

# 液状化地盤における橋台基礎に作用する土圧に関する実験的検討

谷本俊輔・桐山孝晴

## 1. はじめに

平成7年（1995年）兵庫県南部地震や平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震をはじめとする既往の地震において、橋梁基礎は液状化やそれに伴う側方流動等による被害を受けてきた。基礎が一度被害を受けると復旧に多大な時間を要する一方、基礎の補強には通行機能の確保や施工空間上の制約等、施工上の課題も多く、保有する耐震性能の合理的な評価および施工性を考慮した補強技術の確立が重要である。

こうした背景から、CAESARでは、液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価技術および耐震対策技術の開発に取り組んでいる。本報では特に、液状化地盤における橋台基礎の耐震性能照査法の課題を示すとともに、課題解決の上で重要なポイントとなる基礎への作用土圧について、分析を行った結果を報告する。

## 2. 液状化地盤における橋台基礎の耐震性能照査手法の課題

平成14年の道路橋示方書・同解説<sup>1)</sup>より、レベル2地震動に対する液状化地盤上の橋台基礎の耐震性能照査法が導入され、液状化地盤に対する橋台基礎の耐震性向上が図られた。ただし、液状化が生じる場合の橋台の地震時挙動は複雑であり、未解明な点が多いことから、その導入当時より、今後解決すべきいくつかの課題の存在が認識されていた<sup>2)</sup>。その代表的なものが、液状化に伴う側方流動の問題である。

液状化地盤上の橋台に関する概念図を図-1に示す。現行照査法は、橋台躯体への支承反力、慣性力および橋台背面土圧の作用に対して、基礎前面地盤の抵抗が液状化により低下した状態を想定し、基礎の耐力または変形能を確保するというものである。しかし、橋台高さが低い橋台において、各部の慣性力や土圧が小さいにも関わらず、著しい

残留変形を伴う被害を生じた事例も確認されている。こうした事例では、支持地盤が液状化に伴う側方流動を生じ、これが基礎に対する土圧として影響を及ぼした可能性が考えられている。

液状化が生じたときの橋台基礎が支持地盤からの抵抗を得ることができず、土圧の作用を受ける場合は、橋台基礎の耐震性能照査において適切に考慮することが必要となる。しかし、これを実験により一定の精度で把握することに難しさがあるため、影響要因が実験に基づいて詳細に検討された研究例は極めて少ない。このため、設計実務に取り込むことのできる十分な知見がないのが現状である。

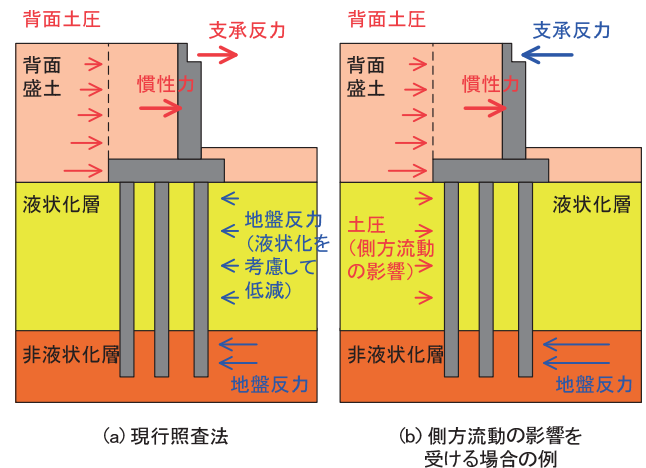


図-1 液状化地盤上の橋台に関する概念図

## 3. 検討対象とした実験

上記の問題認識に基づき、本報では、既報<sup>3)</sup>でも紹介した振動台実験のうちCase1を代表例として、液状化地盤における橋台基礎への作用土圧とその影響要因に関する分析を行った結果について紹介する。ここではまず、実験概要を示すとともに、観測された橋台の地震時挙動を概観する。

この実験は、液状化の影響を考慮した設計がなされていない時代の既設橋台基礎を対象とした振動台実験である。模型概要を図-2に示す。橋台のたて壁と橋桁の接触や衝突を再現できるように、たて壁から5mmの遊間を設けて橋桁模型（ストラット）が設置されている。

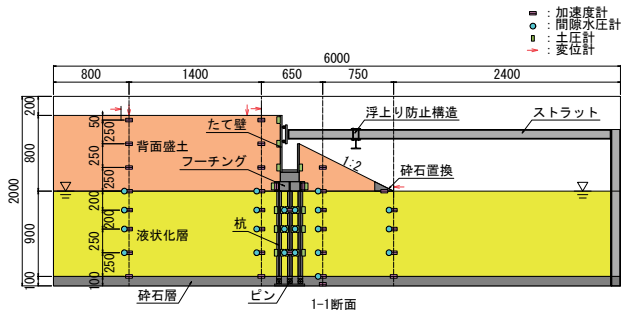


図-2 代表的なケースにおける模型概要 (Case1、単位：mm)

部材は理論上、曲げモーメント分布の軸方向に対する2回微分が分布荷重に一致することから、液状化前は杭が前面側から反力を得ていること、液状化後は土圧を受けていることが容易に推察され、こうした状態変化が液状化の進展に応じて生じていることが分かる。

また、杭列によって曲げひずみ分布が異なっているが、これは、各杭に対して発揮された地盤の水平抵抗あるいは土圧が杭位置によって異なることを示唆している。

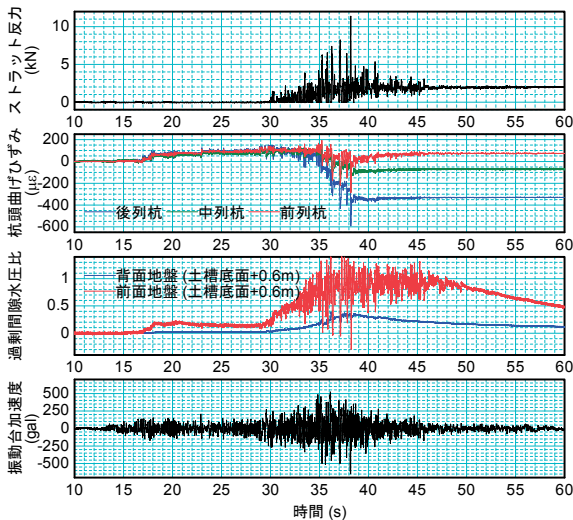


図-3 計測データの一例

#### 4. 計測データに対する数値処理

本研究では、上記のような計測データに特殊な数値処理を加えることで、杭に作用した土圧や液状化の進行度合いに関する指標を求めることを試みた。以下、その方法を示す。

##### 4.1 杭に作用した土圧の算出

模型実験において、杭が液状化層から受けた土圧を精度よく計測することは難しい。これは、土粒子径に対して十分に大きな受圧面を有する土圧計を縮尺模型に設置することが困難なことや、杭表面で計測された局所的な土圧が著しくばらつくこと等によるものである。

そこで、ここでは菊地<sup>4)</sup>の方法を用いて、杭の曲げひずみの計測値から土圧を算出することを試みた。その手順は次のとおりである。

- 1) 計測された杭の曲げひずみから曲げモーメントを算出する。
- 2) 加振中のある瞬間における曲げモーメント分布を3次の平滑化スプライン関数により補間し、得られたスプライン係数から曲げモーメント分布を深さで1回微分することにより、せん断力分布を算出する。
- 3) 杭のせん断力分布をさらに3次の平滑化スプライン関数により補間し、得られたスプライン係数からせん断力分布を深さで1回微分することにより、分布荷重を算出する。さらに、これを杭径で除すことにより土圧を算出する。
- 4) 上記1)～3)の計算を加振中の全時刻に対して行うことで、土圧の時刻歴を得る。

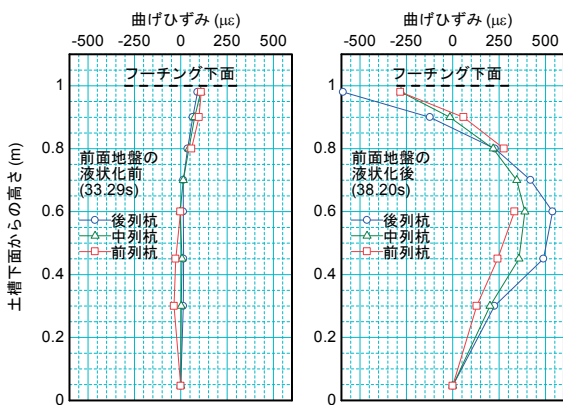


図-4 液状化前後における杭の曲げひずみ分布の変化

この実験による計測データの一例を図-3に示す。前面地盤では約35秒で過剰間隙水圧比が1.0に達し、液状化が生じている。液状化発生前後における杭の曲げひずみは、図-4に示すように、分布形状と大きさが急激に変化した。図-3において、35s付近から一部の杭の杭頭部の曲げひずみに見られるドリフトは、曲げひずみ分布が変化していく様子を捉えたものである。杭のような細長い棒

##### 4.2 液状化に対する抵抗率 $F_L$ の算出

次に、杭に作用する土圧と対比することを目的として、液状化に対する抵抗率 $F_L$ を算出した。 $F_L$ は、地震時に地盤に作用するせん断応力と液

状化発生に要するせん断応力の比である。これは、液状化の発生度合いを表す指標として設計実務で広く用いられていることから、実用的な照査法を開発する上で有用な指標となると考えられる。

ここでは、累積損傷度法を用いて、次の手順により  $F_L$  を算出した。累積損傷度法 の概念図は図-5 に示すとおりである。

- 1) 地中のある深度に生じる地震中のせん断応力が以浅の地盤の慣性力と常につり合う性質を利用し、前面地盤における加速度計測値から、地中せん断応力の時刻歴  $\tau(t)$  を算出し、これを当該深度の初期有効上載圧  $\sigma'_{v0}$  で正規化する。
- 2) せん断応力比の時刻歴  $L(t) = \tau(t) / \sigma'_{v0}$  からゼロクロスピークを抽出し、その絶対値を連ねたものをパルス列  $L_j$  ( $j=1 \sim n$ ) とする。
- 3) 1～ $m$  番目 ( $m=1 \sim n$ ) のパルス列から、累積損傷度法を用いて、 $m$  ( $=1 \sim n$ ) 番目のパルス  $L_m$  の発生時刻における累積損傷度  $D$  に基づき、文献5)の方法により  $F_L$  を算出する。
- 4) 上記1)～3)の計算を加振中の全時刻に対して行うことで、 $F_L$  の時刻歴を得る。

累積損傷度法は、もともと金属の疲労問題に適用される手法であるが、液状化の問題への適用性も確認されており、液状化判定法にも応用されている<sup>6)</sup>。累積損傷度法の適用にあたって必要となる模型地盤の液状化強度曲線は、実験時の計測データに基づき、脇中ら<sup>5)</sup>の方法により逆解析的に求めた。

## 5. 土圧の算出結果と発生傾向

### 5.1 土圧と $F_L$ の経時変化

杭に作用した土圧と  $F_L$  について、算出された時刻歴の例を図-6に示す。ここに示す土圧とは、橋台の背面側から前面側に向かう方向を正としたものである。

約15～30秒の間は土圧が負の値を示しており、杭が前面地盤からの反力を得ているのに対し、約30秒以降では杭が土圧を受けていることが分かる。図-3に示すストラット反力（橋桁からの反力）の時刻歴から、ちょうど30秒付近より橋台たて壁の上部と橋桁の接触が始まっており、液状化発生前後における橋台の力のつり合いは、それぞれ図-1(a)、(b)の状態に近いことが分かる。

前面地盤の  $F_L$  は時間とともに低下し、34～36s

付近において1.0を下回っていることから、過剰間隙水圧比とよく対応した算出結果が得られていることが分かる。

### 5.2 土圧の深さ方向分布

次に、算出された土圧がピークを示したいくつかの時刻における土圧の深さ方向分布を図-7に示す。なお、前列杭については、杭頭から0.3mの深さにおける曲げひずみ計測値にノイズが認められたことから、土圧の算出対象としていない。

いずれの杭においても、杭頭から0.4m程度の範囲で土圧が大きな値を示し、地中深部に向かって小さくなっている。これは、杭先端に向かうほど杭と地盤の相対変位が小さくなることに対応しているものと考えられる。土圧が大きな値を示した杭頭～0.4m程度の深さにおける土圧の大きさは、全上載圧と同程度であった。

また、杭に作用した土圧の大きさは、杭位置によって異なっている。中列杭に対して背面側の地盤からの土圧を直接的に受ける後列杭に大きな土圧が作用する傾向は、いわゆる群杭効果によるものと捉えることができる。

なお、液状化発生後の時刻では、土圧の大きさが時刻によって異なるものの、分布形状の著しい

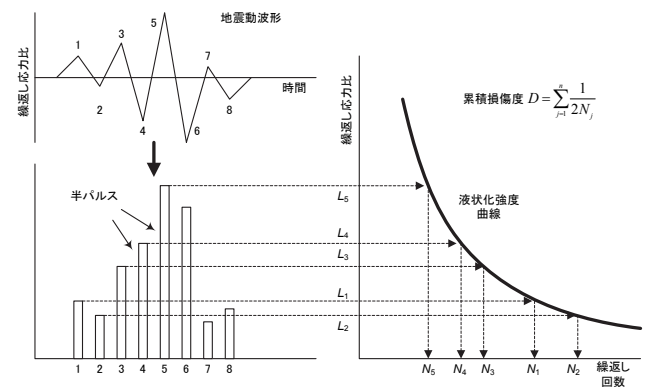


図-5 累積損傷度法 の概念図

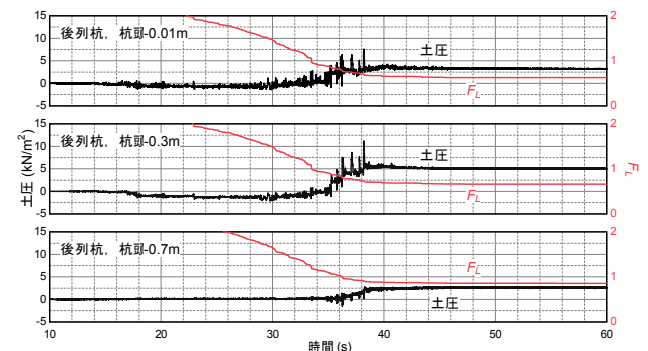


図-6 杭に作用する土圧の算出結果

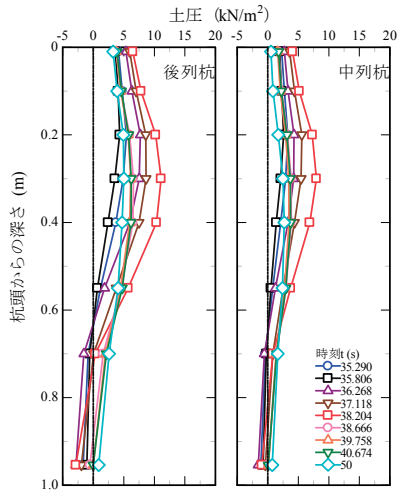


図-7 杭に作用した土圧の深さ方向分布 (Case1)

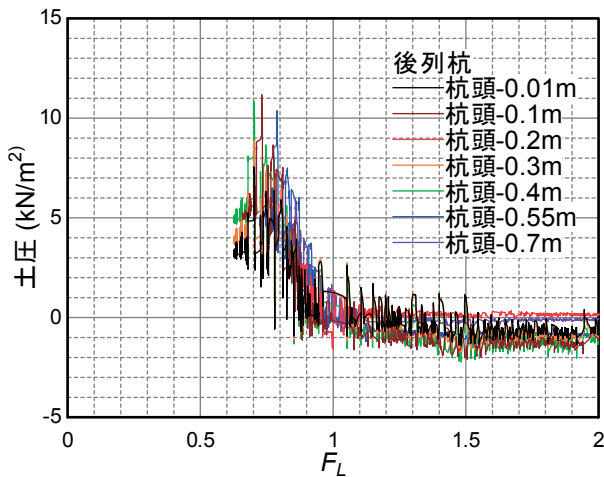


図-8 土圧と  $F_L$  の関係

経時変化は認められない。

### 5.3 土圧と $F_L$ の相関関係

後列杭の各深度における土圧と  $F_L$  の相関の例を図-8に示す。いずれの深さにおいても、土圧と  $F_L$  の間には良好な相関が認められ、かつ、 $F_L$  が1を下回ると同時に土圧が増加する結果が得られている。

現在、こうしたデータを数多くの振動台実験データから杭に作用した土圧と  $F_L$  の関係を抽出し、相関の分析を行っているところである。こうしたデータを積み上げて分析を重ねることで、これらの関係を定式化し、実用的な耐震性能照査法を提案していきたいと考えている。

## 6. まとめ

本報では、液状化地盤における橋台基礎の耐震性能照査法の課題を示すとともに、課題解決の上

で重要なポイントとなる基礎への作用土圧について、振動台実験データに特殊な数値処理を加えることで詳細な発生傾向を示した。本報に示した分析結果は一例であり、さらに多くの実験データを対象とした分析を積み重ねることで、実用的な耐震性能照査法の提案につなげたい。

## 謝 辞

本研究は、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」(管理法人：JST)の一環として実施したものである。また、対策工の設計、実験条件や計測計画の検討は、東京工業大学大学院高橋章浩教授、並びに、(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ものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、2002.3
- 2) Shirato, M., Fukui, J. & Koseki, J. : Current status of ductility design of abutment foundations against large earthquakes, Soils and Foundations, Vol.46, No.3, pp.377-396, 2006.6
- 3) 石田修一、谷本俊輔、星隈順一：液状化地盤における橋台の地震時挙動メカニズム、土木技術資料、第58巻、第9号、pp.30~35、2016
- 4) 菊池喜昭：軟弱粘性土地盤着定式くし形構造物の横抵抗特性に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No.1039、2003.3
- 5) 脇中康太、谷本俊輔、石原雅規、佐々木哲也：地震履歴が砂の液状化強度に及ぼす影響に関する動的遠心模型実験、日本地震工学論文集、Vol.15、No.6、pp.6\_44~6\_59、2015.11
- 6) 松尾修、東拓生：液状化の判定法、土木技術資料、第39巻、第2号、pp.20~25、1997.2

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

桐山孝晴



土木研究所構造物メンテナンス研究センター 耐震研究監  
Takaharu KIRIYAMA