

神戸ポートアイランドまさ土層の液状化強度の推定

風間基樹¹・増田昌昭²・山口 晶³・柳澤栄司⁴

¹正会員 博士(工学) 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

²正会員 工修 前田建設工業(株)東京支店 (〒102 東京都千代田区九段北4-3-1)

³学生員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

⁴正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

1995年兵庫県南部地震の際、神戸ポートアイランドで液状化した埋立まさ土層の液状化強度を推定した結果を報告した。まず、地盤の液状化強度を定ひずみ非排水振動三軸試験の応力ひずみ関係から得られる累積損失エネルギー量ととらえ、その特性を密なまさ土供試体に対して求めた。拘束圧とひずみ振幅をパラメータとした三軸試験では、繰返しによる剛性低下や過剰間隙水圧比の上昇が累積損失エネルギーでほぼ一義的に表されることを示した。また、アレー記録から推定された応力ひずみ関係から求めた累積損失エネルギーと要素試験の結果を比較し、両者がほぼ整合することを示した。

Key Words : 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake, Kobe Port Island, liquefaction, Masa-do soil, liquefaction strength, array observation, dissipation energy, strain controlled cyclic tri-axial test

1. 研究の目的

1995年兵庫県南部地震において、神戸ポートアイランドでは人工島の埋立に使用されたまさ土が液状化した。このまさ土は、細粒分からレキ分まで広範な粒度分布を持つ土であり、今までは液状化しにくいとされる範疇にある土であった。このまさ土層の地震前の液状化強度を要素試験から求めることは、レキ分を含むため大口径の三軸試験が必要となること、大地震の履歴を受けたあとの原位置の不攪乱試料は必ずしも地震前の物性を有していると言えないなど、困難な点が多い。著者らは、すでに兵庫県南部地震で取得されたポートアイランドの鉛直アレー記録を用いて、地盤に発生したと思われる地震時のせん断応力と歪みの関係を推定した¹⁾。また、推定したせん断応力時刻歴を用いて、まさ土の液状化過程を繰返し単純せん断試験および繰返し三軸試験によって検討した²⁾。ここでは、アレー記録から推定された応力-ひずみ関係から、原位置のまさ土の液状化強度の推定を試みたのでそれを報告する。

2. 液状化強度の推定方法

図-1は、まさ土(圧密後 $Dr=83\%$, 2mm以下の試料を用いた)の0.54%定ひずみ制御の非排水繰返し三軸試験(等方圧密応力 1kgf/cm^2 , 正弦波載荷, 載荷振動数0.1Hz)から得られた応力ひずみ関係、過剰間隙水圧応答である。図は、全繰返し回数160回のうち

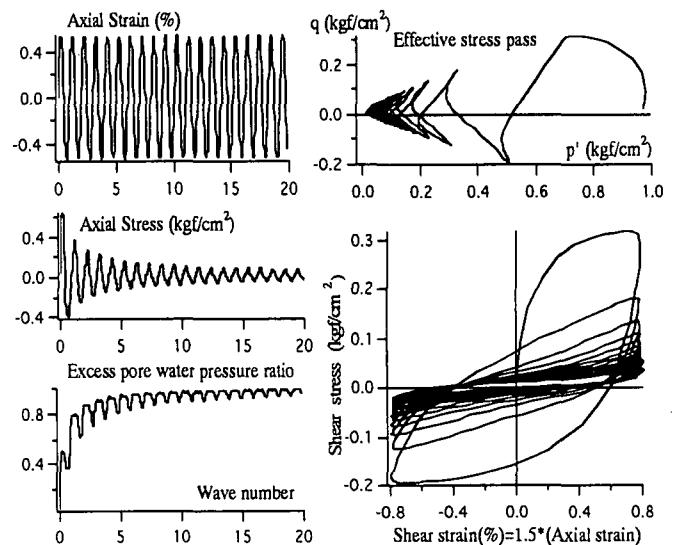


図-1まさ土の定ひずみ(0.54%)非排水繰返し三軸試験

20回までを図示している。繰返しせん断が加わると、過剰間隙水圧が上昇し各サイクルで発現する鉛直(抵抗)応力は徐々に低下し、最後は剛性がほとんどゼロとなる液状化状態に至る。ここで、土要素に蓄えられた累積損失エネルギー(履歴ループが描く面積の累積値)に着目すれば、図-1からわかるとおり液状化した極限の状態では履歴ループは扁平になり貯えられる塑性ひずみエネルギーはほぼゼロになる。したがって、液状化した場合、この蓄積する累積損失エネルギーは上限値を持つことになる。すなわち、この値は土がある応力下で地震荷重を受けた

とき、液状化する過程において塑性変形として蓄えることのできるエネルギー容量を表している。著者らは、この値を新たに「繰返しエネルギー強度」と呼び、液状化強度の新たな指標とすることを提案している³⁾。要素試験におけるこの累積損失エネルギーに関する今までの知見によれば、初期拘束圧で正規化した累積損失エネルギーは要素試験法の種類によらずほぼ一義的に決まること⁴⁾や過剰間隙水圧の上昇量とよい対応関係があること⁵⁾などが知られている。

したがって、これを神戸ポートアイランドのまさ土層に適用すれば、まさ土層の応力-ひずみ関係から得られる累積損失エネルギーの値は、上限を示すとともに、まさ土層が地震時に蓄えうる上限の繰返しエネルギー強度を与えていることになる。

3. アレー記録から求めた繰返しエネルギー強度

兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランドで観測された鉛直アレー記録から推定した応力-ひずみ関係を用いて、各層の中間深さにおいて累積損失エネルギーを計算した。すなわち、せん断応力の時刻歴 $\tau(t)$ とひずみの時刻歴 $\gamma(t)$ が得られたとき、応力-ひずみ曲線 f が得られるが、ある時刻 t までに地盤に蓄積された正規化累積損失エネルギー $W(t)$ は次式で求められる。

$$W(t) = \int_f \tau(\gamma) d\gamma = \int_0^t \tau(\gamma) \gamma'(t) dt$$

$$= \sum_{n=0}^{n(t=t_n)} \frac{\tau_{n+1} + \tau_n}{2} \cdot \frac{\gamma_{n+1} - \gamma_n}{\Delta t} \cdot \Delta t \quad (1)$$

図-2は、データから求めた累積損失エネルギーの蓄積過程である。累積損失エネルギーは、各層の初期有効上載圧（上から、 $\sigma_{vi} = 1.165, 2.50, 5.73 \text{ kgf/cm}^2$ ）で正規化して示した。まず、埋立まさ土層、沖積粘土層、洪積層の違いを見ると、上方に行くにしたがって、累積損失エネルギーは大きな値となり、上方ほど地盤が塑性化し、その仕事に大きなエネルギーが使われたことがわかる。また、5秒付近の最大のせん断応力が作用したところを見ると、洪積層では弾性的にエネルギーが蓄えられたのに対し、埋立まさ土層では、ほとんどのエネルギーが塑性仕事に費やされていることがわかる。これは、まさ土層では弾性範囲を大きく越えて塑性化したためであることは言うまでもない。沖積粘土層について言えば洪積層と埋立まさ土層の中間的な挙動を示している。

次に、埋立まさ土層の累積損失エネルギーに着目

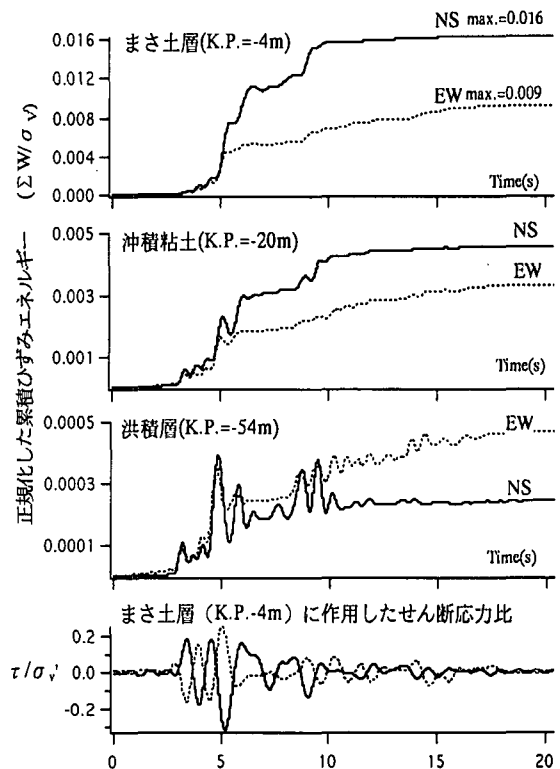


図-2 各深さにおける累積損失ひずみエネルギーの蓄積過程

すると、まだ地震動が終息しない10秒付近からその値はほぼ上限に達し、液状化によってせん断応力をほとんど伝えないような極限の状態になったものと推測できる。その上限の値は、NS成分で0.016、EW成分で0.009となり合計すれば0.025となる。なお、この累積損失エネルギーの蓄積過程は、推定されたせん断応力の時刻歴を用いた繰返しせん断試験の際に得られた過剰間隙水圧の蓄積過程²⁾と非常により対応関係が認められている。

4. 応力ひずみ関係から推定されたまさ土層の累積損失エネルギーと要素試験の対応

(1) 拘束圧の効果について

まさ土はその粒子破碎性ゆえにその特殊性があるとされている。ここではまず、等方圧密応力を $1-3 \text{ kgf/cm}^2$ に変化させた0.33%定ひずみ非排水三軸試験の結果を示す。用いたまさ土試料は、ポートアイランドで地震後採取された攪乱試料であり、2mmふるいを通じたものである。また、その圧密後の密度は88-97%であった。図-3は、繰返し回数と正規化累積損失エネルギーの関係を示したものである。なお、累積損失エネルギーは、繰返し三軸試験から得られた軸ひずみ-軸差応力関係をせん断ひずみ-せん断応力関係に換算した後算定している。また、図-4は、同じく定ひずみ試験において、各サイクルで示した剛性（最大応力/ひずみ振幅）を第1回目のサイ

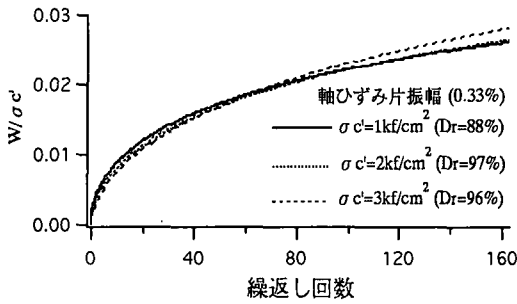


図-3 繰返し回数と正規化累積損失エネルギーの関係

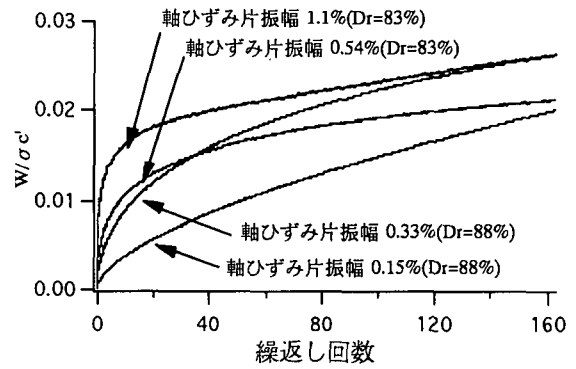


図-5 ひずみ振幅の影響

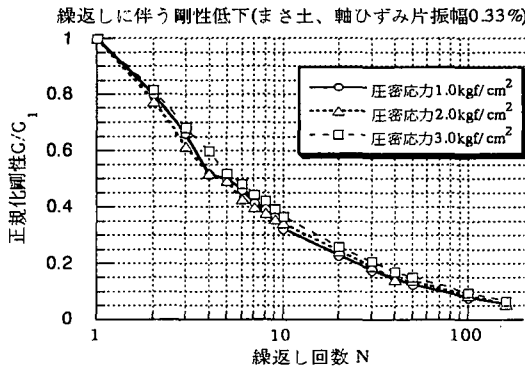


図-4 繰返し回数と剛性低下の関係

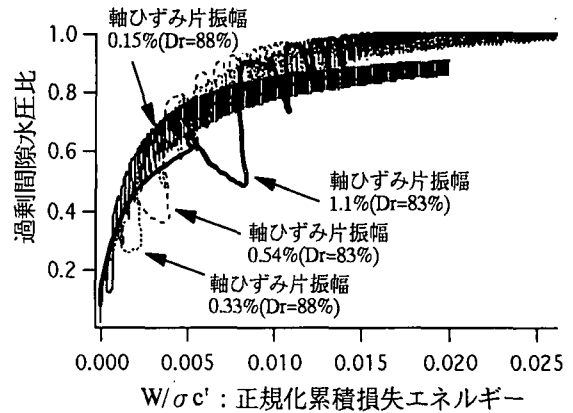


図-6 累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係

クルで示した剛性で正規化した剛性低下率と繰返し回数の関係を示したものである。図-3,4からわかるように、このような正規化によって、異なる初期拘束圧下の実験結果は、ほぼ1本の曲線になる。また、図-3,4から、正規化累積損失エネルギーと剛性低下の関係も一義的な関係にあることもわかる。以上から1-3kgf/cm²程度の応力レベルでは今回用いた試料の粒子破碎の結果への影響は大きく認められなかった。

(2) 三軸試験に用いたひずみ振幅の影響

図-5は、同じく密なまさ土供試体に対する定ひずみ振幅非排水繰返し三軸試験（正弦波0.1Hz）から得られた累積損失エネルギーと繰返し回数の関係である。繰返しの初期の段階では、ひずみ振幅が大きいほど累積損失エネルギーの値は急激に大きくなる。これは、1回の繰返しによって供試体に入力するエネルギー量が異なるためである。一方、繰返しの後半部分では、0.33%以上のひずみ振幅の試験の場合には、累積損失エネルギーはほぼ上限に達しているが、ひずみ振幅0.15%の結果は未だ上昇中である。これは、ひずみ振幅0.15%の試料が160回の繰返しの後でも、まだ過剰間隙水圧比が0.8程度にとどまっていることに対応している。なお、ひずみ振幅0.54%と0.33%の試験結果は後半部分で逆転している。これは、供試体の密度に差があることに加え、等体積条件であっても微小なひずみ履歴が供試体の材料強度を増加させたためと考えている。

図-6は、同じ実験結果の時間を媒介変数とした累

積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係を示したものである。過剰間隙水圧の上昇は、概ね正規化した累積損失エネルギーで説明できる。例えば、過剰間隙水圧比0.8を発生させるのに必要な累積損失エネルギーは、0.007~0.012程度の値である。また、実験によってこれら関係が少し異なるのは、初期の相対密度の若干の違いの他に、ひずみ振幅（ひずみ速度）の影響や先に述べたようにひずみ履歴が影響しているためと考えている。なお、過剰間隙水圧比が0.95を越えたあたりからも、ひずみエネルギーは約20%ほど増加することができるのは注目される。

図-7は、同じく試験結果を、供試体の剛性低下から評価したものである。図の剛性は、最大軸ひずみ時に発揮する軸応力を軸ひずみ振幅で除したいわゆるヤング率Eに対応するものである。したがって、通常の非排水三軸試験の整理方法に従えば、この値の約1/3がせん断剛性である。このうち繰返し1回目のせん断剛性を、凍結サンプリング試料を用いた各ひずみレベルでの動的変形特性試験結果⁹⁾と比較すると、本研究の結果が2,3割小さな値を与えている。

(3) 本研究で用いた再構成試料の液状化強度曲線

図-8は、従来の応力制御試験によって求めたまさ土の液状化強度曲線である。同図には、凍結試料を用いた大口径の振動三軸試験の結果⁹⁾も示してあるが、本研究で用いた試料の方が小さな液状化強度を

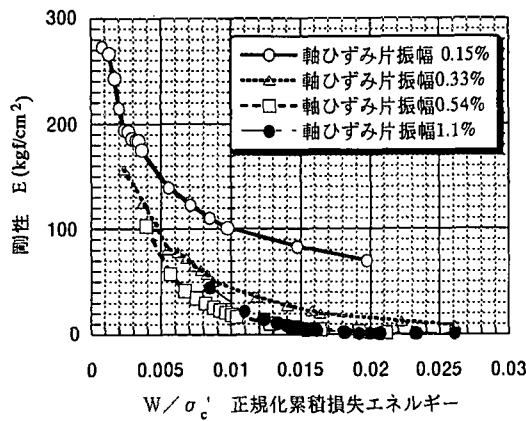


図-7 累積損失エネルギーと剛性低下の関係

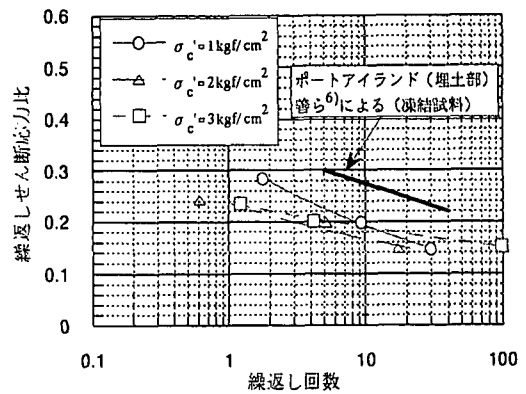


図-8 本研究で用いたまさ土試料の液状化強度曲線(DA=5%)

与えている。まさ土の再構成試料を用いて求めた液状化強度曲線^{7),8),9)}は、本研究の結果とほぼ同じ結果を与えていることから、原位置ではセメンテーションやレキの混入・かみ合わせによって繰返しせん断に対する強度が数割大きいと考えられる。

(4) 種々の土の累積損失エネルギーの比較

(豊浦砂・まさ土・沖積粘土の比較から)

最後に、豊浦砂・まさ土・沖積粘土の試料に対して行った定ひずみ非排水三軸試験結果を図-9に示す。豊浦砂は相対密度15%,83%, まさ土は48%, 83%の結果である。豊浦砂は相対密度が上がるにしたがってエネルギー強度がかなり大きくなる土であるが、まさ土は相対密度には豊浦砂ほど敏感ではない。このようなまさ土と豊浦砂の傾向の違いは通常の応力制御試験⁹⁾からも得られている。また、望月⁹⁾の応力制御試験によれば、まさ土は豊浦砂に比較して少ない繰返し回数の増分で軸ひずみが大きくなることを示されており、豊浦砂より靱性の小さな土と考えられる。また、参考のため示した粘性土の累積損失エネルギーは、砂質土のように繰返しによる急激な剛性低下がないため、図の範囲では液状化のように累積損失エネルギーが飽和することはない。

5. 結論

原位置のまさ土と本研究で用いた試料の違い、土の種類や密度の相違による傾向の違いを総合的に考慮すれば、定ひずみ振動三軸試験から得られたエネルギー強度は概ねアレー記録から推定されたエネルギー強度と対応すると考えてよいものと思われる。

参考文献

- 1) 風間基樹他：アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.171-182,1996.9.
- 2) 増田昌昭他：室内要素試験による神戸ポートアイランド埋立まさ土層の液状化過程の推定，第31回地盤工学研究

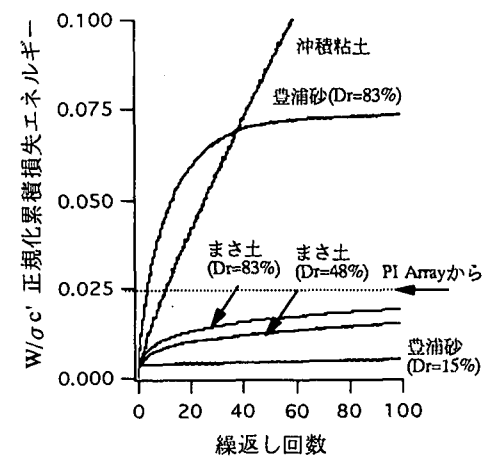


図-9 本研究で用いたまさ土試料と豊浦砂，沖積粘土の比較(軸ひずみ片振幅0.5-0.55%の試験)

発表会，pp.957-958,1996.7.

- 3) 風間基樹：累積損失エネルギーに基づく新たな液状化強度指標の提案，第32回地盤工学研究発表会，1997.7発表予定.
- 4) 菅野高広：砂の変形・強度特性に及ぼす主応力軸方向及び回転の影響に関する実験的研究，東北大学学位論文1994
- 5) Towhata, I. and Ishihara, K.: Shear Work and Pore Water Pressure in Undrained Shear, Soils and Foundations, Vol.25, No.3, pp.73-84,1985.
- 6) 善功企，山崎浩之：埋立地に用いたまさ土の液状化特性，土と基礎，Vol.44, No.2, pp.60-63,1996.2.
- 7) 後藤聡，森井慶行，谷澤房郎，末岡徹：大型三軸試験機を用いたまさ土の液状化特性，第31回地盤工学研究発表会，pp.965-966,1996.7.
- 8) 兵動正幸他：六甲アイランド埋立まさ土の動的強度特性に及ぼす初期せん断応力の影響，第31回地盤工学研究発表会，pp.967-968,1996.7.
- 9) 望月美登志，福島伸二：埋立地盤のまさ土の液状化特性，第31回地盤工学研究発表会，pp.971-972,1996.7.