

道路橋 RC 床版に対する鋼板接着補強工法の信頼性に関する研究

RELIABILITY OF EPOXY BONDED STEEL PLATE METHOD
FOR REPAIRING DAMAGED RC SLABS OF BRIDGE

園田恵一郎*・沖野 真**・林 秀侃***・喜田 浩****

By Keiichiro SONODA, Makoto OKINO, Hidenao HAYASHI and Hiroshi KITA

Epoxy bonded Steel Plate Method is a reinforcement method for repairing cracked and damaged RC slabs of bridge. In the method, a steel skin plate is adhered to the bottom surface of damaged concrete slab with epoxy resin.

The aim of this paper is to examine the reliability of this method. Model slabs were tested under the repetition of truck wheel loading in both the states before and after repairs. From various observations on deflection-growth, cracking in concrete, and strain-increase in steel bar and skin plate, it is concluded that the method is fairly reliable even if the repair is done at the stage of so severe damage as to cause diagonal tension (shear) cracks in the concrete section of slab.

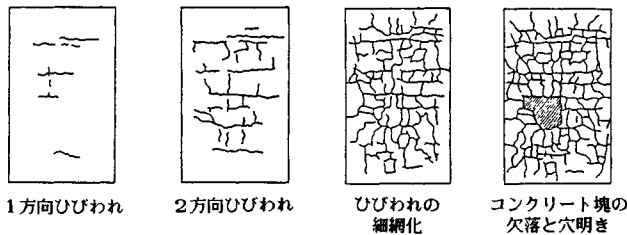
Keywords: bridge deck, RC slab, wheel loading, fatigue, repair

1. ま え が き

道路橋の鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版とよぶ)のひびわれ損傷は昭和41~42年頃よりクローズアップされ、多方面で調査され、また設計基準が段階的に改訂されてきたことは周知のことであろう。一方、すでにひびわれ損傷を受けたRC床版の対策としては、その損傷程度に応じて補修、補強が施され、場合によっては、新しい床版に打ち換えられている。今日、いくつかの実

績をもった補修、補強法としては、増設縦桁工法、鋼板接着工法および増厚工法が挙げられるが、現在まで多用されているのは最初の2つであろう。

ところで、RC床版のひびわれ損傷過程は図-1に示すように、初期の段階では曲げひびわれが床版下面全域に進展していき、その後、ひびわれは床版の厚み方向に進行し、せん断耐力の低下を引き起こし、最終的には、鉄筋のかぶりコンクリートの剝落や舗装面の陥没などが発生し崩壊に至るといわれている^{1)~3)}。したがって、増

図-1 RC床版のひびわれ損傷過程²⁾

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

** 正会員 工修 阪神高速道路公団 環境対策室長

*** 正会員 阪神高速道路公団 大阪第三建設部

**** 正会員 工修 住友金属工業(株) 建設技術部副主任研究員

設縦桁工法は曲げ耐力の向上を意図しているので、ひびわれ損傷の初期の段階での補強法として適しているといえる。

一方、鋼板接着工法は曲げ耐力の向上はもちろん、曲げひびわれの拘束に伴うせん断耐力の向上も期待できる工法である。

この工法に関する初期の研究としては、日本道路公団試験所の一連の実験^{(4)~(6)}があり、ここでは主桁間をスパンとする単純はりおよび版の静的および疲労実験が行われ、鋼板の付着特性についての多くの知見を得ている。

一方、この工法は昭和45年頃より本格的に使われ、今日、諸官庁において多くの実績をもっている。たとえば、阪神高速道路公団では、昭和62年3月時点で全供用路線上の鋼桁橋のRC床版の全パネル数（隣接主桁間と横桁間に囲まれた床版を1パネルとよぶ）90220のうち、補強パネル数は18397（約20%）にのぼっており、損傷度の大きいものから順に主として鋼板接着工法によって補強されている。しかしながら、この工法の信頼性は鋼板とひびわれ損傷コンクリート間のエポキシ樹脂による付着強度に支配されるが、輪荷重の反復という複雑な荷重条件の下での疲労付着強度がまだ不明である。それゆえ、ひびわれ損傷の程度とこの工法の効果の関係が十分に把握できず、合理的な補強計画と補強時間の設定がまだできていないのが現状である。

以上の背景の下に、本研究は鋼板接着工法による補強床版の輪荷重の走行の下での力学的特性を明らかにすることを目的としている。最初に無補強のRC床版を作り、過積載の実験車を走行させてひびわれ損傷を発生させ、損傷度の異なる時期に鋼板接着工を施し、その後の走行回数と補強床版の力学的挙動（ひびわれ、鉄筋ひずみ、鋼板の剝離など）の変化を調べることによって、ひびわれ損傷度と補強効果の関係を把握を試みる。

2. 実験方法

(1) 実験装置

処女床版におけるひびわれ損傷の発生および鋼板接着後の疲労損傷に対して、荷重の特性が大きく影響するので、実験に用いる荷重は自動車荷重とすることが望ましい。それゆえ、写真-1および図-2に示すような、円周上の試験道路の一部にピットを掘り、その上に2主桁の合成桁橋を置き、RC床版の中心を試験車の後輪が通過するような装置を用いた。試験車の総重量は14.5tf（142kN）であり、後輪2個への荷重の分担は走行速度や路面状態などに影響され、確定しにくいので、静止時の検定による平均値である内側後輪4.54tf（44.5kN）、外側後輪4.16tf（40.8kN）を基準に用いた。後

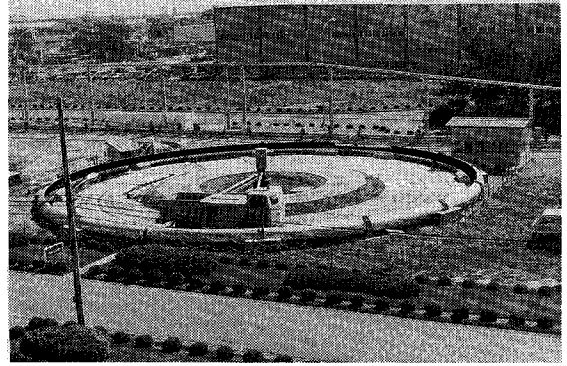


写真-1 試験道路全景

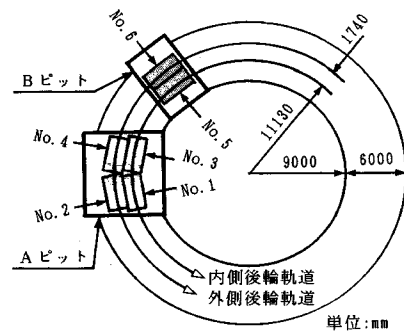


図-2 試験道路と供試体の配置

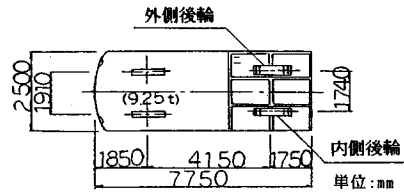


図-3 試験車

輪は図-3に示すように単一のタイヤ（実際の大型自動車は二重タイヤであるが、実験床版と実橋床版のサイズの相違を考慮して、単一タイヤとした）をもち、その接地面は静止時で進行方向に31cm、幅員方向に21cmであった。

(2) 実験床版

供試体の形状を図-4に示す。2主桁の単純合成桁橋モデルで、主桁断面はH-596-199-10/15で、スパンは360cm、主桁間隔は150cmで、床版厚は8cmである。床版の配筋は阪神高速道路公団の鋼桁橋上のRC床版をモデルとし、主鉄筋はD10で間隔100mm、配力鉄筋はD10で間隔150mmとした。表-1には、昭和42年時点での阪神高速道路公団の標準設計合成桁に対する補強床版と本実験に用いた床版との比較を示している。本実験床版の配筋量では、図-3の後輪荷重を床版中央に

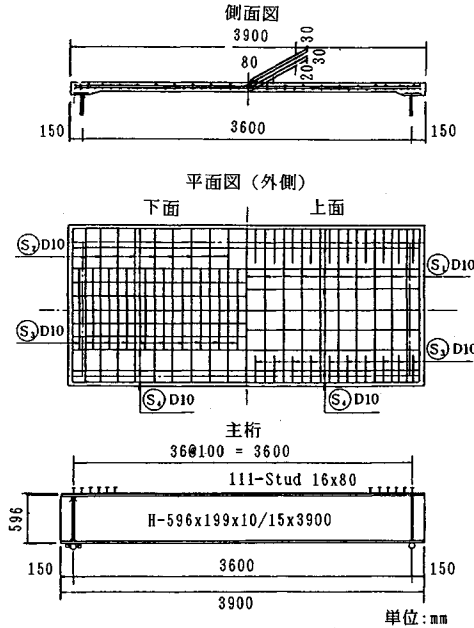


図-4 供試体の概要と床版の配筋図

表-1 実橋床版と試験床版の比較

		実橋単純合成桁 モデル	供試体		
輪 載	荷重 (tf)	9.6	4.30		
	荷重面 (cm ²)	20×50	31×21		
版 支	厚 (cm)	18.0	8.0		
	間 (m)	3.85	1.50		
鋼 板 補 強 前	配 鉄 筋	鉄筋比	0.0132	0.0119	
		かぶり (cm)	3.0	2.0	
		有効高 (cm)	15.0	6.0	
		鉄筋	D16ctc100	D10ctc100	
	配 筋 力	鉄筋比	0.0067	0.0095	
		かぶり (cm)	4.6	3.0	
		有効高 (cm)	13.4	5.0	
		鉄筋	D16ctc220	D10ctc150	
	応 力	主筋	コンクリートσ _c	99.8	140.3
		配筋	鉄筋σ _s	2007	2778
(kgf/cm ²)	主筋	コンクリートσ _c	114.0	158.0	
	配筋	鉄筋σ _s	3079	3049	
鋼板厚 (mm)		4.5	2.3		
鋼 板 補 強 後	主筋側 応力 (kgf/cm ²)	コンクリートσ _c	65.0	66.8	
		鉄筋σ _s	689	384	
配筋側 応力 (kgf/cm ²)	コンクリートσ _c	510	620		
	鉄筋σ _s	40.0	42.1		
	鋼板σ _p	コンクリートσ _c	185	38	
		鉄筋σ _s	469	454	

(注) 1tf=9.81kN, 1kgf/cm²=98.1kPa

表-2 床版のコンクリート配合

配 合 強 度 (kgf/cm ²)	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水 比 W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	A E 剤
300	15	8	4	49.0	39.4	143	292	747	1150	6.66

(注) 1kgf/cm²=98.1kPa

載せたときの平板理論による主鉄筋の最大引張応力の計算値が 2778 kgf/cm² (272 MPa) で、コンクリートの最大圧縮応力が 140 kgf/cm² (13.7 MPa) となっている。これらの値は設計許容応力よりかなり大きな値になっているが、比較的少ない走行回数で所望の損傷を与える加速試験の必要性からこのように定めた。床版に用いたコンクリートの配合と強度を表-2 および 3 に、また鉄筋の機械的性質は表-4 に示す。

一方、ひびわれ損傷を起こさせた後に接着する鋼板の厚さは 2.3 mm とした。図-5 に示すように、鋼板は 3 枚に分けて接着し、継目にはシール剤を充填し、アンカーボルトは M8×L35 の全ねじボルトを用い、接着剤の注入は実橋と基本的に同じ方法によって行った。表-1 に示すように、鋼板接着後の鋼板の応力は実橋床版とほぼ同じになっている。

(3) 载荷と測定法

全部で 6 体の供試体は図-2 に示す A ピットに 4 体 (後輪の内側軌道に No.1 と No.3, 外側軌道に No.2 と No.4), B ピットに 2 体 (内側軌道に No.5, 外側軌

表-3 床版のコンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

圧縮	1 2 3	標準養生		気中養生	
		1週 (7日)		4週 (28日)	
		1	2	1	2
		278	423	381	381
		280	397	417	417
		281	420	393	393

(注) () 内は 3 体の平均強度を示す。1kgf/cm²=98.1kPa

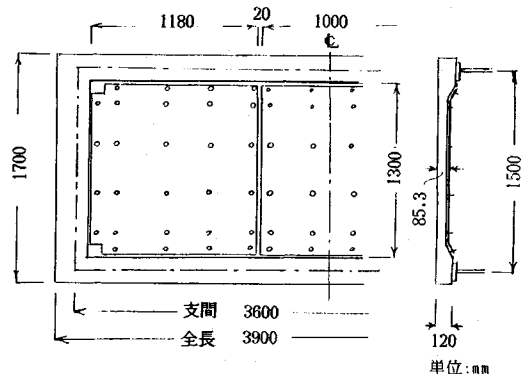


図-5 鋼板接着補強

表—4 使用鉄筋 (SD 30) の機械的性質

試験片	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	伸び (%)
1	3715	5313	22.6
2	3743	5173	19.8
3	3673	5271	23.9
平均	3710	5252	22.1

(注) 1kgf/cm²=98.1kPa

道に No.6) を置き、2 個の後輪が内側と外側の床版の中央点を通過するようにした。また、静的試験は、No.5 と No.6 を事前に室内に移し、油圧ジャッキを用いて行った。試験自動車の走行速度は最高時で 30 km/h である。

測定は所定の走行回数の後に後輪を床版中央点に止め、載荷時と除荷時（後輪が床版から出たとき）の両方で行った。測定項目は主桁のたわみ（4 か所）、床版のたわみ（6 か所）、主桁のひずみ（12 点）、鉄筋のひずみ（43 点）、ひびわれ幅（各供試体で比較的大きなもの 2~4 点）および鋼板の継目と端部のずれ（6 か所）であり、その他目視によるひびわれ図を適宜描いた。

3. 実験結果

(1) 静的載荷実験

後に行う試験車による走行実験での荷重の値を超えない範囲で室内で油圧ジャッキによる静的実験を行った。床版中央のたわみ（主桁のたわみを除いた床版の純たわみ）および鉄筋のひずみを図—6, 7 に示す。床版が薄い（8 cm）ことと主桁の拘束により、乾燥収縮による微細なひびわれがかなり入っていた。したがって、図に示したひびわれ荷重は載荷による最初のひびわれ発生荷重を意味している。最高荷重時（4.3 tf）では、かなりの非線形性が現われているが、また床版は引張部コンクリートを無視したいわゆる RC 断面より全断面有効の状態にはるかに近いといえる。

(2) 走行荷重実験（補強前）

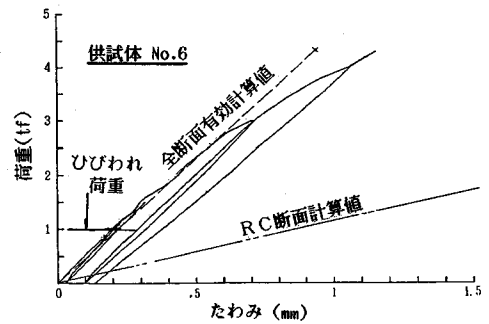
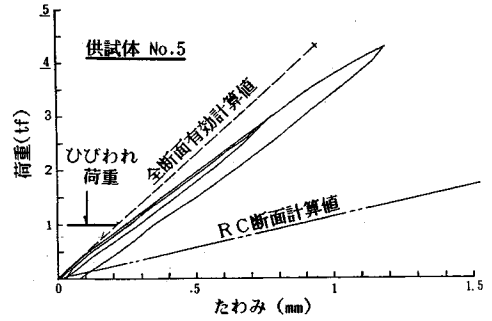
a) 走行中の後輪荷重値

試験道路上にロードセルを埋設し、走行中の後輪荷重の大きさを測定し、静止時と比較したものが表—5 であ

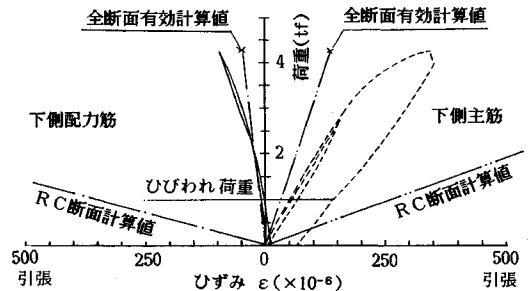
表—5 静止時と走行時の後輪荷重値

	供試体	静止時(tf)	走行時(tf)
内側輪	No.1	4.535	5.175
	No.3		
	No.5		
外側輪	No.2	4.159	4.315
	No.4		
	No.6		

(注) 表中の値は数回の測定値の平均を示す。1tf=9.81kN



図—6 荷重と床版中央たわみ

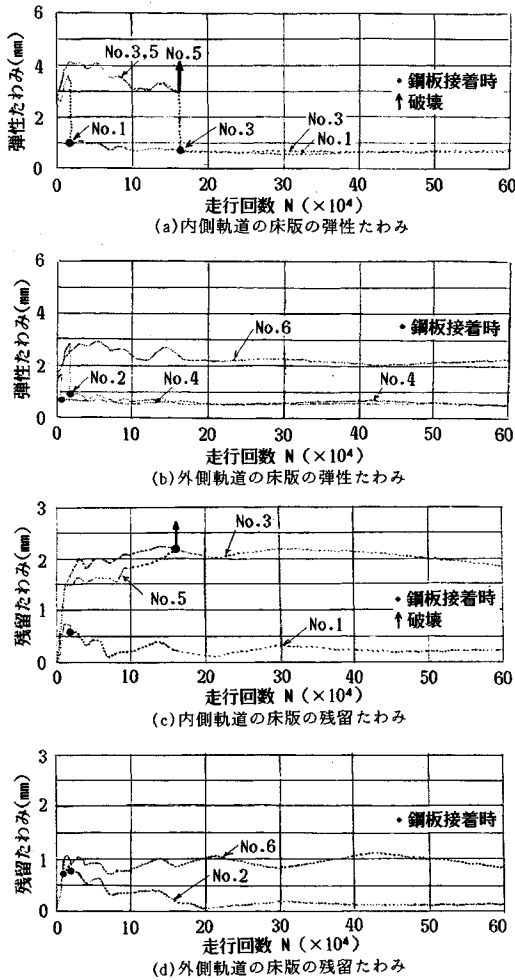


図—7 鉄筋のひずみ (供試体 No.5)

る。外側後輪より内側後輪の方が大きくなっているのは重錘を積んだ自動車の構造による速度効果の相違によるものと思われる。

b) 床版たわみ

床版中央の弾性たわみ（荷重によるたわみ）の変化を図—8(a), (b) に示す。このたわみは後輪が床版中央点に静止したときと床版の外にあるときのたわみの差として所定の走行回数の後に測定されている。また、同じ走行回数後の残留たわみは図—8(c), (d) に示している。明らかに内側軌道と外側軌道の後輪荷重値の差は両たわみに現われている。全体的な傾向としては、弾性たわみは最初の 2~4 万回程度までは増加するが、その後は一定または減少しつつけていく。一方、残留たわみは内側軌道上の供試体の No.5 では、走行回数とともに増加をつづけ、約 16 万回で押し抜きせん断形の破壊（写真—3

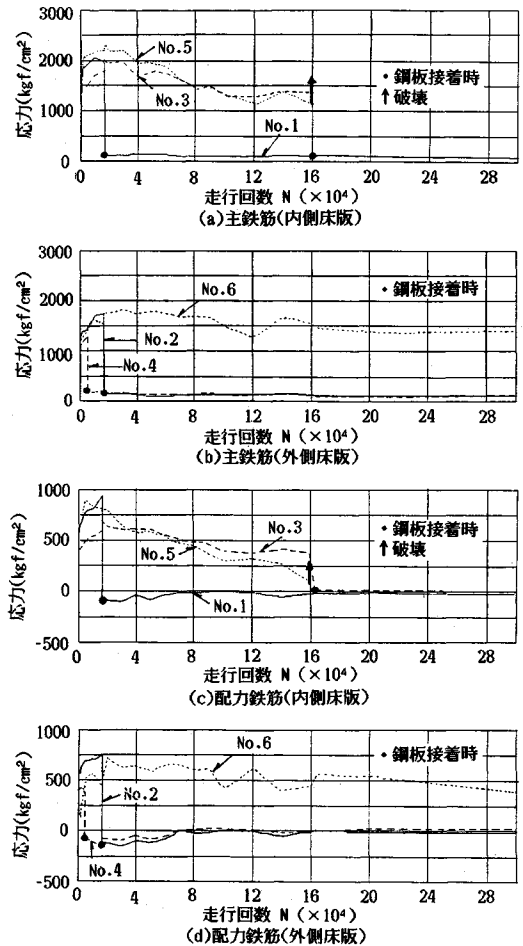


図—8 走行回数と床版中央のたわみの関係

参照) に至っている。外側軌道上の供試体では、若干荷重が小さいことより、残留たわみはほとんど増加していない。

c) 鉄筋応力

走行回数と床版中央点の下側鉄筋の応力の変化の関係を図—9 に示す。ここでの鉄筋の応力とは後輪が床版中央点に載ったときと床版外に出たときの応力差を意味している。主鉄筋の応力の変化は弾性たわみの変化とほぼ類似しているが、約 16 万回で破壊に至った No.5 供試体においても、主鉄筋の応力は増加せず、むしろ減少していることに注目したい。また、配力鉄筋の応力の変化は主鉄筋応力の変化と類似しているが、その大きさは表—1 に示す RC 断面の慣用計算法による値に比べて非常に小さいことがわかる。使用鉄筋の降伏応力は 3710 kgf/cm² (364 MPa) であるので、主鉄筋も配力鉄筋も降伏応力以下にとどまっているといえる。



図—9 走行回数と鉄筋応力(床版中央)の関係

d) ひびわれ性状

ひびわれパターンの変化はどの供試体も類似していたので、供試体 No.6 (無補強のまま 60 万回まで载荷) の一例のみを図—10 に示す。無走行時 ($N=0$) でも乾燥収縮によるひびわれが床版上面と下面とも主鉄筋に平行にかなりの数が発生しているが、これらのひびわれ幅は大きなもので 0.02~0.07 mm 程度であり、図は目視できる範囲の微細なものも含んでいる。走行回数とともにひびわれの幅および数も増加している。床版下面中央部の载荷時のひびわれ幅は、図—11 に示すように、約 2 万回程度で停留しており、それ以上の走行回数ではほぼ一定にとどまっている。このひびわれ幅の傾向は前述のたわみの傾向と類似していることがわかるであろう。また、ひびわれ数は走行回数が少ないときは主鉄筋と平行のものが多く、走行回数の増加につれて配力鉄筋と平行なものも増え、床版中央部では格子状のひびわれ網が形成され、図—1 に示した実橋床版のひびわれ性状と類

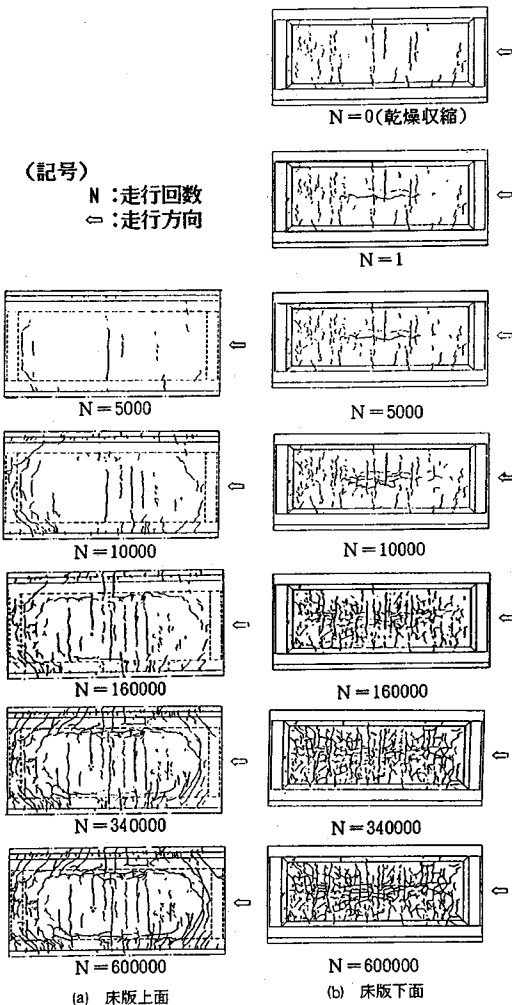


図-10 No.6 供試体（無補強）のひびわれ図

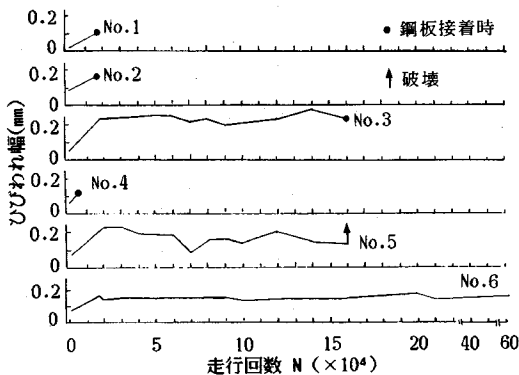


図-11 走行回数と床版下面のひびわれ幅（主鉄筋に直角）の関係

似していることがわかる。ひびわれの密度（床版中央部の単位面積当たりの総ひびわれ長）は走行回数とともに増加するが、 10 m^2 以上になれば停留する傾向にあり、約 16 万回で破壊に至った供試体 No.5 では破壊直前で 14 m^2 程度のひびわれ密度になっていた。

(3) 鋼板接着工法による補強

ひびわれ損傷の程度を表わす指標としては、一般に、ひびわれ密度、ひびわれ幅、たわみ量および漏水、遊離石灰の流出、かぶり部コンクリートの剥落などが用いられる。たとえば、阪神高速道路公団では表-6 に示すように、ひびわれ損傷度を 3 段階 (A, B, C) に区分し、各段階に対応して補修計画を立てている。

本実験ではモデル床版を用いているために、ひびわれ幅や密度などの相似性が事前に把握できなかったため、無補強供試体のひびわれの発生状況をみながら、No.1~4 の供試体に対して表-7 に示す時期に鋼板を接着した。すなわち、外側供試体は内側供試体より荷重が小さいために損傷が少ないので、No.4 は $N=5000$ でひびわれ密度 3.57 m^2 で表-6 の阪神高速道路公団の判定区分 C に相当し、No.2 は $N=17000$ でひびわれ密度 4.57 m^2 で A に相当すると判断した。また、損傷の激しい内側供試体では、 $N=163150$ で No.5 が破壊に

表-6 阪神高速道路公団における RC 床版の損傷判定基準 (抜粋)

点検項目	測定区分		
	A	B	C
ひびわれ	亀甲状もしくは著しい線状ひびわれで、ひびわれ周辺のコンクリートが欠けているか、またはコンクリートがはく離し陥没の恐れがある場合	亀甲状もしくは二方向性のひびわれで大きなひびわれに遊離石灰あるいは死状物質が流出している場合	二方向性のひびわれ（橋軸直角方向および橋軸方向の亀甲状のひびわれ）で、大きなひびわれに一部遊離石灰の流出や変色がある場合
はく離・錆	鉄筋が露出し、錆およびコンクリートの剥離を伴っている場合	部分的に錆が発生してコンクリートのはく離の恐れがある場合	Bランクに相当しない場合
遊離石灰水	ひびわれ部よりの漏水で遊離石灰の流出が著しい場合	ひびわれ部よりの漏水で遊離石灰が流出している場合	Bランクに相当しない場合

表-7 ひびわれ損傷と鋼板補強時期

供試体	輪	補強	走行回数 (N)	ひびわれ密度 (m^2)	判定区分 (阪高相当)
No.1	内	有	17000	6.65	⊕
No.3	内	有	163150	9.26	超⊕
No.5*	内	無			
No.2	外	有	17000	4.57	A
No.4	外	有	5000	3.57	C
No.6**	外	無			

(注) * は、 $N=163150$ で破壊、**は、 $N=600000$ で破壊せず ⊕は、Aよりはるかに損傷が激しく、超⊕は、破壊間近を意味する。

表—8 鋼板接着工法の諸元

名 称	標準工法	試験
1. 注 入 圧 力(kgf/cm ²)	0.3±0.1	0.2
2. 最大コンクリート間隔 (m)	0.500×0.444	0.286×0.270
3. アンカーボルト径 (mm)	M12×L50	M8×L35
4. 鋼 板 厚 (mm)	4.5	2.3
5. 注 入 樹 脂 厚 (mm)	4.0	3.0
6. ボ ル ト 穴 (mm)	φ32	φ22
7. ワ ッ シ ャ ー (mm)	φ42×3.2	φ32×3.2

(注) 注入剤はI⁺樹脂2液型接着剤(ジョイントクラフト)を使用
1kgf/cm²=98.1kPa

至ったので、その時点で No.3 を補強し、No.1 は N=17 000 で補強した。鋼板接着工法の諸元を表—8 に示すが、これらの諸元は施工性を考慮したうえで、供試体と実橋床版の鋼板応力がほぼ同じようになるように定めた。

(4) 床版の走行荷重実験 (補強後)

a) 床版のたわみ

図—8(a), (b) に示すように、鋼板接着後の床版の弾性たわみは減少し、全断面有効とした平板理論による計算値 (内側供試体では 0.654 mm, 外側供試体では 0.599 mm) にほぼ近づき、その後の変化はほとんどなかった。一方、残留たわみは、図—8(c), (d) に示すように、鋼板接着後の増加はみられなく、むしろ減少する傾向にある。この傾向は温度や湿度などの環境条件の変化によるものと思われる。実験期間の関係上、60 万回の走行で実験を終えているが、この時点ではいずれの補強床版もたわみに現われるような劣化の進展はなかったと判断できる。

b) 鋼板の応力

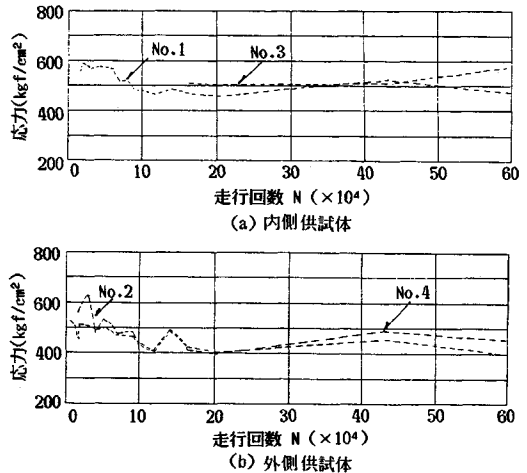
図—12 には床版中央点の鋼板の応力の変化を示す。これもたわみと同じ傾向を示し、実測値は表—1 の計算値を超えていないので、60 万回まではいずれの補強床版も劣化が進行しているようには思えない。

c) 鋼板の継目のずれ

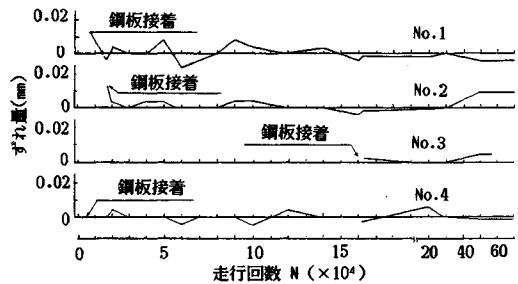
図—13 には鋼板の継目中央のずれ (開き) 量の変化を示す。継目のシーラ材にひびわれが入ることにより、わずかな開きが早期に起こるが、その後は進行していないと判断できる。

d) 床版上面のひびわれ

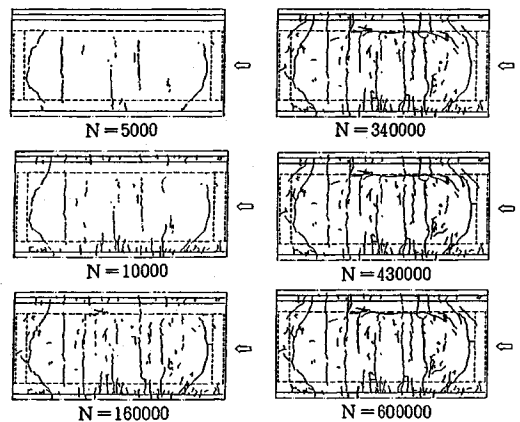
図—14 には、最も早期に補強した供試体 No.4 の上面のひびわれの変化を示す。鋼板接着後も微細なひびわれが増加し、約 10 万回以降に停留しているように思われ、この傾向は無補強床版 (図—10 参照) と差異がなかった。したがって、床版上面のひびわれは乾燥収縮ひびわれと相まって、荷重の反復移動によるねじりせん断応力の交番によって進展すると考えられるので^{3), 8)}、鋼板接着によっても床版上面のひびわれの進展は防止できないものと思われる。



図—12 鋼板の応力 (主鉄筋方向) の変化



図—13 鋼板の継目のずれの変化



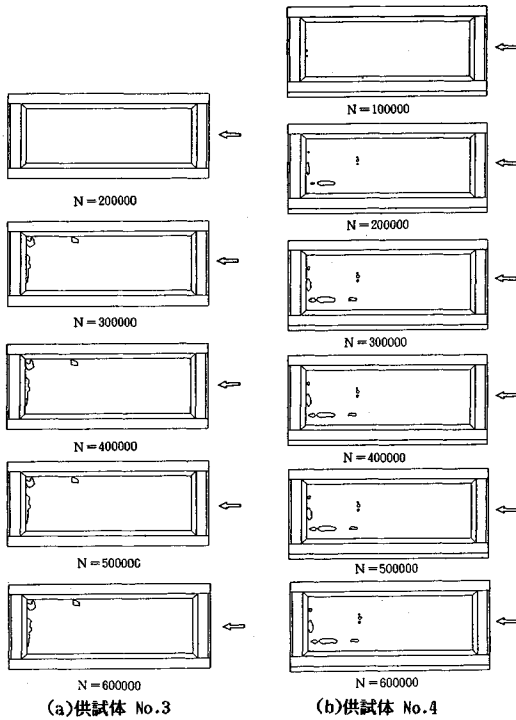
図—14 鋼板補強床版の上面のひびわれ図 (供試体 No.4)

e) 鋼板の剝離

鋼板の部分的な剝離の有無は鋼板を金槌でたたいたときの音の相違によって判断した (これをたたき点検とよぶ)。この方法は原始的であるが、敏感な判定ができる点に特徴がある。図—15 には、この方法によって判定した鋼板の剝離 (空洞部) を示している。他の供試体 No.1, No.2 はいかなる剝離も発見できなかった。

No. 4 はひびわれ損傷の最も小さい段階で鋼板補強したものであるが、車輪の通過端部（図—15(b) 参照）でいくつかの部分的な空洞がみられた。この空洞は鋼板接着時にあったごく小さな空洞（No. 4 のみにみられた）が引金になってきたものと思われた。一方、ひびわれ

損傷の最も大きい段階で鋼板補強した No. 3 では、 $N = 2.2 \times 10^5$ のとき（補強後 6 万回）に、通過端部と隅部で空洞が発生し、 $N = 3 \times 10^5$ までに空洞は拡大したが、その後は $N = 6 \times 10^5$ までこの空洞はほとんど成長しなかった。通過部鋼板のみに空洞が現われたことは、進入部や中央部より通過部の方が大きな衝撃力を受けたものと推察できる。

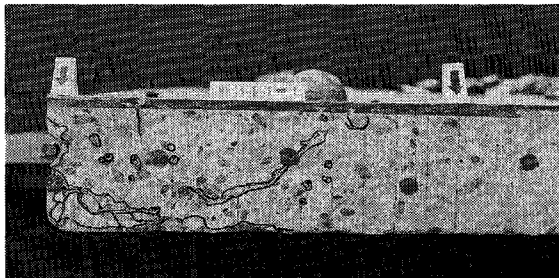


図—15 たたき点検による鋼板の剝離（空洞）箇所

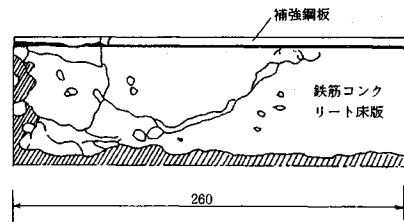
f) 補強床版の切断による調査

走行回数 60 万回の実験終了後に鋼板の部分的な剝離（空洞）がみられた供試体 No. 3, No. 4 を床版中央線に沿って十字に切断したうえで剝離部に沿ってさらに切断することにより断面内のひびわれおよび鋼板の剝離状態を調査した。鋼板補強前のひびわれと補強後のひびわれを区別するために、鋼板接着時のグラウト剤には蛍光顔料を混入しておき、比較的大きなひびわれには蛍光顔料が注入されるようにした。主桁に平行な中央線上の切断面のひびわれと剝離の状態を写真—2 と図—16 に示す。最もひびわれ損傷の激しい時点で鋼板を接着した供試体 No. 3 では、すでに鋼板接着時にせん断ひびわれが発生していることがわかる。すなわち、この時点で同一の条件下にある供試体 No. 5 が静的実験での押し抜きせん断形に類似した形式で破壊していることから、このせん断ひびわれの存在は当然のことと思われる。一方、No. 3, No. 4 の供試体とも切断面のひびわれは蛍光顔料が注入されているものしか発見できなかった。これより、鋼板接着後に新たに入った大きな（目視できるような）ひびわれはないといえる。

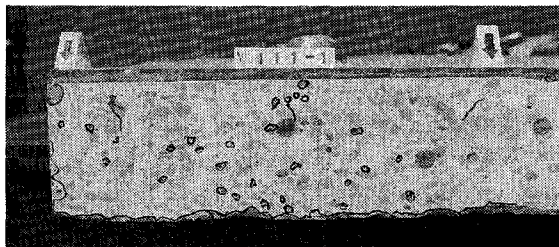
表—9 は、前述のたたき点検によって調査した空洞部



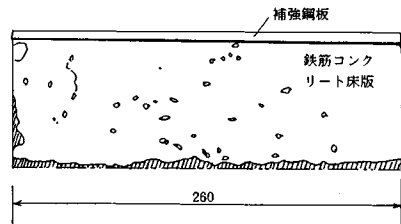
(a) 写真 (No. 3 供試体)



(c) スケッチ (No. 3 供試体)



(b) 写真 (No. 4 供試体)



(d) スケッチ (No. 4 供試体)

写真 2 および図—16 床版中央断面のひびわれおよび鋼板の剝離状況

表—9 切断面での鋼板の剝離長 (mm)

供試体	調査法	剝離箇所				
		1	2	3	4	5
No.3	切断	175	217	35	235	44
	たたき	150	175	22	105	30
No.4	切断	40	50	33	220	26
	たたき	35	64	33	180	26

の長さ (切断面上) と切断後に観察した鋼板の剝離長との比較を示したものである。表—9の結果より両者はほぼ一致していることがわかるであろう。また、供試体 No.3 は供試体 No.4 より鋼板の剝離長が大きく、これは鋼板接着時の床版のひびわれ損傷度の差に起因していると判断できる。

4. 考 察

(1) 無補強床版の耐力

補強しない供試体 No.5, No.6 は無補強床版の特性を調べるためのものである。表—5に示したように、No.5 に対する後輪荷重の動的値は 5.175 tf (50.7 kN), No.4 では 4.315 tf (42.3 kN) であり、No.5 の床版は $N=163150$ で破壊したが、No.4 の床版は $N=600000$ で破壊に至らなかった。いま、たわみ剛性の変化 δ を次式で表わして、

$$\delta = \frac{w - w_0}{w_c - w_0} \dots \dots \dots (1)$$

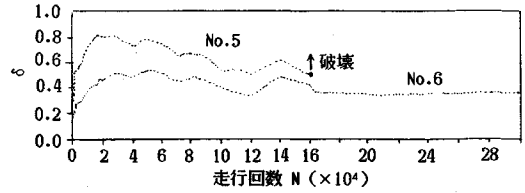
ここに、 w : 床版中央点の荷重によるたわみ測定値

w_0 : 全断面有効としたときの弾性たわみの平板理論による計算値

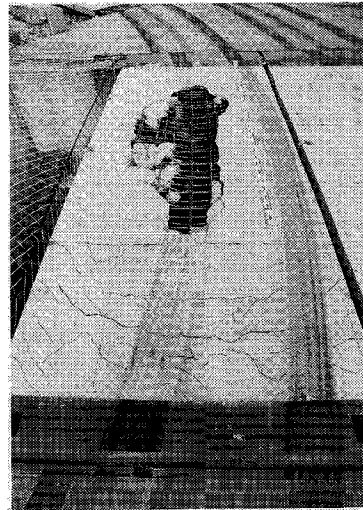
w_c : 引張部コンクリートを無視した場合 (RC 断面) での弾性たわみの平板理論による計算値

走行回数 (N) と δ の関係を図—17に示す。供試体 No.5 では、 $N=2 \times 10^4$ 程度で δ は最大値 (約 0.82) に達し、それ以後は減少し、 $N=16 \times 10^4$ で破壊しており、供試体 No.6 では $N=5 \times 10^4$ で δ は最大値 0.55 に達するが、その後は減少気味であり、 $N=60 \times 10^4$ でも破壊に至っていない。ある程度の走行回数した後で δ が減少する傾向は理解しにくい。実験が野外で長期 (約 6 か月) にわたっているため、温度変化などの環境条件の変化に起因しているものと推察できる。本実験では、後論は同じ軌道の上を走行するので、実橋床版に比べてひびわれ領域が限定され、ひびわれの剛性に与える影響が若干緩慢になることを考慮すれば、 $\delta > 0.8$ 、すなわち荷重による床版のたわみが RC 断面としての計算値に近づいたときは破壊が間近に迫っているといえ、これは $\delta \approx 1$ の状態を使用限界とすべきとした松井氏の指摘⁷⁾と符合している。

破壊の形状を写真—3に示す。試験車は自動運転に



図—17 無補強鋼板の弾性たわみの変化



写真—3 No.5 供試体の破壊状態

よっており、床版の破壊が開始してもある程度の大きなたわみになるまで試験車は停止できないので、発見時の破壊の形状は写真に示すように非常に大きな範囲にわたっていた。この供試体では $N=7 \times 10^4$ のときに床版の断面内を貫通したひびわれから雨水の浸透がみられており、遊離石灰の流出もかなりの範囲に認められた。

後輪荷重が床版中央に固定されたとして、無補強床版の押し抜きせん断耐力をコンクリート標準示方書の式を用いて求めると

$$V_{pca} = f_{pca} u_p d \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} f_{pca} &= 0.6 \beta_a \beta_p \beta_r \sqrt{f'_{ca}} \\ \beta_a &= \sqrt[3]{(100/d)} \leq 1.5 \\ \beta_p &= \sqrt[3]{(100/p)} \leq 1.5 \\ \beta_r &= 1 + 1/(1 + 0.25 u/d) \end{aligned}$$

表—3より、 $f'_{ca} = 397 \text{ kgf/cm}^2$ (38.9 MPa)、表—1より、 $d = 5.5 \text{ cm}$ 、 $p = 0.0107$ 、そして $u = 2 \times (31 + 21) = 104 \text{ cm}$ 、 $u_p = u + \pi d = 121.3 \text{ cm}$ の各値を上式に代入すると、

$$V_{pca} = 14.4 \text{ tf} (141 \text{ kN}) \dots \dots \dots (3)$$

を得る。すなわち、静的押し抜きせん断耐力の約 36% の輪荷重が約 16 万回の走行で床版が破壊に至ったと結論付けられる。

(2) 鋼板接着工法の効果

走行回数 60 万回ではいずれの供試体 (No.1, No.2, No.3, No.4) の床版も破壊に至らなかった。したがって、内側の無補強床版の疲労寿命は 16 万回であったので、床版を鋼板接着によって補強することにより、疲労寿命は少なくとも 3.6 倍以上延びたといえる。実験終了後、たたき点検によって判定された鋼板の部分的な剝離 (空洞) は No.3, No.4 のみにみられたが、切断調査でも No.4 は No.3 より鋼板の剝離部は小さかった。No.4 はひびわれ損傷の最も小さい段階に鋼板補強したものであり、鋼板接着時にすでにごく小さい空洞がみられたことを考慮すれば、No.3 のように破壊の直前になり断面内にせん断ひびわれが発生した時点まで放置しなければ、かなりのひびわれ損傷を受けた床版に対しても接着部に空洞ができないように十分に慎重な施工を行えば、鋼板接着工法は信頼できる補強法であると結論付けられる。

次に、鋼板接着補強床版の押抜きせん断耐力式は今日まだ信頼すべきものがないので、とりあえず式 (2) を準用してみる。すなわち、鉄筋比の中に鋼板断面を含ませ、

$$p=0.0107+0.23/5.5=0.0525$$

とすると、式 (2) より

$$V_{pca}=21.1 \text{ tf } (20.7 \text{ kN}) \dots \dots \dots (4)$$

となり、鋼板接着による静的押し抜きせん断耐力の増加が約 5 割となる。走行荷重の下では、無補強床版はひびわれ面の摩耗によって劣化が進行するといわれているので³⁾、鋼板接着床版ではひびわれの開閉が鋼板で拘束され、ひびわれ面の摩耗が抑制されることも期待できる。

5. ま と め

本研究で得られた主な事項を以下にまとめる。
無補強床版に対して

(1) 後輪が床版中央にあるときの床版のたわみおよび鉄筋のひずみは走行回数 (N) が $2 \sim 4 \times 10^4$ でピーク値が現われ、その後は一定か減少する傾向にあった。

(2) 動荷重値が 5.175 tf (50.7 kN) である後輪の走行の下では、 $N=16 \times 10^4$ で床版が破壊したが、動荷重値が 4.315 tf (42.3 kN) である後輪では $N=60 \times 10^4$ でも破壊に至らなかった。これらの荷重の大きさは主鉄筋の許容応力が 1600 kgf/cm^2 としたときの設計荷重の約 2 倍および 1.7 倍に相当している (表-1 参照)。
鋼板補強床版に対して

(3) 鋼板の剝離または空洞はたたき点検 (鋼板の下面を金槌でたたき、音の相違によって判定する方法) によって十分に発見できる。

(4) 鋼板の剝離は鋼板端部から発生しやすいように

思われる。

(5) 床版の上面のひびわれの進展は鋼板接着によっても防げなく、これはコンクリートの乾燥収縮の影響によるところが大きいと思われた。

(6) 無補強床版が約 16 万回の走行時に破壊したのに比して、鋼板接着補強床版は 60 万回の走行によっても破壊に至るような鋼板の大きな剝離は生じなかった。

(7) 鋼板接着時のひびわれ損傷の度合と補強効果の関係は明確ではないが、コンクリート断面にせん断ひびわれが発生するような損傷の激しい段階での鋼板接着もかなりの補強効果があるといえる。

以上の結果、鋼板接着工法は、接着面に空洞ができないように十分入念に施工をすれば、強度的には十分に信頼できると思われるが、床版の上面のひびわれは防止できないので、実橋床版では雨水の浸透などによる鋼材の腐食に十分に配慮する必要があると思われる。

最後に、本研究は阪神高速道路公団管理技術センターのコンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会の活動の一部として実施されたものである。岡田 清委員長および委員各位、特に実験のご指導を頂いた大阪大学助教授 松井繁之氏に深甚なる謝意を表する次第であります。

参 考 文 献

- 1) 土木学会関西支部：鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ、鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会報告、昭和 52 年 7 月。
- 2) 首都高速道路公団：床版補強の設計施工に関する調査研究委員会、昭和 55 年 3 月。
- 3) 岡田 清・岡村宏一・園田恵一郎・島田 功：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、土木学会論文集、No.321, pp.49-61, 昭和 57 年 5 月。
- 4) 石谷藤次郎・檜貝 勇・細田和夫：鉄筋コンクリート床版の補強方法に関する試験—鋼板接着工法の検討—日本道路公団試験所報告 (昭和 49 年度), pp.150-156, 昭和 50 年 12 月。
- 5) 飯岡 豊・檜貝 勇：鉄筋コンクリート床版の補強方法に関する試験—鋼板接着工法の検討 (その 2)—日本道路公団試験所報告 (昭和 50 年度), pp.142-154, 昭和 51 年 11 月。
- 6) 飯岡 豊・檜貝 勇・細田和夫：鉄筋コンクリート床版の補強方法に関する試験—鋼板接着工法の検討 (その 3)—日本道路公団試験所報告 (昭和 51 年度), pp.143-151, 昭和 52 年 12 月。
- 7) 松井繁之・前田幸雄：道路橋の RC 床版の劣化度判定法の一考察、土木学会論文集、No.374/I-6, pp.419-426, 昭和 61 年 10 月。
- 8) 川口昌弘・川口 隆・原田浩二・高橋三雅：模型橋梁床版の疲労実験と余寿命診断の試み、土木学会論文集、No.380/I-7, pp.283-292, 昭和 62 年 4 月。

(1987.11.6・受付)