

危機耐性を向上させる 自重補償機構の提案と実験的検討

西村 隆義¹・室野 剛隆²・豊岡 亮洋²・五十嵐 晃³

¹正会員 工博 (株) ジェイアール総研エンジニアリング
(〒186-0002 東京都国立市東1-4-13)

²正会員 工博 (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)

³正会員 Ph.D. 京都大学 防災研究所 流域災害研究センター
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

平成24年に改訂された鉄道構造物設計標準(耐震設計)では、設計地震動を超える地震が発生しても破滅的な状態に至らないように配慮する「危機耐性」の概念が導入された。本論文では、危機耐性を高める構造形式として「自重補償柱」を設けることで、柱や橋脚などの鉛直方向の部材に著しい損傷が生じて上部工等の鉛直支持性能を確保する「自重補償機構」を提案し、そのコンセプトを示すとともに模型実験により挙動を確認した。模型試験では、損傷した通常柱の代わりに自重補償柱が上部工の重量を支持できることを確認した。

Key Words : *Anti-catastrophe, dead weight compensation mechanism, seismic performance, vertical support performance*

1. はじめに

地震活動度の高い国土における安全な社会基盤施設整備の必要性を背景として、我が国ではこれまで構造物の地震時の安全性を高めるための様々な技術が開発されてきた。例えば、鉄筋コンクリート構造物の場合、十分に高い変形性能を確保するために帯鉄筋の要求量や配置を定める設計上の規定の整備や、高強度材料や免震・制震装置等の開発と適用により、地震時安全性の飛躍的な向上が達成された^(例えば1)と言える。しかしながら、平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震は、設計地震動を検討する際に想定されてきた規模を遥かに超えるマグニチュード9.0の地震であり、依然とした巨大地震のリスクの存在を強く認識させた。喫緊の課題となったのは、設計地震動の設定方法と、これを上回る地震への対応方法であった。

しかし、平成24年に改訂された鉄道構造物等設計標準(耐震設計)²(以降、耐震標準と呼ぶ)では、設計地震動の設定方法に関しては、現状の予測技術では結果に大きなばらつきを生じざるを得ないとし、このため、設計地震動を物理的に考え得る最大の地震ではなく、経済



図-1 危機耐性の概念(文献7)より

性も勘案して社会的にも妥当とされる範囲で設定された「最大級の地震」と定義しており、設計地震動を超える地震の存在が否定されていない。

一方、設計地震動を上回る地震への対応方法については、土木学会の原子力安全土木技術特定テーマ委員会「原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言(土木工学からの視点)」^{3)等4)}において、「危機耐性」という概念が提案され、設計基準としても耐震標準やに導入されている。危機耐性は土木学会でも議論され、文献6)~8)等において「狭義の設計段階において想定していなかった事象においても、構造物が、単体またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないような性質」と定義されまとめられている。図-1に、文献7)にお

いて室野が提案する危機耐性の概念を示す。つまり、危機耐性とは、狭義の耐震設計が実施されることを前提とし、例えば設計地震動を超える地震動等が生じて、可能な限り破滅的な状況が生じることを避けるように配慮することと解釈できる。ただし、耐震設計においては、危機耐性を向上する具体的な方策や照査方法は現状では不足していることから、危機耐性は照査項目ではなく構造計画の段階で配慮すべき事項として捉えられており、構造的な対応だけでは難しい場合は、ソフト対策とハード対策を組み合わせることで対処すべきことと示されている。

このような背景から、筆者らは危機耐性を向上させる方策を具体化した新しい構造形式として自重補償機構を提案する。本論文では、提案する自重補償機構のコンセプトを示すとともに、高架橋を模擬した試験体を用いた静的載荷実験を実施し、その地震時挙動と自重補償機構が機能することを確認する。なお、本論文では鉄道構造物を対象に議論しているが、道路等の別の用途に用いられる構造物においても同様に議論が可能である。

2. 自重補償機構のコンセプト

危機耐性の向上を検討する前提として、避けるべき「破滅的な状況」という概念が指す具体的な条件を設定する必要がある。本論文では、その最も重大な状態として、「人命が失われること」を想定した。鉄道の橋梁や高架橋を対象とした場合、人命が失われる典型的な事象として、崩壊や落橋すなわち上部工（本稿では、桁に加えて高架橋のスラブを指すものとする）を支持する橋脚く体や高架橋の柱等の鉛直方向部材に想定以上の損傷が生じて、上部工が支持できない状態を定義する。この場合、危機耐性を向上するためには、設計地震動を超える地震動が発生し、想定以上の損傷が鉛直方向部材に生じて、構造物が上部工を許容変位内の高さや位置で支持する性能（以下、鉛直支持性能と呼ぶ）を保持し、崩壊や落橋を回避することが必要となる。

提案する自重補償機構は、「自重補償柱」を設けることで、柱や橋脚などの鉛直方向の部材に著しい損傷が生じて鉛直支持性能の確保を図る構造形式である。橋梁や高架橋では、上部工を支持する橋脚や柱（ここでは「通常柱」と呼ぶ）は、規定されたレベルの水平方向の地震作用に対して要求性能を満足するように設計されている。自重補償柱とは、通常柱が鉛直支持性能を保持している時には上部工の水平慣性力を負担しないよう水平変位から分離された状態で設置され、通常柱が著しく損傷し鉛直支持性能が低下あるいは失われた状態になった場合に、代わって鉛直支持性能を発揮する鉛直方向の部材をいう。すなわち、通常柱が受け持つ上部工の自重を支持する機能を補償することで、構造物が崩壊すること

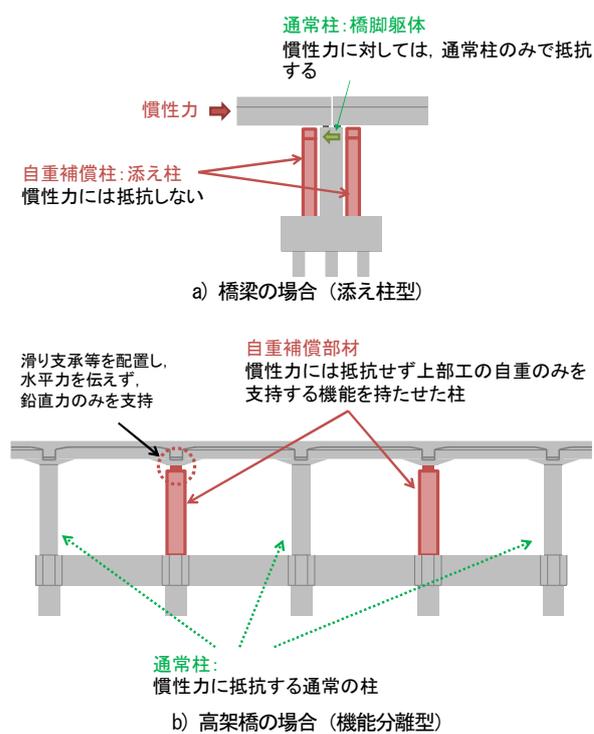


図-2 提案構造の適用例

を防止するための部材である。

自重補償機構を橋梁および高架橋に適用する場合の例を図-2に示す。ラーメン高架橋の場合は、柱のうち数本を自重補償柱とすることで危機耐性を向上させる方法（図-2 b）が考えられる。自重補償機構を有する高架橋を設計する場合は、自重補償柱がないものと仮定した通常の耐震設計、すなわち設計地震動に対して通常柱のみで安全性等の要求性能を満足するように設計する。自重補償柱（図-2中の赤い柱）は、地震時に上部構造の水平慣性力が伝達しないように設計する。具体的な例としては、柱とスラブの接合部にすべり支承を配置することで、上端の水平変位を上部構造の水平変位から分離する。その結果、自重補償柱は地震時に水平慣性力を負担しないので、想定を超える大きさの地震作用により通常柱が著しく損傷しても、自重補償柱は健全な状態で代替機能を発揮し始め、構造物全体系として鉛直支持性能を喪失しない状態を保つことが可能である。また、この方法は柱の機能を変更するのみであり、自重補償柱のために基礎を別途構築する必要はない。

ここで、自重補償機構の概念における構造物全体系の荷重-変位関係と鉛直支持性能-応答変位関係に基づく説明図を図-3に示す。応答が終局状態に至る前の①の段階では、構造物には降伏と剛性低下が生じる。その後、最大耐力点を超過して復元力の低下を伴いつつ終局点に至る。狭義の耐震設計の段階（通常の性能照査）では、構造物が終局状態に至らないように設計されるため、①の段階では鉛直支持性能の低下は生じない。

応答が終局状態を超過する②の段階（危機耐性の範囲）

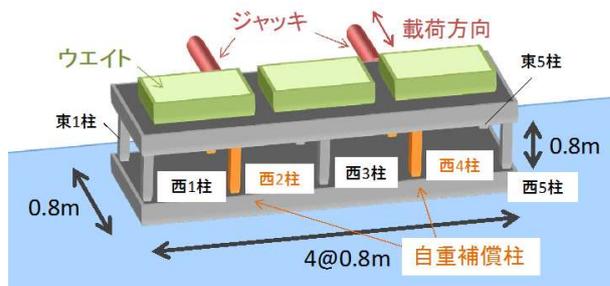
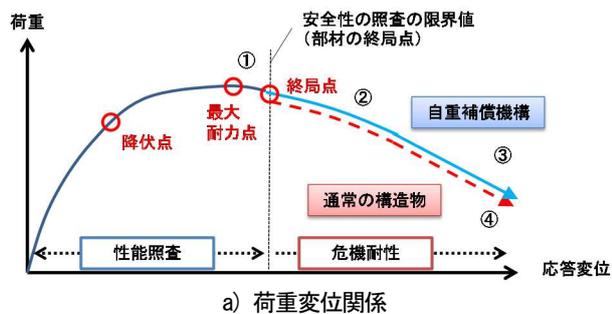
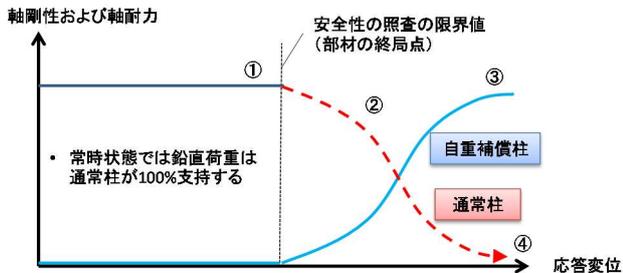
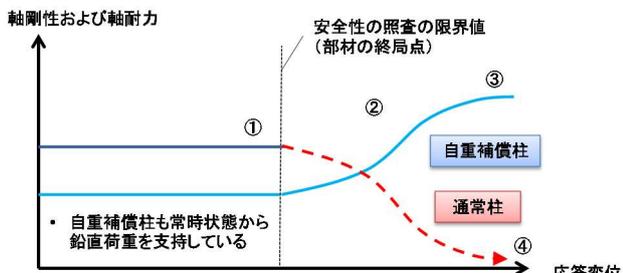


図-4 試験体概要図



b) 鉛直支持性能 (常時から鉛直荷重を支持しない場合)



c) 鉛直支持性能 (常時から鉛直荷重を支持する場合)

図-3 自重補償機構の荷重変位関係と鉛直支持性能との関係の概念図

以降では、水平変位の増加につれて復元力の低下が顕著となるとともに鉛直支持性能が低下する。通常の構造物では、地震作用が大きくなるにつれて②から④の段階に移行し、鉛直支持性能を失うため最終的には構造物の崩壊や落橋に至る。一方、自重補償機構の場合は、通常柱の損傷が進み鉛直支持性能に低下は生じるものの、自重補償柱は健全であるため鉛直支持性能の負担を増加させ③の状態に移行する。結果として、構造物全体系では鉛直支持性能を担保できるため、崩壊や落橋に至るリスクを大幅に低下できる。なお、図-3には、添え柱型のように常時状態では鉛直荷重を支持しない場合 (図中b) と、機能分離型で常時状態から鉛直荷重を支持する場合 (図中c) について鉛直支持性能の変化を示している。これらは初期条件が異なるものの、通常柱が負担していた鉛直荷重を自重補償柱に移行させるという支持機構は同様である。

3. 载荷実験によるコンセプトの検証

自重補償機構は、構造物の通常柱が終局状態を超過し



写真-1 試験体全景 (南西側から)

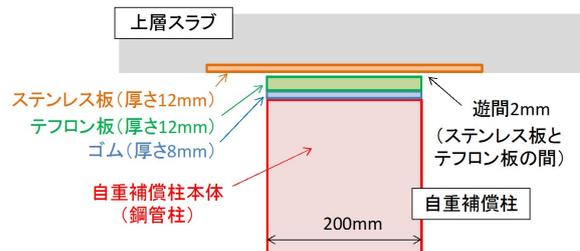


図-5 自重補償柱の結合部の概要

て鉛直支持性能が低下すると、自重補償柱が鉛直支持性能を補償するように機能するように設計されている。その際に、自重補償柱は慣性力に抵抗することなく、健全な状態で存在しておく必要がある。自重補償機構のコンセプトを実現するためには、自重補償柱が想定通り挙動する必要があるため、高架橋を模擬した試験体を用いた静的载荷実験を実施し、地震時挙動と自重補償機構が機能することを確認した。本章ではその結果について示す。

(1) 実験の概要

実験は (公財) 鉄道総合技術研究所において実施した。実験の方法は正負交番水平载荷試験とした。図-4 に試験体概要、写真-1 に試験体全景をそれぞれ示す。試験体は実際に鉄道のラーメン高架橋に用いられる諸元に来るだけ近づけるものとし、線路方向 4 径間、直角方向 1 径間の 1 層ラーメン構造に自重補償機構を適用した構造物とした。試験体の大きさは、試験場のサイズの制約

等から実物の約 1/5 モデルとした。柱は、5 列のうち 3 列を通常柱（図-4：西 13,5 および東 13,5），2 列を自重補償柱（図-4：西 2,4 および東 2,4）とした。自重補償柱の位置を 2 列目および 4 列目としたのは、自重補償柱のみで上部工重量を支持する場合でも、バランス良く支持できるように配慮したためである。また、自重補償柱がスラブ荷重を受け換えるプロセスを確認するために、常時状態では自重を作用させないものとした。

柱は、断面を 200mm×200mm、高さを 800mm とした。これらも実物の約 1/5 モデルである。通常柱は RC 製で、主鉄筋は D10（SD295）を 8 本、せん断補強筋は D6（SD345）を 100ctc で配置し、曲げ破壊形態となるように配慮した。なお、通常柱の軸応力を実際の高架橋に可能な限り近づけるため、スラブ上に重錘を載せた。スラブと重錘を合わせた全重量は約 200kN であり、通常柱の常時における軸応力は約 1N/mm² となった。

自重補償柱は鋼角柱で作製した。柱の上端部には、図-5 に示すような工夫を施した。具体的には、スラブと自重補償柱が接触した後、自重補償柱に伝わる水平方向の摩擦力を出来るだけ低減できるように、自重補償柱側にテフロン板を、上層スラブ側にステンレス板をそれぞれ配置した。また、テフロン板と鋼角柱の間にはゴムパッドを敷き、スラブと柱が接触する際の衝撃的な荷重に配慮した。なお、自重補償柱に常時から自重が作用しないようにテフロン板とステンレス板の間に約 2mm の遊間を設けた。

自重補償柱が鉛直荷重を支持することを確認するためには、軸力を計測する必要があるが、鋼角柱の表面にひずみゲージを添付し、得られたひずみより算定するものとした。

スラブは、載荷用のジャッキを取り付けることや、柱の軸応力を再現するための重錘を載荷することを勘案して、損傷させないように十分に剛となるように設計した。また、スタブは実験においては模型を固定する役割を担うため、十分に剛となるように設計した。スタブは試験場底面に PC 鋼棒で固定した。

慣性力を模擬する水平力の載荷にはジャッキを用いた。載荷方向は直角方向とし回転（ねじれ）防止のため 2 点載荷とした。載荷の目標変位は、事前に実施した解析より推定された通常柱の降伏変位（3mm）を基本変位として、目標変位が基本変位の n 倍となるよう制御した。また載荷パターンは、最大耐力付近までは 3 回繰り返し、耐力低下後は 1 回繰り返しの正負交番載荷とした。正負いずれかの載荷を 1Case とし、本稿では Case-i（i=1~45）と記載している。

(2) 実験結果と考察

図-6 に、実験を実施して得られた構造物全体系の荷

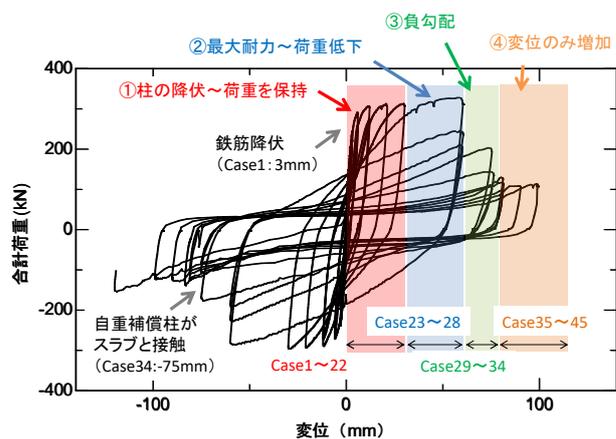


図-6 実験で得られた荷重変位関係

重～変位関係を示す。図の縦軸はジャッキ 2 本分の合計荷重、横軸は載荷位置（2 箇所）において測定した水平変位の平均である。

荷重～変位関係は、骨格曲線が負勾配に入る領域までは、一般的な RC 高架橋と同様の挙動であった。すなわち、初期の段階で柱の鉄筋が降伏することによる剛性低下（水平変位は約 3mm. 以下、括弧内に水平変位を示す。）を生じ、その後しばらく荷重を保持する（図中①で約 30mm）。変位が大きくなり柱が最大耐力を超過すると耐力低下（図中②で約 60mm）を生じ、その後、骨格曲線が明確に負勾配を示すようになった（図中③で 75mm）。

一方、図中④の領域（80mm 以降）に至ると、一般的な RC 高架橋とは異なる挙動を示し、荷重が低下しなくなり変位のみが増加するようになった。この直前の Case-34（75mm で負側に載荷したケース）では自重補償柱とスラブの接触が観察されていた。その後、最大 120mm（塑性率は 40 相当）まで変形させたが、試験体は自重補償柱に接触した状態で倒壊は生じず、鉛直支持性能を喪失しなかった。

上記の各状態における試験体の状況を確認する。写真-2 に Case-22 終了時（目標変位 30mm）における東 5 柱（通常柱）の損傷状況を示す。Case-22 は、図-6 において荷重を保持している状態である。この状態では、通常柱には顕著なひび割れが確認できるものの、かぶりの剥落等は生じていない。

写真-3 に、Case-26 終了時（目標変位 60mm の 2 サイクル終了時）における東 5 柱の損傷状況を示す。これは、図-6 において最大耐力を超過して荷重低下に至る状態であるが、通常柱はかぶりの剥落が生じるなど損傷が進んでいる。

写真-4, 5 に、Case-34 終了時（目標変位 75mm の 3 サイクル終了時）における東 5 柱の損傷状況および西 2 柱と西 4 柱（自重補償柱）の状況を示す。これは、図-6 に

において骨格曲線が明確に負勾配を示す状態であるが、通常柱はかぶりの剥落に加えてコアコンクリートにも損傷が見られる。一方、自重補償柱を確認するとスラブとの接触が確認できる。

写真-6に、Case-38終了時（目標変位 81mmの2サイクル終了時）における東5柱の損傷状況および東2柱（自重補償柱）の状況を示す。これは、図-6において荷重低下せず変位のみ増加する状態であるが、通常柱は大きく損傷しているもののCase-34から進展したかどうかは不明である。自重補償柱がスラブと接触している状況に変化は見られない。

試験体の鉛直方向の挙動と自重補償柱の軸力の変化について確認する。図-7に、スラブの鉛直変位（西4柱付近）と水平変位の関係を示す。グラフは、図-6において整理した状態（①～④）に合わせて着色している。なお、縦軸の鉛直変位の原点はスラブの初期の位置、図中の破線は自重補償デバイスの天端位置（遊間 2mm）を示している。鉛直変位は、骨格曲線が負勾配に至る前まで（図-6の①～②）、水平変位の増加に伴って上昇していることが確認できる。これは、通常柱とスラブもしくはスタブとの接合位置において鉄筋が伸び出していると推定される。一方、骨格曲線が負勾配になる（図-6の③）まで水平変位が増加すると、鉛直変位は沈下に転じている。これは、写真-6以降に見られる通常柱のかぶりコンクリートの剥落、コアコンクリートの損傷、これに伴う通常柱の鉄筋が座屈等、柱の損傷が顕著になったためと考えられる。

Case-34では、鉛直変位が自重補償デバイスの天端位置に到達した。これは写真-5の状況と整合している。その後、自重補償デバイス天端から約2mm位置において沈下は頭打ちとなっており、自重補償柱が適切に機能したことを示している。なお、自重補償デバイス天端から更に約2mm沈下したのは、デバイスに用いたゴムが圧縮変形した影響や施工誤差の影響と考えられる。

図-8に、各自重補償柱の各Caseにおける最大軸力を示したものである。自重補償柱の軸力は、初期状態ではスラブと接触していないため0kNである。一方、スラブと自重補償柱が接触したCase-34以降では軸力が生じており、荷重ケースが進むごとに増加している。これはスラブの重量を支持したためであり、自重補償柱が適切に機能していることが確認できた。

図-9に、各自重補償柱に生じる軸力の履歴を示す。荷重は正負交番で実施しているため、自重補償柱の軸力は、奇数Caseでは東側の2本、偶数Caseでは西側の2本に卓越している。ここでCase-38を例とすると、軸力は2本とも約140kN生じており、合計すると280kNとなる。しかし、柱に作用するスラブと重錘を合わせた全重量は



写真-2 東5柱の損傷状況 (Case-22終了時: 目標変位 30mm)



写真-3 東5柱の損傷状況
(Case-26終了時: 目標変位 60mmの2サイクル終了時)



写真-4 東5柱の損傷状況
(Case-34終了時: 目標変位 75mmの3サイクル終了時)



写真-5 西2柱, 西4柱 (自重補償柱) の状況
(Case-34終了時: 目標変位 75mmの3サイクル終了時)



写真-6 東5柱 (通常柱) 東2柱 (自重補償柱) の状況
(Case-38終了時: 目標変位 81mmの2サイクル終了時)

約 200kN であり、自重補償柱に生じている軸力はこれを超過している。これについては、図-10 に示すようにジャッキによる載荷荷重が自重補償柱の軸力に変換されている場合 (図-10 a) と通常柱が損傷していながらも軸剛性を完全に失っていない場合 (図-10 b) が考えられる。図-9 に示す Case-38 の軸力履歴で約 140kN を生じるのは図中Aの範囲であり、これはジャッキで載荷している範囲であった。要因の特定は困難であったが、図-6 では変位が大きい範囲で荷重が増加に転じていることを考えても、図-10 に示すような影響があった可能性がある。なお、この場合は図-6 に示す合計荷重は Case34 以降で過大評価しており、水平抵抗力はほとんど喪失していることも考えられる。

これらの結果より、自重補償機構を適用した構造物では、通常柱の損傷が顕著になると上部工 (本実験ではスラブ) が沈下するが、自重補償柱が機能してスラブの鉛直荷重を受け替えることが可能であり、これにより通常柱が著しく損傷しても直ちに鉛直支持性能を喪失することを防止できることが確認できた。また、通常柱における鉛直支持性能は、柱のかぶりコンクリートが剥落するような状態になると低下しはじめ、コアコンクリートが損傷すると低下量が顕著になる傾向となった。

ここで、鉛直支持性能の低下が生じる前に鉄筋に伸び出しが生じる場合がある。自重補償柱が常時軸力を受けている場合には、これにより自重補償柱からスラブが離れ、見かけ上、上層梁のスペンが長くなる可能性がある。上層梁の設計にあたっては、鉄筋の伸び出しを考慮することが望ましい。

4. おわりに

本論文では、危機耐性を高める具体的な構造形式として自重補償機構を提案し、そのコンセプトを示すとともに、高架橋を模擬した試験体による正負交番載荷実験を実施して、その挙動を確認した。これらの結果より得られた知見は、以下のとおりである。

1. 提案する自重補償機構は、自重補償柱を設けることで、万一想定以上の地震が作用して通常柱が破壊しても、構造物全体系として鉛直支持性能を補償出来るため、落橋のような破滅的な状況に陥るリスクを減らすことが可能である。
2. ただし、自重補償機構を適用しても狭義の耐震設計の補集合の全てに対して対応できるわけではない。破滅的な状況の設定や付与する性能を明確にした上で、適用方法を検討すべきである。
3. 高架橋を模擬した実験では、通常柱が損傷してスラブの沈下が生じた際に、自重補償柱が鉛直

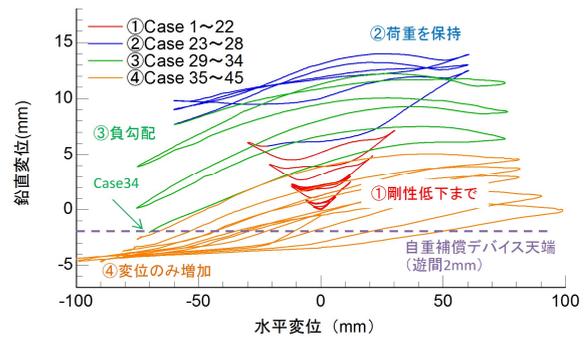


図-7 鉛直変位-水平変位関係 (西4柱)

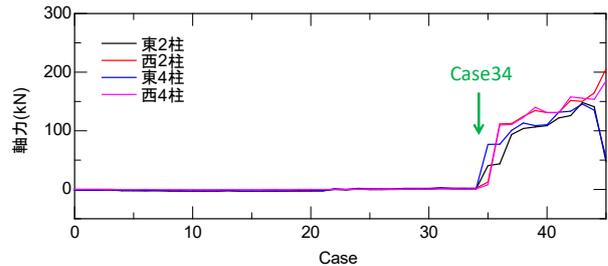


図-8 自重補償柱の軸力と載荷ケースの関係

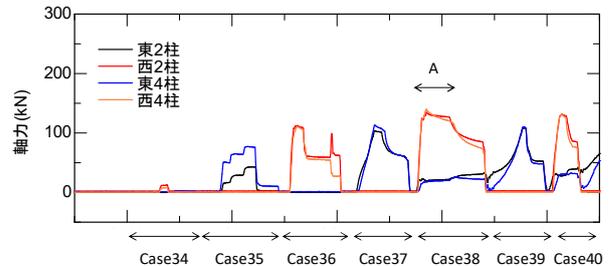


図-9 自重補償柱に生じた軸力の履歴

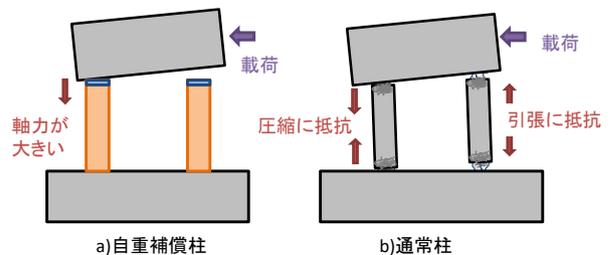


図-10 自重補償柱の軸力が増加する要因

荷重を支持できることを確認した。なお、沈下の様子から、鉛直支持性能の低下が徐々に進行することが示唆される。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.8.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善，2012.9.
- 3) 災害対応マネジメント特定テーマ委員会 (土木学会 東日本大震災フォローアップ委員会) 原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言 (土木工学からの視点) (案)，土木学会，2013.2.
- 4) 土木学会・地震工学委員会・耐震基準小委員会・地

- 震安全評価WG, 社会基盤施設の地震安全の論理構築に向けて, 第32回地震工学研究発表会論文集, 2012.10.
- 5) 室野剛隆: 耐震標準の概要と改訂のポイント, 基礎工特集鉄道設計標準(耐震・基礎・土留め)の改訂, pp.11-16, Vol.41, No.5, 2013.5.
 - 6) 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(1)試案構築にむけての考察, 第35回地震工学研究発表会, 2015.10.
 - 7) 野津厚, 室野剛隆, 本山紘希, 本田利器: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(2)鉄道・港湾構造物の設計指針と「危機耐性」, 第35回地震工学研究発表会, 2015.10.
 - 8) 高橋良和, 秋山充良, 片岡正次郎, 本田利器: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(3)道路橋示方書から読み取る「危機耐性」と国内外の動向を踏まえた課題の整理, 第35回地震工学研究発表会, 2015.10.

DEAD WEIGHT COMPENSATION MECHANISM FOR IMPROVING ANTI-CATASTROPHIC PERFORMANCE OF VIADUCTS: FEASIBILITY INVESTIGATION

Takayoshi NISHIMURA, Yoshitaka MURONO, Akihiro TOYOOKA, and Akira IGARASHI

In the design standards for railway structures (revised in 2012), the concept of "Anti-catastrophe" has been introduced in order to prevent the occurrence of catastrophic states against earthquakes of an unanticipated scale. In this paper, the dead weight compensation mechanism to be applied to enhance the anti-catastrophe performance of viaducts is proposed. The anti-catastrophe performance is achieved by maintaining the vertical support performance even during an extreme earthquake event. The seismic performance and feasibility of the proposed mechanism for railway bridge structures are investigated by loading test. As a result, the structure with the proposed mechanism is confirmed to satisfy the requirement of seismic performance and no loss of vertical support performance of the structural system.