余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす 影響に関する解析的検討

上田 恭平1・井澤 淳2・室野 剛隆3・井合 進4

¹正会員 博士(工学) 公益財団法人鉄道総合技術研究所(〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38)
 E-mail:ueda@rtri.or.jp
 ²正会員 博士(工学) 公益財団法人鉄道総合技術研究所(同上)
 E-mail:izawa@rtri.or.jp
 ³正会員 博士(工学) 公益財団法人鉄道総合技術研究所(同上)
 E-mail:murono@rtri.or.jp
 ⁴正会員 工博 京都大学教授 防災研究所(〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)
 E-mail: iai.susumu.6x@kyoto-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震において甚大な液状化が生じた浦安市の地盤モデルを対象に、長継続時間 地震動を受ける地盤の液状化に及ぼす透水性および余震の影響を調べるため、間隙水の移流を考慮した有 効応力解析を実施した.解析の結果、1)透水性の良いきれいな礫から成る地盤を除き、長継続時間地震動 であっても少なくとも振動中は地盤の液状化に及ぼす透水性の影響は顕著でないこと、2)余震のみ (45gal程度)が作用した場合には液状化が発生しないのに対し、本震後において0.5程度の過剰間隙水圧 比が残っている状態で余震が作用した場合には、再液状化が発生する可能性が高まるとともに、最終的な 沈下量の増大に及ぼす余震の影響が無視できないこと、などがわかった.

Key Words : reliquefaction, effective stress analysis, aftershock, long-duration earthquake

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、千葉県浦安市などの東京湾沿岸部において、大規模な液状化が広範囲にわたり発生した。当該地域は震源から約300km離れた遠方に位置するため、地盤に作用する加速度振幅は比較的小さかったものの、地震動が長時間継続することにより、広範囲にわたって液状化の発生が誘発される結果となった。浦安市入船中学校に設置された防犯カメラの映像¹⁾によると、まず本震時において噴水・噴砂の発生が確認できることから、上記のように地震動が長時間(数分程度)にわたり作用することで液状化が生じたものと考えられる。さらに、防犯カメラには、本震の約30分後に発生した余震の際に噴水・噴砂の生じる範囲が拡大する様子が記録されており、余震により再び液状化の発生が誘発されたことが示唆されている(再液状化).

このような液状化の危険度を詳細に評価するための方 法としては、有効応力解析法の使用が推奨されている^例 ^{えば、2)}.有効応力解析法は、地盤中の過剰間隙水圧の変 動を直接的に評価できるため最も精度の高い方法の一つ であると言えるが、これまでは振動中においては間隙水 の排水効果を無視し、非排水条件を課すことが多かった. これは、継続時間の短い地震動(例えば、1995年兵庫県 南部地震におけるJMA神戸波等)を対象とした場合、間 隙水が排水に要する時間と比較して地震動の継続時間が 短いために、振動中において非排水条件を課すことは妥 当な仮定と考えられるためである.

しかしながら,浦安で観測された継続時間が数百秒に も及ぶ長継続時間地震動の下では,振動中においても間 隙水の移流や排水の影響が無視できない可能性が考えら れる.さらに,東北地方太平洋沖地震のような巨大な海 溝型地震の場合には,本震の後に比較的大きな余震の発 生が危惧されるため,本震のみならず余震の発生までを 考慮に入れた上で,液状化の危険度を評価することが望 ましい.すなわち,本震により上昇した地盤内の過剰間 隙水圧が,余震の発生までにどの程度消散し,加えてそ れにより余震時における再液状化の範囲や程度がどのよ うに変化するかを適切に評価する必要がある.

そこで、本論文では間隙水の透水の影響を考慮できる 有効応力解析法を用い、地盤の透水性(間隙水の排水し 易さの程度)や本震後の余震の発生が、長継続時間地震 動を受ける地盤の再液状化挙動にどのような影響を及ぼ すかについて、基礎的な検討を実施した.

2. 透水の影響を考慮した有効応力解析の概要

本節では、間隙水の透水の影響を考慮した有効応力解 析法の概要について述べる.本検討では、実際に液状化 が生じた浦安市高洲地区の地盤情報¹⁾を参考に、図-1に 示す地盤モデル(有限要素メッシュ)を用いて2次元の 有限要素法による有効応力解析を実施した.解析では、 地下水位面を地表面から-1.1mの位置に設定し、埋立土 Fs層(深度1.1~6.4m)および細砂As1層(深度6.4~ 13.1m)を、液状化の可能性がある地盤として取り扱う こととした.地下水位面以深の地盤は土要素と間隙水要 素から構成される二相系とし、支配方程式として、以下 に示す土と間隙水の混合体としての運動方程式(式 (1))、および間隙水の収支バランス式(式(2))を用い (up formulation³⁾)、間隙水の透水性を考慮した.

$$\operatorname{div}\boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \tag{1}$$

$$k \operatorname{div}(\operatorname{grad} p) - \operatorname{div} \dot{\mathbf{u}} - k \operatorname{div}(\rho_{\mathrm{f}} \mathbf{g})$$

$$= -k \operatorname{div}(\rho_{\mathrm{f}} \ddot{\mathbf{u}}) + n\dot{p} / K_{\mathrm{f}}$$
⁽²⁾

ここに、 σ : 全応力テンソル、 ρ : 土・水混合体とし ての密度、g: 重力加速度ベクトル、u: 土要素の変 位ベクトル、k: 透水係数(ここでは、等方と仮定)、 p: 間隙水圧、 ρ_{f} : 間隙水の密度、n: 間隙率、 K_{f} : 間隙水の体積弾性係数である.

土の構成モデルとしては、井合ら⁴により提案された ひずみ空間多重せん断モデル(カクテルグラスモデル) を用いることとした.このモデルにおける応力とひずみ の関係式は、以下のように表される.

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}'_{\mathrm{m}} \mathbf{I} + \sum_{i=1}^{I} q^{(i)} \left\langle \mathbf{t}^{(i)} \otimes \mathbf{n}^{(i)} \right\rangle \Delta \boldsymbol{\omega}$$
(3)

$$q^{(i)} = \frac{\gamma^{(i)} / \gamma_{v}}{1 + |\gamma^{(i)} / \gamma_{v}|} q_{v}$$
(4)

$$\left\langle \mathbf{t}^{(i)} \otimes \mathbf{n}^{(i)} \right\rangle = \begin{bmatrix} \cos \omega_{i} & \sin \omega_{i} \\ \sin \omega_{i} & -\cos \omega_{i} \end{bmatrix}$$
(5)

ここに、 σ' :有効応力テンソル、 $\sigma'_{m} = \sigma'_{m}(\varepsilon')$:平 均拘束圧、 $\varepsilon'(=\varepsilon - \varepsilon_{d})$:有効体積ひずみ、 ε :体積 ひずみ、 ε_{d} :ダイレイタンシーによる体積ひずみ、 $q^{(i)}$:仮想単純せん断応力、 $\gamma^{(i)}$:仮想単純せん断ひず



図-1 検討対象地盤のモデル図

土層	ρ (t/m ³)	$\phi_{\rm f}$ (°)	K _{ma} (kPa)	G _{ma} (kPa)	<i>k</i> ₍ m/s)
Bs	1.73	32.2	39087	14988	-
Fs	1.83	31.1	43185	16560	2.5×10^{-5}
Asl	1.83	31.3	73575	28213	2.5×10^{-5}
Acl	1.63	27.7	75238	28851	2.5×10^{-8}
As2	1.83	32.2	124033	47561	2.5×10^{4}
Nac	1.73	27.7	180768	69317	2.5×10^{-8}
Nas	1.83	30.1	720358	276228	2.5×10^{-6}

表-1 地盤パラメータ(ダイレイタンシー特性除く)

表-2 ダイレイタンシー特性に関するモデルパラメータ

土層	E _{dem}	$r_{\rm adc}$	r _{ad}	r _k	q_1	q_2	c_1
Fs	0.35	1.38	0.35	0.28	1.0	0.5	1.71
As1	0.55	1.40	0.45	0.18	1.0	0.5	1.72

み、 q_v, γ_v : (仮想単純せん断機構における) せん断 強度および規準ひずみ、 ω_i : 全体座標系における水平 方向と仮想単純せん断の方向のなす角度である(詳細は 文献⁴参照のこと).

解析に用いた地盤のモデルパラメータを、**表**-1および **表-2**に示す.内部摩擦角 $\phi_{\rm f}$ とせん断剛性 $G_{\rm ma}$ について は実測値がないために、当該層のN値と有効上載圧 σ'_v 、もしくはせん断弾性波速度Vs を用いて次式によ り決定した⁵.

$$\phi_{\rm f} = 1.85 \left(\frac{N}{\sigma'_{\rm v} / 100 + 0.7} \right)^{0.6} + 26$$
 (6)

$$G_{\rm ma} = \rho V_s^2 \tag{7}$$

また、体積弾性係数 K_{ma} は、ポアソン比を0.33と仮定してせん断剛性より算定した.なお、せん断剛性 G_{ma} および体積弾性係数 K_{ma} は、当該層の中心部における有効拘束圧 σ'_{ma} の下での値であり、有効拘束圧が変化した場合には、以下に従いその値が変化する.

$$G_{\rm m} = G_{\rm ma} \left(\sigma'_{\rm m} / \sigma'_{\rm ma} \right)^{m_G} \tag{8}$$

$$K_{\rm m} = K_{\rm ma} \left(\sigma'_{\rm m} / \sigma'_{\rm ma} \right)^{m_{\rm K}} \tag{9}$$

ここに、 G_m, K_m は任意の有効拘束圧 σ'_m でのせん断剛 性および体積弾性係数である.なお、本検討では、 $m_G = m_K = 0.5$ とした.

次に、透水係数kに関しても実測値がないため、土質 分類や粒径等を踏まえた上で、一般的な値を用いること とした⁹. なお、本来は埋立土Fs層と細砂Asl層で透水係 数の値は異なるものと考えられるが、本検討では再液状 化挙動に及ぼす地盤の透水性の影響を感度分析的に捉え ることを主な目的としているため、条件を簡略化するた めに同じ値を用いた. **表**-2に示す液状化の発生に寄与す るダイレイタンシー特性に関するパラメータは、鉄道構 造物等設計標準・同解説 耐震設計¹⁰に示す方法で算定し た液状化強度曲線を目標にし、要素シミュレーションに よるパラメータフィッティングを実施することで決定し た. なお、**表**-2には載せていないが、ダイレイタンシー 特性を規定するパラメータの一つである変相角について は、一般的に用いられる値(=28.0°)を用いた.

有効応力解析に用いた地震動波形を図-2に示す.これ は、2011年東北地方太平洋沖地震の際にK-NET浦安で得 られた観測記録(EW方向)を、等価線形化法を用いて 基盤面まで引き戻した波形である.本震時の最大加速度 は100gal程度の小さな値であるが、数百秒にも及ぶ長い 継続時間を有しているのが特徴である.また、本震の約 30分後に発生した余震の最大加速度は約45galとなってお り、本震よりもさらに小さな値であることがわかる.解 析では図-1に示す有限要素メッシュの底面を粘性境界と し、図-2の地震動波形を入力した.

3. 長継続時間地震動を受ける地盤の液状化に及 ぼす透水性の影響

ここでは、浦安で観測されたような継続時間が数百秒 にも及ぶ長継続時間地震動の下で、地盤の透水性が液状 化現象にどのような影響を及ぼすかについての検討を行 った.なお、ここでの検討では、余震については考慮せ ず、図-2に示す前半の本震のみを考慮している.

まず,表-1に示す地盤パラメータ(液状化層の透水 係数は2.5×10⁵m/s)を用いた場合の過剰間隙水圧比の時 刻歴を図-3(a)に示す.入力地震動の加速度振幅は350秒 以降においては10galを下回っており,新たなせん断外 力はほぼ作用していない状態にあるものの,過剰間隙水 圧の消散は見られず高い水圧比を保ったままである.特 にFs層においては,数百秒にわたって水圧比がほぼ1.0を



図-3 過剰間隙水圧比の時刻歴(本震のみ考慮)

維持しており,顕著な液状化状態が続いている.

次に、液状化層の透水係数を100倍(2.5×10³m/s)に 変化させた場合の解析結果を図-3(b)に示す.透水係数 を変化させる前(図-3(a))と同様に、加振直後におい ては水圧比が上昇しているものの、200秒付近から過剰 間隙水圧の消散が見られ、600秒過ぎにおいて完全に水 圧が消散し水圧比がゼロに至っている.後者の透水係数 (2.5×10³m/s)はかなり透水性の良いきれいな礫に相当 し、このような地盤で長継続時間地震動を対象とする場 合には、振動中においても間隙水の透水の影響を考慮す る必要があると考えられる.しかしながら,図-3(c)に 示す非排水(水圧の消散がない)条件での解析結果と比 較すると,図-3(a)に示すように一般的な砂質地盤にお いては、長継続時間地震動を対象とする場合であっても、 非排水条件を課すことに特に問題はないと言える.なお、 後述するように、余震の影響を考慮する場合にはこの限 りではない.

4. 地盤の液状化に及ぼす余震の影響

ここでは、地盤の液状化現象に及ぼす本震(長継続時 間地震動)後の余震の影響について検討を行う.

(1) 基本ケース

まず,表-1に示す地盤パラメータ(液状化層の透水係数は2.5×10⁵m/s)を用いた場合の解析結果について示す. 図-4は過剰間隙水圧比の時刻歴である.本震により生じた過剰間隙水圧は余震発生までにわずかに消散しているものの,余震発生時においても水圧比で0.8前後の高い値を維持している.このような状態で余震が作用することにより,再び水圧比が上昇している様子が確認できる.この結果は,冒頭に述べた入船中学校の実事例とも定性的に合致するものである.ただし,余震発生時における水圧比が元々高い値であったため,上昇量としては余震のみを考慮した場合と同程度,もしくはやや小さい値となっている.

次に、地表面における沈下量の時刻歴を図-5に示す. 余震のみの場合はほとんど沈下が生じていないのに対し、 本震および余震を考慮した場合には最終的に0.57mの沈 下が生じている.これは本震のみを考慮した場合よりも 0.15m程度大きな値であり、この差は本震に加えて余震 を考慮したことによる. 図-4で述べたように、本震後の 余震による水圧比の上昇量に関してはそれほど顕著では ないものの、余震を受けることで水圧比が高い液状化状 態がより長く維持されたことにより、最終的な沈下量に 差が出たものと考えられる. さらに詳細に考察すれば, 次に示す図-6において、Asl層における最大せん断ひず みの値が余震を考慮することにより2倍程度に大きくな っていることも、沈下量の増大に関係している可能性が 高い. また,本検討で用いた地盤の構成モデル4では, せん断ひずみの累積値(累加せん断ひずみ^{例えば、7)})に応 じて体積ひずみの発生量が制御されているため、余震の 発生により液状化層における累加せん断ひずみが累積さ れることで、余震を考慮した際の沈下量が増大している 可能性も考えられる. なお、浦安市高洲地区における液 状化に伴う沈下量は $40\sim50$ cm程度と報告されており⁸、 ここでの解析結果は実被害と概ね整合するものである.



図-4 過剰間隙水圧比の時刻歴 (k=2.5×10⁻⁵m/s)







続いて、解析により得られた最大応答値の深度分布を 図-6に示す.地表面沈下量(図-5)と同様に、最大変位 分布に関しては地表面付近において余震を考慮したこと の影響が現れている.また、最大せん断ひずみについて も、前述のとおりAsl層において差が生じている.しか しながら、それ以外の指標については、本震のみの場合 と本震に加え余震を考慮した場合の結果に大きな違いは 見られない.つまり、余震まで含めて液状化現象を評価 しようとする場合、応答値の最大値でもって評価を行う ことが適切ではないケースも考えられる.

(2) 液状化層の透水係数を変化させたケース

次に、感度解析として液状化層の透水係数を10倍 (2.5×10⁴m/s) にしたケースの解析結果を図-7に示す. 本震直後の過剰間隙水圧比の上昇傾向は図-4と同様であ るが、本震後は間隙水が地表面に向かい次第に排水され るため、時間の経過とともに過剰間隙水圧比が減少する 傾向にあることがわかる.しかしながら、余震の発生ま でに水圧は完全には消散せず、余震時に水圧比が再び大 きく上昇している(Fs層では0.5→0.9程度に上昇). な お、図-4に示すケースでは、透水係数が小さいために地 表面に向かう排水速度が遅く,排水時間と比較して余震 発生までの経過時間が短かったものと考えられる. ここ で、本震を考慮せずに余震のみを作用させた場合の結果 を図-7に併せて示すが、余震の最大加速度が約45galと小 さいために、発生する過剰間隙水圧比は0.2未満となっ ている. つまり, 本震を経ずに余震のみが作用した場合 には液状化が発生しないのに対し、本震後において0.5 程度の過剰間隙水圧比が残っている状態で余震が作用し た場合には、再液状化が発生する可能性が高くなると言 える.

次に、地表面における沈下量の時刻歴を図-8に示す. 図-5の場合と同様に、余震のみの場合にはほとんど沈下 が生じていない.一方、本震および余震を考慮した場合 には、最終的に0.76mの沈下が生じており、これは本震 のみを考慮した場合よりも約0.2m大きな値である. つま り、本震により一旦比較的大きな過剰間隙水圧の発生 (有効応力の減少)を経験した地盤では、仮にその後に 発生する余震の加速度振幅が小さくても沈下量が増大す る可能性が高くなると言える.図-5と図-8を比較すると、 透水係数を10倍にすることにより、本震のみの場合と本 震と余震を考慮した場合の双方において最終的な沈下量 が増大するばかりでなく、余震を考慮したことによる沈 下量の増加量も大きくなることが確認された.また、本 震のみの場合と本震および余震を考慮した場合の沈下量 の時刻歴に差が生じ始める時刻を比較すると、図-5では およそ10,000秒(2.8時間), すなわち余震発生時(約 1.800秒)からかなりの時間が経過した後であるのに対 し、図-8では余震発生直後から沈下量に差が生じ始めて いる.これは、図-8では透水係数を10倍にしたことによ り、余震発生時において水圧比が0.5程度にまで減少し (図-7),沈下が徐々に収束に向かっていることに起因







図-8 地表面沈下量の時刻歴 (k=2.5×10⁴m/s)



図-9 過剰間隙水圧比の時刻歴 (余震の最大振幅20gal, *k*= 2.5×10⁴m/s)

するものと考えられる.一方の図-5では、余震発生時 において高い水圧比が維持されているため(図-4),沈 下が収束する傾向はまだ見られない.このように、余震 の影響を考慮に入れて液状化に伴う諸現象を評価する場 合には、余震発生までの経過時間や地盤の透水性(に起 因する間隙水の排水時間)といった時間のファクターが 非常に重要となるものと考えられる.

(3) 液状化層の透水係数および余震の振幅を変化させた ケース

ここでは、本震の大きさは変化させず、余震の最大加 速度を45galから20galに振幅調整して作用させた場合の 結果について示す.図-9は過剰間隙水圧比の時刻歴であ る.なお、液状化層の透水係数は(2)節と同様に表-1の 10倍の値、すなわち2.5×10⁴(m/s)とした.余震の大きさ が低減されているため、図-7と比べて余震時の水圧比の 上昇量はやや抑制されているものの、余震の振幅が 20galと非常に小さい場合でも再液状化のポテンシャル は顕著に上昇することがわかる. それに対して、本震を 無視して余震(20gal)のみを考慮した場合には、水圧 の上昇はほとんど見られない.

なお、本検討で用いた地盤の構成モデル⁴では、水圧 上昇に寄与する負のダイレイタンシの発生量を累積塑性 せん断仕事により制御している.本震後にある程度の水 圧が保持されている地盤では、せん断剛性が本震前と比 較して小さく、仮に同じせん断応力が作用した場合でも 本震前よりも大きな塑性せん断仕事が累積される.この ことが、本震後の余震の際に過剰間隙水圧比が再び大き く上昇する結果につながったものと考えられる.

(4) 液状化層上部(Fs層)が難透水性の場合

本項および次項では、液状化層の層ごとに透水性が大 きく異なるケースを考え、感度解析を行う.まず、ここ では液状化層のうち、上部の埋立土Fs層の透水係数は表 -1に示す値の0.1倍(2.5×10⁶m/s)に、下部の細砂Asl層 については10倍(2.5×10⁴m/s)の透水係数を用いた場合 の解析結果について示す.すなわち、液状化層上部(Fs 層)が難透水性のケースである.

まず、図-10に過剰間隙水圧比の時刻歴を示す.液状 化層上部が難透水性層であるために、埋立土Fs層のGL-3.2mを除いては、本震加振後の間隙水の消散はほとんど 見られず、余震の際に水圧比がわずかに上昇する傾向に あることが確認できる.比較的透水性の良い細砂As1層

(k=2.5×10⁴m/s) においても間隙水の消散がほとんど見 られないのは,難透水層であるFs層が上部に位置してお り,これがキャップのような役割を果たすことで,As1 層の間隙水の上方向への移流を妨げているためである.

なお、今回の解析では、解析領域の側方に間隙水が流れ 出ることを考えていないため上記のような結果となった が、仮に側方に透水性の低い地盤が存在すれば、Asl層 の過剰間隙水圧はそちらに向かい消散することになると 考えられる.

図-10においてもう一つ注目すべき点は、本震の加振 直後において、G.L.-3.2mにおける過剰間隙水圧比が1.0を 上回っていることである.非排水条件下での解析であれ ば、全応力一定の場合は過剰間隙水圧が初期の有効上載 圧よりも大きくなることはなく、したがって過剰間隙水 圧比は1.0で最大値をとることとなる.しかしながら、 ここでの解析は間隙水の透水を考慮しているため、ある 一つの要素を考えた場合、当該要素の水頭が周辺に存在 する要素の水頭値よりも低ければ、その要素に向かい間 隙水の流れ込みが生じることとなる.つまり、本震によ り生じたAs1層やFs層下部の過剰間隙水圧が、地表面に 向かい流れようとするものの、難透水層のFs層上部がキ ャップのような役割を果たすことにより、GL-3.2m付



図-10 過剰間隙水圧比の時刻歴(液状化層上部(Fs層)が難 透水性の場合)



図-11 地表面沈下量の時刻歴(液状化層上部(Fs層)が難透 水性の場合)

近において間隙水が滞留する結果となったものと考え られる.

続いて、地表面における沈下量の時刻歴を図-11に示 す. なお、同図の横軸の時間スケールは"秒"ではなく "時間"となっているので注意されたい. 地表面付近が 難透水層であるために、間隙水が消散し、沈下量が収束 するまでに、2日程度という非常に長い時間を要してい るのが確認できる. なお、本震に加えて余震も考慮した 場合では、50時間経過した後もまだわずかながら沈下が 継続しているようである.以上の結果より,地表面付近 の地盤の透水性がかなり低く、かつその下に位置する地 盤の透水性が比較的良い場合には、下部の液状化層から 流れ込む間隙水圧が上部の難透水層で滞留し、非常にだ らだらと続く沈下を生じる可能性があることが示唆され る. また、余震の発生が本震の発生から比較的長い時間 が経過した後であっても、ここで対象としたような地盤 では、再液状化のポテンシャルがかなり高くなるものと 考えられる.

(5) 液状化層下部(As1層)が難透水性の場合

本項では、液状化層下部(As1層)が難透水性のケースについて考える. すなわち、上部の埋立土Fs層の透水 係数は表-1に示す値の10倍(2.5×10⁴m/s)に、下部の細 砂As1層については0.1倍(2.5×10⁶m/s)の透水係数を用 いた場合の解析結果について示す.

まず,図-12に過剰間隙水圧比の時刻歴を示す.地表 面付近の埋立土Fs層の透水性は比較的良好であるために

(k=2.5×10⁴m/s),本震の加振後,Fs層の過剰間隙水圧 は徐々に消散し、1.000秒を超えたあたりから水圧比で 0.3前後の小さな値に至っている.ただし、余震が作用 することにより、図-7などと同様に、再び水圧比が0.8 程度にまで上昇し、再液状化の危険度が高まっているこ とが確認できる.一方,難透水層である細砂Asl層では, 透水係数が小さいために本震後の間隙水の消散は見られ ず, 逆に1,000秒を超えたあたりから水圧比が上昇し, 時刻によっては1.0を超えているのがわかる. この原因 としては、以下のような理由が考えられる.まず、Asl 層が難透水層であっても、Fs層との境界部まで間隙水が 移流してくれば、Fs層の透水性が比較的良いために地下 水位面(水圧ゼロ境界)に向かって水圧は消散するはず である.しかしながら、Asl層の透水性が悪いために、 Asl層で発生した過剰間隙水圧はなかなかFs層との境界 部に達することができず, Asl層のある部分(今回のケ ースではG.L.-9.8m付近)において間隙水の滞留が見られ ることとなる. このような間隙水圧の滞留現象は、透水 係数や排水距離に加え、上下の液状化層の透水係数のコ ントラストにも依存する非常に複雑な現象であると考え られる. 仮に液状化層の境界面が傾斜している場合など を考えれば、図-12に示すような境界に近い領域におい て水圧比が高い状態が維持されていることは滑りや側方 流動を誘発する可能性があり非常に危険であり、今後さ らなる研究が必要になるものと思われる.

次に、図-13に地表面の沈下量の時刻歴を示す.図-11 の場合と同様に、横軸の時間スケールは"時間"で整理 されており,過剰間隙水圧が完全に消散し,沈下量が収 束するまでにはかなりの時間を要することが確認できる. 液状化層上部(Fs層)が難透水性の場合の結果(図-11) と比較すると、沈下が収束するまでの時間は上部が 難透水層の場合の方が大きくなっているのに対し、最終 的な沈下量自体は下部(Asl層)が難透水性の場合の方 が大きくなっている. また, 上部が難透水層の場合は, 一定速度で沈下が進展した後に、余震の影響によりだら だらとスピードの遅い沈下が進むようである. つまり、 沈下の進展に及ぼす余震の影響は、余震の発生から相当 に時間(25時間程度)が経過した後に顕在化すると言え る.一方、下部が難透水層の場合は、本震により比較的 スピードの速い沈下現象がまず生じ、余震の発生直後に 沈下量がさらに増大した上で、長時間をかけてだらだら と続く沈下が見られるようである.このように、液状化 層の上下いずれの層の透水性が良いか(または悪いか) によって、沈下の進展具合(沈下速度や余震の影響の顕 在化のタイミング等) に大きな差が生じることがわかっ た.



図-12 過剰間隙水圧比の時刻歴(液状化層下部(As1層)が難 透水性の場合)



図-13 地表面沈下量の時刻歴(液状化層下部(As1層)が難透 水性の場合)

5. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震において甚大な液状化が 生じた浦安市の地盤モデルを対象に、長継続時間地震動 を受ける地盤の液状化に及ぼす透水性および余震の影響 を調べるため、間隙水の移流を考慮した有効応力解析を 実施した.解析の結果、得られた主な結論は以下の通り である.

- (1) 透水係数を変化させて解析を行った結果,少なくと も振動中は,長継続時間地震動であっても地盤の液 状化に及ぼす透水性の影響は顕著でないことがわか った.ただし,かなり透水性の良いきれいな礫(透 水係数k=2.5×10³m/s程度)から成る地盤などでは, この限りではない.
- (2) 本震を経ずに余震のみ(45gal程度)が作用した場合 には液状化が発生しないのに対し、本震後において 0.5程度の過剰間隙水圧比が残っている状態で余震が 作用した場合には、再液状化が発生する可能性が高 くなることがわかった.なお、余震の加速度振幅が さらに小さい場合(20gal程度)においても、同様の 傾向であった.
- (3)本震時に比較的大きな過剰間隙水圧の発生(有効応力の減少)を一旦経験することで、仮にその後に発生する余震の加速度振幅が小さくても、沈下量の増大に及ぼす余震の影響が無視できないことがわかった。
- (4) 液状化層の透水係数が一様でなく,透水性の良い層

と悪い層が混在している場合には、過剰間隙水圧の 上昇および消散傾向や、地表面における沈下の進展 具合(沈下速度や余震の影響が顕在化するタイミン グ等)に大きな差が生じることがわかった.

なお、既往の研究^{9,10}によれば、要素試験レベルでは、 液状化後の排水(再圧密)過程における地盤の異方性の 影響等により、再液状化時の強度が変化することが指摘 されている.今後はこれらの影響の適切なモデル化手法 等を含め、さらに詳細な検討を行いたい.

謝辞:防災科学技術研究所のK-NETの強震記録を使用させて頂きました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 浦安市液状化対策技術検討調査委員会:平成 23 年度 浦安市液状化対策技術検討調査報告書, 2012.
- (公財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計,丸善出版,2012.
- Zienkiewicz, O. C. and Bettess, P.: Soil and other saturated media under transient, dynamic conditions, Soil Mechanics -Transient and Cyclic Loads, John Wiley&Sons, pp. 1-16, 1982.

- Iai,S., Tobita,T., Ozutsumi,O. and Ueda,K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35(3), pp. 360-392, 2011.
- 5) (公財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標 準・同解説 基礎構造物,丸善出版,2011.
- b1 地盤工学会:地盤工学ハンドブック,丸善出版, 2004.
- 7) 原田健二,石原研而:撹乱・不撹乱試料に基づく簡易な液状化による沈下予測法,土木学会第68回年次 学術講演会,III-054,2013.
- 4) 仙頭紀明,風間基樹,渦岡良介:非排水繰返しせん 断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化, 土木学会論文集,No. 764/III-67, pp. 307-317, 2004.
- 9) 鈴木輝一,小田匡寛,川本健,藤森啓之:三軸試験 装置における飽和砂の再液状化抵抗に及ぼす構造異 方性の影響,構造工学論文集, Vol. 46(A), pp. 289-298, 2000.
- Yamada, S., Takamori, T. and Sato, K.: Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, Soils and Foundations, Vol. 50(1), pp. 9-25, 2010.

(2013.?.?受付)

ANALYTICAL STUDY ON THE INFLUENCE OF AFTERSHOCKS ON THE LIQUEFACTION BEHAVIOR OF GROUND

Kyohei UEDA, Jun IZAWA, Yoshitaka MURONO and Susumu IAI

In order to study the influence of soil permeability and aftershocks on the liquefaction behavior of ground, effective stress analyses that can take into account the effect of pore water flow and migration are performed by using a ground model in Urayasu city where extensive liquefaction occurred during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Primary conclusions of this study are summarized as follows: 1) the effect of permeability on the liquefaction of ground is not noticeable at least under shaking during long-duration earthquakes except for gravel ground of which permeability is so high, 2) while liquefaction is not triggered by only an aftershock (about 45 gal), an aftershock following a main shock, during which liquefaction once occurred or excess pore water pressure built up to some degree (e.g. excess pore water pressure ratio is more than about 0.8), increase the possibility of reliquefaction and the effect of aftershocks on the increase of ground settlement can not be ignored even when excess pore water pressure dissipates to some extent after the main shock and the value is not so high at the occurrence of the aftershock.