

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

EFFECTS OF INPUT ACCELERATION WAVES ON ABSORBING PROCESS
OF HYSTERESIS ENERGY IN SOIL

片田 敏行*・織本 慶一**・小室 智昭***

By Toshiyuki KATADA, Keiichi ORIMOTO and Tomoaki KOMURO

In this study, the analysis of the absorbing conditions of hysteresis energy of soil was made. The hysteresis energy is calculated using the results of numerical analysis and on-line earthquake response loading test. Especially, the effect of the characteristics of the input acceleration wave is considered.

As the analytical results, the following conclusions were obtained; when an input wave is narrow-banded wave that have one predominant component, the hysteresis energy is largest. And, in wide-banded wave, the hysteresis energy is very small.

Keywords: soil, hysteresis energy, failure, on-line experiment

1. ま え が き

近年、地震動入力エネルギー量と構造物のエネルギー吸収の能力を対比させて耐震性を確保する極限設計法が提案されている^{1)~3)}。地震時において、構造物に吸収されるエネルギー量をもとに耐震設計を行うためには

- ① その構造物がどの程度のエネルギー量でどの程度破壊するかということを定量的に把握しておくこと、
- ② エネルギー吸収状況に対する入力特性の影響を把握しておくこと、

が必要である。

①について、鋼部材では鈴木・玉松^{4),5)}が、RC部材では家村あるいは西岡ら⁶⁾がそのエネルギー吸収能力を解析している。土質工学の分野でも破壊現象の1つである飽和砂地盤の液状化現象に関して、エネルギー概念を応用しようという試みが、片田・阿部らによって行われている^{7)~9)}。この研究では、飽和した豊浦標準砂を用いて、液状化時の過剰間隙水圧の上昇状況とひずみエネルギー

吸収状況を比較し、定性的ではあるが両者の関係が相関性の高いものであると報告している。さらに、飽和砂の液状化に要するエネルギー量も求められている。しかし、用いた供試体の状態が2種類、入力波が3種類と実験例が少なかつたために、より多くのタイプの入力波を用いた解析が必要といえる。また、破壊に要する履歴吸収エネルギー量は材料である土の種類によっても異なる。この点については片田らにより履歴吸収エネルギー量の違いが明らかにされている^{8),9)}。

しかし、構造部材の示す復元力特性は材料の違いのみならず、地震荷重の不規則性によっても影響を受ける。したがって、入力波の不規則性によって、復元力特性がどのように変化するかを明らかにする必要がある。②の項目に関して、たとえば大野・西岡・藤野¹⁰⁾が入力である地震動特性とエネルギー量の関係を定量的に把握することによって、構造物の破壊の評価を試みている。

土は 10^{-4} 程度の小さなひずみでも塑性化するという点に特徴がある。また、液状化のように物性が急激に変化することもある。このように鋼やRCとは異なった特徴を有する。しかし、土に関しては解析例は少なく、いまだ履歴エネルギーの吸収状況と破壊程度との関係は明確ではない。

そこで、本論文は土の破壊に要する履歴吸収エネルギー

* 正会員 工博 武蔵工業大学助教授 土木工学科
(〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

** 武蔵工業大学土木工学科 (同上)

*** 学生会員 武蔵工業大学大学院修士課程 (同上)

ギ一量に及ぼす入力特性の影響を数値解析により定量的に明らかにすることを目的とする。履歴エネルギーの吸収量には、入力波特性の振幅の変化のみならず、その継続時間も大きな要因であると指摘されている¹¹⁾。しかし本論文では、入力波の振幅の大きさと不規則性が履歴エネルギーの吸収状況に与える影響を解析する。

2. 履歴エネルギー算出方法と解析条件

(1) エネルギー量の算出方法

本研究では、最も基本的な力学モデルである1自由度系のばね-質点系モデルを用いて、入力波の影響を明らかにする。この力学モデルを用いて、種々の非線形復元力特性を有する振動方程式を線形加速度法により応答解析を行う。その解析結果よりエネルギー量を算出する。モデル化の詳細については文献9)を参照されたい。

1自由度系の非線形復元力によるエネルギー平衡式は次式で与えられる。

$$\int_0^t m \ddot{x}(t) \dot{x}(t) dt + \int_0^t c \dot{x}(t) \dot{x}(t) dt + \int_0^t R(t, x) \dot{x}(t) dt = - \int_0^t m \dot{y}(t) \dot{x}(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

式(1)の左辺第3項が非線形復元力による履歴エネルギー量である。

(2) 用いた実地震加速度記録とその特徴

履歴エネルギーの吸収状況と入力波の関係を調べるため、17種類の実地震記録を選び出した。表-1に各波形の地震名、観測地点等を示す。観測記録の時間間隔は0.02秒であり、主要動が完全に含まれるように継続時間を60秒と統一した。60秒よりも長く観測された波形に関してはそれ以降の記録は削除した。また、1つの入力波に対して、最大入力加速度を100 gal, 200 gal, 300 galに正規化した3種類の波を解析に用いた。

17種類の実地震記録は、時刻歴あるいはフーリエスペクトルと比較すると波形に特徴がみられる。たとえば、秋田港記録(NS)、品川記録(EW)、清水-三保記録(NS)にはパルス状の大加速度がみられる。大船渡記録(NS, EW)には顕著な卓越振動数がみられ、きわめて狭帯域成分の波である。一方、八戸記録(NS, EW)には顕著な卓越振動数はなく、広帯域の周波数成分を有する。

(3) 解析条件および用いたパラメーター

解析に用いた非線形復元力モデルは、式(2)に示す修正R.O.G.モデルである^{12), 13)}。このモデルを用いて応答解析を行い、入力波の特性によって履歴吸収エネルギー量がどのように変化するかを検討する。

$$\text{骨格曲線: } \gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} (1 + \alpha |\tau|^\beta), \quad (\alpha, \beta \text{ は定数}) \dots\dots\dots (2)$$

表-1 解析に用いた実地震記録 (港湾技研記録)¹⁴⁾⁻²¹⁾

名称	地震名	観測地点	方向成分	地震発生日時
JS1	日本海中部地震	秋田港湾	E-W	1983.5.26
JS2	日本海中部地震	秋田港湾	N-S	1983.5.26
JS3	十勝沖地震	青森港	N-S	1968.5.16
JS5	十勝沖地震	大船渡港	N-S	1968.5.18
JS6	十勝沖地震	大船渡港	E-W	1968.5.18
JS7	十勝沖地震余震	八戸	E-W	1968.6.12
JS8	十勝沖地震余震	八戸	N-S	1968.6.12
JS9	埼玉県中部地震	品川	N-S	1968.7.1
JS10	埼玉県中部地震	品川	E-W	1968.7.1
JS11	十勝沖地震	室蘭	N-S	1968.5.16
JS15	日向灘地震	細島	N-S	1969.4.21
JS16	日向灘地震	細島	E-W	1969.4.21
JS17		四日市千才	N-S	1971.1.5
JS18		四日市千才	E-W	1971.1.5
JS20		釧路	E-W	1973.6.17
JS21	伊豆大島近海地震	清水-三保	E-W	1978.1.14
JS22	伊豆大島近海地震	清水-三保	N-S	1978.1.14

名称は便宜上付けたものである。

表-2 砂の物理定数

パラメーター	数値
単位体積重量 ρ	1.8 gf/cm ³
間隙比 e	0.7
内部摩擦角 φ	30°
静止土圧係数 K ₀	0.6
粘性減衰定数 β	0.1
固有振動数 f _s	2.2 Hz

$$\text{履歴曲線: } \gamma = \gamma^* + \frac{1}{G_{\max}} (\tau - \tau^*) \left[1 + \alpha \left(\frac{|\tau - \tau^*|}{2} \right)^\beta \right]$$

ただし、τ*とγ*はそれぞれ応力とひずみで履歴曲線を描いた場合の任意の反転する点である。

解析対象とした地盤は豊浦標準砂のような粒径の整った、丸い乾燥した砂の地盤とした。砂の物理状態は表-2のように仮定し、解析を行った。これらの物理定数より、復元力関数モデルに必要なパラメーターを参考文献13)にある提案式を用いて算出した。すなわち、初期最大せん断剛性 G_{max} は、

$$G_{\max} = 900 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \rho \right)^{0.4} \frac{1}{1.4} H^{0.4} \dots\dots\dots (3)$$

$$\therefore G_{\max} = 913 \text{ kgf/cm}^2$$

初期最大せん断応力 τ_{max} は、

$$\tau_{\max} = \left\{ \left(\frac{1 + K_0}{2} \sin \phi \right)^2 - \left(\frac{1 - K_0}{2} \right)^2 \right\}^{0.5} \rho \frac{1}{1.4} H^{0.4} \dots\dots\dots (4)$$

$$\therefore \tau_{\max} = 0.269 \text{ kgf/cm}^2$$

初期最大履歴減衰係数 h_{max} は、

$$h_{\max} = (33 - 1.5 \log N) / 100 \dots\dots\dots (5)$$

$$\therefore h_{\max} = 0.320$$

となる。ただし、Hは想定地盤の層厚、NはN値である。

3. 入力波の違いによる履歴エネルギーの吸収状況の変化

(1) 入力波と履歴エネルギー吸収量の関係

最終的な履歴吸収エネルギー量と入力波の関係を図-1に示す。図-1をみてもわかるように、入力波が異なれば履歴吸収エネルギー量が異なるという結果が得られている。すなわち、大船渡記録(NS)のとき最大になり、室蘭記録(NS)のとき最小になった。最大入力加速度300 galのときで、約53倍の違いが生じている。

なお、17波のうち、品川記録(EW)、室蘭記録(NS)および細島記録(NS, EW)の4つの入力波を用いたオンライン実験では液状化しなかった。

(2) 最大吸収量の入力波と最小吸収量の入力波の比較

図-2は履歴エネルギーの吸収量が最大となる場合の、図-3は最小となる場合の応答解析結果を示している。フーリエ・スペクトル(図-4, 5)を用いて、入力波を比較してわかることは、周波数成分が広帯域の波では吸収量が小さく、単一成分が卓越した狭帯域の周波数

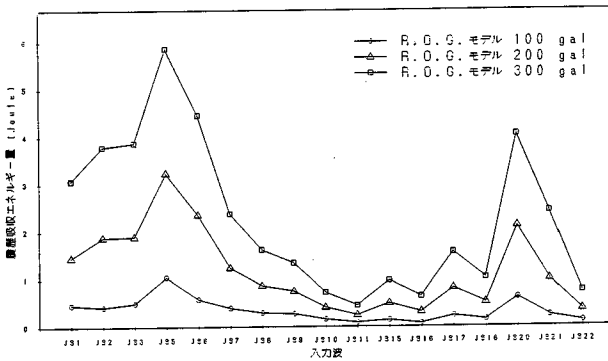


図-1 入力波と履歴吸収エネルギー量の関係 (数値解析による結果)

成分の入力波では、吸収量が大きくなっている。後者のような特徴を有する入力波はメキシコ地震においてメキシコ・シティで観測され、建物に大きな被害を与えている²²⁾。

4. 履歴エネルギーの吸収量と波形特性の関係

(1) 波形特性を表わす特性値²³⁾

地震動波形を表わす代表的な特性値として、①全パワー、②絶対平均加速度、③平均パワー、④最大加速度、⑤継続時間などがある。全パワー、絶対平均加速度の定義を式(6)、(7)に示す。これらのうち本論文で用いた入力波の最大加速度と継続時間は一定とした。そこで、波形特性値として代表的な全パワー、および絶対平均加速度の2つの値を用いた。本研究で用いた上記の2つの値はいずれも振幅レベルの特性値である。

① 絶対平均加速度は次式で定義された式である。

$$|\dot{y}|_{ave} = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} |\dot{y}(t)| dt \dots\dots\dots (6)$$

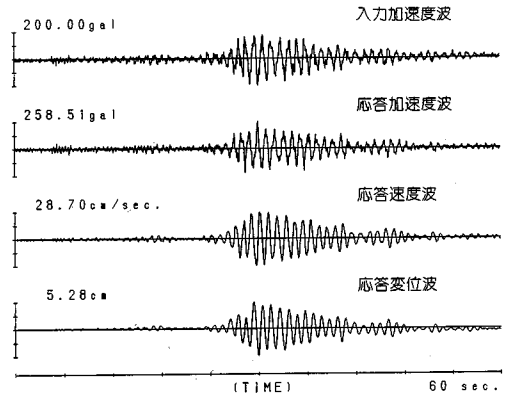


図-2 履歴吸収エネルギー量が最大の場合 (十勝沖地震大船渡港湾記録 NS 成分波)

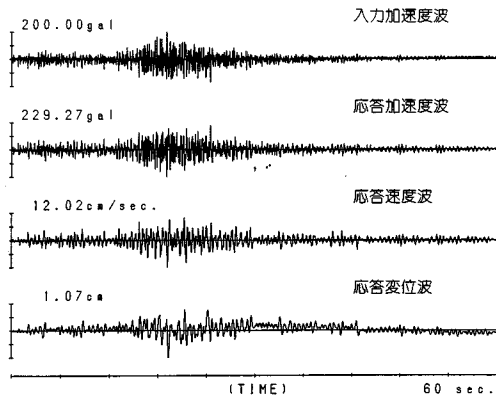


図-3 履歴吸収エネルギー量が最小の場合 (十勝沖地震室蘭記録 NS 成分波)

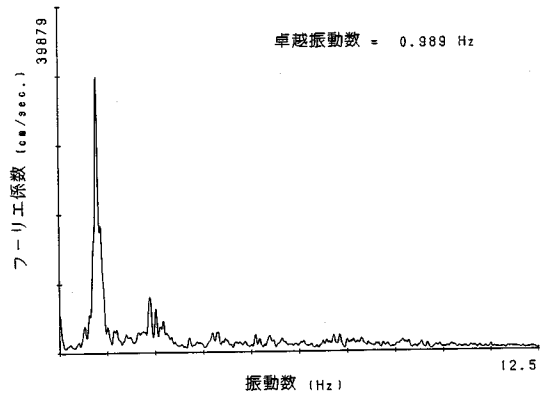


図-4 履歴吸収エネルギー量が最大の場合のフーリエスペクトル (十勝沖地震大船渡港湾記録 NS 成分波)

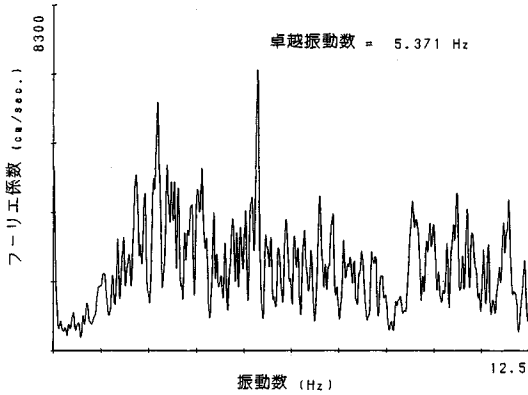


図-5 履歴吸収エネルギー量が最小の場合のフーリエスペクトル (十勝沖地震室蘭記録 NS 成分波)

この特性値は振幅レベルの平均であり、地震動のもつ単位時間当たりの加速度である。

② 加速度の全パワーは次式で定義された式である。

$$P = \int_0^{T_a} (\dot{y}(t))^2 dt \dots \dots \dots (7)$$

この特性値は地震動のパワーと関係付けられる。また、構造物の破壊に対するエネルギーの供給源としての地震強さの評価方法の1つとなり得る。

なお、式(6)、(7)において \dot{y} は地震加速度記録の時間 t における加速度値を示す。

(2) 履歴エネルギー吸収量と波形特性の相関分析

まず、履歴エネルギー吸収量と各波形特性との関係を図-6、7に示す。図-6、7をみてもわかるように、各波形特性とも履歴吸収エネルギー量と高い相関がある。そこで、各波形特性値ごとに相関分析を行った。その分析結果を表-3に示す。各説明変数とも履歴吸収エネルギー量の間約0.74~0.76という比較的高い相関がみられる。また、解析条件として入力波の継続時間を60秒、最大入力加速度を200 galと統一しているので、この解析結果は入力波の周波数特性、あるいは衝撃的、または持続的といった波の形によるものと思われる。

次に、履歴吸収エネルギー量を目的変数とし、絶対平均加速度、全パワーを説明変数とした重回帰分析を行った。解析の結果は

重回帰係数：0.76

$$\text{回帰推定式: } y = -0.171 + 0.0047 x_1 + 0.341 x_2 \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 y ：履歴吸収エネルギー (Joule)

x_1 ：絶対平均加速度

x_2 ：全パワー

であった。単相関分析の場合と同様に比較的高い重回帰係数が得られた。したがって、絶対平均加速度と全パワー

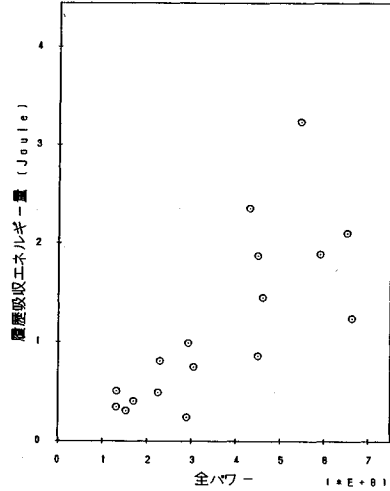


図-6 履歴エネルギー吸収量と全パワーの関係

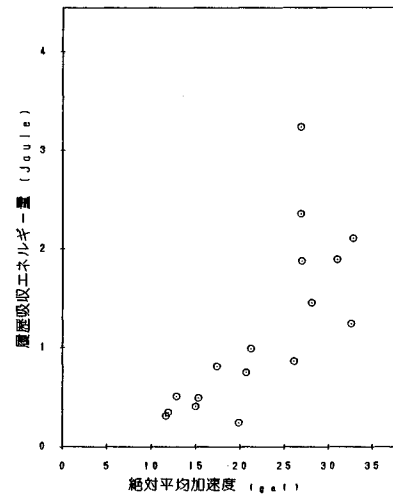


図-7 履歴エネルギー吸収量と絶対平均加速度の関係

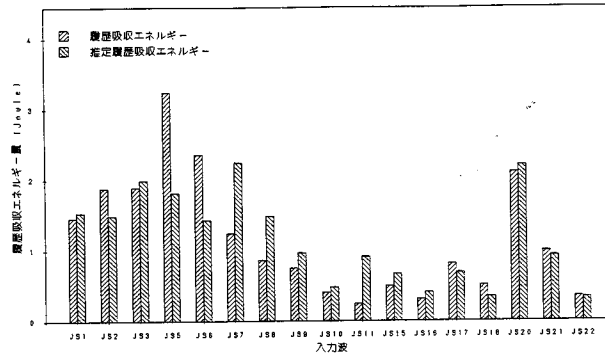
表-3 履歴吸収エネルギー量と波形特性の単相関分析

説明変数	相関係数	回帰直線
絶対平均加速度	0.745	$Y = 0.088 X - 0.778$
全パワー	0.758	$Y = 0.368 X - 0.134$

で履歴吸収エネルギー量を回帰推定できよう。

履歴吸収エネルギー量に関する観測値と回帰推定値を比較すると、十勝沖地震大船渡記録 (NS 成分) のような狭帯域な周波数特性を有する波で両者が大きく異なっている。このことは大船渡記録 (NS 成分) が他の入力波と周波数特性が異なり、特別に履歴エネルギーを良く吸収するためと思われる (図-8)。

履歴エネルギーを多く吸収する原因として入力波と振動系が共振することが考えられる。しかし、本研究で行っ



図—8 入力波による回帰推定値と解析結果の比較

た17波の解析結果をみると、概に入力波の卓越周期が地盤モデルの固有周期に近いからといって、必ずしも履歴エネルギーを多く吸収するとはいえないという傾向がみられる。たとえば、本研究で用いた17波の入力波の中で卓越周期が最も地盤モデルの固有周期に近い入力波は、JS10（表—1参照）の1.758 Hzである。この入力波を用いた数値解析で得られた履歴吸収エネルギー量は0.155 Jouleで、17波のうちで13番目の値である。また、仮定した地盤モデルが変われば履歴エネルギーの吸収量も変わるので、式（8）で示した回帰推定式は表—2のような地盤モデルのときのみ有効である。この意味では一般性は有していないといえる。

5. 飽和砂の液化化を対象とした破壊状態を含む場合における入力波の影響

（1）数値解析より履歴吸収エネルギー量を求める限界

数値解析により、破壊までに要するエネルギー量を精度良く求めるには、復元力特性が極端に変化し破壊していく過程をモデル化しなければならない。しかし、復元力特性を関数でモデル化するためには、応力-ひずみ関係に種々の仮定と近似を導入する必要がある。このため大ひずみ領域やさらには破壊領域までの応答を精度良く求めるのは困難である。それゆえ、その応答値をもとに履歴吸収エネルギー量を算出した場合、破壊に要する履歴吸収エネルギー量あるいは吸収状況が明確ではなくなる。そこで、材料の破壊状態まで動的試験が可能なオンライン地震応答載荷実験結果をもとに、履歴吸収エネルギー量を算出し、入力波の影響を解析する。

本研究で行うオンライン地震応答載荷実験では、振動三軸試験機より復元力を計算機に取り込みながら、地震加速度波に対する1自由度系の応答変位 $x(t)$ と非線形復元力 $R(t, x)$ から、式（1）の左辺第3項を用いて、履歴エネルギーを算出している。したがって、この履歴エネルギーは1自由度系が非線形応答をし、履歴曲線を

描くことにより消費されるエネルギーに相当する。

履歴エネルギー算出のもとになっている1自由度系の非線形復元力を取り出すのに、本研究では、動的振動三軸試験機を用いている。それゆえ、異なる原理の試験機（たとえば、中空ねじり試験機）、供試体の作成技術、供試体の大きさ（寸法効果）、拘束圧、密度などの違いにより、1自由度系の動特性（固有振動数、減衰定数）と入力加速度波（最大値も同じ）が同じであっても、得られる履歴エネルギー量は異なると思われる。

また、応答速度は、動的三軸試験機に設置された供試体上端で得られる反力をせん断復元力に変換し、これを用いた1自由度系の応答計算より算出している。

なお、入力加速度波としては数値解析に用いた17波の実地震加速度記録（表—1）を用いた。

（2）オンライン地震応答載荷実験法の原理

振動系を構成する要素は、地震時に振動系のもつ固有振動数や減衰特性の影響を受けて、地震力が作用する。その結果、要素の物性が変化し、振動系全体の動特性も変化する。この影響を受けて、要素はさらにその物性を変化させる。このように、振動系とそれを構成する要素は、互いに影響しあいながら、変化していく。

オンライン地震応答載荷実験法は、計算機（本研究ではマイコンを使用）で振動系全体の地震応答を計算しながら、要素（本研究の場合には砂）の載荷実験を行う方法である。この方法により、上記に述べたような実際の現象に近い状態で載荷試験ができる。

なお、土のオンライン地震応答載荷実験では1次モードのみを考慮して、表層地盤は1自由度系でモデル化される。

（3）解析条件および供試体の状態

入力波の波形特性の違いが履歴エネルギーの吸収状況に現われるように、解析条件、および供試体の状態はなるべく同一となるように設定した。試料土には豊浦標準砂を用いた。そして、相対密度が約65%前後になるように落下高さ10 cmから砂を自然落下させて供試体を

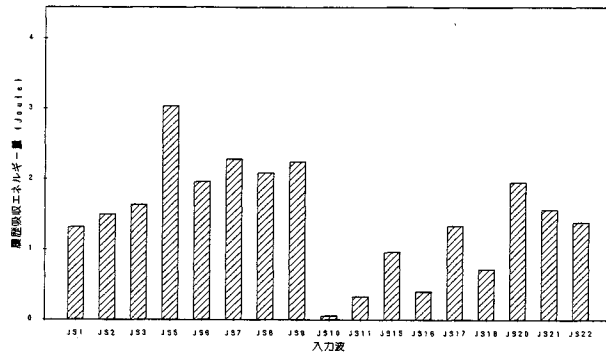


図-9 入力波と液状化に要する履歴吸収エネルギー量の関係

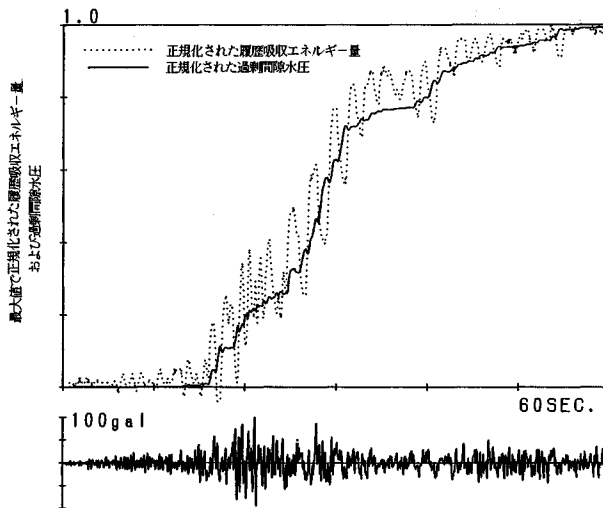


図-10 履歴エネルギーの吸収状況と過剰間隙水圧の上昇過程の比較
 (オンライン地震応答載荷実験の実験条件：1自由度系の固有振動数=1.5 Hz, 供試体の相対密度 $D_r=32.5\%$, 拘束圧 1.5 kgf/cm^2 , 入力波は日本海中部地震秋田港湾記録 (EW)-JS 1)

作成した。次に、想定された表層地盤の動特性より定まる1自由度系の固有振動数、粘性減衰定数はそれぞれ1.5 Hz, 10%と定めた。表-2の値については数値解析に用いており、1.5 Hzの値はオンライン実験に用いた値である。オンライン実験では実物の砂からなる供試体より復元力を得る。供試体は人が人工的に作成するものなので、実際よりも軟らかいと思われるので2.2 Hzよりも若干小さな値である1.5 Hzとした。

固有振動数と粘性減衰定数は特定の地盤を想定したわけではない。また、三軸試験機にセットする供試体の拘束圧 p は 1.5 kgf/cm^2 とした。

これらの解析条件は著者らの既往の論文^{8), 9), 24)}における解析条件と同じとし、比較検討しやすいように定めた。

(4) 飽和砂に吸収される履歴エネルギー量

完全に液状化した10ケースについては間隙水圧が拘束

圧に等しくなるまでの履歴吸収エネルギー量を、間隙水圧が拘束圧に等しくなるまで上昇しなかった3ケースについては、全継続時間(60秒)の履歴吸収エネルギー量を求めた。図-9には、入力波別に吸収された履歴エネルギー量を棒グラフで表わしてある。

なお、オンライン地震応答載荷実験結果より算出された履歴エネルギーの吸収量は、復元力関数モデルを用いた数値解析より算出された履歴エネルギーの吸収量と比較しやすいように、供試体の大ききで正規化していない。

(5) 入力波の違いによる履歴エネルギー吸収状況の相違

入力波の違いにより液状化した場合としない場合の2通りのケースがみられた。完全に液状化したケースと完全には液状化しなかったケースの、どちらも振動の後半部分では過剰間隙水圧は、ほとんど上昇していない。完

全には液状化しなかったケースでは入力加速度波の後半部の振幅が極端に小さい。このために、過剰間隙水圧が上昇しなかったと思われる。しかし、入力波の振幅に合わせるように、過剰間隙水圧は多少ながら昇降している。これに対して、完全に液状化した場合には、入力加速度波の後半部の振幅が大きくとも過剰間隙水圧は一定値をとる。

過剰間隙水圧の上昇過程は波形の特性により異なっているが、大別すると次のように分けられる。

- ① 1, 2波の衝撃的な波により急激に過剰間隙水圧が上昇するもの、
- ② 数回の振動により徐々に過剰間隙水圧が上昇するもの、
- ③ ①と②の中間的な傾向にあるもの。

いずれの場合でも、過剰間隙水圧の上昇過程と履歴エネルギーの吸収状況はよく対応している。図-10をみてわかるように、過剰間隙水圧の上昇過程と履歴エネルギーの吸収状況はよい対応を示す。図-10の履歴吸収エネルギー量は、最大履歴吸収エネルギー量で正規化してある。さて、今回の解析結果の中では①の場合、両者の対応が良くなっている。また、対応のあまり良くないのは、過剰間隙水圧が昇降を繰り返すときである。その理由は、履歴エネルギーは一度吸収されるとあまり他のエネルギーに変換されない。そのため、過剰間隙水圧が下がっても履歴エネルギーが下がらないため、両者の対応が悪くなっている。

完全に液状化した中で最も履歴吸収エネルギー量の多かったのは、大船渡記録 (NS) の 3.0 Joule であり、最も少なかったのは、四日市千才記録 (EW) の 0.7

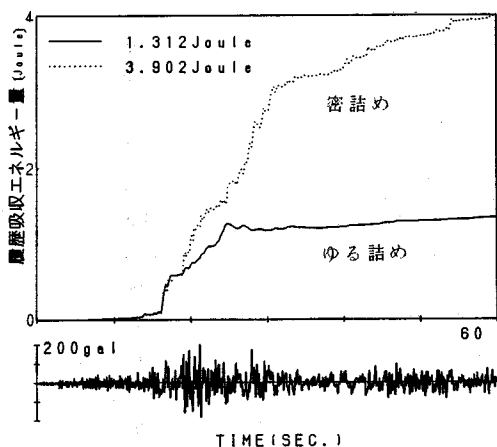


図-11 相対密度による履歴吸収エネルギー量の違い
(実線:ゆる詰め, 破線:密詰め ($D_r=80.9\%$), オンライン地震応答載荷実験の実験条件: 1自由度系の固有振動数=1.5 Hz, 拘束圧=1.5 kgf/cm²)

図-11 相対密度による履歴吸収エネルギー量の違い

Jouleであった。さらに、完全に液状化しなかった品川記録 (EW), 室蘭記録 (NS), 細島記録 (NS, EW) がそれぞれ 0.06, 0.3, 1.0, 0.4 Joule である。このことより、拘束圧が 1.5 kgf/cm² の下で、直径 5 cm, 高さ 10 cm の供試体が完全に液状化するには、少なくとも 1.0 Joule 以上のエネルギー量が必要であるといえる。

また、液状化したケースでは最大で 3.0 Joule, 最小で 0.7 Joule とおよそ 3 倍程度異なる。この差は同一入力波を用いて供試体の相対密度だけを変えた場合 (図-11) のゆる詰め砂と密詰め砂における履歴吸収エネルギー量の違い程度はある。図-11の数字は、ゆる詰め、および密詰めの場合の最大履歴吸収エネルギー量を示している。衝撃的あるいは持続的な波といった振動形態により、液状化の進行状況が異なるために、供試体の状態が等しくてもエネルギー量が異なってくるのだと思われる。

(6) 液状化の進行程度と履歴吸収エネルギー量の関係

完全に液状化した 10 ケースについて過剰間隙水圧比とそれまでに吸収された履歴吸収エネルギー量の関係を図-12に示す。図-12は過剰間隙水圧比が 0.1 だけ上昇するごとに単位体積履歴吸収エネルギー量を求め、両者の関係をプロットしたものである。過剰間隙水圧比が大きくなると履歴吸収エネルギー量がばらついている。1つの入力波に関して、履歴吸収エネルギー量と過剰間隙水圧との対応がよいとすれば、ばらつくのは過剰間隙水圧が高いほど各入力波の波形特性の影響を受けるからだといえる。また、過剰間隙水圧比が飽和砂の損傷程度を示すと仮定すれば、過剰間隙水圧比が 1.0 になったときの履歴吸収エネルギー量が液状化に要するエネルギー量である。また、過剰間隙水圧比が 0.5 のときの履歴吸収エネルギー量が、50% 損傷するのに必要なエネルギー量といえる。

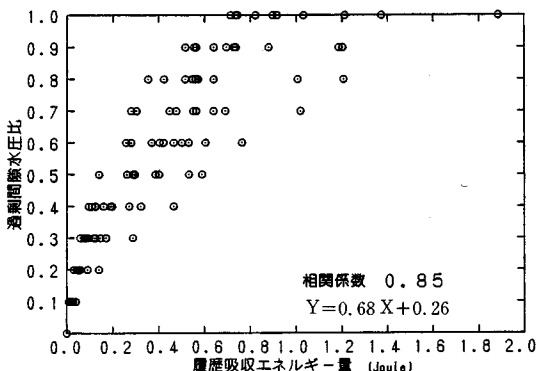


図-12 過剰間隙水圧比と履歴吸収エネルギー量の関係

図一12より過剰間隙水圧比と履歴吸収エネルギー量の相関係数を求めたところ、0.85となった。履歴吸収エネルギー量を X 、過剰間隙水圧比を Y として、回帰直線を求めると以下の式が得られた。

$$Y = 0.68 X + 0.26 \dots\dots\dots (9)$$

式(9)より、1.0 Joule のエネルギー吸収量があると $Y = 0.94$ 程度の値を示すことが推定される。このことは、1.0 Joule によって過剰間隙水圧比が 0.94 となることを意味している。したがって、1.0 Joule でほぼ液化状態となる。

6. あとがき

本研究は地震によって表層地盤に吸収される履歴エネルギーの吸収状況に与える入力波の影響を明らかにしている。初めに、破壊まで至らないときの履歴吸収エネルギーを復元力関数モデルを用いて、数値解析より求めた。次に、破壊する場合として飽和した砂が液化化するまでの履歴吸収エネルギー量をオンライン地震応答載荷実験により算出した。

本研究で行った解析結果の範囲で、以下のことがいえる。

(1) 土の種類と地盤状態に応じて、破壊するまでの履歴吸収エネルギー量は求められる。だが、入力である地震動特性によりその値はばらつく。

(2) すなわち、入力波の種類が異なると、最大加速度値が同じでも、履歴吸収エネルギー量は最大で 53 倍違う。

(3) 単一成分波の卓越した狭帯域成分波の入力波のとき履歴吸収エネルギー量が大きくなり、広帯域成分を有する入力波のとき履歴吸収エネルギー量は小さくなる。この傾向は飽和砂のオンライン実験結果より得られる履歴吸収エネルギー量でも同様であった。

(4) 履歴吸収エネルギーは絶対平均加速度、全パワーなどの波形特性との間には比較的高い相関がみられた。

(5) 過剰間隙水圧と履歴吸収エネルギー量の関係が式(9)のように得られた。

さらに今後の課題として次のようなことが考えられる。破壊するまでに要する履歴吸収エネルギー量はある仮定した動的環境のもとに算出されたものなので、原位置での実地震による破壊現象とどの程度整合性がとれているか求めなければならない。それがわかって初めて求めた履歴吸収エネルギー量が破壊程度を表わす指標に使えるであろう。

謝辞：本研究の遂行にあたっては元本学院生の東山 晃君(現・福田組)には多大の助力を受けています。

本研究で使用した地震加速度記録は運輸省港湾技術研究所で公開されたものです。謝意を表します。

参考文献

- 1) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計，東京大学出版会，1980年9月。
- 2) 加藤 勉・秋山 宏：鋼構造剛接骨組の耐震極限設計，日本建築学会論文報告集，第237号，pp.59～65，昭和50年11月。
- 3) 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，昭和50年9月。
- 4) 鈴木敏郎・玉松健一郎：低層鉄骨造骨組柱材のエネルギー吸収能力に関する研究その1，単調載荷及び定変位振幅載荷を受けるH型鋼柱材のエネルギー吸収能力，日本建築学会論文報告集，第279号，pp.65～75，昭和54年5月。
- 5) 鈴木敏郎・玉松健一郎：低層鉄骨造骨組柱材のエネルギー吸収能力に関する研究その2，変動変位振幅載荷を受けるH型鋼柱材のエネルギー吸収能力，日本建築学会論文集，第280号，pp.19～24，昭和54年6月。
- 6) 藤掛一典・大野友則・西岡 隆：鉄筋コンクリートラームのエネルギー吸収容量に関する実験的研究，土木学会論文集，第390号/V-8，1988.2。
- 7) 片田敏行・阿部幸樹・富山哲次・東山 晃：飽和砂地盤の液化化過程のエネルギー考察，第7回日本地震工学シンポジウム，pp.655～660，昭和61年12月。
- 8) 片田敏行・阿部幸樹・東山 晃：地盤の動的破壊に要するエネルギー量，第19回地震工学研究発表会講演概要，pp.225～228，昭和62年7月。
- 9) 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-3，pp.43～50，1987年12月。
- 10) 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，土木学会論文集，第333号，pp.91～99，1983年5月。
- 11) 伯野元彦・森川 修：地震加速度と構造物破壊の関係についての1つのシミュレーション，土木学会論文集，第344号/I-1，pp.299～302，1984年4月。
- 12) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1982。
- 13) 足立紀尚・龍岡文夫：土の力学(Ⅲ)―圧密・セン断・動的解析―，技報堂出版，1981。
- 14) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料，No.80，運輸省港湾技術研究所，1969.6。
- 15) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1968)，港湾技研資料，No.98，運輸省港湾技術研究所，1970.3。
- 16) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1969)，港湾技研資料，No.100，運輸省港湾技術研究所，1970.6。
- 17) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇：港湾地域強震観測年報(1971)，港湾技研資料，No.136，運輸省港湾技術研究所，1972.3。
- 18) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇：港湾地域強震観測年報

- (1973), 港湾技研資料, No. 181, 運輸省港湾技術研究所, 1974. 3.
- 19) 倉田栄一・井合 進・土田 肇: 1978年伊豆大島近海の地震における強震記録, 港湾技研資料, No. 317, 運輸省港湾技術研究所, 1979. 3.
- 20) 倉田栄一・井合 進・横山淑子・土田 肇: 1978年宮城県沖地震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料, No. 319, 運輸省港湾技術研究所, 1979. 6.
- 21) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男: 昭和58年(1983年)日本海中部地震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料, No. 458, 運輸省港湾技術研究所, 1983. 9.
- 22) 和泉正哲, ほか: 1985年メキシコ地震に関する調査研究, 文部省科学研究費, 自然災害特別研究突発災害研究成果, 昭和61年3月.
- 23) 山原 浩: 地盤の振動特性を考慮した地震時の地動の推定(その1), 日本建築学会論文報告集, No. 175, 1970. 9.
- 24) 東山 晃・片田敏行・成山元一: 地震時における土のひずみエネルギー蓄積状況の解析, 第22回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 531, 昭和62年6月.

(1988. 9. 30・受付)
