

# 論文 積雪寒冷地の RC 壁高欄の耐荷挙動に影響する各種要因の検討

水田 真紀\*1・野々村 佳哲\*2・嶋田 久俊\*3・田口 史雄\*4

**要旨：**凍害と塩害の複合劣化を受けやすい積雪寒冷地にある RC 構造物の劣化程度と傾向を把握するため、北海道内にある橋梁の RC 壁高欄を調査した。その結果、全 RC 壁高欄の約 40%に変状が観察され、主に車道側地覆部近くの基部に変状が発生していることが分かった。そこで、その劣化傾向を反映し、基部の鉄筋の重ね継手長を短縮した試験体の載荷実験を実施し、定着不足による降伏荷重、最大荷重の低下やひび割れ発生状況の変化を確認した。さらに、凍害劣化したコンクリートの各種力学試験で、凍害が付着強度を大きく低下させることが分かり、凍害劣化した RC 壁高欄では基部鉄筋が定着不足にある可能性を示した。

**キーワード：**凍害, 付着, 定着, RC 壁高欄, 積雪寒冷地

## 1. はじめに

積雪量が多く、寒冷な北海道の RC 構造物は、凍害と塩害両方の影響を受けやすく、非常に過酷な環境に曝されている。冬期に、コンクリートは凍結融解作用を受けて、表面にはスケーリングや剥落が生じ、ミクロなひび割れが内部へと進展する。さらに、そのコンクリートの劣化は、沿岸部の飛来塩分や凍結防止剤の散布によって供給される塩化物イオンの侵入を促進し、コンクリート内部の鉄筋腐食の原因となる。このような凍害と塩害の複合劣化の影響を受けやすい RC 構造部材の一つが、コンクリート製剛性防護柵（以下、RC 壁高欄）である。劣化事例を図-1 に示す。



図-1 RC壁高欄の劣化事例

RC 壁高欄は、設置される場所によって形状が異なり、様々な種類があるが、次の 2 つの性質を持った構造部材であると言える。1 つ目は、車両等の衝突による衝撃荷重が作用することを想定していること、2 つ目は、車両等が衝突によって走行範囲から逸脱することに起因する、第三者被害を防止する必要があることである。このため、このような被害の重大性から、RC 壁高欄の劣化状況を正確に把握し、劣化に対して適切に対策することが重要となる。これまでに、RC 壁高欄に対する様々な調査が行われ、例えば、曾我部ら<sup>1)</sup>は、膨大なデータの統計処理により、塩害と中性化による複合劣化が生じた RC 壁高欄のコンクリートの変状と鉄筋の腐食速度を予測するモデルを提案している。

一方、北海道などの積雪寒冷地で生じている凍害と塩害の複合劣化については、研究成果が少ないのが現状である。塩害劣化については、研究成果が蓄積されつつあるものの、凍害劣化した RC 構造の性能を定量的に評価した研究は非常に少ない。最近では、内藤ら<sup>2)</sup>が凍害劣

化した RC 梁のせん断挙動に関する実験を行っており、相対動弾性係数を用いて凍害劣化によるコンクリートの引張強度低下を考慮することで、限定的な条件下であるものの、RC 梁のせん断耐力を予測できると報告している。

本研究では、RC 壁高欄を対象とし、(1)北海道内の RC 壁高欄の劣化状況の調査、(2) RC 壁高欄試験体の載荷実験、(3)凍害劣化したコンクリートの各種力学試験を実施した。上記 3 つの調査および実験では、(1)北海道のような積雪寒冷地の RC 壁高欄の劣化の現状と傾向を把握すること、(2)(1)で得られた劣化傾向を反映させた構造体の実験から、凍害と塩害の複合劣化が耐荷挙動に与える影響程度を把握することを目的とした。そして今後、凍害を受けたコンクリートの特性が RC 壁高欄の耐荷挙動に与える影響を定量的に評価していくため、基礎データの蓄積に主眼を置き、(3)の実験も実施した。

## 2. RC 壁高欄の調査

### 2.1 調査概要

調査橋梁は、国土交通省北海道開発局が管理する、RC 壁高欄を有する 451 橋梁である。図-2 には、建設年次ごとに調査した橋梁数を示す。図では、RC 壁高欄の形

\*1 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム研究員 工博 (正会員)

\*2 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム研究員 (非会員)

\*3 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム主任研究員 (正会員)

\*4 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム上席研究員 工博 (正会員)

状も区別しているが、大多数は直壁型であった。また、今回調査した橋梁のほとんどは、1994年に地域高規格道路として指定され、建設が開始されたものであった。よって、建設後20年未満の橋梁が対象橋梁の大半を占めた。

調査内容は、目視による外観変状とし、①コンクリート表面のスケーリング、②鉄筋腐食に伴うコンクリートかぶりの浮き、③鉄筋の露出の3つの変状と④変状なしに大別した。

## 2.2 調査結果

全対象橋梁の調査結果と、建設から10年経過ごとの調査結果を図-3に示す。すべての対象橋梁の約40%で、3つの変状、①スケーリング、②かぶりの浮き、③鉄筋露出のいずれかが観察された。そして、建設後の経年に伴い、各変状が発生した橋梁の割合が徐々に増加した。さらに、建設後21年以上経過した橋梁については、対象数こそ少ないものの約70%の橋梁に変状が観察され、その約90%が鉄筋露出であったことから、凍害、塩害、あるいは両方の複合劣化が加速期あるいは劣化期まで進行していると想定される。

次に図-4に、3つの変状のうち、かぶりの浮きと鉄筋露出が観察されたRC壁高欄について、発生部位ごとに分類した結果を示す。ここで、内側とは車道側であり、外側とは路外側を表している。これより、約90%がRC壁高欄の内側に変状が生じており、特に地覆を含む基部に多く顕在化していることが分かった。

以上の調査結果を受け、最も多く観察された、RC壁高欄の内側基部の鉄筋が腐食した状態を反映させたRC壁高欄試験体の荷重実験を実施することにした。

## 3. RC壁高欄試験体の荷重実験

### 3.1 実験概要

#### (1) 実験要因

2章に示した調査で区別した2つの変状、鉄筋腐食に伴うコンクリートかぶりの浮き、鉄筋の露出まで生じると、コンクリートと鉄筋の付着が相当劣化していることが予想される。また、床版と壁高欄および地覆のコンクリートの打設日が異なるため、RC壁高欄の高さ方向の鉄筋は、基部に重ね継手が設けられるのが一般的である。これらの理由から、RC壁高欄基部のコンクリートと鉄筋の付着劣化を、重ね継手長を短縮することにより模擬し、定着が不足した試験体と、健全な試験体の耐荷挙動を比較することにした。

#### (2) 試験体概要

図-5に試験体寸法および配筋を示す。なお、荷重方法も同時に示す。対象としたRC壁高欄は直壁型(SC種)である。ここで、実際のRC壁高欄は道路軸方向に長い構造物であるが、本研究では、道路軸方向の影響を考慮

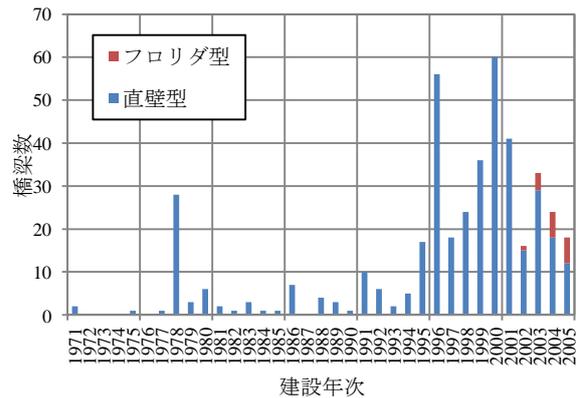


図-2 調査した橋梁の建設年度別内訳

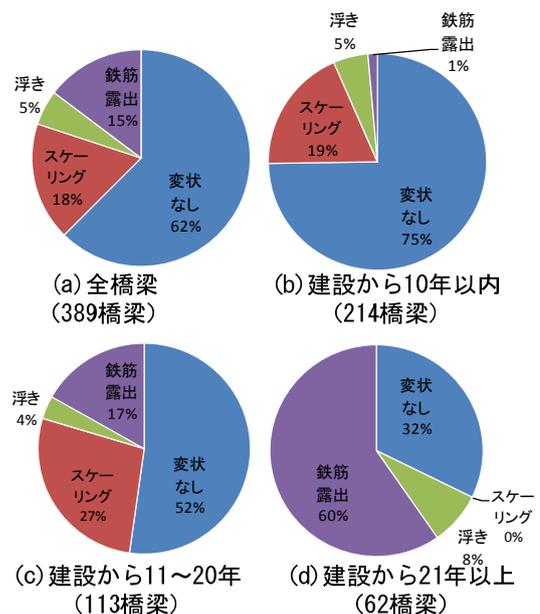


図-3 各変状の割合

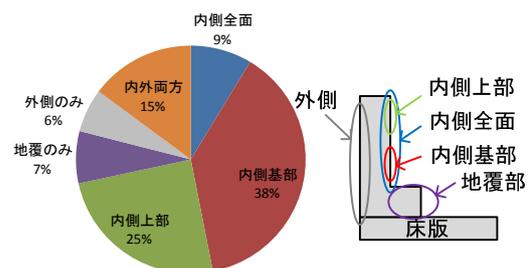
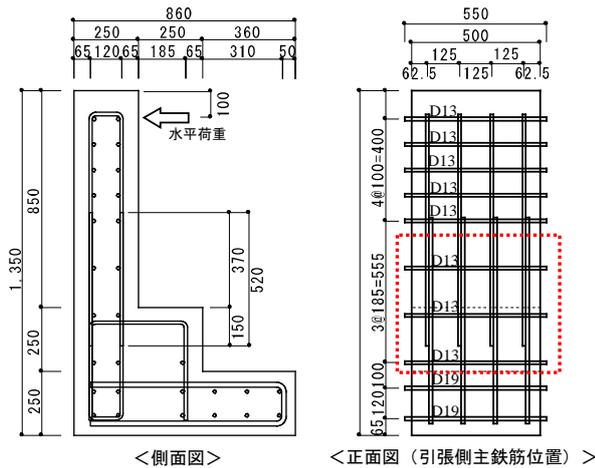
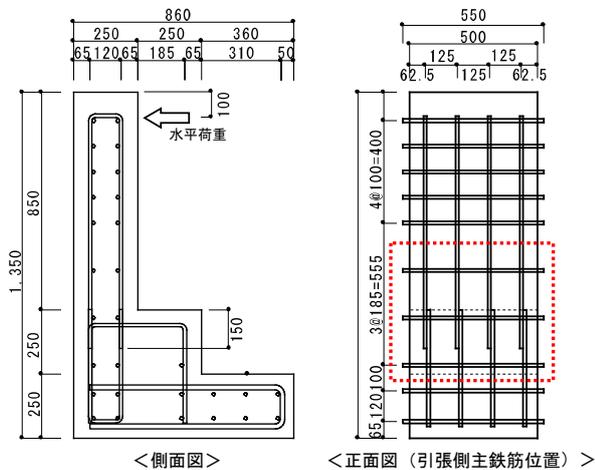


図-4 浮きおよび鉄筋露出の発生部位

せず、本実験では試験体幅を500mmとした。配筋は、日本道路協会「車両用防護柵標準仕様・同解説」<sup>3)</sup>に準じてD13を用い、荷重試験時に固定端となる床版部分のみD19を用いた。そして、健全な試験体では、重ね継手長を520mm(D13の直径の約40倍)とし、付着劣化を模擬した試験体では、内側(車道側)の重ね継手長を大幅に短縮し、150mm(D13の直径の約10倍)とした(図-5の赤線で囲まれた部分)。また、道路軸方向の鉄筋を



(a) 健全



(b) 定着不足

図-5 RC壁高欄試験体概要

試験体幅以上に延伸した。鉄筋の力学特性を表-1に示す。

コンクリートの示方配合と荷重試験時の力学特性を表-2に示す。ここで、配合は、実際のRC壁高欄に使用される配合を参考にして決定した。

(3) 実験方法

荷重方法を図-6に示す。荷重点は、設計で衝突荷重の作用点として照査される点とし、路面から高さ1.0mの点とした。また、荷重は試験体全幅に線荷重として作用させ、鉄筋が降伏するまではヒンジを固定し、その後、ヒンジを開放して荷重を続けた。また、荷重点の水平方向の変位を測定し、鉄筋の降伏は荷重-変位関係から判断した。さらに、床版部分は床にアンカーで固定した。

荷重は、一方向の繰り返し荷重とした。RC壁高欄高さ方向の鉄筋の降伏荷重までは10kNごとに最大荷重を増加させながら、荷重と除荷を繰り返した。そして、鉄筋の降伏後は変位制御とし、さらに荷重が低下するまで

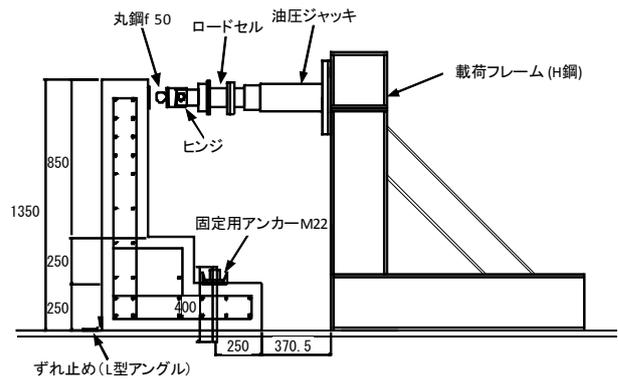


図-6 荷重方法

表-1 鉄筋の力学特性

種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	
D13	SD345	353	1909	1.88 × 10 <sup>5</sup>

表-2 コンクリートの示方配合および力学特性

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						AE
		C	W	S1	S2	G1	G2	
55	46.5	268	147	662	228	668	349	C×1.0%

※粗骨材 (G1, G2) の最大寸法: 20mm

フレッシュ性状		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
スランプ (cm)	空気量 (%)		
8.5	5.1	34.3	25.3

荷重を続けた。

3.2 実験結果および考察

(1) 荷重-変位関係

図-7に荷重-変位関係を示す。図中の○印は、RC壁高欄の高さ方向の鉄筋が降伏した点である。図より、重ね継手長が短くなると、降伏荷重、最大荷重ともに健全な試験体よりも大きく低下した。また、いずれの試験体も、壁高欄高さ方向の鉄筋降伏後、大きく変形する曲げ破壊により終局に至った。以上より、RC壁高欄の車道側基部に、コンクリートの浮きや鉄筋露出のような現象が観察され、重ね継手部分の定着不足が予測される場合、降伏荷重、最大荷重が大きく低下することが示唆された。

既往の研究<sup>4)</sup>から、鉄筋が腐食したRC梁部材の主鉄筋の定着が十分でない場合、せん断耐力が大きく低下し、脆性破壊を生じるとの報告がある。また、曲げ破壊型のRC梁の試験スパン内にアンボンド部を設けた実験では、曲げ耐力はほとんど低下しないとの報告<sup>5)</sup>もある。しか

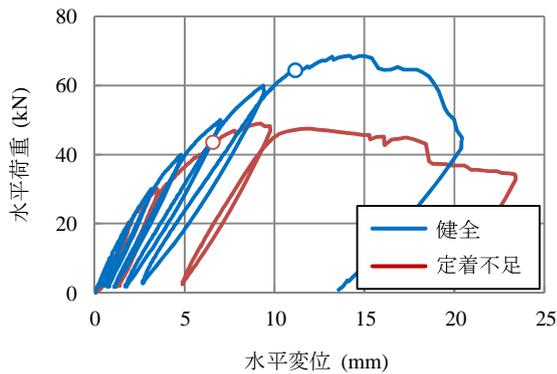


図-7 荷重-変位関係

し、本実験のように、曲げ破壊する構造物の最大曲げモーメント作用部分に重ね継手が設けられ、その部分の付着が劣化している場合、破壊形式は変化しないが、降伏荷重や最大荷重が大きく減少した。車両等の衝突による衝撃荷重の作用時に弾性挙動を求められる RC 壁高欄にとって、降伏荷重の低下は憂慮すべき結果といえる。

## (2) ひび割れ発生状況

終局時のひび割れ状況を図-8 に示す。図には、ひび割れ発生順序と進展方向を矢印と数字①～④で示している。これより、引張側となる内側（車道側）のひび割れ本数と試験体断面のひび割れ進展方向に違いが観察された。重ね継手長を短縮した場合、健全な試験体に比べ、内側のひび割れ本数が減少し、高さ方向の鉄筋に沿ったひび割れが進展しなかった。つまり、重ね継手長 150mm (D13 の直径の約 10 倍) では十分な定着性能を発揮できず、コンクリートと鉄筋間で応力が十分に伝達されなかったと予想される。これより、RC 壁高欄の車道側基部の鉄筋の重ね継手長が不十分な場合、ひび割れが分散せず、損傷が局所的になる可能性が示された。しかしながら、本実験では健全なコンクリートを用いていることから、凍害によるコンクリートの劣化および鉄筋腐食により発生したひび割れを考慮し、更なる検討が必要である。

## 4. 凍害を受けたコンクリートの力学特性

### 4.1 実験概要

コンクリートの示方配合を表-3 に示す。本コンクリートには、凍害劣化を促進させるために AE 剤を添加しなかった。よって、2 章の RC 壁高欄試験体のコンクリートと同程度の強度、スランプが得られるように、水セメント比を一定とし、その他の材料の単位量を決定した。

実験に先立ち、材齢 28 日のコンクリート (□100×100×400mm) について、相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係を求め、実際の試験では、劣化程度を凍結融解サイクル数で管理した。ここで、相対動弾性係数は超音波伝播速度から算出した。

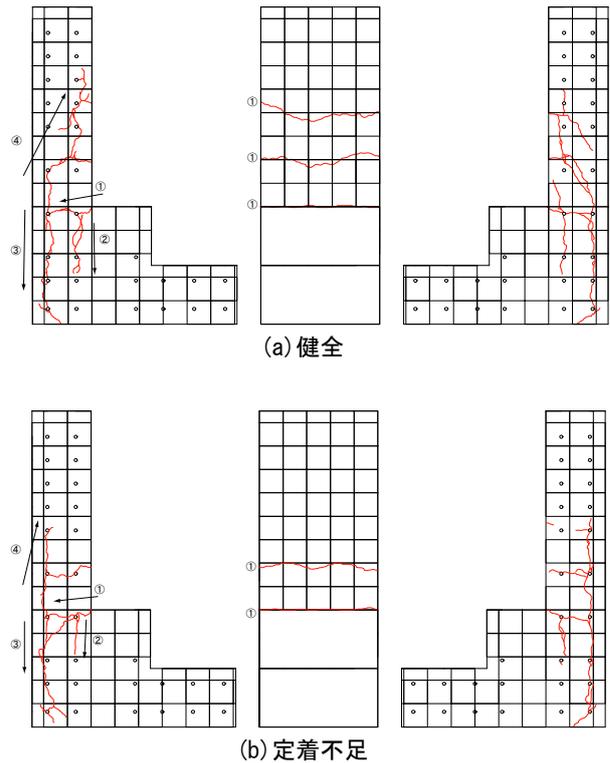


図-8 ひび割れ状況

表-3 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S1	S2	G1	G2
55	47.7	169	308	693	238	668	349

※粗骨材 (G1, G2) の最大寸法：20mm

各種力学試験に使用するコンクリート供試体は、凍害劣化程度を変化させて、作製した。劣化程度は、相対動弾性係数が 100 (健全), 90, 85, 80, 70, 60% の 6 水準とし、材齢が 91 日程度に達した後、JIS A 1148 A 法に準拠した凍結融解試験を実施した。

設定した劣化程度に達した後、各種力学試験 (圧縮強度試験 (JIS A 1108), 静弾性係数試験 (JIS A 1149), 引張強度試験 (JIS A 1113), 曲げ強度試験 (JIS A 1106), 付着強度試験 (JSCE-G 503-2010), 破壊エネルギー試験 (JCI-S-001-2003)) を実施した。各種試験で用いた供試体は、圧縮強度、静弾性係数および引張強度試験では φ100×200mm, 曲げ強度試験と破壊エネルギー試験では □100×100×400mm, 付着試験では □80×80×80mm の断面中央に 1 本の鉄筋 (D13) を配置したものであり、劣化程度ごとに 3 体の供試体を準備した。また、力学試験実施前に、超音波伝播速度を測定した。測定は、φ100×200mm 供試体では長手方向に 1 点、□100×100×400mm 供試体では長手方向に 1 点とその直角方向に 3 点、

□80×80×80mm 供試体では鉄筋に沿った方向 1 点とその直角方向 1 点で行い、測定値の平均を供試体毎の超音波伝播速度とした。

#### 4.2 実験結果および考察

実験結果を図-9 に示す。各種実験の結果は、超音波伝播速度との関係として整理した。ここで、超音波伝播速度は、各種試験前の供試体の測定結果である。

図より、圧縮強度、引張強度、曲げ強度および静弾性係数については、超音波伝播速度との間に相関が見られ、超音波伝播速度が低下するのに伴い、各強度と静弾性係数も低下した。特に、圧縮強度と超音波伝播速度には線形的な関係が見られた。

一方、付着強度では異なる傾向が観察された。ここで、付着強度とは、供試体全長 80mm を付着長とし、片引き付着試験において鉄筋の自由端すべり量が 0.002D (D ; 鉄筋の直径) となった時の平均付着応力である。

付着強度は凍害劣化程度の違いにより、大きく変化した。ほとんどのコンクリートの超音波伝播速度は健全なコンクリートと同じ 4000m/sec 程度であった。RC の場合、鉄筋が凍害によるコンクリートの長さ変化を拘束することにより、超音波伝播速度の低下が抑制されるとの報告<sup>6)</sup>がある。本実験においても、付着強度以外の強度は超音波伝播速度の低下とともに減少したことから、コンクリートは確実に劣化しており、さらに、すべての供試体がコンクリートの割裂破壊で終局に至ったことから、鉄筋拘束の影響が大きかったと推測される。したがって、RC 構造物では、超音波伝播速度が健全なコンクリートと同程度であっても、凍害を受けて付着強度が相当に低下している可能性があることが分かった。

また、荷重速度を変化させた片引き付着試験において、衝撃荷重に相当する速度で鉄筋を引き抜いた場合、静的荷重よりも、コンクリートへの応力伝達の範囲が狭くなり、付着強度が大きくなるとの報告<sup>7)</sup>もある。よって、衝撃荷重の作用を想定している RC 壁高欄では、破壊が局部的に生じる恐れがあるため、凍害劣化したコンクリートの動的付着挙動の把握も今後の課題である。

次に破壊エネルギーの測定結果については、劣化程度が 100~80%の結果のみであるため、他の結果のような凍害による劣化の進行に伴う超音波伝播速度の低下の傾向を読み取ることはできなかった。しかしながら、凍害劣化程度が 80%までは、健全なコンクリートの破壊エネルギーと大差ない結果となった。

#### 5. 結論

本研究で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 国土交通省北海道開発局が管理する、451 橋梁の RC 壁高欄を外観観察し、①コンクリート表面のスケー

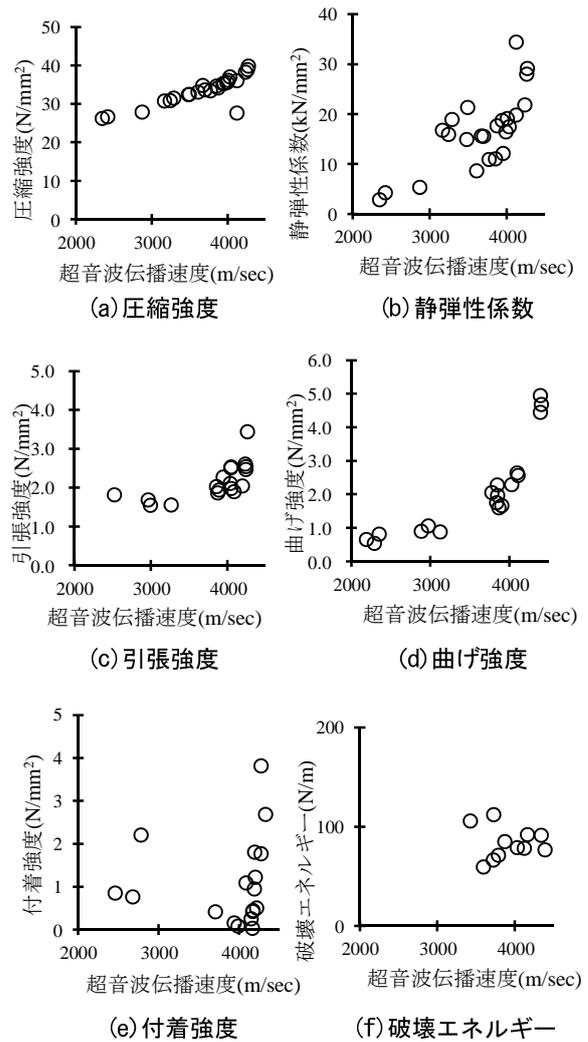


図-9 各種力学試験結果

リング、②鉄筋腐食に伴うコンクリートかぶりの浮き、③鉄筋の露出の 3 つの変状の有無を調査した。その結果、約 40%にいずれかの変状が観察された。さらに、②と③の変状は、主に RC 壁高欄の車道側の基部に多く発生していることが分かった。

- (2) (1)の調査結果を受け、基部の付着劣化を、重ね継手長の短縮による定着不足として模擬した RC 壁高欄試験体の荷重実験を行った。これより、健全な試験体よりも、降伏荷重と最大荷重が大きく低下すること、ひび割れ発生状況が変化することが分かった。
- (3) 凍害を受けたコンクリートの各種力学試験を実施した。圧縮強度、引張強度、曲げ強度、静弾性係数と超音波伝播速度の間には相関があり、特に圧縮強度と超音波伝播速度の間には線形的な関係が見られた。
- (4) 凍害劣化したコンクリートの付着強度は大きく低下したが、超音波伝播速度は健全なコンクリートと大差なかった。これは、凍害によるコンクリートの長さ変化を鉄筋が拘束した可能性がある。

## 参考文献

- 1) 曾我部正道, 谷村幸裕, 松橋宏治, 宇野匡和 : 鉄道高架橋の RC 高欄の変状調査とその劣化予測, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.16-24, 2009.8
- 2) 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行 : 凍結融解作用を受けた腹鉄筋のない RC はりのせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.916-921, 2012
- 3) 社団法人日本道路協会 : 車両用防護柵標準仕様・同解説, pp.68 および pp.115, 2004.3
- 4) 董 衛, 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木修一, 堤 知明 : 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力ならびに破壊性状に及ぼす定着性能の影響に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.13-26, 2011.9
- 5) 村山八洲雄, 金 相昊, 武田絵里, 西村伸一 : 鉄筋の付着損失が RC 部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.733-738, 2008
- 6) 鈴木邦康, 濱 幸雄, 原田彩加 : コンクリートの長さ変化及び凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1149-1154, 2007
- 7) 石本陽一, 島 弘 : 鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼす載荷速度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.129-134, 1993