

低弾性高じん性セメント複合体の開発

Development of Fiber Reinforced Cementitious Composite with High Ductility and Low Elasticity

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

佐々木 亘 WATARU SASAKI

斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA

樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

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特徴を紹介する。この材料は繊維補強セメント複合材料の一種で、PC 桁を連結する床版部分への適用を想定して開発を行ったものである。高い断面力が作用する部分の連結床版は、構造および耐久性の観点から判断して弱点になる可能性があった。そこで、コンクリートに比べて弾性係数が低く、じん性に富み、さらに変形時に発生するひび割れが微細で、多数に分散する性能を持つ材料を開発し、その部分に適用した。

キーワード：じん性、弾性係数、微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料

This report describes the mix proportion and the quality of developed fiber reinforced cementitious composite. This material has been developed for the use of slabs where prestressed concrete girders are connected. The slab in that part which is subjected to higher section force may have a possible weak point from the viewpoint of the structural safety and durability. These problems could be solved by using the material whose modulus of elasticity is small and ductility is high. Even if the deformation of the slab used with the material grows, the minute cracks are expected to well-distribute in the slab.

Key Words: Ductility, Modulus of Elasticity, Fiber Reinforced Cement Composite

1. はじめに

PC 連結桁橋では、一般には図-1 に示すよう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方法が用いられる。しかし、連結部の施工は非常に煩雑な作業となる。また、隣接する主桁の桁高や断面形状が異なる場合には、横桁部で断面および桁下端側の配筋が不連続となる。

これに対し、新しく考案した床版連結構造は、隣り合う径間の PC 桁を床版で連結して連結桁橋とするものである。これにより、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、連結部の施工性や維持管理性の向上を図ることが可能になる。

床版連結構造において、断面力が大きい箇所の床版には、従来のコンクリートよりも弾性係数が低い材料を使用し、かつ床版の支間を大きくすることで、床版部に作用する断面力を大幅に低減することができる。しかし、従来のコンクリートでは、弾性係数を下げようとすると、

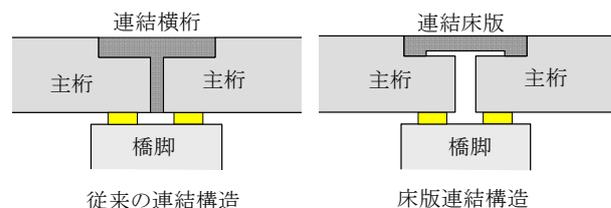


図-1 横桁連結構造と床版連結構造の比較

圧縮強度も低下するため、設計基準強度が大きく制限される。また、一般的なモルタルや人工軽量骨材などを使用することでも弾性係数は小さくできるが、初期ひび割れや脆性的な破壊などを発生する可能性があり、連結床版の長期耐久性を確保するうえで事前の検討・対策を十分に行う必要がある。

筆者らは、それらの問題を解決するため、弾性係数が小さく、じん性とひび割れ分散性に優れた材料「低弾性高じん性セメント系複合体」を開発した。

2. 低弾性高じん性セメント系複合体の要求性能と使用材料・配合

(1) 要求性能

低弾性高じん性セメント系複合体は、第二京阪道路田辺パーキングエリア工事の連結床版への適用を想定し、その要求性能を満足するように配合設計を行った。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）。

同工事は、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、PC桁は各径間の支間長および桁高が異なるものを使用しなければならなかった。図-1に示す連結床版構造を採用し、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、ヤング係数の設計値に関しては、前者が28kN/mm²であるのに対して後者は20kN/mm²であり、通常のコンクリートでは、圧縮強度、ヤング係数の双方の設計値を満足することは難しい。

また、断面力が集中する箇所の連結床版に使用するため、ひび割れの集中・進展に伴う部材の安全性や耐久性の低下に配慮する必要があった。連結床版は後打ちとなるため、主桁に拘束されてひび割れを発生する可能性もあった。このため、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、その体積変化も通常のコンクリートとあまり大きく異なることとした。

さらに、適用する箇所は、床面積が約300m²、打込み数量が約60m³である。補修等を目的にさまざまな材料が開発されているが、少量の材料を小型ミキサで製造し、左官、充てんあるいは吹付けによって施工するようなものが多い。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・施工の設備や方法を適用できるものが必要であった。

(2) 使用材料および配合

前述の要求性能を満足するように開発を行った結果、低弾性高じん性セメント系複合体は、最終的に複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）¹⁾の一種に相当するものとなった。

低弾性高じん性セメント系複合体は、表-1に示すと



写真-1 田辺パーキングエリアの全景（完成後）

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 低弾性高じん性セメント系複合体に使用する特殊粉体と短繊維

おり、水、特殊粉体および短繊維を混合して製造する。

写真-2は、特殊粉体と短繊維を撮影したものである。これらに水を混合するだけで、低弾性高じん性セメント系複合体を得ることができる。

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・計量を行うのは製造が非常に煩雑であった。このため、必要となる材料をすべて粉体とし、また事前に混合・存置できる状態（特殊粉体）としたことで、通常の生コン工場であっても、空きセメントサイロを確保するだけで容易に製造できるようにした。特殊粉体には、ポルトランドセメント、石灰石微粉末、膨張材を主成分とし、粉末減水剤、粉末収縮低減剤、天然砂等が含まれている。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当たり占める短繊維の容積百分率）は2%とした²⁾。

3. 低弾性高じん性セメント系複合体の品質

(1) 自己充てん性および流動性

対象構造物の配筋や施工の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は、高流動コンクリートの自己充てん性のランク 1³⁾ に相当する自己充てん性を持つものとした。自己充てん性のランク 1 とは、鋼材の最小あきが 35~60mm 程度で、複雑な断面形状、断面寸法の小さい部材または箇所に打ち込まれる高流動コンクリートに必要な自己充てん性を有していることを指す。写真-3 に示す試験器を用いた充てん試験 (JSCE-F511 に準拠) を実施し、充てん高さが 300mm 以上であれば合格としている。この試験器の底の部分には、幅 200mm に対して D10 鉄筋を 5 本入れ、そのあきを 35mm とした障害物を入れており、材料の自重のみでこの障害物を通り、300mm 以上の高さまで上がってくる必要がある。

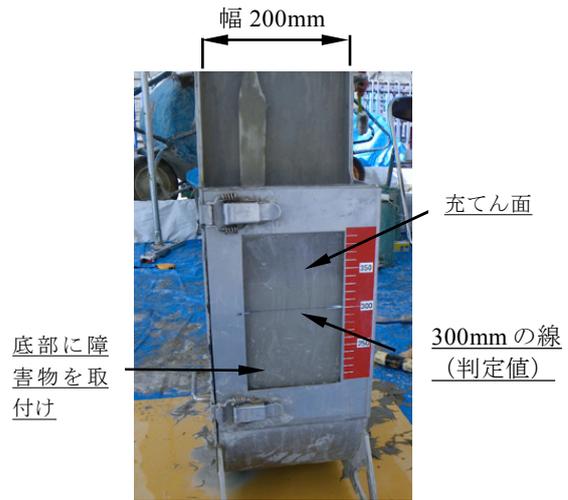


写真-3 充てん高さの測定状況



写真-4 スランプフローの測定状況

写真-4 は、スランプフロー試験 (JIS A 1150 に準拠) 後の状態を示している。低弾性高じん性セメント系複合体は、高流動コンクリートと同様に、流動性がある程度高くないと、所定の自己充てん性が得られない。低弾性高じん性セメント系複合体の練上りのスランプフローは、600~700mm の範囲である。これまでの試験により、スランプフローが 500mm 以上であれば、前述の充てん高さは 300mm 以上となることが確認されている。

(2) 圧縮強度およびヤング係数

低弾性高じん性セメント系複合体の材齢と圧縮強度 (JIS A 1108 による) およびヤング係数 (JIS A 1149 による) の関係を、図-2 に示す。前述のとおり、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 、 18kN/mm^2 である。図中には、比較として設計基準強度 30N/mm^2 に相当する普通ポルトランドセメントと天然骨材を使用した普通コンクリートの結果と設計値を示した。

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と同様に、標準水中養生を行った材齢 28 日の試験値に対して変動係数 10%程度を見込んで水結合材比を定めた。このため、材齢 28 日の圧縮強度は、設計基準強度 30N/mm^2 よりも若干高い。また、低弾性高じん性セメント系複合体の材齢の経過に伴う強度発現性は、普通コンクリートとほとんど違いがないことが分かる。

一方、ヤング係数は、同養生下の材齢 91 日の試験値が設計値である 20kN/mm^2 とほぼ一致するよう、配合設計を行っている。管理材齢 28 日におけるヤング係数は 18kN/mm^2 程度となる。構造設計上の要求により、ヤン

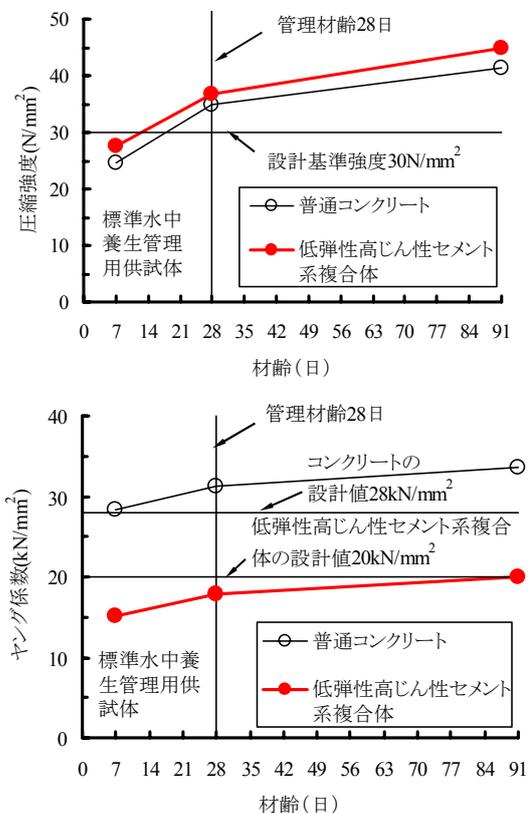


図-2 材齢と圧縮強度およびヤング係数の関係

グ係数は低いほうが望ましいこと、材齢の経過に伴ってヤング係数も増加する傾向があることなどを考慮したものである。低弾性高じん性セメント系複合体のヤング係数は、比較した普通コンクリートに対して、設計値で0.71倍(=20/28)、試験値(材齢28日)では0.57倍(=17.9/31.3)である。

(3) じん性およびひび割れ分散性

低弾性高じん性セメント系複合体は、写真-5に示すように、これを用いた薄板(厚さ10mm)に対して曲げ載荷を行うと、ある程度の荷重まで破断することなく、大きな変形を示す材料である。

図-3は、100×100×400mmの角柱供試体を用いて、低弾性高じん性セメント系複合体の曲げ強度試験(材齢28日、JSCE F553による)を実施した場合の荷重-たわみ曲線を示している。比較として、水セメント比50%のコンクリートに対して、ビニロン繊維(長さ30mm、コンクリート用)の短繊維混入率(Vf)を0~1.5%とした場合の試験結果⁴⁾を図示した。写真-6は、普通コンクリート、短繊維補強コンクリートおよび低弾性高じん性セメント系複合体の曲げ強度試験で発生するひび割れ状態である。

普通コンクリートは、ひび割れ発生荷重に達すると、曲げ破壊が急激に進行する。ビニロン繊維を混入した短繊維補強コンクリートは、曲げひび割れが生じた時点で一度荷重が急降下し、たわみが增大するものの、その後は、ビニロン繊維によって粘りを見せて大きな変形を示す。短繊維混入率が大きいほど、曲げひび割れが発生した後の荷重の低下量は小さく、その後のたわみの増加に伴って荷重も増加する傾向がある。

ビニロン繊維は、引張強度がコンクリートに比べて相当に高いが、ヤング係数はコンクリートと同程度である。また、ビニロン繊維のセメントマトリックスとの一体性は、親水性による繊維表面の付着に依存し、表面の凹凸による機械的な付着に依存する鋼繊維とは異なる。このため、ビニロン繊維のヤング係数が小さいことと多少の抜けを生じることによって直ちにビニロン繊維が荷重を負担することができず、その後、ビニロン繊維が伸長しながら耐力を回復して再び荷重が増加する現象を生じる。

一方、低弾性高じん性セメント系複合体は、ビニロン繊維を使用しているが、微細なものを多量に使用していること、セメントマトリックス中に粗骨材などのひび割れが集中して発生しやすいものが存在しないことなどにより、ひび割れ発生荷重に達した後、たわみの増加に伴って荷重が増加し、たわみが5~6mm程度に達するま

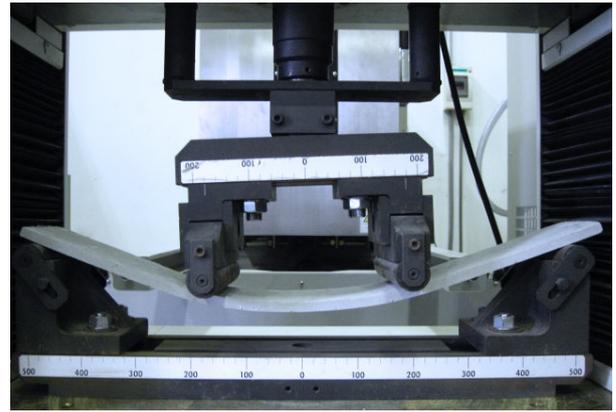


写真-5 低弾性高じん性セメント系複合体を用いた薄板の曲げ変形

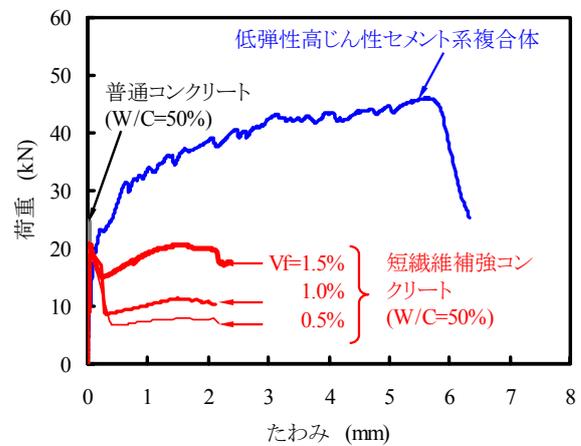


図-3 荷重-たわみ曲線

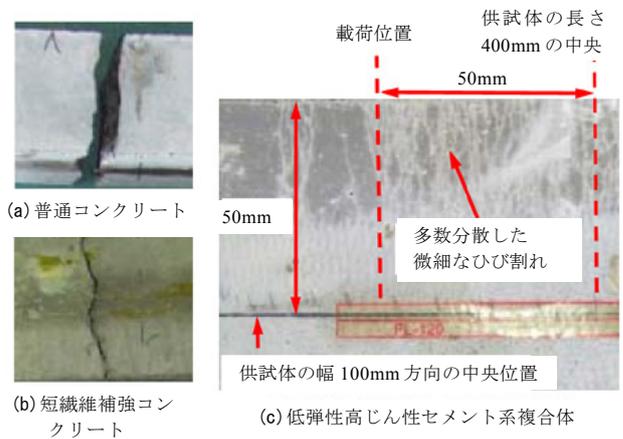


写真-6 曲げ供試体に発生するひび割れ

で破壊に至らない。低弾性高じん性セメント系複合体の最大荷重とそのたわみは、通常の短繊維補強コンクリートに比べて相当に大きい。荷重-たわみ曲線と横軸で囲まれる部分の面積は材料のじん性を表すものであり、低弾性高じん性セメント系複合体が高いじん性を有することが分かる。また、図-3において、低弾性高じん性セ

表-2 曲げ強度試験の結果

材料名	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 E (kN/mm ²)	ひび割れ 発生強度 σ_{bc} (N/mm ²)	曲げ強度 σ_b (N/mm ²)	たわみが 2mmまで の曲げ じん性係数 (N/mm ²)	最大荷重 までの面 積 (N・mm)	最大荷重 までの曲 げじん性 係数 (N/mm ²)	最大荷重 時の曲げ モーメント Mmax (N・mm)	最大荷重 時の曲率 ϕ_u (1/mm)	引張終局 ひずみ $\varepsilon_{tu,b}$	引張強度 f _{t,b} (N/mm ²)
低弾性高じん性セメント系複合体 (設計基準強度30N/mm ² , 微細な ピロコン繊維2.0%混入), A	37.2	15.9	4.08	13.86	9.59	194202	11.53	2342500	428	0.0430	4.62
短繊維補強コンクリート(設計基 準強度30N/mm ² , コンクリート用ピ ロコン繊維0.35%混入), B	34.7	31.3	4.13	4.31	1.00	389	3.64	738333	5	0.000541	1.44
A/B	1.1	0.5	1.0	3.2	9.6	499	3.2	3.2	79	80	3.2

メント系複合体の曲線の小さな凹凸は、写真-6 に示す微細なひび割れを多数発生していることを示している。

表-2 は、JSCE F553 および JCI-S-003 に基づく低弾性高じん性セメント系複合体の曲げ強度試験結果である。表中には参考として、剥落防止を目的としてピロコン短繊維(長さ 30mm, コンクリート用)の短繊維混入率を 0.35%とした設計基準強度 30N/mm²のコンクリートの試験値を併記した。表中に示すひび割れ発生強度、曲げ強度、曲げじん性係数、曲げモーメント、曲率、引張終局ひずみおよび引張強度は、いずれも前述の規準に基づいて算出したものである。

表-2 に示すとおり、低弾性高じん性セメント系複合体のひび割れ発生強度は、圧縮強度が同程度の短繊維補強コンクリートとほぼ一致する。しかし、図-3 に示すとおり、低弾性高じん性セメント系複合体は、ひび割れ発生強度に達した後、荷重を持続して加えると、たわみが 6mm 弱になるまで、荷重およびたわみの双方が大きくなる。このため、曲げ強度はひび割れ発生強度よりも大きく、短繊維補強コンクリートと比べても 3 倍程度大きい。短繊維補強コンクリートの短繊維混入率が高くなると、図-3 に示すように、曲げひび割れ発生後に荷重の増加が見られるようになるが、低弾性高じん性セメント系複合体のように曲げ強度が顕著に大きくならないことが分かる。

荷重-たわみ曲線に囲まれる面積から算出される曲げじん性係数は、たわみ2mmまでの値では約10倍、最大荷重までの値では3倍程度になる。最大荷重までの曲げじん性係数は、短繊維補強コンクリートのように、ひび割れ発生荷重の後に荷重が低下するもの(ひずみ軟化曲線を示すもの)ではひび割れ発生荷重に達するまでのたわみが極めて小さい範囲の曲げじん性係数を

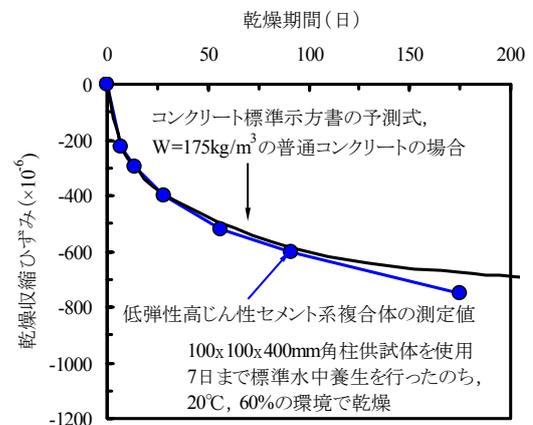


図-4 乾燥収縮試験の結果

求めることになるので、低弾性高じん性セメント系複合体とは直接比較できない。曲げじん性係数よりも最大荷重までの面積を比較すれば、低弾性高じん性セメント系複合体は短繊維補強コンクリートの約500倍となる。

最大荷重時の曲げモーメントおよび曲率も、低弾性高じん性セメント系複合体は短繊維補強コンクリートに比べて相当に大きいことが分かる。なお、短繊維補強コンクリートは、ひずみ軟化曲線を描くため、前述の計算により求まる引張強度は小さくなる。

(4) 体積変化

低弾性高じん性セメント系複合体の自己収縮ひずみ(JCI法に準拠し、埋込みひずみ計を使用した。室内・実機試練りで採取)は、材齢7日および28日において $\pm 50 \times 10^{-6}$ 程度の範囲であり、粉体量が多い材料としては比較的小さな値であった。

図-4 は、低弾性高じん性セメント系複合体の乾燥収縮試験の結果である。試験は、JIS A 1129 に準じ、打込み翌日より標準水中養生を行い、材齢 7 日より乾燥を開始した。測定は、コンタクトゲージ法によるものである。図中には、参考として、土木学会コンクリート標準示方書に示された収縮ひずみの予測式⁵⁾を用いた、通常のコンクリート（単位水量 175kg/m³）の値を示している。低弾性高じん性セメント系複合体の乾燥収縮ひずみは、通常のコンクリートと大きく変わるものではないことが分かる。

自己収縮試験を終了した供試体を使用して熱（線）膨張係数（JSCE K561 による）を測定した。熱膨張係数の試験値は $9.5\sim 9.7\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ となり、通常のコンクリートの設計で用いる標準値（ $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）とほぼ一致する結果となった。

4. まとめ

低弾性高じん性セメント系複合体の品質について、以下のことが確認できた。

- ① 自己充てん性ランク 1 に相当する自己充てん性と高い流動性を有する。
- ② 設計基準強度 30N/mm² を満足する圧縮強度を得ながらヤング係数を 20kN/mm² 以下に抑えることができる。

- ③ 高いじん性を持ち、微細なひび割れに多数分散できる。
- ④ 生コン工場でも容易に製造できる。

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うまく活かしたもので、今後、橋梁の構造の合理化や施工の省力化に向けて展開していく予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.288-290，2008.3
- 4) 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
- 5) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】，pp.45-47，2008.3