

1. 背景・目的

近い将来、東南海・南海地震のようなプレート境界型(海溝型)の超巨大地震の発生が予想されている。このような地震では、兵庫県南部地震のような直下型地震に比べて、最大加速度は小さいが継続時間は長い地震動が襲来する(Fig.1)。また、このような揺れを生じる地域が広範囲となる。このとき、継続時間が長いという特徴から、液状化判定に従来用いられていた液状化強度である R_{20} を用いると地盤の液状化に対する抵抗力を過大評価してしまう可能性がある。そのため、長継続時間地震動を対象とする液状化判定には液状化強度曲線において R_{20} よりも繰返し回数の多い部分のデータの必要性が高まってくると考えられる。

また、現在までにさまざまな液状化強度曲線の近似式(例えば⁽³⁾)が提案されているが、それらの式では繰返し回数が多い部分での精度検証は十分に行われていないのが現状である。

そこで本研究では、繰返し回数 1000 回で液状化を生じるせん断応力比 R_{1000} を中空ねじりせん断試験機を用いた液状化強度試験によって求め、 R_{1000} の推定式および推定された R_{1000} を用いた液状化強度曲線の近似式を検討した。

2. 実験方法

試料には 7 号珪砂を用い、外径 7cm、内径 3cm、高さ 10cm の供試体を相対密度 $Dr=40, 60, 80\%$ になるように水中落下法で作成した。その後、供試体に二酸化炭素、脱気水を通すことにより飽和化をはかり、有効拘束圧 $\sigma'_0=98\text{kPa}$ (背圧 $u_b=196\text{kPa}$) で等方圧密し、応力制御により繰返し载荷を行った。このとき、载荷周波数は 0.1Hz とした。また、液状化は「繰返しせん断による両振幅せん断ひずみ γ_{DA} が 7.5% を初めて超えた時点」と定義した。Table.1 に実験ケースおよび実験結果(液状化を生じるまでの繰返し回数)を示す。

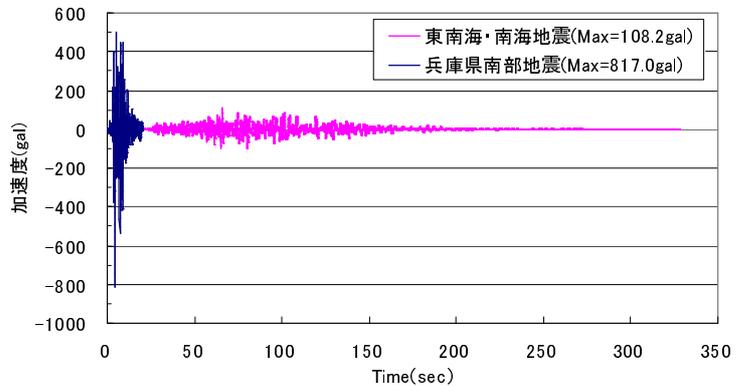


Fig.1 東南海・南海地震で想定される波形の例⁽¹⁾と兵庫県南部地震における観測波形⁽²⁾の比較

Table.1 実験ケースと実験結果

実験ケース	相対密度 $Dr(\%)$	繰返しせん断 応力比 $R(=\tau / \sigma'_0)$	液状化を生じるまでの 繰返し回数 $N_c(\text{回})$
40-7S-1	40	0.211	4.6
40-7S-2		0.187	6.1
40-7S-3		0.146	15.9
40-7S-4		0.143	19.2
40-7S-5		0.122	37.9
40-7S-6		0.105	247.3
40-7S-7		0.103	89.7
40-7S-8		0.088	309.3
40-7S-9		0.075	456.2
40-7S-10		0.073	1014.2
60-7S-1	60	0.239	4.0
60-7S-2		0.203	8.0
60-7S-3		0.180	15.1
60-7S-4		0.157	28.8
60-7S-5		0.151	48.2
60-7S-6		0.148	60.8
60-7S-7		0.141	134.1
60-7S-8		0.136	197.8
60-7S-9		0.134	73.8
60-7S-10		0.127	156.0
60-7S-11		0.120	271.8
60-7S-12		0.115	257.7
60-7S-13		0.107	1031.2
80-7S-1	80	0.410	6.8
80-7S-2		0.257	26.1
80-7S-3		0.236	23.4
80-7S-4		0.201	65.3
80-7S-5		0.176	111.2
80-7S-6		0.162	100.2
80-7S-7		0.145	751.0
80-7S-8		0.142	465.9
80-7S-9		0.135	629.1

3. 実験結果

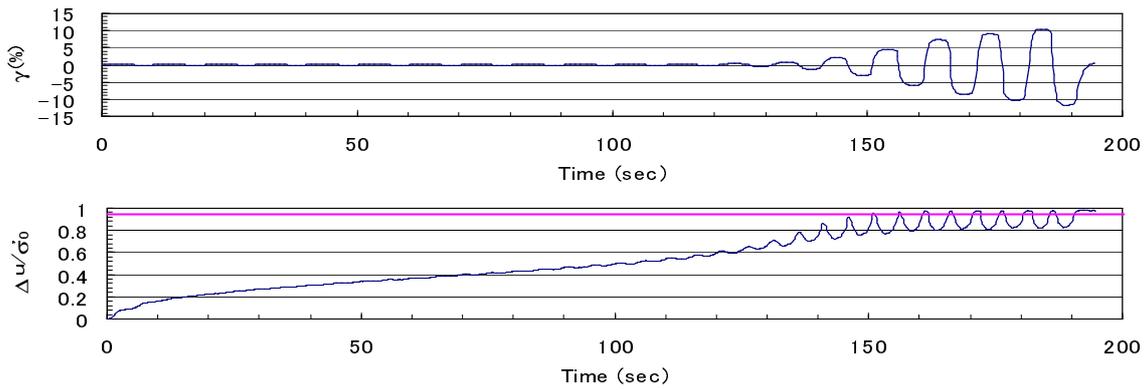


Fig.2 せん断ひずみと過剰間隙水圧比の時刻歴(Dr=60%, R=0.180)

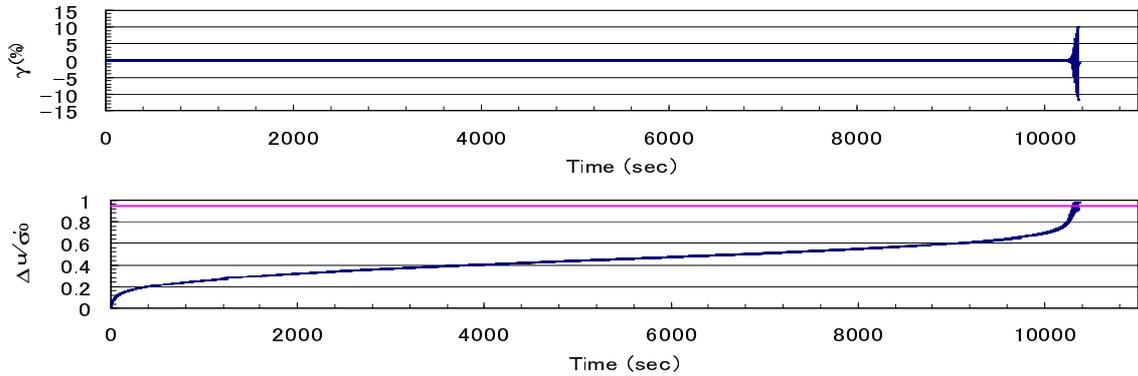


Fig.3 せん断ひずみと過剰間隙水圧比の時刻歴(Dr=60%, R=0.107)

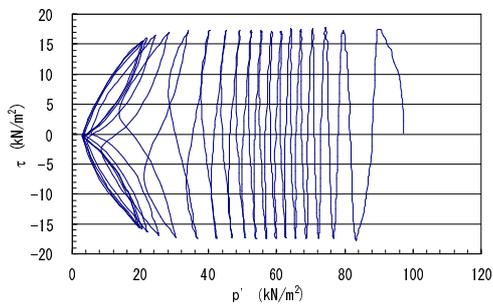


Fig.4 応力経路(Dr=60%, R=0.180)

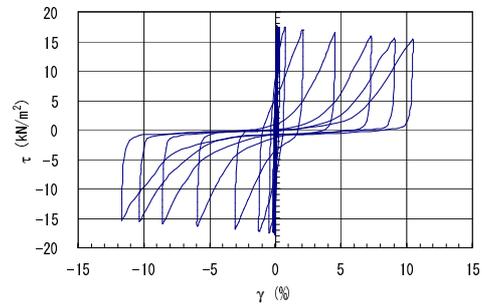


Fig.5 τ-γ 関係(Dr=60%, R=0.180)

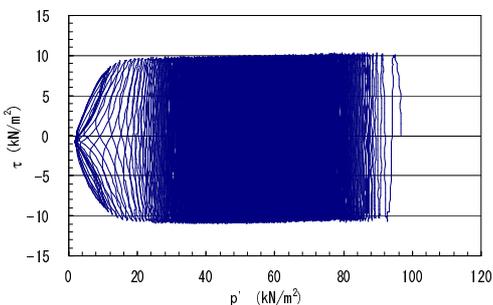


Fig.6 応力経路(Dr=60%, R=0.107)

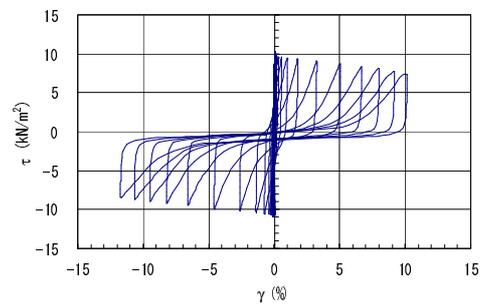


Fig.7 τ-γ 関係(Dr=60%, R=0.107)

Fig.2～Fig.7に相対密度 60%, 液状化が生じるまでの繰り返し回数 $N_c=15$ 回, 1031 回のせん断ひずみおよび過剰間隙水圧比の時刻歴, 応力経路, τ - γ 関係を示す. せん断ひずみは, 両ケースともに载荷の初期段階は微小で, 過剰間隙水圧比が 0.7 を越えたあたりから急激に伸びていることが分かる. また, せん断応力比の違いに

より、荷重の初期段階のひずみに多少の違いがあることが分かった。応力経路は $p'=80\text{kN/m}^2$ 程度までは平均有効主応力の減少量が大きく、 $p'=25\text{kN/m}^2$ あたりまではゆっくりと減少し、その後完全液状化に至るまでは再び、減少量が大きい。また、破壊線の角度には違いが見られなかった。 τ - γ 関係は両ケースともに繰り返し回数が小さいうちは剛性が高く、繰り返し回数が増加するにしたがって剛性が低下し、大きなひずみが生じた。

これらの結果を踏まえて、本研究で R_{1000} を推定するにあたり、荷重の初期段階におけるひずみの生じ方の違いに着目することにした。Fig.8~10 に各相対密度におけるせん断応力比 R と荷重 2 サイクル目の両振幅せん断ひずみ γ_{DA2} の関係を示す。ここで、荷重 2 サイクル目の両振幅せん断ひずみを用いたのは荷重 1 サイクル目の両振幅せん断ひずみは供試体作成時に生じる試料の乱れや砂粒子同士の噛み合わせの良否に大きく影響されバラツキが大きいからである。本研究では、 R - γ_{DA2} 関係が Fig.8~Fig.10 に示すように 3 つの領域で表せると仮定した。ここで、①は「純粋な線形領域」でせん断ひずみによって粒子骨格が変化せず、そのためダイレイタンシー効果がなく、間隙水圧が上昇しない領域である。この領域は、Dobry ら⁽⁴⁾によると $\gamma=0.01\%$ オーダーのひずみの範囲であると考えられる。また、②は「見かけ上は線形とみなせる領域」で、せん断ひずみによって微小なダイレイタンシー効果が働き、間隙水圧が微小ながら上昇する範囲である。本研究では実務で行われる液状化強度試験の繰り返し回数の上限を加味し、繰り返し回数 $N_c=5\sim 100$ 回程度で液状化を生じるせん断応力比の範囲($\gamma_{DA2}=0.07\sim 0.25\%$ の範囲) であると定義した。最後に③は「非線形領域」であり、本研究では $\gamma_{DA2}>0.25\%$ と定義した。

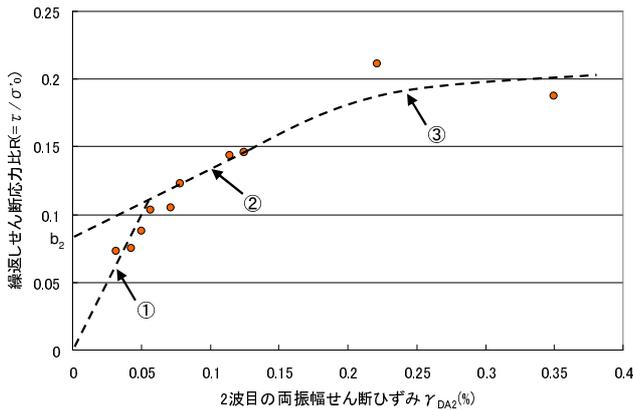


Fig.8 せん断応力比 R と荷重 2 サイクル目の両振幅せん断ひずみ γ_{DA2} の関係($Dr=40\%$)

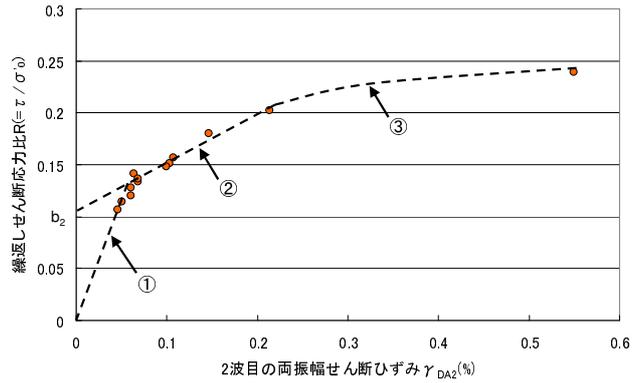


Fig.9 せん断応力比 R と荷重 2 サイクル目の両振幅せん断ひずみ γ_{DA2} の関係($Dr=60\%$)

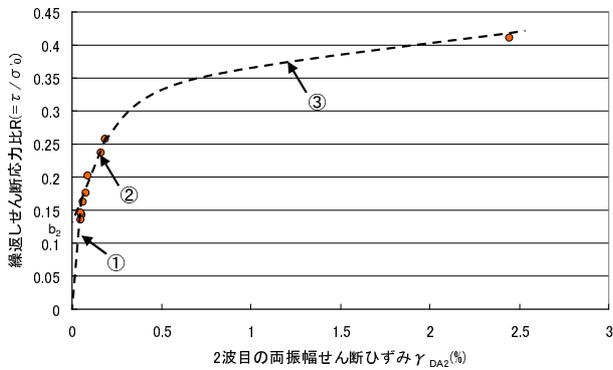


Fig.10 せん断応力比 R と荷重 2 サイクル目の両振幅せん断ひずみ γ_{DA2} の関係($Dr=80\%$)

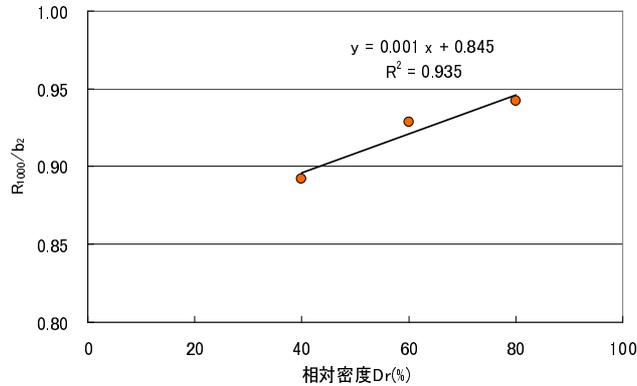


Fig.11 R_{1000}/b_2 と相対密度の関係

この考え方に基づくと、 $R-\gamma_{DA2}$ 関係において $\gamma_{DA2}=0.01\%$ に対応するせん断応力比は無限回の繰返しせん断を与えても液状化を生じないせん断応力比 R_{∞} であると考えられ、これは「見かけ上は線形とみなせる領域」における $\gamma_{DA2}>0.01\%$ のデータから推定できる可能性がある。そこで、 $R-\gamma_{DA2}$ 関係の「見かけ上は線形とみなせる領域」から y 切片にあたる係数 b_2 をまず推定した。この時、 b_2 は R_{∞} より小さい値となるが、 R_{1000} は R_{∞} より大きな値となる。そこで、実際に実験で R_{1000} を求めたところ、 R_{1000} と b_2 の比は相対密度に応じて Fig.11 のようになり、この関係より b_2 による R_{1000} の推定式を以下のように提案する。

$$R_{1000} = (0.001Dr + 0.845) \cdot b_2 \quad (\text{Eq.1})$$

ここで、Dr：相対密度(%)

b_2 ： $R-\gamma_{DA2}$ 関係の「見かけ上は線形とみなせる領域」を延長した時の y 切片(Fig.8～Fig.10)

また、(Eq.1)で求められる R_{1000} を用いて(Eq.2)、(Eq.3)のような液状化強度曲線の近似式を貫井ら⁽³⁾の考え方を参考に提案する。実験結果と提案式の比較を Fig.12 に示す。繰返し回数が多いところまで比較結果は良好である。なお、Dr=80%のデータにおいて提案式が実験値よりも若干上にシフトしているのは R_4 を外挿により求めており、実際の R_4 との誤差が大きいためだと考えられる。

$$R_N = \frac{a}{N^c} + b \quad (\text{Eq.2})$$

$$\begin{cases} a = 20^c (R_{20} - b) \\ b = 0.88 \cdot R_{1000} \\ c = 1.431 \cdot \log_{10} \frac{R_4 - b}{R_{20} - b} \end{cases} \quad (\text{Eq.3})$$

ここで、 R_4 、 R_{20} ：繰返し回数 4 回、20 回で液状化を生じるせん断応力比

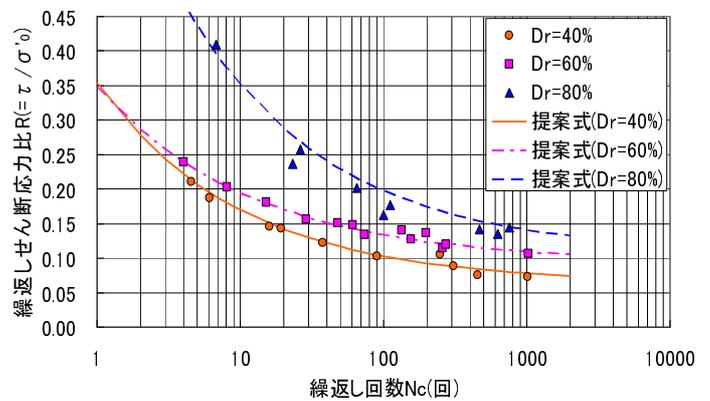


Fig.12 実験結果と提案式の比較(液状化強度曲線)

4. 結論

中空ねじりせん断試験機を用いた液状化強度試験によって R_{1000} を求め、せん断応力比 R と载荷 2 サイクル目の両振幅せん断ひずみ γ_{DA2} の関係から R_{1000} を推定する式を提案した。また、推定した R_{1000} を用いた液状化強度曲線の近似式を提案した。この結果を用いれば、限られた繰返し回数までの実際の実験結果より b_2 を求め、(Eq.1)を用いて R_{1000} を推定することにより、(Eq.2)及び(Eq.3)によって繰返し回数が多いところまで液状化強度を推定することができる。

今後の検討課題として、異なる砂の場合、細粒分含有率 F_c が変化した場合、不攪乱試料を用いた場合、繰返し三軸試験の試験結果を用いた場合についても R_{1000} を求め、本研究で提案した R_{1000} の提案式および液状化強度曲線の近似式の実務的な適用性を検証する必要があると考えられる。また、まだ実験データの数が不十分であり、今後のデータの蓄積が必要である。

参考文献

- (1) 近畿地方整備局神戸港湾空港調査事務所：沿岸構造物のチャート式耐震診断システム説明会資料，2005.
- (2) (財)沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)，p.81，1997.
- (3) 貫井泰ほか：液状化強度曲線の近似式の検討，第 40 回地盤工学研究発表会，pp.471-472，2005.
- (4) Steven L. Kramer：Geotechnical earthquake engineering，Prentice hall，pp.390-394，1996.