

# (75) 液状化時の土圧に関する室内実験

豊橋技術科学大学  
豊橋技術科学大学

河邑 真  
栗林 栄一

## 1. まえがき

液状化の予測手法については、室内動的せん断試験や地盤の地震応答解析を用いた種々の判定法が提案され、液状化の予測精度の向上がはかられている。これに対して、液状化予測結果にもとづいて対策を行う場合に必要となる、液状化が構造物に与える影響については未だ不明な点も多い。本報告では、構造物に作用する土圧の問題をとりあげ、地盤と構造物の相互作用を考慮した室内実験を行い、液状化の程度と構造物に作用する土圧との関連についての検討を加える。ここでいう土圧とはとくにことわらない場合には有効土圧と間隙水圧の和すなわち全応力による値を意味している。

## 2. 実験の概要

図1に示すような、長さ120 cm、高さ70 cm、幅50 cmの砂箱にほぼ飽和した砂とモデル壁を設置して振動実験を行った。モデル壁は長さ20 cm、高さ60 cm、幅5 cm、肉厚12 mm、重さ95 kgfのステンール製の中実の箱を用いた。モデル壁にはそれぞれ3個の土圧計(外径65 cm、内径4.5 cm、容量500 gf/cm<sup>2</sup>)と間隙水圧計(外径3.5 cm、内径2.5 cm、容量500 gf/cm<sup>2</sup>)を図に示す位置に取りつけ、間隙水圧計の1個を砂箱中央の側面にとりつけた。モデル壁の変位は変位計により電氣的に計測した。  
振動台としては、図2に示す振動土槽を用いて水平方向の正弦振動を砂箱に与えた。この水平方向の変位振幅は1 cmに固定し、振動数を最大3 Hzまで増加させることにより加速度を上昇させた。

同種類の実験は土壇らによっても行われたが、従来の実験は振動砂箱の一側面に土圧計、間隙水圧計をとりつけたものであり、地盤との相互作用による壁体の運動は考慮されていない。本実験では砂地盤上にモデル壁を設置しており、土圧の増大にともないモデル壁の移動がおこりうるものとなっている。この点が本実験の一つの特徴である。

図3は実験に使用した川砂の粒径加積曲線を示したものである。液状化をおこしやすい均等な砂である。土粒子の比重は2.65であり、最大間隙比 $e_{max} = 0.86$ 、最小間隙比 $e_{min} = 0.61$ である。振動前の乾燥単位体積重量を $\gamma_s$  (gf/cm<sup>3</sup>)、振動前の相対密度 $D_r$  (%), 振動前砂層厚 $H$  (cm)、振動中の沈下量を $S$  (cm)とすると、実験は次の三条件で行った。

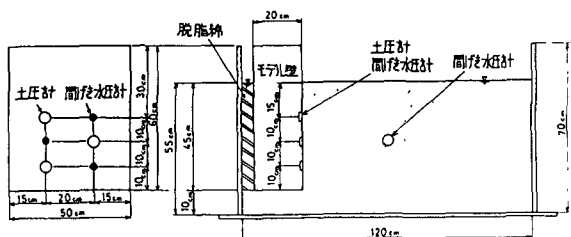


図1 モデル砂層

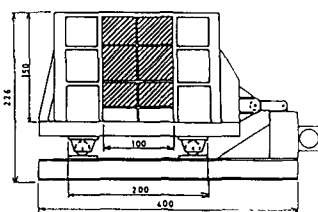


図2 振動土槽 (単位:cm)

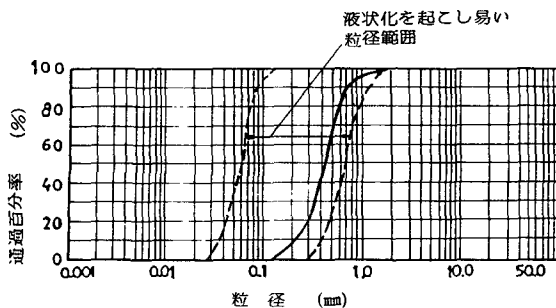


図3 試料の粒度分布

Test A :  $V_s = 1.46 \text{ g/cm}^3$ ,  $D_r = 17\%$ ,  $H = 58.5 \text{ cm}$ ,  $S = 5.2 \text{ cm}$

Test B :  $V_s = 1.57 \text{ g/cm}^3$ ,  $D_r = 64\%$ ,  $H = 46.4 \text{ cm}$ ,  $S = 1.4 \text{ cm}$

Test C :  $V_s = 1.46 \text{ g/cm}^3$ ,  $D_r = 17\%$ ,  $H = 51.5 \text{ cm}$ ,  $S = 8.1 \text{ cm}$

### 3. 液状化現象と間隙動水圧の発生

図4～図8はTest Aにおける計測結果を示したもので、振動かともなる土圧、間隙水圧の変動の特徴について考察を加える。図4は間隙水圧  $p_w$ 、土圧（全応力表示） $p$  および振動台加速度の経時変化の一例を示したものである。起振開始後34秒経過し、振動台加速度が130 galsに達した時点から急激に土圧ならびに間隙水圧が増大し、起振開始後約78秒の時点で大きな間隙動水圧、振動土圧が生じている。起振開始後の時間  $t = 34$  秒の時点では、砂層表面に水が湧出し、地表面に置いた錐りは沈降し、土中に埋めに発泡スチロールの小球は浮きあがるという液状化現象が観察された。また、この時点でモデル壁は約2cm水平方向に変位した。

図4に示した土圧、間隙水圧の最大値および最小値を平均値と振幅に分離して示したものが図5である。液状化が発生した  $t = 34$  秒で土圧、間隙水圧の平均値が急激に増加し、それともない両者の差が近くなる。すなわち、有効応力の著しい減少を表わしており、この点からも液状化が進行していることが推定される。 $t = 40$  秒以降は平均値の減少が生じ、一方では振幅の増加すなわち振動台加速度の増大にともなう振動土圧、間隙動水圧の増加がみられる。ここで注目すべき点は、平均間隙水圧の増大にともなう液状化が最初に生じ、浮遊した砂粒子が沈降し砂層の密度が増大した時点から間隙動水圧が増加するという現象である。

図6はモデル壁面に設置した3個の間隙水圧計と砂箱側面にとりつけた1個の水圧計の計測結果を示したものである。各深さにおける間隙水圧（1サイクル中の最大値）の変化を比較すると、 $t = 34$  秒における液状化現象は砂層の各深さでほぼ同時に生じている。また、モデル壁にとりつけたNo.2の水圧計と砂箱にとりつけたNo.4の水圧計の記録を比較すると、モデル壁の移動

の生じていない  $t = 30$  秒以前では両者の差は少ないが、モデル壁が移動した時点以降では両者の変動に相違がみられる。図7は図6と同様に土圧の最大値の変化を比較したものである。大きな間隙動水圧が生じた  $t = 90$  秒では液状化時より大きな土圧が生じている。すなわち、 $t = 90$  秒の土圧の方が危険側の値となり、液状化の程度により、設計方法についても配慮する必要がある。

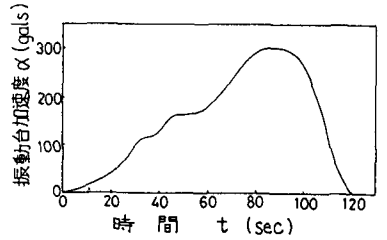
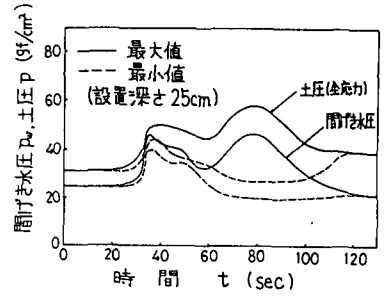


図4 間隙水圧、土圧および振動台加速度の変化 (Test A)

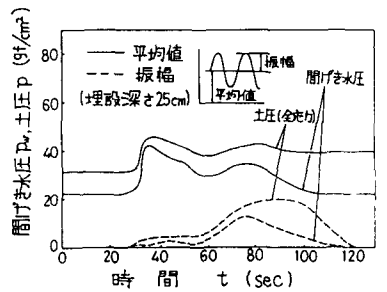


図5 間隙水圧、土圧の平均値と振幅の変化 (Test A)

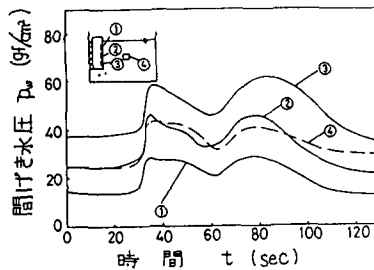


図6 間隙水圧の変化(最大値)

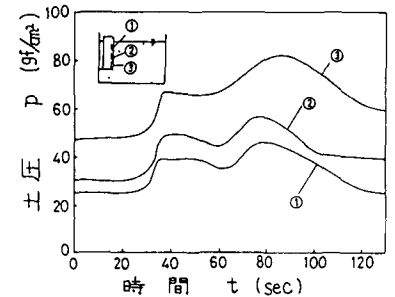


図7 土圧(全応力)の変化(最大値)

図8は時間 $t = 0, 34, 80$ 秒における間隙水圧および土圧(全応力表示)の分布を示したものである。図中の値は1サイクルにおける最大値に対応するものである。間隙水圧は初期状態では静水圧分布を示し、 $t = 34$ 秒では比重が1.6の液体圧に相当し、 $t = 80$ 秒では間隙水圧の増大により、 $t = 34$ 秒の液状化時よりも大きな値となっている。土圧分布は初期状態では静水圧分布と果っているが、液状化時には比重が飽和重量に対応する液体圧に近くなり、分布形も水圧分布に近くなっている。

4. 砂層の密度と液状化

砂層の密度が異なる Test B ( $D_r = 64\%$ ) と Test C ( $D_r = 17\%$ ) の二回の実験における計測結果を比較検討し、液状化の程度とモデル壁に作用する土圧との関連等について考察する。図9は Test B, Test C における計測結果の一例を示したものである。増加率が小さい、すなわち載荷速度の小さい Test B の方が液状化の程度が小さいと推測される。

図10は Test B, Test C における計測結果の一例を示したものである。相対密度の大きい Test B では平均土圧の変化は小さく、振動台加速度の増加にともなって土圧振幅が増大している。また、平均土圧(全応力表示)、平均間隙水圧の差、すなわち有効土圧の変化は小さい。これに対し、Test C では

Test A と同様に  $t = 38$  秒で急激な土圧の増加があり、液状化が発生している。図11は各深さにおける平均土圧、平均間隙水圧の経時変化を示したものである。Test C では全層にわたって同時に液状化が発生しているが、Test B における変化は小さい。

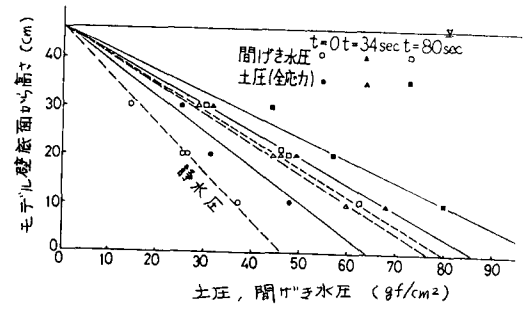


図8 土圧, 間隙水圧の分布 (Test A, 最大値)

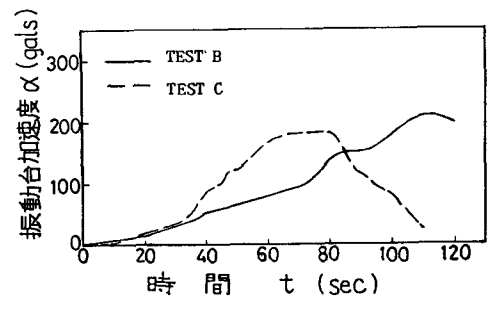


図9 振動台加速度の変化

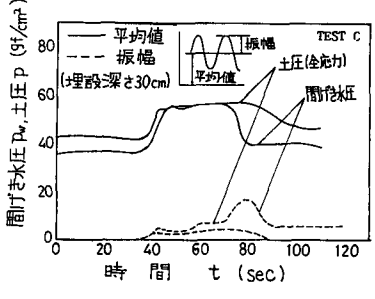
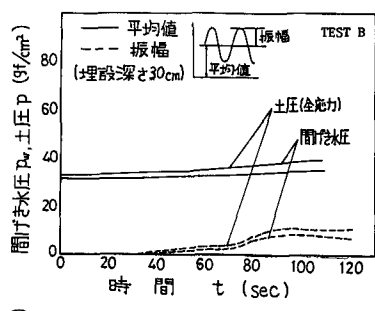


図10, 間隙水圧, 土圧の平均値と振幅の変化

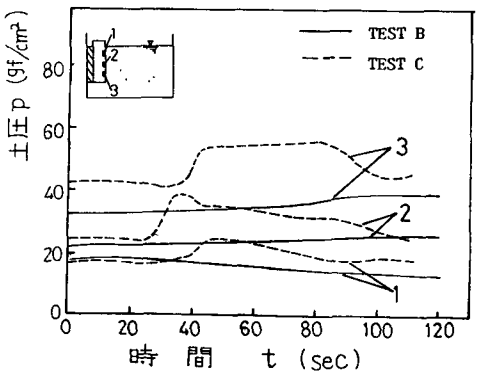
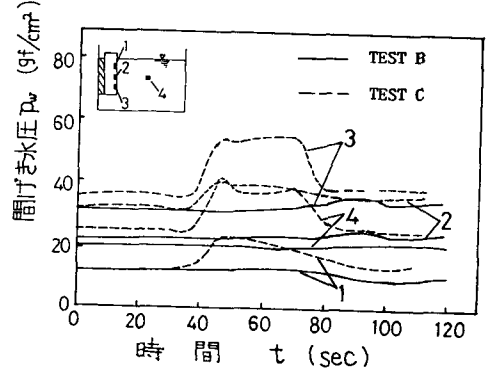


図11 土圧, 間隙水圧の変化 (平均値)

5. 液状化時にモデル壁に作用する土圧

図12は Test B, Test Cにおけるモデル壁の変位量を示したものであり、壁面に作用する土圧の増加にもよって最大約4 cmの移動を示している。図13は図8と同様にモデル壁に作用する土圧の分布を示したものである。図中に示す分布形を仮定して、壁体に作用する土圧の大きさについて比較検討する。図14は土圧の大きさを示す係数Kの変化を概略的に示したものである。この係数Kは静水圧に対する比を表すものとして次式で与えられる。

$$K = p / (\gamma_w \cdot z)$$

ここに、 $p$ は深さ $z$ における土圧の最大値( $gf/cm^2$ )、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量( $gf/cm^3$ )、 $z$ は地表面からの深さを意味している。Test BにおけるKの初期値は1.1であり、振動台加速度が150 galsである $t=90$ 秒で $K=1.4$ となる。Test CではKの初期値は1.2であり、液状化が発生した $t=47$ 秒では $K=1.6$ となっている。この図から、砂層の密度により壁体に作用する土圧の変化に大きな相違があることがわかる。

液状化時に壁体に作用する土圧として、飽和重量に等しい液体圧(静的圧力+動的圧力)として考え、 $\gamma=2.8 gf/cm^3$ 、 $\lambda=0.2$ を想定して計算すると、 $K=2.2$ となる。実験値は計算値に対して小さめの値となっている。実験値が計算値に対して小さめの値となっているのは、液状化発生後土粒子の再分布により有効土圧の回復が生じるためと考えられる。

6. まとめ

- (1) 緩い砂層の場合には、数秒間で液状化が発生し、土粒子の再配列がおこり状態で動的圧力が生じる。
- (2) 密な砂層の場合には、液状化は生じず、振動台加速度の増加にもよって動的圧力が増加する。
- (3) 液状化時に壁体に作用する土圧は、砂の密度、作用震度に影響される。したがって、飽和重量に等しい比重をもつ液体の圧力(静的圧力+動的圧力)を考えると最大に評価することになる。

(参考文献)

- (1) Kawamura et al (1982): Consideration of Prediction of Liquefaction using Effective Stress, Proc. 6th JEEES.
- (2) 土田 肇 (1969): 振動により流動化しに砂層に壁体及び可動壁, 土と基礎, Vol. 16
- (3) Ichihara et al (1977): Earthquake Resistant design of quay walls Proc of 6th WCEE.

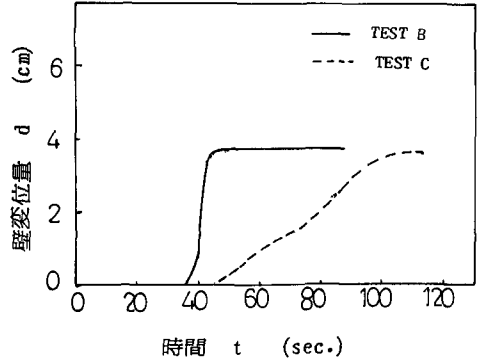


図12 モデル壁の変位量

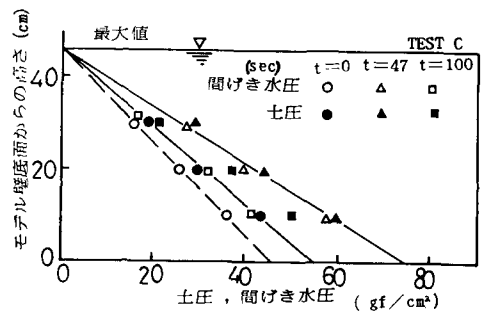
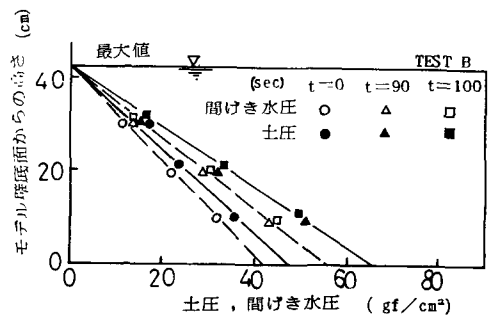


図13 土圧, 間隙水圧の分布

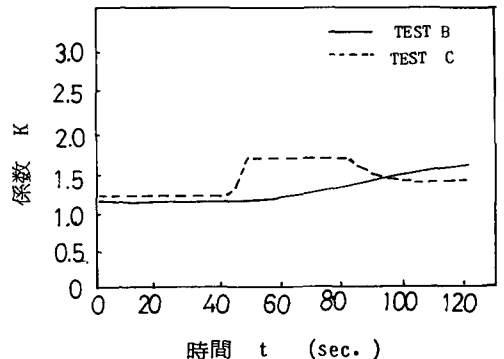


図14 Kの変化