

# 論文 速硬性混和材を用いたコンクリートにおける若材齢時の塩分浸透特性および鉄筋の付着特性に関する一考察

坂井 亮磨<sup>\*1</sup>・有馬 直秀<sup>\*2</sup>・宮下 剛<sup>\*3</sup>・村上 祐貴<sup>\*4</sup>

**要旨：**凍結防止剤による塩害を想定したコンクリート補修材の基礎研究として、塩水噴霧で塩害を促進させた補修材の若材齢時における塩分浸透特性を調べた。さらに塩害で鉄筋が腐食した場合も想定し、腐食鉄筋とコンクリート補修材の付着特性を調べた。結果、コンクリート補修材に速硬および超速硬コンクリートを用いた場合は、普通コンクリートに比べ内部構造が緻密であり、塩分浸透が少なく塩害に対して高耐久性を有することを確認した。また鉄筋が腐食するとコンクリート補修材と鉄筋の付着強度は減少するが、質量減少率が3%程度でも、道路橋示方書の許容付着応力の約12倍となることを確認した。

**キーワード：**速硬性混和材、塩分浸透、付着、鉄筋腐食

## 1. はじめに

北陸地域の高速度道路では、冬期に凍結防止剤が多く使用されている。凍結防止剤による塩害として、鋼橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の上面劣化や老朽化に伴う伸縮装置からの漏水により上部構造のけた端部や橋台に塩害劣化が多く見られる<sup>1)2)</sup>。凍結防止剤による塩害対策の一つとして、RC床版の上面をコンクリート補修材で打換える対策<sup>3)</sup>や、**図-1**のように、けた遊間を鉄筋とコンクリートで閉塞するRC連結ジョイントによる伸縮装置の取換え対策が提案されている<sup>4)</sup>。高速度道路の維持管理では、利用者への影響を極力減らすため、補修に伴う交通規制時間の短縮が求められるため、練混ぜから数時間で所定の圧縮強度が発現する超速硬コンクリートを補修材として用いることが一般である<sup>3)</sup>。

本研究では、北陸地域での凍結防止剤による塩害を想定した補修対策の基礎研究として、若材齢時のコンクリート補修材を塩水噴霧により塩害を促進させた試験（以下、塩害促進試験）を通じて塩害の潜伏期における塩分浸透特性を調べる。具体的には、実務で使用するコンクリート補修材の種別や配合条件を考慮し、塩害促進試験

後のコンクリートの塩化物イオン濃度（以下、塩分）の分布や電子線マイクロアナライザ（以下、EPMA）により塩分分布を視覚的に把握した。これらの塩分浸透の特性を基にコンクリート補修材の凍結防止剤による塩害に対する耐久性を検討した。さらに塩害の進展期以降の鉄筋が腐食した場合を想定し、電食により促進腐食した鉄筋とコンクリート補修材との付着特性を調べ、補修対策の設計時における許容付着応力と比較した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

塩害促進試験は、普通コンクリート、速硬コンクリートおよび超速硬コンクリートの3種類とし、付着試験は超速硬コンクリートを除く2種類とした。高速度道路橋のRC床版の補修は、**写真-1**のように劣化したRC床版のコンクリート材料をウォータージェット（以下、WJ）で除去してコンクリートを打設する。コンクリートに使用する骨材は、WJによるはつり深さを抑えるため粗骨材の最大粒径が20mm以下のものを用いることが多い<sup>3)</sup>。本研究では、実務において補修材として用いられる速硬

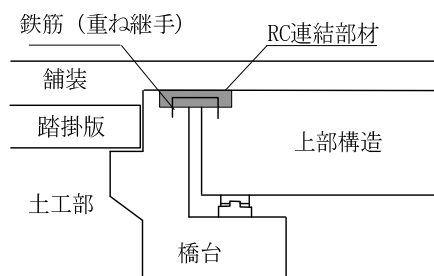


図-1 RC連結ジョイントの概要図



写真-1 ウォータージェットによるはつり

\*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (学生会員)

\*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 道路技術部構造技術課 (正会員)

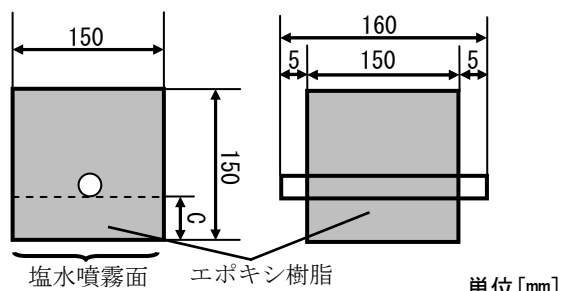
\*3 長岡技術科学大学 環境・建設系 准教授 博(工学)

\*4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 博(工学) (正会員)

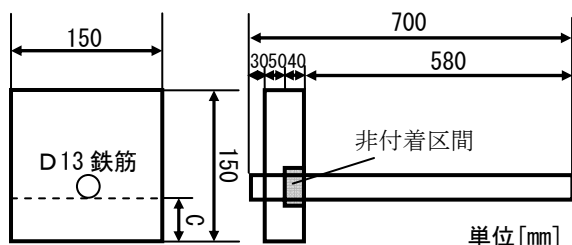
表-1 コンクリートの配合

コンクリート種別	W/C [W/P] (%)	Gmax (mm)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )								
			W	C	S	G	繊維	AE減水剤 [高性能減水剤]	AE助剤	速硬性混和材	調整剤 (P×%)
普通	48	20	162	338	755	1032	11.6	C×0.25%	C×0.002%	—	—
速硬	[36]	20	172	338	755	1032	11.6	C×0.25%	C×0.002%	145	P×0.7
超速硬	38	20	150	400	798	1034	11.6	[C×1.00%]	—	—	—

※P：結合材（セメント＋速硬性混和材）



(a) 塩害促進試験



(b) 付着試験

※C:かぶり

図-2 試験体の概要図

および超速硬コンクリートの塩分浸透特性や付着特性の把握を目的としていることから、粗骨材の最大粒径を20mmとした。コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(普通コンクリート)、超速硬セメント(超速硬コンクリート)を使用した。速硬コンクリートは、普通コンクリートを練混ぜた後、速硬性混和材および硬化時間調整剤(オキシカルボン酸系)を添加して再練練した。試験体の養生は湿布養生とした。なお、付着試験用のコンクリートの練混水は、鉄筋腐食を促進させるため、5%NaCl水溶液とした。

高速道路の補修材では、ポットホールの発生を防止する目的で、繊維混入コンクリートが用いられる場合があるため、試験体の一部には、ポリオレフィン系補強繊維を混入した。なお、鉄筋には、異形鉄筋 D13SD345(塩害促進試験)およびSD390(付着試験)を用いた。

## 2.2 試験体概要

試験体概要を図-2に示す。塩害促進試験体は、断面150×150mm、試験体長150mmの角柱コンクリートに、D13(SD345)をかぶり30mmの位置に配筋した。塩水を噴霧する面は、最少かぶり面とし、その他の面は、外部からの塩分浸透を防ぐため、エポキシ樹脂で被覆した。

付着試験体は、断面150×150mm、試験体長90mmで

表-2 実験パラメータ

(a) 塩害促進試験

試験体名	コンクリート種別	かぶりC (mm)	繊維混入率 (vol%)	試験開始材齢 (時間)
A	普通	30	1.27	120
B	速硬	30	1.27	120
C	超速硬	30	1.27	120

(b) 付着試験

試験体名	コンクリート種別	かぶりC (mm)	繊維混入率 (vol%)	腐食時間 (時間)	付着試験開始材齢 (時間)
No.1	普通	30	0	0	120
No.2			0.5		
No.3			1.27		
No.4			0		
No.5			1.27		
No.6			0		
No.7			1.27		
No.8		0			
No.9		0.5	65	140	260
No.10		1.27			
No.11		0			
No.12		1.27			
No.13		0			
No.14		1.27			
No.15	0				
No.16	0.5	65	140	260	
No.17	1.27				
No.18	0				
No.19	1.27				
No.20	0				
No.21	1.27				
No.22	0				
No.23	0.5	0	24	120	
No.24	1.27				
No.25	0				
No.26	1.27				
No.27	0	65	185	120	
No.28	1.27				

※1つのパラメータにつき、試験体は4体とした

あり、かぶり30mm 或いは50mmの位置にD13(SD390)鉄筋を配筋した。鉄筋とコンクリートの付着区間は50mmとし、鉄筋引抜き端近傍のコンクリートのコーン状破壊を防止するため、引抜き端から40mm区間に塩化ビニル管を用いて非付着区間を設けた。

## 2.3 実験パラメータ

塩害促進試験および付着試験の実験パラメータを表-2に示す。塩害促進試験は、コンクリート種別を3種類、繊維混入率と材齢は一樣とする。付着試験は、普通コンクリートと速硬コンクリートの2種類、かぶりを30、50mmの2種類、繊維混入率を0、0.5、1.27vol%の3種類、コンクリート練混ぜからの材齢を24時間と120時間

の2種類、腐食時間を変化させた。

## 2.4 試験方法

### (1) 塩害促進試験による塩分分析

塩害促進試験は、材齢 120 時間の時点から、複合サイクル試験機を用い JIS K 5600-7-1 : 1999 に準じ、試験条件温度 40°C、塩化ナトリウム 50g±10g/l を 1 日噴霧後、6 日間乾燥を 1 サイクルとし、9 サイクル(63 日間)実施した。その後、塩化物イオンの浸透状況を確認するため、塩水噴霧面から深さ 5mm 毎にスライス・粉砕し、JIS A1154 の電位差滴定法に準拠し、全塩化物イオン濃度分布と EPMA 分析を実施した。

### (2) 電食試験

一部の付着試験体は、凍結防止剤による塩害で鉄筋腐食した場合を想定し、材齢 120 時間の時点から、電食による促進腐食試験を実施した。5%NaCl 水溶液を満たした水槽内に試験体を設置し、鉄筋を陽極側に銅板を陰極側に接続した後、0.03A の直流電流を設定時間通電した。なお、電食時間 65 時間を腐食小、電食時間 140 時間を腐食大とする。鉄筋の腐食率は、試験体作成前に計測した質量と付着試験後に計測した質量減少率である。付着試験終了後、主鉄筋をはつり出し、10%クエン酸二アンモニウム溶液に 24 時間浸漬させ、腐食生成物を除去した。その後、鉄筋とコンクリートの付着区間を切断し、質量を計測した。

### (3) 付着試験

載荷試験は変位制御(0.5mm/min)で行い、片側引抜試験とした。測定項目は、引抜荷重、自由端のコンクリートと鉄筋の相対変位である。付着応力は、引抜荷重を付着面積で除して算出した。鉄筋のすべり量は、鉄筋の伸び量はゼロと仮定し、自由端の相対変位とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 塩害促進試験による塩分分析結果

#### (1) 塩分分析および EPMA 分析

塩化物イオンの濃度分布を図-3 に示す。塩分浸透は、普通コンクリート、速硬コンクリート、超速硬コンクリートの順に少なく、速硬および超速硬コンクリートでは、表面から 15mm 以深の塩分濃度は土コ示に示される鋼材の腐食限界の 1.2kg/m<sup>3</sup> 以下となっている<sup>5)</sup>。

表-3 に示す塩分浸透総量は、塩分濃度(kg/m<sup>3</sup>)×深さ(mm)の塩分濃度分布の積分値によって算出した。普通コンクリートに対する塩分浸透総量の割合は、速硬コンクリートで 0.72、超速硬コンクリートで 0.42 と小さくなっている。これは、コンクリート内部構造の緻密さや W/C や W/P の違いによるものと推察される。

EPMA 分析の結果を図-4 に示す。普通コンクリートに比べ、速硬および超速硬コンクリートでは、内部構造

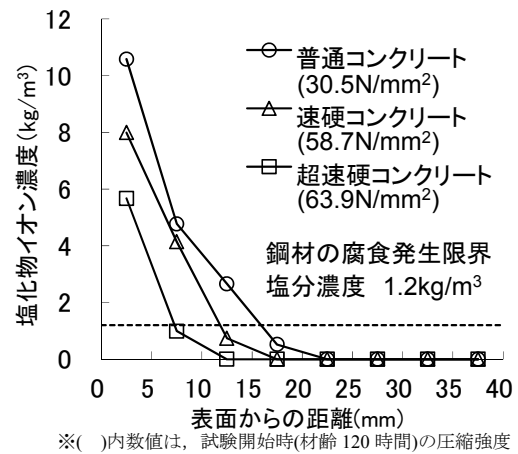


図-3 塩化物イオン濃度と表面からの関係

表-3 塩害促進試験による塩分浸透総量

コンクリート種別	普通	速硬	超速硬
塩分浸透総量 (kg/m <sup>3</sup> ・mm)	64.3 (基準)	46.5 (0.72)	27.0 (0.42)
W/C [W/P] (%)	48	[38]	38

※( )内数値は、普通コンクリートに対する塩分浸透総量の割合を示す

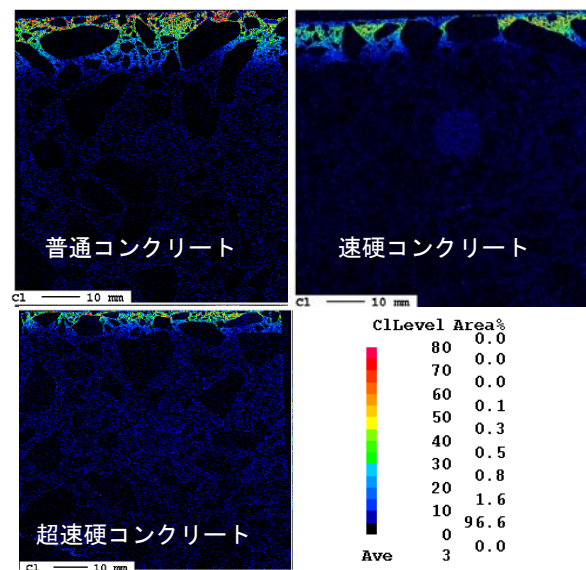


図-4 EPMA 分析の結果

が緻密であり塩分浸透が少ないことが確認される。このため速硬および超速硬コンクリートは、凍結防止剤による塩害に対して高い耐久性を有していると判断できる。

#### (2) 使用環境による劣化に対する耐久性

橋梁路面に散布される凍結防止剤による塩分は、舗装体にひび割れが発生しない限り、防水層により遮断されるため耐久性への影響は少ない。北陸自動車道で取替えた床版の塩分分布より塩害に対する耐久性照査を実施した結果を以下に示す。供用開始から 36 年が経過し劣化した床版の塩分浸透状況より、コンクリート表面における塩化物イオン  $C_0=2.6\text{kg/m}^3$  とし<sup>6)</sup>、拡散係数  $D_d=0.5 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}(W/C=0.4)$ <sup>7)</sup> と設定した。フィックの拡散方程式

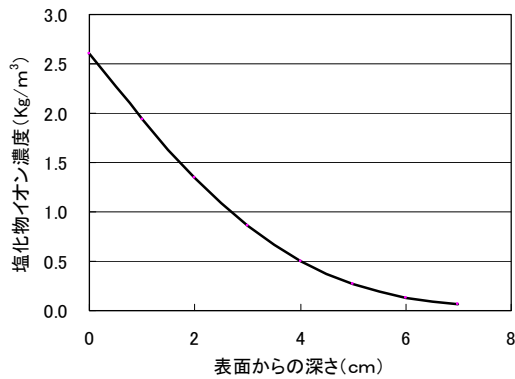


図-5 30年後の塩化物イオン濃度分布の予測

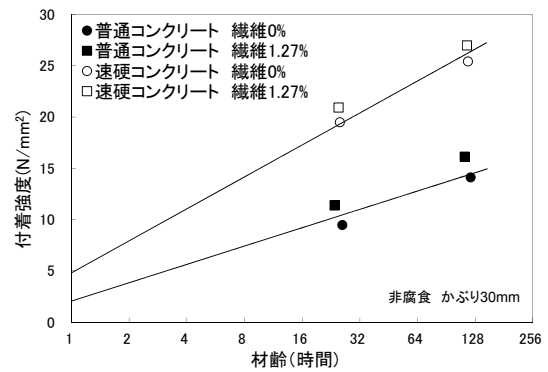


図-6 付着強度と材齢の関係(対数表示)

表-4 実験結果一覧

試験体名	コンクリート種別	かぶりC (mm)	繊維混入率 (vol%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	腐食率 (%)	腐食ひび割れ発生状況 (発生試験体/全試験体)
No.1	普通	30	0	28.7	14.1	0.0	-
No.2			0.5	29.6	12.7	0.0	-
No.3			1.27	31.8	16.1	0.0	-
No.4			0	37.5	13.2	2.1	4/4
No.5			1.27	35.4	14.2	1.7	4/4
No.6			0	34.6	8.4	4.7	4/4
No.7			1.27	36.9	14.9	2.1	4/4
No.8			0	16.2	9.5	0.0	-
No.9			0.5	16.1	10.1	0.0	-
No.10			1.27	17.7	11.4	0.0	-
No.11	速硬	30	0	28.7	13.6	0.0	-
No.12			1.27	31.8	14.8	0.0	-
No.13			0	37.5	14.6	2.8	4/4
No.14			1.27	35.4	17.8	0.9	3/4
No.15			0	56.4	25.4	0.0	-
No.16			0.5	58.0	26.4	0.0	-
No.17			1.27	56.8	27.0	0.0	-
No.18			0	61.0	-*	-	-
No.19	速硬	50	1.27	61.5	19.8	1.2	4/4
No.20			0	64.4	-*	-	-
No.21			1.27	62.7	20.6	3.2	4/4
No.22			0	43.2	19.5	0.0	-
No.23			0.5	47.8	17.3	0.0	-
No.24			1.27	51.6	20.9	0.0	-
No.25			0	56.4	27.2	0.0	-
No.26			1.27	56.8	28.9	0.0	-
No.27	速硬	50	0	61.0	-*	-	-
No.28			1.27	61.5	19.9	1.9	1/4

※No.18, 20, 27は通電不可能だったため、付着試験は未実施

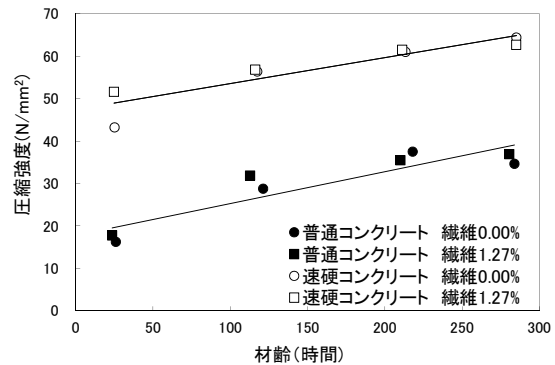


図-7 圧縮強度と材齢の関係

を用いてRC連結ジョイントの30年後の塩分浸透予測の結果を図-5に示す。W/C=0.4時において、最小かぶり面から30mmの位置(鉄筋下面)での腐食限界量である1.2kg/m<sup>3</sup>に到達しないことから、W/C[W/P]の小さい速硬および超速硬コンクリートの拡散係数は上記設定値よりも小さいと予想され、塩害に対する高い耐久性を有していると考えられる。

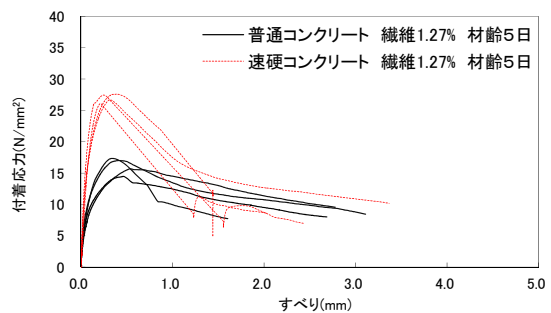
### 3.2 付着試験結果

#### (1) 材齢の影響

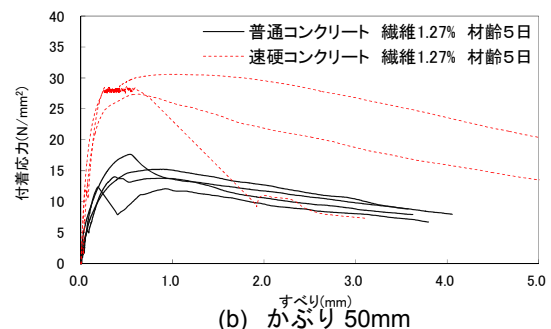
実験結果一覧を表-4に示す。材齢が増加するに従い付着強度は増加する傾向にあり、その増加傾向は図-6に示すように、対数関数的であることが認められた。また、材齢24時間において速硬コンクリートの付着強度が普通コンクリートのおよそ2倍の値を示した。

#### (2) コンクリートの圧縮強度の影響

圧縮強度と材齢の関係を図-7に示す。普通コンクリートの圧縮強度は材齢120時間で24N/mm<sup>2</sup>を示し、速硬コンクリートでは材齢24時間で40N/mm<sup>2</sup>以上を示した。材齢24時間以降は、普通コンクリート、速硬コンクリートともに緩やかに強度が増加しており、その増加率は普



(a) かぶり 30mm



(b) かぶり 50mm

図-8 付着応力すべり関係

通コンクリートの方が速硬コンクリートに比べて大きくなる傾向が認められた。

#### (3) かぶりの影響

付着応力すべり関係の一例として、繊維混入率1.27vol%の非腐食時の結果を図-8に示す。なお、かぶり50mmの試験体のうち1体は、他の試験体と挙動が明らかに異なるため除外した。かぶり30mmの場合、速硬コンクリートの付着剛性は普通コンクリートと比較して

大きい。また、速硬コンクリートでは、最大付着応力以降急激に付着応力が低下し、普通コンクリートの付着応力すべり関係に漸近した。かぶり 50mm の場合は、速硬コンクリートの方が普通コンクリートと比較して、最大付着応力以降においても付着応力は全体的に大きく、すべりの増加とともに緩やかに付着応力が低下した。これは、鉄筋の割裂挙動に対するコンクリートの拘束が高く、破壊形態が付着割裂破壊から鉄筋の引抜破壊に移行したためであると推察される。

腐食小時の付着強度とかぶりの関係を図-9 に示す。腐食時ではかぶりが大きい程、若干ではあるが付着強度も大きくなる傾向が認められた。

#### (4) 繊維混入率の影響

付着強度と繊維混入率の関係を図-10 に示す。非腐食時には繊維混入率によって付着強度に大きな変化が認められない。本実験の範囲内では、繊維混入による鉄筋とコンクリートの付着強度への悪影響は無いものと考えられるが、本実験の付着試験体の寸法は小さく、試験体内に混入される繊維量が少ないため、繊維混入の影響を受けなかった可能性も考えられる。

#### (5) 腐食の影響

非腐食・腐食時における付着応力すべり関係の一例として、速硬コンクリートの繊維混入率 1.27vol%、かぶり 30mm の結果を図-11 に示す。なお、腐食小の試験体のうち 1 体は、他の試験体と挙動が明らかに異なるため除外した。また、速硬コンクリートの繊維混入率 0vol%試験体は、電食試験時に所定の直流電流を通電できず、付着試験を実施していない。これは、速硬コンクリートの内部が非常に緻密であるため電気抵抗が大きかったことが要因として考えられる。

腐食率の増加に伴い、最大付着応力は低下することが認められた。最大付着応力以降は、腐食率が大きい場合、すべりの増加に伴う付着応力の低下は緩やかな傾向にあった。非腐食試験体と腐食試験体では載荷試験材齢が異なり、載荷試験時における圧縮強度は腐食試験体の方が大きい。また、普通コンクリートと速硬コンクリートでは同一材齢での圧縮強度が大きく異なる。そこで、圧縮強度の影響を考慮するため図-12 に示すように、各試験体の付着強度を圧縮強度の 2/3 乗で正規化した。腐食率の増加に伴い、付着強度は線型的に低下し、その低下割合は普通コンクリートと速硬コンクリートで明確な差異は認められなかった。

### 4. 考察

RC 連結ジョイントの重ね継手構造の基礎的研究として、凍結防止剤による塩害環境を考慮し、鉄筋が腐食した場合のコンクリートの付着強度を調べた。また塩害に

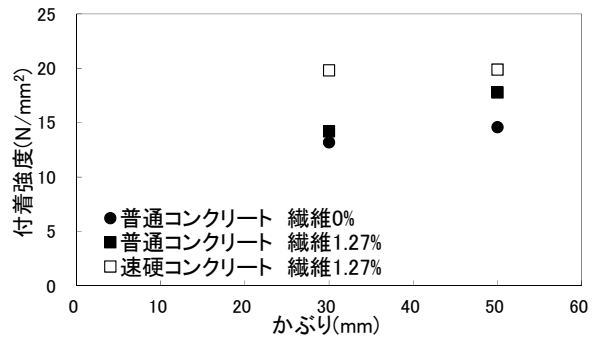


図-9 付着強度とかぶりの関係(腐食小時)

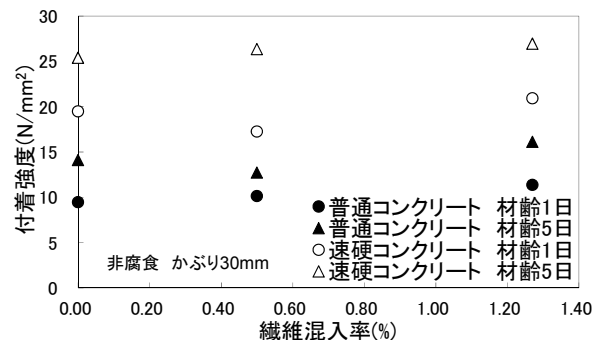


図-10 付着強度と繊維混入率の関係

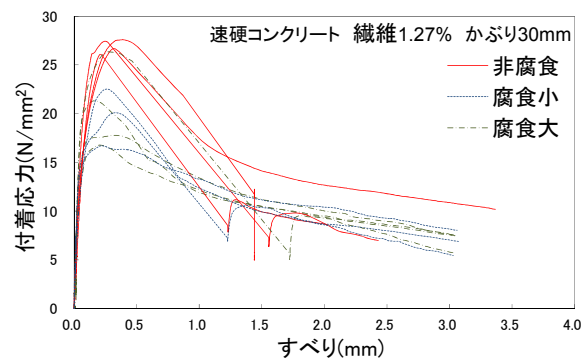


図-11 非腐食・腐食時における付着応力すべり関係

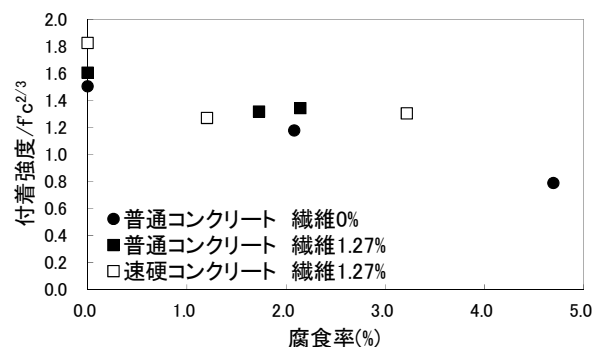
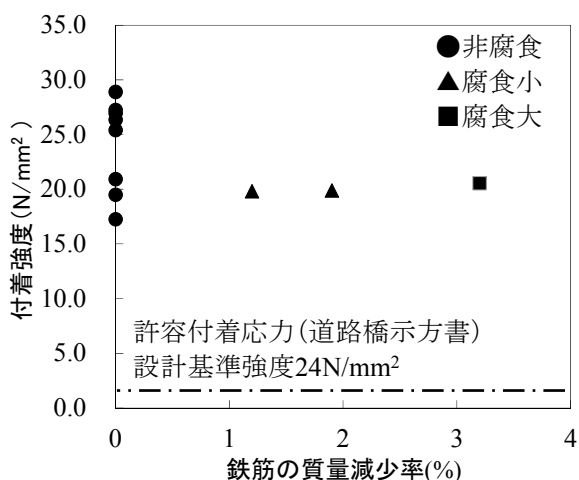


図-12 付着強度と腐食率の関係

対して、耐久性を有する RC 連結ジョイント工法を提案するために、セメント種別、有機繊維の混入率ならびに鉄筋のかぶり量を変化させ、付着試験による腐食鉄筋とコンクリートの付着特性や、塩害促進試験による塩分浸透特性を比較した。

速硬コンクリートの付着試験結果と許容付着応力の関係は図-13 に示す通りであり、鉄筋が腐食することで付着強度は減少するが、質量減少率が 3%程度でも、道



図一13 付着試験結果と許容付着応力の関係

路橋示方書<sup>8)</sup>で規定されている許容付着応力のおよそ12倍以上となることか確認された。このことから、道路橋示方書で規定される普通コンクリートと鉄筋の許容値で設計できると考えられる。

またコンクリートと鉄筋の付着特性は、速硬コンクリートは、普通コンクリートに比べて、材齢増加に伴い得られる付着強度が大きく、この特徴は鉄筋が腐食した場合でも変化が認められなかった。以上のことから、設計においてRC連結ジョイント工法の鉄筋と速硬コンクリートの付着に関する照査は、道路橋示方書の許容付着応力を準用でき、かつ凍結防止剤による塩害に対し、耐久性を有するRC連結ジョイント工法として優位であるものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では若材齢時におけるコンクリート補修材に対し、塩害促進試験による塩分分析やEPMA分析、さらに鉄筋が腐食した場合を考慮した付着試験を通じて付着特性を把握した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 若材齢時において、速硬および超速硬コンクリートは、普通コンクリートに比べ、内部構造が緻密であり塩分浸透が少ないことが確認され、凍結防止剤による塩害に対して高耐久性を有している。
- (2) 材齢増加に伴い、付着強度は緩やかに増加する傾向にあり、材齢24時間での速硬コンクリートの付着強度は普通コンクリートのおよそ2倍の値を示した。
- (3) 若材齢時では、普通コンクリート、速硬コンクリートともに緩やかに圧縮強度が増加しており、その増加率は普通コンクリートの方が速硬コンクリートに比べて大きくなる傾向が認められた。
- (4) かぶり30mmの場合、材齢120時間の時点での速硬コンクリートの付着剛性は普通コンクリートと比較して大きい。また、速硬コンクリートでは、最大

付着応力以降、急激に付着応力が低下し、普通コンクリートの付着応力すべり関係に漸近した。かぶり50mmの場合は、速硬コンクリートの方が普通コンクリートと比較して、最大付着応力以降においても付着応力は全体的に大きく、すべりの増加とともに緩やかに付着応力が低下した。

- (5) 本実験の範囲内では非腐食時において、繊維混入による付着強度への影響は認められなかった。
- (6) 腐食率の増加に伴い、最大付着応力は低下することが認められた。その低下割合は普通コンクリートと速硬コンクリートにおいてほぼ同様であった。
- (7) 鉄筋が腐食することで付着強度は減少するが、質量減少率が3%程度でも、道路橋示方書で規定されている許容付着応力のおよそ12倍以上となることが確認された。したがって、設計においてRC連結ジョイント工法の鉄筋と速硬コンクリートの付着に関する照査は、許容付着応力を準用でき、かつ凍結防止剤による塩害に対し、耐久性を有するRC連結ジョイント工法として優位であると考えられる。

## 謝辞

研究にあたり、太平洋マテリアル株式会社 郭度連 博士より多大なるご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 有馬直秀, 石川裕一, 足立嘉文: 北陸地方における道路鋼橋RC床版の健全度評価法に関する提案, 第7回床版シンポジウム, pp.131-136, 2012.6
- 2) 熊谷和夫, 高橋秀喜, 青山實伸: 北陸地方の橋梁けた端部のコンクリート部材の損傷特性と劣化推移, 土木学会論文集, No798, pp31-39, 2005.9
- 3) 財団法人 高速道路調査会: 上面増厚工法 設計施工マニュアル, 2006.11
- 4) 石川裕一, 凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の耐久性向上に関する研究, 博士学位論文, pp.177-230, 2013.9
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書「維持管理編」, pp.102, 2007
- 6) 石川裕一, 青山實伸, 倉戸伸浩, 西尾守広: 劣化した道路鋼橋RC床版の凍結防止剤による塩分浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol32, pp.1393-1398, 2010
- 7) 青山實伸, 丸山大三: 厳しい塩害環境下のコンクリート橋の塩分浸透性と耐久性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol29, pp.999-1004, 2007
- 8) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 社団法人 日本道路協会, 2012.3