

## UFC埋設型枠を用いたRC床版の実験耐荷力および疲労耐久性評価に関する研究

Study on the experimental load-carrying capacity and the evaluation of fatigue durability of the RC slab using UFC permanent form

新見彩\*, 阿部忠\*\*, 木田哲量\*\*\*, 田中敏嗣\*\*\*\*

Aya Niimi, Tadashi ABE, Tetsukazu Kida, Satoshi Tanaka

\*日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

\*\*博(工), 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

\*\*\*工博, 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

\*\*\*\*博(工), 太平洋セメント株式会社 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

The authors developed an RC slab using UFC permanent form that allows rationalization, labor saving, and environmental preservation in the construction of road bridge RC slabs. Tests were conducted on the RC slab test specimen prepared using an ordinary form, and the RC slab using UFC permanent form test specimen under static and running loads to clarify the load-carrying capacity. The results showed that the load-carrying capacity of the RC slab using UFC permanent form was 1.24 and 1.38 times larger than the RC slab under static and running loads, respectively. A running fatigue test was also conducted under a running wheel load to evaluate the fatigue durability based on equivalent cyclic times. The results show that the number of cycles before the RC slab using UFC permanent form failed was 5.73 times greater than that of the RC slab.

Key Words : RC slab using UFC permanent form, load-carrying capacity, fatigue durability

キーワード : URC 埋設型枠 RC 床版, 耐荷力, 疲労耐久性

## 1. はじめに

近年, 建設事業費の縮減により, 鋼道路橋の構造および施工の合理化, 省力化が求められている。例えば, 鋼桁橋梁は多数主桁構造から少数主桁構造へと移行されており, これに対応するための長支間を有する高耐久性を有する床版構造が要求されている。これらのことから各研究機関や企業では, 長支間に対応できる新床版の開発が行われている<sup>1), 2)</sup>。そこで筆者らは, RC部材の施工における場所打ちコンクリート型枠の取外しの工程を省略し, 施工の合理化・省力化, さらに型枠合板の使用を低減することにより森林資源の保護や産業廃棄物を減少させるなどの環境保全効果にも期待できる超高強度繊維補強コンクリート(UFC)で製作した埋設型枠(以下, UFC埋設型枠とする)工法を提案している<sup>3)</sup>。これは, UFCの力学特性の有効的な活用を目的として, RCはりおよびRC床版の引張鉄筋かぶり内にUFC埋設型枠を合成させた合成構造である<sup>4), 5), 6)</sup>。このUFC埋設型枠による合成構造はUFC埋設型枠とコンクリートが一体化することで耐久性の向上や長寿命化に寄与するものである。UFC埋設型枠

とRCはりの合成構造(以下, UFC埋設型枠RCはり)に関する静荷重実験および走行荷重実験を行った結果, 同一寸法を有するRCはりの最大耐荷力と比較すると, UFC埋設型枠RCはりが約1.25倍の耐荷力が向上する結果が得られている<sup>4)</sup>。そこで, 道路橋RC床版への適用を目的としてUFC埋設型枠をRC床版の引張鉄筋かぶり内に合成させたRC床版(以下, UFC埋設型枠RC床版)を開発した。しかし, 道路橋RC床版への適用は, 大型自動車の過酷な荷重条件を強いられることから実用性を評価するためには静的耐荷力および走行荷重が作用した場合の耐荷力の確保, さらに, 輪荷重走行による疲労耐久性の確保が重要となる。

そこで本研究は, 従来のRC床版(以下, RC床版)とUFC埋設型枠RC床版を用いて, 静荷重実験および一走行ごとに荷重増加を行い輪荷重走行させる実験, すなわち走行荷重実験を行い, 最大耐荷力を評価し, 破壊メカニズムを明らかにする。さらに, 輪荷重連続走行による疲労実験を行い, 等価繰返し走行回数により疲労寿命の推定を行う。また, 疲労耐久性の評価としてS-N曲線についても既往の研究におけるRC床版と比較し, UFC埋設型枠RC床版の実用性を検証する。

表 - 1 コンクリートの配合

| スラブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |     |
|-------------|------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|-----|
|             |            |            |            | C                        | W   | S   | G    | Ad  |
| 8.0±2.5     | 2.0±1.0    | 39.2       | 40.0       | 403                      | 158 | 726 | 1094 | 4.0 |

表 - 2 コンクリートおよび鉄筋材料特性値

| 供試体  | コンクリート<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 鉄 筋 (SD295A, D10)            |                              |                                |
|------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
|      |                                        | 降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
| RC   | 35                                     | 368                          | 568                          | 200                            |
| U.RC | 35                                     | 385                          | 520                          | 200                            |

RC-:RC床版、U.RC-:UFC埋設型枠RC床版

表 - 3 UFC 埋設型枠の配合

| 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |        |
|----------------------------|-----|-----|--------|
| 水                          | 鋼繊維 | 減水剤 | プレミックス |
| 180                        | 158 | 29  | 2250   |

表 - 4 UFC 埋設型枠の材料特性値

| 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 曲げ強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 219.4                        | 34.9                         | 55.0                           |

## 2. UFC埋設型枠の特徴および供試体の使用材料・寸法

## 2.1 UFC埋設型枠の特徴

UFC 埋設型枠は、20mm ~ 30mm 程度の薄肉であるために製作が容易である。また、高強度を有するだけでなく、極めて緻密な硬化体構造となっているため、腐食性因子の浸透を遮断する。さらに、耐衝撃性に優れ、凍結による表面の劣化が進行しないなどの特徴がある。構造においては、UFC 埋設型枠の付着面に凹凸を設けることにより、RC 床版と一体性が図られ、構造物の有効断面として考慮できる。

## 2.2 使用材料および配合

## (1) RC床版

コンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材を使用した。また、鉄筋には SD295A, D10 を用いた。コンクリートの配合を表 - 1、コンクリートと鉄筋の材料特性値を表 - 2に示す。

## (2) UFC埋設型枠の使用材料

UFC 埋設型枠の使用材料は、水 (W)、ポリカルボン酸系の高性能減水剤 (SP)、プレミックス材料 (DP、密度 2.85g/cm<sup>3</sup>) および鋼繊維 (FM、密度 7.85g/cm<sup>3</sup>) とした。鋼繊維は、直径 0.2mm、長さ 15mm を体積比で 2.0%使用した。プレミックス材料は、セメント、シリカフューム、珪石粉末などが最密充填されるように配合されており、骨材は粗骨材を用いず最大粒径 2mm の珪砂が混合されている。混和剤使用量は、目標フロー値を 240mm として決定した。UFC 埋設型枠の配合

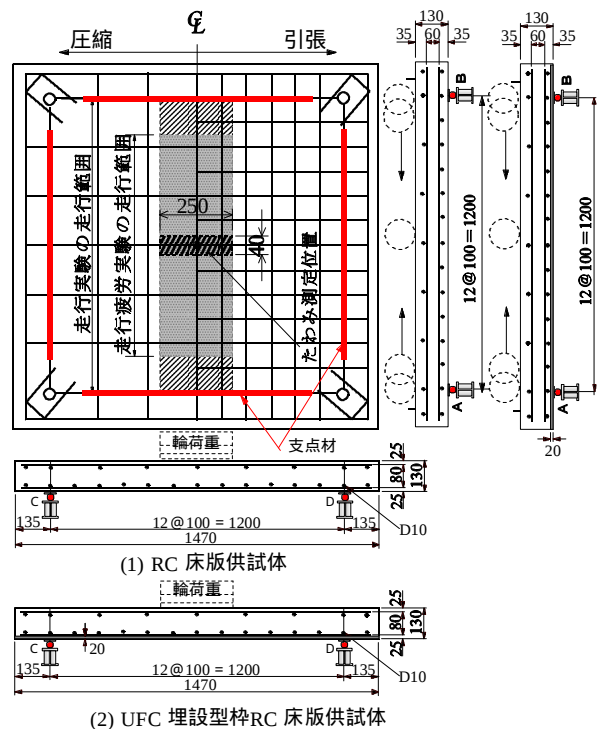


図 - 1 供試体寸法

を表 - 3、材料特性値を表 - 4に示す。

## 2.3 供試体の寸法

本供試体は道路橋 RC 床版の施工の合理化を目指すための実験供試体であるので、道路橋示方書・同解説<sup>7)</sup>(以下、道示)に基づいて、RC 床版の設計支間と大型車両の 1 日 1 方向あたりの計画交通量が 2000 台以上を想定して厚さを決定し、鉄筋を配置した。

## (1) RC床版供試体寸法および鉄筋配置

RC 床版供試体の寸法は、全長 147cm、支間 120cm、厚さ 13cm の正方形版とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、主鉄筋および配力筋を 10cm 間隔、圧縮側は引張側の 1/2 を配置した。有効高さは主鉄筋が 10.5cm、配力筋は 9.5cm とした。供試体寸法を図 - 1に示す。

## (2) UFC埋設型枠RC床版供試体

## 1) UFC埋設型枠の付着面および寸法

UFC 埋設型枠と RC 床版の底面コンクリートとの合成效果を高めるために、UFC 埋設型枠の付着面の製作

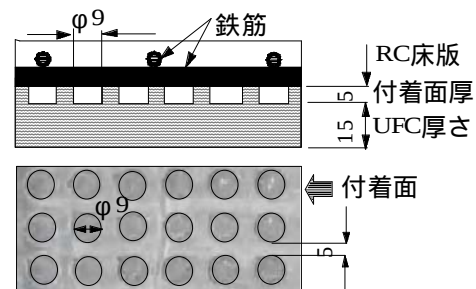
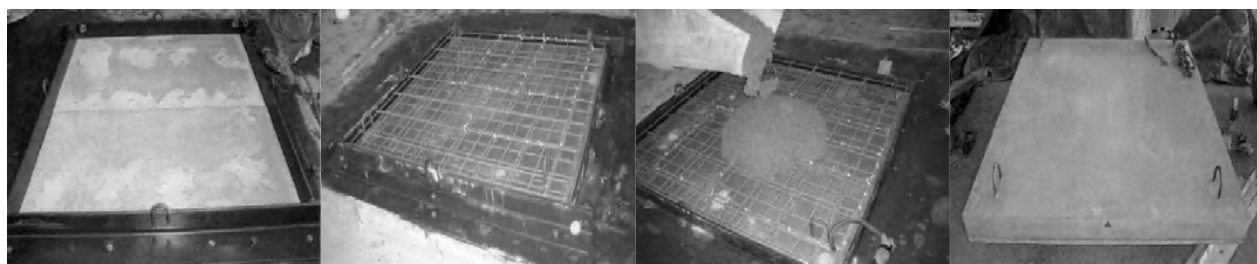


図 - 2 UFC 埋設型枠の形状



(1) UFC 埋設型枠設置

(2)鉄筋配置

(3)コンクリート打設

(4)UFC 埋設C 床版

写真 - 1 UFC 埋設型枠 RC 床版施工手順

が重要となる．そこで本研究では，UFC 埋設型枠の付着面には凸型付き型枠材を用いて付着面に凹部を一様に設けたタイプ（以下，P タイプ）を採用した．P タイプの凹部は直径 9mm，付着面厚 5mm を用いたことから，凹部の面積率は 40%である．断面形状および付着面形状を図 - 2に示す．なお，P タイプはコンクリートとの打ち継ぎ面のせん断ひび割れ強度は，母材コンクリートと同程度の値を示していることから十分な付着が得られることが確認されている<sup>8), 9)</sup>．

UFC 埋設型枠の寸法は，幅 147cm，有効厚 1.5cm，付着面厚は 0.5cm，全厚 2.0cm とし，RC 床版のかぶり内に埋設する．製作は，付着面を P タイプとした UFC 埋設型枠用の型枠に UFC を打設した．養生は，前置き時間を 24 時間とし，脱型後の蒸気養生は最高温度 90 を 48 時間保持した．

## 2) UFC埋設型枠RC床版の施工法

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の施工手順を写真 - 1 に示す．

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の作製は，予め製作した UFC 埋設型枠を設置した後に側面の型枠を作製し（写真 - 1(1)），予め組んで置いた鉄筋を UFC 埋設型枠の上部に配置した（写真 - 1(2)）．その後は，コンクリートを打設し（写真 - 1(3)），UFC 埋設型枠と RC 床版を一体構造とする．コンクリート打設後は通常の RC と同様に脱型し（写真 - 1(4)），養生を行った．

## 3) UFC埋設型枠RC床版寸法および鉄筋配置

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置は，基本的には図 - 1(1)に示した RC 床版供試体と同様である．したがって，床版厚は 13cm であり，厚さ 2cm の UFC 埋設型枠を設置した後，直接鉄筋を配置した．よって，有効高さは主鉄筋が 10.5cm，配力筋が 9.5cm である．UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図 - 1(2)に示す．

## 3. 静荷重・走行荷重実験方法<sup>10)</sup>

本研究は，道路橋 RC 床版のコンクリート打設における型枠施工の合理化・省力化および長支間に対応できる床版構造の開発を目的としている．そこで実験は，基本となる静荷重実験と走行荷重実験を行い，実験耐

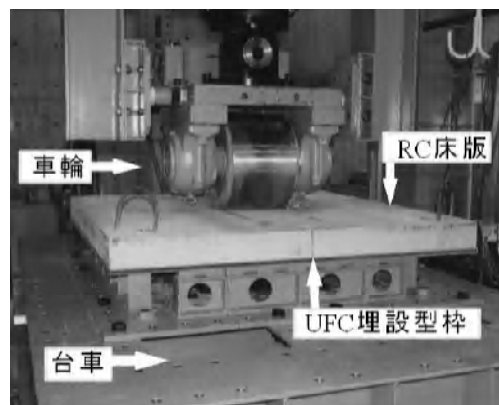


写真 - 2 実験状況

荷力，荷重とたわみの関係および破壊メカニズムを基に，UFC 埋設型枠の実用性について評価する．なお，本実験供試体は，道示 の規定に基づいて設計し，その 1/2 モデルとしたものである．本実験における支持条件は，図 - 2に示すように，床版支間 120cm に対して 100cm の支点材を設け，両支点から 10cm を自由端とし，浮き上がり防止を設けない 14 辺単純支持とする．実験状況を写真 - 2 に示す．

## 3.1 静荷重実験概要

静荷重実験は，最大応力が生じる支間中央に輪荷重を静止して荷重を載荷する実験である．荷重の大きさは，引張主鉄筋が降伏するまでは 10.0kN ずつ増加させ，降伏後は供試体が破壊するまで 5.0kN ずつ増加させる．供試体記号は RC 床版供試体を RC-S とし，UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を U.RC-S とする．

## 3.2 走行荷重実験概要

走行荷重が作用した場合の実験には，図 - 1に示す支点 A から支点 B を折り返す方法と，床版中央に輪荷重を停止し，支間中央を基点に両支点方向へ走行する方法が考えられる．本実験では，静荷重実験の耐力に比して，最も耐力が低下する支間中央から両支点方向へ走行させる実験（以下，走行荷重実験とする）を行った<sup>5), 6)</sup>．なお，本実験における走行速度の平均は 1 往復 2.4m を 13sec で走行する 0.18m/s とした．荷重の大きさは，1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加させる段

表 - 5 実験最大耐力および破壊モード

| 供試体      | 最大耐力<br>(kN) | 平均耐力<br>(kN) | 耐力力比 |         | 破壊モード    |
|----------|--------------|--------------|------|---------|----------|
|          |              |              | R/S  | U.RC/RC |          |
| RC-S-1   | 235.2        | 237.7        | -    | -       | 押抜きせん断破壊 |
| RC-S-2   | 240.2        |              |      |         | 押抜きせん断破壊 |
| RC-R-1   | 172.5        | 172.0        | 0.72 | -       | 押抜きせん断破壊 |
| RC-R-2   | 171.5        |              |      |         | 押抜きせん断破壊 |
| U.RC-S-1 | 299.6        | 294.7        | -    | 1.24    | 押抜きせん断破壊 |
| U.RC-S-2 | 289.7        |              |      |         | 押抜きせん断破壊 |
| U.RC-R-1 | 235.4        | 238.0        | 0.81 | 1.38    | 押抜きせん断破壊 |
| U.RC-R-2 | 240.5        |              |      |         | 押抜きせん断破壊 |

RC：RC床版，U.RC：UFC埋設型枠RC床版，S：静荷重実験，  
R：走行荷重実験，1,2：供試体番号

階荷重とした。走行範囲を図 - 1に併記した。供試体記号はRC床版供試体をRC-Rとし，UFC埋設型枠RC床版供試体をU.RC-Rとする。

#### 4. 静荷重・走行荷重実験の結果および考察

##### 4.1 最大耐力

静荷重実験および走行荷重実験における最大耐力および破壊モードを表 - 5に示す。

##### (1) RC床版供試体

RC床版供試体の最大耐力の平均は静荷重実験の場合は237.7kN，走行荷重実験の場合は172.0kNである。静荷重実験と走行荷重実験の最大耐力を比較すると走行荷重実験は28%耐力が低下した。

##### (2) UFC埋設型枠RC床版供試体

UFC埋設型枠RC床版供試体における最大耐力の平均は静荷重実験の場合は294.7kN，走行荷重実験の場合は238.0kNであり，静荷重実験と走行荷重実験の最大耐力を比較すると走行荷重実験の耐力が19%低下した。

##### (3) RC床版とUFC埋設型枠RC床版の比較

RC床版供試体とUFC埋設型枠RC床版供試体の最大耐力の平均を比較すると，UFC埋設型枠RC床版供試体がRC床版供試体に比して，静荷重実験の場合は1.24倍，走行荷重実験の場合は1.38倍耐力が上回った。また，走行荷重実験における最大耐力の低

下率を比較すると，RC床版供試体に比して9%改善されている。これは，本供試体に用いたUFCには，直径0.2mm，長さ15mmの鋼繊維を体積比で2.0%配合していることから，鋼繊維がひび割れと交差して，ひび割れ発生後も応力を伝達しながら耐力が維持されたためである。すなわち，架橋効果が発揮され，静荷重実験および走行荷重実験においても耐力が維持され，また付着面をPタイプとしたことにより合成效果が発揮されたものと考えられる。

#### 4.2 静荷重・走行荷重実験による破壊状況

本実験におけるRC床版供試体とUFC埋設型枠RC床版供試体のひび割れ状況の一例を図 - 3に示す。

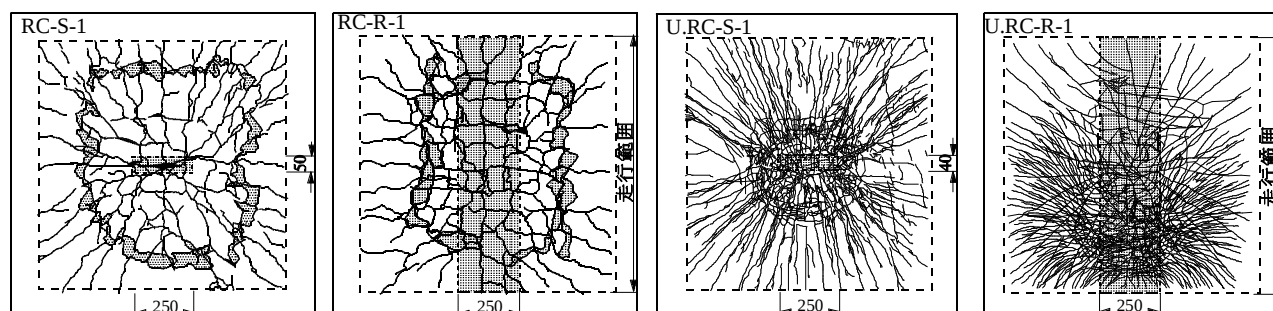
##### (1) RC床版

RC床版供試体における静荷重実験の場合のひび割れ状況を図 - 3(1)，1)に示す。供試体RC-S-1は床版底面のコンクリートがはく離破壊している。これはダウエル効果によるものであり，終局時の破壊は押抜きせん断破壊となった。また，供試体RC-S-2も同様な破壊状況である。

走行荷重実験におけるひび割れ状況を図 - 3(1)，2)に示す。供試体RC-R-1はRC床版の底面に配置した主鉄筋の位置にひび割れが発生している。終局時のひび割れ状況は，荷重が走行することから，軸直角方向の底面の鉄筋かぶり内ははく離破壊している。終局時の破壊状況は走行中に押抜きせん断破壊となった。なお，破壊時におけるRC床版の輪荷重接地面は，実測した結果，250mm×50mmである。また，供試体RC-R-2も同様な破壊状況である。

##### (2) UFC埋設型枠RC床版

UFC埋設型枠RC床版供試体U.RC-S-1の破壊状況は，静荷重実験の場合は図 - 3(2)，1)に示すように，床版中央に荷重を載荷したことから，輪荷重の接地面から45°で荷重が分布するため，その範囲は微細なひび割れが密集している。終局時はRC床版部が押抜きせん断破壊と同時にUFC埋設型枠がはく離した。また，供試体U.RC-S-2も同様な破壊状況である。



1) 静荷重実験

2) 走行荷重実験

(1) RC床版

1) 静荷重実験

2) 走行荷重実験

(2) UFC埋設型枠RC床版

図 - 3 静荷重・走行荷重実験における破壊状況

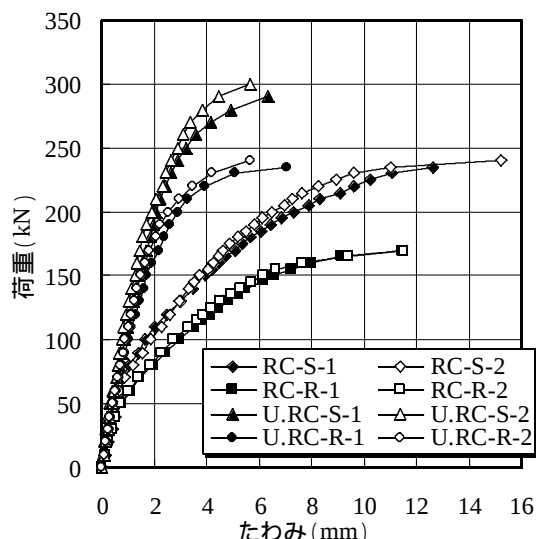


図 - 4 荷重とたわみの関係

走行荷重実験においても図 - 3(2), 2)に示すように，供試体 U.RC-R-1 は荷重が走行する範囲に微細なひび割れが発生し，輪荷重が走行中に支点から 35cm 付近で押抜きせん断破壊を起こすと同時にこの周辺では UFC 埋設型枠と RC 床版部がはく離した．なお，UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は全体的にたわみ量が少ないことから破壊時における RC 床版の輪荷重接地面は実測した結果，250mm×40mm である．また，供試体 U.RC-R-2 は破壊位置は異なるものの同様な破壊状況を示している．

#### 4.3 静荷重・走行荷重実験による荷重とたわみの関係

静荷重実験および走行荷重実験における床版中央の荷重とたわみの関係を図 - 4に示す．

##### (1) RC床版

RC 床版供試体の荷重とたわみの関係では，静荷重実験の場合は，供試体 RC-S-1, 2 とともに荷重 80kN 付近まで線形的にたわみが増加し，その後は荷重の増加に伴いたわみが緩やかに増加し，荷重 200kN 付近から急激な増加が見られた．終局時のたわみの平均は 13.9mm である．また，走行荷重実験の場合は，供試体 RC-R-1, 2 とともに荷重 60kN 付近までは線形的にたわみは増加し，その後の荷重増加に伴い徐々に増加し，荷重 155kN 付近から急激に増加した．終局時のたわみの平均は 10.4mm である．

##### (2) UFC埋設型枠RC床版

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の荷重とたわみの関係は，静荷重実験の場合は供試体 U.RC-S-1, 2 は，荷重 220kN 付近まで線形的にたわみが増加し，その後の荷重増加で急激にたわみが増加した．終局時のたわみの平均は 5.9mm である．また，走行荷重実験の場合は供試体 U.RC-R-1, 2 とともに荷重 190kN 付近までは線形

的にたわみは増加し，その後の荷重増加で増加が著しくなり，終局時のたわみの平均は 6.3mm である．静荷重実験と走行荷重実験を比較すると荷重 150kN 付近まではたわみの増加に大きな差はみられないが，荷重 200kN 付近から走行荷重実験の場合のたわみの増加が大きくなっているものの RC 床版のたわみと比較すると約 1/3 程度である．したがって，静荷重実験および走行荷重実験ともに，UFC の材料特性値（表 - 2）に示すように，UFC のヤング係数が 55kN/mm<sup>2</sup> であることから，曲げ剛性が向上し，たわみの増加が抑制されたものと考えられる．

#### 5. 輪荷重による走行疲労実験概要

実用性を評価するためには疲労耐久性の確保も重要である．よって，輪荷重走行による疲労実験（以下，走行疲労実験）を行い，道路橋床版としての実用性を評価する．

走行疲労実験における走行範囲は床版中央から両支点方向に 45cm（全長 90cm）とする．この走行範囲は，輪荷重が 45° で床版の底面方向に分布するものと仮定すると，輪荷重は床版支間内に分布するものである．走行範囲を図 - 1 に併記した．走行疲労実験の供試体記号は RC 床版供試体を RC-FR とし，UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を U.RC-FR とする．次に，本供試体は活荷重 100kN で設計し，その 1/2 モデルとしたことから，活荷重 100kN の 1/2 の 50kN に安全率 1.2 を考慮して 60kN を基準荷重とする．よって，供試体 U.RC-FR-1, 2 は荷重 60kN で 2 万回まで走行し，その後荷重 80kN で 2 万回，100kN で 2 万回，100kN 以降は 2 万回ごとに 10kN ずつ増加するものである．また，供試体 U.RC-FR-3 は荷重 80kN で 2 万回まで走行し，その後荷重 100kN で 2 万回，100kN 以降は 2 万回ごとに 10kN ずつ増加するものである．

#### 6. 走行疲労実験の結果および考察

##### 6.1 走行疲労実験における等価繰返し走行回数

本実験における走行疲労実験は，2 万回ごとに荷重を増加したことから等価繰返し走行回数を算出して疲労耐久性を評価する．等価繰返し走行回数は，マイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる．なお，基準荷重 60kN とし，基準荷重 60kN の一定載荷として等価繰返し走行回数を算出する．本研究は RC 床版の疲労寿命と UFC 埋設型枠 RC 床版の疲労寿命を比較し，実用性を検証することから，RC 床版の S-N 曲線を基準とする．したがって，S-N 曲線の傾きの逆数  $m$  には，RC 床版および UFC 埋設型枠 RC 床版ともに松井らが提案する S-N 曲線<sup>11)</sup>の傾きの逆数 12.7 を適用する．

表 - 6 等価繰返し走行回数および耐用年数

| 供試体       | 等価繰返し<br>走行回数<br>(回) | 平均等価繰<br>返し走行回<br>数<br>(回) | 走行<br>回数<br>比 | 設計耐<br>用年数<br>(年) | 設計耐<br>用年数<br>の平均<br>(年) |
|-----------|----------------------|----------------------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| RC-FR-1   | 5,390,326            | 6,566,463                  | -             | 7.4               | 9.0                      |
| RC-FR-2   | 6,961,558            |                            |               | 9.5               |                          |
| RC-FR-3   | 7,347,503            |                            |               | 10.1              |                          |
| U.RC-FR-1 | 28,827,114           | 37,594,389                 | 5.73          | 39.5              | 51.5                     |
| U.RC-FR-2 | 35,724,913           |                            |               | 48.9              |                          |
| U.RC-FR-3 | 48,231,141           |                            |               | 66.1              |                          |

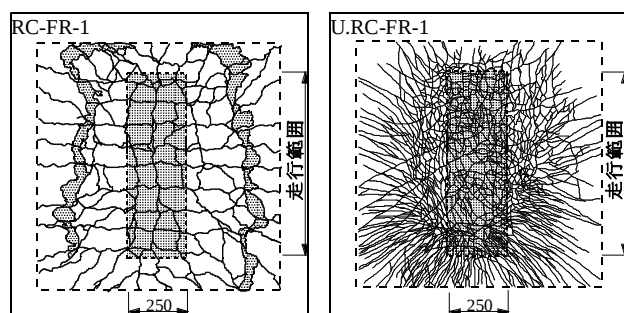
RC : RC床版 U.RC : UFC埋設型枠RC床版 FR : 走行疲労実験 1,2,3 : 供試体番号

$$N_{ep} = \sum (P_i/P)^m \times n_i \quad (1)$$

ここで、 $N_{ep}$  : 等価繰返し走行回数 (回)、 $P_i$  : 載荷荷重 (kN)、 $P$  : 基準荷重 (= 60kN)、 $n_i$  : 実験走行回数 (回)、 $m$  : S-N 曲線の傾きの逆数 (= 12.7)

式(1)より算出した等価繰返し走行回数を表 - 6に示す。表 - 6より、等価繰返し走行回数は、RC 床版供試体の場合は、供試体 RC-FR-1, 2, 3 で、それぞれ 5,390,326 回、6,961,558 回、7,347,503 回であり、平均等価繰返し走行回数は 6,566,463 回である。これに対して、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は、供試体 U.RC-FR-1, 2, 3 で、それぞれ、28,827,114 回、35,724,913 回、48,231,141 回であり、その平均等価繰返し走行回数は 37,594,389 回である。ここで、RC 床版供試体の平均等価繰返し走行回数と比較すると、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体は 5.73 倍となった。

本供試体の設計は、大型車両が 1 日 1 方向当たりの計画交通量を 2000 台以上として床版厚を決定した。そこで、等価繰返し走行回数による設計耐用年数は等価繰返し走行回数を計画交通量 2000 台で除し、これを 365 日で除して算出すると、RC 床版供試体の場合は平均 9.0 年、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は平均 51.5 年に相当する結果となった。したがって、大型車両の走行荷重を想定した走行荷重による疲労実験



(1) RC 床版 (2) UFC 埋設型枠 RC 床版

図 - 5 走行疲労実験における破壊状況

においても、UFC 埋設型枠 RC 床版は疲労耐久性に優れた構造であることが実証された。

## 6.2 走行疲労実験による破壊状況

走行疲労実験における破壊時のひび割れ状況の一例を図 - 5に示す。

### (1) RC床版供試体

RC 床版供試体 RC-FR-1 は図 - 5(1)に示すように、軸直角方向および軸方向に 10cm ~ 12cm 間隔でひび割れが発生し、格子状を形成している。このひび割れ間隔は、軸直角方向および軸方向に配置した鉄筋間隔とほぼ同じ寸法である。最終的な破壊モードは、輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。なお、供試体 RC-FR-2, 3 は破壊位置は異なるものの同様な破壊状況を示している。

### (2) UFC埋設型枠RC床版供試体

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体 U.RC-FR-1 は図 - 5(2)に示すように、全体的にひび割れが発生し、走行範囲には微細なひび割れが密集している。これは、UFC 埋設型枠とコンクリートの付着力が得られ、UFC に配合されている鋼繊維の架橋効果により荷重が分散され、UFC 埋設型枠が引張力を分担したためである。また、最終的な破壊モードは、輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となり、破壊位置で UFC 埋設型枠がはく離した。UFC 埋設型枠のはく離は等価繰返し走行回数  $2.5 \times 10^7$  付近までほとんどみられない。供試体 U.RC-FR-2, 3 のひび割れ状況およびはく離状況も同様な傾向である。したがって、UFC 埋設型枠の合成面に凹型を一樣に設けた P タイプを採用したことにより合成効果が得られ、UFC 埋設型枠 RC 床版は破壊状況からも合成構造として適用可能であることが実証された。

## 6.3 たわみと等価繰返し走行回数の関係

走行疲労実験における床版中央のたわみと等価繰返し走行回数の関係を図 - 6に示す。

RC 床版における、供試体 RC-FR-1, 2 とともに走行回

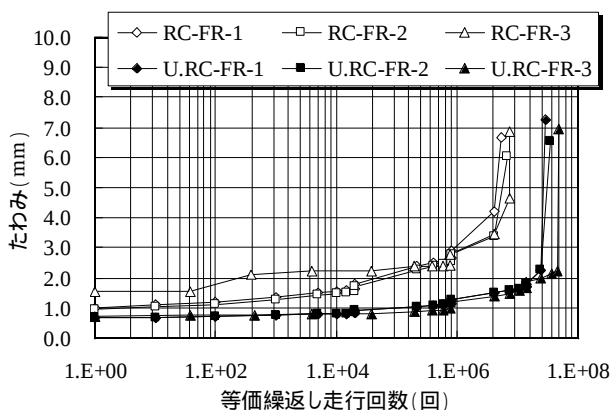


図 - 6 たわみと等価繰返し走行回数の関係

数の増加に伴いたわみは徐々に増加し、等価繰返し走行回数 20,000 回付近から増加が著しい。終局時のたわみは、供試体 RC-FR-1, 2 でそれぞれ、6.6mm, 6.1mm である。供試体 RC-FR-3 は荷重 80kN から走行開始したことから初期たわみが 1.6mm であり、等価繰返し走行回数 386 回では 2.1mm に達している。荷重 100kN での走行からはたわみの上昇が著しく、終局時は供試体 RC-FR-1, 2 とほぼ同じ 6.9mm である。

UFC 埋設型枠 RC 床版の場合、供試体 U.RC-FR-1, 2 はともに等価繰返し走行回数の増加に伴い緩やかにたわみは増加し、等価繰返し走行回数  $1.39 \times 10^7$  付近からたわみの増加が大きくなった。終局時のたわみは、それぞれ 7.3mm, 6.5mm である。次に、供試体 U.RC-FR-3 は初期荷重 80kN から走行開始し、初期たわみは 0.7mm である。終局時のたわみは 6.9mm である。

ここで、RC 床版供試体と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を比較すると、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体はたわみの増加が少なく、曲げ剛性のある床版であることが確認できる。さらに、各等価繰返し走行回数におけるたわみも UFC 埋設型枠 RC 床版供試体が RC 床版供試体に比して抑制された。これは、UFC に配合されている鋼繊維の架橋効果によりひび割れが抑制されたためである。

#### 6.4 RC床版およびUFC埋設型枠RC床版の耐疲労性

##### (1) S-N線図

道路橋 RC 床版は大型自動車の過酷な荷重条件に強いられることから、疲労耐久性の確保が重要となる。UFC 埋設型枠 RC 床版を道路橋 RC 床版へ適用するために、本実験における UFC 埋設型枠 RC 床版の耐疲労性について評価しなければならない。押抜きせん断に対する疲労性能評価方法としては、S-N 曲線が採用されている。S-N 曲線の縦軸  $S$  には、最大作用荷重  $P$  を静的押抜きせん断耐力  $P_0$  で除して無次元化して用いる。また、輪荷重走行による RC 床版は貫通ひび割れによるはり状化の影響を受けることから、松井らは最大作用荷重  $P$  をはり状化した押抜きせん断耐力  $P_{sx}$  で除して無次元化して適用している<sup>11), 12)</sup>。そこで、UFC 埋設型枠 RC 床版における S-N 曲線の縦軸  $S (P/P_{sx})$  には、RC 床版と比較することから松井らが提案するはり幅を考慮した押抜きせん断耐力式を適用する。RC 床版の S-N 曲線式として松井式<sup>11)</sup>および土木研究所式<sup>13)</sup>が提案され、それぞれ式(2), (3)として与えられている。

松井式

$$\log (P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (2)$$

土木研究所式

$$\log (P/P_{sx}) = -0.0545 \log N + \log 0.96 \quad (3)$$

ここに、 $P$ : 基準荷重、 $P_{sx}$ : はり幅  $B$  の押抜きせん断耐力、 $N$ : 繰返し回数

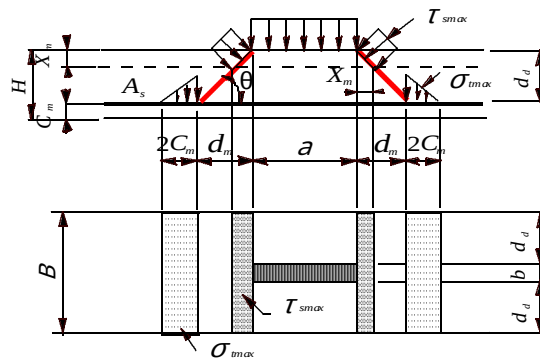


図-7 はり幅を考慮した押抜きせん断力学モデル

##### (2) RC床版のはり幅を考慮した押抜きせん断耐力: $P_{sx}$

道路橋 RC 床版の輪荷重走行疲労試験の押抜きせん断耐力の評価式として、松井らの提案式が採用されている<sup>12)</sup>。この耐力式は大阪大学のクランク式鉄輪の実験結果に基づく実験式であり、これは輪荷重走行によって発生する主鉄筋の貫通ひび割れによって形成されるはり状化された幅  $B$  のせん断耐力を算定する式とし、はり幅  $B$  は載荷ブロック走行方向の幅  $b$  が下側配筋鉄筋の有効高さ  $d_a$  まで  $45^\circ$  で分布するものとして与えられている。はり幅を考慮した押し抜きせん断力学モデルを図-7のように提案し、押し抜きせん断耐力を式(4)として与えている。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (4)$$

$$B = b + 2d_a$$

$$\tau_{smax} = 0.252f_c - 0.00251f_c^2 \quad (4.1)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.269f_c^{2/3} \quad (4.2)$$

ここで、 $B$ : はりの幅(mm)、 $b$ : 輪荷重の軸方向の辺長、 $X_m$ : 主鉄筋方向の中立軸の位置(mm)、 $C_m$ : 引張主鉄筋のかぶり、 $d_a$ : 配筋の有効高さ、 $\tau_{smax}$ : コンクリートのせん断強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{tmax}$ : コンクリートの引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_c$ : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

RC 床版の S-N 曲線における縦軸  $S$  の算出は、松井らが提案した押抜きせん断耐力 ( $P_{sx}$ ) を式(4)より算出する。また、横軸は式(4)より得た等価繰返し走行回数  $N_{ep}$  とする。次に、本実験における破壊時の RC 床版から計測した輪荷重の接地面は、250mm×50mm である。したがって、式(4)における軸方向の辺長  $b$  は 50mm とする。また、配筋の有効高さ  $d_a$  は 95mm、引張主鉄筋のかぶり  $C_m$  は 25mm である (図-1(1))。次に、コンクリートのせん断強度  $\tau_{smax}$  およびコンクリートの引張強度  $\sigma_{tmax}$  は表-2に示した材料特性値を適用し、式(4.1), (4.2)より算出した。その結果、コンクリートのせん断強度  $\tau_{smax}$  は 5.75N/mm<sup>2</sup>、引張強度  $\sigma_{tmax}$  は 2.88N/mm<sup>2</sup> である。よって、はり幅  $B$  の押抜きせん断耐力  $P_{sx}$  は 120.4kN となった。

### (3) RC床版，UFC埋設型枠RC床版のS-N曲線

RC 床版の S-N 曲線における  $S$  は松井式による押抜きせん断耐力  $P_{sx}$  を適用し，走行回数  $N$  は等価繰返し回数  $N_{ep}$  を用いた．RC 床版供試体 RC-FR に関する S-N 曲線を図 - 8 に示す．

一方，RC 床版の S-N 曲線について土木学会鋼構造委員会<sup>14)</sup>では，RC 床版の疲労耐久性評価と S-N 曲線の統一化を目的として共通試験を実施している．共通試験は輪荷重走行試験機を所有している(独)土木研究所，大阪大学，(株)IHI，(株)横河ブリッジ，東京都土木研究所が実施している．供試体は，損傷事例が多くみられた昭和 39 年の道示に準拠して製作した RC 床版である．また，筆者らも平成 14 年の道示に準拠して製作した RC 床版供試体を用いて輪荷重走行による疲労実験を実施している．これらの結果についても図 - 8 に併記した．

RC 床版供試体 RC-FR-1，2，3 とともに松井式(2)，土木研究所式(3)および共通試験の S-N 曲線を上回り，安全性が評価されている．松井式(2)および共通試験における供試体は昭和 39 年の道示に基づいて製作したことから主鉄筋と配力筋の比は引張側が 1 : 0.32，圧縮側が 1 : 0.68 である．これに対して本供試体は平成 14 年の道示に準拠して製作し，さらに主鉄筋量と配力筋量を同等に配置したことにより S-N 曲線が上回る結果となった．

次に，UFC 埋設型枠 RC 床版の輪荷重走行による疲労実験における S-N 曲線式は提案されていない．そこで，本実験における S-N 曲線式は RC 床版における梁状化した押抜きせん断耐力  $P_{sx}$  を基本耐力として無次元化し，走行回数  $N$  は等価繰返し回数  $N_{ep}$  を適用した．UFC 埋設型枠 RC 床版供試体は何れも RC 床版供試体を大きく上回り，安全側となったことから疲労耐久性に優れている合成構造であることが実証された．

ここで，RC 床版における松井式(4)による押抜きせん断耐力  $P_{sx}$  を適用した場合の S-N 曲線式は式(5)として評価される．

UFC 埋設型枠 RC 床版の S-N 曲線推定式

$$\log (P/P_{sx,RC}) = -0.07835 \log N + \log 1.95 \quad (5)$$

ここに， $P$ ：基準荷重， $P_{sx,RC}$ ：RC 床版におけるはり幅  $B$  の押抜きせん断耐力 ( $P_{sx}$ )， $N$ ：繰返し回数

## 7. まとめ

RC 床版，UFC 埋設型枠 RC 床版において，静荷重実験，走行荷重実験を行い，耐力性能を評価した．また，輪荷重走行試験機による走行疲労実験から疲労耐久性能を評価した．これらにより得られた知見を以下

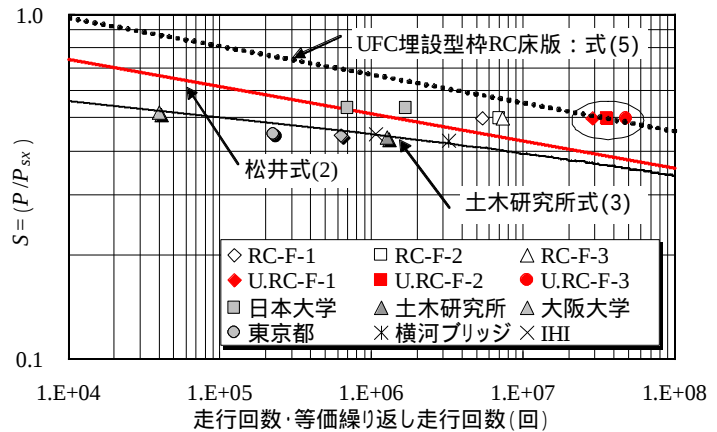


図 - 8 RC 床版・UFC 埋設型枠 RC 床版の S-N 曲線

にまとめる．

- (1) 静荷重実験における耐力は，RC 床版に比して UFC 埋設型枠 RC 床版が 1.24 倍，走行荷重実験の場合は 1.38 倍上回った．
- (2) 破壊モードは，RC 床版の場合が押抜きせん断破壊を呈し，UFC 埋設型枠 RC 床版の場合は押抜きせん断破壊と同時に UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面がはく離した．UFC 埋設型枠 RC 床版のひび割れ状況は UFC 埋設型枠に鋼繊維が配合されたことにより，ひび割れの分散効果がみられる．
- (3) 静荷重実験および走行荷重実験における荷重とたわみの関係より，RC 床版に比して UFC 埋設型枠 RC 床版のたわみが大幅に抑制されている．これは，UFC 埋設型枠の合成面に一様に凹型を設けたことから付着性が向上し，さらに鋼繊維の架橋効果，高引張強度により曲げ剛性が向上したために，たわみの増加が抑制されたものと考えられる．
- (4) 走行疲労実験における等価繰返し走行回数とたわみの関係からも，UFC 埋設型枠 RC 床版は RC 床版に比してたわみが抑制されたことから，UFC 埋設型枠とコンクリートの付着性が長期間にわたり良好であり，UFC 埋設型枠 RC 床版は疲労耐久性に優れた構造であると評価できる．よって，UFC 埋設型枠 RC 床版は鋼道路橋床版として実用性があると評価できる．
- (5) 走行疲労実験において等価繰返し回数により算出した走行回数は，UFC 埋設型枠 RC 床版の場合は RC 床版に比して 5.73 倍となった．また，大型車両 1 日 1 方向の計画交通量が 2000 台以上とした場合，RC 床版の耐用年数が 9.0 年，UFC 埋設型枠 RC 床版は 51.5 年となり，疲労寿命も大幅に向上する結果となった．
- (6) S-N 曲線における縦軸  $S$  の算出に，RC 床版を基準として松井式を適用した場合と土木学会共通試験 土木研究所による S-N 曲線とを比較すると，UFC

埋設型枠 RC 床版はこれらの曲線を大幅に上回っていることから，UFC 埋設型枠 RC 床版の合成構造は疲労耐久性に優れた床版であることが実証された．

#### 参考文献

- 1)加々良直樹，秦裕彰，櫻井孝，大西弘志，松井繁之：アーチ型合成床版の静的および動的荷重下の構造挙動に関する研究，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.91-96，2003.
- 2)長尾千瑛，松井繁之，石崎茂，久保圭吾，小牧秀之，平山紀夫：鋼・FRP 複合永久型枠を用いた打替え用合成床版の耐荷特性，構造工学論文集 Vol.53A，pp.1032-1039，2008.
- 3)牧隆輝，田中敏嗣，阿部忠，木田哲量：RPC 製埋設型枠を用いた RC はりの載荷試験，コンクリート工学年次論文集 Vol.27，No.1，pp.289-294，2005.
- 4)新見彩，阿部忠，木田哲量，片桐誠：UFC 埋設型枠 RC 床版の静的耐荷力と疲労特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，pp.1441-1446，1985.
- 5)新見彩，阿部忠，木田哲量，澤野利章，片桐誠：UFC 埋設型枠 RC 床版の疲労耐久性，第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.69-74，2008.
- 6)澤野利章，阿部忠，木田哲量，片桐誠：走行荷重が作用する UFC 埋設型枠 RC はりの実用性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.61，pp.233-240，2008.
- 7)日本道路橋会：道路橋示方書・同解説，2004.
- 8)土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書「FRP と高強度モルタルの複合部材による高耐久性埋設型枠材「H・R フォーム」」，1995
- 9)土木研究センター：建設技術審査証明報告書「ダクタルフォーム」，2007.
- 10)阿部忠，木田哲量，高野真希子，澤野利章，加藤清志：静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断耐力，構造工学論文集（日本学術会議・土木学会），Vol. 50A，pp. 919-926，2004.
- 11)松井繁之：橋梁の寿命予測，安全工学，Vol.30 No.6，pp.432-440，1991.
- 12)前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，第 348 号，-1，pp.133-141，1984.
- 13)国土交通省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，p.45，2002.
- 14)土木学会：道路橋床版の輪荷重走行による共通試験の評価，土木学会鋼構造委員会，pp. 3-30，2008.

(2008 年 9 月 18 日受付)