

(76) 埋設管路の液状化対策工法に関する実験的考察

日本鋼管株式会社 技術研究所 正会員 大石 博
 日本鋼管株式会社 技術研究所 正会員 ○関口 宏二

1. はじめに

近年、人工島や埋立地などの軟弱地盤中に多くの管路が建設される傾向にあり、地震時の地盤の液状化による埋設管路の危険性が指摘されている。液状化の発生の可能性のある地点での管路建設に関しては、路線変更などにより対処するのが最適であるが、それが不可能な場合には、何らかの対策が必要になる。さらに既設管路においても、液状化し易い地点を通過しているものに対しては、対策が要求される場合もあろう。このような観点から、液状化時の埋設管路の挙動を明らかにし、埋設管路の液状化対策工法の有効性を検討する目的で、実験を行った。

2. 埋設管路の液状化対策工法の基本的考え方

埋設管路の主な液状化対策工法は、次の2種類に大別されよう。

1) 地盤の液状化は許すが、管路の浮上を防止する。

ⅰ) 埋設管路を液状化しない層まで根入れした杭、またはアースアンカーにて固定する。(図1(a))

ⅱ) コンクリートコーティングなどにより、浮力とつりあうように管体を重量化する。(図1(b))

ⅲ) おもりを適切な場所に設置する。(図1(c))

2) 地盤の液状化強度を増加し、液状化そのものを防止する。

対策工法1)は、液状化が発生すると砂質地盤は、流体と同様の挙動を示すので、浮力に対して措置をとったものである。これらの工法は、使用実績が少なく、また実際に液状化に遭遇した事例も報告されていないので、実験により有効性を検討することにした。対策工法2)は、一般の土木構造物の液状化対策として通常行われているものであるが、埋設管路のように施工延長が長い場合には経済性が問題となろう。

3. 埋設管路の液状化対策実験

3.1 実験方法

鋼製の土槽(長さ3m、幅1m、高さ50cm)に水で飽和した砂地盤を作成し、模型管(アルミ製、径60mm、長さ2800mm、厚さ2mm)を深さ15cm(中心までの深さ)に埋設する。土槽を振動台上(3m×3m)にて加振し、液状化を発生させる。実験に用いた砂は、 $D_{50} = 0.6\text{mm}$ 、均等係数3.0の比較的均一な砂である。土槽に水をはり乾燥した砂を落下させる方法で模型砂地盤を作成した。平均湿潤密度 1.86g/cm^3 、相対密度73%であった。

symbol	measuring instruments
□	acceleration meter
⊙	porewater pressure meter
—	strain gage
↓	marker
←	displacement meter

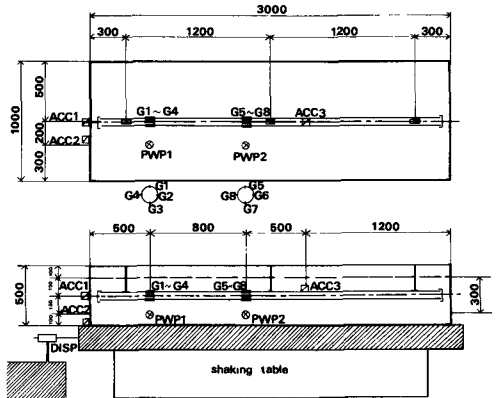


図2 計器配置図

計器配置図を図2に示す。加速度計ACC1, ACC2は土槽に、ACC3は模型管に設置されている。間げき水圧計PWP1, PWP2は、深さ30cmのところ埋設されている。ただし、実験No5ではPWP1は矢板の内側に埋設した。ひずみゲージG1~G8は、管軸方向のひずみを測定している。なお、加振前後の模型管の位置を知るため、目盛つきマーカーを模型管に直接3カ所設置している。

3.2 実験条件

実験条件一覧を表1に示す。実験No1~No4は全層が飽和砂地盤であり、実験No5は模型管を碎石で埋め

戻している。振動台は、全ケースとも2Hzで加振した。また、変位振幅の大きさは、手動操作により徐々に増加させ、一定振幅でしばらく加振の後、現象が定常状態に入ってから振動台を停止した。

表1 実験条件一覧

実験 No.	模型管～地盤系状況図	1 m	液状化対策の方法	備考
1			無対策	No. 2～No. 5 との比較を行う
2			模型管内部に線状のおもりを入れ、比重2.0となるようにした	2 1) II) の対策法 図 1 (b)
3			針金で、土槽底部と模型管を結んだ	2 1) I) の対策法 図 1 (a)
4			模型管におもりを吊るし、全体の比重が2.0となるようにした	2 1) III) の対策法 図 1 (c)
5			模型管を砕石6号で埋戻し、矢板で囲った	矢板にて、液状化・非液状化部分を分離する

3.3 実験結果と考察

実験の記録波形を図4～7に、振動停止後の地盤沈下・模型管の変位を図8に示す。液状化の過程は、いずれの実験においても非定常であり、砂地盤、模型管などは複雑な挙動を示している。しかし、一見複雑に見える挙動も地盤内の応力状態、特に応力径路により分類すると理解し易くなる。

3.3.1 液状化過程の分類と模型管の挙動

間げき水圧の挙動に着目し、液状化の過程を次のように分類する。なお、“不完全液状化”、“完全液状化”、“Cyclic Mobility”などの用語はすでに広く用いられているものであるが、その他の用語は便宜的につけたものである。

A：安定期……振動開始より間げき水圧が上昇を始めるまでの期間。地盤には変化がみられず、模型管と地盤は一体となって運動している。模型管に発生するひずみはきわめて小さい。

B：不完全液状化期……間げき水圧が上昇を始めてから、最大間げき水圧に到るまでの期間。地表では大きな変位応答がみとめられ、地表面への水の浸出が始まる。間げき水圧の上昇に伴い、模型管の加速度は土槽の加速度よりも大きくなる。模型管のひずみは、全液状化過程の中で最大となる。

C：完全液状化期 or Cyclic Mobility …… “不完全液状化期”から“間げき水圧消散期”までの期間。ただし、両者と明確に分離できない場合も多い。砂の密度、振動加速度の大きさなどにより、さらに細かい分類が必要と思われる。実験データの中の代表的な例を、模式的に示したのが、図3である。図中の間げき水圧、土槽加速度、管体加速度は実測に基づき、有効応力径路、応力～ひずみ関係は間げき水圧より推定して描いたものである。

C-a：完全液状化……いわゆる“液状化”と呼ばれている状態。砂は有効応力0となり、流体と同様の挙動を示す。せん断応力が管に伝わらないため、管の加速度は非常に小さくなり、管体ひずみも小さい。

C-b：弱いCyclic Mobility……“Cyclic Mobility”の状態において土に加わるせん断応力が比較的小さい状態をいう。模型管は土槽よりも90°位相が遅れ、パルス的な加速度をもつような動きをする。これは、砂が流体のような状態と、若干有効応力を回復したような状態をくり返すため、後者の状態のときのみ模型管に力を及ぼすためと考えられる。模型管のひずみは、“不完全液状化時”より小さい。

C-c：強いCyclic Mobility……“Cyclic Mobility”の状態で、土に加わるせん断応力が大きい場合

をこう呼ぶ。

C-d: 不完全な Cyclic Mobility ……有効応力径路が、有効応力 0 と初期拘束圧との内側で、変相線に沿うような状態をいう。模型管は、周囲の砂と同一の挙動をしているものと思われ、管と土槽の加速度は同位相である。模型管に発生するひずみは比較的小さい。

D: 間げき水圧消散期……蓄積された間げき水圧が消散を始めてから、間げき水圧が一定値に安定するまでの期間。地盤の沈下、模型管の残留ひずみなどが認められる。

3.3.2 各実験に対する考察

(1) 実験 No 1 (図 4)

0~16秒は“安定期”であり何ら変化はみられない。16~20秒は“不完全液状化期”であり、地表では大きな変位が発生し、浸水が始まる。20~60秒にかけて、“弱い Cyclic Mobility”から“不完全な Cyclic Mobility”へと遷移している。水面では液状化した砂が波打っている。模型管は23秒に浮上を開始し、37秒に60°回転して完全に地表まで浮上した。地表は、“完全液状化”の状態と考えられ、模型管の加速度は非常に小さくなる。その後、徐々に加速度が大きくなっているのは、砂の再堆積により有効応力が増大しているためと考えられる。60秒以後は、“間げき水圧消散期”である。振動停止直後に間げき水圧が若干上昇しているが、これは、振動停止により、上向き浸透流が発生したこと、間げき水圧計が沈下したことなどが原因と考えられる。

(2) 実験 No 2 (図 5)

0~7秒は“安定期”である。7~10秒は“不完全液状化期”であり、地表には大変位が発生し、浸水が始まる。また、間げき水圧が増大し、模型管には大きなひずみが発生している。10秒前後に、きわめて短時間“完全液状化期”となり、管体加速度、ひずみは比較的小さくなる。11~12秒は、“弱い Cyclic Mobility”の状態であり、水面はスロッシングがみとめられた。模型管は浮上せず、土中に留まっている。模型管の加速度は土槽の加速度よりも90°位相が遅れ、パルス状の大加速度をくり返している。また上下曲げひずみが継続している。20秒以後は、“間げき水圧消散期”である。間げき水圧の消散に伴い、模型管には静的な残留ひずみが発生している。

(3) 実験 No 3 (図 6), 実験 No 4 ……実験 No 2 とほぼ同様の挙動を示している。

(4) 実験 No 5 (図 7) ……矢板の内側と外側とでは全く異なる現象を示した。矢板外側では液状化が発生し、地表に置いたモニター構造物の沈下(11~17秒)や、モニター管(-15cmに埋設)の浮上が起こった。しかし、間げき水圧 PWP2 は、加振中に消散が完了している。一方、矢板内側では、間げき水圧はわずかに上昇しただけであり、模型管、砕石および土槽は一体となって運動していると考えられる。模型管の動ひずみは小さいが、砕石の沈下による静的なひずみは比較的大きい。

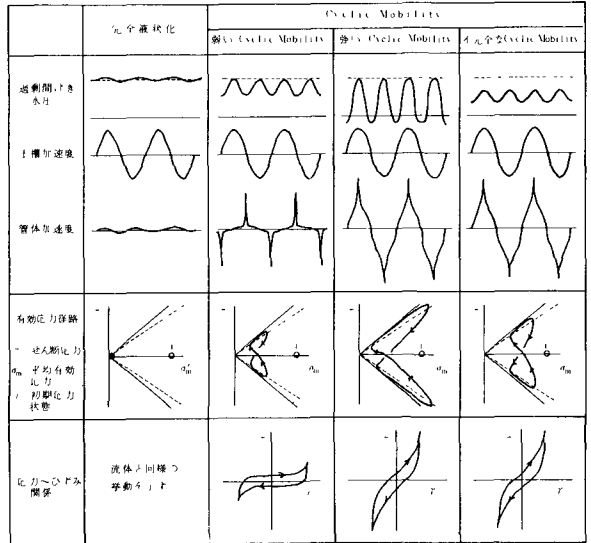


図 3 完全液状化, Cyclic Mobility の分類

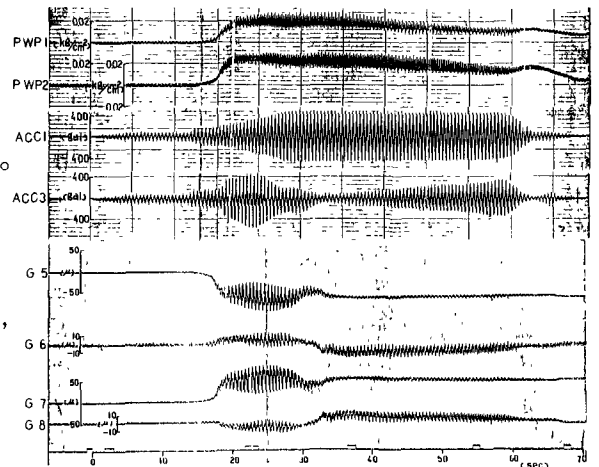


図 4 記録波形(実験 No 1)

3.3.3 対策工法の有効性の検討

まず、実験№2～№4の対策工法に関して検討する。

I) 針金、おもり、重量化などによる悪影響はほとんどみとめられなかった。

II) 加振終了後の地盤沈下、模型管の変位を図8に示す。同図よりいずれの場合も管体の浮上防止効果は良好といえよう。

III) 液状化により地盤沈下が発生している。本実験では両端自由のため、模型管の残留ひずみは比較的小さいが、長い管路に沿うような不等沈下に対しては注意を要する。部分的な不等沈下が発生した場合の管体応力計算は、文献1)などが参考になる。

IV) 不完全液状化時に、大きな管体ひずみが発生するので注意を要する。

V) “弱いCyclic Mobility”において埋設管に大きな加速度が発生する。しかし、通常のゆるい砂地盤の液状化過程では、“安定期”→“不完全液状化期”→“完全液状化期”→“間引き水圧消散期”と推移すると考えられるので、問題はないであろう。本実験では、相似率的にはかなり透水性の良い地盤模型を用いたことが、“弱いCyclic Mobility”の発生の原因と考えている。

次に、実験№5より、碎石埋戻しと矢板の併用は、きわめて効果的な液状化対策工法といえよう。ただし、液状化時の矢板の安定性や、碎石による埋設管表面の損傷などに注意を要する。

4. あとがき

本実験は定性的な実験ではあるが、埋設管路の液状化対策を行う上で基本的に重要な事柄を抽出するよう努めた。ここでは、管体の浮上を防止する工法に重点を置いたが、既設の埋設管路の液状化対策にあたっては、施工中に埋設管に及ぼす影響の小さい碎石ドレーン工法などが有望であろう。今後、より経済的で信頼性の高い、埋設管路の液状化対策工法の確立が必要と考えている。

5. 参考文献

1) 関口・大石：地盤の部分的変形による埋設管断面力の簡易計算法，第38回年次学術講演会発表予定，昭和58年9月。

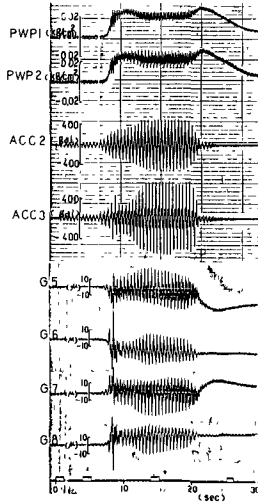


図5 記録波形(実験№2)

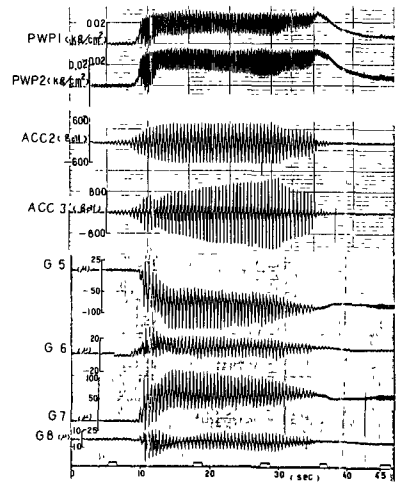


図6 記録波形(実験№3)

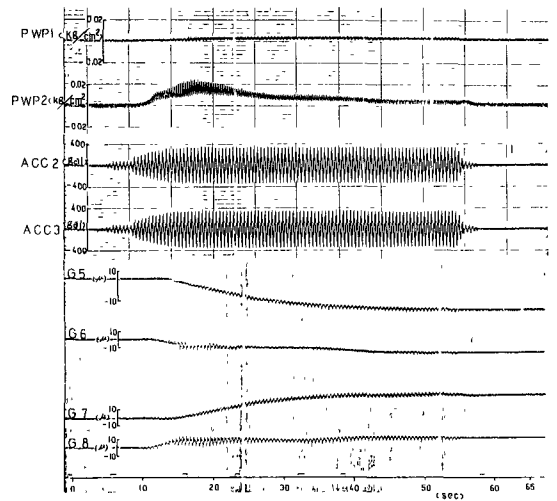


図7 記録波形(実験№5)

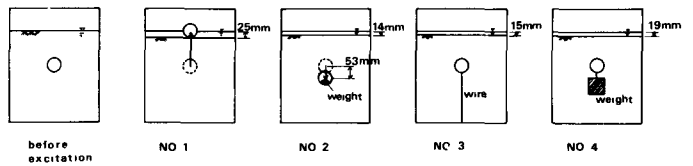


図8 振動停止後の地盤沈下、模型管の変位