

論文 UFC を用いたリブ付きプレテンション床版のせん断耐力

一宮 利通*1・樽谷 早智子*2・小坂 崇*3・金治 英貞*4

要旨：筆者らは、超高強度繊維補強コンクリートを用いて、自重が鋼床版と同程度で耐久性の高い道路橋床版として2方向のリブ付きプレテンション床版を開発している。本研究では、UFC床版のせん断破壊に対する安全性について種々の検討を行った。UFC床版ではリブに沿って繊維が配向するため、水平方向および鉛直方向の引張強度を直接引張試験により確認した。また、リブ1本分の断面をもつ2種類の梁部材のせん断破壊実験およびFEM解析を行い、繊維が部材軸方向に配向した場合のせん断耐力および配向性の影響について検討した。また、UFC床版の押抜きせん断耐力を試算し、安全性を確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、床版、プレテンション部材、せん断耐力、配向性

1. はじめに

筆者らは、超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を用いて、自重が鋼床版と同程度で耐久性の高い道路橋床版（UFC床版）を開発している¹⁾。UFC床版の適用概念を図-1に、UFC床版の概要を図-2に示す。UFC床版は橋軸方向に2.5mピッチで配置される鋼横桁または鋼横リブ、ならびに鋼主桁の4辺で支持される構造である。本床版は橋軸方向および橋軸直角方向に最大260mm間隔でリブを有し、リブ位置での高さは123mm、リブのないスラブの厚さは40mmである。リブには高強度PC鋼材1S15.7mm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。

UFC床版については、安全性および使用性に関する検討を行っており、輪荷重走行試験による疲労に対する安全性の検証についてはすでに報告している²⁾。ここでは、UFC床版のせん断破壊に対する安全性の検討を行った結果を報告する。

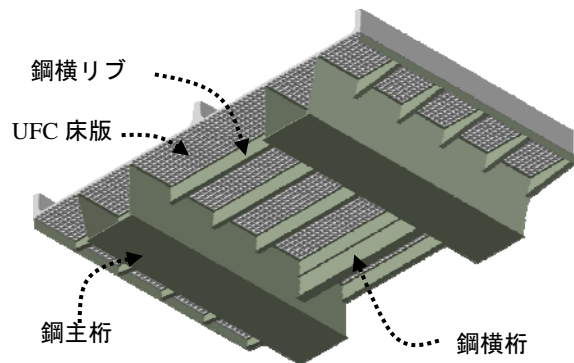


図-1 UFC床版の適用概念

既往の研究によりUFCが流動することによって繊維が配向するため打設方法によって構造性能が異なることが知られている³⁾。リブに沿ってUFCが流動することによってリブの軸方向に繊維が配向すると考えられ、繊維の配向性はせん断耐力にも影響を与えると考えられる。そこで本研究では、UFC床版の打設方法を反映して製作

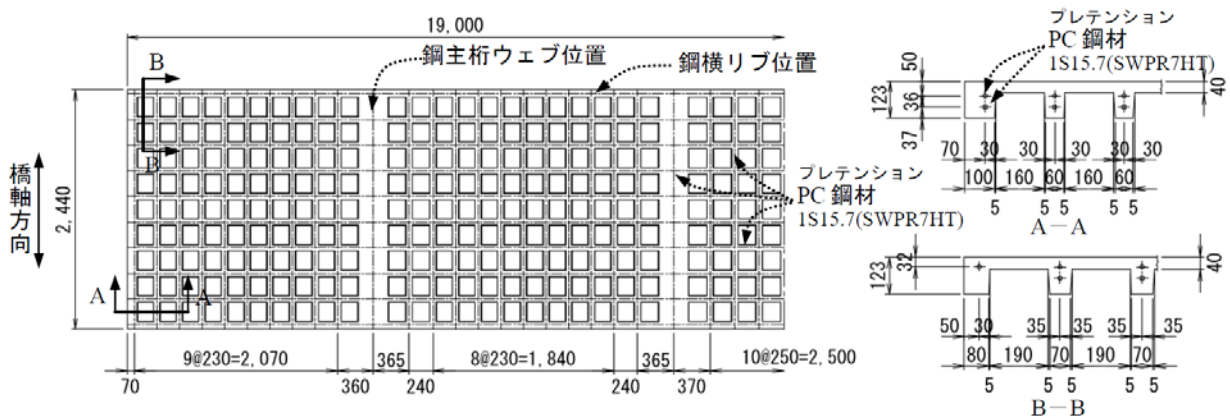


図-2 UFC床版の断面図

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 上席研究員 工修 (正会員)
 *2 鹿島建設(株) 技術研究所 研究員 工修 (正会員)
 *3 阪神高速道路(株) 技術部 技術開発課 課長代理 工修 (正会員)
 *4 阪神高速道路(株) 技術部 技術戦略総括マネージャー 工博

したリブ1本分の梁部材から試験体を採取し、直接引張試験を行って配向性の影響が引張強度に与える影響を確認した。

繊維がリブの軸方向に配向することによって曲げに対しては有利に、せん断に対しては不利になると考えられる。特に、プレストレスが導入される部材では斜めひび割れ角度が小さくなるためせん断耐力に与える影響が大きいと考えられる。また、リブの幅が小さいUFC床版ではリブとスラブが分断されるような破壊モードが生じることが懸念される。そこで本研究では、UFC床版のリブ1本分の断面を模擬した2種類の梁部材のせん断破壊実験を行ってせん断破壊耐力を直接確認することとした。また、非線形FEM解析を行い、引張強度がせん断耐力に与える影響について検討した。さらに、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)」⁴⁾(UFC指針)に準じて2種類の方法で押抜きせん断耐力を試算し、押抜きせん断に対する安全性を検討した。

2. UFC床版の打設方法と繊維の配向

2.1 既往の研究に基づくUFC床版の打設方法の設定

東京国際空港D滑走路ではUFCを用いた1方向のリブ付き床版が採用されている。採用にあたって行われた載荷実験では、打設方法により構造性能が異なることが確認されており、丸口バケツを用いて短辺方向中央部を長辺方向に移動させながら打設する方法が採用されている³⁾。本UFC床版でも同様な打設方法を採用することとし、輪荷重走行試験の試験体製作において上記の方法で打設した²⁾(写真-1)。

文献3)によると、上記の打設方法ではリブの軸方向にUFCが流動することにより繊維がその方向に配向し、ひび割れ発生後の剛性が大きくなるとされている。一方、周らの研究⁵⁾によると、部材軸方向に流動させた場合でも、UFCが部材端部に到達して前方に流れなくなるとUFCは上方に流れ始め、部材軸方向ではなく鉛直に近い方向に繊維が配向することが指摘されている。

本床版の場合は、部材の幅に比べて高さが小さいこと、リブに配置されたPC鋼材が流動を阻害することから、UFCが部材端部に到達する前に床版の大部分で充填が完了するため、繊維はリブの軸方向に配向すると考えられる。

2.2 繊維の配向性が引張強度に与える影響の検討

部材軸方向に配向した場合、引張強度にどのような影響を与えるか確認するため、UFCを部材軸方向に流動させて製作した梁部材から試験体を採取して直接引張試験を行った。

梁部材はUFC床版のリブ1本分を模擬した断面とした。ただし、PC鋼材は配置しなかった。UFCの打設は部材

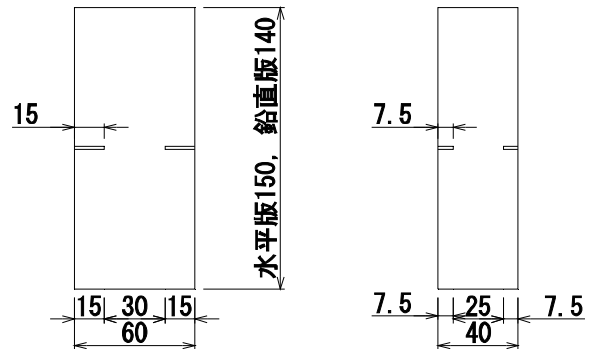
端部からUFCを流動させて行ったが、UFCが部材端部に到達する前に試験体採取区間のリブはほぼ充填が完了した(写真-2)。



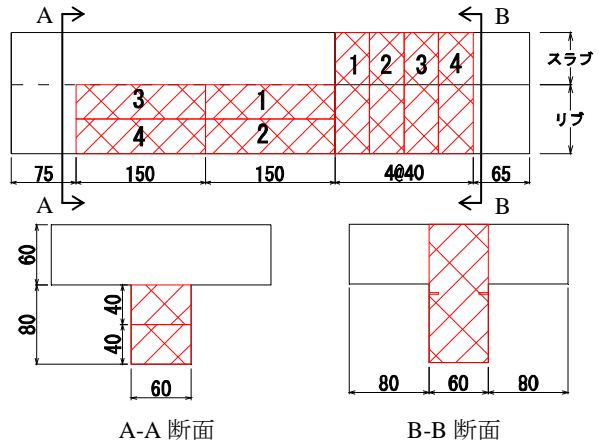
写真-1 UFC床版試験体の打設状況



写真-2 直接引張試験試験体の打設状況



(a)試験体の形状寸法 (単位: mm)



A-A断面

B-B断面

(b)試験体の採取位置 (単位: mm)

図-3 直接引張試験体

試験体の形状寸法および採取位置を図-3に示す。試験体は60mm×40mmの断面で長さ140mmとし、部材軸方向および鉛直方向に4体ずつ採取した。試験体には長さ方向中央位置の4辺に15mmと7.5mmの切欠きを設けた。試験方法は直接引張試験とし、試験体の両端を治具に固定して変位制御で引張力を与えた。

本研究で使用したUFCの配合を表-1に示す。本UFCはエトリンサイト生成系のUFC⁹⁾であり、養生として常温の封緘養生を24時間行い、85℃の蒸気養生を24時間行った。試験時の圧縮強度は195N/mm²、引張強度は12.5N/mm²であった。ただし、圧縮強度はφ100×200mmの円柱供試体、引張強度は100×100×400mmの曲げ強度からUFC指針に準拠して換算したものである。

表-2に試験結果を示す。鉛直方向の引張強度は水平方向の引張強度の半分程度となっており、部材軸方向に鋼繊維が配向した影響であると考えられる。なお、水平方向に採取した試験体のNo.2とNo.4がNo.1とNo.3よりも引張強度が大きくなっているのは、No.1とNo.3が上下面とも切断面であるのに対し、No.2とNo.4では下面が型枠面であり、切欠きは設けたものの鋼繊維が型枠面に沿って鋼繊維が配向した影響があったと考えられる。

表-1 UFCの配合

空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
	水	プレミックス結合材	骨材	混和剤	
2.0	195	1287	905	32.2	137.4

水の単位量は混和剤の水分を含む

表-2 直接引張試験結果

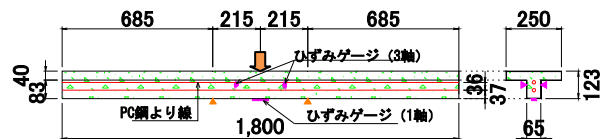
試験体採取方向	引張強度(N/mm ²)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	平均
水平	14.7	17.8	15.7	19.4	16.9
鉛直	7.2	7.3	7.7	6.8	7.3

3. せん断実験

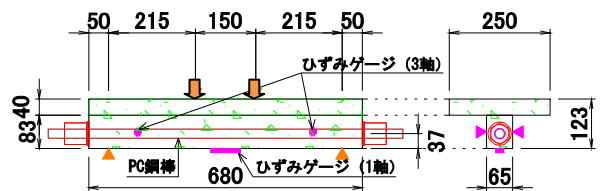
3.1 試験体

試験体の概要を図-4に示す。試験体は、UFC床版のリップ1本分を模擬したプレテンション梁部材(試験体1)および異形PC鋼棒を軸方向筋として配置したRC梁部材(試験体2)の2体とした。前者はプレテンション方式でプレストレスを導入した梁部材のせん断耐力を確認すること、後者は支点より外側の部材長を短くすることによりリップとスラブ(梁部材ではフランジであるがスラブと呼ぶ)が分断される破壊の抵抗断面を小さくしてこの破壊モードが起こらないことを確認することを目的としている。いずれの試験体も直接引張試験を採取した試験体と同様、繊維が部材軸方向に配向するように留意し

て製作した。UFCはエトリンサイト生成系のUFCを用い、直接引張試験体と同様な養生を行った。実験時のUFCの圧縮強度、引張強度および有効プレストレスを表-3に示す。ただし、圧縮強度はφ100×200mmの円柱供試体、引張強度は100×100×400mmの曲げ強度からUFC指針に準拠して換算した。試験体1では、PC鋼材の緊張力を240kN/本としてプレテンション方式でプレストレスを与えた。文献7)を参考に有効係数を0.7として推定した有効平均圧縮応力度は21.8N/mm²であった。



(a) プレテンション部材 (試験体1)



(b) RC 試験体 (試験体2)

図-4 せん断実験試験体

表-3 UFCの材料特性

	UFC強度(N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)	有効プレストレス (N/mm ²)
	圧縮強度	引張強度		
試験体1	213	13.1	46.1	21.8
試験体2	205	13.6	46.3	—

3.2 実験方法

試験体を単純支持し、幅50mmの載荷板を介して試験体1では1点載荷、試験体2では2点載荷で載荷を行った(図-4)。荷重は単調に増加させ、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計測した。また、試験体下面および側面において、UFCのひずみをそれぞれ1軸ゲージおよび3軸ゲージで計測した。

3.3 実験結果

実験結果として荷重と試験体中央鉛直変位の関係を図-5に示す。また、荷重とひずみの関係の計測例として、試験体1の下面のひずみ、ならびに側面の3軸ゲージから求めた最大主ひずみの計測結果を図-6に示す。

試験体1では、載荷荷重166kNで試験体下面のひずみに、203kNで試験体側面の3軸ゲージから求めた最大主ひずみに、荷重との関係が非線形となる挙動が確認され、それぞれ曲げひび割れおよび斜めひび割れが発生したと推定された。その後、荷重の増加とともに微細な曲げひ

び割れおよび斜めひび割れの本数が増加し、載荷荷重が384kNに到達したところで荷重が低下したため載荷を終了した。破壊モードは斜め圧縮破壊と推定された。

試験体2では、試験体1と同様な挙動および破壊モードであり、計測ひずみから推定される曲げひび割れ発生荷重および斜めひび割れ発生荷重はそれぞれ15kNおよび41kN、最大荷重は302kNであった。両試験体ともリブとスラブの境界にひび割れは観察されなかった

図-5には、UFC指針に規定される斜め引張破壊耐力算定式(式(1))および斜め圧縮破壊耐力算定式(式(2))で算定される耐力を実験結果に併記した。

$$V_y = 0.18\sqrt{f'_c} b_w d + f_v / \tan \beta_u b_w d / 1.15 \quad (1)$$

$$V_{wc} = 0.84 f'_c{}^{2/3} \sin(2\beta_u) b_w d \quad (2)$$

ただし、 V_y :斜め引張破壊耐力、 V_{wc} :斜め圧縮破壊耐力、 f'_c :UFCの圧縮強度、 b_w :ウェブ幅、 d :有効高さ、 f_v :UFCの引張強度、 β_u :軸方向と斜めひび割れ面のなす角度で、式(3)による。なお、ウェブ幅はリブの平均幅65mm、有効高さは上段のPC鋼材が図心に近いことから下段のPC鋼材までの高さ86mmとした。

$$\beta_u = \frac{1}{2} \tan^{-1}(2\tau / \sigma'_{xu}) - \beta_0 \quad (3)$$

ただし、 τ :平均せん断応力、 σ'_{xu} :軸方向の平均圧縮応力、 β_0 :軸力を受けない場合の斜めひび割れが部材軸から45°の直線となす角度(ここでは5°)である。UFC指針では β_u の最大値を30°としているが、ここでは σ'_{xu} を有効プレストレス21.8N/mm²として計算される25°とした。また、圧縮強度および引張強度は実強度を用い、安全係数は1.0とした。

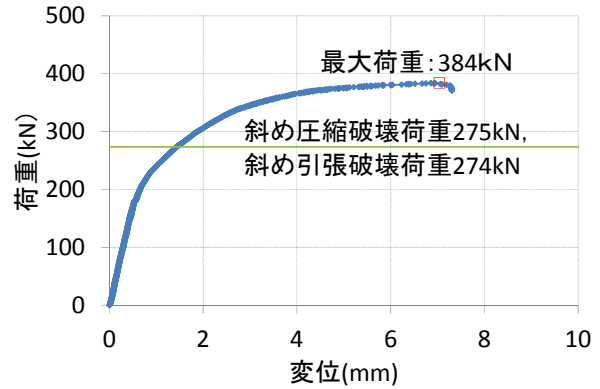
UFC指針による斜め引張破壊耐力は安全側に評価されるため、両試験体とも計算値よりも実験結果の方が大きかった。斜め圧縮破壊耐力については、試験体2では実験値と計算値がほぼ同程度であったが、試験体1では実験値が計算値の約1.4倍程度であった。試験体1の耐力が大きくなったのはプレストレスが影響していると考えられるが、今後検討が必要である。

4. FEM解析

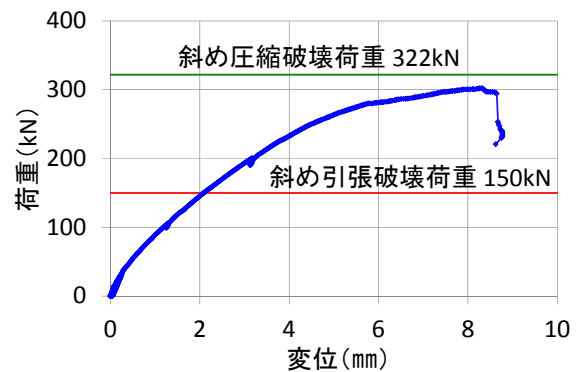
4.1 解析モデル

UFCの引張強度がせん断耐力に与える影響を検討するために、試験体1の実験について材料非線形を考慮した2次元FEM解析を行った。図-7に解析モデルを示す。対称性を考慮して1/2モデルとし、鉛直方向の分割数をスラブでは4分割、ウェブでは8分割とした。

図-8にUFCの応力ひずみモデルを示す。ケース1では、UFCの引張強度 f_t 、圧縮強度 f'_c およびヤング係数



(a) 試験体 1



(b) 試験体 2

図-5 荷重-変位関係

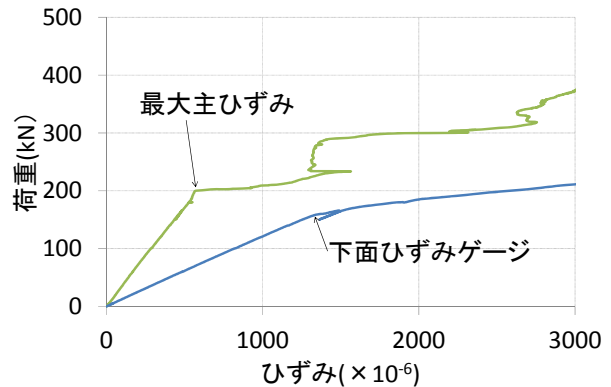


図-6 荷重-ひずみ関係(試験体1)

E_c は表-3に示す実測値を用いた。ケース2では、直接引張強度試験による水平方向と鉛直方向の引張強度の比で引張強度を低減し、 f_t を $13.1 \times 7.3 / 16.9 = 5.7 \text{N/mm}^2$ とした。ただし、水平方向と鉛直方向の引張強度が異なるモデル化はできないため、両方向とも引張強度は同一とした。UFC指針に準拠し、等価検長 L_{eq} 、一定応力を保持できる開口変位 w_{lk} および応力がゼロとなる開口変位 w_{2k} を用いてモデル化した。等価検長 L_{eq} は、桁高123mmとして求め、ケース1では42mm、ケース2では23mmとした。圧縮側は $0.85f'_c$ をピークとして応力度が低減するモデルとした。

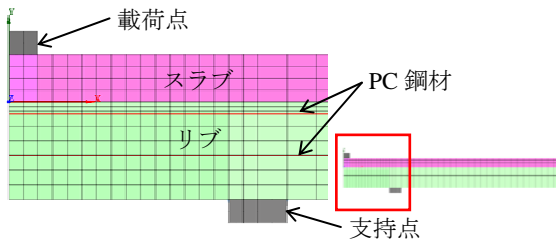


図-7 解析モデル

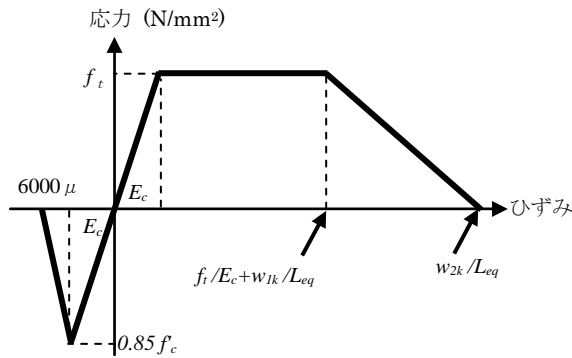


図-8 UFC の応力ひずみモデル

PC 鋼材はコンクリート標準示方書に準拠し、トリニアでモデル化し、UFC とは完全付着とした。プレテンションによるプレストレスは、UFC に生じる平均圧縮応力度が 21.8N/mm^2 になるように PC 鋼材の要素に温度荷重を作用させて与えた。

4.2 解析結果

解析結果として荷重変位曲線を図-9 に、ケース 1 およびケース 2 の最大荷重時におけるひずみ分布を図-10 および図-11 に示す。

ケース 1 で 313kN 、ケース 2 で 274kN に達したところで載荷点近傍の上縁ひずみが $0.85f_c/E_c=3900\mu$ に達し、荷重が低下し始めたことから、両者とも斜め圧縮破壊したと判断される。ケース 1 とケース 2 の耐力の違いは主として部材軸方向の引張強度の違いによるものと考えられる。最大主ひずみを比較すると、ケース 2 ではリブ付け根で引張ひずみが 5600μ と大きくなっているが、ケース 1 ではこの位置でのひずみは約 2000μ であった。引張強度が小さいことでリブ付け根に引張ひずみが卓越することが確認された。しかし、範囲は限定的であり、試験体軸方向に範囲が拡大しなかったことから、リブとスラブが分断するような破壊には至らなかったと考えられる。

UFC 指針に準じて計算した斜め圧縮破壊耐力は 275kN であり、解析結果と同程度であった。実験で耐力が大きくなったのは上縁ひずみが圧縮破壊ひずみに達した後も直ちに応力が低下せず、同程度の応力を伝達したためと推定される。しかし、試験体 2 では UFC 指針に準じて計算した斜め圧縮破壊耐力に近い荷重で破壊しているため

前述のようにプレストレスの影響が一因と考えられるが、原因の検討には試験体 2 の解析を行って比較するなど、詳細な検討が必要である。

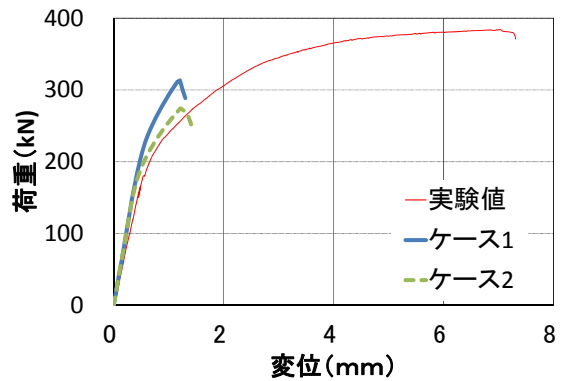
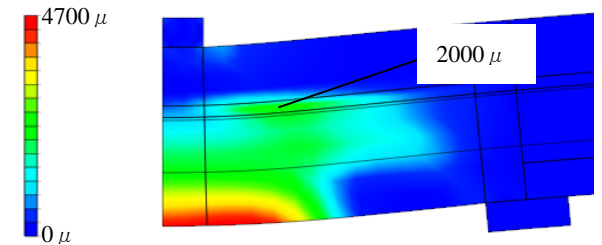
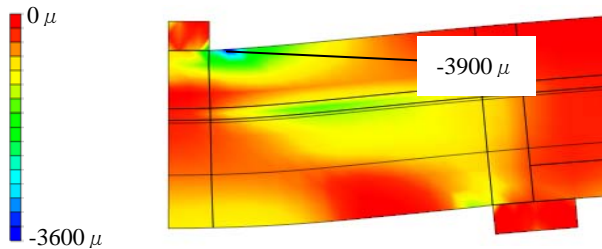


図-9 解析結果

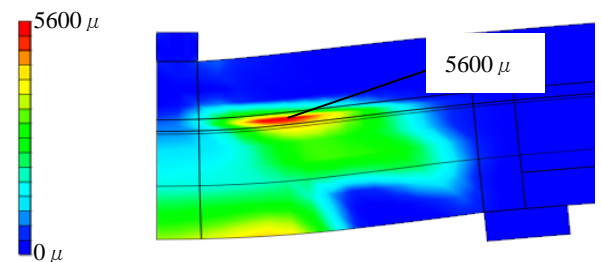


(a)最大主ひずみ

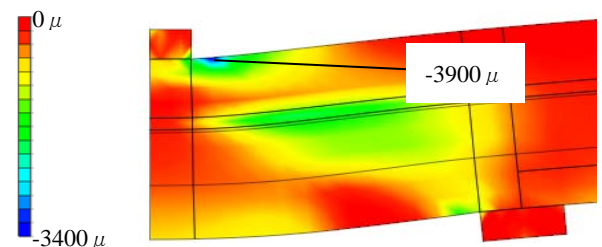


(b)最小主ひずみ

図-10 ひずみ分布 (ケース 1)



(a)最大主ひずみ



(b)最小主ひずみ

図-11 ひずみ分布 (ケース 2)

5. 押抜きせん断耐力の推定

UFC床版に輪荷重が作用した場合の破壊モードは、斜め圧縮破壊だけでなく押抜きせん断破壊が想定されるため、押抜きせん断破壊耐力について検討する必要がある。UFC指針にはUFC部材の押抜きせん断耐力の算定方法が規定されている。しかし、UFC床版は2方向リブ付き床版であるため、この方法を直接適用できない。そこで、ここでは、簡易的な方法により、押抜きせん断破壊耐力の推定を試みた。

輪荷重の作用範囲は橋軸方向200mm、橋軸直角方向500mmである。リブの間隔が最大260mmピッチで橋軸直角方向の輪荷重作用範囲500mmには最低2本のリブが含まれることになることから、リブ2本分の梁部材の斜め引張破壊耐力の2倍(パターン1)として算定した。また、参考として厚さ40mmの版部材のみで抵抗すると考えた場合の押抜きせん断耐力(パターン2)としても算定した。

UFC指針に規定されている押抜きせん断耐力算定式を式(3)に示す。

$$V_{pc} = f_v u_p d \quad (3)$$

ただし、 V_{pc} ：押抜きせん断耐力、 u_p ：設計断面の周長である。

UFCの圧縮強度は180N/mm²、引張強度は8.8N/mm²、式(1)による斜め引張破壊耐力算定時の有効高さ d は86mm、式(3)による押抜きせん断耐力算定時の有効高さ d は40mmとした。

これらの条件で求めた押抜きせん断耐力は、パターン1では521kN、パターン2では419kNであり、それぞれ設計輪荷重の約5倍および約4倍となった。両者とも抵抗断面の設定では安全側の仮定をしており、UFC床版は十分な押抜きせん断耐力を有していると考えられる。

6. おわりに

本研究では、UFC床版のせん断破壊に対する安全性を検討するため、直接引張試験、リブ1本分の梁部材のせん断実験、せん断実験のFEM解析および押抜きせん断耐力の試算を行った。検討の結果得られた知見は以下のとおりである。

- (1) UFC床版では、リブの軸方向に繊維が配向すると考えられ、鉛直方向の引張強度は軸方向の引張強度の半分程度になる。
- (2) 部材軸方向に配向させて製作した2種類の梁部材の試験体を用いてせん断実験を行った結果、UFC指針で計算される斜め引張破壊耐力の1.4倍および2倍

の耐力があった。破壊モードは斜め圧縮破壊であり、リブとスラブが分断されるような破壊モードは生じなかった。

- (3) せん断実験のFEM解析より、引張強度が小さい場合、リブの付根の引張ひずみが卓越することが確認された。しかし、範囲は限定的であり、リブとスラブが分断するような破壊には至らなかった。
- (4) リブ2本分の梁部材の斜め引張破壊耐力、ならびに厚さ40mmの版部材のみで抵抗すると考えた場合の押抜きせん断耐力は設計輪荷重の4~5倍であり、押抜きせん断破壊に対して安全であることが確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり、大阪大学松井名誉教授、長岡技術科学大学長井名誉教授、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) 小坂崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: 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, pp.401-404, 2013.10
- 2) 一宮利通, 齋藤公生, 金治英貞, 小坂崇: 鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高いUFC道路橋床版の輪荷重走行試験, 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, pp.405-408, 2013.10
- 3) 一宮利通, 大野俊夫, 野口孝俊, 南浩郎: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた床版の打設方法が構造的に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1453-1458, 2008.7
- 4) 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
- 5) 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリート曲げ供試体中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.268-273, 2012.7
- 6) 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
- 7) 一宮利通, 曾我部直樹, 本田智昭, 日紫喜剛啓: 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的に, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.505-510, 2006.7