

## 13.7 落橋等の重大事故を防止するための調査・診断技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越潤，木村嘉富，本間英貴，  
澤田守，榎本忠夫，廣江亜紀子

### 【要旨】

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が急速に進む中で、近年、国内ではトラス橋斜材の腐食欠損に伴う破断や PC 橋の PC 鋼材の腐食・破断等が発生している。これらの橋梁形式における主部材の腐食損傷については橋全体系の安全性に重大な影響を及ぼす可能性があり、構造物の状態を適切に調査・診断するための技術が求められている。本研究では、鋼トラス橋や PC 橋を主な対象として、損傷部位・程度に応じた、橋全体系の安全余裕を把握するとともに、耐荷性能喪失に至る過程を検討する。また、部材レベルの残存耐荷性能を評価する手法と詳細調査から措置判断に至るまでの考え方、手法を検討する。

キーワード：トラス橋，PC 橋，維持管理，腐食，耐荷性能

### 1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が急速に進む中で、近年、落橋等の重大事故につながりかねない損傷事例が顕在化している。

鋼橋では、鋼トラス橋において重大損傷が報告されている。平成 19 年に国道 23 号木曾川大橋、国道 7 号本荘大橋において、コンクリート埋込部の腐食による斜材の破断が発生している。このようなトラスやアーチといった橋梁形式の主構部材においては、部材の損傷が橋全体系の安全性に与える影響が大きく、一部材の破断が重大損傷につながるおそれがある。

一方、コンクリート橋では、塩害による鋼材の腐食や破断が報告されている。平成 21 年に国道 18 号妙高大橋において、一部の PC 鋼材の腐食・破断が確認された。これらの損傷についても、損傷部位によっては落橋や重大損傷につながるおそれがある。

いずれも、設計計算上、構造系が成立する上で不可欠な部材の損傷事例であり、このような重大事故を起こす可能性のある損傷については、早期に把握し、状態に応じて通行規制等の適切な措置を行う必要がある。また、前述した国内の損傷事例は、橋全体の構造的冗長性（リダンダンシー）等により、部材損傷が発見された時点では落橋に至っていないものと考えられるが、今後、重大事故を未然に防ぐためには、部材損傷が橋全体の崩壊に及ぼす影響や崩壊メカニズムについて明らかにしていく必要がある。

このような背景から、本研究では、鋼トラス・アーチ

橋及び PC 橋を主な対象として、損傷部位・程度に応じた、橋全体系の安全余裕（構造的冗長性）を把握するとともに、耐荷性能喪失に至る過程（崩壊メカニズム）について検討する。また、部材レベルの残存耐荷性能を評価する手法と構造的冗長性を踏まえた詳細調査から措置判断に至るまでの考え方、手法について検討する。

平成 25 年度は、平成 24 年度に引き続き、腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部と斜材を対象に載荷試験及び FEM 解析を行い、破壊性状及び残存耐荷力を把握するとともに、腐食した橋梁部材の耐荷力評価手法について検討した。また、塩害により劣化したポストテンション PC 桁を対象として、過年度に実施した載荷試験や解体調査等の研究を踏まえ、PC 鋼材の力学的特性や FEM 解析による劣化 PC 桁の耐荷力推定を行い、材料特性や各検査項目および検査精度が耐荷力に与える影響について検討した。

研究を進めるにあたり、鋼トラス・アーチ橋を対象とした検討については、早稲田大学、首都大学東京との共同研究「劣化損傷の生じた橋梁部材の調査・診断手法に関する研究」（平成 25～27 年度）を実施している。

### 2. 腐食劣化の生じた鋼トラス橋部材の残存耐荷力に関する検討

#### 2.1 検討概要

腐食劣化の生じた鋼トラス橋の斜材を含む格点部の耐荷力評価手法の開発を目的として、約 50 年間供用され腐食損傷により架け替えに至った鋼トラス橋の撤去部材

から切り出したトラス格点部を用いて、過年度に実施した4体の格点部(P25d, P72d, P72u, P73d)に引き続き、格点部P25uと斜材D52uについて、腐食量計測、荷重試験及び弾塑性有限変位解析を行い、破壊性状及び残存耐荷力を把握するとともに残存耐荷力評価手法を検討した。

2.2 対象試験体

対象とした橋梁は、一般国道124号線にて千葉県と茨城県との県境の利根川に架かる銚子大橋であり、橋長407mの側径間にゲルバー吊構造を有する鋼5径間連続下路式トラス橋である。図-2.1に対象橋梁を示す。1962年に建造され、2000年の調査結果では、交通量は21,251台/12h、大型車混入率は8.5%であった。本橋は、塩害による部材の腐食損傷が著しく、過去に上下横構の交換、主構、床組の当板添接等の大規模な補修補強を繰り返してきた。供用停止前には、腐食欠損による部材耐荷力の低下により、通行車両が20トン以下に制限されており、

2009年に新橋の供用開始に合わせて撤去されている。

対象橋梁の全体図及び試験体とした格点部及び斜材の位置図を図-2.2に示す。試験体は荷重試験を実施するにあたり、塗膜を除去して後述する腐食量計測を実施した。図-2.3、図-2.4に塗膜除去後の試験体の状況を示す。塗膜除去においては、塗膜の状況に応じてハンマーによる手はつりとジェットタガネを併用し、狭隘で工具による作業が困難な箇所についてはウォータージェットを用いることで、鋼部材の強度特性に影響を与えないように配



図-2.1 撤去前の対象橋梁(手前)と新橋(奥)

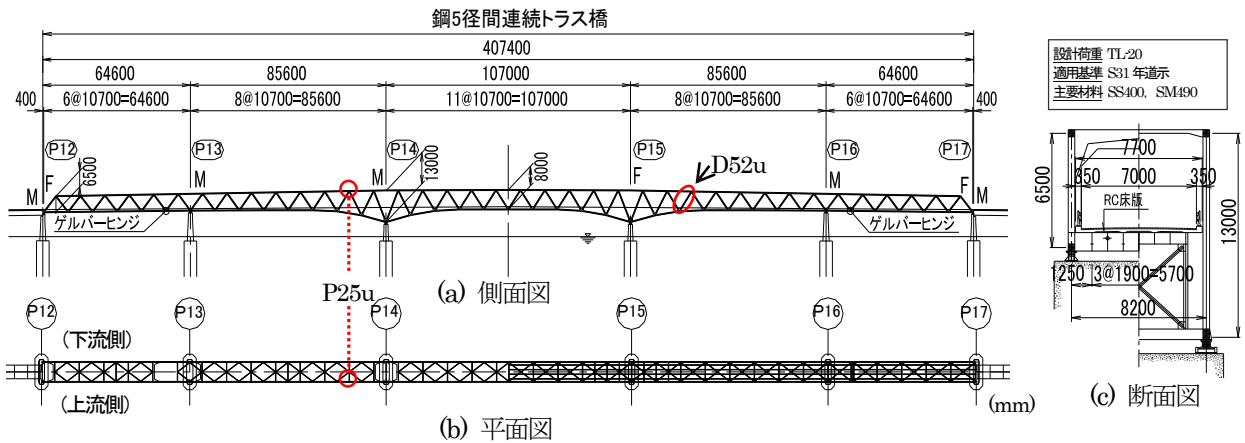


図-2.2 対象橋梁の全体図及び試験体の位置

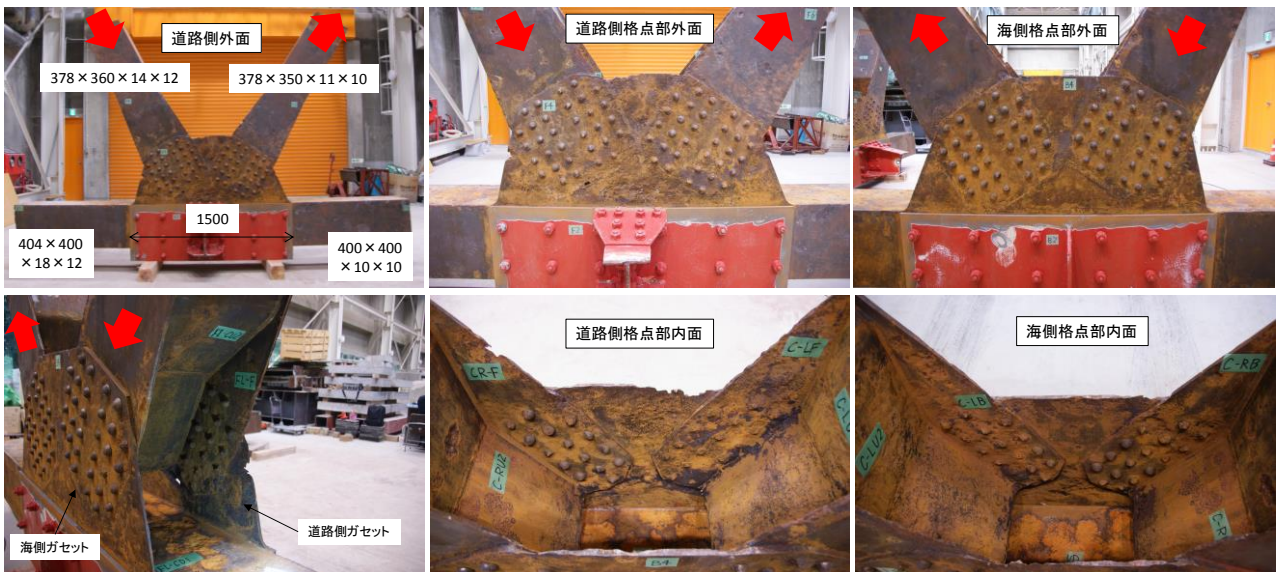


図-2.3 塗膜除去後の試験体 (P25u)

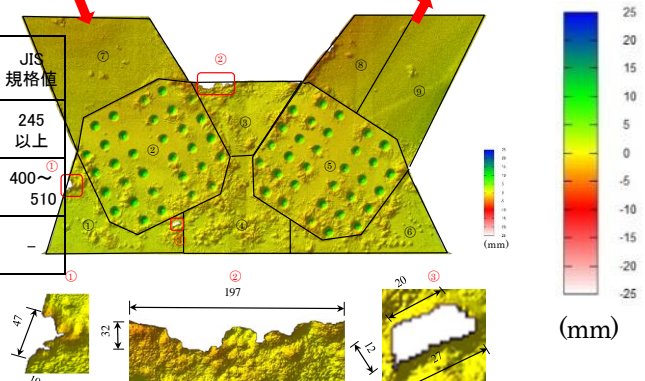


図-2.4 塗膜除去後の試験体 (D52u)

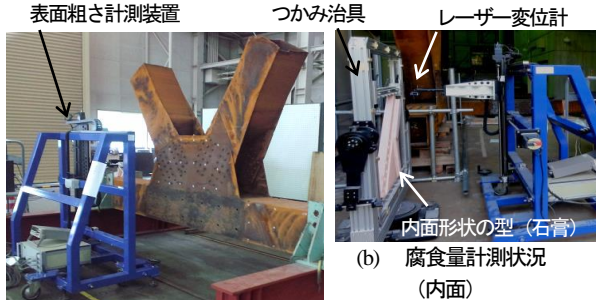
表-2.1 鋼材の引張試験結果

	格点部 P25u					斜材 D52u <sup>注3)</sup>		JIS規格値
	圧縮斜材		引張斜材		ガセット <sup>注2)</sup>	ウェブ	フランジ	
	ウェブ <sup>注1)</sup>	フランジ <sup>注1)</sup>	ウェブ <sup>注1)</sup>	フランジ <sup>注1)</sup>				
降伏点 $\sigma_y$ ( $N/mm^2$ )	262.2	276.0	285.3	276.5	264.9	272.7	274.4	245以上
引張強さ $\sigma_u$ ( $N/mm^2$ )	434.1	456.4	467.3	462.1	432.0	439.6	438.5	400~510
弾性係数 $E$ ( $kN/mm^2$ )	206.3	203.2	206.7	207.4	207.3	203.7	206.9	-

注1)各2体の試験体の平均値とした。  
 注2)ガセットと同一面の圧縮側上弦材ウェブから切り出した3体の平均値とした。  
 注3)各3体の試験体の平均値とした。



(a)道路側外面



(b) 腐食量計測状況 (内面)

(a) 腐食量計測状況 (外面)

図-2.5 腐食量計測状況及び計測装置

慮した。試験体の鋼種は、ガセット及び斜材ともに SM400, リベット (鋼種 SV330) で接合されている。鋼材の引張試験結果 (JIS Z 2241) を表-2.1 に示す。

### 2.3 腐食量計測

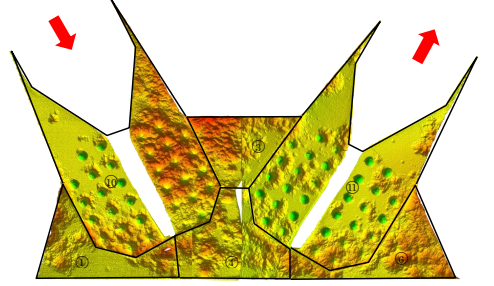
#### 2.3.1 計測方法

塗膜を除去した試験体について、載荷試験前にレーザー変位計を組み込んだ表面粗さ計測装置<sup>21)</sup>を用いて腐食計測を行った。図-2.5 に腐食量計測状況及び計測装置を示す。ガセット内面は、石膏で型を取り、その型の表面凹凸を計測した。計測ピッチは、詳細なデータを取ることを目的として格点部では 1mm ピッチとし、斜材については腐食が少ないことから、計測精度にほとんど影響を与えないことを確認して 2mm ピッチで実施した。

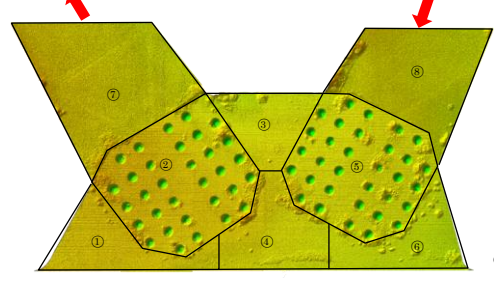
#### 2.3.2 計測結果

##### (1) 格点部 P25u の計測結果

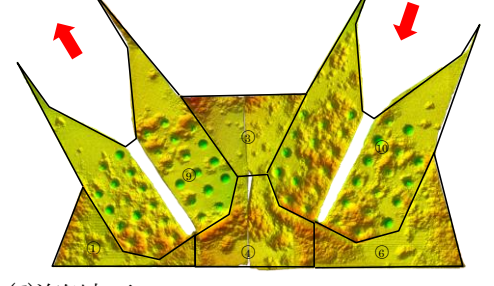
格点部 P25u における腐食量計測結果のコンター図を



(b)道路側内面



(c)海側外面



(d)海側内面

図-2.6 腐食量計測結果 (P25u)

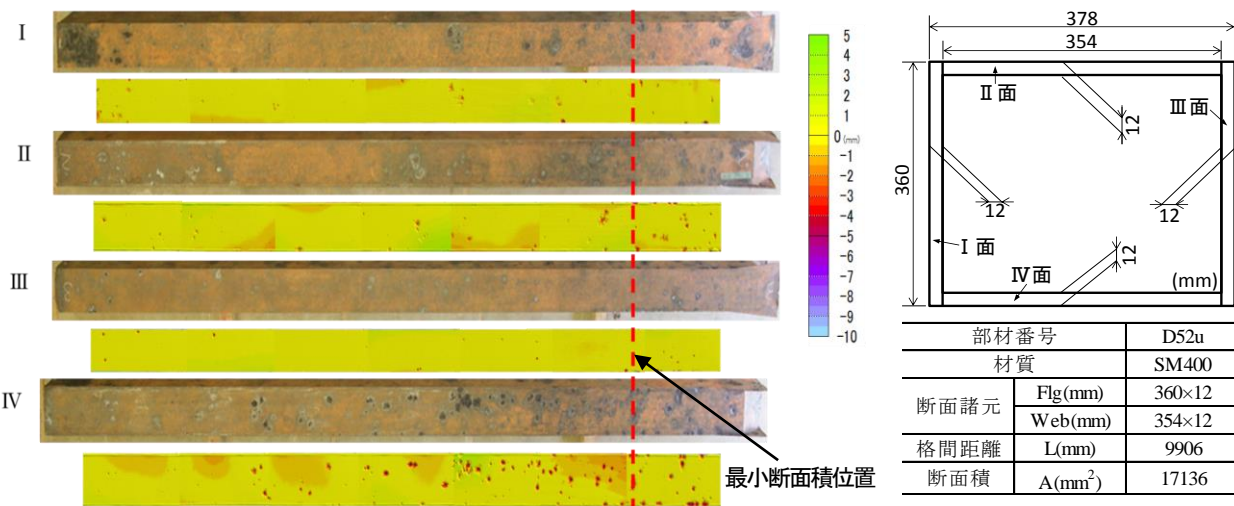


図-2.7 斜材 D52u の腐食計測結果と断面諸元

図-2.6 に示す。腐食量はガセット及び斜材を①～④までの部位ごとに平均化して残存板厚及び腐食率（減肉厚／元板厚）を整理中であるが、腐食深さは道路側の引張斜材取付き部（図中⑥）で最大 2.9mm、腐食率 24.2%となり板厚が約 1/4 まで減肉していた。腐食範囲はガセット全面に及ぶが、特に斜材取付き部の境界部周辺に腐食が激しく、外面よりも内面側の腐食が著しい傾向にある。これは、外面に比べて内面側では雨水による洗い流されにくいいため、海岸近くの厳しい塩害環境下であった本橋においては、特にこの部位の腐食が進行して板厚減少量が著しかったものと推察される。また、道路側のガセット部では、斜材端部や自由端部が腐食劣化により孔食し、図-2.6(a)に示す 3 箇所では完全に欠損していることから、横構などが取付く道路側の方が海側に比べて腐食環境が厳しかったことがうかがえる。

(2) 斜材 D52u の計測結果

斜材 D52u の諸元及び腐食量計測結果のコンター図を図-2.7 に示す。計測対象は外面のみとし、斜材内部の腐食は赤錆程度であったことから、腐食による板厚欠損はないものとして、計測は実施していない。計測の結果から、計測範囲における平均板厚欠損率及び最大断面欠損率を表-2.4、表-2.5 に示す。コンター図より格点部に近い斜材端部付近で孔食が見られるものの、全体的に腐食レベルは小さく、平均残存板厚は 11.9mm、平均板厚欠損率は 0.7%程度と小さい。しかし、IV面については、他の面に比べて孔食が広範囲に及び、孔食による断面欠損が見られた。これらの腐食状況から、雨水による洗い流し効果により、一般部に比べて飛来塩分や雨水が溜まりやすい格点付近の斜材端部の腐食環境が厳しかったと考

表-2.4 平均板厚欠損率 (D52u)

	健全板厚 $t_0$ (mm)	平均残存板厚 $t_{avg}$ (mm)	標準偏差	平均板厚欠損率 $R_{ta}=(t_0-t_{avg})/t_0 \times 100$ (%)
D52u	12.00	11.92	0.73	0.67

表-2.5 最大断面欠損率 (D52u)

	健全断面積 $A_0$ (mm <sup>2</sup> )	最小断面積 $A_{min}$ (mm <sup>2</sup> )	最大断面欠損率 $R_{ta}=(A_0-A_{min})/A_0 \times 100$ (%)
D52u	17136	16623	2.99

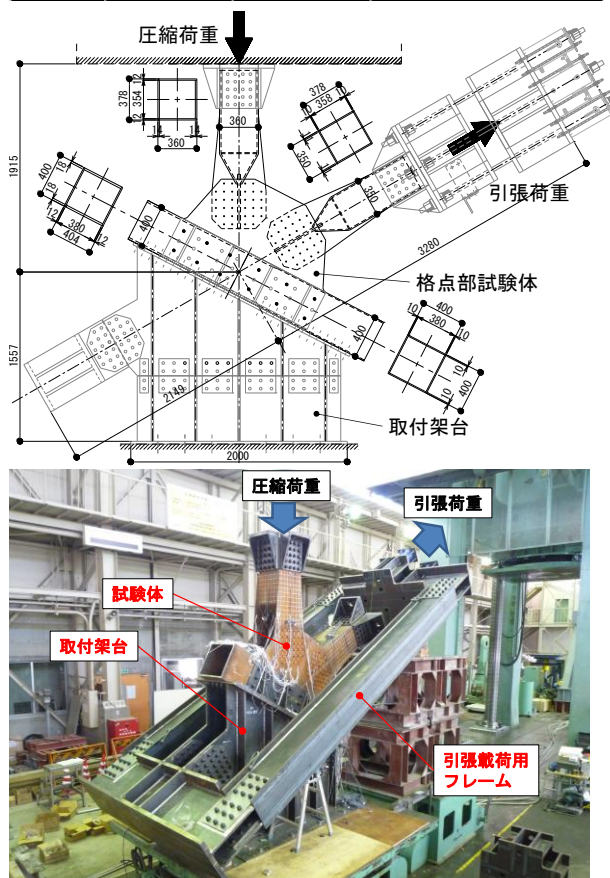


図-2.8 格点部の試験体と試験治具の概要

えられる。また、IV面に腐食が集中している点については、現地でIV面が下側になるように配置され、塩分を含んだ水分が停滞しやすかったことなどが原因と考えられる。なお、図中の赤破線で示す最小断面積位置における最大断面欠損率は2.99%であった。

## 2.4 荷重試験と弾塑性有限変位解析

### 2.4.1 試験方法

#### (1) 格点部

図-2.8に試験体と試験治具の概要を示す。格点部の荷重試験は、過年度の荷重方法を参考<sup>22)</sup>に、圧縮・引張斜材にそれぞれ圧縮荷重と引張荷重を漸増荷重する2軸荷重で実施した。試験体は上弦材格点部であるが、上下を逆にして取付架台に固定し、圧縮斜材側は30MN大型構造部材万能試験機により、引張斜材側は取付架台に自定式の引張荷重用フレームを取付け、センターホールジャッキにより荷重した。荷重は鉛直変位制御により0.2mmピッチ(荷重速度は0.01mm/sec)とし、試験機側の圧縮荷重板と試験体は固定せずに面接触させた。

圧縮着目荷重時の圧縮側と引張側の荷重比率は、両者の設計軸力が概ね同値であることから、荷重増分は同じとした。ただし、引張荷重については、先に引張側で破壊しないように1500kNを上限とし、自定式フレームは死荷重が試験体に作用しないように支保工で支持した。



図-2.9 圧縮斜材の試験体と試験治具の概要

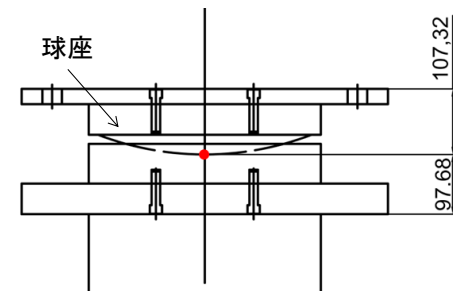


図-2.10 試験体(D52u)上下端の構造

また、試験時には荷重点および試験体の面外・面内方向への変位について接触型変位計で、試験体の斜材及びガセットのひずみについて1軸及び3軸方向ひずみゲージで、ガセットと斜材間の相対変位についてクリップゲージで計測を行った。

#### (2) 圧縮斜材

図-2.9に圧縮斜材の試験状況を示す。試験体は、切り出された撤去部材を6000mmに整形後、試験時に両端がピン支持となるように球座をセットした。試験体の上下端の球座構造を図-2.10に示す。荷重は軸方向への一軸圧縮試験とし、鉛直変位制御により0.2mmピッチで荷重し(荷重速度は0.01mm/sec)、30MN大型構造物万能試験機を用いて実施した。なお、試験体端面は試験機の荷重治具底板とメタルタッチとした。

#### 2.4.2 圧縮斜材の弾塑性有限変位解析

本研究では、試験条件に合わせて試験体及び球座などの試験治具をモデル化し、腐食減肉を伴う部材の残存耐力評価を行うために、腐食量計測結果をモデルに反映した弾塑性有限変位解析を行った。解析モデルの概要を図-2.11に示す。解析には、汎用有限要素解析ソフトウェアMSC.MARC.2011.1.0を使用し、非線形解析手法には弧長増分法とNewton-Raphson法を併用した。モデル化においては、荷重試験状況を再現するために、両端にセ

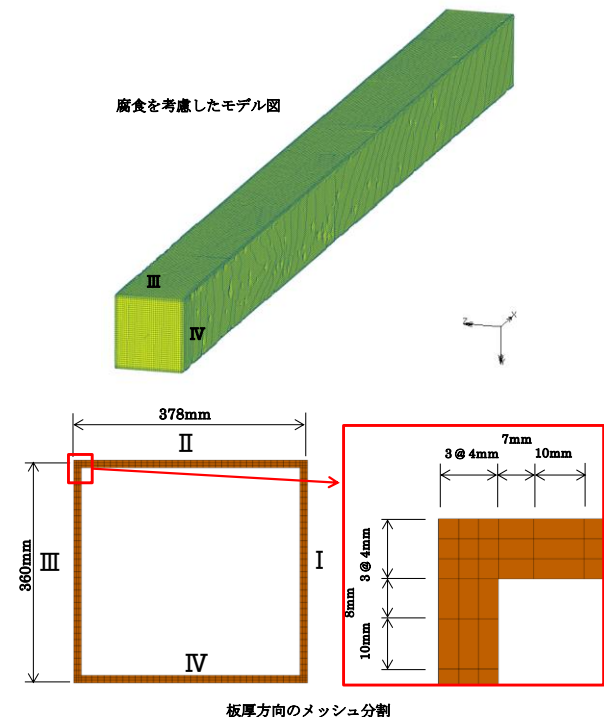


図-2.11 試験体(D52u)のモデル化

表-2.6 試験体(D52u)の構造諸元と耐荷力算定値

部材番号	有効座屈長	断面積	断面二次モーメント		細長比		幅厚比		耐荷力	
	$L_k$ mm	A mm <sup>2</sup>	$I_y$ ×10 <sup>8</sup> mm <sup>4</sup>	$I_z$ ×10 <sup>8</sup> mm <sup>4</sup>	$\lambda_y$	$\lambda_z$	(b/t) <sub>max</sub>	R	$P_{uy}$ kN	$P_{uz}$ kN
D52u	6195.36	17136	3.78	3.51	0.50	0.48	28.00	0.54	4184	4145

ットした球座を考慮し、有効座屈長を考慮するため両端に梁要素による剛棒を取り付けた。また、剛棒から斜材へ均等に荷重が載るように斜材の両端部には載荷板を用いた。斜材部分はソリッド要素、載荷板はシェル要素、剛棒は梁要素によりモデル化した。斜材部分のメッシュ分割について、長手方向(x軸方向)に10mm間隔とし、板厚方向分布は3分割とした。断面内のy軸方向、z軸方向もできる限り10mm間隔とし、端数分を四隅に寄せ、分割した。境界条件は、実験と同様両端ピン支持とした。構成則は材料試験結果からトリリニア型とした。なお、斜材の初期たわみは試験体を試験機にセットした状態で測定した値とし、溶接残留応力は測定していないことから考慮していない。

なお、斜材の道示に基づく耐荷力算定結果は表-2.6及び図-2.12に示す通りである。

## 2.5 試験結果

### 2.5.1 格点部

図-2.13にP25uの試験後の変形状態を示す。P25uは、過年度に載荷試験を実施したP25dと同一諸元であり、両者ともにガセット部の局部座屈が生じる破壊モードとなった。変形状況としては、圧縮斜材先端部の両ガセットが外側に面外変形し、自由辺部では両ガセットで道路側に面外変形を生じた。

図-2.14に載荷試験で得られた荷重と載荷方向変位の関係を示す。図中にP25dの試験結果を併記するが、両者とも載荷荷重が小さい初期の段階では概ね線形性が保たれており、徐々に勾配が緩やかになりながら最大荷重に達し、ガセット先端部及び自由辺部の局部座屈により面外変形を起こした。P25dに比べてP25uの耐荷力が低下した要因としては、P25uの方が全体的に腐食しており、上流側のガセットでは斜材先端部に直径1cm程度の欠損に伴う孔があいていることから、腐食による不均一な減肉が影響しているものと考えられる。なお、P25d、P25uともに最大荷重以降は、ガセットの変形の進行に伴い荷重は緩やかに低下しており、急激な耐荷力の減少は見られなかった。また、図中には過年度に実施したP25dの解析値<sup>2)3)</sup>を併記するが、腐食を考慮した解析による耐荷力の低下率は、ガセットの平均的な減厚の比率に概ね

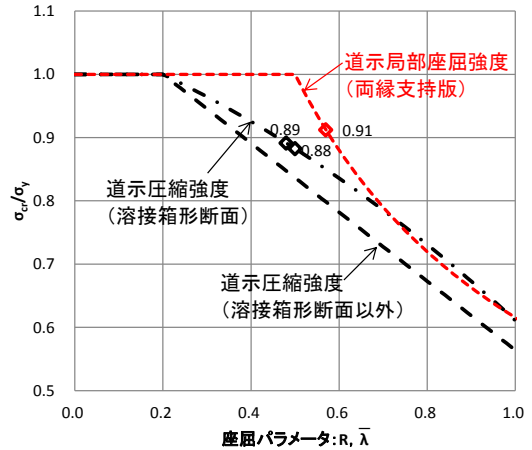


図-2.12 斜材試験体の座屈パラメータ

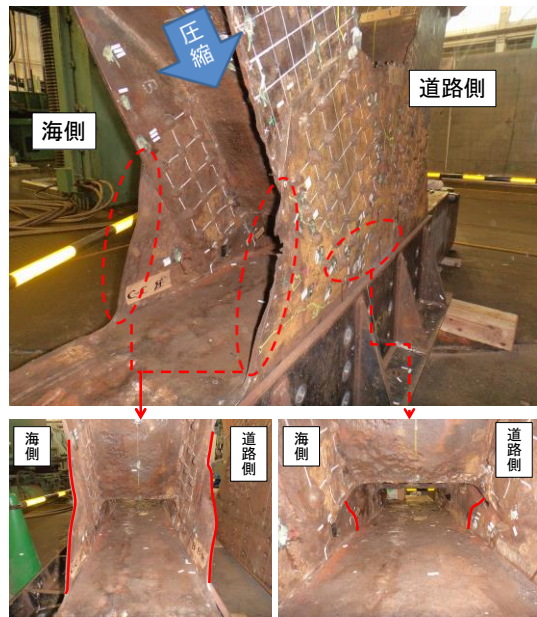


図-2.13 除荷後の試験体の変形状況 (P25u)

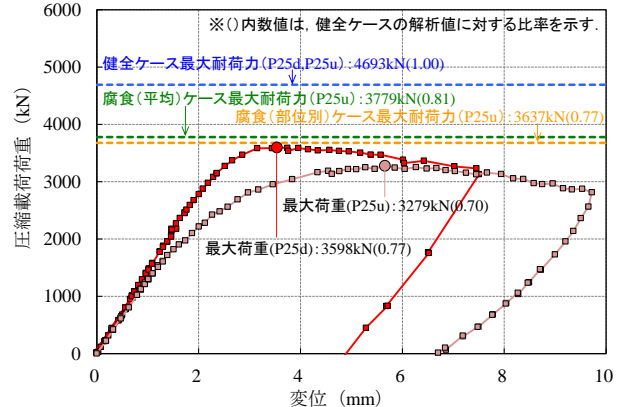


図-2.14 圧縮荷重-載荷方向変位曲線

近い値を示していた。また、最大荷重について、試験値と解析値は良く一致しており、かつ、ガセットの残存板厚を部位毎に考慮することで若干ではあるが解析値は試験値に近づく傾向が確認されている。今後は、P25uを対象とした解析を実施することで、同様な傾向が得られるか確認するとともに、耐荷力算出のための腐食量のモデル化手法について検討する予定である。

### 2.5.2 圧縮斜材の載荷試験結果

D52uの載荷試験後の変形状況を図-2.15に示す。腐食量計測時に最も腐食が激しかったIV面が圧縮側となる全体座屈モードで変形し、局部座屈は確認されなかった。図-2.16に載荷試験結果と解析結果の荷重-軸方向変位の関係を示す。載荷試験の最大荷重は4461kNであり、その時の鉛直変位量は約16mmであった。一方、解析結果では最大荷重が4382kN、この時の軸方向変位が10.3mmであった。試験結果との誤差としては、荷重で2%、軸方向変位で38%であり、荷重についてはよく再現できている。軸方向変位量の誤差が大きい要因としては、残留応力等初期不整のモデル化の影響や両端部の境界条件の影響などが考えられるが、今後詳細な検討を行う必要がある。

載荷試験により得られた耐荷力（道示に基づく耐荷力 $P_{cr}$ により無次元化）と、腐食量計測結果による最大断面欠損率の関係を図-2.17に示す。図中には、D52uの試験結果とともに、H24年度に実施した模擬腐食させた圧縮斜材試験体の結果も示しているが、耐荷力と最大断面欠損率の相関性が高いことから、最大断面欠損率による耐荷力の概略推定が可能であると考えられる。

### 2.6 残存耐荷力評価手法の検討

鋼トラス橋格点部の断面もしくは部位に想定される破壊性状には、図-2.18に示す①～⑦の限界状態が考えられる。この場合、格点部の耐荷力は、これらの各限界状態により得られる耐荷力の最小値として与えられる。ここでは、トラス格点部を起点とした過去の崩落、損傷事例<sup>24)</sup>や腐食が懸念される箇所を考慮し、⑤の圧縮斜材端部におけるガセットの局部座屈を対象に耐荷力評価式<sup>25)</sup>を検討した。

#### 2.6.1 格点部の破壊性状と既往研究の整理

格点部の圧縮耐荷力に関しては、文献<sup>26)</sup>において、圧縮斜材端部の圧縮力を受けるガセット領域(図-2.18⑤)を、圧縮力を受ける柱に置き換えた評価式が提案されている。具体的には、圧縮斜材端部の最縁リベット部と弦



図-2.15 除荷後の試験体の変形状況 (D52u)

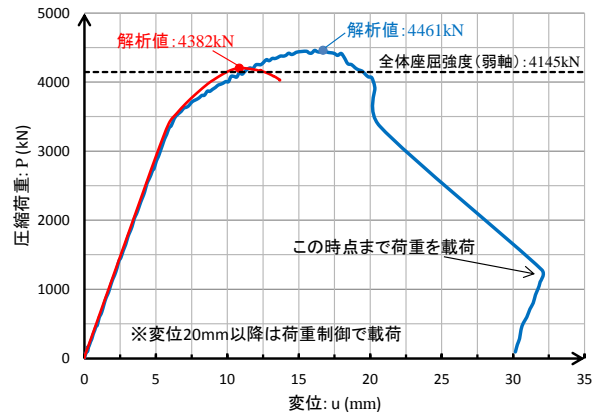


図-2.16 圧縮荷重-載荷方向変位曲線

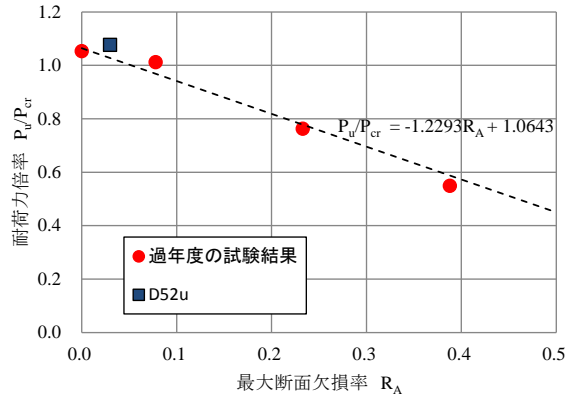


図-2.17 耐荷力と最大断面欠損率の関係

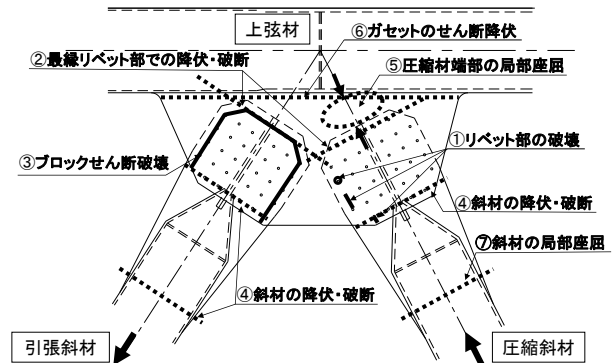


図-2.18 格点部に想定される破壊性状

材の間のガセット領域について、Whitmoreの有効幅を有する圧縮柱と見立てて、AASHTO 道路橋設計示方書で規定される圧縮柱の基準耐荷力曲線から耐荷力を算出している。なお、部材長はWhitmore幅における中心長さとし、ガセットの面外方向を拘束した有効座屈長係数( $\beta$ )として0.5が推奨されている。

図-2.19に、過年度の載荷試験の結果(試験体P25d<sup>2-2</sup>)及びシェル要素を用いた弾塑性FEM解析結果に加えて、ガセット部圧縮耐荷力に着目した既往の国内外の試験・解析結果(腐食なしの健全体)について、文献<sup>26)</sup>中の提案式(抵抗係数は1.0と仮定)を参考に求めた降伏耐荷力の算出結果を示す。なお、腐食格点部試験体P25dの解析値及び算定値は、腐食計測結果を踏まえガセット(板厚12mm)で2.8mmの均一腐食を考慮している。算定値と試験値・解析値との相関係数は0.96と高いが、試験値及び解析値が若干安全側の評価となっている。また、個別のデータについては試験値との差が50%以上となる場合もみられており、圧縮斜材端部を柱とした耐荷機構の考慮だけでは適切に評価できない可能性が考えられる。

2.6.2 耐荷力評価式の検討

過年度に実施した耐荷力試験における破壊後の変形状況やFEM解析結果によれば、圧縮斜材端部の局部座屈に加えて、図-2.20に示す圧縮斜材端部の両側の2つのガセット自由辺部にも変形が生じており、斜材の圧縮力に抵抗していると考えられることから、これらの自由辺部の影響を評価式に考慮することとした。すなわち、本検討では、式(1)に示すような3領域の耐荷力の総和をガセットの圧縮耐荷力とした。

$$P_{gcr} = P_{gcr1} + P_{gsy1} + P_{gsy2} \dots (1)$$

ここで、 $P_{gcr1}$ は有効幅を斜材幅として圧縮柱に見立てた台形箇所(領域C)の圧縮耐荷力とし、部材長( $L$ )を平均値( $(L_1+L_2+L_3)/3$ )、有効座屈長係数( $\beta$ )をガセットの面外方向を拘束したときの道路橋示方書の推奨値である0.65、基準耐荷力を初期不整等の影響が含まれないオイラー曲線として算出した。また、 $P_{gsy1}$ および $P_{gsy2}$ の自由端部については破線部を抵抗断面として、この抵抗断面の降伏耐荷力とした。それぞれの評価式は図中に示す。

以上の結果から、式(1)を用いて算出した耐荷力と既往の試験・解析結果の関係を図-2.21に示す。図-2.19と比べて両者の相関係数は0.98と高く、推定誤差も小さくなっており、構造諸元の違いによる耐荷力の変化を概ね捉えていると考えられる。

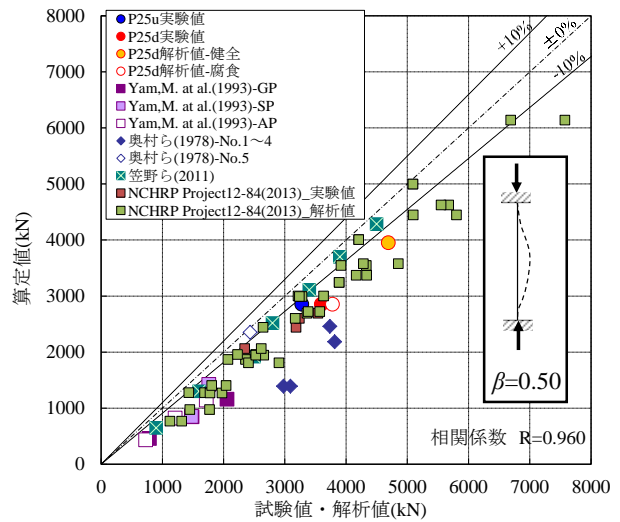


図-2.19 試験・解析結果と耐荷力算定値の関係 (文献3)による算出結果)

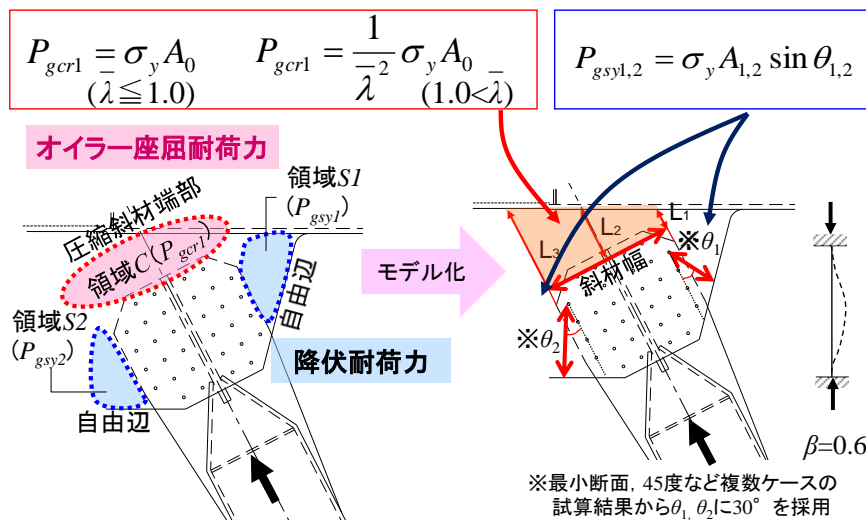


図-2.20 ガセットの3領域と耐荷力評価式



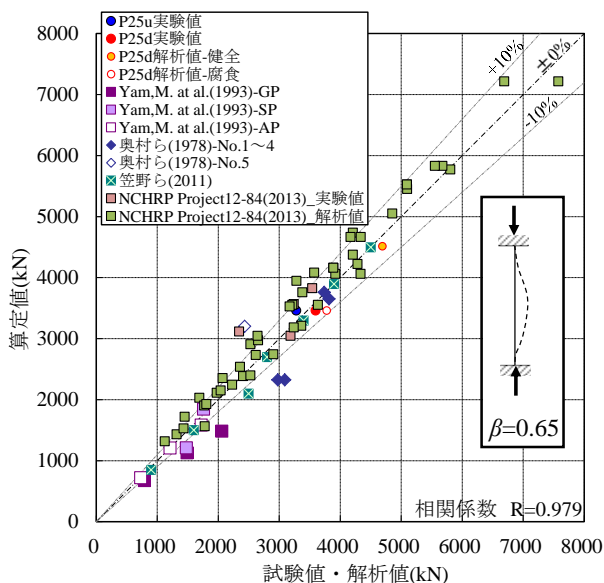


図-2.21 試験・解析結果と耐荷力算定値の関係

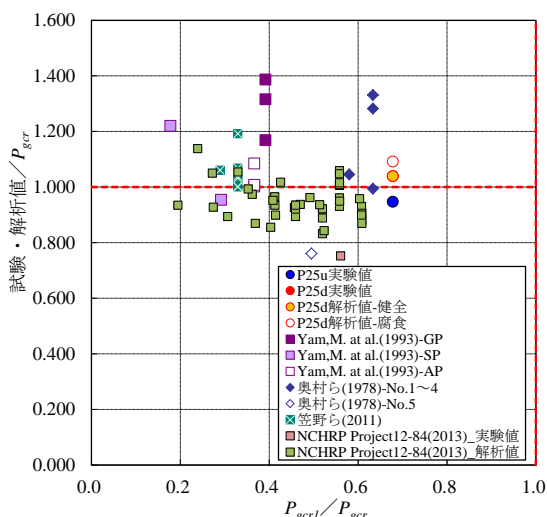


図-2.22 抵抗領域の耐荷力比率

評価式(1)中の圧縮斜材端部の耐力項  $P_{gcr1}$  と試験値・実験値の関係について、 $P_{gcr}$  で無次元化したものを図-2.22に示す。横軸から、構造諸元により  $P_{gcr1}$  の占める割合は20~70%程度と様々であり、自由辺部の抵抗も寄与している可能性が伺われる。また、縦軸より式(1)による算定値と試験・実験値には、両者の違いが最大40%程度と大きい結果も見られており、ばらつきの要因分析と同評価式の適用範囲について、さらに検討が必要である。

## 2.7 まとめ

トラス橋の撤去部材から切り出したトラス格点部(P25u)及び箱断面圧縮斜材(D52u)について、腐食量計測、載荷試験及び弾塑性有限変位解析を行い、破壊性状及び残存耐荷力を把握するとともに残存耐荷力評価手法を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

格点部 P25u を対象とした腐食量計測の結果、腐食深さは道路側の引張斜材取付き部で最大2.9mm、腐食率24.2%となり、板厚が約1/4減肉していた。

斜材 D52u の腐食量計測の結果、端部付近で孔食が見られるものの、全体的に腐食レベルは小さく、平均残存板厚は11.9mm、平均板厚欠損率は0.7%程度であった。

P51d の載荷試験の結果、最大荷重時には圧縮斜材先端部の両ガセットが外側に面外変形し、自由辺部では両ガセットで道路側に面外変形を生じた。載荷試験で得られた荷重と載荷方向変位の関係から、載荷荷重が小さい初期の段階では概ね線形性が保たれており、徐々に勾配が緩やかになりながら最大荷重に達し、ガセット先端部及び自由辺部の局部座屈により面外変形を起こした。同一諸元である P25d に比べて P51d の耐荷力が低下した要因としては、P51d の方が全体的に腐食しており、上流側のガセットでは斜材先端部に直径1cm程度の欠損に伴う孔があいていることから、腐食による不均一な減肉が影響していると考えられる。

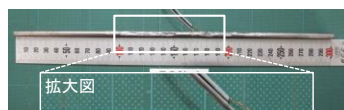
D52u の載荷試験の結果、腐食量計測時に最も腐食が激しかったIV面が圧縮側となる全体座屈モードが支配的となり最大荷重に達した。過年度の試験結果を含めて、載荷試験の結果得られた耐荷力と、腐食量計測結果による最大断面欠損率の相関性は高く、最大断面欠損率による耐荷力の概略推定が可能であると考えられる。

ガセットの圧縮耐荷力に着目した評価式として、既往研究で考慮されている圧縮斜材端部の局部座屈に加えて、圧縮斜材端部の両側の2つのガセット自由辺部の影響を考慮した評価式を提案した。同評価式による算定値と既往の試験・解析値との比較を行い、両者の相関が高く、構造諸元の違いによる耐荷力の変化を概ね捉えていることを確認した。

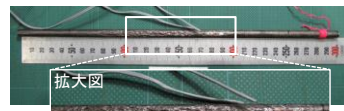
### 3. 塩害により腐食した PC 鋼材の力学的特性

#### 3.1 研究概要

橋梁の耐荷性能を適切に評価するには腐食した鋼材の材料特性を把握することが重要が必要である。その一環として塩害によって損傷を受けた PC 橋について、腐食した PC 鋼材の力学的特性を把握するための研究<sup>3-1),3-2)</sup>が行われているが、これらの研究は、φ5 の PC 鋼材のみを対象としている。そこで今回は、塩害環境にあった PC 橋 2 橋から採取した φ5 および φ7 の腐食 PC 鋼材の引張試験を実施し、直径の異なる PC 鋼材における力学的特性の差異の確認を行った。



(a)PC 鋼材 (φ5)



(b)PC 鋼材 (φ7)

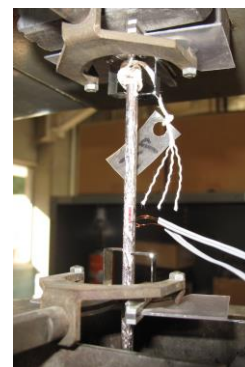


図-3.3 引張試験の様子

図-3.2 試験片

#### 3.2 腐食鋼材の引張試験

##### 3.2.1 実験方法

φ5 の PC 鋼材については本編「4. 数値解析による耐荷力評価に関する検討」で対象とした橋梁から、φ7 の PC 鋼材は同じく日本海沿岸部で 43 年間供用された橋梁<sup>3-3)</sup>から採取した試験片を用いる。2 橋ともに、PC 鋼材に塩害による腐食が確認されている。採取した長さ約 30cm の PC 鋼材を除錆処理したのち、重量を計測し、質量減少率を算出する。部材中にあった PC 鋼材は初期重量の測定が不可能なため、測定した部材のうち最も単位重量が重いものを基本単位重量として使用している。また、目視によりノギスを用いて最小径を計測し、PC 鋼材の断面欠損率を算出した。ここで断面欠損率は、図-3.1 に示すように健全な PC 鋼材の断面積に対する腐食 PC 鋼材の断面積の比率である。引張試験は質量減少率が 0~50% の φ5 の PC 鋼材 32 本と質量減少率が 0~30% の φ7 の PC 鋼材 24 本に対して実施した。

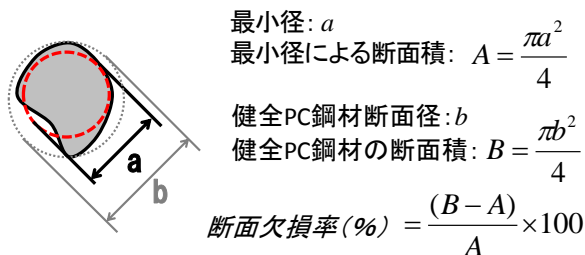


図-3.1 ノギスによる断面欠損率の算出方法

図-3.2 に引張試験前の試験片の一例を示す。目視にて断面積の減少が著しいと判断される位置にひずみゲージを貼付し、鋼材のひずみを測定した。引張試験の様子を図-3.3 に示す。

##### 3.2.2 実験結果と考察

φ5, φ7 それぞれの PC 鋼材について、引張試験による最大荷重残存率と断面欠損率の関係を図-3.4 に示す。なお、鋼材の破断位置は概ね鋼材断面計測位置と一致していた。

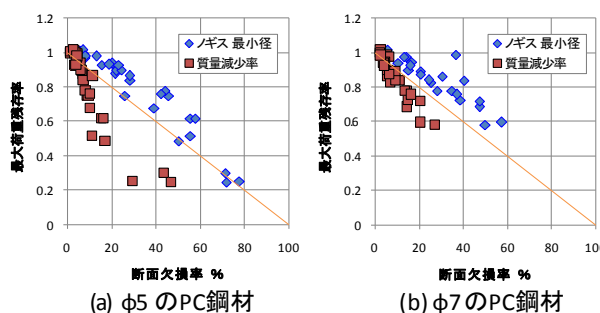


図-3.4 最大荷重残存率と断面欠損率

断面欠損率はノギスを用いて求めたもののほかに、質量減少率に応じて平均的に断面が欠損したと仮定した場合の断面欠損率を用いた。最大荷重残存率の算出においては、引張試験に用いた試験片のうち最も質量減少率の少ないもの各 3 本の最大荷重を、PC 鋼材の基準値として用いた。図-3.4 には最大荷重残存率の減少と断面欠損率の増加が 1:1 となる直線を合わせて図示している。図-3.4 から断面欠損率が増加するにつれ、最大荷重残存率が減少する傾向にあることが読み取れる。また、ノギス計測による最小値を用いた場合は、質量減少率を用いた場合に比べて、断面欠損率の増加に対する最大荷重の減少が小さく、1:1 の直線よりも上方にプロットされる傾向があった。これらの傾向は参考文献<sup>3-2)</sup>に示された傾向に一致する。また、図-3.4 からは、断面欠損率と最大荷重残存率の関係について、ノギス計測による最小径を用いた場合と質量減少率を用いた場合との乖離が、φ7 の PC 鋼材のほうが φ5 よりも小さくなっていることが分かる。

今回用いたφ7のPC鋼材はφ5に比べて、比較的孔食による局所的な断面欠損が少なく、全体的に一樣に腐食しているものが多かった。全体的に一樣に腐食したPC鋼材の断面欠損率は、質量減少率に応じて平均的に断面が欠損したとの仮定による断面欠損率と差が小さくなると考えられる。

参考文献<sup>3-1),3-2)</sup>と比較するため、最大荷重残存率、0.2%耐力残存率、破断伸び残存率について、質量減少率との関係を図-3.5に図示する。0.2%耐力残存率、破断伸び残存率は、最大荷重残存率と同様の手法で算出した。それぞれの残存率の減少と質量減少率の増加が1:1となる直線を合わせて図示している。参考文献<sup>3-1),3-2)</sup>の結果も同図上に示す。図-3.5は今回実施したφ5とφ7のPC鋼材の引張試験においても、最大荷重残存率と0.2%耐力残存率が参考文献のφ5のPC鋼材による結果と同様の傾向になることを示しており、低下の度合いも同程度であった。破断伸び残存率が腐食の比較的軽微なPC鋼材においても大幅に低下するという参考文献の傾向は、今回の結果でも確認できた。しかし、φ7のPC鋼材はφ5のPC鋼材に比べて、破断伸び残存率の減少幅が小さい傾向も確認できるため、破断伸びはPC鋼材の直径により、残存率の減少傾向に差がある可能性がある。

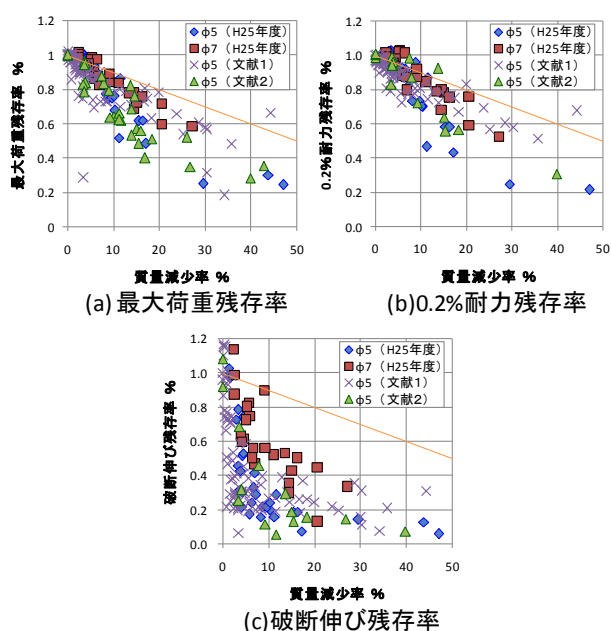


図-3.5 質量減少率との関係

また、今回引張試験を行ったPC鋼材のみに着目すれば、最大荷重残存率、0.2%耐力残存率、破断伸び残存率すべてにおいて、φ7のPC鋼材はφ5のPC鋼材に比べて減少幅が小さい傾向となっている。前述のとおり、今回用

いたφ7のPC鋼材の多くが全体的に一樣に腐食していた。一樣に腐食したPC鋼材は、質量減少率が同程度の局所的な断面欠損を有するPC鋼材と比較した場合、断面欠損率は低い。このため、φ7のPC鋼材は質量減少率が同程度のφ5のPC鋼材に比べて、破断位置における実際の断面欠損が小さかったことが、最大荷重、0.2%耐力、破断伸びの各残存率の減少幅が小さいことの要因と考えられる。

ただし、既往研究の実績も有するφ5と比べて、本年度引張試験を実施したφ7のPC鋼材は本数が少ない。そのため、直径の異なるPC鋼材の力学的特性について十分な比較を行うためには、塩害により腐食したφ7のPC鋼材の引張試験件数を増やす必要がある。

## 4. 数値解析による耐荷力評価に関する検討

### 4.1 検討概要

鋼材腐食の生じたPC橋の曲げ耐荷性状は、撤去したPC桁の荷重試験によりPC鋼材の残存率を用いて概ね推定できることが明らかになっている。また、過年度の研究により、せん断に関する耐荷力評価手法についても、せん断荷重試験で確認された最大荷重から曲げ破壊耐力および斜引張破壊耐力を算出した結果、実験値は鋼材断面減少を仮定した曲げ破壊耐力の計算値とほぼ一致した(詳細は平成24年度報告書を参照)。

しかし、劣化損傷したPC橋において、その都度、桁を撤去し、荷重試験を用いて耐荷力を算出するのは非現実的である。

そこで平成25年度は数値解析による耐荷力評価の研究として、過年度に実施した劣化損傷PC桁を用いた曲げおよびせん断荷重試験結果と外観調査および荷重試験後に実施した解体調査による物性値調査結果より損傷過程及び耐荷力の推定を行い、非破壊検査の各検査項目や検査精度が耐荷力に与える影響について検討を行った。

### 4.2 検討手法

検討手法としては、損傷がないものと仮定した耐荷力の試算と損傷を反映させた耐荷力の試算を行い、それらと比較した。なお、試算は、道路橋示方書に基づく標準的な耐荷力評価方法によるものと、三次元非線形有限要素解析によるものとした。三次元有限要素解析による試算は、外観調査、各非破壊検査、解体調査結果のうち試算結果に及ぼす影響の大きい項目を選定し、荷重試験結果と比較し、妥当性の確認を行った。検討概要を図-4.1に示す。

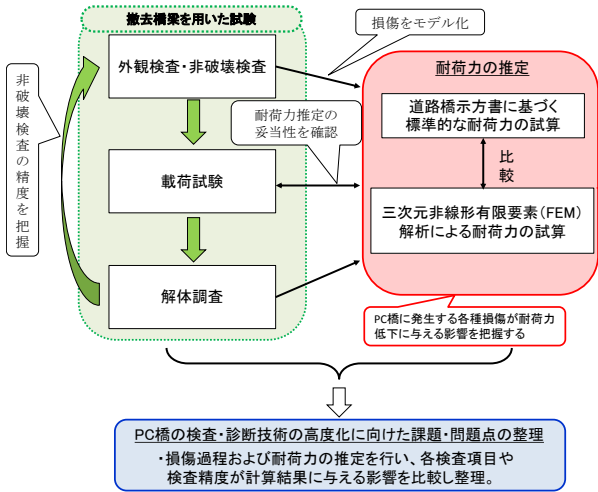


図-4.1 検討概要図

### 4.3 対象橋梁

対象橋梁は海岸線より約 90m の位置に架かる 2 連の単純ポストテンション PCT 桁橋である (写真-4.1). 表-4.1 に本橋の主な橋梁諸元, 図-4.2 に標準断面を示す. 過去 2 度の詳細調査で塩害による鋼材腐食に起因する剥落や浮きが桁全体に確認され, はつり調査において全 PC 鋼材 8 本のうち, 2 本で一部素線破断が確認された. そのため, ライフサイクルコスト比較により架替えが優位と判断され, 供用から 38 年経過した後, 撤去された.

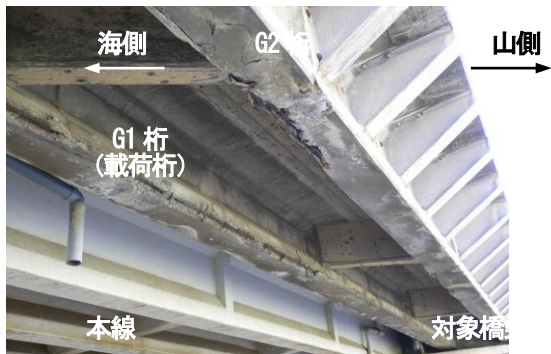


写真-4.1 撤去前の状況

表-4.1 橋梁諸元

橋梁名	相見川海浜橋 (自歩道橋)
架橋位置	石川県宝達志水町 (海岸線より 90m)
路線名	主要地方道 金沢田鶴浜線 (管理: 石川県)
橋長・支間長	44.0m (支間長 19.2m+23.24m)
橋梁形式	単純ポストテンション PCT 桁橋
適用示方書	S43 PC 道路橋示方書 (竣工年より推定)
竣工年	昭和 47 年 (1972 年)
補修履歴	なし
点検履歴	平成 19 年 点検・調査 平成 21 年 詳細調査
撤去年	平成 22 年 (2011 年) 供用後 38 年経過

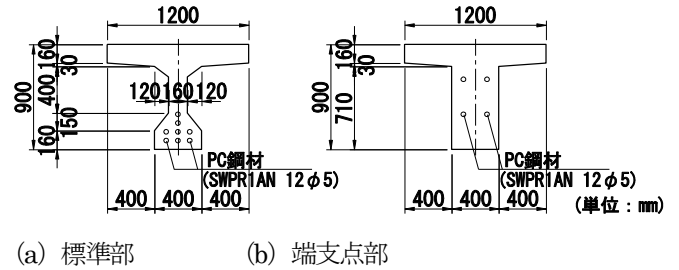


図-4.2 標準断面

### 4.4 既往の調査内容

#### 4.4.1 ひび割れ・浮き・剥離

対象の桁は南側で PC 鋼材の破断が確認されて撤去された桁である. ひび割れ・浮き・剥離は, 桁中央よりも南側で, 特に山側 (B 面) の側面と桁下面に多くみられる. ひび割れ調査は載荷試験前と載荷試験後 (曲げ 1 ケース, せん断 2 ケースの合計 3 ケース) に実施した. また, 解体試験後に桁中心部と損傷が著しかった南側でノギスを用いて鉄筋の断面測定を実施した. 載荷試験前の損傷状況を図-4.3 に示す.

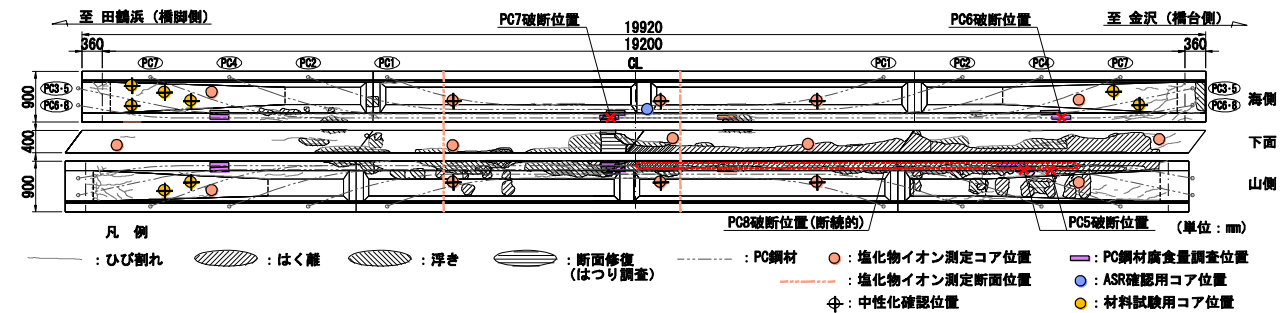


図-4.3 載荷試験前の損傷図

#### 4. 4. 2 PC 鋼材腐食

図-4.4 に両桁端および支間中央部における PC 鋼材の断面減少率を示す。なお、PC 鋼材の断面積の測定は、長さ 30cm の 12 本束の素線を採取し、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠した除錆を行った後、各素線において 50mm ピッチにて最小径とそれと直行する径をノギスによって計測した。その計測結果から各素線全長 30cm における断面積の平均値を算出し、同様の方法で計測した健全な素線の測定結果を基準にして断面減少率を算出している。図中の断面減少率は、各素線の断面減少率（平均値）をさらに各シース内の 12 本において平均した値と、12 本中の断面減少率（平均値）の最大値である。橋台側桁端部において最も腐食の程度が顕著であり、山側の最下段の PC8 は腐食によりシースが消失し、断続的に 12 本全ての素線が破断していた。

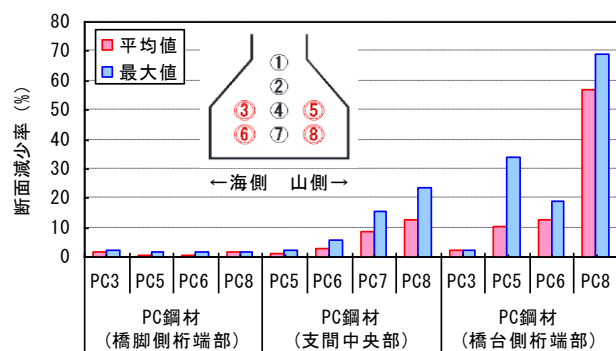


図-4.4 PC 鋼材の断面減少率

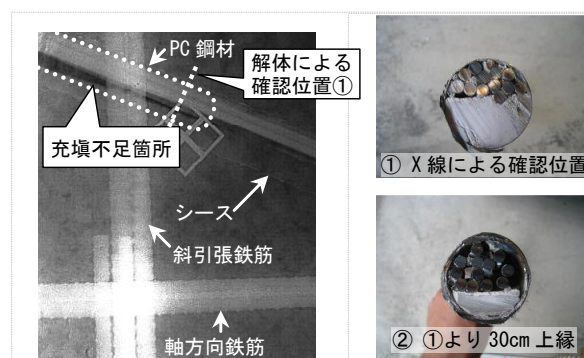
#### 4. 4. 3 鉄筋腐食

鉄筋腐食については、切断によって 3 分割された桁のうち、腐食の激しい終点側のブロックおよび中央ブロックの 2 ブロックにおいて、解体による鉄筋の腐食量調査を実施した。なお、軸方向に配置される主鉄筋と、断面の周方向に配置されるスターラップとは分けて調査した。腐食の激しかった南側ブロックでは、広範囲にかぶりコンクリートの剥離があり、鉄筋腐食が発生していた。最下段の主鉄筋（以降、下段と表現）と下から 2 段目の主鉄筋（以降、上段と表現）、スターラップについて断面減少率の測定を実施した結果、主鉄筋の断面減少率は下段で 0~60%程度、上段で 0~30%程度となっていた。スターラップの断面減少率は海側と山側の両面で測定し、腐食の著しい山側（B 面）で 0~30%程度、海側（A 面）で 0~10%程度の断面減少率となっていた。また、中央ブロックについては、主鉄筋は起点側寄り支間中央付近の海側の側面に、スターラップは起点側半分

に鉄筋の腐食が発生し、主鉄筋・スターラップともに 0~30%程度の断面減少率となっていた。

#### 4. 4. 4 グラウト充填状況

グラウト充填状況の調査は、非破壊検査（X 線透過法）と解体調査で実施した。非破壊検査（X 線透過法）によるグラウト充填度調査より、図-4.5 に示すとおり、上縁定着部付近で一部グラウトの充填不足が確認されたが、概ね充填状況は良好であった。また解体調査では、PC 鋼材の腐食調査用にハツリ出したシースを輪切りにしてグラウト充填状況を確認したが、非破壊検査で得られたものと同様の結果であった。



a) X 線透過法 (b) 解体調査による確認

図-4.5 グラウト充填状況

（上縁定着部付近のウェブにて撮影）

#### 4. 4. 5 各種物性値試験

解体調査時にコンクリートコアを採取し、コンクリート圧縮強度・割裂引張強度・静弾性係数の各種物性値試験を実施した。

試験の結果、圧縮強度・引張強度・静弾性係数ともに大きなバラツキが見られなかったため、試験値の平均値を用いて解析モデルの材料特性を設定した。なお、圧縮強度・引張強度ともに試験値が標準値を上回る値を示していたが、弾性係数は標準値を下回っており、これはアルカリ骨材反応の影響によるものと考えられた。

また、鋼材の引張強度試験は、載荷試験後、桁を切断した端桁から取り出した鋼材で実施した。

試験片の引張軸方向に単軸ひずみゲージを貼り付けて、ひずみを測定し、応力ひずみ曲線、降伏点、引張強さ、弾性係数を測定した。

コンクリートおよび鋼材の材料試験結果の平均値を表-4.2 に示す。

表-4.2 材料強度試験結果

(a)コンクリート

	試験値	標準値 (道路橋示方書)	
		40	60
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	58.9	40	60
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3.16	2.69	3.53
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	21.6	31.0	35.0

(b)鋼材

	鉄筋 (SD295)		PC鋼材 (SWPR 1 AN 12φ5)	
	試験値	規格値	試験値	規格値
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	373	295	1,675	1,400
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	553	440	1,806	1,600
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	213	200	203	200

4. 5 解析方法・解析条件

4. 5. 1 モデル化

撤去 PC 桁のモデル化に際し、要素分割は断面方向の要素幅と側面方向の要素幅の比(アスペクト比)1.0~3.0 を目安とした。断面方向の要素分割は、正方形断面とすることを基本とし、図-4.6のように分割を行った。

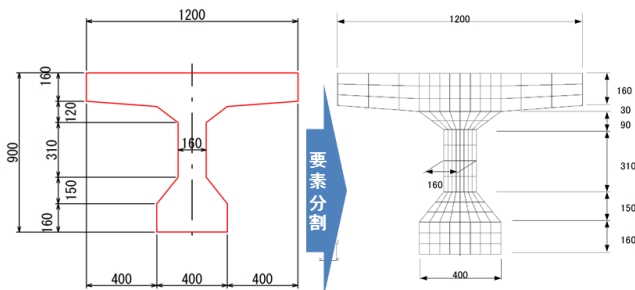


図-4.6 断面の要素分割

材料特性のモデル化については以下のとおり設定した。  
コンクリート

コンクリート(圧縮側)について、本解析ではPC上部工の1方向載荷時における耐荷力を推定することを目的としているため、初期勾配が弾性係数Eと一致するモデルが適していると考え、本検討で使用した有限要素解析ソフト(DIANA)より、図-4.7に示す放物線モデル<sup>41)</sup>を適用した。

なお、このモデルを使用した場合の軟化勾配を定義するための破壊エネルギーGcは既往の研究<sup>42)</sup>より設定し、Gc=8770(f'c)1/2N/mとした。

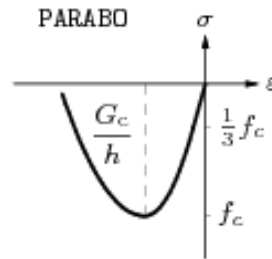


図-4.7 解析で用いる応力-ひずみ曲線(圧縮)<sup>41)</sup>

コンクリートの引張側については、標準的な設計では、コンクリートの材料特性は便宜的に引張側を無視した評価を行うが、実際の鉄筋コンクリート構造物は、コンクリートにひび割れが発生した後も鉄筋の付着によりコンクリートは引張力を分担するため、引張軟化特性を示す。その特性はテンションスティフニング特性と呼ばれており、この特性をコンクリートの材料特性に反映した。引張軟化特性のモデル化は圧縮側と同様に有限要素解析ソフト<sup>41)</sup>より図-4.8に示すモデルを適用した。軟化勾配で定義する必要がある破壊エネルギーGfは既往の研究<sup>42)</sup>より設定し、Gf=34.5(f'c)1/2N/mとした。

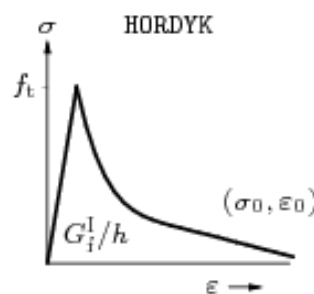


図-4.8 解析で用いる応力-ひずみ曲線(引張)<sup>41)</sup>

PC鋼材

道路橋示方書より、PC鋼材は鉄筋と異なり、応力-ひずみ曲線はトリリニア型となるため<sup>43)</sup>、図-4.9に示すとおり、この特性を解析モデルに設定した。

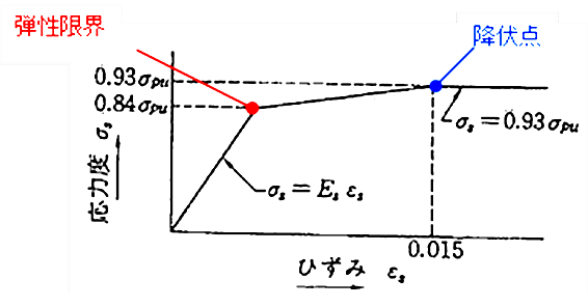


図-4.9 PC鋼材の応力-ひずみ曲線

PC 鋼材の付着すべり特性

対象橋梁のPC ケーブルがφ5の素線を12本束ねたものであり、現在、一般に使用されている異形棒鋼やPC 鋼より線と異なることや、コンクリートではなくグラウトとの付着特性であるため、基礎的な研究成果が不足しているため、本解析では、既往の研究<sup>4)4)4)5)</sup>を参考に以下の通り設定した。

$$\begin{aligned} \text{グラウトとの付着応力} &= 0.3(f'g)1/2 \times \text{低減係数} \\ &= 0.3 \times 201/2 \times 0.5 \\ &= 0.67\text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

ここに、 $f'g$  : グラウトの設計基準強度 (=20N/mm<sup>2</sup>と仮定)  
低減係数 : 丸鋼による低減係数 (=0.5)

上記付着応力を付着降伏応力としたバイリニアモデルを本解析には適用する。

実際の付着は周長を考慮したものとなるため、直径2cmの丸鋼と想定して付着力を設定する  
(φ5-12本束ね≒φ20丸鋼と仮定)。

鉄筋

道路橋示方書より、鉄筋の応力-ひずみ曲線は図-4.10のとおりバイリニア型とした<sup>4)3)</sup>。

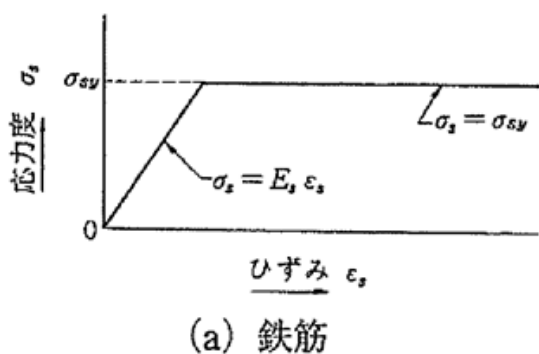


図-4.10 鉄筋の応力-ひずみ曲線<sup>4)3)</sup>

鋼材のモデル化 (プレストレス含む) については以下のとおり設定した。

- 1) PC 鋼材, 鉄筋, スターラップ筋

鋼材のモデル化は、埋込み要素モデルを用いて行った。

- 2) プレストレス

プレストレスのモデル化の方法としては以下の2つの方法が考えられる。

外力を加えてプレストレスを再現する方法

PC 鋼材にプレストレス荷重を入力する方法 (内力を与

える方法)

この2つの方法によるプレストレスのモデル化のうち、PC 鋼材の偏心や曲上げのある桁に対しては、外力でプレストレスをモデル化すると、軸力のモデル化は可能であるが、偏心により発生するモーメントや上向きせん断力のモデル化が困難である。

そのため、鋼材の変化点 (曲げ上げ位置) で有効プレストレスを算出し、内力でプレストレスをモデル化する方法を採用する。

4. 5. 2 各種損傷の解析への反映方法

①断面欠損 (浮き, はく離)

断面欠損は、断面測定結果を解析モデルに反映した。解析モデルでは損傷箇所を重ね合わせ、要素の50%程度の範囲が損傷している場合は断面剛性を考慮しないこととした。

なお、浮きについては、桁の断面部材として抵抗しないと考えられることから、剥離しているものとしてモデル化を行う。

断面欠損のモデル化の概要図は図-4.11に示す。

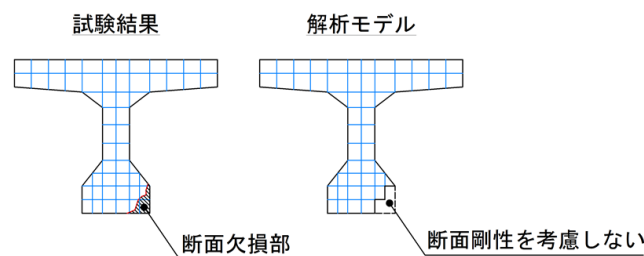


図-4.11 断面欠損のモデル化概要図

②ひび割れ

撤去時のひび割れ (荷重試験前のひび割れ) のモデルは、解析モデルの複雑化を避けるため、ひび割れが確認されている箇所のコンクリート引張強度を落す方法でモデル化した。図-4.12に概念図を示す。

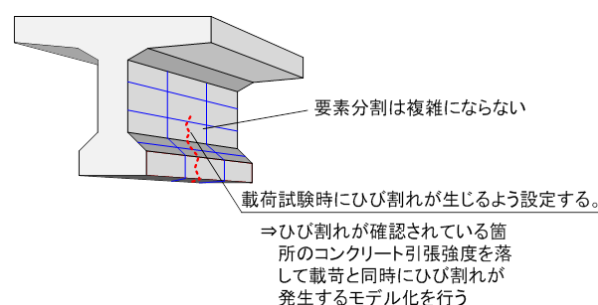


図-4.12 ひび割れモデル化概要図

③鋼材腐食 (PC 鋼材, 鉄筋)

鋼材腐食は, 埋込み要素の断面積Aを減少させることで, 解析モデルに反映した。

④グラウト不良

グラウトについては, 対象橋梁のグラウト充填が比較的良好であったため, 耐荷力の試算には大きく影響しないと考え, グラウト不良はモデル化に反映させなかった。

PC 鋼材腐食と伸び残存率

腐食を受けた PC 鋼材は, 健全な PC 鋼材と比較して伸び能力が減少する研究結果が報告されている<sup>3-1)</sup>。

PC 鋼材の腐食を考慮したモデルでは, この PC 鋼材の材料特性として図-4.13 に示すとおり, 断面の減少率に応じた伸び残存率を考慮した。

PC 鋼材の引張試験結果より, PC 鋼材の伸びは 9.38% であった。つまり, PC 鋼材の破断ひずみは  $\epsilon = 0.0938$  であるため, この値に断面減少率を乗じることで伸び残存率を考慮した破断ひずみを算出し, 伸び残存率を考慮した破断位置を求めた。

(伸び残存率を考慮した破断ひずみ) =  $0.0938 \times$  (伸び残存率)

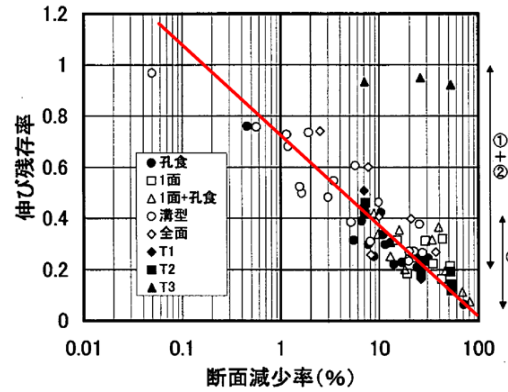


図-4.13 断面減少率と伸び残存率の関係図<sup>3-1)</sup>

4. 5. 3 材料特性

①材料定数

コンクリートの材料定数は表-4.2 に示す材料試験結果を用いる。

②有効プレストレス

有効プレストレスは, 道路橋示方書に基づいて, 導入直後のプレストレスからクリープ・乾燥収縮による減少量及びリラクセーションによる減少量を差し引いた値により算出した。

4. 5. 4 解析モデル

上記のとおりコンクリート, 鉄筋, PC 鋼材の材料特性および損傷状況を反映させた形で, 解析プログラムを用いて図-4.14 に示すとおりモデル作成し解析を実行した。

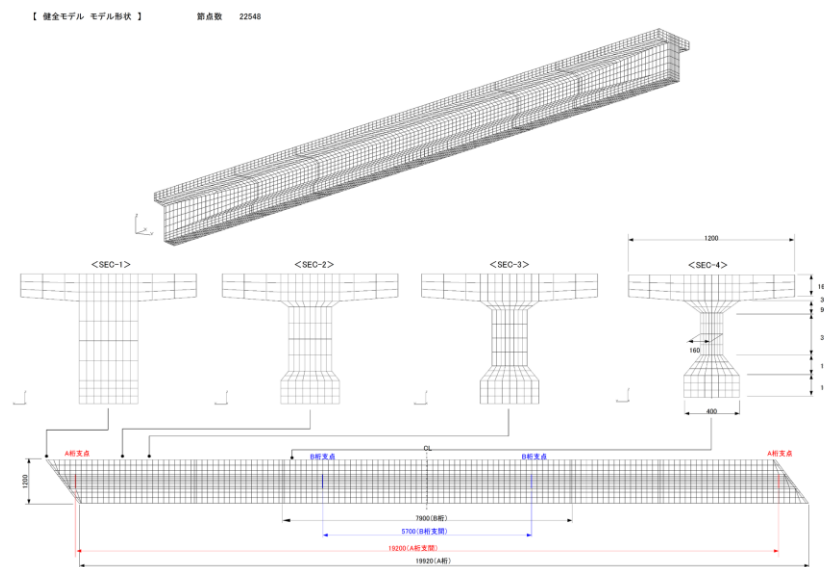


図-4.14 解析モデル (健全モデル)



## 4. 6 三次元非線形有限要素解析の試算ケース設定

### 4. 6. 1 耐荷力の試算結果に及ぼす項目の選定

対象橋梁の耐荷力試算結果に及ぼす影響の大きい項目として以下の5項目を選定した。

#### ①鋼材の健全性

PC 鋼材、鉄筋の健全性は耐荷力の試算結果に及ぼす影響が大きいと想定されるため、その精度の影響も評価できるように、試算ケースに反映させた。

#### ②プレストレス量

ポストテンション桁では、定着部の損傷や腐食による破断により定着が失われた場合、プレストレス量が減少して耐荷力が低下することが想定される。試算結果に及ぼす影響が大きいことから、途中で切断されたE-B桁を対象として耐荷力の試算を行った。

#### ③コンクリートのひび割れ分布と深さ

#### ④コンクリートの浮き、はく離

③、④は耐荷力の試算結果に及ぼす影響が大きいと想定されるため、外観目視により確認できる検査項目として③、④を組み合わせた状態で試算ケースに反映させた。

#### ⑤コンクリートの強度と剛性

コンクリートの強度と剛性は耐荷力の試算結果に及ぼす影響が大きいと想定されるため、試算ケースに反映させた。

### 4. 6. 2 試算ケースの設定

4. 6. 1 で選定した項目に着目して設定した試算ケースのうち、代表的な8ケースを以下のとおりとした。

Case2: 健全モデル (設計基準強度を用いたモデル)

Case4: 健全モデル (撤去桁の健全時を想定したモデル)

Case5: コンクリートの断面損傷を考慮したモデル (健全モデルにコンクリートの浮き・はく離・ひび割れの損傷のみを考慮したモデル)

Case6: 鉄筋・PC 鋼材の断面減少率の最大値を適用したモデル

Case7: 鉄筋・PC 鋼材の断面減少率の平均値を適用したモデル

Case10: 全損傷モデル (撤去桁を再現したモデル)

Case11: 全損傷モデル (弾性係数を変更したモデル)

試算ケースの設定にあたっては、各検査項目や検査精度が計算結果に与える影響を比較するために、損傷がないものと仮定した「健全モデル」とすべての損傷を反映さ

せた「全損傷モデル」に加えて、個別の損傷を反映させた「部分損傷モデル」を設定した。また、部分損傷モデルや弾性係数を変更した試算ケースについては、実橋での載荷荷重が大きく結果の対比が実施しやすい「せん断載荷」ケース、かつ塩害による損傷度合いの大きい南側側 (S側) を対象とした。

## 4. 7 三次元非線形有限要素結果

選定したケースについての三次元非線形有限要素解析を実施した。なお、解析結果のP- $\delta z$ 曲線に静的載荷試験の結果についても記載した。

### 4. 7. 1 材料強度が耐荷力に与える影響

図-4.15 より、健全と想定したモデル (Case2, Case4) で、実際の強度試験結果から得られたコンクリートと鋼材の材料強度を設定して耐荷力を試算した結果 (Case4)、設計で想定している材料強度で試算した結果 (Case2) に対して終局モーメントで 20%程度の耐荷力の向上を確認した。これは、コンクリートの圧縮強度および鋼材の引張強度ともに設計時の想定よりも高いためと考えられる。

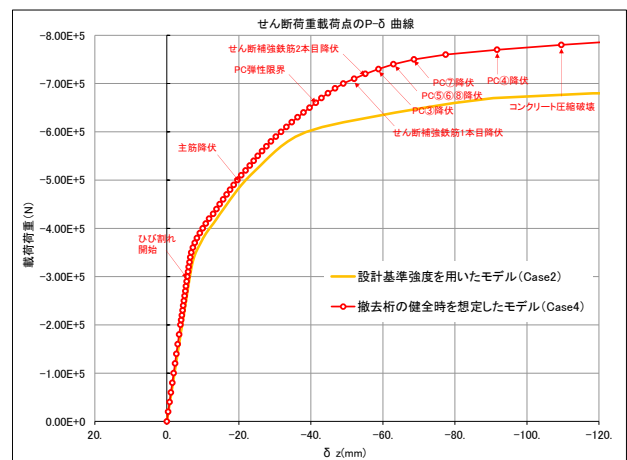


図-4.15 材料強度の耐荷力影響比較

### 4. 7. 2 コンクリートの断面損傷が耐荷力に与える影響

図-4.16 より、塩害による損傷を受けた本橋の断面欠損 (ひび割れ、浮き、はく離) のみを考慮した耐荷力を試算した結果 (Case5)、健全な状態 (Case4) とほぼ同等の耐荷力を有することを確認した。

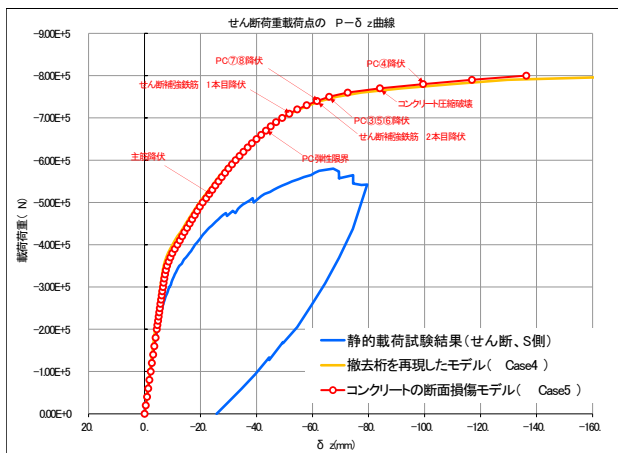


図-4.16 断面損傷度の耐荷力影響比較

### 4. 7. 3 鋼材の破断・断面減少が耐荷力に与える影響

図-4.17 より、PC 鋼材及び鉄筋の破断・断面減少を考慮した耐荷力を試算した結果 (Case7), 健全な状態と比較して終局モーメントで 20%程度の耐荷力低下を確認した。

また、腐食を受けた PC 鋼材の伸び残存率の低下の影響を反映させた結果、腐食程度によってはコンクリートの圧縮破壊に至る以前に PC 鋼材の破断が生じることを確認した。

鋼材の断面減少の検査精度の影響を確認するため、計測されている鋼材 (30cm 区間) の断面減少率の最大値で設定した場合(Case6)と、平均値で設定した場合(Case7)とで耐荷力を試算して比較した結果、終局モーメントで 10%程度の差が生じた。

なお、載荷試験の結果をより精度高く反映できたのは、平均値で設定した試算結果 (Case7) であった。

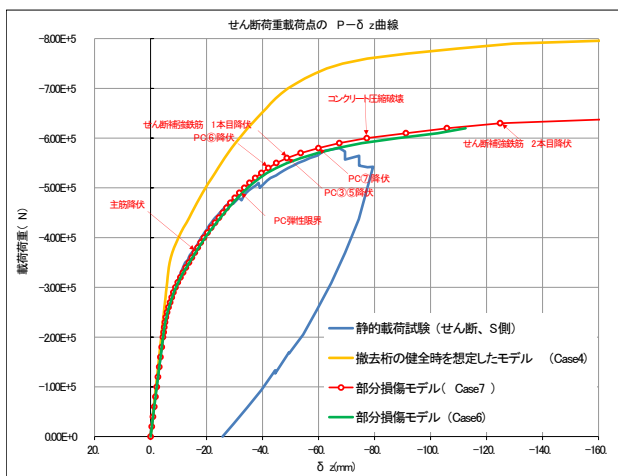


図-4.17 鋼材断面減少の耐荷力影響比較

### 4. 7. 4 コンクリートの弾性係数について

対象橋梁はアルカリ骨材反応の影響を受けており、コアによる圧縮強度試験の結果から弾性係数を設定した耐荷力の試算を行った結果 (Case10), 図-4.18 に示すとおり、実橋の載荷試験結果よりも荷重変位曲線の勾配が緩くなる結果となった。

Case10 の解析結果より、解析モデルの剛度が低いと考えられることからアルカリ骨材反応の影響を受け低下していると考えていたコンクリートの弾性係数を、損傷を受けていない状態の値まで上げて解析を実施した。

具体的な弾性係数は、道路橋示方書に規定の設計基準強度を用いて試験結果の圧縮強度から比例配分し、 $3.5 \times 10\text{N/mm}^2$ とした結果、図-4.18 に示すとおり、実橋の載荷試験結果とよく一致する荷重変位曲線が得られた。

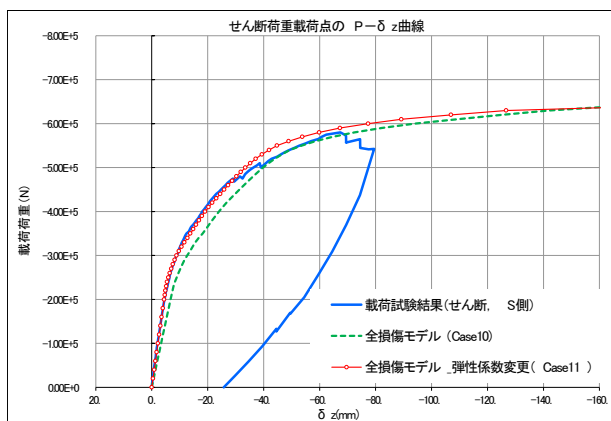


図-4.18 弾性係数の違いによる比較

### 4. 8 検査・診断技術の高度化にむけた課題

実橋の材料強度は設計時に想定しているものとは異なる場合が多いため、耐荷力を精度よく推定するためには実橋の材料強度を適切に反映させることが重要であり、強度を精度よく把握できる検査手法の確立とともに、その結果を適切に耐荷力に反映させるための評価手法の確立が必要となる。

塩害等による劣化を伴う PC 橋の耐荷力低下に影響の大きい損傷は、PC 鋼材、鉄筋の腐食による破断・断面減少であった。したがって、残存耐荷力を精度良く推定するためには、鋼材の腐食の有無だけでなく、破断の有無や鋼材の断面減少度合いを精度良く計測することが重要な課題である。

また、断面減少率の区間平均値と最大値で試算した結果で 10%程度の耐荷力の差が生じたことから、一部ではなく損傷部位全体の腐食状態を精度よく計測する技術が必

要である。

一部のコアを対象とした圧縮強度試験の弾性係数で耐荷力推定を実施すると、実橋の挙動と一致しないケースが本検討で確認された。桁全体の挙動を精度よく推定するためには一部のコアから得られた結果を、どのように耐荷力推定に反映させるかを、今後さらに検証を加えて手法等を確立していくことが望まれる。

#### 参考文献

- 2-1) 野上邦栄, 山本憲, 山沢哲也, 依田照彦, 笠野英行, 村越潤, 遠山直樹, 澤田守, 有村健太郎, 郭路: 鋼トラス橋の上弦材側格点部の腐食計測とその腐食形態の特徴, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.679-691, 2012.3.
- 2-2) 村越潤, 遠山直樹, 澤田守, 有村健太郎, 郭路, 依田照彦, 笠野英行, 野上邦栄: 腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の圧縮耐荷力に着目した載荷試験, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.156-168, 2013.3.
- 2-3) 土木研究所共同研究報告書第 429 号, 腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する共同研究報告書—腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の FEM 解析—, 2012.1.
- 2-4) 土木研究所共同研究報告書第 456 号, 腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する共同研究報告書—腐食劣化の生じた鋼トラス橋を活用した臨床研究報告書—, 2013.6.
- 2-5) NTSB: Highway Accident Report - Collapse of I-35W Highway Bridge 2007.8, 2008.11.
- 2-6) Ocel, J. M.: NCHRP Web-Only Document 197, Guidelines for the Load and Resistance Factor Design and Rating of Riveted and Bolted Gusset-Plate Connections for Steel Bridges, 2013.2.
- 3-1) 土木研究所資料第 3810 号: 塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究(III)—塩害により損傷を受けた PC 鋼材の機械的性質—, 2001.3.
- 3-2) 竹内祐樹, 中村英佑, 村越潤, 木村嘉富: 塩害を受けた PC 橋から採取した腐食 PC 鋼材の力学特性に関する検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-094 pp.185-186, 2009. 9.
- 3-3) 北野勇一, 酒井崇行, 花井拓, 木村嘉富: プレストレストコンクリート道路橋の振動計測 (一般国道 8 号能生大橋), 土木学会第 66 回年次学術講演会, V-149

pp.297-298, 2011.9.

- 4-1) TNO DIANA 社: DIANA 9.4.4 ユーザーズマニュアル, 6.2 Total Strain Crack Models
- 4-2) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析 土木学会論文集 No.620 V-43 pp.187-199, 1999.5
- 4-3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 2012.3.
- 4-4) 前田友章, 徳永光宏, 田所敏弥, 谷村幸裕: 鋼材破断時の付着特性に着目した PC 梁の曲げ耐力に関する一考察 コンクリート工学年次論文集, Vol.32 No.2, pp.529-534, 2010.7
- 4-5) 徳永光宏, 前田友章, 田所敏弥, 谷村幸裕: PC 鋼材の付着特性に及ぼす鋼材種別の影響, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集第 V-593, pp.1185-1186, 2008.9.

## STUDY ON INSPECTION AND ASSESSMENT TECHNIQUE TO PREVENT FATAL ACCIDENTS SUCH AS BRIDGE COLLAPSE

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Bridge and Structural Engineering

Research Group

**Author** : MURAKOSHI Jun

KIMURA Yoshitomi

HONMA Hidetaka

SAWADA Mamoru

ENOMOTO Tadao

HIROE Akiko

**Abstract** : The majority of highway bridges in Japan were constructed during the 1950s-1970s. With recent rapid increase of aged bridges older than 50 years, effective and proper technique for bridge maintenance is more and more needed to be developed. For the maintenance of existing steel truss and prestressed concrete bridges with damaged component, it is very important to evaluate load carrying capacity to prevent fatal collapse of the entire bridge. In FY2012, in order to develop the strength evaluation of the corroded gusset plate connections in steel truss bridges, loading test and FEA were conducted. Also, using a post-tensioned prestressed concrete girder damaged by chloride-induced deterioration, failure mechanism and remaining strength were observed by loading test focused on adhesion characteristics of prestressed concrete steel.

**Key words** : truss bridge, PC bridge, maintenance, corrosion, load carrying capacity