論文

PPC を用いた道路橋 RC 床版の上面増厚補強に関する梁型モデルによる実験的研究

文屋遼太郎*，小森篤也**，佐藤貢一***，小林朗****，吉川弘道*****

*東京都市大学大学院，工学研究科都市工学専攻，(〒157-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)
**博（工），新日鉄住金マテリアルズ株式会社，(〒104-0061 東京都中央区銀座 7-16-3)
***博（工），奈良建設株式会社 東京支店，(〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-12-9)
****修（工），新日鉄住金マテリアルズ株式会社，(〒104-0061　東京都中央区銀座 7-16-3)
*****工博，東京都市大学教授，工学部都市工学科，(〒157-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

主に米国の道路橋床版の舗装部の補修・補強工事の際に用いられるレジンコンクリートの一種である PPC を，床版上面増厚工法の増厚部に用いて載荷実験を行った．PPC を上面増厚に用いることで，大きく曲げ耐力の向上を確認した．また，ファイバーモデルによる数値解析によって載荷実験結果の追跡を行った．

キーワード：上面増厚工法，PPC(Polyester Polymer Concrete)

1. はじめに

我が国の道路橋は，高度経済成長期に建設されたものが多く，特に道路橋 RC 床版の劣化・損傷が大きな社会問題となっている．また，平成 5 年に改正された車両制限令による大型車両の規制緩和に伴い，RC 床版の劣化は加速度的に進行していると考えられる．そして，2014 年に NEXCO3 社が共同で検討を行った，高速道路における大規模更新・大規模修繕に関する報告 [1]によれば，今後 15 年を目途とした高速道路の維持修繕予算のうち，約 6 割が橋梁床版に割り当てられている．

床版の補修・補強工法の一つである上面増厚工法では，アスファルト舗装部および，床版上面 10mm 程度の切削後，スチールショットブラスト等により床版上部が研掃され，鋼繊維混合コンクリート（SFRC）などを用い，増厚コンクリートを打設後に再舗装されている．近年の米国では Polyester Polymer Concrete (ポリエステエルポリマーコンクリート，以下，PPC)を用いた舗装部の補修が行われている [2]．PPC は不飽和ポリエステル樹脂に細骨材・粗骨材を混ぜて硬化させたものであり，耐摩耗性に優れ，すべり抵抗値が高く，硬化時間が短いことにより急速施工が可能な材料である．また，静弾性係数が普通コンクリートの 1/4~1/3 程度であり，靭性が高いため，ひび割れが発生しづらい [3]．そこで本研究では，主に米国で舗装材として用いられる PPC の機械的強度が優れていることに着目して，道路橋 RC 床版の上面増厚工法を想定した梁部材の上面に PPC を用いて静的載荷試験を行い，耐荷力性能の向上を実験的に検証した．また，ファイバーモデルによる数値解析を行い載荷実験による耐力向上効果を確認した．

2. 実験概要

2.1 試験体概要

上面増厚工法を想定した無損傷の梁に，PPC と既設コンクリートの性能が等しい普通コンクリートにて上面増厚をした．試験体の概要を**図-1** に示す．引張鉄筋とせん断補強筋の配筋についてはすべての試験体で曲げ破壊が先行するよう，せん断耐力が曲げ耐力を 1.5 倍程度上回るような配筋設計を行った．試験体の諸元を**表-1** に示す．普通コンクリートの配合については，昭和 39 年鉄筋コンクリート道路橋示方書による RC 床版の標準設計圧縮強度である，24N/mm^2 に準拠した．PPC の配合に関しては，米国にて舗装材として用いられる場合の圧縮強度 50~60N/mm^2 を目標とした配合設計にて打設した．**表-2** に普通コンクリートの示方配合と硬化剤の重量を 1 とした PPC の重量配合比を示す．試験体 SC の上面に増厚した普通コンクリートは下部の既設普通コンクリートと同配合にて打設したが，圧縮強度に大きく差が生じた．各コンクリートの配合設計を**表-2** に示す．対称 2 点載荷 2 点支点の 4 点曲げ試験を行い，曲げ耐力向上効果と変位，ひび割れ挙動，破壊形態の把握をした．

2.2 試験体作成方法

試験体 SC は増厚界面にエポキシ樹脂接着剤を塗布することにより，増厚コンクリートの剥離防止を目指した．本研究では，増厚界面にディスクサンダーを用いて，梁上面に粗骨材が目視で確認できる程度までの研掃を行った．その後に，常温硬化型 2 液性エポキシ樹脂打ち継ぎ用接着剤を 1mm 厚となるように塗布した．接着剤が未硬化の状態で増厚分の普通コンクリートを打設し，バイブレータで締め固めし，試験体上面を左官ゴテにより平滑に仕上げた．試験体 PPC は試験体 SC と同様の下地処理を行った後，ビニルエステル樹脂のプライマーをローラー刷毛にて塗布量 0.3kg/m^2 となるように塗布し，硬化まで 1 時間程度養生した．プライマーの指触乾燥後，PPC を打設した．PPC は主剤に 2 種類の添加剤を入れ撹拌し，硬化剤投入後速やかに骨材と練り混ぜた．試験体 SC 同様に PPC 打設後はバイブレータで締固

・SC：上面50mm を普通コンクリートにて増厚
・PPC：上面50mm をPPC にて増厚
・MO：SC，PPC と同じ断面寸法の一体打ち
・NS：SC，PPC の増厚前断面寸法の一体打ち

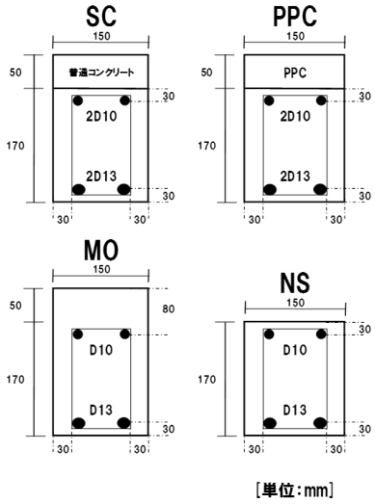

図-1　試験体概要

表-1　試験体諸元

試験体名			SC	PPC	MO	NS
破壊モード			曲げ破壊先行型			
試験体寸法	断面幅	b (mm)	150			
	断面高さ	h (mm)	220	220	220	170
	有効高さ	d (mm)	190	190	190	140
	全長	L_0 (mm)	1600			
	スパン長	L (mm)	1200			
載荷条件	せん断スパン	a (mm)	500			
	純曲げスパン	L-2a (mm)	200			
	せん断スパン比	a/d	2.63			
下部コンクリート	圧縮強度	f'_c (N/mm^2)	30.2			
	弾性係数	E_c (kN/mm^2)	28			
増厚コンクリート	圧縮強度	f'_c (N/mm^2)	20.2	72.5		
	弾性係数	E_c (kN/mm^2)	23	16		
主鉄筋	圧縮:呼び径×本数		D13*2			
	総公称断面積	D (mm^2)	253			
	引張:呼び径×本数		D10*2			
	降伏強度	f_y (N/mm^2)	348			
	弾性係数	E_s (kN/mm^2)	200			
せん断補強筋	呼び径×本数		D6*10			
	降伏強度	f_y (N/mm^2)	348			
	間隔	(mm)	100			
鉄筋比	主鉄筋比	p (%)	0.888			1.204
	せん断補強鉄筋比	p_W (%)	0.447			0.605
算定耐力	終局曲げ耐力	P_U (kN)	66.4	71.0	68.5	45.1
	終局曲げモーメント	M_U (kN・m)	16.6	17.75	17.125	11.275
	せん断終局耐力	P_S (kN)	108.3	114.8	108.3	85.1
	終局耐力比	P_S/P_U	1.63	1.62	1.58	1.89

表-2　コンクリート配合表

	スランプ	空気量	W/C	s/a	セメント量	水量	細骨材量	粗骨材量
コンクリート	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
	10	5	59	45	280	165	796	1011
PPC	S/A	主剤	添加剤A	添加剤B	硬化剤	細骨材	粗骨材	
	(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	※重量比
	53	70	30	1	1	320	280	

め,試験体上面を左官ゴテによって平滑に仕上げた.

3. 実験結果

3.1 破壊形態

すべての試験体において，荷重の増加に伴い，純曲げ区間の下縁コンクリートより曲げひび割れが発生し，その後更なる荷重増大後，引張鉄筋が降伏した．そして，梁上面の圧縮縁のコンクリートが圧縮破壊し終局を迎えた．**写真-1** に載荷試験前の試験体 PPC，**写真-2** に載荷試験後の試験体 PPC，**写真-3** に載荷試験後の試験体PPCの曲げ載荷スパンをそれぞれ示す．試験体 PPC の曲げひび割れは．中立軸の上昇に伴い上昇していき，増厚界面より上部に移行している．しかし，この曲げひび割れは，増厚界面において挙動に変化はなく，増厚界面のコンクリートに浮きや剥離はなかった．試験体 SC の曲げひび割れはは増厚界面まで上昇する前に終局状態を迎え，増厚界面において浮きや剥離はなかった．

3.2 荷重-変位関係

各試験体の荷重値，変位値を**表-3**，荷重変位関係を**図-2** に示す．各試験体の曲げひび割れ発生時の荷重を比較すると，有効高さが同一である試験体 SC，PPC，MO では同程度の荷重を測定した．引張鉄筋降伏時の荷重は，曲げひび割れ発生時同様に断面寸法が同一の試験体 SC,PPC,MO で同程度の荷重を測定した．しかし，最大荷重では試験体 PPC が同断面寸法の試験体 SC，MO よりも大きな値となった．これは，PPC の圧縮強度が普通コンクリートよりも高いこと，PPC の弾性係数が低い為，荷重と変位が大きくなったと考えられる．普通コンクリートにて増厚した試験体 SC は同断面寸法の普通コンクリート一体打ちである MO と比較して，5.0kN 最大荷重が低い値となった．これは試験体 SC の増厚した普通コンクリートの圧縮強度が MO よりも 10.0N/mm^2 低く，圧縮破壊が早期に生じたためと考えられる．同断面寸法の試験体 SC,PPC,MO では引張鉄筋降伏まで同一の挙動を示した．PPC で上面増厚した試験体 PPC は引張鉄筋降伏後，挙動に大きな変化は見られず，荷重の増加に伴い，変位が伸び続けた．

写真-1　試験体 PPC 載荷試験前

写真-2　試験体 PPC 載荷試験後

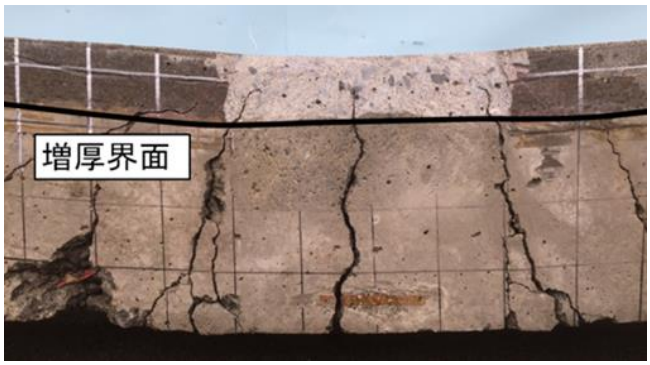

写真-3　試験体 PPC 載荷試験後純曲げ区間

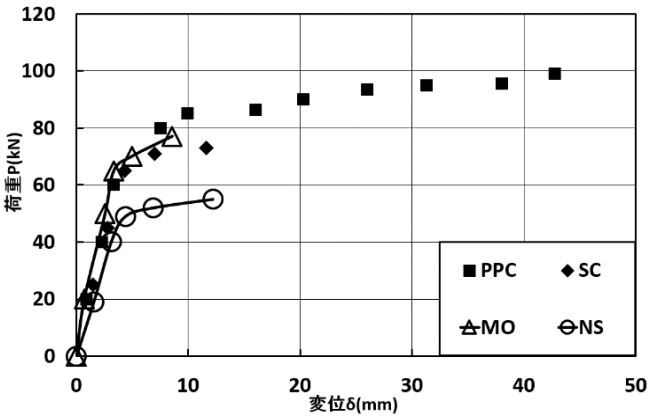

図-2　変位-荷重曲線

表-3　荷重-変位試験結果

	ひび割れ発生		鉄筋降伏		終局	
	荷重(kN)	変位(mm)	荷重(kN)	変位(mm)	荷重(kN)	変位(mm)
SC	15.2	0.71	67.1	4.37	73.4	11.4
PPC	16.2	0.66	64.3	3.74	98.9	43.5
MO	15.4	0.41	67.1	3.81	78.4	8.77
NS	13.4	0.67	50.5	5.45	55.2	12.1

4. ファイバーモデルによる数値解析

表-1 で示した載荷実験条件を用いて，ファイバーモデルを作成し数値解析を行った．使用したコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係であるそれぞれの材料構成則を図-3 に示す．普通コンクリートの構成則は平成 24 年道路橋示方書に準拠した“Hoshikuma；横拘束筋あり”を採用し，PPC の構成則についてもこれを代用した．鉄筋の構成則は“バイリニア（対称）”を採用した．ファイバーモデルによる荷重-変位関係を図-4 に示す．鉄筋を無視した梁の中央たわみにおける荷重-変位関係を弾性解析とした．弾性域について，ファイバーモデルは弾性解析と同等であるが，実験値については弾性域，塑性域においても変位が大きな値となった．また，終局荷重においては，実験値はファイバーモデルと比較し，約 20kN 大きい値を示した．

5. まとめ

不飽和ポリエステル製の樹脂コンクリートである PPC を用い，床版を模擬した梁の上面に増厚し，静的載荷実験を行いその補強効果，破壊形態，変位特性を確認した．試験体 PPC において，普通コンクリートの試験体と同様に梁下縁よりひび割れが発生し，中立軸上昇に伴って曲げひび割れが上昇していった．また，ひび割れが増厚界面より上部に進行したが，増厚界面で曲げひび割れが打ち継ぎ方向に進行することなく，増厚界面での破壊はなかった．そして，PPC の静弾性係数が普通コンクリートよりも低く圧縮強度が高いため，試験体 PPC は試験体 SC に比べ 1.4 倍の曲げ耐力となった．また，ファイバーモデルによる載荷実験の追跡を行ったが，最大荷重，変位など大きな差異が見られ，PPC の材料特性値を考慮した構成則の構築などは今後の課題としたい．

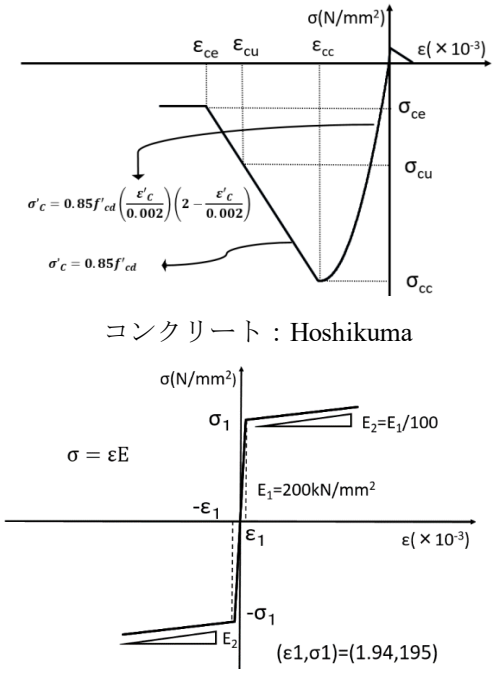

図-3 材料構成則

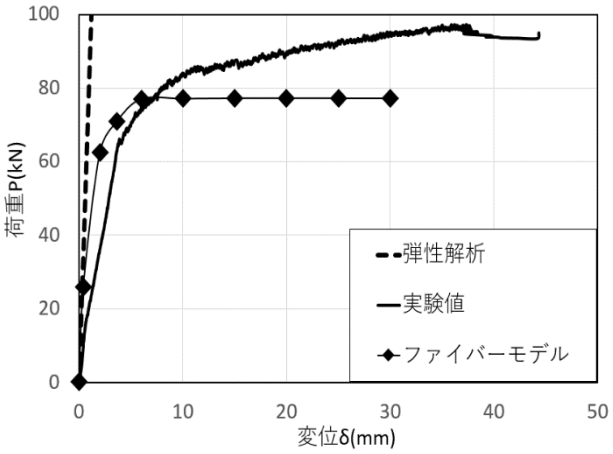

図-4 数値解析による荷重-変位曲線

参考文献

1) NEXCO3 社，東・中・西高速道路株式会社が管理する高速道路における大規模更新・大規模修繕計画(概略)について，NEXCO 東日本プレスルーム，2014．6

2) Keith W. Anderson，Polyester Polymer Concrete Overlay,Washington Department of Transportation Research&Library Services WA-RD797.1．2013．1

3) 大田孝二ら，米国における道路橋床版損傷の適用・国内外の状況と課題，一般社団法人セメント協会月会誌，2013．2