

## 液状化対策としての締固めの施工範囲について

運輸省港湾技術研究所 正員 土田 肇  
運輸省港湾技術研究所 正員 ○井合 進  
運輸省港湾技術研究所 倉田栄一

### 1. はじめに

地震動による砂質地盤の液状化については、1964年の新潟地震における経験を受けて以来、非常に活潑な研究が行なわれてきた。その結果、構造物の建設地点の地盤が設計で考慮する最大級の地震に対して液状化するか否かの予測の方法に関しては多くの提案がなされ、実際の構造物の設計にも適用されるようになってきた。対象地盤が液状化する可能性が大きいと予測された場合には、対策が必要となるが、その対策のひとつとして、サンドコンパクション工法により地盤を締固め、地盤改良を行なうことが考えられる。

このような地盤改良を実施する場合には、地盤改良を実施すべき範囲を決める方法が必要となる。地盤改良の範囲としては深さ方向の範囲と平面における範囲とを考える必要がある。深さ方向に関しては、液状化の可能性の無い土層が比較的浅い位置にあれば、その表面までを改良の対象とすればよい。また、液状化の可能性のある土層が非常に厚い場合でも、地震動の振巾の大きい部分の継続時間は限られているので、何らかの方法により液状化する深さを推定すれば、改良すべき深さが定まる。そこで、著者は深さ方向については液状化しない土層（あるいは深さ）が与えられている場合を考え、平面的に構造物の周囲のどの範囲までを改良すべきかについて検討した。

### 2. 検討の内容と方法

液状化対策としての地盤改良範囲を考える場合、多くの検討事項があるが、ここに報告する研究では、著者は次の事項に着目した。

- i) 非改良部分が液状化し、改良部分は液状化していないという状態が発生したとき、両部分の境界ではどのような現象が発生するであろうか。液状化している部分が地盤改良を行なった部分に徐々に拡大していくことはないであろうか。
- ii) 液状化している部分は飽和砂と同じ単位体積重量の液体と考えられるので、液状化していない部分の境界では静水圧よりも大きな圧力が作用する。これにより、液状化していない地盤内に過剰間げき水圧が発生するが、その分布と構造物に与える影響はどうであろうか。

以上の問題を検討するために、振動台上の剛箱（以後振動箱と書く）に十分締固めた部分とゆるぎの部分をもつ飽和砂層を作り、振動を与えてゆるぎの部分を液状化させ、液状化していない部分との境界付近の現象を観察した。また、砂層内での間げき水圧を測定した。さらに、液状化していない部分の過剰間げき水圧の分布を解析的に求め実験において測定された値と比較した。

### 3. 飽和砂層の振動実験

実験には、高さ1.5m、長さ5m、奥行き1.5mの振動箱を用いた。図-1に見られるように振動箱の長さ方向（振動方向に平行な方向）の右端から1.3mの位置に仮仕切を設け、その右側にはゆるぎの砂層を作り、左側には締固めた砂層を作った。締固めた砂層の製作には、まき出し厚を20cmとしてパイプレータを使用した。砂層厚は80cmとし、砂入れ完了後には仕切版を引抜いて連続した砂層とした。振動箱の振動方向に平行な1側面は内部観察のために強化ガラス板となっている。砂層製作の際にこのガラス板に接する部分に白色砂により水平な白線を作り、砂層の挙動の観測に役立てることとした。

実験に使用した砂は小名浜砂で、その粒径加積曲線を図-2に示す。ゆるぎめの砂層の間げき率は44%、飽和単位体積重量は1.94 g/cm<sup>3</sup>、締固めた砂層の間げき率は36%、飽和単位体積重量は2.07 g/cm<sup>3</sup>であった。間げき水圧計は、奥行方向中央に図-1のように配置した。与えた振動は3.2 Hz、227 galの正弦波であった。振動の立上りの部分は、約8秒間で0 galから227 galになるように時間にほぼ比例させて振幅を増加させた。

振動によりゆるぎめ部分はほぼ完全に液状化し、締固めた部分は液状化せず安定な状態を維持した。このことは先に説明した白線が液状化した部分では消滅したが、締固めた部分では白線がほぼそのまま残っていたことからわかる。図-3は振動前後の白線のようすを示す。液状化していない部分の境界付近(液状化している部分と接しているところ)では、拘束が小さいため振動の振巾が大きくなっていることが観察された。特に振動の振巾が大きくなっている範囲は境界下端を通る主働崩壊面とおおよそ同じであった。

間げき水圧計により測定した圧力は、静的な圧力と振動台の振動周期と同じ周期で変動する動的な圧力とに分けて考えることができる。静的な圧力は振動前は静水圧であるが、振動によって液状化が発生すると共に上昇し、液状化している部分では飽和砂と同じ単位体積重量の液体の圧力とほぼ同じ値に達した。

#### 4. 砂層内の過剰間げき水圧の分布

次に、完全に飽和された地表付近の土層のある部分が液状化した時、それに接した液状化していない土層でどのような過剰間げき水圧が発生するかを検討した。

検討の対象として、図-4のような砂層を考えた。左端( $x=0$ )の不透水層境界は、振動箱での実験との照合を行なうことを考えて設けてある。奥行方向には状態に変化しないものとし、二次元問題として取扱った。また、右端( $x=a$ )の境界面に作用する過剰間げき水圧は定常的に存在するものとした。したがって、振動により徐々に液状化が発生したり、砂層が安定していく過程の検討はここには含まれていない。このことは、過剰間げき水圧の値を大きめ、すなわち安全側に評価していることになる。また、この検討では、振動により生ずる間げき水圧の周期的変動分(間げき動水圧)は考慮されていない。

図-4の座標軸に従って、過剰間げき水圧 $P(x, y)$ を解析的に求めれば次式のようになる。

$$P(x, y) = \frac{8P_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \frac{\cosh[(2n-1)\frac{\pi x}{2b}]}{\cosh[(2n-1)\frac{\pi a}{2b}]} \cdot \cos[(2n-1)\frac{\pi y}{2b}] \quad \dots \textcircled{1}$$

また、左端の不透水層が存在しない半無限の砂層の場合は、右端境界からの距離を $\xi$ とすれば、同様に過剰間げき水圧は次式のようになる。

$$P(\xi, y) = \frac{8P_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp[-(2n-1)\frac{\pi \xi}{2b}] \cdot \cos[(2n-1)\frac{\pi y}{2b}] \quad \dots \textcircled{2}$$

ただし、 $P_0$ は、右端境界の最下点に加わる過剰間げき水圧の値である。

式①、②から、 $a$ が $b$ に比して十分大であれば、右端境界付近の過剰間げき水圧の分布は左端の不透水層の影響をあまり受けないこと、また、過剰間げき水圧は、右端境界からの距離が大になるにつれて指数関数的に減少していくことなどがわかる。

式①により計算した等ポテンシャル図を図-4に示す。ゆるぎめ砂層と締固めた砂層との境界には、ゆるぎめ砂層の飽和単位体積重量1.94 g/cm<sup>3</sup>と同じ単位体積重量を持つ液体の圧力から静水圧を差引いたものが過剰間げき水圧として加わっていると考え計算を行なった。

実験で測定された間げき水圧は3.2 Hzの成分を優勢に含んでいるので、5秒間の移動平均を行なって周期的成分を除去した。この移動平均値の記録全体を通じての最大値を図-5に示した過剰間げき水圧に対応する実験値とした。図-5に実験値と計算値の比較を示した。

以上の結果から、液状化した土層と液状化していない土層が平面的に接している場合、液状化していない土層内での過剰間げき水圧の分布は境界面で飽和砂と同じ単位体積重量の液体の圧力が作用するものとして

計算したものをを用いてよいと判断された。なお、ここで考えたものは、ゆるぎめの砂層は完全に液状化して、その状態が持続し、過剰間げき水圧の分布が定常状態に達した場合を考えている。液状化していない土層の透水性が小さい場合や、液状化した部分がすぐに安定化し、非常に短い時間で液状化した部分の過剰間げき水圧が消散してしまう場合には、前記の考え方は設計上安全側の誤差を含むことになる。また、土層の構成が複雑な場合には、有限要素法を用いて等ポテンシャル線を求めることができる。

## 5. 地盤改良の範囲

前述の実験では液状化現象が問題となる実際の地盤と比較すれば小さな砂層を用いた実験ではあった。しかし、その実験の範囲では、非常に締った地盤とゆるぎめの地盤が平面的に隣接していて、ゆるぎめの地盤が液状化したとき、その境界付近では液状化していない部分の振動の振幅は大きくなるが、液状化している部分がよく締った地盤内にどんどん拡大していくことは無いことが認められた。また、液状化していない地盤では、隣接地盤の液状化による過剰間げき水圧が発生し、その分布は地盤が単純な場合には解析的に推定でき、地盤が複雑な場合には数値解法により推定できることがわかった。

以上の結果をふまえて、次のような考え方で液状化対策として地盤改良を実施する範囲を決めることもその一方法と考える。

- i) 図-6に示すように、液状化の可能性の大きい水平土層があり、図中A-Bで示す境界線の左側まで地盤改良したとすると、当然、A-Bの右側は液状化すると考える。
- ii) B点を通る主動崩壊面C-Bを考え、 $\triangle ABC$ の範囲も液状化すると考える。
- iii) したがって、C-B面よりも右側の地盤は無いものとする。実際には構造物の周辺地盤がこのように無くなったとしても、構造物に支障の生じないようなA-Bの位置を調べ、そこまで地盤改良を行なうことにする。
- iv) 地盤の鉛直方向あるいは水平方向支持力に余裕のない場合には、過剰間げき水圧の分布を求め、有効応力の減少による支持力の低下を評価し、改良範囲の決定または構造物の設計に反映させる。
- v) 振動が問題となる場合には、C-Bより右側の地盤が無いものとして地盤および構造物の地震応答解析を行ない、支障の生じない位置まで改良する。

以上のことのうち i) ~ iii) についてより具体的に説明してみる。図-6に斜線で示すような構造物があって、水平方向支持力から地盤改良範囲を決めようとする場合、I点より受働崩壊面を描き、それが地表と交る点がC点よりも左側にあるようにA-Bの位置を決定する。

## 6. おわりに

ここに報告したことは、紙数の関係で、著者の考えている検討のすべてではない。また、この改良範囲の決定法についても更に検討を進めており現段階における著者の考えを整理したものである。諸賢の御批判御指導をお願いしたく、発表させていただいた。この研究は著者の液状化に関する研究の一環をなすものであるが、運輸省港湾局防災課からの要請もあってこの時点で実施することとなった。実験の一部は海岸事業調査費によった。

文献1) 土田 肇：振動により流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力，土と基礎，Vol. 16 . No. 5，  
1968年5月，PP. 3~10 .

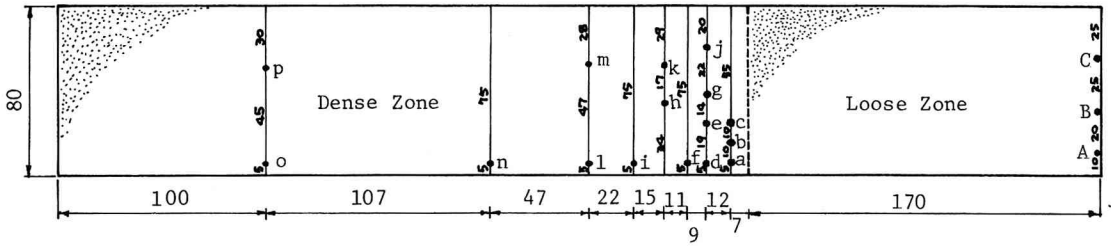


Fig.1 Pore Pressure Gauge Array (cm)

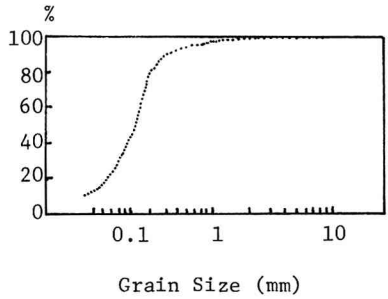


Fig.2 Sand

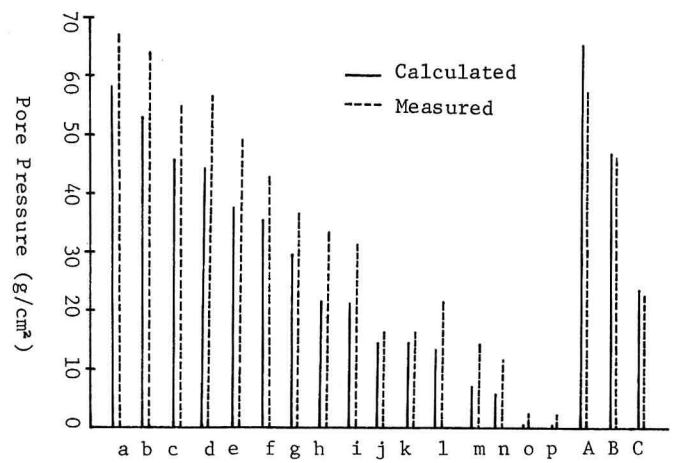


Fig.5 Pore Pressure

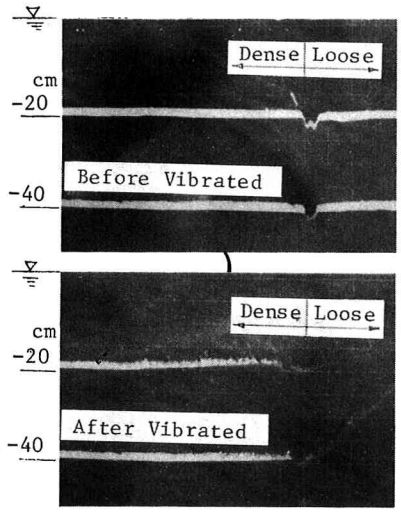


Fig.3 Boundary

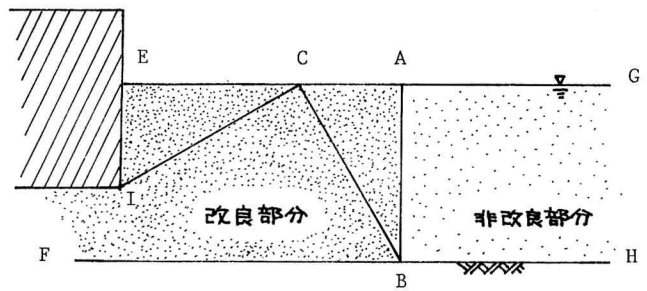


Fig.6 Design

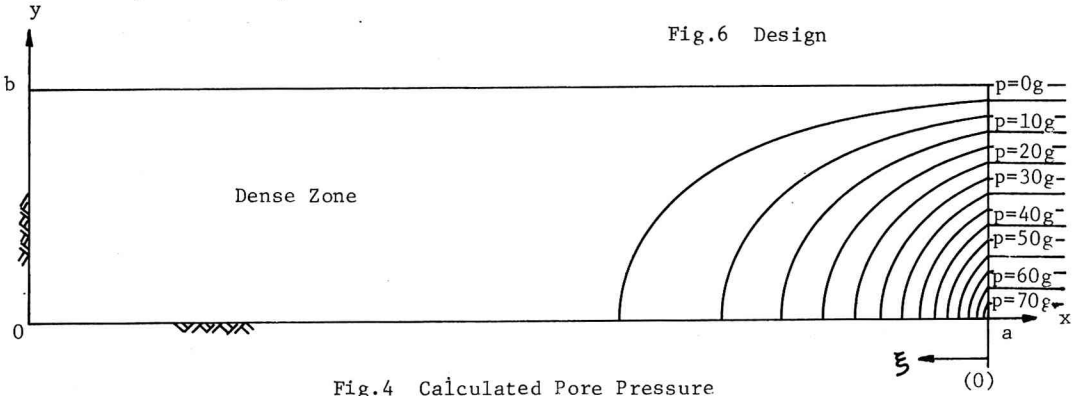


Fig.4 Calculated Pore Pressure