

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

豊岡 亮洋¹・布川 博一²・小野寺 周²・室野 剛隆³

¹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
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 修士（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
（〒185-8540 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
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震は、設計での想定を超える規模や回数の地震作用が発生し得ることを改めて認識させる契機となった。こうした想定を超える地震作用に対しては、耐震設計を十分に行うことに加え、仮に設計での想定以上の地震動が生じたとしても、人命損失などの破滅的な被害を防止することが必要となる¹⁾。この設計思想は「危機耐性」として活発に議論が行われており^{1~3)}、平成24年に改定された「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」においても構造計画の段階での配慮事項としてその概念が取り入れられている⁴⁾。さらに、危機耐性の向上を具体的に実現する手法についても、完全倒壊を防止する補償柱を導入する自重補償構造⁵⁾、簡易なデバイスを設置して人為的に構造物の倒壊方向をコントロールする倒壊方向制御構造^{6~8)}などが提案されており、静的載荷試験や振動台実験によりその有効性が確認されている。

本報告では、このうち倒壊方向制御構造に関する検討を深度化し、実構造に適用する際の設計や応答値算定に不可欠となる耐力や変形性能を静的載荷試験により評価した。また、デバイスを導入することによる耐荷メカニズムについて検討を行った。

2. 倒壊方向制御構造の概要

想定を超える地震動に対して、構造物の倒壊という「危機」を完全に防止することは困難であるが、仮に倒壊したとしても、図1に示すように居住地域

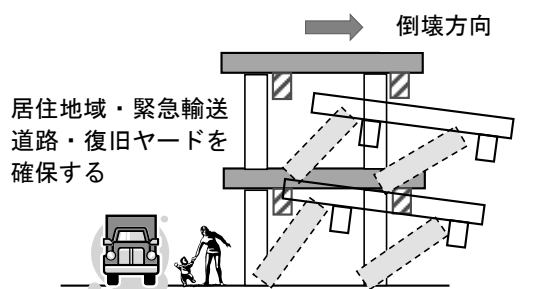


図1 倒壊方向制御構造のコンセプト

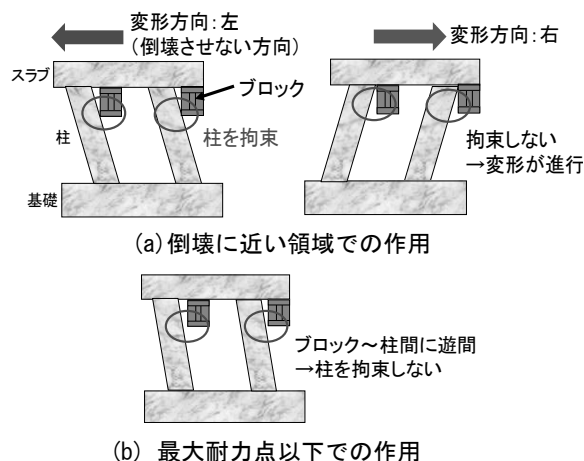
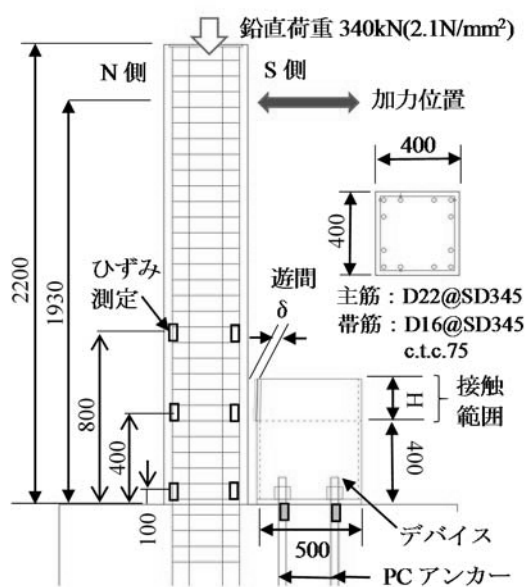
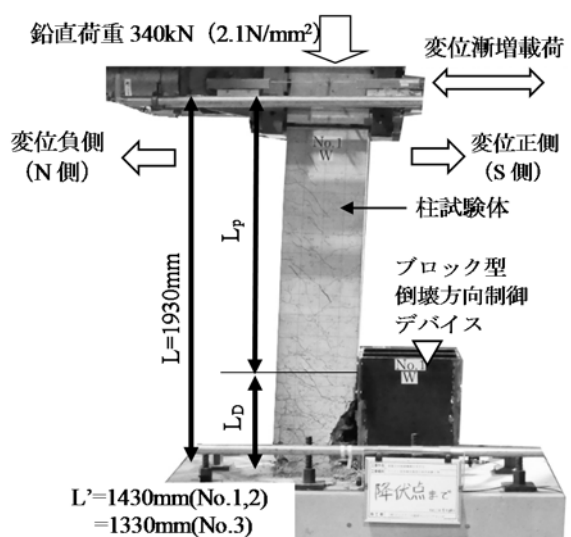


図2 ブロック型倒壊方向制御の機構

や緊急輸送道路、復旧スペース等を支障する方向には構造物を倒壊させないことで、人命損失を回避しつつ構造物の回復力を高め、危機耐性を向上させることは可能である^{6~8)}。この着想に基づき提案された倒壊方向制御構造は、図2のように、ブロックなどの簡易なデバイスを構造物に組み込むことで倒壊方向を人為的に制御することが可能な構造であり、



既往の研究で実施された高架橋模型の振動台実験により、所定方向に倒壊を生じさせることが可能であることが明らかとなっている⁸⁾。本研究では、このブロック型倒壊方向制御デバイス（以下、デバイス）を対象として実用化に向けた検討を深度化し、より実構造に近いスケールの高架橋柱を想定した静的載荷試験を実施する。これにより、倒壊方向制御構造の形状や配置が耐力・変形性能に与える影響や、柱に倒壊に近い損傷が生じる過程での耐力発現メカニズムを定量的に評価する。

3. 耐力・変形性能評価のための静的載荷試験

(1) 試験概要およびラーメン高架橋柱模型

一連の試験では、図3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

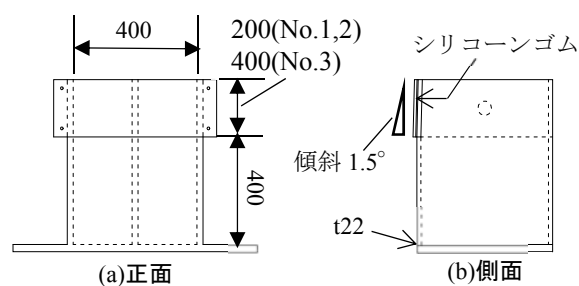


図5 倒壊方向制御デバイス (単位:mm)

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する。製作した柱供試体の主要諸元を図4に示す。この諸元は、過去に耐力低下域までの載荷試験が実施された柱試験体の諸元と同一とした⁹⁾。本試験では、この試験結果を参照し、倒壊方向制御デバイスを組み込むことによる水平方向の履歴や耐力、変形性能の変化を評価する。以下ではこの基本とする既往の柱単体試験を「基本試験」と称する。

(2) 倒壊方向制御デバイス

倒壊方向制御を実現するデバイスは、図5のような鋼製ボックス（SS400材：板厚22mm）とし、図4のように柱基部スタブにアンカーボルト4本を介して設置した。デバイスの設計にあたっては、既往の試験において、柱とブロックが線接触し局所的に柱に大きな損傷が生じたため⁸⁾、柱との接触面には、柱の最大耐力点（M点）での柱回転角に相当する約1.5度の傾斜を設け、柱とデバイスが面接触するように配慮した。また、ブロックと柱の接触面に厚さ10mmのシリコンゴム緩衝材を設置した。

ここで、デバイスと柱の接触タイミングと接触範囲が結果に大きく影響すると考えられることから、この2つを試験パラメータとした。接触タイミングはブロックと柱の間の遊間(図4:δ)で調整し、基本試験の結果等を基に最大耐力点(M点)に相当する載荷点水平変位 $6\delta y$ 付近、およびやや手前の $4\delta y$ で拘束効果が生じる条件を設定した。M点を基準としたのは、通常の耐震設計で想定する応答レベルではデバイスの拘束効果を生じさせないためである。

また、デバイスと柱の接触範囲（図4：H）は、柱基部の塑性ヒンジ形成を阻害しないよう、1D（=400mm）高さから0.5D(=200mm)、1D範囲で接触する条件を設定した。以上の試験条件を表1に示す。デバイスを有する試験体を以降No.1～3と記述する。

表 1 各試験体の载荷条件

試験体	デバイス-柱 接触範囲 H	デバイス接触時 の载荷水平変位	遊間 δ
No.1	0.5D (200mm)	M 点手前: 4 δ y (56mm)	10mm
No.2	0.5D (200mm)	M 点付近: 6 δ y (90mm)	14mm
No.3	1.0D (400mm)	M 点付近: 6 δ y (84mm)	14mm

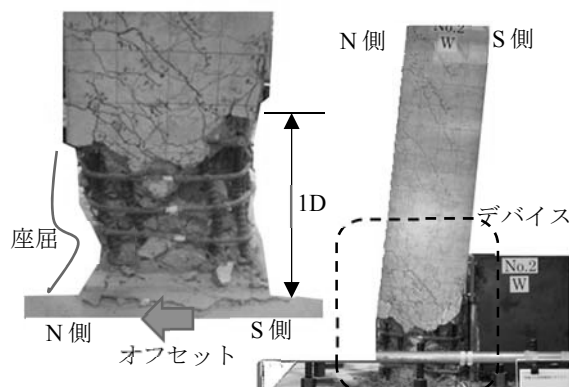


図 6 試験終了後の損傷状況 (No.2 試験体)

(3) 载荷条件および計測項目

3体の試験体はいずれも正負交番载荷により試験を行った。試験では基部の鉄筋降伏時の水平変位 δy を基準として、3回繰り返しの変位漸増载荷により载荷を行った。この δy は試験中に軸方向鉄筋のひずみが事前の材料試験で得た降伏ひずみ(=1987 μ)に達した時点の変位とし、No.2で15mm、他の試験体では14mmであった。载荷は、基本試験で大幅な耐力低下が生じた9~10 δy を目標に実施した。

実験結果は、デバイスを設置することによる、1)耐力や変形性能の評価、2)柱高さ方向の曲げモーメント作用の変化、3)デバイス反力に対する柱の抵抗範囲、の3点に主に着目して整理を行う。すなわち、デバイスの有無による作用と耐力の変化を把握することを目的とする。そこで計測は、a)水平および鉛直方向の荷重・変位、b)軸方向鉄筋のひずみ、c)デバイスを設置したアンカーの軸方向ひずみ、を中心に行った。このうち、a)は1)、b)は3)にそれぞれ直接対応するものである。c)は、項目2)の柱の作用モーメント算定に必要となるデバイス水平反力を推定するために計測した。これは、デバイス水平反力を直接計測できなかったため、試験体No.1,2のデバイス(接触範囲0.5D)単体の载荷を別途行い、水平反力とアンカーひずみの関係を求めることで推定した。

4. 試験結果と考察

(1) 柱の損傷状況

図6には、No.2試験体の载荷終了後における試験体基部の状態を示す。各試験体は、柱基部の主鉄筋座屈とコアコンクリートの圧壊で終局を迎え、これは基本試験と同様の傾向であったが、No.2,3試験体が基本試験と同等の概ね9 δy で著しい耐力低下を生じたのに対し、No.1試験体は正負ともに12 δy まで変形性能を有していた。柱基部は、図6のように、デバイスの水平抵抗の影響で、柱基部が全体的に負側にオフセットするような損傷が見られたが、損傷は主に塑性ヒンジ区間に集中しており、デバイスが接触した箇所付近では顕著なはく離などの損傷は観察されなかった。なお、今回の一連の試験ではいずれも鉄筋の破断は生じなかった。

(2) デバイス設置条件による荷重～変位関係の変化

図7(a)～(c)には、载荷点における水平変位～水平荷重履歴を試験体ごとに示す。図では、デバイスの無い基本試験の履歴も比較のため示している。図7(d)は、図7(a)～(c)の骨格を抽出したものである。いずれも変位正側がデバイスが作用する方向である。

図7から、いずれの試験体も倒壊方向制御デバイスを導入したことで、正負非対称の耐力特性が生じている。これは既往の振動台試験においても確認されている。正側の耐力は、デバイスと柱の遊間および接触面積により差が生じているが、負側の耐力は、No.1～3と基本試験で耐力差はほぼ同等であった。表2には、正側および負側の最大耐力を比較する。このように、デバイスが作用しない負側では基本試験とNo.1～3の耐力差は10%程度であるが、デバイスが作用する正側では20～50%の差が生じた。このことから、デバイスの導入による耐力上昇量は10～40%程度と推定される。

この耐力上昇は、デバイスと柱が接触すると、载荷点を基準としたせん断スパンが図3において L から L_p に見かけ上減少することが要因と考えられる。すなわち、今回の試験は水平変位を制御していることから、水平荷重は柱の剛性が高い方が上昇することになるが、せん断スパンが短い場合、相対的に柱の曲げ剛性が上昇するため、デバイスと接触する変位正側で荷重上昇が生じていると考えられる。ただし、柱の損傷が進展すると鉄筋座屈やコンクリート圧壊等により曲げモーメントに抵抗できなくなるため、荷重上昇量には上限がある。

遊間が耐力に及ぼす影響としてNo.1とNo.2を比較すると、No.2は柱の損傷がより進んだ6 δy でデバイスと柱が接触したため、耐力上昇量はNo.1よりもやや低い結果となった。

また、接触範囲の影響としてNo.2とNo.3を比較す

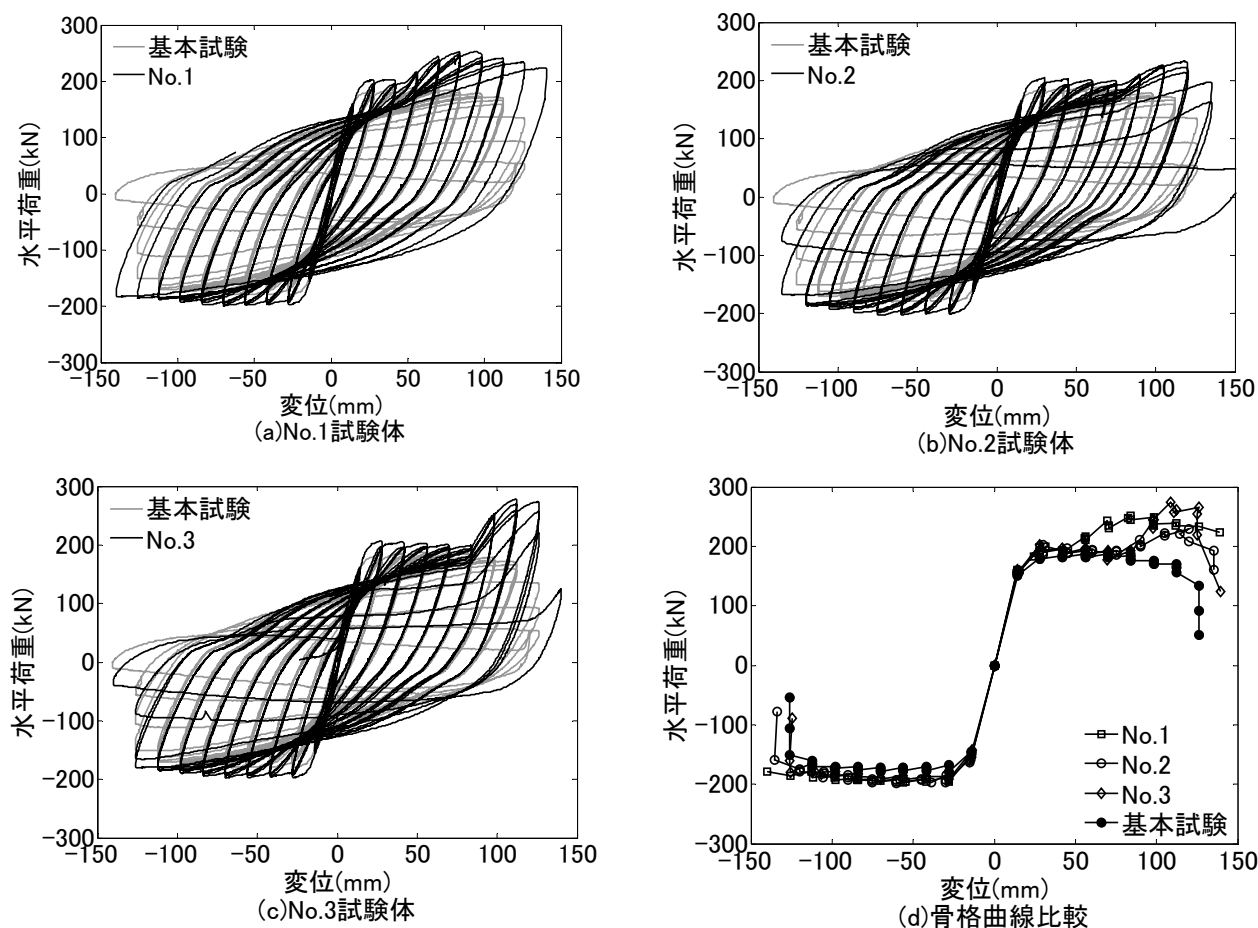


図7 各試験体の荷重～変位履歴および骨格曲線の比較

表2 最大荷重の増加量比較

	正側最大 荷重(kN)	正側増加 割合(%)	負側最大 荷重(kN)	負側増加 割合(%)	増加割合差分 (正－負)
No.1	248.4	132.3	195.4	109.0	23.4
No.2	228.9	121.9	197.6	110.2	11.7
No.3	275.4	146.7	192.2	107.2	39.5
基本試験	187.7	---	179.3	---	---

ると、No.3の方がNo.2よりもみかけのせん断スパン L_p が短く、かつ柱とデバイスの接触範囲もNo.2より広いことから、No.2よりも広範囲の柱耐力を利用して水平荷重に抵抗することができるため、耐力上昇が最も大きい結果となった。

(3) デバイスによる作用モーメントの変化

次に、デバイス設置による作用の変化を把握するため、梁理論による作用モーメント分布の推定を行った。すなわち、図8のように载荷点モーメントを0とし、測定したジャッキの水平荷重、水平変位、鉛直荷重、およびデバイスの水平抵抗力から柱基部およびデバイス作用位置でのモーメントを算定し、3点を結ぶことでモーメント分布を推定した。この推定は、デバイスの水平抵抗力を算定するためのデバ

イス単体の要素試験を実施した、No.1およびNo.2試験体について行った。

図9には、No.1、No.2試験体、および基本試験のそれぞれについて、正側载荷時の作用モーメント分布を算定した結果を示す。横軸は、各試験体の降伏モーメントで正規化している。デバイスと柱が接触する高さ（図3: L_D ）は500mmとした。

このように、ブロックが作用する前の変位 $3\delta_y$ では、基本試験とNo.1,2試験体はほぼ同様のモーメント分布となっているが、デバイスが作用した後の変位 $8\delta_y$ では基本試験とは異なり、デバイスの水平抵抗によりデバイス～基部間の作用モーメントがほぼ一定となった。また、(2)で示した柱のみかけのせん断スパン減少により水平载荷荷重が上昇したことから、全体的な柱モーメント分布は基本試験よりも増加した。

このことから、デバイスを導入した場合、デバイスのせん断スパン L_D の範囲に曲げによる塑性化が分散して生じると推定される。また、せん断力については、モーメント分布がデバイスのせん断スパン L_D の範囲で一定となることから、デバイスが徐々に载荷水平荷重を負担し、柱に伝達するせん断力は減少

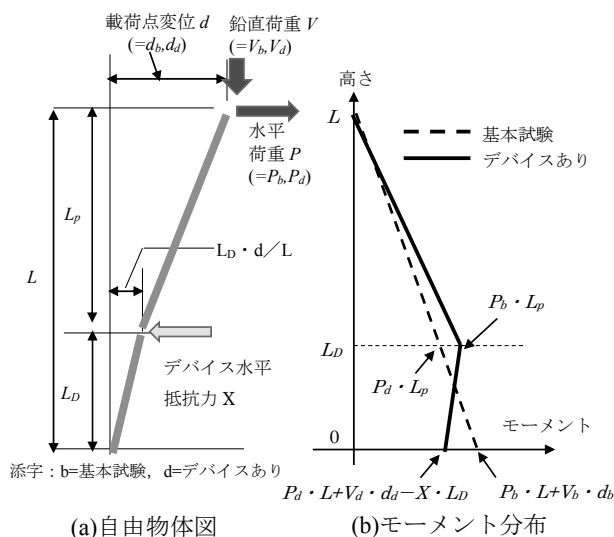


図8 モーメント作用分布の推定

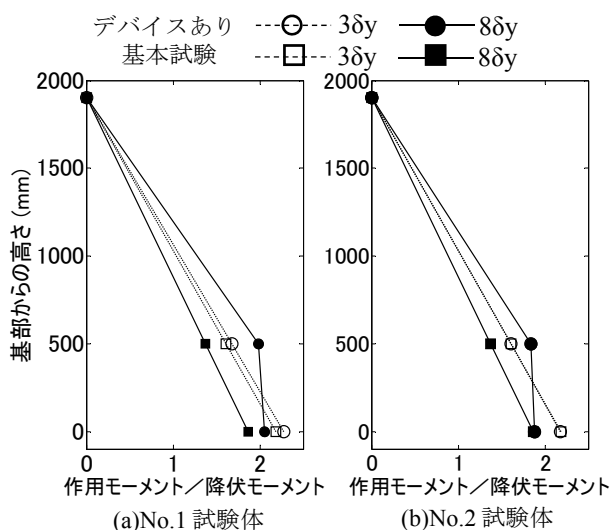


図9 推定したモーメント作用分布

すると推定される。

(4) デバイス反力に抵抗する柱範囲の推定

図10には、載荷荷重およびデバイス反力に抵抗する柱の領域を推定するため、各試験体の載荷ステップごとの軸方向鉄筋引張ひずみを水平変位との関係で示す。デバイスが作用する変位正側の載荷時には図3のN側、変位負側の載荷時にはS側の鉄筋が引張となる。高さ方向には、基部から100mm、400mm(1D)、800mm(2D)の3箇所を抽出した。

この図から、No.1～3と基本試験では降伏点前後の載荷初期ではほぼ同様のひずみの傾向となる。しかし、デバイスが作用した後の4～6δy（約50mm以上）以降、正側載荷時に塑性ヒンジ区間の100mmおよび400mmの位置で、No.1～3のひずみが減少している。これはNo.1～3ではデバイスが基部の曲げ変形を拘束しているためと考えられる。一方、基部+800mmの位置では、正側載荷時に基本試験では見られない大きなひずみが生じている。これは、デバ

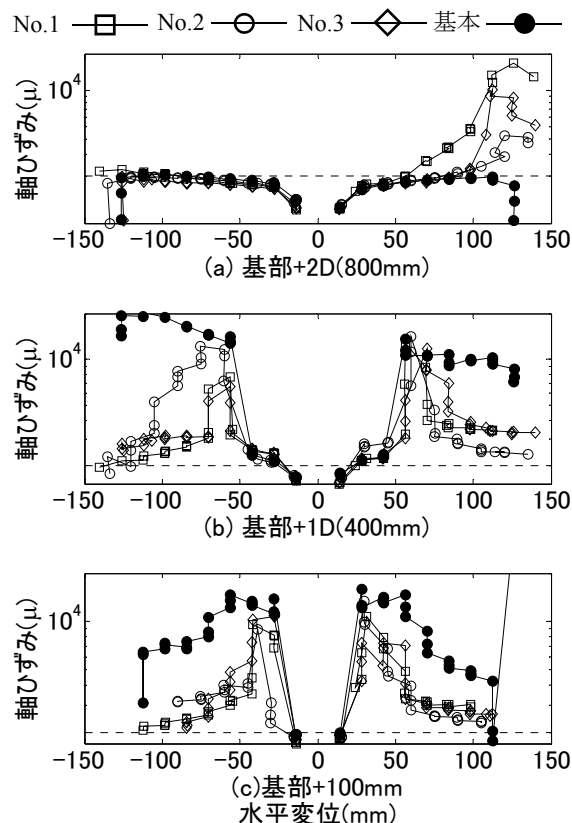


図10 軸方向引張鉄筋ひずみ

イスからの作用力に対し、今回の試験条件では柱高さ2D程度の区間で荷重を分担していることを示しており、(3)で柱高さ方向の作用モーメントが増加したこととも整合している。

なお、デバイスが作用しない変位負側においても、1D区間では降伏ひずみを超過し塑性ヒンジが形成されているが、デバイスを設置したNo.1～3の方が基本試験よりもややひずみが低減している。一般に、基部では鉄筋が圧縮～引張を同程度に繰り返し受けることで座屈が生じ、ひずみが増加する。ここで、デバイスを設置した場合、圧縮側のS側鉄筋が負担する圧縮力の一部をデバイスが負担するとともに、S側の鉄筋座屈やかぶりコンクリートのはらみ出しがデバイスによりある程度拘束される。このため、S側鉄筋の座屈発生が遅れ、また座屈が生じたとしてもデバイスの拘束で外側に大きくはらみ出すことができないため、ひずみの増加が抑制されていると想定される。これは、(1)で示したように、柱とデバイスの遊間を最も小さくしたNo.1試験体において、図7(a),(d)の変位負側で9δy以降も座屈に伴う顕著な耐力低下が生じなかったことから推測される。なお、この座屈発生の遅れによる変形性能の増加は、既往の片側繰返し載荷試験においても指摘されている¹⁰⁾。

以上から、基本試験では載荷点の水平変位はほぼ

基部の曲げ変形で生じるのに対し、デバイスを導入することで柱高さ方向に曲げ変形およびこれに伴う損傷を平滑化する効果が生じると考えられる。また、塑性化範囲は主にデバイスのせん断スパン L_D の領域で生じると考えられる。

(5) まとめ

以上の実験結果から、倒壊方向制御デバイスを導入すると、デバイスの拘束により柱のせん断スパンが見かけ上低減し、同一変位に対する耐力はデバイスが無い場合よりも上昇する。これにより、全体的に柱高さ方向の作用モーメントは増加するものの、塑性ヒンジ区間での曲げ変形がデバイスにより拘束され、柱高さ方向に曲げ変形や損傷を分散させて抵抗することができる。これが倒壊方向制御構造の基本的な耐荷メカニズムであると推定される。

5. 結論

本研究では、柱基部にブロック型のデバイスを設置し、仮に構造物が倒壊したとしても居住地域や緊急輸送道路や復旧スペース等を支障する方向には構造物を倒壊させないことで危機耐性を向上させる倒壊方向制御構造を対象として、水平方向の耐力・変形性能や耐力発現メカニズムを静的載荷試験により評価した。本研究により得られた成果を以下に示す。

- (1) 柱との間に遊間を設けて倒壊方向制御デバイスを設置することで、デバイスが作用しない方向には通常の柱とほぼ同様の耐力・変形性能を維持しつつ、デバイスが作用する方向にのみ耐力上昇が生じ、既往の振動台試験と同様に正負非対称の耐力特性が生じることを確認した。これにより、地震時には応答を一方向に累積させ、倒壊方向を制御することが可能と考えられる。
- (2) デバイス設置による耐力上昇量は遊間および柱とデバイスの接触範囲に依存し、今回の試験の条件では、柱単体の耐力と比較して20～45%程度の耐力上昇が得られた。この耐力上昇は、デバイスが柱の基部を拘束することで見かけ上せん断スパンが上昇することが要因と考えられる。
- (3) デバイス設置による耐力上昇により、デバイスが無い場合と比較して全体的に柱高さ方向の作用モーメントは増加する。これにより全体的に柱高さ方向の作用モーメントは増加するものの、塑性ヒンジ区間での曲げ変形がデバイスにより拘束され、柱高さ方向に曲げ変形や損傷を分散させて抵抗することができる。これが倒壊方向制御構造の耐荷メカニズムと考えられる。

本試験における考察を補強するため、柱とデバイスの遊間をパラメータとして、断面内応力やモーメント、せん断力分布を検討したFEM解析を実施しており、これについては別報で報告する¹¹⁾。

なお、本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 室野剛隆：巨大地震に備える－耐震設計と危機耐性，土木学会誌Vol.100, No.7, pp.24-27, 2015.
- 2) 本田利器，秋山充良，片岡正次郎，高橋良和，野津厚，室野剛隆：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.72, No.4（地震工学論文集第35巻），I-459-472, 2016.
- 3) 野津厚，室野剛隆，本山紘希，本田利器：鉄道・港湾構造物の設計指針と「危機耐性」，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.72, No.4（地震工学論文集第35巻），I-448-458, 2016.
- 4) 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，2012.
- 5) 西村隆義，室野剛隆，本山紘希，五十嵐晃：危機耐性を高める自重補償構造の提案と成立性，第18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，pp.299-304, 2015.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 徳永光宏，田所敏弥，谷村幸裕，北沢宏和：片側繰返し荷重を受けるRC柱の変形性能に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, 2010.
- 11) 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.