

スウェーデン式サウンディング試験結果を用いた液状化判定法に関する研究

- 東北地方太平洋沖地震時における液状化事例を対象とした検討 -

日大生産工 (学部) ○神谷奎吾 日大生産工 下村修一
 日大・短期 (准教授) 酒匂教明 西松建設 熊田健太

1. はじめに

スウェーデン式サウンディング試験(以下、SWS 試験)結果である N_{sw} 値で液状化判定を行う場合、現在は N_{sw} 値を稲田式¹⁾や建築基準整備促進事業の提案式²⁾等を用いて N 値に換算してから判定している。しかし、この方法では評価結果に大きなばらつきを有していることから、本研究では N_{sw} 値から直接液状化判定を行う方法の構築を目的とした。

本論文では東北地方太平洋沖地震(以下、当該地震)の液状化被害が記録されている地点を対象に、観測地震波を用いて SHAKE³⁾により地中せん断応力比と有効上載圧 σ_v で規準化した N_{sw1} 値の関係を求め、 N_{sw} 値から液状化抵抗比を推定する方法を検討した結果を報告する。

2. 検討サイト

本研究では、文献²⁾で当該地震の液状化被害が報告されているサイトと独自に収集したデータを検討対象とした。

表 1 に検討サイトの一覧、図 1 に各サイトと検討に用いた強震記録観測点の位置関係を示す。各サイトでは、標準貫入試験及び SWS 試験が実施されており、地盤構成・地下水位・細粒分含有率が明らかである。表 1 には地表面の変状等を根拠とした液状化被害の程度、さらに参考としてサイト近傍で観測された地表面最大加速度の値⁴⁾を示した。

3. 検討条件

本検討では SWS 試験の適用範囲を鑑み、GL-10m 以浅の砂質土($F_c \leq 50\%$)を対象にした。当該地震で発生した等価な繰返しせん断応力比は、SHAKE³⁾による全応力解析で推定した。初期せん断剛性 G_0 は、各層の N 値から推定したせん断波速度 V_s ⁵⁾と文献⁶⁾を参考に設定した地盤の湿潤単位体積重量 γ_t から算出した。

表 1 検討サイト一覧

No.	サイト		被害程度	PGA(m/s ²)	強震記録
	名称	地域			
1	UYS	浦安, 千葉県	■	1.57 [CHB008]	A
2	IRF	浦安, 千葉県	●	1.57 [CHB008]	A
3	HND	浦安, 千葉県	●	1.57 [CHB008]	A
4	HDM	浦安, 千葉県	○	1.57 [CHB008]	A
5	MEK	浦安, 千葉県	○	1.57 [CHB008]	A
6	TSC	浦安, 千葉県	●	1.57 [CHB008]	A
7	UTC	浦安, 千葉県	●	1.57 [CHB008]	A
8	TSK	浦安, 千葉県	■	1.57 [CHB008]	A
9	NRS-3	習志野, 千葉県	●	2.32 [CHB024]	A
10	EDG	江戸川, 東京都	○	2.12 [TKY027]	A
11	SKW	葛飾, 東京都	○	1.33 [TKY024]	A
12	WKB	葛飾, 東京都	■	2.34 [CHB002]	A
13	HKM7	葛飾, 東京都	■	2.34 [CHB002]	A
14	KUK-1	久喜, 埼玉県	■	2.02 [SIT003]	B
15	KTR-1	香取, 千葉県	●	3.01 [CHB004]	C
16	SB-5	香取, 千葉県	●	3.01 [CHB004]	C
17	SB-9	香取, 千葉県	○	3.01 [CHB004]	C
18	SB-11	香取, 千葉県	○	3.01 [CHB004]	C
19	KTRK	香取, 千葉県	●	3.01 [CHB004]	C
20	TB-14	香取, 千葉県	●	3.01 [CHB004]	C
21	ITK-1	潮来, 茨城県	■	3.01 [CHB004]	C
22	ITK-21	潮来, 茨城県	●	3.01 [CHB004]	C
23	ITK-22	潮来, 茨城県	●	3.01 [CHB004]	C
24	ITK-23	潮来, 茨城県	●	3.01 [CHB004]	C
25	ITK-25	潮来, 茨城県	●	3.01 [CHB004]	C
26	KMSH	神栖, 茨城県	●	2.16 [IBRH20]	D
27	KMS-1	神栖, 茨城県	■	2.16 [IBRH20]	D
28	KMS-4	神栖, 茨城県	●	2.16 [IBRH20]	D
29	KMST	神栖, 茨城県	●	2.16 [IBRH20]	D
30	KMS-10	神栖, 茨城県	■	2.16 [IBRH20]	D

凡例 (●): 液状化大・中, (■): 液状化小, (○): 液状化なし



図 1 検討サイトと強震記録観測点の位置関係

Study on evaluation of liquefaction potential using Swedish weight sounding test result
 - Discussion based on liquefaction damage records during The 2011 off Pacific coast of Tohoku Earthquake -

Keigo KAMIYA, Shuichi SHIMOMURA, Noriaki SAKO and Kenta KUMADA

土の非線形特性には双曲線モデルを用い、規準せん断ひずみ $\gamma_{0.5}$ 、最大減衰定数 h_{max} 及び初期減衰定数 h の値は文献⁵⁾を参考にし、静止土圧係数 $K_0=0.5$ とした。工学的基盤は $V_s=350m/s$ 程度以上の層とし、工学的基盤までの地盤情報が得られていないサイトは、近傍の柱状図^{7),8)}で補完した。計算は NS・EW 成分のそれぞれで実施し、2 成分で大きい方のせん断応力振幅 τ_d を同一深度の有効上載圧 σ_v で除した値に、等価な繰返し回数に関する補正係数 ($\gamma_n=0.1(M \cdot 1)$ 、 M :マグニチュード)を乗じて検討に用いる地中せん断応力比とした。

入力波(2E)は各サイト近傍の強震記録を用いて SHAKE³⁾による全応力解析で工学的基盤相当の地震波として推定し、NS・EW 成分のそれぞれについて求めた。なお、各パラメータは観測点の情報を用いることを原則とするが、情報がない場合は関連文献または各サイトの地中せん断応力比の算出時と同様とした。

図 2~5 に各観測点の地盤モデル、観測波及び推定した入力波の時刻歴を示す。

a) 夢の島観測所⁹⁾

図 1a)の東京湾沿岸部にある夢の島観測所では、図 2 に示した GL-89.5m で当該地震の強震記録が得られている。図 2 に示す地盤モデルは、Ishihara et al.¹⁰⁾を参照した。層上面深さ GL-50.2m の地層は $V_s=560m/s$ であり、工学的基盤とみなせる。そこで図 2 の GL-89.5m の地中観測記録(E+F)を用いて GL-50.2m の工学的基盤における入力波(2E)を推定した。

b) 小川観測所¹¹⁾

図 1b)の埼玉県中部にある小川観測所では、GL-11m で当該地震の強震記録が得られている。図 3 の地盤モデル¹²⁾より GL-11m の地層は $V_s=2100m/s$ であり、工学的基盤とみなせる。そこで図 3 をそのまま入力波(2E)とした。

c) K-NET 佐原⁴⁾

図 1c)の K-NET 佐原では、図 4 に示した地表面での強震記録が得られ、地盤モデルは公開データ⁹⁾を参考にした。層上面深さ GL-13m の地層は $V_s=495m/s$ であり、工学的基盤とみなせる。そこで地表面観測記録(E+F)を用いて GL-13m の工学的基盤面における入力波(2E)を推定した。

d) KiK-NET 波崎²⁴⁾

図 1d)の KiK-NET 波崎 2 では鉛直アレー強震観測所であるが、当該地震の強震記録は図 5 に示した地表面のみ公開されている。当該地点では表層地盤の詳細なデータが公開されていないため、図 5 の地盤モデルは近傍の柱状図¹²⁾に拠った。 V_s 及び γ_t の設定は地中せん断応

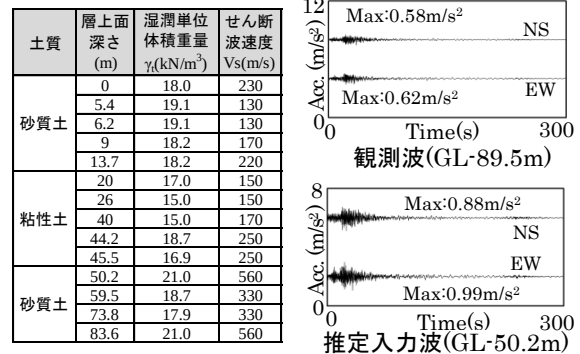


図 2 夢の島観測所の地盤モデルと地震

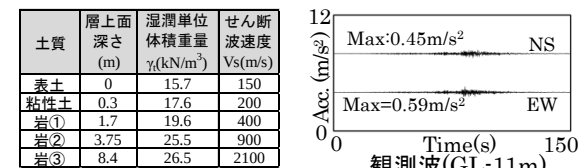


図 3 小川観測所の地盤モデルと地震波(B)

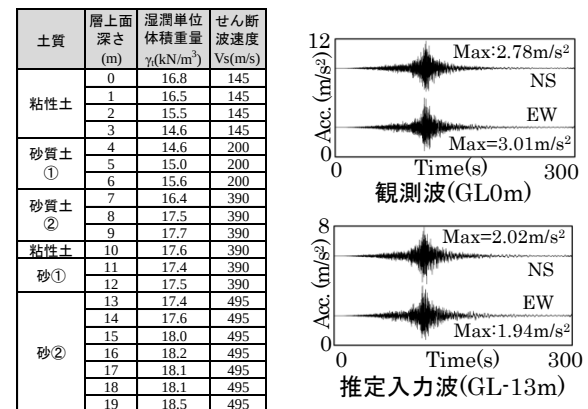


図 4 K-NET 佐原の地盤モデルと地震波(C)

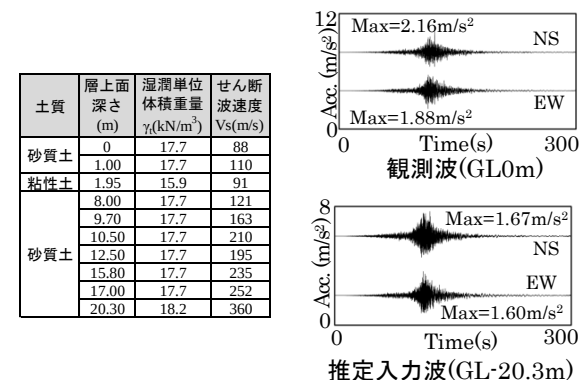


図 5 Kik-NET 波崎 2 の地盤モデルと地震波(D)

力比の算出方法と同様とした。層上面深さ GL-20.3m の地層は $V_s=360m/s$ であり、工学的基盤とみなせる。そこで地表面観測記録(E+F)を用いて工学的基盤面における入力波(2E)を推定した。

4. 検討結果

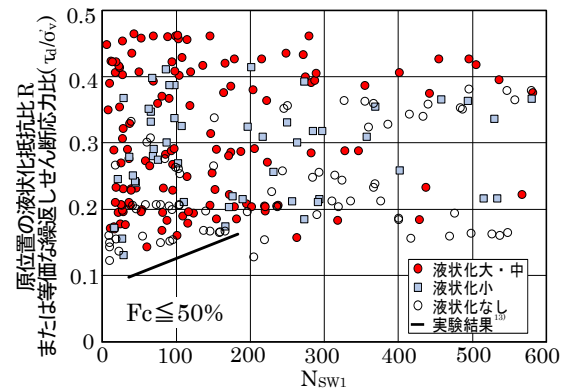
図6に地中せん断応力比と N_{SW1} の関係を示す。ここで N_{SW1} は各プロットの N_{SW} を有効上載圧 $\sigma'_v=98\text{kPa}$ に換算した時の値である。また文献¹³⁾の加圧土槽実験及び繰返し三軸試験による結果から得られた液状化抵抗比 R と N_{SW1} の関係を併記した。図6a)は文献¹³⁾と同様に、建築基礎構造設計指針(以下、基礎指針)に示される地表面加速度を深度方向に低減させる方法で評価した地中せん断応力比、図6b)は **SHAKE**³⁾から求めた地中せん断応力比を用いている。

図6a)を見ると、「液状化大・中」及び「液状化小」と「液状化なし」のプロットは混在し、液状化発生の有無の明確な境界は認められない。一方、図6b)を見ると「液状化大・中」及び「液状化小」のプロットが「液状化なし」よりも上方に位置し、図6a)と比べて液状化発生の有無の境界は明瞭になっていることが分かる。そこで同図には、実験結果を拡張し「液状化大・中」及び「液状化小」と「液状化なし」の境界から判断される境界を破線で示した。破線は $N_{SW1}=450$ 程度で地中せん断応力比を一定にしている。基礎指針⁶⁾に見られる補正 N 値と液状化抵抗比の関係は補正 N 値が大きいほど急増する傾向にある。一方、 N 値と N_{SW} の関係²⁾は比例関係になく、 N 値の高い密な地盤では N_{SW} による N 値の評価値にも限界が認められる。すなわち、SWS 試験の適用範囲内では液状化抵抗比 R に限界があると考えられ、図6b)のプロットからもその傾向がうかがえることから、SWS 試験で評価可能な R は 0.27 までとした。

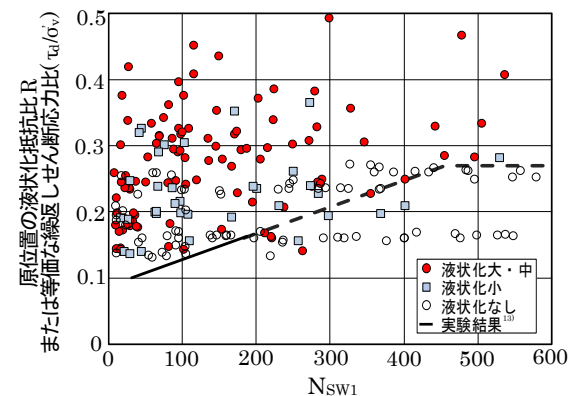
5. 細粒分含有率 F_c による影響

基礎指針⁶⁾では、地盤の液状化抵抗比は細粒分含有率 F_c が大きくなると、同じ N 値でも大きくなることを考慮し、細粒分含有率 F_c の影響を N_1 値に補正值 ΔN_f を加えることで考慮している。そこで図6b)の関係について、細粒分含有率 F_c による影響の補正を試みた。

図7に図6b)の関係を細粒分含有率 F_c が $0\% \leq F_c \leq 10\%$ と $10\% < F_c \leq 50\%$ で区分した関係を示す。同図には図6b)の境界線を実線で併記した。図7a)より、ほとんどの「液状化大・中」のプロットが境界線よりも上方に位置している。「液状化大・中」のプロットが境界線を下回る割合(全プロット数に対する境界線の下側に位置するプロット数)は、7.8%である。一方、細粒分含有率 F_c の大きいデータを対象とした図7b)は、全ての「液状化大・中」のプロットが境界線の上方にある。また図7a)に比べて、 N_{SW1} が小さい範囲では、「液状化なし」のプロ

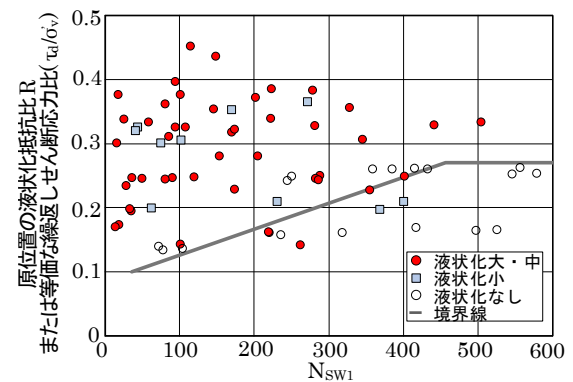


a) 地表面加速度での評価

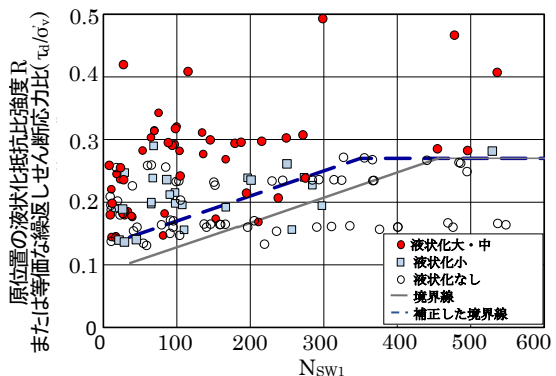


b) SHAKE での評価

図6 等価な繰返しせん断応力比 τ_d / σ'_v と N_{SW1} の関係



a) $0\% \leq F_c \leq 10\%$



b) $10\% < F_c \leq 50\%$

図7 細粒分含有率で分けた等価な繰返しせん断応力比 τ_d / σ'_v と N_{SW1} の関係

ットが境界線の上方に多数分布している。このことから、細粒分含有率 F_c が大きい場合には液状化発生の有無の境界は、細粒分含有率 $F_c=0\%$ の実験結果から評価した境界線よりも上方にあることを示唆していると考えられる。

「液状化大・中」のプロットが境界線を下回る割合を図 7a) と同程度まで許容して、境界線を左側に平行移動すると図 7b) の破線になる。

平行移動分の N_{sw1} を N_{sw} の細粒分含有率 F_c による補正係数 ΔN_{swf} とし、細粒分含有率 F_c と補正係数 ΔN_{swf} の関係を求めた。 ΔN_{swf} は、図 7a) より $F_c \leq 10\%$ の時は $\Delta N_{swf}=0$ 、 $10\% < F_c \leq 50\%$ ではその中央値である $F_c=30\%$ の時に $\Delta N_{swf}=100$ となるよう $10\% < F_c \leq 30\%$ では F_c と ΔN_{swf} は比例関係とし、 $30\% < F_c \leq 50\%$ では $\Delta N_{swf}=100$ とした。

図 8 に基づき $N_{swa}(=N_{sw1} + \Delta N_{swf})$ として図 6b) の各プロットを補正した。図 9 に地中せん断応力比と N_{swa} の関係を示す。同図より、図 6b) と比べて境界線は液状化発生の有無の境界を明瞭に表し、 N_{sw} についても細粒分を考慮した液状化抵抗比 R を評価できる可能性が認められる。

6. おわりに

本研究では近傍の地震観測記録を用いて、各サイトの工学的基盤面での入力波を推定し、SHAKE による全応力解析で評価した地中せん断応力比と N_{sw} の関係を検討した。その結果、有効上載圧 σ_v に加えて細粒分含有率 F_c による補正を行うことで N_{sw} から原位置液状化抵抗比を一意的に評価できる可能性を示した。しかしながら、細粒分含有率 F_c による補正係数については細粒分を含む試料土の実験データに基づく検証が必要である。また、他の地震被害による検証を行い、評価法を確立する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16K06597 の助成を受けたものである。本研究を行うにあたり、実測記録は東京ソイルリサーチの吉田正氏・一条工務店の品川恭一氏・報国エンジニアリングの小川正宏氏にご提供頂きました。また本検討には、防災科学技術研究所・千葉県地質環境インフォメーションバンク・東京都港湾局地震観測所・12 電力会社のデータを使用し、地震応答解析プログラムには株式会社地震工学研究所の「microSHAKE/3Dver.2」を用いました。ここに記して謝意を表します。

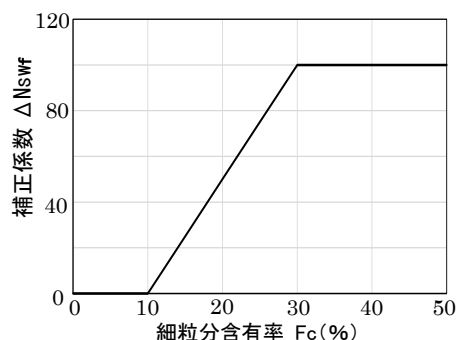


図 8 細粒分含有率 (F_c) と補正係数 (ΔN_{swf}) の関係

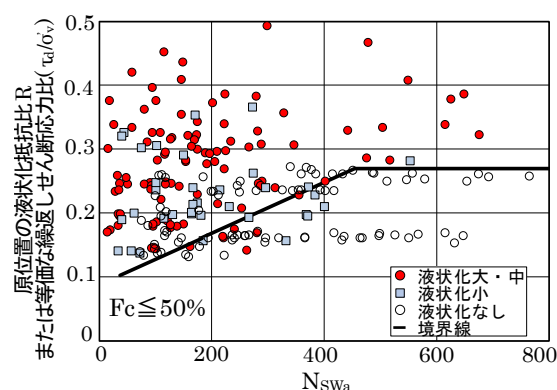


図 9 等価な繰返しせん断応力比 τ_d/σ_v と N_{swa} の関係

【参考文献】

- 1) 稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎，Vol.18，No.1，pp.15-18,1960
- 2) 東京ソイルリサーチほか：平成 25 年度建築基準整備促進事業「小規模建築物に適用する簡易な液状化判定手法の検討」の報告書，2014.3
- 3) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, College of Engineering, Univ. of California, 1972
- 4) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-NET), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2017.1.20 参照)
- 5) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，2006.2
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10
- 7) 地盤工学会：新・関東の地盤 増補地盤情報データベースと地盤モデル付，2014.6
- 8) 千葉県庁：千葉県地質環境インフォメーションバンク，<https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/chishitsu.html> (2017.1.23 参照)
- 9) 東京都港湾局：東京都港湾局地震観測所，<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/keiyaku/kisojoho/jishindou.html> (2017.1.20 参照)
- 10) Ishihara ら：IN-SITU PORE WATER PRESSURES AND GROUND MOTIONS DURING THE 1987 CHIBA-TOHO-OKI EARTHQUAKE, Soils and Foundations, Vol.29, No.4, pp.75-90, 1989.12
- 11) 12 電力会社：「南関東・福島県太平洋沿岸における岩盤の鉛直アレー観測網「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」の本震・余震等の加速度時刻歴波形データ」
- 12) 地盤工学会：新・関東の地盤 増補地盤情報データベースと地盤モデル付，2014.6
- 13) 熊田、酒匂ら：液状化強度を推定するためのスウェーデン式サウンディング試験に関する研究その 2・3 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，構造 I, pp.555-558, 2016.8