

## 余震による再液状化を考慮した液状化評価の重要性

森河 由紀弘<sup>1</sup>, 包 小華<sup>2</sup>, 前田 健一<sup>3</sup>, 今瀬 達也<sup>4</sup>, 張 鋒<sup>5</sup>

1 名古屋工業大学・大学院 創成シミュレーション工学専攻

2 名古屋工業大学・大学院 創成シミュレーション工学専攻

3 名古屋工業大学・大学院 社会工学専攻

4 名古屋工業大学・大学院 社会工学専攻

5 名古屋工業大学・大学院 創成シミュレーション工学専攻

### 概 要

東北地方太平洋沖地震では地盤の液状化は広範囲で発生しているが、今回の被害を十分に理解するには、地震動の長い継続時間と短期間に起きた数度の大きな余震の影響は見逃すことができないと考えられる。今後発生することが予想されている連動型地震に適切に対応するためにも、このような地盤工学的課題に直接向き合う必要がある。そのためにも、長時間地震動による動的挙動と異方性の残留、液状化後の過剰間隙水圧消散と再液状化時の挙動を把握することを目的とし、数値解析を行った。

キーワード：液状化，圧密，異方性，複数地震動，土水連成

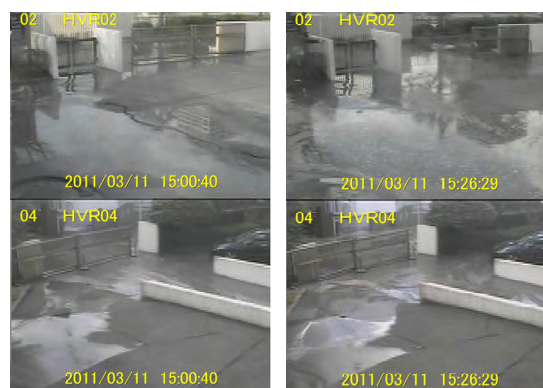
### 1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分 18 秒，太平洋三陸沖を震源とするマグニチュード 9.0 という日本国内観測史上最大の東北地方太平洋沖地震が発生した。死者・行方不明者は 2 万人以上にのぼり，また工場や農場等の生産施設やそれらを支えるエネルギー供給施設も甚大な被害を受け，今や国家全体を揺るがす深刻な事態になっており，現在の日本経済のみならず日本国の成長や我々の未来にも大きな傷跡を残した。この地震の特徴として，「地震動の長周期性」，「津波による浸食・洗掘」，「短期間における複数回にわたる大きな地震動」等が考えられ，その被害は今までの代表的な震災である「地震動による建物の倒壊」や「液状化による構造物の損傷」のみならず，地震が引き起こした巨大津波による被害も甚大であった。

本稿では上記大震災が非常に大きな本震の後，地盤が健全な状態に戻る前にマグニチュード 7.0 を超える非常に大きな余震を複数回受けることにより，地盤の再液状化や異方性の発達，過剰間隙水圧の上昇などによる地盤の不安定化の促進，それに伴う構造物の不安定化による被害の増大に着目した。そこで従来のように本震のみを対象とした単独地震動による解析・評価のみではなく，余震も含めた複数回の地震動による弾塑性動的有限要素解析を行い，単独地震動との比較を行うことにより，異方性の発達・再液状化やその後の圧密沈下等についての影響を考察した。

### 2. 液状化による被害状況

写真 1 に千葉県浦安市における液状化による被害状況を示す。当該地区は昭和 39 年～昭和 50 年に造成された第 1 期埋立地であり，以前より液状化の危険性は危惧されていたが，今回の大震災において短期間に複数回の地震が起きることにより，再液状化や過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤の不安定化が複数回引き起こされたと考えられ，歩道は自転車での走行が困難なほど激しくうねり（最大高低差は 60cm 程度），また通常直接基礎や H 型鋼等を用いた杭基礎等で支持されている信号柱や情報板等はほとんどが普段荷重のかかりにくい歩道側へ傾斜していた。この写真を見てもわかるように，余震を含め複数回発生した地震動により，地盤が再液状化すると被害が拡大することが分かる。



(a)本震直後

(b)余震直後

写真 1 液状化による被害状況（千葉県浦安市 HP より）

### 3. 解析モデル

#### 3.1 定式化

解析は回転硬化型弾塑性構成式Cyclic mobility model<sup>1)</sup>による土水連成有限要素解析プログラム「DBLEAVES」<sup>2)</sup>を用いる。Cyclic mobility modelは土の力学挙動に大きな影響を与える土の密度や過圧密比、自然堆積過程に形成された構造、および各種応力履歴を受けることで発生した土の応力誘導異方性を一つのモデルでパラメータを変えることなく表現することを目的に開発された構成式である。

Zhang et al.(2007)は下負荷面の概念(Hashiguchi and Ueno, 1977)<sup>3)</sup>、及び上負荷面の概念(Asaoka et al., 1998)<sup>4)</sup>に基づき、図1に示す新たな降伏曲面を提案した。このモデルの特徴の一つは限界状態線(以下C.S.L.)の勾配が異方性の発展によらず一定となり、楕円形の降伏曲面の扁平率が一定ではなく、サイクリックモビリティを示すような状態では異方性の大きさに依存して楕円の扁平率が変化する。すなわち応力誘導異方性が大きくなるほど、楕円の扁平率が大きくなることを特徴とする。

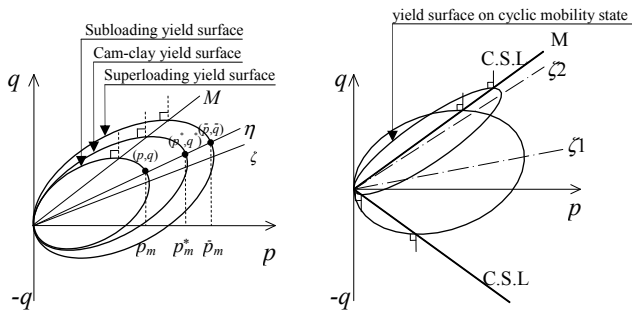


図1 Cyclic mobility modelの降伏曲面

一般応力状態での下負荷面は次式のようにになる。

$$f = \ln \frac{p}{p_0^*} + \ln \frac{M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2}}{M^2 - \zeta^2} + \ln R^* - \ln R - \frac{\varepsilon_v^p}{C_p} = 0 \quad (1)$$

ここで、

$$p = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (2)$$

$$\eta^* = \sqrt{\frac{3}{2} \hat{\eta}_{ij} \hat{\eta}_{ij}}, \quad \hat{\eta}_{ij} = \eta_{ij} - \beta_{ij}, \quad \eta_{ij} = \frac{S_{ij}}{p} = \frac{\sigma_{ij} - p \cdot \delta_{ij}}{p} \quad (3)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{3}{2} \eta_{ij} \eta_{ij}}, \quad \zeta = \sqrt{\frac{3}{2} \beta_{ij} \beta_{ij}}, \quad C_p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (4)$$

$$\begin{cases} p = R\bar{p}, & 0 < R \leq 1, \\ q = R\bar{q}, & R = \frac{1}{\text{OCR}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} p^* = R^* \bar{p}, & 0 < R^* \leq 1 \\ q^* = R^* \bar{q} \end{cases} \quad (6)$$

であり、 $(p, q)$ 、 $(p^*, q^*)$ 、 $(\bar{p}, \bar{q})$ はSubloading yield surface, Cam-clay yield surface, Superloading yield surface上での平均主応力と軸差応力、 $p_0^*$ は初期基準状態での $p_m^*$ (図1)、 $S_{ij}$ は偏差応力テンソル、 $\beta_{ij}$ は異方性応力テンソルである。ここで、式(1)より適合条件式は以下のようにになる。

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij} + \frac{1}{R^*} dR^* - \frac{1}{R} dR - \frac{1}{C_p} d\varepsilon_v^p = 0 \quad (8)$$

#### 3.2 応力誘導の異方性応力テンソルの発展則

応力誘導異方性は過去の応力履歴に依存し、特に砂のような粒状体において、粒子の配列が土の挙動、特にせん断強度だけではなく、ダイレタンシーにも多大な影響を与える。砂がサイクリックモビリティの挙動を示すと、非排水せん断過程において、せん断方向が変わると、砂の体積変化特性が急激にせん断膨張から圧縮、あるいは圧縮から膨張に転じることによって、間隙水圧が急激に変化し(非排水の場合は体積変化が許されない)、平均有効応力が増減する。これは明らかに限界状態線(C.S.L.)の付近において、応力誘導異方性が発達して、その変化も激しくなることを意味する。従って、異方性応力比 $\zeta$ がC.S.L.の勾配 $M$ を上回らないよう、応力誘導異方性テンソルの発展則は以下のように定式化される。ここで、 $b_r$ は応力誘導異方性の発展速度である $d\beta_{ij}$ の大きさをコントロールするパラメータである。

$$d\beta_{ij} = A \frac{\sqrt{6} M b_r (M - \zeta) \hat{\eta}_{ij}}{C_p (M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2}) p} \quad (9)$$

#### 3.3 構造喪失の発展則

Asaoka et al.(1998)は合理性に富んだ構造喪失の発展則を提案しており、その概念をそのまま利用する。ただし、異方性の影響を考慮する必要がある、構造喪失の発展則 $dR^*$ は次式になる。ここで、 $a$ は構造 $R^*$ の喪失速度である $dR^*$ の大きさをコントロールするパラメータである。

$$dR^* = A \frac{2aMR^*(1-R^*)\eta^*}{C_p (M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2}) p} \quad (10)$$

#### 3.4 過圧密比解消の発展則

今まで提案されてきた下負荷面を用いている構成式の多くにおいて、過圧密比の増大は弾性除荷時に下負荷面が小さくなることによりのみ表現されてきたが、室内試験において、砂がサイクリックモビリティ領域に入ると、繰返しせん断過程において応力経路がVの字のようになり、有効応力がゼロに近づき、過圧密比が増加する現象が見られる。Cyclic mobility modelは過圧密の変化速度を塑性ストレッチングテンソルと応力誘導異方性の二つの要因によってコントロールしている。過圧密の発展則は次式で表される。ここで、 $m$ は過圧密の解消速度である $dR$ の大きさコントロールするパラメータである。

$$dR = A \frac{-m \cdot M \ln R \sqrt{6\eta^{*2} + \frac{1}{3}(M^2 - \eta^2)^2}}{C_p (M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2}) p} \left\{ \frac{(p/p_0)^2}{(p/p_0)^2 + 1} \right\}^2 + R \frac{\eta}{M} \frac{\partial f}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij} \quad (11)$$

### 3.5 Cyclic mobility model の特徴

提案モデルの特徴を以下にまとめる。

- 1) 土の力学挙動を表現している 8 つのパラメータの内、5 つのパラメータ ( $\lambda$ ,  $k$ ,  $M$ ,  $N$ ,  $\nu$ ) はカムクレイモデルと全く同じであり、室内三軸試験により決められる。他の 3 つのパラメータ ( $a$ ,  $m$ ,  $b_r$ ) はそれぞれ構造喪失の速度、過圧密解消の速度、および応力誘導異方性の発展速度をコントロールするパラメータである。実験結果より、サイクリックモビリティ状態では応力比が C.S.L の勾配とほぼ同じであり、異方性応力は  $\zeta < M$  を常に満足させ、決して C.S.L を超えない。
- 2) 塑性圧縮と塑性膨張の境界である限界状態線はいかなる載荷過程での有効応力経路において不変である。
- 3) 緩い砂の場合はサイクリックモビリティなしで液状化が起きるが、中密の砂の場合はサイクリックモビリティが起きながら液状化に至る。サイクリックモビリティを伴った液状化は主に応力誘導異方性の発展によって引き起こされる。一方、密な砂は液状化が起きにくい。これらの密度の異なる砂の全ての挙動は同じ材料パラメータを用いて表現できる。
- 4) 過剰間隙水圧が消散した後に強い動作を受けた場合に、再び液状化する現象も表現できる<sup>5)</sup>。
- 5) 応力誘導異方性の発達速度は、砂質土のサイクリックモビリティ発生までの繰返し回数に影響を及ぼす。異方性の発達速度が速ければ速いほど、土のサイクリックモビリティがより起きやすくなる。

## 4. 解析条件

### 4.1 地盤条件

解析メッシュは千葉県浦安市のボーリングデータ<sup>6)</sup>を参考に、幅 1.0m、奥行き 1.0m の 3 次元領域とした。深度方向のメッシュ間隔は 1m を基本とし、図 2 および表 1 に示す 50m のモデル土層を解析の対象とした。ここで、メッシュ下部は  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の変位固定、また同一平面上の 4 接点は  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の等変位境界とした。水理境界は下面、および側面は非排水境界、上面は排水境界とした。なお、地下水位は地表面と仮定した。また初期応力は、自重圧密解析により与えた。透水係数は土工指針等に表示されている一般的と考えられる値を用いた。

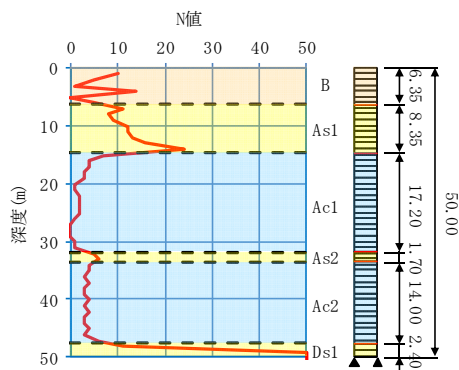


図 2 柱状図・メッシュ図

表 1 モデル土層

土層の種類	深度 (m)	層厚(m)	平均 N 値
埋土 (B 層)	0.00~ 6.35	6.35	6 程度
細砂 (As1 層)	6.35~14.70	8.35	13 程度
シルト (Ac1 層)	14.70~31.90	17.20	2 程度
細砂 (As2 層)	31.90~33.60	1.70	5 程度
シルト (Ac2 層)	33.60~47.60	14.00	3 程度
砂層 (Ds1 層)	47.60~50.00	2.40	50 以上

解析パラメータは室内試験結果等が入手できなかったため、 $N$  値より As 層は一般的な緩い砂層、Ac 層は緩い粘土層、B 層はある程度締め固められた埋土と判断し、過去に行われた豊浦標準砂、および藤の森粘土の解析を参考に表 2 に示すようにパラメータを仮定した。図 3~図 5 に繰返し応力振幅比 (繰返し軸差応力の片振幅の 1/2 を有効拘束圧で除した値) を 0.075 とした場合における各層 (要素) の非排水繰返し載荷時の解析例を示す。B 層、及び As 層において繰返し回数とともにひずみ ( $\varepsilon_{11}$ ) が増大し、サイクリックモビリティなどが適切に表現されていることが分かる。また、基盤である Ds 層は、非常に硬い弾性体材料(弾性係数  $E=100\text{MPa}$ )と仮定した。

表 2 材料パラメータ (弾塑性体材料)

名称	B	As1, As2	Ac1, Ac2
Compression index $\lambda$	0.0500	0.0500	0.1040
Swelling index $\kappa$	0.0064	0.0064	0.0010
Stress ratio at critical state $M$	1.407	1.407	1.200
Void ratio $e_0$ ( $p'=98\text{kPa}$ on N.C.L.)	0.870	0.870	0.920
Poisson's ratio $\nu$	0.300	0.300	0.200
Degradation parameter of overconsolidation state $m$	0.100	0.100	2.200
Degradation parameter of structure $a$	2.200	2.200	0.100
Evolution parameter of anisotropy $b_r$	1.500	1.500	0.100
wet unit weight $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	18.00	18.00	17.00
(under water)	( 8.00)	( 8.00)	( 7.00)
Permeability $k$ (m/sec)	1.00E-4	1.00E-4	1.00E-9
Initial structure $R_0^*$	0.800	0.800	0.600
Initial degree of overconsolidation $1/R_0$	4.000	2.500	1.500
Initial anisotropy $\zeta_0$	0.000	0.000	0.000

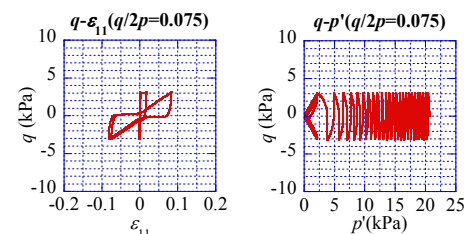


図 3 パラメータ (B 層 : GL-3.5m)

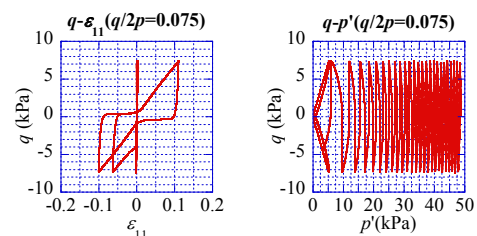


図 4 パラメータ (As 層 : GL-10.5m)

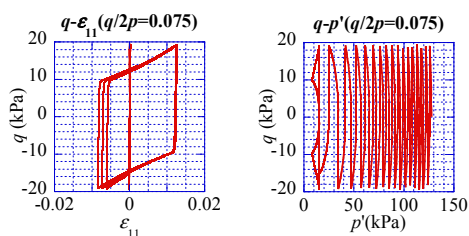


図5 パラメータ (Ac層: GL-22.5m)

#### 4.2 入力地震動

入力地震動は Kik-net 下総 (千葉県) において、設置深度 2300m で観測されたマグニチュード 7.0 以上の地震動 3 波<sup>7)</sup> (本震と 2 つの余震) を用いて、N-S 方向、および E-W 方向の 2 方向より同時に入力した。図 6 に入力地震動の時刻歴を示す。ここで、地震動間隔は実際の地震動観測時刻より決定し、各地震間には同じモデル・パラメータを用いて連続的に静的圧密解析を行った。図 7～図 9 に各地震動における N-S 方向、および E-W 方向での加速度の詳細を示す。観測された最大加速度は本震である第 1 波目が約  $0.85\text{m/sec}^2$ 、第 2 波目 (第 1 波目終了から約 24 分後) では約  $0.25\text{m/sec}^2$ 、第 3 波目 (第 2 波目終了から約 6 分後) では約  $0.04\text{m/sec}^2$  程度であった。解析は図 6 に示す地震動 3 波全てを考慮し、加震後に 50 年間の圧密を行ったものを Case1 (基本パターン)、本震後 (第 1 波) に余震を与えず圧密を行ったものを Case2、本震を与えず第 2 波のみによる動的解析を Case3 とした。表 3～表 5 に各 Case の解析ステップを示す。

静的解析と動的解析の定義は下記の釣り合い式により与えられている:

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + kx = f(x) \quad (12)$$

すなわち、慣性項  $m\ddot{x}$  と粘性項  $C\dot{x}$  がゼロではない時には動的解析、ゼロの場合は静的解析となる。動的解析と静的解析に全く異なる解析プログラムを用いて別々に解析を行うことが普通であるが、本解析では同一のプログラムを用いて、慣性項と粘性項を単に省略して静的解析を行っている。また、静的解析と動的解析での時間積分方法は同様である<sup>2)</sup>。なお、動的解析 (液状化解析) と静的圧密解析を連続的に行っているのは、地震動が非常に小さくなった時に動的解析から静的解析へ切り替えることを意味する。表 3 にも示したように、3 波の入力地震波の計算時間はそれぞれ 300 秒、300 秒と 135 秒であった。いずれも動的解析が打ち切られた時点の加速度が極めて小さくなっている。言い換えれば、その時点で慣性項と粘性項が無視できる。勿論、圧密解析を実行している間に地盤の変形速度が零にはならないが、値が極めて小さいため無視できる (静的解析と見なせる)。なお、本解析では初期剛性比例型のレリー減衰を使用しており、減衰係数  $h$  の値は全地盤において 0.05 である。

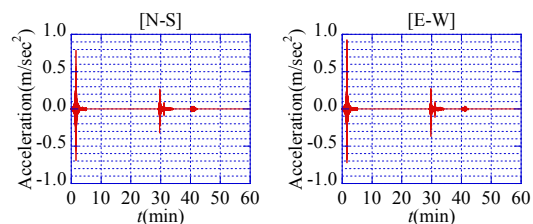


図6 地震動の時刻歴

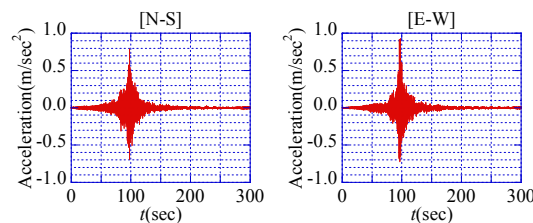


図7 入力地震動 (第1波)

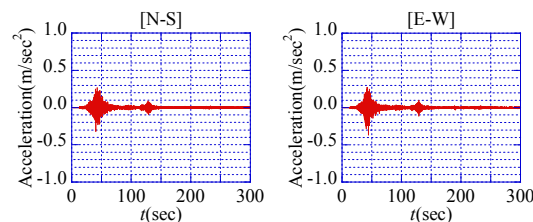


図8 入力地震動 (第2波)

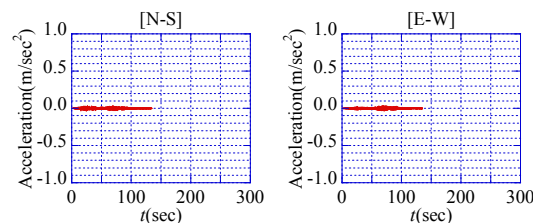


図9 入力地震動 (第3波)

表3 解析ステップ (Case1)

Step	解析の種類	地震動の種類	解析時間(sec)
1	動的解析	第1波	300(5.00min)
2	静的解析	(圧密)	1440(24.00min)
3	動的解析	第2波	300(5.00min)
4	静的解析	(圧密)	360(6.00min)
5	動的解析	第3波	135(2.25min)
6	静的解析	(圧密)	約50年

表4 解析ステップ (Case2)

Step	解析の種類	地震動の種類	解析時間(sec)
1	動的解析	第1波	300(5.00min)
2	静的解析	(圧密)	約50年

表5 解析ステップ (Case3)

Step	解析の種類	地震動の種類	解析時間(sec)
1	動的解析	第2波	300(5.00min)

## 5. 解析結果

### 5.1 地表面加速度

図 10, 図 11 に地表面加速度の解析結果, および実測値 (下総) を示す。下総は解析モデル地点 (浦安市) から多少距離が離れており, また土層も同一のものではないため, 同一条件下で加速度を比較することは難しいが, 解析結果は実測値と同様に地表面に至るまでに加速度が増幅されている現象を表現できている。

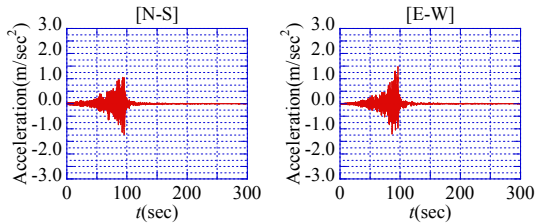


図 10 地表面加速度 (第1波: 解析)

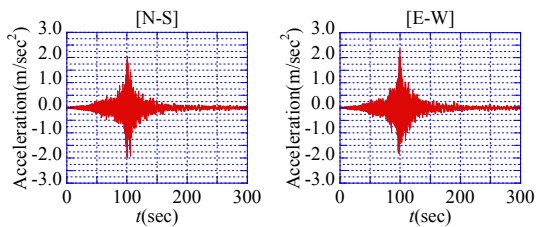


図 11 地表面加速度 (第1波: 実測)

### 5.2 過剰間隙水圧, 過剰間隙水圧比, 平均有効応力

#### 1) 本震部解析結果 (第1波地震動)

Case1 における解析に用いた入力地震動(N-S), および各層における過剰間隙水圧, 過剰間隙水圧比, 平均有効応力を図 12~図 15 に示す。図中の薄赤色で着色された部分が加震部を示す。解析結果より, As1 層は Ac1 層からの水圧の伝搬により, 加震終了後も過剰間隙水圧が若干上昇している。また拘束圧の小さい B 層は液状化しており, As1 層では間隙水圧比が約 40%, Ac1 層では約 30%程度上昇している。また加震終了後( $t=300\text{sec}$ ), 15 分経っても有効応力はあまり回復していないことが分かる。

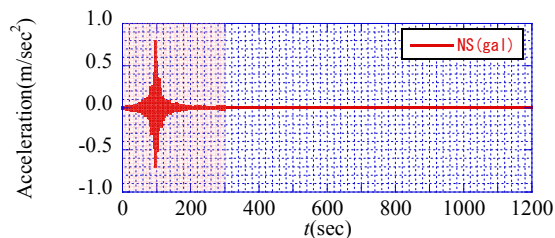


図 12 入力加速度 (第1波: NS 方向)

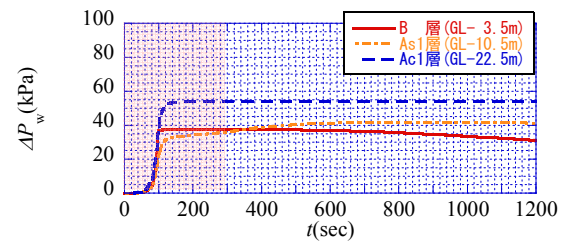


図 13 過剰間隙水圧 (Case1: 第1波)

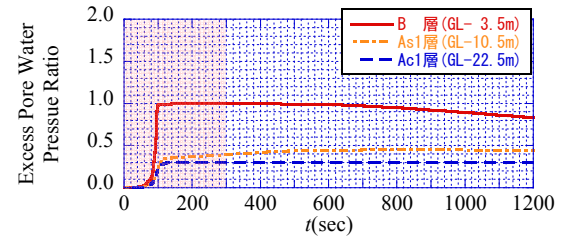


図 14 過剰間隙水圧比 (Case1: 第1波)

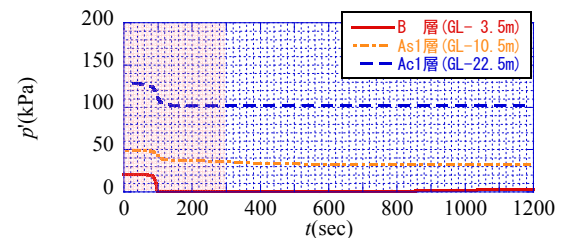


図 15 平均有効応力 (Case1: 第1波)

次に第 1 波加振中( $t=150\text{sec}$ ), および第 2 波加振直前( $t=1740\text{sec}$ )における過剰間隙水圧, および過剰間隙水圧比の分布を図 16, 図 17 に示す。ここで図 16, 及び図 17 は断面方向から見た各深度 (要素) における分布であり, 1 つの要素内における過剰間隙水圧等は一樣である。過剰間隙水圧は深い深度にある粘性土層で大きく上昇しているが, 過剰間隙水圧比は前述したように拘束圧の低い B 層付近で高くなり液状化に至っている。また, 若干ではあるが過剰間隙水圧, および過剰間隙水圧比ともに第 2 波直前までに消散している傾向が見られるが, 第 2 波加振直前においても第 1 波目の影響が強く残っており, 地盤が健全な状態には戻っていないことが分かる。

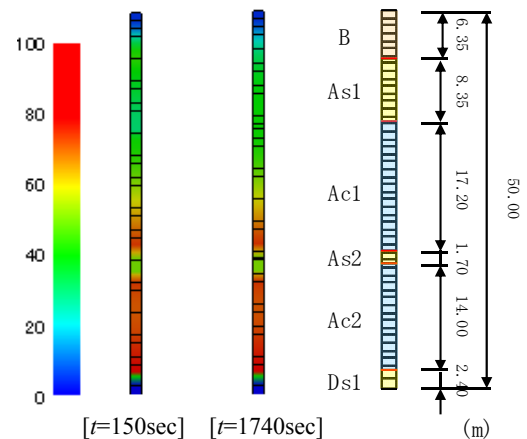


図 16 過剰間隙水圧分布 (kPa)

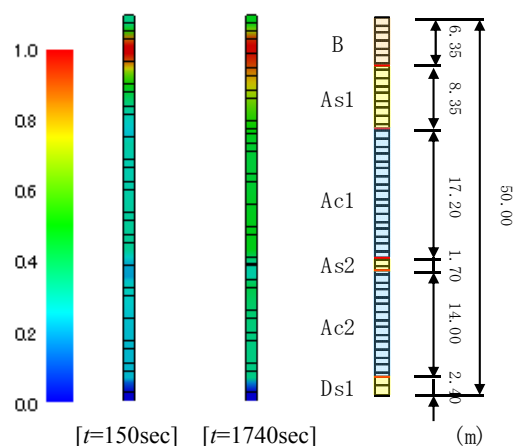


図 17 過剰間隙水圧比分布

## 2) 余震部解析結果（第2波～第3波地震動）

Case1（本震履歴有り）における解析に用いた入力地震動(N-S)，および各層における過剰間隙水圧，過剰間隙水圧比，平均有効応力を図 18～図 21 に示す。また，Case3（本震履歴無し）との比較を図 22～図 24 に示す。解析結果より，本震履歴の無い Case3 においては，入力地震動が小さい第2波では過剰間隙水圧の上昇等による影響は非常に小さく，液状化も起こっていない。しかし，本震履歴のある Case1 においては全層にわたり再び過剰間隙水圧が大きく上昇し，B 層においては再液状化に至っている。よって本解析により過去の履歴により異方性が発達した地盤や，過剰間隙水圧の消散が完了していない地盤においては，普通ならば影響が非常に小さな地震動でも，過剰間隙水圧の上昇や再液状化現象が起きやすいことが明確に表れた。

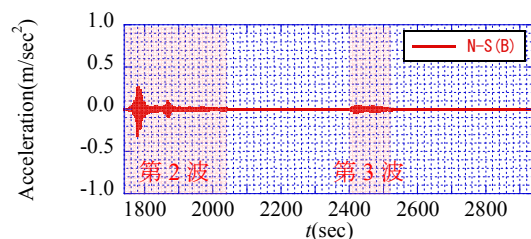


図 18 入力加速度（Case1：第2-3波：NS 方向）

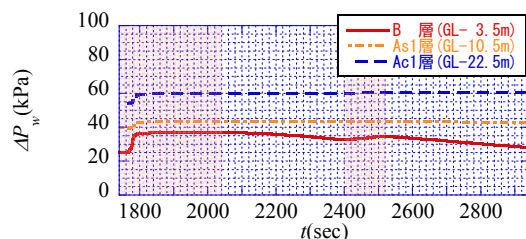


図 19 過剰間隙水圧（Case1：第2-3波）

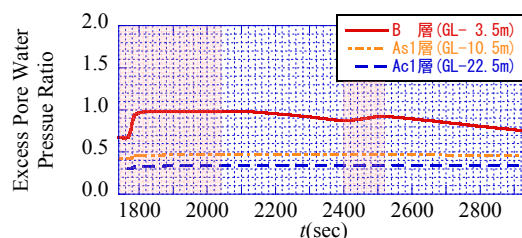


図 20 過剰間隙水圧比（Case1：第2波）

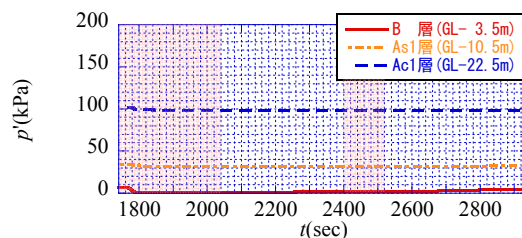


図 21 平均有効応力（Case1：第2波）

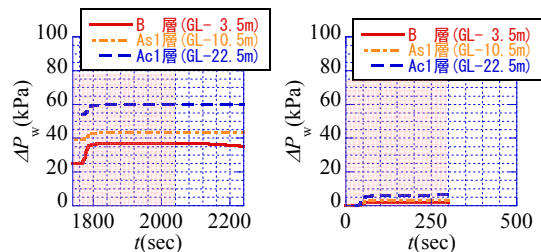


図 22 過剰間隙水圧の比較（第2波）

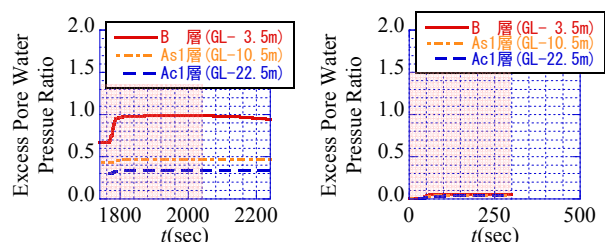


図 23 過剰間隙水圧比の比較（第2波）

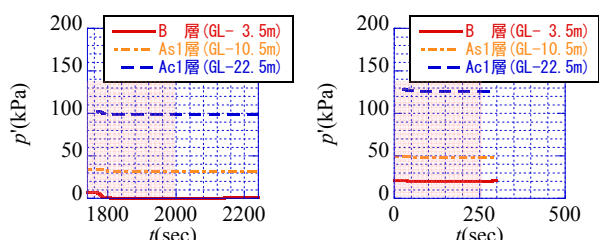


図 24 平均有効応力の比較（第2波）

## 5.3 水平変位，鉛直変位

図 25～図 27 に Case1（余震有り），および Case2（余震無し）における鉛直変位（沈下量）を示す。解析結果より，Case1，及び Case2 とも，本震発生から約 3 時間後までに沈下速度が急激に減少しており，その後は粘性土層の排水距離に応じた圧密沈下が卓越しているといえる。また，Case1，および Case2 を比較すると，本震後の余震が沈下

量に与える影響は本震開始後 60 分で約 0.06m, 24 時間後で約 0.11m, 50 年後で約 0.13m であり, 決して無視することのできない大きな影響となった。前述したように, 余震のみによる過剰間隙水圧の上昇は本震に比べて非常に小さいと考えられるが, 先行して発生した大きな本震による異方性の発達や過剰間隙水圧の上昇により健全度を失った地盤に対しては, 比較的小さな余震でも大きな影響を与える結果となった。

次に図 28, 図 29 に Case1 における地表面での水平変位を示す。この結果を見ても, 鉛直変位と同様に比較的規模の小さい余震においても本震と同程度の水平変位が発生していることが分かる。

以上より, 余震が数十年単位にわたる長期沈下問題や水平変位量に与える影響は少なくないため, 地震動は大きな本震のみではなく, 比較的小さな余震も含め適切に考慮する必要があると言える。

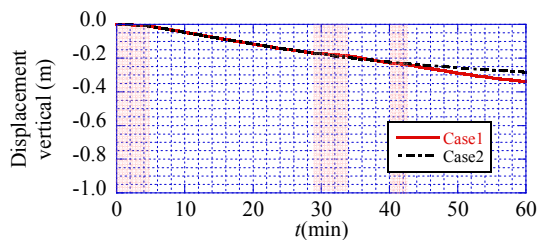


図 25 鉛直変位 (60min)

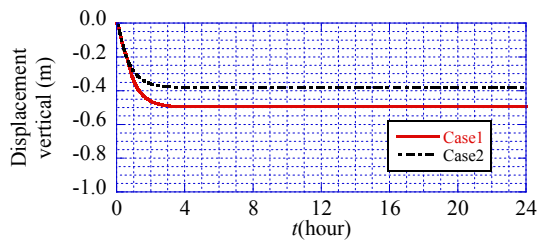


図 26 鉛直変位 (24 hours)

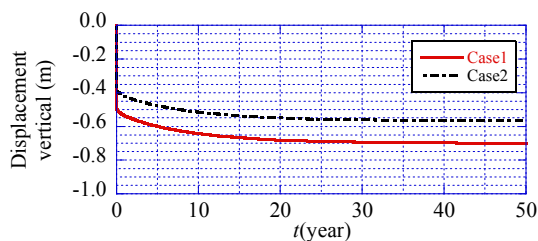


図 27 鉛直変位 (50 years)

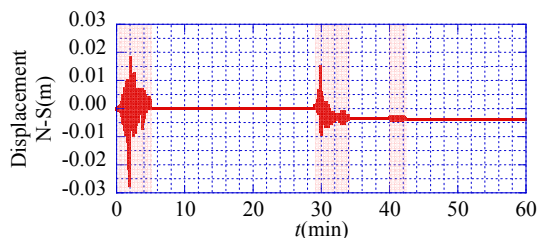


図 28 水平変位 (N-S)

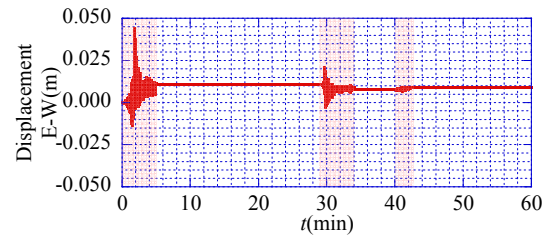


図 29 水平変位 (E-W)

#### 5.4 異方性の発達

図 30, 図 31 に異方性の発達具合を示す。加振とともに液状化の発生したB層や, 有効応力が大きく低下したAs1層は異方性が大きく発達し, 加震終了後においても液状化状態がしばらく続いている状態では, あるいは過剰間隙水圧に変化がない(下がらない)状態においては, 発達した異方性が保持されている。つまり液状化や有効応力低下等により一度発達した異方性は圧密過程においてはほぼそのまま保持され, 再液状化等の危険性が高いことを示している。また, Case1において加震から 600sec 後に, 完全液状化状態だったB層において有効応力の回復と同時に異方性の発達が見られる。このように, 応力履歴は異方性の発達に影響を与え, そして異方性の発達は今後の挙動に大きな影響を与えることから, 応力履歴の影響は適切に考慮する必要がある。また, 砂地盤の液状化は2種類あるが, 緩い砂の場合はサイクリックモビリティなしで液状化する。中密な砂はサイクリックモビリティを示しながら液状化する。本解析の結果をみると, 液状化後の異方性が高い数値を維持したままとなっていることから, 前者にあてると推定できる。

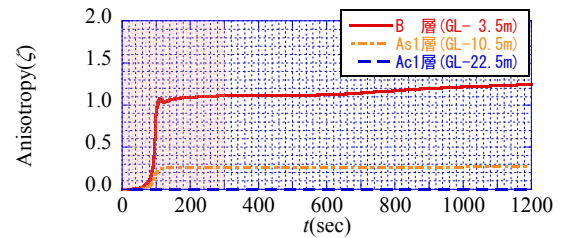


図 30 異方性の発達 (1200sec)

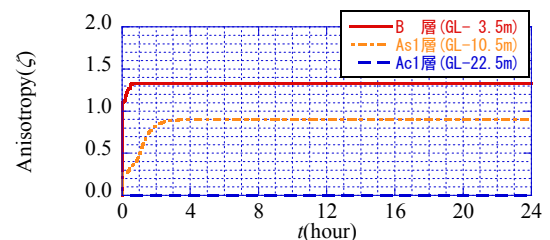


図 31 異方性の発達 (24 hours)

また, 図 23(a)と(b)を比べてもわかるように, (b)に示す等方の場合(本震を受けていない)は余震(第2波)でそれほど間隙水圧が上昇していない(過剰間隙水圧比で約 0.05 上昇)が, (a)では本震による異方性の発達の影響で過

剰間隙水圧がかなり上昇した（過剰間隙水圧比で約 0.30 上昇）。したがって、残留水圧のみの影響だけでなく、異方性の発達により小さい地震であっても再液状化を引き起こす可能性があることが示された。これは異方性の発達による砂地盤力学挙動への影響に関する最新の研究成果<sup>8)</sup>にも裏つけられている。

## 6. まとめ

移動硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model を有する土水連成有限要素解析プログラム「DBLEAVES」を用いて本震後の余震も含めた複数の地震動による動・静的解析を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 応力履歴（先行した地震動）により発達した異方性の影響により、後発地震動が小さい場合でも過剰間隙水圧が上昇しやすく、再液状化等が起こりやすい。
- 2) 大きな本震波のみで計算した場合と、本震後に余震を与えた場合では短期・長期において沈下量に大きな違いが生じる可能性がある。
- 3) 応力履歴は異方性の発達に影響を与え、そして異方性の発達はその後挙動に大きな影響を与えることから、応力経路（地震動等）が複雑な場合でもその経路を適切に表現する必要がある。

- 4) 今後は成層地盤ではないという実地盤の状況を考慮し、綿密な地盤調査データに基づいてより精密な 3 次元解析を行いたい。

## 参 考 文 献

- 1) Zhang, B. Ye, T. Noda, M. Nakano and K. Nakai: Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, Soils and Foundations, Vol.47, No.4, pp.635-648, 2007
- 2) Ye, B.: Experiment and Numerical Simulation of Repeated Liquefaction -Consolidation of Sand, Doctoral Dissertation, Gifu University, 2007.
- 3) Hashiguchi, K. and Ueno, M.: Elastoplastic constitutive laws of granular material, Constitutive Equations of Soils, Pro. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., Spec. Ses. 9, Murayama, S. and Schofield, A. N. (eds.), Tokyo, JSSMFE, pp.73-82, 1977
- 4) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Super loading yield surface concept for the saturated structured soils, Proc. of the Fourth European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering-NUMGE98, pp.232-242, 1998.
- 5) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, Soils and Foundations, Vol.47, No.3, 547-558, 2007.
- 6) 千葉県地質環境インフォメーションバンク  
<http://www.pref.chiba.lg.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>
- 7) 防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net:  
<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 8) Ye B., Ye G. L., F. Zhang.: Numerical modeling of changes in anisotropy during liquefaction using a generalized constitutive model, Computers and Geotechnics, 42, 62-72, 2012.

(2011. 9. 27 受付)

---

## Importance of liquefaction analysis considering re-liquefaction due to aftershock of earthquake

Yukihiro MORIKAWA<sup>1</sup>, Xiaohua BAO<sup>2</sup>, Kenichi MAEDA<sup>3</sup>, Tatsuya IMASE<sup>4</sup> and Feng ZHANG<sup>5</sup>

1 Ph. D. Candidate, Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology

2 Ph. D. Candidate, Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology

3 Professor, Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology

4 Ph. D. Candidate, Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology

5 Professor, Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology

### Abstract

Liquefaction happened in a wide area along Pacific Ocean coastal area during the Eastern Japan Great Earthquake. The influence of repeated long-time earthquake followed by a quiet consolidation period has been investigated carefully in this study. The calculation is conducted with soil-water coupling finite element-finite difference analyses based on the cyclic mobility model. From the analysis, it is known that some small sequential earthquakes, which might not affect the liquefaction of the ground anyhow in an independent vibration, cannot be neglected for their impact to the liquefaction if they vibrate the ground after a major vibration. In order to predict correctly the ground behavior in such repeated earthquake vibration that may occur in future, it is necessary to deal with this geotechnical engineering problem based on sophisticated numerical analysis proposed in this paper. From the work in this paper, it is possible to understand the dynamic behaviors of soil such as, increasing and dissipation of excessive pore water pressure during or after earthquake, the development of stress-induced anisotropy, liquefaction and consolidation etc.

Key words: liquefaction, consolidation, anisotropy, repeated earthquake, soil-water coupling