

# 論文 転倒降伏耐震壁に関する実験的研究

崎野 建治\*1

要旨：本研究においては，従来にない降伏機構を有する耐震壁の提案を行った。提案する耐震壁は，耐力が転倒モーメントにより支配されることから転倒降伏耐震壁と呼ばれ，履歴型ダンパーを内蔵し，フレーム架構の変形モードと同じ変形モードを有する所に特徴がある。試験体は，試設計を行った12層建物1層部の1/4縮尺模型で，試験体数はフレーム試験体1体，耐震壁試験体5体の計6体である。6体の試験体について一定軸力下における繰返し水平加力実験を行った。その結果，いずれの試験体も設計時に想定した降伏機構を形成し，比較的早期に破壊した1体を除き，優れた復元力特性を有する構造要素であることが検証された。

キーワード：耐震壁，転倒モーメント，履歴型ダンパー，CFT柱，繫梁

## 1. 研究目的

本論の研究対象は 図 - 1 に示す降伏機構を持つ転倒降伏耐震壁である。転倒降伏耐震壁の特徴については文献1)を参照されたい。本研究で行う実験的研究の目的は，次の二つである。

- (1) 各種転倒降伏耐震壁を提案し，提案した耐震壁が想定した通りの降伏機構を形成することを検証する。
- (2) 耐震壁に内蔵された繫梁が，履歴ダンパーとしての性能を有するかどうかを検証する。

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体

実験を行った1/4縮尺部分架構模型試験体は，試設計された12層建物<sup>1)</sup>より取出した1層1スパンのフレーム架構1体と転倒降伏耐震壁5体の合

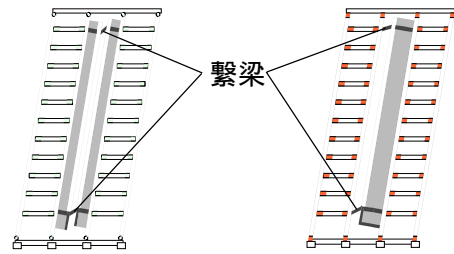


図 - 1 転倒モーメント降伏機構

計6体である。12層建物の概略を図 - 2 に示す。建物は，スパン長さが6.0mで3×5スパンのオフィス想定している。建物の単位重量は10kN/m<sup>2</sup>であり，短辺方向の2構面に転倒降伏耐震壁が配置されている。静的解析により得られたベースシア耐力は，頂点水平変位角  $\theta/H=1/200\text{rad}$ . 時において0.27である。図 - 3 に静的解析における  $\theta/H=1/100\text{rad}$ . 時の耐震壁高さ方向に沿ってのせん断力分布とともに，El Centro，八戸，東北の

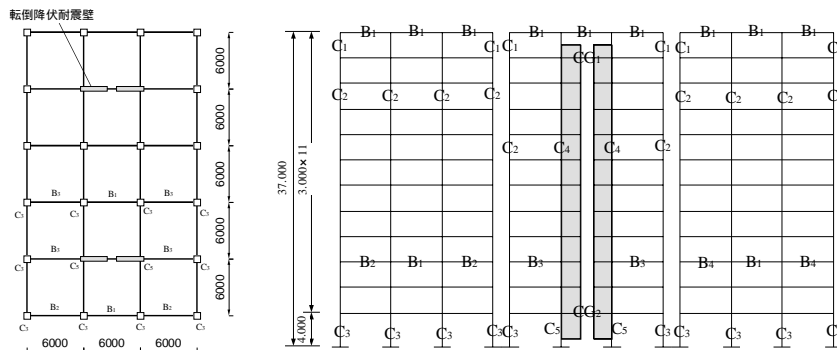


図 - 2 12層解析の平面および立面

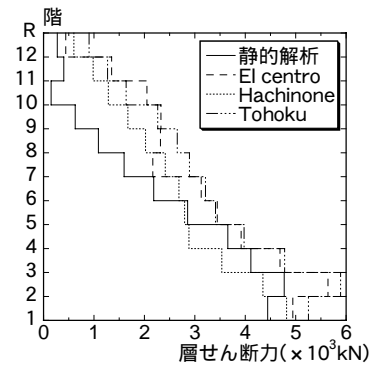


図 - 3 耐震壁のせん断力

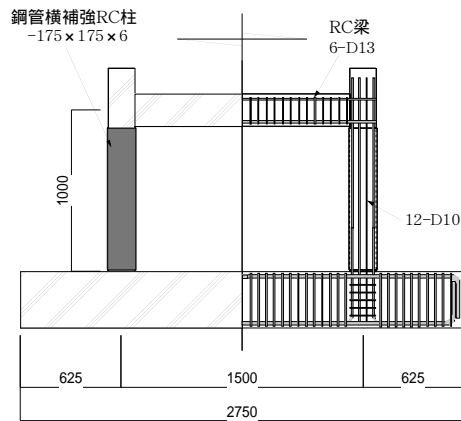
\*1 九州大学大学院 人間環境学研究院教授 工博 (正会員)

3波についてそれぞれ最大速度が75kineの時の耐震壁最大応答せん断力分布を示している。

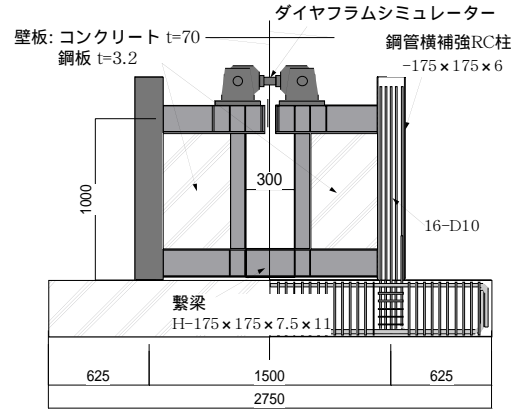
以下、各試験体の詳細について述べる。

RCF 試験体：鋼管横補強柱とRC梁からなるフレーム試験体である。柱脚と梁端部に塑性ヒンジ

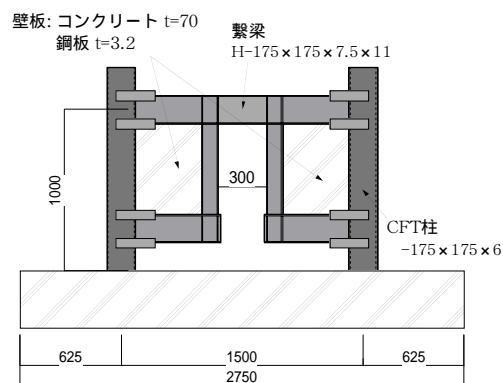
が出来るように設計されている。(図 - 4 a 参照) WCOT試験体：中央開口耐震壁試験体で、耐震壁周辺柱としては、鋼管横補強柱が用いられている。柱には施工上の上限値と言えるほどの多量の主筋を入れている。壁脚部の水平スリット部にお



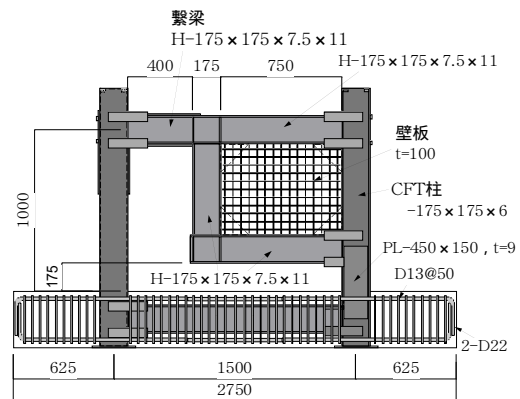
(a) RCF 試験体



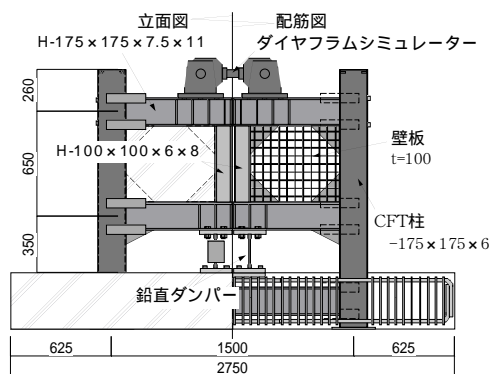
(b) WCOT 試験体



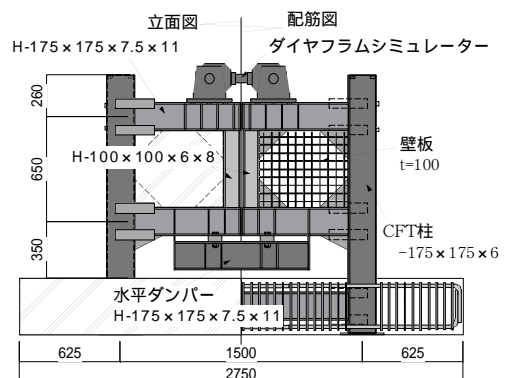
(c) WCO 試験体



(d) WSO 試験体

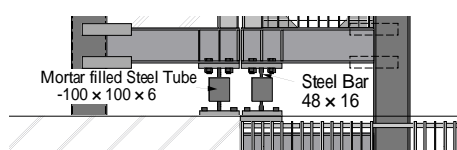


(e) WVD 試験体

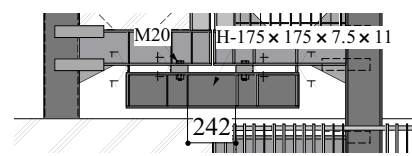


(f) WHD 試験体

図 - 4 試験体の形状および寸法



(a) 鉛直ダンパー



(b) 水平ダンパー

図 - 5 鉛直ダンパーおよび水平ダンパーの詳細 (WVD、WHD)

(単位：mm)

けるパンチングシア破壊を防ぐために基礎梁と繫梁の間に設けた水平スリットは15mmと小さくしている。2階床位置には、ダイヤフラムシミュレーターと呼ばれる軸力のみを伝達する鋼棒が2階鉄骨梁にピンジョイントにより取付けられている。壁板は板厚70mmの高強度プレーンコンクリート壁板と板厚3.2mmの鋼板(周辺鉄骨枠とは両面隅肉溶接により接合)よりなる合成壁板となっている(図-4b参照)。

WCO試験体：中央開口耐震壁試験体で、壁板の詳細と繫梁の耐力は異なるが、他は試設計建物の1/4縮尺モデルである。柱にはコンクリート充填角形鋼管柱(CFT柱と書く)が用いられている。壁板の設計はWCOT試験体のそれとほぼ同様である(図-4c参照)。

WSO試験体：側開口耐震壁試験体で、開口の幅は中央開口試験体(WCO)より若干大きい。壁板は板厚100mmで、高強度コンクリートを使用し、ひび割れ分散のために鉄筋を配筋している。壁筋と周辺鉄骨枠には溶接を行っていない。壁板には鋼板を用いず、鉄骨枠の四隅を三角形スチフナー(板厚9mm)で補強している。CFT柱脚においては殆どの水平力を壁の付いた柱が負担することになるため、壁付き柱の脚部ウエップ両側に板厚9mmの鋼板でせん断補強している。また、繫梁はせん断降伏させるため、フランジ部分に板厚9mmの鋼板で曲げ補強している(図-4d参照)。

WVD試験体：中央鉛直スリット開口耐震壁試験体で、スリット幅は10mmである。この試験体のエネルギー吸収部材には鉛直ダンパーが用いられている。壁板の設計はWSO試験体と同様である(図-4e参照)。鉛直ダンパーは圧縮時の座屈が問題となるため、アンボンドブレースの構造詳細を参考としている(図-5a参照)。

WHD試験体：転倒降伏耐震壁においては、繫梁や鉛直ダンパーを取替え(あるいは補修)可能なエネルギー吸収部材(デバイス)と考えている。本試験体は、実験が終了したWVD試験体の鉛直ダンパーを水平ダンパーに取替えることにより作成した試験体である(図-4f参照)。水平ダン

パーとしては、WCOおよびWSOの繫梁と同じ寸法のH形鋼を用いている(図-5b参照)。

以上、5体の耐震壁試験体の繫梁及び鉛直ダンパーは、試設計建物における耐震壁の転倒モーメント耐力とほぼ同じとなるように設計されている。また、フレーム試験体とWCOT耐震壁試験体の柱は、RC柱を角形鋼管で横補強した「鋼管横補強RC柱」が用いられているが、他の耐震壁試験体4体の柱には「CFT柱」が用いられている。

用いた鋼材の力学的性質と、コンクリートのシリンダー強度 $c_{\sigma_B}$ を表-1に示す。

表-1 材料の力学的性質

		$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$c_{\sigma_B}$ (MPa)
RCF, WCOT, WCO	H-175x175x7.5x11	287	455	
	Steel Tube(-175x175x6)	338	451	
	D10 Steel Bar	354	496	
	D13 Steel Bar	338	500	
	Columns, Beams			40
	Wall Panel			108
WSO	H-175x175x7.5x11	327	485	
	Steel Tube(-175x175x6)	411	480	
	Columns			41
	Wall Panel			113
WVD	Vertical Damper	335	499	
	Steel Tube(-175x175x6)	411	480	
WHD	H-175x175x7.5x11	334	489	
	Steel Tube(-175x175x6)	411	480	
WVD, WHD	Columns			38
	Wall Panel			87

## 2.2 加力装置と測定方法

加力装置の概略図を図-6に示す。試験体には、12層建物の1層に生じる軸力に対応する鉛直荷重529kNを載荷し、実験中一定に保持した。水平力は油圧ジャッキにより繰返し載荷を行った。正負荷重とも図-7に示すように圧縮力により載

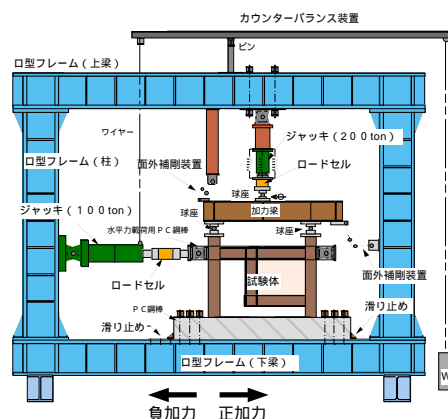


図-6 加力装置

荷した。この事は、梁に圧縮力が導入されることを意味する。図 - 7 に示す  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  を計測し、骨組の相関変形角と繫梁の部材角を測定した。載荷プログラムは正負交番漸増振幅繰返し載荷で、各変位振幅で3回の繰返し載荷を行った。

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$$

$$H = P + N \cos \theta$$

$$N = 529 \text{ kN}$$

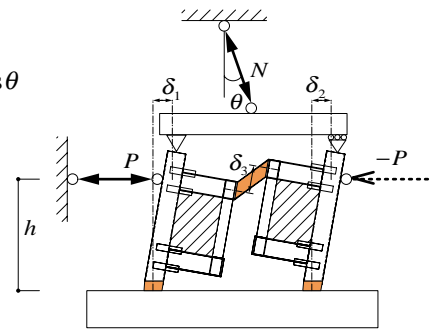


図 - 7 計測方法

### 3. 実験結果と結果の考察

#### 3.1 荷重 - 変形関係と降伏機構

図 - 8 に各試験体の水平荷重と層間変形角の関係を示す。以下、RCF試験体を除く耐震壁試験体の性状について述べる。図中の一点鎖線は、試設計12層建物の各種地震波に対する動的解析により得られた最大応答水平荷重(耐震壁の1層部分における設計用せん断力)である(図 - 3 参照)。全ての耐震壁試験体は、一点鎖線で示す設計用せん断力を上回る水平力時において転倒降伏機構を形成しており、せん断破壊を生じていない。最大応答水平力を上回る水平力を発揮している原因は、1)耐震壁の反曲点位置高さが12層建物の地震応答時と実験時では異なり、実験時の反曲点位置(2層床位置)の方が低い位置にある(図 - 6 参照)、2)転倒降伏耐力が解析と実験において異なり、実験における耐力の方が、鉄骨のひずみ硬化の影響により大きい、の二つであるが、前者の影響の方が大きい。耐震壁のせん断耐力は、最大水平力耐力実験値よりも大きいことは明らかであるから、いずれの耐震壁もせん断設計に関しては十分な余裕があると言える。図中の点線は転倒モーメント降伏機構時の全塑性耐力の計算値で、その計算式は図 - 9 に示すとおりである。 $M_t, M_c, Q$  の計算に用いる鋼材の

材料強度として降伏応力度  $\sigma_y$  および引張強さ  $\sigma_u$  (表 - 1 参照)を用いた場合について計算し、それぞれ細線と太線で示している。繫梁のせん断耐力は、H形鋼のウェブ断面積に  $\sigma_y \sqrt{3}$  (あるいは  $\sigma_u / \sqrt{3}$ ) を乗じて求めた。繫梁には、軸力、曲げモーメントも生じるが、終局耐力時におけるこれらの応力は弾性範囲にあるフランジにより十分負担できるような設計となっている。ま

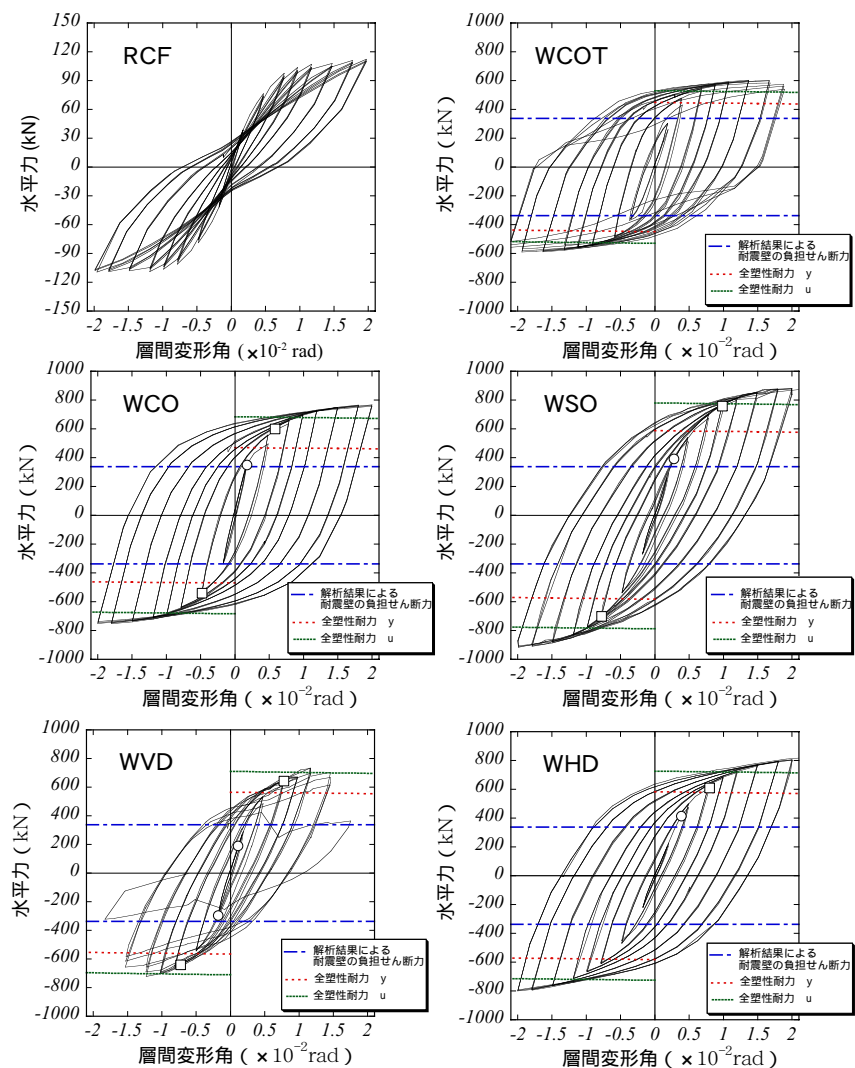


図 - 8 各試験体の荷重 - 変形関係



た、この仮定の妥当性については後述する。

フレーム試験体を含む全ての試験体は、設計時に想定した降伏機構を生じた。所定の繰返し载荷を行った後、大変形時まで载荷を行ったWSO試験体とWHD試験体の実験終了後の状況を写真-1に示す。耐震壁試験体は、フレーム試験体の5~8倍の水平耐力を保有しており、履歴ループの形状は、比較的小さな層間変形時からエネルギー吸収が可能な形状となっている。これが、本研究で提案する転倒降伏耐震壁の特性である。ただし、柱に鋼管横補強RC柱を用いたWCOT試験体は大変形時において復元力特性に劣化が見られるが、この原因は柱脚においてせん断スリップが生じた事による。この試験体の復元力特性には劣化は見られるが、水平耐力の低下は見られない。また、WCOT試験体とWCO試験体の違いは柱の構造形式の違いだけである。したがって、WCOT試験体とWCO試験体の復元力特性(エネルギー吸収能力)の違いは、鋼管横補強RC柱とCFT柱の性能の違いとみなす事ができる。鉛直ダンパーを用いたWVD試験体は $R=1.8 \times 10^{-2}$ rad.時に水平耐力を喪失している。これは、鉛直ダンパーが2本とも破断したためである(写真-2参照)。この場合も、鉛直荷重保持能力は維持している。履歴ダンパーには鉛直荷重保持能力を期待しない設計

となっているからである。

壁板に鋼板と高強度コンクリートを用いたWCOT、WCO試験体は、いずれも剛性が高い。他の3体の耐震壁試験体は、この2体に比較すると剛性がやや低い。特にWSO試験体の剛性が低いが、これは他の試験体に比較すると開口幅が若干大きいためである。鉛直ダンパーが破断したWVD試験体の鉛直ダンパーを繫梁に取り替えたWHD試験体は、再び転倒モーメント降伏機構による安定した復元力特性を示した。

壁板の終局水平耐力(転倒モーメント耐力)は、図-9に示す算定式において、鋼材の引張強さ $\sigma_t$ を用いることによりほぼ評価できることが分かる。この耐力は、理論的には上限耐力であるが、実験値は大変形時にこの上限計算値より若干大きな耐力を発揮している。これは、繫梁のせん断耐力の評価にH型钢フランジの杵効果を無視しているためと思われる。

### 3.2 繫梁の変形と層間変形角の関係

図-10に、繫梁を用いた耐震壁試験体の繫梁に生じた部材角と層間変形角の関係を示す。図-10より、繫梁には、層間変形角の3~5倍の部材角が生じていることが分かる。この事より、繫梁は小さな層間変形角で早期降伏し、地震時における履歴型ダンパーの役割をすることが期待できる。図-10に示す関係は、いずれの試験体も次に述べる共通の特徴を持っている。すなわち、比較的急勾配の2本の平行線とその間を結ぶ勾配の緩い多数の線よりなっている。勾配の緩い線の本数は実験における振幅数に対応している。急勾配の直線の勾配は、降伏機構時における繫梁の部材

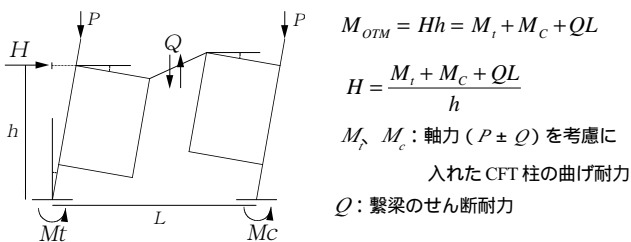
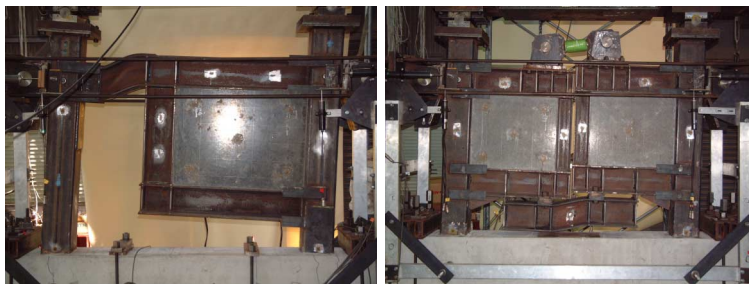


図-9 全塑性耐力の計算仮定



WSO 試験体

WHD 試験体

写真-1 実験終了後の状況

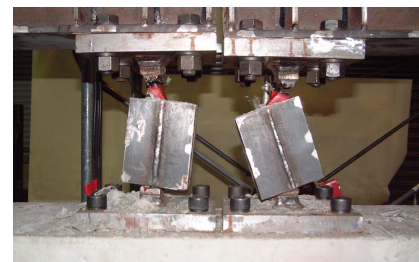


写真-2 鉛直ダンパーの破断

角と層間変形角の関係で、壁板を剛体と仮定すれば、柱の塑性ヒンジの回転中心の位置と試験体の形状から幾何学的関係より求まる。2本の平行直線の幅の広さが、壁板のせん断変形およびCFT柱脚のせん断変形(スリップ変形を含む)の大きさにほぼ対応していると考えることが出来る。したがって、平行直線の幅の事をここではせん断変形と書くことにする。WCO試験体と他の試験体を比較すると、WCO試験体のせん断変形が小さいことが分かる。この原因は壁板を鋼板により補強しているためである。WCOT試験体は、壁板を鋼板により補強しているにもかかわらずせん断変形が大きいのは(RC)柱脚部のせん断変形が大きいためである。特に大変形時には柱脚部でスリップ変形を生じるようになるため、せん断変形が大きくなるとともに、繫梁の変形と層間変形角の关系到スリップ現象が見られるようになる。

せん断変形が小さくなるようにすれば、繫梁はダンパーとして効率的に機能するという事になる。ただし、この場合は「繫梁の疲労破壊」、「溶接部の亀裂」が生じないような配慮が必要である。本実験の範囲においては、繰返し載荷後大変形まで載荷した試験体においても「繫梁の疲労破壊」、「溶接部の亀裂」は観察されなかった。なお、本実験においては前述したように、実際の場合よ

りも反曲点位置が低い状態で載荷を行っている。したがって、せん断変形の影響が見かけ上大きく出ていることに注意する必要がある。言い換えると、実際の構造物中における転倒降伏耐震壁の性状は、図-8に示すよりも、剛性が高くエネルギー吸収能力も大きいものと思われる。なお、「繫梁の疲労破壊」、「溶接部の亀裂」に関しては、厳しい条件となるが、本実験においては大変形まで載荷した場合もこれらの現象は観察されなかった事から、繫梁にロールH形鋼を用いる限りあまり問題はないものと推察される。

#### 4. 結論

本研究で提案する各種転倒降伏耐震壁に関して実験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1)耐震壁の変形性状は、設計時に想定したように、柱脚に形成される塑性ヒンジと繫梁の変形性状に支配され、エネルギー吸収能力の大きい安定した復元力特性を示した。ただし、鉛直ダンパーを用いた試験体(WVD)については、鉛直ダンパーが比較的早期に破断したため、設計詳細を検討し直す必要がある。
- 2)繫梁は、小さな層間変形角での繰返し載荷時にエネルギーを吸収することから、履歴ダンパーとしての性能が期待できる。
- 3)繫梁の取替えが容易なWHD試験体の構造詳細が、耐震性能の観点からは最も優れていると考えられる。

謝辞：本研究は平成15年度基盤研究B(課題番号：15360300、研究代表者：九州大学大学院 崎野建治)の一環として行った。論文全般に渡って九州大学助手日高桃子氏の、実験に際しては、九州大学大学院技官川口晃氏、九州大学大学院生上枝豊氏、九州大学4年生田口雅浩氏の協力を得た。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Hitaka, T. and Sakino, K., "Seismic Performance of Multi-Story Frames Incorporating Composite Shear Walls," Proceedings of the International Conference on Advances in Structures (ASSCCA'03), Sydney, Australia, 22-25 June 2003, Volume 2, pp.1333-1338

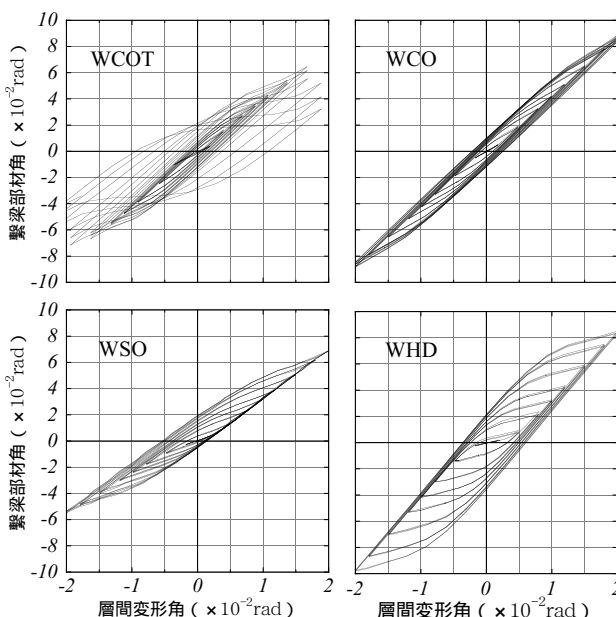


図-10 繫梁に生じる部材角と層間変形角