

報告 既設 RC 床版の移動載荷試験による疲労耐久性評価

松本洋一*1・植木博*2・横山広*3・内藤浩治*4

要旨: 建設後32年経過した橋梁から切り出したRC床版の耐久性評価と炭素繊維シート接着工法の補強効果確認のため、航空機タイヤを使用した自走式移動載荷試験を行った。その結果、漸増載荷試験(98kN→274kN, 累計61.4万回走行)の範囲では切り出したRC床版は健全な状態であったこと、炭素繊維シート接着工法は床版の耐久性向上に効果のあることがわかった。

キーワード: 移動載荷試験, RC床版, 耐久性評価, 炭素繊維シート接着工法

1. はじめに

近年、車両の大型化、交通量の増大とりわけ大型車の増大等により既設RC床版に作用する荷重は厳しく、多くの損傷事例が報告されている。平成5年に道路構造令第35条の改正があり、橋梁の設計自動車荷重が20tfから25tfに変更された。そのため、既設床版の荷重環境は更に過酷なものとなってきている。その結果、荷重増加に対しては積極的に各種の実験・検討がなされているところであるが、それらは新規供試体によるものが多く、実橋レベルでは載荷試験を除けばほとんど行われていないのが実状である。

今回、首都高速道路の呉服橋ランプが改築されることになり、32年間供用されたRC床版が撤去されることになった。本実験では、そこから切り出した床版に輪荷重移動載荷試験を行うことで、床版の残存耐力を確認し、その耐力を考慮したうえでRC床版の補強工法の一つである炭素繊維シート接着工法の補強効果を確認する。

切出し床版の建設時における設計概要を表-1、撤去時の日交通量を表-2に示す。

2. 試験概要

2.1 移動載荷試験

(1) 供試体種類

供試体の種類を表-3に示す。供試体No. 2, 3は無補強の切出し床版で、供試体寸法は橋軸方向

- *1 首都高速道路公団 東京第一保全部 設計課 (正会員)
- *2 首都高速道路公団 保全施設部 保全指導課長 (正会員)
- *3 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 (正会員)
- *4 (株) ニュージェック 道路・橋梁部 橋梁室長 (正会員)

表-1 切出し床版の概要

上部構造		3径間連続非合成箱桁	
設計示方書 (道路橋示方書対応年次)		昭和31年鋼道路橋設計 (昭和39年鋼道路橋設計示方書)	
上部工架設年次		昭和40年	
設計荷重		TL-20	
床版支間(中間部)		2,800m	
床版厚 (設計床版厚)		19~21cm (t=19cm)	
鉄筋	主筋	圧縮 引張	D16 @ 280 D16 @ 140
	配力筋	圧縮 引張	D13 @ 320 D13 @ 320
コンクリート設計基準強度		320kgf/cm ²	

2700mm、橋軸直角方向2400mmである。供試体No. 4, 4'の新規床版は切出し床版の断面諸元およびコンクリートの材料試験の結果を参考にして製作した。供試体の圧縮強度試験結果を表-4に示す。

供試体No. 5の炭素繊維シート接着補強は、首都高速道路公団の「土木構造物点検要領」の判定(ひびわれ間隔30~60cmの二方向ひびわれ)に基づき、床版のひび割れ密度が4.405m/m²、平均間隔45.5cmに進行した時点で行った。

炭素繊維シート接着補強は、首都高速道路公団の「カーボン繊維接着による既設RC床版の補強設計・施工要領(案)」に基づき、幅25cmの炭素繊維シートを格子状に10cm間隔で接着した。接着層

表一 2 日交通量

年 月	普通車	大型車	合計	大型車混入率
H. 8. 11. 1 (金)	5, 726台	173台	5, 899台	2. 9%
H. 8. 11. 2 (土)	2, 577台	172台	2, 749台	6. 3%

表一 3 供試体の種類

供 試 体		厚さ (cm)	実験方法	
			移動載荷試験	静的押し抜き試験
No. 2	切出し床版	21	○	—————
No. 3	切出し床版	19	○	—————
No. 4	新規製作床版 (No. 2 と同等)	21	○	○ : 移動載荷試験後
No. 4'	新規製作床版 (No. 2 と同等)	21	—————	○ : 無載荷 (無走行)
No. 5	切出し床版 + 炭素繊維シート補強	21	○	○ : 移動載荷試験後

注 : No. 1 は切出し床版の特性試験を行う

表一 4 供試体の圧縮強度試験結果

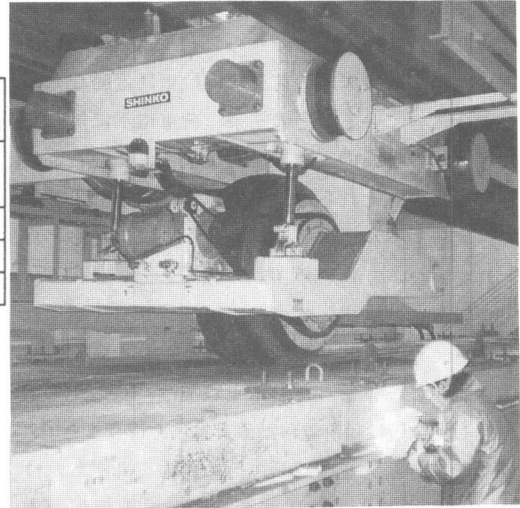
	材令	圧縮強度 (10^3N/cm^2)	弾性係数 (10^6N/cm^2)
切出し床版 (No. 2, 3, 5)		5. 23	3. 51
新規製作床版 (No. 4)	14日	4. 13	
	72日	4. 58	3. 06
	284日	4. 63	3. 28

数は炭素繊維シートをその弾性係数比から引張鉄筋に置き換える計算方法により主鉄筋方向を1層、配力筋方向を2層とした。

(2) 移動載荷試験方法

移動載荷試験に用いた試験装置を写真一 1 に示す。本試験で使用するタイヤはトライスタータイプの大型旅客機のもので、最大で274kNの荷重載荷による走行が可能である。供試体の支持条件を図一 1 に示す。供試体は主鉄筋方向を回転可能な単純支持とし、配力筋方向は横桁による弾性支持とした。供試体の四隅は浮き上がりを防止するために、支持桁とボルトで回転を拘束しない形式で固定した。

荷重載荷プログラムは図一 2 に示す通り、98kN から荷重載荷を開始し127kN、147kN、176kN、209kN、235kNと荷重を増加させた。荷重を増加させる走行回数は98kN、127kNでは5万回走行とし、



写真一 1 移動載荷試験機

それ以降は10万回走行を基本とした。測定は各荷重ステップ毎に0、100、200、500、1000、以降2000回ピッチで行った。計測項目は、たわみ、引張鉄筋のひずみの変化、ひび割れの進行状況(密度、幅、段差の有無)、炭素繊維シートのひずみおよび付着強度である。

2. 2 静的押し抜き試験

(1) 供試体種類・試験方法

移動載荷試験が終了した時点で破壊していない供試体 (No. 4, No. 5) と新規製作床版 (No.

4) の計3体で静的押し抜き試験を行い、耐荷力を確認した。

供試体の支持条件は移動載荷試験と同じで、主鉄筋方向が回転可能な単純支持、配力鉄筋方向は横桁による弾性支持である。載荷点は、床版の中央とし、載荷面の形状は、道路橋示方書に規定されている後輪一輪当たりの設置面積50cm×20cmとした。

測定項目は、床版の破壊荷重、床版のたわみ、鉄筋のひずみおよびひび割れ状況とした。

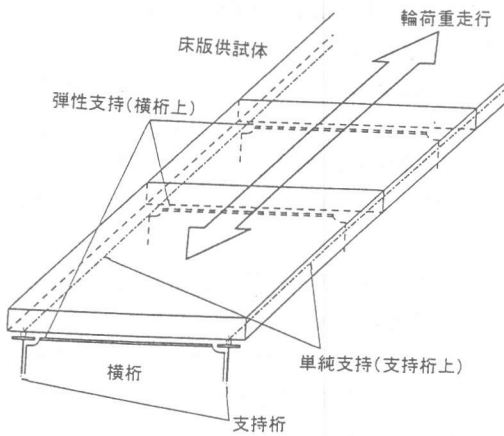


図-1 供試体支持条件

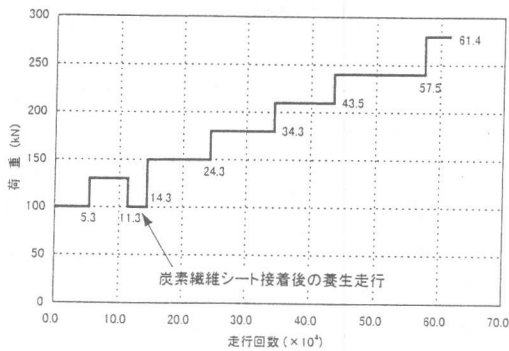


図-2 荷重載荷プログラム (供試体No. 5)

3. 試験結果と考察

3.1 移動載荷試験

(1) 各ステップでの静載荷計測

床版中央部の弾性たわみの変化を図-3に、残

留たわみの変化を図-4に示す。

供試体No. 3は走行開始当初から弾性たわみが大きく、鉄筋の弾性ひずみも大きい。これは、床版厚さが約19cmと他の供試体(約21cm)より薄いことが原因と考えられる。

供試体No. 2とNo. 4は32年を経過した切出し床版と新規製作床版の違いがあるが、形状はほぼ同じでありコンクリート強度にも大きな差はない。移動載荷試験の結果では弾性たわみはほぼ同様で、残留たわみが新規製作版である供試体No. 4が供試体No. 2の2倍程度大きい値を示した。弾性たわみが同等であるということは同じ性能を有していると考えられる。最終段階では供試体No. 2の残留たわみが急増し、供試体No. 4と同等になり、せん断破壊に至った。供試体No. 2は切出し床版であるため供用中に発生した残留たわみは不明であるが、本試験での残留たわみの差の要因の一つとしてはコンクリートの材令の影響が考えられる。

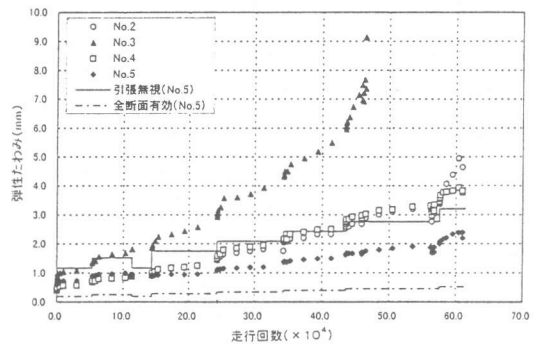


図-3 弾性たわみの変化

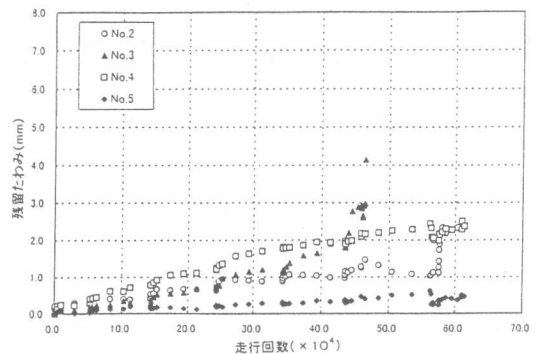


図-4 残留たわみの変化

供試体No. 5は炭素繊維シート接着後(147kN, 約130万回走行後), 弾性たわみ, 残留たわみ, 鉄筋の弾性ひずみが一度減少し, 荷重の増加にあわせて緩やかに増加する傾向を示した。ひび割れの開き量に関しては, 破壊前の段階で供試体No. 2のひび割れ開き量の最大値は約1.0mm, 供試体No. 3では約0.8mm, 供試体No. 4では約0.6mmであった。供試体No. 5についてはひび割れ開き量が0.15mmと他の供試体より極端に小さな値であり, 移動載荷試験の最終段階まで補強前の値を超えなかった。

各供試体の弾性たわみ変化と版理論による計算結果との比較では, 供試体No. 2, 3, 4の供試体が載荷途中で引張無視の計算値を超えており, 弾性たわみが計算値を超えた順(供試体No. 3, No. 2の順)に破壊している。一方, 供試体No. 5のみ試験値が引張無視の計算値を下回る結果であり, 十分な補強効果が確認できた(図-3)。

ひび割れ密度の変化を図-5に示す。

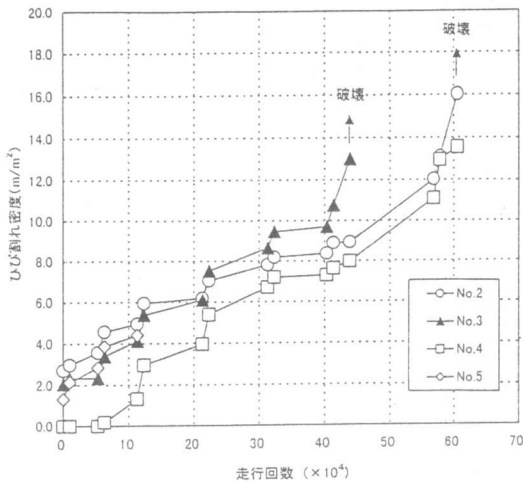


図-5 ひび割れ密度の変化

ひび割れ密度は各床版とも載荷初期に増加し, 約30万回走行時(176kN)から停留する傾向を示した。その後荷重を大きくして走行を続けるとひび割れ密度は再び増加に転じている。破壊した供試体のひび割れ密度は13.0m²/m²を超えており, 破壊していない供試体No. 4も13.5 m²/m²まで損傷

が進行していた。よって, No. 4の余寿命はほとんどない状態であったと考えられる。

初期のひび割れ密度の増加傾向より, 切り出し床版の供用中には100kN中央載荷より小さな荷重状態であったと推定できる。ただし, タイヤ走行位置, 接地面の形状, 舗装の影響があり断定はできない。また, 各供試体でひび割れは格子状に発生した。一般に実橋で発生するひび割れは格子状であることから, 移動載荷試験により実橋の損傷過程を再現できたと考えられる。

(2) 破壊形態および損傷状況

a. 供試体No. 2

本供試体は走行回数約61.36万回, 274kN載荷開始から3.84万回で破壊した。床版上面の陥没破壊は, 破壊直前に観察された浮き範囲全体で発生していた。破壊形態は広範囲の押し抜きせん断破壊であった。

試験終了後に四分割して断面を観察した橋軸直角方向破壊面の角度は約30°であった。(図-6)橋軸方向断面では, 引張側で垂直に発生したひび割れが圧縮側に進行するに従い途中で水平方向に方向を変える傾向がみられた。

b. 供試体No. 3

本供試体は走行回数約47.46万回, 235kN載荷開始から3.78万回走行で破壊した。破壊直前にはひび割れに角落ち現象が顕著に認められた。破壊形態は押し抜きせん断型で, 上面はタイヤ走行位置の床版中央付近で陥没していた。

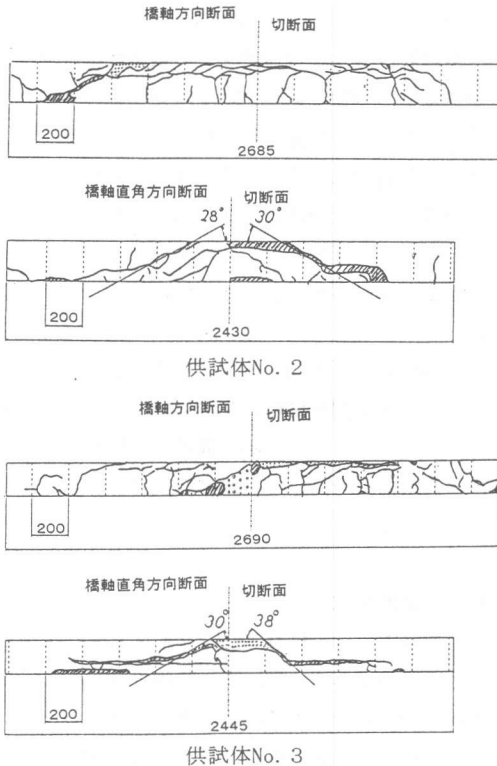
試験終了後に四分割した断面を観察した橋軸直角方向破壊面の角度は約30°と38°(図-6)であった。橋軸方向断面では, No. 2と同様に引張側で垂直に発生したひび割れが圧縮側に進行するに従い途中で水平方向に方向を変える傾向がみられた。

c. 供試体No. 4

走行終了時には床版上面に浮きが発生していた。浮きは供試体のほぼ中央でタイヤ走行位置直下に位置し, 大きさは20×40cmであった。浮きを確認した走行回数は, 274kN載荷開始から3.4万回であった。

d. 供試体No. 5

炭素繊維シートは、最後の荷重ステップである274kN荷重開始から1.0万回と2.8万回で、コンクリート面から部分的に2箇所はく離した。1.0万回ではく離したのは床版の段差をエポキシ樹脂パテ材ですりつけていた箇所、2.8万回ではく離した箇所は炭素繊維シート接着前からひび割れが発生していた。



図一六 床版切断面ひび割れ状態

供試体No. 2の試験結果より、本試験での床版の破壊プロセスは上面の浮きが発生することで抵抗断面が不足し押し抜きせん断破壊に至ったものと考えられる。浮きが発生してから破壊までの期間は短く約1万回の走行であった。同じような浮きは規模は小さいものの供試体No. 4でも確認されており、供試体No. 4の余寿命はわずかであった可能性がある。供試体No. 3では床版上面の浮きを確認していなかったため不明であるが、浮きが発生していた可能性が高い。

本試験で破壊した床版の破壊面の角度は 30° 、 38° で、一般的にいわれている 45° より小さな角度であった。ただし、切断面によって角度が変わる可能性があり全体の傾向を示すものではない。橋軸方向断面での、ひび割れが圧縮側に進行するに従い途中で水平方向に向きを変える現象は、破壊前の床版上面の浮きの原因である可能性がある。

供試体No. 5では、最終荷重で浮きが確認されたが、それらは当初より段差とひび割れのあった箇所である。走行荷重の大きさを考慮する必要があるが、炭素繊維シート接着工法の適用の際には入念な段差処理、ひび割れ注入の検討等が必要と考えられる。

3.2 静的押し抜き試験

(1) 押し抜き試験結果

押し抜き試験結果を表一5に示す。移動載荷履歴のない供試体No. 4'のひび割れ発生状況は放射状で、移動載荷後の供試体No. 4は走行中に発生した格子状のひび割れが拡大する程度であり、異なるひび割れ発生形態であった。

表一五 押し抜き試験結果

供試体	最大荷重(kN)	
	荷重履歴無し	移動載荷後
No.4		665
No.4'	502	
No.5		741
計算値	612	

最大耐力は履歴のないNo. 4'が502kN、載荷後のNo. 4が665kNで載荷後の方が1.33倍大きい値を示した。載荷後供試体No. 4は移動載荷終了時点で床版上面に浮きが発生しており、移動載荷の範囲では余寿命がほとんど無い状況と考えられたが、静的載荷試験では荷重履歴のないものより大きな最大荷重であった。原因については、疲労限以下の荷重履歴を受けたコンクリートは静的強度が高くなるとの報告¹⁾もあるが、詳細は不明であり今後の検討を必要とする。

供試体No. 5の炭素繊維シート接着補強床版の最大荷重は741kNで同一支持条件で計算した平成

8年度示方書に準じて設計した床版 ($f'_{c,d} = 240\text{kgf/cm}^2$ 、鉄筋比(主筋) = 0.01061、鉄筋比(配力筋) = 0.01018) の612kNより1.21倍大きな値を示した。前述の供試体No. 4床版の荷重比が1.33であることを考慮すれば、炭素繊維シート接着床版は移動載荷試験終了時点で平成8年度示方書に準じて設計計算した床版と同等の性能を有していたと考えられる。

(2) 理論計算と試験結果の比較

理論計算の対象としたのは供試体No. 4であり、比較のために床版の押し抜き耐力式で一般的な土木学会式²⁾、角田式²⁾、松井式²⁾の各式により理論計算を行った。比較結果を図-7に示す。

土木学会式で部材係数を無視すると676kNとなり、実験値の方が174kN小さな値を示した。ほかに松井式では811kNとなり、実験値の方が309kN小さな値を示した。一方、角田式では423kNとなり、実験値の方が79kN大きな値を示した。ここで土木学会式では、式の解説にx y両方向の鉄筋比が大きく異なる場合には適用できないとされていることから、配力鉄筋方向断面のみの計算を試みた。その結果、実強度の計算では508kNと実験値とほぼ同じ数値が得られた。

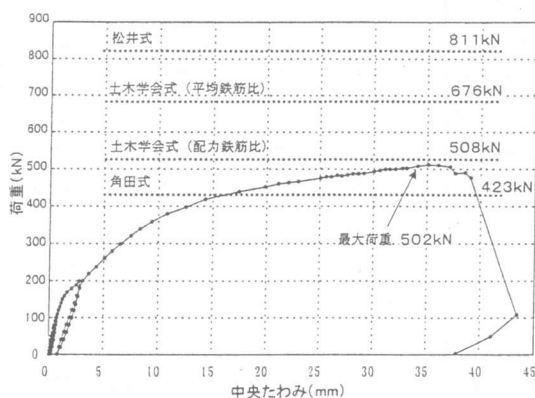


図-7 静的押し抜き試験と計算値の比較

4. まとめ

3年間供用されたランプ橋の鉄筋コンクリート床版に対して、移動載荷試験を中心に種々の試験を行った。試験の目的は、切出し床版の残存耐

力の確認と既設RC床版への炭素繊維シート接着工法の補強効果の確認である。

その結果、切り出し床版は断面諸元を同じにした新規製作床版と同等の性能を示し、十分な耐久性を有していることがわかった。ほかに、損傷が進行した時点で炭素繊維シート接着補強を行った結果、耐久性が向上すること、その耐久性向上に寄与するのがひび割れ拘束作用であることがわかった。

本試験では移動載荷試験で2供試体が破壊したが、破壊前のひび割れ密度は両方とも 13.0m/m^2 を超えており、その値が実橋床版の維持管理(取り替え)の目安になると考えられる。また、移動載荷試験を行った床版は上面に浮きが発生することによって抵抗断面が不足し破壊に至ること、浮きが発生してから破壊までの期間は短いことが示された。

供試体No. 2とNo. 3を比較すると床版厚さが減少すると床版の耐疲労性は急激に低下することが明確になった。また、床版の静的押し抜き耐力は配力鉄筋断面積を用いて土木学会式で計算するとほぼ一致する。

5. おわりに

炭素繊維シート接着工法を適用するRC床版のひび割れ損傷レベルは、炭素繊維シート接着により床版のせん断耐力の向上は期待できないため、二方向ひび割れが発達し、ひび割れが床版厚さ方向に進展し始める段階と考えられる。

今後の課題としては、損傷レベルが異なる場合の炭素繊維シート接着補強効果の確認、床版補強のための炭素繊維シート補強層の最適積層数の把握があげられる。

参考文献

- 1) 岸谷孝一・西澤紀昭ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ・疲労、技報堂出版、p52, 1987. 9
- 2) コンクリート構造の設計・施工の基本-設計編-、土木学会関西支部、1994. 3