

低弾性高じん性セメント複合体の製造・施工

Manufacture and Construction of Fiber Reinforced Cementitious Composite with High Ductility and Low Elasticity

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

佐々木 亘 WATARU SASAKI

樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

大阪支店 室田 敬 KEI MURODA

土木設計部 平 喜彦 YOSHIHIKO TAIRA

本報告では、筆者らが開発した低弾性高じん性セメント系複合体の製造性と施工性の評価を行った。低弾性高じん性セメント系複合体の製造・施工性能試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。①低弾性高じん性セメント系複合体は、通常の生コン工場で製造し、トラックアジテータによって現場まで運搬しても所定の品質が得られる。②低弾性高じん性セメント系複合体の自己充填性は、実施した施工試験の条件下では練混ぜ水の注入から2時間程度確保できる。また、スランプフローが500mm以上であれば、自己充填性を有すると判断できる。③実施した施工試験の条件で施工を行えば、低弾性高じん性セメント系複合体の鉄筋周りの充填性と硬化後の均質性を確保できる。

キーワード：高じん性，低弾性，微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料，製造，施工

This report describes test result of manufacturing and construction using fiber reinforced cementitious composite with high ductility and low elasticity (FRCC). As a result of the examination, the followings were clarified. 1) FRCC which is manufactured from a general ready-mixed concrete plant and transported by a track agitator satisfies the quality confirmed in the laboratory. 2) FRCC has self-compactability within about two hours after mixing. 3) Under the condition of construction tests on FRCC, FRCC in slab elements is homogeneously consolidated and filled around closely arranged reinforcements.

Key Words: High Ductility, Low Elasticity, Fiber Reinforced Cement Composite, Manufacture, Construction

1. はじめに

田辺パーキングエリア工事は、すでに供用されている第二京阪道路の上空に、3~4径間のPC連結桁橋を複数（上り線：10連，下り線：8連）横に並べ、広い範囲の面を構築してパーキングエリアとするものである（写真-1）。しかし、同工事では、第二京阪道路の車線・幅員構成により橋脚位置に制約を受けるため、使用されるPC桁は各径間の支間長および桁高が異なる。

これに対し、筆者らの一部は、隣り合う径間のPC桁を横桁で連結せずに床版を連結すること（以下、床版連結構造と称す）によって連結桁橋を構築する工法を考案した。本構造の採用により、従来の横桁連結と比べて



写真-1 田辺パーキングエリアの全景（完成後）

PC桁相互を柔らかく繋げ、連結部に作用する断面力を低減できる。また、大きな断面力が作用する連結床版に対しては、弾性係数が低く、じん性に富み、ひび割れ分散性にも優れた低弾性高じん性セメント系複合体を使用

した。低弾性高じん性セメント系複合体の品質等の詳細については、別報¹⁾で紹介している。

本報告では、床版連結構造への適用に向けて、低弾性高じん性セメント系複合体の製造および施工に関する検討を実施した内容を述べる。

2. 床版連結構造の概要

PC 連結桁橋では、図-1 (左) に示すとおり、一般に架設した隣接径間の PC 桁どうしを橋脚上で横桁と一体化させる。しかし、従来の連結横桁構造では連結部の施工が煩雑となるとともに、本橋のように隣接する主桁の桁高および断面形状が異なる場合には横桁部で断面が不連続となる。これに伴い、桁下端側の配筋が不連続となるため、完成後には維持管理面の課題が残る。一方、筆者らが考案した床版連結構造は、図-1 (右) に示すとおり、隣り合う径間の PC 桁を床版で連結して連結桁橋を構築するものである。本構造を採用することで、従来の横桁連結と比べて PC 桁相互を柔らかく繋げて、連結部に作用する断面力を低減することができる。また、パーキングエリアの維持管理性の向上と連結部施工の合理化を図ることが可能となる。

本工事では、支間長や桁高の違いによって生じる断面力に応じて、異なる構造諸元および材料を用いている。すなわち、断面力の比較的小さい箇所には、作用する断面力に応じて連結床版の支間を 1.0m ないし 1.5m とし、普通コンクリート（短繊維等を含む）を用いた。一方、断面力が大きい箇所に対しては、新たに開発した低弾性高じん性セメント系複合体を適用し、床版支間を 2.0m とすることで床版部に作用する断面力を低減した。設計基準強度はいずれも 30N/mm² であるが、弾性係数の設計値は、前者が 28kN/mm²、後者が 20kN/mm² である。新材料の適用であるため、設計においては、コンクリートの引張抵抗および短繊維の引張抵抗を無視し、鉄筋のみで引張に抵抗させて、安全側の処置を講じた。

3. 低弾性高じん性セメント系複合体の特徴

(1) 使用材料および配合

低弾性高じん性セメント系複合体の配合を、表-1 に示す。筆者らは、さまざまなタイプの繊維補強セメント複合材料（FRCC）の開発を行ってきた^{例えば、2),3),4)}。今回、開発した低弾性高じん性セメント系複合体は、繊維補強セメント複合材料の中では、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）⁵⁾の一種である。表中の特殊粉体とは、ポルトランドセメント、石灰石微粉

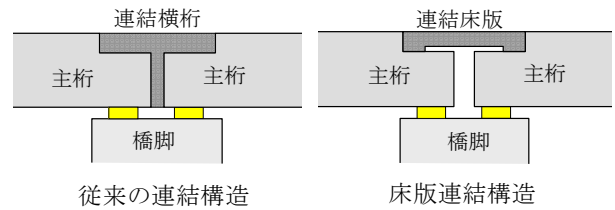


図-1 従来の連結構造と床版連結構造

表-1 低弾性高じん性セメント系複合体の配合

水結合材比 (%)	砂結合材比 (%)	空気量 (%)	短繊維混入率 (%)	単位量(kg/m ³)		
				水	特殊粉体	短繊維
48.4	44.8	3.0	2.0	361	1643	25.6

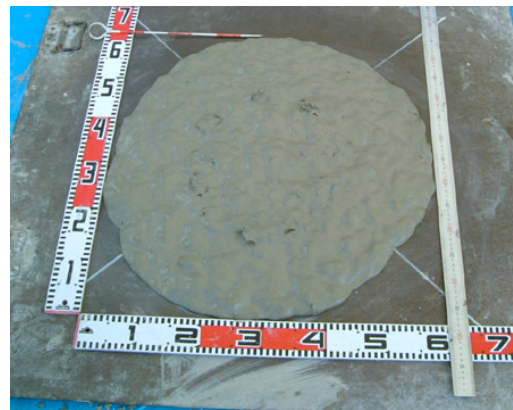


写真-2 スランプフローの状況

末、膨張材を主成分とし、粉末減水剤、粉末収縮低減剤、天然砂などをプレミックスしたものである。使用した短繊維はビニロン繊維（長さ：12mm、直径：40μm）であり、その短繊維混入率（低弾性高じん性セメント系複合体 1m³ 当たりにも占める短繊維の容積百分率）は 2% とした⁴⁾。

(2) 流動性状

配筋や施工の諸条件を総合的に判断し、低弾性高じん性セメント系複合体には締固めなしで充填できる性能（自己充填性）を付与した。自己充填性のレベルは、コンクリート標準示方書の中で最も厳しい条件となるランク 1 に相当するものとした。具体的には、充填試験の充填高さが 300mm 以上となるものとした。

また、自己充填性を確保するうえで、ある程度高い流動性が必要となる。そこで、低弾性高じん性セメント系複合体の流動性は、スランプフロー（写真-2）で管理するものとし、練上がり時に 600~700mm、打込み時

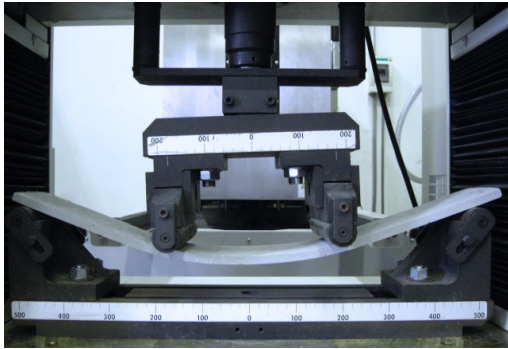


写真-3 低弾性高じん性セメント系複合体を用いた薄板の曲げ変形



写真-4 練り上がりの状態（ミキサ内）

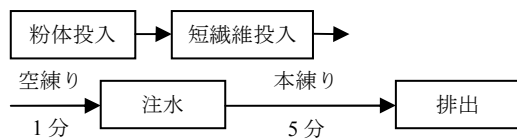


図-2 練混ぜの手順

の最小値を 500mm とした。この根拠については、後述する。

（3）力学的特性および体積変化

構造設計より要求される低弾性高じん性セメント系複合体の圧縮強度およびヤング係数の設計値は、それぞれ 30N/mm^2 、 20kN/mm^2 であり、通常のコンクリートでは双方を満足するように実現することは難しい。

また、低弾性高じん性セメント系複合体は断面力が集中する部分に使用する。このため、ひび割れの集中や進展に伴う部材の使用性、安全性および耐久性の低下に配慮する必要がある。図-1 に示すとおり、連結床版と主桁の剛結により、後打ちを行った連結床版部分は外部拘束によるひび割れを発生する可能性もある。そこで、低弾性高じん性セメント系複合体はじん性とひび割れ分散性に優れ、その体積変化が通常のコンクリートと大きく異なるものとした。

開発した低弾性高じん性セメント系複合体を用いた薄板（厚さ 10mm）は、曲げ荷重を行うと、写真-3 に示すように、ある程度の荷重まで破断することなく、大きな変形を示す。

（4）製造性および施工性

低弾性高じん性セメント系複合体の適用対象は、床面積が約 300m^2 、打込み総量が約 60m^3 になる。補修材などの特殊な材料の多くは、小型ミキサを用いて製造し、左官、充填あるいは吹付けといった方法で少量ずつ施工するものである。しかし、連結部は、従来、コンクリー

トが使用される部分であり、開発する低弾性高じん性セメント系複合体は、通常のコンクリートの製造・施工システムをうまく利用できるものである必要がある。4章および5章で、この製造・施工性に関する試験結果を述べる。

4. 低弾性高じん性セメント系複合体の製造方法に関する検討

（1）貯蔵・搬送

要求性能を満足するためには、さまざまな材料が必要となり、各材料を個別に貯蔵・計量するのは製造が非常に煩雑になる。このため、筆者らは、必要となる材料をすべて粉体とし、事前に混合・存置しても品質変化が小さいことを確認したうえで、プレミックス品（特殊粉体）を採用した。これにより、通常を生コン工場であっても、空きセメントサイロを確保すれば容易に製造できるようになった。

製造試験の結果、特殊粉体は天然砂などのさまざまな材料を含むが、通常のコンクリートの貯蔵・搬送設備（セメントサイロ、貯蔵ビン、搬送管等）を使用しても、閉塞など等の問題を発生しないことが確認された。

（2）計量

練混ぜ水と特殊粉体は、表-1 に示すとおり、単位量が相当に多いため、一般的な計量ビンでは1バッチ分（公称容量 3.0m^3 ミキサを使用した場合の練混ぜ量 2.4m^3 ）を1回で計量できない。しかし、分割して計量すれば、各材料は、1バッチ当たり $\pm 1\text{kg}$ 程度の精度で計量できることが確認された。短繊維は、製造量などを考慮し、事前に1バッチごとに計量し、袋詰めにして人力でミキサ内に投入することとした。

（3）練混ぜ

製造試験は、コンクリート製品工場（栃木県）と生

コン工場（京都府）の2箇所で開催した。工場に保有するミキサは、いずれも強制二軸ミキサであるが、公称容量は、それぞれ、1.5m³、3.0m³と異なるほか、羽根の構造なども若干異なるものであった。

練混ぜ手順を、図-2に示す。短繊維を人力で投入する場合、ミキサを停止した状態で投入するので、粉体と攪拌しながら連続的に短繊維を混入することはできず、投入される箇所に短繊維の偏りを生じる。しかし、空練り時間を30秒程度、練混ぜ水を投入後の練混ぜ時間を5分程度とすることで、短繊維が均一に分散し、かつ流動性が高い状態を得られることが確認された。本練り時間に関しては、3～7分の間で変化させた結果、5分後の流動性状態が最も良いことが確認された。図-2に示す各練混ぜ時間は、それらの結果を反映させたものである。写真-4は、ミキサの開口窓から観察した低弾性高じん性セメント系複合体の練上がり状態である。

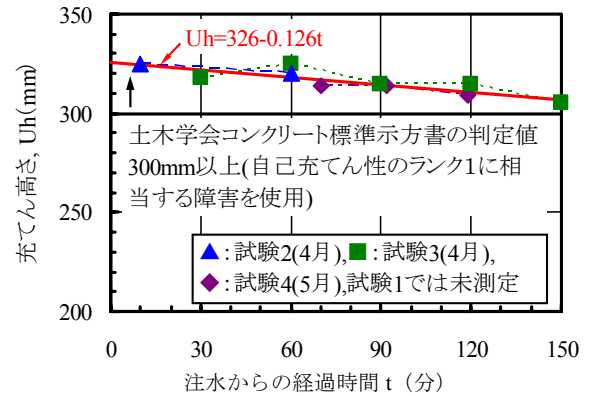
5. 低弾性高じん性セメント系複合体の施工方法に関する検討

(1) 運搬および時間経過による品質変化の確認

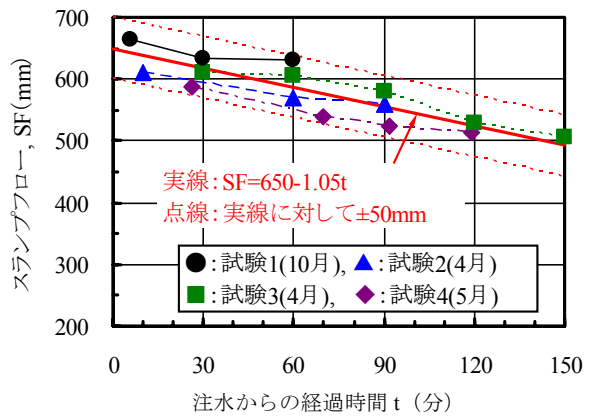
低弾性高じん性セメント系複合体は、通常のトラックアジテータを使用して運搬が可能である。工場から現場までの運搬（25分程度）、積載する2バッチ分の製造、品質管理試験などの時間を加算すると、1バッチ目の注水から打込み開始までの所要時間は60分前後となる。運搬および時間経過により、低弾性高じん性セメント系複合体の品質が変化する可能性がある。このため、トラックアジテータを使用した運搬・経時変化試験を実施した。

図-3は、充填高さおよびスランプフローの経時変化を示すものである。試験は実製造・施工までに4回実施している。図中には、目安として、注水からの経過時間とスランプフローまたは充填高さの試験値を直線回帰した結果を示した。充填高さおよびスランプフローは、試験ごとに若干のばらつきがあるが、注水からの時間の経過に伴い、低下する傾向がある。スランプフローは、120分後では500mm程度にまで低下するが、この場合にも、充填高さは自己充填性の判定値（300mm）以上であることが分かる。

そこで、図-4に示すように、スランプフローと充填高さの関係性を調べた。両値を直線回帰した場合、スランプフローが450mm程度まで低下すると、充填高さが判定値300mmになることが分かる。試験値にばらつきが存在することを考慮し、スランプフローは500mm以上を確保していれば、充填高さが300mm以上となるものと判断された。スランプフローが500mm以上の領域に



(a) 充填高さ



(b) スランプフロー

図-3 充填高さおよびスランプフローの経時変化

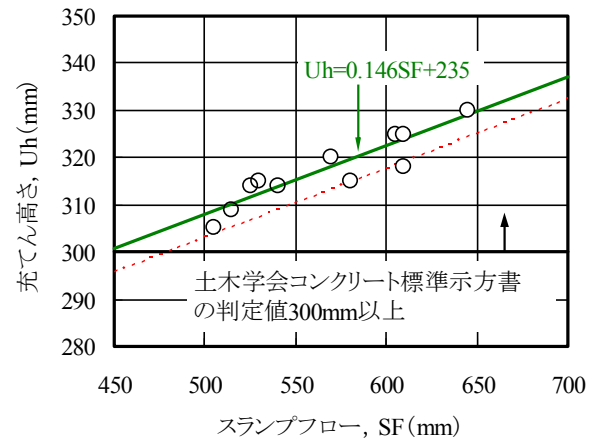


図-4 スランプフローと充填高さの関係

において、どの程度の流動性が必要になるかは、打込み時の流動距離と打込み間隔の関係などの施工方法を十分に検討・決定し、それを満足するように出荷時の目標値の設定や打込み終了までの時間管理を行うことが重要である。

図-5は、空気量の経時変化を示したものである。空気量は、4回の試験において、一部を除き、配合上の設定値3.0%に対して±0.5%の変動幅であり、非常に安定

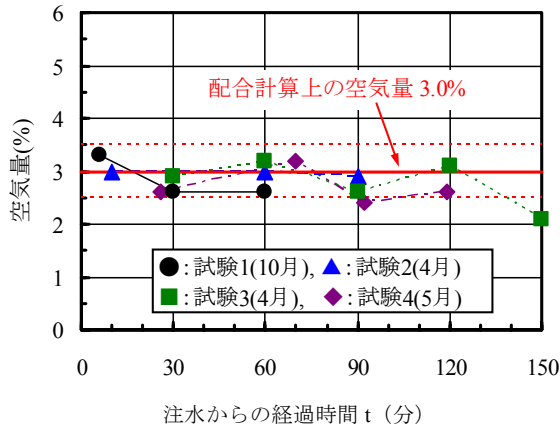


図-5 空気量の経時変化

した状態であった。このため、空気量の変動が圧縮強度などに及ぼす影響も小さく、試験 1 (10 月) と試験 4 (5 月) に実施した施工試験 (出荷から経時変化試験の終了時まで) に 3 回供試体を採取 結果では、圧縮強度は、各試験での平均値に対して $\pm 1.0 \text{ N/mm}^2$ の変動幅で、また両試験の平均値の差は 0.7 N/mm^2 であった。

(2) 打込みによる床版の品質変化の確認

模擬試験体 (寸法は $3.6 \times 3.0 \times 0.2 \text{ m}$, 配筋は実際の連結床版を模擬) を製作し、打込み方法の検討を行った。写真-5 は、模擬試験体の型枠内に打ち込んだ低弾性高じん性セメント系複合体の流動状況である。施工試験では、打込み時のスランブフローは $500 \sim 550 \text{ mm}$ 程度であったが、低弾性高じん性セメント系複合体は底面を先行して流動し、鉄筋周りに充填される様子が観察された。

鉄筋が存在しない側枠近くは摩擦抵抗が小さいため、やや先行して流動するが、最終的な流動距離は鉄筋が密な部分と大きく異なることはなかった。試験体の厚さが 0.2 m で、打込み高さが小さいため、流動距離は試験体の橋軸方向 (3.6 m) の半分以下であった。実際の工事においては、この流動距離を参考として打込み間隔などの計画を行った。

写真-6 は、田辺パーキングエリア工事の連結床版に低弾性高じん性セメント系複合体を打ち込んでいる様子を示すものである。

表-2 は、現場封緘養生を行った管理用供試体と模擬試験体から採取したコア供試体 (両端と中央の 3 箇所、各箇所 3 本ずつ) の圧縮強度およびヤング係数の測定結果である。測定時の材齢は 28 日である。コア供試体の圧縮強度は、管理用供試体の値とほぼ一致し、ヤング係数は管理用供試体に比べて 1 割弱小さい。ヤング係数は、前述のとおり、小さいほうが構造設計上は好ましいので、



写真-5 模擬試験体の型枠内における流動状況



写真-6 実際の工事における打込みの状況

表-2 管理用供試体とコア供試体の圧縮強度およびヤング係数の測定結果

測定項目	荷卸し管理用供試体、現場封緘養生	版模擬試験体から採取したコア供試体				コア供試体と管理用供試体の比
		①	②	③	①②③平均	
圧縮強度 (N/mm ²)	35.5	①	②	③	①②③平均	1.01
		36.9	37.2	36.5	36.9	
		④	⑤	⑥	④⑤⑥平均	
		36.1	35.9	35.2	35.7	
		⑦	⑧	⑨	⑦⑧⑨平均	
		36.2	35.9	33.1	35.1	
		①④⑦平均	②⑤⑧平均	③⑥⑨平均	全平均	
36.4	36.3	34.9	35.9			
ヤング係数 (kN/mm ²)	15.1	①	②	③	①②③平均	0.91
		13.5	14.2	13.7	13.8	
		④	⑤	⑥	④⑤⑥平均	
		13.7	13.6	13.8	13.7	
		⑦	⑧	⑨	⑦⑧⑨平均	
		14.2	13.4	13.4	13.7	
		①④⑦平均	②⑤⑧平均	③⑥⑨平均	全平均	
13.8	13.7	13.6	13.7			

コア供試体の試験値が管理用供試体に比べて若干小さくても問題ない。圧縮強度、ヤング係数ともに、9本のばらつきはとても小さく、標準偏差を求めると、それぞれ、 1.2N/mm^2 、 0.3kN/mm^2 である。

写真-7は、模擬試験体中の鉄筋位置に対してコア抜きを行った場合の側面と、コンクリートカッターを使用して切断した場合の切断面である。いずれにおいても、低弾性高じん性セメント系複合体は、鉄筋周りに対して密実に充填されていることが分かる。

このように、低弾性高じん性セメント系複合体に対して自己充填性を付与し、適切な打込み方法を行うことにより、密実で均質な連結床版が得られることが明らかになった。

6. まとめ

低弾性高じん性セメント系複合体の製造・施工性の試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- ① 低弾性高じん性セメント系複合体は、通常の生コン工場で製造し、トラックアジテータによって現場まで運搬しても所定の品質が得られる。
- ② 低弾性高じん性セメント系複合体の自己充填性は、実施した施工試験の条件下では練混ぜ水の注入から2時間程度確保できる。また、スランプフローが500mm以上であれば、自己充填性を有すると判断できる。
- ③ 実施した施工試験の条件で施工を行えば、低弾性高じん性セメント系複合体の鉄筋周りの充填性と硬化後の連結床版の均質性を確保できる。

低弾性高じん性セメント系複合体を用いた床版連結構造は、材料と構造のそれぞれの特徴を上手に活かした組合せであり、構造の合理化や施工の省力化が図れる。

本構造は新設工事のみならず既設橋梁のリニューアル工事に対しても適用可能であり、今後の展開が期待できる。材料への要求性能は用途によって異なるので、新たな用途に対しては、必要に応じて低弾性高じん性セメント系複合体の改良・開発を進めていく予定である。

謝辞：第二京阪道路田辺パーキングエリア工事において、PC連結床版構造および低弾性高じん性セメント系複合体の採用にあたっては、西日本高速道路(株)に多大なるご理解を賜りました。また、低弾性高じん性セメント系複合体は、三井住友建設(株)と住友大阪セメント(株)が共同で開発したものです。田辺パーキングエリ

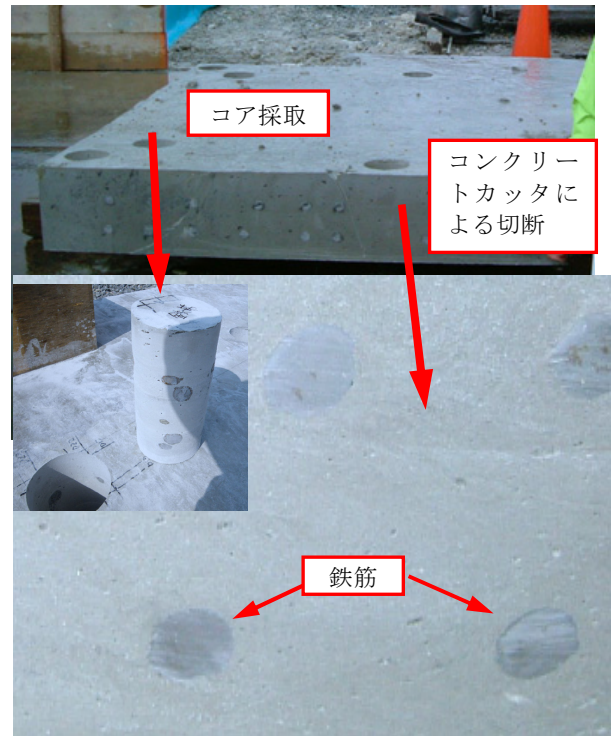


写真-7 模擬試験体から採取したコア側面および切断した側面における鉄筋周りの充填状況

ア工事への適用に向けては住友大阪セメント(株)から多大なるご支援を賜りました。製造に関しては、京阪奈生コン(株)にご協力いただきました。ここに、深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 谷口秀明, 斯波明宏, 佐々木亘, 樋口正典: 低弾性高じん性セメント複合体の開発, 三井住友建設技術開発センター報告, 第8号(投稿中), 2010
- 2) 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 高じん性コンクリートの開発ービニロン繊維補強コンクリートの基礎物性ー, 三井住友建設技術研究所報告, 第6号, pp.73-82, 2008.11
- 3) 谷口秀明, 樋口正典, 佐々木亘, 三上浩: 高じん性コンクリートの開発ー高じん性コンクリートのさらなる高性能化に向けてー, 三井住友建設技術開発センター報告, 第7号, pp.29-38, 2009.9
- 4) 谷口秀明, 樋口正典, 斯波明宏, 佐々木亘: 各種高じん性モルタルの開発, 三井住友建設技術開発センター報告, 第7号, pp.39-44, 2009.9
- 5) 土木学会: 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), 2007.3