

13.10 道路橋桁端部における腐食対策に関する研究

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：木村 嘉富，村越 潤，

田中 良樹，花井 拓，吉田 英二

【要旨】

道路橋の桁端部は、鋼橋，コンクリート橋ともに，伸縮装置からの塩化物を含んだ排水により，厳しい腐食環境にある事例が多く見られる。本研究では，桁端部の腐食を中心に，原因除去による予防保全，腐食発生後の迅速，適切な調査方法及び補修・補強方法を提示する。平成 23 年度は，塩害を受けた PC 橋桁端部の調査・補修方法に関する基礎的検討として，PC 定着体付近における削孔が周囲の応力状態と破壊性状に及ぼす影響を把握するため，実大コンクリート供試体を用いた載荷試験を実施した。その結果，円孔の位置によって，定着体付近の応力状態と破壊形態が大きく変化する状況を，コンクリート内部や円孔縁のひずみ測定により把握した。

キーワード：塩害，PC 定着部，応力集中，コア削孔，支圧強度

1. まえがき

道路橋に見られる主要な劣化現象として，鋼部材，コンクリート部材ともに腐食(塩害)が挙げられる。鋼部材の腐食は，鋼道路橋の主な架替え理由の 1 つに挙げられており¹⁾，長期にわたって維持管理していくためには，定期的な塗替えに加えて，腐食原因除去などの腐食環境の改善と，腐食により断面欠損が生じた部位への適切な補修，補強が重要である。特に，橋桁端部は，狭隘なため湿気がこもりやすい上に，場合により塩分を含む水が伸縮装置から漏水すること等により，腐食しやすい部位である²⁾。このため，桁端部の断面欠損やウェブ等に孔が開く状況に至る事例も見られる^{2),3)}(図-1)。一方，コンクリート橋の塩害については，国内では沿岸部の飛来塩分に起因した塩害が著しい劣化をもたらす事例が多く見られるが，今日，凍結防止剤の散布に起因した塩害事例の報告も徐々に増加しつつある⁴⁾。コンクリート橋の場合も，桁端部周辺の厳しい腐食環境は鋼桁と同様である。特に，プレストレストコンクリート(PC)桁では，桁端部に PC 鋼材の定着部が集中していて，高い圧縮応力を含む，複雑な応力状態である(図-2)。調査のコア採取や補修のはつりを行うためには，安全に配慮した調査，補修方法の検討が必要である。

以上を踏まえて，本研究では，a) 桁端部の腐食環境を迅速に改善するための腐食環境改善方法の提示，b) 安全に配慮した PC 橋桁端部の調査，補修方法の提示，c) 施工性に優れた鋼橋桁端部の補修方法の提示を目

的としている。

本文では，平成 23 年度に実施した，コンクリート桁端部におけるコア削孔を模擬した，円孔を有するコンクリート供試体 3 体(1 体は円孔なし)の静的載荷試験について報告する。

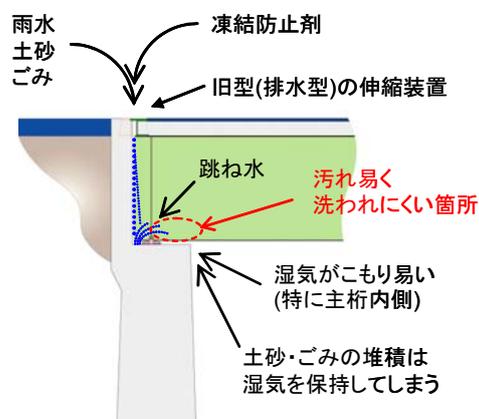


図-1 桁端部の腐食環境²⁾

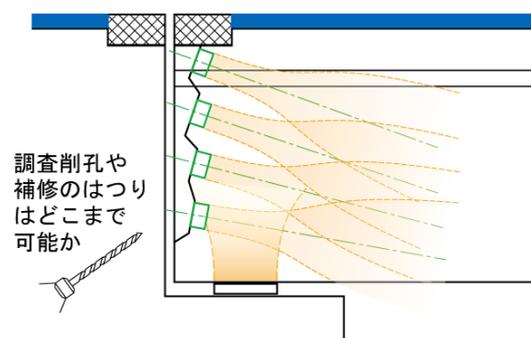


図-2 PC 桁端部の主応力分布（概念図）

2. PC 定着体付近の破壊に関する調査

2.1 目的

PC 橋の黎明期である 1950～60 年代に、PC 鋼材の定着部付近のひび割れ事例が多く見られたため、定着部付近の応力解析やひび割れ防止のための配筋方法に関する研究が行われた⁵⁾。それらの研究成果や経験による知見を踏まえて、定着体周囲の配筋やディテールが改善された。しかし、PC 桁端部で塩害が懸念される場合、主因となる塩化物イオンの浸入状況を調査するため、ドリル削孔や補修・補強のためのはつりが必要となることが想定される。その際、作業員の安全の確保及び橋自体の安全の確保が不可欠であるが、PC 桁端部における削孔やはつりがそれらの安全に及ぼす影響は明確でない。平成 23 年度は、その検討の第一段階として、既往の応力解析法の精度を確認するとともに、削孔がある場合の局部応力を把握するため、単純化した、円孔を有するコンクリート供試体を用いた載荷試験を実施した。

2.2 試験方法

表-1 に供試体の種類を、図-3、4 に供試体の形状寸法と外観を示す。供試体の幅 600mm、載荷面積 200mm×200mm は、それぞれ支間 30m 程度の PCT 桁の端部の幅と PC の定着板を実寸で模擬した。また、帯鉄筋の径と間隔も、同 PC 桁の桁端部付近のスタールップを模擬した。供試体 N は円孔のない供試体である。供試体 O-1、O-2 は、いずれも直径 100mm の貫通円孔を載荷板直下に位置するように配置した。実際には、この位置に PC 鋼材が配置されているため、貫通削孔は行われませんが、モデルを単純化するためこの位置とした。また、桁端部において直径 100mm のコア削孔は実際には行われないと想定されるが、円孔内部の縁ひずみを測定するためのひずみゲージの貼り付けを精度よく行うために、この大きさが必要であった。円孔は、打設前に塩化ビニル管を配置しておき、コンクリートが一定程度硬化した時点で塩化ビニル管を引き抜いた。

表-2 に、コンクリートの配合及び打設結果を示す。また、表-3 にコンクリートの強度試験結果、表-4 に鉄筋の引張試験結果をそれぞれ示す。

試験は、図-3 に示したとおり、上端の中央に 200mm×200mm の正方形の鋼板を配置して、鉛直方向に荷重を静的に載荷した。載荷には 2000kN 万能試験機を用いた。載荷中、載荷点及び側面における変位、コンクリートの載荷板周囲、側面、円孔縁におけるひずみ、

表-1 供試体の種類と最大荷重、破壊状況

供試体	円孔位置* (mm)	最大荷重 (kN)	破壊状況
N	円孔なし	(2000)	外見上の損傷なし
O-1	150	1790	円孔の上下から鉛直方向のひび割れ、円孔を中心に斜め方向の放射状ひび割れ、載荷板に沿った陥没
O-2	300	(2000)	円孔の上下から鉛直方向のひび割れ

注 1) *円孔中心の位置、上端からの距離
2) 括弧内は終局破壊なし、試験機最大能力による。

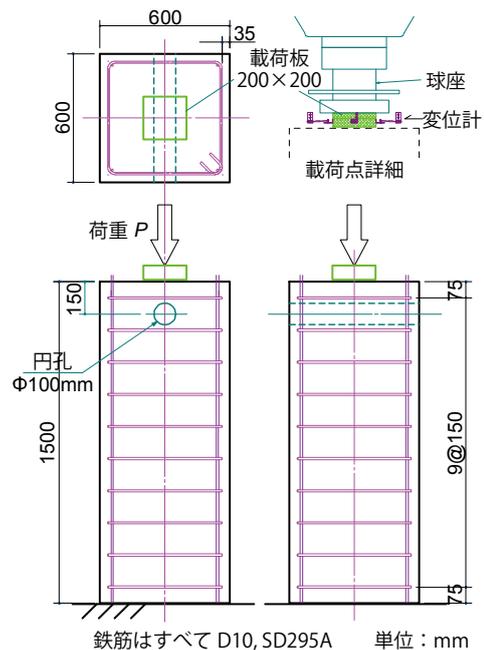


図-3 コンクリート供試体の形状寸法 (円孔は供試体 O-1 の例)



図-4 コンクリート供試体の外観 (左から供試体 O-2、O-1、N)

表-2 コンクリートの配合及び打設記録

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SL (cm)
			W	C	S	G	AE	
57.0	4.7	46.9	178	312	831	968	3.34	18.0

普通ポルトランドセメント、AE 減水剤(No.70)
最大粗骨材寸法 20mm、目標圧縮強度 24 N/mm²

埋め込みゲージによるコンクリート内部のひずみ、及び帯鉄筋のひずみを測定した。円孔縁のひずみゲージのゲージ長は10mmのものを用い、それ以外のコンクリート用のひずみゲージはゲージ長60mmとした。図-3及び図-5に、荷重点付近の変位計設置状況を示す。荷重点の変位は、荷重板四辺の各中央側面にカンチレバー変位計を設置して、その実測値の平均値とした。荷重板の設置に際しては、上端面の不陸を調整するため、厚さ1~2mm程度の石膏を荷重板と供試体の間に敷いた。

表-3 コンクリートの強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm ²)	材齢 (日)
試験前	32.4	21.8	0.147	2.6	131
試験後	32.1	22.4	0.162	2.8	140

注) いずれも供試体と同じ養生によるコア3本の平均値

表-4 鉄筋の引張試験結果

鋼材種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏ひずみ (μ)
D10	357	516	194	1850

注) 鉄筋はSD295A, 3本の平均値

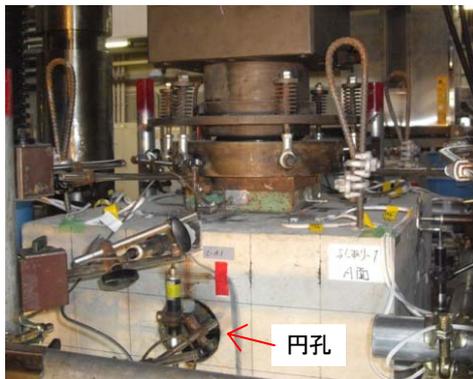


図-5 荷重点付近の状況

2.3 結果

(a) 荷重-変位関係と破壊状況

図-6に、各供試体の荷重-荷重点変位の関係を示す。図中のひび割れ発生荷重は、いずれも供試体側面で目視により確認したときの荷重である。円孔のない供試体 N は、試験機の最大荷重 2000kN までの荷重において、ひび割れ等の変状が見られなかった。円孔を有する供試体 O-1 と O-2 は、いずれも 1200kN 程度で円孔の上端から鉛直上方にひび割れが発生し、その後、円孔下端から鉛直下方にもひび割れが発生した。供試体 O-1 は、1790kN で荷重が低下し始めた。一旦除荷した後、再度荷重を行ったが、1回目のピーク荷重を

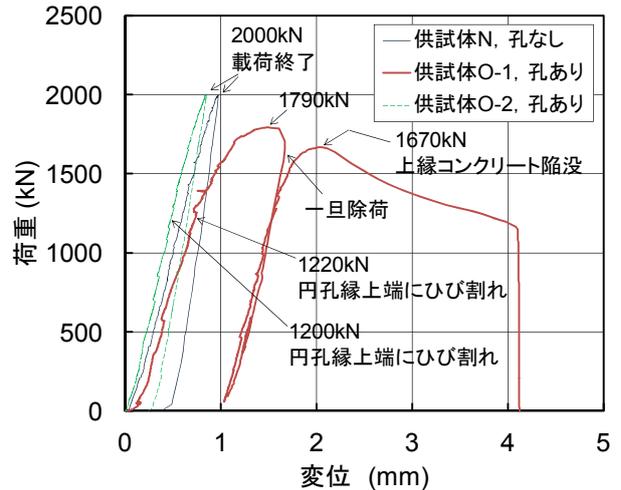
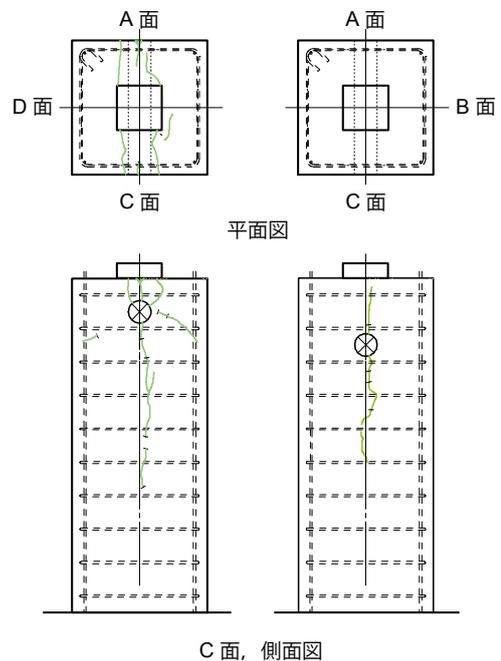


図-6 荷重-変位の関係



(a) 供試体 O-1 1回目ピーク時 (b) 供試体 O-2 試験後

図-7 ひび割れ図

超えることなく、上縁コンクリートの陥没が、目視で明確に確認できる状態まで進行した。供試体 O-2 は、試験機の最大荷重 2000kN で荷重点での陥没が見られなかった。図-7に、円孔を有する供試体のひび割れ図を示す。いずれの供試体とも、A面側とC面側でひび割れ発生状況に顕著な違いはないが、C面側のひび割れ発生がやや早い傾向が見られた。供試体 O-2 は、2000kN までの荷重において、円孔から上下鉛直方向のひび割れが見られたのみであったが、供試体 O-1 は、1回目のピーク時に、上縁から円孔につながる斜めのひび割れが左右に見られるとともに、円孔下方にも B



(a) 1回目ピーク時



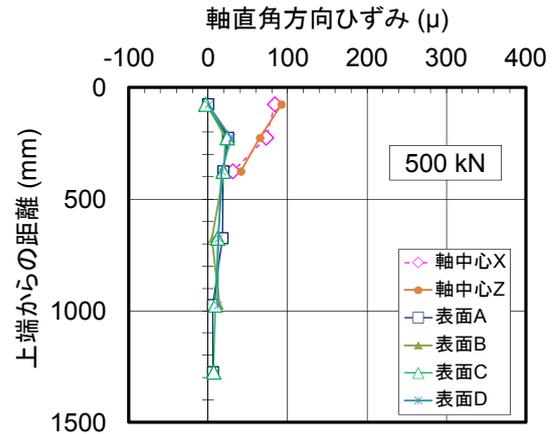
(b) 試験終了後

図-8 供試体 O-1 の円孔内部の破壊状況
(いずれも A 面側から撮影)

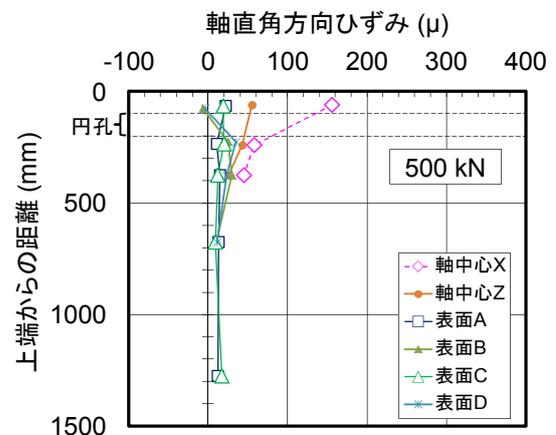
面、D 面に向かう斜め方向のひび割れが見られた。また、供試体 O-1 の上縁には、平面図に示すように、円孔に概ね平行なひび割れが見られた。

図-8 に、供試体 O-1 の円孔内部の破壊状況を示す。1 回目ピーク時は、ひずみゲージ、リード線あるいはリード線の固定用テープに覆われていたこともあり、ひび割れが目視で確認しにくい状況であり、表面付近のひび割れを除いて、少なくとも顕著なひび割れは見られなかった。2 回目の载荷の後には、上縁の載荷板に沿って、著しい陥没が見られ、図-8(b)に示すとおり、円孔内にも大きなひび割れが発生していた。一方、供試体 O-2 の円孔内部には、ひび割れがほとんど発生しておらず、表面付近に見られた円孔の上下に見られたひび割れの深さは、A 面側、C 面側ともに表面から 70mm 程度であった。

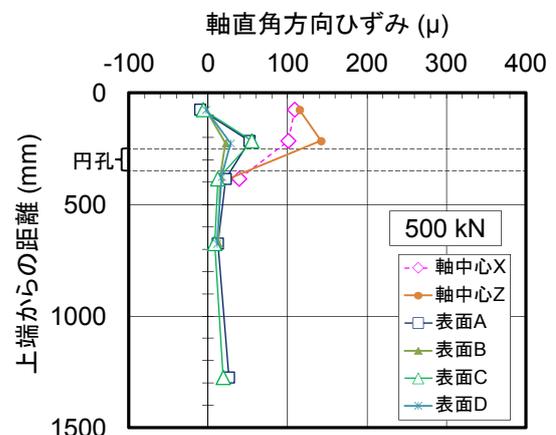
円孔がない場合の計算破壊荷重は、支圧強度を既往の検討⁶⁾を参考に $0.8f_c (A/A')^{1/2.5}$ 、ここに A は上端のコンクリートの面積、 A' は載荷面積、で評価した場合に約 2500kN であるが、供試体 O-1 は、円孔の影響により、その約 70%(1790kN)で破壊に至った。



(a) 供試体 N



(b) 供試体 O-1



(c) 供試体 O-2

図-9 500kN 時におけるコンクリート表面及び内部の水平方向ひずみ分布

(b) コンクリートのひずみ

図-9 に、各供試体の 500kN 時におけるコンクリート表面及び内部の水平方向ひずみ分布(実測値)を示す。図中の記号のうち、軸中心 X、Z は、コンクリート中の埋め込みゲージによる実測値であり、X は B 面から D 面に向かう方向(円孔に直角方向)、Z は A 面から C

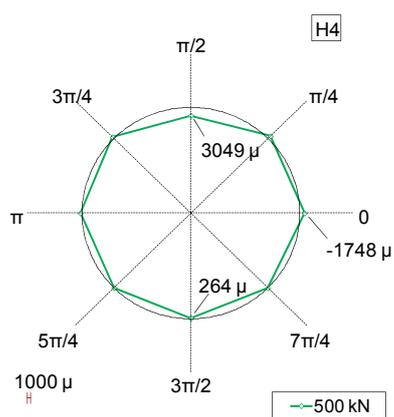
面に向かう方向(円孔に平行方向)をそれぞれ示す。また、表面 A~D は、A~D 面それぞれのコンクリート表面の水平ひずみを示す。孔ありの供試体 O-1、O-2 の図には、それぞれの円孔の位置(上端からの距離)を示す。孔なしの供試体では、表面の水平ひずみは、四方ほぼ均等であり、また上端に近い箇所(上端から 75mm)ではほとんど発生していなかった。荷重点直下では X 方向、Z 方向ともに上端から 75mm の水平ひずみが大きく、 90μ 程度であった。孔ありの供試体の表面ひずみは、孔の開口部がある A、C 面と開口部がない B、D 面で異なり、A、C 面の円孔の直上で値が大きくなる傾向が見られた。円孔の位置が上端から 200mm を超える位置にあった供試体 O-2 の A、C 面表面の最大水平ひずみは、200mm 以内にあった供試体 O-1 よりも大きい傾向が見られた。孔ありの供試体 O-1、O-2 とともに、B、D 面の水平ひずみ分布は、穴なしの結果と概ね同様であった。孔ありの供試体の荷重点直下の水平ひずみも、円孔の上側で大きくなる傾向が見られ、それらの値のうち最大値は約 150μ と、表

面の値に比べて明らかに大きく、また穴なしの供試体に比べても大きくなっていった。

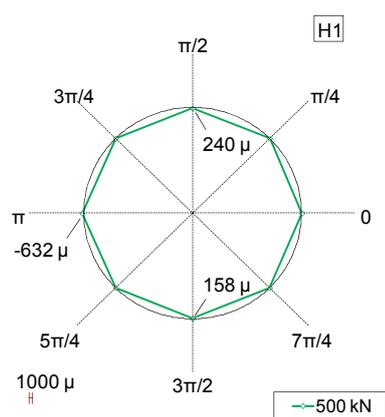
図-10 に、500kN 時の円孔縁のひずみ測定結果を示す。同図(a)、(b)は、供試体 O-1 の結果であり、それぞれ荷重点直下の円孔縁と A 面から 75mm の円孔縁のひずみ分布を示す。同様に、同図(c)、(d)は、供試体 O-2 の結果を示す。供試体 O-1 では、円孔縁の引張ひずみは、荷重点直下の上端で最も大きく、500kN 時で既に 3000μ に達し、表面付近の最大値よりも著しく大きい値であった。一方、供試体 O-2 の円孔縁の最大引張ひずみは、表面付近の方が荷重点直下よりもやや大きい傾向が見られた。

(c) 帯鉄筋のひずみ

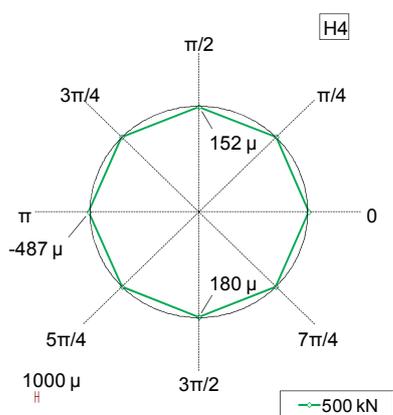
図-11 に、孔ありの供試体 O-1、O-2 の最大引張ひずみが生じていた箇所について、円孔縁のひずみと帯鉄筋のひずみを荷重との関係で示す。供試体 O-1 では、目視によるコンクリートのひび割れが認められた荷重約 1200kN 以降、円孔縁のひずみ増分が大きくなるの



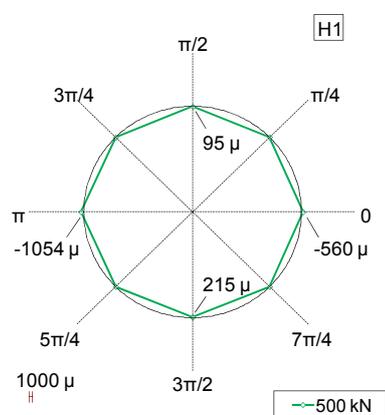
(a) 供試体 O-1, 荷重点直下



(b) 供試体 O-1, A 面から 75mm

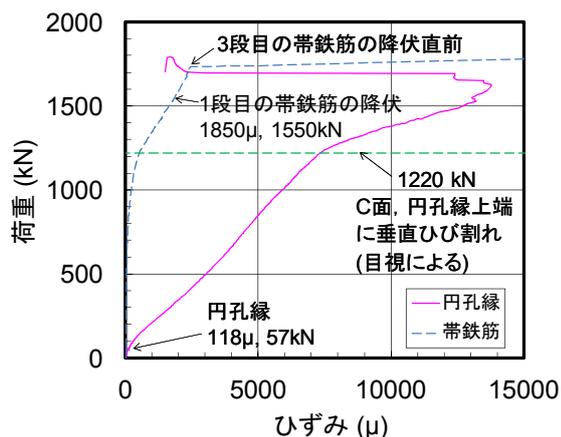


(c) 供試体 O-2, 荷重点直下

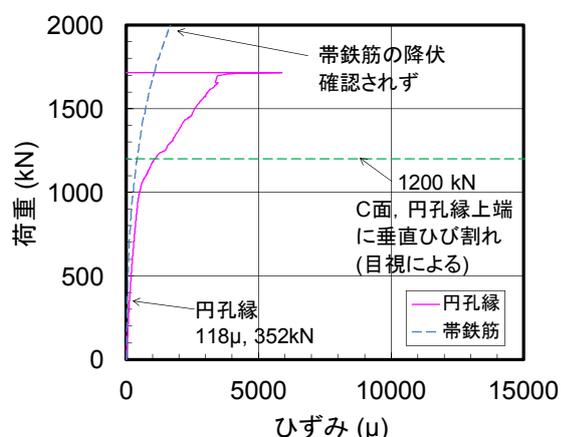


(d) 供試体 O-2, A 面から 75mm

図-10 500kN 時における円孔縁のひずみ分布



(a) 供試体 O-1



(b) 供試体 O-2

図-11 円孔縁と帯鉄筋の荷重-ひずみ関係

に伴って、帯鉄筋のひずみ増分も増加した。供試体 O-1 は 1550kN で上から 1 段目の帯鉄筋の内側から降伏し始め、最大荷重の前に上から 3 段目の帯鉄筋の降伏が始まるとともに、1~3 段目の鉄筋ひずみが急激に増加した。一方、供試体 O-2 は、帯鉄筋の降伏は認められなかった。図-11(b)に示した供試体 O-2 の載荷点直下の円孔縁下端のひずみは、550kN で 200 μ を超え、約 1000kN を超えてからはひずみ増分が大きくなって、1700kN で 5000 μ を超えていた。

(d) 円孔縁のひび割れ

前述のとおり、円孔のある供試体 O-1、O-2 はともに、目視によるコンクリートのひび割れが、約 1200kN で供試体側面及び側面に近い円孔縁に見られた。しかし、図-11 に示したとおり、供試体 O-1 の円孔縁のひずみは、100kN 以下で既に 200 μ を超えており、鉄筋コンクリート梁の下縁であれば、曲げひび割れが発生するレベルにあった。このことから、円孔縁には、早

期にひび割れが発生していた可能性が高い。図-11(a)の荷重-ひずみの関係では、その荷重レベル約 100kN から円孔縁のひずみの増分が大きくなった傾向が見られるが、図-6 に示した荷重-変位の関係には、顕著な影響は見られなかった。図-10 に示した円孔縁のひずみ分布では、3000 μ に達した箇所も見られたが、応力集中による引張ひずみは円孔縁からの深さに応じて急激に減少する傾向にあることから、曲げひび割れの場合と異なり、ひび割れの深さ方向への進展が遅く、よってひび割れ幅の進展も遅く、1200kN 程度までは、供試体全体の挙動に顕著に影響を及ぼすことはなかったものと考えられる。また、供試体 O-2 の載荷点直下付近の円孔内部には、試験後に行った目視でひび割れが見られなかったが、図-11(b)に示した円孔縁の引張ひずみはコンクリートの引張ひずみを著しく超えていたことから、円孔縁のひび割れ状況について、さらに詳細に確認する必要がある。

3. おわりに

本文では、PC 定着体を模擬したコンクリート供試体 3 体を製作して、局部圧縮載荷試験を行った結果を示した。これらの結果を用いて、既往の解析法の検証を行うとともに、円孔の影響の簡易な推定方法を検討する予定である。23 年度は PC 定着体付近の破壊に関する調査のほか、鋼桁ウェブへの鋼板接着補強の設計法に関する載荷試験、及び撤去された鉄筋コンクリート桁の桁端部解体調査を実施した。また、コンクリート橋桁端部の腐食環境改善技術に関して、民間公募を行い、2 社とそれぞれ共同研究を開始した。

参考文献

- 1) 西川和廣, 村越潤, 上仙靖, 福地友博, 中島浩之: 橋梁の架替に関する調査結果(III), 土木研究所資料第 3512 号, 1997.10.
- 2) 田中良樹, 村越潤: 道路橋桁端部における腐食環境の評価と改善方法に関する検討, 土木技術資料, Vol.50, pp.16-19, 2008.11.
- 3) 村越潤, 田中良樹, 船木孝仁: 鋼橋桁端部の腐食対策に関する研究, 土木研究所資料第 4142 号, 2010.3.
- 4) 例えば, 長谷敏彦, 野島昭二, 竈本武弘: これからの維持管理について—高速道路の PC 橋における保全技術—, プレストレストコンクリート, 51-2, pp.93-99, 2009.
- 5) 藤井学: PC に対する設計上の諸問題(静定構造), プレストレストコンクリート最近の進歩, 昭和 41 年度講習会テキスト, 土木学会関西支部, pp.37-56, 1966.11.
- 6) 六車照, 岡本伸: 局部荷重を受けるコンクリートの支圧強度に関する研究, プレストレストコンクリート, 5-5, pp.22-29, 1963.10.

RESEARCH ON RETROFITTING FOR CORRODED GIRDERS AROUND EXPANSION JOINTS

Budget : Grants for operating expenses,
General account

Research Period : FY2011-2015

Research Group : Bridge and Structural
Technology Research Group

Authors : KIMURA Yoshitomi,
MURAKOSHI Jun,
TANAKA Yoshiki,
HANAI Taku,
YOSHIDA Eiji

Abstract :

Both steel and concrete girders near expansion joints in highway bridges often suffer from severe corrosion due to drainage and leakage water containing deicing salts. To reduce the corrosion issues near the expansion joints, the measures for removing major factors bringing on the corrosion, and the investigation and retrofitting methods are examined. In FY2011, to understand the influence of the coring for determining chloride profiles at the anchorage zone of prestressed concrete girders upon structural and human safety, loading tests using three concrete blocks with or without a circular opening were conducted. The results indicated that the stress condition near the loading point and the types of failure were significantly changed owing to the existence and position of the opening.

Key words : corrosion, anchorage zone, stress concentration, coring, bearing capacity