

液状化強度曲線の類型化と経験式の提案 (その2)

応用地質 正会員 ○三上武子  
 東北学院大学 正会員 吉田 望  
 不動テトラ 正会員 原田健二

1. はじめに

地震時の砂質地盤の液状化挙動を評価するために、有効応力解析が行われるケースが増えつつある。地震動は不規則波形であるため、広い範囲の繰返し回数に対して液状化強度曲線が一致するように解析モデルのパラメータを決める必要があるが、実務では実験値が得られない場合もあるため、特定の繰返し回数に対する液状化強度から広い範囲の繰返し回数に対する液状化強度を推定できる方法があると都合が良い。

これまでに提案された液状化強度曲線の推定式の一例を表1に示す。両対数軸上で直線とするもの、折れ線とするもの、片対数軸上で曲線とするものに分類することができる。龍岡らの式<sup>1)</sup>の係数 a は両振幅軸ひずみ  $DA$  の関数となっており、 $R_{L20}$  から任意の繰返し回数やひずみの大きさに対する液状化強度を推定することができる。ただし、材料特性の違いは考慮されていない。一方、東らの式<sup>3)</sup>の係数 b, c は相対密度の関数として表現されている。ただし、豊浦砂の実験結果から構築されたものであるため、実地盤への適用性は不明である。これは、国生ら<sup>2)</sup>の検討(定式化は行われていない)においても同様である。安らの式<sup>4)</sup>は東らの式に係数 d を加えたもので、係数 b, c は  $N_1$  値、係数 d は地質年代と関連付けている。以上より、係数 b~d はいずれも地盤の締め具合に関連付けられているが、粒度特性については考慮されていない。このように、既往の推定式は室内で調整された材料や特定の材料の実験結果をもとに構築されているため、材料特性の違いが十分に考慮されているとは言えず、その適用は限定される。筆者らは、300 試料にも及ぶ不攪乱試料の液状化試験結果から、地質年代と粒度特性の両方を考慮して、繰返し回数  $N_c=20$  回の時の液状化強度  $R_{L20}$  から  $N_c=5$  回の時の液状化強度  $R_{L5}$  を簡易的に推定する実験式を提案した<sup>5)</sup>。ところで、これらの研究では  $N_c=20$  程度までの挙動に焦点があてられている。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震では、継続時間の長い地震動を経験した。また、近い将来に発生が懸念されている東海・南海・東南海地震では繰返し数が数十回になるという報告もある<sup>6)</sup>。これらの地震を対象にすると、既往の研究では不足で、より繰返し数の多い領域の挙動が必要となる。そこで、本報では  $R_{L20}$  から  $N_c=100$  回の時の液状化強度  $R_{L100}$  を推定する実験式を提案する。併せて  $R_{L5} \sim R_{L20}$  関係についても見直しを行った。

2. 検討に用いたデータの性質

検討に用いたデータは、文献5)で採用した試料のうち  $R_{L100}$  が設定可能な 194 試料の液状化試験結果である。このとき、推定式の信頼性を高めるため、なる

表1 既往の液状化強度曲線の推定式

式の形	著者	試料 (括弧内の数値は試料数)
両対数軸上で直線 $R = R_{L20} \left( \frac{N_c}{20} \right)^a$	龍岡ら <sup>1)</sup>	チューブサンプリング試料埋土・沖積砂 (合計 73)
両対数軸上で折れ線	国生ら <sup>2)</sup>	沖積砂(1)の室内作製試料
片対数軸上で曲線	$R = \frac{b}{N_c} + c$	東ら <sup>3)</sup>
	$R = \frac{b}{N_c^d} + c$	安ら <sup>4)</sup>
両対数軸上で直線 $R_{L5} = eR_{L20}^f$	三上ら <sup>5)</sup>	チューブサンプリング試料埋土(67), 沖積砂(198) 洪積砂(37)

表2 検討試料の採取地<sup>5)</sup>に加筆修正

採取地域	地点数	試料数
北海道	3	6
東北	9	25
関東	30	68
北陸	13	35
東海	10	29
近畿	6	8
中四国	7	15
九州	4	8
合計	82	194

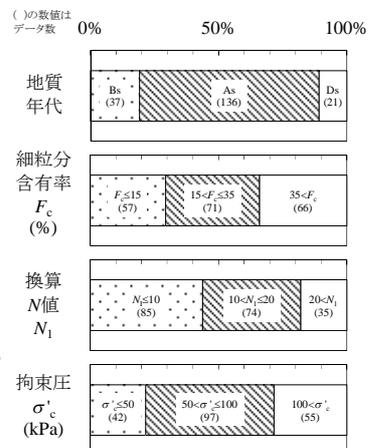


図1 検討試料の物性<sup>5)</sup>に加筆修正

キーワード 液状化強度曲線, 地質年代, 細粒分含有率,  $N$  値, 実験式

連絡先 〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町 1-66-2 応用地質(株) TEL 048-663-8611

べく内挿により  $R_{L5}$ ,  $R_{L100}$  が設定できるデータを採用した。試料の採取地と物性を表2および図1に示す。これらの試料は全てチューブサンプラーで採取したもので、細粒分の少ない試料は、試験室への運搬時に凍結させている。

液状化試験は JGS 0541-2000 に準拠し、原位置の土被り圧を拘束圧として実施した。また、液状化の定義は  $DA=5\%$  に達した時点とした。 $R \sim N_c$  関係をプロットし、工学的判断のもとに液状化強度曲線を設定し、 $R_{L5}$ ,  $R_{L10}$ ,  $R_{L20}$ ,  $R_{L50}$ ,  $R_{L100}$  を読み取った。

3. 検討結果とまとめ

液状化強度曲線の一例として沖積砂の結果を細粒分含有率別にプロットして図2に示す。 $R_{L5}$ ,  $R_{L10}$ ,  $R_{L20}$ ,  $R_{L50}$ ,  $R_{L100}$  の平均値を結んで液状化強度曲線の平均値とし、緑の太線で示した。この平均値を見る限りは、細粒分含有率が多いほど液状化強度曲線が上方に位置する。また、 $N_1$  値が大きいほど液状化強度曲線が上方に分布する傾向が認められるが、個々のデータの分布範囲は広く、非常にばらつきが大きい。そのため、 $R \sim N_c$  関係を直接的に定式化することは困難と考える。一方、図3および図4に示した  $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係は  $N_1$  値の大きさにかかわらず、比較的まとまりが良い。これは、液状化強度そのもののばらつきは大きいですが、液状化強度曲線の形状のばらつきは小さいことを意味する。図3より、 $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係を地質年代別にみると、Bs, As に比べて Ds の傾向がやや異なる。また、図4より、 $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係の傾きは  $F_c \leq 15\%$  と  $15\% < F_c$  で異なっている。紙面の都合で図を割愛したが、 $R_{L5} \sim R_{L20}$  関係においても同様の傾向であった。

以上より、 $R_{L5} \sim R_{L20}$  関係および  $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係は、地質年代については Bs+As と Ds の2種類、細粒分含有率では  $F_c \leq 15\%$  と  $15\% < F_c$  の2種類に分類できることがわかった。ただし、4つに分類するにはデータ数が十分でなく、グループによって偏りがある。また、4種類の回帰式の差は、データのばらつきに対して小さい。

さらに、細分化しすぎると、分類に必要な情報が増えるため、実務での使い勝手が悪くなる。そこで、ここでは地質年代のみに着目することとし、Bs+As と Ds の2種類に分類して  $R_{L5} \sim R_{L20}$  関係および  $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係の回帰式を求めた。結果を図5、図6に示す。

【参考文献】

1) Tatsuoka, F., Yasuda, S., Iwasaki, T. and Tokida, K.: Normalized dynamic undrained strength of sands subjected to cyclic and random loading, Soils and Foundations, Vol. 20, No.3, pp.1-16, 1980. 2) 国生剛治, 嶋田光明, 加藤進: 密な砂の非排水くり返しせん断特性, 第16回土質工学研究発表会, pp.609-612, 1981. 3) 東拓生, 大塚久哲, 二宮嘉朗: 砂質土の相対密度を考慮した液状化強度曲線の定式化, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, pp.528-529, 1994. 4) 安浩輝, 内田明彦, 田屋裕司, 畑中宗憲: 不攪乱砂質土試料による液状化強度曲線の定式化, 日本建築学会大会学術梗概集, pp.419-420, 2002. 5) 三上武子, 吉田望: 液状化強度曲線の類型化と経験式の提案, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, pp.683-684, 2010. 6) 吉田望, 大矢陽介, 澤田純男, 中村晋: 海溝型長継続時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第3号, pp.28-47, 2009.

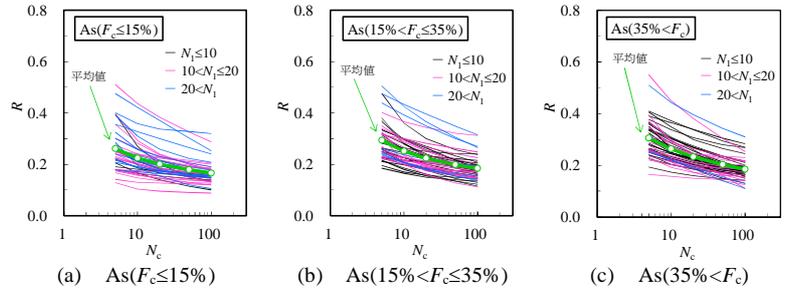


図2 液状化強度曲線 (As)

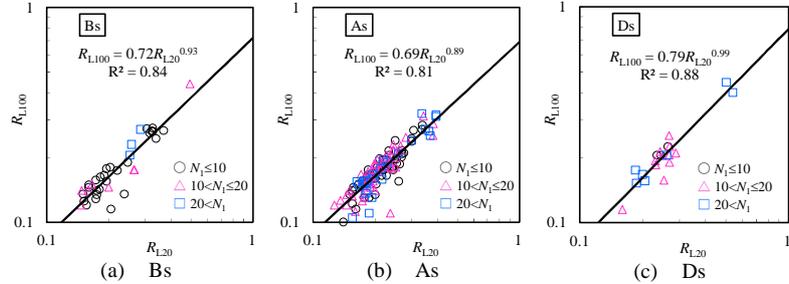


図3 地質年代別に見た  $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係

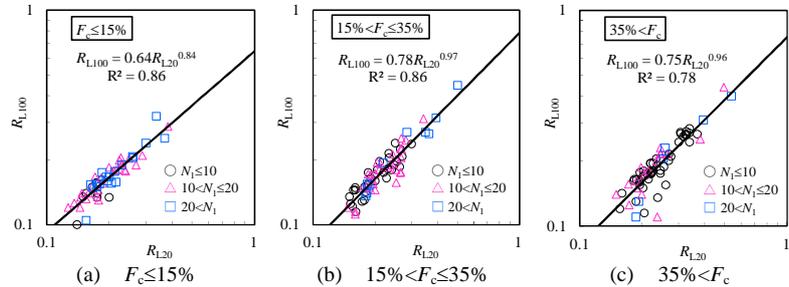


図4 細粒分含有率別に見た  $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係

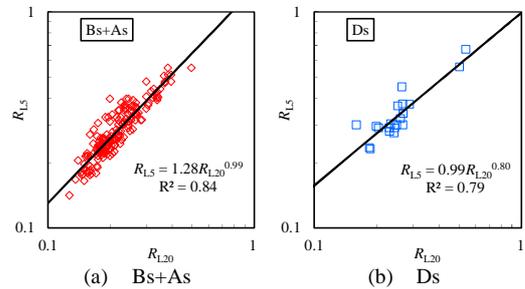


図5  $R_{L5} \sim R_{L20}$  関係の回帰式

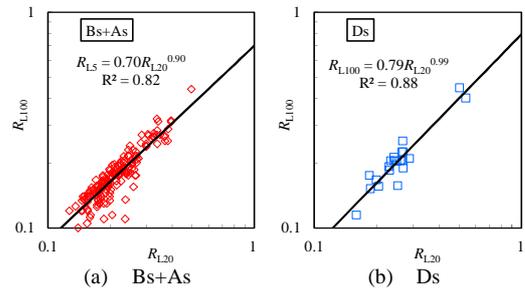


図6  $R_{L100} \sim R_{L20}$  関係の回帰式