

## 報告

## 高強度軽量繊維コンクリートを用いた道路橋床版の開発研究

石川一美\*, 金尾茂樹\*\*, 宮崎健次朗\*\*, 吉本昌弘\*\*, 松井繁之\*\*\*

\*博(工学), カナフレックスコーポレーション株式会社(〒530-6017 大阪市北区天満橋 1-8-30 OAP タワー 17F)

\*\*カナフレックスコーポレーション株式会社(〒530-6017 大阪市北区天満橋 1-8-30 OAP タワー 17F)

\*\*\*工博, 大阪大学名誉教授, 大阪工業大学客員教授(〒565-0824 吹田市山田西 4-6-4)

国土強靱化を目指すため道路建設・維持管理に膨大な公共資金が投入されている。道路維持管理の中で道路橋床版は経年劣化及び交通荷重の繰返しによるひび割れ、損傷が増加し、抜本的な修繕事業としての床版を高耐久のものへの取替え事業が実施されている。著者らは、寿命耐久性を満足し、低価格で提供できる新材料による道路橋床版開発を検討してきた。今回、軽量・高強度・高耐熱性等の機能を有する高強度軽量繊維コンクリートを開発し、プレキャスト床版に適用を試みた。本稿では、床版コストの低減及び施工性、既設部材への負担を考慮した軽量化に主眼を置き、静的載荷試験、輪荷重走行試験による耐久性を確認した。

キーワード：高強度軽量繊維コンクリート、プレキャスト床版、静的はり試験、輪荷重走行試験、高耐荷力、高耐久性

## 1. はじめに

道路橋床版の輪荷重疲労等によるひび割れの増大、ひび割れからの雨水侵入に伴う床版コンクリートの劣化損傷が報告され<sup>1)</sup> 道路橋床版の補修・補強、床版取替え等が実施されている。床版取替えにおいては、耐久性、軽量化に着目した繊維コンクリートによる UFC プレキャスト床版<sup>2)</sup>、高強度軽量プレキャスト PC 床版<sup>3)</sup>、PC プレキャスト床版等様々なプレキャスト床版が開発されている。本稿は、高強度軽量繊維コンクリート（本文ではカナクリートと呼ぶ）を使用したプレキャスト床版について、軽量骨材と繊維を用いたカナクリートの単位重量及び使用鉄筋量の減少による軽量化の可能性を確認する目的で、この材料を用いた静的梁試験、輪荷重走行試験を実施した。その試験結果について報告する。

## 2. カナクリートの概要

プレキャスト床版に使用するカナクリートは、ポルトランドセメント・軽量骨材・合成繊維・起泡剤・混和材等を混合した高強度軽量繊維コンクリートで、図-1 に示す様に単位体積質量と圧縮強度に相関関係を持つ。さらに、混入された起泡剤による内部発生気泡は単独気泡となり外部からの水、熱、外気の侵入を防ぐ効果が期待できる。

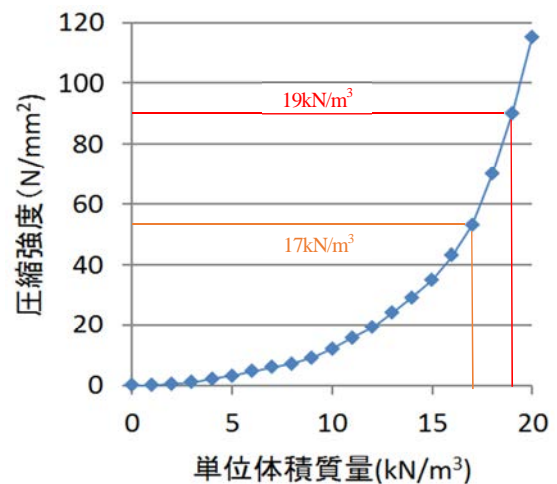


図-1 単位体積質量－圧縮強度 相関図

各種繊維補強セメント複合材料 (FRC、UFC 等) におけるカナクリートの位置を確認する目的で、図-1 の相関図で示す単位体積質量 17~19kN/m<sup>3</sup>、圧縮強度 55~90N/mm<sup>2</sup> の材料を用いて、引張特性、引張終局ひずみ、破壊エネルギー、疲労特性を調査した。図-2 に引張応力と引張終局ひずみを示す。引張終局ひずみは UFC より大きく超強度ひずみ硬化型モルタルに分類される。図-3 に示す破壊エネルギーは UFC と同等となっている。

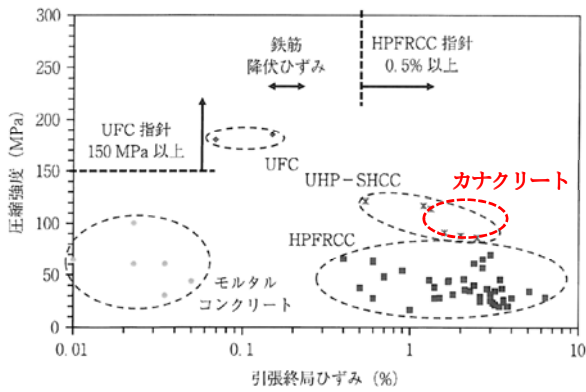


図-2 圧縮強度-引張終局ひずみ

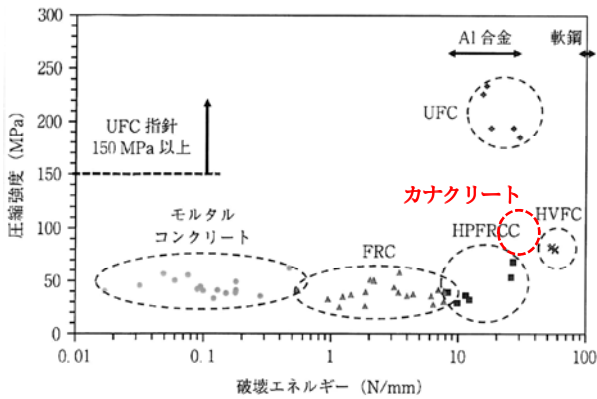


図-3 コンクリート系材料の破壊エネルギー

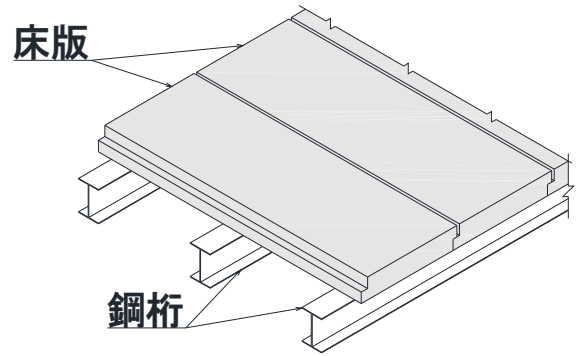


図-4 プレキャスト化した床版構造概要図

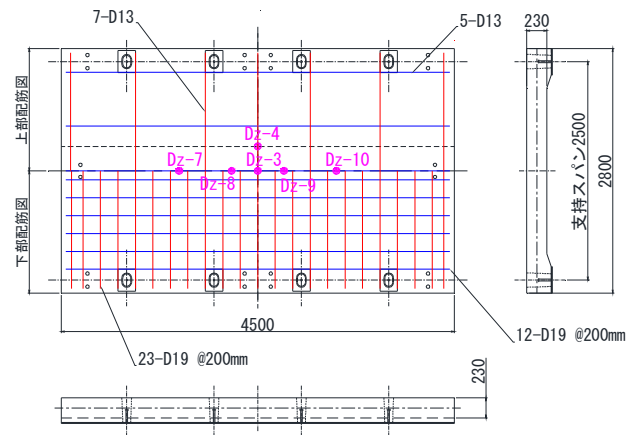


図-5 基準床版の配筋・構造図

### 3. カナクリート床版

#### 3.1 床版諸元

カナクリート床版は、現行で使用されている RC 床版、PC 床版に対して軽量化、製作コスト低減を目指している。従来のコンクリートと比べ曲げ引張応力の高い特性から、極力鉄筋を使用しない床版をコンセプトとし以下の諸元とした。

- ① 対象床版：支間 2.5m の連続版
- ② 床版厚：23cm (道路橋示方書の最小床版厚に準拠)
- ③ 設計曲げモーメント：道路橋示方書に準拠
- ④ 床版緒元：床版支間、床版ハンチの取り方等道路橋示方書に準拠
- ⑤ 床版鉄筋量：軽量化、製作コストの縮減を目的に許容応力を満足する最少鉄筋量
- ⑥ カナクリート特性：
  - 単位体積質量：図-1 より  $17\text{kN/m}^3$
  - 圧縮強度：図-1 より  $53\text{N/mm}^2$
  - 静弾性係数：  $17,300\text{ N/mm}^2$

#### 3.2 床版構造概要

カナクリート床版のプレキャスト化した構造概要を図-4 に、継手を除いた基準床版の配筋・構造図を図-5 に示す。

### 4. 静的梁試験

#### 4.1 供試体緒元

カナクリート床版の軽量化と耐久性の可能性を探る輪荷重走行試験を実施する前段階として静的梁試験による耐荷力の確認を行った。使用した梁試験は表-1 及び図-6、図-7 に示す 2 体を製作した。供試体 No.1 は、軽量化と配筋設置の容易さを目的に最小限鉄筋量とし、使用カナクリートは単位体積質量  $17\text{kN/m}^3$ 、設計基準強度  $40\text{N/mm}^2$  とした。供試体 No.2 は、道路橋示方書に準拠した鉄筋量とし、使用カナクリートは  $19\text{kN/m}^3$ 、設計基準強度  $60\text{N/mm}^2$  とした。図-6、図-7 に 2 体の概要を示す。

表-1 供試体緒元

		供試体 No.1	供試体 No.2
単位体積質量( $\text{kN/m}^3$ )		17.0	19.0
弾性係数( $\text{kN/mm}^2$ )		17.3	25.6
圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )		48.5	64.3
橋軸 直角	圧縮側	鉄筋径 D13	D19
		本数	1
方向 鉄筋	引張側	鉄筋径 D19	D19
		本数	3

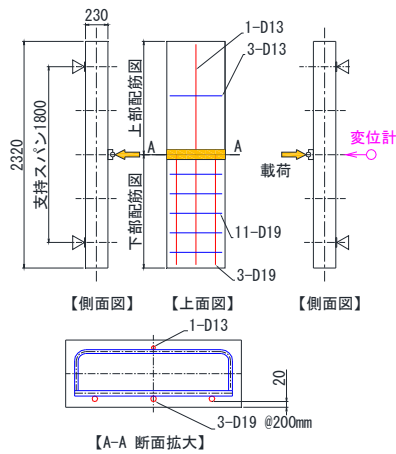


図-6 供試体 No.1 製作図

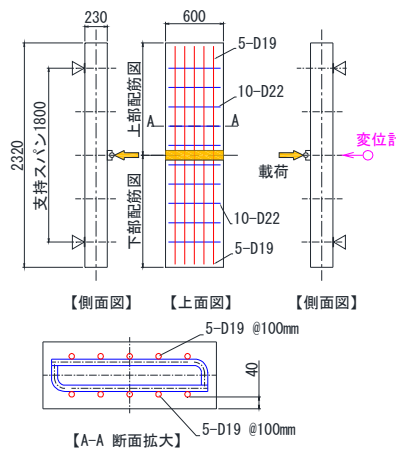


図-7 供試体 No.2 製作図

## 4.2 試験結果

載荷試験は写真-1 に示す静的曲げ試験を行い、たわみ、カナクリートのひずみ、鉄筋ひずみを測定した。支持支間を 1.8m とし、その支間中央で集中荷重を与える単純梁とした。

載荷状況は載荷重 80kN 時に供試体 No.1, No.2 とともにごく僅かにひび割れが発生し、載荷重の増加に伴いひび割れが増加し、供試体 No.1 では約 181kN かつ最大たわみ 11mm の時点、供試体 No.2 では約 205kN かつ最大たわみ 44mm の時点で載荷点に近い床版下面からほぼ鉛直に上面までひび割れが到達し、上面でカナクリートが圧潰した。図-8~図-11 にたわみ、カナクリート・鉄筋ひずみを示す。

たわみ、ひずみの測定値から、内部の鉄筋が降伏する近くまで直線的に変化している。この現象はコンクリートのひび割れによるたわみ増加傾向が少なく、鉄筋が降伏するまで線形的に挙動する状態を長く維持する。この傾向はカナクリート内部に混入される繊維によるひび割れ抑制効果によると考えられる。

また、供試体 No.2 の曲げ破壊は破壊荷重の計算値と同等の結果であったことに対し、軽量化した供試体 No.1 の曲げ破壊は計算値より高い結果となった。これはカナ

クリートの靱性特性により、鉄筋の応力が降伏点を超えてひずみ硬化領域まで達したためと考えられる。



写真-1 載荷試験

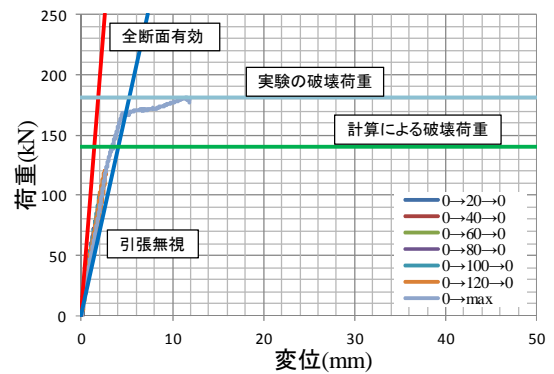


図-8 供試体 No.1 荷重-変位

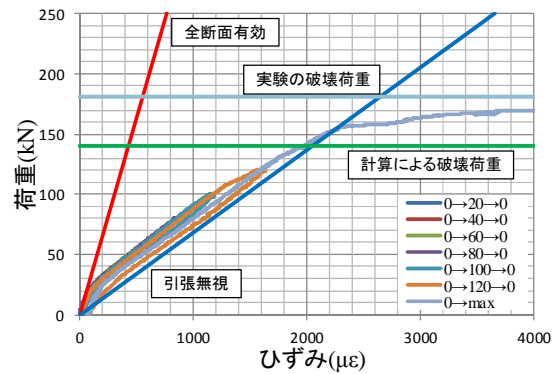


図-9 供試体 No.1 荷重-鉄筋ひずみ

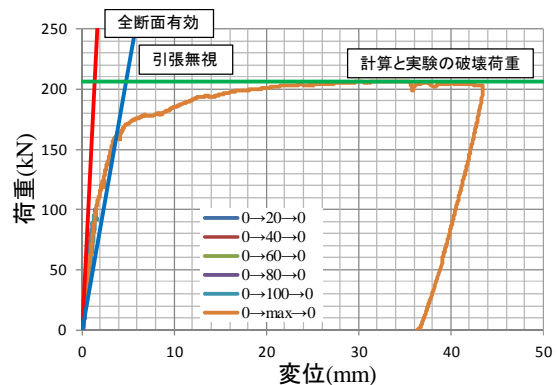


図-10 供試体 No.2 荷重-変位

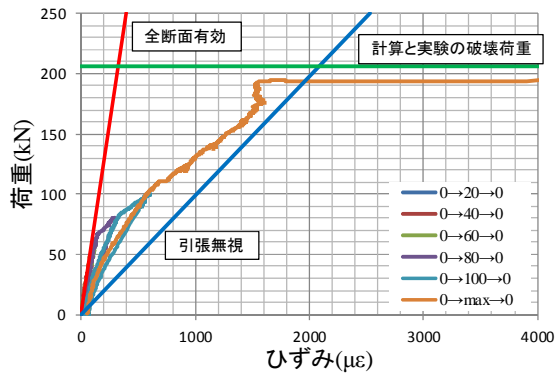


図-11 供試体 No.2 荷重-鉄筋ひずみ

## 5. 輪荷重走行疲労試験

### 5.1 床版試験体

輪荷重走行疲労試験で使用したカナクリート床版の配筋は静的梁試験の結果から供試体 No.1 の断面構成を採用し、表-2 及び図-5 に示す最小鉄筋量のカナクリート床版を製作した。

床版供試体寸法は現行道路橋示方書で準拠した支間 3m の連続版を対象に版厚 23cm とし、その設計曲げモーメントで配筋した。この床版を支間 2.5m で単純支持し、長さ 4.5m の両端辺を横梁で弾性支持する。

表-2 供試体緒元

		床版全体	単位幅当り
単位体積質量(kN/m <sup>3</sup> )		17.0	17.0
弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )		17.3	17.3
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		48.5	48.5
橋軸 直角 方向 鉄筋	圧縮側	鉄筋径	D13
		本数	7
	引張側	鉄筋径	D19
		本数	23

### 5.2 輪荷重走行疲労試験結果

輪荷重走行疲労試験は写真-2 に示す国立研究開発法人土木研究所の輪荷重走行試験機で行った。

支間の中央で橋軸方向の中心を中央にして、±1.5m の範囲で輪荷重を往復させる土研方式とした。写真-2 に輪荷重走行試験状況を示す。荷重方法は最初の 4 万回を 157kN で開始し、その後 4 万回毎に 19.6kN ずつ荷重を上げ、最終 392kN でトータル 52 万回走行させる階段荷重方法（土研方式）を採用した。この方法で過去に行われた代表的な RC 床版の結果は図-12 に示すようなものとなり<sup>4)</sup>、平成 8 年道路橋示方書の床版は昭和 39 年道示の約 2 倍の荷重に耐える耐久性に向上した。

本カナクリート床版は 52 万回寸前の 50 万回で疲労破壊した。その結果を図-13、図-14 に示す。図より明ら

かなように 48 万回まではほぼ健全に耐えていること、残留たわみも疲労破壊するまでほぼ線型的に単調増加したことから、図-12 中の RC8 より格段に疲労耐久性が向上し、繊維補強の効果が現れた。

また、ひび割れ状況は、荷重 216kN、14 万回走行後において、アセトンの蒸発状況の違いにより目視で確認できる程度の幅 0.04mm 未満のひび割れを確認した。その後、荷重 294kN、32 万回走行後に目視で確認できるひび割れが発生し、疲労破壊するまで徐々に増加した。疲労破壊後のひび割れ状況について、図-15、図-16 に示す。ひび割れはあるものの、繊維コンクリートであるカナクリートの特性により、コンクリート片は殆ど落ちていない状況であった。



写真-2 輪荷重走行試験状況

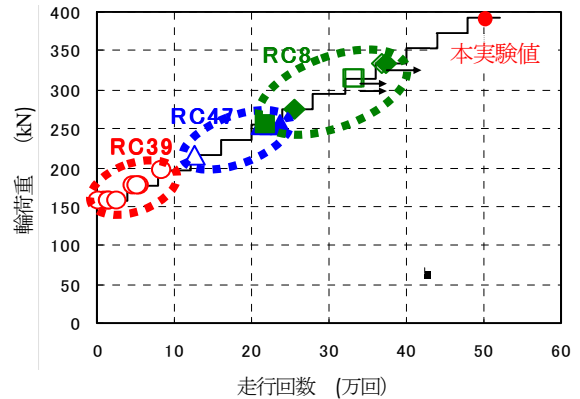


図-12 土研プログラムによる各道示で設計した床版の破壊寿命

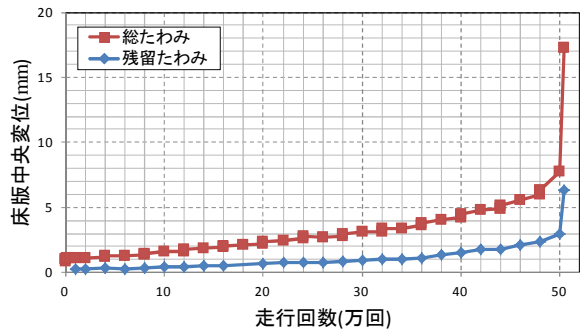


図-13 走行回数におけるたわみの変化



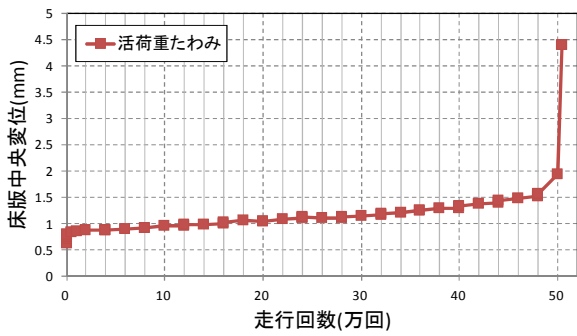


図-14 カナクリート床版の単位荷重 (157kN) に換算した活荷重たわみの変化量

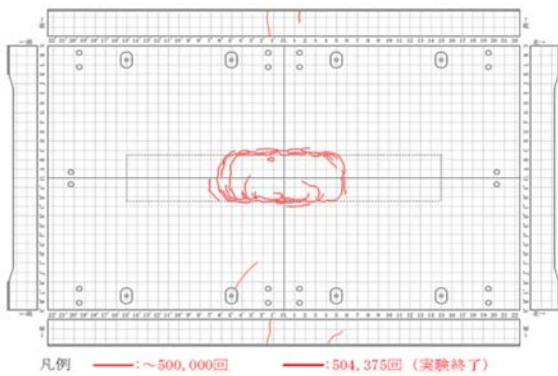


図-15 ひび割れ観察図 (上面、側面)

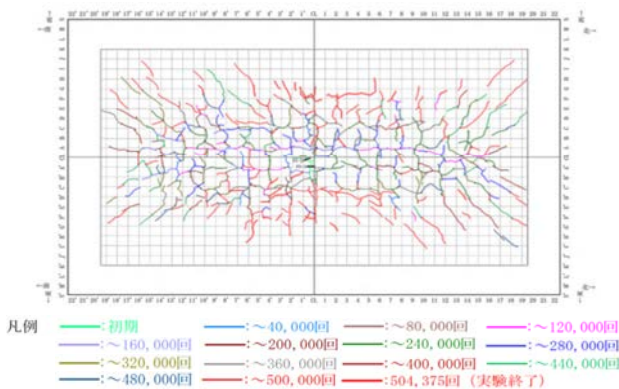


図-16 ひび割れ観察図 (下面)

疲労破壊した床版をほぼ中心位置で縦横に切断し、破壊状況を確認した。橋軸直角方向の切断面を写真-3 に示す。

ひび割れは載荷板端部付近から供試体中央より600mmの位置にかけて45~30°程度の角度で斜め方向にひび割れ、そして、下側主鉄筋に沿った剥離破壊を伴った典型的な押抜きせん断破壊であった。

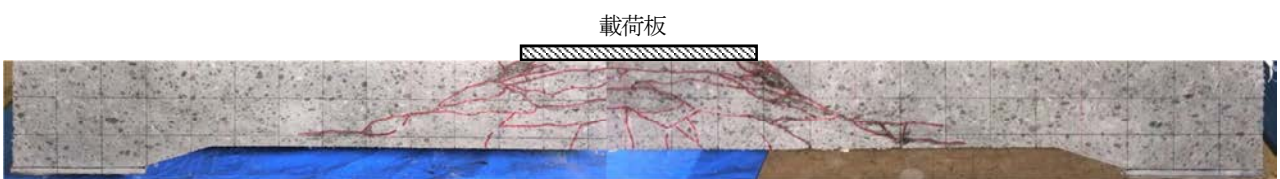


写真-3 床版切断面(橋軸直角方向)

今回のカナクリート床版の疲労破壊寿命の評価を最後に行った。すなわち、実験値を2つの既存のS-N曲線との比較で行った。一つは我国で最初に発表された松井式で、他の一つは本実験で採用した階級載荷法で報告された土研式とした<sup>5),6)</sup>。この両者のS-N曲線を図-18に示す。

松井式

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N_f + \log 1.52 \quad (1)$$

土研式

$$\log(P/P_{sx}) = -0.0545 \log N_f + \log 0.956 \quad (2)$$

ここに、

$$P_{sx} = 2B(f_v \cdot x_m + f_t \cdot C_m) \quad (3)$$

$$B = b + 2d_d$$

$$f_v = 0.656 \cdot f'_c{}^{0.606}$$

$$f_t = 0.269 \cdot f'_c{}^{2/3}$$

$P_{sx}$ : はり幅を考慮した押抜きせん断耐力(kN),  $B$ : はり幅(mm),  $b$ : 輪荷重の軸方向の辺長(mm),  $x_m$ : 使用限界状態における主鉄筋方向の中立軸の位置(mm),  $C_m$ : 引張主鉄筋のかぶり(mm),  $d_d$ : 配力筋の有効高さ(mm),  $f_v$ : コンクリートせん断強度(N/mm<sup>2</sup>),  $f_t$ : コンクリート引張強度(N/mm<sup>2</sup>),  $f_c$ : コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $N_f$ : 繰り返し回数

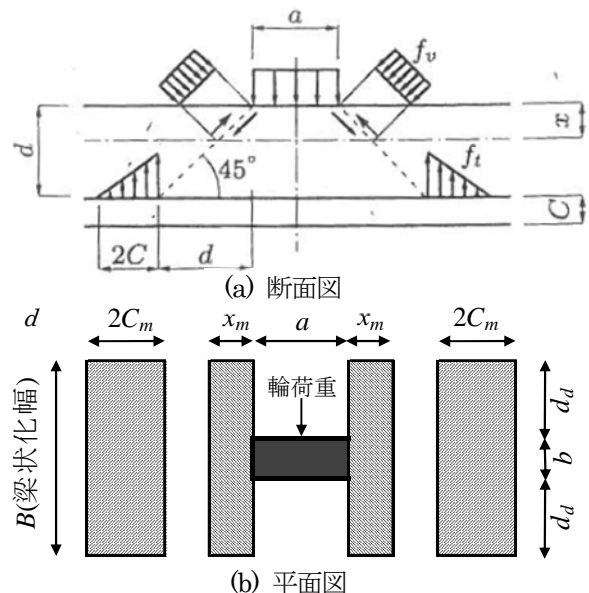


図-17 押抜きせん断破壊応力モデル

この  $P_{sx}$  の算出は、床版が梁状化した幅  $B$  (または計算上の輪荷重載荷による有効幅  $B$ ) で図-17 に示す上側のせん断破壊と下側鉄筋位置での剥離破壊を考えた耐力力である<sup>7)</sup>。

次に、実験の全作用回数は式(4)で与えられる。比較は基準荷重 1 つに対する結果だけで良いが、土研式との関係を明確にするため、 $P$  は 157kN、233kN、330kN を選んだ。 $N_{eq}$  は破壊までの走行回数(換算)で S-N 線で計算される  $N_f$  よりも大きければ、既往の RC 床版より耐久性があると評価できるものである。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (4)$$

ここに、

$N_{eq}$  : 等価走行回数(回)、 $P_i$  : 階級載荷の荷重(kN)、 $P$  : 基準荷重、 $n_i$  : 実験走行回数(回)、 $m$  = S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数(松井式 :  $m=12.7$ 、土研式 :  $m=18.35$ )

基準荷重を 157kN とした場合、松井式で算出したカナクリート床版の等価走行回数は  $7.34 \times 10^{11}$  に対し、松井式の S-N 曲線から算出した疲労破壊回数は  $2.55 \times 10^{10}$  であり、若干低い結果となった。そこで、土研式で算出したカナクリート床版の等価走行回数は  $9.77 \times 10^{11}$  に対し、土木研究所の S-N 曲線から算出した疲労破壊回数は  $1.64 \times 10^{11}$  となった。これらの 2 つの式との違いは載荷板の形状の違いにある。今回は土研で行ったため、後者の結果が評価対象としてよい。

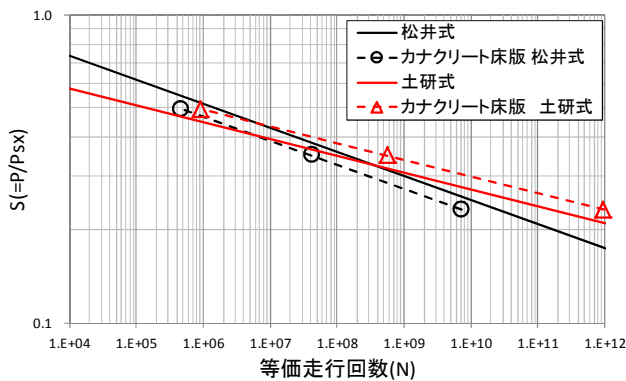


図-18 疲労試験結果と S-N 曲線(土研式)

3 つの基準荷重の結果を含めて図-18 にまとめた。図-18 中の赤実線の土研式に対して実験の破壊寿命は赤字の△と破線となり、土研式よりも上方に(右側に)プロットできた。この結果、今回のカナクリート床版は道路橋示方書に準拠して製作した床版より約 5 倍高い耐疲労性があることが結論づけられる。

## 6. あとがき

従来のコンクリートと比べて高い曲げ引張応力、高い鉄筋との付着性をもつカナクリートの特性を床版に用いることで、鉄筋量を示方書規定のものよりも少なくできると考えた。この特性により、カナクリート床版は現行道路橋示方書に準拠した鉄筋量の約 7 割減、床版質量で RC8 床版に比べ 26.5% 軽量化したにも関わらず、静的梁試験、輪荷重走行試験から約 2 倍の荷重に耐える耐久性、約 5 倍高い耐疲労性があることを示した。

ただし、今回の試験体の配筋設計は道路橋示方書のものから逸脱しているため、実用上は今回の試験床版と道路橋示方書の設計断面の中間的なものが妥当と考える。検討を行って、再度実験を行い、実成果を公開する予定にしている。

## 参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，2007。
- 2) 小坂，金治，一宮，藤代：超高強度繊維補強コンクリートを用いた平板型 UFC 床版による既設床版の取替え検討，第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.187-192，2016。
- 3) 中村，深山，山崎：高強度軽量コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版に関する研究，第 2 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.101-106，2000。
- 4) 松井繁之：床版研究の変遷と輪荷重走行試験機の役割，第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2006。
- 5) (社)土木学会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術，2008。
- 6) カナクリートの品質特性評価報告書，pp.8，2019。
- 7) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版株式会社，2016。

(2020 年 7 月 17 日受付)