

(101) 液状化対策としての地下水位低下工法における止水壁の安定性に関する模型振動実験

大成建設技術研究所 正員 村松 正重
 同 上 正員 小寺 秀則
 同 上 正員 酒見 卓也

1. はじめに 現在、地震時に液状化の発生する危険性のある地盤に立地する大型構造物、重要構造物は非常に多く、この中で未対策なものも少なくない。この既設構造物に対する液状化対策工は、必要性にせまられているにもかかわらず、未だに確立した工法が定まっていないのが現状である。筆者らは、その1つとして地下水位低下工法をとり上げ、止水壁材として可とう性の粘土壁を利用した場合の有効性と止水壁体の安定性および止水性について大型土槽を用いた模型振動実験により検討を行なったのでその結果を報告する。

2. 実験概要 写真-1、図-1に示すように大型土槽（H2m×L4m×B0.9m）の中央部に厚さ20cmの粘土壁を構築し、その両側に6号ケイ砂を用いて乾燥砂層と飽和砂層を相対密度 $D_r=40\%$ 程度に締固め作成し、それぞれ地下水位低下による改良地盤および未改良部地盤を想定したモデルとした。止水壁材は、表-2に示すように細粒分（シルト+粘土）を50%程度含んだものであり、強度は非常に小さいが透水係数が低くなるように工夫されている。また、砂層に用いた6号ケイ砂は、表-1に示すように粒度のそろったものであり液状化の発生しやすいものである。

土槽は、振動方向の側方拘束を減ずるために、側面に下端ヒンジの側板を設けてあり、上端は、ワイヤーで結ばれている。土槽前面は、強化ガラス張りになっており、加振後、地中変形の観察ができるようになっている。実験に使用した振動台は、大成建設技研の大型三軸振動台（4m×4m）である。

加振は、一軸加振で行ない本加振に先立ち、20gal程度の低レベルで定常加振を行ない共振曲線を求めた。本加振は、160gal程度5Hzの正弦波加振を行ない飽和砂層で液状化を発生させ、この時の止水壁および地盤の挙動を観測した。また、この後、日本海中部地震秋田港N S波による加振を行ない、再度液状化を発生させ

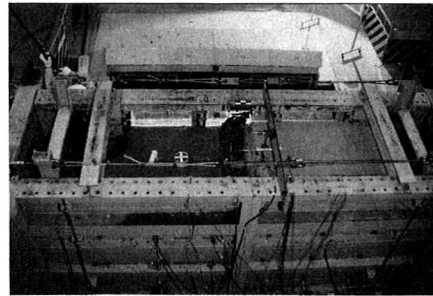


写真-1 模型土槽全景

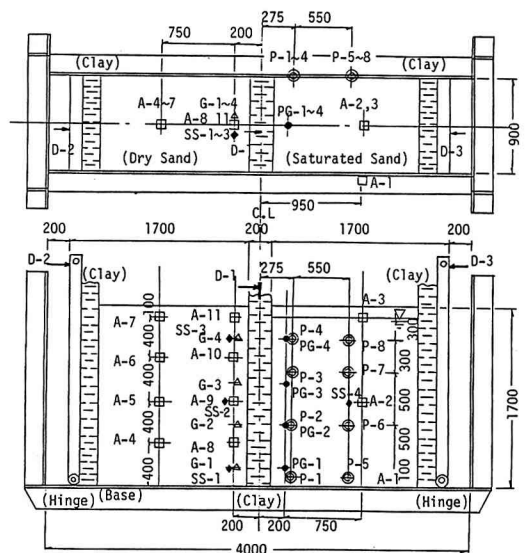


図-1 実験模型及び計測器配置

凡 例

記号	計測器	呼名	数量
□	加速度計	A-1~11	11
◎	壁面間隙水圧計	P-1~8	8
△	土圧計	G-1~4	4
○	間隙水圧計(土圧計用)	PG-1~4	4
→	変位計	D-1~3	3
◇	せん断ひずみ計	SS-1~4	4

ンダム波による影響を調べた。計測は、飽和砂層で液状化の発生状況を見るために加速度計、間げき水圧計を設置し、乾燥砂層では、応答性の影響を見るために加速度計、さらに止水壁の挙動を調べるために、止水壁近傍に、加速度計、土圧計、せん断ひずみ計、止水壁頭部に変位計を設置した。

3. 実験結果

3.1 飽和・乾燥砂層の応答性

本加振前に 20 gal の定常加振により 0.5~1.5 Hz までのステップ加振を実施して求めた砂層模型の共振曲線を図-2 に示す。飽和・乾燥砂層共に 8.0~8.5 Hz にピークがみられ、模型地盤の一次共振点とみられる。応答倍率は、飽和砂でやや大きく 2 倍程度であるが、これは、土槽と砂層との側面のフリクションにより減衰が大きいことなどの理由によるものと考えられる。

図-3 に正弦波加振による本加振実験の結果を示した。入力波は、5 Hz, SIN 波であり、定常状態に達するまで 3~4 秒要しているが、その後は、160 gal の定数加振となっている。飽和砂層では、間げき水圧計記録より完全液状化が生じた。飽和砂層における加速度応答は、一時的に過大な応答を示し、その後は急激に応答が低下する。この傾向は、地中 (GL-90 cm) の加速度応答にみられたが、時間で 3 秒程度の遅れがある。この過大な応答は、間げき水圧上昇に伴う地盤剛性の低下による共振振動数の低下によるものであると考えられるが、地表において間げき水圧が 30~40% 上昇した時点で過大応答が生じている。間げき水圧の上昇は、深くなるほど時間遅れを伴っており、したがって、過大応答の発生時期も時間遅れを伴っている。一方、乾燥砂層では入力加速度に対応した定常応答を示している。図-4 に飽和砂層地表における過大応答時の両砂層における振動モードを示した。飽和砂層の振動モードは、この後、非定常的に最大応答深さが、下方に移ってゆくが、乾燥砂層においては、常に表層で応答倍率 1.4 倍程度の一次モードで振動しており、液状化による影響が少ないことがわかる。図-4 には、止水壁の振動モードを示したが、大部分は乾燥砂層と同一の振動をしていることがわかる。

ただし、図中被線で示したように、飽和砂層の過大応答時に一時的に (片振巾) に大きな振動が生じている。

3.2 止水壁の変形

図-5 に、止水壁の変形と止水壁に作用する水圧と土圧の測定結果を示した。さらに、加振後の止水壁の変形をスケッチしたものを図-7 に示した。加振中の止水壁の変形を見るために止水壁

表-6 6号けい砂諸定数

最大間隙比 (e_{MAX})	1.15
最小間隙比 (e_{MIN})	0.71
真比重 (G_s)	2.65
均等係数 (U_c)	1.80
平均粒径 (D_{50})	0.24 mm
透水係数 (K)	$7.84 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

表-2 止水壁材料粘土の性質

細礫分	4.9 (%)	粘土分	23.2 (%)
砂分	46.3 (%)	比重	2.67
シルト分	25.6 (%)	透水係数	$3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

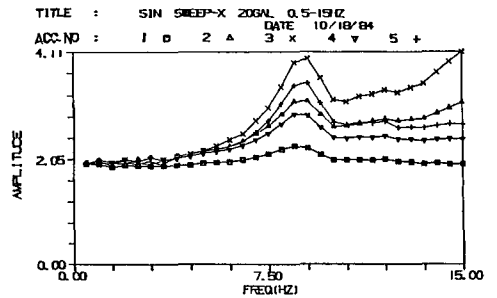


図-2 共振実験結果

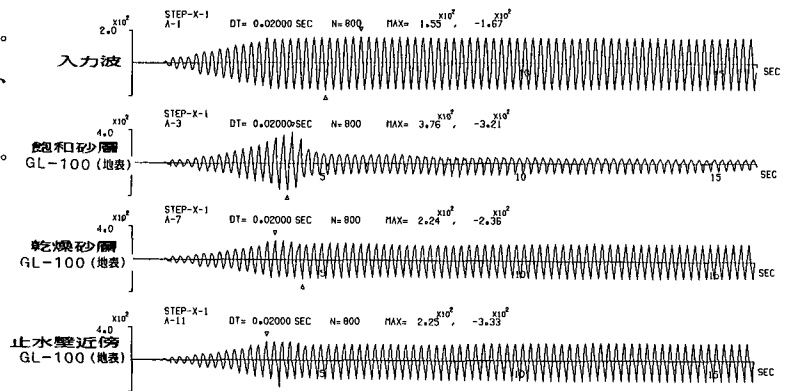


図-3 加速度時刻歴波形 (正弦波加振)

近傍の乾燥地盤中にせん断ひずみ計を設置した。せん断ひずみ計の記録より、止水壁の変形は、動ひずみ（振動ひずみ）と偏心ひずみ（残留ひずみ）の２種類あることがわかる。しかも、後者の偏心ひずみが卓越しており、止水壁の安全性の上で問題があることがわかる。この偏心ひずみは、加振の継続により一定値に収束する傾向にあることがわかる。この偏心ひずみは塑性的であり、加振終了後もそのまま残留するため、加振後のスケッチによって変形状況をとらえることができる。止水壁の残留変形は、図-7でわかるように全体に乾燥砂層側へおされた形に変形しており、全体に2~3 cm水平変位している。地表部では、逆に飽和砂層側へたおれ込んだ形になっている。一定値に収束した残留せん断ひずみは、 $(1 \sim 2) \times 10^{-3}$ と非常に大きなものである。動ひずみは、全般に小さいが、加速度の過大応答時と一致して一時的に 5×10^{-3} 程度のひずみも生じている。止水壁頭部は、5 mm 程度の振動変位が生じており偏心変位は、さほど大きくないが、加振後、12秒ほどして変位が急増し、止水壁が飽和砂層へ倒れ込んだためとみられる。模型改体掘削時に、止水壁断面を観察したが、断面の欠損や減少もなく、きわめて健全であった。図-6に止水壁に作用する土圧の深度方向分布を示した。砂層構築時の土圧（静止土圧）は、砂層の作成方法などに影響され三角形分布とはならず全深度にわたって一様な分布となっている。加振終了直後の土圧は、飽和砂層の液状化に伴ない初期土圧の2~3倍増加している。全体に台形分布になっているのは、底部で完全液状化まで至っていないためと思われる。

加振終了後、時間の経過と共に過剰間隙水圧が消散してゆくが、この過程で土圧も減少してゆく。最終的に安定した土圧を残留土圧としてプロットした。土圧の減少量は、過剰間隙水圧の発生量にほぼ一致している。残留土圧は、深度0.7 m程度まで三角形分布であり土圧係数でほぼ $K = 1.0$ である。0.7 m以深より土圧係数は減少し深度1.5 mでは、静水圧による土圧のみが作用している。

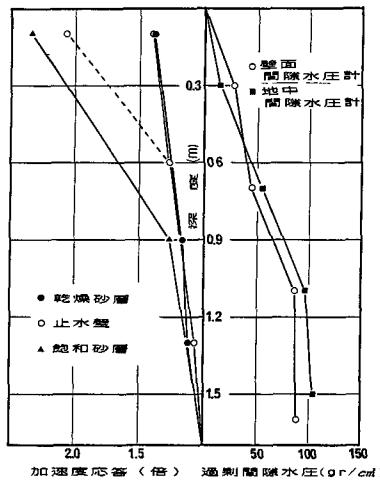


図-4 振動モード及び過剰間隙水圧

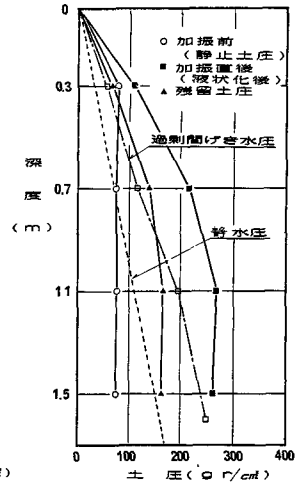


図-6 止水壁作用土圧

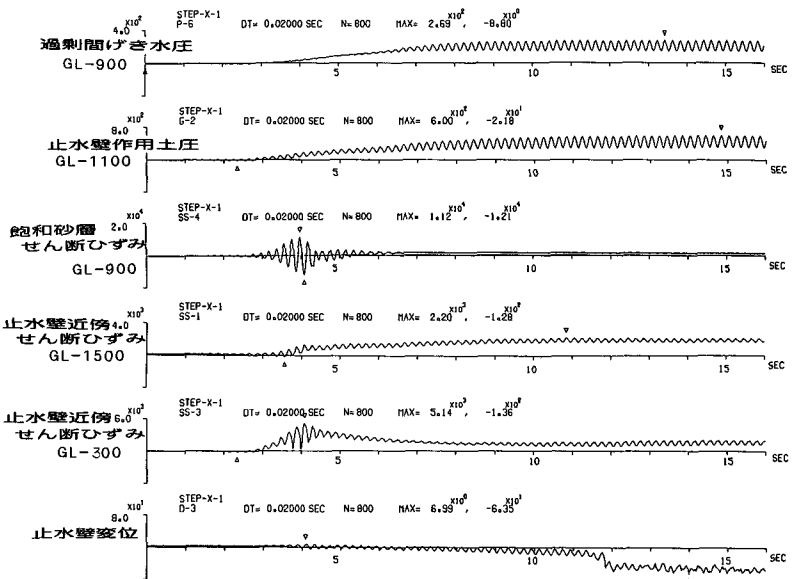


図-5 水壁の変形および作用荷重の時刻歴波形（正弦波加振）

3.3 地震波加振

地震波による加振は、正弦波加振後行なわれたため、模型地盤は、かなり縮った状態で行なわれた。日本海中部地震秋田港N S波を原縮尺で最大加速度303galで入力した。時刻歴波形を図-8に示した。飽和砂層の加速度応答波形は、特異な形を示し液化化時特有の波形とみることができる。乾燥砂層での応答は、入力波とほぼ対応し、最大入力時に最大応答を示しており応答倍率1.3倍程度となっている。次に、各加速度波形の6秒各(全波形を8等分)のフーリエスペクトルをランニングスペクトルとして図-9に示した。入力波は、3ステップ目から主要動部にあたり1Hzから0.5Hzへ卓越振動数の低下がみられる。飽和砂層の応答波は、4ステップ目で高振動数域で増幅がみられ、5ステップ以降で2Hz以上がカットされていることがわかる。乾燥砂層では全ステップを通して入力波と有意な差はない。

4. まとめ 本実験の結果、次のことが明らかになった。

- I) 止水壁は、地下水水位低下地盤側へ大きな残留変位を生ずる
- II) 止水壁には、振動土圧よりも大きな残留土圧が作用する。(K=1.0)
- III) 飽和砂層は、一時的に過大応答を生ずるなど非正常な応答を示すが、改良地盤には影響がない。
- IV) 粘性土壁による止水壁は、過大な地中変形にもよく追従し、断面の欠損や減少も全くなく止水性は十分に保持できることが確認できた。

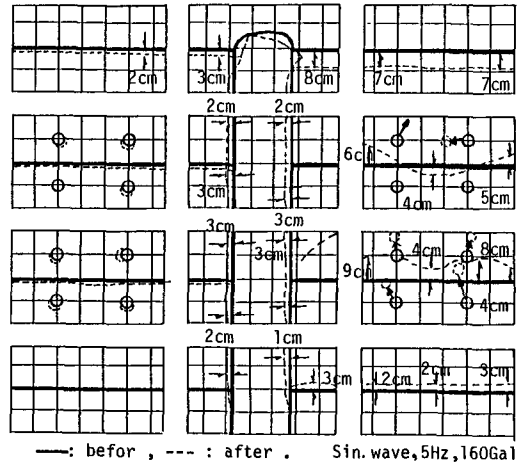


図-7 地中変形スケッチ

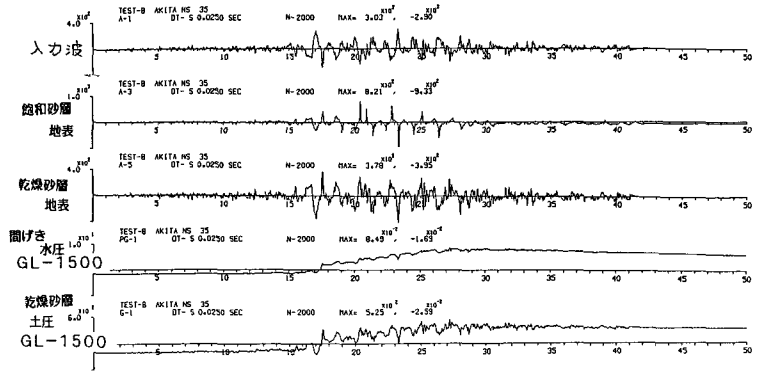


図-8 地震波加振時刻歴波形(日本海中部秋田港)

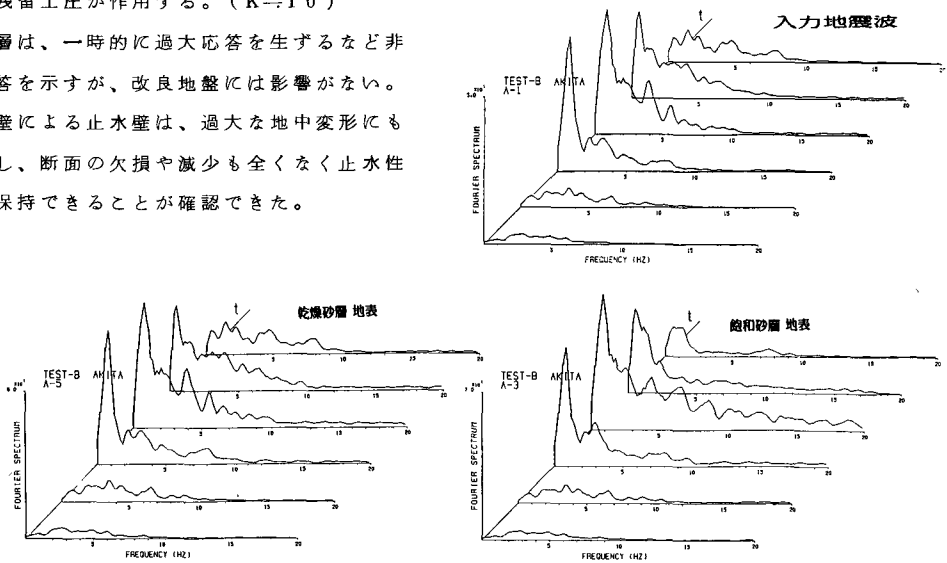


図-9 入力地震波および応答加速度のランニングスペクトル(6secステップ)