

液状化判定法の課題と新しい原位置試験法の開発の取組み

谷本俊輔・大坪正英・佐々木哲也

1. はじめに

各種土木構造物の耐震設計に共通して用いられる地盤の液状化判定法は、昭和 39 年新潟地震を契機として開発された後、平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震や平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等による震災経験を踏まえ、数々の改良がなされて今日に至っている^{1),2),3),4)}。現在の判定法は、危険側の評価を与える（リスクを小さく見積もる）ことはない一方、過度に安全側の評価を与えるケースが多く認められる⁵⁾ことから、実用性を考慮しつつさらなる高精度化を図り、各種構造物の効果的・効率的な液状化対策の推進に貢献することが求められている。

本稿では、液状化判定法の精度向上を図る上での課題を示すとともに、新たな原位置液状化試験法として開発している振動式コーン試験法の概要、現場計測例およびその結果を紹介する。

2. 液状化判定法の課題

液状化の判定は、地中の各深度における地盤の液状化強度と、地震動によって生じる地中せん断応力の対比によって行われる。このうち、地盤の液状化強度の評価手法には、詳細法と簡便法の2つがある。

詳細法は、原位置採取試料に対して繰返し非排水三軸試験を行い、液状化強度を求める方法である。ただし、繰返し非排水三軸試験の結果に対しては、試料採取時に生じる試料のゆるみ、密実化など、乱れが強く影響を及ぼし、かつ、試料品質の確認にも難しさがある。また、地盤を原位置で凍結させた状態で試料を採取する方法（以下「凍結法」という。）など、高品質な試料採取方法も提案されているが、コスト等の問題から、現場事業で採用されるケースは限定的である。

一方、簡便法は、標準貫入試験 N 値や粒度等のデータと繰返し三軸強度比の相関式を用いて、

液状化強度を間接的に推定する方法である。この相関式は、主として凍結法によって採取された試料の繰返し非排水三軸試験データを基に作成されたものである。間接的な推定法とは言え、土木分野の一般的な地盤調査で得られる N 値から、高品質な試料に対して得られる液状化強度を一定の精度で容易に推定することができるため、河川や道路の分野ではこの方法が現行の技術基準類^{例えは 6),7)}において標準的手法として適用されている。

これまで、上記の相関式は、緩い砂～密な砂、細粒分を含む砂～細粒土、砂れきなどに関するデータの長年にわたる蓄積に応じ、数々の改善が重ねられてきた^{1),2),3),4)}。また、地震時の地中せん断応力の評価についても、多数の地震応答解析結果や強震記録の分析に基づく知見が蓄積されてきた^{1),8)}。しかし、未だ抜本的な精度向上には至っていない。その大きな要因として、「年代効果」を挙げることができる。

例として、東京湾岸地域の埋立の変遷を図-1、東北地方太平洋沖地震における主な液状化発生エ

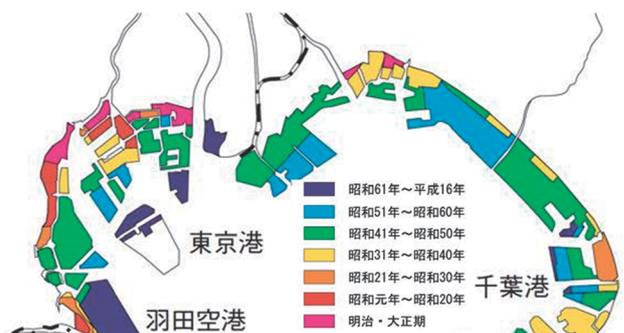


図-1 東京湾岸地域の埋立の変遷⁹⁾を編集



図-2 東京湾岸地域の主な液状化発生エリア¹⁰⁾と液状化判定結果⁵⁾

リアと液状化判定結果を図-2 に示す。主な液状化発生エリアは、各地点の地震動強さや地盤改良の実施状況等とも関連するため単純ではないが、昭和 30 年代以降に造成された埋立地に明らかに集中している。このように造成・堆積年代の新しい地盤ほど液状化被害が生じやすく、古い地盤ほど液状化被害が生じにくい傾向は過去の地震においても確認されており、地盤の液状化特性の「年代効果」と呼ばれている。

一方、図-3 に示す繰返し三軸強度比 R_L - 換算 N 値 N_1 関係は、凍結法で採取された砂質土の繰返し

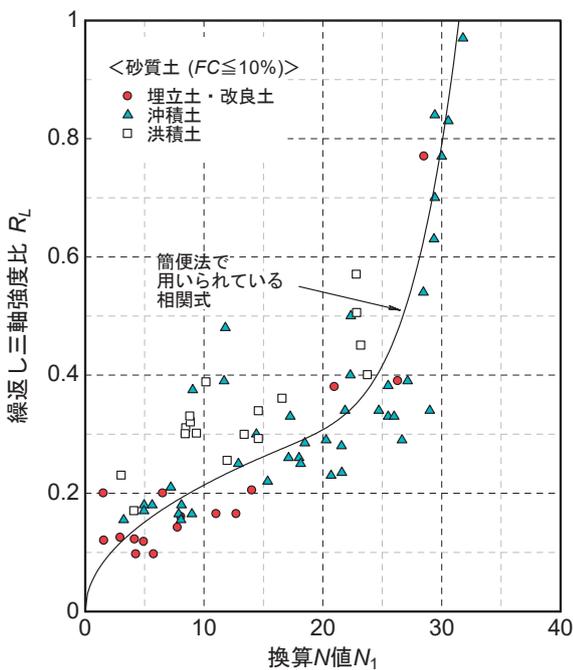


図-3 造成・堆積年代の異なる砂質土の繰返し三軸強度比 R_L - 換算 N 値 N_1 関係³⁾を編集

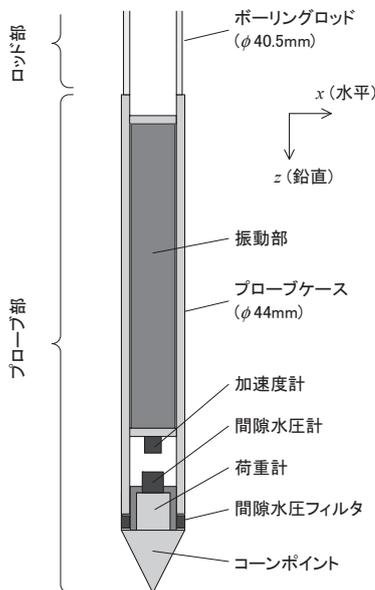


図-4 振動式コーンプローブの概要

し三軸試験データを示したものであるが、埋立土と沖積土で R_L と N_1 の相関関係に有意な差が認められない。このため、上述した簡便法で用いられる相関式は、これら二者を区別することなく作成されている。この式を用いて行った液状化の判定結果が図-2 であり、若齢の埋立地であるか否かによらず、ほとんどの地点で液状化が発生するとの判定結果が得られている。このように、造成・堆積年代による地盤の液状化強度の違いは、詳細法、簡便法のいずれによっても説明することができないのが現状である。

以上に示した年代効果の違いも含め、地盤の液状化特性を精度よく評価していくためには、新たな液状化試験法の開発を含め、様々な発想に基づく技術開発が必要である。

3. 振動式コーンを用いた新しい原位置試験法の開発

試料採取時の乱れの影響を受けることなく地盤の液状化強度を精度よく評価するためには、原位置で地盤に直接的な振動を与えるなどの原位置試験法が一つの方策として考えられるが、三軸試験などの室内試験法に比べると、原位置試験は荷重や変位などを精度よく制御・計測することが難しいこと、厳密な境界条件の設定が困難であることなどの理由から、研究開発例は極めて少ない。また、数少ない研究事例の一つとして、建設省時代の土木研究所によって開発された振動式貫入試験法¹¹⁾があるが、作業効率や計測技術上の課題があり、広く普及するまでには至らなかった。しかし、近年における圧入装置の発展や計測技術の向上を踏まえると、これらの課題は解決することができる可能性があることから、著者らは、振動式貫入試験法を改良した新たな原位置試験法の開発を行っているところである。以下、その試験法の概要と現場実験の結果を示す。

3.1 機器概要

まず、試験に使用する振動式コーンプローブの概要を図-4に示す。これは、コーン状の先端形状を有し、振動装置と計測機器を内蔵した器具であり、地盤に圧入しながら水平方向に振動を加え、先端のコーンポイントに作用する荷重や間隙水圧などを計測することができるものである。建設省時代のプローブに対して、回転数を遠隔操作によ

る可変式とし、振動の様子を記録するためのセンサー（回転数計、加速度計）を増設するなどの改良を行っている。また、地中への圧入には、電気式コーン貫入試験に用いられるCPT圧入装置を用いることで、作業効率の改善を図っている。

3.2 試験方法

この器具を用いて行う試験方法の概念図を図-5に示す。

著者らが定点振動試験法と呼んでいる新たな試験法は、1つの試験孔において、静的貫入試験と定点振動試験を1m程度の間隔で交互に実施するものである。静的貫入試験では、プローブに振動を加えることなく一定速度で圧入し、先端抵抗 q_c や間隙水圧 u などを計測する。定点振動試験では、静的貫入試験で先端抵抗 q_c が残存した状態で振動強さを漸増させ、そのときの q_c の推移を計測する。

静的貫入試験によって深さ方向の硬軟や土質の分布性状を定性的に把握し、定点振動試験によって各深度の土の液状化特性を把握することを意図している。

3.3 現場実験例

例として、東京湾沿岸の埋立地に位置する花見川緑地（千葉市美浜区打瀬地先）で実施した現場実験の結果を示す。

3.3.1 実験条件

本地点における既存ボーリングデータを図-6左

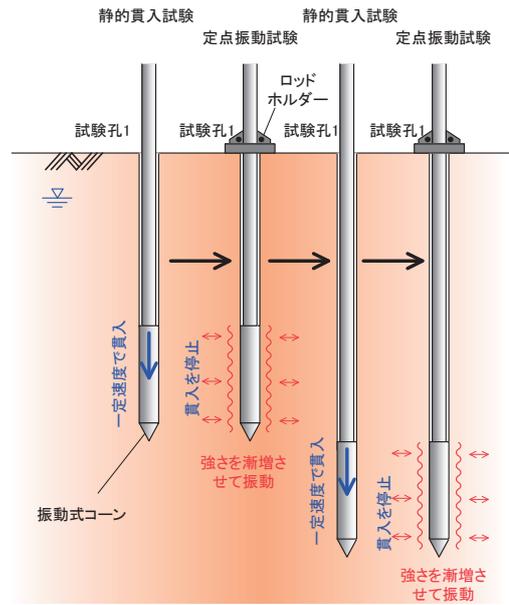


図-5 振動式コーン・定点振動試験法の概念図

(No.15-P) に示す。 N 値は標準貫入試験によるものであり、 W_P 、 W_n 、 W_L 、 FC 、 SC 、 GC はそれぞれ標準貫入試験試料に対して得られた塑性限界、自然含水比、液性限界、細粒分含有率、砂分含有率、礫分含有率である。

本地点では、東北地方太平洋沖地震において鉛直アレー強震観測による本震記録および直後の余震記録が得られており、著者らはその波形処理解析を行った結果から、本震による液状化発生範囲

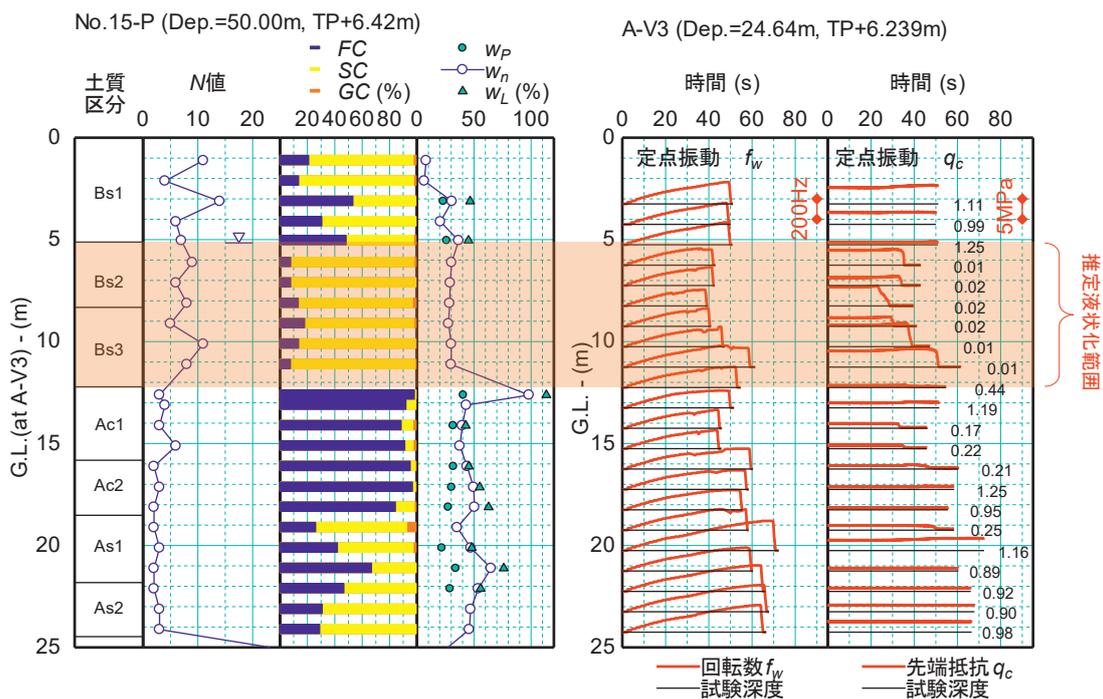


図-6 振動式コーン試験による現場実験データの例

がG.L.-5.1～12.2mの埋土層Bs2、Bs3であったとの推定結果を得ている¹²⁾。

本地点では、振動式コーンを用いた各種試験を7孔にわたり実施したが、ここではその代表データのみを紹介する。

3.3.2 実験結果

振動式コーン・定点振動試験法によるデータを図-6(A-V3)に示す。なお、赤線が各深度で得られた回転数 f_w および先端抵抗 q_c の時刻歴、黒線が試験時のコーン先端深度と各物理量の零点を同時に示したものである。各グラフの右上に示しているのは、各物理量の数値レンジである。

一部の深度において、振動に伴って q_c が低下している様子が確認される。 q_c の図中には試験開始時に対する試験終了時の q_c の比を数値で示しているが、地震時に液状化が生じたと推定されるBs2、Bs3では、 q_c の低下度合いが0.01～0.02倍と顕著である。また、推定液状化深度の範囲外ではあるが、非塑性～低塑性シルトに該当するG.L.-14.25～16.25m、局所的に砂分を多く含むG.L.-19.25mのように、一般的に液状化しやすいとされている土質の出現深度においても q_c が0.17～0.25倍まで低下している。一方で、地下水位が浅く塑性の高い粘性土等においては、 q_c の低下が鈍い。これらの傾向から、本試験法では、液状化の生じやすい地層と生じにくい地層の違いが、明瞭な傾向の違いを以って計測データに反映されていることが分かる。

この計測データを適切に処理することで、地中各深度の液状化強度を精度よく推定できる可能性がある。現在、その方法を確立すべく、検討を重ねているところである。

4. まとめ

本稿では、液状化判定法のさらなる精度向上を図る上での課題を示すとともに、開発中の新たな原位置試験法により、地盤の液状化強度を精度よく推定できる可能性を示した。今後も引き続き、本報に示した原位置試験法の確立に向けて、検討を重ねていきたい。

参考文献

- 1) 岩崎敏男、常田賢一、木全俊雄：地震時における砂質地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究、土木研究所資料、第1729号、1981.9.
- 2) 佐々木康、松本秀鷹、近藤益央：室内土質試験に基づく液状化強度－細粒分含有率の影響－、土木研究所資料、第2590号、1988.2.
- 3) 松尾修：道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題、土木学会論文集、No.757/III-66、pp.1～20、2004.
- 4) 佐々木哲也、石原雅規、林宏親、江川拓也、谷本俊輔、鷺見浩司、川口剛：細粒分を含む砂の液状化強度の評価法に関する再検討、土木研究所資料、第4352号、2016.3.
- 5) 佐々木哲也、石原雅規、谷本俊輔、増山博之：東北地方太平洋沖地震における液状化を踏まえた液状化判定法の検討、土木研究所資料、第4280号、2014.1.
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・解説 II 堤防防備、2016.3.
- 7) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、2017.11.
- 8) 地蔵智樹、谷本俊輔、佐々木哲也：地震動特性と地盤特性を考慮した地中せん断応力の低減係数 r_d の評価方法の検討、土木学会論文集A1 (構造・地震工学)、Vol.73、No.4、pp.I_537～I_550、2017.9.
- 9) 国土交通省：資料 首都圏整備に関する各種データ、平成17年度首都圏白書、p.112、2006.5.
- 10) 国土交通省関東地方整備局、(公社)地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書、2011.8.
- 11) 古賀泰之、島津多賀夫、伊藤良弘：地盤液状化の判定法に関する調査報告書－振動式貫入試験法－、土木研究所資料、第2856号、1990.2.
- 12) 谷本俊輔、川口剛、佐々木哲也：鉛直アレー記録に基づく埋立地盤の液状化発生深度の評価、日本地震工学論文集、Vol.15、No.7、pp.7_157～7_172、2015.12.

谷本俊輔



土木研究所 地質・地盤研究
グループ土質・振動チーム
主任研究員
TANIMOTO Shunsuke

大坪正英



土木研究所 地質・地盤研究
グループ土質・振動チーム
主任研究員
OTSUBO Masahide

佐々木哲也



土木研究所 地質・地盤研究
グループ土質・振動チーム
上席研究員
SASAKI Tetsuya