

入力地震エネルギーに基づく地盤の液状化判定法

東北大学 学生会員 ○鈴木 崇弘

東北大学 正会員 風間 基樹・柳澤 栄司

1.はじめに

現在液状化強度は一定応力の繰返し三軸試験から得られる液状化強度曲線によって表されているが、風間<sup>1)</sup>は土の消費しうる塑性仕事量の上限を用いることを提案している。ここで塑性仕事量は累積損失エネルギーと呼ばれ、個々の土に対して要素試験により求められるものである。この考え方に基づき液状化の判定を行うには地震動により地盤に入力するエネルギー量を算定することが不可欠である。本研究は累積損失エネルギー量を等価線形解析から簡易的に算出し、考察したものである。

2.実地震動による入力地震エネルギーの算定方法

本解析では同一地盤に様々な地震動を入力し地盤の応答解析を行うことによりそれぞれの地震動をエネルギーの面から比較した。解析の対象としたのは神戸ポートアイランドのアレー観測地点の地表から-28mまでの地盤である。この地点はアレー観測記録が得られており地盤条件も明確である<sup>2)</sup>。検討に用いた地盤条件を表-1に示す。

入力地震動としては表-2に示す6地震動から得られた合計8地点の地震波の水平2成分のうち最大加速度が大きい成分を使用した。強震記録取得地点の表層地盤の影響を取り除くために入射波を用いることとし、解析に用いた基盤面の密度、せん断波速度は各観測地震において入射波を推定する際に用いた基盤面の値を用いた（表-2参照）。例えば三陸はるか沖地震について言えば八戸港の地震計設置位置における基盤面の上に神戸ポートアイランドのK.P.-28m以浅の地盤があると考えたときの地震応答を検討することになる。

解析には1次元重複反射理論を用いたプログラムSHAKBを用いた。解析に用いた動的変形特性のひずみ依存曲線のうち海面下の埋立地盤の剛性低下曲線は液状化に伴う剛性低下を考慮して決定した<sup>3)</sup>。

応答解析の結果から各層の累積損失エネルギーすなわち応力ひずみ履歴ループの描く面積を求めたいが本解析は等価線形手法を用いているため非線形の履歴変形挙動は原理的に計算できない。そこで弾性エネルギー $W$ （図-1参照）と減衰定数 $h$ 、消費エネルギー $\Delta W$ の関係

$$\Delta W = 2\pi h W \quad \dots (1)$$

を用いて $\Delta W$ の累積値を計算した。すなわち累積値は式(2)で求められる。

$$\sum_i \Delta W_i = 2\pi h \sum_i W_i \quad \dots (2)$$

3.解析結果

各地震動を入力したときの累積損失エネルギーの分布を図-2に示す。なお累積損失エネルギーの値は各層の中間点での上載圧で正規化した。兵庫県南部地震、三陸はるか沖地震の場合では、埋立土層で累積損失エネルギーが大きくでていることがわかる。一方、その他の地震では埋立土層よりも沖積粘土層の累積損失エネルギーの方が大きくでている。兵庫県南部地震では全累積損失エネルギーに対して埋立土層への蓄積が約95%となり（表-3参照）入力し

表-1 解析対象とした地盤の層分剖

番号	標高 K.P.(m)	地盤種類	層厚 (m)	単位体積 重量(t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	物性曲線 番号
1	4	埋立地盤	2.0	1.7	170	1
2	2	埋立地盤	2.0	1.7	170	1
3	0	埋立地盤	1.0	2.0	210	2
4	-1	埋立地盤	1.0	2.0	210	2
5	-2	埋立地盤	1.0	2.0	210	2
6	-3	埋立地盤	1.0	2.0	210	2
7	-4	埋立地盤	1.0	2.0	210	2
8	-5	埋立地盤	1.0	2.0	210	2
9	-6	埋立地盤	2.0	2.0	210	2
10	-8	埋立地盤	2.0	2.0	210	2
11	-10	埋立地盤	2.0	2.0	210	2
12	-12	埋立地盤	1.4	2.0	210	2
13	-13.4	沖積粘土	2.6	1.6	180	3
14	-16	沖積粘土	2.0	1.6	180	3
15	-18	沖積粘土	2.0	1.6	180	3
16	-20	沖積粘土	2.0	1.6	180	3
17	-22	沖積粘土	2.2	1.6	180	3
18	-24.2	洪積砂礫	1.8	2.0	245	4
19	-26	洪積砂礫	2.0	2.0	245	4
20	-28	基盤	2.0	2.0*	305*	線形

\*：基盤の諸値は表-2参照

表-2 計算に用いた地震波の諸元

番号	発生年	地震名	観測地点	方向	入力波	Max. Acc(Gal)	データ数	基盤密度	基盤S波速度	
1	1968年	十勝沖地震	八戸港	NS	入射波	170	153	1800	2.0t/m <sup>3</sup>	380m/s
2	1978年	宮城県沖地震	大船渡港	E41S	入射波	161	158	1800	2.0t/m <sup>3</sup>	650m/s
3	1978年	宮城県沖地震	開北橋	W42N	入射波	293	279	1800	2.0t/m <sup>3</sup>	650m/s
4	1993年	釧路沖地震	釧路港	EW	入射波	221	221	3600	1.8t/m <sup>3</sup>	430m/s
5	1994年	北海道南西沖地震	函館港	N03W	入射波	142	142	7200	1.84t/m <sup>3</sup>	550m/s
6	1994年	北海道南西沖地震	室蘭港	EW	入射波	144	144	7200	2.0t/m <sup>3</sup>	420m/s
7	1994年	三陸はるか沖地震	八戸港	EW	入射波	999	999	3600	2.0t/m <sup>3</sup>	341m/s
8	1995年	兵庫県南部地震	神戸P.I.	NS	観測波	544	504	1800	2.0t/m <sup>3</sup>	305m/s

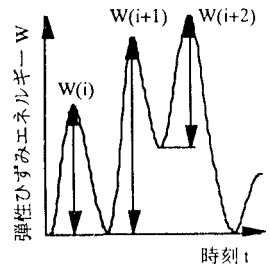


図-1 累積ひずみエネルギーの計算方法

たエネルギーのかなりの部分が埋立土層の塑性仕事に費やされたことがわかる。なお累積損失エネルギーの分布は各層の最大せん断ひずみの分布とよい対応があったこともつけ加えておく。

#### 4. 入力地震動が地盤、構造物に与える影響

基盤からの入力エネルギーの指標として基盤の入射波により求めたスペクトル強度(SI)を用い、表-3にSI値の大きい順に地震動を並べた。SIを求める際の減衰定数は地盤の液状化を考慮した20%のものを指標として用いたが5%のものも同時に求めた。ここでは兵庫県南部地震の波形も観測波から入射波を推定して用いた。

地盤に与えた影響は累積損失エネルギーを指標とし、構造物への影響は地表の応答波形から得られる減衰定数5%のSI値を指標とした。表-3にこれらの諸値を示す。この結果地盤の累積損失エネルギーと基盤の

SI値(h=20%)との相関係数は0.98となり地盤の累積損失エネルギーは基盤のSI値で評価できると思われる。一方

地表応答のSI値との相関は0.65となり基盤のSI値との相関よりも小さい。

また上部構造物への影響については、地盤の液状化の有無が大きな要因になっているようだ。例えば基盤のSI値(h=5%)に対する地表のSI値の比をとると累積損失エネルギーの小さい地震の場合1~3という値になる。これに対し地盤が液状化していると思われる累積損失エネルギーの大きい地震については比が0.6~0.8程度となっている。これは地盤に液状化を起こす地震では液状化地盤で大量のエネルギーが消費され、上層に伝達されなくなっているためと考えられる。累積損失エネルギーと、基盤(h=5%)と地表のSI値の比を図-3に示す。地震動の加速度倍率を変えて入力した結果も含めて示した。地盤の累積損失エネルギーが大きくなるほど基盤から入力したエネルギーが地表に伝わらないことがわかる。

#### 5. 結論

本研究では重複反射理論を用いた等価線形解析の結果から簡易的に算出した累積損失エネルギーを用いて地震時の地盤への影響を評価した。また、地表のSI値を構造物への影響として地盤の被害との関連を考察した。その結果は以下のとおりである。

- (1)地震により入力した累積損失エネルギーと上の蓄えうる塑性仕事量との比較で液状化の判定が可能となる。
- (2)地盤が液状化を起こす場合地盤の累積損失エネルギーは大きな値を示しその中でも液状化した層でほとんどのエネルギーが消費されている。
- (3)地盤の累積損失エネルギーは基盤のSI値とよい相関が見られた。基盤のSI値は地盤へのエネルギー入力の指標になるものと思われる。これに対し地表のSI値は液状化地盤へのエネルギー入力の指標としては信頼性に乏しい。
- (4)基盤から入射したエネルギーが地盤で累積損失エネルギーとして消費されることにより構造物への影響が軽減される。すなわち累積損失エネルギーが大きくなる地盤の液状化時には構造物の1次被害が小さくなる。

#### 【参考文献】

- 1)風間基樹：累積損失エネルギーに基づく新たな液状化強度指標の提案，第32回地盤工学研究発表会，pp.723-724,1997.7
- 2)神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査（ポートアイランド，六甲アイランド）報告書,1995
- 3)風間基樹，河又洋介，鈴木崇弘，柳澤栄司：表層地盤応答・液状化から見た三陸はるか沖地震の強震動強さ，三陸はるか沖地震シンポジウム論文集，pp.28-35，1998.1

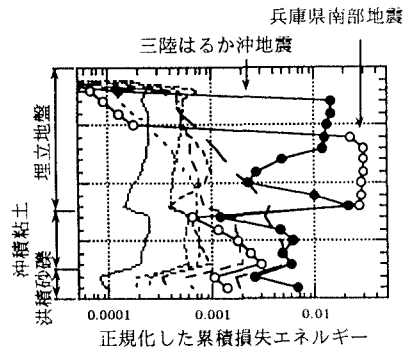


図-2 累積損失エネルギー蓄積状況

表-3 入力地震動と地盤、構造物への影響

地震名	観測地点	方向	基盤SI (kine・s)		地盤の累積損失エネルギー層				地表SI (kine・s)		
			h=20%	h=5%	全累積分	埋立土層	割合(%)	粘土層	割合(%)	h=5%	h=20%
兵庫県南部地震	神戸P.I.	NS	207	391	0.210	0.199	94.8	0.009	4.3	235	0.60
三陸はるか沖地震	八戸港	EW	172	224	0.141	0.109	77.3	0.023	16.3	182	0.81
北海道南西沖地震	函館港	N03W	83	167	0.042	0.015	35.7	0.023	54.8	248	1.49
釧路沖地震	釧路港	EW	65	112	0.017	0.006	35.3	0.009	52.9	165	1.47
宮城県沖地震	石巻開北橋	W42N	54	78	0.012	0.007	58.3	0.004	33.3	123	1.58
十勝沖地震	八戸港	NS	54	46	0.009	0.004	44.4	0.003	33.3	127	2.76
宮城県沖地震	大船渡港	E41S	34	85	0.002	0.002	50.0	0.001	25.0	86	1.01
北海道南西沖地震	室蘭港	EW	27	52	0.009	0.005	55.6	0.003	33.3	68	1.31

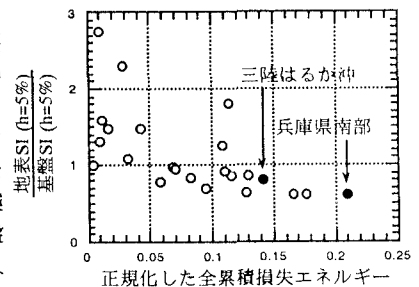


図-3 地盤の累積損失エネルギー - 基盤と地表のSI比