

論文 D-RAP 工法の補強効果に関する 2, 3 の検討

村山貴之*1・内田裕市*2・小柳 洽*3・江口光昭*4

要旨：新しい道路橋RC床版の補強工法であるD-RAP工法について、各種供試体を用いて損傷を受けた部材への補強効果、またD-RAP工法が引張を受ける場合の検討、および上面増厚補強と下面接着補強との相違等について検討した。実験の結果、プレキャスト板を接着することにより損傷を受けた部材への補強効果がみられた。また、引張補強材には連続した繊維を用いることが好ましいが、高強度よりも高弾性の方が効果的であること、ならびに上面補強と下面補強の両者の補強効果の相違について確認できた。

キーワード：D-RAP工法、道路橋RC床版、補強、増厚工法、エポキシ樹脂

1. はじめに

既設道路橋RC床版の劣化のメカニズム等については従来からさまざまな研究がされており、補修、補強についても従来から種々の検討がされてきている。D-RAP工法は、従来の床版増厚工法と同様の考え方で補強を行うものであり、床版上面にプレキャスト板を千鳥状にエポキシ樹脂で接着することによって床版の剛性と耐力とを増加させると共に、接着層が防水層として働く点が有利な補強工法である。その概略を断面図として図-1に示す。ここでは、実橋スラブを想定し一定荷重による損傷を受けた部材を使用し、D-RAP工法の補強効果について検討する。また、D-RAP工法を施工するにあたり、連続支点上の床版や、張り出し床版の支点上のように、床版上面が曲げ引張を受ける場合には、床版上面に引張補強が必要になってくる、そこで最近研究開発が盛んな炭素繊維等を引張補強材として用い、引張補強材の検討を行う。また、これらの実験を通じて上面増厚と下面増厚との相違等についても検討する。

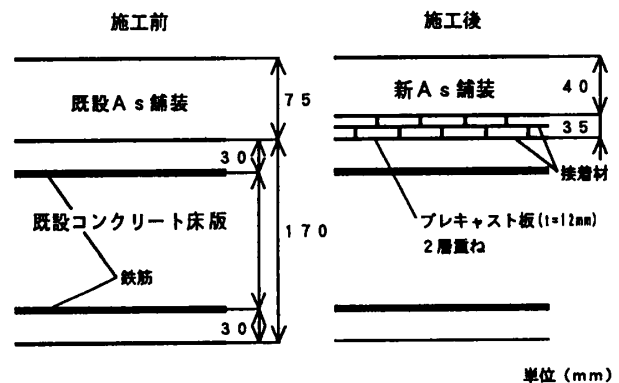


図-1 D-RAP工法の施工断面図

2. 実験概要

2.1 実験計画

本試験においては、前述の各項目について以下のような検討を行った。

(1) 一定荷重による損傷を受けた部材に対するD-RAP工法の補強効果

一定荷重による損傷を受けた部材にD-RAP工法で上面に増厚補強した効果、ならびに破壊性状について大型はりモデル、スラブモデルを用いて検討を行う。なお前報[1]においては小型はりモデルを用いたが、実橋に近いモデルとしてここでは大型はりモデルを用いた。

(2) 引張補強材の検討

床版上面が曲げ引張を受け引張補強が必要な場合を想定し、炭素繊維を中心とした各種引張補強材を用いたD-RAP工法の検討を行う。引張補強材としては、表-1に示す6種類を用いた。

* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

* 2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

* 3 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

* 4 日本道路公団名古屋管理局羽島管理事務所改良助役

(3) 上面増厚と下面増厚との比較

上面増厚補強としてのD-RAP工法と、下面接着補強としてのカーボンシート接着工法を比較検討する。

2.2 供試体および載荷方法

実験に用いた供試体の寸法諸元および種類を表-1、表-2(a), (b)に示す。

コンクリートの平均圧縮強度は334 kgf/cm²である。また、鉄筋の機械的性質を表-3に示す。プレキャスト板はノンスペーススレートボード (F B-N 大型はりを除き幅 150×長さ200×厚さ6mm、大型はりは幅200×長さ200×厚さ12mm、曲げ強度300kgf/cm²) を使用した。接着剤は2液型エポキシ樹脂 (X-JH1 主剤：エポキシ樹脂、硬化剤：変性ポリリアト、配合比主材/硬化剤/珪砂5号=3:1:8、曲げ強度430kgf/cm²) を使用した。

(1) 一定荷重による損傷を受けた部材に対するD-RAP工法の補強効果

本試験については、大型はり、およびスラブを用いて検討を行った。

大型はりは橋梁スラブから切り出したはりを想定している。H3, H4シリーズは、一定荷重による損傷を受けたはりに、上面をD-RAP工法により増厚補強した場合、下面をカーボンシートで補強した場合の補強効果や破壊性状について検討する。スラブ試験の繰り返し載荷試験との対応で、損傷を与える荷重として鉄筋が降伏する直前、直後の荷重をとった。

表-1 供試体種類一覧

供試体番号	概要	数	
H1	大型はり 無補強供試体(補強効果の比較) D-RAP工法による補強供試体(補強効果の比較) 一定荷重による損傷を与えD-RAP工法で補強した補強供試体 一定荷重による損傷を与えカーボンシートで下面補強した補強供試体	2	
H2		2	
H3		2	
H4		2	
S1	スラブ 無補強供試体(1)(補強効果の比較) 無補強供試体(2)(補強供試体S3と同厚、補強効果の比較) D-RAP工法による補強供試体(破壊状態の確認) 損傷を与えた無補強供試体(1) 損傷を与えD-RAP工法で補強した補強供試体 損傷を与えカーボンシートで下面補強した補強供試体	1	
S2		1	
S3		1	
S4		2	
S5		2	
S6		2	
S1/R		無補強供試体(1) 3点移動繰り返し載荷(0.7Ps~破壊)	1
S2/R		無補強供試体(2) " (0.7Ps~破壊)	1
S3/R		D-RAP工法による補強供試体 " (0.7Ps~破壊)	2
S5/R		損傷を与えD-RAP工法で補強した供試体 " (0.8Ps~破壊)	2
S3/R	補強供試体-中央定荷繰り返し載荷試験(0.7Ps~破壊、3回1サイクル)	1	
A	引張補強 樹脂板(バルブをエポキシ樹脂で固めた板)で下面補強 スレート板+格子状連続カーボン繊維で下面補強 セメント板+格子状連続カーボン繊維で下面補強 スレート板+高強度カーボンで下面補強 スレート板+高弾性カーボンで下面補強 補強鉄筋(15D6)+エポキシ樹脂+スレート板で下面補強	2	
B		2	
C		2	
D		2	
E		2	
F		2	

表-2(a) はり供試体寸法

種類	シリーズ	寸法(cm)			支間 (cm)	使用鉄筋	鉄筋のかぶり (cm)	有効高さ (cm)
		幅	厚さ	長さ				
無補強	Hシリーズ	20	17	180	150	引張鉄筋2D16 圧縮鉄筋2D10 スラブ D13	3.0	13.2
		20	20	180				16.2
下面補強	A, B, C, D, E	15	11.5	120	100	2D10	2.0(3.5)	7.5
	F		12.5					7.5

※鉄筋のかぶりの括弧内は引張補強材を含めた場合。

表-2(b) スラブ供試体寸法

供試体種類	方向	辺長 (cm)	厚さ (cm)	支間 (cm)	使用鉄筋	鉄筋のかぶり (cm)	鉄筋の間隔 (cm)	有効高さ (cm)
無補強 (1)	X方向	120×120	8.5	100×100	D10	2.5	7.5	5.5
	Y方向					1.5	5.0	6.5
無補強 (2) 補強	X方向	120×120	10.2	100×100	D10	2.5	7.5	7.2
	Y方向					1.5	5.0	8.2

表-3 鉄筋の機械的性質

使用鉄筋	直径 (mm)	断面積 (cm ²)	降伏強度 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)
D16	15.9	1.99	38.0	54.3
D10	9.53	0.713	36.7	51.8

表-4 引張補強材の機械的性質

種類	高強度カーボン	高弾性カーボン	格子状連続繊維
引張強度 (kgf/mm ²)	343	294	120
弾性係数 (kgf/cm ²)	19.6×10 ⁸	39.2×10 ⁸	10.0×10 ⁸

H3-1, 2は初期荷重を行った後に、D-RAP工法により厚さ30mmの補強を、H4-1, 2は初期荷重を行った後に、カーボンシートで下面補強を行った。カーボンシートは高強度カーボンであり、その機械的性質を表-4に示す。また、カーボンシートによる下面補強方法、荷重方法を図-2に示す。

スラブ供試体は実橋スラブの1/2である。またスラブの配筋は主鉄筋とそれに直交する配力鉄筋から成り、それらの鉄筋比は実橋スラブとほぼ同じとした。スラブ供試体S4, S5, S6, S5/Rは、無補強スラブ供試体S1の終局荷重をPsとした場合、0.7Psの荷重を初期荷重として無補強スラブ供試体に橋梁スラブにかかる活荷重をモデル化してA, B, Cの3点に荷重を行ったのち、S5, S5/RはD-RAP工法で補強し、S6はカーボンで下面補強した。S1~3-1, S4~6-1, 2は静的荷重を行い、S1~2-2/R, S3-2~3/R, S5-3~4/Rは、3点移動荷重とした。荷重方法は主筋と垂直方向にA, B, C各1点ずつの合計3点に図-3に示すように荷重した。なお、ジャッキの中心間隔は20cmである。荷重順序はB→A→Cのそれぞれ1回ずつを1サイクルとし、それぞれの初期荷重を無補強・補強スラブ供試体S1, S2, S3各シリーズの終局荷重を基に決定し、1サイクルごとに0.1Psずつ荷重を上げていき、最終的に破壊するまで3本のジャッキでそれぞれ交互に荷重した。ただし、S5シリーズについてはS3シリーズの終局荷重を基にした。供試体S3-4/Rは、中央繰り返し荷重とした。初期荷重は補強スラブ供試体S3シリーズの終局荷重を基に決定し、3回ずつ荷重したものを1サイクルとし、1サイクルごとに荷重を上げて行き、最終的に破壊するまで荷重した。荷重方法を図-3に示す。

また、スラブ供試体S4~6シリーズ、大型はり供試体のH5, H6シリーズの初期荷重の荷重-変位曲線を図-4に示す。

プレキャスト板は2層とし千鳥配置を原則とした。プレキャスト板の2層全厚は、スラブ供試体が15mm (プレキャスト板6mm×2枚=12mm、接着層3mm)、大型はり供試体が30mm (プレキャスト板12mm×2枚=24mm、接着層6mm) とした。

(2) 引張補強材の検討

引張補強材の種類を図-5、機械的性質をを表-4に示す。供試体A, B, Cシリーズは、樹脂板、各種ハ

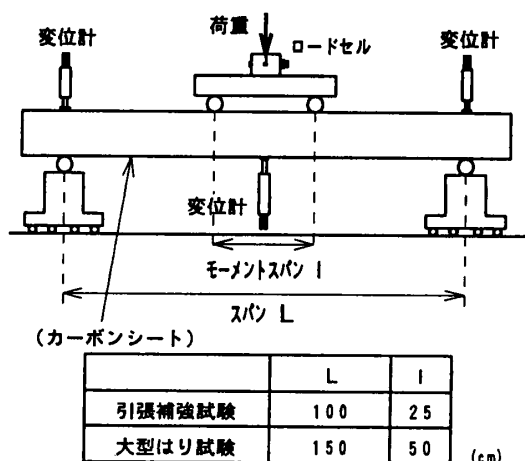


図-2 はり荷重方法

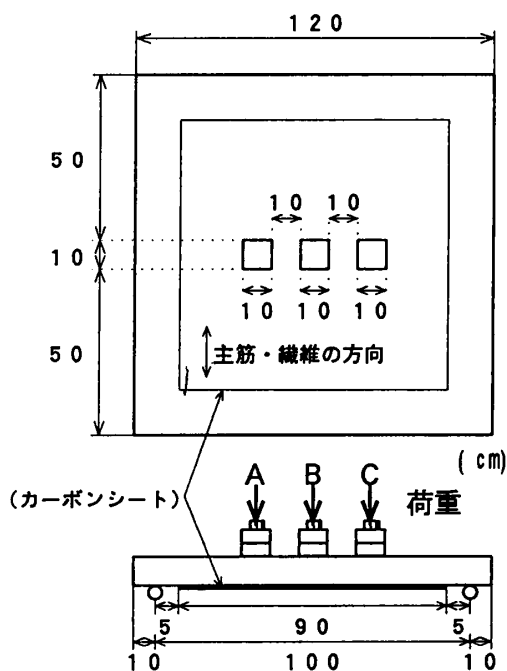


図-3 スラブ荷重方法

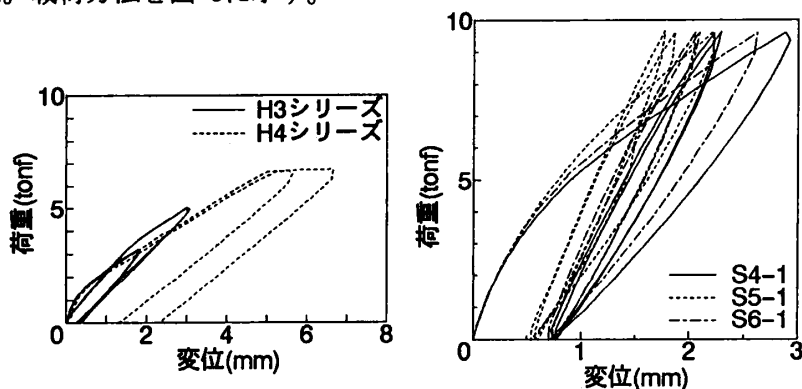


図-4 初期荷重の荷重-変位曲線

補板（スレート板にエポキシ樹脂を用い格子状連続繊維を貼ったもの、格子状連続繊維をセメント板で挟み込んだもの）をはり供試体下面にエポキシ樹脂で2層構成、千鳥配置で接着した。供試体D、Eシリーズは、高強度カーボン、高弾性カーボンをはり供試体下面にエポキシ樹脂で接着した後、供試体下面にスレート板をエポキシ樹脂で2層構成、千鳥配置で接着した。供試体Eシリーズは補強鉄筋をはり供試体下面にエポキシ樹脂で接着した後、供試体下面にスレート板をエポキシ樹脂で2層構成、千鳥配置で接着した。2層全厚は15mm（接着層3mm）とした、なお補強鉄筋を用いる場合、3層全厚は25mm（接着層3mm、補強鉄筋10mm）である。この試験の載荷方法を図-2に示す。

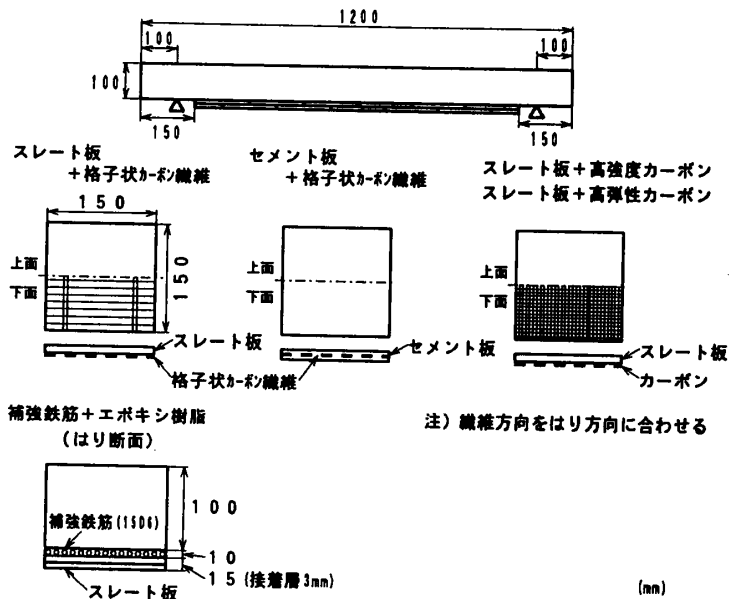


図-5 各引張補強材の概略図

3. 実験結果

3.1 一定荷重による損傷を受けた部材に対するD-RAP工法の補強効果

試験結果をシリーズごとに表-5に示す。ここで変位は最大荷重時の変位である。

大型はり供試体の荷重-変位曲線を図-6~8に示す。

図-6より耐力、変位、剛性の増加が見られD-RAP工法によって増厚することによる補強効果について確認できる。

初期載荷の後に、D-RAP工法により30mm補強したH3シリーズの破壊性状は、H2シリーズと同様に板内の割れが進んだ後、最終的に下層のプレキャスト板とコンクリート間の接着層が剥離しコンクリートの圧壊が起き破壊した。初期載荷を行った後にカーボンシートで下面補強したH4シリーズは、降伏前からカーボンシートとコンクリートの付着が切れる音がし始め、上縁のコンクリートが圧壊し始めた後、一瞬にしてカーボンシートが付着破壊を起こし同時に上縁のコンクリートは圧壊した。図-7,8に示すように、損傷を与えD-RAP工法で補強したH3シリーズは、損傷のない補強供試体H2シリーズと比べると剛性は同じであった。H4シリーズのはり

表-5 試験結果

<大型はり>

NO.	降伏荷重 (tonf)	最大荷重 (tonf)	変位 (mm)	破壊形式
H1-1	6.88	7.65	18.6	○
H1-2	6.95	7.53	18.9	○
H2-1	8.16	10.0	23.2	◎
H2-2	8.20	10.1	26.8	◎
H3-1	8.65	11.4	67.4	◎
H3-2	8.73	10.7	53.7	◎
H4-1	8.03	10.1	16.9	△
H4-2	7.99	9.96	13.3	△

○上縁部の圧壊
◎層間剥離後に上縁部の圧壊
△付着せん断破壊

<スラブ>

NO.	破壊荷重 (tonf)	変位 (mm)	NO.	破壊荷重 (tonf)	変位 (mm)
S1-1	15.8	7.32	S1-2/R	12.8	7.28
S2-1	19.4	6.47	S2-1/R	15.9	3.52
S3-1	19.1	9.66	S3-1/R	15.8	6.34
			S3-2/R	17.1	4.88
S4-1	16.1	6.98			
S4-2	16.5	6.99			
S5-1	21.1	5.04	S5-3/R	19.4	5.27
S5-2	23.4	5.11	S5-4/R	20.8	4.52
S6-1	18.3	6.10			
S6-2	18.5	6.19			

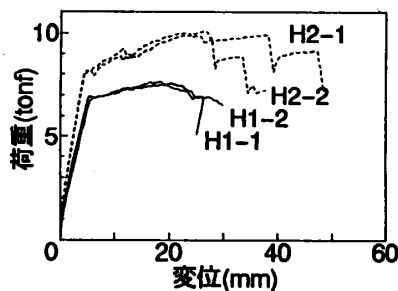


図-6 荷重-変位曲線

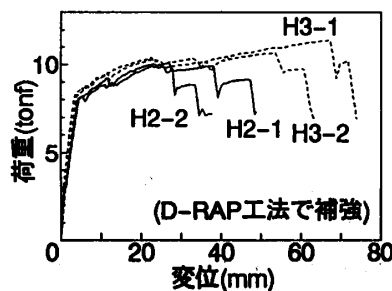


図-7 荷重-変位曲線

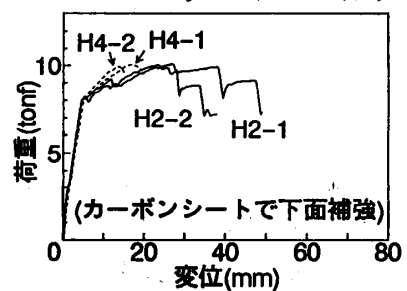


図-8 荷重-変位曲線

高さは無補強供試体H1シリーズと同じであることから、本実験で行なった程度量のカーボンシートで下面補強した場合には、D-RAP補強供試体と同じ程度の剛性を得ている。また、変位はH2シリーズに比べH3シリーズの方が初期剛性がやや大であり、プレキャスト板の変形能が大きいいためコンクリートのように入縁が圧壊せず、最大変位も大となっている。

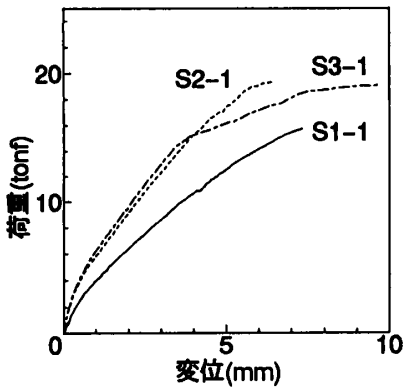


図-9 荷重-変位曲線

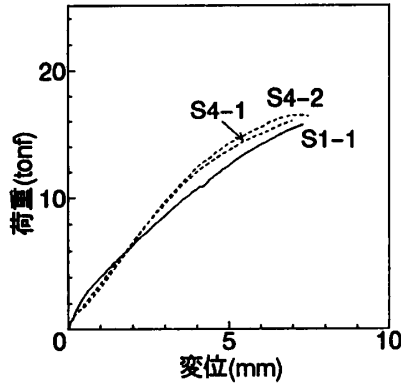


図-10 荷重-変位曲線

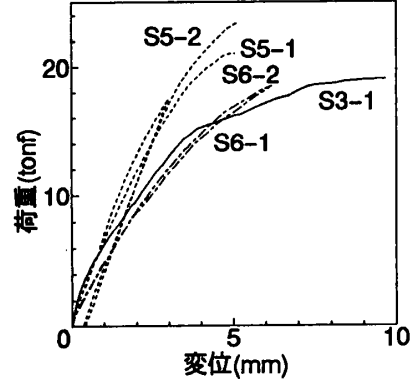


図-11 荷重-変位曲線

スラブ試験はいずれの供試体も、押し抜きせん断破壊であった。それらの荷重-変位曲線を図-9~11に示す。図-9よりD-RAP工法による補強により剛性、耐力が増加したことが確認できる。図-11に示すように、一度損傷を与え、D-RAP工法で補強した供試体では、何も損傷を与えていない供試体に比べ最大耐力が増加し、最終変形はやや減少している。なお、載荷位置を移動させる繰り返し載荷では中央点の静的載荷に比べて耐力は大きく減少した。

3.2 引張補強材の検討

試験結果を表-6に示す。また各供試体の荷重-変位曲線を図-12(a), (b)に示す。

供試体A~Cシリーズは、約1tをすぎると供試体下面補強パネル部分から破断音があり、その後荷重の増加とともに断続的に音が発生し、鉄筋が降伏する以前にAシリーズでは

上下の樹脂板の層間の接着層に、Bシリーズではコンクリートとスレート板の間で、Cシリーズは上下のセメント板の層間の接着層にそれぞれ水平ひび割れが発生した。その後は無補強はり供試体と同様の荷重-変位曲線を描き、A~Bシリーズは最大荷重後下層の目地部から曲げひび割れが進展し、最終的にモーメントスパン内のコンクリート上縁の圧壊で破壊した。Aシリーズにおいて上下の樹脂板の層間の接着層に発生した水平ひび割れの面は、接着剤と樹脂板が完全にはがれており、ここで用いた樹脂板で用いられている樹脂と接着剤の接着が良好ではなかった。また供試体D, E, Fについては、各供試体とも曲げひび割れの発生はほとんど見られず、破壊形式は引張補強の切れた支点近傍か

表-6 試験結果

NO.	降伏荷重 (tonf)	最大荷重 (tonf)	平均変位 (mm)	破壊形式	NO.	降伏荷重 (tonf)	最大荷重 (tonf)	平均変位 (mm)	破壊形式
A-1	2.11	2.34	18.6	○	D-1	----	4.32	3.66	△
A-2	2.04	2.26	16.3	○	D-2	----	4.36	3.16	△
B-1	2.82	2.82	1.99	○	E-1	----	4.53	2.47	△
B-2	3.06	3.06	1.62	○	E-2	----	4.39	2.50	△
C-1	1.42	2.65	3.53	○	F-1	----	4.64	1.69	△
C-2	1.72	2.96	4.85	○	F-2	----	3.96	1.56	△

○上縁部の圧壊

△付着せん断破壊

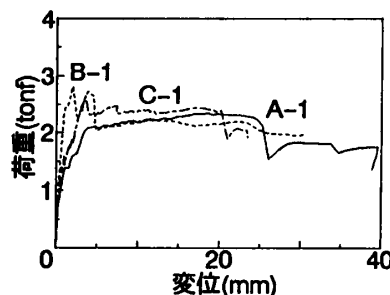


図-12 (a) 荷重-変位曲線

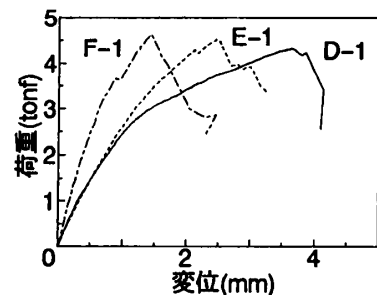


図-12 (b) 荷重-変位曲線

らの付着せん断破壊であった。なお最大荷重は増加し、最大荷重時の変形は減少した。これは、補強材の引張強度が大きく、補強効果十分すぎるためである。D, Eシリーズにおいて、高弾性カーボンを使用している供試体Eシリーズの方が剛性は高いが、変位は高強度カーボン使用している供試体Fシリーズの方が大きい。A, B, CシリーズとD, E, Fシリーズの破壊形式、最大荷重の違いは、引張補強材が連続しているか、していないかの違いである。

各供試体の初期剛性を比較すると、D, E, Fシリーズでは引張補強材が連続しているため、A, B, Cシリーズに比べ明かに剛性が大きい。また、B, CシリーズではCシリーズに引張補強材内での水平ひび割れがみられるまではほぼ同じ剛性であった。

以上より、引張補強材の強度の違いによって引張補強板内での水平ひび割れ発生荷重が異なり、接着剤と引張補強材との付着は初期剛性や耐力に影響を及ぼす。このため、現実にとどこまでの耐力あるいは変位を期待するかによって使用する引張補強材が定まると考える。

3.3 上面増厚と下面増厚との比較

図-13, 14に荷重初期の変位-荷重曲線を示す。図-6, 7, 8, 11をあわせてみると大型はり供試体においてH3シリーズとH4シリーズを比較すると、最大荷重はほぼ同じであるが、H3シリーズはH4シリーズに比べ全般的に剛性が増加しており、また約5倍の変形能を有している。

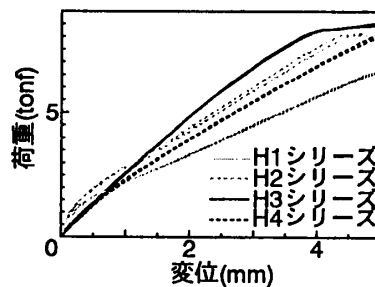


図-13 荷重-変位曲線

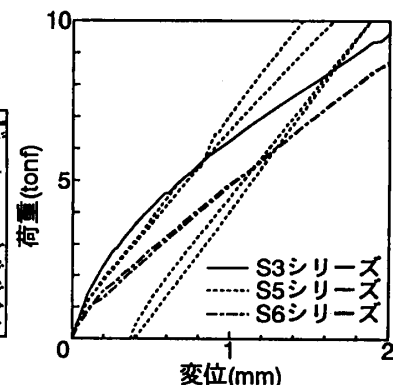


図-14 荷重-変位曲線

またスラブ供試体において比較すると、最大荷重、最大変位、剛性はD-RAPで補強してある供試体の方が大きかった。はりで見られたような、カーボンの剥離はスラブ試験では見られなかった。スラブの下面を増厚接着補強することにより曲げ耐力は増加するものの押し抜きせん断に対する抵抗力は大きくならないが、増厚工法は増厚することにより剛性の増加が期待でき、また押し抜きせん断に対する抵抗性も大きくなるのがわかる。

4. まとめ

本研究は、D-RAP工法について、特に損傷を受けた供試体を用いてD-RAP工法の補強効果、および引張補強材の検討等を行なった。その結果、次のような結論を得た。

- ①無補強供試体に対し、キャスト板を接着した補強供試体は、耐力および変形能に対しても優れており、その補強効果が大きいことを確認できた。
- ②損傷を与えたスラブ供試体にD-RAP工法による補強をしたものは、元の損傷のない供試体に補強を行なったものに比べ耐力が増加した。
- ③上面増厚補強は、下面接着補強に比べせん断補強に対して有効であった。
- ④引張補強材としては、連続した繊維を用いるのが望ましいが、高強度カーボンよりも高弾性カーボンの方が効果的であった。

謝辞：本実験を遂行するに当たって協力いただいた、岐阜大学学生 筒井圭一、吉田由起夫君、大日コンサルタント（株）松島秀夫氏ならびに関係各位に感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 村山、小柳、安井、江口：D-RAP工法と小型はり試験、コンタリート工学年次論文報告集、vol. 7、NO. 2、pp923～928、1995