

報告

[2172] 鋼板接着補強した鋼橋床版の耐久性評価に関する試験

正会員 山本忠守 (日本道路公団試験所)

正会員○飯東義夫 (日本道路公団試験所)

木曾 茂 (日本道路公団試験所)

1. まえがき

若戸大橋は、1962年 9月に北九州市の若松と戸畑を隔てる洞海湾に架けられた吊橋である。建設当初の交通量は6,700 台/日であったが、その後1986年には5倍以上の36,000台/日となり、1990年 3月に 2車線を 4車線に拡幅した。拡幅工事において、床組はRC床版から鋼床版に構造変更された。建設時からのRC床版は、劣化・損傷が目立つようになった1976年以降、鋼板接着補強されており、拡幅工事に伴って撤去されるまで長いもので補強後13年間経過している。そこで、不要となり撤去された鋼板接着補強RC床版を使用して各種試験を実施することとした。

床版補強工法の一つである鋼板接着工法の耐久性および経年後の耐荷力に関する報告は非常に少ないのが現状である。また、鋼板接着後の点検管理が困難であることから日本道路公団では使用を控えている。本報告は、鋼板接着補強したRC床版の耐久性および耐荷力に関する試験ならびに点検管理手法の確立に関する試験の結果と考察について述べるものである。

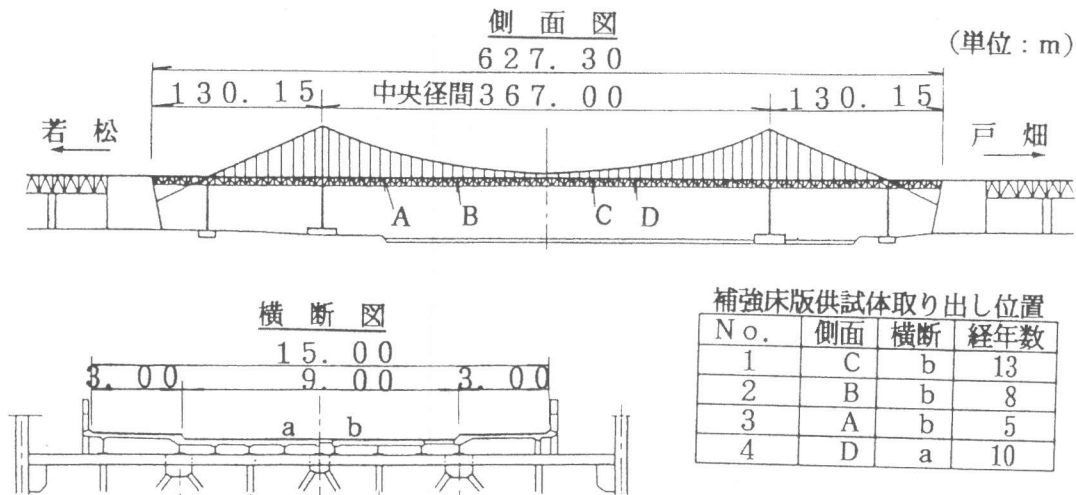


図1 補強床版供試体の切り出し位置

2. 実験概要

2. 1. 鋼板接着補強された床版供試体

体

実橋から切り出した鋼板接着補強されたRC床版供試体 (以下、補強床版供試体という。) の切り出し位置を図1に示す。補強床版供試体は図2のような形状で実験室に搬入されたものを試験の種類に応じて切断、加工および整形した。

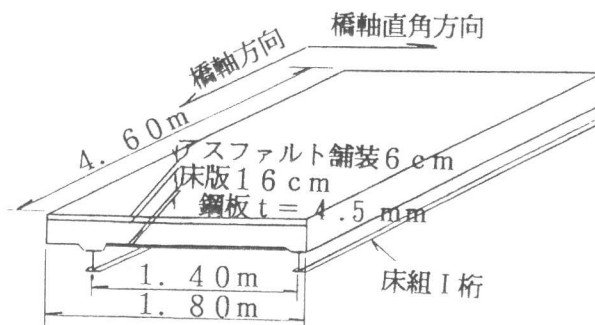


図2 補強床版供試体の形状・寸法

表1 実験内容

実験項目	内 容	数 量	使用供試体	備 考	
外観調査	ひびわれ調査、接着樹脂の充填状況調査	4体	No. 1~No. 4	舗装、鋼板取 除き後を含む	
材 料 試 験	コンクリート	圧縮強度 ($\phi 75 \times 150$)	3本	No. 1	静弾性係数
		引張強度 ($\phi 75 \times 150$)	3本		
		中性化 ($\phi 75 \times 150$)	3本		
	鉄筋	引張強度 ($\phi 13$)	5本	No. 1	主鉄筋 配力筋
		引張強度 ($\phi 9$)	5本		
	接着樹脂	比 重	9(6)個	No. 1	()は1977 年施工の数
		圧縮強度	12(6)個		
		引張強度	9(6)個		
曲げ強度		12(6)個			
非破壊試験・ 局部破壊試験	超音波探査	1体	No. 1~No. 4		
	Pull-Out引抜き試験	27箇所	No. 1		
載荷試験	静的破壊試験	2体	No. 1, No. 2	鋼板有・無	
	疲労試験	1体	No. 3		

2. 2. 実験内容

補強床版供試体を用いた実験内容は表1のとおりである。

(1) 外観調査

すべての補強床版供試体について、アスファルト舗装面およびRC床版面のひびわれ調査を行った。また、ひびわれ調査と同時に鋼板接着に用いたエポキシ樹脂のひびわれ内への充填状況も調査した。

(2) 材料試験

①コンクリート

コンクリートの強度試験および中性化試験用コアは補強床版供試体No. 1から採取した。中性化試験にはひびわれ箇所とひびわれが無い箇所からコアを採取した。そのコアを割裂した面にフェノールフタレインアルコール溶液 1% を噴霧して中性化深さを測定した。

②鉄筋

補強床版供試体No. 1から主鉄筋 ($\phi 13$) および配力鉄筋 ($\phi 9$) を採取して、引張り試験を行った。鉄筋は、腐食の無いものと腐食により断面欠損を生じたものを選定して試験した。

③鋼板の接着樹脂

鋼板と床版の接着に使用されているエポキシ樹脂の経年変化を確認するために表1に示す試験を行った。

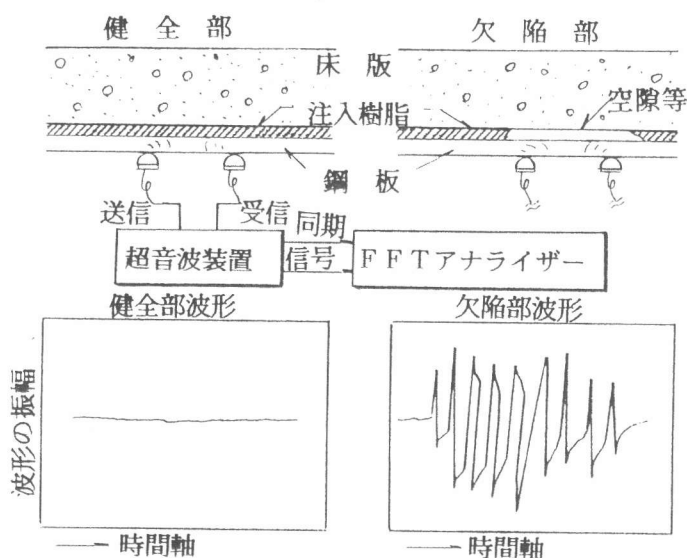


図3 超音波法による非破壊検査

(3) 非破壊検査および局部破壊検査

鋼板とコンクリートの接着状況を、まずハンマーによるたたき点検および図3に示す超音波法による非破壊検査（以下、超音波法という。）で床版下面から調査した。次に補強床版供試体No.1を用いて、図4に示すPull-Out法による局部破壊試験を実施した後、補強鋼板を剥がして接着状況を調査した。超音波法は、数 KHzのパルス信号を送信し、鋼板を振動させてその固有振動を受信するものである。受信した振動波形はスペクトル解析し、スペクトルごとの音圧(SP)レベルで表して欠陥部を検知する。本試験の目的は鋼板とコンクリートの接着状況を調査するだけでなく、非破壊検査の精度を確認し、点検管理上での使用の可否も調査した。

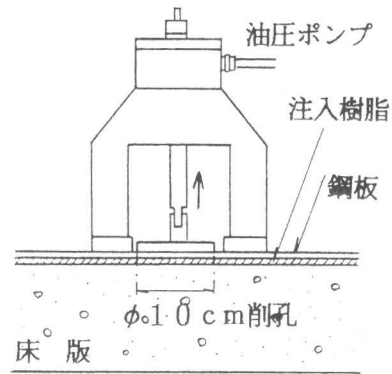


図4 Pull-Out試験

(4) 静載荷試験

静載荷試験には、補強床版供試体 No.1 および No.2 を用いた。補強床版供試体 No.1 は補強鋼板を取り除き、補強前のRC床版の状態での試験した。補強床版 No.2 は鋼板接着補強された状態で試験した。供試体は図2に示したものをアスファルトを取り除き、1.55m × 2.8mに切断、整形した。

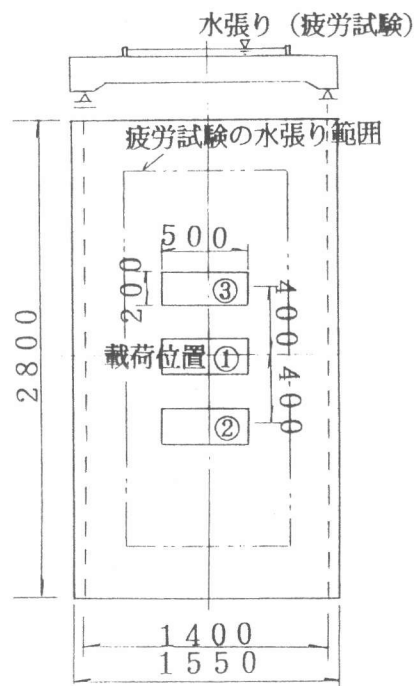


図5 載荷試験

試験には電気油圧サーボ方式で動的100tf、静的150tfの能力を有する試験機を用いた。供試体を図5に示すように、単純支持支間を1.4mとして設置した。辺長比の影響がないように、辺長は支間の2倍の2.8mとした。載荷板は、20cm×50cmの載荷面に硬質ゴムを取り付けた鋼板を用いた。

載荷方法は、図5の位置①、②、③の順序で9.6tfの予備載荷を行った後、①の位置で床版が破壊するまで載荷した。

表2 疲労試験の載荷回数 (×10⁴)

項目	サイ	各位置の回数			平均	各段階の累計
		載荷位置				
		①	②	③		
第一段階	0.5P _u (21.25tf)	1	2	2	2	6
		2	35	35	35	111
		3	67	67	67	104
		4	46	46	46	150
第二段階	0.9P _u (37.50tf)	5	50	50	50	600
		6	35	35	35	105
		7	65	65	8.6	81.2
合計	—	300	300	243.6	281.2	843.6

(5) 疲労試験

疲労試験には補強床版供試体 No.3 を用いて、鋼板補強された状態で試験した。供試体の寸法、試験機および載荷位置は、静載荷試験と同様にした。供試体の上面には、図5に示すように水を張った状態で試験した。

疲労試験の前に予備荷重として、静荷重試験と同様に9.6tfの荷重を行った。上限荷重を静荷重試験で得られたRC床版（無補強）の静的破壊荷重 P_0 の50%とし、表2に示す第一段階の200万回を荷重した後、上限荷重を P_0 の90%として床版が破壊するまで繰り返し荷重した。下限荷重は荷重桁の自重等によりやむを得ず3tfとなった。なお、①、②、③の順序で表2に示す回数を各位置に荷重したものを一つのサイクルとした。

3. 実験結果と考察

3. 1. 外観調査結果

アスファルト舗装面のひびわれは補強床版供試体 No. 3 のみに橋軸直角方向に長さ30cm程度のものが数本見られ、この位置はアスファルト舗装を取り除いた床版上面のひびわれ位置と一致していた。アスファルト舗装および補強鋼板を取り除いた床版上下面のひびわれ密度は、床版上面 $0.86 \sim 2.84\text{m/m}^2$ 、床版下面 $7.20 \sim 7.80\text{m/m}^2$ であり、床版下面のひびわれ密度は4体の供試体とも同程度であった。床版下面には0.20mm以上の幅のひびわれが $1.14 \sim 1.62\text{m/m}^2$ みられたが、漏水の跡はほとんどなかった。

鋼板の接着用に注入したエポキシ樹脂は、床版下面から発生した0.01mm程度の幅のひびわれまで充填されていた。床版下面からひびわれに充填された樹脂は、床版の上面に達しているものもみられた。この樹脂の充填によって、損傷を受けた床版の剛性が回復し、漏水の防止にも効果的であると考えられる。

3. 2. 材料試験結果

(1) コンクリートの試験結果

コンクリートの圧縮強度は 394kgf/cm^2 、割裂方法による引張り強度は 34.0kgf/cm^2 、静弾性係数は $2.56 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。中性化試験の結果、床版の上面で2~3mm、下面で7~18mmの中性化が確認された。また、床版上面からひびわれが発生したコアでは、ひびわれに沿って約6.5cmの深さまで中性化していた。

(2) 鉄筋の試験結果

鉄筋の引張り試験結果、主筋φ13は降伏点 3180kgf/cm^2 、引張強さ 4400kgf/cm^2 、配力筋φ9は降伏点 3633kgf/cm^2 、引張強さ 5073kgf/cm^2 であり、配力筋φ9mmは現行JISのSD35相当の機械的性質を有していた。鉄筋腐食があるものは、腐食による断面欠損がないものと比較して9%程度の耐荷力の低下がみられた。

(3) 鋼板の接着用樹脂の試験結果

補強鋼板の接着に用いられたエポキシ樹脂の試験結果は、すべて建設時の規格値以上の値であり、11~13年経過後もほとんど劣化はみられなかった。

(4) 非破壊検査および局部破壊試験結果

ハンマーによるたたき点検調査と超音波法による調査を比較すると、たたき点検で欠陥部（鋼板の剥離、樹脂の充填不良等）と判定された面積は、超音波法の62~85%となった。これについて、その後の鋼板の剥ぎ取り調査等

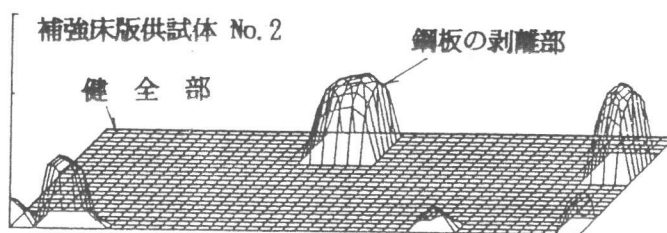


図6 超音波検査の解析結果

で小面積（200cm²程度以下）の欠陥および鋼板のラップ部の欠陥は超音波法のみで検出されることが判明した。また、欠陥部のほとんどが樹脂の充填不良であった。

超音波法による検査では、鋼板が樹脂で床版に接着されると判断される箇所ではSPレベルが約80dB、欠陥部分では約130dBとなり、約50dBの明瞭な差がみられた。また、その中間の部分的に剥離等が生じている箇所は約105dBとなった。

超音波法によるSPレベルとPull-Out法による付着強度（引抜き耐力/抵抗面積）の関係を図7に示す。この図から超音波法によるSPレベルから付着状態が推定可能と考えられる。

Pull-Out法による引抜き試験は、27箇所で実施したが、剥離および破壊形状の内訳は、樹脂とコンクリート面での剥離：15箇所、樹脂にコンクリートが一部付着して剥離：7箇所、鋼板と樹脂の剥離：4箇所、コンクリート部分の破壊：1箇所であった。この結果からコンクリートと樹脂の接着力を大きくして補強効果を高めるには、コンクリート表面へのプライマーの塗布またはチッピング等の表面処理が考えられる。

(5) 静載荷試験結果

補強鋼板を取り除いた無補強床版は、載荷々重が17tfになった段階で床版下面に新たなひびわれが生じた。34tf載荷時に主鉄筋のひずみ変化がなくなり、床版側面で主鉄筋の抜け出しが確認された。38tf載荷時に床版上面の主鉄筋方向に新たなひびわれが発生し、下面ではかぶり部分のコンクリートの剥離がみられた。その後、42.5tfの最大荷重に達し、主鉄筋方向のひびわれが増大して曲げ破壊した。鋼板で補強された床版は、載荷々重が48tfになった段階で床版上面に新たなひびわれが生じた。70tf載荷時に床版側面でハンチ部分から斜めひびわれがみられた。75tfの載荷時に補強鋼板が剥離して床版が押し抜きせん断破壊した。各載荷段階における床版のたわみを図8に示す。無補強床版のたわみは放物線状になっているが、補強床版のたわみは台形に近い曲線となった。両床版の破壊形態は異なり、補強床版は無補強床版の1.8倍の静的破壊耐力となった。

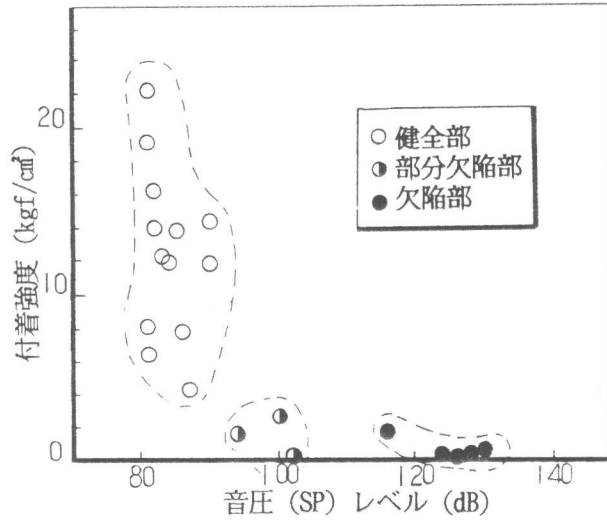


図7 付着強度と音圧レベルの関係

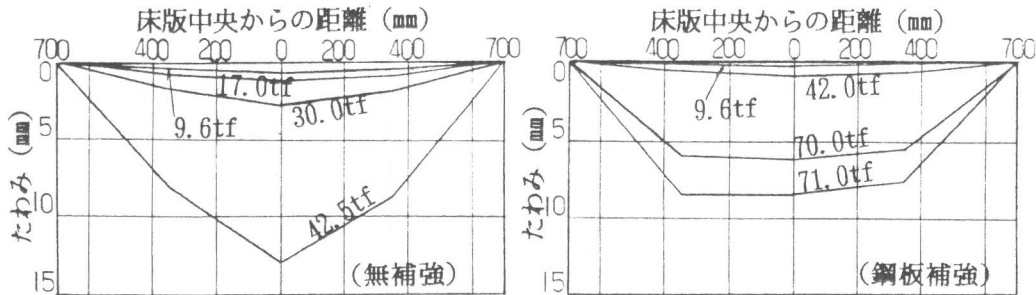


図8 静載荷時の床版のたわみ

(6) 疲労試験結果

疲労試験において、第一段階の200万回繰り返し載荷（上限荷重 21.25tf）では、鋼板の剥離や床版下面からの漏水もなく、表3に示すように鋼板の応力度にもほとんど変化がなかった。

上限荷重を 37.5tf とした第二段階の繰り返し載荷では、載荷位置②で載荷回数が95万回を起えた時点で床版下面のハンチ部分から漏水を生じた。載荷位置を③に移し載荷すると、漏水が多くなり、③位置での載荷回数が 38.8 万回では固定側のハンチ部分の鋼板はほとんど剥離し、載荷に伴って開閉していた。載荷回数が 43.6 万回の時、アンカーボルトの抜け出しと共に押し抜きせん断破壊した。

過去に実施した床版上面に水を張った状態での疲労試験の結果では、200万回繰り返し載荷での疲労強度は $0.27P_u$ であり、本試験の結果から鋼板接着補強により疲労に対して十分な効果があったと言える [1]。

表3 補強鋼板の全応力振幅（単位：kgf/cm²）

	上限荷重	載荷回数	支間方向	直角方向
第一 段階	0.5P _u (21.25tf)	N = 1	328	277
		N = 200 × 10 ⁴	332	296
第二 段階	0.9P _u (37.50tf)	N = 1	611	531
		N = 35 × 10 ⁴	590	462
		N = 41.5 × 10 ⁴	462	601

4. 結論

前述した試験結果を取りまとめると次のようになる。

- ①鋼板接着補強後13年経過した床版の外観調査では、漏水等の劣化はほとんどみられなかった。
- ②鋼板の接着に用いた樹脂は床版下面に発生したひびわれ内に充填され、上面まで達しているものもあり、床版の剛性を回復する効果がある。
- ③架橋地点は海上の厳しい環境条件下にあり、床版上面に生じたひびわれに沿って中性化しており、部分的ではあるが鉄筋が腐食して鉄筋 1本あたりの耐荷力も低下していたので、橋面防水工を併用すると補強効果および耐久性が向上すると考えられる。
- ④鋼板接着の欠陥部探査および付着状態の推定が、本試験で使用した超音波法による非破壊検査で可能であり、点検管理に用いることができる。
- ⑤静載荷試験の結果、無補強床版の耐力 42.5tf に耐して、鋼板接着補強床版の耐力は 75.0tf であり、約 1.8倍の耐力増となった。
- ⑥疲労試験において、鋼板接着補強床版の200万回疲労強度は、無補強床版の静的耐力の50%以上であった。

5. あとがき

床版の鋼板接着工法は、交通規制を必要としない施工性に優れた補強工法の一つであり、本試験結果から耐久性および耐荷力について確認できた。また、問題とされてきた点検管理についても、本試験で使用した超音波法による非破壊検査が有効であると考えている。

最後になりましたが、供試体を提供して頂きました工事関係ならびに本試験にご協力を頂きました皆様方にお礼申し上げます。

〔参考文献〕 [1] 日本道路公団試験所：道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷機構にもとづく健全度判定と補修工法の選択。試験所技術資料第413号。1985年。3月。