

論文 粘弾性ダンパーを用いた既存鉄筋コンクリート造骨組の耐震補強に関する実験的研究

滝口 泰^{*1}・田才 晃^{*2}・益尾 潔^{*3}・太田 寛^{*4}

要旨: 既存建物に対する補強計画および補強工事が建物の使用条件に及ぼす影響が少ない制震装置による耐震補強の有効性を実験的に検討した。制震装置として粘弾性ダンパーを用いた鉄筋コンクリート造骨組に対する動的載荷実験により、各載荷での1回目の振幅では剛性、耐力の上昇が認められ、繰返し時には減衰性能（エネルギー吸収能力）の向上を確認できた。また、層間変形角 $5.0 \times 10^3 \text{rad}$ 以下では、補強後の繰返し時の履歴性状を既存骨組とダンパーの履歴の足し合わせでほぼ予測できることを示した。
キーワード: 耐震補強, 粘弾性ダンパー, 炭素繊維シート, 動的載荷実験

1. はじめに

阪神・淡路大震災以降、既存鉄筋コンクリート造建物の耐震補強の検討が急務の課題となっている。従来からの主要な耐震補強法としては、増設壁補強、および柱、梁のせん断補強があるが、既往の補強法による場合、建物の使用条件から補強計画や補強工事に多大な制約を受けることがある。そのような制約を軽減する方法として、近年研究が進められている制震装置を既存骨組内に取付けることによって、地震時に生じるエネルギーを吸収し、建物の耐震安全性を確保する方法が考えられる。本研究では、制震壁として粘弾性ダンパーを用いた場合の鉄筋コンクリート造骨組の動的載荷実験を行い、制震装置による補強法の有効性の検討を行う。また、より高い耐震性能が要求される建物を想定した、柱のせん断補強として炭素繊維（以下「CFRP」）シートと併用した場合についても検討する。

2. 実験計画

2.1 実験計画の概要

- *1 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻（正会員）
- *2 大阪工業大学助教授 工学部建築学科 工博（正会員）
- *3 (財)日本建築総合試験所 工博（正会員）
- *4 (株)鴻池組 大阪本店設計部（正会員）

実験計画の一覧を補強方法別に表-1 に示す。

試験体 FO および FO+CF は制震補強試験体 FO+V および FO+CF+V に対する比較用の骨組試験体であり、試験体 FO+CF および FO+CF+V は CFRP

シートにより柱を補強した試験体である。

表-1 実験計画の一覧

試験体名	CFRP補強	制震補強
FO	×	×
FO+CF	○	×
FO+V	×	○
FO+CF+V	○	○

○：有，×：無，試験体数：計4体

2.2 試験体の概要

試験体の形状寸法を図-1 に示す。いずれの試験体も、無補強の場合、柱せん断破壊型を想定した断面寸法 250mm × 250mm、内法高さ 750mm の柱を有する門形骨組である。各試験体ともに、主筋は 8-D16+4-D13（SD295A, $p_g=3.36\%$ ）、帯筋は D6（SD295A, $p_w=0.21\%$ ）であり、帯筋端部のフック形状は 135° とした。上部梁は柱崩壊となるよう剛強なものにした。コンクリートの設計基準強度は $F_c=21\text{N/mm}^2$ である。

CFRP 補強の試験体については補強後、曲げ降伏型になるように設計を行った。補強方法は柱断面の隅角部を半径 30mm の円弧に仕上げたうえで柱全面に CFRP 使用量 200g/m^2 のものをエポキシ樹脂を含浸させながら 1 層巻き付けた。なお、CFRP シートの巻き付け端部には 150mm の重ね代を設けた。

制震補強の試験体の骨組内に取付けた制震装置(粘弾性ダンパー)の詳細図を図-2 に示す。補強後の建物の使用性をなるべく損なわないように、取付面積を骨組開口部の約 1/3 に留めるように計画した。粘弾性ダンパーは 3 枚の鋼板(厚さ 6mm)間に設けた 2 層の空隙(層厚さ 3mm)に粘弾性体(ジエン系ゴム材料)を充填したもので、試験体の水平変位に伴って粘弾性体にせん断ひずみが生じるよう両端ピン支持された 2 本の支柱により試験体に取り付けた。すなわち、せん断面積 $A=3075.3\text{cm}^2$ 、せん断隙間 $d=0.3\text{cm}$ の 2 面せん断型である。ダンパーの取付は、躯体にアンカーボルトにより固定し、躯体との隙間にエポキシ樹脂を充填した。

試験体(柱、上梁)に使用したコンクリートの材料試験結果を表-2.1 に、鉄筋の引張試験結果を表-2.2 に示す。また、CFRP 補強に用いた CFRP シートの引張試験結果を表-2.3 に示す。

2.3 制震装置履歴特性

実験に用いたダンパーの履歴特性を確認するため、実験終了後試験体両側の柱を切断し制震装置のみの状態で振動数 2Hz の加力を行った。得られた層せん断力 Q -ダンパーせん断変形 δ_d 関係を図-3 に実線で示す。加力装置、試験体の安定性が悪く、小振幅のみの载荷となったが、履歴ループはほぼ楕円形になっていることが確認された。

なお、図中の破線は後述する力学モデルによる履歴ループを表す。

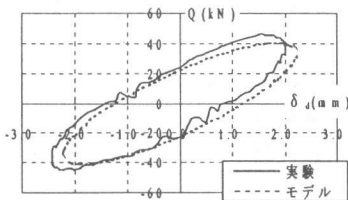


図-3 ダンパー単体履歴

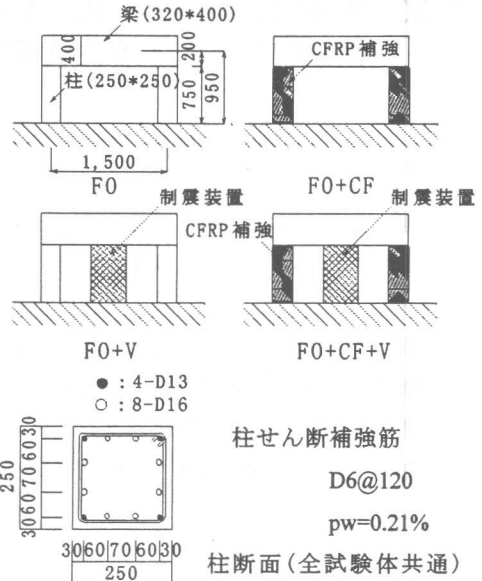


図-1 試験体の形状寸法(単位: mm)

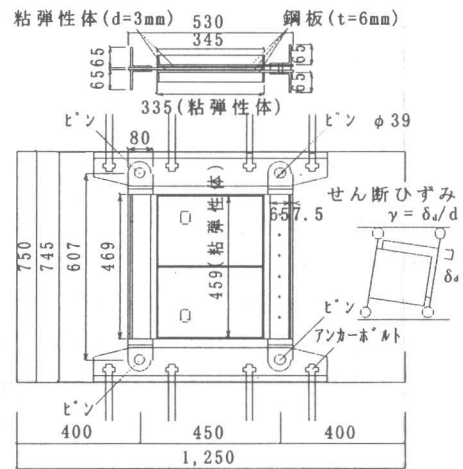


図-2 制震装置(ダンパー)詳細図(単位: mm)

表-2.1 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時のひずみ度 ($\times 10^{-3}$)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
29.1	2.86	2.30	2.49

表-2.2 鉄筋の引張試験結果

鉄筋径 (材質)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
D6 (SD295A)	355	522	27
D13 (SD295A)	361	517	28
D16 (SD295A)	343	502	24

表-2.3 CFRP シートの引張試験結果

使用量	積層数	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性係数 ($\times 10^3$ N/mm ²)
200g/m ²	1層	3974	2.51

3. 実験方法

3. 1 載荷方法

載荷は図-4 に示すように、最大容量静的 981kN(100tf)、動的 883kN(90tf)のサーボアクチュエーターを用いて上部梁の中心軸に一致する方向に水平力を加えた。粘弾性ダンパーを取付けない試験体 FO および FO+CF は静的繰返し加力とした。粘弾性ダンパーの挙動は載荷速度に依存するためダンパーを取付けた試験体 FO+V および FO+CF+V は動的な載荷を行った。各試験体とも軸力は加えなかった。サーボアクチュエーターの自重が試験体に作用しないように図-4 に示すようにカウンターウェイトを取付けた。

静的載荷を行った試験体 FO, FO+CF の載荷履歴は、図-5 に示すように、各サイクルにおける層間変形角 R の上下限値が、 $(\pm 2.5, 5, 10, 5, 15, 20, 10, 30, 40, 60) \times 10^{-3} \text{rad.}$ となるように、正負繰返し載荷を3回ずつ行った。ただし、小振幅に戻る場合は繰返しを2回ずつとし、試験体 FO においてはこの載荷は行っていない。

動的載荷を行った試験体 FO+V, FO+CF+V は静的載荷で行った変形に対応させ層間変形角 R が、 $\pm (2.5, 5, 10, 5, 15, 20, 10, 30, 40, 60) \times 10^{-3} \text{rad.}$ となるように各振幅において振動数 2Hz, 1Hz の順に 2Hz では 40 サイクル, 1Hz では 25 サイクルの正弦波加振をした。ただし、載荷装置の制御特性から目標変位振幅に達するまで漸増繰返し加力となり、サイクル数は漸増加力時を含めた数である。なお、サーボアクチュエーターの性能上 2Hz の加力は $R=10 \times 10^{-3} \text{rad.}$ までとし、 $R=30, 40 \times 10^{-3} \text{rad.}$ では 0.5Hz, $R=60 \times 10^{-3} \text{rad.}$ では 0.3Hz のみの加力を行った。

3. 2 測定方法

変位測定項目は層間変形角（水平変形量）、柱軸方向変形量とし、制震装置を取付けた試験体については粘弾性ダンパーのせん断ひずみも測定した。

ひずみ度測定項目は柱主筋および柱せん断補強筋とし、CFRP 補強の試験体は CFRP シート

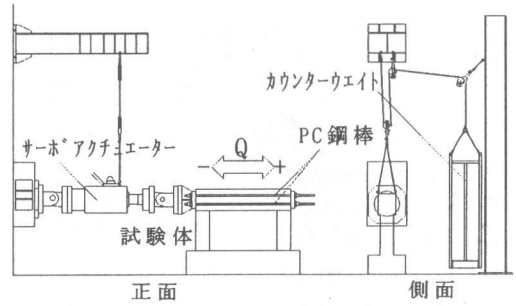


図-4 加力装置

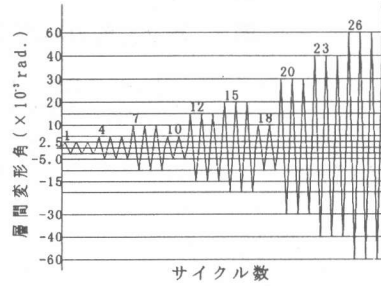


図-5 載荷履歴(静的載荷)

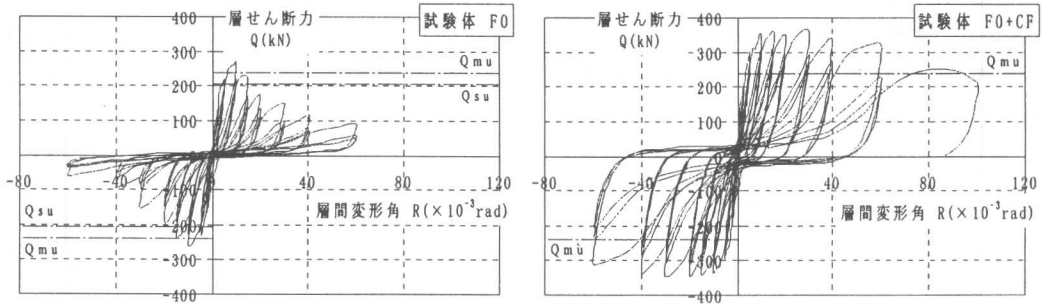
のひずみを測定した。また、制震装置を取付けた試験体については加振時に軸力が作用するとと思われる支柱部のひずみも測定した。

水平力の検出にはサーボアクチュエーターに内蔵されたロードセルを用いた。また、制震補強試験体については粘弾性体の温度を測定した。

4. 実験結果

4. 1 復元力特性と破壊性状

静的な載荷を行った試験体 FO と FO+CF の層せん断力 Q と層間変形角 R の関係を図-6 に示す。また、図中に耐震診断基準式¹⁾による終局耐力を合わせて示す。試験体 FO については、柱のせん断補強筋、主筋の引張降伏が生じた後、7 サイクル目 ($R=10.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ 時)において最大耐力(275kN)に達した。それ以降、柱のせん断ひび割れ、付着割裂ひび割れが進展し、耐力が大きく低下した。試験体 FO+CF は、柱主筋の引張、圧縮降伏が生じた後、20 サイクル目 ($R=30.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ 時)に最大耐力(361kN)に達した。それ以降耐力を保持したが、 $R=60.0 \times 10^{-3}$



注： Q_{μ} 、 Q_{su} ：耐震診断基準式による曲げ，せん断耐力（梁のせん断力を無視。）

図-6 層せん断力 Q -層間変形角 R 関係(試験体 FO, FO+CF)

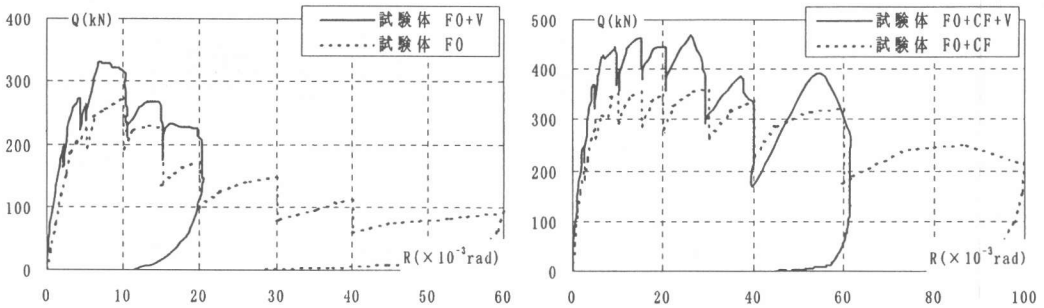


図-7 Q-R 関係の包絡線の比較

rad.で CFRP シートが破断し、耐力が低下した。試験体 FO と比較すると耐力，靱性共に大きく改善されており，CFRP シートによる補強の有効性が認められる。

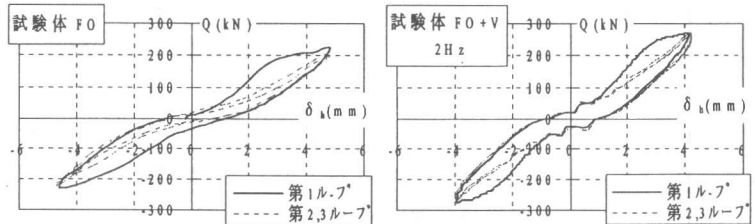


図-8 層せん断力 Q -水平変形量 δ_h 関係 ($R=5.0 \times 10^{-3}$ rad.)

制震補強試験体と対応

する比較試験体の Q - R 関係の包絡線を比べて図-7に示す。試験体 FO+V については、 $R=10.0 \times 10^{-3}$ rad.の载荷時に $R=6.0 \sim 6.6 \times 10^{-3}$ rad.で主筋，せん断補強筋が引張降伏し、 $R=6.9 \times 10^{-3}$ rad.で最大耐力(330kN)に達した。それ以降は試験体 FO と同様に耐力が低下した。FO+CF+V では、 $R=3.1 \times 10^{-3}$ rad.で主筋が引張降伏し、 $R=30.0 \times 10^{-3}$ rad.の载荷時に $R=25.9 \times 10^{-3}$ rad.で最大耐力(465kN)に達した。CFRP シートの破断は、続く $R=40.0 \times 10^{-3}$ rad.の载荷時に生じた。最大耐力以後の耐力低下も FO+CF と同様、小さかった。

試験体 FO と FO+V, FO+CF と FO+CF+V と

の比較を行うと，初期剛性がそれぞれ 42%，20%，最大耐力がそれぞれ 55kN，104kN 増加し，最大耐力時部材角ではそれぞれ 3.1，4.1 $\times 10^{-3}$ rad.減少した。

4. 2 エネルギー吸収性状

試験体 FO, FO+V (2Hz) の $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad. (水平変形量 $\delta_h=4.8$ mm)での Q - δ_h 関係を図-8に示す。制震補強試験体 (FO+V) の第 1 ループは目標変位振幅到達時のループとし，なおかつ，第 1 ループに限り目標変位到達までの包絡線を含めたループとした。試験体 FO と FO+V を比較すると，FO+V は第 2 ループ以降でも大きい履歴面積を維持していることが確認できる。

各試験体の $R=2.5, 5, 10, 15, 20 \times 10^3 \text{rad}$ における第 1, 3 ループでの履歴吸収エネルギー W , 等価粘性減衰定数 heq を比較してそれぞれ図-9, 図-10 に示す。

試験体 FO+V, FO+CF+V では $R=2.5, 5, 10 \times 10^3 \text{rad}$ においては 2Hz, $R=15, 20 \times 10^3 \text{rad}$ においては 1Hz での加振による値を示す。FO+V, FO+CF+V とともに第 3 ループではどの変位でも W , heq の上昇が見られ、ダンパーによる

減衰性能の効果が確認された。しかし、第 1 ループでは試験体 FO+V, FO+CF+V それぞれ $R=5.0, 10.0 \times 10^3 \text{rad}$ 以前での W , heq の変化は見られなかった。

5. 補強効果の検討

5. 1 粘弾性ダンパーの評価

粘弾性ダンパーの評価法として曾田ら²⁾により提案されている粘弾性ダンパーの振動数依存性を定量化しそれをモデル化する手法を用いると、粘弾性体として用いたジエン系ゴム材料でのランダム加力による単体実験結果から、振動数 0 ~ 3Hz せん断ひずみ 20% ~ 70% までの範囲では等価粘性減衰係数 Ceq , 等価剛性 Keq はそれぞれ以下の式(1), (2)で表すことができる。

$$Ceq = A' \left(4.6 \times \frac{0.037}{1 + \omega^2 \times 0.037^2} + 2.1 \times \frac{1}{1 + \omega^2 \times 1^2} \right) \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

$$Keq = A' \left(4.6 \times \frac{0.037^2 \omega^2}{1 + \omega^2 \times 0.037^2} + 2.1 \times \frac{1^2 \omega^2}{1 + \omega^2 \times 1^2} \right) \times \frac{1}{1000} \quad (2)$$

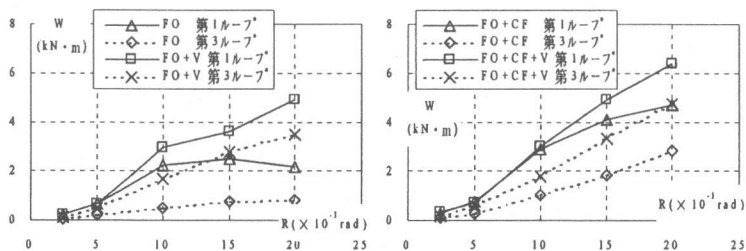


図-9 履歴吸収エネルギー W -層間変形角 R 関係

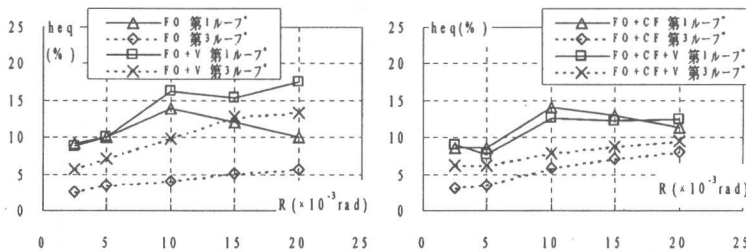


図-10 等価粘性減衰定数 heq -層間変形角 R 関係

ただし、

$$A' = \frac{A}{d} \times \left(\frac{W_0}{h_0} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 ω : 角振動数 (rad/s)

A : 粘弾性ダンパーせん断面積 (cm^2)

d : 粘弾性ダンパーせん断隙間 (cm)

W_0 : 粘弾性ダンパー設置幅 (cm)

h_0 : 粘弾性ダンパー設置高さ (cm)

ダンパーの履歴を近似的に楕円にみなすと式

(1) ~ (2) を用いて下式で表すことができる。³⁾

$$Q = Keq \times \delta_a \pm Ceq \times \omega \sqrt{a^2 - \delta_a^2} \quad (4)$$

ここで、 a : ダンパーせん断振幅 (cm)

δ_a : ダンパーせん断変形 (cm)

なお、振幅依存性、温度依存性に関しては実験結果より得られた基準値(せん断ひずみ 70%, 粘弾性体温度 20℃)に対する補正係数により式(1), (2)に考慮することとする。

図-3 に示した試験体に用いた制震装置での履歴をこの力学モデルにより描いてみると同図の破線で表され、制震装置の履歴がこの力学モデルにより模擬できることを示している。

5. 2 ダンパー補強効果の検討

式(1) ~ (4) による粘弾性ダンパーの履歴ルー

ブを水平変形量 δ_h とダンパーせん断変形 δ_d との関係による補正を実験値より行った上で比較骨組試験体の履歴と足し合わせ、ダンパー補強試験体の履歴との比較を行う。図-11に $R=5.0, 10.0 \times 10^3 \text{rad}$ における第1ループおよび第3ループ (1Hz) の履歴を示す。また、表-3 に比較骨組試験体と力学モデルとの足し合わせによる履歴から求めた

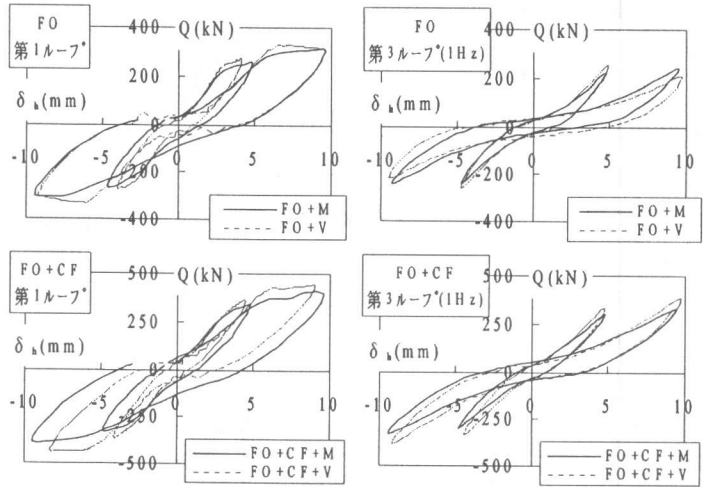


図-11 Q- δ_h 関係 (M:ダンパー力学モデル)

表-3 等価粘性減衰定数 heq , 等価剛性 Keq

等価剛性 Keq , 等価粘性減衰定数 heq と制震補強試験体の履歴から求めた Keq , heq の値を示す。図-11, 表-3 より試験体 FO+M, FO+CF+M (M:ダンパー力学モデル) とともに剛性が低く

R $\times 10^3 \text{rad}$	振動数	ループ	FO+M		FO+V		FO+CF+M		FO+CF+V	
			heq %	Keq kN/mm	heq %	Keq kN/mm	heq %	Keq kN/mm	heq %	Keq kN/mm
2.5	2Hz	1	11.1	71.4	8.7	90.7	10.9	97.4	9.0	105.9
		3	5.0	69.0	5.6	87.0	6.2	92.3	5.5	102.8
5.0	1Hz	1	4.5	68.2	4.9	78.7	5.3	90.4	5.1	90.4
		3	12.8	52.5	10.1	63.3	11.6	72.4	7.6	79.6
10.0	2Hz	1	7.3	47.4	7.1	61.3	6.5	64.6	6.2	77.8
		3	6.3	46.4	6.6	51.5	6.1	62.7	5.9	68.7
5.0	1Hz	1	16.5	32.5	16.3	32.2	17.0	40.9	12.6	48.5
		3	8.7	25.5	9.8	28.8	10.0	35.8	7.9	45.9
10.0	1Hz	1	8.4	25.2	11.6	21.5	8.7	34.9	7.2	40.0
		3								

評価され、第1ループでは履歴面積、 heq が過大評価される傾向にある。しかし、第3ループでの $R=5.0 \times 10^3 \text{rad}$ 以下においてはほぼ近い履歴形状および heq が示されており、繰返し時の制震補強後の履歴性状は、既存骨組とダンパー単体の履歴特性を足し合わせることでほぼ予測できる。

6. まとめ

粘弾性ダンパーによる制震補強の効果について本実験により得られた知見を以下に示す。

- (1) 各載荷での1回目の振幅では、粘弾性ダンパーによる補強で耐力、剛性ともに大幅に上昇した。
- (2) 繰返し時においては減衰性能(エネルギー吸収能力)の向上が顕著に認められ、層間変形角 $R=5.0 \times 10^3 \text{rad}$ 以下においては、制震補強後の履歴性状を既存骨組とダンパー単体の履

歴特性を足し合わせることでほぼ予測できる。

- (3) CFRP 補強との併用によっても無補強試験体と同様に制震補強の効果を発揮する。

謝辞

本実験に供した試験体の製作にあたり、竹沢建設(株)、ショーボンド建設(株)、昭和電線電纜(株)に御協力を頂き、また実験の実施にあたり、早稲田大学曾田研究室石倉敦氏、渡邊新之介氏、大阪工業大学田才研究室上西彰氏、佐古浩彰氏、金子和成氏らの協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) (財)日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 1990
- (2) 曾田五月也, 高橋雄司: ランダム加力による粘弾性ダンパーの振動数依存性の定量化, 日本建築学会構造系論文集, No.498, pp.43-49, 1997.8
- (3) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981