共 同 研 究 報 告 書
整理番号第 488 号

撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の診断技術高度化に関する共同研究報告書

－既設 PC 橋のグラウト充填状況に着目した解体調査－

平成 28 年 3 月

国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター
一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

Copyright © (2016) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は，国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって，この報告書の全部又は一部の転載，複製は，国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共 同 研 究 報 告 書
第 488 号 2016 年 3 月

撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の診断技術高度化に関する共同研究報告書

－既設 PC 橋のグラウト充填状況に着目した解体調査－

国立研究開発法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
上 席 研 究 員　石田　雅博
主 任 研 究 員　宇佐美　惣
研　究　員　吉田　英二
交 流 研 究 員　関口　斉治
先端材料資源研究センター
交 流 研 究 員　栗原　勇樹

一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会
委　員　長　谷口　秀明
副 委 員 長　北野　勇一
委　員　小林　崇
〃　國富　康志
〃　渡瀬　博
〃　小瀬戸　弘樹
〃　櫻井　義之
〃　谷口　正輝
〃　細江　泰規
〃　徳光　卓
〃　三加　崇

平成 28 年 3 月現在

要　旨

本共同研究では，プレストレストコンクリート（PC）橋の診断技術の高度化を目指し，撤去橋梁を活用した臨床研究を推進している。この研究では，グラウト充填不足による PC 鋼材の劣化進行を未然に防止することを目的に，撤去橋梁を用いて既設 PC 橋のグラウト充填状況に着目した解体調査を実施し，各種検討を行った。

その結果，グラウト充填状況は PC 橋の架設年代や，PC 鋼材の種類（容量）および定着位置の影響を受けることが確認された。また，グラウト充填状況が PC 鋼材の腐食に与える影響を調査するとともに，グラウト充填状況と外観変状として現れるひび割れとの関連性について検討した。これらの調査検討結果をもとに，既設 PC 橋のグラウト充填調査におけるポイントを整理した。

キーワード：PC 橋，グラウト，PC 鋼材，解体調査

目　　次

１章　はじめに 1
１．１　本研究の背景と目的 1
１．２　既設 PC 橋の耐久性とグラウト充填状況 3
１．３　グラウト充填状況に関する既往の調査 5
１．４　グラウト充填状況に着目した点検の現状 7
１．５　本報告書の構成 9

２章　グラウト充填状況分析 11
２．１　対象橋梁 11
２．２　グラウト充填状況の調査方法 13
２．３　グラウト充填状況の集計結果 15
２．４　本章のまとめ 21

３章　グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関係 23
３．１　PC 鋼材が健全であった PC 橋の解体調査 23
３．２　PC 鋼材が腐食していた PC 橋の解体調査 25
３．３　本章のまとめ 30

４章　シース沿いひび割れ発生要因の検討 31
４．１　調査橋梁の概況 31
４．２　解体調査によるひび割れ発生要因の検討 32
４．３　FEM 解析によるひび割れ発生要因の検討 37
４．４　本章のまとめ 44

５章　既設 PC 橋グラウト充填調査のポイント 45
５．１　調査目的 45
５．２　調査手順 46
５．３　ひび割れパターンの確認 47
５．４　調査対象橋梁の特定 50
５．５　グラウト充填調査の実施 52
５．６　対策優先度の判断 55

６章　まとめ……57
６．１　本研究の成果……57
６．２　今後の課題……60

付　　録……61
付録１　佐野橋のグラウト充填調査……63
付録２　羽咋川海浜橋のグラウト充填調査……69
付録３　能生大橋の解体調査……72
付録４　植苗橋の解体調査……95
付録５　荒磯橋のグラウト充填調査……117
付録６　和瀬川橋の解体調査……139
付録７　アヒン橋の解体調査……166

１章　はじめに

１．１　本研究の背景と目的

過去に建設されたポストテンション方式 PC 橋において，旧タイプのグラウト[注1)]が用いられていたことによりシース内にグラウトの充填が不充分であり，かつ，内部に水や塩分が侵入し，PC 鋼材が腐食して著しい断面欠損や破断に至った事例が報告されている（**図 1.1.1**，**写真 1.1.1～1.1.2**）[1-1)]。この事例では，劣化が内部で進行したことから，PC 橋の生命線である PC 鋼材の劣化進行が見逃されたおそれがある。

そこで，グラウト充填不足により早期劣化のおそれのある PC 橋を早期に発見し，PC 鋼材の劣化進行を未然に防止することを目的に，撤去橋梁を用いて既設 PC 橋のグラウト充填状況に着目した解体調査を実施し，各種検討を行うことにした。

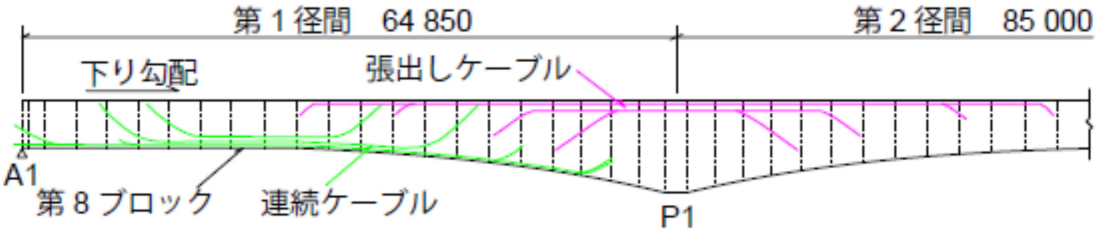


図 1.1.1　グラウト充填不足による早期劣化が確認された PC 橋のケーブル形状 [1-1)]

写真 1.1.1　A1-P1 間下床版下面はつり状況 [1-1)]

写真 1.1.2　P1 付近のシース内の状況 [1-1)]

注1)1997年以前のポストテンション桁にはブリーディングを生じるグラウト（旧タイプのグラウト）が使われていた。現在ではノンブリーディング型のグラウトに切り替えられている。

なお，本報告書で用いる用語を以下に示す（**図 1.1.2** 参照）。

・ポストテンション桁（ポステン桁）：ポストテンション桁は，予めシースを配置してコンクリートを打設し，コンクリートが十分な強度発現後，シース内に PC 鋼材を挿入し，緊張することでプレストレスを導入し製作される。その後，PC 鋼材の付着と防食のためにシース内にグラウトを充填する。

・シース：PC 鋼材をコンクリート桁内に配置するため，あらかじめコンクリート中にあけておく穴を形成するための筒状のもの。過去には厚さ数 mm の鋼製スパイラルシースが多く用いられている。

・シースかぶり：コンクリート表面からシース表面までの最短距離の部分。

・PC 鋼材（PC ケーブル）：ポストテンション桁にプレストレスを与えるために用いる高強度の鋼材。主桁に配置されている PC 鋼材（PC ケーブル）は，主ケーブルともいう。PC 鋼材の種類および容量（緊張可能な最大荷重）は，鋼材の種別，線径，使用本数の組合せによる。例えば，1980 年代までの T 桁主ケーブルに多用されていた PC 鋼材 12φ7mm（PC 鋼線φ7mm を 12 本束ねたもの）の容量は約 750kN，現在使われている PC 鋼材 12S12.7mm（PC 鋼より線 12.7mm を 12 本束ねたもの）の容量は約 2250kN である。

・上縁定着，端部定着：PC 鋼材の定着位置が主桁の上縁の場合を上縁定着，桁端部の場合を端部定着という。過去において，容量の小さい PC 鋼材（12φ7mm など）を用いる際には上縁定着を設ける必要があった。現在では，容量の大きい PC 鋼材（12S12.7mm など）を用いることで PC 鋼材の配置本数が減り，上縁定着を避け，端部定着のみとするようになっている。

・グラウト：シースと PC 鋼材との空隙を充填するための注入用材料。1997 年以前のポストテンション桁にはブリーディングを生じるグラウト（旧タイプのグラウト）が使われていた。現在ではノンブリーディング型のグラウトに切り替えられている。

・グラウト充填度：シース内のグラウト充填の度合い。

・シース沿いひび割れ：シースに沿ったひび割れの総称。主桁下フランジに発生した場合を「主桁下面シース沿いひび割れ」，主桁ウェブに発生した場合を「主桁側面シース沿いひび割れ」と呼ぶ。

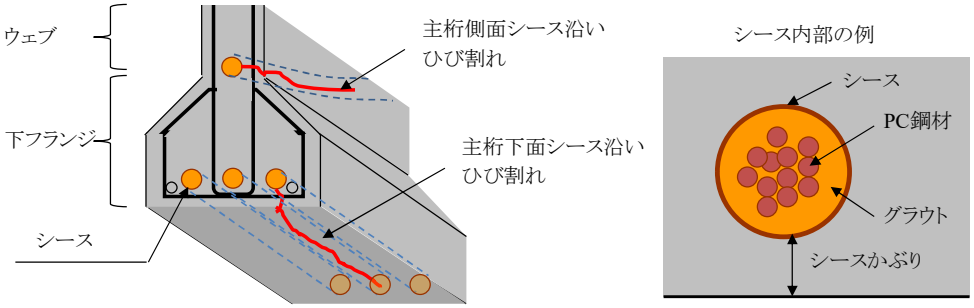


図 1.1.2　ポストテンション桁の説明図

１．２　既設 PC 橋の耐久性とグラウト充填状況

道路統計年報 2015[1-2)]によると，全国にある道路橋のうち PC 橋は箇所数の比率で 43.5%と最も多い橋種となっている。**図 1.2.1** および**表 1.2.1** はこの統計データの分析結果であり，PC 橋の構造形式別には床版橋（プレテンション方式 PC 橋）と T 桁橋（ポストテンション方式 PC 橋）の橋数が突出している。また，**図 1.2.2** は橋長 15m 以上の床版橋と T 桁橋の架設年毎の橋数の推移を整理した結果であり，両橋種とも我が国で PC 橋の建設が始まった 1950 年代から現在に至るまで採用されている。

我が国最初の PC 橋である長生橋（1951 年完成）は床版橋であり，近年の調査により優れた耐久性を発揮していることが報告されている[例えば 1-3)]。また，T 桁橋についても本格的なポストテンション方式 PC 橋として建設された第一大戸川橋梁（1954 年完成）が現在も供用されているなど同様に高い耐久性を有する事例が報告されている[例えば 1-4)]。

しかしながら，ポストテンション方式 PC 橋に関しては，1985 年に英国の Ynys-y-Gwas 橋（1953 年完成）がグラウト充填不足から PC 鋼材の破断を生じて落橋した事例[1-5)]，国内でも 1.1 節で述べたようにグラウト充填不足が顕著な PC 箱桁橋で凍結防止剤散布による塩害が深刻化した事例が報告されている。

以上より，既設 PC 橋の耐久性に重大な影響を及ぼす要因としてポストテンション方式 PC 橋のグラウト充填不足が挙げられ，これまでにストックされてきた既設 PC 橋を適切に管理するためにもグラウト充填状況を把握することが重要であると考えられる。

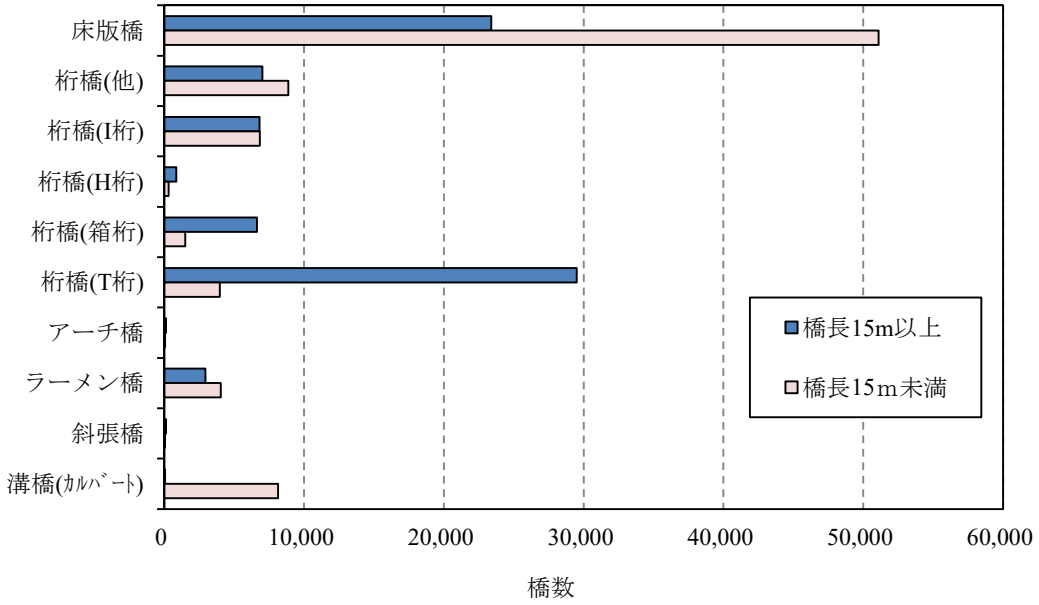


図 1.2.1　PC 橋の構造形式の橋数（2013 年調査，道路橋）

表 1.2.1　PC 橋の構造形式の橋数（2013 年調査，道路橋）

構造形式		橋長15m以上		橋長15m未満	
		橋数	%	橋数	%
床版橋		23381	30.2	51103	60.3
桁橋		7018	9.1	8864	10.5
	I桁	4748	6.1	6490	7.7
	I桁(合成)	2052	2.7	343	0.4
	H桁	579	0.7	251	0.3
	H桁(合成)	263	0.3	48	0.1
	箱桁	5940	7.7	1420	1.7
	箱桁(合成)	673	0.9	65	0.1
	T桁	29508	38.1	3967	4.7
トラス橋		32	0	12	0
アーチ橋		59	0.1	21	0
	アーチ	51	0.1	20	0
	ランガー	6	0	1	0
	ローゼ	7	0	0	0
ラーメン橋		2926	3.8	4035	4.8
斜張橋		52	0.1	2	0
	I桁	16	0	9	0
	箱桁	46	0.1	6	0
	トラス	4	0	0	0
吊橋		13	0	0	0
	I桁	1	0	1	0
	箱下駄	3	0	0	0
	トラス	0	0	0	0
溝橋(カルバート)		47	0.1	8139	9.6
	合計	77425	100	84797	100

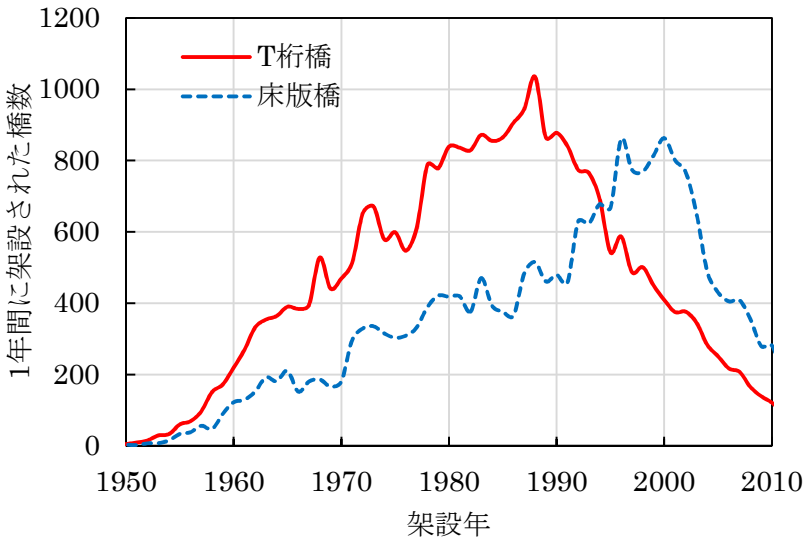


図 1.2.2　床版橋と T 桁橋の年間架設橋数の推移（2013 年調査，橋長 15m 以上の道路橋）

１．３　グラウト充填状況に関する既往の調査

PC 橋のグラウト充填状況に関する既往の調査事例を**表 1.3.1** に示す。番号 1，5，6，7，8 ではグラウトの充填が良好で，PC 鋼材の腐食はほとんど見られず，一部で腐食が見られた場合においても PC 鋼材の引張強度は規格値を満すことが報告されている。また，番号 2～4 ではグラウト充填不足が認められる箇所があり，PC 鋼材はわずかに腐食しているケースから，腐食が進行して引張強度が大きく低下しているケースがあると報告されている。

以上より，グラウト充填状況に関する調査事例があるものの，グラウト充填状況が PC 鋼材の腐食に与える影響については十分に調査されていない現状である。

表 1.3.1　グラウト充填状況に関する調査事例

番号	論文・報告名	橋梁諸元など	グラウト充填状況など
1	昭和 32 年施工の PC 橋(筑穂橋)の載荷試験および耐久性調査 土木構造・材料論文集　第 2 号　1987 年 松下博通，牧角龍憲，宇留島素之，水田権作，藤本義男 pp.109～118	1957 年施工 1986 年調査 供用期間 29 年間 ポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋(2 径間) PC 鋼材 12φ5mm	・グラウト充填良好。 ・PC 鋼材に錆なし。 引張強度も規格値を満足。
2	グラウト不良により劣化した PC 橋の調査と補修 コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1 1996 佐々木 慎一，堺 孝司 pp.1089～1094	1979 年供用開始 1991 年調査 供用期間 30 年間 ポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋(3 径間) PC 鋼材 12φ7mm シース径φ45mm	・グラウト充填不足あり（完全に空洞の箇所もあり）。 ・初期凍害によりひび割れ発生。 ・PC 鋼材の腐食はわずか。 グラウトが全く充填されていなくても多量の水でシース内が満たされていて腐食がなかった。 ・補修としてグラウト再注入を行う。
3	10 年間海岸に暴露した PC 桁の劣化度調査 第 1 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集(1990 年) 太田利隆，堺 孝司，佐々木慎一，高柴保明 pp.199～202	実験期間 10 年間 ポストテンション方式 PC 桁 PC 鋼材 7φ7mm シース径φ36mm	・実験により，グラウトの品質の違いによる充填状況を確認。 ・グラウト充填度が悪いときは，PC 鋼材の腐食が進行する結果となる。

注）下線はグラウト充填状況が良好あるいは PC 鋼材が概ね健全であると判断される箇所，網掛け 2 重下線はグラウト充填不足あるいは PC 鋼材の腐食が確認された箇所を示す。

表 1.3.1　グラウト充填状況に関する調査事例（続き）

番号	論文・報告名	橋梁諸元など	グラウト充填状況など
4	草創期における PC 鉄道橋(光弦橋)の性状調査について 第 1 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集(1990 年) 下村亘，久松光世，林下敦 pp.203～208	1953 年建設 約 37 年を経て調査 ポストテンション方式 床版橋 PC 鋼材φ5mm 孔径φ16(φ5×4 本) (※金属シースなし)	・グラウト充填不足あり。 ・グラウトが充填不足であった PC 鋼材は錆が発生している。 ・グラウトが不足している PC 鋼材は引張強度が大きく低下していた。
5	35 年を経た東京駅ホーム PC 桁の試験 第 1 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集(1990 年) 中原繁則，古谷時春 pp.209～212	1952 年建設 1971 年撤去 約 35 年を経て調査 ポストテンション方式 ホーム桁 PC 鋼材φ5mm	・グラウト充填良好。 ・PC 鋼材は一様に腐食あり。ただし，局部的な点食はなし。 ・PC 鋼材の引張強度の低下はなし。
6	供用後 26 年を経過した PC 軌道桁の健全度調査 第 2 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集(1991 年) 室井和，柏木一夫，宮本征夫，山住克巳，佐久間実 pp.245～250	1964 年供用開始 1990 年調査 供用期間 26 年間 ポストテンション方式 単純桁(中空)(1 径間) PC 鋼棒φ27mm	・グラウト充填状況の大部分は良好。ただし，曲上げ部付近の一部で PC 鋼材がグラウトで覆われていない部分もあり。 ・PC 鋼材に錆なし。 引張強度も規格値を満足。
7	供用後 40 年経過した橋梁におけるグラウト充填状況に関する一考察 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集(2004 年) 牧武志，熊谷三千夫，森本博昭，鎌田敏郎 pp.593～596	1965 年竣工 2003 年撤去 約 40 年を経て調査 ポストテンション方式 単純 T 桁橋(4 径間) PC 鋼材 12φ7mm	・グラウト充填良好。 ただし，定着具内のトランペットシースには空隙あり。 ・PC 鋼材の腐食なし。 引張強度も規格値を満足。
8	38 年間供用された太田跨線橋撤去桁の健全度調査 第 14 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集(2005 年) 二井谷教治，中村雅之，辻幸和　pp.159～162	38 年を経て調査 ポストテンション方式 単純 T 桁橋(4 径間) PC 鋼材 12φ5mm	・グラウト充填良好。 完全に充填されている。 ・PC 鋼材はほとんど腐食なし。 引張強度も規格値を満足。

注）下線はグラウト充填状況が良好あるいは PC 鋼材が概ね健全であると判断される箇所，網掛け 2 重下線はグラウト充填不足あるいは PC 鋼材の腐食が確認された箇所を示す。

１．４　グラウト充填状況に着目した点検の現状

橋梁定期点検要領[1-6]によると， PC 橋の点検は基本的に近接目視点検で行われる。これによってグラウト充填状況を直接知ることはできないものの，特定のひび割れパターンを確認し，PC 鋼材位置との関連性や他の変状の有無などを総合的に勘案することによって，間接的にグラウト充填状況を知ることができると考えられる。この場合の代表的な劣化シナリオとしては，１）グラウト充填不足がはじめにある，２）その部位に水や塩分が徐々に侵入する，３）PC 鋼材の腐食が経年的に進行する，４）シース沿いひび割れの発生が想定される（図 1.4.1 中のシナリオA）。

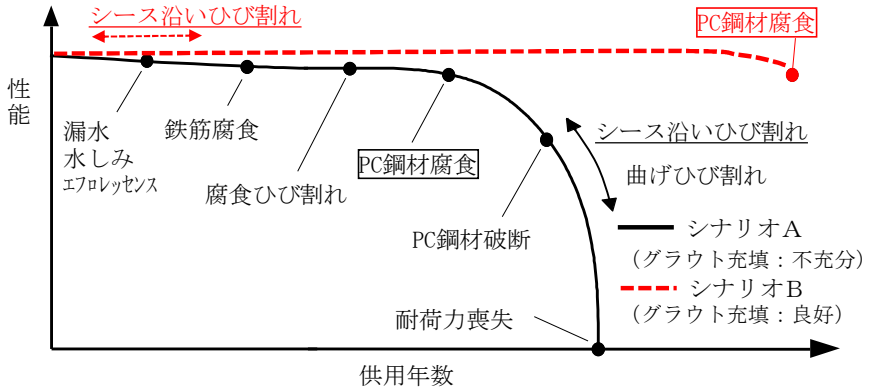


図 1.4.1　PC 橋の予想される劣化シナリオ（文献 1-6 を参考にして作図）

一方，道路橋定期点検結果に基づく玉越らの分析[1-7]によると，PC 橋の初期損傷率（初回点検で確認される損傷の割合）が高いものの代表として主桁のひび割れがあり，シース沿いひび割れ（図 1.4.2 の②や⑳）が数多く確認されている。すなわち，シース沿いひび割れは，上記に示したグラウト充填不足に起因した腐食などの経年劣化により生じるだけではなく，建設直後にひび割れが生じることも想定される。この場合，シース沿いひび割れが生じたからといっても，グラウトが充填されていることで防食効果が発揮され，上述したような劣化シナリオを辿らないことが想定される（図 1.4.1 中のシナリオB）。

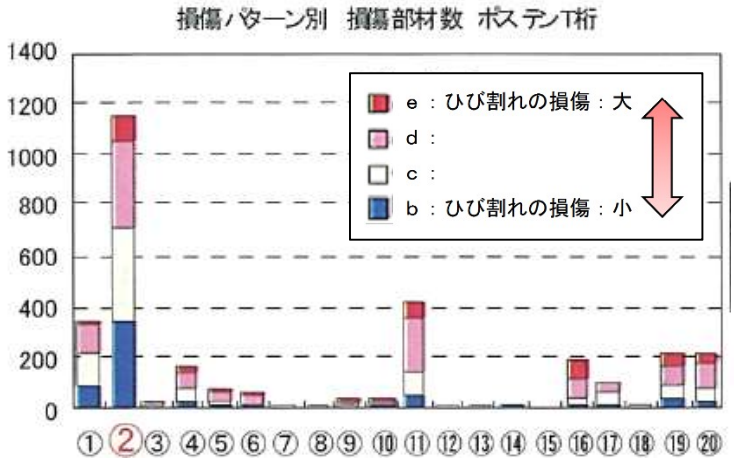
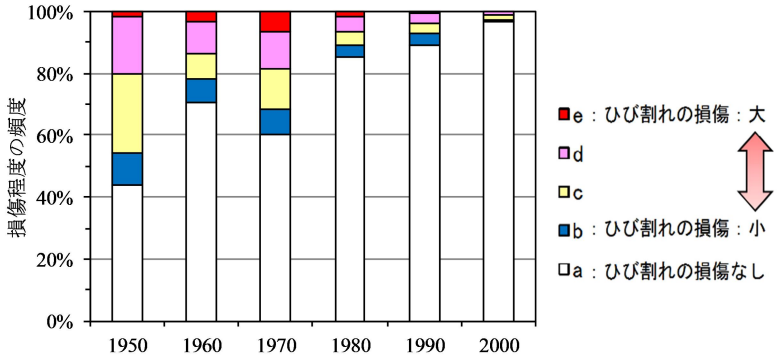


図1.4.2　初回点検時に確認されたひび割れ発生部材数[1-7]

そこで，道路橋定期点検結果に基づき PCT 桁を対象としてひび割れパターンの損傷程度の頻度を建設年代別に整理した。その結果，シース沿いひび割れの発生要因が十分に解明されていないことが判明した。

ひび割れパターン②（主桁下面シース沿いひび割れ）：このひび割れの発生頻度は 1970 年代以前が高く，1980 年代以降になると減少している（**図 1.4.3**）。1968 年までは土木学会の指針[1-8]を参照した設計が行われ，現在よりも小さいかぶり（40mm 以上）が採用されていたと考えられる。1969 年に建設省標準設計が制定され，1970 年以降は PC 鋼材のかぶりを現行の基準程度に大きく取るようになった。このことから，ひび割れパターン②の発生要因として，経年の影響以外に，シースかぶりの影響を検討する必要がある。

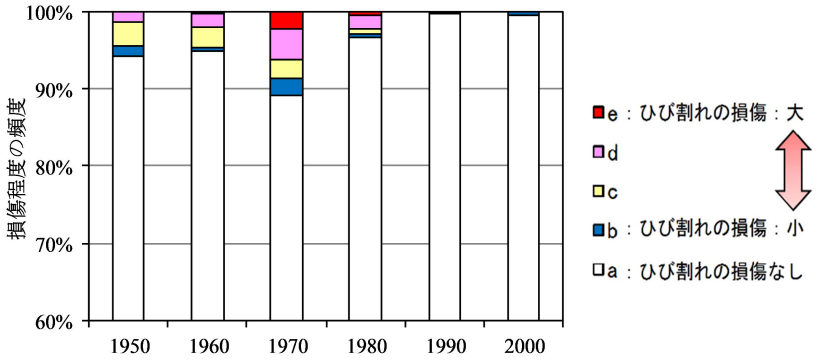


シース かぶり(mm)	建設省標準設計1969制定	1980改訂	1993改訂
	40以上	57.5	62.5	57.5※

※1993 年建設省標準設計の改訂では，PC 鋼材の種類が 12φ7（シース径 45mm）から 7S12.7（シース径 55mm）に変更されたことにより，かぶりが小さく変更されている。

図 1.4.3　PCT 桁橋のひび割れパターン②の損傷程度の頻度の推移

ひび割れパターン⑳（主桁側面シース沿いひび割れ）：このひび割れの発生頻度は 1980 年代以前が高く，1990 年代以降になると概ね皆無となっている（**図 1.4.4**）。定着部位置の変遷を確認すると，1992 年までは上縁定着が行われていたが，1993 年以降は端部定着のみとする仕様に変更されている。このことから，ひび割れパターン⑳の発生要因として，経年の影響以外に，上縁定着の影響を検討する必要がある。



定着部の位置	建設省標準設計1969	1980改訂	1993改訂
	上縁定着:有り	混在	端部定着のみ

図 1.4.4　PCT 桁橋のひび割れパターン⑳の損傷程度の頻度の推移

１．５　本報告書の構成

先述の通り，グラウト充填不足により早期劣化のおそれのある PC 橋を早期に発見し，PC 鋼材の劣化進行を未然に防止するという目的を達成するためには，以下の課題があることが判明した。

① グラウト充填状況が十分に把握されていない。

② グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関連性が十分に整理されていない。

③ シース沿いひび割れの発生要因が十分に解明されていない。

そこで本研究では，撤去橋梁などを用いて既設 PC 橋のグラウト充填状況に着目した解体調査を実施し，上記の課題①～③に関する各種検討を行い，その結果を本報告書としてまとめた。

本報告書の構成を**図 1.5.1** に示す。２章では課題①に対し「グラウト充填状況の把握」を目的として撤去桁のグラウト充填状況を分析した。３章では課題②に対し「グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関連性の整理」を目的として，PC 鋼材が健全であった PC 橋および PC 鋼材が腐食していた PC 橋の解体調査を実施することにより，グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関係について検討を行った。４章では課題③に対し「シース沿いひび割れ発生要因の解明」を目的として，解体調査ならびに解析的検討を行った。これらの調査検討結果をもとに，５章では「既設 PC 橋のグラウト充填調査のポイント」を整理した。６章では，これらの調査の成果と今後の課題について述べる。

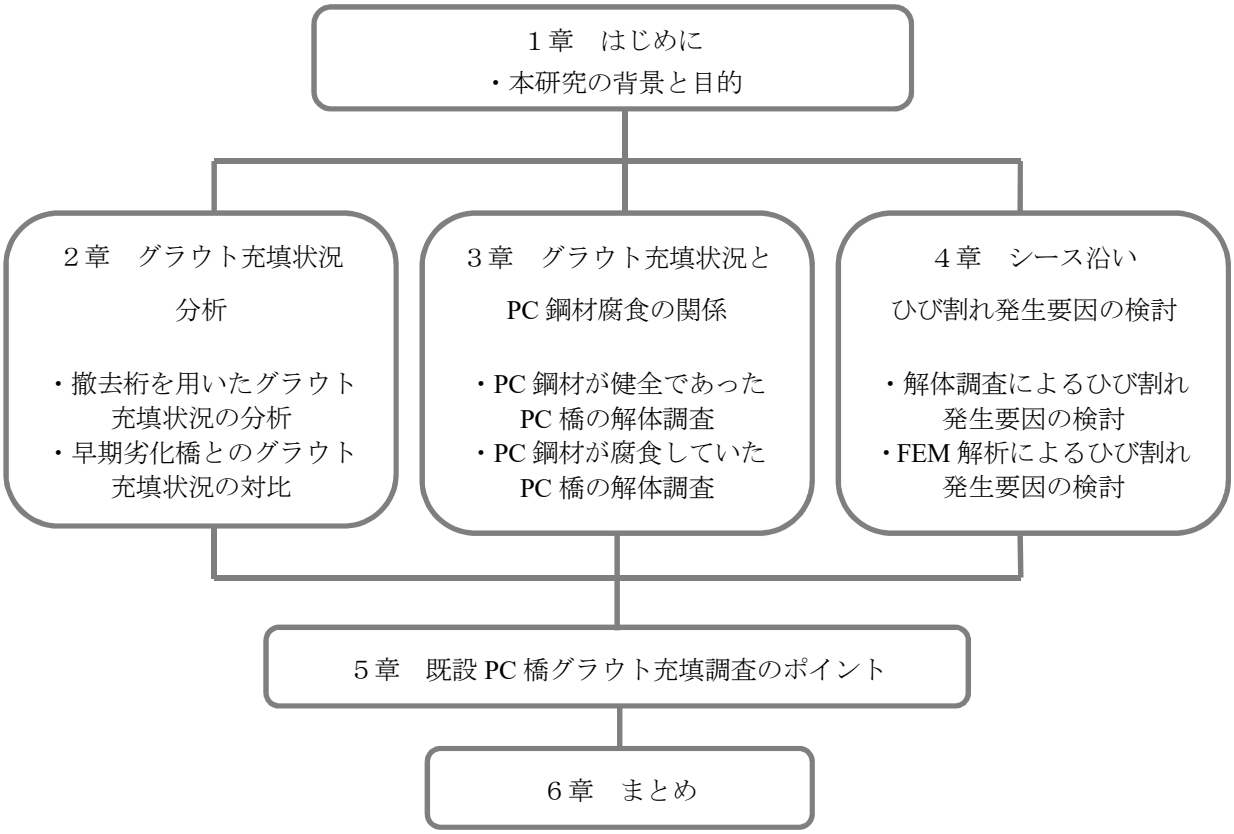


図 1.5.1　本報告書の構成

1 章の参考文献

1-1) 玉越隆史，平賀和文，木村嘉富：PC 鋼材の腐食損傷への対応事例—妙高大橋のグラウト未充填と鋼材腐食の調査—，土木技術資料 54-5，pp.50-51，2012

1-2) 国土交通省ホームページ：道路統計年報 2015（http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/）

1-3) 小門前亮一，西垣義彦，竹越勇ノ介，鳥居和之：わが国で最初の PC 橋（長生橋）の解体調査と PC 桁の載荷試験，プレストレストコンクリート，Vol.44，No.5，pp.39-46，2002.9

1-4) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 80，2008.4

1-5) Woodward, R.，Williams, F. : "Collapse of Ynys-y-Gwas Bridge，West Glamorgan"，Proc. Instn. Civ. Engrs.，84(4)，Part 1，pp.635-669，1988.8

1-6) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の維持保全—PC橋の更なる予防保全に向けて[2015年版]—，p.75，2015.3

1-7) 玉越隆史，大久保雅憲：道路構造物群のマネジメント（管理）における点検データの活用～定期点検結果の分析から見た損傷発生・進行の特徴及び現有性能の指標化～，土木技術資料53-12，pp.18-21，2011.

1-8) 土木学会：昭和36年改訂プレストレストコンクリート設計施工指針，p.59，1961.8

２章　グラウト充填状況分析

本章では，「グラウト充填状況の把握」を目的として，撤去桁の解体調査で得られたグラウト充填状況を分析した。また，グラウト充填不足が原因で早期に劣化した PC 橋（以下，早期劣化橋という）とのグラウト充填状況の対比を行った。

２．１　対象橋梁

表 2.1.1 にグラウト充填調査を実施した PC 橋の一覧を示す。番号①～⑦は**図 2.1.1** に示す PC 橋から採取した撤去桁である（**付録 1～7** 参照）。また，番号⑧と⑨は，早期劣化橋について実施された調査結果[2-1), 2-2)]からグラウト充填状況を整理した。

表 2.1.1　グラウト充填調査を実施した橋梁の一覧

番号		橋梁名	架設年	調査年	撤去理由・調査に至る経緯など
撤去桁	①	佐野橋	1965	2010	幅員の拡幅と河積阻害率の解消のため撤去，架け替えされた。撤去された PC 桁本体は外観上，損傷が認められなかった。
	②	羽咋川海浜橋	1972	2011	主桁下面が剥離するなど塩害による著しい損傷のため撤去された。
	③	能生大橋	1967	2012	波飛沫が直接桁にかかる架橋環境にあり，PC 鋼材の腐食やひび割れなどの塩害劣化が顕著となり撤去された。
	④	植苗橋	1961	2012	幅員が狭く新橋建設に伴い架け替えのため撤去された。主桁下面にひび割れが見られるものの PC 桁本体は健全であった。
	⑤	荒磯橋	既設橋 1965 拡幅橋 1988	2013	既設橋は塩害により過去に断面修復や外ケーブル補強などがなされてきたが，既設橋の塩害劣化が進行したため両橋とも撤去された。
	⑥	和瀬川橋	1978	2014	塩害により過去に断面修復や保護塗装がなされてきたが，曲げひび割れの発生やたわみが生じたことから外ケーブル補強が行われたが，再度曲げひび割れが顕在化したために撤去された。
	⑦	アヒン橋	2000	2015	河川改修のため撤去された。解体調査の結果，PC 桁本体は健全であることが確認された。
早期劣化橋	⑧	M 橋	1972	2011 (調査報告年)	補修工事中に PC 鋼材の腐食破断が発見され，詳細調査が行われた結果，多数の箇所でのグラウト充填不足と複数の経路からシース内への水と塩分の侵入が確認された。載荷試験などから安全性を確認し，補修やモニタリングなどの対策を講じて供用している。
	⑨	O 橋	1974	2012 (調査報告年)	補強工事時に行われた詳細点検により，上縁定着の主ケーブルに沿ってコンクリートの浮きが発見された。はつり調査の結果，グラウト充填不足および PC 鋼材の破断が確認された。破断の原因は，橋面の凍結防止剤を含んだ雨水が上縁定着からシース内へ侵入したことと報告されている。補修後，供用を継続している。

図 2.1.1 撤去橋梁の所在地と全景写真

２．２　グラウト充填状況の調査方法

撤去桁のグラウト充填状況は**図 2.2.1** に示すように切断面を目視確認することにより「充填度 1～4」または「充填，充填不足，未充填」に分類し（**表 2.2.1** 参照），充填度ごとの件数を集計した。また，橋梁や部位によって切断面に配置される PC 鋼材本数が異なるものの，切断箇所数を調整することにより主桁一本あたりの調査箇所数を同程度にすることにした。これによって，グラウト充填状況を PC 鋼材全長に渡り無作為に調査するように努めた。なお，④植苗橋では定着部近傍に着目してグラウト充填状況を調査した。

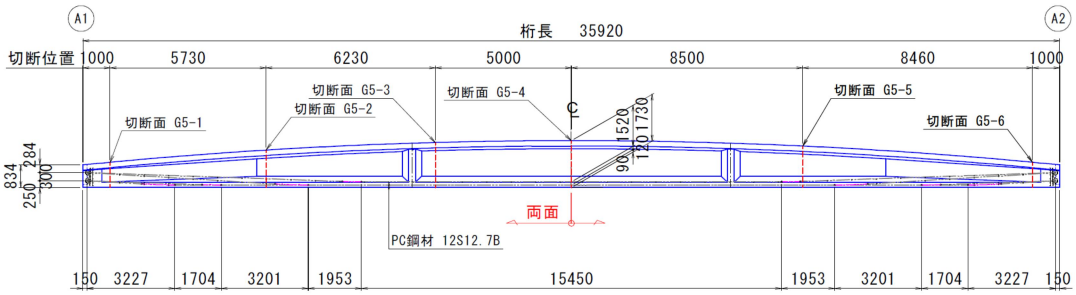


図 2.2.1　撤去桁の切断によるグラウト充填状況の確認（アヒン橋の例）

表 2.2.1　グラウト充填状況の分類

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

表 2.2.2 に撤去桁および早期劣化橋について橋梁諸元，架橋環境，グラウト充填状況および PC 鋼材の状態を確認される範囲で整理した。

撤去桁のうち，①，④，⑦は内陸部に，②，③，⑤，⑥は海岸線からの距離が 300m までの塩害地域に建設されている。①，②，④，⑤，⑥は PC 鋼材の種類が 12φ5mm や 12φ7mm と容量が小さく，その一部が上縁定着されている。また，③は 24φ7mm，⑦は 12S12.7mm と容量の大きい PC 鋼材が使用され，すべて端部定着されている。①～⑥ではブリーディングが生じる旧タイプのグラウト，⑦ではノンブリーディング型のグラウトが使用されている。これらの撤去桁の調査内容の詳細については，**付録 1～7** に掲載した。

また，早期劣化橋である番号⑧の M 橋と番号⑨の O 橋は積雪地域に架橋されているため凍結防止剤が散布される環境にあり，PC 鋼材の一部が上縁定着されている。

表 2.2.2　撤去桁および早期劣化橋の調査結果一覧

橋梁名		撤去桁								早期劣化橋	
		①佐野橋	②羽咋川海浜橋	③能生大橋	④植苗橋	⑤荒磯橋 既設橋	⑤荒磯橋 拡幅橋	⑥和瀬川橋	⑦アヒン橋	⑧M 橋	⑨O 橋
橋梁諸元	上部工構造形式	5 径間単純ポステン PCT 桁	3 径間単純ポステン PCT 桁	5 径間単純ポステン PCT 桁	2 径間単純ポステン PCT 桁	2 径間単純ポステン PCT 桁		単純ポステン PCT 桁	単純ポステン PCT 桁	4 径間連続ポステン PC 箱桁橋	単純 24 連ポステン PCT 桁
	最大支間(m)	22.80	29.20	27.30	18.30	21.70	22.14	29.25	35.12	85.00	44.15
	設計荷重	TL-14	群集荷重	TL-20	TL-14	TL-20	TL-20	TL-20	A 活荷重	TL-20	TL-20
	PC 鋼材	12φ5.4	12φ7*	24φ7	12φ5	12φ5	12φ7	12φ7	12S12.7	7φ12.7	12S12.4
	鋼材本数(断面当り)	12 本	8 本	4 本	8 本	10 本	11 本	10 本	4 本	張出 88 本 連続 60 本	7 本
	上縁定着の有無	有(4 本)	有	無	有(4 本)	有(5 本)	有(5 本)	有(5 本)	無	有	有(3 本)
	シース径	φ35	φ45	φ65	φ40	φ35	φ45	φ45	φ65	φ55	φ65
	シースかぶり(mm)	45	57.5*	67.5	40	57.5	97.5	62.5	57.5	65 程度	ｳｪﾌﾞ 57.5 下面 67.5
	架設年	1965 年	1972 年	1967 年	1961 年	1965 年	1988 年	1978 年	2000 年	1972 年	1974 年
架設環境	海岸からの距離	10km 以上	0.06km	0.08km	10km 以上	0.30km		0.30km	10km 以上	10km 以上	10km 以上
	架橋地域	内陸	塩害	塩害	寒冷内陸	塩害		塩害	内陸	寒冷積雪	積雪
グラウト充填状況	充填不足の有無	有	有	有	有	有	有	有	無	有	有
	充填不足の割合	5～10%	5～10%	5%以下	10～20%	5%以下	5～10%	5～10%	0%	約 2/3	約 2/3
PC 鋼材の状態	腐食の有無	無	有	有	有	有	有	有	無	有	有
	破断の有無	無	有	有	無	有	無	無	無	有	有
	破断箇所	－	下フランジ	下フランジ	－	下フランジ	－	－	－	下床版下面など	ウェブ

注）*印は推定。ポステンは，ポストテンションの略称。

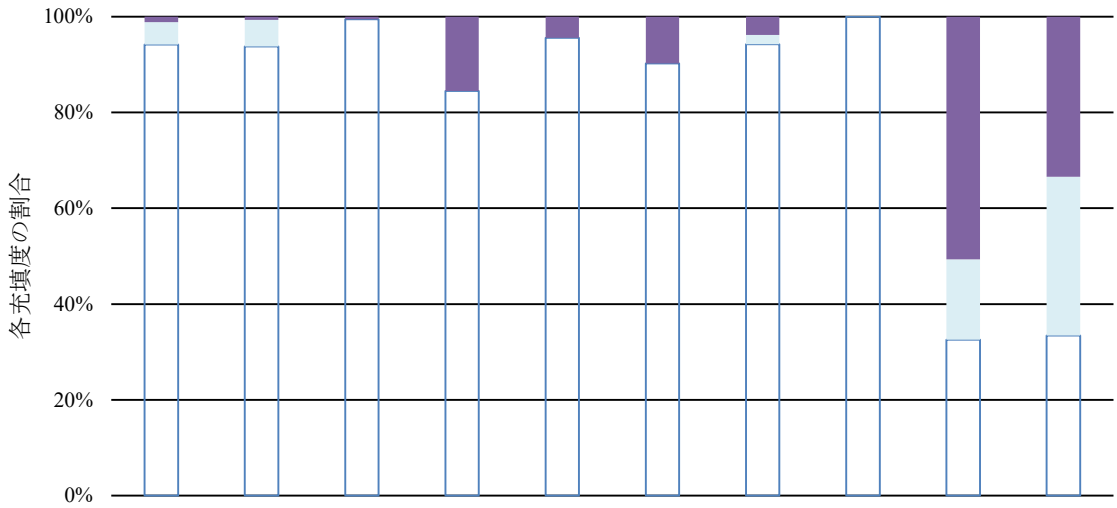
２．３　グラウト充填状況の集計結果

（１）橋梁別の集計結果

橋梁別のグラウト充填度の割合を**図 2.3.1** に示す。また，番号①～⑦の撤去桁および番号⑧と⑨の早期劣化橋に分け，グラウト充填度の割合を再整理した結果を**表 2.3.1** に示す。以下に，調査橋梁のグラウト充填状況の傾向を示す。

・番号①～⑦の撤去桁では充填度 1，2 が平均 94.8%，充填度 3 と充填度 4 の合計が平均 5.2%となった。

・番号⑧と⑨の早期劣化橋では充填度 1，2 が 33.1%（約 1/3）で，充填度 3 と充填度 4 の合計が 66.9%（約 2/3）を占めていた。



	①佐野橋	②羽咋川海浜橋	③能生大橋	④植苗橋	⑤荒磯橋		⑥和瀬川橋	⑦アヒン橋	⑧M 橋	⑨O 橋
					既設橋	拡幅橋				
□ 充填度 1，2	322 件	136 件	186 件	38 件	86 件	37 件	294 件	56 件	70 件	148 件
■ 充填度 3	16 件	8 件	0 件	0 件	0 件	0 件	6 件	0 件	36 件	147 件
■ 充填度 4	4 件	1 件	1 件	7 件	4 件	4 件	12 件	0 件	109 件	148 件
調査件数	342 件	145 件	187 件	45 件	90 件	41 件	312 件	56 件	215 件	443 件

図 2.3.1　橋梁別グラウト充填度の集計

表 2.3.1　撤去桁および早期劣化橋のグラウト充填度の集計

	撤去桁（①～⑦）		早期劣化橋（⑧，⑨）	
	件数	割合	件数	割合
□ 充填度 1，2	1155 件	94.8%	218 件	33.1%
■ 充填度 3	30 件	2.5%	183 件	27.8%
■ 充填度 4	33 件	2.7%	257 件	39.1%
合計	1218 件	100.0%	658 件	100.0%

（2）架設年代に着目した集計結果

図 2.3.2 に架設年代別のグラウト充填度の割合を示す。

・1990 年以前に建設されたすべての PC 橋において，充填度 3，4（グラウト充填不足）が確認された。

・1990 年以降に建設された PC 橋は⑦アヒン橋（2000 年）の 1 橋のみであるが，充填度 1，2（グラウト充填）が 100%で，充填度 3，4（グラウト充填不足）は確認されなかった。

以上より，少なくとも 1990 年代以前の PC 橋においてはグラウト充填不足が生じている実態が明らかになった。グラウト充填不足が生じている要因としては，①ブリーディングを許容する旧タイプのグラウトが用いられていたこと（1997 年頃以降はノンブリーディング型グラウトに切り替えられている），②曲上げ角度の大きい上縁定着ケーブルを有すること（1993 年建設省標準設計以降の PCT 桁橋では曲上げ角度の小さい端部定着のみに移行している）が挙げられる。

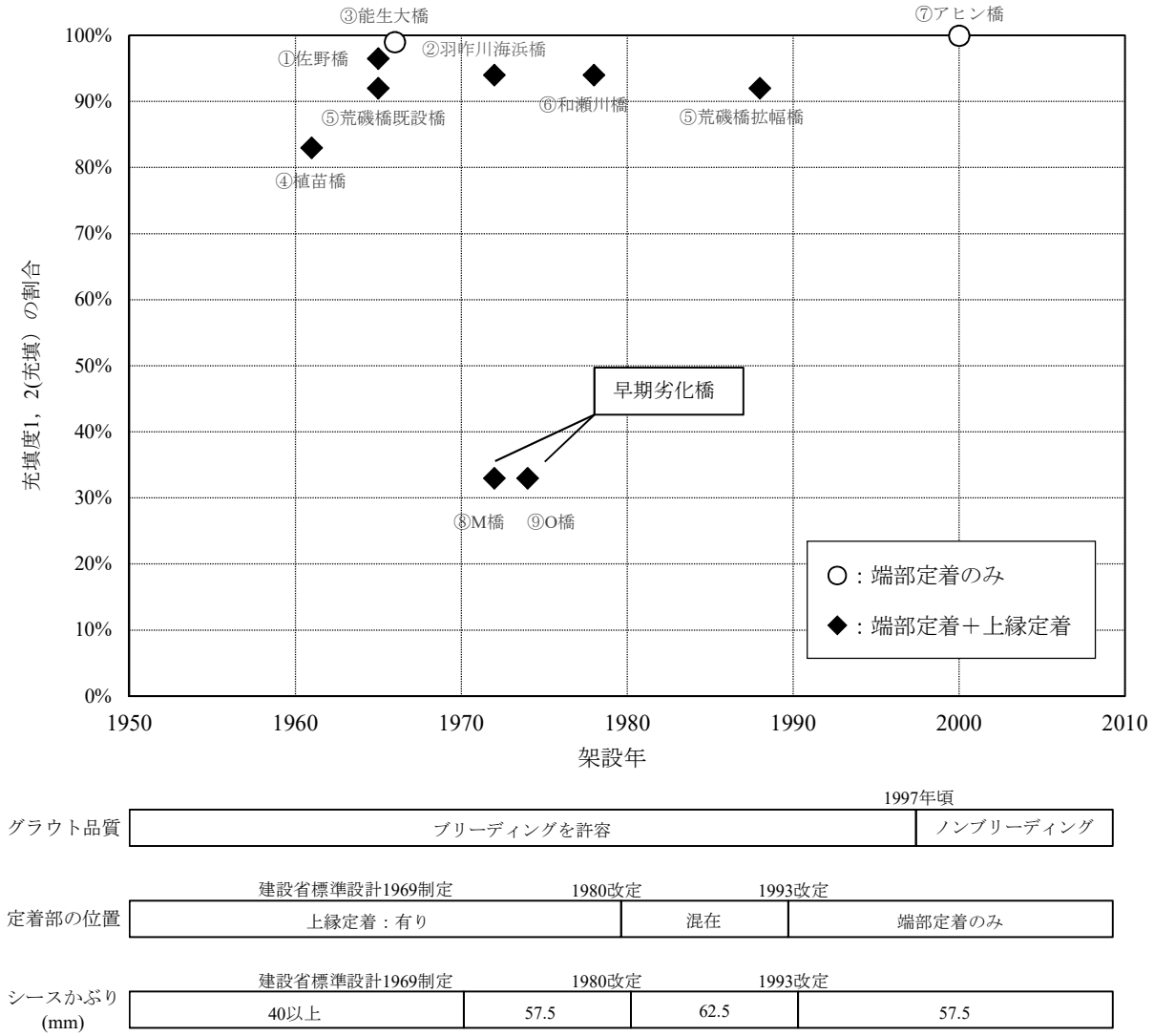


図 2.3.2　架設年別グラウト充填度分布図

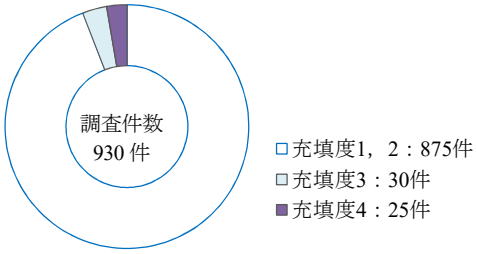
（3）PC 鋼材の種類（容量）に着目した集計結果

容量の小さい PC 鋼材 12φ5（シース径 35mm）や 12φ7（シース径 45mm）が使用されている①佐野橋，②羽咋川海浜橋，⑤荒磯橋，⑥和瀬川橋と，容量の大きい PC 鋼材 24φ7 や 12S12.7（シース径 65mm）が使用されている③能生大橋と⑦アヒン橋のグラウト充填度の集計結果を**図 2.3.3**，**図 2.3.4** に示す。

・容量の小さい PC 鋼材を有する撤去桁では，調査全数 930 件に対して充填度 1，2 は 875 件(94.1%)で，充填度 3 と充填度 4 の合計は 55 件（5.9%）となった。

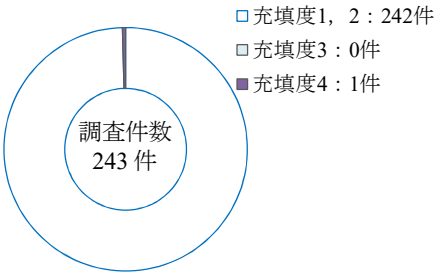
・容量の大きい PC 鋼材を有する撤去桁では，調査件数 243 件に対して充填度 1,2 が 242 件（99.6%）で充填度 4 が 1 件（0.4%）となった。

このことから PC 鋼材の容量によってグラウト充填状況が異なり，容量の小さい PC 鋼材 12φ5 や 12φ7 が用いられている場合はグラウト充填不足が生じる割合が若干高くなることが確認された。要因としては，容量の小さい PC 鋼材はシース径が小さく空隙が狭いことと，一部の PC 鋼材が上縁定着され曲上げ角度が大きいことが挙げられる。ただし，番号⑦のアヒン橋については 2000 年に架設されておりノンブリーディング型のグラウトが標準化された後であることも影響したと考えられる。



	①佐野橋	②羽咋川海浜橋	⑤荒磯橋既設橋	⑤荒磯橋拡幅橋	⑥和瀬川橋	合計	
□ 充填度 1,2	322 件	136 件	86 件	37 件	294 件	875 件	94.1%
□ 充填度 3	16 件	8 件	0 件	0 件	6 件	30 件	3.2%
■ 充填度 4	4 件	1 件	4 件	4 件	12 件	25 件	2.7%
調査件数	342 件	145 件	90 件	41 件	312 件	930 件	－

図 2.3.3　容量の小さい PC 鋼材を有する撤去桁のグラウト充填度の集計

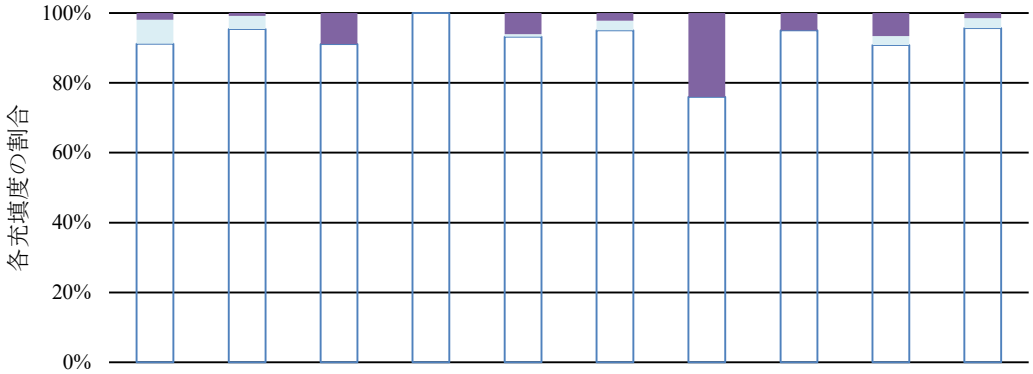


	③能生大橋	⑦アヒン橋	合計	
□ 充填度 1,2	186 件	56 件	242 件	99.6%
□ 充填度 3	0 件	0 件	0 件	0%
■ 充填度 4	1 件	0 件	1 件	0.4%
調査件数	187 件	56 件	243 件	－

図 2.3.4　容量の大きい PC 鋼材を有する撤去桁のグラウト充填度の集計

（4）定着位置に着目した集計結果

上縁定着を有する PC 橋を対象に，定着位置が上縁定着であるケーブルと端部定着であるケーブルに区別し，グラウト充填状況を整理した結果を**図 2.3.5** に示す。また，定着部近傍に着目して調査した④植苗橋においてグラウト充填不足の範囲を確認した結果を**図 2.3.6** に示す



	①佐野橋		⑤荒磯橋 既設橋*		⑥和瀬川橋		④植苗橋 （定着部近傍）		合計** （④除く）	
	上縁	端部	上縁	端部	上縁	端部	上縁	端部	上縁	端部
□ 充填度 1，2	93 件	229 件	41 件	45 件	123 件	171 件	19 件	19 件	257 件	445 件
■ 充填度 3	7 件	9 件	0 件	0 件	1 件	5 件	0 件	0 件	8 件	14 件
■ 充填度 4	2 件	2 件	4 件	0 件	8 件	4 件	6 件	1 件	14 件	6 件
調査件数	102 件	240 件	45 件	45 件	132 件	180 件	25 件	20 件	279 件	465 件

*荒磯橋拡幅桁は全長に渡りグラウト未充填（注入作業を実施していないと考えられる）があり，除外した。

**植苗橋は定着部近傍で調査（他の橋では無作為の切断面に対し調査）したため，合計に算入しないことにした。

図 2.3.5　定着位置別のグラウト充填度の集計

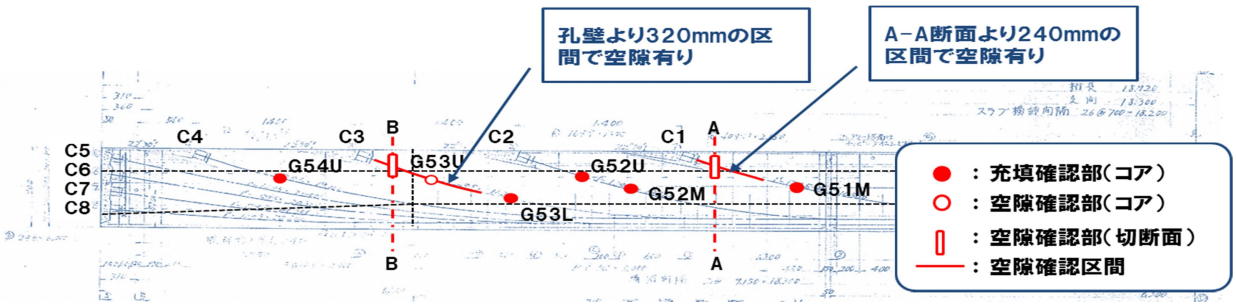


図 2.3.6　グラウト充填不足の範囲を確認した事例（④植苗橋 G5 桁）

・ケーブル全長に渡り無作為に調査を行った番号①，⑤，⑥の 3 橋の結果から，上縁定着ケーブルで充填度 3，4 の件数は調査件数 279 件のうち 22 件（7.9%），端部定着ケーブルでは調査件数 465 件のうち 20 件（4.3%）であり，t 検定による確率を求めると $p = 0.046$ となったことから有意差が認められた。

・定着部近傍に着目して調査した④植苗橋の結果より，上縁定着ケーブルの充填度 3，4 の件数は調査件数 25 件のうち 6 件（24.0%），端部定着ケーブルでは調査件数 20 件のうち 1 件（5.0%）であった。

・グラウト充填不足の範囲は，上縁定着ケーブルの場合，PC 鋼材定着部より 1.0m 程度以下の曲上げ区間で生じていた。

これらのことから，グラウト充填不足の発生割合は端部定着ケーブルよりも上縁定着ケーブルの方が高く，特に上縁定着ケーブルの定着部近傍で顕著となることが明らかになった。

【補足】上縁定着ケーブルの定着部近傍にグラウト充填不足が生じやすい傾向について

⑤荒磯橋の G5（既設桁）および G8（拡幅桁）を対象に，定着部近傍のグラウト充填状況を詳細に調査した結果，全長に渡り未充填（グラウト注入作業をし忘れたと考えられる）であった PC ケーブルを除き，曲上げ角度が 15 度程度以下であるとグラウト充填度 1，2（グラウトはおおむね充填されている），15 度程度を超えるとグラウト充填度 3，4（グラウトは充填不足となっている）となることが確認された（図 2.3.7）。

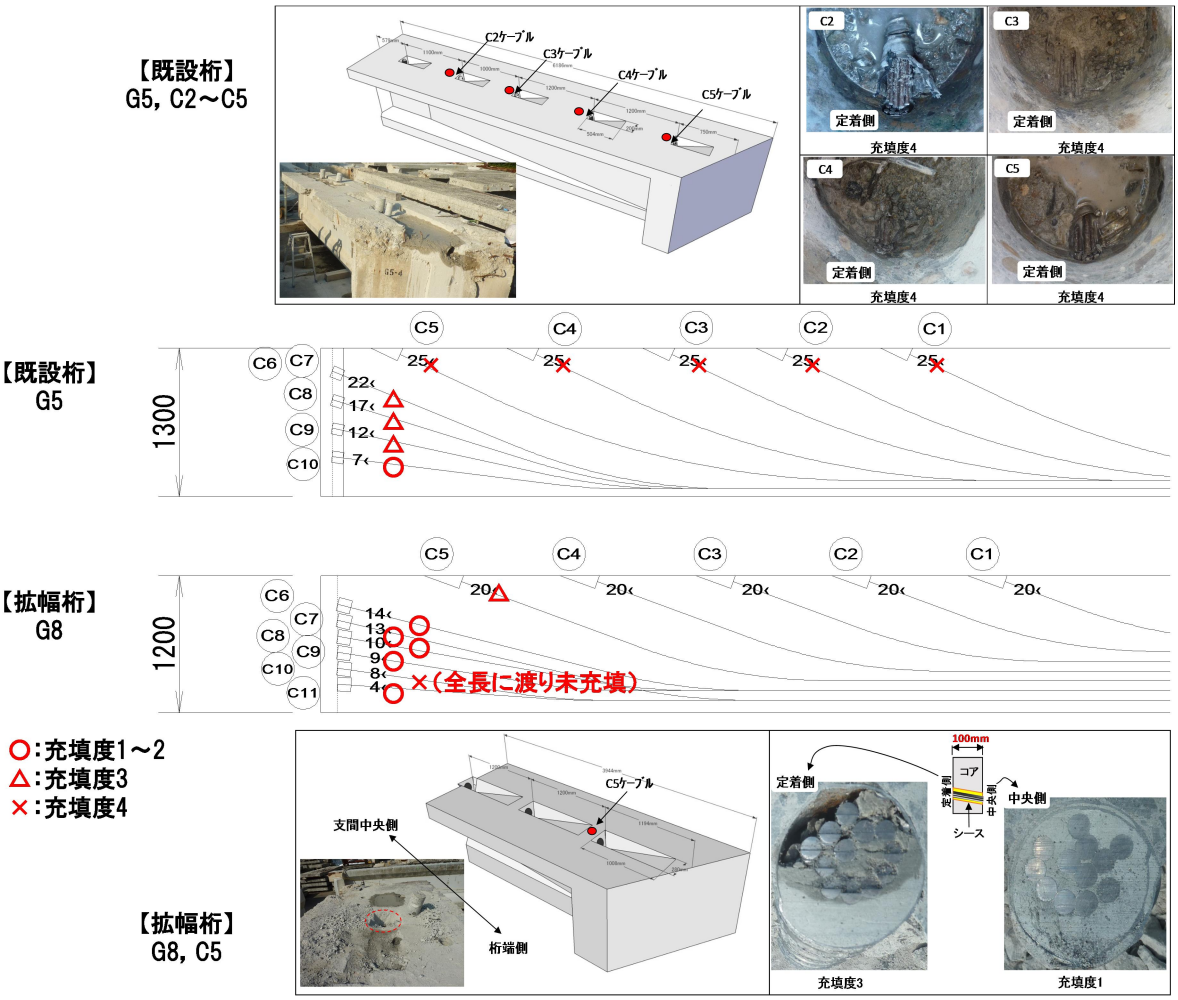


図 2.3.7　定着部近傍のグラウト充填状況（⑤荒磯橋）

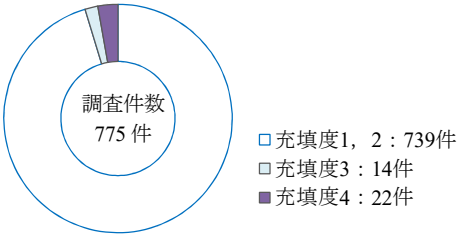
（5）架設環境に着目した集計結果

PC 橋の架設環境を塩害地域と一般環境の地域に分け，グラウト充填度を再集計した結果を**図 2.3.8** と**図 2.3.9** に示す。

・塩害地域に架設された PC 橋では，調査件数 775 件のうち充填度 3，4 は 36 件（4.6%）であった。

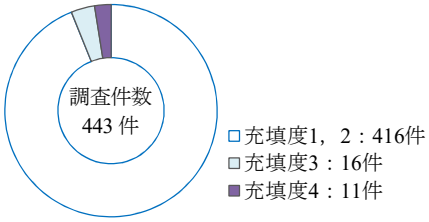
・一般環境の地域に架設された PC 橋では，調査件数 443 件のうち充填度 3，4 は 27 件（6.1%）であった。

このことから，架設環境によってグラウト充填度に差異が生じないことが確認された。しかし，塩害地域に架設された PC 橋では PC 鋼材の腐食破断が生じているケースが多いことから，劣化要因としては架設環境が大きく影響していると考えられる。この点については３章にて詳述する。



	②羽咋川 海浜橋	③能生 大橋	⑤荒磯橋 既設橋	⑤荒磯橋 拡幅橋	⑥和瀬川橋	合計	
□ 充填度 1，2	136 件	186 件	86 件	37 件	294 件	739 件	95.4%
□ 充填度 3	8 件	0 件	0 件	0 件	6 件	14 件	1.8%
■ 充填度 4	1 件	1 件	4 件	4 件	12 件	22 件	2.8%
全数	145 件	187 件	90 件	41 件	312 件	775 件	－
上縁定着	有	無	有	有	有	－	
鋼材の錆	有	有	有	有	有	－	
鋼材破断	有	有	有	無	無	－	

図 2.3.8　塩害環境に架設された PC 橋のグラウト充填度の集計



	①佐野橋	④植苗橋	⑦アヒン橋	合計	
□ 充填度 1，2	322 件	38 件	56 件	416 件	93.9%
□ 充填度 3	16 件	0 件	0 件	16 件	3.6%
■ 充填度 4	4 件	7 件	0 件	11 件	2.5%
全数	342 件	45 件	56 件	443 件	－
上縁定着	有	有	無	－	
鋼材の錆	無	有	無	－	
鋼材破断	無	無	無	－	

図 2.3.9　一般環境の地域に架設された PC 橋のグラウト充填度の集計

２．４　本章のまとめ

本章では，7 橋の撤去桁と早期劣化橋 2 橋のグラウト充填状況の調査結果をもとに，橋梁別，架設年代，定着位置，PC 鋼材の種類（容量）および架設環境に着目して集計を行った。その結果，次のことが確認された。

・撤去桁では充填度 3 と充填度 4（グラウト充填不足）の合計が平均 5.2%となっているのに対し，早期劣化橋では充填度 3 と充填度 4（グラウト充填不足）の合計が 66.9%（約 2/3）を占めていた。

・1990 年以前に建設されたすべての PC 橋において，充填度 3，4（グラウト充填不足）が確認された。一方，1990 年以降に建設された PC 橋は 1 橋であるが充填度 3，4（グラウト充填不足）は確認されなかった。

・容量の小さい PC 鋼材を有する撤去桁では充填度 3 と 4 の合計が 5.9%の割合となるのに対し，容量の大きい PC 鋼材を有する撤去桁では 0.4%となった。

・ケーブル全長に渡り無作為に調査を行った結果，充填度 3，4（グラウト充填不足）の割合は上縁定着ケーブル 7.9%，端部定着ケーブル 4.3%であり，t 検定による確率を求めると $p = 0.046$ となったことから有意差が認められた。一方，定着部近傍に着目して調査した結果より，充填度 3，4（グラウト充填不足）の割合は上縁定着ケーブル 24.0%，端部定着ケーブル 5.0%であった。

・塩害地域に架設された PC 橋では充填度 3，4 の割合が 4.6%であり，一般環境の地域に架設された PC 橋の 6.1%とそれほど差異がなかった。

以上をグラウト充填不足という観点より再度まとめると，グラウト充填不足の発生割合は撤去桁の解体調査により得られた全データの平均が 5.2%であり，少なくとも 1990 年代以前の PC 橋においてはグラウト充填不足が生じていること，容量の小さい PC 鋼材（12φ5mm および 12φ7mm）を有する撤去桁はグラウト充填不足の発生割合が高くなる（平均 5.9%）こと，上縁定着ケーブル（平均 7.9%）は端部定着ケーブル（平均 4.3%）よりもグラウト充填不足の発生割合が高く，特に上縁定着ケーブルの定着部近傍（平均 24.0%）で顕著となることが確認された（図 2.3.10）。

このように，グラウト充填状況は PC 橋の架設年代，PC 鋼材の種類（容量）および定着位置の影響を受けることが明らかになった。

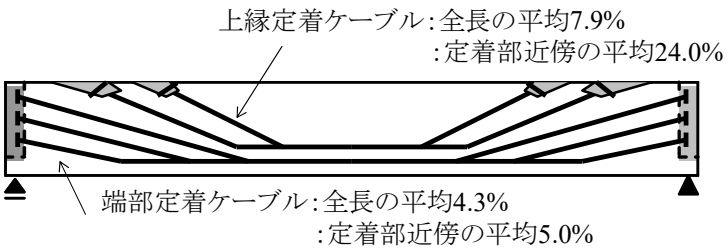


図 2.3.10　グラウト充填不足の発生状況

（上縁定着を有する PCT 桁橋の撤去桁解体調査による）

グラウト充填不足が生じている要因としては，①ブリーディングを許容する旧タイプのグラウトが用いられていたこと（1997 年頃以降はノンブリーディング型グラウトに切り替えられている），②曲上げ角度の大きい上縁定着ケーブルを有すること（1993 年建設省標準設計以降の PCT 桁橋では曲上げ角度の小さい端部定着のみに移行している）が挙げられる。

なお, 早期劣化橋ではグラウト充填不足の割合が撤去桁と比べて極めて高く（撤去桁の平均が 5.2%に対し，早期劣化橋の平均が 66.9%）かつ PC 鋼材全長にわたってグラウト充填不足が確認されていることから，上記に示したような技術変遷の影響というよりはむしろ個別事情があった可能性がある。

2 章の参考文献

2-1) 小林憲一，大平英生，登石清隆，羽田伸介：妙高大橋の PC ケーブル破断調査と対策，橋梁と基礎，45(9)，pp.32-38，2011.9

2-2) 西口裕之，中川義規，伊手一弘，廣井幸夫：グラウト充填度調査手法の選定—近江大橋主桁補強工事の施工報告—, 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.421-424, 2012.10

2-3) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全—PC 橋の更なる予防保全に向けて[2015 年版]—，2015.3

３章　グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関係

本章では，「グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関連性の整理」を目的として，PC 鋼材が健全であった PC 橋および PC 鋼材が腐食していた PC 橋の解体調査を実施することにより，グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関係について検討を行った。

３．１　PC 鋼材が健全であった PC 橋の解体調査

（１）橋梁の概要

佐野橋は，1965 年（昭和 40 年）に兵庫県丹波市に架設された 5 径間単純ポストテンション PCT 桁である（**表 3.1.1**）。主ケーブルについては JIS の規格ではない 12φ5.4mm が使用されており，支間中央では断面あたり 12 本の PC 鋼材が配置されていたため，上縁定着を有する形状であった（**図 3.1.1**）。

本橋の架橋位置は塩害地域ではなく，供用後 45 年を経過していたが，外観目視観察ではひび割れやはく離などの損傷は見られず，比較的健全な状態で維持されていた。しかしながら，拡幅計画による架け替えのために撤去されている（**写真 3.1.1**）。

表 3.1.1　対象橋梁の諸元

橋梁名	佐野橋
架橋位置	兵庫県丹波市
構造形式	5 径間単純ポストテンション PCT 桁橋
橋長・支間長	117.5m（支間長 5@22.8m）
有効幅員	5.5m
架設年	1965 年（昭和 40 年）

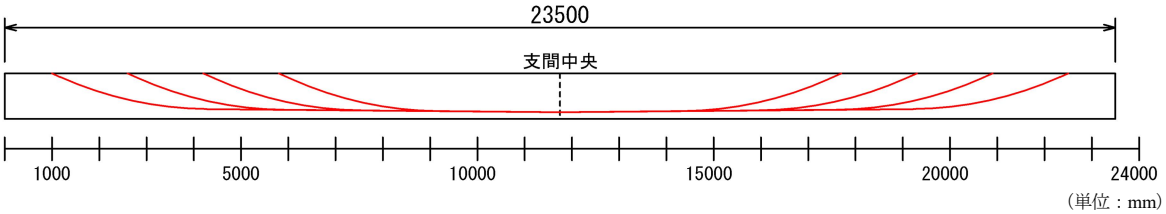


図 3.1.1　PC ケーブルの形状（上縁定着）

写真 3.1.1　橋梁全景（撤去時）

（2）解体調査

主桁は任意の位置で 1 径間あたり 3 ブロックに分割されていた。そのため，全 30 断面（5 径間×3 主桁）に配置された 342 本の PC 鋼材を対象に，各断面のグラウトおよび PC 鋼材を目視観察し，グラウトの充填状況と PC 鋼材の腐食状況を調査した。

グラウト充填状況は２章で述べたように充填度 1，2 相当を充填，充填度 3 相当を充填不足，充填度 4 相当を未充填と捉え 3 段階での評価により集計を実施した。ここで，グラウト充填状況を確認した結果を**図 3.1.2** および**図 3.1.3** に示す。結果としては，対象全 342 件のうち，充填度 1，2 が 322 件（94%），充填度 3，4 が 20 件（6%）であった。**図 3.1.3** に示すように上縁定着鋼材では，特に充填度 3，4 の割合が高い結果となったが，少なからず端部定着鋼材にも発生している状況がわかる。また，上縁定着ケーブルのみに着目した場合のグラウト充填状況を**図 3.1.4** に示す。これによると，充填度 4 は上縁から最大 50cm 下がりに位置し，シース壁面にグラウトが付着し，奥まで空洞が続いているような状況（**写真 3.1.2**）であったが，同一の PC ケーブルに充填不足が集中している状況ではなかった。また，左右のサンプル数に偏りがあるため一概には言えないが，充填度 4 は起点側に集中している。以上のような状況から，ブリーディングの影響や注入のし忘れによるものである可能性は低く，起点側が注入側であり下り勾配による先流れが生じてグラウトが十分に充填されなかった（流動性の高いグラウトを急速注入したことによる）と推察される。

なお，主ケーブルの PC 鋼線は調査した全 342 件ともほぼ腐食していないことが確認されており，グラウト未充填が確認された上縁定着ケーブルのシース中には水が侵入した痕跡は認められなかった。

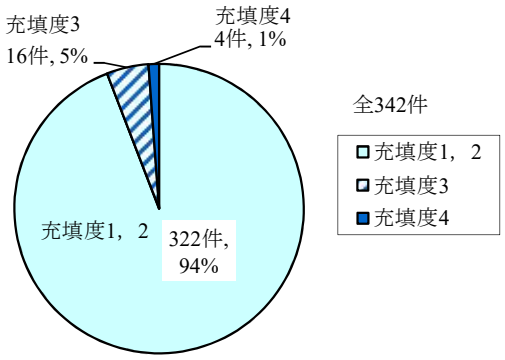


図 3.1.2　グラウト充填調査結果

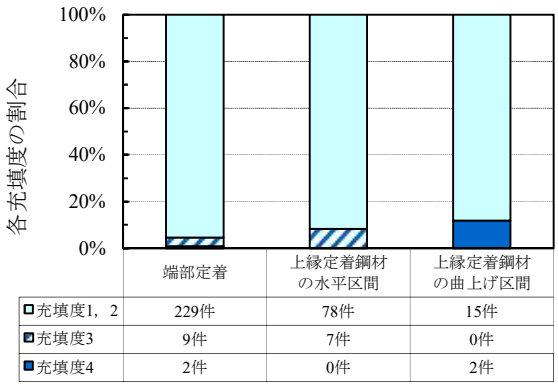


図 3.1.3　位置別のグラウト充填度

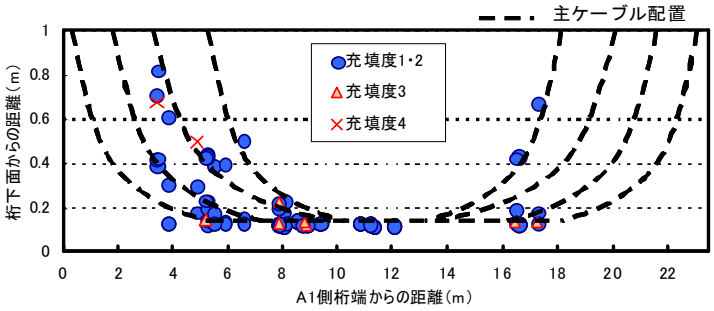


図 3.1.4　上縁定着ケーブルのグラウト充填状況

写真 3.1.2　充填度 4 の状況

３．２　PC 鋼材が腐食していた PC 橋の解体調査

（１）橋梁の概要

能生大橋は，1967 年（昭和 42 年）に新潟県糸魚川市に架設された 5 径間単純ポストテンション PCT 桁である（**写真 3.2.1**，**表 3.2.1**）。主ケーブルには，24φ7mm が用いられ，当時主流であった 12φ7mm と比べて約 2 倍の容量を有することから，上縁定着はなく端部定着のみであった。

本橋は架橋地点が日本海沿岸の海岸線に近接し，冬季には季節風による高波が押し寄せ，波飛沫が直接桁にかかるような厳しい塩害環境のため，その影響による劣化が顕著となった。劣化の状況としては，桁下フランジを中心に鋼材が腐食し，これに伴うコンクリートのひび割れや浮きが多数の主桁に生じていた（**写真 3.2.2**）。径間別では最も損傷が大きかった径間は第 1 径間であり，主桁別では G3 桁の損傷が相対的に高く，第 1 径間の G3 桁 C3 ケーブルでは PC 鋼材の破断が確認された。

このため架替えが計画され2010年9月に供用が停止された。

写真 3.2.1　橋梁全景

写真 3.2.2　PC 桁下フランジ部の劣化状況

橋梁名	能生大橋
架橋位置	新潟県糸魚川市（海岸より 0.1km）
構造形式	5 径間単純ポストテンション PCT 桁橋
橋長・支間長	140.5m（支間長 5@27.3m）
有効幅員	8.0m
架設年	1967 年（昭和 42 年）

（２）解体調査

本橋のような損傷を生じている原因としては，コンクリートやグラウトの力学的特性値が低下している可能性や，グラウトの充填不足に起因する可能性が考えられる。そこで，コンクリートやグラウトの物性調査と，グラウト充填状況の調査として主桁切断面（撤去時は各桁を 6 または 7 分割）のシースを直接目視し評価を行った。ここで，グラウト充填状況の評価については佐野橋と同様の基準によるもので分類した。鋼材腐食状況調査では損傷が最も著しい第 1 径間（**図 3.2.1**）に着目し，G1 桁（過去の調査で PC 鋼材の半数程

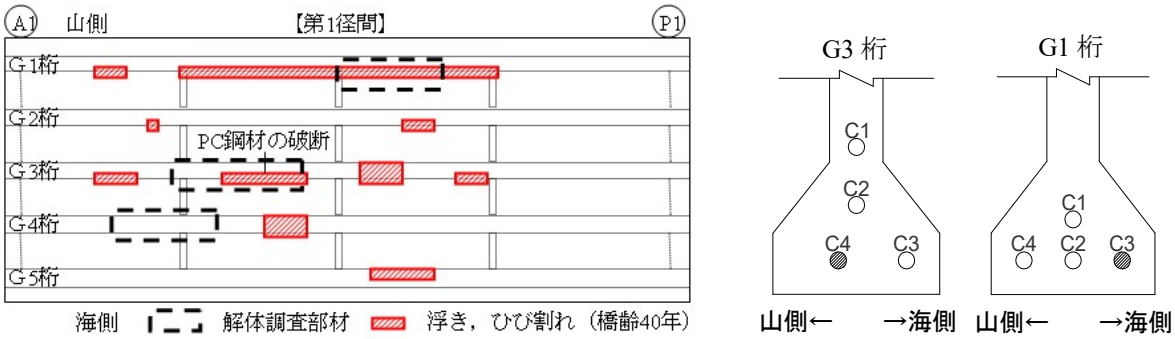


図 3.2.1　第 1 径間主桁下フランジ損傷状況と部材採取位置（左）およびケーブル配置（右）

度の減肉が確認された部位），G3 桁（過去の調査で C3 ケーブル PC 鋼材の全数の減肉と一部に破断が確認された部位），G4 桁（過去に補修履歴がなく，橋齢 40 年以後に損傷が発生した部位）と，2 番目に損傷の著しい第 4 径間について実施した。

コンクリートおよびグラウト物性調査

グラウトの圧縮強度試験は，シースと一緒に採取したコンクリートコア（**写真 3.2.3**）からシース内の一辺 15mm の立方体試料を取り出して実施した。角柱の試料と圧縮強度試験の状況を**写真 3.2.4** に示す。

撤去桁より採取したコンクリートコアにより確認したコンクリートの物性を**表 3.2.2** に，グラウトの物性を**表 3.2.3** に示す。その結果，コンクリート強度は最も著しい損傷を生じていた第 1 径間で 50N/mm^2 以上となり，十分な圧縮強度を有していることが確認された。また，第 5 径間における圧縮強度は 31.4～36.4N/mm^2 と他の径間に比べ低い値となった。しかし，弾性係数は他の径間と同等以上であり，引張強度も 3.0N/mm^2 と比較的高いことから，コンクリート材料としては特に問題がなかったと考えられる。

また，グラウトの圧縮強度は 30N/mm^2 以上であった。

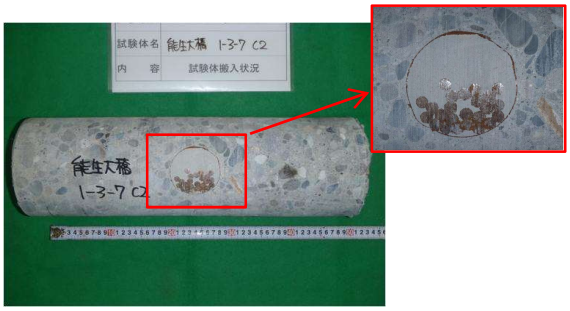


写真 3.2.3　コンクリートコア

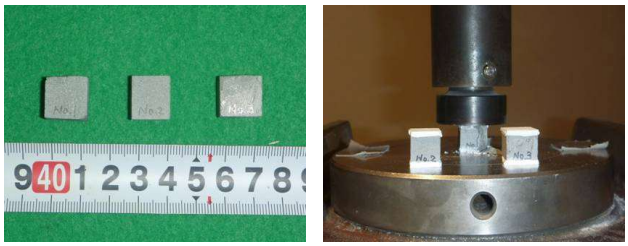


写真 3.2.4　グラウトの角柱試料と試験状況

表 3.2.2　コンクリートの物性値

対象部材		圧縮強度	弾性係数	引張強度
		N/mm^2	×10^{4}N/mm^2	N/mm^2
第1径間	G1桁	52.7	2.64	-
	G3桁	62.3	3.08	-
		60.7	3.11	-
第2径間	G1桁	53.4	2.78	-
	G3桁	63.9	3.32	-
		50.6	3.41	-
第5径間	G3桁	31.4	3.74	3.69
	G5桁	35.9	3.30	4.63
		36.4	3.07	3.00

表 3.2.3　グラウトの物性値

対象部材	圧縮強度	
	測定値（N/mm^2	平均値（N/mm^2
第5径間G3桁	51.9	47.5
第5径間G5桁	40.9	
	49.6	

グラウト充填状況調査

第 1 径間におけるグラウト充填状況の調査結果を**図 3.2.2** に示す。第 1 径間は，5 主桁すべての切断面で調査を実施し，充填度 1，2 が 102 件（99%），充填度 3 が 0 件，充填度 4 が 1 件（1%）であった。第 1 径間は，最も損傷の著しい径間であるが，局部的な空隙が多く見られる一方，PC 鋼材に対する防食効果が期待できないような空隙はほとんど見られず，大多数の箇所でグラウトの充填が良好であった。しかしながら，第 1 径間 G3 桁 C3 ケーブルにおいて充填度 4 が 1 件あり，その箇所では PC 鋼材の破断が確認された（**写真 3.2.5**，**写真 3.2.6**）。

また，第 2，4，5 径間は一部の主桁切断面で調査を実施し，第 1 径間のグラウト充填状況と比較した結果を**図 3.2.3** に示す。この結果からは最も損傷の著しい第 1 径間のグラウト充填状況と比較的健全であったとされる第 2 径間のグラウト充填状況には差がほとんど見られず，充填度 2 の割合は第 2 径間の方が高い結果となった。

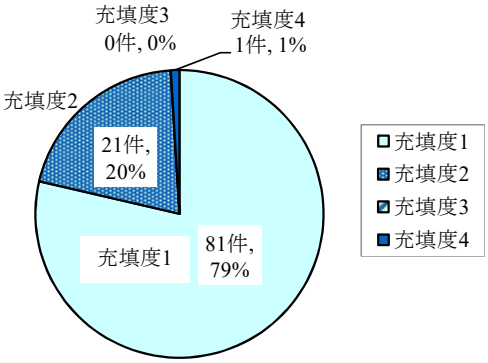


図 3.2.2　グラウト充填調査結果（第 1 径間）

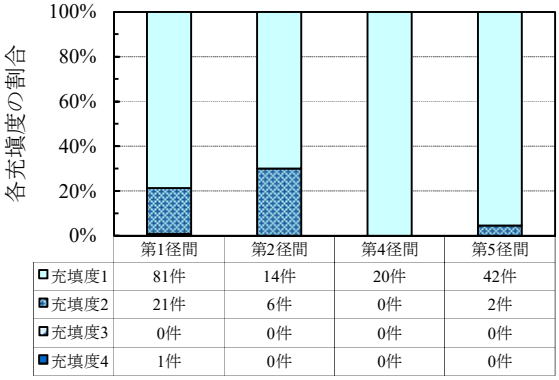


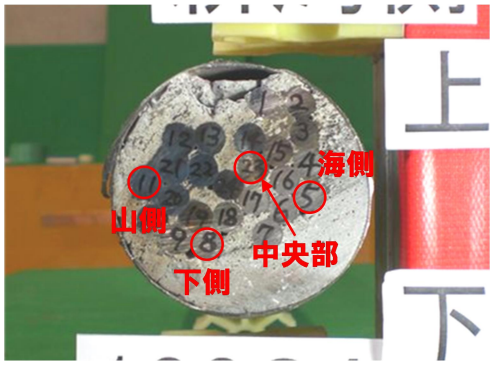
図 3.2.3　径間別のグラウト充填調査結果

写真 3.2.5　第 1 径間 G3 桁 C3 ケーブル（充填度 4）

写真 3.2.6　C3 ケーブル破断状況

鋼材腐食状況調査

質量減少率測定の試料の採取に際してシースやPC鋼材の腐食状況，グラウトの状態の目視観察を行った。試料採取の方法は主桁をはつり出しシース管ごとの状態で採取，解体して PC 鋼材を取り出した。**写真 3.2.7** に第 1 径間 G3 桁（C3 ケーブルが破断した最も損傷の著しかった桁）の C4 ケーブルのシース，グラウトおよび PC 鋼材を取り出した状況を示す。シースは一部に軽度の腐食が見られる程度であった。グラウトの充填状況は断面に若干の隙間が見られるが，PC 鋼材はグラウトに覆われており，充填度 2 と判定された。ただし，上部側のグラウトは脆く，シース取り出しの際に一部が粉砕，気泡や沈降痕も確認されているため，ブリーディングの影響を受けた可能性がある。また，本ケーブルの採取箇所は，本橋で最も損傷の著しい箇所の近傍（同位置で C3 ケーブルが破断）であるが，PC 鋼材の腐食はわずかであることが確認された。以上から，著しい塩害環境下にあっても，グラウトが概ね充填されていれば，PC 鋼材の防食効果が期待できると考えられる。

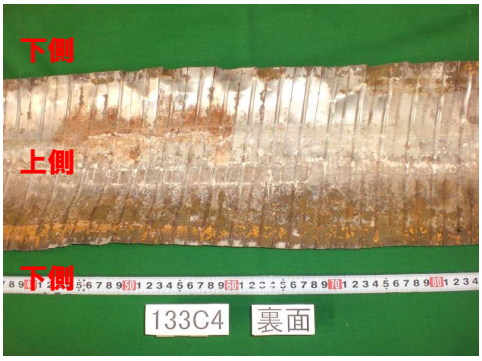


a）断面（右が海側）

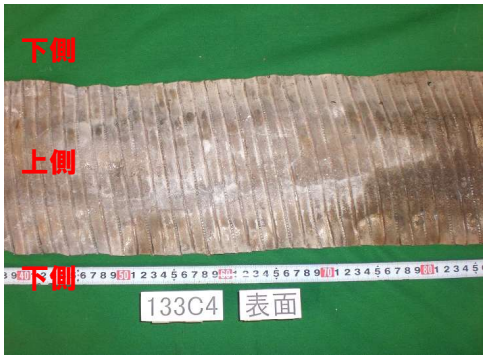
b）シース内側グラウト外観

c）シース内 PC 鋼線（上側）

d）PC 鋼線素線（下側）



e）シース内面（下側から展開）



f）シース外面（下側から展開）

写真 3.2.7　第 1 径間 G3 桁 C4 ケーブルの解体調査

質量減少率測定

質量減少率は，PC 鋼材の公称直径での単位長さ当たり重量と取り出した PC 鋼材の除錆後の単位長さ当たり重量の差を，公称直径での単位長さ当たり重量で除して算出した。ここで，最も損傷の著しかったとされる第 1 径間 G3 桁の同一部材から採取した C1～C4 ケーブルの質量減少率の結果について**図 3.2.4** に，第 1 径間 G3 桁 C3 ケーブルと同程度のかぶりである第 1 径間 G1 桁 C3 ケーブル（2 番目に著しい損傷），第 1 径間 G4 桁 C4 ケーブル（過去の調査時は健全であったが，新たに損傷）と第 4 径間 G4 桁の C3，C4 ケーブル（第 1 径間以外で最も損傷）の質量減少率を**図 3.2.5** に示す。

結果は，13 本の破断が確認されている第 1 径間 G3 桁 C3 ケーブルは 35%を越えたが，同一断面内の他の 3 本のケーブルは 10%以下となった。このことからも，グラウトが概ね充填されていれば PC 鋼材の腐食の抑制をすることができることが分かる。また，同一かぶりによる比較では，著しい損傷が生じた箇所は質量減少率が 10%を超えるような結果（文献 3-1 の腐食分類によると「PC 鋼材は破断しているものとみなす」状況に相当する）であったが，下フランジの軸方向ひび割れ程度の箇所では質量減少率は 10%以下となった。

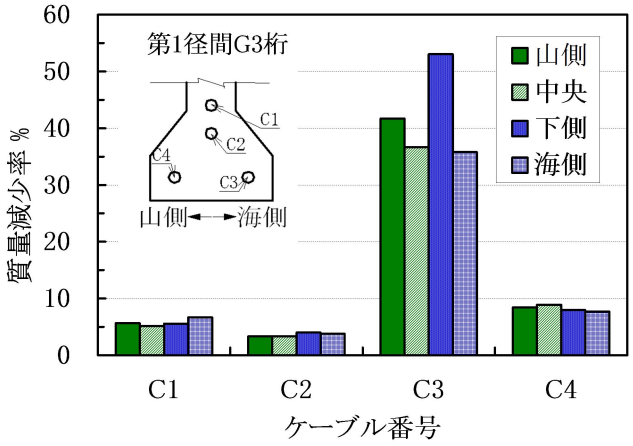


図 3.2.4　ケーブル位置と腐食量の関係（同一部材内における比較）

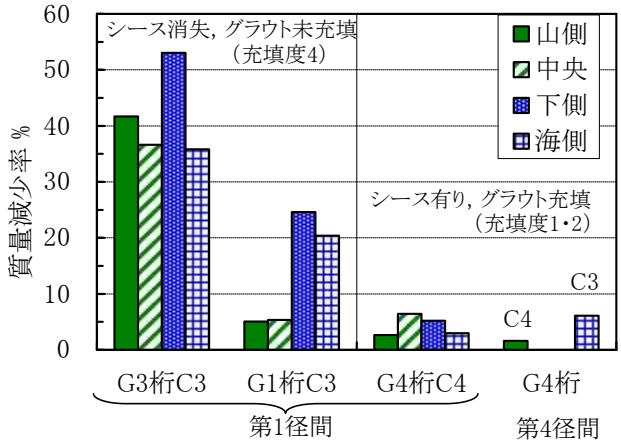


図 3.2.5　損傷状況とケーブル腐食量の関係（同一かぶりによる比較）

３．３　本章のまとめ

グラウト充填状況と PC 鋼材の腐食について，不充分なグラウト充填であっても PC 鋼材が健全であった橋梁と塩害環境下で PC 鋼材が著しく腐食した橋梁の解体調査を通して得られた知見を以下に示す。

（1）グラウト充填が良好な場合

・過酷な塩害を受けると PC 鋼材が腐食することもあったが，最外縁の質量減少率で平均 4%（内側を含めると平均 2%）以下であり，グラウトが充填されていれば相当の防食効果を期待できる。

（2）グラウト充填が不充分な場合

・水が侵入しない状況では PC 鋼材の腐食は認められなかった。

・過酷な塩害を受ける状況では，グラウト充填が不充分な箇所で，PC 鋼材の著しい腐食（質量減少率で 10%を超える）と素線破断が確認された。

以上より，PC 鋼材の防食のためにグラウトが果たす役割が非常に重要であり，グラウト充填が不充分な場合は水と塩分が侵入することで PC 鋼材の質量減少率（腐食量）が大きくなるといえる（**図 3.2.6**）。

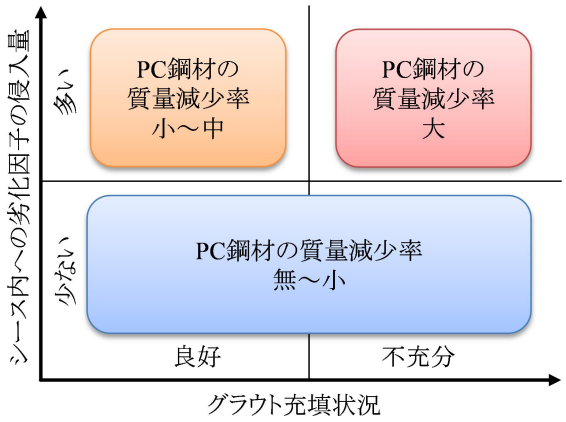


図 3.2.6　グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関連性

（PC 鋼材腐食状況が異なる PCT 桁橋の撤去桁解体調査による）

３章の参考文献

3-1)　一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全—PC 橋の更なる予防保全に向けて[2015 年版]—，p.197，2015.3

４章　シース沿いひび割れ発生要因の検討

本章では，「シース沿いひび割れ発生要因の解明」を目的として，解体調査ならびに解析的検討を行った。

４．１　調査橋梁の概況

植苗橋は，1961 年に北海道苫小牧市にプレキャストブロック工法により架設された 2 径間単純ポストテンション PCT 桁である（**写真 4.1.1**，**表 4.1.1**）。供用後 49 年を経過し，老朽化や幅員も狭いとして新橋の架設後に撤去された橋梁である。本橋の撤去前に行われた外観調査の結果，一部の桁でウェブおよび桁下面のシース沿いひび割れが生じていることが確認された（**写真 4.1.2**）。このシース沿いひび割れは，第 1 径間，第 2 径間とも上流側（北側）の G1 桁で多く生じていた。また，**図 4.1.1** には撤去前に実施された外観調査と X 線透過法によるグラウト充填調査の結果を示す。第 1 径間 A1 側に着目すると，以下のことが確認された。

- G2 桁 C4 ケーブルの X 線画像にはシース内の空隙部が認められなかったが，シース沿いひび割れが生じていた（**写真 4.1.3**）。
- G4 桁 C2 ケーブルと G5 桁 C3 ケーブルの X 線画像にはシース内に空隙部が認められたが，シース沿いひび割れは生じていなかった。

写真 4.1.1　橋梁全景（上流側より撮影）

表 4.1.1　対象橋梁の諸元

橋梁名	植苗橋
架橋位置	北海道苫小牧市（海岸より 10km）
路線名	植苗停車場道線
橋長・支間長	38.0m（支間長 2@18.3m）
橋梁形式	2 径間単純ポストテンション PCT 桁橋
竣工年	1961 年
撤去年	2010 年（供用後 49 年経過）

写真 4.1.2　撤去前の外観調査結果

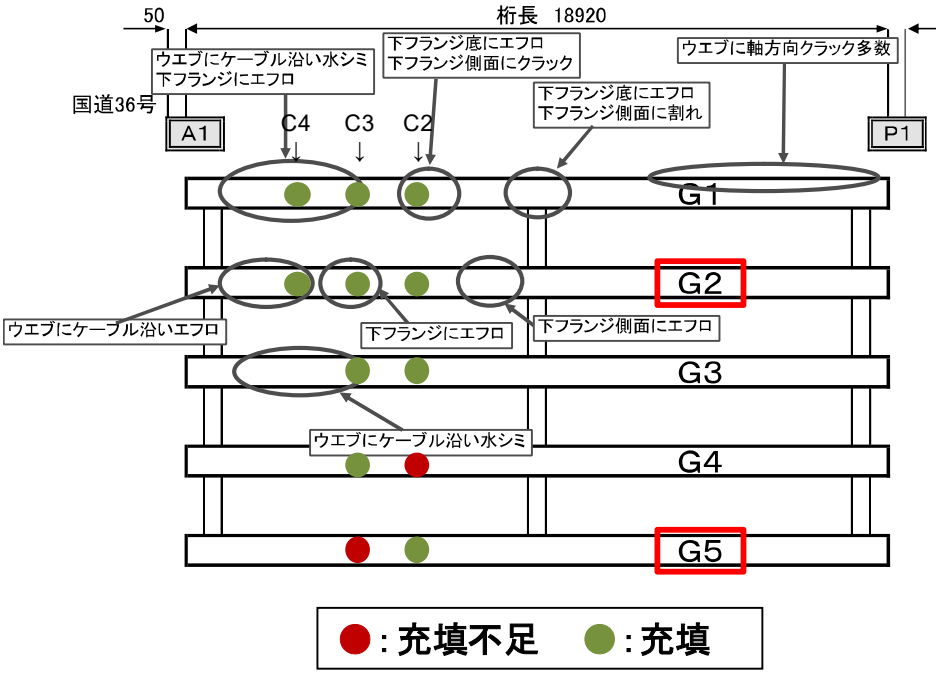


図 4.1.1　撤去前の外観調査結果（第 1 径間）

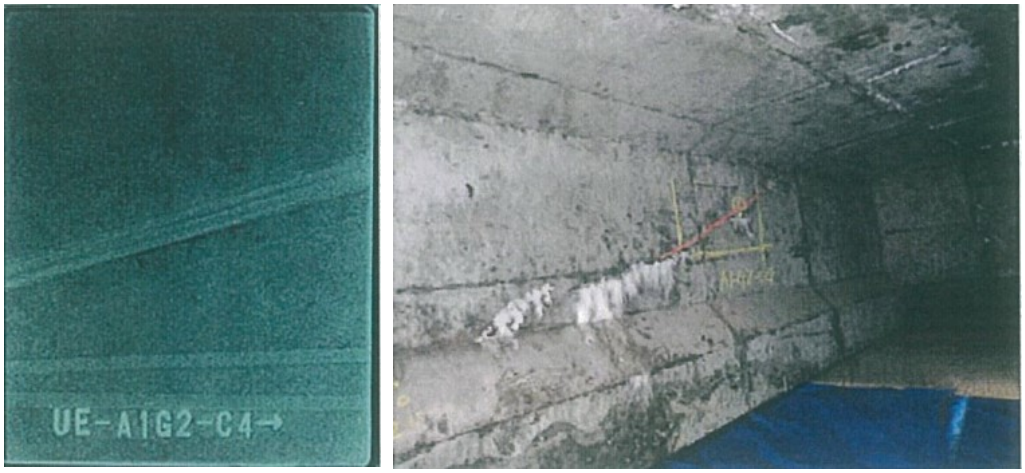


写真 4.1.3　X 線画像と外観状況（第 1 径間 A1 側 G2 桁 C4 ケーブル）

４．２　解体調査によるひび割れ発生要因の検討

撤去前に行われた調査結果より, ひび割れ発生状況とグラウト充填状況の傾向が異なっている第 1 径間 G2 桁と G5 桁を撤去桁として入手した。この撤去桁の解体調査を実施することで，ひび割れ発生要因を詳細に検討した。

（1）シース沿いひび割れとグラウト充填状況の関係

ひび割れ状況は目視によりスケッチした。また，グラウト充填状況は図 4.2.1 に示すように定着部近傍での主桁切断（図中の A-A，B-B，C-C をスラブソーにて切断した）とコア削孔（電磁波レーダーによりシース位置を確認した後，ボーリングマシンによりコアを採取した）により確認した。

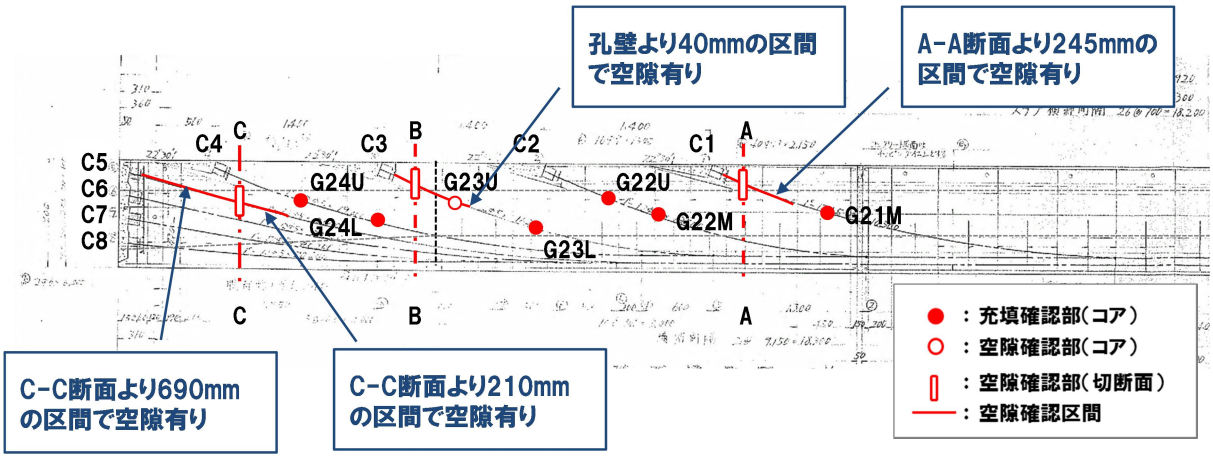


図 4.2.1　切断・コア削孔調査結果（G2 桁）

<u>G2 桁（撤去前の調査においてシース沿いひび割れ有，グラウト充填が確認された桁）</u>

G2 桁の調査結果を**図 4.2.2** に示す。G2 桁では，支点から 2.0m の位置より支間中央に渡る主桁下面シース沿いひび割れが生じているとともに，C3，C4 ケーブルの曲上げ部と同じ位置に主桁側面シース沿いひび割れが生じていることが確認された。シース沿いひび割れが生じていてグラウト充填不足が生じていたのは C3 ケーブルの定着部付近 1 箇所（G23U）のみで，その他すべての主桁側面および主桁下面のシース沿いひび割れでは確認した切断面およびコアにはグラウトが充填されていた。

一方，シース沿いひび割れが生じていない箇所でグラウト充填不足が確認されたのは C1，C5 ケーブル定着部近傍の 2 箇所であった（前出の**図 4.2.1** 参照）。

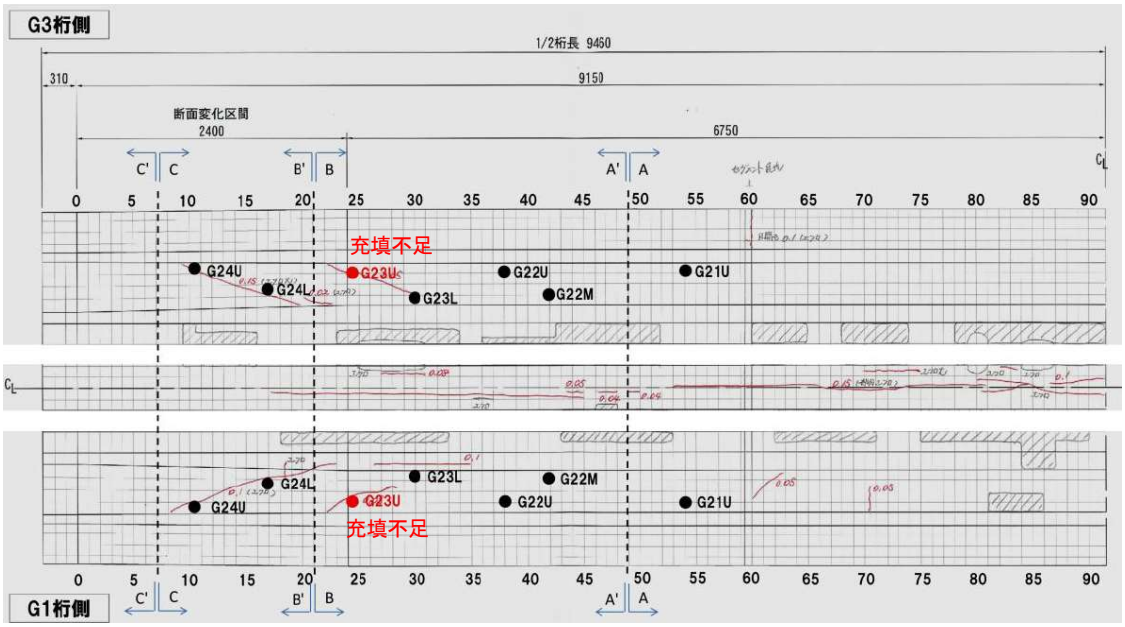


図 4.2.2　シース沿いひび割れとグラウト充填状況（G2 桁）

G5 桁（撤去前の調査においてシース沿いひび割れ無，グラウト充填不足が確認された桁）

G5 桁の調査結果を**図 4.2.3** に示す。G5 桁では，支点から 1.0m の位置より支間中央に渡る主桁下面シース沿いひび割れが生じているが，主桁側面シース沿いひび割れは生じていないことが確認された。上縁定着ケーブル曲上げ部から採取したコアを確認した結果，6 箇所中 5 箇所はグラウトが充填されているが，C3 ケーブルの 1 箇所で空隙部が確認された。

以上より，解体調査を行った撤去桁において，シース沿いひび割れはグラウト充填不足の箇所だけでなく，グラウトが充填されている箇所でも多数生じていることが確認された。

なお，G2 桁，G5 桁 A1 側について 5 つの切断面および 13 本のコアで確認された計 45 箇所のシース断面におけるグラウト充填度の割合を**図 4.2.4** に示す。充填度の割合は，充填度 1 が 84%，充填度 4 が 16%であり充填度として低い数値となったが，これは空隙部を生じやすい上縁定着ケーブルの定着部付近を中心に調査したためであり，シース沿いひび割れが確認された位置におけるグラウト充填状況は概ね良好であった（**写真 4.2.1**）。

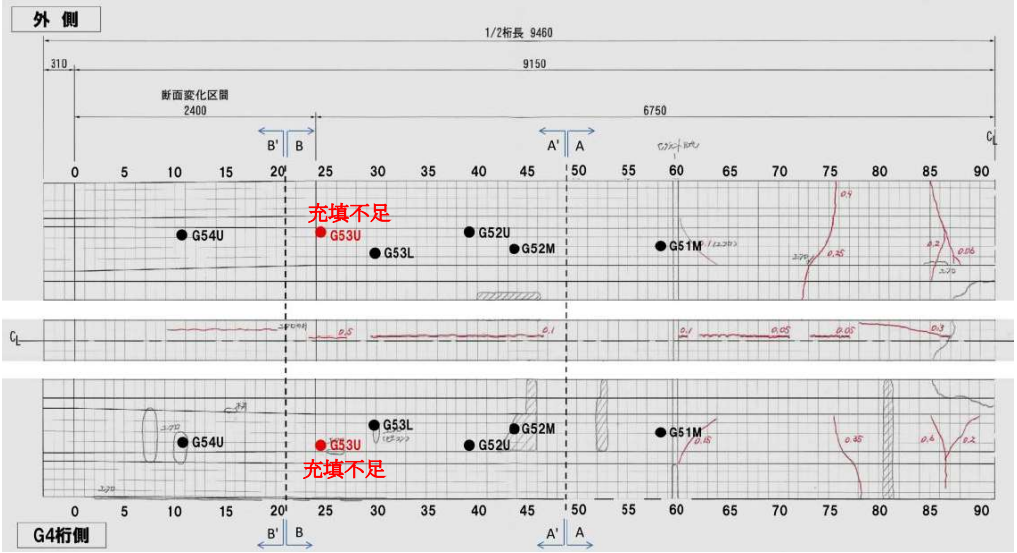


図 4.2.3　シース沿いひび割れとグラウト充填状況（G5 桁）

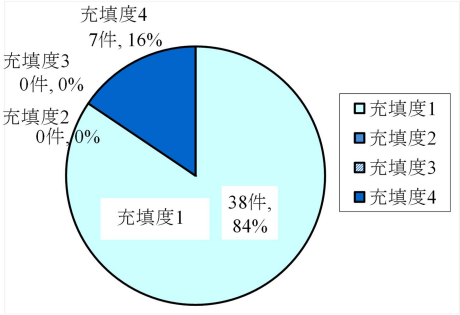


図 4.2.4　グラウト充填度の割合

写真 4.2.1　コア削孔調査結果

（2）材料劣化に関する調査

コンクリートの品質

採取コアなどにより確認したコンクリートの物性を**表 4.2.1** に示す。コンクリートの圧縮強度は想定される設計基準強度 50N/mm^2 に対して十分大きく，静弾性係数や引張強度も設計値を上回るものであり，コンクリートの材料劣化は確認されなかった。

表 4.2.1　コンクリートの物性

対象部材	単位重量 (g/cm^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	線膨張係数 (×10^{-6}/℃)
G2 桁 A1 側	2.51	77.5	－	38.5	－
G5 桁 A1 側	2.51	79.0	－	40.1	－
G2 桁 P1 側	2.50	－	2.90	－	10.4

グラウトの品質

植苗橋撤去桁 G2 桁 P1 側のシース内より採取したグラウトの物性を**表 4.2.2** に示す。ここで，撤去桁のグラウトの圧縮強度は引っ掻き試験（日本建築仕上学会）からの推定値であり，比較として現行グラウトの圧縮強度，静弾性係数（φ50×100mm）および線膨張係数（JIS A1325）の試験値を掲載した。表より，植苗橋のグラウトは，現行グラウトより圧縮強度および単位重量が小さくなっていることがわかる。この原因としては，当時のグラウトにはブリーディング水を排除するためにアルミ粉末を使用してグラウトを発泡させていたことが挙げられる。しかし，グラウトの設計強度 30N/mm^2 を上回ることから初期凍害などの材料劣化は生じていないと考えられる。

表 4.2.2　グラウトの物性

対象部材	単位重量 (g/cm^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	線膨張係数 (×10^{-6}/℃)	備　考
植苗橋撤去桁 G2 桁 P1 側	1.50	40	－	－	
現行グラウト	1.93	57.6	17.4	15	ノンブリーディング型（材齢 28 日）

アルカリシリカ反応（ASR）調査

植苗橋撤去桁よりコンクリートコアを採取し，岩種判定の状況を**写真 4.2.2** に示す。粗骨材と細骨材を構成する岩石のうち，主としてチャートと流紋岩溶結凝灰岩に，反応リム，ASR ゲルの形成が認められた。チャート，流紋岩溶結凝灰岩は一般に ASR 反応性鉱物を含むことの多い岩石である。ASR の反応状況について，一部で反応リム，ASR ゲルの形成が見られたが，骨材中のひび割れや骨材からペースト部へのひび割れの進展は認められなかった。

以上より，シース沿いひび割れの発生原因が ASR である可能性は低いものと推察された。

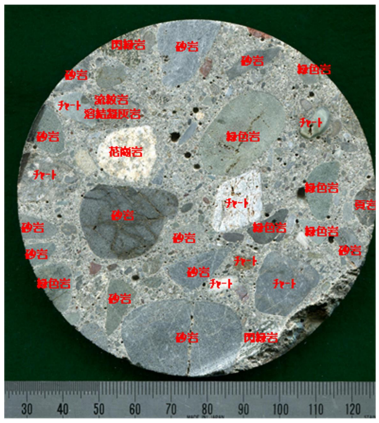


写真 4.2.2　ASR 岩種判定結果

（3）シース沿いひび割れに発生した遊離石灰に関する調査

水みち探査

グラウトが充填されている場合の水みち確認を目的に**写真 4.2.3** および**図 4.2.5** に示す水張り試験を行った。試験は，植苗橋 G2 桁 P1 側撤去桁の上縁定着ケーブル C2,C3（シース沿いひび割れ：無）および C4（シース沿いひび割れ：有）を対象に，定着部付近の調整コンクリートをはつり出した状態にして着色水を張った（**写真 4.2.3**）。水張り以外からシース沿いひび割れへの水の供給がないよう，試験は室内にて実施した。

写真 4.2.3　水張り試験状況

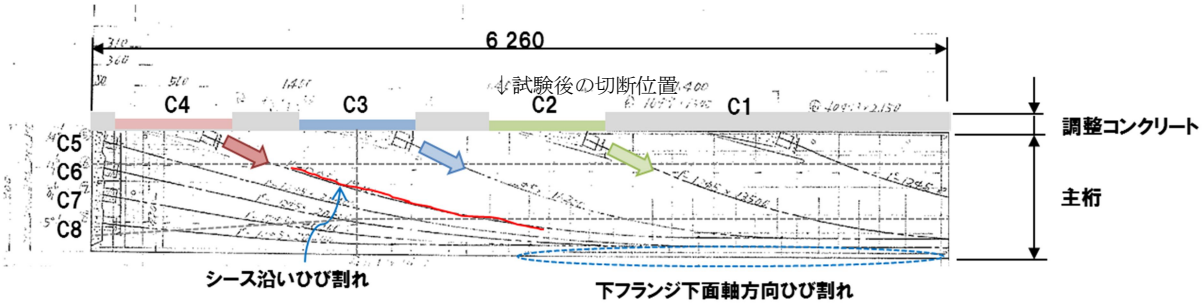


図 4.2.5　水張り試験概要

水張り試験を 3 ヶ月間実施した結果，C4 ケーブルに沿ったシース沿いひび割れから水が滲み出すことはなかった。また，C2 付近で桁を切断して C3，C4 のシース周辺の状況を確認した結果，C4 のシース周辺が部分的に湿った状態であった（**写真 4.2.4**）。

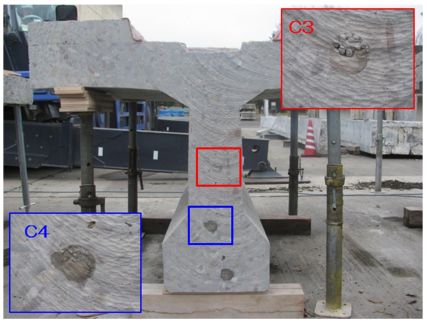
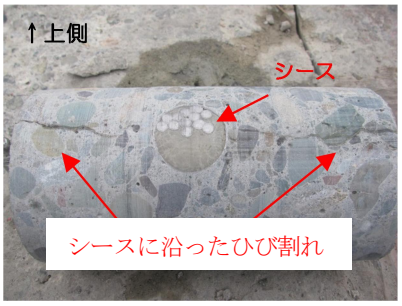


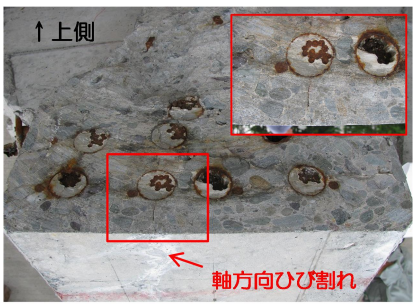
写真 4.2.4　試験後の切断面

遊離石灰の発生状況の確認

シース沿いひび割れの発生状況を確認した結果，C4 のシース沿いひび割れはシースまで達してなかった（**写真 4.2.5 (a)**）。また，ひび割れがシースに達している場合（**写真 4.2.5 (b)**）を含め，遊離石灰が確認される部



(a)　主桁側面に生じたシース沿いひび割れ



(b)　桁下面に生じたシース沿いひび割れ

写真 4.2.5　シース沿いひび割れの発生状況

分はコンクリートの表層部にとどまっていた（**写真 4.2.5**）。なお，グラウトが充填されているため，PC 鋼材の腐食は認められなかった。

まとめ（シース沿いひび割れに発生した遊離石灰について）

以上のことから，グラウトが充填されている場合においても上縁定着部より水が少しずつ伝わる（コンクリートとシースの界面が水みちとなっていると考えられる）こと，伝わった水はシース周辺にとどまりひび割れを通じて外部へ漏れ出していないことが確認された。したがって，上縁定着部からの水の侵入がシース沿いひび割れの発生要因になったとは考えにくい。

なお，シース沿いひび割れに見られる遊離石灰は大気中から結露などによりひび割れ内に供給された水分によるものと考えられる。

４．３　FEM 解析によるひび割れ発生要因の検討

ここではシース沿いひび割れの発生要因として，シースかぶりの影響や上縁定着の影響など PC 橋の建設時点における各種要因に着目して解析的に検討することにした。

なお，建設後の経年的な乾燥収縮やクリープの影響は解析検討の対象外とした。これは，乾燥収縮やクリープを過去に遡って正確に把握するための調査を行っていないことによる。

（1）解析条件

解析方法は 3 次元有限要素による弾性解析とし，桁表面にひび割れを生じる要因を①プレストレス，②グラウト注入圧，③グラウトに混和するアルミ粉の膨張圧（以下，アルミ粉膨張圧という），④コンクリートとグラウトの熱膨張係数の差（以下，熱膨張係数差という）とした。

材料の特性値

解析におけるコンクリート，グラウトおよび PC 鋼材の特性値を**表 4.3.1** に示す。ここで，コンクリートの特性値は本橋がブロック桁であることから設計基準強度を 50N/mm^2 とし，グラウトの特性値は既往の研究[4-1)]をもとに設定した。

表 4.3.1　解析における材料特性値

項　目	単位	コンクリート	グラウト	PC鋼材
静弾性係数	N/mm^2	33,000	20,000	200,000
熱膨張係数	×10^{-6}/℃	10	20	12
ポアソン比	－	0.2	0.2	0.3

荷重条件

前述した 4 つのひび割れの発生要因について，荷重条件を**表 4.3.2** に示す。

表 4.3.2　解析における荷重条件

プレストレス	グラウト注入圧	アルミ粉膨張圧	熱膨張係数差
15 N/mm^2	0.5 N/mm^2	0.5 N/mm^2	+20℃（温度差）

（2）主桁下面に生じたシース沿いひび割れに関する検討

解析モデル

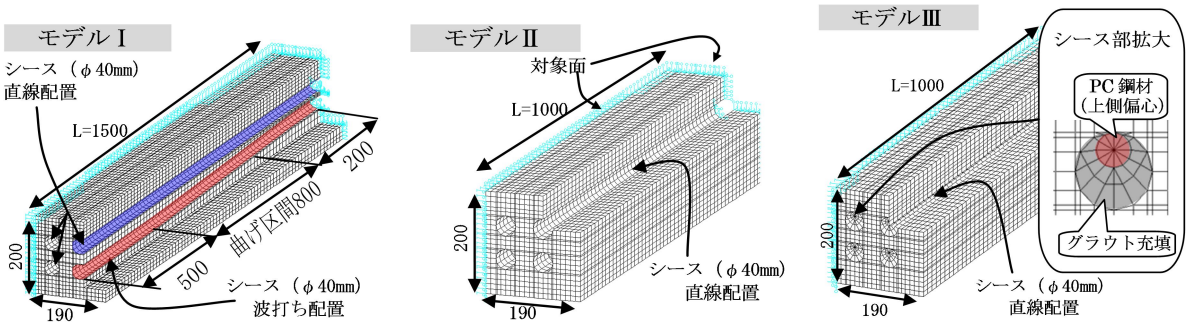
解析モデルは，主桁中心線を対称面とした直方体（190×200mm）であり，シース（φ40mm）内でグラウトと PC 鋼材（12φ5mm）を考慮している。拘束条件は，対称面 1 で橋軸直角方向を固定し，対称面 2 で橋軸方向を固定している。さらに対称面 1 と 2 が交わる直線の最下点で鉛直方向を固定とした。

表 4.3.3 に解析ケースを，**図 4.3.1** に解析モデルを示す。ここで，解析にあたり解析モデルは，ひび割れ発生要因によって梁長さ，シース配置形状，グラウトの有無，PC 鋼材偏心の有無など条件を変えて行った。具体的には，解析モデル I ではシースの波打ち（上下 20mm，曲げ区間 800mm）を考慮するため梁の長さを 3.0m とし，解析モデルⅡとⅢでは梁の長さを 2.0m としてシースは直線に配置した。また，解析モデル I とⅡではグラウトが充填されていない状況を想定しφ40mm の空洞を設けたモデルとしている。また，解析モデルⅢについてはグラウトが充填されコンクリートと一体化した状況を想定しコンクリートとグラウトおよび PC 鋼材を完全剛結にて接合し，シース中の PC 鋼材は 12φ5mm に相当する断面をシース上方へ配置させた。

なお，プレストレスによる表面応力の発生を検討する解析モデル I についてシース配置の波打ちによる腹圧力の発生は考慮していない。

表 4.3.3　解析ケース

ひび割れ要因	プレストレス	グラウト注入圧	アルミ粉膨張圧	熱膨張係数差
解析モデル	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
梁の長さ（m）	3.0	2.0	2.0	2.0
シース配置	波打ち	直線	直線	直線
グラウトの有無	無	無	無	有
PC鋼材の有無	無	無	無	有



(a) プレストレス　　(b) グラウト注入圧・アルミ粉膨張圧　　(c) 熱膨張係数差

図 4.3.1　解析モデル

解析結果

解析結果の最大主応力コンターを**表 4.3.4** に示す。ここで，解析対象であるコンクリート部材下縁部の発生応力に着目した場合，全ての荷重条件において発生する応力はシースの直下付近が最大となり，シースかぶりによって部材表面部に発生する応力が異なることが確認された。**表 4.3.4** には対象橋梁施工時の一般的なシースかぶり 50mm の結果を示し，**表 4.3.5** と**図 4.3.2** に，各荷重条件に対してかぶりを変化させた場合の数値を示す。ここで，**表 4.3.5** に示すかぶり 34mm とは，切断を行った G2 桁 A1 側の切断面で確認された最小かぶり厚である。表中の推定値は FEM の解析値を元に最小二乗法による累乗近似曲線（**図 4.3.2** 中に示す式）から算出した値を示す。

表 4.3.4　FEM 解析結果（シースかぶり 50mm）

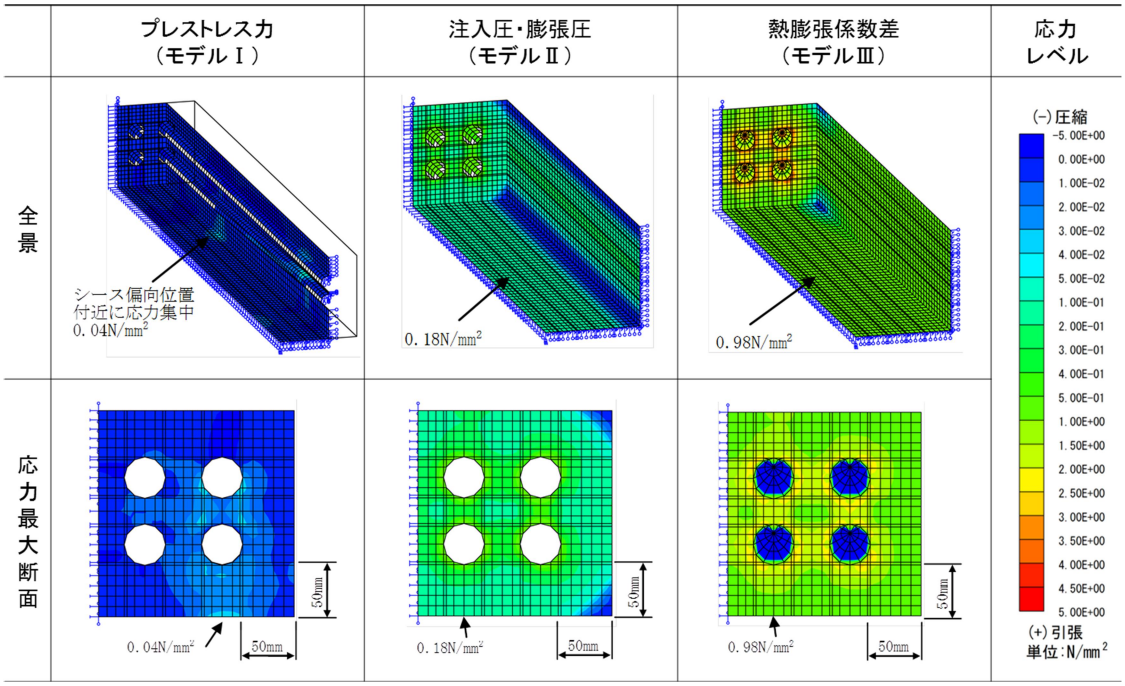


表 4.3.5　主桁下面縁の発生応力（N/mm²）

シースかぶり		30mm	34mm	40mm	50mm	60mm
プレストレス	FEM 解析	0.07	0.06	0.05	0.04	—
	近似式推定	—	—	—	—	0.03
グラウト注入圧 アルミ粉膨張圧	FEM 解析	0.34	0.30	0.25	0.18	—
	近似式推定	—	—	—	—	0.15
熱膨張係数差	FEM 解析	1.86	1.60	1.30	0.98	—
	近似式推定	—	—	—	—	0.78
合成応力	FEM 解析	2.27	1.96	1.60	1.20	—
	近似式推定	—	—	—	—	0.96

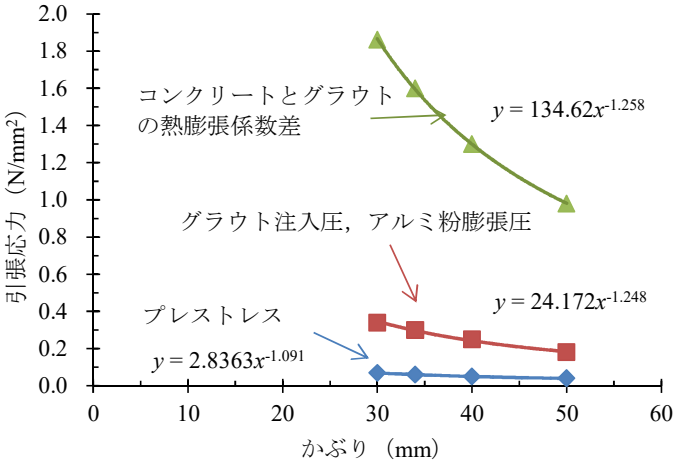


図 4.3.2　シースかぶりと主桁下面引張応力の関係

解析の結果，熱膨張係数差による発生応力は，グラウト注入圧やアルミ粉膨張圧の 5 倍以上であり，最もひび割れに与える影響が大きいことが確認された。一方，シースの波打ちを考慮したプレストレスの影響は小さい。ここで，グラウト注入圧やアルミ粉膨張圧の結果は既往の研究の結果と一致しており，数値解析の結果は妥当であると推察される。

ここで，対象桁の切断調査結果では，シースの最小かぶりが 34mm であるため，かぶり 34mm に着目して考察を行う。解析着目位置での発生応力について，時系列を考慮して合成した結果を**図 4.3.3** に示す。

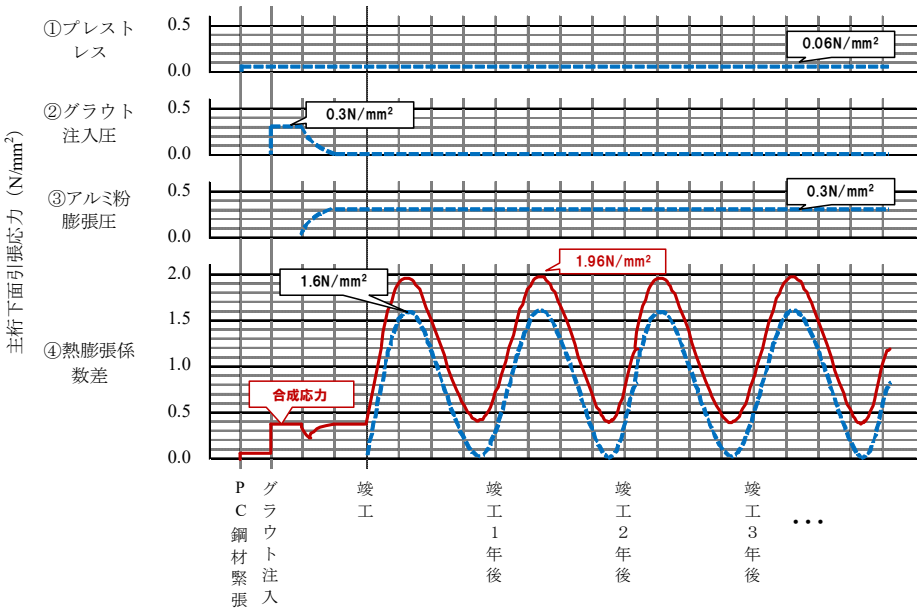


図 4.3.3　FEM 解析に基づく主桁下面引張応力の経時変化（シースかぶり 34mm の例）

プレストレスやアルミ粉の膨張の影響は永続的に作用するが，グラウト注入圧は施工時のみ作用する。また，熱膨張係数差で発生している 1.6N/mm^2 の応力は，年ごとの季節変化に伴い繰返し載荷される。これらの要因により桁下面には最大で 1.96N/mm^2 の応力が発生するが，これは設計基準強度 50N/mm^2 のコンクリー

トの引張強度 3.12N/mm^2 に対して小さく，これらの要因のみではシース沿いひび割れが発生しないものと推察された。

現在の指針では，シースのかぶりは 60mm 以上が確保されている。かぶり 60mm において発生する引張応力は 0.96N/mm^2 程度と推定され（**表 4.3.5**），桁下面の軸方向ひび割れの発生する可能性は低いものと考えられる。

（３）主桁側面に生じたシース沿いひび割れに関する検討

ウェブに生じたシース沿いひび割れの発生原因について検討を行った。ここでの検討は，前述する 4 つのひび割れ要因のうちプレストレスについてのみ解析により行うものとし，グラウト注入圧およびアルミ粉膨張圧は既往の研究における推定式により，コンクリートとグラウトの熱膨張係数差は前出の**図 4.3.2** で確認されたシースかぶりと発生応力の関係式を用いて検討を行った。

【プレストレスによる表面応力】

解析モデル

プレストレス（PC 鋼材の緊張）により生じる表面応力について，曲上げ角度をパラメータとして解析的な検討を行った。

解析モデルは，幅 180mm，高さ 300mm の断面にシースを模擬する孔径 40mm の空洞をかぶり 70mm で設けたモデルとした。

プレストレスは断面に一様な圧縮力として導入しており，曲上げによる偏向力は考慮していない。空洞は直線区間 200mm より曲上げ区間に入り，曲上げ完了後に 335mm の直線区間を有しており，曲上げ角度や区間により長さ寸法が異なるものとなっている。

解析モデルの断面を**図 4.3.4** に，各解析モデルのシース配置を**表 4.3.6** に示す。

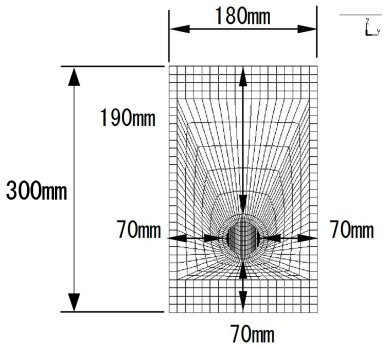
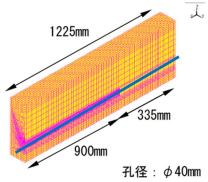
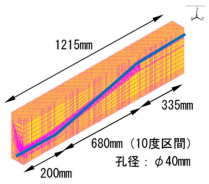
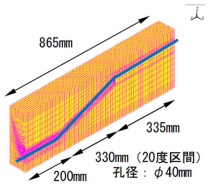
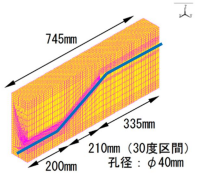


図 4.3.4　解析モデル断面

表 4.3.6　各解析モデルのシース配置

曲上げ角度	0°	10°	20°	30°
モデル —：ケーブル配置イメージ				
曲上げ区間	0mm	680mm	330mm	210mm

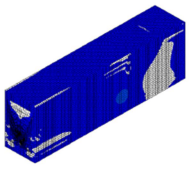
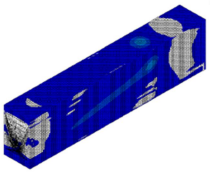
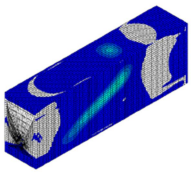
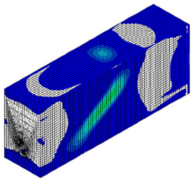
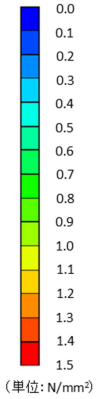
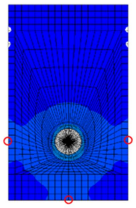
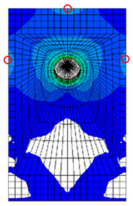
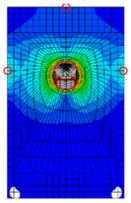
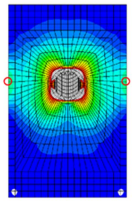
解析結果

表 4.3.7 にプレストレスによる応力の発生状況（コンター図）を示す。

本解析により，プレストレスの導入により側面には引張応力が発生し，曲上げ角度が大きいほど，コンクリート表面応力が増大することが確認された。これは，圧縮力を受ける断面内にはシースを模した空洞があり，桁腹部の幅が小さいことによる表面側へのはらみ出しにより引張応力が発生したためと考えられる。本橋の上縁定着ケーブルは，曲上げ角度が 22°30’となっており，相応の表面応力が発生していたものと推察される。

また，プレストレスにより発生する応力はシース近傍およびコンクリート表面で大きく，その間の応力が小さくなる傾向にある。これは，本橋で行った解体調査において確認されたシース沿いひび割れやシース付近のひび割れ発生状況は類似しており，本解析の妥当性が示されている。

表 4.3.7　プレストレスによる応力の発生状況

曲上げ角度	0°	10°	20°	30°	応力ﾚﾍﾞﾙ
全景（上面）					
側面 最大主応力 MAX断面					
側面 最大主応力	0.17 N/mm²	0.25 N/mm²	0.45 N/mm²	0.64 N/mm²	

【グラウト注入圧，アルミ粉膨張圧による表面応力】

グラウトの注入圧およびアルミ粉の膨張圧により生じる表面応力は，それぞれ内圧を 0.5N/mm^2 と，シース径を 40mm，かぶり厚を 70mm として既往の研究[4-1)]より単位系を補正した以下の式で算出し，それぞれでウェブ表面に 0.09N/mm^2 の引張応力を生じることを確認した。

$$\sigma = 10.2 \times E \cdot p\ (3.15 - 1.5\, i / d) \times 10^{-6}$$

ここで，E：弾性係数（ $= 3.30 \times 10^4$ N/mm^2），p：内圧（ $= 0.5$N/mm^2），

i：シースかぶり，d：シース径

【コンクリートとグラウトの熱膨張係数の差による表面応力】

本橋のウェブにおけるシースかぶりは 70mm である。コンクリートとグラウトの熱膨張係数の差によりウェブ表面に生じる応力は，**図 4.3.2** に示すシースかぶりと発生応力の関係式を外挿して算出した結果，0.64N/mm^2 であった。

【ウェブ表面に生じる応力の合計】

各要因が複合的作用した際の表面応力を**表 4.3.8** に示す。ここで，グラウトの注入により生じる表面応力は**図 4.3.5** に示す各要因による応力の発生イメージのように施工時に一時的に生じるものとして合計からは除外している。

検討した要因が複合的に生じることにより，発生応力は 1.0N/mm^2 を超え，曲上げ角度の大きい鋼材ほどひび割れが発生する可能性が高いことが確認された。

表 4.3.8　各要因による発生応力（N/mm^2）

発生要因	曲上げ角度			
	0 度	10 度	20 度	30 度
プレストレス	0.17	0.25	0.45	0.64
グラウト注入圧	0.00（0.09）			
アルミ粉膨張圧	0.09			
熱膨張係数差	0.64			
合計	0.90	0.98	1.18	1.37

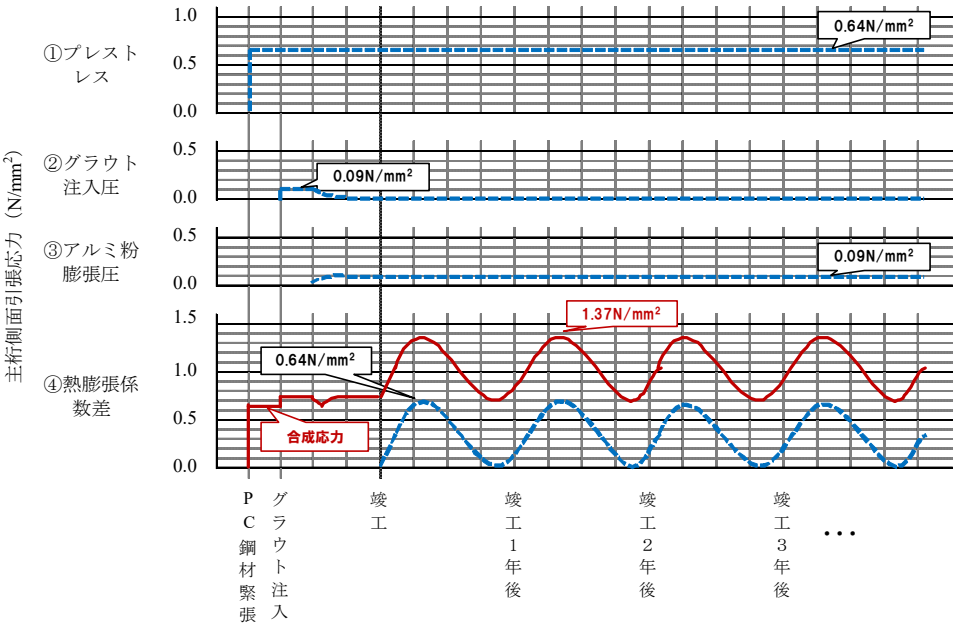


図 4.3.5　FEM 解析に基づく主桁側面引張応力の経時変化（曲上げ角度 30°の例）

以上に示した通り，主桁下面および主桁側面に生じる引張応力の合力はコンクリートの割裂強度（3.12N/mm^2）より小さいことから，経年的な乾燥収縮やクリープの進行などが加味されるなどの複合要因によりシース沿いひび割れが生じたものと推定される。

４．４　本章のまとめ

シース沿いひび割れの発生要因を解明するために実施した解体調査およびFEM解析より得られた知見を以下に示す。

（１）解体調査によるひび割れ発生要因の検討

・解体調査を行った撤去桁において，シース沿いひび割れはグラウト充填不足の箇所だけでなく，グラウトが充填されている箇所でも多数生じていた。

・上記のひび割れは，グラウト充填不足に起因した腐食やコンクリートの材料劣化といった経年劣化により生じたものではないこと，グラウトが充填されている場合においてもグラウト充填不足によって生じるひび割れや遊離石灰と同様の変状が起こることを解体調査により確認した。

（２）FEM解析によるひび割れ発生要因の検討（シースかぶりや上縁定着の影響について検討）

・主桁下面に着目した FEM 解析結果によると，主桁下面に発生する引張応力は「コンクリートとグラウトの熱膨張係数差」が最も大きく，次いで「グラウト注入圧」と「グラウトに混和するアルミ粉の膨張圧」が大きい。

・上記の要因を合成した引張応力は解体調査を行った PC 橋の当時の一般的なシースかぶり 50mm の場合で 1.20N/mm^2，確認されたシースかぶりの最小値 34mm の場合で 1.96N/mm^2 となった。

・主桁側面に着目したFEM解析結果によると，主桁側面のシースかぶりが主桁下面よりも大きいことでグラウトの充填に起因する引張応力は小さいものの，シースの曲上げ角度が20度を超えるとウェブ表面の引張応力が1.0N/mm^{2}を上回った。

以上を整理すると，シース沿いひび割れが必ずしもグラウト充填不足に起因するものではないことが明らかになった。したがって，シース沿いひび割れが生じていることが目視点検で確認された場合においても，グラウト充填不足であるか否か，あるいは，将来的に劣化が進行するか否かを判断するためには詳細調査を実施することが不可欠である。

また，シース沿いひび割れの発生要因をFEM解析により検討した結果，経年劣化以外の要因として，グラウトの充填および上縁定着の曲上げに起因してシース沿いのコンクリート表面に引張応力が生じることがわかった。これらの引張応力はシースかぶりが小さい場合ほど曲上げ角度が大きいほど卓越し，合成された引張応力は場合によって最大2.0N/mm^{2}に達することが解析的に示された。しかし，この引張応力の合力はコンクリートの割裂強度より小さいことから，経年的な乾燥収縮やクリープの進行などが加味されるなどの複合要因によりシース沿いひび割れが生じたものと推定される。

４章の参考文献

4-1)　北海道開発局土木試験所：プレストレストコンクリート用グラウトに関する実験的研究，土木試験所報告第 29 号，1962

５章　既設 PC 橋グラウト充填調査のポイント

５．１　調査目的

既設 PC 橋のグラウト充填調査は，グラウト充填不足による PC 鋼材の劣化進行を未然に防止することを目的に実施する。なお，本章で用いる用語を以下に示す（１章より再掲）。

ポストテンション桁（ポステン桁）：ポストテンション桁は，予めシースを配置してコンクリートを打設し，コンクリートが十分な強度発現後，シース内に PC 鋼材を挿入し，緊張することでプレストレスを導入し製作される。その後，PC 鋼材の付着と防食のためにシース内にグラウトを充填する。

シース：PC 鋼材をコンクリート桁内に配置するため，あらかじめコンクリート中にあけておく穴を形成するための筒状のもの。過去には厚さ数 mm の鋼製スパイラルシースが多く用いられている。

シースかぶり：コンクリート表面からシース表面までの最短距離の部分。

PC 鋼材（PC ケーブル）：ポストテンション桁にプレストレスを与えるために用いる高強度の鋼材。主桁に配置されている PC 鋼材（PC ケーブル）は，主ケーブルともいう。PC 鋼材の種類および容量（緊張可能な最大荷重）は，鋼材の種別，線径，使用本数の組合せによる。例えば，1980 年代までの T 桁主ケーブルに多用されていた PC 鋼材 12φ7mm（PC 鋼線φ7mm を 12 本束ねたもの）の容量は約 750kN，現在使われている PC 鋼材 12S12.7mm（PC 鋼より線 12.7mm を 12 本束ねたもの）の容量は約 2250kN である。

上縁定着，端部定着：PC 鋼材の定着位置が主桁の上縁の場合を上縁定着，桁端部の場合を端部定着という。過去において，容量の小さい PC 鋼材（12φ7mm など）を用いる際には上縁定着を設ける必要があった。現在では，容量の大きい PC 鋼材（12S12.7mm など）を用いることで PC 鋼材の配置本数が減り，上縁定着を避け，端部定着のみとするようになっている。

グラウト：シースと PC 鋼材との空隙を充填するための注入用材料。1997 年以前のポストテンション桁にはブリーディングを生じるグラウト（旧タイプのグラウト）が使われていた。現在ではノンブリーディング型のグラウトに切り替えられている。

グラウト充填度：シース内のグラウト充填の度合い。

シース沿いひび割れ：シースに沿ったひび割れの総称。主桁下フランジに発生した場合を「主桁下面シース沿いひび割れ」，主桁ウェブに発生した場合を「主桁側面シース沿いひび割れ」と呼ぶ。

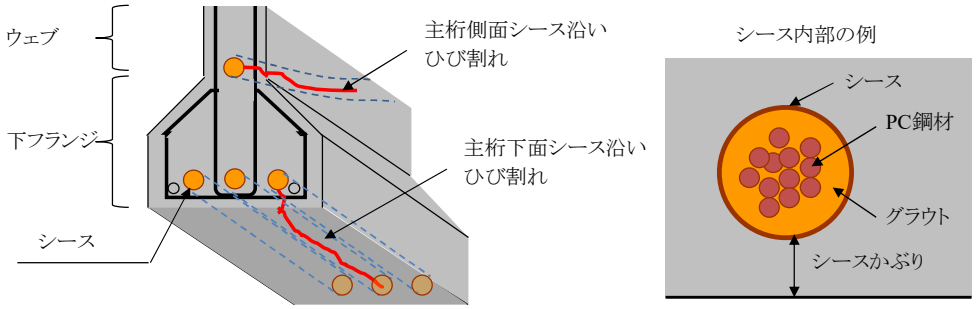
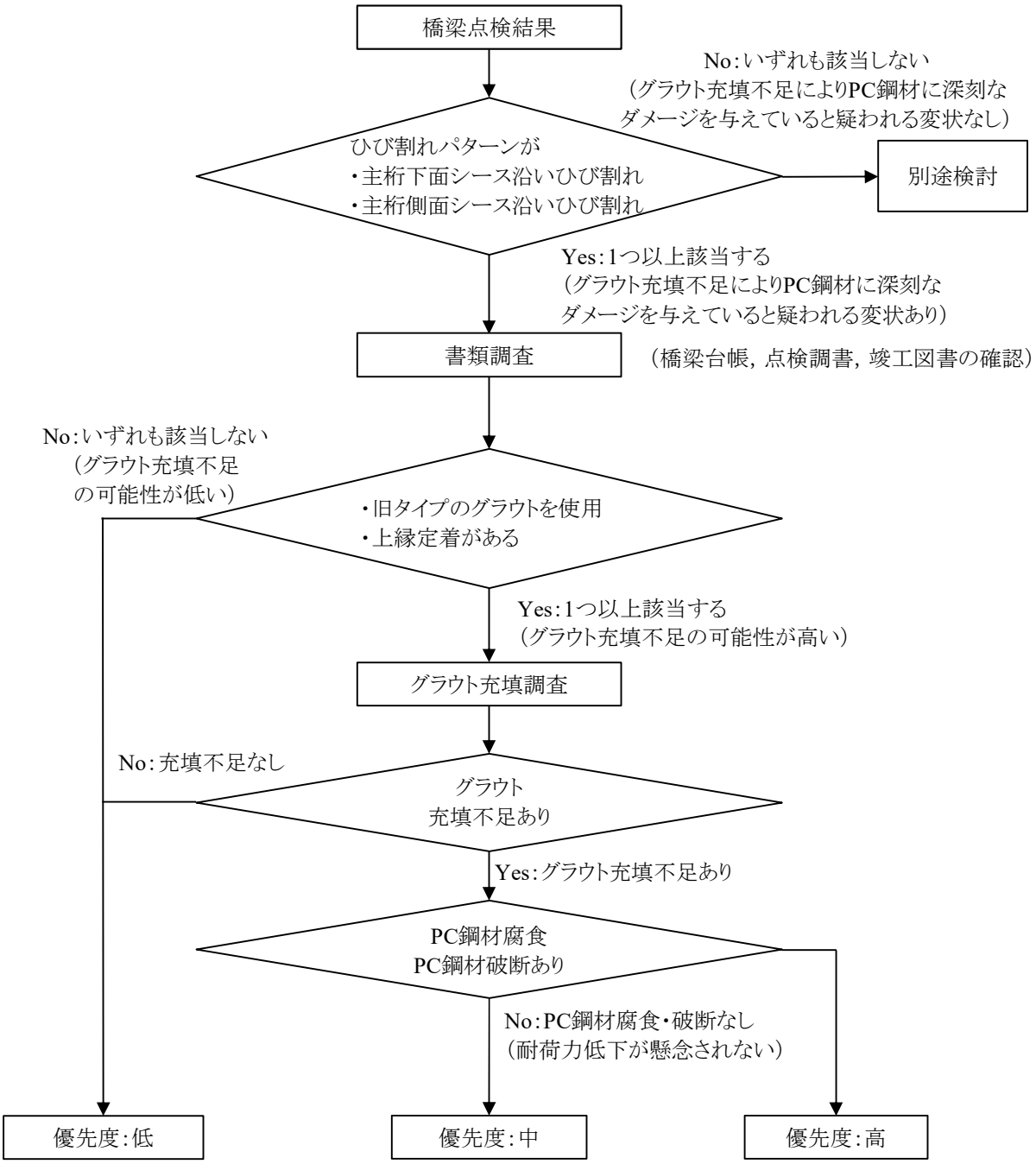


図 5.1.1　ポストテンション桁の説明図

５．２　調査手順

グラウト充填調査は，**図 5.2.1** に示す手順により実施する。

調査手順は，橋梁点検結果よりひび割れパターンの確認を行い（5.3 節），書類調査により調査対象橋梁を特定し（5.4 節），調査が必要と特定された場合にはグラウト充填調査を実施し（5.5 節），対策優先度を判断する（5.6 節）ものとする。



優先度:グラウト充填不足に対する対策の優先度を示すものであり，他の要因による対策の必要性については別途検討する必要がある。

図 5.2.1　グラウト充填調査フロー

５．３　ひび割れパターンの確認

橋梁点検結果よりひび割れパターンの確認を行う。

確認されたひび割れパターンの中から，「主桁下面シース沿いひび割れ」，「主桁側面シース沿いひび割れ」の 1 つ以上に該当する場合は，グラウト充填不足により PC 鋼材に深刻なダメージを与えていると疑われる変状があることから，5.4 節に進み書類調査を行うものとする。

いずれも該当しない場合は，グラウト充填不足により PC 鋼材に深刻なダメージを与えていると疑われる変状がないことから，本章によらずに別途検討を行う。

主桁下面シース沿いひび割れ

PC 桁の支間中央部，主桁下面縦方向ひび割れが該当する（**図 5.3.1**）。ひび割れに沿ってエフロレッセンス（遊離石灰とも呼ばれる）や水しみが見られるケースもある。

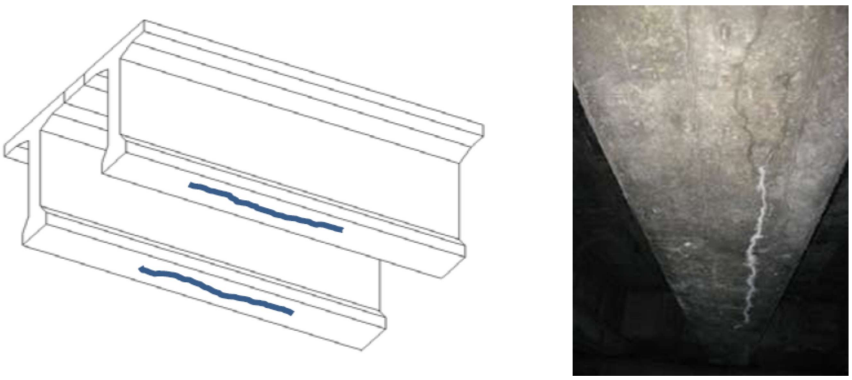


図 5.3.1　主桁下面シース沿いひび割れパターン [5-1)]と事例

主桁側面シース沿いひび割れ

PC 桁ウェブなどシースに沿って生じるひび割れが該当する（**図 5.3.2**）。ひび割れに沿ってエフロレッセンス（遊離石灰とも呼ばれる）や水しみが見られるケースもある。

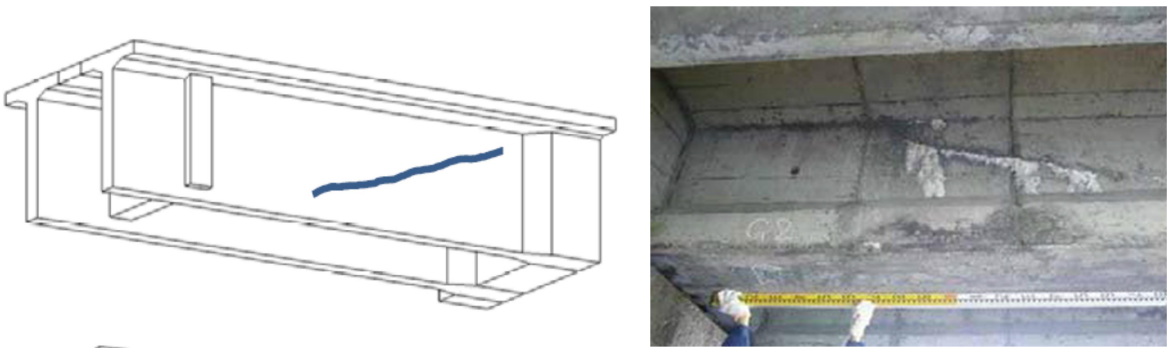


図 5.3.2　主桁側面シース沿いひび割れパターン [5-1)]と事例

なお，これらのシース沿いひび割れは，別の要因によって生じる場合もある。

a)塩害による鉄筋の腐食膨張

b)アルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリートの異常膨張

c)グラウトの初期凍害

d)グラウトに起因する過度な内圧

e)プレストレス他

a)塩害による鉄筋の腐食膨張

海岸線近くに位置している場合は，海から飛来する塩分がコンクリート表面に付着し，コンクリート中に侵入するため，最外縁の鉄筋が先に腐食する。**図 5.3.3** のケースでは，軸方向鉄筋が腐食し，PC 桁下面にひび割れが生じている。この場合は，グラウト充填の有無によらず，いずれは PC 鋼材付近にも塩分が到達するおそれがあるため，早期に塩害対策を講じる必要がある。

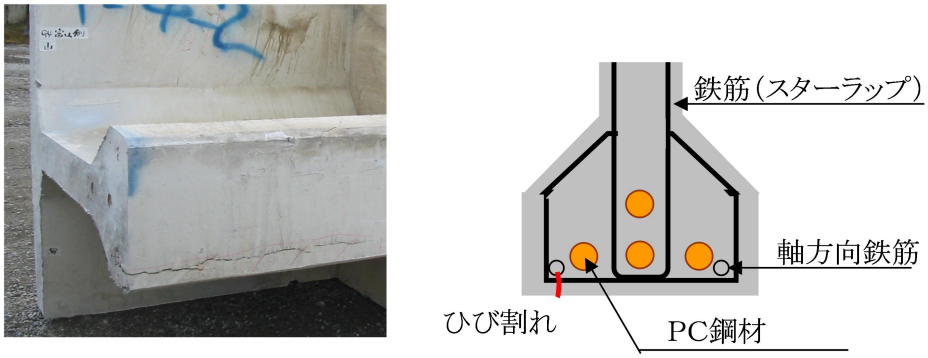


図 5.3.3　塩害により PC 桁下面に生じたひび割れ

b)アルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリートの異常膨張

反応性骨材の使用，水，アルカリの存在によりコンクリートの異常膨張が生じ，**写真 5.3.1** に示すようなひび割れが生じることがある。この場合は，グラウト充填の有無によらず，水の供給を遮断する必要がある。

写真 5.3.1　ASR により PC 桁下面（左）および側面（右）に生じたひび割れ

c)グラウトの初期凍害

寒冷地で冬期施工を行った場合，注入したグラウトが凍結しシース沿いひび割れが生じることがある[5-2)]。

d)グラウトに起因する過度な内圧

４章に示したように，グラウトの注入や初期膨張，グラウトとコンクリートとの線膨張係数差などグラウトに起因する様々な内圧により，シース沿いひび割れが生じることがある（**写真 5.3.2**）。

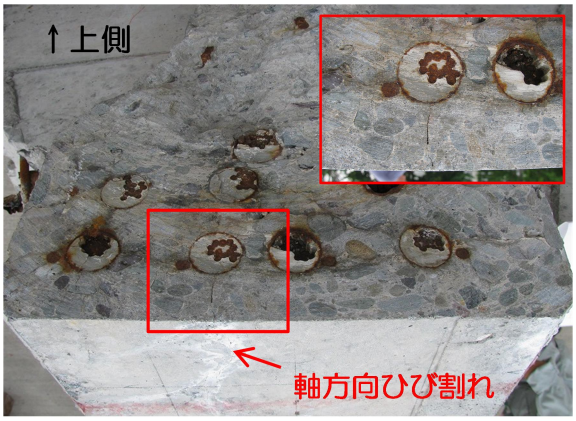


写真 5.3.2　主桁下面に生じたシース沿いひび割れ

e)プレストレス他

プレストレスが過大となる場合には，横ひずみの限界を超えシース沿いひび割れが生じることがある。また，温度応力やクリープ・乾燥収縮，コンクリートの強度不足などはひび割れ発生に影響する。

なお，グラウトが充填されている場合にシース沿いひび割れが卓越する要因として，過去に建設された PC 橋ではシースかぶりが小さかったこと（**図 5.3.4**）やひび割れ防止鉄筋量が少なかったことが挙げられる。

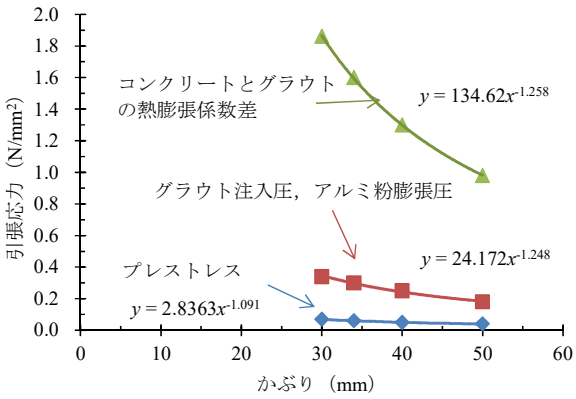


図 5.3.4　シースかぶりとコンクリート表面に生じる引張応力の関係

５．４　調査対象橋梁の特定

ひび割れパターンが「主桁下面シース沿いひび割れ」,「主桁側面シース沿いひび割れ」の 1 つ以上が該当した場合，書類調査により調査対象橋梁を特定する。

書類調査は橋梁台帳，点検調書，竣工図書を確認し，「旧タイプのグラウトを使用」,「上縁定着がある」の 1 つ以上該当する場合は，グラウト充填不足の可能性が高いことから，調査が必要と判断する。また，いずれも該当しない場合は，グラウト充填不足の可能性が低いことから，この場合の優先度を「低」とする。

旧タイプのグラウトを使用

旧タイプのグラウト使用の確認は，以下の方法がある。

方法 A：竣工図書により材料確認を行う

方法 B：1997 年以前のポストテンション桁であることを確認する

なお, 方法 B に関して, 1996 年にはノンブリーディング型グラウトへの切り替えが行われていることから, 1997 年以前のポストテンション桁にはブリーディングを生じるグラウトが使われていると判断した（**表 5.4.1**）。

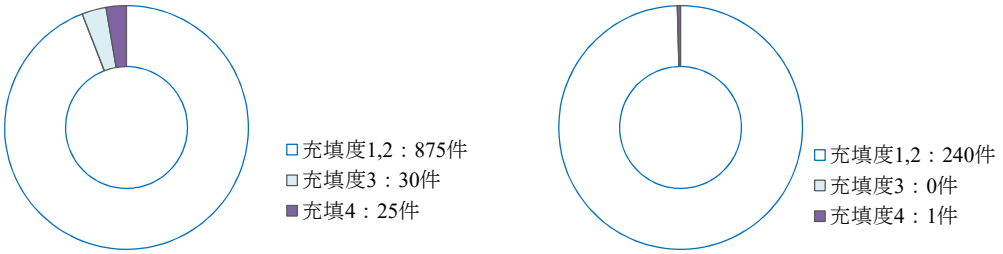
表 5.4.1　PC 橋におけるグラウトの主な変遷 [5-3)]

年代	主な出来事	基準類	グラウトに関する記述内容
1960 年		1961　プレストレストコンクリート設計施工指針（土木学会）	膨張率 0～5%を標準とする。
		1966　ディビダーク工法設計施工指針（案）（土木学会）	ブリーディング率 3%以下 膨張率 10%以下
1970 年			
1980 年	1985　英国 Ynys-y-Gwas 橋落橋	1986　PC グラウト施工マニュアル（PC 建協）	
1990 年	1992　英国「グラウトを用いる PC 橋を禁止」 1996　英国「グラウトを用いる PC 橋禁止令を解除」	1991　コンクリート標準示方書施工編（土木学会）	ブリーディング率 3%以下, 膨張率 10%以下
		1996　コンクリート標準示方書施工編（土木学会）	ノンブリーディングタイプの PC グラウトが望ましい。
		1996　PC グラウト施工マニュアル改訂（PC 建協）	ノンブリーディングタイプを使用する
		1999　PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル（PC 建協）	ノンブリーディングタイプグラウトを低粘性型と高粘性型に分類。
2000 年		2002　コンクリート標準示方書施工編（土木学会） 2005　PC グラウトの設計施工指針（PC 工学会）	グラウトに用いる混和剤はノンブリーディングタイプの使用を標準とする。 超低粘性型の PC グラウトを規定。
2010 年		2012　PC グラウトの設計施工指針改訂（PC 工学会）	実物大注入確認試験の明記 プラスチックシースの推奨

注）PC 建協：プレストレスト・コンクリート建設業協会の略称。
PC 工学会：プレストレストコンクリート工学会の略称。

上縁定着がある

上縁定着された PC 鋼材については，端部定着のみの場合と比べグラウト充填不足が生じやすいことが明らかになっている（図 5.4.1）。したがって，上縁定着がある PC 橋については，グラウト充填不足の可能性が否定できないものとした。



上縁定着を有する PC 橋　　端部定着のみの PC 橋

図 5.4.1　PC 鋼材定着位置別のグラウト充填状況（撤去桁解体調査による）

なお，PCT 桁橋において PC 鋼材をすべて桁端部に定着することになったのは，1993 年に改訂された「建設省標準設計」からである（図 5.4.2）[5-3)]。

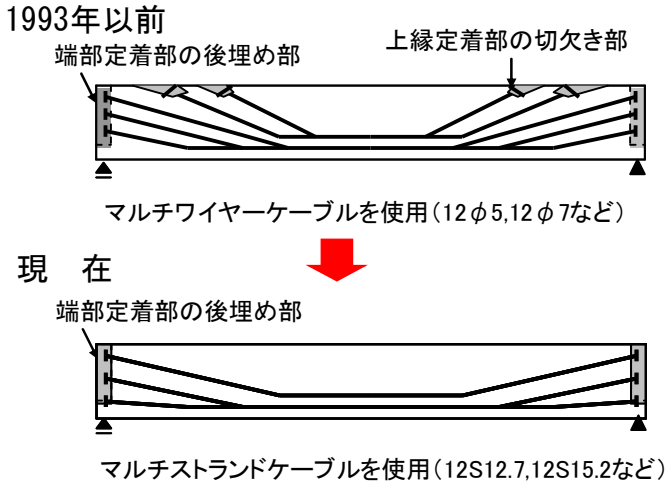


図 5.4.2　PCT 桁橋における PC 鋼材配置 [5-3)]

５．５　グラウト充填調査の実施

（１）概要

橋梁点検結果によるひび割れパターンの確認（5.3 節）と書類調査により調査対象橋梁を特定し（5.4 節），調査が必要と特定された場合にはグラウト充填調査を実施する。

まず調査は，グラウト充填不足の有無について非破壊検査や削孔調査等により確認する。次に，グラウト充填不足がある場合は，非破壊検査や削孔調査により PC 鋼材腐食や PC 鋼材破断の有無について確認する。

（２）調査箇所の選定

撤去桁を用いた解体調査によると，上縁定着部の近傍でグラウト充填不足が生じる割合が高いことが明らかになっている。そこで，グラウト充填調査を行う箇所は，主に，上縁定着された PC 鋼材の曲上げ部やひび割れの前後に着目する（**図 5.5.1**）。

● 調査箇所

図 5.5.1　グラウト充填調査箇所の絞り込み

なお，ひび割れが生じていない PC 鋼材についてもグラウト充填調査を行う場合は，以下に示す優先順位で行う（**図 5.5.2**）。

①PC 鋼材曲上げ部のできるだけ高い箇所（できるだけ定着部に近い位置）

②PC 鋼材曲上げ部のできるだけ低い箇所

③PC 鋼材曲上げ部の中央付近の箇所（①，②の箇所がグラウト充填不足の場合）

④PC 鋼材水平部の中央付近の箇所（　　同　　上　　）

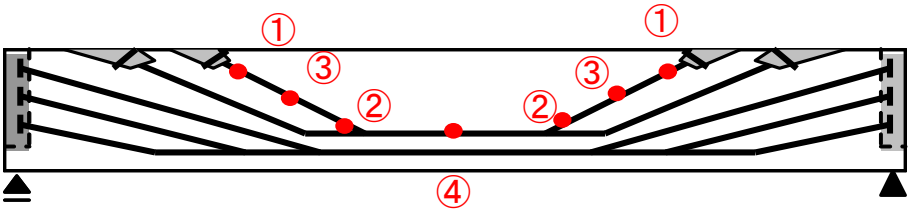


図 5.5.2　グラウト充填調査箇所の優先順位

（3）グラウト充填状況の確認

橋梁点検結果よりグラウト充填不足が疑われるひび割れパターンの確認（5.3 節）と書類調査により調査の必要性を判断し（5.4 節），調査が必要と判断された場合にはグラウト充填調査を行う。

グラウト充填調査手法は，近年新たな非破壊検査手法が開発・実用化されていることから，適切な方法を選定する（**表 5.5.1**）。ここで，削孔目視調査法や通気法は，微破壊を伴うばかりでなく，シース内部に水が滞留していた場合は水を排出したことにより PC 鋼材とシースの腐食を進行させるため [5-4)]，グラウト充填不足が認められた場合にグラウト再注入を速やかに実施することを前提として調査を行う。

表 5.5.1　グラウト充填調査手法 [5-3)]

方　法	概　要	備　考
広帯域超音波法	PC 鋼材直近のコンクリート面に接触端子を配し，発信子から弾性波を入射し，シースの反射波を解析することによってグラウト充填を判断する。	・手前側の PC 鋼材のみ調査可能 ・シース周辺のコンクリート空洞の影響を受ける
インパクトエコー法	PC 鋼材側面のコンクリート上からハンマーなどにより弾性波を入力し，シースからの反射波の周波数応答を解析してグラウト充填を判断する。	
スペクトル イメージング法	衝撃弾性波法の一種であり，インパクトエコー法によりさらに高周波数で大きな弾性波を入力して，シース反射波の信号を画像化する方法によってグラウト充填を判断する。	
放射線透過法	コンクリート表面から X 線や γ 線を使って放射線透過写真を撮影する。	・部材厚 40cm 以下で調査可能
打音振動法	入力側に衝撃を与え，入力エネルギーから出力エネルギーへの減衰や周波数をもとに判断する。	・直線配置の PC 鋼材に適用
削孔目視調査法	コンクリートを削孔した孔から，CCD カメラやファイバースコープによりグラウト充填状況を観察する。	・微破壊を伴う ・グラウト充填不足が認められた場合にグラウト再注入を速やかに実施する
通気法	コンクリートを削孔した孔を通気，または圧縮空気を送り込むことにより，グラウト未充填部の体積やシース内の密実性を把握する。	

グラウト充填状況を確認した結果，**表5.5.2**に従いグラウト充填度を「充填，充填不足」の2段階もしくは「充填，充填不足，未充填」の3段階で分類する。

表 5.5.2　グラウト充填状況の分類

分類		説明	例
充填	充填	シース内が完全にグラウトで充填されている。 もしくは，若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填不足	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	
	未充填	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

また，グラウト充填調査の結果は，グラウト充填不足の有無とその範囲を図面などに整理し，記録する。**図 5.5.3** に示すように側面図として整理すると，グラウト再注入を行う際の参考となる。

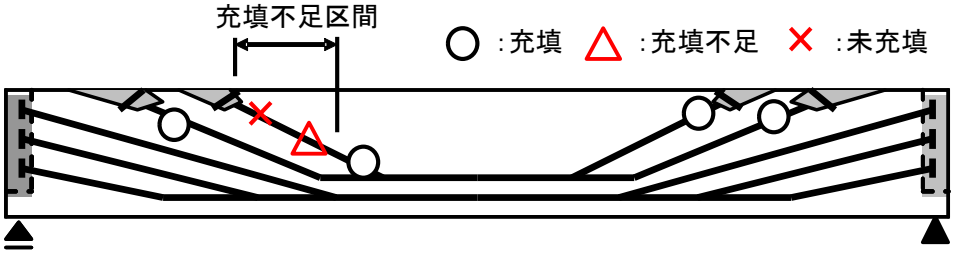


図 5.5.3　グラウト充填調査結果の整理（参考）

（4）PC 鋼材腐食・破断の確認

PC 鋼材の腐食の有無は，現時点では非破壊による判定が困難であることから，削孔目視調査により確認する（図 5.5.4）。ただし，削孔数は前出図 5.5.2 を参考にできるだけ少なくするとともに，削孔径もできるだけ小さくする。コアドリルによる削孔であれば，削孔径を 25mm 程度以下とすることができるが，WJ 削孔の場合はノズルの形状寸法の制約上，削孔径が 50mm 程度以上となる。また，削孔時に鉄筋や PC 鋼材を傷つけないように，メタルセンサー付のコアドリル等を用いる。

なお，PC 鋼材の腐食確認のため削孔を行うと，シース内部に水が滞留していた場合は水を排出したことにより PC 鋼材とシースの腐食を進行させるので [5-4]，グラウト再注入を速やかに実施し，削孔部も補修する。

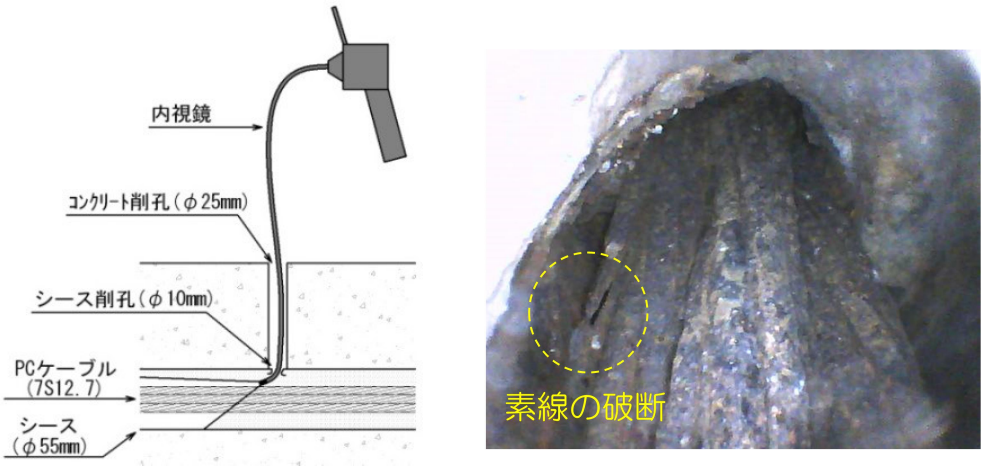


図 5.5.4　削孔目視調査 [5-5]

５．６　対策優先度の判断

橋梁点検調査によるひび割れパターンの確認（5.3 節）と書類調査により調査対象橋梁を特定し（5.4 節），調査の必要に応じてグラウト充填調査を実施した結果より（5.5 節），対策の優先度を以下の通り判断する。

優先度：低

旧タイプのグラウトを使用していない場合，上縁定着がない場合，あるいは，グラウトが充填されている場合。

優先度：中

グラウト充填不足あるいは未充填が確認されるものの，PC 鋼材の腐食・破断が確認されない場合。

優先度：高

グラウト充填不足あるいは未充填が確認され，かつ，PC 鋼材が腐食あるいは破断が確認された場合。

５章の参考文献

5-1)　国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領 H26.6，2014.6

5-2)　林正道，PC ゲタの縦ヒビワレとその対策，橋梁と基礎，Vol.4，No.10，pp.22-26，1970.10

5-3)　一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全―PC 橋の更なる予防保全に向けて[2015 年版]―，2015.3

5-4)　佐々木慎一，堺孝司：グラウト不良により劣化した PC 橋の調査と補修，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1089-1094，1996

5-5)　小林憲一，大平英生，登石清隆，羽田伸介：妙高大橋の PC ケーブル破断調査と対策，橋梁と基礎，Vol45，No.9，pp.32-38，2011.9

６章　まとめ

６．１　本研究の成果

本研究では，グラウト充填不足により早期劣化のおそれのある PC 橋を早期に発見し，PC 鋼材の劣化進行を未然に防止することを目的に，撤去橋梁の解体調査等を実施して各種検討を行った。

１章では，PC橋のグラウト充填状況について既往の文献調査や道路橋定期点検結果に基づくデータ分析を行った。その結果，PC鋼材の劣化進行を未然に防止するためには，以下の課題があることが判明した。

① グラウト充填状況が十分に把握されていない。

② グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関連性が十分に整理されていない。

③ シース沿いひび割れの発生要因が十分に解明されていない。

２章では，課題①に対し「グラウト充填状況の把握」を目的として，解体調査等で得られたグラウト充填状況を分析し，以下のことが確認された。

- グラウト充填不足の発生割合は撤去桁の解体調査により得られた全データの平均が 5.2%であった。
- 少なくとも 1990 年代以前の PC 橋においてはグラウト充填不足が生じていた。
- 容量の小さい PC 鋼材（12φ5mm および 12φ7mm）を有する撤去桁はグラウト充填不足の発生割合が高かった（平均 5.9%）。
- 上縁定着ケーブル（平均 7.9%）は端部定着ケーブル（平均 4.3%）よりもグラウト充填不足の発生割合が高く，特に上縁定着ケーブルの定着部近傍（平均 24.0%）で顕著となった（図 6.1.1）。

以上より，グラウト充填状況は PC 橋の架設年代，PC 鋼材の種類（容量）および定着位置の影響を受けることが明らかになった。なお，グラウト充填不足が生じている要因としては，ブリーディングを許容する旧タイプのグラウトが用いられていたこと，曲上げ角度の大きい上縁定着ケーブルを有することが挙げられる。

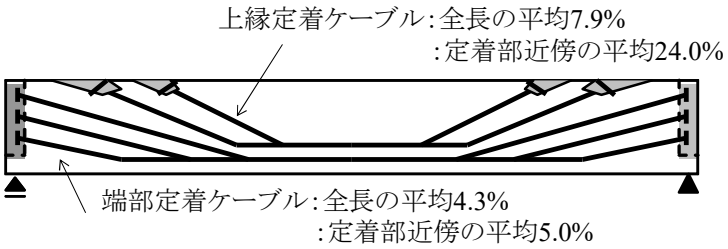


図 6.1.1　グラウト充填不足の発生状況

（上縁定着を有する PCT 桁橋の撤去桁解体調査による）

３章では，課題②に対し「グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関連性の整理」を目的として，PC 鋼材が健全であった PC 橋および PC 鋼材が腐食していた PC 橋の解体調査を実施した結果，次のことが確認された。

- グラウト充填が良好な場合は，過酷な塩害を受けると PC 鋼材が腐食することもあったが，最外縁の質量減少率で平均 4%（内側を含めると平均 2%）以下であり，グラウトが充填されていれば相当の防食効果を期待できる。
- グラウト充填が不充分な場合は，水が浸入しない状況では PC 鋼材の腐食は認められなかった。一方，過酷な塩害を受ける状況では，グラウト充填が不充分な箇所で，PC 鋼材の著しい腐食（質量減少率で 10%を超える）と素線破断が確認された。

以上より，PC 鋼材の防食のためにグラウトが果たす役割が非常に重要であり，グラウト充填が不充分な場合は水と塩分が侵入することで PC 鋼材の質量減少率（腐食量）が大きくなるといえる（**図 6.1.2**）。

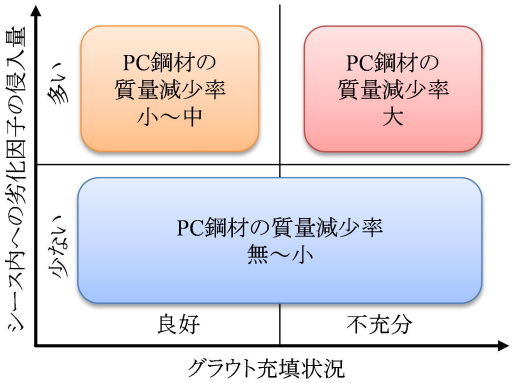


図 6.1.2　グラウト充填状況と PC 鋼材腐食の関連性
（PC 鋼材腐食状況が異なる PCT 桁橋の撤去桁解体調査による）

４章では，課題③に対し「シース沿いひび割れ発生要因の解明」を目的として実施した解体調査およびFEM解析（シースかぶりや上縁定着の影響について検討）より得られた知見を以下に示す。

- 解体調査を行った撤去桁において，シース沿いひび割れはグラウト充填不足の箇所だけでなく，グラウトが充填されている箇所でも多数生じていた。
- 上記のひび割れは，グラウト充填不足に起因した腐食やコンクリートの材料劣化といった経年劣化により生じたものではないこと，グラウトが充填されている場合においてもグラウト充填不足によって生じるひび割れや遊離石灰と同様の変状が起こることを解体調査により確認した。
- 主桁下面に着目したFEM解析結果によると，主桁下面に発生する引張応力は「コンクリートとグラウトの熱膨張係数の差」が最も大きく，次いで「グラウト注入圧」と「グラウトに混和するアルミ粉の膨張」が大きい。また，これらの要因を合成した引張応力は解体調査を行ったPC橋の当時の一般的なシースかぶり50mmの場合で1.20N/mm^2，確認されたシースかぶりの最小値34mmの場合で1.96N/mm^{2}となった。
- 主桁側面に着目したFEM解析結果によると，主桁側面のシースかぶりが主桁下面よりも大きいことで

グラウトの充填に起因する引張応力は小さいものの，シースの曲上げ角度が20度を超えるとウェブ表面の引張応力が1.0N/mm^{2}を上回った。

以上を整理すると，シース沿いひび割れが必ずしもグラウト充填不足に起因するものではないことが明らかになった。したがって，シース沿いひび割れが生じていることが目視点検で確認された場合においても，グラウト充填不足であるか否か，あるいは，将来的に劣化が進行するか否かを判断する（**図 6.1.3** 参照）ためには詳細調査を実施することが不可欠である。

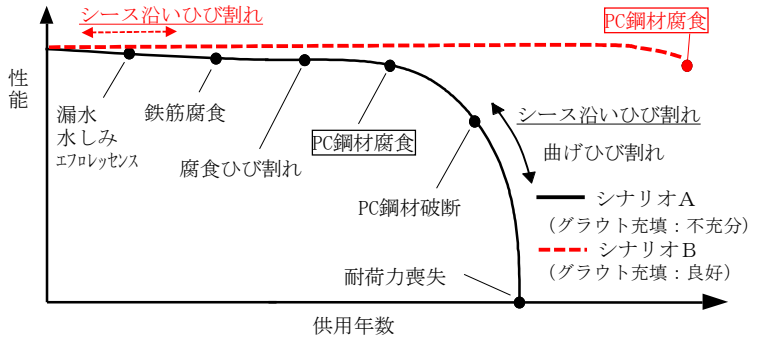


図 6.1.3　PC 橋の予想される劣化シナリオ（文献 6-1 を参考にして作図）

また，シース沿いひび割れの発生要因を FEM 解析により検討した結果，経年劣化以外の要因として，グラウトの充填および上縁定着の曲上げに起因してシース沿いのコンクリート表面に引張応力が生じることがわかった。これらの引張応力はシースかぶりが小さい場合ほど（**図 6.1.4** 参照）曲上げ角度が大きいほど卓越し，合成された引張応力は場合によって最大 2.0N/mm^2 に達することが解析的に示された。しかし，この引張応力の合力はコンクリートの割裂強度より小さいことから，経年的な乾燥収縮やクリープの進行などが加味されるなどの複合要因によりシース沿いひび割れが生じたものと推定される。

なお，現行の技術基準にはシース沿いひび割れへの対応として，シースかぶりを十分に確保し，表面のひび割れ防止鉄筋を密に配置するとともに，PC鋼材の曲上げ角度を小さく取るように改善されている。

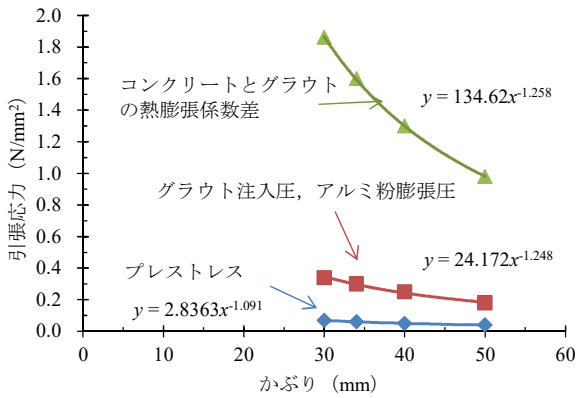


図 6.1.4　シースかぶりと主桁下面引張応力の関係

５章では，２章から４章までの調査検討結果をもとづき，グラウト充填不足による PC 鋼材の劣化進行を未然に防止することを目的に実施されるグラウト充填調査のポイントを整理した。

６．２　今後の課題

今回調査した撤去橋梁はすべて単純 PCT 桁橋である。今後は，以下に示すような観点よりグラウト充填状況に着目した調査検討を進める必要がある。

・PC 中空床版橋，PC 箱桁橋，連続ケーブルを有する多径間の PC 橋のグラウト充填状況

・PC 橋の定着部付近や PC 鋼棒多数配置部など不可視箇所のグラウト充填状況

・長大 PC 橋の柱頭部など近接困難箇所のグラウト充填状況

また，グラウト充填不足により早期劣化のおそれのある PC 橋を早期に発見するためには，現在行われている目視点検手法に限界があることから，今後，非破壊検査技術の活用が一層に望まれる。

６章の参考文献

6-1)　一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全—PC 橋の更なる予防保全に向けて[2015 年版]—，pp.75，2015.3

付　　録

付録１　佐野橋のグラウト充填調査

１．はじめに..... 64

２．調査概要..... 64

３．調査結果..... 65

４．まとめ..... 68

１．はじめに

佐野橋は，1965 年（昭和 40 年）に兵庫県丹波市に架設された 5 径間単純ポストテンション T 桁である。

供用後 45 年を経過していたが，外観目視観察ではひび割れやはく離等の損傷は見られず比較的健全な状態で維持されていたが，拡幅計画による架け替えのために撤去されることになった（**付写真 1.1**）。

ここで，撤去に際して切断される桁断面に配置されたシースついて，グラウトの充填状況の調査を行った。

付写真 1.1　佐野橋全景（撤去時）

付表 1.1　対象橋梁の諸元

橋梁名	佐野橋
架設地	兵庫県丹波市
構造形式	5 径間単純ポストテンション T 桁橋
最大支間	117.5m（支間長 5@22.8m）
荷　重	TL-14
架設年	1965 年（昭和 40 年）

２．調査概要

本橋の撤去は，5 径間それぞれに架かる 3 本の桁を，3 つに切断，分割して行われた。ここで，部材の切断は，切断後の重量をもとに決定されており，切断位置は任意である。調査は，任意の位置で切断された桁 15 本の各 2 断面，計 30 断面について，グラウトの充填状況を確認，充填状況は「健全」に対して，PC 鋼材の錆防止等の効果が期待できない状態を「未充填」，これに該当しない空隙があるような場合は「充填不足」とする 3 段階で評価した。「充填不足」および「未充填」としたグラウト充填評価の例を**付写真 1.2** に示す。

ここで，切断面におけるシース位置，PC 鋼材の腐食の有無についても確認を行った。

調査断面の位置および各ブロックの長さを**付図 1.1** に示す。ここで，分割された各部材は，それぞれを A1 側（右岸側）からブロック 1（以下，BL1）としている。

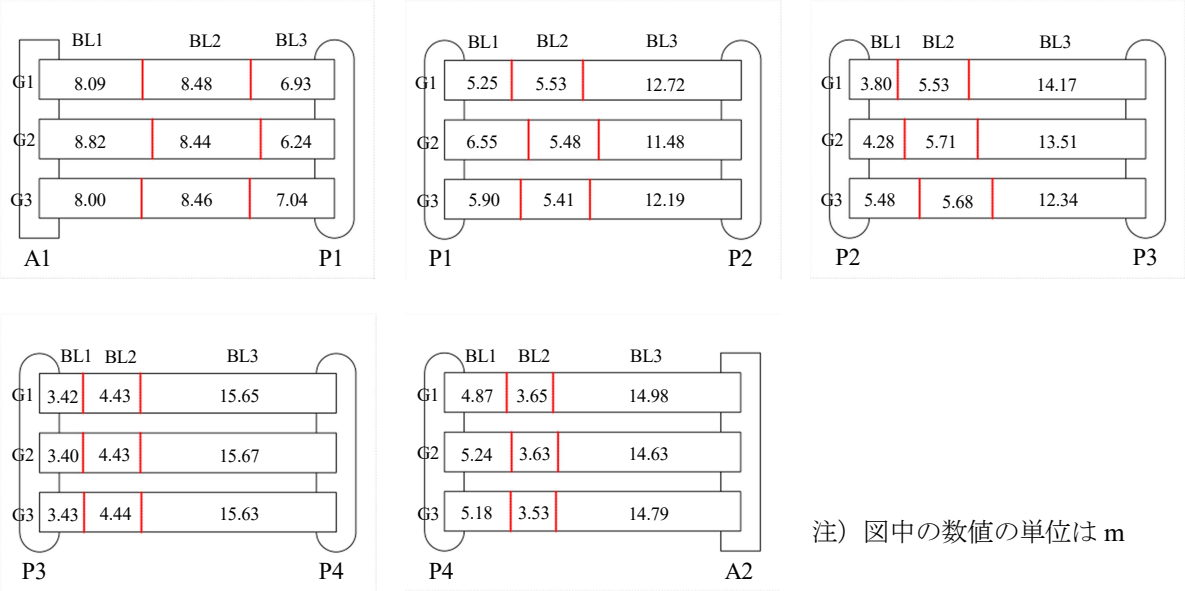
付図 1.2 は桁の PC ケーブル配置の概要図を示す。ここで，概要図の作成は調査結果および当時の標準設計資料を基にした。

分割された桁の外観目視観察では，ひび割れや剥離等の損傷は見られなかった。供用から 45 年程度が経過していたが，健全な状態の橋であった。

(a) 充填不足

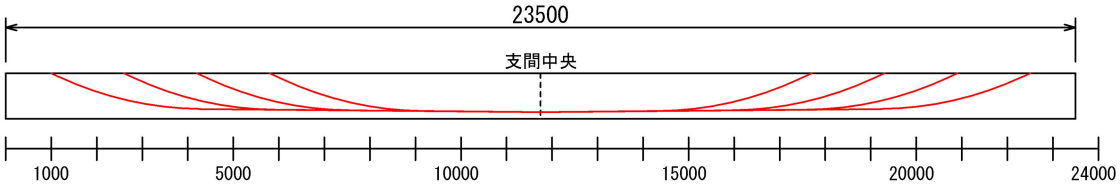
(b) 未充填

付写真 1.2　グラウト充填評価例



注）図中の数値の単位は m

付図 1.1　断面調査箇所およびブロック長

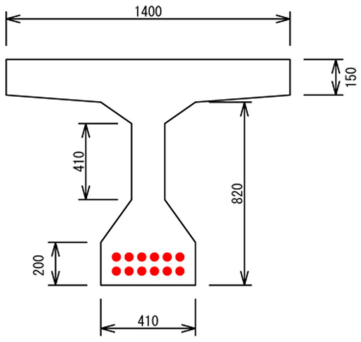


付図 1.2　PC ケーブル（上縁定着）と桁切断面の位置関係

３．調査結果

鋼材位置等に関する調査結果を**付図 1.3** および**付表 1.2** に示す。断面内に PC ケーブルは 1 本当り 12 本の PC 鋼材（直径 5.4mm）が 12 本配置されていた。同年代の標準設計との比較では，材料仕様は桁長がほぼ同じである道路橋設計資料（標-19）に類似したものではなく，同設計資料（標-13）と同等である。

ただし，ここで比較した道路橋設計資料は佐野橋架設年より後の 1966 年（昭和 41 年）に発行されており，建設省からポステン T 桁の標準設計が制定されるのは 1969 年（昭和 44 年）である。佐野橋は 1961 年（昭和 36 年）に土木学会が発行したプレストレストコンクリート設計施工指針に基づき設計されたと考えられる。



付図 1.3　標準断面

付表 1.2　鋼材位置等に関する調査結果

測定	実測値	道路橋設計資料（標-13）※	道路橋設計資料（標-19）※
鋼材本数	12 本	9 本	5 本
シース径	φ34.4（平均）	φ35	φ45
シース純かぶり（水平方向）	59.6mm（平均） 最大：85mm 最小：35mm	－	－
シース純かぶり（鉛直方向）	60.4mm（平均） 最大：74mm 最小：45mm	－	－
PC 鋼材	φ5.4（平均）－12	φ5－12	φ7－12
鉄筋径	φ9	φ9	φ9
鉄筋かぶり	44.6mm 最大：70mm 最小：30mm	－	－

※昭和 41 年に橋梁編纂委員会が発行したプレストレストコンクリート道路橋設計資料から同規模程度の標準設計を参考とした。標準設計資料（標-13）は桁長 21m，標準設計資料（標-19）は桁長 23m の仕様である。

グラウトの充填状況を**付表 1.3** に示す。グラウトの充填状況は 94%が「健全」であり，残る 6%が「未充填」または「充填不足」と判定された。

PC ケーブルの定着型式で分類する「未充填」または「充填不足」とされた断面は**付表 1.4** のようになり，「充填不足」はフランジのみで確認された。また，ウェブでは「未充填」のみが確認され，調査断面数 17 面に対して 12%であった。

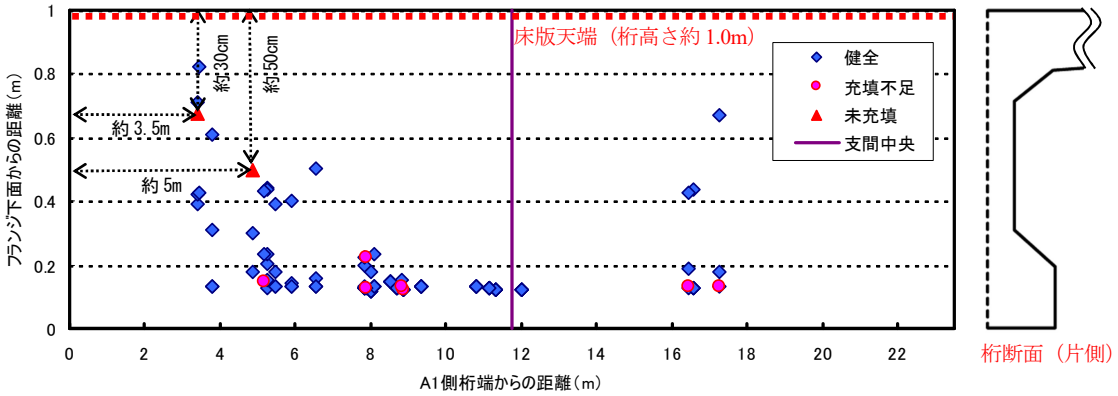
付表 1.3　グラウト充填の状態および割合

分類	断面数	割合
健全	322	94.2%
充填不足	16	4.7%
未充填	4	1.2%
合計	342	－

付表 1.4　グラウト充填不足の箇所数および割合

定着位置	端部定着	上縁定着		合計
部位	フランジ	フランジ	ウェブ	
調査断面数	240	85	17	342
充填不足	9 (3.8%)	7 (8.2%)	0	16
未充填	2 (0.8%)	0	2 (11.8%)	4

付図 1.4 は上縁定着されている PC ケーブルの調査断面位置を A1 側桁端からの距離と下フランジ下面からの距離の関係で表している。ウェブ内でグラウト未充填と判断した 2 箇所は床版天端から約 30cm 下がりと約 50cm 下がりに位置していた（付写真 1.3 参照）。各ケーブルとも未充填による空洞が奥まで続いている状態であったため，曲上げ区間のグラウトは十分に充填できていなかった可能性がある。ただし，曲上げ区間でグラウト未充填が見つかった PC ケーブルは曲上げ開始点より先ではグラウトが充填されていた。このため，PC ケーブルの全長にわたってグラウトが充填されていないケースはなかったと考えられる。また，グラウトが充填されていない PC ケーブルはいずれも PC 鋼材の腐食は見られなかった。



付図 1.4　橋軸方向位置毎のグラウト充填状況（上縁定着ケーブル）

(a) 床版天端から約 50cm 下にある未充填箇所
（第 4 径間 G1 桁 BL1　A2 側断面）

(b) 床版天端から約 30cm 下にある未充填箇所
（第 5 径間 G1 桁 BL1　A2 側断面）

付写真 1.3　グラウト未充填が見られた桁断面

桁切断面の下フランジには外側から剥離しているようなひび割れが見られるものがあった（付写真 1.4）。このひび割れは，桁切断時に発生したものと考えられる。

付写真 1.4　下フランジに見られたひび割れ

４．まとめ

調査の結果，一部のシースでグラウトの未充填や充填不足が見られたが，これはブリーディングや注入作業の良否（例えば，急速な注入や注入作業の中断等）によるものと考えられる。特に，上縁定着ケーブルのウェブ曲上げ部に見られたグラウト未充填に関しては，ケーブル配置角度が急であったため，グラウト注入時に先流れを生じたものと考えられる。

なお，本橋の解体調査ではグラウト充填の有無によらず，すべての調査箇所において PC ケーブルの腐食は見られなかった。

付録２　羽咋川海浜橋のグラウト充填調査

１．はじめに..... 70

２．橋梁諸元..... 70

３．調査方法..... 71

４．調査結果..... 71

１．はじめに

羽咋川海浜橋は，塩害による著しい損傷のために撤去されることとなった。本橋の撤去時に主桁切断面におけるグラウト充填状況を調査した。**付写真 2.1** に全景写真を，**付写真 2.2** に損傷写真を示す。

付写真 2.1　全景

付写真 2.2　損傷状況

２．橋梁諸元

本橋の橋梁諸元を**付表 2.1** に示す。本橋は，1972 年に架設され供用 38 年目に撤去されることになった。**付写真 2.3 に**切断面の状況を示す。

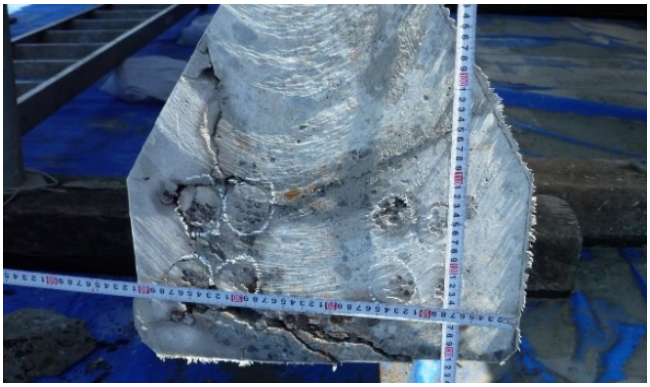
付表 2.1　橋梁諸元

橋梁名	羽咋川海浜橋
橋梁位置	石川県
構造種別	単純 PC ポストテンション T 桁橋
最大支間	29.2m
活荷重	群集荷重
架設年度	1972 年（昭和 47 年）
撤去年度	2010 年（平成 22 年）

付写真 2.3　切断面の状況

３．調査方法

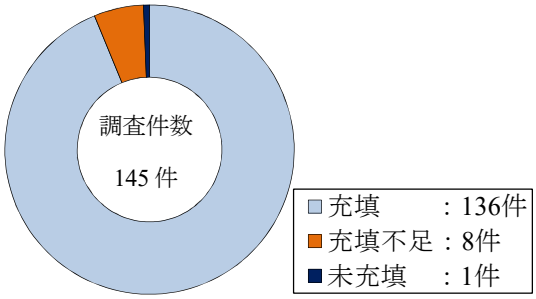
主桁切断の際，PC ケーブルのグラウト充填不足が確認されており，主桁切断面で目視にてグラウト充填状況を確認した。



付写真 2.4　グラウト充填調査

４．調査結果

グラウト充填度の調査結果を付図 2.1 に示す。調査件数 145 件中，充填不足が 8 件，未充填が 1 件の結果であった。



付図 2.1　グラウト充填度の割合

付録３　能生大橋の解体調査

１．はじめに 73

２．橋梁緒元 73

３．調査概要 77
　３．１　調査項目 77
　３．２　解体調査の対象 77

４．調査の方法および結果 79
　４．１　グラウト充填度の調査 79
　４．２　コンクリート物性調査 88
　４．３　グラウト物性調査 89
　４．４　塩化物含有量調査 90
　４．５　PC 鋼材の腐食量調査 91
　４．６　鋼材の引張試験 93

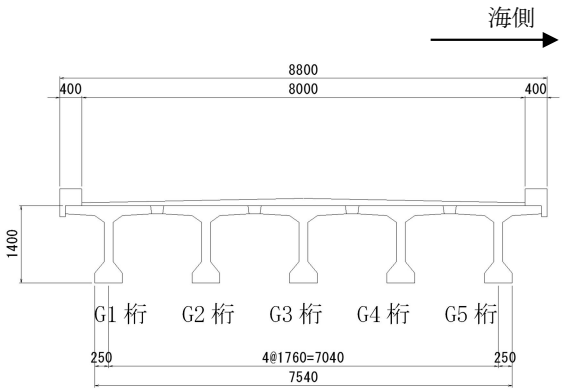
１．はじめに

本橋は 1967 年に建設されたポストテンション PCT 桁橋（単純桁 5 連）であり，各径間とも支間長，幅員および主桁形状が等しい（**付写真 3.1**）。本橋は架橋地点が日本海沿岸の海岸線に近接し，冬季には海側から吹く季節風が強く，波飛沫が直接桁にかかるような厳しい塩害環境に長く曝されたことにより劣化が顕著となった（**付写真 3.2**）。劣化は PC 桁下フランジを中心に PC 鋼材の腐食と，これに伴うコンクリートのひび割れや浮きが多数の主桁に生じていた（**付表 3.1**）。径間別では第 1，第 4，第 5 径間，主桁別では G3 桁（**付図 3.1**）の損傷度が相対的に高く，第 1 径間では C3 ケーブルの破断が確認された。このため架替えが計画され，2010 年 9 月に供用が停止された。

本調査は，撤去後の主桁の切断面からグラウトの充填調査を行った。また，コンクリートの物性（圧縮強度，静弾性係数など），採取した PC 鋼材の腐食量および引張強度を測定した。

２．橋梁諸元

本橋の橋梁諸元を**付表 3.2** に示す。また，竣工図面からわかる主桁の PC 鋼材データを**付表 3.3** に示す。



付図 3.1　断面図

付写真 3.1　橋梁全景

付写真 3.2　PC 桁下フランジ部の劣化状況

付表 3.1　PC 桁の損傷度（2007 年時点）

主桁番号	径間番号				
	第 1	第 2	第 3	第 4	第 5
G1	A		C	C	C
G2				C	C
G3	B	B	B	C	A
G4	C	C		A	
G5	C			C	B

損傷度A・B・C：主桁下フランジコンクリートの浮きが連続して 5m，2m，1m 以上連続した箇所のあるもの。

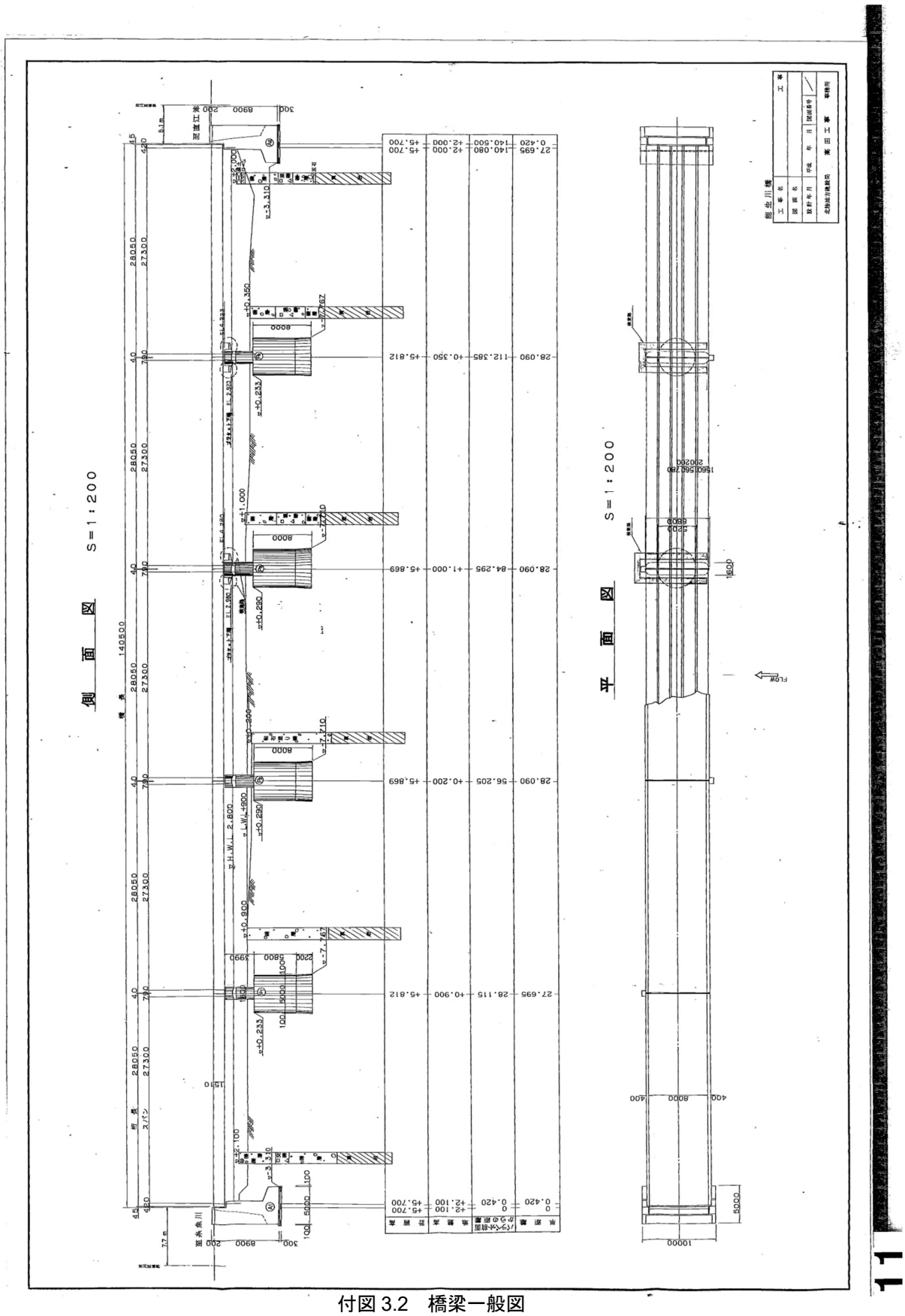
付表 3.2　橋梁諸元

架設地	新潟県糸魚川市（海岸より 0.1km）
構造種別	5 径間単純ポストテンション方式PCT桁橋
橋　　長	140.5m
支 間 長	5@27.3m
有効幅員	8.0m
荷重	TL-20
竣工年次	1967 年
撤去年次	2010 年

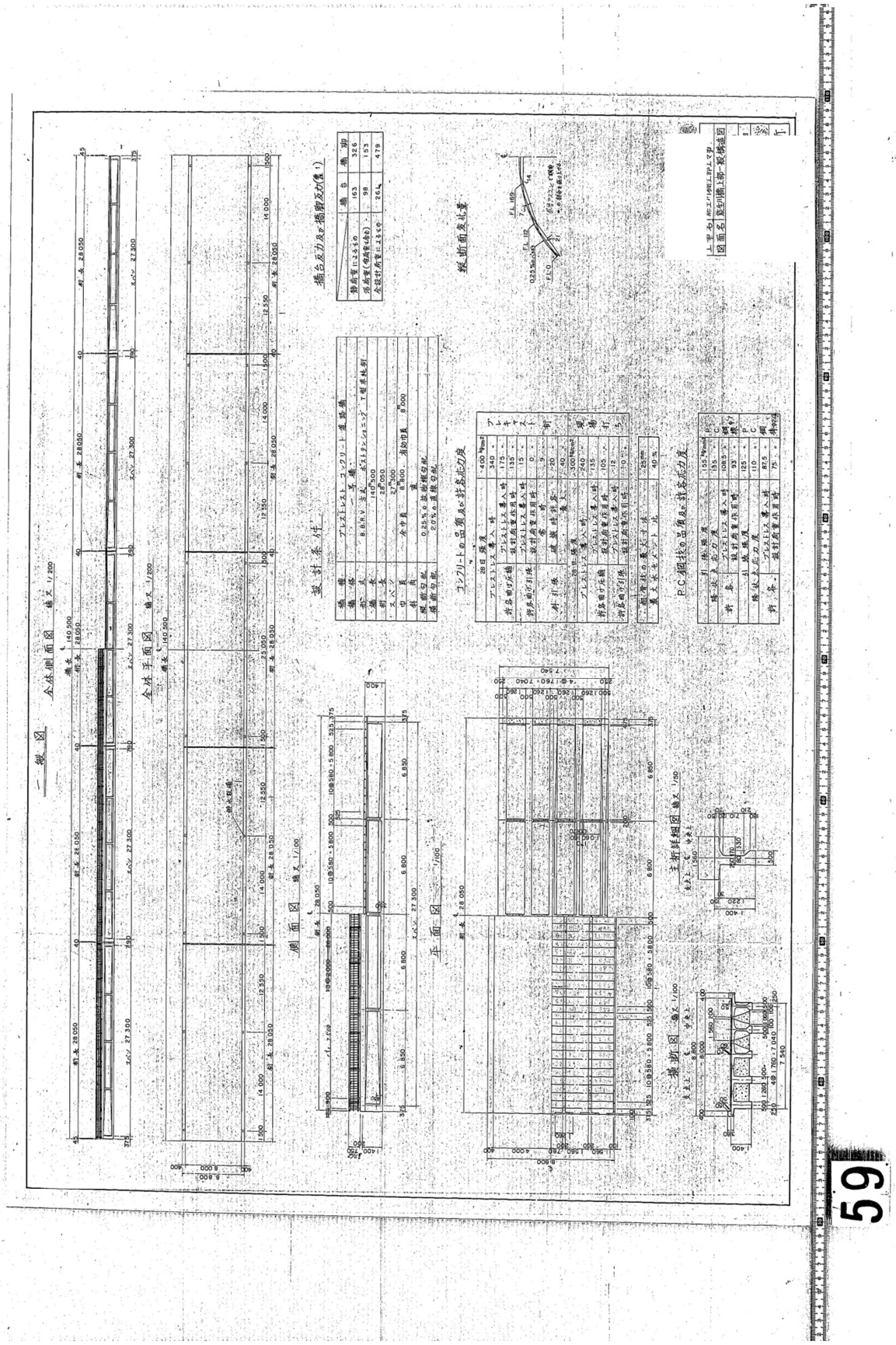
付表 3.3　主桁の PC 鋼材データ

定着工法	B.B.R.V
使用材料	PC 鋼線 24-φ7mm
上縁定着	なし
シース径	φ65mm

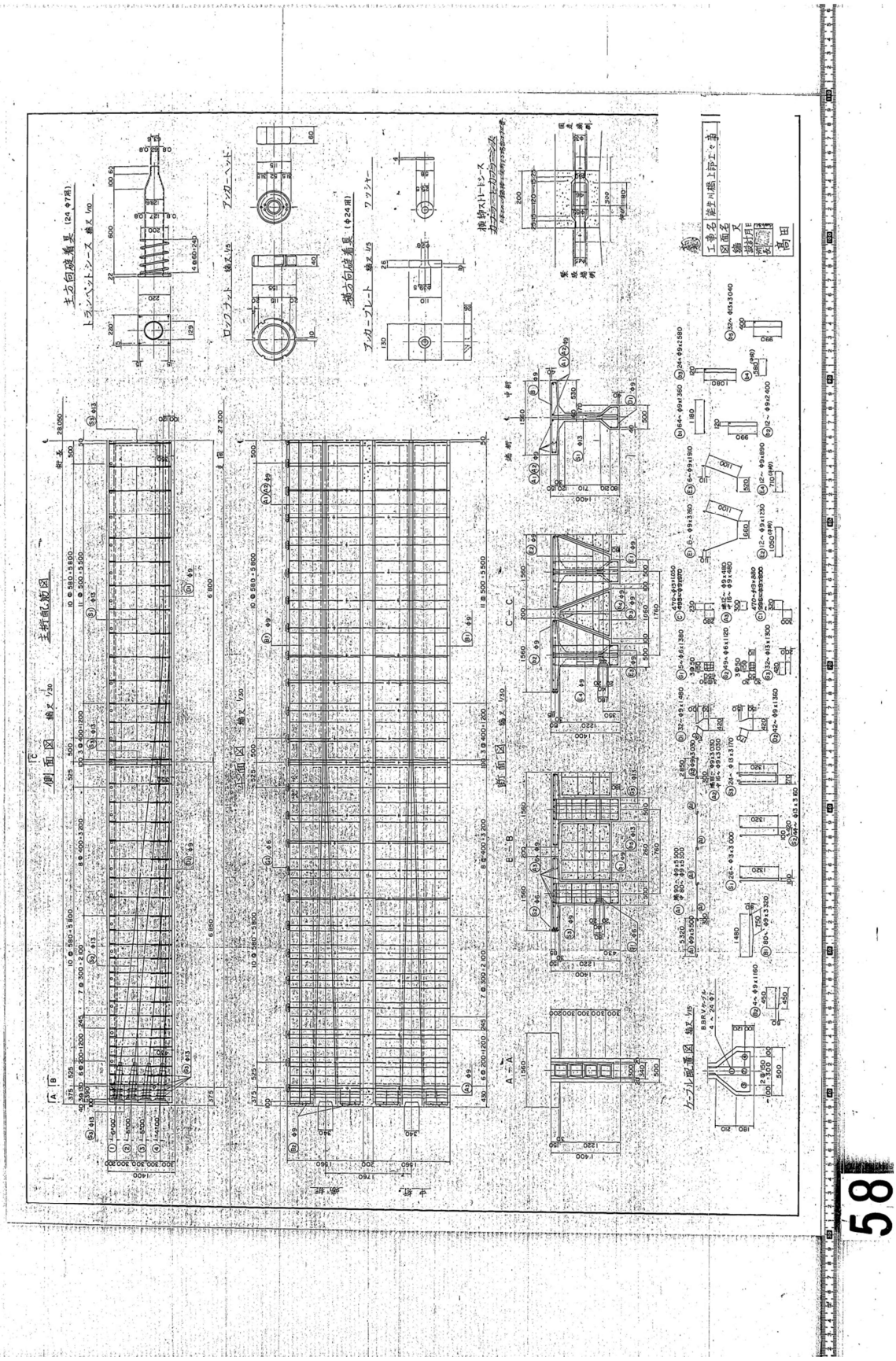
付図 3.2～3.4 に竣工図の一般図，一般構造図，主桁配筋図（PC 鋼材配置図）を示す。



付図 3.2　橋梁一般図


一般図
全体側面図
全体平面図
側面図
平面図
横断図
主桁詳細図
橋台反力及び橋脚反力(表1)
設計条件
縦断面表示
コンクリートの品質に対する応力度
PC鋼材の品質及び許容応力度

付図 3.3　構造一般図



付図 3.4　主桁配筋および PC 鋼材配置図

３．調査概要

３．１　調査項目

撤去時，現地にて切断面を目視によりグラウト充填状況を調査した。また，撤去後に切断した桁を土木研究所に搬入し，解体調査を実施した。**付表 3.4** に調査項目を示す。

付表 3.4　調査項目

No.	調査項目	概　　要
1	グラウト充填状況	切断面の目視調査
2	コンクリート物性値	圧縮強度，静弾性係数，割裂引張強度
3	グラウト物性値	圧縮強度，静弾性係数
4	塩化物含有量	塩化物イオン濃度測定
5	鋼材腐食量（PC 鋼材・鉄筋）	質量減少率，断面減少率
6	鋼材引張強度（PC 鋼材・鉄筋）	引張強度測定

３．２　解体調査の対象

解体調査は，損傷の著しかった第 1 径間や第 5 径間と，比較的健全であった第 2 径間の一部の部材で行った（**付写真 3.3**）。特に損傷の著しい部材である 1-3-3 部材は，腐食が起因とされるシースの消失と PC 鋼材（C3 ケーブル）の破断が確認されている（**付写真 3.4**）。また，部材の橋梁における位置関係を**付図 3.5** に示す。

a)1-3-3 部材

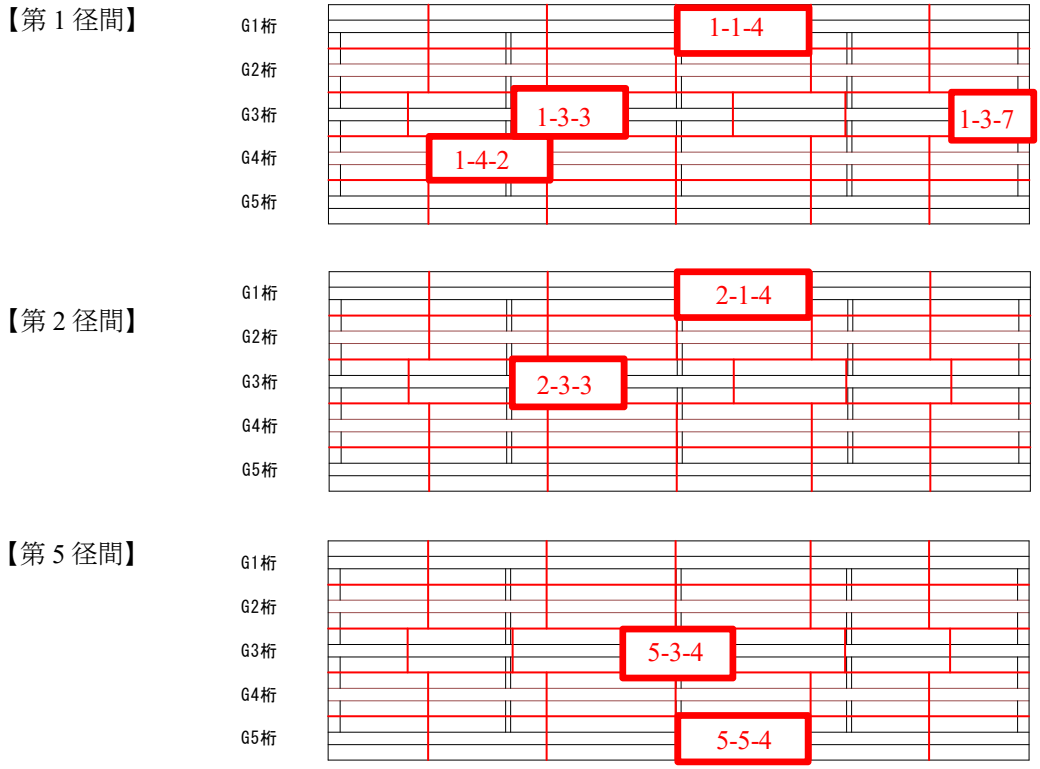
b)2-1-4 部材

付写真 3.3　解体調査部材

a)シースの消失

b)PC 鋼材の破断

付写真 3.4　1-3-3 部材 C3 ケーブル採取状況



付図 3.5　撤去桁の採取位置図

４．調査の方法および結果

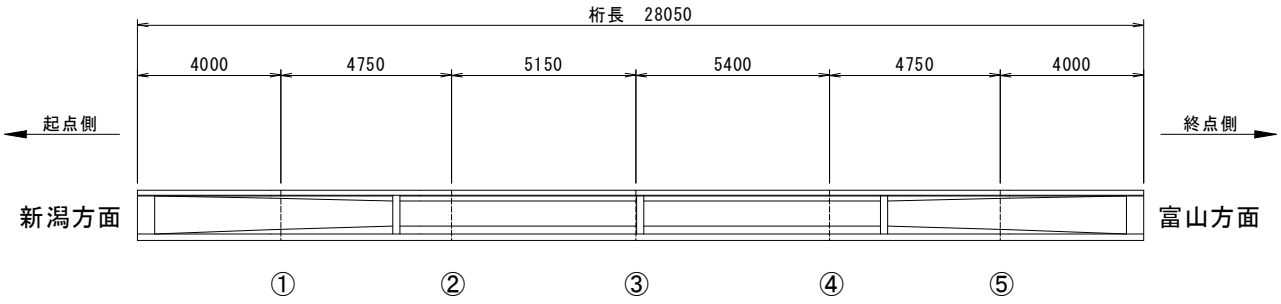
４．１　グラウト充填度の調査

（１）調査方法

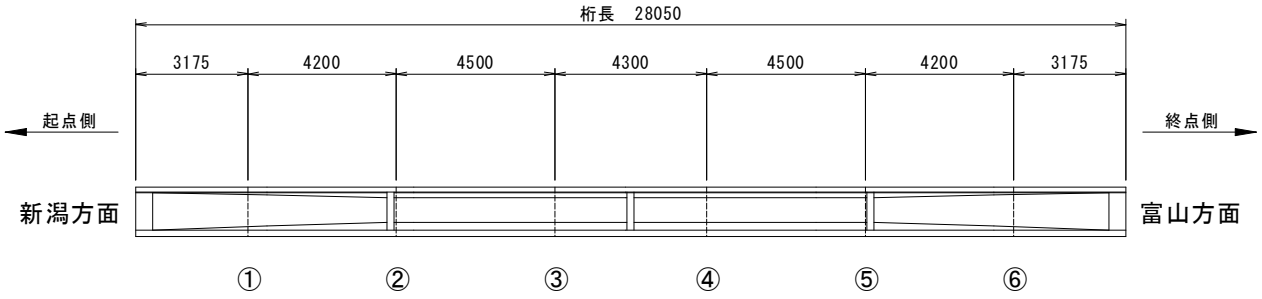
撤去桁の切断面を目視してグラウトの充填状況の調査を行った。付図 3.6 に示すように G3 桁以外の主桁では 5 ヶ所の切断面を対象とし、G3 桁では 6 ヶ所の切断面とした。特に損傷の著しい第 1 径間については，全数の切断面に対して調査を行った。調査数量は以下に示す通りである。

第 1 径間：103 ケーブル（G1~G5 桁），第 2 径間：20 ケーブル（G3，G4 桁）

第 4 径間：20 ケーブル（G4 桁），第 5 径間：44 ケーブル（G3，G5 桁）



a) G1，G2，G4，G5 桁の切断位置



b) G3 桁の切断位置

付図 3.6　グラウト充填状況調査の断面位置図

グラウト充填状況の分類については付表 3.5 に従って行う。

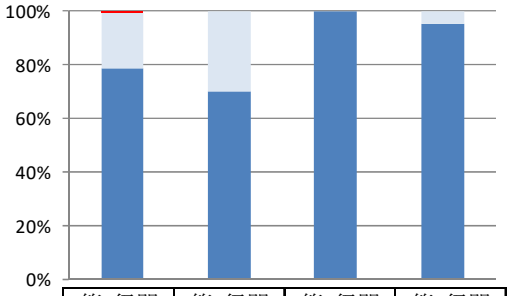
付表 3.5　グラウト充填状況の分類

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

（２）調査結果

各径間のグラウト充填度の結果を付図3.7に示す。各径間を合計すると，充填度1が157件，充填度2が29件，充填度3が0件，充填度4が1件となった。唯一，グラウトの未充填が確認されたのは第1径間のG3桁C3ケーブルのPC鋼材の破断が確認された位置付近であった（付写真3.5

参照)。グラウト充填度1と2の判定例について**付写真3.6**，**付写真3.7**に示す。**付写真3.7**は上部の若干の空隙により，充填度2と判定されたが，PC鋼材が十分覆われていた。

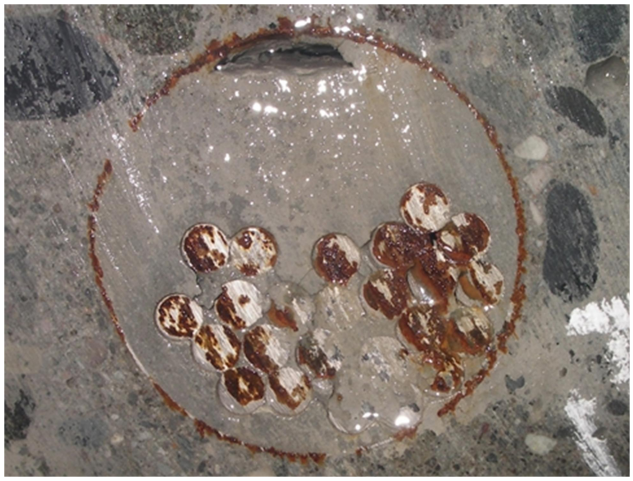


	第1径間	第2径間	第4径間	第5径間
充填度1	81件	14件	20件	42件
充填度2	21件	6件	0件	2件
充填度3	0件	0件	0件	0件
充填度4	1件	0件	0件	0件

付図3.7　径間毎のグラウト充填度

付写真3.5　グラウト充填度4（第1径間G3桁③）

付写真3.6　グラウト充填度1（第1径間G2桁⑤）

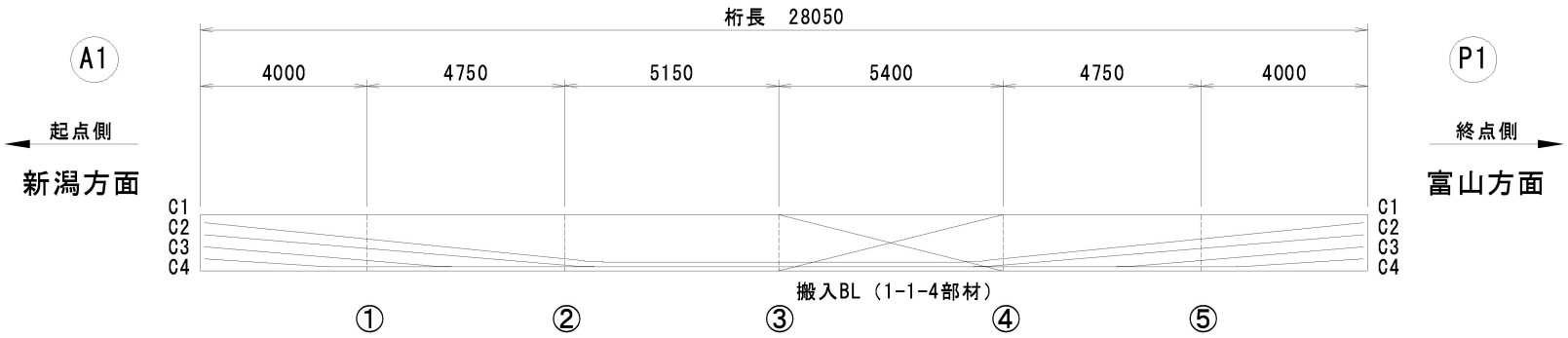


付写真3.7　グラウト充填度2（第1径間G3桁⑤）

グラウト充填状況の詳細を以降に示す。

能生大橋　第1径間　G1桁　グラウト充填状況

側面図



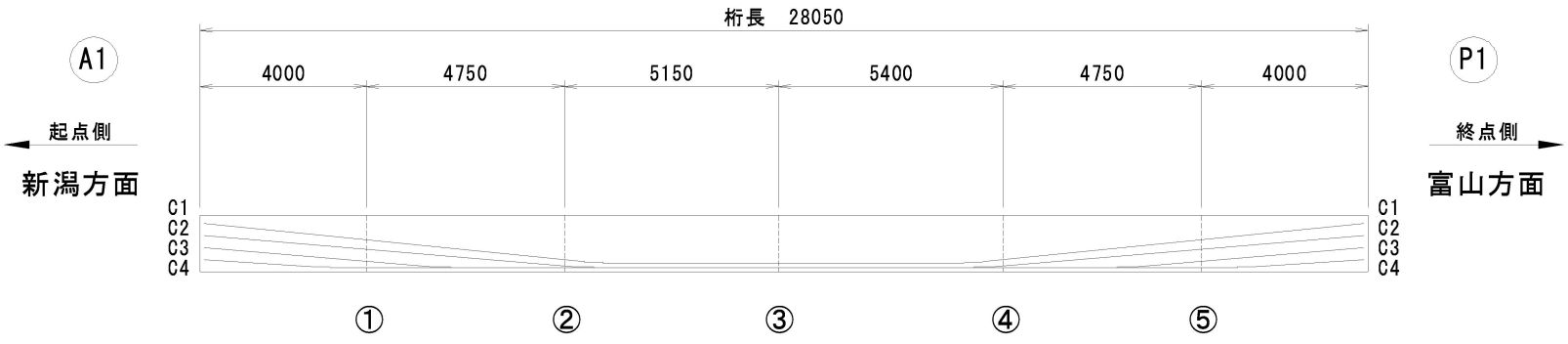
グラウト充填度

	①	②	③	④	⑤
C1	1	1	1	1	1
C2	2	1	1	1	1
C3	1	1	1	2	1
C4	2	2	2	1	1

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

能生大橋　第1径間　G2桁　グラウト充填状況

側面図



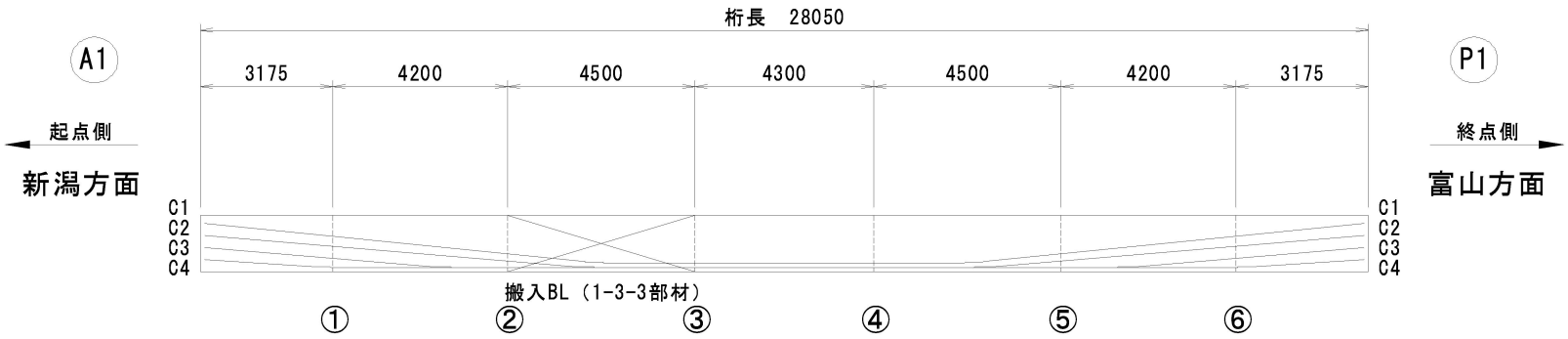
グラウト充填度

	①	②	③	④	⑤
C1	1	1	1	1	1
C2	2	1	1	1	1
C3	1	1	1	1	1
C4	2	1	1	1	1

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

能生大橋　第1径間　G3桁　グラウト充填状況

側面図



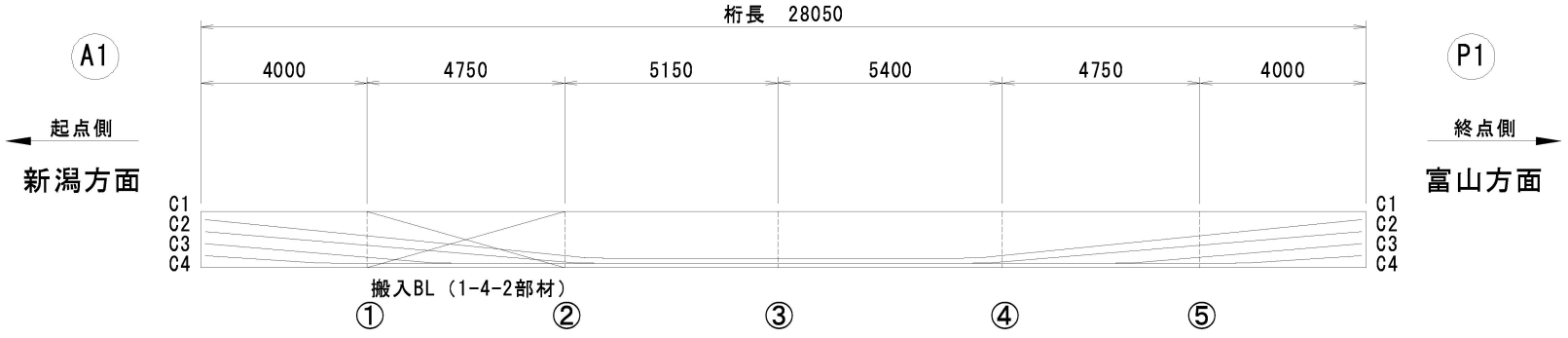
グラウト充填度

	①	②	③	④	⑤	⑤
C1	1	1	1	1	1	1
C2	1	1	1	1	1	1
C3	1	1	2	1	1	1
C4	2	2	4	2	2	1

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの, PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

能生大橋　第1径間　G4桁　グラウト充填状況

側面図



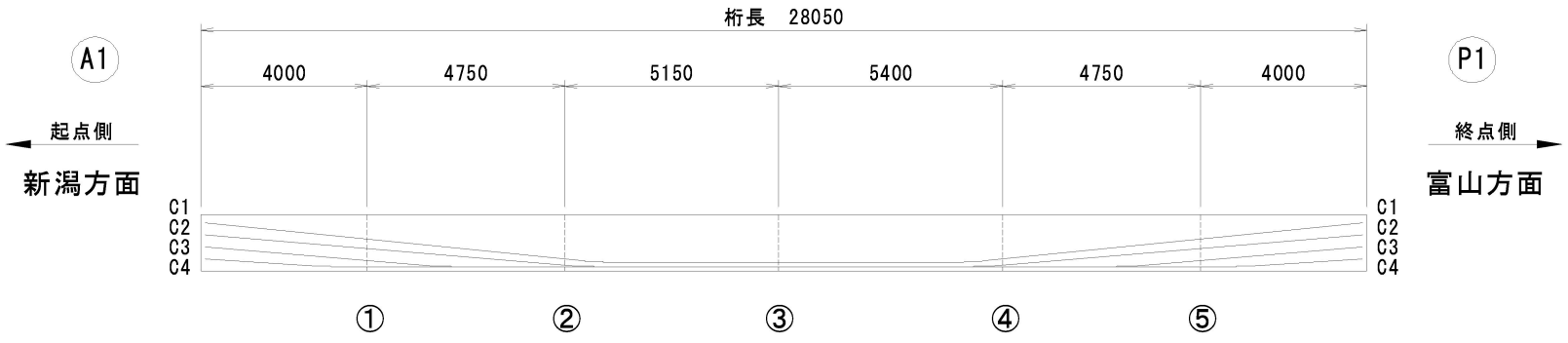
グラウト充填度

	①	②	③	④	⑤
C1	1	1	1	1	1
C2	1	2	1	1	1
C3	2	1	1	1	1
C4	2	2	1	2	1

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

能生大橋　第1径間　G5桁　グラウト充填状況

側面図



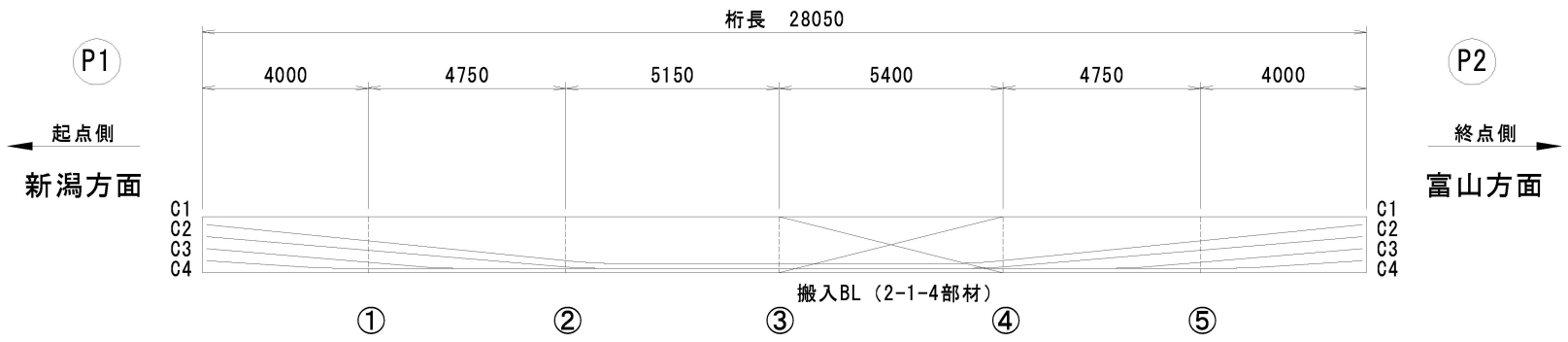
グラウト充填度

	①	②	③	④	⑤
C1	2	1	1	1	1
C2	2	1	1	1	1
C3	1	1	1	1	1
C4	2	1	2	−	1

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

能生大橋　第2径間　G1桁　グラウト充填状況

側面図



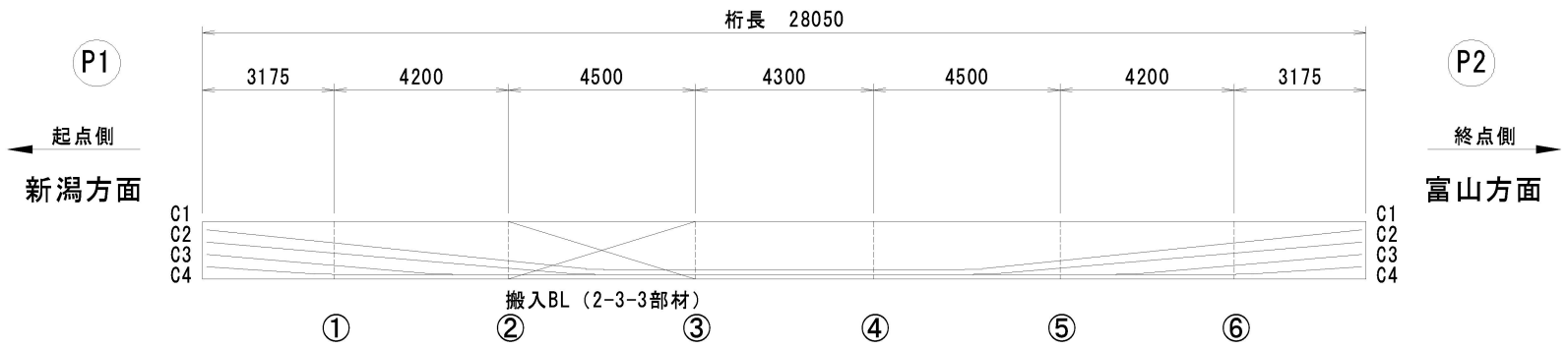
グラウト充填度

	①	②	③	④	⑤
C1	－	1	－	－	－
C2	－	1	－	－	－
C3	－	1	－	－	－
C4	－	2	－	－	－

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

能生大橋　第2径間　G3桁　グラウト充填状況

側面図



グラウト充填度

	①	②	③	④	⑤	⑤
C1	2	2	－	－	1	1
C2	1	1	－	－	1	1
C3	1	1	－	－	2	1
C4	2	2	－	－	1	1

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの，PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

４．２　コンクリート物性調査

（１）調査方法

PC 鋼材の破断が確認された箇所や，比較的健全であった箇所についてコアを採取し，コンクリート物性を調査した。本橋のウェブ厚さは 170mm であり，φ100mm×200mm のコアを採取することができない。そのため，採取コアはφ70mm 以下とした。

コンクリート物性調査の項目や試料採取箇所，調査方法を**付表 3.6** に示す。

付表 3.6　調査項目

調査項目	試料採取箇所	試料種類	調査方法
圧縮強度 静弾性係数	1-1-4（w），1-3-3（w，f）	φ68×136 （N=9 本）	JIS A 1108 JIS A 1149
	2-1-4（w），2-3-3（w，f）		
	5-3-4（w），5-5-4（w）		
引張強度	5-3-4（w），5-5-4（w）	φ68×100 （N=3 本）	JIS A 1113

※記号 w：ウェブから採取，記号 f：下フランジから採取

（２）調査結果

圧縮強度及び割裂引張強度の結果を**付表 3.7** に示す。PC 鋼材の破断の破断が確認されている第 1 径間および第 2 径間の圧縮強度は 50.6～63.9N/mm^2 であった。当時，場所打ちポストテンション PCT 桁の設計基準強度は 40N/mm^2 が一般的であったことからすると，設計値以上の強度が確認された。一方，第 5 径間から採取したコアの圧縮強度は 31.4～36.4N/mm^2 であり，設計値を下回る結果となった。ただし，第 5 径間の弾性係数は第 1 および第 2 径間より高く，引張強度は 3.0N/mm^2 以上であったことから，コンクリート材料そのものには問題がなかったと考えられる。

付表 3.7　コンクリートの物性調査結果

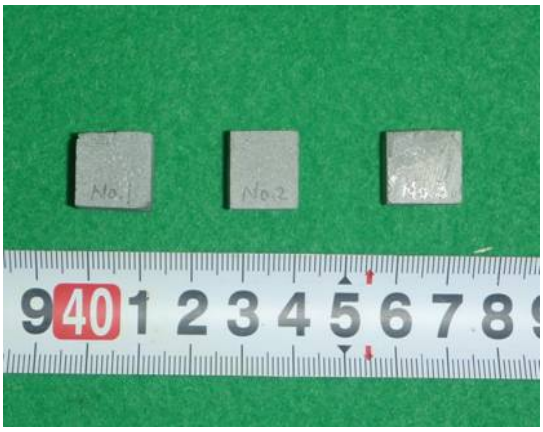
径間	部材名	採取位置	平均直径	断面積	最大荷重	圧縮強度	弾性係数	引張強度
			mm	mm^2	kN	N/mm^2	×10^{4}N/mm^2	N/mm^2
第 1 径間	1-1-4	ウエブ	68.38	3671.8	193.63	52.7	2.64	-
	1-3-3	ウエブ	68.41	3675.1	228.94	62.3	3.08	-
	1-3-3	下フランジ	68.44	3678.3	223.09	60.7	3.11	-
第 2 径間	2-1-4	ウエブ	68.36	3670.2	196.17	53.4	2.78	-
	2-3-3	ウエブ	68.40	3674.5	234.83	63.9	3.32	-
	2-3-3	下フランジ	68.38	3671.8	185.69	50.6	3.41	-
第 5 径間	5-3-4	ウエブ	68.63	3699.3	193.63	31.4	3.74	3.69
	5-5-4	ウエブ	68.60	3695.5	193.63	35.9	3.30	4.63
	5-5-4	ウエブ	68.63	3699.3	193.63	36.4	3.07	3.00

４．３　グラウト物性調査

（１）調査方法

グラウト物性調査は，第 5 径間の部材のシースと一緒に抜いたコンクリートコア（φ150mm）のグラウト部分から立方体の試料（15mm×15mm×15mm）を採取し，圧縮強度試験を行った。採取したコンクリートコアを**付写真 3.8** に，グラウト試料を**付写真 3.9** に示す。

グラウト物性調査の項目や試料採取箇所，調査方法を**付表 3.8** に示す。

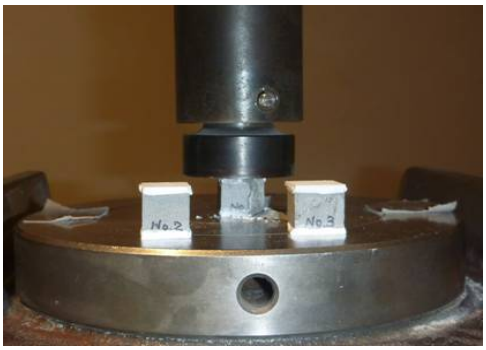


付表 3.8　調査項目

調査項目	試料採取箇所	試料種類	調査方法
圧縮強度	1-3-7	15mm×15mm×15mm （N=3 本）	JIS A 1108

（２）調査結果

圧縮強度試験の状況を**付写真 3.10** に，結果を**付表 3.9** に示す。一般的な試験方法は直径 5cm 高さ 10cm の円柱であり，PC グラウトの設計施工指針における PC グラウトの設計強度は 30N/mm^2 以上とされている。今回の試験方法は，これとは異なるものの，圧縮強度は平均 47.5N/mm^2 で，いずれも設計値を上回っていることが確認された。



付写真 3.10　圧縮強度試験状況

付表 3.9　グラウト物性調査結果

試料名	断面積 (mm^2)	最大荷重 (kN)	圧縮強度	
			測定値 (N/mm^2)	平均値 (N/mm^2)
①	231	12.0	51.9	47.5
②	188	7.7	40.9	
③	200	9.9	49.6	

４．４　塩化物含有量調査

（１）調査方法

ここでは，主な腐食要因である塩化物イオンが桁端部から侵入した可能性が考えられたため，桁端部の後埋めコンクリートと PC グラウトの塩化物含有量を測定した。測定方法は JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法（9.塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法）」に準拠した。また，単位容積質量の測定は社団法人セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」により実施した。

採取した後埋めコンクリートの試料を**付写真 3.11** に示す。この試料の表面から 2cm 間隔に 4 深度でカッティングし，105℃で乾燥後，粗砕・縮分，微粉砕した。また，最深度以降のものを単位容積質量測定の試料とした。PC グラウトの試料に関しては，グラウトの物性調査と同じコンクリートコアから採取したものを使用し，105℃で乾燥後，粗砕・縮分，微粉砕を行った。

a)カッティング前

b)カッティング後

付写真 3.11　後埋めコンクリート部の試料

（2）調査結果

塩化物含有量試験の結果を**付表 3.10** に示す。「2012 年制定　コンクリート標準示方書　設計編」に従い，後埋めコンクリートの水セメント比を 40%と仮定した場合の鋼材の腐食発錆限界塩化物イオン濃度を算出すると 1.72kg/m^3 となるため，調査した中の最大値でも下回っていることがわかる。また，PC グラウトの塩化物イオン量は 0.07 kg/m^3 となり，ほとんど塩化物イオンの浸透が認められなかった。

付表 3.10　調査結果

試料種類	深度 (mm)	塩化物イオン濃度 (Cl^-%)	絶乾単位容積質量 (kg/m^3)	塩化物イオン量 (kg/m^3)
後埋め コンクリート	0～20	0.060	2210	1.33
	20～40	0.041		0.91
	40～60	0.038		0.84
	60～80	0.054		1.19
PC グラウト	－	0.005	1450	0.07

４．５　PC 鋼材の腐食量調査

（1）調査方法

PC 鋼材の腐食量調査の調査項目や試料採取部材を**付表 3.11** に示す。ここでは，撤去桁の一部から採取した PC 鋼材の腐食状況を確認するために，PC 鋼材の除錆後に第 1 径間では質量減少率，第 5 径間では断面減少率を算出し，同一シース内あるいは同一断面内での鋼材腐食状態の傾向について検討を行った。

付表 3.11　調査項目

調査項目	径間	部材名	ケーブル番号	試料種類
質量減少率	第 1 径間	1-1-4	C3	L=500mm　N=24 本
		1-3-3	C3	L=1000mm　N=12 本
			C1，C2，C4	L=1000mm　N=各 4 本
		1-4-2	C4	L=500mm　N=24 本
断面減少率	第 5 径間	5-3-4	C3	L=1000mm　N=24 本
		5-5-4	C1	L=1000mm　N=24 本

<u>質量減少率測定方法</u>

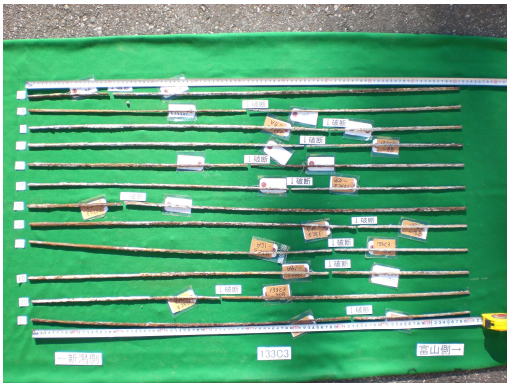
PC 鋼材は，クエン酸二アンモニウム 10%水溶液に浸せきさせ，60℃の恒温槽に 2 日間保管し，鋼材表面をブラッシングして除錆した（**付写真 3.12**）。PC 鋼材の初期重量は不明なため，直径をφ7mm（A＝38.4845mm^2）と仮定して鋼材比重 7.85 から単位長さあたりの重量を算出し，除錆した PC 鋼材の質量減少率を求めた。

<u>断面減少率測定方法</u>

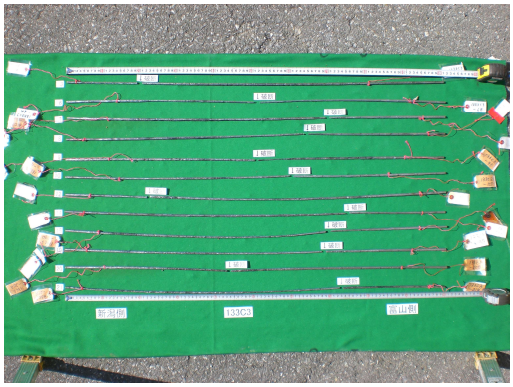
各鉄筋の健全と見られる部分の最小径と，直交した二つの値の平均値から算出した断面積を健全鉄筋の断面積とした。採取した PC 鋼材のそれぞれの直径をデジタルノギスにより測定し，断面減少率を求めた。

a)試薬への浸せき

b)恒温槽を使用した養生



c)除錆前（1-3-3C3）



d)除錆後（1-3-3C3）

付写真 3.12　PC 鋼材の除錆作業

（2）調査結果

PC 鋼材腐食量調査の結果を**付表 3.12** に示す。1-3-3 部材 C3 ケーブルは破断していた箇所であり，約 45%もの PC 鋼材の減少が確認された。また，1-1-4 部材についても劣化の著しい桁であったため，一部の PC 鋼材で 20%を超える結果となったが，24 本の平均にすると 10%を切る減少率となった。

付表 3.12　調査結果

径間	部材名	ケーブル番号	位置別減少率(%)				減少率平均(%)	調査方法
			海側	下側	山側	中央側		
第 1 径間	1-1-4	C3	20.38	24.61	5.09	5.33	9.78	質量減少率
	1-3-3	C1	6.67	5.58	5.69	5.15	5.77	
		C2	3.80	4.00	3.35	3.33	3.62	
		C3	35.81	53.04	41.68	36.64	44.80	
		C4	7.70	7.97	8.43	8.93	8.26	
	1-4-2	C4	2.96	5.21	2.66	6.44	5.55	
第 5 径間	5-3-4	C3	-	-	-	-	9.24	断面減少率
	5-5-4	C1	-	-	-	-	6.94	

※位置別減少率は，採取した PC 鋼材の中から代表的な 1 本を抽出した数値である。

４．６　鋼材の引張試験

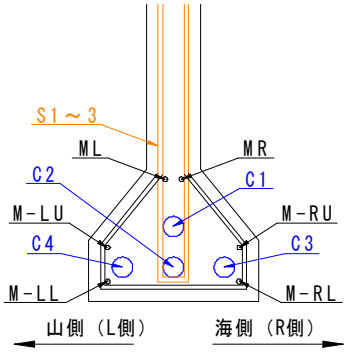
（１）試験方法

ここでは，主桁の損傷劣化の原因として架橋当時に使用した材料が問題ではなかったことを確認することを目的として，万能試験機による引張強度試験を実施した。引張強度試験の実施にあたって，鋼材の断面に欠損や局部の劣化がある場合に適正な評価が出来なくなるおそれがある。そのため，引張強度試験に使用した鋼材は，各部材から比較的腐食の少ないものを選択し使用した。

鋼材の引張強度調査の試料種類や採取位置の一覧を**付表 3.13** に，断面内の鋼材の位置や試料の採取位置について**付図 3.8** に示す。また，試験の状況を**付写真 3.13** に示す。

付表 3.13　調査項目

調査項目	鋼材種類	部材名	採取位置
引張強度	PC 鋼材	5-3-4	C1
		5-5-4	C2
	スターラップ	5-3-4	ML
			MR
		5-5-4	MR
	主鉄筋	5-5-4	S1
			S2
			S3



付図 3.8　試料採取位置

a)引張試験状況

b)引張試験後の試料

付写真 3.13　鋼材の引張強度試験状況

（2）試験結果

PC 鋼材

PC 鋼材引張試験結果を**付表 3.14** に示す。すべての試料で降伏強度と引張強度，伸びが建設当時の規格値を満足することが確認された。弾性係数についても設計計算に使用する数値と同程度であった。

なお，資料番号②と③は，標点外で破断したため，伸びを測定することができなかった。

付表 3.14　PC 鋼材引張試験結果

番号	部材名	採取位置	0.2%永久伸びに対する		引張荷重 (kN)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	伸び (%)
			荷重(kN)	強度(N/mm^2)				
①	5-3-4	C1	54.8	1425.8	63.5	1650.9	204.6	6.99
②	5-3-4	C1	51.4	1336.6	61.3	1592.4	204.2	-
③	5-5-4	C2	54.5	1417.0	63.8	1658.7	204.9	-
平均			53.6	1393.1	63.5	1634.0	204.6	6.99
PC 鋼線 φ7mm 規格値※			-	130kgf/mm^2 以上	-	155kgf/mm^2 以上	-	5.00

※PC 鋼線 φ7mm 規格値は，プレストレストコンクリート設計施工指針(1955 年)の値を示したものである。

鉄筋（スターラップ，主鉄筋）

鉄筋の引張強度試験の結果を**付表 3.15** に示す。使用されている鉄筋の規格は不明であるが，当時 SD295 が一般的に用いられていたと想定され,今回の調査結果は降伏強度が 306.7～351.0N/mm^2 の数値を示しているため，架橋当時使用された鉄筋の物性に問題がなかったと考えられる。

付表 3.15　鉄筋引張試験結果

	番号	部材名	採取位置	降伏強度 (N/mm^2)	最大強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
スターラップ	①	5-3-4	ML	351.0	454.2	202.1
	②	5-3-4	MR	317.7	424.0	195.6
	③	5-5-4	MR	306.7	425.6	198.7
	平均			325.1	434.6	198.8
主鉄筋	①	5-5-4	S1	323.2	439.6	215.7
	②	5-5-4	S2	314.5	438.4	212.7
	③	5-5-4	S3	314.1	434.5	213.9
	平均			317.3	437.5	214.1

付録４　植苗橋の解体調査

１．はじめに 96

２．対象橋梁の概要 97
　２．１　橋梁諸元 97
　２．２　撤去前調査 97

３．調査の項目，方法および結果 101
　３．１　外観調査 102
　３．２　グラウト充填調査 105
　３．３　コンクリートおよびグラウト物性調査 109
　３．４　ASR 調査 112
　３．５　上縁定着部からの漏水調査 114
　３．６　内部ひび割れ調査 116

１．はじめに

植苗橋は，1961 年（昭和 36 年）に北海道苫小牧市にプレキャストブロック工法により架設された 2 径間単純ポストテンション PCT 桁である（**付写真 4.1**）。供用後 48 年を経過し，老朽化も著しく幅員も狭いことから新橋の架設後に撤去された。本橋の一部の桁にはウェブにシースに沿った遊離石灰を伴うひび割れ，下フランジにも遊離石灰を伴う軸方向のひび割れが生じている（**付写真 4.2**）。これらのシース沿いひび割れの発生原因は，シース内にグラウトの充填が十分でないために生じた空隙部に水が浸入，滞留し，これの凍結融解作用による膨張圧とされることが多い。しかし，本橋で撤去前に実施された X 線透過法によるグラウト充填状況の調査によると，シース沿いひび割れ付近のシースにはグラウトが充填されていた。

そこで，シース沿いひび割れが確認された撤去桁を入手し，解体調査を行ってグラウト充填状況等を詳細に確認するとともに解析的検討を実施してひび割れ発生原因を追求した。

付写真 4.1　植苗橋全景（撤去前）

付写真 4.2　撤去前の外観変状

２．対象橋梁の概要

２．１　橋梁諸元

対象橋梁の橋梁諸元を**付表 4.1**，構造一般図を**付図 4.1**，PC 鋼材の配置図を**付図 4.2** にそれぞれ示す。

解体調査は, ウェブにシース沿ったひび割れの発生しかつグラウトの充填が確認された第 1 径間 G2 桁と，シース沿いひび割れの発生がなくかつグラウト充填不足が確認された第 1 径間 G5 桁を対象とした（**付写真 4.3**）。

付表 4.1　対象橋梁の諸元

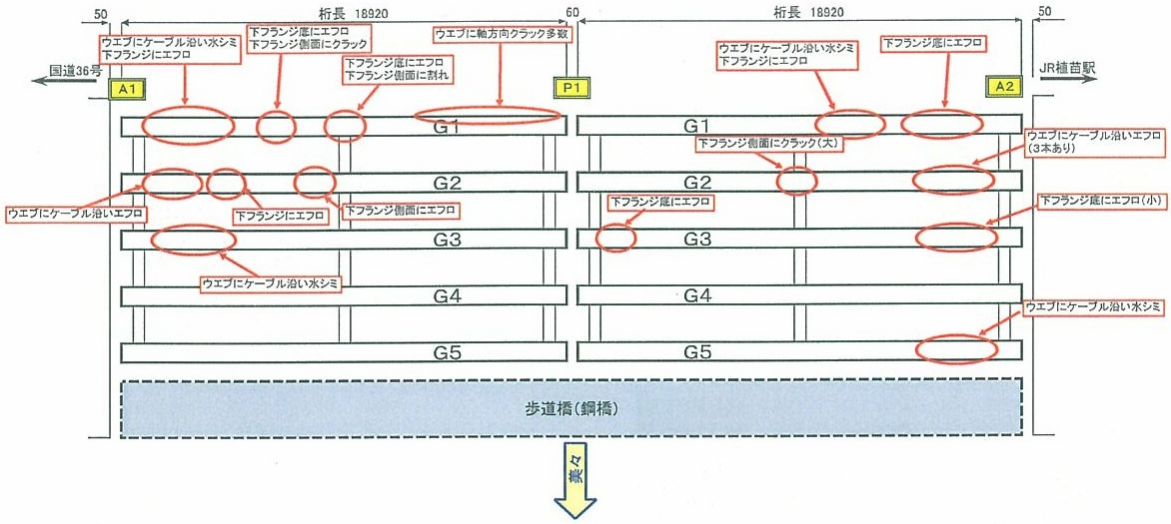
橋梁名	植苗橋
架設地	北海道苫小牧市（海岸より 10km）
構造形式	2 径間単純ポストテンション T 桁橋
橋　長	38.0m（2@18.3m）
荷　重	TL-14
有効幅員	5.5m
架設年	1961 年（昭和 36 年）

付写真 4.3　調査対象部材

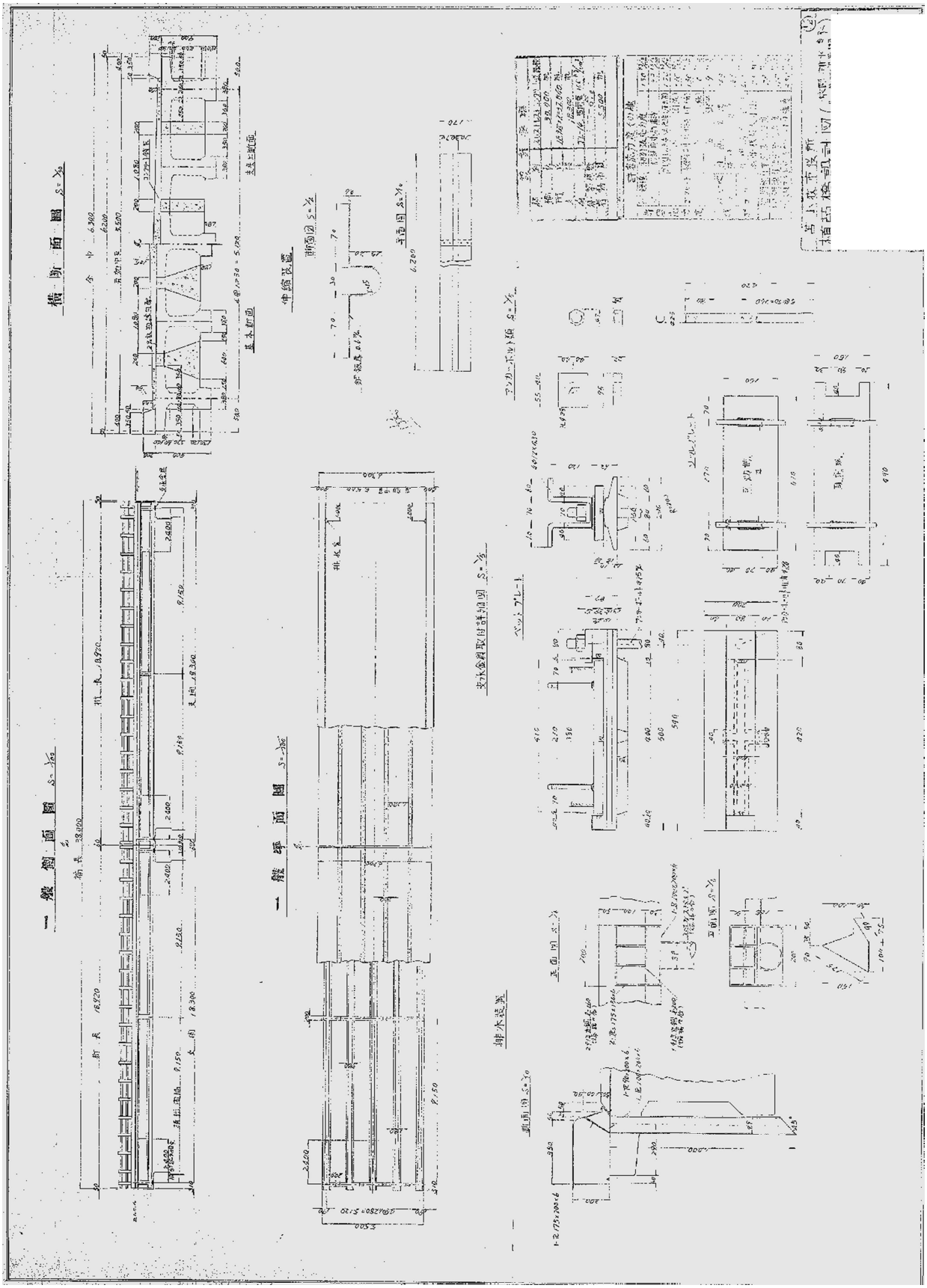
２．２　撤去前調査

（1）外観目視調査

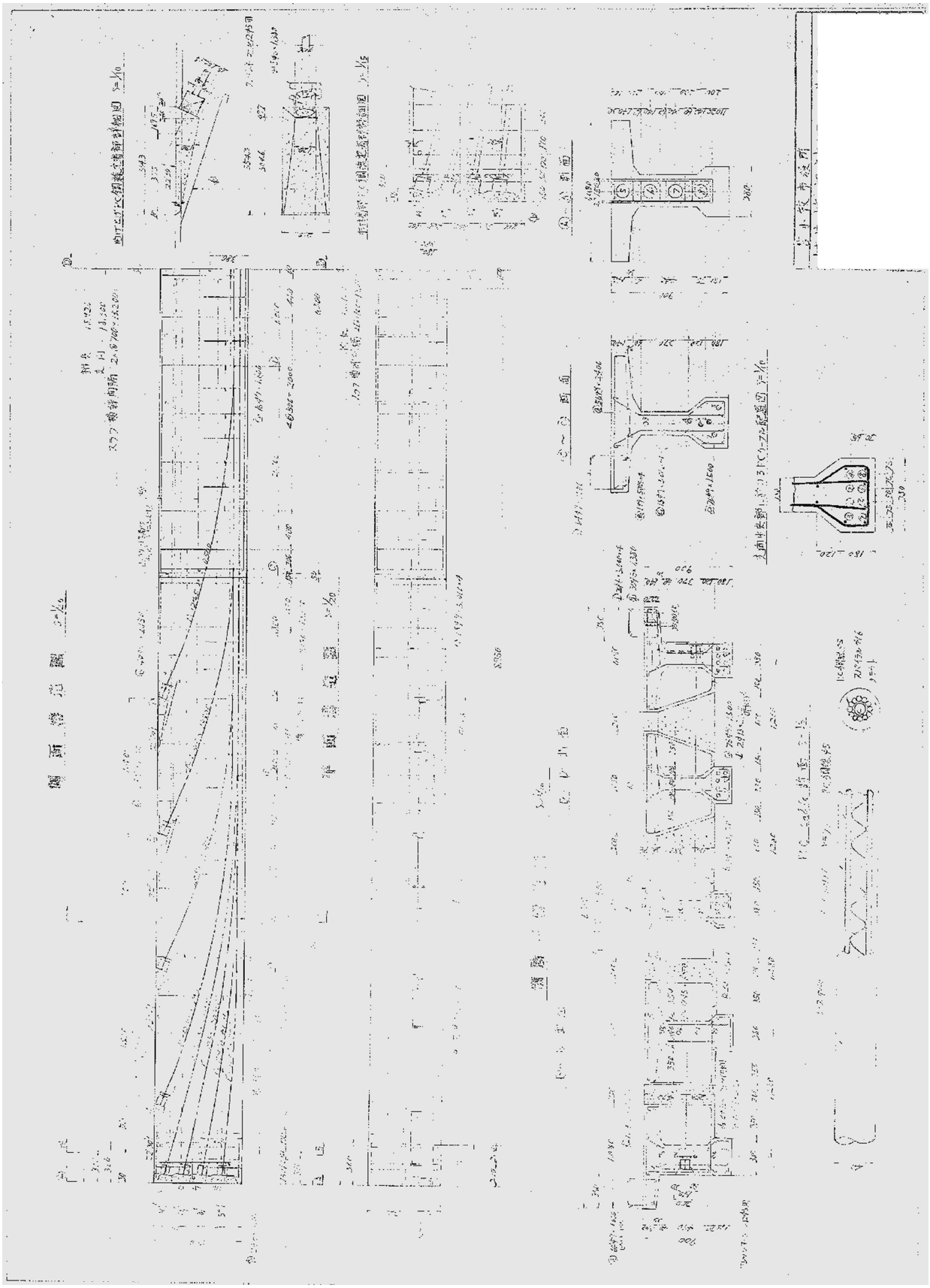
撤去に先立ち実施された目視による外観調査について，調査結果を**付図 4.3** に示す。ウェブには遊離石灰を伴うシース（ケーブル）に沿ったひび割れが，下フランジ下面にも遊離石灰を伴う軸方向のひび割れが確認されている。損傷は，第 1 径間，第 2 径間とも上流側（北側）となる G1 側で多く確認されている。



付図 4.3　撤去前外観調査結果



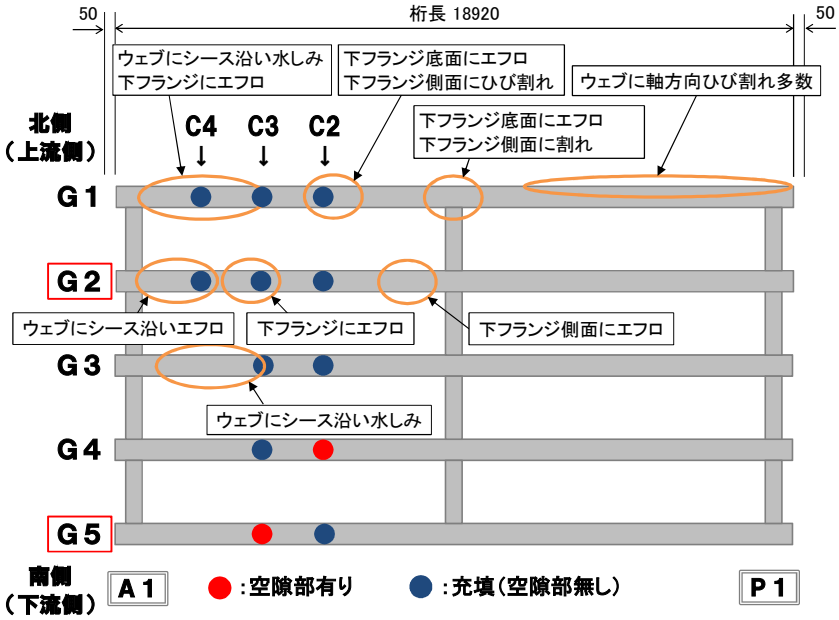
付図 4.1　植苗橋構造一般図



付図 4.2　PC 鋼材配置図

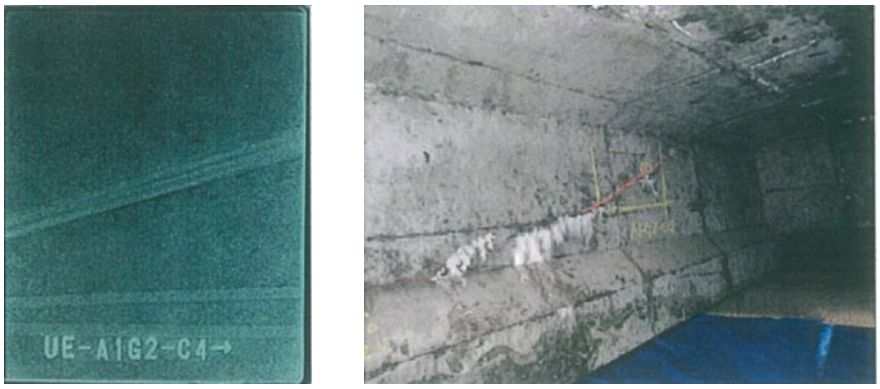
（2）グラウト充填状況調査

グラウトの充填状況は，第 1 径間の各主桁の上縁に定着されたケーブルについて，A1 側ウェブ内曲上げ部を X 線透過法により確認した。本調査により得られたグラウト充填状況と外観調査結果の関係を付図 4.4 に示す。図より，G4 桁 C2 ケーブルと G5 桁 C3 ケーブルでグラウト未充填であると思われる空隙部が確認されたが，シース沿いひび割れは認められなかった。また，G2 桁 C4 ケーブルではシース沿いひび割れが確認されたが，X 線透過法の結果，シース内の空隙部は認められなかった。



付図 4.4　グラウト充填状況と外観調査結果の関係

付写真 4.4 に G2 桁 C4 ケーブル（グラウト未充填であると思われる空隙部が確認されたが，シース沿いひび割れは認められなかった）の X 線透過画像と外観状況を示す。



付写真 4.4　X 線画像と外観状況（G2 桁 C4 ケーブル）

３．調査の項目，方法および結果

植苗橋においてウェブに生じたシース沿いひび割れ，下フランジ下面に生じた軸方向ひび割れの発生原因の検討を目的として部材の解体調査やコンクリート・グラウトの物性調査，ひび割れの生じた遊離石灰について上縁定着ケーブル定着部からの漏水調査を実施した。

また，橋梁撤去時にシース内より採取された脆弱グラウトや解体調査のなかで確認された灰色と白色の色の異なるグラウトについて成分分析による比較を行った。

付表 4.2 に調査項目と概要を示し，各調査の方法および結果について以下に示す。

付表 4.2　植苗橋の調査項目および概要

節	調査項目		概　要
３．１	外観調査		移設された撤去部材（第 1 径間 G2 桁，G5 桁）について外観の詳細調査
３．２	グラウト充填状況調査	切断調査	切断面に配置されたシースについてグラウト充填状況を確認
		コア削孔調査	シースに向かって採取したコアの側面についてグラウト充填状況を確認
３．３	コンクリート・ グラウト物性調査	コンクリート	コア供試体による密度，圧縮強度，静・動弾性係数，引張強度および線膨張性係数の確認
		グラウト	・シース内より採取したグラウト片による圧縮強度の確認 ・製作した現行グラウト供試体による線膨張性係数の確認
３．４	ASR 調査		コア切断面による岩種判定
３．５	上縁定着部漏水調査		水張り試験による上縁定着ケーブル定着部からシース内への水の侵入の確認
３．６	内部ひび割れ調査		切断およびコア削孔による断面内ひび割れの詳細調査

注）グラウト充填状況は以下に示すように分類する。

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの, PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

３．１　外観調査

撤去部材について，ひび割れ発生状況の詳細調査，ひび割れと PC 鋼材との位置関係の確認を目的として，外観調査を実施した。

付写真 4.5　外観調査状況

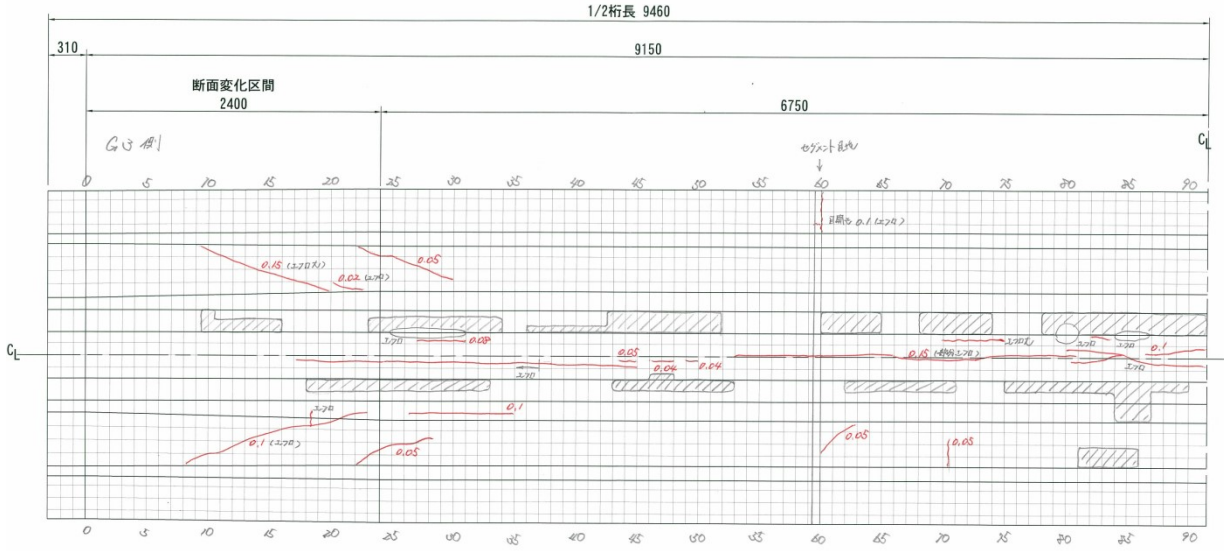
（１）　調査方法

調査は，撤去部材のウェブ側面およびフランジ下面に 100×100mm のメッシュを入れ，ひび割れ等の損傷，断面修復跡をスケッチするとともに，電磁波レーダーにより鉄筋，シース位置の確認することにより行った（付写真 4.5）。

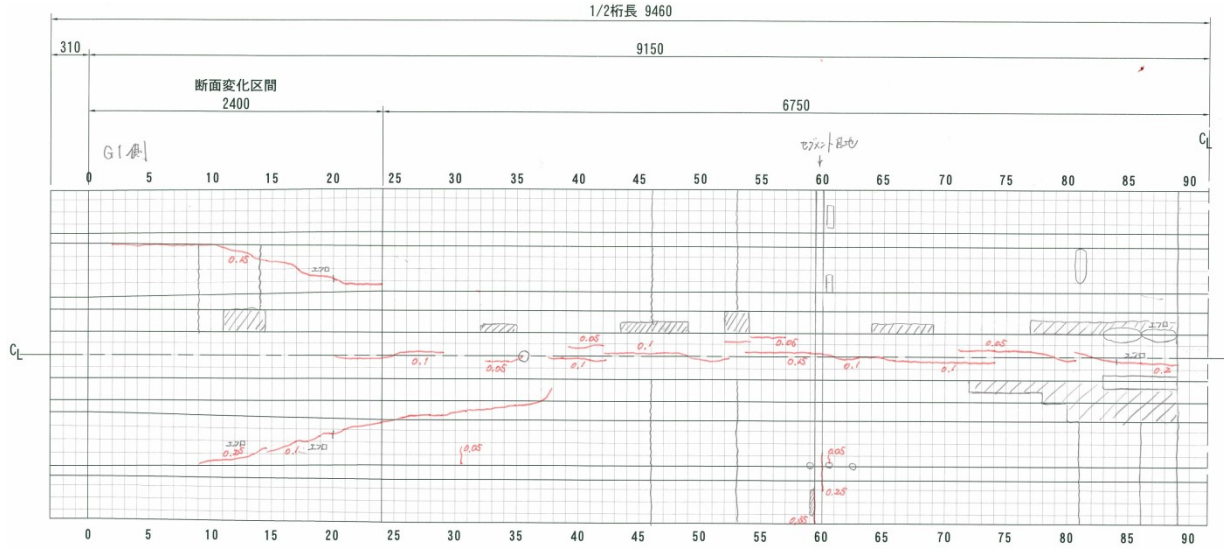
（２）　調査結果

付図 4.5 に G2 桁の，付図 4.6 に G5 桁の外観状況を記録した展開図をそれぞれ示す。ここで，外観状況を記録した展開図について，赤線はひび割れを，斜線部は断面修復跡を示している。

各桁は撤去および搬送の都合から支間中央で破砕されており，特に G5 桁で見られる支間中央付近の損傷は，破砕時に生じたものと思われる。撤去前の外観調査では，G5 桁でシース沿いひび割れは確認されていなかったが，本調査において P1 側でシース沿いひび割れを生じていることが確認された。一方で，シース内に空隙が確認された A1 側 C3 ケーブル付近では，撤去前の調査と同様にシース沿いひび割れは確認されなかった。

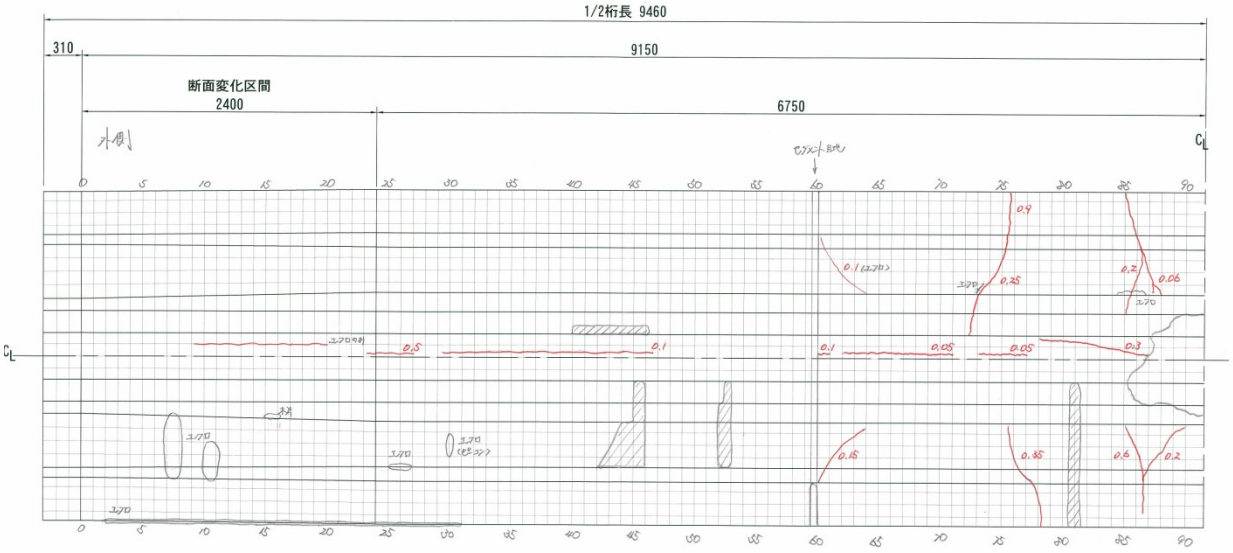


(a)　A1 側

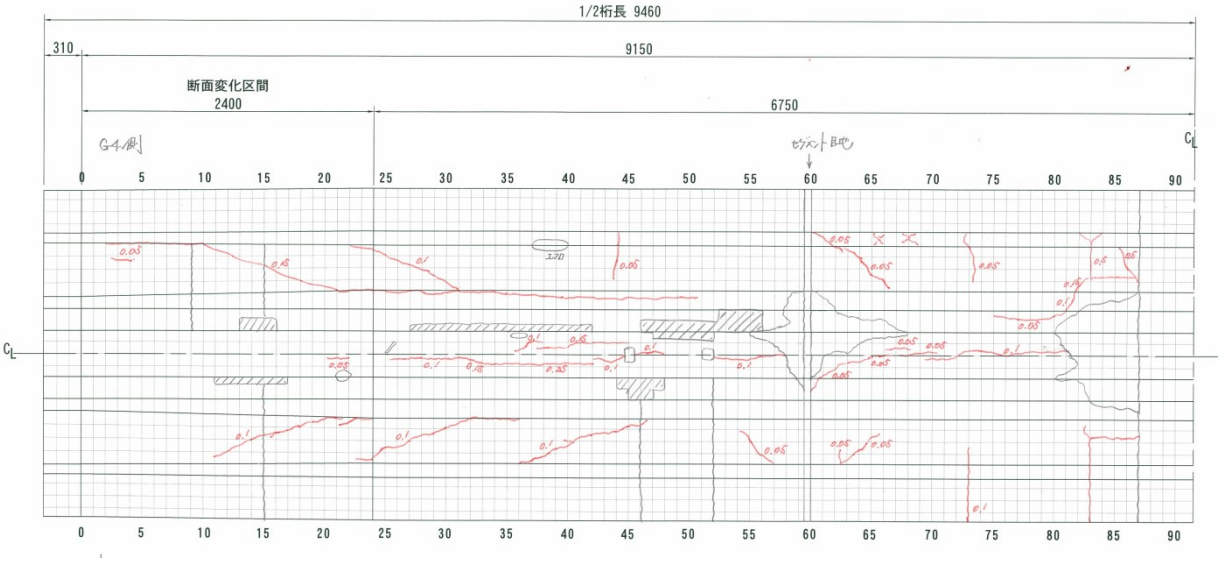


(b)　P1 側

付図 4.5　G2 桁の損傷状況



(a)　A1 側



(b)　P1 側

付図 4.6　G5 桁の損傷状況

３．２　グラウト充填調査

対象橋梁は，PC ケーブルが 8 本配置されており，4 本は桁上縁に，4 本は桁端部に定着されている。上縁に定着されたケーブルは，端部に定着されたケーブルに比べ曲上げ角度が大きく，ブリーディングの影響により定着部付近に空隙を生じやすく，また，ウェブに生じたシース沿いひび割れも上縁定着ケーブルに沿って発生している。

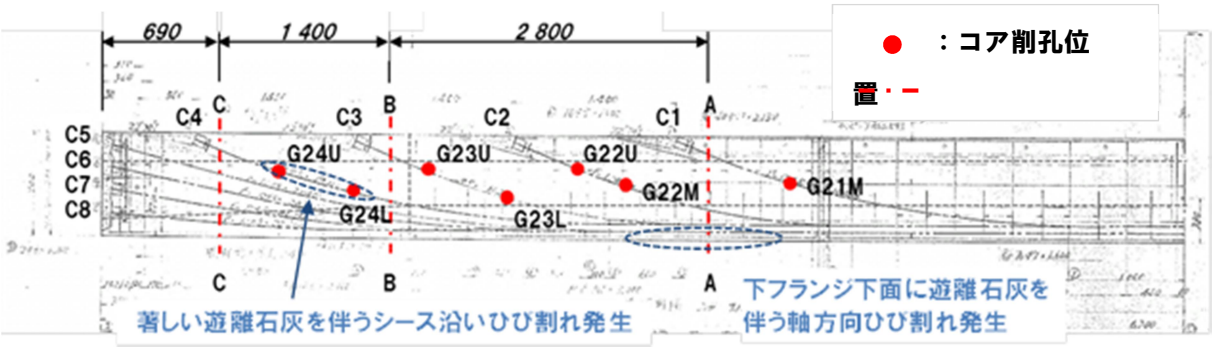
ここでは，上縁定着ケーブル，およびこれに沿って生じたシース沿いひび割れに着目し，切断およびコア削孔によりグラウトの充填状況を確認した（付写真 4.6）。

付写真 4.6　切断・コア削孔調査

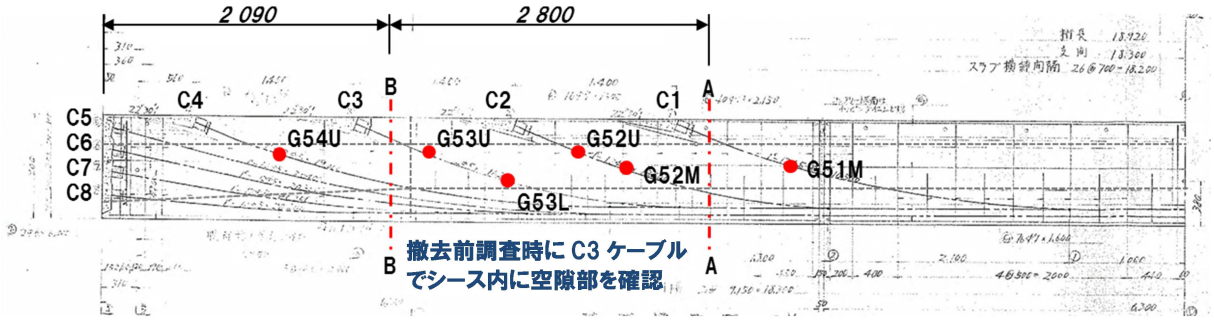
（1）調査方法

切断調査およびコア削孔調査位置を付図 4.7，付表 4.3，付表 4.4 に，切断・削孔状況を付写真 4.7 に示す。

ここで，調査部材は G2 桁および G5 桁の A1 側とし，切断調査はスラブソー，コア削孔調査はボーリングマシンを用いて行った。また，調査位置については，切断調査により定着部付近の，コア削孔調査によりウェブ位置でのグラウト充填状況を確認するものとして，上縁に定着された C1~C4 ケーブルについて調査箇所が 2~3 箇所となるよう調査位置を設定した。



(a)　G2 桁



(b)　G5 桁

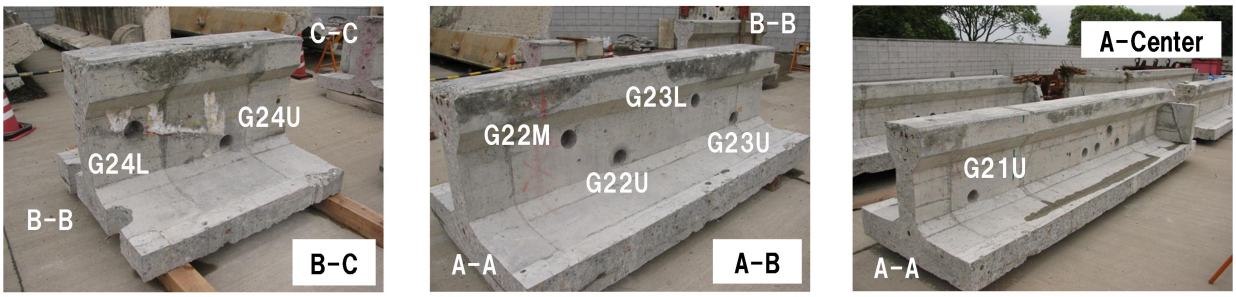
付図 4.7　切断・コア削孔調査位置

付表 4.3　コア削孔位置（G2 桁）

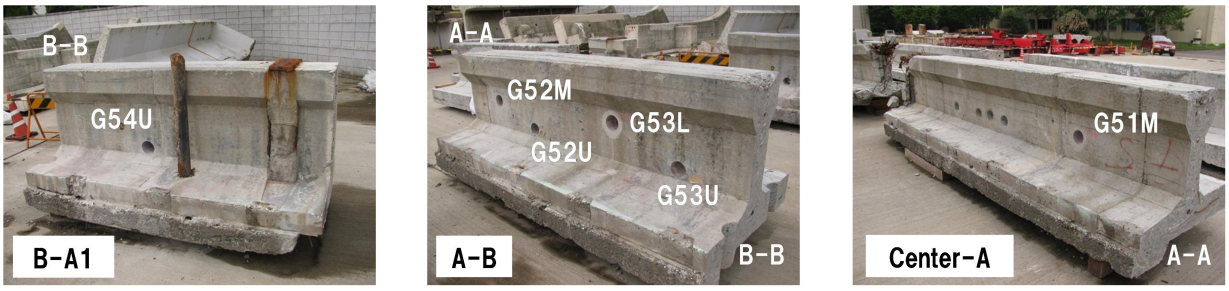
位置（mm）	G24U	G24L	G23U	G23L	G22U	G22M	G21U
桁端からの距離	1050	1680	2435	3010	3800	4190	5390
フランジ下面からの高さ	645	415	610	355	610	390	620

付表 4.4　コア削孔位置（G5 桁）

位置（mm）	G54U	G53U	G53L	G52U	G52M	G51M
桁端からの距離	1035	2430	2940	3825	4345	5790
フランジ下面からの高さ	615	610	405	610	435	470



(a)　G2 桁



(b)　G5 桁

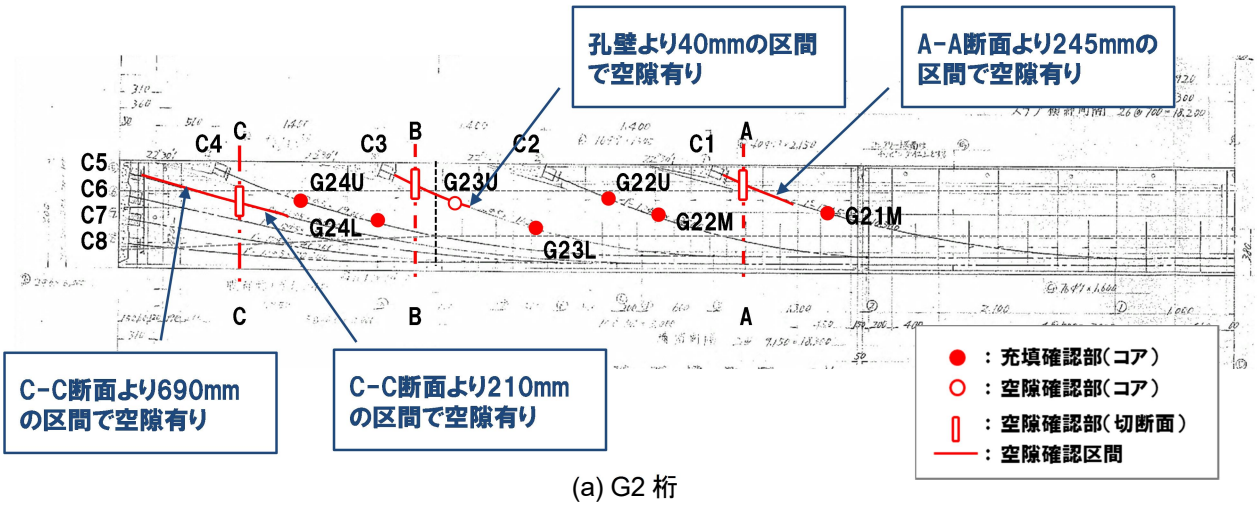
付写真 4.7　切断・コア削孔調査状況

（2）調査結果

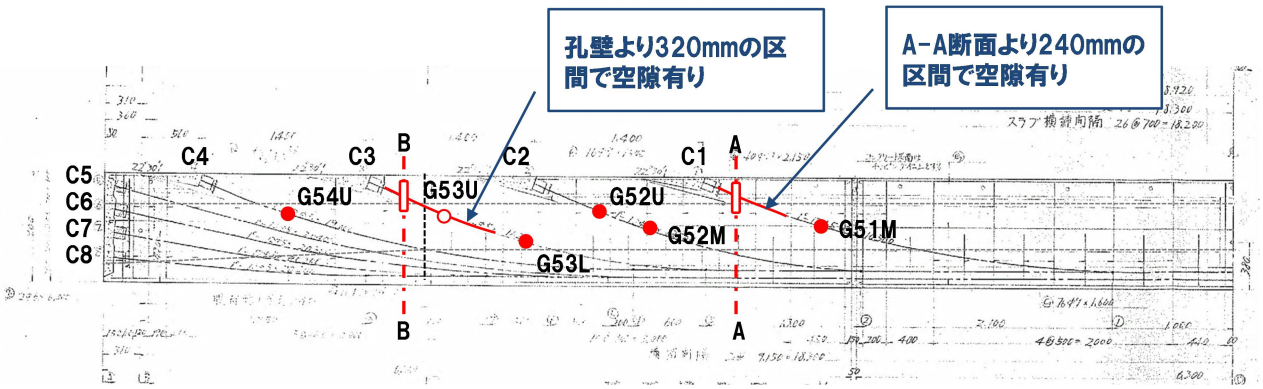
切断およびコア削孔によるグラウト充填状況の調査結果を**付図 4.8**，**付写真 4.8** に示す。ここで，シース内の空隙区間の確認は，切断面において空隙が確認されたケーブルについて針金を挿入することにより確認している。

上縁定着ケーブルの定着部付近に着目した切断調査について，5 つの切断面に配置されたケーブルに対する 32 箇所の調査のうち 5 箇所で空隙が確認された。内訳は 4 箇所が上縁定着ケーブル定着部付近，1 箇所は端部の最上段に配置されたケーブルの端部から 690mm の位置である。G2 桁の C4 ケーブルについては切断位置が定着具に接触したため充填状況が確認できておらず，確認した全ての上縁定着ケーブルの定

着部付近で空隙が確認されている。また，下フランジに配置されたケーブルのグラウト充填状況は，下フランジ下面の軸方向ひび割れの有無に関わらず良好であった。



(a) G2 桁



(b) G5 桁

付図 4.8　切断・コア削孔調査結果

また，コア削孔調査について調査した 13 箇所のうち G2 桁および G5 桁の C3 ケーブルそれぞれ 1 箇所で空隙部が確認された。一方で著しい遊離石灰を伴うシース沿いひび割れを生じた G2 桁 C4 ケーブルのグラウトの充填は良好であった。

付表 4.5，付表 4.6 に G2 桁，G5 桁の各調査箇所におけるグラウト充填度を，付表 4.7，付図 4.9 にグラウト充填度の割合を示す。植苗橋のグラウトの充填度の割合は，充填度 1 が 84%，充填度 4 が 16%であった。

グラウト充填度の割合について，撤去橋梁を用いたグラウト充填状況の調査では，撤去時に部材の重量から決定される任意の切断面により確認を行っている。これに対して，植苗橋のグラウト充填調査は，空隙部を生じやすい上縁定着ケーブルの定着部付近を中心に調査したため，充填度が低くなっている。

(a)　G2 桁

(b)　G5 桁

付写真 4.8　切断・コア削孔調査結果

付表 4.5　各調査位置におけるグラウト充填度（G2 桁）

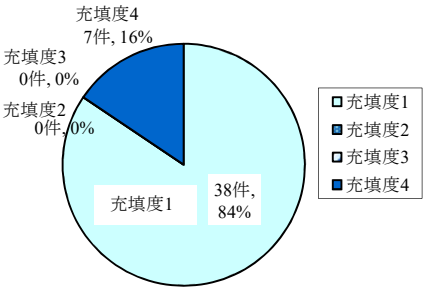
ケーブル		C-C	G24U	G24L	B-B	G23U	G23L	G22U	G22L	A-A	G21U
上縁定着	C1									4	1
	C2							1	1	1	
	C3				4	4	1			1	
	C4		1	1	1					1	
端部定着	C5	4			1					1	
	C6	1			1					1	
	C7	1			1					1	
	C8	1			1					1	

付表 4.6　各調査位置におけるグラウト充填度（G5 桁）

ケーブル		ケーブル	G54U	B-B	G53U	G53L	G52U	G52M	A-A	G51M
上縁定着	C1	C1							4	1
	C2	C2					1	1	1	
	C3	C3		4	4	1			1	
	C4	C4	1	1					1	
端部定着	C5	C5		1					1	
	C6	C6		1					1	
	C7	C7		1					1	
	C8	C8		1					1	

付表 4.7　グラウト充填度の割合

	充填度				合計
	1	2	3	4	
上縁定着	19 件	0 件	0 件	6 件	25 件
端部定着	19 件	0 件	0 件	1 件	20 件
合計	38 件	0 件	0 件	7 件	45 件
割合	84.4%	0.0%	0.0%	15.6%	100.0%



付図 4.9　グラウト充填度の割合

３．３　コンクリートおよびグラウト物性調査

コンクリートおよびグラウト物性調査の項目および調査方法を**付表 4.8** に示す。グラウトの線膨張係数は，シース内より試験に必要な寸法のグラウト試験片の採取が困難であったため，現行のノンブリーディングタイプのグラウトで確認を行った。

付表 4.8　コンクリートおよびグラウト物性調査

種類	調査項目	対象部材	試料種類	調査方法
コンクリート	圧縮強度 静弾性係数 動弾性係数	G2 桁 A1 側 G5 桁 A1 側	コア（φ100×180）・各部材より 3 本	JIS A1107 JIS A1149 JIS A1127
	引張強度	G5 桁 P1 側	コア（φ80×160）・5 本	JIS A1113
	線膨張係数	G5 桁 P1 側	コア（φ45×100）・3 本	JIS A 1325
グラウト	圧縮強度	G5 桁 P1 側	長さ 100mm のグラウト片・1 体	日本建築仕上学会 式引っかき試験
	線膨張係数	現行グラウト （GF1720）	テストピース（φ50×100）・3 本	JIS A 1325

（1）コンクリートの圧縮強度，静・動弾性係数

圧縮強度，静・動弾性係数の確認は，JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」，JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」，および JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数，動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」により行った。

付表 4.9 にコンクリートの圧縮強度，静弾性係数，動弾性係数を示す。

圧縮強度は設計基準強度に対して十分大きく，これに対する静弾性係数も推定式等で求められる数値程度である。これより，コンクリートの材料劣化などは見られず，ASR による弾性係数の低下などは確認されなかった。

付表 4.9　コンクリートの圧縮強度および弾性係数

対象部材	単位重量 (g/cm³)		圧縮強度 (N/mm²)		動弾性係数 (kN/mm²)		静弾性係数 (kN/mm²)	
G2 桁 A1 側	2.510	2.507	74.5	77.5	44.0	43.5	39.0	38.5
	2.500		76.1		42.2		38.5	
	2.510		82.0		44.4		38.1	
G5 桁 A1 側	2.520	2.510	75.8	79.0	45.3	45.2	39.8	40.1
	2.510		70.5		43.1		39.3	
	2.500		90.8		47.1		41.1	

（2）コンクリートの引張強度

引張強度の確認は，JIS A1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠して行った。

付表 4.10 にコンクリートの引張強度を示す。引張強度は圧縮強度の実測値に対する数値としては小さいが，想定される設計基準強度に対して標準程度であった。

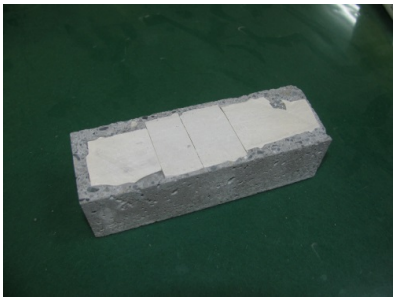
付表 4.10　コンクリートの引張強度

対象部材	単位重量 (g/cm³)		引張強度 (N/mm²)	
G2 桁 P1 側	2.549	2.501	2.3	2.9
	2.503		2.4	
	2.486		3.1	
	2.474		3.2	
	2.494		3.5	

（3）グラウトの圧縮強度

グラウトの圧縮強度は，日本建築仕上学会式引っ掻き試験により引っ掻き傷幅より換算した。引っ掻き試験に使用する試験体は 100mm の長さが必要である。しかし，植苗橋では PC 鋼線 12φ5 に対してシース径は 40mm と小さく，100mm のグラウト片の採取が困難であった。このため，試験片はフレッシュなモルタルに数個のグラウト片を並べて埋め込み，モルタル硬化後に表面を平滑に研磨することにより製作した（付写真 4.9）。

付表 4.11 にグラウトの推定強度を示す。



付写真 4.9　引っかき試験試験体

付表 4.11　グラウト強度

対象部材	傷幅 (mm)	推定強度 (N/mm²)	
G2 桁 P1 側	0.30	35	40
	0.30	35	
	0.25	50	

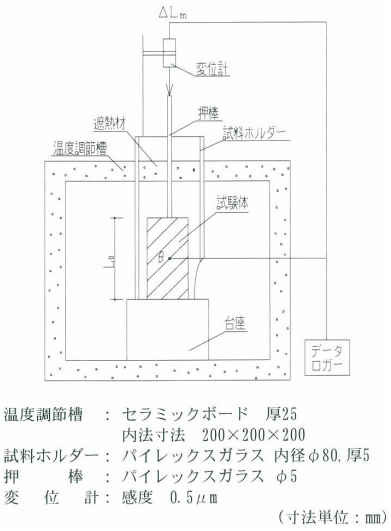
（4）コンクリートおよびグラウトの線膨張係数

コンクリートおよびグラウトの線膨張係数の確認は，JIS A 1325「建築材料の線膨張率測定方法」により確認した。

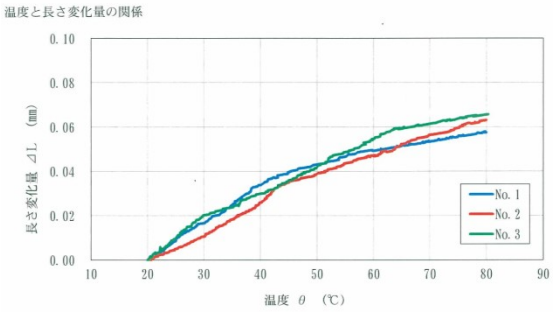
本方法は，高さ 100mm の試験片に対して 20～80℃まで 15℃/hr で昇温し，このときの長さ変化量より線膨張率を測定するものであり，試験体は長さ 100mm で自立する必要がある（**付図 4.10**）。

本試験においてシース内からの試験体の採取が困難であったため，ここでは現行のノンブリーディングタイプのグラウト（GF1720：BASF 社）で製作した試験体の線膨張係数を確認し，コンクリートと比較，後述する解析において使用するものとした。

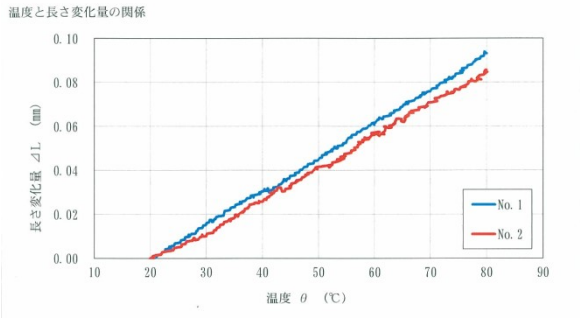
付図 4.11 にコンクリートおよびグラウトの温度と長さ変化の関係を，**付表 4.12** に線膨張係数を示す。



付図 4.10　測定装置図



(a)　コンクリート



(b)　グラウト（GF-1720）

付図 4.11　温度と長さ変化の関係

付表 4.12　線膨張係数

種類	対象部材	線膨張係数（$\times 10^{-6}$/℃）
コンクリート	G2 桁 P1 側	10.4
現行グラウト（GF1720）	テストピース製作（φ50×100mm）	15.0

３．４　ASR 調査

PC 構造物において PC 鋼材（シース）に沿ったひび割れを生じる原因の一つとして ASR がある。

ここで，本橋に生じたひび割れの発生原因として，ASR の可能性について確認を行った。

（１）調査方法

調査は，コンクリートコアの切断面において，骨材の種類・形状・岩石の種類，コンクリート中に分布する ASR による変状などを観察する岩種判定とした。

粗骨材を構成する岩石の構成割合は JCI-DD4 に準拠し，コンクリートコアの切断面に 10mm 間隔の直線を引き，岩石種ごとに，この線と交わる長さを測り，積算長さを積算総延長で除すことで求めた（線積分法）。岩石の分類は岩石組織，構成鉱物，粒度などを実体顕微鏡下で観察することにより行った。

対象部材，調査方法を**付表 4.13** に示す。

付表 4.13　ASR 粗骨材岩種判定

種類	対象部材	調査方法	摘　要
コンクリート	G2 桁 A1 側 支間中央付近	肉眼観察	鉱物種の構成割合

（２）調査結果

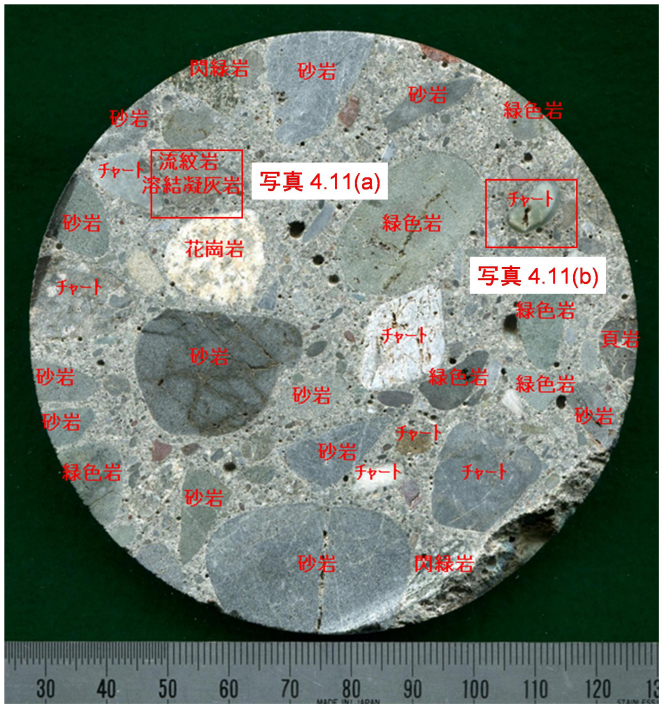
植苗橋のコンクリートについて，粗骨材は円摩された（角のとれた）砂利からなり，コア試験体に認められた限りの最大寸法は 20mm 程度であった。粗骨材を構成する岩石は，砂岩・緑色岩・チャート・閃緑岩などであり，その構成割合は**付表 4.14** に示す通りである。一方，細骨材は石英・長石・雲母の結晶破片のほか，粗骨材と同様の岩石の小さな岩片から構成される砂であった。

付表 4.14　粗骨材を構成する岩石と構成割合

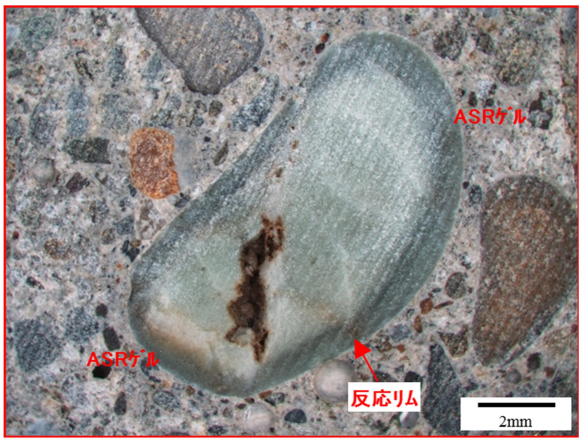
岩石名	構成割合 (vol.%)	備　考
砂岩	32	砂粒主体の堆積物が固結して生成した岩石。中～細粒。色調は灰・暗灰・灰緑色など。
緑色岩	24	変成作用を受けた玄武岩やドレライト。原岩組織が残存している。色調は緑色。
チャート	21	珪質堆積物が固結した堅硬緻密で微粒な岩石。色調は白・灰・紫灰色など。一部に ASR ゲルが認められた。
閃緑岩	10	中間質組成の深成岩。斜長石・輝石・角閃石から主に構成される。色調は緑色。
頁岩	8	シルトサイズの粒子が固結して生成した岩石。色調は暗灰色。
花崗岩	4	珪長質組成の深成岩。石英・斜長石・カリ長石・黒雲母から主に構成される。中～細粒。色調は優白・灰色。
流紋岩 溶結凝灰岩	1	珪長質組成の火山砕屑岩。溶結した火山ガラス片や軽石を主とする基質中に、結晶破片などを含む。色調は灰緑色。ASR ゲルが認められた。

コア試料の切断面の様子を**付写真 4.10**，**付写真 4.11** に示す。粗骨材と細骨材を構成する岩石のうち，主としてチャートと流紋岩溶結凝灰岩に，反応リム・ASR ゲルの形成が認められた。チャート，流紋岩溶結凝灰岩は一般に ASR 反応性鉱物を含むことの多い岩石である。

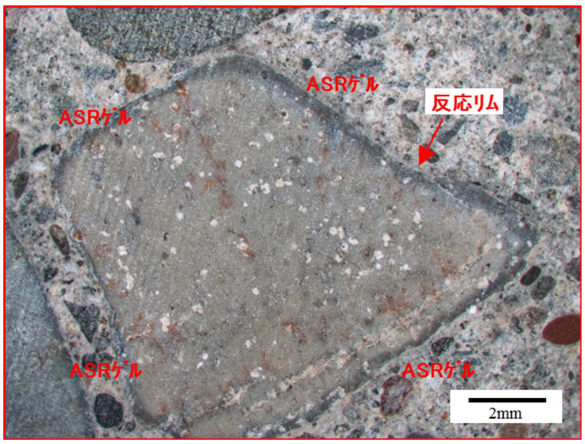
ASR の反応状況について，一断面のみの観察結果ではあるが，反応リム・ASR ゲルの形成は一部であり，骨材中のひび割れや骨材からペースト部へのひび割れの進展は認められなかった。これより，ひび割れの発生原因が ASR である可能性は低いものと推察された。



付写真 4.10　ASR 岩種判定結果



(a)　チャートから切断面に滲出した ASR ゲル



(b)　流紋岩溶結凝灰岩に生じた ASR ゲル

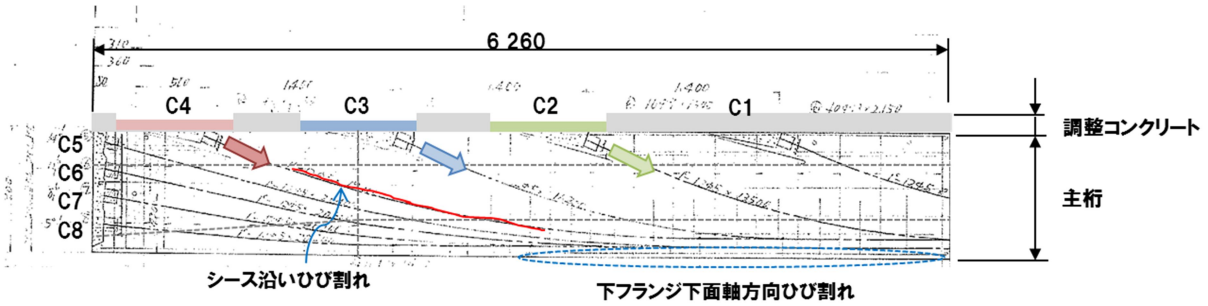
付写真 4.11　反応リム・ASR ゲル

３．５　上縁定着部からの漏水調査

前述したようにグラウト充填状況調査により，ひび割れを生じた付近のシースにはグラウトが充填されていることが確認されている。一方で，一部のひび割れでは遊離石灰を伴っている。ここで，グラウトが充填されている状況での上縁定着ケーブル定着部からの漏水の有無および漏水がある場合の水みちの確認を目的として水張り試験による水みち探査を実施した。

（１）調査方法

調査は，C4 ケーブル付近のウェブ，および桁下面にシースに沿ったひび割れを生じた第 1 径間 G2 桁 P1 側部材を対象とし，C2，C3，C4 ケーブル定着部付近の調整コンクリートをはつって形成した槽内に一定期間（3 ヶ月）それぞれ色の異なる着色水を張り，その後に部材をひび割れ付近で切断して断面における着色状況を確認するものとした。付図 4.11 に水張り試験の概要を，付写真 4.12 に部材の外観を，付写真 4.13 に試験状況を示す。



付図 4.11　水張り試験概要

付写真 4.12　水張り試験体の外観

（２）調査結果

C4 ケーブルに沿ったひび割れついて，ひび割れ発生状況，切断状況，シース内への水の侵入状況およびひび割れへの水の侵入状況を付写真 4.14 に示す。

切断面に配置される C4 ケーブルはグラウトが充填されているものの湿った状態にあり，グラウトやコンクリートとシースの界面からの水の侵入した可能性が疑われた。一方で，ひび割れ内部に遊離石灰が確認さ

れておらず，シースに沿ったひび割れへの水の侵入は見られず，遊離石灰はシース内からではなく外部から供給された水によるものと推察された。

(a) 水張り前

(b) 水張り後

付写真 4.13　水張り試験状況

(a) シースに沿ったひび割れの発生状況

(b) ひび割れ部切断状況

(c) 切断面

(d) シースに沿ったひび割れへの水の侵入状況

付写真 4.14　C4 ケーブルに沿ったひび割れ付近の状況

今回，上縁定着ケーブル定着部からの水の漏水がある場合，水みちの探査を目的として，ポスターカラーにより着色した水を使用した。しかし，切断面で確認したケーブルに着色は見られず，水みちの探査に至らなかった。今後同様の試験を実施する際には，水の着色方法について検討が必要である。

３．６　内部ひび割れ調査

グラウト充填調査，および水張り試験における切断面，および削孔して採取したコアより，シースに沿ったひび割れの部材内部の状況を確認した。桁下面に生じたひび割れの部材内部の状況を**付写真 4.15** に，ウェブに生じたひび割れの部材内部の状況を**付写真 4.16** に示す。

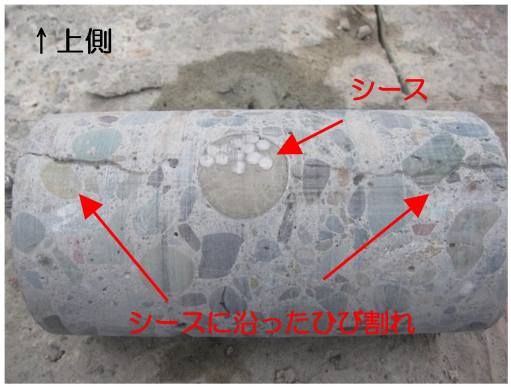
桁下面に生じたひび割れは，断面の下段に配置されたシースに達していたが，下段に配置されたシースは桁端部に定着されたケーブルのものであり，グラウトの充填状況は良好である。ウェブに生じたひび割れは，シースに達しているものと達していないものが確認された。いずれのひび割れも内部で遊離石灰は確認されておらず，前述の水張り試験と同様に遊離石灰は外部から供給された水によるものと推定された。

(a)　ひび割れの発生状況

(b)　部材内部のひび割れ状況

付写真 4.15　桁下面に生じたシースに沿ったひび割れ

(a)　ひび割れ部削孔状況



(b)　部材内部のひび割れ状況

付写真 4.16　ウェブに生じたシースに沿ったひび割れ

付録５　荒磯橋のグラウト充填調査

１．はじめに..... 118

２．橋梁緒元..... 118

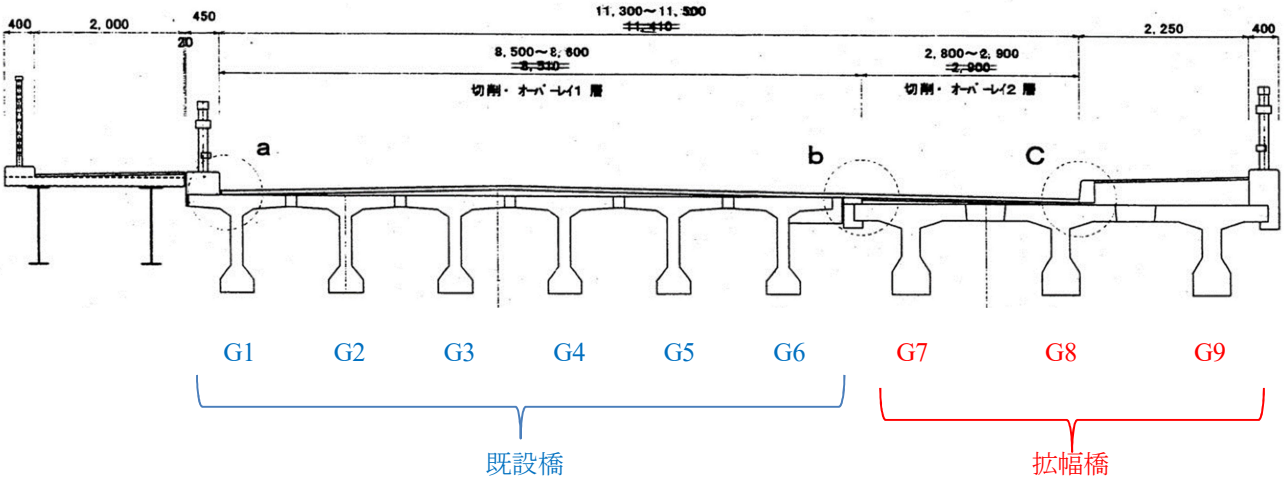
３．調査方法（切断面のグラウト充填度の調査）..... 126

４．調査結果（切断面のグラウト充填度の調査）..... 127

５．その他の調査（圧縮強度試験・塩化物イオン濃度測定・中性化深さ）..... 133

1．はじめに

荒磯橋は秋田県由利郡の海岸線沿いの国道の道路橋である。本橋は海岸線に近接することから塩害を受けており，過去に断面修復・電気防食・外ケーブル補強・下部工の脱塩工法により補修・補強がなされてきた。しかし，長年の潮風や凍結防止剤の影響により塩害劣化が進行したため，2013 年に撤去されることになった。なお，**付図 5.1** のとおり本橋は主桁 6 本の既設橋と 3 本の拡幅橋に分かれており，それぞれ施工年度が異なる。既設橋は 1965 年竣工で，塩害に対するかぶりは確保されていない。一方，拡幅橋は 1988 年竣工で，塩害対策として鉄筋の腐食防止のために 70mm のかぶりで施工されている。



付図 5.1　荒磯橋　断面図

2．橋梁諸元

本橋の橋梁諸元を**付表 5.1** に示す。また，竣工図面からわかる主桁の PC 鋼材データを**付表 5.2** に示す。

付表 5.1　橋梁諸元

架設地	秋田県由利本荘市（海岸より 0.3km）	
構造種別	PC2 径間単純ポストテンション方式 T 桁橋	
	既設橋	拡幅橋
橋　　長	45.00m	45.80m
支 間 長	21.70m×2	22.14m×2
有効幅員	8.0m	車道 3.2m＋歩道 2.25m
荷重	TL-20+雪荷重 100kgf/m^2	
竣工年次	1965 年	1988 年
実施年次	2014 年　撤去後	2014 年　撤去後

付表 5.2　主桁の PC 鋼材データ

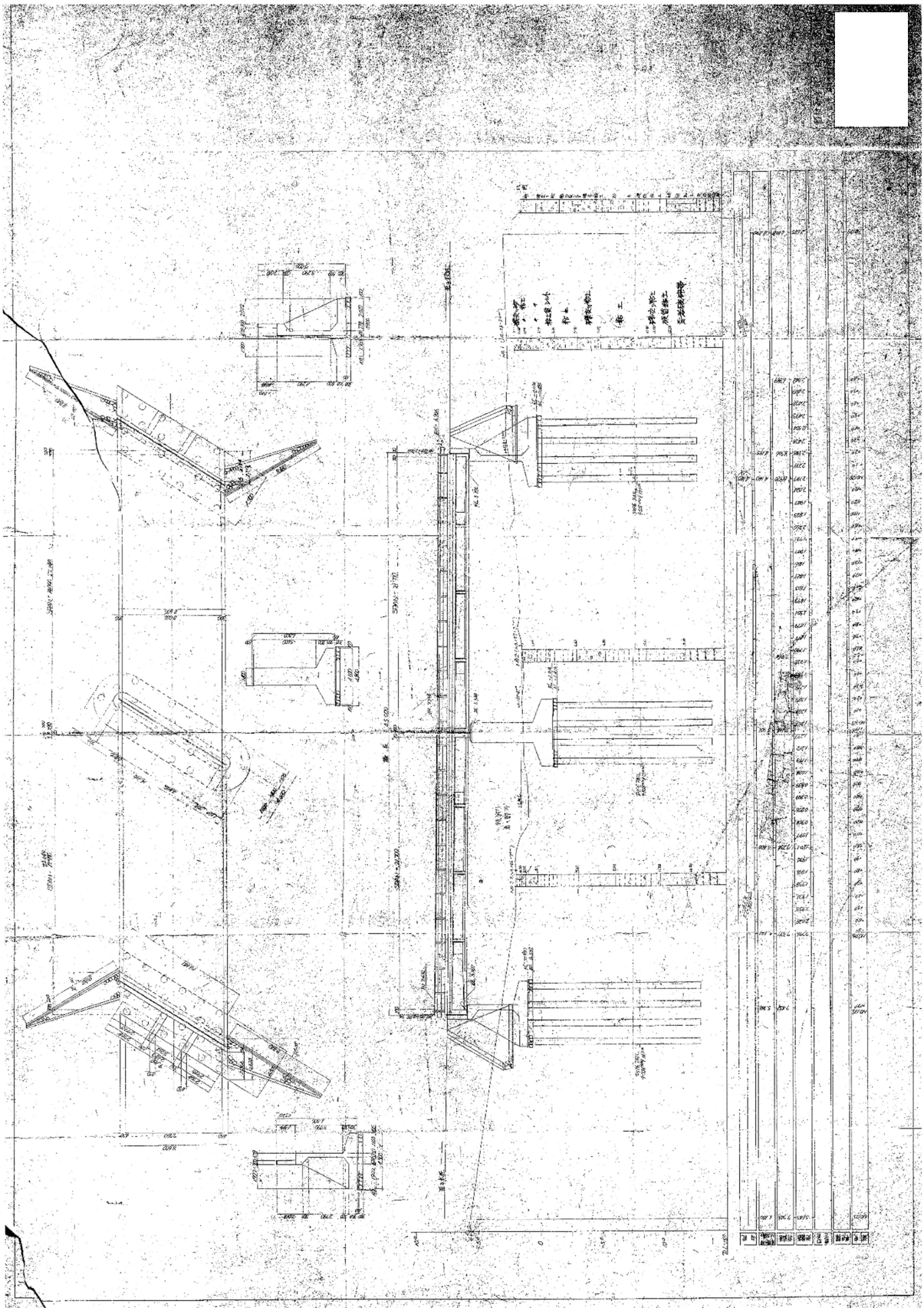
	既設橋	拡幅橋
定着工法	不明	フレシネー工法
使用材料	PC 鋼線 12-φ5(mm)	PC 鋼線 12-φ7(mm)
上縁定着	あり	あり
シース径	φ35(mm)	φ45(mm)
シース かぶり	下面 52.5(mm) 側面 47.5(mm)	下面 87.5(mm) 側面 102.5(mm)

付表 5.3 に拡幅工事にて使用されたグラウトの示方配合を示す。なお，ブリーディングの生じる旧タイプのグラウトが使用されている。

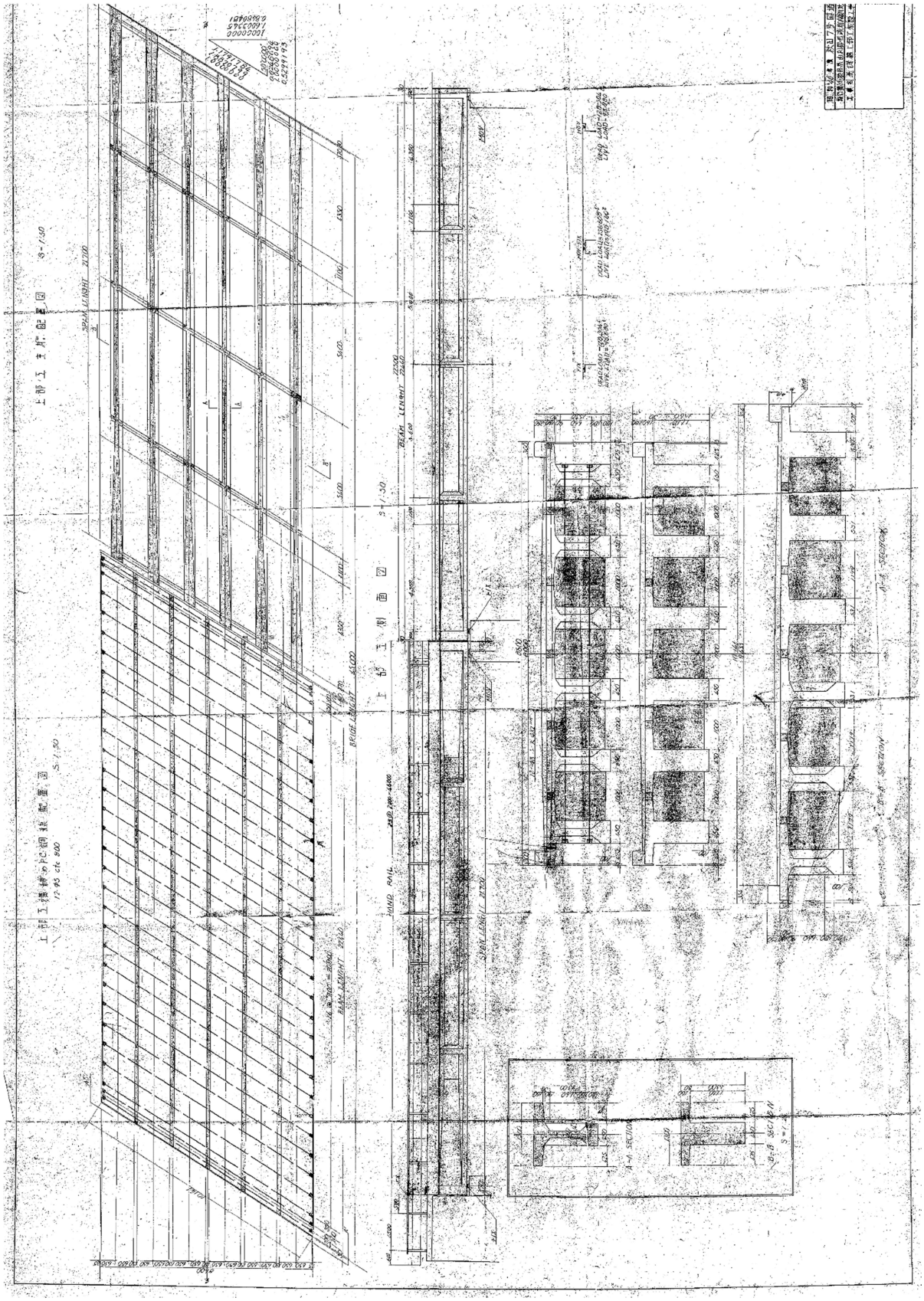
付表 5.3　示方配合

セメント C（kg）	水 W（kg）	W／C （%）	混和剤 （kg）	備考
1400.0	560.0	40	14	混和剤ポゾリス GF630

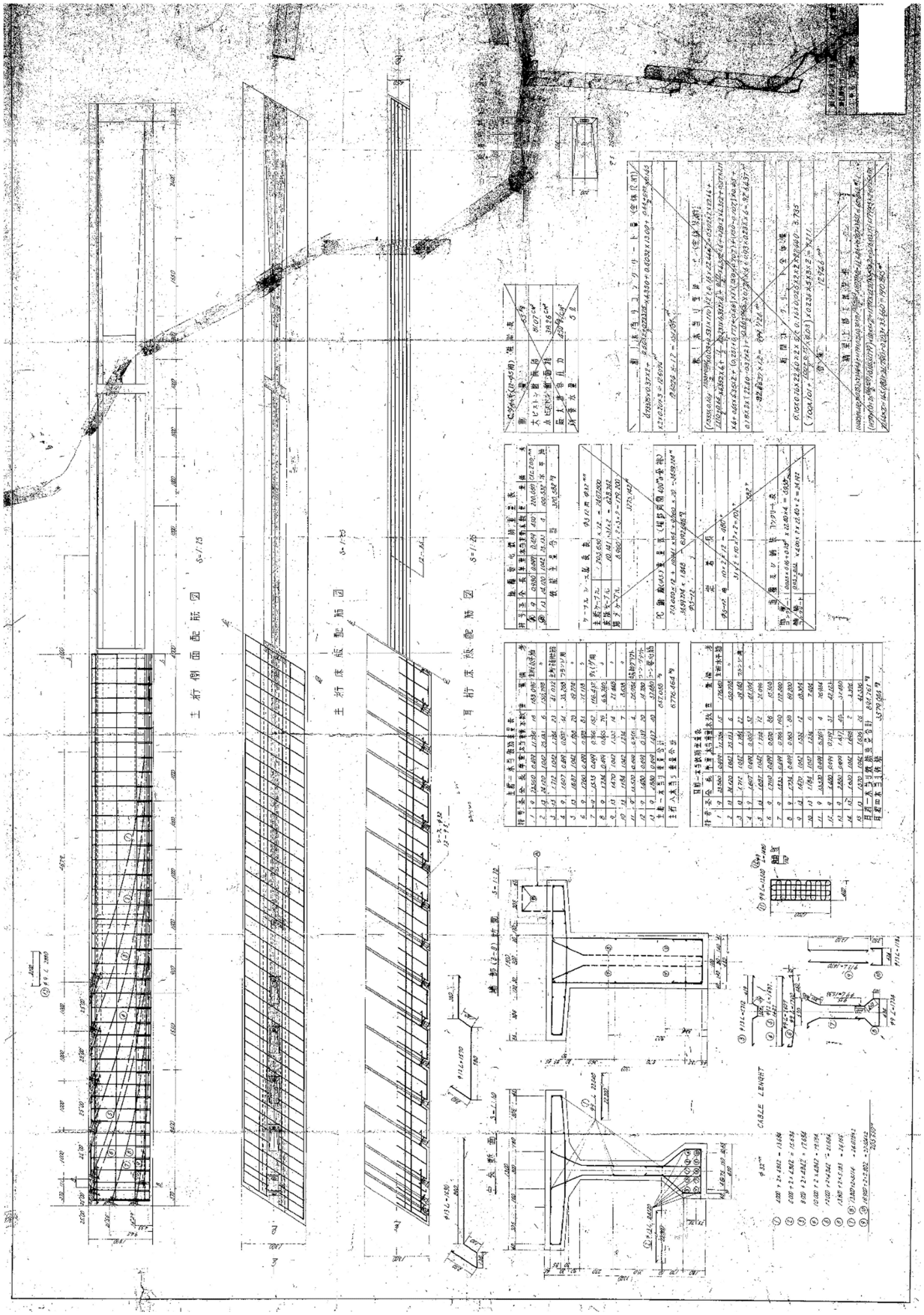
付図 5.2～5.7 に竣工図の既設橋・拡幅橋の一般構造図，主桁配筋図（PC 鋼材配置図）を示す。



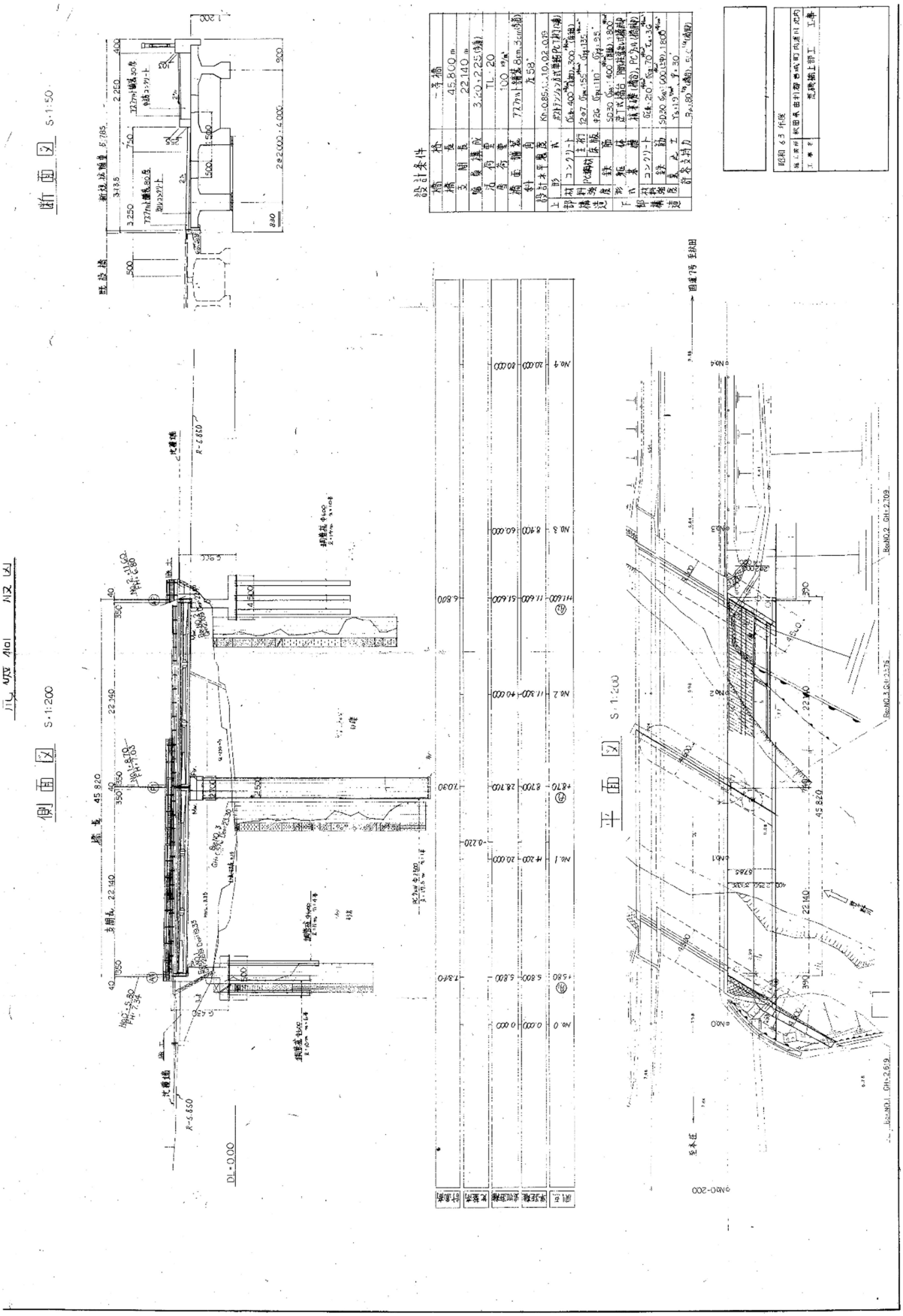
付図 5.2　荒磯橋　一般図：既設橋



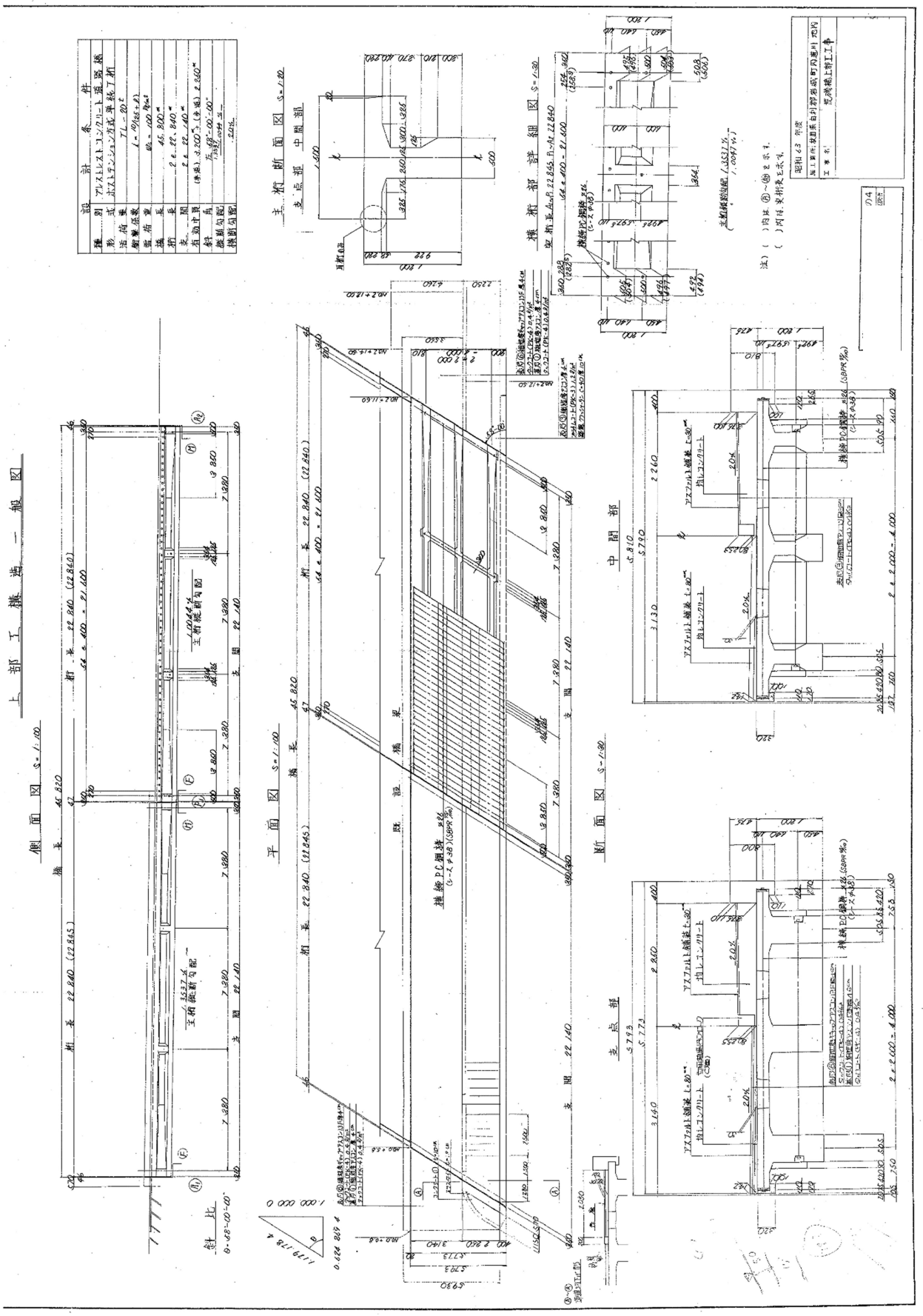
付図 5.3　荒磯橋　一般構造図：既設橋



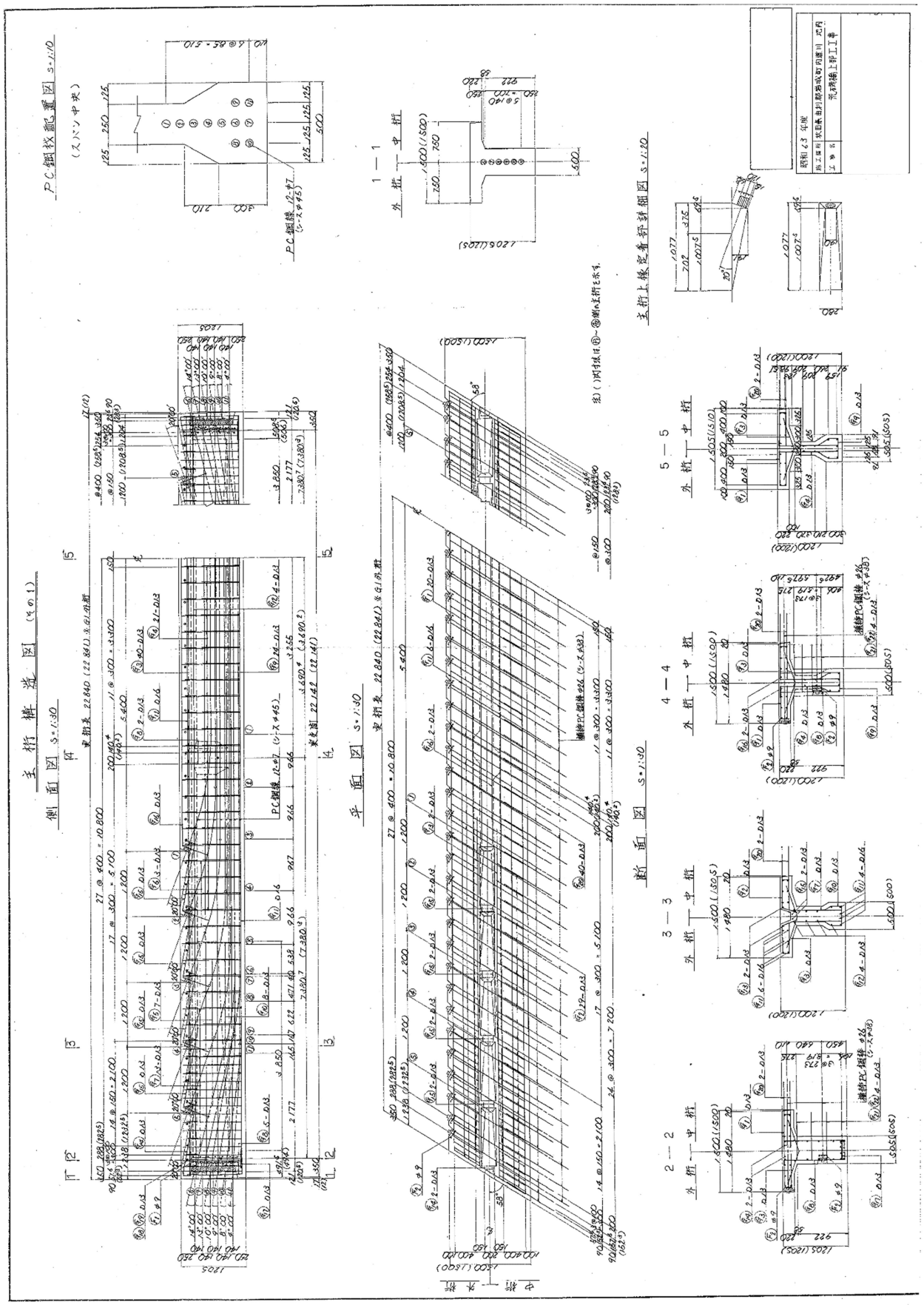
付図 5.4　荒磯橋　主桁配筋図（PC 鋼材配置図）：既設橋



付図 5.5　荒磯橋　一般図：拡幅橋



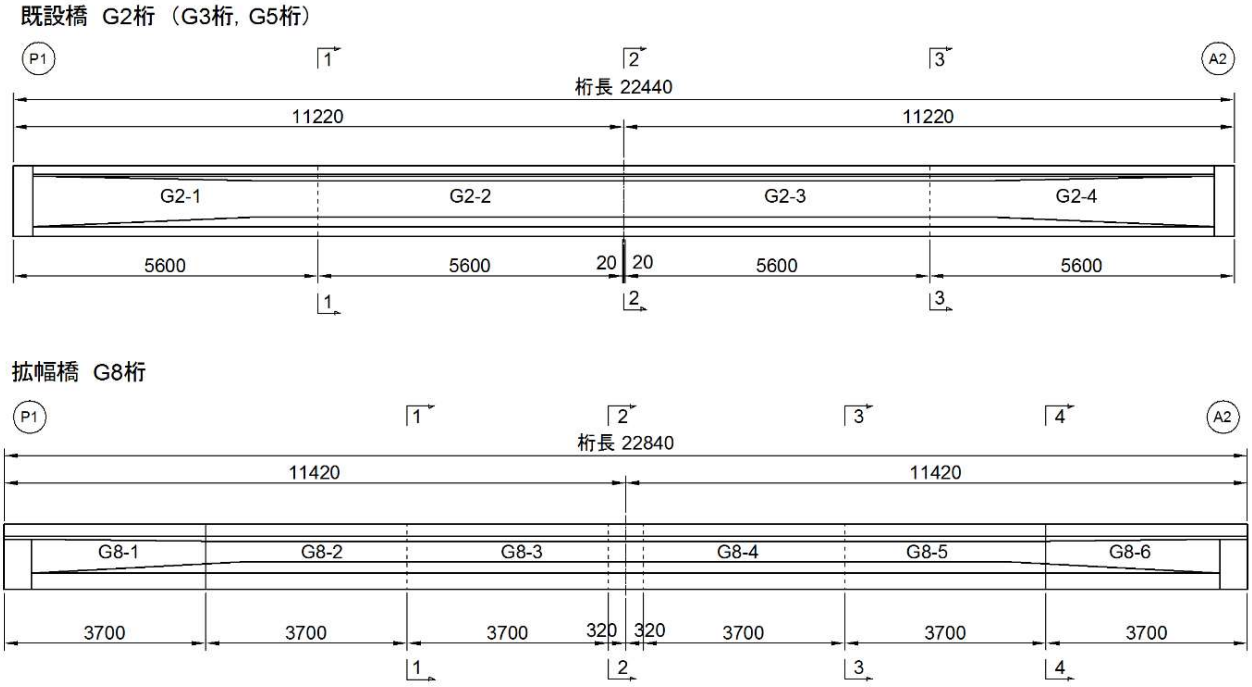
付図 5.6　荒磯橋　一般構造図：拡幅橋



付図 5.7　荒磯橋　主桁配筋図（PC 鋼材配置図）：拡幅橋

３．調査方法（切断面のグラウト充填度の調査）

撤去桁の切断面を目視してグラウトの充填状況の調査を行った。調査する断面は，**付図 5.8** のように P1～A2 径間における既設橋の G2 桁，G3 桁，G5 桁の 3 断面および拡幅桁の G8 桁の 4 断面を対象とした。グラウト充填状況の分類については**付表 5.4** に従って行った。



付図 5.8　グラウト充填状況調査の断面位置図

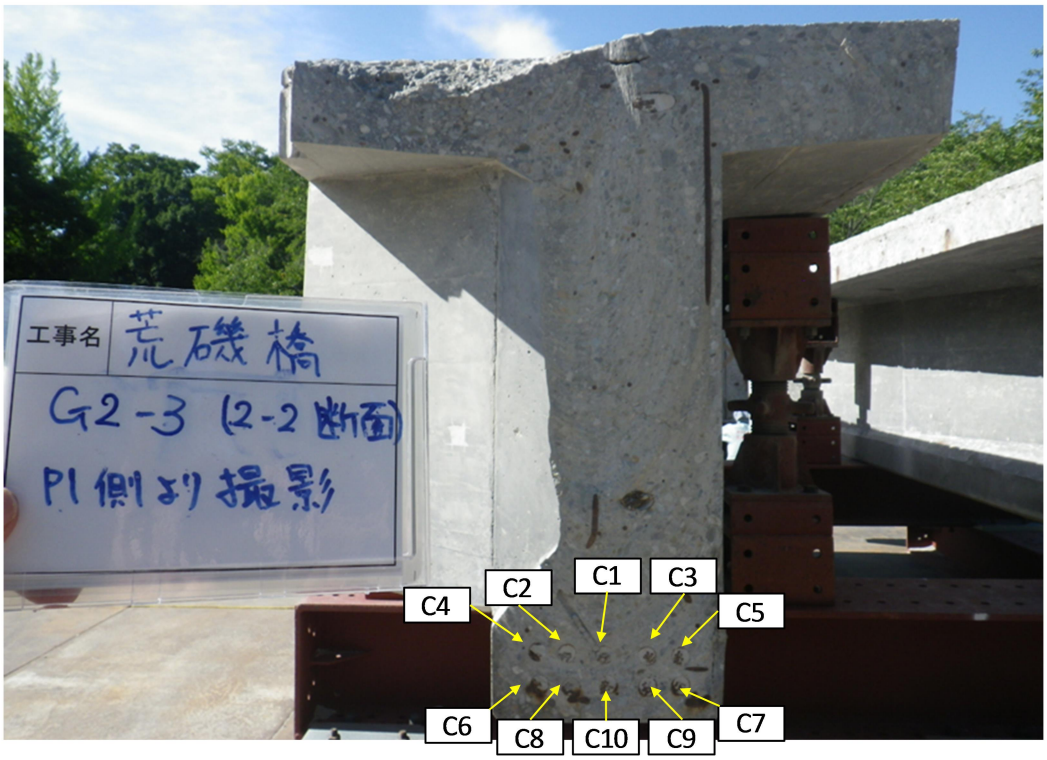
付表 5.4　グラウト充填状況の分類

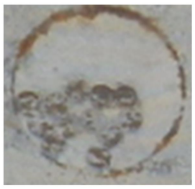
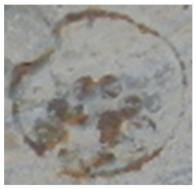
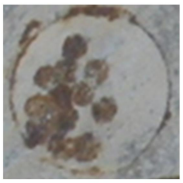
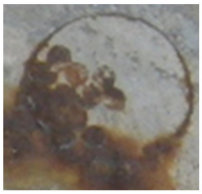
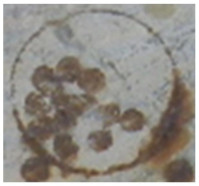
分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの, PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

４．調査結果（切断面のグラウト充填度の調査）

既設橋G2桁の支間中央の2-2断面のグラウト充填状況を**付写真5.1**に示す。すべてのケーブルにおいて充填度は1でグラウトが充填されていた。

撤去桁切断状況写真

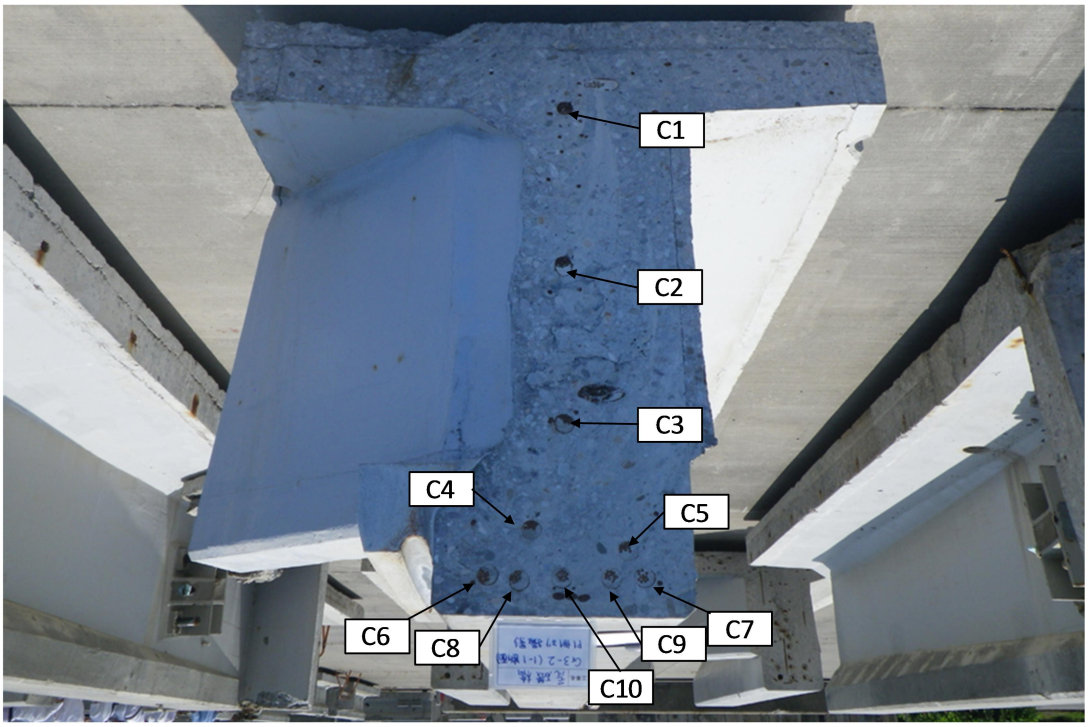


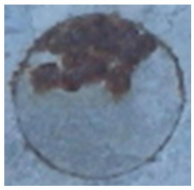
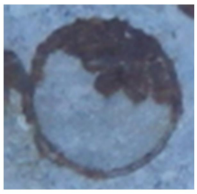
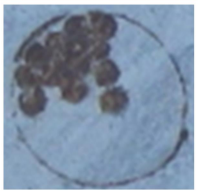
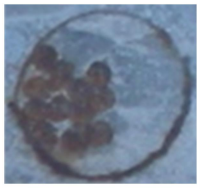
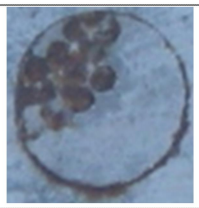
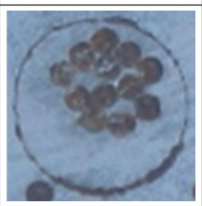
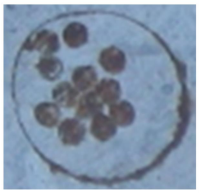
C4	C2	C1	C3	C5	
					
充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	
C6	C8	C10	C9	C7	
					
充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	

付写真 5.1　既設橋 G2 桁の支間中央 2-2 断面のグラウト充填状況

既設橋 G3 桁の 1-1 断面のグラウト充填状況を付写真 5.2 に示す。C1 ケーブルのみグラウトが充填されていない状態であった。これと同様に既設桁 G3 桁の 3-3 断面や既設橋 G5 桁の 1-1 断面，3-3 断面も，C1 ケーブルのみグラウトが充填されていないことが判明した。C1 ケーブルは上縁定着されており，切断面 1-1 の位置がこの定着位置に近い。このことから，上縁定着の定着付近はグラウト充填されにくいと考えられる。

撤去桁切断状況写真

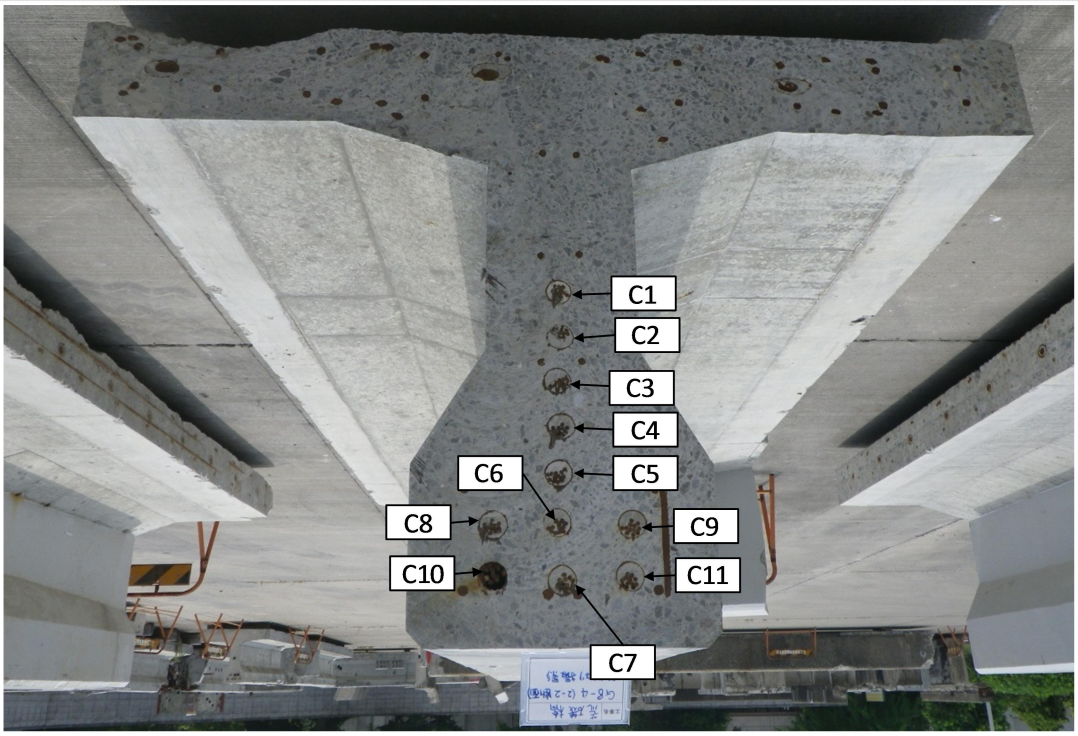


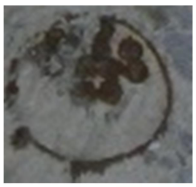
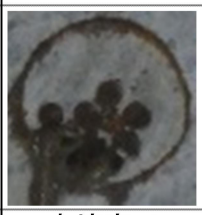
C4	C2	C1	C3	C5	
					
充填度:1	充填度:1	充填度:4	充填度:1	充填度:1	
C6	C8	C10	C9	C7	
					
充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	

付写真 5.2　既設橋 G3 桁の 1-1 断面のグラウト充填状況

拡幅橋 G8 桁の支間中央の 2-2 断面のグラウト充填状況を**付写真 5.3** に示す。C10 ケーブルのみグラウトが充填されていないが，他のケーブルはすべてグラウトが充填されていた。

撤去桁切断状況写真



C1	C2	C3	C4	C5	
					
充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:1	
C8	C6	C9	C10	C7	C11
充填度:1	充填度:1	充填度:1	充填度:4	充填度:1	充填度:1

付写真 5.3　拡幅橋 G8 桁の支間中央 2-2 断面のグラウト充填状況

グラウト充填別の切断面数の集計を付表5.5に示す。また，「上縁定着」と「端部定着」のケーブル配置の異なるグループに分けて，グラウト充填度の割合を付表5.6に示す。「上縁定着」と「端部定着」ではグラウト充填度4の割合はほぼ同じであった。さらに，付表5.5の元データである主桁毎のグラウト充填度を付表5.7，付表5.8に示す。

付表 5.5　グラウト充填度別の切断面数

定着位置	グラウト充填度	主桁番号				小計
		既設橋			拡幅橋	
		G2桁	G3桁	G5桁	G8桁	
上縁定着	1	15	13	13	17	58
	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	4	0	2	2	0	4
端部定着	1	15	15	15	20	65
	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	4	4
小計		30	30	30	41	131

グラウト充填度の説明

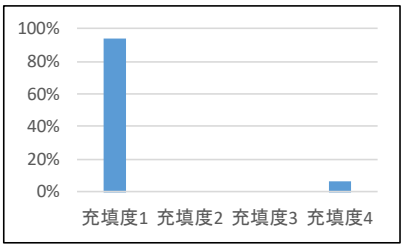
充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

付表 5.6　上縁定着と端部定着の違いによるグラウトの充填状況

上縁定着ケーブルの充填度の集計

充填度	切断面数	割合%
充填度1	58	94%
充填度2	0	0%
充填度3	0	0%
充填度4	4	6%
全数	62	100%

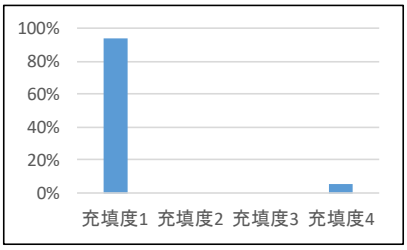
上縁定着ケーブルの充填度のグラフ



端部定着ケーブルの充填度の集計

充填度	切断面数	割合%
充填度1	65	94%
充填度2	0	0%
充填度3	0	0%
充填度4	4	6%
全数	69	100%

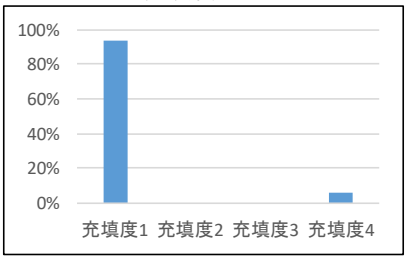
端部定着ケーブルの充填度のグラフ



全ケーブルの充填度の集計

充填度	切断面数	割合%
充填度1	123	94%
充填度2	0	0%
充填度3	0	0%
充填度4	8	6%
全数	131	100%

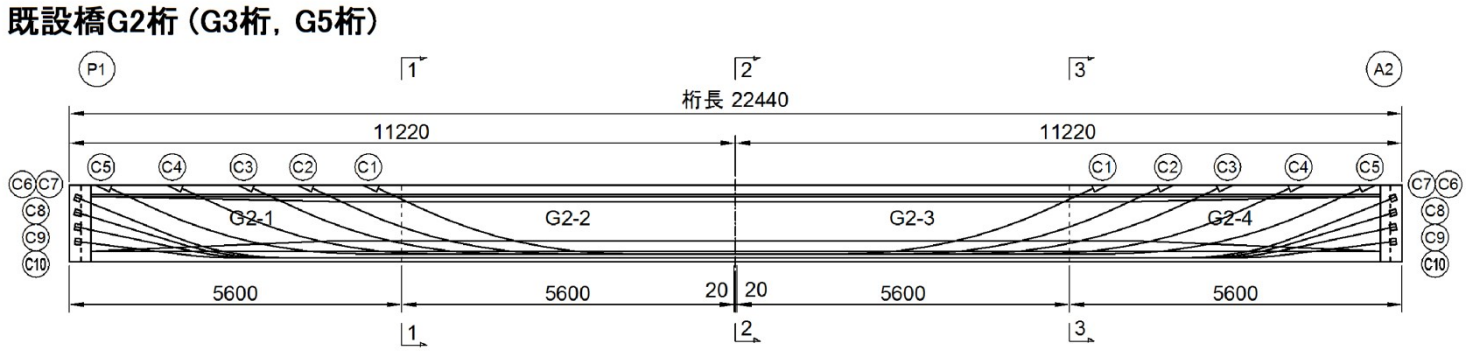
全ケーブルの充填度のグラフ



付表 5.7　既設橋 G2 桁，G3 桁，G5 桁のグラウト充填状況

A橋＿【既設橋G2桁，G3桁，G5桁】＿グラウト充填状況

側 面 図



グラウト充填度

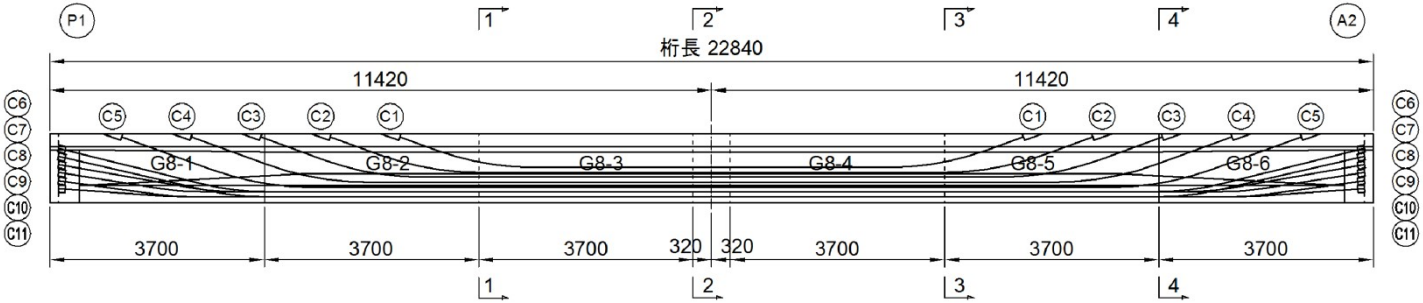
		既設橋G2桁			既設橋G3桁			既設橋G5桁		
断面番号		1	2	3	1	2	3	1	2	3
上縁定着	C1	1	1	1	4	1	4	4	1	4
	C2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
端部定着	C6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C8	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C10	1	1	1	1	1	1	1	1	1

充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

付表 5.8　拡幅橋 G8 桁のグラウト充填状況

A橋＿【拡幅橋G8桁】＿グラウト充填状況

側 面 図



グラウト充填度

		拡幅橋G8桁			
断面番号		1	2	3	4
上縁定着	C1	1	1	1	ー
	C2	1	1	1	ー
	C3	1	1	1	ー
	C4	1	1	1	1
	C5	1	1	1	1
端部定着	C6	1	1	1	1
	C7	1	1	1	1
	C8	1	1	1	1
	C9	1	1	1	1
	C10	4	4	4	4
	C11	1	1	1	1

充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

５．その他の調査（圧縮強度試験・塩化物イオン濃度測定・中性化深さ）

（１）圧縮強度試験

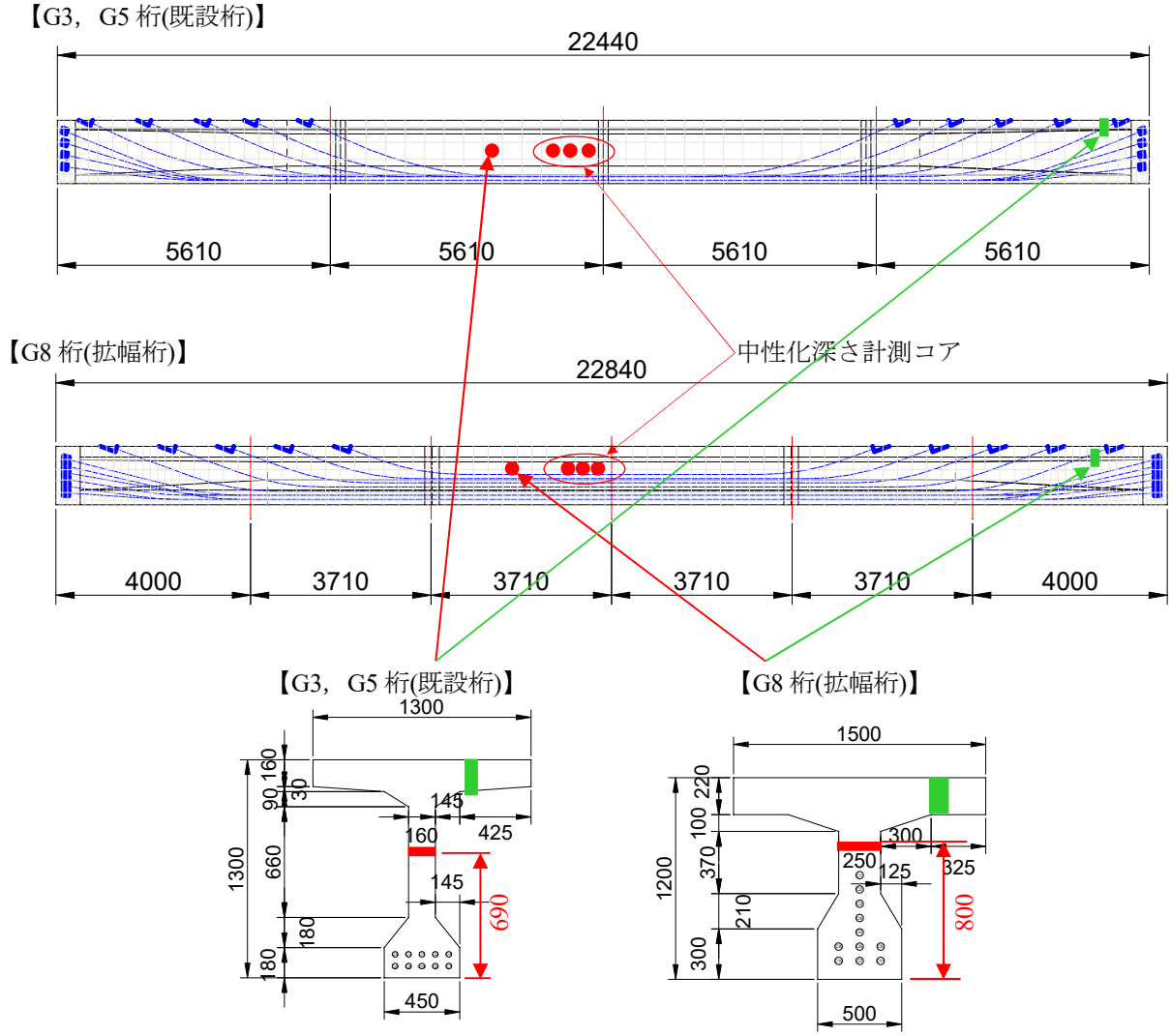
圧縮強度試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠した。コアは、両端をダイヤモンドカッターにて切断した後、研磨による端面処理を行い、試験に供した。圧縮強度の試験結果を**付表 5.9** に示す。圧縮強度はすべての供試体において設計基準強度の 40(N/mm^2)以上を満足していた。一方，静弾性係数はすべて 30(kN/mm^2)以下を示している。圧縮強度が 40(N/mm^2)の場合，静弾性係数は 31(kN/mm^2)程度と推定されるため，静弾性係数は設計値より低い値となっている。

付表 5.9　圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

試料名		圧縮強度		静弾性係数	
対象部材(桁)名		(N/mm^2)	平均	(kN/mm^2)	平均
G3-2	④-1-A	54.8	52.7	27.5	25.7
	④-1-B	55.4		26.4	
	④-1-C	55.7		25.1	
	④-1-D	51.3		26.1	
	④-1-E	46.2		23.4	
G5-2	④-1-A	55.7	57.9	26.1	25.4
	④-1-B	50.8		21.0	
	④-1-C	67.3		29.0	
G8-3	④-1-A	51.5	49.4	21.9	21.0
	④-1-B	49.3		20.1	
	④-1-C	47.4		20.9	

（2）塩化物イオン濃度測定

塩化物イオン濃度を測定するためのコア採取位置を付図 5.9 に示す。



付図 5.9　試験片採取位置

塩化物イオン濃度測定のために採取した試料の概要を付表 5.10 に示す。

付表 5.10　塩化物イオン濃度測定に用いた試料概要

試料名	対象部材(桁)名	試料の種類	コア本数 ()内は試料数	コア径	コア採取位置	着目点
①-1	G3-4、G5-4、G8-6	コンクリートコア	4 (9)	φ 150mm又はφ 50mm	桁端部	桁端定着後打ち部と主桁コンクリートの境界面
①-2	G3-4、G5-4、G8-6	コンクリートコア	3 (9)	φ 100mm	上床版	上縁定着後打ち部と主桁コンクリートの境界面
①-3	G3-2、G5-2、G8-5	コンクリートコア、グラウト	4 (7)	φ 150mm	グラウト未充填部	未充填グラウトとそのシース周辺のコンクリート
②	G3-2、G5-2、G8-3	コンクリートコア	3 (26)	φ 100mm	ウェブ	ウェブコンクリート

試験は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法（9.塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法)」に準拠した。また、単位容積質量（絶乾単位容積質量）は、社団法人 セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」（セメント協会法）により実施した。

試料のスライス位置は、以下の条件とした。

(1) ①-1 のコアについては、主桁コンクリートと桁端定着部後打ちコンクリートとの界面から主桁側に 2 深度、後打ち側に 1 深度の計 3 深度まで試料を採取した。なお、スライス厚さを 20mm とした。

(2) ①-2 のコアについては、上縁定着部後打ちコンクリートと主桁コンクリートの界面から主桁側に 3 深度まで試料を採取した。なお、スライス厚さを 10mm とした。

(3) ①-3 のコアについては、シース管内部のグラウトから試料を採取し、また、シース管とコンクリートの界面から海側に 1 深度まで試料を採取した。ただし、G8-5 C-10 のコアについては、スライス試料のみ採取した。なお、スライス厚さを 10mm とした。

(4) ②のコアについては、海側面および山側面からそれぞれ 4 深度（計 8 深度）または 5 深度（計 10 深度）まで試料を採取した。なお、スライス厚さを 20mm とした。

塩化物イオン濃度測定結果を**付表 5.11～付表 5.14** に示す。

付表 5.11　塩化物イオン含有量試験結果（①-1 コア）

試料名	対象部材(桁)名	深度 (mm)	単位容積質量(kg/m^3) 表乾	単位容積質量(kg/m^3) 絶乾	Cl^- (mass%)	Cl^- (kg/m^3)
①-1	G3-4	後打ち0～20	－	－	0.16 (0.157)	－
		主桁0～20	2360	2200	0.08 (0.082)	1.80
		主桁20～40			0.07 (0.074)	1.63
	G5-4	後打ち0～20	－	－	0.04 (0.040)	－
		主桁0～20	2370	2210	0.04 (0.043)	0.95
		主桁20～40			0.03 (0.028)	0.62
	G8-6	後打ち0～20	－	－	0.07 (0.070)	－
		主桁0～20	2280	2090	0.07 (0.070)	1.46
		主桁20～40			0.04 (0.043)	0.90

注）塩化物イオン量試験の結果は絶乾ベース。( ) 内は単位容積質量当たりの塩化物イオン量換算に使用した値である。　Cl^- (kg/m^3) ＝ 絶乾単位容積質量 (kg/m^3) × Cl^- (mass%) ÷ 100

付表 5.12　塩化物イオン含有量試験結果（①-2 コア）

試料名	対象部材(桁)名	深度 (mm)	単位容積質量（kg/m^3） 表乾	単位容積質量（kg/m^3） 絶乾	Cl^- (mass%)	Cl^- (kg/m^3)
①-2	G3-4	0～10	2380	2230	0.08 (0.082)	1.83
		10～20			0.05 (0.053)	1.18
		20～30			0.05 (0.046)	1.03
	G5-4	0～10	2370	2220	0.04 (0.042)	0.93
		10～20			0.02 (0.019)	0.42
		20～30			0.01 (0.015)	0.33
	G8-6	0～10	2340	2200	0.05 (0.047)	1.03
		10～20			0.04 (0.040)	0.88
		20～30			0.03 (0.028)	0.62

注）塩化物イオン量試験の結果は絶乾ベース。（ ）内は単位容積質量当たりの塩化物イオン量換算に使用した値である。　Cl^- (kg/m^3) ＝ 絶乾単位容積質量 (kg/m^3) × Cl^- (mass%) ÷ 100

付表 5.13　塩化物イオン含有量試験結果（①-3 コアおよびグラウト）

試料名	対象部材(桁)名	採取位置	単位容積質量（kg/m^3） 表乾	単位容積質量（kg/m^3） 絶乾	Cl^- (mass%)	Cl^- (kg/m^3)
①-3	G3-2	海側のシース界面付近	2400	2270	0.01 (0.011)	0.25
		グラウト内	－	－	0.01 (0.007)	－
	G5-2	海側のシース界面付近	2400	2260	0.01 (0.008)	0.18
		グラウト内	－	－	0.00 (0.005)	－
	G8-5 C-1	海側のシース界面付近	2310	2150	0.01 (0.014)	0.30
		グラウト内	－	－	0.01 (0.007)	－
	G8-5 C-10	海側のシース界面付近	2310	2150	0.01 (0.010)	0.22

注）塩化物イオン量試験の結果は絶乾ベース。（ ）内は単位容積質量当たりの塩化物イオン量換算に使用した値である。　Cl^- (kg/m^3) ＝ 絶乾単位容積質量 (kg/m^3) × Cl^- (mass%) ÷ 100

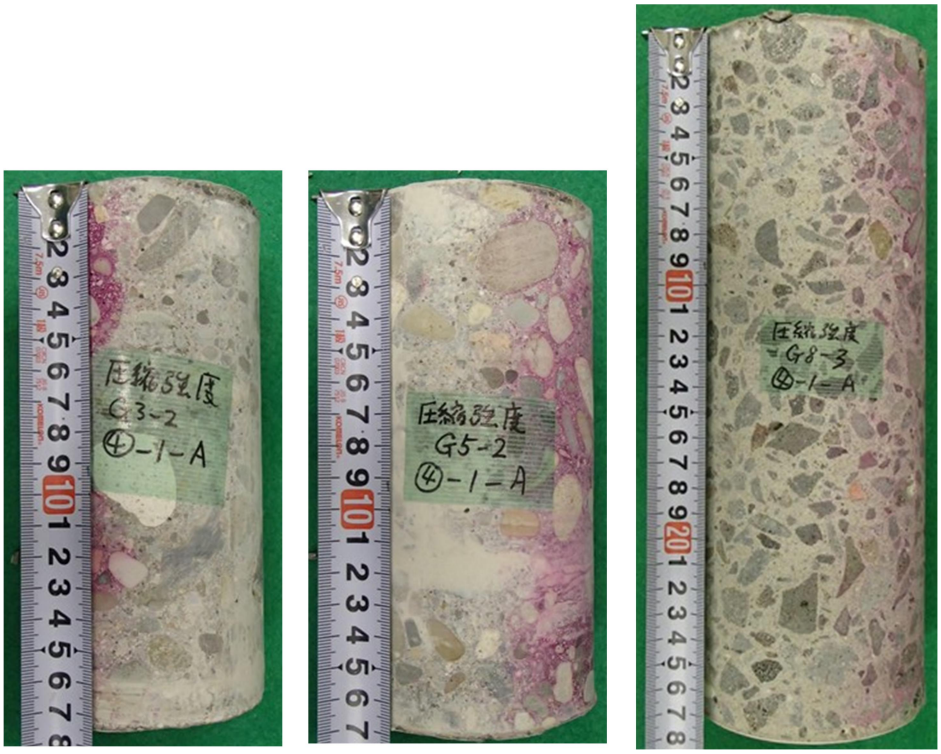
付表 5.14　塩化物イオン含有量試験結果(②コア)

試料名	対象部材(桁)名	深度 (mm)	単位容積質量(kg/m³) 表乾	単位容積質量(kg/m³) 絶乾	Cl^- (mass%)	Cl^- (kg/m³)
②	G3-2海側面	0～20	2360	2210	0.24 (0.237)	5.24
		20～40			0.32 (0.317)	7.01
		40～60			0.16 (0.159)	3.51
		60～80			0.05 (0.053)	1.17
	G3-2山側面	0～20			0.19 (0.193)	4.27
		20～40			0.20 (0.201)	4.44
		40～60			0.10 (0.101)	2.23
		60～80			0.04 (0.038)	0.84
	G5-2海側面	0～20	2400	2270	0.27 (0.275)	6.24
		20～40			0.25 (0.247)	5.61
		40～60			0.16 (0.164)	3.72
		60～80			0.06 (0.059)	1.34
	G5-2山側面	0～20			0.07 (0.070)	1.59
		20～40			0.02 (0.020)	0.45
		40～60			0.00 (0.003)	0.07
		60～80			0.00 (0.003)	0.07
	G8-3海側面	0～20	2350	2200	0.08 (0.075)	1.65
		20～40			0.07 (0.065)	1.43
		40～60			0.04 (0.036)	0.79
		60～80			0.02 (0.022)	0.48
		80～100			0.01 (0.013)	0.29
	G8-3山側面	0～20			0.13 (0.126)	2.78
		20～40			0.16 (0.157)	3.45
		40～60			0.08 (0.082)	1.80
		60～80			0.04 (0.041)	0.90
		80～100			0.03 (0.026)	0.57

注）塩化物イオン量試験の結果は絶乾ベース。( ) 内は単位容積質量当たりの塩化物イオン量換算に使用した値である。　Cl^- (kg/m³) ＝ 絶乾単位容積質量 (kg/m³) × Cl^- (mass%) ÷ 100

（3）中性化深さ

中性化深さの測定結果を**付写真 5.4** に示す。測定の結果，G3 桁は最大 8.0mm 程度（海側）であり，G5 桁は最大 2.0mm（海側）程度，G8 桁は概ね 0.0mm であった。G3 桁は比較的中性化が進行しているが，この結果は H10 年に実施された結果と同様（平均深さ 4.4mm）である。



G3 桁（G3-2）　　G5 桁（G5-2）　　G8 桁（G8-3）

付写真 5.4　中性化深さ

付録６　和瀬川橋の解体調査

１．はじめに 140

２．橋梁緒元 140

３．調査方法 144
　３．１　切断面のグラウト充填度の調査 144
　３．２　切断面の PC 鋼材の引込み量の調査 145
　３．３　撤去桁解体調査 146

４．調査結果 147
　４．１　切断面のシースかぶりの調査結果 147
　４．２　切断面の断面形状の調査結果 148
　４．３　切断面のグラウト充填度の調査 149
　４．４　切断面の PC 鋼材の引込み量の調査結果 156
　４．５　撤去桁解体調査結果 156
　４．６　調査結果のまとめ 165

１．はじめに

和瀬川橋は静岡県静岡市に位置する重交通のある道路橋である。特に下り線は駿河湾に近接することから塩害を受け，過去に断面修復や保護塗装がなされてきた。また，最も海側の外桁 G4 桁（**付図 6.1 参照**）に複数の曲げひび割れが発生し，他の桁より支間中央が 30～40mm のたわみが確認され，2011 年に外ケーブル補強が実施されることになった（**付写真 6.1**）。外ケーブル補強後，再度曲げひび割れが生じ，2014 年に撤去されることになった。撤去時の G4 桁の支間中央付近の曲げひび割れ状況を**付写真 6.2** に示す。撤去後の主桁の切断面からグラウトの充填調査を行い，G4 桁のたわみの原因を探った。さらに G4 桁と G3 桁の一部を土木研究所に搬入し，コンクリートの物性や PC 鋼材の引込み量や腐食量を測定して 2 つの桁の比較を行った。

２．橋梁諸元

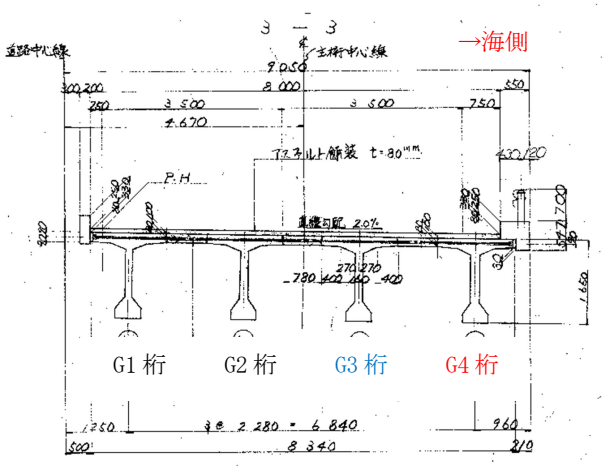
本橋の橋梁諸元を**付表 6.1** に示す。調査の対象は海側の下り線の主桁とする。また竣工図面からわかる主桁の PC 鋼材データを**付表 6.2** に示す。

付表 6.1　橋梁諸元

架設地	静岡県静岡市（海岸より 0.3km）
構造種別	PC 単純ポストテンション方式 T 桁橋
橋　　長	30.00m
支 間 長	29.25m
有効幅員	上り線 7.4m，下り線 8.0m
荷重	TL-20
竣工年次	上り線 1971 年，下り線 1978 年
実施年次	2014 年　撤去後

表 6.2　主桁の PC 鋼材データ

定着工法	不明
使用材料	PC 鋼線 12-φ7(mm)
上縁定着	あり
シース径	φ45(mm)
シースかぶり	下面 62.5(mm)，側面 57.5(mm)

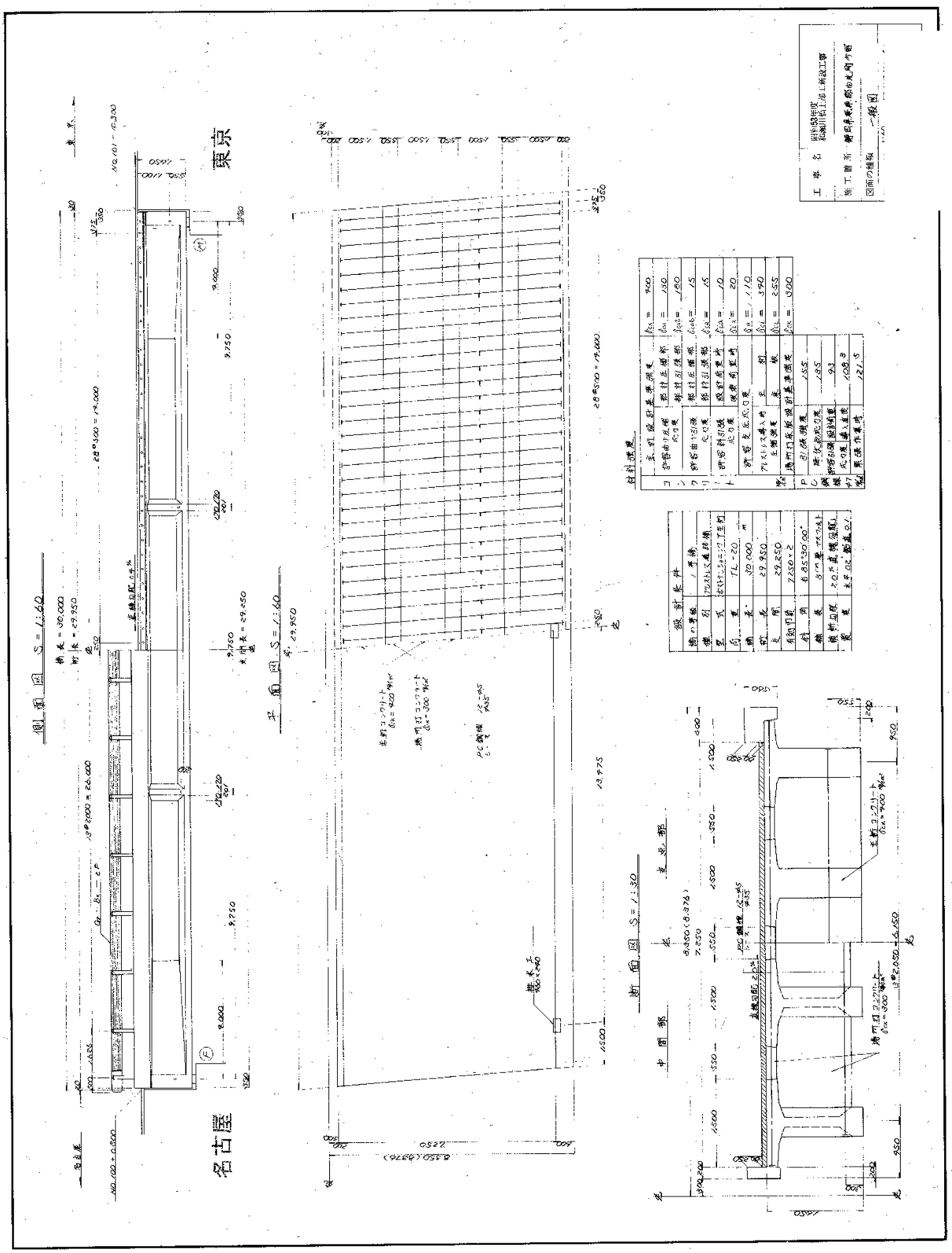


付図 6.1　和瀬川橋下り線の断面図

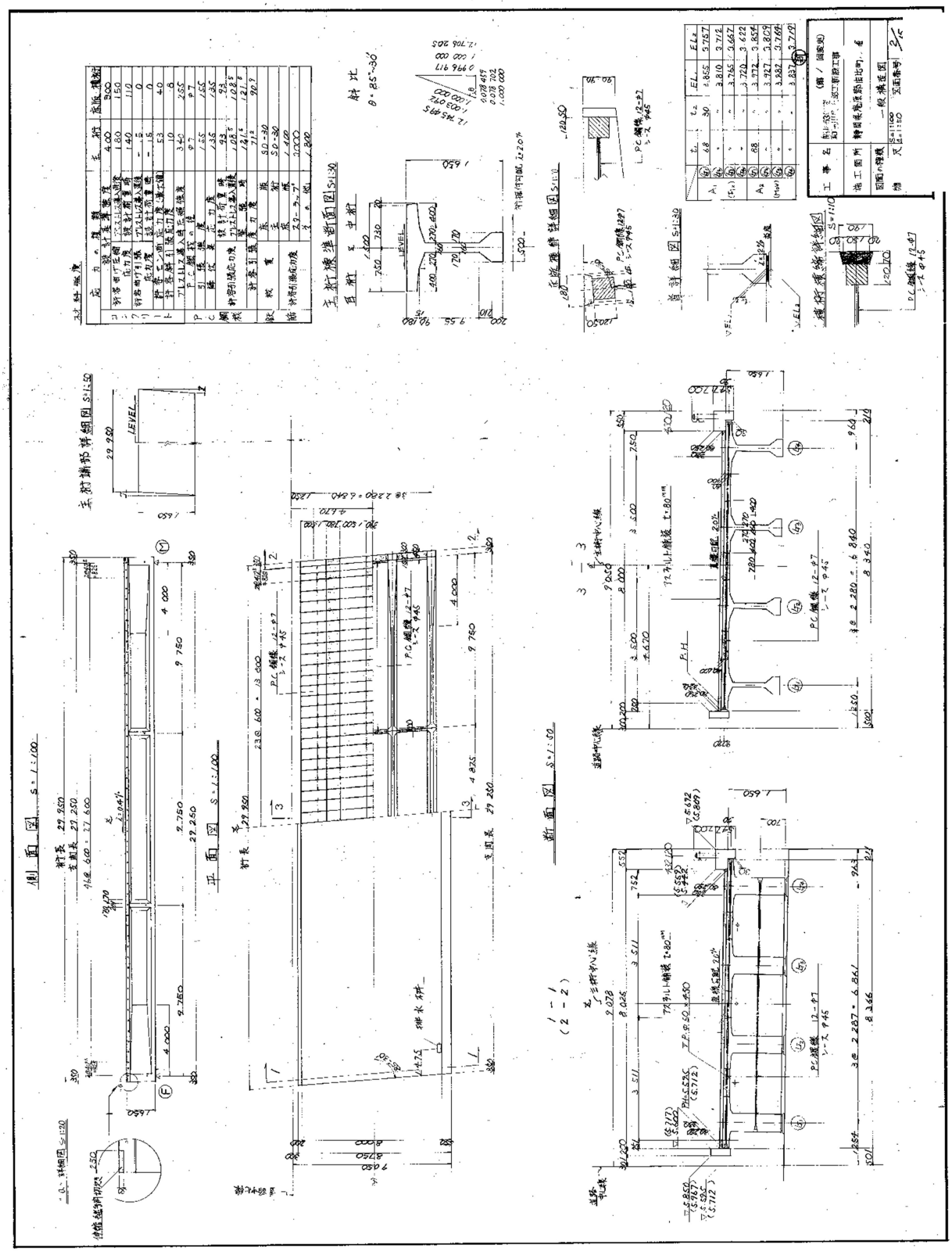
付写真 6.1　外ケーブル緊張状況

付写真 6.2　G4 桁支間中央付近の撤去桁のひび割れ状況

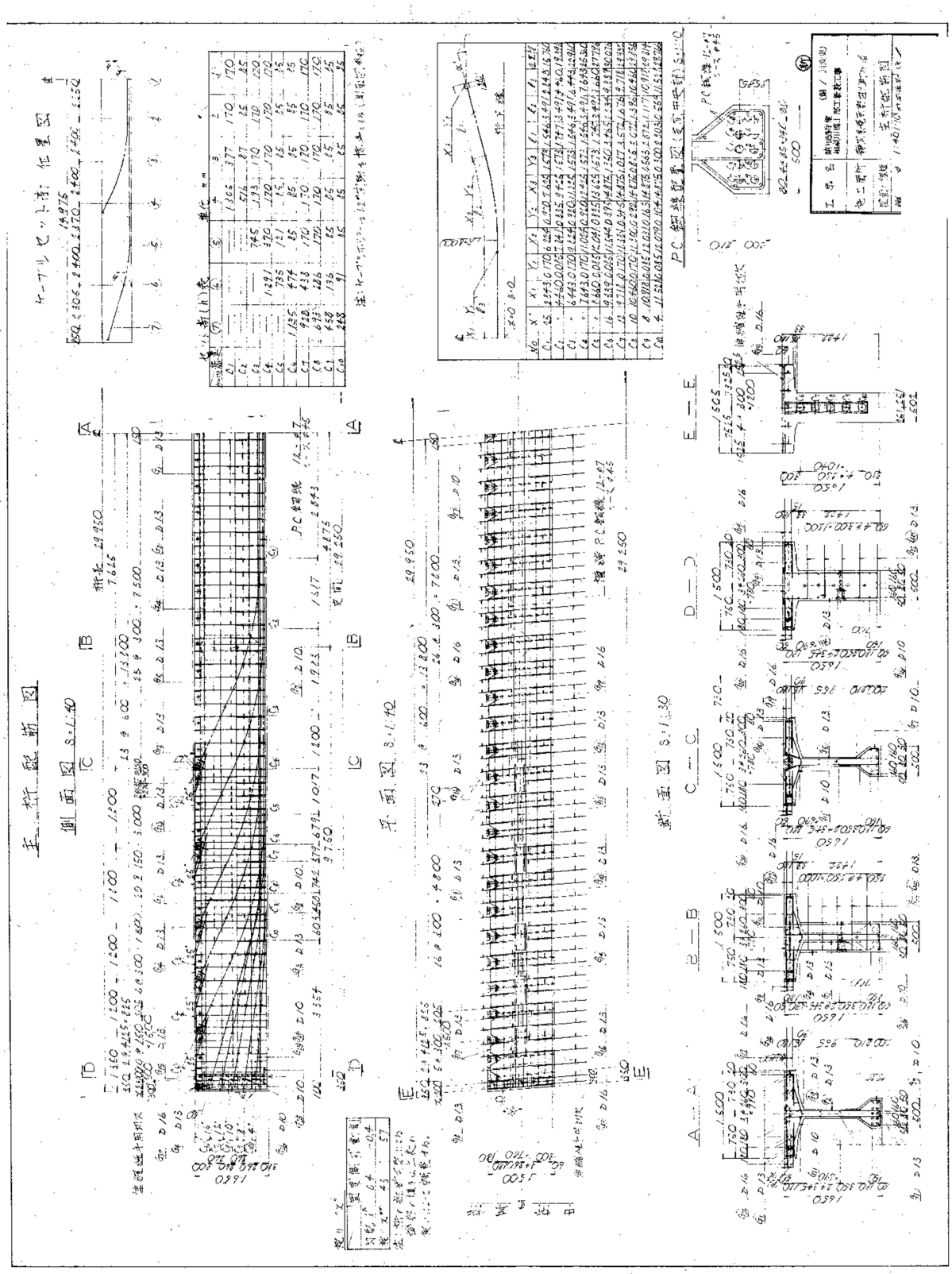
付図 6.2～6.4 に竣工図の一般図，一般構造図，主桁配筋図（PC 鋼材配置図）を示す。



付図 6.2　和瀬川橋　一般図



付図 6.3　和瀬川橋　一般構造図

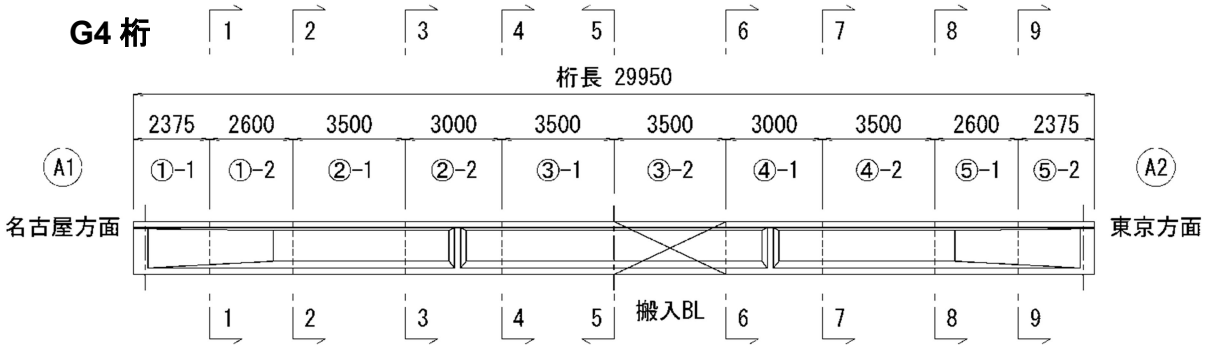


付図 6.4　和瀬川橋　主桁配筋図（PC 鋼材配置図）

３．調査方法

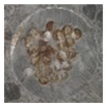
３．１　切断面のグラウト充填度の調査

撤去桁の切断面を目視してグラウトの充填状況の調査を行った。調査する断面は G1 桁～G4 桁の付図 6.5 のような 9 ヶ所を対象として，合計 36 断面とした。グラウト充填状況の分類については付表 6.3 に従って行った。また，切断面における主桁断面形状とシース位置および撤去切出し部材の切断長についてスケールを用いて測定した。



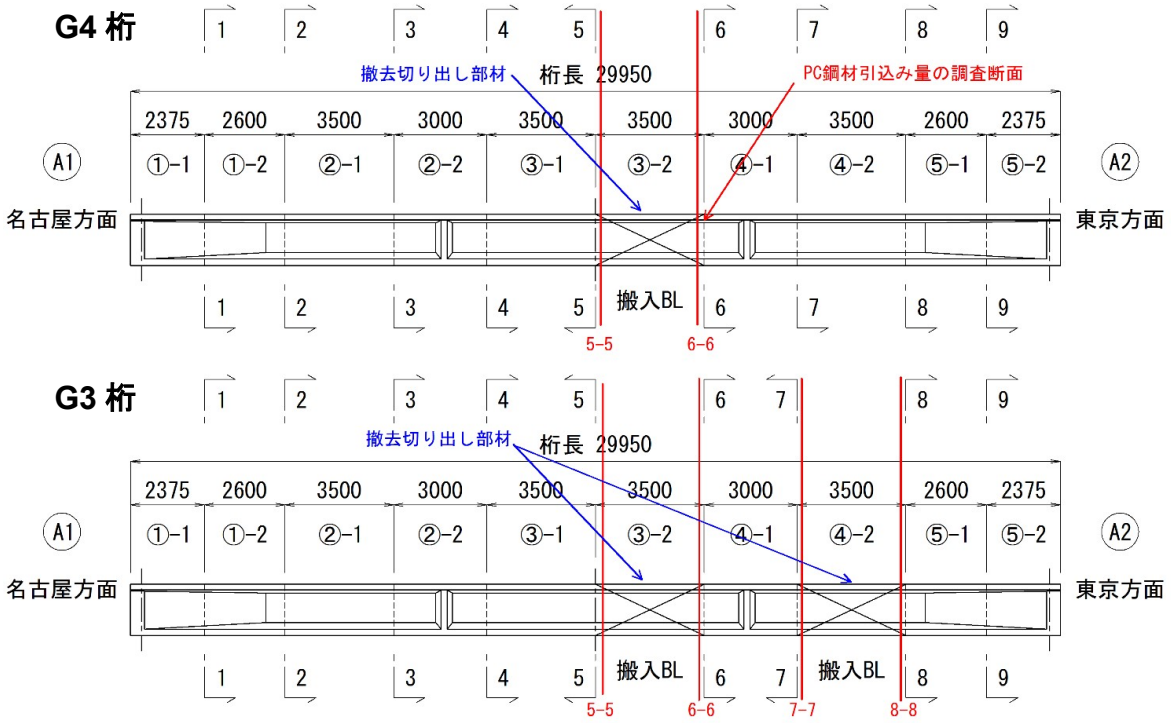
付図 6.5　グラウト充填状況調査の断面位置図（G4 桁の例）

付表 6.3　グラウト充填状況の分類

分類		グラウト充填状況	補足
充填	充填度 1	シース内が完全にグラウトで充填されている。 	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
	充填度 2	若干の空隙は見られるものの, PC 鋼材がすべてグラウトで覆われている。	
充填不足	充填度 3	シース内のグラウトの充填が不充分であり，PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
未充填	充填度 4	シース内にグラウトが充填されてなく，PC 鋼材が完全に露出している。	

３．２　切断面の PC 鋼材の引込み量の調査

PC 鋼材の引込み量は切断面のシースのグラウト表面から PC 鋼材表面までの距離として，ノギス（最小表示 0.01mm）により計測した。この引込み量が大きいほどプレストレスが大きいと判断することができる。引込み量を調査する切断面は，**付図 6.6** に示す G4 桁・G3 桁の撤去切出し部材の 3 体の切断面（両面）として，合計 6 断面を対象とした。



付図 6.6　PC 鋼材引込量調査の断面位置図（G4 桁・G3 桁）

付写真 6.3　PC 鋼材引込量の測定状況

３．３　撤去桁解体調査

曲げひび割れが複数発生し, たわみが生じた G4 桁とこれと隣接していた G3 桁を土木研究所へ搬入して解体調査を行った。調査項目は以下のとおりである。切り出して搬入した部分は，付図 6.6 のとおり，G4 桁の③-2 と G3 桁の③-2，④-2 の 3 つである。

３．３．１　コンクリート物性の調査（圧縮強度・割裂強度・塩化物濃度試験・中性化深さ）

（１）圧縮強度試験・割裂強度試験

3 つの各切り出し部材からコア供試体を採取して，圧縮強度試験と割裂強度試験を行った。コアの寸法は内径φ73.5mm とし，長さは直径の 2 倍程度とした。

（２）塩化物濃度試験

各切り出し部材のうち G4 桁の③-2 と G3 桁の③-2 からコア供試体を採取して塩化物濃度を測定した。コアの寸法は内径φ45mm×L100mm として，スライス位置は表面から 5 等分(1 スライス 20mm)とした。

（３）中性化深さ

（１）の割裂強度試験用のコアについて中性化深さを測定した。

３．３．２　PC 鋼材の腐食状況

PC 鋼材の腐食状況を確認するため，PC 鋼材の引張試験と断面減少率を測定する。断面減少率は断面積比と重量比の 2 つの方法で測定した。PC 鋼材の採取は切り出し部材のシース内の素線を採取しているが，その選択はグラウト充填度が異なるシースとした。素線はシース内で錆が著しいものを選択した。

４．調査結果

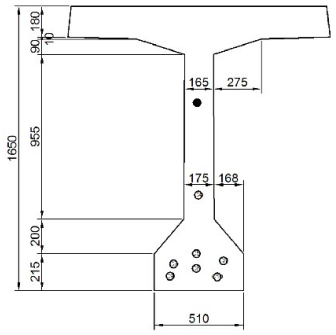
４．１　切断面のシースかぶりの調査結果

切断面の調査時の撤去桁の全景を**付写真 6.4** に示す。調査結果より集計したシースかぶりの測定結果を**付表 6.4** に示す。桁端部の断面 1 と 9 ではウェブ厚が大きくなり，シースも曲げ上がることから，かぶりは十分大きくなるため，本表からは除外している。**付表 6.4** より，かぶりの測定値は最小で 38(mm)の箇所も存在するが，概ねシース径の 45(mm)以上は確保されていることがわかった。

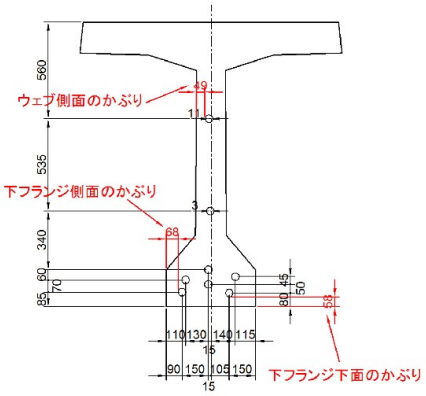
付写真 6.4　撤去桁の全景

付表 6.4　シースかぶりの測定結果

断面形状の測定寸法
（G4桁の2-2断面）



シース位置の測定寸法
（G4桁の2-2断面）



G4桁　(mm)

項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
ウェブ側面	57.5	－	49	48	－	－	－	62	62	－	62	48	55	＋5	－10	－2
下フランジ側面	57.5	－	68	48	58	53	43	73	78	－	78	43	60	＋20	－15	＋2
下フランジ下面	62.5	－	58	58	53	68	53	58	63	－	68	53	58	＋5	－10	－4

G3桁　(mm)

項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
ウェブ側面	57.5	－	55	67	－	－	－	65	51	－	67	51	59	＋9	－7	＋2
下フランジ側面	57.5	－	53	63	63	58	53	58	73	－	73	53	60	＋15	－5	＋2
下フランジ下面	62.5	－	63	53	58	63	63	63	53	－	63	53	59	±0	－10	－4

G2桁　(mm)

項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
ウェブ側面	57.5	－	63	40	－	－	－	39	54	－	63	39	49	＋5	－19	－9
下フランジ側面	57.5	－	38	43	58	58	58	73	73	－	73	38	57	＋15	－20	－1
下フランジ下面	62.5	－	73	58	68	68	68	68	68	－	73	58	67	＋10	－5	＋4

G1桁　(mm)

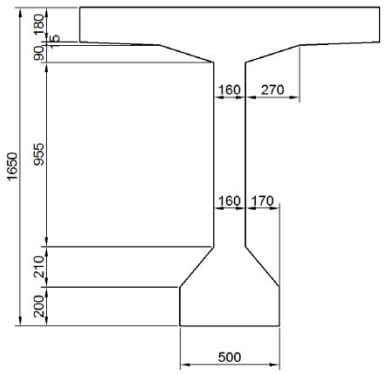
項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
ウェブ側面	57.5	－	59	55	－	－	－	57	60	－	60	55	57	＋2	－3	±0
下フランジ側面	57.5	－	58	58	58	48	43	38	63	－	63	38	52	＋5	－20	－6
下フランジ下面	62.5	－	63	63	68	63	63	68	58	－	68	58	63	＋5	－5	＋1

４．２　切断面の断面形状の調査結果

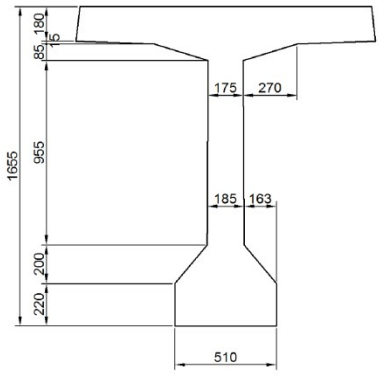
切断面の断面形状の測定結果を**付表 6.5** に示す。ウェブ厚の測定値は上部と下部の測定結果の平均値としている。**付表 6.5** の測定結果より，すべての主桁において測定値と設計値の差は-1～+26(mm)の範囲であり，大きな問題はなかった。ただし，G4 桁のウェブ厚は他の桁と比較して 10(mm)程度小さくなっており，断面性能がやや劣ると考えられる。

付表 6.5　断面形状の測定結果

設計寸法



測定寸法（G4桁の5-5断面）



G4桁　(mm)

項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
桁高	1650	1645	1650	1655	1650	1655	1645	1665	1665	1660	1665	1645	1654	＋15	－5	＋4
上フランジ厚	180	160	180	185	180	180	185	180	180	190	190	160	180	＋10	－20	±0
ウェブ厚	160	－	170	160	175	180	168	175	178	－	180	160	172	＋20	±0	＋12
下フランジ幅	500	505	510	500	505	510	505	510	510	505	510	500	507	＋10	±0	＋7

G3桁　(mm)

項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
桁高	1650	1645	1650	1665	1660	1660	1675	1665	1655	1655	1675	1645	1659	＋25	－5	＋9
上フランジ厚	180	185	180	190	200	195	190	195	195	185	200	180	191	＋20	±0	＋11
ウェブ厚	160	－	190	190	190	175	188	193	178	－	192.5	175	186	＋33	＋15	＋26
下フランジ幅	500	520	520	535	525	515	515	525	520	530	535	515	523	＋35	＋15	＋23

G2桁　(mm)

項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
桁高	1650	1655	1655	1660	1655	1655	1655	1655	1645	1675	1675	1645	1657	＋25	－5	＋7
上フランジ厚	180	190	180	190	190	180	185	180	185	190	190	180	186	＋10	±0	＋6
ウェブ厚	160	－	178	175	190	195	185	185	180	－	195	175	184	＋35	＋15	＋24
下フランジ幅	500	520	510	505	510	515	525	525	515	520	525	505	516	＋25	＋5	＋16

G1桁　(mm)

項目	設計値	測定値												設計値と測定値の差		
		断面番号									最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9						
桁高	1650	1655	1660	1660	1655	1670	1670	1655	1645	1665	1670	1645	1659	＋20	－5	＋9
上フランジ厚	180	170	180	185	180	185	175	180	175	185	185	170	179	＋5	－10	－1
ウェブ厚	160	－	183	185	180	185	178	173	175	－	185	172.5	180	＋25	＋13	＋20
下フランジ幅	500	520	510	520	515	510	505	505	515	510	520	505	512	＋20	＋5	＋12

４．３　切断面のグラウト充填度の調査

G4桁とG3桁の支間中央(5-5断面)のグラウト充填状況を**付写真6.5・付写真6.6**に示す。また各ケーブルのグラウト充填度別の切断面数を**付表6.6**に示す。**付写真6.5・付表6.6**から，曲げひび割れが複数発生したG4桁のグラウト充填度は良好であることがわかる。一方でG3桁はグラウト充填度4が数断面あり，G4桁よりもグラウトの充填が不足していることがわかる。このことから，G4桁の曲げひび割れの原因はグラウト充填不足によるものでないと判断される。

付写真 6.5　G4 桁の支間中央 5-5 断面のグラウト充填状況

付写真 6.6　G3 桁の支間中央 5-5 断面のグラウト充填状況

付表 6.6　グラウト充填度別の切断面数

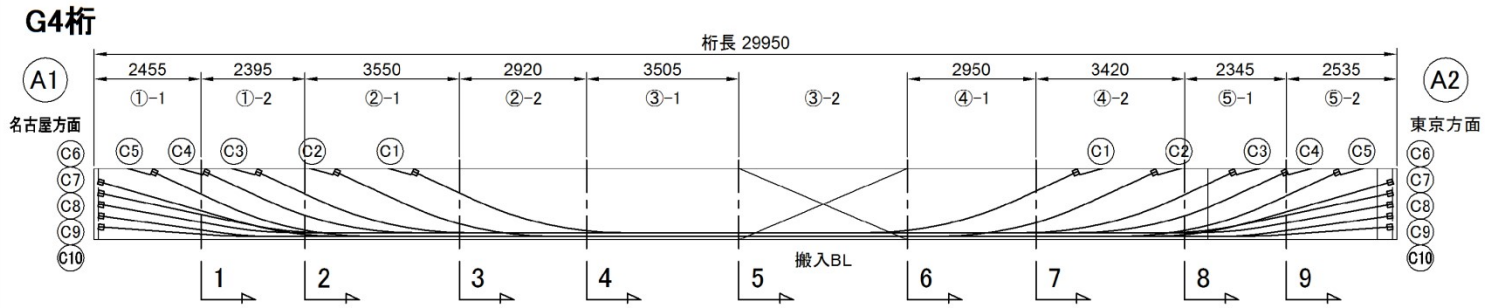
定着位置	グラウト充填度	主桁番号				小計
		G4桁	G3桁	G2桁	G1桁	
上縁定着	1	32	26	28	30	116
	2	1	4	0	2	7
	3	0	0	0	1	1
	4	0	3	5	0	8
端部定着	1	45	35	45	44	169
	2	0	2	0	0	2
	3	0	4	0	1	5
	4	0	4	0	0	4
小計		78	78	78	78	312

グラウト充填度の説明
充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

付表 6.7　G4 桁のグラウト充填状況

W橋＿【G4桁】＿グラウト充填状況

側　面　図



グラウト充填度

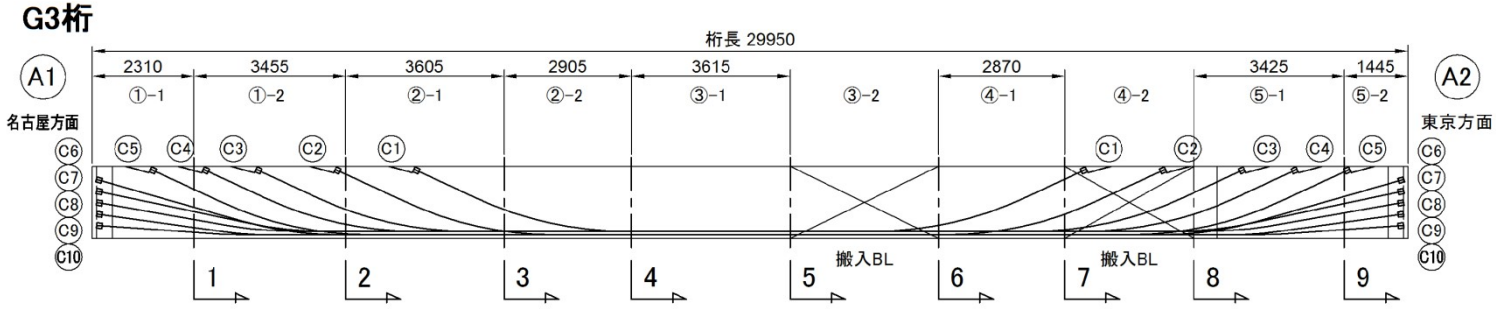
断面番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
上縁定着	C1	―	―	1	1	1	1	1	―	―
	C2	―	―	1	1	1	1	1	―	―
	C3	―	2	1	1	1	1	1	1	―
	C4	―	1	1	1	1	1	1	1	―
	C5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
端部定着	C6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C8	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C10	1	1	1	1	1	1	1	1	1

充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

付表 6.8　G3 桁のグラウト充填状況

W橋＿【G3桁】＿グラウト充填状況

側 面 図



グラウト充填度

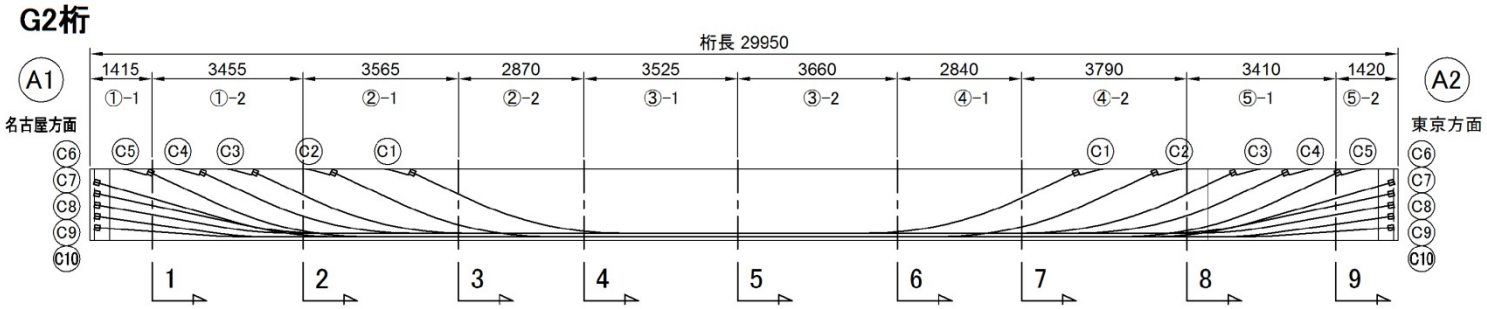
断面番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
上縁定着	C1	―	―	2	1	1	2	4	―	―
	C2	―	―	2	1	1	1	1	―	―
	C3	―	1	1	1	1	1	1	2	―
	C4	―	1	1	1	1	1	1	1	―
	C5	1	4	1	1	1	1	1	4	1
端部定着	C6	1	1	4	4	4	4	3	1	1
	C7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C8	1	1	2	1	1	1	1	1	1
	C9	1	1	2	1	1	1	1	3	1
	C10	3	1	1	1	1	1	1	1	3

充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

付表 6.9　G2 桁のグラウト充填状況

W橋＿【G2桁】＿グラウト充填状況

側 面 図



グラウト充填度

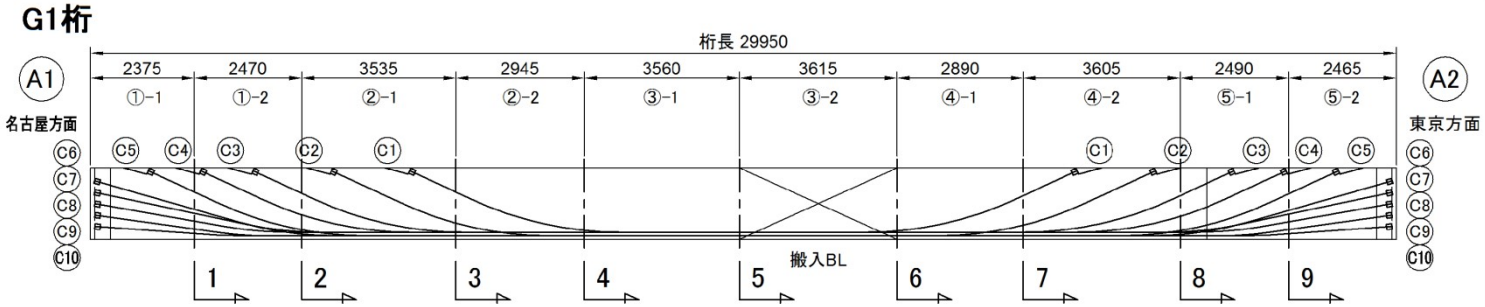
断面番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
上縁定着	C1	―	―	1	1	1	1	1	―	―
	C2	―	―	4	4	4	4	4	―	―
	C3	―	1	1	1	1	1	1	1	―
	C4	―	1	1	1	1	1	1	1	―
	C5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
端部定着	C6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C8	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C10	1	1	1	1	1	1	1	1	1

充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

付表 6.10　G1 桁のグラウト充填状況

W橋＿【G1桁】＿グラウト充填状況

側 面 図



グラウト充填度

断面番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
上縁定着	C1	―	―	1	1	1	1	1	―	―
	C2	―	―	1	1	1	1	1	―	―
	C3	―	1	1	1	1	1	1	1	―
	C4	―	1	1	1	1	1	1	1	―
	C5	2	1	1	1	1	1	1	2	3
端部定着	C6	1	1	1	1	1	1	1	1	3
	C7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C8	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C10	1	1	1	1	1	1	1	1	1

充填度1：グラウトが完全に充填されている。
充填度2：若干の空隙があるが，PC鋼材はほぼグラウトに覆われている。
充填度3：グラウトの充填が不十分であり，PC鋼材が露出している。
充填度4：グラウトが充填されていない。

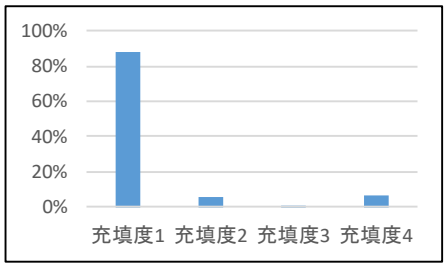
G4 桁～G1 桁のグラウト充填状況を付表 6.7～付表 6.10 に示す。G4 桁と G1 桁はすべての断面においてグラウト充填は良好であった。また G2 桁の C2 ケーブルは全長にわたりグラウトがない状態であったが，その他のケーブルはすべての断面において充填度 1 となっている。G3 桁は他の桁に比べて，グラウト充填が不足している箇所が多いことがわかった。なお，付表 6.8 の G3 桁のグラウト充填状況において C5 ケーブルと C6 ケーブルにまたがって充填度 4 の箇所が存在しているが，これらは施工時のケーブルの配置間違いにより，1 本のケーブル内のみに充填度 4 が存在している可能性がある。

次に，付表 6.7～付表 6.10 のグラウト充填状況の結果をもとに「上縁定着」と「端部定着」のケーブル配置の異なるグループに分けて，グラウト充填度の割合を付表 6.11，付表 6.12 にまとめた。付表 6.11 は切断面数毎に集計し，付表 6.12 ではケーブル数毎に集計している。この結果からは「上縁定着」と「端部定着」に大きな充填度の違いは判別できず，ほぼ同じような割合となっている。若干ではあるが，「上縁定着」の充填度のほうが「端部定着」より悪い結果となっている。

付表 6.11　上縁定着と端部定着違いによるグラウト充填状況（切断面数による集計）

上縁定着ケーブルの充填度の集計

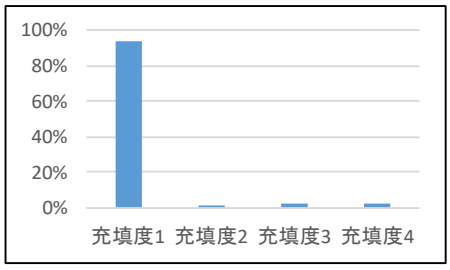
充填度	切断面数	割合%
充填度1	116	88%
充填度2	7	5%
充填度3	1	1%
充填度4	8	6%
全数	132	100%



端部定着ケーブルの充填度の集計

充填度	切断面数	割合%
充填度1	169	94%
充填度2	2	1%
充填度3	5	3%
充填度4	4	2%
全数	180	100%

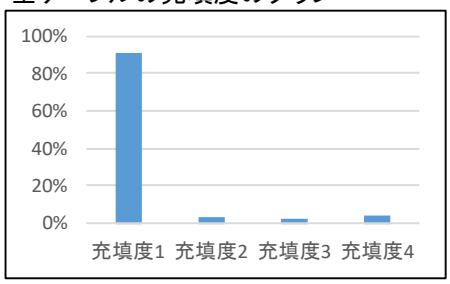
端部定着ケーブルの充填度のグラフ



全ケーブルの充填度の集計

充填度	切断面数	割合%
充填度1	285	91%
充填度2	9	3%
充填度3	6	2%
充填度4	12	4%
全数	312	100%

全ケーブルの充填度のグラフ

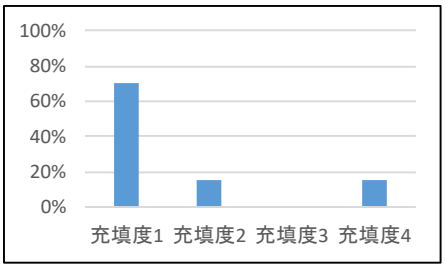


付表 6.12　上縁定着と端部定着違いによるグラウト充填状況（ケーブル数による集計）

上縁定着ケーブルの充填度の集計

充填度	ケーブル数	割合%
充填度1	14	70%
充填度2	3	15%
充填度3	0	0%
充填度4	3	15%
全数	20	100%

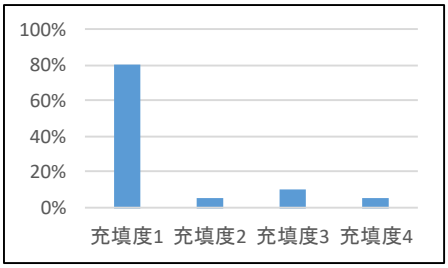
上縁定着ケーブルの充填度のグラフ



端部定着ケーブルの充填度の集計

充填度	ケーブル数	割合%
充填度1	16	80%
充填度2	1	5%
充填度3	2	10%
充填度4	1	5%
全数	20	100%

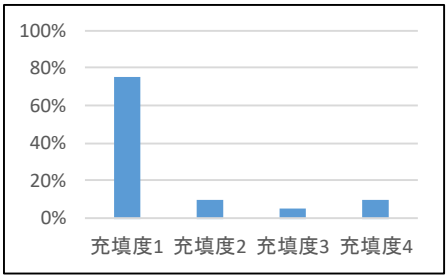
端部定着ケーブルの充填度のグラフ



全ケーブルの充填度の集計

充填度	ケーブル数	割合%
充填度1	30	75%
充填度2	4	10%
充填度3	2	5%
充填度4	4	10%
全数	40	100%

全ケーブルの充填度のグラフ



４．４　切断面の PC 鋼材の引込み量の調査結果

PC鋼材の引込み量の計測結果を付表6.13に示す。本表の数値は1ケーブルのシース内に含まれる12本の素線の引込み量の平均値を示す。なお,「－」はPC鋼材試験のため採取された位置やシース内が充填されていない位置であり，測定不能であったことを示す。本表から，G4桁のケーブルの引込み量はG3桁と比較して，全体的に小さいことがわかる。このことから，G4桁のPC鋼材の緊張力が小さかったと推測される。

付表 6.13　PC 鋼材の引込み量測定結果

ケーブル No.	PC 鋼材の引込み量　x(mm)					
	G4 桁		G3 桁			
	切出し部材③-2		切出し部材③-2		切出し部材④-2	
	5-5 断面	6-6 断面	5-5 断面	6-6 断面	7-7 断面	8-8 断面
C1	－	－	－	－	－	－
C2	0.33	0.94	－	－	－	－
C3	0.13	0.53	0.77	0.64	－	－
C4	0.99	1.76	－	－	0.28	5.73
C5	0.00	0.00	0.73	1.14	－	－
C6	－	－	－	－	－	－
C7	0.13	0.17	0.55	0.85	0.93	2.25
C8	0.06	0.00	－	－	0.40	4.04
C9	0.00	0.00	1.38	1.55	－	－
C10	－	－	－	－	－	－
平均	0.23	0.49	0.86	1.05	0.54	4.01
合計	0.72		1.91		4.55	

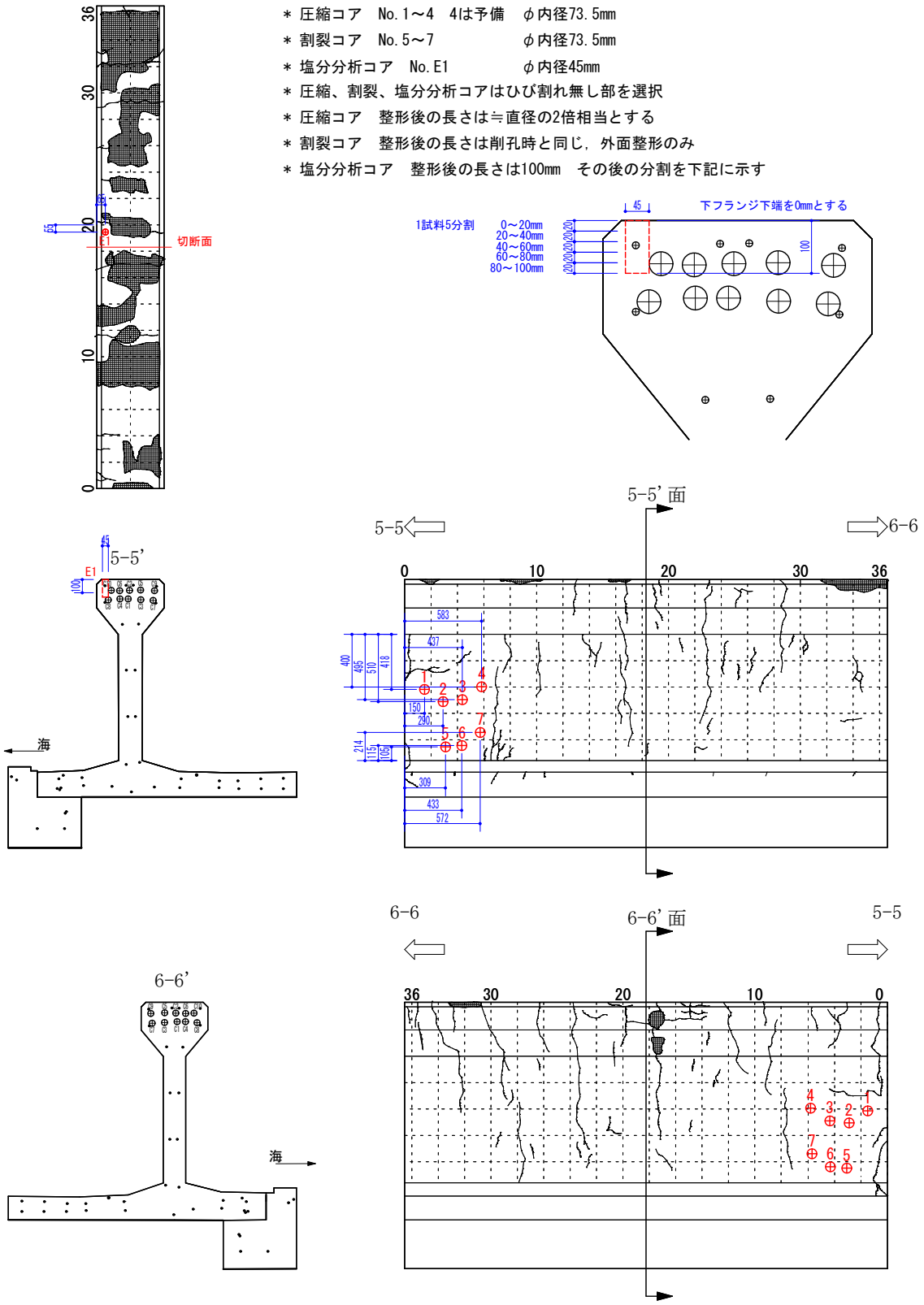
４．５　撤去桁解体調査結果

４．５．１　コンクリート物性の調査結果（圧縮強度・割裂強度・塩化物濃度試験・中性化深さ）

コンクリートの物性試験のためのコア採取位置を付図 6.7～付図 6.9 に示す。

凡例

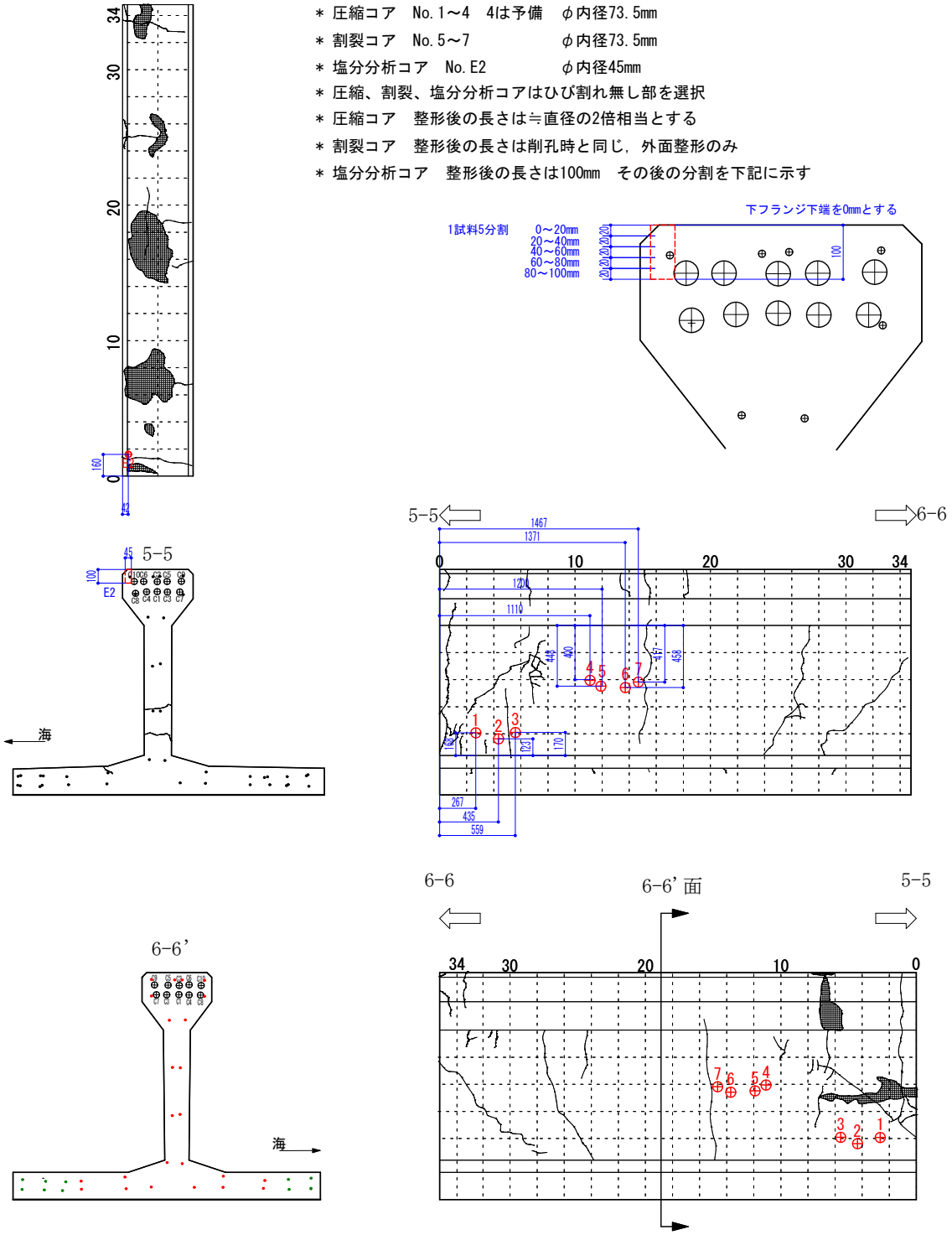
＊ 圧縮コア　No.1～4　4は予備　φ内径73.5mm
＊ 割裂コア　No.5～7　φ内径73.5mm
＊ 塩分分析コア　No.E1　φ内径45mm
＊ 圧縮、割裂、塩分分析コアはひび割れ無し部を選択
＊ 圧縮コア　整形後の長さは≒直径の2倍相当とする
＊ 割裂コア　整形後の長さは削孔時と同じ，外面整形のみ
＊ 塩分分析コア　整形後の長さは100mm　その後の分割を下記に示す



付図 6.7　圧縮強度・割裂強度・塩化物濃度試験のコア採取位置図：G4 桁③-2

凡例

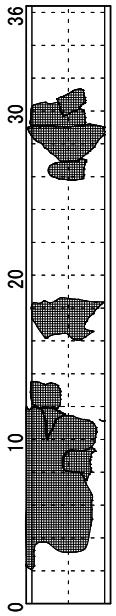
＊ 圧縮コア　No.1～4　4は予備　φ内径73.5mm
＊ 割裂コア　No.5～7　φ内径73.5mm
＊ 塩分分析コア　No.E2　φ内径45mm
＊ 圧縮、割裂、塩分分析コアはひび割れ無し部を選択
＊ 圧縮コア　整形後の長さは≒直径の2倍相当とする
＊ 割裂コア　整形後の長さは削孔時と同じ，外面整形のみ
＊ 塩分分析コア　整形後の長さは100mm　その後の分割を下記に示す

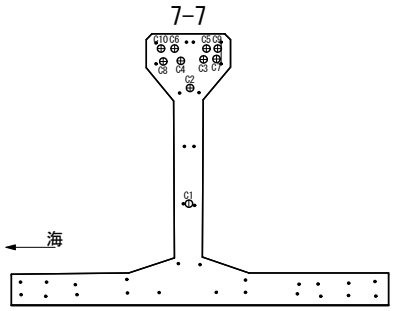


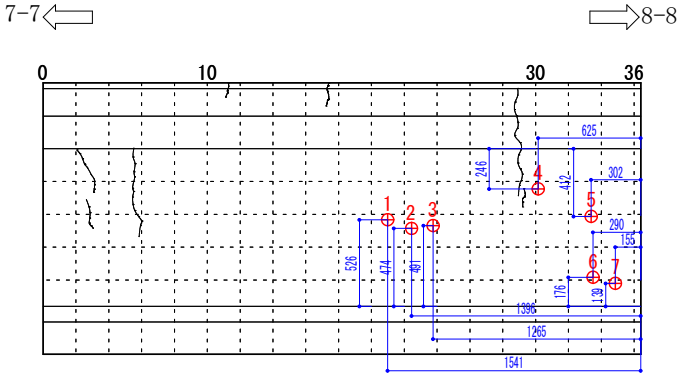
付図 6.8　圧縮強度・割裂強度・塩化物濃度試験のコア採取位置図：G3 桁③-2

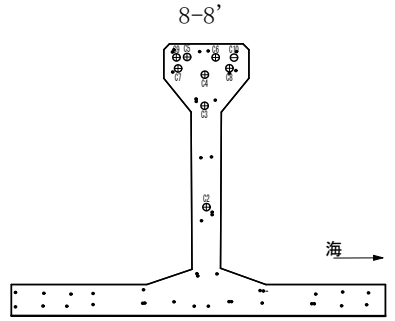
凡例

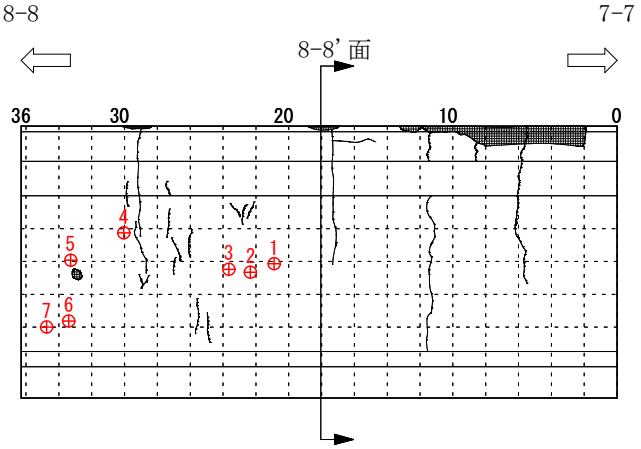
＊ 圧縮コア　No.1～4　4は予備　φ内径73.5mm
＊ 割裂コア　No.5～7　　φ内径73.5mm
＊ 塩分分析コア　なし
＊ 圧縮、割裂コアはひび割れ無し部を選択
＊ 圧縮コア　整形後の長さは≒直径の2倍相当とする
＊ 割裂コア　整形後の長さは削孔時と同じ，外面整形のみ











付図 6.9　圧縮強度・割裂強度・塩化物濃度試験のコア採取位置図：G3 桁④-2

（1）圧縮強度試験・割裂強度試験

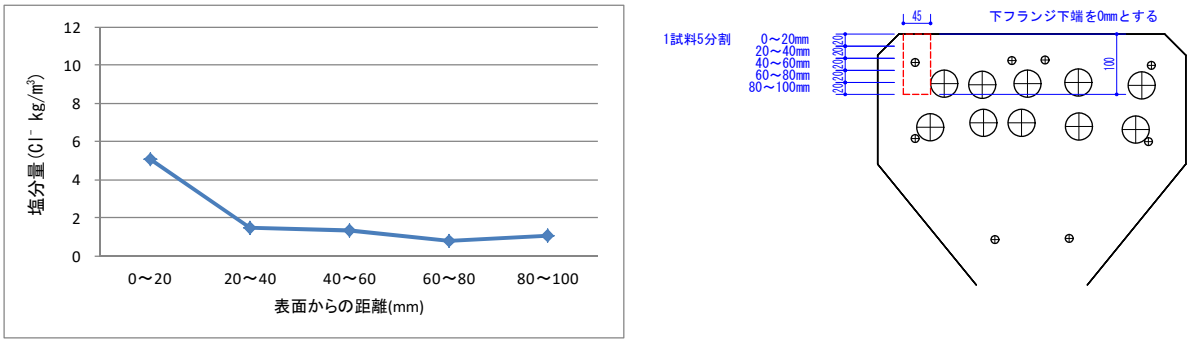
圧縮強度と割裂強度の試験結果を**付表 6.14** に示す。圧縮強度はすべての供試体において設計基準強度の 40N/mm^2 以上を満足していた。ただし，G4 桁の圧縮強度は G3 桁より 10N/mm^2 程度低い結果となっている。

付表 6.14　圧縮強度試験結果

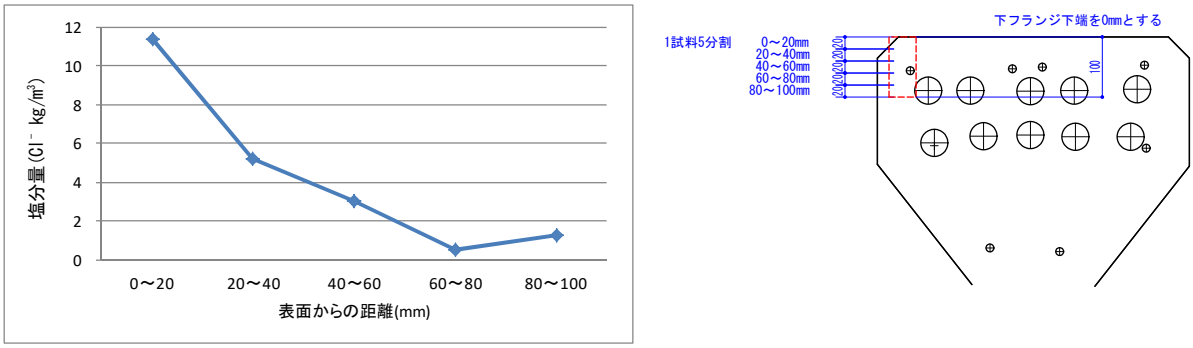
採取位置	静弾性係数(kN/mm^2)		圧縮強度(N/mm^2)		割裂強度(N/mm^2)	
	各供試体毎	平均値	各供試体毎	平均値	各供試体毎	平均値
G4 桁の③-2	27.92	30.32	41.87	42.71	3.06	3.09
	32.30		42.72		3.58	
	30.75		43.55		2.63	
G3 桁の③-2	30.23	31.59	51.75	52.76	3.48	3.96
	31.66		53.57		3.90	
	32.88		52.97		4.50	
G3 桁の④-2	38.96	34.70	53.58	52.38	3.67	3.53
	33.85		50.33		3.56	
	31.29		53.25		3.37	

（2）塩化物イオン濃度測定

塩化物イオン濃度の測定結果を付図 6.10，付図 6.11，付表 6.15 に示す。



付図 6.10　塩化物イオン濃度測定結果：G4 桁③-2



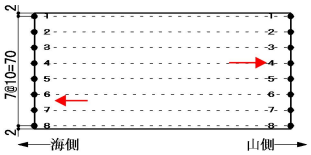
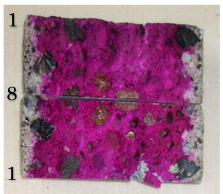
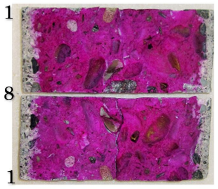
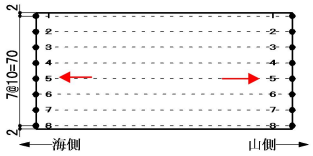
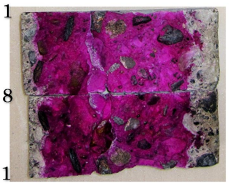
付図 6.11　塩化物イオン濃度測定結果：G3 桁③-2

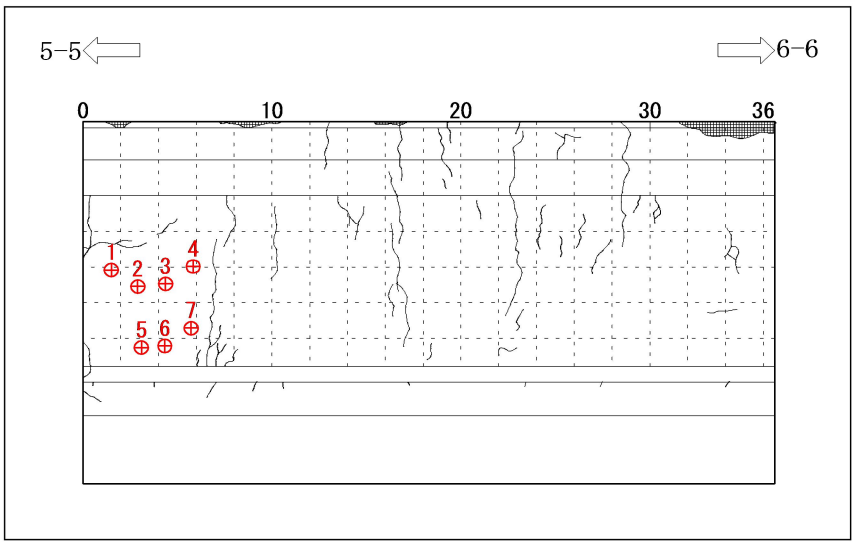
付表 6.15　塩化物イオン濃度測定結果：G4 桁③-2・G3 桁③-2：単位 kg/m^3

コア採取位置	表面からの距離(mm)				
	0～20	20～40	40～60	60～80	80～100
G4 桁③-2	5.05	1.50	1.31	0.78	1.09
G3 桁③-2	11.40	5.21	3.03	0.52	1.28

（3）中性化深さ

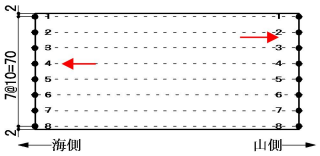
中性化深さの測定結果を付図 6.12～付図 6.14 に示す。

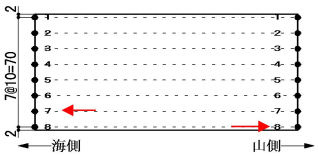
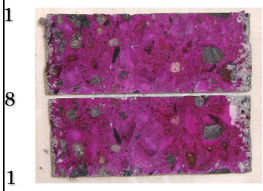
TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm) ⑤	1	13	1	20		
	2	15	2	✘3		
	3	14	3	13		
	4	16	4	22		
	5	✘10	5	20		
	6	✘12	6	11		
	7	✘5	7	17		
	8	✘2	8	16		
	Max	18	Max	22		
	1～8平均	14.5	1～8平均	17.0	海Max位置 6.3 山Max位置 4.0	1は加圧上面, 8は下面
TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm) ⑥	1	13	1	✘5		
	2	10	2	13		
	3	10	3	✘7		
	4	13	4	✘8		
	5	16	5	✘8		
	6	✘10	6	11		
	7	16	7	15		
	8	✘7	8	15		
	Max	17	Max	15		
	1～8平均	13.0	1～8平均	13.5	海Max位置 4.8 山Max位置 7.0	1は加圧上面, 8は下面
TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm) ⑦	1	13	1	33		
	2	16	2	30		
	3	12	3	27		
	4	14	4	23		
	5	18	5	36		
	6	10	6	30		
	7	9	7	29		
	8	17	8	27		
	Max	19	Max	36		
	1～8平均	13.6	1～8平均	29.4	海Max位置 4.8 山Max位置 5.0	1は割裂上面, 8は下面

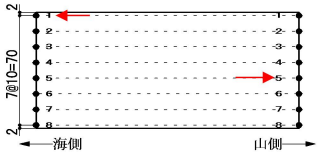
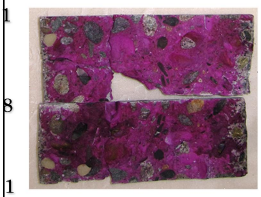


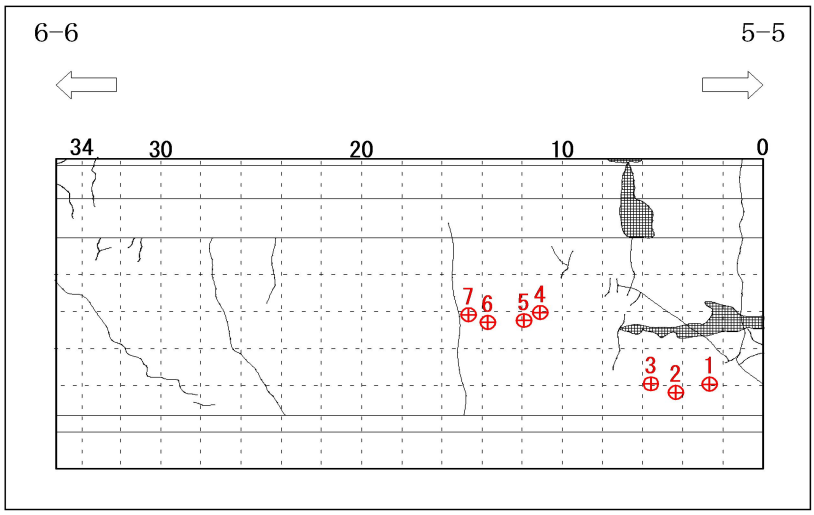
*赤字1～7は コンクリートコア採取番号を示す。　1,2,3は圧縮試験適応　4は予備　5,6,7は割裂試験適応

付図 6.12　中性化深さの測定結果：G4 桁③-2

TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm)	1	3	1	3		
	2	4	2	9		
	3	4	3	9		
	4	8	4	8		
	5	8	5	✘3		
⑤	6	4	6	10		
	7	3	7	9		
	8	1	8	11		
	Max	4	Max	14		
	1～8平均	4.4	1～8平均	8.4	海Max位置 4.0 山Max位置 2.3	1は加圧上面，8は下面

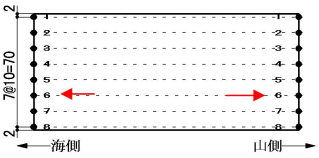
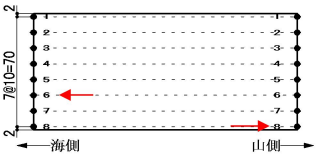
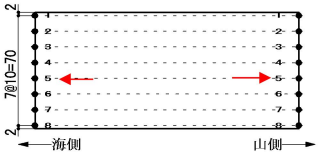
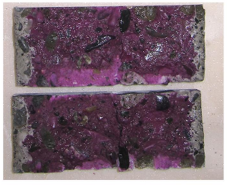
TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm)	1	7	1	11		
	2	3	2	8		
	3	7	3	6		
	4	3	4	9		
	5	7	5	12		
⑥	6	4	6	18		
	7	5	7	21		
	8	7	8	23		
	Max	7	Max	23		
	1～8平均	5.4	1～8平均	13.5	海Max位置 7.0 山Max位置 8.0	1は加圧上面，8は下面

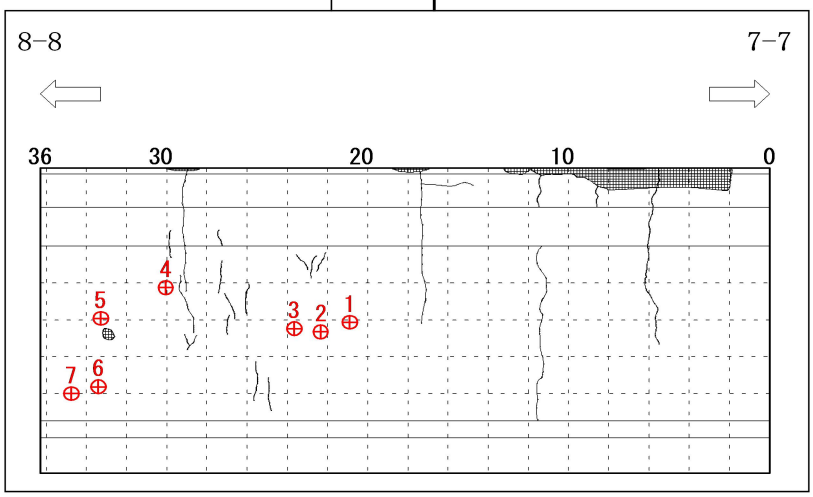
TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm)	1	15	1	0		
	2	11	2	14		
	3	✘2	3	10		
	4	4	4	6		
	5	8	5	15		
⑦	6	10	6	13		
	7	3	7	9		
	8	8	8	8		
	Max	15	Max	15		
	1～8平均	8.4	1～8平均	9.4	海Max位置 1.0 山Max位置 5.0	1は割裂上面，8は下面



*赤字1～7は コンクリートコア採取番号を示す。　1,2,3は圧縮試験適応　4は予備　5,6,7は割裂試験適応

付図 6.13　中性化深さの測定結果：G3 桁③−2

TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm) ⑤	1	11	1	10		
	2	12	2	10		
	3	12	3	12		
	4	7	4	11		
	5	12	5	9		
	6	✘1	6	17		
	7	12	7	8		
	8	13	8	3		
	Max	13	Max	17		
	1～8平均	11.3	1～8平均	10.0	海Max位置 6.0 山Max位置 6.0	1は加圧上面，8は下面
TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm) ⑥	1	✘3	1	15		
	2	✘14	2	13		
	3	21	3	7		
	4	18	4	15		
	5	16	5	9		
	6	21	6	15		
	7	16	7	14		
	8	10	8	17		
	Max	21	Max	17		
	1～8平均	17.0	1～8平均	13.1	海Max位置 6.0 山Max位置 8.0	1は加圧上面，8は下面
TP.No.	海側	(mm)	山側	(mm)	計測位置	中性化画像
中性化深さ (mm) ⑦	1	17	1	✘0		
	2	18	2	✘0		
	3	16	3	19		
	4	13	4	14		
	5	20	5	10		
	6	✘0	6	11		
	7	✘3	7	8		
	8	10	8	8		
	Max	20	Max	10		
	1～8平均	15.7	1～8平均	11.7	海Max位置 5.0 山Max位置 5.0	1は割裂上面，8は下面



*赤字1～7は コンクリートコア採取番号を示す。　1,2,3は圧縮試験適応　4は予備　5,6,7は割裂試験適応

付図 6.14　中性化深さの測定結果：G3 桁④-2

４．５．２　PC 鋼材の腐食状況の結果

PC 鋼材の引張試験と断面減少率の測定結果を**付表 6.16** に示す。引張強度（最大応力）は，測定したすべての PC 鋼材の素線において設計値以上の値を示していた。断面減少率は 0.1～4%程度であり，PC 鋼材の品質には大きな問題はなかったと判断できる。

付表 6.16　PC 鋼材の引張試験と断面減少率の測定結果

採取位置	鋼材番号	グラウト充填度	実断面積 (mm^2)	最大応力 (N/mm^2)	最大荷重 (kN)	断面減少率	
						面積比	重量比
G4 桁 ③-2	C10-1	1	37.99	1747	66.4	－	－
	C6-1	1～4	39.14	1670	65.4	0.66%	0.13%
	C6-2	1～4	38.04	1717	65.3		
	平均	－	－	1711	－	－	－
G3 桁 ③-2	C10-1	1	38.21	1735	66.3	－	－
	C6-1	4	37.94	1731	65.7	3.51%	4.36%
	C6-2	4	37.18	1697	63.1		
	C1-1	1～2	37.94	1734	65.8	2.24%	1.26%
	C1-2	1～2	38.32	1706	65.4		
	平均	－	－	1721	－	－	－
G3 桁 ④-2	C1-1	4	37.88	1724	65.3	1.19%	1.34%
	C1-2	4	38.04	1722	65.5		
	C10-1	1	35.04	1847	64.7	－	－
	C3-1	1～2	37.83	1753	66.3	1.49%	1.57%
	C3-2	1～2	37.99	1753	66.6		
	C9-1	1～3	37.94	1708	64.8	1.23%	0.71%
	C9-2	1～3	38.10	1693	64.5		
	平均	－	－	1742	－	－	－
設計値	径φ7	－	38.49	1520	58.5	－	－

４．６　調査結果のまとめ

和瀬川橋の撤去桁の切断面からグラウト充填度の調査を行った。また，コンクリートの物性試験とPC鋼材の引込み量と引張強度を測定した。これらの結果から，G4桁の複数の曲げひび割れの原因は，「プレストレスの導入不足」と考えられる。グラウト充填は一部において充填不足はあるものの，全体的にはよく充填されており，PC鋼材の品質もよいため，グラウト充填不足が曲げひび割れの原因ではないと判断できる。

付録７　アヒン橋の解体調査

１．はじめに 167

２．橋梁緒元 167

３．調査概要 167

４．調査の方法および結果 172
　４．１　外観変状調査結果 172
　４．２　切断面のグラウト充填調査 172
　４．３　PC ケーブル解体調査 175
　４．４　PC 鋼材引き込み量の測定 179
　４．５　PC 鋼材の引張試験 181

５．調査結果のまとめ 183

１．はじめに

アヒン橋は，鹿児島県大島郡龍郷町を流れる大美川に架けられたポストテンション方式の T 桁橋である（**付写真 7.1**）。本橋は竣工が 2000 年（平成 12 年）の比較的新しい橋梁であるが，このたび床上浸水による被害対策（河川改修）に伴い撤去されることとなった。上縁定着の廃止やグラウト材料が改善された 1990 年代以降の橋齢 10～30 年のものが撤去されることは非常に稀であり調査事例は極めて少ない。そこで，この機会に本撤去桁を用いてグラウト充填状況を調査し改善効果を確認する。

付写真 7.1　橋梁全景

２．橋梁諸元

本橋の橋梁諸元を**付表 7.1** に示す。また，竣工図面・材料承諾等の報告書から PC 鋼材，グラウト材料について**付表 7.2** に材料諸元を示す。

付表 7.1　橋梁諸元

橋梁名	アヒン橋
橋梁位置	鹿児島県大島郡龍郷町戸口地内
構造種別	単純 PC ポストテンション T 桁橋
橋長	36.00m
支間長	35.12m
有効幅員	7.00m
活荷重	A 活荷重
竣工年度	2000 年（平成 12 年）
撤去年度	2015 年（平成 27 年）

３．調査概要

撤去工事に伴う実施調査を，**付表 7.3** に示す。

付写真 7.2　主桁側面

付写真 7.3　床版下面

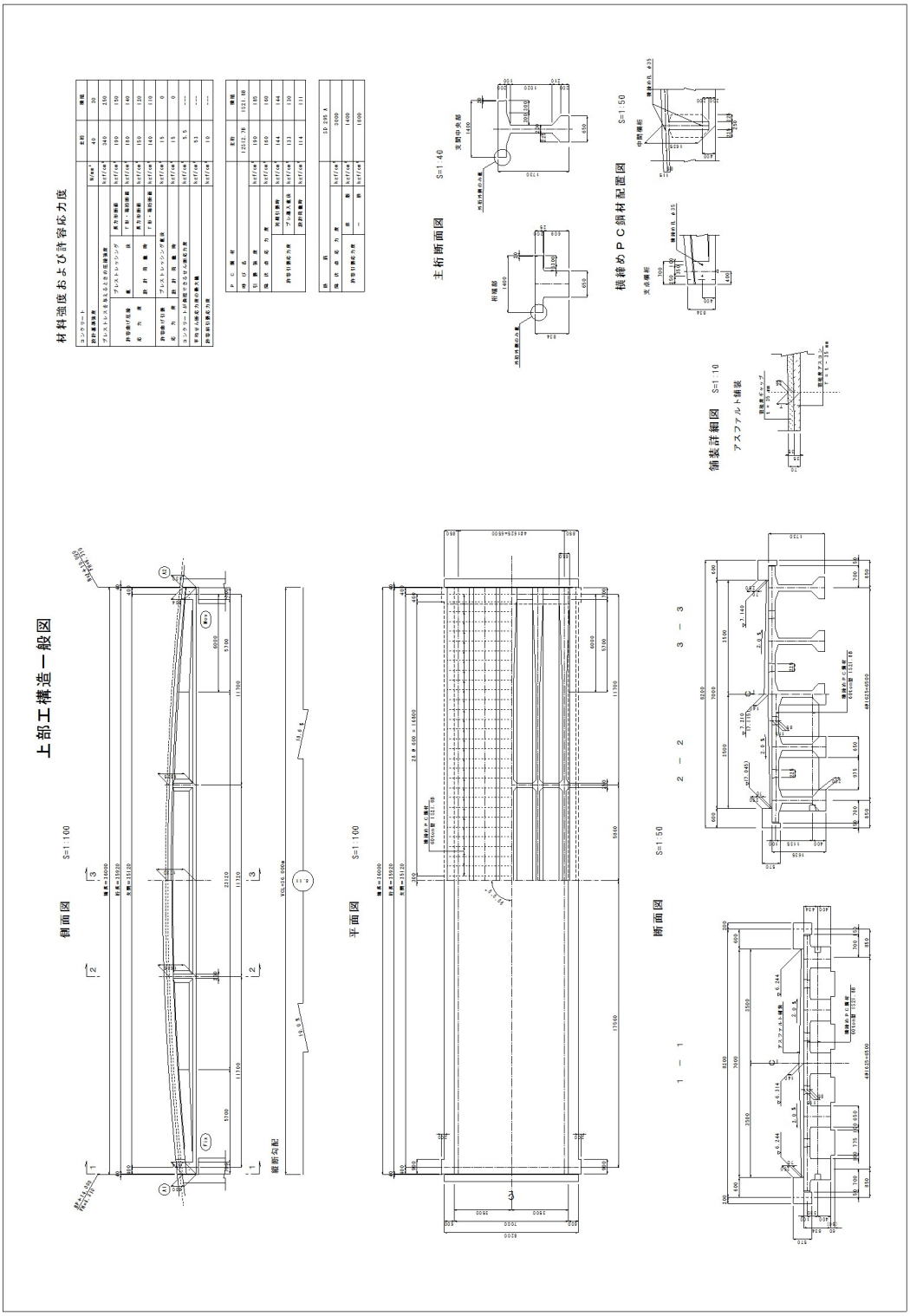
付表 7.2　材料諸元

コンクリート	設計強度 40 N/mm^2 （主桁）
PC 鋼材	SWPR7BL 12S12.7B
シース	呼び径 φ65mm（外径φ68mm）
グラウト	設計強度 20N/mm^2 以上 普通ポルトランドセメント
主ケーブル	高粘性ﾉﾝﾌﾞﾘｰﾃﾞｨﾝｸﾞ型混和剤
横締め	低粘性ﾉﾝﾌﾞﾘｰﾃﾞｨﾝｸﾞ型混和剤

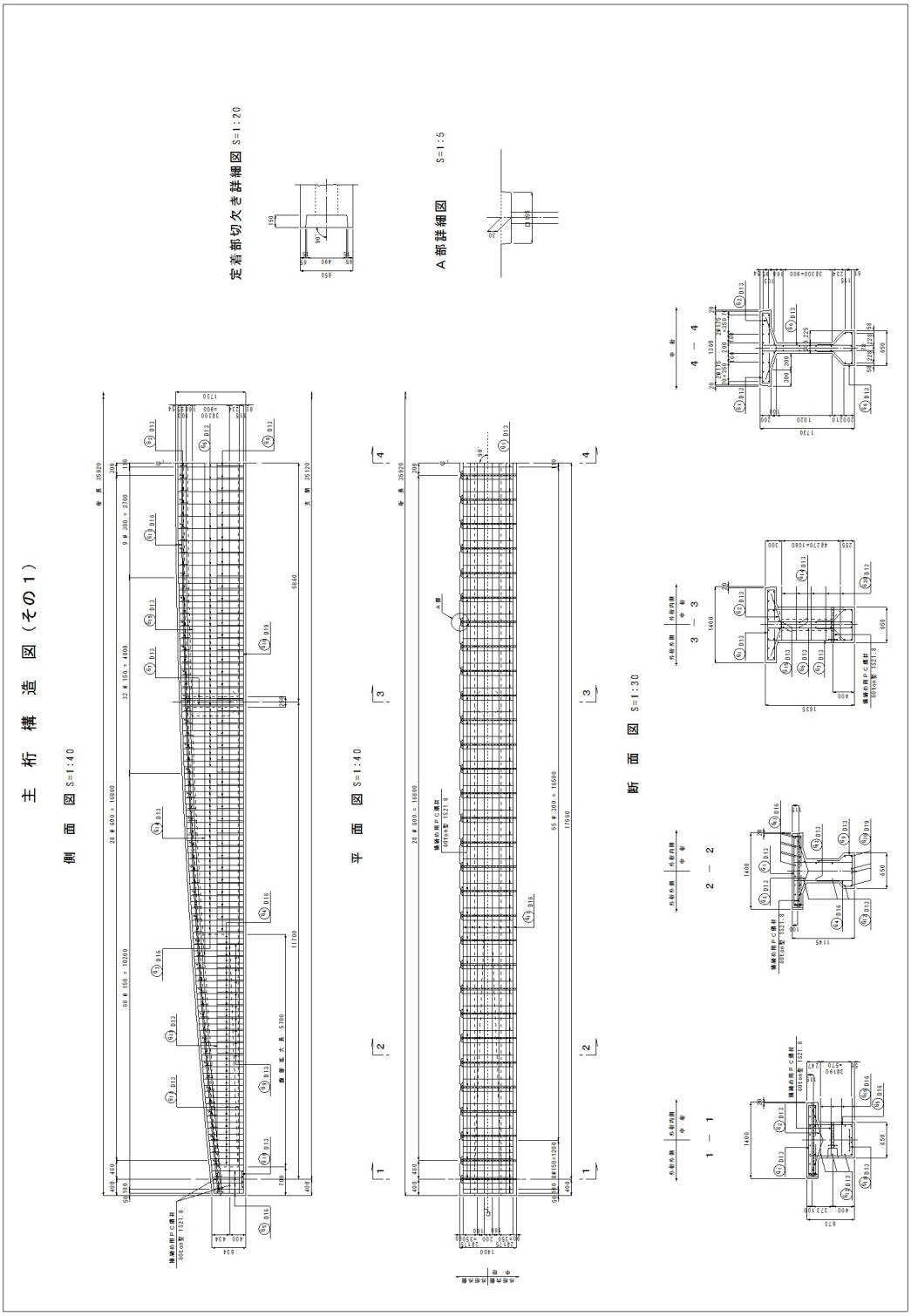
付表 7.3　調査項目

No.	調査項目	概　　要
1	グラウト充填状況	切断面の目視調査
2	PC ケーブル解体調査	解体目視調査
3	PC 鋼材の引込み量	切断面での計測
4	PC 鋼材引張試験	引張強度測定

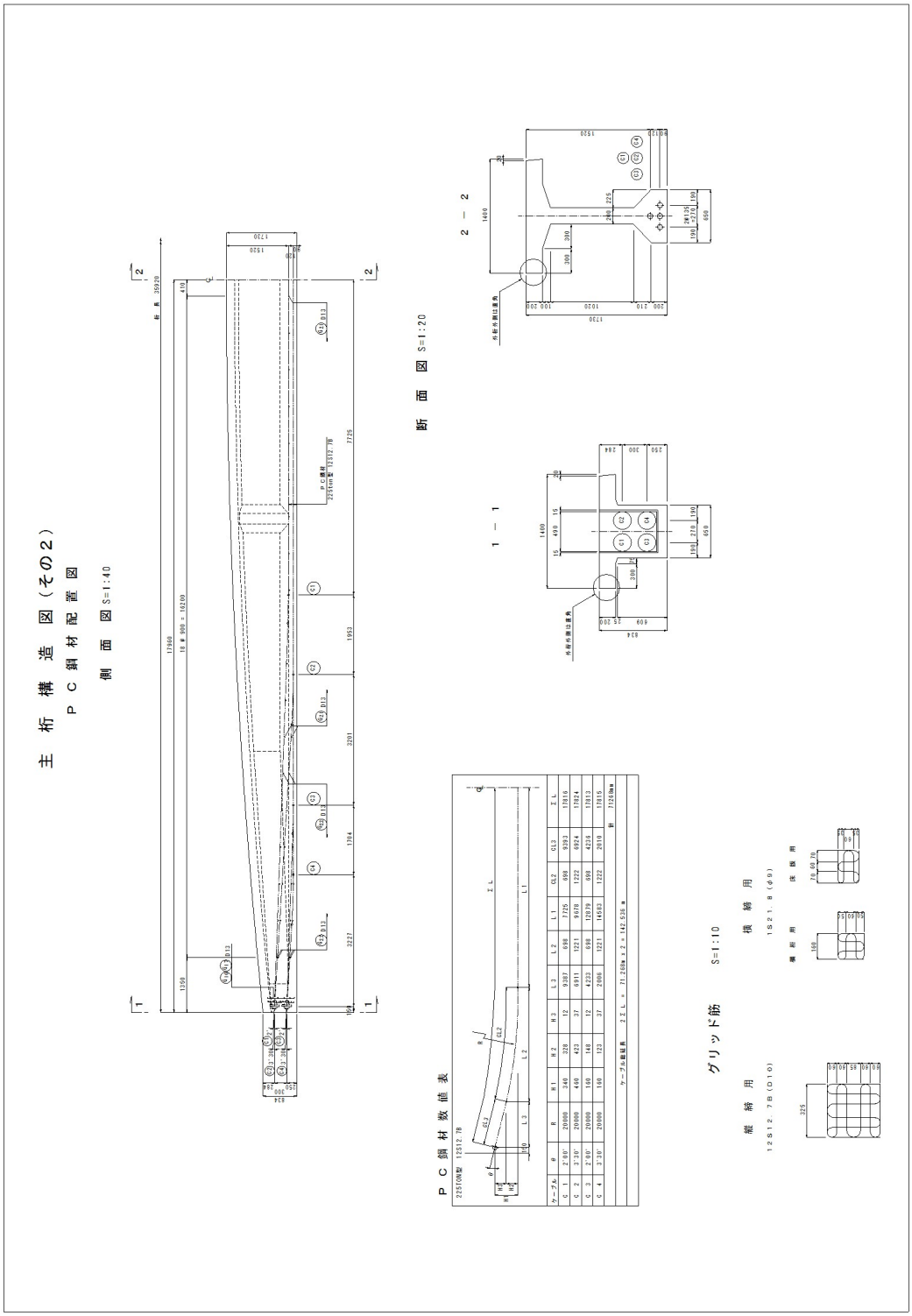
付図 7.1～7.4 に竣工図（構造一般図，主桁配筋図，PC 鋼材配置図）とグラウトの施工記録を示す。



付図 7.1　構造一般図


主 桁 構 造 図（その１）
側 面 図 S=1:40
平 面 図 S=1:40
断 面 図 S=1:30
定着部切欠き詳細図 S=1:20
A 部詳細図 S=1:5

付図 7.2　主桁配筋図



付図 7.3　PC 鋼材配置図

アヒン橋【グラウト施工の記録】

品質管理の記録

施工箇所　：　G1主桁～G5主桁
施 工 日　：　平成11年11月5日
天　　候　：　晴れ

施工機械
ミキサー：　回転翼ミキサー　MG-100型（1000回転/分）
ポンプ　：　電動グラウトポンプ　NR-25型（粘性型対応）

流動性試験

No	気温(℃)	セメント温度(℃)	使用水温(℃)	練り時間(秒)	グラウト温度(℃)	J14漏斗流下時間(秒)	平均(秒
1	16.0	27.5	17.0	180	27.0	6.9	7.3
2						7.8	
3						7.1	

使用材料および配合

	セメント(kg)	水(kg)	混和剤(kg)	W／C(%)
品名	普通ポルトランドセメント	水道水	ポゾリスGF-1720	－
$1m^3$当り	1305	586.7	13.05	45
1バッチ当り	75	33.75	0.75	45

ブリーディング率及び膨張率試験

No	グラウト体積(cc)	3h後水の量	20h後水の量	20h後グラウト体積(cc)	ブリーディング率 3h	ブリーディング率 20h	膨張率(20h以降)	平均 ブリーディング率(%)	平均 膨張率(%)
1	470	0	0	470	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	450	0	0	450	0.00	0.00	0.00		
3	470	0	0	470	0.00	0.00	0.00		

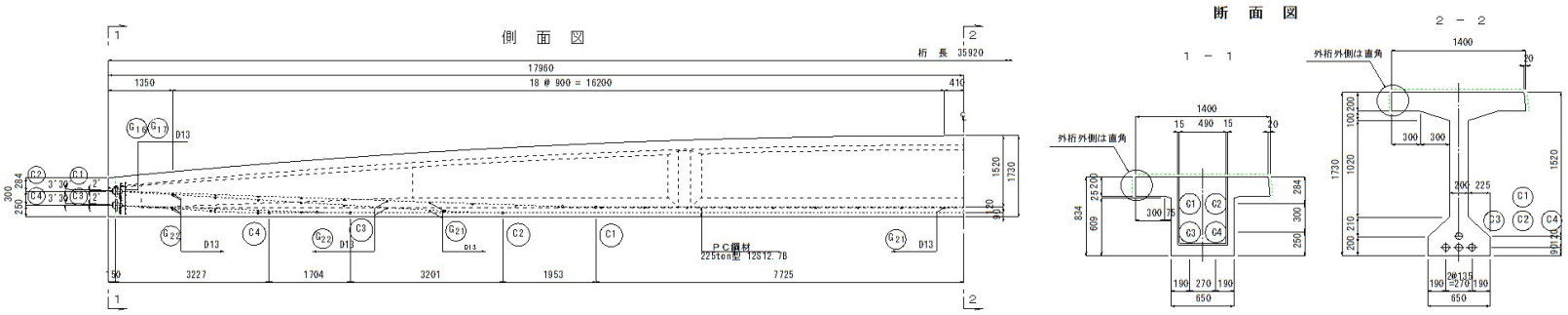
塩化物含有量

No	測定値(%)	平均値(%)	混和剤種類	算出方法	塩化物含有量(kg/m^3)
1	0.0044	0.0044	ノンブリーディング型	希釈法(4倍希釈)	0.10
2	0.0044				
3	0.0044				

圧縮強度試験

No	重量(gf)	荷重(kN)	強度σ28(N/mm²)	平均(N/mm²)
1	353	70.0	35.7	36.9 ≧20.0
2	370	72.0	36.7	
3	357	75.0	38.2	

ケーブル配置図



付図7.4　グラウトの施工記録

４．調査方法および結果

４．１　外観変状調査結果

撤去に先だって，道路橋定期点検要領[1)]に準じた外観変状調査を実施した。その結果，橋面舗装の変状や主桁（**付写真 7.2**），床版（**付写真 7.3**）でのひび割れ，鉄筋露出等の変状も認められなかった。また，床版間詰め部や桁端部付近からの漏水も認められなかった。

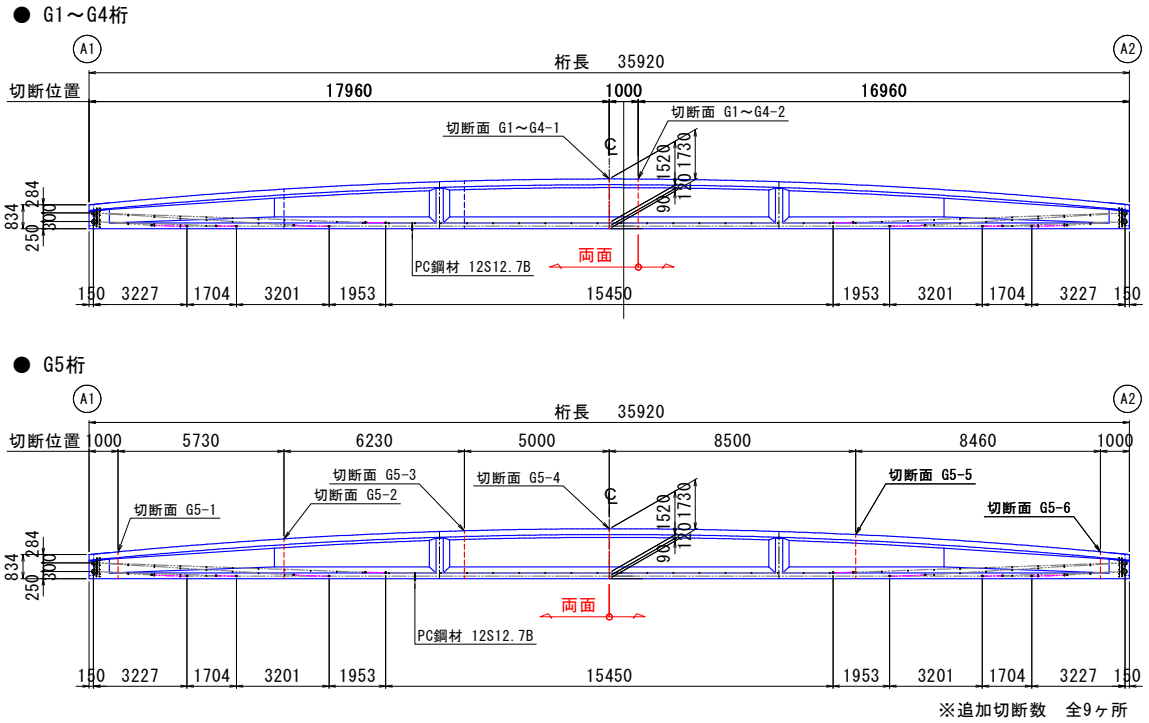
これは，床版上面に防水層が設置されていたことや大型車の交通量が少なかったこと，それに加えて塩害環境などの厳しい環境でなかったため，劣化が生じにくかったと考えられる。

４．２　切断面のグラウト充填調査

（１）調査方法

撤去桁の切断面を目視してグラウト充填状況の調査を実施した。

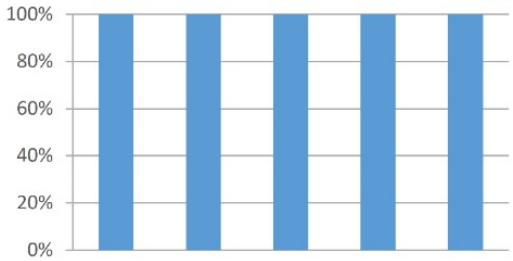
調査位置は，G1 から G4 桁については支間中央部 2 断面（4 ケーブル×2 面×4 主桁），G5 桁については PC 鋼材の角変化部，定着具付近に着目した 6 断面（4 ケーブル×6 面×1 主桁）とした（**付図 7.5**）。



付図 7.5　グラウト充填状況の調査位置

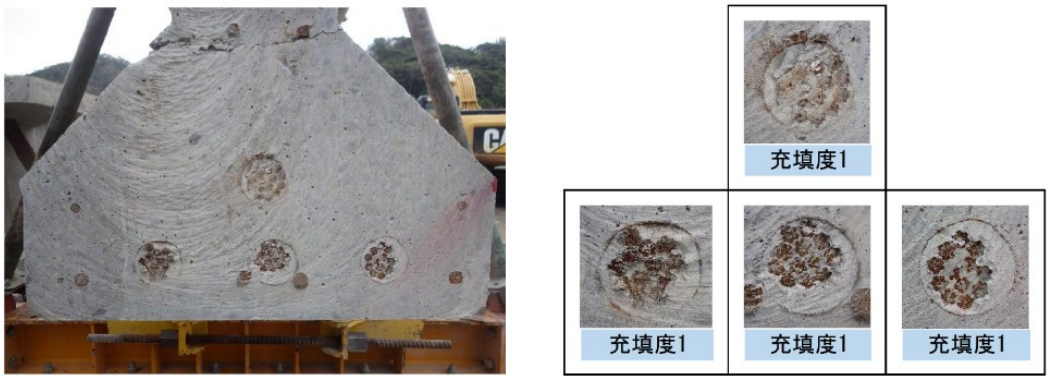
（2）グラウト充填度調査結果

主桁毎のグラウト充填度の結果を**付図 7.6**，グラウト充填調査結果の一例を**付図 7.7** に示す。支間中央部，定着具付近，ケーブル巻上げ付近の断面全てのケーブル 56 件において，充填度 1（**付写真 7.4**，**7.5**）でありグラウト充填は極めて良好であった。

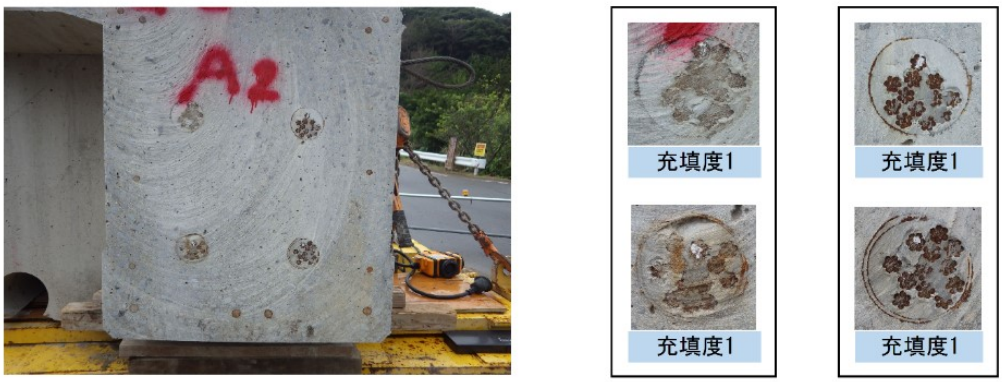


	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁
充填度1	8件	8件	8件	8件	24件
充填度2	0件	0件	0件	0件	0件
充填度3	0件	0件	0件	0件	0件
充填度4	0件	0件	0件	0件	0件
合計	-----				56件

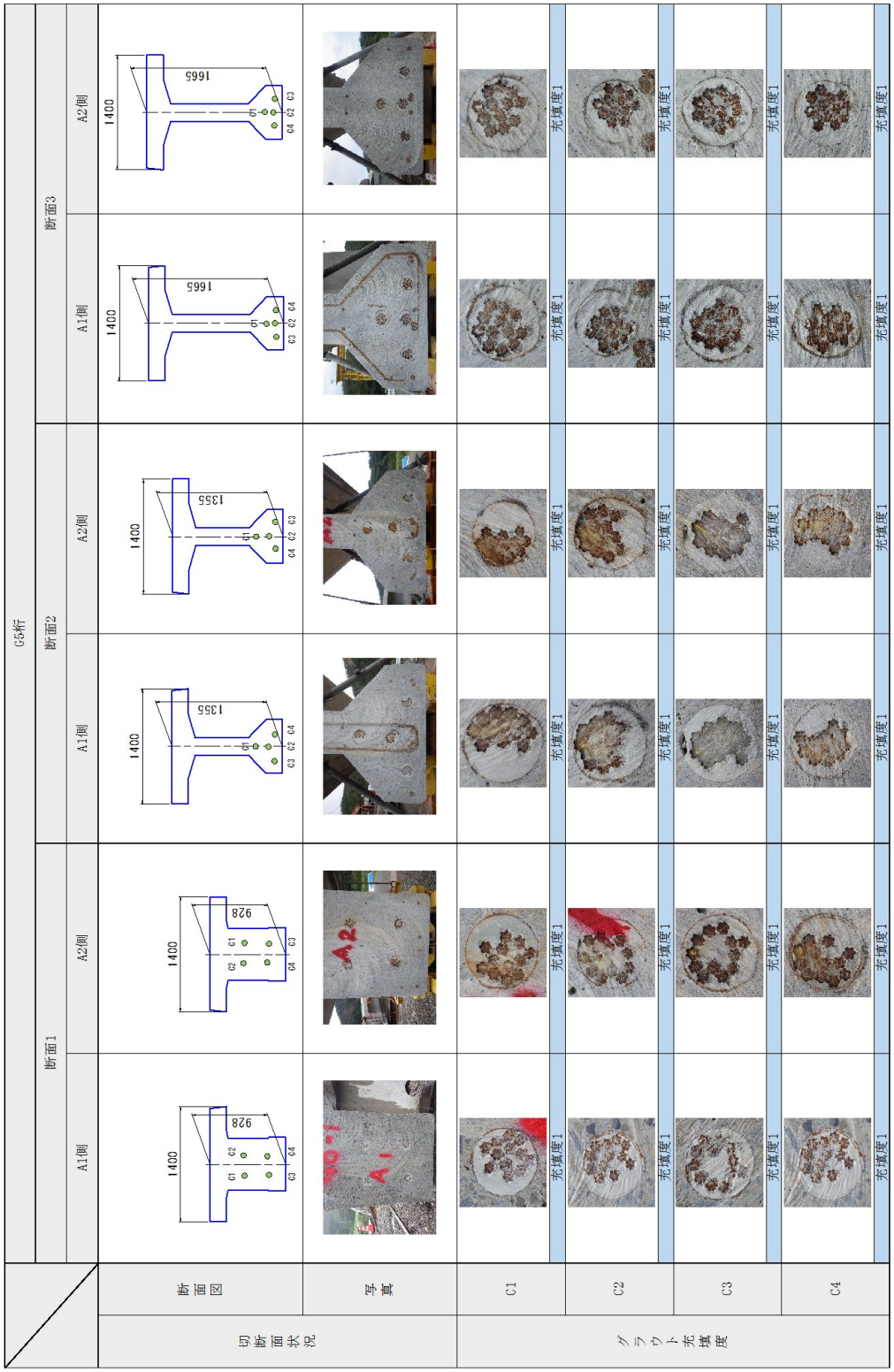
付図 7.6　主桁毎のグラウト充填度（桁端部定着のみ）



付写真 7.4　G5 主桁　支間中央部（切断面 4）



付写真 7.5　G5 主桁　桁端部付近（切断面 6）



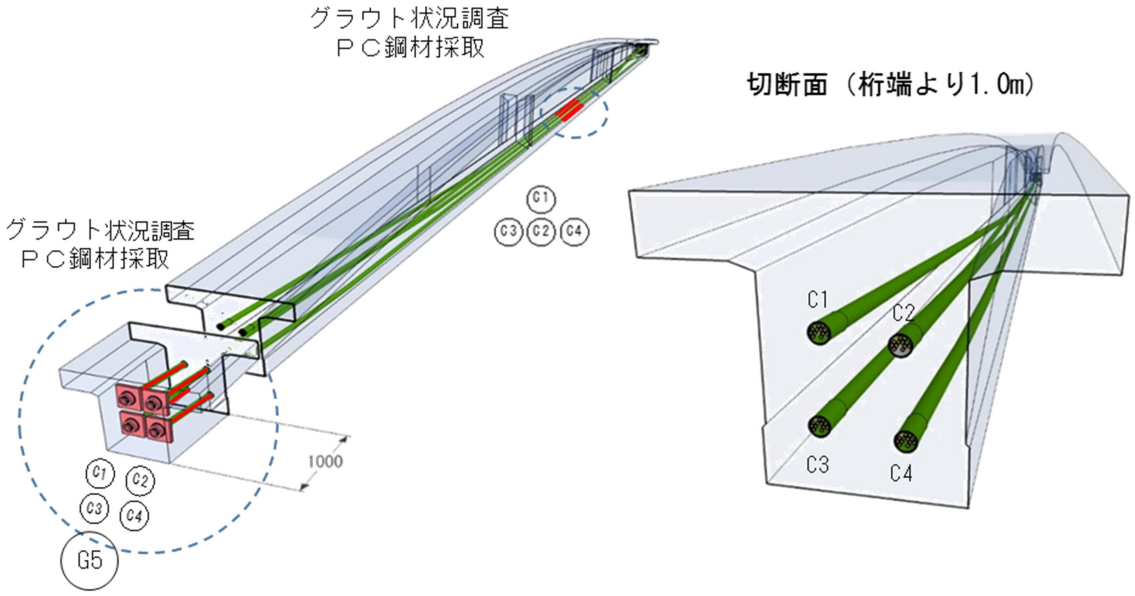
付図 7.7　グラウト充填調査結果（G5 桁）

４．３　PC ケーブル解体調査

（１）調査方法

桁端部の解体調査は，グラウト充填度の分類結果より充填度の低いブロック（片側）から PC 鋼材（シース，定着具を含む）をブレーカ，ハンドブレーカでハツリ出し切断面から定着部までの充填状況を目視にて確認した。また，支間中央部についても同様の方法で実施した。

PC 鋼材の採取は，G1 桁の支間中央部と G5 桁の定着部付近の長さ約 1.0m を採取した（付図 7.8）。



付図 7.8　定着具付近のグラウト充填状況確認位置図

（2）PC ケーブル解体調査結果

支間中央部の PC ケーブル（付図 7.9）

付写真 7.7(d),(e)のとおり，グラウト表面に米粒程度の大きさの気泡痕，PC 鋼材素線間に空隙が確認されたが，充填不良等は認められず充填状況は極めて良好であった。また，**付写真** 7.6(a)のようにシース内面・外面，PC 鋼材表面にも腐食は認められなかった。

主桁端部の PC ケーブル（付図 7.10）

ケーブルの巻上げ位置でグラウトの先流れやブリーディングに起因する未充填が予想されたが，**付写真** 7.6(b)のとおりグラウトは問題なく充填されていた。ただし，定着具を解体した際にコーンジョイント部で**付写真** 7.7(f)のような空隙が認められた。

端部横桁の横締めケーブル

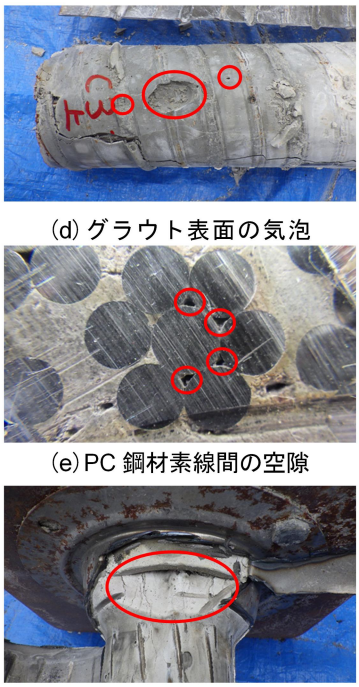
付写真 7.6(c)のとおり，グラウトの充填状況は極めて良好であり，PC 鋼材についても腐食等の劣化は確認できず良好な状態であった。しかし，主ケーブルに対してグラウト表面の細かい気泡跡が目立った。既存の資料を確認すると横締めケーブルのグラウト材料が低粘性でありグラウトの注入速度が速かったために空気が残留し細かい気泡痕が発生したと考えられる。

(a) G1 桁 支間中央部の主ケーブル

(b) G5 桁 A2 端部の主ケーブル

(c) G5 桁 A2 端部の横締めケーブル

付写真 7.6　ケーブル解体状況



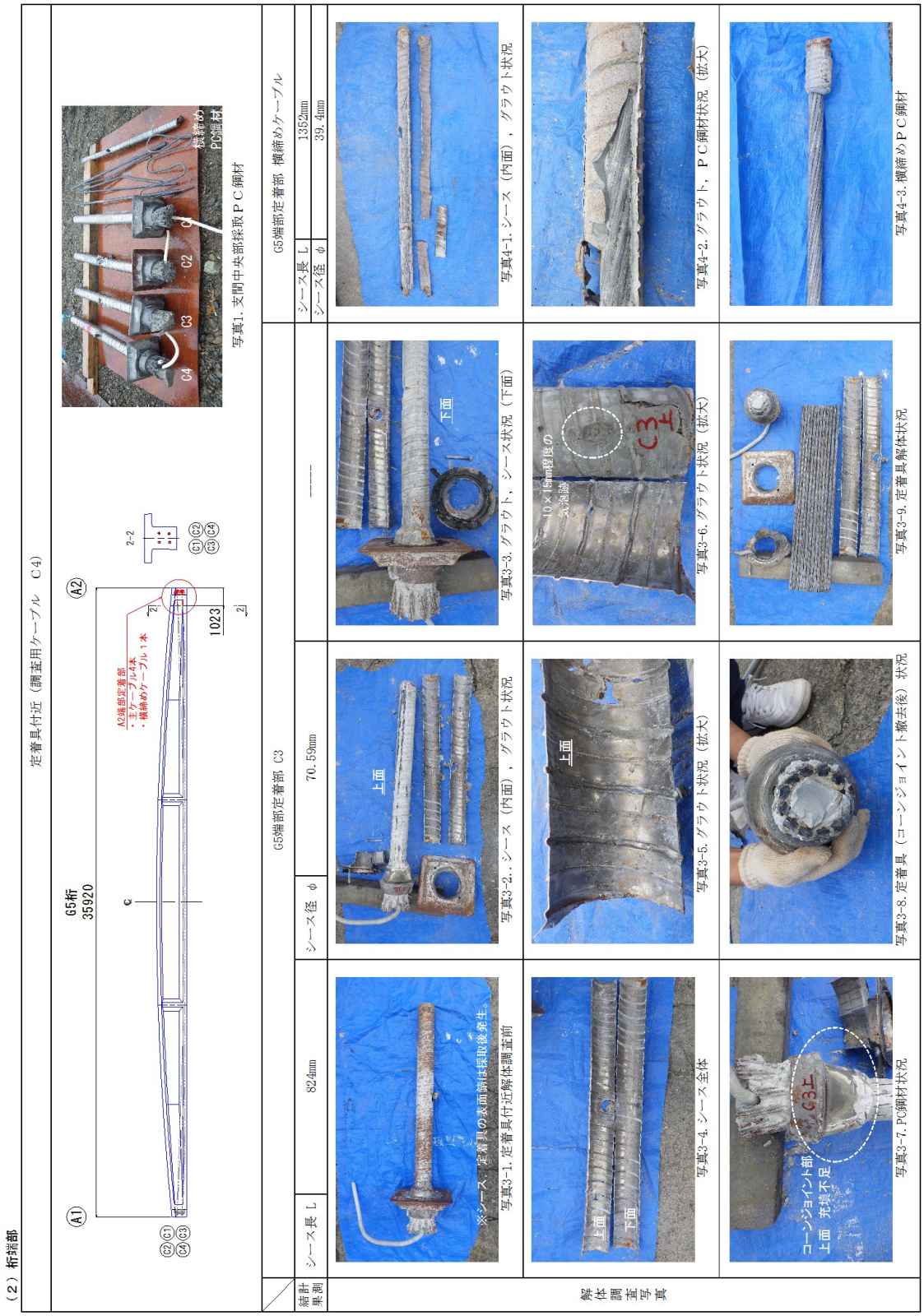
(d) グラウト表面の気泡

(e) PC 鋼材素線間の空隙

(f) コーンジョイント部の空隙

付写真 7.7　グラウト充填

付図 7.9　解体調査結果（支間中央部）



付図 7.10　解体調査結果（桁端部）

４．４　PC 鋼材引き込み量の測定

（１）調査方法

PC 鋼材引き込み量の測定は，切断面（両面）でシースの充填材表面から PC 鋼材までの距離をノギス（最小単位 0.01mm）により測定した（**付写真 7.8**）。調査対象は，グラウト充填度の分類で充填度 1，2 のシースとした。引き込み量は，シース内 12 本の PC 鋼材で計測値を平均し両面分を加算した値とした。

付写真 7.8　PC 鋼材引き込み量調査状況

（２）PC 鋼材引き込み量調査

付図 7.11 に PC 鋼材引き込み量の調査結果を示す。調査時，主桁切断面の PC 鋼材がシース内へ引込まれる現象がみられた。ノギスにて測定した結果，引込み量は各桁の支間中央部で 3mm から 5mm 程度であり，各 PC 鋼材でのバラつきも少なかった。このことは，切断時のプレストレス力の解放により PC 鋼材の伸びが元に戻ったことを示しており，プレストレス力が施工当初から問題なく導入され続けていたと推察される。

付図 7.11　PC 鋼材引き込み量調査結果（G5 桁）

		G5桁																					
		断面1						断面2						断面3						断面4			
		A1側			A2側			A1側			A2側			A1側			A2側			A1側			A2側		
PC鋼材引込み量（mm）	C1		1	2.24		1	1.88		1	0.71		1	0.17		1	2.25		1	1.39		1	-		1	1.20
			2	2.59		2	2.70		2	3.06		2	2.81		2	0.72		2	1.21		2	1.23		2	0.43
			3	2.01		3	1.95		3	0.35		3	0.49		3	0.66		3	0.87		3	-		3	0.45
			4	-		4	-		4	-		4	-		4	3.16		4	1.36		4	1.36		4	1.02
			5	1.66		5	1.42		5	3.12		5	4.05		5	-		5	-		5	-		5	-
			6	1.58		6	2.20		6	-		6	-		6	-		6	-		6	-		6	0.54
			7	1.32		7	0.54		7	1.06		7	2.70		7	0.75		7	1.12		7	1.84		7	1.91
			8	-		8	-		8	-		8	3.64		8	2.05		8	1.00		8	-		8	-
			9	1.87		9	2.07		9	2.11		9	3.22		9	-		9	1.76		9	-		9	-
			10	1.98		10	1.97		10	2.92		10	3.55		10	2.59		10	1.12		10	1.82		10	1.91
			11	1.20		11	1.39		11	3.95		11	3.02		11	3.75		11	2.70		11	1.02		11	1.77
			12	2.41		12	2.26		12	2.25		12	3.09		12	2.74		12	2.08		12	0.62		12	0.43
			平均	1.89		平均	1.84		平均	2.17		平均	2.67		平均	2.07		平均	1.46		平均	1.32		平均	1.07
		両断面合計			3.72			両断面合計			2.67			両断面合計			3.54			両断面合計			2.39		
	C2		1	1.05		1	0.13		1	2.68		1	2.06		1	1.21		1	2.44		1	1.38		1	1.80
			2	0.99		2	0.88		2	1.92		2	1.05		2	1.70		2	2.25		2	0.53		2	1.63
			3	-		3	-		3	3.88		3	2.03		3	1.23		3	2.39		3	2.41		3	1.98
			4	0.84		4	0.38		4	3.26		4	-		4	3.81		4	2.76		4	-		4	-
			5	1.44		5	0.59		5	1.43		5	1.16		5	-		5	-		5	1.18		5	2.01
			6	0.23		6	-		6	3.77		6	2.12		6	1.77		6	2.58		6	2.84		6	1.59
			7	0.45		7	1.24		7	-		7	2.80		7	2.50		7	3.34		7	-		7	-
			8	2.17		8	1.03		8	-		8	-		8	-		8	-		8	-		8	-
			9	2.20		9	1.60		9	1.69		9	2.84		9	1.49		9	2.89		9	1.65		9	1.34
			10	0.82		10	2.23		10	2.93		10	1.73		10	3.63		10	3.58		10	2.51		10	1.39
			11	1.29		11	1.51		11	2.46		11	2.29		11	2.85		11	3.83		11	2.07		11	2.22
			12	2.65		12	0.70		12	1.46		12	2.31		12	3.26		12	2.83		12	2.04		12	2.73
			平均	1.28		平均	1.03		平均	2.55		平均	2.04		平均	2.35		平均	2.89		平均	1.85		平均	1.85
		両断面合計			2.31			両断面合計			4.59			両断面合計			5.23			両断面合計			3.70		
	C3		1	2.10		1	1.82		1	3.12		1	2.50		1	3.82		1	5.37		1	3.16		1	2.64
			2	1.49		2	1.66		2	1.19		2	1.17		2	1.19		2	4.56		2	5.16		2	3.13
			3	2.88		3	3.59		3	3.06		3	3.72		3	3.99		3	5.99		3	0.49		3	0.54
			4	2.37		4	1.96		4	-		4	-		4	-		4	-		4	4.83		4	-
			5	1.96		5	2.91		5	0.68		5	1.43		5	1.09		5	1.89		5	-		5	-
			6	2.55		6	1.83		6	3.24		6	4.72		6	4.66		6	6.13		6	3.43		6	1.34
			7	2.68		7	2.73		7	-		7	-		7	-		7	-		7	5.44		7	4.51
			8	2.24		8	2.96		8	2.52		8	2.30		8	-		8	-		8	-		8	-
			9	2.54		9	3.09		9	3.55		9	3.29		9	2.64		9	3.03		9	5.01		9	2.54
			10	2.19		10	4.04		10	2.73		10	3.71		10	5.11		10	5.98		10	5.60		10	5.20
			11	3.06		11	3.28		11	4.12		11	3.30		11	4.73		11	5.09		11	5.33		11	4.92
			12	2.94		12	3.70		12	4.06		12	4.46		12	3.04		12	3.66		12	4.76		12	3.88
			平均	2.42		平均	2.80		平均	2.83		平均	3.06		平均	3.36		平均	4.63		平均	4.32		平均	3.19
		両断面合計			2.42			両断面合計			5.89			両断面合計			8.00			両断面合計			7.51		
	C4		1	1.80		1	1.17		1	1.58		1	0.94		1	1.91		1	2.53		1	1.69		1	1.73
			2	1.50		2	1.12		2	2.13		2	2.33		2	1.84		2	1.15		2	1.00		2	1.69
			3	0.86		3	1.89		3	3.42		3	1.26		3	2.54		3	2.93		3	1.54		3	1.67
			4	-		4	-		4	-		4	2.58		4	-		4	-		4	1.88		4	1.83
			5	2.64		5	1.84		5	3.92		5	1.82		5	1.06		5	3.38		5	-		5	-
			6	1.94		6	2.06		6	-		6	-		6	3.18		6	3.47		6	1.88		6	2.90
			7	-		7	-		7	3.46		7	2.58		7	3.15		7	-		7	2.39		7	1.70
			8	2.27		8	3.37		8	3.97		8	1.58		8	4.02		8	4.64		8	-		8	-
			9	1.72		9	2.11		9	-		9	-		9	-		9	-		9	1.78		9	3.15
			10	1.25		10	2.09		10	3.77		10	3.85		10	3.64		10	4.58		10	3.58		10	2.60
			11	2.07		11	2.98		11	3.99		11	3.41		11	4.05		11	4.18		11	2.33		11	2.57
			12	1.98		12	2.87		12	4.43		12	3.83		12	3.52		12	4.30		12	2.73		12	1.60
			平均	1.80		平均	2.15		平均	3.41		平均	2.42		平均	2.89		平均	3.46		平均	2.08		平均	2.14
		両断面合計			2.15			両断面合計			5.83			両断面合計			6.35			両断面合計			4.22		
	平均	2.65						4.74						5.78						4.46					

４．５　PC 鋼材の引張試験

（１）試験方法

PC 鋼材の機械的性質を確認する目的で**付表 7.4** に示す支間中央部で採取した PC 鋼材（C2 ケーブル）を用いて引張試験を実施した。試験は，PC 鋼材の 1 ケーブル（12S12.7）に配置されている 12 本で実施した。

（２）PC 鋼材引張試験

付写真 7.6(a)の支間中央部の C2 ケーブルにて引張試験を実施した。

<u>0.2%永久伸びに対する試験力の測定結果</u>

C2 ケーブルの 0.2%永久伸びに対する試験力は 180.0kN であり，JIS G 3536「PC 鋼線および PC 鋼より線」SWPR7BL の規格値である 156.0kN 以上を満足している。

<u>最大試験力・破断伸びの測定結果</u>

C2 ケーブルの最大試験力の平均値は 189.7kN，破断伸びの平均値は 8.2%であった。これらの測定値は，JIS G 3536「PC 鋼線および PC 鋼より線」SWPR7BL の規格値である 183.0kN 以上，3.5%以上をそれぞれ満足している。

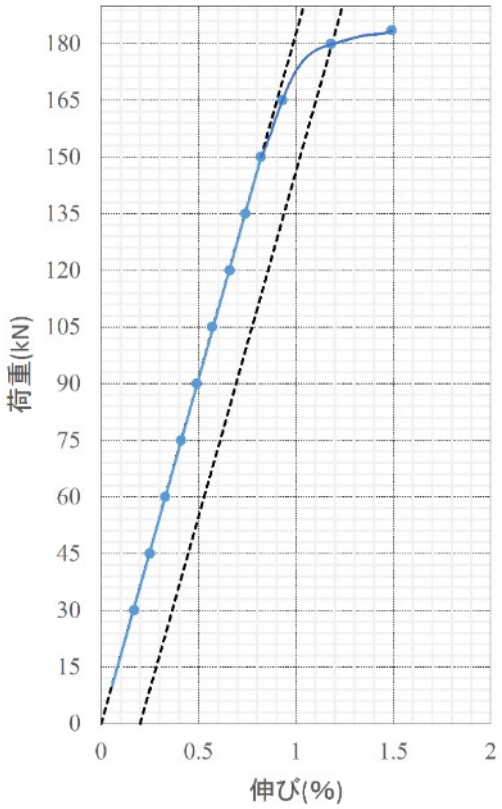
<u>まとめ</u>

C2 ケーブルの PC 鋼より線は，現行の規格である JIS G 3536「PC 鋼線および PC 鋼より線」のうち，SWPR7BL に相当するものであると確認でき，全ての試験片で規格値を満足する結果が得られた。

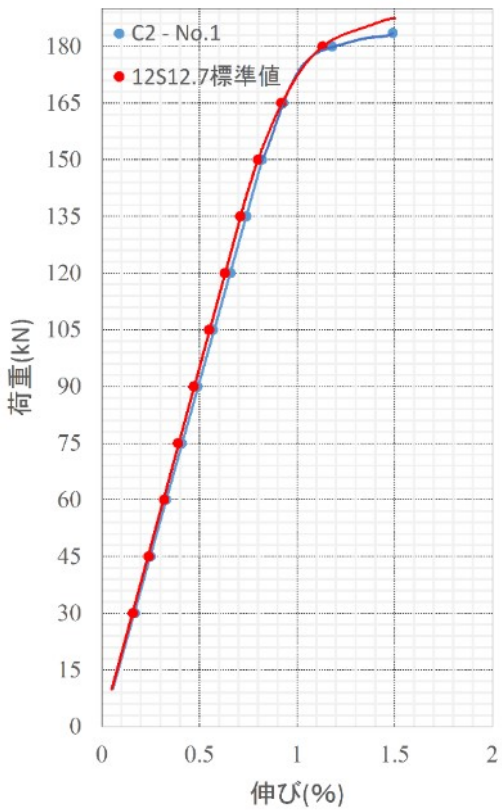
引張試験における荷重－伸び曲線図を**付図 7.12**，**付図 7.13** に示す。**付図 7.12** はアヒン橋 C2 ケーブル PC 鋼より線の試験結果を，**付図 7.13** は試験結果とアヒン橋建設時のメーカー標準値[2)]の両者を比較したものである。**付図 7.13** のとおり PC 鋼より線の荷重－伸び曲線は，建設時のメーカー標準値とほぼ一致する結果となった。この結果から，PC 鋼線は腐食等の劣化を生じておらず，今回の試験から PC 鋼材の機械的性質においても問題ないことが確認できた。

付表 7.4　アヒン橋 C2 ケーブル PC 鋼より線φ12.7mm の試験結果

アヒン橋	PC 鋼材 No.	径 (mm)	最大試験力 (kN)	0.2%永久伸びに対する試験力(kN)	伸び GL=600mm (%)	よりの長さ D×倍
C2 ケーブル	No.1	12.75	191	180	8.3	13.5
	No.2	12.75	190	－	8.6	13.4
	No.3	12.75	190	－	7.4	13.4
	No.4	12.80	193	－	8.4	13.1
	No.5	12.79	189	－	8.8	12.9
	No.6	12.82	189	－	8.2	13.1
	No.7	12.81	189	－	8.1	13.2
	No.8	12.82	188	－	7.9	13.1
	No.9	12.80	189	－	8.5	13.1
	No.10	12.81	188	－	7.6	13.1
	No.11	12.82	191	－	8.5	13.5
	No.12	12.83	189	－	7.9	13.0
	Ave.	**12.80**	**189.7**	**180**	**8.2**	**13.2**
JIS G 3536:2014　規格値 SWPR7BN または SWPR7BL		＋0.4 －0.2	≧183	≧156	≧3.5	12－18



付図 7.12　荷重−伸び曲線



付図 7.13　比較図

５．調査結果のまとめ

今回の調査結果から以下のことが確認できた。

（１）グラウトの充填状況は極めて良好であり，PC 鋼材の保護の目的を充分に果たしていた。

（２）充填不足が生じやすい巻上げ開始位置から定着部までの位置においても，空隙は認められなかった。

1999 年にグラウトのノンブリーディングが標準化されノンブリーディング型のグラウト混和剤が用いられるようになったことに加えて，ポンプの性能が大幅に改善されたことが良好なグラウト施工に繋がったと考えられる。これらの改善策はグラウトの充填度を高めるために非常に有効であることが確認できた。

【参考文献】

1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2014 年

2) 極東鋼弦コンクリート振興株式会社：FKK フレシネー工法施工基準，2000 年

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No.488 March 2016

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課

〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754