

2種の砂を用いた東日本大震災 K-NET 原町波による液状化試験

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

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は $M_w=9.0$ という我が国における観測史上最大規模の地震であり、岩手県沖から茨城県沖までの広範囲にわたってのプレート破壊が生じた海溝型地震で、地震動の継続時間は非常に長かった。本研究は、東北地方太平洋沖地震時に観測された地震波を用いた液状化試験を行い、試料に含まれる細粒分の違いが地震波荷重の不規則性に関する補正係数に与える影響に関して検討を行った。

2. 試験方法

試験に用いた試料は、東北地方太平洋沖地震後の現地調査時に採取された噴砂試料（浦安砂）と豊浦砂の2種類である。各試料の物理特性を表1に示し、各試料の粒径加積曲線を図1に示す。物理試験結果より、浦安砂は細粒分を多く含む砂質土で、地盤材料の工学的分類によると細粒分質砂(SF)に区分され、試料に含まれる細粒分は非塑性であった。液状化試験には、繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いた。

供試体の寸法は、外形10cm、内径6cm、高さ10cmの中空円筒形である。豊浦砂は、既往の研究データ¹²⁾をもとに緩い、中密、密な状態となるように4種類の密度を設定した。浦安砂は、地震後に浦安市内で行われた地盤調査での乱れの少ない試料の乾燥密度を参考に密度を設定した。相対密度は試験結果の相対密度の平均値の値であり、2～5%程度の密度幅がある。供試体を作製した後、負圧をかけて供試体を自立させ、負圧を側圧に置換した後に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、軸方向変位を固定し、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2に示す、東北地方太平洋沖地震時にK-NET 原町³⁾で観測された地震波形を用いて繰返しせん断応力を与えた。ただし、载荷装置の都合上波形の時間軸を10倍に伸ばしたものを使用した。

3. 液状化強度比の算出方法

液状化強度比は、石原・安田の考え方⁴⁾に準じて整理した。地震波荷重の载荷が終了した段階の過剰間隙水圧比に着目するとある程度上昇した状態となっており、この過剰間隙水圧比を残留過剰間隙水圧比(U_r/σ'_c)とする。また、この時に加えた荷重振幅の中での最大せん断応力比($\tau_{\max}/\sigma'_c$)で代表するこ

表1 各試料の物理特性

試料名	豊浦砂	浦安砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.643
細粒分含有率 F_c (%)	0.0	36.5
均等係数 U_c	1.7	5.8
曲率係数 U_c	1.0	1.3
塑性指数 I_p	NP	NP
最少乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.343	1.067
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.652	1.446
最小間隙比 e_{min}	0.604	0.828
最大間隙比 e_{max}	0.973	1.477
工学的分類	S	SF

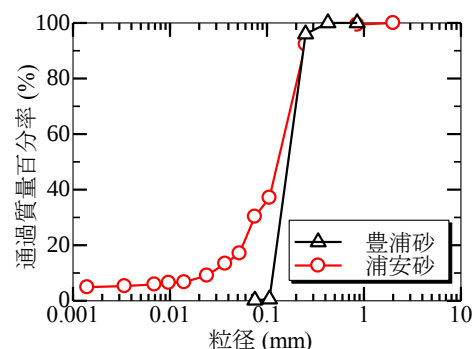


図1 各試料の粒径加積曲線

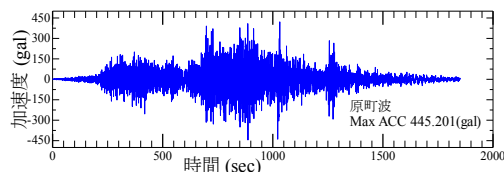


図2 液状化試験に用いた地震波形

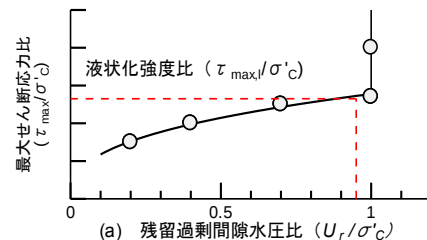


図3 液状化強度比の求め方

キーワード 東日本大震災, 地震波, 液状化強度, 繰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

とし、この値を縦軸に、そして先ほど求めた残留過剰間隙水圧比の値を横軸にとり図3の模式図の通りに整理する。応力レベルを相対的に変化した複数の試験結果から整理した最大せん断応力比と残留過剰間隙水圧比の関係より、 $U_r/\sigma'_c=0.95$ となる点を残留過剰間隙水圧比で評価した場合の液状化強度比($\tau_{max,l,u}/\sigma'_c$)と定義した。

4. 液状化試験結果

図4に豊浦砂における液状化試験結果を示す。供試体密度が緩い～中密($Dr=77.8\%$ 以下)の場合では、繰り返しせん断応力比のわずかな増加で残留過剰間隙水圧比の増加がみられた。密な状態($Dr=85.9\%$)では $U_r/\sigma'_c=0.75$ を境に繰り返しせん断応力比が急増する結果となった。図5に浦安砂における液状化試験結果を示す。どの供試体密度の場合でも最大せん断応力比の増加によって過剰間隙水圧比が緩やかに上昇していることが分かる。また、供試体密度の増加によって勾配が急になる傾向がみられた。

既往の研究¹⁾より、正弦波荷重を用いた試験結果の液状化強度比を使用し、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。この算出した補正係数 C_2 と正弦波荷重の液状化強度比の関係のプロットを図6に示す。豊浦砂は C_2 の値がほぼ $C_2=1.0$ であるが、浦安砂の場合は密度が増加するほど C_2 が小さくなり、地震波の不規則性の影響を強く受けていることが分かる。また、浦安波で行われた既往の研究¹⁾の液状化強度比と C_2 に関する近似曲線と比較すると、 C_2 の値が小さいことが分かる。このことから、原町波は豊浦波に比べて波形形状が液状化強度に与える影響が大きいと考えられる。

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震時に観測された原町波を使用して異なる試料に対して液状化試験を行った。その結果、豊浦砂は地震波の不規則性の影響を受けにくい、浦安砂は地震波の不規則性の影響が相対密度の増加に伴い大きくなることが分かった。また、既往の研究と比較すると、原町波は浦安波に比べて C_2 に与える影響が大きいことが分かった。

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、垂水秀樹氏と高木柚奈氏(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) 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, 2) 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, 3) 防災科学技術研究所：強震観測網 K-NET, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, 2011/03/11, 4) 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,

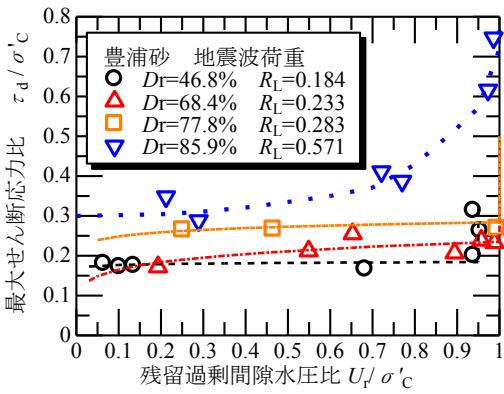


図4 豊浦砂における液状化試験結果

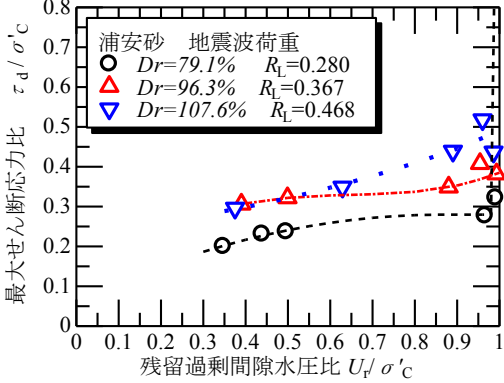


図5 浦安砂における液状化試験結果

表2 地震波の不規則性に関する補正係数

試料名	原町波		正弦波		不規則性に関する補正係数 C_2
	相対密度 $Dr(\%)$	液状化強度比	相対密度 $Dr(\%)$	液状化強度比	
豊浦砂	46.8	0.184	43.8	0.179	1.028
	68.4	0.233	67.7	0.229	1.017
	77.8	0.283	78.6	0.312	0.907
	85.9	0.571	88.0	0.569	1.004
浦安砂	79.1	0.28	75.8	0.212	1.321
	96.3	0.367	97.3	0.282	1.301
	107.6	0.468	108.5	0.444	1.054

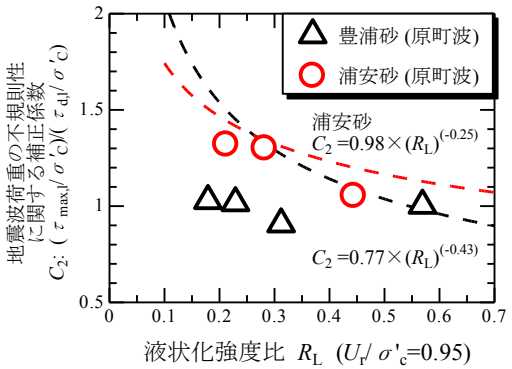


図6 正弦波荷重の液状化強度比と C_2 の関係