

(63) 累積損傷度理論を用いた簡易液状化判定手法の提案

日本道路公団 正員 大川征治
 日本道路公団 正員 前田良刀
 日本技術開発 正員 ○真鍋 進
 東京大学生産技術研究所 正員 龍岡文夫

1. はじめに

現在、設計示方書類¹⁾で規定されている液状化に対する抵抗率 F_L を用いた液状化判定は、あくまで簡便な手法である。本手法に示されている諸係数を用いた時の $F_L < 1.0$ の場合を直ちに液状化が発生するとし取り扱うことは、大規模かつ極めて稀にしか生じない地震動を特定した場合（入力地震動が極めて大きい場合）その精度上適切とはいえない。また、重要構造物に対しては、詳細な地盤調査として不攪乱試料にもとづく繰返し三軸試験等を実施するとともに、入力地震動の設定および地盤の地震応答解析を行い、液状化について検討する機会が多い。しかし、これらは、技術的に高度な判断を要し逐一実施することは実務上からも難しい。

このような問題点を考慮し、ここでは、比較的簡易な手法で実際に地盤内に生じると考えられる地震時のせん断応力のパターンおよび、液状化の発生機構をより現象に忠実に評価する判定法について報告する。

2. 判定手法の概要

累積損傷度理論は金属の疲労破壊の分野で提案されたもので、この理論を砂の液状化強度特性への適用性については、すでに妥当との結論が得られている²⁾。同理論では、疲労破壊を生じる荷重強度 $S \sim$ 繰返し回数 N の関係 ($N = N_f(s)$) から、1回の荷重 S_i により損傷度 $1/N_f(S_i)$ が生じ、繰返し荷重により損傷度が累積して $D = \sum_i \{1/N_f(S_i)\} = 1$ で疲労破壊が生じるものである。ここで提案する砂の液状化に対して $S \sim N$ の関係は、国生らの研究成果³⁾を用いる。一方、繰返し荷重強度 S 、すなわち地盤内せん断応力比の推定は、地表面上の応答加速度の不規則性を考慮したものである。図-1に判定手法のフローチャートを示す。本検討で定義した不規則荷重におけるパルスを図-2に示す。累積損傷度理論に対す

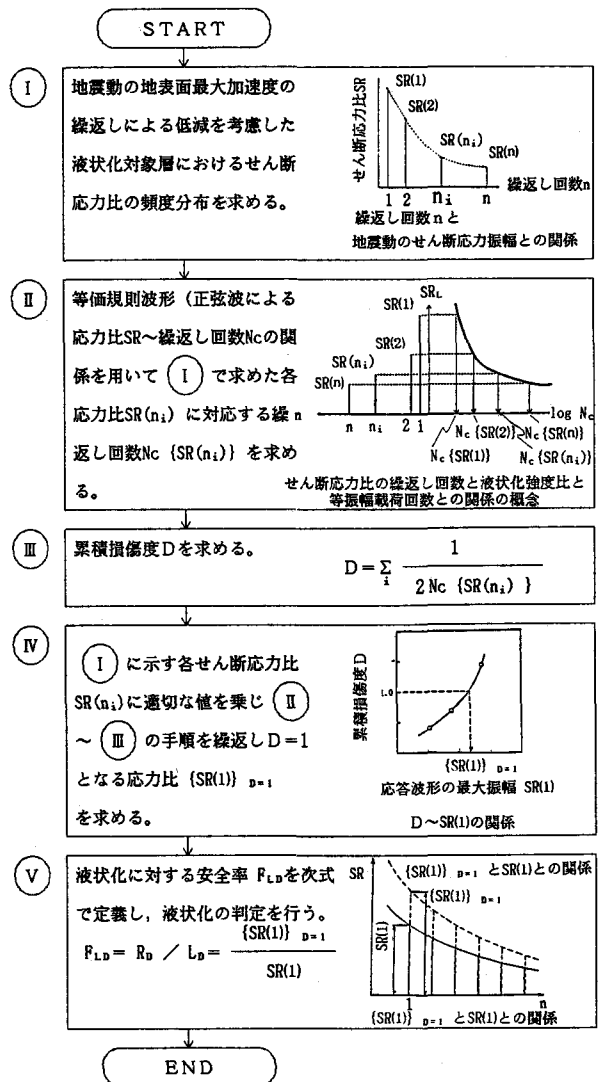


図-1 累積損傷度理論による液状化判定手法の手順

る不規則荷重は、全パルスよりも半パルスを用いた時の方が強度をかなりよく予測でき、しかもパルスの順序の影響についても、全体の精度から見て特に問題ないことがわかっている²⁾。

したがって、地震時の地盤内に生じる不規則なせん断応力比は、佐々木ら³⁾による地表面上における強震記録の統計処理にもとづき設定した最大加速度の繰返しの低減を考慮し以下のように求める。

$$SR(Z, n_i) = \beta(Z) \frac{\eta(n_i) Q_{max}}{g} \frac{\sigma_v(Z)}{\sigma_v'(Z)}$$

$$\eta(n_i) = \frac{Q_p(n_i)}{Q_p(1)} = \frac{Q_p(n_i)}{Q_{max}}$$

ここに、

- SR (Z, n_i) ; 地表面から Z(m)における応答の繰返しを考慮した最大値から第 i 番目のせん断応力比
- β (Z) ; 表層地盤の 1 次固有周期に着目した場合の振動モードを表わす係数
- g ; 重力の加速度 (980gal)
- η (n_i) ; 最大値から第 i 番目の繰返し低減係数で図-3 のように求まる⁴⁾。
- Q_{max} ; 地表面での最大加速度 (gal)
- σ_v (Z) ; 地表面から深さ Z(m)における全上載圧 (tf/m²)
- σ_v' (Z) ; 地表面から深さ Z(m)における有効上載圧 (tf/m²)

上式によって、図-1の①に示した関係がある任意の深度で求まることとなる。

次に一様正弦波荷重を用いた室内繰返し三軸試験などにより SR ~ N_c の関係を求めておけば、累積損傷度 $D = \sum_i \{1/2N_c \{SR(n_i)\}\}$ を求めることができる (図-1②, ③)。さらに同図④に示すようにせん断応力比振幅を調整して D = 1 となる応力比 (液状化強度) $\{SR(1)\}_{D=1}$ を求めることができ、⑤に示す液状化に対する安全率 F_{LD} により液状化判定を行うものである。

3. 試算例

試算にあたって設定した条件としては、まず、地表面の最大加速度 Q_{max} であるが、これについては地表面の強震記録の統計処理結果にもとづき川島ら⁵⁾が提案した次式によった。

$$Q_{max} = a \times 10^{bM} \times (\Delta + 30)^c$$

- ここに、a, b, c ; 地盤種別により定まる係数
- M ; 想定地震のマグニチュード
- Δ ; 震央距離 (km)

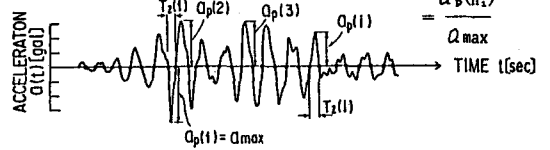


図-2 繰返し低減係数の定義

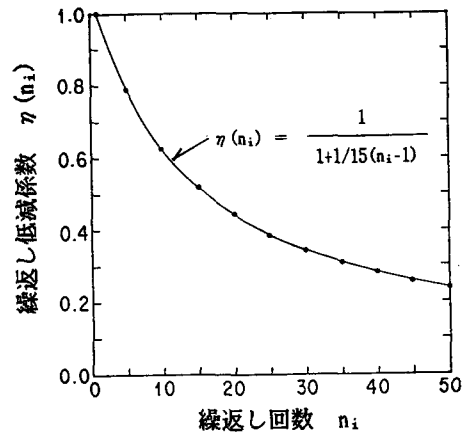


図-3 各パルスを大きさの順にならべた時の n_i 番目 (n_i を繰返し回数と呼ぶ) のパルスの相対的大小 η (n_i) = Q_p (n_i) / Q_{max}

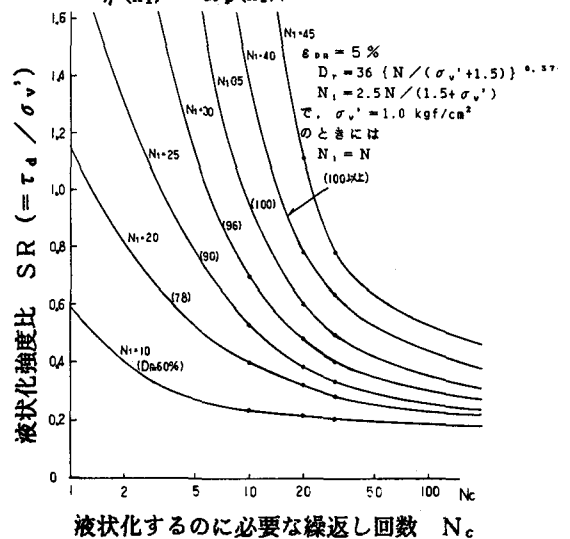


図-4 SR ~ N_c 曲線

また、地震動の繰返し回数を規定する継続時間 $T\alpha$ についても Q_{max} と同じように下式によった⁶⁾。

$$T\alpha = \tilde{a} \times 10^{\tilde{b}M} \times (\Delta + 30)^{\tilde{c}}$$

ここに、 \tilde{a} , \tilde{b} , \tilde{c} : 最大加速度 Q_{max} に対する対象とする振幅比および地盤種別により定まる係数

M, Δ ; 前出

一方、 $SR \sim N_c$ 曲線は国生ら³⁾による利根川砂を用いた比較的密な状態での繰返し三軸試験結果から図-4に示すように基準化 N 値 N_1 ($N_1 = 2.5 N / (1.5 + \sigma_v')$) ごとに設定した (σ_v' : kgf/cm^2)。

以上の条件のもとにモデル地盤についての判定結果を図-5に示す。ここでの想定地震動のレベルとしては、 $M=8.0$ とし、震央距離 $\Delta=20\text{km}$ としている。同図には、応答の繰返しの低減過程に応じた応力比 $SR(n_i)$ および繰返し回数 N_c ($SR(n_i)$) を示すとともに、これらを累積した判定結果(F_{LD})を示したものであるが、その想定地震動が $M=8$ と極めて稀にしか生じない地震動に対して、ほぼ深度13m以深の N 値が30以上の部分では F_{LD} は1.0以上を確保していることがわかる。また図-6は、単一なモデル地盤に対して液状化判定の算定図の一例を示したものである。

実際の地盤は極めて複雑な堆積状況であるのが一般ではあるが、液状化の検討が必要とされる地点の各地層に対して第1次近似として十分で適用可能なものと判断できる。図-7は、本提案手法と既往の手法による判定結果を対比して示したものである。このうち手法Aは、現在の設計示方書としてよく使用されている岩崎ら¹⁾の提案した地盤の N 値、単位体積重量および平均粒径などにより簡易に判定できるものである。また手法Bは、文献³⁾の国生らの提案に基づくとともに、礫を含む砂については、石原⁷⁾の提案もとっており、比較的密な砂に対しても適用可能と判断されるものである。同図の N 値のところでは実線が実測値であり、破線は礫分を含む砂層について計算上の N 値を推定したものを示してある(手法Bで適用したもの)。なお、各手法における地震入力、想定地震動を $M=8$ とし、地表面最大加速度は 633gal (水

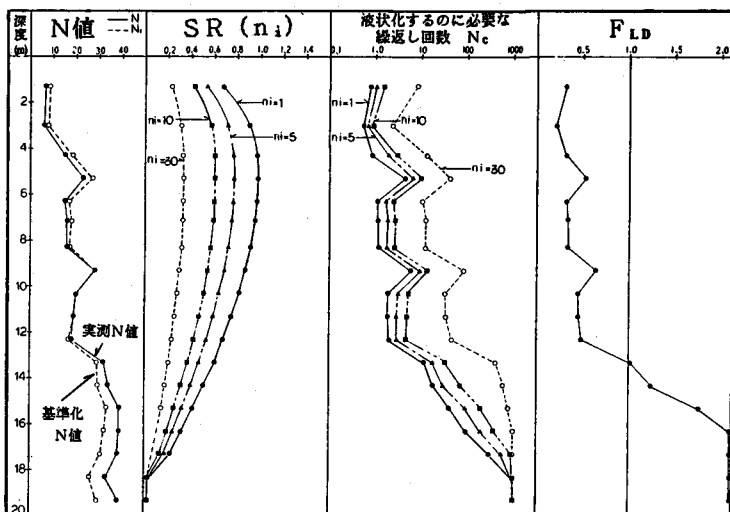
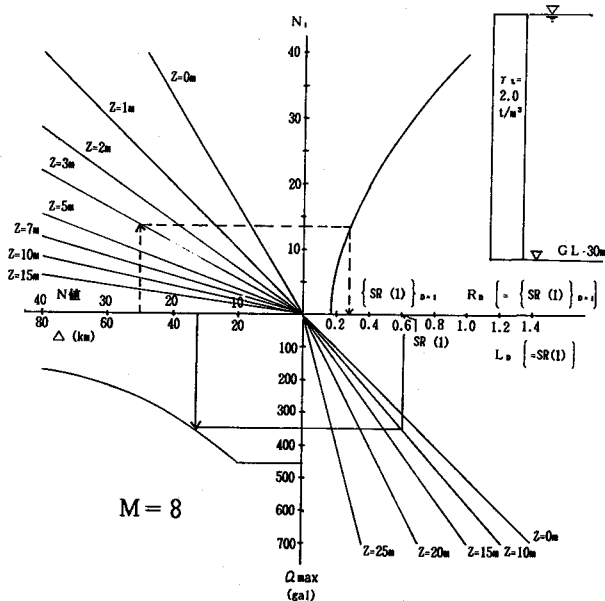


図-5 繰返しによるせん断応力比の低減と F_{LD} との関係



G C III (表層地盤の層厚 30^* の場合)

図-6 R_D と L_D の算定図の一例

平震度 $k_h = 0.48$) である。この図において特徴的なことは、比較的密な砂に対して手法Aが最も安全率が低く、手法B、本提案手法と安全率が大きくなることである。しかも、提案手法であれば $N=30$ 以上では F_{LD} は 1.0 を十分確保していることがわかる。

4. まとめ

液状化判定法として、地震動の不規則な繰返し荷重を簡便な方法により推定し、累積損傷度理論にもとづく判定手法について提案した。この手法を用いた地震動レベルは極めて稀に生じる地震動強度 ($M=8$) とし、比較的密な砂質地盤に対して試算を行い、ほぼ妥当な結果が得られた。本提案手法は、地震動強度レベルや液状化対象となる砂質土層の性状によらず広く適用できること、しかも地震動の不規則性を合理的に評価できる手法であることから、液状化判定手法としての適用可能性は極めて高いものと考えられる。したがって、課題として、地震動の不規則性の予測精度の向上および種々の砂質土層での $SR \sim N_c$ 曲線の整備等による判定手法としての精度向上を図ること、また、既往の震害事例による検証など手法としての妥当性の検討がのこされており、さらなる研究が必要と考えられる。

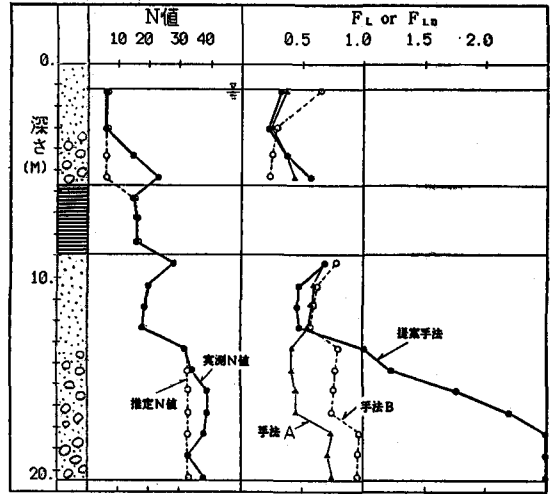


図-7 各手法による液状化判定結果の比較

謝辞

本報告は、東名高速道路耐震補強対策検討会（座長：池田尚治・横浜国立大学教授）において審議、検討された結果にもとづくものであり、有益な御意見を頂いた委員各位に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，昭和55年5月
- 2) 龍岡文夫：講座 土の動的性質 2.2 動的強度特性，土と基礎，Vol.33, No.9, pp.63~70, 1985.
- 3) 国生，吉田，長崎：密な砂地盤のN値による液状化判定法，第19回土質工学研究発表会講演集，pp.559~562, 1984.
- 4) 佐々木，田村，相沢，高橋：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法—（その9）地震動の繰返しを考慮した最大加速度—，土木研究所資料，No.2282, 1986.
- 5) 川島，相沢，高橋：強震記録の重回帰分析による地震動の最大加速度，最大速度および最大変位の推定式，土木技術資料，Vol.26-2, 1984.
- 6) 川島，相沢，高橋：強震記録の重回帰分析に基づく地震動加速度の継続時間の推定法，土木技術資料，Vol.27-4, 1985.
- 7) 石原研而：動土質力学—礫および細粒分を含む土の液状化特性—，昭和60年度 最近の土質・基礎に関する講習会 講演資料，土質工学会，pp.161~175.