B-79

中空ねじりせん断試験と繰返し三軸試験における液状化特性の評価に関する研究
― ひずみ変動勾配を用いた試験方法の相違に関する検討―

Study on Liquefaction Characteristic of Hollow Cylindrical Torsional Test and Cyclic Triaxial Test
—Consideration of the different test methods by using strain variation gradient—

○小澤飛翔[1]，山田雅一[2]，中浜悠史[3]，堂野前大貴[3]
Tsubasa Ozawa[1]，Masaichi Yamada[2]，Yushi Nakahama[3]，Daiki Dounomae[3]

Abstract: The objective of this study is evaluating the difference of liquefaction characteristics of the cyclic triaxial test and hollow cylindrical torsional test. In this paper, the relation between liquefaction resistance and number of loading cycles are investigated by cyclic triaxial test and hollow cylindrical torsional test. Furthermore, this paper describes the results of consideration of strain variation gradient.

１．はじめに

原位置の液状化抵抗を評価するための室内液状化試験として，繰返し三軸試験が採用されることが多い．もう一つの代表的な室内液状化試験で，繰返し三軸試験に比べて地盤内の応力変形条件の再現性に優れている中空ねじりせん断試験があるが，供試体作製の難しさや，試験方法の基準が確立していないことから，実務で用いられることは少ない．既往の文献[1)]では繰返し三軸試験から得られた液状化強度に対して，中空ねじりせん断試験の液状化強度を定量的に評価しているものの，細粒分を含んだ砂に対しての検討は十分に行なわれていない．また既往の文献[2)]で細粒分を含んだ砂と含まない砂では，液状化強度に大きな差異が生じるという報告がなされている．

そこで，本報告では既報[3)]の試験結果に新たに砂試料を加え，非塑性細粒分を含んだ砂を用いて繰返し三軸試験と中空ねじりせん断試験を行い，試験方法の相違が液状化特性に与える影響について検討する．

２．試験概要

２．１試験試料

本報告では砂の種類による影響を考慮するために，豊浦砂，新潟砂，霞ヶ浦砂，鬼怒川砂の 4 種類の砂と細粒分には非塑性シルトである DL クレイを用いた．表 1 に試料の物理的性質を，図 1 には試料の粒径加積曲線を示す．繰返し三軸試験の供試体作製は円柱供試体(直径 5cm, 高さ 10cm)を JGS 0520 に準拠して行い細粒分を含まない砂においては空中落下法，細粒分を含んだ砂においてはドライタンピング法を用いた．中空ねじりせん断試験の供試体は中空円筒供試体(外径 10cm, 内径 6cm, 高さ 10cm)を JGS 0550 に準拠して繰返し三軸試験と同様の方法により作製した．相対密度は各試料ともに Dr=40%, 60%, 80%として細粒分含有率は Fc=0%, 5%, 10%, 20%とした．またここでの相対密度は粗粒土のみを考慮した．

Table.1 Physical characteristics of the samples

試料	土粒子密度 ρ_s(g/cm^3)	e_{max}	e_{min}	D_{50}(mm)	均等係数U'c
豊浦砂	2.631	0.98	0.61	0.17	1.59
新潟砂	2.692	1.07	0.65	0.21	2.36
霞ヶ浦砂	2.755	0.94	0.61	0.56	3.26
鬼怒川砂	2.796	1.00	0.64	0.46	3.28
DLクレイ	2.659	–	–	0.02	–

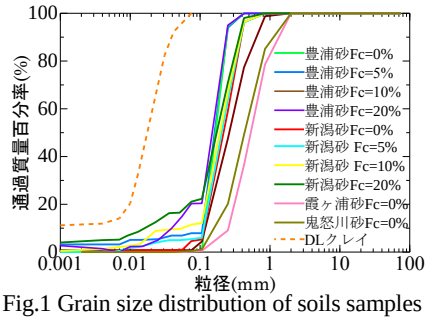

Fig.1 Grain size distribution of soils samples

２．２試験方法

供試体作製後，CO_2 及び脱気水を通し飽和させ，背圧を 100kN/m^2 与え，間隙圧係数 B 値が 0.96 以上であることを確認した．有効拘束圧 49kN/m^2 で等方応力を載荷し，排水量がほぼ一定値に収束するまで圧密した．繰返し三軸試験は載荷周波数 1Hz の一定応力振幅による非排水繰返し載荷を，両振幅軸ひずみ 5%に達するまで行った．中空ねじりせん断試験においては一定応力振幅による応力制御で，せん断ひずみが両振幅 15%に達するまで非排水繰返し載荷を行った．

３．試験結果

３．１軸ひずみ比による検討

既往の文献[1)]では軸ひずみ比を用いることで，繰返し三軸試験と中空ねじりせん断試験の液状化強度の相違を定量的に評価できることを報告している．ここで軸ひずみ比とは，繰返し三軸試験において供試体の両振幅軸ひずみが，5%に達した時のひずみ量に対する圧縮側のひずみ量の割合である．図 2 にせん断強度比(τ_{cy}/σ'_c)/($\sigma_d/2\sigma'_c$)と軸ひずみ比の関係を示す．また同図中には既往の文献[1)]の試験結果(＊)を

1：日大理工・学部・建築，2：日大理工・教員・建築，3：日大理工・院・建築

併せ示した．同図より，本報告の試験結果の範囲内ではせん断強度と軸ひずみ比の関係には良い相関が得られなかった．特に細粒分を含んだ砂や平均粒径が，豊浦砂（D_{50}=0.17mm）に比べ比較的大きい霞ヶ浦砂（D_{50}=0.56mm），鬼怒川砂（D_{50}=0.46mm）のような試料において既往の文献[1)]の試験結果と大きく異なる傾向が見られた．これはせん断強度比と軸ひずみ比の関係が，非塑性細粒分を含んだ砂を考慮しておらず，細粒分含有率 Fc=20%の試料の試験結果においては，繰返し三軸試験の載荷中に圧縮側にほとんどひずみが発生しなかったことや，平均粒径が大きい試料においては，メンブレンペネトレーションの影響が原因と考えられる．

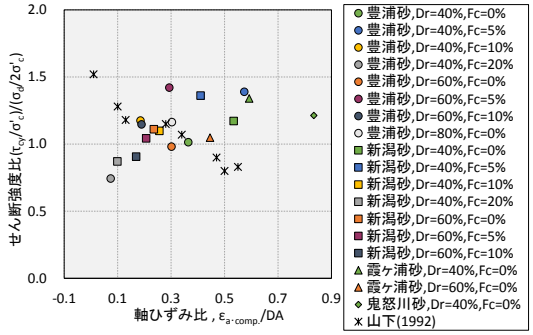

Fig.2 Relationships between shear strength ratio and axial strain ratio

３．２間隙水圧比による検討

既往の文献[1)]は，三軸試験の載荷中に発生する間隙水圧にも着目し，間隙水圧比（U_1・comp./U_1）を用いることで繰返し三軸試験と中空ねじりせん断試験の液状化強度の相違を定量的に評価できるとしている．間隙水圧比とは繰返し載荷における第 1 サイクルでの最初の半サイクルで残留する水圧と，第 1 サイクル全体で残留する水圧との比である．図 3 にせん断強度比と間隙水圧比の関係を示す．また既往の文献[1)]の試験結果（＊）を同図中に併せ示した．同図より，せん断強度比と間隙水圧比の関係は，多少ばらつきがあるものの，軸ひずみ比を用いた場合に比べて良い相関が得られた．しかしこの結果に関しても，軸ひずみ比同様に細粒分を含んだ砂や平均粒径の大きな試料によってばらつきが生じていると考えられる．

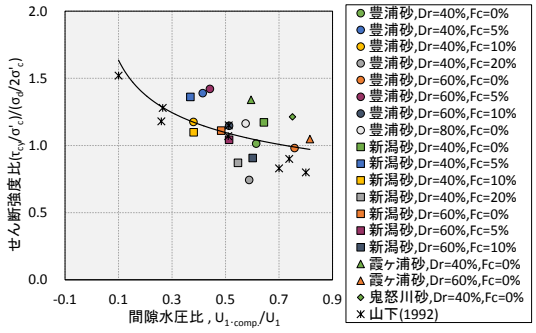

Fig.3 Relationships between shear strength ratio and pore water pressure ratio

３．３新しい補正方法の提案

図 2 及び図 3 の試験結果を踏まえ，本報告では，両試験から得られる液状化強度を定量的に比較するための新しい補正方法を提案した．繰返し三軸試験は載荷中の軸ひずみの発生量が圧縮方向と伸張方向で異なり，一般的には圧縮側よりも伸張方向に大きくひずみが発生する．また軸ひずみが発生する．また軸ひずみと繰返し回数の関係を見たときに，ひずみと基軸がずれていく方向やその発生量は試料により様々であり，同じ試料においても細粒分を含む場合と含まない場合では，傾向が異なることが本試験結果から確認されている．

そこで本報告では，両振幅軸ひずみ 5%に達した時の圧縮側のひずみ量と両振幅軸ひずみ 2%に達した時の圧縮側のひずみ量の比をひずみ変動勾配と定義した．図 4 にせん断強度比とひずみ変動勾配の関係を示した．また同図中には既往の文献[1)]の試験結果（＊）4 点と，既往の文献[4)]の試験結果（×）を併せ示した．同図より，既往の文献[4)]で行われたシルト質細砂や本報告の細粒分を含んだ砂の結果から，せん断強度比とひずみ変動勾配の関係は良い相関が得られた．このひずみ変動勾配から求められるせん断強度比の値を，試験方法に関する補正係数として用いることで，細粒分の影響を考慮できる可能性が示唆された．

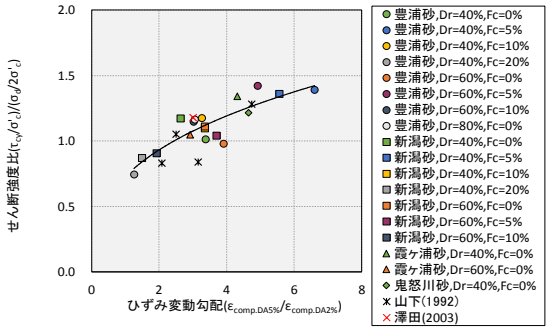

Fig.4 Relationships between shear strength ratio and strain variation gradient

４．まとめ

せん断強度比と軸ひずみ比の関係にはあまり良い相関が得られなかった．一方，せん断強度比と間隙水圧比の関係には，軸ひずみ比を用いた場合に比べて，良い相関が得られた．しかし軸ひずみ比及び間隙水圧比のどちらの場合においても，細粒分の影響によりばらつきが生じた．

ひずみ変動勾配から求められるせん断強度比を試験方法の相違に関する補正係数として提案し，非塑性細粒分や試料の物理的性質の影響を考慮できる可能性を示した．

【参考文献】
1) 山下聡：砂の繰返し載荷試験結果に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究, 北海道大学博士論文, 1992.
2) 黄大振, 柳沢栄司, 菅野高弘：シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, pp. 25 - 33, 1993
3) 所義登他：せん断試験方法の相違が液状化強度に与える影響，第 50 回地盤工学研究発表会, pp. 481 - 482, 2015
4) 澤田俊一他：過剰間隙水圧の発生過程が地盤の地震応答に与える影響, 土木学会地震工学委員会「レベル 2 地震動による液状化」, pp. 397−400, 2003.