

軟弱地盤上の砂層の流動化に関する模型実験

建設省土木研究所

正会員 ○ 堀井幸武

北家康夫

山本洋司

長大橋設計センター

〃

右近大道

1 まえがき

飽和された砂質土の地震時の流動化についてはこれまでに数多くの調査研究がなされている。これらの研究の多くは砂地盤そのものを対象にしているが、現実には流動化の発生している場所が沖積層の上にあり、しかも流動化しに砂質土の下には必ずみ追従性の大きい粘性土盤が分布している事例が多い(図-1)。飽和しに砂の流動化現象がせん断ひずみの大小に起因していることが知られてきたが、そのせん断力のよって生じることは必ずしも明確でない。その点を各方面から検討した結果、地震発生から砂質土の流動化までの過程で当該砂質土盤の下に粘性土盤の果たす役割を無視することができないことがわかった。本報告は模型箱の中に粘性土盤と砂層を造成し、加振することによって両者の振動性状を調べに実験と、その性状が基礎ぐいに及ぼす影響を調べに実験について報告するものである。

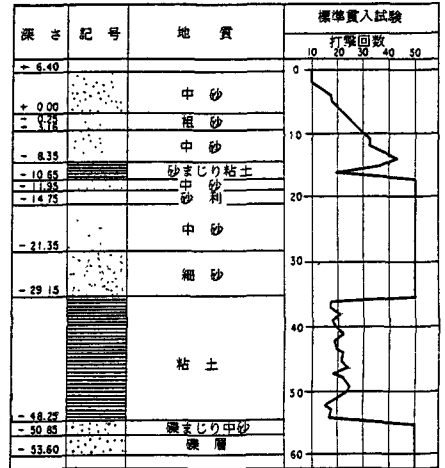


図-1 福井盆地の地質の一例

2. 目的

飽和した砂質土盤上の構造物の基礎の地震時に対する設計を合理化するために、地震時の流動化現象のメカニズムを明らかにするとともに、それが基礎に与える影響とその変形性状を調べようとするものである。

3. 方法

地震時に粘性土盤の存在が上部砂層の流動化に対する影響を調べるために図-2に示す6種類の模型について振動実験を行なった。

模型1は粘性土盤の振動性状を、模型2は砂層の重量の影響を、模型3は粘性土盤の上載層の拘束効果を、模型4は上部砂層が乾燥砂の場合の振動性状、模型5は飽和砂の場合の振動性状、模型6は飽和砂の上の不透水層の影響を調べるものである。

模型に使用した材料のうち、粘性土盤にはほぼ弾性体とみはしうる合成樹脂材を用いて固有周期が7~8秒になるように調整した。砂層は茨城県高萩産の砂で、60%粒径0.6mm、20%粒径0.4mm、均等係数2.0のものである。

測定計器の配置は図-3のとおりで、加速度計(Ai)を7個、土圧計(Di)を4個、間隙水圧計(Pi)を2個、リン青銅板(h:800, w:50, t:0.2mm)には1つにひずみ計(Si)を2枚使用した。

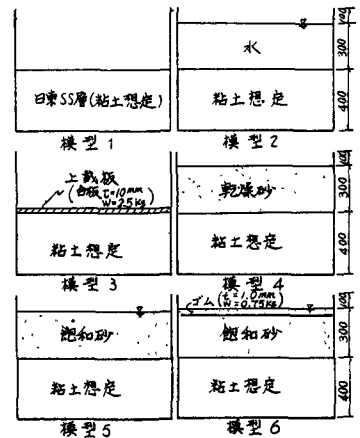


図-2 模型の種類

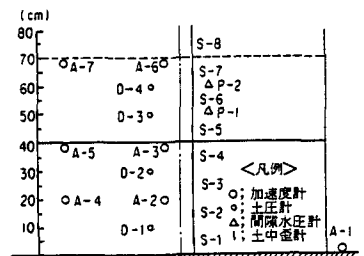


図-3 模型①~⑥の計器の配置

加振台の仕様は表-1のとおりである。入力は不規則波形、正弦波、衝撃波形とし、それぞれの目標に応じて20ガルから500ガルまでを作用させた。不規則波形は5~40Hzの周波数成分を含むホワイトノイズをデータレコーダで再生して加振台制御盤へ入れた。

記録には、どれもデータレコーダ、ペンレコーダあるいは電磁オシログラフを用いた。磁気テープのアナログデータはAD変換（サンプリングは0.005秒）して実応答波形とした。

不規則波形については加速度計による波形のパワースペクトラム $G_x(f)$ 、 $G_y(f)$ とクロススペクトラム $G_{xy}(f)$ を求めた。 $G_x(f)$ は入力波形に、 $G_y(f)$ は応答波形に関するものである（図-1参照）。 $G_x(f)$ と $G_{xy}(f)$ の間の周波数応答関数 $H(f)$ と位相差 $\phi(f)$ は次式によった。

$$H = \frac{G_{xy}(f)}{G_x(f)}, \quad \phi(f) = \tan^{-1} \left( \frac{I(G_{xy}(f))}{R(G_{xy}(f))} \right)$$

ここに  $R(G_{xy}(f))$  は  $G_{xy}(f)$  の実数部分

$I(G_{xy}(f))$  は  $G_{xy}(f)$  の虚数部分

正弦波形については各計器の記録の最大応答値、応答率、位相差を求めた。衝撃波形については自由減衰振動数と減衰定数を可能な限り求めることにした。

次に上述の模型おおよびにおける砂層の厚さが地盤の流動性に与える影響をチェックするために模型7~9の振動実験を計画した（図-4参照）。

入力波は不規則波形、正弦波形とし、模型1~6と同じ条件で100~500ガルまでの加速度を作用させた他は同様の処置をした。

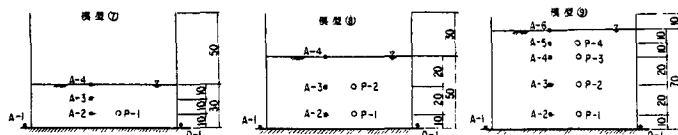


図-4 模型7~9の計器の配置図

最後に図-5に示すようにこのような地盤に、くいを設置した場合も相対的にモデルについて振動実験を行なった。現実には下部の粘性地盤までくいを到達させることは困難であるが、流動性に砂層がくいを与える影響を調べるために実施した試験である。模型⑩は普通の砂層、模型⑪は不透水層が地表にある場合である。模型くいは5.0x1.0x69.0cmの矩形である。

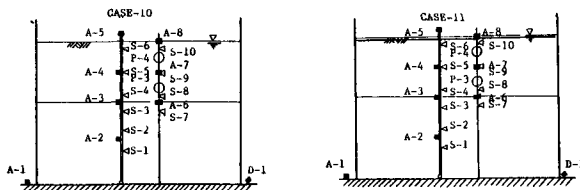


図-5 模型10, 11の計器の配置図

表-2 地盤内の卓越振動数(Hz)

| 模型番号 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 5'   | 6    | 6'   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A2   | 10.9 | 24.1 | 11.1 | 21.5 | 20.0 | 23.2 | 18.0 | 20.5 |
| A3   | 10.9 | 24.7 | 10.3 | 20.7 | 18.5 | 17.3 | 18.0 | 17.8 |
| A4   | 10.9 | 24.1 | 9.6  | 21.1 | 18.5 | 17.3 | 18.0 | 19.0 |
| A5   | 10.9 | 24.7 | 10.9 | 20.8 | 18.3 | 16.6 | 18.0 | 16.8 |
| A6   |      |      |      | 20.9 | 18.0 | 16.3 | 18.0 | 17.5 |
| A7   |      |      |      | 21.1 | 18.3 | 17.8 | 18.0 | 17.2 |

注) 5, 6は、100galの入力時

5'は250gal, 6'は300galの入力時

#### 4. 実験結果

模型1~6の振動実験は不規則波形、正弦波、衝撃波形の順序で行われた。しかし、各振動毎の模型のヒリ換えや砂の入れ換えを行わなかったため、後の方の振動実験における模型地盤はその前に与えられた振動波形による締固め効果などの影響を受けている。

不規則波形による模型地盤の応答は図-1に

示すスペクトラムを用いて整理した。これらの応答曲線から算出した各模型の加速度計の位置における卓越振動数の値は表-2のとおりとなった。模型1の合成樹脂層の振動が予定の7~8Hzにはならないのは側壁の影響であることが後の解析の結果から判明した。

正弦波形による各地盤の最大応答倍率は表-3のとおりとなった。

衝撃波形によるものは減衰が早すぎて後続の波形が困難であった。

流動化は模型らにおいて不規則波で500ガル正弦波10Hzで400ガルで、模型6においては不規則波形で200ガル、正弦波の10Hzで300ガルの時に発生している。

実験中の上部砂層の沈下量は模型4においては約1cm、模型らにおいては5.5cmであったが流動化時は1.9cmであった。模型6では3.6cmのうち、流動化時のものは2.3cmであった。

流動化発生までのガルが高すぎるので、砂層の厚さの影響を図-4の3つの模型で検討してみた。そのうちから不規則波形に対する加速度の値を表-5に示す。流動化は模型9、8、7の順で顕著で、継続時間は2~3秒程度であった。

流動化は正弦波10Hzで模型①が300ガル、模型②が200ガル、模型④が200ガルであった。表-5からそれぞれの推定弾性波速度はそれぞれ32.45、52%と比するので、見かけのせん断剛性が厚さとともに上昇するこに与る。正弦波10Hz、300ガルのときの間隙水圧は模型①で $P_1=10.8$ 、模型②で $P_1=9.3$ 、 $P_2=13.0$ 、模型④で $P_1=11.3$ 、 $P_2=11.5$ 、 $P_3=12.8$ 、 $P_4=9.4\%$ であった。

模型10、11の振動実験の結果を表-6に示す。表-7は不規則波を入れたときの図-1の各計器に示されに最大応答値である。

## 5. 考察

図-1にみるとおり、不規則波形と正弦波形との間によい一致がみられるところから、不規則波形の応答倍率は固有周期の算出に有効な手段であることがわかった。また、模型1の共振振動数10.9Hzは多重反射モデルから算出した値とも一致する。

模型2において水の重量によって下層の振動性状が大きく変化している。模型らにおいて、表層面拘束効果は

表-3 地盤内の応答倍率(10Hz時)

| 模型番号 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 5'  | 6   | 6'  |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A2   | 2.7 | 1.7 | 2.7 | 1.3 | 1.5 | 0.8 | 1.4 | 0.5 |
| A3   | 3.2 | 1.6 | 3.4 | 1.3 | 1.7 | 1.1 | 1.6 | 0.8 |
| A4   | 2.0 | 1.1 | 2.4 | 1.3 | 1.5 | 1.1 | 1.5 | 0.9 |
| A5   | 3.1 | 1.3 | 2.9 | 1.2 | 1.6 | 1.1 | 1.4 | 0.8 |
| A6   |     |     |     | 1.4 | 2.0 | 0.9 | 2.0 | 0.5 |
| A7   |     |     |     | 2.9 | 1.9 | 0.7 | 1.6 | 0.1 |

注) 5'は、10Hz、400galの時、流動化

6'は、10Hz、300galの時、流動化

表-4 入力速度と共振振動数の関係

| 入力速度 | 20 gal  | 50 gal  | 100 gal | 150 gal |
|------|---------|---------|---------|---------|
| A-2  | 22.6 Hz | 22.1 Hz | 21.5 Hz | 21.7 Hz |
| A-3  | 22.6    | 22.9    | 21.7    | 19.9    |
| A-4  | 22.6    | 22.0    | 21.1    | 21.3    |
| A-5  | 22.6    | 22.0    | 20.8    | 20.0    |
| A-6  | 22.8    | 22.1    | 20.9    | 20.2    |
| A-7  | 22.8    | 22.1    | 21.1    | 20.6    |

A-2~A5は粘土層に、A-6、7は砂層に設置した加速度計である。

表-5 砂層厚の振動性状に与える影響

| 加速計<br>加通<br>記名 | 砂層厚70cm(模型9) |       | 砂層厚50cm(模型8) |      | 砂層厚30cm(模型7) |      |
|-----------------|--------------|-------|--------------|------|--------------|------|
|                 | 卓越振動数        | 応答倍率  | 卓越振動数        | 応答倍率 | 卓越振動数        | 応答倍率 |
| A-2             | 18.8 Hz      | 2.26  | 22.2 Hz      | 2.08 | —            | —    |
| A-3             | 19.1 Hz      | 6.16  | 22.6 Hz      | 5.42 | 24.0 Hz      | 4.22 |
| A-4             | 19.0 Hz      | 8.60  | 22.6 Hz      | 7.20 | 24.0 Hz      | 4.72 |
| A-5             | 19.0 Hz      | 10.44 |              |      |              |      |
| A-6             | 19.0 Hz      | 11.04 |              |      |              |      |

表-7 正弦波入力時の最大応答値

表-6 模型10、11の卓越振動数応答倍率

| 加速計名 | 模型 10   |      | 模型 11   |      |
|------|---------|------|---------|------|
|      | 卓越振動数   | 応答倍率 | 卓越振動数   | 応答倍率 |
| A-2  | 18.7 Hz | 4.52 | 18.6 Hz | 3.70 |
| A-3  | 18.7    | 5.92 | 18.6    | 5.20 |
| A-4  | 18.7    | 5.54 | 18.6    | 5.14 |
| A-5  | 18.7    | 9.24 | 18.6    | 8.60 |
| A-6  | 18.5    | 4.73 | 18.6    | 4.31 |
| A-7  | 18.7    | 5.02 | 18.6    | 5.16 |
| A-8  | 18.6    | 6.76 | 18.6    | 6.18 |

| 計器    | 模型10                     | 模型11                     |
|-------|--------------------------|--------------------------|
| 卓越振動数 | 卓越振動数                    | 卓越振動数                    |
| A-1   | 211.2 gal                | 317.0 gal                |
| A-2   | 489.5                    | 864.4                    |
| A-3   | 362.7                    | 548.2                    |
| A-4   | 337.0                    | 537.0                    |
| A-5   | 1024.4                   | 2124.1                   |
| A-6   | 328.5                    | 503.0                    |
| A-7   | 331.5                    | 447.9                    |
| A-8   | 617.4                    | 906.3                    |
| P-3   | 12.5 %                   | 11.4 %                   |
| P-4   | 6.2                      | 5.9                      |
| D-1   | 0.7 mm                   | 1.0 mm                   |
| S-2   | 55.7 x 10 <sup>-3</sup>  | 91.3 x 10 <sup>-3</sup>  |
| S-3   | 142.4 x 10 <sup>-3</sup> | 133.9 x 10 <sup>-3</sup> |
| S-4   | 158.9 x 10 <sup>-3</sup> | 147.1 x 10 <sup>-3</sup> |
| S-5   | 27.3 x 10 <sup>-3</sup>  | 157.4 x 10 <sup>-3</sup> |
| S-6   | 28.6 x 10 <sup>-3</sup>  | 51.7 x 10 <sup>-3</sup>  |
| S-7   | 44.4 x 10 <sup>-3</sup>  | 51.8 x 10 <sup>-3</sup>  |
| S-8   | 60.4 x 10 <sup>-3</sup>  | 86.5 x 10 <sup>-3</sup>  |
| S-9   | 39.6 x 10 <sup>-3</sup>  | 22.1 x 10 <sup>-3</sup>  |
| S-10  | 13.8 x 10 <sup>-3</sup>  | 165.7 x 10 <sup>-3</sup> |

あまりないことがわかった。

模型4は模型2と模型3の合成したものとみられる。流動化は発生しなかったが、表-4のような結果が得られた。この傾向ほどの模型にも見られる。

模型5までの流動化時にはリン青銅板のひびき計も対応する動きを示した。A6, A7の加速度計は応答率が低くはなっても、せん断抵抗の完全な喪失はあったものと推定できる。A2, A3, A6のパワースペクトル比をもって図示したものが図-6である。流動化によるエネルギーの遷移と継続時間が注目される。流動化前後の地盤の卓越振動数をもったものが、表-8である。

模型6では模型5と比べて流動化が早くあらわれているが、理由としては不透水膜の存在による間隙水圧の上昇、入力振動の不透水膜における反射による砂量のひびきの増大などが考えられる。

模型①～④においては、砂量の厚さの増加とともに卓越振動数が低下する傾向がみられる。卓越振動数  $f = v_s / 4d$  ( $v_s$ : 弾性波速度,  $d$ : 砂層の厚さ) の関係し、 $v_s = (G/\rho)^{1/2}$  ( $G$ : せん断弾性定数,  $\rho$ : 砂の単位体積重量) の関係からそれぞれの模型のせん断弾性定数はそれぞれ、1652%、2089%、2265%とになり、地盤の剛性の高まる傾向にある。

模型10, 11においては、くいの応答は地盤の応答より幾分高い値もにしているが、おおむね地盤の振動状況に支配されている。

また模型11では模型6でみられた間隙水圧の上昇があまり顕著ではなかったのは、くいやリン青銅板などのために不透水膜に大きな穴をあけていたことに原因があると思われる。しかし両者に共通していることはくいとリン青銅板のひびきの値に大きな差がみられる。このことは流動化のある砂層の中ではくいの剛性もあまり高めない方が有利なこともあることを示唆しているようでもある。

## 5. まとめ

以上の実験の解析はまだ完了していないが、今までのところ次のようなことがわかってきた。

- (1) 軟弱地盤上の飽和砂層は軟弱地盤中で蓄積、拡大した振動エネルギーの影響を大きく受ける。
- (2) 飽和砂層の流動化によって振動エネルギーの大部分は砂層の破壊という仕事量と流動化した砂の運動エネルギーに転換したものと推定できる。
- (3) 上層地盤の強度が高いときには下部の軟弱地盤の振動も拘束され、全体の振動も小さくなる。
- (4) 軟弱地盤の振動解析にみに、上層地盤の重量を無視することができない。重量の存在によって下部軟弱層のみかけの弾性係数の値が上昇する。
- (5) 飽和砂層の上の不透水膜の存在は振動波の反射やその下の砂層の間隙水圧の上昇など、流動化に大きな影響を与える。
- (6) 地盤中の有知にかは流動化の防止に貢献するということは地盤のせん断剛性係数の向上という現象からも説明できよう。
- (7) 流動化しに砂層中のくいの挙動は地盤の振動状況に支配され、流動化した砂層のヒコで大きく増大される。

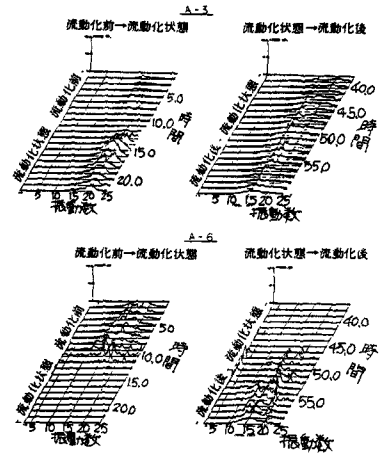


図-6 各層のパワースペクトル

表-8 流動化前後の卓越振動数

| 模型状態<br>計器 | 卓越振動数   |        |        |
|------------|---------|--------|--------|
|            | 流動化前    | 流動化状態  | 流動化後   |
| A-2        |         | 20.8Hz |        |
| A-3        | 16.75Hz | 20.0   | 16.5Hz |
| A-4        | 18.5    | 20.75  | 18.0   |
| A-5        | 16.75   | 19.0   | 15.5   |
| A-6        | 17.2    |        | 16.25  |
| A-7        | 16.75   |        | 16.0   |