

論文 RC床版部分上面増厚工法の適用性に関する輪荷重走行疲労実験とFEM解析

菅野匡*1・長谷俊彦*2・谷倉泉*3・松井繁之*4

要旨: 10日前後の集中工事期間に実施される上面増厚工法には、最近のサービス向上の点から工期短縮が要請されているが、現在の施工システムにおいては工期短縮が非常に困難である。具体的な対策として、施工を車線ごとの2回に分割し、数年間で全幅員の増厚を完了させる段階施工方法を提案し検討した。この部分増厚施工では、増厚端部が主桁上にある場合があり、供用下では負の曲げモーメントの作用による増厚層の剥離が懸念された。このため、FEM解析で主桁上の増厚打ち継ぎ面の応力を計算し、事前に打ち継ぎ面剥離の検討を加えた上で、実寸大床版の輪荷重走行疲労実験により工法の耐久性を確認した。

キーワード: 道路橋, 補修補強, 床版, 打ち継ぎ, 剥離, 押し抜きせん断, 疲労

1. はじめに

上面増厚工法は、現在RC床版の補修に用いられる工法の中では、安価で、しかももともと延命効果に優れた補強工法であり、最近では広く採用されてきている。

上面増厚工法の導入初期の段階では、既設RC床版と増厚層との層間剥離、舗装のスポーリングなどの早期劣化の問題が提起された。その後、原因の究明と改善を目的とする実験¹⁾を重ねた結果、現在では、設計施工マニュアル²⁾も発行され、新旧コンクリートの一体化によって耐久性を向上できる工法として評価されるに至っている。

一方で、最近では、サービス性向上の見地から、集中工事期間の短縮が課題とされ、上面増厚補修工法には工期短縮が要請されている。他の補修工法には、炭素繊維接着、下面増厚、鋼板接着などの工法がある。しかし、上面増厚工法と代替案のコスト比較を行った場合、集中工事ともなう収入の減額損失を考慮に入れたとしても、大都市内を除いては、なお、上面増厚

工法が勝るという試算を得ている。

このようなことから、上面増厚工法適用時の工期短縮の一方策として、車線単位の段階施工を提案し、この耐久性を検証した。東名高速道路の一橋梁の補強を想定し、ほぼ実寸大の断面を持つ試験体を作成し、輪荷重走行疲労実験に付した。実験は、想定する橋梁で生ずる応力を再現した上で、主に既設RC床版と増厚層との打ち継ぎ面の剥離が危惧される鋼主桁上フランジ直上に位置する増厚端部に着目した。

2. 実験方法

2.1 試験体

増厚補強するRC床版は、昭和44年の東名高速道路全線供用開始後、RC床版設計基準の改訂にしたがって、順次、増設縦桁補強が施されている。東名高速道路では、鋼橋RC床版の3/4が4本主桁であり、1/4が3本主桁である。

従来の増厚施工においては、半幅施工時の打ち継ぎ端部を桁の上フランジ上としている。車線単位の段階施工によって増厚を行う場合には、

*1 日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室 主任 工修 正会員

*2 日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室 正会員

*3 (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 研究第二部 課長 工修 正会員

*4 大阪大学 工学部 地球総合工学科 教授 工博

増厚層の Peeling が問題となる、つまり、負の曲げモーメントとせん断力が作用する部分の剥離について輪荷重載荷によって検討する必要がある。これが段階施工の適用性を決定すると考えられるから、試験体は3本主桁構造とし、中桁の上端に増厚端部を設ける構造とした。

日本道路公団試験研究所の輪荷重走行疲労実験装置は、実寸大床版試験体の実験を許すように設計されており、また、車輪荷重変動のプログラミングが可能であるという特徴を備えている。この装置を用いれば、既設橋と同一諸元の試験体に交通荷重の通過をシミュレートすることができる。

でき得る限り実際の条件に合致させるよう、想定橋梁とほぼ同一の断面と配筋を持つ RC 床版を打設し、風雨に曝した養生でこれに乾燥収縮ひび割れを発生させた。さらに、上表面を 10mm の厚さ機械切削し、表面研掃後に上面増厚補強を施して試験体を作成した。RC 床版の疲労実験開始時における圧縮強度は 39.7MPa、上面増厚工法は、現在一般に用いられている諸元のもので、ファイバー混入量 100kg/m³ 量の超早強コンクリートを 60mm の厚さで施工した。既設 RC 床版の諸元を表 - 1 に示す。

表 - 1 既設 RC 床版の試験体諸元

床版厚	190mm
床版支間	3m+3m
床版長さ	6m
主鉄筋	D16(SD295A) @100mm
配力鉄筋	D16(SD295A) @140mm
かぶり	22mm
設計基準強度	24MPa

2.2 床版支持条件

本研究では、特に増厚層の繰り返し応力による剥離に着目しているため、補強後に想定橋梁で発生する応力履歴と、試験体に輪荷重走行疲労実験時に発生する応力履歴とを考えなければならない。試験体はほぼ実寸大であるから、試験体の剛性と想定橋梁の剛性を同一にしてお

ば、単位荷重に対する応力は一致する。

橋梁床版は、平板理論³⁾においては2径間連続無限版と考えられる。試験体をここから切り取った床版の一部と同じ応力場と等価とするためには、試験体自由辺に弾性拘束条件を付与しなければならない。弾性拘束に必要な断面力は、1方向板の支間方向を x 、支持線方向を y とするとき、 $N(x,b)$ 、 $V_y(x,b)$ 、 $M_y(x,b)$ 、 $M_{xy}(x,b)$ の4つから成る関数族である。このうち、 $N(x,b)$ 、 $M_{xy}(x,b)$ は、試験体の長さが支間の2倍であり、自由辺上では消滅するため、残る V_y 、 M_y を一致させるための支持を考えれば良い。さらに、Levy の級数解ではいくつかの Fourier 級数項の部分級数和で支持条件を決定できる。以上の理論に基づき、自由辺上に弾性梁を配置して、床版の一部を試験体で再現した。図-1-4 に平板理論に基づく対象橋梁 RC 床版の FEM 解析結果と試験体のそれとの比較を示す。

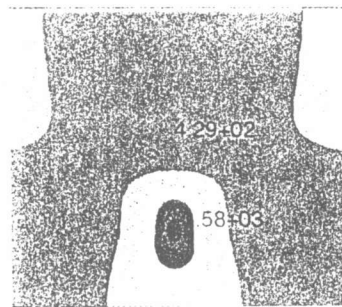


図-1 全体系曲げモーメント M_y 分布

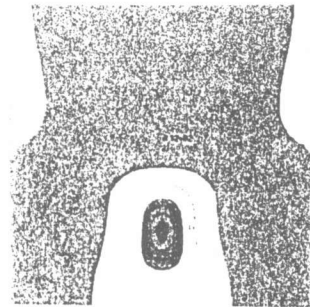


図-2 試験体曲げモーメント M_y 分布

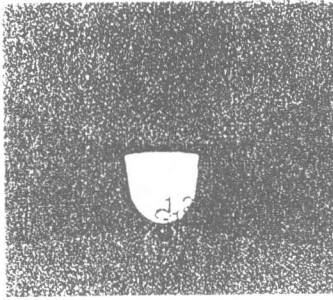


図-3 全体系せん断力 V_y 分布

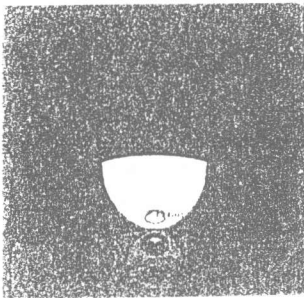


図-4 試験体せん断力 V_y 分布

2.3 立体 FEM 解析による実験条件の検討

(1) 解析モデル

輪荷重疲労実験の実施に先立って、立体 FEM 解析により、剥離が危惧される増厚層端部における応力分布を推定するとともに、打ち継ぎ面の応力度が厳しくなる載荷位置を検討した。

モデルは試験体とほぼ同一の形状としており、長さ 6m、幅 6m（支間 3m×2 径間）である。試験体では増厚部は未増厚の既設床版厚 190mm のうち表面 10mm を切削した後 60mm の増厚施工を行っているが、モデルでは、増厚コンクリートの厚さを 55mm とし、この下に 5mm のインターフェイス要素⁴⁾を挿入している。各要素の材料定数を表-2のように定義した。

表-2 要素材料定数

要素名称	弾性係数	ポアソン比
既設床版コンクリート	27.4MPa	0.167
増厚層コンクリート	36.3MPa	0.230
鉄筋	205.8MPa	0.300

図-5 に要素分割図を示す。節点数 4018 点、要素数 3340 に分割されている。既設床版コンクリート部に 8 節点 3 次元ソリッド要素を、鉄筋に埋め込み鉄筋要素を、増厚層と既設床版との打ち継ぎ面にインターフェイス要素を当てはめた。

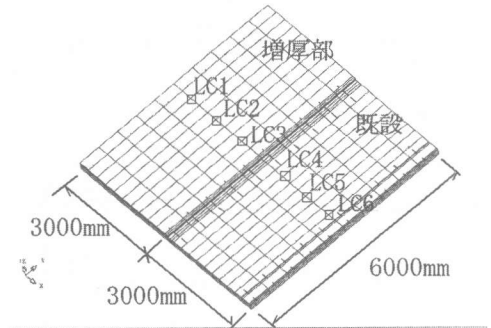


図-5 要素分割図

境界条件を、床版下面の主桁位置にあたる全節点で鉛直方向変位拘束、中桁位置の端部 1 点で 3 方向変位拘束に設定し、図-5 に示す 6 箇所単位鉛直外力を負荷した。橋軸方向の床版端部については拘束を設定していない。なお、FEM 解析ツールは DIANA6.2 を使用した。

(2) 解析結果

外力により生じた床版のたわみ、増厚層と既設床版との打ち継ぎ面の応力に着目し、分析した。

表-3 に解析結果を示す。

表-3 FEM 解析結果(単位外力作用時)

荷重ケース	最大たわみ(mm)		打ち継ぎ面最大せん断応力度(MPa)
	増厚支間	未増厚支間	
LC1	+0.0139	-0.0033	1.18
LC2	+0.0238	-0.00672	1.39
LC3	+0.0121	-0.00567	1.60
LC4	-0.00673	+0.0238	3.01
LC5	-0.00629	+0.0377	1.50
LC6	-0.00292	+0.0212	0.50

荷重ケース LC4 で打ち継ぎ部最大せん断応力度が最大となるから、応力状態が最も厳しくなる荷重位置は、中桁近傍の未増厚支間側である。したがって、疲労実験においては、ケース LC4 の外力荷重位置近傍に輪荷重往復位置を置いた (図-6)。

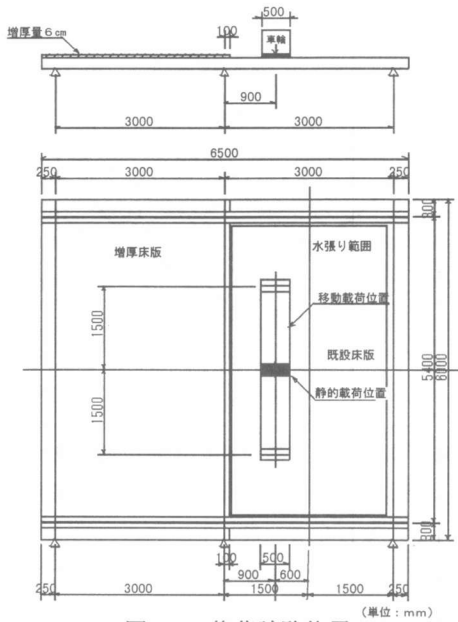


図 - 6 荷重試験位置 (単位: mm)

荷重ケース LC4 における接合面の法線方向応力度分布、接線方向最大せん断応力度分布を図-7,8 に示す。これら図から、LC4 において、接合面の応力度が最大となる位置は、増厚部近傍であることが確認できた。それらの値は、外力を 10tf としたときに法線方向に 2.3MPa、接線方向に 0.3MPa となり、静的荷重によっては、打ち継ぎ面にひび割れは発生しないものと予想された。

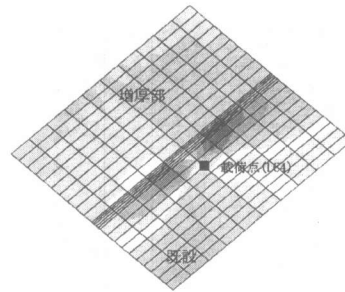


図 - 7 接線方向最大せん断応力分布 (単位荷重当り)

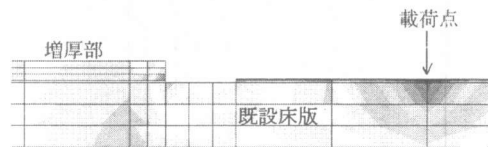


図 - 8 法線方向応力度分布 (単位荷重当り)

2.4 輪荷重および輪荷重往復荷回数

輪荷重走行疲労実験では、疲労耐力は S-N 曲線によって表現される。本来、着目する増厚打ち継ぎ面の剥離に及ぼす交通荷重の影響を想定橋梁のそれと等価なものにしなければならない。しかし、疲労剥離現象が十分に解明されていないため、想定橋梁が補修後に受ける荷重履歴を、輪荷重走行疲労実験における押し抜きせん断疲労耐力の損傷率において等価なものとして実験荷重を設定した。

補強床版は、部分増厚後数年間その状態で供用下に置かれる。最近の東名高速道路の軸重計測結果から得られた車両輪重が 8 年間通過することを想定し、線形累積損傷則で計算した 14tf、2 万回往復荷重を輪荷重荷重条件とした。

本実験では、この範囲の荷重では打ち継ぎ部に剥離が認められなかったため、さらに荷重を 20tf とし、4 万回の繰返し荷重を行った。これは供用下での 16 年間の供用と等価な損傷に相

当する。

2.5 測定項目および測定位置

この実験では増厚層端部での剥離状況を捕えることを目的として、図-9に示す位置において、床版鉛直変位、増厚打ち継ぎ面鉛直方向応力、増厚打ち継ぎ面鉛直方向変位、既設および増厚コンクリート内水平方向ひずみを計測した。

輪荷重通過回数 0, 5 000, 40 000, 85 000, 120 000 回で計測し、このとき、同時に増厚打ち継ぎ面の剥離状態も目視により検査した。

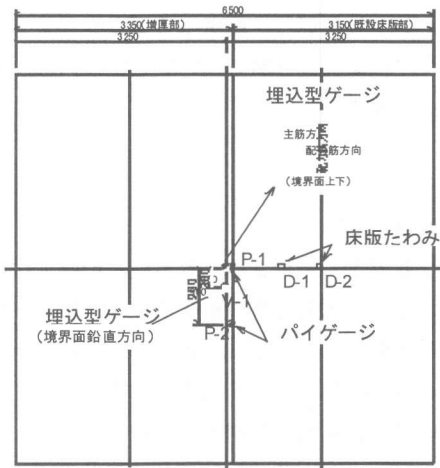


図 - 9 測定項目と測定位置

3. 疲労試験結果

輪荷重走行疲労試験の途中段階において静的載荷試験を行い、前述した各測定項目の経時変化を見た。

図-10は載荷点直下および未増厚部中央部のたわみの経時変化であるが、載荷に伴うたわみの増加はほとんど見られず、荷重の増加に比例したたわみの増加が見られた程度である。

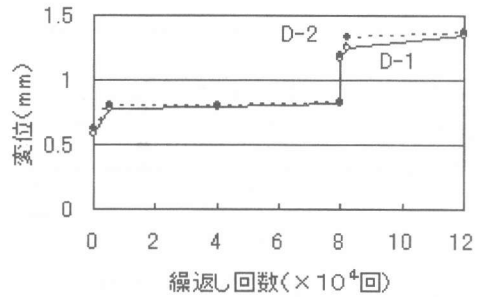


図 - 10 鉛直たわみ変化

図-11は増厚打ち継ぎ部の鉛直ひずみの変化である。これは荷重を20tfに上げる直前に設置したものであるが、荷重20tfでの静的載荷試験時に、最大で65 μ のひずみが計測された(B-1)。コンクリートの弾性係数を27.4MPa(表-2)とすると、このときの応力は1.8MPaであり、解析結果の2.3MPaに非常に近い値であった。

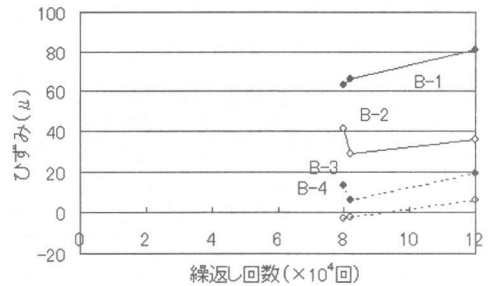


図 - 11 打ち継ぎ面ひずみ変化

図-12は増厚打ち継ぎ面の開口変位に伴う挙動変化を鉛直方向変位として追跡したものである。この部位の鉛直変位は最大でも0.06mm以下であり、12万回の載荷に至るまでの経時変化もほとんど見られなかった。

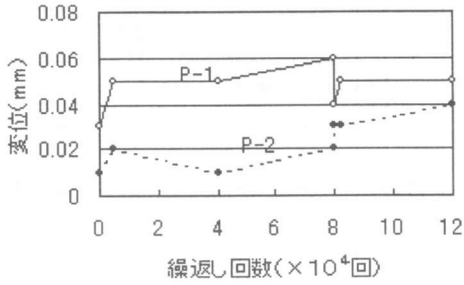


図 - 12 開口変位変化 (測定点間距離 50mm)

図-13 は増厚打ち継ぎ面の上下に埋め込んだひずみ計で、既設コンクリートおよび増厚コンクリートの水平方向のひずみ変化を追ったものである。その結果、主筋方向および配力筋方向における両者のひずみ差は 10~20 μ 程度であり、著しい変化は見られなかった。

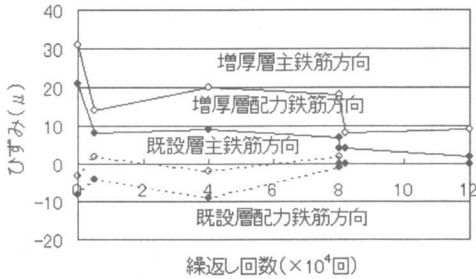


図 - 13 内部ひずみ変化

以上より、本実験の载荷範囲においては、増厚打ち継ぎ面での剥離を表す挙動は得られず、既設 RC 床版下面のひび割れ発生も軽微であった。

4. 結論

実寸大試験体を用いた輪荷重走行疲労実験の結果、増厚端部に剥離が認められなかったことより、この部分増厚床版は 24 年間の供用に対しても十分な耐久性を有することが確認できた。すなわち、段階施工による上面増厚工法を実橋に適用しても、確実な施工を行えば問題は生じないと考えられる。

あとがき

本実験は 1 月中旬に実験が終了したこともあり、すべてのデータを紹介することはできなかった。しかしながら、測定項目ごとのデータの傾向は、本論文で説明した内容とほぼ同じであることを確認している。

参考文献

- 1) 松井繁之・木村元哉・養毛勉：増厚工法による RC 床版補強の耐久性評価，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1085-1096，1992.3.
- 2) 日本道路公団：上面増厚補強設計施工マニュアル，高速道路調査会，1994.
- 3) Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger: Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.
- 4) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: Element Library DIANA User's Manual release 6.1, DIANA Foundation, 1996.