

## (73) 永久変位対策工に関する模型実験と解析

九州工業大学工学部      ○安田    進  
同 上                      永瀬   英生  
九州工業大学大学院      規矩   大義  
第一復建（株）            内田   泰

### 1. まえがき

近年、液状化被害に関する研究の進展に伴って、数々の対策工が提案され、その幾つかは既に実用化されている。しかし、これらの対策工は主として、液状化の発生自体を抑止するものであり、広範囲な地盤の液状化によって発生する永久変位の抑制を目的として考案された工法は、ほとんど無い。本研究ではまず、永久変位の発生を抑止、軽減する対策工法を幾つか挙げ、その対策効果を振動台実験で確認した。次に、筆者達が提案している永久変位の簡易予測プログラムを用いて、実地盤に対策工を適用し、対策の効果を検討した。

### 2. 対策工の考え方

液状化による地盤の永久変位が定量的に把握されてから<sup>1)</sup>まだ数年しかたっていない。したがって、永久変位に対する対策工はまだ本格的には適用されていなく、どのような対策工が有効かわかりかにされていない。ただし、図-1に示すように次のような3つの方法があると考えられる。

(a) 締固めなどの通常の液状化対策工により液状化が発生しないようにする。

(b) 永久変位が生じても被害を受けないように構造物を強化する。

(c) 液状化が発生しても永久変位が生じないように地中連続壁などで地盤の動きをくい止める。

これらのうち、(a)は通常の液状化対策方法であり、また(b)は構造物ごとに異なるのでここでは扱わず、(c)の場合について以下検討を行ってみた。

### 3. 振動台実験の方法

筆者達はこれまでに液状化による地盤の永久変位のメカニズムを調べるため、振動台実験をいくつか行ってきた<sup>2)</sup>。これと同じ振動台、土槽、地盤モデル、加振方法で実験を行った。つまり、図-2に示すように幅1.0m、高さ0.65m、奥行き0.6mの土槽を用い、よく締固めた下層（非液状化層と呼ぶ）の上に、相対密度30%のゆる詰め層（液状化層と呼ぶ）を設けた。試料には豊浦標準砂（平均粒径が0.195mmのきれいな砂）を用い、液状化層は厚さ20cmで地表面、下面とも3%の傾きをもたせた。地下水位は中央付近で地表面から2cmの位置とした。

対策工の種類としては図-2に示したように、次の4種類を考え、それに相当する模型を作製した。

#### (a) サンドコンパクションパイル

外径2cmのアルミニウムのパイプを非液状化層に5cmほど差しこんでおき、その後液状化層を詰めた。そのあと、パイプを抜きその孔へ砂を入れてロッドによりサンドパイルを締固めた。その相対密度は90%~100%程度になるようにした。サンドパイルのピッチ、したがって置換率を表-1(a)に示すように3種類変えた実

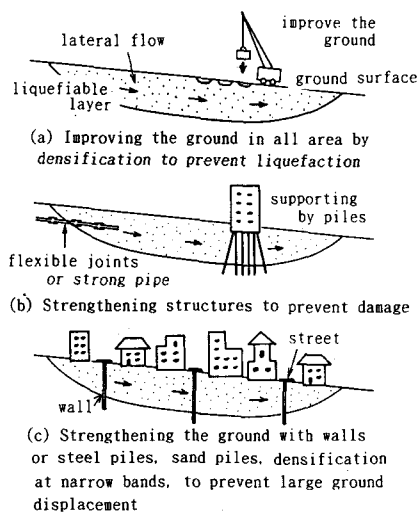


Fig.1 Three Categories of Countermeasure against Permanent Ground Displacement

験を行った。

#### (b) 鋼管杭

鋼管杭のモデルでは杭に加わる応力は特に問題にせず、すり抜けの防止のみに着目した。このため、特に相似則は考えず、内径1.8cm、肉厚2.5mmの塩化ビニールのパイプを模型として用いた。(a)と同様に非液化化層に立てた後、液化化層を詰めた。杭の配置は一列および二列(三角形配置)とした。その間隔は表-1(b)のように6通りとした。

#### (c) 壁状の締固め

(a) のパイプの代わりに厚さ2mmのアルミ板を2枚立てておいて液化化層を詰めた。その後板を引抜いてその溝に砂を詰め、(a)と同様に締固めた。その厚さは表-1(c)に示すように4種類とした。

#### (d) 地中連続壁

コンクリート製の地中連続壁や鋼矢板を想定し、アクリル製の板を用いた。その厚さは表-1(d)に示すように

2mm、3mmとした。曲げひずみを測定するため、その両面には深さ方向に4組のストレインゲージを貼った。

このように作製したモデルに3Hzの正弦波で加振を行った。加振方向は地表面の傾きと直角方向とし、液化化が発生して10秒後に加振を停止させた。地表面の変位はマーカ- (ピン) で、側面の変位は“うどん”にて測定した。

#### 4. 振動台実験結果

図-3に実験結果のうち、加振停止までの地表面の変位を示す。対策工を設けなかった場合は2~2.5cmの変位が生じ、特に土槽の中央部付近で大きくなっている。これに対し、対策工を施したものは2cm~2mmと小さな変位となり、対策工付近の斜面上方側で特に小さくなっている。つまり、対策工によって変位をくい止

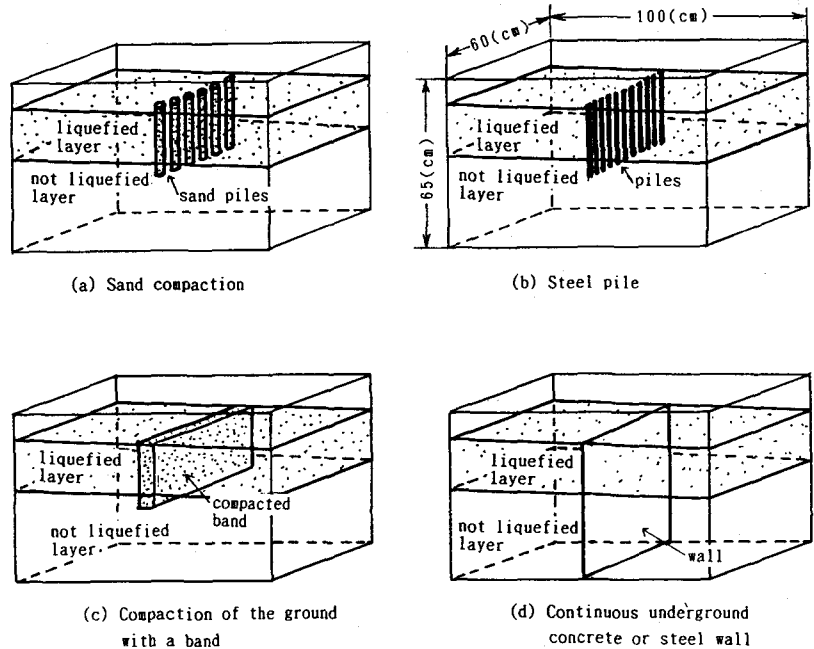


Fig.2 Models of Countermeasures in Shaking Table Tests

Table 1 Test Conditions of Countermeasures

(a) Sand Compaction

| Case No. | Number of piles | Rate of replacement As (%) |
|----------|-----------------|----------------------------|
| S-1      | 6               | 3.1                        |
| S-2      | 8               | 5.6                        |
| S-3      | 10              | 8.7                        |

(b) Steel pile

| Case No. | Number of piles | Pitch of piles(cm) | Number of rows |
|----------|-----------------|--------------------|----------------|
| P-1      | 10              | 6                  | 1              |
| P-2      | 12              | 5                  | 1              |
| P-3      | 15              | 4                  | 1              |
| P-4      | 20              | 3                  | 1              |
| PT-1     | 15              | 7.5                | 2              |
| PT-2     | 20              | 5.8                | 2              |

(c) Compaction of the ground with a band

| Case No. | Thickness of the compacted band (cm) |
|----------|--------------------------------------|
| W-1      | 0.5                                  |
| W-2      | 1.0                                  |
| W-3      | 1.5                                  |
| W-4      | 2.0                                  |

(d) Continuous underground concrete or steel wall

| Case No. | Thickness of the wall (cm) |
|----------|----------------------------|
| A-1      | 0.2                        |
| A-2      | 0.3                        |

められた恰好となっている。今回行った実験条件内では、4つの工法のうち、(d)の地中連続壁のモデルが一番変位量が小さくなった。サンドコンパクションや鋼管杭のモデルではパイル間に、やはりすり抜けが生じていた。ただし、図-3(b)でP-3とPT-1やP-4とPT-2を比較してみると、後者の方が少し変位量が少なく、同じ杭本数であれば一列に配置するより、二列で三角形配置にした方が効果的であった。壁状の締固め工法では、表層部の締固めが不十分だったのか、斜面上方側からの圧力に押されて、液化化後に少し曲がってしまっていた。

図-4には工法ごとに、サンドコンパクションパイルの置換率、杭の間隔、壁状締固めの厚さ、アクリル板の厚さと地表面変位量の関係を示す。これらの要因によって変位量は影響を受けてきている。実験条件の範囲内では特にサンドコンパクションパイルの置換率や壁状締固めの厚さに伴い変位量は大きく低減している。

地中連続壁のモデルにおいて、ストレインゲージの測定結果およ

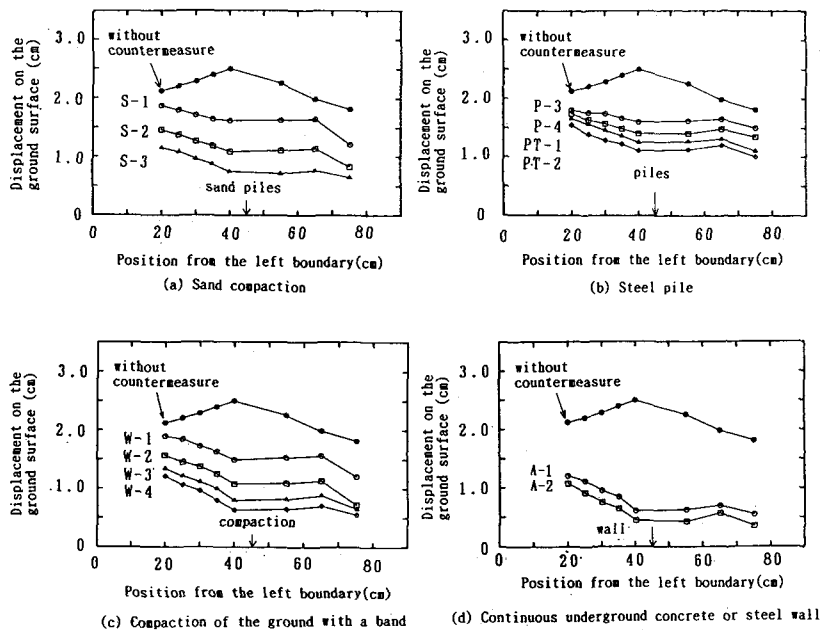


Fig.3 Measured Displacement in Shaking Table Tests

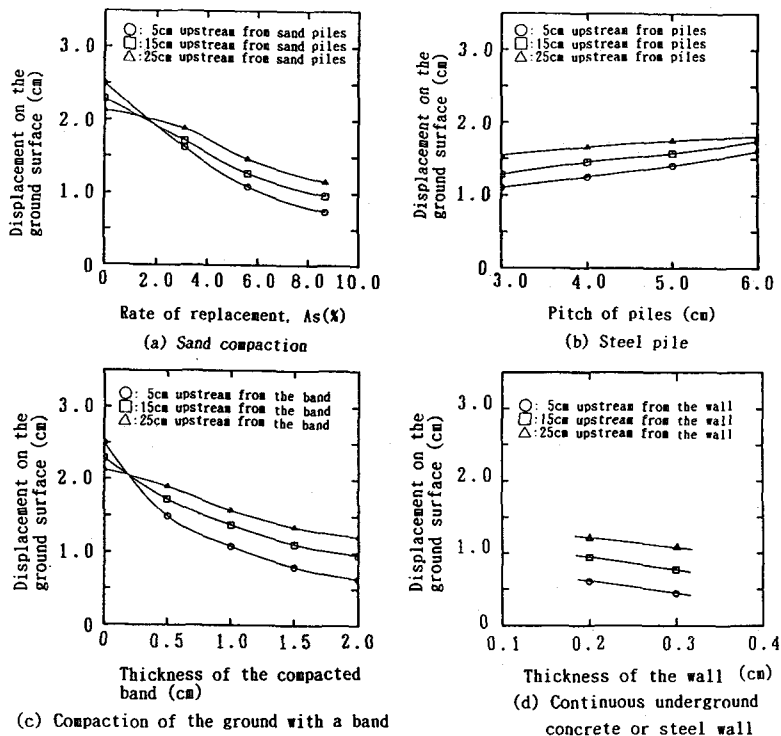


Fig.4 Effect of Countermeasures in Shaking Table Tests

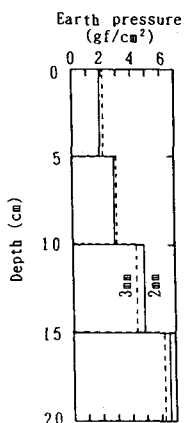


Fig. 5 Distribution of Earth Pressure

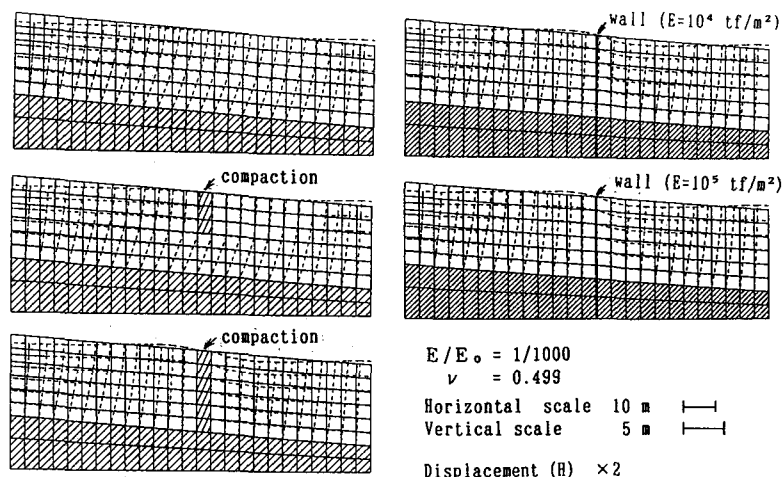


Fig. 6 Analyzed Deformation of Model Grounds with Countermeasure

びアクリル板のヤング率から推定した土圧分布を示すと図-5となる。これは斜面上方側と下方側の土圧の差を示したものと言えるが、深さ方向に三角形分布に近い値となっている。

#### 5. 実際の地盤における対策効果の解析

模型だけでなく、実際の地盤においてもこのような対策工が効果あるかどうか検討するため、モデル地盤についていくつかの解析を行ってみた。モデル地盤は図-6に示すように100mの長さとし、表層に10mほど液状化が生じるものと仮定した。液状化層および非液状化層のN値はそれぞれ、3.30とした。また、地表面および液状化層下面の傾きは3%とした。対策工としては上記の4種類のうち、壁状の締固めと地中連続壁の2種類を想定した。

解析では有限要素法を用い、液状化により地盤の変形係数が1/1000まで低下すると仮定し、地震前の解析結果より求めた変形量から液状化時の解析結果より求めた変形量を差し引いて、液状化による永久変位量を求めた。解析方法の詳細については文献2を参照していただきたい。

締固めでは対策工の深さ、連続壁ではヤング率を変えて解析を行った結果を図-6に示す。締固めは非液状化層と同程度の密度とし、幅は4mとした。また連続壁の厚さは40cmとした。前者では液状化層の中間まで締固めただけでは効果が少ないのに対し、液状化層下面まで締固めるとかなり効果的であるとの結果となっている。また、後者ではこのヤング率のレンジでも相当効果がある結果となっている。

#### 6. まとめ

以上、液状化による地盤の永久変位をくい止める対策工として4種類を想定し、振動台実験を行ってみた。今回の実験、解析条件内では地中連続壁が最も効果的との結果になったが、壁体が発生する応力のチェックも必要となろう。今後、実験や解析をさらに進めてゆきたいを考えている。

#### 7. 参考文献

- 1) 浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定とその考察、土木学会論文集、第376号、III-6、pp.211-220, 1986.
- 2) Yasuda, S., Nagase, H. and Kiku, H.: Shaking Table Tests on Permanent Ground Displacement Due to Liquefaction, 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol.1, pp.245-252, 1991.