超高強度繊維補強コンクリートを用いたワッフル型 UFC 床版の開発

藤代 勝*, 一宮利通**, 金治英貞***, 小坂 崇****

*工博, 鹿島建設(株), 土木設計本部(〒135-0042 東京都港区赤坂 6-5-30) **工修, 鹿島建設(株), 技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1) ***工博, 阪神高速道路(株), 技術部(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3) ****工修, 阪神高速道路(株), 技術部(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

筆者らは超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を用いて、ワッフル型の形状で鋼床版と同程度の軽量さを有する疲労耐久性の高い道路橋床版を 開発し、輪荷重走行試験によって疲労耐久性を確認している.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、載荷 実験および FEM 解析による検討を行った.また、床版を実構造物として設 置し、実車走行における振動を加速度計および変位計により計測し挙動を 確認した.

キーワード: UFC 床版, 耐荷性能, 振動

1. はじめに

近年,鋼床版では重交通の繰返し載荷によって疲労損 傷が顕在化しており,補強やコンクリート系材料による 開断面リブやデッキプレートの増厚が行われているもの の,この疲労損傷の根本的解決には至っていない.この 損傷に対して筆者らは,特殊鋼繊維を用いた超高強度繊 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軽量さを有する疲労耐久性の高 い道路橋床版(UFC 床版)を開発している²⁾.

ワッフル型 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. ワッフル型 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で,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²⁾.

開発したワッフル型 UFC 床版はこれまでに解析や実 験で安全性を検証しているが,道路橋床版に適用された 実績のない構造であるため,破壊モードや実交通下にお ける挙動を確認するのが望ましい.

本研究では、UFC 床版の安全性に関する検討の一環と して、輪荷重走行試験終了後の試験体を用いて静的載荷 試験による UFC 床版の破壊モードおよび床版の破壊耐 力に対する安全性の確認載荷実験および材料非線形 FEM 解析による再現解析検討を行った.また、道路施設 の管理用道路にワッフル型 UFC 床版試験体を永久構造



図-1 ワッフル型 UFC 床版の適用イメージ

物として設置し、実交通下における振動を加速度計およ び変位計により動的計測を行い、振動特性および実交通 下における挙動を確認した.

2. 構造概要と輪荷重走行試験概要

2.1 床版の構造概要

ワッフル型 UFC 床版は、橋軸方向および直角方向に約 250mm 間隔でリブを有し、ワッフル型 UFC 床版の断面 は、閉断面縦リブを有する鋼床版と重量がほぼ同等とな るよう、スラブ厚 40mm、リブ高 83mm とした.2 方向 のリブ内には2本の PC 鋼材が配置され、プレテンショ ン方式で床版にプレストレスを導入する構造である.

設計荷重に対する安全性は、薄肉構造かつ断面が不連続な版構造であるため3次元 FEM 解析を実施し、耐荷性能は活荷重による発生応力度で照査した.設計に用い



図-2 輪荷重走行疲労試験体の概要



写真-1 輪荷重走行疲労試験の状況

る応力度制限値は、使用する UFC の材料マニュアル³⁾ に従い、設計手法は UFC 指針¹⁾に従い、圧縮側は 0.6 fck=108N/mm²、引張側はひび割れ発生強度である fcr= -8.0N/mm² として照査を行った.

2.2 輪荷重走行試験の概要

後述する静的載荷試験および振動計測は,輪荷重走行 試験を経験した試験体を用いているため,その試験につ いて概説する.

ワッフル型 UFC 道路橋床版の安全性を確認するため に、輪荷重走行疲労試験を実施した⁴⁾(写真-1).床版 が複雑な形状であるため、移動する輪荷重によりリブの ねじりなど局所的な応力が問題となる可能性が考えられ たためである.輪荷重試験の載荷プログラムを図-3 に 示す.

試験で計測したたわみ量およびひずみの結果を図-4 に示す.荷重の増加に比例して増加し,それぞれの各荷 重ステップ間における静的載荷の計測結果に差はなく, 繰返し載荷による剛性の低下は見られなかった.また, ひび割れ発生の有無を目視で観察したが,曲げやせん断 によるひび割れは確認できなかった.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,160kNの3万回目であるた



め、本試験により疲労耐久性が確認できた.その後,引 続いて水を張った状態で輪荷重走行疲労試験を実施した が、たわみ量の増加、水の漏れや濁りなどなく床版が健 全であることが確認できた.

3. 耐荷性能の確認

輪荷重走行疲労試験終了後の試験体を用いて,静的載 荷試験による床版の破壊耐力および破壊モードの確認⁵ と,材料非線形 FEM 解析による再現解析を行った.



図-5 載荷方法



図-6 試験体上面のひずみ計測位置

3.1 静的載荷実験の概要

静的載荷実験には、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 UFC³ (AFt 系 UFC) で、蒸気養生後の UFC の圧縮強度は 198N/mm²,引張強 度は 9.3N/mm²,ヤング係数は 43.3kN/mm² であった.

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辺を単純線支持し, 試験体の中央において道路 橋示方書の T 荷重を参考に橋軸方向 200mm, 直角方向 500mmの載荷板を介して載荷を行った. 載荷のたわみに により試験体の4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行わなかっ 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. また, 試験体上面において, UFC のひず みを図-6 に示す位置でひずみゲージで計測した.

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、載荷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380kN で荷重変位関係の勾配が低下し始めた.荷重約700kNに 達したところで載荷板の角付近の UFC が圧縮破壊して 橋軸直角方向に徐々に圧縮破壊領域が広がり,荷重が 751kN に到達したときに荷重が急激に低下したため載荷 を終了した.

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,図中の緑)は約3700μ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,破壊モードは 上縁の UFC が圧縮限界に達したことによる曲げ破壊と 考えられ,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.なお,試験体のたわみ による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,破壊時においては最大 2mm の浮上りが生 じた.



3.3 FEM 解析方法

前節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, DIANA を用いて材料非線形 FEM 解析を行 った. UFC 床版はソリッド要素で, PC 鋼材はビーム要 素でモデル化し, PC 鋼材の応力度が設計と同様に 1093N/mm²で釣り合うように初期ひずみを与えることに よって UFC に有効プレストレスを与えた.境界条件は載 荷実験と同様2辺を線支持とし,実験と同様な変形挙動 を再現できるよう浮き上がりを考慮できるノーテンシ ョンばねを設定した.

解析に用いた UFC の材料モデルを図-10,11 に示す. UFC の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、引張側応力ひずみ曲線は UFC 指針¹⁾に準じてモデル化した. PC 鋼材は図-12 に 示すように試験体と同様にビーム要素とし、コンクリー ト標準示方書に準じてモデル化した.



図-12 PC鋼材の解析モデル



図-14 圧縮ひずみコンター図

3.4 解析結果

解析結果として荷重-変位曲線を図-13 に, 圧縮ひず みコンター図を図-14 に示す.

荷重が約 570kN で PC 鋼材が降伏し,約 650kN で UFC が圧縮強度に達した. 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 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 -14より,載荷板の 4 角付近で 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 領域の進行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.



4. 床版の振動特性

道路施設の管理用道路にワッフル型 UFC 床版試験体 を永久構造物として設置し、実交通下における振動と変 位を加速度計および変位計により動的計測を行い、床版 の振動特性を確認した.

4.1 試験体の設置概要

試験体は輪荷重走行試験を行ったワッフル型 UFC 床版であり、これを管理用道路に設置した. UFC 床版のサイズは、橋軸方向に 2.50m、直角方向に 2.74m で、床版は橋軸直角方向の 2 辺を硬質ゴムで単純線支持できる図-15 に示す簡易な橋台を設置した.

4.2 振動計測結果

振動計測は加速度計を用いて、常時微動および自由振動を計測した.常時微動は 10 分間の計測を行い、卓越振動数を確認した.自由振動計測は、床版中央にゴム板を敷いて木槌で打撃し、床版の卓越振動数および振動モードを確認した.

常時微動測定の結果を図-16 に示す.床版中央で計測 された卓越振動数は 53.8Hz であった.後述する自由振動 試験でも同等の振動数が計測されていることから,この 数値が床版の1次振動モードの固有振動数であると推定 される.同様な支持間隔でワッフル型 UFC 床版を梁と見 なして両端ヒンジとした場合に固有周期を求める振動 の式で算出した結果,36Hz であった.計測結果の方が大 きな振動数が計測されているが,これは設置した床版に は 4 辺に高さ 150mm のリブがあり,その剛性が影響し ていると考えられる.

自由振動試験の卓越振動数は床版中央において 51.5Hzであり、この値が床版の固有振動数と考えられる. 橋軸方向に5か所の計測から得られた固有振動数による 1次の振動モードを図-17に示す.また、床版中央の測 定結果から、減衰定数は4.0%であることが確認できた.

土木研究所では、大型車が伸縮継ぎ手の段差部を走行 した場合に生じる変動荷重および衝撃力についての実 験・研究を行っている⁶.これによると、タンデム式ダ ンプトラックのバネ下振動数は、中軸で13Hz、後軸で



図-16 常時微動の周波数スペクトル



18Hz となっていることから、今回計測された自由振動数 では共振等の可能性は少ないと考えられる.

4.2 変形測定結果

(1)静的試験

ダンプトラックの前輪を床版の支間中心位置に静的 載荷し,床版の下面に設置した5台の変位計を用いて床 版のたわみ分布を計測した.計測結果を図-18 に示す. 載荷荷重はロードセルを用いて事前に29.53kNであるこ とを確認した.後述する動的載荷試験の結果と比較する ための計測結果は,床版中央のたわみ量は0.472mmであ った.

(2)動的試験

ダンプトラックを 10, 20, 30, 40km/h 程度で走行さ せ、床版の下面に設置した変位計を用いて床版のたわみ 変化を動的に計測した.動的載荷試験状況を写真-2 に 示す.

静的載荷試験によるたわみ量と比較することにより, 動的載荷によるたわみ量増分を確認した.床版中央(測



写真-2 動的載荷試験状況



点 D3)における各速度と静的載荷のたわみ量の比較を図 -19に示す.速度 20km/h では最大たわみが 0.358mm と 静的載荷時のたわみ量の 0.76 倍に小さくなっていたが, それ以外は速度に関わらず静的載荷時のたわみ量の 1.1 ~1.2 倍に増加した.車両の速度や固有振動数,路面の状 況によって変化すると考えられるが,今回の試験の範囲 では,走行による衝撃係数は約 0.2 が計測された.

5. おわりに

本研究において、耐荷性能の確認では、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て、静的載荷試験を 実施した.また、載荷実験およびそのシミュレーション 解析を行い、UFC 床版の破壊モードは PC 鋼材降伏後に UFC が圧縮破壊する曲げ破壊であること、耐力が道路橋 示方書のT荷重の7.5 倍程度であることを確認した.

振動特性の確認では、常時微動および自由振動の計測 からワッフル型 UFC 床版の固有周期が計測できた.数値 計算による振動数よりも試験結果の方が大きいが、実ヤ ング係数の違いや、端部リブの剛性の影響があると考え られる.載荷試験では、事前の FEM 解析とほぼ同等な 結果が得られ、走行による衝撃を含めたたわみ量は約1.2 倍程度となることが確認でき、これは衝撃係数と同様な 意味を持つことが考えられる.

謝辞

本研究を行うにあたり,輪荷重走行疲労試験に関し大 阪大学松井名誉教授に,床版の耐荷性能に関し長岡技術 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,神戸大学三木准教授にご指導をいただきま した.また,振動特性に関し神戸大学川谷名誉教授にご 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

- 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) 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
- 4)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, 2014.1
- 5) 一宮利通・樽谷早智子・金治英貞・小坂崇: 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, 2015.8
- 6) 建設省土木研究所構造研究室:橋の衝撃荷重に関する 試験調査報告書(I-1987),土木研究所資料 No.2508 (2016 年 7 月 18 日受付)