

(65) 締固めによる埋設管の液状化対策についての研究(その1)

—振動台実験による浮上り防止効果の検討—

(財) 電力中央研究所 ○ 栃木 均 当麻純一

大友敬三 田中幸久

小峯秀雄

東京電力 (株)

福田聡之 安部秀範

1. はじめに

送配電用の洞道・管路、燃料輸送用導管などの地中構造物の中には、地下水位の高い比較的緩い砂層の地表面付近や海底の地盤内に設置せざるを得ないものがある。これらの地中構造物は、みかけの比重が小さいことが多く、大地震時に液状化が起き地盤が泥水状態になると構造物は浮き上がってしまうものと考えられる。実際に、過去の地中構造物の被害をみても、浮上りによるものとみなされる被害形態、あるいは液状化した地盤が全体的に水平方向に流動したためと思われるもの等が報告されている。⁽¹⁾

地中構造物の浮上りの防止を目的とした液状化対策としては砕石埋め戻し工法、締固め工法等が講じられているが、このうち管路等の埋設管に対しては、締固め工法の適用性が高いと考えられる。この場合、地盤の締固めによって地震時の過剰間隙水圧の抑制が期待されるが、改良範囲や締固めの程度が不充分であると、周辺の非改良地盤からの間隙水の浸透により改良地盤内の間隙水圧の上昇が起き、これが揚圧力として埋設管に作用する。このため、適切な改良範囲を定めることが必要である。

本研究では埋設管の液状化対策としての締固め工法について、地盤の改良範囲の合理的な設定法の提案を行うことを目的としている。研究の全体的な構成は、地盤の締固め範囲と締固めの程度をパラメーターとした模型振動実験、定常透水試験²⁾ およびそれらに関する数値解析³⁾ から成る。

模型振動実験により、締固め効果の確認を行い、定常透水試験により主として地震後の浸透流の影響について検討した。そして、数値解析により実設計への適用性の検討を行った。ここでは、これらのうち、模型振動実験の結果について報告する。

2. 実験方法

(1) 概要

層厚5mの飽和したゆるい砂地盤内に直径60cmの鋼管2本を埋設した場合を想定し、1/5縮尺の模型実験を実施した。振動台上に固定した鋼製の土槽内に厚さ1mの飽和砂層を作成し、砂層内に直径12cmの鋼管模型を埋設した。土槽の内のり寸法は、高さ1m、長さ6m、奥行き1mであり、鋼管の埋設深さは管の中心位置で36cm(実地盤では1.8mに相当)とした。埋設管の周辺の砂層を締固めによる地盤改良を行

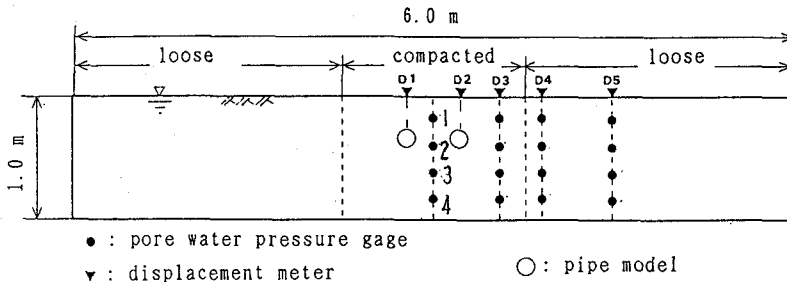


図-1 実験模型の概要

い、地盤の改良幅と締固め程度を種々変化させた。すなわち、実験を2つのフェーズに分類し、締固めの目標値を相対密度80%として地盤の改良幅を60、90、120 cmと変えた実験（第1フェーズ）と、地盤の改良幅を60 cmとして締固めの目標値を相対密度40、60、80%と変えた実験（第2フェーズ）を実施した。これらの実験により地盤の改良幅と締固めの程度が埋設管の浮上り量や地盤内の過剰間隙水圧等に及ぼす影響を調べた。図-1には模型の概要を示す。

(2) 砂層

砂層は改良部と非改良部に分けられるが、どちらも同じ砂材料を用いて作成した。砂材料には、第1フェーズでは利根川産の川砂を用い、第2フェーズでは実施工で用いられる浅間山砂を用いた。図-2には、それらの粒度曲線を示す。

非改良部は、液状化しやすい砂層とすることが目的なので相対的密度の目標値は特に設定せず、水中落下方式によってできるだけ緩い砂層を作成した。完成後に投入砂重量と土槽内容積から求めた相対密度は30~50%であった。

改良部は、1 m²当たりの打撃回数を400回に定めて、厚さ約5 cmごとに木ダコによって締固めて作成した。完成後に、地下水位を地表面に一致させている。締固めの目標値の上限を80%としたのは、砂の液状化に対する抵抗が急に高まるときの目安とされていることと、施工条件のほぼ上限に近いと考えられることによる。

(3) 埋設管模型

本実験では、ガスパイプライン（外径609.6mm、内厚18.3 mm、見かけの比重1.0の鋼管、2条）を想定し、その1/5の大きさの鋼管模型を使用した。埋設管模型の直径は12 cm、長さ98 cmであり、埋設管の長手方向が土槽の奥行き方向（1 m）に一致するように埋設した。2本の管の中心の距離は24 cm（実地盤では1.2 mに相当）とし、液状化に伴う埋設管の浮上りや沈下を地表面から測定するために、管にアクリル製の支柱を取付けた。この支柱を含めた管全体の見かけの比重は1.03である。

3. 実験結果

(1) 無対策の場合の過剰間隙水圧と埋設管の浮上り性状

土槽の中心位置の過剰間隙水圧計の深さごとの記録波形と埋設管の鉛直変位を図-3、4に示す。これらは、地盤の改良幅を60 cmとし相対密度が51%となるまで締固めた場合の記録であり、無対策に近い状態を表している。加振条件は、片振幅187gal、振動数5 Hzの一定正弦波を25波である（加振時間5秒間）。図-3によれば、砂層の全深

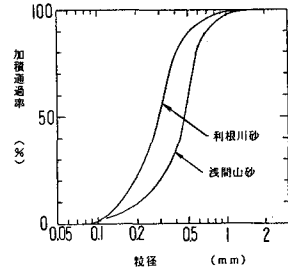


図-2 砂材料の粒径加積曲線

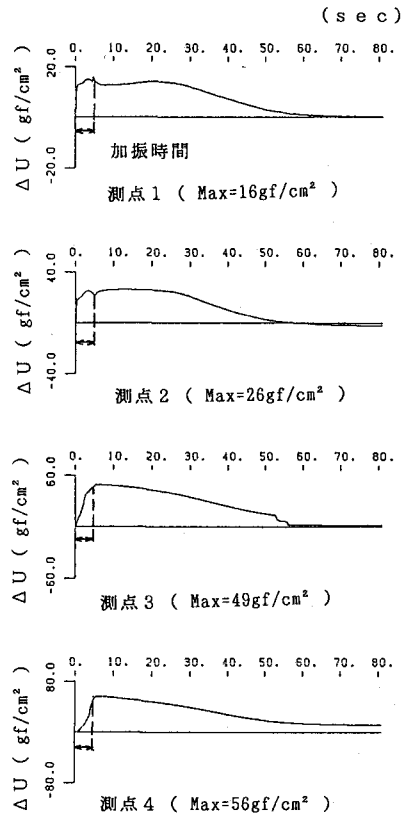


図-3 無対策の場合の過剰間隙水圧
(5 Hz, 187gal, 25波)

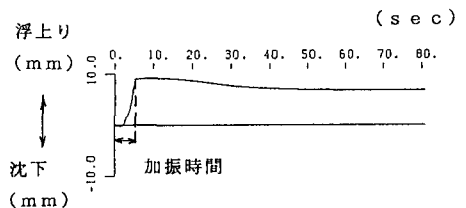


図-4 無対策の場合の埋設管の鉛直変位
(5 Hz, 187gal, 25波)

さにわたって間隙水圧が上昇していることがわかる。このうち、測点1（深さ20 cm）と測点2（深さ40 cm）では加振開始とともにほぼ瞬間的に最高圧力まで上昇するが、測点3（深さ60 cm）と測点4（深さ80 cm）では加振中に徐々に水圧が上昇し、最高圧力に達している。これら最高圧力はそれぞれの深さでの初期有効上載圧に等しいと考えられ、従って液状化は地表から地盤の深部までほぼ完全に進行している。また、地表に近いほど水圧が最高値を維持している時間が長いことは、深部から地表面への上向きの浸透流が生じていることを意味している。

一方、埋設管の鉛直変位（図-4）は、加振中に管の浮上りによる上向きの変位が増大する傾向にあり、加振終了後は変動が小さくなって、最終的に約10mmの浮上り変位が生じた。この結果は、本実験の範囲では、埋設管の浮上りが主として加振中に起きたことを示している。

また、図-5には埋設管の底部位置の過剰間隙水圧と埋設管の浮上り量の関係を示す。この結果は加速度振幅を54, 80, 100, 150, 186, 234 galとした加振による管の浮上り変位をプロットしたものである。同図から、無対策の場合には、埋設管の底部位置の過剰間隙水圧比が約0.7を越えると浮上りが著しくなることがわかる。

(2) 浮上り防止に対する改良幅の影響

締固めの目標値を相対密度80%とし、地盤の改良幅を60, 90, 120 cmと変えたときの埋設管の床つけレベル（測点2、深さ40 cm）の過剰間隙水圧の波形を図-6に示す。この図から、改良幅が広いほど過剰間隙水圧が小さくなっていることは明瞭である。また、締固めを行った場合には、無対策の場合と異なり、いずれも振動終了後に過剰間隙水圧の上昇が認められる。これは、地盤を締固めたことによって改良部の過剰間隙水圧が抑制されたために周辺の非改良部との間に水頭差が生じ、これによって非改良部から改良部への横方向の浸透が起きたためと考えられる。

上記の過剰間隙水圧波形等に基づいて、埋設管の床つけレベルの過剰間隙水圧の最大値分布を水平方向について整理したものが図-7である。この図からも、改良幅が広いほど改良域中心部の過剰間隙水圧は低く抑制されていることがわかる。図中には埋設管の浮上りについての力のつり合い限界と考えられる水圧値（ 28 gf/cm^2 ）を破線で示した。改良幅を最小の60 cmとしたケースでは改良域中心部の過剰間隙水圧の最大値がほぼ浮上り限界値に近づいているが、他のケースでは過剰間隙水圧が低減されていることがわかる。

次に、2本の埋設管と地表面（3ヶ所）の残留変位を図

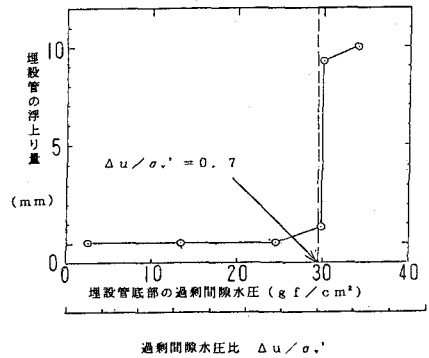


図-5 無対策の場合の埋設管浮上り量と過剰間隙水圧の関係

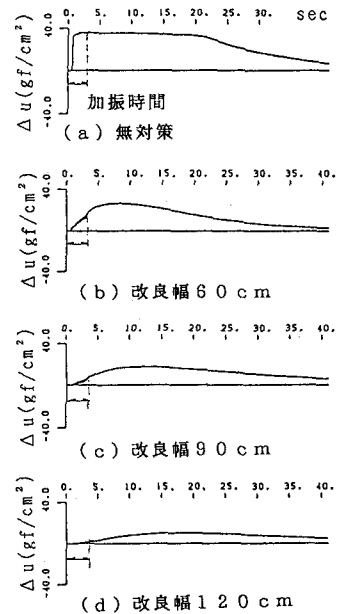


図-6 過剰間隙水圧波形に及ぼす改良幅の影響

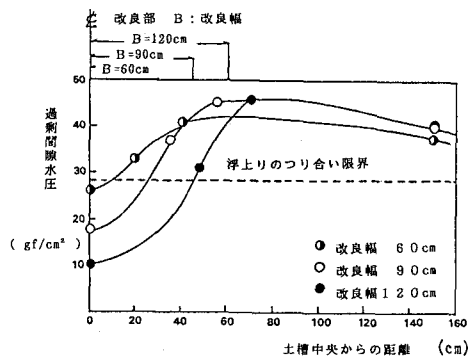


図-7 過剰間隙水圧分布—改良幅を変えた場合

一八に示す。同図は、改良幅を60cmとしたケースである。これによると、非改良域(D5)ではおよそ6mm程度の地盤の沈下が認められるが、改良域内(D3)では地盤の沈下量はその1/2程度に低減していることがわかる。そして、埋設管は2本(D1、D2)とも0.1mm程度のきわめてわずかな浮上り量を示しているだけである。これは、締固めにより地盤が改良されたためであるが、改良幅をさらに大きくして90cmおよび120cmとすると埋設管の浮上り量はさらに小さくなり、無視できるほど微小となっている。

以上を要約すると、締固めの目標値を相対密度80%とすると、改良幅を最小の60cmとした場合においても過剰間隙水圧の上昇を抑制することができて、埋設管の浮上りを防止できる。

(3) 浮上り防止に対する締固め程度の影響

次に、地盤の改良幅を60cmとして一定にし、地盤の相対密度を80%から低下させていくことにより、締固め程度の影響を調べた。

図-9および図-10にはそれぞれ地盤の相対密度の違いによる最大過剰間隙水圧と埋設管の浮上り量の変化を示す。図-9は埋設管の床付け深さでの過剰間隙水圧分布を示しているが、これによると地盤の相対密度が小さいほど改良域の過剰間隙水圧は大きくなり、無対策の状態に近い相対密度51%とした場合には、埋設管の浮上りに対するつり合い限界と考えられる水圧値(28g/cm²)に達することがわかる。図-10は1回ごとの加振によって生じた埋設管の浮上り量を振動台の加速度に対してプロットしたものである。これらの結果によれば、埋設管の浮上り量は、図-9に示した過剰間隙水圧に対応して、地盤の相対密度が小さいほど大きくなり、地盤の相対密度を64%に低下させた場合においても、無対策の場合の1/2以下に抑えられることがわかる。

4. まとめ

縮尺1/5の模型振動実験を実施した結果、埋設管の液状化対策として締固めによる地盤改良を行うことにより、振動中の埋設管の浮上りを防止できることが示された。

振動終了後の挙動については、非改良部から改良部への浸透流が起き、これによって改良部の過剰間隙水圧が上昇することが認められたが、この点についての検討は(その2)で行っている。

参考文献

- 1) 土木学会新潟震災調査委員会編:昭和39年新潟地震震害調査報告、土木学会、1966。
- 2), 3) 田中幸久、小峯秀雄、他:締固めによる埋設管の液状化対策についての研究(その2、その3)、第21回地震工学研究発表会講演概要集。

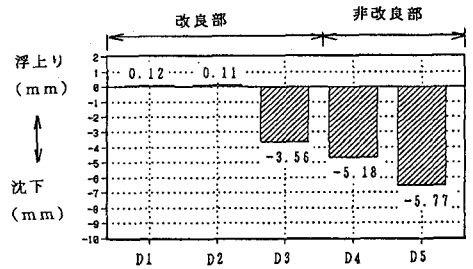


図-8 埋設管と地表面の変位

(目標相対密度80%、改良幅60cm、
10Hz、120gal、25波)

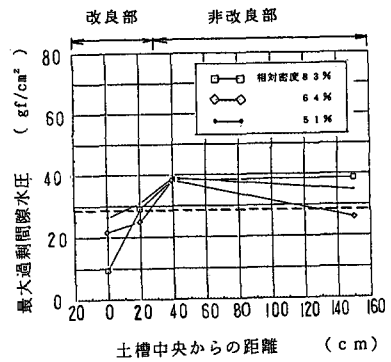


図-9 過剰間隙水圧の水平分布
一締固めを変えた場合

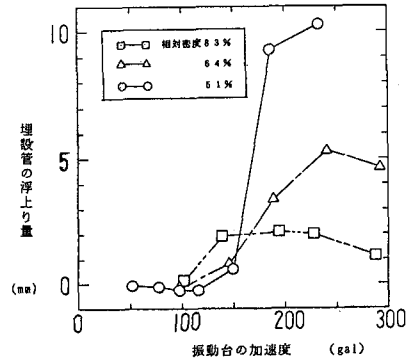


図-10 埋設管の浮上り量と
振動台加速度の関係