

(78) 液状化実験による対策工法の効果について

熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 熊本大学工学部 正員 ○松本英敏
 八代工業高等専門学校 正員 瀧田邦彦

1. まえがき 地震時の埋設管路に数多くの被害が生じる原因として、液状化によって引き起こされる地盤の側方流動が指摘されており¹⁾、液状化時の管路の大変形問題に対して何らかの対策が必要である。液状化対策の1つとして、局所的に液状化を抑える効果のある砕石置換による施工実績が増えつつあり、著者らはその液状化対策に関する模型実験を行ってきたが²⁾、局所的な排水効果だけで広域の防止効果を期待するのは現実的には問題があり³⁾、他の工法の補助ないしは併用が望まれる。また液状化対策の代表例としては、サンドコンパクションパイル工法などの締固め工法があり、砂層の密度の増大を図る工法として広く施工され、その効果も報告されている⁴⁾。一方、液状化時の側方流動の発生メカニズム、構造物への影響や対策工法の効果など活発に研究が進められているが⁵⁾、解明すべき問題もまだ数多い。以上のような現状を踏まえて、本研究では、管路における液状化対策という観点から、対策工法の有効性について、主として実験的に検討する。まずはじめに動圧密ないしはパイロタンパーを想定した地表面の振動締固めを行い、管路における地盤反力係数より締固め工法の液状化対策としての有効性を検討した。

次に、液状化時の側方流動に関して、これを地盤のせん断変形に基づくものであるとの観点からシートパイル工法を想定した模型実験および解析より、シートパイルによる対策の効果について考察した。

2. 地盤反力係数の実験概要 本研究に用いた引抜き試験装置は、図1のように、レール上に固定した起振機と砂槽(幅38×長さ98×高さ33cm)をころの上に載せて水平加振するものである。模型地盤は、表1の物理定数に示すように、均等係数2.31の比較的均一な川砂を用いており、これを砂槽底部の噴き上げ装置により、緩詰め状態とした。図1(a)の締固め地盤の作成にあたっては、小型起振機(早坂機械製作所製)を緩詰め地盤の地表面に設置し、起振力2.9kgfで約20秒間振動締固めを行った。その後、地盤の締固めの度合を調べるためベーン(直径5cm, 高さ10cm)を用いてせん断断力を計測した。一方、図1(b)は飽和砂部分と砕石部分とからなる砕石置換工法の模型地盤である。砕石部分はコンクリート用骨材の砕石(最大寸法20mm)を密に詰めて作成し、飽和砂部分と砕石部分との境界には砂の移動を防ぐためにナイロンメッシュを用いている。

実験ではまずa)無対策地盤とb)締固め地盤中に、地表面から5, 15, 25cmの深さ方向3ヶ所に水圧計, 加速度計を設置し, 加振実験を実施した。次に, 液状化時の側方流動に対する地盤の抵抗力を調べる目的で, 模型管路を強制的に水平移動させる実験を行ったが, 図1には滑車を介して模型管路をクレーンで引っ張る装置を示している。模型管は深さ10および20cmの位置に設置し, 水平移動時の引張力と変位をそれぞれロードセルと変位計にて計測した。滑車はわずかに砂を噛んだが, クレーンの引き上げ速度が16.5cm/secとその性能上速かったた

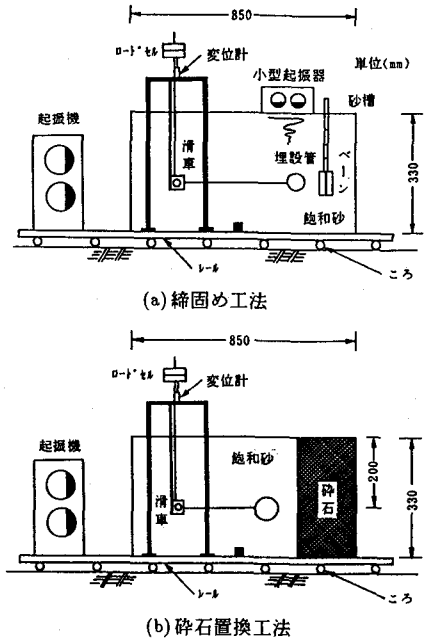


図1 振動砂槽と引抜き試験装置

表1 模型地盤の物理定数

比重	2.74
最大粒径	2.0(mm)
e_{max}	1.026
e_{min}	0.671
均等係数	2.31
平均粒径	0.34(mm)
透水係数	2.12×10^{-2}

表2 試験条件

単位体積重量	1.88(gf/cm ³)
管の長さ	25(cm)
埋設深さH	100, 200(cm)
管径d	3.8, 6.0(cm)

め、滑車の抵抗は無視できるほど小さかった。今回の実験では砂槽は各れの場合も振動数12Hz, 最大加速度約120galで正弦加振した。

3. 地盤反力係数の実験結果と考察 表2に示す試験条件のもとで、振動締固めによる引抜き試験を行った。図2は埋設深25cmにおける無対策および振動締固めによる過剰間隙水圧の時刻歴である。無対策の場合は、加振と同時に過剰間隙水圧が急激に上昇していることがわかる。一方、締固めた場合は、最下図の初期せん断強度(τ_0)が大きい場合、過剰間隙水圧の上昇開始時刻が遅れ、その上昇も緩やかであるが、液状化の発生自体は防止できていない。

図3は完全液状化継続時間(T_L)とベンセン断試験による初期せん断応力(τ_0)との関係を示したものである。5, 15, 25cmのいずれの深さにおいても締固めを行った場合の液状化継続時間は、無対策の場合(黒塗り)のそれよりわずかに短いことがわかる。また、初期せん断応力の増大に対して継続時間は短くなる傾向にあり、締固め工法の効果が認められるが、埋設が深くなるに従いその傾斜は緩やかとなって締固めの効果は小さくなるようである。

図4は地盤反力係数と初期せん断応力との関係を示したものである。無対策の場合は完全液状化しており地盤反力係数は0.02~0.03(kgf/cm²)付近に集中している。一方、締固め地盤においては初期せん断応力が増すに従い、地盤反力係数も増加する傾向にあり、深さ10cmでは、締固めの効果がよく表われている。しかし、深さ20cmでは、初期せん断応力が50gf/cm²程度以上になると頭打ちの傾向が見られ、締固めの効果がなくなるようである。

図5は、図1(b)の碎石置換による地盤反力係数と締固めによるそれとを、埋設深さ・管径比(H/d)に対して図示したものである。無対策の場合は完全液状化しており、深さに関係なくほぼ一定の値となっている。碎石置換の場合(碎石境界より10cm)には、深さに比例して地盤反力係数が増加する傾向が見られる。一方、締固め工法の場合には、データに多少のばらつきがあるものの、 H/d が小さい場合は碎石置換による地盤反力係数よりも大きくなっており、その効果は認められるが、 H/d が大きくなると締め固めによる地盤反力係数は減少ないしは頭打ちの傾向にあるといえる。

4. 側方流動の実験概要 以上は、液状化時の地盤反力係数より締固め工法などの対策の効果を検討したが、次に、地盤反力係数とともに液状化時の管路被害に関して重要な指標と考えられる側方流動の問題を取上げる。側方流動に関する実験のために、図1と同様の振動実験装置の砂槽中に、図6のような、十分に締固めた液状化しない基盤と水中落下による飽和砂地盤とからなる模型地盤を作成した。砂は地盤反力係数の実験の場合と同様、表1に示すものを用いた。模型地盤の基盤上には木製の

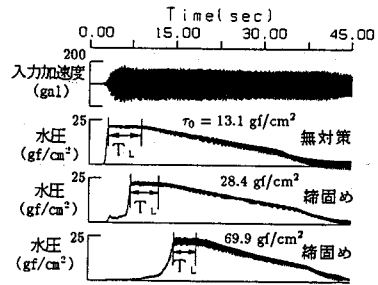


図2 入力加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

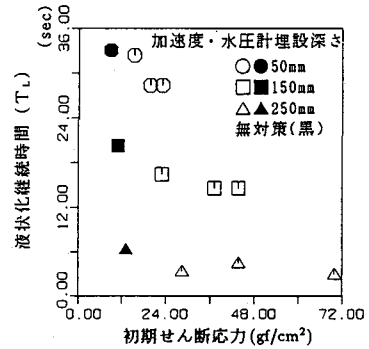


図3 液状化継続時間と初期せん断応力との関係

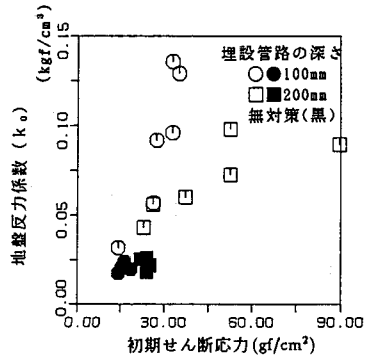


図4 地盤反力係数と初期せん断応力との関係

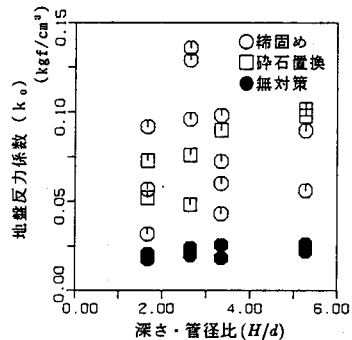


図5 地盤反力係数と深さ・管径比との関係

製の板を敷いて地盤に傾斜をもたせた。ここでは、側方流動による永久変位発生のための基本的な条件として、地表面および基盤が同一の傾斜角 ($\theta = 5\%$) で傾斜している場合について実験を行った。また側方流動に対する対策工法のシートパイルの模型として、砂層のせん断変形による鉛直方向の曲げ方程式の線形相似率 (原型に対する模型の縮尺として、長さの縮尺=1/100, 地盤ばね定数の縮尺=1/1 など) を考慮して、その幅と厚さがそれぞれ 37.0, 0.30cm のアクリル板を用い、模型地盤の深さと同じ高さのものを基盤上の木製板に固定して用いた。

実験は無対策地盤とシートパイルによる改良地盤において、振動数 12Hz, 最大加速度約 120gal で正弦加振実験を実施した。このとき、模型地盤の地表面の加振方向およびその直角方向には合計 12ヶ所にピンを配置し、振動実験時の時間的変動をビデオカメラにより撮影し、側方流動による永久変位量を測定した。また側方流動の鉛直分布を観察するため、砂槽側面にスポンジの柱を等間隔に 4ヶ所配置し、その振動後の側方移動量を測定した。

5. 側方流動の実験結果と考察 図 7 (a) は、無対策地盤における側方流動の実験結果であり、長さ 1m, 深さ 0.15m の砂層を $25 \times 5 = 125$ のメッシュに分割し、4ヶ所のスポンジによる側方流動の鉛直分布測定結果より隣接スポンジ間のメッシュの変位を線形的に内挿して求め、これを破線で図示したものである。すなわち実線は地盤の変形前の状態を、破線が変形後の状態を表わしている。この図より、側方流動による永久変位は、ある面をすべり面として表層が流動したのではなく、安田⁵⁾も指摘しているように液状化層が一定のひずみ量でせん断変形を起こした結果によるものと推察される。

以上の実験結果のみならず液状化による地盤の大変形の被害事例からも、永久変位の発生メカニズムは、地盤の軟化による土塊のすべりではなく、地盤全体のせん断変形によると考えられる場合が多い。そこで地盤のせん断変形を永久変位発生の主要因とする考えに基づいて、有限要素法を用いた解析を行った。このとき液状化地盤は 2次元弾性体とし、外力は液状化地盤の自重とする静的な解析としたが、地盤のせん断弾性係数は実験結果の卓越周期等より求めたものを用いた。解析結果の 1例が図 7 (b) であり、図 7 (a) と同様、実線は地盤の変形前の状態を、破線が変形後の状態を表わしている。解析の対象とした地盤は、模型地盤の縮尺より模型地盤の 100 倍の大きさとし、図 7 (b) の 1メッシュの大きさは 4×3 m である。(a) の実験結果と (b) の解析結果より、永久変位の分布および大きさは比較的良好に対応しており、FEM による解析手法が概ね妥当であることを示している。

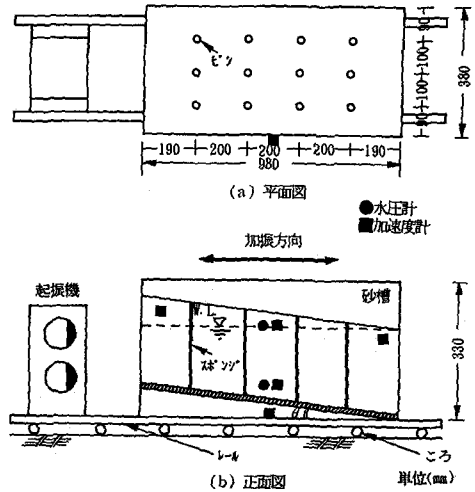


図 6 側方流動実験装置

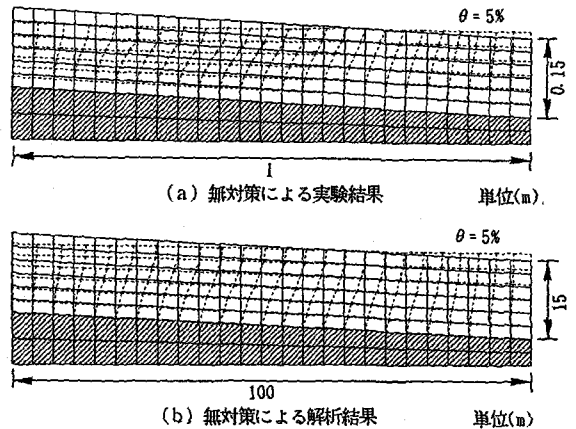


図 7 無対策地盤の側方流動結果の 1例 (地盤厚 $H=0.15$ m, 傾斜角 $\theta=5\%$)

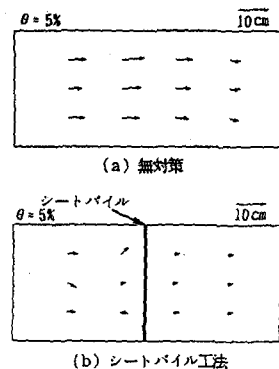


図 8 模型地盤表面の側方流動変位の 1例

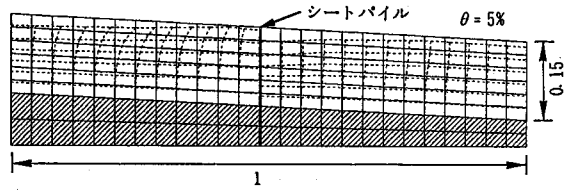
次に、側方流動の対策として、シートパイル工法の有効性について検討する。図8 (a) (b)はそれぞれ無対策およびシートパイル工法を用いた場合の地表面における変位ベクトルの実験結果を図示したものである。図より明らかなように、シートパイル工法によって地表面における変位量は減少しており、その効果が認められる。中央部6ヶ所の平均変位を比較すると、無対策の場合の5.83cmが、シートパイル工法では2.05cmと約1/3に低下している。

図9はシートパイル工法を施した地盤における変位分布の実験と解析による結果を表わしたもので、(a), (b)はシートパイルを1ヶ所設置した場合のそれぞれ実験、解析の結果を、(c)はシートパイルを3ヶ所設置した場合の解析結果を表わしている。(a)より、シートパイル近傍の地表面の水平変位量は、図7 (a)の無対策の場合に比べてかなり小さくなっており、対策工法の効果が表われている。また、地表面の沈下量については、図9 (a)のシートパイル設置位置よりも左側の山側部では沈下量も小さく対策の効果が表われているが、それよりも右側の谷側部では、シートパイル近傍の沈下量が図7 (a)の無対策の場合よりも大きくなっている。これは、シートパイルによってその左右の地盤が遮断されてそれぞれ独立に安定しようとしたためと考えられる。

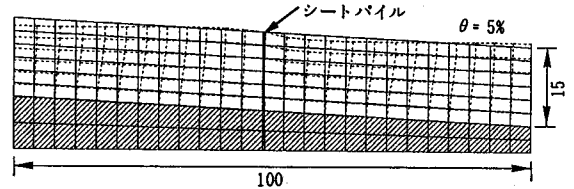
図9 (b)のシートパイルを施した地盤の解析結果を、(a)の実験結果と比較すると、地表面の側方流動による変位量や沈下量がかなり近い値となっており、解析手法は実験結果をよく表現していることからほぼ妥当であるといつてよいであろう。図9 (c)のようにシートパイルを等間隔に3ヶ所設置した場合には、地表面の変位量と沈下量はさらに小さくなり、対策工法の効果が高められている。

図10はシートパイルの施工個数と最大水平変位との関係を図示したものである。シートパイルの施工個数が増すほど、最大水平変位量は減少し、シートパイルを2ヶ所設置した場合で、最大水平変位は約1/4以下に低下している。これよりシートパイルを設置することによって、永久変位をかなり抑制することが可能と考えられる。

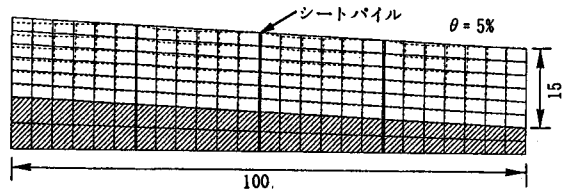
6.まとめ 以上のように本研究では、まず締固め工法に関する実験により、締固めによる液状化対策は埋設が浅い場合に効果が認められ、深くなるほどその効果は頭打ちの傾向となり、地盤の内部では液状化が発生する可能性があることなどを確認した。次に側方流動に関する実験および解析より、シートパイル工法による液状化対策は側方流動変位の抑制に効果があることを明らかにした。



(a) シートパイルによる実験結果 (1ヶ所) 単位(m)



(b) シートパイルによる解析結果 (1ヶ所) 単位(m)



(c) シートパイルによる解析結果 (3ヶ所) 単位(m)

図9 シートパイルにより改良した地盤の側方流動結果 (地盤厚H=0.15m, 傾斜角 $\theta=5\%$)

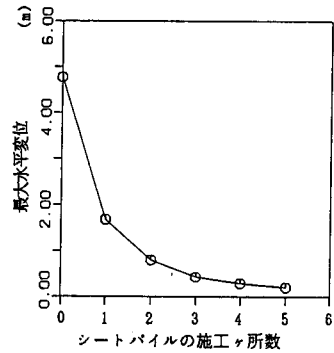


図10 シートパイルの施工個数と最大水平変位との関係

参考文献 1) 浜田他3名: 土木学会論文集, No.376, pp.211~220, 1989. 2) 秋吉他3名: 土木学会第45回年次学術講演会, pp.1192~1193, 1990. 3) 吉見吉昭: 土と基礎, pp.33~38, 1990.6 4) 例えば安田 進: 液状化の調査から対策まで, 鹿島出版会, 1988. 5) 安田 進: 平成元年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書, 1990