論文 炭素繊維補強された被災 RC 柱の動的挙動に関する実験的研究

三原 愛未^{*1}·高木 仁之^{*2}·滝澤 一孝^{*3}

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 RC 柱部材にこの補強方法 を施し,動的加力実験を行い,動的加力下のせん断強度の検討をした。試験体は,主筋の付着 性状の影響における炭素繊維補強効果を見るため,付着を有するものと無いものについて検討 した。破壊性状は,主筋の付着の有無に対し相違したが,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,既往のせん断強度式との比較においても充分な効果がある と判断された。

キーワード: RC 柱,炭素繊維,補強,動的挙動,動的加力

1. はじめに

本研究は、動的加力下の耐震補強の耐震性能 に関するもので、ここでは、柱のせん断補強と して、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行ってい る。文献1は、筆者らの行った PC 梁に関する 同様な実験であり、炭素繊維補強により靱性と 強度の向上が確認されたが、破壊性状が曲げ降 伏先行型に支配され、動的加力下の炭素繊維補 強によるせん断強度を検討するには至っていな い。本研究は、RC 柱の炭素繊維補強による動 的加力下のせん断強度に対する補強効果を目的 に検討を行ったもので、前もって載荷し、損傷 させた柱にこの補強を施し、静的及び動的加力 実験を行い耐震性能について検討した。

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 RC 柱 6 体を炭素繊維シート補強し,静的実験(2 体)と動的加力実験(4 体)を行う。その中で主筋 の付着性能が著しく劣化していると想定したも のと通常の付着を有するものとの影響を検討し た。動的加力実験では,いずれの試験体も変形 角 1/100rad 時の速度が 60kine レベルに達する高 速加力を計画した。

2.1 試験体概要

補強前の試験体概要を表-1 に、補強前の試 験体配筋図一例を図-1 に示す。共通因子とし て、試験部は 300×300mm の正方形断面で、試 験体は、柱主筋に通常付着がある A タイプ (8-D22)と主筋の付着が著しく劣化したものを 想定し、主筋にグリースを塗りビニールホース で包みコンクリートと鉄筋間の付着作用を除去 した B タイプ(8-23 ϕ)で構成されている。変動 因子は、コンクリート強度 36、60N/mm²、せん 断補強筋比 0.39、0.61%で、動的載荷速度は 60kine とする。

2.2 使用材料

各使用材料の力学的性質を表-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 303g/m², シート引張強度 4325N/mm²,シート引張弾性率 236×10³N/mm² 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/mm² である。

^{*1 (}株)九建設計 工修 (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㈱技術研究所 (正会員)

表-1 試験体概要

タイプ	試験体名	コンクリート 強度 [N/mm ²]	せん断 補強筋比 [%]	載荷 速度 [kine]		
А	CFD-36-39-H	36	0.39			
	CFD-36-61-H	50	0.61	60		
	CFD-60-39-H	60				
	CFD-36-39-0		0.30	0		
р	CFR-36-39-H	36	0.39	60		
D	CFR-36-39-0			0		
 試験体共通因子 ・断面:幅×せい[mm]=300×300 ・試験区間長[mm]:1200 ・せん断補強筋:2-D6 (SD295) ・主筋:異形PC鋼棒8-D22(B種1号) PC鋼棒8-23 φ (B種1号) ・せん断スパン比:2.0 						



2.3 補強前試験体破壊状況

補強前の試験体最終ひび割れ状況を後掲の図 -4に示す。ひび割れ図は左側から,試験体左側 面,正面,右側面と展開した図である。付着の ある試験体は,試験体正面上下部にせん断ひび 割れ及び主筋に沿った付着割裂ひび割れが上下 方向に伸展している。また,側面には水平方向 の曲げひび割れと鉛直方向に伸びた付着割裂ひ び割れにより格子状に広がっている。ひび割れ 幅は,付着割裂ひび割れが CFD-36-39-H で最

表-2 使用材料の力学的性質

コンクリート						
試験体	設計 強度 [N/mm ²]	圧縮 強度 [N/mm ²]	ヤング率 [×10 ⁴ N/mm ²]			
CFD-36-39-H CFD-36-61-H	36	40.66	4.08			
CFD-60-39-H	60	59.26	4.59			
CFD-36-39-0		38.07	4.38			
CFR-36-39-H	36	42.14	4.73			
CFR-36-39-0		41.85	4.05			
鋼 材						
種別	降伏 強度 [N/mm ²]	引張 強度 [N/mm ²]	ヤング率 [×10 ³ N/mm ²]			
異形鉄筋D6	446	564	178.6			
異形PC鋼棒D22	991	1134	187.9			
PC鋼棒23 φ	1034	1126	188.1			

大 4.6mm, せん断ひび割れが CFD-36-39-0 で最 大 4.9mm である。他の試験体(CFD-60-39-H, CFD-36-61-H)では, ひび割れ幅は小さく約 1mm 程度にとどまっている。曲げ圧縮部の圧壊は, 下部位置で生じているが, CFD-36-39-0 で軽微な ものとなっている。付着のない試験体では,付 着がある場合と大きく相違し,せん断ひび割れ 及び付着割裂ひび割れは,ほとんど発生してい ない。曲げひび割れである水平方向のひび割れ が主要であり,ひび割れ幅は, CFR-36-39-H で最 大 3.5mm, CFR-36-39-0 で 1.5mm となっている。 曲げ圧縮部の圧壊は,動的加力した CFR-36-39-H において,付着のあるものに比べ大きく上下端 部で発生している。

各試験体の補強前の荷重-変位曲線を後掲の 図-6に示す。各試験体ともに耐力の確認までの 変形で制御しているが,動的加力では変形角 1/50rad を超えるように加力装置の初期設定を行 い,ほぼ 1/50rad(δ =24mm)の最大変形である。 静的加力では,最大荷重時変形は,付着の有無 に関わらずほぼ 1/100rad(δ =12mm)と同様であ るが,付着のない試験体ではその後,急激な耐 力低下がなかったため,約 1/50rad(δ =24mm)ま で加力を継続している。

2.4 補強方法

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

加力装置を図-2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。動的加力では、炭素繊維補強 による高靱性化の影響を考慮し,変形角 1/24rad(δ=50mm)を超えるように加力装置の初 期設定を行い、変位制御のランプ波 (100mm/0.001sec)を1回与える。静的加力では, 同装置を用い、破壊に至るまで単調載荷とする。 測定位置を図-3に示す。測定は、アクチュエー ターの変位・荷重,試験体水平変位,部材端部 の伸縮について行い,動的加力実験では,加力 ビーム・上スタブの加速度についても測定を行 う。測定データは、動的加力実験では 0.001sec 刻みの時刻歴として、静的加力実験ではステッ プ毎に記録する。なお、補強前の実験も同様の 載荷方法及び測定方法である。

3. 実験結果

3.1 最大応答値

動的加力実験を行った試験体の速度-変位曲 線を図-4に示す。図中の〇印は最大荷重点を示 す。また、制御最大変位(最大変位)と試験体最大 耐力時までに生じた最大速度、加速度、試験体 荷重を実験結果として表-3に示す。各試験体と も変位 5mm 前後で約 50kine,変位 10~15mm で 70~80kine となっている。また、加速度は各試 験体とも 1~2mm で 6000gal 前後の値を示す。な お、試験体荷重は、アクチュエーター荷重より 質量慣性力 $F=m\alpha$ (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 し引いて算出している。



図-2 加力装置



3.2 破壊状況

補強前後の破壊状況の一例を図-5に、補強後 の破壊状況凡例を表-4に示す。主筋に付着があ る A タイプは、下側圧縮部分で炭素繊維シート の浮きやはらみだしが生じているが、シートの 破断は見られない。しかし、写真-1で見られる ように、中央部の広範囲に炭素繊維の破断・め くれ上がり・浮きが生じている。また、破断し た炭素繊維の内部コンクリートには、斜め方向 の無数のせん断ひび割れとひび割れ面でのずれ による圧壊が確認された。これに対し、主筋に 付着のない B タイプでは、上下圧縮部分におい て炭素繊維の破断等が生じたが、損傷の幅は小 さく、また、補強前に損傷が生じなかった中央 部は、補強後も健全であった。



図-4 速度-変位曲線





CFD-36-39-0





CFR-36-39-0

表-3 最大応答値一覧

試験体	最大 変位 [mm]	最大 速度 [kine]	最大 加速度 [gal]	最大 荷重 [kN]
CFD-36-39-H	48.5	76.7	5900	522.9
CFD-36-61-H	45.7	78.5	12100	611.5
CFD-60-39-H	44.8	68.9	6500	683.4
CFD-36-39-0	92.1	-	-	362.4
CFR-36-39-H	50.5	84.3	6200	323.5
CFR-36-39-0	45.7	-	-	202.8





CFD-36-39-H





CFR-36-39-H

図-5 破壊状況(左:補強前,右:補強後)

表-4 補強後破壊状況凡例



載荷速度による影響は,付着のない試験体では 見られないが,動的加力を行った付着のある試 験体では,ひび割れが試験体中央部付近にやや 集中している。



写真-1 破壊状況(CFD-36-39-H)



図-6 荷重-変位曲線

表-5 初期剛性一覧

試驗体	初期剛性[kN/mm]		基 十 刻
时心 例 平	補強前	補強後	垍八平
CFD-36-39-H	56	62	1.1
CFD-36-61-H	56	84	1.5
CFD-60-39-H	75	77	1
CFD-36-39-0	48	44	0.9
CFR-36-39-H	47	68	1.4
CFR-36-39-0	17	49	2.9

3.3荷重-変形関係

静的加力時及び動的加力時における補強効果 を付着の有無別に対比した試験体の荷重-変位 曲線を図-6 に、初期剛性一覧を表-5 に示す。 初期剛性は、損傷させていない補強前の剛性に ほぼ回復している。荷重-変位曲線から、補強後 は荷重及び変形ともに優っていることが確認で きる。最大荷重は、補強前に比べ動的加力では、 1.34~1.73 倍、静的加力では1.55~1.79 倍の増大 となっており、補強効果が認められる。最大荷 重時の変形は、動的加力では、補強前の18~ 22mm に対して補強後が27~38mm と1.5~1.7 倍、同様に静的加力でも、補強前の13mm に対 して補強後が25mm~33mmと1.9~2.6 倍となり、 靱性が向上している。また、静的加力に対する 動的加力の耐力比は、付着のあるCFD-36-39 で は1.44 倍、付着のないCFR-36-39 では1.59 倍と なり、それぞれに耐力の増大が見られ、炭素繊 維補強の載荷速度による劣化は認められず良好 である。



4. 既往のせん断強度式との適合性

既往のせん断強度計算値として、日本建築学 会の塑性理論式である終局強度型A法・B法²⁾, 靭性保証型³⁾及び New-RC 式⁴⁾を取り上げ,計算 値に対する実験値の比率を付着の有無により図 -7,8に示す。なお、補強後のせん断強度計算値 は、付着のある試験体では炭素繊維をせん断補 強筋量として加味し、付着のない試験体ではア ーチ機構耐力のみとしている。各強度式との適 合性は,静的加力では,コンクリート強度有効 係数を考慮していない B 法で高く評価している が、B法を除く他式において、付着のある試験体 では補強前の実/計が0.76~0.84,補強後は0.90 ~1.03 となり良好である。また、付着のない試 験体では補強前が 0.92~1.09(B 法除く)で良好で あるが、補強後は 1.64~1.95(B 法除く)で過小評 価され,逆にB法が0.88と適合性が見られる。 これは、破壊状況からも付着のない場合の破壊 が,端部の圧壊により決定し,炭素繊維補強が コンクリートの圧縮拘束効果として加わったこ と及び中央部にひび割れが生じずコンクリート の圧縮強度劣化があまりないことに起因すると 考えられる。次に、動的加力では、いずれの式 も比率は、ほぼ 1.0 を超え安全側の評価を与え、 付着のある試験体では,補強前が 1.13~1.31, 補 強後が 1.19~1.65(B 法除く)の増加となり、補強 後の比率が一層高い。また,動的加力のB法は, 補強前において非常によく適合し、補強後も過 小評価にあるが,他式に比べばらつきが小さく、 動的加力下ではB法の適合性がよいといえる。



5. まとめ

本報で得られた結果を以下に示す。

- 破壊性状は、付着のある試験体では、補強前 の付着割裂状のひび割れから補強後のせん 断状ひび割れに変わったが、付着のない試験 体は変化がない。
- 最大荷重及び最大荷重時変形は、炭素繊維補 強により増大し、その傾向は静的加力より動 的加力で大きい。
- 3) 既往のせん断強度式の適合性は、動的加力下 において、コンクリート強度有効係数を考慮 していない B 法で適合性がよい。

【参考文献】

- 三原愛未,高木仁之,滝澤一孝: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,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2,pp1543-1548,2002.6
- 2) 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
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱 性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 4) (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化・超高層化技術の 開発,平成4年度構造性能分科会報告書

【謝辞】東邦化工建設株式会社の渡辺俊雄氏には,試験体製作に協力を頂きました。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(野口弘行))によった。