

せん断波速度 V_s を利用した新しい液状化強度の推定法とその適用性検証

東京大学 ○清田隆 1*
片桐俊彦 2*
志賀正崇 3*

三軸液状化試験 液状化強度比 せん断波速度
液状化判定 年代効果 土粒子構造

研究の目的

N 値を用いた従来の簡易液状化判定法では、実際の液状化強度を極端に安全側に評価することが 2011 年東北地方太平洋沖地震後の調査で指摘されている¹⁾。また、一般的なサンプリング手法による不攪乱試料を用いた液状化試験結果は、供試体の乱れの影響を大きく受ける²⁾。このような現行の液状化強度予測手法の課題に対し、清田ら^{3,4)}は土粒子構造が液状化強度に及ぼす影響をせん断波速度 V_s で評価できることを示し、原位置試験と再構成試料を用いた室内試験で計測される V_s を利用して原位置液状化強度を評価する手法（以降、提案手法と称する）を開発した。本研究では、この提案手法をより多様な地盤に適用させること、および実務への適用性を検証することを目的とする。

研究の内容

本研究では、具体的に以下の内容を検討した。

- ① 既往研究^{3,4)}では、液状化強度 CRR と V_s の相関について、応力履歴により土粒子構造を変化させた供試体を対象に求めているが、堆積環境の違い等に起因するより極端な土粒子構造の変化については言及されていない。そこで本研究では、作製方法を変化させた供試体を用いた一連の実験を実施し、既往研究と比較した。
- ② 既往研究^{3,4)}の $CRR-V_s$ 関係は、豊浦砂等の限られた試料を中心とする実験で示された。本研究では東京湾臨海部で採取された沖積砂質土、および火山灰質土を対象に一連の実験を実施し、既往研究と比較した。
- ③ 過去の地震で液状化の発生が確認されていないにもかかわらず、簡易液状化判定手法では液状化と判定される地盤を対象に、採取試料を用いた一連の室内試験を実施して提案手法の適用性を検討した。

実験方法

供試体作製方法の影響（研究内容①）は豊浦砂を用い、動締固め法と湿潤突き固め法により異なる土粒子構造を有する供試体を作製した。異なる地盤材料への適用性（研究内容②）を検討した試料（沖積砂 1・火山灰質土）については、異なる過圧密履歴を与えることで土粒子構造の変化を期待した。また、提案手法の適用性検討（研究内容③）は、沖積砂 2 と火山灰質土を対象に実施した。

本研究では、応力制御式とひずみ制御式の三軸載荷装置を用いた。所定の有効拘束圧まで等方圧密後、T&A 法、

もしくはベンダーエレメント法により、供試体を伝搬する V_s を計測した。その後、応力振幅一定の非排水三軸繰り返し試験（液状化試験）を実施した。

研究成果

(1) $CRR-V_s$ 関係に及ぼす供試体の諸条件

a) 供試体作製方法の影響

本研究で実施した振動締固め法、湿潤突き固め法で作製された供試体の V_s 計測および液状化試験結果に加え、空中落下法で作成され異なるせん断履歴を受けた供試体の結果⁴⁾を合わせた V_s-CRR 関係を図 1 に示す。液状化強度 CRR と V_s は、空中落下法、振動法、湿潤突き固め法の順番で大きくなっており、同じ密度でも異なる供試体作製方法で作成されたことによる土粒子構造の違いが、実験結果に大きく反映されている。 V_s と CRR は良い相関を示しており、指数関数でフィッティングした場合のべき数は 5.27 と、既往研究⁴⁾が示す値とほぼ整合する。この結果は、供試体作製方法や応力履歴の違いによらず、液状化前の供試体の土粒子構造の違いが V_s と CRR に及ぼす影響は、一意的に表されることを示唆している。

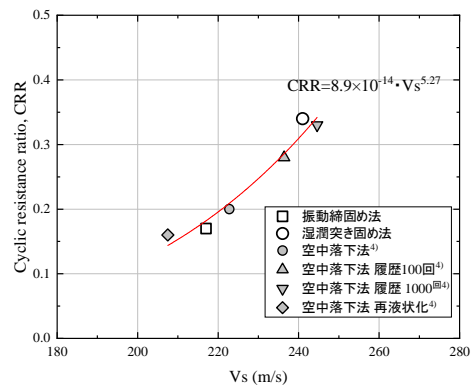


図 1 豊浦砂の V_s と液状化強度 CRR の関係

b) 異なる地盤材料の影響

研究内容②の検討のため、東京湾臨海部（川崎市）で採取した砂質土（沖積砂質土 1）、および北海道美幌町地内から採取した火山灰質土を対象に、所定の密度において過圧密履歴により土粒子構造を変化させた供試体を用いて、一連の V_s 計測と液状化試験を実施した。

図 2 に沖積砂質土 1 の液状化強度曲線を示す。供試体密度は同等であるが、 OCR が大きくなると CRR 、 V_s 共に大きくなることが確認され、過圧密履歴により土粒子構造が強化されたことが示唆される。同様の傾向は火山灰質

土でも確認された。また、それぞれの試料の $OCR=1$ の結果で正規化した V_s-CRR 関係について、既往研究⁴⁾の結果と合わせたものを図3に示す。沖積砂質土1、火山灰質土ともに既往研究の示す傾向と整合することが確認された。本研究で用いた火山灰質土は、実験前後で有意な破碎性は確認されなかった。現時点では、土粒子の破碎性が $V_s/V_s^*-CRR/CRR^*$ 関係に及ぼす影響は明らかではないが、火山灰質土であっても破碎性を示さない限りは、提案手法、即ち室内試験と原位置試験による V_s を用いて原位置液状化強度を推定できる可能性がある。

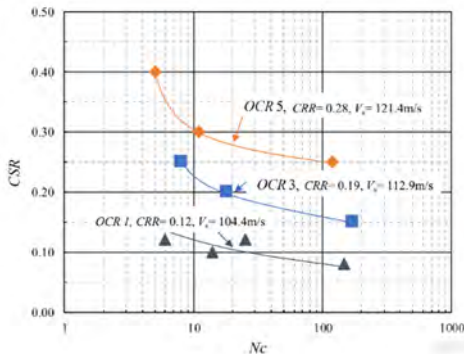


図2 沖積砂質土1の液状化強度曲線

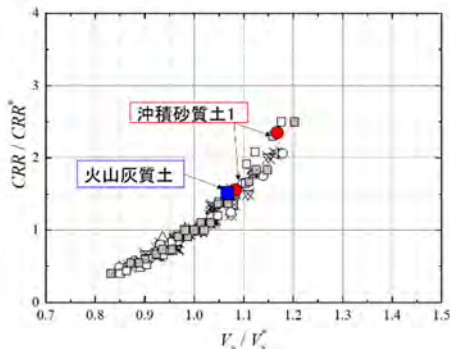


図3 $V_s/V_s^*-CRR/CRR^*$ 関係 (既往研究⁴⁾に加筆)

(2) 液状化強度予測に関する提案手法の検証

2011年東北地方太平洋沖地震において、従来の簡易液状化判定手法(道路橋示方書)では液状化と判定されたが実際はその痕跡が確認されなかった東京都葛飾区地内の江戸川河川敷を対象に、提案手法(図4)の検証を行った(研究内容③)。検討に利用した地表面水平加速度は、262galである。また、本研究では簡易判定法でFL値が0.24と最も低かったGL-7.5mの沖積砂質土を対象に検討を実施した。

図4のフローに従い、標準貫入試験により採取された攪乱試料を用い、原位置密度($\rho_d=1.44g/cm^3$)と同等になるように調整した再構成試料において、原地盤の有効上載圧を考慮した圧力($\sigma'_v=50kPa$)で等方圧密後、 V_s 計測と液状化試験を実施した。提案手法では、原位置液状化強

度 CRR は、室内試験による液状化強度 CRR^* とせん断波速度 V_s^* 、および原位置PS検層より求まるせん断波速度 V_s を用いて図4中の式で示される。

この結果、原位置液状化強度 CRR は0.42と見積もられ、検討対象深度ではFL=0.99となった。これは当該地点で東北地応太平洋沖地震時に液状化の痕跡が確認されなかった事実を反映しており、従来の簡易判定と比べて現実的な値であると言える。

本提案手法は、N値のみでは評価できない原地盤が有する土粒子構造(かみ合わせ効果)が液状化強度に及ぼす影響を、 V_s を利用して評価することを特徴とするものである。本研究では上述の沖積砂質土のほか、2003年十勝沖地震を対象とした火山灰質土の事例を検討したが、いずれも提案手法の妥当性を示す結果が得られた。

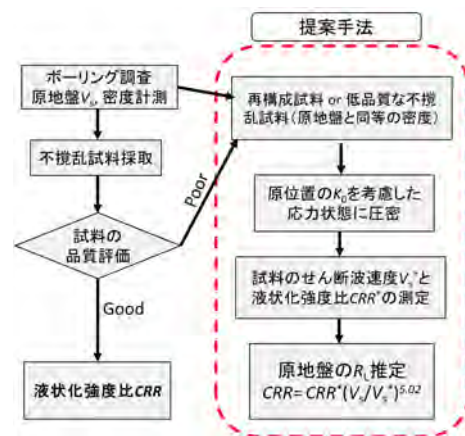


図4 V_s を利用した液状化強度推定法の手順⁴⁾

まとめ

同じ密度で土粒子構造が異なる地盤の液状化強度とせん断波速度の関係は、様々な堆積環境や地盤種別に対しても一意的に説明できる可能性が示された。また、原位置の液状化強度を推定する提案手法を、既往地震(2011年東北地方太平洋沖地震・2003年北海道十勝沖地震)の非液状化事例に適用した結果、従来の簡易判定手法では液状化すると判定される原地盤の液状化強度を適切に評価することができた。

謝辞

本研究は、一般社団法人大成学術財団の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 土木研究所資料, 第4280号, 2014.
- 2) Yoshimi et al., Geotechnique, 44 (3), 479-494, 1994.
- 3) 清田ら, 地盤工学ジャーナル, 12 (4), 375-383, 2017.
- 4) Kiyota et al., Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 117, 164-173, 2019.

1*東京大学 生産技術研究所・准教授

2*同・技術職員 3*同・大学院生(博士課程)

* Institute of Industrial Science, University of Tokyo