

中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁の復元力特性

低降伏点鋼を用いた境界梁ダンパーに関する研究 その2

RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF COUPLING BEAM DAMPERS

Coupling beam dampers with low yield point steel (Part 2)

熊谷仁志*, 島崎和司**, 林 静雄***

Hitoshi KUMAGAI, Kazushi SHIMAZAKI and Shizuo HAYASHI

RC coupling beams with low-yield-point steel web panel in the mid-span (coupling beam damper) have been developed and applied to actual buildings. Cyclic loading tests had been performed, resulting that the coupling beam dampers provided the stable hysteretic performance and load carrying capacity did not deteriorate up to 1/20 of drift angle.

In this paper, finite element analysis has been carried out to evaluate the shear buckling strength of the coupling beam damper. It is verified that the low-yield-point steel web panel (with width-thick ratio of about 15) of the coupling beam damper is thick enough to avoid shear buckling. Restoring force characteristics of the coupling beam dampers for structural design is also proposed. An appropriate modeling of RC parts is important to represent the total structural performance.

Keywords : Steel damper, Low yield point steel, Coupling beam, Restoring force characteristics

鋼材ダンパー, 低降伏点鋼, 境界梁, 復元力特性

1. はじめに

筆者らは, 高層建物に鉄筋コンクリート造 (RC) の立体耐震壁 (コアウォール) を配置し, コアウォール間を中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁 (以下, 境界梁ダンパーとする) で連結する構法を研究開発しており, その実験結果や適用事例について報告してきた¹⁾²⁾。境界梁ダンパーは地震動によって建物へ入力するエネルギーを効果的に吸収し, コアウォールなど主要構造の損傷軽減が期待できる。

本論文は 2 編で構成され, 前編¹⁾ (その 1) では, 境界梁ダンパーの曲げせん断実験結果から, 基本的な構造性能および根巻き接合部におけるせん断力伝達機構について検討を行った。境界梁ダンパーは紡錘形の復元力特性を示し, 等価粘性減衰定数にして梁全体部材角 $R=1/400$ で 10% 程度, $1/200 \sim 1/100$ で 20% 程度, $1/50$ 以降で 30% 程度の優れたエネルギー吸収能力を有していることが確認された。一方で最終的に $R=1/20$ まで加力を行い, 材料強度として引張強さを用いて計算したダンパー部せん断耐力の約 1.5 倍に至っても耐力は低下しなかった。ダンパー部の終局状態については, さらなる検討が必要であることが確認された。

本編 (その 2) では, まず境界梁ダンパーの曲げせん断実験結果を分析し, RC 部の変形を分離することによって, ダンパー部のせん断力-せん断変形関係を抽出する。次に中央のダンパー部を対象

として有限要素法を用いた弾塑性大変形解析を行い, 実験結果から抽出したダンパー部のせん断力-変形関係と比較して評価を行う。

最後に, 構造設計 (地震応答解析) に用いる, 境界梁ダンパーの復元力特性のモデル化手法について提案を行う。

2. 実験概要

境界梁ダンパーの曲げせん断実験については前編¹⁾ (その 1) で詳細に報告しているため, 本編ではその概要について記す。

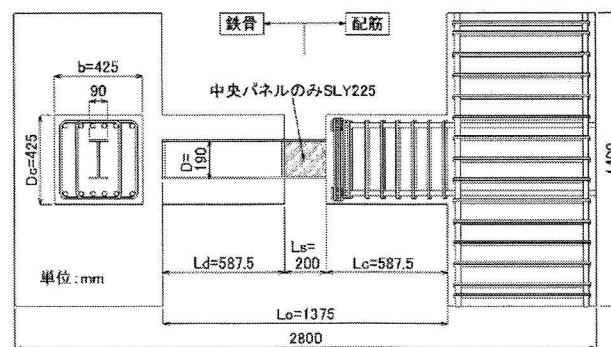


図 1 試験体の形状および配筋 (No.5 の例)

* 清水建設株式会社 主任研究員・工修

** 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

*** 東京工業大学セキュア材料研究センター
教授・工博

Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.
Prof., Secure Materials Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

表1 本論文で検討を行う試験体の諸元

試験体	スパン L_o (mm)	鉄骨 (せいを D とする)	埋込長 L_d (mm)	RC 部寸法 (mm)			L_d / D	主筋 上下	せん断 補強筋
				幅 b	せい D_c	長さ L_c			
No.3	1000	BH-200×100×12×12	387	300	450	400	1.94	4-D22	4-D10@57
No.5	1375	BH-190×90×12×9	587.5	425	425	587.5	3.09	6-D22	4-D10@75
No.7	850	BH-150×100×12×9	325		350	325	2.18	4-D22	先端部に集約補強筋

試験体は図1に示すような中央に鋼材ダンパーを有する境界梁の約1/2の縮小モデルである。厚さ12mmの低降伏点鋼LY225をH形鋼の中央ウェブに溶接により組み込み、他の部分にはすべて普通鋼SS400を用いている。ダンパー部の区間は200mmで共通である。H形鋼のRC部への接合方法、施工方法、埋め込み長さなどをパラメータとして計7体の実験を実施したが、本論文ではRC梁端部まで埋め込んだ根巻き接合タイプの試験体No.3, No.5, No.7について検討を行う。これらの試験体は表1に示すように内法スパンが異なっており、それに伴って埋め込み長さも変化している。

加力サイクルは図2に示すようにスタブ間変形 δ を内法スパン L_o で除した梁全体変形角 R で制御した。 $R=1/2000$ (1サイクル) → $1/1000$ (1サイクル) → $1/400$ (3サイクル) → $1/200$ (3サイクル) → $1/100$ (6サイクル) → $1/50$ (3サイクル) → $1/33$ (1サイクル, No.3はこのサイクル無し) を加力した後、正側で $1/20$ まで加力した。プロトタイプ建物の地震応答解析結果によれば、 $R=1/100$ が概ね最大速度500mm/secレベルの地震動に対する梁応答変形角(層間変形角では $1/200 \sim 1/100$)に相当する。

スタブ間変形のほか、図2に示すようにRC部の変形(曲げ変形, せん断変形), ダンパー部抜出しによる変形, ダンパー端部のめりこみ変形を計測できるように変位計を設置した。

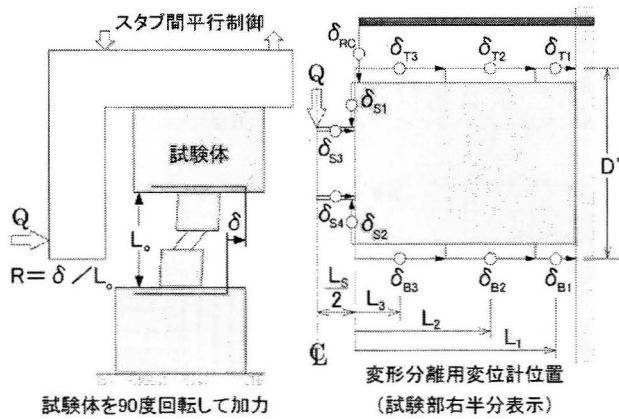


図2 変位計測方法

3. ダンパー部せん断力-せん断変形関係の抽出

図2の変位計測結果から以下のようにして各変形成分を求めた。

RC部曲げ変形

$$\delta_{RCF} = \sum \left[\frac{(\delta_{Ti} - \delta_{Bi})}{D'} L_i \right] \quad \dots \text{式(1)}$$

RC部せん断変形

$$\delta_{RCS} = \delta_{RC} - \delta_{RCF} \quad \dots \text{式(2)}$$

RC先端部回転角によるダンパー部変形

$$\delta_{RCR} = \left[\sum \frac{(\delta_{Ti} - \delta_{Bi})}{D'} \right] \frac{L_s}{2} \quad \dots \text{式(3)}$$

ダンパー部抜出しによる変形(ダンパー部曲げ変形を含む)

$$\delta_{SL} = \frac{(\delta_{S3} - \delta_{S4}) L_s}{d_w} \quad \dots \text{式(4)}$$

ダンパー端部めりこみ変形

$$\delta_{SI} = \frac{\delta_{S1} - \delta_{S2}}{2} \quad \dots \text{式(5)}$$

ダンパー部せん断変形

$$\delta_D = \delta - \delta_{RCF} - \delta_{RCS} - \delta_{RCR} - \delta_{SL} - \delta_{SI} \quad \dots \text{式(6)}$$

ここで、

L_s : ダンパー部の区間長さ

d_w : ウェブのせい(フランジの内側)

なお、式(1)~式(5)は左右の1/2について記述したもので、式(6)では左右それぞれについて計算した結果を合計したものをスタブ間変形 δ (全体変形)から差し引くものとする。

試験体No.5を例として、抽出されたダンパー部のせん断力-せん断変形関係を図3に示す。図3(a)のせん断力-全体変形関係では、逆S字型のスリップ挙動が見られるが、図3(b)のせん断力-ダンパー部せん断変形関係ではこうした挙動が取り除かれている。図3(c)はダンパー部せん断変形をダンパー部の長さ L_s で除してせん断変形角とし、ダンパー部ウェブ中央に貼付した3軸ひずみゲージから求めたせん断ひずみと比較したものである(ひずみゲージが計測可能であった $R=1/50$ の第1サイクルまでを示す)。両者は良く一致しており、今回行ったダンパー部変形の抽出方法は妥当であったと考えられる。これらは他の試験体でも同様であった。

図4は式(1)~式(6)によって計算した各変形成分の全体変形に対する比率を、正側サイクルピーク時について示したものである。3回以上繰り返しを行ったサイクルについては第1サイクルと最終サイクルのみを示している。 $R=1/2000$ ではダンパー部のせん断変形が占める割合は小さいが、 $R=1/400 \sim 1/200$ でダンパー部がせん断降伏するとその割合は上昇し、 $R=1/100$ では約50%、 $R=1/20$ では約70%に達している。RC部の曲げ変形・せん断変形・先端部回転

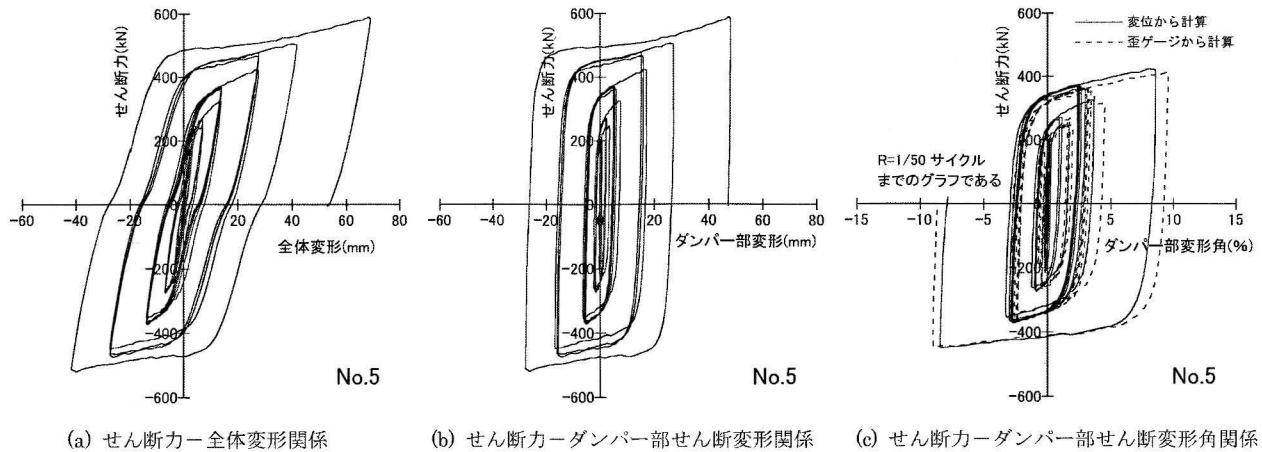


図3 ダンパー部のせん断力-せん断変形関係

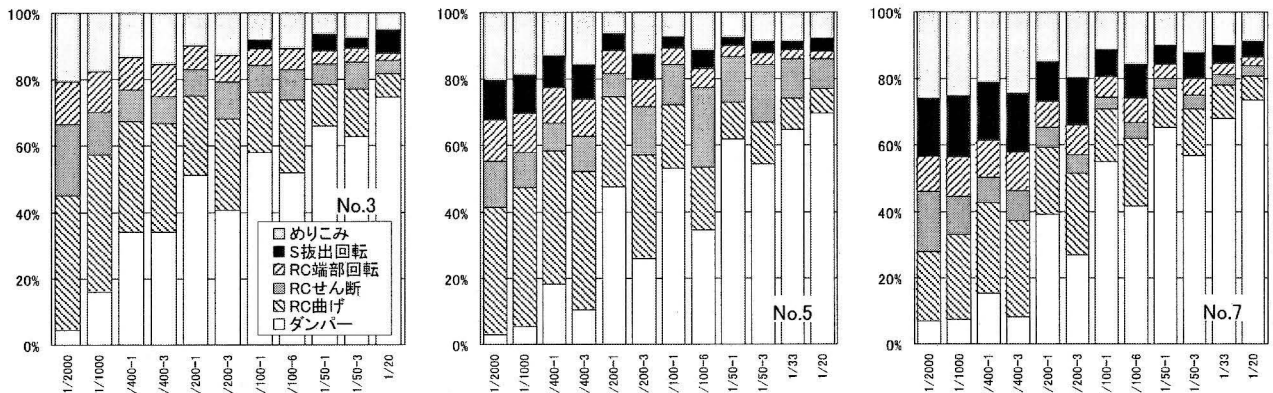


図4 変形成分の比率 (正側サイクルピーク時)

角による変形については、これとは反対に全体変形角の増加に伴って減少しているが、めりこみ変形は常に10~20%を占めており無視できない。拔出しによる変形は、試験体 No.7 を除き、それほど大きな割合にはなっていない。同一変形角での繰返しでは最終サイクルは第1サイクルに比べてダンパー部せん断変形の割合が小さく、せん断変形・めりこみ変形の割合が大きくなっている。

4. 有限要素解析

試験体 No.3, No.5, No.7 のダンパー部を取り出し、有限要素法を用いた弾塑性大変形・大ひずみ解析 (Updated Lagrange 法) を行った。解析には汎用有限要素解析プログラム MARC を用いた。フランジ・ウェブともに4 節点の積層シェル要素 (厚さ方向 11 層) を用い、降伏条件には Von-Mises の条件を、硬化則には等方硬化則を用いた。初期不整は考慮していない。試験体ダンパー部の左右にはリブプレートが溶接されていることから、両端のフランジ・ウェブの回転を拘束した境界条件を適用し、変形角にして 150% (変形 150mm) までウェブ面内せん断方向に強制変形を与えた。

解析に用いる真応力-真ひずみ関係は材料試験による公称応力-公称ひずみ関係を、香林らの研究³⁾を参考にして式(7)~式(9)を用いてモデル化した。最大公称応力時のひずみは 0.2 とし、それを超える大ひずみ領域では香林らの方法³⁾で外挿した (図 5)。

ひずみ硬化領域のモデル化

$$s/s_u = \left[\frac{2(e/e_u)}{(e/e_u)^2 + 1} \right]^{0.3} \quad \dots \text{式(7)}$$

公称ひずみから真ひずみへの変換

$$\varepsilon = \ln(1+e) \quad \dots \text{式(8)}$$

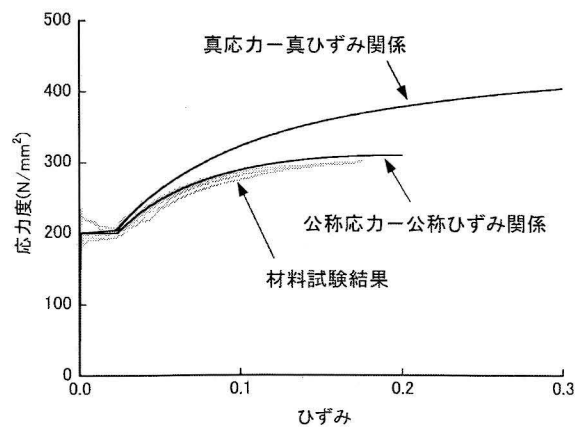


図5 真応力-真ひずみ関係の作成 (SLY225)

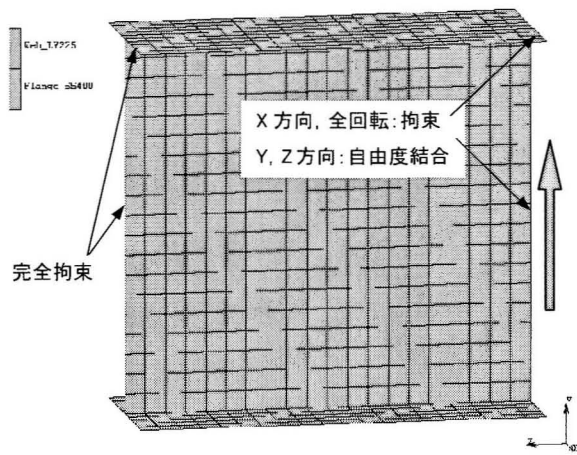


図6 解析モデル (No.5の例)

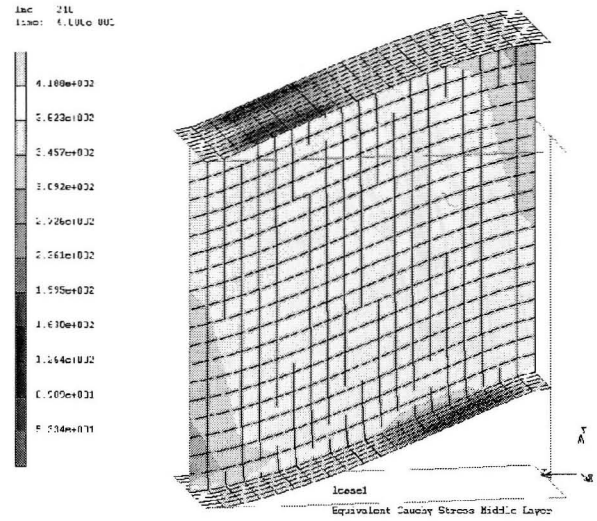


図7 変形角 30%時の相当応力コンター (No.3)

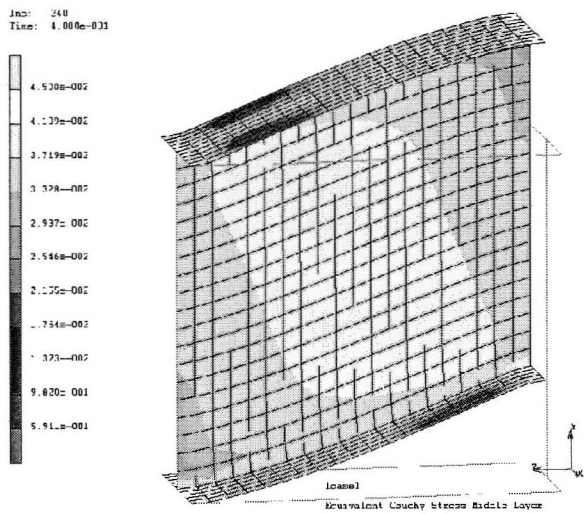


図8 変形角 30%時の相当応力コンター (No.5)

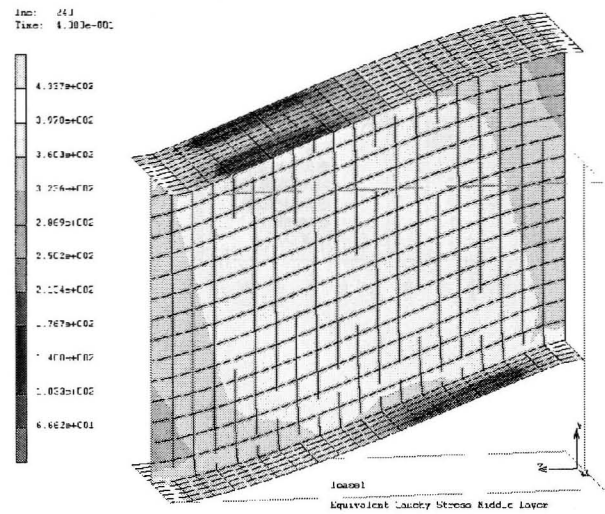


図9 変形角 30%時の相当応力コンター (No.7)

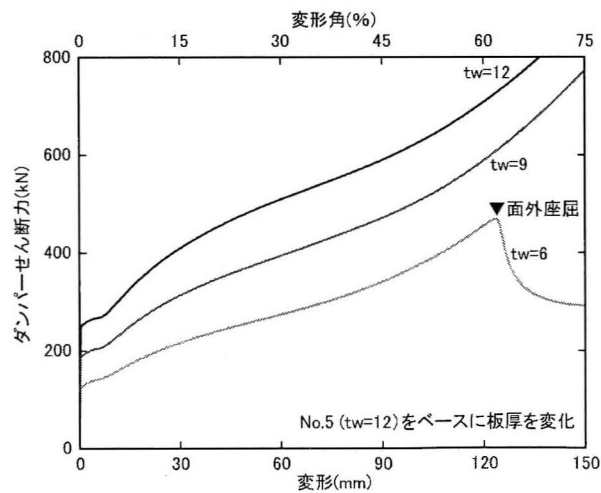


図10 せん断力-変形関係の比較
(No.5に対してウェブ厚を変化させた場合)

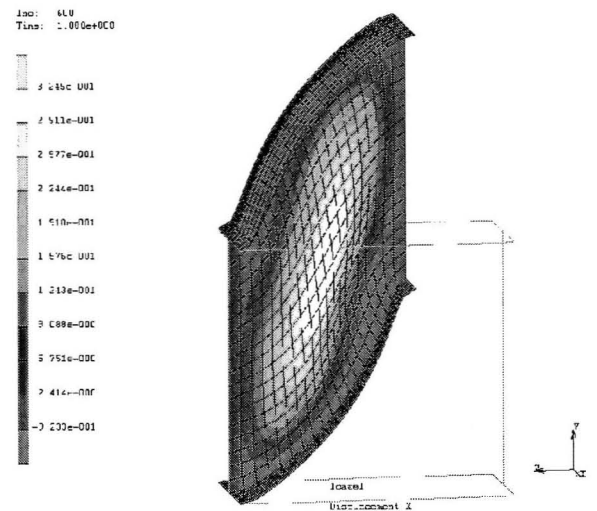


図11 変形角 75%時の面外変形コンター (ウェブ厚 6mm)

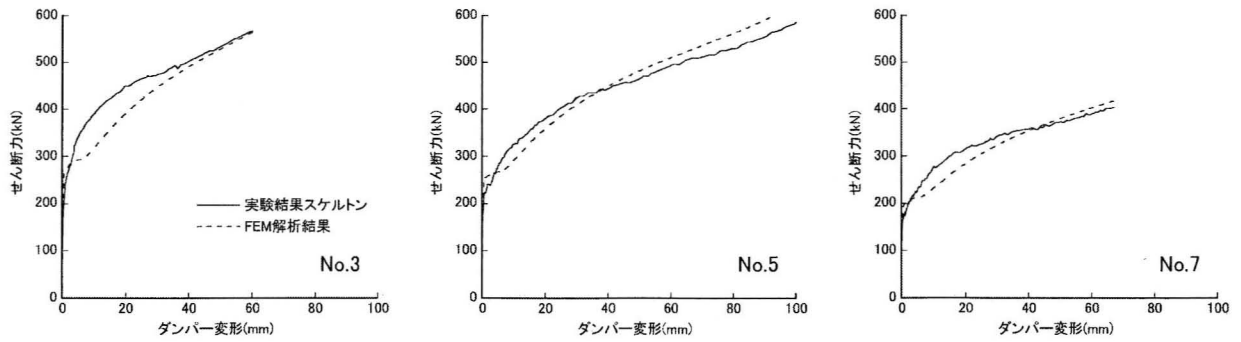


図 12 実験結果と有限要素解析結果の比較

公称応力から真応力への変換

$$\sigma = s(1 + e) \quad \dots \text{式(9)}$$

ここで、

- s : 公称応力, s_u : 最大公称応力 (引張強さ)
- e : 公称ひずみ, e_u : 最大公称応力時のひずみ
- ε : 真ひずみ, σ : 真応力

解析モデルを図 6 に、解析結果の一例として実験での $R = 1/33 \sim 1/20$ 時に相当する、変形角 30% 時の中心層の相当応力コンターを図 7~図 9 に示す。相当応力コンターを見ると、ウェブはほぼ一様な応力度になっているが、フランジの端部には局所的な曲げによる応力集中が認められる。変形角で 75% まで解析を行ったが、いずれのモデルについても座屈による耐力低下は示さなかった。そこで試験体 No.5 のモデル (ウェブ厚 $t_w = 12\text{mm}$, $d_w/t_w = 14.3$) に対して、ウェブ厚を 9mm ($d_w/t_w = 19.1$), 6mm ($d_w/t_w = 28.6$) と変化させた場合の解析結果を図 10 に示す。ウェブ厚 6mm の場合に、変形角 60% (変形 120mm) で耐力低下が発生した。このとき図 11 に示すように座屈による面外変形が生じていることが認められた。境界梁ダンパーは RC 梁に取り付くため、鋼材ダンパーの大きさに制約がありウェブの幅厚比 (d_w/t_w) が 15 程度と小さくなるのが特徴的である。筆者らが設計で対象としている 15 程度の幅厚比では、座屈による耐力低下は示さないものと考えられる。

図 12 に 3 章で求めた各試験体のダンパー部のせん断力-せん断変形関係 (骨格曲線) と有限要素解析結果の比較を示す。実験結果と解析結果は良く一致しており、有限要素解析によって境界梁ダンパーの終局耐力や骨格曲線を評価できるものと考えられる⁴⁾。

5. 設計用復元力特性モデルの提案

実際の構造設計 (地震応答解析) では部材数も多く、簡便なモデル化が求められる。前編¹⁾ (その 1) の RC 部の終局耐力評価では重ね梁モデルを用いているが、鉄骨と RC の付着を無視しているため剛性を過小評価してしまう。そこで本論文では図 13 に示すダンパー部と RC 部を直列に接続したモデルを用いて検討する。

4 章の有限要素解析の結果ではダンパー部のウェブについてはほぼ一様なせん断応力場が生じていることが確認された。そこで、ダンパー部については図 5 に示した真応力 (σ)-真ひずみ (ε) 関係を、式(10)および式(11)を用いて、せん断応力度 (τ)-せん断ひずみ (γ)

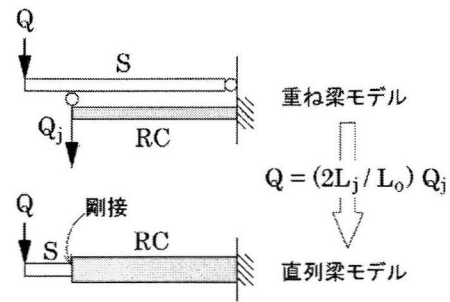


図 13 境界梁ダンパーのモデル化

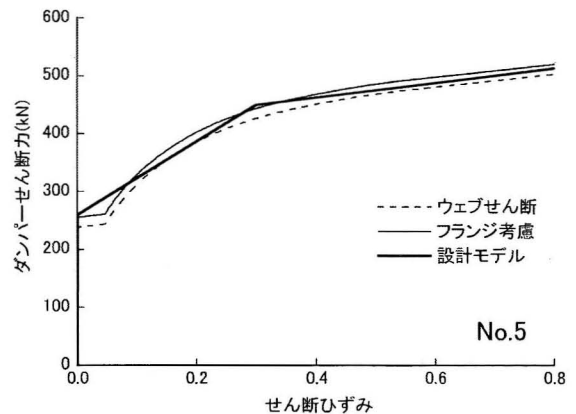


図 14 ダンパー部の復元力特性 (骨格曲線)

関係に変換する。これをもとに式(12)を用いて、ダンパー部のせん断力-せん断変形角関係を求めることができる。設計用復元力特性では図 14 に示すように、これを 3 折線で近似した Tri-linear モデルを用いる。降伏条件には Von-Mises の条件を、硬化則には等方硬化則を用いる。曲げ変形については弾性とし、拔出しによる変形は考慮しない。

真応力からせん断応力度への変換

$$\tau = \sigma / \sqrt{3} \quad \dots \text{式(10)}$$

真ひずみからせん断ひずみへの変換

$$\gamma = 2\varepsilon \quad \dots \text{式(11)}$$

ダンパー部のせん断力（右辺第 2 項はフランジを考慮）

$$Q_D = \tau t_w d_w + \frac{4\sigma_{fu} Z_{pf}}{L_s} \quad \dots \text{式(12)}$$

ここで、

σ_{fu} : フランジの引張強さ

Z_{pf} : フランジの塑性断面係数

RC 部の復元力特性については、曲げ変形・せん断変形ともに武田モデルを用いる。第 1 折れ点は曲げひび割れならびにせん断ひび割れ発生荷重となるが、それらは靱性保証型耐震設計指針⁹⁾を用いて計算する。ただし、直列梁モデルにおけるせん断力は材軸方向に一定であるが、実際には RC 部に生じるせん断力はダンパー部のせん断力よりも大きくなる。そこで、直列梁モデルの RC 部せん断ひび割れ発生荷重については式(13)の関係を用いて低減している。

RC 部せん断力(Q_j)からダンパー部せん断力(Q)への変換

$$Q = \frac{2L_j}{L_o} Q_j \quad \dots \text{式(13)}$$

ここで、

L_j : 鉄骨からの反力作用位置、ここでは終局耐力計算時¹⁾とは異なり RC 部長さ(L_c)とする

第 2 折れ点は RC 部の曲げ耐力・せん断耐力であるが、これらは前編¹⁾ (その 1) で詳述しており、今回対象とする試験体では曲げ耐力・せん断耐力に達しないため説明を割愛する。初期剛性に対する第 2 剛性の比率は断面解析の結果を参考にして 0.12 とし、除荷剛性を決定するパラメータは 0.2 とした。

このような RC 部の復元力特性（骨格曲線）と No.5 の実験結果の比較を図 15 に示す。図 15(a) に示した曲げ変形については適切なモデル化ができています。図 15(b) に示したせん断変形については剛性が高めになっている。先に述べたようにダンパー部のめりこみ変形は無視できないが、めりこみ変形はせん断ひび割れが拡大することによって生じることから、設計モデルでは簡単のため、めりこみ変形もせん断変形に含めて評価する。図 15(c) はせん断変形とめりこみ変形を合わせて示したものであり、設計モデルではせん断弾性剛性を 1/5 に低下させている。同図では試験体 No.5 を例として示しているが、いずれの試験体も見かけ上のせん断弾性剛性を 1/5 に低下させた場合に、めりこみ変形を含めた実験結果を概ね評価できている。

また、図 15(c) では繰り返しによって変形が増大していく傾向が見

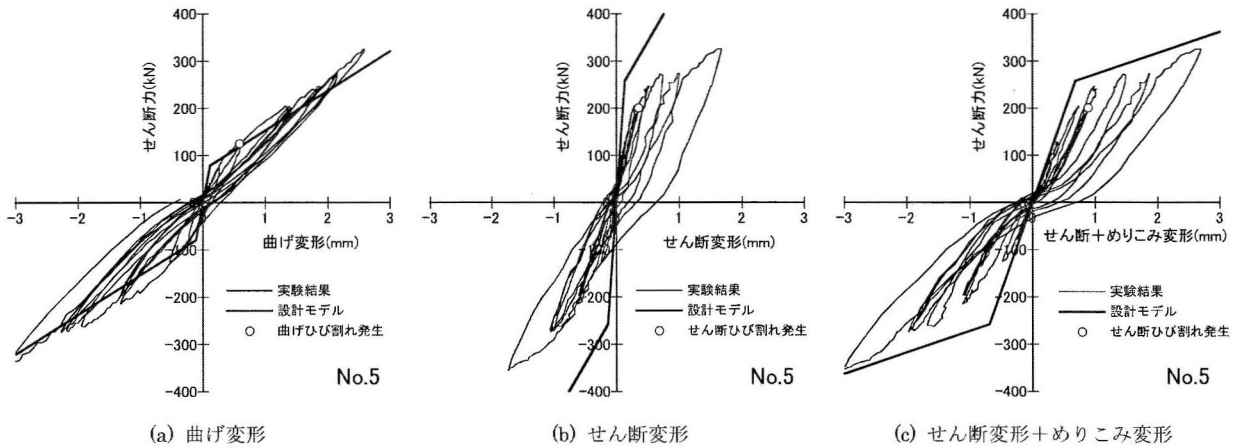


図 15 RC 部の復元力特性（骨格曲線）の適用性

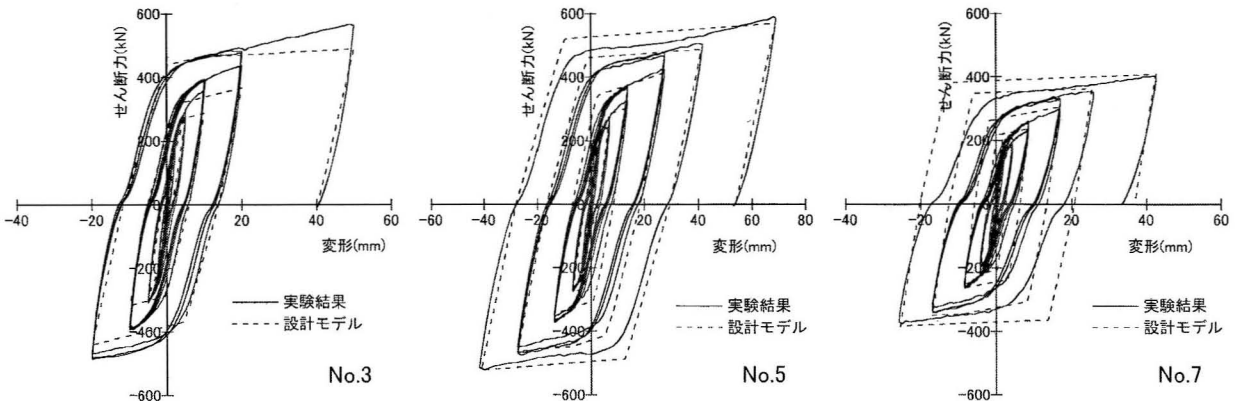


図 16 実験結果と設計モデルの比較（全体変形）

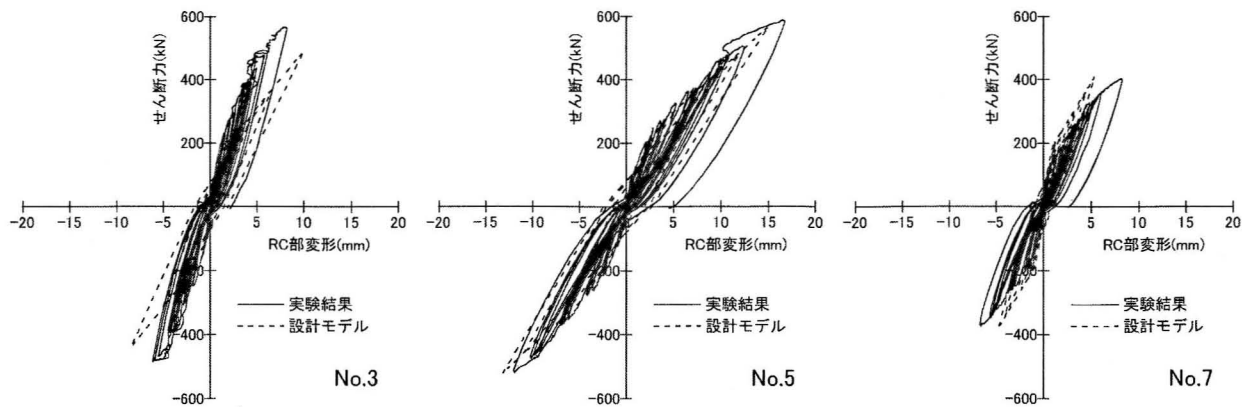


図 17 実験結果と設計モデルの比較 (RC 部変形)

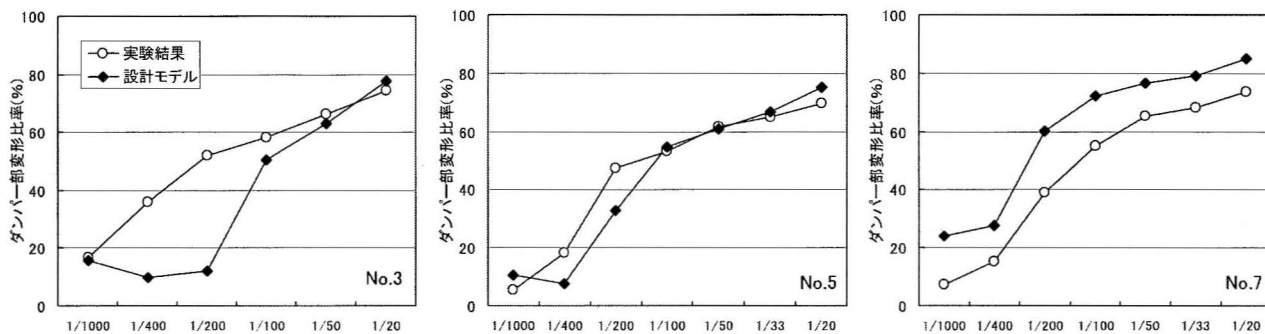


図 18 実験結果と設計モデルのダンパー部変形比率の比較

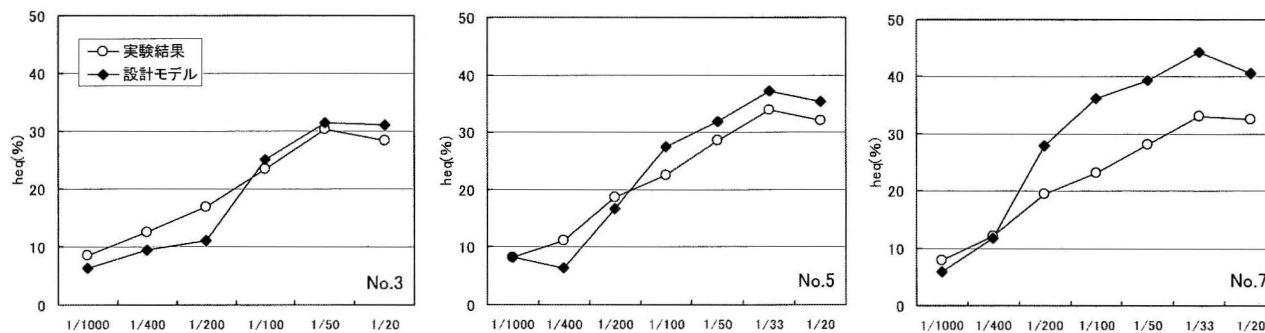


図 19 実験結果と設計モデルの等価粘性減衰定数の比較

られる。図 4 の説明でも述べたように、全体変形角 R として同一変形角での繰り返しでも、最終サイクルでは第 1 サイクルよりもダンパー部せん断変形の割合が小さくなり、せん断変形・めりこみ変形の割合が大きくなっていくことと符号している。現状ではこれらを定量的に評価するには十分なデータが無く、今後の課題である。

図 13 の直列梁キャンチレバーモデル (実際の左右 1/2 のモデル) に以上のような復元力特性を設定し、梁先端に実験におけるスタブ間変形履歴の 1/2 の振幅を作用させた (ただし同一変形での複数回繰り返しは行っていない)。図 16 は計算結果の梁先端の変形を 2 倍して全体変形として、図 17 は RC 先端の変形を 2 倍して RC 部変形として実験結果と比較したものである。せん断力-全体変形関係の形状としては、試験体 No.3 および No.5 については実験結果と一

致しているが、No.7 では実験結果のほうが逆 S 字型の傾向が強く現れている。耐力上昇の過程については、試験体 No.5 および No.7 については実験結果と一致しているが、No.3 では実験結果のほうがやや高くなっている。これらは設計モデルにおいて RC 部の変形を No.3 では大きめに、No.7 では小さめに評価していることが影響していると考えられる。図 13 のモデル図に示したように直列梁モデルでは RC 部とダンパー部を剛接合しているため、ダンパー部の RC 部からの抜出しによる回転角は表されていない。図 4 に示したように $R=1/200$ 程度の小振幅の範囲では、試験体 No.3 では抜出しによる変形が生じていないのに対して、No.7 では全体の 15% 程度の抜出しによる変形が生じており、ダンパー部の抜出しを無視したことによる影響が現れているものと考えられる。

図 18 はダンパー部変形比率の比較をしたものである。試験体 No.5 は設計モデルと実験結果が良く一致している。No.3 は小振幅の範囲ではダンパー部変形比率を過小評価しているが、 $R=1/100$ 以上では一致している。No.7 は全体としてダンパー部変形比率を大きめに評価している。

図 19 は等価粘性減衰定数の比較をしたものである。試験体 No.3 および No.5 については実験結果と一致しているが、No.7 については等価粘性減衰定数を大きめに評価している。

6. まとめ

中央に低降伏点鋼を用いた鋼材ダンパーを有する RC 境界梁（境界梁ダンパー）について、ダンパー部を取り出して有限要素法を用いた弾塑性大変形解析を行い、実験結果から抽出したダンパー部のせん断力-変形関係と比較を行った。また、地震応答解析に用いる境界梁ダンパーの復元力特性のモデル化についても検討を行った。その結果を以下に要約する。

- 実験結果の変形成分を分析すると、 $R=1/2000$ ではダンパー部のせん断変形が全体変形に占める割合は小さいが、 $R=1/400\sim 1/200$ でダンパー部がせん断降伏するとその割合は上昇し、 $R=1/100$ では約 50%、 $R=1/20$ では約 70%に達している。RC 部の曲げ変形・せん断変形・先端部回転角による変形については、これとは反対に全体変形角の増加に伴って減少しているが、めりこみ変形は常に 10~20%を占めており無視できない。
- ダンパー部を取り出して有限要素法を用いた弾塑性大変形解析を行った結果、実験結果のダンパー部のせん断力-変形関係（骨格曲線）と良く一致した。ウェブはほぼ一様な応力度になっていることが確認され、変形角 75%まで解析を行っても座屈は生じなかった。ウェブの板厚を試験体の 12mm（幅厚比が約 15）に対して半分の 6mm（幅厚比が約 30）として解析を行った結果、変形角 60%で座屈が生じ、耐力が低下した。初期不整の影響などで解析よりも座屈の発生が早まる可能性もあるが、筆者らが設計で対象としている幅厚比 15 程度では、境界梁ダンパーの座屈による耐力低下は考慮しなくてもよいものと考えられる。

- RC 部とダンパー部を直列に接合したモデルを用いて、境界梁ダンパーのせん断力-変形関係を表すことができる。その際、鋼材の材料試験から得られた真応力-ひずみ関係をせん断応力度-せん断ひずみ関係に変換し、Von-Mises の降伏条件と等方硬化則を用いることによって、ダンパー部の耐力上昇を評価することができる。RC 部については一般の RC 梁部材と同様に武田モデルを用いて概ね評価できるが、ダンパー端部のめりこみ変形やダンパー部の RC 部からの拔出し変形による影響を適切に考慮することが重要である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、清水建設株式会社の開発プロジェクト関係各位に支援をいただきました。実験の実施にあたっては、神奈川大学の教務技術主任五十嵐泉氏、島崎研究室学生・大学院生各位の協力を得ました。解析の実施にあたっては株式会社計算力学研究センターの石井英之氏の協力を得ました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄: 中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁に関する実験的研究-低降伏点鋼を用いた境界梁ダンパーに関する研究 その 1-, 日本建築学会構造系論文集, No.638, pp.755-763, 2009.4
- 2) 熊谷仁志, 松浦正一, 黒瀬行信, 梅津誠二: 工事記録/高強度 RC コアウォールと境界梁ダンパーを用いた超高層集合住宅, コンクリート工学, Vol.46, No.2, 2008.2
- 3) 香林洋, 山崎真司, 見波進, 石井大吾: 鋼材の応力歪関係の数式表現, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.859-860, 2002.9
- 4) 佐々木康人, 桂大輔, 佐々木聡, 田中清: 極低降伏点鋼を用いたせん断パネル型ダンパーの最大せん断耐力に関する考察-その 2 数値解析による検討-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.967-968, 2002.9
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999

(2009年3月10日原稿受理, 2009年6月15日採用決定)