

[163] 輪荷重の反復の下での RC 床版の挙動

正会員 ○園田恵一郎(大阪市立大学工学部)

今井宏典(阪神高速道路公団)

堀川都志雄(大阪市立大学工学部)

船越博行(オリエンタルコンサルタンツKK)

1. まえがき

道路橋 RC 床版を対象として取上げ、輪荷重の 10^4 回を限度とする繰返しの下での RC 床版の挙動(ひびわれ、剛性低下、強度低下、破壊機構、疲労寿命など)を調査し、作用荷重の大きさ、繰返数と RC 床版の損傷度(劣化度)の関係を明らかにする。

2. 実験方法

(a) 輪荷重反復装置 概要を図1に示す。カウンターウェイト方式による定荷重装置を採用し、車輪は直径 30 cm、幅 15 cm の鋼製輪の上に厚さ 20 mm のポリウレタンゴム(硬度 JIS95)を巻きつけたものである。荷重の反復・移動はウィンチによるけん引と電磁クラッチの切換えによった。移動速度は 10 m/分であり、移動時の荷重の変動率を表1に示す。荷重の作用面は荷重の増加につれて大きくなり、 2^t 時で $2.9 \times 15 \text{ cm}^2$ 、 5^t 時で $4.5 \times 15 \text{ cm}^2$ であった。

(b) 供試体 代表的な合成桁床版の主桁間の1パネルの約 $1/3$ の縮尺のモデルを想定し、表2に示すように、短スパン 80 cm、長スパン 3 m の単純支持(4隅の浮き上がりを防止した)の供試体を採用した。使用したコンクリートおよび鉄筋の特性を表3,4に示す。

3. 実験結果

(a) 静的載荷実験 車輪を中央点に固定して、載荷したところ、破壊は局所的な押抜きせん断形であったので、中央点より ±90 cm 離れた2点の載荷試験を追加した。3点の破壊荷重はほとんど同じであった。表5の値はそれらの平均値を示す。いずれの供試体も押抜きせん断破壊した。初期ひびわれはいずれの供試体でも荷重が 1.5^t かまたは 2.0^t (0.5^t きざみで観測)の時に確認され、荷重点直下の主筋と平行か、またはそれと直角なひびわれも同時に発生した。初期ひびわれ確認時の主筋の最大ひずみは $400 \sim 500 \times 10^{-6}$ であり、たわみは $0.1 \sim 0.15 \text{ mm}$ であった。

(b) 走行荷重実験 輪荷重の走行位置を図2に示すように、短スパン中央の長辺方向の 2.3 m である。計測は所定の走行繰返の後に、中央点で車輪を止め除荷時と負荷時の両方で行った。図3に供試体 IS における中央点の弾性たわみ(荷重によるたわみ)と残留たわみ(除荷時のたわみ)の繰返回数 N (長辺方向の1回の走行を $N=1$ と数える)による変化を示し、図4には同じく供試体 IS の中央点のひずみの変化を示す。他の供試体にもほぼ同様の傾向を示し

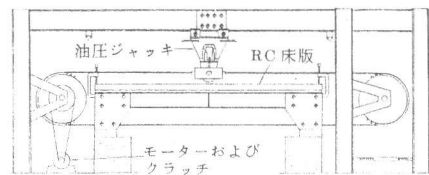


図1 輪荷重装置

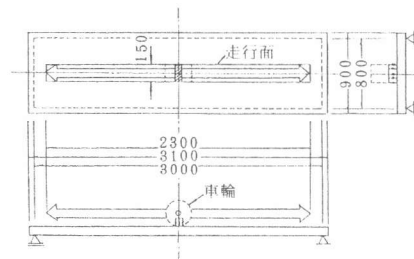


図2 走行荷重実験での載荷領域

表1 荷重の変動率

呼称荷重 (ton)	静荷重 (kg)	変動最大荷重 (kg)	変動最小荷重 (kg)	変動率 (%)
5.0	5040	5491	4723	+9. -6
4.0	4028	4483	3780	+11. -6
3.5	3487	3853	3260	+10. -7
3.0	3015	3320	2703	+10. -10
2.6	2610	3291	2508	+26. -3
2.5	2475	2969	2303	+20. -7
2.2	2205	2618	2023	+19. -8
1.7	1665	2017	1416	+21. -17

表2 供試体諸元

名称	枚数	寸法 cm	板厚 cm	有効高 cm	短スパン	鉄筋	引張鉄筋比(%)		圧縮鉄筋比(%)	
							主	配	主	配
IS	6	90×310	7.2	6.2	80	D6	1.02	1.13	-	-
ISS	6	〃	7.5	6.5	〃	〃	0.97	1.02	-	-
IR	6	〃	7.2	6.2	〃	〃	1.02	1.13	0.57	0.51
ID	6	〃	〃	〃	〃	〃	1.02	1.13	1.13	1.02
OS	5	〃	〃	〃	〃	〃	1.02	0.57	-	-
OR	3	〃	〃	〃	〃	〃	1.02	0.57	0.57	0.28

たが、紙面の都合上結果の図は割愛する。破壊形状は、1例を図6に示すが、いずれの供試体も最終的には押抜きせん断形であり、鉄筋の破断はなかった。破壊位置は各供試体によって異なるので、床版中央のたわみの破壊直前の値はばらつくが、残留たわみ値で約2.5mm(ただし、供試体ISSでは3.0mm弱)に到達した時に、急速に押抜きせん断破壊が起こった。一方、主筋ひずみは、荷重の大きいときは最初の数回の繰返しで降伏点を越え、その後、繰返回数の増加とともに増大するが、荷重が小さいときは床版の破壊直前までほとんど変化しなかった。また、配力筋ひずみは主筋に比べてかなり小さく、繰返回数とともにほとんど変化しないかまたは小さくなる傾向にあった。さらに、ひびわれの残留幅については、配力筋と平行のものは図5に示すように残留たわみの変化とはほぼ同様な傾向を示したが、主筋と平行のものは(紙面では省略)はゲージの測定値にはほとんど現われなかったが、肉眼では配力筋と平行なものと同様にはっきりと観測でき、ひびわれ網は鉄筋の位置に沿った格子状(図6)になった。このことから、主筋と平行な残留ひびわれは曲げ変形によってひびわれ面が開いたのではなく、ひびわれ面のコンクリートが荷重の繰返しとともにすり減って見かけ上のひびわれ幅が拡大したものである。尚、ひびわれ間隔は鉄筋間隔とほぼ同じ最小5mmであり、ひびわれ幅の測定はゲージ長50mmのπゲージを用いて行い、主筋方向には3個の直列に配置したπゲージの総開き量、配力筋方向には5個のそれらの総開き量をもってひびわれ幅の計測値としている。

走行荷重の下での破壊荷重値と繰返回数の関係を図7に示す。図中、設計荷重相当値とは、輪荷重を床版中央に載せたときの主筋の最大引張応力が道路橋示方書で規定された許容応力度($\sigma_{ta} = 1.400 \text{ kg/cm}^2$)になる時の弾性平板理論による計算荷重であり、約1.7tになり、静的耐力比(S_0)では約0.16(ただし、供試体ISSでは0.124, IDでは0.14)になる。

4. 損傷度(劣化度)の評価

一般的に考えて、RC床版の損傷度の評価は次の項目の調査によって可能になるものと思われる。

- ①一定荷重の下での鉄筋ひずみの変化
- ②ひびわれの残留幅
- ③一定荷重の下での弾性たわみ値の変化(版剛性の低下)
- ④残留たわみ値の変化

前節の実験結果から見れば、破壊が曲げ破壊形でないので鉄筋のひずみを損傷度の指標にするのは不適當である。配力筋と平行なひびわれの残留幅の変化は残留たわみの変化に類似しているが、バラツキが大きく定量的に捉えにくい。また

表3 コンクリートの配合と強度

供試体	単位セメント量 (kg/m ³)	水・セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランジュ (cm)	空気量 (%)	最大粗骨材径 (mm)	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)
IS, OR, IR, ID, OS	370	50	47	10~22	3~5	15	47.8*	3.7*
ISS	370	50	47	10~22	3~5	10	18.7**	1.9**

*材令70日, 8月打設 **材令28日, 8月打設

表4 鉄筋の強度

供試体	降伏強度 (kg/cm ²)	破断強度 (kg/cm ²)	備考
IS, OS, IR, ID, OR	3700	5700	熱処理済
ISS	4758	6450	熱処理せず

表5 静的破壊荷重(t)

	ID	OR	ISS	IS	OS	IR
実験値	1.24	7.8	13.7	10.7	10.2	10.3
降伏線理論 [※]	1.67	11.2	1.24	1.22	9.0	15.1
押抜きせん断式 [※]	1.28	1.28	10.0	13.2	13.2	13.2

※実験による最高荷重時の輪荷重接地面(6×15cm²)を使用。押抜きせん断式はコンクリートライブラリー48による。

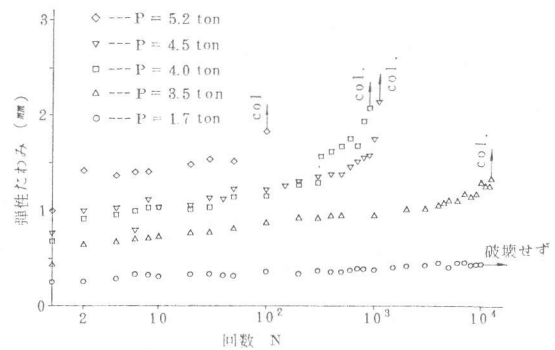


図3a 中央点の弾性たわみ

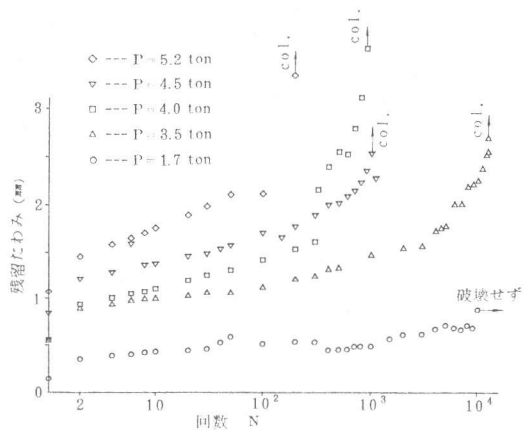


図3b 中央点の残留たわみ

剛性の低下を意味する弾性たわみの変化は比較的緩慢であり、これより損傷度の評価は精度的に不利である。これに対して一定荷重の繰返しの下での残留たわみ値は塑性変形量で、床版の消散エネルギー量に対応するので、残留たわみ値による損傷度の評価は物理的にも適切であると思われる。図8は残留たわみ値の実験値を両対数グラフにプロットし直したものの1例である。これらのデータ(ただし、2.5mm以上の残留たわみ値は破壊に近い時点のもので場所による差が大きいので省いている)より、最小2乗法を用いて走行回数(N)と残留たわみ値(δ)の関係($\log \delta = A + B \log N$)を見出せば表6の結果を得る。全体的な傾向としては $\log N$ が大きくなるにつれて $\log \delta$ の変化率も漸増しているので、直線近似を用いるのは精度的には若干問題があるが、これより $\delta = 2.5$ mmになる時の走行回数($N_{2.5}$)を予測すれば、表6の値を得る。したがって、 $\delta = 2.5$ mmに到達した時を破壊直前と見なせば、この表より設計荷重相当値での疲労寿命は供試体ISで 10^{12} , IRで 10^9 , IDで 10^9 であるといえる。

つぎに、RC床版の損傷度(D_p)を設計荷重相当値の走行による寿命 N^d とこれより過大な荷重の下での寿命 N^P の比として定義すれば、

$$D_p = N^d / N^P$$

すなわち、 D_p は過積載車荷重が1回走行したときの損傷度と同じになるための設計荷重相当の走行回数を意味する。表6の回帰直線を利用して、 $\delta = 2.5, 2.0, 1.5$ mmになる時の寿命を規準にして D_p を求めたものが表7である。なお、供試体ISSでは荷重が小さく $N = 10^4$ ではいずれも破壊しなかったため、 $\delta = 2.5$ mmの評価は誤差が大きいため省略している。荷重の小さいところでの D_p はかなり乱れているが、設計荷重の約2倍で D_p は $10^4 \sim 10^7$ になっている。最後に、図7の押抜きせん断破壊のデータに最小2乗法を用いて、 $S_0 = A^* + B^* \log N$ の関係を見出し、これより輪荷重の1回の走行

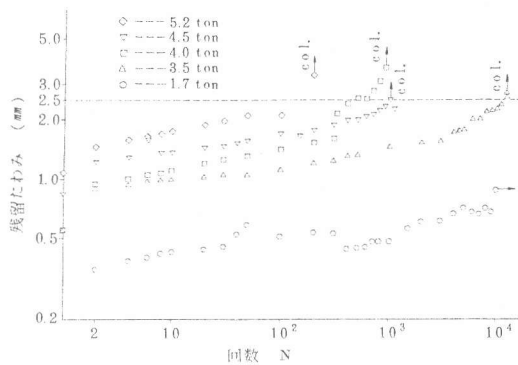


図8 中央点での残留たわみの変化

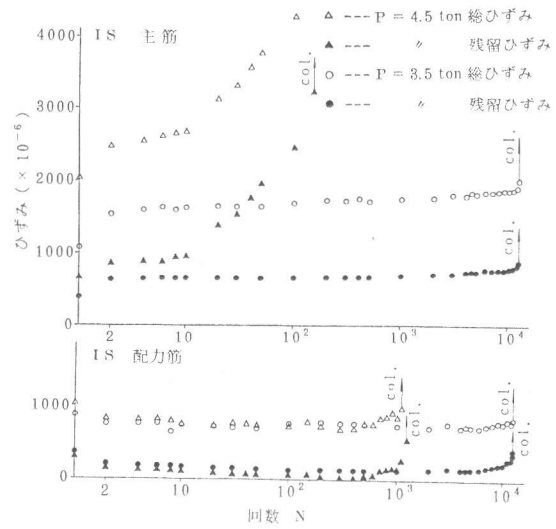


図4 中央点の総ひずみと残留ひずみ

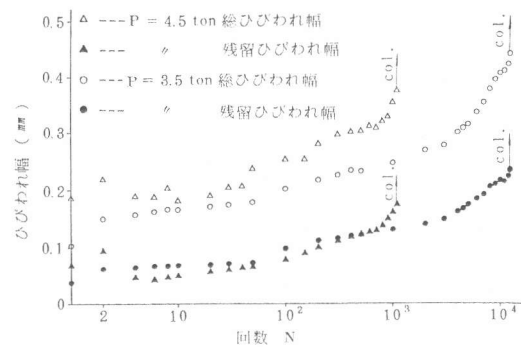


図5 配力筋と平行なひびわれ幅の変化

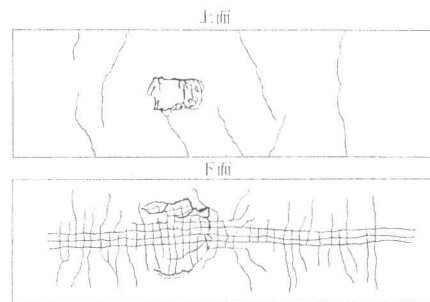


図6 走行荷重下での破壊形状

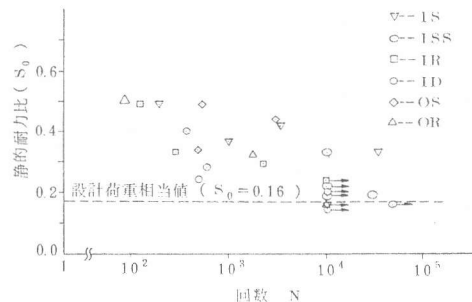


図7 静的耐力比と繰返回数

($N=1$)と 10^4 回の走行($N=10^4$)時での破壊荷重を推定したもので、表8の実験値に示すが、図7のデータ数は少なく、しかも非常にバラツキがあるので、より多くの実験データを利用し、精度を上げるために $\delta=2.5$ mmの時を破壊時点と仮定し、表6の回帰直線を利用して同様の関係を見出したものを表8には記入している。

5. まとめ

(1) 静的載荷および走行荷重実験のいずれも破壊形式は押抜きせん断形であった。

(2) 荷重の走行が床版の耐力に与える影響は大きく、1回の走行時の耐力の中央点載荷による静的耐力に対する比は、圧縮筋のない供試体(IS, OS)では約53~67%、圧縮筋のある供試体(IR, OR)では51~82%であった。

(3) 10^4 回走行時の疲労耐力の静的耐力に対する比は、供試体(IS, OS)で約33~45%、供試体(IR, OR)で約16~34%であった。これより、圧縮筋を有する供試体の方が、圧縮筋のない供試体より疲労の影響を受け易いという結果を得たが、この原因には、コンクリートの乾燥収縮応力の影響(実験前に既にひびわれが見られた供試体がいくつかあり、これらの供試体の疲労寿命は非常に短かったが、これらのデータは本論文からは除外されている)または圧縮鉄筋の存在によるせん断に対するコンクリートの有効断面の減少などが考えられる。

(4) 走行荷重実験では残留たわみ値が約2.5mm(供試体ISSでは3.0mm弱)すなわち、床版厚の3.5~3.7%に到達した直後に押抜きせん断破壊が起こった。したがって、同じ厚みの床版ではほぼ同じ残留たわみ値のときに破壊するといえる。

(5) RC床版の損傷度(劣化度)は、残留たわみの変化によって評価できる。

(6) 残留たわみ値から損傷度を評価すれば、設計荷重の約2倍の荷重の1回の走行が床版に与える損傷度は設計荷重の $10^4 \sim 10^7$ 回の走行時の損傷度に相当する。

表6 回帰直線と寿命予測

	S_0	A	B	$\log N_{2.5}$	実験値
IS	0.49	1.375	0.1021	2.54	2.29
	0.42	1.100	0.0969	3.68	3.09
	0.37	0.859	0.1089	4.26	2.99
	0.33	0.747	0.1070	4.90	4.09
	0.16	0.344	0.0707	1.22	—
ISS	0.26	0.592	0.0841	2.50	—
	0.22	0.433	0.0698	1.09	—
	0.19	0.424	0.0900	8.57	—
	0.19	0.504	0.7304	9.52	—
	0.16	0.226	0.9481	1.10	—
IR	0.49	1.320	0.1384	2.01	2.10
	0.34	1.011	0.1415	2.78	2.43
	0.29	0.863	0.0983	4.70	3.31
	0.24	0.492	0.1114	6.34	—
	0.16	0.420	0.0896	8.64	—
ID	0.40	1.005	0.1367	2.89	2.57
	0.28	0.642	0.1941	3.04	2.78
	0.24	0.545	0.2379	2.78	2.59
	0.20	0.474	0.8442	1.09	—
	0.14	0.534	0.0714	9.39	—
OS	0.49	1.501	0.0745	2.98	2.29
	0.44	1.075	0.0936	3.91	3.08
	0.39	1.033	0.0651	5.90	3.74
OR	0.50	0.828	0.2625	1.83	1.94
	0.32	0.307	0.2724	3.35	3.04

表7 静的耐力比と損傷度

	P/P_d	S_0	$\delta=2.5$ に対する D_p	$\delta=2.0$ に対する D_p	$\delta=1.5$ に対する D_p
IS	3.1	0.49	4.5×10^9	1.6×10^9	4.7×10^8
	2.6	0.42	3.3×10^8	1.3×10^8	4.5×10^7
	2.3	0.37	8.7×10^7	2.7×10^7	6.6×10^6
	2.1	0.33	2.0×10^7	6.3×10^6	1.6×10^6
ISS	1.6	0.26	—	5.0×10^3	7.4×10^3
	1.4	0.22	—	3.0×10^3	8.7×10^2
	1.2	0.19	—	3.2×10^2	3.7×10^2
IR	1.2	0.19	—	6.3×10	1.5×10^2
	3.1	0.49	4.3×10^6	1.8×10^6	5.9×10^5
	2.1	0.34	7.2×10^5	3.0×10^5	9.1×10^4
ID	1.8	0.29	8.7×10^3	7.1×10^3	5.4×10^3
	1.5	0.24	2.0×10^2	1.2×10^2	6.6×10
	2.9	0.40	3.2×10^6	7.1×10^5	1.0×10^5
	2.0	0.28	2.2×10^6	3.1×10^5	2.4×10^4
	1.7	0.24	4.1×10^6	4.6×10^5	2.7×10^4
	1.4	0.20	3.1×10^{-22}	1.3×10^{-1}	7.9×10^{-1}

表8 繰返し回数 $N=1$ と 10^4 での推定耐力

供試体	破壊基準	$S_0(N=1)$	$S_0(N=10^4)$	A^*	B^*
IS	$\log N_{2.5}^{**}$	0.5253	0.4011	0.5253	-0.0311
	実験値	0.6658	0.3277	0.6658	-0.0845
IR	$\log N_{2.5}^{**}$	0.5139	0.3424	0.5139	-0.0429
	実験値	0.7468	0.1751	0.7468	-0.1429
OS	$\log N_{2.5}^{**}$	0.5799	0.4486	0.5799	-0.0328
	実験値	0.6489	0.3737	0.6489	-0.0688
OR	$\log N_{2.5}^{**}$	0.7167	0.2430	0.7167	-0.1184
	実験値	0.8175	0.1629	0.8175	-0.1636