

超高耐久床版の疲労耐久性に関する実験的検討

Experimental Study on Fatigue Durability of Ultra High Durable Slab

構造技術部 狩野 武 TAKESHI KARINO
 構造技術部 永元 直樹 NAOKI NAGAMOTO
 技術研究所 三加 崇 TAKASHI SANGA
 技術研究所 浅井 洋 HIROSHI ASAI

昨今、大規模更新事業の床版取替え工事が多く取り組まれているが、将来の維持管理の負担を考慮するとできるだけ耐久性の高い床版構造が望まれる。そこで、腐食による劣化の原因となる鋼材を一切使用しないコンクリート床版『超高耐久床版（Dura-Slab®）』を西日本高速道路㈱と共同開発した。本提案構造は繊維を使用した高強度繊維補強コンクリートによるリブ付き床版である。緊張力はアラミド FRP ロッドによって与えている。疲労耐久性を確かめるために、輪荷重走行試験を実施した。本実験の結果で、提案した構造が疲労耐久性に関して、日本で交通量が最も多い高速道路において 100 年以上のサービスを十分に提供できることを示した。

キーワード： 超高耐久床版，高強度繊維補強コンクリート，アラミド FRP ロッド，輪荷重走行試験

Recently, there are a lot of work of replacing slabs on the large renewal project. However, considering the burden on maintenance and management in the future, the slab structures that are as durable as possible are required. Therefore, "Ultra high durable slab (Dura-Slab®)" which is a concrete slab that does not use any steel which causes deterioration due to corrosion has been developed with West Nippon Expressway. The proposed structure is a ribbed deck slab using high strength fiber reinforced concrete. Prestressing is applied by using aramid FRP rods. The wheel load running tests was conducted to verify the fatigue durability of this structure. The results showed that the proposed structure provided adequate fatigue durability for more than 100 years of services under the heaviest highway traffic volume condition in Japan.

Key Words: Ultra High Durable Slab, High Strength Fiber Reinforced Concrete, Aramid FRP Rod, Wheel Load Running Tests

1. はじめに

近年、日本では道路橋床版の劣化が深刻な社会問題になっており、高速道路橋の大規模更新事業の床版取替え工事が多く取り組まれている。コンクリート床版の劣化の主要因のひとつは塩害であり、寒冷地や山間部における凍結防止剤散布や海岸線における飛来塩分の影響が大きい。塩害によってコンクリート床版内の鉄筋が腐食し構造的な性能が低下する事例や、鉄筋の腐食膨張によりコンクリート片が剥落し第三者が影響を受ける危険性などが報告されていることから、コンクリート床版には適切な維持管理が必要不可欠である。しかし、日本では今後ますます技術者不足や維持管理費・更新費の増加が深

刻になっていくと考えられる。そのため、将来の維持管理の負担をできるだけ小さくしていく必要があり、今後新設されるコンクリート床版はできるだけ耐久性の高い床版構造が望まれる。このような社会的な背景を鑑み、著者らは鉄筋や PC 鋼材などの腐食による劣化の原因となる鋼材を一切使用しない『超高耐久床版（Dura-Slab®）』を開発した。

なお、この超高耐久床版は、西日本高速道路㈱と共同開発したものであり、平成 22 年 3 月より共同開発を進めてきた、『超高耐久橋梁（Dura-Bridge®）』の研究成果を応用した。

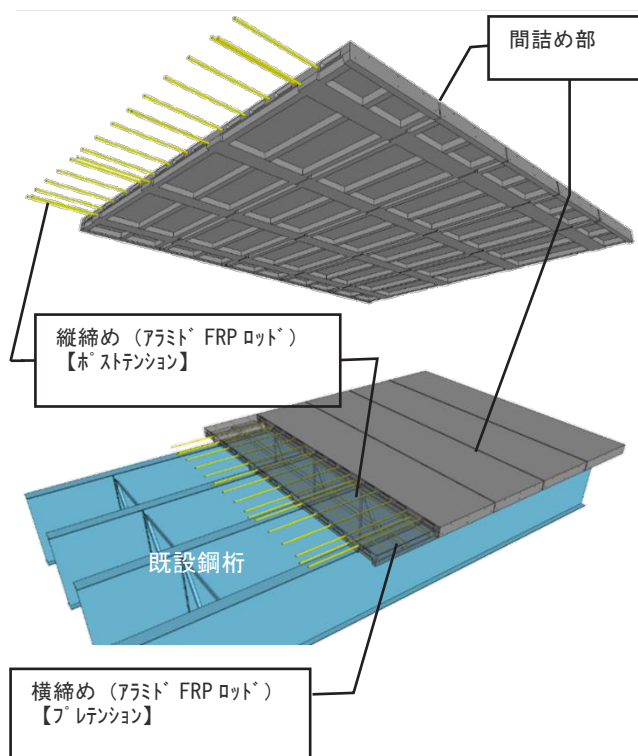


図-1a 超高耐久床版の概要図（3次元図）

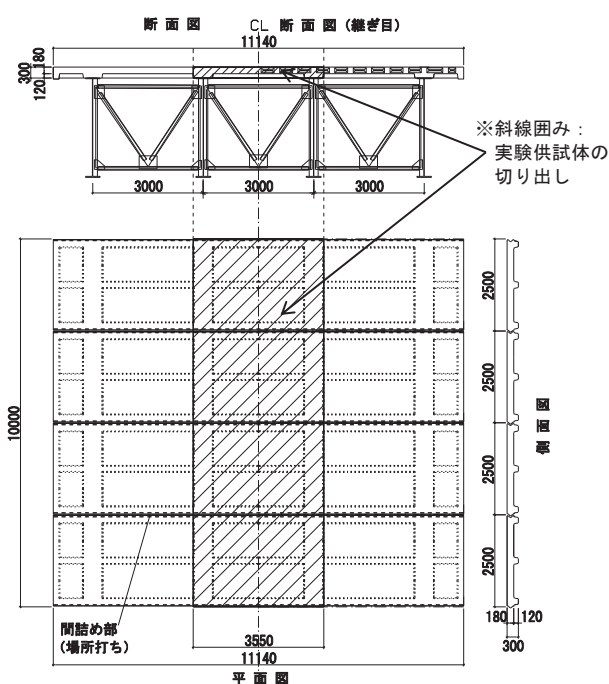


図-1b 超高耐久床版の概要図（2次元図）

2. 超高耐久床版の概要

この超高耐久床版は、設計基準強度 80N/mm^2 の高強度繊維補強コンクリート^{1),2)}と緊張材として用いるアラミド FRP ロッド^{1),2)}のみを用い、鉄筋や PC 鋼材を一切使用していないリブ付きのプレキャスト床版構造であり、二次製品工場で製作される。構造概要を図-1a, b に示す。

アラミド FRP ロッドは既設の RC 橋脚などの耐震補強などで実績のある材料である。アラミド FRP ロッドおよび一般的な PC 鋼材の材料特性の比較を表-1 に示す。PC 鋼材と比較し、同程度の引張強度で低弾性な性質を有し、軽量である。アラミド FRP ロッドの形状を図-2 に示す。横締めのアラミド FRP ロッドは、工場にてプレテンション方式で緊張し、縦締めのアラミド FRP ロッドは、現場にてポストテンション方式で緊張し、プレキャスト床版パネルを連結する。また、コンクリート内に混入する短繊維も非鉄製のビニロン繊維としている。ビニロン繊維は剥落防止対策などで実績がある材料である。ビニロン繊維の材料特性を表-2 に示す。

表-1 アラミド FRP ロッドと PC 鋼材の材料特性比較

	アラミドFRPロッド	PC鋼材
密度	1310 kg/m^3	7850 kg/m^3
引張強度	1670 N/mm^2	1860 N/mm^2
引張ヤング係数	46 kN/mm^2	200 kN/mm^2
破断伸度	3.6%	3.5%

※引張強度、引張ヤング係数は公称断面に基づく

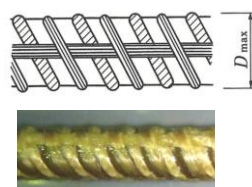


図-2 アラミド FRP ロッドの形状

表-2 ビニロン繊維の材料特性

	ビニロン繊維
繊維径 a	0.66 mm
繊維長 b	30 mm
アスペクト比 b/a	45
密度	1.3 g/cm^3
引張強度	900 N/mm^2

3. 疲労耐久性の検討

（1）実験概要

道路橋床版は、重交通に起因する疲労による劣化が懸念される。本床版構造は水平リブを設けているが、補強鉄筋や PC 鋼材を一切配置せず、ビニロン短繊維とアラミド FRP ロッドによるプレストレスのみで補強されている床版のため、床版の疲労に対する抵抗機構が通常のコンクリート床版とは異なる。そこで、床版一般部、水平リブおよび間詰め部に着目した実物大の輪荷重走行試験により、疲労耐久性を検討した。

（2）供試体形状

実験供試体は、図-3 に示すように図-1 の実橋モデルの斜線囲み部を切り出した形状とした。橋軸直角方向について実橋モデルは3径間連続床版であるのに対し、実験供試体のモデルは単純支持のため、図-4 のように立体 FEM 解析で検証し、表-3 のように実験供試体の発生応力度が実橋モデルより小さくならないように切り出しモデルの形状およびプレストレス量を設定した。リブ間、

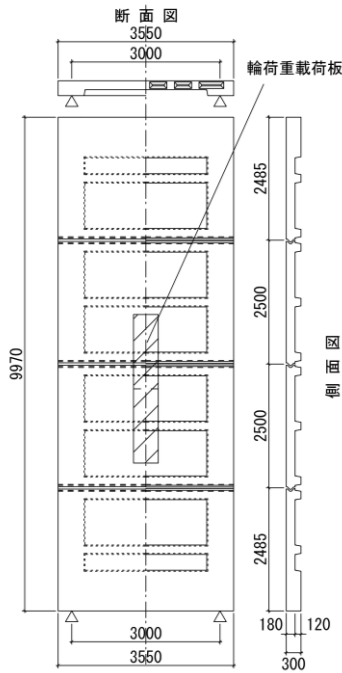


図-3 実験供試体形状

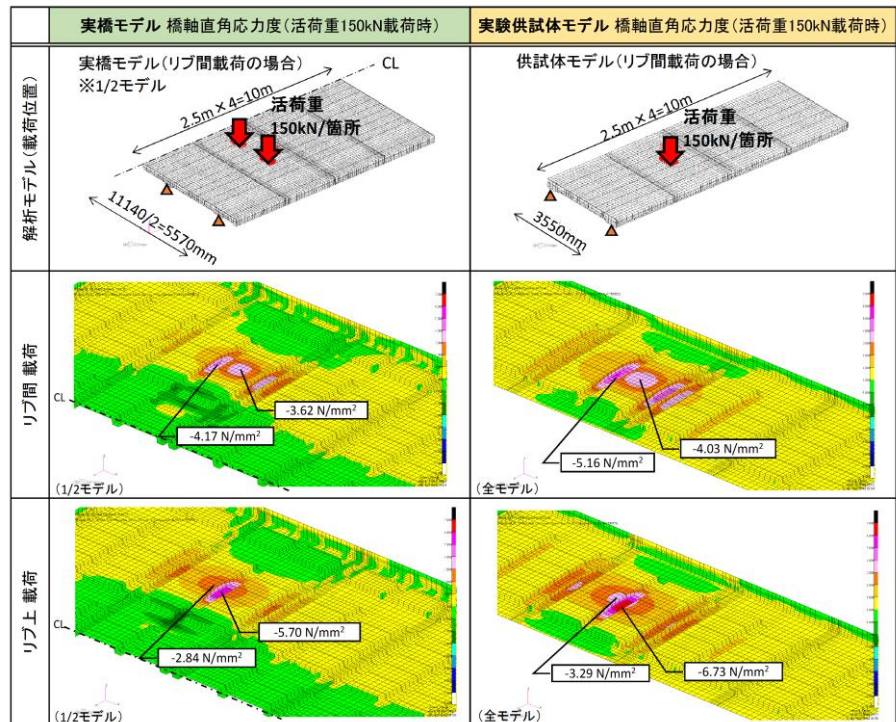


図-4 実橋モデルと実験供試体モデルの FEM 解析結果比較



写真-1 輪荷重走行試験状況

表-3 実橋モデルと実験供試体モデルの応力度比較（着目点を黄色明示）

橋軸直角方向応力 (N/mm ²)	許容値 (実橋モデル)	実橋モデル			実験供試体モデル			
		床版上縁	床版下縁	リブ下縁	床版上縁	床版下縁	リブ下縁	応力振幅
①死荷重時	> 0.0	0.27	2.98	4.85	-0.40	2.89	5.17	
②設計荷重時 150kN(リブ間) 載荷	> -2.0	4.77	-0.64	0.68	-3.62	4.46	-1.14	-4.03
③設計荷重時 200kN(リブ間) 載荷		6.27	-1.84	-0.71	-4.83	6.08	-2.48	-5.37
④設計荷重時 250kN(リブ間) 載荷		7.77	-3.05	-2.10	-6.03	7.70	-3.82	-6.72
⑤設計荷重時 150kN(リブ上) 載荷	> -2.0	4.36	0.14	-0.85	-5.70	4.26	-0.40	-1.56
⑥設計荷重時 200kN(リブ上) 載荷		5.72	-0.80	-2.75	-7.60	5.82	-1.49	-3.80
⑦設計荷重時 250kN(リブ上) 載荷		7.09	-1.75	-4.65	-9.50	7.37	-2.59	-6.05

※リブ間載荷は床版下縁に着目し、リブ上載荷はリブ下縁に着目。応力振幅は着目部の活荷重によるものである。

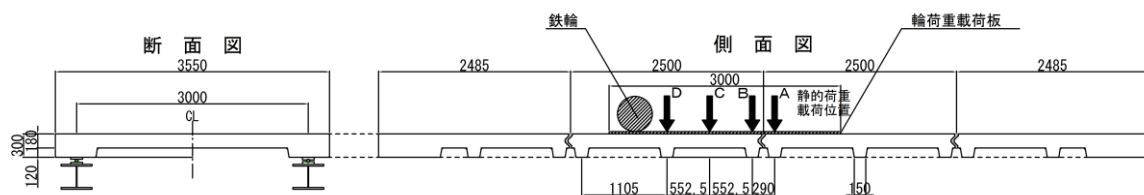


図-5 輪荷重走行試験の概要

リブ上および間詰め部に着目するために中央に配置した2枚のプレキャスト床版でモデル化し、その両外側にプレストレス伝達用として、各1枚のプレキャスト床版を設置した。その後、間詰めにはプレキャスト床版と同じ設計基準強度を有する無収縮モルタルを流し込み、硬化後に橋軸方向にアラミド FRP ロッドによってプレストレスを導入した。なお、橋軸方向のプレストレス量は、橋長70m、支間35mの鋼2径間連続非合成鉄桁橋の設計結果より、負曲げモーメントが最も大きい中間支点部に着目し、その位置における設計荷重時の上床版応力度を

再現する値とした。

(3) 試験方法

載荷方法は写真-1、図-5のように鉄輪による1軸載荷とし、床版支間中央部を橋軸方向に3.0mの往復走行をさせた。載荷板は中央の間詰め前後以外の水平リブにも荷重が載荷されるように、橋軸方向の中央から500mmずらしている。鉛直荷重は図-6のように段階的に増加させた。なお、道路橋示方書における衝撃荷重を考慮した設計活荷重150kNの1.33倍の200kN×20万回および、

設計活荷重 150kN の 1.67 倍の 250kN×10 万回の累計 30 万回の繰返し載荷（156.9kN 基準にした場合の等価繰返し回数）が、日本で最も重交通な高速道路の路線である東名高速道路の交通量調査をもとに算出した供用年数 100 年以上に相当する。

30 万回以降はさらなる疲労に対する耐久性を検証するため、載荷荷重を 450kN まで順次増加させ累計 54 万回を実施して破壊性状を確認することとした。また、図-6 のステップで、ステップ 1 と 2 では 0 回、1000 回、4 万回、以後 4 万回ごとに、ステップ 3～6 では 0 回、4 万回で静的載荷を各ステップと同一の載荷荷重で実施した。載荷位置は、図-5 に示す A 点～D 点の 4 箇所とした。

（4）実験結果

a) 損傷概要

床版支間中央部のリブ間（図-5 C 点）およびリブ上（図-5 B 点）における各ステップの繰返し載荷後の輪荷重と同一荷重の静的載荷時のたわみ量と載荷荷重の関係を図-7 に示す。疲労によるたわみ量の進展を評価するために、各ステップの繰返し載荷後の 200kN 静的載荷時のたわみ量も図-7 に示す。載荷荷重ごとの損傷概要を述べる。

① 載荷荷重 200kN：繰返し回数 20 万回までは、リブ間およびリブ上ともに載荷によるたわみ量の変化は小さく、疲労の影響は小さいと考えられる。また、200kN の累計 1000 回程度で B 点のリブ下面に、200kN の累計 16 万回で C 点のリブ間床版下面にそれぞれ 0.07mm 程度のひび割れが発生したが、それらが進展することはない。なお、弾性 FEM 解析による載荷荷重 200kN でのたわみ量はリブ間で 0.92mm、リブ上で 0.91mm であり、実験結果とほぼ同等であったことから上記のひび割れは剛性低下をもたらすようなひび割れではなく実験供試体全体としては弾性的な挙動をしていると考えられる。

② 載荷荷重 250kN：載荷荷重 200kN で発生したひび割れが進展したが、それ以外の損傷の進展は見られなかった。ステップ 1 の載荷荷重 200kN×20 万回繰返し載荷後の静的荷重 200kN のたわみ量に比べ、ステップ 2 の載荷荷重 250kN×18 万回繰返し載荷後の静的荷重 200kN のたわみ量はほとんど変化がなかった。

③ 載荷荷重 300kN 以降：ステップ 2 の載荷荷重 250kN×18 万回繰返し載荷後の静的荷重 200kN のたわみ量に対し、ステップが進んでも繰返し載荷後の静的荷重 200kN のたわみ量はほとんど変化がなかった。また、載荷荷重 200kN で発生したリブ間床版下面のひび

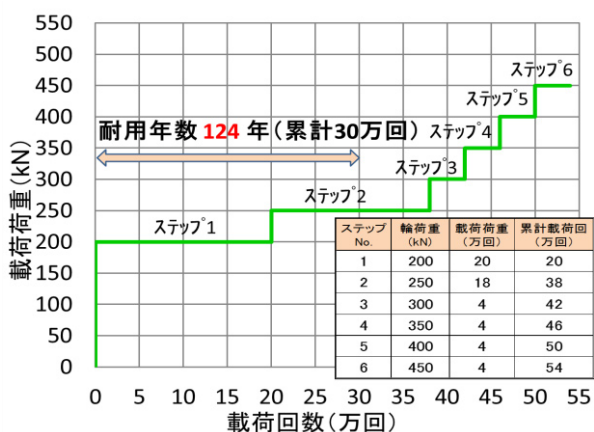


図-6 輪荷重走行試験載荷ステップ

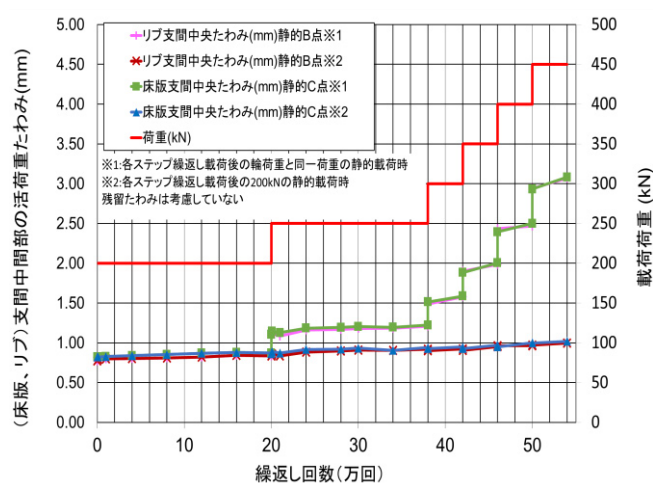


図-7 床版たわみ（活荷重たわみ）と繰返し回数の関係

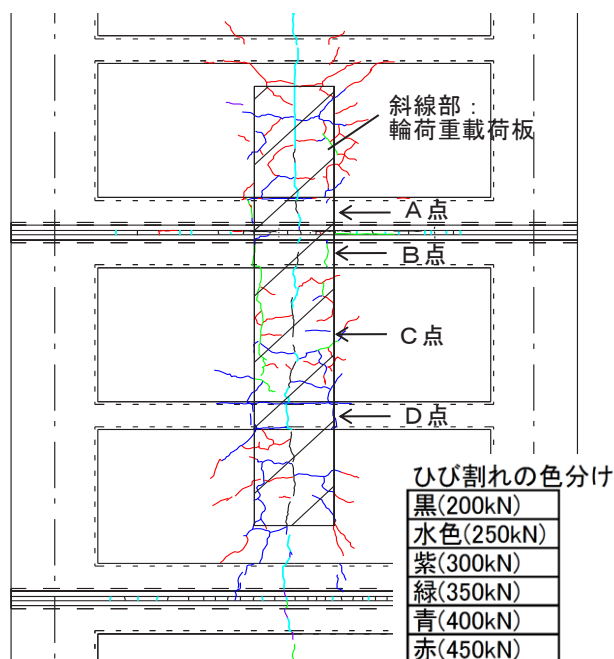


図-8 ひび割れ発生状況（累計載荷 54 万回）

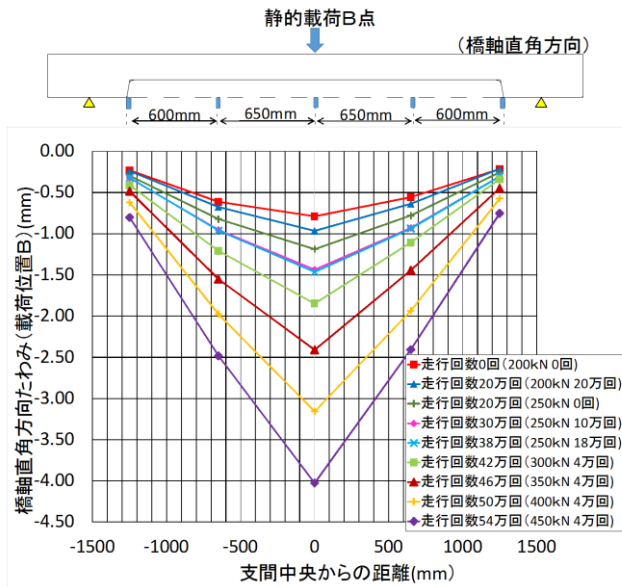


図-9a 橋軸直角方向の床版たわみ（活荷重たわみ）分布

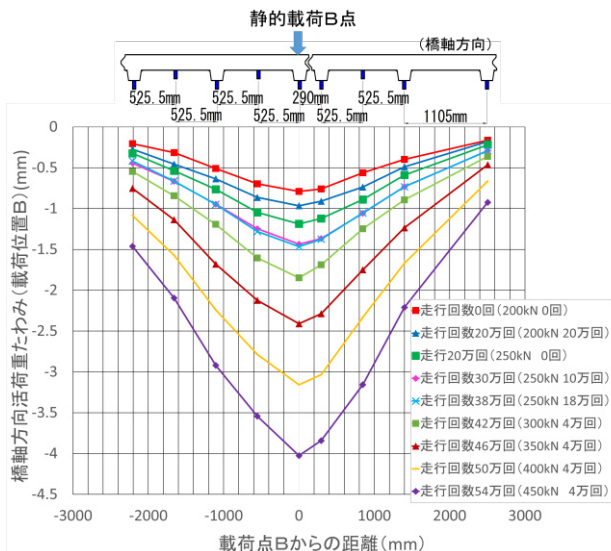


図-9b 橋軸方向の床版たわみ（活荷重たわみ）分布

割れ幅に関しては，0.04mm (200kN) →0.16mm (250kN) →0.62mm (450kN) と進展した。なお，このひび割れ幅は，ひび割れ発生後に設置したπ型変位計の計測値であり，クラックスケールを用いた計測値は，0.08mm (250kN) →0.40mm (450kN) であった。

④ 荷重終了後：荷重荷重 450kN の除荷後の残留ひび割れ幅は 0.19mm，残留たわみは 0.99mm であった。繰返し荷重の最終段階 (450kN) の後でも，立体 FEM 解析で想定される曲げひび割れ以外の発生はなく，そのひび割れ幅，ひび割れ長さの急激な進展は見られなかった。これらより，今回の繰返し荷重後も所定の残存耐力は保有していると考えられる。図-8 に荷重終了時の床版下面のひび割れ状況を示す。

b) 間詰め部付近の連続性

間詰め部付近の B 点におけるリブにおいて，橋軸直角方

向および橋軸方向の床版のたわみ分布を図-9a, b に示す。図-9a, b とともに繰返し荷重の最終段階 (450kN) までのたわみ分布は連続性のある分布を示しており，間詰め部付近では局所的な損傷は発生していないと考えられる。また，間詰めの目開きについては，450kN 荷重時に床版下面の最大 0.10mm (A 点荷重) であったが，荷重を除荷するとひび割れ幅はほぼ 0mm となった。また，実験終了後に間詰め部の上面で水張り試験を実施したが，写真-2, 3 に示すように水漏れは確認されなかった。そのため，目開きのひび割れは表面的なものであり，貫通には至っていないと考えられる。

c) 考察

図-7 の各ステップのあとの繰返し荷重後の静的荷重 200kN のたわみ量のグラフからわかるように，本構造は荷重荷重 200kN, 250kN ではたわみ量増加がないことから，この段階までは疲労の影響は見受けられない。また，荷重荷重 300kN 以降ではたわみ量はほとんど増加がないことから，ひび割れ以外に急激な損傷などは起こっていないため，疲労における加速期までは至っていないと考えられる。さらに，450kN の繰返し荷重終了後も弾性 FEM 解析で算出した応力に相当するひび割れ程度の損傷しか発生しておらず，疲労に対して十分な余剰耐力を有していると言える。

4. 従来のプレキャスト PC 床版に対する優位性

(1) RC ループ継手を有する従来のプレキャスト PC 床版に対する利点

従来のプレキャスト PC 床版は，図-10a に示すように 500mm 程度の現場打ち目地部を設け，そこにループ形状の鉄筋などを配置しコンクリートを打設することで一体化する構造である。一方，超高耐久床版は，図-10b に示すようにアラミド FRP ロッドにより橋軸方向にプレストレスを導入することで連結する構造である。従来のプレキャスト PC 床版に対して，超高耐久床版の構造および維持管理の利点について以下に述べる。

a) 間詰め部

超高耐久床版では間詰め部を極限まで小さくするとともに，橋軸方向にプレストレスを導入することで引張力を制御し耐久性の向上を図っている。さらに，間詰め部では鉄筋などの鋼部材は一切配置されておらず，橋軸方向の緊張材もアラミド FRP ロッドであるため，万が一接合面から雨水などが侵入した場合でも腐食を起こさない。

b) 床版厚さ

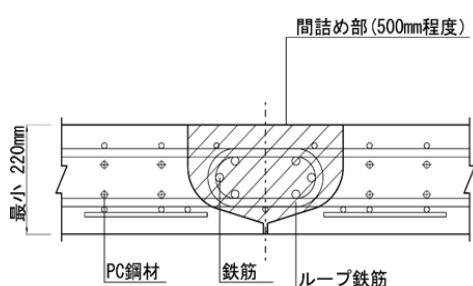
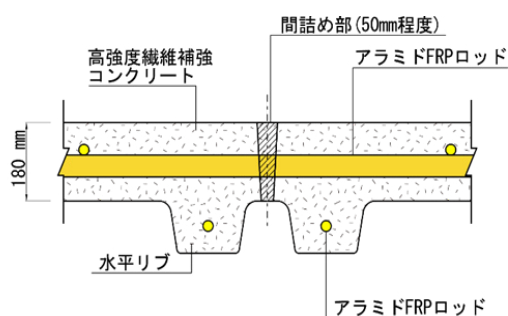
超高耐久床版は，アラミド FRP ロッドで連結する構



写真-2 超高耐久床版の水張り試験



写真-3 水漏れなし（輪荷重走行試験後）

図-10a 従来のプレキャスト PC 床版の接合
(RC ループ継手)図-10b 超高耐久床版の接合
(縦締めアラミド FRP ロッド)

造のため、従来のプレキャスト PC 床版のようにループ継手鉄筋を配置する必要がないこと、高強度繊維補強コンクリートを用いていること、およびリブ付き床版構造を採用していることから、床版厚を約 2 割 (220mm→

180mm) 薄くできている。これにより、床版の軽量化を図ることができ、床版取替え後の耐震性の向上が期待できる。

C) 維持管理

超高耐久床版は鉄筋などの腐食する部材を内部に配置していないため、近年多く発生している腐食劣化によるコンクリートの浮きなどに起因するコンクリート片はく落が抑制できる。さらに 4.a),b) のように輪荷重走行に対する疲労耐久性が向上している。そのため、将来の点検などの維持管理における人的及び経済的負荷を低減することができる。

(2) 既往の論文による輪荷重走行試験の結果から考えられる利点

a) 橋軸方向のプレストレス導入およびリブの効果

今回開発した床版構造と同等の床版厚 (図-12) を有する通常の PC 床版に対する既往の研究³⁾では、プレキャスト PC 床版 (以下、PC 床版-1 とする) に対し、図-11 に示すように 157kN を初期荷重として走行回数 4 万回毎に 19.6kN ずつ荷重を増加させ、輪荷重走行試験を実施しており、載荷荷重 392kN×486,253 回で破壊に至っている。なお、PC 床版-1 は間詰め部がない一体製作の供試体である。PC 床版-1 は、橋軸方向にプレストレスを導入しておらず、輪荷重走行試験の結果において、床版下面に橋軸直角方向のひび割れが卓越して生じている。このことから、橋軸方向にアラミド FRP ロッドを配置し、プレストレスを導入している超高耐久床版は、図-8 のように床版部下面の橋軸直角方向のひび割れを抑制でき、さらにリブも床版下面の橋軸直角方向の引張応力を低減するだけでなく、橋軸方向の床版下面の引張応力も低減できる。そのため、床版部の疲労に対する耐久性が向上しているといえる。また、間詰め部においても、貫通ひび割れが発生しておらず、水の浸透による疲労劣化の進行も抑制できる。

b) 輪荷重走行試験の載荷回数について

今回提案した床版構造と、上記の PC 床版-1 における輪荷重走行試験の結果を比較する。それぞれの荷重と繰返し回数が違うため、既往の研究より、松井の式における S-N 曲線の勾配の逆数 $m=12.76$ を用いて、マイナー則に準拠して等価繰返し回数を求め比較した⁴⁾。PC 床版の S-N 曲線は実験例が少なく明示されていないため、安全側を考慮し、一般的に寿命が PC 床版より短い RC 床版の S-N 曲線を使用した。その結果を表-4 に示す。これより、PC 床版-1 は載荷荷重 250kN の換算回数約 1450 万回相当で破壊に至っている。一方、今回提案の床版構造は換算回数で約 9200 万回相当の繰返し載荷を行った後も貫通ひび割れは発見されず、破壊にも至つ

ていない。これより、今回提案の床版構造の換算載荷回数により、PC 床版-1 に比べ十分な疲労に対する耐久性を有していると言える。また、表-4 より、両方とも耐用年数は 100 年以上確保できており、輪荷重走行試験の

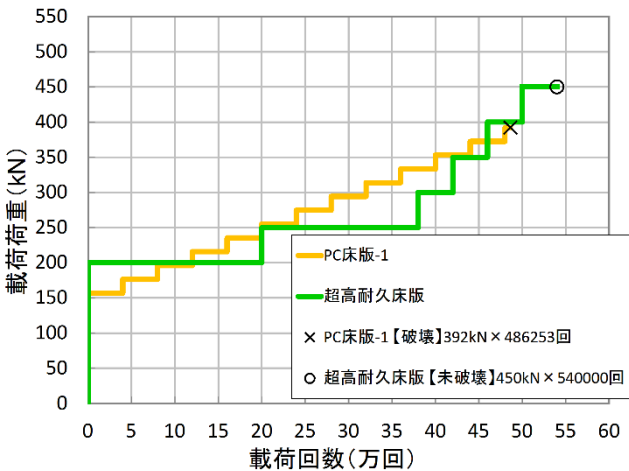


図-11 各床版の輪荷重走行試験載荷ステップ

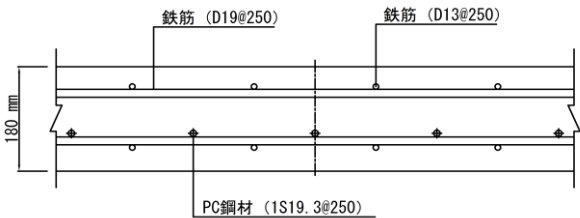


図-12 PC 床版-1 の床版構造

結果からは、超高耐久床版の寿命を考えると、交通荷重による疲労劣化は主要因とはならないといえる。

5. まとめ

本検討では、コンクリート床版の耐久性向上を目的とし、鉄筋や PC 鋼材などの腐食する部材を一切用いない超高耐久床版を開発した。本構造は塩害などの腐食劣化因子に対しては高い抵抗性を有するが、鉄筋などを一切用いていないため交通荷重に対する疲労特性が通常のコンクリート床版と異なることが考えられた。そこで、輪荷重走行試験により疲労に対する耐久性を検討した。本検討で得られた結果を以下に示す。

- ①ビニロン繊維を用いた設計基準強度 80N/mm² の高強度繊維補強コンクリートとアラミド FRP ロッドのみを用いた床版を開発した。
- ②上記の床版に対して、実物大による輪荷重走行試験の結果、東名高速道路の交通量に対しても 100 年以上の疲労に対する耐久性を有していることが確認できた。
- ③輪荷重の載荷荷重を設計荷重の 3 倍に相当する荷重まで増加した繰り返し載荷後も耐力低下につながるような大きな損傷等は発生せず、十分な残存耐力を有する構造であることが確認できた。
- ④橋軸方向にプレストレスを導入およびリブの効果

表-4 輪荷重走行試験における等価走行回数

STEP	載荷荷重	載荷荷重 (SI換算)	載荷回数	載荷回数 (累計)	基本荷重	S-N曲線 ⁵⁾ 傾きの逆 数	換算走行回数 (累計)	供試体の損傷状態 (耐用年数)
	(tf)	(kN)	回	回	(kN)		回	
PC床版-1(国総研)								
1	16.0	157	40,000	40,000	250	12.76	0	STEP7までで耐用年数100年以上(232年)確保
2	18.0	177	40,000	80,000	250	12.76	0	
3	20.0	196	40,000	120,000	250	12.76	0	
4	22.0	216	40,000	160,000	250	12.76	10,000	
5	24.0	235	40,000	200,000	250	12.76	30,000	
6	26.0	255	40,000	240,000	250	12.76	80,000	
7	28.0	275	40,000	280,000	250	12.76	210,000	
8	30.0	294	40,000	320,000	250	12.76	530,000	
9	32.0	314	40,000	360,000	250	12.76	1,250,000	
10	34.0	333	40,000	400,000	250	12.76	2,820,000	
11	36.0	353	40,000	440,000	250	12.76	6,080,000	
12	38.0	373	40,000	480,000	250	12.76	12,570,000	
13	40.0	392	6,253	486,253	250	12.76	14,530,000	
超高耐久床版								
1	20.4	200	200,000	200,000	250	12.76	10,000	STEP2までで耐用年数100年以上(124年)確保
2	25.5	250	100,000	300,000	250	12.76	110,000	
3	25.5	250	80,000	380,000	250	12.76	190,000	
4	30.6	300	40,000	420,000	250	12.76	600,000	
5	35.7	350	40,000	460,000	250	12.76	3,530,000	
6	40.8	400	40,000	500,000	250	12.76	19,650,000	
7	45.9	450	40,000	540,000	250	12.76	92,120,000	

で、床版部および間詰め部の橋軸方向の連続性を確保でき、既往の論文による輪荷重走行試験の結果に対しても疲労に対する耐久性が向上しているといえる。

ただし、今回の実験も既往の実験も耐用年数は 100 年以上確保できており、輪荷重走行試験の結果からは、超高耐久床版の寿命を考えると、交通荷重による疲労劣化は主要因とはならないといえる。

以上の結果より、今回開発した超高耐久床版は実用に十分な疲労耐久性を有すると考えられる。

謝辞：本研究は、平成 26 年 12 月からの西日本高速道路㈱と三井住友建設（株）の共同研究『新素材を採用した高耐久な橋梁構造物に関する研究』によるものであり、西日本高速道路㈱の関係者の方々から多くのご助言を頂くとともに、細部にわたりご指導戴きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1)緒方辰男，大城壮司，永元直樹，片健一：超高耐久橋梁の開発と実証橋の施工，プレストレストコンクリート，pp73-80，Vol.58，No.2，Mar.2016
- 2)三加崇，大城壮司，松井隆行，永元直樹：高強度繊維補強コンクリートと AFRP 緊張材の PC 床版の疲労特性に関する研究，pp395-400，プレストレストコンクリート工学会 第 22 回シンポジウム論文集（2013 年 10 月）
- 3)国土技術総合政策研究所資料：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，2002 年 3 月
- 4)松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，1984