2016 年熊本地震の KiK-net 益城の観測地震波による豊浦砂の液状化試験

東京電機大学理工学部　フェロー会員　安田　進
東京電機大学理工学部　正会員　石川　敬祐
東京電機大学大学院　学生会員　○佐藤　剛

１．はじめに

2016 年 4 月 14 日から 16 日にかけて熊本県熊本地方を震源とする 2016 年熊本地震が発生した。この地震では短期間に強い地震動が複数回発生した観測史上例が無いことが特徴 [1)]であった。この地震の液状化被害は熊本市や宇土市にかけての白川や緑川流域の平野部に集中し、前震から本震にかけて被害が増大したことが分かっている [2)]。本研究では、熊本地震時に KiK-net 益城で観測された地震波 [3)]を用いた液状化試験を行い、前震と本震の波形形状が液状化強度に与える影響や、地震波の連続性が液状化強度に与える影響の検討を行った。

表１　豊浦砂の物理特性

試料名			豊浦砂
土粒子の密度	ρ_s	(g/cm^3)	2.650
細粒分含有率	Fc	(%)	0.0
均等係数	Uc		1.7
曲率係数	Uc		1.0
塑性指数	Ip		NP
最少乾燥密度	ρ_{dmin}	(g/cm^3)	1.343
最大乾燥密度	ρ_{dmax}	(g/cm^3)	1.652
最小間隙比	e_{min}		0.604
最大間隙比	e_{max}		0.973
工学的分類			S

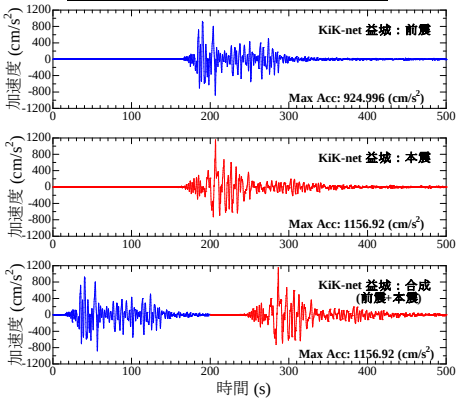

図１　使用波形

２．試験方法

液状化試験は繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いて行った。試験に用いた試料は表 1 に示す物理特性をもつ豊浦砂である。供試体は外形 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の中空円筒形である。供試体の密度は既往の研究データ [4)]と比較するために相対密度を 70%に設定し、空中落下法を用いて作製を行った。供試体を作製した後、供試体を自立させ 2 時間以上二酸化炭素を通した後､12 時間以上かけて通水を行い、土粒子間を脱気水で満たした。その後、間隙水圧係数 B 値にて飽和度を確認し、有効拘束圧を 50kPa として等方圧密を行った。その後、非排水条件で図 1 に示す KiK-net 益城の観測地震波形の形状を繰り返しせん断応力として与えた。ただし、載荷装置の都合上、地震波形の時間軸を 10 倍に伸ばしている。試験に用いた地震波形は 4 月 14 日 21 時 26 分の前震の波形、16 日 1 時 25 分の本震の波形､複数回の強い地震動の連続を再現するために前震と本震の波形を連続させた合成波形の 3 種類の波を使用して試験を行った。

液状化強度比は、石原・安田の考え方 [5)]に準じて整理した。本試験では液状化の定義を、残留過剰間隙水圧比による定義($\tau_{max,l,u}/\sigma'_c$)と両振幅最大せん断ひずみによる定義($\tau_{max,l,\gamma}/\sigma'_c$)の 2 つで定義した。

3．液状化試験結果

図 2~4 に試験結果の時刻歴図の一例を示す。これらの試験結果は同程度の最大せん断応力比の試験結果をまとめたものであり、前震・本震の波形による試験では液状化しなかったが、前震+本震の波形では液状化した結果となっている。過剰間隙水圧比の時刻歴をみると、どの波形においてもせん断力が加わることで間隙水圧が段階的に上昇していくことが分かる。図 4 の過剰間隙水圧比を前震と本震のそれぞれに着目すると、前震と本震の試験結果の間隙水圧比とほぼ同程度の上昇していることが分かり､同程度の最大せん断応力比でも入力波形の継続時間や波形の繰り返し回数で水圧比が変わることが分かる。図 4 のせん断ひずみに着目すると、U_r/σ'_c=0.8 付近に達した時刻からせん断ひずみが大きく発生することが分かる。図 5 に液状化試験の結果を示す。両方の定義で本震･前震･前震+本震の順に液状化に至るための最大せん断応力比が低下し、液状化し易い波形であることが分かった。前震と本震においては液状化の定義の違いで最大せん断応力比が異なることが分かった。

キーワード　熊本地震，地震波，液状化強度，繰り返しねじりせん断試験
連絡先　〒350-0394　埼玉県比企郡鳩山町石坂　東京電機大学理工学部　TEL　049-296-0042

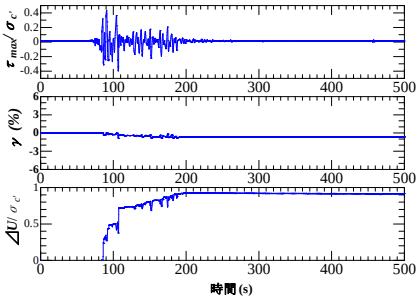

図 2　前震の試験結果

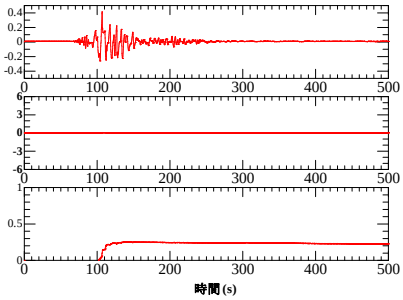

図 3　本震の試験結果

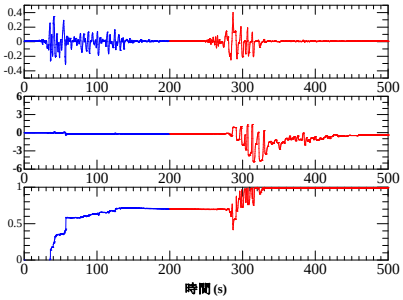

図 4　前震+本震の試験結果

石川らの研究[4]から正弦波荷重による試験結果を使用し、地震波荷重の不規則性に関する補正係数 C_2 を算出した結果を表 2 に示す。本試験では地震波荷重に対する液状化強度比と正弦波荷重に対する液状化強度比の比で表した。また、有効波数[5] N_{ef} の考え方、石原ら[6]によるせん断応力波形の分類を行った結果も表 2 に示す。既往の研究[4)6)7)]より不規則波荷重を用いた液状化試験の結果を、C_2 と N_{ef} の関係についてまとめたものを図 6 に示す。同図より有効波数 N_{ef} が大きくなるにつれ C_2 が減少することが分かった。石原らの研究と比較すると、衝撃型・振動型それぞれで既往の研究結果と比較して C_2 の値が大きいことが分かる。道路橋示方書[8]が示す補正係数 C_2 はレベル 2 地震動タイプ I の場合 C_2=1.67、レベル 2 地震動タイプ II の場合の C_2 は正弦波での液状化試験結果[4] R_L=0.23 から算出すると C_2=2.38 となる。Dr=70%での試験結果ではあるが道路橋示方書の基準と比較すると、道路橋示方書の補正係数を下回ることから、KiK-net 益城で観測された地震波形は、波形の不規則性を受けやすいことが分かる。

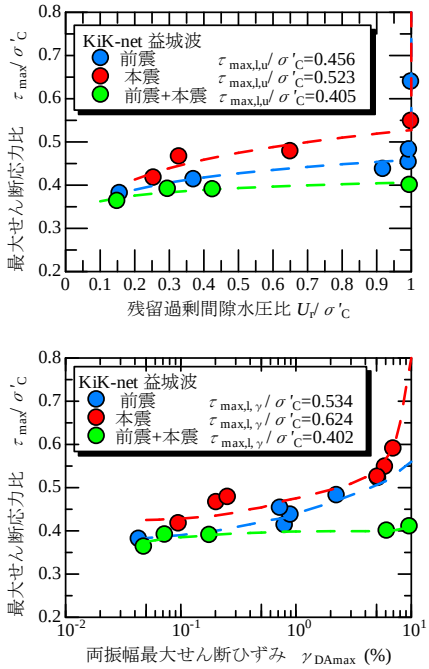

図 5　液状化試験結果

表 2　地震波の不規則性に関する補正係数 C_2

豊浦砂 設定Dr=70% 波形	有効波数 N_{ef}	波形 (石原[5])	液状化強度比 水圧	液状化強度比 ひずみ	不規則性に関する補正係数: C_2 水圧	不規則性に関する補正係数: C_2 ひずみ
前震	3	衝撃型	0.456	0.534	1.98	2.33
本震	1.5	衝撃型	0.523	0.624	2.27	2.72
前震+本震	3.5	振動型	0.405	0.402	1.76	1.76
正弦波			0.230	0.229		

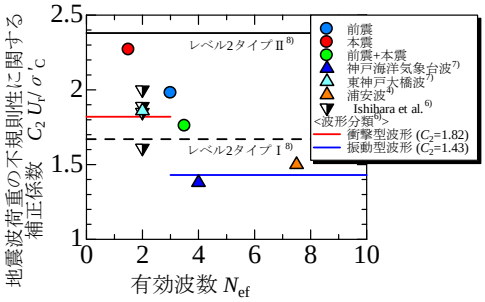

図 6　既往の研究との比較

4. まとめ

2016 年の熊本地震時の KiK-net 益城で観測された波形による豊浦砂を用いた液状化試験を行った。その結果有効波数 N_{ef} や繰り返し回数が多くなるほど補正係数 C_2 に与える影響が小さくなることが分かった。

謝辞

防災科学研究所の K-NET で観測された地震動波形を使用させていただきました。要素試験を実施する際には、中野彰人氏と藤田厚志氏 (東京電機大学)にご協力いただきました。末筆ながらお礼申し上げます。

参考文献

1) 重藤迪子・神野達夫：2016 年熊本地震の強震動,日本地震工学会誌,第 29 号 2016 年 10 月,p6-9,2016, 2) 若松加寿江:平成 28 年(2016 年)熊本地震液状化報告 (第 3 報), 3) 防災科学技術研究所：強震観測網 K-NET, 4) 石川敬祐・安田進・青柳貴是：海溝型巨大地震時の合理的な簡易液状化判定手法に関する研究, 地盤工学ジャーナル vol.9, No.2, pp.169-183, 2014, 5) 山崎浩之,江本翔一：地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案,港湾空港技術研究所報告, vol049-03-04, 2010, 6) 石原研而・安田進：液状化に及ぼす地震波の不規則性と初期拘束圧の影響, 土と基礎, Vol.23, No.6, pp29-35, 1975, 7) 安田進・石川敬祐・垂水秀樹：二つの大震災時の地震波形による液状化試験, 土木学会第 70 回年次学術講演概要集, III-296,pp.591-592, 2015, 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp134-136, 2012,