

水中盛土の振動試験

齋藤 二郎
李 相一

Vibration Test of Model Banking Constructed under Water

Jiro Saito
Soichi Lee

Abstract

For earthquake-resistant design of a banking constructed under water, it is necessary to study the liquefaction potential and the subsidence of the top surface of the banking.

This investigation was carried out to obtain some data for the purpose mentioned above, constructing a model banking under water and vibrating it horizontally by a shaking table.

In the experiments, the variables were the relative density of the banking and acceleration of the shaking table, and the acceleration and excess pore water pressure in the banking, and the subsidence of the top surface of the banking were measured.

The resume of the experimental results is as follows: Excess pore water pressure is produced in the lower part of the banking and reduced pore water pressure in the upper through shaking of the table, and water flows from the lower part to the upper causing disorder of the sand grains, that is, a liquefaction phenomenon.

The settlement of the top surface of the banking is classified into two groups. The ranges are below 1.0% in case of no liquefaction, and over 3.5% in case of liquefaction, both at 20 cycles. The borderline between liquefaction or no liquefaction is determined by the interrelation of the relative density of the model banking and the base acceleration.

概 要

水中に造成された盛土の地震時の安定の問題の中、震動による液状化現象発生の是非と盛土天端の沈下量の予測は、耐震設計に必要なプロセスである。本研究は水中に模型盛土を造り、振動台により水平振動を加え、上記の目的の資料を得る為に行なった。盛土の相対密度、台加速度をパラメーターにし、盛土内の加速度、間隙水圧ならびに天端の沈下量を計測した。試験結果の概要として、振動により盛土下部には過剰間隙水圧が発生し上部には減圧が生じ、この故に盛土下部から上部に向う水流が発生し、水流による砂粒子の攪乱が生じて所謂液状化現象となる。液状化現象が生じる場合の天端の沈下量は振動回数20で盛土高の3.5%以上になり、生じない場合の沈下量は盛土高の1.0%以下である。両者の境界は盛土の相対密度と振動台加速度の相互関係により決定されることを報告する。

1. まえがき

水中に盛土を造成することは、例えば東京湾横断道路計画の例に見るように増加の傾向にあるが、その地震時の安定の問題、中でも震動による液状化発生の是非の予測と、盛土天端の沈下量の予測は、耐震設計では不可欠のプロセスである。

この為の方法としては、土の各種要素試験の成果、中でも砂質土要素に加えた振動とその液状化ならびに奔積変化の関係を導入した土構造物の解析法・計算法

の開発があるが、現段階では未だ具体的成果はない。

他の簡単な方法として模型試験があるが、これにはいくつかの制約がある。

一つは相似則を満たすことである。この現象のように、振動による水中での土の変形を対象とする場合、幾何学的相似の他に重力、慣性力ならびに水の粘性力の三つの力が相似でなければならないがその場合の結論は

$$\frac{t_m}{t_p} = \sqrt{\lambda} \quad (\text{重力と慣性力の相似})$$

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{重力と水の粘性力の相似})$$

となり、両式をともに満足させるには実物試験以外に無いという矛盾がある。(ここで t は時間, m, p は模型と実物, λ は両者の縮尺比)

第 2 に境界条件の相異がある。実際の中盛土は規模が大きく、全底面が同一位相・同一振巾で動くものではなく、法面の条件も違う。第 3 に模型と実物の共振振動数が一致しない。

以上の諸点を考慮すると、模型試験の動的性状は実物のそれをどの程度反映しているかは疑問であるが、現状ではそれ以外の適切な方法が無い。

本研究は以上の目的ならびに制約のもとで、水中盛土の振動性状を定性的に把握する為に、模型試験を行ったものである。

2. 試験装置と試験方法

図一 1 に試験装置の概略図を示す。水槽は長手 370 cm, 巾 120 cm, 深さ 80 cm の鋼製の箱で、一面はアクリル樹脂板である。水槽の作成に於て、振動による波が生じないように留意した。振動方向の壁を可動板にしてペロフラムシリンダーに接続し、ペロフラム圧を調整することにより波が生じないようにし、さらに水面に水平に押え網を敷いた。結果として、前者は可動板の剛性、ペロフラム内の粘性が大きい故に予想ほどには作動せず、消波効果は後者の方が顕著であった。

盛土作成用の網は各節点がヒンズであり、上端は土の出し入れの為に開いている。

図一 2 に示すように、天端から 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm の各深さに加速度計 (定格容量 2G・垂錘カンチレバー型ひずみゲージ変換式)、間隙水圧計 (定格容量 0.2 kg/cm²・半導体ゲージ式) を埋設し、振動台に加速度計をとりつける。埋設する計器は比重を 2 にして、砂が液状化した場合にも上昇・沈下しないようセットした。

供試体作成後、当研究所の電気油圧式振動台により、振動数 2 Hz・一定振巾・正弦波加速度で水平方向に加振する。台加速度が所定の規模になるまでの立ち上り時間は約 1 sec 以内にとどめた。

供試体の相対密度を 2 段階に、台加速度を 3 段階に変化させた。

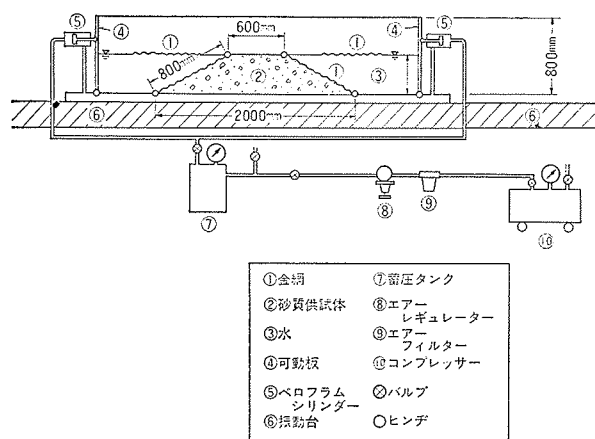
天端の沈下量は写真測定による。

3. 供試体の作成

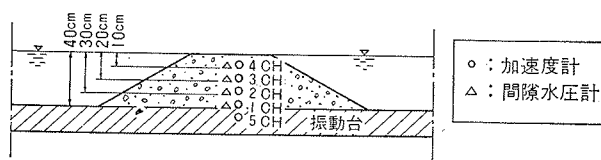
試料は浅間山の山砂を用いた。G_s (比重) = 2.68, D₅₀ (平均径) = 0.28 mm, U_C (均等係数) = 1.8, e_{max}

(最大間隙比) = 0.95, e_{min} (最小間隙比) = 0.60 である。図一 3 に粘度試験の結果を示す。比較的均等である。気乾状態での w (含水比) = 6.0% である。

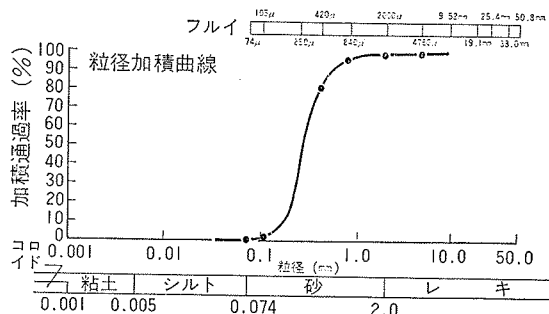
図一 1 の盛土形の金網を設置してこれを押え板で押え、天端まで水浸させる。上部から砂を沈澱させて成形した供試体はゆるづめであり、これを Loose と呼ぶ。その間隙比は各部分で平均して e_{mean} = 0.80, D_r = 43% である。成形時に各部分を一樣にバイブレーターで締め固めたものは、やや密になっており、これを Medium Dense と呼ぶ。e_{mean} = 0.72, D_r = 67% である。こうして成形したのち、押え板を撤去して加振する。



図一 1 試験装置の概略図



図一 2 模型盛土の断面図と計器の位置



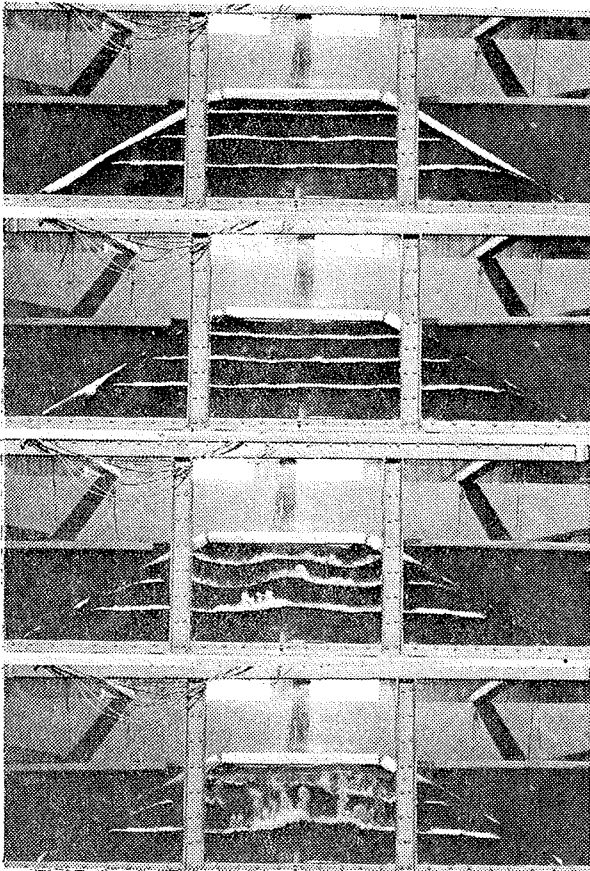
図一 3 試料土の粒径加積曲線

4. 試験結果とその検討

写真一に示すのは Loose な供試体を 0.18G で振動させた例の、スタートから 10, 20, 30sec 後の状態である。観察の為に石灰粉を敷いている。

20sec 後には盛土中央下部から上部へ水が流れ、それにひかれて土が移動している。同時に、中央から両側へ土が流動し、天端の沈下が生じている。30sec 後には中央部は完全液状化を生じて、土粒子の配列が乱れており、この状態では支持力が無い。

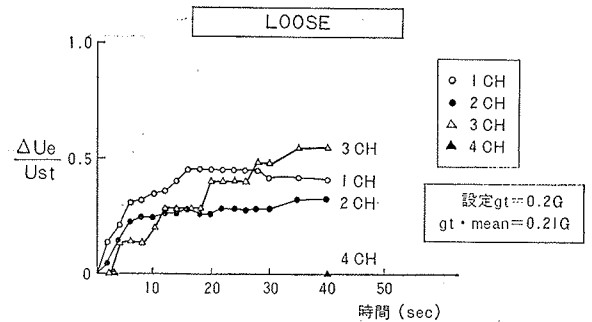
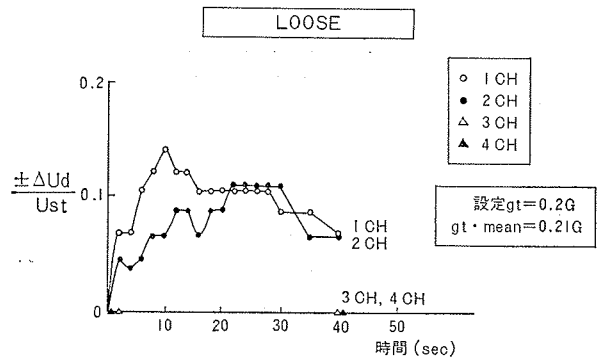
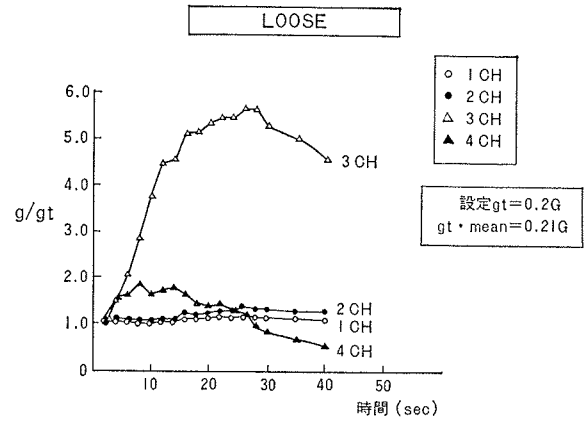
盛土高さが 40cm であり排水距離はそれ以下であるが液状化が生じること、並びにそれが盛土全体で一樣に生じるのではなく、中央下部から上部への水流によ



写真一 Loose 供試体・台加速度0.18Gの例 上から、開始時、10sec、20sec、30sec 経過状況

り生じていることが写真より判る。

図一4に示すのは Loose 供試体で台加速度の時間平均が0.21Gの例である。横軸に時間、縦軸に各深さでの g/g_t , $\pm \Delta u_d/u_{st}$, $\Delta u_e/u_{st}$ を示す。ただし、1CH~4CH は図一2に示す如く、天端から 40cm~10cm の深さのデータであることを示し、 g (各深さでの加速度), g_t (台の加速度), $\pm \Delta u_d$ (動的間隙水



図一4 Loose 供試体・台加速度0.21Gの g/g_t , $\pm \Delta u_d/u_{st}$, $\Delta u_e/u_{st}$ の時間変化

圧), Δu_e (過剰間隙水圧), u_{st} (静的間隙水圧, 1CH~4CH で 40gr/cm²~10gr/cm²) を指す。

g/g_t の傾向として、1・2CH は振動とともに若干増加するにすぎないが、上部の 3・4CH は増幅されたのち減少する。写真によると 10sec 後に流動化が始っており、これは 1・2CH の $\pm \Delta u_d/u_{st}$, $\Delta u_e/u_{st}$ の増加と対応している。この時点に下部から上部への水流が生じ、3CH の Δu_e が増加し、上部の剛性が変化する為に g/g_t が減少するものと見なされる。3CH の Δu_e の増加は振動ではなく水流によるものであることは $\pm \Delta u_d$ の傾向からもわかる。

図一5に示すのは Medium Dense 供試体が台加速度の時間平均が0.26Gの例である。

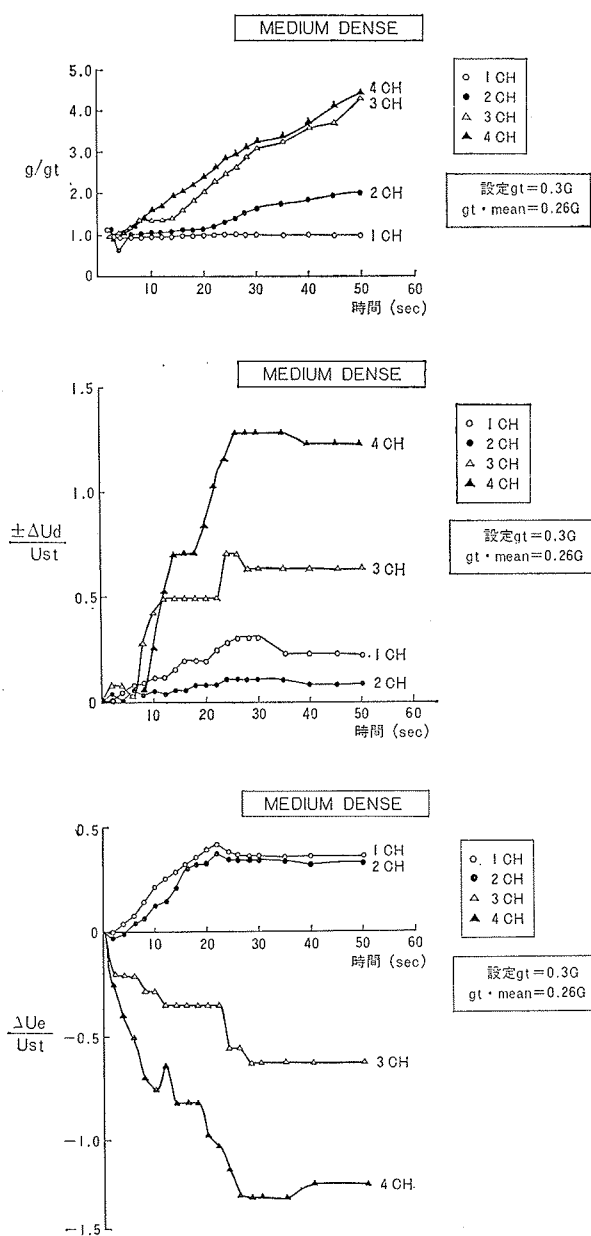
g/g_t の傾向は Loose な場合と同じく上部ほど増巾され単調に増加している。Loose な場合との顕著な差異は、 g/g_t の減少がなく、 $\pm \Delta u_d/u_{st}$ が 3・4CH とともに大きく、これに対応して $\Delta u_e/u_{st}$ の減圧が大きいことである。 Δu_e が減圧となる原因は、3・4CH の土要素が破壊近くまでの大きくなり返し応力を受ける為、体積が増大する傾向となる故である。

図一六に示すのは Loose, Medium Dense の各場合につき、1CH (40cm深さ)、4CH (10cm 深さ) の加速度と $\Delta u_e/u_{st}$ の関係である。1CH の場合は両者の間に正の比例関係があり、 g に対する $\Delta u_e/u_{st}$ の増加

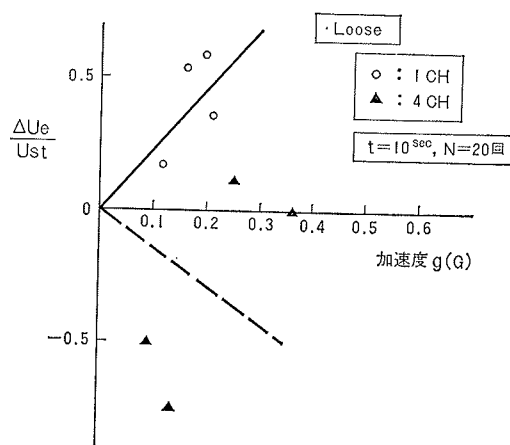
割合は Loose の方が大きい。これは Loose の方が圧縮性がある為である。4CH の方は、Medium Dense の場合に負の比例関係が比較的明瞭であるが、Loose の場合はバラツキが大きい。

写真一 1 ならびは図一六、7より判断して、振動により盛土中央下部には過剰間隙水圧が発生し、上部では減圧が生ずる。この為、両者の水圧差による水流が下部から上部へ向って生じ、水流による砂の攪乱が模型盛土の流動化を起こしている。

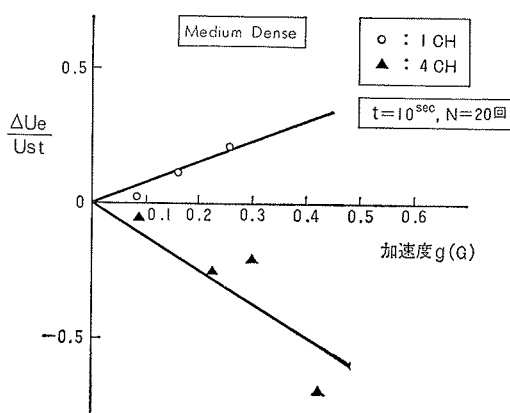
所謂、完全液状化というものは過剰間隙水圧が有効拘束圧に一致することであり、砂の水中での有効密度



図一五 Medium Dense 供試体・台加速度 0.26G の g/g_t , $\pm \Delta u_d/u_{st}$, $\Delta u_e/u_{st}$ の時間変化



図一六 Loose 供試体, 10sec 後の g と $\Delta u_e/u_{st}$

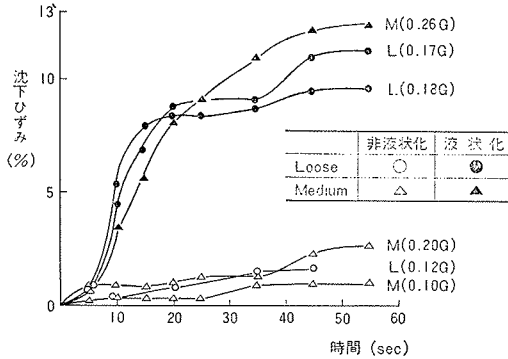


図一七 Medium Dense 供試体, 10sec 後の g と $\Delta u_e/u_{st}$

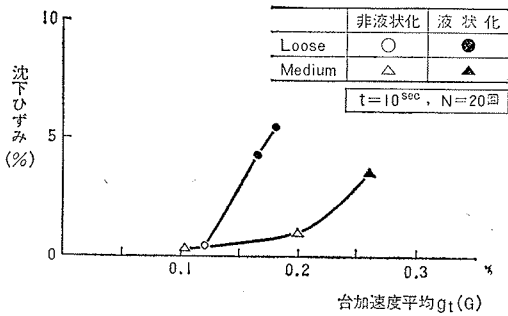
は Loose のもので 0.93gr/cm^3 , Medium Dense のもので 0.98gr/cm^3 である為、 $\Delta u_e/0.93u_{st}=1$ (Loose), $\Delta u_e/0.98u_{st}=1$ (Medium Dense) が完全液状化の条件である。ところで試験データに於ては、盛土各部分での Δu_e の値が完全液状化の半分以内の段階で液状化が生じている。

従って、盛土のある部分で完全液状化が発生してそれが伝播していくというメカニズムの他に、各部分で

の Δu の差違によって生ずる浸透流による砂粒子の攪乱というメカニズムが、現実にもかなり発生しているものと思われる。



図一 8 沈下ひずみと時間



図一 9 台加速度平均と沈下ひずみ (10sec 後)

図一 8 に天端の沈下量の盛土高さに対する比の時間的变化を示す。傾向として、Loose と Medium Dense について、加速度が大きい場合ほど沈下量も大きい。また、沈下量は時間とともに漸増し、約 60sec 程度で停留値となるが、その量は二つのグループに大別される。一つは液状化を生じない方のグループで、その場合の沈下ひずみは 2.5% 以内である。他方は液状化を生じた場合で、それは 10sec (20回) 付近から急増し、13% にも達することがある。この場合の沈下量の原因は、盛土内の各々の土要素が発生した過剰間隙水圧に

より圧密排水されることによるものもあるが、側方への流動によるものが多く、試験前後の供試体の間隙比の変化測定による試算では、前者が30%で後者が70%であった。この場合も、液状化の判定は石灰粉の部分的乱れから決めた。

図一 9 に 10sec (20回) での台加速度と沈下ひずみの関係を示す。液状化しない場合の沈下ひずみは 1% 以内であるが、液状化すると 3.5% 以上である。土構造物は全体が同時に一様に間隙水圧が上昇し液状化するものではない為、土構造物自体としての液状化に対する強度を評価することは困難である。そこで、10sec (20回) の場合、便宜的に沈下ひずみ 3% を破壊と定義すると、この模型試験では Loose で 0.15G, Medium Dense で 0.25G が限界の台加速度となる。

5. まとめ

- i) 模型水中盛土の振動試験に於て、供試体の相対密度により定まる限界加速度以上の振動台水平加速度を与えると、盛土中央下部には過剰間隙水圧が、上部には減圧が生じ、下部から上部への水流により砂粒子相互間が分離して液状化する。
- ii) 振動回数20に於る沈下ひずみは、液状化が生じない場合は 1% 以内であるが、生じると 3.5% 以上となる。

おわりに、本研究を行なうに当って、伊吹山四郎氏 (大林道路㈱)、中川恭次氏 (当研究所) の御援助・助言を頂いたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土田肇：飽和砂質土の振動実験結果にもとづいた液状化の予測，土質工学会シンポジウム，1971.
- 2) Seed, H.B. & Silver, M.L.: Settlement of Dry Sand during Earthquake., ASCE, Apr., 1972.