

論文 梁の軸方向力を考慮した摩擦ダンパー筋違付き RC 門型架構の有限要素解析

毎田 悠承*1・坂田 弘安*2

要旨: 本論文では、ダンパー力対処用異形鉄筋を柱・梁の断面中央部に通した RC 骨組を対象として、摩擦ダンパー筋違付き RC 門型架構の有限要素解析を行った。解析において、ダンパー力に対して弾性範囲に保てる異形鉄筋を使用した場合、実験と同様、ダンパーは安定した履歴特性を示した。一方、ダンパー力に対して、降伏強度以内に抑えられない径の鉄筋を使用した場合、ダンパーの安定した軸変形が確保できなかった。梁に生じる引張軸力により梁のコンクリートのひび割れが大きく生じたためと考えられる。したがって、ダンパー力に対して、弾性範囲に保てる異形鉄筋を柱・梁断面中央に通すことは有用であると言える。

キーワード: 鉄筋コンクリート骨組, 摩擦ダンパー, 異形鉄筋, 有限要素解析

1. 序

鉄筋コンクリート（以下、RC）骨組の地震時応答制御のために、ダンパーを適用することは有効であるが、ダンパーを筋違型に取り付けると、ダンパー力の鉛直成分が柱に、水平成分が梁に軸力として作用する。通常、梁の軸力は考慮せずに設計されているが、筋違型ダンパーを取り付けた場合には梁に生じる軸力による梁耐力の増減、周辺架構への付加応力など、RC 骨組の力学挙動に影響を与える可能性がある。以上のことから、筆者らは柱・梁部材に生じる軸力に対処するため、RC 柱・梁全体の断面中央部に異形鉄筋を通した骨組を用い、摩擦ダンパー筋違（以下、単にダンパー）付き RC 門型架構の実験を行った¹⁾。既報¹⁾の実験では柱・梁部材断面中央にダンパー力対処用の異形鉄筋を通すことで、安定したダンパーの滑り量を確保できることを示している。

本論文では、実験を再現する有限要素解析モデルを製作し、そのモデルを基にダンパー力対処用異形鉄筋の径の違いが、RC 骨組やダンパーの挙動に与える影響などを検討する。

2. 解析対象とした実験の概要

2.1 試験体

試験体諸元を表-1に、RC 試験体詳細を図-1に、ダ

表-1 試験体諸元¹⁾

		CD-N	CD-D
部材中央部		異形鉄筋 D25 (SD490)	
ダンパーの有無		無	有
柱	$b \times D$ [mm]	320×320	
	F_c [N/mm ²]	27	
	主筋	12-D13 (SD390) $p_t=0.50\%$	
	帯筋	4-D6@70 (USD785) $p_w=0.57\%$	
	軸力 [kN]	461 (軸力比: 0.15)	
梁	$b \times D$ [mm]	130×280	
	F_c [N/mm ²]	27	
	主筋	上端筋	3+2-D10 (SD390) $p_t=0.98\%$
	主筋	下端筋	3+2-D10 (SD390) $p_t=0.98\%$
あばら筋	3-D6@60 (USD785) $p_w=1.23\%$		
スタブ	$b \times D$ [mm]	360×500	
	F_c [N/mm ²]	27	
	主筋	上端筋	4-D22 (SD345) $p_t=0.86\%$
	主筋	下端筋	2+4-D22 (SD345) $p_t=1.29\%$
あばら筋	4-D13@70 (SD345) $p_w=2.02\%$		

(b : 幅, D : せい, F_c : コンクリートの設計基準強度)

試験体名称

CD: 部材中央部異形鉄筋, N: ダンパーなし, D: ダンパーあり

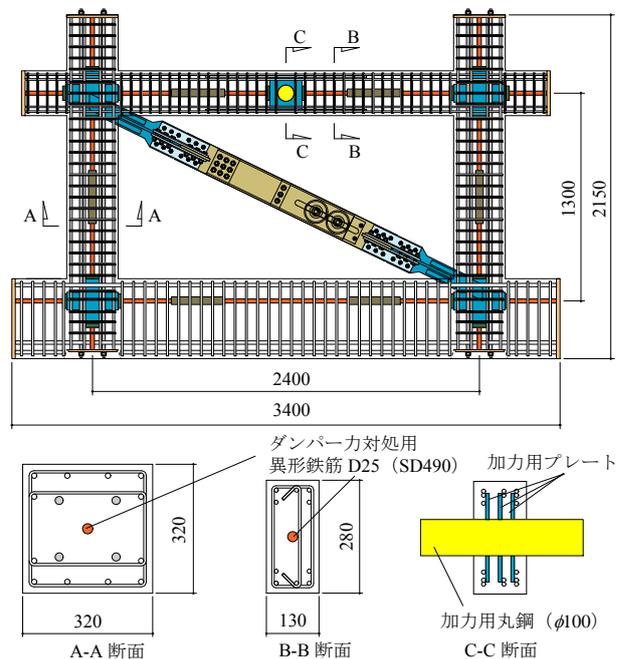


図-1 CD-D 試験体詳細¹⁾ (単位 [mm])

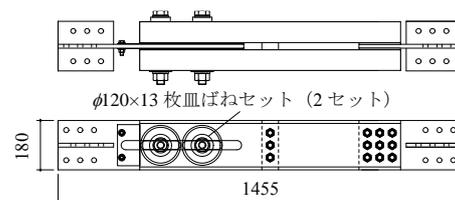


図-2 ダンパー詳細¹⁾ (単位 [mm])

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 助教 博士 (工学) (正会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 教授 工学博士 (正会員)

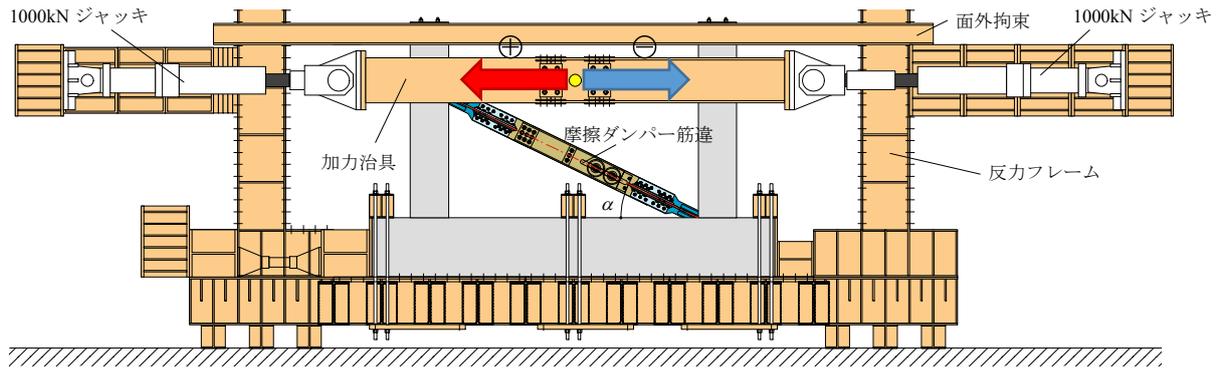


図-3 セットアップ¹⁾

ンパーの詳細を図-2に示す。解析対象とした試験体は、既報¹⁾で実験を行ったCD-Nと、CD-D試験体の2体である。RC試験体は、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準2010²⁾の構造設計例に示される7層RC造建築物の最下層を対象とした約1/3スケールの柱・梁からなる1層1スパンの平面門型架構(以下、RCフレーム)である。柱の軸力比は0.15(軸力 $N=461\text{kN}$)とした。ダンパーを接合するために柱梁接合部にガセットプレート(以下、G.PL)付き鋼板を埋め込んでいる。ダンパーは取り付け角度 α を 26.1° 、ダンパー軸方向の滑り力 N_D は 236kN に設定した。CD-N、CD-D試験体のRCフレームは同一諸元であり、筋違型ダンパーの取り付けによって柱・梁部材に生じる軸力に対処するため、RCフレーム全体の柱・梁の断面中央部に異形鉄筋を通して、その異形鉄筋はG.PL付き鋼板に溶接した。パラメータはダンパーの有無とし、ダンパーなしがCD-N、ダンパーありがCD-Dである。梁の断面中央に通す異形鉄筋は、ダンパー軸方向の滑り力 $N_D=236\text{kN}$ の水平成分 $N_{D,\cos}$ ($=N_D \times \cos\alpha=236\text{kN} \times \cos 26.1^\circ=212\text{kN}$)に対して弾性範囲に留めるように設計し、D25(SD490)を1本とした。これはD25(SD490)の規格降伏強度を基に算出される降伏耐力 $F_y=248\text{kN}$ (規格断面積 $A=506.7\text{mm}^2$ と規格降伏強度 $\sigma_y=490\text{N/mm}^2$ の積)が、 $N_{D,\cos}=212\text{kN}$ を超えるように鉄筋径と鋼種を決定したものである。柱の断面中央に通す異形鉄筋は梁と同一のものとした。試験体の詳細や、材料特性などは既報¹⁾を参照されたい。

2.2 荷荷方法

セットアップを図-3に示す。試験体のスタブ部分を反力フレームに固定している。梁中央から突出させた加力用丸鋼に加力治具を介して、左右からジャッキを取り付けることで、梁中央をピンとする加力を行った¹⁾。正加力時は図中の左側ジャッキを引張変位制御し、右側ジャッキは荷重0を保持する荷荷とし、負加力時はその逆で右側ジャッキを引張変位制御し、左側ジャッキは荷重0を保持する荷荷とした。目標加力サイクル等の詳細は既報¹⁾を参照されたい。

3. 有限要素解析の概要

3.1 解析モデル

解析には汎用有限要素法プログラム"FINAL ver.11"³⁾を用いた。解析モデルの要素分割を図-4に示す。コンクリート、鋼板、G.PLには四辺形要素を、鉄筋にはトラス要素を用いた。ダンパーは実験で用いたものの軸剛性、滑り力を考慮したトラス要素でモデル化した。コンクリートと柱・梁主筋、断面中央異形鉄筋との付着は、節点を別々に定義し、接合要素を用いて表現した。G.PL-ダンパー間のボルト接合部は、破壊しないと考え、力の伝達ができるように節点を共有させてモデル化した。

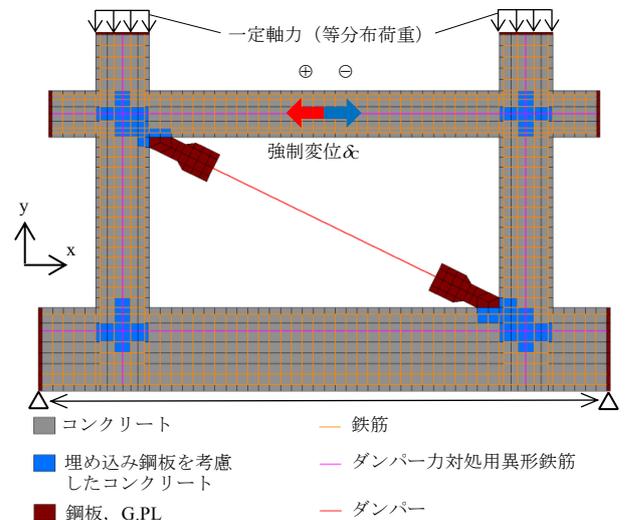


図-4 解析モデル

3.2 材料構成則

(1) コンクリート

コンクリートの主応力度-等価一軸ひずみ関係を図-5に示す。引張側はひび割れまで線形を仮定し、ひび割れ後は出雲モデル⁴⁾により引張軟化特性を考慮した。圧縮側の最大強度まで、および最大強度後の特性は修正Ahmadモデル⁵⁾を用いた。破壊条件はKupfer⁶⁾らの2軸破壊基準により決定した。ひび割れ面のせん断伝達特性にはAl-Mahaidiモデル⁷⁾を用いた。ひび割れ後の圧縮劣化特性を長沼の提案式⁸⁾により考慮した。繰り返し応力下の履歴特性には長沼・大久保によるモデル⁹⁾を用いた。

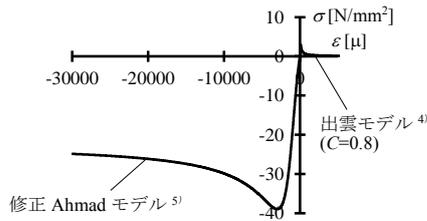


図-5 コンクリートの主応力度—等価一軸ひずみ関係

(2) 鉄筋・G.PL・エンドプレート

柱・梁の主筋，せん断補強筋の応力度 σ —ひずみ ϵ 関係は引張試験結果を基にバイリニア型にモデル化した。断面中央の異形鉄筋，G.PLや部材端部のエンドプレートなどの鋼材は引張試験を行っていないため，応力度 σ —ひずみ ϵ 関係は鋼材の規格値を基にバイリニア型にモデル化した。

(3) ダンパー

ダンパーの軸力—軸変形関係を図-6に示す。既報¹⁾の実験で使用したダンパーの軸力 N_D —軸変形 δ 関係を基に完全弾塑性型とし，ダンパー滑り力 N_{D_s} を236kN，滑り時の軸変形 δ_{D_s} を0.14mmとした。したがって，ダンパー剛性 E_D は $E_D=N_{D_s}/\delta_{D_s}=1.69 \times 10^6 \text{N/mm}$ となる。また，解析を安定させるために，滑り力到達後は非常に小さい2次剛性 $E_{D,2}$ ($=E_D/10000$)を設定した。

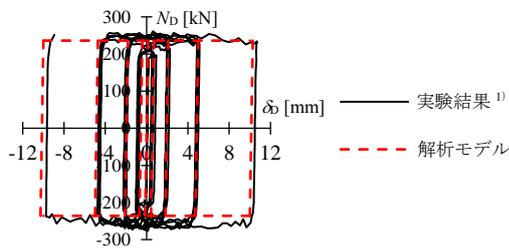


図-6 ダンパーの軸力—軸変形関係

(4) 付着

柱・梁の主筋，断面中央の異形鉄筋とコンクリート間の付着すべり特性は剛接合とした。本解析では，ダンパー力対処用異形鉄筋の径の違いが，RC骨組やダンパーの挙動に与える影響などの検討を主目的としたため，それらの比較検討に鉄筋—コンクリート間の付着すべり特性が与える影響を除外するため，剛接合とした。なお，実情に即した付着すべり特性を与えて解析した場合も解析結果は大きく変わらないことを別途確認している。

3.3 荷重・境界条件

解析における荷重，および境界条件の概略を図-4に示す。荷重は，まず柱上部に一定軸力 $N=461\text{kN}$ を等分布荷重として荷重した後，実験と同様に梁芯のspan中央部の節点に水平方向の強制変位 δ_c を与えた。目標加力サイクルは，強制変位 δ_c をスタブ上面から梁芯までの高さ1160mmで除した変形角 $R_c=1/800, 1/400, 1/200, 1/100\text{rad}$ において正負交番荷重を2サイクルずつ行った。境界条件はスタブ底辺のx，y方向を拘束とした。

4. 有限要素解析の結果と考察

4.1 層せん断力—層間変形角関係

実験と解析の層せん断力 Q —層間変形角 R 関係を図-7に示す。解析では，梁中央の加力点位置の節点変位で制御し， R は左右の柱の変形角の平均値としたため，図中の実験と解析の R のピーク点は一致していない。

CD-N，CD-Dともに，正側は $1/200\text{rad}$ 程度までは解析の方が同一変位時の層せん断力をやや大きく評価しているが，負側は $1/100\text{rad}$ 除荷の解析終了まで良好に評価できており，実験と解析は概ね対応していると言える。

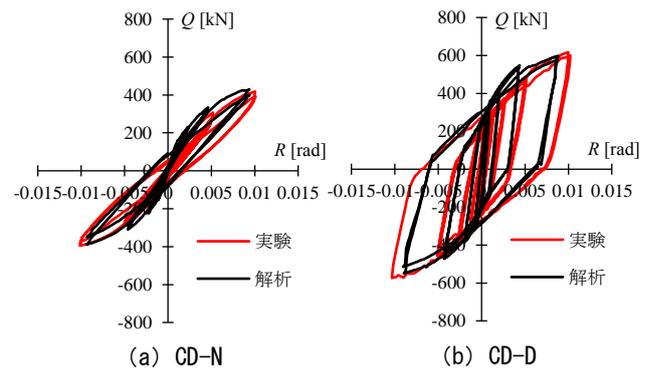


図-7 層せん断力—層間変形角関係

4.2 ダンパー力対処用異形鉄筋の検討

前述の通り，既報¹⁾の実験では，梁に生じる軸力を考慮し，ダンパー軸方向の滑り力 $N_D=236\text{kN}$ の水平成分 $N_{D_{\cos}}=212\text{kN}$ に対して，断面中央に通す異形鉄筋はD25(SD490)を1本とした。

ここでは，実験では確認できていない，D25に満たない異形鉄筋を断面中央に通して，ダンパーを取り付けた場合の力学挙動を確認するため，D22(SD490)に変更したモデルの解析を実施した。この解析モデルをCD22-Dモデルと呼ぶこととする。CD22-Dは，柱・梁断面中央の異形鉄筋の径以外はCD-Dと全て同一の解析モデルである。D22(SD490)(規格断面積 $A=387.1\text{mm}^2$)の規格降伏強度を基に算出される降伏耐力 F_y は190kNであり，ダンパー力水平成分 $N_{D_{\cos}}=212\text{kN}$ の方が大きくなる。

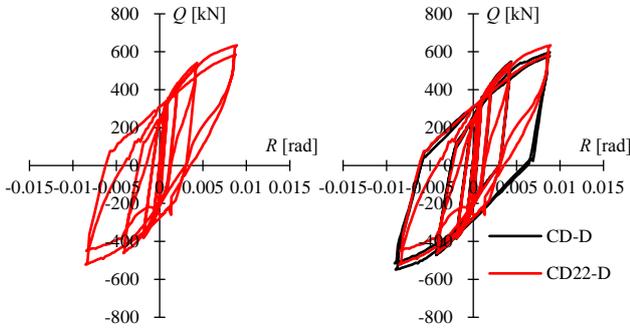
なお，ダンパー力対処用異形鉄筋を通さないモデルや，D19(SD490)としたモデルの解析も行ったが，小変形領域でコンクリートに損傷が激しく生じ，解析が不安定になった。

(1) 層せん断力—層間変形角関係

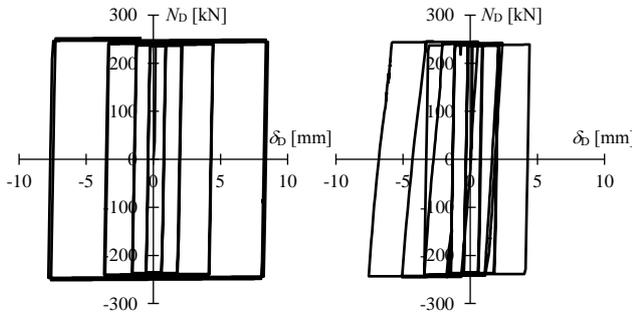
CD22-Dの解析における層せん断力 Q —層間変形角 R 関係を図-8(a)に，CD-DとCD22-Dの解析結果の比較を図-8(b)に示す。

CD22-Dは $1/200\text{rad}$ 程度までの変形角において，正負それぞれの荷重時はCD-Dと同様の剛性・耐力である。 $1/100\text{rad}$ の正負それぞれの荷重時も1サイクル目はCD-Dと同様であるが，2サイクル目で耐力低下が生じた。

また、正負それぞれのピーク変形からの除荷時について着目すると、CD-D に比べて CD22-D では履歴ループが細る性状になった。断面中央の異形鉄筋のみではダンパー力に対処できないため、ダンパー接合部周辺や梁の損傷などによって、ダンパーの実効変形にロスが生じ、ダンパー本来の履歴特性が確保できなかったと考えられる。



(a) CD22-D の解析結果 (b) CD-D と CD22-D の比較
図-8 CD22-D の層せん断力-層間変形角関係



(a) CD-D (b) CD22-D
図-9 ダンパーの軸力-軸変形関係

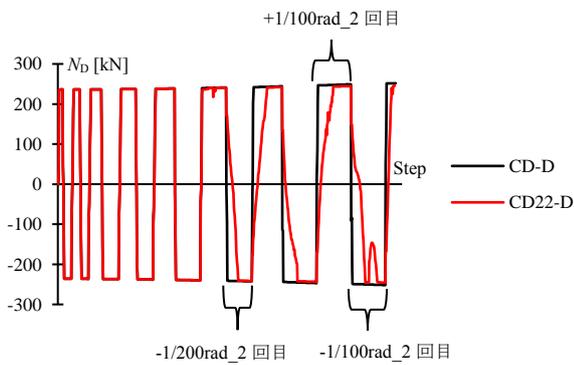


図-10 ダンパー軸力の推移

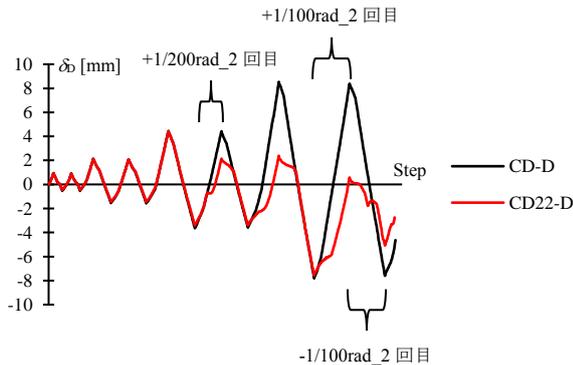


図-11 ダンパー軸変形の推移

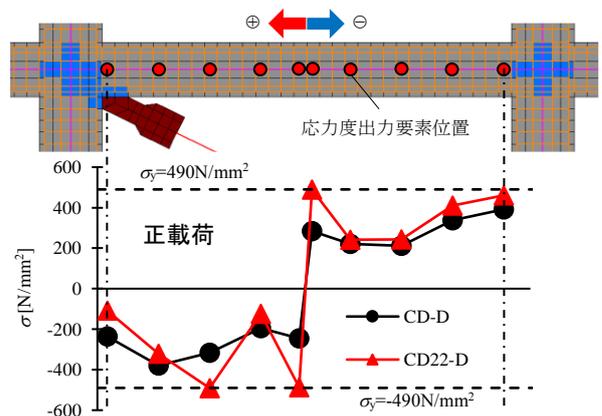
(2) ダンパーの挙動

CD-D、および CD22-D のダンパーの軸力 N_D -軸変形 δ_D 関係を図-9 に、ダンパー軸力 N_D の推移を図-10 に、ダンパー軸変形 δ_D の推移を図-11 に示す。図-10、11 の横軸は解析の荷重ステップである。

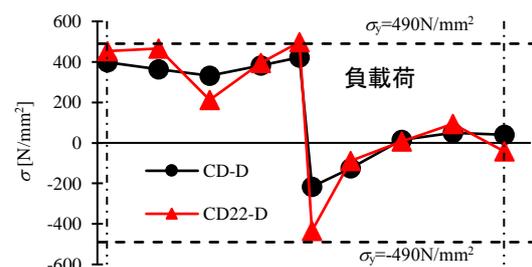
N_D - δ_D 関係から、CD-D のダンパーは安定した履歴特性を有しており、各変形角の正負ピークで安定したダンパーの軸変形を確保できている。一方、CD22-D では、正側の軸変形が負側に比べて生じていないことが分かる。

N_D の推移から、CD22-D のダンパーは、CD-D のダンパーと比較して、 $-1/200\text{rad}$ の 2 サイクル目荷重時からダンパー軸力の正負切り替わりが遅れ始めていることが分かる。その後の繰り返し荷重においても、正負の荷重時で、CD-D に比べ、CD22-D はダンパー軸力の発揮が遅い。

δ_D の推移から、CD22-D のダンパーでは $\pm 1/200\text{rad}$ の 1 サイクル目まではダンパー軸変形は安定して生じさせることができているが、 $+1/200\text{rad}$ の 2 サイクル目荷重時から正側でのダンパー軸変形が確保できなくなり、 $+1/100\text{rad}$ の 2 サイクル目荷重時には、ほとんど正側に軸変形が生じなかった。正側でダンパー軸変形が安定して確保できなかった理由として、負側荷重時にダンパーが圧縮となり、ダンパーが取り付く梁の左側には引張軸力が作用することで、コンクリートにひび割れや損傷が大きく生じ、負側除荷から正側荷重にかけて、それらのひび割れが閉じるまではダンパーに変形を生じさせることができなかったためと考えられる。



(a) $R=+1/100\text{rad}$ の 2 サイクル目ピーク時



(b) $R=-1/100\text{rad}$ の 2 サイクル目ピーク時

図-12 ダンパー力対処用異形鉄筋の応力度分布

(3) ダンパー力対処用異形鉄筋の応力度

梁の断面中央に通したダンパー力対処用異形鉄筋の $R=\pm 1/100\text{rad}$ の 2 サイクル目ピーク時における応力度分布を図-12 に示す。縦軸は応力度 σ 、横軸は図の上側に示す応力度を出力した要素の位置である。図中の破線はダンパー力対処用異形鉄筋の降伏強度 $\sigma_y=490\text{N/mm}^2$ を示している。

いずれの解析モデルにおいても、正載荷ピーク時には梁のスパン中央から左側の異形鉄筋には圧縮応力が、右側には引張応力が生じている。一方、負載荷ピーク時には梁のスパン中央から左側の異形鉄筋は降伏強度に近い大きな引張応力が生じているが、右側はそれほど大きな圧縮・引張の応力は生じていないことが見て取れる。これは梁のスパン中央を加力したことにより、負載荷時はスパン中央から右側の異形鉄筋には加力により生じる圧縮応力と、梁の左側に取り付けたダンパーから生じる引張応力が作用しているためと考えられる。

CD-D と CD22-D における梁のスパン中央から左側の異形鉄筋の応力度の違いに着目すると、正載荷時、負載荷時ともに、CD22-D では降伏強度 σ_y に達しているが、CD-D では達していない。そのため、CD22-D では除荷後の梁のひび割れの閉じる度合いが低く、安定したダンパーの軸変形の確保が困難になったと考えられる。したがって、ダンパー軸力の水平成分に対して、弾性を保てる異形鉄筋を梁断面中央に通すことは有用である。

(4) コンクリートの最小主応力度

$R=\pm 1/100\text{rad}$ の 2 サイクル目ピーク時におけるコンクリートの最小主応力度分布を図-13 に示す。ダンパーの有無による影響も確認するため、CD-D と CD22-D だけでなく、CD-N モデルの結果も併せて示している。

CD-N では、ダンパーによる付加軸力や複合応力は発生しないが、本解析および実験では梁中央を加力することにより、正載荷時には梁のスパン中央から左側には圧縮軸力が、右側には引張軸力が生じる。また、負載

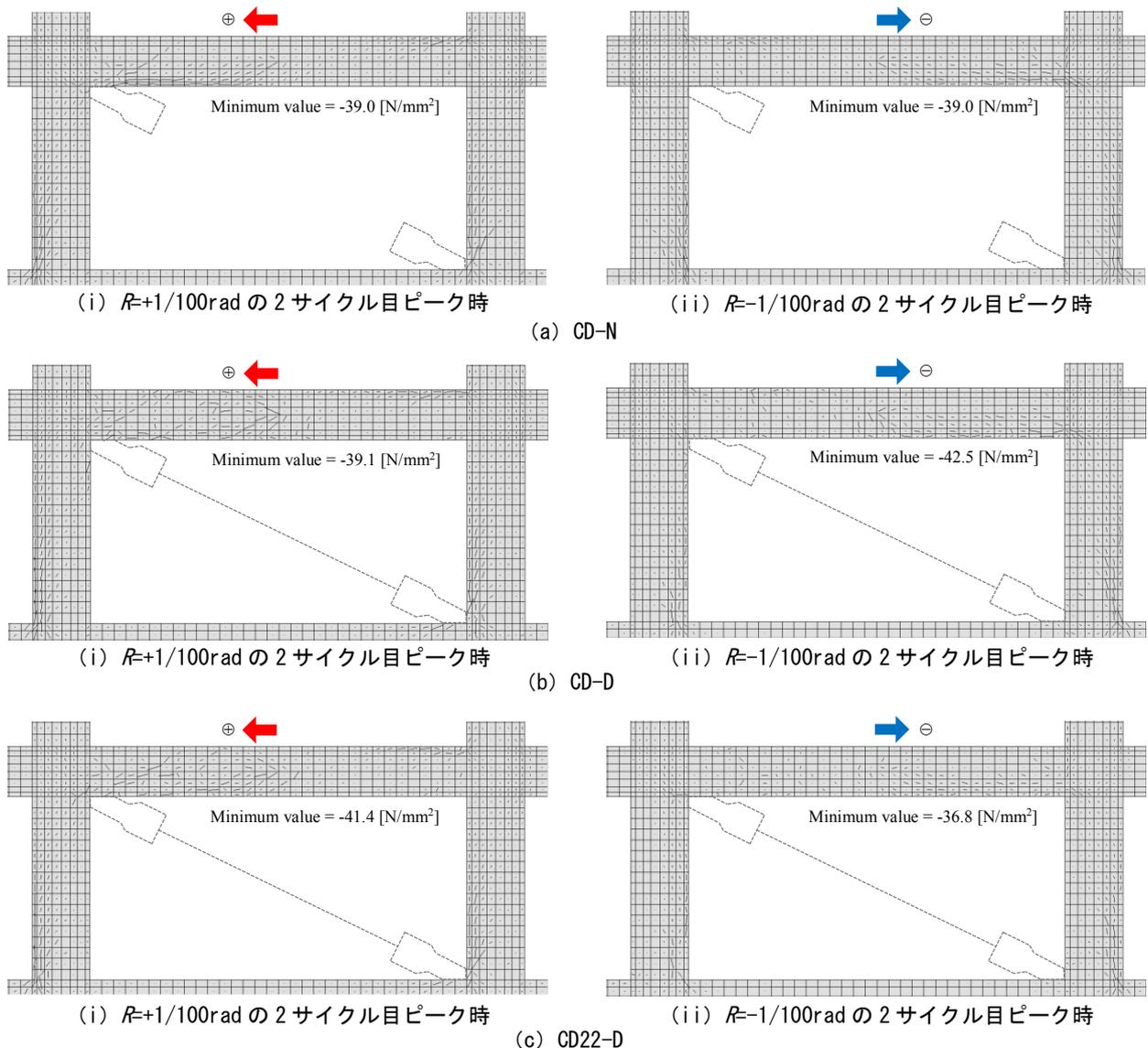


図-13 コンクリートの最小主応力度分布 (線長 2 倍)

荷時はその逆である。そのため、梁の中央部付近の最小主応力度の方向は材軸方向と平行に近いが、端部に行くにつれて曲げの影響を受けていることが分かる。また、梁の左側と右側の端部で最小主応力度の大きさに差異が生じており、曲げを受け、且つ圧縮軸力も受ける箇所の最小主応力度の絶対値が大きい。

CD-D, CD22-D では、ダンパーから梁に軸力が作用するため、正載荷時の梁の中央から左側の最小主応力度の絶対値が CD-N に比べて大きいことが分かる。特に梁中央部付近の最小主応力度の絶対値が顕著に大きくなった。一方、CD-D, CD22-D の負載荷時には、前述の通り、梁のスパン中央から右側には、梁中央加力による圧縮軸力と、梁左側に取り付けたダンパーによる引張軸力が作用するため、正載荷時の左側に比べて最小主応力度の絶対値が小さいことが分かる。

5. 結

本論文では、ダンパー取り付けにより RC 部材に生じる軸力に対処するために、RC 柱・梁の断面中央部に異形鉄筋を通した RC 骨組を対象として、摩擦ダンパー筋違付き RC 門型架構の有限要素解析を行った。得られた知見を以下に示す。

- 摩擦ダンパー筋違付き RC 門型架構の実験を再現する有限要素解析を行った。実験では、ダンパー力に対して弾性範囲に保てる異形鉄筋を使用した。解析の結果、実験と解析は概ね対応していた。
- 有限要素解析モデルを用いて、柱・梁部材に通すダンパー力対処用異形鉄筋の径を小さくした場合の解析を行った。その結果、ダンパー軸力の水平成分に対して、降伏強度以内に抑えられない径の鉄筋を梁に使用した場合、 $\pm 1/200\text{rad}$ の 1 サイクル目まではダンパー軸変形を安定して生じさせることができていたが、その後はできなくなった。特に正側でダンパーの軸変形を安定して確保できなかった。その理由として、負側載荷時にダンパーが圧縮となり、ダンパーが取り付く梁の左側には引張軸力が作用することで、コンクリートにひび割れや損傷が大きく生じ、負側除荷から正側載荷にかけて、それらのひび割れが閉じるまではダンパーに変形を生じさせることができなかつたためと考えられる。
- ダンパー力対処用異形鉄筋の応力度分布から、異形鉄筋の径を小さくした場合、異形鉄筋は降伏強度に達していた。一方、実験でも採用したダンパー力に対して弾性範囲に保てる異形鉄筋を使用した場合降伏しなかつた。そのため、径を小さくした解析モデルでは除荷後の梁のひび割れの閉じる度合が

低く、安定したダンパーの軸変形の確保が難しくなつたと考えられる。したがって、RC 骨組に筋違型ダンパーを取り付ける場合、ダンパー軸力の水平成分に対して、弾性を保てる異形鉄筋を梁断面中央に通すことは有用である。

実構造物においては、周辺架構にもダンパーが取り付けられていたり、梁にスラブが取り付けられていたりするなど、これらの影響も考慮する必要があるため、今後も検討を重ねていきたい。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金・若手研究（課題番号：19K15145, 研究代表者：毎田悠承）の一部として実施したものです。実験においては、東京工業大学・笠井和彦特任教授にご指導、ご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 毎田悠承, 笠井和彦, 坂田弘安: 梁の軸方向力を考慮した摩擦ダンパー筋違付き RC 門型架構の繰返し水平力載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.817-822, 2014.7
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010, 2010.2
- 3) 伊藤忠テクノソリューションズ (株): FINAL/V11 HELP, 2011.7
- 4) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 5) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 6) Kupfer H.B., Gerstle K.H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 99, No. EM4, pp.853-866, 1973.8
- 7) Al-Mahaidi, et al.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., 1979.1
- 8) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 9) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.135-142, 2000.10