

本震後の余震の発生が地盤の再液状化挙動に及ぼす影響について

鉄道総合技術研究所 正会員 ○上田 恭平
正会員 井澤 淳
正会員 室野 剛隆

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において、大規模な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おいて再び液状化が生じることで（再液状化）、噴水・噴砂の範囲が拡大する様子が確認された¹⁾。このような液状化危険度を評価する方法としては、地盤中の過剰間隙水圧の変動を直接的に評価できる有効応力解析法が挙げられるが、長継続時間地震動や余震を対象とする場合には地盤中の間隙水の移流の影響を適切に評価する必要がある。そこで、本論文では透水の影響を考慮できる有効応力解析法を用い、本震後の余震が地盤の再液状化にどのような影響を与えるかについて検討した。

2. 有効応力解析の概要

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、1次元有効応力解析に用いる地盤モデルを図1のように設定した。解析では、地下水位以下の埋立土Fs層と細砂As1層を液状化の可能性がある地盤として扱うこととした。地盤はひずみ空間多重せん断モデル²⁾を用いてモデル化し、運動方程式および水流の収支バランス式としてu-p formulation³⁾を採用することで間隙水の透水性を考慮した。表1に解析に用いた地盤のモデルパラメータを示す。せん断剛性Gと内部摩擦角φは、せん断波速度VsとN値より経験的に決定した。透水係数kも実測値がないため、一般的な値を用いることとした⁴⁾。また、液状化の発生に寄与するダイレイタンシパラメータは、耐震標準⁵⁾に示す方法で算定した液状化強度曲線にフィッティングするように設定した。図2に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）を基盤に引き戻した波形を示す。本震は最大加速度が約100gal程度の小さな値であるが、継続時間が数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で、本震よりもさらに小さい。解析では底面を粘性境界とし、図2の地震動波形を入力した。

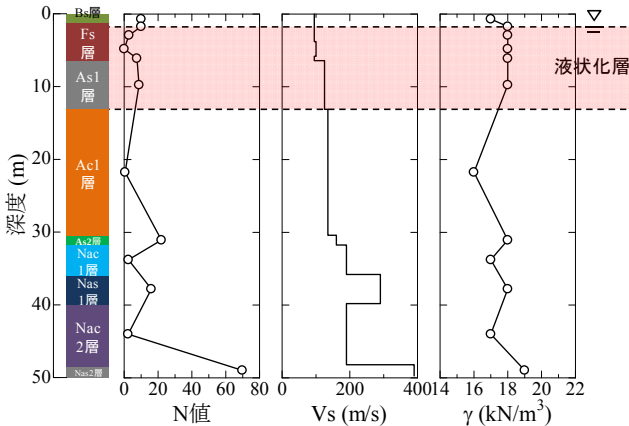


図1 検討対象地盤のモデル図

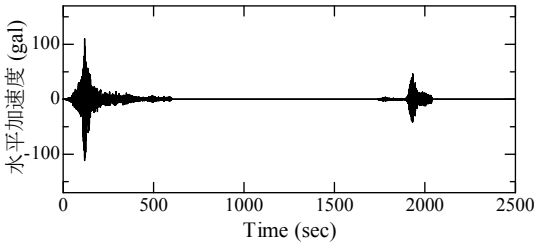


図2 浦安基盤波（EW方向）

表1 液状化層の諸元

	G (kPa)	k (m/s)	φ (°)	ダイレイタンシパラメータ							
				φ _p	ε _{dcm}	r _{edc}	r _{ed}	r _k	q ₁	q ₂	c ₁
Fs	31800	1×10 ⁻⁵	31.1	28.0	0.35	1.38	0.35	0.28	1.0	0.5	1.71
As1	36500	1×10 ⁻⁵	31.3	28.0	0.55	1.40	0.45	0.18	1.0	0.5	1.72

3. 地盤の液状化に及ぼす余震の影響

解析により得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を図3に示す。いずれの深度においても本震時に過剰間隙水圧が上昇し、特にGL. -6.4mでは水圧比がほぼ1.0となり顕著な液状化の発生が示唆される。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

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

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7394

る。しかし、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。この結果は、冒頭に述べた入船中学校の事例とも定性的に合致するものである。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3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に過剰間隙水圧比の上昇はほとんど見られない。以上より、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ことが確認された。

次に、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を図4に示す。余震の大きさが低減されているため、図3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ほぼ水圧の上昇が見られない。

なお、本検討で用いた地盤の構成モデル²⁾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増加される。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。

最後に、図2の波形を入力波とした場合の地表面沈下量の時刻歴を図5に示す。本震+余震により最終的に約0.76mの沈下が生じているが、これは本震のみを考慮した結果(約0.55m)よりも約0.2m大きな値である。余震のみを考慮した場合には沈下がほぼ生じていないことから、本震により一旦液状化を経験した地盤では、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が増大する可能性が高くなることが確認された。

4. まとめ

本震後に発生する余震が地盤の再液状化に及ぼす影響を調べるため、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、本震時に一旦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、過剰間隙水圧比の再上昇や沈下量の増大に及ぼす影響が無視できないことがわかった。なお、既往の研究^{6),7)}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。

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) Iai et al.: 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。3) Zienkiewicz et al.: Soil and other saturated media under transient, dynamic conditions, Soil Mechanics -Transient and Cyclic Loads, John Wiley&Sons, pp. 1-16, 1982。4) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，丸善出版，2004。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 耐震設計，丸善出版，2012。6) 鈴木ら：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。7) Yamada et al.: Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, Soils and Foundations, Vol. 50(1), pp. 9-25, 2010。

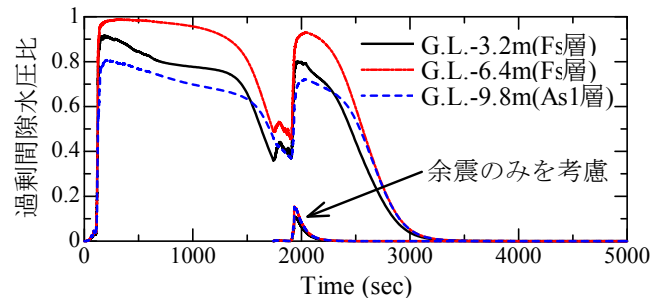


図3 過剰間隙水圧比の時刻歴

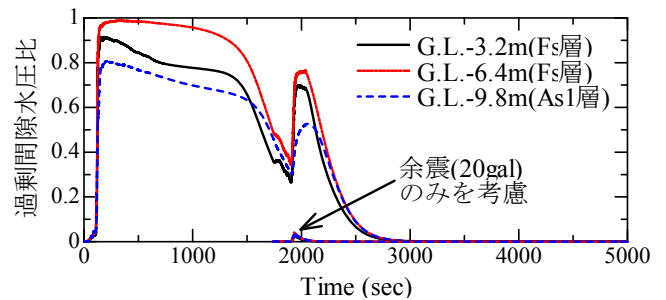


図4 過剰間隙水圧比の時刻歴(余震振幅20gal)

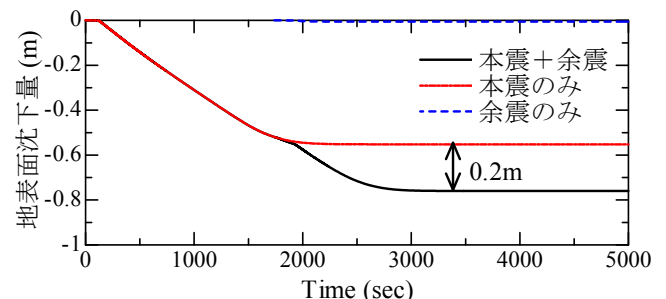


図5 地表面沈下量の時刻歴