

危機耐性を向上させる倒壊方向制御構造の振動台実験

豊岡 亮洋¹・室野 剛隆²・齊藤 正人³

¹正会員 博（工）（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博（工）（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター センター長
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 博（工）埼玉大学教授 大学院理工学研究科／レジリエント社会研究センター
（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255）

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、仮に設計で想定した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⁾。このような設計思想は「危機耐性」として近年活発に議論が行われており^{1~5)}、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⁶⁾。さらに、こうした危機耐性を具体的に実現する手法についても研究開発が行われている。兵庫県南部地震を一つの契機として広く実施されてきた鋼板巻き補強やRC巻き補強は、構造物の脆性的な破壊を防止し、損傷をゆるやかに進展させるものであり、危機耐性を向上させる手法の一つと解釈できるが⁵⁾、耐震設計で制御可能な領域を超える範囲、すなわち耐震設計の補集合領域¹⁾での構造物挙動をより積極的に制御する手法として、自重補償構造⁷⁾、倒壊方向制御構造⁸⁾などが提案されている。

本研究では、このうち倒壊方向制御構造に着目し、高架橋を主な対象として倒壊方向制御構造を実現する具体的なデバイスを2種類提案するとともに、その効果を振動台実験により検証した結果を報告する。

2. 提案する倒壊方向制御構造の概要

(1) 倒壊方向制御構造のコンセプト

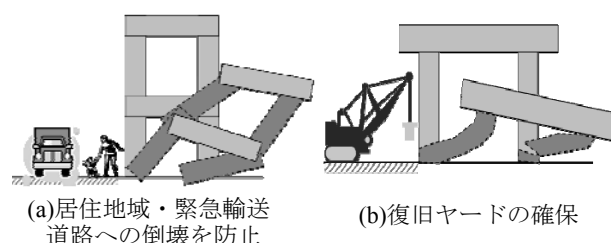


図1 倒壊方向制御構造のコンセプト

危機耐性の議論を行うには、まず回避すべき具体的な災害シナリオを想定する必要がある⁴⁾。この一つとして、構造物が想定を超える地震に対して倒壊し、人命の損失や復旧困難な状態に陥る状況を「危機」と定義できると考えられる^{5),8)}。次に、想定を超える地震作用に対して構造物の倒壊という「危機」を完全に排除することは難しいという前提に立ち、可能な限り「危機耐性」の高い構造物の構築を目指す必要がある。例えば倒壊時にスラブを支持する自重補償柱を別途設け、完全な倒壊を防止する「自重補償構造」が提案されている⁷⁾。しかし、自重補償柱本体および基礎の設置が比較的大規模となるため、緊急輸送道路と交差する箇所など、優先度の高い箇所から順次導入していくことが考えられる。

これに対し、より多くの構造物で危機耐性を向上させることを考えた場合、倒壊が仮に生じたとしても、図1のように居住地域や緊急輸送道路、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、人命損失を回避し構造物の回復力を高める、という方策も考えられる。こうした着想のもとに、実構造において数量が多いラーメン高架橋を主な対象とした「倒壊方向制御構造」のコンセプトが提案されており⁸⁾、本研究ではこの構造を具体的に実現

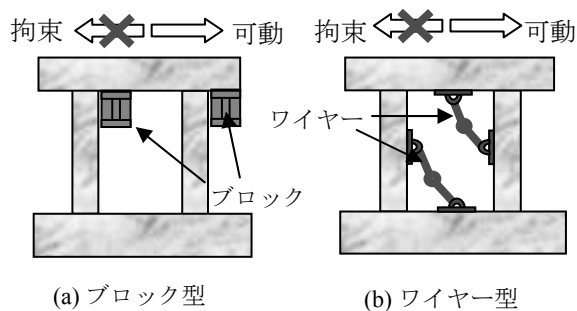


図2 提案する倒壊方向制御構造

するデバイスを開発するものである。

一般的な耐震設計で想定されている、ラーメン高架橋が倒壊に至るメカニズムは、せん断補強が十分行われていることを前提とすれば、柱の上下端に塑性ヒンジが形成され、自重倒壊するモードが主要な倒壊挙動と考えられる。しかし、構造物が倒壊に至る現象は非常に複雑であり、倒壊する方向も入力特性や材料特性によりばらつきが生じるため、事前にこれを正確に予測することは困難である。そこで、最終的な倒壊方向を確実に制御するためには、構造物の振動挙動に人為的に非対称性を設けることで、想定する方向に損傷を積極的に誘導することが有効な手法の一つと考えられる。また、居住地域や緊急輸送道路等は、高架橋に沿って比較的広範囲に位置することが多いと考えられることから、倒壊方向制御構造は多数の高架橋に同時に導入する必要があるが、工費や維持管理性の観点から、個々のデバイスは可能な限り簡易かつ安価な構造であることが望ましい。

(2) 倒壊方向を制御可能なデバイス

このような要求を実現するデバイスとして、図2のように、ブロック型およびワイヤー型の2種類の概念が提案されている⁸⁾。ブロック型は、高架橋スラブにブロックを設置することで、想定する倒壊方向と逆方向に構造物の変位が進行した場合、ブロックが柱を拘束して変位を抑制する機構を有する。また、ワイヤー型は高架橋スラブと柱をワイヤー等の可とう性デバイスで接続し、想定する倒壊方向と逆方向に対する変位を抑制する機構を有する。いずれのデバイスも、想定する倒壊方向への変位は拘束せず、通常の構造物と同様に挙動させることを意図している。また、ブロック、ワイヤーともに構造的にはシンプルかつ安価であり、多数の構造物に導入することが可能であると考えられる。

なお、微小振動領域からこれらのデバイスが作用した場合、柱の反力分布や損傷モードが変化し、柱部でのせん断破壊など予期し得ない倒壊モードが生

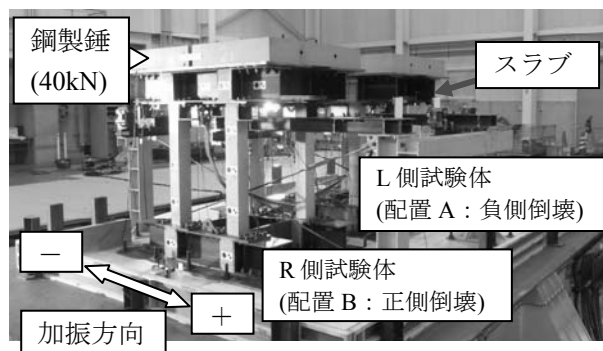


図3 高架橋模型の振動台実験状況

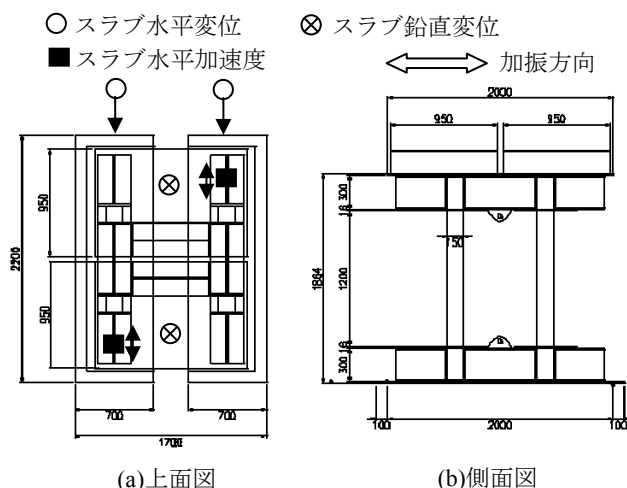


図4 高架橋模型の概要（デバイス設置前）

じる懸念がある。そこで、構造全体系が最大力点付近まで応答し、柱の上下端に塑性ヒンジが確実に形成された後にデバイスを機能させるものとする。これは、ブロック型の場合は柱とブロックの間に遊間を設けること、ワイヤー型の場合は与たるみを設けることでそれぞれ実現することができる。

3. 振動台実験による効果検証

(1) 試験概要

2章で示した2種類のデバイスを具体的に設計・製作するとともに、これらを組み込んだ高架橋模型を製作し、振動台を用いた動的載荷試験を実施した。これにより、倒壊方向が事前に想定する方向に生じることを確認し、倒壊方向制御構造のコンセプトの成立性を検証する。

載荷試験では、(2)に示すラーメン高架橋模型に対して、まずブロック型のデバイスを組み込んだ試験体を2体製作し、図3のように振動台に上載して一方向に同時加振を行った。この2体の試験体は、(3)に示すように倒壊方向が異なるようにデバイスを配置している。加振試験は高架橋模型に倒壊が生じる

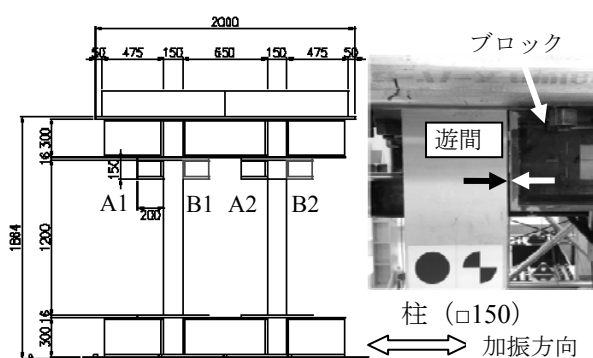


図5 ブロック型デバイスの配置

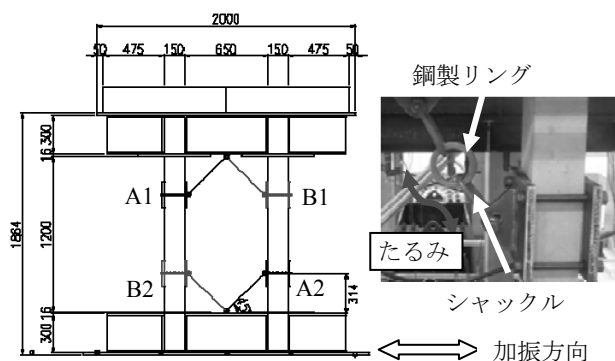


図6 ワイヤ型デバイスの配置

まで入力加速度を漸増して実施した。ブロック型デバイスの試験終了後に供試体を撤去し、ワイヤー型デバイスを組み込んだ試験体2体を設置し、同様の破壊試験を実施した。試験の詳細は以降で示す。

(2) ラーメン高架橋模型の概要

ラーメン高架橋模型は図4に示すように、鋼製フレームによりスラブおよびスタブを構築し、スラブをコンクリート柱4本で支持する構造とした。スラブ上には、鋼製錘により死荷重を作用させた。柱はRC製でW150mm×D150mm×H1200mm、軸方向鉄筋は8-D6(SD295)とし、スラブ上には40kNの鋼製錘を上載した。これにスラブの重量を加算した柱4本に作用する死荷重は48.5kN、柱1本あたりの軸力は0.54N/mm²である。

模型試験体の設計にあたっては、振動台の加振能力および試験の安全性の観点から、降伏震度0.6程度を目標とし、(4)の静的非線形解析等に基づき設計を行った。柱高さおよび配筋については、せん断破壊が生じず、柱の上下端に塑性ヒンジが形成されるように設計している。なお、本試験は高架橋模型が倒壊に近い挙動を示すまで载荷を行うことから、安全対策として鋼製フレームをテーブル上に設置し、倒壊時にスラブ荷重を受ける構造とした。

(3) 倒壊方向制御構造の設計

ブロック型デバイスの配置を図5に、ワイヤー型デバイスの配置を図6にそれぞれ示す。デバイスは図中のA1/A2（配置A）およびB1/B2（配置B）をセットで配置する。倒壊方向は配置Aの場合は紙面左側、配置Bでは紙面右側を想定する。以降の議論では、図3のように、配置Aの試験体をL側試験体、配置Bの試験体をR側試験体と称する。試験では、(1)で述べたようにL側およびR側試験体2体を振動台上に並べて同時加振を行った。なお、変位の極性は図3のように手前側が正となるように設定しており、L側試験体は変位負方向、R側試験体は変位正方向が想定する倒壊方向である。

ブロック型デバイスは、柱1D区間相当の高さ(150mm)が柱に接触する構造とし、スラブに4-M24により固定した。また、柱とブロック型デバイスの間には4mm程度の遊間を設けた。これは2章(2)で述べた理由から、以降の(4)の数値解析に基づき、試験体が最大耐力点となる水平変位時においてブロックが柱と接触することを想定している。

また、ワイヤー型デバイスは、作用モーメントが小さい柱中間部付近（下端から高さ314mm）と、スラブ・スタブの間にシャックルを設置し、これらを鋼製リングにより接続した。ワイヤー型デバイスにおいても、最大耐力点以降で張力が発生するよう、たるみをあらかじめ持たせて配置した。

なお、本試験は倒壊方向制御構造のコンセプトを確認することが主目的であり、デバイスの詳細な設計法については今後の課題であるが、本試験においては、ブロック、ワイヤーの耐力、およびボルトや治具の耐力については、試験体の最大耐力点時において十分な耐力を持たせることで設計を行っている。

(4) 倒壊方向制御構造を有する模型の非線形特性

試験体の設計および基本挙動の確認のため、無対策構造の高架橋モデル、および試験を行う2種類の倒壊方向制御デバイスを組み込んだフレーム解析モデルを作成し、静的非線形解析を実施した。

解析モデルはブロック型およびワイヤー型のいずれも図5、図6の配置A（負側倒壊）を想定し、ブロック型については、ブロックが拘束する柱上端の1D区間を剛体に置換した柱でモデル化した。また、ワイヤー型については軸力のみ伝達させるトラス要素により表現した。本解析モデルに対して、スラブ～錘の重心位置および柱に静的慣性力を作用させ、この慣性力を正方向に一樣に増加させて非線形特性を算定した。また、倒壊方向制御構造が作用しない負

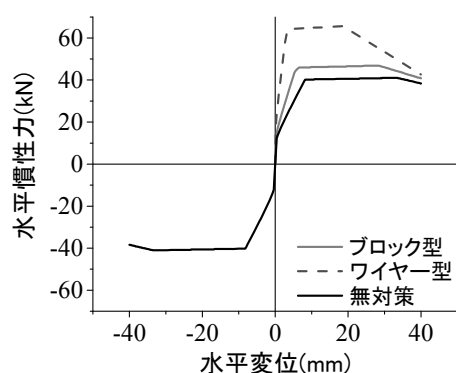


図7 静的非線形解析結果の比較

表1 载荷試験条件

Case	ブロック型		Case	ワイヤー型	
B1	2Hz-500gal	---	W1	2Hz-500gal	---
B2	2Hz-750gal	---	W2	2Hz-750gal	L
B3	2Hz-750gal	---	W3	2Hz-750gal	---
B4	2Hz-1000gal	---	W4	1Hz-750gal	R
B5	2Hz-1500gal	---			
B6	1Hz-750gal	L,R			

側の挙動については、高架橋単体の解析により表現した。部材特性は、鉄筋についてはコンクリート標準の設計用値の1.2倍、コンクリートの圧縮強度については 30N/mm^2 を設定した。なお、ここでは倒壊方向制御構造による耐力の増加を把握することを目的とするため、先述の遊間は考慮していない。

解析の結果得られた、試験体スラブ重心位置での水平慣性力～スラブ水平変位の骨格曲線を図7に示す。このように、倒壊を誘導する負側の方向（高架橋単体）では水平慣性力が最大 41.0kN 程度生じる結果となった。一方、倒壊方向制御構造を導入した場合、拘束効果の影響によりブロック型で 46.8kN 、ワイヤー型で 65.6kN にそれぞれ上昇する結果となった。これらをスラブ重量で除した最大応答震度としては、無対策構造で0.84、ブロック型で0.96、ワイヤー型で1.35となる。このように、デバイスを設置することで試験体全体の荷重～変位関係は正側と負側で非対称構造となり、倒壊方向制御構造を設置しない方向、すなわち耐力が相対的に低く損傷が生じやすい方向に倒壊方向を誘導することが本工法の特徴である。なお、ワイヤー型はブロック型と比較して柱の変形を拘束する範囲が広いことから、図7から相対的に拘束効果が高く変形性能が小さいことが分かる。また、試験体単体の降伏震度は0.61となり、曲げ破壊モードであることを確認している。

(5) 計測・加振条件

計測は図4に示すように、加振方向におけるスラブの応答加速度およびスラブと振動台の相対変位、ならびにスラブの鉛直変位を中心に測定した。また、倒壊に至る過程を確認するため、高速度カメラにより試験体側面から撮影した。

加振は加速度制御により2体の試験体を同時に一方向载荷し、試験体に倒壊が生じて安全対策用の鋼製フレームにスラブが落下するまで最大加速度を増加させながら実施した。入力には加振前後にテーパー波を5波を有する正弦波5波を用いた。正弦波を用いることで、入力自体の非対称性はほぼ無視できることから、試験の結果生じる倒壊方向の違いなどの非対称性は、挿入した倒壊方向制御構造の影響、およびこれによる試験体の損傷の非対称性による影響と判断することができる。

正弦波加振の振動数は 2.0Hz を基本とした。これは、(4)の静的非線形解析から試験体为非線形化した状態での柱剛性を算出して固有値解析を実施したところ、一次固有振動数は降伏点相当の剛性で 5.0Hz 、最大耐力点相当の剛性で 2.3Hz と得られたことから、最大耐力点以降まで試験体を損傷させることが可能な振動数として 2.0Hz を選定した。表1には、ブロック型およびワイヤー型試験体における実際の加振条件を示す。なお、これらの条件は、試験体の挙動を確認しながら载荷中に設定したものである。

4. 実験結果と考察

(1) ブロック型デバイス

ブロック型デバイスを設置した試験体に関する代表的な载荷結果として、図8には、表1の全ての加振ケースにおけるL側およびR側試験体のスラブ慣性力～スラブ水平変位履歴を重ねて示す。スラブ慣性力は、スラブの応答加速度にスラブ+錘質量を乗じて算出している。また、図9には、各試験におけるスラブ水平変位の時刻歴の推移を示す。図10には、柱・鉄筋の損傷を確認するため、スラブ鉛直変位～スラブ水平変位履歴を示す。なお、表1のL,Rは、それぞれL側およびR側の試験体が倒壊した試験ケースを示す。CaseB6で試験体を倒壊させた際の加振振動数は 1.0Hz であるが、これは倒壊に近い領域では固有振動数が大幅に低下し、 2.0Hz の加振では損傷が進行しなかったために設定したものである。

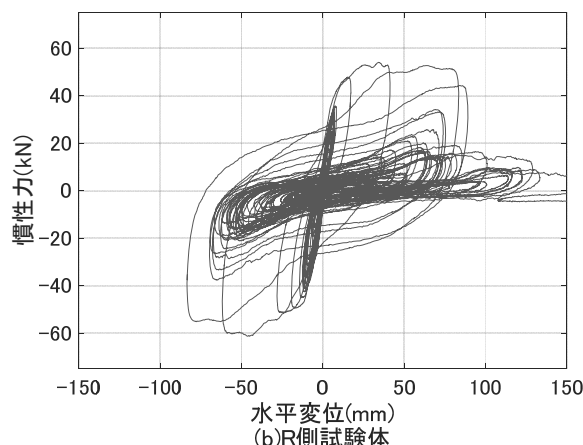
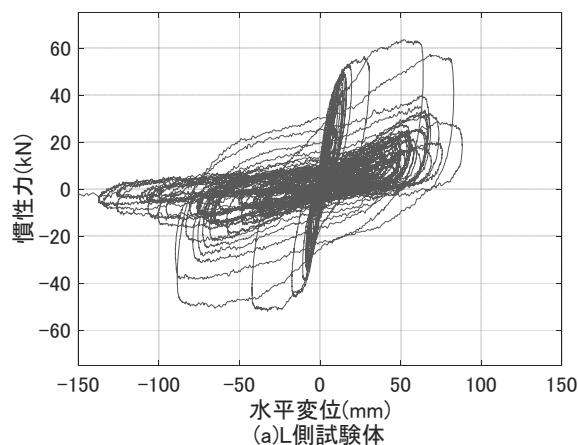


図8 水平慣性力～水平変位履歴比較（ブロック型：全ケース）

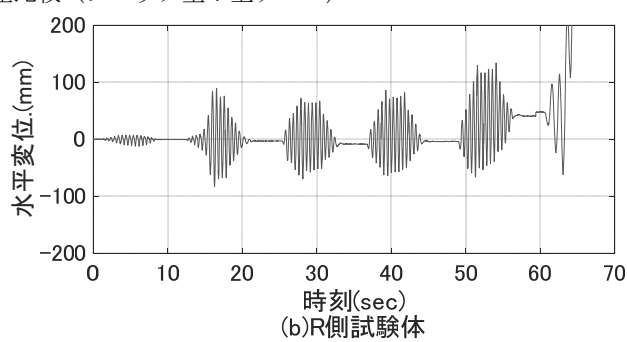
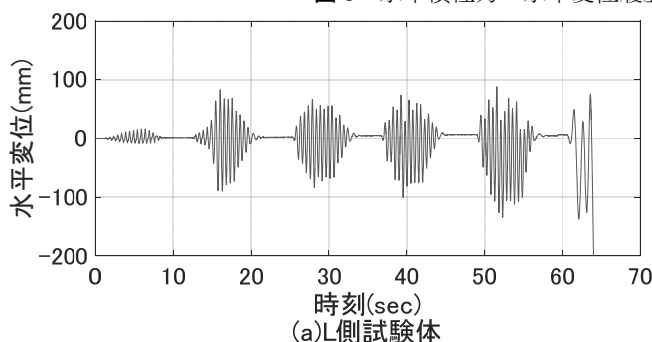


図9 水平変位時刻歴比較（ブロック型：全ケース）

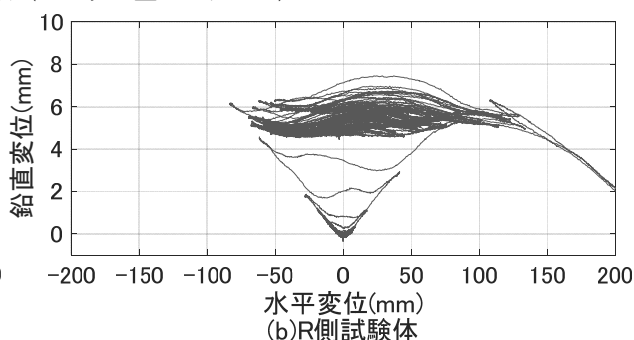
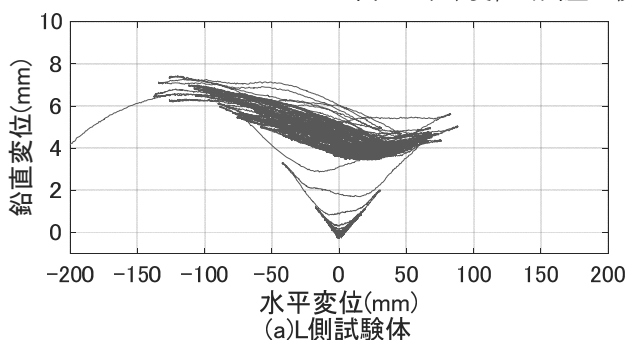


図10 水平変位～スラブ鉛直変位履歴比較（ブロック型：全ケース）

図8、図9のように、最大耐力点以降の耐力低下領域において、L側試験体は変位負側に、R側は変位正側にそれぞれ応答が進展し、倒壊方向が想定される方向に誘導されていることが分かる。最終的な倒壊方向も、事前に想定した通り、L側試験体は負側、R側は正側となった。

また、各载荷ケースにおける水平方向の損傷状態を確認するため、図11には、表1のCaseB2、B5の加振におけるスラブ慣性力～試験体水平変位履歴を示す。CaseB2では最大耐力点を過ぎて耐力低下が生じているが、この段階ではブロックと柱の接触が少なく、履歴に与える影響は限定的である。一方、CaseB5で耐力劣化が進行した場合、ブロックが片方向の変形増加を抑制し、L側およびR側ともに変位応答が想定する方向に進行していることが分かる。図12には、CaseB4の载荷中でのR側試験体の挙動を

示すが、一般的なラーメン高架橋と同様に柱の上下端に塑性ヒンジが形成され、かつ想定する倒壊方向と逆に変位した際にブロックが柱を拘束していることが分かる。

最終的には、CaseB6において、2体の試験体に同時に倒壊が生じた。図13には、R側試験体の倒壊時における損傷状況を示す。倒壊時には柱の鉄筋が上下端で破断するモードとなった。これは、図10の鉛直変位～水平変位履歴から分かるように、加振中に鉄筋は伸び出し方向に一樣に変位を受けており、最終的に鉛直変位が7mm程度に達した際、鉄筋が破断強度に達して切断したものと推定される。

(2) ワイヤ型デバイス

ワイヤー型デバイスを設置した試験体についても、図14に、表1の全ての加振ケースにおけるL側および

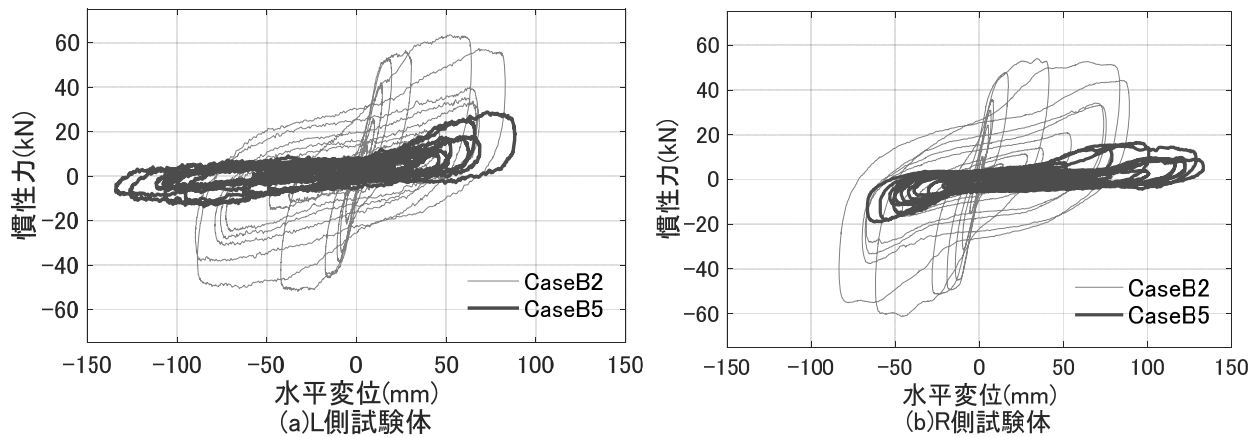


図 11 水平慣性力～水平変位履歴比較（ブロック型：CaseB2/B5）

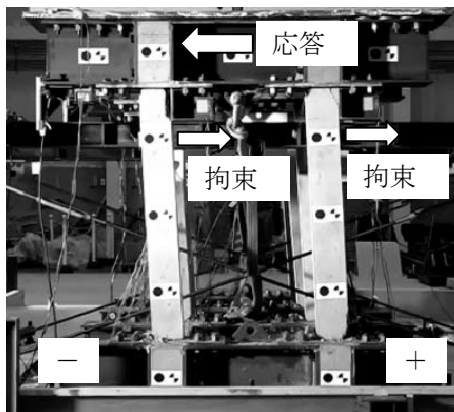


図 12 加振中の状況（R 側：CaseB4）

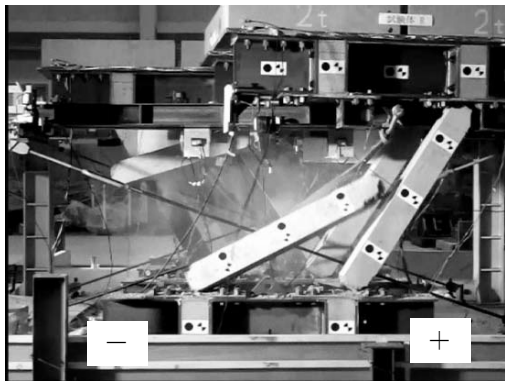


図 13 倒壊時の状況（R 側：CaseB6）

R側試験体のスラブ慣性力～スラブ水平変位履歴を重ねて示す。また、図15には、各試験におけるスラブ水平変位の時刻歴の推移を示す。図16には、スラブ鉛直変位～スラブ水平変位履歴を示す。CaseW4で加振振動数を1.0Hzとしているのはブロック型デバイスの場合と同様の理由による。

図14、図15から、ワイヤー型デバイスにおいても、最大耐力点以降の耐力低下領域において、L側試験体は負側、R側は正側にそれぞれ変位応答が進展し、倒壊方向が想定される方向に誘導されていることが分かる。

図17には、表1のCaseW1、W2の加振におけるスラブ慣性力～試験体水平変位履歴を示す。CaseW1ではいずれの試験体もほぼ弾性挙動を示しているが、CaseW2では耐力低下域まで応答が進展しており、L側試験体では柱の鉄筋が上下端で破断して変位負側に倒壊が生じた。ブロック型の同等の加振（CaseB2）で大きな損傷が生じなかったため、この挙動の差異は倒壊方向制御構造の影響と想定される。

図16の鉛直変位～水平変位履歴から、このCaseW2では、CaseB6で鉄筋破断が生じた7mm程度までスラブ鉛直変位が増大しており、ワイヤー型のCaseW2ではCaseB2よりも鉄筋に生じる負荷がより大きかったものと推定される。CaseW2のL側試験体において、加振中にワイヤー型デバイスが作用した際の挙動を図18に示すが、ワイヤー型デバイスは柱の曲げ挙動を瞬間的に拘束しており、この拘束時の慣性力および衝撃力が引き抜け作用として柱基部の鉄筋に伝達することで、ブロック型よりも早い段階で鉄筋の損傷が進行したと推定される。なお、CaseW2でR側試験体には倒壊が生じなかったが、これはワイヤーのたるみ量のばらつき等に起因していると考えられる。

CaseW2の後にL側試験体を撤去して加振を継続し、最終的には、CaseW4において、R側試験体にも倒壊が生じた。図19には、倒壊時における試験体の損傷状況を示す。倒壊は、ブロック型と同様に柱上下端の鉄筋破断により生じ、倒壊方向も事前に想定した通り、L側試験体は負側、R側は正側となった。

(3) まとめ

以上の結果から、2種類の倒壊方向制御構造は、いずれも高架橋模型の倒壊を事前に想定した方向に誘導できることを確認した。2種類のデバイスを比較すると、ブロック型デバイスは高架橋自体の振動

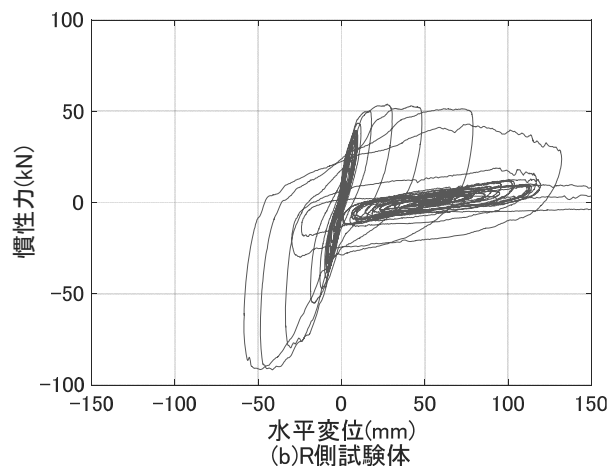
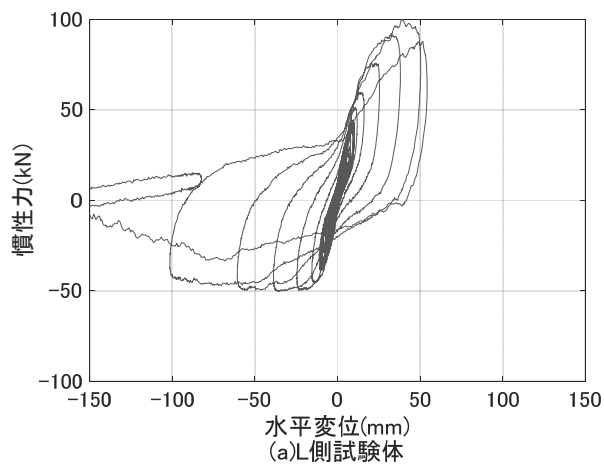


図 14 水平慣性力～水平変位履歴比較（ワイヤー型：全ケース）

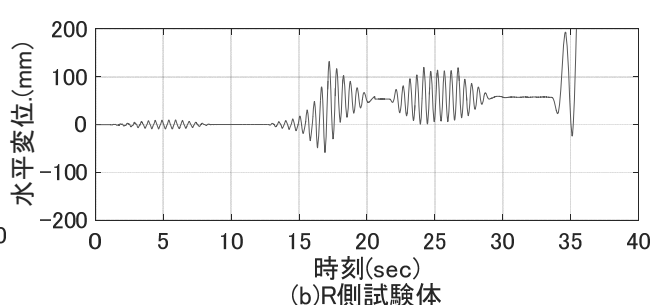
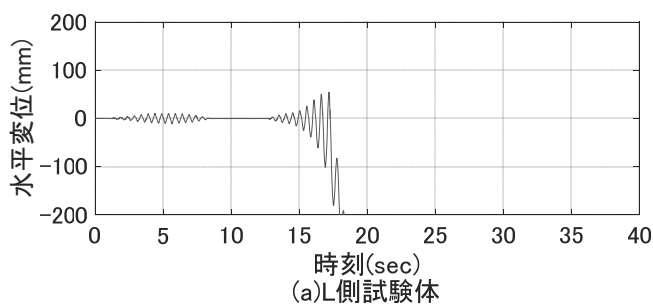


図 15 水平変位時刻歴比較（ワイヤー型：全ケース）

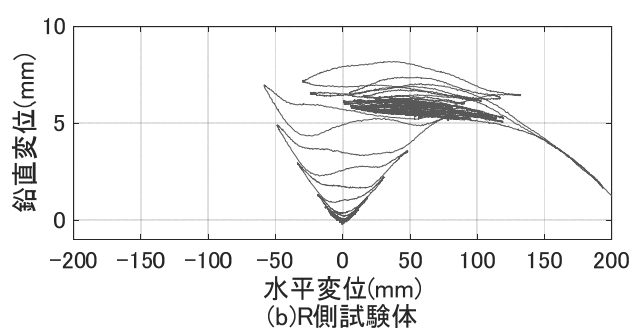
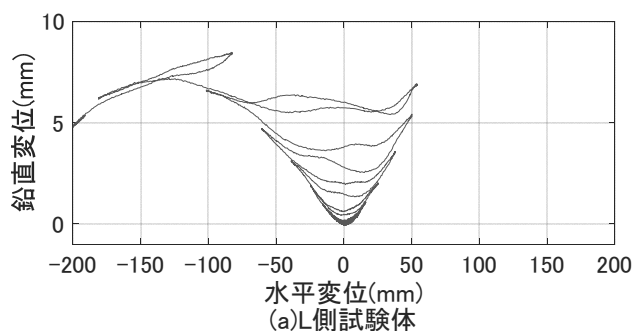


図 16 水平変位～スラブ鉛直変位履歴比較（ワイヤー型：全ケース）

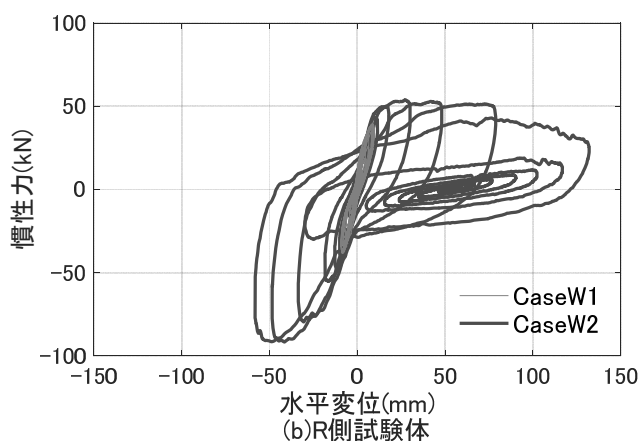
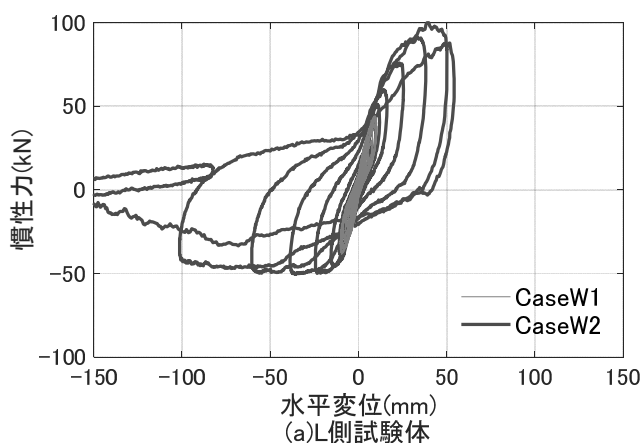


図 17 水平慣性力～水平変位履歴比較（ワイヤー型：CaseW1/W2）

特性を大きく変化させず、比較的多くの繰返しを受けるまで倒壊が生じなかったが、ワイヤー型では柱を強く拘束することで、より少ない繰返し回数で倒壊に至った。

このことから、ワイヤー型については緩衝材を設けるなど、構造的な改良も検討する必要があると考えられる。

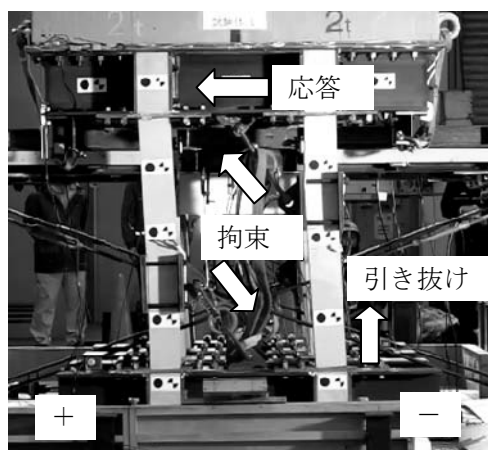


図 18 加振中の状況 (L 側 : CaseW2)

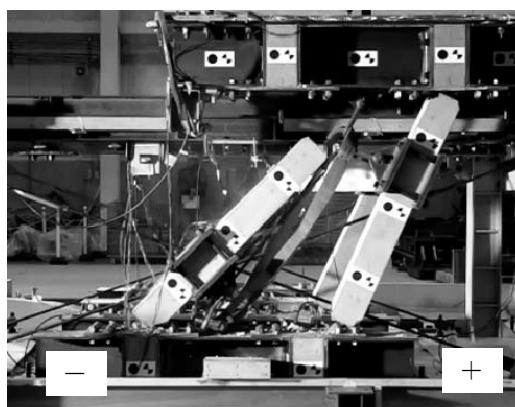


図 19 倒壊時の状況 (R 側 : CaseW4)

5. 結論

本研究では、想定を超える地震動に対して、居住地域や緊急輸送道路、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、構造物の回復力を高めて危機耐性を向上させることが可能な「倒壊方向制御構造」を具体的に実現するデバイスを製作した。また、倒壊方向制御構造を有する高架橋模型の破壊試験を行い、提案構造の成立性を検証した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 倒壊方向を制御可能デバイスとして提案されているブロック型およびワイヤー型の2種類の倒壊方向制御構造について、実路線で数量が多いラーメン高架橋に組み込むことを想定した具体的な構造を提案した。ブロック型は、高架橋スラブと柱の間に塑性ヒンジ区間(1D)程度の大きさのブロックを設置したものであり、ワイヤー型は高架橋スラブと柱中間部を可とう性ワイヤーで接続したものである。これらはいずれも想定する倒壊方向と逆方向に構造物が変位した場合には柱の変形を拘束して変位の進行を抑制する

が、倒壊を想定する方向に対しては機能しないことで、振動挙動に人為的な非対称性を導入し、想定する方向に倒壊を誘導する構造である。

- (2) ブロック型およびワイヤー型デバイスを組み込んだラーメン高架橋模型を振動台上に設置し、加振試験により破壊試験を行った。試験では、2体の試験体に倒壊方向が異なるようにデバイスを配置し、非対称性の無い正弦波の加速度を漸増させて载荷した。その結果、いずれのデバイスも高架橋模型の倒壊を事前に想定する方向に誘導しており、提案工法の成立性を確認した。

今後は、より実規模に近い柱模型を対象とした载荷試験等により、倒壊方向制御構造の実用化を図る予定である。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) Hollnagel E., Woods D.D., and Leveson N.: Resilience Engineering – Concepts and Precepts, CRC Press, 2006.
- 3) Bruenau, M., Chang, S.E., Eguchi R.T., Lee G.C., O'Rourke T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallance W.A., and von Winterfeldt, D.: A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, Earthquake Spectra, Vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 国土交通省鉄道局監修，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.
- 7) 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70回土木学会年次学術講演会概要集，2015.
- 8) 齋藤正人，室野剛隆，本山紘希：地震時における構造物の東海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.