

神戸大学工学部 正真 谷本喜一

同 正真 西 勝

1. まえがき

比較的粒径の均等な砂の飽和砂層が振動あるいは衝撃をうけると、その粒子構造の急激な破壊に伴う過剰間隙水圧の発生によって流動化することは、かなり以前より多くの震害調査および室内実験によって報告されている。ことに、その震害の大半がこの現象に起因すると確認された1964年の新潟地震以後、この現象に関する諸種の研究が活発に実施され、その成果も多数発表されていることは周知のとおりである。しかしながら、この流動化現象の機構に関する定量的な解析法に就いた研究は極めて少ないように思われる。

本研究は、模型的に流動化した飽和砂層の表面沈下量および過剰間隙水圧の実測記録に基づいて、全沈下量が衝撃による粒子構造の急激な一時的破壊によるものと、圧密によるものとの二つの過程に大別されること、および後者の圧密過程における過剰間隙水圧の消散過程が飽和粘土に対する一次元圧密理論によって近似的に解析されることを明らかにしたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、一辺80 cmの正方形断面をもった高さ130 cmの砂箱、14枚の板バネによって支持された水平振動台、60 kgの衝撃用落錘および諸種の測定装置からなり、それらは図-1のように配置されている。また、使用された試料は有効粒径 $C_u=0.29\text{ mm}$ 、均等係数 $C_u=2.69$ をもった比較的粒径の均等な砂である。実験方法としては、この試料を振動台上に固定された砂箱に高さ110 cmまで水中でできるだけゆるく($e=0.66$)詰めした後、砂層内の加速度が最大約200~300 gal になるようにあらかじめ定められた高さより落錘を自由落下させて振動台に水平振動を与えた。この衝撃振

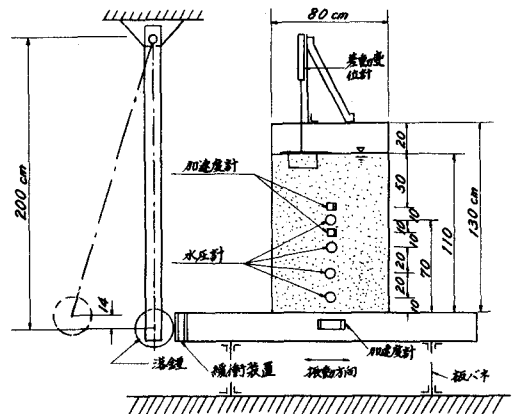


図-1 実験装置

動中に生じる砂層内の加速度、いろいろな深さでの過剰間隙水圧および表面沈下量の時間的変動は砂層内に埋設された2個の加速度計、4個の水圧計および砂層表面にその足と埋の込まれに軽量の多孔性板に設置された差動変位計によってそれぞれ電気的に記録された。

流動化機構に及ぼす衝撃間隔の影響を調べるために次の2種類の実験が実施された。

(1). 単一衝撃の繰返しによる実験(以後、単打実験と略記する)

この実験は、同量の単一衝撃を与えるとき、砂層内に生じる過剰間隙水圧の上昇および表面沈下量がその初期間隙比によってどのように影響されるかを検討する目的でなされたもので、前回の衝撃影響が完全に消滅するように6時間以上の間隔を置いて総数15回の衝撃が与えられた。

(2). 連続衝撃による実験(以後、連打実験と略記する)

この実験は、砂層が同量の連続的衝撃をうける場合の過剰間ゲキ水圧および表面沈下量の変動を調べるために実施されたもので、約3秒間隔で過剰間ゲキ水圧がほぼ消滅するまで続けられた。

3. 実験結果

単打実験の結果：1例として、才1回目の衝撃による砂箱底面から10 cmの位置での間ゲキ水圧、砂層内の加速度および表面沈下量の実測記録を示すと図-2のようになる。最上図より、過剰間ゲキ水圧は加振後約3.6秒で最大値に達し、その後じょじょに減少し約25秒でほとんど消散することが確かめられる。この最大間ゲキ水圧値に達するまでに要する時間は、衝撃回数の増加とともに減少するようである。また、最下図に示されるように、表面沈下量の変動の様子は、衝撃直後においてかなり振動的であるが、漸次なめらかな曲線に移行し一定値に達している。解析を簡単にするために、この沈下実測記録はその全振幅のほぼ中心を結んだ破線で示される曲線に置換された。

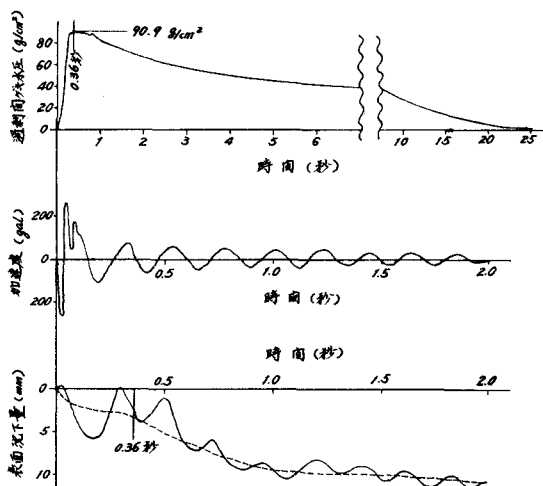


図-2 単打実験測定記録

紙面の関係上、その図は省略されたが衝撃回数が増加するとともに、すなわち砂層が密になるほど流動化現象が生じにくくなることが確かめられている。

紙面の関係上、その図は省略されたが衝撃回数が増加するとともに、すなわち砂層が密になるほど流動化現象が生じにくくなることが確かめられている。

連打実験の結果：連続的に与えられたビジュラフから読まれる時間記録を横軸にとり、単打実験の場合と同様に補正された曲線から読みとられる各打撃ごとの最大間ゲキ水圧および最大沈下量の時間的変動を示すと図-3のようになる。この図より、砂層内の各位置での最大過剰間ゲキ水圧はいずれも時間の経過とともに減少するが、その割合は経過時間が小さい間は小さく、ある時間以後急激に大きくなることが認められる。また、最大沈下量は時間の経過とともに一様に増加するが、過剰間ゲキ水圧がほぼ一定値に達する時間に前後して一定値となることが確かめられる。さらに、同図上に最大加速度の実測値も示されているが、予期したように大体200-300 galの範囲にあるようである。

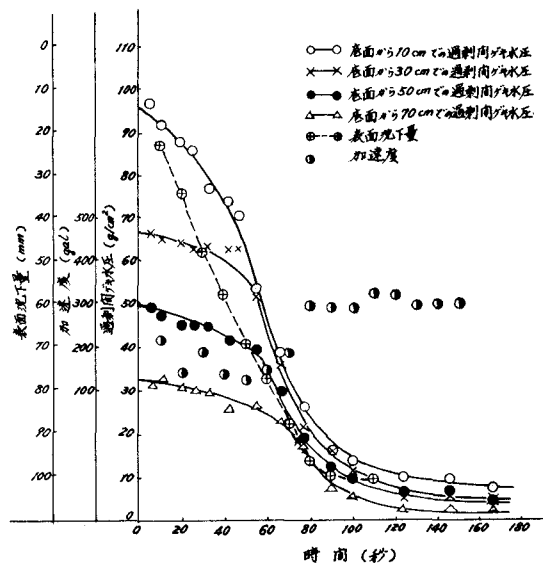


図-3 連打実験測定記録

4. 考察および解析

図-2の破線で示された置換沈下曲線と半対数紙上で再現すると図-4のようになる。この曲線が加振後約3秒でほぼ直線関係に入ることより、これ以後の沈下過程は粘性土の一次元圧密理論によって解析されると考えられる。さらに、この圧密過程は過剰間ゲキ水圧が最大になる時間(0.36秒)で始まると仮

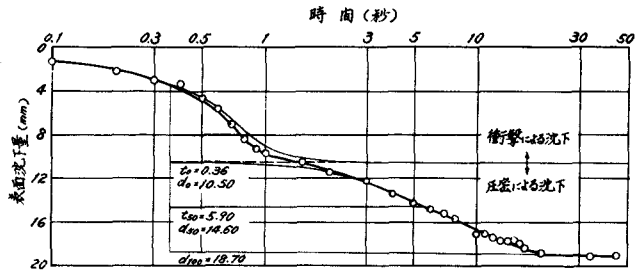


図-4 単打実験沈下曲線

定し、 $\log t$ 法における初期補正法(放物線関係)によって整理すれば、同図上の細線で示されるように、砂層の表面沈下量は他の原因によるものと圧密によるものとの二つの過程に大別される。衝撃直後短時間の間に生じる前者の過程は、衝撃による砂粒子構造の急激な一時的破壊に起因するものと思われ、乾燥状態で同じ間ゲキ比をもつように詰められた同試料が同様に加振されたときに生じる沈下性状に類似しているのではないかと推測される。この過程と本研究では単に「衝撃による沈下過程」と称し、圧密によるものと区別することにした。

同様な操作で連打実験の沈下記録を二つの過程に分離すれば図-5が得られる。この結果より、連打実験の場合、衝撃による沈下過程の影響は時間の経過とともに減少し、約50秒前後でこの過程による累積沈下量はほぼ一定値に達することが認められる。すなわち、この経過時間以後の表面沈下量はほとんど圧密過程のみに左右されるものと思われる。

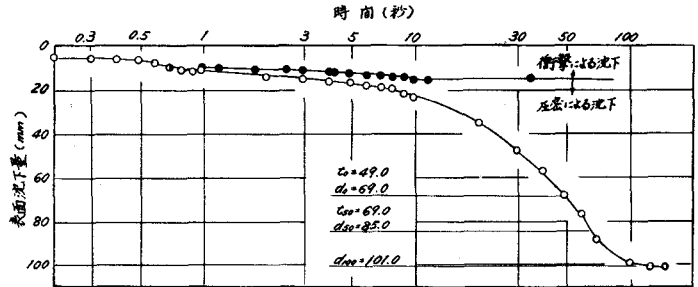


図-5 連打実験沈下曲線

本研究における数値解析は流動化現象の圧密過程に関するもののため、上記観察結果による飽和砂層の圧密過程に粘性土の一次元圧密理論が適用されるかどうかを検討したものである。

一次元圧密理論の基本方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{----- (1)}$$

で表わされる。ここに u は過剰間ゲキ水圧、 t は圧密開始後の経過時間、 z は砂層表面からの深さである。後述されるように、圧密過程が始まると仮定された時間での深さに関する過剰間ゲキ水圧は近似的に三角形分布をなすことが、単打実験、連打実験いずれの実験記録においても観察されるので、その初期条件は

$$u(z, 0) = qz \quad \text{----- (2)}$$

と仮定される。さらに、鉛直方向の一次元的浸透流を仮定すれば、その境界条件は

$$u(0, t) = 0 \quad \text{----- (3)}$$

$$\partial/\partial z u(H_0, t) = 0 \quad \text{----- (4)}$$

となる。(2),(3),(4)による方程式(1)の解は

$$u = \frac{8aH}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{(2n+1)^2} \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2H} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 C_v t}{4H^2} \right] \quad \text{----- (5)}$$

となる。次に(5)式で計算される過剰間ゲキ水压の消滅過程と両実験の実測記録と比較する。

単打実験：図-6の破線で示される一連の過剰間ゲキ水压分布線は、才1回目の衝撃における実測記録から得られたもので、図中の各数字は圧密過程が始まると仮定された時間からの経過時間を示している。この結果より、初期条件

$$u(z, 0) = \alpha z = \beta' z = 0.90 z$$

が得られる。ここに β は砂層の平均水中単位重量であり、この関係は衝撃によって砂層が完全に流動化したことを示している。次に圧密係数 C_v は、初期三角形間ゲキ水压分布に対する圧密度50%の時間係数 T および図-4に示される仮定圧密曲線の圧密度50%までの経過 t_{50} より、平均値として

$$C_v = TH_v^2/t_{50} = 0.294 \times 110^2/5.54 = 6.4 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{sec.}$$

と求められる。これらの α および C_v の値を(5)式に代入すると、同図上に実線で示されているそれぞれの分布曲線が計算される。これらの計算値が実測値とかなり良く一致することより、砂層の過剰間ゲキ水压消滅過程も一次元圧密理論によって近似的に解析されるものと思われる。また、他の衝撃回数に対しても同様の結果が得られている。

連打実験：純粋な圧密過程は過剰間ゲキ水压が急激に減少し始める時間より始まると仮定すれば、全層あたりのその平均値は加振後約4秒となる。この圧密開始時における各位置での実測過剰間ゲキ水压を添この関数として表せば、初期条件は

$$u(z, 0) = \alpha z = 0.74 z$$

となる。また C_v の値は、図-5に示された沈下曲線より

$$C_v = 0.294 \times 103.5^2/20.0 = 151 \text{ cm}^2/\text{sec.}$$

計算される。これらの値を(5)式に代入して得られた計算値と実測値とが図-7に示されているが、この場合にも両値はかなり良く一致することが認められる。

5. 結論

衝撃によって砂層が完全に流動化しようとしないうとにがかわらず、その沈下量は衝撃によるものおよび圧密によるものとの二つの過程に大別される。また、後者の圧密過程における砂層の過剰間ゲキ水压消滅過程も粘性土の場合と同様に一次元圧密理論によって近似的に解析されるようである。

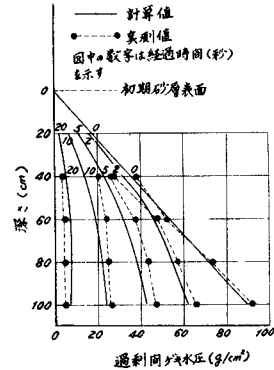


図-6 計算値と実測値との比較 (単打実験)

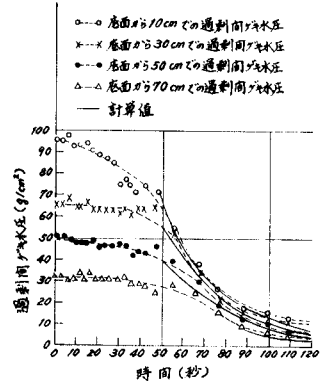


図-7 計算値と実測値との比較 (連打実験)