

[56] 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

前田 幸雄 (大阪大学工学部)

正会員 ○松井 繁之 (大阪大学工学部)

1. まえがき

道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷問題が注目され始めてすでに10数年になる。この間、このひびわれ損傷機構に関して多くの研究がなされたが、①ひびわれ床版の使用限界の判定、②終局状態の把握、③終局限界に至るまでの寿命、④補修補強の最適時期の推定など、重要な課題はまだ解決されていない。これには適切な疲労実験データが必要である。筆者らは、実橋床版の格子状ひびわれに対する原因の1つとして、荷重である自動車の移動にあると着眼し、床版疲労実験法として多点移動繰返し載荷方法(多点の載荷点を設定し、1つの載荷点で数万回つつの繰返し載荷を行い、順次載荷点を移す方法)を提案し、現在、この方法が定着しつつある。この方法によって、実橋と同様なひびわれパターンが再現でき、ひびわれ増加に伴う板挙動の変化について合理的な資料を得た。しかし、除荷時にはほとんどのひびわれは閉じてしまい、ひびわれ面の劣化は再現できなかった。一方、実橋では無載荷時でもひびわれ幅が0.1~0.3mmのものが発見され、ひびわれ面の劣化は著しい。この差は、後述のように作用せん断力およびねじりモーメントの大きさと作用回数との差にあると予想される。実橋では着目点を常に荷重が通過し、その回数毎にこれら断面力の大きな振幅が生じる。よって、この通過現象を荷重の発生数と同回数で与える実験法を採用しなければならない。今回、より合理的な疲労データを得るため、上記のことを考慮して、輪荷重を往復走行させる輪荷重動移動装置を製作し、実物大RC床版の疲労実験を行った。ここに、その結果を示し、RC床版の耐久性の主要指標である疲労強度について報告する。

2. 輪荷重動移動装置・供試体寸法・支持装置の概要

装置の概要を写真1と図1に示す。供試体に荷重を作用させながら走行する車体部と、これをモーターの回転によって往復される起動装置の2ブロックからなる。各部は次の能力をもつ。

- ①最大荷重……30t(油圧ジャッキによる)、
- ②荷重制御……油圧ユニットとアクチュエーターによる、
- ③車輪……直径50cm、幅30cmの鉄輪、
- ④移動距離……2m(回転アームを1mにする)、
- ⑤移動速度……28往復/毎分(ギョドモーター使用)

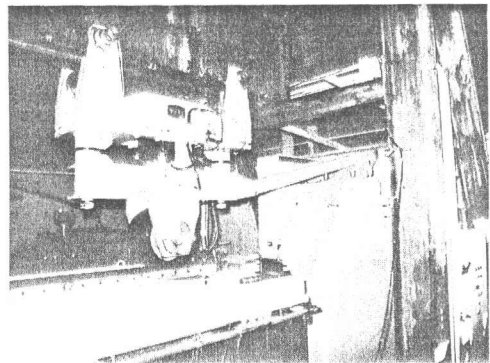


写真1 試験装置(車体部)

荷重の反力は載荷フレームで取っている。

供試体は外型2m×3m、床版厚19cmの単純版である。配筋およびコンクリート強度は表1に示した。供試体の長辺方向の2辺を単純支持(スパン1.8m)し、他の2辺を横桁により非合成で支持した。この横桁は、移動する輪荷重下の断面力が床版中央載荷時の最大値を越えないという条件で設計された。床版の4隅に写真2のように支持桁フランジからボルトを立てた装置を設置し、回転拘束を与えないで浮き上がりを防止した。

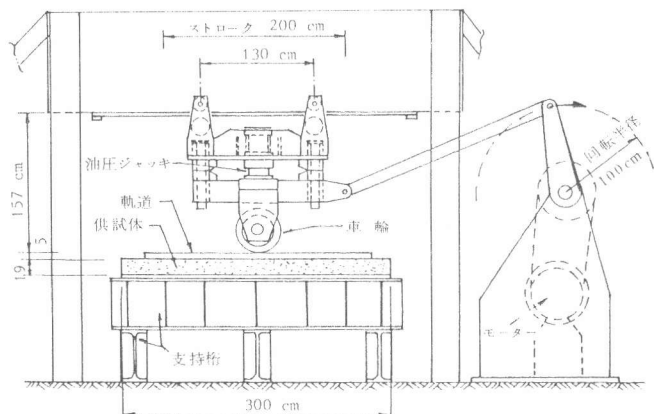


図1 輪荷重動移動装置による実験概要

自動車の後輪荷重はダブルタイヤの接地面積 $50\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ に等分布で作用する。本実験ではその辺長を60%に縮小した $30\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ を載荷面とした。この載荷面を常時確保しながら荷重を移動させる必要がある。当初、この載荷面を確保するタイヤを考えたが、疲労実験に耐えられるものが見つからず、前述のように鉄輪にした。このため、図2に略記したように、床版上面に $30\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ の鉄板を5mmの間隔を開けて19ヶ配置し、キャタピラ型式の軌道によって載荷面を確保した。ただし、鉄板の移動を防ぎ、円滑な走行面を得るため、さらに10mm厚程度の鋼板を載せた。写真2に支持装置、軌道等の状況を示した。

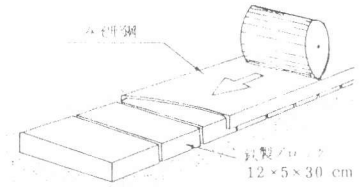


図2 軌道

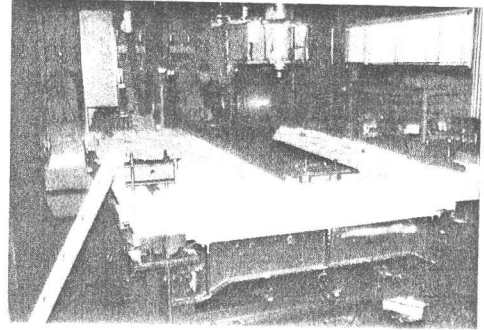


写真2 横桁、軌道、浮き上がり防止装置

3. 実験結果と考察

試験体数は計7体であり、各供試体の条件および結果のまとめを表1に示す。得られた結果の各種限界の繰返し回数はすべて走行往復数で示している。DR-1~5は昭和39年示方書で、DR-6~7は昭和46年示方書で設計した配筋を行った。

荷重の走行によって疲労劣化が進み板性状が変化するため、実験途中で、たわみ、鉄筋・コンクリートのひずみ、ひびわれの動き、ひびわれ進展状況について測定・観察を行った。以下、結果の一部を示し、動的走行試験結果の特徴を述べる。

(1) ひびわれ状況

図3にDR-1の最終ひびわれ状況を示す。本供試体では、床版下面のひびわれの多くは走行数1万往復までに入ってしまい、その後の増加はわずかであった。上面のひびわれはほとんど主鉄筋に平行なものであり、走行数1万往復までに、床版中央1本と、床版中央より約40cm程度離れた左右のひびわれの計3本が発生し、50万往復以後再び発生した。床版下面では、ひびわれ面のこすり合わせによって微細なコンクリート片が落下する。走行初期には約1mm程度のものが落下し、破壊近くなると5mm程度のものが落下した。途中はコンクリート粉が常時落下し、ひびわれ面の劣化が確認できた。活荷重たわみが引張側コンクリート無視の直交異方性板理論値に達する走行回数的前後で床版下面のひびわれに段差が生じた。この1例を図3に示した。各供試体の段差発生回数は表1に記した通りであった。

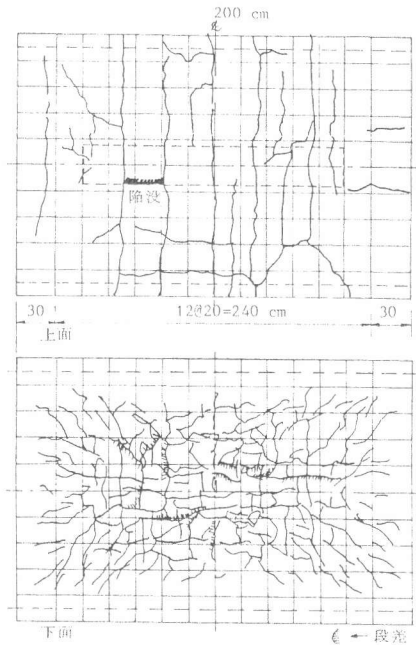


図3 DR-1の最終ひびわれ図

(2) たわみ変化

図4に床版中央点の活荷重たわみ、残留たわみの走行回数に伴う変化

表1 各供試体の条件と試験結果のまとめ

供試体	実験種別	載荷荷重 (t)	σ_{ck} (MPa)	配筋	限界たわみ到達回数 (万往復)	段差発生回数 (万往復)	破壊時回数 (万往復)	破壊型式
DR-1	動的移動	14.2	288	主鉄筋 D16@9cm (d=16cm) D16@18cm (d'=3cm)	27.6	55	114	せん断破壊
DR-2	〃	20.0	189	配力鉄筋 D13@25cm (d=14.55cm) D13@40cm (d'=4.45cm)	0.5	0.25	0.5	〃
DR-3	〃	16.0	170		—	2	5.37	〃
DR-4	〃	16.0	307		18.6	16.1	21.9	〃
DR-5	〃	14.2	327	主鉄筋 D16@10cm (d=15cm) D16@20cm (d'=4cm)	89	70	150	〃
DR-6	静的載荷	66.2	415	配力鉄筋 D16@13cm (d=13.4cm) D16@26cm (d'=5.6cm)	—	—	—	押抜きせん断破壊 (算定値: 65.96t)
DR-7	動的移動	22.0	415		58.5	62	67	せん断破壊

注：限界たわみとは引張側コンクリートを無視した直交異方性板の計算たわみ

状況の1例を示した。これらの測定値は走行を随時停止し静的載荷によって得た。図示のように、たわみは非常に早い時期に急激に増加し、その後徐々に増加する傾向を示す。初期の急激な増加は曲げ効果によるもので、後の遅い変化は全断面力の繰返し作用による疲労劣化の進行によるものである。このような変化状況は各供試体ともほぼ同じである。活荷重たわみと残留たわみがほぼ同じである点も興味深い。

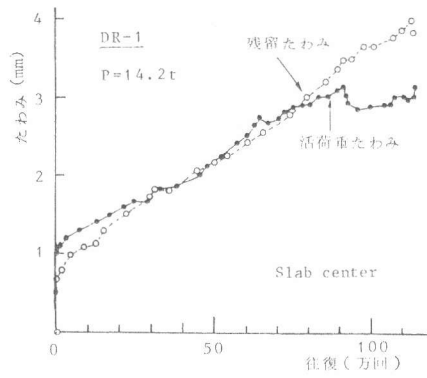


図4 DR-1の床版中央のたわみ変化

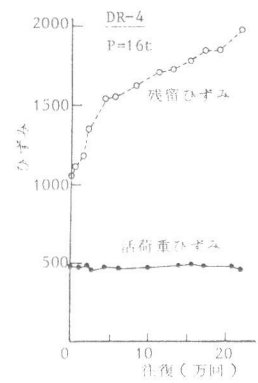


図5 主鉄筋のひずみ変化

(3) 鉄筋のひずみ変化

図5に床版中央部の主鉄筋のひずみ変化の状況を示した。この図のように一般的に、活荷重ひずみは走行回数が進んでもたわみのような漸増傾向はあまり見られない。ただし、残留ひずみは増加する。鉄筋のひずみは局所的な変位であり、ゲージ位置とひびわれ位置との関係によってひずみ発現性は異なると予想される。また、鉄筋ひずみは板剛性と中立軸の関数であり、ひびわれ深さが大きくなると両者は減少・増加し、結果的に相殺され、上記のように変動が停滞したようになると思われる。

図7は荷重1往復時間中の動的な変化状況をオシログラフで記録したものであるが、主鉄筋・配力鉄筋で異なった応答を示している。これは図8に示したそれぞれの鉄筋に直角な断面に作用する曲げモーメントの変化状況と相似であり正しい応答を示していることがわかる。

(4) ひびわれの動的な動き

図7にひびわれの動的な動きの記録を示した。ひびわれの動きには3つの方向がある。1つは曲げモーメントによる開閉であり、第2は垂直せん断力による上下のずれ、残りはねじりモーメントによる水平方向のずれである。後の2者は特に主鉄筋方向のひびわれに顕著であり、かつ、方向が交番している。この2つの記録波形は図8に示した Q_x 、 M_{xy} の変化状況とやはり相似である。よって、ひびわれの劣化は主鉄筋方向のものに顕著になる。次に、図6に示したDR-4の主鉄筋方向のひびわれの開き変化に注目したい。ひびわれ計で測ったひびわれ幅は10万回以後ほとんど変化がなく上記説明と矛盾するように受け取れる。実際は、コンクリートのひびわれではひびわれ面のこすり合わせによって微粉が落だし、スリット化によってひびわれ幅が増大し、両側の相対変位によるひびわれ幅増大の傾向が少なく、矛盾しない。

(5) 最終破壊

最終破壊は軌道下の1部が押抜きせん断破壊的に陥没破壊を呈する。図2の上面にDR-1の破壊位置を示す。試験後

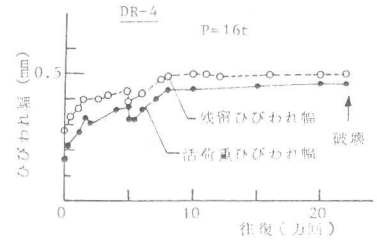


図6 主鉄筋方向のひびわれ幅の変化

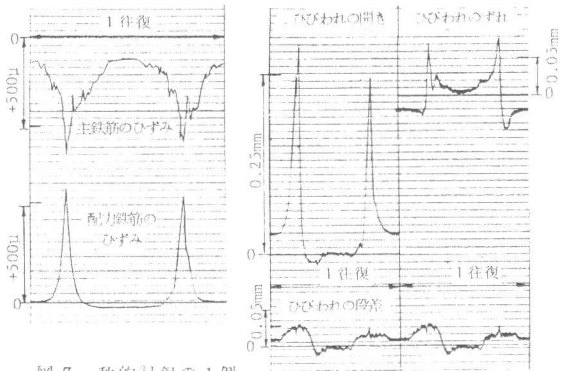


図7 動的記録の1例

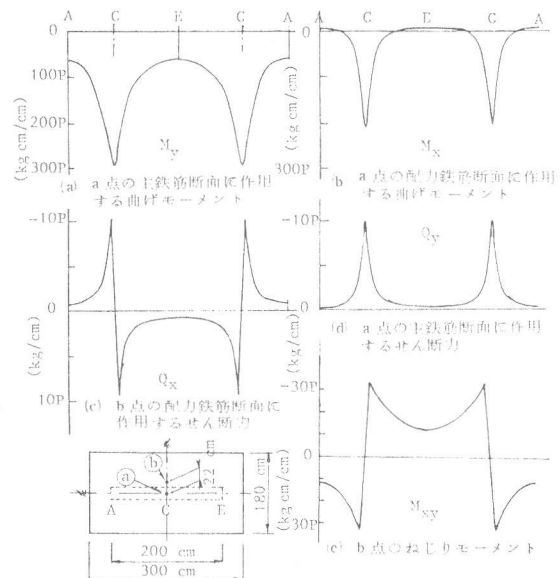


図8 a, b点の断面力影響線

DR-1とDR-4を切断し、切断面から主鉄筋断面のせん断破壊が主破壊であることを確認した。

4. S-N結果と破壊機構の考察

最終的にRC床版の耐久性を評価するため、同一配筋のDR-1~5の結果を図9のS-N図にプロットし、S-N曲線を求めた。縦軸には既往の研究と同様に、最大荷重/静的強度の荷重比を採用した。この静的強度は筆者らが提案した押抜きせん断耐荷方式(1)²⁾で求めた。本式の説明は省略するが、1例を表1のDR-6で示したように、算定精度は高い。

$$P_{\text{punch}} = \tau_{s, \text{max}} \{ 2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m \} + \sigma_{t, \text{max}} \{ 2(4c_d+2d_d+b)c_m + 2(a+2d_m)c_d \} \quad (1)$$

ここに、a：載荷板幅、b：載荷板長

図9には定点載荷による既往の疲労実験結果 (P_{punch} は角田式による)^{3~5)}を併記した。図で明らかなように、今回の輪荷重動移動によるS-N曲線は定点載荷のものより寿命で約 10^4 回のオーダー、作用荷重で約50%も低下した。動的走行の疲労に与える影響の大きさが明確になった。

この低下の原因は配力鉄筋断面に作用する垂直せん断力 Q_x とねじりモーメント M_{xy} にあると予想してきたが、動的走行の場合、どの断面が床版構成材料のどの強度に最も影響しているか考察を加えた。図10は図8中に示した床版中央部2点の5つの断面力の影響線である。この影響線を用いて床版中央部におけるコンクリートの圧縮・引張、および、鉄筋の引張に対する疲労被害率(マイナー則による)について、1点載荷、5点移動載荷、動的移動の比較を行った。結果は表2の通りで、予想通り動的移動を行うと Q_x と M_{xy} によってコンクリートの引張に対して著しく高い疲労被害を与えることがわかる。この結果と実験事実から、走行荷重をうけるRC床版特有の疲労破壊機構を次のように説明できる。

↑ M_{xy} によって床版上面から疲労ひびわれが発生し、その後もそれらのひびわれ面の劣化も早まる。また、 Q_x は曲げにより下面からのひびわれをさらに上方へ進展させる。ついにはひびわれは貫通しその後のひびわれ面の摩耗が進む。同時に荷重分配作用の減少のため主鉄筋断面の疲労が急進し、その断面のせん断耐力が限界に達し、最終破壊に至る。

5. 結論

- (1) 動移動荷重を受ける実物大RC床版のS-N曲線を求めた。
- (2) このS-N曲線によると、疲労強度は定点載荷のもの約1/2に低下する。このようなS-N曲線を用いて実橋の疲労耐久性を論じる必要がある。
- (3) 疲労強度の大幅な低下は荷重の走行によって配力鉄筋断面に作用するせん断力とねじりモーメントが変番することにある。
- (4) RC床版特有の疲労破壊機構が明確になった。

(参考文献) 1) 前田・松井：昭和51年度土木学会関西支部年次講演会，I-46，1976。 2) 前田・松井：土木学会第37回年次講演会，V-30，1982。
3) 角田・藤田：土木学会論文報告集，No. 317，1982。 4) 上平・園田：昭和54年度土木学会関西支部年次講演会，V-20，1979。
5) 飯岡・梶具・藤田：日本道路公団試験所報告 昭和52年度，1978。

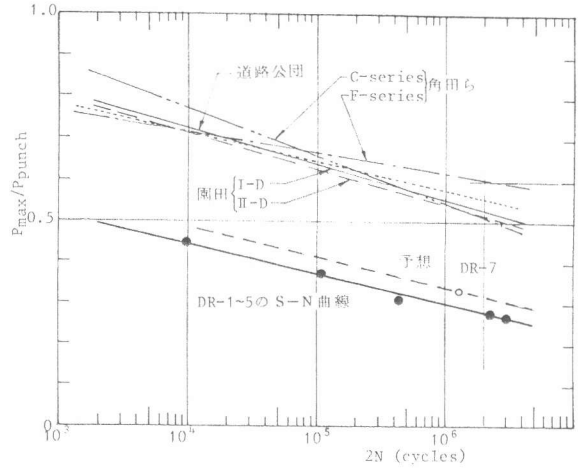


図9 DR-1~5, DR-7のS-N結果

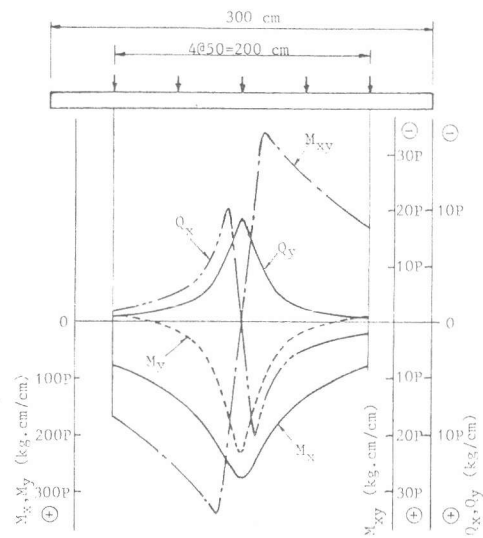


図10 床版中央部の断面力の影響線

表2 疲労被害率の比較(1点載荷を1とする)

断面力	破壊の着目現象								
	コンクリートの圧縮破壊 (m=3.4, 7.2)			コンクリートの引張破壊 (m=1.3, 9.2)			鉄筋の引張切断 (m=1.0, 0)		
	動的移動	5点移動	1点載荷	動的移動	5点移動	1点載荷	動的移動	5点移動	1点載荷
My	204	1	1	8.4	1,0003	1	4.6	1	1
Mx	0.0003	1	1	0.0392	1,0003	1	0.096	1	1
Qy				9.4	1	1			
Qx				67000	1,99	1			
Mxy				67000	2,05	1			

注：mは各材料のS-N曲線をlog-log表示したときのS-N曲線の傾きの逆数