

超高強度繊維補強コンクリート床版の輪荷重走行に対する疲労特性

Fatigue Characteristics of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Slabs under Wheel Running Loads

田中 良弘*, 高倉 克彦*, 阿部 忠**, 木田 哲量**, 前堀 伸平***

Yoshihiro TANAKA, Kastuhiko TAKAKURA, Tadashi ABE, Testukazu KIDA, Shinpei MAEHORI

*大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

**日本大学 生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

***太平洋セメント(株) 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

Innovative design method and unique construction method for footbridges or highway bridges have been recently developed applying ultra high strength fiber reinforced concrete (hereafter described by UFC) and the construction of several footbridges and a highway bridge have been completed successfully in Japan. UFC has durable properties and self-leveling performance as well as exceptional mechanical properties. The recommendation of design and construction method for ultra high strength fiber reinforced concrete was published from JSCE in 2004. The bending fatigue characteristics of UFC are described in this recommendation.

Because UFC has exceptional mechanical properties (200 N/mm² in compressive strength and 35-40 N/mm² in bending strength), the pre-stressed UFC slabs for highway bridge can be thinner than the minimum thickness recommended due to Specifications of Highway Bridges published by Japan Road Association.

In this paper, the fundamental fatigue behavior of the pre-stressed UFC slabs under wheel running loads are investigated in order to clarify the fatigue design for actual UFC highway bridge slabs.

Key Words: pre-stressed UFC slabs, wheel running tests, fatigue failure

キーワード: プレストレスUFC床版, 輪荷重走行試験, 疲労破壊

1. はじめに

近年, 超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の一種である反応性粉体コンクリート (RPCまたは商品名: Ductal) を適用した, 歩道橋^{1), 2)} はじめ道路橋³⁾ や建築分野での歩廊橋⁴⁾ の設計・施工が実施されている。UFCの構造物を設計施工するには, すでに土木学会コンクリートライブラリー⁵⁾ として土木学会より出版されているUFCの設計施工指針(案)に従えばよい。UFCは, 緻密なセメント系マトリクスに微小で超高強度の鋼繊維を容積で2%混入した自己充填性能を有する材料である。UFC部材は鉄筋補強が不要であり, 圧縮のみならず引張応力に対しても抵抗できるのが特徴である。そのためUFC部材は, 曲げ引張に対する疲労照査が必要である。RPC梁による水中・気中における曲げ疲労特性実験(S-N曲線)とその考察が実施⁶⁾されたために, 曲げに対する疲労性能照査を行うことができる。

一般的に, 道路橋のコンクリート床版は, 輪荷重走行による疲労性能を照査する必要がある。これまでの調査研究によれば, 従来のコンクリートを用いたRC床版やPC床版では, 輪荷重走行による疲労損傷が進展する過

程は, 乾燥収縮や曲げひび割れに端を発して床版の押し抜きせん断破壊に似た亀甲状のひび割れに進行する破壊パターンが多く見られた。そのために, 道路橋示方書の構造細目では, 道路橋の最小厚みを規定して, このような進行性疲労破壊が生じないようにしている。しかし, RPC床版を道路橋床版に適用した試設計を行うと 1) 鉄筋を使用しないのでかぶりの確保が必要ない, 2) RPCのひび割れ発生強度を設計的に期待できる, 3) 90°Cで48時間の熱養生後は乾燥収縮がゼロである, 4) 原則としてプレストレスを導入するなどの理由により, 従来のコンクリート床版に比べて床版厚さは薄くなる。そのために, 構造細目に合致しない場合が生じて, RPCの材料特性を活かした経済的設計が困難となる場合がある。

本研究の目的は, プレストレスを導入した薄肉RPC床版が輪荷重走行を受けた場合の基礎的な疲労挙動を明らかにすることにある。版厚が70mmと80mmで床版支間方向にプレストレスを導入したRPC床版を対象に, 静的な載荷実験と輪荷重走行による疲労実験を実施して, RPC床版の輪荷重走行に対する基礎的な疲労破壊機構を明らかにする。

2. 輪荷重疲労試験の概要

2.1 輪荷重走行試験装置

従来、道路橋床版の輪荷重による疲労損傷を試験する装置として、所定の荷重を鋼製あるいはゴムタイヤの試験輪に与えて前後に走行する方式であった。しかし今回は日本大学生産工学部において開発された、図-1に示すような、試験輪は走行させず油圧アクチュエータを介して所定の荷重を与え、床版供試体とその支持装置全体をクランクアームにより前後運動させる輪荷重走行試験装置を用いた。試験輪は直径40cm、幅25cm×長さ4cmの鋼製輪でRPC床版の走行部には厚み3mmで幅27cmの薄鋼板を敷いて衝撃荷重の発生を回避した。走行輪はストローク100cmで往復走行させた。

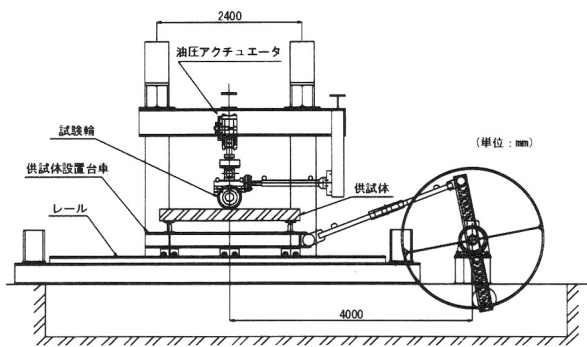


図-1 輪荷重走行試験装置の概要

2.2 RPC床版の供試体

RPC(Reactive Powder Concrete)床版の供試体は、表-1に示す配合のRPCを平打ちし、一次養生後に90°Cで48時間の熱養生を行って製作した薄肉の床版である。熱養生後、支間方向にφ12.4mmのモノストランドによりポストテンション方式でプレストレスを導入した。RPCは水セメント比22%のセメント系マトリクスに超高強度の鋼繊維を2Vol.%混入して得られる、自己充填性能を有する高耐久性のコンクリートである。圧縮強度特性値が180N/mm²、曲げ引張強度特性値が28.9N/mm²、ひび割れ発生引張強度の特性値が8.0N/mm²の力学特性を有し、鉄筋による補強を不要とする材料である。

表-1 RPCの配合

単位: kg/m ³				
水	低熱ポルトランドセメント	珪砂、珪石、珪灰石微粉末、シリカフューム	鋼繊維*1)	ポリカルボン酸系高性能減水剤
180	818	1479	157	24

*1) 直径φ=0.2mm、長さL=15mm、引張強度 $f_u=2700\text{N/mm}^2$

RPC床版に対する実験の組合せと供試体番号を表-2に示す。輪荷重走行による疲労破壊機構を明らかにするために、輪荷重走行試験の他に静的載荷試験を、供試体の版厚が70mmと80mmに対して実施した。道路橋の床版支間のスパン長は、一般的に3.0m~3.5m程度で

ある。そのために、従来の輪荷重試験では支間方向のスパンを2.5m前後としている場合が多い。本試験では、支間方向のスパン長を1.0mとしているために、実物大の走行試験とは言えず、縮小モデルとしての扱いになる。

表-2 RPC床版の試験内容

供試体番号	試験方法	平均厚(mm) ¹⁾	有効プレストレス(N/mm ²)		支間のスパン(mm)
			上縁	下縁 ²⁾	
S-80	静的試験	82.9	1.02	2.55	1000
S-70		67.5	6.19	6.80	
D-80-1	輪荷重走行試験	81.7	0.93	2.31	
D-80-2		82.0	0.88	2.44	
D-70		72.4	5.32	5.42	

注: 1) 平均厚は床版中央部9点の平均値。

2) 設計時の下縁有効プレストレスは、版厚80mmで2.8N/mm²、版厚70mmで6.0N/mm²

支間方向の有効プレストレスは、T荷重を60kNとして道路橋示方書に従い設計し、RPCのひび割れ発生強度を8.0N/mm²として得られた。一般にRPCの道路橋は、橋軸方向にプレストレスを導入するために、床版の支間直角方向にプレストレスが導入される。しかし、今回の実験では、支間直角方向のプレストレスを導入しなかったために、版厚70mmのRPC床版は、支間直角方向の断面性能を設計的に満足していない。

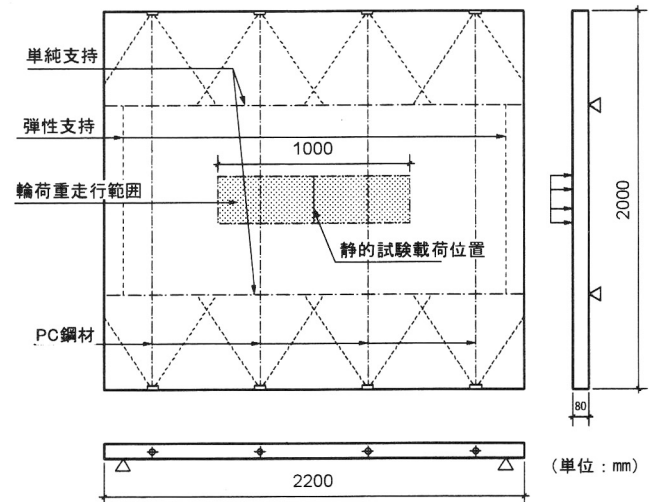


図-2 RPC床版の供試体 (t=80mm)

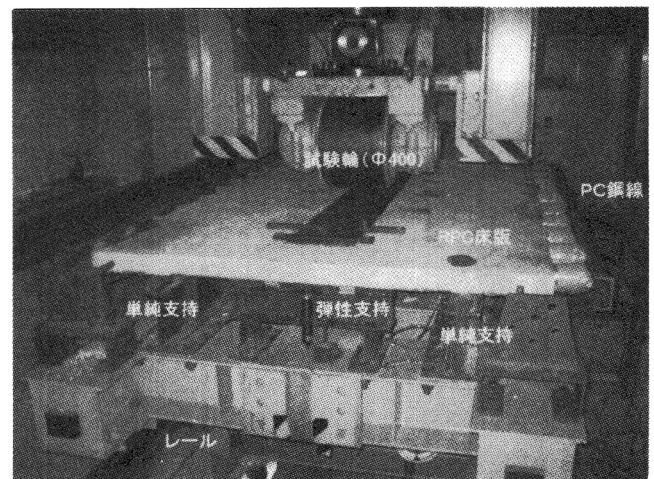


写真-1 輪荷重走行試験の状況

R P C床版 (版厚 80mm) の P C鋼線配置や輪荷重走行位置, スパン割りを図-2に示す. 支間方向のスパン長は 1.0mであるが, 有効プレストレスが版全体に導入されるように, 余分長を取り全長で 2.0mとした. 支間直角方向にはスパン長が無限長となるようにモデル化した弾性支持を設けた. 版厚 80mm の P C鋼線は, 562mmピッチで 4本配置し (版厚 70mmでは 220mmピッチで 10本配置), プレストレス導入後グラウト注入した. なお, 写真-1に版厚 70mmにおける輪荷重走行試験の実施状況を示す.

3. 試験の結果

3.1 静的載荷試験の結果

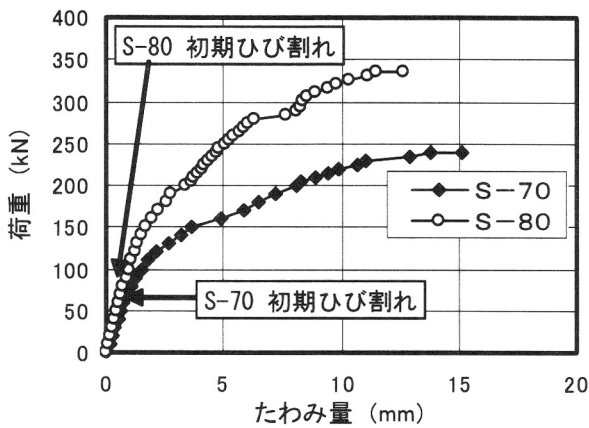
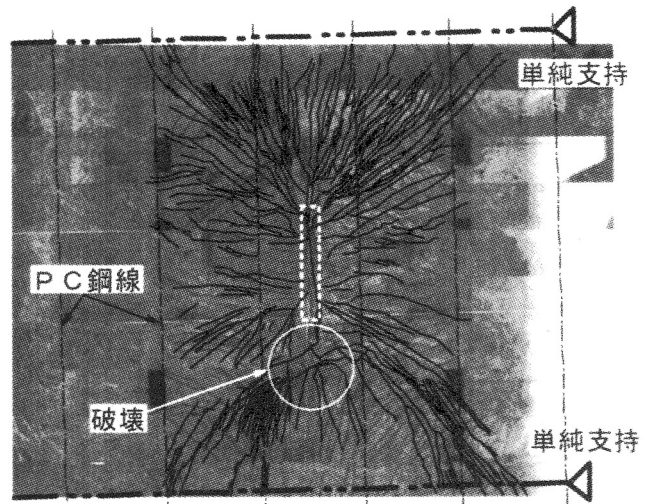


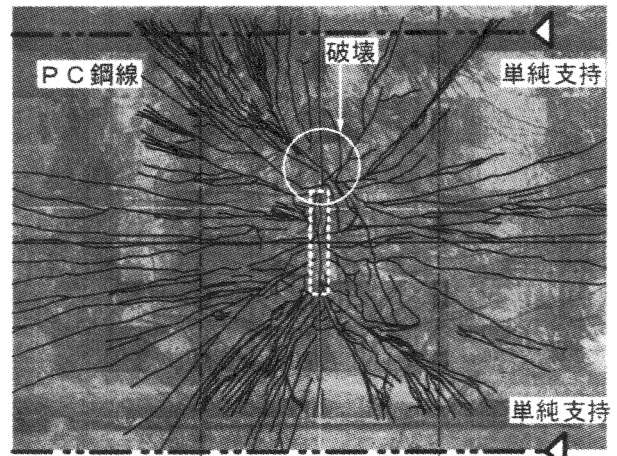
図-3 静的載荷による荷重とたわみ量

静的載荷試験は, 図-2に示すようにR P C床版の中央に試験輪をセットし, 静的載荷によるたわみやひび割れ分布を計測した. 載荷荷重と載荷点のたわみの関係を図-3に示す. また, R P C床版の底面に発生したひび割れ分布図を図-4に示す. 供試体 S-70 では荷重 70kN 付近で, S-80 では荷重 90kN 付近でアセトンで確認できる初期ひび割れが発生した. 載荷荷重は, 幅 25cm の鋼製の試験輪による強制変位として与えられた. そのため曲げの断面力は強制変位の両端部で大きくなったと考えられ, 初期ひび割れは両端部から放射状に発生した.

ひび割れ分布の特徴は, 版厚に関係なく両者とも曲げによるひび割れは分散していて, ひび割れ幅が 0.04~0.1mm と微小である. これは, R P Cに混入されている鋼繊維 ($\phi 0.2\text{mm}$, $L=15\text{mm}$) がひび割れ発生以降にひび割れ面に働く引張力に対して架橋効果が働いたためである. また, 両者のひび割れパターンが類似している. まず, 載荷直下において支間方向にひび割れが発生し, 試験輪の幅の範囲でほぼ支間直角方向に分散したひび割れが発生している. 試験輪の両端部においては, 放射状にひび割れが発生している. また, 終局の曲げ破壊もこの両端部のいずれかで発生している. これらのひび割れ発生パターンは, 1) 床版の支持条件が無限長版の支間方向単純支持であるために, 曲げモーメントの大部分は



a) S-70のひび割れ分布



b) S-80のひび割れ分布

図-4 静的載荷によるひび割れ分布図

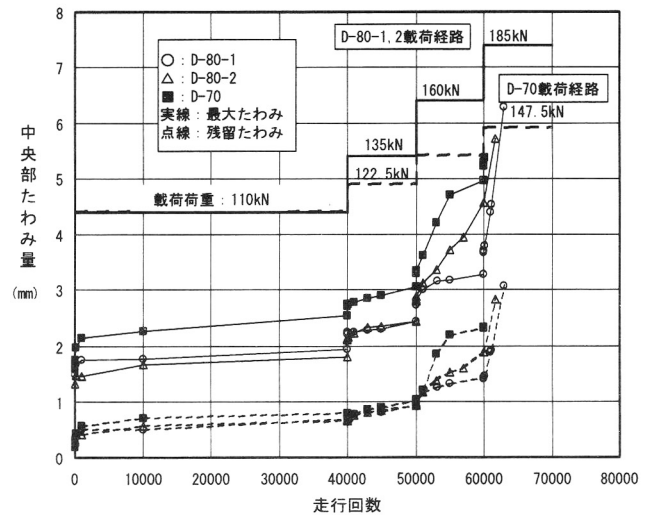


図-5 輪荷重走行試験の結果

支間方向に流れたが, 支間方向にはプレストレスを導入している, 2) 載荷は試験輪の幅での強制変位である, の理由で発生した. なお, 支間方向のプレストレス導入量は S-80 の方が小さいために, S-80 の支間直角方向のひび割れ長が S-70 よりも長くなったと考えられる.

3.2 輪荷重走行試験の結果

輪荷重走行試験の走行荷重履歴はじめ床版中央部の最大たわみ、残留たわみの結果を図-5に示す。輪荷重の載荷経路は、最初は載荷荷重 110kN としたが、その後 D-70 は 122.5kN, 135.0kN, 147.5kN とし、D-80 は 135.0kN, 160.0kN, 185.0kN とした。

走行回数が 4 万回と 5 万回までの荷重ステップ 1 と 2 までは、D-70 と D-80 共にたわみの増加率が少ない。しかし走行回数が 5 万回以降の荷重ステップにおいては、両者共に増加率が增大した。走行回数 5 万回までの荷重ステップ 1, 以降の荷重ステップ 2, 3, 4 における床版下面におけるひび割れ進展の分布図を、版厚 70mm と版厚 80mm に対して図-6 と図-7 に示す。

荷重ステップ 1 の載荷重が 110kN (設計荷重 60kN の 1.83 倍) に対しては、静的載荷実験結果から版厚 70mm, 80mm 共に初期ひび割れが発生した状態での疲労載荷である。しかし、ひび割れ進展図から 5 万回走行後でもひび割れの本数は少なく、たわみの増加率も小さい。この荷重ステップにおける特徴は、D-70 では、クラック本数が D-80 よりも若干少なく、クラック方向は支間方向である。一方、D-80 はクラック本数が D-70 よりも多く、クラック方向は支間方向とその直角方向に混在している。これは、D-70 の版厚が薄いものの、プレストレス応力が D-80 よりも多く導入されていることが原因であると考えられる。荷重ステップ 2 に対しても、大幅なひび割れの進展はない。荷重ステップ 3 におけるひび割れ本数は、それまで以上に増加している。荷重ステップ 4 においては、それまでのひび割れ進展とは異なり、微細なひび割れが試験輪の走行する範囲の両端部から放射状に進展する特徴を持っている。このひび割れパターンは、静的載荷のひび割れ分布と似ている。特に走行両端部から支間直角方向へのひび割れは、弾性支持の設定が不十分で供試体の形状効果が影響している可能性がある。

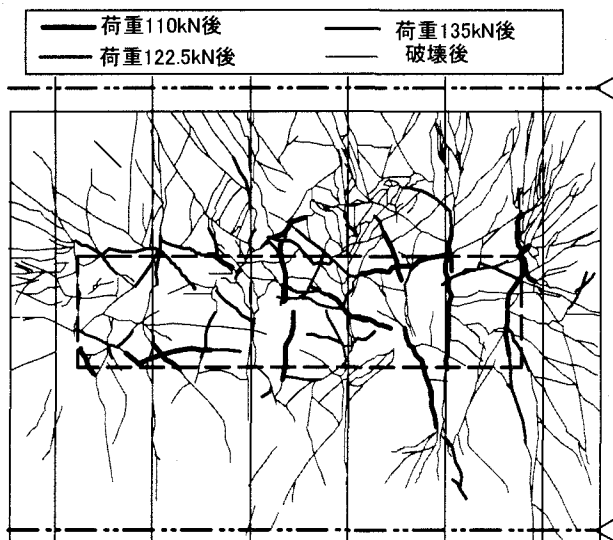
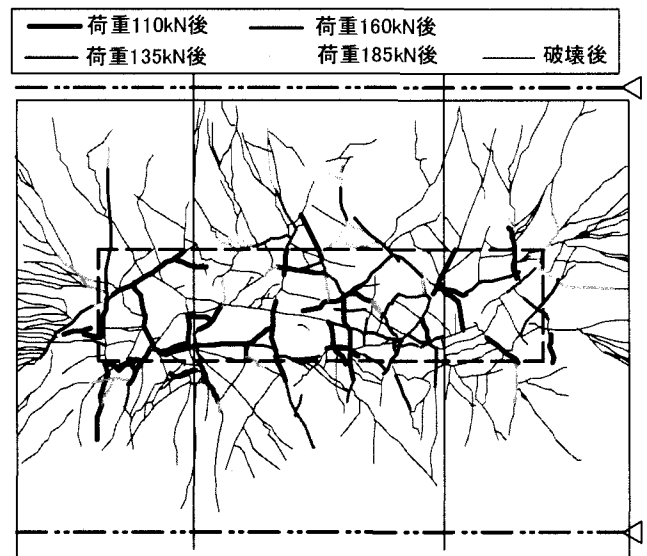
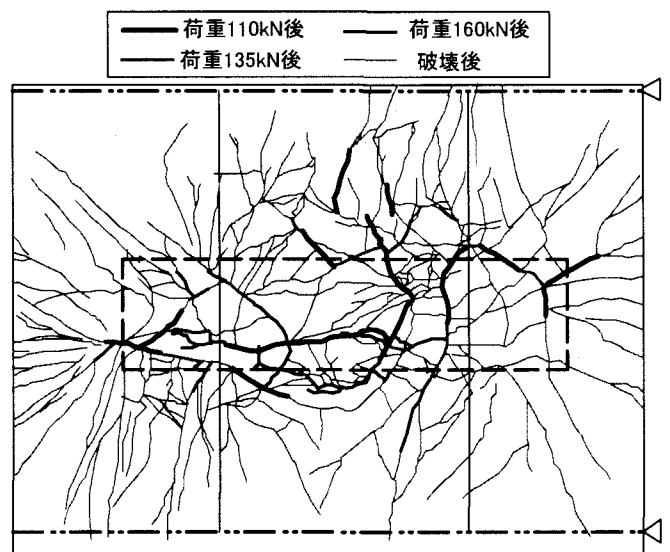


図-6 版厚 70mm のひび割れ進展図



a) 供試体D80-1



b) 供試体D80-2

図-7 版厚 80mm のひび割れ進展図

最終のひび割れ分布を見ると、従来の RC 床版での特徴である明確な亀甲状のひび割れパターンとは異なるように思われる。特に、ひび割れ幅に注目すると、RC 床版の場合にはひび割れ部でのずれせん断によりひび割れ幅が拡大しているのが特徴である。しかし、RPC 床版の場合には、ひび割れ部分でのずれは少なくひび割れ幅は最大でも 1.0mm~1.2mm 以下である。これは、ひび割れ進展図には示されないほど微細なひび割れ (ひび割れ幅が 0.4mm 以下) が分散していることと、RPC 床版のせん断力の伝達は斜め引張力に抵抗できる RPC を介して行われているためである。

RPC 床版の疲労破壊機構を調べるために、輪荷重走行試験終了後に供試体を切断して、破壊面を調査した。疲労破壊による RPC 床版内部の破壊面を、写真-2 (D-70) と写真-3 (D-80) に示す。

破壊面の形状から、RPC床版の疲労破壊は、曲げによるひび割れが進展して最終的には床版の押し抜きせん断破壊であると考えられる。特に、D-80の供試体ではせん断破壊面がコーン状であることがわかる。D-70とD-80は、版厚と支間方向のプレストレス導入応力が異なっている。両方の供試体の支間方向のせん断ひび割れの角度を比較すると、D-70はD-80よりも角度が水平に近い。これは、支間方向のプレストレス応力がD-70の方が約2倍大きいためである。同様に、支間直角方向のせん断ひび割れの角度は、いずれも角度が立っている。これは両方の床版とも支間直角方向にはプレストレスを導入していないためである。D-70供試体の支間直角方向のせん断ひび割れが、PC鋼線の位置から進展している。これは、PC鋼線による断面欠損が原因と考えられる。

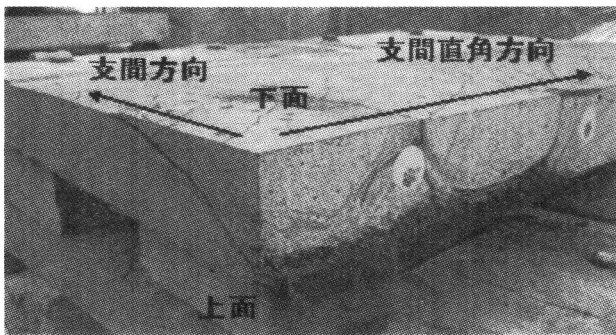


写真-2 D-70の内部破壊面

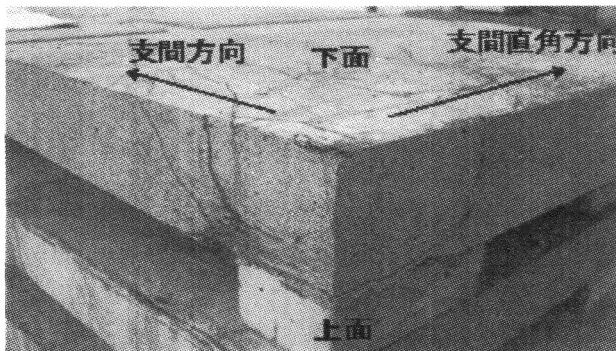


写真-3 D-80の内部破壊面

4. RPC床版の輪荷重疲労に対する考察

4.1 静的載荷試験と輪荷重走行試験の相違

終局破壊時におけるRPC床版の破壊モードは、ひび割れ分布図と床版内部破壊面の写真から推定されるように、静的試験では試験輪が移動していないために、曲げ破壊であるが、輪荷重試験では曲げから進展した押し抜きせん断破壊である。

しかし、両方の異なる試験によるひび割れ分布図は最終の図面のみを比較すると一見異なるようであるが相互に関連している。輪荷重の荷重ステップ1や2の段階では、走行荷重/破壊荷重の比は30~40%程度であり、初期クラックが発生した程度の損傷であり、このような走行荷重では、支間方向とその直角方向に若干のひび割れ

が発生する程度である。そのために輪荷重は移動荷重であるものの、そのひび割れ分布は中央部に静的載荷したひび割れ分布図から容易に推定できる。一方、輪荷重による終局ひび割れ進展図では、走行範囲から放射状にひび割れが進展していて、これが静的載荷による放射状のひび割れと類似していることから、走行範囲の境界から外側には、静的載荷と同様の応力状態になっているものと考えられる。

4.2 輪荷重走行による疲労特性

S-N曲線を求める通常の試験方法は、同一荷重で疲労破壊するまで疲労試験を行い、異なる荷重比に対する疲労破壊回数を求める。輪荷重走行試験による床版の疲労特性を確認する方法は、この従来の方法では疲労試験が大変なので、同一供試体に対してステップ漸増載荷による疲労試験法が多く取られている。しかし、この方法では直接、S-N曲線を求めることはできないために、異なる材料や形状の床版に対してすべて輪荷重走行試験を行う必要があり、現実的には実施困難であった。

本研究では、いくつかの仮定を設けて、階段載荷の輪荷重走行試験からS-N曲線を求める試みを行った。まず注目したのは、文献6)で実施されたRPC梁の曲げ疲労実験である。それは、ある載荷荷重で曲げによる梁の定常的な区間のたわみ増加率Rと曲げ破壊に達する繰返し回数Nとの関係が次式で示される回帰式である。

$$N = \frac{4.06}{R^{0.925}} \quad (1)$$

たわみの増加率は、荷重ステップ1~3までの定常部から求めた。また、そのときの走行荷重/破壊荷重の比Sは、静的載荷試験の結果を破壊荷重と考えて求めた。表-3にその計算結果を示す。

表-3 たわみ増加率から走行回数の計算

	輪荷重 (kN)	110	122.5	135
D-70	たわみの増加率 R	2.355E-06	5.729E-06	5.415E-05
	走行回数 N	6.523E+05	2.866E+05	3.589E+04
	走行荷重/破壊荷重	0.458	0.510	0.563
D-80-1	輪荷重 (kN)	110	135	160
	たわみの増加率 R	2.500E-07	7.143E-07	2.096E-06
	走行回数 N	5.193E+06	1.966E+06	7.265E+05
	走行荷重/破壊荷重	0.328	0.403	0.478
D-80-2	輪荷重 (kN)	110	135	160
	たわみの増加率 R	2.820E-06	6.486E-06	9.013E-05
	走行回数 N	5.521E+05	2.555E+05	2.240E+04
	走行荷重/破壊荷重	0.328	0.403	0.478

ここで、走行荷重は試験輪が移動した状態での荷重であり、破壊荷重はRPC床版中央に載荷した際の破壊荷重であるために、直接的に比を取ることは問題がある。また、式(1)は固定した荷重作用点におけるRPC梁の曲げ疲労破壊に達する繰返し回数Nとたわみ増加率Rとの回帰式である。一方RPC床版は移動荷重による押

抜きせん断疲労破壊を示している。したがって、今回は大胆な仮定のもとに計算したものである。なお、たわみ増加率の算定は、疲労回数当たりのたわみ増加量をたわみ増加率として求めた。

表-3よりS-N曲線の疲労破壊の荷重比と走行回数との関係が得られたので、横軸に走行回数Nを対数表示し縦軸に疲労破壊の荷重比Sをとりデータをプロットする。図-8にRPC床版(D-70とD-80)のS-N曲線の結果を示す。この結果では、荷重比Sの範囲がそれほど広くないが、荷重比Sと疲労回数(走行回数)Nとの関係は、多くのS-N曲線に類似している。

少ないデータであるが、RPC床版(D-70とD-80)のS-N曲線を回帰すると、以下の曲線が得られた。

$$D-70 : S = 1 - \frac{1}{K_1} \log N \quad ; \quad K_1 = 10.8 \quad (2)$$

$$D-80 : S = 1 - \frac{1}{K_2} \log N \quad ; \quad K_2 = 9.6 \quad (3)$$

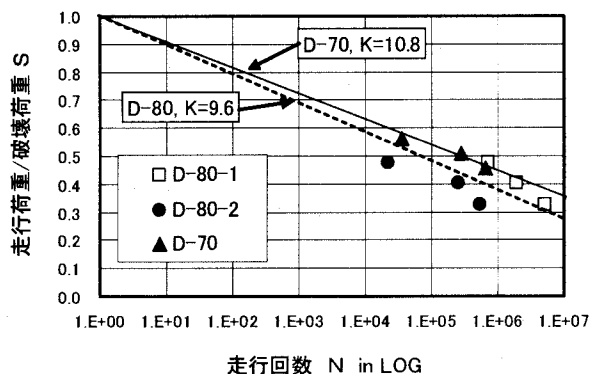


図-8 RPC床版の推定S-N曲線

図-8に示された推定S-N曲線は、大胆な仮定の下に推定されたものである。水中と気中で曲げ疲労に相違がない理由を文献6)では、「RPC部材では曲げひび割れが分散したマイクロクラックとなるためにひび割れ面で砕けた水和物や細骨材が生成されないために、水中であつてもすりへり現象が生じない」としている。このことはRPC床版についても同様に分散したマイクロクラックが観察されたことから、たとえ破壊モードが異なるRPC床版においても水中環境下に依存したすりへり現象による早期の疲労損傷が発生するとは考えにくい。しかし今後、荷重比Sが0.6~0.9の範囲で湿潤状態を考慮した輪荷重走行試験を行い、実験によるS-N曲線の検証と、ひび割れ面における水の影響を明らかにする必要がある。

5. まとめ

- 1) プレストレスを導入したRPC床版は、道路橋示方書に基づいた設計と輪荷重走行による疲労損傷に対する概略照査を行った結果、道路橋示方書に示される構造細目の最小床版厚16cmよりも薄くできる可能性がある。
- 2) 輪荷重走行試験によりRPC床版の破壊モードは押し抜きせん断で、静的載荷による破壊モードは曲げ破壊と異なるが、静的載荷のひび割れ分布から輪荷重による破壊機構を推定することができる。
- 3) RPC床版が輪荷重走行による疲労損傷を受けた際の、ひび割れ幅やひび割れの分散は、従来のRC床版に比較すると異なる。RPC床版は、明確な亀甲状のひび割れではなくひび割れ幅が微細であり、分散している。
- 4) RPC梁の曲げによる疲労は、水中においても気中と同等の疲労特性を有しているので、RPC床版でも水中による疲労損傷の早期化は考えにくい。
- 5) 輪荷重走行の疲労損傷の機構は、一定荷重による輪荷重走行による定常的なたわみ増加率により、最終破壊の走行回数に関係すると仮定すると、少ない階段載荷による輪荷重走行試験から、S-N曲線を求めることができる。この仮説は、今後、要素実験により解明する必要がある。

【参考文献】

- 1) 田中良弘, 武者浩透, 大竹明朗, 下山善秀: 超高強度繊維補強コンクリートによるPC歩道橋の設計施工法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1603-1608, 2002.
- 2) 田中良弘, 武者浩透, 大島邦裕, 安部吉広: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC橋梁の長大スパン化に関する研究開発, コンクリート工学, Vol.42, No.8, pp.30-36, 2004.
- 3) 黒岩 正, 岩崎郁夫, 大熊 光: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋—東九州自動車道掘越Cランプ橋—, コンクリート工学, Vol.43, No.10, 2005.
- 4) 萱嶋 誠, 篠崎洋三, 飯塚崇文, 大和矢麻起: Fc200N/mm²級の超高強度繊維補強コンクリートを用いた連絡橋の設計・施工, コンクリート工学, Vol.43, No.7, pp.65-69, 2005.
- 5) 土木学会コンクリート委員会: 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.
- 6) 田中良弘, 横田 弘, 岩波光保, 前堀伸平: 超高強度繊維補強コンクリートの空中・気中曲げ疲労特性, コンクリート年次工学発表論文報告集, Vol.26, No.2, pp.1309-1314, 2005.