

ロッキング壁と鋼材ダンパーを用いた既存 RC 建物の耐震改修
SEISMIC RETROFIT OF EXISTING RC BUILDING
WITH ROCKING WALLS AND STEEL DAMPERS

曲 哲¹⁾, 元結正次郎²⁾, 坂田弘安³⁾, 吉敷祥一⁴⁾, 和田 章⁵⁾

Zhe QU¹⁾, Shojiro MOTOYUI²⁾, Hiroyasu SAKATA³⁾,
Shoichi KISHIKI⁴⁾, Akira WADA⁵⁾

1) 東京工業大学都市地震工学センター, ポスドク研究員 Ph.D.

¹ PD Researcher, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

e-mail : m.quzhe@gmail.com

2) 東京工業大学総合理工学研究科, 准教授 工学博士

² Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

e-mail : motoyui.s.aa@m.titech.ac.jp

3) 東京工業大学建築物理研究センター, 准教授 工学博士

³ Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

e-mail : hsakata@serc.titech.ac.jp

4) 東京工業大学建築物理研究センター, 助教 博士(工学)

⁴ Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

e-mail : kishiki@serc.titech.ac.jp

5) 東京工業大学建築物理研究センター, 教授 工学博士

⁵ Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

e-mail : wada@serc.titech.ac.jp

ABSTRACT: G3 Building is a complex of the Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology. According to a seismic inspection carried out in 2006, the existing structure can not fulfill the current requirements of corresponding building standards and specifications. An innovative retrofitting solution is proposed. It consists of 6 pieces of pre-stressed concrete (PC) walls with pin connections at the bottom and dozens of steel dampers in the gaps between the PC walls and the existing SRC frame. When the structure is subjected to severe earthquakes along its longitudinal direction, the PC walls are expected to rotate around their bases without being heavily damaged.

キーワード: 耐震改修, 鉄筋コンクリート造建物, ロッキング壁, 鋼材ダンパー

1. 序

新耐震設計法が施行された1981年以前に建てられた建築物は当時の基準を満たしてはいたが、1995年に起きた兵庫県南部地震では大きな被害が集中した。このような建築物の耐震性を見直し、取り壊しをせずに耐震改修が盛んに行われている。しかしながら、一般的に行われている耐震改修の多くは層毎の耐力計算を行い、筋違や耐力壁の増設によってその耐力不足を補うという方法であり、建築物の耐震性能を全体として捉える観点が抜けている。

一方、十分に強い柱や連層壁は、動的なせん断力を効率良く負担することができ、建物が全体として耐力を発揮することができる¹⁾など。この効果を顕著に現した例として五重塔の心柱があり、著者ら²⁾はこの心柱効果をロッキング壁(以下、RW)として既存躯体に付加することによって取り入れ、既存建築物の耐震改修(以下、RW耐震改修)を本校すずかけ台キャンパスのG3棟とR1棟に適用した。

本論文ではこのRWと既存柱の間に介在させ、静的な抵抗力と付加的な減衰を期待する鋼材ダンパー載荷実験を行い、このダンパーの復元力特性と疲労性能を把握する。次いで本校すずかけ台キャンパスのR1棟を元にした一般的なRC造の多質点せん断系モデルを構築し、地震応答解析からRWのパラメータ等の違いが層間変形の均一化や既存躯体の損傷低減に及ぼす影響について考察を行う。



図 1 東京工業大学すずかけ台キャンパスにおける RW 耐震改修事例 (G3 棟)

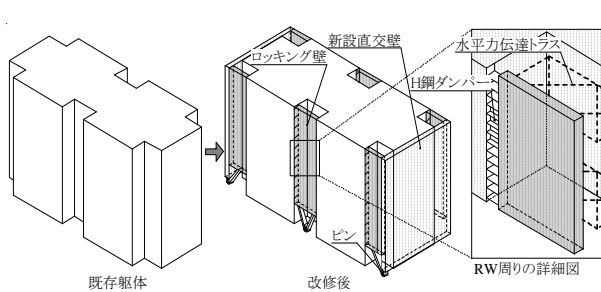


図 2 RW 耐震改修の概要

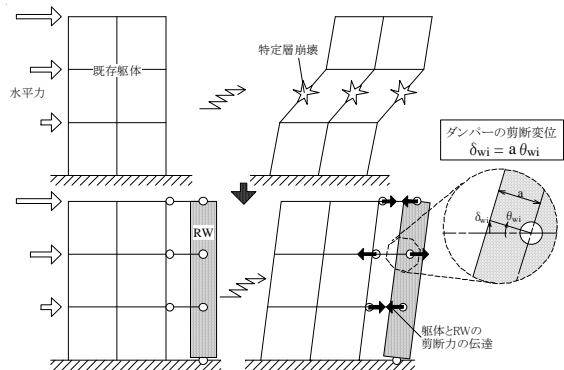


図 3 RW の心柱効果

2. RW耐震改修の概要

ロッキング壁と鋼材ダンパーを用いた耐震改修の概要を図2に示す。現在の建築基準では静的設計地震外力は A_i 分布を基に求められているが、実際に生じる層せん断力はこれに沿うとは限らず、仮に建物が基準を満たすような設計耐力分布であったとしても、ある層に作用するせん断力が早期にその耐力に達する場合がある。この場合には他の層に耐力の余裕が残ったまま、ある特定層の変形のみが進行し、層崩壊に至る可能性がある。これに対して剛強な壁を全層にわたって連続させ、基部を回転自由としたRWを配することで、自身の弾性剛性を介して全層の変形を均一化する心柱効果により特定層に生じる損傷

集中を抑制し、建築物全体の耐力を有効に発揮させることができる。すなわち、図3に示すように、層崩壊が起こりうる2層の層せん断力をRWが負担することで、その反力として上下層に層せん断力を分配する役割を果たす。

一方、静的設計地震外力などに対して各層の変形に大きな差が生じなければ、RWは抵抗力を発揮しない。これに対してはRWの回転変形に伴って生じるRWと既存躯体の鉛直方向の相対変形を利用し、既存躯体の間にせん断降伏型の鋼材ダンパーを配置することで静的な抵抗力と地震応答に対する減衰を期待する。本論ではこのRW耐震改修において、RWのパラメータが特定層崩壊の抑制効果・負荷の均一化に及ぼす影響を検討する。

3. せん断降伏型ダンパーの実験

3.1. 実験概要

まずRW耐震改修で使用されるダンパーについて、その復元力特性と疲労性能を把握するための載荷実験を行った。載荷装置のセットアップを図4に、試験体の寸法を図5に、試験体に使用した鋼材の材料試験結果を表1に示す。試験体のウェブには6mm厚の低降伏点鋼(LY225)を用い、この部位をせん断降伏させる。このウェブの上下と側面部にはフランジ(19mm)とスチフナ(9mm)を、中央部にはリブ(6mm)をそれぞれ取り付けることでウェブの面外座屈を補剛した。試験体はこれらの補剛材によって分割されたウェブの等価幅厚比³⁾が26.0(F)、45.3(T)、64.7(N)となる3種類を用意した。また、試験体Tは本実験の基準であり、実際に本校すずかけ台キャンパスの耐震改修に用いたダンパーと同一の等価幅厚比を有する。

実験は、等価幅厚比をパラメータとした漸増変位振幅載荷(以後、実験1)と、試験体Tに絞って目標せん断変形角 γ をパラメータとした疲労実験(以後、実験2)の2種類の実験を行った。実験1と実験2の載荷パターンを表2、表3に示す。

3.2. 実験結果と考察

【等価幅厚比と復元力特性(実験1)】

試験体T、N、Fのせん断力-せん断変形角関係の結果を図6に示す。図中の破線は材料試験結果から求めたせん断降伏耐力 Q_y の計算値である。

座屈補剛材がウェブ中央にない試験体Nではウェブの面外変形が早期に進行して最大耐力が低下した。実際の耐震改修で想定されるせん断変形(±2%程度)に対してこの程度の補強でも十分に安定した履歴挙動を示したが、ウェブの面外座屈の影響によりフランジ接合部分がめくれ上がる損傷が見られた。ダンパーは既存躯体にあと施工アンカーなどによって接合するため、接合部における局所的な引張力の作用は好ましくない。一方、幅厚比が50より小さい試験体T1やFでは安定した履歴挙動を示している。しかしながら、リブを密に配置した等価幅厚比26の試験体Fでは、ウェブ以外にリブやスチフナが負担するせん断力が増え、さらにウェブの座屈も生じないため、降伏耐力計算値の2倍以上の耐力を発揮している。このように等価幅厚比が非常に小さい場合には耐力が上昇し続けるため、既存構造物との接合部等の設計範囲が狭まると言える。したがって、ウェブの等価幅厚比は45程度が望ましいと言える。

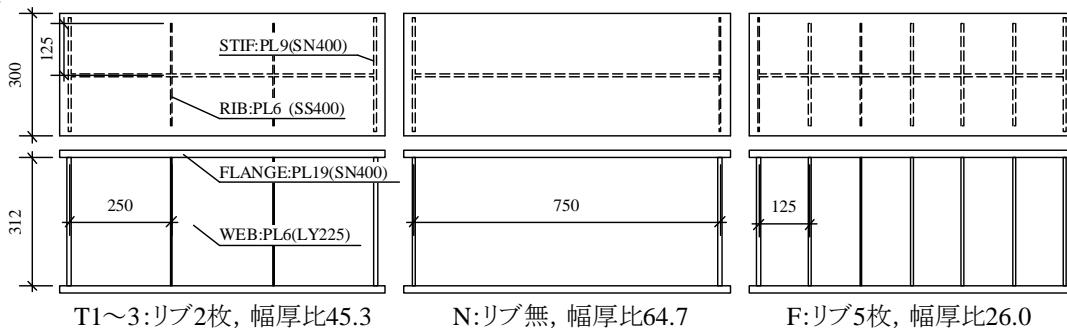


図5 試験体の寸法と等価幅厚比

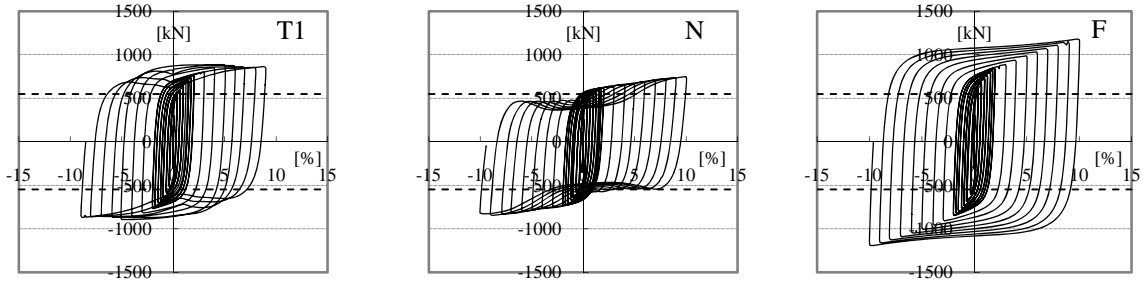


図6 せん断力-せん断変形角関係(リブ量の違い)

表1 材料試験結果

鋼材種	降伏応力 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	使用箇所
LY225	211	313	ウェブ(PL-6)
SN400	303	430	フランジ(PL-19) スチフナ(PL-9)
SS400	322	416	リブ(PL-6)

表2 実験1の载荷履歴

载荷パターン	三角波(各Cycle数)			
	0.08	0.34	1.25	1.50
層間変形角 (%)	0.68	1.00	1.75	2.00
T1, N, F	3Cycle	2Cycle	1Cycle	~

表3 実験2の载荷履歴

载荷パターン	Sin波
試験体NO.	層間変形角(%)
T2	1.5
T3	2.5

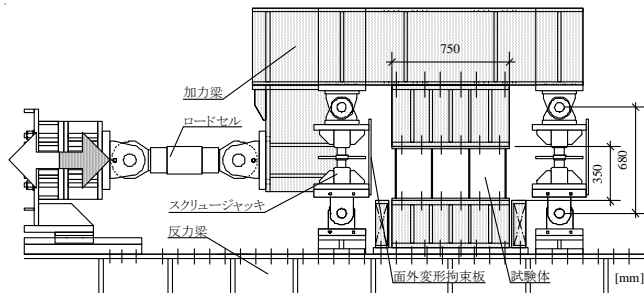


図4 実験装置の概要

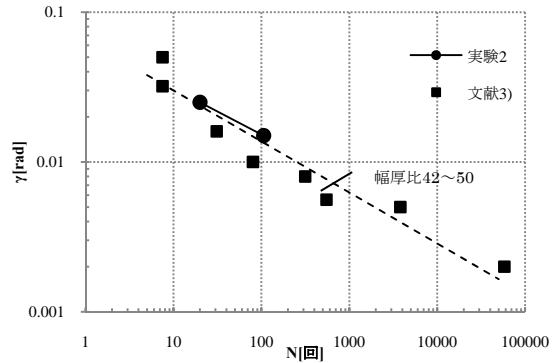


図7 既往の疲労曲線との比較

【疲労性能(実験2)】

試験体Tを対象として目標せん断変形角 $\gamma = 0.025, 0.015$ [rad.]の一定変位振幅载荷による疲労実験を行った。それぞれの実験より得られた1サイクルの耐力が最大耐力時の10%以下にまで低下した時の繰り返し数 N を疲労性能として図7に示す。図中には等価幅厚比42~50の実験結果と疲労曲線³⁾を併せて示した。本実験で使用したダンパーの等価幅厚比は45.3であり、疲労性能は既往の疲労曲線と概ね対応する。なお、実験で用いたダンパーのせん断降伏変形角は $\gamma_y = 0.0017$ であり、塑性率 μ 、累積塑性変形倍率 η は、 $\gamma = 0.025$ で $\mu = 14.7$ $\eta = 2110$ 、 $\gamma = 0.015$ で $\mu = 8.8$ $\eta = 1630$ であった。

4. RW耐震改修の解析モデルと解析内容

次にRW耐震改修によるRWの剛性やダンパーの有無が、既存躯体の層せん断力分布や層間変形角分布、エネルギー吸収量などに及ぼす影響を明らかにするため、多質点せん断系モデルを用いた非線形地震応答解析による検討を行った。

4.1 解析モデルの設定

RWによる耐震改修の既存躯体のモデルとして、本校すずかけ台キャンパスのR1棟を元に、図8に示す9層RC造のせん断系モデルを考える。一層あたりの重量は1000[ton]、階高は3.6mである。各層のせん断ばねの復元力特性には武田モデルを用いる。 i 層の弾性剛性 K_{i1} に対して二次剛性 K_{i2} は1/3倍、三次剛性 K_{i3} は1/300倍とした。最下層の K_{11} は、9層RC造の固有周期を $T = 0.02H$ から0.648[sec.](H :建物高さ)と仮定し、振動系に逆三角形の変位分布が生じたときの等価質量を M_{ud} として $K_{11} = 4\pi^2 M_{ud} / T^2$ か

ら決定した。また、 K_{i1} の分布は最上層の一次剛性が $K_{91}=0.2 K_{11}$ となる直線分布とした。

解析パラメータの一つとして、既存躯体の耐力分布を変化させ、以下の5種類の既存躯体モデルを設計した。

- 1) NM：Ai分布($C_b=0.3$)に沿って各層のせん断耐力を決定した基準となるモデル
- 2) OM：旧基準である水平震度分布を包括し、せん断耐力が三層毎に切り替わるモデル
- 3) PW：ピロティや吹き抜けを想定して1、2層のせん断耐力が基準モデルのせん断耐力以下となっているモデル
- 4) MS：基準モデルに対して中間層のせん断耐力が相対的に強いモデル
- 5) MW：基準モデルに対して中間層のせん断耐力が相対的に弱いモデル

以上、5種類の降伏耐力と層せん断力係数の分布を図9に示す。なお、ひび割れ耐力は降伏耐力の1/3倍とした。

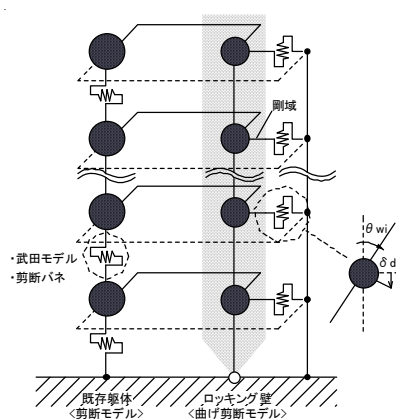


図8 解析モデル

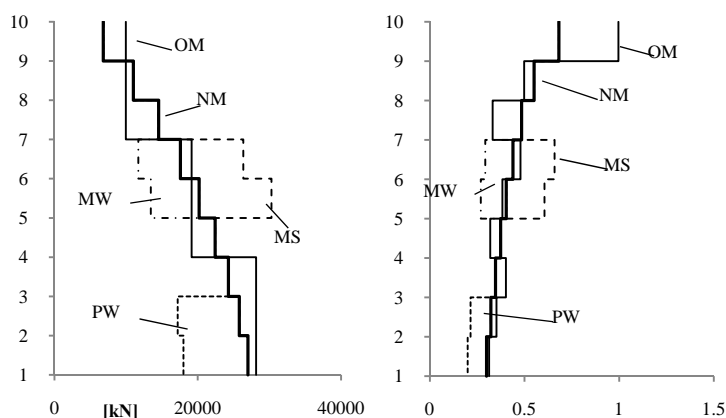


図9 モデルの降伏耐力と層せん断力係数分布

4.2 解析結果と検討

まずAi分布($C_b=0.3$)に沿って各層のせん断耐力を決定した基準モデルOMに対して、RW無し(N)、RWあり(W)、RWとダンパーあり(WD)の解析結果を考察する。解析より得られた最大層間変形角の分布を図10(a)に、RWのみを付与したモデルOM-Wについて最大層せん断力分布と、ある時間における既存躯体とRWの層せん断力の負担割合を図10(b)、(c)に示す。RWを付与することで相対的に耐力が弱い層の層せん断力をRWが負担し、各層の層間変形角を均一化していることが分かる。すなわちRWが、相対的に強度に余裕のある層の耐力を有効に発揮させている。またRWに加えてダンパーを付与することで、層間変形角が全体的に抑制されていることが分かる。以下、RWの剛性、既存躯体のせん断耐力分布の違い、およびダンパー量をパラメータとした解析結果を考察する。

【RWの剛性と心柱効果】

RWの幅を490cmとして厚さを $t = 0 \sim 320\text{cm}$ とすることでRWの弾性剛性を変化させて行った解析の結果を図11に示す。ただし、RWは弾性を保つとし、RWの弾性剛性の影響を考察するためにダンパーは付与しない。

解析結果を見るとRWの厚さ $t > 40\text{cm}$ であればRWは十分な心柱効果を発揮している。すなわち、各層の最大層間変形角を均一化し、各層のせん断耐力を引き出している。一方、RWが厚くなって弾性剛性が大きくなるにつれてRWの負担するせん断力と曲げモーメントは大きくなるが、既存躯体の最大層間変形角や負担せん断力が減少するわけではない。したがって、耐震改修の観点からいえば、RWには必要以上の厚さは不必要であると言える。また、この検討結果からRWの必要十分な厚さを80cmとして以後の解析を行った。

【設計層せん断力分布の違いと心柱効果】

前述したせん断耐力分布の異なる5種類の既存躯体モデルに対して行った解析の結果を図12に示す。各層の最大層間変形角と最大層せん断力の分布から、RWが既存躯体モデルのせん断耐力分布に依らず、

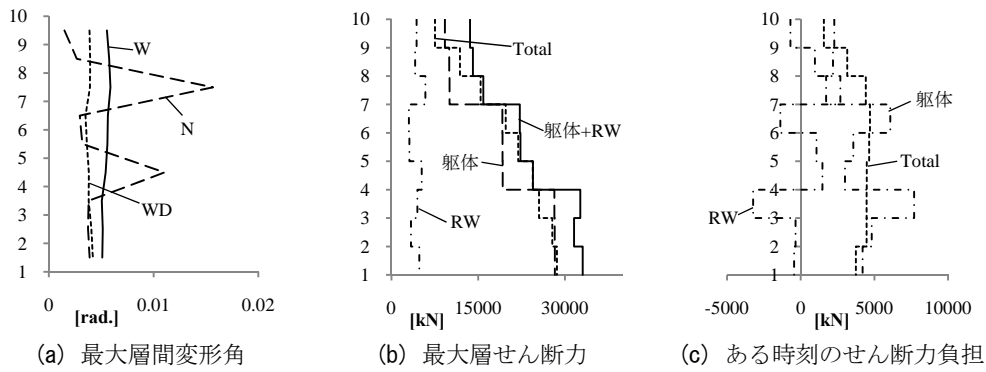


図 10 基準モデル OM の解析結果

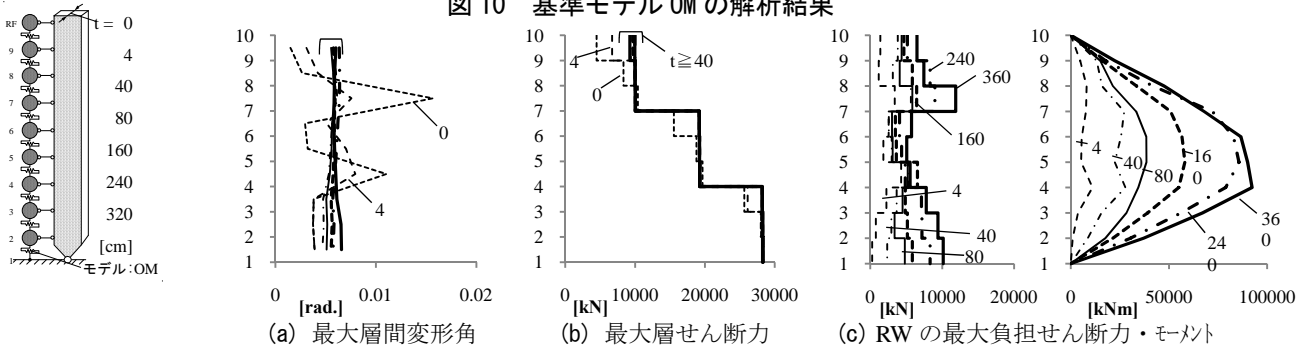


図 11 RW の剛性をパラメータとした解析の結果

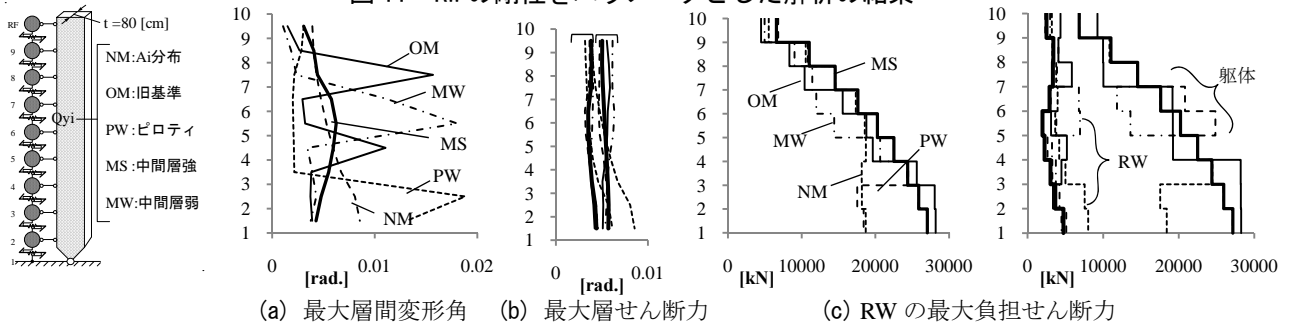


図 12 せん断耐力分布をパラメータとした解析の結果

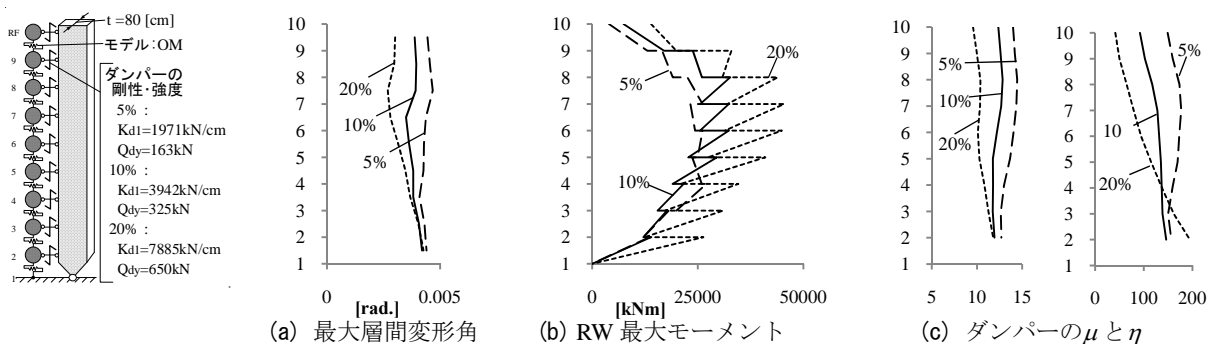


図 13 ダンパー量をパラメータとした解析の結果

耐力の弱い層に合わせて如何なるせん断力も補い、各層の最大層間変形角を均一化していることが分かる。また、全層が基準モデルの耐力を満たし、かつ部分的に耐力が高い場合には、耐力が高い層についてもその耐力を引き出していることが分かる。

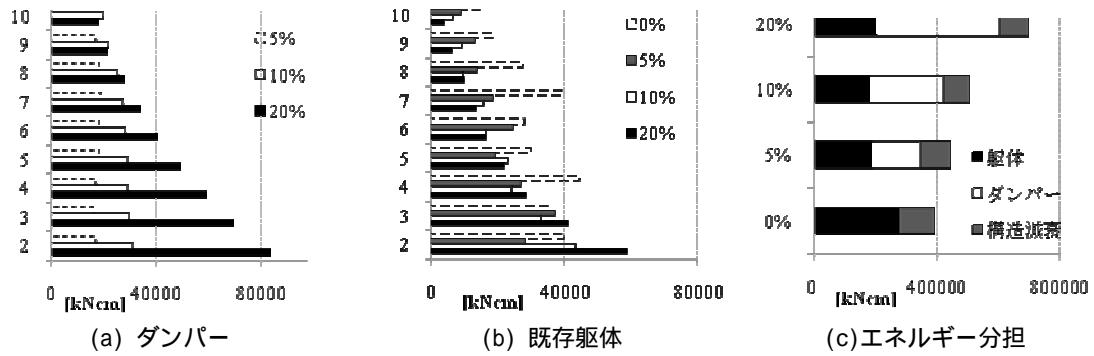


図 14 各階のエネルギー吸収量

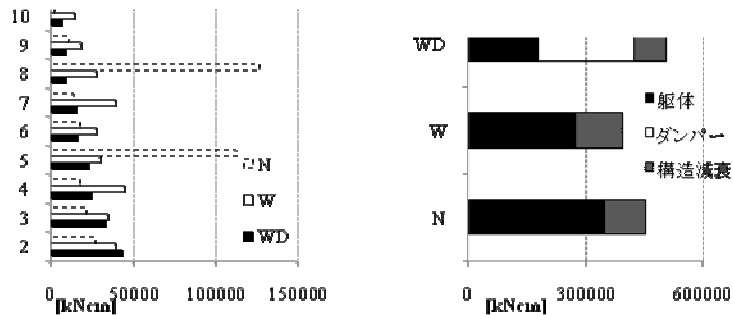


図 15 N・W・WD の躯体各階の吸収エネルギーと各種吸収エネルギー

【ダンパーの強度とエネルギー吸収量】

RWには上述のように動的な外力に対しては効果があるが、各層の変形差が小さい静的な外力分布に対しては効果がない。一方、ダンパーはRWの回転変形によって抵抗力を発揮するため、静的な抵抗力を付加したことになる。ダンパーの抵抗転倒モーメントとRWに逆三角形分布の水平力がはたらくと仮定した時の転倒モーメントとの釣り合いから、RWの最下層が負担する静的な層せん断力 Q_{w1} が求められる。これと躯体最下層の耐力 Q_{fl} との比を C_q とし、 $C_q = Q_{w1} / Q_{fl} = 5, 10, 20\%$ とし、解析を行った。

解析結果を図13～図15に示す。ダンパーの静的な抵抗力が大きくなるにつれ、躯体の層間変形角が抑えられていることが分かる。しかし、既存躯体の吸収エネルギー量(損傷)はダンパーを付加することで軽減されるが、ダンパーの強度が大きくなっても吸収エネルギーの軽減は見られない。これは、各階ダンパーの最大塑性率 μ の大小に比べて累積塑性変形倍率 η の大小が2, 3階において $C_q = 20\%$ で逆転していることや、各階ダンパーの吸収エネルギーが $C_q = 20\%$ では三角形分布になっていることから、ダンパーのはたらきが下層部に偏っているためであるといえる。ダンパーに期待する効果を、既存躯体に生じるせん断力や層間変形角や吸収エネルギーの全体的な低減とすれば、 C_q を10%程度としてダンパーの設計をするのが望ましいといえる。また、この時ダンパーの μ と η は最大でも13と150程度であり、前章の実験で得られた結果と比較して十分に安全な範囲で使用できる。

5. 結

本論文ではロッキング壁と鋼材ダンパーによる耐震改修の有用性を把握するため、ダンパーの繰り返し履歴挙動や疲労性能を確認するとともに、既存躯体の耐力分布と、RWの剛性やダンパー量をパラメータとした数値解析による検討を行った。この結果、RWには心柱効果を発揮する必要十分な剛性があること、ダンパーには期待するエネルギー吸収を効率的に発揮する強度があることを示した。

謝 辞

元東京工業大学ポスドク研究員 伊藤浩資博士、日建設計・石井正人氏には、数値解析とモデル化について御教授戴きました。また、本論文における検討は、元東京工業大学大学院生 内山裕太君の修士論文

として行いました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 秋山 宏, 高橋 誠: 損傷分散型多層骨組のDs値, 日本建築学会論文報告集, pp.54-61, 第341号, 1984.7
- 2) Akira Wada, Zhe Qu, Hiroshi Ito, Shojiro Motoyui and Hiroyasu Sakata : SEISMIC RETROFITTING USING ROCKING WALLS AND STEEL DAMPERS Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, 2009 ATC & SEI of ASCE Conference USA, 2009.12
- 3) 成原弘之, 中込忠男: 低降伏点鋼製せん断パネル型履歴ダンパーの低サイクル疲労曲線, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.9