

橋梁の新耐震技術の性能検証のための標準実験手法の提案

運上茂樹*

1. はじめに

構造物の設計においては、国際化、要求性能の多様化、コスト縮減成果の早期導入等を背景として、個々の材料や構造を具体的に特定するのではなく、必要な機能や性能を明示し、それを満足すれば必ずしも従来の材料や構造によらなくてもよいとする性能を基本とする方向が指向されている。

橋梁構造物の耐震性能を例にとると、必要な性能を有しているか否かを照査する手法として、実験等により検証された範囲で静的照査法や動的照査法などの解析的な手法が一般に用いられるが、この他に直接的に実験に基づいて照査する手法もある。新しい構造や工法を用いた橋で地震時挙動や部材の耐力・変形性能等が明かでない場合や、解析的に検討することが困難な場合には、実験によりこれらの特性を明らかにし、その結果を性能照査に反映させていくことが一般に行われる。ここで重要になるのが実験法、試験法である。

本文では、新技術開発の性能検証を行うために提案する1つの標準実験法の要点を示すとともに、鉄筋コンクリート（以下、RC）橋脚を対象とした新技術開発について実験的に検討を行った事例を示す。

2. 橋の耐震性能評価に用いる実験手法に関するガイドライン（案）

桁、橋脚、支承、基礎等の橋を構成する部材等に関する新技術について耐震性能を評価するためには使用条件下における破壊等の限界性能を知ることが必要とされる。耐震限界性能としては、耐力や、降伏しても安定して耐力を保持しながら変形できる性能（変形性能）が基本となる。これらの実験的な検証方法としては、繰返し載荷実験や振動台実験等が用いられる。実験方法については、使用できる実験施設や載荷装置の規模などの制約

もあり、全てにわたって統一的なルールで実験を実施することが困難な場合もある。しかしながら、同じ構造物を対象とした実験であっても、実験模型の設計・製作、載荷方法や計測方法が異なることによって、本来同様の結果となるべき実験結果に違いが生じるのは好ましくない。

このような背景で、著者らは実験結果に差異が生じると考えられる事項や統一事項として考慮すべき点について検討し、これを「橋の耐震性能評価に用いる実験手法に関するガイドライン（案）」として提案している¹⁾。本ガイドライン（案）における性能検証の重要ポイントとしては、縮小模型の製作方法、載荷方法、そして検証の適用範囲の3点が挙げられる。

(1) 縮小模型の製作方法

実験検証は、実物大で実験できれば確実性が最も高いが、一般に土木構造物は規模が大きく、試験装置の制約などから実物大での実験は困難な場合がほとんどである。このため、縮小模型を用いた実験検証によらざるを得ないのが実状である。例えば、RC構造の性能検証のための実験では、その縮小模型の設計段階において相似則に十分配慮しておく必要がある²⁾。縮小模型は、できる限り相似則に基づく縮小値を再現する必要があるが、例えば、任意の径の鉄筋の入手は困難で限られた規格から選択する必要があることや、縮小模型の施工上の制約等から、相似則に基づいて全ての構造諸元を適切にスケールダウンさせて製作することが困難な場合もある。断面内の鉄筋比を完全に同一にしても、鉄筋の径によって変形性能が影響を受けることも明らかになっている。したがって、縮小模型の設計においては、鉄筋径もできる限り縮小率に応じたものを選定することが重要であり、このため、可能な範囲でできる限り大きな供試体で実験を行うのが望ましい。

一例として、RC橋脚の曲げ変形性能に関する模型試験体の設計方法について検討した事例を示す。写真-1は、断面2.4m、高さ約10mの曲げ破壊型の実大模型とこれを1/4に縮小した模型を示

したものである。同一の荷重条件を仮定してその耐力と変形性能の比較を行った結果が図-1である。ここでは、寸法についての補正を行った荷重や変位として比較している。前述のように、部材の挙動特性と耐震限界性能としては、耐力や変形性能が重要であることから、耐力と変形性能の関係によって比較したものである。多少のばらつきはあるが、実大模型と縮小模型ではその耐力や変形性能の挙動がほぼ整合していることがわかる。詳細はここには示していないが、損傷範囲、鉄筋のひずみなどについても実大模型と縮小模型がほ

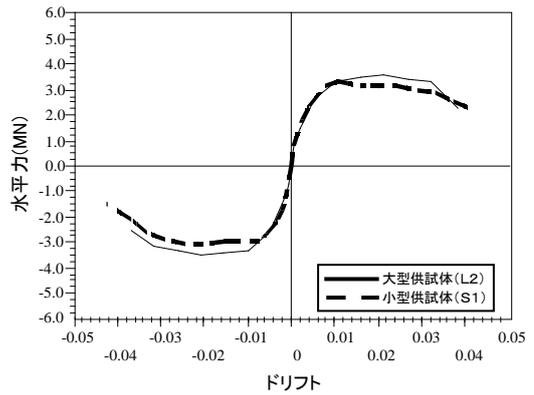
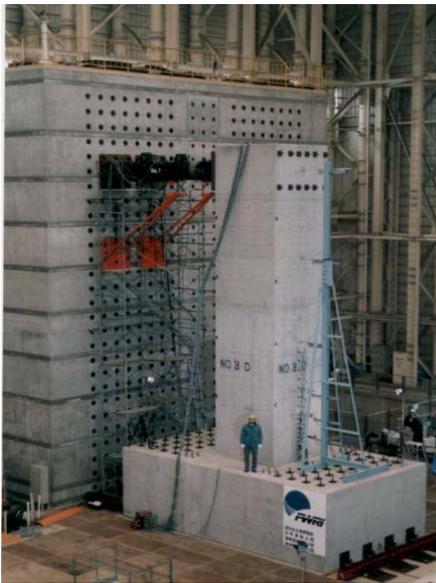
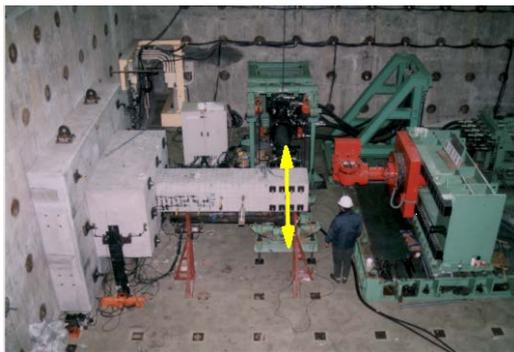


図-1 実大模型と縮小模型の耐力と変形性能の比較



(a)実大模型 (大型試験体L2)



(b)縮小模型 (小型試験体S1)

写真-1 比較に用いた実大模型と縮小模型

ぼ同様の結果となることを確認している。

このように、実験による性能検証では、試験装置に制約の範囲でできるだけ大きい模型を用い、その設計製作においては、相似率に十分配慮することによって、ほぼ実大の構造物の挙動推定が可能であるということが出来る。

(2) 荷重実験における荷重パターン

例えば、RC橋脚の耐力や変形性能を実験的に検証する場合、一般に前述のような繰返し荷重実験が行われる。振動台実験は、ある特定の地震動が作用した時の挙動を実験的に検証する手法であるのに対して、繰返し荷重実験は橋脚がどの程度の耐力や変形性能を有しているのかを検証する手法として用いられる。繰返し荷重試験では、一般には、降伏変位を基準変位としてその整数倍の変位を順次与える荷重方法が採用される場合が多い。各荷重ステップにおける繰返し回数は、必ずしも統一的ではなく、このような荷重パターンの選択によって変形性能に影響を及ぼす場合もある。このように、荷重方法によって耐力や変形性能に影響を受けるため、試験体に対してどのように荷重や強制変位を荷重するかが重要となる。

荷重方法の考え方としては、外的作用として地震を想定する場合は地震動の特性に基づいて荷重することが基本と考えられる。図-2は、橋脚を対象とした場合の橋脚天端での地震時の応答変位の例を示したものである。一例として、1983年日本海中部地震での津軽大橋周辺地盤(Ⅲ種地盤、最大加速度278gal)と1995年兵庫県南部地震での東神戸大橋周辺地盤(Ⅲ種地盤、最大加速度327gal)の観測記録を用いて、得られた時刻歴応答変位を示している。

これによれば、1983年日本海中部地震の地震動では、地震発生から橋脚の最大応答変位が生じる時刻までの間、応答変位の振幅が徐々に大きくなっており、また、応答の繰返し回数も多いことがわかる。一方、1995年兵庫県南部地震の地震動を用いた場合の応答波形を見ると、まず $2\delta y$ 程度の応答変位が1回正負に作用した次に、 $6\delta y$

に相当する最大の応答変位が正側に生じており、その後数回の振幅を経て、最終的には $2\delta y$ 程度に相当する残留変位が生じている。このように橋脚の応答変位は地震動の特性に大きく影響を受ける。

载荷方法としては、このような地震動の特性を反映させることが必要となることから、実地震記録を用いた統計解析からこのような载荷方法を決めるのが合理的と考えられる。図-3は、プレート境界付近の海洋型地震により生じた地震動（タイプⅠの地震動）と内陸直下型地震により生じた地震動（タイプⅡの地震動）の実観測記録を用いて、構造物に最大応答変位が生じる前までの時間において応答が何回生じているかを解析したものである。

これより、タイプⅠの地震動では、標準偏差の

1倍のばらつきを考慮すると、 $1\sim 2\delta y$ の応答が23回前後作用するが、 $3\sim 4\delta y$ の応答は6回前後、 $5\sim 6\delta y$ の応答は3回前後となっている。応答変位の増大に伴って、その繰り返し回数が徐々に少なくなっている点も特徴的である。一方、タイプⅡの地震動に対する繰り返し回数は、明らかにタイプⅠの地震動の場合よりも少ない。すなわち、 $1\sim 2\delta y$ の応答は6回前後作用しているが、 $3\delta y$ 以降の応答変位は、1回程度ずつしか作用していない。これは、タイプⅡの地震動に対しては、繰返し载荷実験において、 $3\delta y$ 以上の载荷ステップの繰り返し回数は1回でも十分であることを示している。

上述したようなRC橋脚に生じる変位応答の繰返し回数特性に基づき、RC橋脚に対する繰返し载荷実験に用いる载荷パターンを提案している。

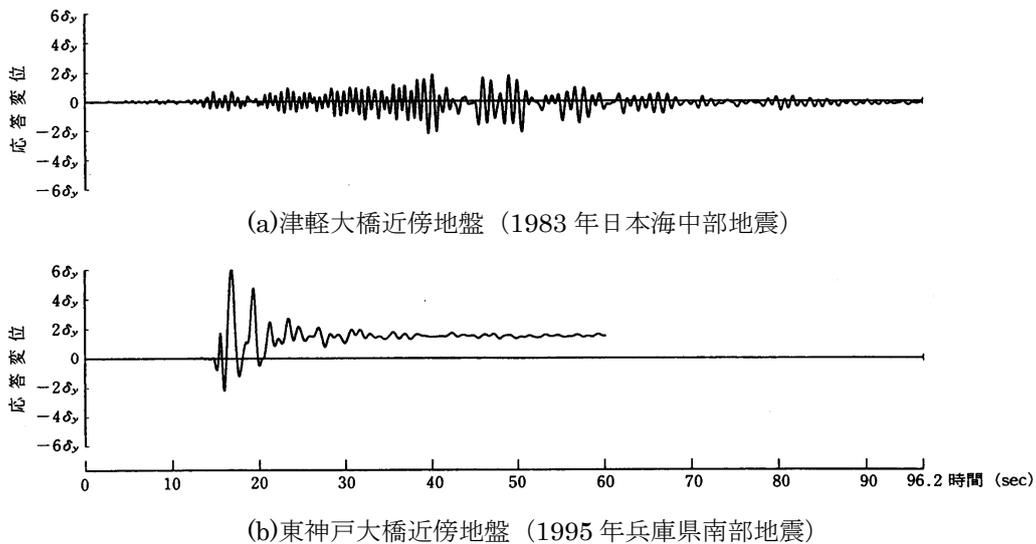


図-2 地震時の橋脚の応答変位波形の例

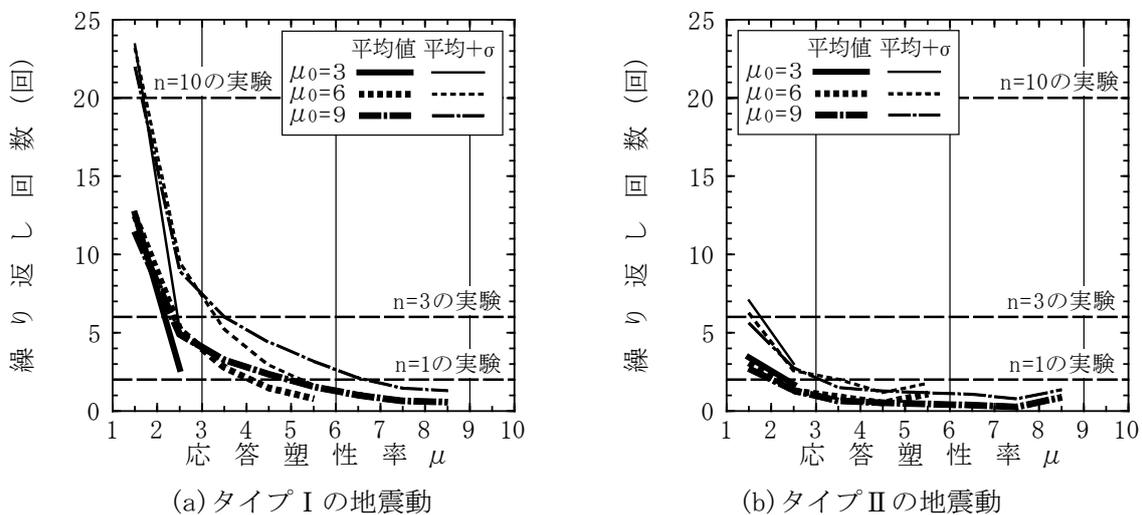


図-3 実地震記録の統計解析による繰返し回数

本結果によれば、タイプⅠの地震動、タイプⅡの地震動いずれに対しても、降伏変位の整数倍で3回の繰返しを考慮した載荷実験を行っておけば、実際の地震観測記録の統計解析からみた場合、統計的なばらつきを考慮しても同等の影響を及ぼす載荷方法と考えることができる。

(3) 実験検証の適用範囲

上記のような実験検証において特に注意しなければならないのが適用範囲である。実験は有限の個数の範囲で、ある特定の条件の範囲で実施できる場合がほとんどである。このため、性能検証で実施した実験結果がどこまで適用できるかを明確にしておく必要がある。通常は、実験により検証された範囲として、実験の条件を明確に示しておくことが必要とされる。

3. 実験による新しい技術開発の性能検証例

技術開発並びに実験による性能検証としては様々なものがあるが、ここでは、RC構造を対象に新しい耐震技術開発の性能検証のために実施した実験例を2つ示す。

(1) 楕円型の帯鉄筋を有するRC橋脚（楕円インターロッキング（IL）構造）

IL構造とは、図-4に示すように矩形断面の橋脚に対して矩形状に鉄筋を配置するのではなく、じん性の向上に有利な円形の鉄筋を組み合わせる配置する構造である。もともと海外での採用が多かったが、我が国でも近年実橋に適用されるようになってきている。この構造では円形の帯鉄筋を用いるため、拘束効果が高くなるとともに中間帯鉄筋が不要になり、鉄筋量を効果的に低減できる可能性のある構造である。

このような変形性能により優れるIL構造の適用範囲を拡大するために、我が国で多用されてい

る長方形断面にも適用できるように考案したのが、任意の幅を有する長方形断面に適用可能な楕円形の帯鉄筋を有する「オーバルIL構造」である。

これは、図-4に示すように3連の円形帯鉄筋によるIL式配筋と比較しても、帯鉄筋量を減らすことができ、かつ、施工性も向上することが期待されるが、その一方で帯鉄筋の形状を楕円とすることで円形帯鉄筋よりも拘束効果が低下し、変形性能が低下することが懸念される。このような構造の性能検証を行うために、繰返し載荷実験を実施したものである。

実験模型は、実物の1/5程度の縮小模型で、図-5に示すような帯鉄筋の曲げ形状をパラメータとして3体の実験を行った。IL供試体は、円形の帯鉄筋、OV-1及びOV-2供試体は、その幅を変化させた楕円状に曲げた2連の帯鉄筋を重ね合わせたオーバルIL式配筋である。

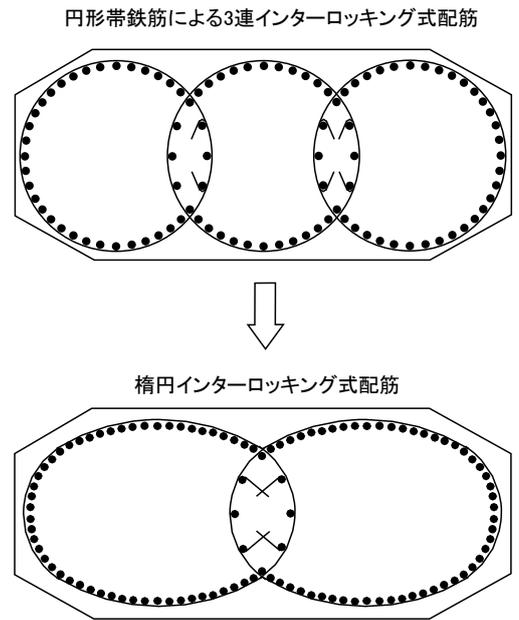


図-4 インターロッキング（IL）構造

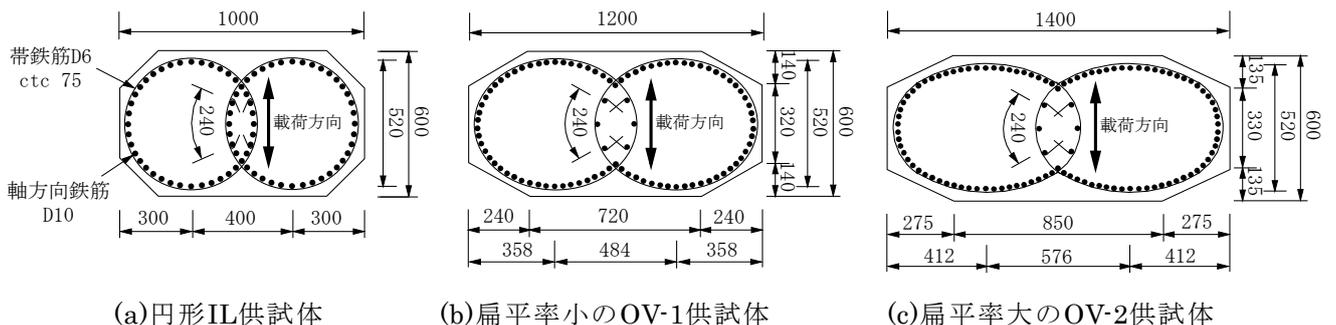


図-5 オーバルIL配筋の性能検証のための実験模型

実験による性能検証の目的は、楕円型のIL配筋が円形帯鉄筋よりも拘束効果が低下し、変形性能が低下するのではないかと、低下するとすればどの程度の楕円形状から生じるのか、であった。

図-6は実験から求められた3試験体の耐力-変位関係を比較した結果である。これより、3体の耐力-変形性能にはほとんど相違がなく、実験を行った配筋、楕円の扁平率の範囲内であれば、オーバルIL式配筋をした橋脚は従来からある円形の帯鉄筋によるIL式橋脚と同等の変形性能を有していることが確認されたものである。したがって、拘束効果に関しても楕円形状であっても、この扁平率の範囲内であれば円形断面と同様の拘束効果を見込めるという結果である。

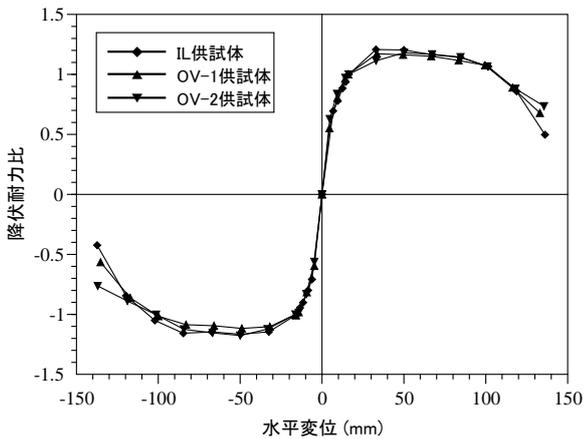
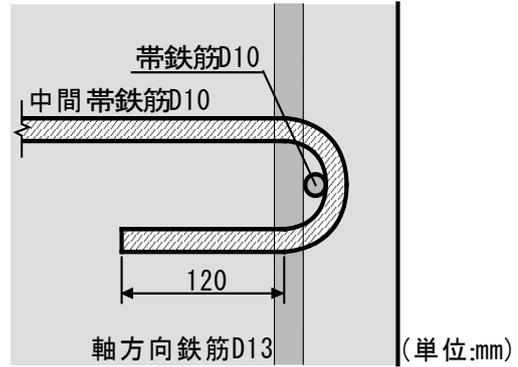


図-6 耐力比-水平変位関係の比較

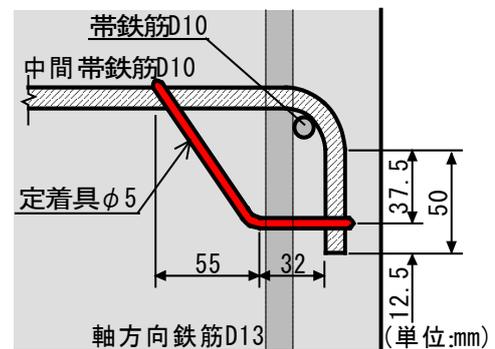
(2) 帯鉄筋の簡易定着構造

次は、RC橋脚の変形性能の確保に重要となる帯鉄筋の定着構造の性能検証例である。兵庫県南部地震以後、RC構造においては変形性能を向上させるために帯鉄筋や中間帯鉄筋が多く配筋されるようになるとともに、これらの定着に関しても十分な性能を確保することが必要とされる。これに伴って、現場における帯鉄筋や中間帯鉄筋の施工作業が煩雑になるとともに、コンクリートの確実な充填性についても注意が必要となっている。

このような施工の向上を図るために図-7に示すように、端部のフックとして施工性のよい直角フックを用いつつ、かぶりコンクリートが剥落するような損傷が生じても帯鉄筋との定着を確保し得る単純で機構の定着構造を考案した例である。このような構造の定着性能と橋脚の変形性能に及



(a)一般的な定着構造である半円形フック



(b)直角フックを用いたリング式定着構造

図-7 帯鉄筋の定着構造

ぼす影響に対して、繰返し載荷実験により検証を行ったものである。

実験に用いた模型供試体の諸元を、図-8に示す。中間帯鉄筋の定着構造形式をパラメータとした2体の供試体について実験を実施した。一体は柱部全断面において中間帯鉄筋の端部定着に従来から用いられている拘束効果の高い半円形フックを用いた供試体、もう一体は、提案するリング式定着構造を用いた供試体である。

図-9は、2体の模型橋脚に対する耐力と変形性能について比較したものである。両模型ともにほぼ同様の損傷の進展状況であり、両者の耐力と変形性能については、耐力が低下する領域も含めてほとんど同じ特性を有していることがわかる。このため、今回実験で用いた諸元の範囲内で、中間帯鉄筋の端部定着にリング式定着構造を用いた橋脚は従来から用いられている半円形フックによる定着とした橋脚と同等の変形性能を有しているといえる。

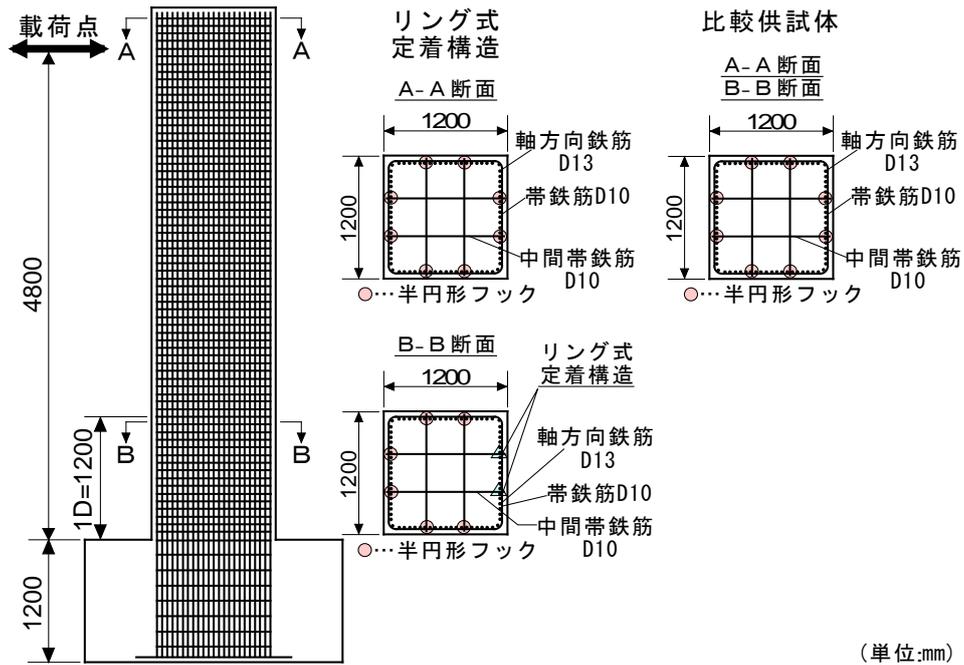


図-8 帯鉄筋の定着性能の検証のための荷重実験に用いた模型橋脚

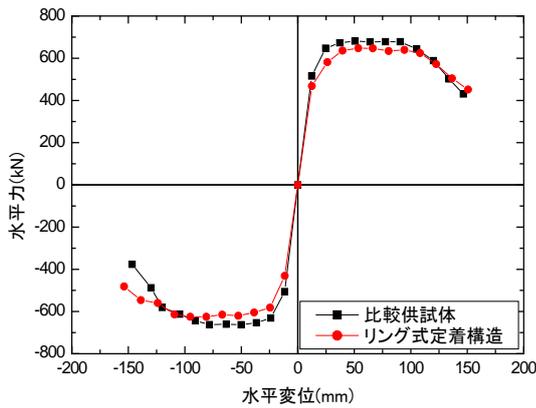


図-9 水平力-水平変位関係の履歴曲線

4. まとめ

本文では、性能規定化に伴う新技術の性能検証に際して重要となる耐震性能の評価のための標準実施手法の提案について示した。現在、本文に示した橋脚構造以外にも支承を対象とした試験方法もまとめている。今後、性能アップ並びに合理化構造に貢献できる実験・試験・評価方法としてさらに検討していく予定である。

参考文献

- 1) 運上茂樹、星隈順一、西田秀明：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン（案）、土木研究所資料No.4023、2006（本ガイドライン(案)は、土木研究所の以下のホームページよりダウンロードできます）
(<http://www.pwri.go.jp/team/taishin/publication/tpwri4023.pdf>)
- 2) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究、土木学会論文集、No.669/V-50、pp.215-232、2001

運上茂樹*



独立行政法人土木研究所構造物
メンテナンス研究センター橋梁
構造研究グループ 上席研究
員、工博
Dr. Shigeki UNJOH