

高架橋の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* 室野 剛隆** 齊藤 正人***

Development of the Collapse Direction Control Device
for Improving Anti-Catastrophe Performance of a Viaduct

Akihiro TOYOOKA Yoshitaka MURONO Masato SAITOH

Railway structures may be totally collapsed if the intensity of an earthquake is beyond the design motion. Nevertheless, the significant loss of life and the long-term suspension of train operation are avoidable if the direction of collapse is artificially controlled so as not for the remains of the structure to disturb the essential areas such as residential areas and yards for reconstruction. This feature is referred to as “anti-catastrophe” in the Japanese design standard. In order to attain such performance, a new “collapse direction control” device was proposed. The dynamic loading tests were then conducted using a shake table, on which a viaduct model with the device was mounted. It was confirmed that the proposed device was capable of controlling the collapse direction of the specimen.

キーワード：危機耐性，倒壊方向制御構造，振動台実験

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」においては構造計画の段階での配慮事項として危機耐性の概念が取り入れられている⁶⁾。さらに、危機耐性向上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。例えば、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⁵⁾。さらに、耐震設計で制御可能な領域を超える範囲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) 9)}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試作するとともに、その動的挙動を振動台実験により検証した。

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
** 鉄道地震工学研究センター
*** 埼玉大学 レジリエント社会研究センター

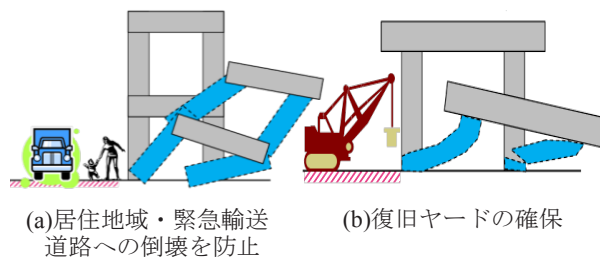


図1 倒壊方向制御構造のコンセプト

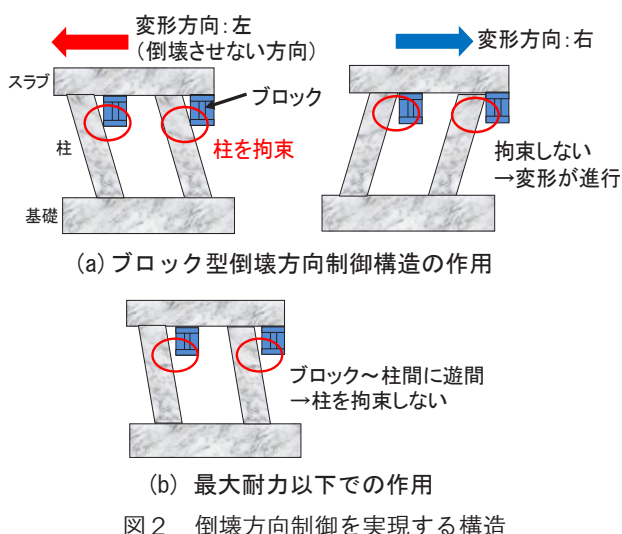
2. 倒壊方向制御構造の概要

2.1 基本コンセプト

危機耐性を考慮した設計を行うには、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⁾。たとえば、構造物が想定を超える地震により倒壊し、人命の損失や復旧困難な状態に陥る状況が「危機」と定義できる^{5) 8)}。次に、想定を超える地震作用に対し、上記のような「危機」を完全に排除することは難しいという前提に立ちつつ、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。こうした危機耐性を高める具体的な工法の例として、倒壊時に桁や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」の開発が進められている⁷⁾。

これに対し、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を避けて構造物を倒壊させることで、人命損失を回避しながら構造物の回復力を高める、という方策も考え

特集：地震対策技術

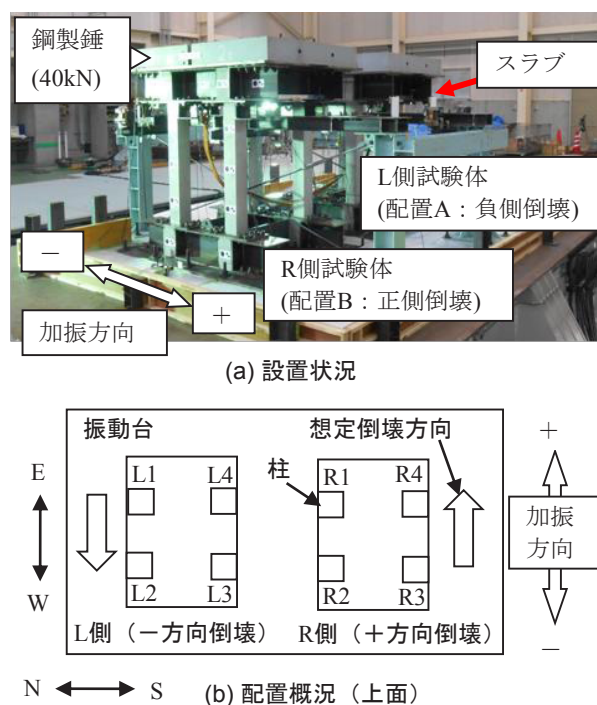


られる。この着想のもと、実構造において数量が多いラーメン高架橋を主な対象とした「倒壊方向制御構造」が提案されており⁸⁾、本研究ではこの構造を具体的に実現する工法を開発することを目的としている。

ここで、柱や梁にせん断破壊が生じないことを前提とすれば、一般にラーメン高架橋は、柱の上下端に塑性ヒンジが形成されて自重により倒壊に至るものと想定される。この倒壊に至る現象は非常に複雑であり、倒壊する方向やタイミングは入力や材料特性に大きく依存することから、倒壊する方向を事前に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、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り、工費や維持管理の観点から、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。

2.2 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構造として、図2のような、ブロック型倒壊方向制御構造が提案されている⁸⁾。これは、高架橋スラブや基礎にブロックを設置する構造であり、図2(a)において、仮に左方向に高架橋の変位が進行した場合、ブロックが柱を拘束して左方向への変位を抑制する。一方、右方向にはブロックによる拘束が生じず、ブロックを有しない通常の高架橋とほぼ同様の振動や倒壊が生じる。これにより、図2の左方向への倒壊を抑制する構造である。ブロックを図2とは逆に柱の左側に設置した場合は右方向への倒壊を抑制することができる。本構造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。



ただし、微小振動領域からブロックが柱を拘束すると、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じる懸念がある。そこで本デバイスの設計にあたっては、構造全体系が最大耐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が機能することが必要である。これは、図2(b)のように柱とブロックの間に遊間を設けることで実現することができる。

3. 振動台実験による効果検証

3.1 試験概要

2章で示した倒壊方向制御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。

載荷試験では、ラーメン高架橋模型に対して、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2体同時加振を行った。この2体の試験体は、倒壊方向が互いに異なるようにデバイスを配置している。試験は模型に倒壊が生じるまで入力加速度を漸増して実施した。これにより、2体の試験体の倒壊方向がそれぞれ事前に想定した方向に生じることを確認し、提案構造の成立性を検証する。

3.2 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、鋼製フレームでスラブとスタブを構築し、スラブをコンクリート

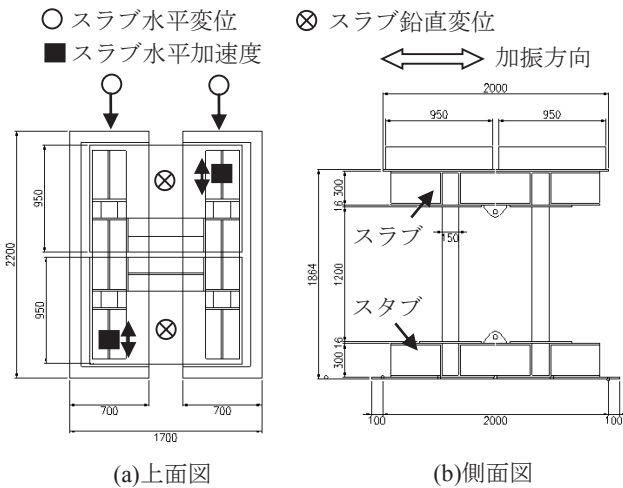


図4 高架橋模型と測定点の概要 (単位:mm)

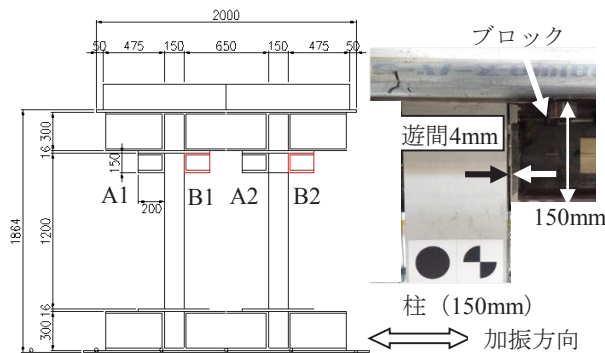


図5 ブロック型デバイスの配置 (単位:mm)

柱4本で支持する構造とした。スラブ上には鋼製錘を設置して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、上載した鋼製錘は40kNとした。スラブの重量を加算すると、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、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、柱の上下端に損傷(塑性ヒンジ)が形成されるように設計した。

3.3 倒壊方向制御構造の設計

倒壊方向制御デバイスの配置を図5に示す。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では紙面右側となる。以降では、図3、図5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、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のように設定しており、図5の配置条件から、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。

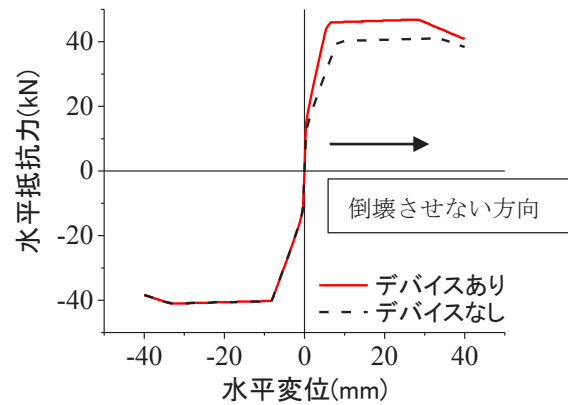


図6 静的非線形解析結果の比較(配置A)

ブロックは、図5のように柱の塑性ヒンジ区間に相当する1D(D:断面高さ=150mm)相当の高さで柱に接触する構造とし、スラブにボルト(4-M24)で固定した。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、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ため、試験体の最大耐力点に相当する水平変位時においてブロックが柱と接触するように設定したものである。

3.4 倒壊方向制御構造による耐力の非対称性

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単体モデル、および試験を行う倒壊方向制御デバイスを組み込んだ2種類の二次元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。

デバイスを組み込んだモデルは図5の配置A(変位負側へ倒壊)を想定し、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スラブを支持するモデルとした。また、デバイスが作用しない負側の挙動については、高架橋単体のモデルにより表した。これらのモデルのスラブ～錘の重心位置に静的慣性力を作用させ、モデルの非線形特性を算定した。

部材特性は、試験体の実強度相当とするため、鉄筋の降伏強度は規格値の1.2倍、コンクリートの圧縮強度は30N/mm²を設定した。なお、ここでは倒壊方向制御デバイス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6に示す。このように、変位負方向(高架橋単体)では水平慣性力が最大41.0kN程度生じるが、倒壊方向制御構造により倒壊を抑制する変位正方向では、拘束効果の影響により46.8kNまで耐力が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は、デバイス導入により0.84から0.96に上昇した。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

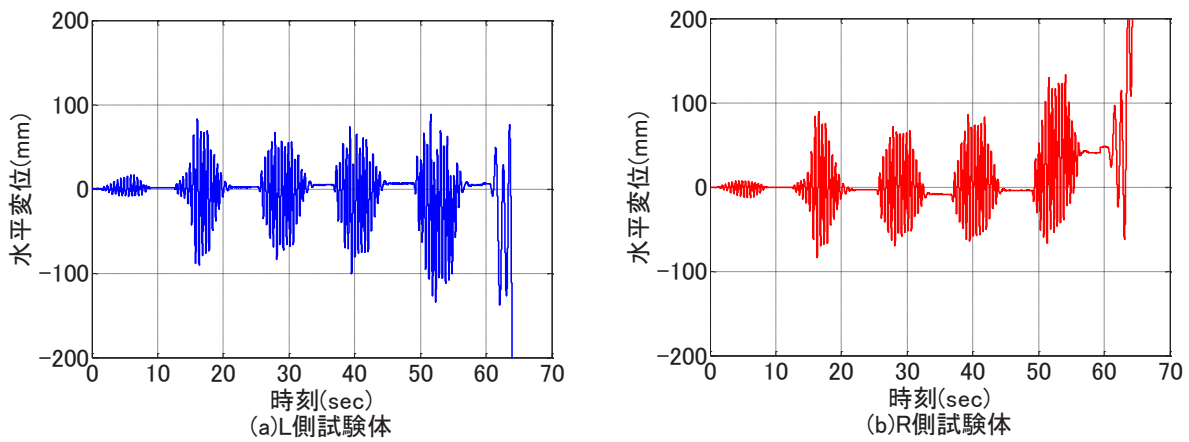


図7 スラブ水平変位の推移（全試験ケース）

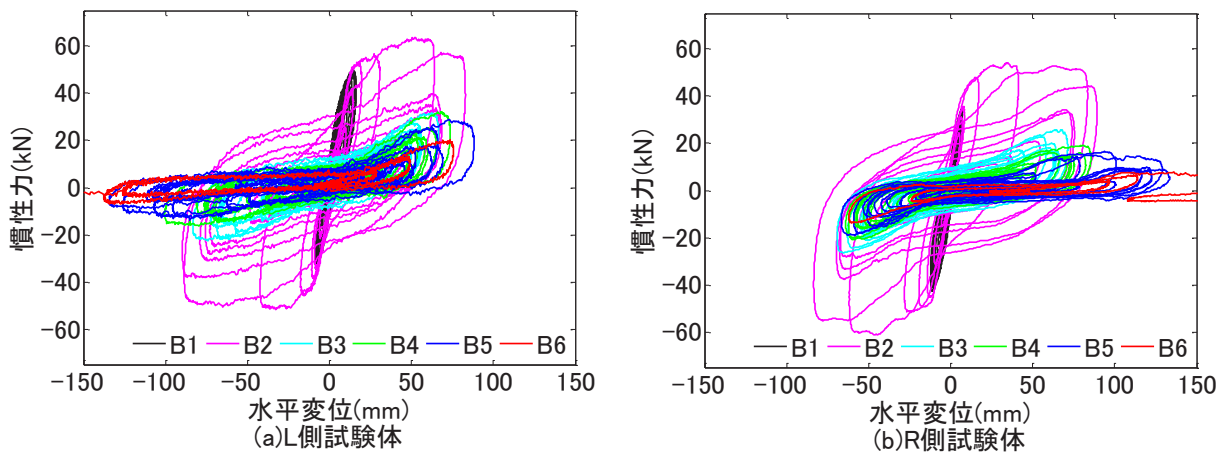


図8 水平慣性力～水平変位履歴比較（全試験ケース）

表1 加振条件およびスラブ最大水平変位

Case	加振条件	最大変位 (mm)	
		L側試験体	R側試験体
B1	2Hz-500gal	16.3	-12.3
B2	2Hz-750gal	-90.0	89.3
B3	2Hz-750gal	-83.4	71.5
B4	2Hz-1000gal	-100.6	85.6
B5	2Hz-1500gal	-134.2	133.5
B6	1Hz-750gal	負側倒壊	正側倒壊

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が誘導される。なお、本試験体は曲げ破壊モード（降伏震度 0.61）であることを別途確認している。

3.5 計測・加振条件

計測は図4に示したように、加振方向のスラブ応答加速度およびスラブ～振動台の相対変位、ならびにスラブ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を撮影した。

試験は加速度制御により2体の試験体を同時に一方向

加振し、試験体に倒壊が生じるまで最大加速度を増加させながら実施した。入力にはテーパ5波を有する正弦波5波を用いた。これは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、試験で生じる倒壊方向の違いなどの非対称性は、倒壊方向制御構造の影響と判断できると考えたためである。

正弦波加振の振動数は2.0Hzを基本とした。これは、試験体が非線形化した状態での等価剛性を用い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、最大耐力点以降も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。

4. 実験結果

4.1 倒壊に至るまでの挙動

表1に試験ケース、実際の加振条件および試験体スラブの最大水平変位を示す。加振条件は、試験体挙動を確認しながら载荷中に設定したものである。図7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。また、図8には、表1の全ての加振ケースにおけるL側

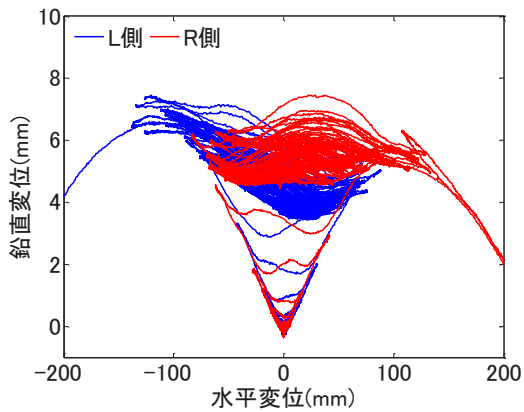


図9 スラブ水平変位～鉛直変位関係比較

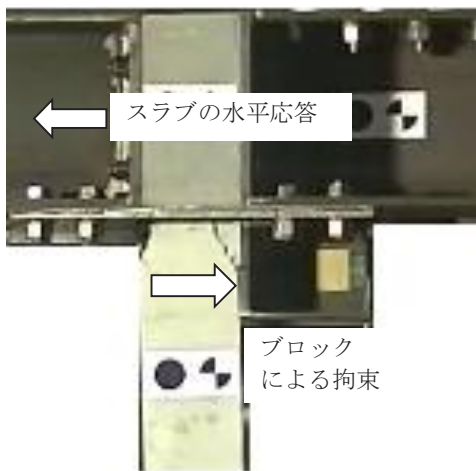


図10 加振中のブロック付近の挙動 (R側：CaseB4)

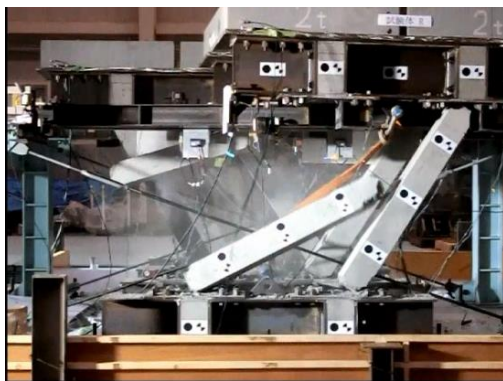


図11 倒壊時の状況 (R側：CaseB6)

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。ここでスラブ慣性力は、スラブの応答加速度にスラブと錘質量の和を乗じて推定している。さらに、図9には、柱鉄筋の抜け出しや損傷を確認するため、スラブ鉛直変位～水平変位関係を示す。鉛直変位は抜け出しが正である。

表1に示すように、試験体の倒壊はCaseB6において、L、R側でほぼ同時に生じた。この倒壊時の加振振動数

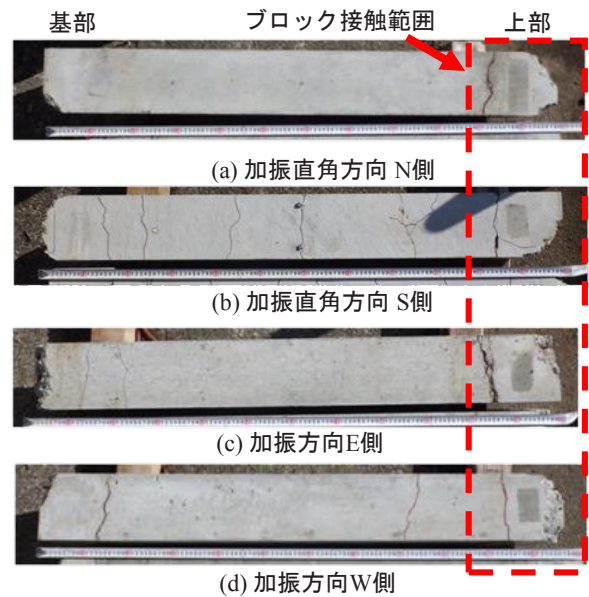


図12 柱の損傷状況の例 (R4柱)

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。

スラブの変位応答を示した図7から、入力加速度を増加させて損傷が進展するに従い、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ており、倒壊方向が所要の方向に誘導されていることが分かる。

次に、図8により試験体の非線形挙動に与える倒壊方向制御デバイスの影響をみると、CaseB1～B2ではLおよびR側試験体はいずれも最大耐力点を超過しやや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はほぼ生じておらず、変位正側・負側で概ね対称な履歴形状を示している。その後、CaseB3～B5で耐力劣化が進行すると、ブロックが片方向の変形増加を抑制することで、図7で示したようにL側およびR側ともに変位応答が一方向に進行している。

図10には、CaseB4载荷中の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端部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。この拘束の影響で、図8に見られるように、L側試験体では正側の方が負側よりも、またR側試験体では負側の方が正側よりも抵抗力が大きく生じており、耐力の非対称性が観察される。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。この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。

4.2 損傷後の試験体状況

図11にR側試験体の倒壊時における損傷状況を示す。また、図12には、柱の損傷状況の例として、図3にお

特集：地震対策技術

ける R 側試験体の R4 柱の損傷状況を示す。図 12 において赤点線枠はブロックが柱と接触する箇所を示す。

図 11 から明らかなように、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 9 の鉛直変位～水平変位履歴から、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と推定される。また、図 12 から、ブロックが柱と接触する箇所と比較的大きな柱全周ひびわれが生じていた。これは柱がブロックの隅角で線接触したためと想定される。このことから、ブロック型のデバイスを実構造に適用するにあたっては、面的な接触によりせん断力を分散させる等の配慮が必要と考えられる。

4.3 まとめ

以上の結果から、提案する倒壊方向制御構造は、高架橋模型の倒壊を所定方向に誘導し、望ましくない方向への倒壊を防止できることを確認した。柱とデバイスとの間に遊間を設けたことで、加振中においても高架橋自体の振動特性を大きく変化させず、比較的多くの繰り返しを受けるまで倒壊が生じなかった。ただし、デバイスの拘束に伴い柱に局所的なせん断力が生じ、柱に比較的大きなひびわれが生じた。このことから、荷重を面的に支持する機構への改良や接触面への緩衝材の設置などが必要であると考えられる。

5. おわりに

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倒壊試験を行い、提案構造の成立性を検証した。本研究の成果を以下に示す。

- (1) 倒壊方向を制御可能なデバイスとして提案されているブロック型倒壊方向制御構造について、実路線での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。デバイスは、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、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、望ましくない方向への倒壊を防止する構造である。
- (2) 提案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、倒壊に至るまで加振試験を行った。

この動的試験では、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、対称な正弦波入力加速度を漸増させて载荷した。その結果、デバイスを設置することで高架橋模型の倒壊は所定の方向に生じ、提案工法の成立性を確認した。一方で、ブロックが柱を局所的に拘束することで部分的に大きなひびわれが生じた。これらについては、形状の変更や緩衝材の導入等、デバイスのさらなる改良が必要と考えている。

本研究では、倒壊方向制御デバイスの成立性に着目した試験を実施したが、現在、本研究の成果を基にデバイスのディテールを改良し、実規模に近い柱模型を対象とした载荷試験等により耐力や変形性能の評価を行っている。今後はより実規模に近い動的試験や数値解析等を継続し、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。

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., Wallace 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 卷)，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 卷)，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
- 9) 豊岡亮洋，室野剛隆，齋藤正人：危機耐性を向上させる倒壊方向制御構造の振動台実験，土木学会地震工学委員会第 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