

3.3 橋梁基礎の耐震補強技術に関する試験調査

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：中谷昌一，白戸真大，谷本俊輔

【要旨】

本研究では、現場の条件や求める基礎の耐震性能に応じて、補強効果や施工の確実性を含めた品質、維持管理性、地震後の長期的な状態評価までも含め、耐震補強に求める要求性能とその検証方法をセットで提示することを目的としている。平成 20 年度は、数多く提案されている基礎の耐震補強工法を設計の考え方や施工法に応じた 5 グループに分類し、それぞれのグループの性能検証のための課題を整理した。また、現在の設計計算手法では地震に対して極めて脆弱と判定される一方、これまで基礎の損傷に伴う下部構造の顕著な残留変位が確認されていないケーソン基礎を対象に、原位置の状態を模擬した土中供試体を用いた曲げ破壊実験を行い、土中部での破壊に至るまでの挙動を明らかにするとともに、耐震性能の評価モデルの検討を行った。

キーワード：橋梁基礎，耐震補強，ケーソン基礎

1. はじめに

地震後の震災復旧において重要となる安全性・信頼性の高い道路ネットワークの確保には、既設道路橋の耐震性向上が不可欠である。橋梁基礎の耐震補強にあたっては、耐震性能の不足程度や現場ごとの施工環境など、様々な条件が考えられ、条件に応じて適切な補強工法を選定することができるよう、耐震補強工法のメニューを充実させる必要がある。

現在、構造物基礎の耐震補強工法は数多く提案されており、その補強原理も多種多様である。しかし、性能の検証が開発者任せになっている一方で、道路橋の設計基準や標準的な設計法の開発に照らして、検証が不十分であるものが多い。たとえば、補強後の基礎の大地震時あるいは大地震後の挙動が不明確であるなど、達成される耐震性能が現在の耐震設計の標準的な考え方と合致していない、補強効果の評価法やその前提条件が不明確、プロセス管理のみでは設計の前提条件である出来型確認（寸法、強度の平均値管理）が困難、補強の出来形と既設基礎部材設計の安全率の考え方が整合していないなどが挙げられる。このような現状では、道路管理者が基礎の補強工法を適切に選択することができず、かつ補強した結果が当初目標、又は基準を満たしたのかを技術的根拠を以て証明することも難しい。

そこで、本研究では、民間企業 4 社と共同研究「橋梁基礎の耐震補強技術の性能検証法の開発」（平成 20～22 年度）を開始し、各種耐震補強技術に対して、補強効果

や施工の確実性を含めた品質、維持管理性、地震後の長期的な状態までも含めた性能を評価・整理し、要求性能とその検証方法を開発者に対して提示すること、補強工法選定手法を開発することを目的としている。平成 20 年度は、橋梁基礎の耐震補強に対する要求性能水準を整理し、数多くの工法の分類を行うとともに、課題の整理を行った。

また、全ての補強工法について共通する課題や提案されている工法で対処することが困難な場合の例として、フーチングの補強法、木杭基礎の耐震性能の評価、低鉄筋比のケーソン基礎の性能評価・補強法の開発などが挙げられる。平成 20 年度は、これらのうち、現在の設計計算手法では地震に対して極めて脆弱と判定される一方、これまで基礎の損傷に伴う下部構造の顕著な残留変位が確認されていないケーソン基礎を対象に、曲げ破壊実験を行い、破壊に至るまでの挙動を明らかにするとともに、耐震性能の評価モデルの検討を行った。

2. 既設橋梁基礎の耐震補強工法と要求性能の整理

2.1. 耐震補強工法の分類

現在、基礎の耐震補強工法として様々な原理に基づくものが提案されている。そこで、課題の整理、性能検証法の開発等を今後進めていくにあたり、基礎の耐震補強工法を表-1 のように分類した。まず、基礎の耐震補強工法は、構造部材の増設等による構造系補強工法と、地盤改良を実施する地盤改良系補強工法に大別することがで

きる。さらに、補強原理に着目すると、構造系補強工法の中で3種類、地盤改良系補強工法の中で2種類の中分類を設けることができる。以下、中分類ごとにその特徴と考えられる課題を示す。

2.1.1. 増し杭工法

既設基礎の補強を前提とし、低空頭下における適用性に着目した工法が数多く存在する。低空頭下においても施工可能な杭工法としては、ロッド・施工機械を小型化したもの、部材を小型化したものなどがある。一方、増しフーチングあるいは既設フーチングの補強が必要となるが、その具体的な方法については、各杭工法に共通する課題として挙げられる。

2.1.2. 部材補強工法

橋脚等の柱部材に地上で補強材を巻き立て、地中に圧入するなどにより、既設基礎の部材そのものを補強する工法である。パイルメントやPC ウェルのように地上の柱部材と基礎部材が一体型の場合など、適用可能な基礎形式は限定される。

2.1.3. 仮想ケーソン工法

基礎周囲に矢板等の構造部材を増設し、既設基礎と一体化することで、仮想ケーソン基礎を構築する工法である。単に基礎周囲に矢板等を増設する単体工法や、矢板を増設した後、矢板内に地盤改良を行う複合工法もある。支持機構の明確化や、増設部材等と一体化された仮想ケーソン基礎全体としての限界状態の設定法、既設基礎と増設部材との結合方法の照査法などが課題として挙げられる。

2.1.4. 地盤強化工法

基礎の周囲あるいは直下の地盤にセメント等を混入させて固化体を形成することにより、地盤の水平抵抗を増大させる工法である。支持機構として、改良体と基礎を一体化した複合基礎（仮想ケーソン基礎）とみなすもの、改良体と地盤を複合地盤とみなしてその抵抗を期待するものが考えられる。所定の補強効果を得るための平面的な改良範囲の設定方法が課題である。また、基礎の周囲、直下あるいは両方に固化体を形成するのか、どのような改良形式（ブロック式、ラップ式、接円式）とするかなど、様々なパターンが考えられ、それぞれ挙動が異なることを考慮すべきである。また、改良体が損傷を受けたあとの基礎部材との一体性についても、検証が必要である。

さらに、基礎に悪影響を及ぼさないための強度管理方法（上限値管理の必要性の有無）についても課題が残されている。何らかの化学材料を地上から投入するとき、

地中のどの範囲にどの程度の量が入ったのかは分からないということでは、たとえばコンクリート部材の構造設計に比べて確度が劣る。地盤改良工法では通常強度等の物性値の下限値を管理するが、基礎の設計において、材料値の下限値しか管理されない材料を用いることで最も生じ得ると考えられる構造物本体と相互作用を捉えられない可能性が高く、設計上の取り扱いと施工管理を一体で考える必要がある。

2.1.5. 液状化対策工法

地盤の液状化を防止あるいは抑制することによって地盤の水平抵抗の喪失を防ぐ工法であり、地盤系補強工法のうち、対策工自体への地震時の水平力の分担を期待しない工法グループである。地盤の密度を増大させる工法、セメントや薬液等によって土粒子に固着力を与える工法、過剰間隙水圧の消散を促すドレーンを設置する工法などが提案されている。いずれについても、どれだけの範囲（平面あるいは深さ方向）を対策すれば基礎にとって液状化の影響を無視しうるかについて、検討が必要である。

表-1 基礎の耐震補強工法の分類

大分類	中分類	小分類
構造系補強工法	増し杭工法	部材小型化工法
		施工機械小型化工法
	部材補強工法	拘束圧入工法
	仮想ケーソン工法	単体工法 複合工法
地盤系補強工法	地盤強化工法	周囲固結工法 直下固結工法
		液状化対策工法

2.2. 基礎の耐震補強工法の評価における考え方

ここで、橋梁基礎の耐震補強工法の選定がどのような観点から行われるかについて、道路管理者の視点から考えてみることにする。

まず、基礎の耐震補強工事は大規模なものとなるため、二度以上にわたって段階的に補強していくことは現実的ではない。このため、補強工法に要求される水準としては、一度の補強により、現行の道路橋示方書における要求水準まで性能を向上させることが基本となるであろう。このとき、技術としての完成度の観点からも、現行の道路橋示方書と同等以上の水準を有する工法を選定すべきである。ここで、技術としての完成度とは、限界状態の

明確さや設計計算法や安全率設定法の完成度、施工の確実性、維持管理性、大地震後の長期的な反力特性の明確さなどが挙げられ、これらが明確か否かは、当該工法によって保証される性能の水準と関連する。例えば、設計計算が可能でも施工品質が不確かであれば、設計計算どおりの性能が保証されるとは言い難い。一方で、用地制限からフーチングを一切拡張できず、既設基礎の直下を地盤改良する以外に手段がない場合など、施工環境によって自ずと適用可能な工法が限定され、技術としての完成度が不十分であってもそれなりの性能しか保証されないことを認識しつつ工法を選択せざるを得ない場面も考えられる。このため、完成度が不十分な工法を排除するのではなく、各工法によって保証される性能の水準と対応した指標を提示し、それを認識しつつ工法を選定していくことが重要となる。このことは、補強技術の開発者に対しても、技術開発にあたって進むべき方向性を明確に提示することになる。

さらに、補強原理の明確さや施工により既設基礎を損傷させないことなどは当然のこととして、基礎の補強工事が周辺環境に与える影響、経済性、その他の社会的要因など、様々な観点に基づく評価がなされ、最適な工法が特定されることになる。

以上を勘案すると、基礎の耐震補強工法の評価指標は、次のように大別されると考えられる。

- A. 基本事項
- B. 現場条件等に応じた個別評価事項
- C. 保証性能水準に関する事項

A. は全ての補強工法について必ず満たさなければならない事項、あるいは明確化しておく必要がある事項である。B. は現場条件その他に応じて道路管理者が個々に評価すべき事項である。C. は工法の効果発揮の確実性や工法としての成立性に関する評価指標であり、不十分であると評価されれば、その工法によって保証される性能水準が低いと考えるべきである。例えば、設計計算上はある一定の性能を有すると判断された場合でも、施工による出来型の確認が困難である場合、計算上の性能水準より1ランク下の水準までしか保証されないものと見なすといった評価も考えられる。

以下、項目A～Cに関する評価指標を整理した結果を示す。

A. 基本事項：

A-1. 補強原理： 工法に期待する補強効果が明確であること。例えば、地震時における荷重伝達機構、荷

重分担が明確であること。

A-2. 既設基礎の性能決定要因と補強原理の合致： 既設基礎に性能が不足することを決定する要因として、根入れ不足により支持力が不足するもの、部材のじん性やせん断耐力が不足するもの、不安定な斜面や水際線近傍の液状化地盤など地震時に不安定となる地盤にあるものなどが考えられるが、これらの要因と当該工法の補強原理が合致していること。

A-3. 補強範囲・数量の設定方法： 補強範囲や数量の設定方法が確立されていること。補強効果を得るために必要な補強範囲が明らかとなっていること。

A-4. 施工時の影響： 施工時に既設基礎に変位・損傷を生じさせないこと。また、基礎周辺地盤の乱れ等によって常時の基礎の鉛直・水平支持力特性に変化を及ぼさないこと、あるいは施工中の支持力特性の変化を事前に評価しうること。

B. 現場条件等に応じた個別評価事項：

B-1. 施工環境： 与えられた空頭制限、用地制限、作業ヤードの中で施工が可能であること。

B-2. 施工期間： 当該橋梁に許容される通行規制期間の範囲内で施工可能であること。

B-3. 周辺環境への影響： 施工時に有害な騒音・振動が生じないこと、近接構造物に悪影響を及ぼさないこと、河川水や地下水を汚染させないこと、工事に伴う廃棄物の発生量が少ないことなど。

B-4. 経済性： 耐震補強やその後の維持管理等に要するコスト。

C. 保証性能水準に関する事項：

C-1. 限界状態の明確さ： これまでの設計法の開発と同様に、載荷試験等に基づき、荷重-変位関係上での基礎の限界状態が明らかになっていること¹⁾。また、各限界状態が明確な工学的指標と関連付けられていること。

C-2. 応答計算モデルの完成度： 各限界状態までの挙動を追跡することのできる適切な応答計算モデルが提案されていること。載荷試験結果の再現性を確認するなどの検証がなされていること。

C-3. 施工管理方法の完成度： 設計思想に照らした施工管理手法が提案されていること。施工が確実に行われたものと見なしうる施工管理項目・数量が設定されていること。

C-4. 点検・補修の容易さ： 施工後や地震後に想定さ

ケーソン模型一般構造図<橋軸方向荷重時> S=1/20

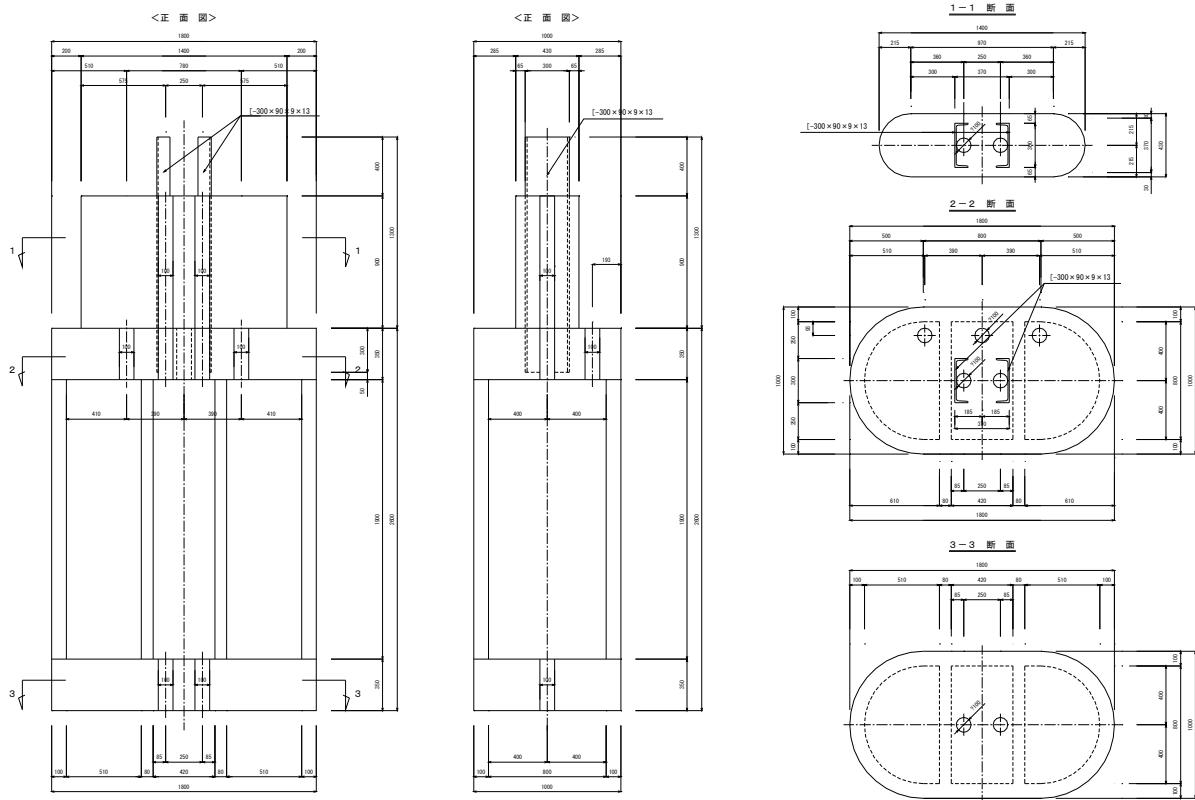


図-1 ケーソン基礎模型

れる変状とその点検，補修の容易さ。

C-5. 地震後の長期的な反力特性の明確さ： 大地震後のあらゆる作用（活荷重，余震，風など）に対して，補強設計時に想定した反力特性が得られることの確実性。

C-6. 耐久性： 残存供用期間において，地震時の抵抗機構に支障を生じるような経年劣化等を生じないこと。

2.3. 今後の課題

今後は，上記に示した項目 A および C について，5つの工法グループごとに現状と課題を整理する。そして，特に各工法グループの確実性・成立性の具体的な評価指標・区分(項目 C)について明らかにするとともに，保証性能水準の関係を明確化する予定である。また，必要に応じて載荷実験等を行い，具体的な検証作業を行う予定である。

3. 既設ケーソン基礎の載荷実験

3.1. 背景と目的

平成8年の道路橋示方書より，ケーソン基礎に対しても地震時保有水平耐力法が導入され，大規模地震時にお

ける基礎の耐力・じん性に着目した設計がなされている。一方，平成2年以前の道路橋示方書に基づいて設計されたケーソン基礎については，現在の水準に比べると鉄筋量が少ない。これまでにケーソン基礎が損傷に伴って下部構造の顕著な残留変位を生じた例は確認されていないものの，現在の設計計算手法に基づけば地震に対して極めて脆弱と判定される。そこで，既設ケーソン基礎を対象とした曲げ破壊実験を行い，破壊に至るまでの挙動を明らかにするとともに，耐震性能の評価モデルの検討を行った。

3.2. 実験方法

実験は，独立行政法人土木研究所の基礎特殊実験施設で行われた。実験ピットに作製した模型地盤内にケーソン模型を埋設し，上部構造位置に設置した油圧ジャッキによって橋軸方向に繰返し水平変位を与えた。実験状況を写真-1，ケーソン基礎の縮小模型の概要を図-1に示す。

載荷試験状況の概要を図-2に示す。ケーソン模型の設置，上下部土層の作製の後にケーソン模型の上部に橋脚模型を設置し，センターホールジャッキにより死荷重相当の鉛直力(370kN)を導入した状態で，油圧ジャッキにより橋脚模型の頂部(基礎天端より1.45m上方)に繰返



写真-1 実験状況

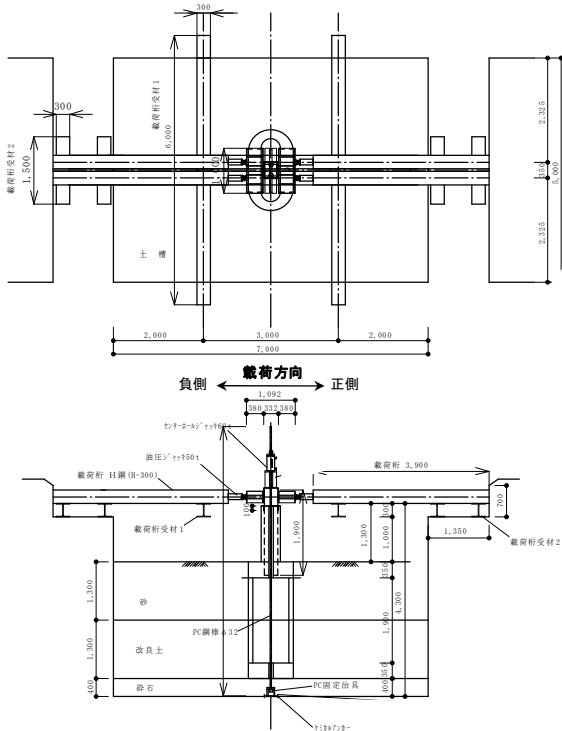


図-2 荷重試験の概要

し水平変位を与えた。荷重パターンは図-3に示すとおりである。ここで、基準変位 δ_b は、計算によりあらかじめ断面引張り側の45度範囲内の鉄筋が降伏に達するときの変位(=11mm)とした。また、正側、負側の向きは図-2を参照されたい。

ケーソン模型の外寸は、橋軸方向の幅が1.0m、橋軸直角方向の幅が1.8m、高さが2.6mである。鉛直方向鉄筋はSD295A-D4を約190mmピッチ、周方向鉄筋はSD295A-D3を約78mmピッチで配置した。橋脚部および頂版については、損傷が生じないように、多めに鉄筋を配置した。コンクリート強度 σ_c の試験値は33.5N/mm²(ケーソン模型と同一の養生日数)、鉄筋の降伏応力 σ_y の試験値はD4で384N/mm²、D3で263N/mm²であった。図

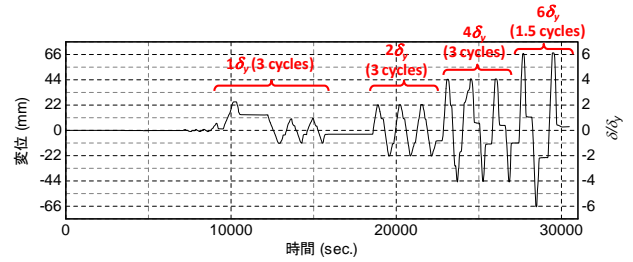


図-3 荷重パターン

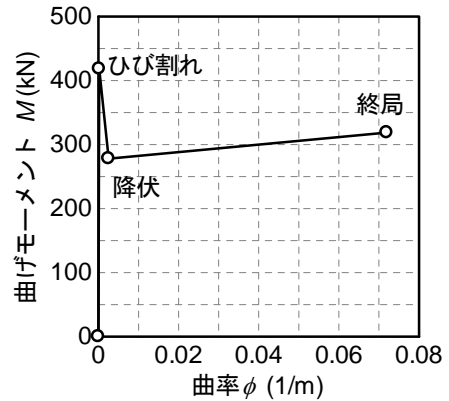


図-4 ケーソンの曲げモーメントM-曲率 ϕ 関係
(実勢強度ベースでの計算値)

4に示すとおり、このケーソン模型は、計算上、ひび割れモーメント M_c が終局モーメント M_u を上回っている。

ケーソン基礎に生じる断面力は、剛性・強度比の大きい土層境界付近に集中し、最も厳しくなるものと考えられる。そこで、模型地盤は、緩い砂層とセメント改良土層からなる2層構成とした。なお、下層にセメント改良土を用いたのは、拘束圧の低い実験ピット内で剛性・強度比の大きな2層地盤を作製するためのものであり、ケーソン基礎の周囲にセメント改良を行った状態を想定したものではないことを断っておく。ケーソン基礎底面には砕石を敷き、その上にケーソン基礎模型を設置し、セメント改良土層を打設した。セメント改良土層は鹿島砂に普通ポルトランドセメントを5.5%の乾燥重量比で混合させることで作成したものであり、目標一軸圧縮強度500kN/m²に対して実際の一軸圧縮強度は735kN/m²、CD試験結果は $c_t=190\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_t=40.7\text{deg}$ であった。上部の緩い砂層も同じく鹿島砂により作成し、撒き出しと敷き均しにより相対密度 $D_r=60\%$ ($\phi_t=30.2\text{deg}$)とした。これにより、上部の緩い砂層と下部のセメント改良土層の層中央位置での受働土圧強度 p_p の比率は概ね20倍程度である。また、ケーソン底面の砕石については、ケーソン模型を設置した状態でセンターホールジャッキにより鉛直荷重を加えて鉛直方向地盤反力係数を測定したところ、370,000~400,000kN/m²程度であった。

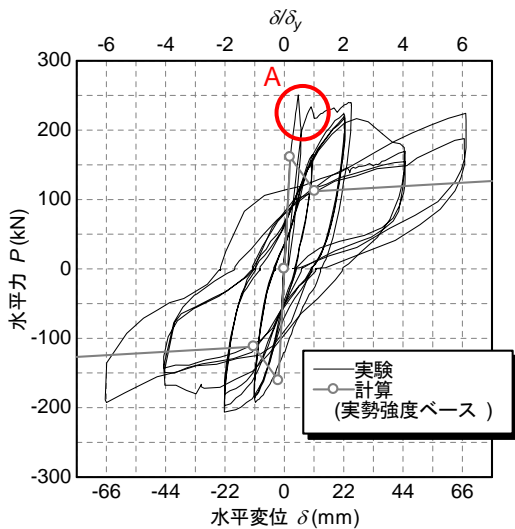


図6 載荷点での水平力-水平変位関係

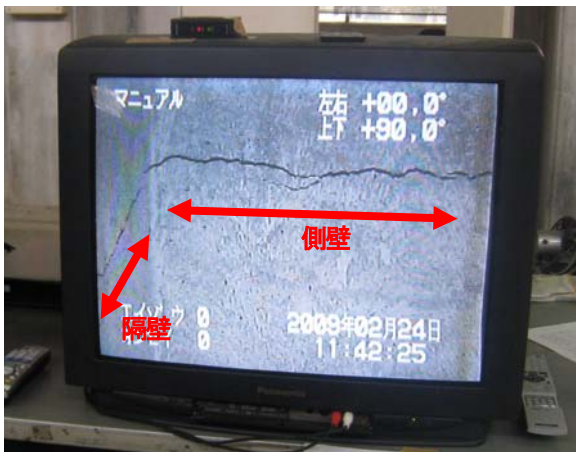


写真3 ケーソン内部の損傷状況
(層境界付近, 1dy-1 サイクル目)

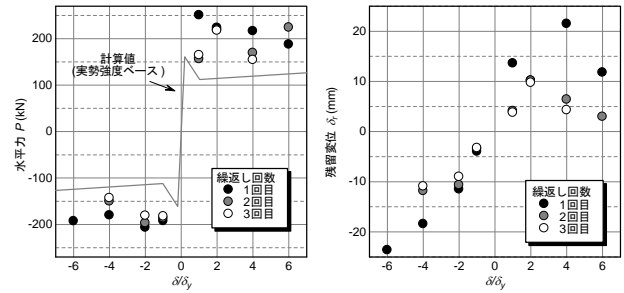
このとき、画面に映っている面は引張側

データ計測は、載荷点における荷重、基礎天端における鉛直・水平変位・回転角、コンクリートのひずみ(モールドゲージ)、鉄筋のひずみについて行った。また、載荷実験中におけるケーソン躯体の損傷状況を確認するため、内部に CCD カメラを設置した。

3.3. 実験結果

上部構造位置における荷重-変位関係を図-6 に示す。計算上、ひび割れ時の水平耐力が降伏時、終局時の水平耐力を上回るが、実験においても、1 δ_y に至る前に耐力のピークが見られ(同図 A)、その後、耐力低下が生じる挙動が確認された。写真-3 に示すように、CCD カメラによる映像から、1 δ_y -1 サイクル目の負側載荷で、ケーソン断面の正側、土層境界位置における側壁・隔壁に水平方向のクラックが生じていることが分かる。

各載荷段階における載荷点位置での最大耐力および残



(a) 最大耐力 (b) 残留変位
図-5 各載荷段階での最大耐力・残留変位

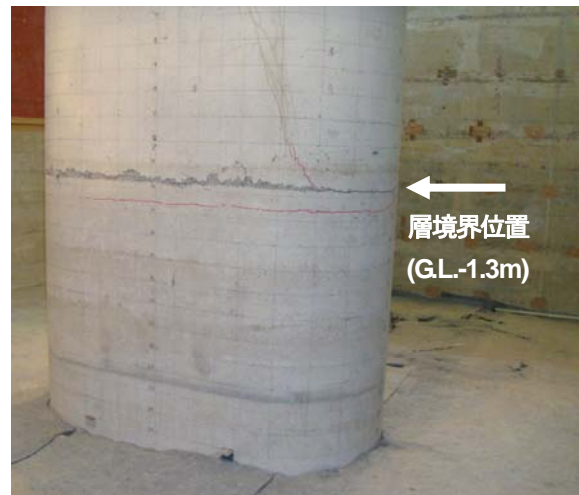


写真-2 実験後のケーソン模型の損傷状況

留変位の推移を図-5 に示す。4 δ_y の 2 サイクル目に耐力低下を示している。

実験後に模型地盤を撤去した状態で撮影したケーソン模型の状況を写真-2 に示すが、側壁に見られる損傷は層境界付近で周方向に貫通するクラックのみである。鉛直方向の鉄筋量が少ないため、いわゆる塑性ヒンジ長は極めて短く、鉄筋の破断、座屈やはらみだしは確認されなかった。さらに、残留変位については、いずれの載荷段階においても、繰返しとともに低下する傾向が見られることから、クラック面付近の高さにおいて鉛直方向鉄筋が破断してその上下で躯体が分断され、その間で鉄筋が伸び、クラック面より上方のケーソン躯体が直接基礎のように浮き上がり・着地を繰返すものと考えられる。

そして、6 δ_y で 2 サイクル目にわずかな耐力増加を示しているのは、ケーソン基礎の変位が大きくなり、作用する受働土圧抵抗が大きくなるためと推測されるが、その原因については、今後のさらなるデータ分析によって調べる必要がある。結果として、降伏後には耐力が概ね一定のまま変位が進行している。

このように、ぜい性的な曲げ破壊が生じる低鉄筋のケーソン基礎は、現在の設計計算上の想定とは異なった支

持機構に変化する。しかし、支持機構の変化後においても、周辺地盤からの受働抵抗が期待される場合には、滑動や転倒によって安定を失うことは考えにくい。したがって、ぜい性的な曲げ破壊が生じると判定されたケーソン基礎については、基礎全体系として見るとぜい性破壊の様相を呈することなく、地震中に安定を保ち、かつ、地震後においても鉛直荷重を問題なく支持することが可能であると評価することができる。

今後は、今回行った載荷実験に対する解析から、このような状態に至ったケーソン基礎の変位が上部構造に及ぼす影響を評価するため、ケーソン躯体の塑性ヒンジ長に関する検討が必要となる。また、せん断破壊が想定される橋軸直角方向に対する載荷実験し、せん断耐力を調べるとともに、コンクリートを中詰めすること等によって耐震補強がなされた場合の耐力・変形特性を調べるための載荷実験を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では、現場の条件や求める基礎の耐震性能に応じて、補強効果や施工の確実性を含めた品質、維持管理性、地震後の長期的な状態評価までも含め、耐震補強に求める要求性能とその検証方法をセットで提示することを目的としている。平成20年度は、数多く提案されている基礎の耐震補強工法を設計の考え方や施工法に応じた5グループに分類し、それぞれのグループの性能検証のための課題を整理した。今後、工法分類ごとに技術の確実性・成立性に関する具体的な評価指標や区分を明らかにするとともに、補強によって保証される基礎の性能水準の関係を明確化していく必要がある。

また、現在の設計計算手法では地震に対して極めて脆弱と判定される一方、これまで基礎の損傷に伴う下部構造の顕著な残留変位が確認されていないケーソン基礎を対象に、原位置の状態を模擬した土中供試体を用いた曲げ破壊実験を行い、土中部での破壊に至るまでの挙動を明らかにするとともに、耐震性能の評価モデルの検討を行った。

参考文献

- 1) 中谷昌一，白戸真大，河野哲也：9.3 道路橋下部構造の部分係数設計法に関する研究，土木研究所重点プロジェクト研究成果報告書，2009.3.

RESEARCH ON THE SEISMIC RETROFIT OF HIGHWAY BRIDGE FOUNDATIONS

Abstract:

A lot of retrofit methods are proposed from academic and industry sectors, while the verification demand and process to check if those methods meet the design criteria or required performance are not set out as norms and standards. In addition, those retrofit methods mainly target at shallow foundations and typical pile foundations. Hence the goals of this study are to set out the performance demands and confirmation requirements on seismic retrofit methods of highway bridge foundations and to propose retrofit methods for footings, aged timber pile foundations, and caisson type foundations that are not necessarily paid attention to from developers. In FY2008, we categorize a lot of proposed methods into five groups from the viewpoint of retrofit mechanisms and construction methods. Then, items that should be checked during the verification process are summarized for those groups. The items are associated with retrofit mechanisms, construction quality management, design models and safety margin that consider the retrofit mechanism and construction quality, and the behavior and re-usability even after a large earthquake event. In addition, a caisson foundation specimen that was embedded under ground and had a pier was constructed and tested for the behavior during cyclic lateral loading. Although caissons usually have an extremely low reinforcement ratio and a bending failure of the specimen was observed under ground during the experiment, the upper part responded as a shallow foundation and was uplifted for lateral loading that could dissipate the seismic load. In addition, because of lateral soil resistance, the load did not suddenly decrease.

Key words: bridge foundation, seismic retrofit