

自走式試験機による道路橋床版の使用限界の評価

Evaluation of Serviceability for Highway Bridge slabs under wheel running Loads

横山広^{*}, 長屋優子^{**}, 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㈱ 北陸支店技術課 (〒920-0362 金沢市古府 1-140)

^{**}独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ橋梁構造チーム (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

^{***}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 大阪工業大学工学部 都市デザイン工学科 (〒535-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

The fatigue durability 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 data for S-N curves. The machines in the present study are steel-wheel-type or small equipment. No S-N curves have yet been provided by rubber-tire-type machines for full-scale specimens. Wheel running tests were here in conducted for 13 reinforced concrete slabs under rubber-tire wheel running loads. Based on the test results, the development of cracks and changes in deflection were evaluated and the process of damage to the reinforced concrete slab was identified. For determining S-N curves, an equation was proposed and is valid for the rubber-tire wheel running tests in addition to the relation provided by existing research efforts. An equation for evaluating the repeated loads 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あるため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。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。

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¹⁾や園田・堀川式²⁾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³⁾、筆者らによる試験結果⁴⁾に限定されている。

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を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、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、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、タイヤ式輪荷重走行試験機での荷重と走行回数との S-N 曲線式を誘導し、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、さらに信頼性の考え方をういて実用設計に向けての評価を示す。最後に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、鉄輪と載荷板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自走式試験機は、台車本体に搭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にこれらの自走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年道示に準拠した床版は実橋床版⁵⁾(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、数値計算では接地面の形状に応じて矩形状で置換している。

4. 試験結果

図-1(a)、および(b)に活荷重たわみ(=弾性たわみ)の走行による経時変化を示す。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-1(a)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(=ひび割れ断面)の計算値も示している。引張無視時の計算ではヤング係数比を $n=15$ としている。

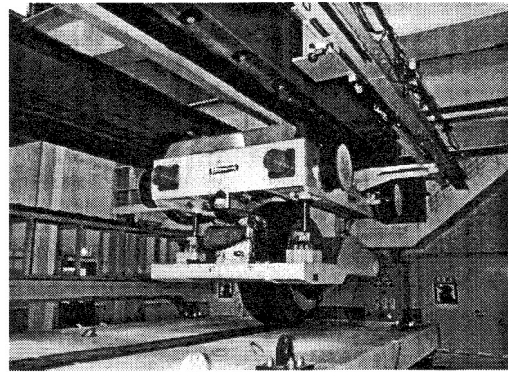


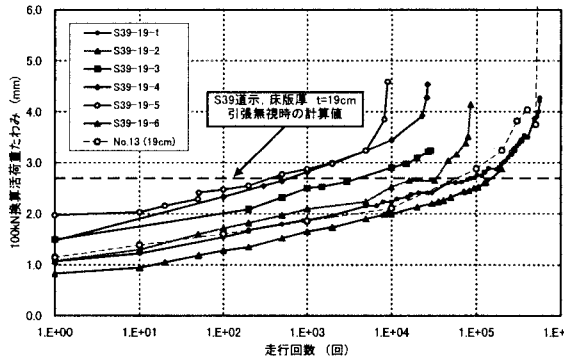
写真-1 自走式輪荷重走行試験機

表-1 自走式輪荷重走行試験機の性能

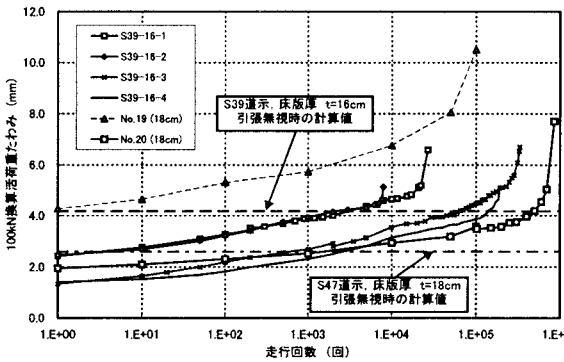
項目	ショーボンド建設	東京都 土木技術研究所
試験装置	幅3.0m×長さ15m	フレーム幅3.9m×長さ12.1m
形状寸法	ピット	ピット無し
車輪	種類	航空機用ゴムタイヤ
		産業車両用ゴムタイヤ
性能	負荷荷重	60kN~280kN
	定速走行速度	0.4~5.5 km/hr
	走行区間	最大12.5m

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	190	2800×3500 (床版支間 2500)	S39-19-1						37.1	220	
			S39-19-2	D16	30	300	D10	43	300	40.1	250
			S39-19-3	D16	160	150	D13	146	300	45.1	250
			S39-19-4							45.1	280
	S39-19-5								23.7	240	
	S39-19-6								40.1	240	
	S39-16-1		160							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	190	2920×4500 (床版支間 2500)	No.13 (S39)	D16	63	125	D13	91	300	52.5	157
				D16	157	125	D13	14.30	300		
	180		No.19 (S47)	D19	41	240	D19	61.00	300	31.4	157
				D19	137	120	D19	120.00	150		
			No.20 (S47)	D19	46	240	D19	71.00	300		
				D19	138	120	D19	119.00	150		



(a) S39-19 シリーズ (100kN 換算)



(b) S39-16, S47 道示床版 (100kN 換算)

図-5 活荷重たわみの経時変化

図-1(b)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ものとなっているが、この供試体は施工不良を考慮した供試体であり、載荷前ですでに乾燥収縮によるひび割れが生じており、床版下面のひび割れ密度は 3.7m^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え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との関係

5.1 終局時の評価

表-3 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た後に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

表-3 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}	Pf/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

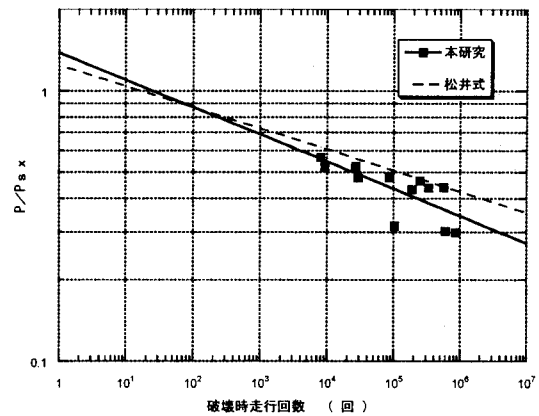


図-2 式(1)による S-N 曲線

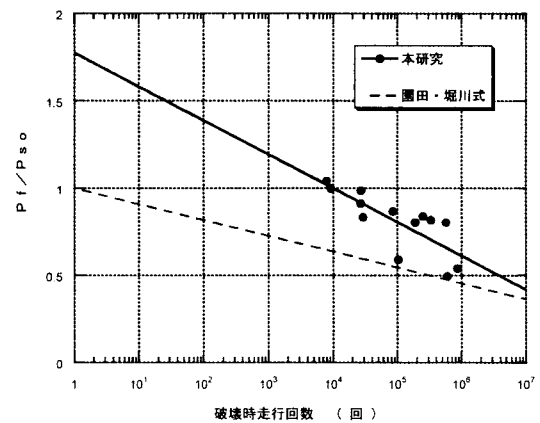


図-3 式(2)による S-N 曲線

試体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目的で、各提案式と同じ手法で試験結果を整理する。

図-2 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曲線の下方に位置し、式(1)の S-N 曲線式となる。本研究による勾配の絶対値は約 10 乗であり、松井の約 13 乗よりも小さい結果となった。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.100711 \log N + \log 1.384 \quad (1)$$

相関係数 R=0.77516

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

図-3は園田・堀川の方法で整理したS-N関係を示したもので、本研究での結果は、園田・堀川が提案する曲線の上方に位置し、式(2)のS-N曲線式となる。S-N曲線の傾きの絶対値は、園田・堀川の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

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

式(1)および式(2)のそれぞれの相関係数は0.7よりも大きいことより、信頼性は高いと推察できる。

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の把握と今後の交通予測を考慮した使用限界状態での評価が必要となる。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状態に至る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・補強が行われるため、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(3)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⁶⁾。しかし、ひび割れ密度との関係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。本研究においても使用限界状態を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、ひび割れ密度をもって損傷程度を計る指標としている監督官庁も多い。因みに東京都では、 10m^2 を超えるひび割れ密度で何らかの補強を施している⁵⁾。

$$D_s = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad (3)$$

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-4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^2 を超える走行回数も同様に計算した。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、

表-4 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^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

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。

走行試験のひび割れ発生状況の観察結果から、破壊時走行回数の25%の走行回数では梁状化現象が起っていないことが判明しているため、使用限界状態に至る走行回数を推定する際には、梁状化現象を伴わない版構造を保持しているとみなす方が妥当であると推量される。したがって、その指標として版の押抜きせん断耐力を基準値として採用する。現在、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(4)の土木学会式で整理する。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f'_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (4)$$

ここに、

V_{pcd} : 設計押抜きせん断耐力

$$f'_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \quad \text{ただし } f'_{pcd} \leq 1.2N/mm^2$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad \text{ただし, } \beta_d > 1.5 \text{ では } 1.5 \text{ とする。}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 \cdot p} \quad \text{ただし, } \beta_p > 1.5 \text{ では } 1.5 \text{ とする。}$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

u_p : 設計断面の周長

γ_b : 一般に 1.3, 試験では 1.0

図-4 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(5)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。

$$\left(\frac{P}{V_{pcd}} \right) = 0.8268 - 0.09713 \cdot \log N \quad (5)$$

相関係数 $R=0.80124$

S39-19-6 供試体では、活荷重たわみが引張無視時の値を超える走行回数比が破壊時走行回数の64%にも昇っており、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(5)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。走行試験の観察によれば、その回数ではひび割れ密度が10m/m²程度に至っていることが判っている。使用限界状態の設定では活荷重たわみだけでなく、ひび割れ密度にも着目する必要がある。10m/m²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する。すなわち、式(5)から推定される使用限界状態に達する走行回数は維持管理する立場のひび割れ密度判定

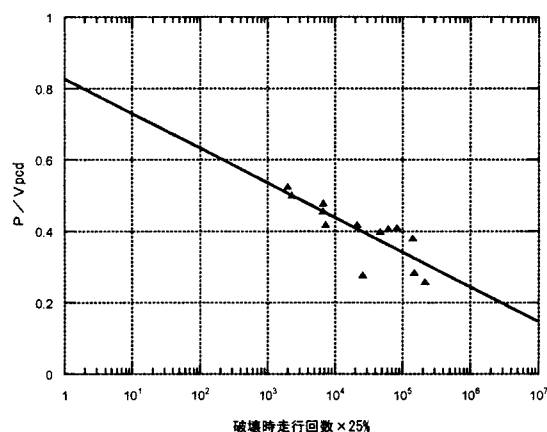


図-4 式(5)による使用限界での S-N 曲線

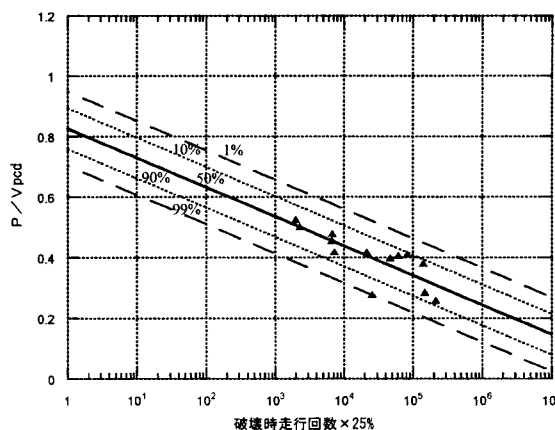


図-5 式(5)の S-N 曲線と非超過確率曲線

も考慮できる値を示すことが判る。

図-5 は式(5)に非超過確率曲線を追加したもので、最も下方の曲線が非超過確率99%、順に上方に向かって90%、50%、10%、1%の非超過確率を示したものである。図より、全てのデータが非超過確率99%を上回っており、90%でも1データが下回るのみである。図-5によれば、使用限界の設定に当たっては非超過確率90%の設定が適当であり、その際の縦軸の切片の値は式(6)に示す0.7596となる。

$$\left(\frac{P}{V_{pcd}} \right) = 0.7596 - 0.09713 \cdot \log N \quad (6)$$

6. S-N 関係式の評価

実際の道路橋床版に対して誘導された S-N 曲線式(6)を適用して、床版の使用限界に至るまで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-5 に示す断面とする⁷⁾。表-6 は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。式(6)の 90%の非超過確率による縦軸の切片を採用した計算の結果、S39 道示床版の使用限界状態に至るまで走行回数は約 1.1 万回、S47 道示床版では約 7.7 万回となり、H8 のそれは約 25.5 万回となる。次に、実測データの車両通行量にマイナー則を適用して式(6)を考慮した 10 乗則により 1 日当たりの 100kN 荷重の走行台数に換算した場合の使用限界に至る年数は、東京の国道 347 号の H8 道示床版が約 75 年で三重の国道 1 号では 10 年となる。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。何れも実際の交通量、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(5)はライフサイクルを検討する際の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、使用限界状態に達する走行回数を推定するための梁状化現象を伴わない版の押抜きせん断耐力を基準値とする評価式を提案した。さらに、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知見を列挙する。

- (1) 輪荷重走行試験での活荷重たわみの走行による経時変化は、走行回数の増加に応じて漸増し、引張無視 (= ひび割れ断面) の計算値を超えた後に活荷重たわみは急激に増大して破壊に至る傾向が確かめられた。
- (2) 終局時の S-N 曲線を既往の研究との比較から、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 11 乗の傾きが 5 乗であった。
- (3) 使用限界状態を活荷重たわみが引張無視時の計算値を超えた時点、あるいはひび割れ密度が 10m/m^2 に達する時点とする定義から、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。
- (4) 非超過確率の概念を導入し、その 90%非超過確率を採用して実際の道路橋床版に適用すれば、使用限界状態に到達する走行回数の S-N 曲線式は実用的な数値を示すことが判った。

表-5 S-N 曲線を評価する断面

道示年度	床版厚 (mm)	主鉄筋 (上段:圧縮,下段:引張)			配力筋 (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	30	300	D10	43	300	18
		D16	160	150	D13	146	300	
S47	200	D19	40	250	D16	58	200	21
		D19	160	125	D16	142	100	
H8	250	D19	40	300	D16	58	250	24
		D19	210	150	D16	192	125	

表-6 疲労寿命の算定結果

道示年度	載荷荷重 $P=Pf$	P/V_{pcd}	式(5)非超過 確率90%回数	東京 国道347号 9.29台/日/年	三重 国道1号 67.17台/日/年
S39	100kN	0.4908	8590	2.53	0.35
S47		0.3389	136975	40.39	5.59
H8		0.2475	724887	213.8	29.6

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 関口幹夫, 宍戸薫, 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
- 6) 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.
- 7) 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