

論文 厳しい塩害環境下に約 80 年間晒され劣化した実橋 RC 桁の 載荷試験

山口 貴幸^{*1}・下村 匠^{*2}・田中 泰司^{*3}

要旨：新潟県の日本海沿岸において約 80 年間塩害環境に晒され、著しく塩害劣化した鉄筋コンクリート道路橋において、解体時に切り出した桁 2 体を実験室に搬送し、破壊するまで曲げ載荷試験を行った。解体前に、事前調査として外観検査・塩化物イオン量測定を実施し、曲げ試験後、鉄筋を取り出し、腐食減量調査を行った。劣化の程度が異なる桁 2 体の載荷試験の結果、鉄筋の重量減少率が平均 14%の桁の残存曲げ耐力は、健全時の推定値と比較してほとんど低下が見られなかったが、平均 24%腐食した桁では鉄筋継ぎ手の定着不良が生じ、耐力は健全時の約 5 割となった。

キーワード：鉄筋腐食、塩害、実橋桁載荷試験、残存曲げ耐力

1. はじめに

現在、塩害により劣化した鉄筋コンクリート構造物が数多く存在しており、これらの維持管理を行う上で残存性能の評価が大きな課題になっている¹⁾。

著者らは、新潟県の日本海沿岸において約 80 年間塩害環境に晒された鉄筋コンクリート道路橋の解体調査の機会を得、解体時に切り出した桁 2 体を実験室に搬送し、破壊するまで曲げ載荷試験を行った。本橋梁は、長年の激しい飛来塩分の作用により塩害による劣化が著しい。自然の塩害環境に約 80 年晒された実際の鉄筋コンクリート構造物の劣化状況を詳細に調査すること自体貴重な機会であるが、そのうえに載荷試験により残存

構造性能を実際に試験することにより、室内促進試験では得られない多くの有益な情報が得られると考えられる。

2. 能生川橋の概要

載荷実験を行った RC 桁は、日本海に注ぐ新潟県糸川市の能生川の河口に架けられていた能生川橋から解体時に切り出したものである。能生川橋の外観を図-1 に示す。上部工形式は 3 径間連続鉄筋コンクリート桁橋（橋長 132m＝約 11m×12 径間）である。供用地点は冬季季節風による海からの飛来塩分が著しい塩害地域にある。当該橋梁は海岸から約 100 m の地点に位置していたので、冬季には常時激しい飛来塩分に晒されていたと思われる。

能生川橋の竣工は昭和 5 年であり、内務省土木局「道路構造に関する細則」（大正 15 年）の 2 等橋に準拠して架設されたと推察される。これによる設計活荷重を図-2 に示す。長く幹線道路としての機能を果たしてきたが、昭和 42 年に隣に能生大橋が新設されたこととともない、市町村道となった。塩害腐食による劣化が進行したため、平成 8 年に供用制限が開始され、平成 18 年に供用中止、平成 21 年に解体・撤去が行われた。載荷実験を行った平成 21 年時点で橋齢は 79 年になる。なお、昭和 34 年にかぶりコンクリートのはつり、モルタルによる断面修復を含む、大規模な補修が行われていた。



図-1 能生川橋の外観（平成 20 年 8 月撮影）

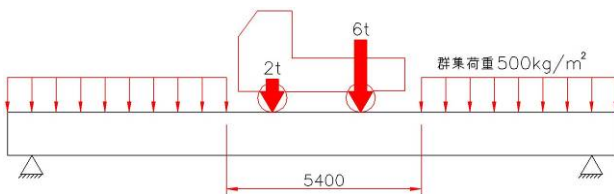


図-2 設計活荷重

3. 劣化状況

3.1 外観調査

能生川橋は供用中から塩害による劣化が顕在化していた。いずれの桁においても軸方向の腐食ひび割れが観

*1 長岡技術科学大学 修(工) (正会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系准教授 博(工) (正会員)

*3 長岡技術科学大学 環境・建設系助教 博(工) (正会員)

察され、一部の桁では大規模なかぶりの剥落が認められた（図－３）。

載荷試験のために切り出した主桁２本を対象に外観調査を行った。切り出し位置はP8橋脚とP9橋脚の間とし、海側の外桁と中桁の２本を切り出した（図－４、図－５）。

図－６、図－７に外桁と中桁の外観をそれぞれ示す。海側に面していた外桁は腐食の進行が著しく、スパン全長のおよそ半分でかぶりが剥落し、軸方向鉄筋が露出していた。剥落した部分は、昭和３４年の補修時にモルタルにより断面修復した部分と推察される。露出部分ではスターラップは腐食して破断していた。一方、中桁では鉄筋に沿った縦ひび割れが確認されたものの、かぶりの剥落は見られなかった。既往の規準類に従って外観調査から劣化度の判定を行った。土木学会コンクリート標準示方書維持管理編^{２)}、港湾の施設の維持管理技術マニ

アル^{３)}、塩害橋梁維持管理マニュアル（案）^{４)}に従って判定を行った結果、表－２に示すように、外桁は前２者の規準で最も高い劣化度に判定され、もう一つの基準では２番目に高い劣化度に判定された。中桁の劣化度はいずれの規準によっても２番目に高い劣化度であると判定された。

3.2 塩化物イオン量の測定

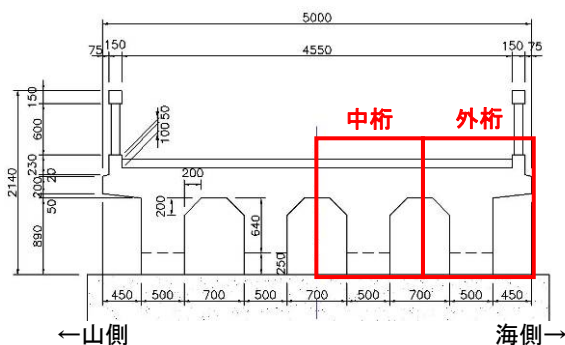
2007年2008年に現地調査を行い、配筋やコンクリートの圧縮強度および中性化深さの測定、塩化物イオン量分析などを行った。P9-P10間（図－５参照）において実施した全塩化物イオン量の測定結果の一例を図－８に示す。本橋梁の軸方向主鉄筋のかぶりは実測約50mm、側方かぶりは約90mmであるが、鉄筋位置における塩化物イオン量は腐食発生限界の目安である 1.2kg/m^3 を大きく上回っていた。また、コンクリート中の塩化物イオン



図－３ 能生川橋の劣化状況（桁下面）



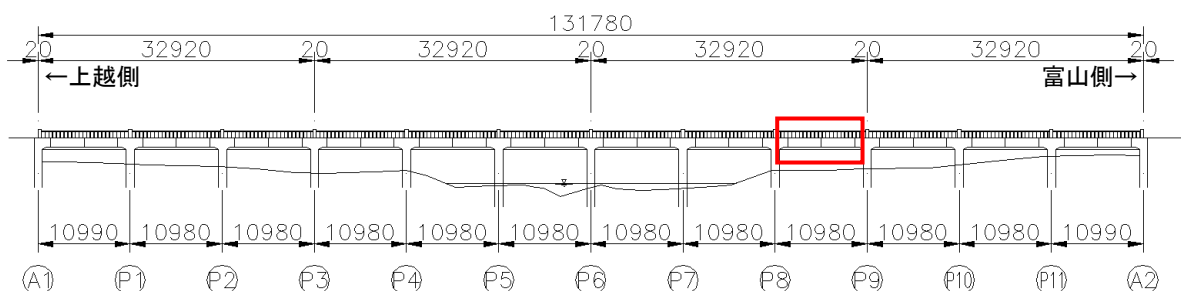
図－６ 外桁の外観（実験室搬入後）



図－４ 試験体切り出し位置（断面図）



図－７ 中桁の外観（実験室搬入後）



図－５ 能生川橋の側面図

量は必ずしも海に面した外桁のほうが高くなるわけではなかった。その原因としては、外桁での雨水による洗い流し効果などが考えられる。それでも外桁のほうが激しい劣化が見られたのは、日照・降雨による乾湿繰り返しの影響が考えられる。昭和 34 年にモルタル吹き付けによる断面修復が行われており、その当時からすでに塩害による腐食が進行していたと推測される。

なお、桁の補修モルタル表面から測定した中性化深さは、いずれの位置においても 0mm であった。

4. 載荷試験

4.1 試験準備

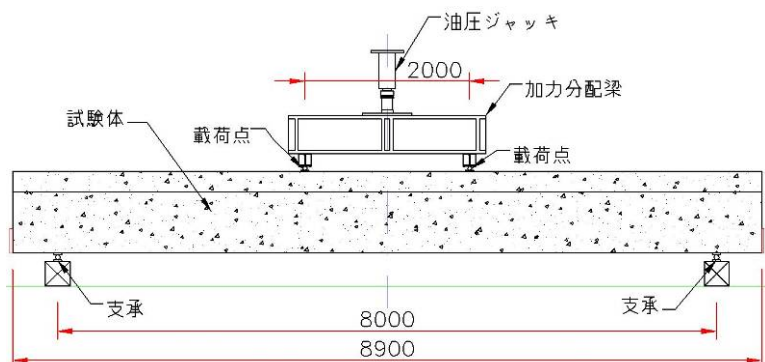
橋梁から切り出した桁を 2 点集中荷重により破壊するまで載荷試験し、残存耐力の確認を行った。橋脚の中心から 1 m 程度離れた位置で切断を行ったので、試験体長さは橋長よりも若干小さくなり 8900mm となった。図－ 9 に載荷方法を示す。支持条件は単純支持とし、載荷スパンは 8000mm とした。等曲げ区間は 2000mm とした。本橋梁では、腐食ひび割れやかぶりの剥落が生じていたので、そのまま載荷した場合には、支点付近で定着破壊が生じる恐れがあった。そこで部材端面において軸方向鉄筋の端部をコンクリートからはつり出し、支圧鋼板に溶接して定着補強を行った。また、外桁では支承付近のかぶりが剥落していたので、コンクリートによる断面修復を行った上で支圧板による定着補強を行った。測定項目は、載荷荷重、変位（中央、載荷点）とした。

4.2 試験結果

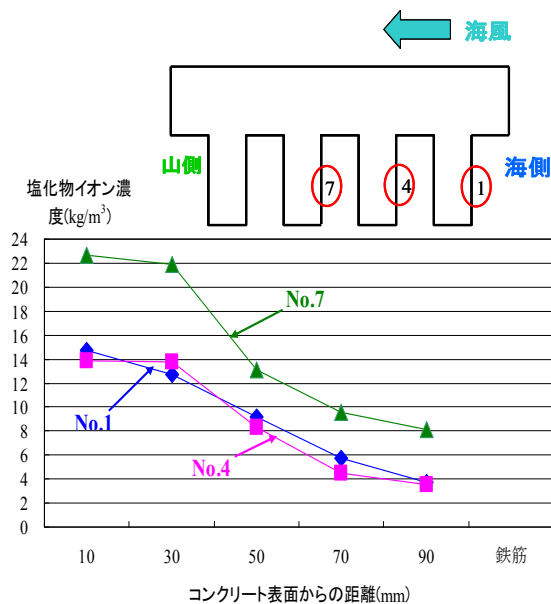
図－ 10 に中桁と外桁の荷重－中央変位関係を示す。

表－ 2 各規準により判定された外観上の劣化グレード

	中桁	外桁
土木学会示方書〔維持管理編〕	状態 II-2 (加速期後期) (腐食ひび割れが多数発生。さび汁が見られる。部分的なはく離・剥落が見られる。腐食量の増大。)	状態 III (劣化期) (腐食ひび割れが多数発生、ひび割れ幅が大きい。さび汁が見られる。はく離・剥落が見られる。変位・たわみが大きい。)
港湾の施設の維持管理技術マニュアル	劣化度 b (部材の性能が低下している状態)	劣化度 a (部材の性能が著しく低下している状態)
塩害橋梁維持管理マニュアル (案)	グレード III (塩害が原因の損傷が見られるため、損傷の進行を抑制または現状の性能を維持するための補修対策が必要)	グレード III (塩害が原因の損傷が見られるため、損傷の進行を抑制または現状の性能を維持するための補修対策が必要)



中桁は載荷によって新たな曲げひび割れが複数発生したことから、供用中にはそれほど大きな交通荷重を受けていなかったと推定される。図－ 11 に示すように本橋梁には、T 型桁の上に 10~15cm の舗装用の増厚コンクリートが敷かれていた。この増厚コンクリートの、部材の耐荷性能への寄与は設計上無視されていると考えられるが、今回の実験では、中桁では鉄筋降伏後いくらか変形が進んだ段階まで T 型桁本体と一体化していた。その後、中央変位が約 40mm に達したときに増厚コンクリー

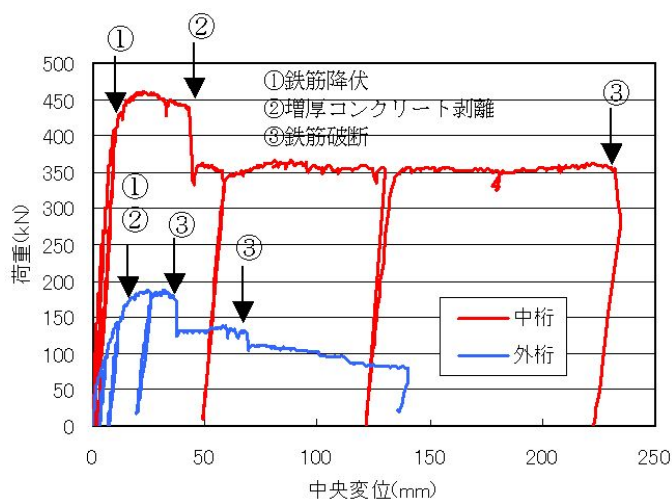


図－ 8 全塩化物イオン量の測定結果の例

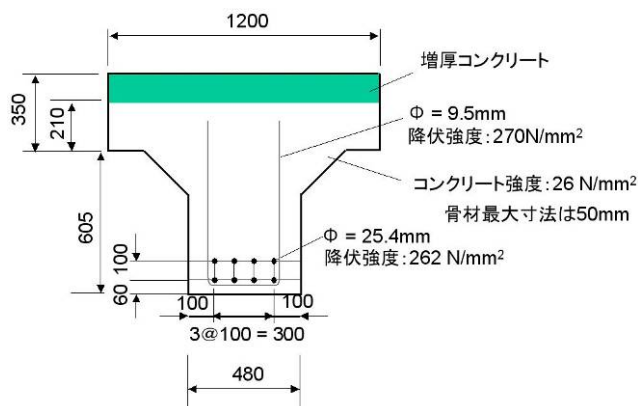


溶接による主鉄筋の定着補強（中桁）

図－ 9 試験体の載荷方法



図－１０ 荷重－変位関係



図－１１ 中桁の断面図



図－１２ 増厚コンクリートの剥離状況（中桁）



図－１３ 鉄筋継ぎ手露出（中桁）

トと T 型桁の境界で剥離が生じ、荷重が 2 割程度低下した。外桁では、鉄筋降伏とほぼ同じ段階で徐々に剥離が生じた。中桁では中央変位が 232mm のときに主鉄筋の破断（鉄筋 A，軸方向位置-1：図－１４，１６参照）が生じて荷重が低下したので載荷を終了した。鉄筋破断が生じた終局段階では、上部コンクリートの圧縮破壊も生じていたので、破壊モードは曲げ引張破壊とみなしてよいと思われる。外桁では、中央変位が 37mm（鉄筋 O，軸方向位置-0.1），68mm（鉄筋 M，軸方向位置-1）のときに鉄筋破断が生じ、その後は変位の増加とともに徐々に荷重が低下した。

また、図－１３に示すように、載荷による変形によって、等曲げ区間でかぶりが剥落し、鉄筋継ぎ手部が露出した。剥落のときに荷重が低下することはなかったので、この鉄筋継ぎ手は、かぶりコンクリートの剥落以前からほとんど引張力を伝達していなかったと考えられる。このように、腐食による付着力の低下、腐食膨張圧によるかぶりの損傷によって、継ぎ手不良が生じ、応力を負担していなかった鉄筋が複数あることが分かった。

図－１１に示す材料強度は、載荷試験後に、主鉄筋の引張試験とコア抜きコンクリートの圧縮試験により測

定したものである。

5. 解体調査

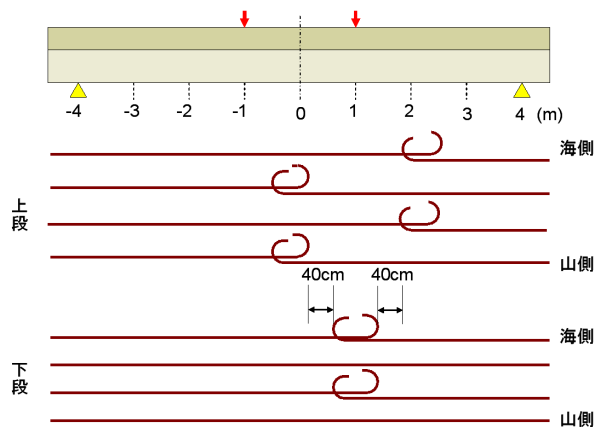
載荷試験後に桁を解体しながら配筋調査を行った。また、主鉄筋を取り出して腐食減量調査を行った。

5.1 配筋調査

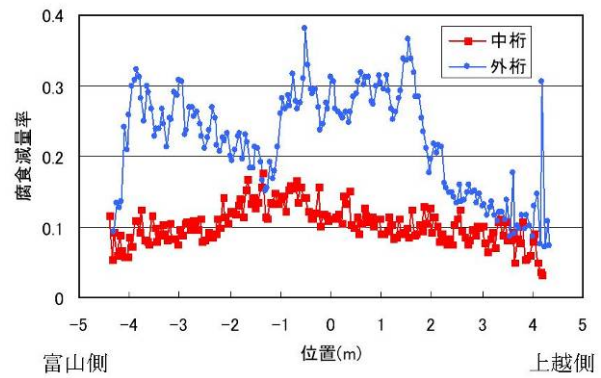
配筋調査結果を図－１４に示す。中桁・外桁とも同様の配筋であった。重ね継ぎ手は計 6 箇所であり、1 箇所あたり 2 本の鉄筋に継ぎ手が設けられていた。ラップ長さや曲げ半径などの構造細目は、昭和 6 年版のコンクリート示方書⁵⁾におおむね相違しない形状であった。

5.2 鉄筋腐食減量調査

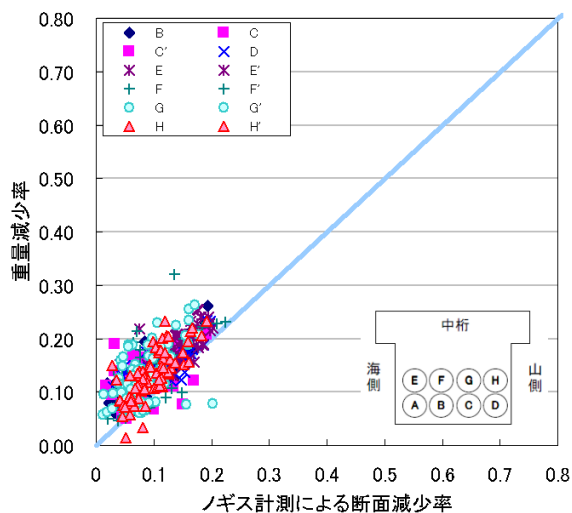
コンクリートから取り出した主鉄筋を 10% クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し、錆を除去した後に腐食量測定を行った。本実験では、5cm おきにノギス径測定を行い、10cm 毎の重量を計測した。ノギス計測は、任意の直径とそれに直交する直径の平均から残存断面直径を求め、その結果から断面減少率を、重量測定から重量減少率をそれぞれ求め、比較を行った。図－１５に、各断面で平均した重量減少率分布を示す。比較的劣化の程度が小さい中桁の平均重量減少率は 14%，外桁では 24% で



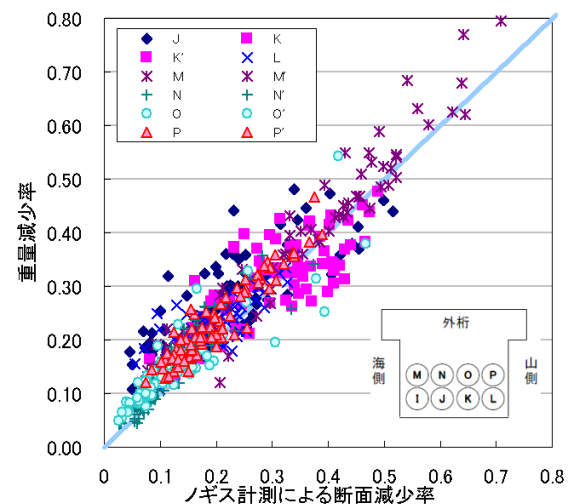
図－１４ 配筋調査結果



図－１５ 鉄筋重量減少分布

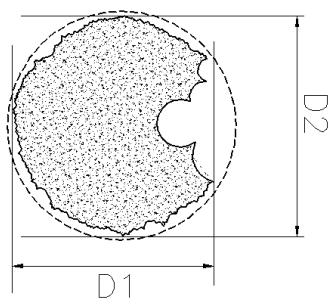


(a) 中桁

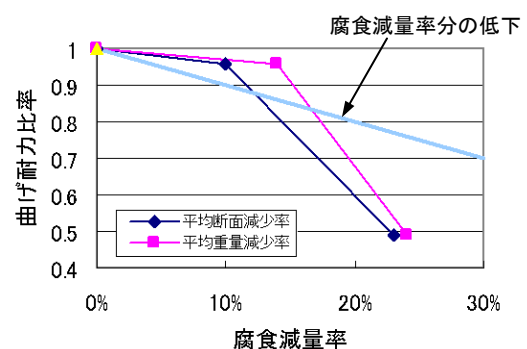


(b) 外桁

図－１６ 腐食量の測定方法による比較



図－１７ 鉄筋断面の状況とノギス計測値



図－１８ 腐食減少率と曲げ耐力の関係

あった。図－１６(a)に中桁の断面減少率と重量減少率の比較を示す。ノギス計測による結果は重量測定の結果よりも総じて小さくなった。これは、異形鉄筋で確認されている傾向とは異なる⁶⁾。図－１７には、腐食した鉄筋の断面状況とノギス径計測値の対応関係を示した。丸鋼の場合には、孔食のような腐食が軸方向に発生したが、ノギスによる計測ではその部分を測定できなかった。一方、外桁の場合(図－１６(b))には、腐食量が多いため、凹部が消失し、結果としてノギス計測と重量測定が大体一致したのだと考えられる。

6. 腐食減少率と曲げ耐力

図－１８に腐食減少率と曲げ耐力比の関係を示す。ここで曲げ耐力比は、自重の作用も含んだ最大曲げモーメントの実験値を、新設時の曲げ耐力で除することによって求められる。新設時の曲げ耐力は、図－１１の断面諸元とはり理論計算から求めた。なお、自重によって載荷スパン中央に作用するモーメントは、いずれの試験体においても、 $1.472 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}$ であるとした。

小型のRCはりによる促進腐食試験結果では、曲げ耐力

表－3 腐食減量調査結果と曲げ耐力比

	鉄筋腐食減量率				曲げ耐力 (N・mm)	耐力比
	断面減少率		重量減少率			
	平均	最大	平均	最大		
新設時推定	0%	0%	0%	0%	8.745×10^8	1
中桁	10%	49%	14%	32%	8.387×10^8	0.96
外桁	23%	90%	24%	80%	4.277×10^8	0.49

の低下率は、おおむね腐食減少率と同等となる^りことが示されている。中桁の曲げ耐力比は、腐食減少率よりも低下率が小さかったが、外桁の曲げ耐力比は、平均腐食率と比べてかなり小さくなっていた。この耐力低下の主要因は、重ね継ぎ手の定着不良だと推測される。なお、外桁では、載荷試験終了時に2箇所の重ね継ぎ手が完全に露出していた。

7. 劣化グレーディングと耐力比の比較

各指針類の劣化グレーディングと耐力の対応を検討するため、表－2のグレーディング結果と表－3の耐力比の比較を行うこととした。強度低下がほとんど生じなかった中桁に対しては、いずれの指針においても下から2番目のグレードに評価された。このグレードに対応する構造性能の劣化状態は、実験結果とおおむね一致していた。

一方、顕著な強度低下が生じた外桁は、土木学会維持管理編と港湾施設の維持管理マニュアルでは、もっとも下のグレードに評価され、構造性能がかなり低下していると判別されたのに対し、塩害橋梁維持管理マニュアル(案)では、中桁と同様に下から2番目のグレードに評価され、耐力が顕著に低下しているとは判別されなかった。これは、塩害橋梁維持管理マニュアル(案)では具体的な破壊形式は考慮されておらず、重ね継ぎ手の定着不良が生じるようなことは想定されていないためである。土木学会維持管理編においても、港湾施設の維持管理マニュアルにおいても、外桁の耐力低下が適切にグレーディング分けされたのは、継ぎ手の影響を考慮していたからではなく、かなり安全側の判断となるようにグレード分けが構成されているからである。このように、現行の点検指針類による判定結果が同じでも、耐力低下に差が生じる場合もあるので、残存耐力を推定する際には、さらに詳細に劣化状態を把握しておく必要がある。

8. まとめ

本研究では、約80年の間、厳しい塩害環境に晒され

て劣化したRC桁を対象として、破壊試験を実施し、残存耐力を確認した。事前調査、載荷後の解体調査を通して、得られた結果を以下に示す。

- (1) 雨水の洗い流し効果などがあるので、必ずしも海側の桁で塩化物イオン量が高くなるわけではない。また、塩害劣化の進行速度は、塩化物イオン量だけでなく、日照による乾湿繰り返しなどの影響もあると考えられる。
- (2) 塩害によって鉄筋継ぎ手部分のかぶりコンクリートが損傷すると、定着不良が生じ、残存耐力に大きく影響すると考えられる。
- (3) 鉄筋の平均腐食減量率が10%程度では、曲げ耐力の低下はほとんど見られなかったが、23%では耐力が約半分になった。強度低下の大半は、継ぎ手部の定着不良によるものだと考えられる。

謝辞：本研究は、長岡工業高等専門学校、新潟県コンクリートメンテナンス研究会との共同研究として実施したものである。調査に快く協力いただいた新潟県糸魚川市に感謝申し上げる。本研究の開始当初から、中心的に指導にあたられた長岡工業高等専門学校佐藤國雄先生に関係者一同深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ85, 土木学会, 2009.5.
- 2) 2007年制定土木学会コンクリート標準示方書維持管理編, 土木学会, 2008.3.
- 3) 港湾の施設の維持管理マニュアル, 沿岸技術ライブラリーNo.26, (財)沿岸技術研究センター, 2007
- 4) 塩害橋梁維持管理マニュアル(案), 橋梁塩害対策検討委員会, 2008.4.
- 5) 鉄筋コンクリート標準示方書, 土木学会, 昭和6年
- 6) 大屋戸理明: 腐食した鉄筋コンクリート部材の力学性能の評価, 筑波大学博士論文, 2007.3