

床版取替えに対応した UFC 床版の疲労耐久性に関する検討

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

Abstract : Due to the continual load of heavy traffic and the resulting deterioration on highway bridges, damage to decks of highway bridge has become a reality in recent years. It is with situations like this in mind that UFC deck, are being developed as light weight, high durability decks that can be applied in both newly build decks and as replacements in existing decks. In this study, the wheel running fatigue test were carried out to evaluate the fatigue durability of flat plate type UFC decks, where increasing loads of 100 to 400 kN were run over the decks a total of 400,000 times. This load and number of passes greatly exceeds the equivalent number of passes for a 100-year period. The experiments confirmed that the UFC decks and the connecting material between decks were not destroyed. We verified the high fatigue durability of flat plate type UFC decks.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete , UFC deck , Bridge deck , Wheel loading fatigue test

1. はじめに

昭和 30 年代後半から 40 年代に建設された高速道路は、供用年数の経過による老朽化や、重交通の载荷によって、劣化や損傷が顕在化している。高速道路会社は、劣化や損傷した構造物を、長期的に維持管理していくために、平成 27 年度より大規模更新・修繕事業に取り組んでいる。本事業では、既設 RC 床版を耐久性の高い床版に取り替える計画としている。

床版取替えには、軽量かつ薄い床版が求められる。取替え対象の既設床版は、昭和 47 年 3 月以前に制定された道路橋示方書（以下、道示）によって設計された厚さが 170～180mm の RC 床版である。現行の道示¹⁾によれば、床版の支間長 4.0m の連続版に対する PC 床版の最小厚さは 210mm である。既設床版より床版厚が大きい床版に取り替えると、鋼桁や下部構造への常時の負担が増加するだけでなく、地震時の安全性が損なわれる。また、路面の縦断線形への影響を避けるために、取替え前と同じ橋面高さとする必要がある。

筆者らは、床版取替えに対応した軽量かつ薄い床版として、圧縮強度が 180N/mm² のエトリンサイト生成系²⁾の超高強度繊維補強コンクリート³⁾を用いた UFC 道路橋床版（以下、UFC 床版）を開発している⁴⁾。UFC 床版には、リブ構造のワッフル型 UFC 床版と平板型 UFC 床版がある。平板型 UFC 床版と、鋼鉄桁による合成桁を図-1 に、平板型 UFC 床版の構造を図-2 に示す。これまで、床版取替えへの適用について、試設計、接合部の実験などを実施している^{5),6)}。本検討では、平板型 UFC 床版の疲労耐久性に関する検討を実施した。

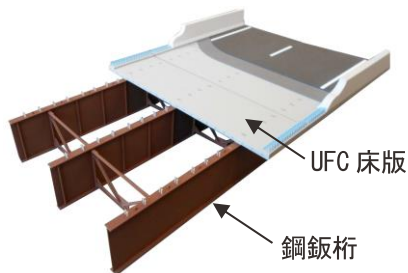


図-1 平板型 UFC 道路橋床版を用いた合成桁

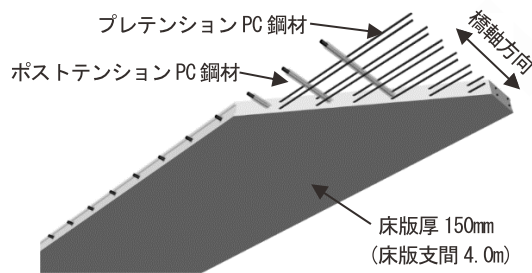


図-2 平板型 UFC 床版の構造

2. 試験概要

2.1 目的

本検討の目的は、平板型 UFC 床版の疲労耐久性を輪荷重走行試験で確認することと、床版本体や接合部の損傷順序の確認によって、維持管理における点検などの着目点など基礎資料を得ることである。

2.2 試験体

輪荷重走行試験の試験体および設置図を図-3 に示す。平板型 UFC 床版の厚さは、床版支間 3m の連続版として設計し、床版厚さを 130mm と算定した。試験では単純版の支持条件となるため、床版支間中央の曲げモーメントを連続版と合わせるため、床版支間を 2.5m とした。床版の直角方向幅は、2.8m として床版支間中央に輪荷重を載荷した。橋軸方向に床版 2 枚を接合し、接合部を超えて輪荷重を載荷した。

床版同士の接合部を、図-3 の側面図に示す。床版同士の遊間最小幅を 20mm とし、無収縮モルタルによって間詰めし、橋軸方向に配置したポストテンション方式 PC 鋼材でプレストレスを導入する PC 構造の接合部である。接合部の設計においては、活荷重作用時 (プレストレス+活荷重) に、引張応力度が生じない、フルプレストレスとなるように接合部を設計した。

試験体に用いた UFC および無収縮モルタルの材料試験値を表-1 に、PC 鋼材の緒元を表-2 に示す。

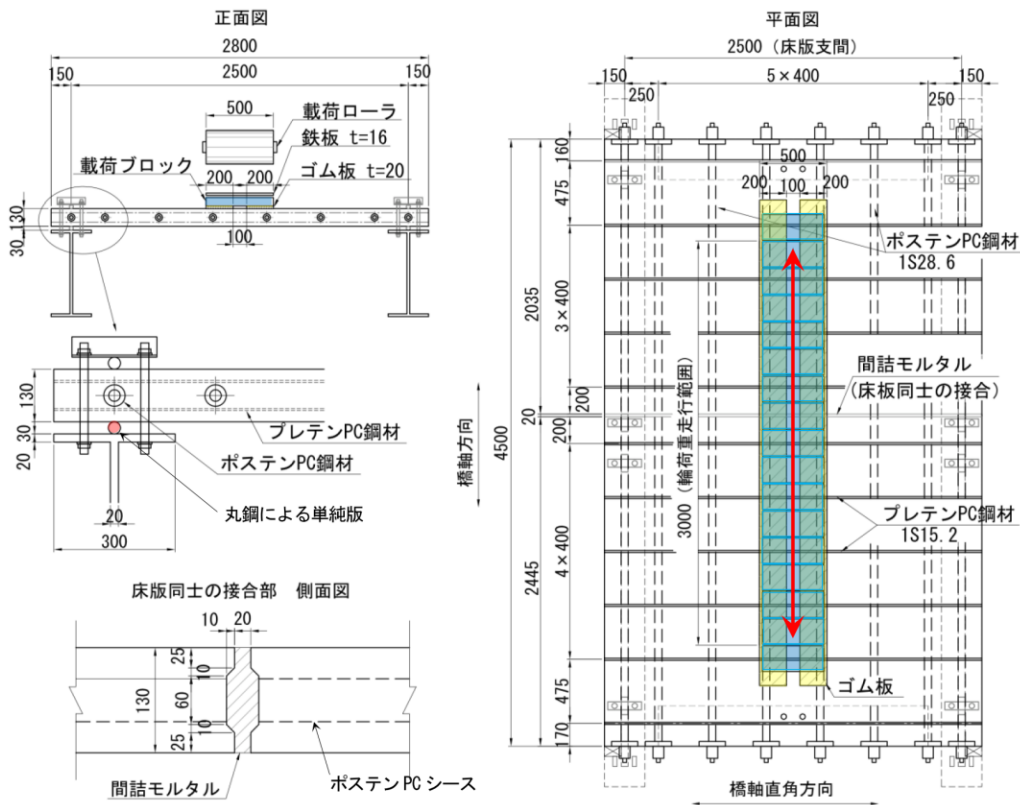


図-3 輪荷重走行試験の試験体

表-1 UFC およびモルタルの材料試験値 (N/mm²)

		試験値
UFC 圧縮強度 (3 体平均値)	材齢 1 日	46
	材齢 8 日	186
	材齢 255 日	192
無収縮モルタル 圧縮強度	材齢 3 日	35.9
	材齢 196 日	84.0

※ 材齢 196 日, 255 日は試験開始前の時点である。

表-2 PC 鋼材の緒元

		単位	諸元値
直角方向 PC 1S15.2 (SWPR7BL)	断面積	mm ²	138.7
	緊張応力度	N/mm ²	1440
	緊張力	kN	200
橋軸方向 PC 1S28.6 (SWPR19L)	断面積	mm ²	532.4
	緊張応力度	N/mm ²	1057
	緊張力	kN	281

2.3 繰り返し載荷

輪荷重走行試験に用いた試験装置は、試験結果を既往の PC 床版の輪荷重走行試験結果⁷⁾と比較するために、400kN の動的載荷が可能で、国立研究開発法人土木研究所の試験機を使用した。繰り返し載荷は、階段状荷重漸増載荷（以下、階段載荷）により行うこととした。階段載荷の載荷ステップは、道示において床版の設計に用いる活荷重（T 荷重）相当の 100kN を初期荷重として、走行 4 万回ごとに 280kN までは 30kN ずつ荷重を増加させた。280kN から 400kN までは 40kN ずつ荷重を増加させた。100kN から 160kN の 12 万回は、床版上に水を張った状態で繰り返し載荷した（図-11 参照）。

この載荷ステップは、既往の輪荷重試験における設定と、床版の設計供用年数である 100 年に相当する輪荷重より大きな荷重を載荷するように設定した。なお、阪神高速道路において実測した軸重の 100 年に等価な繰り返し回数は、本試験の階段載荷における 160kN 時点（10.8 万回）に相当するものである。

2.4 静的載荷

階段載荷において荷重を増加させる前後で静的に荷重を載荷し、試験体の挙動を確認した。静的載荷による挙動を確認した項目は、床版のたわみ、床版および PC 鋼材のひずみ、床版同士の接合部の目開き、床版同士の接合部の鉛直ずれ変位である。床版同士の目開きおよび鉛直ずれ変位は、接合部に π ゲージと変位計を設置し、目開きだけでなく、鉛直方向と水平方向のずれ変位を計測した。

3. 試験結果

3.1 繰り返し載荷試験

(1) 床版の損傷

輪荷重走行試験の状況（100kN から 160kN の 12 万回における水張り試験時）を写真-1 に示す。最大 400kN、40 万回まで載荷したが、床版および床版同士の接合部は破壊しなかった。床版の損傷としては、床版下面に、主に曲げによるひび割れが生じた。床版同士の接合部に目開きは生じたが、段差などの損傷は生じなかった。

(2) ひび割れ（床版下面）

床版下面における UFC 表面のひび割れ観察図を図-4 に示す。ひび割れは、輪荷重が走行している状態で目視によって観察した。

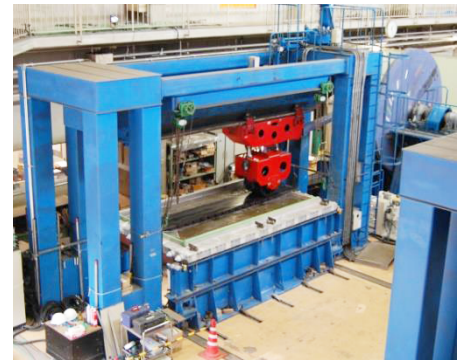


写真-1 輪荷重走行試験の状況

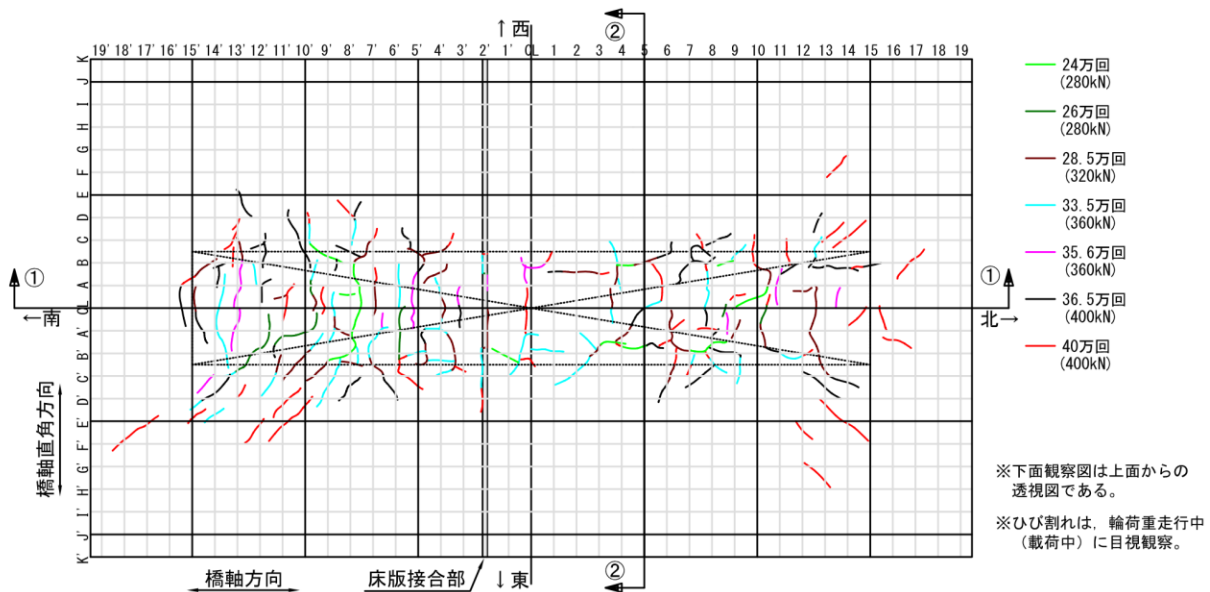


図-4 ひび割れ観察図（下面）

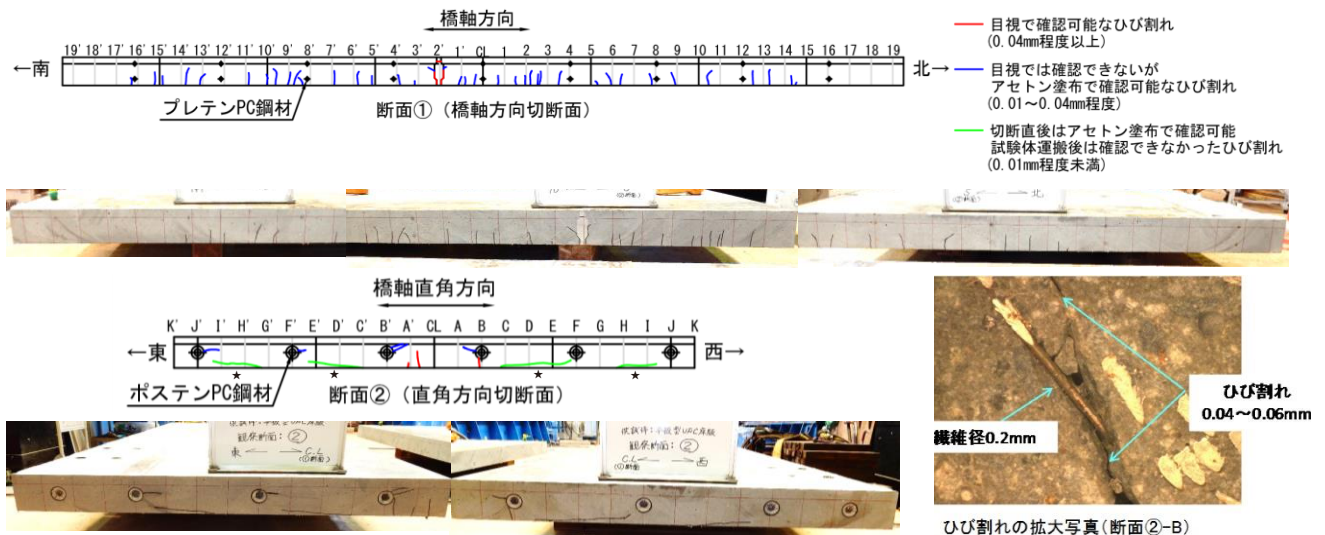


図-5 切断面のひび割れ図

24.0 万回 (280kN) に、南側の直角方向ひび割れと北側に橋軸方向ひび割れが生じた。28.5 万回 (320kN) に、接合部の間詰めに沿ったひび割れ (目開き) が確認された。33.5 万回 (360kN) から 35.6 万回 (360kN) は、主にそれまでのひび割れが伸展する状況が確認され、36.5 万回から 40 万回 (400kN) に直角方向と橋軸方向への斜め方向のひび割れが確認された。

(3) ひび割れ (断面)

輪荷重試験後に床版内部のひび割れを確認するために床版を切断した。切断面のひび割れ図を図-5 に示す。断面①のひび割れは、いずれも曲げひび割れと考えられる。断面高さの 2/3 程度まで伸びている。走行範囲の全長に分布しており、走行範囲に同程度の曲げが作用していたといえる。断面②のひび割れは、輪荷重が走行した支間中央付近の曲げによるひび割れであると考えられる。また、ひび割れは、輪荷重の載荷ブロックの左右付近に集中しているため、載荷ブロックの影響を受けていると考えられる。断面②星印のように、水平方向のひび割れが試験体切断直後には観察された。ただし、試験体を運搬し約 1 ヶ月後に観察した際には確認できなかった。RC 床版や PC 床版に対する輪荷重走行試験での一般的な破壊形態である押抜きせん断破壊につながるひび割れは確認されなかった。また、床版接合部のひび割れは、間詰めモルタルと UFC の境界にひび割れを確認した。間詰め内に、ひび割れは生じなかった。

3.2 静的載荷試験結果

図-6 に静的載荷試験の載荷荷重と走行回数の関係を示す。解析によって算出した、床版接合部に引張応力度が発生する載荷荷重 (136kN) と、床版がひび割れ発生限界となる載荷荷重 (221kN) を破線で示している。

(1) 接合部の目開き

π 型変位計で計測した、床版同士の接合部の目開きは、図-7 に示すように、20 万回走行後の 250kN 載荷後の除荷時に、0.01mm の目開きが生じた。

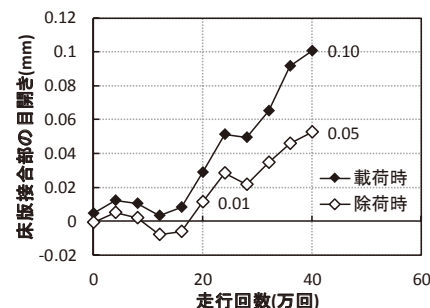
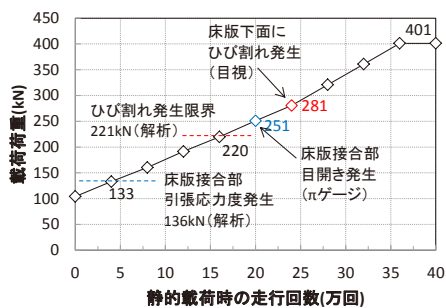


図-6 静的載荷試験の載荷荷重と走行回数の関係

図-7 間詰めの目開き (床版接合部)

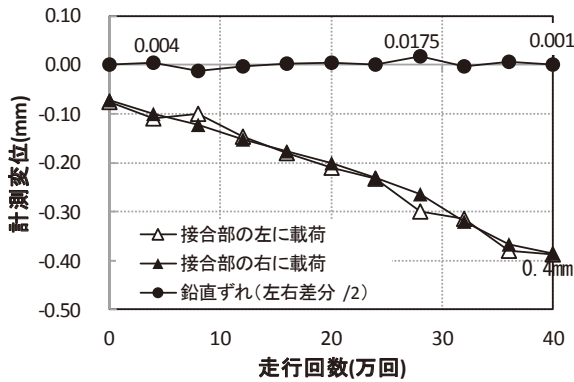


図-8 間詰め鉛直ずれ変位 (床版接合部)

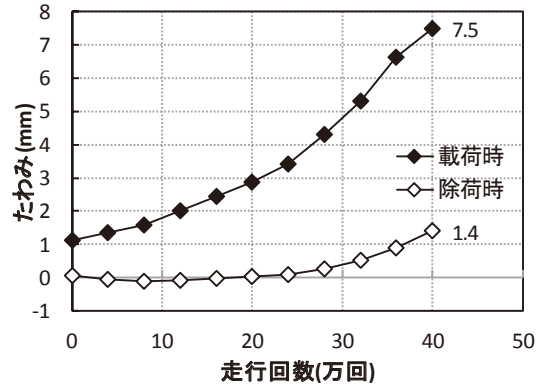


図-9 荷点直下のたわみ

(2) 接合部の鉛直方向ずれ

鉛直方向ずれは、接合部の左右に静的に荷重した時の接合部で計測された鉛直変位の差分から算出した。図-8に示すように0.01mm以下であり、接合部のひび割れに伴う鉛直方向ずれは生じていなかったといえる。

(3) 床版のたわみ

除荷時のたわみは、図-9に示すように、24万回以降増加し、曲線に若干の非線形性を示した。24万回(280kN)に確認されたひび割れの影響によって、たわみに非線形性が生じたと推測される。

4. 疲労耐久性の評価

既往のPC床版を対象とした輪荷重走行試験との比較によって、UFC床版の疲労耐久性を評価した。既往のPC床版の輪荷重走行試験として、土木研究所で実施された平成8年版道示で設計されたPC床版の試験結果⁷⁾と比較する。このPC床版は、353kN(40.3万回)、392kN(48.6万回)で破壊に至っている。階段荷重のステップが、本試験と異なるため、図-10に示すように、横軸を荷重100kNとした等価回数、縦軸を正規化たわみとして比較することとした。

縦軸の正規化たわみ R_δ は、計測たわみ δ_m を作用荷重 P_i で除して単位荷重あたりのたわみを求め、さらに、初期荷重100kN作用時のたわみ δ_0 で除して、初期たわみからの比率として表したものである($R_\delta = \delta_m / P_i / \delta_0$)。横軸の等価回数は、式(1)を用いて算出した。 N_{eq} は荷重 T_i が n_i 回作用した場合における $T_0=100kN$ を基本荷重とした回数である。 m は疲労強度曲線の傾きの逆数の絶対値である。UFC床版やPC床版の疲労強度曲線が無い場合、ここでは、既往のRC床版の研究⁸⁾によって算定された $m=12.763$ を用いた。なお、阪神高速道路において実測した軸重の100年等価回数は $N_{eq}=1.26 \times 10^7$ (回)である。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i}{T_0} \right)^m n_i \quad (1)$$

既往の検討で実施したワッフル型UFC床版の輪荷重試験結果⁴⁾は図の通り正規化たわみが1.02で破壊することなく試験を終了している。平板型UFC床版は、ワッフル型UFC床版の試験終了時の等価回数を超えたあたりから、正規化たわみが大きくなり始めた。このことから、ひび割れの影響によって剛性が低下したと考えられる。最終的には正規化たわみが1.43で破壊することなく終了した。

一方、PC床版は正規化たわみが約2.00~2.50を超え

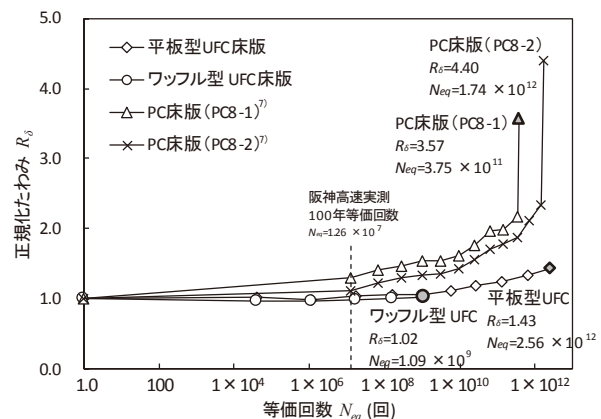


図-10 等価回数-正規化たわみ

たあたりで、たわみが大きくなって破壊に至っている。よって、式(1)の m の値が平板型 UFC 床版および PC 床版ともに RC 床版と同一と仮定した場合にはあるが、平板型 UFC 床版は PC 床版が破壊した等価回数よりも大きな等価回数に対する輪荷重走行試験に対して破壊せず、正規化たわみが小さくなる結果を得た。また、PC 床版は 353kN および 392kN で押抜きせん断破壊したのに対して、平板型 UFC 床版は 400kN で破壊しなかったことから、平板型 UFC 床版は PC 床版よりも輪荷重の繰返し载荷による押抜きせん断破壊に対して高い抵抗性を有すると推測される。

5. おわりに

本検討では、床版取替えに対応した平板型 UFC 床版を対象に、輪荷重走行試験を実施し、疲労耐久性に関する検討をおこなった。

試験の結果、図-11 に示すように 400kN (40 万回) という、設計で想定する供用年数である 100 年を大きく上回るレベルの载荷に対して、ひび割れは生じたが破壊せず、高い疲労耐久性があることが確認できた。

よって、軽量な平板型 UFC 床版を床版取替え後の床版に適用することによって、地震時の安全性

を低下させることなく、橋梁の耐久性を向上できる。また、UFC 床版を老朽化した橋梁の更新・修繕に適用することは、構造物の長寿命化に寄与するだけでなく、構造物に対する安全・安心に資するものといえる。

今後の課題は、現場における施工時間の短縮、狭隘な空間での効率的な施工方法の検討などがあげられる。実施中の詳細設計において、これらの課題を検討し解決していきたいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり大阪大学 松井繁之名誉教授、長岡技術科学大学 長井正嗣名誉教授、東京工業大学 二羽淳一郎教授、岐阜大学 内田裕市教授および神戸大学 三木朋広准教授にご指導を頂いている。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.17，2015.7.
- 5) 小坂 崇・金治英貞・一宮利通・齋藤公生：超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版の既設橋への適用に関する検討，第 14 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，材料学会，2014.10.
- 6) 小坂 崇，佐藤彰紀，一宮利通，藤代 勝：UFC 道路橋床版の開発と大規模更新への適用性検討，コンクリート工学，Vol.54，No.1，2016.1.
- 7) 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料，第 28 号，2002.3.
- 8) 松井繁之：道路橋床版—設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10.

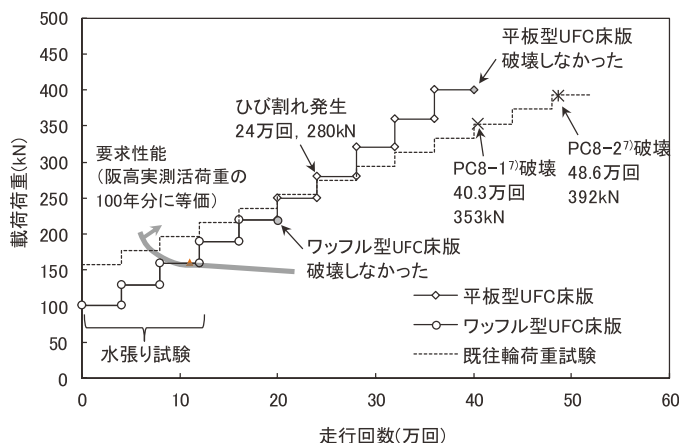


図-11 要求性能と輪荷重走行試験結果