

液状化検討における塑性指数の重要性

株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング ○平井 陸大, 広瀬 義純

1. はじめに

私たちが住む日本は世界有数の地震大国であり、近年では東日本震災や能登震災が発生し、さらに今後 30 年以内には南海トラフ地震の発生が予想されている。これより、国土強靱化に向けて、地盤の安定性を適切に評価することは非常に重要である。

調査は、愛知県内の河川堤防沿いの地盤において、液状化対策範囲の低減を目的に液状化対象層のサンプリング及び繰り返し非排水三軸試験を実施して液状化検討を行った。

本論は上記の調査を通して気付いた、簡易法による液状化判定の留意点や課題、液状化強度試験の有効性を土の靱性（粘り気）に着目し考察する。

2. 調査地の地形地質概要

調査地は、愛知県安西市諸桑町地内の日光川沿いであり、河川の沖積作用や海水準の低下などによって、約 1200 年以降に陸化した蟹江三角州に位置する。

地形分類上は、「氾濫平野（河川の氾濫により形成された平坦地）」にあたり、地表面付近より T.P. -30m 付近まで南陽層（沖積層）が分布し、その下位に濃尾層（洪積層）が分布する。

一般に液状化の恐れがある地盤条件は、「続成作用が発揮されていない N 値の低い土層」と「地下水位が高い地盤」といわれており、調査地が位置する日光川沿いは、上記の条件を全て満たす。地形分類から見ても液状化が生じやすい地盤といえる。

3. 液状化判定結果

本調査では、 N 値による簡易判定式で F_L 値が 1.0 を下回ったとしても、繰り返し非排水三軸試験を行うことで F_L 値が大きくなり（ F_L 値が 1.0 を上回り）、液状化対策範囲が縮小されることが期待された。しかしながら、判定の結果は、全ての層において N 値による簡易判定式に比べて、繰り返し非排水三軸試験による F_L 値が低くなる傾向を示した。

各地点の N 値による簡易判定と繰り返し非排水三軸試験（ $RL=20$ ）による F_L 値の算定結果を比較して表-1 及び表-2 に示す。

表-1 液状化判定結果〔R06-B01:水位 GL-1.25m〕

地層名	検討深度 (GL-m)	N 値	LEVEL2地震動安全率 (FL値)					
			LEVEL1地震動安全率 (FL値)				タイプ2地震動	
			タイプ1地震動		タイプ2地震動		タイプ2地震動	
			N 値 (標準貫入試験)	$RL=20$ (液状化試験)	N 値 (標準貫入試験)	$RL=20$ (液状化試験)	N 値 (標準貫入試験)	$RL=20$ (液状化試験)
As1-1	5.3	11	0.922	0.844	0.346	0.317	0.420	0.367
	8.3	26	2.149	0.906	0.806	0.34	1.290	0.415
As1-2	10.3	11	1.412	0.723	0.529	0.271	0.847	0.293
Ac1-2	13.3	5	6.013	0.754	2.255	0.283	3.608	0.31
As1-2	14.3	15	0.902	0.794	0.338	0.298	0.406	0.333

表-2 液状化判定結果〔R06-B02:水位 GL-1.70m〕

地層名	検討深度 (GL-m)	N 値	LEVEL1地震動安全率 (FL値)				LEVEL2地震動安全率 (FL値)			
			タイプ1地震動		タイプ2地震動		タイプ1地震動		タイプ2地震動	
			N 値 (標準貫入試験)	$RL=20$ (液状化試験)	N 値 (標準貫入試験)	$RL=20$ (液状化試験)	N 値 (標準貫入試験)	$RL=20$ (液状化試験)	N 値 (標準貫入試験)	$RL=20$ (液状化試験)
As1-1	3.3	12	1.234	1.132	0.463	0.425	0.593	0.518		
	7.3	29	4.172	0.624	1.564	0.234	2.503	0.228		
As1-2	11.3	13	436.700	0.865	163.762	0.325	262.020	0.374		
As1-2	15.3	13	232.257	0.773	87.096	0.290	139.354	0.312		

4. F_L 値が低下した要因

液状化の発生（判定）に影響を及ぼす要因としては、いくつかの条件が考えられる。

今回の試験結果では、特に細粒分の含有量が多い試料ほど、簡易判定式に比べ液状化試験の安全率が低下する傾向が強く現れた。この理由は、細粒分の含有量が多い試料の“土そのものの性質”と N 値による簡易判定式における“ N 値の補正式”に主な原因があると考えられる。

(1) 土そのものの性質

液状化の発生は地震の揺れにより土粒子の噛み合いが外れてしまうことが原因で発生する。

図-1 に粘土粒子と砂粒子の接触方法の違いを示す。土粒子の間隙が水で満たされた砂地盤は、普段は砂粒子同士の摩擦によって噛み合い、安定した状態を保っているが、強い地震動を受けると、砂粒子が移動することによって間隙水圧が上昇し、砂粒子の噛み合いが外れてしまう。一方で、細粒分が含まれてくると粘着力が生じてくるため、地震動によっても土粒子の骨格構造が破壊されにくくなる。そのため、細粒分含有率（ FC ）が大きいと簡易判定式では N 値に補正がかかり、安全率 F_L が高い値を示す。しかし、細粒分の混入により、土粒子の電気化学的な結合力（粘着力）が生じてくるかは、細粒分の細かい粒子表面における電荷や吸着水の存在程度によって変わってくる。

土粒子の粘着力を評価する塑性限界試験の結果は、すべての層において NP（ $I_p=1$ 未満）であり、調査地の土質特性として靱性が低い（粘り気が少ない）ことが確認された。

そのため、細粒分含有率が多いにもかかわらず、繰り返し非排水三軸試験の結果が低かったと考えられる。

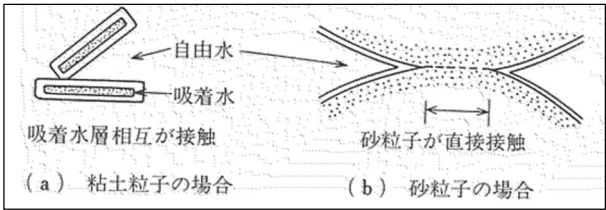


図-1 粘土粒子と砂粒子の接触¹⁾

(2) N 値の補正式

N 値による簡易判定手法では、細粒分の含有量が大きいほど、 N 値の補正が大きくかかるため、液状化強度が強くなる傾向となる。一方で、塑性指数は計算式自体には勘案されないため、調査地の土質特性のように、非塑性にある細粒分は液状化強度が過大に算定される可能性がある。

今回の検討結果から判断すると、調査地の土層に分布する細粒分は、靱性が低い(粘り気が少ない)特徴にあることから、 N 値による簡易判定手法では液状化強度が過大に評価される可能性が考えられる。

$$\begin{aligned}
 R &= c_w R_L \\
 \left. \begin{aligned} &(\text{レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動 (タイプ I) の場合}) \\ &c_w = 1.0 \\ &(\text{レベル 2 地震動 (タイプ II) の場合}) \end{aligned} \right\} \\
 c_w &= \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases} \\
 R_L &= \begin{cases} 0.0882 \sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{N_a/1.7 + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5}} & (14 \leq N_a) \end{cases} \\
 N_a &= \begin{cases} c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 & (D_{50} < 2\text{mm}) \\ \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 & (D_{50} \geq 2\text{mm}) \end{cases} \\
 N_1 &= 170N/(\sigma_{vb}' + 70) \\
 c_{FC} &= \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases}
 \end{aligned}$$

図-2 R の算定式を抜粋²⁾

(3) 簡易法の留意点と課題

土粒子の靱性(粘り気)は、塑性指数 (I_p) として液状化判定対象層の判別に利用されている。しかし、 N 値による簡易判定式は、地盤の能力として、50%粒形 (D_{50}) が 2mm 未満の場合は、細粒分含有率 (FC) と強度 (N 値) のみが計算に関わる算定式となり、計算上の液状化強度には勘案されていない。そのため、細粒分含有率 (FC) が多いが塑性指数 (I_p) が低い地盤では、液状化強度が過大に評価されている恐れがある。

5. 繰り返し非排水三軸試験の有効性及び留意点

(1) 繰り返し非排水三軸試験の有効性

繰り返し非排水三軸試験による液状化判定は、 N 値による簡易判定よりも靱性(粘り気)の程度等、土そのものの液状化特性が違いとして反映されるため、地盤本来の液状化特性を求めることができる。

(2) 繰り返し非排水三軸試験の留意点

採取試料の乱れは液状化強度への影響が顕著に現れるため、採取試料の状態確認や試料の運搬には細心の注意を払う必要がある。

本業務では、乱れた試料での液状化試験を回避するため、下記の対策を行った。

- ① 土の採取管に透明なアクリル管(従来は塩ビ管)を使用し、採取試料の状態を目視確認することによって、採取した試料が液状化試験に使用できるかを判断した。(写真1 参照)

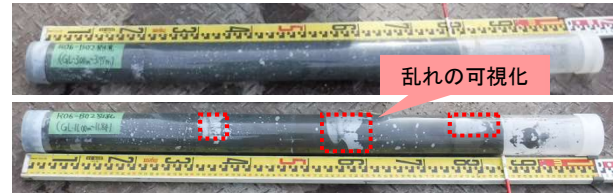


写真-1 透明管を用いたサンプリング試料の例

- ② 試験室への運搬前には現場にて試料をドライアイスで凍結させ、運搬時の震動等で試料の乱れが生じないように留意した。(写真2 参照)



写真-2 運搬時における試料の凍結

6. さいごに

非塑性にある細粒分では、 N 値による簡易判定で安全率 F_L が 1.0 を上回ったとしても、実際の液状化強度は簡易算定よりも低い可能性がある。

一方、細粒分の混入率が 35%以下で液状化判定対象層となり、さらに N 値が小さく安全率 F_L が 1.0 を下回ったとしても、混入する細粒分の靱性が高い(粘り気が大きい)場合には、実際の液状化強度は簡易算定よりも大きくなる(対策不要等となる)可能性がある。

よって、上記のケースでは、繰り返し非排水三軸圧縮試験が非常に有効であり、液状化特性を詳細に把握し、より確実な対策を講じることや過大設計を未然に防ぐことが可能である。

今後は、本業務で得た経験を活かし、液状化検討の精度を上げることによって、より安全なインフラ整備と発注者の工費削減に貢献していく。

《引用・参考文献》

- 1) 鹿島出版社：液状化の調査から対策工まで (昭和 63 年)
- 2) 公益財団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (平成 29 年)