

論文 膨張性超速硬増厚コンクリートの諸性質に関する研究

番地 成朋^{*1}・梶尾 聡^{*2}・子田 康弘^{*3}・岩城 一郎^{*4}

要旨：近年，我が国の都市内高速道路では，構造物の老朽化と重交通による繰返し荷重の影響を受け，床版の疲労劣化が顕在化している。このうち RC 床版の補強対策については，これまで交通規制を必要としない床版下面から行われてきたが，今後，床版上面からの増厚補強を余儀なくされると考えられる。そこで，本研究では，都市内高速道路に適用可能な床版上面増厚コンクリートの開発を目的とした。ここでは，要求性能を満足する材料として，膨張性超速硬繊維補強コンクリートを提案し，そのフレッシュ性状，強度特性，および膨張収縮挙動に関する検討を行った。

キーワード：床版上面増厚工法，超速硬コンクリート，早強性膨張材，ひび割れ制御

1. はじめに

我が国の都市内高速道路は，厳しい重交通環境下において供用後 30 年以上経過したものが多く，床版の疲労劣化が顕在化している。このうち RC 床版の補強工事は，これまで交通規制を必要としない床版下面から行われてきたが¹⁾，この方法にも限界があり，今後は床版上面からの増厚補強を余儀なくされると思われる。都市内高速道路では，その舗装構成や前後の床版のすり合わせから，増厚厚さが 40mm と従来の厚さ (60mm) より薄くする必要がある。床版上面増厚を行った際の床版および舗装構成を図-1 に示す。また，都市内高速道路固有の問題として，近隣住民に配慮した低振動・低騒音施工が挙げられる。すなわち，従来の振動締固め装置では，施工時の振動騒音が許容値を超え，夜間施工が出来なくなるという問題が生じる。さらに，一夜間で，一スパン (約 30m) 一車線 (約 3.5m) の増厚施工を行うためには，増厚材料に対する厳しい品質管理が要求される。一方，RC 床版の高耐久化，長寿命化を図るためには，既設床版と増厚コンクリートの付着性状の改善や増厚コンクリートのひび割れ制御対策が求められる。

以上の背景より，本研究では都市内高速道路に適用可能な RC 床版上面増厚コンクリートの開発を行うことを目的とした。すなわち，増厚厚さ 40mm を可能にするため粗骨材最大寸法を 13mm に抑え，軽微な振動による締固めを可能とするためコンクリートのワーカビリティを格段に向上させた上で，収縮ひび割れ抑制対策として早強性膨張材を添加した膨張性超速硬繊維補強コンクリートの開発を行なった。本稿ではそのフレッシュ性状，強度特性，膨張収縮挙動について検討を行う。また，本コンクリートの適用範囲拡大を目的に，鋼繊維の量を低減させた場合，鋼繊維の代わりにビニロン繊維を使用した場合，さらに比較用に繊維を混入しない場合の各条件におけるフレッシュ性状および強度特性についても検討を行った。

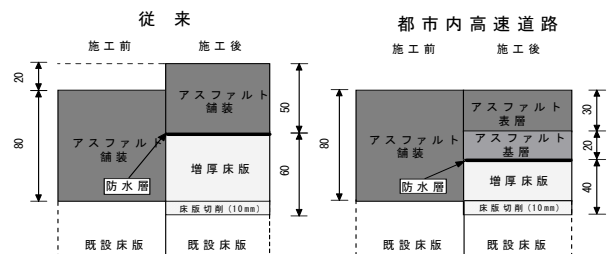


図-1 床版上面増厚工法の施工断面例

*1 日本大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

*2 太平洋セメント株式会社 中央研究所技術企画部 CS チーム (正会員)

*3 日本大学 工学部土木工学科助手 (正会員)

*4 日本大学 工学部土木工学科助教授 (正会員)

表-1 示方配合 (シリーズ 1)

W/B (%)	s/a (%)	Unit Content(kg/m ³)							SP	JS
		W	C	Ex	S	G	SF			
40.5	55	175	412	20	935	808	100	8.21	6.48	
								10.34		
								12.53		

表-2 示方配合 (シリーズ 2)

	W/B (%)	s/a (%)	Unit Content(kg/m ³)							
			W	C	Ex	S	G	Fiber	SP	JS
SF100	40.5	55	175	412	20	935	808	100	10.34	6.48
SF80				412	20	938	811	80	10.34	6.48
VF15				412	20	937	810	15	10.34	6.48
NonF				412	20	954	825	0	10.34	6.48

表-3 示方配合 (シリーズ 3)

	W/B (%)	s/a (%)	Unit Content(kg/m ³)							
			W	C	Ex	S	G	Fiber	SP	JS
Ex20-SF100	40.5	55	175	412	20	914	762	100	8.21	6.48
Ex0-NonF				432	0	932	777	0	6.48	4.75
Ex0-SF100				432	0	913	761	100	6.48	4.75

2. 実験概要

2.1 要求性能

可使時間はスランプが 15-5cm の範囲を満たす時間とし、フレッシュ性状の要求性能は可使時間 30min 以上とした。スランプは、軽微な振動により締固めを可能とするため、従来 (5cm 程度) より高く設定している。また、硬化性状の要求性能は、既往の研究^{1), 2)}を参考に、材齢 3 時間の圧縮強度 24N/mm² 以上、材齢 7 日の新旧コンクリートの付着強度 1N/mm² 以上とした。膨張収縮挙動および曲げ強度については、現段階では要求性能を設けず、膨張材および繊維の効果が明確に表れることを確認することとした。

2.2 配合および使用材料

本研究は、3つの実験シリーズからなる。すなわち、高性能減水剤の添加量がフレッシュ性状に及ぼす影響 (シリーズ 1)、繊維の種類および使用量がフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響 (シリーズ 2)、膨張材および鋼繊維が膨張収縮挙動に及ぼす影響 (シリーズ 3) である。表-1、表-2、表-3 に各実験に用いたコンクリートの示方配合を示す。なお、表中の B (結合材質量) は、セメントと膨張材を合わせたものである。

本コンクリートの構成材料は、水、超速硬セ

メント (密度 3.01g/cm³)、福島県相馬市新地町産砕砂 (表乾密度 2.66g/cm³)、福島県いわき市好間産砕石 (表乾密度 2.81g/cm³)、早強性膨張材 (石灰系、密度 3.19g/cm³:Ex)、鋼繊維 (繊維長 30mm、アスペクト比 50、密度 7.69g/cm³:SF)、ビニロン繊維 (繊維長 30mm、アスペクト比 45、密度 1.30g/cm³:VF)、高性能減水剤 (ポリカルボン酸系:SP)、凝結遅延剤 (JS) である。ただし、表-3 のコンクリートの細骨材には静岡県御前崎産陸砂 (表乾密度 2.60g/cm³) を使用し、粗骨材に茨城県岩瀬産砕石 (表乾密度 2.65g/cm³) を使用した。

2.3 試験項目

(1) スランプ試験

本実験では、最適なフレッシュ性状が得られるよう高性能減水剤の添加量を変化させ、コンクリート排出から 10 分間隔で、目標スランプの範囲を切るまでのスランプの経時変化を測定した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JCI-SE5「キャッピングを必要としない圧縮強度試験用供試体の作り方及び試験方法」に準じて行い、供試体の作製は、横置き円柱型枠に打込み後、材齢 3 時間、7 日 (以上、封かん養生)、28 日 (標準養生) で行うことを基本とした。さらに詳細な強度発現性を調べるため、材齢 2, 2.5, 3, 6, 12, 24 時間、3, 7 日 (封かん養生) において圧縮強度を測定した。

(3) 付着強度試験

付着強度試験は、打込みから 5 日間封かん養生後、供試体の両端にエポキシ樹脂で固定具を接着し、2 日間乾燥させた後行った。付着強度試験に使用した供試体は、図-2 に示すように、φ 100×80mm で既設コンクリート上に増厚コンクリートを打ち込んだものである。既設コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いて W/C=50% のコンクリートを事前に作製しておき、その上面 5mm を目粗し、その上から本増厚コンクリートを 40mm 打ち込んだ。試験は、図-3 に示した試験装置に供試体を固定し、センターホール型加圧ジャッキにより加圧する方法であり、

ロードセルによる引張荷重の計測と、高感度変位計による伸び量の計測を動ひずみ計で行った。

(4) 曲げ強度試験

曲げ強度試験で使用した供試体は JSCE-G 552 「鋼繊維補強コンクリートの強度およびタフネス試験用供試体の作り方」に準じ、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体とし、7日間封かん養生後試験を行った。また、曲げ強度試験は JIS A 1106 「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じて3等分点荷重を行い、動ひずみ計により荷重と変位を計測した。

(5) 膨張収縮試験

本コンクリートの膨張収縮試験は、自由ひずみを測定するにあたり、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体を使用し、供試体中央に埋込み型ひずみゲージを設置した。型枠とコンクリートの界面は既往の文献に従い、付着を切る構造としている。図-4 に自由ひずみ測定用供試体を示す。⁴⁾コンクリートの養生は $20^\circ\text{C} \cdot 80\% \text{R.H.}$ 恒温恒湿室にて打込み後、打込み面にポリエステルフィルムを貼り付け、24時間湿布養生を行い、材齢7日まで封かん養生を行なった後、同室内で気中養生した。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプ試験結果

(1) 混和剤の添加量の影響 (シリーズ 1)

本研究では、要求性能を満足する最適なフレッシュ性状が得られるよう、凝結遅延剤一定の条件で、高性能減水剤の添加量を3種類に変化させた。図-5 にコンクリート排出後のスランプの経時変化を示す。図より、高性能減水剤の添加量が増えるに従い初期のスランプが高くなり、可使用時間が長くなるという結果となった。また、排出直後に多少のバラツキはあるものの、時間の経過に伴うスランプロス傾向はほぼ同様であり、高性能減水剤の添加量を変えることによりスランプおよび可使用時間を調整可能であることが確認された。本研究では高性能減水剤添加量 10.34kg/m^3 (結合材質量 B に対して 2.4%) を、

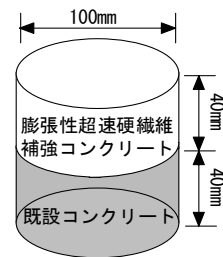


図-2 付着強度試験用供試体

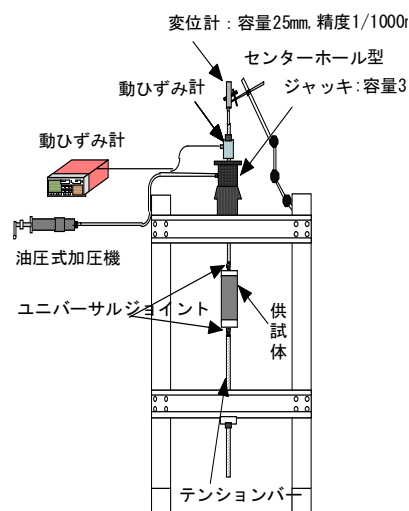


図-3 付着強度試験装置

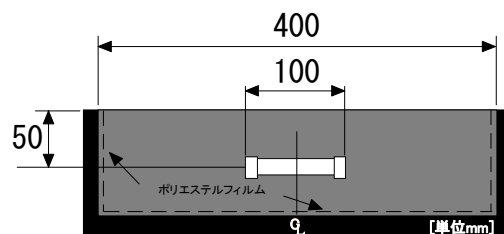


図-4 自由ひずみ測定用供試体

要求性能を満たす条件として採用した。

(2) 繊維量および種類の影響 (シリーズ 2)

図-6 にコンクリート排出後のスランプの経時変化を示す。ここでは、標準的な鋼繊維量 100kg/m^3 を用いた場合 (SF100)、鋼繊維量を 80kg/m^3 に抑えた場合 (SF80)、ビニロン繊維 (15kg/m^3 : 繊維の単位容積は SF100 と同等) を用いた場合 (VF15)、繊維を用いない場合 (NonF) の比較を行う。図より、鋼繊維量を減らすことにより、排出後のスランプが上がることで、一方、単位体積が同じであれば、ビニロン繊維と鋼繊維ではスランプに優位な差が生じないことが確

認められた。また、いずれのケースも排出後 10 分でスランプがピークとなり、その後スランプはほぼ同じ傾きで低下する傾向を示した。繊維を混入した 3 種類に着目すると、スランプの要求性能 (15-5cm) はほぼ満足しているが、上記の理由により SF80, VF15 では可使時間が多少長くなるため、強度に及ぼす影響を考え、可使時間を短縮するためには凝結遅延剤添加量を若干減らす必要があると思われる。

3.2 圧縮強度試験結果

(1) 繊維量および種類の影響 (シリーズ 2)

図-7 に各条件での圧縮強度試験結果を示す。図より、材齢 3 時間では繊維量を低減させた場合 (SF80) のみ要求性能 (24N/mm²) を満たさない結果となり、それ以外は要求性能を上回る結果となった。SF80 の圧縮強度が基準強度を下回った理由は、凝結時間が必要以上に遅れたためと考えられることから、高性能減水剤と凝結遅延剤の添加量を調整することにより十分改善可能であると思われる。また、材齢 7 日では全ての条件で約 60N/mm² 以上、材齢 28 日では約 70N/mm² 以上に達し、材齢が進むにつれ繊維の有無や量、種類の違いに関係なく同程度の強度に達することが確認された。

(2) 強度発現性について

図-8 に材齢 2 時間から 7 日までの SF100 の圧縮強度の強度発現性を示す。図より、本コンクリートは、硬化開始から材齢 6 時間までに急激に強度が増進し、材齢 6 時間から 7 日までは比較的緩やかに強度が増進する特性を持つことが確認された。

3.3 付着強度試験結果

図-9 に材齢 7 日の付着強度試験結果を示す。本試験はばらつき大きい試験ではあるが、破断は新旧打継ぎ面あるいは既設コンクリート側で発生した。この結果は、新旧界面での付着強度と既設コンクリートの引張強度との大小関係によると思われる。また、全ての供試体で基準付着強度である 1.0N/mm² を上回る結果となった。しかし、繊維を使用しない場合 (NonF)、繊維を

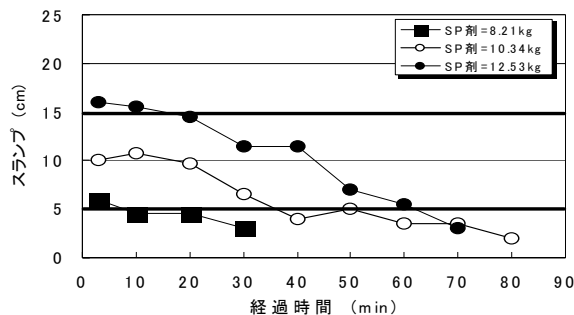


図-5 排出からのスランプの経時変化 (シリーズ 1)

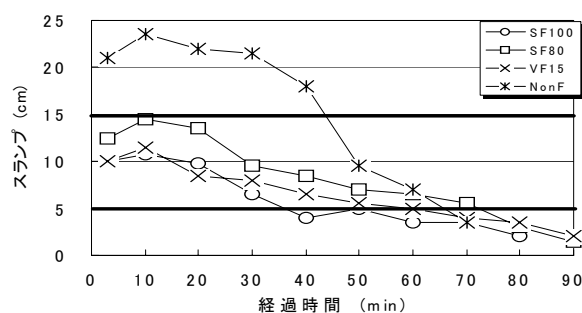


図-6 排出からのスランプ経時変化 (シリーズ 2)

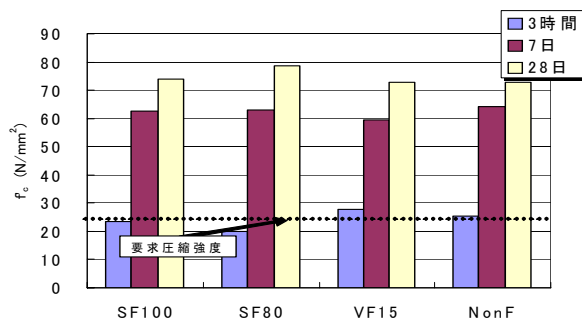


図-7 圧縮強度試験結果 (シリーズ 2)

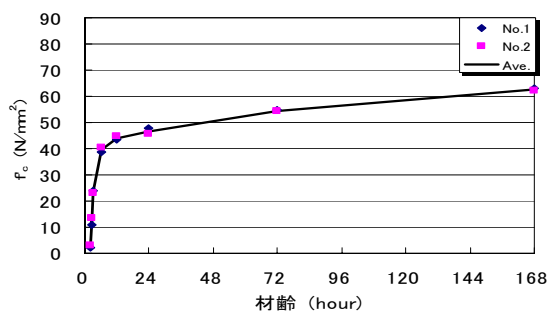


図-8 圧縮強度の強度発現性 (SF100)

使用した場合に比べ、付着強度が多少低下する傾向を示した。ただし、繊維を使用しない場合 (NonF) でも、最大で 1.5N/mm^2 の付着強度を得ており、繊維混入の有無は付着強度そのものには大きな影響を及ぼさないものと思われる。また、SF100, SF80, VF15 の平均付着強度には大きな違いが見られないことから、繊維量やその種類は付着強度に顕著な影響を及ぼさないことが確認された。

3.4 曲げ強度試験結果

図-10 に曲げ強度試験で得られた荷重-変位関係を、図-11 および図-12 に曲げ強度および曲げ靱性係数の結果を示す。図-10 より、鋼繊維を用いた SF100 と SF80 では、曲げひび割れ発生後、さらに荷重が増加し、最大荷重に達した後は緩やかに荷重が低下しながら変位が進行し、破断するといった挙動を示した。一方、ビニロン繊維を用いた VF15 では、曲げひび割れ発生後、一旦荷重が低下し、その後再び増加し、ピークに達した後、緩やかに荷重が低下し破壊するといった特異な挙動を示した。以上のことから、繊維を適量混入することで最大荷重に達した後も荷重は急激に低下することなく、繊維の架橋効果により十分な変形性能を有していることが示された。また、図-11 および図-12 より、曲げ強度および曲げ靱性係数は、大きい順に SF100, SF80, VF15 となり、繊維量や繊維の種類によって曲げ強度および曲げ靱性係数に明らかな違いは見られるものの、繊維による効果は十分に期待される結果となった。

3.5 収縮試験結果

図-13 および図-14 に測定開始から 24 時間および 35 日までの自由ひずみの測定結果を示す。ここで、本測定の基点はプロクター貫入抵抗試験により測定した凝結始発としている。図-13 中に凝結試験結果を併せて示す。図-13 より、膨張材と鋼繊維を混入しない場合 (Ex0-SF0) は、測定開始から急激な自己収縮を示したが、鋼繊維だけを混入した場合 (Ex0-SF100)、繊維の拘束により初期の急激な自己収縮がやや抑えられる

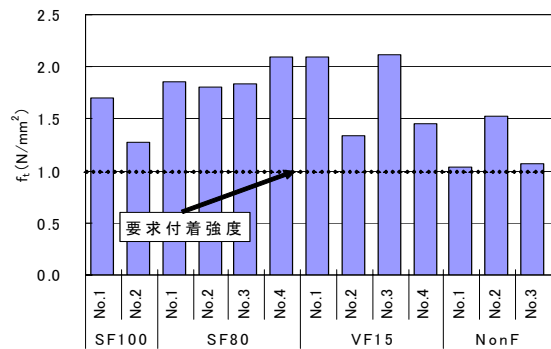


図-9 付着強度試験結果 (シリーズ 2)

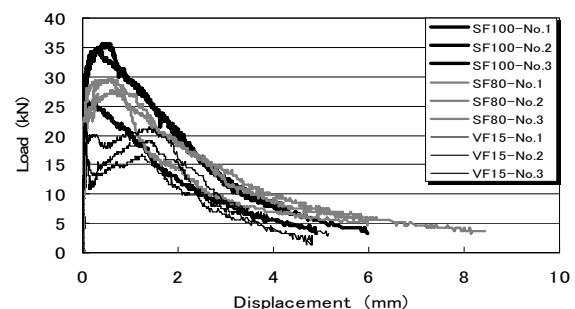


図-10 荷重-変位関係 (シリーズ 2)

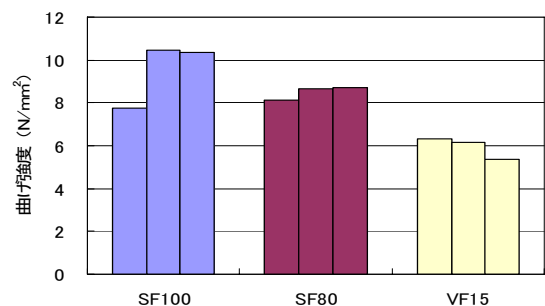


図-11 曲げ強度測定結果 (シリーズ 2)

結果となった。さらに、膨張材と鋼繊維を混入した場合 (Ex20-SF100) は測定開始から約 30 分後には収縮側から膨張側へ移行し、膨張材と鋼繊維を混入しない場合 (Ex0-SF0) と比較すると、自己収縮がほぼ抑えられ、さらに測定開始から 2 時間後には 100μ 程度の膨張ひずみが発生する結果となった。すなわち、膨張材と鋼繊維の添加により顕著な自己収縮抑制効果が期待できることが確認された。図-14 より、7 日後から $20^{\circ}\text{C} \cdot 70\% \text{R.H.}$ の恒温恒湿室で気中養生を行なった場

合、Ex0-SF0 では材齢 35 日で 450μ 以上の収縮ひずみが発生しているのに対し、Ex20-SF100 ではわずか 100μ に抑えられていることから、本材料は膨張材による優れた収縮補償効果を有していると判断される。

4. まとめ

以下に、本研究で得られた主な知見を記す。

(1) 凝結遅延剤一定の下、高性能減水剤添加量を調整した結果、可使時間 30 分以上、その間のスランプ 15-5cm という優れたフレッシュ性状を有するコンクリートを作製することができた。また、フレッシュ性状に及ぼす鋼繊維量および繊維の種類による影響を概略明らかにすることが出来た。

(2) 本コンクリートは、強度に関する要求性能である 3 時間圧縮強度 24N/mm^2 を満たすことが確認された。また、圧縮強度や付着強度に及ぼす繊維量および繊維の種類による影響はさほど大きくないことが確認された。また、曲げ試験結果には繊維量およびその種類による影響が顕著に現れることが明らかになった。

(3) 鋼繊維を混入することで超速硬コンクリートに見られる初期の急激な自己収縮が多少拘束されることが示された。さらに、早強性膨張材の使用により、自己収縮がほぼ完全に抑えられ、逆に 100μ 程度の膨張作用が期待される結果となった。このことから、乾燥の影響を含めた場合においても、膨張材による顕著な収縮補償効果が期待されることが明らかになった。

以上のことから、本材料は都市内高速道路における RC 床版上面増厚材料としての要求性能を満たしていることが確認された。今後は本材料を施した床版の耐荷性、耐疲労性を評価すると共に、軽微な振動による締固めが可能であることを施工性試験により確認するなど、更なる検討を進める予定である。

参考文献

1)岡田昌澄, 首都高速道路の維持管理, 土木学会誌, Vol.86, pp.15-16, 2001.12

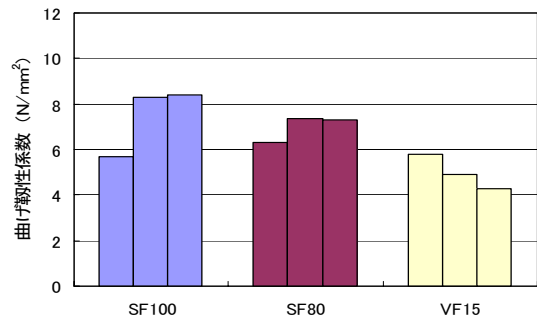


図-12 曲げ靱性係数測定結果 (シリーズ 2)

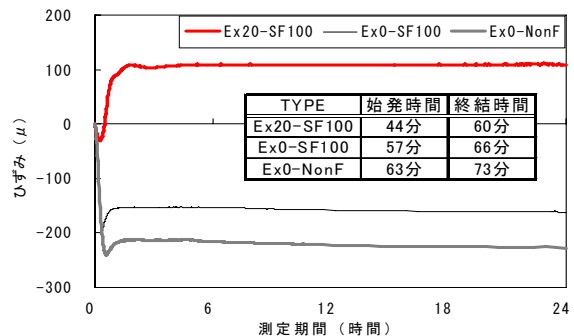


図-13 自由ひずみ測定結果 (シリーズ 3: 24 時間)

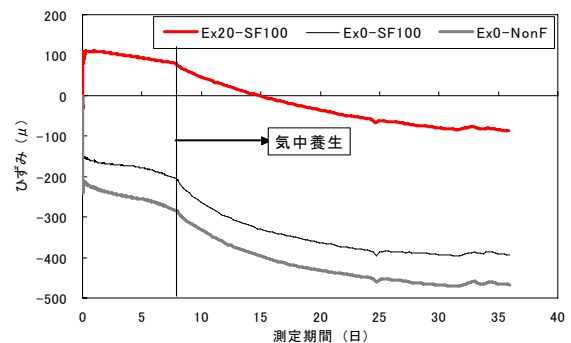


図-14 自由ひずみ測定結果 (シリーズ 3: 35 日)

2)高速道路調査会, 上面増厚工法設計施工マニュアル, pp.29-32, 1995.11

3)樺山 好幸: 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, 土木学会論文集 No.540/VI-31, 241-250, 1996.6

4)日本コンクリート工学協会, 超流動コンクリート研究委員会報告書 (II), 1994.5