

# 床版上面増厚工法に関する超速硬SFコンクリート 付着強度発現機構に関する研究

横山好幸<sup>1</sup>・大友弘志<sup>2</sup>・半田 実<sup>3</sup>・五味秀明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本道路公団名古屋管理局技術部調査役 (〒491 一宮市丹陽町九日市場)

<sup>2</sup>日本道路公団東京第一管理局横浜管理事務所改良助役 (〒227 横浜市緑区長津田町)

<sup>3</sup>電気化学工業株式会社青海工場(株)・特混研究所研究部長代理 (〒949-03 西頸城郡青海町)

<sup>4</sup>正会員 電気化学工業株式会社特混技術課担当課長 (〒100 千代田区有楽町1-4-1)

本研究は、上面増厚工法用鋼繊維補強超速硬コンクリート（以下、超速硬SFコンクリートと記す）の下地コンクリートとの付着特性を明らかにするためにに行った。その結果、超速硬SFコンクリートの付着強度は、下地コンクリートの品質の影響を受け、下地コンクリートの圧縮強度が高ければ高いほど付着強度は高くなるとともに、スランプの経時変化に伴い付着強度は低下することが判明した。これには、超速硬セメントのエトリンガイトの生成時期および量が影響していることが明らかになった。

**Key Words :** concrete overlay, ultra rapid hardening cement, steel fiber reinforced concrete, bond strength, ettringite, SEM

## 1. 研究経緯

### (1)背景

近年のめざましいモータリゼーションの発展により我が国の高速道路は日本の大動脈として、社会、経済活動に果たす役割は増すばかりであり、今や生活に欠かせない重要輸送施設となっている。日本道路公団（以下公団という）の例を述べると、平成7年3月末現在で公団が管理している高速道路の総延長は、5712kmに及んでおり、貨物の輸送量を例として挙げるならば、図-1に示すとおり、貨物全体に対する高速道路の分担率は20.2%に達している<sup>1)</sup>。このように、高速道路が社会経済に対する重要性を増大していくことは、高速道路の存在理由が社会的に認知されてきた証明とも考えられる。しかし巨大な社会資本としての高速道路を如何に健全なまま未来へ引き継いでいくか、道路管理者の果たさなければならない責務は、極めて大きなものとなってきている。

公団の管理している高速道路の構成比率は、図-2に示すとおりである。橋梁の総延長827.4km、橋数6,490橋に達し、およそ1.5橋/kmの割合で建設され、管理に移行している状況にある。また、橋種別の延長比率は、RC橋32.5%、PC橋27.3%、鋼橋40.2%となっている。

また、現在までに橋梁の設計基準となる「道路橋示方書」は時代のニーズおよび経験に基づき変遷が重ねられ設計荷重についても名神時代の設計活荷重(TL-20<sup>1</sup>)、東名のTL-20、昭和48年からのTT-43、平成5年からTL-25と社会における車両の大型化の要請に対応し、橋梁の設計荷重は大きくなってきている。

公団においては、補強の必要な橋梁について損傷の程度を考慮しながら、鋭意TL-25荷重に対応すべく橋梁の補強・補修を進めているところであるが、橋梁の補強方法には橋の種類、構造等により種々の方法（表-1）があり、その損傷の度合い、応力照査の結果、交通量等の総合的な判断により補強方法を決定して条件の整った橋梁から工事を漸次行っている状況にある。



図-1 輸送機関別貨物輸送量 (トンキロ)

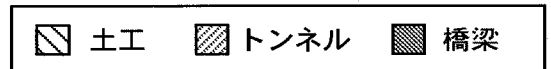


図-2 高速道路の工種別構成比

表-1 橋梁補強方法

橋種	補強方法
RC橋	上面増厚（無筋・有筋）・鋼板接着・FRP
PC橋	上面増厚（無筋・有筋）・外ケーブル・鋼板接着・FRP
鋼橋	桁増設・桁補強 上面増厚（無筋）・外ケーブル

また、高速道路における工事の問題点として、走行車両に極力影響を及ぼさない、交通規制を伴わない工事を行う必要がある、基本的には橋梁下面からの工事を実施し、やむを得ない場合には、集中工事等の施工時間の限られた短期決戦型の工事を行っている状況にある。

## (2) 動機

モータリゼーションの発展による自動車交通の伸びと車両の大型化は、構造物の維持管理を考えるうえで非常に大きな問題となってきた。すなわち、当初の設計時には考えられなかった交通量や車両の重量化が、直接輪荷重を受ける床版、それを受ける桁、支承に対して、極めて大きな損傷を与えており、維持管理上の重要な問題となっている。これら損傷を受けた橋梁の補強方法は種々検討されているが、その中でも直接輪荷重を受ける床版の損傷対策として、床版上面増厚工法が桁の補強と併用して採用されている状況にある。

平成6年春、名神高速道路の彦根管理事務所管内における橋梁で、床版上面増厚工事が2件実施された。その工事は、A社がAタイプの超速硬セメントを使用し、B社がBタイプの超速硬セメントを使用するという、セメント種別の異なる超速硬SFコンクリートが設計施工されたのである。工事は双方とも入念に施工され短期間に無事終了したが、新旧床版間のコンクリート付着力に、設計基準を上回ったものの差異が見られた。後述の直接引張接着試験による試験結果を表-2に示す。また、平成7年度名神リフレッシュ工事における付着力試験結果を表-3に示す。

床版上面増厚工法は、旧床版コンクリートの上に新設コンクリートを打設するため、新旧コンクリートが二層構造の版として機能する。この二層の間の「付着力=せん断抵抗力」が一体化された床版の耐力を左右することとなる。計算では、18cmの床版に5cm増厚するときの必要付着力は $0.3 \text{ N/mm}^2$ 程度と考えられる<sup>2)</sup>が、当然ながら床版の構造や打継ぎ目の位置等により必要とされる付着力は異なってくる。なお、公団では安全率等を考慮して $1 \text{ N/mm}^2$ を付着力の最小値としている<sup>3)</sup>。

新旧コンクリートの付着力は、施工業者のノウハウはあるものの、コンクリートフィニッシャの振動エネルギーにより影響を受けることの研究<sup>4), 5)</sup>はあった。しかし、基本的にはセメントが違っても同一の付着強度が発現すると考えていたので、付着メカニズムも含め、付着発現機構についてを究明することとした。

## 2. 床版上面増厚工法および超速硬セメントの硬化メカニズムのモデル化

表-2 平成6年度 強度試験結果

セメント種別	付着強度 (材齢7日)	圧縮強度 (材齢3時間)
Aタイプ	1.13	25.6
Bタイプ	3.20	28.5

(単位:  $\text{N/mm}^2$ )

表-3 平成7年度 付着強度試験結果

セメント種別	A社 (t=5cm)	B社 (t=5cm)	C社* (t=10cm)
Aタイプ	—	1.73	1.58
Bタイプ	$\geq 1.75^{**}$	—	—

材齢7日 \* : C社は鉄筋あり (単位:  $\text{N/mm}^2$ )  
\*\* : 下床版から破断したため、 $\geq$ と記載

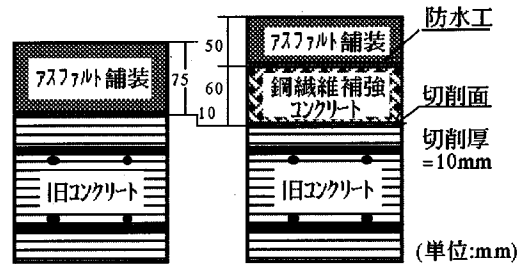


図-3 施工断面例

### (1) 床版上面増厚工法

床版上面増厚工法は、図-3に示すとおり、床版断面を増加させるものであり、その時新旧コンクリートの一体性が耐力に影響を及ぼすことはもちろん、上面への防水工を行うことにより耐久性を確保することを基本としている。

現時点での上面増厚工法の検討すべき問題点は、下記のとおりである。

①事前調査法 (RCレーダー、弾性波、赤外線) の確立: 床版の現況を把握するため、RCレーダー等により舗装厚、鉄筋の位置、コンクリートの損傷度を事前に調査する。

②橋面舗装およびコンクリートの切削、研掃手法の確立: 切削によるコンクリート中のマイクロクラック・劣化コンクリートをウォータージェット等により効果的に除去する。

③付着力確保: 新旧コンクリートの確実な付着力の確保

④施工法の向上

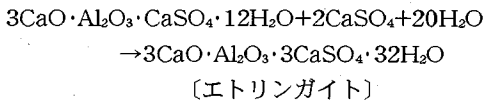
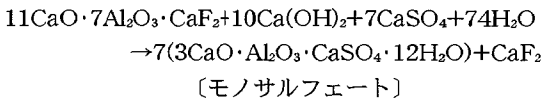
以上の内、付着力に着目し研究を進めた。

### (2) 超速硬セメントの硬化メカニズムのモデル化

通常の土木・建築工事に使用されている普通ポルトランドセメントは、一般には材齢28日における強度を基準としている。ポルトランドセメントの主要鉱物はけい酸三石灰( $\text{C}_3\text{S}$ )、けい酸二石灰( $\text{C}_2\text{S}$ )、アルミン酸三石灰( $\text{C}_3\text{A}$ )、鉄アルミン酸四石灰( $\text{C}_4\text{AF}$ )であ

る。ちなみに、20N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度を得るのに、少なくとも普通ポルトランドセメントでは3日以上、早強ポルトランドセメントでは1.5日以上、超早強ポルトランドセメントでは12時間以上を必要とするが、2～3時間で20N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度を得るセメントとして超速硬セメントがある。現在我が国で市販されている超速硬セメントは、超速硬性を付与させる成分としてカルシウムフルオロアルミネート(C<sub>11</sub>A<sub>7</sub>・C a F<sub>2</sub>)あるいは非晶質カルシウムアルミネート(C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>)を利用している2種類のものがある<sup>6)</sup>。(本報告では前者をAタイプ、後者をBタイプとする。)

Aタイプは、ポルトランドセメントの主要鉱物であるC<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S、C<sub>4</sub>A Fの他に、超速硬成分として活性化されたカルシウムフルオロアルミネートを含有するクリンカーを粉砕して製造した特殊セメントで、ポルトランドセメントと同様キルン法で製造している。この水和反応モデルを図-4に示す。注水によりセメント中のカルシウムフルオロアルミネートが直ちに溶解し、けい酸三石灰の溶解により生成したCa(OH)<sub>2</sub>と反応してカルシウムアルミネート水和物を生成する。これらの水和物は、C a S O<sub>4</sub>と反応し、早期にモノサルフェート水和物(C<sub>3</sub>A・C a S O<sub>4</sub>・12H<sub>2</sub>O)またはエトリンサイト(C<sub>3</sub>A・3C a S O<sub>4</sub>・32H<sub>2</sub>O)を生成し、初期強度を発現する。



Bタイプは、超速硬成分として非晶質カルシウムアルミネート(C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>)と早強ポルトランドセメントを混合した超速硬セメントで、その水和反応モデルを図-5に示す。すなわち、注水によりセメント中の非晶質カルシウムアルミネートが直ちに溶出し、早強ポルトランドセメントの溶解により生成した水酸化カルシウムと反応してカルシウムアルミネート水和物を生成する。さらに、溶解したC a S O<sub>4</sub>と反応し、これらの水和物はモノサルフェート水和物(C<sub>3</sub>A・C a S O<sub>4</sub>・12H<sub>2</sub>O)、またはエトリンサイト(C<sub>3</sub>A・3C a S O<sub>4</sub>・32H<sub>2</sub>O)に変化し、初期強度を発現する。

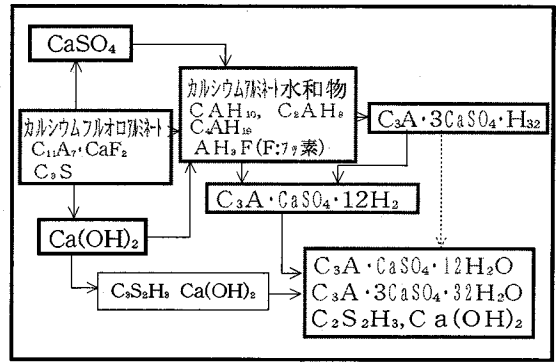
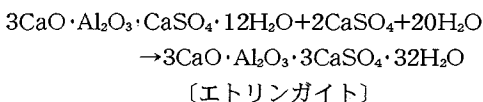
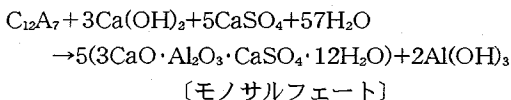


図-4 Aタイプの水和反応モデル

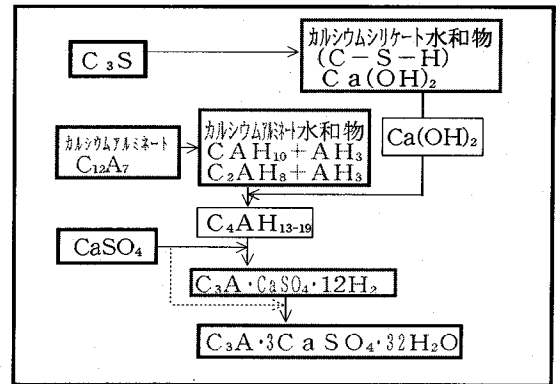


図-5 Bタイプの水和反応モデル

### 3. 試験概要

#### (1) 使用材料およびコンクリート配合

使用した超速硬セメントのAタイプとBタイプの化学成分を表-4に示す。骨材は、細骨材、粗骨材とも新潟県姫川産のものを使用した。減水剤は、β-NS系の高性能減水剤を用い、鋼繊維は、ストレート鋼繊維(φ0.6×30mm)とした。使用材料の物性値を表-5に示す。

下地コンクリートの配合は表-6に示すとおりである。打継ぎコンクリートは、配合A、配合Bの2種類とし、配合は表-7に示す。

#### (2) 試験条件

付着強度試験の要因と水準を、表-8に示す。

超速硬セメントは、Aタイプ、Bタイプの2種類とし、下地コンクリートの強度レベルによる打継ぎコンクリートの付着強度への影響を確認するため、下地コンクリートの目標強度を、25、35、45および100N/mm<sup>2</sup>の4種類とした。材齢28日経過した下地コンクリートに超速硬SFコンクリートを打ち継いだ。なお、供試体の個数は3体とし、数値は平均値を示す。

表-4 超速硬セメントの化学成分

種別	lgloss	insol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> Oeq
Aタイプ	0.6	0.1	13.8	11.4	1.5	59.1	0.9	10.2	0.8
Bタイプ	2.0	0.2	15.7	9.7	2.0	58.2	0.8	9.7	0.7

表-5 使用材料

記号	名称	比重	物性ほか
C	超速硬Aタイプ	3.04	比表面積5,300 [cm <sup>2</sup> /g]
	超速硬Bタイプ	3.04	比表面積4,700 [cm <sup>2</sup> /g]
S	細骨材	2.62	新潟県姫川産川砂, 吸水率2.04 [%], 実績率65.0 [%], F.M. 2.82
G	粗骨材	2.65	新潟県姫川産川砂利, 吸水率1.21 [%], 実績率60.9 [%], F.M. 6.76
HWRA1	高性能減水剤1	1.21	ナフタリルスルホン酸ホルマリン高縮合物塩
HWRA2	高性能減水剤2	1.14	アルキルアリスルホン酸塩+高性能リガコンスルホン酸塩
SF	鋼繊維	7.85	φ0.6×30mm

表-6 下地コンクリートの配合

目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	AE減水剤
25	25	12	4±1	66.0	42	160	244	776	1086	0.976
35		±		46.4	42	159	346	699	1083	1.384
45		2.5		38.4	39	163	429	651	1052	1.716
100	-	-	-	15.0	-	高強度プレミックスモルタル使用				

表-7 打継ぎ(超速硬)コンクリートの配合

配合名	セメントの種類	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )				
							W	C	S	G	HRA
配合A	Aタイプ	20	5±1.5	2±1	38	58	156	434	1008	739	8.68
配合B	Bタイプ				37	55	158	450	944	781	9.00

表-8 要因と水準

要因	水準
超速硬セメント	2 Aタイプ Bタイプ
下地コンクリートの強度	4 25, 35, 45, 100 N/mm <sup>2</sup>
練置き時間	3 直後 30分 60分

超速硬セメントの混練後の水和反応による流動性の経時変化が、付着強度に及ぼす影響を確認するため、打継ぎコンクリートの練置き時間を、練上がり直後、30分後、60分後の3水準とした。

### (3) 試験項目および試験方法

#### a) フレッシュコンクリートの性状

超速硬コンクリートの混練から練置き60分までの経時変化をスランプ試験(JIS A 1101)により測定した。コンクリートの可使時間(作業可能時間)は、試験方法に規定はないものの、コンクリートの温度上昇により判定した。すなわち、練上がり温度より1℃上昇をゲ

ル化時間(流動性を失う時間)、4℃上昇を硬化時間とした。

#### b) 圧縮強度

下地コンクリートおよび打継ぎコンクリートともφ10×20cmの円柱供試体で求めた。打継ぎコンクリートである超速硬SFコンクリートは、材齢3時間、1日、7日、28日で圧縮強度試験(JIS A 1108)を実施した。

#### c) 付着強度

下地コンクリートの表面は電動式高速多針タガネを用いて均一にチップングした。超速硬SFコンクリートは、練上がり直後、30分後、60分後の3水準で厚み6cmで打ち継いだ。打継ぎ際の下地コンクリートの表面は乾燥状態とした。材齢3日で打継ぎコンクリート表面より下地コンクリートまでコアリング(φ10cm)して供試体の上下端に直接引張接着試験用アタッチメントを樹脂系接着剤で接着した。打継ぎコンクリート打設後材齢7日で付着試験を実施し、付着試験後の破断

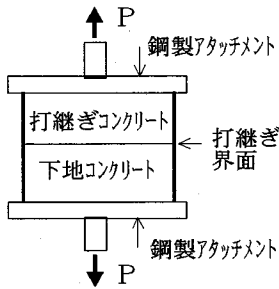


図-6 付着試験方法

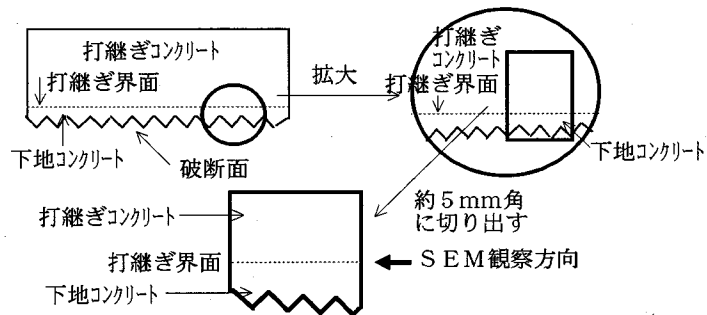


図-7 SEM観察用サンプル

面の状態を目視観察するとともに、走査型電子顕微鏡観察用試験片を採取した。付着強度試験方法は、日本道路協会『舗装試験法便覧』の「コンクリート床版防水層の引張接着試験方法」(図-6)による。

d)付着界面の走査型電子顕微鏡観察

付着強度試験後の破断した供試体の打継ぎ界面付近より、図-7に示す通り、約5mm角の観察用サンプルを切り出し、打継ぎコンクリート界面および破断面を観察した。使用した走査型電子顕微鏡は、S-800である。また、SEMによる結果は極一部であって信頼性が劣り、定量的評価に欠けるという指摘があるがここでは打継ぎコンクリート界面および破断面の定性的評価としてSEM観察を行った。

e)セメントペーストによる水和生成物の分析

ガラス板上にφ5×10cmの型枠を組み、超速硬セメントペーストを打設し、硬化過程における水和生成物の分析を行うとともに、硬化後の超速硬セメントペーストとガラス板との界面のSEM観察を行った。超速硬セメントペーストの水セメント比(W/C)は37%とし、ペースト界面とガラス板とのSEM観察は、材齢7日でS-800を用いて行った。エトリンガイトの生成量は、差動熱量法(DSC)による水和生成物の吸熱量より測定した。

4. 試験結果および考察

(1)フレッシュコンクリートの性状

表-9に打継ぎコンクリートのフレッシュコンクリートの性状を示す。練置き時間60分後に打継ぎコンクリートを打設するため、可使時間の調節に各超速硬セメントに用いられている凝結調整剤を使用した。凝結調整剤の添加量は、Aタイプの場合C×0.5%、Bタイプの場合C×0.2%とした。

図-8に打継ぎコンクリートのスランプの経時変化を示す。配合A、配合Bとも、凝結調整剤添加により可使時間を60分強まで維持可能であった。配合Bのスランプの経時変化は、60分後で1cm程度の低下で

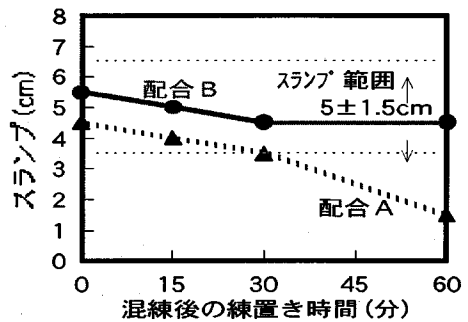


図-8 スランプの経時変化

表-10 下地コンクリートの圧縮強度

目標強度	25	35	45	100
実際の強度	22.8	32.1	45.7	103

(単位 :N/mm<sup>2</sup>)

表-11 打継ぎコンクリートの圧縮強度

配合名	養生温度(°C)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			
		3時間	1日	7日	28日
配合A	20	27.1	64.8	69.2	79.2
配合B		24.8	57.9	62.4	69.4

あった。配合Aは、30分までは1cm程度のスランプ低下で小さいが、30分から60分までのスランプ低下が2.0cmと大きい。

(2)圧縮強度

付着強度試験を行ったときの下地コンクリートの圧縮強度を表-10に示す。打継ぎコンクリートの圧縮強度試験結果は表-11に示した。超速硬SFコンクリートは目標強度(3時間圧縮強度≥24N/mm<sup>2</sup>)に到達後材齢とともに強度が増大している。

(3)付着強度

下地コンクリートの圧縮強度を変化させた場合のスランプ上がり直後(練置きなし)に打設した供試体の付着強度とその破断状態を表-12と図-9に示す。

この図に示すとおり、下地コンクリートの圧縮強度

表-9 打継ぎコンクリートのフレッシュコンクリートの性状

配合名	凝結調整剤(C×%)	練上がり温度(°C)	可使時間(分)		スランブの経時変化(cm)				空気量(直後)(%)
			ゲル化	硬化	直後	15分後	30分後	60分後	
配合A	0.5	22.0	67	92	4.5	4.0	3.5	1.5	1.8
配合B	0.2	21.0	64	75	5.5	5.0	4.5	4.5	2.3

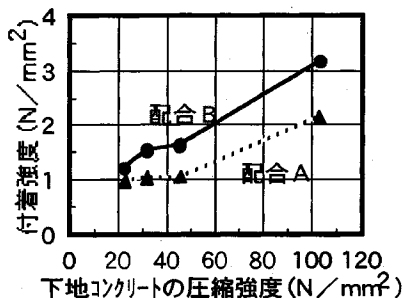


図-9 下地コンクリート強度の影響

表-12 付着強度に及ぼす下地コンクリートの影響

下地コンクリートの目標強度(N/mm²)	練置き時間(分)	付着強度(N/mm²)			
		配合A		配合B	
		平均値	破断箇所*	平均値	破断箇所*
25	0 (直後)	0.97	材破	1.21	材破
35		1.03	材破	1.54	材破
45		1.04	材破	1.63	材破
100		2.14	界面	3.16	界面

\*材破：下地コンクリートが破壊(打継ぎコンクリートが下地コンクリートに付着した状態)  
界面：打継ぎコンクリートと下地コンクリートの界面付近で破壊

の増加に伴って付着強度が増加する傾向が認められ、下地コンクリートの圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>を越える場合、付着強度も2N/mm<sup>2</sup>を超える値となる。また破断箇所は、下地コンクリートの目標圧縮強度45N/mm<sup>2</sup>までは、打継ぎコンクリートに下地コンクリートが付着した状態で、下地コンクリートが材破するのに対して、下地コンクリートの圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>を越える場合には、打継ぎコンクリートと下地コンクリートとの界面付近で破断する界面破壊となる。すなわち、下地コンクリートより打継ぎコンクリートが強い場合は、下地コンクリートが破壊するが、下地コンクリートが打継ぎコンクリートより高強度になると、下地コンクリートが破壊せず、打継ぎコンクリートと下地コンクリートの界面で破断している。このことから増厚工法においては、下地コンクリートのはつりにおいて、健全なコンクリートを出すことが非常に重要となる。練置き時間を置かずに、練上がり直後に打ち継いだ供試体の配合Aおよび配合Bの付着試験後の破断面を、写真-1、写真-2に示す。

表-13、図-10および図-11に、練置き時間を変化させて打設した場合の付着強度試験結果を示す。図-10は、下地コンクリートの目標強度が35N/mm<sup>2</sup>の場合、図-11は、下地コンクリートの目標強度が45N/mm<sup>2</sup>の場合である。配合Bの場合、練置き時間60分までに打設した場合の付着強度および破断箇所に変化は認められないが、配合Aの場合、練置き時間の経過とともに、付着強度が低下する傾向が認められた。この傾向は、図-7に示したスランブの経時変化の傾向に類似している。

また配合Aの場合、破断箇所は、練置き時間なしの場合、図-12に示すように、下地コンクリートが破断

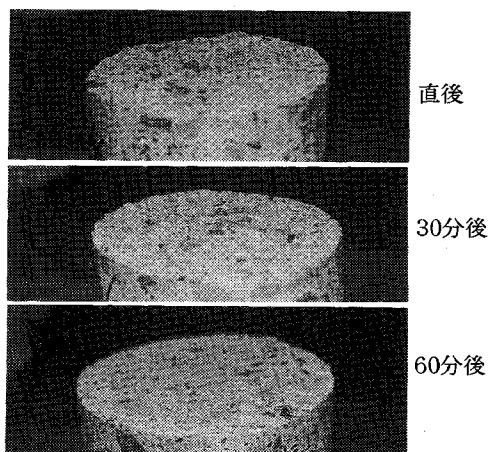


写真-1 配合Aの付着試験後の破断面

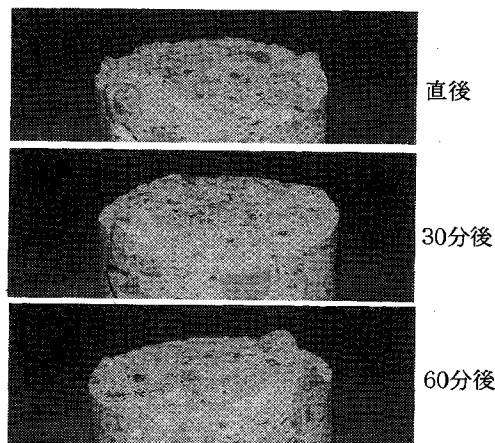


写真-2 配合Bの付着試験後の破断面

する材料破壊を示し、練置き時間30分、60分の場合打継ぎコンクリートと下地コンクリートとの界面付近で

表-13 付着強度に及ぼす練置き時間の影響  
①下地コンクリートの目標強度=35N/mm<sup>2</sup>

練置き時間 (分)	付着強度(N/mm <sup>2</sup> )			
	配合A		配合B	
	平均値	破断	平均値	破断
0	1.03	材破	1.54	材破
30	0.94	界面	1.46	材破
60	0.79	界面	1.47	材破

②下地コンクリートの目標強度=45N/mm<sup>2</sup>

練置き時間 (分)	付着強度(N/mm <sup>2</sup> )			
	配合A		配合B	
	平均値	破断	平均値	破断
0	1.03	材破	1.54	材破
30	0.94	界面	1.46	材破
60	0.79	界面	1.47	材破

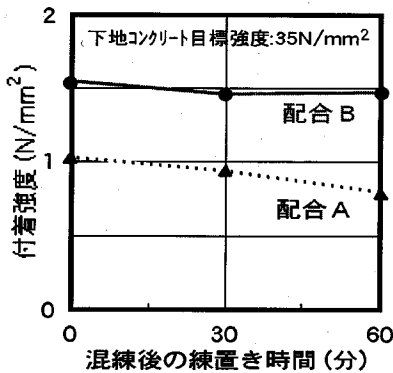


図-10 付着強度に及ぼす練置き時間の影響 1

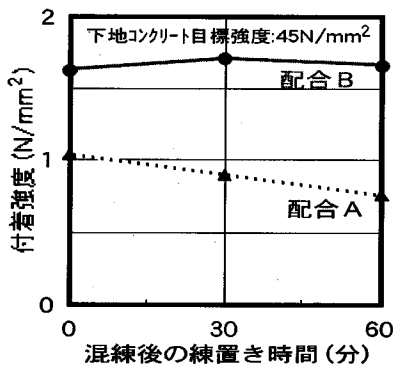


図-11 付着強度に及ぼす練置き時間の影響 2

破断する界面破壊に変化している。

写真-1, 写真-2に付着試験後の打継ぎコンクリート側の破断面を示す。写真-1の配合Aでは、練上がり直後打設で打継ぎコンクリート側に下地コンクリ

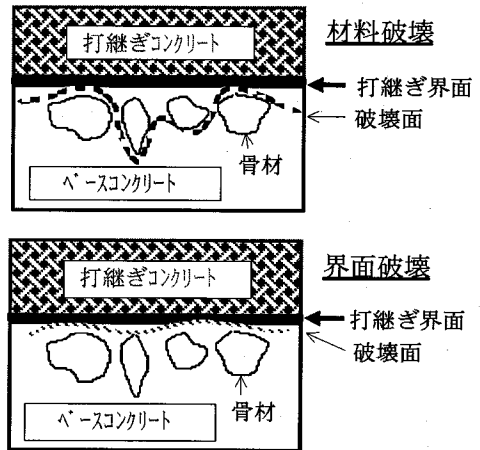


図-12 付着強度試験後の破壊状態

ートの粗骨材が付着しているが、30分後、60分後打設コンクリートでは破断面は滑らかであり、打継ぎコンクリートと下地コンクリートとの界面破壊となっているのに対して、写真-2に示すとおり配合Bでは、練上がり直後、30分後、60分後打設コンクリートとも、打継ぎコンクリート側に下地コンクリートの粗骨材部分がはぎ取られる状況が確認される。

#### (4)付着界面の走査型電子顕微鏡観察

写真-3(配合B), 写真-4(配合A)に、下地コンクリート(目標強度100N/mm<sup>2</sup>)と打継ぎコンクリートとの付着界面の走査型電子顕微鏡(SEM)による観察結果を示す。

SEM観察用サンプルは、図-7に示すとおり、付着強度試験後の破断した供試体の打継ぎ界面部分を約5mm角に切り出し、打継ぎ界面付近の打継ぎコンクリートと下地コンクリートを同時に観察した電子顕微鏡写真である。写真-3, 写真-4とも、練置き時間60分後に打設した供試体の観察結果である。配合Bの場合、打継ぎ界面付近に、下地コンクリートのC-S-Hと思われる水和物と打継ぎコンクリート側から成長したエトリンガイトと思われる針状結晶が絡み合っている様子が認められる。それに比較して配合Aの場合、打継ぎ界面付近にエトリンガイトと思われる針状結晶の生成は認められるが、その生成量は少なく、配合Bのような下地コンクリート内部までの成長は認められない。

写真-5は、付着強度試験後の破断した供試体の打継ぎコンクリート側の打継ぎ界面を直角方向より観察した電子顕微鏡写真であるが、配合Aおよび配合Bともに、結晶の大きさは別として、エトリンガイトと思われる針状結晶が認められる。

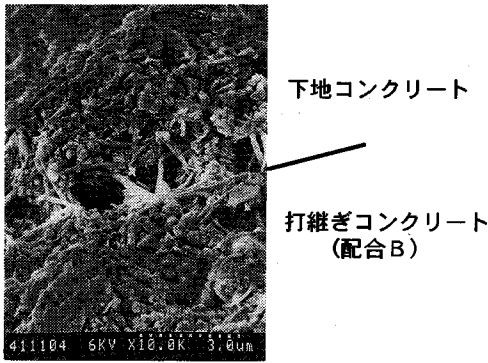


写真-3 打継ぎ・下地コンクリート界面(配合B)

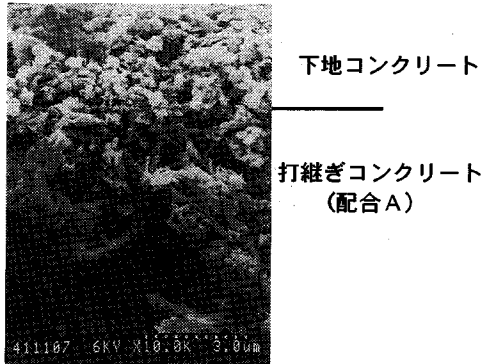


写真-4 打継ぎ、下地コンクリート界面(配合A)

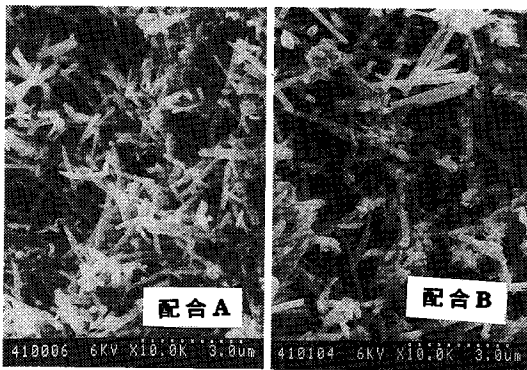


写真-5 打継ぎコンクリートのSEM観察

この両結果より、次のことが推論できる。配合Bの場合、下地コンクリートの上に打ち継がれた後にエトリンガイト結晶が生成し、下地コンクリートのポーラスな部分に成長して、打継ぎコンクリートからアンカーを打ち込んだような効果を示しているのに対して、配合Aの場合、練置き時間が60分であったため、下地コンクリート上に打ち継がれる前にエトリンガイト結晶が生成してしまい、打ち継がれた後、下地コンクリート内部へのエトリンガイト結晶の成長が少なく、アンカー効果が発揮できないと考えられる。なお、打継ぎコンクリートと下地コンクリートとの付着力は、コ

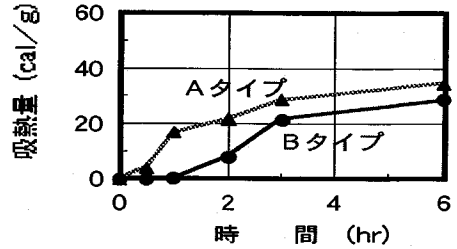


図-13 DSCによるエトリンガイトの測定

ンクリートの物性のみによるものではなく、内田の研究<sup>4)</sup>によれば、付着力に与える振動エネルギーの影響は明らかであり、振動の時期および量についても今後研究する必要がある。

#### (5)セメントペーストによる水和生成物の分析および水和物の結晶形態の観察

セメントペーストの注水直後から30分後、60分後、24時間後の水和反応により生成したエトリンガイトの生成量を差動熱量法(DSC)で測定した結果を図-13に示す。Bタイプの場合、注水から60分までのエトリンガイトの生成量は少なく、60分以降にエトリンガイトの顕著な生成が認められる。Aタイプの場合、注水直後からエトリンガイトの生成が認められる。この際X線回折により確認される水和物はエトリンガイトのみであり、この吸熱ピークをエトリンガイト生成量の傾向捕らえられると考える。

また、大門ら<sup>6)</sup>が、凝結調整剤により可使時間を30分、60分に調整したAタイプ、Bタイプのコンダクションカロリメータによる水和発熱速度を測定した結果を図-14、図-15に示す。

Bタイプの場合、注水直後の発熱は観察されず、可使時間後に1つの水和発熱ピークが観察される。これに対しAタイプの場合、注水直後より急激な水和発熱反応による第1ピークが観察され、その後さらに第2段階の水和発熱反応による第2ピークが認められる。Aタイプの場合、第1ピークは、凝結調整剤を添加しても可使時間前の注水直後に発現するとともに、凝結調整剤を添加して可使時間を長くした場合でも、第2ピークの生成時期は可使時間以前である。X線回折による水和物としては、Aタイプ Bタイプともにエトリンガイトの生成が認められた。この結果は、AタイプとBタイプのスランプの経時変化の差および練置き時間を長くした場合の付着強度の差に関連があると思われる。つまり、Bタイプの場合、凝結調整剤で調整された可使時間までエトリンガイトの生成は非常に少なく、その後急激にエトリンガイトが生成するのに対



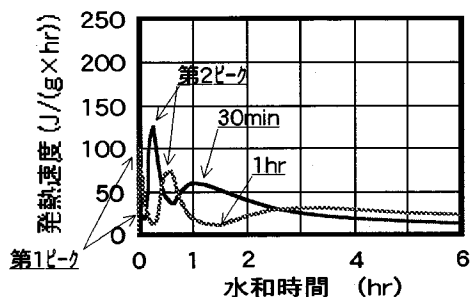


図-14 Aタイプの水和

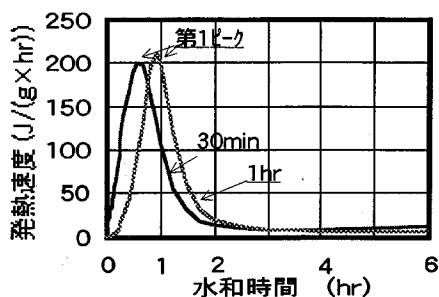


図-15 Bタイプの水和

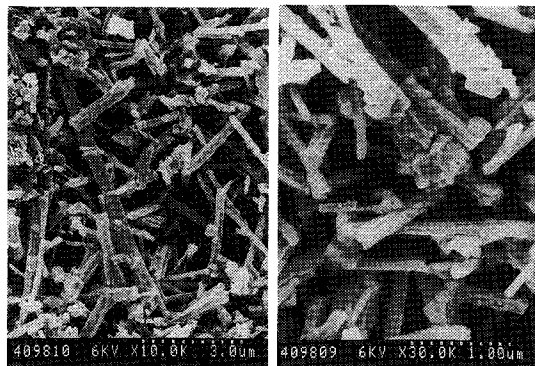


写真-6 セメントペーストのSEM観察(Bタイプ)

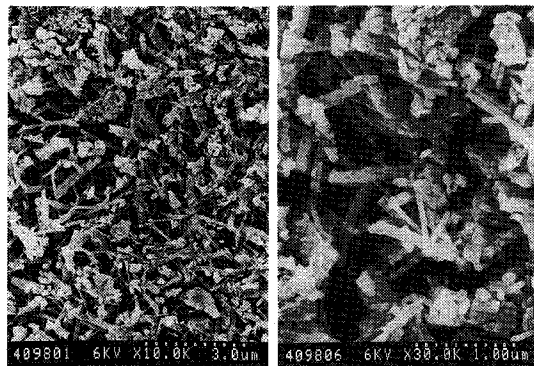


写真-7 セメントペーストのSEM観察(Aタイプ)

して、Aタイプでは、注水直後からエトリンガイトが生成し、それに伴いスランプの経時変化が徐々に始まる。そしてエトリンガイトがある生成量になったところが可使時間の終了に相当していると思われる。したがって、Aタイプの場合、練置き時間が長くなると、エトリンガイトがある程度生成してしまい、打ち継がれた後では下地コンクリート側にエトリンガイトの結晶成長が十分に起こらず、Bタイプほどの高い付着強度が得られなくなり、また、練置き時間を長くするにつれて、付着強度の低下が発生するものと思われる。この結果は、前記の写真-3、写真-4の状況をよく説明しており、このことから、特にAタイプは練混ぜ後すみやかな施工が望まれる。

ガラス板の上に打設したセメントペーストについて硬化後のペーストとガラスとの界面のSEM観察結果を写真-6(Bタイプ)、写真-7(Aタイプ)に示す。倍率は、1万倍(左側)と3万倍(右側)とした。

この写真から、Bタイプの水和により生成するエトリンガイトは太くて長い結晶形態をしているのに比較して、Aタイプの水和によるエトリンガイトは、細くかつ短い。C-S-Hの結晶形態には違いは見られない。このことは、Bタイプから生成するエトリンガイトは、凝結調整剤の添加によりその生成時期が調節されゆっくり生成するため、太くて長い結晶になるのに

対して、Aタイプのそれは、注水直後の早期に生成するため、細く短い結晶になってしまうものと考えられる。したがって、下地コンクリートへの成長力も小さく、エトリンガイトによるアンカー効果が小さくなるものと思われる。

## 5. まとめ

本研究では、強度レベルの異なる下地コンクリートに対し、2種類の超速硬セメントを用いて、超速硬SFコンクリートを混練後練置き時間を変えて打設し、下地コンクリートに対して超速硬SFコンクリートの付着試験を行った。さらに、付着界面の分析、超速硬セメントの水和機構の解析を行い、超速硬SFコンクリートの付着特性について考察した。

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

(1) 超速硬SFコンクリートの付着強度は、下地コンクリートの圧縮強度により変化し、下地コンクリートの圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>までの範囲では、下地コンクリートの圧縮強度が高ければ高いほど、付着強度は高くなることがわかった。すなわち、下地コンクリートの品質の影響を大きく受ける。

(2) 練置き時間なしの場合、打継ぎコンクリートと下地コンクリートの強度の違いにより、付着試験後の

破断状態が異なる。すなわち、打継ぎコンクリートの強度が下地コンクリートよりも高ければ、下地コンクリートの材料破壊が起こり、打継ぎコンクリートよりも下地コンクリートの強度が高ければ、界面破壊が起こる。

(3) 超速硬セメントの、混練から打設までの練置き時間が長くなると、練置き時間に比例して付着強度が低下する場合がある。これは、超速硬SFコンクリートのスランプの経時変化の大きさに対応する。すなわち、スランプの経時変化の少ないBタイプでは、練上がり直後と練置き時間60分後の付着強度に差は見られないが、練置き時間30分以降にスランプ低下の見られるAタイプは、練置き時間60分後で約2割の付着強度の低下が見られた。したがって、超速硬SFコンクリートは、スランプ低下する前に打ち継ぐことが望ましい。

(4) 下地コンクリートと打継ぎコンクリートとの打継ぎ界面のSEM観察の結果から、練置き60分後のコンクリートにおいて、Bタイプでは、下地コンクリート中の主な水和物であるC-S-Hと打継ぎコンクリートから水和成長したエトリンガイト結晶が絡み合い、エトリンガイト結晶による下地コンクリートに対するアンカー効果が見られる。Aタイプでは、打継ぎ界面付近のエトリンガイト生成量はあるが、下地コンクリート内部への成長が認められない。

(5) セメントペーストの水和過程の分析より、Bタイプは、可使時間終了までエトリンガイトの生成が見られないのに対して、Aタイプは、注水直後から急激な発熱反応があり、可使時間終了以前にエトリンガイトの顕著な生成が認められる。このエトリンガイトの生成が、スランプの経時変化および練置き時間60分後の付着強度低下に影響を及ぼしていると思われる。

以上、超速硬セメントの種類の違いによる付着強度発現メカニズムに関し、今までに得られた知見をここに示した。当初にも述べたように、公団における床版上面増厚工法は緒についたばかりであり、不明な点も

山積みしている。今回は付着力に着目し、研究を行ったが、両者の超速硬セメントの強度発現メカニズムの特徴を活かした施工により、よりよい床版補強を構築していれば幸いと考えている。

**謝辞：**本研究を行うにあたり、岐阜大学小柳治教授<sup>®</sup>の御指導と御示唆を得た。また、本稿をまとめるにあたり、山梨大学檜貝勇教授<sup>®</sup>に貴重な御助言を頂いた。ここに記して、厚く御礼申し上げる次第である。

#### 参考文献

- 1) 高速道路便覧'95年版, 全国高速自動車国道建設協議会, 1995. 4.
- 2) 名神高速道路橋梁老朽化対策検討報告書, 日本道路公団名古屋管理局, 1995. 3.
- 3) 上面増厚工法マニュアル: 日本道路公団東京第一管理局, 1995. 3.
- 4) 内田美生: 超速硬セメントを用いたコンクリート構造物の補修補強工法の開発研究, 埼玉大学学位論文, 1992. 3.
- 5) 石井孝男, 斎藤碩, 野々田充, 内田美生: 超速硬セメントを用いた鋼橋コンクリート床版の上面増厚工法-増厚工法の急速・大規模施工法の構築とその適用例-, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文集, コンクリート工学協会, pp.69-76, 1992.10.
- 6) 大門正機, 坂井悦郎, 伊藤巧, 二階堂泰之: 超速硬セメントの初期水和におけるエトリンガイト生成と微細構造, コンクリート学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 17, No.1, pp.319-324, 1995.
- 7) 小柳 治: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状と引張軟化曲線, 土木学会論文集, No.460, V-18, pp.57-64, 1993他.
- 8) 梅原秀哲, 石神孝之, 檜貝勇: 増厚した鉄筋コンクリート床版の力学的挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.451, V-17, pp.88-98, 1992. 8.

(1995. 11. 1 受付)

## STUDY ON BOND MECHANISM OF STEEL FIBER REINFORCED ULTRA RAPID HARDENING CONCRETE APPLIED TO CONCRETE OVERLAY Yoshiyuki MOMIYAMA, Hiroshi OOTOMO, Minoru HANDA and Hideaki GOMI

The purpose of this study is to investigate bond mechanism of steel fiber reinforced ultra hardening concrete. Bond strength of steel fiber reinforced ultra rapid hardening concrete is influenced by quality of foundation concrete, that is to say the higher compressive strength of foundation concrete, the higher bond strength is. And bond strength decreases with slump down of ultra rapid hardening concrete. This is related to producing time and volume of ettringite. This is related to product time and volume of ettringite.