Japan Concrete Institute

[2108] 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について

正会員 松井繁之（大阪大学工学部）

1. まえがき

道路橋ＲＣ床版の損傷問題が発生してから約２０年経過した。この間、床版設計法は数次にわたって改訂が行われるとともに、既存の損傷床版に対しては種々の補修・補強対策が講じられ、一見問題は鎮静化したように見られる。しかし、床版の損傷機構、疲労強度等についてまだ明確な結論は出ておらず、合理的な疲労設計法は確立されていない。さらに、現行の補修法の効果も根本的には評価されていないのが現状であろう。

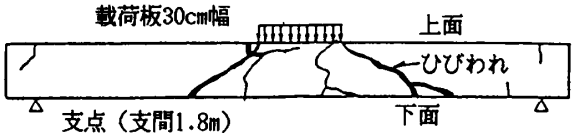
本論文はＲＣ床版のひびわれ損傷を道路橋特有の疲労現象であるとの観点に立って、ＲＣ床版に対する疲労設計法確立の基礎となる疲労強度の評価法について述べるものである。さらに、実橋の観察から、損傷には輪荷重の繰り返し載荷だけが原因するのではなく、雨水も大きな影響因子になっていると推察できることから、供試体床版の上面に水を張って実験を行い、その影響度を基礎的であるが定量的に調べた。これらの結果を併せて述べ、床版防水工の必要性を強調した。

2. 疲労実験法と疲労強度の評価法について

2.1 輪荷重走行試験法

ＲＣ床版の損傷は広義の疲労であるとの認識から種々の疲労実験が行われてきた。その中で、自動車の走行性に起因するねじりモーメントとせん断力の交番繰返しが損傷の主原因であるとの着想から、筆者ら[1]、園田ら[2]、および、川口ら[3]は輪荷重を走行させる疲労実験法を開発し、多くの疲労実験データを報告している。また、実物大のトラックを円軌道上に走行させる道路耐久性試験装置を用いた疲労実験も行われている[4]。これら輪荷重走行試験法によれば、床版は荷重下の一部で押し抜きせん断破壊的なせん断破壊を起こし、実橋床版の陥没破壊がほぼ説明できるようになった。図－１は筆者の実験床版を破壊位置でカットした横断面図である。載荷板の両端からせん断破壊したことがわかる。

そして、それらのＳ－Ｎ結果は従来の一定点載荷法による結果から大幅に低下し、実橋の疲労寿命推定も可能になってきた。



図－１ せん断破壊を示す横断面.

2.2 既往のＳ軸表現法によるＳ－Ｎ曲線

筆者はこれまで表－１に示す実物大床版（ＦＡ、ＦＢｼﾘｰｽﾞ）の疲労実験を行った。ＦＡｼﾘｰｽは旧示方書[5]に準拠し配力鉄筋比を約４０％にしたのものである。一方、ＦＢｼﾘｰｽﾞでは現行示方書[6]に準拠してそれを７７％にした。これら２シリーズの結果をＳ－Ｎ図にプロットしてみる。

表－１ 筆者および園田が実験した床版の諸元.

供試体	シリーズ	供試体数	寸法 (cm)	支間 (cm)	主鉄筋 径 (cm)	主鉄筋 有効高 (cm)	主鉄筋 間隔 (cm)	配力鉄筋 径 (cm)	配力鉄筋 有効高 (cm)	配力鉄筋 間隔 (cm)
著者	ＦＡ	5	200x300x19	180	D16	16(3)	9(18)	D13	14.5(4.6)	25(40)
	ＦＢ	5	〃	〃	〃	15(4)	10(20)	D16	13.4(5.6)	13(26)
園田ら	ＩＳ	6	90x310x7.2	80	Ø6	6.2	5.0	Ø6	5.6	5.0
	ＩＲ	6	〃	〃	〃	〃(1.6)	〃(10)	〃	〃(1.0)	〃(10)
	ＩＤ	6	〃	〃	〃	〃(〃)	〃(〃)	〃	〃(〃)	〃(〃)
	ＯＳ	5	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
	ＯＲ	3	〃	〃	〃	〃(〃)	〃(〃)	〃	〃(〃)	〃(20)

注：（）内は複鉄筋断面の上側鉄筋の諸量

一般に、新コンクリート標準示方書[7]でも見られるように、コンクリートの疲労強度特性を

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

表わすＳ－Ｎ曲線の縦軸Ｓには最大作用荷重／静的耐荷力の無次元量が採用される。ここでも、まずこの表現法を使用するが、静的耐荷力Ｐｏ を計算する必要がある。輪荷重のような部分集中荷重が作用する場合、一般的に床版は押し抜きせん断破壊し、Ｐｏ にこの耐荷力を充てることができ、これは筆者の提案した次式の押し抜きせん断耐荷力評価式[8]で計算できる。

$$Po=\tau_{smax}\{2(a+2x_m)x_d+2(b+2x_d)x_m\}+\sigma_{tmax}\{2(4C_d+2d_d+b)C_m+2(a+2d_m)C_d\} \quad (1)$$

ここに、τ_{smax}：コンクリートの最大せん断応力度（$\tau_{smax}=0.252\sigma_{ck}-0.000246\sigma_{ck}^2$）、

σ_{tmax}：コンクリートの最大引張応力度（$\sigma_{tmax}=0.583(\sigma_{ck})^{2/3}$）、

σ_{ck}：コンクリートの圧縮強度、

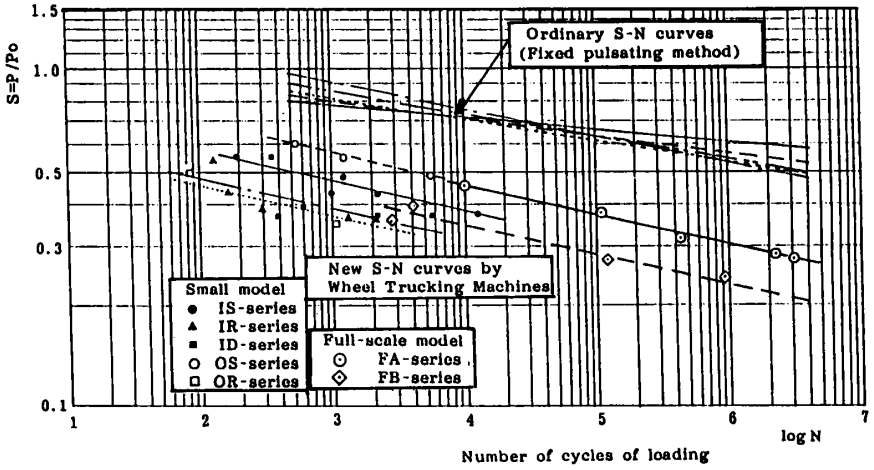
a，b：載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の辺長、

x_m，x_d：引張側コンクリート無視した場合の主鉄筋断面、配力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、

d_m,d_d：引張側主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ、

C_m,C_d：主鉄筋、配力鉄筋のかぶり厚さ。

最終的に、Ｓ－Ｎ曲線は図－２のようになり、ＦＡｼﾘｰｽﾞとＦＢｼﾘｰｽﾞが明瞭に分離した。そして、ＦＢｼﾘｰｽﾞのほうがＦＡｼﾘｰｽﾞのものよりも下方にきた。載荷荷重を直接比較すると、同じ寿命に対してはＦＢｼﾘｰｽﾞの載荷荷重はＦＡｼﾘｰｽﾞよりも大きく、配力鉄筋の増加は疲労強度の向上には寄与していることがわかる。しかし、縦軸Ｐ／Ｐｏ の無次元量で表示すると図－２のようになってしまう。これは、ＦＢｼﾘｰｽﾞのＰｏ が配力鉄筋の増加によって大幅に大きくなったためである。



図－２　Ｓ軸にＰ／Ｐｏを用いたＳ－Ｎ曲線.

この図に園田ら[2] のモデル床版の結果も併記した。表－１に記した条件で実験された。試験体の厚さが７．２cmと小さく、かつ、１万回までの載荷であるが、傾きはほぼ一致した。しかし、筆者らの結果よりやや低い方にプロットされたが、これには床版厚が影響していると判断できる。

2.3　統一化したＳ－Ｎ曲線

上記のようにＳ－Ｎ曲線は配力鉄筋比、床版厚が異なれば違ったものになり、Ｐ／Ｐｏ の表現法を使用するかぎり、床版構成パラメーターが変わる毎に実験し、Ｓ－Ｎ曲線を求めなければならないことになる。これは不可能に近い。そこで、縦軸の表現を変えて統一化したＳ－Ｎ曲線が呈示できないものかと模索した。

最終的に、破壊現象に着眼すればよいことがわかった。すなわち、疲労繰り返しが進むにつれて、主鉄筋方向にひびわれが一定間隔で発生し、床版は板構造からはり状化し、最終的に主鉄筋断面がせん断破壊する。よって、はりのせん断耐荷力を基準にしてもよいことに帰着した。

筆者の実験した供試体について貫通ひびわれの間隔について調査してみたところ、約４０cm前後の間隔であった。園田の結果は床版厚が小さいため、これよりは小さかった。詳細な観察と検

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

討の結果、この間隔Bは次ぎのように計算したものとほぼ一致した。

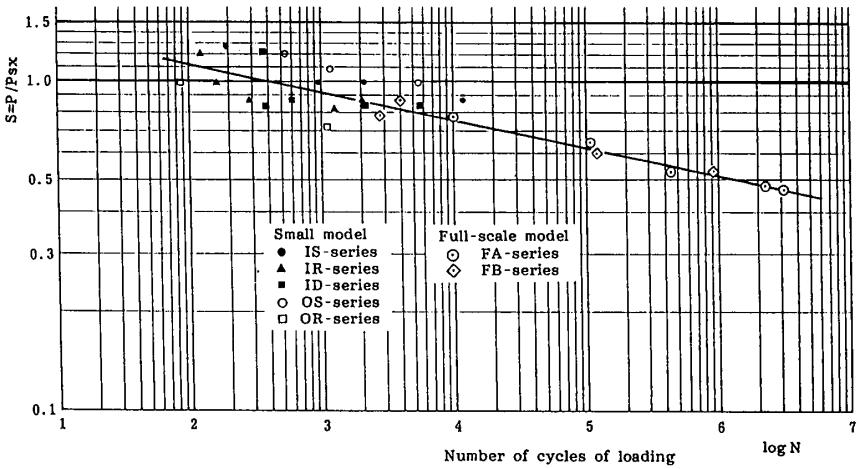
$$B = b + 2d_d \qquad (2)$$

これはいわゆる疲労に対する床版の有効幅とも言えるものである。

この幅をもつはりのせん断耐荷力は、式(1) の配力鉄筋断面の寄与分を差し引き、次式のように与えられる。

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{smax} \cdot x_m \cdot B + 2 \cdot \sigma_{tmax} \cdot C_m \cdot B \qquad (3)$$

この式で求めた耐荷力で載荷荷重を割った無次元量Ｐ／Ｐsxを縦軸にして全結果をプロットしたのが図－３である。全結果が１つのＳ－Ｎ曲線で表現できるようになった。このことは、移動輪荷重を受けるＲＣ床版の疲労強度には配力鉄筋量は大きく影響しないことを示しており、はり状になって破壊するメカニズムとも矛盾しない。



図－３　S軸にＰ／Ｐsxを用いたＳ－Ｎ曲線.

以上から、ＲＣ床版の疲労強度特性は床版厚・鉄筋量に無関係に図－３のＳ－Ｎ曲線で推定してもよいと言える。ただし、この検定は筆者の実物大供試体と園田のモデル供試体だけで行ったため、適用範囲を表－２のように設定しておきたい。なお、配力鉄筋量が確定している場合には図－２の結果を使用してもよい。

表－２　図－３のＳ－Ｎ曲線の適用範囲、

床　版　厚	７～２０cm程度
配力鉄筋比	２５％以上、かつ、下側配力鉄筋間隔は最大２５cmまで。

３．　水張り疲労実験による水の影響度評価

3.1　実橋における水の振舞い

ひびわれ損傷を受けた実橋床版の下面には一般的に遊離石灰が沈着しており、雨水が貫通ひびわれ中を浸透したことは確実である。ただ、疲労によって分離したコンクリート粉が析出し沈着したものか、セメント中の石灰分であるのか疑問の残るところである。

写真－１　実橋床版の破壊事例.

筆者はしばしば舗装の打換え時に床版上面を観測する機会を得たが、床版上面に泥がたまっていたり、上側かぶりコンクリートが全く骨材だけになっていたことを目撃できた。写真－１は最終破壊の一例であるが、完全にコンクリートが分離しており、砂利だけが残り、モルタル分が流出していた。このようなモルタル分の流出は水の仕業であることは明白である。

一方、ひびわれ損傷はひどいが、全く遊離石灰の沈着がない床版もある。このような床版は多くの場合、橋梁に縦断勾配がついており水はけが良好である。

NII-Electronic Library Service

以上のような経験から、水処理の重要性を再認識していた。水は床版にとって悪い影響はあっても、良いものでないことは明らかである。そこで、今回、床版上面に水を張って輪荷重走行試験法によって疲労実験した。水に影響による疲労破壊性状の変化、疲労寿命の低下について基礎的に調べようとした。これまで、後藤ら[9]、岡田ら[10]の水張り実験があるが、これらは一定点載荷法によって行われたもので、疲労強度についての定量的な解明はなされていない。

3.2 実験方法

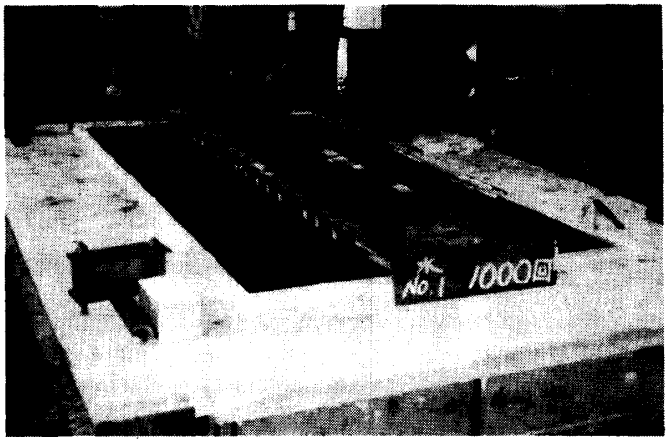
a）実験供試体　　供試体は先に述べたＦＡシリーズと同一のもので、主鉄筋方向２m、配力鉄筋方向３m、厚さ１９cmの実物大床版であり、２辺単純支持、２辺弾性支持の条件で実験した。断面の構成、使用材料および押し抜きせん断耐荷力の計算値は表－３の通りである。実験状況を写真－２に示す。水の張った範囲は1.2x2.2mで、水深は 5mm～1cmである。輪荷重の走行範囲は２mである。

表－３　水張り試験の試験条件、

床版厚		19cm
主鉄筋	上側主鉄筋	D16@18cm
	下側主鉄筋	D16@ 9cm
	かぶり	3cm
配力鉄筋	上側主鉄筋	D13@40cm
	下側主鉄筋	D13@25cm
	かぶり	4.45cm
コンクリート強度		331kg/cm²
終局耐荷力		52.92 t
載荷荷重	No.1	15.0 t (0.283)
	No.2	10.5 t (0.198)

b）載荷荷重　　No.1供試体では 15t, No.2では 10.5t とした。この荷重が30x12cmの面積で作用しながら移動する。

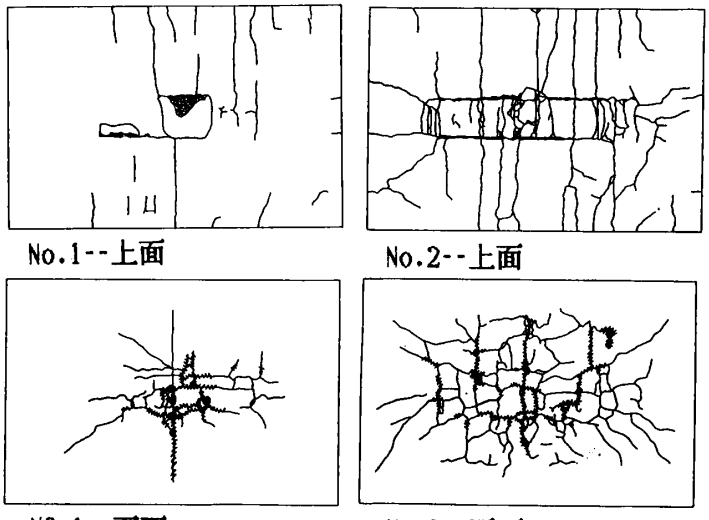
c）測定方法　　適宜走行を中止し、床版中央点で静的載荷を行って鉄筋のひずみ、たわみを測定した。ひびわれ・漏水の状況の観察は走行中に行った。



写真－２　水張り実験の状況.

3.3 実験結果

外観観察 -----図－４に最終のひびわれ発生状況を示す。No.1供試体では走行回数約 150往復で、 No.2 では約15000往復で、 床版中央の主鉄筋方向のひびわれに漏水が発生した。その後、1000往復の間に漏水長さは約４０cmとなり、同時に配力鉄筋方向のひびわれでも漏水した。また、非常に短時間の間にそのれらの漏水ひびわれから写真－３で見られるようにコンクリート片が剝落した。大きさは約１～３cm程度である。このような剝落は乾燥状態下での疲労実験では見られなかった。水の浸入によってコンクリートが膨張し、その結果、ひびわれ面相互がたたかれ、こすり合わされてコンクリートの結合がゆるみ剝落しているようであった。漏水中にはコンクリート粉あるいはセメント分が多く、漏水受けのバケツの底

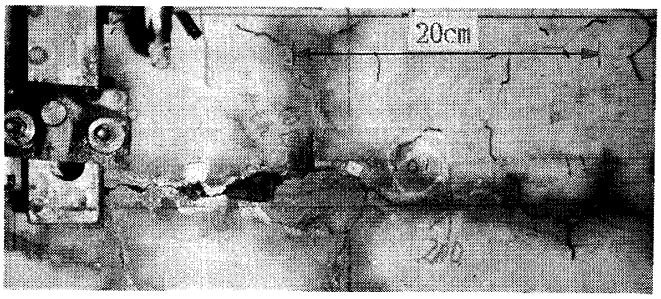


図－４　床版上下面の最終ひびわれ状況.

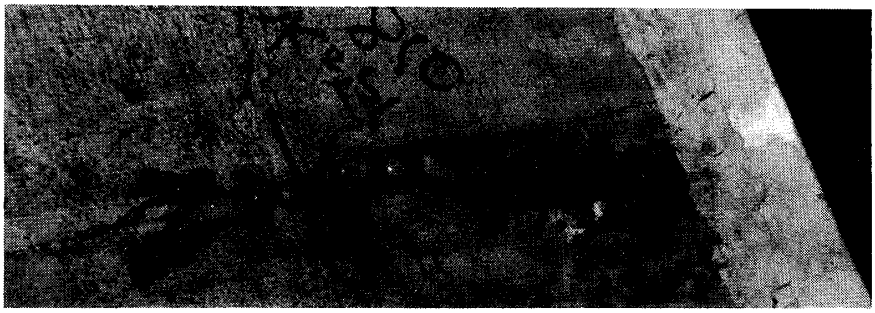
NII-Electronic Library Service

にこれらが沈澱固着した。

一方、床版上面でも写真－４に示すように、プール外のひびわれに水の湧出が見られた。また、プール内では水の吹き上げが観察された。この湧出水にもセメント分やコンクリート粉を含んでおり、ひびわれ近傍ではそれらが堆積した。このような上面での挙動を見ると、実橋床版の舗装下で泥が観察されたことが、やはり、水のしわざであると断定できる。武田ら[11]は実橋観測し、床版上面のひびわれの方が下面のものよりひびわれ幅が大きいことが多いと報告している。今回の実験においても、この傾向は明らかに見られた。ひびわれ面のこすり合わせによってコンクリート粉が噴出したためである。乾燥下の実験では全くこのような傾向は見られなかった。

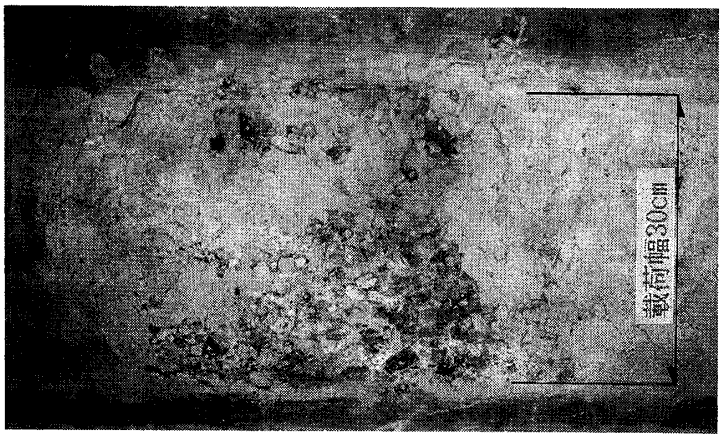


写真－３　床版下面での漏水と角落ち状況.



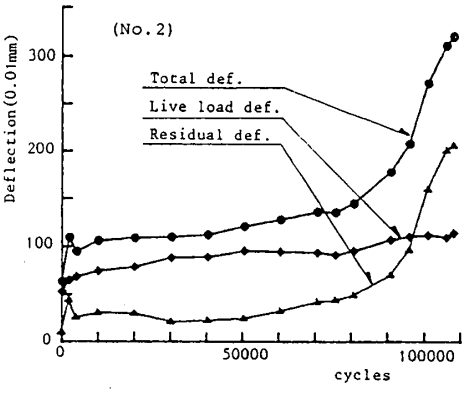
写真－４　上面ひびわれの水の湧出状況.

最終的に、軌道下の床版中央部が陥没破壊した。上面の破壊状況を写真－５に示したが、上側コンクリートが砂利になっており、実橋の破損例と同様になった。



写真－５　上面の最終破壊状況（Ｎｏ．１）.

たわみの変化状況 -----図－５は、たわみ変化の一例である。これらから１つの傾向がみられる。すなわち、水の漏出後の寿命は大変短いことである。また、劣化は残留たわみに顕著に現れるが、活荷重たわみには漏水前後で大きな変化は現れない。



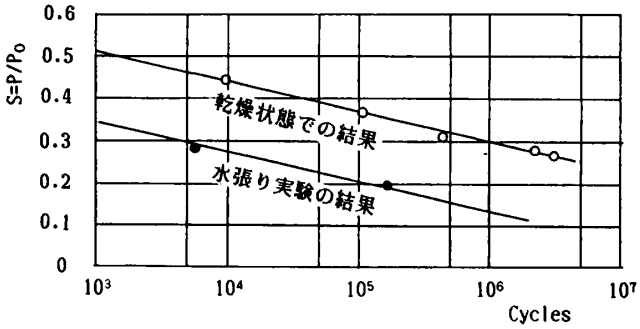
図－５ 床版中央点のたわみ変化の一例.

疲労強度 -----図－６にＳ－Ｎ結果を示した。乾燥状態下で行った同一条件の供試体であるＦＡシリーズの疲労実験結果も転記した。　ただし、Ｓ－Ｎ曲線の縦軸はＰ／Ｐｏである。S-N曲線の傾きはほぼ同じとなること、および、水張りの場合、約 1／250 も疲労寿命が低下したことがわかる。この低下は非常に大きいと言える。乾燥下のＳ－Ｎ曲線を用いて１８ｃｍ厚の床版（スパン３．８ｍ）の疲労寿命を通常の都市高速道路の活荷重を用いて計算すると約５００

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

年程度となるが、もし、この床版の舗装が悪く、常に水が滞留していると仮定すると、その寿命はせいぜい２年となってしまう。一般に、わが国では毎日雨は降らず、橋面排水にも注意が払われており、また、床版上にはアスファルト舗装が施されるため、水の滞留時間は非常に短いと考えられ、実際にはここで示したものよりはるかに寿命は延びるであろう。しかし、交通量が多くて舗装の割れが目立つ橋梁で、路面に勾配がない場合には、雨後も相当長い時間水が滞留する恐れがあり、疲労寿命の短縮が心配される。このような橋梁では床版防水工による延命が強く望まれる。



図－６　水張り実験のＳ－Ｎ結果.

４．　結　論

輪荷重走行試験法によるＳ－Ｎ結果は実橋の疲労寿命の推定には有効なものであるが、これまでのように縦軸をＰ／Ｐoで表現すると床版構成パラメーター毎にＳ-Ｎ曲線が分離し実用的でない。このため、縦軸表示をＰ／Ｐsx に変換した。 この結果、これまでのＳ－Ｎ結果を１本のＳ－Ｎ曲線で表現できるようになった。

また、今回、床版上面の水環境を極端な劣悪状態に想定し、ＲＣ床版の最小寿命を求めた。寒冷地においてはひびわれに浸入した水が凍結融解を繰り返し、さらに寿命が低下するものと予想される。床版防水の必要性がいろいろな所で論議されているが、今回の本実験結果から明確にその必要性が強調できる。

参考文献

[1] 前田、松井：輪荷重動移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究、第６回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.221-224、1984.

[2] 園田、今井、堀川、船越：輪荷重の反復下でのＲＣ床版の挙動、第６回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.649-652、1984.

[3] 原田、川口、高橋：模型橋梁床版の走行荷重による疲労実験、土木学会第４１回年次学術講演会　I-241、pp.481-482、昭和61年11月.

[4] H.KITA, H.TAKENAKA and H.NAKAI:Durability of Composite Girders Using Prestressed Precast Concrete Slabs Under Moving Vehicle, Proceedings of the 1st East Asian Conference on Struc. Eng. and Const., Bangkok, Vol.1, pp.681-694, Jan. 1986.

[5] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編、昭和55年2月.

[6] 日本道路協会：鋼道路橋設計製作示方書解説、昭和39年6月.

[7] 土木学会：昭和６１年制定コンクリート標準示方書、昭和61年10月.

[8] 前田、松井：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文報告集　V-1、pp.133-141、1984.

[9] 後藤、中村、高橋：人為ひびわれを発生させた鋼橋床版の疲労耐力、第３８回土木学会年次学術講演概要　V-158、pp.313-314、昭和58年11月.

[10] 岡田、岡村、園田、島田：道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状、土木学会論文報告集　第３２１号、pp.49-61、1982年5月.

[11] 武田、遠藤、藤田：鋼橋ＲＣ床版の破損機構に関する一考察、第３７回土木学会年次学術講演概要　V-5、pp.9-10、昭和58年10月.

NII-Electronic Library Service