

余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす影響 に関する基礎的検討

上田 恭平¹・井澤 淳¹・室野 剛隆¹・井合 進²

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）

²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）

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見逃し、非排水条件を課することが多かった。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、振動中において非排水条件を課する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（ u -

p formulation³⁾), 間隙水の透水性を考慮した.

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

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

ここに、 $\boldsymbol{\sigma}$: 全応力テンソル、 ρ : 土・水混合体としての密度、 $\mathbf{g}$: 重力加速度ベクトル、 $\mathbf{u}$: 土要素の変位ベクトル、 k : 透水係数、 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.

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

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

$$\left\langle\mathbf{t}^{(i)} \otimes \mathbf{n}^{(i)}\right\rangle=\left[\begin{array}{cc} \cos \omega_i & \sin \omega_i \\ \sin \omega_i & -\cos \omega_i \end{array}\right] \quad (5)$$

ここに、 $\boldsymbol{\sigma}'$: 有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}'_m=\boldsymbol{\sigma}'_m\left(\varepsilon'\right)$: 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 ϕ_f とせん断剛性 G_{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 V_s を用いて次式により決定した⁵⁾.

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

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

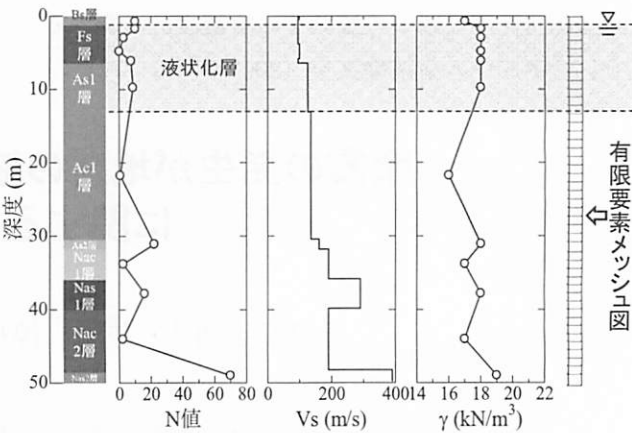


図-1 検討対象地盤のモデル図

表-1 地盤パラメータ (ダイレイタンシー特性除く)

土層	ρ (t/m^3)	ϕ_f ($^\circ$)	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}

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	ε_{dc}	r_{edc}	r_{ed}	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

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、過剰間隙水圧の発生とともに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.

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

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

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、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⁶⁾. なお、本来は埋立土 Fs 層と細砂

As1 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ス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¹⁾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 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)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($2.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)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、

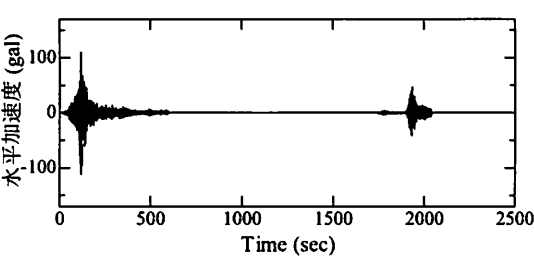
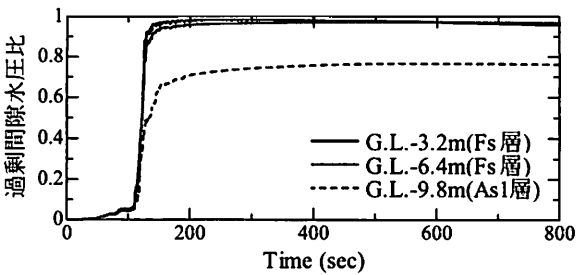
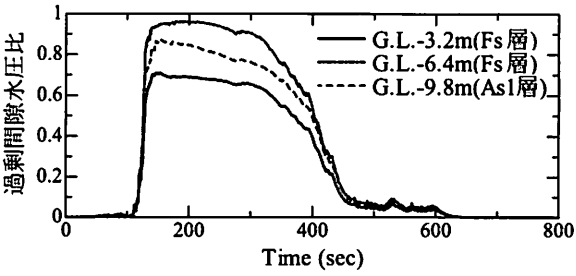


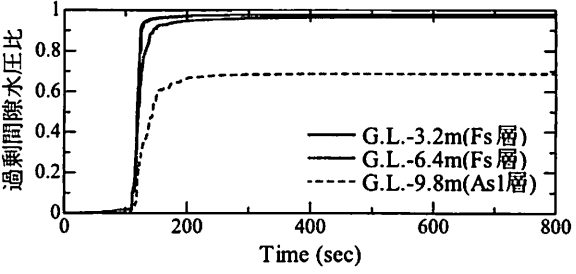
図-2 浦安基盤波 (EW方向)



(a) 透水係数 $k=2.5 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ の場合



(b) 透水係数 $k=2.5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$ の場合



(c) 非排水解析の場合

図-3 過剰間隙水圧比の時刻歴 (本震のみ考慮)

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($2.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)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

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 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ）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事実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、As1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。

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

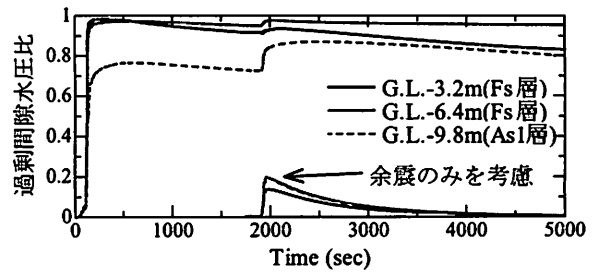


図-4 過剰間隙水圧比の時刻歴 ($k=2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

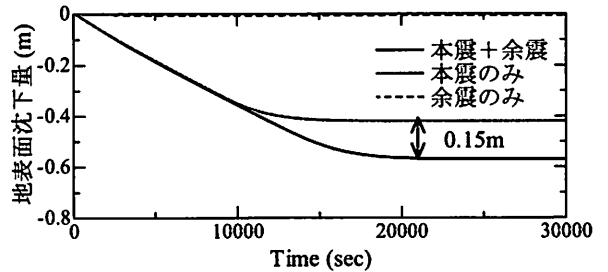


図-5 地表面沈下量の時刻歴 ($k=2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

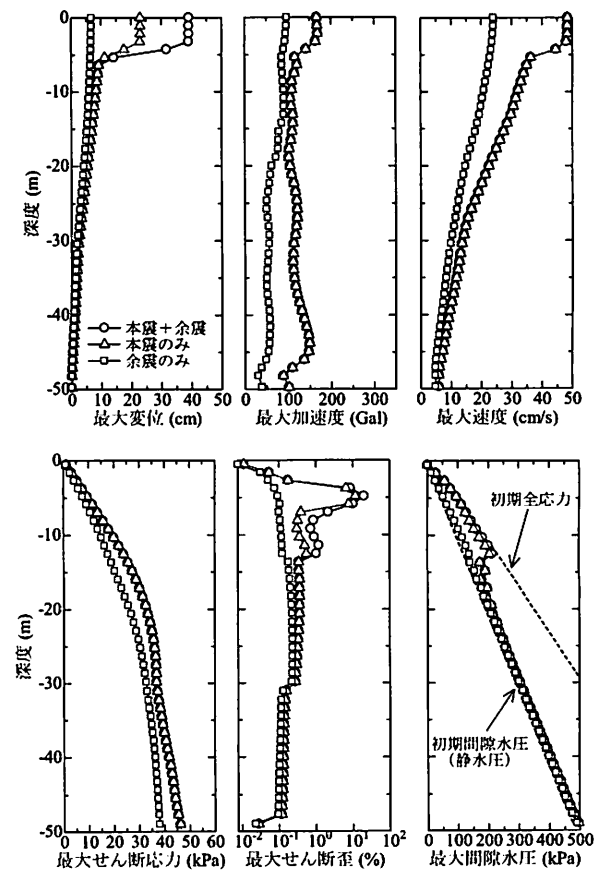


図-6 最大応答値の深度分布 ($k=2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

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As1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

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 ($2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$) 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

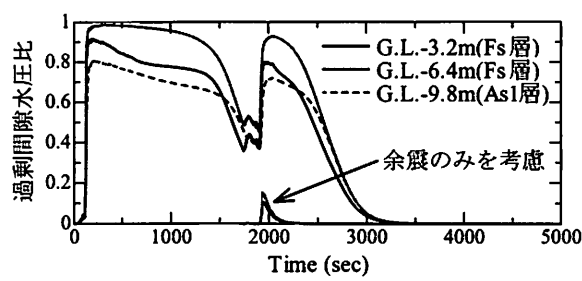


図-7 過剰間隙水圧比の時刻歴 ($k=2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)

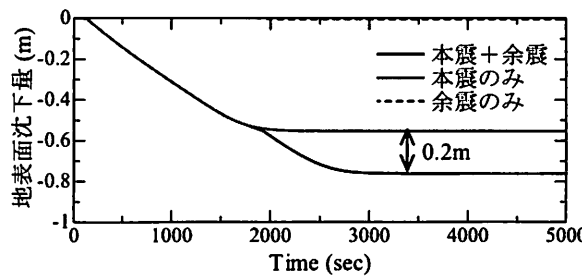


図-8 地表面沈下量の時刻歴 ($k=2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)

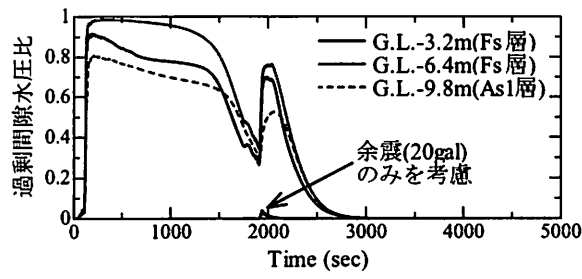


図-9 過剰間隙水圧比の時刻歴 (余震の最大振幅20gal, $k=2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)

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 $2.5 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ 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ス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($2.5 \times 10^{-6} \text{m/s}$)に、下部の細砂As1層については10倍($2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)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G.L.-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($k=2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)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、As1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

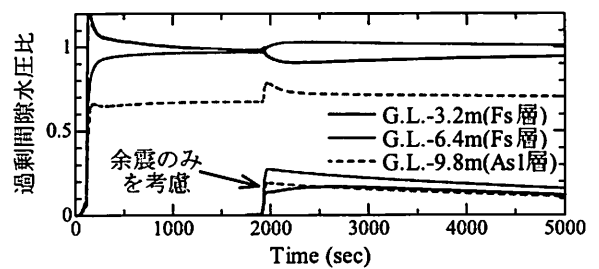


図-10 過剰間隙水圧比の時刻歴(液状化層上部(Fs層)が難透水性の場合)

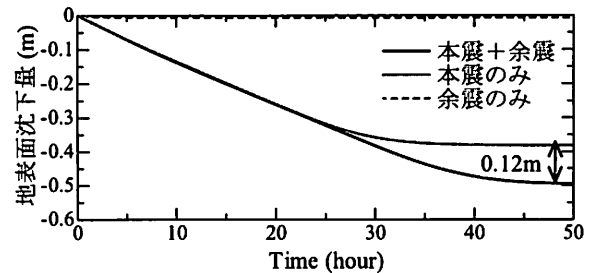


図-11 地表面沈下量の時刻歴(液状化層上部(Fs層)が難透水性の場合)

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、G.L.-3.2m付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 ($2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$) に、下部の細砂As1層については0.1倍 ($2.5 \times 10^{-6} \text{m/s}$) 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 ($k=2.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)、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As1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、As1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好のために地下水位面 (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、As1層の透水性が悪いために、As1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、As1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

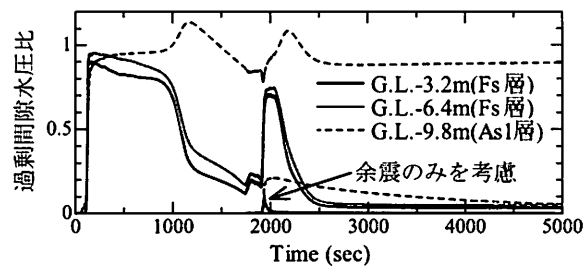


図-12 過剰間隙水圧比の時刻歴 (液状化層下部 (As1層) が難透水性の場合)

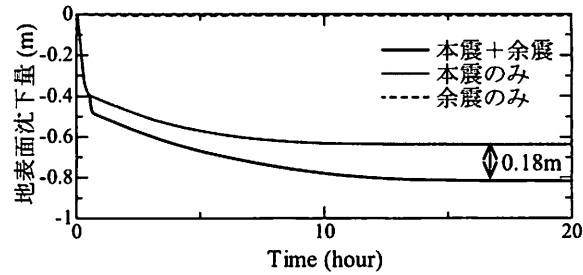


図-13 地表面沈下量の時刻歴 (液状化層下部 (As1層) が難透水性の場合)

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 (As1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、本震により比較的速度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。

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 $k=2.5 \times 10^{-3}$ m/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^{8), 9)}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

- 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) 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.
- 4) 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。
- 6) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，丸善出版，2004。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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.