振動台実験に基づく液状化地盤における既設橋台の地震時挙動

- (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 正会員 〇石田 修一
- (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 正会員 谷本 俊輔
- (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 正会員 星隈 順一

1. はじめに

我が国で発生した既往の大地震において,液状化が生じた地盤における落橋や長時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.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広く実施されてきたが,まだ明確にできていない課題も残されている^{1),2)}. 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,その地震時挙 動を明らかにするための大型模型による振動台実験を実施したので,その結果を報告する.

2. 実験概要

2.1 実験対象とした橋台

本実験では、液状化を考慮した設計がされていなかった時代の基準³⁾に基づいて設計された可動支承側の 橋台を対象とした.対象橋台は、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 の液状化層厚を有する地盤上に設置されていることを想定した.また、当時は 0.2 前後の設計水平震度 による耐震設計であり、桁端部と橋台との間の遊間は現在の基準よりも小さいことを考慮し、既設橋での実 績をも踏まえ 50mm と想定した.

2.2 実験模型および実験条件

実験は、土木研究所所有の三次元大型振動台と大型剛土槽(幅 6m×奥行き 3m×高さ 2m, いずれも内寸) を使用して実施した(写真-1).図-1は、振動台実験に用いた模型の概要を示したものであり、平面図に示す ように土槽の側面沿いに半断面の橋台模型を設置した.ここで、模型の縮尺スケールは土槽の大きさの制約 から決まることとなるが、今回の実験では 1/10 に設定した.橋台模型の設計では、前節で概述した橋台の諸 元を可能な限り 1/10 となるように配慮した.ただし、本実験の目的に照らし、杭については杭径だけでなく 曲げ剛性についても調和した相似特性となるようにすることが重要であることに鑑み、杭の模型については、 受圧面の機能を持つ鞘管と断面力の伝達機能を持つ芯棒から構成される二重構造とする工夫を施した(図 -2).芯棒の剛性は、中列杭の杭頭に死荷重相当の軸力が導入されているときの降伏剛性に合わせた.実杭の 降伏点および終局点は、模型杭の曲げひずみにして 204µε および 1223µε に相当する.なお、杭先端は十分な 根入れ深さの確保が難しいため、土槽底面にピン結合により支持させた.

また,橋の実際の構造特性を実験条件として適切に反映させるため,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た.ただし,土槽内でのセ ットアップの制約から,このストラットの重量までは対象橋で想定している上部構造相当の重量を相似則に より換算した値とは調和できていない.

模型地盤は背面盛土,液状化層ともに相対密度 Dr = 50%の宇部珪砂 6 号(土粒子の密度 $\rho_s = 2.647$ g/cm³, 50%粒径 $D_{50} = 0.29$ mm,細粒分含有率 FC = 0.70%,均等係数 $U_c = 2.08$)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. Dr = 50%の宇部珪砂 6 号に対する繰返し非排水三軸試験の結果,繰返し三軸強度比 $R_c = 0.133$ であった.その他,液状化層を均一に飽和させるため,土槽底面に砕石層を設置した.また,盛土のり尻部を安定させるため,のり尻部を砕石で置換した.なお,橋台背面の盛土形状は,河川堤防を想

キーワード 液状化,振動台実験,既設橋台,地震時挙動 連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター TEL 029-879-6773



図-1 振動台実験に用いた模型の概要 定して土槽奥行き方向に一様とした.

地盤には、加速度計、間隙水圧計、変位計を設 置した.橋台模型には、加速度計、変位計、土圧 計を設置した.模型杭は、3本の杭に7深度で芯 棒にひずみゲージを貼り付けて曲げひずみを計測 した.また、ロードセルを介して衝突板を設ける ことで、ストラットとたて壁の接触力を計測した.

入力地震動は,道路橋示方書⁴⁾におけるレベル2 タイプ I 地震動の動的解析用時刻歴波形の中から



写真-1 三次元大型振動台による実験状況



図-2 模型杭



写真-2 加振後の地盤の残留変形

I-I-3 (I種地盤,新晩翠橋周辺地盤上NS)を選定した.ここで,時間スケールは実物との時間に関する相似 性を考慮して(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. 振動実験により得られた地盤および橋台の地震時挙動

3.1 地盤の残留変形

加振後の模型地盤の変形状況を写真-2に示す.地盤中の標線からわかるとおり,のり尻から右側の地盤で は水平方向に大きな残留変形が生じているのに対し,のり尻から左側(橋台側)の残留変形は比較的小さい.

3.2 過剰間隙水圧の発生状況

ストラット反力,たて壁の背面土圧,フーチング下面中央の水平,鉛直変位および回転角,杭頭曲げひずみ,地盤内の過剰間隙水圧,土槽底面加速度の時刻歴を図-3に示す.それぞれの計測位置は,図-1中に示している.また,各測線における深度ごとの過剰間隙水圧の最大値分布を図-4に示す.のり尻位置(Line-6)で液状化が発生したのに対し,背面側の橋台遠方(Line-1),背面側の橋台近傍(Line-2)および前面側の橋台近傍(Line-5)の地盤は液状化に至っていないことがわかる.これは,前述の地盤の残留変形の状況とも調和的である.時刻歴で見ると,前面地盤(Line-6)では約30秒より上昇傾向が顕著となり,約35秒で過剰間隙水圧が1.0に達している.一方,橋台背面(Line-2)の液状化層の過剰間隙水圧比も約35秒までの間







図-5 杭の曲げひずみ分布

に上昇しているが,最大でも0.35程度と上昇度合いは鈍い.盛土下の液状化層で水圧が上昇しにくい傾向は 既往の研究^{5),6}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応力状態の異方性が 発達しやすく,正のダイレイタンシーが卓越すること等が挙げられる.

3.3 橋桁とたて壁の衝突が橋台の地震時挙動に及ぼす影響

橋桁を模したストラットとたて壁は 30 秒付近から接触し生じ始め、その後の振動により衝突を繰り返し

ていることがわかる.これに呼応する形でたて壁の背面土圧も増減している.特に,ストラットとたて壁の衝 突の瞬間に著しいピークを示し,その大きさは,有効上載圧の1.8~3.9倍であった.たて壁がストラットに 拘束された状態で大きな背面土圧を受けている状況から,背面土の応力状態は主働というよりも,むしろ受 働状態に近いと考えられる.一方,フーチング下面位置での水平変位および回転角は,過剰間隙水圧の上昇 が顕著となり始めた約 30 秒から増加し始めたが,回転角が後転側(図-1側面図で反時計回り)に生じている 点が特徴である.このような橋台の変形モードは既往の地震被害事例においても見られ,たて壁の変位が上 部構造に拘束された状態で地盤からの厳しい偏荷重を受けた結果であると考えられる.以降,基礎に生じた 変位は回復することなく,ほぼそのまま残留した.

3. 4 杭の曲げひずみ

杭頭における曲げひずみの時刻歴を見ると,前面地盤が液状化した 35 秒付近より大きくドリフトしてい る.その前後で比較的大きなピークを示した時刻として,加振開始後 33.29 秒および 38.20 秒における杭の 曲げひずみ分布を図-5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同図右のような形状に急変し,分布形状の逆転と全深度にわたる曲げひずみ の増加が生じた.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.前述した地盤の残留変形や過剰間隙水圧の発生状況に鑑みると, 前面地盤の剛性が液状化に伴って著しく低下することで,地中の応力状態,杭の荷重バランスが急変した結 果であると考えられる.また,芯棒の曲げひずみの最大値は,後列杭で 600µε 程度,中列杭で 400µε 程度, 前列杭で 300µε 程度であった.これは,実杭に換算すると全ての杭が杭頭あるいは地中部で降伏を超えてい る状態である.今回の杭模型に使用した材料での応答としては弾性範囲内であるものの,降伏後の曲げ抵抗 特性が実際の杭の特性と同等であれば,基礎の残留変位はさらに大きくなっていたと推測される.

4. まとめ

本研究では、液状化の影響が耐震設計で考慮されていない既設橋台を対象として振動台実験を行った.今回の実験条件では、たて壁上部が橋桁に接触して前面側への変位が拘束された状態となることにより地盤から大きな偏荷重を受け、橋台が後転側に回転するモードで残留変位を生じ、地中部で全ての杭が降伏を超える状態に至るという地震時挙動であることが確認された.今後、橋台高さや橋台と橋桁の遊間量、地盤の液状化層厚等が橋台の地震時挙動に及ぼす影響についてもさらに検証していく予定である。

謝辞:本研究は,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ものであり,液状化対策運 営委員会の委員各位より貴重なご意見をいただいた.また,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」の一環として 実施した.ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 白戸真大,福井次郎:橋台の地震時保有水平耐力法における課題,レベル2 地震動による液状化研究小 委員会活動成果報告書, pp.427-434, 2003.6.
- 2) 谷本俊輔,田辺晶規:橋台の耐震設計に関する課題と取り組み,土木技術資料, Vol.57, No.12, pp.55-56, 2015.12.
- 3) (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, 1961.3.
- 4) (社) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 2012.3.
- 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.