

液状化地盤における既設橋台基礎の耐震性評価技術

七澤利明・谷本俊輔・高橋宏和・中田光彦

1. はじめに

我が国の道路橋では、過去の大地震による被害経験¹⁾を踏まえ、落橋等の重篤な被害を防止する観点から、落橋防止システムの設置や橋脚柱の補強等が進められてきた。一方、既設橋の基礎に関しては、耐震性を合理的に評価する手法が確立されておらず、新設橋を対象とした道路橋示方書の評価手法を準用すると、耐震性が不足すると判断される事例が少なくないため、補強等を進める上での課題となっている。特に、液状化地盤にある基礎については、昭和46年道路橋耐震設計指針以前は液状化を考慮した設計が行われていなかったこと（図-1参照）、レベル2地震動への未対応等から、耐震性が不足すると評価されるものが多いことが想定される。しかし、実際の大地震時の被害状況としては、液状化に伴う地盤の側方流動等により、一部では甚大な被害も出ているものの（写真-1参照）、多くは被害の程度が限定的である。また、既設基礎の補強は、一般に新設での施工よりも条件が厳しく^{例えば3)}、通行機能の確保や施工空間上の制約等、施工にあたっての課題も多いため、施工性も考慮して補強設計法等を確立していく必要がある。

このような背景から、土木研究所では、液状化地盤にある既設基礎の耐震性評価に着目し、橋の供用性に影響が生じる変位や損傷をより精度よく評価できる手法の開発や、既設橋の現場条件を考慮した現実的な基礎の補強技術の開発に取り組んでいる。本報では、既設基礎の耐震性を合理的に評価する手法の一部として開発中の、簡易解析モデルについて、液状化に伴い流動力が作用する橋台基礎の振動台実験を対象とした再現解析結果⁴⁾の代表例を報告する。さらに、この結果に基づいて、橋台及び橋台基礎の設計実務への適用が可能な耐震性評価手法について検討した結果を報告する。

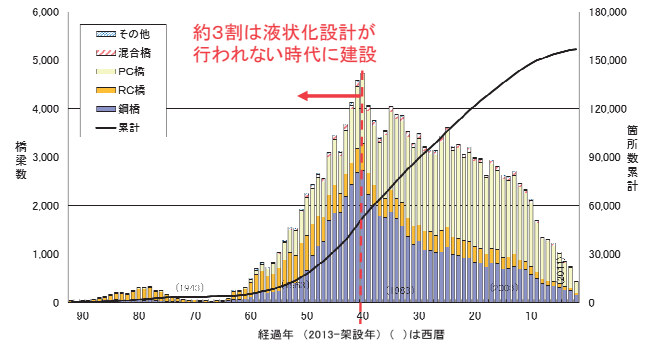


図-1 既設橋梁数と経過年数²⁾



写真-1 側方流動による橋台の損傷事例（東魚崎大橋・1995年兵庫県南部地震）



写真-2 三次元大型振動台による実験状況

2. 液状化地盤における橋台基礎を対象とした振動台実験の再現解析

2.1 解析対象

液状化に伴う側方流動の影響を受ける橋台を対象とした振動台実験（写真-2参照）の結果を基に、設計実務への適用が可能な解析モデルについて検討する。解析対象とした2ケースの振動台実験の模型諸元を表-1、模型概要図を図-2に示す。2ケースの模型は、同一の地盤条件のもと、一方が旧基準、他方が現行基準に基づき設計されたもので、杭径及び杭本数に加え、桁の遊間も異なる。振動台実験では、2ケース共に同一の入力地震動

を用いて実施され、どちらの実験ケースも桁と橋台が接触し、桁から受ける反力が最大になった時に橋台の変位や背面土圧、杭基礎の断面力も最大となった。この実験結果から、桁から受ける反力が最大になった時刻の計測値を再現解析の対象とした。

また、解析方法としては、橋台及び杭基礎が液状化地盤から受ける流動力を荷重（土圧）としてモデル化し作用させる方法を用いた。

2.2 解析モデルと解析ケース

解析モデルは、図-3に示す通り、2次元はり・ばねモデルとし、橋台及びフーチングは剛体、杭は線形はり要素とした。境界条件は、実験模型に合わせて杭下端をピン結合、杭頭部を剛結合とした。また、桁－橋台パラペット間には、遊間相当の水平変位が生じた後、桁により橋台が拘束されることを考慮したバイリニア型のばねを設けた。橋台に与える土圧は、振動台実験で観測された地盤の加速度から求まる水平震度を用いて、修正物部・岡部の方法⁷⁾により算出した。

杭に作用させる土圧は、実験値の土圧分布を参考に、液状化層の中間までは深度方向に全上載圧相当とし、その点から土圧を減少させ液状化層の下端で零になる分布を基本とした（図-3参照）。また、兵庫県南部地震の際に橋脚基礎に作用した流動力の逆解析結果⁸⁾では、液状化層中の杭に作用する土圧を全上載圧の30%程度とすることにより評価できることが示されている。今回は橋台基礎を対象とするものの、これを参考に、杭に与える土圧を全上載圧の0.3倍とするケースについても解析した。

また、杭相互の干渉による作用土圧の違い（群杭効果）を考慮するために、単杭に対する地盤作用領域 A_0 を図-4のように仮定し、群杭中の杭列毎に平均化した作用領域 A_n の比により補正係数 $\eta(=A_n/A_0)$ を設定⁹⁾することで、杭位置に応じて異なる土圧を与えた。なお、杭の作用領域比は杭径及び杭配置が関係するため、旧基準と現行基準の杭でその比の値は異なる。

2.3 解析結果

解析結果のうち、土圧分布を図-5、杭の曲げモーメント分布を図-6に示す。図-5より、杭に作用させる土圧を全上載圧相当とすると、実験値よりも過大となった。一方、杭に作用させる土圧を

表-1 振動台実験の模型諸元

適用基準	基礎の諸元	桁の遊間
S39指針 ⁵⁾	既製RC杭φ450 8×3列	50mm
H24道示 ⁶⁾	場所打ち杭φ1200 4×3列	200mm

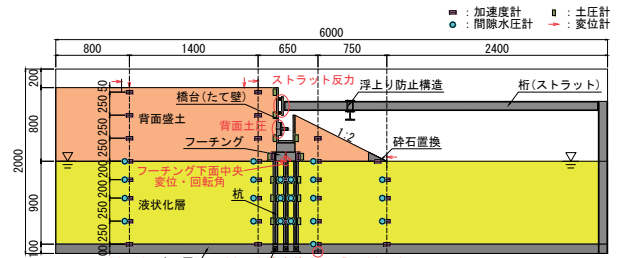


図-2 模型概要図（旧基準）

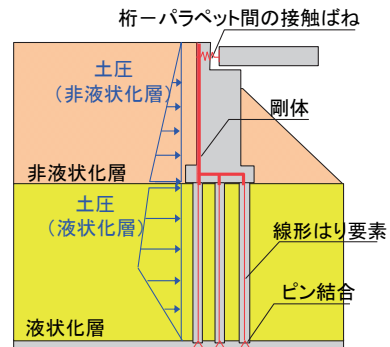
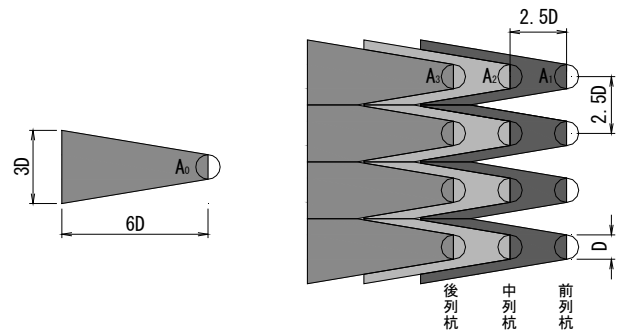


図-3 解析モデル



(a) 単杭に対する作用領域 (b) 群杭に対する作用領域

図-4 単杭及び群杭に対する地盤の作用領域

全上載圧の0.3倍に低減したケースでは、深度等によってばらつきがあるものの平均的には概ね同程度の土圧が作用し、その結果図-6に示すように解析値の杭の曲げモーメント分布が実験値の曲げモーメント分布を概ね再現できている。この点は、杭の剛性が著しく異なる旧基準と現行基準で共通している。各杭列の曲げモーメントの大きさについては、実験値と差が生じているものもあり、一部課題が残るものの、群杭効果を考慮することにより、実験のように杭位置によって曲げモーメントが異なる挙動を評価できることを確認した。

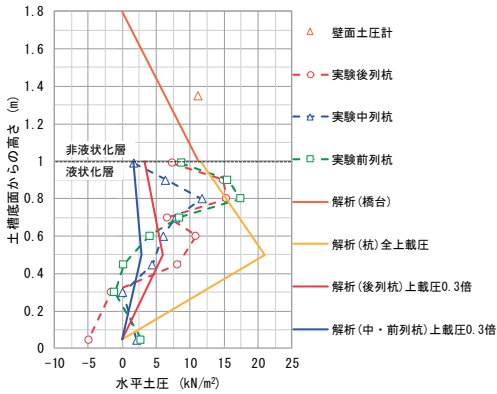
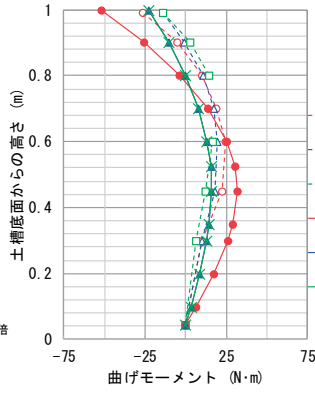
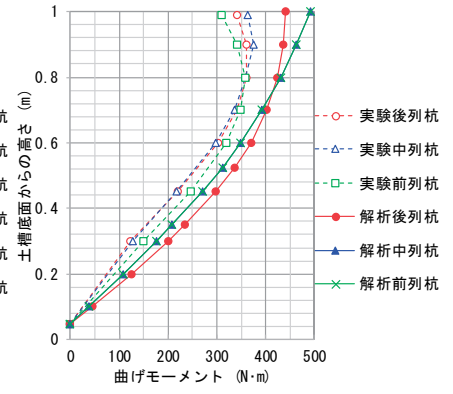


図-5 土圧分布(旧基準)



(a)旧基準



(b)現行基準

図-6 杭の曲げモーメント分布(上載圧の0.3倍のケース)

3. 設計実務への適用が可能な解析モデル及び耐震性評価手法

3.1 耐震性評価の観点

2.では、実験結果の再現解析に基づく流動力のモデル化について報告した。以下では、そのような流動力を受ける橋台及び橋台基礎に対し、設計実務への適用が可能な解析モデル及び耐震性評価手法について、筆者らが考案した内容を示す。図-7は、これまでの被災事例も踏まえた上で、地震後の速やかな橋の供用を阻害し得る損傷と位置付けられるものを整理し示したものである。耐震性評価にあたってはこれを考慮し、以下の(1)から(4)に示す観点で行う。

- (1) 上部構造(桁)：橋台パラペットとの接触により、交通荷重等を支持する能力が低下するような損傷が桁に生じない。
- (2) 支承部：支承部は損傷しても必ず橋の供用が困難となる訳ではない。ただし、支承部の損傷に伴い路面に段差が生じた場合には、橋の供用が困難となるため、路面の段差を生じさせない。
- (3) 橋台たて壁、橋台基礎(フーチング・杭基礎)：せん断破壊及び曲げ破壊を防止し、最低限震後の交通荷重や背面土圧に抵抗できるだけの性能を確保する。
- (4) 橋台パラペット、背面盛土：桁との接触による橋台パラペットの損傷や背面盛土の沈下を許容しつつ、別途路面段差の補修等の応急対策によって震後の橋の供用性を確保する。

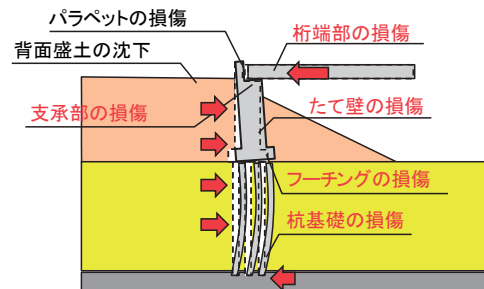
3.2 解析モデル及び耐震性評価手法

図-8に、橋台及び橋台基礎の解析モデル及び耐震性評価手法について、具体的なモデル化の概要を示す。設計実務への適用が可能な簡易解析モデル

による静的照査を基本に、橋台と基礎は一体でモデル化し、3.1に示した観点で個々の部材の耐震性について照査する。具体的には、2.に示した再現解析結果を踏まえて、橋台及び橋台基礎への作用土圧に対し、以下のように考える。

- (1) 桁と橋台パラペットは、遊間に設けたばね反力を接触力とし、その力に対し照査を行う。

その際、桁については耐荷力上問題ないことを確認する。また、橋台パラペットは、損傷を許容しつつ、桁に拘束され杭基礎に大きな断面力が生じる状態を再現するために、曲げ降伏後にも一定の耐力を有するようにモデル化する。



※赤字：“地震後の速やかな橋の供用を阻害し得る損傷”と位置付けられるもの

図-7 想定される損傷形態

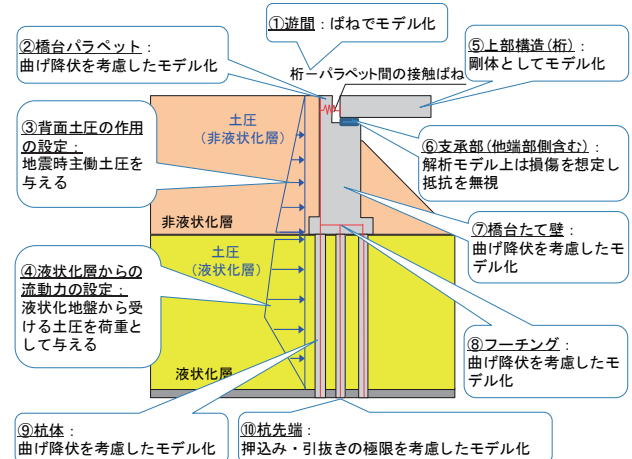


図-8 橋台及び橋台基礎のモデル化の概要

- (2) 橋台パラペットが桁に拘束された状態で流動力が作用する状況が、橋台及び橋台基礎にとって厳しい条件となるため、解析上は支承部の抵抗を無視する。ただし、実際に支承部に損傷が生じるかどうか確認するため、別途支承部に作用する力に対し、照査を行う。その結果、支承部に損傷が生じる場合には、必要に応じて段差防止構造等の対策を講じる。
- (3) 橋台たて壁、橋台基礎(フーチング・杭)については、曲げ降伏後の塑性化を許容しつつ、曲げ破壊・せん断破壊が生じないことを確認する。

4. おわりに

本報では、液状化地盤における橋台基礎の被害の有無をより精度よく評価できる手法の開発を目的として、橋台基礎に作用する流動力のモデル化や、流動力が作用する橋台及び橋台基礎の耐震性評価手法について検討した結果を報告した。今後、筆者らが考案した評価手法について試算等による検証を進め、液状化により損傷が生じるとしても供用性に対する影響の有無を判定できる、より精度の高い評価手法を開発していく。

なお、今回報告した設計実務への適用が可能な簡易解析モデルのほか、3次元FEMによる詳細な解析モデルの検討も行っている。また、既設基礎の補強技術の開発については、本報文執筆後に防災科学技術研究所が所有する実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)による大規模実証実験において、耐震対策技術の補強効果等の検証を行う予定である。最終的には、これらの検討結果をとり纏め、実務に適用が可能な「液状化地盤における橋梁基礎の耐震性評価手法及び耐震対策技術に対するガイドライン(案)」を作成・公表するとともに基準類への反映等を通じ、既設橋の耐

震性向上を支援していく考えである。

謝 辞

本報は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理人: JST)の一環として実施したものである。また、耐震性評価手法の検討は、東京工業大学高橋章浩教授、ならびに、(一社)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。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

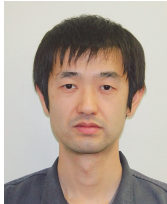
- 1) 運上茂樹、星隈順一、堺淳一、植田健介: 過去の大規模地震における落橋事例とその分析、土研資料第4158号、2009.2
- 2) 玉越隆史、横井芳輝: 平成25年度道路構造物に関する基本データ集、国総研資料第822号、2015.1
- 3) 渡辺尚夫、石崎浩、北川隆司: 阪神高速道路5号湾岸線の基礎の復旧工事、耐震補強・補修技術、耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集、pp.156~150、1997
- 4) 高橋宏和、谷本俊輔、中田光彦、七澤利明: 簡易解析モデルを用いた液状化地盤上の橋台杭基礎の地震応答評価、第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2017.7
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇、1964.3
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、2012.3
- 7) Koseki, J., Tatsuoka, F., Munaf, Y., Tateyama, M. & Kojima, k.: A modified procedure to evaluate active earth pressure at high seismic loads, Special Issue of Soils and Foundations, pp.209-216, 1998.9.
- 8) 田村敬一、東拓生、小林寛、濱田禎: 橋梁基礎に作用した流動力の逆解析、土木研究所資料、No.3770、2000.12
- 9) 白戸真大、野々村佳哲、福井次郎: 動的解析における群杭のモデル化に関する検討、土木学会地震工学論文集、2005.3

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

谷本俊輔



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 研究員、(併)構造物メンテナンス研究センター 研究員
Shunsuke TANIMOTO

高橋宏和



土木研究所構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
Hirokazu TAKAHASHI

中田光彦



土木研究所構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
Mitsuhiro NAKATA