

道路橋基礎の地震時挙動の評価と耐震対策技術の開発

星隈順一・七澤利明

1. 既設橋の耐震対策に関する現状と課題

我が国の道路橋では、過去の大地震による致命的な被害経験¹⁾を踏まえ、これまでに目的に応じた耐震補強が順次実施されてきている。例えば、鉄筋コンクリート橋脚における軸方向鉄筋段落し部の補強や桁端部における上部構造の落橋防止対策は、既往の震災経験に基づいて優先的に進められてきた取り組みである。平成23年東北地方太平洋沖地震では、この耐震補強の効果が道路ネットワークの早期機能回復に大きく貢献したところでもある^{2),3)}。

一方で、首都直下地震や南海トラフの巨大地震等、人口が密集する都市の社会機能に大きな影響を及ぼすことが懸念される巨大地震の切迫が指摘されている。これらの大地震では、地震による強い揺れだけでなく、臨海エリアや河川沿いを中心に、液状化による地盤沈下や側方流動などにより広域的に幹線道路等が通行不能となるような被害を受けることも想定されている。発災後の救命・救助活動への支援、被災地への緊急物資輸送、そしてサプライチェーンの早期回復の観点からも道路がネットワークとして果たすべき役割は重要であり、合理的かつ着実に既設橋の耐震対策の推進が図られるよう、現場が求める技術ニーズにマッチした実用的な技術開発を推し進めていく必要がある。

本稿では、橋を構成する部材のうち基礎に着目する。基礎は地中部に設置される部材であり、地震時には上部構造から伝達されてくる慣性力の影響だけでなく、地震によって生じる周辺地盤の変状の影響も直接受ける部材でもある。このため、既設橋の基礎の照査においては、不確実性を少しでも排除していく観点から、適切な地盤調査方法により信頼性の高い地盤特性に関する情報を取得した上で、より実際に近い基礎の地震時挙動、より実際に近い基礎の耐力・変形特性を評価できるようにすることが求められている。

このような技術ニーズを踏まえ、既設橋におけ

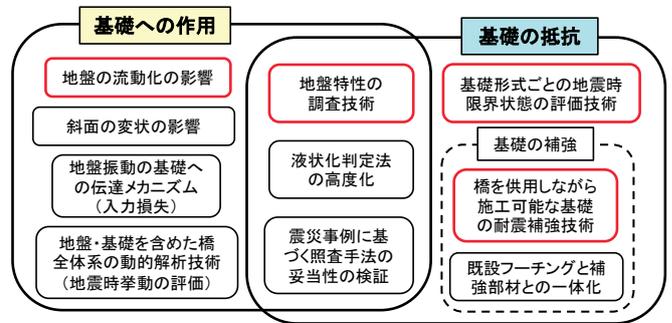


図-1 基礎の耐震評価と補強対策に関する研究課題
(赤枠は本稿で取り組みの一部を紹介している項目)

る基礎の照査や耐震対策の検討において参考となる技術情報を発信していくため、現在、土木研究所CAESAR等で取り組んでいる研究項目の全体像を示すと図-1の通りである。この中から、本稿では、液状化地盤における基礎の地震時挙動の評価の高度化と耐震対策に向けた取り組み、既設基礎の地震時限界状態の評価の高度化に向けた取り組みについて報告する。

2. 土木研究所の取り組み

2.1 基礎の地震時挙動の評価技術

既往の大地震においては、橋脚の損傷が原因となって落橋に至った事例が多いものの、液状化地盤に建設された橋において、基礎の損傷や変状により落橋や長期間の通行止めを要するような致命的な被害が生じた事例もある⁴⁾。このため、特に液状化の影響を考慮していない時代に設計された既設橋に対しては、照査の結果に応じて適切な基礎の補強対策を講じていく必要がある。しかしながら、既設橋の数は非常に多く、また既設基礎の形式と地盤条件の組合せも様々である。このような既設基礎の中から耐震対策の必要性の高い条件の基礎を適確に抽出し、効率的に対策を進めていくことがマネジメントとして求められている。

そこで、過去の地震において液状化地盤上の橋が受けた被災の中でも、通行機能に支障を生じるような被災事例が比較的多く、かつ、既往の研究事例が少ない液状化地盤上の橋台を検討対象として取り上げ、大型振動台による振動実験を通じて地震時挙動

Recent Research Activities on Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Foundations for Bridges

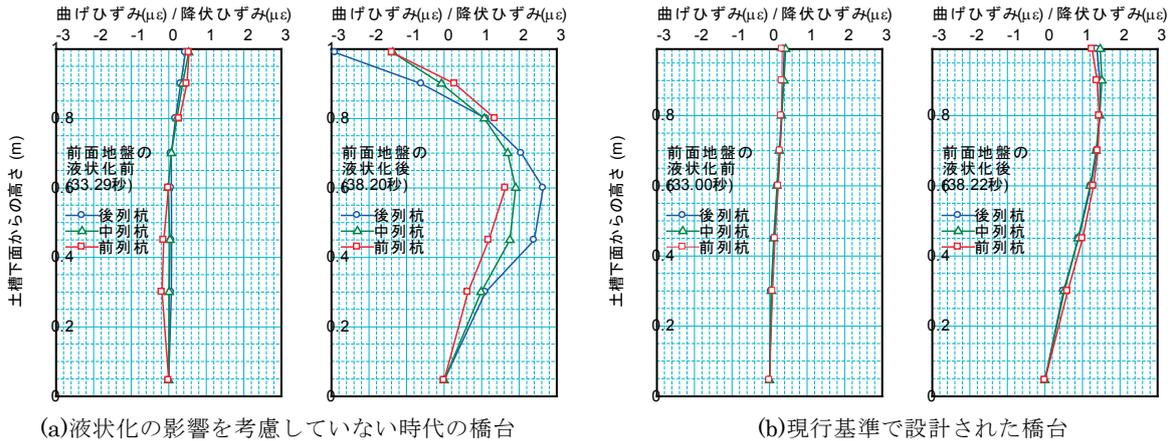


図-2 振動実験の結果得られた橋台を支持する杭の曲げひずみの分布

の解明に取り組んでいる⁴⁾。ここで紹介する実験ケースは、液状化の影響が設計基準で考慮されていなかった時代に設計された既製RC杭（φ450mm，8×3列）で支持された橋台（橋台高さ8m，液状化層厚10m）、並びに、現行の基準に基づいて液状化の影響を考慮して設計された場所打ち杭（φ1200mm，4×3列）で支持された橋台である。実験模型は実物の約1/10縮尺であるが、橋の実際の構造特性を可能な限り実験模型に反映するため、杭の曲げ剛性、橋桁端部と橋台との遊間量等については相似則に基づき適切にモデル化している。

このような液状化地盤における既設橋台の模型に対して、道路橋示方書⁵⁾のレベル2地震動（タイプI地震動）に相当する地震動を与えて加震した。実験結果の一部については本誌でも既に速報的に紹介しているところであるが⁴⁾、杭基礎の地震応答は橋台前面の地盤が液状化した（過剰間隙水圧比が1.0に達した）時を境に大きな変化を示した。図-2は、両実験ケースに対して、橋台前面の地盤に液状化が生じた時刻のおよそ2秒前と3秒後における杭に生じた曲げひずみの分布を比較して示したものである。ここで、両ケースの実験結果を相対的に比較するため、曲げひずみの値は、本模型の対象として想定している実杭における降伏ひずみに相当する値で除して無次元化している。いずれのケースとも、前面地盤に液状化が生じる前は、フーチング下面からの水平力を杭とその前面地盤で支持している。液状化が生じた後は、液状化の影響を考慮していない時代の橋台では、橋台が前面に変位して橋桁との遊間が詰まり、たて壁の頂部は前面への変位が拘束される状況となり、前面地盤の液状化に伴って、杭には大きな曲げひずみが生じる挙動となっている。一方で、現行の基準により設計された橋台のケースで

は、橋桁端部との遊間が相対的に大きく、たて壁の頂部は前面側へ変位するものの、橋桁端部による拘束の影響を大きく受けずに挙動しており、このことがたて壁に作用する土圧を減少させ、杭に生じる曲げひずみは抑えられる傾向となっている。

このように、液状化する地盤における橋台の地震時挙動のメカニズムを解明していく上で重要なデータが得られてきている。両ケースにおける挙動の比較分析についてはさらに精査を行った上で、別途報告していきたいが、これらの実験結果を用いて、3次元動的FEM解析に適用する解析モデルの開発も進めているところである。

2.2 地震時挙動評価の高度化に向けた地盤調査技術

既設基礎の耐震性をより精度よく評価するためには、実橋における地盤の状態をより精密に調査し、個々の橋の耐震性評価に反映していくことも重要である。ここでは、こうした地盤調査技術に関する2つの取組みについて示す。

既設基礎の耐震性評価を行う際に、液状化に対する設計が基準に示されていない昭和40年代半ば以前の杭基礎の取り扱いが大きな問題となる。液状化設計が行われていないため、現行基準に基づき液状化が生じるものとして評価すると性能が著しく不足する結果となる。特に、既製コンクリート杭については過去の震災でも一部で著しい損傷が確認されているため、優先的に補強の可否を検討する必要がある。一方、昭和40年代半ば以前では、既製杭の施工法としては打撃工法しか確立されていなかった。このため、同時代の既製杭基礎の性能を評価する際に、杭の打撃貫入に伴う地盤の密度増加の影響を見込むと、より精密で合理的な評価が可能になると考えられる。地盤の密度増加による効果としては、①液状化の抑制、②地盤抵抗の増加（周面摩

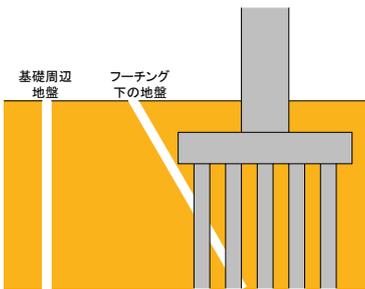


図-3 地盤調査のイメージ



写真-1 実現場における地盤調査の状況

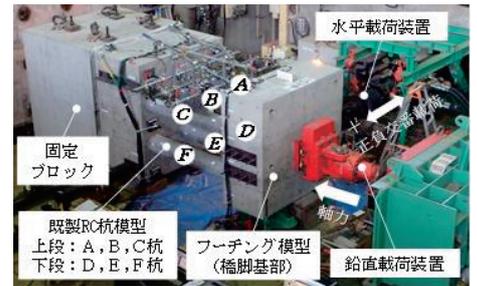


写真-2 既製RC杭基礎模型の正負交番載荷実験

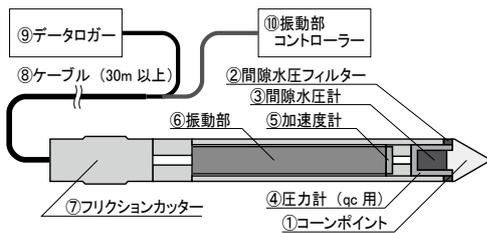


図-4 振動コーン試験機

摩擦力、水平方向地盤反力係数)が想定される。①に関しては、標準的な杭間隔 $2.5D$ で杭を打ち込んだ場合の置換率を計算すると12.6%であり、サンドコンパクションパイルによる液状化対策での一般的な置換率(約10%、細粒分を含まない場合)と同等となる。また、②については地盤条件によって変わるため一概には評価できないが、地盤調査でN値等の貫入抵抗を調べることにより定量的な評価が可能となる。ただし、密度増加の効果を評価法に取り込んでいくためには、現実に施工された杭基礎でどの程度の密度増加が生じているのか範囲も含めて調査をした上で、密度増加が生じていない周辺地盤も含めた解析的検討等により効果を検証する必要がある。

このため、現在、昭和40年代半ば以前に施工された複数の既製杭基礎を対象として、地盤の密度等に関する現地調査を実施している。図-3に地盤調査のイメージを、写真-1に既設橋周辺での地盤調査状況を示す。周辺地盤及び杭間地盤に対して、標準貫入試験のほか土の現場密度の測定が可能なRIコーン貫入試験等を試験的に適用し、周辺と杭間での密度や貫入抵抗の違い等について評価を行う予定である。将来的には今回のような調査手法を確立・標準化し、「高度な地盤調査をすれば既設基礎をより合理的に評価できる」という道筋をつけていきたいと考えている。

もう一つの取組みとして、振動コーン試験機の開発と同試験調査による液状化判定手法の高精度化がある。図-4に試作した振動コーン試験機の概要を

示すが、先端部を振動させることにより、対象地盤の液状化有無や特性を直接的に計測するという原理である。現在は土木研究所及びEーディフェンスの振動実験土槽や埋立て地盤等において試験的に適用しており、今後、試作機の改良や評価手法について検討を進めていく予定である。

2.3 既設基礎の地震時限界状態の評価技術

既設橋の基礎形式には複数の種類があり、また、特に古い基準で設計された基礎の塑性変形能や破壊特性に関する知見はまだ少ない。ここでは、既設基礎の地震時限界状態に関する研究の一環として、1960年代頃に設計・製造された既製RC杭を対象として、その保有している耐力や変形能に関して実験的に検討した事例を紹介する⁶⁾。

実験に用いた既製RC杭の配筋細目は、実際の橋で供用された後に撤去された杭のはつり調査の結果を踏まえて設定した。実験は、地震時における杭頭部付近の荷重状態を再現できるよう、写真-2に示すような載荷セットアップで行った。ここで、本実験における構造条件に対して道路橋示方書に基づいて評価を行うと、本既製RC杭基礎模型はせん断破壊型と評価される。

載荷実験の結果は、曲げ変形が卓越したような履歴曲線となり、 $5\delta_y$ の載荷ステップから杭頭部近傍でかぶりコンクリートの剥落が生じ、さらに $8\delta_y \sim 9\delta_y$ 時において杭の軸方向鉄筋がはらみだすことによりスパイラル筋の破断が生じた。そして最終的には、 $20\delta_y$ の載荷ステップの途上において、コンクリート断面の損傷とスパイラル筋の破断に伴うせん断抵抗の低下により、一部の杭体でせん断破壊が生じた。せん断耐力にはばらつきがあることから、照査においてはそのばらつきに応じた安全余裕が考慮されているが、今回の実験結果を慎重に精査し、スパイラル筋や中詰コンクリートのせん断抵抗への寄与の度合いについて検討しているところである。

2.4 既設基礎の耐震対策技術

既設基礎の耐震対策技術については、液状化地盤における基礎の地震時挙動や被害の生じるメカニズムを踏まえ、さらに供用中の道路橋であるという施工上の制約条件をも考慮した上で選定していく必要がある。土木研究所では鋼管杭・鋼矢板技術協会(JASPP)との共同研究により、橋の供用をできるだけ阻害せずに工事を行える鋼管杭等を用いた補強工法・構造を提案するとともに、補強効果を確認するため60Gの遠心場での遠心載荷実験を実施している。既往の地震における橋台基礎の被災事例の分析結果⁷⁾に基づき、橋台高さ・液状化層厚を補強の有無等に加えてパラメータとしている⁴⁾。なお、入力地震動や実験供試体の構成(橋台躯体、基礎、上部構造)、盛土形状や液状化層の地盤材料等は2.で示した振動実験と概ね同じ条件としている。

写真-3に現行基準により設計された試験ケースに対する加振後の状況を示す。橋台高(5m)に比べて液状化層厚が厚いため(18m)、背面盛土下側の地盤も液状化が生じ、盛土の沈下・前方への流動が生じていることが分かる。杭の曲げひずみは液状化層の中央部で最大となり、2.と同様の傾向となっている。今後、複数の補強工法を模擬した橋台の試験等を行い、効果的な補強対策について明らかにしていく予定である。



写真-3 加振後の状況 (現行基準の橋台の試験ケース)

3. おわりに

本稿では、既設橋の耐震性能の照査における基礎の評価や耐震対策に関連し、土木研究所における最近の研究の取組みの一部を紹介した。既設橋は文字通り現に構築されている構造物であり、それゆえ、部材の材料特性や地盤の特性は調査の精度を高めれば高めるほど、実際に近い評価に近づく。既設橋の

耐震性能の評価、とりわけ地盤条件の影響を大きく受ける基礎の評価においては、地盤調査により適切な地盤特性を把握することが重要である。そのようにして得られた地盤特性を用いることにより、基礎の地震時挙動や限界状態の評価がより合理的にできるような仕組みにしていきたいと考えている。

謝 辞

2.1や2.4で紹介した内容は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人:JST)の一環として実施している。また、当該研究は、東京工業大学大学院高橋章浩教授との共同研究、ならびに、一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会との共同研究として実施しているものである。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 運上茂樹、星限順一、堺淳一、植田健介：過去の大規模地震における落橋事例とその分析、土研資料第4158号、2009年12月
- 2) 星限順一、張広鋒、堺淳一：橋梁の耐震性の向上に向けて—東北地方太平洋沖地震における耐震補強された橋の挙動—、土木技術資料、第54巻、第1号、pp.8~11、2012
- 3) 星限順一：東日本大震災による道路橋の被災から見た今後の課題、基礎工、Vol.40、No.4、pp.2~6、2012
- 4) 運上茂樹、星限順一、七澤利明、河野哲也、谷本俊輔：既設橋の液状化被害を防ぐための耐震技術の開発、土木技術資料、第58巻、第1号、pp.18~21、2016
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、2012年3月
- 6) 岡田太賀雄、鬼木浩二、河野哲也、星限順一：既製RC杭を用いた既設杭基礎の地震時限界状態の評価に関する実験的研究、土木技術資料、第58巻、第5号、pp.24~27、2016
- 7) 福井次郎、中谷昌一、白戸真大：道路橋橋台およびその基礎の地震被災事例、土木研究所資料第4014号、2006.5

星限順一



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター上席研究員、現 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長、博(工)
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA

七澤利明



土木研究所構造物メンテナンス研究センター上席研究員
Toshiaki NANAZAWA