

RC床版の輪荷重移動載荷疲労試験

Fatigue Tests for RC Slabs by Large Wheel Running Machine

鈴木 統*, 石井 孝男**, 森安 宏***, 松井 繁之****

Osamu SUZUKI, Takao ISHII, Hiroshi MORIYASU, Sigeyuki MATSUI

- *石川島播磨重工業(株) 橋梁基本計画部 (〒135-8322東京都江東区毛利1-19-10)
- **工博 石川島播磨重工業(株) 橋梁スタッフG (〒135-8322東京都江東区毛利1-19-10)
- ***石川島播磨重工業(株) 機械鉄構事業本部 (〒135-8322東京都江東区毛利1-19-10)
- ****工博 大阪大学教授 大学院工学専攻 土木工学科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

During these two decades, the number of Wheel Running Machines for highway bridge slabs have increased remarkably. But S-N curves have been stoked merely a few by S. Matsui, Osaka University. Ishikawajima-Harima Heavy Industry developed a large sized wheel running machine of 500kN capacity in dynamic with a special loading pad system. The pad system was separated into two steel plates of 240x200mm connected together by a key from the design wheel load attaching area of 500x200mm. It was modified to give uniformly distributed load over 500x200mm. The authors have tried to arrange S-N curves from thicker slabs using the machine. A S-N curve could be drawn little bit lower than existing curve obtained by Matsui.

key words: wheel running machine, loading pad system, RC slabs, fatigue test, S-N curve

1.はじめに

近年橋梁の床版に関する様々な実験が行われ、特に疲労耐久性を確認する試みが行われている。従来の定点載荷による疲労試験では実橋の床版の疲労破壊を再現できず、松井らの研究により、輪荷重移動載荷疲労試験機によって実橋床版の疲労損傷の状況を再現できることが確認された。松井らは多くのRC床版の試験結果から、供試体の大きさや寸法を無次元化することにより統一化されたS-N線式を提案し、これによってRC床版の実験室レベルでの疲労寿命の予測が可能となってきた。また、最近話題の省力化橋梁(少主桁橋梁)における床版は構造部材としての役割が期待され、それに伴って床版の研究が急速に増加し、各種の新形式の床版構造が開発され始めている。JH日本道路公団が所有する(社)建設機械化研究所の試験機や、建設省土木研究所の試験機など、阪大と同形式の試験機があいつい

で製作され、盛んに疲労耐久性に関する研究が行われている。

弊社においても、コンクリート系床版の研究開発促進のため、神奈川県綾瀬市の試験研究所に輪荷重移動載荷疲労試験機を設置した。ここで問題となるのは、各試験機は供試体・荷重の大きさや載荷方法などにそれぞれの特徴があり、各試験機による試験は必ずしも同一条件下による試験とは言い難いということである。

JHの試験機の諸元は建設省土木研究所の試験機のものと同様であるが、載荷ブロック(橋軸方向200mm, 橋軸直角方向500mm)を橋軸直角方向に2分割することにより(橋軸方向200mm, 橋軸直角方向250mm*2)、従来の幅500mmの載荷ブロックよりも床版のたわみへの追従性を改善するなどの特徴がある。

本研究においては、今まで実験を行ったRC床版の試験結果を用いて、S-N関係を近似する曲線を求め、従来の松井による

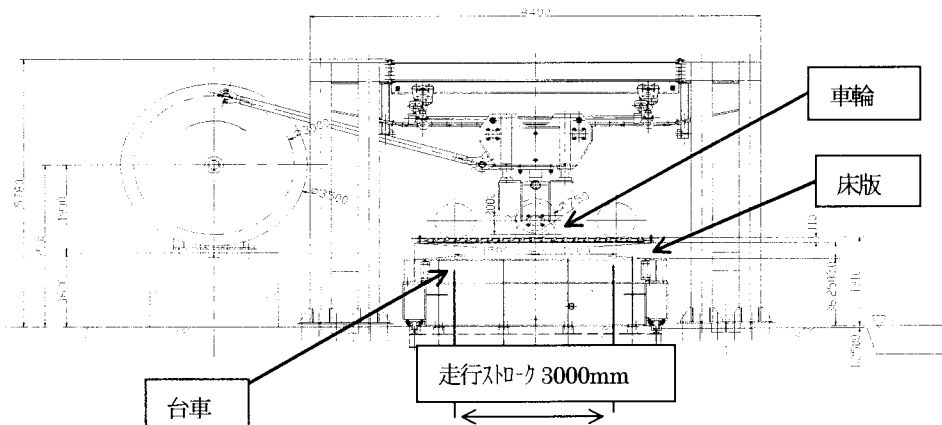


図-1 輪荷重移動載荷疲労試験機

S-N線図との相関を明らかにする目的で行うものである。

2. 試験機の概要

本試験機の概要を図-1、諸元を表-1に示す。

表-1 試験機諸元

主な仕様

項目	仕様	
形状・寸法	試験装置寸法	フレーム：高さ約5.8m×長さ約8m フライホイール：直径3.5m
	供試体寸法	標準 幅2.8m×長さ4.5m×厚さ0.16~0.35m (供試体幅 最大5.3m)
	車輪の種類	鉄輪：直径750mm×幅320mm
駆動	電動機	90KW×6P×AC400V×f3×50HZ (インバーター制御)
	走行範囲	±1.5m (±0.5/±1.0/±1.25m対応可)
	フライホイール回転数	MAX30rpm
載荷	載荷荷重	12t~50t
	シリンダ・ストローク	400mm

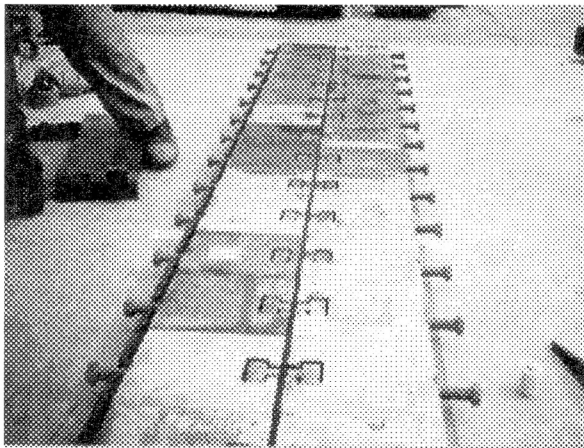


写真-1 載荷ブロック敷設状況

一般に鉄輪による載荷方式の輪荷重走行試験機においては鉄輪が供試体の床版上を直接走行することはできない。そのため供試体上の車輪の走行位置に幅500mm、長さ200mmの載荷版を敷設し車輪による線荷重を道路橋示方書に規定される輪荷重の載荷幅(幅500mm、長さ200mm)に変換する軌道装置が設置されている。しかし、床版に大きな荷重が載荷されたとき、床版はたわみを生じ500mmの幅の載荷版では載荷版全体に等分布する面荷重でなく、載荷版の端による橋軸方向の線荷重となる恐れがある。そこで本試験機の載荷版は幅方向500mmを2分割することによって床版支間方向のたわみに対して追従できるように計画されたものである。本試験機の特徴である分割された載荷ブロックの敷設状況を写真-1に示す。また、写真-2に示すように感圧シートを用いてブロック下の面圧を計測したところ、ムラ無く変色し一定の面圧であることが確認された。

3. 試験概要

本試験機を用いてRC床版のS-N関係の近似線を得るために、床版厚22cmの床版2体(RC22-1~2)と、25cmの床版1体(RC25)のデータを用いる。各床版の諸元を表

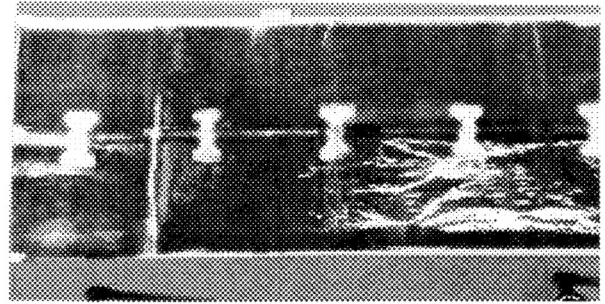


写真-2 面圧測定結果

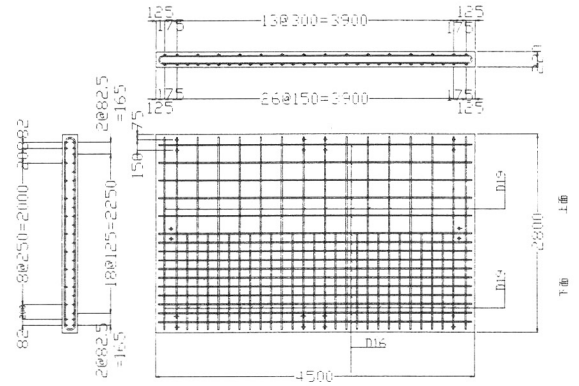


図-2 RC22-1, 2

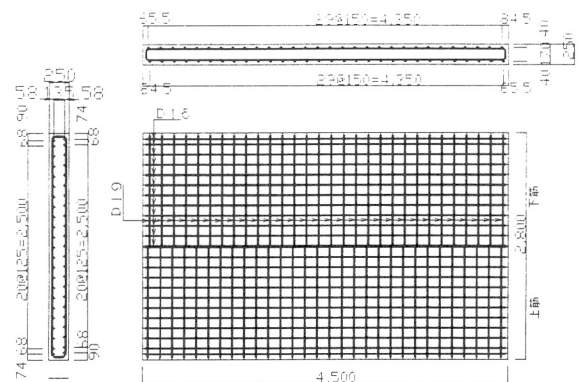


図-3 RC25

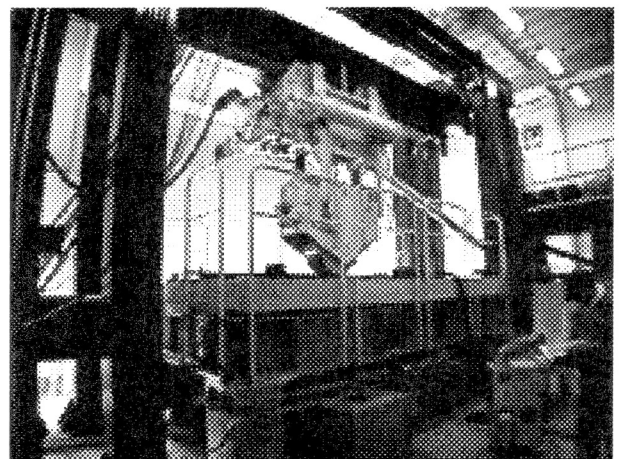


写真-3 移動載荷試験実施状況

図-2に、図面を図-2、3に示す。

床版への荷重方法は22cmの床版は、それぞれ異なった荷重で一定荷重荷重を行い、25cmの床版では荷重157kNから392kNまで、4万回毎に荷重を約20kNづつ上げていく階段状の荷重を行った。試験の様子を写真-3に示す。試験における荷重方法、荷重の大きさ、各供試体の破壊回数は表-3の通りであった。

表-2 供試体諸元

供試体名	寸法 (mm) B×t×L	σ _{ck} (N/mm ²)
RC22-1	2800×220×4500	24
RC22-2	2800×220×4500	24
RC25	2800×250×4500	30

表-3 試験方法および供試体破壊回数

供試体名	RC22-1	RC22-2	RC25
荷重方法	一定荷重	一定荷重	階段荷重
荷重荷重	323kN	235kN	157kN ~ 372kN
破壊回数	36,640	63,252	444,890

各供試体の破壊までの床版中央たわみ-荷重回数の関係を図-4、図-5、図-6に示す。

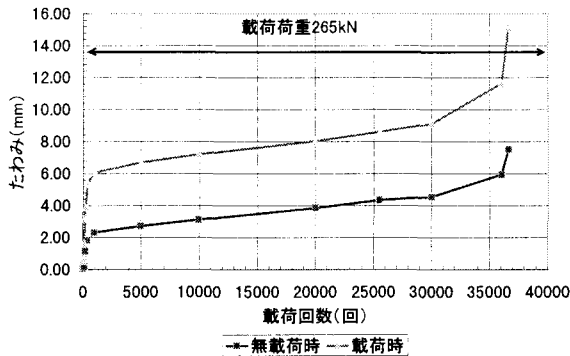


図-4 RC22-1 床版中央たわみ-荷重回数

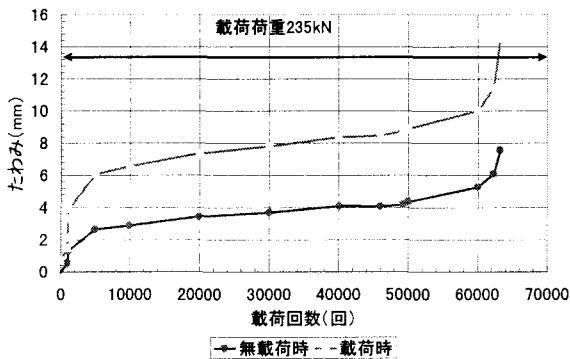


図-5 RC22-2 床版中央たわみ-荷重回数

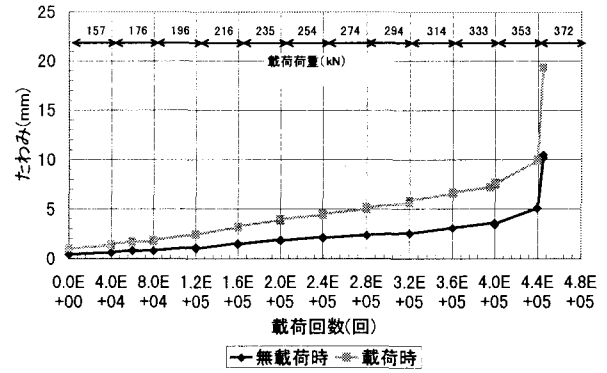


図-6 RC25 床版中央たわみ-荷重回数関係

図-4、5より、22cm厚の供試体は活荷重荷重時の総たわみが10mmを越えた近辺から急激にたわみが増加し、押し抜きせん断破壊に至った。25cmの床版は活荷重の増加に比例したたわみの増加を見せていたが、40万回の荷重を終えた時点からグラフの勾配が大きくなり、444890回で押し抜きせん断破壊を生じた。

4. S-N関係

RC床版は松井らの研究により、損傷のメカニズムが解明されていて、以下のような過程で疲労破壊に至ることが知られている。¹⁾

- ①コンクリートの乾燥収縮により、橋軸方向に引張り力が働いている状態での輪荷重の荷重により、主に主鉄筋方向へのクラックが発生する。
- ②主鉄筋方向のクラックにより配筋方向の剛性が小さくなり、床版は異方性になる。主鉄筋方向への曲げモーメントの負担が増加し、配筋方向へのクラックが発生する。
- ③版全体の剛性が低下し、また、貫通ひび割れの発生により、クラック位置でのこすれ・開閉によりコンクリート面の摩耗が生じる。クラックの数も増加し、亀甲状のひび割れとなる。
- ④コンクリートのせん断耐力が小さくなり、押し抜きせん断破壊が生じる。

この時、床版は主鉄筋方向に梁状化し、梁としての押し抜きせん断耐力が疲労耐久性に影響を及ぼすことが知られている。せん断耐力式、およびS-N曲線式は松井により以下のように提案されている。²⁾

梁状化したときのせん断耐力 P_{sx} は

$$P_{sx} = 2\tau_{smax} \cdot X_m \cdot B + 2\sigma_{tmax} \cdot C_m \cdot B \quad (式1)$$

P_{sx} を用いて無次元化された統一化したS-N曲線式

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

ここで

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度

$$\tau_{smax} = 0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$$

X_m : 引張り側コンクリートを無視した場合の主鉄筋断面の圧縮側コンクリート表面から中立軸までの距離

また、梁状化したときの梁の幅 B は

$$B = b + 2d_f \quad (式3)$$

b : 載荷板の配力筋方向の辺長

d_f : 引張り側配力筋の有効高さ

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張り応力度

$$\sigma_{tmax} = 0.583 (\sigma_{ck})^{2/3}$$

C_m : 主鉄筋のかぶり厚さ

(式1)、(式3)を用いて各供試体の P_{sx} 、B を求めると

RC22-1.2

$$P_{sx} = 437 \text{ kN}$$

$$B = 52.5 \text{ cm}$$

RC25

$$P_{sx} = 608 \text{ kN}$$

$$B = 58.5 \text{ cm}$$

各供試体は亀甲状のクラックが発生した後、最終的には押し抜きせん断破壊で実験を終了した。RC25 の押し抜きせん断破壊に至る過程のクラックの進行を図-5 に示す。

図-5 においては

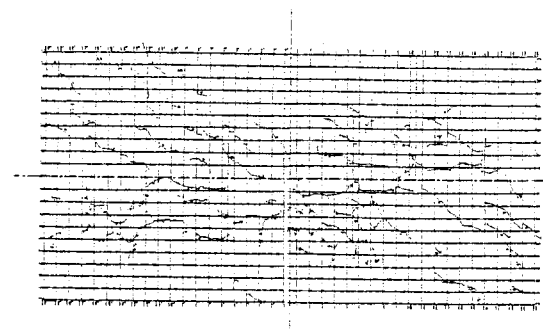
- ① 4 万回載荷後 : 主鉄筋に対して斜め方向にクラックが発生。上記破壊ステップの①に相当。
- ② 12 万回載荷後 : 配力筋方向のクラックが多数発生し橋軸方向、橋軸直角方向のクラックが繋がった状態になった。上記破壊ステップの②に相当。
- ③ 40 万回載荷後 : 橋軸方向、橋軸直角方向ともクラックが著しく増加。完全に亀甲状のひび割れとなっている。この時点では貫通ひび割れも多数発生し、クラック面のこすれ、目開きによりコンクリートの小片・粉が多数床版下面より落下。
- ④ 444890 回載荷後 : 載荷範囲中央を中心に、押し抜きせん断破壊を生じた。この時床版端部がかぶりコンクリートの剝離・落下が生じたが、これはたまたま弱点となる要素が落下部分に有ったと思われる。

実験終了後に供試体をカットし、断面において床版厚、鉄筋のかぶりを計測し、実際のコンクリート強度を用いて P_{sx} 、B を再計算したところ表-4 のようになった。

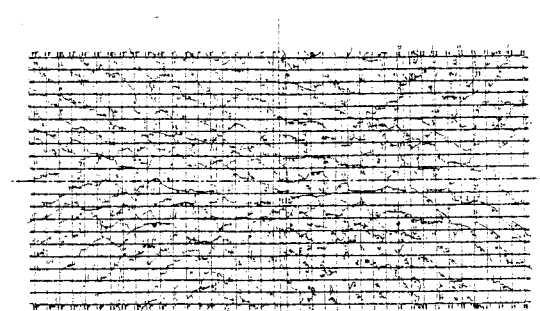
表-4 実測値より求めた P_{sx} 、B

供試体名	コンクリート強度	P_{sx}	B
RC22-1	25.2N/mm ²	436kN	53.46cm
RC22-2	25.8N/mm ²	423kN	52.66cm
RC25	36.2N/mm ²	667kN	58.5cm

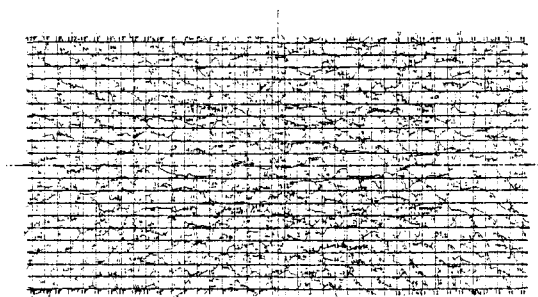
RC25 の階段載荷における破壊時の回数-荷重の関係を図-6 に示す。RC25 は 44 万回の載荷を終了し、荷重を 372kN に上げた直後に疲労による押し抜きせん断破壊を起こした。また、このグラフに RC22-1、2 の結果を 157kN からの階段載荷に換算した結果も同時にプロットする。(式1)を用いてマイナー則より荷重の換算式を求めると以下ようになる。各載荷荷重 P_i の n_i 回載荷の P_0 kN に対する等価繰返し回数を n_{ie} とすると、



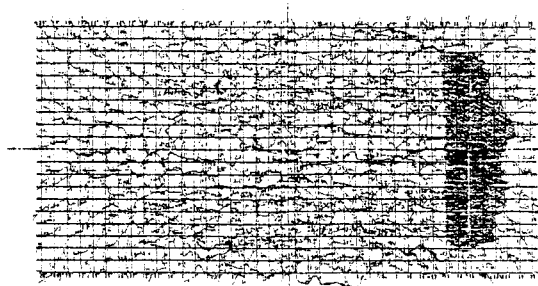
a) 4 万回載荷後



b) 12 万回載荷後



c) 40 万回載荷後 (破壊)



d) 444890 回載荷後

図-5 RC25 ひび割れ進展状況

$$nie = ni \times \left(\frac{Pi}{P0} \right)^{12.763} \quad (式 4)$$

ここで P i : 換算される荷重

P 0 : 換算する荷重

上式を用いて 264 kN、235kN の載荷回数を換算する。
366640 回、63252 回の破壊回数は表-5、6 のように換算された。これより RC22-1、2 とともに階段載荷を行った場合、載荷荷重 255kN 時に壊れる結果となった。

表-5 RC22-1 の階段載荷への換算

Pi(kN)	ni(回)	Σni	Pi/P0	nie(回)	Σnie
157	40000	40000	0.5947	5.265E+01	5.265E+01
176	40000	80000	0.6667	2.263E+02	2.789E+02
196	40000	120000	0.7424	8.937E+02	1.173E+03
216	40000	160000	0.8182	3.089E+03	4.261E+03
235	40000	200000	0.8902	9.059E+03	1.332E+04
255	40000	240000	0.9659	2.569E+04	3.901E+04

表-6 RC22-2 の階段載荷への換算

Pi(kN)	ni(回)	Σni	Pi/P0	nie(回)	Σnie
157	40000	40000	0.6681	2.325E+02	2.325E+02
176	40000	80000	0.7489	9.991E+02	1.232E+03
196	40000	120000	0.8340	3.946E+03	5.178E+03
216	40000	160000	0.9191	1.364E+04	1.882E+04
235	40000	200000	1.0000	4.000E+04	5.882E+04
255	40000	240000	1.0851	1.134E+05	1.723E+05

次に RC25 の結果を S-N 線図にプロットするため、階段載荷荷重 P をマイナー則を用いて 157kN の一定載荷荷重に変換する。荷重 157kN からスタートし、4 万回毎に荷重を 19.6kN ずつ 392kN まで上げ、最終的に 52 万回まで載荷を行う階段載荷を 156kN に換算した累積回数 Σnie を表-7 に示す。

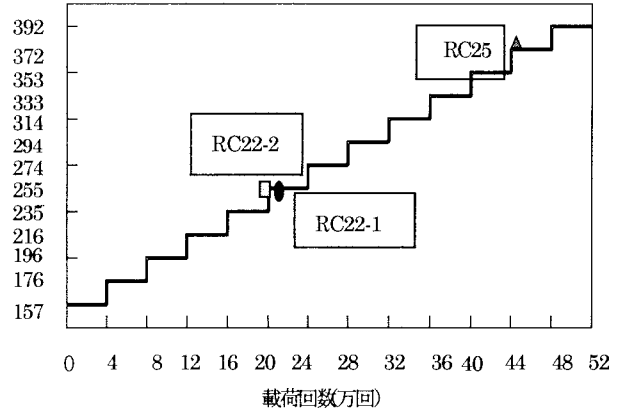


図-6 荷重-載荷回数関係

本床版が 444890 回 (372kN) で破壊したことより、157kN での換算回数 n は

$$n = 2.3049 \times 109 + (444.890 - 440,000) \times (372 / 157)^{12.763} = 2.6006 \times 10^9 \text{ 回}$$

となる。

表-7 階段載荷荷重の一定荷重 (157kN) への換算

Pi(kN)	ni(回)	Σni	Pi/P0	nie(回)	Σnie
157	40000	40000	1.0000	4.000E+04	4.000E+04
176	40000	80000	1.1210	1.719E+05	2.119E+05
196	40000	120000	1.2484	6.790E+05	8.909E+05
216	40000	160000	1.3758	2.347E+06	3.237E+06
235	40000	200000	1.4968	6.882E+06	1.012E+07
255	40000	240000	1.6242	1.952E+07	2.964E+07
274	40000	280000	1.7452	4.884E+07	7.848E+07
294	40000	320000	1.8726	1.200E+08	1.985E+08
314	40000	360000	2.0000	2.780E+08	4.766E+08
333	40000	400000	2.1210	5.885E+08	1.065E+09
353	40000	440000	2.2484	1.239E+09	2.304E+09
372	40000	480000	2.3694	2.419E+09	4.723E+09
392	40000	520000	2.4968	4.720E+09	9.443E+09

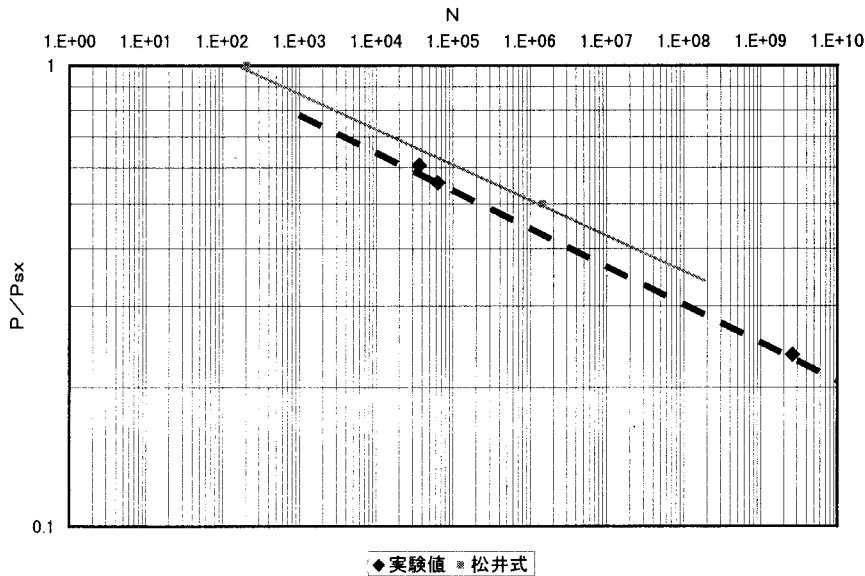


図-7 実験値 S-N 関係

以上の結果より、RC22-1、2、RC25の結果をプロットすると図-7のようになった。

図-7において、松井の提案するRC床版のS-N線とともに実験結果をプロットし、近似線を求めるとその式は

$$y=1.423x^{-0.083}$$

で表される。

これで見ると松井の式に比べてやや傾きがやや大きく全体に松井式より下側にシフトしているのがわかる。

5. 考 察

現在の段階ではプロットできる実験結果が少なく、S-N線を求めるにもやや無理が有ると思われる。松井式との相違については試験体の大きさ、載荷ブロックの形状など試験条件の相違の影響が考えられる。こうした中で今回の結果を得たことで、本試験機における疲労寿命の予測に多少なりとも参考になる結果が得られたものと思われる。

今後はプロット数を増やすことにより、更に精度のよいS-N関係の近似線を得られるようにするものである。

参考文献

- 1) 松井、大田、西川：RC床版とその損傷，橋梁と基礎 1998-5, pp49-53
- 2) 石井、谷倉、庄中、國原、松井：23年供用したRC床版の損傷実態・残存疲労寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究，土木学会論文集N0.537/I-35, 155-166, 1996.4