

取替RC床版の押抜きせん断耐荷力および疲労寿命推定法に関する実験研究

Experimental study on estimation method of punching shear capacity
and fatigue life of replacement RC slab

阿部忠[†], 小野晃良*, 木内彬喬**, 高橋明彦*, 大西弘志***, 久田真****

Tadashi Abe, Kousuke Ono, Akitaka Kiuchi, Akihiko Takahashi, Hiroshi Onishi, Makoto Hisada

[†] 博(工), 日本大学大学院非常勤講師, 生産工学研究科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

*(株)小野工業所 (〒 960-2261 福島県福島市町庭坂字堀ノ内 3-1)

**日本大学大学院, 生産工学研究科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

***博(工), 岩手大学准教授, 理工学部システム創成工学科社会基盤・環境コース
(〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

****博(工), 東北大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

This study was verified consistency of the equation for punching shear load-carrying and S-N curve formula using the replacement RC slabs with two type of interstitial parts carried out running load experiment and wheel running fatigue test. As a result, the fracture modes of two kind of experiments resulted in the punching shear fracture with the precast slab. On the basis of the experiment results, the punching shear load-carrying capacity (P_{sx}) proposed by Abe et al was evaluated as above 0.93 times compared with the experiment value. In the verification of the consistency with the S-N curve formula from the relationship with number of equivalent cycle using P_{sx} were plotted within $\pm 5\%$ of confidence limit.

Key Words: replacement RC slab, punching shear load-carrying capacity, S-N curve

キーワード: 取替RC床版, 押抜きせん断耐荷力, S-N 曲線

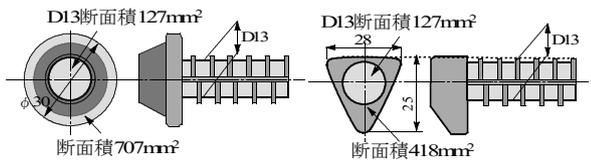
1. はじめに

地方自治体が管理する鋼道路橋 RC 床版においては, 補修・補強法が施されながら数十年が経過し, 再劣化が生じ, その対策として取替 RC 床版が提案されている¹⁾. 取替床版においては床版厚を最小厚とすることから一般的には PC 構造とした取替床版が提案され, 高速道路等で実施工されている^{2), 3), 4)}. しかし, 地方自治体が管理する橋梁床版は交通量が少ないことや 2 等橋で設計された橋梁も多いことから, 筆者らは地方道を対象とした取替 RC 床版構造を提案し, 輪荷重走行疲労実験など各種試験を実施し, 耐疲労性が評価され⁵⁾, 実橋で採用されている. 筆者らの取替 RC 床版において既往の研究では, 1994 年以降に改定された道路橋示方書・同解説 (以下, 道示とする)⁶⁾に規定する B 活荷重対応とした RC 床版供試体を用いて

輪荷重走行疲労実験を行い, 等価走行回数を基準に軸直角方向および軸直角方向と軸方向に間詰部を設けた 2 タイプの取替 RC 床版のそれぞれの等価走行回数から輪荷重走行疲労実験による耐疲労性を評価した⁵⁾. これによると RC 床版の等価走行回数に対して軸方向に間詰部を設けた供試体が 12.1 倍, 2 方向に間詰部を設けた供試体が 12.5 倍となり, 実験における耐疲労性の評価がなされた. しかし, 取替 RC 床版の寿命予測についての検証は行なっていないのが現状である. RC 床版の寿命推定式には, 松井らにより 1964 年改定の鋼道路橋設計基準⁷⁾に基づいた RC 床版および一部に異形鉄筋を配置した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い S-N 曲線式⁸⁾および S-N 曲線式に適用する押抜きせん断耐力式⁹⁾が提案されている. また, 土木研究所¹⁰⁾においても 1996 年改定の道示に準拠して製作した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い S-N 曲線式を提案している. なお, 押抜きせん断耐力式には松井らが提案する押抜きせん断耐力式が

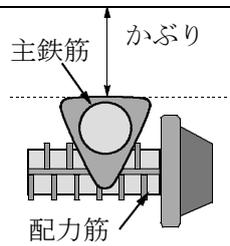
[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: abe.tadashi@nihon-u.ac.jp

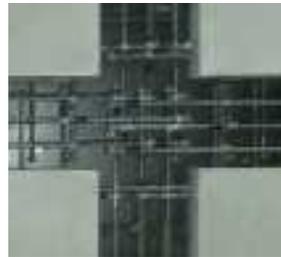


(1) 配力筋の突起部

(2) 主鉄筋の突起部



(3) かぶり



(4) 間詰部の配力筋

図-1 鉄筋端部の突起形状およびかぶり⁵⁾

表-1 コンクリートの配合

取替RC床版	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
				C	W	S	G		
床版部	10±2.5	35.0	43.2	443	155	732	968	3.1	0.004
間詰部	8±2.5	32.9	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004

W : 水, C : セメント, S : 砂, G : 粗骨材

表-2 材料特性値

取替RC床版	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
		使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
床版部	56.4	D13	366	539	200
間詰部	62.4				

適用されている。

一方、阿部ら^{11), 12)}は 1994 改定の道示に基づいて設計し、モデル化した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い S-N 曲線式および走行荷重実験による破壊荷重付近の押し抜きせん断耐荷力式^{11), 12), 13)}を提案し、寿命推定が行われている。よって、予防保全型維持管理計画における取替 RC 床版の寿命予測における押し抜きせん断耐荷力および S-N 曲線式との整合性の検証が必要となる。

そこで本研究では、鋼道路橋 RC 床版の劣化に伴う取替 RC 床版において軸直角方向と軸直角方向および軸方向に間詰部を設けた 2 種類の取替 RC 床版を用いて、輪荷重による走行荷重実験を行い、最大耐荷力すなわち押し抜きせん断耐荷力を検証する。また、輪荷重走行疲労実験を行い、松井らが提案する S-N 曲線式の傾きの逆数の絶対値 $m = 12.7^8)$ を適用して得られた等価走行回数より耐疲労性の検証を行う。そして、阿部らが提案する RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証し、取替 RC 床版の寿命推定の一助とする。

2. 取替RC床版構造⁵⁾

取替 RC 床版は、地方自治体が管理する道路橋を対象とした床版であり、従来の取替 PC 床版工法と同様にプレキャスト床版を工場で製作し、現地で軸方向に並列しながら一体化するものである。

取替 RC 床版の施工法は、プレキャスト床版を軸方向に並列し、並列した後は間詰部にコンクリートを打ち込み一体化するのである。間詰部を軸直角方向に設ける場合は、軸方向筋すなわち配力筋方向が継手構造となる。本供試体には図-1(1)のように D13 の鉄筋を用いた場合は $\phi 30\text{mm}$ の円形の突起形状とすることで、付着面積は 580mm^2 となる。次に、走行車線の片側の施工が終了した後、反対車線側を同様に並列に設

置する。この場合、軸方向に間詰部が生じる。この軸方向の間詰部の鉄筋継手は軸直角方向すなわち主鉄筋方向に継手構造が必要となる。主鉄筋の端部の突起は図-1(2)に示すように、底辺幅が 28mm、高さ 25mm の逆三角形とし、付着面積は 277mm^2 であり、鉄筋と併せて付着力を確保する継手構造である。また、図-1(3)に示すように逆三角形の突起を設けることで異形鉄筋同様にかぶりの確保が可能となる。なお、配力筋は主鉄筋の内側に配置することからかぶりの確保は可能となる。ここで、間詰部交差部の配置形状は図-1(4)となる。最後に軸直角方向および軸方向の間詰部にコンクリートを打ち込み一体化するものである。

なお、本実験供試体の間詰部の寸法は、軸方向間詰部の上面に直接負荷させるために実験用の輪荷重幅 300mm と同一寸法である幅 300mm とし、軸直角方向および軸方向の継手長を 280mm とした。

以上のように、軸方向および軸直角方向の鉄筋端部に突起を設けた継手構造は、間詰部の付着性が確保できる構造である。

3. 供試体の使用材料・寸法

3.1 使用材料

取替 RC 床版供試体のプレキャスト RC 床版部のコンクリート材料には、普通ポルトランドセメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、最大骨材寸法 5mm の砕砂を使用し、配合を表-1 に示す。取替 RC 床版の要求性能は、コンクリートの圧縮強度 40N/mm^2 を目標とする。これは、間詰部コンクリートはプレキャスト床版を並列した後に、間詰部に超速硬セメントを用いたコンクリートを打設することから、同一条件となるように要求性能を定めた。鉄筋には SD 345, D13 を用いる。ここで、プレキャスト RC 床版のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-2 に示す。

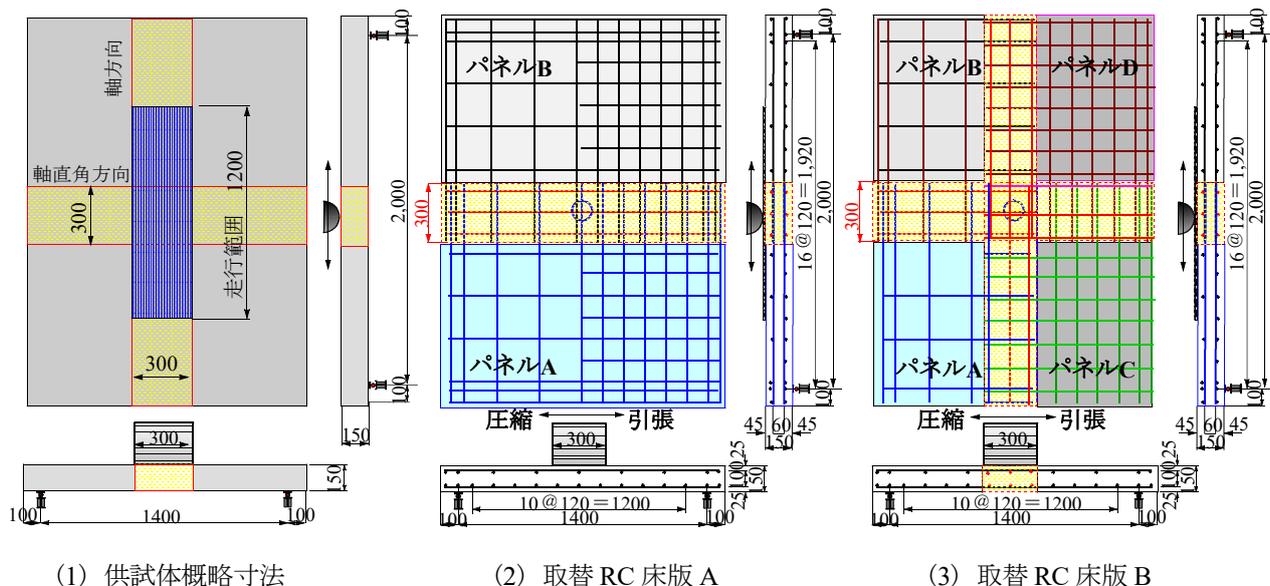


図-2 供試体寸法および鉄筋配置

間詰部のコンクリートには、現場での施工時間を 8 時間以内として、要求性能は材齢 3 時間で道示⁶⁾に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上、材齢 14 日で 40N/mm^2 以上確保できる配合とする。よって、コンクリートには超速硬セメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、最大骨材寸法 5mm の砕砂を使用し、配合を表-1 に併記する。また、鉄筋はプレキャスト RC 床版部と同様に SD345, D13 を配置する。ここで、材齢 28 日の間詰部のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-2 に併記する。表-2 より、プレキャスト床版の実験時のコンクリートの圧縮強度は 56.4N/mm^2 と要求性能である 40N/mm^2 以上は確保されている。次に、間詰部のコンクリートの発現強度は、材齢 3 時間で 34.9N/mm^2 、実験時は 62.4N/mm^2 である。よって、打設 3 時間後の強度が 24N/mm^2 以上であり、並列後の施工の省力化が図られる材料である。

3.2 供試体寸法および鉄筋配置

取替 RC 床版供試体は、1994 年改定の道示に準拠し、その 3/5 モデルとする。供試体は、実験装置の車輪幅が 300mm であり、道示に規定する輪荷重幅 500mm に対して 3/5 モデルであることから、実験供試体も 3/5 モデルとした。なお、取替 RC 床版供試体の間詰部の寸法は鉄筋の付着長 280mm を考慮して 300mm とする。ここで、取替 RC 床版の寸法の概略を図-2(1)に示す。

本論文では、輪荷重走行による取替 RC 床版の最大耐荷力、すなわち破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力を評価するために走行荷重実験を行う。押抜きせん断耐荷力の評価には、軸直角方向と軸直角方向および軸方向の 2 方向に間詰部を設けた供試体をそれぞれ 2

体製作する。ここで、取替 RC 床版の軸直角方向に間詰部を設けた供試体を取替 RC 床版-A (記号を R.RC-R-A (Replacement RC slab-Running load-A)) とし、軸直角方向および軸方向に間詰部を設けた供試体を取替 RC 床版-B (記号を R.RC-R-B (Replacement RC slab-Running load-B)) とする。

次に、耐疲労性の評価においては輪荷重走行疲労実験を行うものとする。よって、走行荷重実験同様に供試体は各 2 体製作する。輪荷重走行疲労実験に用いる供試体記号を R.RC-F-A (Replacement RC slab-Fatigue load-A) および R.RC-F-B とする。取替 RC 床版 A, B 供試体の寸法および鉄筋配置を図-2(2), (3)に示す。

(1) 取替RC床版A (R.RC-R-A, R.RC-F-A)

取替 RC 床版 A 供試体の寸法は図-2(2)に示すように、床版支間方向 $1,600\text{mm}$ 、軸方向 $2,200\text{mm}$ 、床版厚 150mm とする。なお、床版支間は $1,400\text{mm}$ 、軸方向の支間を $2,000\text{mm}$ とする。プレキャスト床版部は軸方向の寸法 850mm であり、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置した。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。

間詰部の寸法は、軸方向支間中央 (支点から $1,000\text{mm}$) に継手長 280mm を考慮し、幅 300mm を設けた。間詰部の配力筋の配置状況は、主鉄筋には D13 を上下に 3 本並列配置した。継手部の構造は、主鉄筋の内側に配力筋を配置し、端部は図-1(1)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置する。

(2) 取替RC床版B (R.RC-R-B, R.RC-F-B)

取替 RC 床版 B 供試体の間詰部の寸法は、図-2(3)に示すように、全長、床版厚、支間は取替 RC 床版と同様である。軸方向の支点から $1,000\text{mm}$ (支間中央) および軸直角方向の中央にそれぞれ幅 300mm を設けた。これは、輪荷重幅 300mm と同じ幅とした。間詰



写真-1 実験状況

部の構造およびの配筋は、主鉄筋には D13 を上下に 3 本並列配置した。継手部の鉄筋は主鉄筋方向のかぶり確保するために三角形の突起を設けている。突起部は主鉄筋の上縁と同位置となることからかぶりは確保されている(図-1(2))。一方、配力筋も D13 を上下に 3 本並列配置した。配力筋は主鉄筋の内側に配置され、図-1(1)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置した(図-1(4))。

4. 走行荷重実験方法および耐力の評価

4.1 実験装置の概要

取替 RC 床版供試体の走行荷重実験による最大耐力の評価および輪荷重走行疲労実験には、輪荷重走行疲労試験機を用いる。ここで、実験装置を写真-1 に示す。

実験装置の荷重装置には車輪(幅 300mm)を取り付け、最大荷重 500kN まで載荷が可能である。試験体を台車に設置し、その台車をモータとクランクアームにより水平方向に走行させるものである。本実験装置は最大 2,000mm までの走行が可能であるが図-2(1)に示すように本実験では 1,200mm を走行させる。

4.2 輪荷重走行荷重試験方法

(3) 走行荷重実験方法¹⁵⁾

輪荷重走行荷重実験は、図-2(1)に示すように、軸直角方向床版中央を幅 300mm の輪荷重を軸方向に 1,200mm の範囲を 1 走行し、1 走行毎に荷重を 10kN 増加させる段階荷重載荷とする。荷重 200kN 以降は 1 走行ごとに 5kN 増加し、破壊するまで荷重増加と走行を繰り返す方法である。

(2) 最大耐力および押抜きせん断耐力の評価

走行荷重実験において、荷重を載荷し、1,200mm を走行した最大荷重を実験供試体の最大耐力とし、これを押抜きせん断耐力とする。なお、走行中に破壊した場合の荷重を破壊荷重とする。

表-3 最大耐力

供試体名称	最大耐力 (kN)	平均耐力 (kN)	耐力比
R.RC-R-A1	250.8	255.8	—
R.RC-R-A2	260.9		
R.RC-R-B1	265.8	265.9	1.04
R.RC-R-B2	265.9		

4.3 輪荷重走行実験の結果および考察

(1) 実験最大耐力

走行荷重実験による最大耐力を表-3 に示す。

取替 RC 床版供試体 R.RC-R-A1 の最大耐力は 250.8kN であり、供試体 R.RC-R-A2 は 260.9kN、最大耐力の平均は 255.8kN である。また、取替 RC 床版供試体 R.RC-R-B1 の最大耐力は 265.8kN、供試体 R.RC-R-B2 は 265.9kN、最大耐力の平均は 265.9kN である。

軸直角方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-A の耐力に対して 2 方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-B の耐力が 1.04 倍向上している。これは、走行方向および軸直角方向の間詰部に配置された鉄筋量がプレキャスト床版部より多く、さらに間詰部コンクリートの圧縮強度が高いためと考えられる。

(2) 走行荷重実験による破壊状況

走行荷重実験における破壊時のひび割れ状況を図-3 に示す。

取替 RC 床版 A の供試体 R.RC-R-A1 のひび割れ状況は図-3(1)に示すように、下面は間詰部を除いたプレキャスト床版部に 2 方向のひび割れが発生している。破壊はパネル A 側で床版中央から 500mm 付近で押抜きせん断破壊となっている。破壊位置付近は荷重載荷位置から 45 度底面にダウエル効果によるはく離が見られる。次に、床版中央の軸直角方向の切断面 A-A は図-3(1), 1)に示すように輪荷重走行位置のみにひび割れが発生している。この位置はプレキャスト床版部の鉄筋量に対して、多く配置されていることから、ひび割れの進展が抑制されている。破壊位置の切断面 B-B は図-3(1), 2)に示すように荷重載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となる斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 C-C は図-3(1), 3)に示すように破壊位置から 45 度に斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となるひび割れ形状を呈している。

また、供試体 R.RC-R-A2 の破壊状況は図-3(2)に示すように、供試体 R.RC-R-A1 と同様に間詰部付近のひび割れは鉄筋量も多いことから走行付近の下面のみに発生し、プレキャスト床版と比較してかなり抑制されている。破壊は供試体 R.RC-R-A1 同様にパネル A で床版中央から 500mm 付近で、押抜きせん断破壊となった。切断面 A-A は図-3(2), 1), 切断面 B-B は図-3(2), 2)に示すように荷重載荷位置から 45 度で

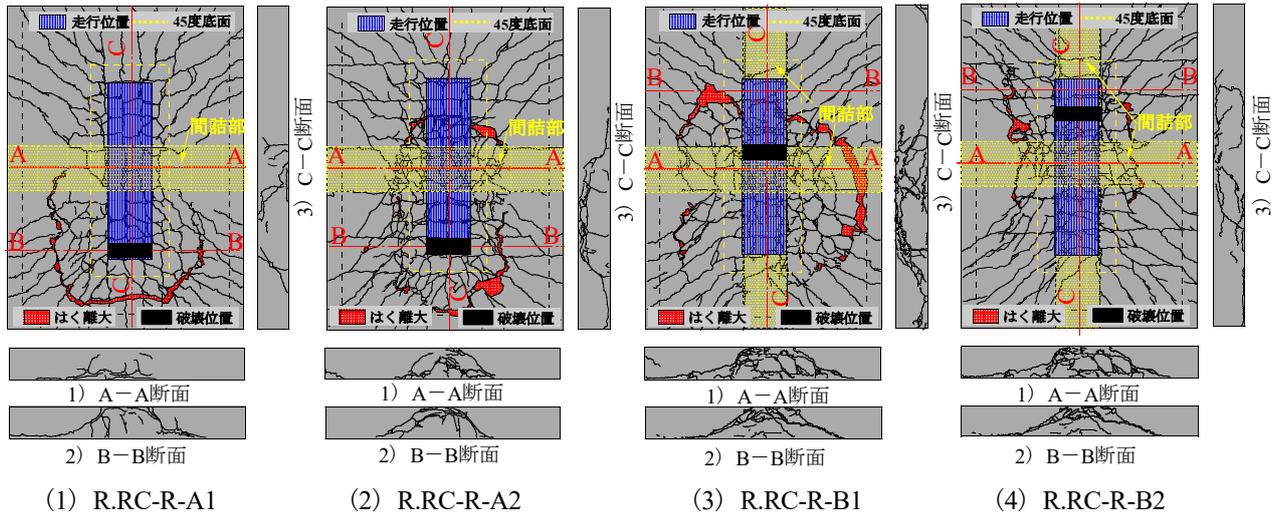


図-3 走行荷重実験による破壊状況

押抜きせん断破壊となる斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 C-C は図-3(2), (3)に示すように破壊位置から 45 度の斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となった。

次に、取替 RC 床版 B は軸方向に走行荷重実験を行ったものである。供試体 R.RC-R-B1 のひび割れ状況を図-3(3)に示す。輪荷重走行により床版下面には 2 方向のひび割れが発生している。破壊は床版中央から 150mm 付近、すなわち間詰部とプレキャスト床版との打継目付近で押抜きせん断破壊となっている。間詰部中央の切断面 A-A は図-3(3), (1)に示すように走行位置から斜めひび割れが発生している。また、図-3(3), (2)に示す切断面 B-B も同様に押抜きせん断破壊形状を示している。また、軸方向の間詰部中央の切断面 C-C は図-3(3), (3)に示すように軸直角方向の間詰部付近のひび割れの発生が著しい。

また、供試体 R.RC-R-B2 の破壊状況は図-3(4)に示すように下面は 2 方向ひび割れが発生するもの軸直角方向の間詰部は輪荷重の走行範囲に発生するもののプレキャスト床版と比較するとひび割れの発生が抑制されている。破壊はパネル B, D 側で床版中央から 300mm 付近で押抜きせん断破壊となっている。破壊位置から 45 度付近はダウエル効果によるはく離も発生している。間詰部の切断面 A-A は図-3(4), (1)に示すように押抜きせん断破壊形状を示している。また、切断面 B-B は図-3(4), (2)に示すよう破壊位置より 300mm の端部であるが、押抜きせん断破壊形状を示している。軸方向の切断面 C-C は図-3(4), (3)に示すように走行範囲にひび割れが発生している。

以上より、走行荷重実験による破壊状況は、供試体 R.RC-R-A1, R.RC-R-A2, R.RC-R-B2 は走行中にプレキャスト床版で押抜きせん断破壊となっている。一方、供試体 R.RC-R-B1 については、間詰部とプレキャスト床版の打継目上で押抜きせん断破壊となった。よっ

て、これらの破壊状況を基に押抜きせん断力学モデルとの整合性を検証する。

5. 輪荷重走行疲労実験による耐疲労性の評価

5.1 輪荷重走行疲労実験方法^{11), 12), 15)}

輪荷重走行疲労実験は、取替 RC 床版供試体上面に幅 300mm の輪荷重を軸方向に 1,200mm の範囲を繰返し走行させる実験である (図-2(1))。床版上面には幅 300mm, 厚さ 4.5mm の鋼板を設置する。また、輪荷重走行疲労実験における初期荷重は 100kN から 140kN までは 40,000 回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加する段階荷重載荷とする。荷重 140kN 以降は 40,000 回走行ごとに 10kN 増加し、破壊するまで連続走行させる。

5.2 走行疲労実験における等価走行回数

本実験における段階荷重載荷による輪荷重走行疲労実験では、耐疲労性の評価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。式(1)は、載荷荷重 P_i を基準荷重 P で除した値の S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 m 乗に実験走行回数 n_i を乗じることにより破壊までの等価走行回数が算定される。

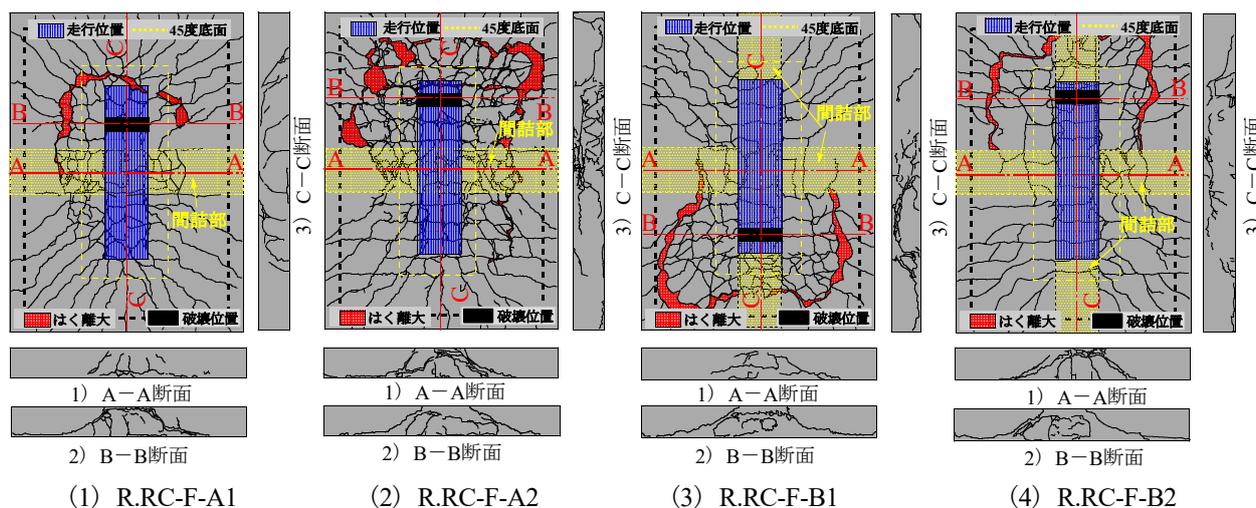
$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P} \right)^{m \times n_i} \quad (1)$$

ここに、 N_{eq} : 等価走行回数 (回), P_i : 載荷荷重 (kN), P : 基準荷重 (kN), n_i : 実験走行回数 (回), m : S-N 曲線の傾きの逆数 (=12.7)⁸⁾

松井らの提案する S-N 曲線式に用いた実験データは、短寿命側から長寿命側まで分布していることから、S-N 曲線の勾配の信頼性が高いと考えられる。これらの松井らが提案する S-N 曲線式は他の研究において

表－4 実験走行回数および等価走行回数

供試体	実験走行回数および等価走行回数					合計等価走行回数	平均等価走行回数
	荷重	100kN	120kN	140kN	150kN		
R.RC-F-A1	実験走行回数	40000	40000	40000	4501	124,501	271,134,365
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	50,297,372	265,273,230	
R.RC-F-A2	実験走行回数	40000	40000	40000	5550	125,550	
	等価走行回数	2,593,805	26,274,781	186,107,271	62,019,644	276,995,501	
R.RC-F-B1	実験走行回数	40000	40000	40000	5350	125,350	276,990,242
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	59,784,702	274,760,560	
R.RC-F-B2	実験走行回数	40000	40000	40000	5750	125,750	
	等価走行回数	2,593,805	26,274,781	186,103,275	64,248,064	279,219,925	



図－4 輪荷重走行疲労実験による破壊状況

もマイナー則の適用時に用いられるなど実績も多い。したがって、このS-N曲線式をRC床版の輪荷重走行疲労試験結果による基本S-N曲線とみなし、基本S-N曲線の傾きの逆数の絶対値 $m = 12.7$ を式(1)に適用する^{8), 11), 12), 16), 17), 18)} また、式(1)における基準荷重 P は、B活荷重100kNの3/5に安全率1.2を考慮すると72kNになる^{11), 12)}。なお、安全率は、輪荷重走行実験による荷重変動が $\pm 5\sim 10\%$ 程度生じることからこれらも考慮して1.2とした^{11), 12)}。

5.3 輪荷重走行実験の結果および考察

(1) 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における実験走行回数 n_i と式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} を表－4に示す。

供試体 R.RC-F-A1 は、図－2(2)に示すように、軸方向支間中央で軸直角方向に間詰部を設けた床版である。供試体 R.RC-F-A1 の等価走行回数 N_{eq} は 265.272×10^6 回である。供試体 R.RC-F-A2 の等価走行回数は 276.995×10^6 回であり、平均等価走行回数は 271.134×10^6 回である。

一方、床版中央で2方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-F-B1 の等価走行回数は 274.760×10^6 回、供試体 R.RC-F-B2 は 279.219×10^6 回である。等価走行回数の

平均は 276.990×10^6 回であり、直角方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-F-A の1.02倍の等価走行回数であり、僅かであるが2方向に間詰部を設けた供試体の等価走行回数が上回っている。これは中央部には主鉄筋および配力筋が重ね継手となり、鉄筋量も多いことから走行荷重実験による押抜きせん断耐力と同様に等価走行回数も向上したものと考えられる。

(2) 輪荷重走行疲労実験における破壊状況

輪荷重走行疲労実験における取替RC床版の損傷状況を図－4に示す。なお、図－4に示す青枠は走行範囲、黄色枠は間詰部である。また、赤色ははく離が著しい範囲である。

取替RC床版Aの供試体 R.RC-F-A1 の下面のひび割れ状況は図－4(1)に示すように、輪荷重走行位置付近に2方向のひび割れが発生している。また、輪荷重走行位置から45度底面にはダウエル効果の影響によるはく離が見られる。破壊は輪荷重が走行中にパネルB側で床版中央から300mmの位置で押抜きせん断破壊となった。また、切断面A-Aは図－4(1), 1)に示すように、斜めひび割れが発生している。この位置は鉄筋が重ね継ぎ手となり多くの鉄筋が配置されていることから、ひび割れの進展が抑制されている。破壊位置の切断面B-Bは図－4(1), 2)に示すように荷重

載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となる斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 C-C は図-4(1), 3) に示すように、輪荷重走行位置から 45 度に斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となるひび割れ形状を示している。

また、供試体 R.RC-F-A2 の下面のひび割れ状況は図-4(2) に示すように供試体 R.RC-F-A1 と比較して下面の損傷が著しい。これは走行回数の差によるものと考えられる。また、間詰部付近のひび割れ損傷はプレキャスト部と比較して鉄筋量が多いことからひび割れの進展が抑制されている。破壊は輪荷重走行中にパネル B 側で床版中央から 500mm の位置で押抜きせん断破壊となった。また、切断面 A-A は図-4(2), 1) および切断面 B-B は図-4(2), 2) に示すように荷重載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となる斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 C-C は図-4(2), 3) に示すように破壊したプレキャスト部側の損傷が著しい。輪荷重走行位置から 45 度に斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となるひび割れ形状を呈している。

次に、取替 RC 床版 B の供試体 R.RC-F-B1 の下面のひび割れ状況は図-4(3) に示すように破壊はパネル A, C 側で床版中央から 500mm の位置で押抜きせん断破壊となった。供試体 R.RC-F-A1 とほぼ反対側の同位置である。また、切断面 A-A は図-4(3), 1) に示すように走行位置から斜めひび割れが発生している。切断面 B-B も図-4(3), 2) に示すように押抜きせん断破壊形状を示している。また、切断面 C-C は図-4(3), 3) に示すように、破壊位置付近には斜めひび割れの発生とダウエルの影響によるはく離も見られる。軸方向の間詰部上を輪荷重が走行した場合においても、中央の間詰部の交差位置は主鉄筋端部に三角形の突起、配力筋には円形の突起が設けられ、それぞれが重ね継手構造となることから交差部はそれぞれがダブル配置となり、破壊しにくい構造である。

次に、供試体 R.RC-F-B2 の下面のひび割れ状況は図-4(4) に示すように供試体 R.RC-F-B1 と同様なひび割れ形状である。破壊はパネル B, D 側で輪荷重の折返し付近で押抜きせん断破壊となっている。下面にはダウエル効果の影響によりはく離が見られる。また、切断面 A-A の図-4(4), 1) および切断面 B-B の図-4(4), 2) に示すように荷重載荷位置から 45 度で斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 C-C は図-4(4), 3) に示すように破壊したプレキャスト部側の損傷が著しい。輪荷重走行位置から 45 度に斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となるひび割れ形状を呈している。

以上のように、輪荷重走行疲労実験における破壊位置は 4 体ともにプレキャスト部で押抜きせん断破壊となっている。よって、疲労寿命推定における押抜きせん断耐荷力の評価においては、破壊状況から RC 床版の押抜きせん断モデルおよび押抜きせん断耐荷力を算定して、耐疲労性を評価する。

ん断耐荷力の評価においては、破壊状況から RC 床版の押抜きせん断モデルおよび押抜きせん断耐荷力を算定して、耐疲労性を評価する。

6. 輪荷重走行疲労実験における RC 床版の S-N 曲線

6.1 松井らや土木研究所が提案する S-N 曲線式

(1) 松井らが提案する S-N 曲線・押抜きせん断耐荷力

RC 床版の S-N 曲線式として松井らは輪荷重走行疲労実験を行い、S-N 曲線式(2)を提案している。

また、松井ら^{8), 9)}は、輪荷重走行の繰り返しにより RC 床版が貫通ひび割れが発生し、はり状化することを踏まえ、はり状化した場合の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} の算定式(3)を提案し、輪荷重走行疲労実験における最大作用荷重 P をはり状化した押抜きせん断耐荷力 P_{sx} で除して無次元化した $S=P/P_{sx}$ を縦軸とした式(2)で表される S-N 曲線式を示している。

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

ここに、 P : 基準荷重, P_{sx} : 式(5)で与えられるはり幅 B の押抜きせん断耐荷力 (kN), N : 繰り返し回数 (回)

式(2)における S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値は $m=12.7$ である。RC 床版の耐疲労性の評価式として、松井らが提案する S-N 曲線式の縦軸 S には、いずれも実験荷重 P を松井らが提案した輪荷重の繰り返しによるはり状化後の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} で無次元化した無次元荷重 P/P_{sx} が用いられている。なお、松井らの提案式⁸⁾は、1964 年の道示以前の基準に従って設計された供試体が用いられており、配力鉄筋量が少なくはり状化が生じ易い床版である。よって、S-N 曲線式(2)に適用するはり幅 B を考慮した押抜きせん断耐荷力は式(3)として与えられる。なお、式(3)における中立軸 X_m の算定は許容応力度設計法における中立軸の算定式が用いられている。

$$P_{sx} = 2B(f_{cv0} \cdot X_m + f_i \cdot C_m) \quad (3)$$

ただし、

$$B = b + 2da$$

$$f_{cv0} = 0.252f_c - 0.00251f_c^2$$

$$f_i = 0.269f_c^{2/3}$$

ここに、 P_{sx} : はり幅 B を考慮した押抜きせん断耐荷力 (kN), b : 載荷板の配力筋方向の辺長 (mm), X_m : 主鉄筋の中立軸の位置 (mm), da : 引張側配力筋の有効高さ (mm), C_m : 引張主鉄筋のかぶり (mm), f_{cv0} : コンクリートのせん断強度 (N/mm²), f_i : コンクリートの引張強度 (N/mm²)¹⁹⁾, f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

(2) 土木研究所が提案するS-N曲線

土木研究所¹⁰⁾では、1973年、1996年改定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疲労実験を行い、S-N曲線式(4)を提案している。式(4)におけるS-N曲線の傾きの逆数の絶対値は $m=18.3$ である。土木研究所¹⁰⁾の提案するS-N曲線式におけるS値も P/P_{sx} で整理されており、押抜きせん断耐荷力 P_{sx} には松井らが提案する式(3)が適用されている。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.0545 \log N + \log 0.956 \quad (4)$$

ここに、 P ：基準荷重、 P_{sx} ：式(3)で与えられるはり幅 B の押抜きせん断耐荷力(kN)、 N ：繰り返し回数(回)

6.2 阿部らが提案するRC床版のS-N曲線

阿部らは1994年改定道示に準拠して設計したRC床版の1/2、3/5縮尺モデルとした供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を実施し、松井らが提案するRC床版のS-N曲線式の傾きの逆数の絶対値 $m=12.7$ を適用した等価走行回数と走行荷重が及ぼす押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ の関係からS-N曲線式(5)を提案^{11), 12)}している。式(5)におけるS-N曲線の傾きの逆数の絶対値は $m=15.5$ である。

$$\log(P/P_{s,max}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad (5)$$

ここに、 P ：基準荷重、 $P_{s,max}$ ：式(6)で与えられる押抜きせん断耐荷力(kN)、 N ：繰り返し回数(回)

式(5)に適用する破壊荷重付近の押抜きせん断力学モデルを図-5に示す。さらに押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ を式(6)として与えている。

$$P_{s,max} = f_{cv0} \{2(B+2a)a + 2(A \times a)\} + f_t \{4(2d_a + B)C_d\} \quad (6)$$

ただし、

$$f_{cv0} = 0.688 f_c^{0.610} \leq f_c = 80 \text{N/mm}^2$$

$$f_t = 0.269 f_c^{2/3}$$

ここに、 A, B ：輪荷重の軸直角方向、軸方向の辺長(=300×49mm)、 a ：主鉄筋方向 a_x 、配力鉄筋方向 a_y の等価応力ブロックの平均値(mm)($= (a_x + a_y)/2$)、 C_d ：ダウエル効果の影響を示す寸法効果(mm)、すなわち主鉄筋のかぶり C_x ($= c_x + D_x/2$, c_x ：主鉄筋かぶり、 D_x ：主鉄筋の直径)と配力筋方向のかぶり C_y ($= c_y + D_y/2$, c_y ：配力筋かぶり、 D_y ：配力筋の直径)の平均(mm)($= (C_x + C_y)/2$)、 d_a ：主鉄筋の有効高さ(d_x)と配力筋方向の有効高さ(d_y)の平均(mm)($= (H - C_d)$, H ：床版全厚(mm)、 f_{cv0} ：コンクリートのせん断強度(N/mm²)^{11), 12)}、 f_t ：コンクリートの引張強度(N/mm²)¹⁹⁾、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

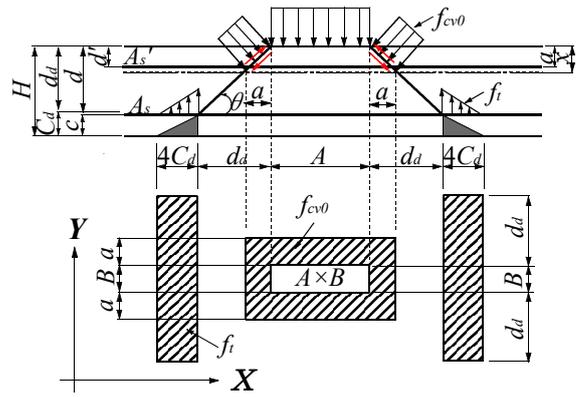


図-5 押抜きせん断力学モデル¹²⁾

RC床版の破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式(6)は、主鉄筋および配力筋方向の等価応力ブロックの平均値 a ($= (a_x + a_y)/2$)の範囲に、コンクリートのせん断強度 f_{cv0} による押抜きせん断耐荷力と主鉄筋および配力筋方向のかぶりの平均値 C_d ($= (C_x + C_y)/2$)の範囲にコンクリートの引張強度 f_t ¹⁹⁾による押抜きせん断耐荷力の合計である。そこで、主鉄筋、配力筋方向の等価応力ブロック a は式(7)として与えられる。なお、式(7)における等価応力ブロック a は一般式であり、引張鉄筋は降伏するものの圧縮鉄筋は降伏しない場合の条件式である²⁰⁾。本来、等価応力ブロック a の算出には、鉄筋の降伏強度 f_{jd} を適用するが、破壊荷重付近の等価応力ブロックを算定することから鉄筋の引張強度 f_y (表-2)を適用する。また、等価応力ブロック a は主鉄筋方向 a_x 、配力筋方向 a_y をそれぞれ求め、その平均値を a とする。本供試体はモデル化したことから主鉄筋および配力筋方向の有効幅 b は床版支間 L からせん断スパン比^{11), 12), 20)}を除いた曲げ領域の距離($= L - (2.5d \times 2)$, L ：床版支間、 d ：有効高)とする。よって、主鉄筋は軸方向支間からせん断スパン比を除くと1,000mm以上となるので $b = 1,000$ mm、配力筋方向は軸直角方向支間からせん断スパン比を除くと840mmとなる。

等価応力ブロック： a

$$a/d = \frac{m/2 [p - p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y)]}{\sqrt{\{p - p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y)\}^2 + p' \cdot 4\beta/m \cdot d'/d \cdot \epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y}} \quad (7)$$

ただし、

$$m = f_y/0.85f_c, \quad p = A_s/(b \cdot d), \quad p' = A'_s/(b \cdot d),$$

$$\beta = 0.8$$

ここで、 f_y ：鉄筋の引張強度(=539N/mm²(表-2))、 A_s ：主鉄筋および配力筋の引張側の鉄筋量(=1056mm²)、 A'_s ：主鉄筋および配力筋の圧縮側の鉄筋量(=528mm²)、 d ：有効高さ(主鉄筋：125mm、配力筋：112mm)、 d' ：圧縮鉄筋図心から表面までの距

離 (mm), b : 部材幅 (主鉄筋方向 1,000mm, 配力筋方向 840mm), E_s : 鉄筋のヤング係数, ϵ'_{cu} : コンクリートの終局ひずみ (=0.0035), f'_c : コンクリートの圧縮強度 (= 56.4N/mm² (表-2))

6.3 押抜きせん断耐力の算定およびS-N曲線式

(1) 押抜きせん断耐力: $P_{s,max}$

走行荷重実験および輪荷重走行疲労実験における破壊状況は, 間詰部を軸直角方向に設けた供試体 R.RC-R-A, R.RC-F-A および 2 方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-B, R.RC-F-B はともにプレキャスト床版部で押抜きせん断破壊となっている. また, 走行荷重実験における供試体 R.RC-R-B1 は間詰部とプレキャスト部との打継目上で押抜きせん断破壊となっている. 本実験供試体は 1994 年改定道示以降の荷重, すなわち B 活荷重を考慮した床版供試体である. また, 取替 RC 床版の寿命推定は破壊荷重付近で評価する. よって, 実験による最大耐力と押抜きせん断耐力の評価式には, 阿部ら¹²⁾ (以下, 文献 12) とする) が提案する力学モデル (図-5) および押抜きせん断耐力式(6)を用いることとする.

以上より, 実験最大耐力 P_{max} と押抜きせん断耐力 $P_{s,max}$ の関係を表-5 に示す.

供試体 R.RC-R-A の押抜きせん断耐力 $P_{s,max}$ (式(6)) は表-5 に示すように 247.9kN であり, 実験による最大耐力と比較すると供試体 R.RC-R-A1 および供試体 R.RC-R-A2 のそれぞれ 98%, 95%である.

次に, 供試体 R.RC-R-B 押抜きせん断耐力 $P_{s,max}$ は 247.9kN であり, 実験による最大耐力と比較すると軸直角方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-B1, R.RC-R-B2 とともに実験値の 93%であり, 破壊時の 90%以内の耐力が評価され, 文献 11), 12) に示す結果と近似している.

以上より, 実験最大耐力と式(6)から算定した押抜きせん断耐力はほぼ近似する結果が得られた. よって, S-N 曲線式の縦軸 S 値の評価が可能であると考ええる.

(2) S-N曲線

S-N 曲線式における縦軸 S と等価走行回数を表-6 に示す.

本実験供試体の基準荷重 P を走行荷重実験による供試体 R.RC-R-A の実験耐力の平均値 255.8kN で除した縦軸 $S (= P/P_{max})$ は 0.281 となる. 供試体 R.RC-R-B の最大耐力の平均は 265.9kN, S 値は 0.271 である. そこで, 実験耐力から得られた S 値と等価走行回数 N_{eq} の関係, すなわち S-N 曲線式との関係を図-6(1)に示す.

一方, 基準荷重 P と式(6)より算出した押抜きせん断耐力 $P_{s,max}$ より, S 値は 0.290 となる. そこで, 押抜きせん断耐力から得られた S 値と等価走行回

表-5 実験耐力および押抜きせん断耐力

供試体名称	最大耐力 P_{max} (kN)	押抜きせん断耐力 $P_{s,max}$ (kN)	耐力比
R.RC-R-A1	250.8	247.9	0.99
R.RC-R-A2	260.9		0.95
R.RC-R-B1	265.8		0.93
R.RC-R-B2	265.9		0.93

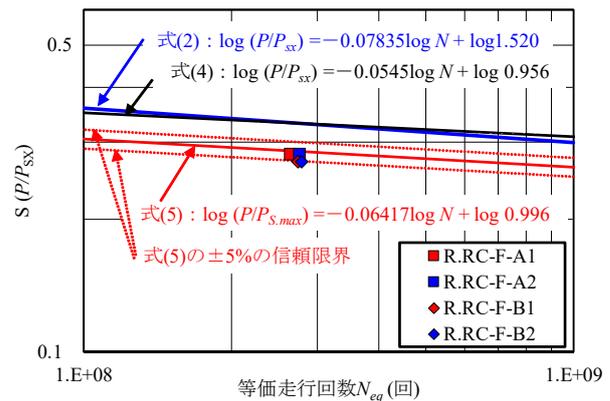
表-6 S 値と等価走行回数

(1) 実験耐力と等価走行回数

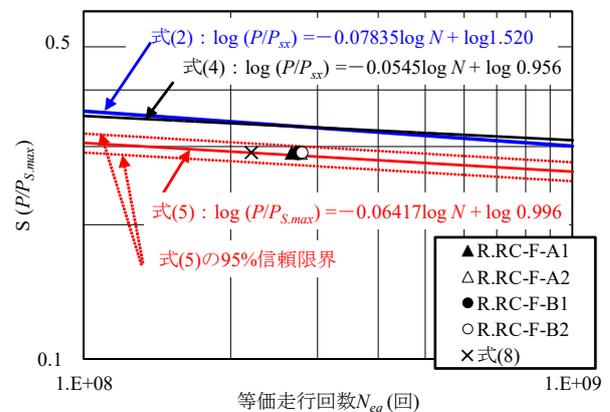
供試体	P (kN)	P_{max} (kN)	$S=P/P_{max}$	N_{eq} (回)
R.RC-F-A1	72	255.8	0.281	265,273,230
R.RC-F-A2				276,995,501
R.RC-F-B1		265.9	0.271	274,706,560
R.RC-F-B2				279,219,925

(2) 押抜きせん断耐力と等価走行回数

供試体	P (kN)	$P_{s,max}$ (kN)	$S=P/P_{s,max}$	N_{eq} (回)
R.RC-F-A1	72	247.9	0.290	265,273,230
R.RC-F-A2				276,995,501
R.RC-F-B1				274,706,560
R.RC-F-B2				279,219,925



(1) 実験耐力と等価走行回数



(2) 押抜きせん断耐力と等価走行回数

図-6 RC 床版の S-N 曲線式との整合性

数 N_{eq} の関係、すなわち S-N 曲線式との関係を図-6(2)に示す。なお、図-6には松井らや土木研究所による S-N 曲線式も併記した。

間詰部を軸直角方向に設けた供試体 R.RC-F-A の走行実験による最大耐荷力 P_{max} と輪荷重走行疲労実験による等価走行回数 N_{eq} の関係は図-6(1)に示すように阿部らが提案する S-N 曲線上付近にプロットされ、近似している。また、間詰部を2方向に設けた供試体 R.RC-F-B の供試体は S-N 曲線式の下方にプロットされているものの信頼限界 95%の範囲にプロットされ、ほぼ整合性が得られていると考えられる。

次に、モデル化した供試体の基準荷重 P と破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ から得られた S 値と輪荷重走行疲労実験から得られた等価走行回数 N_{eq} の関係は図-6(2)に示すように、阿部らが提案する S-N 曲線式の僅かであるが上方にプロットされている。これは式(6)より得られた押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ は破壊荷重の 93%~99%であるために上方にプロットされた結果である。いずれにおいても信頼限界 $\pm 5\%$ 内²¹⁾にプロットされている。よって、マイナー則を適用し、得られる等価走行回数は適切であり、提案した押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ についても破壊荷重付近であることから、S-N 曲線式は、破壊荷重付近の寿命推定が可能であると考えられる。また、プロットされた S と N の関係は文献 21)に示す S-N 曲線の $\pm 5\%$ の信頼限界内にプロットされた。よって、本実験より得られた等価走行回数と押抜きせん断耐荷力との整合性が得られたと評価できる。また、取替 RC 床版のプレキャスト部の寿命推定は RC 床版の S-N 曲線式の適用が可能であると考えられる。

(3) 破壊走行回数とS-N曲線との整合性の検証

破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ と基準荷重 P の関係から破壊走行回数を算定する。破壊走行回数は S-N 曲線式(5)の関係から式(8)として与えられる。

$$N_f = 10^m (\log C - \log S) \quad (8)$$

ここで、 N_f : 破壊までの走行回数、 C : S-N 曲線の切片 (= 0.996)、 m : 式(5)に示す S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数 (= 15.58)、 S : 基準荷重 ($P/P_{s,max}$)

モデル化した取替 RC 床版の基準荷重 $P = 72\text{kN}$ を押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max} = 247.9\text{kN}$ で除した S 値は 0.290 となる。これらを式(8)に適用した破壊走行回数 N_f は 219.661×10^6 回である。ここで、基準荷重を押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ で除し、無次元化した S 値を式(8)に適用して得られた破壊走行回数の関係を図-6(2)に併記した。

実験による等価走行回数 N_{eq} を比較すると取替 RC

床版 A (R.RC-F-A) が 81%、取替 RC 床版 B (R.RC-F-B) が 79%となり、破壊走行回数が安全側に算定される結果となり、整合性が得られたと評価できる。

7. まとめ

- (1) 輪荷重走行実験による軸直角方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-A の最大耐荷力の平均は 255.8kN、軸直角方向および軸方向の2方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-B の最大耐荷力の平均は 265.9kN であり、2方向に間詰部を設けた供試体は、軸方向継手部の鉄筋量がプレキャスト床版と比較して、僅かに上回るとともに間詰部コンクリートの圧縮強度において高いことから耐荷力が向上したものと考えられる。
- (2) 走行荷重実験による最大耐荷力 P_{max} と文献 12)に示す押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ とを比較すると文献 12)より得られた耐荷力は間詰部を軸直角方向に設けた供試体 R.RC-F-A は平均で 96%、2方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-F-B が 93%となり、破壊荷重の 90%以内となり、ほぼ近似した耐荷力が得られた。
- (3) 輪荷重走行疲労実験における耐疲労性の評価においては、軸直角方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-F-A の等価走行回数の平均は 271.134×10^6 回、2方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-F-B の等価走行回数は 276.990×10^6 回であり、疲労実験における等価走行回数についても2方向に間詰部を設けた供試体の等価走行回数が僅かに上回っている。
- (4) RC 床版の S-N 曲線式との整合性の検証については基準荷重 P を押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ で除した S 値と等価走行回数の関係においては、文献 21)が提案する RC 床版の S-N 曲線式上の信頼限界値の $\pm 5\%$ 内にプロットされることから、RC 床版の寿命推定式である S-N 曲線式との整合性が得られた。また、基準荷重 P を押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ で除し、無次元化した S 値と S-N 曲線式から得られる破壊走行回数 N_f に対して、間詰部を軸直角方向に設けた供試体 R.RC-F-A の実験等価走行回数は平均で 0.81、2方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-F-B が 0.79 となり、安全側に評価される結果となる。
- (5) 取替 RC 床版の寿命推定は阿部らが提案する破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式および S-N 曲線式を適用することで寿命推定が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 岩手県宮古地方振興局土木部：法師渡大橋ほか橋梁補修詳細設計業務委託報告書，2008。

- 2) 中村定明, 三浦尚: RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No.774/V-65, pp.17-26, 2004.
- 3) 角本周, 山本敏彦, 城戸靖彦, 三浦康博: 九州自動車道・向佐野橋における PC 床版取替工事, 第七回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.43-48, 2012.
- 4) 大柳修一, 大林敦裕: 既設床版の半断面床版取替工法の開発(輪荷重疲労載荷試験), ピーエス三菱技報, 第 13 号, 2015.
- 5) 高橋明彦, 阿部忠, 小野晃良, 大西弘志, 久田真: 間詰部を設けた取替床版の耐疲労性の評価に関する実験研究, 構造工学論文集, Vol.65A, 655-664, 2019.
- 6) 日本道路橋会: 道路橋示方書・同解説 I, 1994.
- 7) 日本道路協会: 鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説, 1964.
- 8) 松井繁之: 道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 9) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, No.348, V-1, pp.133-141, 1984.
- 10) 中谷晶一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 宮崎和彦, 川間重一, 松尾伸二, 道路橋床版の疲労耐久性に関する実験, 国総研資料, 第 28 号, 2002.
- 11) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 川井豊: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価, 土木学会論文集 A1, pp.39-54, 2011.
- 12) 阿部忠, 川井豊: 輪荷重走行疲労実験における RC 床版の押抜きせん断耐荷力および S-N 曲線式との整合性の評価, コンクリート工学論文集, 第 30 卷, pp1-10, 2019.
- 13) 阿部忠, 木田哲量, 徐銘謙, 澤野利章: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.199-207, 2007.
- 14) 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 床版の押抜きせん断耐力, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.919-926, 2004.
- 15) 阿部忠, 木田哲量, 水口和彦, 川井豊: 輪荷重走行疲労実験における車輪寸法が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響および評価法, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1305-1315, 2011.
- 16) 前田幸雄, 松井繁之, 田中敏幸: 鉄筋コンクリート床版に関する 2, 3 の考察, 昭和 46 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 1971.
- 17) 土木学会: コンクリート標準示方書(構造性能照査編), 土木学会, 2002.
- 18) 川井豊, 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子: 道路橋 RC 床版の S-N 曲線に関する一考察, 第七回路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.263-268, 2012.
- 19) 岡村甫: コンクリート構造の限界状態設計法, コンクリートセミナー 4, 共立出版, pp. 17-18, 1979.
- 20) 岡田清, 不破昭, 伊藤和幸, 平沢征夫: 鉄筋コンクリート工学, 鹿島出版, 1997.
- 21) 川井豊, 中村聖三, 阿部忠: 信頼度を考慮した道路橋 RC 床版の疲労耐久設計について, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1160-1167, 2016.

(2019 年 9 月 20 日受付)

(2020 年 2 月 1 日受理)