

## 既設橋の液状化被害を防ぐための耐震技術の開発

運上茂樹・星隈順一・七澤利明・河野哲也・谷本俊輔

### 1. はじめに

土木研究所構造物メンテナンス研究センターでは、戦略的イノベーション創造プログラム（以下「SIP」という。）の研究プロジェクトに参画しており、その中で、港湾空港技術研究所、総務省消防庁消防研究センターとの連携の下、「大規模実証実験等に基づく液状化対策技術の研究開発」を平成26年度から5カ年の計画で実施している<sup>2)</sup>。本文では、本研究プログラムの一環として著者らが実施している「液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価手法と耐震対策技術の開発」について紹介する。

### 2. 研究開発の目的と意義

発生の切迫性が指摘されている南海トラフ巨大地震や首都直下地震では、強い揺れに伴い、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が想定されている。発災後の救命・救助活動への支援はもとより、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ために、こうした液状化被害の防止、軽減は、大規模地震対策の重要課題の1つとされており、それに答える確実かつ実用的な技術開発が急務となっている。

本研究で対象としている液状化地盤における橋については、過去の地震において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がある<sup>2)</sup>。このような震災経験を踏まえ、これまでに地盤の液状化を考慮した橋の耐震設計技術に関する研究が実施され、その成果が設計基準にも導入されてきたところであるが、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、必要に応じた適切な対策を講じていく必要がある。しかし、既設橋には多くのストックがあり、また、基礎の補強には費用も要することから、耐震対策の必要性の高い条件の基礎を適切に抽出し、効率的に順次対策を

進めていくことが行政ニーズになっている。このようなニーズに応えるためには、個々の既設橋が有している耐震性能の真の実力を精度よく評価できるようにし、液状化に伴って致命的な被害が生じる可能性のある橋を適確に評価することができる技術が必要である。その上で、被害の発生メカニズムに応じた合理的な耐震対策技術を開発していく必要がある。

本研究は、このような現場のニーズに対応していくため、液状化地盤における橋の耐震性能評価手法の高度化を図るとともに、確実に信頼性の高い橋梁基礎の耐震対策技術の開発を目的としている。ここで、本研究の大きな特徴の一つは、大規模な検証実験を通じて技術開発がなされる点である。従来この種の研究では、予算や試験装置の性能等の制約から、実橋の規模に比して非常に小さな模型による検証が中心であり、検証結果の実橋への適用性という観点から、明確にできていない課題も残されている。そこで、土木研究所が所有する三次元大型振動台の性能を最大限活用して大型模型による振動実験を行い、信頼性の高い検証データに基づく研究開発を実施している。

### 3. 大型模型による地震時挙動の検証実験

#### 3.1 実験対象と実験計画

本研究では、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よう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最初に取り上げ、土木研究所の三次元大型振動台により実験を行っている（写真・1）。ここでは、実験



写真-1 三次元大型振動台による振動実験

結果の一部を速報的に紹介する。

図-1は、振動実験に用いた模型の概要を示したものであり、模型の縮尺スケールは1/10である。本文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橋台である。具体には、8×3列の既製RC杭（杭径450mm）に支持される高さ8mの橋台であり、10mの液状化層厚を想定して模型を設計した。また、橋台背面の盛土形状は、河川堤防を想定して土槽奥行き方向に一様としたケースである。

たて壁、フーチング、杭を鋼材により模し、平面図に示すように土槽の側面沿いに半断面の模型を設置した。橋の実際の構造特性を実験条件として反映するため、たて壁から5mmの遊間を確保して橋桁を模したストラットを設置し、壁と橋桁の接触や衝突を再現できるようにしている。また、杭先端は土槽底面にピン結合により支持させた。模型地盤は背面盛土、液状化層ともに相対密度 $D_r=50\%$ の宇部珪砂6号により作製し、地下水位を橋台前面側の地表位置に設定した。

入力地震動については、道路橋示方書<sup>3)</sup>におけるレベル2地震動（タイプI）の動的解析用時刻歴波形の中からI-I-3を選定した。ここで、相似則に基づき、時間スケールは $(1/10)^{0.5}$ 倍に縮尺し、加速度振幅は原波形と同一（1.0倍）とした。

### 3.2 実験結果

加振後の模型地盤の変形状況を写真-2に示す。土槽のガラス面沿いに設置した標線から、のり尻から右側の地盤に大きな水平変位が生じているのに対し、のり尻から左側（橋台側）における液状化層の変形量は比較的小さいことがわかる。

ストラット反力、杭頭曲げひずみ、地盤内の過剰間隙水圧、振動台加速度の時刻歴を図-2に示す。前面地盤では約35秒で過剰間隙水圧比が1.0に達したのに対し、橋台背面の液状化層の過剰間隙水圧比は最大でも0.35程度であり、前述の地盤の変形状況と調和的である。盛土下の液状化層で水圧が上昇していく傾向は既往の研究<sup>4),5),6)</sup>においても認められており、その理由としては、盛土下の地盤は地震中にせん断応力比（せん断応力と有効拘束圧の比）が大きくなりやすく、せん断変形に伴う体積膨張が卓越すること等が挙げられる。杭頭曲げひずみは、前面地盤が液状化した35秒付近より大きく変化した。ストラットとたて壁は30秒付近から接触し生じ始

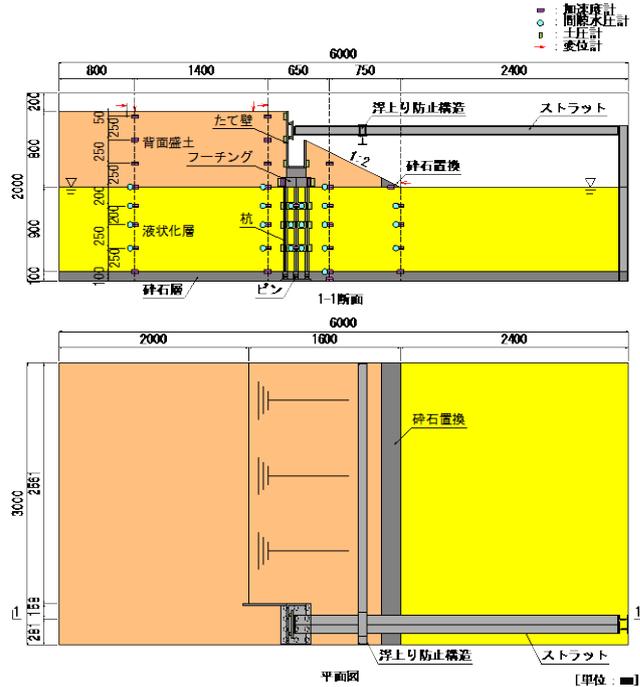


図-1 振動実験に用いた模型の概要

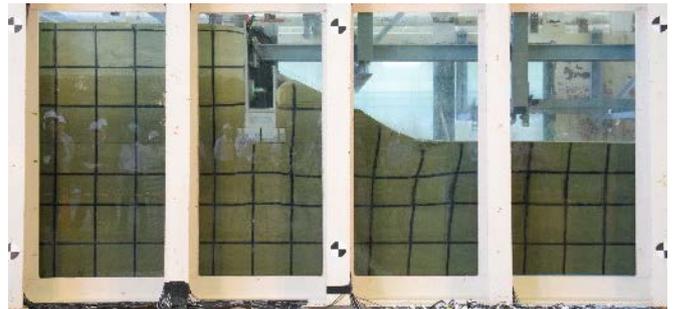


写真-2 加振後の地盤の変状

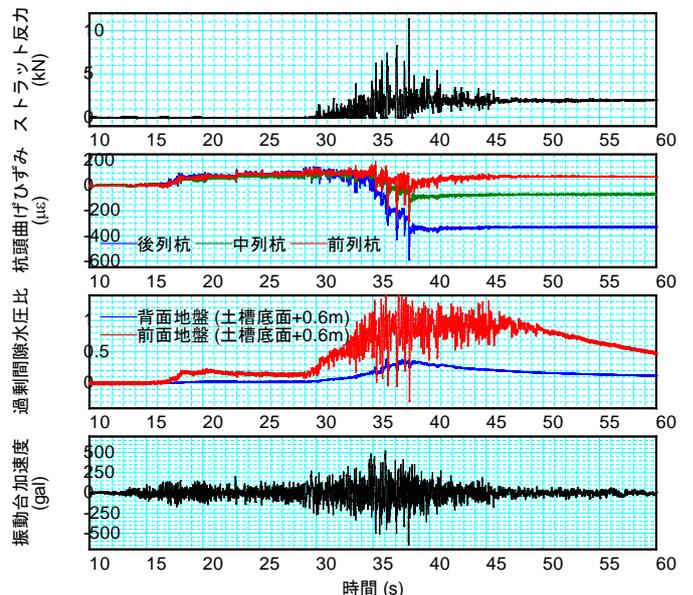


図-2 入力地震動と地震応答特性

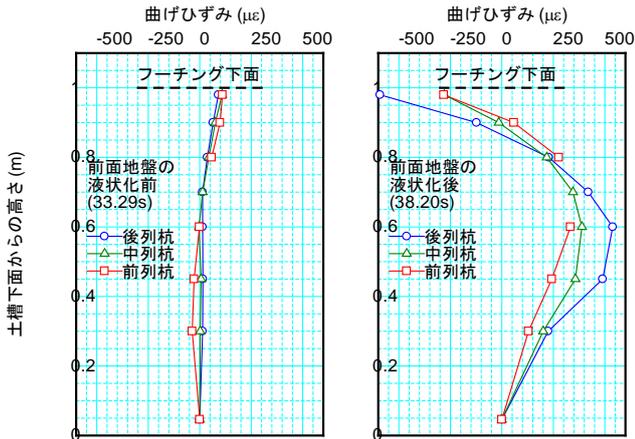


図-3 杭の曲げひずみ分布

め、その後の振動により衝突を繰り返している。紙面の都合上図示していないが、ストラットとたて壁の衝突の瞬間は、たて壁の背面土圧もピークを示した。

加振開始後33.29秒および38.20秒における模型杭の曲げモーメント分布を図-3に示す。前面地盤に液状化が生じる前の33.29秒における曲げひずみ分布は、基礎天端からの水平力を杭とその前面地盤で支持していることを示している。しかし、前面地盤に液状化が生じた35秒付近より、曲げひずみ分布は右図のような形状に急変した。この分布形状は、たて壁の変位がストラットで拘束された状態で、杭が前面側に向かう大きな土圧を受けていることを示している。

このように、液状化の影響が耐震設計で考慮されていない橋台の地震時挙動は、橋桁によるたて壁の水平変位の拘束と、地盤の変形、応力状態の影響を強く受ける結果となった。

なお、本振動実験については、引き続き、橋台背面の盛土形状として道路盛土を想定したケース、橋台基礎として現行の基準に基づいて液状化の影響を考慮して耐震設計されたケースについて実施し、それらの影響が地震時挙動にどのような影響をもたらすのかについて検証していく計画である。

#### 4. 対策技術に関する動的遠心力载荷試験

##### 4.1 対策技術の選定

本研究で対象としている液状化地盤における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。

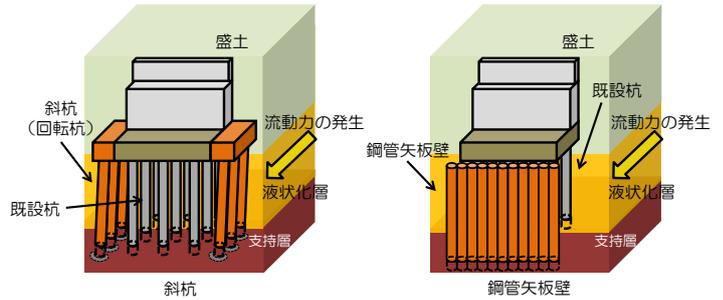


図-4 橋台基礎に対する対策工法のイメージ (左：斜杭による補強 (側面：一体型)、右：鋼管矢板壁による補強 (前面：分離型))

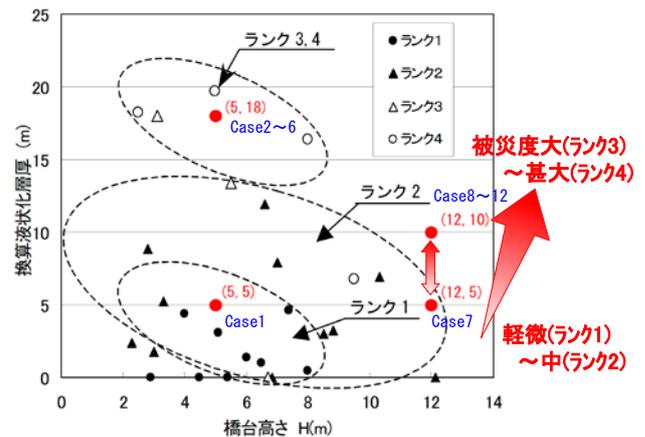


図-5 橋台高さおよび換算液状化層厚と被災ランクの関係 (文献7) に加筆)

この様な観点を踏まえ、鋼管杭・鋼矢板技術協会 (JASPP) との共同研究により、これまでに液状化による流動力を受ける橋台等の補強工法・構造として次の3つを選定した (図-4)。

- ①斜杭による補強 (側面：一体型)
- ②鋼管矢板壁による補強 (側面：一体型)
- ③鋼管矢板壁による補強 (前面：分離型)

##### 4.2 実験条件の設定

実験条件は、図-5 に示す既往の地震における橋台基礎の被災事例の分析結果<sup>7)</sup>に基づき、橋台高さ と液状化層厚をパラメータとした。対策工法の有無や準拠基準の違いもパラメータとして、合計 12 ケースの実験を予定している (表-1)。

検証実験は、土木研究所が所有する大型動的遠心力载荷試験装置を用いて60Gの遠心場で実施する予定である。実験の概要は図-6に示すとおりであり、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3. で示した実験と概ね同じである。地盤構成については、盛土層、液状化層に加えて支持層を作製し、杭先端は支持層内に杭径程度根入れさせる予定である。

表-1 動的遠心力載荷試験の実験ケース

Case	橋台高	液状化層厚	新設・既設	補強工法
1	5m	5m	既設	無対策
2	5m	18m	既設	無対策
3	5m	18m	既設	壁（前面）
4	5m	18m	既設	斜杭
5	5m	18m	既設	壁（側面）
6	5m	18m	新設	-
7	12m	5m	既設	無対策
8	12m	10m	既設	無対策
9	12m	10m	既設	壁（前面）
10	12m	10m	既設	斜杭
11	12m	10m	既設	壁（側面）
12	12m	10m	新設	-

●：加速度計  
○：静水圧計  
□：土圧計  
△：変位計  
◇：ひずみゲージ

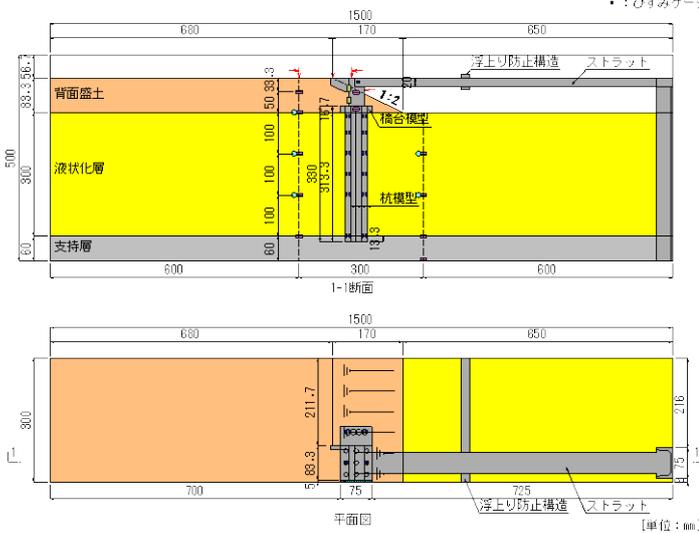


図-6 遠心実験の概要 (Case 5の例)

## 5. おわりに

本稿では、SIPの研究プログラムの一環として実施している液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価手法と耐震対策技術の開発に関して、研究の進捗状況と今後の実験計画等について紹介した。ここに紹介した振動実験等の結果については、今後3次元動的FEM解析に適用する解析モデルの開発にも活用し、地震時挙動の評価技術の高度化につなげて

いく予定である。また、最終的には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も計画しているところである。そして、本研究開発により得られた液状化地盤における橋梁基礎の評価手法と耐震対策技術については、設計実務に適用しやすくなるように最終的にはマニュアルの形としてとりまとめ、成果の最大化を図っていく考えである。

## 謝 辞

本研究は、東京工業大学大学院理工学研究科の高橋章浩教授との共同研究「液状化地盤における道路橋基礎の挙動推定法に関する研究」、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「既設道路橋基礎の耐震補強方法に関する研究」により実施している。ここに記して関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 武澤永純、大住道生：「戦略的イノベーション創造プログラム」と土木研究所の参画、土木技術資料、第57巻、第1号、pp.46～47、2015
- 2) 星隈順一、七澤利明：液状化地盤における橋梁基礎の耐震評価技術の開発、土木技術資料、第57巻、第10号、pp.46～47、2015
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、2012.3
- 4) 松尾修、岡村未対、島津多賀夫：有効応力に基づいた弾塑性FEMによる河川堤防の地震時変形量に関する解析、土木研究所資料第3700号、2000.3
- 5) 荒木裕行、谷本俊輔、石原雅規、佐々木哲也：基礎地盤の液状化に対する堤体直下固化改良工に関する動的遠心模型実験、第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集、pp.59～62、2014.12
- 6) 渦岡良介：地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究、岐阜大学博士論文、2000
- 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

運上茂樹



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、博(工)  
Dr. Shigeki UNJOH

星隈順一



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、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

河野哲也



土木研究所構造物メンテナンス研究センター  
主任研究員、博(工)  
Dr. Tetsuya KOHNO

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  
Shunsuke TANIMOTO