

液状化地盤における橋台杭基礎に作用する土圧のモデル化と検証解析

(その1 模型地盤の液状化強度曲線の同定)

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○谷本 俊輔, 楊 勇, 河口 大輔, 桐山 孝晴, 大住 道生

1. はじめに 著者らはこれまで、液状化地盤における橋台の耐震性評価手法および耐震補強技術の開発を目的として、一連の模型実験を行ってきた¹⁾。その結果は、図-1に示すデータ例のように、橋台前面地盤における液状化の発生に伴って杭周辺地盤の抵抗(地盤反力)が作用(土圧)に転じ、杭に大きな断面力を発生させるというものであった。橋台基礎が周辺地盤の液状化によって受ける土圧の変化は、道路橋の照査モデルにおいて考慮されておらず、既設橋台の耐震性評価や補強効果の評価を行う上では、この影響を考慮することが必要であると考えられる。

そこで、本報および続報²⁾では、橋台基礎が液状化層から受ける土圧をモデル化するとともに、模型実験を対象として行った検証解析の結果について報告する。

2. 土圧のモデル化の流れ 橋台基礎が周辺地盤の液状化によって受ける土圧をモデル化する方法としては、①土圧(荷重)として表現する方法、②地盤変位と基礎・地盤間の相互作用を考慮して表現する方法が考えられるが、本研究では実用上の取扱いの容易さを重視し、①の方法について検討する。また、いずれの模型実験においても、液状化の進展に伴って土圧が増加する傾向が認められたことから、液状化抵抗率 F_L を指標としてその経時変化を評価し、杭に作用する土圧と対比した上で、両者の関係を定式化することとした。

杭に作用した土圧は、杭の曲げモーメントの深さ方向分布から菊池の方法³⁾により算出した。加振中における F_L の経時変化については、累積損傷度法によって求めた。このときに必要となる模型地盤の液状化強度曲線(繰返し応力比 CSR と液状化発生に要する繰返し回数 N_c の関係)については、加振実験データから同定することにより設定することとした。

3. 液状化強度曲線の同定方法 模型地盤の液状化強度曲線の同定には、脇中ら⁴⁾の方法を用いた。液状化強度曲線は次式で与えた。

$$CSR = a (N_c / N_{cr})^b \quad (1)$$

a , b はそれぞれ液状化強度比、液状化強度曲線の勾配であり、同定の対象とするパラメータである。 N_{cr} は基準繰返し回数であり、20回とする。水圧上昇曲線(過剰間隙水圧比 R_u と累積損傷度 D の関係)は $R_u = D$ (<1)として簡易に与えた。このとき、着目深さにおけるせん断応力比の半パルス列 L_j (せん断応力比 $L = \tau / \sigma'_{v0}$ の時刻歴のゼロクロスピーク列。 $j=1 \sim m$)から、次式により過剰間隙水圧比の推定値 $\overline{R}_u$ が求まる。

$$\overline{R}_u = (1/2N_{cr}) \sum_{j=1}^m (L_j / c_1 a)^{1/b}, \quad c_1 = (1 + 2K_0) / 3 \quad (2)$$

c_1 は拘束圧に関する補正係数、 K_0 は静止土圧係数(0.5とした)である。なお、模型地盤に作用するせん断応力比 L は、加速度計測値から風間ら⁵⁾の方法により求めた。そして、過剰間隙水圧比の推定誤差を次式の目的関数 S で代表させ、これを最小化するような a , b を最適解として求めた。

$$S = \frac{1}{t_e - t_s} \sum_{j=1}^m (t_{j+1} - t_j) (R_{u,j} - \overline{R}_{u,j})^2 \quad (3)$$

t_s , t_e は同定対象時刻の起点、終点、 t_j は j 番目の半パルス L_j の起点側のゼロクロス時刻である。

4. 液状化強度曲線の同定結果 逆解析の対象とした実験ケースを表-1、模型概要図の例を図-2に示す。いずれの実験も、液状化層は相対密度 $Dr=60\%$ の宇部珪砂6号(土粒子密度 $\rho_s=2.647\text{g/cm}^3$, 50%粒径 $D_{50}=0.29\text{mm}$, 細粒分

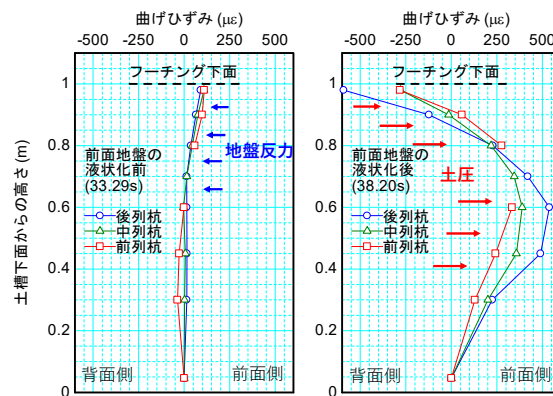


図-1 橋台前面地盤の液状化発生前後における杭の曲げひずみ分布

キーワード 液状化, 振動台実験, F_L , 過剰間隙水圧比

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所 CAESAR TEL. 029-879-6773

含有率 $FC = 0.7\%$ 、均等係数 $U_c = 2.08$ ）により作製され、入力地震動は道路橋示方書に規定されるレベル2地震動（タイプI）の動的解析用時刻歴波形2-I-I-3を相似則に基づいて補正した波形である。また、杭に作用する土圧は前面地盤の液状化に伴って変化するため、橋台前面地盤を対象として同定を行った。

表-1 実験ケース（※ 寸法は模型スケール、単位：mm）

実験シリーズ	重力加速度	縮尺スケール	盛土層厚(※)	液状化層厚(※)	地震動振幅	加振ケース数	同定対象ケース数	同定結果	
								a	b
1	60G	1/60	83.3	83.3	100%	1	1	0.33	0.56
			83.3	300	100%	5	5		
			200	83.3	100%	1	1		
			200	166.7	100%	5	5		
2	1G	1/10	800	900	100%	5	2	1.26	0.38
					200%	1	0		
3	1G	1/4.5	1780	2200	100%	1	1	1.17(G.L.-1m以浅)	0.15(G.L.-1m以浅)
								3.13(G.L.-1m以深)	0.59(G.L.-1m以深)
					150%	1	1	1.87(G.L.-1m以浅)	0.60(G.L.-1m以浅)
								5.74(G.L.-1m以深)	0.68(G.L.-1m以深)

多数の a 、 b パラメータセットに対する目的関数 S の算出例を図-3示す。 S の分布に局所的な凹凸はなく、 a 、 b の最適解が安定的に得られていることが分かる。図-4に例示するように、最適な a 、 b を用いると、過剰間隙水圧比の推定値は計測値を概ね近似し、 F_L は水圧比が概ね 1.0 に達した時刻で 1 となっている。

前述の表-1には、同定したパラメータ a 、 b を示している。なお、実験に使用した砂の繰返し非排水三軸試験から得られた液状化強度曲線を式(1)でフィッティングした結果は $a=0.133$ 、 $b=0.131$ であり、模型実験から同定された液状化強度が非常に大きいことが分かる。これは、模型地盤の飽和が完全でなかったことや、加振中における水圧消散の影響によるものと考えられる。特に、1G 場の振動台実験では大気圧下で模型地盤を飽和させたため、大きな液状化強度が同定されたものと考えられる。

実地盤への適用を想定した土圧の定式化にあたっては、模型実験に特有な液状化特性の影響を除去するため、上記により同定された液状化強度曲線を以降の分析に用いることとした。

5. まとめ 本報では、液状化地盤における橋台基礎に作用する土圧を多数の実験結果から回帰的にモデル化する上での基礎的検討として、模型地盤の液状化強度曲線の同定を行った。続報²⁾では、これを用いた土圧の定式化と検証解析について述べる。

参考文献 1) 土木研究所、東京工業大学、鋼管杭・鋼矢板技術協会：橋梁基礎の液状化に対する耐震性能評価手法と耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書、共同研究報告書第506号、2019.3。2) 楊、河口ら：液状化地盤における橋台杭基礎に作用する土圧のモデル化と検証解析（その2、その3）、第74回土木学会年次学術講演会、2019.9.（投稿中）3) 菊池：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。4) 脇中ら：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。5) 風間ら：遠心振動実験から求めた砂地盤の応力ひずみ関係、土木学会論文集、No.535/III-34、pp.73-82、1996.3。

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、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たものである。ここに記して謝意を表する。

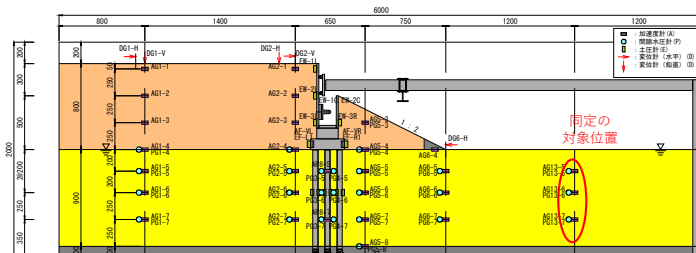
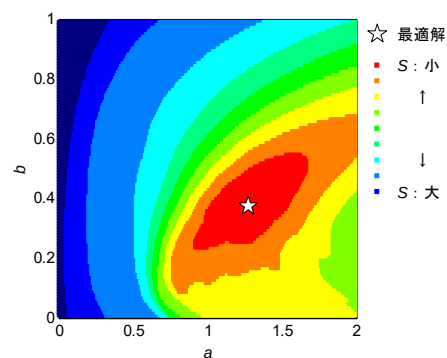
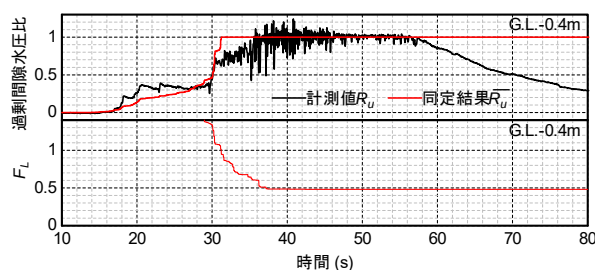


図-2 模型概要図の例（実験シリーズ2）

図-3 多数の a 、 b パラメータセットに対する目的関数 S の算出例（実験シリーズ2、100%加振）図-4 過剰間隙水圧比および F_L の時刻歴の例（実験シリーズ2、100%加振）