

本震後の余震発生に伴う地盤の再液状化挙動の評価

上田 恭平* 井澤 淳* 室野 剛隆**

Evaluation of the Re-liquefaction Behavior of the Ground due to the Occurrence of Aftershocks
Following a Main Shock

Kyohei UEDA Jun IZAWA Yoshitaka MURONO

In order to study the influence of aftershocks on the re-liquefaction behavior of the ground, effective stress analyses in which the effect of pore water flow and migration can be considered are performed by using a ground model in Urayasu city where extensive liquefaction occurred during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The primary conclusions of this study are summarized as follows: 1) while liquefaction is not triggered only by an aftershock, an aftershock following a main shock may increase the possibility of re-liquefaction, 2) the effect of aftershocks on the increase of ground settlement can't be ignored when excess pore water pressure dissipates after a main shock but remains to some extent on the occurrence of aftershocks.

キーワード：再液状化，有効応力解析，余震，長継続時間地震動，地盤の透水性

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、甚大な液状化被害が発生した。当該地域は震源から約300km離れた遠方に位置し、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、広範囲にわたり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、本震時において液状化の発生に伴って噴水・噴砂が生じる様子が確認されている。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（再液状化現象）が示唆されている。液状化が発生すると、上昇した間隙水圧が時間とともに消散する過程で地盤沈下が生じるが、浦安市の例では水圧が完全に消散する前に余震が発生したために沈下が進展し、最大0.6mにも及ぶ地表沈下が発生した。

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、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が、従来は振動中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、振動中の非排水

条件の仮定は妥当なもの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、本震後に比較的大きな余震の発生が危惧されるため、本震に加えて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。本震時に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。しかしながら、従来の液状化の検討では水圧消散に伴う地盤沈下や余震による再液状化の影響は考慮されておらず、評価手法も確立していない。

本研究では、巨大地震を対象に余震の影響も含めた液状化地盤の変形量予測を行うため、地盤内の過剰間隙水圧の上昇だけでなく消散過程も同時に考慮できる有効応力地盤解析法を開発した。本論文ではこの手法を用い、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。本報告では、解析手法とこれらの検討結果について述べる。

2. 過剰間隙水圧の上昇・消散を考慮した地盤解析法

地下水面下の飽和地盤は、図1(a)のように土粒子と間隙水から構成されている。このような地盤が地震動

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター

特集：防災技術

により繰返しせん断を受けると地盤内の間隙水圧が上昇し、土粒子間の接触が外れる（有効応力がゼロになる）ことで地盤の液状化が発生する。ここで、図1 (a) のような地盤領域を考えると、周囲の地盤への間隙水の流出と周囲の地盤からの間隙水の流入、さらには地表面への間隙水の排水が生じるが、地震動が作用している振動中に限れば、これらの影響は大きくないと考えられる（そのため、図1 (a) の左図では間隙水の流入出を破線で示している）。

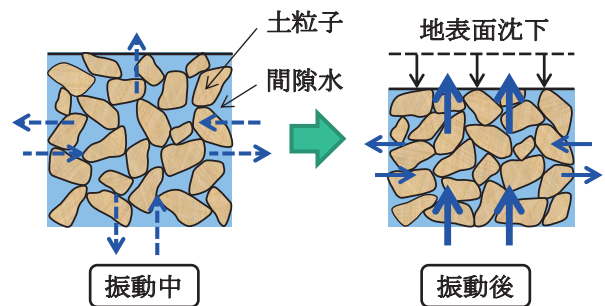
しかし、地震動により上昇した間隙水圧は徐々に地表面へと排水するため、水圧の消散とともに地表面沈下が生じる結果となり、振動後の地盤挙動を扱う場合は排水の影響を無視できない。また、継続時間が数百秒にも及ぶ長継続時間地震動の下では、振動中でも間隙水の排水の影響が無視できない可能性がある。そこで、新たに開発した過剰間隙水圧の上昇および消散過程を同時に考慮できる地盤解析法³⁾では、図1 (a) のような地盤領域を考えたとき、周囲の地盤への間隙水の流出と周囲の地盤からの間隙水の流入を、振動中から振動後にかけて厳密に考慮することとした。これは、解析的には以下に示す土粒子と間隙水の混合体としての運動方程式（式(1)）と間隙水の収支バランス式（式(2)）を連成させて解く（u-p formulation⁴⁾）ことに相当する。

$$\text{div}(\boldsymbol{\sigma}' + p) + \rho \mathbf{g} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

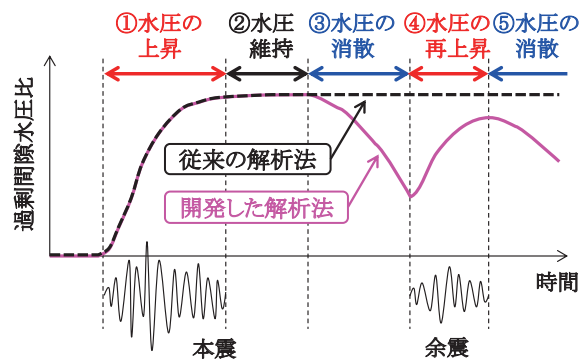
$$\begin{aligned} k \text{div}(\text{grad} p) - \text{div} \dot{\mathbf{u}} - k \text{div}(\rho_f \mathbf{g}) \\ = -k \text{div}(\rho_f \ddot{\mathbf{u}}) + n \dot{p} / K_f \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $\boldsymbol{\sigma}'$ ：有効応力テンソル、 p ：間隙水圧、 ρ ：（土粒子と間隙水の複合物としての）密度、 \mathbf{g} ：重力加速度ベクトル、 \mathbf{u} ：土骨格の変位ベクトル、 k ：透水係数、 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。間隙水圧に関しては、土骨格の変位と同様に要素を構成する各節点に離散化することとし、式(1)(2)を時系列で連成させて解くための時間積分法にはSSpj法⁵⁾を用いることとした。水圧を節点で与えた理由は、圧密解析で一般的に用いられる水圧を要素中心で与える方法と比較して、得られる水圧分布が要素の分割方法の影響を受けにくいという利点があるためである。

このような現象を本震・余震の発生に関する時間軸との関係で整理したのが図1 (b) であり、従来の解析法では間隙水の排水の影響を無視しているため、本震時に上昇した水圧は時間が経過しても消散せずピークの値を維持したままとなる。つまり、従来の解析法では図1 (b) の過程③～⑤を適切に考慮できず、間隙水の消散に伴う地盤沈下も評価できない。実際の現象を考えた場合、本震で上昇した間隙水圧が余震の発生までにある程度消散し（過程③）、余震時の繰返しせん断で水圧が再上昇する（過程④）ものと考えられる。本地盤解析法では間隙



(a) 間隙水の流入・流出の概念図



(b) 過剰間隙水圧比の時刻歴

図1 開発した地盤解析法のイメージ

水の流入出を考慮しており、上記の過程③～⑤および水圧消散に伴う地盤沈下を適切に評価することが可能となる。

3. 本震・余震を考慮した再液状化挙動の評価

3.1 解析における諸条件

間隙水の排水の影響を考慮した有効応力解析法の有効性を確認するため、東北地方太平洋沖地震の際に実際に液状化が生じた浦安市高洲地区を対象に、本震と余震を考慮した解析を実施した³⁾。本検討では、高洲地区の地盤情報¹⁾を参考に、1次元の土柱モデルを図2のように設定した。地下水位面を地表面から-1.1mの位置に設定し、地下水位面下の埋立土Fs層（深度1.1～6.4m）と細砂As1層（深度6.4～13.1m）を、液状化のある地盤として取り扱った。地下水位面で深の地盤は、土要素と間隙水要素から構成される二相系とし、2章で述べたとおり支配方程式として式(1)と式(2)を連成させることにより間隙水の透水性を考慮した。

土の構成モデルとしては、膨張的および収縮的成分から構成されるダイレイタンスーモデルを組み込んだひずみ空間多重せん断モデル⁶⁾を用いることとした。このモデルの応力とひずみの関係式は、以下のように表される。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}'_m \mathbf{I} + \sum_{i=1}^n q^{(i)} \langle \mathbf{t}^{(i)} \otimes \mathbf{n}^{(i)} \rangle \Delta \omega \quad (3)$$

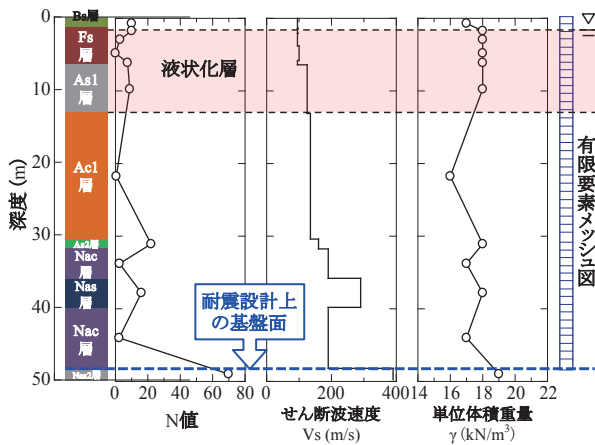


図2 検討対象地盤のモデル図

$$q^{(i)} = \frac{\gamma^{(i)} / \gamma_v}{1 + |\gamma^{(i)} / \gamma_v|} q_v \quad (4)$$

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

ここに、 $\sigma'_m = \sigma'_m(\varepsilon')$ ：有効拘束圧、 $\varepsilon' (= \varepsilon - \varepsilon_d)$ ：有効体積ひずみ、 ε ：体積ひずみ、 ε_d ：ダイレイタンスーによる体積ひずみ、 $q^{(i)}$ ：仮想単純せん断応力、 q_v ：仮想単純せん断ひずみ、 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。本モデルでは、せん断変形に伴ってダイレイタンスーによる体積ひずみ ε_d が発生し、これに基づき有効拘束圧 σ'_m を介して式(1)に示す有効応力テンソル σ' が算定されるため、複雑な液状化挙動を精緻に表現することが可能となっている(詳細は文献⁶⁾を参照のこと)。

解析に用いた地盤のモデルパラメータを、表1に示す。ここに、内部摩擦角 ϕ_f は実測値がないため、鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物⁷⁾に従い、当該層の N 値と有効上載圧 σ'_v をもとに次式を用いて設定した。

$$\phi_f = 1.85 \left(\frac{N}{\sigma'_v / 100 + 0.7} \right)^{0.6} + 26 \quad (6)$$

一方、初期せん断剛性 G_{ma} は、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計²⁾(以下、耐震標準と略記)に従い、せん断波速度 V_s (m/s) と単位体積重量 γ (kN/m³) に基づき次式により算定した。

$$G_{ma} = \rho V_s^2 = (\gamma / g) V_s^2 \quad (7)$$

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'_m の下での値であり、有効拘束圧が変化した場

表1 解析に用いた地盤パラメータ(ダイレイタンスー特性除く)

土層	ρ (t/m ³)	ϕ_f (°)	K_{ma} (kPa)	G_{ma} (kPa)	k (m/s)
Bs	1.73	32.2	39087	14988	-
Fs	1.83	31.1	43185	16560	2.5×10^{-5}
As1	1.83	31.3	73575	28213	2.5×10^{-5}
Ac1	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}

合には、以下に従いその値が変化することとなる。

$$G_m = G_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_G} \quad (8)$$

$$K_m = K_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_K} \quad (9)$$

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、地盤の透水係数 k についても実測値がないため、土質分類や土粒子の粒径を踏まえて経験的に設定した⁸⁾。

液状化層については、表1の他に液状化の発生に寄与するダイレイタンスー特性を設定する必要がある。ここでは、耐震標準²⁾に示す方法で地盤の N 値と平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c から液状化強度曲線を算定し、それを目標にして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。このようにして設定した液状化層のダイレイタンスー特性に関するパラメータを表2に示す。なお、表2には載せていないが、ダイレイタンス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

表2 ダイレイタンスーに関するパラメータ⁶⁾

パラメータの説明	Fs層	As1層
負のダイレイタンスーによる体積ひずみの終局値 ε_{dem}	0.35	0.55
負のダイレイタンスーを制御するパラメータ r_{dc}	1.38	1.40
正負の両ダイレイタンスーを制御するパラメータ r_{cd}	0.35	0.45
体積弾性係数の低減係数 r_k	0.28	0.18
水圧上昇過程前半におけるひずみの伸びを制御するパラメータ q_1	1.0	1.0
水圧上昇過程後半におけるひずみの伸びを制御するパラメータ q_2	0.5	0.5
液状化抵抗曲線の下限を制御するパラメータ c_1	1.71	1.72

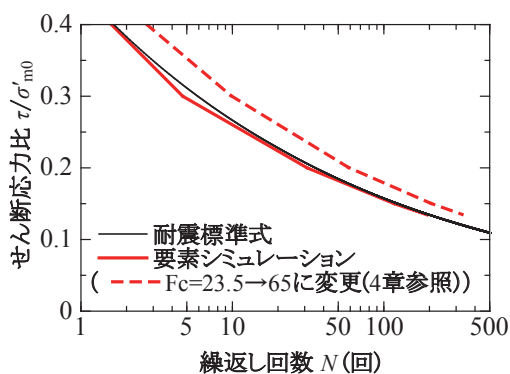


図3 液状化強度曲線 (Fs層)

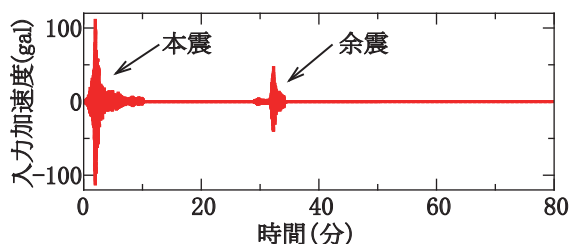


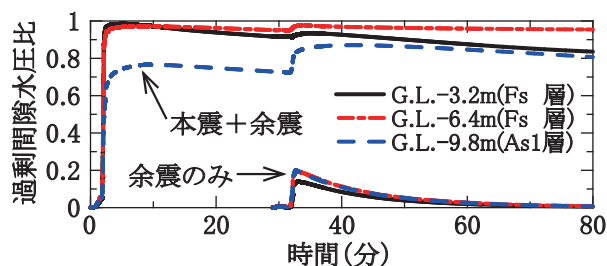
図4 浦安基盤波 (EW方向)

用いた。一例として、Fs層の液状化強度曲線を図3に示す(図中の破線については、4.2節で後述する)。

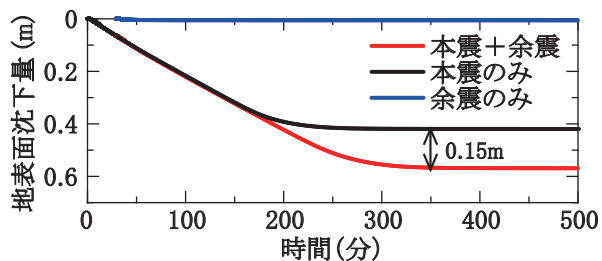
次に、解析に用いた地震動波形を図4に示す。この波形は、2011年東北地方太平洋沖地震の際にK-NET浦安で得られた観測記録(EW方向)を、等価線形化法により耐震設計上の基盤面まで引き戻した波形である。本震時の最大加速度は100gal程度であるが、数百秒にも及ぶ長い継続時間を有しているのが特徴である。本震の約30分後に発生した余震の最大加速度は約45galと本震よりさらに小さい。解析では有限要素モデル底面を粘性境界とし、図4に示す地震動波形を入力した。

3.2 余震を考慮した再現解析の結果

まず、液状化層における過剰間隙水圧比の時刻歴を図5(a)に示す。過剰間隙水圧比 $r_u (=1-\sigma'_m/\sigma'_{m0})$ は液状化の程度を表す指標であり (σ'_{m0} は地震応答解析における初期有効拘束圧)、この値が1.0に至れば完全な液状化状態を意味する。図5(a)より、特にFs層では本震時に過剰間隙水圧が1.0近くまで上昇し、顕著な液状化の発生が示唆される。本震後は地表面に向かい間隙水が徐々に排水されるため、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(As1層では余震により本震時よりも高い水圧比となっている)。この結果は、冒頭に述べた入船中学校の実事例¹⁾とも定性的に合致す



(a) 過剰間隙水圧比の時刻歴



(b) 地表面沈下量の時刻歴

図5 本震・余震を考慮した解析結果

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。なお、図中には示していないが、十分時間が経過した時点(余震発生から5時間程度)で、過剰間隙水圧が完全に消散していることを確認している。

次に、地表面における沈下量の時刻歴を図5(b)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5(a)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。本検討で用いた地盤の構成モデル⁶⁾では、既往の研究結果^{例えは、9)}を踏まえ、せん断ひずみの累積値に応じて水圧消散に伴う体積ひずみの発生量が制御されている。より詳細に考察すれば、本震により上昇した間隙水圧が完全に消散せずにある程度残存した状態では、地盤のせん断剛性が低下しているため、余震が作用することで生じるせん断ひずみは本震を経験しない場合よりも大きくなるはずである。したがって、本震後の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より累積されることとなり、結果として余震を考慮した際の地表面沈下量が增大するに至ったものと考えられる。なお、浦安市高洲地区における液状化に伴う沈下量は40～60cm程度と報告され

ており^{例えば, 10) 11)}, 解析結果は実被害と概ね整合するものである。

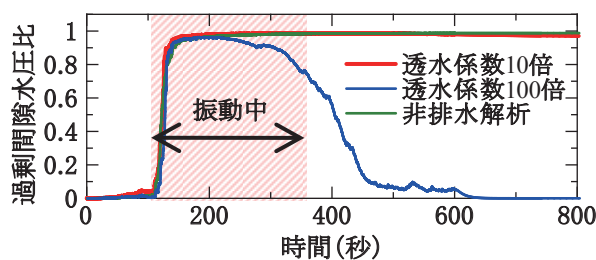
以上より, 開発した地盤解析法の有効性が確認されるとともに, 本震時において一度液状化を経験した地盤では, 仮にその後に発生する余震の加速度振幅が小さい場合であっても再液状化が生じ, 地表面の沈下量が增大する可能性が高くなることが明らかになった。

4. 地盤特性の違いが余震時の再液状化挙動に及ぼす影響

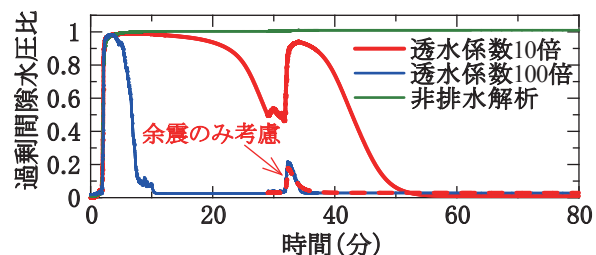
4.1 地盤の透水性の影響

本章では, 地盤特性の違いが本震・余震時の液状化挙動に及ぼす影響について検討する。まず, 地盤の透水性の影響について考察するため, 土柱モデルおよび地震動は図2と図4のままとし, 液状化層の透水係数を表1の10倍 ($2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$) および100倍 ($2.5 \times 10^{-3} \text{m/s}$: きれいな礫に相当)に変更して地震応答解析を実施した。解析により得られた過剰間隙水圧比 (Fs層: G.L.-6.4m)の時刻歴を図6に示す。図6(a)は本震時の応答に着目したもので, 図中のハッチングは入力地震動の加速度振幅が10gal以上に対応し, 本検討ではこの状態を振動中とみなすこととした。透水係数が10倍の場合, 本震による振動中は過剰間隙水圧の消散は見られず, 間隙水の透水性を考慮しない非排水解析の結果と同等である。一方, 透水係数を100倍にした場合, 振動途中から水圧の消散が始まることから, 透水性がかなり良好な地盤では地震動が作用している間でも非排水条件の仮定が成立しないことがわかった。

次に, 図6(b)に示すとおり本震後は地表面に向かい間隙水が徐々に排水されるため, 時間の経過とともに水圧比が減少する傾向にあるものの, 透水係数が10倍の条件では, 余震の発生までに水圧は完全には消散していない。このように余震発生時に比較的高い過剰間隙水圧比(本ケースでは0.5程度)が残存している場合, 余震の規模が小さくても水圧比が再び大きく上昇して再液状化が生じている。比較のため, 地盤物性は同条件とし, 本震を経験せずに余震のみ作用させた場合の結果も図6(b)に併せて示すが, 余震の最大加速度が約45galと非常に小さいため過剰間隙水圧の上昇はほとんど見られない。このことから, 本震時に発生した過剰間隙水圧の残存が余震による地盤の再液状化に大きく影響することが確認された。一方, 透水係数100倍のきれいな礫相当の地盤では, 本震時に上昇した過剰間隙水圧は余震発生までに完全に消散し, 余震による再液状化が発生しない結果となった。



(a) 本震時の時間軸を拡大



(b) 本震～余震後の水圧消散まで

図6 地盤の透水性の影響 (Fs層: G.L.-6.4m)

4.2 地盤の液状化強度の影響

次に, 地盤の液状化強度の違いが本震および余震時の液状化挙動に及ぼす影響について検討する。解析に用いる土柱モデルおよび地震動は図2と図4のままとし, 液状化層の透水係数は4.1節と同様に表1の10倍 ($2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)に設定した上で, 一例として液状化層 (Fs層)の細粒分含有率 F_c を23.5%から65%に変更して地震応答解析を実施した。なお, 地盤工学会の基準^{例えば, 8)}によれば, 細粒分含有率 F_c が50%以上の土質は細粒土に分類され, 一般的には液状化しにくい地盤とされる。また, 耐震標準²⁾においても, 液状化の判定を行う土層として $F_c \leq 35\%$ の条件が記載されており (ただし, $F_c > 35\%$ であっても, 粘土分含有率 P_c が15%以下の場合には液状化判定を行う), $F_c=65\%$ の土層は完全な液状化状態には至りにくいものと考えられる。実際, 3.1節と同様に耐震標準²⁾に示す方法に従い, 地盤の N 値と平均粒径 D_{50} , 細粒分含有率 F_c から液状化強度曲線を算定すると, 液状化強度曲線は図3の破線のようなになる。同図より, F_c が増加したことで, 液状化強度は繰返し回数²⁾の全領域において大きくなっていることがわかる。繰返し回数20回における液状化強度比 R_{20} で比較すると, F_c 変更前は $R_{20}=0.22$ であった値が $R_{20}=0.27$ 程度まで増大している。

解析より得られたFs層 (G.L.-6.4m)における過剰間隙水圧比の時刻歴を図7に実線で示す。図中の破線 (F_c 変更前)と比較すると, F_c の増大に伴い本震時の水圧比のピークが0.8程度に低減されており, F_c が増加して液状化強度が大きくなることで, 本震に対して液状化しにくい地盤となっていることがわかる。次に余震時の挙

特集：防災技術

動に目を向けると、 F_c 変更前は余震発生時に過剰間隙水圧比が 0.5 程度残存しているのに対し、 F_c 変更後は本震時の水圧比のピーク値が抑えられているために、余震発生時において過剰間隙水圧比は 0.4 程度にまで消散している。細粒分含有率 F_c が大きい地盤では、図 3 に示すように液状化強度が大きいことに加え、このように余震発生時の残存過剰間隙水圧比が小さいために、同じ大きさの余震が作用してもそれに伴う間隙水圧の上昇量が小さく、再液状化が発生しにくくなることが確認された。すなわち、地盤改良等により液状化強度を増加させることは、本震の液状化抵抗を高めるのみならず、余震時の再液状化抵抗についても有効に働くものと考えられる。

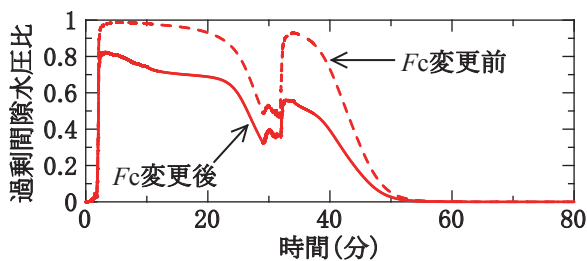


図 7 異なる地盤条件での解析結果

5. まとめ

巨大地震を対象に余震の影響も含めた液状化地盤の変形量予測を行うため、地盤中の過剰間隙水圧の上昇だけでなく消散過程も併せて考慮できる地盤解析法を開発した。また、本手法を用いて、余震の発生や地盤条件の違いが地盤の再液状化挙動に及ぼす影響について検討した。本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に再液状化による被害が生じた千葉県浦安地区を対象に、本手法を用いて本震および余震を考慮した再現解析を実施した結果、開発した地盤解析法の有効性が確認された。
- (2) 透水係数を変化させて解析を行った結果、一般的な砂質地盤（透水係数 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ m/s 程度）では、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地盤（透水係数 10^{-3} m/s 程度）ではこの限りではない。
- (3) 本震を経ずに余震のみ（45gal 程度）が作用した場合を仮定した結果では液状化が発生しないのに対し、本震時に一度水圧が上昇し、ある程度高い過剰間隙水圧比（本ケースでは 0.5 以上）が残存し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ことから、残存水圧比が再液状化挙動に影響を及

ぼすことがわかった。

- (4) 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、残留変形量に及ぼす余震の影響が無視できないことがわかった。

謝 辞

本研究では、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。

文 献

- 1) 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
- 2) (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
- 3) 上田恭平，井澤淳，室野剛隆，井合進：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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 70, No. 4, pp.578-585, 2014
- 4) 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.
- 5) Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. and Zhu, J.H.: Finite Element Method its basis and fundamentals sixth edition, Elsevier, 2005.
- 6) 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.
- 7) (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
- 8) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，丸善出版，2004
- 9) 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
- 10) 原田健二，石原研而：攪乱・不攪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
- 11) 千葉県環境研究センター：平成 23（2011）年東北地方太平洋沖地震時の房総半島における液状化 - 流動化現象 第 3 報 千葉県内の液状化 - 流動化現象とその被害の概要及び詳細分布調査結果 - 浦安地区（1） -，2011