

(57) 地盤の動的破壊に要するエネルギー量

武蔵工業大学土木工学科 片田 敏行
岩手県庁港湾課 阿部 幸樹
武蔵工業大学大学院 東山 晃

1. まえがき

構造物を破壊するためにはそれに必要なだけの地震動エネルギーが不可欠である。それゆえ、エネルギー量を用いて、構造物の破壊の評価をする場合がある^{1)・8)}。さらには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²⁾。

この考え方にに基づき、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なうためには、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が不可欠である。鈴木・玉松³⁾は低層鉄骨骨組を対象としてH型鋼柱材の破壊実験の結果より破壊に至るまでのエネルギー吸収量を算出している。

上記のようにエネルギー論的手法は強震時における構造物の破壊現象を検討する際に有力な手段となっている。同様に構造物を支持する表層地盤も液状化、地すべり、地割れなどの破壊を起こすことが多い。それゆえ、建設地点の表層地盤が地震時に破壊するかどうかを検討することが重要である。そのためには地震時において、表層地盤にどのように地震動エネルギーが入力し、どれだけのエネルギーが吸収されるかを明らかにする必要がある。本研究は砂、関東ローム、軟弱粘土を対象として、破壊に至るまでのエネルギーの吸収状況を解析し、その結果と考察を報告している。エネルギー量の算出にはオンライン地震応答載荷実験の結果を用いている。

2. オンライン地震応答載荷実験

(1) 解析装置の概要⁶⁾

本研究で用いた実験装置は応答計算を行なうマイクロ・コンピュータ(NEC・PC9801VM)と復元力を取り出す振動三軸試験装置から成り立っている。1自由度系の応答計算には線形加速度法を用いている。他の数値解析理論を用いることも考えられる。プログラムの実行はMS-DOS上のベーシック・コンパイラで行ない、計算速度の高速化をはかっている。その結果、応答計算が1ステップ、0.02秒で可能となった。

(2) 供試体の状態及び1自由度系の特性

解析例として、以下のような状態、条件を設定し、解析を行った。これらの値は特定の地盤を想定したものではない。まず、オンライン地震応答載荷実験で非線形復元力を明らかにするために三軸試験機にセットされた供試体の拘束圧 p は1.5Kgf/cm²とした。試料土には豊浦標準砂、関東ロームおよび軟弱粘土を使用した。軟弱粘土は横浜市内の宅地造成地内の谷あいの低湿地の腐植土層より採取した。これらの土を用いて供試体を作成した。用いた試料土の物理状態を表-1に示す。さらに、この時に1自由度系の固有振動数は関東ロームと密詰め砂は $f_0=2$ Hz、軟弱粘土とゆる詰め砂は $f_0=1.5$ Hzとした。減衰定数はともに $h=0.10$ と仮定し、この動的特性の環境のもとにおける非線形復元力特性を解析する。

(3) 入力波

表-1 試料土の物理状態

入力波には日本海中部地震(1983.5.26., $M=7.7$)において秋田港で記録された強震加速度波(S1567)を用いた。解析ではこれらの波形の最大値を200galに修正して使用した。

(4) オンライン地震応答載荷実験の結果

載荷の結果、飽和砂は液状化した。しかし、関東ロ

試料土の種類	含水比	密度
関東ローム	72%	$\rho_s=1.37$ gf/cm ³
豊浦標準砂	ゆる詰め	Dr=30%、
	密詰め	Dr=70%、
軟弱粘土	77%	$\rho_s=1.50$ gf/cm ³

ームの場合には反力の顕著な低下は見られず、破壊したとは思えなかった。これは用いた入力波の最大振幅と継続時間では破壊に必要な量までエネルギーが入力しなかったためであろう。

3. ひずみエネルギーの吸収量の算出

(1) 破壊に関係するエネルギー

地震動によって、構造物は繰り返し変形し、その結果破壊する。このため、破壊程度を論ずるための指標として構造物の塑性変形に費やされる塑性ひずみエネルギーが用いられている。表層地盤を対象としている本研究でも、このひずみエネルギーを指標として用いる。

(2) エネルギー量算出に当たっての問題点

これまでの研究では非線形復元力モデルを用いて応答解析を行ない、得られた応答値より振動系のエネルギー量を算出している⁴⁾。この場合、非線形復元力モデルのパラメーターの値をどのように定めるかによって振動系が吸収可能なエネルギー量も変わって来る。また、変位制御あるいは荷重制御方式で材料の動的試験を行ない、吸収されるエネルギー量を直接算出することもよく行なわれている⁵⁾。しかし、定変位制御あるいは定荷重制御方式による動的実験では、破壊付近における応力-ひずみ関係が正確に得られない。したがって、破壊に至るまでのエネルギー吸収量は定まらない。それゆえ、近頃ではオンライン地震応答載荷実験結果を用いてエネルギー量を算出している例が見られる^{5), 6)}。

(3) ひずみエネルギー量の算出式

非線形振動する1自由度系において時刻 t_1 から t_2 までに吸収されるひずみエネルギー量 E_s は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{ひずみエネルギー } E_s &= \int_{t_1}^{t_2} R(t) \times(t) dt \\ &= [R(t_2) \times(t_2) + R(t_1) \times(t_1)] (t_2 - t_1) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

(1)式を時間ステップごとに順次計算することにより各時間ステップにおけるエネルギー量を算出できる。ここで問題となるのはエネルギー算出に必要な速度応答値 $\dot{x}(t)$ と復元力 $R(t)$ をどのようにして求めるかである。本研究では土に対してオンライン地震応答載荷実験を行ない $\dot{x}(t)$ と $R(t)$ を求めている。ひずみエネルギー量は得られた復元力 $R(t)$ と $\dot{x}(t)$ を(1)式に代入して算出する。

4. ひずみエネルギーの吸収状況

(1) ひずみエネルギーの総吸収量

図-1は4種類の土(表-1)について時刻歴でひずみエネルギー吸収量を比較したものである。土の種類の違いによりひずみエネルギーの吸収状況が異なっている。その傾向は振動の初期には吸収量は小さい。非線形性が進行し、ひずみが大きくなるとひずみエネルギーの吸収も大きくなる。軟弱粘土ではこの入力波に対して反力は小さいが応答変位は大きい。しかし、そのひずみエネルギー吸収量は4ケース中で最も小さい。飽和ゆる詰め砂は載荷により液状化するので、密詰め砂よりひずみエネルギー吸収量は小さい。最も大きなひずみエネルギー吸収量を示したのは関東ロームであった。

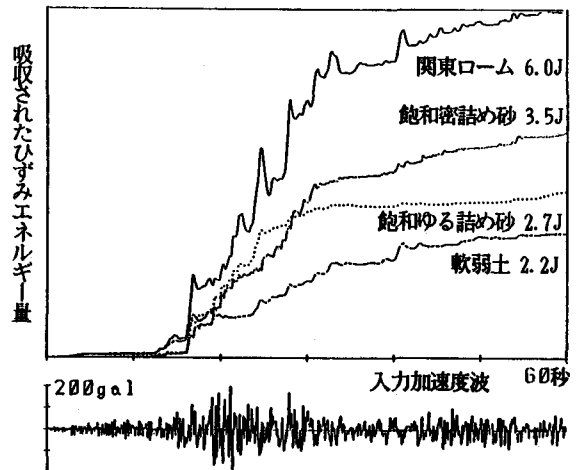


図-1 (a) ひずみエネルギーの吸収状況 (EW成分)

(2) 単位体積の飽和砂が完全液状化するに要するひずみエネルギー量

図-1には単位断面の土柱の飽和砂が完全液状化するのに要するひずみエネルギー量が求められている。そこで、液状化するまでに単位体積当りの飽和砂が吸収するひずみエネルギー量を求めることにする。

载荷実験は1自由度系の振動を満足するように行われている。1自由度系は単位断面の土柱をモデル化したものである(図-2)。したがって、土柱の体積Vは

$$V = A \cdot H \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし、Aは土柱の断面積、Hは土柱の高さである。

载荷実験結果より算出されたひずみエネルギー量をVで割れば単位体積当りのエネルギー量が求められる。ここで、問題となるのは土柱の高さHをどう求めるかである。そこで、供試体の拘束圧pと試料土の湿潤密度 ρ 。より以下のように求めることにした。

$$H = p / \rho \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上の結果、飽和ゆる詰め砂が液状化するまでに吸収されるひずみエネルギー量を E_{li} 。とすると、完全液状化状態になるのに要した単位体積当りのひずみエネルギー量Eは次式で与えられる。

$$E = \frac{E_{li}}{V} = \frac{E_{li}}{A \cdot p / \rho} \quad \dots\dots\dots (4)$$

液状化した飽和ゆる詰め砂の供試体は拘束圧1.5Kgf/cm²なる三軸状態とした。その相対密度はゆる詰め度約30%であった。このとき、飽和砂の単位体積重量は約1.8 gf/cm³であった。最大入力加速度 200galの場合、ゆる詰め飽和砂が完全液状化状態になるのに要するひずみエネルギー量は

秋田港湾記録のEW成分波・・・約2.7(joule)

秋田港湾記録のNS成分波・・・約2.6(joule)

である(図-1)。これを(4)式に代入すると、単位体積当りのひずみエネルギー量Eが求められる。

したがって、EW成分波では約 3.2×10^{-3} (joule)、NS成分波では約 3.1×10^{-3} (joule)となる。

(3) 単位体積の軟弱粘土に inputs するひずみエネルギー量

飽和砂の場合と同様に(4)式を用いて、単位体積の軟弱粘土に inputs するひずみエネルギー量を求める。図-1より入力波の終了時までに吸収されるひずみエネルギー量は

秋田港湾記録のEW成分波・・・約2.2(joule)

秋田港湾記録のNS成分波・・・約2.6(joule)

である。表-1より単位体積重量 ρ 。を求め、これを(4)式に代入する。その結果、単位体積当りに吸収されるひずみエネルギー量はEW成分波では約 2.2×10^{-3} (joule)、NS成分波では約 2.6×10^{-3} (joule)となる。

5. 結論

エネルギー論的観点から土構造物の耐震性を検討する第1ステップとして、本研究では砂、関東ローム、軟弱粘土より成る地盤について、その破壊にいたるまでに吸収されるひずみエネルギーを求めた。地震時に土が吸収するひずみエネルギー量はオンライン実験方法を用いた応答解析の結果より算出した。本研究で得

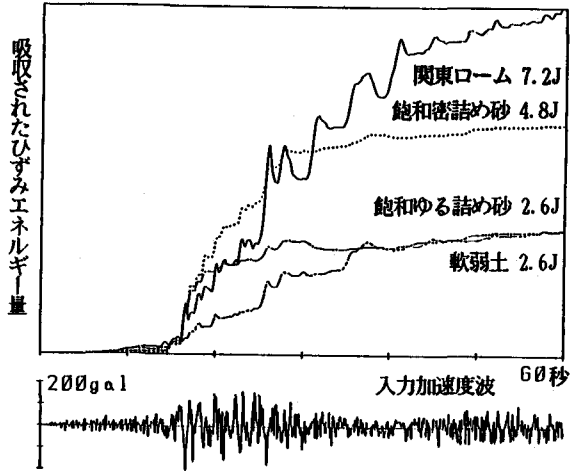


図-1(b) ひずみエネルギーの吸収状況(NS成分)

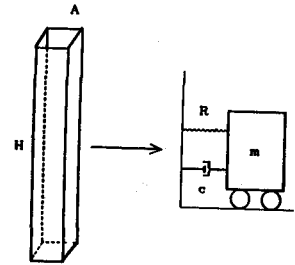


図-2 表層地盤のモデル化

られた結論を以下に示す。

- (1) 関東ロームの場合には本研究で用いた入力波(最大値200gal, 継続時間60秒)では破壊状態までに至らなかった。
- (2) 最大入力加速度200galの場合、単位体積の飽和砂はゆる詰め状態でおよそ 3.1×10^{-3} (joule) で、ひずみエネルギーで完全に液化化した。
- (3) 軟弱土の場合にはおよそ $(2.2 \sim 2.6) \times 10^{-3}$ (joule) のひずみエネルギー量が吸収される。

本研究の結果、ゆる詰め飽和砂については完全液化化に要するひずみエネルギー量が定量的に求められた。今後の課題としては粘性土についても、より強い入力波を用いることにより破壊に至るまでのひずみエネルギー吸収量を求めたい。本研究では1種類の動特性、1種類の最大入力加速度等の限られた条件のもとにおけるエネルギー量を求めている。今後、様々な条件のもとにおける解析が必要である。

どのくらいのひずみエネルギー量で破壊に至るかが明らかになれば、土構造物の耐震設計に適用できる可能性が出て来る。

謝辞

本研究におけるオンライン地震応答載荷実験に当たっては、本学卒論生の手助けを受けています。記して謝意を表する次第です。試料土の採取およびその物理試験等に当たっては本学土質・基礎研究室の成山元一講師と目黒栄治技士に多大なるご助力を賜っております。

参考文献

- (1) Housner, G. W.: Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proc. of 1st WCEE, pp. 5-1~13, 1956.
- (2) 土岐憲三、他: 構造物地盤系の終局安全性の分配とそれに基づく耐震設計法の開発、昭和60年度科学研究費補助金(総合研究A) 研究成果報告書、pp. 109-119、昭和61年3月。
- (3) 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。
- (4) 安藤範平・手塚武仁・峰岸茂: 地震時に構造物が消費する塑性エネルギーについて、その1、各種復元力を持つ1質点系の塑性エネルギー入力、日本建築学会学術講演会講演梗概集、pp. 691-692、昭和52年10月。
- (5) 金多潔・西沢英和: 高力ボルト摩擦接合部を有する架構の地震応答解析(その2-エネルギー応答に関する考察)、日本建築学会論文集、第346号、pp. 91-100、昭和59年12月。
- (6) 片田敏行・勝田博敏・中田隆博: TSS回線による大型計算機を用いたハイブリッド地盤応答解析、土木学会論文集、第376号、pp. 549-556、1986年10月。
- (7) 片田敏行・阿部幸樹・富山哲治・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) 山田善一・家村浩和・伊津野和行・水元義久: 地震応答実験システム(HYLSER)によるRC柱模型の修復・補強効果の検討、第18回地震工学研究発表会講演梗概集、pp. 321-324、1985年5月。