

超高強度繊維補強コンクリートを使用した鉄道橋梁の設計

全日本コンサルタント(株) 技術部

梶原 雅也

真鍋 恒行

中野 誠嗣

神尾 正

論文要旨

河川改修に伴う鉄道橋梁の改築を設計するに際し、長スパン化によって現橋梁より桁高が高くなり、線路嵩上が必要となる問題に直面した。線路嵩上には種々の問題点があったため、橋梁を下路桁構造とし、鉄道橋梁では国内初の超高強度繊維補強コンクリートを用いることにより床版厚を薄くし、この問題を解決するに至った。

本稿では、従来の鉄道PC下路桁との設計比較、問題点およびそれらの設計方針とFEM解析を用いた机上検証結果について報告する。

キーワード：鉄道単線桁、UFC下路桁、超高強度繊維補強コンクリート

まえがき

三岐鉄道(株)三岐線中村第3橋梁は三重県四日市市中村町に位置する橋長9.6m、支間長8.9mの鋼槽状桁である。この度、準用河川^{かよう}生川河川改修事業に伴い架け替えられることになった。河川改修に伴い本橋は橋長が約15.9m、支間長が約14.5mとなり、従来の単線PC下路桁で設計を行えば約150mmの線路嵩上が必要となる。但し、鉄道事業者からは以下の2条件が提示された。

当該の橋梁は駅部に近接しているため線路嵩上は不可能

線路勾配、縦曲線半径は現状維持を最低条件とする

そこで新しい材料である超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete: 以下、UFC)を用いた下路桁を採用することによって床版厚を薄くし、結果、鉄道縦断線形を変更せず、橋梁改築を可能なものとした。以下に、従来のPC下路桁との設計比較、問題点およびそれらを解決するための対策について述べるものとする。

1. 設計概要

新設される橋梁は単線載荷1径間の下路桁橋(支間長14.5m、幅員4.0m)である。

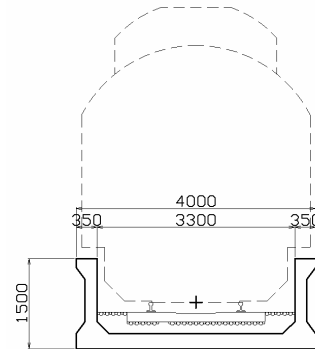


図-1 標準断面図

材料に今回鉄道橋として初めて採用されるUFCを使用することにより、問題となる床版厚を線路嵩上げが不要となる250mm以下とする。

設計基準は「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 鉄道総合研究所編 平成16年4月版」(以下、鉄道標準)に基づいて設計することを原則とした。但し、UFCは従来のコンクリートと材料特性の異なる点があるため、適宜「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案) 土木学会 平成16年9月版」(以下、UFC指針)を適用する。

また、鉄道標準に基づかない部分があることかつ鉄道橋として初のUFC採用となるため、従来からの設計に追加してFEM解析を実施し詳細な検討を実施することとした。

更に、橋梁供用に際しては、計測等を実施し、設計段階における想定の妥当性を確認することが望ましいと考えられるため、それらの試験方法についても示した。

2. UFCの特性

UFC指針によれば、超高強度補強繊維コンクリートとは、圧縮強度の特性値が150 N/mm²以上、ひび割れ発生強度の特性値が4 N/mm²以上、引張強度の特性値が5 N/mm²以上の繊維補強を行ったセメント質複合材である。高強度かつコンクリートの引張強度を期待できることが大きな特徴であり、その他にも高じん性、高耐久性を有する材料である。

また、異形鉄筋を用いると構造部材の製作時にUFCの収縮が異形鉄筋により拘束され、ひび割れが発生する可能性があるため原則使用しない。

2-1 使用材料

基本的な構成材料は、セメント、シリカヒューム等の混和材、骨材、水、減水剤、補強繊維である。

表 - 1

		単位	UFC	普通コンクリート
使用材料	セメントの種類		ポルトランドセメント	
	骨材の粒径	mm	~2.5	25
	その他		シリカヒューム補強用繊維	—
水セメント比			~0.24	0.55
単位重量		kN/mm ³	25.5	24.5

補強繊維は、直径0.1 mm~0.25 mm、長さ10~20 mm、 2×10^3 N/mm²以上の引張強度を有するものを標準とする。このような仕様の繊維として鋼繊維があげられる。



図 - 2 鋼繊維

2-2 今回使用材料の物性値

表 - 2

		単位	UFC	普通コンクリート
特性値	圧縮強度	N/mm ²	180	50
	引張強度 (ひび割れ発生強度)	N/mm ²	8.0	3.1
弾性係数		N/mm ²	5.0×10^4	3.3×10^4
ポアソン比			0.2	
透水係数		cm/s	4×10^{-17}	$10^{-11} \sim 10^{-10}$
塩化物イオンの拡散係数		cm ² /年	0.0019	0.14~0.9
空隙量		vol.%	4	10

2-3 養生

打ち込み後に初期養生を施した後、標準熱養生(90の蒸気養生48時間)を行うことを原則とする。これにより、硬化後の組織がより緻密化し、高強度を発現するとともに、収縮やクリープを大幅に低減し、耐久性を向上することができる。

表 - 3

		単位	UFC	普通コンクリート
収縮	標準熱養生中	$\times 10^{-6}$	450	380
	養生終了後	$\times 10^{-6}$	50	130
クリープ係数			0.4	1.2

2-4 製作方法

UFC下路桁の製作は工場製作によるプレキャスト方式となる。これは前述の標準熱養生の必要性が一つの理由であるが、もう一つの理由に、繊維補強コンクリートであるための繊維配置の連続性にある。UFC下路桁は鉄筋の代わりに配置されている鋼繊維によってじん性が確保されているため、打継ぎ面での繊維の無配置面が存在してはならず、そのため打継ぎ無しの一括形成(打設)とする必要があるが、場所打ちの型枠設備では対応が難しいためである。

2-5 継目部の処理

本橋では、線路方向7ブロックとし、ブロック毎に製作されたプレキャスト部材を現地でPC鋼線により一体化するセグメント工法を採用した。前述のとおり、独立して製作されたプレキャスト部材をプレストレスによって一体とする場合には、継目部の位置、継目部に用いる材料の性質、プレストレス等によって、その継目部の構造的性質および耐久性は相当に異なる。現段階ではプレキャスト部材と同等のUFCを数cm程度の幅で打ち込み、継目部に対し標準熱養生を行うのが良いとされる。

【机上検証結果】

(1) 応力照査

a) 軸方向応力度

FEM解析の結果、主応力が引張応力の制限値内にあることを確認した。また、格子解析結果と比較しても大差が無かった。

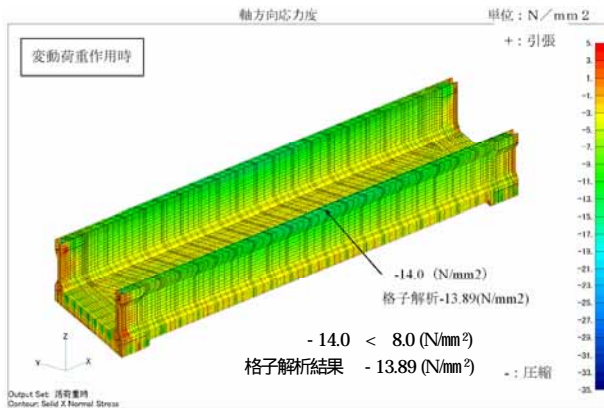


図 - 3 軸方向応力度 (上面)

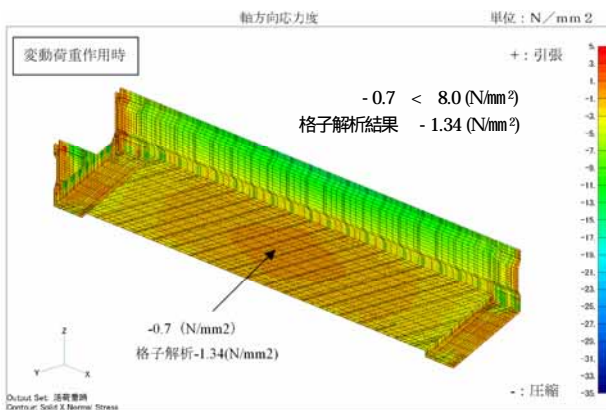


図 - 4 軸方向応力度 (下面)

b) 最大主応力

FEM解析の結果、主応力が引張応力の制限値内にあることを確認した。

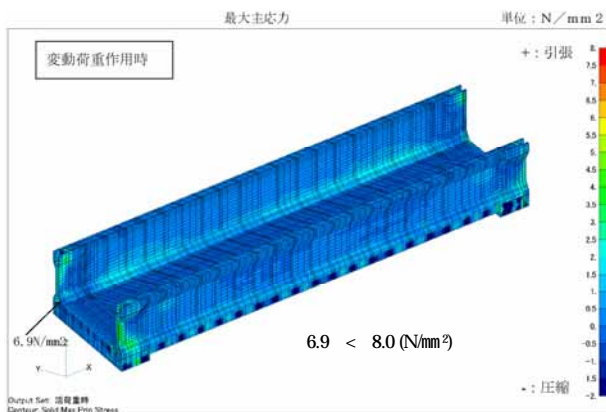


図 - 5 最大主応力時 (上面)

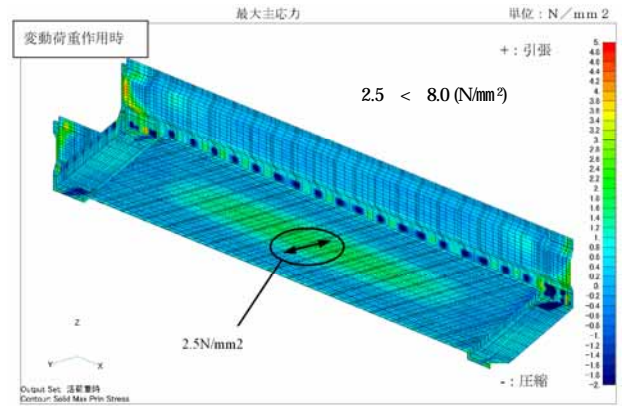


図 - 6 最大主応力時 (下面)

(2) 横座屈に対する安全照査

FEM解析の結果、横座屈限界は変動荷重が約 155 倍作用した場合であり、十分に安全であることを確認した。

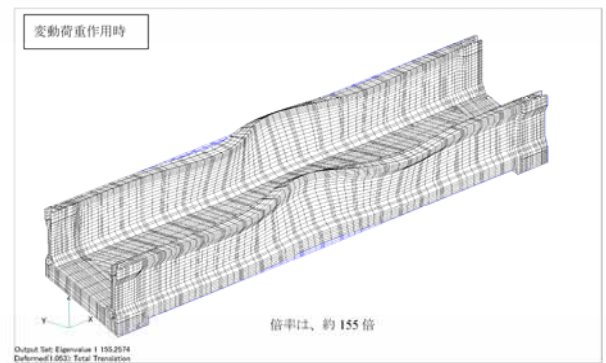


図 - 7

4-2 振動特性の把握

【設計方針】

UFCを用いた構造物は部材厚が薄くなり、普通コンクリート構造物に比べて固有周期が長くなる可能性がある。よって、本橋梁での列車の走行を考慮した振動特性 (横方向の振動含む) を把握し、共振や衝撃の影響がないか確認する。

具体的には、従来と同様の方法 $[f = 1/(2 \times L_0^2) \cdot ((EI \cdot g)/D)]$ の他、3次元FEM解析により固有値解析を実施することとし、これから求まる固有振動数と従来のPC下路桁との比較を行い、振動特性の違いを把握する。

【机上検証結果】

従来設計法に基づくPC下路桁では、簡易式による振動数は11.0Hzである。FEM解析によりUFC下路桁の固有値解析を行った結果、1次モードが10.2Hz、簡易式による振動数は11.1Hzであり、振動数に大差の無いことを確認した。

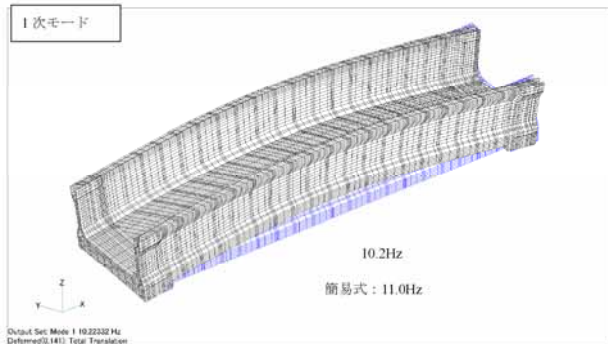


図 - 8 1次モード時

4-3 たわみ量の照査

【設計方針】

従来同様、2次元フレーム解析により求められるが、今回は、斜角を考慮した3次元FEM解析にて別途検討を行い、常時の走行安定性からたわみの設計限界値は $(< L_b / 500)$ とする。「鉄道標準変位制限 7.2.3」

【机上検証結果】

2次元フレーム解析及びFEM解析を行った結果、たわみ量は4.8mm(2次元フレーム解析)、5.0mm(FEM解析)となり、限界値29.0mm以下であることを確認した。格子解析とFEM解析ではほぼ同程度の値が求まっており、この点からも問題ないと思われる。

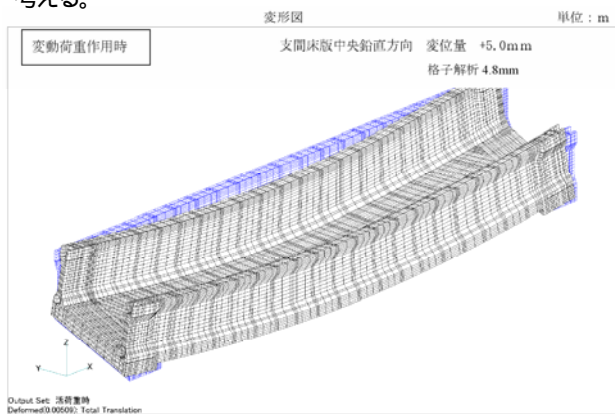


図 - 9

4-4 補強鉄筋の必要性の照査

吊下げ鉄筋・PC定着部補強・ストッパー周辺の補強等、鉄道標準の規定では補強鉄筋が必要とされるが、UFC構造には原則使用しない。そこで、鉄道標準の照査手法を十分に把握した上で各設計方針を定めることとした。

(1) 吊下げ鉄筋

【設計方針】

U形断面の桁は、床スラブが主梁下縁に吊り下げられている構造であるため、主梁腹部には鉛直方向の引張力が生じている。これに対して、吊り下げ鉄筋を配置する必要がある。

「鉄道標準 14.6.4(9)」

本設計では、3次元FEM解析によりウェブ下端に生じる鉛直方向応力がUFCの引張応力の制限値内にあることを照査することとする。

【机上検証結果】

FEM解析を行った結果、ウェブ下端に生じる鉛直方向応力がUFCの引張応力の制限値内であることが確認された。よって、吊下げ鉄筋は不要と判断する。

(2) PC定着部補強鉄筋

【設計方針】

定着具背面のコンクリートは、PC鋼材に垂直な方向に生じる引張応力に対して、U字筋、格子状、らせん状の鉄筋で補強する。「鉄道標準 11.12.2」

本設計では定着具背面のコンクリートの割裂に対しては、定着部に対して3次元FEM解析を行い、定着部背面に発生している主応力がUFCの引張応力の制限値内にあることを照査する。

【机上検証結果】

FEM解析を行った結果、定着部背面に生ずる主応力がUFCの引張応力の制限値内であることが確認された。よって、補強筋は不要と判断する。

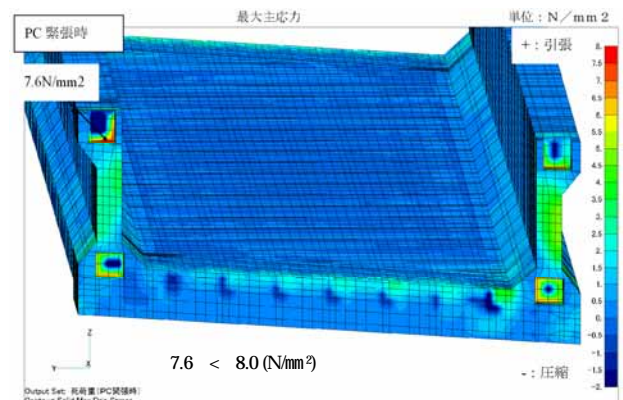


図 - 10

(3) ストッパー周辺の補強鉄筋

【設計方針】

鉄道標準の規定では、ストッパー周辺の桁端は設計水平力に対し、次の1)2)により破壊に関する照査を行う必要があるが、UFC構造には原則鉄筋を使用しないため、設計方針上の課題が生じる。

1) コンクリートのせん断破壊の照査

コンクリートの設計水平耐力算出式にはせん断破壊面に交差する補強鉄筋量が含まれているため、鉄道標準の規定では照査できない。

2) 補強鉄筋量の算出

鉄道標準では、仮にコンクリートのせん断破壊が生じても桁端が破壊しないように補強鉄筋を配置することとしている。「鉄道標準 16.6.4」

本設計では、UFCにおけるせん断耐力の算出はUFC指針に従い、ストッパーの外側に働く面内のせん断に対してせん断破壊面に沿って抵抗できる終局せん断耐力を求めることとする。

【机上検証結果】

上記のような設計方法により、せん断破壊の照査を行い、十分に安全であることを確認した。よって、ストッパー周辺の補強鉄筋は不要と判断する。

5. 実橋での検証計画

鉄道として初のUFC採用となるため、橋梁供用に際しては実橋での計測を実施し、机上での検証の妥当性を確認することが望ましいと考える。具体的には、1)列車通過時のたわみ量および応力値を測定し設計段階における算定数値の妥当性を確認する 2)衝撃振動特性の把握を目的として振動計測を行い、固有振動数、振動モード形の確認を行う 等が考えられる。

6. 考察および今後の課題

本設計では、UFCが鉄道橋梁として実績の無い材料であることを踏まえ、従来設計に基づくPC下路桁と比べ極端な断面剛性の低下を避けるため、床スラブ、主梁等の部材厚は構造細目から決まる最小値まで縮小したが、桁高に関しては当初設計(PC下路桁)の値とした。結果、安全性および復旧性の照査は、安全率0.5~0.7<1.0程度と余裕がある結果となり、FEM解析による検証も問題なかった。

今後、実橋での各計測結果から机上での設計を逆検証し、

設計手法の妥当性の確認、剛性低下による影響度合いの把握および設計段階における設定条件の精度向上を図れば、桁高縮小等上部工の更なる軽量化が可能かと考える。本橋梁はスパンが短いため、応力ではなく定着金具などから決まる最小値で部材を決定している。よって、より長スパンの橋梁では、UFCの特性を生かした最適プロポーショナルな橋梁が設計できるのではないかと考える。

あとがき

本稿では、鉄道橋梁としては国内初となるUFC下路桁橋を採用するにあたり、設計基準が存在しない中、設計方法を策定し、別途FEM解析により設計結果の検証も行った。

UFCは強度と耐久性に優れる材料であるが、普通コンクリートと比べ、実績が少なく材料コストも高いのが現状である。しかし、本橋梁のような特殊な条件下、実績を積み上げ、上部工死荷重の軽減、長スパン化、強いては下部工の縮小・減少等が期待できる材料であるが故、今後も鉄道橋梁で採用される機会が増加すると思われる。

最後に、本稿の作成にあたり、ご指導、ご助言およびご協力を頂きました三岐鉄道株式会社、鉄道総合技術研究所ならびに関係各位に深く感謝の意を示す次第です。

参考文献(または引用文献)

- 1) (財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計基準・同解説 コンクリート構造物、平成16年4月
- 2) (財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計基準・同解説 変位制限、平成18年2月
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)、平成16年9月
- 4) 土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、平成14年3月