

地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用

風間基樹¹・鈴木崇弘²・柳澤栄司³

¹正会員 博士(工学) 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)

²正会員 運輸省 第四港湾建設局 企画課(〒750-8504 下関市竹崎町4-6-1)

³正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)

筆者らは、水平成層地盤の液状化を判定する手法として、地震時に地盤中で費やされた累積損失エネルギーと地盤材料が液状化時に蓄えうる累積損失エネルギーを対比する方法を提案している。本研究は、その方法の適用の際に必要な強震時に表層地盤で費やされる累積損失エネルギーを等価線形地震応答解析から簡易に推定する方法について論じたものである。提案手法の妥当性を検討するため、神戸ポートアイランドの-28m以浅の地盤を対象として、近年の大地震において観測された強震記録に対する地震応答解析を行い、地盤各層に蓄積された累積損失エネルギーを評価した。また、新たな液状化判定法の枠組みを示し、累積損失エネルギーを外力の指標とすることの有用性を示した。

Key Words : cumulative dissipation energy, strong motion, seismic intensity, SI value, seismic response, liquefaction, equivalent linear analysis, liquefaction evaluation

1. まえがき

(1) 研究の背景および目的

近年の大地震において、500Galを越える強震動が相次いで観測されている。1993年釧路沖地震、1994年ノースリッジ地震、1994年三陸はるか沖地震、1995年兵庫県南部地震がその例である。このような状況を背景にして、耐震設計上対象とする入力地震動レベルは、これまで以上に大きくなり、いわゆるレベル2地震動として基準類の改訂が行われてきたところである。しかしながら、従来の設計法の枠組みをそのままにして単純に地震荷重レベルだけを増加させる対応には限界があると考えられている。荷重レベルの大きさによっては、従来の設計法では設計できない事態が発生したり、設計できてもコストが非常に大きくなる可能性があるからである。そこで、いわゆるレベル2地震動に対する考え方として、無被害を目標とするのではなく、構造物や地盤の被害をある程度許容すると言う考え方が主流になっている。しかしその場合には、構造物や基礎地盤が弾性範囲を超えてからのねばりや靱性を積極的に考慮でき、被災変形量を予測できる安全照査手法が必要となる。

地盤の液状化の問題についても、阪神大震災を契

機に、大きな荷重レベルに対する強度の予測法の研究やきれいな砂だけでなく広範な粒度を対象とした液状化の研究の必要性が指摘されてきた¹⁾。著者ら²⁾はこのような背景から、新たに地盤の液状化強度予測手法として、定ひずみ制御繰返し三軸試験において地盤要素が液状化するまでに費やすことのできる累積損失エネルギー量と剛性低下の関係を液状化強度指標とすることを提案している。この指標の利点は、地盤材料の靱性・ねばりを考慮でき、地盤の塑性化の程度を定量的に表現できる点にある。この強度指標を用いて液状化の判定を行う場合には、地盤に入力する地震外力を地盤の塑性変形に費やされるエネルギー量として評価する必要がある。

本研究はこのような観点から、ある対象とする水平成層地盤にある地震動が入力したとき、地盤の各層において地盤の塑性化に使われる累積損失エネルギー量の簡易推定手法について検討したものである。

なお、地盤に入力するエネルギーを評価するということは、入力エネルギー量の観点から入力地震動の強さを評価することを意味しており、地震動強さの一つの指標とも考えられる。これは、同じように500Galを越える加速度を記録した地震でも、その被害程度が必ずしも同じではないことの一つの説明に

なりうるものである。著者ら³⁾は、すでにこのような観点から、三陸はるか沖地震の際に観測された地震動の破壊力を兵庫県南部地震と比較し、その大小関係を論じた。その結果、液状化に寄与する地震動強さを単に最大加速度の大小で議論することに限界があることを示した。また、著者ら⁴⁾は、地盤条件との関連で地表面応答に及ぼす軟弱地盤の影響について検討し、地表面下に軟弱層がある場合には、軟弱層の塑性化によって、地表面の最大加速度応答は小さくなるものの震動の長周期成分は大きく減衰しないことを示した。これは、層ごとの入力地震エネルギーの分配が地盤構造に支配されることを示すものである。本研究のもう一つの目的は、地盤に蓄積する塑性ひずみエネルギー量とその分配関係を検討し、近年の大地震において観測された地震動の強さを評価することである。

(2) 構造物および地盤に入力する地震エネルギーに関する既往の研究

構造物の耐震性評価をエネルギーの観点から論じた研究はHousner⁵⁾に端を発する。Housnerは地震動により構造物が消費するエネルギー（履歴エネルギー）と構造物が破壊するまでに消費するエネルギーの限界値を比較することで構造物の耐震評価指標にすることを基礎を示した。また、Housnerはエネルギー入力 E_D を次式のように速度応答スペクトルに関連づけた。

$$E_D = \frac{m}{2} y_{e,max}^2 \quad (1)$$

ここに、 m ：1質点系の質量、 $y_{e,max}$ ：弾性系の速度応答の最大値（速度スペクトル）である。

加藤・秋山⁷⁾はHousnerによるエネルギー入力の考えを発展させエネルギー入力に基づく耐震設計法を提案している。その中で構造物に入力する総エネルギー量は復元力特性に関わらず一定で総質量、固有周期のみに依存するもので、質量分布、剛性分布、減衰定数には依存しないことを示した。

星谷・山崎⁸⁾は地盤-構造物系のモデルを用いて、地震動を受けて構造物の消費する塑性ひずみエネルギー量が構造物特性、地盤特性のどのような要因に影響されるのかを検討した。構造物特性としては固有周期が小さく、単位面積重量の大きい構造物ほど塑性ひずみエネルギーが蓄積されやすく、地盤特性としては地盤が剛であるほど地震動エネルギーが入力されやすいことを示した。

大野ら⁹⁾は地震動により構造物に入力する各種のエネルギー量と入力特性との関係を明らかにした。入

力地震動の周期特性を検討し、ある特定の周波数が卓越する波ほど小さな加速度でも大きなエネルギーを入力することを示した。同時に全入力エネルギーのうち塑性ひずみエネルギーの占める割合は構造特性のみに依存することを示した。

片田ら¹⁰⁾は、入力地震動エネルギーの観点から、地盤の液状化を検討した。地盤を1質点系にモデル化し応答計算を行い、オンライン地震載荷実験により地盤に入力した累積損失エネルギー量と液状化発生の関係を調べた。この結果、累積損失エネルギーの蓄積過程は過剰間隙水圧上昇過程に対応しており、過剰間隙水圧上昇による剛性の低下とともに塑性ひずみエネルギーの蓄積がおこることを示した。また、片田ら¹¹⁾は入力地震動特性との関係も検討し、最大加速度を同じにした17個の地震動を入力させ、累積損失エネルギーの蓄積状況を比較している。これによると同じ地盤でも塑性ひずみエネルギーの蓄積量は最大加速度が同じでも入力波の種類が異なると最大53倍の違いが生じたとしている。また、単一成分波が卓越する狭帯域成分波を入力波として用いると、広帯域成分を有する入力波を用いた場合より、累積損失エネルギーが大きくなることを示した。

Towhataら¹²⁾は、液状化を早期に判定する手法として、地表の強震動データから求められるスペクトル強度(SI)を利用する方法を提案している。Housnerが示したように、SIは地震動のエネルギーに対応した量と考えられるので、液状化が地震動の入力エネルギーに密接に関係することを示す研究とみなすことができる。なお、Towhataらの用いたSIは、減衰定数20%の1質点系の速度応答スペクトルの0.1秒から2.5秒の間の定積分値を考えている領域で平均化したものであり、次式で表されるように速度の次元を持っている。

$$\bar{SI}_{(h=20\%)} = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_{v(h=20\%)} dT \quad [\text{cm/s}] \quad (2)$$

一方、要素試験におけるこの累積損失エネルギーに関する今までの知見によれば、初期拘束圧で正規化した累積損失エネルギーは要素試験法の種類によらずほぼ一義的に決まること¹³⁾や、二方向せん断の場合にも同様に評価できること¹⁵⁾、過剰間隙水圧の上昇量とよい対応関係があること¹⁶⁾、粘性土の剛性低下量が一義的に説明できること¹⁹⁾、応力振幅一定試験とひずみ振幅一定試験で得られる初期液状化に至るまでの累積損失エネルギーがほぼ同じであること²⁰⁾などが明らかにされている。著者ら²⁾は、粘性土から砂質土まで様々な土について定ひずみ非排水繰返し

三軸試験を実施し、土の蓄えうる累積損失エネルギーの値を比較した。その結果、液状化に伴って剛性が急激に低下する砂質土には累積損失エネルギーの上限値があるのに対し、極端な剛性低下がない粘性土はエネルギーを吸収し続けることを示した。このことは、粘性土のように元来液状化しない土を明確に判断できることを示している。さらに筆者ら^{20,23)}は兵庫県南部地震の際に液状化した神戸ポートアイランドのまさ土層の累積損失エネルギーを検討した。その結果、アレー観測記録から推定した累積損失エネルギー²⁴⁾とまさ土の非排水定ひずみ繰返し三軸試験から推定したそれがほぼ整合することを示した。さらに、有効応力解析法において、材料パラメータを累積損失エネルギーに関係づけることも、すでに行われており、いくつかの解析コード^{25,26)}で使われているところである。以上は、地盤の液状化や変形係数の低下に着目した土材料の性質に関する研究である。

なお、今までエネルギーに基づく液状化の評価は、地震動のマグニチュードと震央距離の関係から得られるある地点のエネルギー量との関係で、液状化の危険度解析に利用されてきた経緯がある^{27,29)}。本研究で対象としているのは、このような入力エネルギーのマクロな取り扱いではなく、液状化判定の対象とする地盤の直下に、ある地震動が想定されたときの累積損失エネルギー量の推定である。

2. 地盤に入力するエネルギー

(1) 二層地盤のエネルギー伝達

まず、水平に堆積した二層構造地盤(図-1)にSH波が鉛直下方から入射した場合のエネルギー伝達特性を重複反射理論から検討する。

ここでは、地盤を線形弾性体とみなし、せん断波の鉛直方向への伝播を考える。図の二層構造地盤に角振動数 ω の正弦波が鉛直に入射したとき、各層の定常振幅は次のように書ける。

$$u_n(x_n, t) = (E_n e^{ik_n x_n} + F_n e^{-ik_n x_n}) e^{i\omega t} \quad (3)$$

ここに、 $u_n(x_n, t)$: 第 n 層の水平変位、 E_n : 第 n 層の入射波の振幅、 F_n : 第 n 層の反射波の振幅、 k_n : 第 n 層地盤物性と角振動数から決まる波数、 t : 時間である。地表面のせん断応力がゼロ、第1層と2層の境界における変位・応力の連続条件を入れると、第1層の反射波および第2層の入射・反射波の変位振幅は、第

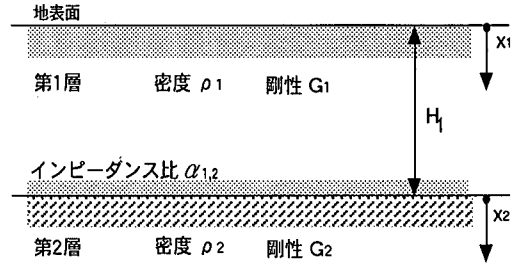


図-1 水平に堆積した二層構造地盤

1層の入射波の振幅 E_1 を用いて、それぞれ

$$F_1 = E_1 \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} E_1 \left\{ (1 + \alpha_{1,2}) e^{i\beta_1} + (1 - \alpha_{1,2}) e^{-i\beta_1} \right\} \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} E_1 \left\{ (1 - \alpha_{1,2}) e^{i\beta_1} + (1 + \alpha_{1,2}) e^{-i\beta_1} \right\} \quad (6)$$

と書ける。ここに $\alpha_{1,2} = \left(\frac{k_1 G_1}{k_2 G_2} \right) = \left(\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2} \right)^{\frac{1}{2}} = \alpha$:

第1層と第2層のインピーダンス比、 H_1 : 第1層の層厚、 $\beta_1 = k_1 H_1 = \beta$: 無次元波数、 ρ : 密度、 G : せん断剛性である。

さて、第1層と第2層の変位振幅が上記のように決まると、ある任意深さにおける単位体積あたりの運動エネルギー K と弾性ひずみエネルギー P は、以下のように書ける。

$$K = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{2} G \gamma^2 = \frac{1}{2} G \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \quad (8)$$

ここに、 v : 速度、 γ : せん断ひずみである。式(3)から式(6)の関係を式(7),(8)に代入すると第1層と第2層のある地点、ある時刻の運動エネルギーとひずみエネルギーは以下のように求められる。

$$K_1 = 2\rho_1 \omega^2 E_1^2 \sin^2 \omega t \cos^2 k_1 x_1 \quad (9)$$

$$P_1 = 2G_1 k_1^2 E_1^2 \cos^2 \omega t \sin^2 k_1 x_1 \quad (10)$$

$$K_2 = 2\rho_2 \omega^2 E_1^2 \sin^2 \omega t \times (\cos \beta \cos k_2 x_2 - \alpha \sin \beta \sin k_2 x_2)^2 \quad (11)$$

$$P_2 = 2G_2 k_2^2 E_1^2 \cos^2 \omega t \times (\cos \beta \sin k_2 x_2 + \alpha \sin \beta \cos k_2 x_2)^2 \quad (12)$$

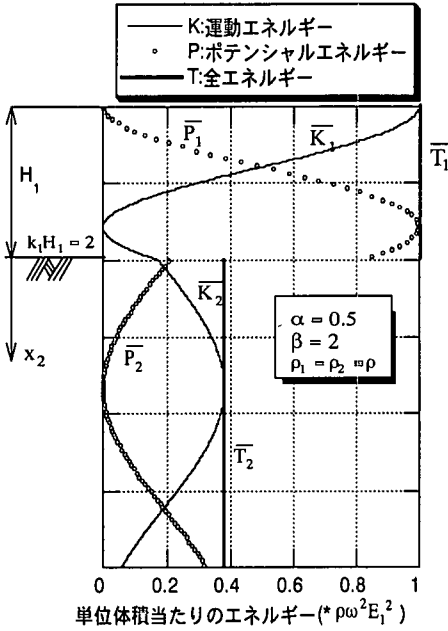


図-2 地盤に入射したエネルギーの深さ方向分布 (インピーダンス比=0.5, 無次元波数 $\beta=2$ の場合)

次に式(9)から(12)を周期 T の間で時間平均すると、第1層と第2層の任意深さにおける単位体積あたりの時間平均運動エネルギー \bar{K} と時間平均弾性ひずみエネルギー \bar{P} 、時間平均全エネルギー \bar{T} は、以下のように書ける。

$$\bar{K}_1 = \rho_1 \omega^2 E_1^2 \cos^2 k_1 x_1 \quad (13)$$

$$\bar{P}_1 = G_1 k_1^2 E_1^2 \sin^2 k_1 x_1 \quad (14)$$

$$\bar{T}_1 = \bar{K}_1 + \bar{P}_1 = \rho_1 \omega^2 E_1^2 \quad (15)$$

$$\bar{K}_2 = \rho_2 \omega^2 E_1^2 (\cos \beta \cos k_2 x_2 - \alpha \sin \beta \sin k_2 x_2)^2 \quad (16)$$

$$\bar{P}_2 = G_2 k_2^2 E_1^2 (\cos \beta \sin k_2 x_2 + \alpha \sin \beta \cos k_2 x_2)^2 \quad (17)$$

$$\bar{T}_2 = \bar{K}_2 + \bar{P}_2 = \rho_2 \omega^2 E_1^2 (\cos^2 \beta + \alpha^2 \sin^2 \beta) \quad (18)$$

$$\frac{\bar{T}_1}{\bar{T}_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{1}{(\cos^2 \beta + \alpha^2 \sin^2 \beta)} \quad (19)$$

式(13)から式(18)で求められる上層と下層の深さ方向のエネルギー分布を図にすると図-2のようになる。同図は、インピーダンス比が0.5の場合である。図から、深さ方向に運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーの分布が異なること、また各層の全エネルギーは同一層内で一定であるが、その値はインピーダンス比と無次元波数 β の関数である。この図で注目

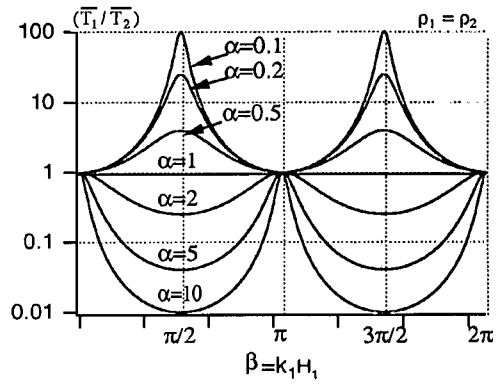


図-3 上層と下層のエネルギー比とインピーダンス比 α 、無次元波数 β の関係

すべきことは、地表面ではエネルギーは運動エネルギーとしてのみ存在し、逆に節となる場所ではポテンシャルエネルギーとしてのみ存在することである。次に上層と下層の全エネルギー比 (\bar{T}_1/\bar{T}_2) を図示すると図-3のようになる。図から、 β が一定ならば α が小さいほど上層のエネルギーが大きくなるのがわかる。また、 $\alpha < 1$ の場合、 $\beta = (2n-1)\pi/2$ ($n=1,2,\dots$)のとき(ちょうど上層の厚さが波長の1/4倍、3/4倍...のとき)インピーダンス比の逆数の二乗の極大値をとり、同じく $\alpha > 1$ のとき極小値をとることがわかる。図は、いわゆる共振によってエネルギーの伝達特性が支配されることを意味している。

以上をまとめると、深さ方向の全エネルギーの伝達は地盤構造に支配され、しかも深さ方向に運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーの分布が異なることがわかる。したがって、ある特定の地盤に入射する地震エネルギー量を評価するためには、その地盤構造に対して地震応答計算をしなければならないことになる。

(2) 累積損失エネルギーの簡易算定方法

(1)における重複反射理論の考察においては地盤を線形弾性体と仮定したが、その場合には地盤材料は地震エネルギーを弾性的に蓄えるのみである。ここで求めたいものは強震動を受けた場合に地盤材料が塑性変形することによって費やされるエネルギー量であり、履歴減衰エネルギーあるいは累積損失エネルギー、累積消費エネルギーなどと呼ばれるものである。(以下、累積損失エネルギーと統一する。)累積損失エネルギー ΔW は地震動により地盤に生じた応力 τ -ひずみ γ 関係のループ f の描く面積を累積したものであり、次式で示される。

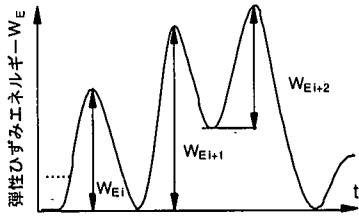


図-4 ランダム荷重を受けた土が蓄える弾性ひずみエネルギーの時刻歴の概念図

$$\Delta W = \int_V \tau(\gamma) d\gamma = \int_0^t \tau(\gamma) \dot{\gamma}(t) dt \quad (20)$$

一般に、この累積損失エネルギーは地盤の非線形な履歴変形特性を組み入れた有効応力解析を実施すれば計算できる。しかしながら、非線形有効応力解析を行うことは、それ自身が液状化解析であり、累積損失エネルギーを求めることの意義はすでに失われている。そこで、ここでは実務で一般に用いられている等価線形解析法を用いて累積損失エネルギーを求める方法について述べる。

さて、等価線形解析でも基本的に線形な応力-ひずみ関係を扱っていることから、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と減衰定数の関係を用いて蓄積した損失エネルギーを計算することとした。まず、等価線形解析からある時刻に地盤に蓄えられている弾性ひずみエネルギー $W_E(t)$ は次式で表される。

$$W_E(t) = \frac{1}{2} G_{eq} \{ \gamma(t) \}^2 \quad (21)$$

ここで、 G_{eq} は等価線形解析で収束したせん断剛性である。一方、よく知られているように、土材料の動的変形特性試験から得られる減衰定数と1サイクルあたりの累積損失エネルギー ΔW の間には次の関係がある。

$$\Delta W = 4\pi h_{eq} W_E \quad (22)$$

ここで、 h_{eq} は等価線形解析において収束した減衰定数の値である。例えば、ランダムな荷重を受けた土材料が蓄えた弾性ひずみエネルギーの時刻歴が図-4のように求められた場合、式(22)から除荷時に解放されず土の塑性変形に費やされた損失エネルギーを、それぞれの载荷過程のパルスの値から求めることができる。すなわち、第 n 層の全累積損失エネルギー $\Delta W_{n, total}$ は、すべてのパルス (1個) ごとの損失エネルギーを加えていくことで次のように求められる。

表-1 解析対象とした地盤物性の諸元

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

*基盤の諸値は表-2参照

$$\Delta W_{n, total} = \sum_{i=1}^I \Delta W_{n, i} = 2\pi h_{eq} \sum_{i=1}^I W_{E, n, i} \quad (23)$$

ここに、各パルスは半サイクルの载荷-除荷に対応しているため、式(22)から得られる値の半分となる。

なお、液状化を対象とする場合には、地盤の物性は非定常に変化するため、地震動の継続時間を通じて一定の減衰定数を利用することは、厳密な意味では不適切である。例えば、式(23)は各パルスにおいて評価できることから、そのパルスのひずみレベルに応じて等価減衰定数を変化させて計算することも可能である。しかし、応答計算を周波数領域で行って、エネルギーの算定の計算に用いる定数の非定常性を考慮することは整合性がとれないので、減衰定数は地震動の継続時間中一定として取り扱うこととした。

3. 解析条件

(1) 解析対象地盤

本研究において解析対象とした地盤は、神戸ポートアイランドのアレー観測地点の-28m以浅の地盤である。この地点を選定したのは、アレーの記録が得られていること、地盤条件などが明確であること、兵庫県南部地震の際の被害状況が明らかになっていくことからである。表-1は、検討に用いた地盤の層分割を示したものである。アレー観測では、K.P.-

表-2 解析に用いた地震波と基盤物性の諸元

番号	発生年	地震名	観測地点	方向	入力波	Max.Acc		使用 データ数	基盤の密度 (t/m ³)	基盤の S波速度(m/s)
						(Gal)	*3			
1	1968年	十勝沖地震	八戸港	NS	入射波	170	153	1800	2.00	380
2	1978年	宮城県沖地震	大船渡港	E41S	入射波	161	158	1800	2.00	650
3			開北橋	W42N	入射波	293	279	1800	2.00	650
4	1993年	釧路沖地震	釧路港	EW	入射波	221	221	3600	1.80	430
5	1994年	北海道南西沖地震	函館港	N03W	入射波	142	142	7200	1.84	550
6			室蘭港	EW	入射波	144	144	7200	2.00	420
7	1994年	三陸はるか沖地震*1	八戸港*2	EW	入射波	1350	1350	3600	2.00	341
8	1995年	兵庫県南部地震*1	神戸PI	NS	観測波	544	504	1800	2.00	305

*1:加速度振幅を小さくした計算も実施, *2:設置場所は1968年と350m移動, *3:10Hzのローパスフィルター後の値

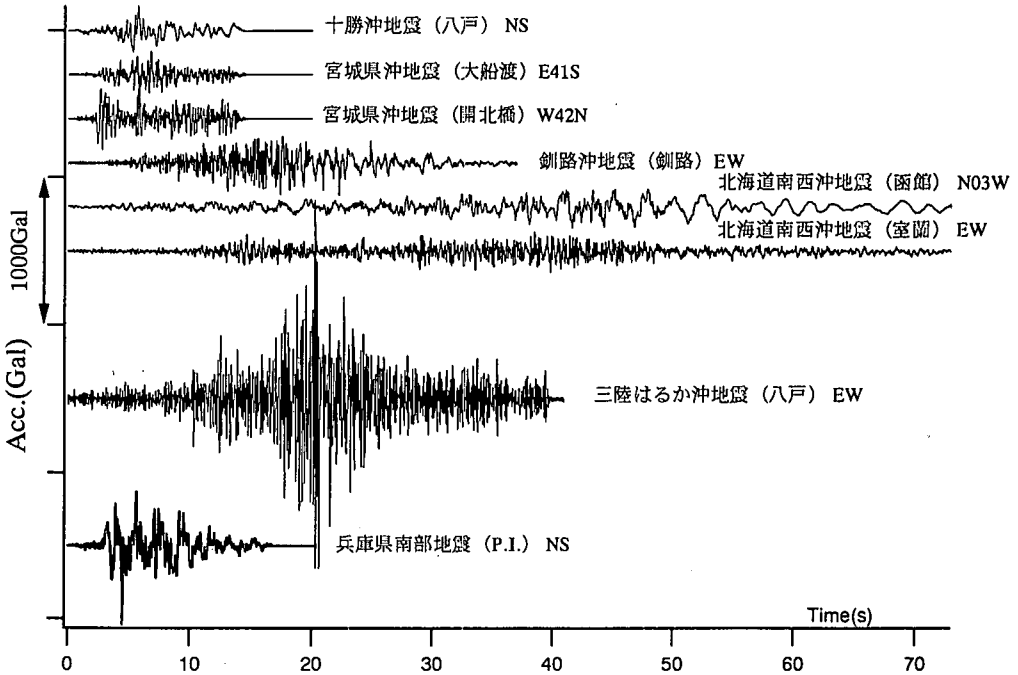


図-5 地震応答計算に用いた基盤入射波形時刻歴

79mまで観測記録が得られているが、ここではK.P.-28m以浅の沖積粘土地盤および埋立地盤をモデル化している。これらの地層構成や物性値は神戸市開発局の報告書³⁰⁾を元に作成したものである。

(2) 解析に用いた地震動および基盤せん断波速度

本解析に使用した地震波形は表-2に示す6個の地震の際に得られた合計8地点の地震波形である。水平2成分の地震波形のうち最大加速度が大きい方を用いることとしたが、釧路沖地震については観測波形にサイクリックモビリティの影響³¹⁾があるため最大加速度が小さいEW成分を解析対象とした。

入力地震動は基盤(K.P.-28m)から入力させたが、兵庫県南部地震は神戸ポートアイランドアレー観測地点のK.P.-28mの観測波形を入力し、そのほかの地震動は基盤面での入射波(2E)を入力した。これは強震

記録取得地点の表層地盤の影響を取り除くためである。十勝沖地震八戸港、宮城県沖地震大船渡港、宮城県沖地震開北橋の入力地震動は、すでに作成されていた基盤入射波を用いた^{32),33)}。釧路沖地震釧路港³¹⁾、北海道南西沖地震室蘭港³⁴⁾、三陸はるか沖地震八戸港³⁵⁾における基盤入射波は地表において得られた観測波と観測地点の地盤データを用いて推定したものである。また、北海道南西沖地震函館港³⁴⁾においては、基盤と地表の2点観測が行われていたため、基盤観測波から基盤入射波を計算した。推定計算は重複反射理論に基づく等価線形解析(SHAKE³⁶⁾)で行なったが、土の動的変形特性のひずみ依存曲線は港湾で用いられている標準的な曲線³³⁾を用いた。こうして求めた基盤入力波は図-5に示すとおりである。図の波形は兵庫県南部地震は観測波それ以外は基盤入射波を示しているが、一見して三陸はるか沖地震の

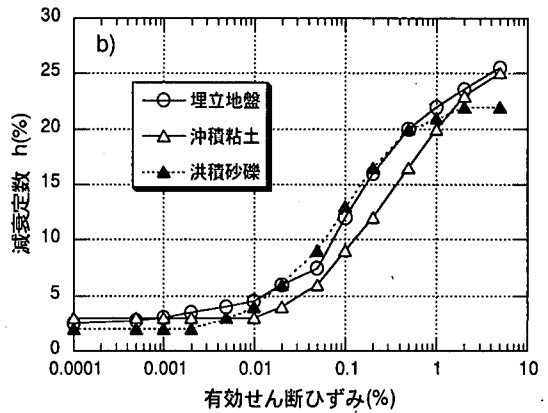
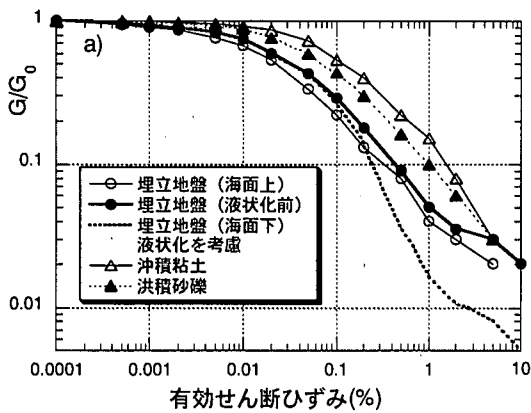


図-6 計算に用いたせん断剛性と減衰定数のひずみ依存曲線

強烈さが印象に残るものとなっている。計算に用いた地震波の諸元を表-2に示す。

それぞれの強震動の強さを明確にするため、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。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、すなわち密度 2.0t/m^3 、せん断波速度 341m/s を基盤としてそ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。各地震動ごとの基盤の密度、せん断波速度も表-2に示す。なお、宮城県沖地震の場合には、露頭した岩盤面の記録を直接使用しており、入射波を求める作業は行っていない。開北橋の岩盤面のせん断波速度は、文献³⁷⁾によれば、 $650-1300\text{m/s}$ となっているが、ここでは 650m/s を用いた。また、大船渡港の観測地点のせん断波速度は不明であったが、開北橋と同じく露頭岩盤であることから 650m/s を仮定した。また、八戸港における基盤面せん断波速度の値は、入射波形の算定に用いられた基盤面の値とした³²⁾。

なお、応答計算における解析最高振動数は 10Hz までとし、兵庫県南部地震・三陸はるか沖地震の場合には加速度振幅を縮小した計算も実施した。

(3)解析に用いた動的変形特性のひずみ依存曲線

図-6は本解析で用いたせん断剛性と減衰定数のひずみ依存曲線を示したものである。図中の、沖積粘土および洪積砂礫のデータについては、神戸市開発局の実施した動的変形特性試験結果³⁰⁾を参考にした。また、埋立地盤のデータは、善・山崎ら³⁰⁾のポートアイランドの埋立地盤の凍結サンプル試料による動的変形特性試験結果を参考にした。この報告によれば、まさ土の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線は、港湾で用いられている砂の標準的な曲線³³⁾と一致している。そこで、地下

水面より上の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線は、砂質土に対して標準的に得られている曲線のうち、拘束圧 98kPa 程度に対応する曲線を決めた。しかしながら、善・山崎らの報告による動的変形特性試験は、約 0.2% のひずみレベルまでのデータしか得られていない。これは、非排水状態においてこれ以上のひずみレベルで繰返しせん断を加えると、液状化が生じ、定常な履歴ループが得られないためと思われる。そこで、地下水面の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線は、埋立地盤の液状化による剛性低下を考えた物性曲線を用いることとした。具体的には、まず神戸ポートアイランドの埋立材料であるまさ土試料を用いた一定ひずみ振幅 (0.1% 以上) の非排水繰返しせん断試験を実施した^{20,39)}。この試験においては、繰返しせん断を与えていくと過剰間隙水圧が徐々に蓄積されていくと同時に発揮する抵抗応力が徐々に小さくなるため、理想的な動的変形特性を求める試験のように履歴ループが定常にならない。実験からは、あるひずみレベルにおける液状化に伴う割線剛性の低下と繰返し回数の関係が得られる。したがって、せん断の繰返し回数を決めることができれば、ひずみが大きくなることによって生じる剛性低下に加えて過剰間隙水圧が発生することによって生じる剛性低下分を考慮することができる。以上のことから、拘束圧を $1-2\text{kgf/cm}^2$ ($98-196\text{kPa}$)程度と考えたときの標準的な曲線(図-6aの海面下のひずみ依存曲線)に対して繰返し4回に対応する剛性低下割合を乗じて求めたひずみ依存曲線(図-6aの太点線)を与えることとした。間隙水圧の上昇によってせん断剛性の低下が始まるひずみレベルは、まさ土の試験結果から 0.1% とした。繰返し回数を4回に選んだのは、神戸ポートアイランドの観測記録の主要動がおおよそ繰返し4回に対応すると考えられたからである。なお、本来ならば、それぞれの地震動の主要動の繰返し回数を考えてこの物性曲

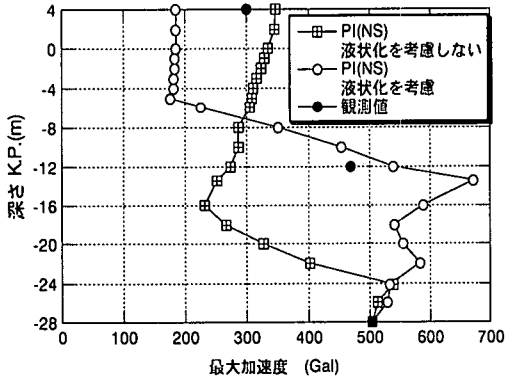


図-7 最大加速度の深さ方向分布 (1995年兵庫県南部地震, 神戸ポートアイランドNS成分)

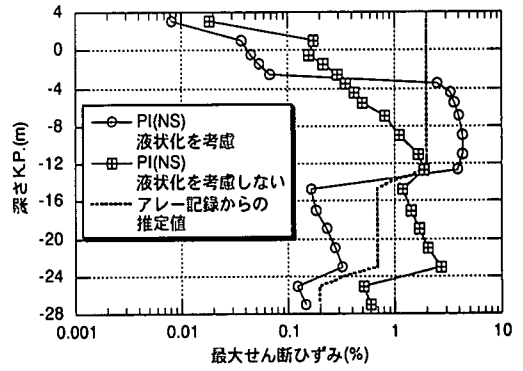


図-8 最大せん断ひずみの深さ方向分布 (1995年兵庫県南部地震, 神戸ポートアイランドNS成分)

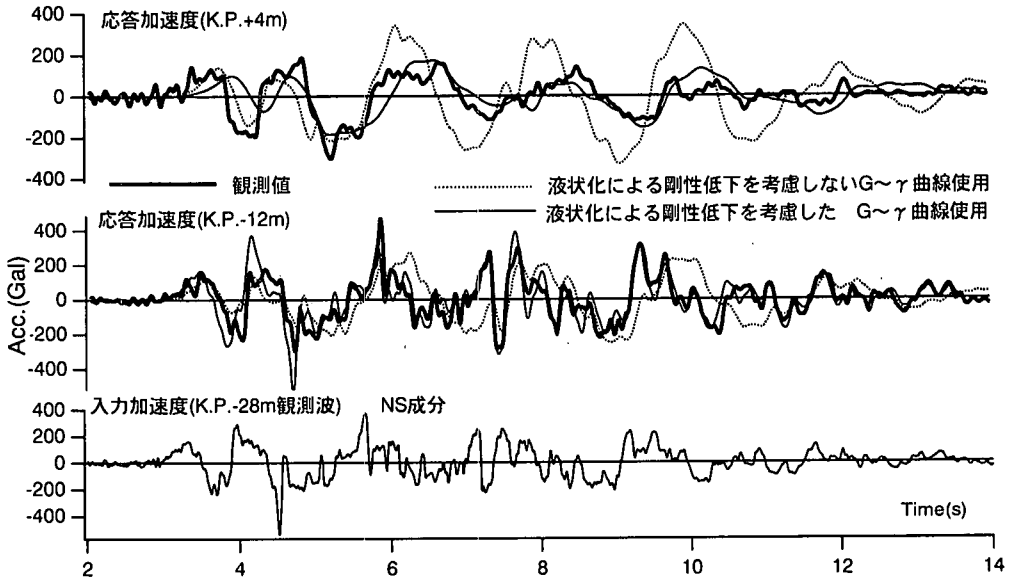


図-9 観測加速度応答時刻歴と計算結果の比較 (1995年兵庫県南部地震, ポートアイランドNS成分)

線を定める必要があるが、そもそも等価線形化手法は、液状化過程を追える解析法ではなく、地震の最中の平均的な物性を与えていることから、簡単のため兵庫県南部地震以外の場合にもこの曲線を用いることとした。

一方、埋立地盤の減衰定数のひずみ依存曲線は、地下水面より上か下かにかかわらず、標準的な砂の $h \sim \gamma$ 曲線を用いた。これはひずみ振幅一定の非排水繰返しせん断試験からは、過剰間隙水圧の上昇によって、減衰定数が極端に大きくなるような傾向を確認できなかったからである。また、善・山崎らの報告にある $h \sim \gamma$ 曲線を用いなかったのは、大きなひずみレベルまでデータがなかったためである。

(4) 等価線形解析を行うことの妥当性

神戸ポートアイランドにおいては、アレー観測が

行われているので、等価線形解析法を用いることの是非、用いた物性曲線の是非は、アレー観測結果と計算値を比較することによって論じることができる。図-7~9は、神戸の観測記録のNS成分について観測結果と計算結果を比較したものであり、それぞれ最大加速度の深さ方向分布、最大せん断ひずみの深さ方向分布、応答加速度の時刻歴を示している。なお、観測加速度記録には計算結果と対応させるため10Hzのローパスフィルターをかけている。また、図には先に述べたように液状化による剛性低下を考慮した $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線を用いた計算結果と液状化による剛性低下を考慮しない計算結果と併せて示した。

まず、最大加速度の分布は、二つの計算条件でかなり異なる計算結果となっており、地表の観測値との対応も不明確である。しかし、液状化を考慮した計算は、K.P.-12mより地表面応答が小さくなる傾向

をとらえている。

次に、図-8のせん断ひずみの深さ方向分布は、アレー観測記録から推定した平均的な最大せん断ひずみ²⁹⁾と比較しているが、値そのものおよび分布形ともに、液状化を考慮した曲線を用いた計算結果の方が対応がよい。これは、ここで比較している観測最大値が液状化の影響を受けた値となっているためと思われる。液状化を考慮しない曲線を用いた結果では、地盤に発生したひずみは、埋立地盤よりもむしろ沖積粘土層で大きくなる傾向がある。一方、液状化による剛性低下を考慮した曲線を用いた結果では、埋立地盤に発生するひずみの方が沖積粘土地盤のそれより大きく、ポートアイランドで液状化が生じたことに対応している。

最後に、図-9の時刻歴をみると、地表の記録において6秒付近までは液状化を考慮しない物性曲線を用いた計算値と観測値が対応しているが、6秒付近から以降は液状化を考慮した物性曲線を用いた計算値と観測値の方が対応が良い。すなわち、液状化によって埋立地盤のせん断剛性が急激に低下したと考えられる6秒付近を境にして、埋立地盤の物性が大きく変化したことに対応していると考えられる。また、地中-12mの記録についても液状化による剛性低下を考慮した計算値の方が観測値とよく対応している。すなわち、等価線形解析では、強震時に非正常に変化する物性の影響を考慮できない点にその限界があることは明かである。しかしながら、地震動のごく初期において最大ひずみが発生し、それ以降の挙動が初期の塑性化によって支配されるような場合には、全継続時間を通じて等価線形解析を用いることにさほど支障がないことも示している。

以上のように、液状化に伴う地盤剛性の低下を考慮した等価線形解析は、液状化が生じた神戸ポートアイランドにおける6秒以降の主要動の地盤震動をおおよそ表現できているとみなすことができる。

なお、ポートアイランドの強震記録を等価線形解析で再現する試みもいくつか行われている。佐藤ら⁴⁰⁾は、逆解析で求めた剛性と減衰定数を使った線形解析を、また三輪ら⁴¹⁾は液状化による剛性低下を考慮したときの等価線形解析を実施している。それらの研究によれば、適切な物性を用いると、等価線形解析でもポートアイランドの記録をある程度再現できるとしている。このような結果は、従来考えられていた等価線形解析が適用できるひずみレベルの限界を若干越えて同解析法を使用できる可能性を示唆しているものである。

一方、神戸ポートアイランドのアレー記録を非線形の有効応力解析を用いて解析した事例も多く報告

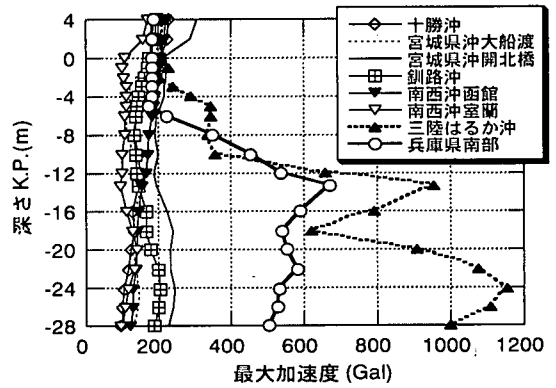


図-10 最大応答加速度の深さ方向分布

されている(例えば⁴²⁾。これらに関連して等価線形解析がどの程度のひずみレベルまで適用可能については古くから議論の対象となってきた^{43),44)}。これらの経緯によれば、おおよそ0.5%程度がその限界とされている。これは、一つには数%を越えるようなひずみレベルの動的変形特性に関するデータがほとんどないことにも関連している。具体的に言えば、まさにこの程度のひずみレベルから過剰間隙水圧の発生が顕著になり、動的変形特性よりもむしろ動的強度の問題となる。

ここでは、累積損失エネルギーに関する要素試験データの蓄積がないことから、等価線形解析を利用するが、この点に関しては、今後のデータの積み重ねを待つしかない状況にある。

4. 種々の強震動に対する解析結果

(1)地震加速度応答の最大値分布

図-10は、先に示した計算条件で求めた各層の最大応答加速度の分布である。図はすべて液状化による剛性低下を考慮した物性曲線を用いた計算結果である。これらを見ると、十勝沖地震・宮城県沖地震・釧路沖地震、北海道南西沖地震では、地表面に向かって若干増幅する傾向があるが、三陸はるか沖地震・兵庫県南部地震では、地表応答加速度は地中部より小さくなるパターンを示しており、液状化に伴う剛性低下によって、地表面の最大加速度応答が小さくなる様子が現れている。

なお、兵庫県南部地震と三陸はるか沖地震の計算波形を深さ方向に比較したところ、基盤から地表面に行くにしたがって波形は短周期成分がなくなること、しかもその傾向は埋立地盤から顕著に現れていることが認められた。

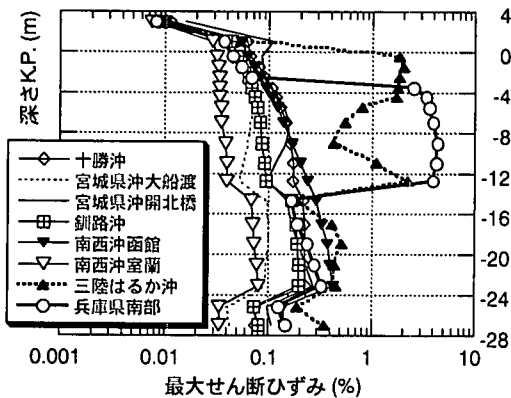


図-11 最大せん断ひずみの深さ方向分布

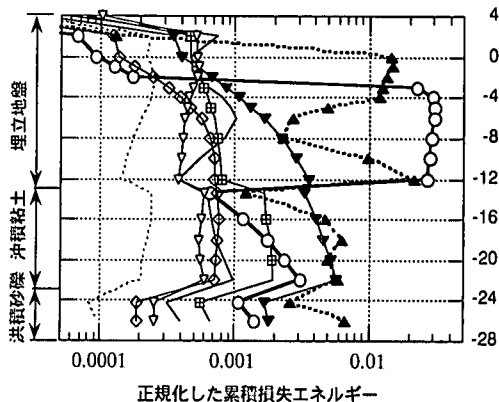


図-12 正規化累積損失エネルギーの深さ方向分布

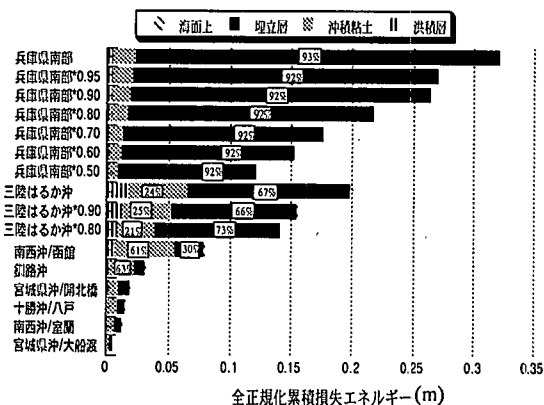


図-13 各地震動ごとの全累積損失エネルギー量とその割合

(2)最大せん断ひずみ分布

図-11は、深さ方向に発生した最大せん断ひずみの分布を示したものである。最大せん断ひずみは、各層の中間点で評価している。まず、三陸はるか沖地震と兵庫県南部地震の結果について見ると、埋立地盤において数%のせん断ひずみが発生していることがわかる。一方、十勝沖地震・宮城県沖地震・釧路沖地震・北海道南西沖地震についてみれば、埋立地盤に発生したひずみは、最大でも0.2%程度に留まっており、埋立地盤よりむしろ沖積粘土層の方が大きい傾向を示している。これは沖積粘土の初期剛性が埋立地盤のそれより小さいために、ひずみレベルの小さいうちは沖積粘土のひずみの方が埋立地盤より大きくなるためと考えられる。

(3)地盤中で費やされた累積損失エネルギー

a) 全累積損失エネルギー量とその分布

図-12は、応答計算の結果をもとに、先に提案した式(23)に基づく簡易法で各層の累積損失エネルギーの値を求めたものである。累積損失エネルギーの値は各層の中間点の上載圧で正規化した。上載圧で正

規化した理由は、摩擦性材料の強度が応力比で規定されるのと同様に、損失エネルギーも拘束圧で正規化することが可能と考えられるためである。兵庫県南部地震、三陸はるか沖地震の場合は、埋立層の累積損失エネルギーの方が沖積粘土層よりも大きくなっていることがわかる。一方、その他の地震では逆に埋立層よりも沖積粘土層の累積損失エネルギーの方が大きい傾向がある。また、この分布形は最大ひずみの分布形と類似している。特に、埋立地盤に着目すると兵庫県南部地震NS成分による正規化した累積損失エネルギーは0.02~0.03となっており、アレー記録から推定されたK.P.-4mでのNS成分による累積損失エネルギーの値0.016(NS成分のみの値)²²⁾あるいは、要素試験から求めたまさ土の累積損失エネルギーの上限値約0.02²³⁾を若干越える値となっている。

図-13はこれら地震動の計算結果から、地盤全体の累積損失エネルギー量とその配分関係を整理したものである。地盤全体の累積損失エネルギー量の指標として第1層から第N層までに蓄えられた正規化累積損失エネルギーをそれぞれの層厚で重みをつけたものを次式のように定義した。

$$(\Delta W / \sigma'_v)_{\text{total}} \cdot H_{\text{total}} = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta W_{n,\text{total}}}{\sigma'_{v,n}} \cdot H_n \quad (24)$$

ここで H_{total} は全層厚であり、 $(\Delta W / \sigma'_v)_{\text{total}} \cdot H_{\text{total}}$ を全正規化累積損失エネルギーと称することにする。この値は、長さの次元を持つがこれを全層厚32mで除せば地盤が深さ方向に消費した平均の正規化累積損失エネルギー量を表すことになる。図から兵庫県南部地震では全正規化累積損失エネルギーのうち93%が埋立層の塑性仕事に費やされたことがわかる。三陸はるか沖地震の場合にも67%が埋立層に蓄積しているが、その他の地震動では埋立層への蓄積は30~

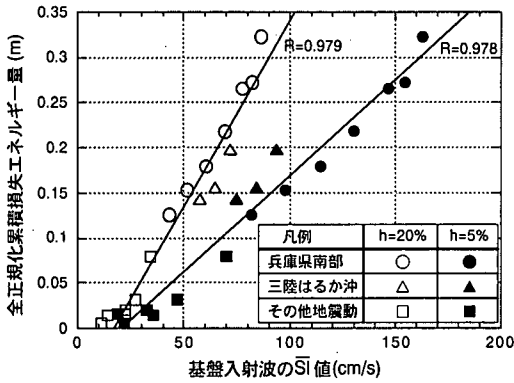


図-14 基盤入射波のSI値と累積損失エネルギーの関係

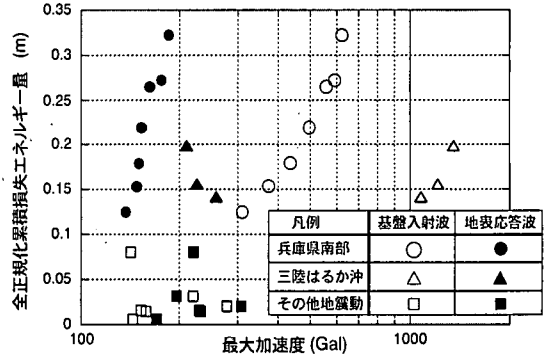


図-16 最大加速度と累積損失エネルギーの関係

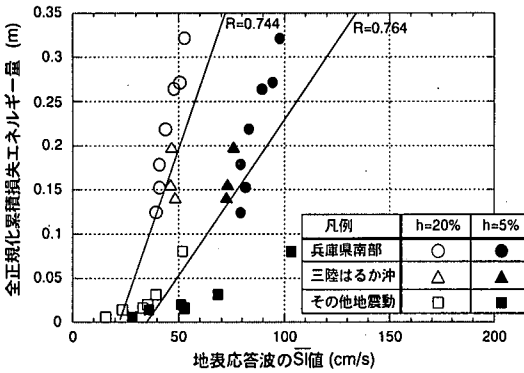


図-15 地表応答波のSI値と累積損失エネルギーの関係

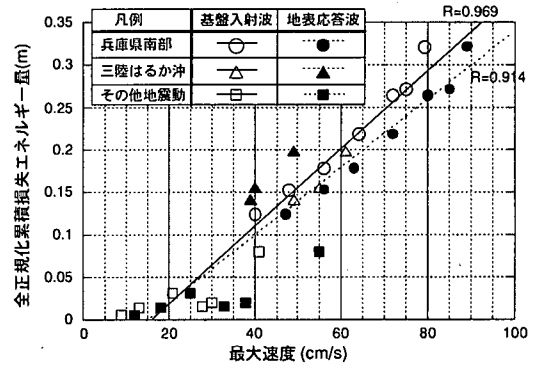


図-17 最大速度と累積損失エネルギーの関係

45%であり沖積粘土層でのエネルギー消費割合が大きくなっていることがわかる。

また、兵庫県南部地震、三陸はるか沖地震の加速度倍率を変えた結果を見ると全正規化累積損失エネルギーは加速度倍率に応じてほぼ線形に変化するものの、地盤中でのエネルギー配分は加速度倍率に関わらずほぼ一定の値となることがわかる。(ただし液状化が発生しないようなレベルまで加速度倍率を小さくした場合には違った傾向となる。)すなわち液状化層で大きなエネルギーが消費される場合のエネルギー配分は周期特性によって概ね決まってくるといえる。

b)地盤の累積損失エネルギーと相関の高い指標

地盤への入力エネルギー量が地震動のどのような値と関連性があるかを考察した。指標として用いたのは、地表応答波と基盤入射波から求めたスペクトル強度 (SI), 最大加速度および最大速度である。ここでSI値は基盤, 地表ともに減衰定数5%と20%のものを用いた。また、基盤入射波のSI値をもとめる際、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。用いたSI値は、Towhataらの研究と対応づけるため、式(2)による値とした。

図-14,15は、地盤の全正規化累積損失エネルギーと基盤入射波のSI値(h=20%,h=5%)および地表面応答波のSI値(h=20%, h=5%)との関係を示したものである。また、図-16,17は同じく地盤の全正規化累積損失エネルギーと基盤入射波および地表応答波の最大加速度と最大速度の関係を示したものである。なお、速度波形は加速度波形に0.15Hzのローカットフィルターをかけて積分したものである。

これらの図から地盤の全正規化累積損失エネルギーと最も相関が高いのは基盤入射波のSI値(h=20%)であり相関係数は0.979となる。また、応答スペクトルを求める際のダンピングを5%にしても、相関係数はほとんど同じでありダンピングの影響は小さい。一方、地表応答波のSI値(h=20%)との相関は0.74、SI値(h=5%)との相関は0.76となる。近年、地表のSI値(h=20%)を用いての液状化の早期判定が試みられている¹²⁾が地表応答のSI値との相関は基盤のSI値との相関よりも小さい。また、最大加速度との相関は基盤、地表ともに同一の地震動に対しては相関が見られるものの、異なる地震動間の正の相関はなかった。一方、最大速度との相関は、基盤入射波で0.969、地表応答波で0.914となり、異なる地震動でもかなり良い

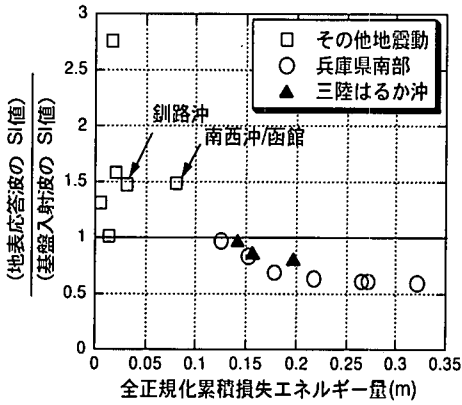


図-18 累積損失エネルギーとSI値の比の関係

相関を示した。

以上のことより地盤の全正規化累積損失エネルギー量は基盤入射波のSI値で評価することができるが地震時に即座に得られる値としては地中もしくは地表の最大速度が指標になると考えられる。なお、基盤観測波についても同様の検討を行ったが、入射波の相関係数より若干小さめの値が得られた。また、地表のSI値について液化化後の値ということで液化化による短周期波の減衰を考慮して固有周期1.0~2.5秒のSI値($h=20\%$)を求め元のSI値と比較したが全正規化累積損失エネルギーとの相関は0.800となった。基盤のSI値に比べて相関は小さいものの地表の固有周期0.1~2.5秒のSI値に比べるとやや相関がよくなった。

c) 表層地盤の軟化によるSI値の低下とエネルギー量

図-18は、基盤入射波のSI値($h=5\%$)と地表応答波のSI値($h=5\%$)の比と地盤中で費やされた累積損失エネルギーの関係を示したものである。図から、累積損失エネルギーの大きな地震動ほど、その比は小さくなっており、1以下のものもある。このSI値の比が1以下であるということは、基盤入射波の方が地表面応答波より強い地震動であることを意味しているので、固有周期帯域が0.1から2.5秒の構造物にとっては、表層地盤の軟化がいわゆる免震的な作用をしたと解釈できる。一方、このSI値の比が1以上であるということは、表層地盤の地震動増幅効果によって、地表面応答波の方が地震力が大きいことを意味している。したがって、地盤が液化化によって大きく軟化したと考えられる兵庫県南部地震・三陸はるか沖地震は、その比が0.6~0.8程度となっていることから、表層地盤中で大量のエネルギーが消費されたため、地表応答波の地震力が小さくなったとする解釈が成り立つように思われる。しかし、0.1秒から2.5秒の短い固有周期を持つ構造物に対する地震力を反映

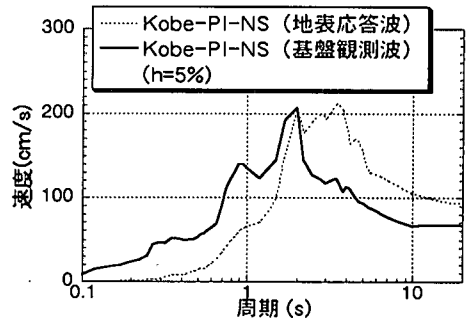


図-19 神戸ポートアイランド波の速度応答スペクトル

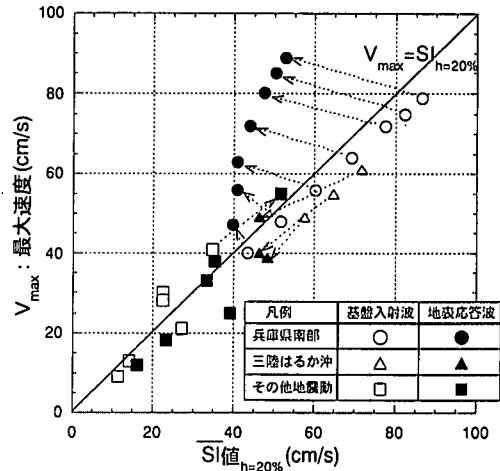


図-20 最大速度とSI値_{h=20%}の比の関係

したSI値ではなく、より広い周期帯域で平均したスペクトル強度をとった場合には違う結論になる。例えば、図-19は、SI値の計算に用いた神戸ポートアイランドの基盤観測波と地表応答波の応答スペクトルであるが、明らかに2秒以上の長周期構造物にとっては、地表応答波の方が地震力としては厳しいという結論になる。以上のことから、短周期構造物に対する免震効果は、地震動の周期帯域が全般に長周期側に伸びたからであり、表層地盤でエネルギーが消費された影響は小さいと考えられる。言い換えれば、地震動の震動エネルギーは表層地盤が軟弱なほど逸散されず蓄積されるのは従来の考えとなんらかわるところがない。

なお、Towhataの研究¹²⁾によれば $\bar{S}I_{h=20\%}$ と地表最大速度はほぼ等しい関係にあるとしているが、これが成立するかどうかを吟味したのが図-20である。図は、先の検討と同様に地表応答波と基盤入射波についてそのSI値と最大速度の関係を示しているが多くの場合 $\bar{S}I_{h=20\%} = V_{max}$ を支持するデータとなっている。しかしながら、液化化の程度が激しかった

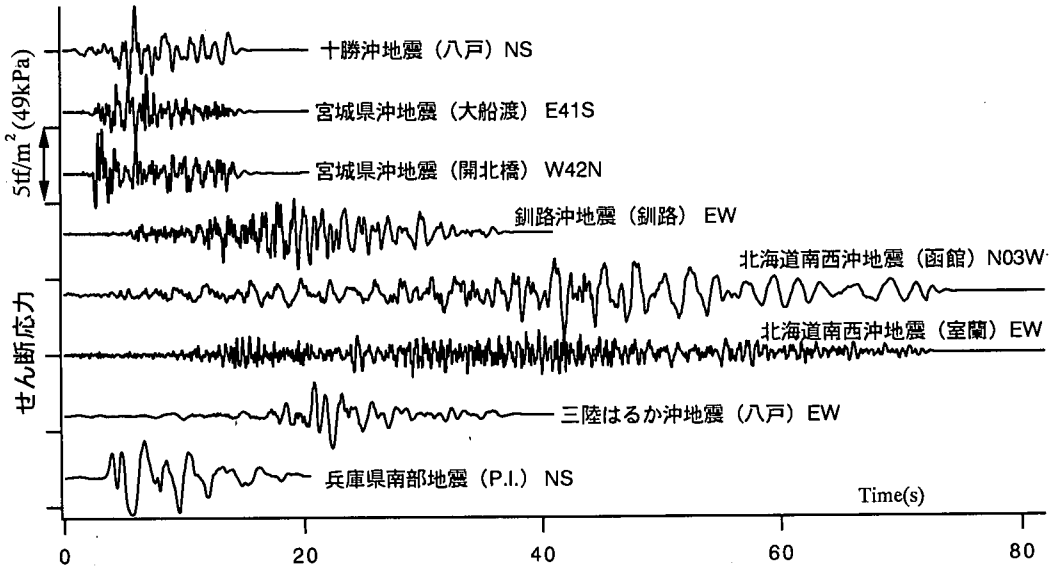


図-21 第6層目、埋立地盤に発生したせん断応力時刻歴の比較

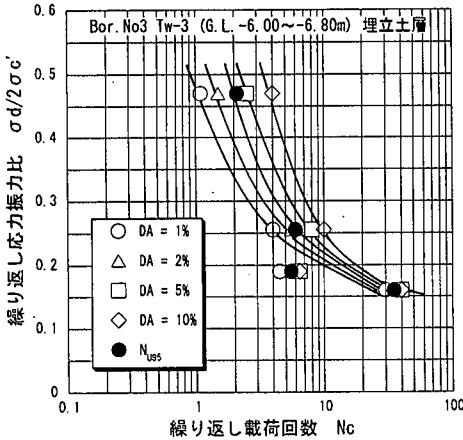


図-22 神戸ポートアイランドの液状化強度曲線³⁰⁾

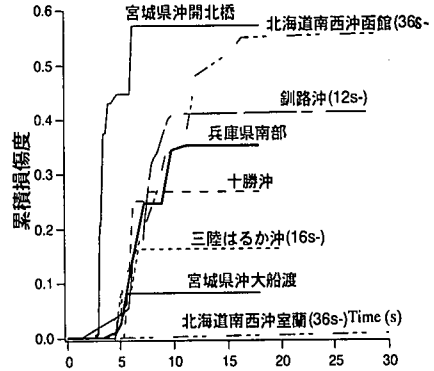


図-23 応力波形から求めた第6層の累積損傷度

と考えられる兵庫県南部地震の基盤入射波と地表応答波のデータの関係を他の地震動のそれと比較すると(図中の点線), $\bar{S}_{h=20\%} = V_{max}$ の傾きに等しい変化を示していない。これは液状化の程度によっては、その影響を受けた地表応答波のSI値を利用すると、その地点の入力地震動を過小評価することを示している。

(4) 埋立層での液状化の判定

a) 累積損傷度による判定

図-21は、第6層目の埋立土層に着目してその応力時刻歴を各地震動について図示したものである。応力の最大値はどの地震の場合も $2-3 \text{tf/m}^2$ ($19.6-29.4 \text{kPa}$) 程度になっており、この層の中間深さにおける上載圧 10.3tf/m^2 (100.9kPa) で除した応力比にし

て約0.2-0.3となる。この応力波形とポートアイランドの土質試験から得られている液状化強度曲線(ポートアイランドG.L.-6.00~-6.80m, 軸ひずみ1%, 図-22)から累積損傷度理論³³⁾によって累積損傷度をゼロクロス半波ごとに計算し、時刻歴上にその累積値を示したのが図-23である。この図から地震動終了後の累積損傷度の値は宮城県沖地震開北橋の結果が一番大きくなっている。これは図-21に示す応力波形のように開北橋の場合が最も短周期の繰返しが多いことに起因するが、先に計算した第6層の累積損失エネルギー量の地震動ごとの大小関係とは傾向が一致しない。さらに、液状化したはずの兵庫県南部地震の累積損傷度が1.0になっていないばかりでなく、その値は兵庫県南部地震より小さな地震力であったと思われる宮城県沖開北橋の累積損傷度よ

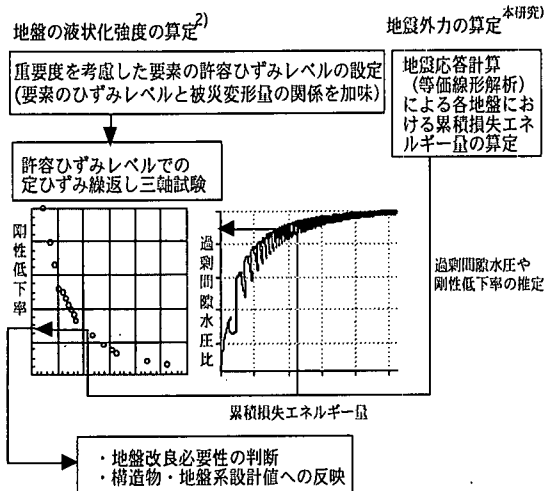


図-24 累積損失エネルギーに基づく液状化予測の概要

り小さな値となっている。以上の結果は液状化による地盤の剛性低下を考慮した等価線形解析から得られる応力時刻歴を用いた累積損傷度理論による液状化判定法の適用性を支持しない結果となっている。この原因は、液状化のために大きなせん断応力を伝えられなくなっている地盤の応力波形を用いて再び液状化の判定を行う点に無理があると考えられる。すなわち、図-21のように求められた応力波形は、地盤材料のせん断剛性のある値に決めたときに結果的に得られる波形であり、それを再び外力とみなすことに矛盾がある。つまり、有効せん断ひずみの増大や液状化に伴うせん断剛性の低下を考慮する場合、累積損傷度を計算するに当たって与えられた応力は、いったい地盤の剛性がどの程度低下したときに発揮された応力なのかを無視しているからである。

b) 累積損失エネルギーによる判定

著者らは、累積損失エネルギーに基づく新たな液状化判定法を提案している²⁾が、その方法のおおよその流れを説明すれば図-24のようになる。

まず第一に、構造物の重要度を考慮して、許容できる要素レベルのひずみ量を規定する。このとき、事前の検討により要素レベルのひずみ量と構造物-地盤系の被災変形量の関係が求められていれば都合が良い。次に、決められたひずみレベルにおける定ひずみ繰返し三軸試験を実施し、第1サイクルの載荷におけるせん断剛性 G_1 と後続サイクルのせん断剛性の比率あるいは過剰間隙水圧比と正規化累積損失エネルギーの関係を求める。ここまでは、地盤の繰返し強度の算定法であるが、重要度によるひずみレベルの設定や剛性低下に着目することで、地盤材料の液状化に対するねばりを考慮できるようになって

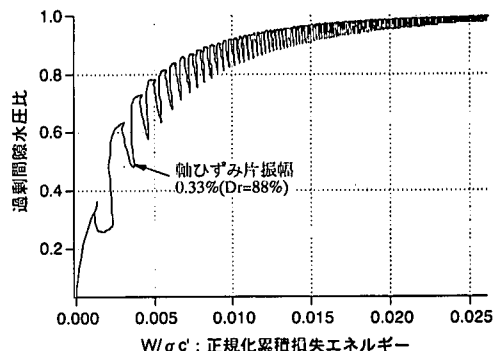


図-25 累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係 (まさ土、軸ひずみ片振幅0.33%の場合)

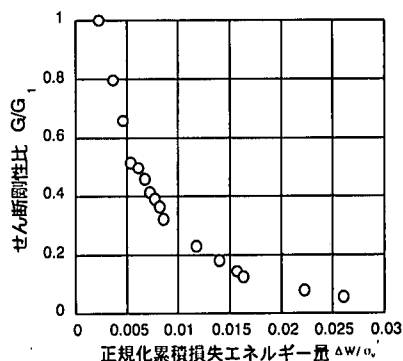


図-26 累積損失エネルギーとせん断剛性比 G/G_1 の関係 (まさ土、軸ひずみ片振幅0.33%の場合)

いる。一方、ある地震動が想定されたときの外力の算定は、本研究で示したように地震によって表面地盤に発生する累積損失エネルギー量によって行う。この推定された累積損失エネルギーと先に行った要素試験結果から、地震時に発生する過剰間隙水圧や剛性低下量が算定できることになる。この方法の特長は、液状化するかしないかの判定ではないこと、外力の算定の際に地震動の継続時間の影響が考慮されていることである。

図-25は、神戸ポートアイランドのまさ土(粒径2mm以下)の試験結果²⁾から得られた正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係を示したものである。同図は、試験における時間を媒介変数として示したものであり、履歴に対応している。同図の関係は、ひずみ振幅(0.15~1.1%)に大きく影響を受けないことがわかっている。また、まさ土の相対密度がこの試験結果に及ぼす影響も非常に小さいこともわかっている²⁾。

図-26は、同じ試験において得られた累積損失エネルギーの累積に伴うせん断剛性の低下を示したものである。せん断剛性の低下は、第1サイクルのせん断

表-3 累積損失エネルギーに基づく液状化程度の推定

地震名	埋立層平均累積 損失エネルギー	過剰間隙 水圧比	剛性比 G/G ₁
兵庫県南部地震	0.0220	0.97	7%
三陸はるか沖地震	0.0099	0.88	28%
南西沖/函館	0.0018	0.45	-
釧路沖地震	0.0007	0.25	-
宮城県沖/開北	0.0007	0.25	-
十勝沖地震	0.0005	0.20	-
南西沖/室蘭	0.0005	0.20	-
宮城県沖/大船渡	0.0002	-	-

断時に得られたせん断剛性G₁に対する後続のサイクルのせん断剛性の比率で表した。この関係が、拘束圧(98~294kPa)によらないことも確かめられている。

一方、地震応答解析から得られる正規化累積損失エネルギー量は、層厚を重みとして埋立層の平均的な値が求められる。求められた平均的な正規化累積損失エネルギー値より、それぞれの地震動によって生じるであろう埋立層での平均的な過剰間隙水圧比、剛性比は表-3のように求められた。兵庫県南部地震、三陸はるか沖地震では0.8以上の大きな過剰間隙水圧比が発生すると予測されるが、その他の地震の液状化の程度は小さいと推定できる。これは、それぞれの地震における液状化被害の程度の大小関係と概ね整合する結果と考えられる。

なお、エネルギーに基づく液状化の評価の際には、累積損傷度理論の適用の際に指摘したような矛盾は生じない。仮にひずみ軟化特性を有する材料であっても、累積損失エネルギー量は単調に増加するからである。(これは力によって発生した弾性ひずみエネルギーが力の大きさのみで決まらないことにも関係している。同じ大きさの応力を加えても、軟らかい材料の方が硬い材料より大きなひずみエネルギーを蓄える。)すなわち、外力の指標としての観点から見ても、材料がピーク強度を越えてからの挙動まで議論する場合には、外力を応力そのもので表すよりも、材料に蓄積されたエネルギー量で表す方が適切と考えられる。

5. 結論

本研究では強震記録を用いて、液状化が生じるような表層地盤の応答・液状化に及ぼす地震動強さを、累積損失エネルギーの観点から検討した。本研究の結論を整理すると以下とおりである。

(1)液状化による剛性の低下を考慮したG/G₀~ γ 曲線

を用いた等価線形解析を実施し、ポートアイランドの観測結果との対応関係を調べた。その結果、液状化が発生したような地盤においても、液状化に伴うせん断剛性の低下を適切に評価することによって、より観測値に近い計算値が得られた。

- (2)等価線形解析法を用いて地盤中で費やされた累積損失エネルギーを算定する一方法を示した。
- (3)神戸ポートアイランドの地盤を対象として、近年の大地震で観測された強震記録に対する入射波解析を行い、それぞれの地震動による地盤の累積損失エネルギーを評価した。その結果、地中の累積損失エネルギー分布は、おおよそ最大ひずみ分布と対応が良いことがわかった。また、全層に累積したトータルの累積損失エネルギー量からそれぞれの地震動強さを評価したところ、兵庫県南部地震・三陸はるか沖地震・北海道南西沖地震/函館・釧路沖地震...の順となった。
- (4)地盤中で費やされた累積損失エネルギー量は、最大加速度とは相関がなく最大速度やSI値と相関があること、また同じ最大速度やSI値でも地表応答波よりも基盤入射波のそのの方が相関が高い。
- (5)液状化による地盤の剛性低下を考慮した等価線形解析から得られる応力時刻歴を用いて累積損傷度から液状化判定する方法には原理的に矛盾があることを示した。一方、本研究で提案している累積損失エネルギーに基づく方法は、累積損傷度理論で指摘したような矛盾はなく、破壊後にも利用できる強度指標であることを示した。提案した方法は、地震動の継続時間の影響を取り扱えることや、材料のねばりを考慮できる特長を有している。

謝辞：本研究は、東レ科学振興財団からの援助を受けて行ったものである。また、同じく科学研究費補助金試験研究B「地震動波形が地盤の液状化に及ぼす影響」(研究代表者：柳澤栄司)の補助を受けて行ったものである。関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) (社)土木学会：土木構造物の耐震基準に関する「第二次提言」、1996年1月。
- 2) 風間基樹、柳澤栄司、増田昌昭：定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性、土と基礎、第46巻、第4号、pp.21-24、1998年4月。
- 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地震動強さ、三陸はるか沖地震シンポジウム論文集、pp.28-35、

- 1998年1月.
- 4) 風間基樹, 柳澤栄司, 稲富隆昌: 地表面応答に及ぼす中間軟弱粘土層の非線形性の影響, 土木学会論文集, No.575/Ⅲ-40, pp.219-230, 1997年9月.
 - 5) Housner, G.W.: Behaviour of structure during earthquakes, *ASCE, EM4*, pp.109-129, 1959.
 - 6) Housner, G.W.: Limit design of structure to resist earthquakes, *Proc. of 1st. WCEE*, pp.1-13, 1956.
 - 7) 加藤 勉, 秋山 宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9-18, 1975年11月.
 - 8) 星谷 勝, 山崎武文: 地震動エネルギーに基づく応答解析, 土木学会論文報告集, 第291号, pp.1-14, 1979年11月.
 - 9) 大野友則, 西岡 隆, 藤野陽三: 構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価, 土木学会論文報告集, 第333号, pp.91-99, 1983年5月.
 - 10) 片田敏行, 阿部幸樹, 東山 晃: ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和砂地盤の液化化過程の考察, 土木学会論文集, 第388号/Ⅲ-8, pp.43-50, 1987年12月.
 - 11) 片田敏行, 織本慶一, 小室智昭: 飽和砂の履歴エネルギー吸収状況に及ぼす入力特性の影響, 土木学会論文集, 第412号/Ⅲ-12, pp.33-41, 1989年12月.
 - 12) Towhata, I., Park, J.K., Orense, R.P. and Kano, H.: Use of spectrum intensity for immediate detection of subsoil liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.2, pp.29-44, 1996.
 - 13) Sugano, T. and Yanagisawa, E.: Undrained shear behavior of sand under surface wave stress conditions, *Proc. of the 9th. Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.71-74, 1991.
 - 14) Sugano, T. and Yanagisawa, E.: Cyclic undrained shear behavior of sand under surface wave stress conditions, *Proc. of the 10th. WCEE*, Vol.3, pp.1323-1327, 1992.
 - 15) 遠藤 修, 東畑郁生, 大河内保彦: 液化化時の消散エネルギーとせん断ひずみ, 過剰間隙水圧の関係, 第33回地盤工学研究発表会, pp.857-858, 1998年7月.
 - 16) Towhata, I. and Ishihara, K.: Shear work and pore water pressure in undrained shear, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.3, pp.73-84, 1985.
 - 17) Okada, N. and Nemat-Nasser, S.: Energy dissipation in inelastic flow of saturated cohesionless granular media, *Geotechnique*, Vol.44, No.1, pp.1-19, 1994.
 - 18) 安達俊夫, 山田雅一, 板並 昭, 鴨下順司, 過剰間隙水圧評価に関するエネルギー概念の適用, 第32回地盤工学研究発表会, pp.733-734, 1997年7月.
 - 19) 中山義久, 西田一彦, 西形達明, 井上啓司: 繰返し載荷を受けた粘性土の変形係数の低下とその回復, 土木学会論文集, No.589/Ⅲ-42, pp.131-140, 1998年3月.
 - 20) 増田昌昭, 風間基樹, 柳澤栄司: ひずみ制御繰返し三軸試験による土の非排水繰返し強度評価, 第32回地盤工学研究発表会, pp.725-726, 1997年7月.
 - 21) 風間基樹, 増田昌昭, 山口 晶, 柳澤栄司: ポートアイランドまさ土層の液化化強度の推定, 第24回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.465-468, 1997年7月.
 - 22) Kazama, M., Masuda, M., Yamaguchi, A. and Yanagisawa, E.: Liquefaction strength of decomposed granite soil inferred from array records, *Proc. of the 12th Engineering Mechanics Conf., ASCE*, pp.478-481, 1998.
 - 23) 加賀谷俊和, 風間基樹, 柳澤栄司: 定みずみステップ載荷試験によるまさ土の液化化強度の評価, 第53回土木学会年次学術講演会, pp.132-133, 1998年10月.
 - 24) 風間基樹, 柳澤栄司, 稲富隆昌, 菅野高弘, 稲垣紘史: アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力ひずみ関係, 土木学会論文集, No.547/Ⅲ-36, pp.171-182, 1996年9月.
 - 25) Yamazaki, F., Towhata, I. and Ishihara, K.: Numerical model for liquefaction problem under multi-directional shearing on horizontal plane, *5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Vol.1, pp.339-406, 1985.
 - 26) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
 - 27) Yegian, M.K. and Whitman R.V.: Risk analysis for ground failure by liquefaction, *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.104, pp.921-938, 1978.
 - 28) Davis, R.O. and Berrill, J.B.: Energy dissipation and seismic liquefaction in sands, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, pp.59-68, 1982.
 - 29) Law, K.T. and Cao, Y.L.: An energy approach for assessing seismic liquefaction potential, *Can. Geotech. J.*, Vol.27, pp.320-329, 1990.
 - 30) 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.
 - 31) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K.: Response of a dense sand deposit during the 1993 Kushiro-oki Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.1, pp.115-131, Mar. 1995.
 - 32) 土田肇, 上部達生: 地表における強震記録より推定した基盤の地震動の特性, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 4号, 1972年.
 - 33) (財) 沿岸開発技術センター編: 埋立地の液化化対策ハンドブック(改訂版), 1997年.
 - 34) 1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害状況, 港湾技研資料, No.791, 1994年9月.
 - 35) 平成6年三陸はるか沖地震被害調査報告書, 土質工学会, 1996年10月.
 - 36) Schnabel, P.B., Seed, H.B. and Lysmer, J.: SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *Report No. EERC72-12*, Univ. of California, Berkeley, 1972.
 - 37) 岩崎敏男, 川島一彦, 高木義和, 相沢 興: 開北橋における地盤とケーソン橋脚の動的相互作用の解析, 土木学会論文報告集, 第322号, pp.15-24, 1982年.
 - 38) 善功企, 山崎浩之: 埋立地に用いたまさ土の液化化特性, 土と基礎, 第44巻, 第2号, pp.60-63, 1996年2月.

- 39) 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年7月。
- 40) Sato, K., Kokusho, K., Matsumoto, M. and Yamada, E. : Nonlinear seismic response and soil property during strong motion, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp.41-52, 1996.
- 41) 三輪 滋，池田隆明，鬼丸貞友：兵庫県南部地震における埋立地盤の地震時挙動の検討，第33回地盤工学研究発表会，pp.877-878，1998年7月。
- 42) 吉田 望：1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析，土と基礎，Vol.43, No.10, pp.49-54, 1995.
- 43) 吉田 望：実用プログラムSHAKEの適用性，軟弱地盤の地震動増幅シンポジウム発表論文集，pp.14-31, 1994.
- 44) 森 伸一郎，三輪 滋，Guan Baoqi：液状化した地盤の地震時挙動に関する検討，第22回地震工学研究発表会，pp.51-54, 1993.

(1998.7.24受付)

EVALUATION OF DISSIPATION ENERGY ACCUMULATED IN SURFACE GROUND AND ITS APPLICATION TO LIQUEFACTION PREDICTION

Motoki KAZAMA, Takahiro SUZUKI and Eiji YANAGISAWA

Recently the authors proposed a new scheme to evaluate liquefaction potential based on an energy dissipation capacity of ground material. In this study how to evaluate the dissipation energy accumulated in the surface ground during strong earthquake was discussed. The dissipation energy was calculated from the elastic energy and damping ratio evaluated in an equivalent linear analysis. To confirm the validity of the method, we conducted case study of Kobe Port Island array observation site using various strong earthquake motions. It was explained theoretically that the dissipation energy should be used as an index to represent the external force instead of the stress.