

◆ 特集：動的実験施設を活用した研究開発 ◆

液状化地盤上の橋梁構造物の振動台実験

小野和行* 鈴木貴喜** 田村敬一*** 岡村未対**** 近藤益央***** 谷本俊輔*****

1. はじめに

地震により液状化や流動化などの地盤の不安定化が生じた場合の橋梁基礎の挙動については未解明な点が多く、そのメカニズム解明には振動台を用いた実験的研究が数多く行われている。

本報文では、独立行政法人土木研究所において実施した、液状化地盤上の橋梁構造物の振動台実験(本誌グラビア, 写真-2 参照)の実験概要および結果の一部を報告する。

2. 地盤変形を考慮した橋脚基礎の振動台実験

2.1 実験の背景と目的

過去の多くの震災事例から液状化地盤における杭基礎の被害が報告されているが、近年その中で、杭頭部以外の杭中間部・深部においても被害が確認されている。また、この被害が、上部構造物の慣性力以外に地盤の液状化に伴う地盤変形によるものであることが種々の研究(例えば,1)で報告されている。しかし、液状化時の地盤変形が杭基礎に及ぼす影響については未解明な点が多く、定量的に評価されるまでには至っていない。

本研究では液状化した地盤と杭基礎の相互作用に着目した振動台実験を行い、液状化地盤において杭基礎に作用する土圧を定量的に評価することを目的とする。

2.2 実験方法

2.2.1 実験施設

実験は、独立行政法人土木研究所所有の二次元大型振動台(テーブル寸法 長さ 8m × 幅 6m)を用い、一方向加振により行った。

2.2.2 実験方法と実験条件

実験では、地盤のせん断変形に対する拘束を低減するためにアルミ製せん断土槽(内寸長さ 1.5m × 幅 0.75m × 高さ 1.0m)を用いた。土槽内には地盤変形により発生する土圧を精度よく計測するために、ロードセルを内蔵した杭基礎模型を設置

し、振動台上に剛結した反力フレームに杭頭を固定、杭先端は土槽底面に固定した。この杭は、上下端を固定された角鋼(□32)と、外径φ76.3mmで、高さ 100, 200mm の円筒パイプを 6 段重ねたものから成り、各パイプはロードセルを介して角鋼に固定した。また、加速度計、間隙水圧計等を図-1 に示す位置に設置した。

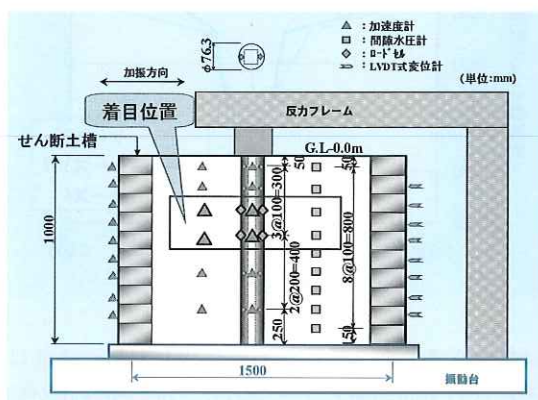


図-1 計測器配置

模型地盤は次のように作成した。すなわち豊浦砂をせん断土槽に投入し、土槽底面に配置したパイプから水を供給することによってボイリングさせ、所定の相対密度 70%の飽和地盤を作成した。加振波形は正弦波とし、入力加速度および周波数を変えて、表-1 に示す 4 ケースの実験を行った。

表-1 実験ケース

ケース	入力加速度 (gal)	入力周波数 (Hz)	応答速度* (cm/s)	応答変位* (cm)
S-1	100	3.0	5.3	0.3
S-2	300	8.0	6.1	0.1
S-3	150	2.0	11.9	1.0
S-4	200	2.0	15.9	1.3

注) *は振動台応答を示す。

2.3 実験結果と考察

図-2 にケース S-2,3 について、G.L.-0.25m または -0.35m の位置で計測した杭加速度-土圧時刻歴の一部を示す。S-2 は、応答速度および変位が小さいケースで、S-3 は大きなケースである。

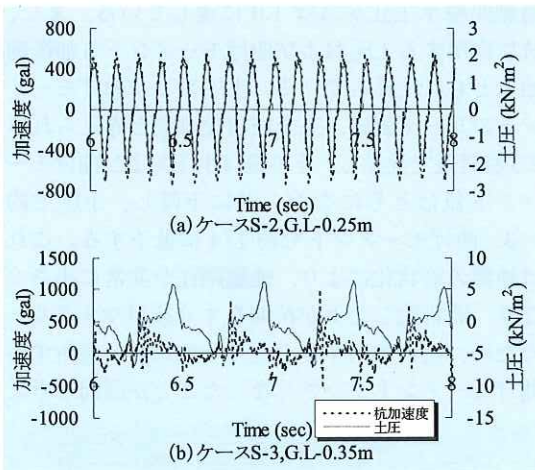


図-2 杭加速度-土圧時刻歴

いずれのケースでも加振後約2秒程度で地盤全体が液状化した。

図-2において、S-2では加速度と土圧の波形の位相がよく一致しており、両者の相関性が確認できる。一方、S-3については、土圧が比較的小さな部分では、加速度と土圧との相関性がある程度確認できるが、大きな土圧が生じている時刻、すなわち土圧にサイクリックモビリティの影響によるスパイク状の波形が生じた部分では、加速度との相関性はほとんどみられない。

次に、図-3にS-2, 3の加速度-土圧履歴を示

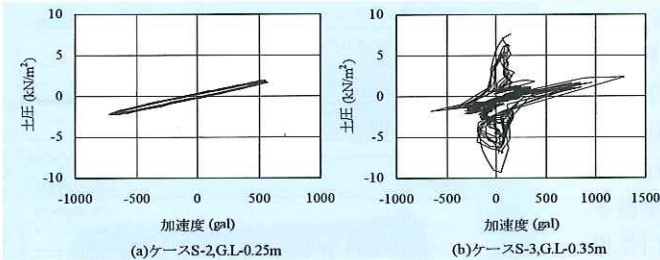


図-3 加速度-土圧履歴

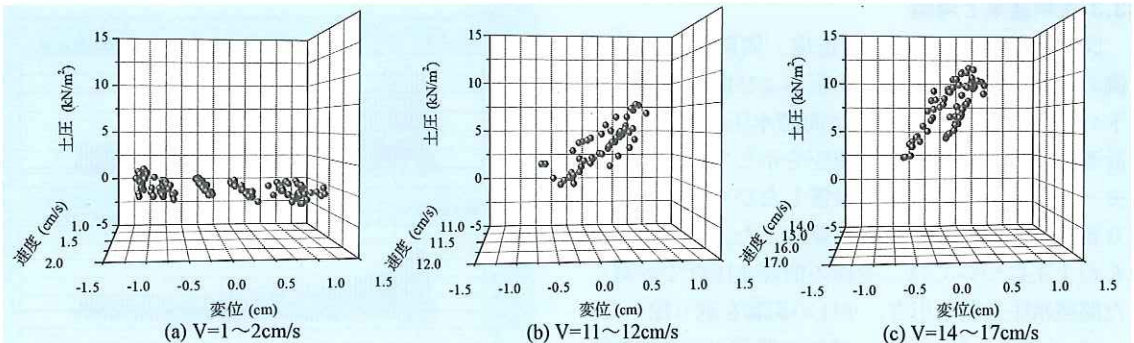


図-4 速度変位-土圧関係 (全ケース、G.L.-0.35m)

す。S-2においては、全時刻にわたり両者が直線的な履歴を示し、加速度に依存した土圧が杭基礎に作用していることが確認できる。また、S-3においても、両者が直線的な履歴を示す時刻も確認できる。これより、加振レベルが異なるケースでも比較的小さな土圧は、加速度に依存することが分かる。

一方、前述のように杭基礎に作用する大きな土圧は、加速度との相関性が確認できないことから、以下のとおり、速度および変位に着目した。

図-4には、全ケースについて、地盤が液状化した後のG.L.-0.35mの位置での相対速度・変位-土圧関係を示す(速度および土圧は正側のみ示している)。ここで、相対速度は、地盤加速度と杭加速度の差を1回積分、相対変位は2回積分して求めた杭と地盤の相対速度および変位である。

速度をパラメータとしたこの図から、変位と土圧関係に顕著な違いが確認できる。すなわち、速度が小さい(a)の場合は、変位が大きくなっても、杭基礎に作用する土圧は小さい。一方、(b)~(c)と速度が大きくなるに伴い、杭基礎に作用する土圧は、僅かな変位で発生し大きな値を示すことが確認できる。これは相対速度が大きい場合、杭周辺部の液状化した地盤では、一時的に有効拘束圧が0となっても、僅かな変位の発生で地盤の剛性が回復し、サイクリックモビリティの影響による大きな土圧が杭基礎に作用したものと考えられる。一方、相対速度が小さい場合には局所的な間隙水の移動が生じることで、変位の増加に伴う地盤の剛性回復はほとんどなく、杭基礎に作用する土圧は小さくなると考えられる。

以上のことから、杭基礎に作用する土圧は、地盤との相対速度に応じて、加速度に依存する場合、また、相対変位に依存する場合があることが確認できた。

3. 橋台を対象とした模型振動実験

3.1 実験の背景と目的

液状化地盤上の橋台には、背面土による主動土圧および受働土圧以外に、地盤の液状化に伴う背面土の沈み込みにより土圧が作用することが考えられる。これらの土圧に関しては未解明な点が多く残されており、橋台を合理的に耐震設計するためには橋台の地震時挙動を把握し、橋台および杭基礎に作用する土圧を的確に評価する必要がある。

本研究では、地盤が液状化することにより橋台基礎に作用する土圧（流動力）に着目した振動台実験を行い、土圧の時間的変化や深度分布について考察することを目的とする。

3.2 実験方法

実験は、独立行政法人土木研究所の中型振動台（3×2m、水平1方向加振）上に、長さ1.8m、幅0.6m、高さ1.15mの実験土槽を設置して行った。

計測器の配置状況を図-5に示す。橋台模型は、コンクリートの単位体積重量と合うように鋼板で作成した。杭基礎は曲げ変形が卓越するような杭径・剛性（アクリル材）とし、2列×5本の10本配列とした。加振波形は橋台模型と地盤が共振しない振動数（5Hz）の正弦波とし、地盤が確実に液状化するために必要な加速度振幅（目標 400gal）・加振時間（15秒）を設定した。加振は橋軸方向（土槽長手方向）とした。地盤材料には豊浦標準砂を使用し、液状化地盤（飽和地盤）、背後地盤（乾燥砂）をそれぞれ作成した²⁾。

3.3 実験結果と考察

図-6に振動台の入力加速度、間隙水圧、背面側の後列杭で計測された土圧および曲げモーメントの一例を示す。図中には間隙水圧と合わせて、計測位置における有効上載圧を示している。曲げモーメントは、杭基礎に設置したひずみゲージより得られる曲げひずみより算出した。また、計測した土圧については、近傍の間隙水圧計で計測した間隙水圧を差し引き、水圧の影響を取り除いた。

図-6に示したように、地盤の間隙水圧は加振開始とともに上昇し、目標加速度に達した時には、

過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達している。また、杭に作用する土圧および曲げモーメントも加振開始とともに上昇している。土圧および曲げモーメントのピーク値は、完全液状化直前と考えられる2.5秒付近で発生し、その後は土圧および曲げモーメント値はともになだらかに下降し、土圧で約1/3、曲げモーメントで約1/4に低下する。これは地盤の液状化により、地盤剛性が非常に小さくなり、液状化した土が杭間をすり抜けやすくなったため、杭に作用する土圧やそれに伴い発生する曲げモーメントが小さくなったことが原因と考え

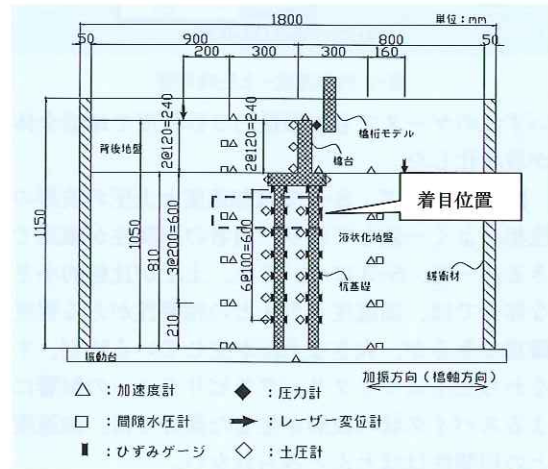


図-5 模型概要および計測器の配置

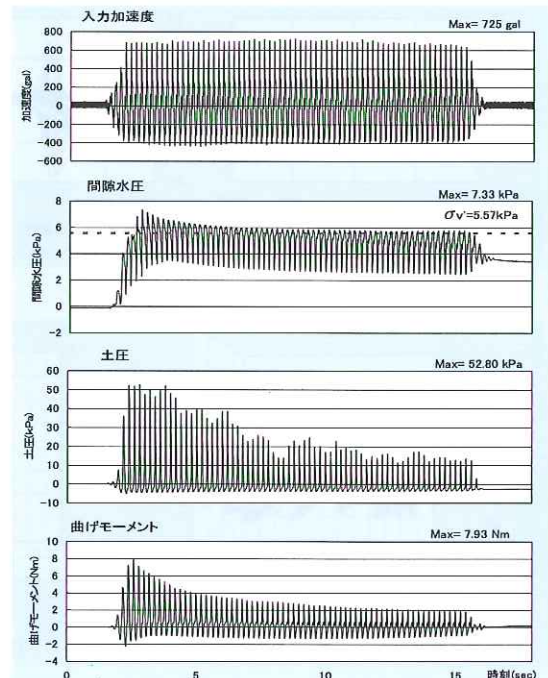
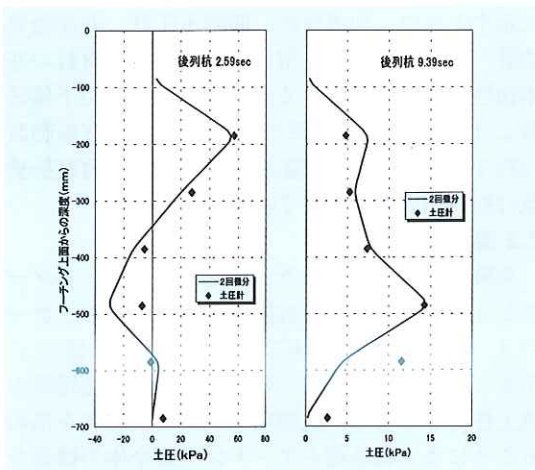


図-6 杭に作用する土圧および曲げモーメント

られる。

次に、図-7 に杭に作用する土圧の深度分布を示す。杭に作用する土圧の深度分布は、杭の曲げモーメント分布 (深度 185mm と深度 485mm の位置の曲げモーメントが最大となる時刻における深度分布) をスプライン曲線でフィッティングして、その値を 2 回微分することにより算出した³⁾。また、土圧計により直接計測した土圧も併記した。図-7 より、土圧計による計測値と曲げモーメントから算出した土圧分布形状はよく一致している。したがって、柔な模型杭に作用する土圧は、曲げモーメント分布を 2 回微分することにより、精度良く算出することが可能である。



(a) 2.59 秒

(b) 9.39 秒

図-7 土圧の深度分布

深度 185mm の最大土圧は、完全に液状化したと考えられる 2.59 秒に発生し、深度 485mm の位置で最大土圧は、9.39 秒に発生している。この最大土圧発生の時間的なずれは、地盤の液状化に伴い背面土が沈下し、徐々に杭深部へとその影響が伝わっていることによると考えられる。これは、

橋台基礎に作用する流動力に特有のメカニズムと考えられ、道路橋示方書で規定されている橋脚基礎に作用する流動力のメカニズムとは異なると思われる。

4. おわりに

本報文では、液状化地盤上の橋梁構造物の振動台実験の実験概要および結果の一部を報告した。液状化した地盤と構造物が相互に影響し合うメカニズムは複雑であり、今後も実験を中心とした研究が重要であると思われる。また、それらの実験結果を適切に評価し、耐震設計に反映させていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 堀越研一、大津宏康：兵庫県南部地震により被害を受けた PC 杭の調査，第 31 回地盤工学研究発表会講演論文集，pp.1227-1228，1996 年 7 月
- 2) 鈴木貴喜、田村敬一、小林寛、谷本俊輔、小野和行：液状化地盤における橋台の模型振動実験，第 57 回年次学術講演会講演概要集 第 3 部，pp.1045-1046，2002 年 9 月
- 3) 廣田雅彦、菊地喜昭：側方流動地盤における杭の間隔と作用土圧の関係，第 55 回年次学術講演会講演概要集 第 3 部，pp.22-23，2000 年 9 月

小野和行*



独立行政法人土木研究所
耐震研究グループ振動
チーム交流研究員
Kazuyuki ONO

鈴木貴喜**



同 振動チーム交流研究
員
Takayoshi SUZUKI

田村敬一***



同 振動チーム首席研究
員，工博
Dr.Keiichi TAMURA

岡村未対****



同 振動チーム主任研究
員，工博
Dr.Mitsu OKAMURA

近藤益央*****



同 振動チーム主任研究
員
Masuo KONDOH

谷本俊輔*****



同 振動チーム
Shunsuke TANIMOTO