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

一宮利通^{*1}・樽谷早智子^{*2}・金治英貞^{*3}・小坂 崇^{*4}

概要 近年、鋼床版の溶接部に車両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（UFC）を用い、耐久性が高く、しかも鋼床版並みに軽量のワッフル型 UFC 床版を開発している。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を行っている。本研究では、破壊モードの確認および破壊耐力に対する安全性の検証を目的として、輪荷重走行試験後の試験体を用いた載荷実験を行った。その結果、破壊モードは曲げ破壊であり、設計輪荷重の 7.5 倍の耐力を有することを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、道路橋床版、破壊耐力、輪荷重走行試験

1. はじめに

近年、鋼床版の溶接部に、車両（特に大型車）の走行に伴う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、自重が鋼床版と同程度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 2.5 m ピッチで配置される鋼横桁または鋼縦リブ、ならびに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 床版と鋼桁および鋼横リブはスタッド等で接合するものとし後死荷

重や活荷重に対して合成桁として挙動する。

UFC 床版については、これまでに解析や実験によって安全性および使用性に関する検討を行っている。例えば、FEM 解析による輪荷重作用時の床版としての挙動、ならびに合成桁としての全体挙動を確認して構造成立性を確認している²⁾。また、輪荷重走行試験による UFC 床版の疲労に対する安全性の検証²⁾、1 本のリブを切り出した部材実験によるせん断破壊に対する安全性の検証³⁾を行っている。

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を行った。ここでは、輪荷重走行試験の概要および床版の静的載荷実験について報告する。

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 260 mm 間隔でリブを有し、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 1S15.7⁴⁾ 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 に示す。本 UFC はエトリンサイト生成系の UFC⁵⁾ であり、ここでは一次養生として 20～30℃ の湿潤養生を 2 日、二次養生として 85℃ の蒸気養生を 24 時間行った。PC 鋼材を 240 kN/本で緊張した状態で UFC を打ち込み、一次養生後に圧縮強度が 100～120 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。試験時における UFC の圧縮強度は 182～198 N/mm² であった。

試験体は、実構造物と同様に橋軸方向に 2.5 m ピッチ

図-1 UFC 床版の適用概念

*1 いちのみや・としみち／鹿島建設(株) 技術研究所 上席研究員（正会員）

*2 たるたに・さちこ／鹿島建設(株) 技術研究所 研究員（正会員）

*3 かなじ・ひでさだ／阪神高速道路(株) 技術部 技術推進室長

*4 こさか・たかし／阪神高速道路(株) 技術部 技術推進室 課長代理（正会員）

図-2 輪荷重走行試験の試験体の概要 (単位: mm)

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	1 287	905	32.2	137.4

水の単位量は混和剤の水分を含む

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

に配置された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。その後、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。図-3に載荷プログラムを示す。

190 kN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0.01 mm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倍の荷重載荷時であったこと、UFCはひび割れが生じて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

Experimental Study on Safety of Bridge Deck using UFC

By T. Ichinomiya, S. Tarutani, H. Kanaji and T. Kosaka

Concrete Journal, Vol.53, No.8, pp.698~702, Aug. 2015

Synopsis In recent years, the occurrence in steel deck welds of fatigue cracks caused by deformation arising from vehicle travel has become conspicuous, and costs required for maintenance such as inspection and repair are rising. In response to this situation, the authors developed waffle-type slabs that use ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) for high durability and light weight on a par with that of steel slabs. Thus far, stress verification by FEM analysis and verification of safety against fatigue through wheel load running tests have been conducted. In the present study, load testing was performed on test specimens after subjecting them to the wheel load running test, for the purpose of identifying the failure mode and verifying safety in terms of fracture strength. As a result, the failure mode was identified as flexural failure, and the specimens were confirmed to have load-bearing capacity 7.5 times the design wheel load.

Keywords : ultra high strength fiber reinforced concrete, highway bridge deck, failure strength, wheel load running test

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²⁾。

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⁶⁾。また、リブ 1 本分を切り出したプレテンション梁試験体を用いて繰返し載荷によりリブ側面の微細ひび割れを再現し、付着力の低下等による構造性能の低下が生じないことを確認した⁶⁾。

3. UFC 床版の静的載荷実験

3.1 試験体および実験方法

静的載荷実験には、図-2 に示す試験体のうち中央の試験体を用いた。表-2 に示すように、蒸気養生後の AFt 系 UFC の圧縮強度は 198 N/mm^2 、引張強度は 9.3 N/mm^2 、ヤング係数は 43.3 kN/mm^2 であった。ただし、圧縮強度は $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体、引張強度は $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の曲げ強度から土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」¹⁾ に準拠して換算したものである。

載荷方法の概要を図-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橋軸方向 200 mm 、直角方向 500 mm の載荷板を介して載荷を行った。載荷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

表-2 蒸気養生後における AFt 系 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-5 載荷方法

なかった。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、試験体のたわみを変位計により計測した（図-6）。また、試験体下面および上面において、UFC のひずみをひずみゲージで計測した（図-7）。

3.2 実験結果

荷重と試験体中央変位の関係を図-8 に、荷重と試験体角部変位の関係を図-9 に、載荷終了後におけるひび割れ図を図-10 に、破壊状況を写真-1 に示す。なお、変位はいずれも載荷する方向が正である。荷重が約 270 kN で橋軸方向のリブのうち中央のリブ下面において目視でひび割れの発生が確認され、約 380 kN で荷重変位関係の勾配が低下し始めた。荷重が 751 kN に到達したところで荷重が急激に低下したため載荷を終了した。最大荷重は道路橋示方書⁷⁾における T 荷重 100 kN /箇所の約 7.5

図-6 変位計設置位置

(a) 上面

(b) 下面（上面からの透視図）

図-7 ひずみ計測位置

倍であった。破壊モードは曲げ破壊と考えられ押抜きせん断破壊ではなかった。載荷板の角から主として橋軸直角方向にひび割れおよび圧縮破壊領域が広がった。試験

図-8 荷重－試験体中央変位関係

図-9 荷重－試験体角部変位関係

図-10 載荷終了後のひび割れ図

写真-1 試験体上面の破壊状況

体の角部の変位は荷重が 400 kN を超えたあたりから浮上りが生じ、破壊時には最大 2 mm の浮上りが生じた。なお、PC 鋼材のひずみは計測していないため、PC 鋼材が降伏したかどうかは不明である。

荷重と下面ひずみの関係を図-11 に示す。荷重が約 240 kN で荷重と橋軸方向リブ下面のひずみ (CLX-f 56) の関係が非線形となる挙動が確認されたためひび割れが生じたと推定される。橋軸直角方向リブ下面のひずみ (CLY-6 ef) は橋軸方向リブ下面のひずみ (CLX-f 56) に比べると小さいが、荷重が約 320 kN で非線形となる挙動が確認され、ひび割れが生じたと考えられる。支間方向は橋軸方向であるが、橋軸直角方向のリブが荷重を伝達していることがうかがえる。厚さ 40 mm のスラブ下面の橋軸方向ひずみ (CLX-56 fg) は荷重が約 220 kN まではほぼゼロであったが、これはスラブ下面が床版の中立軸の位置にあたるためと考えられる。橋軸方向リブにひび割れが発生した 240 kN 以降は中立軸がスラブ内に移動したため引張ひずみが発生していると考えられる。なお、破壊後はスラブ下面にもひび割れが確認された。

荷重と上面ひずみの関係を図-12 に示す。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-d 56) は約 3700μ であった。UFC の圧縮応力ひずみ曲線はピークまではほぼ直線であるため¹⁾、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 4600μ 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

図-11 荷重－下面ひずみ関係

図-12 荷重－上面ひずみ関係

と小さい値であった。破壊が橋軸直角方向に進行したため、載荷点の支点側における橋軸方向ひずみ（CUX-f67）は約 $1\,300\,\mu$ 、橋軸直角方向のひずみ（CUX-5 de）は約 $310\,\mu$ と小さい値であった。

以上のとおり、UFC 床版の載荷実験により、破壊モードは曲げ破壊であり、橋軸直角方向のリブが荷重を伝達することによって主として橋軸直角方向に破壊が進行することが確認された。また、耐力は設計輪荷重の 7.5 倍程度であった。

4. おわりに

本研究では、床版の曲げ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を行い、UFC 床版の破壊モードは橋軸方向の曲げ破壊であること、耐力が T 荷重の 7.5 倍程度であることを確認した。今後、FEM 解析と比較することによって詳細な検証を行う予定である。

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) 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) 小坂 崇・金治英貞・一宮利通・齋藤公生：連続合成桁に用いる超高強度繊維補強コンクリート道路橋床版の開発、第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2013. 11
- 3) 一宮利通・樽谷早智子・小坂 崇・金治英貞：UFC を用いたリブ付きプレテンション床版のせん断耐力、コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1129~1134, 2015. 7
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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, 2014. 10
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2012. 3