

# 論文 混合より線を用いた外付け鉄骨フレームによる耐震補強工法

田中 佑樹<sup>\*1</sup>・佐藤 尚隆<sup>\*2</sup>・坂下 雅信<sup>\*3</sup>・河野 進<sup>\*4</sup>

**要旨:** 降伏強度の異なる素線を組み合わせた混合より線を用いた外付け耐震補強工法の耐震補強性能を確認する目的で、実存する既存不適格建築物を模した RC 躯体を補強し、擬似動的載荷実験を行った。実験で得られた履歴ループ及び等価粘性減衰定数より、本補強工法による応答変位低減効果を確認した。また、この試験体の力学的挙動を模擬する骨組解析モデルを構築し、実験結果を追跡できることを確かめた。

**キーワード:** 耐震補強, 混合より線, ダンパー, 居ながら

## 1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災において旧耐震設計法などにより建てられた既存不適格建物が甚大な構造被害を受けた。このような既存不適格建物の存在は今後発生する可能性の高い大地震時に大きな人的、経済的被害を及ぼすであろうと予測される。阪神・淡路大震災を機により既存不適格建物の施工性や経済性に優れた耐震補強法を早急に開発する必要性が生じている。

特に近年、学校校舎や集合住宅においては、建物を使用しながらの耐震補強工事の需要が高く、使用者が居ながらの施工することを可能とする外付け耐震補強工法が多種類開発されている。また、制振補強など建物自体の地震応答を低減する補強工法も多種類開発されている。本研究は、これらの耐震補強の一つとして、建物を使いながらの施工が可能かつ、建物の応答変位を低減可能な耐震補強工法を開発することを目的としている。本報で提案する補強工法は、『既存建物の外周に、これとは独立した骨組み（外付けフレーム）を新設し、外付けフレームと既存建物の間を、ダンパー効果を持つ混合より線を介して連結し、地震時の2種類のフレームの変位差により発生する混合より線のダンパー効果により、建物の応答を低減する補強工法』である。混合より線<sup>1)</sup>はエネルギー消費能力を有する緊張材として、文献1)及び文献2)で取り扱ったものであり、これらの使用用途の拡大も目的としている。この工法の特徴は以下である。

- ① 集合住宅の外周に設けられるバルコニーや廊下の構面外に、耐震要素（外付けフレーム）を新設し、水平力を負担させる。
- ② 既存骨組の柱梁に沿った、柱梁から成る外付けフレームや、梁の材軸方

向に配置した制振要素（混合より線）を設けることにより、建物内部からの視界を遮らない。

- ③ 混合より線の制振効果により耐震部材（外付けフレーム）を必要最低限のものとし材料のコストダウンができる。

この工法の有用性を確認するため、既存建物の鉄筋コンクリート造柱梁架構を模した実大試験体を本工法で補強し、擬似動的載荷実験を行った。また、骨組解析モデルを構築し、実験結果を模擬できることを確認した。

## 2. 提案する耐震補強工法

### 2.1 混合より線

本実験に用いる混合より線は、低強度素線と高強度素線をより合わせたものであり、図-1に示すような形状をしている。このように撻りあわせることにより、二種類の素線が同じひずみ範囲で挙動する。図-2には混合より線の引張力と伸びの関係を示している。初期引張力を加えることにより、地震荷重下で低強度素線が圧縮及び引張で降伏し、エネルギーを消費する。高強度素線は低強度素線と同じひずみで弾性挙動し、架構の残留変形を抑制する。地震時に生じる混合より線の伸縮が、低強度素線のエネルギー消費によるダンパー機能（エネルギー消費性能）を生み出す一方で、高強度素線が混合より線の張力を常に引張に保つ役割と地震水平力に抵抗する

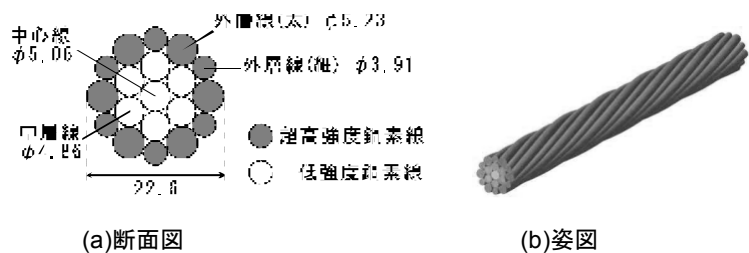


図-1 混合より線(単位: mm)

\*1 京都大学 大学院工学研究科 (正会員)

\*2 (独) 科学技術振興機構 (JST) 研究員 (正会員)

\*3 京都大学 大学院工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 京都大学 大学院工学研究科准教授 Ph. D. (正会員)

役割(残留変形抑制性能)を果たすものである。通常、より線は PC 緊張材として用いるのが一般的であるが、既往の研究<sup>2)</sup>では、混合より線が PC 緊張材としてだけでなく、ケーブルやブレースなどの引張材として使用可能であり、既存建物の耐震補強にも用途拡大できることを示した。

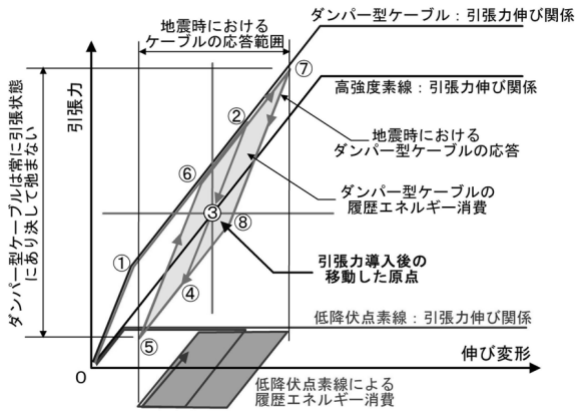
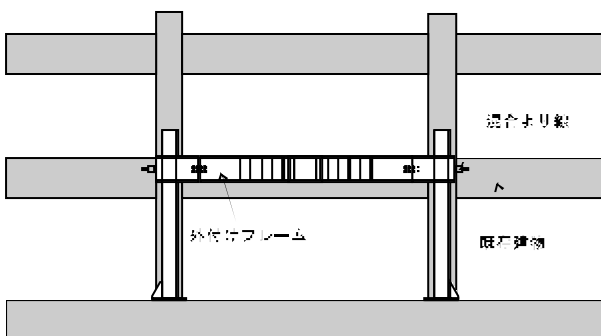


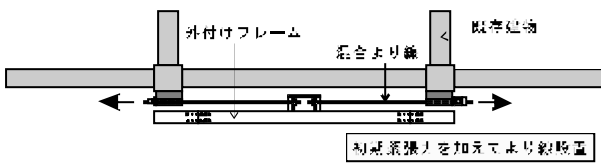
図-2 混合より線挙動概念

## 2.2 提案する補強工法

提案する補強工法は、ダンパー効果を持つ緊張材である混合より線、外付けフレームの設置により、既存建物に加わる地震水平力を鉄骨フレームに負担させ、さらに混合より線のエネルギー消費性能により地震応答を低減させるものである。この工法は、図-3 に示すように既存建物構面外に、建物内部からの視界を遮らないスレンダーでかつ剛性の高い外付けフレームを設置し、既存建物と外付けフレームを、混合より線により連結する。



(a) 立面図



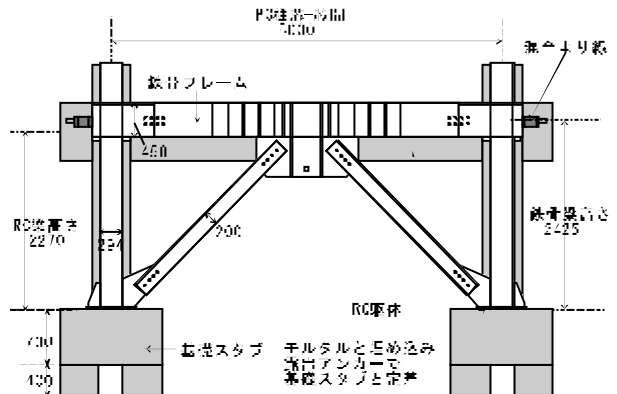
(b) 平面図

図-3 提案する耐震補強工法

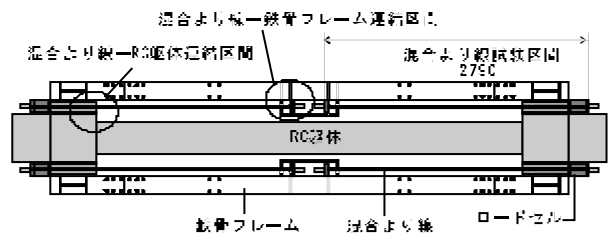
混合より線には、専用ジャッキを用いて初期緊張力を与える。地震時に RC 躯体と鉄骨フレームに変位差が生じると、混合より線は伸縮し、2.1 節で示した残留変形抑制機能を有するダンパーとして性能を発揮する。本補強工法は、補強部材(混合より線)を建物構面外に設置できるのが特徴である。座屈拘束ブレースによる補強はブレース材が既存建物内部からの視界を遮るが、本補強工法は既存建物の梁と外付けフレームの梁との間に混合より線を隠すように設置することができ、既存建物内部からの視界を一切遮らない意匠上の利点がある。また、耐震補強には既存建物にあと施工アンカーを多数設ける工法が多いが、本補強工法は既存建物の柱梁接合部のみにアンカーを設けるだけでよく、アンカーの本数が少ないという施工上の利点もある。

## 3. 実験計画

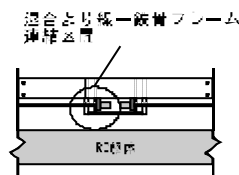
既存建物を模した RC 躯体を、本補強工法で耐震補強した試験体を製作し、擬似動的載荷実験を行った実験概要を報告する。



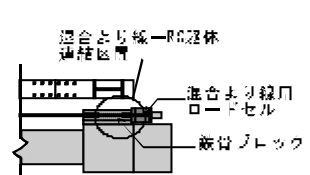
(a) 立面図



(b) 平面図



(c) 中央部



(d) 両端部

図-4 試験体

### 3.1 試験体

試験体を図-4に示す。試験体はRC躯体部分と耐震補強部分から成る。

#### (1) RC 躯体

図-5にRC躯体の詳細を示す。また、表-1に使用したコンクリート、表-2に鉄筋の材料特性を示す。RC躯体は、1981年の新耐震基準施行以前に設計された既存不適格建築物の5階建てRC造集合住宅の桁行き方向構面（純ラーメン構造）の1構面1スパンを実大スケールで切り出したものである。ユニオンシステムの一貫設計ソフトSS2を用い算出した $I_s$ 値は、0.44である。柱断面は500mm×500mm、梁断面は740×350mmである。主筋はSD295AのD16であり、コンクリート圧縮強度はRC基礎スタブで46.9MPa、その他は21.5MPaである。柱梁接合部に混合より線設置用の鉄骨ブロックを高力ボルト接合している。使用した高力ボルトは、F10TのM22で、鉄骨ブロック一つにつき6本使用した。導入トルクは高力ボルト1本につき560N・mである。

#### (2) 耐震補強部分

図-4に示すように、耐震補強部分は鉄骨フレームと混合より線から成る。実際の耐震補強において、外付けフレームは、RC造、鉄骨造どちらを採用することも可能であるが、今回は実験の簡便化のため、鉄骨フレーム

とした。また、高い水平剛性を確保するため、ブレースを設けた。鉄骨フレームはRC躯体の柱、梁に沿うように設置され、SS400のH形鋼の柱及び梁、溝形鋼のブレースから成る。表-3に鉄骨フレームに使用したH形鋼

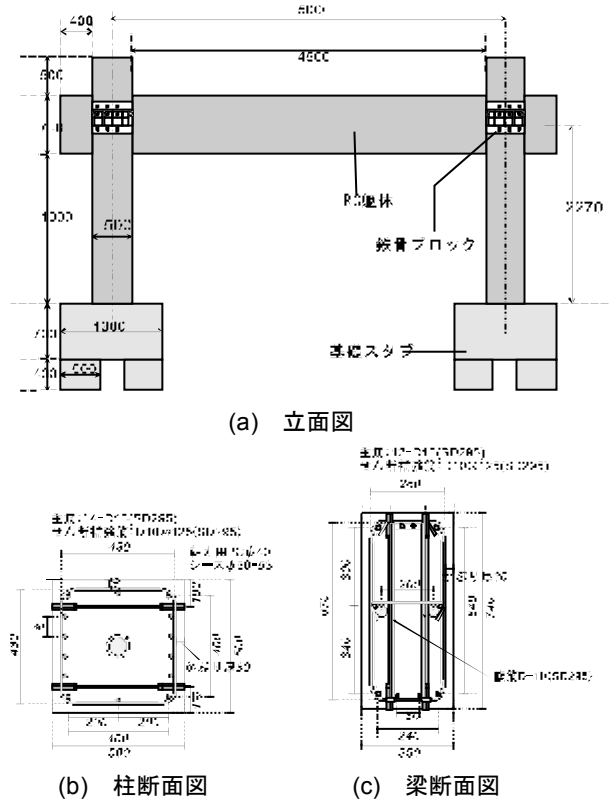


図-5 RC躯体

表-1 コンクリートの材料特性

	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
柱	23.2	21.5	2.33
梁			
基礎スタブ	31.4	46.9	3.73

表-2 鉄筋の材料特性

使用箇所	鋼種	鉄筋径	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
柱および梁主筋	SD295	D16	179	379	546
柱および梁せん断補強筋	SD295	D10	159	355	530
基礎スタブ鉄筋	SD295	D13	159	355	530
	SD295	D19	173	376	549

表-3 鉄骨フレームに使用したH形鋼の材料特性

使用箇所	材質	形状	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
柱	SS400	H-450×200×9×14	208	364	458
梁	SS400	H-294×200×8×12	199	372	493
ブレース	SS400	C-200×90×8×13.5	199	372	493

表-4 混合より線の材料特性

		構成 本数	断面積 (mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 <sup>※1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	降伏軸力 <sup>※1</sup> (kN)	降伏 <sup>※2</sup> ひずみ
高強度鋼	外層線(太)	6	21.48	209	2100	430	0.0102
	外層線(細)	6	12.01	209	2200		0.0107
極低降伏点鋼	中心線	1	20.08	203	331	43	0.0016
	中層線	6	18.54	208	331		0.0016

※1 0.2%オフセット値を使用

※2 一次勾配が低下し始める点のひずみとした

の材料特性を示す。混合より線は、図-4(c), (d)に示すように、試験体中央部で鉄骨フレームと、両端部でRC躯体とそれぞれ結合されている。

本実験で用いた混合より線は文献1)で使用した19本混合より線であり、計4本使用した。図-1に使用した混合より線の形状、表-4に混合より線の材料特性について示す。これらの耐震補強部分の設置に関しては、RC躯体に鉄骨フレームを設置後、混合より線を専用のジャッキを用いて引張緊張力を与えて設置した。

### 3.2 载荷概要

本実験では、試験体を仮想質量400t、減衰定数は0.025を想定した水平方向1自由度の1質点系にモデル化し、擬似動

的載荷実験を行った。このときの地震応答解析の数値積分は Newmark  $\beta$  法で  $\beta=0$  (陽的積分法である衝撃加速度法に従う) を用いた。

載荷装置を図-6 に示す。4000kN ジャッキを梁の中心高さに左右 2 本設置し、梁に軸力が作用しないよう押しと引きが同じ大きさの水平力を作用させた。また、柱 1 本につき軸力比 0.18 (980kN) の一定軸力を加えた。擬似動的載荷に用いた入力地震波は ELCENTRO-NS 波であり、原波の加速度に 10%, 20%, 30%, 50%, 75%, 100%, 150% の倍率を乗じたものを使用した。実験名と入力地震波、実験後の損傷状況の関係を表-5 に示す。Case0 は耐震補強を施す前の、RC 躯体のみの剛性確認を目的として載荷した実験である。

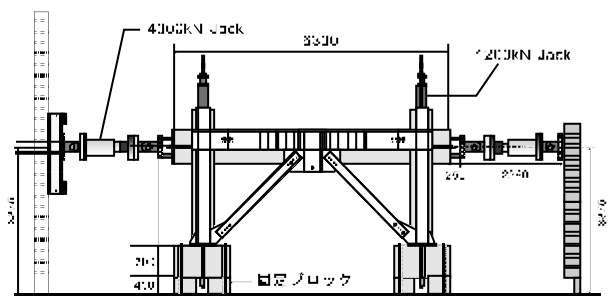


図-6 載荷装置 (単位:mm)

#### 4. 実験結果

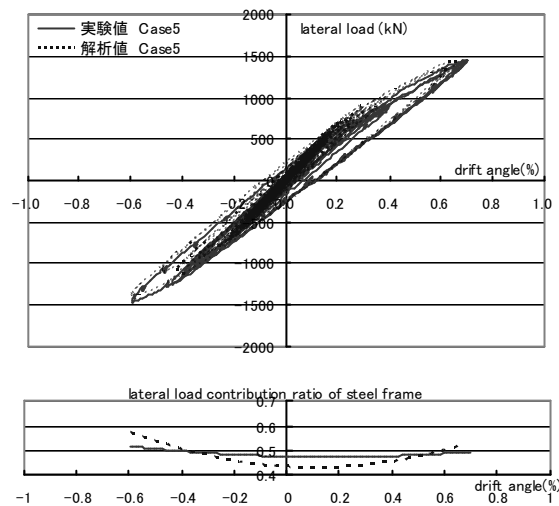
##### 4.1 水平荷重-層間変形角関係

図-7 に実験結果から得られた Case5 及び 6 の水平荷重-層間変形角関係と鉄骨フレームの水平力負担比率を示す。なお、水平力負担比率は二次曲線で近似した。他の入力地震波については、Case0~4 は試験体に大きな損傷が無かったため、Case7 は試験体損傷が大きく、また、4 本の混合より線の引張張力が 0 になるなどのトラブルが生じたため省略する。

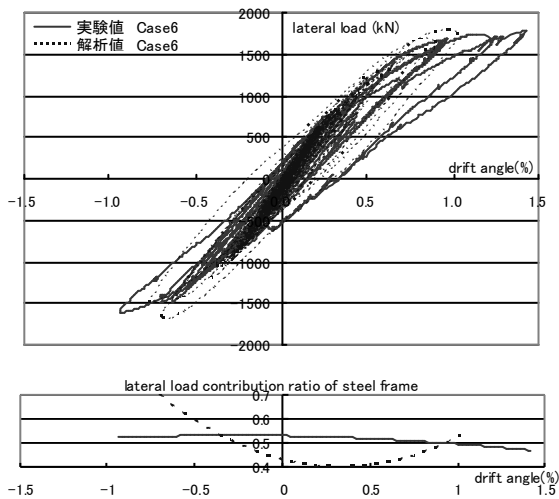
Case5 においては、RC 躯体は弾性域であるが、混合より線の低強度素線の降伏により、履歴ループを描いている。また、高強度素線は弾性域であるので、ダンパー機能を発揮しながら、水平荷重 0 時の残留変形は小さい。Case5 においては、残留変形抑制機能とエネルギー消費性能を有するダンパーとして混合より線はその性能を発揮した。Case6 においては、 $R=0.75\%$  で RC 主筋の降伏が生じ、

表-5 実験名と入力地震波、実験後の損傷状況

実験名	入力地震波 ELCENTRO -NS波	継続 時間 (秒)	試験後の損傷状況			
			RC躯体	鉄骨フレーム	混合より線	
					低強度素線	高強度素線
Case0	30%	5	弾性域、曲げひび割れ	-	-	-
Case1	10%	5	弾性域	弾性域	弾性域	弾性域
Case2	20%	5	弾性域	弾性域	弾性域	弾性域
Case3	30%	5	弾性域、曲げひび割れ	弾性域	弾性域	弾性域
Case4	50%	5	弾性域、曲げひび割れ	弾性域	塑性化し始める	弾性域
Case5	75%	5	弾性域、曲げひび割れ	弾性域	塑性域	弾性域
Case6	100%	5	梁主筋の降伏	弾性域	塑性域	塑性化し始める
Case7	150%	5	柱脚主筋の降伏	弾性域	塑性域	塑性化と張力が0となる現象が見られる



(a) Case5



(b) Case6

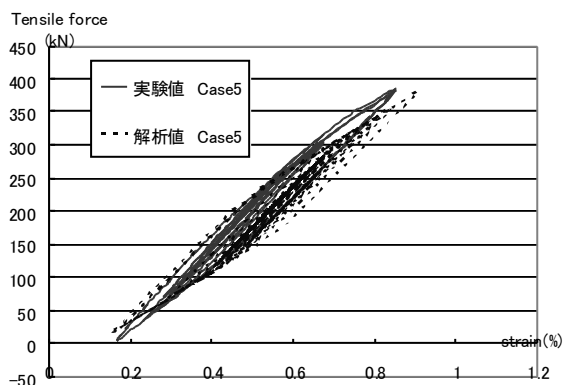
図-7 水平荷重-層間変形角関係と鉄骨フレームの水平力負担比率

剛性の低下が見られるが、 $R=0.95\%$  までは主筋降伏後も残留変形が抑制されている。ただし、 $R=0.95\%$  を超えると正側で履歴が横ばいになっている領域がある。これは、RC 躯体の主筋の降伏と、4 本ある混合より線のうち、2 本が高強度素線の降伏、他の 2 本が張力 0 になり、鉄骨フレームの水平力負担比率の低下が示すように、鉄骨フレームが水平力をそれ以上負担しなくなったためである。Case6 では Case5 より大きな履歴ループを描いているが  $R=0.95\%$  を超えると高強度素線の降伏により、除荷時に正側の残留変形が残っている。

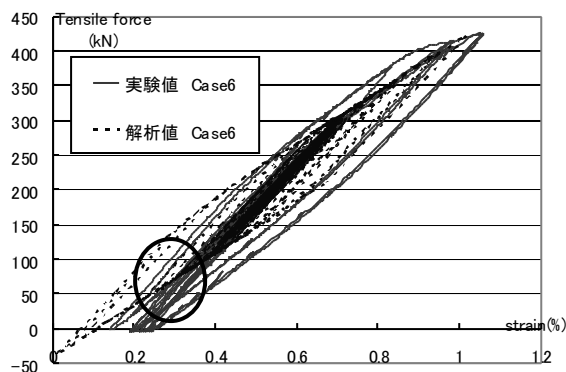
#### 4.2 混合より線の軸力-ひずみ関係

図-8 に実験結果から得られた Case5, Case6 の混合より線の軸力-ひずみ関係を示す。軸力は混合より線の定着部に設置したロードセルの値であり、ひずみは高強度素線に貼付した複数のひずみゲージの平均値である。試験に用いた 4 本の混合より線は、ほぼ同じ応答であった。

Case5, Case6 とともに履歴ループを描き、混合より線がエネルギー消費をしていることが分かる。Case6 においては、高強度素線の引張降伏し始めるひずみ範囲、また、混合より線の引張張力が 0 になるひずみ範囲に達し、使用限界状態に達している。しかし、高強度素線が降伏した後も、また、引張張力が 0 となった後も、安定したループを描き、エネルギー消費性能が失われなかったことが分かる。



(a) Case5



(b) Case6

図-8 混合より線の軸力-ひずみ関係

#### 4.3 等価粘性減衰定数 $H_s$

本節では、Galkun, Sozen が定義した平均的な等価粘性減衰定数  $H_s$  (substitute damping) <sup>4)</sup>により、試験体の動的载荷によるエネルギー消費能力について検討する。算出した試験体の  $H_s$  を図-9 に示す。縦軸は  $H_s$ 、横軸は入力地震波の倍率である。また、Case0 の結果も合わせて

示す。図-9 より、入力地震波の大きさが大きくなるにつれ、 $H_s$  も増加することが分かる。また、倍率 30% において、RC 躯体(Case0)のみより  $H_s$  が 1.5 倍程度大きな値を示し、耐震補強により骨組のエネルギー消費性能が向上していることが分かる。また、倍率 100% (Case6) において  $H_s$  が 4.5%、倍率 150% (Case7) において  $H_s$  が 8.0% という値が得られた。しかし、この値はエネルギー消費デバイスを組み込んだ系としては、小さい値である。

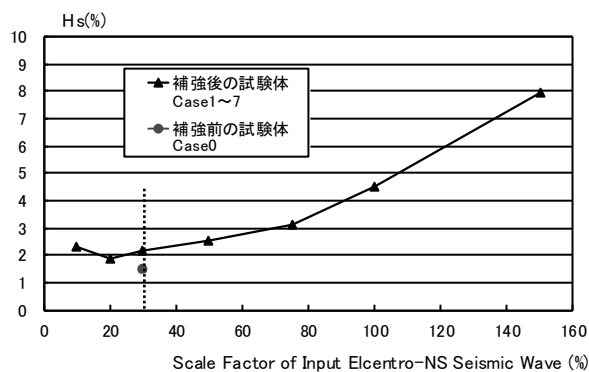


図-9 等価粘性減衰定数  $H_s$

#### 5. 解析結果

動的弾塑性解析プログラム TDAPIII<sup>3)</sup>を用いて数値解析を行い、本実験結果の追跡を行った。

図-10 に解析モデルを示す。RC 躯体の梁、柱塑性ヒンジゾーンにおいては、図-10(b), (c)に示すファイバーモデルを用い、RC 躯体のその他の領域、鉄骨フレームについては線材置換した弾性モデルを用いた。混合より線は、その材料特性より図-2 に示すようなパイリニアモデルを用いた。

解析結果を図-7, 図-8 に実験結果とともに示す。図-7 の水平荷重-層間変形角関係においては、Case5 においては、剛性、最大耐力ともに概ね追跡できている。Case6 においては、水平荷重が大きくなると、実験結果ほどの変位が得られず、正側、負側において最大変位は追跡できていないが、水平剛性は追跡できている。

図-8 の混合より線の軸力-ひずみ関係においても、Case5, Case6 とともに軸力はほぼ追跡できているが、低強度素線降伏後の剛性については、実験値の方が解析値に比べ大きい。また、Case6 の図-8(b) 中の楕円で示す範囲で、実験値では低強度素線が圧縮降伏することなく、張力が減少している。これは、より線の撚りの弛緩により、軸方向のひずみが減少せず張力が減少したためだと思われる。また、図-11 に解析結果から得られた Case5, Case6 の応答変位-時間(以下 t)関係を、実験結果、また耐震補強しない RC 躯体のみの解析結果とともに示す。

図-11 より、Case5 においては、载荷終了時まで実験値をある程度追跡できている。また、RC 躯体のみの解

析値よりも、応答変位を抑制でき、耐震補強の効果があることが分かる。Case6 においては、 $t=4.80(s)$ 時までは、実験値をある程度追跡でき、RC 躯体のみより応答変位

を抑制しているが、それ以降は解析値が実験値を下回っている。

$t=4.80(s)$ では、変形が過大になり、4.1 節に示した、4 本ある混合より線のうち、2 本が高強度素線の降伏、他の 2 本が張力 0 になり、鉄骨フレームが水平力をそれ以上負担しなくなる現象が生じている。この現象が生じると、実験値が解析値を大きく上回り、地震応答を抑制できない。

## 6. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 提案する耐震補強工法は、Case5, Case6 において、 $R=0.95$ までは、RC 主筋降伏後も残留変形抑制機能とエネルギー消費性能を發揮した。また、混合より線は高強度素線が降伏する変形域に達しても安定した履歴ループを描いた。この補強工法により、エネルギー消費性能は向上し、エネルギー消費能力は入力地震波の倍率 100% (Case6) において  $H_S$  が 4.5%、倍率 150% (Case7) において  $H_S$  が 8.0%であった。
- (2) 解析において、本実験結果の履歴を追跡することができた。また、解析において、耐震補強による応答変位抑制の効果が見られた。

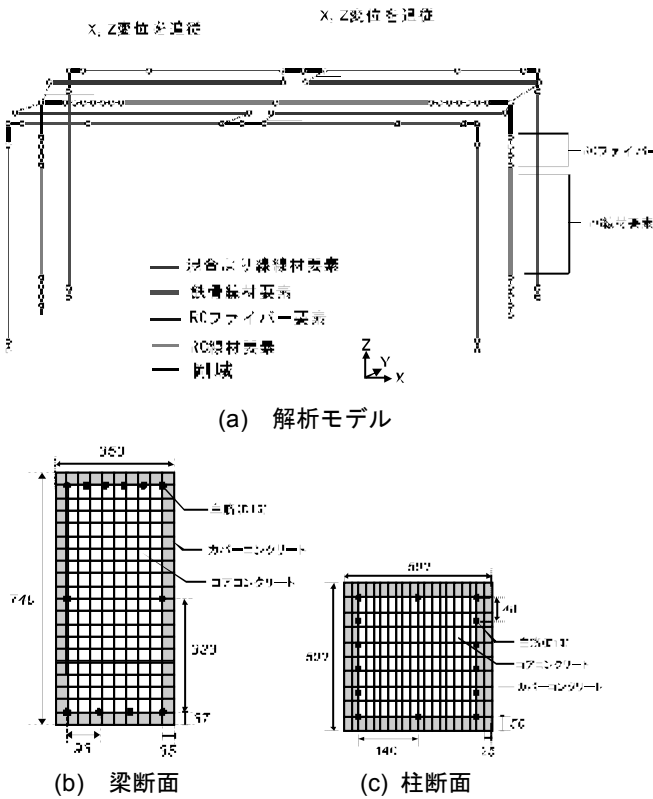
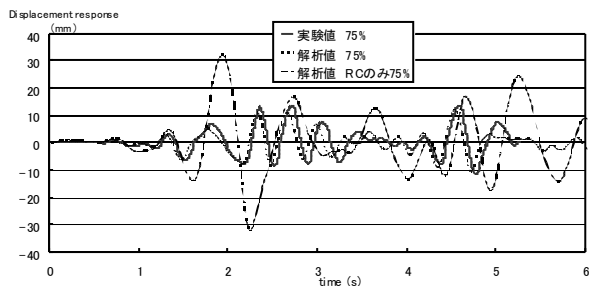
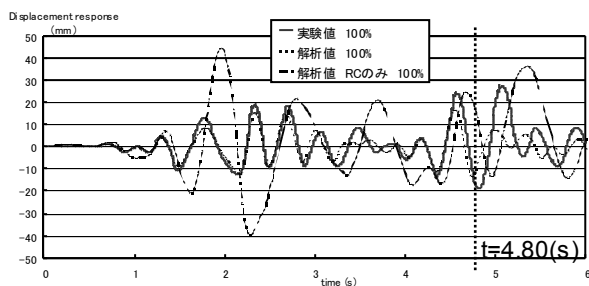


図-10 解析モデル



(a) Case5



(b) Case6

図-11 応答変位-時間関係

## 謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構「JST イノベーションプラザ京都」育成研究(代表者:河野進)の一部として行われた。実験において株式会社浅沼組および住友電工スチールワイヤー株式会社に御協力頂いた。また研究全般を通して、渡邊史夫名誉教授(京都大学)、金尾伊織准教授(京都工芸繊維大学)石川俊介氏(京都大学院生)の多大な尽力があった。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 田中佑樹ほか: 混合より線を用いた損傷制御型構造形式の開発基礎研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, C-2, pp. 1195-1196, 2008.
- 2) 田中佑樹ほか: 混合より線を用いた損傷制御型門型架構の静的繰り返し実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, C-2, pp. 499-500, 2009.
- 3) アーク情報システム: TDAP III, Ver. 3.00 使用手引書, 2007.
- 4) 柴田明徳: 等価線形系による非線形地震応答の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, p.453-454, 1975.