

柱との接触条件をパラメータとしたブロック型倒壊方向制御構造の解析

布川 博一¹・豊岡 亮洋²・小野寺 周³・室野 剛隆⁴

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
(〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: nunokawa.hirokazu.82@rtri.or.jp

²正会員 博士 (工学) (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
(〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: toyooka.akihiro.58@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
(〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: onodera.meguru.58@rtri.or.jp

⁴正会員 博士 (工学) (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

耐震設計で想定する地震動を超えるような地震動に対して、構造物が破滅的な被害に至らないように危機耐性に優れた構造の実現が求められている。この一つの方法として、構造物の倒壊方向を任意の方向へ誘導する倒壊方向制御構造の開発が進められている。本論文は、デバイスの有無をパラメータとしたラーメン高架橋柱の正負交番載荷試験の再現解析を FEM 解析により行い、試験との整合性及び柱断面の応力状態を評価した。その結果、デバイスとの接触により柱の耐力上昇が生じ、保有耐力に非対称性が生じた。また、柱基部の作用モーメント・作用せん断力は接触箇所を境界に減少し、柱上部へ作用モーメント・作用せん断力が分散され、本来応力の作用が小さい柱上部まで抵抗範囲が広がることで柱の耐力上昇につながることを明らかにした。

Key Words: Collapse direction control, Crisis tolerance, Pushover analysis

1. はじめに

近年、2011年の東北地方太平洋沖地震や2016年の熊本地震では、これまでの想定を超えるような大きな地震動や震度7を多数観測するなど、従来の耐震設計では考慮されない地震作用が発生している。このような想定を超えるような地震作用に対して、従来の耐震設計を行うことに加え、想定以上の地震に対しても構造物が破滅的な被害に繋がらないような危機耐性に優れた構造とすることが望まれている¹⁾。

この一つの方法として、地震時に損傷が集中する部材に予め特定方向への変位を抑制するデバイスを取り付けることによって構造物の耐力に非対称性を与え、構造物の倒壊方向を任意の方向へ誘導する倒壊方向制御構造(図-1)の開発が進められている²⁻⁴⁾。

倒壊方向制御構造は、構造物が万一、倒壊したとしても人的被害が生じる恐れのある居住地域や緊急輸送道路等に支障する方向には、構造物を倒壊させないことで、

破滅的な被害に至らないようにすることが可能である。

これまでの研究で、倒壊方向制御構造を適用した振動台試験等で動的な挙動について評価⁴⁾が行われているが、その耐荷機構は不明であった。本論文では、倒壊方向制御構造を適用したラーメン高架橋柱の正負交番載荷試験結果の再現を FEM 解析により行い、試験との整合性及び柱との接触範囲をパラメータとした場合の柱断面の応力状態の評価を目的に検討した結果を報告する。

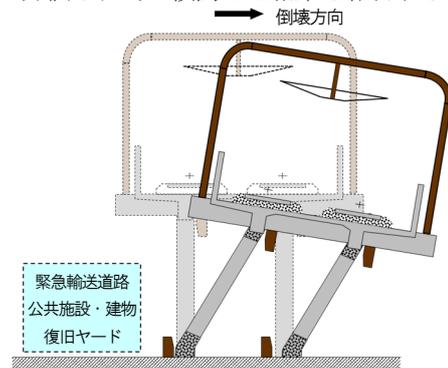


図-1 倒壊方向制御構造の概要

2. 静的載荷試験の概要^{6),9)}

静的載荷試験は、図-2のようなRCラーメン高架橋柱の半スパン分を1/2.5スケール程度で取り出した柱試験体を3体製作し、柱基部に倒壊方向制御デバイスを設置する。その後、鉛直荷重を作用させた状態で水平方向（ピン支持）に静的交番載荷を実施し、荷重～変位関係等を中心にデバイスの耐力特性を評価した^{6),9)}。製作した柱試験体の主要諸元を図-3に示す。

以降では、この試験結果をFEM解析で再現するとともに、柱断面の応力状態や柱とデバイスの接触範囲の違いが柱耐力に与える影響など、ブロック型倒壊方向制御デバイスの耐荷機構について解析的に検討を行った。

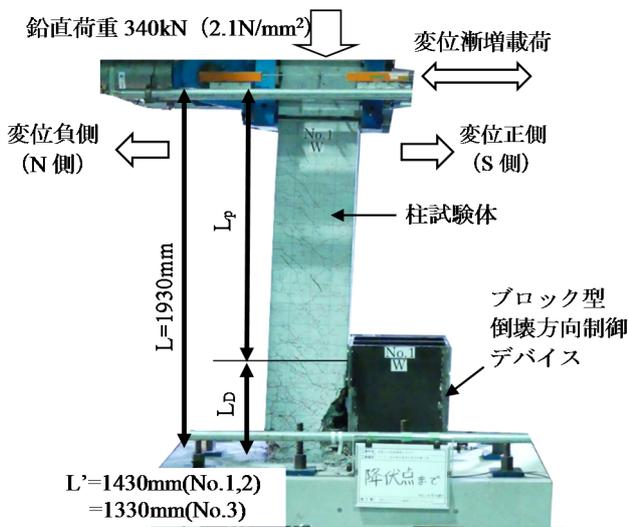


図-2 静的載荷試験の概要

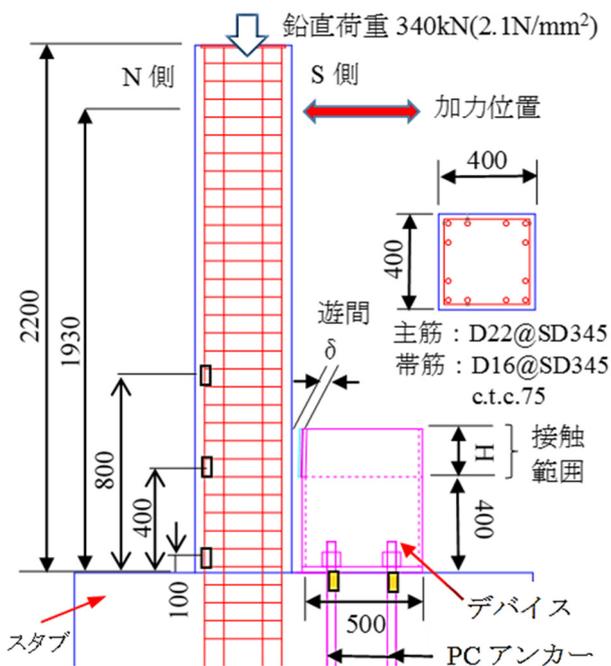


図-3 柱試験体の諸元 ※単位mm

3. FEM解析の概要

解析モデルは図-4に示すRCラーメン高架橋柱の正負交番載荷試験での試験^{6),9)}を参考に、載荷方向に対象性を持たせた3次元有限要素モデルとした。部材特性としてスタブは線形でモデル化し、柱のコンクリートは図-5に示すように引張特性は出雲らのモデル⁷⁾、圧縮特性は修正Ahmadモデル⁸⁾を与え、ひび割れを考慮した非線形特性とした。また、柱の鉄筋は図-6に示すバイリニア型でモデル化した。

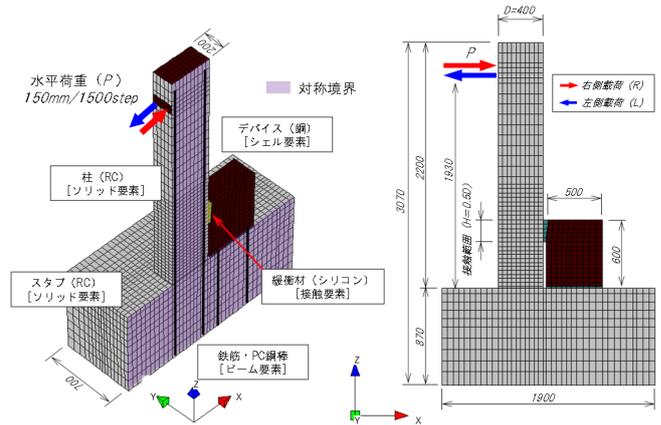


図-4 解析モデルの諸元 (接触範囲0.5D) ※単位mm

表-1 解析使用する各材料の特性値

材料		特性値
コンクリート	圧縮強度	37.9 N/mm ²
	引張強度	2.6 N/mm ²
鉄筋 (降伏強度)		385 N/mm ²
緩衝材 (剛性)		20.6 N/mm ²

柱とデバイスの接触は、すべりや剥離が生じるような力学的特性を使用できる接触要素（フィルム要素）で表現し、緩衝材の剛性、柱との遊間を考慮した図-7に示すギャップ型の非線形特性とした。各材料物性値は、試験体で使用した材料試験結果から表-1のように与えた。

倒壊方向制御を実現するデバイスは、図-8のような鋼製ボックス（SS400材：板厚22mm）をシェル要素により線形でモデル化し、スタブと剛結した。

解析ケースは、表-2に示すように柱の正負交番載荷試験と比較するため、デバイス無の柱単体の試験体に対応したCase A、デバイス有の試験体に対応し、柱との接触範囲をパラメータとしたCase B、Cの2ケースを設定した。柱とデバイスの遊間は、試験結果から最大耐力点（M点）付近で接触するよう試験と同様に17mmの遊間を設定した。倒壊方向制御構造は、通常の耐震設計で行われている応答レベルを阻害せずに作用させることを基本的な設計思想としている^{2),4)}。したがって、柱とデバイスの遊間のコントロールポイントは、地震時の復旧性の限界値の目安となるM点を基準としている。

また、デバイスと柱の接触範囲も前述と同様に変形性能を阻害しないよう柱単体の変形する塑性ヒンジの範囲 $1.0D$ (D : 断面高さ=400mm) 高さから $0.5D$ (柱基部から600mm), $1.0D$ (柱基部から800mm) の範囲で接触する条件で設定した。

柱天端に与える水平荷重は、静的荷重試験で耐力低下が確認された $9\delta_y$ ($1\delta_y = 15\text{mm}$) を超えるように、150mmを最大変位とした一方向の変位制御のプッシュオーバー解析を同一モデルで左方向(L)及び右方向(R)それぞれ実施した。解析コードはFINAL¹¹⁾を使用した。

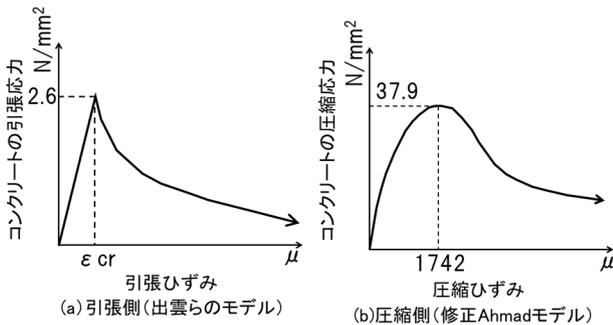


図-5 コンクリートの非線形特性

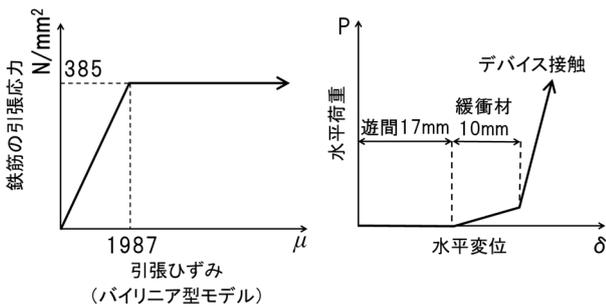


図-6 鉄筋の非線形特性

図-7 緩衝材の非線形特性

表-2 解析ケース

解析ケース	デバイスの有・無	試験との対応	柱とデバイスの遊間
Case A	無(柱単体)	試験体No.0 ⁵⁾	—
Case B	有(接触範囲0.5D)	試験体No.2 ^{6),9)}	17mm
Case C	有(接触範囲1.0D)	試験体No.3 ^{6),9)}	17mm

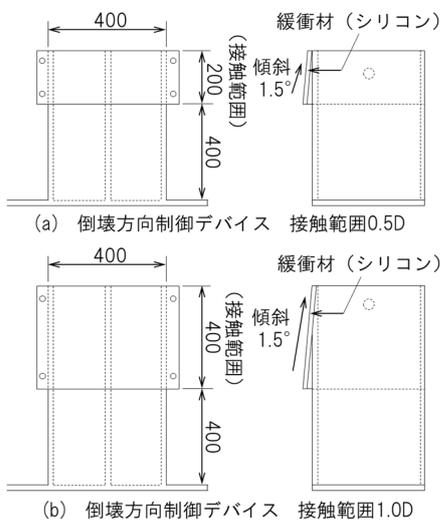


図-8 倒壊方向制御デバイス ※単位 mm

4. 試験結果とプッシュオーバー解析の比較

図-9 に過去に耐力低下域まで実施した柱単体の正負交番荷重試験を行った試験体 No.0 の履歴曲線⁵⁾と Case A の骨格曲線、図-10, 11 に柱の右側にデバイスを設置して接触範囲 0.5D 及び 1.0D として正負交番荷重試験を行った試験体 No.2, No.3 の履歴曲線と Case B, C の骨格曲線の比較結果を示す。

各図ともデバイスの有無や接触範囲の違いにかかわらず解析結果の骨格曲線と試験結果の荷重-変位関係は、ほぼ整合した挙動を示している。デバイスを設置した Case B, C では、右側荷重の骨格曲線において柱とデバイスの接触点 (P 点) を超えると水平荷重の上昇が確認でき、デバイスが作用しない左側荷重の骨格曲線と比較すると柱の水平荷重が上昇したことで左右で非対称な骨格曲線が生じていることがわかる。また、接触範囲 1.0D の Case C では、水平荷重の上昇量が Case B より大きくより顕著に左右で非対称な骨格曲線となることがわかる。

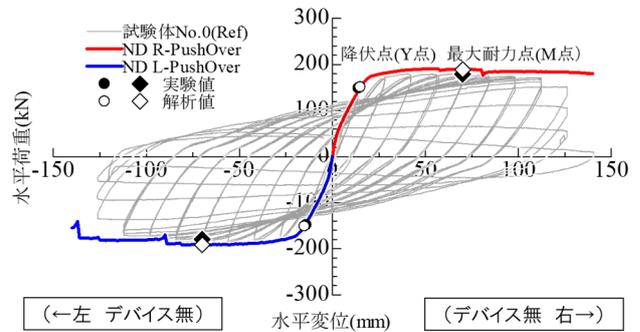


図-9 試験体 No.0 (柱単体) と Case A の比較

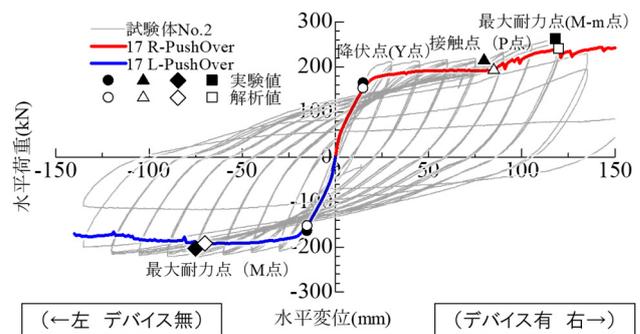


図-10 試験体 No.2 (接触範囲 0.5D) と Case B の比較

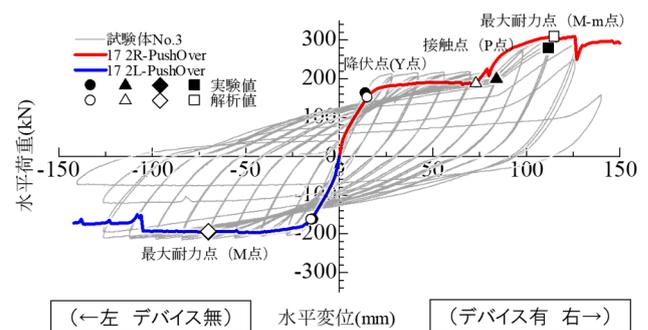


図-11 試験体 No.3 (接触範囲 1.0D) と Case C の比較

試験結果と解析結果の整合性の確認を確認するため、デバイスが作用する右側荷重の履歴曲線と骨格曲線の変化を、デバイスとの接触点 (△, ▲ : P 点) 及びデバイス接触後の最大耐力点 (□, ■ : M-m 点) で比較した。図-10, 11 に示すように P 点, M-m 点の発生荷重と発生変位のタイミングはほぼ整合する結果が得られた。したがって、図-4 のモデルを用いた変位制御によるプッシュオーバー解析で、ブロック型倒壊方向制御デバイスの導入によって生じる荷重途中で耐力上昇する柱の非線形挙動を、柱との接触範囲の違いにかかわらず良好に再現できることを確認した。

表-3, 4 に両方向にプッシュオーバー解析を行った Case B, C の降伏点 (Y 点), 柱単体の最大耐力点 (M 点), デバイスとの接触点 (P 点), デバイス接触後の最大耐力点 (M-m 点), 解析終了時の水平変位と水平荷重の関係を比較する。なお, 解析結果より降伏点 (Y 点) での降伏変位 (1.0δy) は 15mm である。

表-3, 4 より, 各ケースとも Y 点, M 点, P 点までは, 左右の水平荷重に大きな差は確認できないが, 柱とデバイスが接触した後の最大耐力点 (M-m 点) において, デバイスが作用した右側の水平荷重は Case B で 240.2kN, Case C で 308.2kN となり, 柱の耐力上昇が確認できる。M-m 点における左右の水平荷重を比較した増加割合は, Case B は 39%, Case C は 79% であり, デバイスとの接触範囲が大きいほど柱の耐力上昇は大きく増加する。同様に, 柱単体の試験で水平荷重の低下が確認された解析終了時 (9.0δy) のデバイスが作用した右側の水平荷重は Case B で 237.6kN, Case C で 293.0kN であり, 表-3, 4 からわかるようにデバイスが作用しない柱単体の左側の水平荷重と比べると, デバイスが作用することによる柱の耐力上昇状態は保持されており, 柱の左右で保有耐力が異なる荷重状態となった。また, 柱とデバイスの接触範囲が大きいほど柱の左右での保有耐力の差が大きくなることが確認できた。

表-3 Case Bにおける左右の水平荷重の比較

状態	水平変位 (mm)	水平荷重 (kN)		増加割合 (%)
		デバイス有 (遊間17mm) CaseB(R)	デバイス有 (遊間17mm) CaseB(L)	
初期状態	0.0	0	0	—
降伏点 (Y点) 1.0δy	15.0	152.62	153.06	-0.29
柱単体の最大耐力点 (M点) 4.7δy	70.0	192.06	191.48	0.30
デバイスとの接触点 (P点) 5.6δy	85.0	192.86	185.9	3.74
デバイス接触後の最大耐力点 (M-m点) 8.0δy	120.0	240.2	172.36	39.36
解析終了時 9δy	135.0	237.6	175.68	35.25

表-4 Case Cにおける左右の水平荷重の比較

状態	水平変位 (mm)	水平荷重 (kN)		増加割合 (%)
		デバイス有 (遊間17mm) CaseC(R)	デバイス有 (遊間17mm) CaseC(L)	
初期状態	0.0	0	0	—
降伏点 (Y点) 1.0δy	15.0	152.00	163.22	-6.87
柱単体の最大耐力点 (M点) 4.7δy	70.0	188.80	193.94	-2.65
デバイスとの接触点 (P点) 4.9δy	73.0	188.06	194.2	-3.16
デバイス接触後の最大耐力点 (M-m点) 8.0δy	115.0	308.20	172.22	78.96
解析終了時 9δy	135.0	293.00	175.24	67.20

5. デバイス作用による柱の応力状態の変化

(1) 作用モーメントの分布

デバイスの有無及びデバイスと柱の接触範囲をパラメータとした場合の柱の応力状態を確認するため, 表-2 に示す解析ケースについて, デバイスが作用する右側にプッシュオーバー解析を行った結果 (Case A-R, Case B-R, Case C-R) について, 柱基部からの高さ 0.5D~3.0D の位置で作用モーメントを算定した。作用モーメントは各断面において平面保持を仮定し, 部材軸中心から各断面内の要素中心までの距離と軸応力から算定した。

図-12 に各ケースの作用モーメントと水平変位の関係を示す。デバイスの無い Case A では, 水平変位の増加に伴い柱基部に近い 0.5D を作用モーメントの最大値として柱上部に向かうほど作用モーメントが減少する一般的な柱のモーメント分布となった。

デバイスを設置した Case B (接触範囲 0.5D) では, 降伏点 (Y 点) を越えてデバイスとの接触点 (①P 点) まで Case A と同様の傾向を示すが, デバイスとの接触点 (①P 点) を越えると, 0.5D の位置では水平変位の増加とともに作用モーメントは低減される。一方で, 1.0D~2.0D の位置では作用モーメントの増加が生じている。

同様に Case C (接触範囲 1.0D) においても, 降伏点 (Y 点) を越えてデバイスとの接触点 (①P 点) まで Case A と同様であり, デバイスとの接触点 (①P 点) を越えると, 0.5D 及び 1.0D の位置では水平変位の増加とともに作用モーメントは低減される。一方で, 2.0D~3.0D の位置では作用モーメントの増加が生じている。

各抽出位置での作用モーメントの増減変化は, Case B, C ともデバイスとの接触点 (①P 点) からデバイス接触後の最大耐力点 (②M-m 点) 間で生じ, M-m 点超過後の作用モーメントの値は約 300kN・m 付近に集中するような傾向となった。また, 接触範囲が大きい Case C のほうが Case B に比べ, 柱上部での作用モーメントの変化が

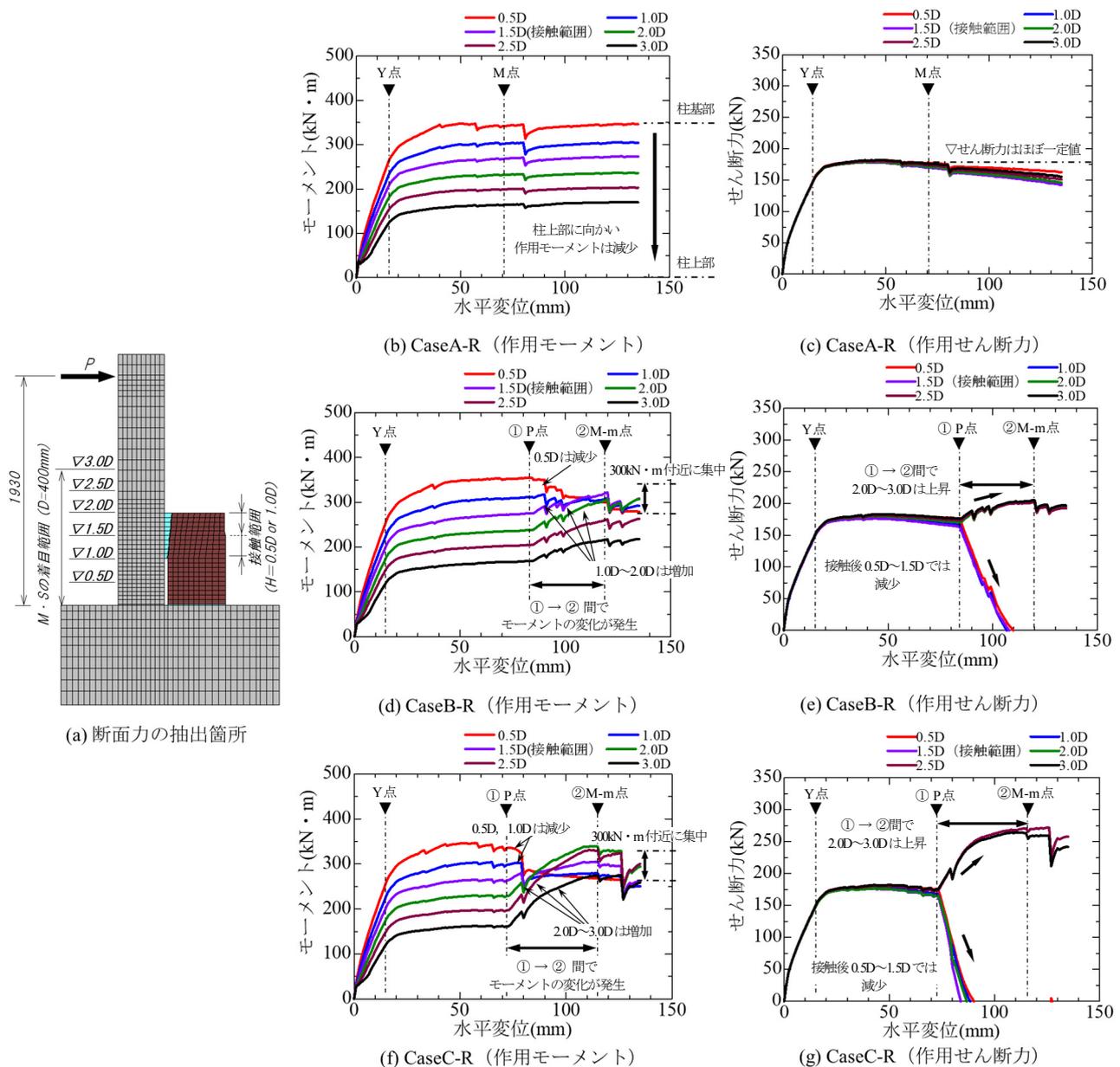


図-12 各ケースの作用モーメント・作用せん断力と変位の関係

大きく、デバイスとの接触点 (①P 点) を越えた後は、2.0D~3.0D での作用モーメントの増加量が大きくなることからわかる。

次に、デバイス接触前後の柱全体の作用モーメント分布の違いを比較するため、図-13 で各ケースにおける P 点及び M-m 点における作用モーメントを示す。図-13 に示すように P 点では、各ケースとも作用モーメント分布に大きな違いはなく、柱基部を最大値とするような三角形分布のモーメントを示している。一方で、M-m 点に達するとデバイスを設置した Case B, C では、Case A と比較してそれぞれ接触範囲より下部で作用モーメントは減少する。接触範囲より上部では、Case A と比較して作用モーメントは増加し、接触範囲が大きいほど柱上部の作用モーメントは大きくなることを確認できる。したがって、デバイスを設置することにより、接触箇所の上

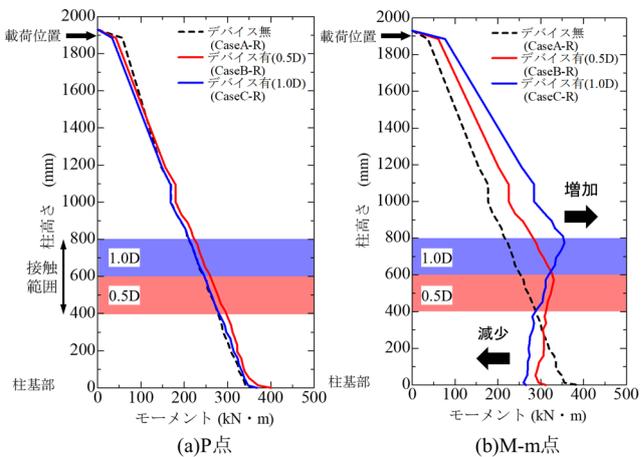


図-13 各ケースの柱全体の作用モーメント分布

(柱基部から 1.5D または 2.0D) を作用モーメントの最大値となるようなモーメント分布に移行し、本来作用モーメントが小さい柱上部にモーメントが分散される傾向

となると考えられる。

(2) 作用せん断力の分布

次に、作用モーメントと同様に0.5D~3.0Dの位置で作用せん断力の抽出をおこなった。作用せん断力は、各断面内の要素ごとに生じるせん断力の和により算定した。

図-12に各ケースの作用せん断力と水平変位の関係を示す。

デバイスの無いCase Aでは、水平変位の増加とともにせん断力は上昇し、降伏点(Y点)通過後に180kN付近で最大値となったのちせん断力はほぼ一定値で推移し柱全体に一定のせん断力が作用していることがわかる。

デバイスを設置したCase B(接触範囲0.5D)は、降伏点(Y点)を越えてデバイスとの接触点(①P点)までCase Aと同様の傾向を示すが、デバイスとの接触点(①P点)を越えると、接触範囲より下部の0.5D~1.5Dの位置では急激にせん断力が低下し、一方で2.0D~3.0Dの位置ではせん断力の上昇が確認できる。

同様にCase C(接触範囲1.0D)においても、降伏点(Y点)を越えてデバイスとの接触点(①P点)までCase Aと同様であり、デバイスとの接触点(①P点)を越えると、接触範囲より下部の0.5D~1.5Dの位置では急激にせん断力が低下し、一方で2.0D~3.0Dの位置ではせん断力の上昇が確認できる。デバイスを設置したCase B, Cの接触範囲より下部の位置でのせん断力の低下は、柱とデバイスが接触したことにより、デバイスに柱のせん断力が伝達されたものと考えられる。また、作用せん断力の変化は、作用モーメントと同様にデバイスとの接触点(①P点)を越えるとせん断力が上昇し、デバイス接触後の最大耐力点(②M-m点)まで緩やかに変化する。このときの最大せん断力はCase Bでは240kN(表-3)、Case Cでは308kN(表-4)であり、最大せん断力は、接触範囲が大きいほど大きくなる傾向にあることがわかる。

デバイス接触前後の柱全体のせん断力の違いを比較するため、図-14に各ケースにおけるP点及びM-m点の作用せん断力を示す。図-14よりP点では、各ケースとも柱全体に180kN程度のせん断力が発生しており、デバイスの有無にかかわらず大きな違いは確認できない。一方で、M-m点に達するとデバイスを設置したCase B, Cは、Case Aと比較して接触範囲より下部の作用せん断力は大きく減少する。接触範囲より上部では、Case Aと比較して作用せん断力は増加し、接触範囲が大きいほど柱上部の作用せん断力は大きくなることを確認できる。これは、荷重を変位増分で行っており、柱とデバイスが接触することでデバイスにせん断力が伝達されて、柱のせん断スパンが見かけ上短くなり、柱に作用するせん断力が増加したのと考えられる。せん断力の増加は、デバイスの接触範囲が大きいほど短スパン化されるため、大きなせん断力が柱に作用することが考えられる。

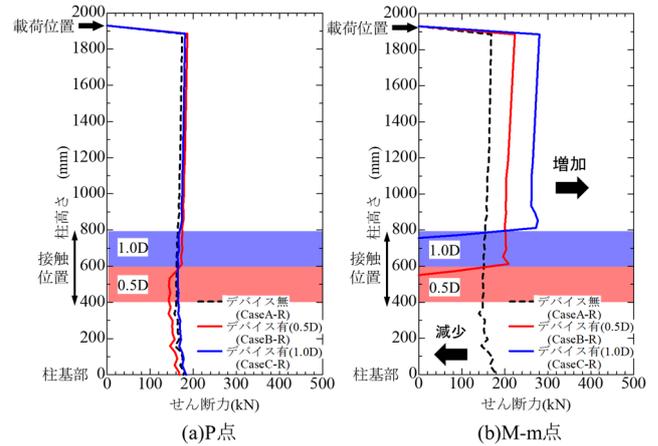


図-14 各ケースの柱全体の作用せん断力分布

(3) 柱全体のひずみ分布

デバイス接触後の水平力に対する柱の抵抗範囲を推定するため、図-15に静的荷重試験で耐力低下が確認された天端変位135mm(9 δ_y)における各ケースの柱の鉛直ひずみの分布を示す。

図-15よりデバイスの無いCase Aでは0.5D付近の柱基部で大きな引張ひずみが集中していることがわかる。前述の図-13に示す作用モーメント分布は、0.5D付近で最大値となっていることから、0.5D付近で柱に大きな変形が生じているものと考えられる。

一方で、デバイスを設置したCase B, Cに着目すると接触範囲を0.5DとしたCase Bは、0.5D~2.0D付近まで引張ひずみが発生していることが確認できる。したがって、Case Bはデバイスが作用したことで柱の0.5D~2.0Dの広い範囲に損傷が分散されると考えられる。

同様に、接触範囲を1.0DとしたCase Cは、柱基部と1.5D~2.0D付近の2か所に引張ひずみが発生していることが確認できる。したがって、Case Cはデバイスが作用したことで柱基部と1.5D~2.0D付近の2か所に損傷が集中すると考えられる。損傷の分散は、静的荷重試験においてもデバイス作用後に、柱の上部に向かってひび割れが進展することが確認されている⁹⁾。よって、上述したような損傷の分散傾向は試験結果とも整合していると考えられる。

Case B, Cそれぞれのひずみ分布から、Case Bは本来の柱の変形性能を発揮したのちにデバイスが作用したことで柱に局所的なひずみの集中は低減され柱の広い範囲に損傷が分散することで、柱の耐力上昇に寄与しているものと推察される。一方で、Case CはCase Bと同様に本来の柱の変形性能を発揮したのちデバイスが作用するものの、接触後にデバイスの接触範囲の上部を固定点とするような短い柱の状態となり、固定点を新たな柱の基部として損傷が発生することにより柱の耐力上昇に寄与しているものと推察される。倒壊方向制御構造は、本来の

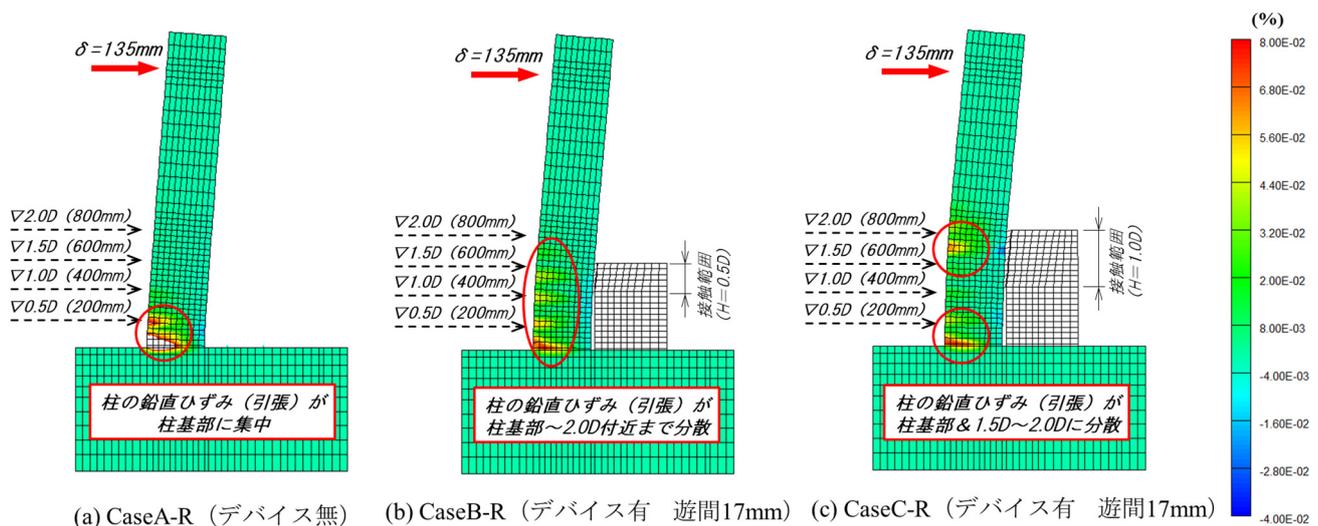


図-15 各解析ケースの作用モーメント・作用せん断力と変位の関係

柱の変形性能を発揮したのちにデバイスが作用することを目的としている。したがって、両者ともデバイスが作用することで、柱に新たな損傷箇所が生じることで耐力上昇に寄与すると考えられるが、接触範囲の大きさにより柱の損傷発生箇所が異なることがひずみ分布よりわかった。

6. まとめ

本論文では、デバイスの有無およびデバイスの接触範囲を変化させたラーメン高架橋柱の正負交番載荷試験の再現を FEM 解析により行い、試験との整合性や柱断面の応力状態について評価した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 柱の正負交番載荷試験結果の再現を FEM 解析により実施した。その結果、プッシュオーバー解析からデバイスの有無にかかわらず荷重-変位関係はほぼ整合した結果が得られた。デバイスを設置した場合、デバイスの作用による荷重変化点及び柱耐力の上昇が確認できる。柱耐力の上昇は、柱単体時の耐力と比べて柱との接触範囲を 0.5D (D: 断面高さ) の場合は 39%、柱との接触範囲を 1.0D の場合は 79% であり、デバイスとの接触範囲が大きいほど柱の耐力上昇は大きく増加する。これにより柱の左右で保有耐力が異なる荷重状態となり非対称性が生じることが明らかとなった。
- (2) デバイスを設置したことによる柱の応力状態は、デバイスとの接触範囲より下部では、作用モーメントは減少する。接触範囲より上部では、柱単体の作用モーメントと比較して増加し、接触範囲が大きいほど柱上部の作用モーメントは大きくなることが確認された。作用せん断力も同様に、デバイスとの接触範囲より下部では大きく減少し、接

触範囲より上部では、柱単体の作用せん断力と比較して増加し、接触範囲が大きいほど柱上部の作用せん断力は大きくなることが確認された。

これは、柱とデバイスが接触することで柱のせん断スパンが見かけ上短くなり、柱に作用するモーメント及びせん断力が増加したものと考えられる。モーメント及びせん断力の増加は、デバイスの接触範囲が大きいほど短スパン化されるため、大きなせん断力が柱に作用することが考えられる。

- (3) 柱のひずみ分布は、デバイスを設置することで接触に伴い柱の上部に向かって損傷箇所が生じて、柱全体のひずみ分布は分散される。柱とデバイスの接触範囲を 0.5D (D: 断面高さ) 程度とすると、本来の柱の変形性能を発揮した後に、デバイスが作用することで柱に局所的なひずみの集中は低減され柱の広い範囲に損傷が分散することで、柱の耐力上昇に寄与しているものと推察される。一方で、柱とデバイスの接触範囲を 1.0D 程度とするとデバイスの接触範囲の上部を固定点とするような短い柱の状態となり、固定点を基部とした新たな損傷が発生することにより柱の耐力上昇に寄与しているものと推察される。両者ともデバイスが作用し、柱に新たな損傷箇所が生じることにより耐力上昇に寄与すると考えられるが、接触範囲の大きさの違いにより、柱の損傷発生箇所が異なることが確認された。

以上が接触範囲をパラメータとしたブロック型倒壊方向制御構造の耐荷メカニズムである。倒壊方向制御構造は、本来の柱の変形性能を発揮したのちに作用することを目的としており、柱との遊間及びデバイスの接触範囲が本構造を導入した場合に柱の耐荷機構に大きく影響する。本論文ではデバイスの接触範囲を 0.5D または 1.0D

とするとデバイスの作用により柱の広い範囲に損傷が分散される傾向が確認でき、見かけのせん断スパンが変化することで柱耐力に非対称性を与えることが可能である。また、接触範囲が大きいほど柱耐力の非対称性を顕著に生じられることが明らかとなった。このような提案構造をラーメン高架橋柱に付与することで、地震時において柱の左右で保有耐力が異なる状態となり耐力の小さいほうへ損傷を進展させて、任意の方向に倒壊を制御することが可能となる。ただし、設計上の課題としてはデバイスが作用すると見かけの柱のせん断スパンが短くなり、せん断破壊先行型へ破壊モードが移行する恐れがある。これについてはデバイス長を差し引いた短いせん断スパンでも柱が曲げ破壊先行型となることを照査することで、脆性的な破壊を防止して柱の耐荷性能を損なうことなく適用可能と考えられる。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012.
- 2) 斎藤正人，室野剛隆，本山紘希：地震時における構造物の倒壊に対する危機耐性機構の一考察，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，I-144，2015.
- 3) Saitoh, M., Muroho, Y., Motoyama, H., Resilient Structural Systems for Earthquake Disaster Mitigation Using Collapse Direction Control Device, Proc. of the 4th ISEE, pp.614-617, 2015.
- 4) 豊岡亮洋，室野剛隆，齊藤正人：危機耐性を向上させる倒壊方向制御構造の振動台実験，第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2017.
- 5) 田所敏弥，田中浩一，谷村幸裕，黒川浩嗣，服部尚道，室野剛隆：鉄筋コンクリート柱の崩壊に関する限界の評価法，土木学会論文集 E Vol.64 No.2，298-313，2008.
- 6) 豊岡亮洋，室野剛隆，小野寺周，布川博一：ブロック型倒壊方向制御構造に耐力評価のための静的載荷試験，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集，2018
- 7) 出雲淳一，他：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，25巻(1987)9号 p.107-120
- 8) 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
- 9) 豊岡亮洋，布川博一，小野寺周，室野剛隆：ブロック型倒壊方向制御構造を有するラーメン高架橋柱の耐力・変形性能評価試験，第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2018.
- 10) 布川博一，豊岡亮洋，小野寺周，室野剛隆：ブロック型倒壊方向制御構造を有するラーメン高架橋柱の耐荷機構の解析，第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2018.
- 11) 米澤健次 他：正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の三次元非線形 FEM 解析—自社開発ソフト”FINAL”の精度向上—，大林組技術研究所報 No.67，2003

ANALYSIS OF BLOCK TYPE COLLAPSE DIRECTION CONTROL STRUCTURE WITH PARAMETER OF CONTACT CONDITIONS WITH COLUMN

Hirokazu NUNOKAWA, Akihiro TOYOOKA, Meguru ONODERA and Yoshitaka MURONO

Realization of a structure that is excellent in crisis resistance is required so that the structure does not lead to catastrophic damage to earthquake motions exceeding the earthquake ground motion assumed by seismic design. To this end, development of a collapse direction control device that guides the collapse direction of a structure in a designated direction is under way. In this paper, analysis of cyclic loading tests with and without a device was performed by FEM, and the consistency with the test and the stress state of the column cross section were evaluated. As a result, the stress of the column increased due to contact with the device, resulting in asymmetry in the reacting force according to with and without device. In addition, it was verified that the acting moment and shear force of the column at bottom decreased, because they were dissipated into the upper area of the column. It followed that a wider area of column reacted against horizontal force that increased the bearing moment capacity. Bending resistance is generated to the upper portion of the pillar where the action of the moment is small, leading to increased yield strength.