

液状化過程における杭の動的挙動

正会員 ○時松 孝次 同 吉見 吉昭
同 上紺屋好行

【はじめに】

液状化過程に於ける杭構造物地盤系の相互作用についての実験研究は、現在まで数多く行われてきた。しかし、それらの多くは正弦波による定常加振実験であり、液状化過程に於ける複雑な杭構造物地盤系の相互作用の影響を見落としている可能性がある。そこで、本研究では比較的大型の杭構造物地盤系模型に対する振動台実験を不規則波加振でも行うことにより、液状化過程に於ける杭構造物地盤系の相互作用を明らかにすることを目的としている。

【実験の概要】

杭構造物地盤系模型は図-1に示す振動台上の大型せん断土槽(4m×2m×2m)内に作成した。せん断土槽は高さ8cmの角パイプ枠を25段積み重ねたもので、地盤のせん断変形を拘束しないようになっている。杭構造物模型は、直径4.86cm・肉厚3.2mm・長さ2mの鋼管4本を、正方形に組んだフランジの四隅に溶接したもので、先端は振動台上にボルトで固定、頭部には270kgのおもりをボルトで固定してある。杭構造物系の空中及び水中での固有周期はどちらもほぼ2.7Hzであった。模型と実物の相似則と相似比を表-1に示す。

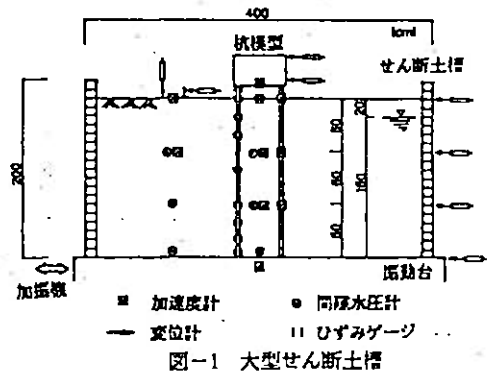


図-1 大型せん断土槽

砂地盤はせん断土槽にあらかじめ杭及び水を入れておき、そこに砂(珪砂6号)を投入して作成した。砂の物理定数を表-2に示す。砂地盤作製後、約15時間放置した。その後、杭頭部におもりを取り付け、コーン貫入試験・せん断波速度の測定・杭の水平載荷試験を行い、最終的に水平振動による液状化実験を行った。水平加振は、5Hzの正弦波約20波および不規則波により行った。不規則波には、相似則にあわせて時間軸を短縮したタフト波(E-W)を用いた。加振中、加速度・変位・ひずみ・間隙水圧を測定した。各種センサーの設置状況を図-1に示す。

表-1 相似則と相似比

量	相似則	相似比
長さ	1/10	1/10
密度	ρ/ρ_0	1
時間	1/10	1/10
加速度	$(1/10^2)/(1/10^2)$	1
ひずみ	ϵ/ϵ_0	1
せん断剛性	$(\rho/\rho_0) \cdot (1/10^2)$	1/100
内部摩擦角	ϕ/ϕ_0	1

表-2

珪砂6号の物理定数

D_{10} (mm)	0.17
D_{50} (mm)	0.28
U_c	1.71
G_s	2.651
ρ_{sat} (g/cm^3)	1.619
ρ_{sol} (g/cm^3)	1.296

【実験結果】

図-2に、地盤の相対密度が約50%の場合について、5Hzの正弦波及び不規則波加振の液状化実験における主要測定値の時刻歴を比較して示す。不規則波の加振では加振開始後約4秒ほどで全層がほぼ液状化し、それにつれて地表面加速度の応答が小さくなり、周期が長くなっていることが分かる。杭頭加速度も同様の傾向が認められるが、杭頭曲げモーメントは液状化後かなり大きくなっている。一方、5Hz加振の実験では、地表面加速度と杭頭加速度については同様の現象が観察されるが、液状化後の杭頭曲げモーメントは不規則波の場合に比べ1オーダー程度小さくなっている。

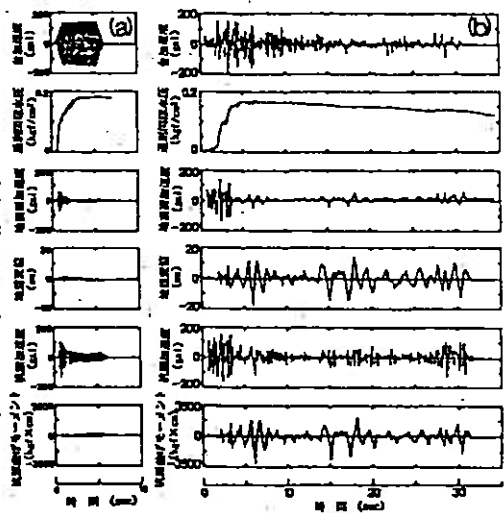


図-2 時刻歴 (a)正弦波加振 (b)不規則波加振

以上の現象の差異を明らかにするために、図-3、4に、不規則波入力の場合の液状化実験について、入力加速度に対する杭頭加速度及び地表面加速度のフーリエ・スペクトル比の経時変化を示す。加振初期(0~2s)から液状化前後(4~8s)にかけて、スペクトル比が最大値を示す振動数は約7Hzから約1Hzまで下がっている。せん断波速度から推定した地盤の微小ひずみレベルの固有振動数は約10Hzであるから、液状化により地盤の固有振動数が1/10程度に低下したことになる。さらに、このような液状化による地盤の固有振動数の変化にともなって、液状化後の地盤および杭の2Hz以上のスペクトル比がかなり小さくなっていることが分かる。このことは、5Hz正弦波入力の実験で液状化前後から杭、地盤共に応答がほとんどなくなってしまったことに対応すると考えられる。なお、杭の卓越振動数は、地盤が液状化するしないにかかわらず地盤の固有振動数とよく対応している。したがって、完全液状化後の杭の卓越振動数(約1Hz)は、水中加振時の杭の固有振動数(約2.7Hz)よりかなり低くなっている。これらは、地盤の液状化の程度に関係なく、杭の応答に与える地盤の影響が大きい場合があることを示している。

不規則波入力の実験で、液状化前(1.58s)、完全液状化直後(6.12s)に杭に生じた曲げモーメント分布を、それぞれ図-5、6に示す。図には、このとき杭頭に生じた慣性力を、地盤のない状態及び地盤のある状態で、杭頭に加えた静的水平荷試験時に測定した曲げモーメント分布も示す。液状化前では加振実験の曲げモーメントは地盤のある状態での水平荷試験の曲げモーメントに比較的良く一致しているが、完全液状化後では加振実験の曲げモーメントは地盤がない場合の水平荷試験の曲げモーメントの約3倍の大きさになっている。このことは、液状化した地盤は水平力を分担できなくなるばかりでなく、杭を強制変形させて杭に大きな応力を生じさせる可能性があることを示唆している。実際、図-2の時刻歴をみると杭頭曲げモーメントは地盤変形の影響を強く受けていることが分かる。一方、液状化後に地盤応答変形量が小さいと考えられる正弦波5Hzの加振実験では、杭に生じる曲げモーメントは慣性力を地盤のない状態で静的に加えたときに生ずる曲げモーメントとほぼ同じであった。以上の結果は、地盤の固有振動数が間隙水圧の上昇と共に変化する液状化過程における構造物地盤系の応答特性を把握するためには、一定周波数が卓越した波を入力した実験を行うだけでは不十分であること、また、杭頭に慣性力を加える従来の静的設計法では、杭に発生する曲げモーメントを過小評価する可能性があることを示唆している。

【むすび】

定量的結論を導くには行った実験数が少ないが、砂地盤が液状化する過程に於て、杭は地盤の影響を受け、特に完全液状化後も杭構造物地盤系の相互作用によって従来考えられていたよりも大きな応力が杭に生じる場合があることが示された。

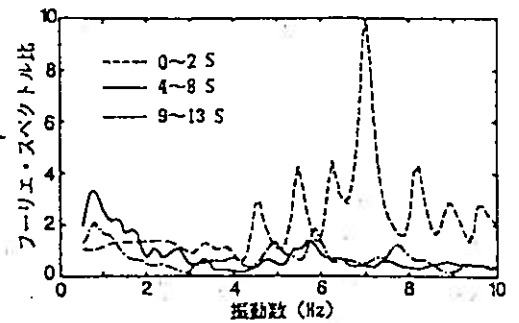


図-3 杭頭加速度スペクトル比

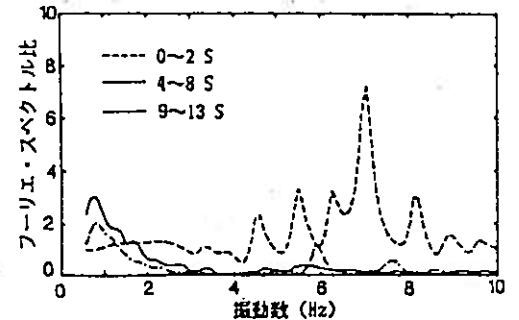


図-4 地表面加速度スペクトル比

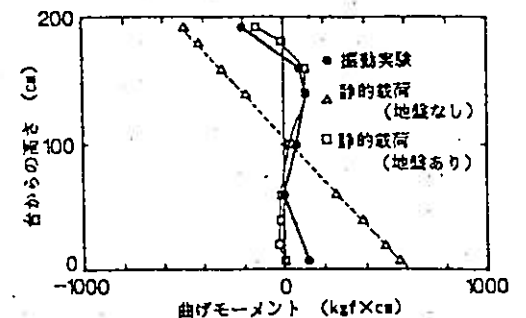


図-5 曲げモーメント分布(液状化前)

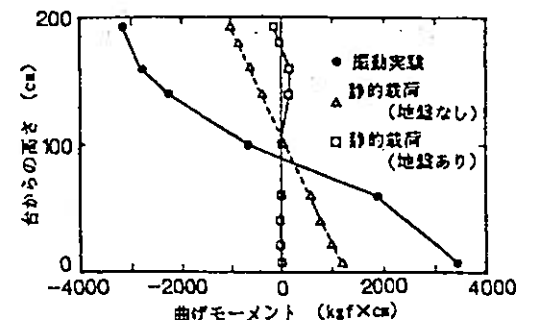


図-6 曲げモーメント分布(液状化後)

(* 東京工業大学, ** (株)武智工務所)