

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

Fatigue Properties of Existing RC slabs under Wheel Running Machine with pneumatic tire

松尾 伸二* , 横山 広** , 樋野 勝巳*** , 堀川 都志雄****

Shinji MATSUO , Hiroshi YOKOYAMA , Katsumi HINO and Toshio HORIKAWA

* 工修 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)

** ショーボンド建設(株) 北陸支店 (〒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)

**** 工博 大阪工業大学 土木工学科 教授 (〒535-0002 大阪市旭区大宮5-16-1)

The mechanism of damage to existing reinforced concrete slabs has been identified by wheel running tests.

The wheel running machine induces back and forth movement while applying a certain load. A total of ten machines have been installed in Japan. The wheel running machines are classified as the crank type equipped with steel wheels or the self-running type equipped with pneumatic tires.

In this study, pneumatic tire, self-running wheel running machines were used to grasp the fatigue properties of existing reinforced concrete slabs. Studies were made of 1) cracking on the top and bottom surfaces of a slab, 2) the relationship between the cycle of running and deflection, and 3) the relationship between the load applied and running cycle at the time of failure.

For test specimens, reinforced concrete slabs designed and constructed to the Standard Specifications for Steel Highway Bridges of 1964 were used. The slabs had a thickness of 19 or 26 cm. The load applied was 220, 250 or 280 kN. A constant load was applied until the failure of the specimen.

Key words: wheel running test, pneumatic tire, RC slab, fatigue properties

1. はじめに

昭和40～50年代に道路橋RC床版の陥没損傷が顕在化し、各機関での活発な研究により、RC床版の損傷メカニズムが明らかにされてきた¹⁾。

つまり、道路橋RC床版の損傷メカニズム²⁾は、①完成直後の床版は、等方性に近い強靱な版構造であり、耐荷力は極めて大きい。②コンクリート硬化にともなう乾燥収縮による橋軸直角方向のひび割れ発生。③輪荷重により縦横のひび割れが発生し、格子状のひび割れが増加する。④輪荷重により床版上面ではねじりモーメントに起因するひび割れが発生し、下面から発生した曲げひび割れとつながり、並列した梁化になる。⑤貫通したひび割れ面のすり磨きや浸入水による石灰分の流出により、ひび割れ幅が拡大してせん断抵抗を失う段階。を経て、⑥低下した押抜きせん断強度を超える輪荷重により抜け落ちを生じ、陥没に至る。これらの損傷メカニズムは、輪荷重走行試験機の活用により解明できるまでになった。

この輪荷重走行試験機は、任意の荷重を作用させながら往復運動するもので、現在、国内に十数台が設置されている。それらの輪荷重走行試験機は鉄輪を装着したクラック

式(以下、鉄輪式)と、ゴムタイヤを装着した自走式(以下、ゴムタイヤ式)に大別される。これまで、損傷メカニズムの解明やRC床版のS-N曲線の提案は、主に鉄輪式の輪荷重走行試験機によって行われている。

本報告は、ゴムタイヤ式の輪荷重走行試験機下でのRC床版の疲労特性を把握することを目的として、RC床版供試体を対象とする走行試験を実施し、検討を行ったものである。

2. 輪荷重走行試験機による疲労試験の現状と課題

輪荷重走行試験は、既設RC床版の損傷メカニズムの解明や疲労耐久性、既設RC床版の損傷状態に応じた効果的な補修・補強方法、新しい形式の床版の疲労耐久性を評価することが可能であり、最近、多方面で活用されている。

現在、国内には輪荷重走行試験機のタイプとして、鉄輪式とゴムタイヤ式が設置されている。2つのタイプの試験機はそれぞれ特長を有しているが、相関性が得られていないのが現状である。また、設置台数が少ないことから、それらの試験機を所有する機関が連携して試験を進め、効率

的な研究を行うことが望まれている。

これまで、輪荷重走行試験によって、既設 RC 床版の損傷メカニズムは解明されてきたが、床版に関する技術的課題は数多く残されている。

具体的な課題としては、広範囲なパラメータによる床版の S-N 曲線の整備や損傷メカニズムの解明等であり、それらは今後の維持管理や新しい形式の床版の評価にも影響を及ぼすものである。

試験の効率化を図るための前提として、各機関が所有する輪荷重走行試験機の特徴を把握する必要がある。この方法としては、①標準試験体による試験結果の比較、②試験方法の統一化、等が挙げられる。

①の標準試験体の試験結果があれば、鉄輪式とゴムタイヤ式による試験データが共有できることになり、S-N 曲線の整備に有効である。具体的には、建設省土木研究所によって過去に行われた、昭和 39 年鋼道路橋示方書（以下、S39 道示）による RC 床版³⁾を標準供試体とすることが挙げられる。

②の試験方法の統一化によれば、データの共有以外にも、新しい形式の床版を評価する場合に、試験機の違いによる評価の差がなくなるという利点もある。この場合、2つのタイプの試験機は載荷方式、載荷荷重等に違いがあるため、同一の試験方法は困難ではあるが、何らかの指標、例えば、たわみを設定し、評価することが考えられる。

特にゴムタイヤ式の輪荷重走行試験機は、実橋床版に作用する自動車の輪荷重を正確に再現することができることから、試験方法の統一化によるデータの共有は有効である。

以上のように、鉄輪式ならびにゴムタイヤ式の特長を生かした研究の連携による効果は大きく、床版の技術的課題の解明に有効である。また、各試験機の特徴が明確になることは、各機関の試験の役割・分担も明確となり、調査・研究の効率化を図ることができる。

3. ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の概要

本研究で使用した輪荷重走行試験機はゴムタイヤを装着した自走式である。写真-1 にゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の外観を示す。自走式とは、ゴムタイヤを装着した台車に油圧モータが設置され、チェーンにより駆動力が伝達されるものである。本試験機の大きな特長は、ゴムタイヤを装着しているため床版供試体の上面を直接載荷することが可能であり、実橋に近い載荷形態である。

表-1 にゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の概要を示す。車輪は航空機用のゴムタイヤ、または産業車両用のゴムタイヤを装着することが可能であ

る。航空機用ゴムタイヤの載荷荷重は、最大 280kN であり、産業車両用ゴムタイヤの載荷荷重は、最大 100kN である。定速走行速度は、最大 5.5km/hr である。走行区間は、最大 12.5m であり、供試体を 3 または 4 体を直列に敷並べ、同一条件で試験することが可能である。

4. 試験概要

4.1 供試体

表-2 に RC 床版供試体の一覧を示す。本試験では、ゴムタイヤ式の輪荷重走行試験機の特徴を把握し、今後、鉄輪式の走行試験機との相関性を検討することを目的として、供試体の形状・寸法は、建設省土木研究所で行われている S39 道示の RC 床版と同様とした。

この S39 道示の RC 床版は、現在の設計基準と比較して配力鉄筋量および床版の最小全厚が少なく規定されており、損傷事例も多く報告されている。

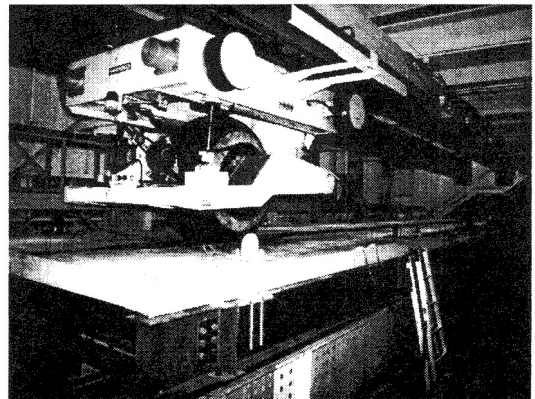


写真-1 ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機

表-1 ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の概要

項目	仕様	
試験装置	寸法	幅3.0m × 長さ15m
形状寸法	ビット	幅3.7m、深さ1.0m
車輪	種類	航空機用ゴムタイヤ 産業車両用ゴムタイヤ
	充填材	窒素ガス
性能	負荷荷重	航空機用ゴムタイヤ ; 60kN~280kN 産業車両用ゴムタイヤ ; 60kN~100kN
	定速走行速度	0.4~5.5 km/hr
	走行区間	最大12.5m

表-2 供試体の一覧

供試体名	床版厚 (cm)	供試体寸法 床版支間方向 × 橋軸方向 (cm)	主鉄筋			配力筋			コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)
			呼び 径	有効高 (cm)	間隔 (cm)	呼び 径	有効高 (cm)	間隔 (cm)	
S39道示-19-1	19	280 × 350 (床版支間 250)	D16	3.00	30.00	D10	4.30	30.00	37.1
S39道示-19-2	19			16.00	15.00				D13
S39道示-19-3	19		D16	3.00	30.00	D10	4.30	30.00	45.1
S39道示-19-4	19								13.00
S39道示-16-1	16		D16	3.00	30.00	D10	4.30	30.00	37.1
S39道示-16-2	16								13.00

供試体数は、床版厚さを19cmとした供試体を4体、16cmとした供試体を2体の合計6体とした。

供試体の形状・寸法の例（S39道示-19-1,2,3,4）を図-1に示す。

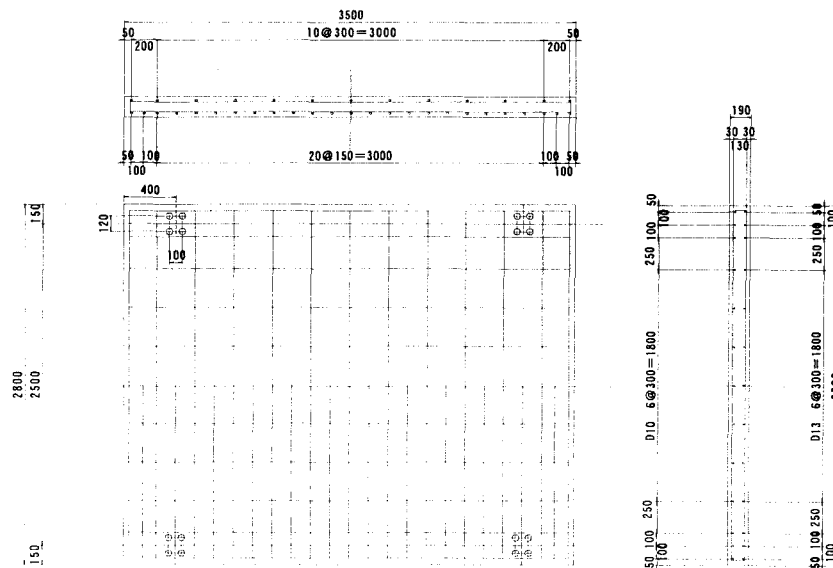


図-1 供試体の形状・寸法 (S39道示-19-1, 2, 3, 4) (単位:mm)

4.2 載荷方法

試験は、輪荷重走行試験機に供試体を床版支間2.5mで単純支持し、床版支間中央の供試体上を直接、ゴムタイヤが走行するものとした。

支持条件は、橋軸直角方向を支間2.5mで単純支持し、橋軸方向を弾性支持した。さらに、供試体は、隅角部の浮き上がりを防止するために回転拘束を与えないように固定した。

載荷段階は荷重一定の載荷とした。載荷荷重は220kN、250kNまたは280kNの3種類とし、供試体が破壊に至るまで一定とした。なお、本研究では、車輪として航空機用のゴムタイヤを用いた。

ここで、表-3に各供試体の載荷荷重毎のゴムタイヤの接地幅および接地面積を、図-2に載荷荷重250kN時のゴムタイヤの接地分布の測定結果（感圧紙による接地分布）および等価面積となる換算値を示す。

表-3 ゴムタイヤの接地分布

供試体名	載荷荷重 (kN)	ゴムタイヤの接地		
		橋軸直角方向 (cm)	橋軸方向 (cm)	面積 (cm ²)
S39道示-19-1	220	34.6	40.3	1394
S39道示-19-2	250	36.2	42.7	1546
S39道示-19-3	250	36.2	42.7	1546
S39道示-19-4	280	37.8	45.0	1701
S39道示-16-1	220	34.6	40.3	1394
S39道示-16-2	250	36.2	42.7	1546

5. 試験結果

5.1 床版上面・下面と内部のひび割れ状況

図-3および図-4に破壊時の供試体上・下面のひび割れ状況（S39道示-16-1）を示す。また、写真-2に供試体内部のひび割れ状況（S39道示-16-2）を示す。

それぞれの供試体は、破壊前に大きく変形し、押抜きせん断型の破壊を生じた。

床版下面では、輪荷重走行直下において格子状にひび割れが発生し、破壊時には抜け落ちによる著しい段差が確認された。床版上面では、橋軸直角方向に床版下面からのひび割れと貫通していると推測されるひび割れが確認された。このひび割れは、各供試体でそれぞれ4~7本が確認された。

破壊後の供試体内部の調査では、押抜きせん断型の斜めひび割れが確認された。

図-5に各供試体の破壊に至る時の総走行回数を基準値1とした時の走行回数比（走行回数/破壊時走行回数）と床版中央の活荷重たわみの関係を示す。

床版の上・下面でのひび割れの発生状況を図-5と併せ

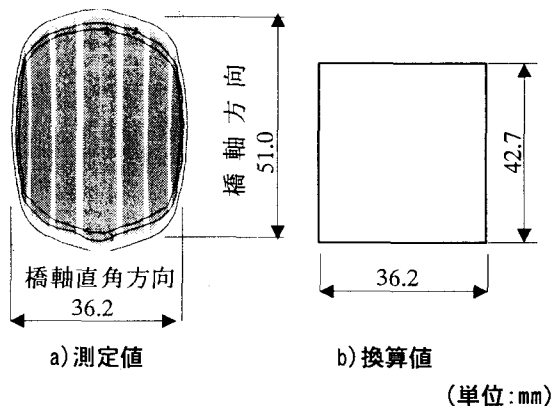


図-2 載荷荷重250kN時のタイヤ接地分布の測定値および換算値 (単位:mm)

て観察すると、走行回数比が0.1程度までは、たわみおよび床版下面のひび割れが増加する。走行回数比が0.02程度から、たわみおよび床版下面のひび割れの増加率が急増から漸増へと鈍化し、床版上面では橋軸直角方向にひび割れが発生する。その後、走行回数比が0.35程度から、床版上面のかぶりコンクリートの浮きによる異常音（ハンマーによるたたき検査による）が確認された。その後、床版下面

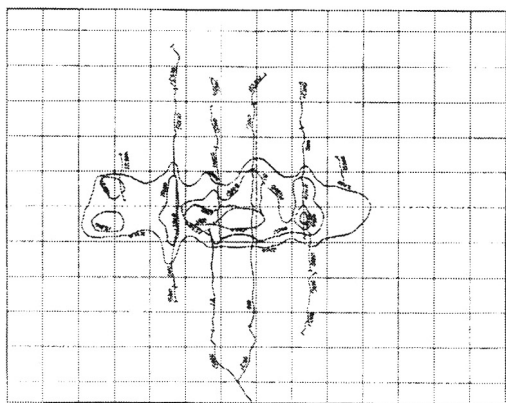


図-3 床版上面のひび割れ
(S39 道示-16-1)

では、ひび割れ面の段差、コンクリートの角落ちが確認された。さらに、破壊直前には、床版上面の異常音が確認された部分のコンクリートが砂利化する現象が確認された(写真-3)。

以上、これらの損傷過程は、既往の研究と同様であった。

5. 2 床版中央点におけるたわみの経時変化

所定の走行回数に車輪を床版中央点に設定して、載荷時と除荷時の両方で測定し、たわみの経時変化を調査した。

図-6に各供試体の床版中央点における活荷重たわみ(載荷時たわみと除荷たわみとの差)と走行回数の関係を示す。

各供試体のたわみは、走行回数の増加に伴って漸増し、さらに、破壊直前には、たわみが急増し抜け落ちに至った。破壊の位置は必ずしも一定でなかったため、たわみの値はばらついているが、破壊直前の活荷重たわみは、9~12mmであった。なお、同一時期における載荷時の総たわみは、14~21mm、除荷時のたわみは、5~9mmであった。

床版厚さ 16cm の供試体は、同一載荷荷重の床版厚さ 19cm と比較すれば、当然のことであるが、初期載荷からたわみが大きく、破壊に至るまでの走行回数が小さいことがわかった。

表-4に各供試体の直交異方性板理論によるたわみの計算値を示す。版の剛性は、Huber の提案式を適用し、コンクリートを全断面有効時とした場合と引張側のコンクリートを無視した時の値を求めた。ここで、松井は、RC 床版の使用限界を活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した時の理論値に達した時点(以下、使用限界状態時)であると定義している³⁾。たわみによる劣化度 D_s 評価式を式(1)に示す。

$$D_s = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad (1)$$

ここに、 W_0 : コンクリート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
 W : 実測値たわみ

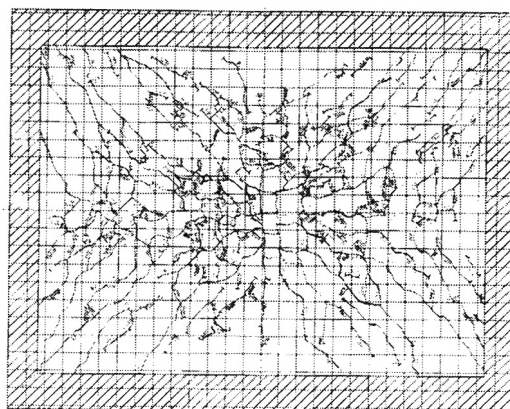


図-4 床版下面のひび割れ
(S39 道示-16-1)

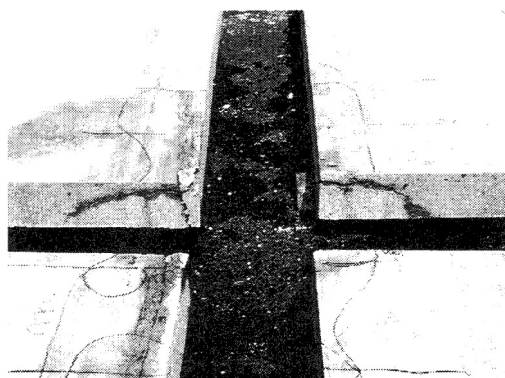


写真-2 床版内部のひび割れ
(S39 道示-16-2)

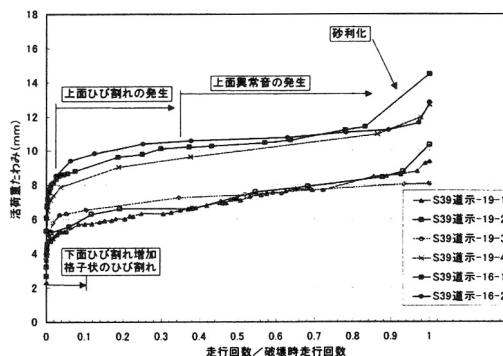


図-5 活荷重たわみと走行回数

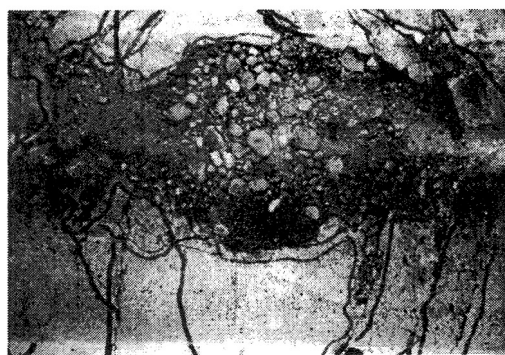


写真-3 床版上面の砂利化の状況
(S39 道示-19-2)

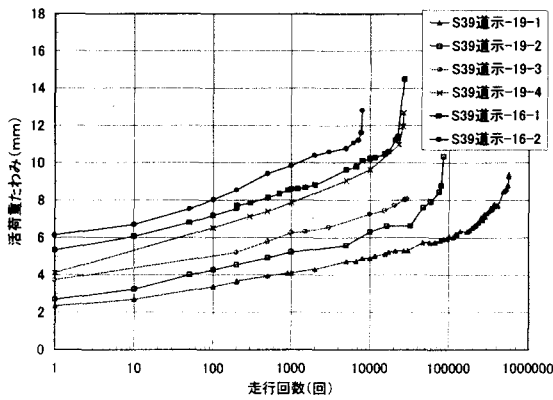


図-6 活荷重たわみと走行回数

ここで、使用限界状態の時、劣化度 D_d は 1.0 となる。なお、表-4 中には、図-6 における使用限界状態時の走行回数および破壊時走行回数に対する比を併せて示した。

1 回目の荷重によって、全ての供試体がコンクリート全断面有効時のたわみ値を上回った。これは、1 回目の荷重によって、ひび割れが発生したためと考えられる。走行回数の増加につれて、引張側コンクリートを無視した計算値に達し、その後、たわみの増加が大きくなり、破壊に至っている。ここで、使用限界状態時の走行回数は、前述の図-5 と併せて観察すると、床版上面に橋軸直角方向のひび割れが発生している時期と一致する。

各供試体の載荷荷重が異なっているため、図-7 に 100kN に換算した時の活荷重たわみと走行回数の関係を示す。図には、床版厚さ 19cm ならびに 16cm の引張側コンクリートを無視した時の計算値を併せて示した。各供試体のたわみは、引張側コンクリートを無視した時の計算値を超えてから、たわみが増加し破壊に至っていることがわかる。

5. 3 載荷荷重と破壊時走行回数の関係

表-5 に各供試体の載荷荷重と破壊時走行回数を示す。

RC 床版の疲労寿命を予測するための S-N 曲線は、松井¹⁾や園田・堀川⁵⁾によって提案されている。それらは鉄輪式の輪荷重走行試験機によるものや小型輪荷重走行試験機によるものであり、本研究で対象としているゴムタイヤ式の輪荷重走行試験機による検討は行われていない。

ここでは、本研究のゴムタイヤ式輪荷重走行試験機によって得られた載荷荷重と破壊時走行回数を、松井や園田・堀川による S-N 曲線と比較した。

式(2)に松井が提案している気乾時での S-N 曲線の関係式を、式(3)に園田・堀川の提案する S-N 曲線の関係式を示す。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.25 \quad (2)$$

ここに、 P : 作用荷重， N : 走行回数， P_{sx} : はり化した押抜きせん断耐力

表-4 活荷重たわみと走行回数

供試体名	床版厚さ (cm)	載荷荷重 (kN)	コンクリート全断面 有効時のたわみ (mm)	引張側コンクリート 無視時のたわみ (mm)	使用限界状態時 の走行回数 (回)	使用限界状態時 の走行回数/破 壊時走行回数
S39道示-19-1	19	220	1.08	5.89	90,000	0.16
S39道示-19-2		250	1.22	6.69	20,000	0.23
S39道示-19-3		250	1.22	6.69	4,000	0.14
S39道示-19-4		280	1.36	7.44	600	0.02
S39道示-16-1	16	220	1.75	9.38	4,000	0.15
S39道示-16-2		250	1.99	10.62	3,000	0.38

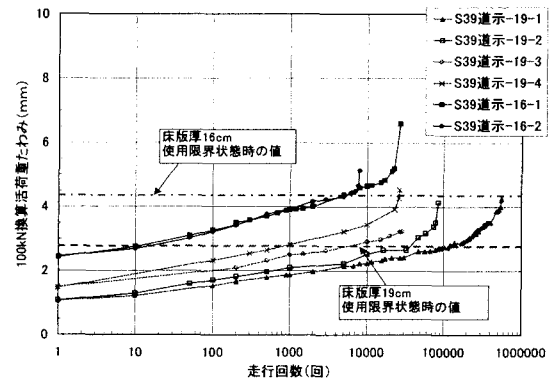


図-7 100kN 換算活荷重たわみと走行回数

表-5 各供試体の載荷荷重と破壊時走行回数

供試体名	床版厚さ (cm)	載荷荷重 (kN)	破壊時走行回数 (回)
S39道示-19-1	19	220	562,315
S39道示-19-2		250	85,157
S39道示-19-3		250	28,900
S39道示-19-4		280	26,600
S39道示-16-1	16	220	26,598
S39道示-16-2		250	7,934

$$\frac{P_f}{P_{so}} = 1 - \frac{\log N}{11} \quad (3)$$

ここに、 P_f : 作用荷重， N : 走行回数，

P_{so} : (はり部材のせん断耐力) $\times 2$

図-8 に式(2)による S-N 曲線を示す。S-N 曲線は、縦軸にはり化した押抜きせん断耐力 P_{sx} に対する載荷荷重 P の比を示し、横軸には破壊した時の走行回数をともに常用対数で示した。

図-8 において、本試験の結果は、松井による S-N 曲線より下方にプロットされた。また、松井による S-N 曲線の傾き約 13 乗よりも大きな約 19 乗の結果を得た。得られた S-N 曲線は次の式(4)のようになる。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.05145 \log N + \log 0.869 \quad (4)$$

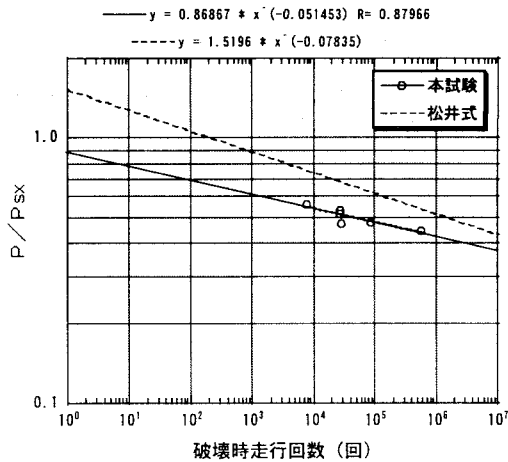


図-8 式(2)によるS-N曲線

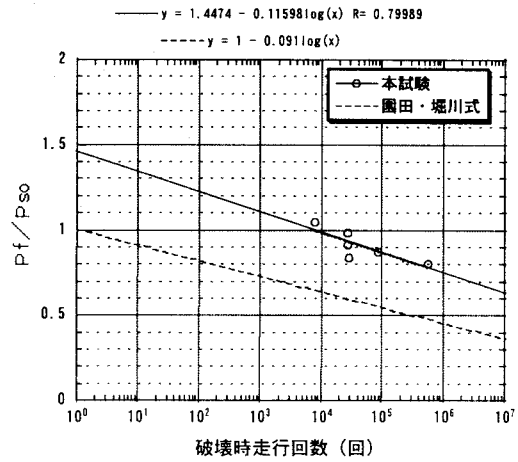


図-9 式(3)によるS-N曲線

図-9に式(3)によって整理したS-N曲線を示す。S-N曲線は、縦軸にはり部材のせん断耐力の2倍の耐力 P_{so} に対する載荷荷重 P_f の比を示し、横軸に破壊した走行回数を常用対数で示した。

図-9において、本試験の結果は、園田・堀川によるS-N曲線より上方にプロットされた。また、S-N曲線の関係式の傾きは、園田・堀川による11乗よりも小さく約9乗の結果を得た。得られたS-N曲線は次の式(5)のようになる。

$$\frac{P_f}{P_{so}} = 1.45 - \frac{\log N}{9} \quad (5)$$

本試験では、6体の少ないデータで整理しているため、ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機のS-N曲線の関係の整備には、さらなるデータの蓄積が必要であると推測される。

6. 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S39道示RC床版の疲労試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- 1) ひび割れの発生状況および損傷メカニズムは、鉄輪式輪荷重走行試験機による既往の研究と同様であった。
- 2) たわみは、引張側のコンクリートを無視した計算値を超えた付近から、たわみの増加率が大きくなって急増し、破壊に至ることがわかった。
- 3) S39道示RC床版のS-N曲線は、データ数が少ないが、既往の研究のS-N曲線と比較した。本試験の結果は、松井の提案式で整理を行った場合、そのS-N曲線より下方にプロットされ、S-N曲線の傾きは約19乗であった。また、園田・堀川の提案式のS-N曲線より上方にプロットされ、傾きは約9乗であった。

7. おわりに

現在、道路橋床版の疲労耐久性は、鉄輪式あるいはゴムタイヤ式の輪荷重走行試験機によって評価することの一般的となっている。

本研究では、ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の特徴を把握するため、S39道示RC床版を用いた。試験機の特徴を把握するために、さらなる試験データの充実を図り、検討することが必要である。さらに、これらのデータと鉄輪式の試験機による結果との照合を行って、本試験機の位置付けを見出すことが必要である。

今後、各機関との連携を図ることは、床版の技術課題の解決に繋がると推測される。

【参考文献】

- 1) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労寿命予測 -，安全工学，Vol.30 No.6，1991
- 2) 松井繁之，西川和廣，大田孝二：RC床版とその損傷（その2），橋梁と基礎，1998.6
- 3) 内田賢一，西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，土木学会第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，1998.11
- 4) 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-6，1986.10
- 5) 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-8，1988.2