

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

阿部忠 (日大生産工・教授), 木田哲量 (日大生産工・教授), 澤野利章 (日大生産工・教授)
水口和彦 (日大生産工・助教), 高野真希子 (日大生産工・P.D.)

1. はじめに

道路橋RC床版の耐疲労性を評価するために、各研究機関では輪荷重走行試験装置を開発してRC床版の疲労実験を行い、耐疲労性に関する評価式が提案されてきた。

そこで本研究では、1980年および1994年改訂の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）¹⁾に準拠して設計したRC床版をモデル化した供試体を製作した。これらの、供試体はコンクリートの圧縮強度、床版厚、有効高、鉄筋比が異なるRC床版とし、車輪幅250mmで実験する供試体を実橋RC床版の1/2モデル、車輪幅300mmで実験する供試体を3/5モデルとする。そして、供試体に対する輪荷重走行疲労実験を行い、基準荷重(P)と押抜きせん断耐荷力(P_s)および走行回数(N)の関係からS-N曲線式を提案し、今後、疲労劣化が予想される80-94床版の耐疲労性の評価法の一助とする。

2. 供試体の使用材料・寸法

(1)使用材料 鋼道路橋RC床版に使用するコンクリートの設計基準強度は、1973年改訂以前の道示では21N/mm²以上であるが、1980年改訂の道示では24N/mm²以上と改定された。本研究では、コンクリート圧縮強度の影響も評価することから21N/mm²～35N/mm²の範囲となるように配合した。したがって、本供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと5mm以下の砕砂および5mm～20mmの砕石を使用した。

供試体A、Bの鉄筋にはSD295A、D10を配置し、供試体CにはSD295A、D13を配置した。輪荷重走行疲労実験に用いた供試体の材料の力学特性値を表-1に示す。

(2)供試体寸法および鉄筋の配置 供試体寸法および鉄筋の配置を図-1に示し、諸元を表-1に併記した。供試体Aの寸法は、全長1470mm、支間1200mm、

床版厚110mmである。また、供試体Bの寸法は、全長1470mm、支間1200mm、床版厚130mmである。次に、供試体Cは全長1600mm、支間1400mm、床版厚150mmである。

3. 耐疲労性評価に関する実験

(1)実験方法 RC床版の耐疲労性を評価する実験は、輪荷重走行疲労実験を行うこととする。走行疲労実験は、RC床版の中央から両支点方向に450mm(走行範囲：900mm)の範囲に輪荷重を繰り返し走行させる実験である。

本実験装置の車輪幅250mmおよび車輪幅300mmは、道示Iに規定するT荷重の接地幅500mmの1/2および3/5であることから、本供試体の寸法も実床版の1/2および3/5モデルとした。よって、設計活荷重は車輪幅250mmの場合は50kNであり、これに安全率1.2を考慮した60kNを基準荷重とする。また、車輪幅300mmの場合は60kNであり、これに安全率1.2を考慮した72kNを基準荷重とする。

輪荷重走行疲労実験における初期走行荷重は、車輪幅250mmの供試体Aおよび供試体B-21, 27, 32は60kN、圧縮強度が35N/mm²の供試体B-35は80kN、供試体Cは100kNとした。

車輪幅250mmの場合の荷重載荷方法は、RC床版中央に輪荷重を停止させ、静的荷重を初期走行荷重まで10kNごとに増加させ、初期走行荷重までのたわみを計測する。その後、2万回走行ごとに荷重を20kNずつ増加させる。次に、車輪幅300mmの場合の供試体Cは、初期荷重100kNから走行を開始し、2万回走行ごとに荷重を20kNずつ増加させる。たわみの計測は、各供試体ともに輪荷重走行1, 10, 100, 1000, 5000回および5000回以降は5000回走行ごとに行うものとする。

(2)走行疲労実験における等価走行回数 本実験における輪荷重走行疲労実験は、2万回走行ごとに荷

表-1 供試体の材料特性値および寸法

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD295A)				設計支間 (mm)	床版厚 (mm)	有効高		1m ² 当たりの鉄筋量	
		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)			主鉄筋 (mm)	配力筋 (mm)	主鉄筋A _s (mm ²)	配力筋A' _s (mm ²)
A-RC-35-1, 2	35.0	D10	365	510	200	1200	110	90	80	713	592
B-RC-21-1, 2	21.0	D10	370	511	200	1200	130	105	95	713	713
B-RC-27-1	27.0	D10	368	516	200	1200	130	105	95	713	713
B-RC-32-1, 2, 3	32.0	D10	370	511	200	1200	130	105	95	713	713
B-RC-35-1, 2	35.0	D10	368	516	200	1200	130	105	95	713	713
C-RC-26-1	26.0	D13	368	515	200	1400	150	125	112	1058	1058
C-RC-30-1	30.0	D13	368	515	200	1400	150	125	112	1058	1058
C-RC-34-1	34.0	D13	368	515	200	1400	150	125	112	1058	1058

重を増加する段階荷重としたことから、等価走行回数を算出して耐疲労性を評価する。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。式(1)における基準荷重Pは、供試体A, Bは60kN, 供試体Cは72kNとする。また、S-N曲線の傾きの逆数mは等価走行回数に大きく影響するものであり、松井らは $m=12.7$ 、土木研究では $m=18.3$ 、東京都は $m=6.0$ を得ている^{2), 3)}。これらの平均値は $m=12.3$ となり、松井らの提案式に近い値となる。本研究では、RC床版を対象とした輪荷重走行疲労実験によって評価され、データ数が最も多い回帰式から得られた松井式の $m=12.7$ を採用した。

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

ここで、 N_{ep} ：等価走行回数(回)、 P_i ：載荷荷重(kN)、 P ：基準荷重(供試体A, B：60kN, 供試体C：72kN)、 n_i ：実験走行回数(回)、 m ：S-N曲線の傾きの逆数(=12.7)。

4. 結果および考察

(1)等価走行回数 式(1)より算出した輪荷重走行疲労実験における各供試体の等価走行回数 N_{ep} を表-2に示す。

1)供試体A 供試体A-RC-35-1, 2は、それぞれ荷重60kNで2万回、その後、荷重80kNで供試体A-RC-35-1は1,950回、供試体A-RC-35-2は1,800回走行後、破壊に至った。等価走行回数 N_{ep} は、それぞれ95,293回、89,502回である。破壊モードは両供試体ともに輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

2)供試体B 供試体Bにおけるコンクリート圧縮強度が21N/mm²の供試体B-RC-21-1, 2は、荷重60kNで2万回走行後、供試体B-RC-21-1は荷重80kNで17,545回、供試体B-RC-21-2は2万回、荷重100kNで1,379回走行後に破壊した。平均等価走行回数は1,197,774回である。また、圧縮強度27N/mm²の供試体B-RC-27-1は、荷重60kN, 80kNで各2万回走行後、荷重100kN

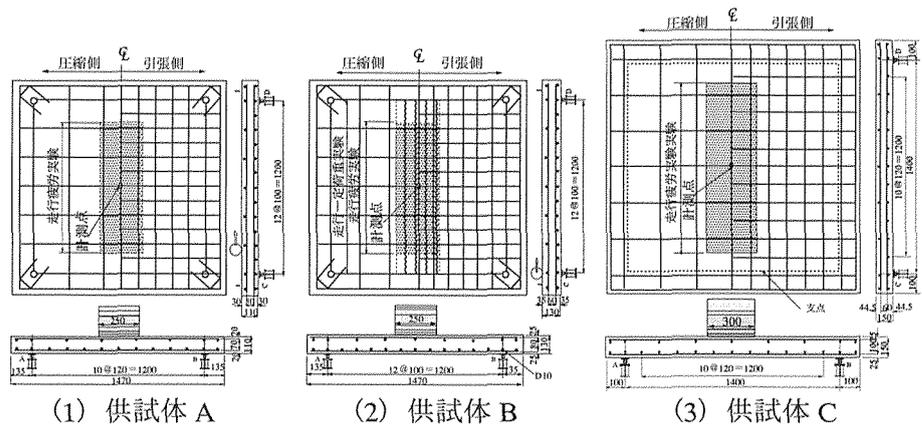


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

表-2 実験走行回数および等価走行回数

供試体	荷重				等価走行回数 合計	平均等価走行回数 (回)
	60 kN	80 kN	100 kN	120kN		
A-RC35-1	実験走行回数	20,000	1,950			92,397
	等価走行回数	20,000	75,293		95,293	
A-RC35-2	実験走行回数	20,000	1,800			89,502
	等価走行回数	20,000	69,502		89,502	
B-RC21-1	実験走行回数	20,000	17,545			1,197,774
	等価走行回数	20,000	677,447		697,447	
B-RC21-2	実験走行回数	20,000	20,000	1,379		1,698,101
	等価走行回数	20,000	772,278	905,823	1,698,101	
B-RC27-1	実験走行回数	20,000	20,000	2,533		2,456,129
	等価走行回数	20,000	772,278	1,663,851	2,456,129	
B-RC32-1	実験走行回数	20,000	20,000	7,000		6,495,876
	等価走行回数	20,000	772,278	4,598,087	5,390,365	
B-RC32-2	実験走行回数	20,000	20,000	9,399		7,938,686
	等価走行回数	20,000	772,278	6,173,260	6,965,538	
B-RC32-3	実験走行回数	20,000	20,000	9,651		7,938,686
	等価走行回数	20,000	772,278	6,339,448	7,131,726	
B-RC35-1	実験走行回数		20,000	10,009		7,938,686
	等価走行回数		772,239	6,575,264	7,347,503	
B-RC35-2	実験走行回数		20,000	11,810		7,938,686
	等価走行回数		772,239	7,757,629	8,529,869	
C-RC26-1	実験走行回数			6,991		5,889,077
	等価走行回数			1,296,902	4,592,175	
C-RC30-1	実験走行回数			10,691		8,319,495
	等価走行回数			1,296,902	7,022,592	
C-RC34-1	実験走行回数			19,935		14,391,597
	等価走行回数			1,296,902	13,094,694	

で2,533回走行後に破壊した。その等価走行回数は2,456,129回である。次に、圧縮強度が32N/mm²の供試体B-RC32-1, 2, 3は荷重60kN, 80kNで各2万回走行後、荷重100kNで供試体B-RC-32-1は、7,000回、供試体B-RC-32-2, 3は、それぞれ9,399回、9,651回走行後に破壊した。平均等価走行回数は6,495,876回である。圧縮強度が35N/mm²の供試体B-RC35-1, 2は荷重80kNで2万回走行後、荷重100kNで、それぞれ10,009回、11,810回走行して破壊した。平均等価走行回数は7,938,686回である。なお、供試体Bの破壊モードは、全ての供試体で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

以上より、供試体Bは同一寸法および鉄筋配置としていることから耐疲労性においてはコンクリート圧縮強度の影響が顕著となった。

また、床版厚110mmの供試体A-RC35の平均等価走行回と比較すると、床版厚130mmの供試体B-RC32

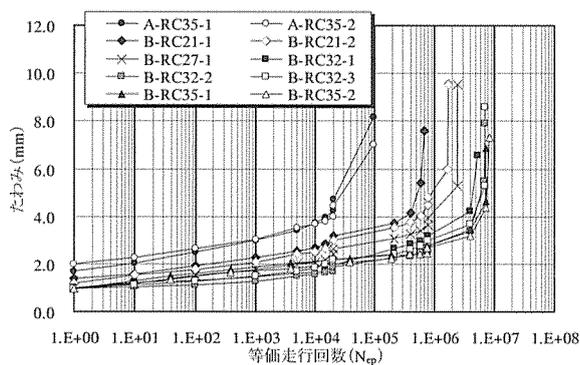
の平均等価走行回数は68.8倍となり、当然のことながら、RC床版の厚さが耐疲労性に大きな影響を及ぼすことが実証された。

3) 供試体C 供試体Cにおけるコンクリートの圧縮強度が 26N/mm^2 の供試体C-RC-26-1は、荷重 100kN で2万回、荷重 120kN で6,991回走行後に破壊した。その等価走行回数は5,889,077回である。また、圧縮強度が 30N/mm^2 の供試体C-RC-30-1は、荷重 100kN で2万回走行後、荷重 120kN で10,691回走行して破壊した。等価走行回数は8,319,495回である。圧縮強度が 34N/mm^2 の供試体C-RC-34-1は、荷重 100kN で2万回走行後、荷重 120kN で19,935回走行して破壊した。等価走行回数は14,391,597回である。なお、供試体Cの破壊モードは、全ての供試体で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

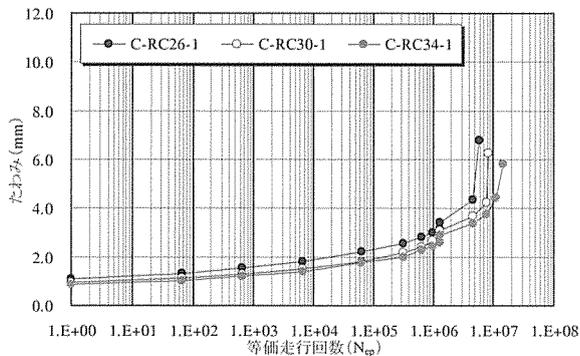
(2) たわみと等価走行回数の関係 輪荷重走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数の関係を供試体A, Bの場合を図-5(1), 供試体Cの場合を図-5(2)に示す。

1) 供試体A 供試体A-RC35-1, 2は、等価走行回数の増加にともないたわみが上昇した。等価走行回数が2万回付近のたわみは、それぞれ 4.0mm , 3.9mm であり、その後、荷重を 80kN に増加して走行後にたわみの増加が著しくなった。最大たわみは、それぞれ 8.2mm , 7.0mm である。

2) 供試体B 供試体B-RC21-1, 2は、ともに等価走



(1) 供試体A, B



(2) 供試体C

図-5 たわみと等価走行回数の関係

行回数の増加にともないたわみが上昇した。等価走行回数が2万回付近のたわみは、それぞれ 3.0mm , 3.2mm である。その後、供試体B-RC21-1は等価走行回数40,600回、供試体B-RC21-2は792,000回付近からたわみの増加が著しく、最大たわみは、それぞれ 7.6mm , 9.5mm である。供試体B-RC27-1の等価走行回数2万回付近のたわみは 2.6mm である。荷重 80kN では急激なたわみの増加が見られないが、荷重が 100kN 載荷後にたわみは急激に増加し、最大たわみは 9.6mm である。次に、コンクリートの圧縮強度 32N/mm^2 の供試体B-RC32-1, 2, 3の2万回走行時のたわみは、それぞれ 1.7mm , 2.0mm , 2.1mm であり、コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体の65%程度である。さらに、荷重増加後の等価走行回数792,000回でのたわみは、それぞれ 2.7mm , 3.0mm , 2.9mm であり、荷重を 100kN に増加後からたわみの増加が著しくなっている。最大たわみは、それぞれ 6.6mm , 7.9mm , 8.6mm である。圧縮強度 35N/mm^2 の供試体B-RC35-1, 2の2万回走行時のたわみは、それぞれ 2.44mm , 2.40mm である。荷重を 100kN に増加後においても急激なたわみの増加は見られず、最大たわみは、それぞれ 6.9mm , 7.3mm である。

3) 供試体C コンクリートの圧縮強度が 26N/mm^2 の供試体C-RC26-1の走行回数2万回走行時の等価走行回数は1,296,903回であり、たわみは 3.16mm である。荷重を 120kN に増加後にたわみの増加が著しくなり、等価走行回数5,889,078回での最大たわみは 6.8mm である。また、コンクリートの圧縮強度 30N/mm^2 の供試体C-RC30-1は、荷重 100kN で2万回走行時の等価走行回数1,296,903回のたわみは 2.87mm であり、この時点のたわみは圧縮強度が 26N/mm^2 の供試体の90%程度である。その後、荷重を 120kN に増加して5千回走行時、等価走行回数4,581,908回付近からたわみの増加が著しくなり、破壊時のたわみは 6.3mm である。次に、圧縮強度が 34N/mm^2 の供試体C-RC34-1は、2万回走行時の等価走行回数1,296,903回でのたわみは 2.6mm であり、圧縮強度が 26N/mm^2 の供試体の82%程度である。その後、荷重を 120kN に増加後の走行からたわみの増加が著しくなり、破壊時のたわみは 5.8mm である。

したがって、コンクリートの圧縮強度はたわみの増加に大きな影響を与える結果となった。

5. 輪荷重走行疲労実験におけるRC床版のS-N曲線

(1) 走行荷重が作用するRC床版の押抜きせん断耐力

1) 64-73床版の押抜きせん断耐力^{4), 5)} 道路橋RC床版の輪荷重走行疲労試験による押抜きせん断耐力の評価式には、松井らの提案式が一般的に用いられている。松井式は、1964年（以下、64床版とする）および1973年（以下、73床版とする）改定の道示に準拠したRC床版供試体を用いた大阪大学のクラ

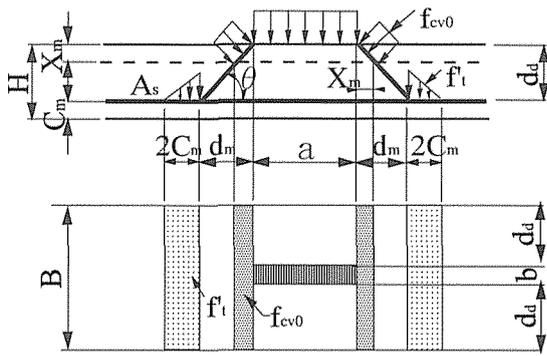


図-6 押抜きせん断力学モデル (64-73床版)^{2), 3)}

ンク式鉄輪の走行実験結果に基づく実験式である。これは、輪荷重の走行によって発生する貫通ひび割れによって形成されるはり状化された幅、すなわちはり幅Bのせん断耐荷力を算定する式である。はり幅Bは載荷ブロック走行方向の幅bが引張側配力筋の有効高さ d_d まで45度で分布するとしたものであり、はり幅を考慮した押抜きせん断力学モデル図-6を提案し、押抜きせん断耐荷力を式(2)として与えている。

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

$$B = b + 2d_d$$

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

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

ここで、 P_{sx} ：はり幅を考慮した押抜きせん断耐荷力(kN)、 B ：はり幅(mm)、 a ：輪荷重の軸直角方向の辺長(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_{cv0} ：コンクリートのせん断強度(N/mm^2)⁹⁾、 f_t ：コンクリートの引張強度(N/mm^2)⁷⁾、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

2) 80-94床版の押抜きせん断耐荷力⁸⁾ 走行荷重実験における破壊荷重付近の破壊状況は、RC床版供試体下面の主鉄筋および配力筋方向にひび割れが発生し、中立軸付近まで至っている。すなわち、RC床版ははり状化することにより等方性が失われる。また、破壊荷重付近では、中立軸の位置が圧縮鉄筋付近に上昇するとともに、限界状態設計法の場合は、等価応力ブロックの範囲が圧縮域になると仮定される。そこで、本力学モデルおよび耐荷力式は、破壊荷重付近の等価応力ブロックを考慮することにする⁹⁾。

走行荷重実験における破壊状況によると、はく離幅がかぶりの4倍以上となっているので、ダウエル効果が及ぼす下面の応力分布幅は破壊荷重付近であるとし、主鉄筋のかぶり(C_x)と配力筋方向のかぶり(C_y)の平均値(C_x)として与え、その4倍の範囲に応力が三角分布するとして作用させる。すなわち、破壊荷重付近の最大押抜きせん断耐荷力(P_{sx})に関する

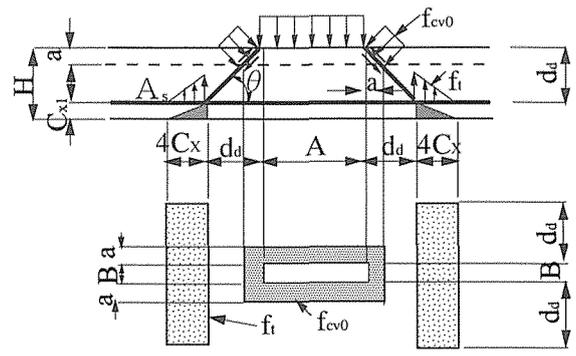


図-7 押抜きせん断力学モデル (80-94床版)⁸⁾

力学モデル図-7を提案し、破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力を式(3)として与える。

$$P_{sx} = f_{cv0} \{ 2(B + 2a)a + 2(Ax_a) \} + f_t \{ 4(2d_d + B)C_x \} \quad (3)$$

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

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

$$C_x = (C_x + C_y) / 2$$

ここで、 A 、 B ：輪荷重の軸直角方向、軸方向の辺長(mm)、 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_x ：ダウエル効果の影響を示す寸法効果(mm)、 d_d ：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)、($d_d = (H - C_x)$)、 H ：床版全厚(mm)、 f_{cv0} ：コンクリートのせん断強度(N/mm^2)⁹⁾、 f_t ：コンクリートの引張強度(N/mm^2)⁷⁾、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

(2) 土木学会共通試験および本実験における押抜きせん断耐荷力、走行回数

土木学会鋼構造委員会³⁾では、1964年改定の道路橋示方書に準拠した64床版供試体を製作し、1994年改訂道示の活荷重100kNに対応するS-N曲線の統一化を目的として、輪荷重走行試験機を所有する(独)土木研究所、大阪大学、(株)IHI、(株)横河ブリッジ、東京都土木研究所らが連携して統一的な共通試験を実施している。共通試験における押抜きせん断耐荷力式には、松井らが提案するはり幅Bを考慮した理論押抜きせん断耐荷力 P_{sx} (式(2))を適用している。また、筆者らは80-94床版に対する輪荷重走行実験(A-RC, B-RC, C-RC)を実施した。床版諸元および筆者らが提案する破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} (式(3))および等価走行回数を表-3に示す。

1) 64-73床版のS-N曲線(松井式)^{2), 3)} RC床版の耐疲労性の評価方法には、S-N曲線が用いられている。RC床版は輪荷重の走行により貫通ひび割れが発生し、はり状化する。そこで、松井らのはり状化した場合の押抜きせん断耐荷力(P_{sx})評価式(式(2))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て縦軸Sとし、横軸を走行回数NとしたS-N

表-3 本実験供試体の諸元およびS, N_{ep}値

供試体	輪荷重 接地面 (cm×cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	1m当たりの鉄筋量		床版厚 (mm)	引張鉄筋位置		圧縮鉄筋位置		X _m or a _x (mm)	P (kN)	P _{sx} (kN)	S=P/P _{sx}	走行回数, 等価走行 回数(N _{ep})
			主鉄筋 (cm ²)	配力筋 (mm ²)		主鉄筋 d _m (mm)	配力筋 d _d (mm)	主鉄筋 d _{m'} (mm)	配力筋 d _{d'} (mm)					
A-RC35-1	25×5	35.0	A _s =7.13	A _s '=5.92	110.0	90.0	80.0	20.0	30.0	1.76	60.0	127.5	0.471	95,293
A-RC35-2	25×5	35.0	A _s '=3.57	A _s '=2.96	110.0	90.0	80.0	20.0	30.0	1.76	60.0	127.5	0.471	89,502
B-RC21-1	25×5	21.0	A _s =7.13 A _s '=3.57	A _s '=7.13 A _s '=3.57	130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.74	60.0	143.5	0.418	697,447
B-RC21-2	25×5	21.0			130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.74	60.0	143.5	0.418	1,698,101
B-RC27-1	25×5	27.0			130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.38	60.0	153.0	0.392	2,456,129
B-RC32-1	25×5	32.0			130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.14	60.0	161.0	0.373	5,390,365
B-RC32-2	25×5	32.0			130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.14	60.0	161.0	0.373	6,965,538
B-RC32-3	25×5	32.0			130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.14	60.0	161.0	0.373	7,131,726
B-RC35-1	25×5	35.0	A _s =20.59 A _s '=5.29	A _s '=20.59 A _s '=5.29	130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.04	60.0	165.7	0.362	7,347,503
B-RC35-2	25×5	35.0			130.0	105.0	95.0	25.0	35.0	2.04	60.0	165.7	0.362	8,529,869
C-RC26-1	30×6	26.0	A _s =20.59 A _s '=5.29	A _s '=20.59 A _s '=5.29	150.0	125.0	112.0	25.0	38.0	2.77	72.0	196.0	0.367	5,889,077
C-RC30-1	30×6	30.0			150.0	125.0	112.0	25.0	38.0	2.54	72.0	203.0	0.355	8,319,495
C-RC34-1	30×6	34.0			150.0	125.0	112.0	25.0	38.0	2.36	72.0	209.0	0.344	14,391,598

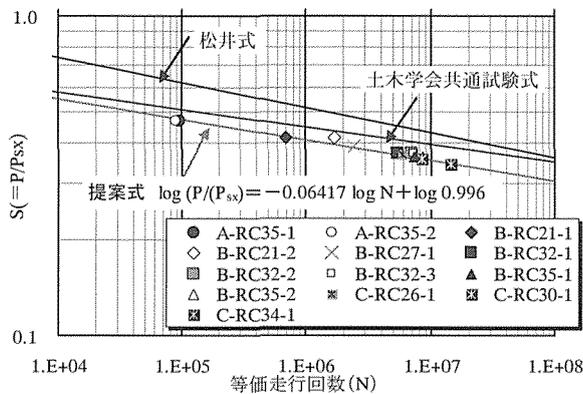


図-8 S-N曲線 (松井式, 土木学会式, 提案式)

曲線式を式(4)として提案している。松井らが提案するS-N曲線を図-8に示す。

$$\text{松井式: } \log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (4)$$

ただし, $P_{sx} = 2B(f_{cv0} \cdot X_m + f_i \cdot C_m)$

$$B = b + 2d_d$$

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

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

ここで, P: 基準荷重(kN), P_{sx}: はり幅Bの押抜きせん断耐荷力(kN), N: 繰返し回数(回)

2) 64床版のS-N曲線(土木学会共通試験)²⁾ 表-3に示した土木学会による共通試験結果によるS値と走行回数N値の関係から, S-N曲線は式(5)として与えられる。土木学会共通試験によるS-N曲線を図-8に併記した。なお, 押抜きせん断耐荷力P_{sx}には, 松井式(式(2))が適用されている。

土木学会共通試験式:

$$\log(P/P_{sx}) = -0.04263 \log N + \log 0.790 \quad (5)$$

3) 80-94床版のS-N曲線(提案式) 1973年改定の道示では, RC床版の設計におけるコンクリートの圧縮強度は21N/mm²~30N/mm²であり, 活荷重は80kNである。一方, 1994年改定の道示では, 活荷重は100kNとなった。そこで, 大型車両の1日1方向あたりの計画交通量500台未満および2,000台以上を想定した厚さを有し, かつコンクリートの圧縮強度(21N/mm²~35N/mm²)が異なる床版, すなわち供試体A, BのS-N

曲線は式(6)として与えられる。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad (6)$$

ただし,

$$P_{sx} = f_{cv0} \{2(B+2a)a + 2(Ax_a)\} + f_i \{4(2d_d+B)C_x\}$$

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

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

$$C_x = (C_x' + C_y')/2$$

ここで, P: 基準荷重(kN), P_{sx}: 押抜きせん断耐荷力(kN), N: 繰返し回数(回)

本研究による提案S-N曲線式(式(6))は, 松井式(式(4))および土木学会共通試験式(式(5))の下限界近くになった。これは, 松井式(式(4))に適用されている押抜きせん断耐荷力式P_{sx}(式(2))は, 1964年改定の道示に準拠したRC床版を対象としたものであり, 本提案における押抜きせん断耐荷力式P_{sx}(式(3))は, 1980年改定の道示に準拠して製作した供試体を対象としたためであると考えられる。すなわち, 本提案のS-N曲線式(式(6))は, 床版厚は1日1方向の計画交通量を500台未満と2,000台以上を想定した厚さ, コンクリートの圧縮強度の差異, さらに実験装置の車輪寸法に合わせた供試体寸法の3つの要因を考慮してモデル化した供試体である。よって, 破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力P_{sx}が64-73床版の1.3倍程度となっていることによってS値(=P/P_{sx})が低い値の領域となったものである。さらに, 輪荷重走行試験装置の車輪寸法を考慮してモデル化した供試体Cを用いて輪荷重走行疲労実験を行い, その基準荷重Pを本研究で提案する押抜きせん断耐荷力式P_{sx}で除したS値と松井らが提案するS-N曲線の逆数m=12.7を適用して得られた等価走行回数N_{ep}によるS-N曲線が供試体A, BにおけるS-N曲線と近似するかを検討した。その結果, 供試体CのS値と等価走行回数N_{ep}の関係も, ほぼS-N曲線式(式(6))上にプロットされている。よって, 車輪寸法を考慮して供試体をモデル化することで, 耐疲労性の評価に整合性が得られるものと考えられる。

次に, S-N曲線の傾きの逆数は, 松井式(式(4))はm=12.7であるのに対して本提案式(式(6))の傾きの逆

数は $m=15.6$ となった。本実験は段階荷重載荷による輪荷重走行疲労実験結果に対し、64-73床版を対象とした松井らが提案するS-N曲線の傾き逆数 $m=12.7$ を適用して等価走行回数(式(1))を算定し、80-94床版のS-N曲線式を提案したものである。しかし、本提案のS-N曲線の傾きの逆数 $m=15.6$ を適用して、段階荷重載荷による輪荷重疲労実験結果による等価走行回数およびS-N曲線の傾きの逆数 m を求めると、その傾きはさらに大きくなり、過剰な評価となる可能性がある。したがって、段階荷重載荷による輪荷重疲労実験の場合は、多くの実験データによって定められている松井らが提案するS-N曲線の傾きの逆数 $m=12.7$ の採用が妥当と考える。

したがって、RC床版のS-N曲線式(4)、(6)より、破壊に至る繰返し回数(以下、破壊走行回数とする) N_f は、式(7)として与えられる。

$$N_f = 10^{[(\log(C) - \log(P/P_{sx}))]/K} \quad (7)$$

ここで、 N_f ：破壊走行回数、 P ：基準荷重(kN)、 P_{sx} ：押抜きせん断耐荷力(kN)、 C ：S-N曲線におけるS値(64-73床版：1.520、80-94床版：0.996)、 K ：S-N曲線における曲線の傾き(64-73床版：0.07835、80-94床版：0.06417)

以上より、64-73床版および80-94床版の破壊走行回数 N_f は式(7)より算出することが可能となる。また、国土交通省ではRC床版の累積疲労損傷度 D^{10} を示しており、破壊走行回数 N_f に累積疲労損傷度 D を適用することで、RC床版の劣化過程における走行回数 N の推定が可能となる。

6. まとめ

- (1) 1/2モデルの供試体においては、コンクリートの圧縮強度が 35N/mm^2 であり、床版厚を変化させた供試体の等価走行回数を比較すると、大型車両の計画交通量を500台未満を対象とした床版厚110mmの場合に比して、2000台以上を対象とした床版厚130mmの場合は86倍となり、床版厚が耐疲労性に大きな影響を及ぼすことを確認した。
- (2) コンクリートの圧縮強度のみを変化させた場合の輪荷重走行疲労実験による等価走行回数は、Bタイプの圧縮強度が 21N/mm^2 の平均等価走行回数に比して、圧縮強度が 27N/mm^2 、 32N/mm^2 、 35N/mm^2 の場合は、それぞれ2.1倍、5.4倍、6.6倍となった。また、Bタイプの圧縮強度が 26N/mm^2 の等価走行回数に比して、圧縮強度が 30N/mm^2 、 34N/mm^2 の場合は、それぞれ1.4倍、2.4倍となった。よって、コンクリートの圧縮強度を高めることはRC床版の耐疲労性を大幅に向上させることとなる。
- (3) 輪荷重走行疲労実験によるS-N曲線に関して、床版厚、コンクリートの圧縮強度、鉄筋比の異なる供試体および輪荷重走行疲労実験装置の異なる車輪寸法を用いた疲労実験の結果、モデル

化した供試体の設計荷重に安全率を考慮した基準荷重 P を本提案の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} で除したS値と等価走行回数 N_{ep} は、本提案のS-N曲線上にほとんどがプロットされた。したがって、車輪寸法に合わせて供試体をモデル化することが必要である。

- (4) 本提案の80-94床版に対するS-N曲線式で得られる破壊走行回数 N_f を用いるならば、RC床版の疲労寿命の推定が可能となる。したがって、道路橋長寿命化修繕計画におけるRC床版の劣化予測には、S-N曲線式から得られる破壊走行回数 N_f にRC床版の累積疲労損傷度を加味することで劣化過程の推定が可能である。
- (5) 本研究は、段階荷重載荷による輪荷重走行疲労実験結果に、松井らが提案するS-N曲線の傾き逆数 $m=12.7$ を適用して等価走行回数を算定し、80-94床版に対するS-N曲線式を提案した。しかし、本提案のS-N曲線の傾きの逆数 $m=15.6$ を適用した段階荷重載荷の場合の等価走行回数およびS-N曲線の傾きの逆数 m はさらに大きくなり、耐疲労性は過剰となる。したがって、段階荷重載荷による疲労実験の場合は、松井らが提案するS-N曲線の傾き逆数 $m=12.7$ が妥当である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2004.
- 2) 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.
- 3) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 4) 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, 第348号, V-1, pp.133-141, 1984.
- 5) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 2, pp. 627-632, 1987.
- 6) 伊東茂富：コンクリート工学, 森北出版, pp. 75, 1972.
- 7) 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.
- 8) 阿部忠, 木田哲量, 水口和彦, 川井 豊：走行荷重が作用する道路橋RC床版の押抜きせん断耐力評価式, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1468-1477, 2009.
- 9) 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, pp. 29-39, 1997.
- 10) 玉越隆史, 大久保雅憲, 渡辺陽太：道路橋の計画管理に関する調査-橋梁マネジメントシステム(BMS)-, 国土技術政策総合研究所資料, 国総研資料523号, 2009.