

本震後の余震発生に伴う地盤の再液状化挙動の評価

鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
研究員 上田 恭平

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で液状化が広範囲にわたり発生した。浦安市入船中学校の防犯カメラの映像によると、本震時に液状化に伴う噴水・噴砂が発生し、さらに本震の約30分後に発生した余震時に再び液状化が生じて噴水・噴砂による被害の範囲が拡大する様子が確認された¹⁾。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0.8mにも及ぶ地表面沈下が発生した。このように地盤の液状化挙動を考える際に余震の影響が無視できない場合があるが、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。

そこで、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考慮できる地盤解析法を開発した。また、本手法により本震後の余震発生に伴う地盤の再液状化挙動について検討した結果、再液状化現象には余震発生時に残存する過剰間隙水圧比が大きく影響を及ぼすことがわかった²⁾。本報告では、解析手法の説明およびこれを用いた再液状化挙動の現象評価について述べる。

2. 過剰間隙水圧の上昇・消散を考慮した地盤解析手法の概要

新たに開発した水圧の上昇・消散過程を同時に考慮できる地盤解析法²⁾について述べる。図1(a)に示すように、飽和した地盤は土粒子と間隙水から構成される。地震動により繰返しせん断を受けて間隙水圧が上昇し、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。このとき、上昇した間隙水圧は徐々に地表面に向かい排水するが、従来は振動中は排水の影響は考慮せずに非排水条件で解析を実施していた。これは、地震動の継続時間と比較して間隙水が排水に要する時間が長いからであるが、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。本地盤解析法では図1(a)のようにある地盤領域を考えたとき、周囲の地盤への間隙水の流出および周囲の地盤からの間隙水の流入を考慮する(解析的には、土粒子と間隙水の混合体としての運動方程式と間隙水の収支バランス式を連成させて解く)こととした。振動中は排水効果が支配的でなく間隙水の流入出は

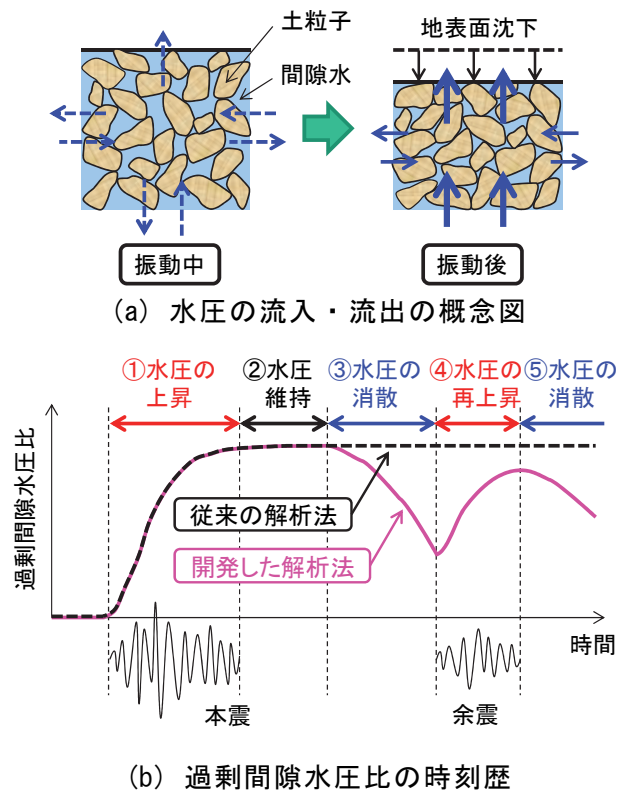


図1 開発した地盤解析法のイメージ

わずかであるが（図 1(a)の左図では破線で示してある）、振動後は地震動を受けて上昇した間隙水圧が地表面に向けて消散し、これに伴い地表面沈下が生じることとなる。

このような現象を本震・余震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影響を無視しているため、本震により上昇した間隙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。これに対して実際の現象では、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水の流入出を考慮しているため、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. 本震および余震を考慮した再液状化挙動の評価

(1) 解析における諸条件

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の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²⁾。解析では実際に液状化が生じた地点の地盤情報¹⁾を参考に、土柱モデルを図 2 のように設定した。このうち、地下水面下の埋立土 (Fs) 層と細砂 (As1) 層を液状化の可能性のある地盤として扱った。地盤の物性値は表 1 に示す値を用いた。ここに、初期せん断剛性はせん断波速度 V_s (m/s)と単位体積重量 γ (kN/m³)より、内部摩擦角は鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物³⁾に従い N 値より算定した。地盤の透水係数は土粒子の粒径から経験的に設定した²⁾。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特性²⁾を設定する必要がある。ここでは、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計⁴⁾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、それにフィッティングするようにパラメータを設定した。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)で後述する）。

次に、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、耐震設計上の基盤面まで引き戻した波形を図 4 に示す。本震は最大加速度が 100gal 程度とそ

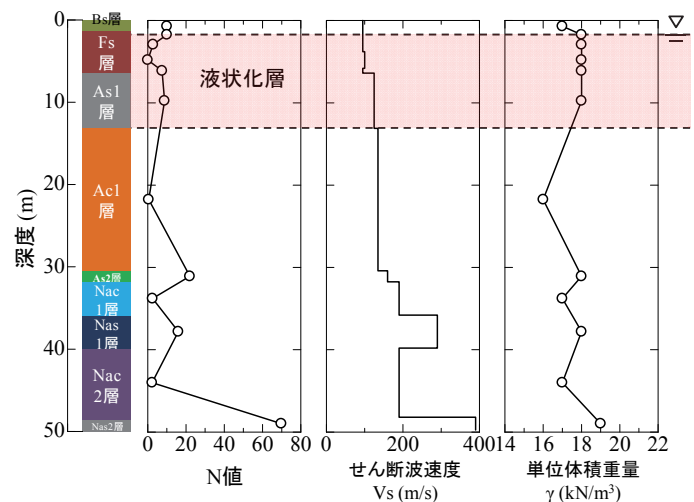


図 2 検討対象地盤のモデル図

表 1 解析に用いた地盤物性値

土層	単位体積重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (°)	初期体積剛性 (kPa)	初期せん断剛性 (kPa)	透水係数 (m/s)
Bs	17.3	32.2	39087	14988	-
Fs	18.3	31.1	43185	16560	2.5×10^{-5}
As1	18.3	31.3	73575	28213	2.5×10^{-5}
Ac1	16.3	27.7	75238	28851	2.5×10^{-8}
As2	18.3	32.2	124033	47561	2.5×10^{-4}
Nac	17.3	27.7	180768	69317	2.5×10^{-8}
Nas	18.3	30.1	720358	276228	2.5×10^{-6}

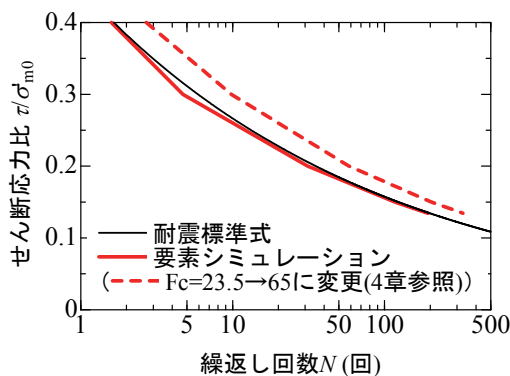


図 3 液状化強度曲線 (Fs 層)

れほど大きくないものの、継続時間が数百秒と長いのが特徴である。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の底面を粘性境界とし、図 4 に示す地震動波形を入力した。

(2) 余震を考慮した再現解析の結果

本震後の余震発生を考慮した地盤応答解析の結果について示す。図 5(a) は G.L.-6.4m (Fs 層) における過剰間隙水圧比 (液状化の程度を表す指標で、1.0 であれば完全液状化に相当する) の時刻歴であるが、本震時に過剰間隙水圧が 1.0 に至っており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減少する傾向にある。しかし、余震の発生までに水圧は完全には消散せず、過剰間隙水圧比が 0.5 程度残存した状態で余震が作用することで、水圧比が再び大きく上昇して再液状化が生じている。この結果は、浦安の現場の状況とも定性的に合致している。本震を経験せずに余震のみ作用させた場合の結果も図 5(a) 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ず、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。

地盤応答解析より得られた地表面位置での沈下量の時刻歴を図 5(b) に示す。本震を経験せずに余震と同規模の地震が作用する条件では、液状化に伴う地盤沈下はほとんど生じていない。一方、本震に続いて余震が作用する再現条件では、地盤の再液状化の影響により最終的な沈下量は本震のみを考慮した結果 (約 0.55m) よりも 0.2m 程度増大し、その値は観測された沈下量 (約 0.8m) と概ね合致した。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、地表面の沈下量が増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

(1) 地盤の透水性の影響

地盤特性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した。地盤の透水性の影響について考察するため、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を表 1 の 100 倍の値 ($2.5 \times 10^{-3} \text{m/s}$: きれいな礫に相当) に変更した。解析により得られた過剰間隙水圧比 (G.L.-6.4m (Fs 層)) の時刻歴を図 6 に示す。図 6(a) は本震時の時間軸を拡大したもので、図中のハッチングは入力地震動の加速度振幅が 10gal 以上 (≡ 振動中)

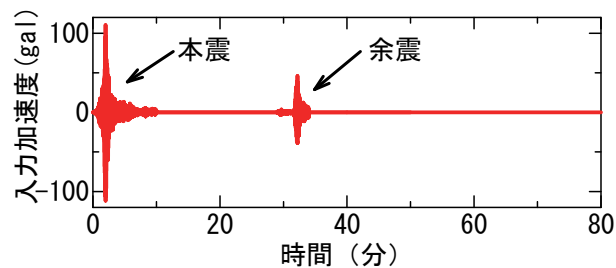
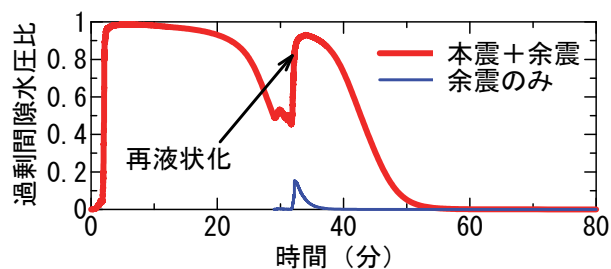
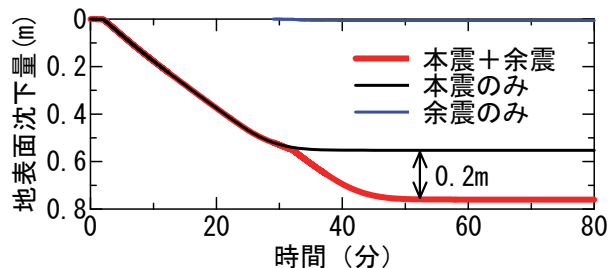


図 4 浦安基盤波 (EW 方向)



(a) 過剰間隙水圧比 (G.L.-6.4m (Fs 層))



(b) 地表面沈下量

図 5 本震・余震を考慮した解析の結果

であることを示す。透水係数が1倍（3章と同条件）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。また、図6(b)に示す通り、再現解析の条件では余震により過剰間隙水圧が大きく上昇して再液状化するのに対し、透水係数100倍のきれいな礫相当の地盤では余震発生までに水圧が完全に消散し、余震による再液状化が発生しない結果となった。

(2) 地盤の液状化強度の影響

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(Fs層)の細粒分含有率 F_c を23.5から65に変更して解析を実施した。このとき、液状化強度曲線は図3の破線となる。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に破線で示す。図中の実線(図5(a)の再掲)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程度に低減されている。余震発生時には水圧比が0.4程度まで消散しており、同じ余震が作用しても、余震時の水圧上昇が少なく再液状化の発生しやすさが異なることがわかる。

これらの結果より、本解析法を用いれば、地盤の再液状化のしやすさの相対評価も可能となる。

5. まとめ

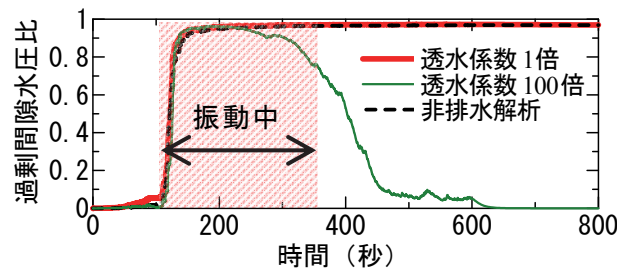
巨大地震を対象に余震の影響も含めた液状化地盤の変形量予測を行うため、地盤中の過剰間隙水圧の上昇だけでなく消散過程も併せて考慮できる地盤解析法を開発した。本震および余震を考慮して再液状化時の地盤挙動について検討した結果、本震時に一度液状化状態を経験することで、仮に余震の加速度振幅が小さくても、過剰間隙水圧の再上昇(再液状化)や沈下量の増大に及ぼす影響が無視できないことが明らかになった。

本手法と別途開発した「余震を含んだ時系列地震動群の予測手法」を組合せれば、本震から余震発生までの時間間隔と余震の規模が再液状化の可能性に及ぼす影響について評価可能となる。

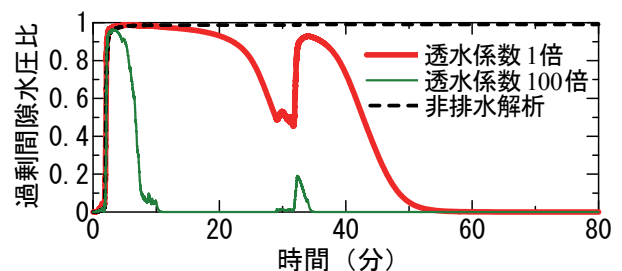
謝辞：防災科学技術研究所のK-NETの強震記録を使用させて頂いた。ここに記して謝意を表す。

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) 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：第33回地震工学研究発表会講演論文集，2-425，2013。
- 3) (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。
- 4) (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。



(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 (G.L.-6.4m (Fs層))

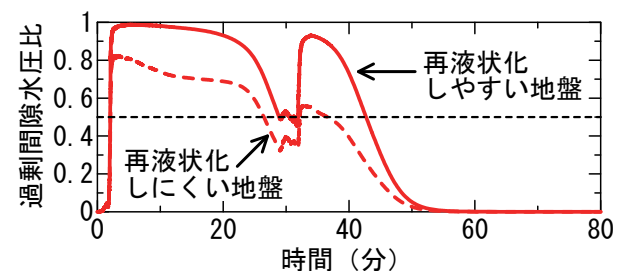


図7 異なる地盤条件での解析結果