

震動継続時間の影響を考慮した 液状化危険度判定法について

八代 和幸¹・杉戸 真太²・八嶋 厚³・古本 吉倫⁴・渦岡 良介⁵

¹ ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 (〒460-0008 名古屋市中区栄二丁目5番1号)

E-mail:k-yasiro@jrcc.co.jp

² 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1) E-mail:sugito@cc.gifu-u.ac.jp

³ 岐阜大学工学部社会基盤工学科教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1) E-mail:yashima@cc.gifu-u.ac.jp

⁴ 岐阜大学工学部社会基盤工学科助手 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1) E-mail:furumoto@cive.gifu-u.ac.jp

⁵ 東北大学大学院工学研究科講師 (〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1-1) E-mail:uzuoka@civil.tohoku.ac.jp

地盤の液状化による被害は、地震動の最大振幅に加えて震動継続時間が大きく影響することが知られている。道路橋示方書では過去の地震動記録を検討し、最大加速度に加えて地震のタイプによる分類(タイプI地震動:プレート境界型, タイプII地震動:内陸直下型)で土のせん断強度の補正係数 C_W を与えている。本研究では、想定東海地震、東南海地震のように震動継続時間がさらに長くなった場合の適切な補正係数 C_W について検討したものである。具体的には、これらの想定地震による東海各県域におけるシミュレーション地震動を算出し、各波形における補正係数を算出した。その結果、ゆるい砂の場合、タイプI地震動で1.0と規定されている補正係数を概ね0.9程度とする必要があることが示された。

Key Words: Simple Index for Liquefaction Potential, Effect of Grand Motion Duration, Theory of Damage Accumulation, Hypothetical Tokai Earthquake

1. はじめに

南海トラフ沿いで発生する東海、東南海地震では、断層規模が大きいことにより強い揺れが長時間継続することが予想され、特に、軟弱地盤で強いゆれが長く続くこと、また、広域の液状化によって住家や様々な社会基盤施設に甚大な被害が発生する恐れがある。これらのプレート境界型巨大地震が起こること自体は避けられないが、それによって引き起こされる強震動や地盤の液状化の程度を精度よく予測し適切な準備ができるならば、災害は大きく軽減されるものと考えられる。このような観点から地震の特徴を踏まえた精度の高い震度や液状化危険度などの各種ハザードマップを作成することは、地域の防災対策にとって大変重要である。

液状化の危険度を精度良く推定するには、液状化の程度に大きく関与する地震動の大きさと繰返し特性を考慮する必要がある。想定東海・東南海地震について、中央防災会議¹⁾及び地震調査研究推進本部²⁾がまとめた断層パラメータを含む震源情報から地震動予測を行った事例によると、地震動継続時間が非常に長く最大振幅に近い大きな振幅の波が長く継続することから、広い地域で地盤の液状化発生危険性が高くなるものと考えられている。

現在、液状化判定法としてよく用いられている道路橋

示方書³⁾では、プレート境界型の大規模な地震を想定した地震動(以下「タイプI地震動」という。)と内陸直下地震を想定した地震動(以下「タイプII地震動」という。)の2種類の地震動について継続時間に依存する繰返し特性を考慮するパラメータを規定しているが、震源過程が詳しく調査されている東海・東南海地震は、タイプI地震動で対象とした過去の地震よりもさらに断層が大きく震動継続時間が長くなるため、この影響を検討する必要がある。

以上のことから、道路橋示方書の簡易液状化判定法におけるタイプI地震動に対応する継続時間を考慮したせん断強度の補正係数を東海・東南海地震においてどの程度とすべきかについて検討した。

2. 震動継続時間が液状化被害に及ぼす影響に関する試算

地盤の液状化に大きく依存する地震動の大きさと地震動の繰返し特性の違う地震動波形を入力として有効応力解析⁴⁾を行い、港湾岸壁ケースの移動量(典型的な液状化による被害)に着目し、地震動継続時間 t_{90} が液状化被害に及ぼす影響について検討した。地震動継続時間 t_{90} とは図-1に示すように地震動の累積パワーが5%~95%

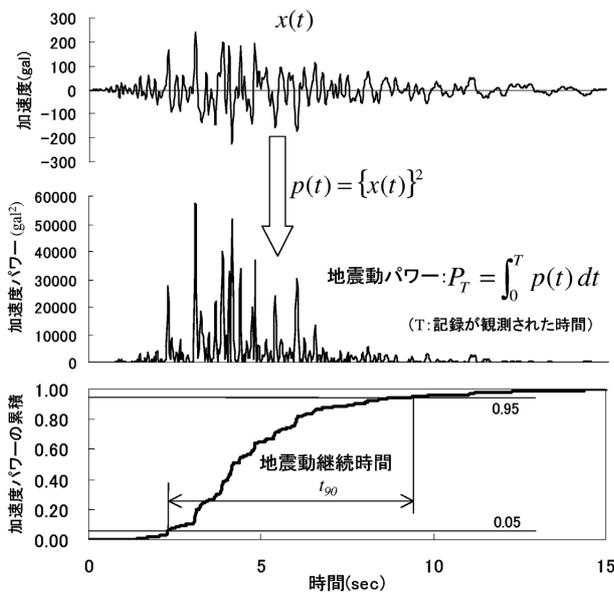


図-1 地震動継続時間 t_{90} の定義

にいたるまでの時間で定義される。

図-2 に、六甲アイランドの港湾岸壁ケーソン及び周辺地盤のモデルを対象として有効応力解析⁴⁾を行い、得られた残留変位ならびに周辺地盤の過剰間隙水圧分布を示す。(a) に六甲アイランドの港湾岸壁ケーソン及び周辺地盤の解析モデルを示す。解析モデルでは、ケーソン背面及び底面にジョイント要素はなく、海水の影響はないものとした。(b) は神戸ポートアイランドで観測された1995年兵庫県南部地震の基盤入射波とその解析結果、(c) は想定東南海地震による名古屋港地点でのシミュレーション地震動とその解析結果である。(c) の入力地震動は(b) と比べ最大振幅が3分の1程度と低いものの、震動継続時間が約3倍と非常に長い。港湾岸壁ケーソンの移動量に着目すると、地震動の最大振幅が3分の1程度であっても、継続時間が t_{90} が3倍程度に長くなるこれらのケースでは同程度の移動量となっていることが分かる。つまり、地盤の液状化被害の程度は、地震動の最大振幅のみならず、震動継続時間にも強く支配されることが分かる。

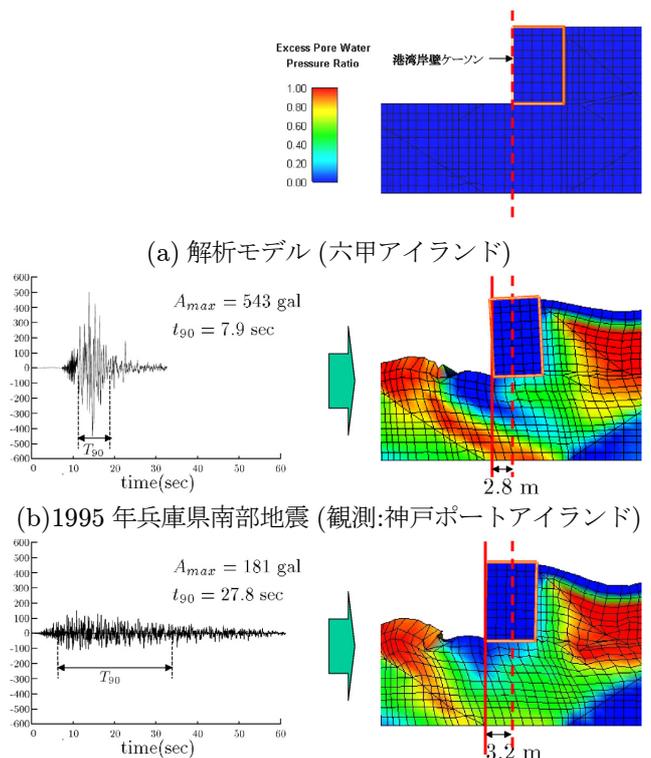


図-2 入力地震動波形と有効応力解析結果

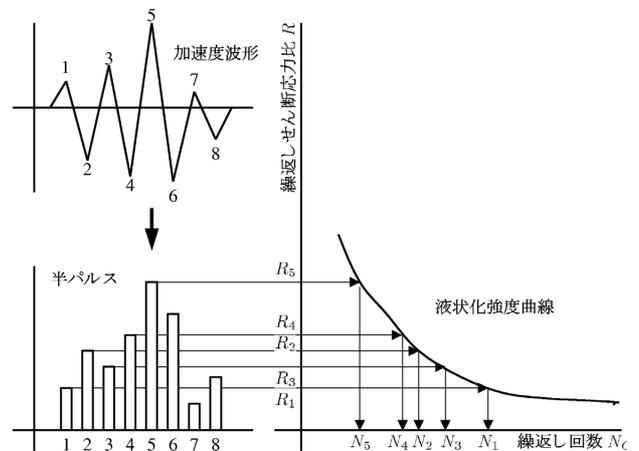


図-3 累積損傷度理論の概要⁷⁾

3. 震動継続時間を考慮した地震動繰返し特性による補正係数の算出

過去のプレート境界型地震による強震記録の例より、地震動継続時間が非常に長いと予想される想定東海・東南海地震の地震動繰返し特性による補正係数を道路橋示方書³⁾に基づき、累積損傷度理論により算定する。

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⁵⁾、真壁ら⁶⁾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(動的せん断強度比と繰返し回数の関係)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の2分の1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、 $D \geq 1.0$ のとき液状化すると判定した。(図-3参照)

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、 $D = 1.0$ となる時の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 R_{20} を求め、道路橋示方書で定められている地震動の繰返し特性による補正係数 C_W を、次式によって求めた。

$$C_W = \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{max}}{R_{20}} \quad (1)$$

表-1 解析に用いた地震動の最大加速度と継続時間

地震名	サイト名	成分	A_{max} (gal)	t_{90} (sec)
1968年 十勝沖地震	室蘭	NS	210.26	31.62
		EW	229.12	28.26
	青森	NS	250.19	56.46
		EW	179.58	56.56
	八戸	NS	252.61	45.20
		EW	212.29	38.54
1995年 兵庫県南部地震	ポートアイランド	NS	409.50	7.76
		EW	441.31	9.46
	総合技術研究所	NS	213.23	10.84
		EW	312.67	14.62
	新神戸	NS	497.49	8.06
		EW	576.49	8.20
	神戸海洋気象台	NS	809.40	8.06
		EW	605.18	9.50
想定東海地震 (シミュレーション)	名古屋	-	179.51	30.60
	半田	-	219.04	35.28
	南知多	-	224.13	38.02
	稲武	-	379.22	22.42
	岐阜	-	167.61	29.26
	高山	-	260.81	18.88
	四日市	-	151.91	35.98
	津	-	156.72	40.72
	伊勢	-	130.62	43.20
	尾鷲	-	72.86	44.48
	熊野	-	106.56	40.72
	想定東南海地震 (シミュレーション)	名古屋	-	230.27
半田		-	353.14	25.78
南知多		-	483.64	25.64
稲武		-	374.43	17.72
岐阜		-	175.36	29.96
高山		-	203.39	23.78
四日市		-	249.34	32.76
津		-	300.98	36.14
伊勢		-	406.37	33.34
尾鷲		-	149.64	46.14
熊野		-	308.90	52.64

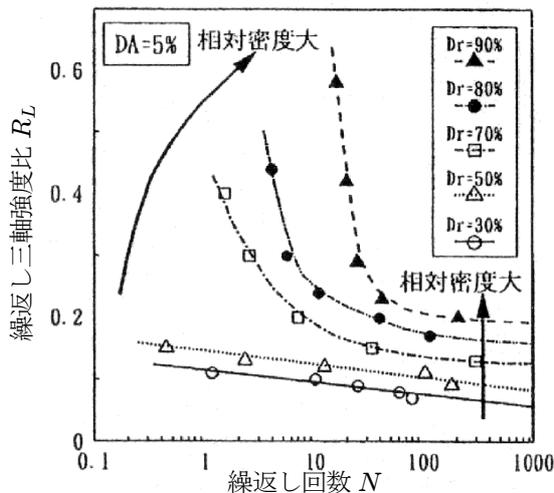


図-4 豊浦標準砂の液状化強度曲線⁷⁾

対象とした地震動波形は、1968年十勝沖地震と1995年兵庫県南部地震の強震記録と、想定東海・東南海地震による東海地域の各地点でのシミュレーション波形である。後者は、中央防災会議¹⁾でまとめられた震源やアスペリティの位置を用いて、工学的基盤における非定常地震動予測モデル(EMPR⁸⁾)により作成し、各観測地点において周波数依存型等価線形化手法(FDEL⁹⁾)により得られる地表での波形である。表-1に解析に用いた観測記録とシミュレーション地震動の最大加速度と継続時間を示す。

また、解析に用いる液状化強度曲線は、図-4に示す豊浦標準砂を用いて行われた繰返しせん断試験結果を、双曲線型の関数でモデル化したものを用いた。相対密度は、30%~100%までを対象として検討した。

4. 東海・東南海地震における地震動特性による補正係数

図-5に地震動繰返し特性による補正係数 C_W の算出結果を示す。図中の点は各地震ごとに得られる各地点での C_W の平均である。また、実線は道路橋示方書³⁾で以下のようにタイプI地震動とタイプII地震動に分けて規定されている地震動繰返し特性による補正係数である。

(タイプI地震動の場合)

$$C_W = 1.0 \quad (2)$$

(タイプII地震動の場合)

$$C_W \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 R_L は繰返し三軸強度比である。

同図より、タイプII地震動の1995年兵庫県南部地震では C_W の値がタイプI地震動と比較して相対的に大きくなっていることが分かる。換言すれば、衝撃的なタイプII地震動は、繰返し回数が少ないことから最大振幅が大きくても相対的には液状化しにくいことを表している。一方、タイプI地震動の1968年十勝沖地震と想定東海・東南海地震に着目すると R_L に関わらず、 C_W が概ね一定であると言える。また、十勝沖地震と想定東海・東南海地震を比較すると、後者の方がより小さい値を示しており、これは、より継続時間が長いことによるものである。

以上のことから、想定東海・東南海地震のように震動継続時間が非常に長い場合には、過去のタイプI地震動を用いた検討結果よりもさらに C_W の値が低くなることが示された。従って、液状化危険度予測をこの判定法に基づいて行う際には、道路橋示方書で規定されているタイプI地震動の場合の $C_W = 1.0$ をさらに下回る値を用いる必要があると考えられる。

そこで、図中太線で示すような $0.1 \leq R_L \leq 0.4$ の範囲(通常ゆるい砂層に相当する範囲)の想定東海・東南海地震の平均値 $C_W = 0.9(0.8968)$ を用いることとした。 $0.1 \leq R_L \leq 0.4$ の範囲の平均値とするにあたり以下の点を考慮した。

- 図-6に示すように、想定東海地震を対象とした各地点での補正係数 C_W は対象地点による地震波の違いによりばらつきがある。断層サイズによって決まるおよその継続時間の影響を見るため、各地震ごとに繰返し三軸強度比 R_L に対して各地点での C_W の相加平均値を求めた。
- 繰返し三軸強度比 $R_L = 0.2$ のあたりで C_W の値のピークを示している。これは土の物性的影響というよりは、相対密度 $D_r = 80\%$ に対応する液状化強度曲線のモデル化に依存していると考えられる。

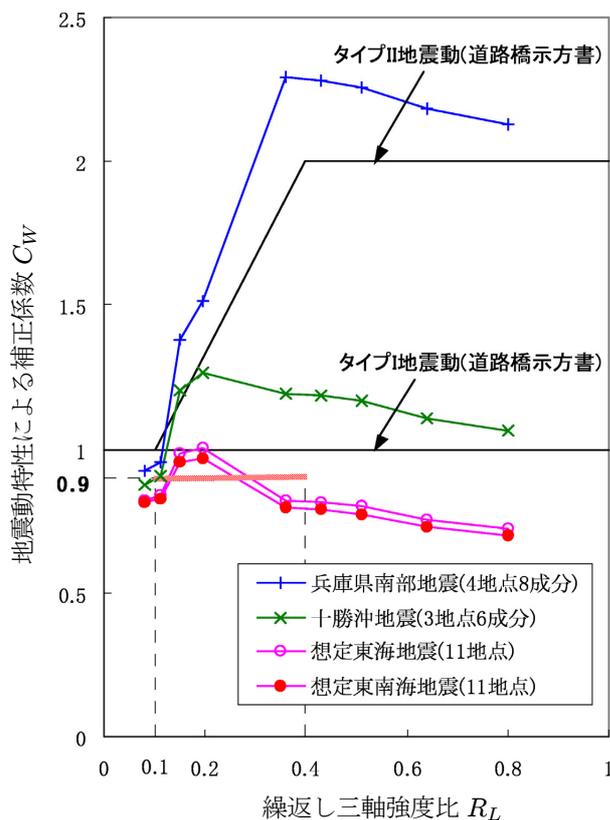


図-5 各地震動における地震動繰返し特性による補正係数

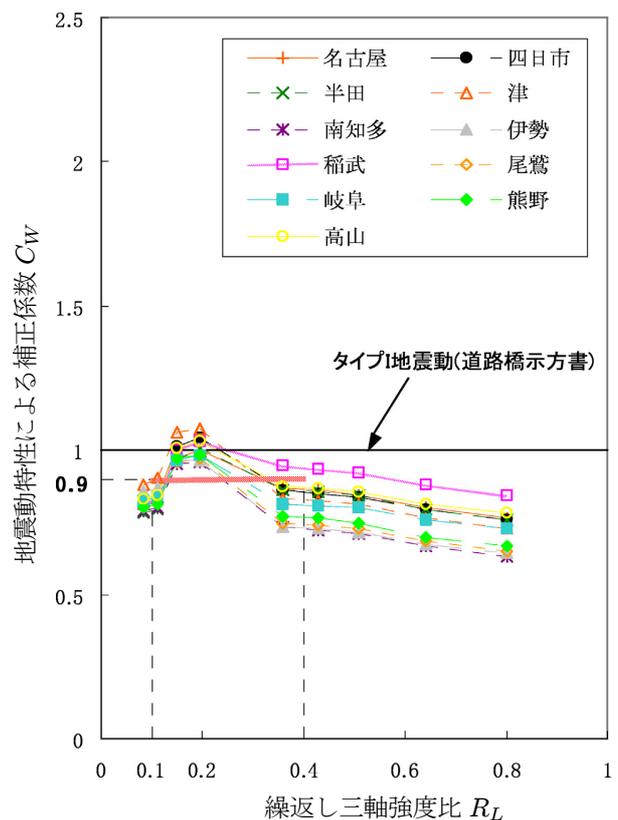


図-6 東海地震における地震動繰返し特性による補正係数(愛知, 岐阜, 三重の11地点)

3. 液状化対象土層の沖積低地の多くは繰返し三軸強度比 R_L が0.1~0.4の範囲であり, R_L が0.4を越えるような密な砂や礫では地盤の液状化の危険性が低い.
4. 道路橋示方書における液状化判定法は, あくまで簡易法であり, 観測地点ごとの震動継続時間のばらつきは考慮せず, C_W を定数(平均値)としてとらえるべきとした.

以上のような考察のもとに, 想定東海・東南海地震のように震動継続時間が非常に長くなるような場合における液状化危険度を検討する際には, 平均値 $C_W = 0.9$ 程度を用いる必要があると判断した.

5. おわりに

想定東海・東南海地震の震源情報により得られるシミュレーション地震動を用いて, 震動継続時間を考慮した地震動繰返し特性による補正係数 C_W を道路橋示方書の算定法に基づいて算出した. 当該地震による各地点でのシミュレーション地震動より得られた C_W の値から, 震動継続時間が想定東海・東南海地震のように非常に長い場合には, C_W の値を1.0より低くする必要が示された. そこで, プレート境界型巨大地震における C_W の値として, $C_W = 0.9$ を提案した.

参考文献

- 1) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会, <http://www.bousai.go.jp/jisin/chuou/tokai/index.html>
- 2) 地震調査研究推進本部：南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について (中間報告), <http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/01b/hyoka.pdf>
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3.
- 4) Oka, F. Yashima, A. Kato, M. and Uzuoka, R. : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of aporous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994
- 5) 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
- 6) 真壁, 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
- 7) 東拓生・田村敬一・二宮嘉朗：地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化判定法に関する研究, 土木学会第51回年次学術講演概要集, pp.196-197, 1996年9月
- 8) M.Sugito, Y.Furumoto, T.Sugiyama : Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12WCEE, Auckland, New Zealand (CD-ROM)
- 9) 杉戸真太・合田尚義・増田民夫：周波数特性を考慮した等価線形ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集 No.493/III-27, pp.49-58, 1994.

(2003.10.8 受付)