

地震波による砂の液状化

東京大学工学部 正員 石原 研而
 東京大学大学院 学生員 ○安田 進

まえがき

飽和砂の液状化についての室内実験は、一様振幅のくり返し荷重を試料に加えて、水圧上昇やセン断ひずみの進行を観察するという方式が、今までほぼ採用されてきた。そして、複雑な地震時の応力変化は、それと等価な効力をもつ、回数と振幅の指定された一様応力のくり返しに、置きかえて取扱うのが常であった。この方式は、等価な変換ルールが正しく確立されてはじめてその正当性が認められるべきであるが、現状では、この点があいまいなまに残されている。そこで、荷重を任意にコントロールできる油圧サーボ式載荷装置と三軸圧縮装置にとりつけ、色々な地震波形と荷重変化に変換して実験を行ってみたので、その結果について以下報告することにする。

実験装置と実験方法

油圧サーボ機構で駆動されるアクチュエーターを直接三軸装置の荷重軸に連結すると、砂試料が液状化を起しその剛性が激減するような場合に応力制御が困難になって、必ず載荷重が減ってくる。この難点を克服する為荷重軸に緩衝材を介させ、応力制御が完璧にできるようにした。地震波は Data recorder に store してあり、これを実際と同じ速度で、任意の増幅度で荷重に変換して、試料に加えた。試料は直径 5 cm、高さ 10 cm の円筒形で、用いた砂は富士川で採取した $D_{60}=0.486$ mm、均等係数 3.16、 $e_{max}=1.032$ 、 $e_{min}=0.481$ の堅い種からなる砂である。この砂を拘束圧 $\sigma_c=1.5$ kg/cm² で圧密した後、非排水状態で動的荷重を加えた。相対密度は約 40% にした。

用いた地震波形は 1968 年十勝沖地震における本震および余震の加速度記録で、記録がとれた場所日時、最大加速度は表 1 に示してある。これらは、全国各地の港湾に設置してある運輸省港湾技研の強震計によって得られた記録で、すべて、地下水面の高い砂地盤上で得られたものである。

三軸装置でランダム波試験を行う時、波形中で最大加速度が達せられる方向と圧縮側にも、てくるか、引張り側にも、てくるかによって、試料の挙動がかなり異なってくる。前者を C-M 試験と呼び、後者を E-M 試験と以下呼ぶことにする。ここで報告する結果は、すべて E-M 試験についてのものである。

地震波の記録をよく見ると最初微小振幅の波がかなり続き、その後で大きな波が来る。

表 1. 実際に用いた地震波

Name			Date and time	α_{max}
Aomori	S-235 N-S	M.S.	1968.5.16. 9:49	213gal
"	S-264 "	A.S.	" " 19:39	56
Muroran	S-234 "	M.S.	" " 9:49	209
"	S-241 "	A.S.	" " 19:39	95
Hachinohe	S-252 "	M.S.	" " 9:49	235
"	S-310 "	A.S.	" 6.12. 22:42	35

M.S. : Main shock
 A.S. : After shock

従って、どの時点をも、て波動の開始時刻と見なすかということはなかなか定まらずかしい問題である。ここでは最大振幅の約25%の波が最初に来た時点と時刻0とした。なお、こうすると時刻0までの間隙水圧上昇量は側圧の5%（本実験では $1.5 \times 0.05 = 0.075 \text{ kg/cm}^2$ ）以下におこえられていて、液状化に及ぼす効果に影響を与えないとみなせる。

実験結果とその考察

地震時に水平地盤内の土の要素が受ける力は、主として水平方向のせん断応力であると考えられる。これをここで表わすと、これは近似的に地表面の水平加速度、 a 、と次式によって関係づけられる。(2)

$$\tau / \rho h = \rho a / g \quad \text{--- (1)}$$

ただし、 h は考えている土要素の存在する深さ、 ρ は土の単位水中重量、 ρh は常載（深さによって変化する）とする。

(1)式は、土に加わる地震時のせん断力の時間的変動が、地表面で観測される加速度の時間的変化と同じ波形をもってあり、振幅だけがお互いに異なる、ということを示している。このような仮定にもとづき、加速度波形をそのまま荷重変化に直し、液状化をおこす時の応力比（ $= \tau / \sigma_c = \tau / \rho h$ ）を実験で求めた。この結果から逆に(1)式によって地盤が液状化をおこす時の加速度を推定することが可能となる。

実験は図1に示すような手順で行った。図1の(a)は神戸港でとられた1968年6月12日の地震加速度記録とせん断応力におきか

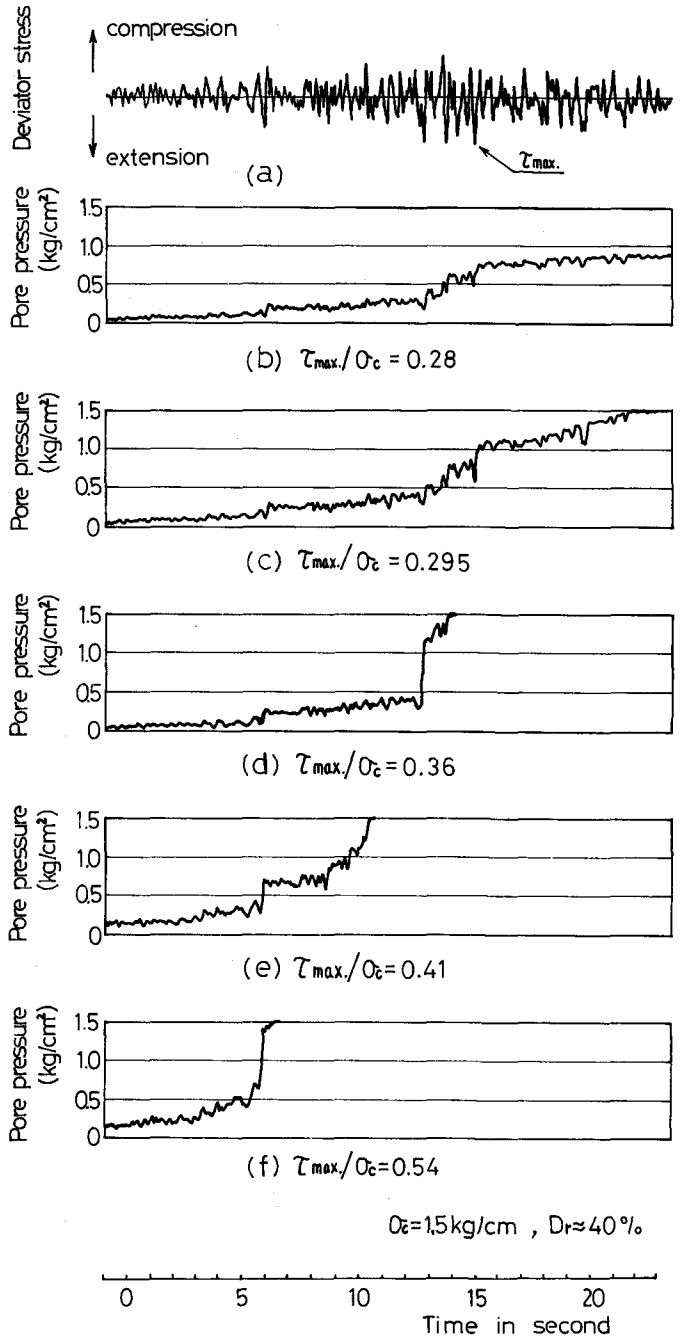


図1. 地震波を加えた時の間隙水圧上昇過程

えたものである。この応力波形の中で最大のせん断力の値を τ_{max} とする。まず、 $\tau_{max}/\sigma_c = 0.28$ ($\tau_{max} = \sigma_{max}/2$ 、つまり軸方向力の最大値の半分をとった)の振幅で実験を行ったところ、試料中の間隙水圧は図1-(b)のごとく上昇した。最終的な間隙水圧、 u 、を求め、これを τ_{max}/σ_c に対して図2 (Aで示してある点)にプロットした。次に振幅を増し、 $\tau_{max}/\sigma_c = 0.295$ で同様な実験を行うと図1-(c)のごとく間隙水圧が上昇し、約22秒後に液状化を生じた。この τ_{max}/σ_c の値と、間隙水圧の値も図2に示してある。同様な一連の実験を他の地震波についても行い、 τ_{max}/σ_c の増加とともに、最終的な間隙水圧がいかに増大するかを示したものが図2である。この図より、間隙水圧を拘束圧の50%まで上昇させるに必要な応力比、 τ_{max}/σ_c 、は100%、

つまり液状化を起こさせる時の応力比より5~7%小さいだけである、ということがわかる。応力比を次第に増して行って、初めて液状化が起こる時の τ_{max}/σ_c の値を各地震波について求めたものが、図2の右側に示してある。これより、波形は各々異なる、でも、大体 $\tau_{max}/\sigma_c = 0.25 \sim 0.34$ 位の範囲の応力比で液状化が起こることがわかる。一方、正弦波をくり返し加える実験も行ったが、その結果によると、1回のくり返し ($N_t=1$)で液状化を生じる応力比は0.370、20回のくり返しだと0.165であ

った。ただし、この場合、一様なせん断応力の振幅を τ_{max} とした。この結果も図2に示してある。1回のくり返しは衝撃的荷重に相当し、20回のくり返しは振動的荷重に匹敵す

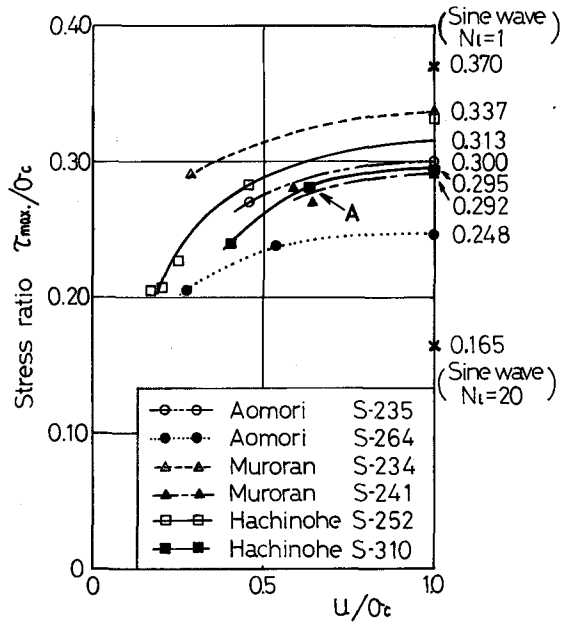


図2. 応力比と最終間隙水圧との関係

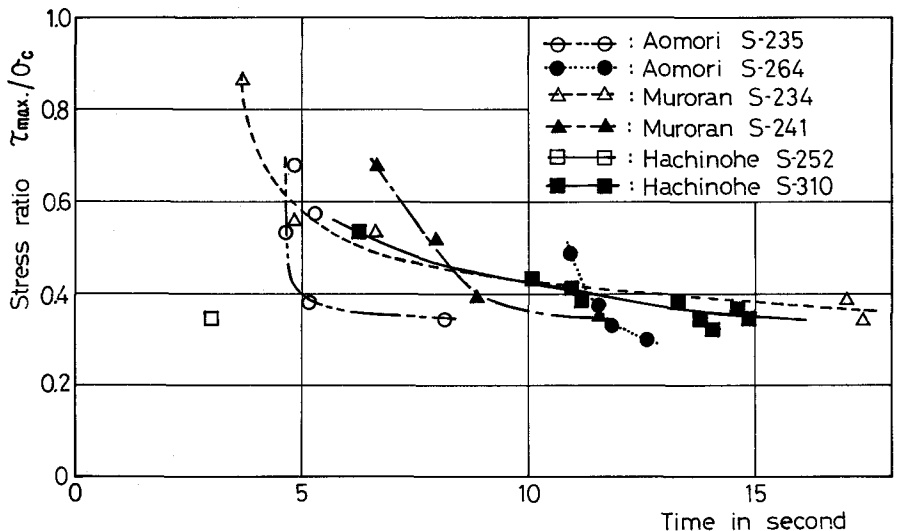


図3. 応力比と液状化までの時間

るから、結局、この2つの性格を兼ね備えている実際の地震波による液状化が、この両極端の中間にある応力比で発生するのは当然のことと言えるであろう。そして地震波形とこの τ_{max}/σ_c の値を対応させてみると、例えばS-234では波形が衝撃的荷重に近い波形で、S-264では振動的荷重に近い波形であることが観察された。

次に、さらに応力比を上げて試験を行ってみた。 τ_{max}/σ_c の値を0.36, 0.41, 0.54にした場合の間隙水圧の上昇は図1-(d), (e), (f)のごとくになった。つまり、振動開始から液状化までの時間が短縮され、早い時期に液状化がおこることになる。各地震波についてこのような実験をくり返し、 τ_{max}/σ_c の値を液状化が生じた時刻に対してプロットしてみると図3のようになる。ただし、一波形中の τ_{max} がくる前に液状化する事も生じるが、この場合も、波形が液状化後継続していれば生じると考えられる最大のせん断力を τ_{max} とした。この図の右側の下限値は、与えられた地震波の中で最も早く液状化を生じる τ_{max}/σ_c の最低値を表わしている。前述のようにこの値は0.25~0.34の間に大体おさまってくる。次に、この図の左側の値は、地震波が全般的にみて衝撃型であるか振動型であるかによって異なる。1つか2つのはっきりしたピークが存在するよう衝撃型は、左方で τ_{max}/σ_c の値が増加し、一般的な振動型に近い地震波ではこれが小さい値にとどまることになる。

以上はすべてE-M試験の結果である。これを逆にC-M試験を行うと結果が少し異なることは前に新潟地震波での実験結果でみた通りである⁴⁾。表1の地震波の中で青森S-264についてはこのような試験を実施してみたが、それによると $\tau_{max}/\sigma_c = 0.310$ であった。これはE-M試験の0.248に比べてかなり大きい。その他の波形に関しては現在試験を実施中であるが、これら2種類の試験の結果の平均をとって、実際の地震波に関する液状化時の応力比とすべきと考えられる。

結 論

十勝沖地震の際に砂地盤で得られた6種類の加速度波形を用い、地震荷重をsimulateした三軸圧縮、伸張試験を実施し、次のような結論をえた。

- (1) 三軸試験の伸張側に最大加速度の方向が一致するようにして実験を行うと、 $\tau_{max}/\sigma_c = 0.25 \sim 0.34$ 位の値で試料に液状化が起った。これらの値は1回および20回の繰り返し応力比でそれぞれ液状化がおこる応力比 $\tau_{max}/\sigma_c = 0.370$ および 0.165 の間にあることが判明した。また波形が衝撃的だとこの値は大きく、振動的だと小さくなることがわかった。
- (2) 三軸試験の圧縮側に最大加速度の方向が一致するように試験を行うと、全般的により大きな応力比と与えないと液状化が生じない。従って、実際の応用に際してはこれらの2種類の方法で得た値の平均を用いるべきであろう。

謝辞：この実験の大部分は東大土木工学科において久保隆男君（国鉄）が卒論として行ったものである。又、地震波の録音に際しては運輸省港湾技研の土田肇氏、他の方々に援助をしていただいた。未筆ながら感謝する次第である。

参考文献：(1)石原，守田；新潟地震の液状化に関する動的三軸試験 昭47 第7回土質工学研究発表会

(2) H.B. Seed & I.M. Idriss ; Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential
ASCE 1971 SM9