

# 不規則荷重条件下における液状化特性について

——間隙水圧蓄積量の定量化に関する試み——

平 間 邦 興      松 本      伸

## Study on Characteristics of Liquefaction under Random Loading

——An Attempt for Quantification of Cumulative Pore Water Pressure——

Kunioki Hirama      Shin Matsumoto

### Abstract

It is very important but difficult to grasp the quantity of pore water pressure occurring in saturated sandy ground during earthquake because there are many unknown factors about liquefaction characteristics during random loadings. It was thought that the accumulation of pore water pressure might correspond to the revised cumulative damage concept (normally indicating the extent of fatigue), that could be calculated from random loadings comparatively easily. Liquefaction tests were performed using random loadings and the pore water pressures occurring were compared with the cumulative damage concept. As a result, it was found that the relation between the two was linear when the strains of elements were relatively small, and the pore water pressure under random loadings could be estimated by use of the cumulative damage concept to a certain extent.

### 概 要

地震時に飽和砂地盤に発生する間隙水圧を定量的に把握することは非常に重要であるが、不規則荷重の液状化特性におよぼす影響については不明な点も多く、難しい。

ここで、不規則荷重による液状化実験結果から比較的容易に計算できる累積損傷度（本来は、金属材料の疲労の程度を表す）を多少修正することによって間隙水圧の蓄積量と考えることができるため、不規則荷重による液状化実験を実施し、発生する間隙水圧と累積損傷度の両者を比較した。その結果、供試体に発生するひずみが比較的小さいときには両者の間に直線的な関係のあることが明らかになり、ある程度、累積損傷度によって不規則荷重条件下の間隙水圧を推定できることがわかった。

## 1. まえがき

地震時に飽和砂地盤に発生する間隙水圧を定量的に把握することは非常に重要な意味があり。例えば、石原<sup>1)</sup>は地震時に地盤内に発生する最大せん断応力比 ( $\tau/\sigma'_v$ ) と相対密度から簡易に間隙水圧を求める方法を示している。特に最近では、間隙水圧の発生や逸散を考慮した有効応力解析による任意の地点の液状化判定も実施されてきている。

また、比較的容易に地震時の間隙水圧を推定する方法として、金属材料の分野で提案され、不規則荷重に対する疲労の程度を表す累積損傷度 (Cumulative Damage Concept)<sup>2),3)</sup> が考えられる。

そこで、この累積損傷度が不規則荷重下における間隙

水圧の推定に適用できるか否かを究明するために、振動三軸試験機を用いて、正弦波荷重および不規則荷重による液状化実験を実施し、発生する間隙水圧と累積損傷度の両者を比較した。

## 2. 不規則荷重の作成

要素試験の動荷重として用いた不規則波は人工地震波であり、その作成方法を以下に示す。

### 2.1. 基盤地震波の作成

基盤地震波作成のフローチャートを図-1に示す。

まず、フーリエスペクトル振幅としては本来違うものなのだが、減衰定数も5%と小さいことから、図-2の道路橋示方書<sup>4)</sup>に示されている第1種地盤(岩盤)において地震のマグニチュード  $M$  が  $6.8 \leq M < 7.5$  で震央距離

$\Delta$ が  $20 \text{ km} \leq \Delta < 60 \text{ km}$  に相当する最大加速度応答スペクトルを代用した。また、位相はランダムとし、この両者より逆フーリエ変換して波を作成する。次に、作成した波を図-3に示すジェニングスの包絡線<sup>5)</sup>(M=7級の地震の震央付近)によって包絡した。

しかし、このようにして作成した波をフーリエ変換すると、一般に元のスペクトル振幅と異なったものとなるので、再び第1種地盤のスペクトル振幅を入れて同様の作業を繰り返す。このような繰り返しをフーリエ変換して求めたスペクトル振幅と第1種地盤のスペクトル振幅との差が20%以下になるまで、さらに逆フーリエ変換した波形とジェニングスの包絡線との差が20%以下になるまで行なった。

なお、計算にあたってはサンプリングタイム  $\Delta t$  を 0.02秒、継続時間を80秒とした。

## 2.2. 地表面地震波の作成

前述の方法で作成した基底地震波をSHAKEによって応答計算し、地表面の地震波を求めた。

ここで、応答計算を実施する前に、地盤のモデルとして、図-4に示すような比較的緩い砂地盤の単層を考えた。計算にあたって、層の分割は5分割として行なっている。

このようにして求めた地表面の地震波のスペクトル振幅を図-5に、また、波形を図-6に示す。これらは加速度波形であるが、実験には荷重として与えている。

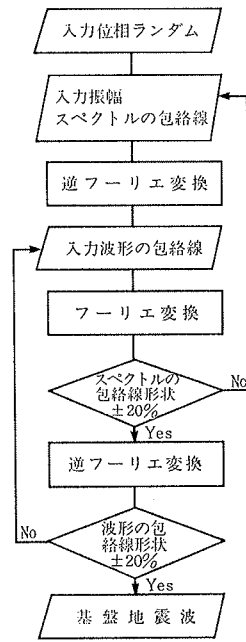


図-1 基底地震波作成のフローチャート

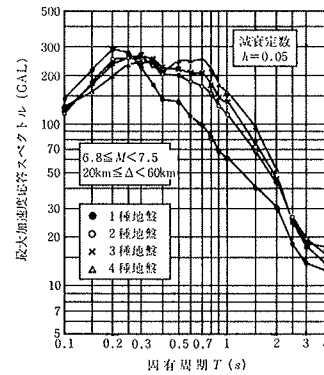
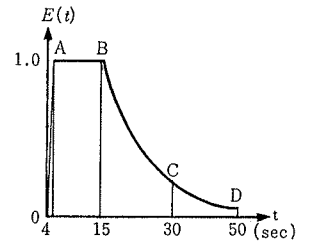


図-2 加速度応答スペクトル図(道路橋示方書)



(M=7級の地震の震央付近)

図-3 ジェニングスの包絡線

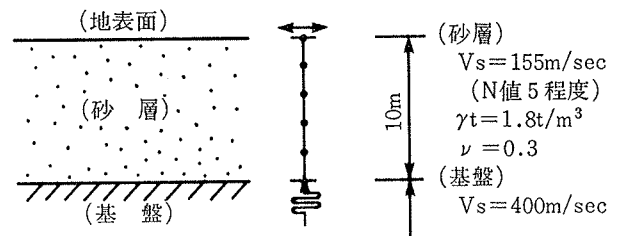


図-4 応答計算に用いた地盤モデル

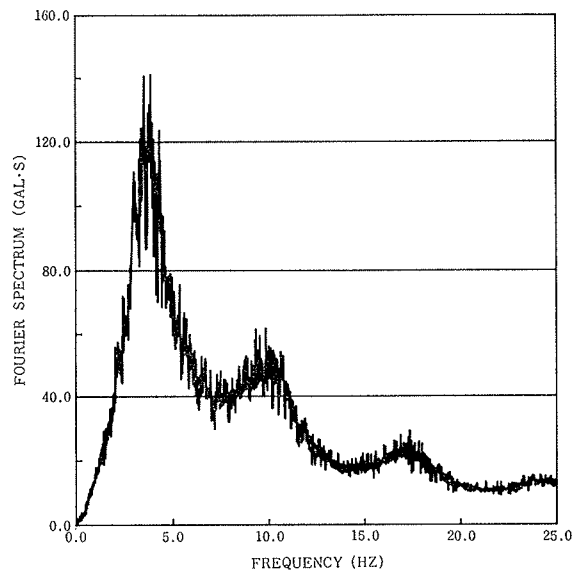


図-5 地表面地震動のフーリエスペクトル

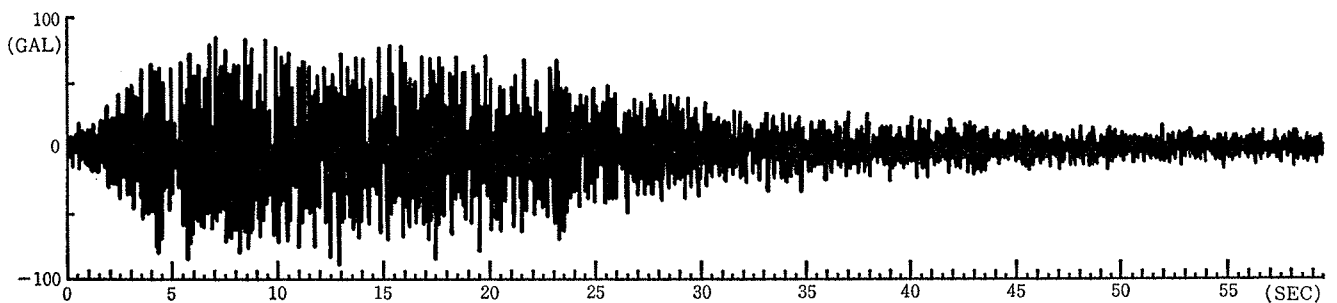


図-6 地表面の地震動波形

### 3. 実験方法

実験には、油圧サーボ型の振動三軸試験機を用いた。試料は、横浜市金沢区の埋立て地で採取した浅間山砂であり、粒度分布を図-7に示す。均等係数  $U_c=2.36$ 、比重  $G_s=2.73$  である。

供試体は空中落下法<sup>6)</sup>にて作成し、拘束圧  $\sigma'_0=1 \text{ kgf/cm}^2$  で等方圧密した後、B値が0.95以上になるのを待って非排水条件の下で液状化実験を行なった。B値をあげるために、圧密前に供試体内の空気を炭酸ガスに置換してから通水させる方法を用いている。

供試体の相対密度は、おおむね60%に統一したが、正弦波荷重による事前の実験については、これに加えて50, 70, 80%についても実験を行なった。正弦波荷重の振動数は1 Hzである。

不規則荷重は前述の方法で作成した波およびこれをさらに時間軸に伸ばしてできた波の2種類であり、卓越振動数は前者が3 Hz、後者が2 Hzである。これらの波は、前もって大きさを何種類かに変えてデータレコーダーに入力しておき、試験時にデータレコーダーから試験機の油圧用アンプを経て、軸荷重として供試体に与えられる。

### 4. 累積損傷度および液状化強度曲線の修正

累積損傷度とは、本来、金属材料の疲労試験から求まる図-8(a)に示す疲労曲線 (S-N 曲線) を使って不規則な荷重に対する材料の疲労の程度を定量的に表すものである。今、不規則な応力のうち、任意の振幅  $\tau_i$  をもつせん断応力が1回作用すれば損傷度は  $1/N_{if}$  となり、不規則応力全体の累積損傷度  $D$  はこれらの合計によって次のように求められる。

$$D = \sum_i \frac{1}{N_{if}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

したがって、疲労試験では図-8 (b)に示すように累積損傷度は繰返し回数に比例して増加し、 $D=1.0$  で破壊することになる。ここで、S-N 曲線の代わりに正弦波荷重による液状化実験から求まる液状化強度曲線 (応力比  $\sigma_d/2\sigma'_0$  と液状化を生じる繰返し回数の関係; R-N 曲線) を用いれば、この損傷度の累積過程は液状化実験における間隙水圧の蓄積過程と同じものとみなすことができる。

正弦波荷重による液状化強度曲線を図-9に示す。

ところで、一般に液状化過程の間隙水圧を間隙水圧比 ( $u/\sigma'_0$ ) で表わせば、図-10のような曲線となることが知られている。また、 $u/\sigma'_0=0.25$ 、および  $u/\sigma'_0=0.70$  で変曲点を持つ場合も多い。

そこで、間隙水圧比と累積損傷度の上昇過程を近似さ

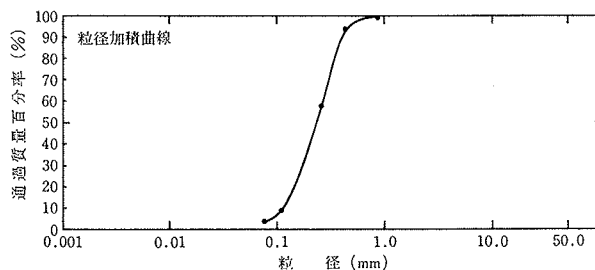


図-7 試料の粒度分布

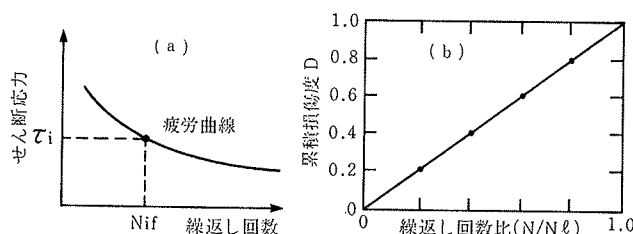


図-8 疲労曲線 (S-N 曲線) と累積損傷度

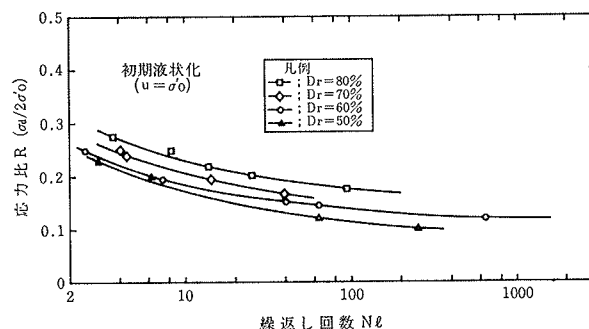


図-9 液状化強度曲線 (R-N 曲線)

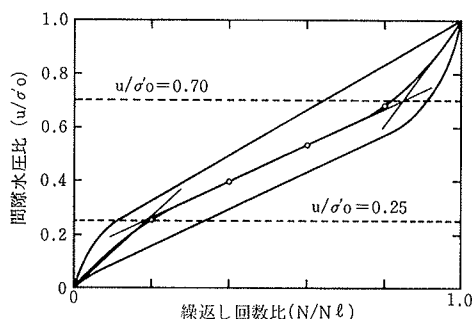


図-10 間隙水圧比の一般的な蓄積過程

せるために、これらの点で曲線を3分割して累積損傷度の上昇量に合わせて重みをつけ、液状化強度曲線を修正することにした。

修正の方法を以下に示す。まず、図-10のような任意の応力比における間隙水圧と繰返し回数の曲線から、それぞれの区間での傾きを求める。次にこの傾きから間隙水圧を100%上昇させるのに必要な繰返し回数を計算することができるから、この繰返し回数を応力比に対して

ロットする。この作業を各応力比に対して行なえば、3本の強度曲線が得られる。これを概念的に示したのが図-11(a)である。

以上のような方法で図-9の強度曲線のうち  $D_r=60\%$  について修正したものが図-12である。

したがって、修正した強度曲線を使って累積損傷度  $D$  は、その上昇量にあわせて次のように求められる。

$$0 \leq \text{累積損傷度 } D < 0.25$$

$$D = \sum_i \frac{1}{N_{iif}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$0.25 \leq \text{累積損傷度 } D < 0.70$$

$$D = 0.25 + \sum_i \frac{1}{N_{2if}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$0.70 \leq \text{累積損傷度 } D$$

$$D = 0.70 + \sum_i \frac{1}{N_{3if}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

当然のことながら、正弦波荷重に対して、修正した強度曲線を適用し累積損傷度を求めると、図-11(b)のようになり、修正前よりも間隙水圧の蓄積過程に近くなっている。

不規則荷重の振幅については、次のように定めた。例えば、図-13に示すような荷重の場合にはゼロクロッシング点から次のゼロクロッシング点までの最大値を振幅と考える。したがって、累積損傷度を求めるにはこの振幅を用いればよいのだが、式-1(1), (2), (3), (4)はすべて荷重1サイクルに対するものであることから、求めた値を半分にする必要がある。

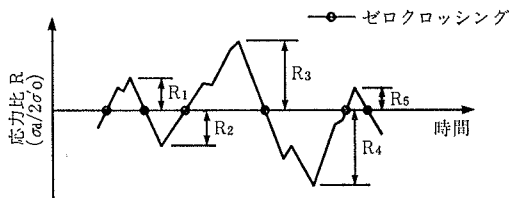


図-13 応力比Rの振幅の定義

5. 実験結果および考察

不規則荷重によって供試体に作用する応力比  $(\sigma_d/2\sigma'_v)$ 、発生する間隙水圧比  $(u/\sigma'_v)$  および軸ひずみの経時変化の例を示したのが図-14 (タイプ1-卓越振動数 3Hz)、図-15 (タイプ2-卓越振動数 2Hz) である。応力比は、三軸セル内のロードセルによって記録されたものである。また図中には、累積損傷度についても間隙水圧比と比較し易いように示してある。

これらの結果から、タイプ別に、横軸に間隙水

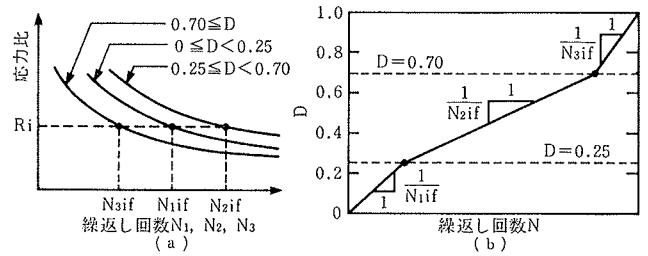


図-11 修正後の強度曲線と累積損傷度の模式図

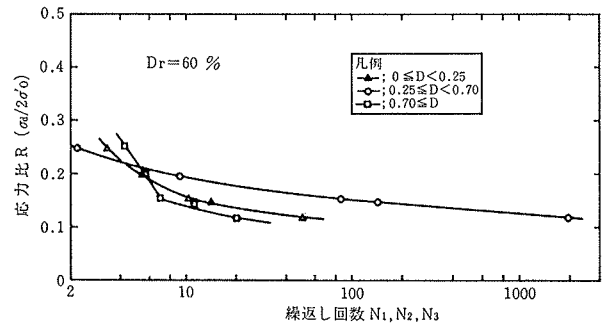


図-12 修正後の液状化強度曲線

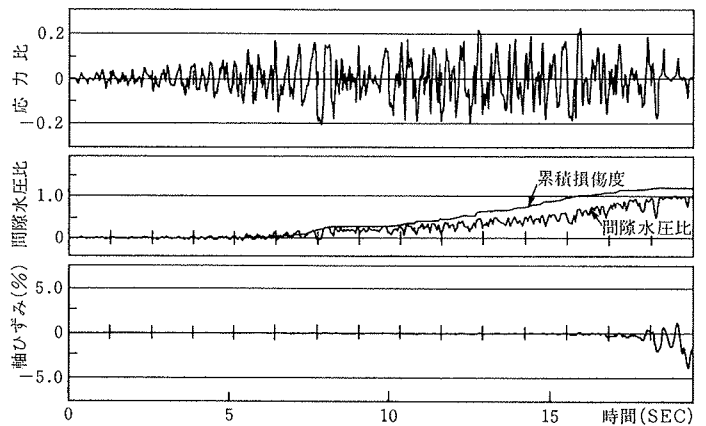


図-14 不規則荷重による液状化実験例 (タイプ1)

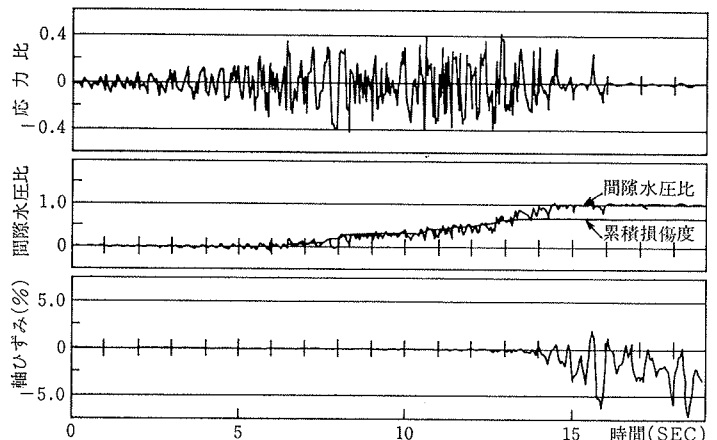


図-15 不規則荷重による液状化実験例 (タイプ2)

圧比( $u/\sigma'_0$ )、縦軸に累積損傷度Dをプロットしたのが図一16である。白丸がタイプ1、黒丸がタイプ2である。

この図より明らかなように、両タイプのいずれについても間隙水圧比が約70%までは両者に直線的な関係があり、累積損傷度から間隙水圧を推定することが可能といえるようである。

しかし、間隙水圧比が70%を越える頃から累積損傷度の上昇量は急激に減少する。

この理由としては、二つ考えられる。その一つは、図一14、図一15からも明らかなように間隙水圧比が70%を越える頃から供試体に軸ひずみが現われ始め、間隙水圧はそのまま上昇し続けるのに対して、応力が追従しなくなり、その結果、損傷度は減少する。

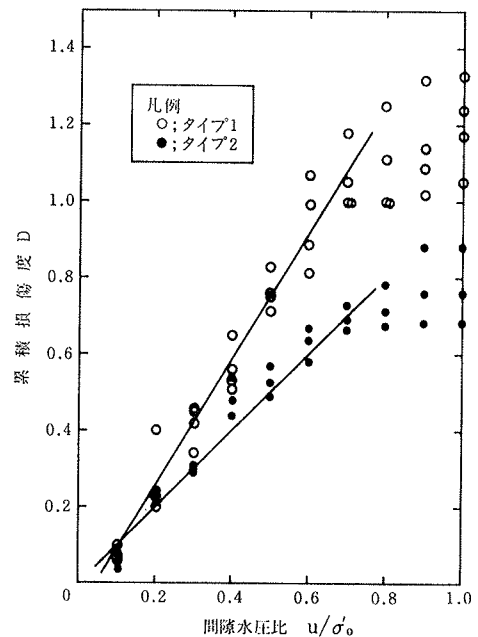
もう一つの理由は、間隙水圧がかなり蓄積して、ひずみが増大すると砂試料の性状は、それまでとは全く違った状態（破壊＝液状化）に急激に至ることが知られており、この状態における間隙水圧を累積損傷度によって推定するには限界のある可能性もないとは言えない。したがって、不規則荷重の振動数を極力下げて応力が追従するようにして実験を行えばこの理由が明らかになると思われる。

また、図一16からも明らかなように、不規則荷重の波の形状が変わると間隙水圧比と累積損傷度の傾きは異なったものとなり、タイプ1の場合には、約 1:1.5、タイプ2の場合には約 1:1.0 の勾配を示した。このように不規則荷重の波形の違いによって両者の関係に相異が認められており、波形の影響についての検討も今後の課題と考えている。

## 6. おわりに

不規則荷重による室内液状化実験を実施して、発生する間隙水圧と累積損傷度の両者を比較した結果、ある程度、両者に直線的な関係があることが明らかになった。しかしながら、供試体にひずみが現われ始めてからの両者の動き、あるいは、不規則荷重の波形の違いによる両者の関係について、いまだ不明な点も多いことから、本報は中間報告と考えて頂ければ幸いです。

なお、実験のデータ整理および不規則波の作成にあたっては、川崎地質(株)宮永良一、安部松昭両氏の尽力に依るところが多い。未筆ながら深甚なる謝意を表します。



図一16 間隙水圧比と累積損傷度の関係

## 参考文献

- 1) Ishihara, K.: Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits during Earthquakes, Soils and Foundations, vol. 17, No. 3, (1977), pp. 1~17
- 2) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂出版, (昭和55), pp. 51~56
- 3) 龍岡ら: 正弦波荷重と不規則荷重に対する砂の非排水繰返し強度の関係, 地盤と基礎の地震災害に関するシンポジウム, (1983), pp. 37~44
- 4) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 日本道路協会, (昭和55), pp. 111~125
- 5) P. C. Jennings, G. W. Housner and N. C. Tsai: Simulated Earthquake Motions for Design Purposes, 4WCEE, vol. 1, (1969)
- 6) Tatsuoka, F., Muramatsu, M., Sasaki, T.: Cyclic Undrained stress strain Behavior of Dense Sands by Torsional Simple Shear Test, Soils and Foundations, vol 22, No. 2, (1982), pp. 55~70