

## 分割型載荷板を用いた輪荷重走行試験による RC 床版の S-N 曲線の検討

Discussions for S-N curve of RC slab by wheel load running test with separated loading plates

大西弘志\*, 松井繁之\*\*, 渡邊裕一\*\*\*

Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI and Yuuichi WATANABE

\*工修, 大阪大学大学院助手, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\*工博, 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*石川島播磨重工業株, 橋梁事業部 (〒135-8731 東京都江東区豊洲 2-1-1)

Recently, many fatigue tests of bridge decks are carried out with wheel load running machines to know the durability of decks. The wheel load running machine (WLRM) is well known as the best simulator for the load condition under real traffic. In Japan, the number of operated WLRM is over 10 and it is on the increase.

In the fatigue test with WLRM, the results are generally evaluated with S-N curve given by previous studies. However, the data with WLRM is much affected with the support and loading condition. In this paper, the authors describe the results of fatigue tests using a new WLRM with separated loading plates and discuss the S-N curve on the results given by the new WLRM.

*Key Words: bridge decks, fatigue, wheel load running machine, S-N curve*

キーワード: 床版、疲労、輪荷重走行試験機、S-N 曲線

### 1. はじめに

現在, わが国において道路橋の維持管理上の最も重要な問題の一つとして床版の疲労損傷が考えられている。床版の疲労損傷は昭和 40 年代から見られ, そのメカニズムや対策の解明を目指した数多くの研究がなされてきた。これらの研究の結果, 近年では鉄筋コンクリート系床版の疲労劣化メカニズムが明らかとなり, 数多くの対策工法が開発・実用化されている。現在のような, 床版の疲労損傷問題に対して数多くの知見が集積され, 活用されるような状況がもたらされるようになった契機として, 輪荷重走行試験機による疲労試験方法の開発をあげることができる。

輪荷重走行試験機は, 実際の走行車両による荷重作用状況を正確にシミュレートすることで床版の疲労損傷を再現できる疲労試験装置である。国内には現在, 大小含め 10 台以上が稼動し, 現在も国内や韓国において設置計画が進められている。これらの輪荷重走行試験機は大きく分類すると, 床版の終局状態を観察するための促進試験に適したクランク式と実際の交通荷重が走行しているときの使用状態での床版の挙動を確認するのに適した自走式(タイヤ)に分類される。ただし, 同じ形式に分類される試験機においても, 床版の支持条件や荷重の載荷条件が微妙に異なることから疲労試験の結果に差が生じることが懸念さ

れている。

本研究では, 上記のような問題に対してどのように対処すればいいのかを明確にするために, 平成 10 年に設置された石川島播磨重工業株のクランク式輪荷重走行試験機を使用して得られた試験結果を利用することにした。この輪荷重走行試験機は載荷板形状に特徴があり, 2 つに分割された載荷板を使用することで実走行車両のタイヤによる荷重載荷状態を従来のものより精度よく再現できるようになっている。この試験機を用いて RC 床版供試体で走行試験を実施し, 機械固有の特徴や供試体支持方法の違いが疲労試験の結果にもたらす差について客観的に評価するためのデータを収集した。本論文では, 今回得られたデータに対して, 床版供試体自体, 輪荷重走行試験機ごとの違いとして補正すべきと考えられる項目について補正を行い, 異なる輪荷重走行試験機の結果に対して, 既往の研究で提示されている S-N 曲線を適用できるのかどうかを検討することにした。

### 2. 輪荷重走行試験機概要

#### 2. 1. 輪荷重走行試験機概要

本研究では既往の研究で使用されてきた輪荷重走行試験機と比較するための試験機として石川島播磨重工業株

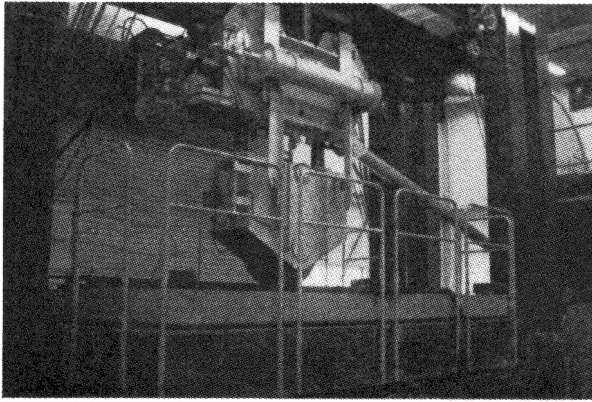


図-1 輪荷重走行試験機 (石川島播磨重工業株)

が保有するクランク式輪荷重走行試験機 (図-1) を使用した。以下に本試験機の概要を示す。

- 1) 形式 : クランク式輪荷重走行試験機
- 2) 車輪 : 鉄輪 (直径 750mm、幅 500mm)
- 3) 載荷荷重 157kN~490kN
- 4) 供試体寸法(最大) :  
幅 5.3m×長さ 5.0m×厚さ 0.35m
- 5) 走行速度 : 最大 17km/h (30r.p.m)
- 6) 載荷板 : 幅 50cm×長さ 20cm の載荷板を 2 枚に分割したもの (図-2)

特に、本試験機は載荷板の形状に特徴があり、これまでに例のない形状となっているため、載荷板の性能を確認するための面圧分布の測定を実施した。測定の方法と結果を図-3に示す。図-3 (b)を見ると明らかなように、本試験機の載荷ブロックを使用することで載荷ブロック直下における面圧の分布は一様であり、均一な分布荷重の付与が実現できていることが確認されている。

## 2. 2. 供試体概要

本研究で試験された床版の配筋図一例を図-4に、供試体の諸元を表-1に示す。今回使用した供試体は橋軸方向 4.5m×橋軸直角方向 2.8m×床版厚 22cm の寸法を有する RC床版であり、試験時の床版支間は 2.5m である。今回の試験では供試体 1, 2, 3, 6 と供試体 4, 5 で鉄筋の配置と使用するコンクリートの設計基準強度を変化させ、供試体 4, 5 の押抜きせん断強度が供試体 1, 2, 3, 6 よりも大きくなるように設定している。今回の試験で使用するコンクリートの材料試験結果を表-2に示す。今回の一連の試験では、試験の結果得られる破壊寿命に幅を持たせるために、ある程度、載荷荷重の大きさに差をつけて試験を実施した。

## 2. 3. 試験結果概要

本研究により得られた結果を表-3に示す。今回の試験では供試体 No.3 以外は全て一定の荷重で載荷を行い、押し抜きせん断破壊を生じさせている。この試験結果を既往の S-N 曲線と比較した結果を図-5に示す。図-5の縦軸には既往の研究で数多く採用されている指標である、走

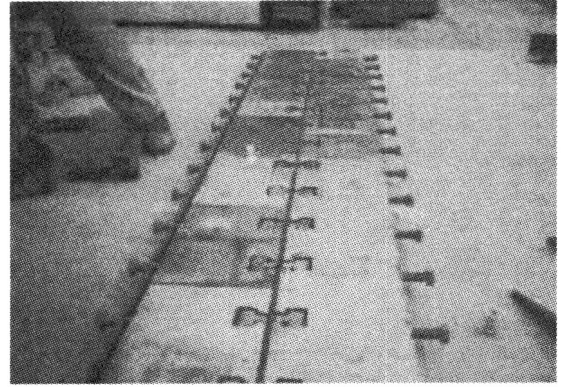
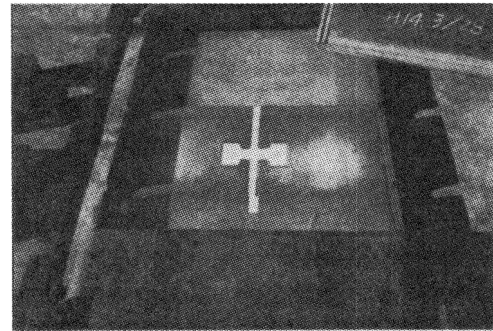
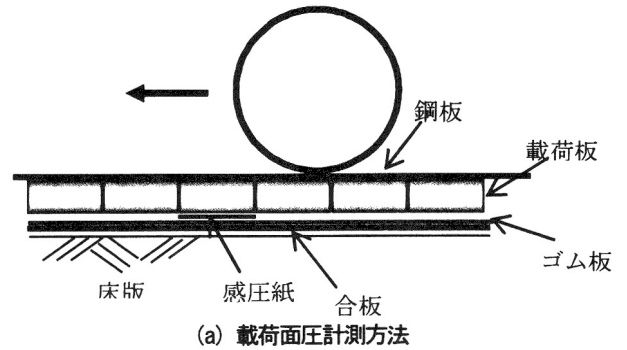


図-2 分割型載荷ブロック



(b) 載荷面圧計測結果

図-3 載荷面圧の計測

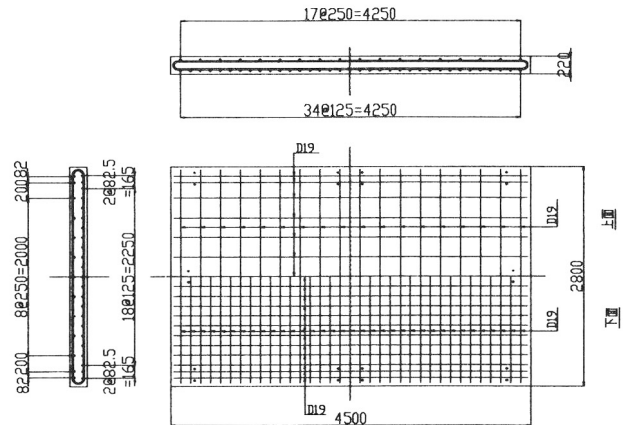


図-4 床版配筋図

表-1 RC 床版供試体諸元

供試体 No.	供試体寸法	引張主鉄筋	引張側配力鉄筋
1, 2, 3, 6	2800×220 ×4500	D19@150	D16@125
4, 5		D19@125	D19@125

表-2 コンクリート材料試験結果

供試体 No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング率* (kN/mm <sup>2</sup> )
1	25.2	2.41	17.13
2	25.8	2.49	17.67
3	27.4	2.42	19.20
4	34.5	2.78	25.68
5	38.8	2.95	29.64
6	32.9		24.24

\*ヤング率は、次式による計算値:  $E_c = 900 \cdot (\sigma_c - 300) + 210000$

行荷重を床版の使用限界時の押抜きせん断荷重  $P_{sx}$  で除して無次元化した  $P/P_{sx}$  を荷重強度の指標として用いている。図中の実線と破線は既往の研究の中でも参照される場合が多いと見られる、土木研究所と大阪大学の輪荷重走行試験機により得られたS-N曲線である。この図を見ると今回の試験の結果は、既往の研究の代表例である2つの曲線とは異なる傾向を示しており、試験機の違いによる差異が明確に現れたものと考えられる。

### 3. 試験結果の補正

前述のように今回の試験で得られた結果は既往の研究の結果と比較して傾向が異なることが確認された。この原因としては試験機の詳細な点における差の影響を受けていることが想定されるが、試験機ごとに傾向が異なるS-N曲線を用意し、評価に用いることは合理的であるとは言い難い。そこで、本研究では次に示す点に対する補正を行うことにより、今回得られた試験結果に対して既往のS-N曲線を適用することを試みた。

- ①床版厚、鉄筋位置
- ②コンクリートの圧縮強度
- ③コンクリートの弾性係数
- ④荷重
- ⑤載荷板
- ⑥載荷板幅と床版支間

これらの補正に関する項目のうち①-③は床版そのものの施工精度に関する補正であり、既往の研究においてもしばしば補正対象となった項目である。また、項目④は試験機自体の精度、⑤は荷重の分布状況、⑥は床版の支持条件に関する補正であり、これまでに補正対象になる場合がほとんどなかった項目であるといえる。本研究ではこれらの項目のうち①-③がよく適用されていることを考慮して、これらの項目に関する補正を先に行い、続いて④-⑥の補正を実施することにした。

#### 3.1. 床版厚、鉄筋位置の補正

本研究では、はじめに設計段階で設定した床版厚、鉄筋配置と実際の床版の床版厚、鉄筋位置の相違に着目し、補正を実施することにした。実際の床版厚と鉄筋の位置は輪荷重走行試験終了後、床版を切断して直接計測することにより求めた。 $P_{sx}$  の算出には測定断面内における全ての測定値の平均値を用いた。表-4中にこの補正により得られ

表-3 試験結果

供試体	載荷荷重 (kN)	載荷回数
No. 1	264.6	36,640回
No. 2	235	63,252回
No. 3	196 →235(30万回以降)	405,146回
No. 4	323.6	22,846回
No. 5	196	2,700,000回
No. 6	225	347,852回

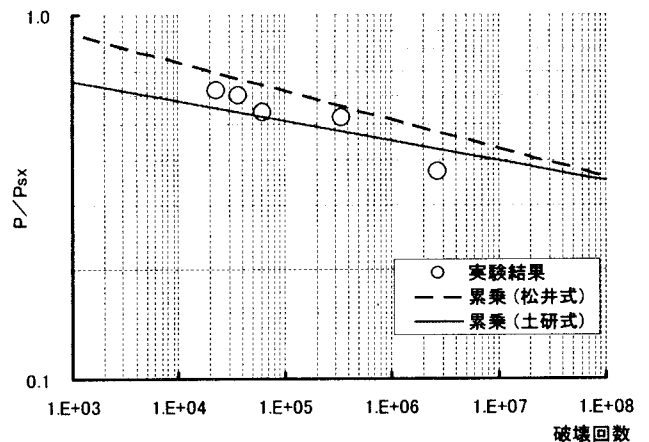


図-5 試験結果のS-N関係 ( $P_{sx}$  は設計段階の情報を用いて算定)

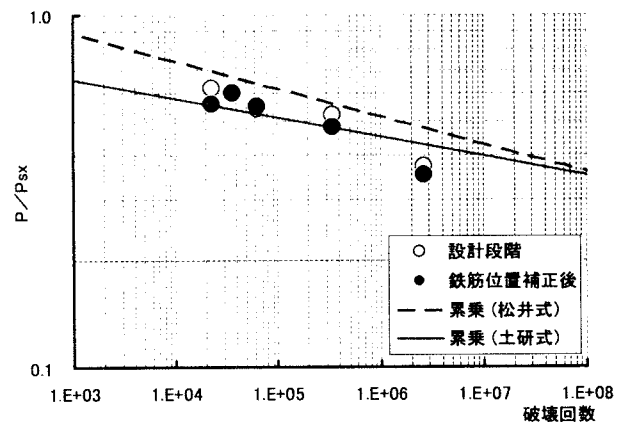


図-6 鉄筋位置による補正結果

表-4 鉄筋位置等による補正

供試体No.	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{smax}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$X_m$ (cm)	配力筋 $d_s$ (cm)	主筋 $d_c$ (cm)	B(cm)	$\sigma_{tmax}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	主筋 $C_m$ (cm)	$P_{sx}$ (kgf)
1	25.2 257	48.52	6.46	16.23	17.62	52.46	23.57	4.4	43787
2	25.8 283	49.26	6.34	15.83	17.39	52.46	23.93	4.27	42825
3	27.4 290	51.27	6.38	16.8	18.16	51.66	24.95	4.97	48358
4	34.5 352	58.22	6.27	16.63	18.77	53.26	29.06	4.97	54268
5	38.8 396	61.22	5.80	16.28	18.27	52.56	31.44	4.64	52861
6	33 337	1.84	6.00	16.28	19.03	50.30	28.23	4.64	48457

た鉄筋位置の測定結果を示し、図-6にこの補正に伴うデータの変化を示す。

これらの補正の結果を見ると、補正後のデータは設計段階の情報でプロットされた点よりも土木研究所の試験結果により得られたS-N曲線に近づいていることがわかる。このことは、本研究の輪荷重走行試験で用いた試験機の載荷条件が大阪大学の試験機よりも土木研究所の試験機の

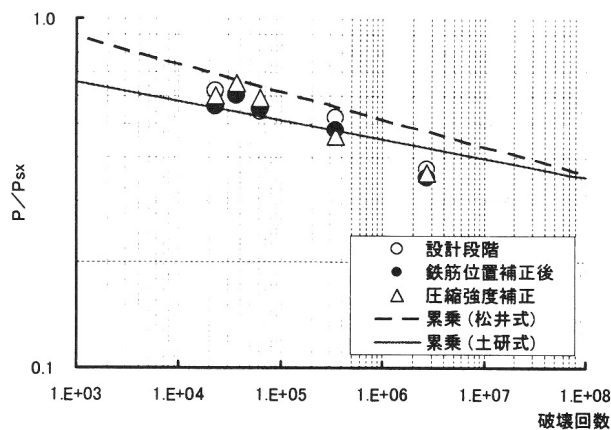


図-7 圧縮強度による補正結果

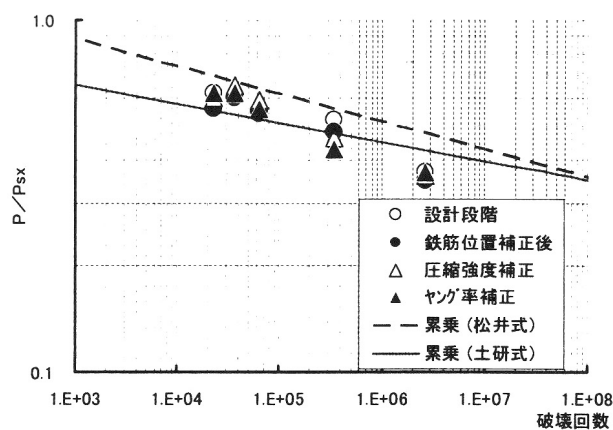


図-8 ヤング係数の補正結果

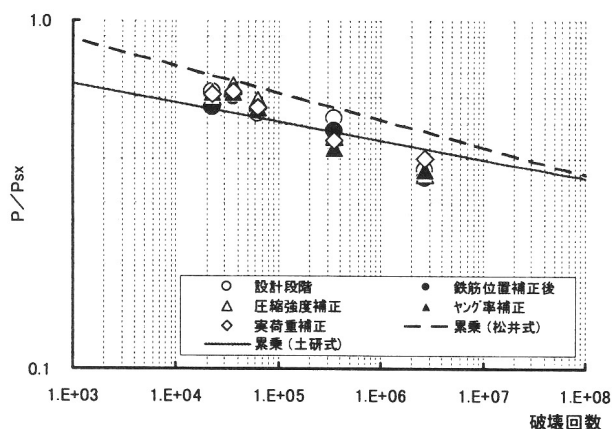


図-9 荷重実測値を用いた補正結果

条件に近いこと由来するものと考えられる。しかしながら、全体としては既往のデータに近づいていると評価できるものの、一部のデータでは逆に既往のデータから外れるような変化を示しているものもあることから、さらに補正を加えることにした。

### 3. 2. 圧縮強度の補正

これまでの  $P_{sx}$  の算定には、コンクリートの圧縮強度に設計基準強度を用いていたので、これを材料試験により得られた実測値（表-2参照）に置き換え、コンクリートの引張強度とせん断強度を求め、 $P_{sx}$  の算出に用いるという補正を行なった。なお、この段階ではヤング率は設計段階の仮定のみであるので、 $n=15$  となっている。この補正により得られた結果を図-7に示す。

この図を見ると各データの変動としては既往の土木研究所のデータに近づかず、離れる傾向が明確になっていることがわかる。このことから、コンクリートの物性による補正は圧縮強度のみによるものでは不十分であると判断されたので、更なる補正を実施することにした。

### 3. 3. ヤング率の補正

前述のように、コンクリートの物性に関する補正で、圧縮強度の実測値を用いた補正では実験データの補正が十分ではないと判断されたので、本研究ではコンクリートのヤング率に対する補正も実施することにした。ここで、

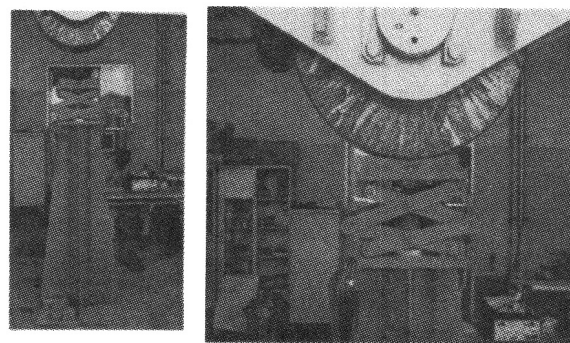


図-10 荷重検定状況

本研究では材料試験時のデータから求まるヤング率を用いるのではなく、以下の式により与えられるヤング率を用いることにした。

$$E_c = 900 \cdot (\sigma_{ck} - 300) + 210000 \quad (1)$$

ここで、 $E_c$  : コンクリートのヤング率 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ck}$  : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

この式は多数ある既往の研究の内、大阪大学でなされた試験結果の整理に使用されているものである。この式を用いて試験結果の補正を実施した結果を図-8に示す。

この補正によるデータの変動状況を確認すると、本研究で実施した輪荷重走行試験においてはコンクリートのヤング率による補正ではデータにさほどの変動が無いことがわかる。そこで、本研究では材料物性による補正のみでは実験結果の適正な評価は困難であると判断し、さらに荷重項での補正を加えることにした。

### 3. 4. 荷重の補正

本研究ではすでにコンクリートの材料物性に基づく補正を実施したが、データの補正が十分になされたとは判断できなかったため、続いて荷重の補正を実施することにした。本研究では図-10に示す専用の治具を用意し、載荷荷重の測定を実施し、その結果に基づいて補正を実施することにした。荷重の測定は荷重の校正後1年経過時であり、稼働率が高い時期に実施している。このときの測定の結果、

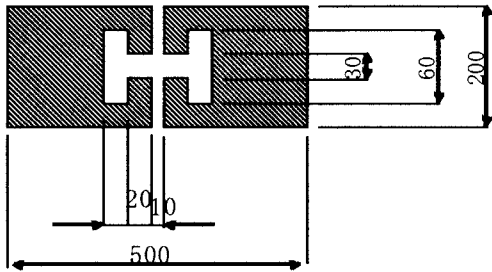


図-11 本研究で使用了試験機の載荷板寸法

載荷荷重が 12tf~26tf の範囲では、指令値と実測値との誤差は+0.1%~+0.8%であった。載荷荷重が 28tf~40tf の範囲については+1.6%~+3.4%の誤差が確認された。これらの測定結果を試験結果に反映させた結果を図-9に示す。この結果を見ると  $P/P_{sx}$  の値が小さい領域にある2点のデータが土木研究所の S-N 曲線に近づいているが他の3点に関しては大きな変動が確認できておらず、これらの点では荷重による影響がさほど大きくなかったことがわかった。しかしながら、このままではこれらの点に対して既往の S-N 曲線を適用できないことから、本研究では続いて載荷条件に関する補正を行なうことにした。

### 3. 5. 載荷板の補正

本研究で使用了輪荷重走行試験機では、載荷に際して、輪荷重が均一に作用する状態を再現するために、図-11に示すような2つに分割された載荷版を使用した。これは載荷版の幅が 500mm 程度になると、載荷に用いている車輪や載荷板が床版と比較して十分に剛であるので、載荷版の短辺付近にせん断力が集中してしまうのではないかと懸念があるため、それを解消するために開発された構造である。しかしながら、この構造の載荷版を使用した場合、載荷版自体の有効面積が  $920\text{cm}^2$  程度になり、載荷部分での面圧の上昇が無視できなくなると考えられる。つまり、応力レベルで考えると、載荷板直下の面圧の上昇に伴い載荷板の端部におけるせん断応力が大きくなっており、実際の荷重により計算される効果よりも大きな影響を受けているものと考えられる。そこで、本研究ではその影響を勘案するために載荷板の面積比を用いて補正を実施することにした。前述のように、本研究で使用された載荷板の有効面積は  $920\text{cm}^2$  であるのに対し、土木研究所の試験機の載荷板の面積が  $1,000\text{cm}^2$  であることから、面圧は  $1000/920 \approx 1.09$  倍となるので、本研究では実際の荷重を 1.09 倍にして評価を行うことにした。この補正を実施した結果を図-12に示す。

この図を見ると、荷重比が大きいグループ ( $P/P_{sx} \geq 0.6$ ) のデータは大阪大学の S-N 曲線に近づき、荷重比が小さいグループ ( $P/P_{sx} \leq 0.6$ ) は土木研究所の S-N 曲線の上に位置することがわかる。これは本試験機で使用了載荷板が期待通りの性能を發揮した結果、荷重比が大きい範囲で

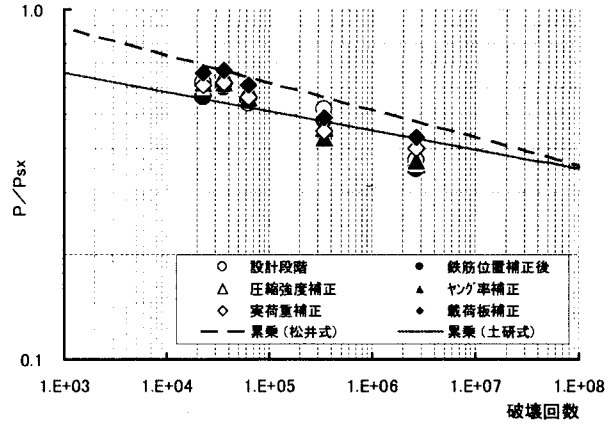


図-12 載荷板の違いによる補正の結果

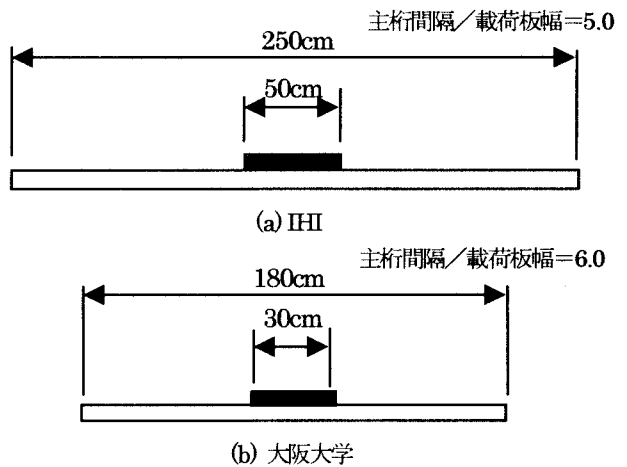


図-13 載荷板幅と床版支間の比較

は土木研究所の試験機と異なり載荷板端部にせん断力の集中という現象が発生しなかった結果、補正されたデータが大阪大学の S-N 曲線に近づいたものと考えられる。他方、荷重比が小さい範囲では土木研究所方式の載荷板でも載荷板の全面に荷重が均一に分布したため、今回使用した載荷板との大きな差がなくなった結果であると考えられる。この段階で本研究において収集された試験データと既往の試験データの間である程度の補正ができたと思わせるが、この段階では走行試験時の荷重レベルによって傾向が異なる2本の S-N 曲線を用いて評価しなくてはならないということになる。そこで、本研究ではさらに6つ目の項目である載荷板幅と床版支間に着目した補正を行い、単独の S-N 曲線で今回得られた試験結果を評価できる可能性があるのかどうかを確認することにした。

### 3. 6. 載荷板幅と床版支間による補正

本研究では単独の S-N 曲線での評価を実施するために載荷板幅と床版支間の大小関係による影響に着目し補正を試みることにした。今回の検討では荷重比が大きいグループ ( $P/P_{sx} \geq 0.6$ ) のデータが大阪大学の S-N 曲線に近いこと、荷重比が小さいグループのデータでも大阪大学の S-N 曲線から離れていないことから、評価を行うための単独の S-N 曲線として大阪大学の S-N 曲線を用いることを想定して補正を実施することにした。

今回の補正では本研究で実施された走行試験の支持条件と大阪大学の走行試験の支持条件を比較、検討した。これらの試験における支持条件を図-13 に示す。この図を見ると明らかなように、本研究で実施した試験と大阪大学で実施された試験では床版支間と載荷板幅の比が異なっている。ここで、この影響により床版に作用するせん断力を計算により求め比較すると、本研究で実施した走行試験の条件（床版支間／載荷板幅＝5.0）のほうが大阪大学で実施された試験の条件（床版支間／載荷板幅＝6.0）よりも大きなせん断力が作用することがわかり、その比は1.014 であることがわかった。そこで、この結果をもとに試験データの補正を行った結果を図-14 に示す。この図を見ると、 $P/P_{sx}=0.5$  付近のデータが少し離れてはいるが、それ以外のデータは大阪大学のS-N 曲線に十分に近く、今回得られたデータの疲労耐久性をこの曲線により評価することができたものと結論付けた。

#### 4. 結論

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 本試験で採用した2分割型の載荷板を用いることにより、 $P/P_{sx}$  が大きい範囲においてもせん断力の集中による影響を回避することができた。
- 2) 今回用いた試験機によるデータに関して、鉄筋位置・床版厚、圧縮強度、ヤング率、荷重、載荷板面積、載荷板幅と床版支間の関係、の6項目に関する補正を実施すれば既往のS-N 曲線を用いて疲労耐久性の評価を行うことが可能である。
- 3) 今回の一連の検討の結果から、RC床版の輪荷重走行試験結果を単独のS-N 曲線で評価する場合、その曲線は大阪大学で作製されたものになる可能性が高い。(図-15 参照)

#### 参考文献

- 1) 松井繁之：橋梁の寿命予測、安全工学 Vol. 30, No.6, pp.432-440, 1991
- 2) 例えば、建設省土木研究所：道路橋床版の輪荷重走行試験機における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書（その1）—標準試験方法および第1回試験報告—、共同研究報告書第221号、平成11年3月

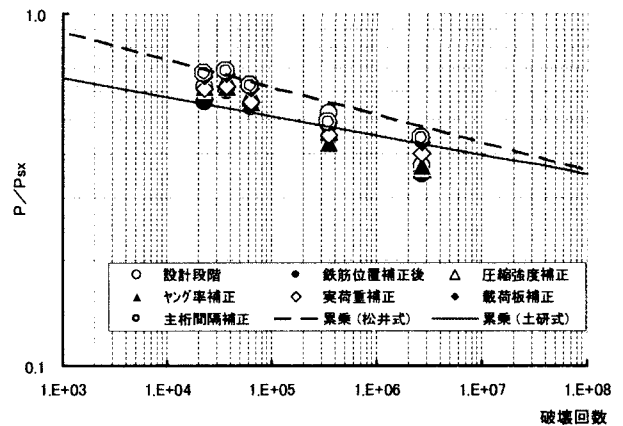


図 - 14 載荷板幅と床版支間による補正の結果

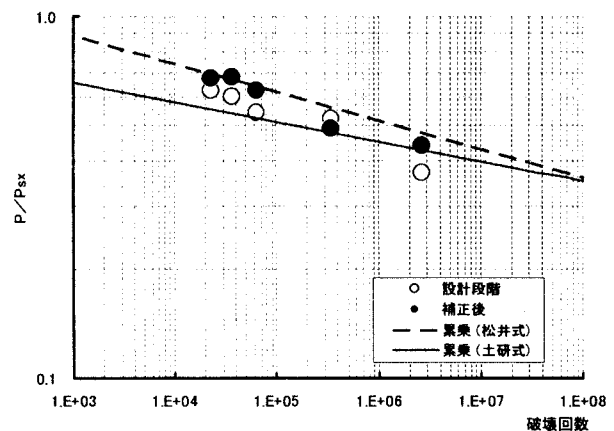


図 - 15 補正によるデータの移動