

長期間塩害環境下に曝された RC橋脚の耐震補強部材の耐荷特性

榎本武雄¹・篠原聖二²・星隈順一³

¹正会員 独立行政法人 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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修(工) 独立行政法人 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(同上)

³正会員 博(工) 独立行政法人 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(同上)

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下部構造で行われるため、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場合があることから、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、その後の経年変化について検討された研究はほとんどない。そこで、本稿では、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、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年に架設された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。本橋では、2010年9月より交通を仮橋に迂回させ、下部構造を含めた架け替え工事が実施され、2013年3月から新しい橋の供用が始まっている。なお、本橋の上部構造については、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^{1), 2)}。

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



写真-1 対象橋梁の全景

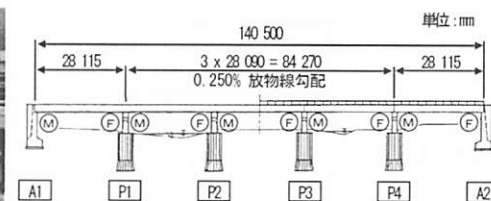


図-1 対象橋梁の一般図

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PC5径間単純ポストテンション方式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

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。実験にあたっては、撤去対象となったRC橋脚をそのまま活用することとし、図-2中に示す①～③の部位を採取することとした。

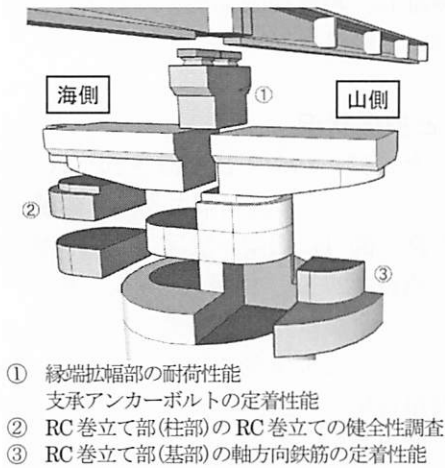
3. 試験概要

本研究で実施する試験項目一覧を表-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。また、耐震補強部材ではないが、既設の線支承についても、塩害による著しい腐食がみられることから、支承アンカーボルトの定着性能を評価するために引き抜き抵抗試験を行う。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を行う。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

横梁の縁端拡幅部については、横梁と拡幅部の一



- ① 縁端拡幅部の耐荷性能
支承アンカーボルトの定着性能
- ② RC巻立て部(柱部)のRC巻立ての健全性調査
- ③ RC巻立て部(基部)の軸方向鉄筋の定着性能

図-2 採取部位と主な試験内容

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	②RC巻立て(柱部)	③RC巻立て(基部)
写真			
調査・材料試験	・外観調査 (縁端拡幅部・支承アンカーボルト) ・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	・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	・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 支承アンカーボルト引き抜き試験	—	RC巻立て部軸方向鉄筋の引き抜き耐力試験

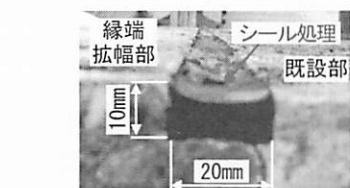


写真-2 縁端拡幅部と既設部の境界部上面に設置されたシール

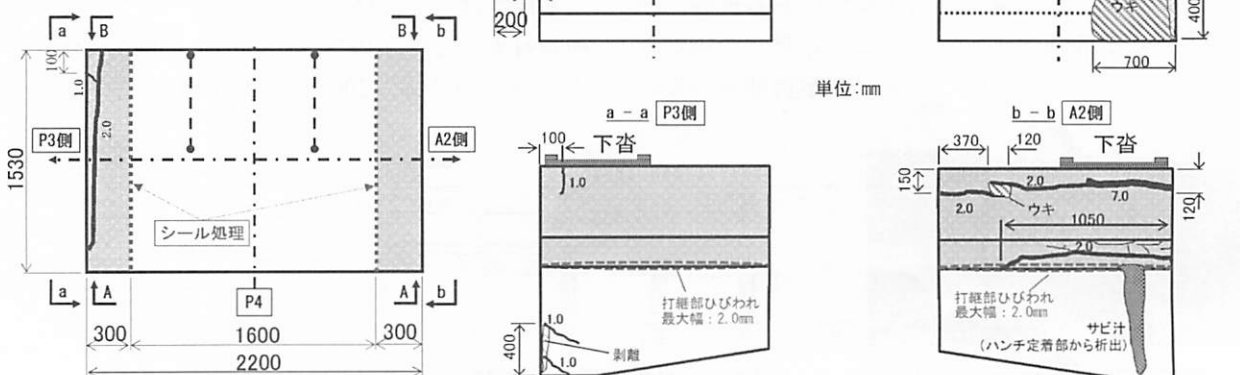


図-3 縁端拡幅部 外観状況

部分（図-2の①の部位）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。

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（図-3）。P3側（図-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（図-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側ともに許容値を満足していた。

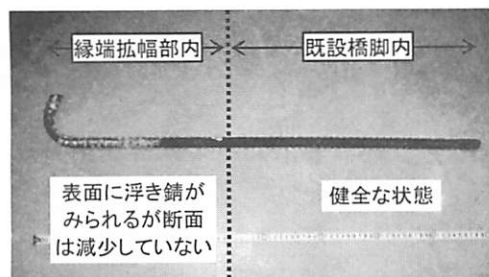


写真-3 取り出した
縁端拡幅部アンカー鉄筋

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

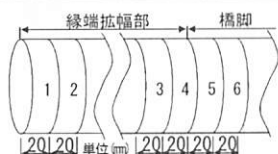


図-4 塩化物イオン含有量
試験の試料採取位置

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、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降伏耐力(231kN)を大きく上回った。P3側は、最大荷

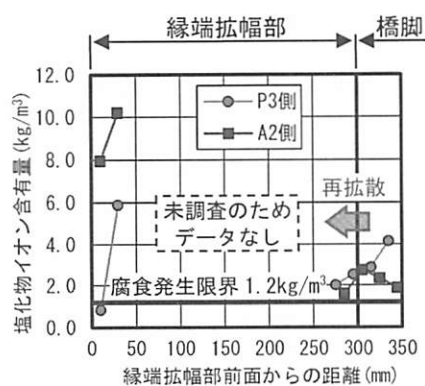


図-5 塩化物イオン
含有量試験結果

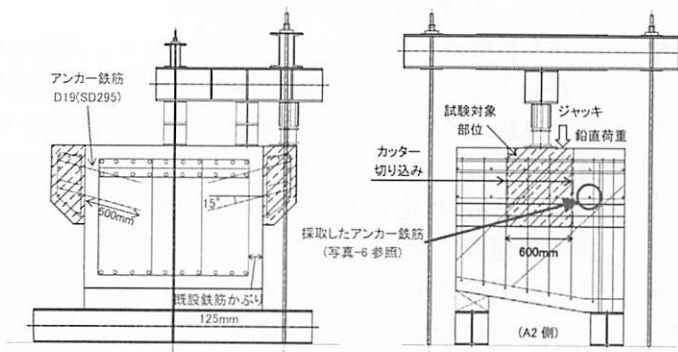


図-6 縁端拡幅部耐荷力試験要領

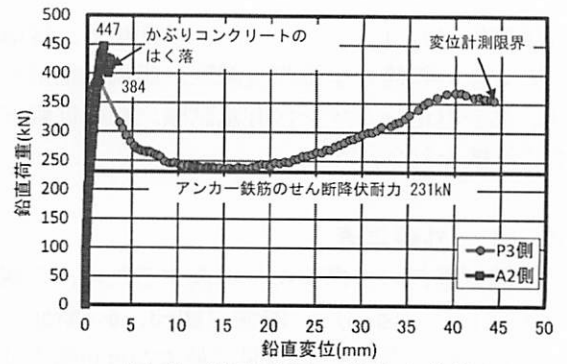


図-7 鉛直荷重—鉛直変位関係

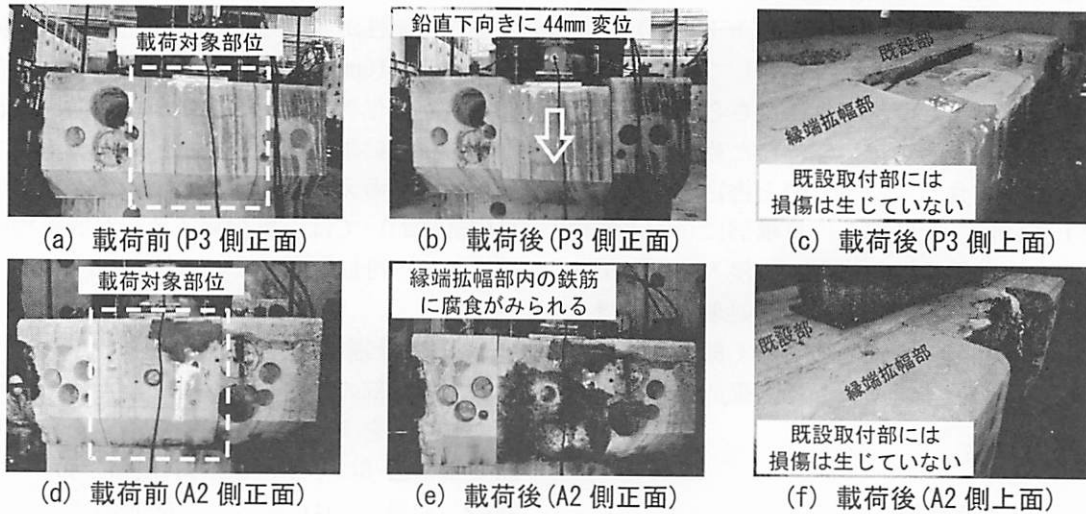


写真-4 縁端拡幅部の載荷前・載荷後の状況

重到達直後から徐々に変位が増大し、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。A2側は、最大荷重到達時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. 支承部アンカーボルト

耐震補強部材ではないが、既設の線支承についても、塩害による著しい腐食がみられることから、支承アンカーボルトの定着性能を評価するために引き抜き抵抗試験を行った。

5. 1. 外観調査

支承部の上面を写真-5に示す。外側(写真右側)のアンカーボルトは部材採取時の切断位置に近く、引き抜き試験に適さないことから外観を調査した後、

モルタルをハツリ、内部の状況を調査する。ハツリ作業前の状況を写真-6に示す。可動支承のアンカーボルトはモルタルが十分に充填されていたが、固定支承のアンカーボルトは部分的に充填が不足している部分が見られた。ハツリ作業後、調査したアンカーボルトの仕様、健全性等を表-4に示す。可動支承、固定支承いずれも、下沓が著しく腐食しており、腐食によりアンカーボルトと一体化していた。可動支承のアンカーボルトは比較的健全であったが、固定支承のアンカーボルトは表面の一部に腐食がみられた。固定支承側は、ハツリ前の外観調査から、モルタルの充填不足が確認されており、空隙部分から水が浸入した可能性がある。また、固定支承のアンカーボルトについては、補強のためのスパイラル鉄筋が配置されていた。

5. 2. 支承アンカーボルト引き抜き耐力試験

写真-5に示す引張試験対象アンカーボルトに対し、引き抜き耐力試験を行った。当初、下沓からアンカーボルトを取り外し、アンカーボルトのみを引張することを考えていたが、前節で述べたように腐食が著しく進行し、下沓とアンカーボルトを分離することができなかったため、下沓ごと引張試験を行うこ

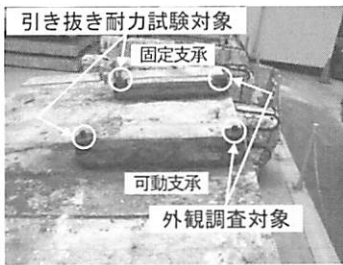


写真-5 支承部上面

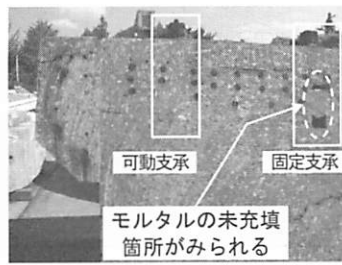


写真-6 支承部断面

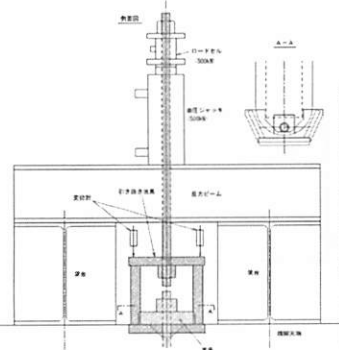


図-8 支承アンカーボルト引き抜き耐力試験要領



写真-7 セットアップ状況(固定支承側)

表-4 支承部ハツリ調査結果

支持条件	可動支承	固定支承
写真		
アンカー種別	丸鋼	丸鋼
アンカー径	25mm	32~33mm
定着長	270mm(≒10φ)	330mm(≒10φ)
ハツリ後の外観に関する特筆事項	<ul style="list-style-type: none"> アンカーボルトと下沓が腐食により一体化しており、分離することができない。 アンカーボルトは比較的健全 スパイラル鉄筋は設置されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> アンカーボルトと下沓が腐食により一体化しており、分離することができない。 アンカーボルトの表面に一部腐食が発生している。 スパイラル鉄筋が配置されていた。

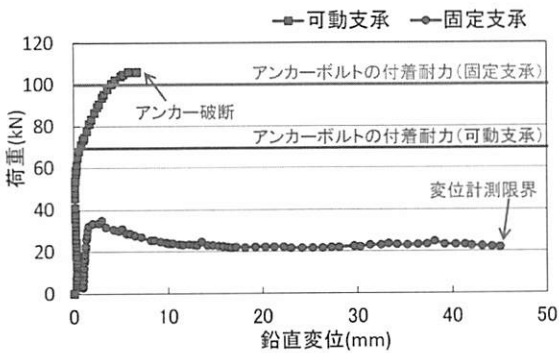


図-9 荷重-鉛直変位関係

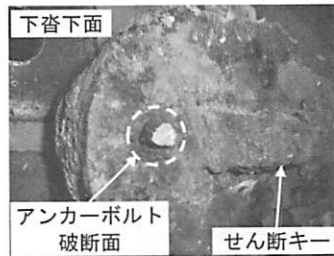


写真-8 可動側支承アンカーボルト破断面

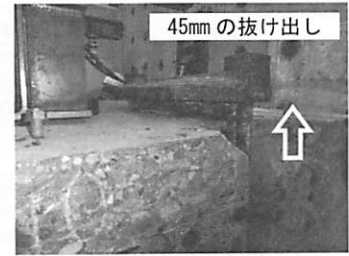


写真-9 固定側支承アンカーボルトの抜け出し状況

とした。図-8に示すように下沓の下部を部分的にハツリ、空間を確保した上で、下沓下面に治具をセットし、引きあげることとした。セットアップ状況を写真-7に示す。

荷重-鉛直変位関係を図-9に示す。ここで鉛直変位は、図-8に示す治具に設置した変位計により計測した。可動支承アンカーボルトについては、現行の道路橋支承便覧³⁾により算出した丸鋼の付着耐力(70kN)以上の抵抗力を発揮しており、最終的には鉛直荷重108kNでアンカーボルトの下沓直下部において破断し終局を迎えた。アンカーボルトの破断面を写真-8に示す。アンカーボルトが降伏後、ほとんど伸びずに破断したのは、腐食によりアンカーボルト断面が減少していた可能性がある。固定支承アンカーボルトについては、鉛直荷重30kN程度でアンカーボルトとモルタルの付着が切れ、アンカーボルトのみが抜けだし始めた。その後、鉛直変位45mmで設

置していた変位計の計測限界を迎えた。試験後の状況を写真-9に示す。引張試験を行った側のアンカーボルトのモルタルの充填状況は直接確認していないが、ハツリ調査を行った側の固定支承アンカーボルトではモルタルの充填不足がみられたことから、引張試験を行ったアンカーボルトについても同様のモルタルの充填不足により、現行の道路橋支承便覧により求まる付着耐力が得られなかった可能性がある。

6. RC巻立て補強部(柱部)

RC巻立て補強の柱部(図-2の②の部位)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た。

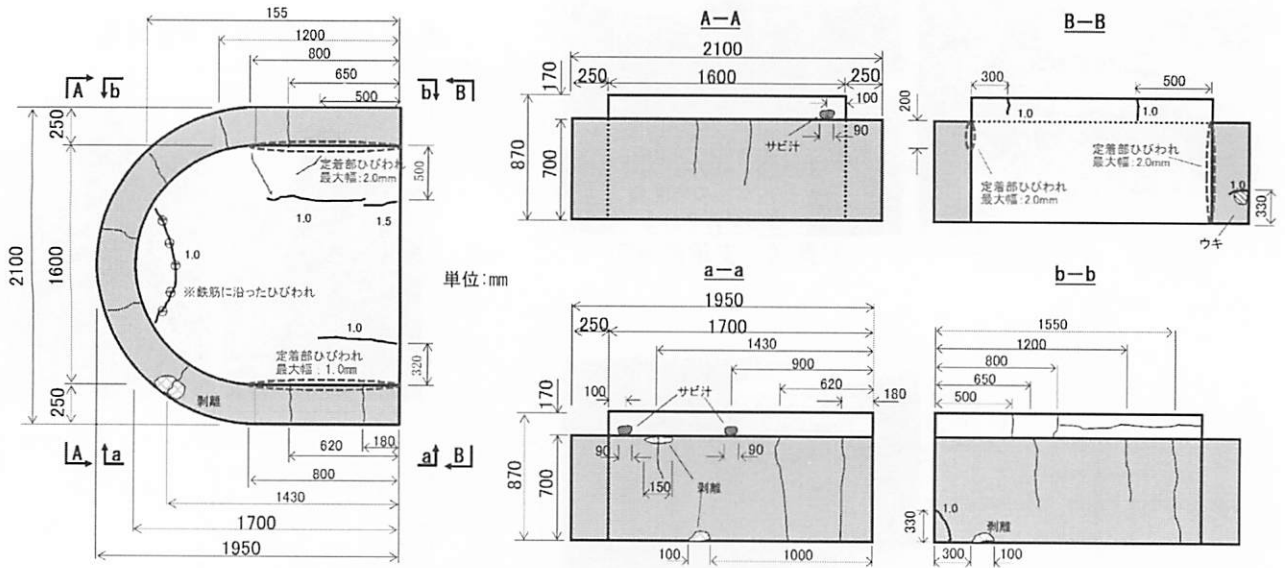


図-10 RC巻立て補強部（柱部）外観状況

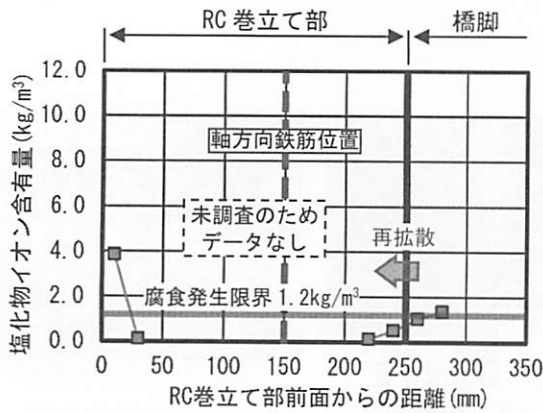


図-11 塩化物イオン含有量試験結果

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（図-10）。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サビ汁の析出は確認されなかった。

6. 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。

6. 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-11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。

7. RC巻立て補強部（基部）

RC巻立て補強部の基部（ケーソン頂版との接合部、図-2の③の部位）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。

7. 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-12）。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。

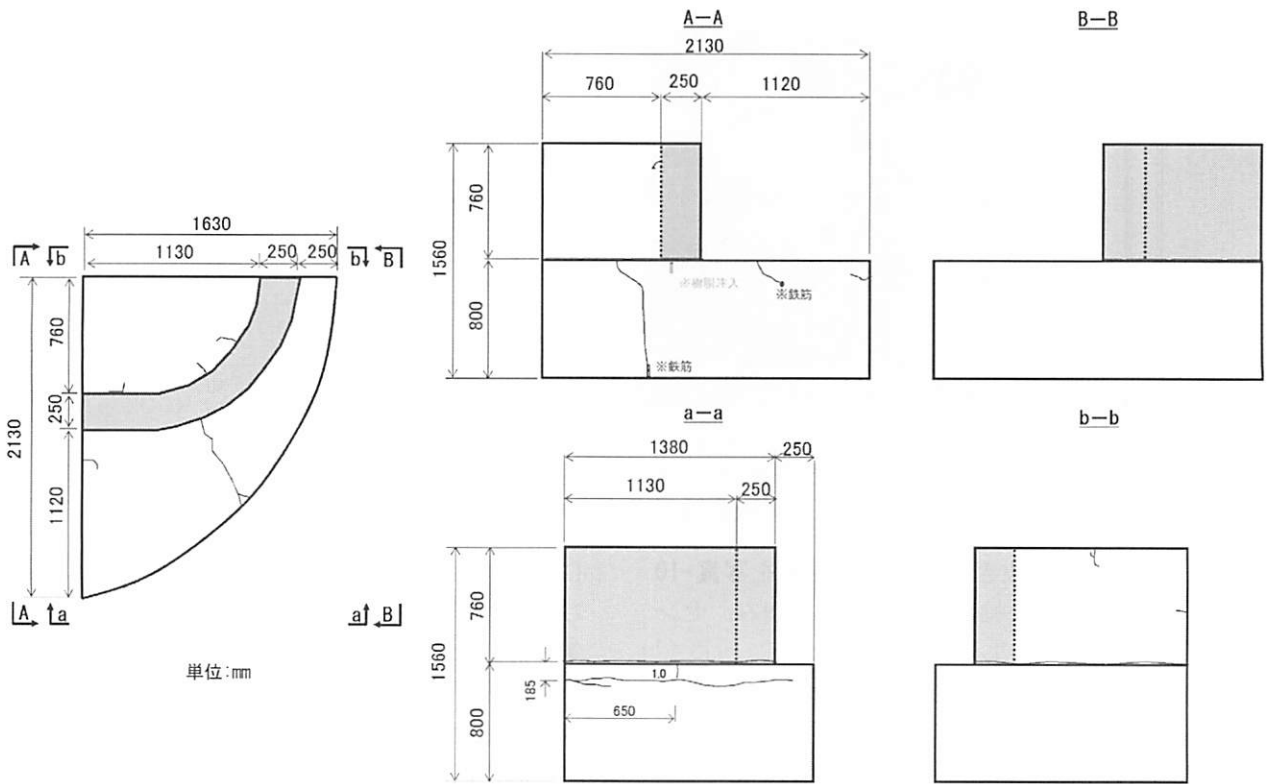


図-12 RC巻立て補強部（基部）外観状況

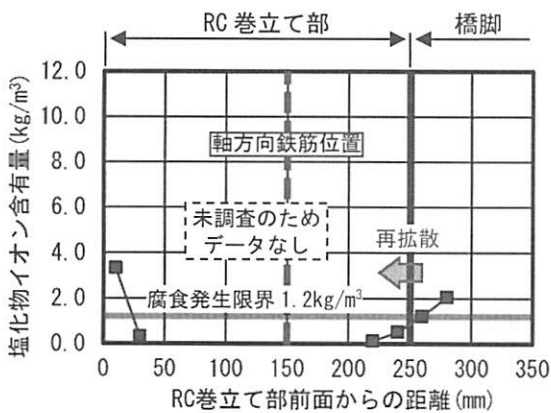


図-13 塩化物イオン含有量試験結果

7. 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、柱部同様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。

7. 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-13に塩化物イオン含有量試験の結果を示す。図-11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。

7. 4. RC巻立て部の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⁴⁾が採用されている。鉄筋の定着長は図-14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。

3本の軸方向鉄筋を引張するため、写真-10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

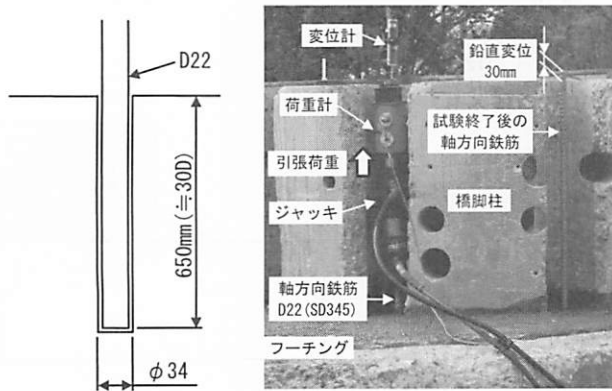


図-14 RC巻立て軸方向鉄筋定着長

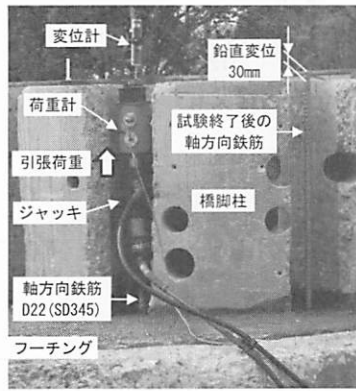


写真-10 RC巻立て軸方向鉄筋のハツリ出し状況および引き抜き耐力試験要領

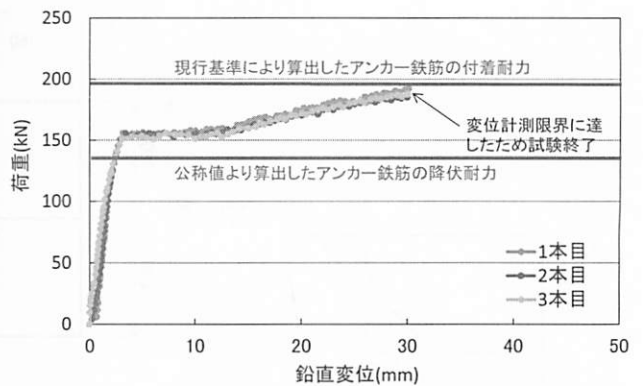


図-15 軸方向鉄筋鉛直荷重—鉛直変位関係

が確認された。引き抜き耐力試験の要領を写真-10に示す。ハツリ出した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-15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はみられず、必要な定着性能が確保されていたものと考えられる。

8. まとめ

本研究では、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を検証するために、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。以下に得られた主な知見を示す。

- (1) 縁端拡幅部、RC巻立て基部の鉄筋定着部を対象とした耐荷力試験の結果、厳しい塩害環境下においても、それぞれ所定の耐荷力を有しており、耐震補強効果の一定の持続性が確認された。
- (2) 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。
- (3) 縁端拡幅部においては、アンカー鉄筋のせん断降伏耐力から求まる耐荷力は確保されているものの、塩害による鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れが発生していたA2側においては、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。

- (4) 補強部位での塩分含有量調査の結果から、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を検討するとともに、補強後は定期的に調査を行い、新設部への拡散状況を把握する必要があると考えられる。
- (5) 支承のアンカーボルトについては、現行の支承便覧に基づき算出した引き抜き耐力を満足しないケースがあった。ハツリ調査の結果から、施工時のモルタル充填が不足していた可能性があり、特に支承に大きな上揚力が発生するようなケースでは留意する必要がある。

9. 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, 北野, 花井, 木村: 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, プレストレスコンクリート工学会, 第21回シンポジウム論文集, 2012.10.
- 2) 北野, 酒井, 花井, 木村: プレストレス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, 2011.9.
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.4.
- 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.