

論文 制震補強された既存校舎の弾塑性挙動に関する研究

横内 基^{*1}・北嶋 圭二^{*2}・中西 三和^{*3}・安達 洋^{*3}

要旨：摩擦ダンパー付き制震ブレースにより耐震補強された既存 RC 造校舎の実大耐震実験結果と解析結果の比較から、既存建物の弾塑性挙動について検討した。解析により摩擦ダンパー付き制震ブレースを取り付けることで、実験と同様な補強効果が得られ、実在建物の挙動を精度良く再現できることを確認した。また、各部材の履歴消費エネルギーやエネルギースペクトルから、補強による損傷低減効果を明確にすると共に、各部材の変形と損傷状況の関係を調べることで、制震補強した建物が地震を受けた時の被害状況を推定する資料を得た。

キーワード：既存建物、耐震補強、制震補強、実大実験、摩擦ダンパー、応答制御

1. はじめに

学校建築物を中心に耐震補強が精力的に行われている中、近年、工事中の粉塵や工期の問題等から、外付けブレース工法等の「居ながら補強」の要望が増えつつある。筆者らは、これまで摩擦ダンパーを用いた外付けブレース工法の研究・開発を推進し¹⁾、解体予定の小学校校舎を利用した既存 RC 造建物の実大耐震実験(以下、実大実験)において、摩擦ダンパーによる制震補強効果、並びに既存 RC 造建物の耐震性能に関する有益なデータを取得した²⁾。文献2)では、実大実験の方法や結果についてまとめた。そこで本論文では、解析による実大実験結果の再現精度を確認し、制震補強時及び無補強時の既存建物の復元力特性や損傷状況など弾塑性挙動について解析的に検討することにより、制震補強した建物が地震を受けた時の補強効果や被害状況を明確にすることを目的とする。

2. 試験体及び実験概要

写真-1 に試験体全景を、図-1 に実験対象建物平面図を示す。建物は、X 方向 10 スパン、Y 方向 3 スパンの RC 造 3 階建ての学校校舎で、

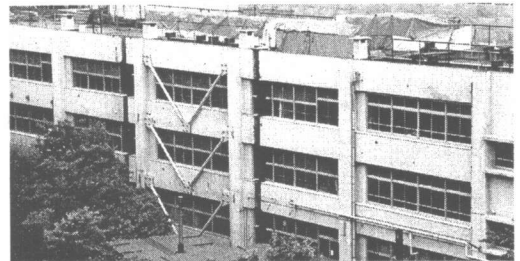


写真-1 試験体全景

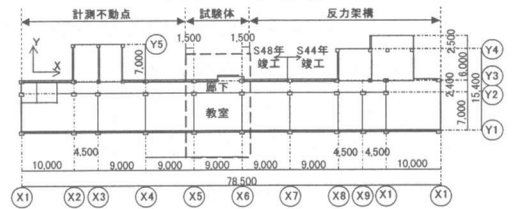


図-1 実験対象建物平面図

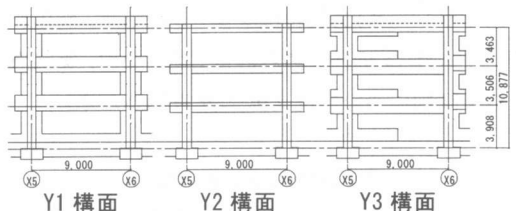


図-2 試験体軸組図

X7-X11 は S44 年に、X1-X7 は S48 年に竣工したものである。試験体は、X5-X6、Y1-Y3 の 1×2 スパンとし、X 方向両サイドの 2・3・R 階の梁

*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 工修 (正会員)
 *2 (株)青木建設 研究所建築研究室長 工博 (正会員)
 *3 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 工博 (正会員)

階層位置	Y1通り		Y2通り		Y3通り		断面	定柱共通
	端部	中央	端部	中央	端部	中央		
3							10-22φ	9φ @100
2							10-22φ	
1							12-22φ	9φ @100
上層筋	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22		
下層筋	2-D22	3-D22	3-D22	3-D22	2-D22	3-D22		
STP	9φ @200		9φ @200		9φ @200			
位置	端部	中央	端部	中央	端部	中央		
3							10-22φ	9φ @100
2							10-22φ	
1							12-22φ	9φ @100
上層筋	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22		
下層筋	2-D22	3-D22	3-D22	3-D22	2-D22	3-D22		
STP	9φ @150		9φ @200		9φ @200			
位置	端部	中央	端部	中央	端部	中央		
2							10-22φ	9φ @100
1							10-22φ	
上層筋	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22		
下層筋	2-D22	3-D22	3-D22	3-D22	2-D22	3-D22		
STP	9φ @200		9φ @150		9φ @200			
位置	端部	中央	端部	中央	端部	中央		
1							10-22φ	9φ @100
0							10-22φ	
上層筋	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22	4-D22	2-D22		
下層筋	2-D22	3-D22	3-D22	3-D22	2-D22	3-D22		
STP	9φ @200		9φ @150		9φ @200			
位置	端部	中央	端部	中央	端部	中央		

図-3 部材断面リスト

及びスラブを構造基準線より 1.5m の位置から幅 50cm で縁切りした。図-2 に試験体部分の軸組図を、図-3 に部材断面リストを示す。

表-1 には実大実験の全体スケジュールを示す。実大実験では、制震補強効果を確認することを目的に、制震補強時と無補強時の仮動的実験を行った。また、試験体の耐震性能及び変形と損傷の関係を把握するための破壊実験と、各実験前後に試験体の固有周期を測定するための振動実験(自由振動実験と人力加振実験)を行った。

制震補強実験で使用した摩擦ダンパーの機構を図-4 に、摩擦ダンパー付きブレース(以下、制震ブレース)の取付図を図-5 に示す。制震ブレースは Y1 構面にのみ設置した。なお、実験方法の詳細については文献 2) を参照されたい。

3. 実大実験結果の解析的検討

3.1 部材評価と試験体保有耐力

実験から得られた試験体の最大耐力は、事前解析結果に比べ高くなった。その主たる原因として考えられるのが、スラブの有効幅である。実験では、終局耐力近傍でスラブに、加振と直交方向のひび割れがほぼ全幅にわたり観察され、事前評価したスラブの有効幅よりも広い範囲のスラブ筋が、

表-1 実験スケジュール

実施日	実験名	備考
99/4/30	振動実験(1)	0.24sec
	VV 試験体縁切り VV	
5/22	振動実験(2)	0.20sec
	VV 制震ブレース取付 VV	
6/3	振動実験(3)	0.18sec
6/10	制震補強実験(1)	EL Centro 50kine
6/11	振動実験(4)	0.22sec
6/15	制震補強実験(2)	EL Centro 65kine
6/16	同一荷重制御実験	±1400kN
6/17	振動実験(5)	0.24sec
	VV 制震ブレース撤去 VV	
6/23	振動実験(6)	0.26sec
6/26	無補強実験	EL Centro 65kine
6/28	振動実験(7)	0.33sec
7/4	破壊実験	最大変形角 :1/33
7/5	振動実験(8)	0.66sec

振動実験の備考欄:自由振動実験で得られた試験体の固有周期

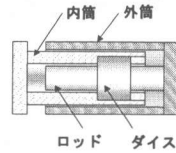


図-4 摩擦ダンパーの機構

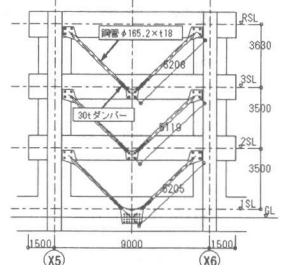


図-5 制震ブレース取付図

耐力に寄与したと考えられる。そこで、スラブの有効幅を全幅有効として、実測より得られた材料強度や部材断面から各部材性能を評価した静的解析を行い、試験体の保有耐力について検討した。解析は、線材置換した各部材を、表-2 に示すように評価し、3次元弾塑性解析プログラム⁶⁾を使用して行った。外力分布は実験と同様に頂部集中とし、荷重増分法により行っている。図-6 に主体構造の2層における層せん断

表-2 断面評価方法

	事前解析モデル	解析モデル
断面	設計図書に従う。	試験体実測結果に従う。
部材剛性	柱・梁・袖壁・腰壁・垂壁を考慮 スラブの協力幅:RC規準の協力幅	同左
剛域	柱・梁:部材せいの1/4入った位置 (部材せい=袖壁、腰壁、垂壁を考慮)	袖壁・腰壁・垂壁付き部材:部材せいの1/2入った位置 その他の部材:同左
材料強度	コンクリート:設計基準強度(18MPa) 鉄筋:JIS規格降伏強度の1.1倍	試験体より採取したテストピースによる材料試験結果の値。
部材耐力	柱・梁:袖壁、腰壁・垂壁を考慮。 スラブ筋有効幅:1.0m	柱・梁:同左 スラブ筋有効幅:全スラブ幅
	耐力算定式:文献(3)(4)(5)参照	耐力算定式:同左

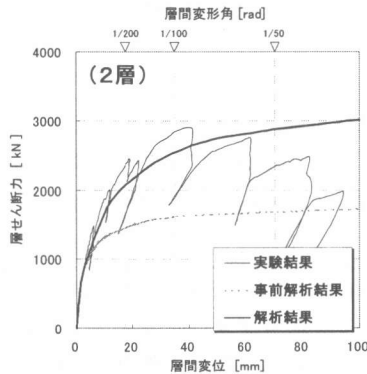


図-6 層せん断力-層間変形関係

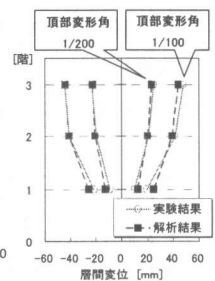
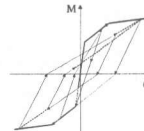


図-7 変形分布

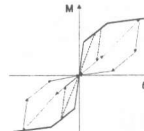
力と層間変形の関係を示す。図中の実験結果は、制震補強実験結果からダンパー負担せん断力を除いた主体構造のみの履歴と、無補強実験及び破壊実験の全ての荷重-変形曲線を包絡する履歴曲線である。実験最大耐力と同一変形時の解析結果の耐力は、実験結果に若干及ばないものの、概ね良く対応し、試験体は終局限界状態で、スラブ筋がほぼ全幅にわたり耐力に寄与していたといえる。また図-7に示す各層の変形分布も実験結果と良い対応を示した。

3.2 復元力特性

実験結果を解析的に検討する上で、各部材の復元力特性を把握する必要がある。しかし実験では、各部材の復元力特性を計測していない。そこで、仮動的実験より得られた頂部応答変位と同一変位を経験させる静的解析を行い、主体構造の履歴形状と履歴消費エネルギーを実験結果と対応させることにより、各部材の復元力特性を推測した。検討に使用した復元力モデルは、武田モデル(図-8(a))と、実験結果の履歴形状に見られたスリップ性状を考慮したスリップモデル(図-8(b))である。なお、実験では柱の損傷が僅かであったので、梁にのみスリップモデルを用いて検討した。検討した解析ケースを表-3に示す。なお、各部材のスケルトンは、保有耐力の検討で求めたもので統一している。表-4に、2層の層せん断力-層間変形の履歴面積を積分して得られた履歴消費エネルギーの比率(解析/実験)を示す。すべての梁にスリップを考慮したcase 2の履歴消費エネルギーは実験結果に比べ過小となり、case 3の履歴消費エネルギーがいずれの実験結果とも良く対応している。また、図-9に示すcase 3の履歴形状を実験結果と比較しても、垂壁・腰壁付き梁にのみスリップを考慮することにより実験と良く似た履歴形状を示し、無補強時では実験と同様なスリップ性状が見られた。このことより、実験では、柱・梁の主筋に使用されている異形鉄筋に比べ、附着性能が劣る丸鋼が配筋された垂壁及び腰壁に抜

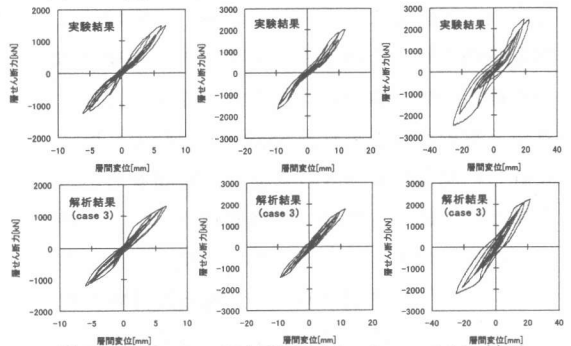


(a)武田モデル



(b)スリップモデル

図-8 履歴モデル



(a)補強(50kine) (b)補強(65kine) (c)無補強
図-9 case 3と実験結果の履歴形状の比較(2層)

け出しが生じていたと考えられ、その影響で実験結果の履歴性状にスリップが生じたものと推測される。

3.3 仮動的実験結果の再現性

垂壁及び腰壁付き梁にのみスリップモデルを用いたcase 3について地震応答解析を行い、2台のアクチュエータを変位制御して行った仮動的実験との比較から、解析結果の再現精度を確認する。地震応答解析諸元を表-5に示す。なお、制震ブレースの復元力モデルには、バイリニアモデルを使用し、耐力・剛性は、設計値を設定した。制震補強時及び無補強時の65kine入力における頂部応答変位時刻歴を図-10に、2層の層せん断力と層間変形の関係(応答履歴曲

表-3 解析ケース

	垂壁・腰壁付き梁	その他の梁	柱
case 1	武田モデル	武田モデル	武田モデル
case 2	スリップモデル	スリップモデル	武田モデル
case 3	スリップモデル	武田モデル	武田モデル

表-4 履歴消費エネルギー比率(2層:解析/実験)

	制震補強時		無補強時	
	50kine	65kine	50kine	65kine
実験結果	1.00	1.00	1.00	1.00
case 1	1.18	1.26	1.11	1.11
case 2	0.69	0.54	0.58	0.58
case 3	0.96	0.95	0.88	0.88

表-5 地震応答解析諸元

解析モデル	case 3 (垂壁・腰壁付き梁にスリップモデル)
試験体質量	頂部集中質量: 276.8t
数値積分・時間刻み	Newmark-β法 (β=0)・Δt=0.005sec
減衰	初期剛性比例型 (h=3%)
入力地震波	補強時: EL Centro<NS> 50kine・65kine 7sec 無補強時: EL Centro<NS> 65kine 7sec
回転変形	拘束(変位制御で行った実験と対応)

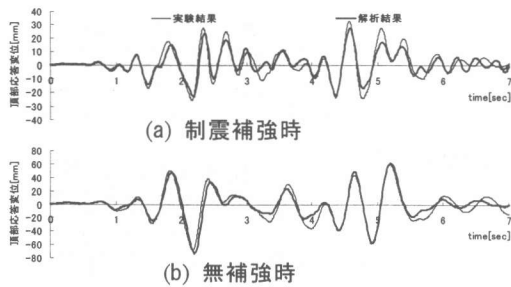


図-10 頂部応答変位時刻歴

線)を 図-11 に示す。実験結果と解析結果の応答変位や履歴形状は良い対応を示し、解析的に実在建物の挙動を精度良く再現でき、実験と同様な補強効果を確認した。また、図-12 に示す実験と解析から得られた65kine入力時の2層に設置した制震ブレースの挙動は、層間変形が若干異なっているものの、履歴形状やダンパー負担せん断力の大きさについては、良く一致しており、実験では制震ブレースが補強設計時に想定した通りに挙動していたことが確認できる。

3.4 ねじれ挙動の再現性

仮動的実験は、試験体にねじれが生じない変位制御で行った。しかし、制震ブレースをY1構面のみ設置することにより、建物が偏心し、ねじれが生じることが考えられる。そこで、実大実験では2台のアクチュエータを同一荷重で制御し、片側構面にのみ制震ブレースを設置した際のねじれ挙動について確認する同一荷重制御実験も行った。加力は、 $\pm 1400\text{kN}$ の頂部集中加力を1サイクル行った。図-13に、実験及び解析における屋上階床の挙動を示す。実験結果は、加力と共にねじれが生じ、制震ブレースを設置していない構面(Y3構面)の変形が設置構面(Y1構面)に比べ大きくなり、両構面の変位差は最大で3.4mm程度になるが、摩擦ダンパーが滑り始めると偏心は無くなり、建物が並進振動することが確認できた。この結果を解析結果と比較すると、若干変形量に差異が見られるものの、摩擦ダンパーが滑り始めると偏心が無くなり、建物が並進振動する応答性状は一致しており、解析結果は実験で生じたねじれ挙動を良く再現しているといえる。また、実験及び解析により

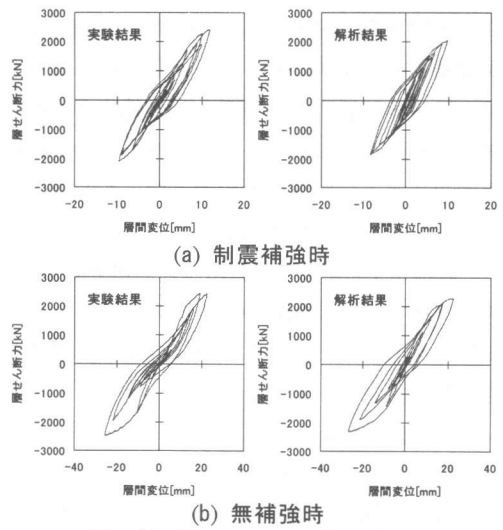


図-11 層せん断力-層間変形関係

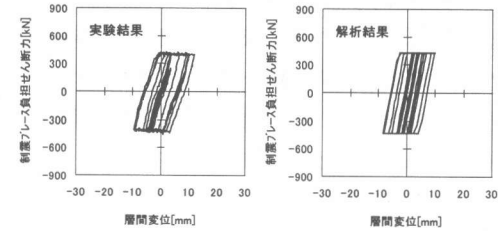


図-12 制震ブレースの履歴形状

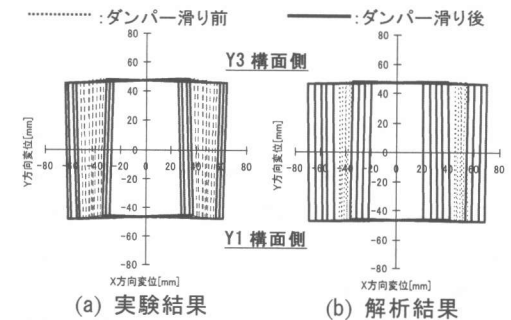


図-13 屋上階床のねじれ挙動

確認されたねじれ量は僅かであり、本実験では、制震ブレースを片側構面にのみ設置することによるねじれの影響は少ないといえる。

4. 制震ブレースによる損傷低減効果

4.1 各部材の履歴消費エネルギーの比較

仮動的実験では、制震ブレースを組み込むことによる補強効果が確認でき、また実験時の挙動は解析によって精度良く再現できた。そこで、実験では把握できない各部材の挙動に着目し、制震補強時に試験体各部材の損傷がどの程度低

減されたかを履歴消費エネルギーから把握する。表-6に、制震補強時及び無補強時について、それぞれの総履歴消費エネルギーに占める各部材履歴消費エネルギーを示す。無補強時では梁端部が全体の76%のエネルギーを吸収していたのに対し、制震補強時には制震ブレースが66%ものエネルギーを吸収することにより、梁の負担は23%に抑えられていることがわかる。また、制震補強時の総履歴消費エネルギー自体も

表-6 各部材別の履歴消費エネルギー

	総履歴消費エネルギー	柱	梁	制震ブレース
制震補強時	137.9 (100%)	14.6 (11%)	32.1 (23%)	91.2 (66%)
無補強時	221.8 (100%)	52.2 (24%)	169.5 (76%)	

[kN・m]

表-7 履歴消費エネルギー低減率

	柱	梁	主体構造
Y1構面	0.32	0.16	0.19
Y2構面	0.15	0.27	0.25
Y3構面	0.31	0.16	0.22
合計	0.28	0.19	0.21

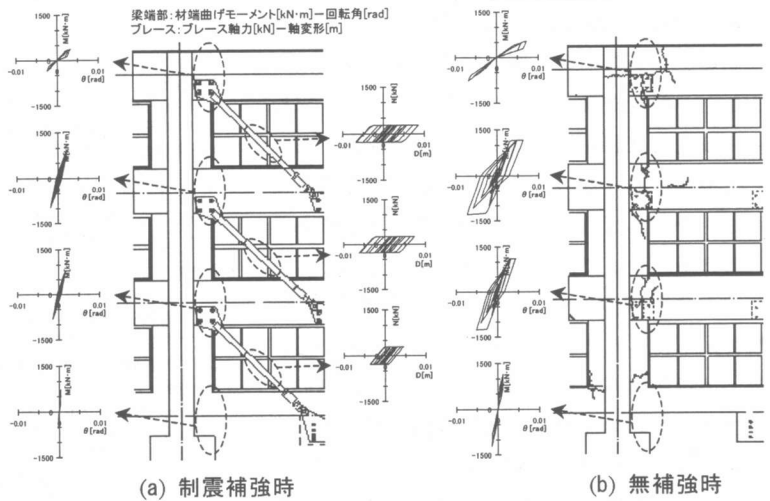


図-14 梁端部とダンパーの履歴形状の比較

低減されている。そして、表-7に示す補強時の各構面毎の柱及び梁、並びに主体構造(柱と梁の和)の履歴消費エネルギーの低減率(補強時の各々の履歴消費エネルギーを無補強時の履歴消費エネルギーで除した値)を見ると、ばらつきはあるものの、全ての部材で2~3割に低減されていることがわかる。図-14に解析より得られたY1構面X5側の梁端部と制震ブレースの履歴形状を制震補強時及び無補強時を比較して示す。また、図中には、実験のひび割れ状況も併せて示している。制震補強時には、完全弾塑性型の履歴形状を有する摩擦ダンパーがエネルギーを効率良く吸収し、梁端部がほとんど塑性化していないのが確認できる。一方、無補強時は、地震エネルギーを主体構造の塑性化によって吸収するため、梁の変形が大きくなり、実験でもひび割れが顕著に生じていることが確認できる。

4.2 入力エネルギーと変形

制震補強の概念は、入力エネルギーを低減させ、変形を小さくすることで、損傷を抑えるものであり、この概念をスペクトルによって示すと図-15のようになる。図には、制震補強実験及び無補強実験で得られた試験体の等価粘性減

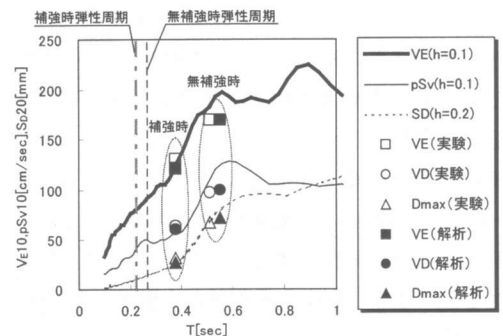


図-15 エネルギースペクトル

衰定数が、最大応答変位近傍で10~20%であったことより²⁾、総エネルギー入力(V_E)スペクトル [$h=10\%$], 擬似速度応答 (pSv) スペクトル [$h=10\%$], 変位応答 (S_D) スペクトル [$h=20\%$]の弾性スペクトルを示し、実験結果と解析結果から求めた総エネルギー入力等価速度, 最大応答変位, 最大応答変位発生時の1ループ分の履歴消費エネルギー等価速度を等価周期(最大応答変位発生時までの正負の最大応答点を結ぶ見かけの剛性と質量から求めた周期)と対応させてプロットしている。図より実験結果と解析結果の値はほぼ一致し、弾性スペクトルと同様の傾向を示していることがわかる。この結果は、無補強時には損傷に伴う長周期化により入力エネルギーが増

大するのに対し、制震補強時には小さな変形レベルでエネルギーの釣合い状態が保持されていることにより、損傷に伴う長周期化を抑える相乗効果があることを示している。

4.3 各部材の損傷と変形の関係

制震ブレースにより各部材の損傷が低減されることが解析結果より確認できた。このことは、言い換えれば制震補強により変形を制御することで損傷を抑えるのであり、変形から損傷状況を推測できれば、補強設計上非常に有効であると考えられる。そこで、破壊実験から得られた大変形時も含め、実験で観察されている損傷状況と、解析から得られた変形の関係について調べる。静的解析から得られた2層における各部材の材端塑性率と層間変形角の関係を図-16に示す。図中には、実験での部材損傷度(I~V)⁷⁾及び被災度区分判定結果と破壊状況を併せて示している。図より、水飲み場があるY3X6上端を除くと、解析結果の材端塑性率(2程度の幅を考慮)と実験による損傷度や破壊状況が、ある程度対応していることがわかる。この結果をまとめ、解析結果の材端塑性率と損傷の関係の一覧を表-8に、実験時の梁端部の損傷状況とあわせて示す。これらの検討より、解析から得られる部材変形により、建物の損傷状況を推定するための一資料が得られたといえる。

5. まとめ

以上、制震補強された既存校舎の実大耐震実験結果を解析的に検討し、実在建物の外壁面に制震ブレースを外付けすることで、実験と同様な補強効果が得られることを確認し、履歴消費

エネルギーやエネルギー Spektral から、補強による損傷低減効果を明確にした。また、実験での損傷状況と解析結果の関係を調べることで、変形と損傷状況を対応付ける一資料を得ることができた。

【謝辞】

本研究の一部は文部科学省学術フロンティア推進事業(日本大学理工学部)・研究課題「環境・防災都市に関する研究」(研究代表者:理工学研究所長川幡長勝)の一環として実施したものである。また、本実験は(社)埼玉建築設計監理協会(会長:高岡敏夫)内に設置された実大耐震実験研究会(会長:工学院大学教授広沢雅也)の一環として行われた。ここに記し、関係各位に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 北嶋圭二ほか:ダンパーを用いた既存RC造建物の耐震補強法に関する研究(その1-その21), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996.9-1999.9
- 2) 木村将士ほか:制震補強された既存校舎の実大耐震実験, コンクリート工学年次論文集, vol.22, No.3, pp.1675-1680, 2000.6
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算標準・解説, 1999.11
- 4) 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), 1990.10
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987.9
- 6) 構造システム:任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム「SNAP」テクニカルマニュアル, 1999.7
- 7) 日本建築防災協会:震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針, 1995.3

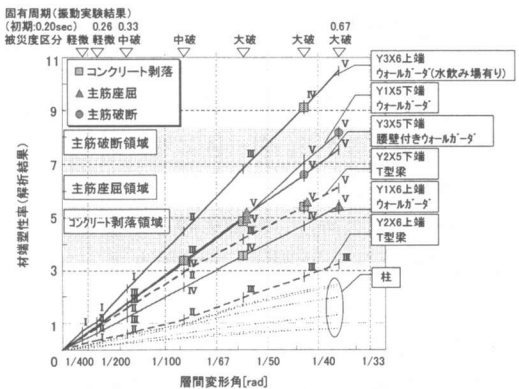


図-16 解析結果の材端塑性率と層間変形角の関係(2層)

表-8 材端塑性率と損傷状況の対応

材端塑性率 (解析結果)	0~1	1~3	3~5	5~7	7以上
損傷状況	0.3mm程度のクラック	0.3mm以上のクラックが多数発生	コンクリートの剥落	主筋の座屈	主筋の破断
損傷度	I~II	II~III	III~IV	V	V
実験状況 Y3X5 側 梁下端					