

14.2 凍害・塩害の複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力向上対策に関する研究

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:寒地保全技術研究グループ(耐寒材料)

技術開発調整監付(寒地技術推進室)

研究担当者:田口史雄、島多昭典、三原慎弘、嶋田久俊、内藤勲、野々村佳哲
水田真紀、川村浩二、村中智幸、渡辺淳、鈴木哲

【要旨】

本研究では、凍害・塩害の複合劣化を受けた壁高欄の機能を適切に維持することを目的とし、壁高欄の衝撃耐荷力の評価技術の提案、点検・診断技術と補修・補強対策の提案を行う。平成 25 年度は、(1)複合劣化した試験体の衝撃載荷実験、(2)衝撃耐荷力の評価技術の検討、(3)劣化程度と衝撃耐荷力の関係の整理等を行った。(1)複合劣化した試験体の衝撃載荷実験は、小型 RC 梁を用いて実施し、試験体の形状や凍害劣化程度を変化させて実施するとともに、前年度の課題であった試験体の作製方法については、端部の補強方法の違いによる凍害劣化程度への影響が小さいことを確認した。(2)衝撃耐荷力の評価技術の検討では、劣化度と耐荷性能の関係をリスクマトリクスで表現する手法を提案し、補修の要否を判断できる可能性を示した。(3)劣化程度と衝撃耐荷力の関係の整理では、実壁高欄から切り出した梁型試験体の曲げ載荷試験により、外観上著しい剥落や広範囲での浮きが見られた試験体でも、当初の設計と同等またはそれ以上の耐力を有していること、変形性能や付着性能については、算定値を下回っている部分があることを確認した。また、小型 RC 梁を用いた衝撃載荷実験により、凍害劣化程度と衝撃耐荷力の関係を把握した。

キーワード:凍害、塩害、複合劣化、壁高欄、衝撃耐荷力

1. はじめに

積雪寒冷地のコンクリート製車両用剛性防護柵(以下、壁高欄)は、凍結防止剤や沿岸地域の飛来塩分、融雪水の影響を受け、凍害と塩害による複合劣化が生じやすい。また、壁高欄は、車両衝突時に弾性的な挙動をするように設計されており、複合劣化によってその性能が低下すれば、車両の高架橋や跨線橋からの逸脱やそれに伴う第三者被害を引き起こす危険性がある。このため、複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力低下を判断できる点検・診断技術を確立すると同時に、劣化程度に応じた補修・補強対策を提案していくことが重要である。

現状では、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の研究成果はまだまだ少ない。そこで、平成 23 年度より現場調査を行い、北海道の壁高欄、地覆の劣化状況を整理した。これによれば、調査対象とした橋梁の約 40%に壁高欄の変状が見られ、その約半数に鉄筋露出やコンクリートの浮きが生じ、相当な劣化の進行が懸念される結果であった。

平成 25 年度は、①凍害・塩害の複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力の評価技術の提案を目的とし、複合劣化した壁高欄を模擬した試験体の衝撃載荷実験、

複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力の評価技術の検討を行った。また、②凍害・塩害の複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力の点検・診断技術と補修・補強対策の提案を目的に、現場調査および実験で得られた劣化程度と衝撃耐荷力の関係の整理、点検や簡易な現場調査による衝撃耐荷力の診断技術の検討、補修工法の検討および実験による補強対策時の衝撃耐荷力向上効果の検証を実施した。そして、これら各検討項目で用いた結果は、(a)小型 RC 梁の衝撃載荷実験、(b)実壁高欄を対象とした劣化調査および構造実験、(c)複合劣化したコンクリートの付着試験、(d)AE コンクリートの凍結融解試験から得た。

以下に平成 25 年度の研究成果を報告する。なお、2 章では、各検討項目と実施した調査・実験との対応を記す。よって、3 章以降に研究成果を示し、実施した実験(a)から(d)の順に報告する。

2. 平成 25 年度の研究成果の概要

①凍害・塩害の複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力の評価技術の提案のうち、①-2 劣化した壁高欄を模擬した試験体の衝撃載荷実験については、小型 RC 梁の衝撃載荷実験を行い、端部の補強方法および梁長さ

異なる小型 RC 梁の作製を通じて、試験区間内の凍害劣化程度が一樣になる試験体作製方法の検討、衝撃載荷実験の結果の精度向上に関わる検討を行った。①-3 複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力の評価技術の検討については、実壁高欄を対象とした劣化調査をもとに、劣化度と耐荷性能の関係をリスクマトリクスで表現する手法を検討した。

②凍害・塩害の複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力の点検・診断技術と補修・補強対策の提案のうち、②-1 現場調査および実験で得られた劣化程度と衝撃耐荷力の関係の整理については、凍害劣化した小型 RC 梁の衝撃載荷実験、実壁高欄を対象とした劣化調査および構造実験を実施した。実壁高欄については、外観性状とコンクリートおよび鉄筋の劣化状況の関係を整理したほか、切り出した梁型試験体の載荷実験を実施した。②-2 点検や簡易な現場調査による衝撃耐荷力の診断技術の検討については、小型 RC 梁の衝撃載荷実験、実壁高欄を対象とした劣化調査、AE コンクリートの凍結融解試験を通じて、超音波伝播速度の測定の適用について検討した。②-3 補修工法の検討および実験による補強対策時の衝撃耐荷力向上効果の検証については、実壁高欄のコンクリートや鉄筋を対象とした劣化調査を行い、各材料の構成則構築による劣化の定量化と補修・補強判断指標の検討、および複合劣化進展機の照査方法の検討を行ったほか、凍害劣化したコンクリートの片引き付着試験を行い、付着構成則構築により補修・補強判断指標を検討した。

3. 小型 RC 梁の衝撃載荷実験

3.1 実験概要

平成 24 年度には、凍害劣化程度の異なる小型 RC 梁を作製し、凍害劣化度と衝撃耐荷力の関係を検討した。しかし、作製した小型 RC 梁の試験区間内で凍害劣化程度が著しく変化し、衝撃載荷実験の結果が大き

くばらついた。そこで平成 25 年度は、衝撃載荷実験結果の精度向上を目指し、試験区間内の凍害劣化程度が一樣になる試験体作製方法の検討に取り組んだ。特に、梁端部に凍害による損傷が集中し、長手方向に劣化程度が分布していたことから、端部の補強方法と長さが異なる小型 RC 梁を作製した。そして、超音波伝播速度測定により凍害劣化程度を把握した後、衝撃載荷実験を実施した。

以下、超音波伝播速度の測定結果と衝撃載荷実験結果について、それぞれ示す。

3.2 超音波伝播速度測定による凍害劣化程度の把握

図-1に作製した小型 RC 梁の寸法と補強方法を示す。なお、超音波伝播速度の測定位置（透過距離 60mm）についても示している。断面寸法について、幅は小型衝撃載荷試験機の重錘の寸法、高さは汎用の異形鉄筋の最小径 D10 を用いた場合に曲げ先行型になり且つ最大粗骨材寸法を考慮し、設定した。また長さは、劣化程度が長手方向に分布することを考慮し、平成 24 年度の梁よりも長い 1.0m と 1.6m の 2 種類（タイプ B）を基本とし、鉄筋を配置しないプレーンコンクリート（タイプ A）も作製した。そして、端部補強方法は 3 水準とし、FRP シートを接着したもの、FRP シートを接着した上をポリスチレンフォームで覆ったもの、ポリスチレンフォームを接着した後、境目から内側 30mm のコンクリートに表面含浸材を塗布したものとした。なお、端部補強を施す梁については、鉄筋を曲げ上げた定着部の補強の有無についても検討し、定着部外を補強した梁長さは、定着部を補強した梁長さより 0.2m 長い 1.2m と 1.8m とした（タイプ C）。

図-2 に超音波伝播速度から算出した相対動弾性係数の結果を示す。なお、横軸は長手方向を示し、凡例の梁タイプに続く数字は、凍結融解サイクル数を表している。いずれの補強方法でも、長手方向の相対動弾

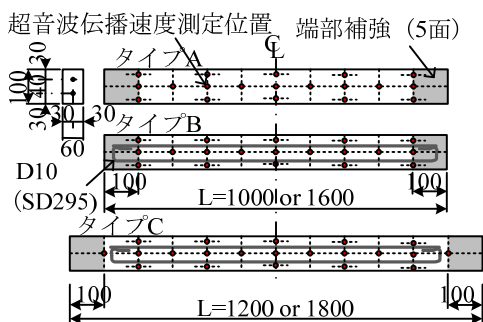


図-1 小型RC梁の寸法と補強方法

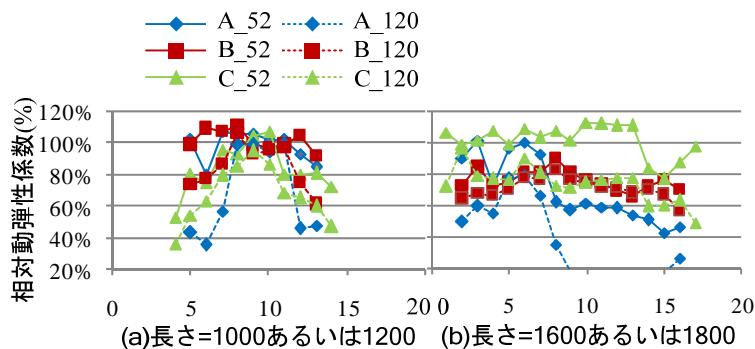


図-2 小型RC梁の相対動弾性係数

表-1 小型 RC 梁衝撃載荷実験結果

実験 No.	試験体名	全長 m	試験スパン m	補強方法	落下高さ mm	重錘衝撃力 kN	支点反力 kN	変位 mm	備考
1	B-1	1.6	1.0	FRP	25	3.6	7.1	0.76	同一梁の繰り返し載荷
2					50	9.6	10.4	1.06	
3					75	14.0	14.7	1.28	
4					100	27.5	16.5	1.60	
5					200	37.0	21.3	2.11	
6					300	45.0	24.9	2.85	
7					500	64.9	29.4	3.74	
8	B-2	1.6		FRP+XPS	500	52.9	21.1	3.95	同一梁の繰り返し載荷
9					1000	38.9	29.7	5.67	
10					1000	78.9	32.0	6.95	
11	B-3	1.6		XPS	1250	93.6	35.3	7.06	---
12	C-1	1.8		FRP	1250	108.3	34.1	6.69	---
13	C-2	1.8		FRP+XPS	1250	136.1	33.5	6.86	---
14	C-3	1.8		XPS	1250	124.4	40.4	6.76	---
15	B-1	1.0	0.8	FRP	500	98.1	19.3	6.20	同一梁の繰り返し載荷
16					750	72.5	19.7	8.61	
17	B-2	1.0		FRP+XPS	500	82.4	21.7	6.70	---
18	B-3	1.0		XPS	500	83.2	13.6	7.41	---
19	C-1	1.2		FRP	500	128.6	24.4	7.21	---
20	C-2	1.2		FRP+XPS	500	65.9	20.2	7.44	---
21	C-3	1.2		XPS	500	61.7	21.8	6.69	---

※ FRP : FRP シート、XPS : ポリスチレンフォーム (extruded polystyrene)



図-3 衝撃載荷実験の状況

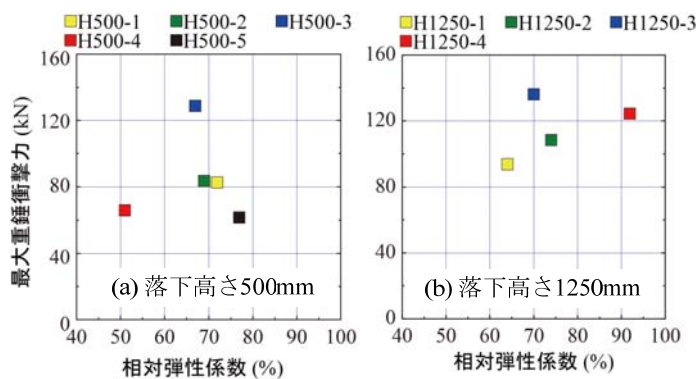


図-4 最大重錘衝撃力と相対動弾性係数の関係

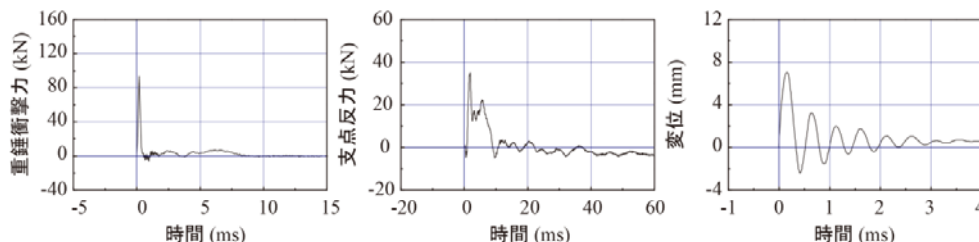


図-5 重錘衝撃力・支点反力・変位の応答波形 (H1250-1)

性係数の分布は同様の傾向を示していたため、ここでは FRP シートを接着したものの結果のみを示す。本実験より、端部の補強方法や定着部の補強の有無による違いは小さく、梁長さを長くするほど、相対動弾性

係数が同程度になる範囲が広がることがわかった。一方、プレーンコンクリートについては、RC よりも相対動弾性係数が小さくなる傾向が見られた。

表-2 実壁高欄の試験実施状況

提供年度	壁高欄 No.	H24 実施	H25 実施
H24	No.1 ～No.12	No.6,11,12 →劣化調査、構造実験	No.6,11,12 →一部の劣化調査 No.8 →劣化調査
H25	No.1 ～No.10		No.4 →劣化調査 No.1,2,6,7 →劣化調査、構造実験

表-3 劣化調査および構造実験内容

調査対象	内 容	得られる結果
<劣化調査①>		
外観	・目視 ・打音	ひび割れ、コンクリートの剥落 コンクリートの浮き
コンクリート	・超音波法	超音波伝播速度（断面方向）
鉄筋	・切断面の観察	横方向鉄筋の配置位置 ひび割れ
<劣化調査②>		
コンクリート	・超音波法 ・圧縮試験	超音波伝播速度（断面直角方向） 圧縮強度、静弾性係数、応力ひずみ関係
鉄筋	・腐食調査 ・引張試験	重量減少率、腐食・孔食分布 引張強度、降伏点強度、弾性係数、伸び
<構造実験>		
梁部材	・曲げ載荷試験	耐荷性能、変形性能、ひび割れ状況、破壊形式

※劣化調査①：構造実験に利用する梁試験体を切り出す前の状態での調査

3. 3 凍害劣化した RC 梁の衝撃耐荷力

サイクル数 120 回の凍結融解作用を受けた小型 RC 梁の衝撃載荷実験を実施した。表-1 に、載荷条件も含めた実験結果を示す。測定項目は、重錘、支点の応答荷重、加速度であり、さらに変形を高速度カメラで捉えた。また、図-3 には重錘落下前の小型 RC 梁設置状況を示す。

衝撃載荷実験において、単一載荷とした小型 RC 梁の最大重錘衝撃力と相対動弾性係数の関係を図-4 に示す。なお、図-4 に示す試験体名については、表-2 の実験 No.11～14 が H1250-1～H1250-4、実験 No.17～21 が H500-1～H500-5 にそれぞれ対応している。そして、相対動弾性係数は、図-2 に示す梁長手方向の値の平均値である。さらに、図-5 には、重錘衝撃力・支点反力・変位の応答波形の例として、H1250-1 試験体の結果を示す。なお、変位は梁中央の変位である。

図-4 より、凍結融解サイクルはすべて 120 回であるにも拘らず、コンクリートの相対動弾性係数には 30% 程度のばらつきが生じた。また、梁長さの短い(a)の方がコンクリートの相対動弾性係数が小さくなり、梁端部の相対動弾性係数が大きく低下したことが影響していたと考えられる。

一方、重錘落下高さが高く、梁長さが長い(b)では、

(a)と比較すると最大重錘衝撃力のばらつきは小さくなった。以上より、端部を補強し、梁長さを長くすれば、梁全体の劣化程度が一様に近付き、図-5 に示すように重錘衝撃力、支点反力を精度良く測定できることを確認できた。

凍害劣化が衝撃耐荷力に与える影響について整理した結果、凍害が進み、相対動弾性係数が低下した場合に最大重錘衝撃力が低下する傾向がみられるが、外れている点もあることから、今後、さらに劣化が進行した RC 梁の衝撃載荷実験を継続し、壁高欄の耐衝撃性の要求性能を満足しなくなる劣化程度を確認する必要がある。

4. 実壁高欄を対象とした劣化調査および構造実験

4. 1 実験概要

平成 24 年度に続き平成 25 年度も、NEXCO 東日本より、撤去された実壁高欄の提供を受けた。同じ高速道路の反対車線に設置されていた壁高欄であり、道路面より上部を幅 2m に切断した 10 ヶ所である。平成 24 年度の実験から、外観変状がなく、コンクリートに浮きが生じていない部分であっても、凍害の影響を受けてコンクリートの劣化（特に静弾性係数の低下）が進んでいるケースが観察された。よって、現地で目視、

打音、シュミットハンマーによる調査を行い、コンクリートの劣化が疑われる部分を主に選定した。

表-2 に実壁高欄の試験実施状況、表-3 に劣化調査および構造実験内容を示す。

以後、4.2 節に劣化調査、4.3 節に構造実験の結果を報告する。

4.2 劣化調査

本節では、壁高欄 No.8 (平成 24 年度) を詳細に劣化調査した結果について、報告する。

4.2.1 調査方法

調査は、(1)目視と打音調査、(2)コンクリートの圧縮強度試験、(3)鉄筋の腐食調査の順に実施した。(2)では、断面方向(奥行 200mm の方向)に抜いたコアを $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の試料とし、圧縮試験から強度と静弾性係数を測定した。また、(3)では、すべての鉄筋をはつり出し、錆の除去後、重量減少率を測定した。ここでは、腐食の分布状況を把握するため、縦方向と横方向鉄筋が交差する隣り合った点間の中央を切断し、約 200mm 長さに分割したものについて実施した。なお、重量減少率(%) = (腐食前重量 - 除錆後重量) / 腐食前重量 $\times 100$ と定義している。

4.2.2 調査結果

車道側から見た切断前の外観性状、切断面の状況、目視と打音調査結果を反映したスケッチ図を図-6 に示す。また、図-6 には縦・横方向鉄筋の名称(V-1~10 および T-1~4) も示す。なお、車道反対側に変状は観察されなかった。図より、所々のコンクリートが剥落し、打音調査から広範囲な浮きを確認していたが、両方の切断面からも車道側の横方向鉄筋をつなぐように幅数 mm に及ぶひび割れが確認された。また、横方向鉄筋の配置位置の測定結果は図-7 に示すとおりであり、設計と同じかぶり(60mm)が確保されていなかった。このような鉄筋の偏りが、車道側と車道反対側の変状の差を引き起こした一因とも考えられる。図-8 に、車道側から深さ 70mm までの塩化物イオン濃度分布を示す。壁高欄の上・下部に関係なく、車道側鉄筋位置の濃度は非常に高く、本壁高欄が厳しい塩害環境下に曝されていたことがうかがえた。

コンクリートの強度試験結果を表-4 に示す。なお、試験結果は、表中の部位に示した横方向鉄筋近傍から採取したコアコンクリート 6 個の平均である。建設当初の強度に関する情報は残されていなかったが、設計基準強度は 24N/mm^2 であり、コンクリートの圧縮特性はすべて設計値を満足していた。ただし、車道側のほぼ全面のコンクリートに浮きが生じ、強度試験を実

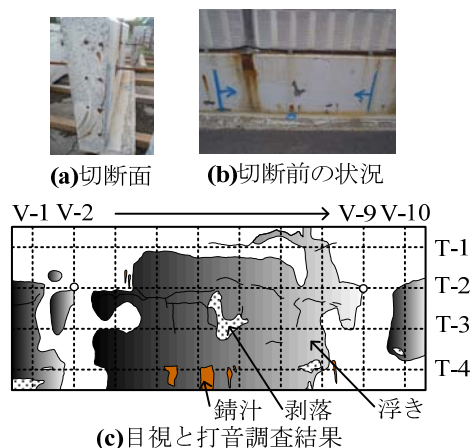


図-6 実壁高欄の外観性状

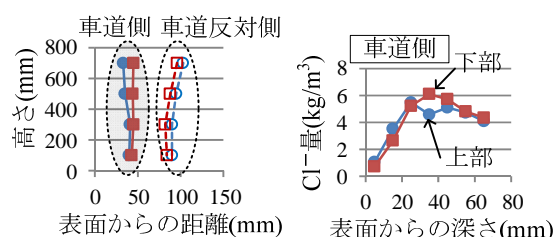


図-7 横方向鉄筋の配置位置

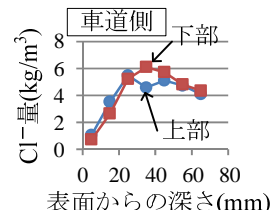


図-8 塩化物イオン濃度分布

表-4 コンクリートの圧縮特性

部位	圧縮強度 N/mm^2	静弾性係数 kN/mm^2
T1	31.3	27.8
T2	33.0	29.2
T3	32.6	27.4
T4	30.7	28.2

施した試料は車道反対側から深さ 100mm までのものであったことから、外観に変状のない車道反対側のコンクリートの圧縮特性を表している可能性もある。

車道側と車道反対側に配置された鉄筋の腐食状況を図-9 に示す。なお、鉄筋 No. はすべて車道側から見て番号を付し、左上を No.1 とした。図より、塩化物イオン濃度分布の結果と同様、上下の差は小さかったが、車道側の方が、腐食が進行している様子が見られ、縦方向鉄筋にその傾向が顕著に表れた。次に、縦方向と横方向鉄筋の腐食状況を比較すると、極端に重量減少率が高かった車道側 V-3、V-4 近辺の横方向鉄筋の重量減少率は、他の部分に比べて高くなったが、全体的には表面に近い縦方向の方が横方向鉄筋よりも重量減少率が高く、車道側では 2 倍程度の差があった。さらに、車道側の変状と鉄筋の腐食状況を対応させると、縦方向鉄筋 (V-1~V-10) の重量減少率が 20%程度以

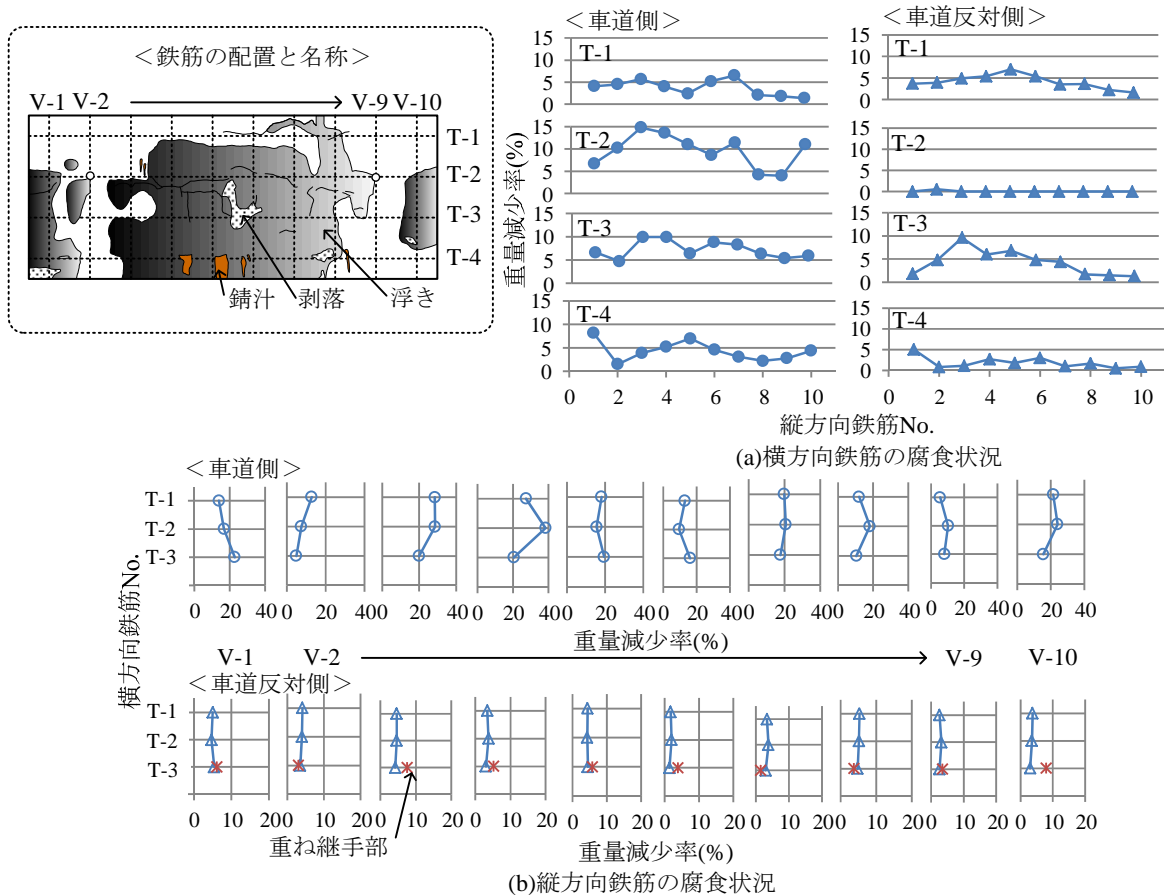


図-9 鉄筋の腐食状況

上であれば、打音調査で浮きを確認できていた。

4.2.3 まとめ

北海道で約 40 年間供用された実壁高欄を対象に、詳細な劣化調査結果の一例を示した。表面の変状と鉄筋の腐食状況の対応、鉄筋の腐食の分布状況、コンクリートの圧縮特性を把握し、ほぼ同位置に配置された鉄筋でも腐食状況が大きく異なること、重量減少率 20% 程度以上であれば打音で浮きを確認できること、コンクリートの圧縮特性が健全なものと同程度であったことについて報告した。

4.3 構造実験

点検データを総合的に判断し、その後の対策を決定することのできる維持管理方法を提案することを目的とし、材料の劣化度とそれが構造物あるいは部材の性能に与える影響度を関連付け、図化することを試みた。評価方法には、カリフォルニア構造技術者協会 (SEAOC) の Vision 2000 の要求性能マトリクス²⁾と、(財) 日本科学技術連盟の「R-Map 実践研究会」で開発されたリスクアセスメント手法^{4) 5)}の考え方を参考にした。そして、実壁高欄から切り出した梁試験体の載荷実験結果と劣化調査結果を活用し、提案した

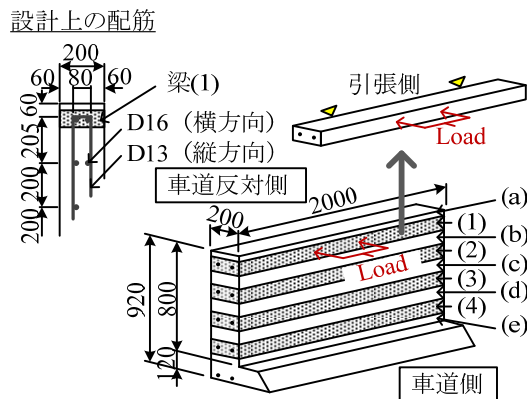


図-10 実壁高欄の概要

維持管理方法の有用性について検討した。調査した実壁高欄の概要は図-10 に示すようであり、以後、横方向鉄筋を主鉄筋とする梁部材として見なし、梁試験体 (1)~(4) の実験結果として取りまとめる。

4.3.1 劣化調査および構造実験結果

(1) 外観変状等

対象とする壁高欄は 2 ヶ所、壁高欄 No.6 と No.12 であり、図-11 は目視とたたき調査を行った結果のトレース図である。いずれの壁高欄も、両面が表面被覆

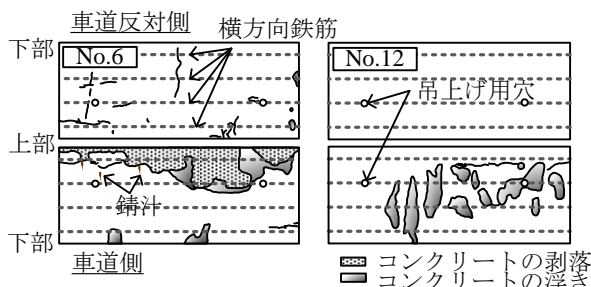


図-11 実壁高欄の外観変状

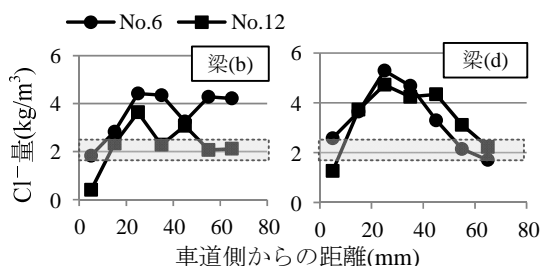


図-12 塩化物イオン濃度分布

により補修されており、壁高欄 No.12 の車道反対側は FRP メッシュで補修されていた。まず、車道側の変状を見ると、壁高欄 No.6 では著しくコンクリートが剥落し、No.12 では広範囲なコンクリートの浮きが観察された。なお、コンクリートの剥落は、鉄筋まで到達していなかったことから、主に凍害によるスケーリングに因るものと推察された。また、車道反対側について、壁高欄 No.6 では複数本のひび割れが観察されたが、No.12 に変状は見られなかった。

(2) コンクリートと鉄筋の劣化状況

上部の梁(b)と下部の(d)のコンクリート (図-10 参照) への塩化物イオン浸透状況を図-12 に示す。なお、網掛け部分は示方書 9) に示された鉄筋の発錆限界である。壁高欄の上部と下部、また No.6 と No.12 に大きな差はなく、横方向鉄筋が配置されている車道側表面から 50~60mm の位置まで発錆限界以上の塩化物イオンが浸透していた。

コンクリートの圧縮試験結果を表-5 に示す。設計基準強度は $f'_{cd}=24\text{N/mm}^2$ であるが、実際の強度結果は残されていなかった。なお、ここに示す結果は、4 本以上のコアコンクリートから得られた結果の平均値である。

鉄筋の引張試験結果を表-6 に示す。種類は SD30 (現在の SD295A) であり、梁 No.毎に車道側、車道反対側の順に並んでいる。ここで、表中の「判定」とは鉄筋の破断位置であり、JIS Z 2241 にならい、標点間の中央から標点距離の 1/4 以内で破断した場合は A、それを外れた場合は B、標点間の外で破断した場合は C

表-5 コンクリートの圧縮試験結果

梁 No.	壁高欄 No.6		壁高欄 No.12	
	f'_c	E_c	f'_c	E_c
1	32.6	16.3	30.4	19.7
2	32.5	19.5	30.0	20.9
3	33.3	18.8	27.6	19.2
4	33.9	21.3	29.5	20.8

※ f'_c : 圧縮強度(N/mm²)、 E_c : 静弾性係数(kN/mm²)

表-6 鉄筋の引張試験結果

No.	f_y	f_u	δ	W_L	判定	
6	1	284.0	441.1	13.4	10.2	A
		284.0	494.5	11.3	4.6	B
	2	329.3	554.9	18.4	2.1	A
		322.3	525.7	18.0	4.3	A
	3	316.2	495.5	15.8	5.7	B
		326.3	548.8	23.7	1.7	A
	4	317.2	485.4	11.8	4.9	A
		341.4	519.6	16.0	1.5	B
12	1	319.2	490.4	---	4.5	C
		346.4	493.5	---	2.0	C
	2	339.4	539.8	10.2	1.8	A
		350.5	575.0	20.2	1.1	A
	3	346.4	528.7	10.5	3.9	A
		339.4	548.8	14.4	1.6	A
	4	349.4	450.2	6.1	1.6	A
		351.5	565.0	18.4	2.0	B

※ f_u, f_y : 引張、降伏強度(N/mm²)、 δ : 伸び(%)
 W_L : 重量減少率(%)

表-7 載荷試験結果

No.	性能への影響度					
	側面	外観変状	耐力	変形	付着	
6	1	車道	剥落	○	○	▲
	3	車道	剥落	○	▲	▲
	4	反対	ひび割れ	○	▲	▲
12	1	車道	浮き	◎	○	◎
	3	車道	浮き	◎	△	◎
	4	車道	浮き	◎	△	◎

※レベル表記 (理論値に対する比較):

◎ (優) → ○ (同等) → △ (少し劣る) → ▲ (劣)

ただし、付着性能のみ 2 レベル判定

※側面: 車道側 (車道) と車道反対側 (反対)

とした。また、JIS に定められた SD295A の機械的性質を満たさなかった結果は網掛けした。なお、重量減少率は以下の式から算出した。

$$\text{重量減少率 } W_L (\%) = \frac{(\text{腐食前重量} - \text{除錆後重量})}{\text{腐食前重量}} \times 100$$

ここで、腐食前重量は、鉄筋の長さの測定値に単位質量(kg/m)を乗ずることにより算出した。

(3) 曲げ載荷試験結果

載荷は、せん断スパン a を実際の有効高さ d に合わせて変化させ、せん断スパン有効高さ比 $a/d=4.0$ となるように実施した。

試験結果を表-7 に示す。なお、梁(2)は壁高欄を吊り上げるための穴が横方向鉄筋を貫通しており、他の梁と載荷条件が異なったため、これ以降の検討では用いないことにした。ここで、外観変状は側面の変状であり、側面は図-10 の引張側にあたる。また、曲げ耐荷力、変形は理論値と比較することによってレベルを区別し、付着は載荷で曲げスパンに発生したひび割れ状況から優劣を推定した。なお、レベル表記については表下に示す。

4.3.2 劣化度と性能への影響度の関係

(1) 劣化した RC 構造のリスクマトリクス

リスクマトリクスは、先に述べたように危害の発生確率とその危害の程度の組み合わせであり、リスク対策によって4つに分類され、理想的には図-13(a)のように表される。また、R-Map 手法⁴⁾⁵⁾では3つに分類しており(適用の一例、図-13(b))、図-13(a)のリスク低減および移転の領域は ALARP (as low as reasonably practicable; 危険/効用基準あるいはコストを含めて、リスク低減策の実現性を考慮しながらも最小限のリスクまで低減すべき) 領域 B に対応する。いずれのマトリクスでも、矢印の方向にリスクの発生確率を下げるあるいはリスク発生時の影響を小さくすることによって、リスク低減の対策が取られ、そのポジションは同様である。

図-13 の危害の程度は、劣化した RC 構造では性能に与える影響度と置き換えることができる。しかし、劣化において発生確率を定義することは困難である。そこで、Vision 2000 の耐震性能に関する性能マトリクス²⁾³⁾を参考ことにした。図-14 に性能マトリクスを示す。図の縦軸は地震の発生確率であるとともに、設計で用いる地震規模の大きさを表しており、発生確率が低くなるほど地震規模は大きくなる。これを劣化した RC 構造にあてはめると、縦軸は劣化度となり、下方向に劣化度が高くなると考えることができる。さらに、劣化は時間の経過とともに進行するため、縦軸は時間軸と考えることもできる。よって、劣化した RC 構造のリスクマトリクスは図-15 のように表すことができる。

(2) リスク低減対策

図-15 に示した各リスクポジションで取るべき対策

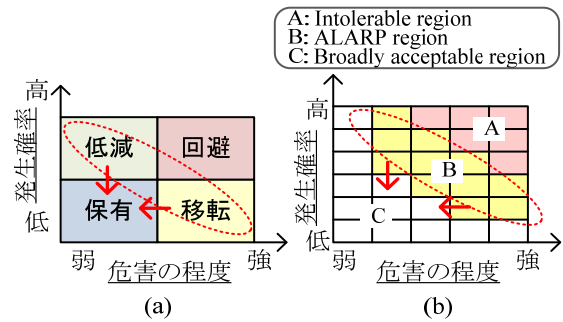


図-13 リスクマトリクス

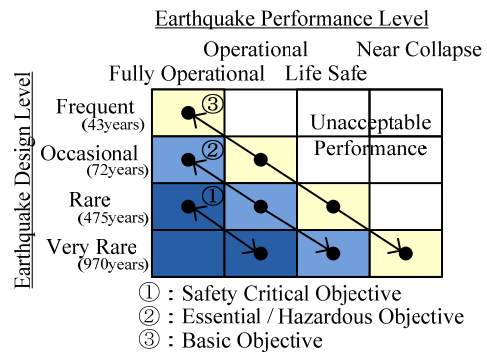


図-14 性能マトリクス

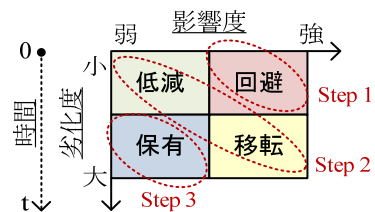


図-15 劣化したRC構造のリスクマトリクス

について、ISO/IEC ガイド 51⁷⁾に示されている 3 step method を参考に示す。以下に概要を示す。なお、和訳は文献⁸⁾を参照している。

- Step 1 : Inherently safe design (本質安全設計)
 - 可能な限りリスクを除去するか軽減する。
- Step 2 : Risk reduction measures (保護手段 (安全防護))
 - リスクに対して必要な保護手段を採用する。
- Step 3 : Information for use (使用上の情報)
 - リスクの情報を与え、使用上の注意を促す。

これより、Step 1 から 3 へ進むにしたがい、リスクは低減されることから、Step 1 は「回避」、Step 2 は「低減」あるいは「移転」、Step 3 は「保有」のリスクポジションに相当する。そして、劣化した RC 構造の維持管理において、各リスクポジションで取るべき対策は次のように考えることができる。

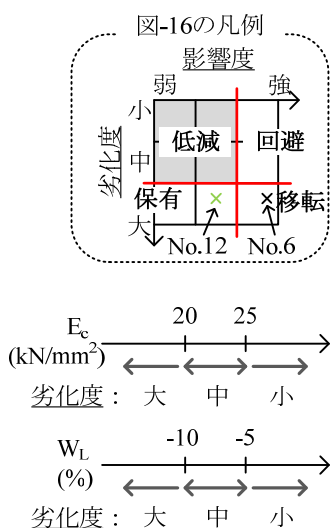


図-16 劣化度の評価

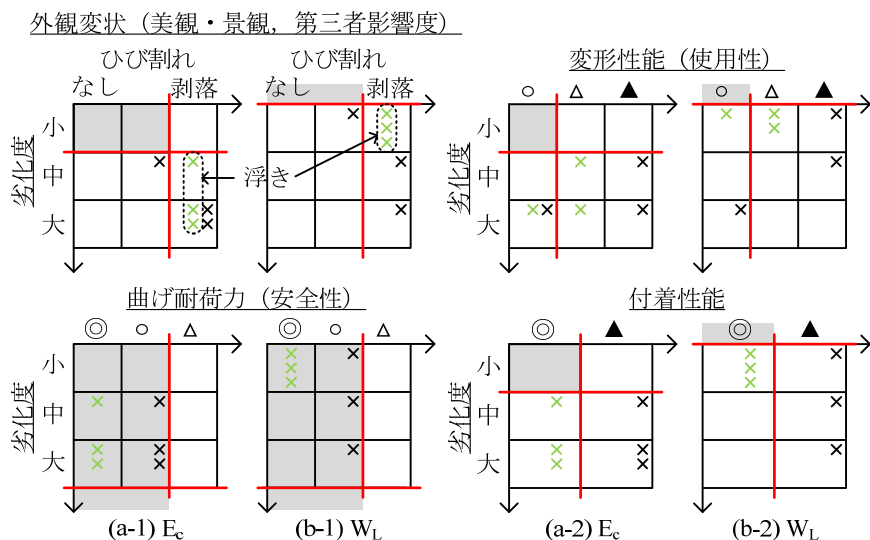


図-17 劣化したRC構造のリスクマトリクス

- 回避：設計で耐久性に関する照査を行う。
- 低減あるいは移転：点検結果を評価、判定し、対策を行う。供用期間の短い「低減」では補修、それ以上に供用されている「移転」では補強や解体・撤去の対策を行う。
- 保有：日常および定期点検によって、リスクがこの領域にあることを確認する。

以上のことから、前節で提案したリスクマトリクスを用いて劣化したRC構造を維持管理するということは、「低減」あるいは「移転」ポジションを決定することと同義となる。そして、「低減」の範囲を決める境界線は、補修の必要性を判断する指標を意味すると考えることができる。

(3) リスクマトリクスへの適用

ここでは、実壁高欄の調査結果を、提案したリスクマトリクス(図-15)に適用した結果について示す。

材料の劣化度毎、構造の性能毎にマトリクスを作成した。性能は、美観・景観として外観変状(載荷試験で引張側となる面)、第三者影響度としてコンクリートの浮きの有無、安全性として曲げ耐荷力、使用性として変形性能、複数の性能に関わるものとして付着性能を取り上げた。なお、調査結果の分布範囲を参考にし、材料の劣化度は図-16に示す3水準に分類し、鉄筋の劣化度は重量減少率 W_L を負の記号で表した。よって、ここでの劣化度の大・中・小は一般的な意味と異なり、あくまで本調査結果の中で劣化程度が大きい、小さいかを判断している。

マトリクスのマス目内に調査結果をプロットすると、図-17の結果が得られた。なお、黒プロットは壁

高欄 No.6、緑プロットは壁高欄 No.12の結果である。調査結果は、材料の劣化とそれがもたらす性能への影響を実験で確認した結果であり、図-17の関係は、そのままリスクマトリクスに反映させることができる。また、図に示す「低減」のポジション(網掛け部)は、以下の考えに基づき決定した。

- ① 性能に与える影響度(横軸)について、理論値と同等の性能を保有しているか否かを判定し、「低減」と「回避」の境界線(赤色縦線)を決定した。なお、外観変状ではコンクリートのひび割れ発生まで、付着性能では「優」判定のみを「低減」に含めることにした。
- ② ①で決定された境界線の右側の範囲は「回避」と「移転」の対策が必要な範囲となる。本調査結果が、既に40年程度供用された実壁高欄の結果であることから、「回避」の対策を取る必要があるとは考えにくい。よって、この範囲にあるプロット点の最小の劣化度を「移転」の下限值であると考え、「回避」と「移転」の境界線(赤色横線)を決定した。ただし、境界線が横軸と一致する場合は、「低減」のポジションをマトリクス範囲外まで拡大して表示した。

図-17のように材料の劣化度と性能に与える影響度の関係をマトリクス表示し、材料の劣化度が同程度であっても、性能によって影響度が異なることを明確に示すことができた。また、この関係をリスクマトリクスにあてはめることにより、補修の必要性を判断する指標を示すことができた。

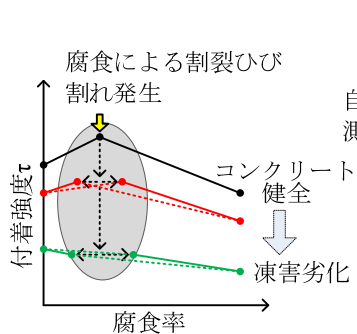


図-18 付着のイメージ

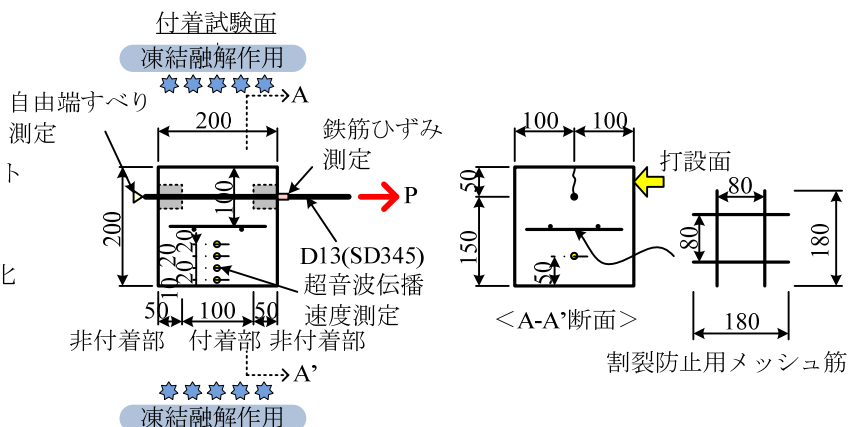


図-19 片引き付着試験体の概要



図-20 凍結融解試験の様子

表-8 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)					
		C	W	S1	S2	G1	G2
55.0	46.5	268	147	662	228	668	349

※粗骨材 (G1, G2) の最大寸法: 20mm

※混和剤を C×1%使用 (AE 減水剤)

表-9 鉄筋の力学特性

種類	規格	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²
D13	SD345	407	573

※ f_y , f_u : 降伏点強度および引張強度

4.3.3 まとめ

本研究では、RC 構造の維持管理において、診断による判定結果と劣化の影響を受けて低下した実際の性能との差をリスクとして捉え、劣化した RC 構造のリスクマトリクスを提案した。そして、補修の要否を判断するための指標をマトリクスの中に示した。さらに、凍害と塩害の複合劣化を受けた実壁高欄の調査結果を提案したリスクマトリクスに適用した。

今後は、調査結果の量、質ともに充実させ、劣化のばらつきを考慮した上で劣化度を決定する方法も示す必要がある。そして、RC 構造の補修の要否を一目瞭然に判断できるように、リスクマトリクスの精度を高め、維持管理方法として確立させたい。

5. 複合劣化したコンクリートの付着試験

5.1 実験概要

RC 構造が凍害と塩害の複合劣化を受ける場合、図-18 に示すように、付着強度の低下とともに、割裂ひび割れが発生する時期が変化すると予想される。この割裂ひび割れ発生時期は、目視調査で壁高欄を点検する際の 1 つの指標になる。そこで本研究では、1 面に割裂ひび割れが発生するように、鉄筋を偏心させて配置した片引き付着試験を計画した。平成 25 年度は、凍結融解回数 200 サイクルまでの結果を報告する。

5.1.1 試験体作製方法

片引き付着試験体の概要を図-19 に示す。なお、図-19 の上下面を試験面とするため、図の正面を打設面とした。コンクリートの示方配合を表-8、鉄筋の力学特性を表-9 に示す。

試験体は、コンクリート打設後、打設面に木製型枠を取り付け、さらに全試験体をビニールシートで覆い、20℃で養生した。さらにこの状態を 28 日間保持し、脱型した後、7 日間水中養生した。水中養生の前後で、吸水による重量の増加はほとんどなかったため、試験体は飽水状態であると考え、材齢 35 日で凍結融解を開始した。また、凍結融解試験中も試験体に飽水状態を保持させるため、水を吸水させた養生マットで覆い、さらに厚手のビニール袋を 2 重にして包んだ。凍結融解試験装置内の試験体設置状況を図-20 に示す。なお、ビニール袋内部に湿度計を設置し、凍結融解試験中も飽水状態を保持していることを確認した。

凍結融解試験は、試験体内部 (鉄筋配置位置と同じ、表面から 50mm の位置) の温度を +5 ~ -18℃ に設定

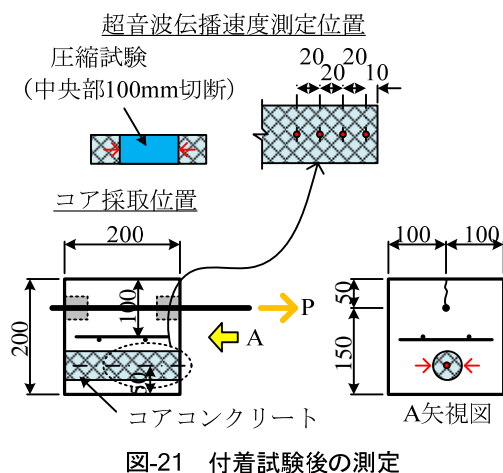


図-21 付着試験後の測定



図-22 付着試験状況

し、気中凍結気中溶解（1サイクルは約15時間）とした。また、装置内が広く、試験体設置場所によって劣化程度に差が生じることが懸念された。よって、約15サイクルに1回、試験体を時計回りに移動させ、さらに棚の段数と試験体上下面もローテーションさせた。

5.1.2 コンクリートの各特性の測定方法

片引き付着試験を実施する前に、コンクリートの特性を超音波法により把握した。測定点は、図-19に示すとおりである。

また、片引き付着試験後には、鉄筋と同位置、同方向のコアコンクリートを採取し、超音波法で超音波伝播速度を測定し、圧縮試験により圧縮強度と静弾性係数を測定した（図-21）。

5.1.3 付着試験方法

付着試験の実施状況を図-22に示す。測定項目は、鉄筋のひずみ、自由端のすべり量、荷重である。

5.2 実験結果

凍結融解サイクル毎に6体の片引き付着試験を実施した。凍結融解サイクル数は0、100、200とした。

図-23に、凍結融解を0と200サイクルを受けた試

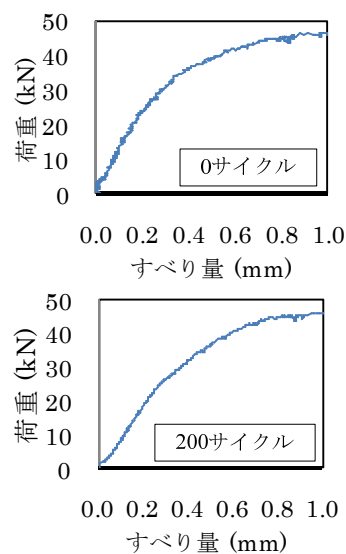


図-23 片引き付着試験結果

表-10 付着試験時のコンクリート特性

凍結融解 サイクル数	f'_c N/mm ²	E_c kN/mm ²
0	23.7	18.5
100	27.9	23.2
200	26.0	22.1

験体の荷重—自由端すべり量の関係の例を示す。また、表-10には、付着試験時のコンクリートの特性（圧縮強度 f'_c および静弾性係数 E_c ）を示した。なお、凍結融解サイクル数に拘らず、すべての試験体で鉄筋が降伏したため、そこで試験を終了した。

以上より、凍結融解サイクル200サイクルまでは、コンクリート特性、付着特性に大きな違いは見られなかった。しかし、すべり出し荷重のみ、0サイクルのものよりも凍結融解作用を受けた試験体の方が小さくなった。今後、500サイクルまで凍結融解試験を継続し、塩害も含めた研究成果を報告する予定である。

6. AE コンクリートの凍結融解試験

6.1 実験概要

平成24年度から継続していたAEコンクリートの凍結融解試験結果について報告する。

6.2 実験結果

6.2.1 試験時期

□10×10×40cmの供試体の共鳴振動による相対動弾性係数を基準として、それらが100%（試験前）、約80%、約60%、約40%となった段階で、各種試験を

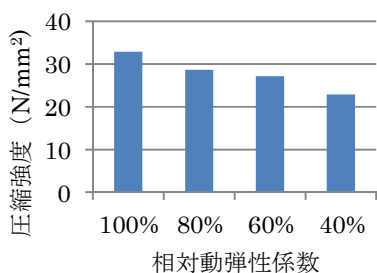


図-24 圧縮強度と相対動弾性係数の関係

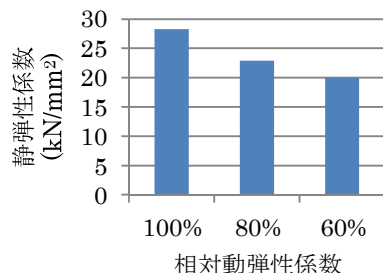


図-25 静弾性係数と相対動弾性係数の関係

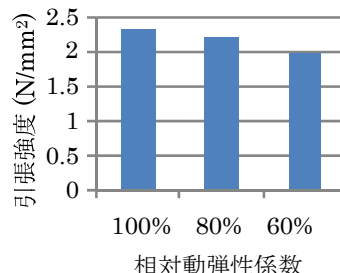


図-26 引張強度と相対動弾性係数の関係

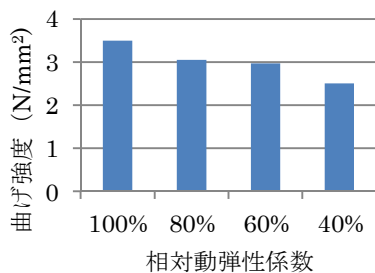


図-27 曲げ強度と相対動弾性係数の関係

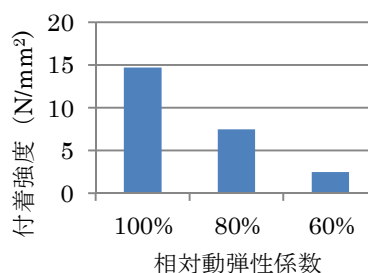


図-28 付着強度と相対動弾性係数の関係

行った。なお、相対動弾性係数が約 80%になるのに 714 サイクル、約 60%になるのに 1674 サイクル、約 40%になるのに 2186 サイクルを要した。通常の凍結融解サイクルは 300 サイクルで実施することを考えると、耐久性に優れたコンクリートであったと言える。

6.2.2 圧縮強度

図-24 に、□10×10×40cm の供試体の圧縮強度と相対動弾性係数の関係を示す。凍結融解により圧縮強度が低下しているのがわかる。

6.2.3 静弾性係数

図-25 に、□10×10×40cm の供試体の静弾性係数と相対動弾性係数の関係を示す。相対動弾性係数が 80%以下になると、表面劣化が激しく、測定機器の据え付けができない状態になり、ここでは、80%では 2 本の平均値であり、60%では 1 本の値で示している。圧縮強度と同様に、凍結融解により静弾性係数も低下しているのがわかる。

6.2.4 引張強度

図-26 に、□10×10×40cm の供試体の引張強度と相対動弾性係数の関係を示す。凍結融解により、引張強度が低下しているのがわかる。

6.2.5 曲げ強度

図-27 に□10×10×40cm の供試体の曲げ強度と相対動弾性係数の関係を示す。凍結融解により、曲げ強度が低下しているのがわかる。

6.2.6 付着強度

図-28 に、□10×10×40cm の供試体の付着強度と

相対動弾性係数の関係を示す。他の強度等と同様に、凍結融解により付着強度も低下している。

7. まとめ

平成 25 年度の課題毎の取り組みと成果について、以下に簡潔に述べる。

- (1) 複合劣化した壁高欄を模擬した試験体の衝撃載荷実験について、試験体の形状や凍結劣化程度を変化させた小型 RC 梁を用いて実施した。また、前年度の課題であった試験体の作製方法については、端部の補強方法の違いによる凍害劣化程度の違いが小さいことを確認した。
- (2) 衝撃耐荷力の評価技術として、劣化度と耐荷性能の関係をリスクマトリクスで表現する手法を提案し、補修の可否を判断できる可能性を示した。
- (3) 劣化程度と衝撃耐荷力の関係については、実壁高欄から切り出した梁型試験体の曲げ載荷試験により、外観上著しい剥落や広範囲での浮きがみられた試験体でも、当初の設計と同等またはそれ以上の耐力を有していることを確認した。一方で、変形性能や付着性能については、算定値を下回っている部分も確認された。また、小型 RC 梁を用いた衝撃載荷実験により、凍害劣化程度と衝撃耐荷力の関係を把握した。
- (4) 衝撃耐荷力の診断技術については、昨年度末の課題である超音波法による凍害劣化診断の信頼性向上に向け、小型 RC 梁、AE コンクリート供試体、

14.2 凍害・塩害の複合劣化を受けた壁高欄の衝撃耐荷力向上対策に関する研究

付着試験体および実壁高欄から切り出した梁型供試体を活用し、透過方向、凍結融解作用面からの深さ、鉄筋の有無を要因とした超音波伝播速度測定を実施し、データを蓄積している。

- (5) 補修工法の検討に向け、補修・補強判断指標を検討するため、実壁高欄を対象としたコンクリートおよび鉄筋の劣化度の定量化を行った。また、目視調査で補修要否を判断する指標となる割裂ひび割れの発生時期と付着強度の低下を把握するため、凍害劣化したコンクリートの片引き付着試験を開始した。

参考文献

- 1) 水田真紀、野々村佳哲、嶋田久俊、島多昭典：コンクリート製車両用防護柵の設計と北海道での劣化事例、コンクリート工学、Vo.52、No.3、pp.263-267、2014
- 2) Structural Engineers Association of California (SEAOC) : Vision 2000 - Performance-Based Seismic Engineering of Buildings, Final Report of Vision 2000 Committee, 1995
- 3) 本城勇介：性能設計概念に基いた設計コードの開発、Code PLATFORM ver.1 と基礎構造等の設計原則、第53回構造工学シンポジウム特別講演会資料、2007 ほか
- 4) (財)日本科学技術連盟「R-Map 実践研究会」編著：製品安全、リスクアセスメントのための R-Map 入門(第1版)、ダウンロード版
- 5) 経済産業省：リスクアセスメント・ハンドブック(実務編)、2011.6
- 6) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書設計編、pp.148-151、2012
- 7) ISO/IEC : Safety Aspects -Guidelines for their inclusion in standards (Guide 51), 2012

A STUDY ON IMPACT RESISTANT CAPACITY OF RC BRIDGE WALL RAIL DETERIORATED BY COMBINED EFFECT OF FROST AND SALT ATTACK

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold-Region Maintenance

Engineering Research Group

(Materials Research Team)

Cold-Region Technology

Development Coordination

(Cold-Region Technology

Promotion Division)

Author : TAGUCHI Fumio

SHIMATA Akinori

MIHARA Norihiro

SHIMADA Hisatoshi

NAITOH Isao

NONOMURA Yoshinori

MIZUTA Maki

KAWAMURA Koji

MURANAKA Tomoyuki

WATANABE Jun

SUZUKI Satoshi

Abstract : The objective of this study is to appropriately maintain a RC bridge wall rail affected by combined influences of frost and salt actions. Therefore, evaluation of impact loading capacity, investigation in assessment and a remedial measure of existing RC bridge wall rails are proposed. In FY2013, results were obtained such as (1) an impact loading test of a specimen damaged by combined influences, (2) evaluation of impact loading capacity and (3) investigation of relation between degree of combined degradation and impact loading capacity. (1) The impact loading test of a small-sized RC beam was conducted. The beams with various lengths were exposed to freezing and thawing actions and their edges were reinforced by a FRP sheet or an extruded polystyrene board. Accordingly, the procedure for fabricating a beam specimen uniformly damaged was confirmed. (2) Relation between degree of degradation and load bearing performance was represented as a risk matrix. This matrix is useful for indicating a time when an existing RC bridge wall rail needs repair. (3) Beam specimens were removed from the actual RC bridge wall rail and a loading test was carried out. It was clarified that the severe deterioration, i.e. widely spalling of concrete and an unstable concrete cover caused by steel corrosion did not much affect loading capacity of the beam specimens. On the other hand, some specimens had less ductility and bond performance. Moreover, relation between degree of degradation by frost and impact loading capacity was found by the impact loading test of the small-sized RC beam.

Key words: Frost damage, Salt damage, Combined deterioration, RC bridge wall rail, Impact loading capacity