

第1章 床版の損傷事例

1.1 損傷事例と解説

鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)は輪荷重を支持し、主桁へ伝達する部材である。構造的には支間に比べて部材厚が薄い。ため、曲げモーメントに対してコンクリート及び鉄筋の応力度が許容応力度以下になるように断面諸元を決定することで、押抜きせん断に対しても十分な耐荷力を有すると認識があった。

しかし、輪荷重を直接昭和47年5月に開通して数年しか供用されていない阪神高速道路の大阪堺線で、続いて大阪守口線で鋼橋の鉄筋コンクリート床版に穴があく事故が発生した。大阪堺線の損傷状況は写真-1.1.1に示すように床版下面に30cm近い欠損穴、約1.5×4mの範囲に亀甲状の舗装ひびわれおよび剥離寸前のコンクリート破壊が見られた。舗装面は3m²の範囲にわたって30mmから50mmのくぼみがあった。舗装撤後の床版上面は写真-1.1.2に示すように砂利化し、一部のコンクリートが崩壊して大小の塊状化状態となっている。しかし、鉄筋は健全な状態であった。この現象は当時の設計における考え方では説明できないものであった。

その後、全国の道路橋において破損事故が相次ぎ、多くの損傷実態調査及び研究が実施された。道路橋輪荷重による床版の疲労損傷形態は以下に示す損傷過程を示すことが明らかとなっている。

①1方向ひびわれの生成

コンクリート床版は乾燥収縮、温度応力が鋼桁により拘束されると、床版に引張応力が発生する。一方、輪荷重が載荷されると曲げモーメントにより床版下面に引張応力が発生する。これらの応力が重ね合されて最初に主鉄筋方向にひびわれが発生する。

②2方向ひびわれの生成

主鉄筋方向にひび割れが発生すると、配力筋方向の曲げ剛性が主鉄筋方向の曲げ剛性に比較して著しく低下する。床版の構造的状態は等方性版から異方性版へ変化し、配力筋方向の剛性低下に伴って曲げモーメントの負担は減少し、剛性が大きな主鉄筋方向の曲げモーメントの負担率が大きくなり、梁構造に移行する。このため、ひびわれは配力筋方向にも生じ、2方向ひびわれが生成する。

③2方向ひびわれの発達と亀甲状化

2方向ひびわれは輪荷重の繰り返し作用をうけて、ひびわれの長さ、ひび割れ幅及びひびわれ深さが増加する。ひびわれが床版全厚まで進行すると、貫通ひびわれとなり、床版上面からの雨水が貫通ひびわれに浸透し、コンクリートの石灰分を溶解し、遊離石灰を床版下面に析出する。貫通ひびわれは伸展するとともに、新たな貫通ひびわれを発生し、細分化が生じ、最終的に亀甲状となる。

④角落ち、ひびわれのスリット化

亀甲状のひびわれは20cm～30cm角程度のひびわれ間隔になると、新たなひびわれの発生は停止するが、輪荷重の繰り返しによってひびわれの開閉、こすり合わせ挙動によりその端面で角落ちが発生し、損傷が急速に進行する。

⑤コンクリートの剥離・抜け落ち

2方向ひびわれが進行すると、コンクリートの剥離、陥没が生じる。陥没が生じると、舗装面に放射状あるいは亀甲状のひびわれが発生する。

陥没を生じた部分の床版は輪荷重を鉄筋のみで支持する状況となる。さらに、損傷が進行すると、コンクリートは抜け落ち、床版に欠損穴が生じる。

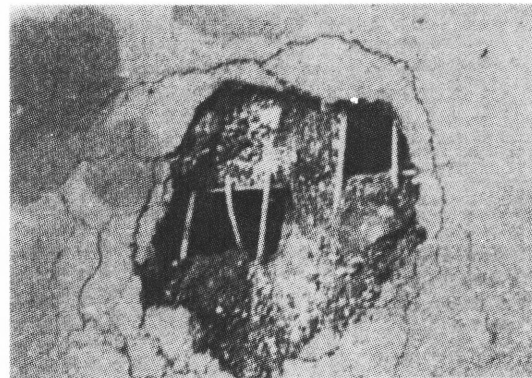


写真-1.1.1 舗装面の損傷状況

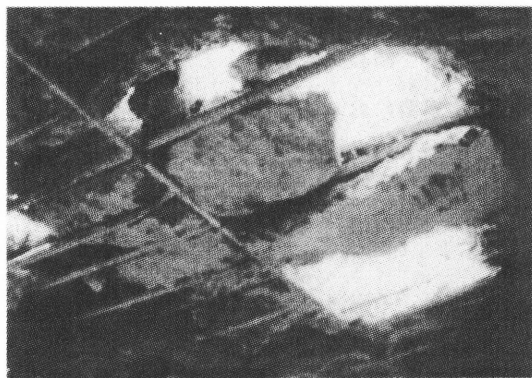


写真-1.1.2 床版下面の損傷状況

損傷原因に関する研究成果をふまえ、昭和 39 年から数回にわたって、道路橋示方書の改訂が実施され、最小床版厚、設計曲げモーメントの算定式、鉄筋の許容応力度等の諸規定が変更されている。その後、設計荷重は 8 トン(重要路線 9.6 トン)から 10 トンに変更された以外は大幅な変更はみられない。道路橋示方書の改訂に伴い、損傷事例の報告が少ないことから、床版の疲労耐久性が大きく改善されたことを物語っている。

昭和 39 年示方書を適用した床版に抜け落ちが多く発生した原因は以下に示す要因が複合したことが考えられている。

① 過大な輪荷重の作用

○昭和 30 年代の高度成長に伴う交通量の増加と過積載車の走行等により、過大な輪荷重による繰り返し走行の影響を受ける

② 設計

○高強度鉄筋、高強度コンクリートを採用して RC 床版の軽量化をはかるため、床版厚が薄くなった。
 ○配力鉄筋量が主鉄筋の 25% であり、主鉄筋に比較して少ないため、ひびわれが進行しやすい。
 ○乾燥収縮が主桁によって拘束されると、主鉄筋方向にひびわれが発生しやすい。

③ 施工(コンクリートの品質)

コンクリートの粗骨材が砂利から碎石に移行した時期にあたった。碎石を用いたコンクリートは砂利を用いたコンクリートと比較すると、単位水量と単位セメント量が増加し、乾燥収縮によるひび割れが発生しやすい傾向にある。

④ 環境

床版の貫通ひびわれに雨水が浸透すると、ひびわれ面の磨耗及び床版上面の砂利化をもたらし、疲労損傷が促進された。

表-1.2.1 床版コンクリートのひびわれ形態の分類

	損傷現像	模式図	写真
1	橋軸直方向のひびわれ		
2	直交方向ひびわれ		
3	亀甲状のひびわれ		
4	遊離石灰の沈着		
5	角落ちひびわれのスリット化		
6	抜け落ち		

表-1.1.1 道路橋示方書の変遷

制定年月	適用基準および通達等	設計自動車荷重	設計曲げモーメント		設計基準の内容 床版最厚 d_0	桁間隔 (床版支間)	許容応力度(kgf/cm^2)		配力筋
			主筋方向	配力筋方向			コンクリート	鉄筋(引張)	
昭和31年5月	鋼道路橋設計示方書(日本道路協会)		$M=0.4P(L-i)/(L+4)(1+i)$ $i=20/(60+L) \leq 0.3$		14cm (有効厚11cm 被り3cm)	4m以下	$\sigma_{ck}/3 < 70$ ($\sigma_{ck} > 160$)	1,300	主鉄筋量の25%以上
昭和39年6月	鋼道路橋設計示方書(日本道路協会)	1等橋 TL20 P=20tf 2等橋 TL14 P=14tf			$d_0 = 3L+9 \geq 16\text{cm}$		$\sigma_{ck}/3 < 70$ ($\sigma_{ck} > 160$)	1,400 (S+24, SD24) 1,600 (SR30) 1,800 (SC30)	
昭和42年9月	鋼道路一方方向RC床版の配力鉄筋量設計要領								
昭和43年5月	鋼道路橋の床版設計に関する暫定基準案(日本道路協会)								
昭和46年3月	鋼道路橋RC床版の設計について(建設省通達)		TL20, TL14に加えてTT43を導入	$M=0.8(0.12L+0.07)P$	$d_0 = 3L+11 \geq 16\text{cm}$ $d_0 = 3L+11 \geq 16\text{cm}$	3.6m以下を原則とする		1,400	主鉄筋量の70%以上
昭和48年2月	道路橋示方書(日本道路協会)			$M=0.8(0.12L+0.04)P$			$\sigma_{ck}/3 < 100$ ($\sigma_{ck} > 210$)	1,400	配力筋方向の曲げモーメントに対して照査を行い配力鉄筋量を決定する
昭和53年4月	道路橋RC床版の設計、施工について(建設省通達)				$d_0 = 3L+11 \geq 16\text{cm}$ $d = K_1 K_2 d_0$ K_1 : 交通量の係数 K_2 : 付加モーメントの	3m以下が望ましい		1,400に対して200程度余裕を持たせる	
昭和55年2月	道路橋示方書(日本道路協会)							1,400	
昭和59年	道路橋鉄筋コンクリート床版の設計施工指針								
平成2年2月	道路橋示方書(日本道路協会)						$\sigma_{ck}/3 < 100$ ($\sigma_{ck} > 240$)	1,400	付加曲げモーメントを加えない場合200程度余裕を持たせる
平成5年3月	橋、高架の道路等の技術基準における活荷重の取扱について(建設省通達)		道路構造令の改正で設計自動車荷重を25tfまで引き上げた。 $P=25\text{tf}$						
平成6年2月	道路橋示方書(日本道路協会)		TL20, TL14およびTT43を廃止して、A活荷重とB活荷重を制定						
平成8年2月	道路橋示方書(日本道路協会)								

載荷試験による床版の疲労特性

RC床版の疲労特性は従来より、供試体床版の版中央部に所定面積の載荷版を、片振幅の繰り返し載荷(一定点載荷法)が多くの研究者によって実施されてきた。

一定点載荷法におけるひびわれ状況は図-1.1.1に示すように、載荷点直下から放射線状に広がっている。実橋から切り出したRC床版は、荷重が移動するため、ひびわれは一様に分布するとともに縦横の格子状になる。破壊形態についてみると、一定点載荷法は主鉄筋の破断が先行した押抜きせん断破壊で、実橋における床版コンクリートの抜け落ち現象は見られない。

これらの挙動についても、自動車の走行を模擬した輪荷重走行試験では図-1.1.2に示すように実橋に近い損傷形態及び破壊形態が実験で再現されている。

実橋床版の挙動は図-1.1.3に示すように、一定点載荷法でも新規に製作した床版(以下、新規床版)はコンクリートが全断面有効と仮定した等方版理論による理論たわみ値、実橋床版は引張部コンクリートを無視した直交異方性版理論による理論たわみ値とよい一致を示している。従って、自動車による移動載荷を受けると、剛性が低下し、等方性版から直交異方性版に移行することを示している。

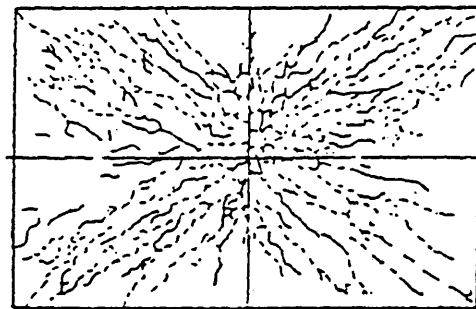


図-1.1.1 一定点載荷における破壊形態

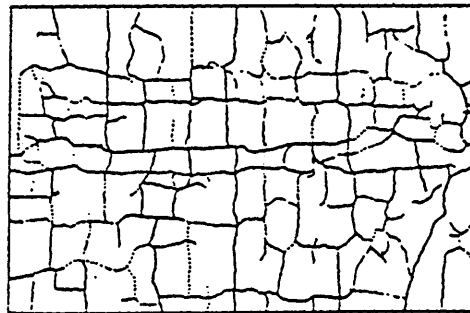


図-1.1.2 移動載荷試験におけるひびわれ状況

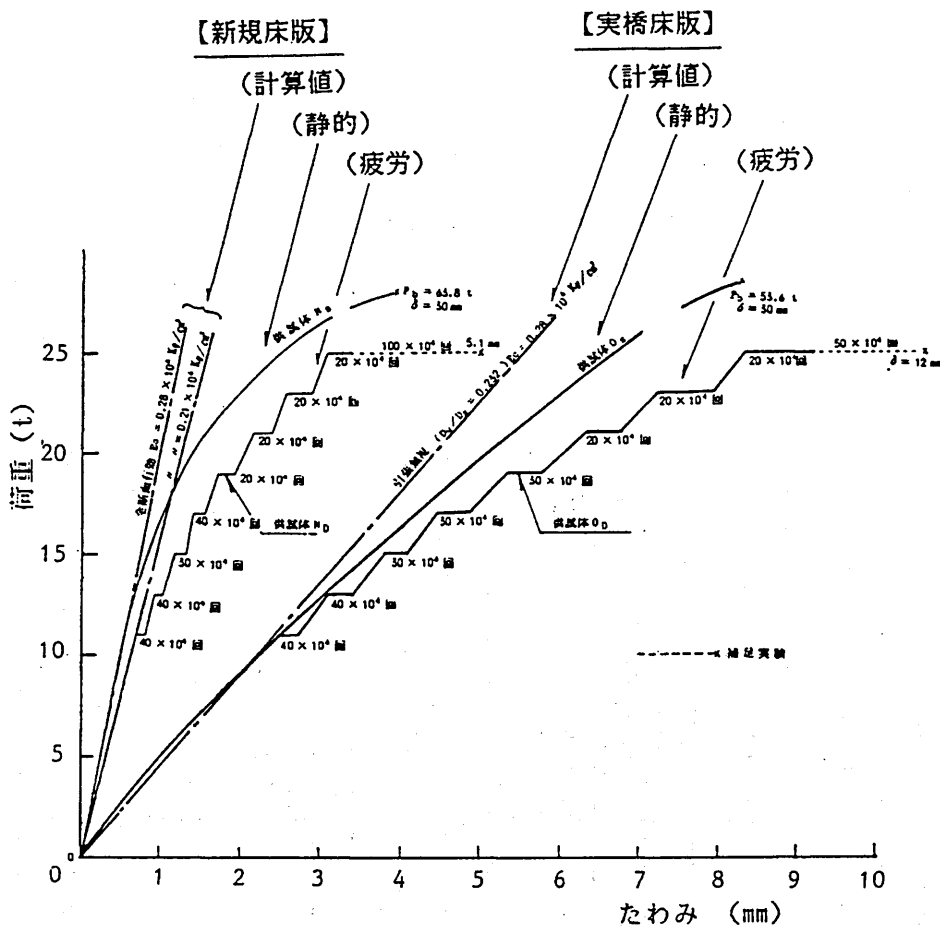


図-1.1.3 実橋床版及び新規床版における荷重～たわみ

1.2 荷重実態

交通荷重は東京都における軸重観測によれば、図-1.2.1に示すように、大型過積載車が経済情勢に対応してバブル期の平成4年前後にピークを持つ分布を示している。平成6年以降は過積載車の取り締まり強化に伴って大幅に減少している。

輪荷重走行試験による室内実験結果によれば、床版の押抜きせん断疲労はマイナー則が適用できることが報告されている。S-N曲線の傾きの絶対値の逆数mは13前後の値を取り、3前後の値をとる鋼部材に比較して約4倍、大きくなっている。

軸重による疲労損傷に対して、マイナー則を適用すると、基準輪荷重 P_0 に対する疲労荷重への換算係数 C は次式を用いて求められる。

$$C = \{ \sum (P/P_0)^m (n_i/N) \}^{1/m}$$

ここに、

P : 荷重

P_0 : 基準荷重

n_i : 輪荷重 P の載荷回数

N : 全載荷回数 ($= \sum n_i$)

バブル期前後における C をみると、表-1.2.1に示すように1.29から1.03に減少しているため、基準荷重の換算繰り返し回数が $(1.29/1.03)^{13}$ 倍、18.1となる。従って、過積載車の取り締まり強化によって、床版の疲労寿命が20倍近く増加することが明らかとなっている。

参考文献

- 1) 道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性 阪神高速道路公団
- 2) 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、1982年5月

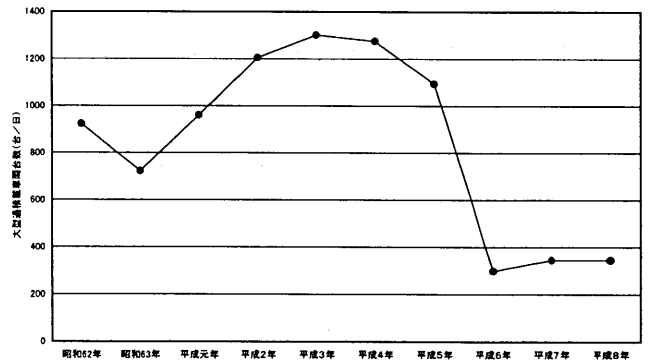


図-1.2.1 東京都における軸重観測結果
(軸重 5.5 t f 以上の過積載車の台数)

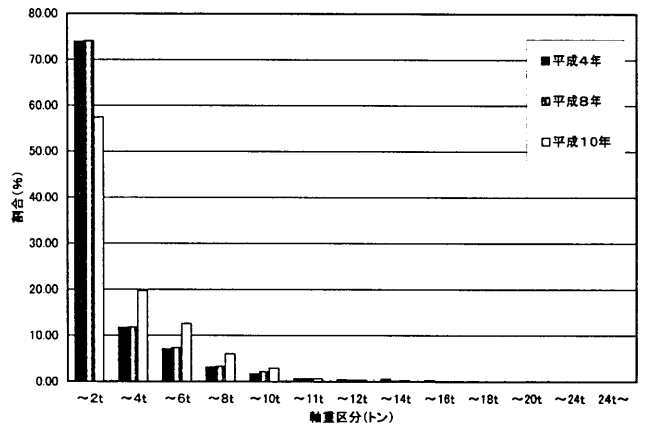


図-1.2.2 東京都における軸重分布

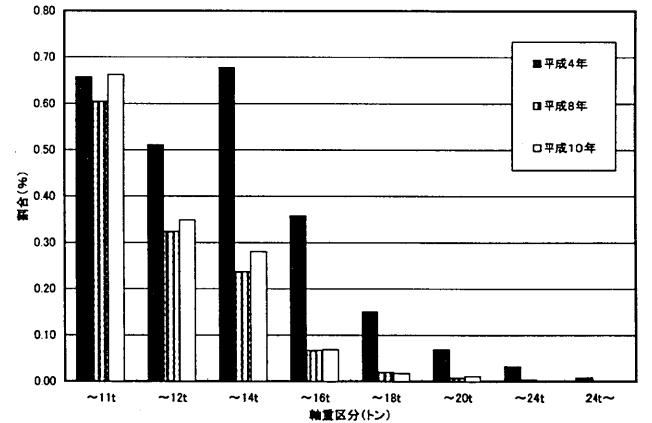


図-1.2.3 東京都における軸重分布
(軸重 5.5 t f 以上の過積載車)

表-1.2.1 疲労寿命

輪重P	軸重														C	疲労寿命比	
	~2t	~4t	~6t	~8t	~10t	~11t	~12t	~14t	~16t	~18t	~20t	~24t	24t~				
$(P/P_0)^{13}$	1	2	3	4	5	5.5	6	7	8	9	10	12	14				
	0.000	0.000	0.000	0.016	0.290	1.000	3.099	22.991	130.453	603.167	2373	25389	188343	1.00			
$(P/P_0)^{13} * (n_i/N)$	平成4年	0.000	0.000	0.001	0.005	0.007	0.016	0.156	0.466	0.906	2	8	15	1.29	1.0		
	平成8年	0.000	0.000	0.000	0.001	0.006	0.010	0.054	0.088	0.119	0.187	1.003	0.000	1.03	18.1		
	平成10年	0.000	0.000	0.000	0.001	0.009	0.007	0.011	0.064	0.089	0.103	0.271	0.000	0.000	0.96	48.1	