

不同沈下した粘性土層上の砂質土層における液状化の発生に関する解析的評価

An Analytical Evaluation of Liquefaction Occurrence of Sand Layer
above A Clay Stratum with Uneven Settlement北出圭介 Keisuke KITADE (中電技術コンサルタント(株))
一井康二 Koji ICHII (広島大学工学研究院)

粘性土地盤においては、不均質な地盤構成等に起因する不同沈下が地表面に発生することがある。つまり粘性土地盤上に砂質土を埋立てた場合、粘性土の不同沈下により、上層の埋立土層の物性に影響を与える可能性がある。本研究では、単純な砂質地盤モデルの底面に様々なパターンの不同沈下を再現し、下部粘性土地盤の不同沈下が砂質地盤に及ぼす影響を特に液状化の発生の観点から評価した。この結果は、性能規定が求められている中で、埋立地のような広範囲の液状化評価に役立つことが期待できる。

キーワード：液状化，埋立地，不同沈下，性能設計 (IGC : E-2, E-8)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、津波により甚大な被害を東北地方沿岸部に及ぼした。しかし被害は津波によるものだけではなく、震源から300km～500km離れた関東地方では、沿岸部では埋立地、内陸部では旧河道や湖沼の埋立地の広範囲で液状化による被害が多く発生していた¹⁾。特に東京湾沿岸部での液状化現象は従来の想定を超えるものであり、我々の液状化現象に関する理解がまだ不十分であることが示唆された。

長い年月を経て堆積し土層を構成する自然地盤は不均質性を有している。粘性土地盤の場合は土質定数の不均質性により、圧密沈下にばらつきが生じる不同沈下の現象が確認されている²⁾。また、埋立て、盛土等の人工地盤を造成する場合、地盤材料、施工方法等の様々な要因により、人工地盤そのものに不均質性が生じることが考えられる。そこで、本研究では、粘性土地盤上に人工地盤を造成した場合、粘性土地盤の不同沈下により発生する人工地盤の地盤内応力の不均質性に着目し、これらが上層地盤の液状化の発生に及ぼす影響を検討する。

人工地盤が砂質土で構成されている場合、地盤内応力の不均質性が砂質土の応力状態、ひいては液状化特性に影響し、液状化の発生の分布も不均質になると考えられる。圧密の不同沈下は経年的に発生するため、人工地盤の液状化抵抗が経年的に変化し、年代効果による液状化抵抗の増加はあるものの、地震時における地盤の液状化に対する安定性が低下するおそれもある。

本研究では、不同沈下による地盤内応力の変化の様相、

および地震時液状化の発生の変化の様相について、FEMを使用した解析的検討を行った。

2. 検討方法

2.1 検討モデルと地盤条件

本検討では、埋立人工地盤を想定し、粘性土地盤上に等価N値10の砂質地盤が層厚15mで造成した状態をモデル化した。なお、粘性土地盤は不同沈下形状のみを解析領域底面の形状変化としてモデル化するため、ここでは地盤としてモデル化はしない。水平方向は不同沈下形状が模擬できるように十分広い幅の100mとした。また、液状化した場合の計算の安定上、地表面の有効平均拘束圧が小さくなりすぎないように、地下水位をGL-2mとし不飽和領域を設けた(図-1)。解析メッシュは、要素の大きさを1m×1mの正方形とした1500要素とし、地表面部には不同沈下による地面の鉛直方向に生じる割れ、ずれを表現できるようにジョイント要素を設けた(図-1)。なお、ジョイント要素は初期自重解析のみ機能するものとし、地震応答解析時は、ジョイント要素を構成する二重節点同士を拘束することで、機能しないようにした。解析は、有効応力法に基づく地震応答プログラム“FLIP (Finite Element Analysis of Liquefaction Program)³⁾”を使用した。地盤定数は、等価N値10、細粒分含有率Fc=0%と仮定して、簡易設定法³⁾により動的変形特性、液状化特性を設定した。設定した定数を表-1に、動的変形特性の算定方法を以下に示す。

$$N_{131} = N_{65} \times \{0.0041 \times (131 - 65) + 1\} + 0.019 \times (131 - 65) \quad (1)$$

$$G_{ma} = 14100 \times N_{131}^{0.68} \quad (2)$$

$$K_{ma} = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G_{ma} \quad (3)$$

$$D_r = 21 \left(\frac{100N_{131}}{131+70} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$\phi = 0.0003 \times D_r^2 + 0.0426 \times D_r + 36.682 \quad (5)$$

ここに、

N_{65} : 等価 N 値 (有効上載圧 65kN/m² に対する N 値)

N_{131} : 土圧係数 0.5 の基で、有効拘束圧 98kN/m² に対応する有効上載圧 131kN/m² に対する N 値

G_{ma} : 有効拘束圧 98kN/m² に対するせん断弾性係数 (kN/m²)

K_{ma} : 有効拘束圧 98kN/m² に対する体積弾性係数 (kN/m²)

ν : ポアソン比

D_r : 相対密度

ϕ : せん断抵抗角 (°)

また、液状化特性としての液状化強度曲線を図-2、ジョイント要素の定数を表-2 に示す。液状化強度は、作用するせん断応力 τ と初期平均有効拘束圧 σ'_{m0} の比なので、 σ'_{m0} が要素ごとに異なると、液状化強度も不均一となる。また、せん断弾性係数およびせん断強度も σ'_{m0} に依存するため不均質となる。

2.2 不同沈下を模擬した自重解析

粘性土地盤の不同沈下は解析メッシュの底面節点で模擬する。不同沈下の形状は、100m の延長で 2 箇所発生する場合と 3 箇所発生する場合の 2 パターンで検討した。不同沈下の形状を図-3 に示す。

なお、不同沈下の形状について正弦波形状である根拠はない。しかし、不同沈下の量は、地盤物性の相関性に依存しており、地盤のばらつきに基づく不同沈下の場合、極端に不連続な沈下が生じないことがわかっている²⁾。よって、連続性を担保できる一般的な形状として正弦波形状を仮定した。また、波長は地盤物性相関性や層厚に依存するが、100m で 2~3 地点の沈下のピークは現実的に生じるパターンである⁴⁾。FLIP では、動的解析の前段階として、地盤の密度に重力加速度を作用させることによって地盤内の初期応力を再現する初期自重解析を実施する。不同沈下によ

って発生する地盤内応力を模擬する方法として、この初期自重解析終了と同時に、目標とする不同沈下形状になるように、底面の各節点に鉛直下向きの強制変位を与えた。不同沈下については、実際には補修されることもある(費用の問題から放置されることも多い)が、解析的に地表面形状を再度水平にすることは難しいため、ここでは地表面の不整形は放置されているものとして解析した。不同沈下の計算ケースを表-3 に示す。

2.3 地震応答解析

不同沈下による不均一な応力分布が液状化の発生に及ぼす影響を評価するため、簡単な条件での地震応答解析を実施した。具体的手順は、自重解析の後、底面境界に水平加速度として、周期 1 秒、最大加速度 100gal の正弦波形を 10 波作用させた。水平加速度時刻歴図を図-4 に示す。単純な地層構成のため、単純な正弦波加振が最も地盤内の液状化の発生の状況の差異を把握できると考えている。過剰間隙水圧比の上昇モデルは井合モデル⁵⁾を使用した。井合モデルは各要素のせん断応力とせん断ひずみからせん断仕事を算定し、その累積値から液状化の進行程度を表す液状化フロントパラメータを求めるものである。

表-1 土の動的変形特性

ρ (t/m ³)		N_{65}	G_{ma} (kN/m ²)	K_{ma} (kN/m ²)	ν	σ'_{ma} (kN/m ²)	ϕ (deg)	h_{max}
飽和	不飽和							
2.0	1.8	10	84495	220349	0.33	98	39.67	0.24

表-2 ジョイント要素の定数

垂直方向初期剛性 Kn(kN/m ²)	せん断方向初期剛性 Ks(kN/m ²)	ϕ (deg)
1000000	0	0

表-3 計算ケース

不同沈下箇所数	2箇所, 3箇所
沈下量(m)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

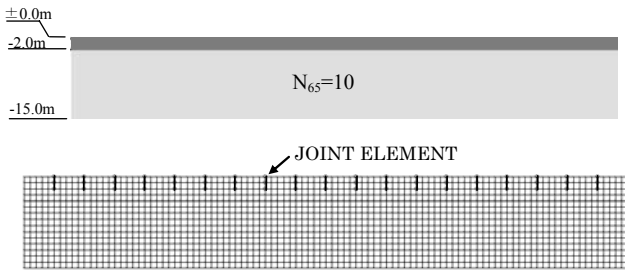


図-1 土層モデルと解析メッシュ

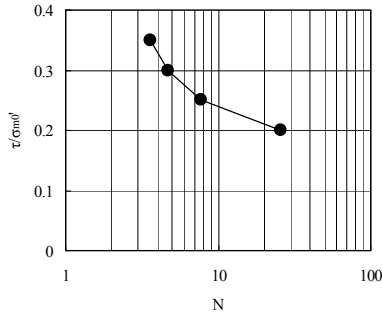


図-2 液状化強度曲線

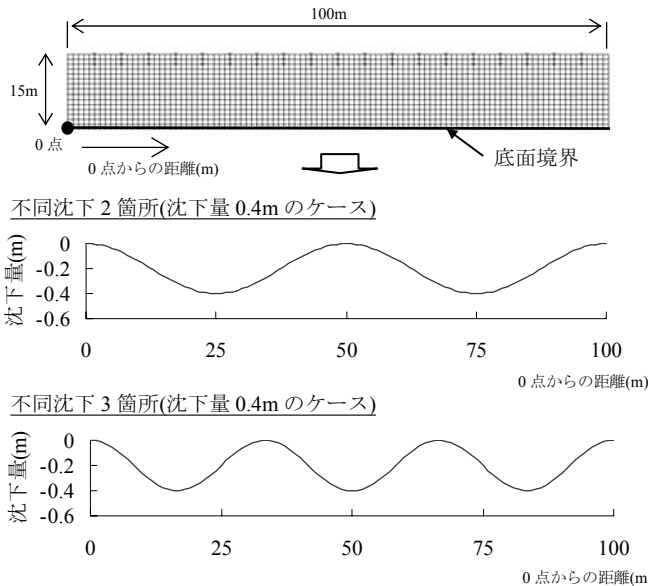


図-3 不同沈下の模擬

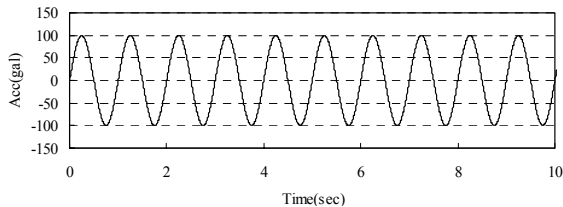


図-4 入力波形

3. 不同沈下に伴う地盤内応力の変化

3.1 有効拘束圧と初期せん断応力の変化

沈下が3箇所、沈下量0.3mのケースについて、不同沈下後の変形図を図-5に示す。なお、変形スケールは10倍としている。次に地盤内応力として、主応力図、初期平均

有効拘束圧 σ'_{m0} 、初期せん断応力 τ_{max0} 、初期せん断応力比 τ_{max0}/σ'_{m0} を図-6, 8, 11, 13 に示す。また、比較のために、不同沈下がない場合の地盤内応力を図-7, 10 に、不同沈下がある場合とない場合の地盤内応力の差を図-9, 12 に示す。

不同沈下が発生することによる地盤内応力の変化の傾向を以下に示す。

- ・ 沈下が大きい箇所と沈下が小さい箇所で主応力の向きに傾きが発生する。(図-6)
- ・ 不同沈下が大きい箇所の周りで、主応力の向きがアーチ状となる。(図-6)
- ・ 深度が大きい範囲の平均有効拘束圧 σ'_{m0} は、不同沈下が大きい箇所は小さくなるが、不同沈下が小さい箇所は大きくなる。(図-7, 8, 9)
- ・ 初期せん断応力 τ_{max0} は不同沈下により全体的に大きくなるが、沈下が大きい箇所の周りのアーチ状の範囲で特に大きくなる。(図-10, 11, 12)
- ・ 初期せん断応力比 τ_{max0}/σ'_{m0} は、沈下が大きい箇所の深度が小さい範囲、および沈下が大きい箇所と小さい箇所間で大きくなる。(図-13)

また、最大沈下点が3地点の解析事例では、同様の応力分布が並ぶようになっている。すなわち、地盤内応力は境界からの距離に依存してなく水平に無限に続く地盤を解析的に模擬できる。よって、応力分布の変化は最大沈下点からの距離と地盤深度で整理できる可能性が高いことがわかる。

3.2 沈下量と応力状態の変化

最大沈下点からの距離と深度の関係から地盤内応力の変化傾向を整理し、沈下量の影響を検討する。図-14に示すようにA~Fの6測線、5深度(GL-2.5m, GL-5.5m, GL-8.5m, GL-11.5m, GL-14.5m)を考えた。A~Fの測線における地盤内応力の深度分布図を、まず沈下量0.3mを例として図-15に示す。また、不同沈下しない均質な地盤応力の場合の深度分布についても併せて示す。

各測線の深度分布図の傾向は以下のとおりである。

- ・ 初期平均有効拘束圧 σ'_{m0} は、沈下が大きい測線 A, B については、深度が大きくなるにしたがって不同沈下しない場合より小さくなるが、他の測線では不同沈下しない場合より各深度で大きくなる。
- ・ 初期せん断応力 τ_{max0} は、各測線とも大部分で不同沈下しない場合よりも大きくなっているが、沈下が大きい測線ほど深度が大きくなるにつれて τ_{max0} は小さくなる傾向がある。
- ・ 初期せん断応力比 τ_{max0}/σ'_{m0} は、不同沈下しない場合

よりも大きくなっている。沈下が大きい測線，小さい測線と比較して，その中間の測線は深度分布のばらつきが小さい傾向にある。

図-15 より，不同沈下しない場合の初期せん断応力比は $\tau_{\max 0} / \sigma'_{m0} = 0.34$ 程度である。一方で，不同沈下した場合の各測線のせん断応力比は $\tau_{\max 0} / \sigma'_{m0} > 0.34$ である。したがって，模式的に図-16 に示すように，不同沈下した場合の方が有効応力経路の初期地点（自重圧密終了後の応力状態）が破壊線に近く，この事が液状化の起こり易さに影響してくると思われる。

次に，沈下量が増加した場合に，図-15 で得られた傾向がどのように変化するかを図-17 に示す。図-17 は沈下量 0.1m に対する沈下量 0.3m の場合の地盤内応力の比の深度

分布を示している。この結果，沈下量が増加するにしたがい，以下の傾向が見られた。

- 例えば A 側線の σ'_{m0} など，上端・下端と，深度中央付近で増減の傾向が異なる場合もあり沈下量の増加に伴う応力分布の変化は極めて複雑である。
- 沈下量の増加によって σ'_{m0} が増加した点では， $\tau_{\max 0}$ も増加していき，結果として図-17 右側に見られるように，全般では沈下量の増加により初期せん断応力比 $\tau_{\max 0} / \sigma'_{m0}$ が増加している。
- 沈下量の増加に伴う初期せん断応力比の増加は，ばらつきはあるものの，各側線，深度ともに，ほぼ同程度である。

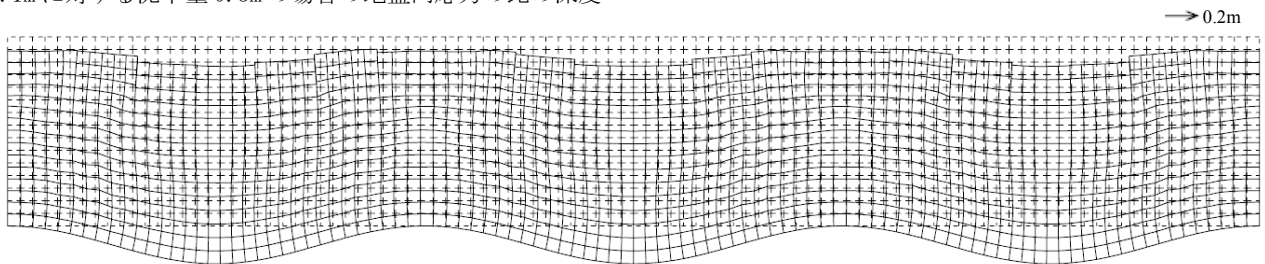


図-5 変形図(不同沈下 3 箇所，沈下量 0.3m)

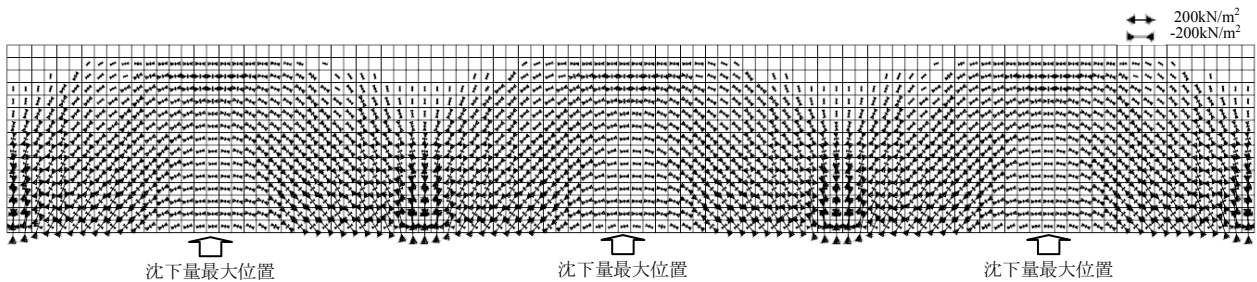


図-6 主応力図(不同沈下 3 箇所，沈下量 0.3m)

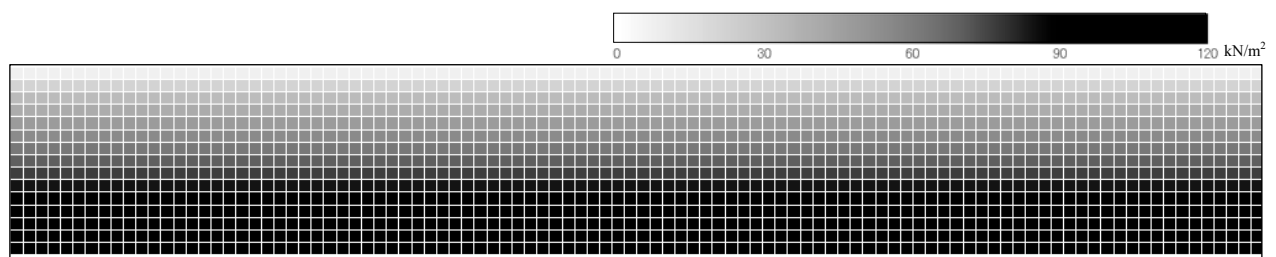


図-7 初期有効拘束圧 σ'_{m0} 分布図(不同沈下無し)

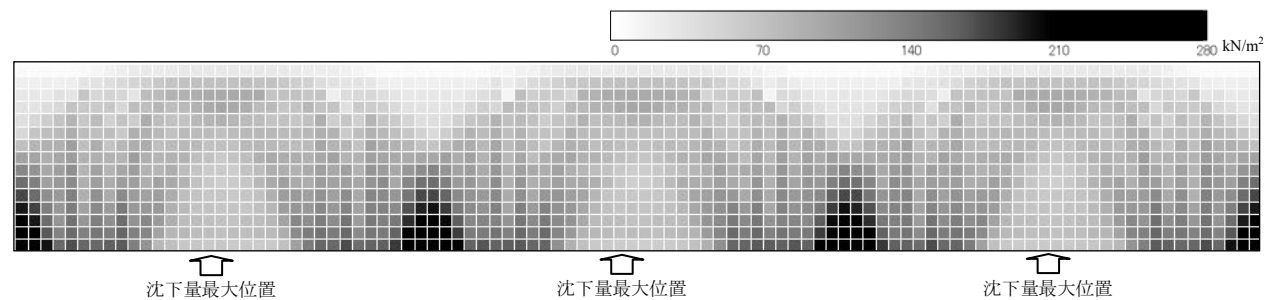


図-8 初期有効拘束圧 σ'_{m0} 分布図(不同沈下 3 箇所，沈下量 0.3m)

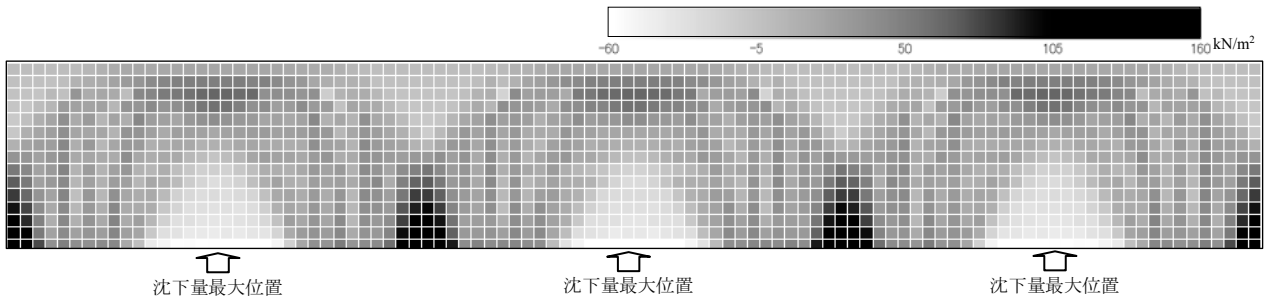


図-9 不同沈下無しに対して不同沈下によって生じる初期有効拘束圧 σ'_{m0} の差分の分布図

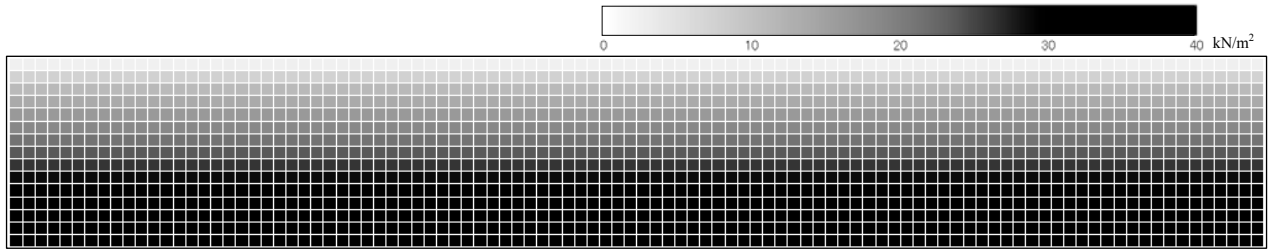


図-10 初期せん断応力度 $\tau_{\max 0}$ 分布図(不同沈下無し)

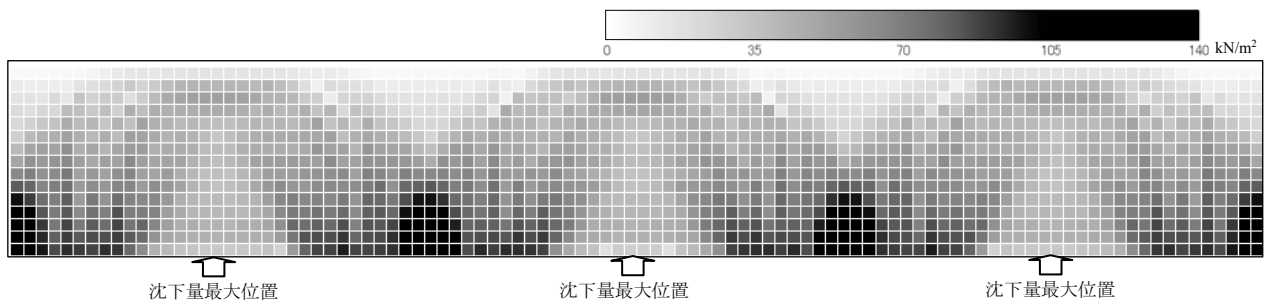


図-11 初期せん断応力度 $\tau_{\max 0}$ 分布図(不同沈下3箇所, 沈下量0.3m)

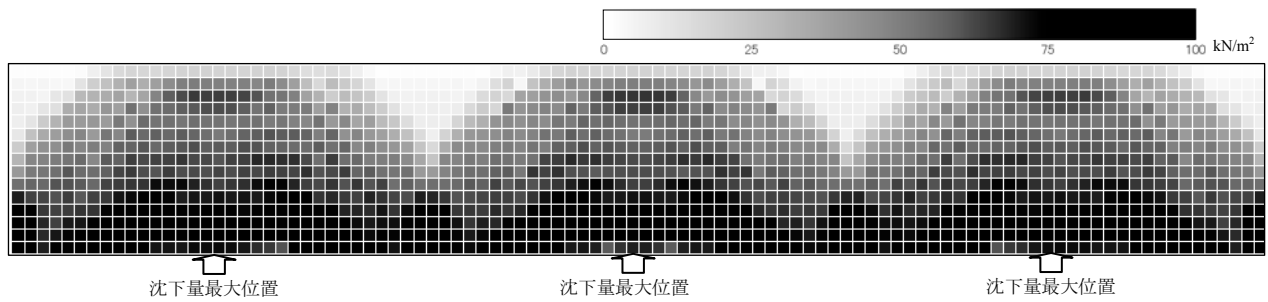


図-12 不同沈下無しに対して不同沈下によって生じる $\tau_{\max 0}$ の差分の分布図

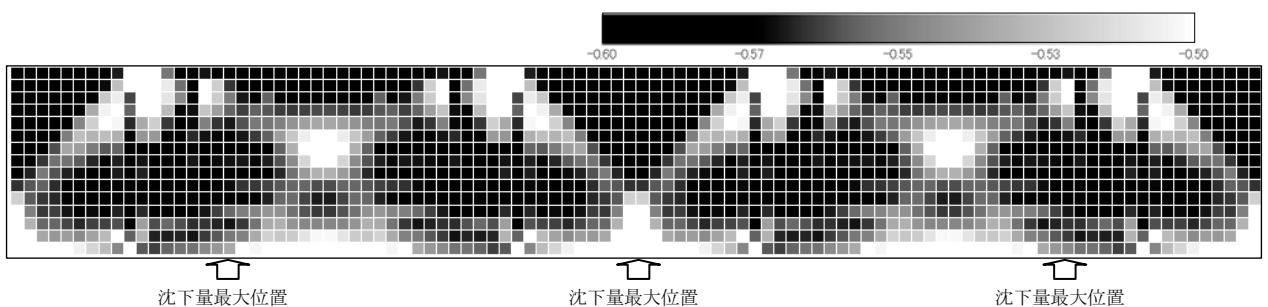


図-13 せん断応力比 $\tau_{\max 0} / \sigma'_{m0}$ の分布図

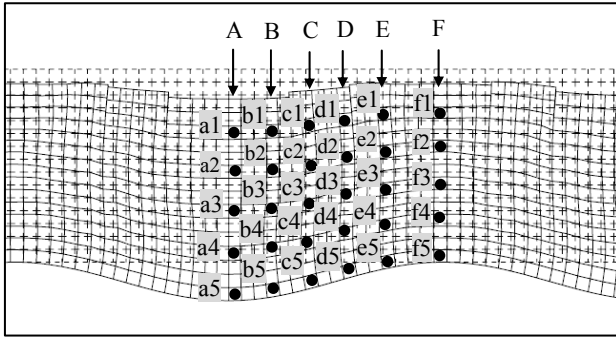


図-14 地盤内応力の抽出要素

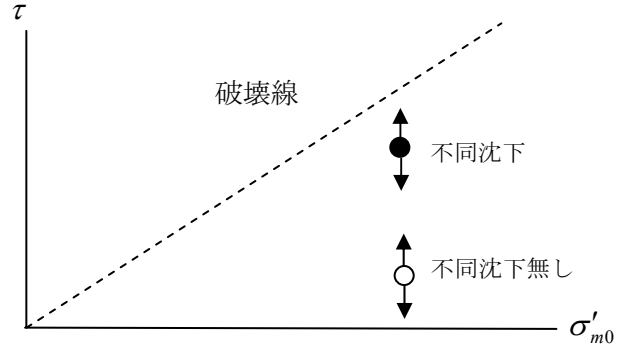


図-16 初期応力の違いの模式図

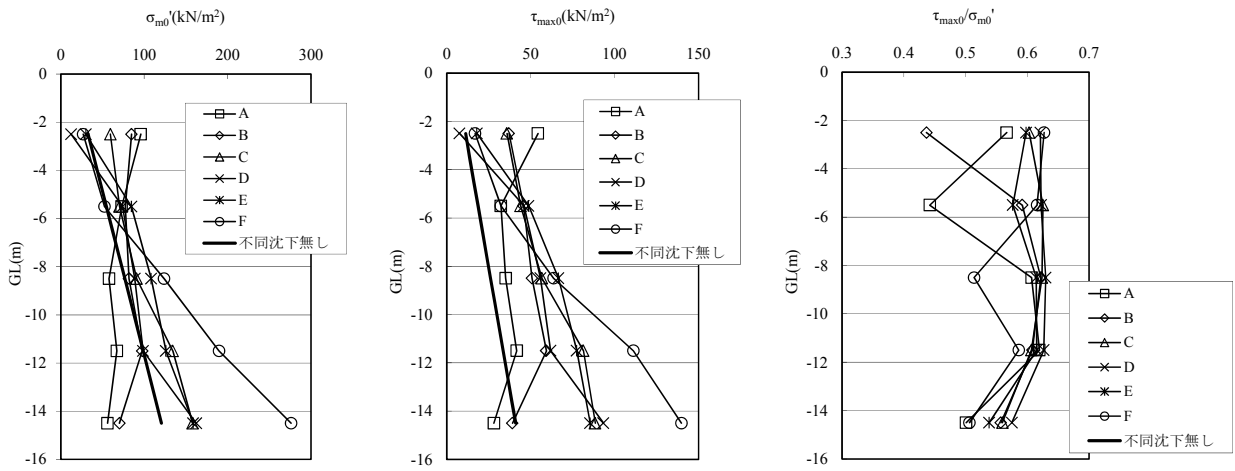


図-15 地盤内応力の深度分布図(沈下量 0.3m)

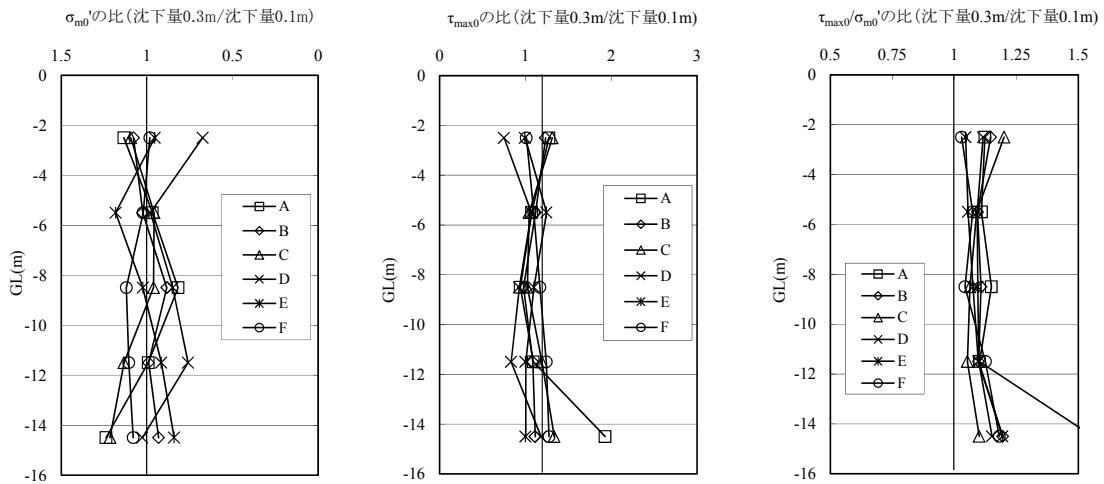


図-17 地盤内応力の深度分布図の沈下量による変化

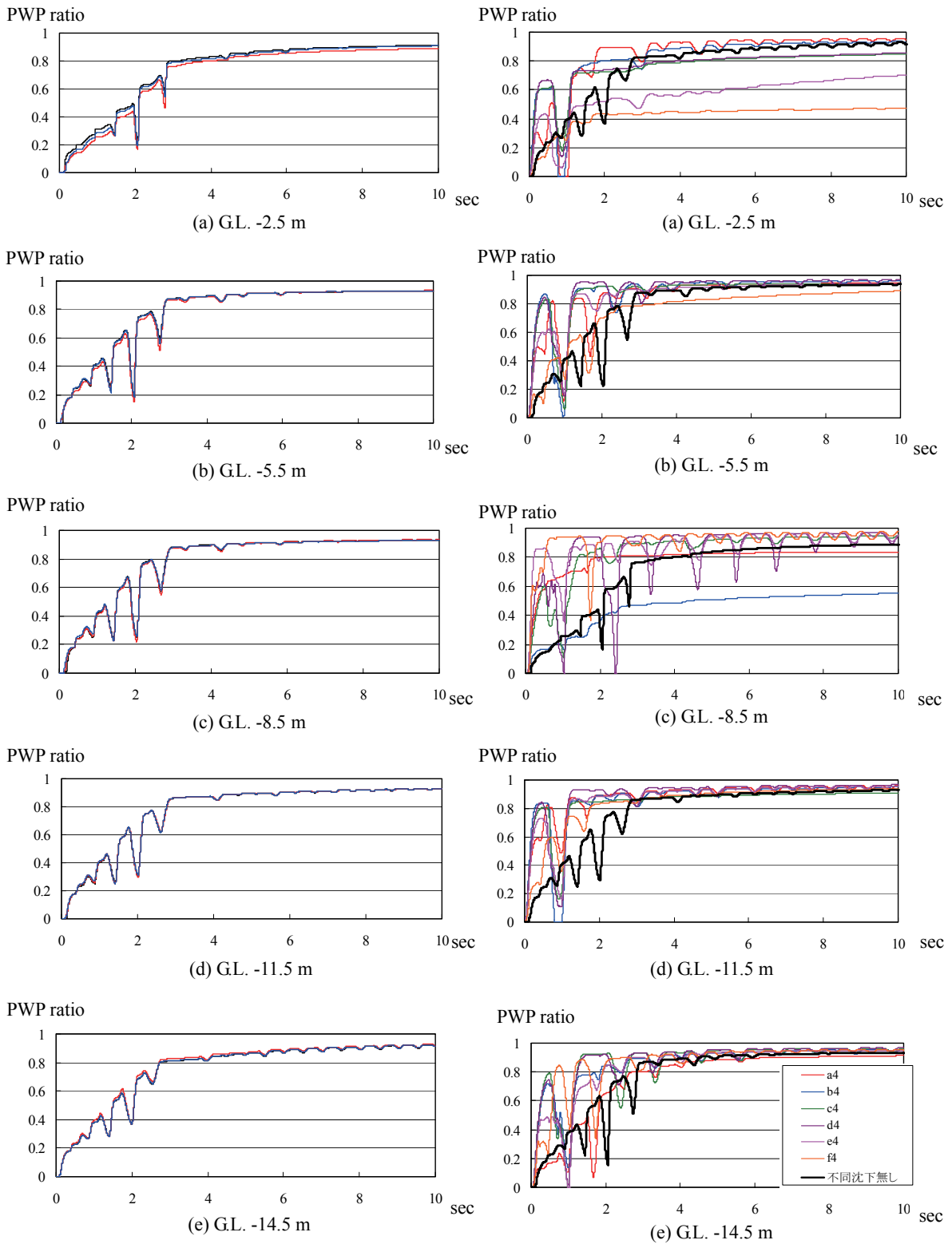


図-18 不同沈下が無い場合の
過剰間隙水圧比時刻歴図

図-19 不同沈下した場合の
過剰間隙水圧比時刻歴図

4. 地盤内の応力変化と液状化挙動

不同沈下しない場合の均質な地盤の動的解析で得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を図-18に示す。過剰間隙水圧比の抽出箇所は、深度方向では水面以下で3m 間隔の5箇所とし(GL-2.5m, GL-5.5m, GL-8.5m, GL-11.5m, GL-14.5m),

水平方向は領域の左側, 中央部, 右側の位置で3地点とした。深度によって水圧の上昇傾向は若干異なるが各深度における過剰間隙水圧比の上昇傾向はほぼ同じ傾向を示し, 全域で均質な液状化状態になっている。図-19に不同沈下0.3mの時の動的解析で得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。一部で過剰間隙水圧比が均質な地盤内応力よりも

小さくなるが、大部分で不同沈下が無いケースより早い時点で過剰間隙水圧比が大きくなる。特に立ち上がり早い箇所は、沈下が大きい位置と小さい位置の中間の範囲であり、図-14 に示す要素における 0.5 秒後の過剰間隙水圧比を求めると、c1(0.38), c2(0.57), c3(0.59), c4(0.55), c5(0.46), d1(0.41), d2(0.59), d3(0.59), d4(0.51), d5(0.50)である。ここで、括弧内の数値は、不同沈下しない場合に対して、不同沈下した場合の過剰間隙水圧比の増分を示す。なお、不同沈下しない場合の過剰間隙水圧比は、領域中心における値を使用した。この位置の地盤内応力の特徴は、主応力の向きが 45 度に傾いている範囲であり(図-6)、また、 τ_{\max}/σ'_{m0} が他の領域よりも大きくなっている(図-13, 15)。

すなわち、定性的には、不同沈下により沈下の大きな位置と小さな位置の中間で初期せん断応力比が最も大きくなること、また、地震時の間隙水圧上昇もそのエリアで早く生じることがわかる。このことは、不同沈下による地盤内応力の変化が、液状化の発生の状況に影響を及ぼしていることを示している。

初期せん断応力が不同沈下により大きくなる程度について、沈下量 (D)、最大沈下位置の間隔 (L)、および砂層の層厚 (H) に着目して検討した。図-20 に、c3 の初期せん断応力について、最大沈下箇所が 2 か所の場合と 3 か所の場合(最大沈下位置の間隔が異なる)を併せて示す。これらの図より、最大沈下箇所が 2 か所の場合と 3 か所の場合の双方とも、D/L および D/H が大きくなるにつれて初期せん断応力が大きくなることわかる。

これらの図より、D/L および D/H が大きくなるにつれて τ_{\max}/σ'_{m0} が大きくなる傾向となる。

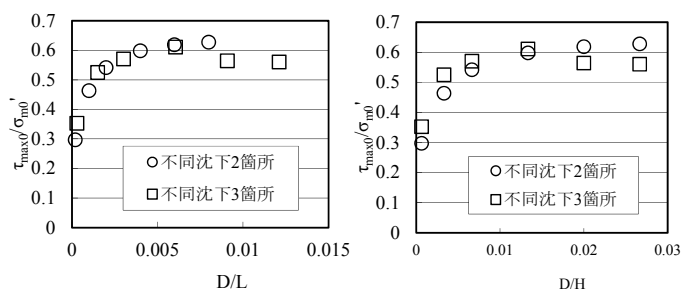


図-20 要素位置 c3 における

不同沈下形状と τ_{\max}/σ'_{m0} の関係

なお、水圧の上昇と変形の発生は、要素の初期応力状態にも依存し、必ずしも 1 対 1 の対応とはならない。本検討の結果は、水圧の上昇と液状化の発生のみに着目しており、液状化の進展に伴って地盤変形が大きく発生するような土構造物の断面を対象としていない。したがって、液状化

地盤の変形も含めた議論を行うには別の事例での検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、粘性土層の不同沈下により粘性土層上の砂質地盤の液状化特性に対する影響の評価を行なった。以下に解析によって得られた結論を次に示す。

- 1) 沈下量が大きい位置の底面近傍で有効拘束圧 σ'_{m0} が低下し、沈下量が小さい位置の底面近傍では、有効拘束圧 σ'_{m0} は増加した。
- 2) 不同沈下すると、初期せん断応力 $\tau_{\max0}$ は増加する。特に沈下箇所の周辺のアーチ状の範囲で増加している。
- 3) 初期せん断応力比 $\tau_{\max0}/\sigma'_{m0}$ は、沈下量が大きい位置の地表面部と、沈下量が大きい位置と小さい位置の中間部で増加している。
- 4) 沈下量が増加するほど、地盤内応力の変化も大きくなるが、その変化の分布は複雑である。しかし、せん断応力比 $\tau_{\max0}/\sigma'_{m0}$ については、沈下量の増加に伴って全般的に同程度の増加傾向を示す。
- 5) 沈下量が大きい位置と小さい位置の中間部で過剰間隙水圧比の上昇が早くなる。また、その位置は、 $\tau_{\max0}/\sigma'_{m0}$ が他より大きくなる範囲である。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局、公益社団法人地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書、2011。
- 2) 奥村樹郎，土田孝：土質定数のパラツキを考慮した不同沈下の推定，港湾技術研究所報告，Vol.20，No.3，pp.131-168，1981。
- 3) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997。
- 4) 山根信幸，深沢健，平林弘，土田孝，坂井彰，藤原辰彦：大規模埋立工事に対応した施工管理システムの開発とその適用，地盤工学ジャーナル Vol.3，No.3，pp.243-259，2007。
- 5) 井合進，松永康男，亀岡知弘：サイクリックモビリティのモデルのパラメタの同定，港湾技術研究所報告 Vol.29，No.4，pp.27-56，1990。

(2012 年 6 月 25 日 受付)