# 論文 炭素繊維補強された損傷 PC 梁の動的挙動に関する実験的研究

三原 愛未<sup>\*1</sup>·高木 仁之<sup>\*2</sup>·滝澤 一孝<sup>\*3</sup>

要旨:本研究は, RC 造の耐震補強における柱・梁部材のせん断補強方法として多用されてい る炭素繊維補強の耐震補強効果を検討することを目的に,損傷した PC 梁部材にこの補強方法 を施し,静的実験及び動的衝撃加力実験を行い,耐震性能の把握を試みた。その結果,補強後 は制御最大変位到達までの荷重低下も少なく,炭素繊維補強が靭性と強度の向上に寄与するこ とが確認された。また,動的衝撃加力実験では静的実験より耐力及び変形性能が向上しており, 動的衝撃加力下においても炭素繊維補強が耐震性能上,充分な効果があると判断された。 キーワード:炭素繊維,補強, PC 梁,動的挙動,静的加力,動的衝撃加力

### 1. はじめに

本研究は,動的衝撃加力下の耐震補強の耐震 性能に関するもので特に,柱・梁のせん断補強 に重点を置いた。既存 RC の柱・梁のせん断補 強方法としては,鋼板巻付けや炭素繊維巻付け が一般的に多く行われている。これを踏まえ, ここでは,比較的容易な方法である炭素繊維補 強の耐震補強効果を検討することを目的に,前 もって載荷し損傷させた柱・梁部材にこの補強 を施し,静的加力実験(仮動的加力)及び動的衝 撃加力実験を行い耐震性能を検討した。

### 2. 実験計画

逆対称曲げせん断加力実験により損傷させた PC 部材 6 体を炭素繊維シート補強し,静的実



\*1 明治大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)
\*2 明治大学専任講師 理工学部建築学科 工修 (正会員)
\*3 北野建設㈱生産管理部 (正会員)

験(RS シリーズ 3 体)<sup>1)</sup>と動的衝撃加力実験(RD シリーズ 3 体)<sup>2)</sup>を行う。動的衝撃加力実験では, 何れの試験体も変形角が 1/100rad 時の速度が 80kine レベルに達する高速加力を計画した。な お, 仮動的実験では,兵庫県南部地震における 記録波(JMA-KobeNS)を用いたが,特に実建物 を想定したものではなく,単に静的加力実験と して行うためのものである。

### 2.1 試験体概要

補強前の試験体概略を図-1 に,補強前の試 験体概要を表-1 に示す。共通因子として試験 部は250×400mmの長方形断面で,主筋は6-D16 及び 2-PC32 φ,あばら筋はあばら筋比 0.4%で D6を使用している。RS-1~3 は,柱を想定し静 的漸増加力により損傷させたもので,軸力とし

> て引張軸力を RS-1 では 500kN を与 え、RS-2 では 1000kN、RS-3 では軸 力を零としプレストレス量を 600kN 与えたものである。RD-1~3 は,梁 を想定し動的衝撃加力により損傷さ せたもので,軸力を零として,RS-1 に対して加力速度(RD-1),プレスト レス量(RD-2), コンクリート強度 (RD-3),を変動させたものである。

試験体No.	RS-1	RS-2	RS-3	RD-1	RD-2	RD-3	試験体共通因子	通因子		
コンクリート圧縮	48					60	断面積[mm×mm]	250×400		
強度[N/mm <sup>2</sup> ]						00	試験区間長[mm]	1600		
引張軸力[kN]	500	1000	0				PC鋼棒	2-32φ(C種1号)		
プレストレス量[kN]	200 6		60	500 900		600	主筋	6 - D16 (SD345)		
(軸力比)	(0.04) (0.		(0.19)		(0.10)	せん断補強筋	□2 - D6@60 (SD295)			
速度[kine]		- 約60以		約60以_	Ŀ.	せん断補強筋比	0.4			
加力方法	静的漸増加力		動的衝擊加力		叩力	せん断スパン比	2.0			

表-1 試験体概要

表-2 使用材料の力学的性質

		コン	鋼材							
試験体	RS-1	RS-2	RS-3	RD-1	RD-2	RD-3	種別	D6	D16	PC32
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	51.6	50.8	50.8	50.3	49.7	64.7	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	328.5	341.7	1213
ャング率 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	3.41	3.23	3.23	3.37	3.28	3.57	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	530.2	504.8	1231
終局歪度 (×10 <sup>-6</sup> )	2210	2032	2032	2179	2095	2229	ャング率 (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	1.80	1.70	2.04



図-2 補強前試験体破壊状況(展開図)





# 2.2 使用材料

鋼材の引張試験結果およびコンクリートの圧 縮試験結果を表-2 に示す。補強材料として用 いた炭素繊維シートの性能は,設計厚さ 0.169mm,炭素繊維目付量 302g/m<sup>2</sup>,シート引張 強度 4011N/mm<sup>2</sup>,シート引張弾性率 246× 10<sup>3</sup>N/mm<sup>2</sup>である。補修材料に用いた無収縮モル タルは,市販の速硬性プレミックスモルタルで 28 日圧縮強度 39.1N/mm<sup>2</sup>である。

# 2.3 補強前試験体破壊状況

補強前の試験体破壊状況を図-2に, RS-1~3 の補強前の荷重-変位曲線を図-3に, RD-1~3 の補強前の荷重-変位曲線を図-4に示す。いず れの試験体も,曲げ及びせん断ひび割れがある。 せん断ひび割れ幅は, RS-1 で最大 2.0mm のひ び割れがあるが, いずれの試験体も 0.1~0.3mm のひび割れが支配的である。RS-1,2 では引張軸 カ下での実験により, 水平方向のひび割れがあ るが, ひび割れ幅はほとんど確認できない。ま た, 各試験体とも耐力の確認までの変形で制御 しているが, 動的衝撃加力では変形角 1/50rad を超えるように加力装置の初期設定を行い, 結 果として最大経験変位はそれぞれ異なり, RS-1 ~3 で 1/53~1/25rad、RD-1~3 で 1/53~1/27rad となっており, 変形量が大きいものほど圧壊が 広範囲に及んでいる。

### 2.4 補強方法

各試験体は下地処理として,ひび割れ部分に エポキシ樹脂を注入して補修し,コンクリート の圧壊部分は,無収縮モルタルにより整形補修 する。その後,プライマー,マトリックス樹脂 を塗布し,炭素繊維シートを巻き付けている。 補強量は各試験体で同一とし,材軸直交方向に 1層貼りとする。

# 2.5 載荷方法及び測定方法

加力装置図を図-5 に示す。載荷方法は,動 的アクチュエーターによる一方向逆対称曲げせ ん断加力方式とする。載荷履歴は,仮動的加力 では RS-1~3 で行い,JMA-Kobe NS 波の最大値 (818gal)を含む 10sec 間のデータを用い,入力レ ベルを加速度倍率で 100~500%の範囲において, 徐々に増分させることにより破壊に至らしめる 載荷とした。動的衝撃加力は RD-1~3 で行い, 変位制御のランプ波(100mm/0.001sec)による衝



撃力を1回与える。測定は、アクチュエーター の変位・荷重、上下スタブ間の相対変位、部材 端部の伸縮、加力ビーム・上下スタブ・試験部 の加速度を、静的実験では時間刻み 0.0067sec で 10sec 間の応答値として、動的衝撃加力実験 では時間刻み 0.001sec の時刻歴として記録する。

### 3. 実験結果

### 3.1 最大応答値

# (1) 仮動的実験

最大応答値一覧を表-3に、試験体 RS-3の荷 重-変位曲線を図-6に示す。入力加速度倍率 275%時の応答値は、RS-1と RS-2では概ね同様 の結果となった。RS-3では最大荷重は他の2体 と同程度となったが、変位量は約1/2となった。 これは、RS-3は前回の実験での引張軸力による 影響(水平亀裂)がないため、他の試験体に比べ て剛性が高かったと考えられる。このことから 判断して、今回の補強がせん断補強を意図した ため、炭素繊維補強が水平ひび割れ方向に補強 されておらず、また、エポキシ樹脂のみの補強

表-3 最大応答値一覧

試験体	加速度 倍率(%)	加速度 (gal)	速度 (kine)	変位 (mm)	最大荷重 (kN)
	100	1030	33	23	203
RS-1	150	1350	35	28	250
	275	2010	80	91	368
RS-2	100	1010	25	14	207
	275	2050	63	88	388
RS-3	100	920	14	8	183
	275	2200	37	41	367
	500	3100	83	93	394

※絶対加速度、相対速度、相対変位の応答値は、絶対値で示す。



# 表-4 実験結果一覧

試験体	最大変位 (mm)	最大速度 (kine)	最大加速度 (gal)	最大荷重 (kN)
RD-1	94.0	106	7443	540
RD-2	96.8	118	6967	536
RD-3	96.1	115	6496	563



図-7 荷重-変位曲線



では十分な剛性回復効果が得られなかったと考 えられる。最大荷重は、ほぼ曲げ耐力計算値 380kN に達し、せん断補強効果は得られたと推 察される。

#### (2)動的衝撃加力実験

試験体に与えた制御最大変位(最大変位)とそ れまでに生じた最大の速度,加速度,荷重を実 験結果として表-4に,各試験体の荷重-変位曲 線を図-7に示す。試験体荷重は,アクチュエ ーター荷重より質量慣性力 F=m α (m:試験体質 量の 1/2 と取り付け冶具質量,α:試験体に生 じた加速度)を差し引いて算出した。また,各試 験体の到達速度-変位関係を図-8に示す。荷重 -変位関係は,全試験体共に全体的に塑性変形能



▲RS-1 上端部 ▲RS-3 上端部
 図一9 破壊状況写真(静的)



▲上部正面

▲上部右側面(圧壊部分)



▲下部正面 ▲下部左側面(圧壊部分) 図-10 破壊状況写真(RD-1)



力に富む履歴となっている。到達速度は, 変位 10mm(R=1/160rad)で 80kine 程度に達し, 変位

- 45mm(R=1/36rad)で最大値 100kine に達した。
  - 3.2 破壊状況

# (1)静的加力実験

破壊状況写真を図-9 に示す。破壊は全ての 試験体共に同様で,試験体上下端の曲げ圧縮部 が膨張し,試験体の出隅部の炭素繊維シートが 破断してコンクリートが圧壊した。 なお,曲げ応力の引張部にはコンクリートの ひび割れに伴う水平(材軸直交)方向の亀裂がシ ート上にみられた。

### (2)動的衝撃加力実験

代表例として, RD-1 の破壊状況写真を図-10 に,全体水平変位と脚部の回転角によって得ら れた水平変位の関係を図-11 に示す。破壊状況 は,静的加力実験の場合と概ね同様で,全試験 体共に曲げモーメント作用下の圧縮域の圧壊に よる破壊形式であった。なお,試験体中央部で の炭素繊維シートの付着しわが見られないこと から,せん断ひび割れの発生はないと判断した。 また,全体変位に対する回転変位の割合が90% 以上であることから,曲げ破壊が支配的な挙動 であり,炭素繊維補強はコンクリートの圧縮域 の圧縮強度及び靭性の向上に寄与したと考えら れる。

### 3.3 試験体の剛性(動的衝撃加力実験)

変位 20mm までの試験体剛性-変位曲線を図 -12 に示す。初期剛性は図からは判断しにくい が,最大値をみると概ね, RD-1 が 33、RD-2 が 28, RD-3 が 25kN/mm であり,損傷前の計算値 (87~99kN/mm)の 30~40%の剛性となり,静的 加力実験と同様に剛性に関しては補強効果がみ られない。

### 3.4 最大耐力(動的衝撃加力実験)

各せん断強度計算値と実験値及び曲げ強度計 算値<sup>3),4),5)</sup>を表-5に、補強前の曲げ強度計算値 に対する各せん断強度計算値(縦軸:せん断余裕 度)を図-13に、補強前後の荷重-変位曲線の比 較図を、各試験体について図-14~16に示す。 ここで、炭素繊維シートは、せん断補強量に換 算し、プレストレス力は軸力に換算して、せん 断強度を算定している。せん断余裕度は、補強 前では0.80~1.22であったが、補強後は1.47~ 1.65と大きく向上した。最大荷重は、全ての試 験体でせん断強度計算値より低く、86~97%程 度であり、約540kNを超え、炭素繊維補強によ り補強前のパラメータの影響による耐力差は無 くなり、曲げ耐力に支配されたと考えられ、十



表-5 せん断破壊荷重比較

試験体			せん断頭	40,234			
		学会終局 指針A法	New-RC 式	学会終局 指針B法	PC基準	曲け強 度(kN)	夫颜恒 (kN)
RD-1	補銷	304	314	389	382	379	439
	補餓後	625	585	558	558	379	540
RD-2	補銷	304	317	389	382	379	524
	補餓後	625	560	558	558	379	536
RD-3	補銷	315	345	480	472	395	507
	補餓後	636	627	648	648	395	563



分な補強効果が得られた。最大耐力時の変形は, 1/22~1/18rad でコンクリート強度の高い RD-3 でやや大きく,補強前に比べ3~6倍となり,靭 性が向上した。その後,制御最大変位である 1/17rad で耐力低下がみられた。

#### 4. 静的加力実験と動的衝撃加力実験の比較

静的加力実験の RS-3 と動的衝撃加力実験の RD-1の荷重-変位曲線の比較図を図-17に示す。

初期加力付近の荷重-変位曲線は,動的衝撃加 力の場合では,曲線形状が凹凸でばらつきが大 きいが,大局的に見て静的加力の場合とそれ程 相違していない。



静的加力実験のRS-3は,最大荷重が395kN(変 位49.8mm,変形角1/32rad)で,衝撃加力実験の 最大荷重は563kNであり,衝撃加力実験の方が 1.43倍と大きな値を示し,変位についても1.83 倍の値となった。全体的に動的衝撃加力下では, 耐力及び変形性状が優る傾向が認められる。

# 5. まとめ

本報で得られた結果を以下に示す。

- 補強前後の比較では、最大荷重は補強後上 昇し、ほぼ曲げ耐力に支配され、補強効果 が認められた。また、動的衝撃加力では、 静的加力の約 1.4 倍の耐力上昇となった。
- 2)変形性状では、柱頭及び柱脚部の回転角に よる曲げ変形が卓越し、炭素繊維補強によ って曲げ圧縮ゾーンが補強され、靭性が大 幅に向上した。
- 3) 本実験の静的加力と動的衝撃加力の破壊の 比較では、曲げ圧縮ゾーンの炭素繊維の出 隅部の破断とコンクリートの圧壊であり、 破壊性状の相違は認められない。



図-17 荷重−変位曲線

# 謝辞

東邦化工建設株式会社の渡辺俊雄氏には,試験体 製作に多大な協力と炭素繊維シート補強に関する 貴重なアドバイスを頂きました。また,実験では, 本研究室の大学院生加藤豪氏,宮脇毅氏に協力頂 きました。ここに感謝の意を表します。

本研究は,平成10年度文部省学術フロンティア 推進事業の重点研究(明治大学理工学研究科)及び 平成12年度文部省科学研究費補助金(基盤研究 (A)(2),課題番号(12305036),研究代表者(狩野芳一) によった。

#### 参考文献

- 白石一郎,高木仁之ほか:引張軸力を受ける RC柱のせん断抵抗機構に関する研究,コンク リート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1045-1050, 2001.6
- 2) 滝澤一孝,高木仁之:衝撃力を受ける PC 梁の 挙動に関する実験的研究,コンクリート工学 年次論文集, Vol.22, No.3, pp.859-864, 2000.6
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終 局強度型耐震設計指針・同解説,1990
- 日本建築学会:プレストレストコンクリート 設計施工規準・同解説,1998
- 5) (財)国土開発技術研究センター:鉄筋コンクリ ート造建物の超軽量・超高層化技術の開発, 平成4年度構造性能分科会報告書