

論文 長期間塩害環境下に曝されていた RC 橋脚の耐震補強部材の耐荷特性に関する実験的研究

榎本 武雄^{*1}・篠原 聖二^{*2}・張 広鋒^{*3}・星隈 順一^{*4}

要旨: 本研究は、厳しい塩害環境下における橋梁の耐震補強効果の持続性に着目し、RC 橋脚の沓座部の縁端拡幅補強や躯体部の RC 巻立て補強を対象として、撤去橋梁を活用した耐荷力試験、材料強度試験および塩化物イオン含有量試験を実施した。著者らは、損傷が認められた縁端拡幅補強の耐荷力や RC 巻立て基部の軸方向鉄筋の定着性能を実験的に示すとともに、長期間耐震補強効果を持続させる上で重要な事項についても考察を行った。

キーワード: 耐震補強, 塩害, 長期持続性, 耐荷力

1. はじめに

道路橋の耐震設計技術は、過去の震災における落橋経験等を踏まえ、徐々に改良が積み重ねられてきている。既設橋に対しては、落橋経験のある同種の構造を優先に、これまでに桁かかり長の拡幅、落橋防止構造の設置、橋脚躯体の補強等の対策から順次進められてきている。その一方で、桁かかり長の拡幅や落橋防止構造の設置は一般に桁端部を支持する橋脚の頂部で行われるため、排水の処理が適切になされていない場合、当該部位に後施工で設置した部材の取り付け部の耐久性に悪影響を与える可能性もある。さらに、塩害環境下にある場合には、塩害によって鉄筋コンクリート部材の耐荷力が低下する可能性があることから、耐震補強された部材でも、経年劣化が耐震補強効果を低下させる直接的要因となる場合もあることが懸念される。

これまでに、橋梁の耐震補強技術とその効果に関する論文は多数あるが、それらは補強した直後の性能を対象として論じたものがほとんどである。経年変化について検討された研究では、塩害により劣化させた RC 部材に対して正負交番載荷試験を実施し、耐震性能について検討を行った研究があり、塩害により鉄筋の腐食やコンクリートのひび割れが進展すると、耐荷力やエネルギー吸収量が低下するという報告がある^{1),2)}。しかし、この研究は、塩害による劣化を模擬的に促進させ鉄筋を腐食さ

せた状態での耐震性に着目したものであり、長期間自然環境下に曝された条件下でどのような耐震性能への影響があるかについて検討されたものではない。

そこで、本研究では、厳しい塩害環境にある地域に存し、過去に耐震補強が実施されている実物の橋梁の部材を対象として、現時点における耐震補強効果を臨床実験的に検証し、このような条件下で耐震補強効果を持続する上で重要な事項について検討を行った。

2. 橋梁概要と損傷状況

研究対象とした橋は、1967年に供用が開始された PC5 径間単純ポストテンション方式 T 桁橋である。写真-1 に橋梁の全景写真、図-1 に橋梁一般図、表-1 に橋梁諸元を示す。支間長は 27.3m、橋長は 140.5m、橋脚は T 型 RC 橋脚である。本橋は、日本海沿岸の海岸線の近くに位置し、厳しい塩害環境に長期間曝されていた。1983年(供用17年)、2000-2001年(供用34-35年)、2008年(供用42年)と複数回にわたり塩害に伴い発生した損傷に対する上部構造の補修(断面修復、表面被覆など)が施されているが、いずれも再劣化が生じている。このため、本橋では、上部構造を架け替える方針となり、これに伴って上部構造形式が PC4 径間連結ポストテンション中空床版桁橋へと変更となったことから、既設の下部構造も撤去されることになった。なお、本橋の上部構造については、



写真-1 対象橋梁の全景

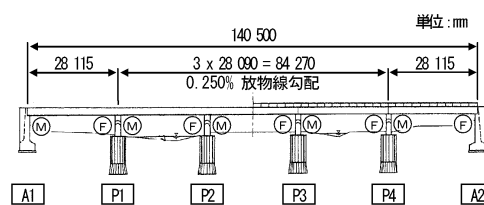


図-1 対象橋梁の一般図

表-1 橋梁諸元

橋長	140.50m (支間5@27.3m)
幅員	全幅員8.80m, 有効幅員8.0m (車道幅3.5m×2)
上部構造	単純PCボステンT桁橋
下部構造	逆T式橋台2基, T型橋脚 (RC) 4基
基礎形式	直接基礎2基, オープンケーソン4基
適用示方書	昭和39年
供用開始年	1967年

*1 (独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 (正会員)

*2 (独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員 工修

*3 (一財)首都高速道路技術センター 技術開発部 博(工)

*4 (独)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 博(工)

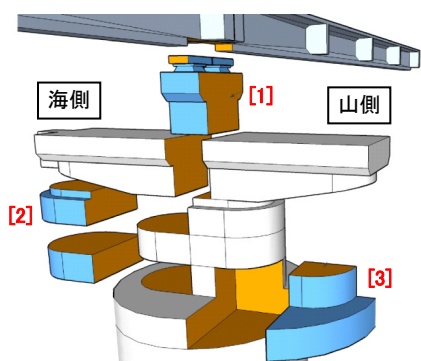


図-2 採取部位

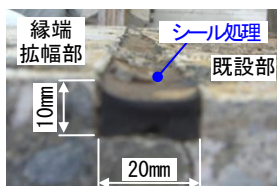


写真-2 縁端拡幅部と既設部の境界部上面に設置されたシール

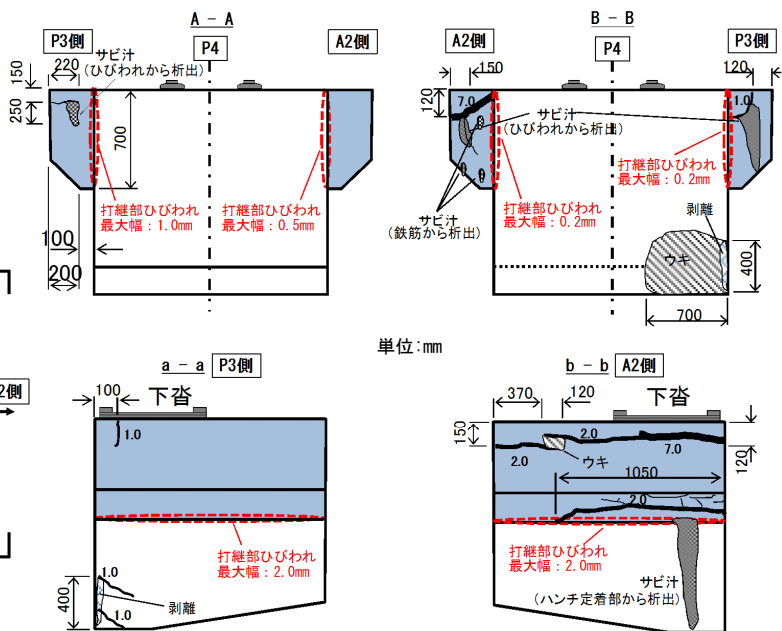
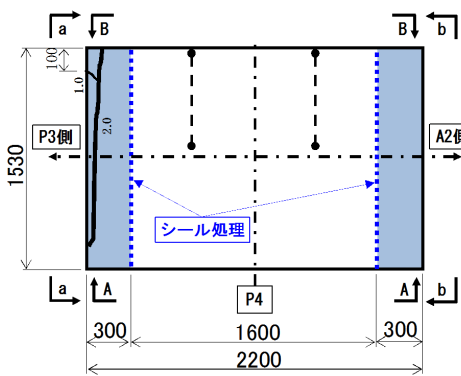


図-3 縁端拡幅部 外観状況

その撤去部材を活用して、劣化損傷が顕在化した既設橋梁の健全度評価に関する研究が土木研究所において別途行われている^{3), 4)}。

本橋では、上部構造の塩害対策だけでなく、耐震補強対策として、1978年に桁かかり長を確保するための横梁の拡幅、2005年にRC橋脚の曲げ耐力や変形性能を向上させるためのRC巻立て補強も実施されている。耐震補強対策として施された部位にも経年劣化によると見られる損傷が生じていることに鑑み、本研究では、図-2に示すように、耐震補強で実施された横梁の拡幅部とRC巻立て部に着目し、これらの部位の耐荷力等を実験的に評価することとした。本来であれば、撤去対象となったRC橋脚をそのままの状態を活用したいが、橋脚の全体形状を保持したまま実験施設まで運搬することは不可能である。よって、実験にあたっては、分割して撤去されたRC橋脚を活用することとし、図-2中に示す[1]~[3]の部位を採取することとした。RC巻立て部の曲げ耐力については、軸方向鉄筋の引張強度と定着性能およびコンクリートの強度を調査することで、評価することとした。

表-2 採取部位と試験項目一覧

採取部材	[1] 横梁縁端拡幅部	[2] RC巻立て(柱部)	[3] RC巻立て(基部)
写真			
評価項目	縁端拡幅部の耐荷性能	RC巻立ての健全性	軸方向鉄筋の定着性能
調査・材料試験	外観調査、コンクリート圧縮強度試験、鉄筋引張強度試験、塩化物イオン含有量試験		
耐荷試験	縁端拡幅部耐荷力試験	—	軸方向鉄筋の引き抜き耐力試験

3. 試験概要

過去に耐震補強を目的として実施された横梁の縁端拡幅並びにRC巻立て補強の部位が、長期間にわたって厳しい塩害環境下に曝されてきた現在の状態においても、当初の耐震補強効果が確保されているかを実験により検証する。横梁の縁端拡幅は、桁端部の桁かかり長を確保することを目的として施された対策であり、地震によって支承部が破壊しても、当該拡幅部がその支点の死荷重反力を支持することにより桁の落下を防止するものである。よって、耐震補強効果の検証をする上では、縁端拡幅部の鉛直下向きの耐荷力特性が重要な評価項目となる。一方、RC巻立て補強は、橋脚全体としての保有耐力と塑性変形能を向上させることを目的として施された対策である。よって、耐震補強効果の検証をする上では、RC巻立て軸方向鉄筋の強度と基礎コンクリートへの定着性能が重要な評価項目となる。試験項目の一覧を表-2に示す。横梁の縁端拡幅部については、拡幅部と横梁の一部分(図-2の[1])を対象として、外観調査、縁端拡幅部のコンクリート圧縮強度試験、縁端拡幅部アンカー鉄筋の引張強度試験、縁端拡幅部および既設部の塩化物イオ

ン含有量試験，縁端拡幅部の耐荷力試験を行う。RC 巻立ての柱部（図-2 の[2]）については，外観調査，RC 巻立て部のコンクリート圧縮強度，RC 巻立て軸方向鉄筋の引張強度試験，RC 巻立て部および既設部の塩化物イオン含有量試験を行う。なお，RC 巻立て補強は巻立て厚 250mm，軸方向鉄筋 D22 (SD345) が外周面から 150mm の位置に配置されている。RC 巻立ての基部（ケーソン頂版との接合部，図-2 の[3]）については，外観調査，RC 巻立て部のコンクリート圧縮強度試験，RC 巻立て軸方向鉄筋の引張強度試験，RC 巻立て部および既設部の塩化物イオン含有量試験，RC 巻立て軸方向鉄筋の定着性能を評価するために引き抜き抵抗試験を行う。

4. RC 橋脚の横梁縁端拡幅部に対する調査及び試験

4.1 外観調査

縁端拡幅部の損傷状況を把握するため，外観調査を実施した（写真-3）。P3 側（写真-3，a-a 断面）は，縁端拡幅部と既設柱部の間に最大 2.0mm 幅のひび割れが発生していたが，それ以外に目立った損傷は見られなかった。一方，A2 側（写真-3，b-b 断面）は，最大 7.0mm 幅の水平ひび割れが発生しており，一部コンクリートの浮きも確認された。さらに打継部下面からは，錆汁の析出が認められたため，縁端拡幅部内部の鉄筋は腐食しているものと推定される。縁端拡幅部上面には，既設部との打継部にシール処理（ポリサルファイド系）が施され，浸入防止対策が講じられていた（写真-2）。シール処理の状態は，材料の劣化や剥離が生じた箇所もなく健全な状態であり，打継部への塩害対策として効果的であった可能性がある。

4.2 材料強度試験

縁端拡幅部のコンクリート材料の劣化度合いを確認するため，コア抜き後，圧縮強度試験を実施した。P3 側が 29.7N/mm²，A2 側が 28.1N/mm² となり，ともに当初の設計基準強度（21N/mm²）を満足する結果となった。また，同様に鉄筋の劣化度合いを評価するため，アンカー鉄筋をコア抜きにより採取した。外観調査の結果より，P3 側

よりも損傷が進行していた A2 側の図-6 に示す位置から採取した鉄筋を写真-3 に，引張試験の結果を表-3 に示す。採取した鉄筋は，表面に腐食はみられるものの，断面は減少していなかった。また，引張強度試験については，P3 側，A2 側ともに規格値を満足していた。

4.3 塩化物イオン含有量試験

縁端拡幅部コンクリートの塩化物イオン量の分布を評価するため，塩化物イオン含有量試験を実施した。試料は，縁端拡幅部前面および橋脚と縁端拡幅部の打継部からコアスライスにより採取した（図-4）。図-5 に塩化物イオン含有量試験の結果を示す。縁端拡幅部前面では，P3 側，A2 側いずれも腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m³ を超過する値を示している。P3 側に比して A2 側の塩化物イオン含有量が多く検出された。A2 側は大きなひび割れが発生していることから，内部まで塩化物イオンが進展している可能性が考えられる。また，縁端拡幅部前面から内部へ 10mm 入った位置より 30mm 入った位置のほうが，塩化物イオン含有量が多く検出された。これは，縁端拡幅部前面が雨水により洗い流されていた可能性が考えられる。また，橋脚と縁端拡幅部の打継部においては，塩化物イオンが既設橋脚から縁端拡幅部へ再拡散されている傾向がみられた。

4.4 縁端拡幅部耐荷力試験

縁端拡幅部の耐荷力を評価するため，縁端拡幅部に鉛直荷重を下向きに載荷する試験を実施した。試験要領を図-6 に示す。試験対象部位は，アンカー鉄筋 4 本（2 段×2 列）を含んだ 600mm 幅とし，この部分のみが荷重負担するよう，縁端拡幅部の左右をカッターで切込みを入れて縁を切った。なお，縁端拡幅のための後施工アンカー鉄筋は，エポキシ樹脂の充填性を向上させるため，図-6 に示すように 15° の傾斜がつけられていた。載荷位置については，地震荷重により支承部が破壊して桁が移動し，縁端拡幅部のみで桁を支持している状態を想定し，縁端拡幅部の先端から 75mm を載荷中心位置とした。載荷荷重および鉛直変位の関係を図-7 に示す。最大荷重は，P3 側が 384kN，A2 側が 447kN となり，von Mises の降伏

表-3 縁端拡幅部アンカー鉄筋の引張強度

	D19(SD295A)		
	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
P3側	351	511	26
A2側	352	510	24
許容値	295以上	440~600	16以上

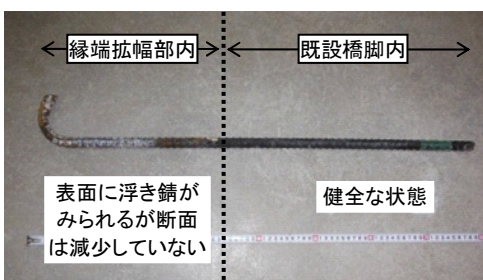


写真-3 取り出した A2 側縁端拡幅部のアンカー鉄筋

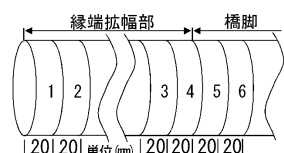


図-4 塩化物イオン含有量試験の試料採取位置

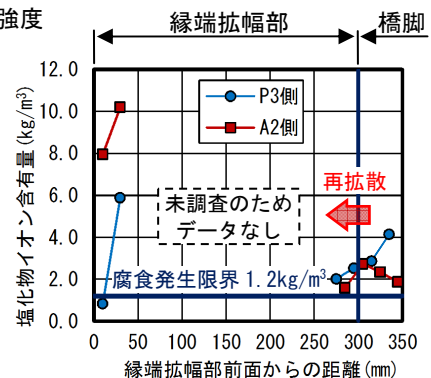


図-5 塩化物イオン含有量試験結果

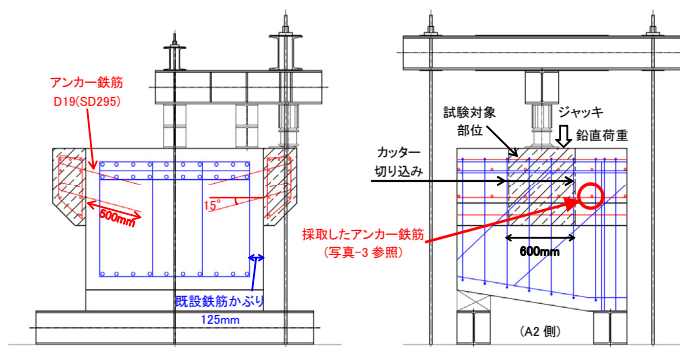


図-6 縁端拡幅部耐力試験要領

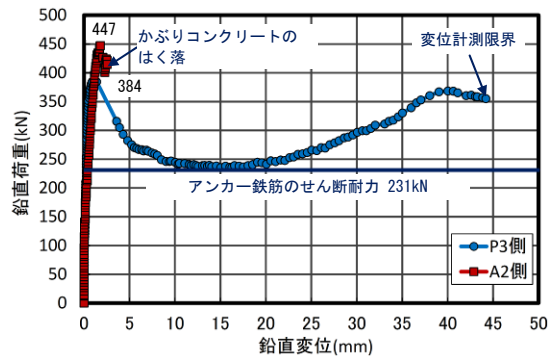


図-7 鉛直荷重—鉛直変位関係

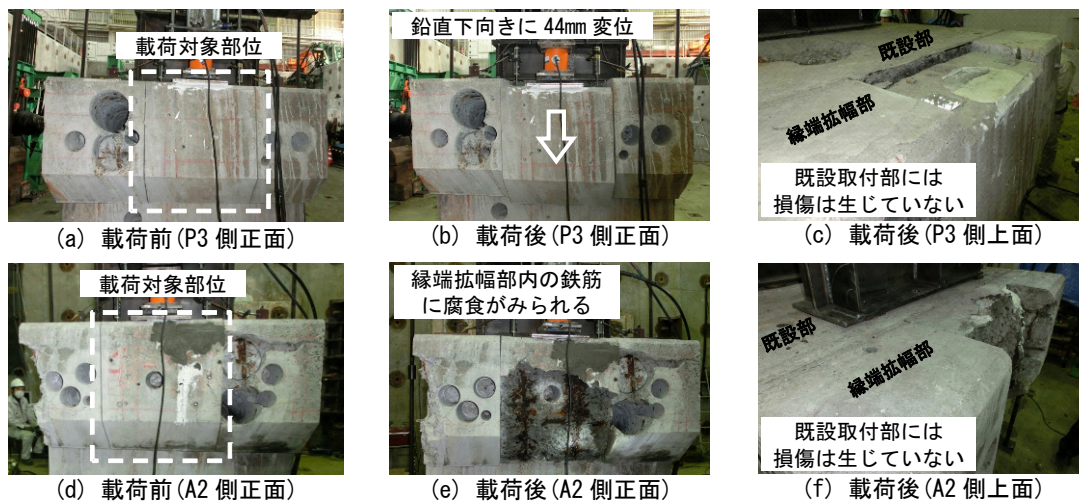


写真-4 縁端拡幅部の載荷前・載荷後の状況

条件 ($\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$) を適用して鉄筋の引張強度試験結果による降伏点をもとに算出したせん断応力度に、アンカー鉄筋 4 本分の断面積を乗じて算出したせん断耐力 (231kN) を大きく上回った。これは、既設橋脚と縁端拡幅部の境界位置において、アンカー鉄筋のせん断耐力が確保されていたうえに、縁端拡幅部の設計では見込んでいない既設橋脚と縁端拡幅部とのコンクリート境界面の付着力による効果が発揮されたためと考えられる。P3 側は、最大荷重到達直後からコンクリート境界面の付着力による効果が失われて徐々に変位が増大し、鉛直荷重がせん断耐力まで低下した。さらに載荷すると、アンカー鉄筋のひずみ硬化により鉛直荷重が増大するとともに、縁端拡幅部形状を維持しながら 44mm まで鉛直下向きに変位し、変位計の計測限界に達したため試験を終了した。一方 A2 側は、コンクリート境界面の付着力による効果が失われる前に、最大荷重到達直後に縁端拡幅部前面のかぶりコンクリートがはく落し、急激に耐力が低下した。P3 側、A2 側それぞれの載荷前後の状況を写真-4 に示す。A2 側の縁端拡幅部内の鉄筋は腐食により膨張していた。A2 側のコンクリートに発生していたひび割れは塩害により腐食した鉄筋の膨張により発生したと考えられる。また、P3 側、A2 側いずれも既設取り付け側のコンクリートには載荷による損傷は生じなかった。

5. RC 巻立て補強部 (柱部) に対する調査及び試験

5.1 外観調査

RC 巻立て部の損傷状況を把握するため、外観調査を実施した (図-8)。巻立てコンクリートと既設橋脚の境界部に最大 2.0mm 幅のひび割れが見られたが、定着部やひび割れからの錆汁の析出は確認されなかった。

5.2 材料強度試験

RC 巻立て部 (柱部) および既設部のコンクリート圧縮強度試験を実施した。RC 巻立て部において 62.8N/mm^2 、既設部において 32.2N/mm^2 (いずれも 3 供試体の平均値) と、比較的高い値を示した。また、RC 巻立て部 (柱部) の軸方向鉄筋 4 本を採取して引張強度試験を行ったところ、いずれも規格値 (降伏点、引張強さ、伸び) を満足した。

5.3 塩化物イオン含有量試験

RC 巻立て補強部 (柱部) コンクリートの塩化物イオン量の分布を確認するため、塩化物イオン含有量試験を実施した。試料は、RC 巻立てコンクリート前面および橋脚と RC 巻立て部の打継部からコアスライスにより採取した。図-9 に塩化物イオン含有量試験の結果を示す。RC 巻立ての表面部において腐食発生限界の塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 を超過する値を示しているが、表面から 30mm の位置ではほぼ 0 になっている。よって、表面か

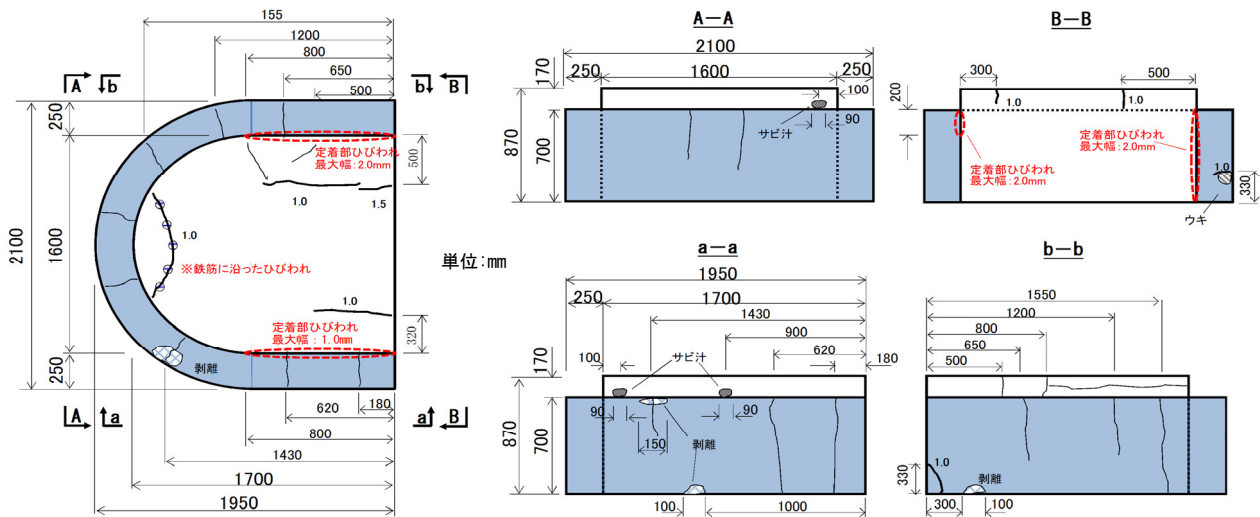


図-8 RC巻立て補強部（柱部）外観状況

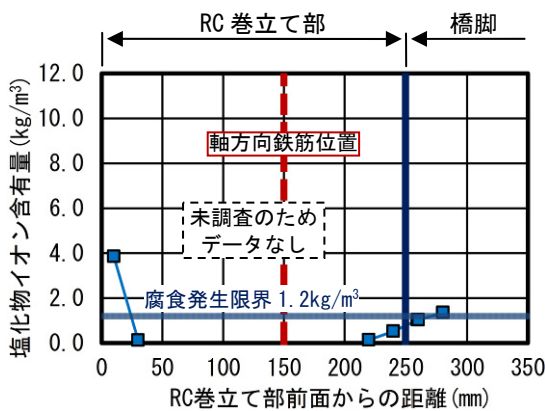


図-9 塩化物イオン含有量試験結果（柱部）

ら 150mm の軸方向鉄筋位置では、塩化物イオン含有量は低いと考えられる。RC 巻立て補強は 2005 年に実施されており、経過年数が少なく、大きなひび割れもないため内部への浸透はまだ進行していないものと推定される。一方、縁端拡幅部同様、既設部から巻立て部への塩化物イオンの再拡散傾向がみられた。

6. RC 巻立て補強部（基部）に対する調査及び試験

6.1 外観調査

RC 巻立て部の損傷状況を把握するため、外観調査を実施した。巻立てコンクリート定着部を含め、全体的に目立った変状は生じていなかった。

6.2 材料強度試験

RC 巻立て部（基部）および既設部のコンクリート圧縮強度試験を実施した。RC 巻立て部において 66.7N/mm^2 、既設部において 32.0N/mm^2 （いずれも 3 供試体の平均値）と、柱部に比較的高い値を示した。また、RC 巻立て部（柱部）の軸方向鉄筋 6 本を採取して引張強度試験を行ったところ、いずれも規格値（降伏点、引張強さ、伸び）を満足した。

6.3 塩化物イオン含有量試験

RC 巻立て部（基部）コンクリートの塩化物イオン量の分布を確認するため、塩化物イオン含有量試験を実施

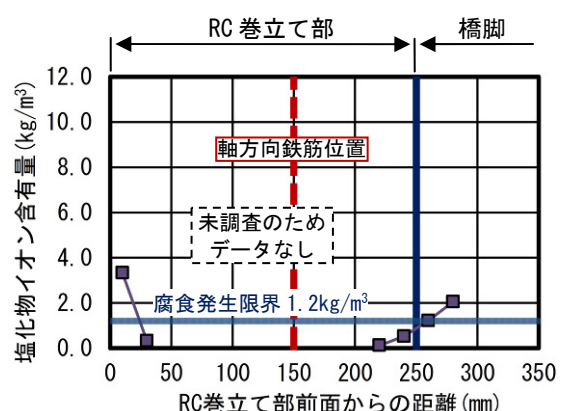


図-10 塩化物イオン含有量試験結果（基部）

した。試料は、RC 巻立てコンクリート前面および橋脚と RC 巻立て部の打継部からコアスライスにより採取した。図-10 に塩化物イオン含有量試験の結果を示す。図-9 に示した柱部での試験結果と同様、RC 巻立ての表面部において腐食発生限界の塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 を超過する値を示しているが、表面から 30mm の位置では大幅に低減している。従って、柱部同様、表面から 150mm の軸方向鉄筋位置では、塩化物イオン含有量は低いと考えられる。既設部から巻立て部への塩化物イオンの再拡散傾向もみられた。

6.4 軸方向鉄筋定着部に対する引き抜き耐力試験

RC 巻立て軸方向鉄筋の基礎コンクリートへの定着性能を評価するために、引き抜き耐力試験を行った。軸方向鉄筋には架設地点が塩害環境下であることを考慮して、エポキシ樹脂鉄筋が採用されていた。鉄筋の定着長は図-11 に示すように、D22 の異形鉄筋に対して 650mm（ $\approx 30D$ ）が確保されており、エポキシ樹脂鉄筋とコンクリートとの付着を考慮して、一般的に用いられる 20D を超える長さが確保されていた⁵⁾。

3本の軸方向鉄筋を引張するため、写真-5 に示すように軸方向鉄筋をはつり出した。エポキシ樹脂で被覆された軸方向鉄筋自体は健全な状態であることが確認された。引き抜き耐力試験の要領を写真-5 に示す。はつり出した

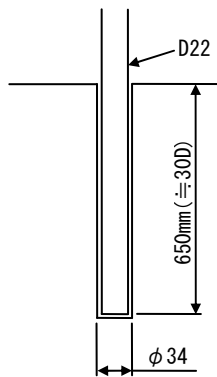


図-11 RC 巻立て軸方向鉄筋定着長

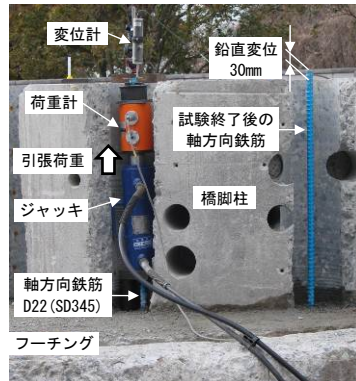


写真-5 RC 巻立て軸方向鉄筋のハツリ出し状況および引き抜き耐力試験要領

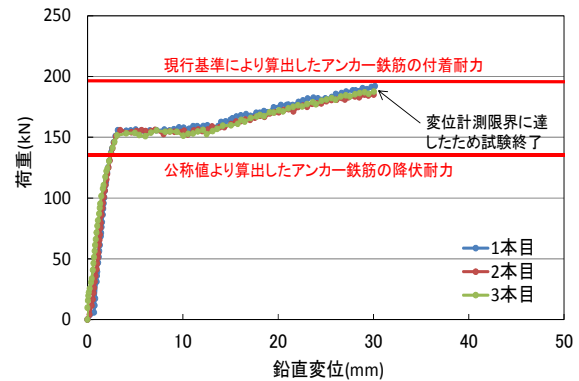


図-12 軸方向鉄筋鉛直荷重—鉛直変位関係

軸方向鉄筋を直接掴み、センターホールジャッキにより引張力を与えた。引張試験を行った3本の軸方向鉄筋の鉛直荷重—鉛直変位関係を図-12に示す。いずれの鉄筋もSD345の公称値により算出した降伏耐力(134kN)を超えた150kNで降伏し、その後、ひずみ硬化により徐々に耐力が上昇した後、鉛直変位30mmで変位計測限界に達したため試験を終了した。試験終了までアンカー鉄筋の抜け出しや定着部のコンクリートに変状がみられなかったうえ、降伏耐力を超えた後もアンカー鉄筋の伸びのみが増大していったことから、定着部は健全な状態を保持していたものと考えられ、必要な定着性能は確保されていたといえる。

7. まとめ

本研究では、厳しい塩害環境下に曝されていた撤去橋梁を活用して、RC橋脚沓座部の縁端拡幅補強や躯体部のRC巻立て補強を対象に、耐荷力試験、材料強度試験および塩化物イオン含有量試験を実施した。以下に得られた主な知見を示す。

- (1) A2側の縁端拡幅部は、最大7.0mm幅の水平ひび割れ、コンクリートの浮き、錆汁の析出などの目立った損傷が認められたにも関わらず、所要の耐荷力は確保できている状態であった。このように、縁端拡幅部の耐荷性能の確保という観点では、特にアンカー鉄筋を健全な状態に維持することが重要と言える。
- (2) A2側の縁端拡幅部は、最終的にはかぶりコンクリートの剥落を起因として、急激に耐力が低下した。塩害環境下でコンクリートにひび割れが発生している場合は、鉄筋の腐食状況等の詳細な調査が必要と考えられる。
- (3) 縁端拡幅部においては、既設部と縁端拡幅部の境界上面部にシールがなされ、このシールに機能低下をもたらすような損傷が生じていなかったことが効果的であった可能性がある。
- (4) 補強部位での塩化物イオン含有量試験の結果から、

既設部の塩化物イオンが、新設部に拡散する傾向が認められた。既設部に予め多くの塩化物イオンが含まれていた場合は、補強前に新設部への再拡散をできるだけ防ぐ対策の検討が重要になると考えられる。

(5) 本研究で対象としたRC巻立て基部の軸方向鉄筋定着部は、補強工事を実施してから5年間塩害環境下に曝された後においても、必要な定着性能は確保されていることを実験的に確認した。

8. 謝辞

本研究で用いた供試体は、国土交通省北陸地方整備局のご協力により提供して頂きました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 小林孝一, 志知裕幸, 榎原吉正: 塩害がRC部材の耐震性に与える影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1059-1064, 2004.6.
小林孝一: 塩害により劣化したRC部材の耐震性に関する研究, コンクリート工学論文集, 第16巻第2号, pp.49-59, 2005.5.
- 2) 小林崇, 北野勇一, 花井拓, 木村嘉富: 既設PC橋のグラウト充填状況がPC鋼材の腐食に与える影響, プレストレストコンクリート工学会, 第21回シンポジウム論文集, pp.443-448, 2012.10.
- 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) 一般社団法人土木学会: エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版], コンクリートライブラリー112, 2003.11.
- 5) 一般社団法人土木学会: エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版], コンクリートライブラリー112, 2003.11.