

22cm厚R C床版の疲労寿命に関する実験的評価

保全施設部 保全技術課 瀬戸口 嘉明
同 部 同 課 澤 登 善 誠

要 約

道路橋のR C床版のひびわれ損傷問題が発生して、すでに20数年が経過した。この間、各種の調査・研究の結果、新設床版においては床版厚等に改善がなされてきた。しかし、新しい基準¹⁾を適用したR C床版(標準床版支間3.42m、床版厚22cm)においても若干ではあるが、ひびわれの発生が点検により発見されている。

本論文は、輪荷重走行試験機を用いた22cm厚R C床版の疲労実験の結果に基づいて、床版寿命を評価したものである。

まえがき

昭和47年5月に大阪堺線、続いて大阪守口線にて、床版コンクリートが抜け落ち、舗装面に穴があくという陥没事故が起った。

阪神高速道路公団「以下、公団という」では同様な損傷が生じないように、予防措置としての技術的対策と維持管理体制の強化を図ることとした。すなわち、R C床版に係る各種の実験や研究を行い、さらには実橋での追跡調査を重ねて損傷発生機構の解明を行うと共に、合理的な点検および評価の方法、また、補修、補強の工法も種々開発し、R C床版の維持管理を行っている。

ところで、新規R C床版に対してはその設計法が数次に渡って改訂され、改善が加えられてきている。しかしながら、昭和46年3月からの基準(昭53年5月まで適用)を適用した床版標準支間3.42mで厚さ22cmの床版において、若干であるがひび

われが発生しており、これらの床版の安全性を評価しておく必要性が生じた。特に、舗装に浸透した雨水が床版のひびわれ内に浸透するようになると、所要の疲労寿命が期待できない可能性がある。そこで、床版上面を水張り条件下で疲労実験を行い、疲労破壊特性および疲労寿命を調べることにした。

1. 実験方法

1-1 供試体

過去に実験・解析した、18cm厚床版の疲労寿命²⁾との比較をするため、今回用いた供試体の外形寸法は200cm×300cm×22cmとした。

配筋は標準図を参照し、主鉄筋にD19を用い、配力筋にはD16を使用した。かぶり厚は4cmである。

使用したコンクリートの配合を表-1に、コンクリートの圧縮強度試験の結果得られた機械的性

質を表-2に示す。なお、供試体は2体(WA、WB)とした。

表-1 コンクリートの配合

配合条件	呼び強度	スラブ	骨材最大寸法	セメントの種類	空気量
	300kg/cm ²	8cm	20mm	早強セメント	4%
配合 (kg/m ³)	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
	360	169	763	1011	0.900
W/C=47%		S/A=43.3%		(Poz. No. 70)	

表-2 コンクリートの機械的性質

	WA	WB
1/3 割線弾性係数(kg/cm ²)	3.26×10^5	3.25×10^5
圧縮強度 (kg/cm ²)	443	450

1-2 床版支持装置

供試体は単純板とし、図-1に示すように長辺方向の2辺で単純支持し、他の2辺は横桁による弾性支持とした。載荷にあたっては図-2に示したような浮き上がり防止装置を使用した。

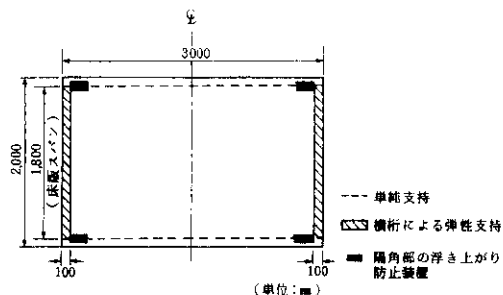


図-1 床版支持装置

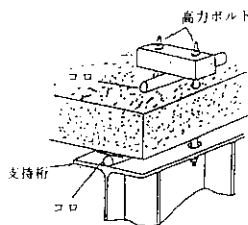


図-2 浮き上がり防止装置

1-3 水張り実験の方法

本実験は水張り下で行うという条件から、床版の上面に高さ2cmのウレタン製の枠木を利用してせきを作り、その内側に1cm程度の水を張った。軌道は常時水につかり、軌道の下にも水が浸透するように留意した。

また、試験機は自動車輪荷重の走行をシュミレートした輪荷重走行試験機(大阪大学工学部橋梁研究室所有)を使用した。概要を図-3に示す。

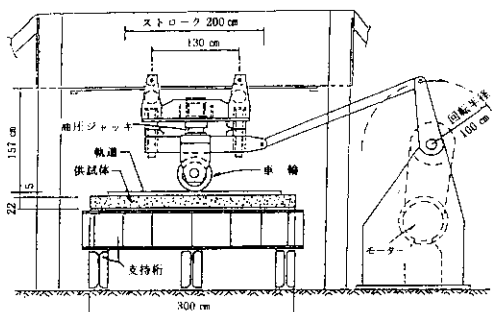


図-3 輪荷重走行試験機の概要

1-4 測定項目

測定項目は①たわみ、②鉄筋ひずみ、③ひびわれの発生状況、である。たわみ測定にはダイヤルゲージを用い、測定点は荷重移動方向に20cmピッチで13ヶ所設置した。測定点を床版中央縦断方向に沿って配置したのは、ひびわれの進展による床版の劣化特性が、各断面でのたわみ分布の変化として顕著に現われるからである。鉄筋にはコンクリート打設前にひずみゲージをあらかじめ貼付しておいた。ひずみの測定点を図-4に示す。

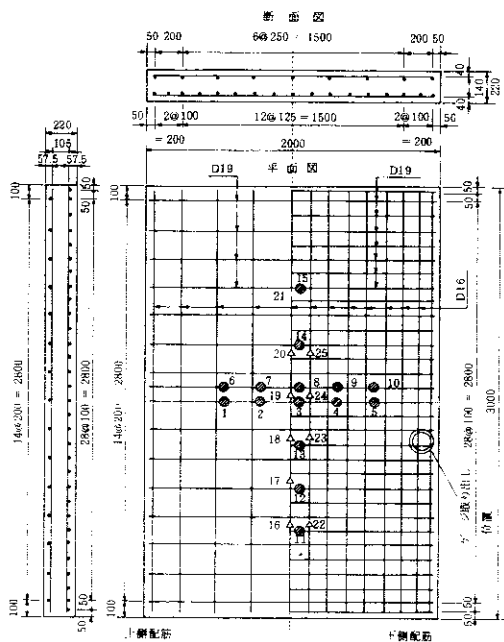


図-4 ひずみ測定位置

なお、たわみおよび鉄筋のひずみの測定は、適当な走行回数ごとに試験機を停止し、車輪を床版中央に移動させて静的載荷することにより行った。

ひびわれの発生状況の観測は、試験機の走行中に目視によって適直行った。

2. 載荷荷重

過去に行なわれた床版の疲労実験の結果から得られたS-N曲線を基に載荷荷重を決定した。床版の疲労強度特性は式(1)⁴⁾で与えられる。

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -K \cdot \text{Log}N + \text{Log}C \quad (1)$$

ここに、P：載荷荷重 (kgf, N)

P_{sx} ：はり状化した後の静的せん断破壊強度 (kgf/cm², N/cm²)

N：繰り返し回数

K：S-N曲線の傾き

C：定数

なお、同条件下で過去に実施した18cm厚床版供試体の実験結果から得られたS-N曲線の各値は

次のとおりである。

$$K=0.07835 \quad C=1.2366$$

また、載荷荷重決定のための P_{sx} は式(2)⁴⁾で与えられる。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{s,max} \cdot X_m + \sigma_{t,max} \cdot C_m) \quad (2)$$

ここに、B：はりの有効幅(cm)、 $B = b + 2d_n$

b：載荷板の配力鉄筋方向の辺長 (cm)

d_n ：引張側配力鉄筋の有効高さ (cm)

X_m ：主鉄筋に直角な断面の中立軸深さ (cm)

C_m ：主鉄筋のかぶり深さ (cm)

$\tau_{s,max}$ ：コンクリートの最大せん断応力度 (kgf/cm², N/cm²)

$$\tau_{s,max} = 0.252\sigma_c - 0.000246\sigma_c^2$$

$\sigma_{t,max}$ ：コンクリートの最大引張応力度 (kgf/cm², N/cm²)

$$\sigma_{t,max} = 0.583\sigma_c^{2/3}$$

ここで、表-2に示した供試体コンクリートの機械的性質を適用すると、

供試体WAで、 $P_{sx} = 47.37tf (464.54kN)$ 、供試体WBで、 $P_{sx} = 47.64tf (467.19kN)$ となり、平均値をとって、 $P_{sx} = 47.5tf (465.82kN)$ となる。

(1) 供試体WAの荷重の決定

供試体WAについては、18cm厚の供試体と床版下面のひびわれ発生状況、たわみの増加状況等を直接比較するため、18cm厚の床版供試体(W-2供試体)の載荷荷重17.25tf(169.16kN)を採用した。そこで、供試体W-2の実験結果から得られたS-N曲線を用いて、破壊にいたる輪荷重走行回数を算出すると534万往復となる。しかし、この回数の実験は、相当の日数を要するので、約80万往復まで17.25tf(169.16kN)で載荷した後、荷重を20tf(169.13kN)に引き上げて破壊にいたらしめることとした。

(2) 供試体WBの荷重の決定

本供試体ではW-2と同じ寿命で破壊するような載荷荷重で、実験を行うことにした。まず、18cm厚の供試体W-2では破壊にいたる走行回数は14.9万往復であり、 P/P_{sx} の値は、0.486であっ

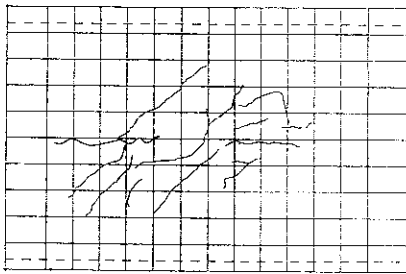
た。よって、供試体W-2と同程度の寿命を与える
 載荷荷重Pは23.01tf(225.65kN)となる。そこ
 で、供試体WBの載荷荷重を23tf(225.55kN)と決
 定した。

3. 実験結果

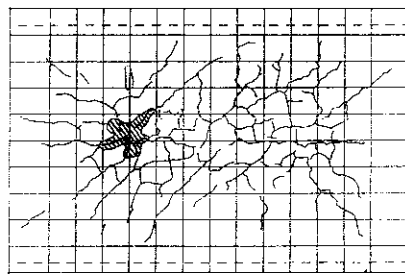
3-1 ひびわれと損傷状況

適当な回数ごとにひびわれ状態の写図を作成し、

各走行回数におけるひびわれ密度を算出した。ひ
 びわれ写図を図-5~6に示し、各供試体のひび
 われ密度の変化状況を図-7~8に示す。ここで、
 ひびわれ密度の算出には格子密度法⁹⁾を用いた。
 格子密度法とはひびわれ写図に橋軸方向、橋軸直
 角方向に格子線(12.5cm間隔)を記し、ひびわれ
 と橋軸方向、橋軸直角方向の格子線との交点数を
 数え、格子線の総延長で除してひびわれ密度を求
 める方法である。なお、着目範囲は床版中央を中



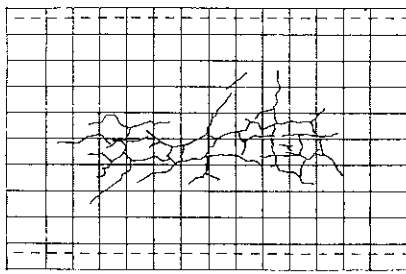
(a) : 2万回



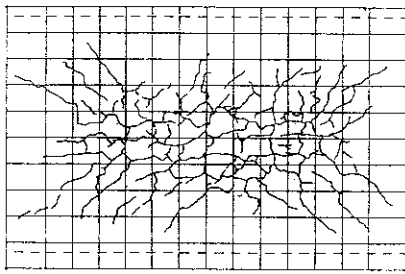
(b) : 62万回

■ 着目範囲

図-5 ひびわれ写図(供試体WA)



(a) : 2000回



(b) : 10万回

図-6 ひびわれ写図(供試体WB)

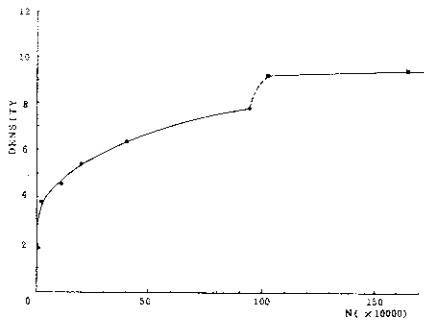


図-7 ひびわれ密度の変化状況
 (供試体WA)

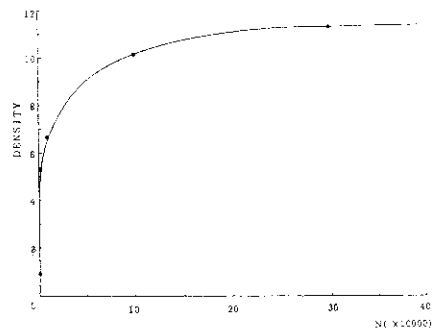


図-8 ひびわれ密度の変化状況
 (供試体WB)

心として、橋軸方向、橋軸方向ともに150cmの正方形の範囲とした。

(1) 供試体WA

ひびわれ密度に着目すると、実験開始後2万回程度までは著しいひびわれの進展があったが、その後ひびわれの進展速度は鈍化し、外観上のひびわれの変化は少なくなった。走行回数80万往復で載荷荷重を17.25tf (169.16kN) から20tf (196.13kN) に上げたところ、84万往復程度まではひびわれの進展が顕著になった。しかし、その後は再び停留状態に戻った。やがて、120万往復で床版下面に水が染み出る程度の漏水が発見されたものの、その後は漏水範囲の拡大は見られなかった、ところが、150万往復に達したところで漏水範囲が最初の漏水地点の周りに急速に拡大し、その範囲内で漏水がコンクリート粉を含んだ状態となり、ひびわれに沿って3mm程度の角落ちが始まった。漏水部分の様子を写真-1に示す。この状況から床版

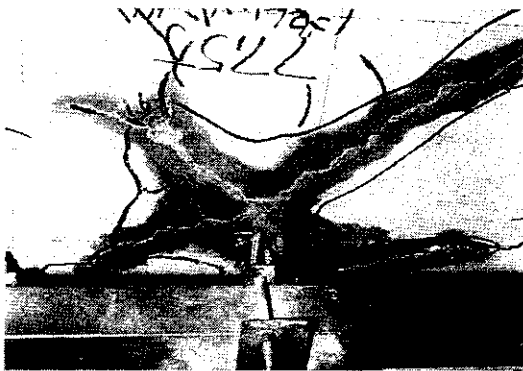


写真-1 供試体WAの漏水部

上面にも砂利化等の劣化が生じていると予想し、走行回数162万往復で実験を終了した。

しかし、実験終了後に軌道装置を外して床版上面を調べたところ、砂利化やはく離などの変化は一切見られなかった。

(2) 供試体WB

ひびわれの発生状況は、供試体WAよりはやや多いものの、18cm厚の床版よりもやはり少なかった。その進展状況は供試体WAとよく似ており、10万往復程度で停留状態となった。

その後、当初の目標回数14.9万回を超えたため輪荷重走行回数40万回で実験を終了したが、結局最後まで床版下面に漏水は見られず、軌道装置を取り除いた後の床版上面にも劣化は見られなかった。

3-2 たわみ変化の状況

各供試体の床版中央載荷時における床版中央点のたわみの変化状況を図-9~10に示す。図中に

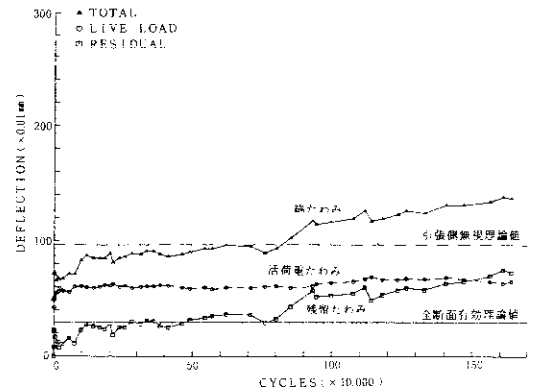


図-9 たわみ-回数曲線 (供試体WA)

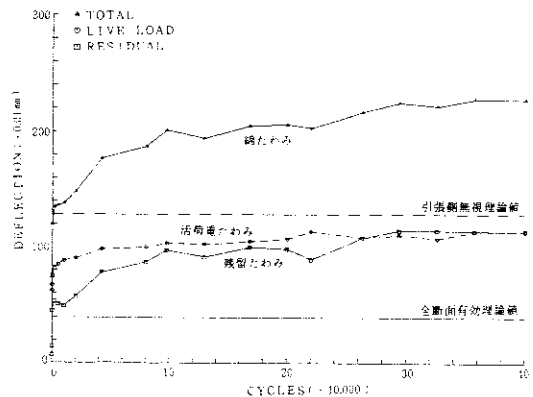


図-10 たわみ-回数曲線 (供試体WB)

は全断面有効とした場合および引張側コンクリートを無視した場合の理論値もあわせて記した。

輪荷重載荷開始後の短期間に、まず活荷重たわみが、つづいて残留にたわみが急増する。これは曲げひびわれの発生、進展によるものと考えられる。

供試体WA、WBのどちらにおいても概ね10万

回程度からは停留した。この時の活荷重たわみの値は、供試体WAでは引張側無視の理論値と全断面有効の理論値の中間程度にとどまり、供試体WBでも引張側無視の理論値には達していなかった。

WAでは、載荷荷重を引き上げた80万回から活荷重たわみはやや増加傾向に転じ、残留たわみはいったん急増した。さらに、110万回を過ぎると活荷重たわみよりも残留たわみの増加率が大きくなり、150万往復からは残留たわみの方が大きくなった。供試体WBにおいても同様の傾向が見られ、25万往復から残留たわみの方が大きくなっている。

次に、載荷縦断面における活荷重たわみ分布の変化状況を図-11~12に示す。図中には、全断面

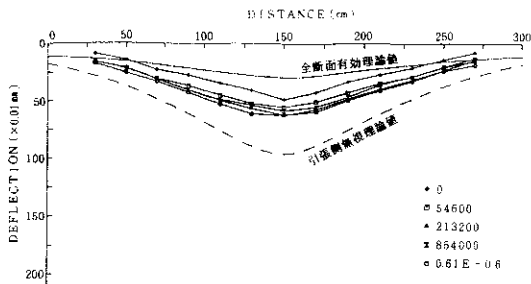


図-11 たわみ分布曲線 (供試体WA)

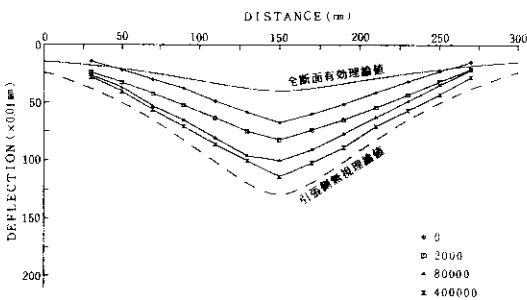


図-12 たわみ分布曲線 (供試体WB)

有効および引張側コンクリート無視のたわみ分布の理論値を併記したが、床版端部では実際のたわみ分布が理論値に比べて小さくなる傾向がある。これは理論値が全断面に渡って均一な剛性として計算しているのに対し、実際の供試体では輪荷重のストローク範囲が2mであることから、床版端

部では中央付近のような剛性の低下が生じないためと思われる。通常、たわみ分布は劣化の進展に伴って中央付近がとがった形状を示すようになる。しかし、供試体WA、WBともに理論値のたわみ分布形状と比較すると分かるように、最終の測定値でもとがった形状を示していないことから、床版の劣化には進展していないことが分かる。

そこで、実験終了時に下面のひびわれがどれくらいの深さまで進展しているかを検討するため、ひびわれ深さを変化させた時のたわみの理論値を計算し、その結果を各供試体の最終状態のたわみの測定値とあわせて図-13~14に示す。図中には、

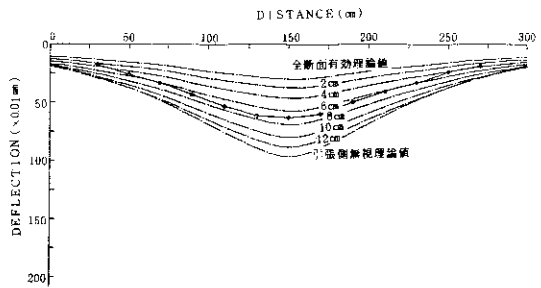


図-13 ひびわれ深さの推定 (供試体WA)

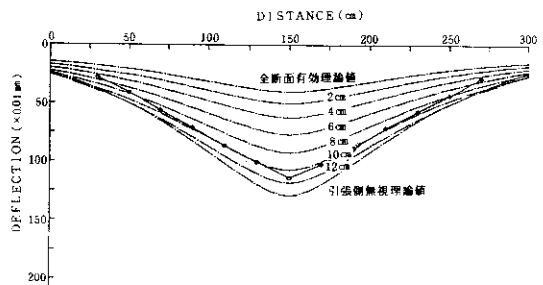


図-14 ひびわれ深さの推定 (供試体WB)

ひびわれ深さが2cmから12cmまでの2cm刻みで変わったときの理論値に加えて、ひびわれ深さが0cmすなわち全断面有効の理論値、引張側コンクリート無視の理論値を記す。この図を見ると、床版中央付近でのひびわれ深さは供試体WAで約7cm、WBでは約11cmと読み取れる。

4. 実験結果の考察

以前に実施した18cm厚の床版、および今回実施した22cm厚の床版のS-N結果をまとめると表-3に示すとおりになる。なお、供試体WAは実験

表-3 18cmおよび22cm厚の床版のS-N結果

床版厚	供試体No.	$P_{10}(t)$	$P(t)$	P/P_{10}	破壊回数
18cm	W-1	36.83	14.31	0.3885	206,000
	W-2	35.48	17.25	0.4862	149,000
22cm	WA	47.37	20.12 (17.34)	0.4247	854,000* (1,640,000)
	WB	47.64	23.16	0.4861	400,000

*20.12t換算回数

の途中で載荷荷重を変えているため、実験開始から終了までを20.12tf(197.31kN)で載荷した場合に換算した走行回数を用いている。

表-3に示した各値をS-N曲線上に記した結果を図-15に示す。なお、この図では縦軸に無次

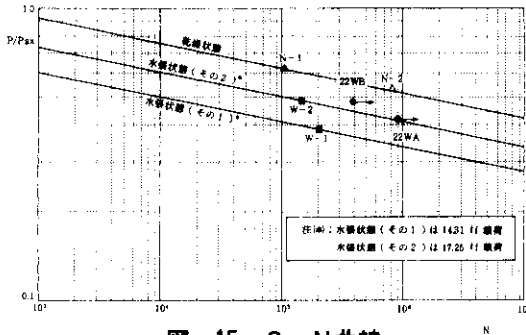


図-15 S-N曲線

次元として載荷荷重 P とはり状化したときのせん断耐荷力 Ps_x の比 P/Ps_x を用いている。ここで、既往の実験ではすべて破壊にいたるまで実験を行っているが、今回の実験では破壊にいたる前に実験を終了している。このため供試体WA、WBについては、破壊まで実験を続けた場合に得られるであろうS-N結果⁹⁾は、図-15において現在の点よりも右側へ移動することになり、その結果18cm

厚床版のS-N曲線よりも上にプロットされることになる。

一般に、同型式の構造物が同一の形式で破壊した場合のS-N曲線は単一のものになると予想されるが、今回の実験では18cm厚の床版と22cmのものが一つの曲線上に載らないという結果になった。これは、水の浸入がほとんどなかったためであり、乾燥状態下の実験に近づいたと判断できる。

RC床版に動的走行荷重を載荷すると、床版上面にねじりモーメントによる主鉄筋方向のひびわれが発生し、それに水が浸入し、この水が動的荷重を受けると圧力水になりひびわれ面に対してくさび作用を与え、このことが床版の劣化を加速させる。今回実験を行った22cm厚の床版は、これまでに実験された18cm厚の床版に比べて、剛性が大きく上面のひびわれは発生しにくくなったと考えられる。そこで22cm厚床版と18cm厚床版のねじり剛度を比較すると、

$$D_{xy_{22}} = 5.61 \times 10^7 \text{ cm/kg}$$

$$D_{xy_{18}} = 3.10 \times 10^7 \text{ cm/kg}$$

$$D_{xy_{22}}/D_{xy_{18}} = 1.81$$

となり、ねじり剛度は1.81倍向上している。

一方、発生ねじりモーメントは供試体WAでは20.12/17.25=1.17倍、供試体WBでは23.16/17.25=1.34倍に増加したに過ぎない。よって、次式のように、各供試体のねじりに対する耐力は18cm厚の床版に対し供試体WAでは1.54倍に、供試体ではWBでは1.35倍にそれぞれ増加していると言える。これより、マイナーの線形被害則⁷⁾を用いて計算すると、ひびわれ発生寿命は供試体WAでは247倍に、供試体WBでは46倍にそれぞれ増加しているものと推定できる。

$$\text{供試体WA } \alpha = 1.81/1.17 = 1.54$$

$$\text{寿命の伸び} = \alpha^{12.76} = 247.0$$

$$\text{供試体WB } \alpha = 1.81/1.34 = 1.35$$

$$\text{寿命の伸び} = \alpha^{12.76} = 46.0$$

さらに、ひびわれの発生後は輪荷重の走行による変位や曲げの最大値および振幅ともに小さいことから、劣化の進展そのものも遅くなったと考えられる。

5. 寿命評価

本実験は、22cm厚の床版は18cm厚のものに比較して疲労寿命が向上するであろうことを検証したものである。実橋床版において、劣化進展速度の増加の大きな要因と考えられている雨水の影響を考慮するために、水張り条件下で実験を行った。

実験の結果、22cm厚床版の疲労寿命は18cm厚の床版より大幅に伸び、床版厚増加の効果が確認された。寿命が伸びた理由としては、床版上面のひびわれの発生がほとんどなく、従来の18cm厚の床版に比べて床版内部に水の浸入がなかったためである。

供試体WAでは床版下面に若干の水の浸出がみられた時期に上面では砂利化などは全く見受けられず健全であった。また、供試体WBも実験終了時でも何ら異常は認められなかった。

ところで、今回行った2体の供試体についてマイナーの線形被害則を用いて、17.25tf(169.16kN)に換算した時の終了回数を算出すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{供試体WA } N_f &= 854000 \times (20.12/17.25)^{12.76} \\ &= 6089000 \quad (\text{往復}) \end{aligned}$$

18cm厚の床版に対する寿命の伸び

$$\alpha = 6089000/149000 = 40.87 \text{倍}$$

$$\begin{aligned} \text{供試体WB } N_f &= 400000 \times (23.16/17.25)^{12.76} \\ &= 17183000 \quad (\text{往復}) \end{aligned}$$

18cm厚の床版に対する寿命の伸び

$$\alpha = 17183000/149000 = 115.32 \text{倍}$$

つまり、18cm厚の床版と22cm厚の床版の疲労寿命を比較すると供試体WAについては40.87倍以上、供試体WBについては115.32倍以上の寿命が伸びており、4cmの増厚で大きな効果が得られることになる。

6. あとがき

床版の点検は「道路構造物の点検標準」(昭和60年9月)に準じて実施しているが、その内容は旧基準で設計された床版(薄い床版)が対象であ

る。今回の検討結果はモデル供試体による実験的評価であり、実構造物への対応についてはさらに検討を必要とするが、今後は本実験の成果をうけて、床版の設計年度を考慮した点検頻度や評価方法等の検討が必要であろう。

最後に、本実験は防災科学研究所に委託したもので、実験に関しては大阪大学松井繁之助教授の御指導のもとに実施され、成果を得たものである。ここに感謝の意を表するとともに、また、本実験の企画、実施に対し「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」(委員長 岡田清京都大学名誉教授)と同第一分科会(主査 園田恵一郎大阪市立大学教授)の委員各位の御助言と御支援を賜った。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (I 共通編・II 鋼橋編) 昭和48年2月
- 2) 阪神高速道路公団、災害科学研究所：道路橋RC床版の防水工の耐久性に関する調査研究業務、昭和62年3月
- 3) 松井繁之：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、コンクリート工学年次論文報告集9-2、1987
- 4) 前田幸雄・松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文集第348号V-1、1984年8月
- 5) 松井ら：RC床版の耐荷力と耐久性、昭和60年度土木学会関西支部講習会テキスト、昭和60年7月
- 6) 阪神高速道路公団、災害科学研究所：阪神高速道路の橋梁床版の疲労強度に関する検討業務、平成2年3月
- 7) 例えば、A. J. M. Slemes : Miner's Rule with respect to Plain Concrete Variable Amplitude Tests, ACI SP-75, 1982.