

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

布川 博一¹・豊岡 亮洋²・小野寺 周¹・室野 剛隆³

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）

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）

³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）

1. はじめに

鉄道構造物は一般に公共性の高いものであり、それらの円滑な機能の維持・確保が個人の生命や生活社会・生産活動にとって非常に重要であることを考えると、想定以上の地震に対しても破滅的な被害に繋がらないような危機耐性の高い構造とする必要がある。そのため、鉄道構造物の耐震設計として、想定を超えるような地震動が作用した場合でも、構造物が破滅的な破壊に至らない危機耐性に優れた構造の実現が求められている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機構の開発が進められており、その動的挙動や耐力評価試験が行われている^{2~4)}。

倒壊方向制御機構は、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、安全性および復旧性を向上させることが可能である。

本稿では、倒壊方向を制御するためのデバイスの有無および柱とデバイスとの遊間を変化させ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、試験との整合性や柱断面の応力状態について評価した。また、柱とデバイスとの遊間をパラメータとした柱の水平耐力の上昇量について考察した結果を報告する。

2. 静的載荷試験の概要

静的載荷試験は、図-1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。製作した柱供試体の主要諸元を図-2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との遊間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。

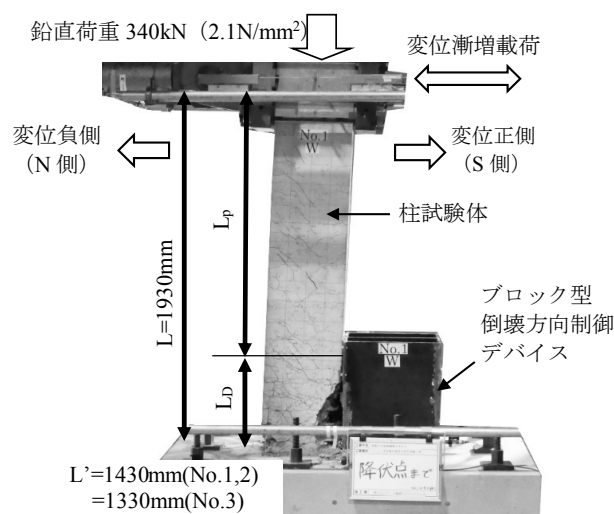


図-1 静的載荷試験の概要

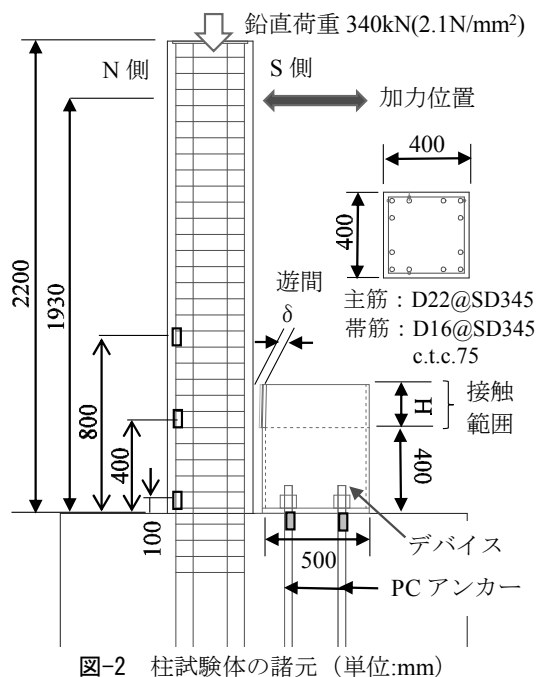


図-2 柱試験体の諸元 (単位:mm)

3. FEM解析の概要

解析モデルは図-3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⁾を参考に、載荷方向に対対象性を持たせた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-4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-5に示すバイリニア型でモデル化した。

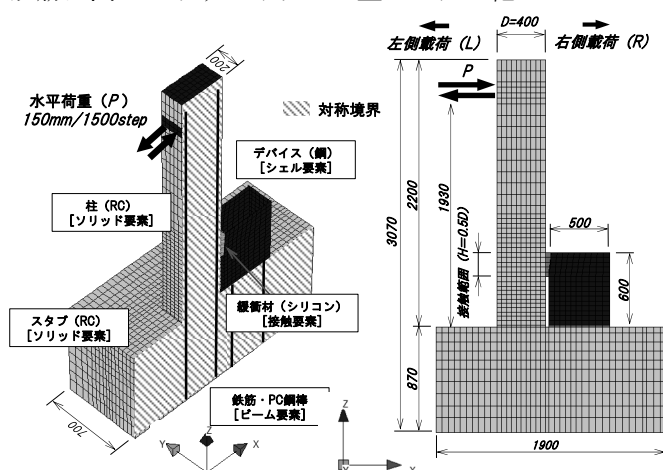


図-3 解析モデルの諸元 (単位:mm)

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表現ができる接触要素（フィルム要素）により、緩衝材の剛性、柱との遊間を考慮した図-6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のように与えている。

倒壊方向制御を実現するデバイスは、図-7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CaseA、デバイス有の柱との遊間を変化させたCaseB～Eの5ケースを設定した。柱とデバイスの遊間は、柱単体の試験結果等を基に最大耐力点（M点）に対して、M点より手前で接触するCaseB・Cと、M点付近～超過後で接触するCaseD・Eとしてそれぞれ遊間を設定した。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、地震時の復旧性限界値の目安となるM点を基準にパラメータを設定した。

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1D（=400mm）高さから0.5D（=200mm）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、静的載荷試験で耐力低下が確認された9δy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FINALを使用した。

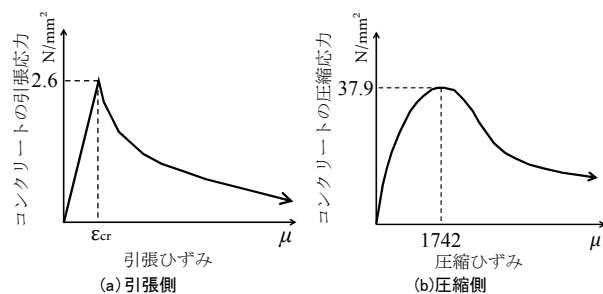


図-4 コンクリートの非線形特性

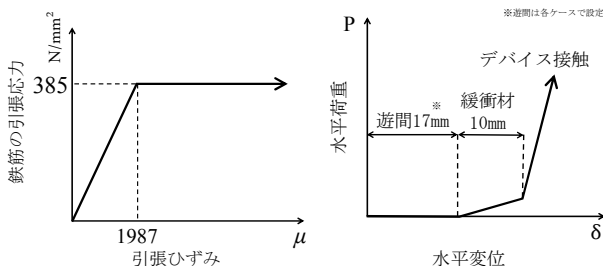


図-5 鉄筋の非線形特性

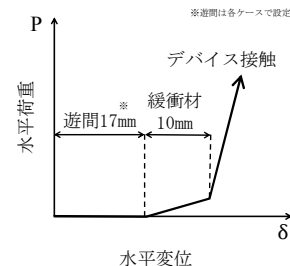


図-6 緩衝材の非線形特性

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	—
Case B	有(接触範囲0.5D)	解析のみ	6mm
Case C	〃	試験体No.1	10mm
Case D	〃	試験体No.2	17mm
Case E	〃	解析のみ	20mm

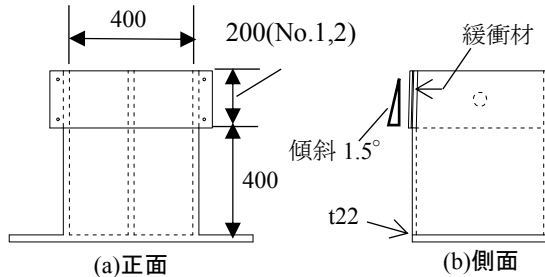


図-7 倒壊方向制御デバイス (単位:mm)

4. 試験結果とプッシュオーバー解析の比較

図-8に過去に実施したデバイスが無い柱単体の正負交番荷重試験を行った試験体No.0の履歴曲線とCaseAの骨格曲線、図-9に柱の右側にデバイスを設置し正負交番荷重試験を行った試験体No.2の履歴曲線とCaseDの骨格曲線の比較結果を示す。

図-8、図-9ともデバイスの有無に関わらずCaseA、D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CaseDでは、柱とデバイスとの接触点(P点)で水平荷重の上昇が確認できデバイスが無い左側に荷重したときの荷重-変位関係と比べて、柱の水平荷重が上昇したことで左右で非対称性が生じていることが分かる。

表-3に両方向にプッシュオーバー解析を行ったCaseD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)、解析終了時で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)での降伏変位は $1.0\delta_y=15\text{mm}$ である。

表-3より、Y点・M点・P点までは、両方向の水平荷重に大きな差が確認できないが、柱とデバイスが接触した後の最大耐力点(M-m点)では、デバイスを設置した右側の水平荷重は240kN程度まで上昇し、デバイスが無い左側の水平荷重を比べ、39%の柱の耐力上昇が確認できた。表-4に示す試験体No.2の試験結果からも柱とデバイスが接触した後の最大耐力点(M-m点)では、26%の柱の耐力上昇が確認されている。

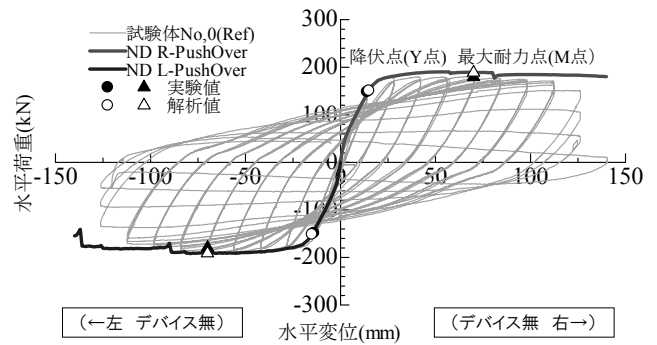


図-8 試験体 No.0 と解析結果の比較

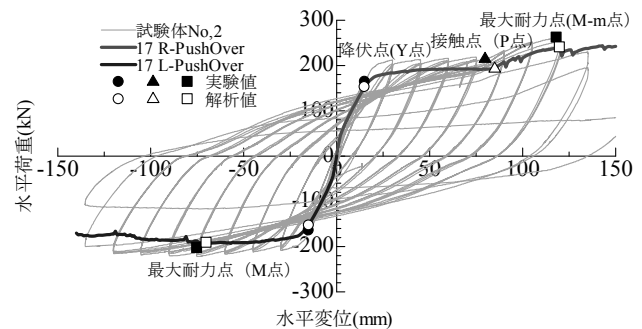


図-9 試験体No.2と解析結果の比較

表-3 CaseD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) CaseD(R)	デバイス有 (遊間17mm) CaseD(L)	
初期状態	0.0	0	0	—
降伏点 (Y点) 1.0 δ_y	15.0	152.62	153.06	-0.29
柱単体の最大耐力点 (M点) 4.7 δ_y	70.0	192.06	191.48	0.30
デバイスとの接触点 (P点) 5.6 δ_y	85.0	192.86	185.9	3.74
デバイス接触後の最大耐力点 (M-m点) 8.0 δ_y	120.0	240.2	172.36	39.36
解析終了時 9 δ_y	135.0	237.6	175.68	35.25

表-4 試験体No.2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) 試験体(R)	デバイス無 (遊間17mm) 試験体(L)	
初期状態	0.0	0	0	—
降伏点 (Y点) 1 δ_y	15.0	164.16	164.16	0.00
柱単体の最大耐力点 (M点) 5.0 δ_y	75.0	199.8	197.60	1.11
デバイスとの接触点 (P点) 6.0 δ_y	90.0	211.68	197.64	7.10
デバイス接触後の最大耐力点 (M-m点) 8.0 δ_y	120.0	228.9	180.36	26.91

また、試験体No.2の履歴曲線とCaseDの骨格曲線を比較すると、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)の発生変位のタ

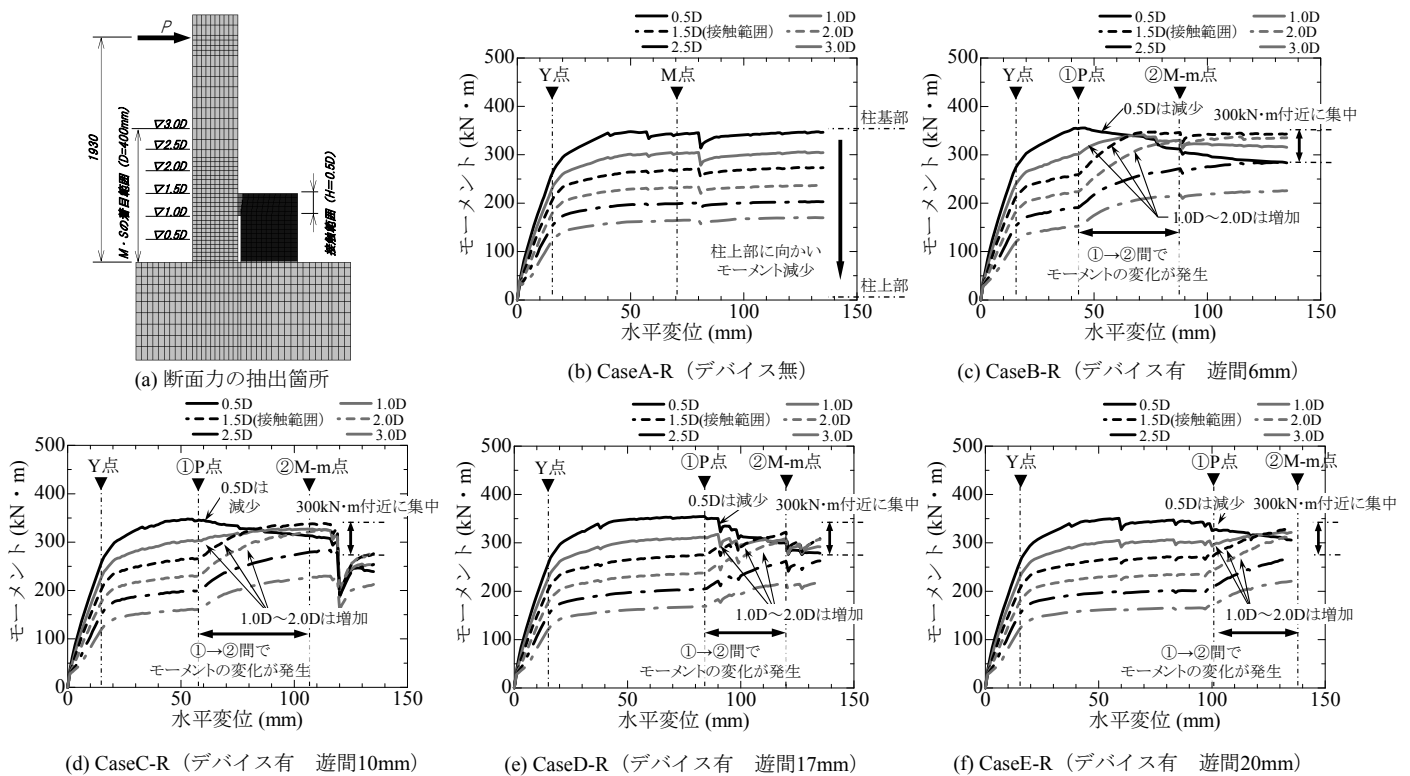


図-10 各解析ケースの曲げモーメントと変位の関係

イメージがほぼ整合している結果が得られており、プッシュオーバー解析により荷重途中で耐力上昇が生じるような柱の非線形挙動を図-3のモデルを用いて良好に再現できることを確認した。

5. デバイス設置による柱の応力状態の変化

(1) 曲げモーメントの分布

デバイスの有無及びデバイスと柱の遊間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、デバイスと柱が接触する右方向 (R) にプッシュオーバー解析を行った結果について、0.5D～3.0Dの位置で曲げモーメントを算定した。曲げ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-10に各ケースの曲げモーメントー水平変位関係を示す。デバイスの無いCaseAでは、水平荷重の増加に伴い柱基部に近い0.5Dを曲げモーメントの最大値として、柱上部に向かうほど曲げモーメントが減少する一般的な柱の応力分布となった。

デバイスを設置したCaseB～Eでは、降伏点 (Y点) まではCaseAと同様の傾向を示すが、各ケースで設定した遊間により生じる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曲げモーメントは低減される。一方で、

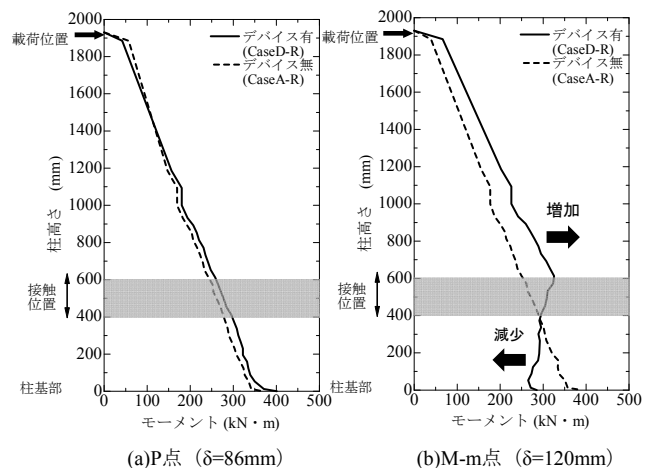


図-11 CaseA・Dの柱全体の曲げモーメント分布の比較

1.0D～2.0Dの位置では曲げモーメントの増加が生じている。各抽出位置での曲げモーメントの変化は、デバイスと柱の遊間の設定により変化するタイミングは異なるもののデバイスとの接触点 (①P点) ～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0.5D～2.0Dの位置での曲げモーメントの値は、約300kN・m付近で一定値となった。

デバイス接触前後の柱全体の曲げモーメント分布の違いを比較するため、図-11にデバイス無のCaseAとデバイス有のCaseDのP点とM-m点における柱全体の曲げモーメントを示す。図-11に示すようにP点ではCaseAとCaseDとも柱基部を最大値とする曲げモ

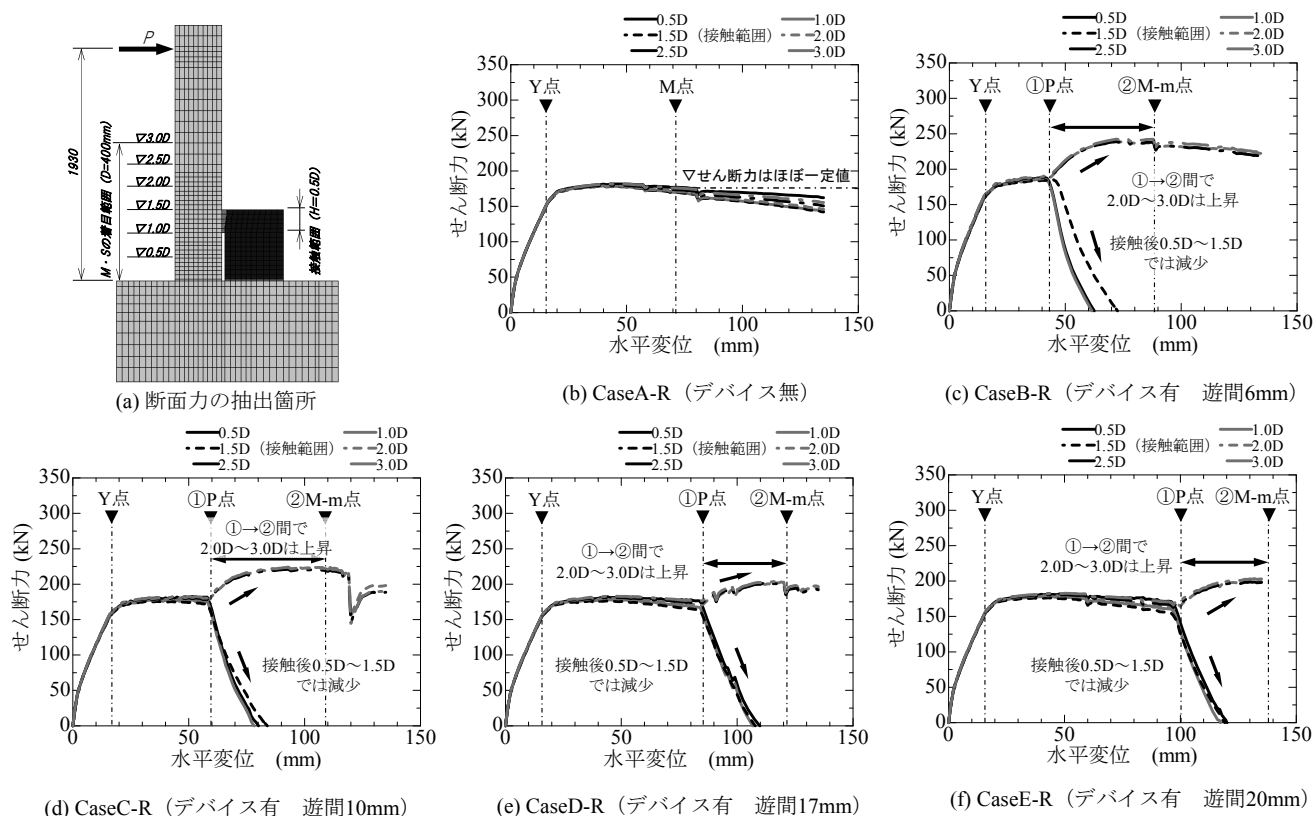


図-12 各解析ケースのせん断力と変位の関係

ーメント分布で大きな差異はないが、M-m点に達するとCaseDはデバイスとの接触により、接触範囲より下部はCaseAと比べ曲げモーメントが減少している。一方で、接触範囲より上部ではCaseAと比べ曲げモーメントが増加していることが確認できる。これは、柱とデバイスが接触してデバイスが水平反力を受け持つことで、柱のせん断スパンが低減されたものと考えられる。したがって、柱とデバイスが接触した後は1.5D付近で曲げモーメントが最大値となるようなモーメント分布応に移行し、本来曲げモーメントの作用の小さい柱上部に曲げモーメントが分散されるような傾向を示すと考えられる。この傾向は静的載荷試験においても観察されている⁹⁾

(2) せん断力の分布

次に、表-2に示す解析ケースについて0.5D～3.0Dの位置でせん断力の抽出をおこなった。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に各ケースのせん断力-水平変位関係を示す。デバイスの無いCaseAでは、水平荷重の増加とともにせん断力は上昇し、降伏点(Y点)超過後は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分かる。

デバイスを設置したCaseB～Eでは、降伏点(Y

表-5 各ケースの最大耐力点でのせん断力の比較

デバイス接触後の最大耐力点 (M-m点)	水平変位 (mm)	水平荷重 (kN)	M点からの 増加割合(%)
CaseA(R) デバイス無(M点)	70.0	188.8kN	—
CaseB(R) 遊間6mm	88.0	266.2kN	41.00
CaseC(R) 遊間10mm	109.0	257.8kN	36.55
CaseD(R) 遊間17mm	120.0	240.2kN	27.22
CaseE(R) 遊間20mm	135.0	243.0kN	28.71

点) まではデバイスの無いCaseAと同様に180kN程度でせん断力はほぼ一定値で推移するが、各ケースで設定した遊間により生じる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、せん断力の上昇が生じる。接触範囲より下部の0.5D～1.5Dの位置におけるせん断力の低下は、柱とデバイスの接触によりデバイスが水平反力を受け持つようになったためと考えられる。2.0D～3.0Dの位置では、デバイスとの接触点(①P点)を超えた後、デバイス接触後の最大耐力点(②M-m点)まで緩やかにせん断力が上昇し、M-m点でせん断力は240kN程度で最大値を示した。

表-5にCaseB～Eのデバイス接触後の最大耐力点(②M-m点)におけるせん断力とデバイスの無いCaseAの最大耐力点(M点)を比較する。表-5より

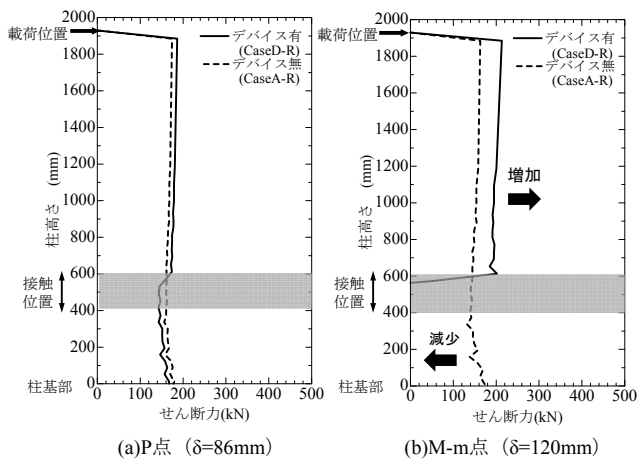


図-13 CaseA・Dの柱全体のせん断力分布の比較

柱とデバイスの遊間が小さいCaseBのせん断力が最も大きくなり、遊間が大きくなるとM-m点でのせん断力の値は10%程度低下する傾向となった。

デバイスが無いCaseAのM点におけるせん断力を比較するとデバイスを設置することでCaseB～Eのいずれにおいても40～30%程度の水平耐力の上昇とM点での水平変位より大きい変位まで、水平耐力を保持できていることが分かる。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-13にCaseAとCaseDのP点とM-m点における柱全体のせん断力を示す。

図-13に示すようにデバイスとの接触点(P点)ではCaseAとCaseDとも柱全体に180kN程度のせん断力が発生しているが、デバイス接触後の最大耐力点(②M-m点)では、CaseDはデバイスとの接触により、接触範囲より下部はCaseAと比べせん断力が大きく減少し、接触範囲より上部ではCaseAと比べせん断力が増加していることが確認できる。

これは、柱とデバイスが接触したことでデバイスが反力を受け持ち、柱のせん断スパンが短くなり柱に作用するせん断力が増加したものと考えられる。したがって、柱とデバイスが接触後は1.5D付近を柱の固定点とするような応力状態に移行し、見かけ上せん断スパンの短くなることで柱に生じるせん断力が増加するような傾向を示すと考えられる。

(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に抵抗範囲を推定するため、図-14に静的载荷試験で耐力低下が

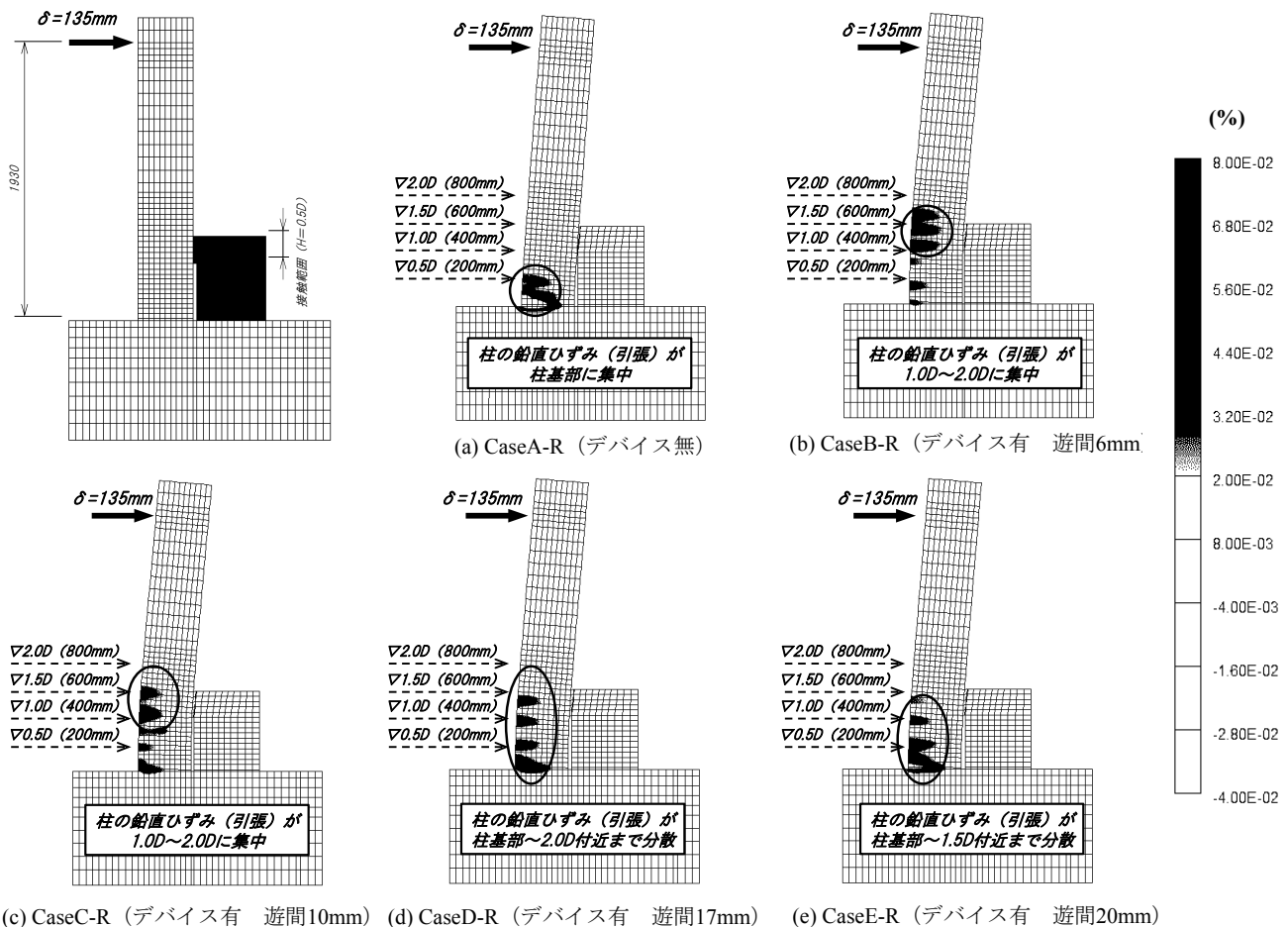


図-14 各解析ケースの柱の鉛直ひずみ分布 (天端変位 135mm)

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コンター図を示す。

図-14よりデバイスの無いCaseA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分かる。前述の図-10に示す曲げモーメント分布で0.5D付近の曲げモーメントが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CaseB～Eを比較すると、柱単体の最大耐力点（M点）に対して、M点より手前で接触するように遊間を設定したCaseB・Cは1.0D～2.0D付近に大きな引張ひずみが集中し、デバイスの無いCaseAと比べると柱基部付近のひずみの分布は小さいことがわかる。このことから、CaseB・Cでは柱の1.0D～2.0D付近をに大きな変形が生じるものと考えられる。柱単体での最大耐力点（M点）に対して、M点付近で接触するように遊間を設定したCaseDは、0.5D～2.0D付近まで引張ひずみは発生していることが確認できる。また、CaseDより遊間が大きく設定したCaseEは0.5D～1.5D付近まで引張ひずみは発生していることが確認できる。したがって、CaseD・Eでは柱の0.5D～1.5Dまたは2.0D付近の広い範囲に損傷が分散されるものと考えられる。各ケースでの柱のひずみ分布を比較すると、M点より手前で接触するように遊間を設定したCaseB・Cは、CaseAで確認できるような本来の柱基部に十分な変形やひずみが生じない状態でデバイスと接触しており、本来の柱の高さよりも短い柱の変形形態に近づいている。CaseB・Cのように柱とデバイスの遊間が小さく設定すると、柱のせん断力は上昇するものの本来の柱で生じる変形箇所とは異なる箇所で大変形が生じる可能性がある。

一方で、M点より付近で接触するように遊間を設定したCaseD・Eは、CaseAと同様に本来の柱基部に生じるようなひずみが確認でき、柱基部が変形した後で、デバイスと接触し上部にひずみが生じたものと考えられる。また、最も遊間を大きく設定したCaseEは、CaseDと比較して柱上部へのひずみの進展する範囲が小さくなっていることから、柱基部の変形が大きく進行した後でデバイスと接触しても、ひずみの上部への分散は小さくなると考えられる。

したがって、デバイスと柱が接触するタイミングにより柱に作用するひずみ分布に大きな違いが生じるため遊間の設定は、本来の柱の変形性能を発揮した後にデバイスと接触させて、局所的なひずみの集中を避けて、柱上部へひずみを分散させることが必要と考えられる。

6. まとめ

本稿では、デバイスの有無および柱とデバイスとの遊間を変化させ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有無にかかわらず荷重－変位関係は試験結果とほぼ整合し、再現性が確認できた。デバイスを設置した場合、柱とデバイスの接触に伴う柱の荷重変化点・耐力上昇が確認でき、約 30% の柱の水平耐力上昇して柱耐力に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、柱基部の曲げモーメントはデバイスとの接触点付近を境界に低減され、1.0D～2.0D の位置では曲げモーメントが増加して柱上部へ曲げモーメントが分散するような傾向を示す。また、せん断力は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 の位置でせん断力の上昇が生じる。これは柱とデバイスの接触により、柱のせん断スパンが短くなり、接触範囲付近を柱の固定点とするような見かけ上、短い柱の応力状態に変化すると考えられる。
- (3)柱のひずみ分布は、柱単体の M 点より手前で接触するように遊間を設定すると、柱基部に十分な変形やひずみが確認されずに柱上部にひずみが進展して本来の柱の高さよりも短い柱の変形形態に近づく傾向となる。一方で、柱単体の M 点より付近で接触するように遊間を設定すると、本来の柱基部に生じるようなひずみが確認でき、柱基部が変形した後で、デバイスと接触し上部にひずみが分散したと考えられる。したがって、デバイスと柱が接触するタイミングにより柱に作用するひずみ分布に大きな違いが生じるため、遊間の設定はデバイスを設置しない本来の柱の変形性能を発揮させ、局所的なひずみの集中を避けて柱上部へひずみを分散させることが必要である。

以上がブロック型倒壊方向制御構造の耐荷メカニズムであり、このような耐荷機構を有する倒壊方向制御構造をラーメン高架橋の柱に付与させることで、地震時に柱耐力に非対称を与えることが可能となり柱を倒壊方向を任意の方向へ誘導することが可能になると思われる。

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) 齊藤正人，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., Murono, 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 卷 (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.