

# 高架橋の危機耐性を向上させる自重補償構造の振動台試験

豊岡 亮洋\* 室野 剛隆\*\* 布川 博一\*\*\*

Development of the Dead Weight Compensation Device  
for Improving Anti-Catastrophe Performance of a Viaduct

Akihiro TOYOOKA Yoshitaka MURONO Hirokazu NUNOKAWA

Railway structures may be severely damaged if the intensity of an earthquake is beyond the design motion. Even in this situation, the significant loss of life and the long-term suspension of train operation would be avoidable if the total collapse of the structure were somehow prevented. This feature is referred to as “anti-catastrophe” in the Japanese design standard. In order to attain such a characteristic, a new “dead weight compensation” device is proposed. The dynamic loading tests were conducted using a shake table, on which a viaduct model with the device was mounted. It is confirmed that the proposed device is capable of avoiding the total collapse of the specimen under extreme motions.

キーワード：危機耐性，自重補償構造，崩壊防止，振動台試験

## 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<sup>1)</sup>。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<sup>1)~5)</sup>、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<sup>6)</sup>。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、構造物の脆性的な崩壊を防止し、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<sup>5)</sup>。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<sup>7)</sup>、倒壊方向制御構造<sup>8)9)</sup>などが提案されている。

本研究では、このうち自重補償構造（図1）について、高架橋を主な対象とした具体的なデバイスを提案試作するとともに、その動的挙動を振動台実験により検証した結果を報告する。

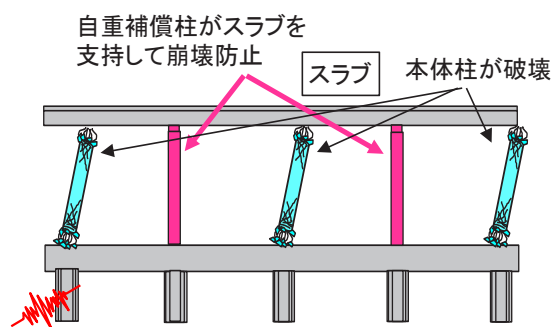


図1 自重補償構造のコンセプト

## 2. 自重補償構造の概要

### 2.1 基本コンセプト

構造物の危機耐性を向上させるためには、想定外の外力を受けた場合に生じうる破滅的な被害シナリオを想定し、これを回避する方法を考案する必要がある。この破滅的な被害には様々なものが考えられるが、優先すべきは構造物の崩壊に伴う人命損失等、安全性に関する被害の防止であることは言をまたない。そこで、こうした破滅的な被害を防止するためには、設計地震動を超える地震動が発生して想定以上の損傷が構造物に生じた場合においても、構造物の崩壊を生じさせない機構を実現すればよく、これにより危機耐性を高めることができる。

こうした着想の元に提案された構造が「自重補償構造」である<sup>1)</sup>。これは図1のように、通常の耐震設計を行う柱部材（以下、本体柱）に加えて、「自重補償柱」を設けた構造である。この図は、新設のラーメン高架橋への

\* 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  
\*\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室  
(現 東海旅客鉄道株式会社)

## 特集：地震対策技術

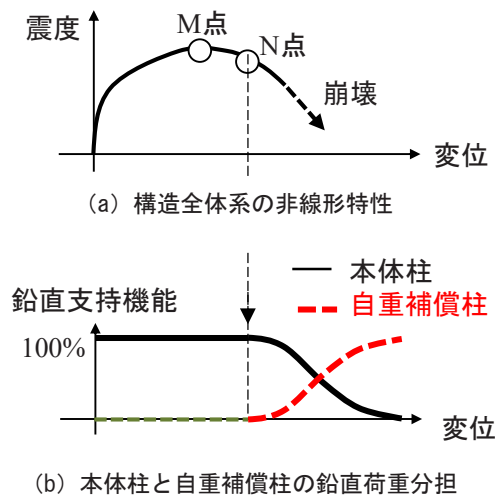


図2 構造全体系の性能と自重補償柱の鉛直支持機能

適用を想定した概念図である。

ここで、自重補償柱とは、本体柱が著しく損傷し、スラブなどの鉛直荷重を支持する性能が大幅に低下もしくは喪失した場合にのみ、本体柱に代わり、もしくは本体柱と協調して鉛直支持性能を発揮する部材である。この機能を模式的に図2に示す<sup>10)</sup>。通常の耐震設計が行われている最大耐力(M)～終局(N)点付近までに構造物の応答が収まる場合は、本体柱が水平抵抗および鉛直支持機能を発揮する。一方、想定を超える地震作用を受け、終局(N)点を超えるような崩壊領域にまで応答が達すると、高架橋スラブなどの自重を支持する機能が本体柱から自重補償柱に徐々に移行し、構造物の崩壊を防止する。

## 2.2 自重補償柱を構成するデバイス

自重補償柱は、スラブなどの大きな鉛直荷重を支持可能な性能を有すると同時に、スラブの慣性力のように水平方向に作用する荷重に対する抵抗は非常に小さなレベルに抑える必要がある。これは、自重補償柱にスラブからの大きな水平慣性力が伝達されると、自重補償柱自体に損傷が生じ、構造物の崩壊時に鉛直荷重の支持機能が発揮できない可能性があるためである。さらに、自重補償柱は、想定を超える地震作用により構造物が崩壊する極限状態でのみ確実に鉛直支持作用を発揮させる付加的な構造であり、通常の耐震設計の範囲では高架橋の水平振動に大きな影響を及ぼさないことも求められる。

こうした要求性能を実現するための工夫として、自重補償柱の頂部をすべり摩擦支承に類似した構造とし、水平方向に対する自重補償柱と構造物の相互作用を極力小さくする構造が考えられ、本研究の一環で実施した静的载荷試験でその効果が実証されている<sup>7)</sup>。しかし、大規模な動的作用下における提案構造の効果はこれまで未検証であったことから、本研究では地震動作用下での自重補償効果を検証する実験を大型振動台で実施した。

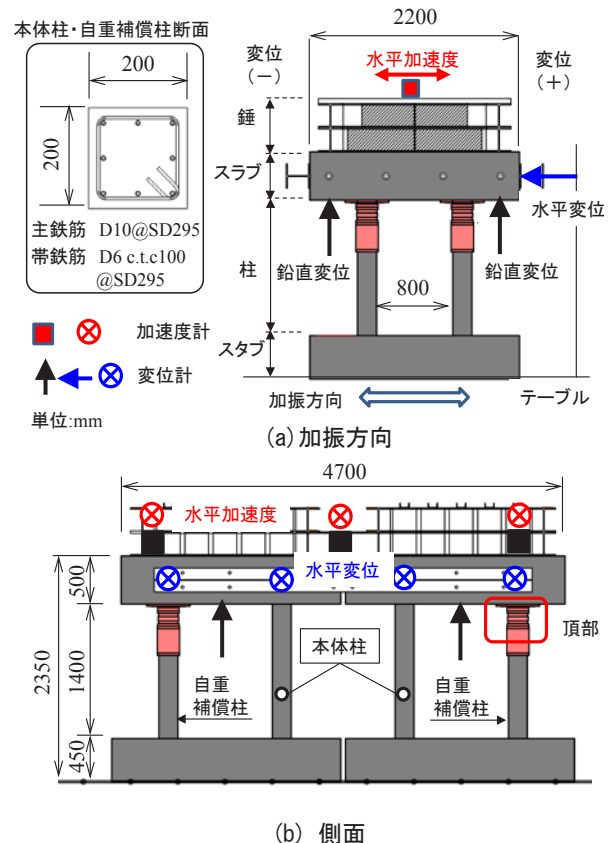


図3 自重補償柱を有するラーメン高架橋模型

## 3. 振動台実験による実証試験

### 3.1 試験概要

2章で示した自重補償構造を具体的に設計・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载荷試験を実施した。

载荷試験では、柱の一部を自重補償柱とした図3のようなラーメン高架橋模型を製作し、振動台に上載して加振加速度を漸増させ、本体柱が大きく損傷して試験体が崩壊に達するまで一方向加振を行った。この本体柱の損傷時に、自重補償柱により高架橋スラブの鉛直荷重が支持され、崩壊を防止できることを確認することで、提案構造の成立性を検証する。また、地震動のような非定常作用下においても、高架橋の本体柱から自重補償柱へ鉛直荷重がスムーズに受け換え可能であること、および余震のような繰り返し作用に対する自重補償構造の安定性についても実験的に検証を行った。

### 3.2 ラーメン高架橋模型の概要

図3に振動台実験で用いた自重補償構造の試験体の概要を示す。このように、8本柱のうち、端部4本の柱を自重補償柱とし、中間部の4本を本体柱とした。柱は、本体柱および自重補償柱ともに一辺200mmの正方形断面とし、配筋等は過去に実施した自重補償構造の高架橋

模型試験の柱諸元に準じて図3中に示すように設計した。これらの諸元は、概ね実構造の1/4程度のサイズである。試験体は、製作と運搬の関係で、4柱模型を2体作成し、振動台上で2基のスラブをPC鋼棒で一体化した。スラブ上には振動台の重量制限の範囲内で可能な限り多くの鋼製錘を設置した。本体柱4本で支持する鉛直荷重はスラブと錘の合計重量である約275 kNであり、柱応力は $1.72\text{N/mm}^2$ 程度となった。事前の静的非線形解析によれば、自重補償柱からの水平抵抗を無視し得ると仮定し、本体柱4本分が水平方向に抵抗すると仮定した場合の最大耐力点の震度は0.43程度となる。

### 3.3 自重補償柱の構成

自重補償柱の頂部は、スラブの鉛直荷重を安定して支持し、かつスラブの水平力による損傷を防止するため、図4のように、柱頂部にテフロン、スラブ面に鋼板をそれぞれ設置したすべり摩擦構造とする構造とした。このすべり面は、スラブからの鉛直荷重を安定して支持し、かつ自重補償柱に過度な曲げやせん断を生じさせないよう、水平方向には低摩擦（摩擦係数0.1程度）材料で構成した。なお、自重補償柱は鉛直荷重を主に支持できればよいと、通常柱よりも配筋の省略や小断面化を行うことができる可能性があるが、ここでは製作の都合上、本体柱と同じ配筋・断面構造とした。

自重補償柱頂部のテフロンは、あと施工で設置した。これは、模型の打設後に、テフロンと自重補償柱頂部の間に荷重計測を行う3分力計を設置するためである。そこで施工においては、図5に示すように、3分力計の基部にボールスクリージャッキを取付け、自重補償柱頂部にテフロンと3分力計を取付けた後にジャッキで高さ調整を行い、柱頂部とスラブを密着させた後にジャッキ部をモルタルで埋め殺した。このため、自重補償柱は初期状態で6kN程度の微小な鉛直荷重を支持している。実際の施工でも同様の手法で自重補償柱を構築できると考えられる。

### 3.4 計測・加振条件

加振では、図3(a)の高架橋線路直角方向に一方向の加速度を入力した。入力地震動には、L2地震動スペクトルI (G3地盤)<sup>6)</sup>を用いた。この加振条件は、継続時間の長い波を用いることで、本体柱に確実に損傷を与えて自重補償柱に鉛直支持機能を移行させるとともに、自重補償柱とスラブの間にすべり応答を多数回繰り返し生じさせることを意図して選定した。この地震動を表1に示すように100galから段階的に増加させて自重補償柱に鉛直支持機能を移行させ、その後余震を想定して2回(No.14および15)繰り返し载荷を行った。試験の相似則は、加速度および応力の相似率を1とし、模型の



図4 自重補償柱頂部のすべり摩擦構造

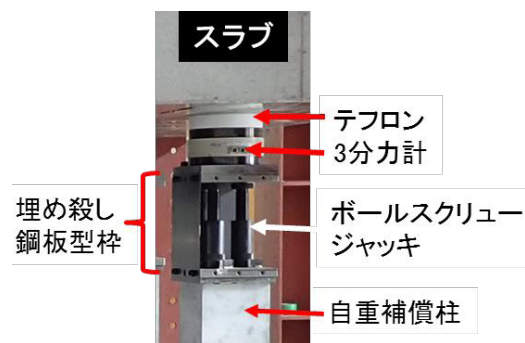


図5 自重補償柱頂部の施工状況

表1 実験条件（最大加速度）

| No | 最大加速度    | No | 最大加速度       |
|----|----------|----|-------------|
| 1  | 100 gal  | 9  | 1100 gal(1) |
| 2  | 200 gal  | 10 | 1100 gal(2) |
| 3  | 300 gal  | 11 | 1100 gal(3) |
| 4  | 400 gal  | 12 | 1100 gal(4) |
| 5  | 500 gal  | 13 | 1300 gal    |
| 6  | 600 gal  | 14 | 800 gal(1)  |
| 7  | 800 gal  | 15 | 800 gal(2)  |
| 8  | 1000 gal |    |             |

スケール（実物の1/4を想定）から時間軸を1/2に圧縮して用いた。

以上のように段階的に加振することにより、徐々に試験体の損傷が進展し、本体柱の基部が座屈等の大きな損傷を受ける。この中間部4本の本体柱が損傷した後も、端部4本の自重補償柱が鉛直荷重の支持機能を受け換え、構造全体が倒壊しないことを確認する。なお、各試験では鋼製フレームをスラブ下に設け、測定の固定点とするとともに万一の試験体崩壊に対する安全対策とした。スラブとフレームの離隔は30mm程度とした。

計測は、図3に示すように、水平および鉛直のスラブ変位、スラブおよび振動台の加速度を中心に計測した。

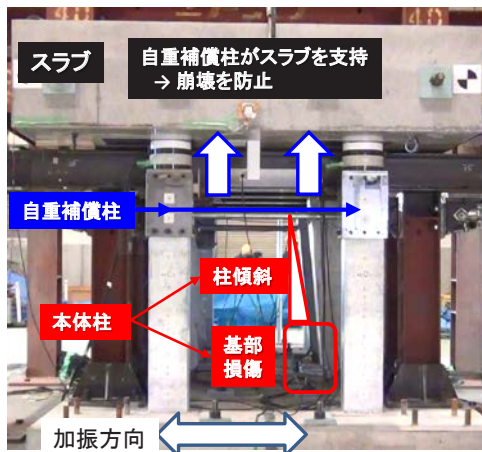


図6 試験後の状況（最終：No.15 加振後）



図7 試験後の柱基部の損傷状況（No.15 加振後）

また、図4のようにテフロン下面に3分力計を設置した。これにより、自重補償柱に作用する水平および鉛直荷重を計測する。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 試験体の挙動

表1の条件で試験を実施したところ、加速度入力が増加とともに徐々にスラブの応答変位が進行し、No.8 (1000gal) 加振の際に最大耐力を超過し、耐力低下が生じた。その後も加振の継続とともに耐力低下が進行し、本体柱基部の座屈や柱全体の傾斜などが生じた。本体柱の鉄筋の抜け出しで自重補償柱とスラブは一度非接触となるが、No.11 (1100gal-3回目) で自重補償柱とスラブが再接触してスラブの鉛直荷重が自重補償柱に作用し、その後は自重補償柱とスラブの間のすべり挙動が支配的となった。図6には、最終のNo.15 (800gal) 加振後の試験体の状況を示す。図7は、この最終加振後の本体柱基部および自重補償柱基部の状況を示す。これらの図から、本体柱には鉄筋座屈やコアコンクリート圧壊など大きな損傷が生じ、柱の傾斜も生じているが、自重補償柱

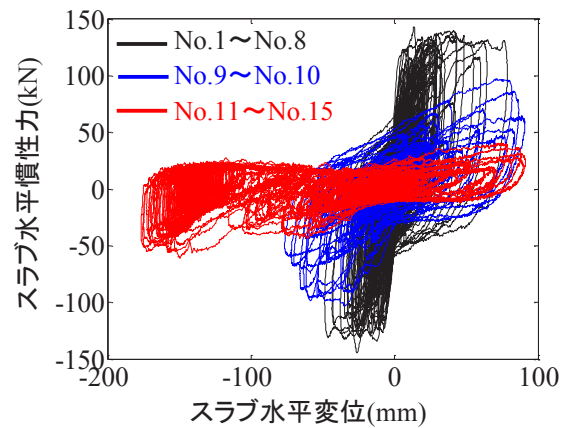
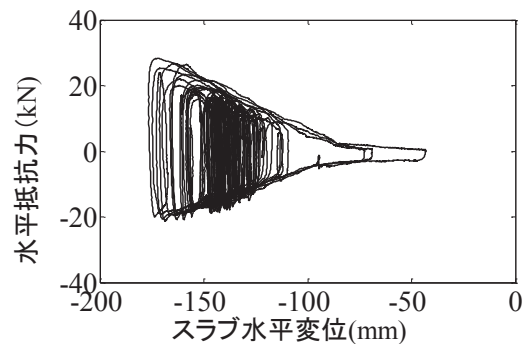
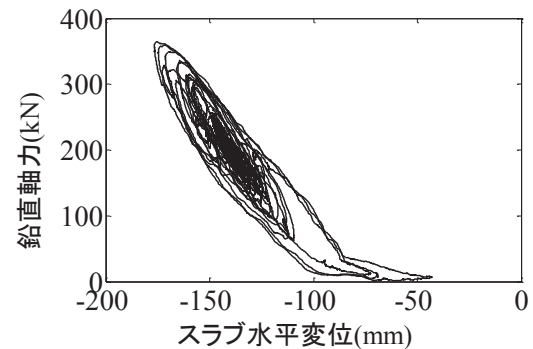


図8 スラブの水平慣性力～水平変位履歴



(a) 水平荷重～スラブ変位履歴



(b) 鉛直荷重～スラブ変位履歴

図9 自重補償柱4基分の水平・鉛直荷重履歴 (No.15 載荷試験時)

がスラブの鉛直荷重を受け換えることで、試験体の崩壊を防止していることが分かる。また、自重補償柱の頂部をすべり摩擦構造としたことで、スラブの慣性力が低減し、自重補償柱基部には目立った損傷は生じていない。

### 4.2 本体柱および自重補償柱の損傷

試験体挙動をより詳細に検証するため、全ての加振ケースについて、スラブの水平慣性力と振動台～スラブの相対水平変位の履歴を重ねて図8に示す。同図では、4.1節の試験結果から、耐力低下が生じるまでのNo.1～No.8試験、耐力低下が進行するNo.9・No.10試験、お

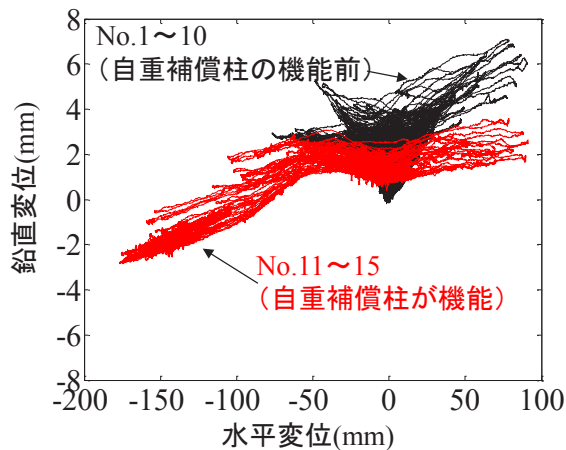


図10 スラブの水平変位～鉛直変位履歴

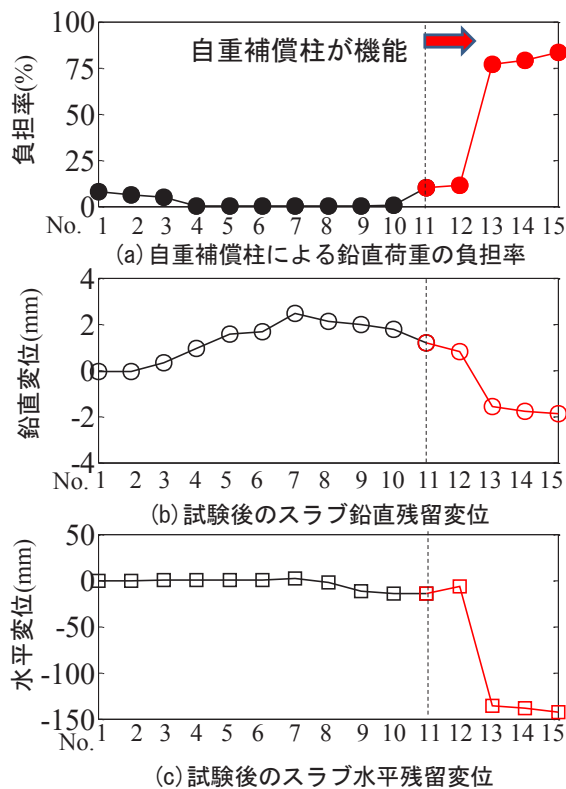


図11 自重補償柱による鉛直荷重負担と試験体の損傷状態の関係

および自重補償柱が機能する No.11 以降の試験に分類し、それぞれ表示を分けている。また、水平慣性力は、スラブの絶対加速度にスラブ質量を乗じて算定した。

このように、加振レベルが増加して本体柱が損傷することで、高架橋模型の最大耐力（約 125kN）の半分程度まで耐力低下が生じるが、自重補償柱が鉛直荷重を支持することで、抵抗力 25kN 程度のすべり摩擦型の履歴性状に移行し、本体柱が損傷後も崩壊することなく複数回の加振に耐えられることが分かる。

図9は、最終の No.15（800gal）加振において3分力計で測定した自重補償柱4本分の水平および鉛直荷重の合計を、スラブの水平変位との関係で示したものである。自重補償柱の水平方向の特性はすべり摩擦性状を示しており、柱への作用軸力の増加に伴い摩擦力も増加している。これは加振により負側に変位が増加する際、スラブが自重補償柱を押し込むように挙動していることを示している。この影響で、図8のスラブ全体の荷重～変位履歴においても、変位負側で作用荷重が増加している。ただし、自重補償柱の鉛直荷重と水平荷重の比である摩擦係数は、変位によらずほぼ0.1程度となっており、概ね銅板とテフロン摩擦係数に近い挙動を示した。

さらに、図10には、表1の全ケースでのスラブの水平～鉛直変位履歴を示す。鉛直変位は負側が沈下である。先述のように、No.1～10までの加振では、本体柱の主鉄筋の伸び出しが生じて自重補償柱とスラブは非接触となるが、その後主鉄筋が座屈してスラブは沈下に転じる。通常の構造ではこのとき鉛直変位が急激に増加して崩壊が生じる。一方、自重補償柱を導入すると、図10に示すように、試験 No.11 以降、鉛直変位は -3mm 程度で抑制されている。これは、スラブの鉛直荷重が自重補償柱により確実に支持されていることを示している。

#### 4.3 自重補償柱の鉛直支持性能

次に加振ケースごとに自重補償柱の鉛直支持性能を検討する。図11には、表1の各ケースで加振を行った後の、(a) 自重補償柱が支持する鉛直荷重の割合、(b) 鉛直方向のスラブの残留変位、(c) 水平方向のスラブの残留変位を示す。図11(a)は、ロードセルにより4基の自重補償柱の合計鉛直荷重を計測し、この荷重がスラブ鉛直重量（275kN）に占める割合を算定することで自重補償柱の負担割合を求めた。

このように、自重補償柱には加振 No.11（1100gal 3回目）付近から徐々に鉛直荷重が作用しており、No.13（1300gal）の加振で80%近くまで荷重負担が増加している。このケース以降、高架橋模型の損傷が進行し、図11(b)、図11(c)のように鉛直や水平の残留変位が生じた。本体柱の損傷が進展するに伴い、自重補償柱に鉛直荷重の支持機能が移行したことが分かる。また、自重補償柱に支持機能が移行した後は安定してスラブの鉛直荷重を支持しており、動的作用下でも自重補償構造の機能が発揮されていることが分かる。

以上の結果から、提案する自重補償構造により、地震動作用下で構造物の本体柱に大きな損傷が生じた場合も、自重補償柱が鉛直支持機能を発揮し、崩壊を防止できることが実証された。

なお、図11(a)から、本体柱が大きく損傷した最後の No.15（800gal）加振後において、自重補償柱による鉛

## 特集：地震対策技術

直荷重の支持割合は約 83% であった。このことは逆に、損傷の大きな本体柱も、柱自体の倒壊が生じない限りは一定の鉛直荷重の支持性能を有していることを示しており、鉛直荷重の 17% を 4 本の本体柱で支持していることから、本実験では本体柱 1 本あたりの支持性能は約 4.3%、断面応力に換算して  $0.29\text{N/mm}^2$  程度残存していることが分かる。地震により損傷し、水平方向の耐力が大きく低下したコンクリート柱においても、鉛直支持機能が完全には喪失しないことは既往研究でも示されており<sup>11)</sup>、本体柱が損傷した状態を想定して自重補償柱を設計する際、本体柱にも数 % 程度の鉛直支持を考慮し得ると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、人命損失などの破滅的なシナリオを回避する危機耐性の高い構造を実現する自重補償構造について、新設構造を想定した具体的な構造を提案するとともに、実用化に向けた検討として、ラーメン高架橋模型の大規模振動台試験を行い、地震動作用下における提案構造の効果を実証した。本研究の成果を以下に示す。

- (1) 想定を超える作用に対しても、構造物に崩壊を生じさせないことで危機耐性を確保することを目的とする自重補償構造を具体的に実現する構造を提案した。これは、通常のコンクリート柱（本体柱）が損傷した後にスラブの鉛直支持機能を発揮する「自重補償柱」を別に設けるものである。自重補償柱の頂部はテフロンと鋼板等を組み合わせた低摩擦すべり構造とすることで、鉛直方向に高い支持力を発揮しつつ、水平方向の慣性力で自重補償柱が損傷することを防止する構造とした。
- (2) 提案する自重補償柱 4 本と本体柱 4 本から構成される 1/4 スケールの RC 高架橋模型を構築し、振動台を用いた破壊試験を実施した。その結果、本体柱が損傷した後も自重補償柱がスラブの鉛直荷重を安定して支持し、繰り返し地震動が作用する状況においても崩壊を防止できることを実証した。
- (3) 高架橋スラブの鉛直荷重が自重補償柱に十分移行した後も、本体柱自体に破断や倒壊が生じなければ、損傷した本体柱においても 1 本あたり数 % 程度の鉛直荷重負担が期待できることが分かった。この分担率は自重補償状態を想定した構造設計に適用できると考えられる。

なお、本実証実験の結果を参考にした試設計を通じて新設および既設構造を対象とした設計法を提案しており、今後は、新設および既設構造物の危機耐性向上を実

現する構造として実展開を図りたいと考えている。なお、重要道路と交差する構造物に本工法を適用すれば、崩壊を防止して地震後の道路通行を確保し、鉄道や道路などの早期復旧にも資することができると考えられる。さらに、既設の高架橋に本工法を適用すると、自重補償構造の特徴である構造物の崩壊防止機能により安全性を担保することが可能であり、こうした耐震補強法としての側面にも着目して適用を図りたいと考えている。

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 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，布川博一，室野剛隆：高架橋の崩壊防止により危機耐性向上を図る自重補償構造の振動台試験，土木学会第 74 回年次学術講演会概要集，2019
- 10) 土井達也，豊岡亮洋，室野剛隆，西村隆義：自重補償機構を設置した鉄道ラーメン高架橋の設計例，第 15 回日本地震工学シンポジウム，GO01-02-01, 2018
- 11) 中尾尚史，宮田秀太，大住道生：超過作用により限界状態 3 に至った RC 橋脚の耐荷能力に関する評価，土木学会第 38 回地震工学研究発表会講演論文集，No.1275, 2018