

流動限界と損失エネルギーによる まさ土の液状化特性の評価

中山義久¹・西田一彦²・西形達明³・井上啓司⁴

¹正会員 工修 協同組合 関西土質研究センター 課長 (〒566-0042 大阪府摂津市東別府 1 丁目 3-3)

²正会員 工博 関西大学 教授 工学部土木工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3-1)

³正会員 工博 関西大学 助教授 工学部土木工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3-1)

⁴正会員 協同組合 関西土質研究センター 専務理事 (〒566-0042 大阪府摂津市東別府 1 丁目 3-3)

まさ土の液状化強度曲線および液状化に至る変形挙動と供試体内で消費される損失エネルギーの関係をまさ土の物性値である流動限界をもとに調べた。実験には締固めた供試体と繰返し三軸試験機を用いた。その結果、圧密後の間隙比と流動限界で液状化時までの累積損失エネルギー量が決まること、および累積損失エネルギー量から液状化強度曲線を推定できることが分かった。さらに、液状化に至るまでの変形特性についても考察し、変形係数比の低下は累積損失エネルギー量と双曲線関係にあること、および双曲線の定数と流動限界との関係について示した。

Key Words: decomposed granite soil, liquefaction, void ratio, grain size, consistency, dissipation energy

1. はじめに

比較的粒度のよい花崗岩の風化残積土であるまさ土は液状化強度が高く、良質な埋め立て材として知られ、とくに関西周辺では臨海部の埋め立て地盤材として多用されてきた。しかし、1995年の兵庫県南部地震において、まさ土地盤が液状化したことは周知の通りである。そして、これを機にまさ土の液状化に関する研究が再度活発に行われるようになった。筆者らはまさ土を対象とした場合、その液状化特性を細粒分含有率や平均粒径だけで評価することは不十分であることを指摘し、砂質土のコンシステンシーと等価な流動限界を指標とすれば、まさ土の液状化強度の評価が可能であることを示した¹⁾。また、このような砂質土の液状化に至るまでの変形特性も重要なポイントであり、これについては従来より損失エネルギーをもとに検討が加えられている。

損失エネルギーと液状化に至る変形挙動の関係を調べたものとして Towhata and Ishihara²⁾は中空ねじりせん断試験機を、坂井・落合³⁾は振動三軸試験機を、また片田・阿部・東山⁴⁾はオンライン地震応答載荷装置を用い、豊浦砂に対してそれぞれ液状化試験を実施している。それらの研究によると、累積損失エネルギーを用いると、たとえ応力経路の異なる液状化試験を実施しても、それぞれから得られる過剰間隙水圧を統一的に整理することが可能であることが示されている。しかし、これらの研究においては液状化に至る過程の変形特性と累積損失エネルギーの関係についてはあまり言及されていないように思われる。

一方、風間ら⁵⁾は砂質土、まさ土に対して定みずみ制御

繰返し三軸試験による液状化試験を行い、累積損失エネルギーと過剰間隙水圧、およびせん断剛性の低下の関係が一義的に求められることを明らかにしている。さらに風間らは⁶⁾累積損失エネルギーを用いて、地震時にまさ土地盤に発生する過剰間隙水圧やせん断剛性低下の予測をしている。この予測の特徴は地盤の液状化の有無ではなく、靱性・ねばりの影響を考慮していることにある。

このように累積損失エネルギーと液状化に至る過程における変形抵抗との関係を明確にすることが重要である。そこで本研究では、関西に数多く分布するまさ土の液状化過程におけるせん断剛性低下の挙動と、繰返し載荷中の累積損失エネルギーとの関係を明らかにし、個々のまさ土に対して物理・力学的性質と密接な関係にある流動限界を物性値の指標として考察したものである。

2. 用いた試料の特徴と実験方法

実験で用いた試料は表-1に示すように生駒山系、5種類(B試料, W・S試料, Y・K試料)と六甲山系、4種類(RA, RB試料, TK試料, T試料)および淡路島1種類(AW試料)である。まさ土は母岩、産地、風化の程度により軟岩から細粒土に近いものまで存在するが本研究で使用した試料は関西地区で採取されるまさ土のほぼ代表的なものとなっている。なお、各試料の粒度は文献1)を参照されたい。

2mmふるい通過試料を用い、直径50mm、高さ100mmの円柱供試体となるように3層に分け、締固めて作製した。試験試料の乾燥密度は最小・最大密度試験より得られた結果

表-1 試料の物性値

タイプ	産地	試料名	平均粒径 D_{50} (mm)	細粒分含有率 F_c (%)	流動限界 w_f (%)
領家型	生駒山地	B1	0.066	55.0	40.5
		B2	0.057	58.0	41.5
		B3	0.170	31.0	28.0
		W1	0.330	23.0	23.0
		W2	0.380	12.0	21.0
		W3	0.460	16.0	18.2
		Y1	1.200	16.0	28.5
		Y2	0.210	15.0	24.0
		Y3	0.71	12.0	22.6
		KH	2.500	13.6	29.1
		KL	2.500	16.7	25.1
		SH	0.670	13.9	26.7
	淡路島	AW	2.000	14.0	35.8
六甲型	六甲山	RA	2.600	16.9	18.0
		RB	0.550	16.0	19.1
		TK	3.020	15.0	18.0
		TA	2.280	13.2	22.2
		TB	2.200	16.6	33.4
		TC	2.000	15.5	33.5

をもとに緩詰めから密詰めまで3~5種類の値を設定した。締固め後、自立しない供試体については凍結した後、三軸セル内で2時間以上かけて解凍した。そして、CO₂通気と脱気水通水後、196kPaの背圧を負荷し、B値が0.95以上であることを確認して、 $\sigma_v = 98\text{kPa}$ で等方圧密を行った後、液状化試験を行った。繰返し載荷は荷重制御による周波数0.1Hzのサイン波とし、側圧一定の非排水条件で行った。本研究では液状化を生じ易い比較的浅い飽和地盤の有効土被り圧を想定して圧密圧力を98kPaに統一した。繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_v'$ である。ただし、 σ_v' は繰返し軸差応力である。

3. まさ土の液状化強度特性

(1) 過剰間隙水圧の発生挙動

図-1は液状化試験より得られる液状化強度曲線を示している。液状化強度比は各供試体ごとに軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ となる繰返し載荷回数と、繰返し応力振幅比の関係から載荷回数20回時で求めたものである。流動限界による影響をみるために、圧密後の間隙比がほぼ等しく流動限界の異なる試料の液状化強度曲線を示している。この図をみると、流動限界が大きくなると液状化強度比が大きくなっており、まさ土の液状化強度比は流動限界に大きく影響

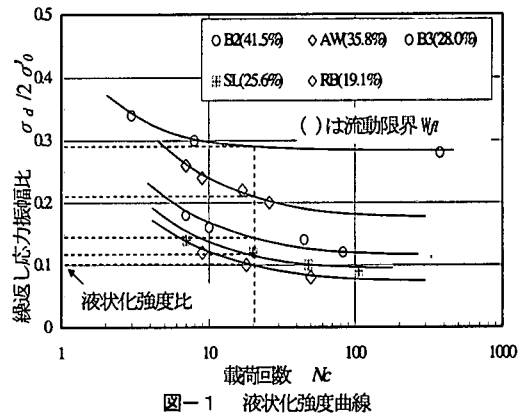


図-1 液状化強度曲線

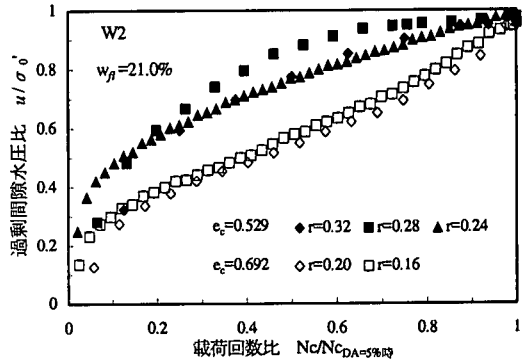


図-2 間隙水圧と載荷回数比の関係(W2 試料)

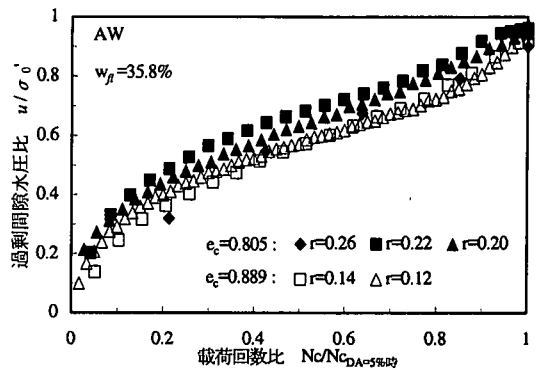


図-3 間隙水圧と載荷回数比の関係(AW 試料)

を受けることがわかる。したがって流動限界はまさ土の液状化強度特性と密接な関係を有しているものと考えられる。そこで、液状化過程におけるまさ土の液状化に至るまでの変形挙動について考える上で損失エネルギーに注目し、これと流動限界との関係を明らかにすることで液状化時の変形特性を流動限界によって整理することを試みる。

まず、液状化($DA=5\%$)に至るまでの間隙水圧の発生経路を示したものが図-2、図-3である。図-2は流動限界の小さいW2試料の試験結果を、図-3は流動限界の大きいAW

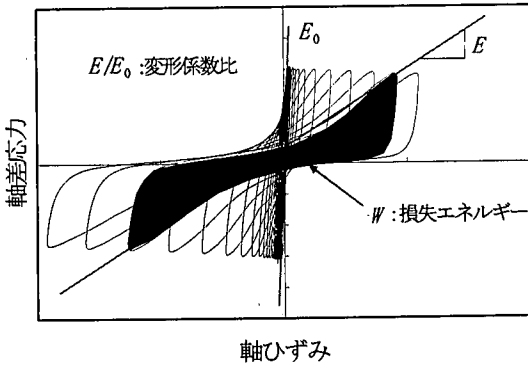


図-4 ヒステリシスループの模式図

試料の試験結果を示している。図は縦軸に過剰間隙水圧比、横軸には軸ひずみ両振幅 DA=5%時の回数で除した载荷回数比をとった。過剰間隙水圧は繰返し载荷中に変動するが図中の点は安全側を想定して1サイクルごとの最大値をとった。なお、両図ともに黒塗りは密詰め試料を表し、白抜きは緩詰め試料の場合を表している。まず、図-2をみると、間隙比の違いによる過剰間隙水圧の発生経路には顕著な違いがみられるが、同一間隙比においては応力比が異なってもほぼ同一の過剰間隙水圧発生経路を示している。一方、流動限界の大きい図-3をみると、間隙比の違いに関わらず間隙水圧の発生経路はほぼ同一になっていることがわかる。

次に、図-4は繰返し载荷によって描かれるヒステリシスループの模式図である。1つの履歴曲線で囲まれた面積が繰返し回数1回あたりに供試体内部で変形に費やされたエネルギーを示している。このエネルギーを損失エネルギー W ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$)と定義し、载荷によって累積されたものを累積損失エネルギー ΣW ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$)とした。また、このヒステリシスループの頂点を結ぶ直線の勾配を変形係数 E とし、繰返し载荷第1波目の勾配を E_0 として、任意の载荷回数に対する変形係数比 E/E_0 を変形特性の変化の指標として用いることにした。

図-5はW2試料、図-6はAW試料の試験結果を示している。縦軸には過剰間隙水圧比、横軸に累積損失エネルギーを軸ひずみ振幅 DA=5%時の累積損失エネルギーで正規化したものをとった。以下、これを累積損失エネルギー比と呼ぶ。両図をみると、流動限界の小さい試料では、間隙比の違いによって多少の差がみられるが、全体的な間隙水圧の発生経路には大きな差はみられない。とくに、流動限界の大きいまき土になると、いずれの条件でも過剰間隙水圧の発生経路はほぼ等しくなっている。

以上の結果より、载荷回数比でまとめたものでは間隙比の違いによって間隙水圧の発生経路に差が生じたが、累積損失エネルギー比で表現すると、同様な発生経路になる。この結果より、液状化過程における過剰間隙水圧の発生挙

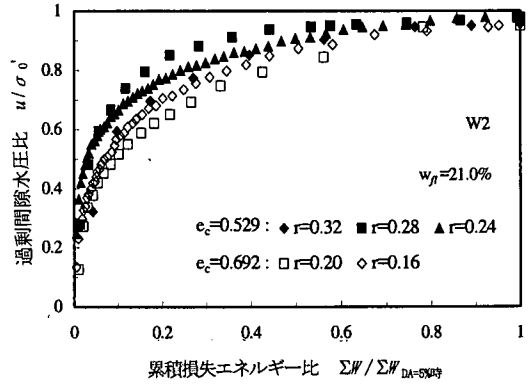


図-5 間隙水圧比とエネルギー比の関係(W2試料)

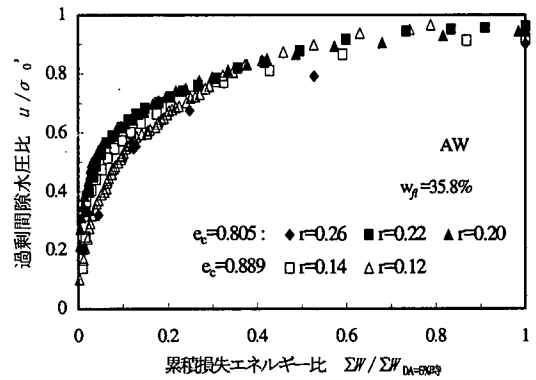


図-6 間隙水圧比とエネルギー比の関係(AW試料)

動は累積損失エネルギーによって統一的に表現しうることがわかる。

(2) 液状化時の累積損失エネルギー

流動限界の小さい試料($w_f < 30\%$)と流動限界の大きい試料($w_f > 30\%$)について図-7と図-8にそれぞれDA=5%までの累積損失エネルギーと载荷回数の関係を示した。これらの図をみると、同一間隙比の試料について繰返し応力振幅応力比 r が0.3より小さい範囲では、 r の違いに関わらず液状化時の累積損失エネルギー ΣW ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$)は等しくなっていることがわかる。このことは液状化強度曲線は等累積損失エネルギー線と等価であることを示している。さらに、この累積損失エネルギーの値は間隙比が小さくなるほど大きくなっている。また、流動限界の違いに注目すると、流動限界の大きい試料の方が液状化時の累積損失エネルギーの値は大きくなっていることがわかる。

以上の結果より、液状化に至るまでの累積損失エネルギーは繰返し応力振幅比が0.3より小さい範囲では間隙比と流動限界によって表すことができるものと考えられる。そこで、全試料を液状化に至るまでの累積損失エネルギー

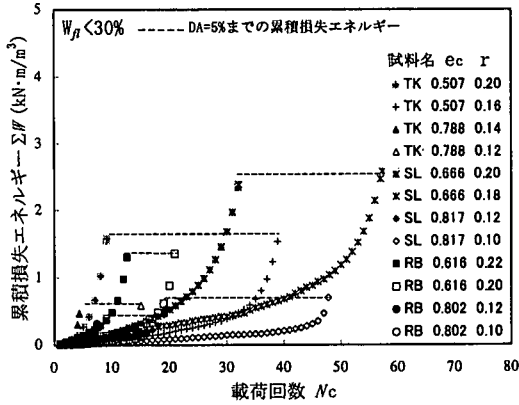


図-7 累積損失エネルギーと載荷回数との関係(流動限界<30%)

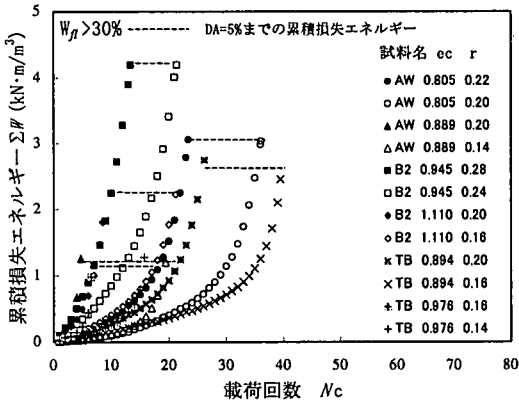


図-8 累積損失エネルギーと載荷回数との関係(流動限界>30%)

と流動限界の図上にプロットすると図-9のようになる。なお、図中の値は圧密後の間隙比を表している。この図で、ほぼ同じ間隙比の値を等間隙比線として結ぶと液状化に至るまでの累積損失エネルギーと流動限界は図中のような曲線関係を持つことになる。これより、まき土の間隙比と流動限界がわかれば、液化時の累積損失エネルギーの推定が可能となる。

4. 液状化強度曲線の推定

以上に得られた結果を用いると液状化時の累積損失エネルギーを用いて液状化強度曲線の推定を行うことが可能となる。図-10は本研究で実施したすべての実験におけ

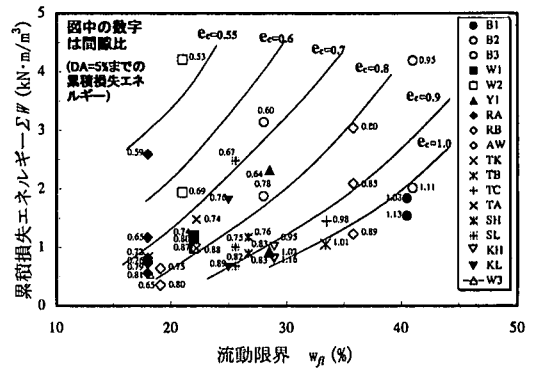


図-9 累積損失エネルギーと流動限界の関係

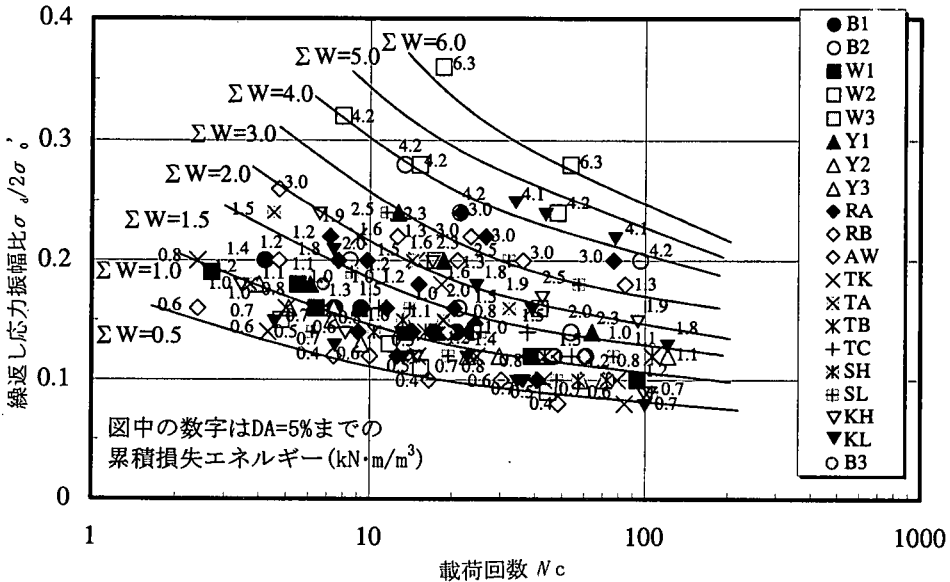


図-10 繰返し応力振幅比と載荷回数との関係

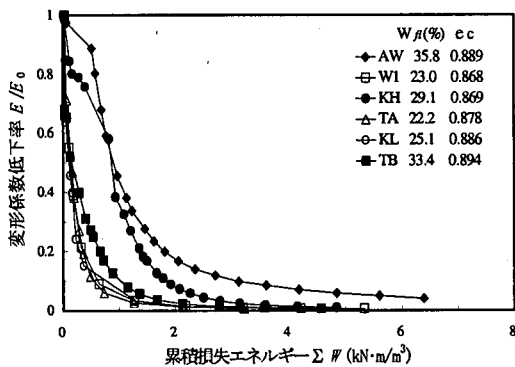


図-11 変形係数比の低下率と累積損失エネルギーの関係

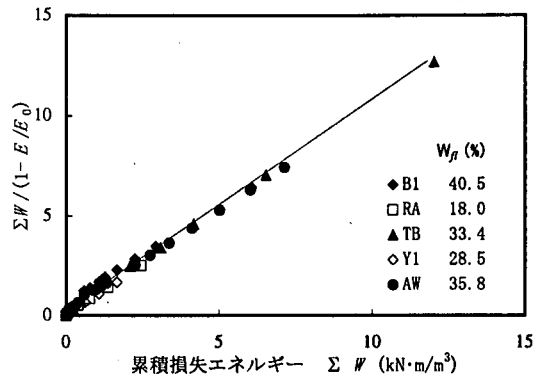


図-12 変形係数比の低下率の双曲線近似

る液状化時の繰返し応力比 $\sigma_v/2\sigma'_v$ と載荷回数 N_c の関係を示している。なお、図中の値はそれぞれの $DA=5\%$ までの累積損失エネルギーを示している。多少のばらつきはみられるが、図中に示すような等累積損失エネルギー線を引くことができる。液状化強度曲線は等エネルギー線と等価であるとすると個々の線は液状化強度曲線そのものであることがわかる。したがって、この図より、液状化時の累積損失エネルギーがわかれば、容易に液状化強度曲線を推定することができる。これにより、まさ土の物性値としての流動限界と状態量としての圧密後の間隙比を知ることにより図-9 から液状化時の累積損失エネルギー値を求め、この値から図-10 を用いることで液状化強度曲線を簡便的に推定することができる。

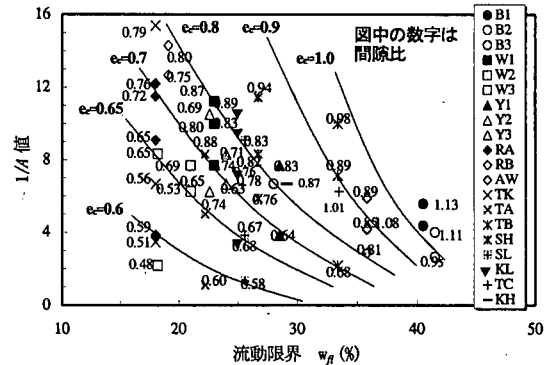


図-13 定数 1/A と流動限界の関係

5. 液状化過程における変形特性

現在、液状化の予測をするためには液状化強度を知ることが主眼となっている^{7,8)}。しかし、液状化強度のように液状化する、しないの2極的な考え方には液状化強度の定義の仕方により過大評価や過小評価する可能性がある。破壊に至らなくとも大きな変形を生じると構造物は機能しなくなるなどを考えると、これからの耐震設計を考える上でその変形特性を検討することが非常に重要である。そこで、ここでは前節で説明した変形係数比の低下率に注目し、土が繰返しせん断を受けて液状化に至るまでの変形係数の低下について検討する。そして、前述までの液状化強度の推定法と同様に流動限界と変形係数の低下挙動の関係を明らかにすることを試みる。

繰返し載荷に伴う変形係数比の低下挙動の表現には載荷回数、間隙水圧、累積損失エネルギーなどを用いる方法があるが、ここでは前章までに述べてきた累積損失エネルギーと変形係数比の関係に注目する。図-11 は縦軸に変形係数比 E/E_0 を、横軸に $DA=5\%$ に至るまでの累積損失エネルギー ΣW ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$)をとったものである。この図では流動

限界による影響をみるために、間隙比、応力比がほぼ等しく、流動限界の異なる場合の結果を示した。この図より、流動限界が20~25%の範囲では変形係数比の低下挙動に大きな違いはみられないが、流動限界が大きくなると変形係数比の低下曲線の勾配が緩やかになっており、損失エネルギーの蓄積量も大きくなっている。このことは流動限界の大きいまさ土は繰返し載荷に対して剛性を保持する能力が高く、繰返しせん断に対する変形抵抗性が高いことを示している。そこで、この剛性の低下率を定量的に表現するため、粘性土について求めた双曲線関係式で回帰を行った⁹⁾。

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{\Sigma W}{A + B\Sigma W} \quad (1)$$

ここで、 A, B は回帰定数、 ΣW は累積損失エネルギーを示している。

図-12 は双曲線の係数を求めるための直線近似の結果である。この図より累積損失エネルギーと $\Sigma W/(1-E/E_0)$ の間には明確な直線関係が存在することから変形係数の低下を累積損失エネルギーの双曲線関数で表現することの妥当性が伺える。この関係式より算出された定数 $1/A$ は加振初期の変形係数比の低下率を表しており、定数 $1/B$ は最終的な変形係数比の低下率を表している。液状化過程

のまさ土の変形挙動を考えると、最終的な変形係数比の低下率を考えるよりも初期の変形抵抗を表す定数 $1/A$ を基準にした方がよいと考えられる。

そこで、まさ土試料におけるすべての実験結果について定数 $1/A$ と流動限界の関係を示したものが図-13である。図中の値は間隙比を示している。この図をみると、ほぼ同じ間隙比の値を等間隙比線として結ぶと定数 $1/A$ と流動限界は図中のような曲線関係を持つことになる。

また、図より流動限界の大きい試料の方が繰返しせん断初期での変形に対する抵抗性が高く、変形に対する剛性をより保持しうることがわかる。しかし、流動限界の小さい試料においては、ある程度まで締固めないで繰返しせん断初期での変形に対する抵抗性が低く、規模の小さい地震においても変形を起こす可能性があることを示している。したがって、この関係より、まさ土地盤の間隙比と流動限界から地震動に対する変形抵抗の概略的な判別が可能であると考えられる。

6. まとめ

広範囲の物性値を有するまさ土の液状化特性を表す指標として流動限界を用いることの妥当性を検討した。そして液状化過程における損失エネルギーに注目して強度と変形の立場からまさ土の液状化特性を考察した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 液状化に至るまでの累積損失エネルギーは、間隙比が同じであれば繰返し応力振幅比に関わらずほぼ同じ値になる。このことから従来から用いられている液状化強度曲線は液状化に至るまでの累積損失エネルギーの等しい線、すなわち、等エネルギー線と等価であることがわかった。
- 2) まさ土の間隙比と流動限界から、液状化に至るまでの累積損失エネルギーの値を簡便に推定することができる。
- 3) 2)の方法で累積損失エネルギーが推定できると、図-13を用いることで容易に液状化強度曲線を推定すること

ができる。すなわち、間隙比と流動限界から液状化強度曲線を直接推定することができることが明らかとなった。

4) 流動限界と間隙比を用いることで、液状化に至るまでの変形抵抗の変化を容易に評価することができる。

最後に本論文を進めるに当たり、実験に従事して頂いた元関西大学大学院生 竹田昌史君に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 中山義久, 西田一彦, 西形達明, 井上啓司: まさ土の物性と液状化特性, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 207~215, 1999.
- 2) 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.
- 3) 坂井晃, 落合英俊: せん断仕事に基づく飽和砂地盤の液状化解析, 土木学会論文集, No. 307/III-5, pp. 75~83, 1986.
- 4) 片田敏行, 阿部幸樹, 東山晃: ひずみエネルギー蓄積効果を有した飽和砂の地盤の液状化過程の考察, 土木学会論文集, No. 388/III-7, pp. 43~50, 1987.
- 5) 風間基樹, 柳沢栄司, 増田昌昭: 定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性, 土と基礎, 第46巻, 第4号, pp. 21~24, 1998.
- 6) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳沢栄司: 地盤に投入された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集, 第631号/III-48, pp. 161~177, 1999.
- 7) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設的设计上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp. 204~209, 1997.
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, pp. 91~97, 1996.
- 9) 中山義久, 西田一彦, 西形達明, 井上啓司: 繰返し载荷を受けた粘性土の変形係数の低下とその回復, 土木学会論文集, No. 589/III-42, pp. 131~141, 1998.

(2000. 7. 3 受付)

EVALUATION OF LIQUEFACTION OF DECOMPOSED GRANITE SOILS BY MEANS OF FLOW LIMIT AND DISSIPATION ENERGY

Yoshihisa NAKAYAMA, Kazuhiko NISHIDA, Tatsuaki NISHIGATA and Keiji INOUE

Deformation characteristics of decomposed granite soils during liquefaction process were experimentally discussed from results of cyclic tri-axial test. As a result, the accumulated dissipation energy at occurrence of liquefaction depends on the void ratio and flow limit value of the sample of decomposed granite soil, and the approximate liquefaction resistance can be easily estimated from the values of the accumulated dissipation energy. Furthermore, the decrease process of shear modulus during liquefaction is closely related with flow limit value, and has a hyperbolic relation to the accumulated dissipation energy.