

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

Evaluation of Liquefaction Resistance Using Strain Controlled Cyclic Triaxial Test

風 間 基 樹 (かざま もとき)

東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻

柳 澤 栄 司 (やなぎさわ えいじ)

東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

増 田 昌 昭 (ますだ まさあき)

前田建設工業(株)東京支店

1. ま え が き

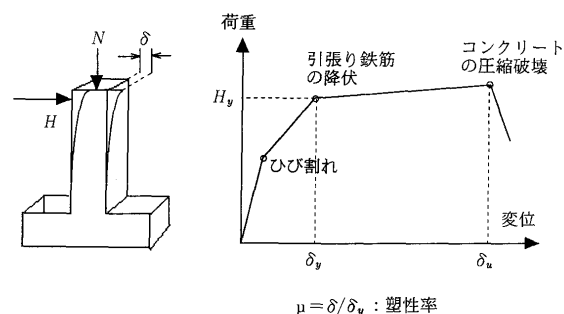
阪神・淡路大震災を契機に、土の液状化に関連して、幾つかの課題が提起されてきた。例えば、震災1年後の1996年1月に出された土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」¹⁾では、“まさ土のような礫、砂、シルトからなる均等係数の高い土の静的および動的変形挙動特性の研究の進展”や“高密度、低繰返し回数のもとでの液状化強度を適切に評価できるような基準等の改訂の必要性”が指摘されている。また、何よりもレベル2地震動に対して、土構造物の破壊を防ぐための方策と土材料の靱性を評価できるような液状化強度指標が求められているところである。

ここでは、以上のような課題に加えて、従来から指摘されている細粒分の影響なども適切に評価できる液状化強度評価法の可能性として、定ひずみ制御の繰返し三軸試験を利用する方法について考えてみる。

2. 液状化強度における靱性の評価の必要性

現在、土の非排水繰返しせん断強度（砂質土を対象とする場合には液状化強度と呼ばれている）は、一定応力振幅の繰返し三軸試験から求められることが多い。その結果得られる強度曲線は、一定の応力振幅の荷重を加えたとき、軸ひずみ振幅がある大きくなるまでの繰返し回数と応力比の関係を与えており、土の疲労破壊的な強度を与えていると考えられる。

この試験方法の不備な点としては、1)低サイクルでの強度を求めることが難しいこと、2)载荷中のひずみ速度が異なること、3)ひずみが大きくなった時の挙動の信頼性などがしばしば指摘されてきた。しかし、より本質的な問題点は地震動によって急激にせん断抵抗を失う砂質土の液状化と粘土の疲労による強度低下を区別することができないという点であると考えられる。特に、レベル2の地震動に対する検討を行う場合には、粘性土でも所定の荷重に対して破壊と定義されるひずみを越える可能性が高く、破壊後に保有している地盤のねばりを適切に評価する手法が確立されなければならない。また、仮に地盤の強度や靱性を高めるための地盤改良を施すことになった場合にも、その効果を評価できなければならない。現在の方法では液状化するかしんないかの判定



図—1 鉄筋コンクリート橋脚の水平保有耐力

を行うのが主目的であり、延性的な性質を評価するものにはなっていない。現在、岸壁・堤防・盛土・擁壁などの地震時変形量を照査するための解析もしばしば行われるが、その際解析に入れるべき地盤物性は、この強度曲線を模擬して決定する場合が多い。液状化に起因する地震時の大きな被災変形量は、地盤が液状化してからの残留強度やねばりに左右されると考えられることから、靱性の評価は解析の信頼性を左右するものと言える。

なお、吉見²⁾は強度曲線において設計で考えている以上の応力振幅の荷重が作用したときの液状化抵抗の増加の大小をねばりと言う観点から考察しているが、ここで言っている材料の靱性とは少し異なる意味を持つものである。

3. 定ひずみ制御試験の必要性

定ひずみ制御試験の必要性を説明するには、鉄筋コンクリート橋脚の繰返し荷重に対する水平保有耐力の評価³⁾を例にとってみるとよい。図—1は、一般的な鉄筋コンクリート橋脚に静的に水平荷重を加えたときの荷重-変位関係である。破壊過程をみると、まずコンクリートにひび割れが入り、次に引張り鉄筋が降伏する。この段階で、剛性は非常に小さくなるが、抵抗を若干増しながら変形が増大していく。そして、最後に圧縮側のコンクリートの破壊によって部材は急激な脆性破壊に至る。さて、静的荷重に対してこのような抵抗特性を持つ橋脚の繰返し荷重に対する靱性を評価しようとするとき、机上では荷重制御方式と変位制御方式が考えられる。しかし、繰返しによって強度低下を起こすような部材を、静的強度に近い一定荷重レベルで繰返し载荷試験することはできない。2度目、3度目の载荷時にその荷重を發揮

できない事態に至るからである。一方、仮に引張り鉄筋が降伏する荷重の1/2のレベルで一定荷重の繰返し载荷はできる。しかし、その場合には鉄筋の疲労試験になってしまう。このため、鉄筋コンクリートや鋼の橋脚の繰返し荷重に対する保有耐力は、降伏を起こす変位レベルに基づく繰返し载荷試験から検討が行われている。

以上が、大地震を想定した場合に、ひずみ振幅一定で繰返し三軸試験をすべきだと言う理由であるが、土の場合には少し事情が異なっている。よく知られているように、密な砂は大ひずみ時にダイレイタンスーによって剛性が回復する。この現象によって鉄筋コンクリートではできなかった大きな荷重レベルでの荷重一定試験が、土によってはできるのである。このことがまさに、応力制御試験を採用している理由でもある。言い換えれば、応力制御試験は、比較的密な砂質土を対象として想定された液状化強度評価法と言えるだろう。

さて、工学的に問題となる液状化とは、過剰間隙水圧の上昇によってせん断強度が急激に低下してしまう現象である。その意味では、中密より密度の大きな砂は過剰間隙水圧が上昇してもあるひずみレベルで剛性が回復する砂であり、このような土は大きな液状化被害を発生させない可能性がある。現実に残留変形や強度が問題になるのは、このような密な砂の液状化ではなく、大ひずみでも剛性が回復しないような緩い砂の液状化であり、その場合には先の理由でひずみ制御試験が有効と考えられるのである。

4. 剛性低下に基づく液状化の評価

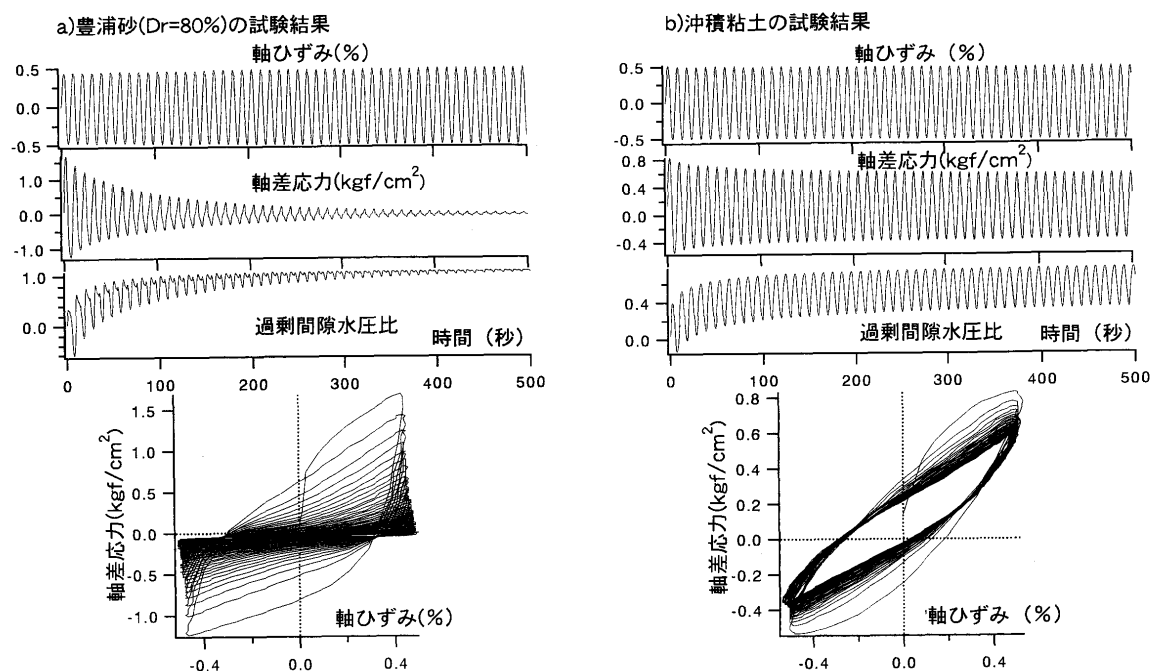
先の議論から、被害との関連で液状化強度を考えるならば、繰返しせん断強度としての応力比で評価するよりもむしろ、もともとの静的強度あるいは剛性がどのくらい低下するかで定量化する方が被災量との対応が容易であると考えられる。すなわち、液状化を評価するための

指標としては、発揮しうる最大の抵抗値ではなく、初期の剛性を急激にその1/100程度まで低下させるまでに必要な外力の大きさをとる方法が考えられる。このように液状化強度の定義をする場合には、応力振幅一定の繰返し三軸試験では都合が悪い。なぜなら応力振幅一定で剛性を1/100程度にまで低下させるためには、非常に大きなひずみレベルまで供試体を変形させなければならない、これが難しいからである。

図—2は、軸ひずみ片振幅0.5%の定ひずみ制御の繰返し非排水三軸試験の結果を示している。図には、密な豊浦標準砂 ($D_r=80\%$) の結果と宮城県石巻稲井地区から採取した乱さない沖積粘土 ($I_p=30\%$) の結果を示している。豊浦砂は繰返し変形によって徐々に過剰間隙水圧が発生し、それに伴って各サイクルで発揮される軸差応力も低下する。そして最後は剛性がほとんど0となる状態に至る。一方、沖積粘土はこのひずみレベルでは、繰返し50回を与えたとき、過剰間隙水圧比は最高0.8程度にまで上昇しているが、剛性は初期剛性の7割程度にしか低下しない。このような傾向は多くの粘性土に見られる一般的なものである(例えば4,5)。次に、同様の試験を細粒分を35%以上含む東京国際空港埋立地の乱さないシルト質砂(以下羽田土と称す)や緩い豊浦砂 ($D_r=20\%$)・六甲まさ土に対して行い、繰返し1回目と n 回目の剛性比を繰返し回数の関係として描いたのが図—3である。各試料の粒径加積曲線を図—4に示す。この図から、仮に液状化を繰返しによる剛性低下が1/100になることと定義するならば、この沖積粘土を液状化しない土として明確に除外することができる。

5. 靱性の評価

それでは、密度の異なる砂や塑性の程度の異なる土の靱性をどのように評価したらよいだろうか。先に示したひずみ制御試験によって得られる応力-ひずみ関係(図



図—2 ひずみ制御試験結果の例(繰返し50回まで、载荷振動数0.1 Hz、等方圧密応力=1 kgf/cm²)

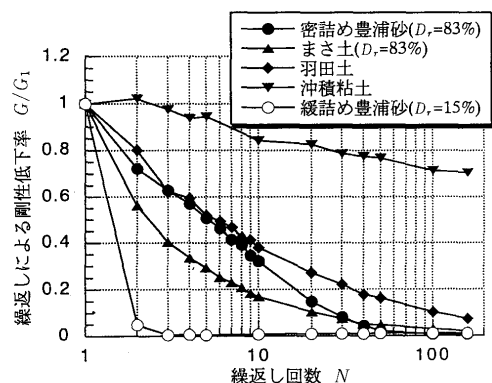


図-3 ひずみ制御試験から求められた繰返しに伴う剛性低下率
(軸ひずみ片振幅0.5~0.55%のひずみ制御試験結果)

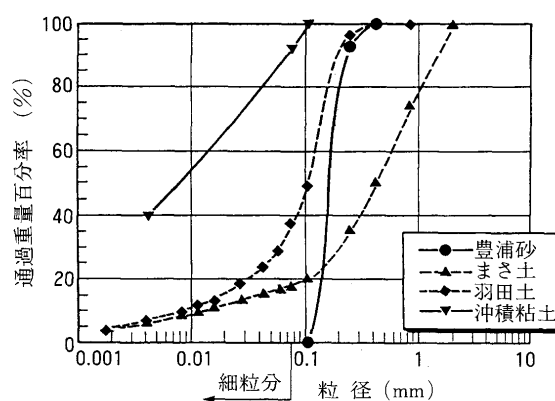


図-4 試験に用いた材料の粒度分布

—2) 中で、土の塑性ひずみエネルギーとして蓄えられた累積損失エネルギーに着目してみよう。よく知られているように、1 サイクル間に費やされた損失エネルギーは、ループで囲まれた面積であり、せん断応力とひずみの時刻歴が得られたとき、ある時刻までに地盤に蓄積された累積損失エネルギーは次式で求めることができる。

$$W(t) = \oint_f \tau(\gamma) d\gamma = \int_0^t \tau(t) \dot{\gamma}(t) dt \dots \dots \dots (1)$$

図-2 からわかるとおり三軸試験で液状化した極限の状態を考えると、履歴ループは偏平になり、1 サイクルの損失ひずみエネルギーはほぼ0になる。靱性のある土では、履歴ループが常に存在するので、損失エネルギーは一定の傾きで増加する傾向を示す。しかし、液状化するような土の場合には、土が蓄えられる塑性ひずみエネルギーは上限値を持つであろう。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して費やすことのできるエネルギー容量を表しており、この値が大きいほどエネルギー吸収性能が高い土と考えることができる。したがって、このエネルギー量を土の靱性を加味した液状化強度指標とみなすことができる。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^{6),7)}や、過剰間隙水圧の上昇量とよい対応関係があること⁸⁾、粘性土の剛性低下量が一義的に説明できること⁹⁾、応力振幅一定試験とひずみ振幅一定試

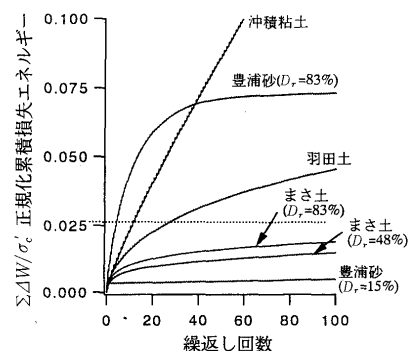


図-5 種々の土の正規化累積損失エネルギーの比較
(軸ひずみ片振幅0.5~0.55%のひずみ制御試験結果)

験で得られる初期液状化に至るまでの累積損失エネルギーがほぼ同じであること¹⁰⁾などが明らかにされている。また、累積損失エネルギーは一部の有効応力解析モデル¹¹⁾にも利用されている。

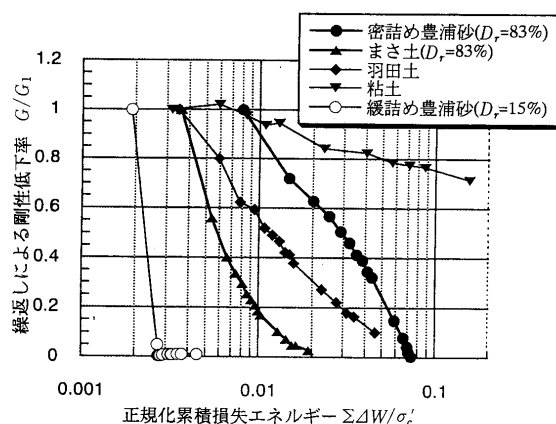
図-5 は、種々の土の累積損失エネルギーと繰返し回数の関係を示したものである。これらはすべて圧密応力 1.0 kgf/cm² で等方圧密した後、载荷速度 0.1 Hz の正弦波、軸ひずみ片振幅が 0.5~0.55% のひずみ制御繰返し三軸試験によって求められたものであり、エネルギーは軸差応力-軸ひずみ関係をせん断応力-せん断ひずみ関係に換算した後で求めている。これを見ると、費やされる累積損失エネルギーは沖積粘土・密な豊浦砂・羽田土・まさ土・緩い豊浦砂の順で大きくなる。豊浦砂の 1 回の繰返しによるエネルギー増分は液状化のため徐々に小さくなるのに対し、細粒分の影響は繰返し回数が増えてからの損失エネルギーの増分に現れているようである。設計では、ひずみ制御試験から得られた図-3 のような剛性低下の関数と組み合わせることによって得られる剛性低下率と累積損失エネルギーの関係 (図-6) を利用することができる。

また、試験に利用するひずみ振幅の考え方としては、大きな地震荷重を想定して静的強度を発揮するひずみレベルとするか、あるいは数回から 20 回程度で液状化と定義される剛性低下を起こすようなひずみ振幅で行うのが当面考えられる対応である。ひずみ振幅を規定しないことにより、強度回復を加味した累積損失エネルギーが算定できる可能性があるからである。

なお、応力制御試験と比較してひずみ制御試験は、ひずみ速度の影響を考慮できることのほかに、1 回の試験で繰返しによる剛性低下を評価できることや、試験機の制約によるひずみの限界を考えなくて良いなどの長所も有している。

6. 地震荷重の算定法

以上で述べたような強度指標を設計に利用するためには、検討対象地盤に大きな剛性低下を起こさせるような繰返し荷重が、これを入力エネルギーとしてとらえたとき、1 回の大地震の破壊力とどのように対応しているのかを明らかにすることが必要となる。今まで、エネルギーに基づく液状化の評価は、地震動のマグニチュードと



図—6 正規化累積損失エネルギーと剛性低下率の関係
(軸ひずみ片振幅0.5～0.55%のひずみ制御試験結果、繰返し100回まで)

震央距離の関係から得られるある地点のエネルギー量との関係で、液状化の危険度解析に利用されてきた経緯がある^{12)～14)}。詳細な解析に利用するためには、このような入力エネルギーのマクロな取扱いではなく、液状化判定の対象とする地盤の直下、ある地震動が想定されたときの入力エネルギー量を調べる必要がある。片田ら^{15),16)}は、すでにオンライン実験を用いて、地震時の入力エネルギーを土に蓄えられたひずみエネルギーの観点から検討している。また、筆者ら¹⁷⁾はここで示した考え方に基づいて、神戸ポートアイランドのまさ土層の累積損失エネルギーを検討した。その結果、プレー観測記録から推定した累積損失エネルギーとまさ土の非排水定ひずみ繰返し三軸試験から推定したそれがほぼ整合することが明らかとなっている。

外力算定の難しさは、土に入力する地震エネルギー量が地盤の応答に左右されることにあるが、この点に関してはある想定した入力地震動に対する地震応答解析を行って、地盤の各深さに入力されるエネルギーの大きさとその分配関係を明らかにすることが必要である。ひずみレベルが大きくなると、入力エネルギーの多くは土の履歴によるエネルギーによって消費されることは想像に難くない。建築物に対する地震入力エネルギーの検討¹⁸⁾によれば、入力エネルギーは同じ地震動のもとでは建物の復元力特性に鈍感であることが知られている。地盤の場合にも、建物の場合と同じように、地盤に入力する地震エネルギーが地盤の履歴変形特性に鈍感であるならば、地盤の詳細な履歴変形特性を入力エネルギー量を求めるための地震応答解析に導入する必要が無く、液状化の判定に非常に都合がよい。

こうして地盤に入力する地震エネルギー量が決められたとき、要素試験から求められたその地盤の累積損失エネルギーと剛性低下率の関係から、想定した地震に対する剛性低下率が算定できることになる。

7. あとがき

本稿では、土の靱性を加味した液状化強度を評価するための方法論として、ひずみ制御試験から求められる剛

性低下率と累積損失エネルギーの関係を利用する方法の可能性を説明させていただいた。ここで示した方法の適用に当たっては、解決すべき課題が多いと考えられるが、現在さまざまな角度から検討中である。

本研究は財東レ科学振興会の科学技術研究助成を受けて行っているものである。関係各位に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準に関する「第二次提言」，1996。
- 2) 吉見吉昭：「ねばり強さ」に関する液状化対策の評価基準，土と基礎，Vol. 38, No. 6, pp. 33～38, 1990。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書（V 耐震設計編）・同解説，1996。
- 4) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp. 185～188, 1976。
- 5) 安原一哉・永埜宗孝・半沢秀郎・湯 怡新：直接せん断試験による繰返し履歴を受けた粘性土のせん断強度の劣化，第29回土質工学研究発表会，pp. 885～886, 1994。
- 6) Sugano, T. and Yanagisawa, E.: Undrained Shear Behavior of Sand Under Surface Wave Stress Conditions, Proc. of the 9th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 71～74, 1991。
- 7) Sugano, T. and Yanagisawa, E.: Cyclic Undrained Shear Behavior of Sand Under Surface Wave Stress Conditions, Proc. of the 10th WCEE, Vol. 3, pp. 1323～1327, 1992。
- 8) 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。
- 9) 西田一彦・西形達明・井上啓司・中山義久：粘土の繰返し荷重下の変形係数の低下とその回復について，粘性土の動的性質に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 177～180, 1995。
- 10) 増田昌昭・風間基樹・柳澤栄司：ひずみ制御繰返し三軸試験による土の非排水繰返し強度評価，第32回地盤工学研究発表会，pp. 725～726, 1997。
- 11) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1～15, 1992。
- 12) Yegian, M. K. and Whitman R. V.: Risk analysis for ground failure by liquefaction, J. of Geotechnical Engineering, Div., ASCE, Vol. 104, pp. 921～938, 1978。
- 13) Davis, R. O. and Berrill, J. B.: Energy dissipation and seismic liquefaction in sands, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 59～68, 1982。
- 14) Law, K. T. and Cao, Y. L.: An energy approach for assessing seismic liquefaction potential, Can. Geotech. J., Vol. 27, pp. 320～329, 1990。
- 15) 片田敏行・阿部幸樹・東山 晃：ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和砂地盤の液状化過程の考察，土木学会論文集，第388号/Ⅲ-8, pp. 43～50, 1987。
- 16) 片田敏行・織本慶一・小室智昭：飽和砂の履歴エネルギー吸収状況に及ぼす入力特性の影響，土木学会論文集，第412号/Ⅲ-12, pp. 33～41, 1989。
- 17) 風間基樹・増田昌昭・山口 晶・柳澤栄司：神戸ポートアイランドまさ土層の液状化強度の推定，第24回地震工学研究発表会，pp. 465～469, 1997。
- 18) 加藤 勉・秋山 宏：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷，日本建築学会論文報告集，第235号，pp. 9～19, 1975。

(原稿受理 1997.7.22)