

I-9 既設道路 R.C.床版の疲労破壊実験と疲労破壊機構に関する一考察

大阪市立大学工学部 倉田 宗章
 大阪市立大学工学部 ○園田 恵一郎
 建設省近畿地方建設局 実松 秀夫
 東洋技研コンサルタント 竹村 泰弘

諸 言

竣工後、約 8 年を経過し、既に損傷の激しい道路橋 R.C.床版を現場から 2 枚切り出し、それと同設計の新床版 3 枚とともに、実験室にて、静的ならびに繰返し載荷による疲労破壊実験を行なった。この実験では、損傷床版と新床版の静的および疲労破壊特性の相異の調査はもちろんであるが、特に、実際の走行自動車荷重をシミュレートした多点、移動繰返し荷重による実験を通して、この種の床版の疲労破壊過程（コンクリートの亀裂の進展と損傷の拡大）の究明に努力した。

1. 実験供試体

①種類；供試体の種類および寸法は、表 1 に示す。

表 1 実験供試体の種類と寸法

供試体名	寸 法	摘 要
O _s	(巾) (長) (厚) 2.5 ^m ×3.75 ^m ×18 ^{cm}	実橋より採取、静的載荷試験用
O _b	〃 〃 〃	〃、繰返し載荷試験用
N _s	2.5×3.8×18	新規製作、静的載荷試験用
N _b	〃 〃 〃	〃、繰返し 〃
N _{dm}	〃 〃 〃	〃、移動繰返し載荷試験用

②実橋より採取した床版について；床版を採取した橋梁は、一般国道 43 号線の橋で、昭和 41 年 3 月に竣工し、採取時点までに、約 8 年の荷重履歴を受けている。交通量は、2 回の調査により、竣工後約 3 年間は 1 車線当り約 2 万台／日（大型車混入率約 60％）であり、その後は約 3 千台／日と推定された。この床版は、昭和 39 年 3 月制定、鋼道路橋設計示方書

図 1 実橋より採取した床版の配筋

(T-20) に基づいて設計されたもので配筋状態を図 1 に示す。採取部の床版厚は 18 cm（舗装は削除）、主筋は、圧縮側 φ16 mm，

c. t. 200 mm，引張側 φ16 mm，c. t. c.100

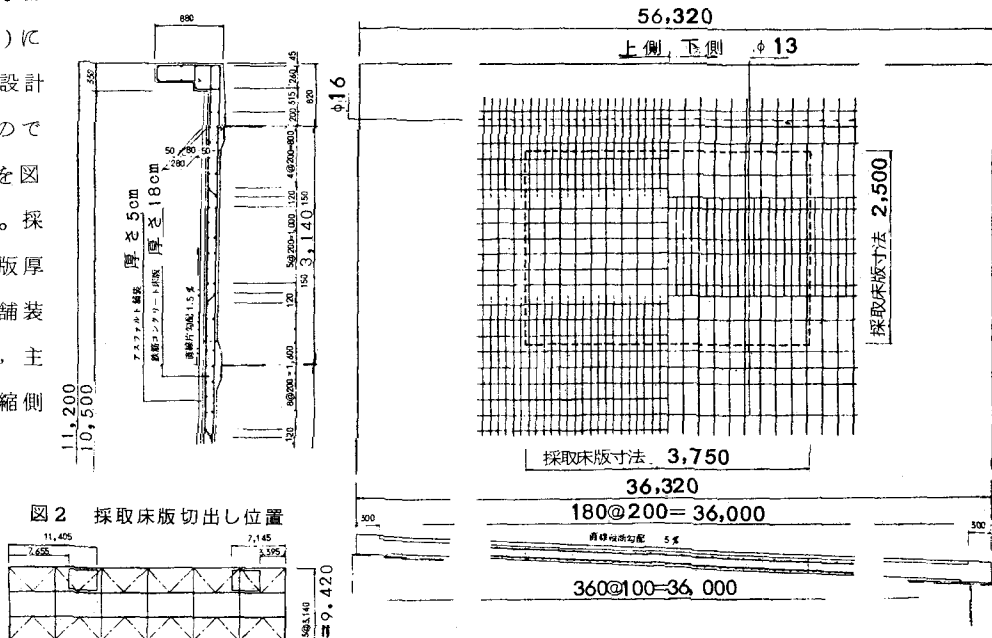


図 2 採取床版切出し位置

mm, 配力筋は圧縮側 $\phi 13\text{mm}$ c. t. c. 200 mm, 引張側 $\phi 13\text{mm}$, c. t. c. 200~400 mmで主筋に対する配力筋の比は約35%で, 鉄筋の材質はSR 24(丸棒)である。次に, 床版の材料の力学的特性について, 実橋より採取した鉄筋($\phi 16$, 3本)及びコンクリート($\phi 100$ のコアボーリング, 圧縮, 引張用各3個)の材料試験結果は, 鉄筋の平均降伏応力, 平均引張強度は, 各々, $3,300\text{ kg/cm}^2$, $4,700\text{ kg/cm}^2$, コンクリートの平均圧縮強度, 平均引張強度, 平均圧縮弾性係数は, 各々, 323 kg/cm^2 , 33 kg/cm^2 , $2.8 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$ であった。また, 実橋採取床版(O_p)の上面及び下面の亀裂状況を図3に示す。下面の大きな亀裂のいくつかは上面まで貫通していた。供試体 O_s もほぼ同様であった。

③新規床版について; 設計諸元は, 実験床版と同じであり, 従って, 配筋も同じである。コンクリートの配合を表2に示すが, 実験期日の関係上, 早強セメントを使用し, 自然養生で, 実橋床版の設計強度(280 kg/cm^2)と同程度になるように配慮した。実験開始時の強度については, 供試体 N_s で, 平均圧縮強度及び平均引張強度は, 各々, 255 kg/cm^2 , 24 kg/cm^2 , N_p で各々, 301 kg/cm^2 , 24 kg/cm^2 , N_{dm} で各々, 320 kg/cm^2 , 28 kg/cm^2 であった。

2 実験方法

載荷装置 載荷装置を図4に示す。ジャッキは3本あり, 中央が30 t電気油圧式疲労試験用, 両側の2本は50 t静的試験用である。載荷面は, 道路橋示方書で規定された後輪荷重の幅($20 \times 50\text{ cm}$)に舗装厚さ分の広がりを考慮した $30 \times 60\text{ cm}$ の長方形とし(ただし供試体 N_{dm} は $20 \times 50\text{ cm}$)載荷板には厚さ25mm鋼板を用い, 床版との接触面には厚さ25cmの硬質ゴム板を挿入した。荷重は後輪一個のみを考慮し, 一点載荷とした。つぎに, 長辺に沿った支持辺は単純剛支持とするために, 床版の下面に帯鋼板を貼り付け, コンクリート支持台の上に固定された棒丸鋼($\phi 52\text{ mm}$)の上に載せた。また, 短辺に沿った支持辺は, 実橋の支持条件に近づけるために, 弾性支持とし, H型钢($300 \times 170\text{ mm}$)の上に載せ, 床版とH型钢の間には樹脂を注入して接合した。

載荷方法 静的試験では, 版の中央点の載荷一除荷を1サイクルとし, 各サイクルの上限荷重は荷重20 tまでは1.25 tきざみで, それ以降は5 tきざみで上昇させた。一方, 繰返し試験(疲労試験)では, 供試体 O_p 及び N_p に対し

表2 供試体Nのコンクリートの標準配合

圧縮強度 σ_{bc} (kg/cm^2)	最大骨材 寸 法 (mm)	スランブ 法 (cm)	単位セメント 量 (kg/m^3)	単位水量 (kg/m^3)	水セメント 比 w/c	細骨材率 S/A %	空気量 %	混和材
280	25	10	402	164	40.8	40.1	4.0	ポリス No5L

注) 圧縮強度は14日強度を基準とした。セメントは早強を使用

図3 上面および下面の既存ひびわれ状態
(供試体 O_p)

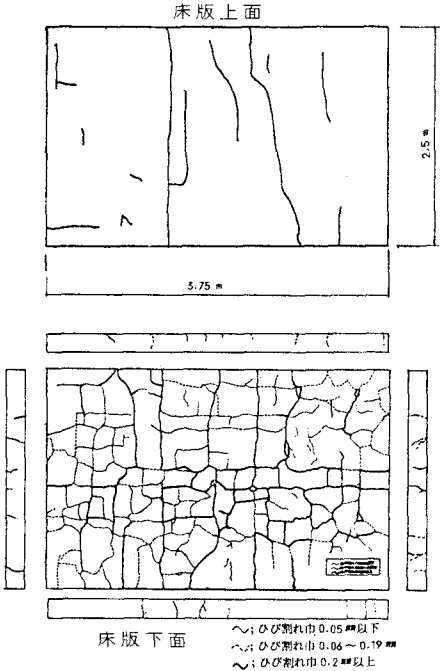
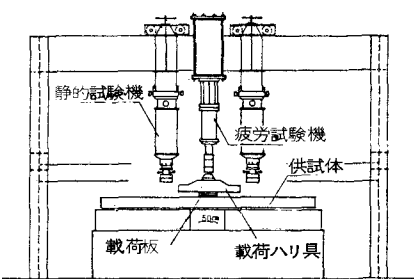
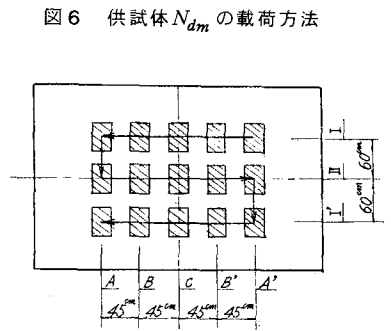
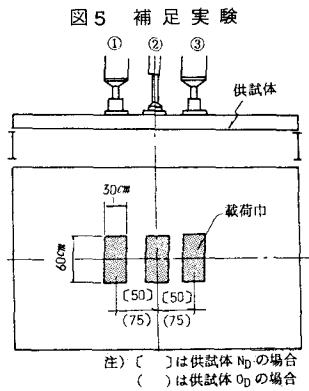


図4 載荷装置



ては、版の中央点での繰返し回数が230万回になる時を一つの基準にとり、これを本実験とした。230万回で破壊に至らなかったの、その後図5に示す、3本のジャッキでサイクリックに載荷一除荷、繰返し載荷（静的）の補足実験を行なった。本実験の繰返し波形は正弦波とし、荷重速度は4 Hzを原則とし、下限荷



重は0.5 t、上限荷重は11 tより、2 t きざみで上昇させた。この上限荷重の最小値は、衝撃を考慮した設計荷重相当値である。荷重と繰返し数の関係を図7に示す。次に、供試体 N_{dm} に対しては、図6に示すように15点を順に移動し、1点1万回ずつ計15万回で一順するように載荷した。なお、移動回数は自動車1台の走行に相当する図6の1行分の移動をもって1回と数えた。

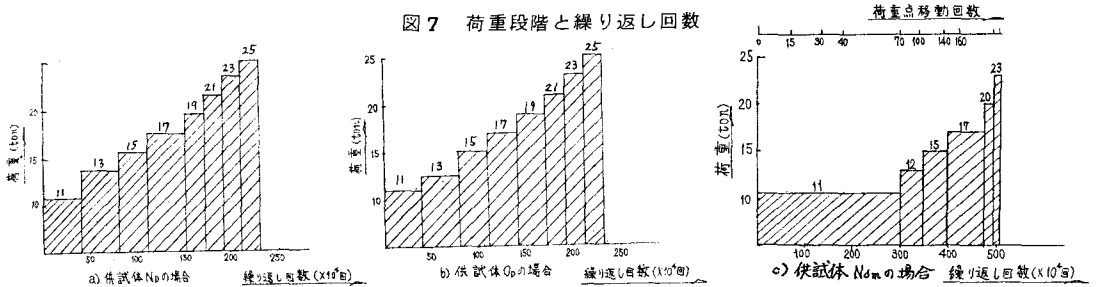
測定方法 たわみ測定；ダイヤルゲージ（精度1/100mm）にて版中央点および他の主要点（ N_s 、 N_D では96点）のたわみを測定した。ひびわれ測定；ひびわれ模様は目測によりマーキングし、写真撮影した。ひびわれ幅の測定はコンタクトゲージによった。ひずみ測定；供試体 N_s のみについて、版中央部の主筋および配力筋にストレインゲージを貼付し、各荷重段階でひずみ測定した。

3. 実験結果

実験結果の記述に際して、つぎの語句を用いた。たわみ（ δ_p ）；各サイクルの最初の値を基準にした各載荷時のたわみ量。残留たわみ（ δ_o ）；実験開始前を基準にした各サイクルの開始時（無載荷時）のたわみ量。総たわみ（ δ_t ）； $\delta_t = \delta_o + \delta_p$ （なお、支点沈下量は十分小さかったのでこの影響を無視した）。既存ひびわれ；実橋において既に発生していたひびわれ。新規ひびわれ；載荷試験中に新たに発生したひびわれ。初期ひびわれ；新規ひびわれの最初のもの。角落ち；ひびわれの表面の角がとれる現象。すり減り；ひびわれの間からコンクリートの粉が落ち、ひびわれ幅が大きくなる現象。段差；ひびわれ面が上、下方向にずれる現象。崩壊面傾斜角；床版の水平面と陥没崩壊面とのなす角

3.1. 静的試験

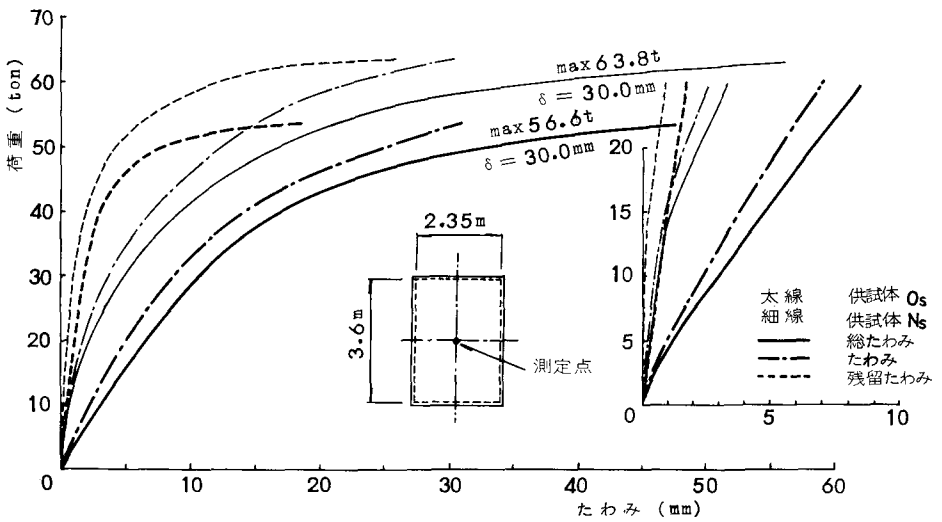
① 供試体 Q_p について；荷重—たわみ曲線を図8に示す。設計荷重相当時（ $P = 11 \text{ t}$ ）のたわみは約29mmであり、新規ひびわれは生じなかった。最初の新規ひびわれは、 $P = 20 \text{ t}$ 時で、床版下面の載荷板下付近と載荷板下より約1 m離れた点の2本で、たわみは約5mmであった。新規ひびわれの急激



な増加は、 $P =$

23 t からで、たわみは約 68 mm であった。ただし新規ひびわれ長さは 15 cm 程度と短く、既存ひびわれにつながっていた。そしてこの荷重段階より、既存ひびわれの角落ち現象が生じ始めた。

図 8 供試体 O と供試体 N のたわみ比較（静的実験）



$P > 23$ t のひびわれ状態は図 12 が示すように载荷位置より 45° 方向の放射状に発生したものが多く、鉄筋に沿ったひびわれは数少なかった。 $P = 53.6$ t 時に曲げ変形により生じたひびわれとは異なったせん断変形を伴うひびわれ（段差）が急激に生じ崩壊した。この時のたわみは 30 mm（残留たわみ 17.5 mm）であった。崩壊状態を図 9 に示す。

② 供試体 N_s について；荷重・たわみ曲線を図 8 に示す。設計荷重相当時（ $P = 11$ t）のたわみは約 0.6 mm であり、新規ひびわれは生じなかった。最初のひびわれは、 $P = 17.5$ t 時に確認した。ひびわれ位置は、床版下面の版中央付近（1 m 四方以内）で 10 本程生じた。この時のたわみは約 1 mm で、この荷重段階までの荷重・たわみ曲線はほぼ直線を示した。新規ひびわれが急激に増加し始めたのは $P = 25$ t からで、たわみは約 2.4 mm であり、図 12 のごとく、初期ひびわれと同様、放射状であった。 $P = 63.8$ t 時に曲げ変形に伴う剪断破壊によって陥没した。この時のたわみは 30 mm であった。崩壊状態を図 9 に示す。

3.2 繰返し実験について

① 供試体 O_b について； $P = 11$ t 時の繰返し回数（ N ）が 1 回目のたわみは 2.6 mm であり、繰返し回数の増加と共にたわみは $N = 10 \times 10^4$ 回程度まで増加の傾向（ $N = 10 \times 10^4$ 時のたわみ 2.68 mm）を示した。その後、同一荷重で繰返しても増加の傾向を示さず、 $N = 40 \times 10^4$ 時のたわみは 2.72 mm とほとんど同じであった。 $P = 11$ t、 $N > 30 \times 10^4$ 時に载荷板下に既存ひびわれに角落ち、すり減り現象が生じ、これらはたわみと同様、 $N = 10 \times 10^4$ までに多く生じ、それ以後は徐々に減少する傾向が見られた。初期ひびわれは $P = 13$ t、 $N = 45 \times 10^4$ 時に生じた。新規ひびわれが急激に増加し始めたのは、 $P = 17$ t、 $N = 120 \sim 140 \times 10^4$ 時以降であり、载荷点から放射状に進展した。角落ち、すり減り現象は、荷重を上げた直後に激しくなり、一定荷重では繰返し回数が 1 万回以上では減少する傾向にあった。 $P = 25$ t、 $N = 210 \times 10^4$ 時には、落下物の塊も大きくなった。繰返し回数とたわみの関係を図 10 及び図 11 に示す。計画による所定の回数、 $N = 230 \times 10^4$ （ $P = 25$ t）で供試体は破壊に至らなかった。

② 供試体 N_D につ

いて；設計荷重相当時 ($P = 11 \text{ t}$) において、たわみは繰返し回数、 $N = 1$ で 0.6 mm 、その後 10×10^4 程度まで増加の傾向をたどり、 $N = 10 \times 10^4$ で 0.7 mm (残留 0.4 mm) であった。その後、 $N = 40 \times 10^4$ ま

で繰返したが増加の傾向は、初期に比して鈍くなった。初期ひびわれは最初の荷重段階 ($P = 11 \text{ t}$) で $N = 1000$ 時に載荷板下の主筋方向に長さ約 70 cm 生じた。その後のひびわれの進展は、 $P = 11 \text{ t}$ 、 $N = 40 \times 10^4$ 時で、載荷板付近から放射状に延びた。しかしながら、これらのひびわれ幅は、非常に微小で、無載荷時には、最初に入った載荷板中央主筋方向のもの以外は、ほとんど確認できなかった。ひびわれが急激に増加しはじめたのは、累計繰返し回数 $N = 80 \times 10^4$ ($P = 15 \text{ t}$) の頃からであり、 $N = 140 \times 10^4$ ($P = 17 \text{ t}$) 頃よりひびわれの増加率は減少し出した。角落ち現象は、

$N = 70 \times 10^4$ ($P = 13 \text{ t}$) 頃から生じ始めたが落下物の大きさは微細で、表面の一部のみが欠落した。繰返し回数とたわみの関係は、図 10 に示す。各荷重段階における傾向は、 $P = 11 \text{ t}$ とほとんど同じようであり、 $N = 230 \times 10^4$ ($P = 25 \text{ t}$) 時のたわみは 3.4 mm (残留たわみは 2.3 mm) であった。また、この段階でのひびわれ状態を図 12 に示すが、ひびわれ間隔は非常に密で、方向は載荷点から放射状で

図 9 各供試体の崩壊状態

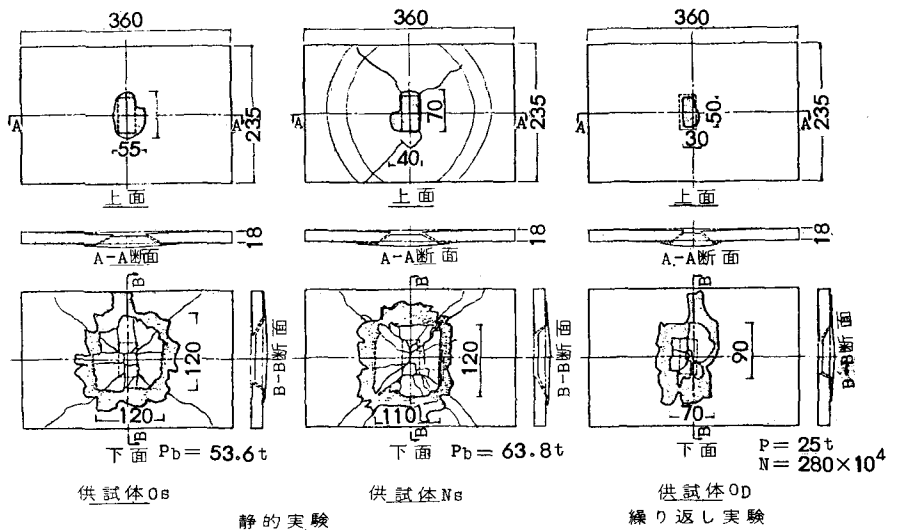


図 10 繰返し回数とたわみの関係

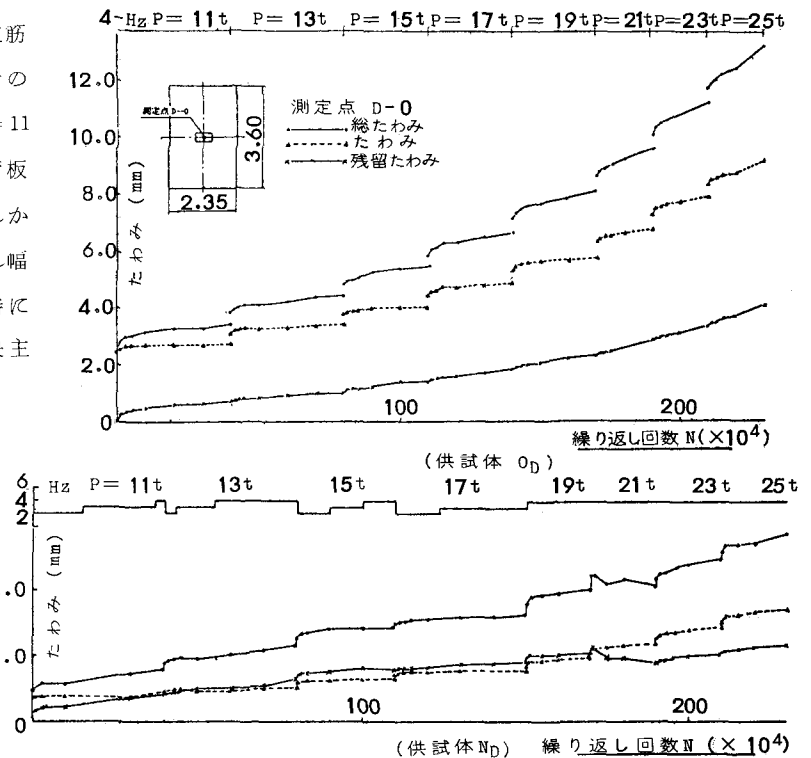


図 11 実験値とたわみ計算値との関係

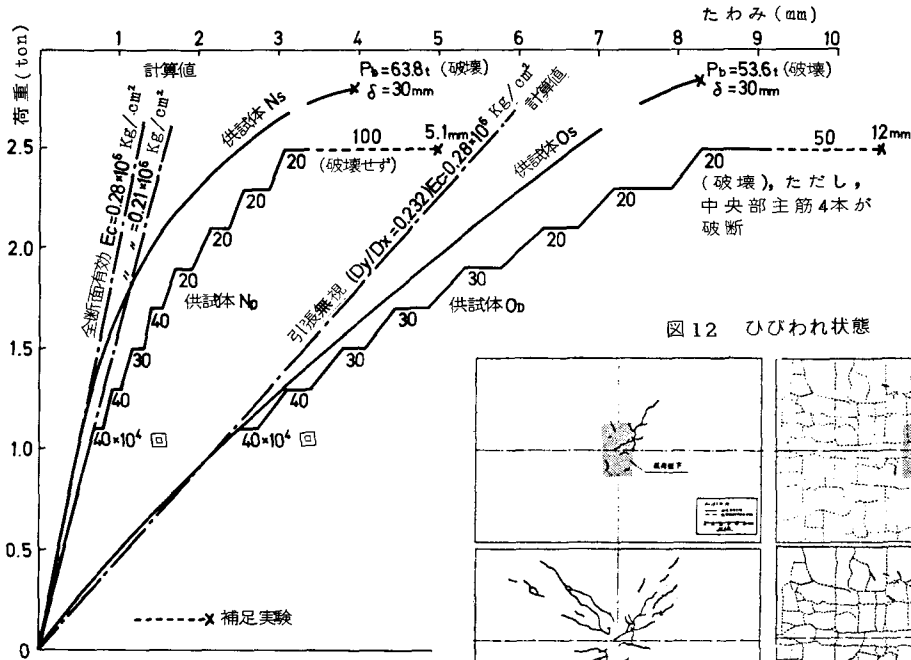
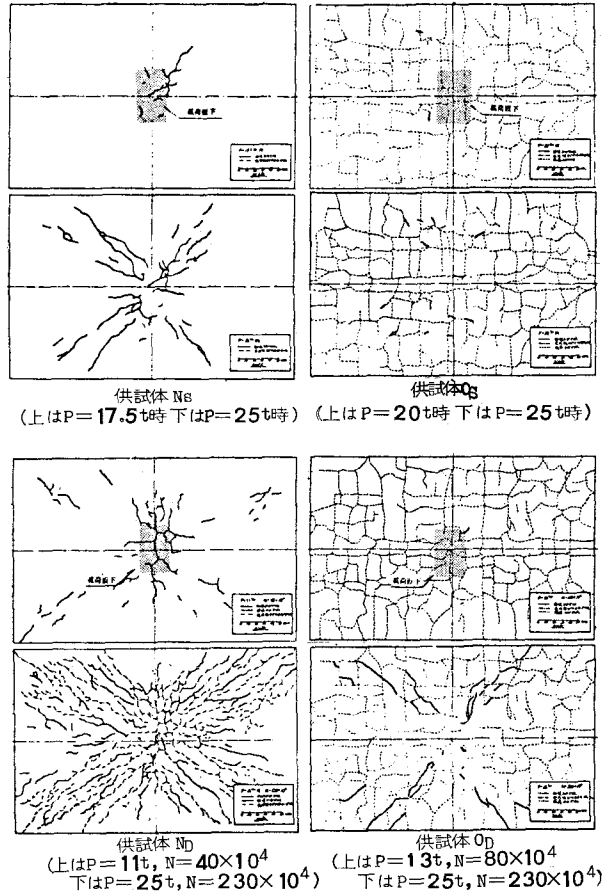


図 12 ひびわれ状態



あった。計画による所定の繰返し回数 $N = 230 \times 10^4$ ($P = 25 \text{ t}$) で破壊しなかった。その後、供試体 O_d 及び N_d に対して、図 5 の交番荷重による補足実験を行なった。載荷点を移動すれば、新しいひびわれが発生し、角落ち現象は著しく顕著になった。更に、版中央点から若干ずれた点を繰返し載荷すれば、供試体 O_d では角落ち、すり減りが著しくなり、ついに、累計繰返し回数 $N = 275 \times 10^4$ ($P = 25 \text{ t}$) 時に、中央部の主筋 4 本が疲労破断し、陥没破壊を起こした。(図 9 参照)

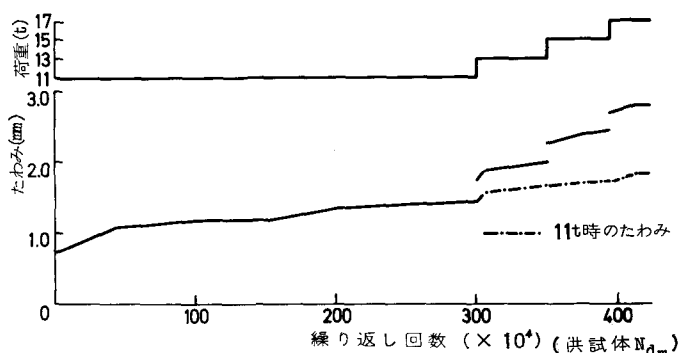
3.3. 移動荷重繰返し実験 (供試体 N_{dm}) について

供試体 N_d では初期ひびわれは、最初の荷重段階 ($P = 11 \text{ t}$) で発生したので、初期ひびわれ発生の最小荷重を調べる為に予備実験として、版中央点の繰返し荷重を 4 t から 5 万回毎 2 t おきに荷重を上昇させた結果、 $P = 6 \text{ t}$ (3 万回) 時に、載荷版中央、主筋と平行にひびわれが入った。その後荷重を 11 t に上げ、図 6 の載荷方法と図 7 に示す荷重・繰返し回数関係によって本実験を行なった。繰返し回数 $N = 1$ 時で 0.77 mm 、その後 $N = 50 \times 10^4$ (荷重移動回数、 $S = 10$) 時までは増加率は大きく、その時のたわみは 1.14 mm であった。しかし $N = 50 \times 10^4$ 以降になると鈍くなり、 $N = 80 \times 10^4$ (荷重移動回数 $S = 15$) 時でたわみは 1.19 mm であり、その後勾配は緩やかだが回数の増加と共にたわみは増大し、 N

$= 300 \times 10^4$ ($S = 70$) 時で 149 mm であ

図 13 繰返し回数とたわみ関係

り、この値は供試体 O_D の $P = 11$ t での初期たわみ (2.5 mm) の 60% に相当した (図 13 参照)。次に、ひびわれは、荷重移動回数 $S = 1$ において、荷重点を移動するごとに約 1 千回の繰返しで、載荷版直下、主筋と平行方向に生じた。これらのひびわれは非常に微細で、無載荷時には確認できない



程であった。その後ひびわれ量は $N = 80 \times 10^4$ ($S = 15$) までに大きく増加した (図 14 参照)。また、この時にコンクリート表面から微小な角落ちが起こった。 $N = 80 \times 10^4$ 以降、荷重点の移動に伴い、ひびわれは亀甲状の様相を呈し、 $N = 140 \times 10^4$ ($S = 30$) 程度でほぼ亀裂模様は完成し、その後の変化は殆どなくなった。しかし、 $N = 180 \times 10^4$ ($S = 30$) 頃よりすり減り現象が確認され、その後、繰返し回数及び移動回数の増加と共に新しいひびわれは発生しなかったが、既存のひびわれ幅は拡大した。 $N = 330 \times 10^4$ ($S = 70$) 時で、版中央載荷版下のひびわれ幅は無載荷時で約 0.1 mm 程度になった。載荷装置の関係上 (荷重点の移動は手動による)、荷重移動回数には限界があったので、図 7 に示すように、この段階で荷重を 13 t に上げ、同様の繰返し載荷実験を行なった。

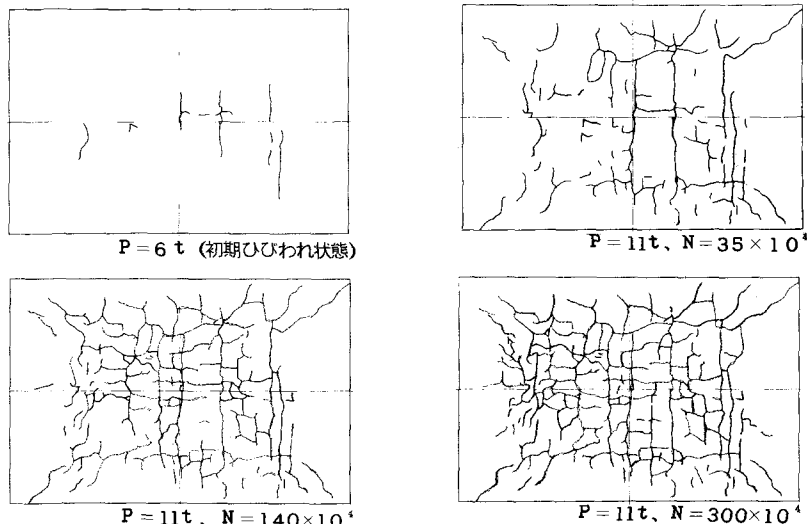
更に、荷重を 15 t, 17 t, 20 t と上昇させていけば、新しいひびわれは殆ど生じなかったが、荷重の移動に伴う角落ち及びすり減り現象は非常に激しくなり、落下物も 5 ~ 10 mm の大きさの物になった。そして、 $P = 23$ t 時 ($N = 490 \times 10^4$, $S = 190$) に床版の上面にひびわれが入った。このひびわれは、版中央点より 45 cm 離れた主筋と平行方向のもので、下面の大きなひびわれと一致していた (図 15 の B II の点)。

4. 実験結果のまとめ及び床版の疲労破壊機構の一考察

4.1. たわみ性状

図 14 供試体 N_{dm} のひびわれ模様

① 既存のひびわれを有する実橋採取床版 (O_s , O_D) は引張側コンクリート部無視の断面性状を持ち設計荷重相当時の荷重・たわみ曲線は直交異方性板としての計算値[☆]によく一致していた。それに対し健全な床版は全断面有効の断面性状を持



っていた（図11の計算値を参照）。②静的及び繰返し載荷のどちらにおいても、見かけの版剛度（全断面有効の計算たわみ／実測たわみ）が約1／10になれば、崩壊（陥没）が生じた。③固定荷重の繰返しでは、一定荷重の下で約十万回以上にあれば、たわみの進行は停止したが、移動荷重の繰返しでは、荷重の移動につれてたわみは徐々に増大していった。（☆大阪大学松井講師の協力を得た）

4.2 ひびわれ性状

①初期ひびわれは、健全な床版（ N_{dm} ）において、 $P = 6 \text{ t}$ （ $N = 3 \times 10^4$ 回）にて発生し、この時の版下面のコンクリートの計算最大ひずみは、主筋方向で 77×10^8 、配力筋方向で 74×10^8 であった。②初期ひびわれ後に発生する新たなひびわれは、固定荷重の下では、静的及び繰返し載荷の何れも載荷点より放射状に進展したが、移動繰返し載荷（供試体 N_{dm} ）では、実橋床版の既存ひびわれ模様と似た亀甲状に入った。③交番繰返し（3本のジャッキで位置を変えた荷重を交互にかける）において、荷重位置を移動すれば、その載荷板直下に新しいひびわれが生じた。この現象は、移動繰返し荷重の場合でも同じであった。ひびわれ幅の動きは、載荷板下近傍では下面が開くが、載荷板より離れた位置にあるものは、逆の現象（下面で閉じ、上面で開く）を示した（図15参照）。このひびわれの開閉が載荷位置により異なる為に、ひびわれ内部ではコンクリートのすり減り現象が起こり、表面では角落ち現象が起こり、更に進行すると、ひびわれ位置において上、下のズレ（段差）を生じ、最終的にははくり現象を引き起こした。

4.3 終局荷重

①静的崩壊荷重は供試体 O_s で53.6 t、 N_s で63.8 tであり、降伏線理論による計算値は、各々75.4 t、63.9 tであり、既存ひびわれの終局荷重への影響は認められたが終局荷重は設計荷重（ $P = 11 \text{ t}$ ）より遙かに大きかった。②供試体 O_D は交番荷重による静的載荷及び偏心繰返し載荷によって $P = 25 \text{ t}$ （ $N = 275 \times 10^4$ ）時に中央部引張側の主筋4本が疲労破断し床版は陥没破壊した。

4.4 移動繰返し荷重によるR.C床版の疲労破壊過程の推測

走行自動車荷重によるR.C床版（特に配力筋が少ないものに対して）の疲労破壊の一つの過程を以下に示す。①通常の荷重の下で、引張側コンクリートに主筋と平行方向にひびわれが発生②移動荷重の繰返しにより、亀裂面での鉄筋の極く局部的な付着破壊に起因する微小なズレの発生、③移動荷重の繰返しにより、亀裂面は開閉しその結果、摩耗によるコンクリートのすり減りが起こる。④コンクリートのすり減りによって亀裂面はスリット状になり、床版の連続性が失われ、その結果、荷重の移動に伴って亀裂断面上の健全なコンクリート部にも、正負の繰返し応力が発生し、亀裂は断面内に進行し、場合によっては上面まで貫通する（図15参照）。⑤、④の状態が進行すると、亀裂面での局部破壊（角落ち、はく離など）が起こり、ついにはコンクリートの一部が離脱する。

図15 載荷位置の移動によるひびわれ幅の変化

