

論文 若材齢時に振動を受ける鋼板と超速硬 HPFRCC との付着強度試験方法の提案とエポキシプライマーの粘性の影響

林 承燦^{*1}・大久保 仁人^{*2}・新家 一秀^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：本研究では、付着強度試験用アタッチメントを組み込んだ鋼製型枠を作製し、打設直後から 4 時間の間、定期的に振動を受けた場合の鋼板と超速硬 HPFRCC との付着性能を打設 4.5 時間後から測定した。その結果、作製した付着強度試験用型枠を用いて、若材齢時の振動状況下においても付着性能が得られることを確認できた。本試験の範囲内の振動下では、振動が付着強度に与える影響はほとんど無く、鋼板に塗布するエポキシ樹脂系プライマーの粘性について検討したところ、エポキシプライマー塗布後の打設のタイミングや打設時に生じるエポキシプライマーの流動が、付着性能に大きく影響することを明らかにした。

キーワード：付着性能、振動、超速硬 HPFRCC、鋼板、エポキシプライマー

1. はじめに

経年に伴う構造物の劣化ならびに構造物の増設の際の補修または補強工法として、コンクリート並びにモルタルによる上・下面増し厚や断面修復工法が多く用いられている。面増し厚や断面修復における補修・補強において、躯体と補修補強材の一体性の確保は、構造物の安全性や耐久性の確保の上で最も重要である。

構造物躯体がコンクリートの場合、躯体表面の脆弱層の除去および適切な凹凸を形成させることが、補修・補強材との一体性の確保に有効であると知られている。しかし、構造物躯体が鋼材の場合、表面に凹凸を形成させることが難しいため、エポキシ樹脂系のプライマーが多く用いられている。既設構造物の補修・補強においては、経済性等の理由により交通量の抑制や制限が困難であることより、列車や大型車両等による振動下での施工が多い。さらに、時間的制限等により、工期の短縮や緊急性が求められる工事においては、超速硬型セメント系補修・補強材料が使用される。

近年、短繊維を多量に混入することにより、引張応力下で疑似ひずみ硬化特性を示し、複数の微細ひび割れが分散する複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材（HPFRCC）が開発されている¹⁾。HPFRCC は一般的なセメント系材料の脆性的な性質を克服した高性能な補修材料であり、増厚および断面修復材料としての適用性についても幾つかの検討がなされている^{2),3)}。また、短繊維を多量に混入することにより、ひずみ硬化特性や複数の微細ひび割れ特性を有した超速硬 HPFRCC が開発されている。

本研究では、試作した付着強度試験用鋼製型枠を振動台の上に設置し、エポキシプライマーを用いて、振動下での鋼板と超速硬 HPFRCC との付着性状とその評価方法について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 超速硬 HPFRCC

本試験で用いた超速硬 HPFRCC は市販のもので、配合の概略を表-1 に示す。超速硬 HPFRCC のセメントには超速硬セメントを使用し、PVA 短繊維(直径 0.04mm, 長さ 12mm)を約 1.9vol%混入した。

(2) エポキシプライマー

本試験では、主剤(エポキシ樹脂)と硬化剤(変性脂肪族ポリアミン)で構成される 2 液性のエポキシプライマーを使用した。このプライマーは、早期に想定硬化特を得る目的で使用され、塗布有効時間(練混ぜ後、塗布までの施工有効時間: 10 分(20℃))や打設有効時間(練混ぜ後、モルタル打設までの施工有効時間:1 時間(20℃))が短い、材齢 4.5 時間(20℃)で約 50N/mm² の圧縮強度や約 20N/mm² の引張強度が期待できる。

エポキシプライマーの粘性の違いによる付着性能への影響を検討するため、増粘剤を添加することで粘性を変化させた。増粘剤の添加量は、主剤 100g, 硬化剤 20g に対して、0, 1, 2, 3 および 5g の 5 水準とした。エポキシプライマーの配合および粘性を表-2 に示す。

2.2 付着強度試験用型枠

図-1 に付着強度試験用鋼製型枠の形状を示す。鋼製

*1 株式会社デーロス・ジャパン 企画開発部 博士(工学) (正会員)

*2 岐阜大学工学部社会基盤工学科

*3 トーヨーマテラン株式会社 技術部 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

表－1 超速硬 HPFRCC の配合

W/B(%)	W(kg/m ³)	短繊維混入率(vol%)
42	332	1.9

表－2 エポキシプライマーの増粘剤量と粘度

配合	増粘剤 (g)	粘度(mps・s)		チクソ係数*1
		20rpm 測定	2rpm 測定	
主剤:	0	5000	9500	1.90
100g	1	6700	14500	2.16
硬化剤:	2	9000	23000	2.56
20g	3	19000	6000	3.16
	5	64000	320000	5.00

*1: チクソ係数=2rpm/20rpm

型枠は、内鋼板と外鋼板とし、内鋼板には約 50mm 間隔に 44(縦)×44(横)×15(厚さ)mm の空洞を設けた。その空洞の中に 40(縦)×40(横)×15(厚さ)mm の付着強度試験用治具(アタッチメント)が埋設される形状とした。内鋼板や付着強度試験用治具の裏面には穴を設け、外鋼板に設けた穴からボルトを通し、ボルト締めにより外鋼板に固定した。付着強度試験用型枠は、中央に間仕切り板を設け、左右対称の 2 連型枠とし、供試体を 2 個作製できるようにした。アタッチメントは、供試体 1 個に型枠底部部 12 箇所と側面部の片側に 6 箇所の合計 18 箇所設置した。内鋼板にアタッチメントの埋設後の隙間は、エポキシプライマーおよびモルタルが隙間に入らないようにゴムパッキンを用いて漏れ止め処理を行った。アタッチメント以外の鋼板部分はエポキシプライマーおよびモルタルが付着しないようにマスキングテープを貼り付けた。アタッチメント部の概念図を図－2 に示す。

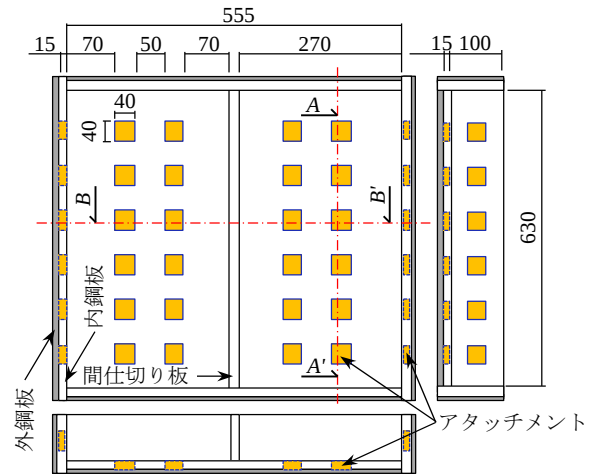
2.3 試験方法

(1) 供試体作製方法

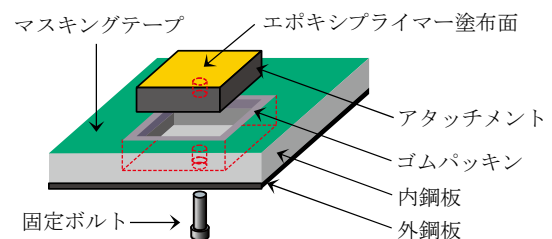
本試験に用いた試験条件を表－3 に示す。振動を与える全ての試験において、振動条件を一定とした。エポキシプライマーは、増粘剤の添加量を変えて 5 水準とした。エポキシプライマーは練り混ぜ後、直ちにアタッチメントに塗布した。超速硬 HPFRCC の打設は、アタッチメントにエポキシプライマー塗布直後、10 分後ならびに 30 分後の 2 水準とした。超速硬 HPFRCC の打設直後から振動を与え、材齢 4 時間後に型枠を外し、材齢 4.5 時間、1 日および 7 日目に付着強度試験を行った。また、一部の試験条件において、振動無についても検討を行った。

(2) 振動条件

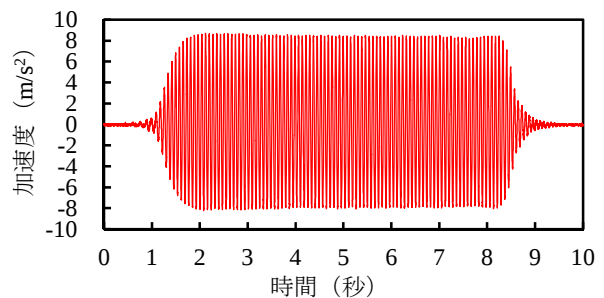
付着強度試験用鋼製型枠に取り付け加速度計により計測した加速度と振動時間との関係を図－3 に示す。付着強度試験用型枠は、振動台の上にゴム板を敷き、その上に型枠を設置した後、型枠と振動台の台座を鋼製の



図－1 付着強度試験用型枠の形状



図－2 アタッチメント部の概念図



図－3 振動試験時の加速度

表－3 試験条件

区分	増粘剤添加量	HPFRCC打設間隔*1	振動条件	付着試験材齢
S0-10,30	0g	10 分,30 分	HPFRCC 打設直後～4 時間・振動の周期: 5 分毎に 8 秒間	4.5 時間 1 日 7 日
S1-10	1g	10 分		
S2-10	2g	10 分		
S3-10,30	3g	10 分,30 分		
S5-10,30	5g	10 分,30 分		
Nc0-10	0g	10 分	振動無	4.5 時間

*1 エポキシプライマー塗布後からの超速硬 HPFRCC を打設するまでの時間間隔

治具を用いて、締め付けて固定した。付着強度試験用鋼製型枠を振動台に固定させることで振動を与える構造とした。付着強度試験用鋼製型枠に与えた振動は、鉄道橋での列車通過間隔やその時の橋梁床板部の振動履歴等を

考量し、加速度を 8m/s^2 、周波数を 12Hz 程度とし、振動は 5 分毎に 8 秒間与えた。振動を与える時間は、超速硬 HPRCC の打設直後から、4 時間とした。

(3) 付着強度試験方法

付着強度試験には、建研式付着強さ試験器を用いた。脱型直後の供試体および付着強度試験状況を写真-1 に示す。



写真-1 脱型後の供試体と付着試験状況

3. 試験結果および考察

3.1 超速硬 HPRCC の圧縮および引張性能

本試験で用いた超速硬 HPRCC のフレッシュ状態の物性ならびに圧縮強度を表-4 に示す。材齢 7 日と 28 日で、ダンベル型供試体（引張試験領域の寸法：長さ 80mm 、幅 30mm 、厚さ 15mm ）を用いて一軸引張試験により求めた引張応力-ひずみ関係を図-4 に示す。超速硬 HPRCC の流動性は、フロー値が 180mm 程度、可使時間が約 1 時間程度で、材齢 3 時間で 10N/mm^2 以上の圧縮強度が得られた。また、短繊維補強により優れた引張ひずみ硬化特性や複数の微細ひび割れ特性を有した材料であった。

3.2 打設時間と付着強度

外気温 20°C でのエポキシプライマーのゲル化開始時間（塗料乾燥時間測定器による 1 次線状痕跡時間）を表-5 に示す。表には、エポキシプライマー練混ぜ直後直ちに鋼板に塗布し、ゲル化開始時間（2 時間後）とゲル化開始時間の $1/2$ の時間（1 時間後）で超速硬 HPRCC を打設した場合の材齢 1 日での付着強度を示す。

本試験で用いたエポキシプライマーのゲル化開始時間は 2 時間程度であったが、ゲル化開始時間に超速硬 HPRCC を打設した場合の付着強度は 0.1N/mm^2 とほとんど付着が無い状況であった。また、その破壊箇所も、超速硬 HPRCC とエポキシプライマーとの境界面であった。しかし、ゲル化開始時間の $1/2$ の時間で超速硬 HPRCC を打設した場合、付着強度は 1.1N/mm^2 で、破壊箇所は超速硬 HPRCC 内であった。セメント系材料における新旧コンクリートやモルタルの付着は、旧の硬化体の凹凸面に打設された新コンクリートやモルタルの硬化後の絡み合いによる機械的な結合により付着力が得られる。しかし、硬化したエポキシ系の表面は緻密で、コンクリートやモルタルのセメント粒子が侵入して絡み合いの形成が可能な凹凸が無い非常に滑らかな面で、機械的な結合が期待できないため付着し難い。ゲル化開始時間でのエポキシプライマーの表面は硬化後の表面性状とほぼ同程度となり、超速硬 HPRCC との付着が得られなかったと考えられる。

以上より、エポキシプライマーを打継接着材として一体性を得るためには、ゲル化開始時間前に超速硬

表-4 超速硬 HPRCC のフレッシュ性状と圧縮強度

可使時間*1	フロー値	材齢	圧縮強度 (N/mm^2)
50～70 分 (15°C)	180	3 時間	11.2
		4.5 時間	14.8
		1 日	18.0
		7 日	33.5
		28 日	48.0

*1 超速硬 HPRCC の打設及び仕上げ可能時間

表-5 エポキシプライマーのゲル化時間と付着の関係

ゲル化 時間*1	HPFRCC 打設間 隔*2	付着強 度 (N/mm^2)	破壊箇所の割合	
			HPFRCC	境界面*3
2 時間 (20°C)	2 時間	0.26	10%	90%
		0.02	0%	100%
		0.00	10%	90%
	1 時間	1.01	100%	0%
		1.08	100%	0%
		1.24	100%	0%

*1 エポキシプライマーのゲル化開始時間

*2 エポキシプライマー塗布後からの超速硬 HPRCC を打設する迄の時間間隔

*3 超速硬 HPRCC とエポキシプライマーの境界面

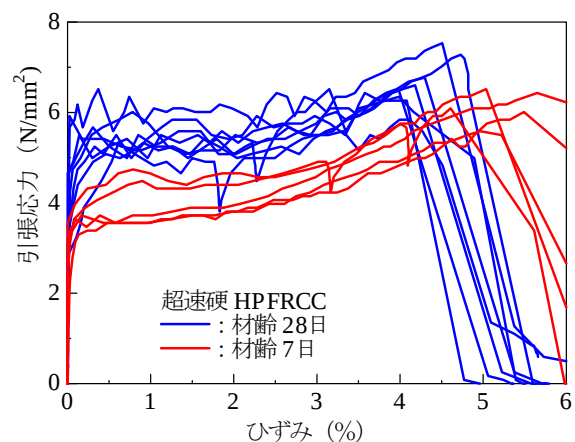


図-4 一軸引張試験による引張応力-ひずみ関係

HPFRCCを打設することが最も重要であることが分かった。また、外気温 20℃以下における 5℃ごとのゲル化開始時間の計測を行った結果、気温が低いほどゲル化開始時間が長くなることを確認した。

3.3 エポキシプライマーの粘性と付着強度

エポキシプライマーの添加量ごとの付着強度試験結果を図-5 に示す。全ての試験条件において、経過時間に伴う水和反応の進行により付着強度が増大する傾向であったが、付着強度のバラツキは大きい結果となった。付着強度のバラツキの原因としては、建研式付着強さ試験の場合、非常に簡易的な試験方法であるが、付着強度試験面に直角に建研式付着強さ試験装置を設置し引張試験を行うことが難しいため、偏心による付着強度試験箇所での応力集中の影響や、付着強度を破壊断面積ではなくアタッチメントの断面積で求めることによる影響が考えられる。

エポキシプライマー塗布 10 分後に超速硬 HPFRCC を打設したケースにおいては、増粘剤無の場合、複数の付着強度試験個所で、材齢 4.5 時間で付着強度 0.5 N/mm² 以下、材齢 1 日で付着強度 1.0 N/mm² 以下であった。しかし、増粘剤無でエポキシプライマー塗布 30 分後に超速硬 HPFRCC を打設した場合は、他のケースとほぼ同程度の付着強度が得られた。これらは、付着強度試験用型枠の底面部の付着強度の傾向であり、付着強度試験用型枠の側面においては、増粘剤無の場合も他のケースとほぼ同程度の付着強度が得られた。

増粘剤無のエポキシプライマー塗布 10 分後に超速硬 HPFRCC を打設した供試体の付着強度試験後の写真を写真-2 に示す。エポキシプライマーは付着強度試験用アタッチメント上面のみに塗布したが、アタッチメントの周辺にもエポキシプライマーの痕跡が観察された。超速硬 HPFRCC は付着強度試験用型枠の中央から流し込む方法に打設を行っており、打設時の超速硬 HPFRCC の流れにより、アタッチメント上面のエポキシプライマーが押し出されることで、アタッチメントの周辺にもエポキシプライマーの痕跡が観察されたと考えられる。また、アタッチメント周辺のエポキシプライマーの痕跡は型枠中央から両端部に広がる方向で、超速硬 HPFRCC の流し込む時の流れ方向と同じ方向であった。以上より、増粘剤無の場合、エポキシプライマーの粘性が低いため、アタッチメント上面のエポキシプライマーが超速硬 HPFRCC に流されることより付着強度の低い個所が多く表れたと考えられる。しかし、付着強度試験用型枠の側



写真-2 付着試験後の供試体

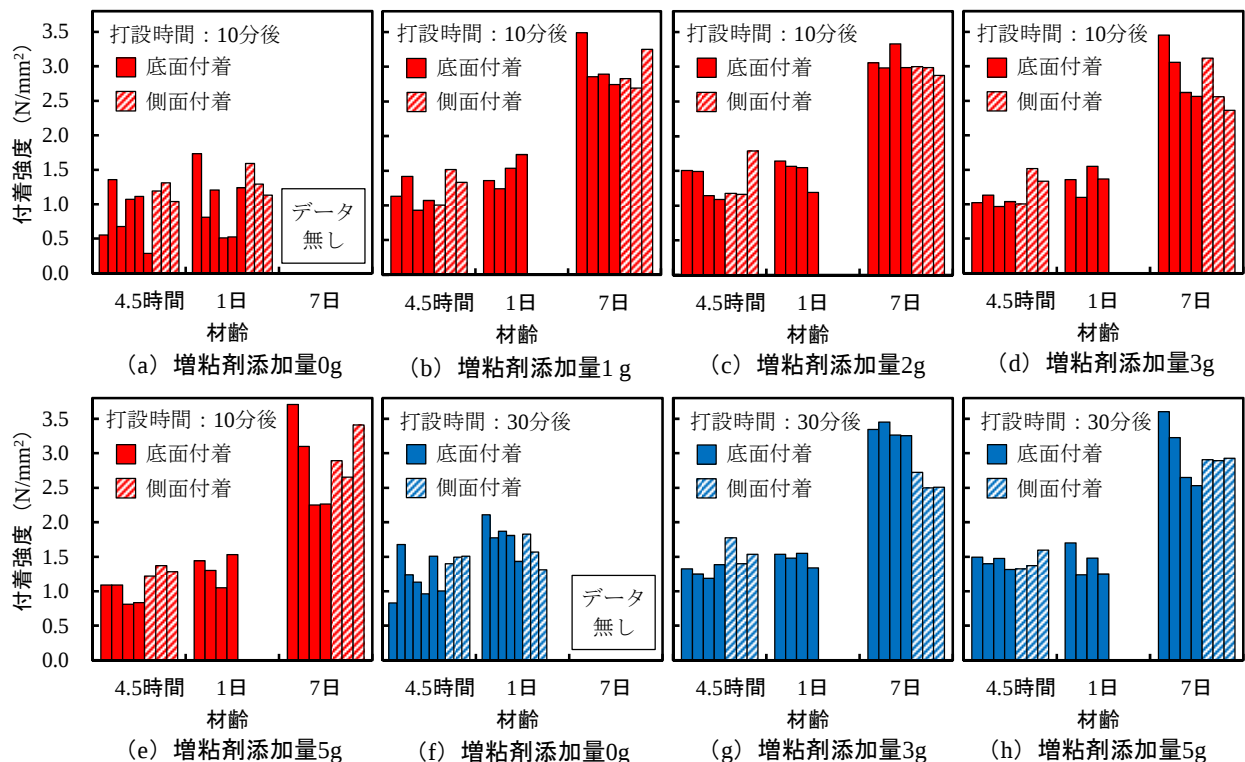


図-5 エポキシプライマー増粘剤添加量毎の付着強度

面においては、超速硬 HPFRCC の打設時の流れによる影響を受け難い状況であったため、増粘剤無の場合においても増粘剤を添加した場合と同程度の付着強度が得られたと考えられる。

一方、増粘剤を 3g あるいは 5g と多量に添加して高粘性とし、エポキシプライマー塗布直後に超速硬 HPFRCC を打設した場合には、増粘剤が多く粘性が高いほど付着強度も高くなる傾向であったが、一部の箇所において低付着箇所が観察された。しかし、増粘剤添加量を 0g と 1g の少量にした場合、エポキシプライマーの粘性は高くないが、超速硬 HPFRCC の打設を塗布後 30 分に遅らせることで、多量の増粘剤混入と同程度の付着強度が得られた。これは、エポキシプライマー塗布後、時間の経過とともに粘性が増大した結果であると考えられる。増粘材添加により粘性を増大させた場合、塗布後の打設までの時間の検討は、作業性の低下や塗布ムラをなくす上で重要であるとする。また、エポキシプライマーへの増粘剤添加による粘性の増大と塗布後の経過時間による粘性の増大とが付着性状に与える影響については、今後検討が必要である。

3.4 エポキシプライマーの粘性と付着破壊箇所

付着強度試験後の破壊箇所を目視で観察した。エポキシプライマーの層間破壊の観察は目視では困難であり、超速硬 HPFRCC の打設の際に流されたエポキシプライマーも多いことから、付着強度試験後のアタッチメントに付着されている超速硬 HPFRCC の面積の割合と付着強度の関係について検討を行った。付着強度試験後のアタッチメントの写真を写真-3 に、アタッチメントに付着している超速硬 HPFRCC の破壊面積の割合と付着強度の関係を図-6 に示す。付着破壊状況は、付着強度試験後のアタッチメントの全面に超速硬 HPFRCC が付着しているケース、一部に付着しているケース、ほとんど付着していないケースの 3 ケースに大きく分類される傾向であった。アタッチメントに付着している超速硬 HPFRCC の面積割合が高いほど付着強度も増加する傾向で、超速硬 HPFRCC の面積割合が 90% 以上では、面積割合が 100% の場合とほぼ同程度の付着強度が得られた。

材齢 7 日の超速硬 HPFRCC の面積割合 100% での付着強度は約 3N/mm^2 であり、一軸引張試験における材齢 7 日の初期ひび割れ発生強度(図-4)とほぼ同程度であった。エポキシプライマーが超速硬 HPFRCC の打設の際に流され、アタッチメント上面にエポキシプライマーの無塗布領域が生じる。その無塗布領域では超速硬 HPFRCC と鋼板との境界面での破壊となり、アタッチメントに付着している速硬 HPFRCC の面積割合も低下する結果となったと考えられる。これより、エポキシプライマーが超速硬 HPFRCC と鋼材との境界面の付着力を増大させ、その破壊箇所は超速硬 HPFRCC での破壊となり、付着強度も増加したと考えられる。

3.5 振動による影響

振動無の静置状態と打設直後から 4 時間の間、5 分毎に 8 秒間振動を与えた場合とで振動の有無による付着性能の違いについて検討を行った。試験はエポキシプライマーへの増粘剤の添加量 0g、エポキシプライマー塗布後の超速硬 HPFRCC の打設時間を 10 分とし、材齢 4.5 時間後に付着試験を行った。振動の有無と付着強度の関係を図-7、付着強度試験後の写真を写真-4 に示す。

付着強度のバラツキは、振動無の場合は、測定位置が底面に比べ側面が大きく、振動有の場合は、側面に比べ底面が大きい結果となった。また、平均付着強度は、振動無の底面 0.97N/mm^2 、側面 0.62N/mm^2 、振動有の底面 0.84N/mm^2 、側面 1.18N/mm^2 となり、振動無の側面の付着強度が若干小さい結果となったが、他は同程度で振動の影響はほとんど無かった。付着強度試験後の破壊箇所においては、底面の場合、振動有および振動無ともに付

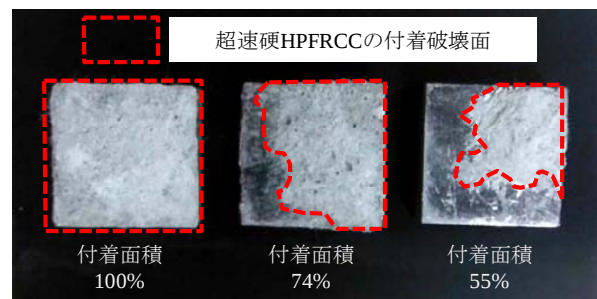


写真-3 付着試験後のアタッチメント

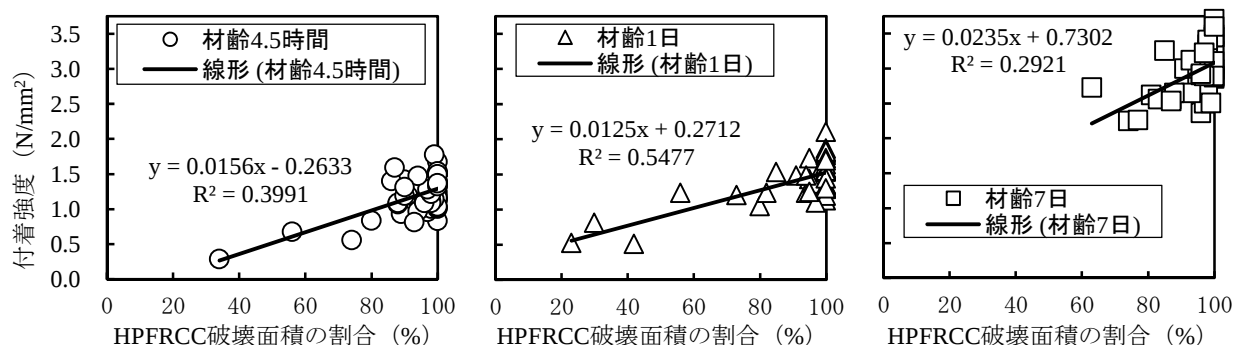


図-6 超速硬HPFRCCの破壊面積の割合と付着強度の関係

着試験後アタッチメントに付着している超速硬 HPRCC の付着面積の割合が 30～100%範囲とバラツキが大きい。しかし、側面の場合、超速硬 HPRCC の付着面積の割合が 85～100%範囲とバラツキが小さい結果となった。振動無の側面における、超速硬 HPRCC の破壊面積の割合が 85%以上であるが、付着強度のバラツキが大きく、付着強度が低い。付着試験前の型枠脱枠時に付着試験箇所の 50%のアタッチメントが外れる結果となったことから、脱枠時に型枠に加えた力がアタッチメントにも作用し、超速硬 HPRCC の破壊面積の割合が 85%以上にもかかわらず付着強度の値が低くなったものと考えられる。

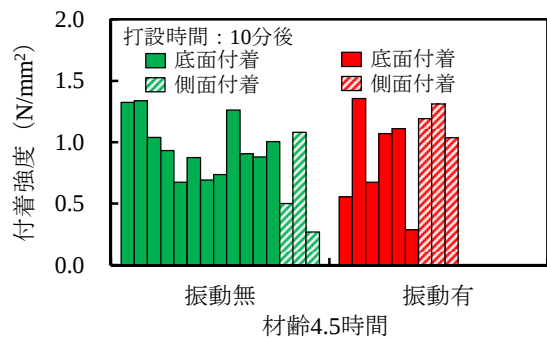
また、付着試験後のエポキシプライマーの痕跡においては、振動の有無ともに、底面の場合、アタッチメントの周辺で、型枠中央から外側方向に、側面の場合、アタッチメントの周辺から底面方向にエポキシプライマーが広がっている痕跡が観察された。本試験における振動は上下方向の振動であるが、振動有の側面の場合においてもアタッチメントの上面方向へのエポキシプライマーの広がりがほとんどない。以上より、付着強度への影響は、底面では、打設時の超速硬 HPRCC の流れによる影響が大きく、側面では、エポキシプライマー塗布後の垂れによる影響が大きいことが推定できる。

4. まとめ

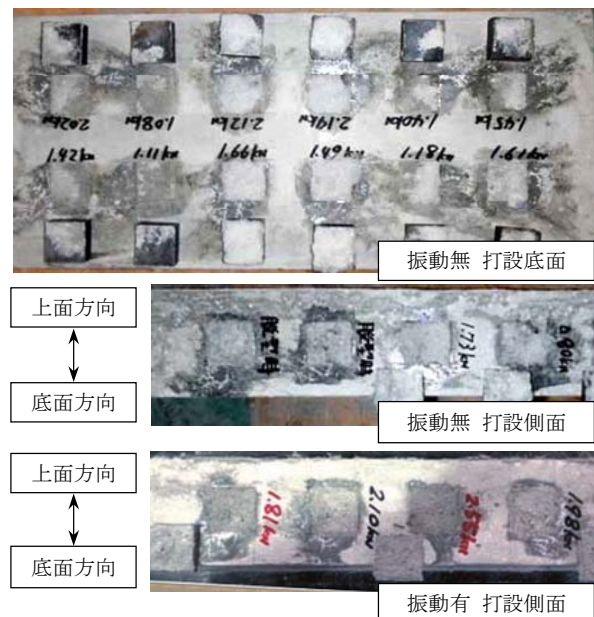
本試験では、付着強度試験用鋼製アタッチメントを組み込んだ付着強度試験用鋼製型枠を作製し、エポキシプライマーを用いた振動下での鋼板と超速硬 HPRCC との付着性状とその評価方法について検討を行った。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 作製した付着強度試験用鋼製型枠を使用し、鋼板と超速硬 HPRCC との付着性能を確認できた。若材齢時の振動状況下においても付着性能を確認できた。
- (2) エポキシプライマーを打継接着材として用いる場合には、エポキシプライマーのゲル化開始時間前に超速硬 HPRCC を打設することが最も重要であることが分かった。
- (3) 超速硬 HPRCC の打設時の流れ方向にエポキシプライマーが押し出された場合、エポキシプライマーの無塗布領域が生じ、付着力が低下する傾向が見られた。特にエポキシプライマーの粘性が低い場合は、その傾向が顕著に見られた。
- (4) エポキシプライマーの粘性が低い場合においても、超速硬 HPRCC の打設を 30 分程度遅らせることで、多量の増粘剤混入と同程度の付着強度が得られた。
- (5) 付着強度試験後のアタッチメントに付着している超速硬 HPRCC の面積率が高いほど付着強度も増大する傾向があり、超速硬 HPRCC の付着面積率が 90%

以上では、ほぼ同程度の大きな付着強度が得られた。



図－7 振動の有無と付着強度の関係



写真－4 振動の有無と付着強度試験後の写真

- (6) 本試験の範囲内の振動下では、超速硬 HPRCC の硬化時における振動が付着強度に与える影響はほとんど無く、エポキシプライマーの粘性および打設時の超速硬 HPRCC の流れによる影響が大きい結果となった。

参考文献

- 1) 土木学会(編)：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー127，316 pages，2007.3
- 2) 加藤久也，森山守，林承燦，六郷恵哲：複数微細ひび割れを導入した HPRCC の耐凍害性ならびに引張性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp. 333-338，2007
- 3) 清水英樹，幸左賢二，合田寛基，佐々木達生：高靱性セメントの柱外周面使用方法に着目した耐震補強効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1096-1074，2012.7