

地中線上構造物の液状化浮上に関する数値解析

松田 隆¹・佐藤 清²

¹株式会社大林組 技術研究所 土木構造研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:matsuda.takasi@obayashi.co.jp

²株式会社大林組 技術研究所 土木構造研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:sato.kiyo@obayashi.co.jp

管状地中構造の液状化による浮上量予測を、動的有効応力解析で行った。解析対象は、深さ25mの液状化層に埋設され、土被り9.5m、直径5mの円筒管体である。解析の結果、周辺地盤の過剰間隙水圧比が0.8を超えると浮上が開始し、その後、加振加速度・変位・過剰間隙水圧の変動に大きく影響されず、浮上が進行することがわかった。この浮上現象は、周辺地盤が管体の下部に移動することによって生じ、管体直下の液状化抵抗が重要であることがわかった。

浮上対策工として周辺地盤の液状化対策工と管体とネイリング工を接合する方法を検討した。地盤の液状化対策は、上半より下半に行ったほうが効果的であり、改良範囲の拡大によって浮上量を低減できることがわかった。ネイリング工も浮上低減に効果的であり、この場合も、下半に打設したほうが効果的であること、ネイリングの剛性も浮上抑止効果に関与すること、などがわかった。

Key Words : *Underground structure, Liquefaction, Dynamic Analysis, Uplift*

1. はじめに

地震時の地盤液状化時に埋設構造物が浮き上がる現象は多く観測されており、シールドトンネルや大型カルバートも浮上する可能性がある。これまで周辺地盤が液状化すると判定される場合、共同溝指針¹⁾などに定義されている浮上がり量の評価基準によって判定し、浮上がると予想される場合、必要な対策が講じられることになる。しかし、レベル2地震動に対して浮上がると判定された場合、これを阻止する対策は膨大になることもある。このとき、判定で浮上がるとされた場合でも浮上がり量が小さく、レベル2地震動に対して設定されている機能及び構造上の限界状態を満足するようならば、小さな浮上がりは許容できるとともに、要求性能に応じて合理的な対策が可能となる。

管路の浮上がり量の評価方法には、佐々木等が提案している浮上予測式²⁾がある。この予測式に関しては、著者らも遠心模型振動実験で適用性を確認している¹⁾。ただし、浮上抑止対策の効果に関しては、対策工の原理にもよるが、実験的あるいは詳細な数値解析を用いた分析が必要である。一方、許容浮上がり量を上回る場合、対策工が必要となるが、基本的に地盤の液状化を防止する方法、構造物と地盤の接合を向上させる方法、構造物の重量を含む構

造で対処する方法が考えられる。構造物の位置が浅い場合は地盤の液状化対策が効果的になるが、トンネルなど構造物の位置が深くなった場合、地表面からの対応は高コストになる可能性がある。そのため、境界部を含む構造物側からの対策が合理的になると考えられる。

本報告では、まず、FEM液状化解析手法を用いて、液状化時の周辺地盤及び管体の動的挙動と浮上の関係をまとめることで浮上がりのメカニズムを考察する。その後、管体周辺地盤の地盤改良を用いた対策と構造物周辺に設置するアースネイリングによる対策を選定し、それら対策工の効果的な配置に関して考察を加える。

2. 検討方法

浮上量算定には動的有効応力解析法EFECTを用いた。解析対象となる構造物は、外径5mの円形トンネルである。ここでは、トンネルの剛体的な変位を算定するため覆工構造のモデル化は行わず、図1に示すトンネルの部分を、等価な重量(比重0.47)で構成するソリッド要素でモデル化した。土被りはほぼ2Dにあたる9.5mとした。

周辺地盤は、浮上がり、すなわち液状化が顕著に

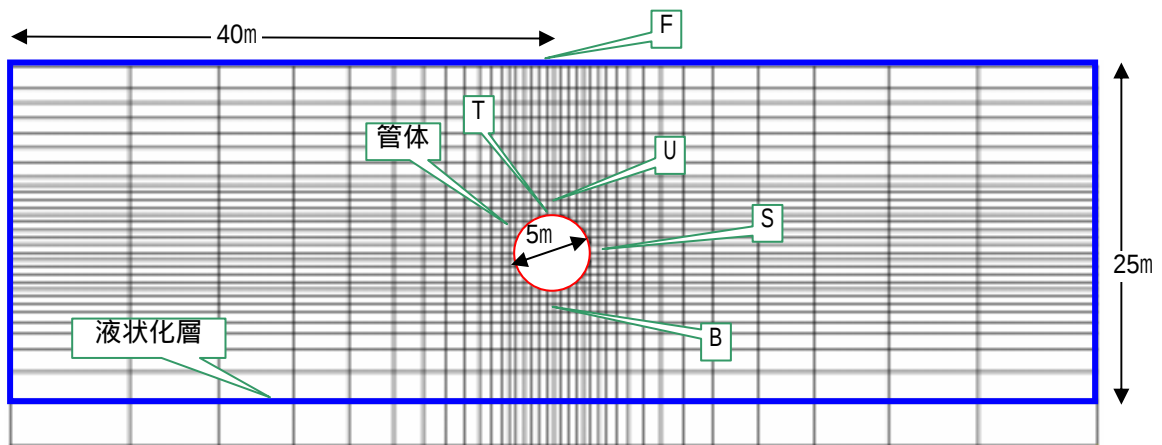


図-1 解析モデル (Case-0: 無対策)

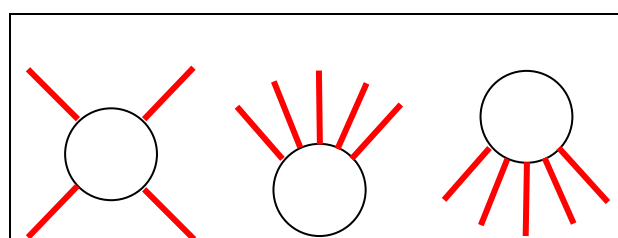
なるようにモデル化した．ここでは，深さ25mの液状化層(Dr60%，飽和重量1.83)を仮定し，その下に3m支持層を設置した．液状化層の非線形性に関する物性値は液状化強度 $R=0.23$ として設定した．地下水位は，地表面とした．

地盤の幾何モデルにおいては，成層地盤とするが，初期応力とその応力状態に対応した地盤物性にはトンネルの影響は考慮している．自由地盤側においては，トンネルの影響が小さくなる領域までモデル化し，両端の水平方向境界を繰り返し条件とした．トンネルと地盤は非排水条件を課している．

入力地震波は，1995年神戸海洋気象台波（最大振幅812Gal）を用いた．解析時間ステップは1/1000秒とし，主要動きが終了した後も解析を続行し，解析継続時間としては30秒間とした（図-4参照）．

対策工は低圧式アースネイリング工法（芯材：D29鉄筋，仕上り径：10cm，長さ：2.5m）をトンネル内部から打設し，定着させることを想定した．検討パラメータは図-2に示すように，ネイリングの断面内の打設方向とした（Case-1：全周45°方向，Case-2：上半，Case-3：下半）．Case-3では，ネイリングの剛性を2倍にしたモデル(Case-3b)も実施した．トンネル軸方向のアースネイリング打設間隔は0.25mピッチとした．

Case-4～6は，管体周辺の液状化を防止する地盤改良を仮定した．ここでは，地盤改良の具体的な工法を仮定せず，液状化強度が現地盤の3倍になるように地盤定数を設定した．解析パラメータは改良位置である．全周改良が望ましいと考えられるが，ここでは，改良位置の影響を明確にすることから，上半と下半の比較を行った．Case-4は上半改良で，改良面積は10.2m²である．この改良面積はトンネル断面19.6m²の52%にあたる．Case-5は下半改良で，改良面積はCase-4と同様の10.2m²である．Case-6は改良面積の影響を把握するため，改良面積を18.2m²とし，トンネル断面の93%相当を改良したモデルとした．



Case-1(4本)

Case-2(5本)

Case-3(5本)

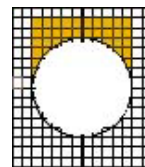
45°方向

上半補強

下半補強

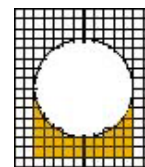
図-2 対策工モデル（アースネイリング）

(Case-1～Case3)



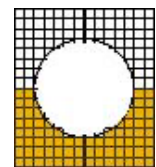
Case-4

上半改良



Case-5

下半改良



Case-6

下部拡大改良

図-3 対策工モデル（地盤改良）

(Case-4～Case6)

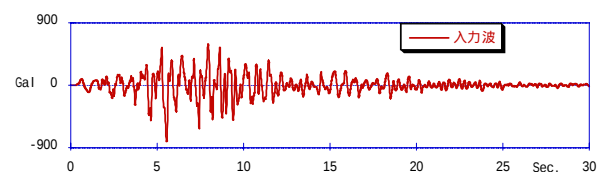


図-4 入力地震動
(1995 神戸海洋気象台波 812Gal)

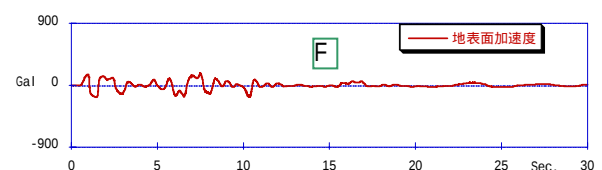


図-5 地表面応答加速度

3. 管体の浮上メカニズム

図-4、-5に地盤の応答加速度を示す。地表面Fの最大加速度172Galは、地盤が液状化する事によって入力加速度（最大812Gal）より大幅に低下している。管体頂部Tでは最大加速度は248Gal（図-6参照）であり、これらのことから、管体に作用するせん断力は、非液状化時に比べ小さくなる。

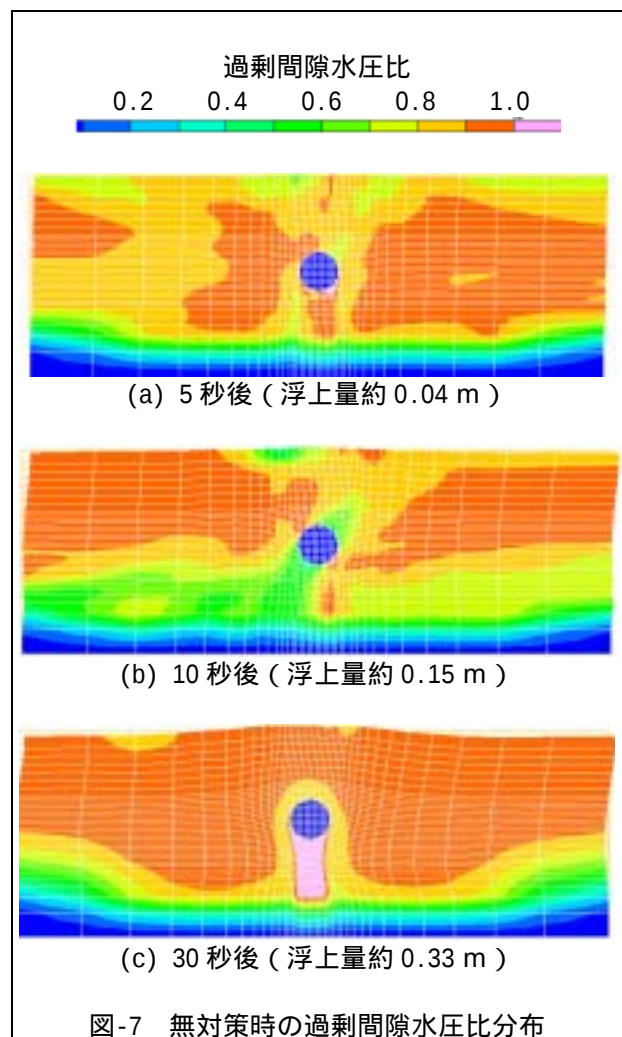
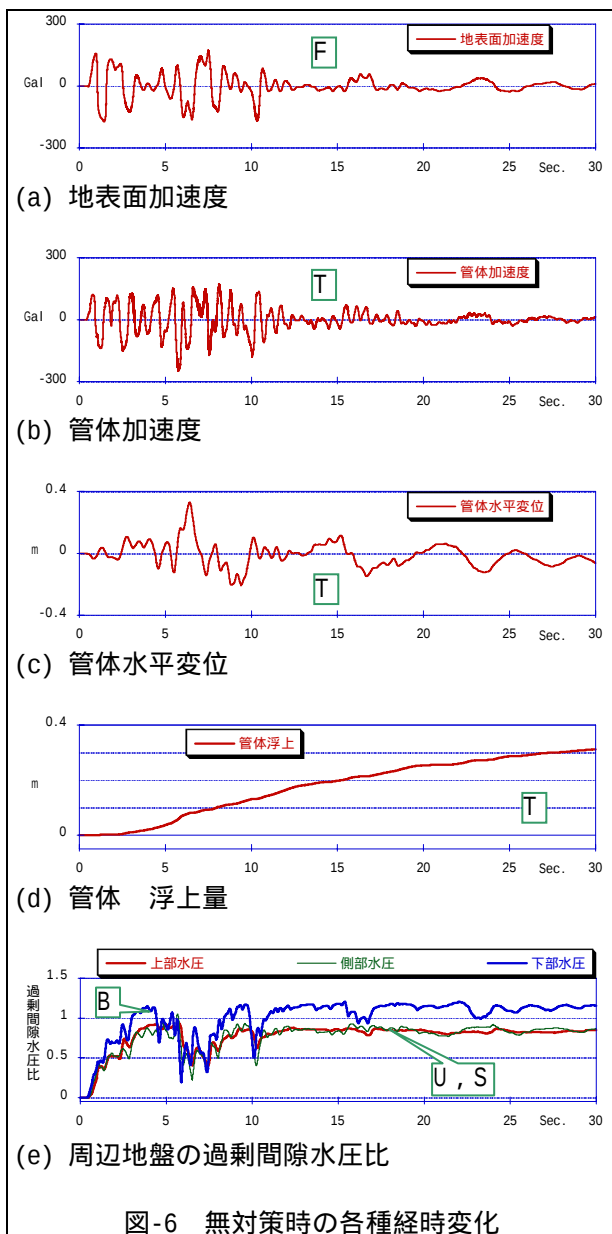
図-6に管体の水平変位・浮上変位・周辺地盤の過剰間隙水圧比の経時変化を示す。最大入力加速度は5.5秒付近であるが、それよりやや遅れた6秒付近には大きな水平変位振幅が現れている。液状化は3秒付近で達しているが、5～8秒及び10秒付近で大きな変位振幅に伴い一時的に過剰間隙水圧は低下している時間帯がある。

一方、管体の浮上速度は時間の経過と共に緩やかになり、最終浮上量に収束している傾向はある。この間、水平方向の振動は大きいが、浮上量に顕著な

変化は生じていない。過剰間隙水圧や水平変位の変動には大きく関与されないようである。過剰間隙水圧比は管体の下部Bで大きくなっており、このことが管体の浮上に大きく影響していると考えられる。

図7に周辺地盤の液状化に関するコンターを示している。加振開始から5秒後では、管体下部及び管体からやや離れた側方でほぼ液状化に達しており、ほぼ全周での有効拘束応力が低下していることになる。このことが浮上を誘引している。更に、5秒後（加振開始から10秒後）には側方地盤の大半が液状化した状態になっている。この間、管体下部は絶えず大きな間隙水圧比を示し、常に液状化している状態にある。解析の最終状態である30秒後では、地盤の大半が液状化状態になっている。この時間帯では下部地盤では過剰間隙水圧比が1を超えているが、これはこの部分の初期拘束圧が管体の影響で自由地盤側の拘束圧より小さいためである。すなわち、管体下部の水圧は周辺地盤の水圧より小さく、その水頭差によって周辺地盤から管体下部へ間隙流体が移動するためと考えられる。

図-8に最終変形状態を示す。管体は浮上し、その影響で直上の地盤も盛り上がっている（隆起は14cm）。これに対して、管体から離れた地盤は沈下（12cm）しており、管体のある部分とない部分の段



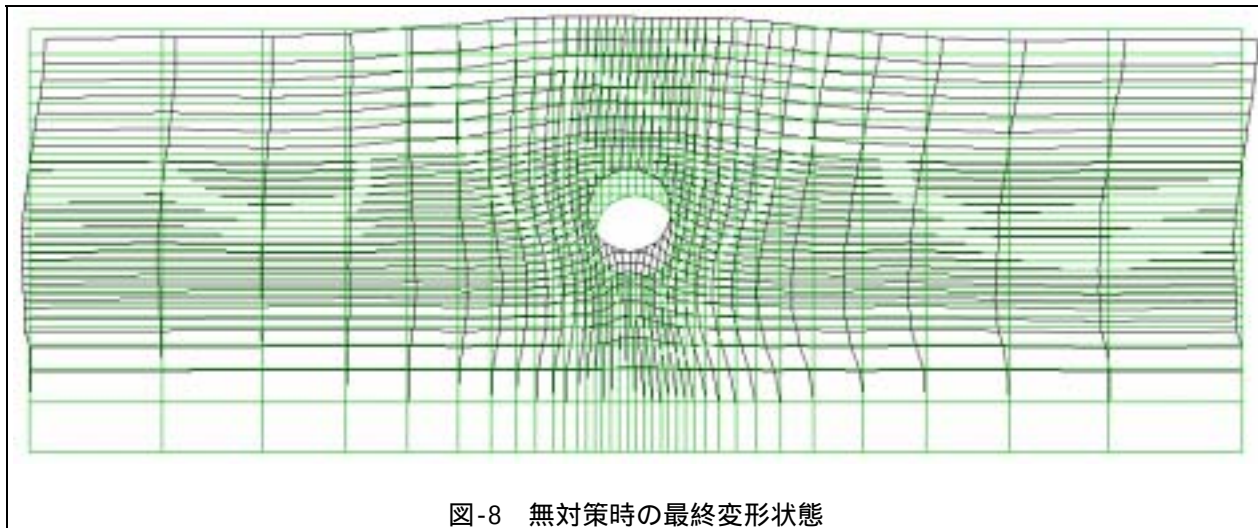


図-8 無対策時の最終変形状態

差は約26cmになる。管体下部の地盤では周辺地盤から入り込む状態となっていることがわかる。この影響は水平方向に伝播し、管直径の約3倍の領域で管の浮上による地盤変形が現れている。

図-9に、最終状態での地盤鉛直方向変形量の分布を示す。自由地盤では管体天端GL-9.5m位置で約10cm沈下しているが、管体は約31cm浮上しておりその差は41cmである。自由地盤の沈下は上層に向かって累積する関係で増大するのに対して、管体上の地盤隆起は、地上に向かって徐々に減少していることがわかる。

図-10に加速度、変位及び過剰間隙水圧比と浮上量関係を示す。これらの図で加速度、変位及び過剰間隙水圧比は傾向を明瞭にするためスムージングと絶対値化をしている。浮上は過剰間隙水圧比が約0.8を越すと始まり、一時的な過剰間隙水圧の低下時にも浮上は進行している。このことから、浮上のトリガーには過剰間隙水圧が大きく関係しているが、一旦浮上が開始すると、過剰間隙水圧の変動より水平変位振幅に相関が見られる。すなわち、浮力に関する過剰間隙水圧比と同様に、振動によって浮上は進行する可能性があることになる。

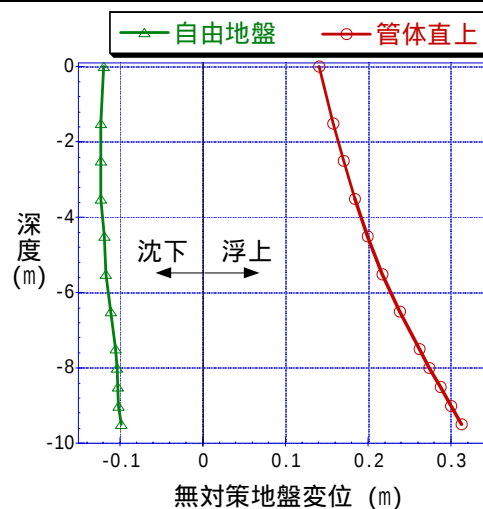


図-9 地盤の鉛直方向変位分布

4. 対策の効果確認

図-11に浮上の経時変化を示す。打設方向に関しては、Case-2(上半)よりCase-3(下半)のほうが浮上量は小さい。図-12には、最終浮上量の比較を示すが、上半より下半に打設したほうが浮上抑止効果は

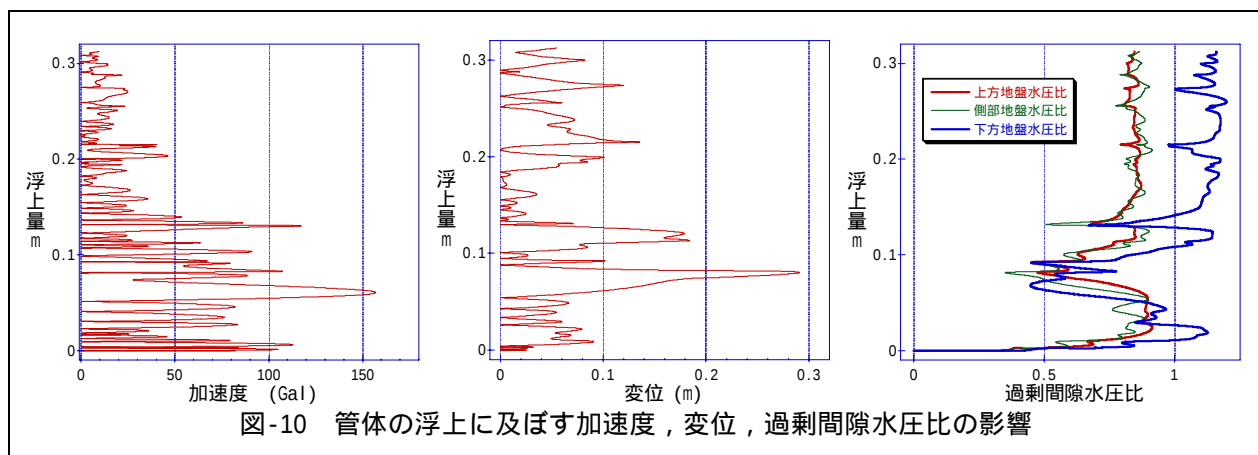


図-10 管体の浮上に及ぼす加速度、変位、過剰間隙水圧比の影響

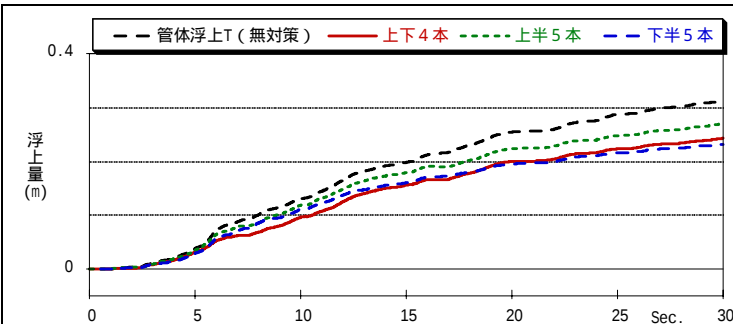


図-11 ネイリング系の各対策工の浮上量経時変化

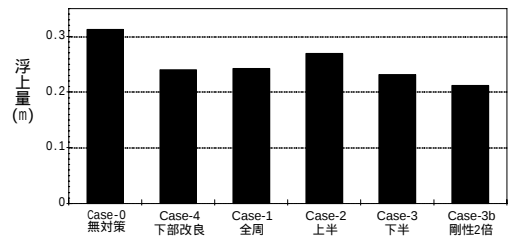


図-12 対策工効果（最終浮上量）

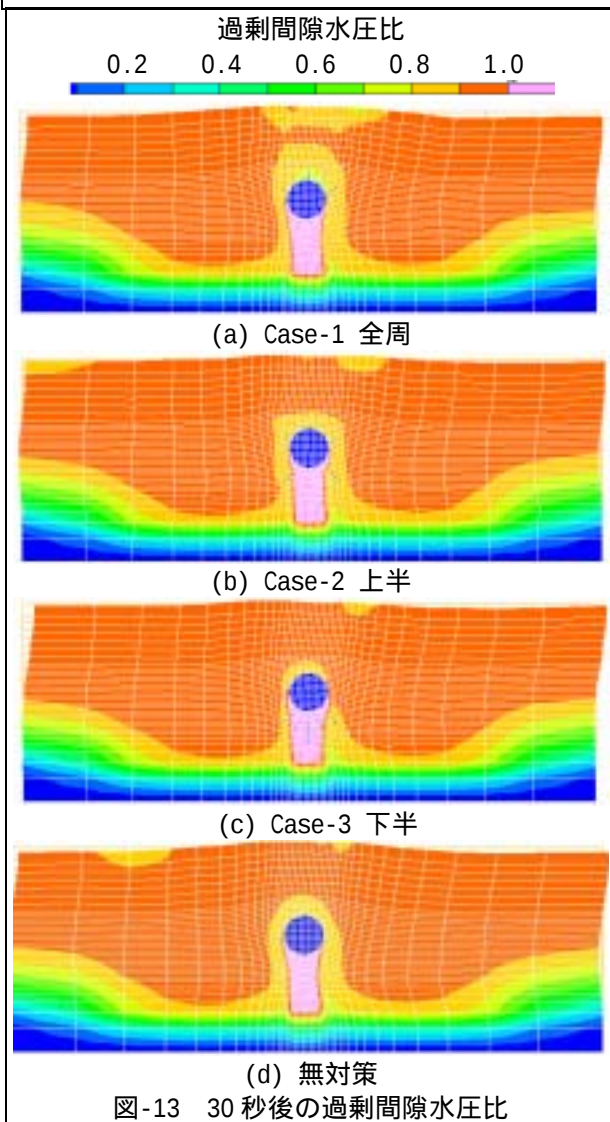


図-13 30秒後の過剰間隙水圧比

高い。さらに、ネイリングの剛性を2倍にした場合、浮上量は低減されるが、効果としては9%程度の低減にすぎない。今回の解析では、浮上量抑制効果は最大で無対策の67%になった。

図-13に過剰間隙水圧比分布を比較して示す。全周打設の場合、無対策に比べ管体周辺の過剰間隙水圧比が一様に低下している。これに対して、上半の場合管体の上部に、下半の場合下部地盤の過剰間隙水圧比が低下し、それらの影響で浮上が抑制される

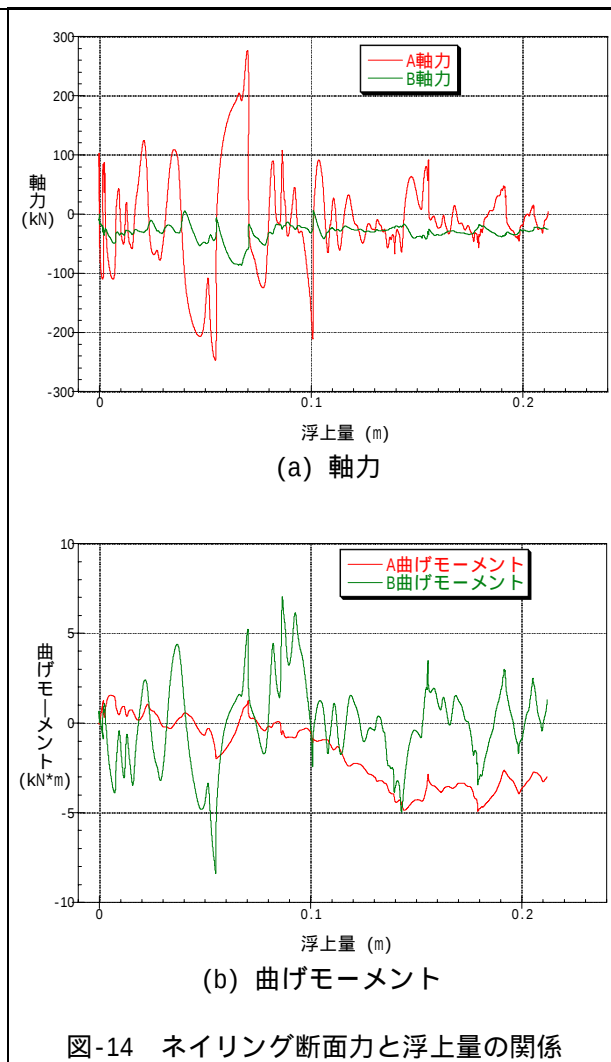
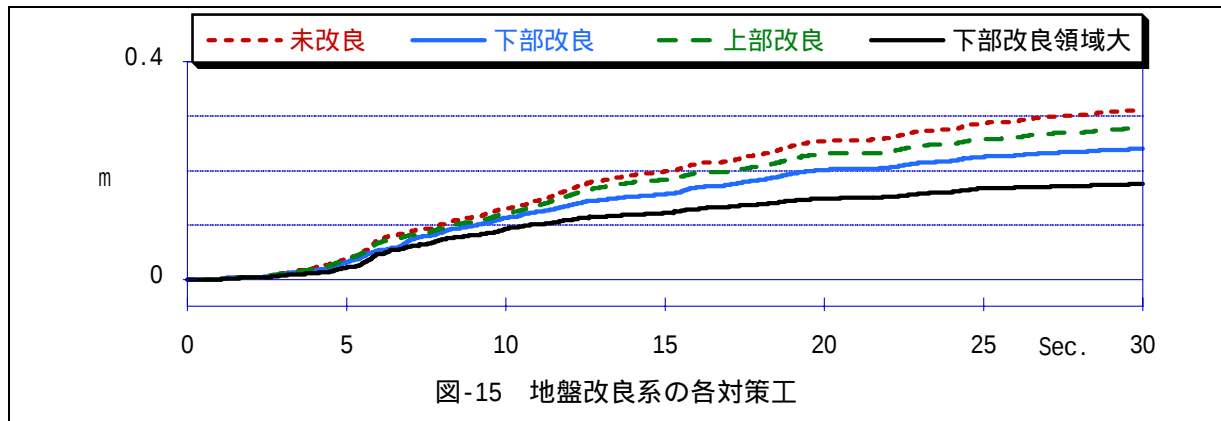


図-14 ネイリング断面力と浮上量の関係

ことになる。特に、下半の場合、周辺地盤からの回り込みも防止できることから効果的であることがわかる。

上半打設の場合、対策工のネイリングは圧縮応力を受けると共に、曲げ変形を助長する地盤応力が作用する。そのためネイリングは弓なりに変形し、浮上抑制効果は低減する。これに対して、下半の場合、ネイリングは伸張側に軸力が発生し、曲げモーメントは小さい。図-14に浮上とネイリングに発生する断面力を示す。図から浮上量と断面力の相関は小さく、振動成分は大きい。これは、今回のネイリング



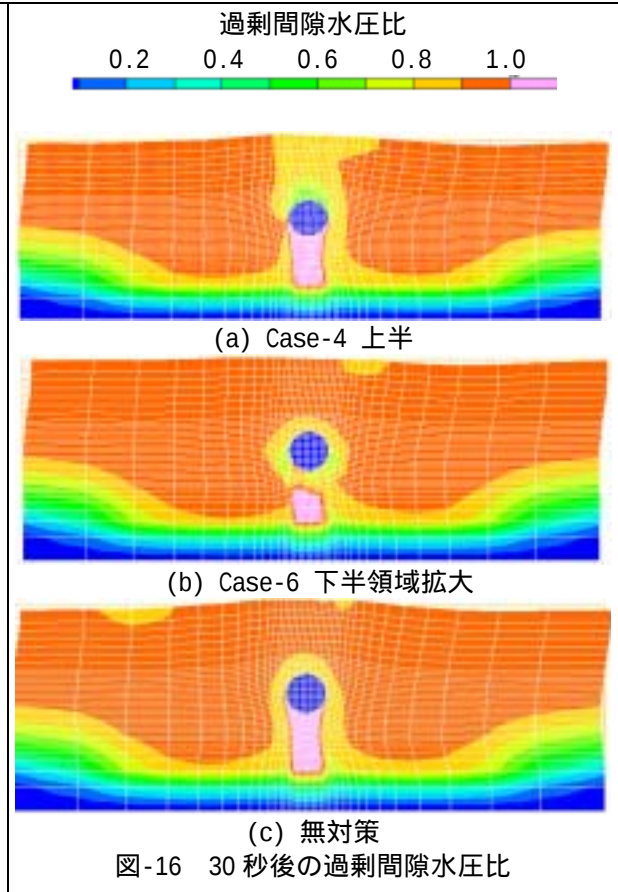
は非液化化層に定着するものでないことに起因する
と考えられる。残留応力は、斜めに打設したAに発
生している。最大断面応力は軸力成分が卓越するが、
106N/mm²で降伏には至らない。

図-15は地盤改良系の浮上抑制効果を示す。いず
れの地盤改良においても浮上量が抑制されるが、特
に、管体下部地盤の液化化対策が有効で、同様の改
良面積の場合、上部の対策に比べ、下部の対策は2
倍程度の浮上抑制効果がある。また、下部のほか側
部を含め、改良範囲を広げることで、浮上量は未対
策の場合の1/2程度に抑制できる。

図-16に地盤改良系の過剰間隙水圧比分布を比較
して示す。上半の場合管体の上部は液化化せず、下
半の場合下部地盤の過剰間隙水圧比が低下するのは
当然であるが、それらの影響は地表面まで現れてい
る。下方改良の場合、周辺地盤の回りこみも抑制さ
れ、浮上が抑制されることになる。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：共同溝設計指針，pp.64-71，
1986。
- 2) 佐々木哲也，田村敬一：地中構造物の浮上り予測手
法に関する検討（その3），第38回地盤工学研究発
表会，pp1851-1852，2003
- 3) 松田隆，佐藤清：地中埋設構造物の液化化による浮
上に対する予測解析，第40回地盤工学研究発表会，
2005。



(2005. 6. 15 受付)

A LIQUEFACTION ANALYSIS FOR UPLIFTING OF UNDERGROUD TUBE STRUCTURES

MATSUDA Takashi and SATO Kiyoshi

Uplifting phenomena of underground tube structures was analyzed by FEM liquefaction code. Uplifting initiates as the excess porewater ratio of surrounding soil layers exceeds over 0.8. Uplifting continues constantly although the fluctuation of surrounding excess pore water pressure or amplitude of vibration. The soil improvement method and the earth nailing method as countermeasures for uplifting were investigated using same FEM code. It was found that the countermeasures treated underneath of the tube is more effective than that at the head of the tube.