

建設省土木研究所 正会員 ○東 拓生
田村敬一
二宮嘉朗

1. まえがき

液状化判定法に用いられている動的せん断強度比 (R) は、一定振幅の正弦波で非排水繰返し三軸試験を行い、繰返し回数 20 回のときの繰返しせん断応力比に基づいて定義されている。しかし、実際の地震動波形は不規則であり、液状化強度は地震動波形の不規則性の影響を受けると考えられる。

本研究では、これまでに地盤上で観測された地震動波形を用いて累積損傷度理論に基づく計算を行うことにより、地震動波形の繰返し特性が液状化強度に及ぼす影響について検討する。

2. 累積損傷度理論に基づいた地震動波形の不規則性に対する補正係数 (C₂) の検討

累積損傷度理論とは、金属疲労の分野で提案された計算方法で、これまでに龍岡¹⁾、真鍋ら²⁾によって、地震動波形の不規則性を考慮した液状化問題に適用する方法について検討されている。この計算方法は、地震動の加速度波形をゼロクロッシングではさまれた半パルスに分解し、正弦波による砂質土の非排水繰返しせん断強度試験から得られる液状化強度曲線から、1つのパルスの応力比に対応する繰返し回数を求める。この繰返し回数の逆数を全てのパルスについて求め、その総和を累積損傷度(D)とし、D ≥ 1.0 のとき液状化すると判定するものである (図-1 参照)。

本検討では、1つの地震動波形中の全てのパルスでDを計算し、ちょうどD=1.0となるときに地震動波形の最大せん断応力比 R_{max} と正弦波 20 回での液状化強度比 R₂₀ を求め、道路橋示方書耐震設計編の参考資料に示されている地震動波形の不規則性に対する補正係数 (C₂) を、C₂=R_{max} / R₂₀ として算出する。

用いた地震動波形は、表-1 に示す海洋型 6 地震、直下型 2 地震の水平 130 成分を用いた。また計算に用いる液状化強度曲線は、図-2 に示すような、過去に豊浦標準砂を用いて行われた繰返しせん断試験結果を、双曲線型の関数で回帰したものを用いる。相対密度は 30 ~ 100% までを対象として検討した。

また、表-1 の地震動波形の繰返し特性を表すパラメータとして、地震動波形中に、あるレベル以上の地震動 (パルス) が何回含まれるかを表す指標である、地震動の繰返し低減係数を用いて整理した。

地震動の繰返し低減係数とは、図-1 と同様に地震動波形をゼロクロッシングではさまれた半パルスに分解し、このパルスをピーク加速度の大きい順にカウントした N 番目のピーク加速度 a_p(N) を、最大加速度 a_{max} で除したものを地震動の繰返し低減係数 η_a(N) と定義する。これを図化するると図-3 のような曲線となる。この地震動の繰返し低減係数の曲線は、以下の式で回帰することができる。

$$\eta_a(N) = \frac{1}{1+a(N-1)} \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

η_a(N): 繰返し低減係数

N: 繰返し回数

a: 波形の特性 (振動型か衝撃型か) を表す係数

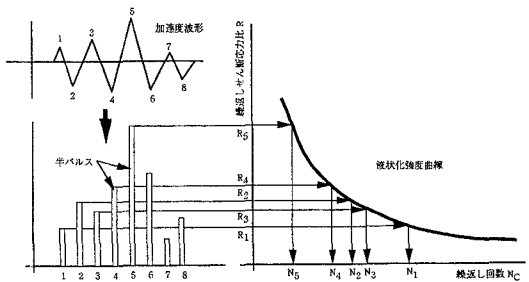


図-1 累積損傷度理論の概要

表-1 計算に使用した地震と係数 a の平均値

地震種別	地震名	記録数	係数 a
直下型地震	十勝沖地震 (M=7.9)	8	0.034
	宮城県沖地震 (M=7.4)	8	0.042
	日本海中部地震 (M=7.7)	10	0.035
	千葉県東方沖地震 (M=6.7)	20	0.042
	釧路沖地震 (M=7.8)	16	0.041
	北海道南西沖地震 (M=7.8)	10	0.036
海洋型地震	ノースリッジ地震 (M=6.7)	30	0.175
	兵庫県南部地震 (M=7.2)	28	0.225

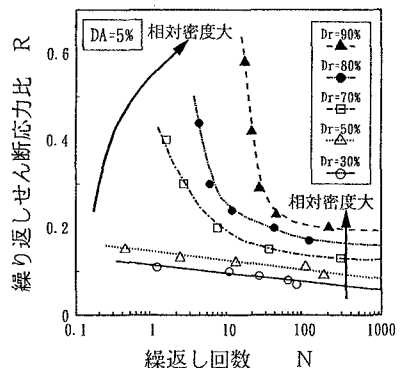


図-2 計算に用いた液状化強度曲線

上式の a は、波形が振動型の場合は小さい値（正弦波のときは 0）をとり、波形が衝撃型になるに伴い増加する特性を持っており、この係数 a を用いて地震動波形の繰返し特性を表すことが出来る。

本研究では、この係数 a と累積損傷度理論により算出した C_2 との関係について検討した。また、地震の特性（海洋型地震か直下型地震か）が a および C_2 に与える影響についても検討した。

3. 全波形での計算結果

図-5 に、入力地震動波形の繰返し特性を表す係数 a と累積損傷度理論に基づく計算により求めた地震動波形の不規則性に対する補正係数 C_2 の関係を、緩い砂と密な砂について示す。この図から、 a が大きくなる（波形が衝撃型になる）と C_2 は大きくなる傾向が見られる。また、緩い砂では、 C_2 に与える地震動波形の繰返し特性の影響は小さいが、密な砂では地震動波形の繰返し特性の影響が顕著に現れ、直下型地震の波形では、 C_2 が非常に大きくなる事が分かる。また、図中には、石原ら³⁾、龍岡ら⁴⁾、嶋田ら⁵⁾が行った、地震動波形を用いた繰返し中空ねじりせん断試験結果と、その載荷波形の係数 a を計算して示しているが、これらの試験結果と今回の計算結果はよく一致している。

4. 各地震ごとの係数 a および C_2 の検討結果

係数 a の各地震ごとの平均値は表-2 のような値になる。海洋型地震では係数 a は 0.03 ~ 0.045 程度の値をとり振動型の波形といえるが、直下型地震では 0.1 以上の値をとり、かなり衝撃型の傾向を示していると考えられる。

程度まで増加することが分かる。また、液状化強度が低い ($R_{20} < 0.2$) 場合は、 $C_2 = 1.3 \sim 1.8$ 程度 ($1/0.77 \sim 1/0.55$ 程度) となり、石原らの既往の報告³⁾と同様の値を示している。

これらの結果から、 C_2 を以下の式で表すことが出来る。

(海洋型地震の場合)

$$C_2 = \begin{cases} 1.35 & (R_{20} \leq 0.1) \\ 2.25 \cdot R_{20} + 1.125 & (0.1 < R_{20} \leq 0.3) \\ 1.8 & (R_{20} < 0.3) \end{cases}$$

(直下型地震の場合)

$$C_2 = \begin{cases} 1.5 & (R_{20} \leq 0.1) \\ 5.0 \cdot R_{20} + 1.0 & (0.1 < R_{20} \leq 0.4) \\ 3.0 & (R_{20} < 0.4) \end{cases}$$

【参考文献】

- 1) 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, pp63 ~ 70, 1985
- 2) 真鍋，大川，前田，龍岡：累積損傷度理論を用いた簡易液状化判定法の提案，第 19 回地震工学研究発表会，1987
- 3) 石原研一：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp265 ~ 273, 1976
- 4) 前田，龍岡，山田，藤井：飽和砂の不規則波に対する液状化強度，第 18 回土質工学研究発表会，pp549 ~ 552, 1983
- 5) 嶋田，国生，加藤：密な砂の非排水繰返しせん断特性，第 16 回土質工学研究発表会，pp609 ~ 612, 1981

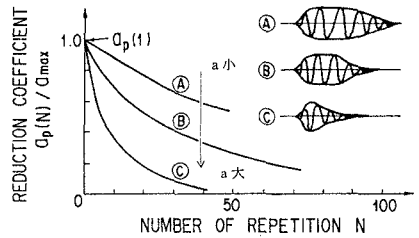


図-3 繰返し低減係数の例

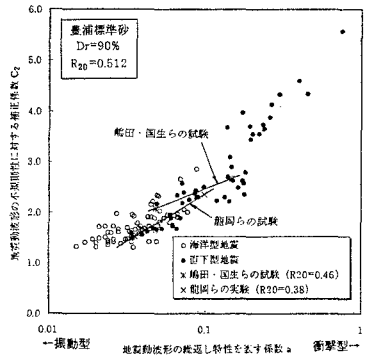
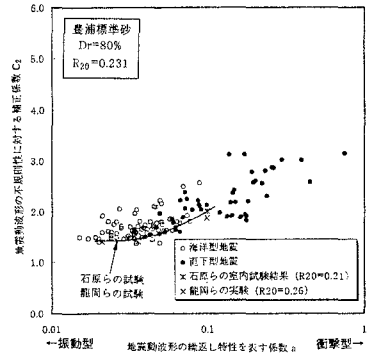


図-4 係数 a と C_2 の関係

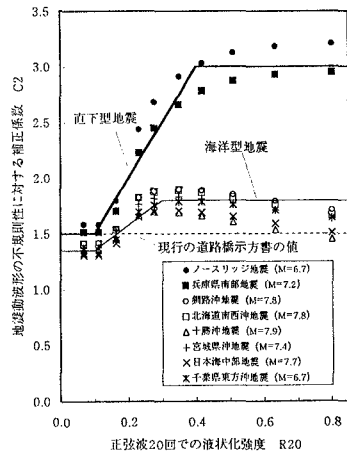


図-5 R_{20} と各地震ごとの C_2 の平均値