

ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機による道路橋床版の疲労耐久性評価手法

Method for evaluating the fatigue endurance of Highway Bridge slabs by a rubber-tire wheel running machine

横山広^{*}, 篠原晃^{**}, 関口幹夫^{***}, 堀川都志雄^{****}

Hiroshi Yokoyama, Akira Shinohara, Mikio Sekiguchi, Toshio Horikawa

^{*}ショーボンド建設(株) 北陸支店技術課 (〒920-0362 金沢市古府 1-140)^{**}ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 (〒305-0003 つくば市桜 1-17)^{***}東京都 土木技術研究所 技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)^{****}工博 大阪工業大学教授 都市デザイン工学科 (〒535-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Identifying the fatigue endurance of a highway bridge slab is important to the maintenance of the bridge. About a dozen of wheel running machines are currently in operation in Japan. Wheel running tests have provided a few S-N curves. The machines used are steel-wheel-type or small equipment. No S-N curves have yet been provided by rubber-tire-type machines using full-scale specimens. Then, wheel running tests were conducted for 13 reinforced concrete slabs using rubber-tire wheel running machines. Based on the test results, the development of cracks and changes in deflection were examined and the process of damage to the reinforced concrete slab was identified. For examining S-N curves, a relationship equation was presented that is valid for the rubber-tire wheel running tests in addition to the relation provided by existing research efforts. An equation for evaluating the frequency of running until the serviceability limit is reached was also proposed.

Key words: rubber-tire type, wheel running machine, fatigue endurance, S-N curve, serviceability limit

キーワード: ゴムタイヤ, 輪荷重走行試験機, 疲労耐久性, S-N 曲線, 使用限界

1. はじめに

道路橋床版は車両を直接支持する部材で過酷な荷重環境に晒されており、昭和 40 年代後半に鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版と称す）の陥没損傷の事例が報告されて以来、各地で顕在化していったことは周知のことである。損傷原因の解明に当たって、各監督官庁や研究機関の精力的な努力により、過大な荷重作用やコンクリートの乾燥収縮、および主桁の拘束による初期ひび割れが引き金となり、輪荷重の走行繰返し作用によって損傷が進行する広義の疲労現象であることが明らかにされた。①過大な輪荷重下において床版下面で初期ひび割れが起こり、②その後の繰返し作用によってひび割れが進展し、下面ひび割れは亀甲状の網目を呈する。③床版上面にひび割れが発生した後に貫通ひび割れが形成され、床版は梁状化する。④梁状化することで荷重に対する抵抗断面が減少し、ついには押抜きせん断破壊に至るとの劣化過程が解明された¹⁾。コンクリート系の道路橋床版の疲労耐久性を向上させるには、床版厚さを大きくして、せん断力に対する抵抗断面を増加させることが効果的であるとの認識から、その後の道路橋示方書（以下、道示と称す）では、大型車の通行量を考慮

した割り増し係数の設定等により床版厚を増加させる方向で改訂が行われてきた。因みに床版支間 3.0m で比較すれば、昭和 39 年道示による RC 床版の厚さが 190mm であるのに対して、現行の道示では 250mm と算出され、約 1.3 倍となっている。

近年、性能照査型設計への移行を受けて、道路橋床版の疲労耐久性に関する評価手法が、多方面で議論・検討されているが未だ確立されたものはない。現在の所、破壊を伴う終局限界状態を考慮した疲労曲線、いわゆる S-N 曲線として提示されているものは、昭和 39 年道示に代表されるような主鉄筋量に比べて配力鉄筋量が少ない RC 床版、つまり梁状化を伴ってせん断破壊に至る床版を対象にして提案された松井式²⁾や園田・堀川式³⁾に加え、平成 8 年道示による床版の試験結果を踏まえた土木研究所の提案式⁴⁾、筆者らによる試験結果⁵⁾に限定されている。また今日盛んに技術開発が進められている合成床版や、プレストレストコンクリート床版、および補修済み床版等の梁状化の劣化過程を経過しないで終局状態に至る床版形式に対しても適用が可能な、汎用性のある評価式の提案も求められている。一方、道路橋床版の維持管理の面に着目すれば、終局状態に達しない段階での使用性能や供用性能

を重視した使用限界状態に関心が寄せられている。すなわちどの程度の損傷度合いの床版に対して、何時の時点で、どのような工法で補修・補強を行えば高い費用対効果がもたらされるのかの観点に立った評価式が所望されている。

本研究では過去の報告に新たに供試体を追加し、①輪荷重の大きさを一定に保持した状態での走行試験から、ひび割れの進展状況、およびたわみが増大する経緯が、走行回数にどのように影響されるのかを調査する。②終局状態での走行回数に着目した疲労耐久性を中心に据え、ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機での荷重と走行回数との関係式（S-N曲線式）を改めて誘導し、既往の研究との比較を行う。また③梁状化を伴わない版の押抜きせん断力を指標とする使用限界状態での評価式を提示し、④実橋床版と同様の諸元を用いた場合での各提案式による算定結果の比較から、本論文で提案する関係式の妥当性を検証する。

2. 輪荷重走行試験機

輪荷重走行試験機にはクランク式とゴムタイヤを装着した自走式の2種類があり、国内では十数台が稼働している。クランク式試験機はフライホイールの回転をシャフトを介して台車の前後運動に変換して移動荷重を載荷するもので、鉄輪と載荷版の組み合わせによって供試体に荷重が伝達される。本研究で対象としているゴムタイヤ式試験機は、台車本体に積載した油圧モーターを動力源として、台車が路面上をころがり駆動することにより往復運動するもので、航空機用の空気入りゴムタイヤを装着することで実橋に近い載荷状況が再現できる利点がある（写真-1）。また、走行区間を大きく設定できるので、種類が異なる複数の供試体を同じ条件下で同時に試験することが可能である。本研究では2機の輪荷重走行試験機を使用しており、表-1にこれらのゴムタイヤ式試験機の性能を示す。

3. 輪荷重走行試験の概要

3.1 供試体

試験に用いた供試体の一覧を表-2に示す。供試体総数は13体で、その内訳は昭和39年道示、及び昭和47年道示に準拠した供試体がそれぞれ11体と2体である。昭和39年道示供試体の床版厚さは、 $t=190\text{mm}$ と 160mm を設定しており、昭和47年道示床版は実橋床版⁶⁾（東京都T橋）をモデル化した $t=180\text{mm}$ のものである。表中のコンクリート物性値はS39-19、および16シリーズではコンクリート打設時に採取

したテストピースによる走行時直前の値で、No.13、19、および20供試体では、試験後に損傷を受けていない部分から採取したコア試験体による値である。

なお、供試体の製作時期や製作から試験までの期間が異なるためコンクリート強度にはばらつきがある。図-1にS39-19シリーズとNo.19供試体の外観形状、配筋状況を示す。なお、床版上には舗装していない。

3.2 載荷方法

供試体は2.5mの床版支間で単純支持し、その中央を航空機用のタイヤを装着した輪荷重走行試験機を通過させている。試験機が走り抜ける橋軸方向の端部には横桁を下面に配置して弾性支持とした。供試体の四隅には、端部の回転を拘束しないように浮き上がり防止用の金具を設置

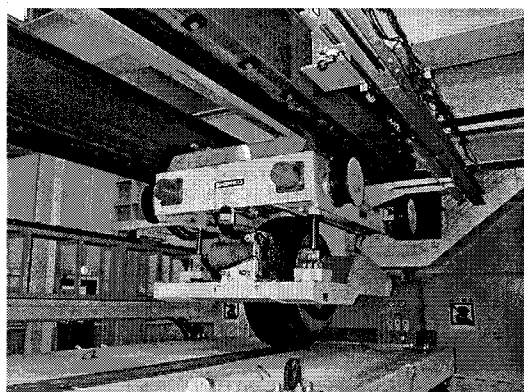


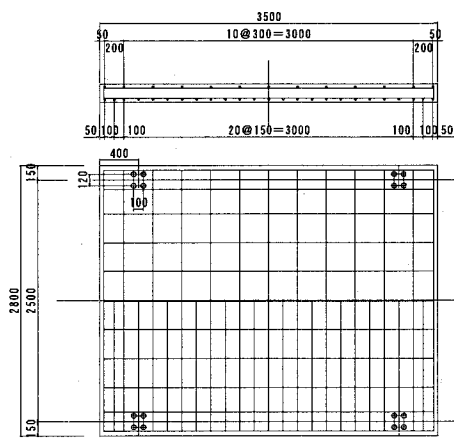
写真-1 ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機

表-1 ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の性能

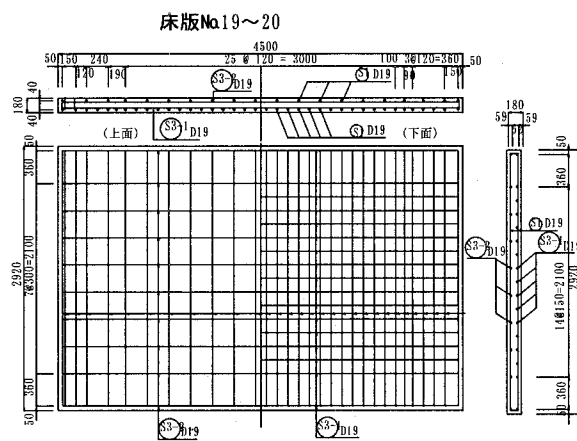
項目		ショーボンド建設	東京都 土木技術研究所
試験装置 形状寸法	寸法	幅3.0m×長さ15m	フレーム幅3.9m×長さ12.1m
	ピット	幅3.7m、深さ1.0m	ピット無し
車輪	種類	航空機用ゴムタイヤ 産業車両用ゴムタイヤ	航空機用ゴムタイヤ 産業車両用ゴムタイヤ
	負荷荷重	60kN～280kN	60kN～280kN
性能	定速走行速度	0.4～5.5 km/hr	0.4～5.5 km/hr
	走行区間	最大12.5m	最大6.5m

表-2 試験供試体

供試体名		床版厚 (mm)	供試体寸法 床版支間方向 ×橋軸方向 (mm)	主鉄筋 (上段:圧縮,下段:引張)			配力鉄筋 (上段:圧縮,下段:引張)			コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	載荷荷重 (kN)
				呼び 径	有効高 (mm)	間隔 (mm)	呼び 径	有効高 (mm)	間隔 (mm)		
ショー ボンド 建設 補修工 学研 究所	S39-19-1	190	2800×3500 (床版支間 2500)	D16	30	300	D10	43	300	37.1	220
	S39-19-2			D16	160	150	D13	146	300	40.1	250
	S39-19-3								45.1	250	
	S39-19-4								45.1	280	
	S39-19-5								23.7	240	
	S39-19-6	160							40.1	240	
	S39-16-1								37.1	220	
	S39-16-2		D16	30	300	D10	43	300	42.3	250	
	S39-16-3		D16	130	150	D13	116	300	30.3	160	
	S39-16-4								32.1	160	
東京都土木技術研究所	No.13 (S39)	190	2920×4500 (床版支間 2500)	D16	63	125	D13	91	300	52.5	157
		D16		157	125	D13	14.30	300			
	No.19 (S47)	180		D19	41	240	D19	61.00	300	31.4	157
				D19	137	120	D19	120.00	150		
				D19	46	240	D19	71.00	300		
				D19	138	120	D19	119.00	150		

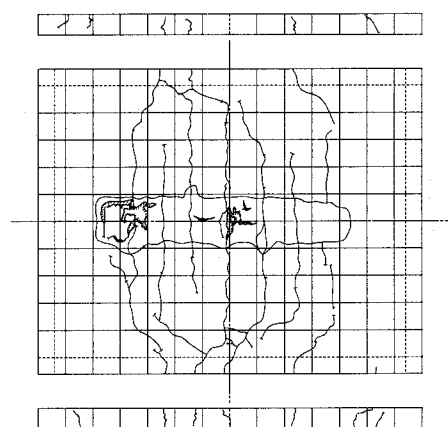


(a) S39-19 シリーズ

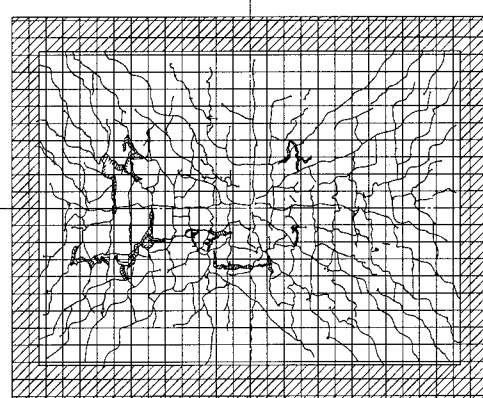


(b) No. 19 (No. 20) 供試体

図-1 供試体の形状 (単位: mm)



(a) 上面のひび割れ



(b) 下面のひび割れ

図-2 S39-19-1 供試体のひび割れ

表-3 接地面の大きさ

載荷荷重 (kN)	橋軸直角方向 a (mm)	橋軸方向 b (mm)	面積 a × b (mm ²)
160 (≒157)	315	346	108990
220	346	403	139438
240	357	419	149583
250	362	427	154574
280	378	450	170100

した。載荷荷重の値は床版が終局状態に至って破壊するまで一定とし、S-N 曲線の作成を意識して供試体毎に変化させている。

ゴムタイヤによる荷重伝達では、荷重値の大きさによって接地面の拡がり異なることになるので、接地面の形状を感圧紙を用いて計測する。たわみ値等の解析には表-3 に示す矩形状で置換している。

4. 試験結果

4.1 ひび割れ発生状況

図-2(a)と(b)に S39-19-1 供試体の上・下面のひび割れを、

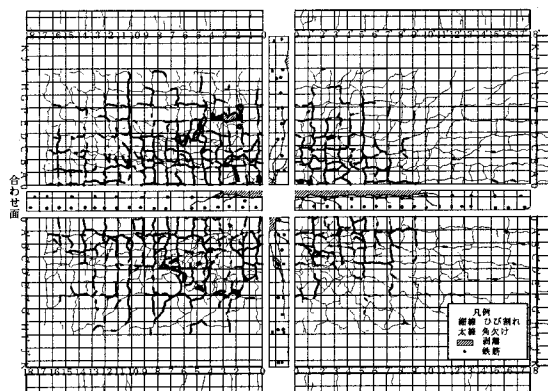


図-3 No. 20 供試体下面のひび割れ

図-3 に No. 20 供試体下面の試験終了時のひび割れ発生状況のスケッチを示す。S39-19-1 供試体の上面には 250～300mm の間隔で橋軸直角方向のひび割れが発生しており、上側の主鉄筋位置に近い位置で発生していた。床版下面側のひび割れは輪荷重の走行直下、およびその周辺部で格子状に発生しており、実橋のひび割れ損傷状況が再現できていた。下面側ひび割れの進展状況は、載荷初期から格子状のひび割れ発生形態を示し、たわみの増加に併せて細網化

表-4 ひび割れ密度、上面ひび割れと走行回数

供試体名	破壊直前の ひび割れ密度 (m/m^2)	上面ひび割れ発生 走行回数 (回)	はり化 走行回数 (回)	破壊時 走行回数 (回)
S39-19-1	12.74	56,800	200,000	562,315
S39-19-2	11.76	32,000	40,000	85,157
S39-19-3	13.2	500	10,000	28,900
S39-19-4	16.7	100	1,000	26,600
S39-19-5	9.04	5,000	8,106	9,106
S39-16-2	14.58	2,000	—	7,934
S39-16-3	11.63	10,000	30,000	329,802
No.13	19.41	—	—	592,200
No.19	17.82	—	—	102,531
No.20	21.65	—	—	849,529

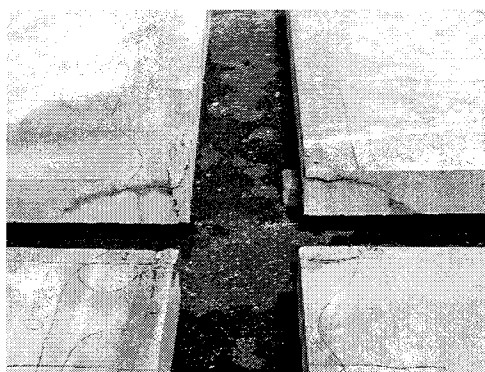


写真-2 試験後の切断面

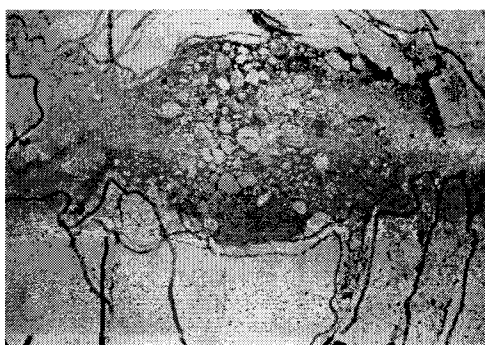


写真-3 上面のかぶりコンクリートの砂利化

する。その後、中央付近からすり磨き現象による角欠けが発生し、陥没破壊前には、その角欠けが下面全体に広がっていくことが観察された。

表-4 に試験終了時のひび割れ密度、および上面ひび割れの発生時の走行回数を、また上面ひび割れが主鉄筋方向に進展して梁状化したと推測される走行回数もあわせて示す。破壊直前のひび割れ密度は、S39-19-1 供試体で $12.74\text{m}/\text{m}^2$ 、No.20 供試体では $21.65\text{m}/\text{m}^2$ まで確認できている。ひび割れは目視で把握できる 0.1mm 程度以上のひび割れ幅を記録対象とした。ひび割れ観察をたわみ計測時に併せて行っているため、上面ひび割れ発生時、および梁状化した走行回数は正確なものではない。写真-2 は S39-16-2 の試験後の切断面を示したものであるが、押抜きせん断型の破壊面が観察できる。写真-3 は、S39-19-2 供試体の試験後の上面の破壊状況を示したものであるが、かぶりコンクリート部分が砂利化していた。

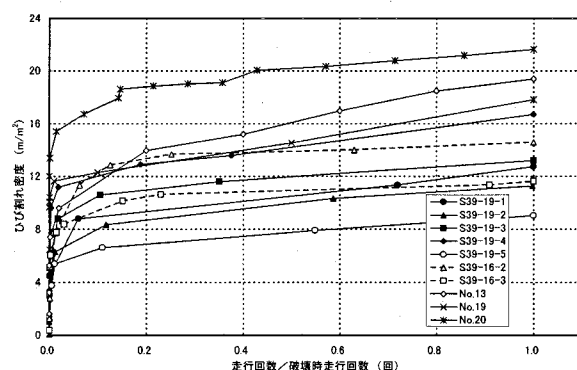
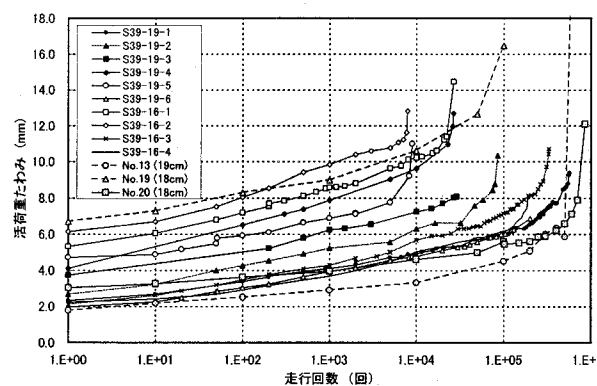
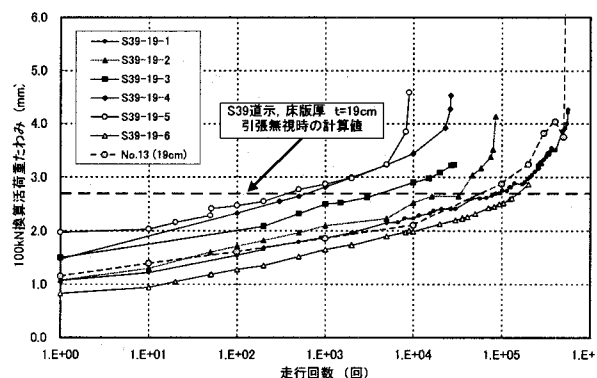


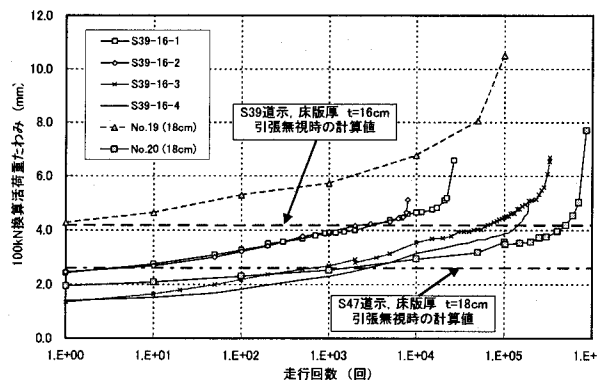
図-4 ひび割れ密度の経時変化



(a) 全供試体の活荷重たわみ



(b) S39-19 シリーズ (100kN 換算)



(c) S39-16, S47 道示床版 (100kN 換算)

図-5 活荷重たわみの経時変化

図-4 はひび割れ密度と走行回数の関係を示したもので、ひび割れは載荷初期に急増し、その後はゆるやかに増加する傾向が認められた。これは過去のクランク式輪荷重走行試験の結果とほぼ一致する傾向である。

4.2 たわみの経時変化

図-5(a)~(c)に活荷重たわみ（弾性たわみ）の経時変化を示す。本研究では、載荷時たわみから除荷時の残留たわみを控除した値を活荷重たわみと定義する。図-5(a)は全供試体の活荷重たわみを示したものであるが、たわみは走行回数の増加に応じて漸増し、破壊前に急増する傾向が認められた。図-5(b)は、S39-19 各供試体の活荷重たわみを、走行荷重値 100kN に換算したもので図中には薄板理論による引張無視時の計算値も示している⁷⁾。引張無視時の計算ではヤング係数比を $n=15$ としている。図-5(c)には S39-16 と S47 道示床版の換算たわみも示した。No.19 供試体の活荷重たわみの値が突出したのとなっているが、この供試体は施工不良を考慮した供試体であり、載荷前の段階で乾燥収縮によるひび割れが生じており、ひび割れ密度は $3.7\text{m}^2/\text{m}^2$ 程度であった。

図より、全ての供試体が引張無視時の計算値を超過すればたわみ量が急激に増加する傾向が伺える。S39-19 の各供試体の結果では、活荷重たわみが一番大きい値で推移した供試体 S39-19-5 は、コンクリートの圧縮強度とヤング係数の値が最も小さい。逆に活荷重たわみが小さい値の S39-19-6 供試体はヤング係数が最も大きい供試体であった。しかし他の供試体においては、活荷重たわみとコンクリートの物性値の間には特に関係は認められなかった。

5. 載荷荷重と走行回数の関係

5.1 終局時の評価

表-5 に各供試体の載荷荷重と終局状態時での走行回数を掲げる。主鉄筋量に対して配力鉄筋量が少ない RC 床版の疲労破壊は、主鉄筋方向のひび割れによる梁状化現象を経てからせん断破壊に至るとの仮定をもとに、梁の有効幅を考慮した S-N 曲線が松井や園田・堀川によってそれぞれ提案されている。ただし、松井による S-N 曲線式はクランク式の試験結果により、また園田・堀川式は小型供試体の試験から得られたものであり、本載荷形式と異なるため、これらの提案式と本試験結果との関係を明らかにする必要から、各提案式と同じ手法で試験結果を整理する。

式(1)は松井による S-N 曲線式で、載荷版の幅に配力鉄筋の有効高さを加えた値を有効幅としている。式(2)は園田・堀川による S-N 曲線式で、版のせん断有効幅の概念を導入してコンクリート標準示方書のせん断疲労強度式に依拠している。

$$\log \left(\frac{P}{P_{sx}} \right) = -0.07835 \log N + \log 1.25 \quad (1)$$

表-5 破壊時の走行回数

供試体名	床版厚さ (mm)	載荷荷重 (kN)	破壊時走行回数 (回)	P/P_{sx}	P_f/P_{so}
S39-19-1	190	220	562,315	0.440	0.805
S39-19-2		250	85,157	0.479	0.868
S39-19-3		250	28,900	0.477	0.835
S39-19-4		280	26,600	0.518	0.913
S39-19-5		240	9,106	0.521	0.999
S39-19-6		240	246,140	0.465	0.840
S39-16-1	160	220	26,798	0.526	0.986
S39-16-2		250	7,934	0.567	1.043
S39-16-3		160	329,802	0.438	0.818
S39-16-4		160	187,389	0.432	0.804
No.13	190	157	592,200	0.303	0.495
No.19	180	157	102,531	0.317	0.590
No.20		157	849,529	0.300	0.540

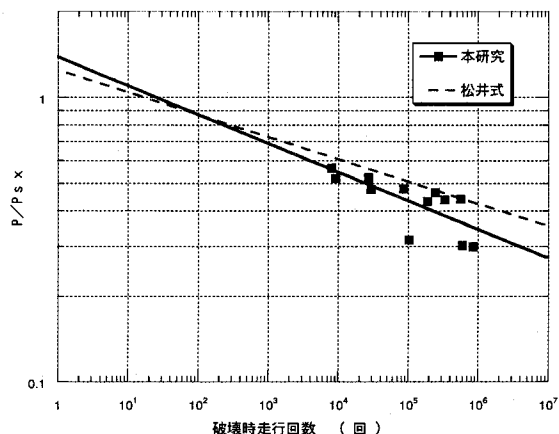


図-6 式(1)と(3)による S-N 曲線

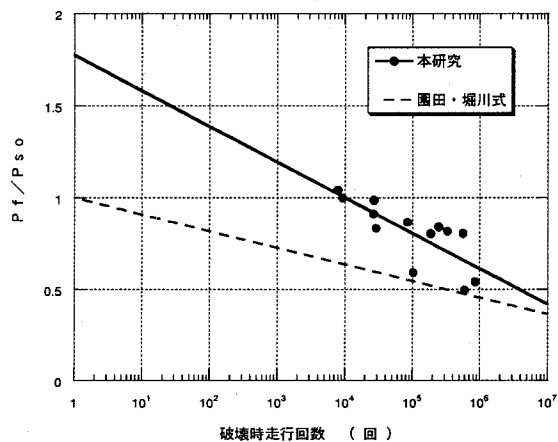


図-7 式(2)と(4)による S-N 曲線

ここに、

P : 作用荷重

P_{sx} : 梁状化を考慮した床版の押抜きせん断耐力

N : 走行回数

$$\left(\frac{P_f}{P_{so}} \right) = 1 - \frac{\log N}{11} \quad (2)$$

ここに,

P_f : 作用荷重

P_{so} : はり部材としてのせん断耐力の2倍

N : 走行回数

図-6は松井の方法で整理したS-N関係を示したものである。本研究におけるS-N関係は松井の提案する式(1)の下方に位置し、式(3)のS-N関係式となる。本研究による傾きの絶対値は約10乗であり、式(1)の約13乗よりも小さい結果となった。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.100711 \log N + \log 1.384 \quad (3)$$

相関係数 $R=0.77516$

図-7は園田・堀川の方法で整理したS-N関係を示したもので、本研究による結果は、式(2)の上方に位置し、式(4)のS-N関係式となる。S-N曲線の傾きの絶対値は、式(2)の11乗に対して5乗であった。

$$\left(\frac{P_f}{P_{so}}\right) = 1.78 - \frac{\log N}{5} \quad (4)$$

相関係数 $R=0.77838$

図-6,7ではNo.19供試体の値が下方に突出しているが、前述の通り施工不良を考慮した乾燥収縮ひび割れが発生している供試体の結果である。S-N関係を実橋床版に適用するための汎用性を考慮して、評価対象とする必要性のあるデータと推量される。

著者らの過去の報告では、式(1)に対して19乗、式(2)に対して9乗の結果が得られていたが、供試体数が当初の6体から13体にまで多くなっていることや、S47道示床版の結果を考慮することでより信頼性のあるS-N関係式を導いた。

5.2 使用限界時での評価

道路橋床版の維持管理を適切に行うには、現状における供用性把握と今後の荷重実態を考慮した使用限界状態での評価が重要となる。このことは、実際の維持管理では、現実問題として損傷床版が終局まで供用されることはなく、それ以前の損傷段階で何らかの補修が行われるため、補修時点での評価とその後の耐久性評価が重要であることを意味している。使用限界状態の定義に関しては式(5)に示す松井の評価式があり、活荷重たわみが引張無視時の計算値と同一になるたわみに到達した時点を使用限界としている⁸⁾。しかし、ひび割れ密度については何ら言及していない。その使用限界状態の概念は、輪荷重走行試験の鉄筋コンクリート床版の走行疲労試験の結果から誘導されているものであるが、筆者らの走行試験でもたわみが引張無視時を超えてから増加傾向が顕著になり、まもなく破壊に至るとの結果をもとにすれば、使用限界状態の推定手法として有効であると推量できる。よって、本研究においても使用限界状態は活荷重たわみが引張無視時の値を超えた時点と定義する。一方、実橋での維持管理では、活荷重たわみの計測は困難であり、ひび割れ密度を損傷程度を計る指標としている例も多い。因みに東京都では、10m/m²を超えるひび割れ密度で補強が施されている⁶⁾。

$$D_0 = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad (5)$$

ここに,

W : 活荷重たわみ

W_0 : 全断面有効時の理論たわみ

W_c : 引張側コンクリート無視時の理論たわみ

表-6は、各供試体の活荷重たわみが引張無視時の計算値を超える走行回数、すなわち使用限界に達した走行回数を示したものである。表中の計算値を超える走行回数は、両方の値が交わる前後のたわみ値から直線補間して求めている。表中のひび割れ密度が10m/m²を超える走行回数

表-6 使用限界と走行回数

供試体名	載荷荷重 (kN)	引張側コンクリート無視時のたわみ (mm)	破壊時走行回数 A (回)	活荷重たわみが引張無視を超える回数 B (回)	回数比 B/A	ひび割れ密度が10m/m ² を超える回数 (回)	破壊時走行回数の25% (回)
S39-19-1	220	5.89	562,315	81,257	0.14	198,870	140,580
S39-19-2	250	6.69	85,157	33,403	0.39	43,100	21,290
S39-19-3	250	6.76	28,900	5,000	0.17	2,170	7,230
S39-19-4	280	7.55	26,600	541	0.02	200	6,650
S39-19-5	240	6.332	9,106	319	0.04	—	2,280
S39-19-6	240	6.502	246,140	156,487	0.64	—	61,540
S39-16-1	220	9.153	26,798	4,074	0.15	—	6,700
S39-16-2	250	10.44	7,934	3,222	0.41	350	1,980
S39-16-3	160	6.702	329,802	63,600	0.19	46,850	82,450
S39-16-4	160	6.643	187,389	136,955	0.73	—	46,850
No.13	157	4.07	592,200	66,250	0.11	18,260	148,050
No.19	157	4.091	102,531	—	—	—	25,630
No.20	157	4.089	849,529	2,667	—	—	212,380

も同様に計算した。活荷重たわみが引張無視時の値を超える回数と破壊時走行回数の比 B/A を求めれば、概ね 0.1～0.4 の範囲にある。このばらつきの原因は、床版の終局がひび割れ性状によって異なることが考えられる。実橋床版においてもコンクリートの状況や荷重環境によって終局に至る過程に差が生じていることが観察されているため、ばらつきを考慮した評価方法が望ましい。よって、本研究ではその平均を考慮し、かつひび割れ密度による評価も併せて勘案して破壊時走行回数の 25% で使用限界に達するものと仮定して試験結果を整理する。

表-6 の使用限界状態に達した回数と表-4 のひび割れの観察をもとに梁状化したと推測される回数とを比較すると、ほとんどの供試体で引張無視の計算値を超える段階で、例えば S39-19-1 で表-6 の値 14 万回が表-4 では 20 万回と示され、梁状化が起こっていないことが判る。よって、使用限界状態に至る走行回数を推定する際には、梁状化現象を考慮するのではなく、版構造で評価すべきであることが判り、その指標として版の押抜きせん断耐力としなければならない。現在では、押抜きせん断耐力を求めるものとして、角田式、松井式および土木学会式がある。本研究においては汎用性を考慮して、式(6)の土木学会式⁹⁾で整理する。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f'_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (6)$$

ここに、

- V_{pcd} : 設計押抜きせん断耐力
- $f'_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}}$ ただし $f'_{pcd} \leq 1.2N/mm^2$
- $\beta_d = \sqrt[3]{1/d}$ ただし、 $\beta_d > 1.5$ では 1.5 とする。
- $\beta_p = \sqrt[3]{100 \cdot p}$ ただし、 $\beta_p > 1.5$ では 1.5 とする。
- $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$
- u_p : 設計断面の周長
- γ_b : 一般に 1.3、試験では 1.0

図-7 は使用限界状態に至る走行回数と押抜きせん断耐力で整理した結果を示しており、式(7)に近似曲線式を示す。使用限界状態での S-N 曲線の傾きの値は 10 乗となった。

$$\left(\frac{P}{V_{pcd}} \right) = 0.8268 - \frac{\log N}{10} \quad (7)$$

相関係数 $R=0.80124$

S39-19-6 供試体では、活荷重たわみが引張り無視時の値を超える走行回数比が破壊時走行回数の 64% となってお

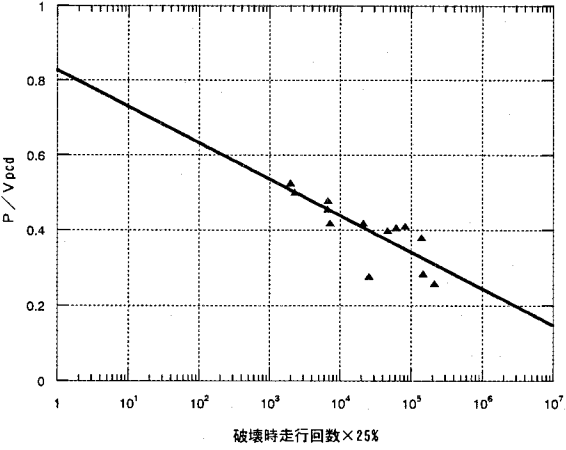


図-7 式(7)による使用限界での S-N 曲線

り、本研究による破壊時走行回数の 25% で使用限界に達するとの仮定と異なり、式(7)を適用した本供試体の使用限界状態に達する走行回数は約 21,000 回と推定される。本供試体のひび割れデータを採取していないため推定になるが、他の供試体のひび割れ密度の推移過程を流用すれば、21,000 回走行時点ではひび割れ密度が $8m/m^2$ を超え、 $10m/m^2$ 程度に至っている。使用限界状態の設定では活荷重たわみだけではなく、ひび割れ密度にも着目する必要がある。10 m/m^2 程度のひび割れ密度では何らかの対応が必要な状況と推測される。これは前述の東京都の損傷度指標による補強が必要とされる段階とも一致しており、式(7)から推定される使用限界状態に達する走行回数は意味のある値を示すことが判る。

6. S-N 関係式の評価

実際の道路橋床版に誘導された S-N 曲線式(3)、(4)および(7)を適用して、床版の疲労寿命を予測する。評価対象とする床版は S39 道示、S47 道示および H8 道示に準拠して製作される床版で表-7 に示す断面とする¹⁰⁾。表-8 は

表-7 S-N 曲線の評価する断面

道示 年度	床版厚 (mm)	主鉄筋 (上段: 圧縮, 下段: 引張)			配筋筋 (上段: 圧縮, 下段: 引張)			コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)
		呼び 径	有効高 (mm)	間隔 (mm)	呼び 径	有効高 (mm)	間隔 (mm)	
S39	190	D16 D16	30 160	300 150	D10 D13	43 146	300 300	18
S47	200	D19 D19	40 160	250 125	D16 D16	58 142	200 100	21
H8	250	D19 D19	40 210	300 150	D16 D16	58 192	250 125	24

表-8 疲労寿命の算定結果

道示 年度	載荷荷重 P=Pf	P/Psx	Pf/Pso	P/V_pcd	式(3)による 走行回数	式(4)による 走行回数	式(7)による走行回数 (回)	2000台/年
S39	100kN	0.4515	0.5157	0.4908	912,440	13,049,170	127,878	0.175
S47		0.3524	0.408	0.3389	10,697,500	58,032,800	1,443,046	1.98
H8		0.2547	0.3097	0.2475	—	—	6,199,148	8.49

算定結果の一覧を示したもので、載荷荷重として道示に示されている 100kN の B 活荷重を採用する。また、大型車の車両通行量を 1 日当たり 2000 台の走行台数と仮定している。S39 道示床版の終局状態に至るまで走行回数は式(3)で約 91 万回、式(4)で約 1,300 万回となり、疲労寿命はそれぞれ 1.2 年、17.9 年と得られる。式(4)は S47 道示床版でも走行回数が増える傾向があり、配筋鉄筋量の少ない梁状化する床版に対する疲労寿命の予測には式(3)の方が妥当であると考えられる。

使用限界状態に達する走行回数を式(7)で計算した結果、S39 道示床版が約 0.2 年、S47 道示床版で約 2.0 年となり、H8 道示床版では約 8.5 年の数値が得られた。ただし、設計押抜きせん断耐力 V_{pcd} の計算では、部材係数 $\gamma_b=1.3$ を考慮している。何れも床版厚さ、コンクリートの圧縮強度および鉄筋量を考慮すれば妥当な値であり、式(7)は使用限界の推定に適用できるものと推量できる。

7. まとめ

本研究では、ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機による 13 体の試験結果から得られたひび割れの進展や、たわみの経時変化等の劣化過程に着目して、本装置による疲労耐久性を評価するための S-N 関係式を検討した。梁状化の破壊過程を前提にした松井や、園田・堀川によるそれぞれの提案式と対比する形で、ゴムタイヤ式走行試験機での関係式を改めて誘導した。さらに使用限界状態に達する走行回数を推定するために、梁状化を伴わない版の押抜きせん断耐力を指標とする評価式も同時に提案した。最後に、実橋床版を例に、本研究で導いた式の妥当性を吟味した。以下に本研究で得られた結果を列挙する。

- (1) 本形式での走行試験によれば、床版下面のひび割れは格子状に発生し、実橋での損傷状況が再現されていた。ひび割れ密度は載荷初期に急増し、その後は載荷回数に併せて増加するがその増加率は小さい。終局時には押抜きせん断型で破壊し、上面のかぶりコンクリートは砂利化していた。
- (2) 輪荷重走行試験での活荷重たわみの経時変化は、走行回数の増加に応じて漸増し、破壊前に急増する傾向が認められた。また、引張無視の計算値を超えた後に活荷重たわみは急激に増大した。
- (3) 終局時の S-N 曲線を既往の研究の比較から、松井の方法では S-N 曲線の傾きの絶対値が約 13 乗から約 10 と小さい値になった。同様に園田・堀川の方法に対してはでは 11 乗の傾きが 5 乗であった。

- (4) 使用限界状態を活荷重たわみが引張無視時の理論計算値を超えた時点であり、またひび割れ密度が 10m/m^2 以内であるとの定義から、試験による破壊時走行回数の 25%を土木学会式による押抜きせん断耐力で整理した結果、S-N 曲線の傾きは約 10 乗となった。
- (5) 本研究で得られた S-N 関係式を実際の道路橋床版に適用すれば、破壊時の走行回数に関しては、松井の方法による疲労寿命の値は妥当なものであった。また、使用限界状態に到達する走行回数の S-N 曲線式も実用的な数値を示していることが判った。

本研究で得た使用限界状態に達する走行回数の S-N 曲線は、押抜きせん断耐力で整理しているので、梁状化しない PC 床版や合成床版にも適用できると推測される。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団、阪神高速道路管理技術センター：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性，pp.3-5，平成 3 年 12 月
- 2) 松井繁之：橋梁の寿命予測—道路橋 RC 床版の寿命予測—，安全工学 Vol.30 No.6，pp.432-440，1991。
- 3) 園田恵一郎，堀川都志雄：輪荷重の反復作用下での道路橋 RC 床版の低サイクル疲労特性，土木学会論文集 第 390 号/V-8，pp.97-106,1988.2。
- 4) 土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，pp.38-41，平成 12 年 10 月
- 5) 松尾伸二，横山広，樋野勝巳，堀川都志雄：ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機による既設 RC 床版の疲労特性，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.161-166，平成 12 年 10 月
- 6) 関口幹夫，矢戸薫，森俊介：RC 床版の輪荷重走行疲労実験，都土木技研年報，平成 14 年
- 7) 例えば，成岡昌夫ほか：構造力学 第三巻 板の力学，丸善株式会社，昭和 45 年 10 月
- 8) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集 第 374 号/I-6，pp.419-426，1986.10。
- 9) 土木学会 コンクリート委員会：コンクリート標準示方書，2002.3。
- 10) 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，国土技術政策総合研究所資料，第 28 号，pp.7-13，平成 14 年 3 月

(2003 年 9 月 12 日受付)