

1. 液状化地盤上の埋設管を有する小規模構造物の三次元地震応答解析

3D Earthquake Response Analysis of a Small Structure Laid on Liquefied Ground

山下 勝司*¹ 高稲 敏浩*¹

要 旨

軟弱砂質地盤上に建設された小規模構造物について、地震時の安定性を 3 次元水～土連成弾塑性有限法（ソースコード：GEOASIA）を用いて、地盤－構造物系の地震前～地震後までの一連の挙動を検討した。解析の結果、長周期成分を含む東海・東南海・南海 3 連動地震を入力すると、構造物は、1～4 秒の周期で水平振動し、地震後の沈下はベースコンクリート面積の広いほうが大きくなるが、不同沈下は小さくなることが分かった。

キーワード：有効応力解析／液状化／有限要素法

1. はじめに

軟弱砂質地盤上に建設されたトップヘビーな小規模構造物について、地震時の安定性を 3 次元水～土連成有限変形解析コード GEOASIA^{1),2),3)}を用いて検討した。構造物は、地中埋設管と繋がった構造となっており、小構造物ではあるがライフラインの重要な設備である。検討に用いた地震動は長周期成分を含む東海・東南海・南海 3 連動地震であるが、検討は、地震前～地震後までの一連の挙動について実施した⁴⁾。

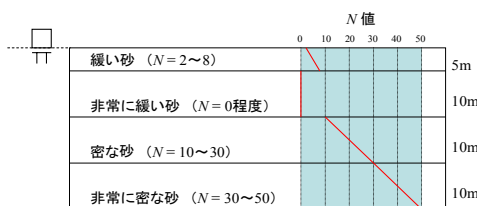
2. 計算条件

地盤は、図－1 に示すように上層から、緩い砂、非常に緩い砂、密な砂、非常に密な砂の 4 層からなる地盤である。計算に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を図－2 に、材料定数を表－1 に示す。層 1（非常に密な砂）については、ほぼ剛な地盤であるとして 1m のみをモデル化した。構造の程度、比体積は各層で均一として、土被り圧に応じて過圧密比を鉛直方向に分布させた。また、

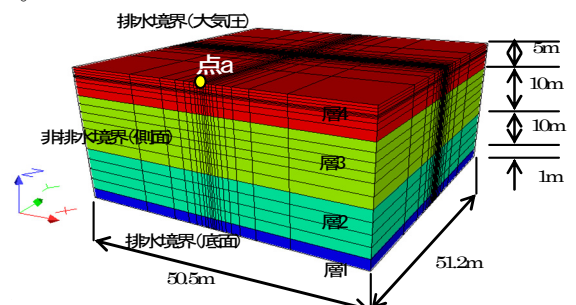
工学的基盤面にあたる地盤下端は、底面粘性境界（ $V_s=380\text{m/sec}$ ）を設定し、地盤両側の同一高さにある全節点の x,y,z 方向に等変位条件を課した（周期境界）。

地盤中央に設置する小規模な構造物を図－3 に示すが、重心位置が高くトップヘビーな構造となっている。計算にあたっては、土中敷設の構造物（埋設管）はその部分の土要素を 1 相系弾性体で置換することにより再現し、地上部分の構造物は 1 相系弾性体の要素を追加することで再現した。ベースコンクリート幅の影響を調べるため、大小 2 ケースについて検討した。

地震動は、地盤底面の全節点の x,y 軸方向に東海・東南海・南海 3 連動地震（図－4）を入力した。図－5 に示すように長周期成分を含む 4 秒付近が卓越した地震動である。計算は地震動を与えた後、圧密が終了するまで実施した。



図－1 地層区分と N 値



図－2 計算に用いた有限要素メッシュおよび境界条件

表－1 材料定数

層	弾塑性パラメーター					発展則パラメーター							初期値				土の密度 ρ_s (t/m^3)	透水係数 k (cm/sec)
	圧縮指数 λ	膨潤指数 κ	境界状態 定数 M	NCL の切片 N	ポアソン 比 ν	構造低位化指数 a b c C_s				正規圧密 土化指数 m	回転硬化 指数 b_r	回転硬化 境界定数 m_b	応力比 K_0	構造の 程度 I/R_0	異方性の 程度 K_β	比体積 v_0		
層1($D_r=80\%$)	0.05	0.002	1.1	1.989	0.3	5.0	1.0	1.0	0.1	0.12	3.0	0.9	0.6	1.4	0.6	1.72	2.675	1.0×10^{-4}
層2($D_r=60\%$)	0.05	0.002	1.1	1.989	0.3	5.0	1.0	1.0	0.1	0.12	3.0	0.9	0.6	1.4	0.6	1.79	2.675	1.0×10^{-4}
層3($D_r=40\%$)	0.05	0.002	1.1	1.989	0.3	5.0	1.0	1.0	0.1	0.12	3.0	0.9	0.6	1.4	0.6	1.86	2.675	1.0×10^{-4}
層4($D_r=40\%$)	0.05	0.002	1.1	1.989	0.3	5.0	1.0	1.0	0.1	0.12	3.0	0.9	0.6	1.4	0.6	1.86	2.675	1.0×10^{-4}

($N_p=98\text{kN/m}^2$ における繰り返し土の等方正規圧密線上の比体積)

*¹ 技術研究所構造研究グループ

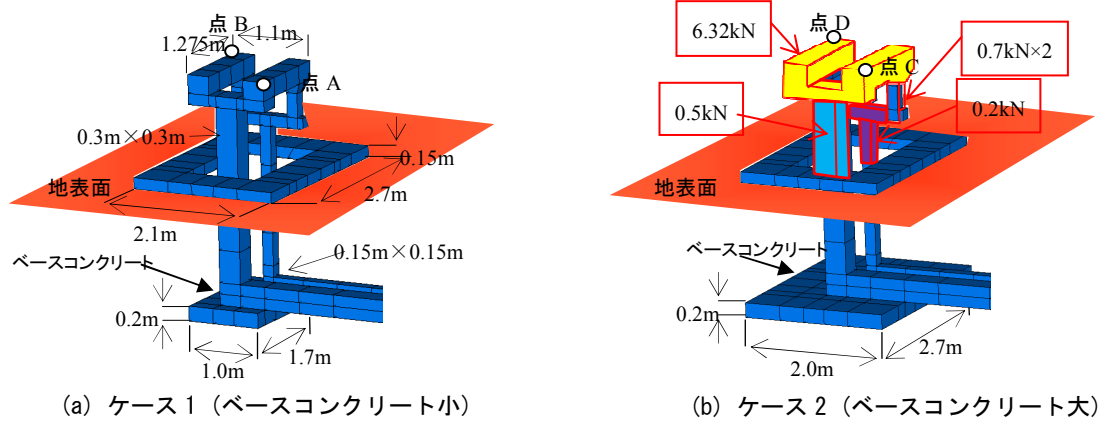


図-3 構造物メッシュ図

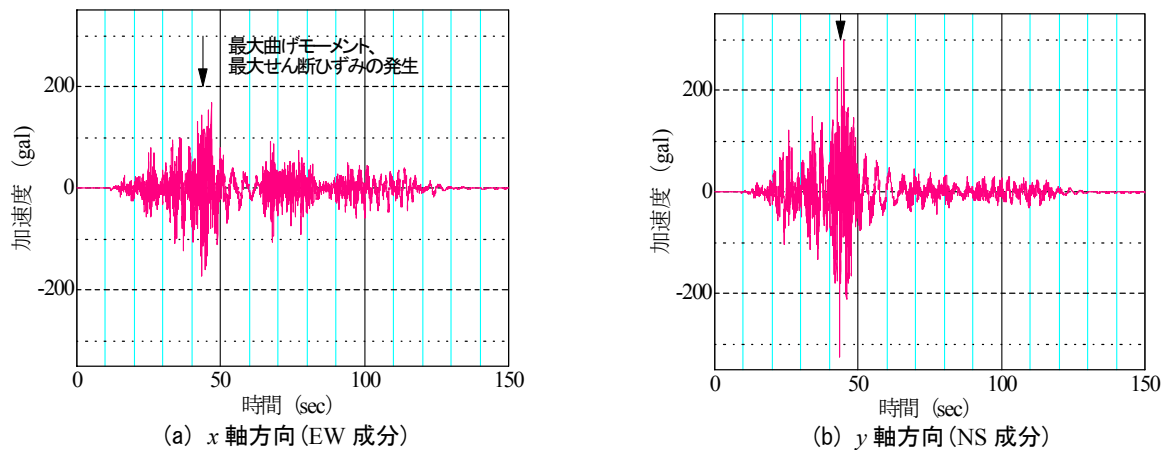


図-4 入力地震

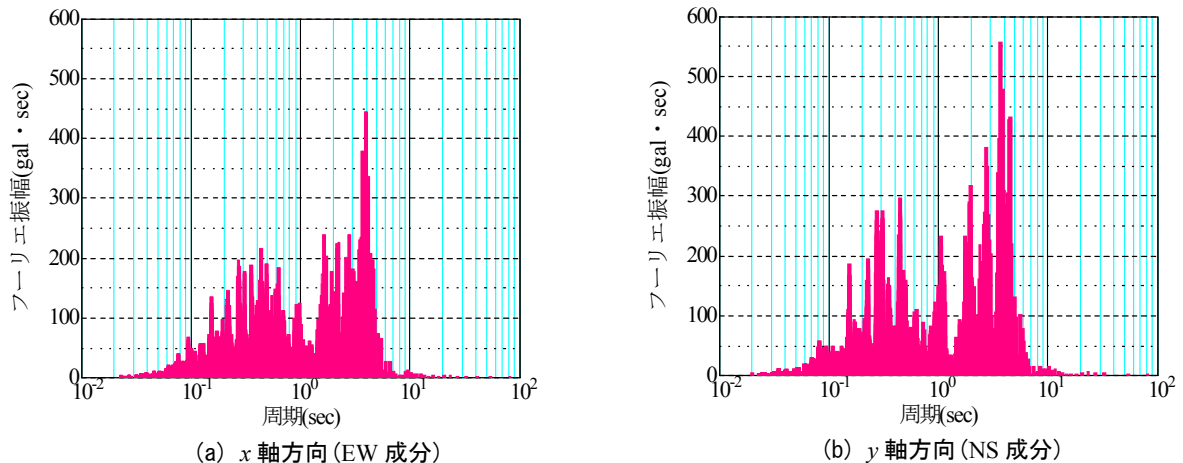


図-5 フーリエ振幅

3. 計算結果

地盤の液状化の様子について調べる。点 a (図-2 参照) における地震中の過剰間隙水圧比の変化を図-6 に、30 秒経過後の平均有効応力分布を図-7 に示す。図-6, 7 より、概ね 30 秒以降に過剰間隙水圧比が 0.95 を越えており、液状化しているものと判断される。

構造物の地震応答について、点 A (ケース 1) および点 C (ケース 2) (図-3 参照) における地震中の水平変位量を図-8 に、また、点 A (ケース 1) の応答加速度および

フーリエ振幅を図-9, 10 に示す。図-8 より、水平変位量は、x 方向はケース 1, 2 ともに最大 9.6cm、地震終了時 7.6cm となり、y 方向はケース 1 で最大 8.2cm、地震終了時 1.8cm、ケース 2 で最大 7.6cm、地震終了時 0.8cm となる。図-9 より、点 A の最大加速度は x 方向で 670gal、y 方向で 980gal となる。また、図-9, 10 より、構造物は地盤が液状化した後、周期 1~4 秒の長周期で水平に振動していると見てとれる。

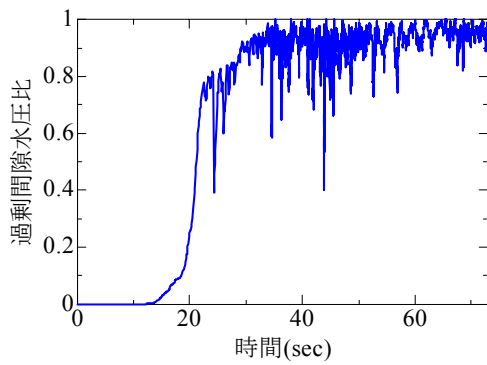


図-6 過剰間隙水圧比

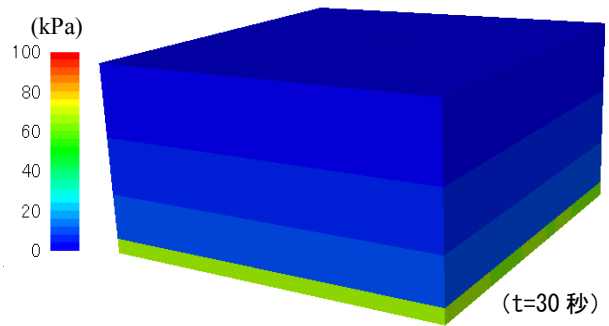
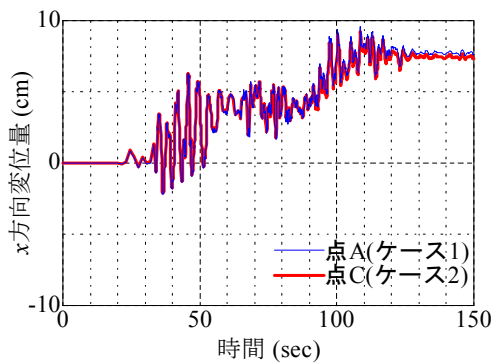
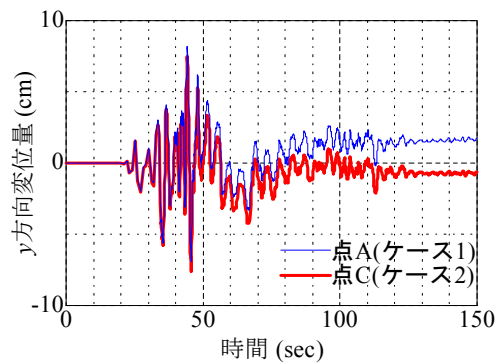


図-7 平均有効応力分布

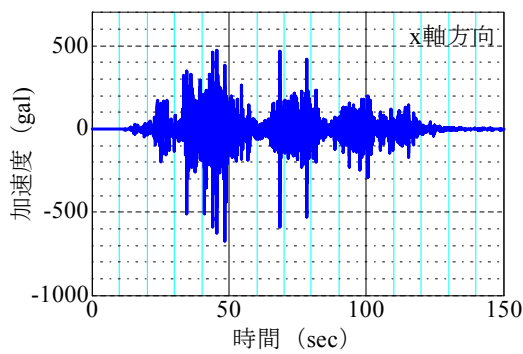


(a) x 方向変位量

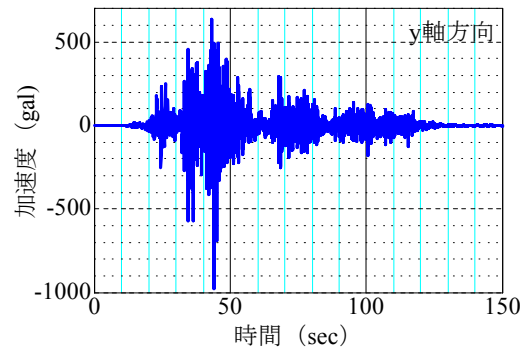


(b) y 方向変位量

図-8 水平変位量

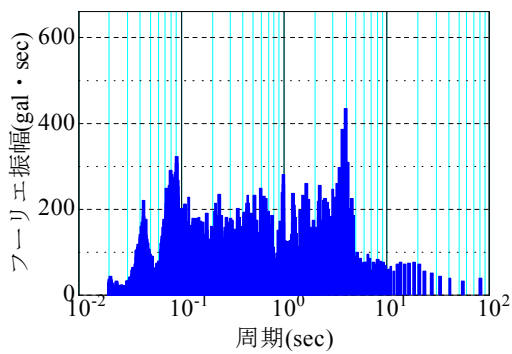


(a) x 軸方向

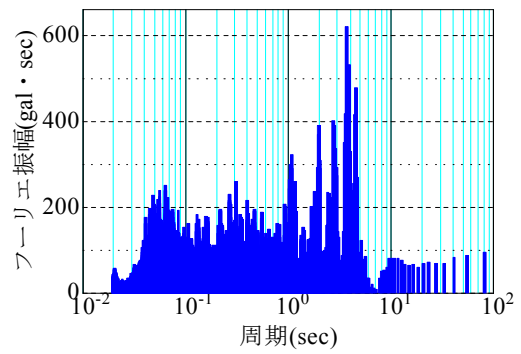


(b) y 軸方向

図-9 点 A 応答加速度



(a) x 軸方向



(b) y 軸方向

図-10 点 A フーリエ振幅

次に、構造物の地震中に生じる応力とひずみについて、管(□0.15m)の立ち上がり柱部分と水平部分の最大曲げモーメントと構造物の最大せん断ひずみ分布をケース 1,2 について、それぞれ図-11, 12 に示す。ケース 1,2 とも図-4 に示した矢印の時刻 $t=44$ 秒付近で、最大曲げモーメントおよび最大せん断ひずみが生じている。その大きさ

は、柱部分はケース 1 で $12.2\text{kN}\cdot\text{m}$ 、ケース 2 で $13.8\text{kN}\cdot\text{m}$ となっており、ベースコンクリート幅の大きいケース 2の方が大きくなっている。水平部分はケース 1,2 ともに $13.5\text{kN}\cdot\text{m}$ となる。また、最大せん断ひずみが生じた時の主応力についても併せて示すが、部材の許容応力以内であることを確認している。

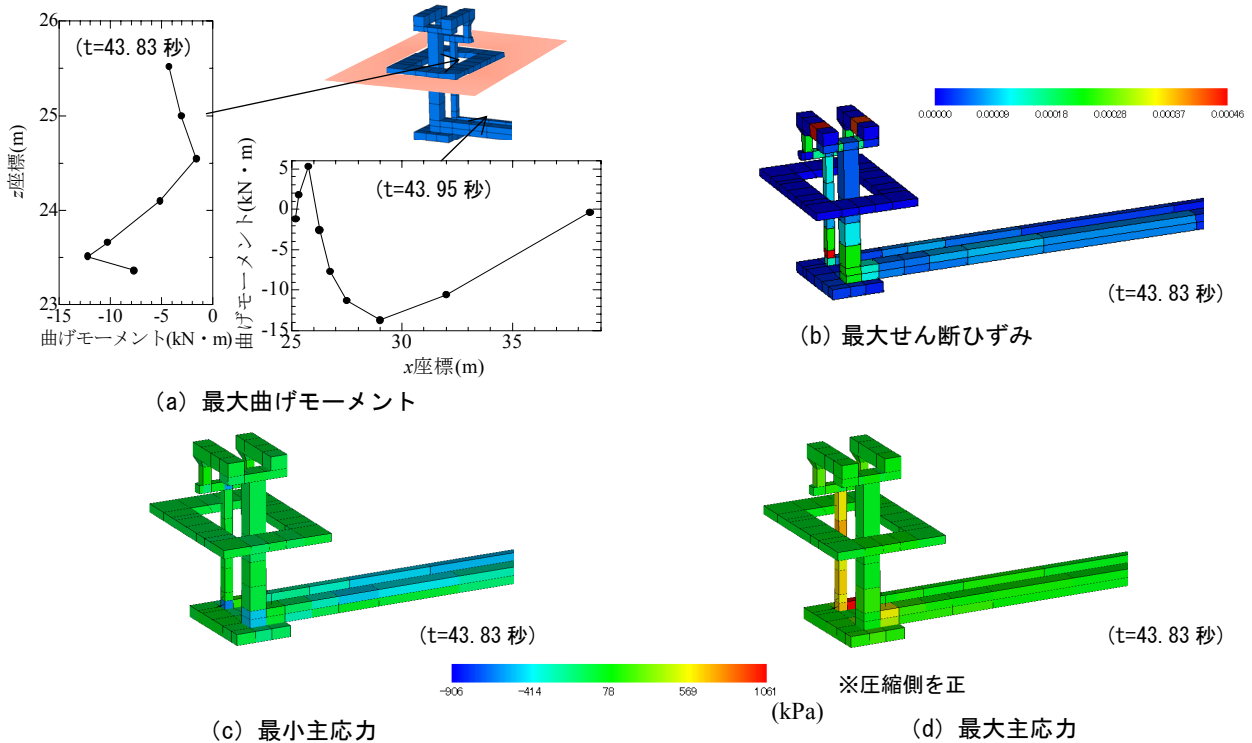


図-11 構造物の諸量 (ケース 1)

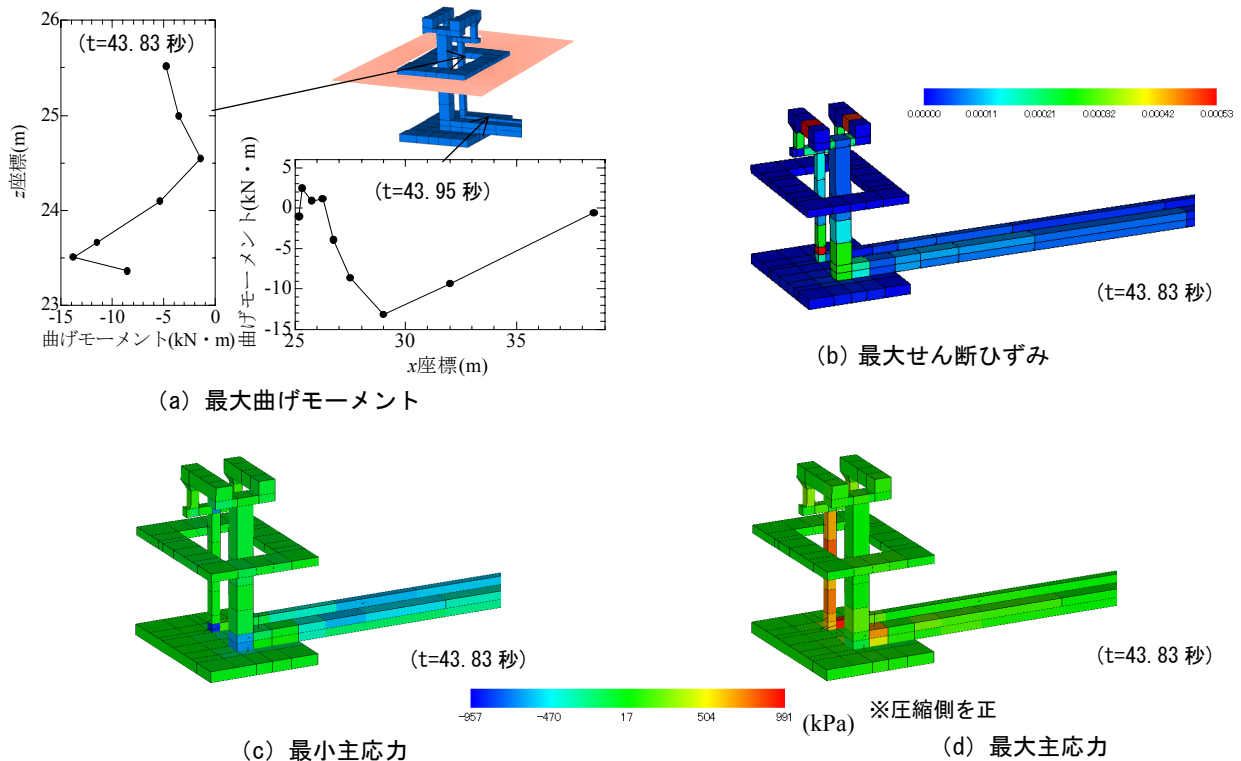


図-12 構造物の諸量 (ケース 2)

次に、地震中～地震後における沈下量について調べる。
地盤各層の時間～沈下量関係を図-13 に示すが、層 3 および層 4 での沈下が大きい。これは、層 3 および層 4 が液状化し、地震後過剰間隙水圧の消散とともに沈下したためである。構造物の点 A～D の時間～沈下量関係を図-14 に示す。各点の最終沈下量は、ケース 1 で点 A6.2cm、点 B8.0cm、ケース 2 で点 C7.9cm、点 D8.6cm となっており、ケース 2 のほうが大きくなっているが、点 C と点 D (ケース 2) の沈下量の差は 0.7cm と、点 A と点 B (ケース 1) の差 1.8cm より小さくなっている。ベースコンクリートの面積を広くすることで、不同沈下が抑えられている。 $t=43.83$ 秒および地震後圧密終了時のせん断ひずみ

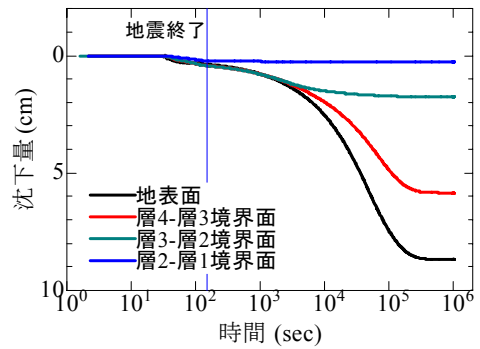
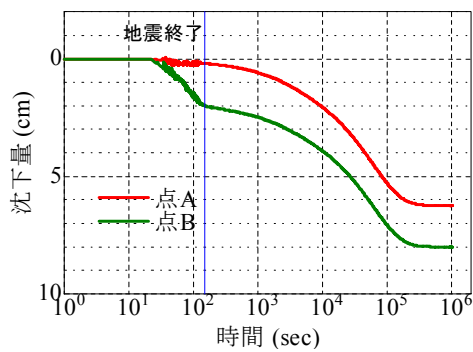
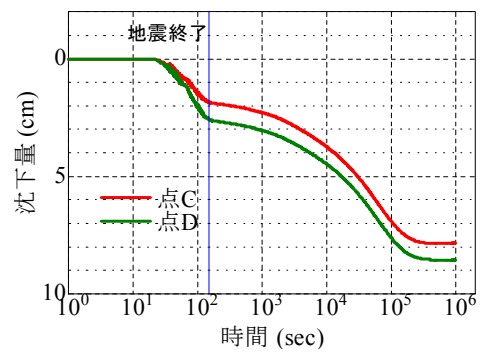


図-13 時間～沈下量関係(地盤)

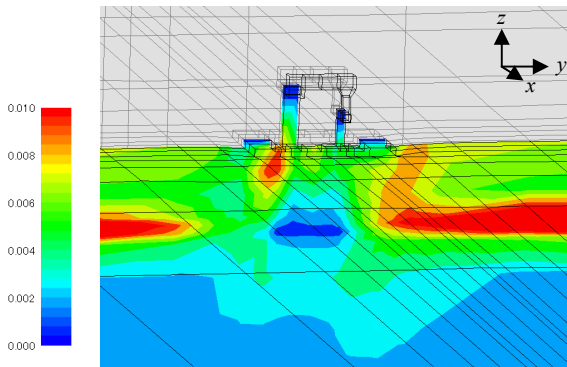


(a) ケース 1

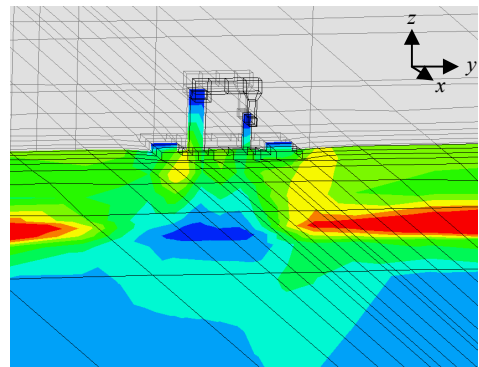


(b) ケース 2

図-14 時間～沈下量関係

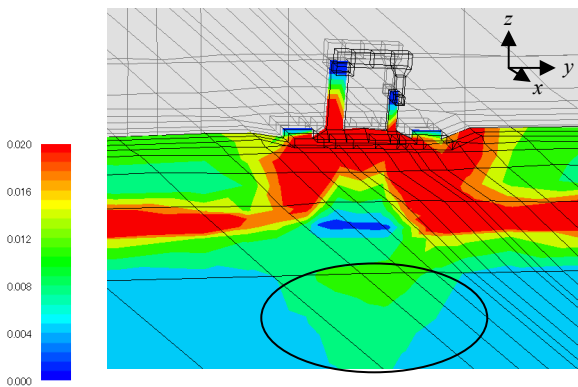


(a) ケース 1

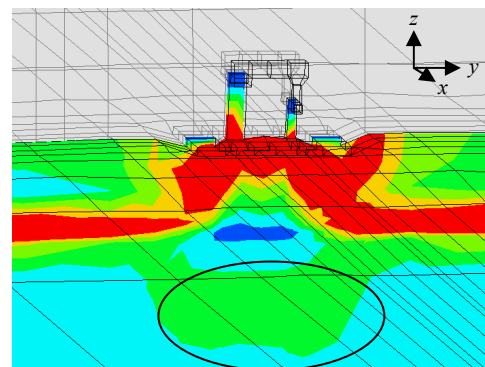


(b) ケース 2

図-15 せん断ひずみ分布($t=43.83$ 秒)



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-16 せん断ひずみ分布(圧密終了時)

分布をそれぞれ図-15, 16 に示す（図-2 点 a を通る yz 平面で表示）。ケース 1,2 とともに沈下量が大きい点 B,D 側（y 軸のプラス側）でせん断ひずみが大きく生じている。ケース 2 では、ベースコンクリート下でのせん断ひずみが、ケース 1 より広い範囲で大きくなっており（図中、○で囲った部分）、不同沈下が抑えられている。

4. まとめ

液状化層を有する軟弱砂質地盤上に建設された小規模構造物について、3 次元地震応答解析を実施した。解析の結果、長周期成分を含む東海・東南海・南海 3 連動地震を入力すると、地盤は 30 秒ほどで液状化し、その後、構造物は 1~4 秒の周期で水平振動するが、部材は許容応力以内であることを確認した。地震後の構造物の沈下は、ベースコンクリート面積の広いほうが大きい、不同沈下は小さくなった。

今回想定した地震動では、解析対象とした構造物に大きな被害が生じないことを確認した。

[謝 辞]

名古屋大学野田利弘教授、中井健太郎准教授のご指導のもと解析を実施いたしました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) Asaoka, A. and Noda, T.: All soils all states all round geo-analysis integration, International Workshop on Constitutive Modeling - Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, pp.11-27, 2007.
- 2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K., Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 4) 高稲敏浩、野田利弘、中井健太郎、浅岡顕、山下勝司、：液状化地盤に敷設されたトップヘビーな小規模構造物の三次元地震応答解析，第 47 回地盤工学研究発表会, pp.1411-1412, 2012.