

建物近傍の地震時地盤ひずみに影響する 埋戻し領域の形状

飛田哲男¹・荒木恵徳²・楢田泰子³・宮本勝利⁴・佐藤清⁵

小西康彦⁶・砂坂善雄⁷

¹正会員 京都大学准教授 防災研究所地盤災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄E-414D)

E-mail: tobita.tetsuo.8e@kyoto-u.ac.jp

²西日本旅客鉄道株式会社 新幹線管理本部 小倉新幹線保線区 博多保線管理室

E-mail: yasuaraki555@hotmail.co.jp

³正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

⁴正会員 株式会社日水コン 大阪水道事業部 (〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101)

E-mail: miyamoto_k@nissuicon.co.jp

⁵正会員 株式会社大林組 生産技術本部設計第一部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

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

⁶正会員 株式会社日水コン 下水道事業部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

E-mail: konisi_y@nissuicon.co.jp

⁷正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

E-mail: sunasaka@kajima.com

埋設管路の耐震性について、構造物近傍の埋戻し部の掘削形状の影響を考察するため有効応力解析を行う。解析対象地盤としては、浄水場の建物周辺を想定する。一般に、浄水場では建物ごとにその周囲の掘削深度が異なるため、隣接する構造物との間の掘削部底面には傾斜が配されている。その傾斜角と傾斜下端と建物との離隔距離をパラメトリックに変化させ、埋戻し土内に発生する引張ひずみの大きさと分布形状について考察する。本解析結果から、液状化による水平ひずみの発生を抑えることのできる掘削形状が有する条件は以下のとおりである。1) 傾斜下端と構造物の距離が短い。2) 傾斜角度が直角に近い。3) ただし、掘削底面付近に管路を敷設する場合は、傾斜角度が小さい方(水平に近いほう)がよい(今回の解析では0度から26.6度)。

Key Words : Pipeline, Liquefaction, Backfill, Effective stress analysis, Earthquake

1. はじめに

上・下水道、電力、ガス、通信等の都市ライフラインを担う地中埋設管(以下、埋設管)の延長は、高度成長期以降の都市化によって急増しており、また浄水場等の

拠点となる施設のストックも増えている¹⁾。一方で、これらの施設は老朽化が進み地震被害を受けやすい状況にある。ライフライン被害は直接市民生活に影響するため、埋設管の耐震性は都市の地震対策にとって極めて重要な項目のひとつである。

埋設管の被害は、その周辺地盤の変形に伴って発生することが多く、特に液状化で大きな地盤変形が生じる場合には壊滅的な被害となる。2011年東北地方太平洋沖地震では、多くの浄水場や下水処理場において、液状化による施設や埋設管の損傷が発生し、上下水処理が停止した²⁾。その被害形態は、主に管路の脱管や継ぎ手部の開きであったことが報告されている。例えば、茨城県W浄水場では、構造物との取合い部において脱管が生じた³⁾

(図-1)。このように埋設管と構造物の接合部は弱点となる⁴⁾。もともと液状化の懸念がある場所に建設される構造物は杭基礎で支持されることが多く、液状化による沈下は抑制される。しかし、埋設管に対しては沈下対策が施されていないため、液状化による地盤変形に追随し管路接合部において過大な相対変位が生じる。図-2に茨城県W浄水場施設内の管路被害が生じた箇所の断面図を示す。同図より、構造物と埋設管の接合部付近の埋戻し土底面(掘削底面)の深度がG.L. -1.9mからG.L. -3.4mへと階段状に変化していることがわかる。このような不整形地盤においては、地震波動が複雑な伝播をし、このことが接合部の地盤変形に影響することも考えられる。

不整形地盤が振動特性に及ぼす影響に関してはこれまで多くの研究がなされてきた。地層が急変する箇所では、水平変位やひずみ(圧縮伸張ひずみやせん断ひずみ)が集中する傾向にあることが明らかにされている^{5,6)}。その原因は、主に二次的に発生した表面波であることが指摘されている⁷⁾。また、地盤の非線形性を考慮した解析では、地盤の固有振動数よりも低い入力振動数を入力した場合、傾斜部で地盤のひずみが著しく増幅することが指摘されている⁸⁾。

埋設管の被害が生じやすい構造物との接合部での地盤変形のメカニズムを理解することは、構造物近傍の埋設管路の被害抑制につながるものと考えられる。そこで、本研究では、傾斜面を含む埋戻し土の掘削形状を考え、傾斜角度及び傾斜面から構造物までの距離をパラメータとして、傾斜面に沿った地盤の最大水平ひずみの分布形状に着目して考察する。

埋設管路は、隣接する構造物との接合部において液状化時の過大な地盤変形により、損傷を受けやすい。これまでに液状化が原因である埋設管路の脱管や継ぎ手の開きといった損傷の事例が多く報告されてきた。そのような埋設管路を敷設する際の掘削形状は、掘削底面が埋設管路の軸方向を含む鉛直面内で変化する形状である。このように地盤構造が鉛直面内で水平方向に対して不規則に変化する地盤を不整形地盤という。



図-1 茨城県W浄水場における埋設管の脱管³⁾

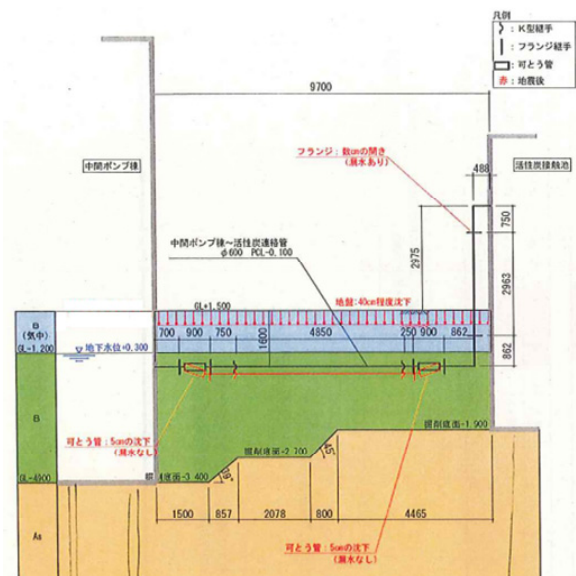


図-2 茨城県W浄水場における掘削埋戻し領域と管路の位置

2. 解析手法

数値解析には多重せん断ばねモデルとカクテルグラスモデルを構成則とする有効応力原理に基づく二次元有限要素解析法FLIP (Ver. 7.2.2)^{9,11)}を用いる。解析対象とするのは、図-3に示すように構造物と埋戻し領域を有する複合地盤である。掘削底面の形状が、管路埋設深さの地盤ひずみに与える影響を考察するため、埋戻し底面の傾斜角度(α)と構造物と傾斜下端の距離(β)をパラメータとし、 α を0から90度、 β を1.2mから無限大に変化させる。ただし、簡単のため管路はモデル化せず、そのかわり埋設深度に位置する地盤要素の水平ひずみに着目する。地盤パラメータ及び液状化パラメータは、茨城県W浄水場の原位置で得られた土の要素試験結果から決定した。一例として、地盤の液状化強度曲線を図-4に示す。

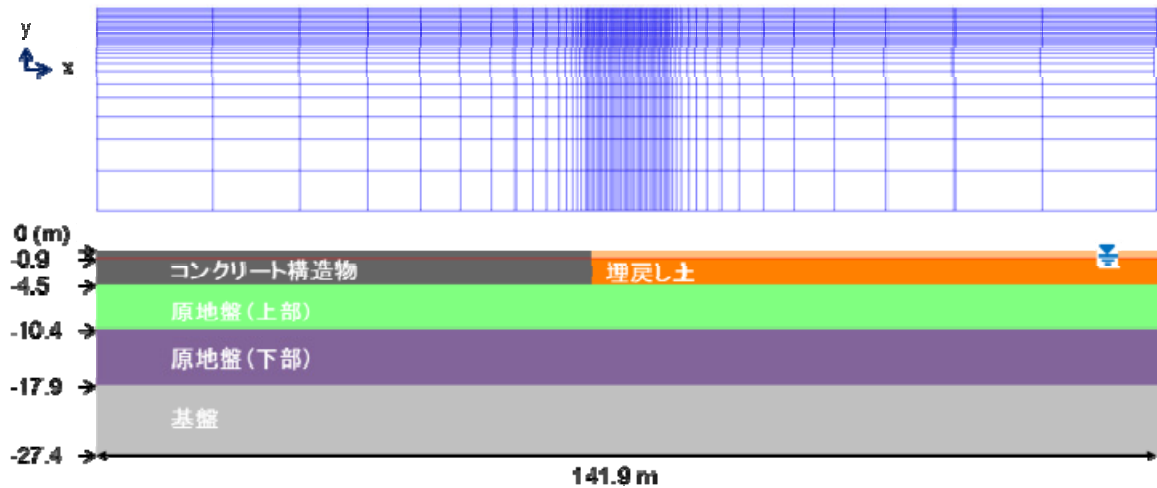


図-5 解析メッシュおよびモデル化した地盤構造断面

本解析に使用した解析メッシュを図-5に示す。解析地盤は埋戻し土、原地盤（上部）及び（下部）、基盤層の4層で構成されている。地下水位はG.L: -0.9 (m)である。コンクリート構造物は、埋戻し土層の一部を線形平面要素に置き換えコンクリートの物性値を入力した。

境界条件は、底面を固定境界、側面を循環境界とした。解析メッシュの節点数、要素数は、傾斜角度及び地盤条件（乾燥砂・飽和砂）によって異なるが、約2,000節点、約3,700要素である。解析に用いた地盤パラメータ、液状化パラメータ、構造物パラメータを、それぞれ表-1から表-3に示す。

解析ケースについて（表-4）、Case A1からCase A5では、掘削底面の傾斜角（ α ）が90度の場合を検討する。また、Case A1からCase A5では、構造物の有無と構造物と傾斜までの距離（ β ）を変化させたケースとする。以下、Case B からCase Dは、傾斜角が異なる。Case Eは、 $\alpha=0$ 度で構造物のない、水平成層地盤である。

1/4波長則により得られる地盤の固有周期は、傾斜地盤の場合、埋め戻し土の層厚が大きい方では約7Hz、層厚が小さい方では約12Hzである。また、構造物がある場合の地盤-構造物計の固有振動数は、別途ランダム波を入力して行った解析から約2.7Hzである。これらの値を参考に、表-5に示す入力波の振動数を決定した。入力波の一例を図-7に示す。

隣接構造物

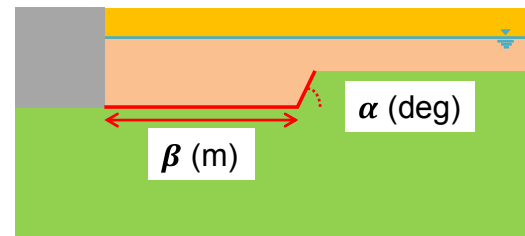


図-3 解析対象とする地盤断面

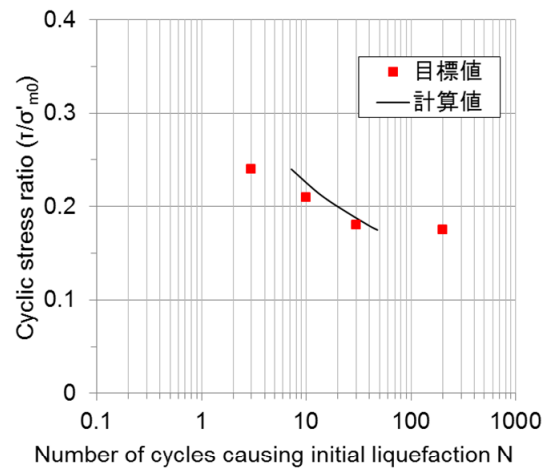


図-4 現位置試料と要素解析による液状化強度曲線

表-1 地盤パラメータ

| 土層名 | 質量密度 ρ (t/m ³) | 初期せん断剛性 G_{max} (kPa) | 体積弾性係数 K_{max} (kPa) | 平均有効拘束圧 σ'_{ma} (kPa) | 内部摩擦角 ϕ_i (deg) | 最大減衰定数 h_{max} |
|--------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 埋戻し土 | 1.94 | 31041 | 80950 | 98 | 31.4 | 0.24 |
| 原地盤(上) | 1.94 | 81000 | 211235 | 98 | 38.7 | 0.24 |
| 原地盤(下) | 1.94 | 188080 | 490483 | 98 | 41.1 | 0.24 |
| 基盤 | 1.94 | 237500 | 619362 | 98 | 45.0 | 0.24 |

表-2 液状化パラメータ

| | | | | | | | | |
|------|--------------|-------------------|-----------------|---------------|----------|-------|---------|----------|
| 埋戻し土 | Φ_p (°) | ϵ_d^{cm} | $r\epsilon_d$ ° | $r\epsilon_d$ | Q_1 | Q_2 | r_0 | |
| | 28 | 0.1 | 1.25 | 0.25 | 1.0 | 0.5 | 0.4 | |
| | k | r_k | s_1 | c_1 | q_{us} | q_4 | $rgmma$ | $rrmtmp$ |
| | 2.0 | 0.4 | 0.005 | 2.0 | 10000 | 1.0 | 0.5 | 0.5 |

表-3 線形平面要素（コンクリート構造物）パラメータ

| | | |
|-----------|----------|----------------------------|
| ヤング率 | ポアソン比 | 密度 |
| E (kPa) | ν | ρ (t/m ³) |
| 2.23E+07 | 1.70E-01 | 2.45E+00 |

表-4 解析ケース

| Case | 埋戻し土斜面の傾斜角度 (deg) | 構造物と埋戻し土斜面下端までの距離 (m) |
|------|-------------------|-----------------------|
| A1 | 90 | 構造物無し |
| A2 | | 4.8 |
| A3 | | 3.6 |
| A4 | | 2.4 |
| A5 | | 1.2 |
| B1 | 63.4 | 構造物無し |
| B2 | | 4.8 |
| B3 | | 3.6 |
| B4 | | 2.4 |
| B5 | | 1.2 |
| C1 | 45 | 構造物無し |
| C2 | | 4.8 |
| C3 | | 3.6 |
| C4 | | 2.4 |
| C5 | | 1.2 |
| D1 | 26.6 | 構造物無し |
| D2 | | 4.8 |
| D3 | | 3.6 |
| D4 | | 2.4 |
| D5 | | 1.2 |
| E0 | 0 | — |

表-5 入力加速度の諸元

| 入力波 | 地盤条件 | 振動数 (Hz) | 最大入力加速度 (Gal) |
|-----|------|----------|---------------|
| 正弦波 | 乾燥砂 | 1.0 | 300 |
| | | 2.0 | |
| | | 2.7 | |
| | | 4.0 | |
| | | 8.0 | |
| 正弦波 | 飽和砂 | 1.0 | 300 |
| | | 2.0 | |
| | | 2.7 | |
| | | 4.0 | |
| | | 8.0 | |

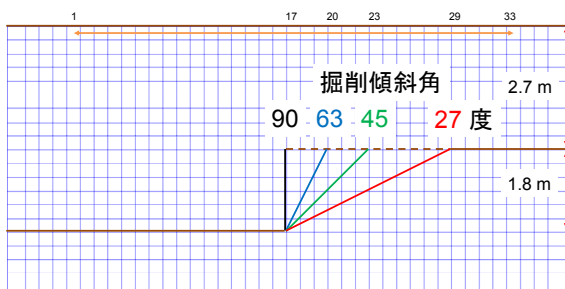


図-6 掘削部の傾斜角の詳細

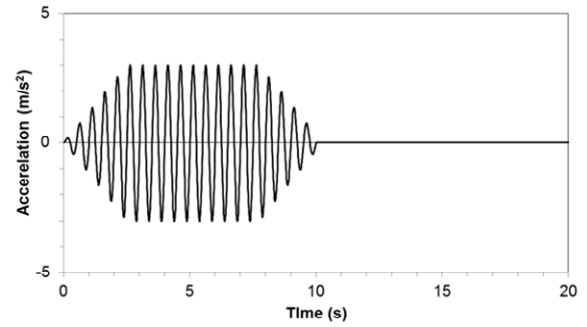


図-7 入力加速度時刻歴

3. 解析結果

上記の解析ケースについて計算したところ、震度G.L. -1.35mにおける過剰間隙水圧比は、図-8に示すように、入力振動数が8.0Hzの場合には0.6程度にとどまっていることから、完全な液状化には至っていないことがわかる。以下の考察において、入力振動数8.0Hzの水平ひずみが小さいのはこのためであると推察される。

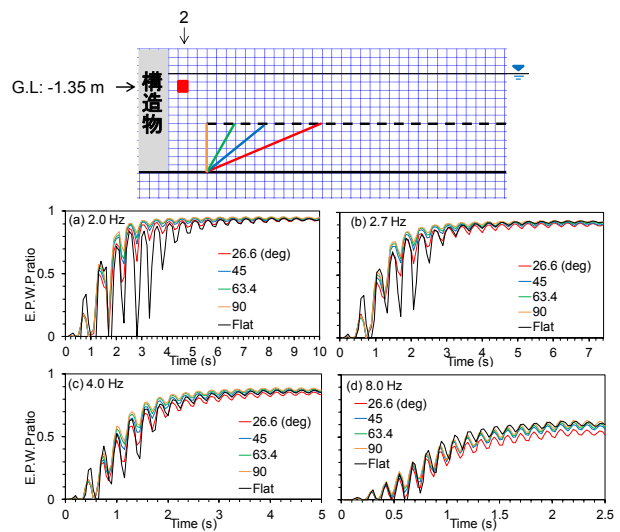


図-8 構造物近傍における過剰間隙水圧比の時刻歴 (G.L. -1.35 m) : (a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

(1) 離隔距離 (β) と水平ひずみ

構造物と傾斜部間の距離 (β) を変化させたときの地盤水平ひずみの分布形状について考察する。ただし、以下では水平ひずみは引張りを正とする。傾斜角 (α) は、一定値63.4度とする。図-9には、深度G.L. -1.35m、図-10には、深度G.L. -2.55 mにおける地盤水平ひずみの分布を示す。まず図-9より、

振動数が小さいほど発生する水平ひずみの大きさが大きく、その値は入力振動数が2.0Hzのとき、構造物近傍で約3%である。水平ひずみの掘削底面に沿った分布形状は、距離 (β) には大きく依存しないが、距離 (β) が大きくなるにつれてピーク値は減少する傾向にある。

一方、図-10より、掘削の上端部の水平ひずみは、図-9と同様、入力振動数が小さいほど大きくなる傾向にあるが、分布形状は距離 (β) に依存し、傾斜上端部でピーク値を取ることがわかる。また、その最大値は、傾斜下端が構造物に近いほど大きくなる。この深度での最大水平ひずみは、入力振動数2.0Hzで $\beta=1.2$ mのとき約1.8%である。

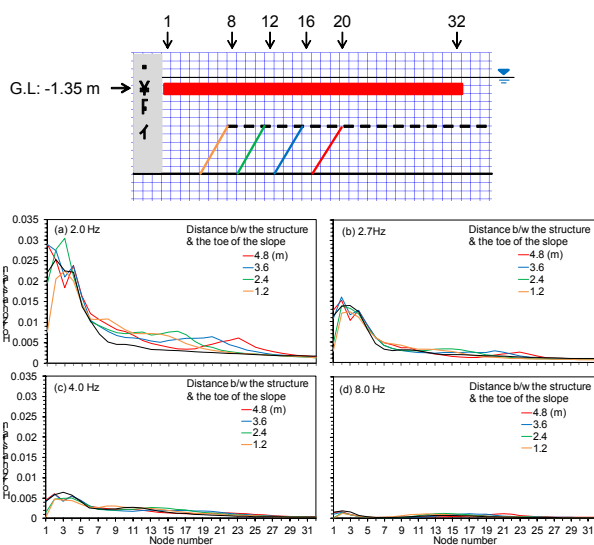


図-9 最大水平ひずみの分布の距離による比較 (出力深度 G. L. -1.35 m) (a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

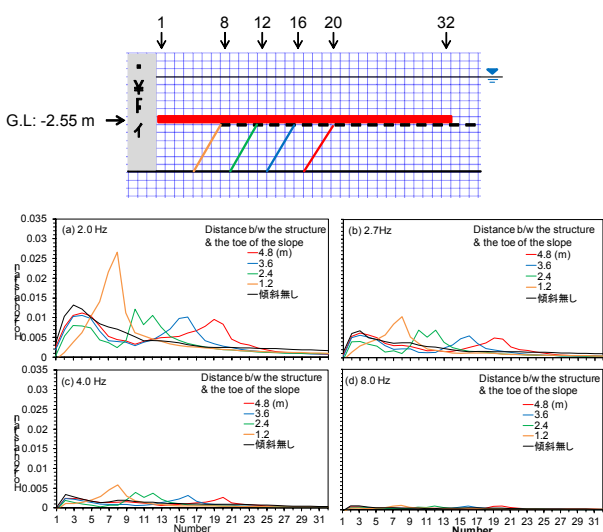


図-10 最大水平ひずみの分布の距離による比較 (出力深度 G. L. -2.55 m) (a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

(2) 傾斜角 (α) と水平ひずみ

傾斜角 (α) を変化させたときの地盤水平ひずみの分布形状について考察する。図-11は、先ほどと同様、深度G.L. -1.35 m、図-12は深度G.L. -2.55 mにおける水平ひずみ分布である。図-11より、入力振動数が小さくなるほど水平ひずみは大きくなる傾向にあることがわかる。水平ひずみは、入力振動数2.0Hzのとき、最大値約2.5%となっている。深度G.L. -1.35mでは、水平ひずみの掘削部に沿った分布形状は、傾斜角 (α) には大きく依存せず、いずれの入力振動数においても構造物から約1.0から1.5m離れたところにピークを持つ形状となっている。

図-12より、深度G.L. -2.55mでの水平ひずみ分布を見ると、先と同様、振動数が小さいほど最大値が大きくなる傾向が見て取れる。また、この深度では、水平ひずみの分布形状が傾斜角 (α) に依存している。すなわち、傾斜角 (α) が90度に近くなるにつれて、水平ひずみがピーク値を取る位置が構造物側に移動する。このときの水平ひずみのピーク値は、約2.8%である。

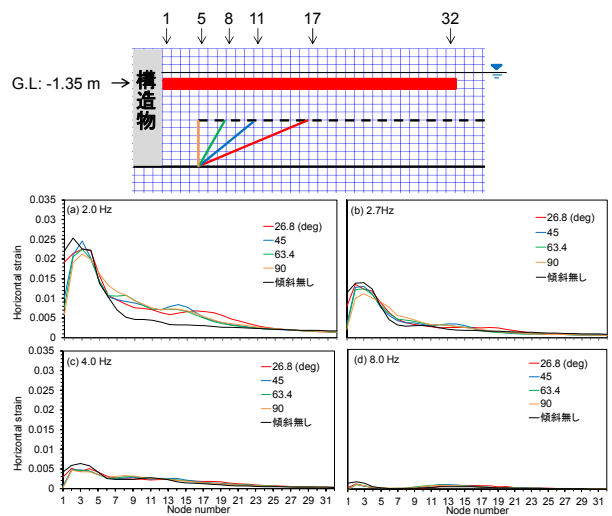


図-11 最大水平ひずみの分布の傾斜角度による比較 (出力深度 G. L. -1.35 m) (a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

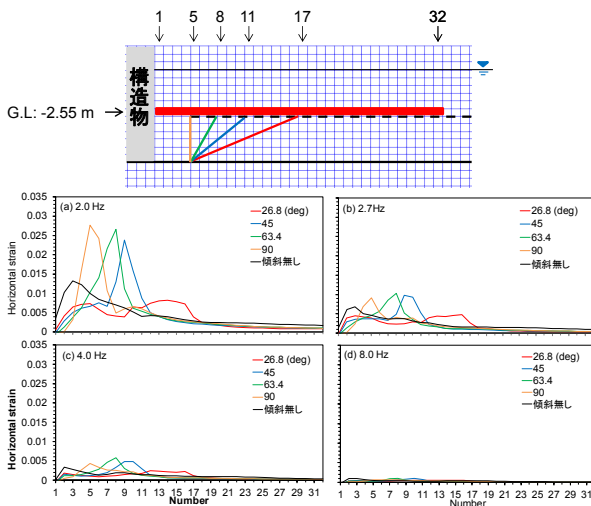


図-12 大水平ひずみの分布の傾斜角度による比較（出力深度 G.L.: -2.55 m）(a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

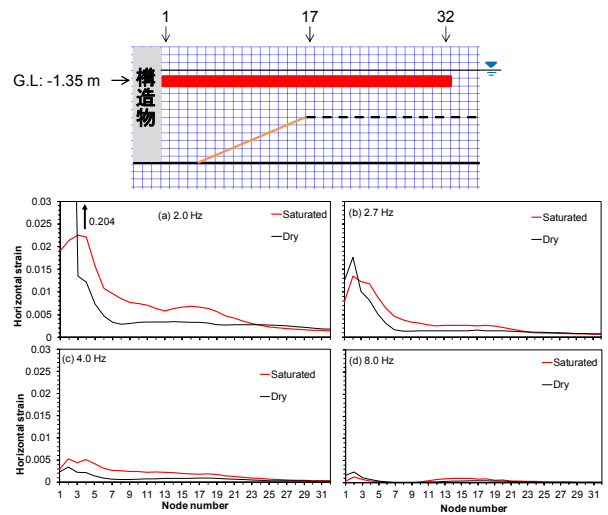


図-13 傾斜角度26.6度の乾燥砂と飽和砂の最大水平ひずみの分布の比較（G.L.: 1.35 m）:(a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

(3) 地盤条件の違い

次に、地盤変位が小さい乾燥砂地盤における地盤ひずみと比較する。図-13と図-14は、傾斜角（ α ）26.6度、離隔距離（ β ）1.2mの場合について、先と同様、深度G.L. -1.35 m, G.L. -2.55 mの場合の、水平ひずみ分布を示すものである。深度G.L. -1.35m（図-13）では、乾燥砂地盤、飽和砂地盤いずれも構造物近傍で水平ひずみが最大になっており、ピークを一つ持っている。これに対し、深度G.L. -2.55mでは、入力振動数が2.7Hz以下の場合、飽和砂地盤の水平ひずみ分布にピークが二つ現れている。同図より、乾燥砂地盤の場合、水平ひずみのピークの位置は、ほぼ傾斜の上端部に一致しており、飽和砂地盤についてもほぼ同じ位置にピークがあるが、これよりも構造物に近い位置にもうひとつのピークが生じている。後者のピーク値は約0.8%である。また、図-14より、入力振動数4.0Hzにおいても乾燥砂地盤の場合と比較して、構造物近傍で相対的に大きな水平ひずみが発生していることがわかる。

次に、傾斜角（ α ）63度、離隔距離（ β ）1.2mの場合について（図-15、図-16）同様に分布形状を考察する。図-15より、この場合にも深度G.L. -1.35mではピークを一つ持つ分布形状になっている。一方、図-16より、図-14と異なりピークがひとつの分布形状であり、その位置は傾斜上端部に一致していることがわかる。

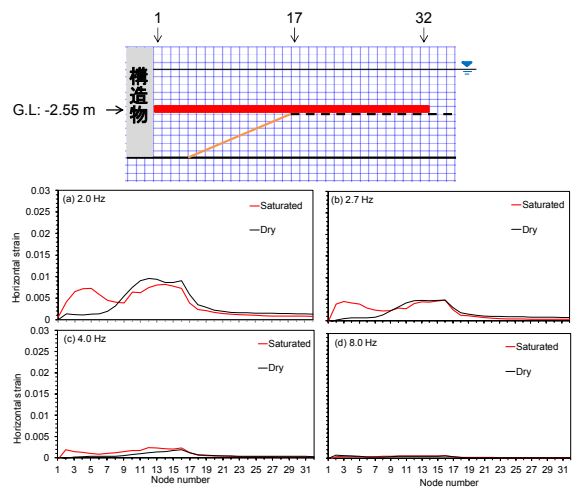


図-14 傾斜角度26.6度の乾燥砂と飽和砂の最大水平ひずみの分布の比較（G.L.: 2.55 m）:(a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

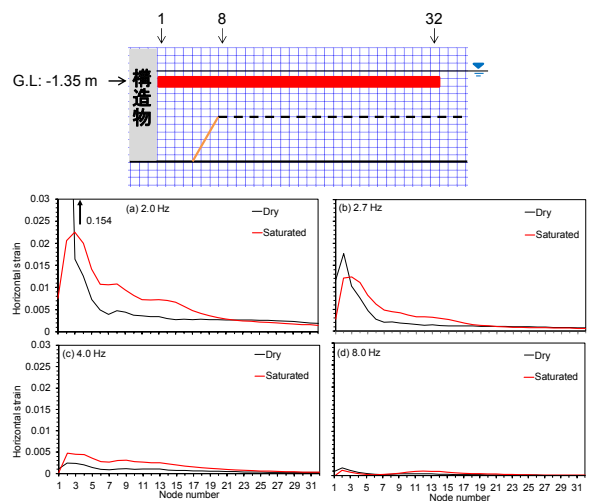


図-15 距離2.4(m)での乾燥砂と飽和砂の最大水平ひずみの分布の比較（G.L.: -1.35 m）2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

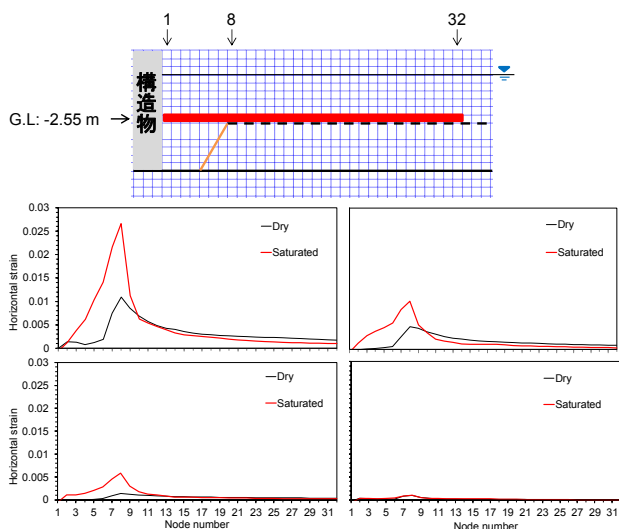


図-16 距離 2.4 (m)での乾燥砂と飽和砂の最大水平ひずみの分布の比較 (G.L.: -2.55 m) (a) 2 Hz (b) 2.7 Hz (c) 4 Hz (d) 8 Hz

4. 考察

傾斜角 (α) 90 度, 離隔距離 (β) 1.2m の加振直後の過剰間隙水圧分布を見ると (図-17), 埋め戻し領域内で水圧分布が非均質であることがわかる. 特に, 傾斜下端付近の過剰間隙水圧が小さい. このときの地盤の変形ベクトルを観察すると (図-18), 液状化した埋め戻し土が, 傾斜上端を境に左右に変位していることがわかる. すなわち, 掘削深度が大きい建物近傍では, 液状化した地盤は傾斜に沿って変位するのに対し, 傾斜上端部では, 傾斜部に進入できなかった液状化した土が傾斜と反対方向に変位している. このときの傾斜部上端での水平ひずみは図-12 より, 約 2.5%である. 傾斜上端部付近で地盤変位が逆向きとなると, 管路に引抜き力が作用することになる. このような現象により管路被害が発生しているかどうか, 今後精査が必要である.

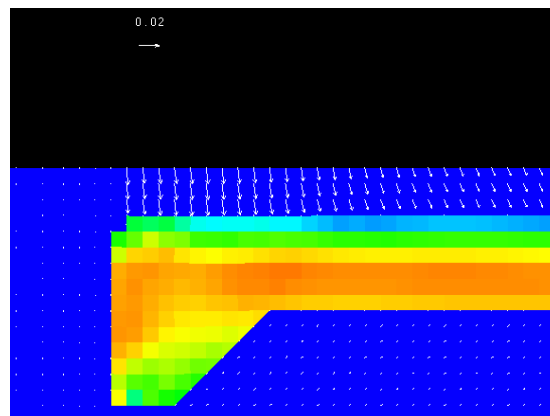


図-17 構造物近傍の過剰間隙水圧の状況 (傾斜角 (α) 90 度, 離隔距離 (β) 1.2m)

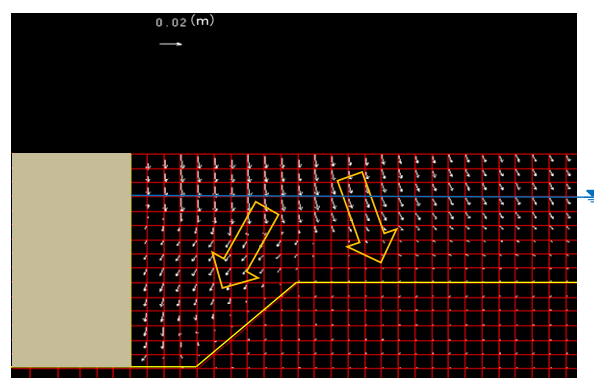


図-18 構造物近傍の地盤変位ベクトル

5. まとめ

本研究では, 埋戻し土掘削底面の形状と振動特性及び変形特性の関係性を調べ, 地盤の変形に対して最適な掘削形状の提案を行うことを目的として, ひずみ空間での多重せん断モデルを構成則とする有効応力法 (FLIP) による数値解析を行った. 埋戻し土掘削底面の形状のパラメータは, 傾斜角度及び構造物から傾斜下端まで距離とした. 解析を通じて明らかになった事は以下のとおりである.

- 1) 入力振動数, 深度によらず, 取合い部 (構造物近傍) において水平ひずみは局所的に増大する.
- 2) 埋め戻し部に傾斜を有する場合には, 傾斜上端部の水平ひずみは大きくなる傾向にある.
- 3) 地表面に近いところでは, 構造物との距離を短くすると取合い部の最大水平ひずみは減少する.
- 4) 埋め戻し部に傾斜を有する場合には, 傾斜上端部付近で残留変位ベクトルの水平成分が逆向きになる.

以上より, 液状化による水平ひずみの発生を抑えることのできる掘削形状が有する条件は以下のとおりである.

- 1) 傾斜下端と構造物の距離が短い.

- 2) 傾斜角度が直角に近い。
- 3) ただし、掘削底面付近に管路を敷設する場合は、傾斜角度が小さい方（水平に近いほう）がよい（今回の解析では0度から26.6度）。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ:

http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html (2014年9月12日アクセス)。

- 2) 国土技術政策総合研究所：平成23年東北地方太平洋沖地震の下水道施設被害状況（速報），2011.4.4.
- 3) 株式会社日水コン：液状化現象による浄水場被害の状況分析事例の報告，2013.4.12.
- 4) 財団法人沿岸開発技術センター：埋立地の液状化対策ハンドブック，1993.
- 5) 大槻明，田蔵隆，清水勝美：傾斜基盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ，土木学会論文集，第350号，I-2，1984.
- 6) 松原勝己，安藤広和：不整形地盤に発生する地震時のひずみについて，応用地質35巻，6号，1995.
- 7) 神山眞，佐藤勉，鈴木猛康：不整形地盤の地震応答に

おける短周期表面波の工学的重要性に関する研究，土木学会論文集，第682号，I-56，pp.225-243，2001.

- 8) 今井淳一郎：地盤の不均質性が管路の地震時挙動に及ぼす影響に関する研究，京都大学修士論文.
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp.27-56, 1990.
- 10) Iai, S. Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Parameter identification for a cyclic mobility model, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp.57-83, 1990.
- 11) 井合進，飛田哲男，小堤治：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係，京都大学防災研究所年報，第51号，pp.291-304，2008.

EFFECTS OF A BOUNDARY SHAPE OF AN EXCAVATION ON GROUND STRAINS ADJACENT TO A STRUCTURE DURING EARTHQUAKES

Tetsuo TOBITA, Yasunori ARAKI, Yasuko KUWATA, Katsutoshi Miyamoto, Kiyoshi SATO, Yasuhiko KONISHI, and Yoshio SUNASAKA

In water treatment plants, some structures are constructed on the deep excavated ground and pipes connecting each structure are buried in backfill whose thickness is relatively deep compared to ones buried along local streets. In such a case, depth of excavation along a pipe may vary and, therefore, ground deformation along a pipe may irregular, which might cause adverse effect on stability of pipes. Effects of excavation shape on ground strains are investigated with the effective stress analysis. Results show that the ground strain becomes the largest at the top edge of the excavation. However, its magnitude varies with the inclination angle of excavation.