

論文 下面増厚した道路橋床版の増厚構造の最適解

横山 和昭^{*1}・菅野 匡^{*2}・佐藤 貢一^{*3}・Meera Mohan^{*4}

要旨: 道路橋床版の下面増厚補強工法に関し、増厚部の厚さ、モルタルの弾性係数及び補強鉄筋量をパラメータとした各種の増厚構造で補強された床版をF E解析し、補強効果の定性的傾向と構造の最適解を検討した。その結果、曲げ挙動は下面増厚補強部の剛性増加と共に改善されるのが一般的であるが、既設床版と下面増厚部との打ち継ぎ面の剥離に着目すると、剛性と剥離限界荷重との関係は単調ではないことが明らかになり、最適な下面増厚構造は、増厚層厚とモルタル弾性係数及び補強鉄筋量の適切な組合せの中に存在することを確認した。

キーワード: 道路橋床版、補強、下面増厚、剥離、押し抜きせん断

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版の補強技術では、上面増厚工法がすでに一般的となっているが、さらに、2週に渡って交通規制可能な区間向けに早強コンクリート上面増厚工法を、5日間に限定される区間の長大橋向けに部分上面増厚工法を開発し、世に送り出している^{1,2)}。

しかし、大都市圏における交通規制に対する制約は非常に多く、交通規制を必要としない下面増厚工法の確立が求められている。試算では、東名高速道路の東京・大井松田において、交通規制を要しない下面増厚工法を採用するほうが、廉価な上面増厚補強をするよりも、無規制によって料金収入が増加するために、費用対効果に優れるという結果を得ている。

現在、下面増厚補強は、直径6mmの補強鉄筋と純かぶり10mmで施工されている。

また、補修材料であり、下面増厚の材料ともなっているポリマーセメントモルタルと吹き付けモルタルに関しては、ACI委員会から指針

としてまとめられている^{3,4,5)}。

しかし、在来工法の開発においては、疲労耐久性が試験されている^{6,7,8,9)}だけで、一般に開発において遭遇する最適化問題におけるPareto解、あるいは経済学のTrade-Offの関係は、研究されていないのが実情である。

本研究は、非線形F E解析によって、増厚構造の最適解を見いだしたものである。

まず、既往の輪荷重走行実験とF E解析から、下面増厚補強工法において、着目した照査すべき応力度を見いだした。これを、増厚層厚、モルタル弾性係数、補強鉄筋量の3つをパラメータとする27の構造に関して、破壊挙動を非線形F E解析によって破壊まで追跡した。最終的にこれらの解析を感度解析と捕らえ、各パラメータの破壊荷重への感度としてまとめ、最適解を提唱したものである。

*1 日本道路公団 試験研究所

工修 (正会員)

*2 日本道路公団 試験研究所 主任

工修 (正会員)

*3 奈良建設(株) 技術研究所 主任研究員

(正会員)

*4 Compumod Pty. Ltd. Sydney, Senior Engineering Analyst, M.Sc.

2. 下面増厚工法の輪荷重走行試験における損傷進行と破壊挙動

既往の床版下面増厚した道路橋床版の輪荷重走行試験結果^{10,11)}より、下面増厚床版の損傷進行及び破壊挙動を以下に提示する。

2.1 既往の輪荷重走行試験概要

昭和 39 年道路橋示方書に準拠し製作した母床版に、157kN の輪荷重を走行させ、ひび割れ密度 9.5m/m^2 、床版中央の総たわみ量が 8mm の初期損傷を与えた上で、図-1 と表-1 に示すように、2 種類の補強筋で下面増厚補強した。

本载荷は図-2 に示すように輪荷重を 157kN から走行回数 40,000 回毎に 19.6kN ずつ増進させ破壊するまで輪荷重を走行させ、それぞれの持つ補強効果と破壊挙動を検討している。

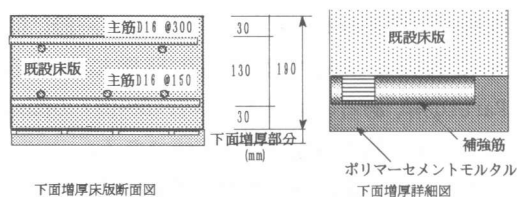


図-1 床版下面増厚概要図

表-1 補強筋材料特性

供試体	種 類	繊維断面積 (mm^2)	最大荷重 kN	引張強度 N/mm^2	ピッチ (mm)	増厚量 (mm)
1	主筋方向	45	128.9	2864	75	27
	配筋方向	30	83.5	2782	100	
2	主筋方向	15	51.1	3403	75	22
	配筋方向	15	51.1	3403	75	

炭素繊維：弾性係数 $4.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$

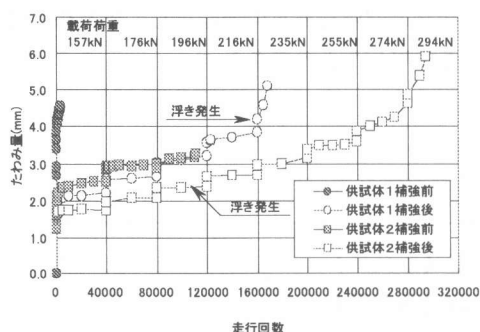


図-2 載荷荷重・走行回数・たわみ関係

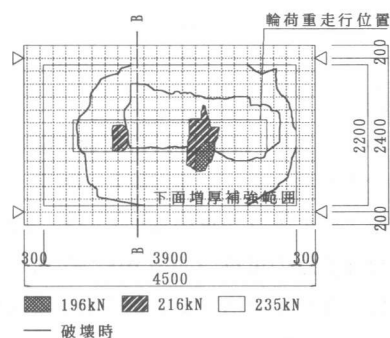
2.2 疲労劣化の進行

図-3 に疲労劣化の進行による床版下面増厚の剥離領域を示す。

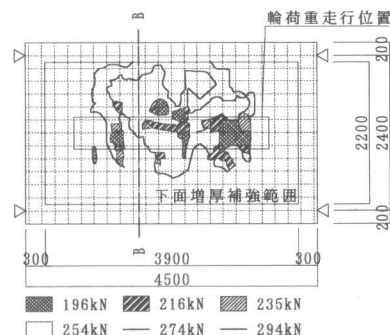
供試体 1 は載荷荷重 196kN 載荷時に床版下面全体に 2 方向を成すひび割れが進展し輪荷重直下に 0.3m^2 の剥離が発生し、216kN 荷重載荷時に $0.3 \sim 0.4\text{m}^2$ 程度の剥離が 2 方所発生している。剥離の生じた箇所は輪荷重軌道中心から楕円形に広がるものである。

供試体 2 は載荷荷重 196kN 走行回数 100,000 回で供試体下面全体に 2 方向を成すひび割れが進展し、 $0.3 \sim 0.4\text{m}^2$ 程度の剥離が発生した。剥離の生じた箇所は供試体 1 と同様に、輪荷重軌道中心から橋軸直角方向に楕円形に広がるものである。剥離領域は載荷荷重の増加と共に徐々に拡大した。

輪荷重直下の小範囲の剥離発生後も、補強効果は持続している。



供試体 1

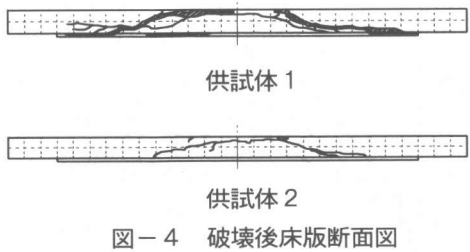


供試体 2

図-3 床版下面増厚剥離領域

2.3 破壊挙動

図－4に示すように、各供試体共に最大荷重時に輪荷重軌道中心直下の床版上面の橋軸直角方向ひび割れが、輪荷重走行に伴いひび割れせん断方向に変位した。この後、走行回数の増加に伴いたわみは増大し、押し抜きせん断破壊した。破壊時においては、床版上面中央から斜め方向に下がった円錐状にひび割れが発生し、ドーナツ状に剥離した。このように、下面増厚補強においては、剥離が発生したり、鉄筋が降伏した結果たわみが増大する。すなわち、打ち継ぎ面の剥離または補強筋の降伏が使用限界状態となる。これを下面増厚工法の一般的特徴とし、解析においては界面応力に着目した。

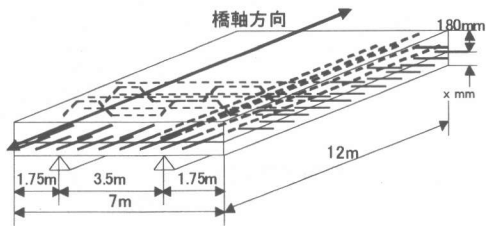


図－4 破壊後床版断面図

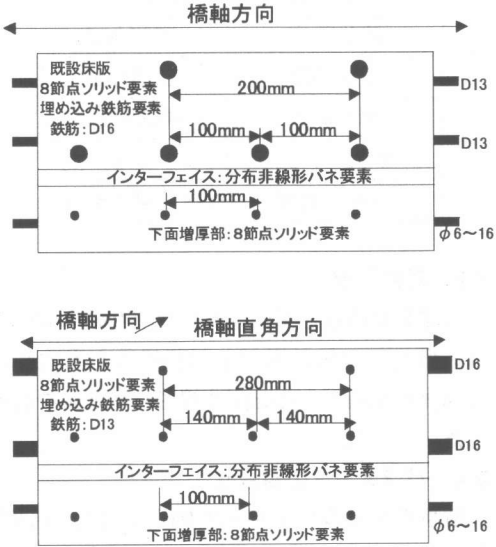
3. 解析モデル

3.1 床版形状

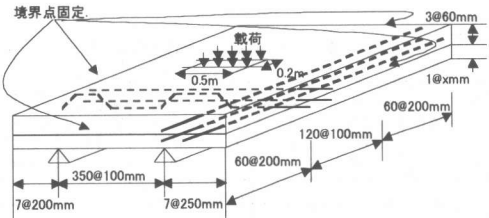
解析対象とする道路橋の床版形状は、図－5に示すように厚さ180mmの既設RC床版の下面に各種厚さの増厚部で補強したモデルとし、鉄筋配置の断面図を図－6に、幾何条件を図－7に示す。



図－5 床版形状



図－6 鉄筋配置



図－7 要素分割と境界・荷重条件

3.2 材料特性

既設RC床版のコンクリート及び鉄筋は表－2及び表－3に示すような材料特性とした。

表－2 コンクリート材料特性

設計基準強度	24 N/mm ²
静弾性係数	25 kN/mm ²
終局強度	20.4N/mm ²
最大強度時のひずみ	0.0025
終局時のひずみ	0.0035
引張強度	1.9N/mm ²
ポアソン比	0.2
8節点ソリッド要素	

表－3 鉄筋材料特性

降伏強度	300N/mm ²
引張強度	500N/mm ²
弾性係数	200kN/mm ²
ポアソン比	0.3
ソリッド要素の表面接合梁モデル	

3.3 界面付着

既設R C床版と下面増厚補強部との界面付着は、既往の実験結果⁹⁾と材料係数を考慮し、1.5N/mm²で剥離する分配非線形バネ要素を設定した。

3.4 パラメータの組合せ

解析モデルのパラメータの組合せは、下面増厚の層厚、モルタルの弾性係数、補強鉄筋の断面積をパラメータとし、開発のターゲットになりうる表－4に示すような27種類の組合せを設定した。

表－4 パラメータの組合せ

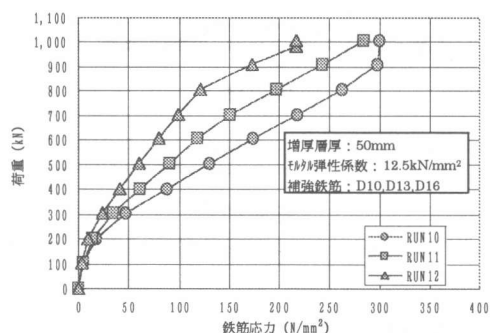
項目 RUNNO	パラメータ					想定諸元	
	下面増厚層厚 (mm)	モルタル弾性係数 (kN/mm ²)	補強鉄筋断面積 (mm ²)	補強鉄筋径 (mm)	モルタルかぶり (mm)		
RUN 1	22	12.5	31.67	6	10		
RUN 2	22	19.0	31.67	6	10		
RUN 3	22	25.0	31.67	6	10		
RUN 4	30	12.5	31.67	6	18		
RUN 5	30	12.5	71.33	10	10		
RUN 6	30	19.0	31.67	6	18		
RUN 7	30	19.0	71.33	10	10		
RUN 8	30	25.0	31.67	6	18		
RUN 9	30	25.0	71.33	10	10		
RUN 10	50	12.5	71.33	10	30		
RUN 11	50	12.5	126.70	13	24		
RUN 12	50	12.5	198.60	16	18		
RUN 13	50	19.0	71.33	10	30		
RUN 14	50	19.0	126.70	13	24		
RUN 15	50	19.0	198.60	16	18		
RUN 16	50	25.0	71.33	10	30		
RUN 17	50	25.0	126.70	13	24		
RUN 18	50	25.0	198.60	16	18		
RUN 19	70	12.5	71.33	10	50		
RUN 20	70	12.5	126.70	13	44		
RUN 21	70	12.5	198.60	16	38		
RUN 22	70	19.0	71.33	10	50		
RUN 23	70	19.0	126.70	13	44		
RUN 24	70	19.0	198.60	16	38		
RUN 25	70	25.0	71.33	10	50		
RUN 26	70	25.0	126.70	13	44		
RUN 27	70	25.0	198.60	16	38		

4. 解析結果

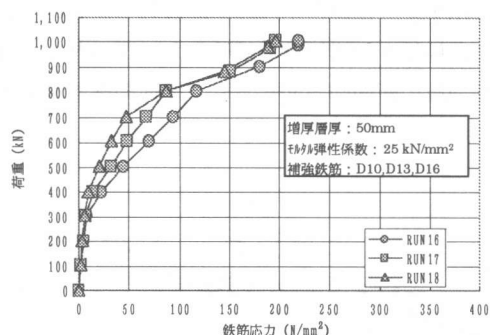
4.1 既設鉄筋応力の低下量

既設R C床版の下縁主鉄筋応力と荷重の関係を図－8～図－11に示す。図－8及び図－9は増厚部の層厚とモルタルの弾性係数を固定し、補強鉄筋断面積を変化させて比較したグラフである。図－10及び図－11は補強鉄筋断面積とモルタルの弾性係数を固定し、増厚の層厚を変化させて比較したグラフである。

4つのグラフより、下面増厚工法においては、既設鉄筋応力を低下させるには、小さいモルタル弾性係数に対しては増厚層厚の増加よりも補強鉄筋量の増加のほうが効果を示し、大きなモルタル弾性係数に対しては増厚層厚の増加が効果をもたらすことが確認できる。



図－8 荷重と既設主鉄筋応力の関係
(パラメータ：補強鉄筋量)



図－9 荷重と既設主鉄筋応力の関係
(パラメータ：補強鉄筋量)

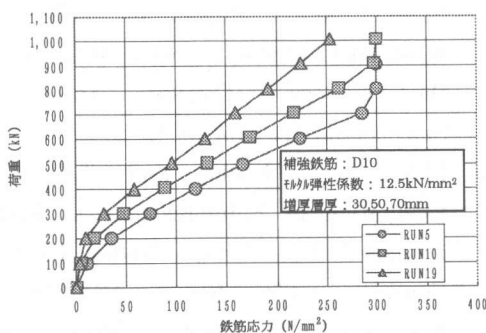


図-10 荷重と既設主鉄筋応力の関係
(パラメータ: 増厚層厚)

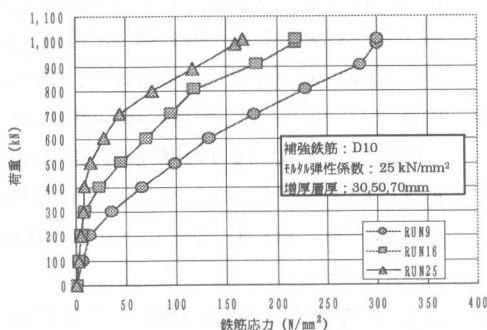


図-11 荷重と既設主鉄筋応力の関係
(パラメータ: 増厚層厚)

4.2 破壊挙動と最適解

前述した輪荷重走行試験の結果で、破壊の前段において起こる打ち継ぎ面での剥離もしくは補強鉄筋の降伏が使用限界状態と定義できることを明らかにした。解析では、3.3 で記述した界面付着応力の橋軸及び橋軸直角方向が限界値 0.9N/mm^2 に至った場合に剥離が生じると仮定し、その時点の荷重と補強鉄筋が降伏した時点の荷重を記した結果を表-5に示す。表中の最小荷重(※印表示)時点が破壊の前段で発生する打ち継ぎ面での剥離、もしくは補強鉄筋の降伏となる。表-5は増厚層厚に着目して比較したものであり、補強鉄筋断面積が 31.67mm^2 の場合(着目A)は、床版主鉄筋方向のせん断力による剥離が使用限界となっており、使用限界となる荷重は、増厚層厚とモルタル弾性係数の増加に大きく影響を受けない。また、補強鉄筋断面積が 71.33mm^2 の場合(着目B)は、モルタルの弾性係

数が 12.5kN/mm^2 では橋軸直角方向のせん断力による剥離が限界荷重を与えており、モルタルの弾性係数が 19.0kN/mm^2 及び 25.0kN/mm^2 では限界荷重が橋軸直角方向せん断応力から橋軸方向せん断応力に移行している。この傾向は、補強鉄筋断面積が 126.7mm^2 の場合(着目C)及び補強鉄筋断面積が 198.66mm^2 の場合(着目D)でも同様である。なお、全体の限界荷重の最大値は 603kN (着目Bでの RUN 22)で、橋軸方向及び橋軸直角方向の両方向での打ち継ぎ面剥離である。一般には、増厚層厚とモルタル弾性係数が増えれば、曲げ剛性も向上し、同時に剥離荷重も大きくなると考えられているが、表-5に示すとおり、剛性と剥離限界荷重との関係は単調増加ではない。2つの方向に分解して考えた打ち継ぎ目せん断応力の合力をとったとしても、最適な下面増厚構造は、打ち継ぎ面剥離と補強鉄筋の降伏に着目し、増厚層厚とモルタル弾性係数及び補強鉄筋量の組合せの中に存在すると言える。

表-5 剥離限界荷重及び鉄筋降伏荷重

項目 RUNNO	パラメータ			打ち継ぎ面剥離荷重		着目範囲
	下面増厚層厚(mm)	モルタル弾性係数(kN/mm^2)	補強鉄筋断面積(mm^2)	橋軸方向せん断(kN)	橋軸直角方向せん断(kN)	
RUN 1	22	12.5	31.67	797	※393	着目A
RUN 4	30	12.5	31.67	796	※395	
RUN 2	22	19.0	31.67	791	※388	
RUN 6	30	19.0	31.67	792	※389	
RUN 3	22	25.0	31.67	784	※383	着目B
RUN 8	30	25.0	31.67	600	※399	
RUN 5	30	12.5	71.33	702	※402	
RUN 10	50	12.5	71.33	806	※403	
RUN 19	70	12.5	71.33	705	※503	着目C
RUN 7	30	19.0	71.33	693	※293	
RUN 13	50	19.0	71.33	704	※502	
RUN 22	70	19.0	71.33	※603	※603	
RUN 9	30	25.0	71.33	601	※400	着目D
RUN 16	50	25.0	71.33	※402	503	
RUN 25	70	25.0	71.33	※403	605	
RUN 11	50	12.5	126.70	706	※403	
RUN 20	70	12.5	126.70	604	※503	着目D
RUN 14	50	19.0	126.70	704	※503	
RUN 23	70	19.0	126.70	※503	604	
RUN 17	50	25.0	126.70	※403	※403	
RUN 26	70	25.0	126.70	※403	※403	着目D
RUN 12	50	12.5	198.60	605	※403	
RUN 21	70	12.5	198.60	907	※504	
RUN 15	50	19.0	198.60	604	※503	
RUN 24	70	19.0	198.60	※503	604	
RUN 18	50	25.0	198.60	※403	※403	

5. まとめ

下面増厚層厚、モルタルの弾性係数及び補強鉄筋量をパラメータとしたF E解析を行った結果、次の結論を得た。

(1) 最適な下面増厚構造は、既設床版と増厚部との打ち継ぎ面の剥離及び補強鉄筋の降伏を考慮した上で、増厚層厚とモルタル弾性係数及び補強鉄筋量の適切な組合せで決定する。

(2) 下面増厚部の曲げ剛性の向上によって既設床版の鉄筋応力を低下させるには、小さいモルタル弾性係数に対しては、補強鉄筋量の増加が効果を示し、大きなモルタル弾性係数に対しては増厚量の増加が効果を示す。

今後は、打ち継ぎ面の付着や補強鉄筋の腐食膨張に対する抵抗性等、増厚材料の耐久性能の評価手法を確立することが望まれる。

参考文献

- 1) 菅野匡, 長谷俊彦, 谷倉泉, 松井繁之: 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F E M解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1561-1566, 1999.6
- 2) 紫桃孝一郎, 上東泰, 菅野匡, 片桐良貴: 繊維補強早強コンクリート上面増厚工法の開発, EXTEC, Vol.13, No.4, pp.50-51, 2000.
- 3) ACI Committee 506: Proposed Revision of Specifications for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete (ACI 506.2), Material Journal of the American Concrete Institute, Jan./Feb. pp.108-115, 1994.
- 4) ACI Committee 548: Guide for Polymer Concrete Overlays, Material Journal of the American Concrete Institute, Sep./Oct. pp.499-521, 1993.
- 5) ACI Committee 548: Abstract of

State-of-the-Art Report on Polymer-Modified Concrete, Material Journal of the American Concrete Institute, Sep./Oct. pp.511-515, 1994.

- 6) M.Kamiya, Y.Iizuka and T.Kanno: Evaluation of Reinforcement to Slab Damaged by Heavy Traffic Loads, Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading (Volume 1), E&FN Spon, 1995.
- 7) 辻本和敬, 長谷俊彦, 菅野匡: 実橋床版を用いた輪荷重走行実験による各種補修・補強工法の疲労寿命比較, 第23回日本道路会議論文集, No.B, pp.374-375, 1999.
- 8) 佐藤貢一, 小玉克己, 加納暢彦, 前田哲哉: 下面増厚したRCはりの補強筋剛性と破壊形態に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.563-568, 1998.
- 9) 佐藤貢一, 檜作正登, 肥田研一, 引地健彦: 吹付け下面増厚補強した道路橋RC床版の補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.517-522, 2000.
- 10) 佐藤貢一, 関根健一, 小林朗, 財津公明: FRPグリット工法により床版下面増厚補強した道路橋RC床版の輪荷重走行試験, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, CS-259, pp.518-519, 2000.9
- 11) 建設省土木研究所: 共同研究報告書 第233号, 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その2), pp.41-pp.62, 1999.10