

UFC道路橋床版の耐荷性状に関する検討

鹿島建設(株)	正会員	工修	○一宮	利通
阪神高速道路(株)		工博	金治	英貞
阪神高速道路(株)	正会員	工修	小坂	崇
鹿島建設(株)	正会員	工博	藤代	勝

Abstract : Recently, fatigue crack to be caused by the deformation with loading of the vehicle in the weld of the steel deck plate is actualized, and the cost for maintenance including inspection and the repair tends to increase. Therefore the authors develop lightweight waffle type deck slab like a steel floor version using ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC). The collation of the stress by the FEM analysis and the inspection of safety against fatigue by the wheel loading test have been carried out. In this study, the loading experiment using the specimen after the wheel loading test and non-linear FEM analysis were carried out for the purpose of the confirmation of the failure mode and the ultimate strength. As a result, it was confirmed that the failure mode was flexural failure , and that ultimate strength was 7.5 times of the design load.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete, Bridge deck, Ultimate strength

1. はじめに

近年、鋼床版の溶接部に、車両（特に大型車）の走行による変形に起因する疲労き裂の発生が顕在化しており、点検や補修など維持管理に必要なコストが増加する傾向にある。そこで筆者らは、超高強度繊維補強コンクリート¹⁾ (UFC) を用いて、ワッフル型の形状で鋼床版と同程度の質量で、疲労耐久性の高い道路橋床版 (UFC床版) を開発している²⁾。

UFC床版の適用概念を図-1に示す。鋼床版のデッキプレートおよび縦リブを同等質量のUFC床版で代替するものである。UFC床版は2.5mピッチで配置される鋼横桁または鋼横リブ、および鋼主桁の4辺で支持される構造としている。UFC床版については、これまでにFEM解析による応力度の照査や輪荷重走行試験による疲労に対する安全性の検証など、安全性および使用性に関する検討を行っている³⁾。

本研究では、これらのUFC床版に関する検討の一環として、UFC床版の破壊モードおよび床版の破壊耐力に対する安全性を確認するために、輪荷重走行試験終了後の試験体を用いた載荷実験⁴⁾およびFEM解析による検討を行った。

2. UFC床版および輪荷重走行試験の概要

輪荷重走行試験の試験体を図-2に示す。UFC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1S15.7⁵⁾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。

本研究で使用したUFCの配合を表-1に、蒸気養生後の材料特性を表-2に示す。本UFCはエトリンガイト生成系のUFC⁶⁾ (AFt系UFC) 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

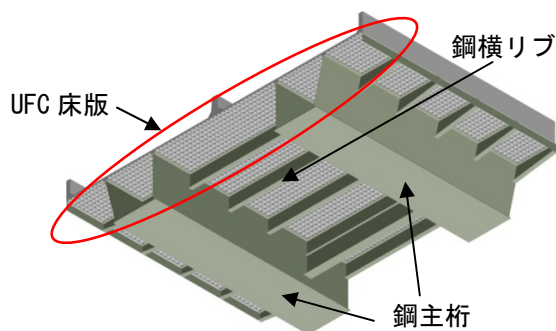


図-1 平板型 UFC 床版を用いた道路橋

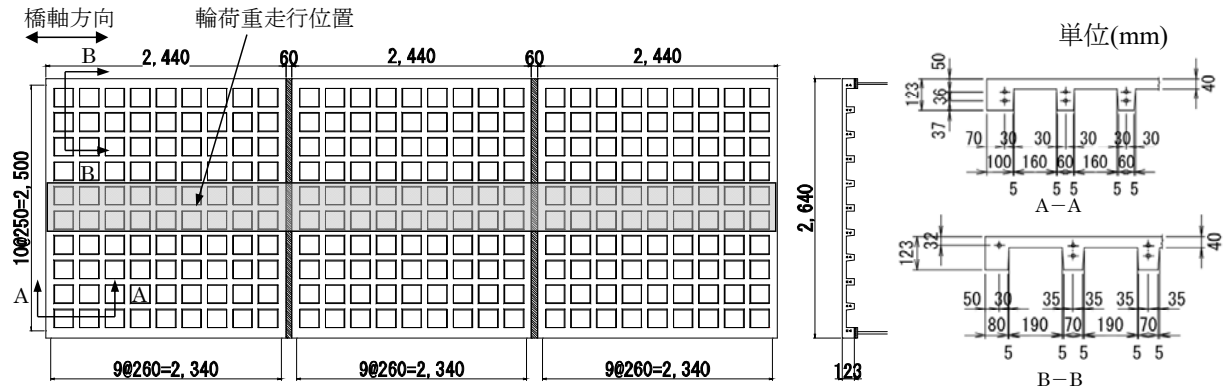


図-2 輪荷重走行試験の試験体の概要

を24時間行った。

試験体は、実構造物と同様に橋軸方向に2.5m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、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て4辺支持とした。輪荷重走行試験では、最大220kNまで載荷できるジャンボタイヤを用いて100kNから220kNまで30kN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。その後、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。図-3に載荷プログラムを示す。

190kNでの4万回載荷後、一部の床版においてリブ付け根の側面水平方向に0.01mm未満の微細なひび割れが観察されたが、ひび割れが生じたのは設計輪荷重の約2倍である荷重190kN載荷時であったこと、UFCはひび割れが生じても鋼繊維の引張補強効果によって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(図-4)、床版の構造性能に与える影響は小さいと考えられた³⁾。

ひび割れは、プレストレス導入時においてUFCとPC鋼材のポアソン比の差によってUFCにPC鋼材直角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が作用することによって顕在化した可能性が示された⁷⁾。また、リブ1本分を切

表-1 UFCの配合

空気量 (%)	単用量(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

水の単用量は混和剤の水分を含む

表-2 蒸気養生後のUFCの材料特性

UFC強度(N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)
圧縮強度	引張強度	
198	9.3	43.3

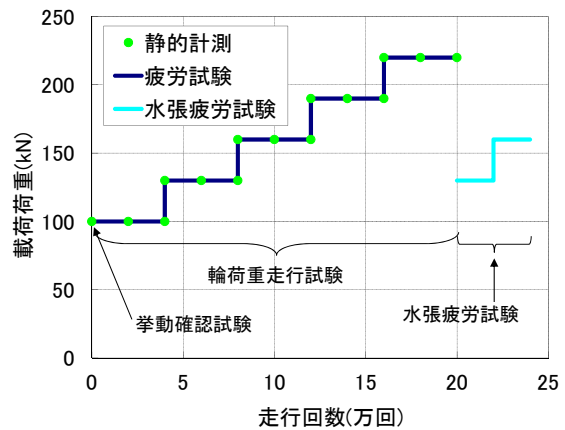


図-3 輪荷重走行試験載荷プログラム

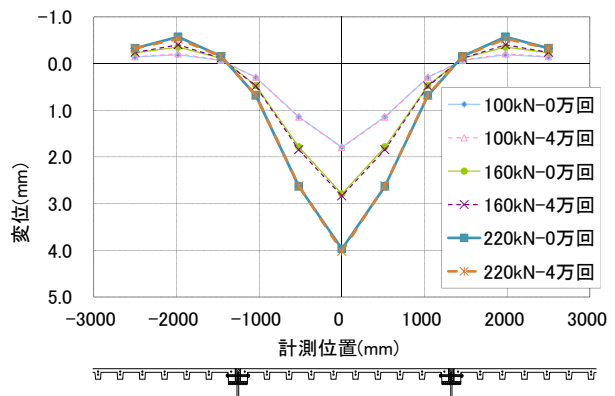


図-4 中央床版の橋軸方向たわみ分布

り出したプレテンション梁試験体を用いて繰返し荷重によりリブ側面の微細ひび割れを再現し、付着力の低下などによる構造性能の低下が生じないことを確認した⁷⁾。

3. 荷重実験

3.1 試験体および実験方法

静的荷重実験には、図-2に示す輪荷重走行試験に用いた試験体のうち中央の試験体を用いた。試験体に用いたUFCはエトリンガイト生成系のUFC⁶⁾である。蒸気養生後のUFCの圧縮強度は表-2に示すとおり、198N/mm²、引張強度は9.3N/mm²、ヤング係数は43.3kN/mm²であった。

荷重方法の概要を図-5に示す。試験体を鋼横リブの位置で2辺を単純支持し、試験体の中央において道路橋示方書のT荷重と同様に橋軸方向200mm、直角方向500mmの鋼製の荷重板を介して荷重を行った。荷重により試験体の角部が浮き上がると考えられるが、安全側の評価になると考えられるため拘束はしなかった。荷重は単調に増加させ、荷重開始から終了まで、荷重荷重をロードセルにより、試験体のたわみを変位計により計測した。また、試験体上面において、ゲージ長10mmのモルタル用ひずみゲージを用いてUFCのひずみを計測した(図-6)。

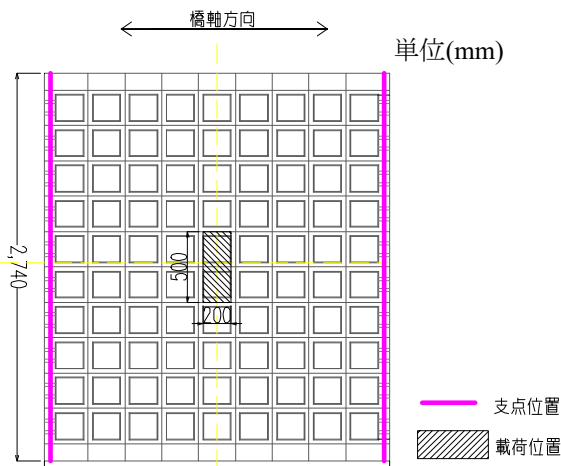


図-5 荷重方法

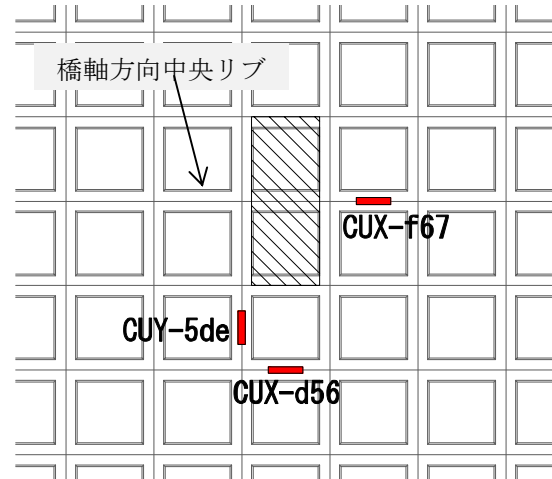


図-6 試験体上面のひずみ計測位置

3.2 実験結果

荷重と試験体中央変位の関係を図-7に、荷重と上面ひずみの関係を図-8に、荷重終了後におけるひび割れ状況を図-9に示す。

荷重が約270kNで橋軸方向リブのうち中央リブの下面の荷重点付近において目視により橋軸直角方向のひび割れが確認され、約380kNで荷重変位関係の勾配が低下し始めた。PC鋼材のひずみは計測してい

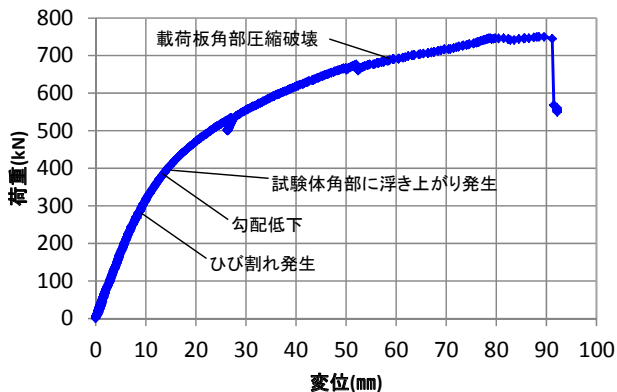


図-7 荷重-試験体中央変位関係

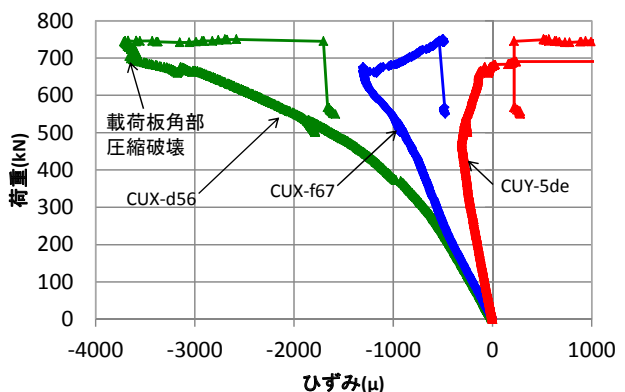


図-8 荷重-上面ひずみ関係

ないが、後述する解析では荷重570kNでPC鋼材が降伏ひずみに達しているため、勾配の低下はひび割れの進展によるものと推定される。荷重約700kNに達したところで載荷板の角付近のUFCが圧縮破壊し、橋軸直角方向に圧縮破壊領域が広がりながら徐々に荷重が増加した。荷重が751kNに到達したときに圧縮破壊領域が床版端部に達するとともに荷重が急激に低下したため載荷を終了した。なお、試験体の角部の変位は荷重が400kNを超えたあたりから浮上りが生じ、破壊時には最大2mmの浮上りが生じた。

圧縮破壊した箇所と近い位置における橋軸方向のひずみ (CUX-d56) は約3700 μ であった。UFCの圧縮応力-ひずみ曲線はほぼ直線であるため、終局ひずみは圧縮強度をヤング係数で除した値である約4600 μ に近いと考えられるが、破壊した箇所から若干離れているため、これに比べると小さい値であったと考えられる。

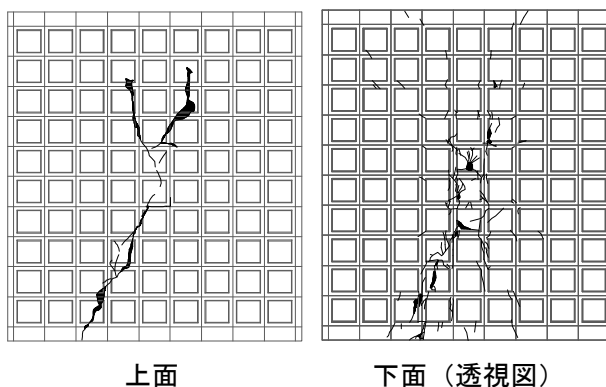
PC鋼材のひずみは計測できていないが、後述する解析においてPC鋼材が降伏していること、試験体上面のUFCが圧縮破壊していること、その直下の下面でUFCのひび割れが拡大していることから、破壊モードは曲げ破壊と考えられる。最大荷重は道路橋示方書におけるT荷重100kN/箇所の約7.5倍であった。

4. FEM解析

4.1 解析方法

前章に示す載荷実験の再現性および破壊挙動を確認するために、汎用非線形FEM解析プログラム (DIANA) を用いて解析を行った。図-10にUFC床版の解析モデルを、図-11にPC鋼材の解析モデルを示す。PC鋼材はビーム要素でモデル化してUFCとは完全に付着させ、PC鋼材に初期ひずみを与えることによってプレストレスを再現した。このときのPC鋼材の引張応力度は、PC鋼材緊張直後の許容値に対して有効係数0.7を考慮した値1093N/mm²となるようにした。境界条件は載荷実験と同様2辺支持とし、浮き上がりを考慮できるように負反力が作用する場合には無効となるノーテンションばねを設定した。

PC鋼材およびUFCの解析モデルを図-12~14に示す。PC鋼材はコンクリート標準示方書に準じてモデ



上面 下面 (透視図)
図-9 載荷終了後のひび割れ図

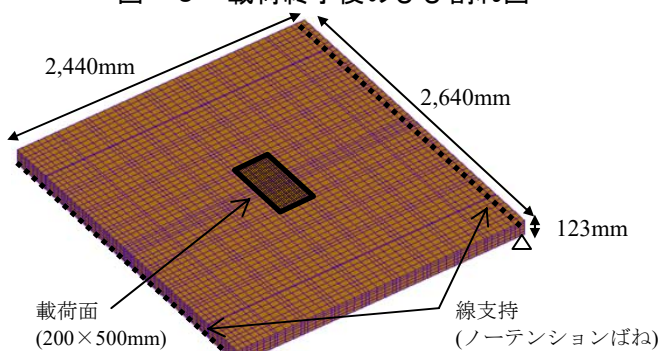


図-10 UFC床版の解析モデル

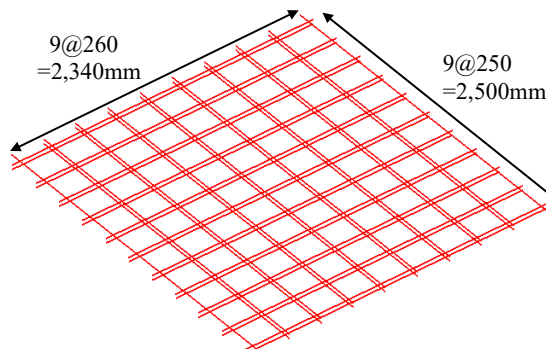


図-11 PC鋼材の解析モデル

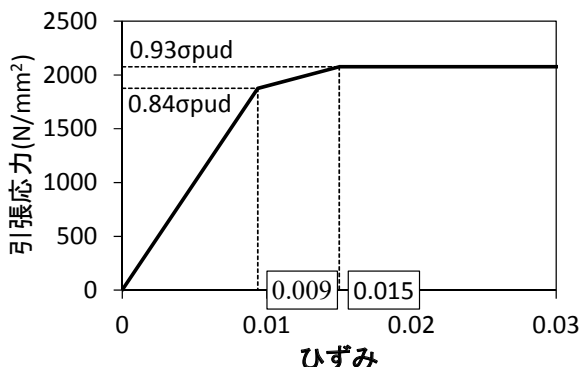


図-12 PC鋼材の解析モデル

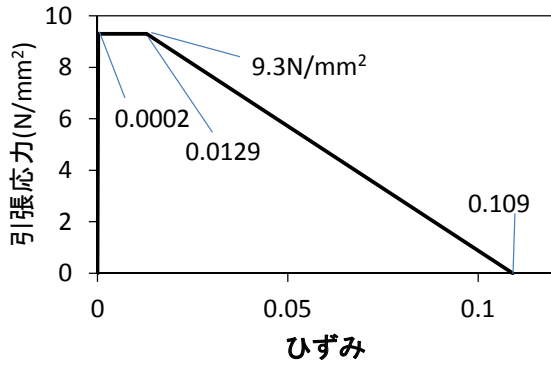


図-13 UFCの引張側解析モデル

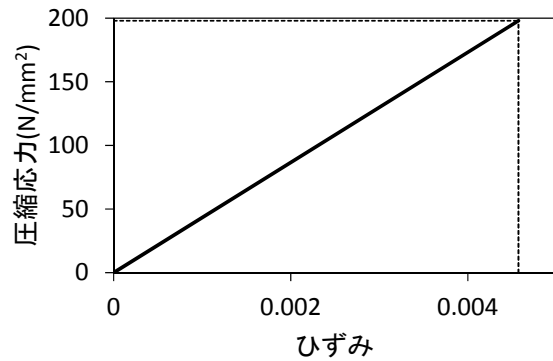


図-14 UFCの圧縮側解析モデル

ル化した。UFCの引張側応力-ひずみ曲線は土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」¹⁾に準じてモデル化し、圧縮側応力-ひずみ曲線は、実挙動に近いモデルとするため直線でモデル化した。

4.2 解析結果

解析結果として荷重-変位曲線を図-15に、荷重-PC鋼材ひずみ曲線を図-16に、荷重-UFCひずみ曲線を図-17に、圧縮ひずみコンター図を図-18に示す。なお、図-17のUFCのひずみは載荷板近傍の圧縮ひずみが最も大きい要素のひずみである。

荷重が約570kNでPC鋼材が降伏ひずみ9380 μ に達し、荷重-変位曲線の勾配が小さくなった。約650kNで載荷板の近傍においてUFCの圧縮応力度が圧縮強度198N/mm²(圧縮ひずみが4570 μ)に達したところで解析を終了した。

荷重-変位曲線および荷重-UFC曲線において、UFCの圧縮強度に至るまでの挙動はおおむね解析で再現できており、載荷実験でも解析と同様にPC鋼材の降伏後にUFCが圧縮破壊したものと考えられる。

図-18より、載荷板の4角の付近でUFCの圧縮ひずみが約4600 μ に達しており、載荷実験でもここが破壊の起点となってUFCの圧縮破壊が進行したと考えられる。載荷実験では、荷重約700kNで載荷板の角部に圧縮破壊が観察されたが、直ちに耐力が低下するのではなく、圧縮破壊領域の拡大にともなって試験体の変形が大きくなったと考えられる。

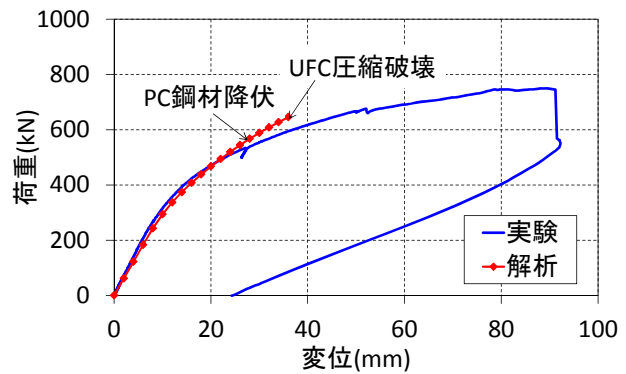


図-15 荷重-変位曲線

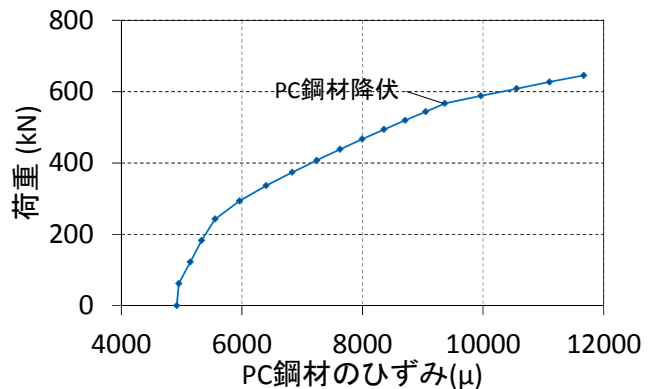


図-16 荷重-PC鋼材ひずみ曲線

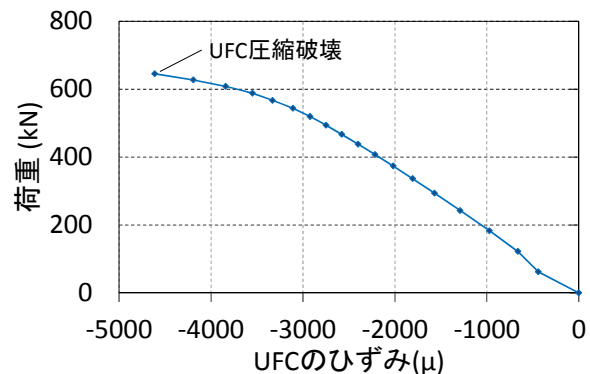


図-17 荷重-UFCひずみ曲線(載荷板近傍)

5. おわりに

本研究では、UFC床版の破壊耐力に対する安全性を検証することを目的として、輪荷重走行試験終了後の試験体を用いた載荷実験およびそのシミュレーション解析を行い、以下の結果が得られた。

- UFC床版の破壊モードはUFCが圧縮破壊する曲げ破壊であると推定された。
- 衝撃の影響を考慮したT荷重作用時に応力度がUFCの引張応力度の許容値 $8\text{N}/\text{mm}^2$ 以下となるように設計した本UFC床版では、耐力が道路橋示方書のT荷重の7.5倍程度であった。
- UFCが圧縮強度に達するまでは、非線形FEM解析で概ね載荷実験を再現できており、載荷実験でも解析と同様にPC鋼材の降伏後にUFCが圧縮破壊したものと考えられる。

本研究を行うにあたり、長岡技術科学大学長井名誉教授、東京工業大学二羽教授、岐阜大学内田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) 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），コンクリートライブラリー113，2004.9
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート（UFC）道路橋床版に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo. 17，2015
- 3) 一宮利通，金治英貞，小坂崇，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，プレストレストコンクリート，Vol. 56, No. 1, pp. 37-42, 2014. 1
- 4) 超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版の安全性に関する実験的研究，コンクリート工学，Vol. 53, No. 8, pp. 698-702, 2015. 8
- 5) プレストレストコンクリート工学会：高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針，2011. 6
- 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
- 7) 一宮利通，金治英貞，小坂崇，樽谷早智子：薄肉UFCプレテンション部材の構造性能に関する検討，第23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. 599-604

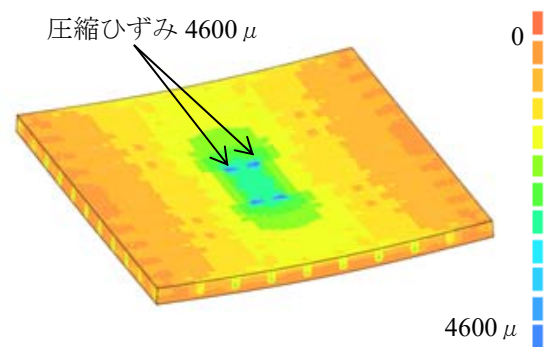


図-18 圧縮ひずみコンター図