# 研究報告

# 鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の開発

一宮 利通\*1・金治 英貞\*2・小坂 崇\*3・齋藤 公生\*4

近年、鋼床版の溶接部に、車両(とくに大型車)の走行に伴う変形に起因する疲労き裂の発生が顕在化している。新設橋梁においては、開断面リブやデッキプレートの増厚などの対応により、そのリスク低減が図られているが、舗装の損傷など付随した懸念点も残されている。そこで、超高強度繊維補強コンクリートを用い、耐久性が高く、しかも鋼床版並みに軽量なコンクリート系床版を開発した。ここでは、FEM解析による試設計から構造諸元を決定するとともに、輪荷重走行試験により輪荷重の繰返し載荷に対する安全性を検証した結果、ならびに軸圧縮力の繰返し載荷に対する安全性を検証した結果を報告する。

キーワード:超高強度繊維補強コンクリート、道路橋床版、輪荷重走行試験

# 1. はじめに

都市高速の道路橋では、橋脚の位置や基礎の規模が制約 されたり、非常に短い期間での建設が要求されたりするこ とから, 軽量な鋼床版の使用頻度が他の道路と比べ相対的 に高い。しかし、近年、既設道路橋においてさまざまな要 因により疲労き裂の発生が顕在化している。新設橋梁にお いては開断面リブやデッキプレートの増厚などの対応によ りそのリスク低減が図られているが、根本的な解決とはな っていない。そこで、筆者らは、超高強度繊維補強コンク リート(以下, UFC)を用い、自重が鋼床版と同程度とな る道路橋床版(以下, UFC床版)を開発している1)。本 床版は次章で示すように2方向にリブを有する構造となっ ており、輪荷重載荷によるリブのねじりなど局所的な応 力、ならびに輪荷重の繰返し走行に対する安全性を検証す る必要がある。また、合成桁に作用する曲げモーメントに より床版には軸圧縮力が繰返し作用する。そこで本研究で は、輪荷重による床版の挙動および輪荷重の繰返し載荷に 対する安全性を検証した。また、UFC 床版への軸圧縮力 の繰返し載荷に対する安全性を検証した。

# 2. UFC 床版の概要

UFC 床版の概念を図・1 に示す。鋼床版箱桁のデッキプレートおよび縦リブをこれらと重量が同等な UFC 床版で代替するものとした。UFC 床版は橋軸直角方向に配置される鋼横桁または鋼横リブ、および橋軸方向に配置される鋼主桁または鋼縦桁の4辺で支持される構造とした。また、UFC 床版と鋼桁はずれ止めにより一体化され、合成後に載荷される死荷重や活荷重に対して合成桁として抵抗するものとした1)。

UFC 床版の概要を図 - 2 に示す。リブの配置は種々考

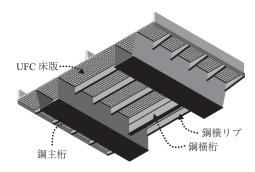


図 - 1 UFC 床版の概要

えられるが、今回はワッフルタイプとした。本床版は橋軸 方向および橋軸直角方向に約 250 mm 間隔でリブを有し、床版リブ位置での高さは 123 mm、リブのないスラブの厚さは 40 mm である。リブには高強度 PC 鋼材 1S15.7 mm が 2 本ずつ配置され、プレテンション方式で 2 方向にプレストレスが導入される 1)。

# 3. UFC 床版の試設計

## 3.1 試設計の対象構造

試設計は、実橋である鋼 5 径間連続鋼床版箱桁(平均支間長 70 m、全幅員 19 m)を対象モデルとして、鋼床版のデッキプレートおよび鋼縦リブ部分を UFC 床版に置き換えて試設計した。試設計の結果、算定された UFC 床版は、図 - 2 に示すようにスラブ厚 40 mm、リブ高 123 mm であり、2 方向にリブを配置したワッフル状の床版である。

本検討に用いた UFC の圧縮強度  $f'_{ck}$  は 180 N/mm², ひび割れ発生強度  $f_{cr}$  は 8 N/mm² とした。UFC 床版に生じる応力度は土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」(以下,UFC 指針)<sup>2)</sup> に準拠し,引張はひび割れ発生強度  $f_{cr}$ , 圧縮は  $0.6 f'_{ck} = -108$  N/mm² を制限

<sup>\*1</sup> Toshimichi ICHINOMIYA: 鹿島建設㈱ 技術研究所 上席研究員

<sup>\*2</sup> Hidesada KANAJI: 阪神高速道路(株) 技術部 室長

<sup>\*3</sup> Takashi KOSAKA: 阪神高速道路 ㈱ 技術部 課長代理

<sup>\*4</sup> Kimio SAITO: 鹿島建設 ㈱ 土木管理本部 グループ長

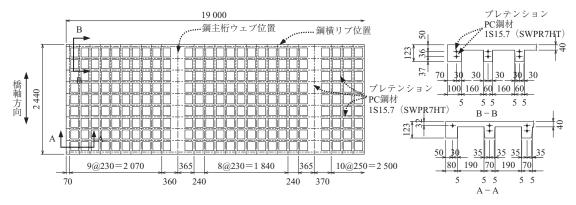


図 - 2 試設計によって設定したサクセム床版(単位:mm)

値とした。PC 鋼材は、高強度 PC 鋼材 1S15.7(SWPR7HT)を床版 1 枚あたり橋軸方向に 152 本  $(2 \times 4 / 1)$  が、橋軸直角方向に 18 本  $(2 \times 4 / 1)$  が、配置した。

# 3.2 床版の試設計

#### (1) 設計・解析条件

床版の設計については、道路橋示方書で規定されている 床版に作用する曲げモーメントを直接適用できないと考え られるため、3 次元 FEM 解析によって活荷重による発生 応力度に対する構造の成立性を確認した。解析にあたって は、UFC 床版を支持する鋼横リブの配置間隔を 2.5 m と し、橋軸方向に 15.0 m (6 パネル) の範囲をモデル化した。 また、対称性を考慮して橋軸直角方向は半分の断面をモデ ル化した。解析モデルにおいて、鋼桁はシェル要素、UFC 床版はソリッド要素、PC 鋼材はバー要素を用いてモデル 化した。PC 鋼材の緊張力は、バー要素に温度荷重を与え て所定の緊張力が生じるようにした。また、既往の試験結 果3) を参考に床版端部から 600 mm 区間の緊張力の口スに ついては、バー要素に与える温度荷重を変化させて表現し た。解析モデルを図 - 3 に示す。

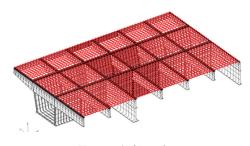


図 - 3 解析モデル

載荷荷重は、活荷重(面分布荷重)、床版自重(物体力)、 橋面荷重(面分布荷重)とした。拘束条件としては箱桁ウェブ下端を線支持とした。支持条件および境界条件を図-4に示す。

活荷重については、床版の曲げもしくはせん断が厳しくなると想定される箇所にT荷重を載荷するものとし、6パターン載荷した。輪荷重の載荷面積は $500 \times 200$  mm とし、衝撃係数 (i=0.4) および安全係数 (va=0.1) を考慮

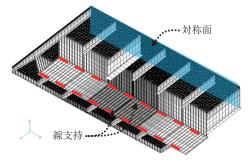


図 - 4 支持条件および境界条件

した。

# (2) 設計結果

発生応力度がもっとも大きくなった載荷パターンである「張出し床版先端付近での曲げ」と「箱桁 - 箱桁間での曲げ」に着目した載荷パターンの解析結果(死荷重+プレストレス+活荷重)として、最大主応力分布と最小主応力分布を図 - 5、6 に示す。床版上面で 6.6 N/mm² の引張応力

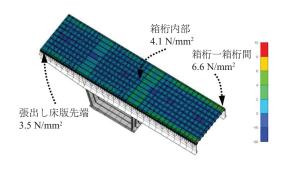


図 - 5 最大主応力分布

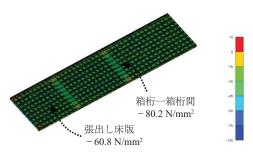


図 - 6 最小主応力分布

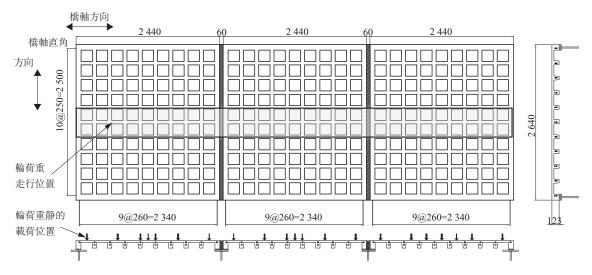


図 - 7 輪荷重走行試験の試験体

度、床版下面側で $-80.2 \text{ N/mm}^2$ の圧縮応力度が生じている。上縁と下縁の応力度の差は大きいものの、すべての載荷パターンについて制限値内であり、図-2に示す薄肉部材による軽量な UFC 床版の設計を成立させることができた。

#### 3.3 床版の質量比較

試設計の結果算定された図 - 2に示す UFC 床版、鋼床版および PC 床版に対する、 $19 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  の床版の質量比較を表 - 1に示す。鋼床版については、縦リブに U リブを有する構造を想定している。表の括弧内の数値はデッキプレートの板厚および PC 床版の一般部の厚さを示す。算定した UFC 床版の質量は、デッキプレートの板厚が16 mm の鋼床版と同等であり、PC 床版の約 1/4 であった。

表 - 1 UFC 床版と他形式床版の質量比較

UFC 床版	鋼床版 (t = 16 mm)	PC 床版 (t = 260 mm)	
8.472 t	8.272 t	34.963 t	
(1.00)	(0.98)	(4.13)	

# 4. 輪荷重走行試験

# 4.1 試験の概要

試験体を図・7に示す。試験体は、実構造物と同様に 橋軸方向に2.5 m ピッチに配置された鋼横リブに支持され る構造とした。橋軸直角方向の長さは、実橋における鋼主 桁または鋼縦桁の最小間隔と同程度の2.5 m とした。橋軸 方向に3枚の床版を並べ、中央の試験体は鋼横リブのみで 支持される2辺支持とした。2辺支持とした場合の床版と しての剛性は、幅が十分に大きい場合と大きく変わらない ことを確認している。両側の試験体は鋼主桁または鋼縦桁 で支持されることを想定し、鋼桁にボルトで緊結して4辺 支持とした。

本試験に用いた UFC の配合を表 - 2 に示す。UFC としては、エトリンガイト生成系の UFC $^{4}$  を用いた。PC 鋼材

表 - 2 UFC の配合

空気量 (%) 水	単位量(kg/m³)				鋼繊維
	水	プレミックス 結合材	骨材	混和剤	词叫和以市庄 (kg)
2.0	195	1 287	905	32.2	137.4

水の単位量は混和剤の水分を含む

を緊張した状態で丸口バケットを用いて床版の中央にUFCを打ち込み、放射状に流動させながら充填した。一次養生として  $20 \sim 30$   $\mathbb C$  の湿潤養生を 2 日行い、圧縮強度が  $100 \sim 120$  N/mm² で緊張力を解放して UFC 床版にプレストレスを導入した。その後、85  $\mathbb C$  の蒸気養生を 24 時間行った。試験時の圧縮強度は  $182 \sim 198$  N/mm² であった。

試験には、大阪工業大学所有の輪荷重走行試験装置を用いた(写真 - 1)。床版の挙動を確認するための静的載荷試験では、実際の大型車のタイヤを模擬したダブルタイヤを用い、走行方向には図 - 7 に矢印で示す位置に、直角方向には二つのタイヤが中央のリブを跨ぐように、100 kNの輪荷重を静的に載荷した。載荷前後において、荷重、床版ひずみおよび床版たわみを計測した。輪荷重の移動繰返し載荷に対する安全性を確認するための試験では、最大



写真 - 1 輪荷重走行試験状況

220 kN まで載荷できるジャンボタイヤを用いて 100 kN から 220 kN まで 30 kN 刻みで階段状に荷重を増加させながら各荷重で 4 万回ずつ繰返し載荷し、合計 20 万回(10 万往復)輪荷重を走行させた。各荷重載荷開始前(0 万回)および 4 万回載荷後(4 万回)に、静的載荷試験を行い、荷重、床版のたわみおよびひずみを計測した。さらに、床版表面に水を張って 130 kN で 2 万回、160 kN で 2 万回の輪荷重走行試験を行った。高速道路で実測された軸重から100 年分の載荷回数を推定して試験における等価回数を求めたところ、160 kN の 3 万回目であったため、本疲労試験により床版としての安全性を確認できると考えられる。図 - 8 に載荷プログラムを示す。

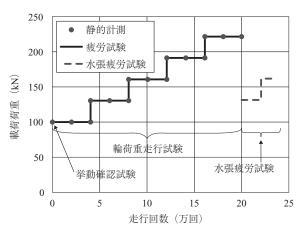


図 - 8 輪荷重走行試験プログラム

#### 4.2 試験結果

# (1) 静的挙動確認試験結果

試験結果の例として、輪荷重載荷位置の隣のリブ側面鉛直ひずみ、中央リブ直上の走行直角方向ひずみ、輪荷重直下の版部材下面の走行直角方向ひずみを図 - 9~11に示す。それぞれ、リブが横に開くことによる影響、輪荷重がリブを跨いで載荷される影響、薄い版部材の曲げの影響について確認するための計測である。横軸は図 - 7に矢印で示す載荷位置となっており、影響線載荷した場合のひずみを示している。直角方向の載荷位置と計測位置の関係をそれぞれ図中に示す。

図 - 9 より、リブ側面の鉛直ひずみは計測点の直近に 載荷された場合にひずみの変動が最も大きくなっており、リブの両側とも圧縮であった。引張ひずみは最大で  $13~\mu$  (応力度に換算すると  $0.6~N/mm^2$ ) であり、圧縮ひずみは最大で  $61~\mu$  (応力度に換算すると  $2.8~N/mm^2$ ) であった。 載荷点に近い側が圧縮となったのは、輪荷重の載荷によって走行方向リブが横に開こうとするのを直角方向のリブが 拘束したことによると考えられる。図 - 10~ より、リブを 跨いでダブルタイヤが載荷されることによって、床版上面 が直角方向に引っ張られる挙動を示すが、輪荷重の載荷によって床版上面直角方向のひずみは圧縮となっており、輪荷重の載荷によって引張が生じることはなかった。 床版全体の曲げの影響が大きかったためと考えられる。図 - 11~ より、輪荷重の直下の床版下面直角方向において  $80~\mu$  程

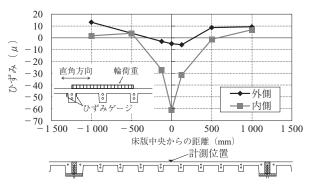


図 - 9 リブ側面の鉛直ひずみ

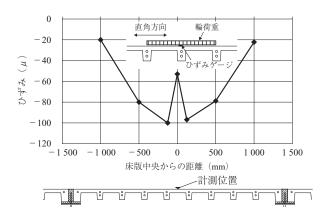


図 - 10 床版上面の走行直角方向ひずみ

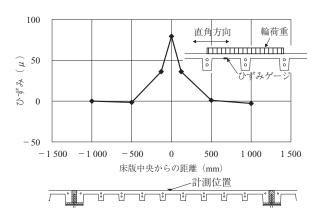


図 - 11 床版下面走行直角方向ひずみ

度のひずみ(応力度に換算すると 3.7 N/mm²) が生じていたが、輪荷重が倍になった場合でもひび割れ発生強度の特性値 8 N/mm² 以下であること、プレストレスが導入されていることから、ひび割れ発生の可能性は低いと考えられる。

## (2) 輪荷重走行試験結果

試験結果の例として、荷重 100 kN、160 kN および 220 kN で 0 万回および 4 万回における中央床版のたわみ 分布およびひずみ分布を図 - 12 および図 - 13 に示す。 両者とも、 輪荷重を載荷する前後の計測値の差をとったも のである。たわみおよびひずみとも、荷重の増加に比例して増加した。また、それぞれの荷重における繰返し載荷前

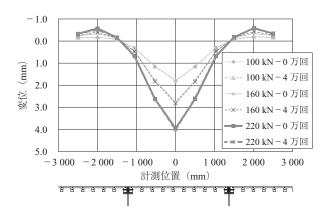


図 - 12 中央床版の橋軸方向たわみ分布

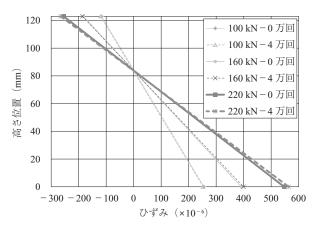


図 - 13 中央床版の橋軸方向ひずみ分布

後で差はなく、輪荷重の繰返し載荷による剛性の低下は見られなかった。ほかの計測位置やほかの床版も同様な結果であった。

190 kNでの4万回載荷後、リブ付け根の側面水平方向に幅0.04 mm 未満の微細なひび割れが観察された。また、220 kNでの4万回までに同様なひび割れが数十箇所で観察された。ひび割れの原因は特定できていないが、プレストレス導入時にPC鋼材のポアソン効果によってPC鋼材周囲のUFCに円周方向の引張応力が生じ、引張応力が残留した状態のリブ側面に、輪荷重の繰返し載荷による応力変動(図-9)が作用したことによって発生したものと推定される。ただし、ひび割れが生じたのは設計輪荷重の約2倍の荷重載荷時であったこと、UFCはひび割れが生じても鋼繊維の補強効果によりひび割れ発生強度以上の引張応力を伝達することができること、たわみ分布やひずみ分布からは剛性の低下は見られなかったことから、床版の構造性能に与える影響は小さいと考えられる。

さらに、床版表面に水を張って130kNで2万回,160kNで2万回の輪荷重走行試験を行ったが、床版に損傷はなく、健全であった。

# 5. 軸圧縮力に対する検討

## 5.1 検討の概要

UFC 床版と鋼桁はずれ止めで一体化されて合成桁とし

て挙動するため、合成桁に正曲げが作用した場合、床版には軸圧縮力が作用する。床版に作用する軸圧縮応力度は、橋梁の規模にもよるが、圧縮応力度の制限値に近い値となる可能性がある。そこで、エトリンガイト生成系の UFC<sup>4</sup>) について、圧縮疲労試験を行い、疲労強度を求めた。

また、床版にはプレテンション方式でプレストレスが導入されているが、プレテンション部材に作用する変動軸力が PC 鋼材の付着を劣化させる可能性が考えられる。そこで、プレテンション部材を用いた軸圧縮疲労試験を行い、付着の健全性を確認した。付着の健全性は疲労載荷の有無をパラメータとして曲げ試験によって評価した。

#### 5.2 圧縮疲労強度

 $\phi$  50mm × 100 mm の試験体を用いて最大 200 万回の圧縮疲労強度試験を行った結果を図 - 14 に示す。なお、UFC の実強度は  $\phi$  50 mm × 100 mm の試験体で 209 N/mm² であった。

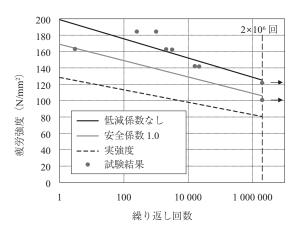


図 - 14 圧縮疲労強度試験結果

土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] $^{5)}$ の疲労強度を式  $^{(1)}$ に示す。疲労強度  $f_{rd}$  は式  $^{(1)}$  を用いて求めた。なお、 $k_{lf}$  は安全側に評価するための低減係数で  $k_{lf}=0.85$ 、 $f_{d}$  はコンクリート強度、 $\sigma_{p}$  は永久荷重によるコンクリートの応力度、N は疲労寿命、K はコンクリートの状態に関する係数で K=17 である。グラフの「実強度」は実強度を安全係数 1.3 で割って  $f_{d}$  を求めたもの、「安全係数 1.0」は実強度をそのまま  $f_{d}$  としたもの、「低減係数なし」はさらに  $k_{lf}$  を 1.0 としたものである。

$$f_{rd} = k_1 f_d \left( 1 - \sigma_p / f_d \right) \left( 1 - \log N / K \right) \tag{1}$$

圧縮強度の 0.8 倍の載荷で 3 回で破壊したもの以外は安全係数を 1.0 とした推定値よりも安全側の結果となっており、UFC についてもコンクリート標準示方書の式で安全側に評価できると考えられる。

# 5.3 プレテンション部材の軸圧縮疲労試験

#### (1) 軸圧縮疲労試験

試験体は図 - 15 に示すとおり、床版のリブを取り出した断面を想定し、均等な応力が作用するように長方形断面とし、高強度 PC 鋼材 1S15.7 (SWPR7HT) を 2 本配置した。試験体の長さは、付着長が確保できるように 1500 mm とした。

圧縮疲労試験は写真 - 2 に示すように 500 kN サーボパルサーを使用して行った。試験体を両端固定の状態で設置するため、鋼製の治具をサーボパルサーに固定して試験体を治具内に設置し、治具と試験体の隙間に無収縮モルタルを充填した。試験体に導入した有効プレストレスは、床版に導入する圧縮応力度と同程度の 35.3 N/mm² とした。圧縮疲労試験では、最小応力度を 5.2N/mm²、最大応力度を 63.6 N/mm² と設定し、プレストレスト合わせた UFC に作用する最大応力度は圧縮応力度の許容値 108 N/mm² に近い約 100 N/mm² に設定した。載荷回数は、荷重の満載と除荷が繰り返されるのは 1日 2 回と仮定し、100 年分を上回る 10 万回とした。

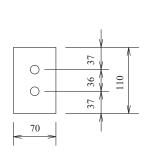




図 - 15 試験体の断面図

写真 - 2 載荷方法

#### (2) 曲げ試験による健全性評価

載荷方法は、図-16に示すように、支間長を1300mm,等曲げ区間を200mとした4点曲げ試験とした。 載荷開始から終了まで、載荷荷重をロードセルにより、試験体中央のたわみを変位計により、試験体中央下面のひずみをひずみゲージにより計測した。

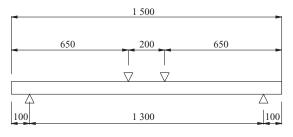


図 - 16 曲げ試験の概要

荷重と試験体中央の鉛直変位の関係を図 - 17 に示す。 圧縮疲労試験の有無にかかわらず約 30 kN でひび割れが確認され、荷重変位曲線の勾配が低下し始めた。ひび割れの発生は、ひずみゲージの計測値からも確認された。圧縮力の繰返し載荷により付着が劣化すると見かけのひび割れ発生強度が低下すると考えられるが、ひび割れ発生強度は低下しなかったことから、付着の劣化は生じなかったと判断される。ひび割れ発生後の荷重 - 変位関係の挙動も圧縮疲労試験の有無にかかわらず同様であり、圧縮力の繰返し載荷による部材としての構造性能の低下は確認されなかった。したがって、圧縮応力度の制限値に近い圧縮応力度が

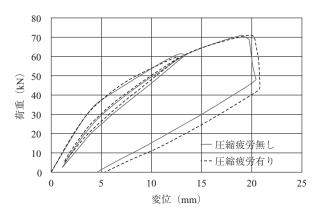


図 - 17 曲げ試験による荷重 - 変位関係

繰返し作用した場合でも、PC 鋼材の付着劣化などのプレテンション部材としての構造性能の低下は生じないと考えられる。

# 6. おわりに

UFC 床版の開発において、試設計の結果、ワッフル形状の床版形状を算定し、デッキプレートの板厚が 16 mm の鋼床版と同等の軽量な構造で UFC 床版を構成することができた。試設計で設定した諸元の床版について、輪荷重の載荷による挙動を確認するために静的載荷試験を行った結果、ひび割れが生じるような引張応力度は生じないことが分かった。また、設計荷重の2倍以上の荷重を載荷した輪荷重走行試験により輪荷重の移動繰返し載荷に対する安全性を確認した。さらに、プレテンション部材に圧縮応力度の制限値に近い圧縮応力度が繰返し作用した場合でも、構造性能の低下は生じないことを確認した。

今後,これらの試設計や実験結果をふまえ,設計・施工のための手引きを作成し,実構造へ適用するための開発を進める予定である。

本研究を行うにあたり、大阪工業大学松井教授、長岡技術科学大学長井教授、東京工業大学二羽教授および神戸大学三木准教授にご指導をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 小坂ら: 鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版 の開発, 第22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2013.10
- 2) 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), 2004.9
- 3) 一宮ら:超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレテンション部材の構造性能,コンクリート工学年次論文集,Vol.28,20067
- 4) 土木学会:超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術 評価報告書 技術推進ライブラリー No.3 2006.11.
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3

【2013年11月5日受付】