

# 不規則荷重条件下における液状化特性について (その2)

——実地震波載荷時の間隙水圧蓄積量の定量化の試み——

木村 薫 平間 邦興  
松本 伸

## Study on Characteristics of Liquefaction under Random Loading (Part 2)

——A Test for Quantifying Cumulative Pore Water Pressure  
under Real Earthquake Loading——

Kaoru Kimura Kunioki Hirama  
Shin Matsumoto

### Abstract

Under repetitions of stresses applied by earthquakes, waves, etc., pore water pressures rise in saturated sandy ground, and in extreme cases, liquefaction results. In the past, most judgments made were simply either "liquefaction" or "non-liquefaction", but lately it has become necessary to analyze the process of liquefaction, that is to say, the behavior of pore water pressure, so that many methods of judgment have been proposed.

In the previous report, the authors showed a cumulative damage technique that was comparatively easy to carry out and was practical, but there were some problems in application above pore water pressure ratio of 70 percent so that these problems were examined. Testing was done using not only one artificial seismic wave but also five real ones. As a result, it was found that improvements were obtained to nearly 100 percent in pore water pressure ratio. This paper describes the results of these tests and applicability of the cumulative damage concept.

### 概 要

地震あるいは波浪などの繰返し応力によって、飽和した砂地盤には過剰間隙水圧が蓄積し、極端な場合には液状化に至る。以前までは、ある調査地点で“液状化する”“しない”というような判定が多くなされていたが、近頃では液状化に至る過程、言い換えれば、間隙水圧の挙動までを解析することが必要とされ、さまざまな判定手法が提案されている。

このようなことから、前報<sup>1)</sup>では比較的容易に解析でき実用的な累積損傷度を用いた手法を示してきたが、間隙水圧比が約70%以上で適用性にやや問題があった。そこで、この問題点について検討を加え、人工地震波のみならず5種類の実地震波を載荷した結果、どの場合も間隙水圧比100%近くまで比較的良く一致することがわかった。本報告は、これらの実験結果および累積損傷度の適用性について考察するものである。

### 1. まえがき

地震あるいは波浪などの繰返し応力によって飽和砂地盤に発生する間隙水圧を定量的に表わす方法として、非常に簡易なものから動的有効応力解析<sup>2),3)</sup>による詳細なものまで多数提案されている。

そこで、前報では、実用的な面で非常に使いやすく、また、間隙水圧の蓄積過程も定量化できる累積損傷度について示してきた。ところが、本手法を適用した結果、

間隙水圧比と累積損傷度の対応は、約70%までは良いがこれ以上で、試料に大歪が現われ始め、応力の追従性が極端に悪くなったのが原因で、おもわしくない結果となった。また、この実験に用いた不規則荷重が、地盤を想定して求めた人工地震波一波のみであることも適用性の面で問題があった。

このようなことから、まず、応力の追従性を良くするために不規則波を時間軸に5倍に伸ばし、振動数を低くおさえて載荷している。また、不規則荷重の種類として

は、前報に示す人工地震波以外に新潟地震、十勝沖地震あるいは宮城県沖地震などで記録された計6種類の地震波を用いている。本報告は、これらの地震波を動荷重として載荷した場合の実験結果を示すとともに累積損傷度の適用性について検討するものである。

なお、累積損傷度についての詳細な説明は、前報を参照されたい。

2. 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ており、荷重計は、正確な応力を測定するために三軸セル内に設置している。試料は、前報に示すものと同様、均等係数  $U_0=2.36$ 、比重  $G_s=2.73$  の砂である。

供試体は空中落下法にて作製し、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で液状化実験を行なった。B値を上げるために、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。また、供試体の相対密度はおおむね60%に統一している。

実験に用いた不規則荷重は、前報で示した人工地震波に加えて、表1に示す比較的最大の加速度の大きな5種類の実地震波の計6種類の地震波である。実験には、これらの波を時間軸に5倍に伸ばし、最大値も何種類かに変えて入力している。

ここで、動荷重である地震波を時間軸に伸ばした理由は、まきがきでも述べたが液状化が近づき間隙水圧が70%を越えた後も試料にかかる応力の再現性を良くするためである。ただし、このように動荷重の振動数を低下させることによる液状化の強度特性への影響について、ほとんど無視しうる程度であるという吉見ら<sup>4)</sup>あるいは龍岡ら<sup>5)</sup>の報告がある。

3. 累積損傷度と応力振幅の定義

累積損傷度の定義など詳細は前報で示してあるので、ここでは簡単に触れる程度にする。

NO.	地震波名	地震名	方向	震央距離 (km)	最大加速度 (gal)
1	宮古-S	宮城県沖地震	N90E	167	223
2	開北橋	"	L-G	83	316
3	新潟	新潟地震	N-S	51	126
4	板島橋	日向灘地震	L-G	103	194
5	八戸	十勝沖地震	N-S	189	235
6	人工地震波	人工地震	-	20~60*	90*

\*分断1)より

表一 地震波の概要

累積損傷度とは、材料の疲労の程度を表わすものであり、例えば、図一に示すような液状化強度曲線（応力比—繰返し回数曲線）を使って、不規則荷重に対する累積損傷度Dは、次式によって求められる。ただし、図一は、液状化過程における間隙水圧の上昇過程が直線的でないことを考慮して、累積損傷度の上昇量にあわせて3区間に分割し、それぞれの区間で重みをつけて修正した後の曲線群である。

$$D \leq \text{累積損傷度 } D < 0.25$$

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

$$0.25 \leq \text{累積損傷度 } D < 0.70$$

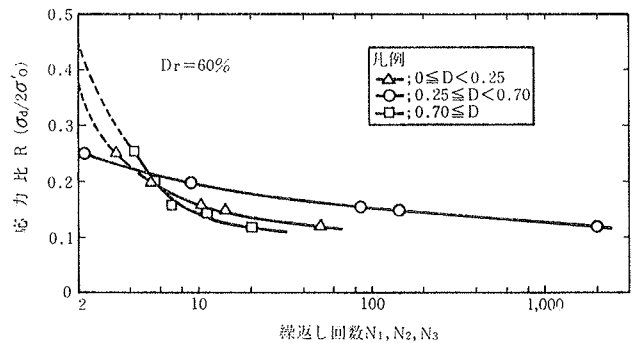
$$D = 0.25 + \sum_i \frac{1}{N_{2if}} \dots\dots\dots(2)$$

$$0.70 \leq \text{累積損傷度 } D$$

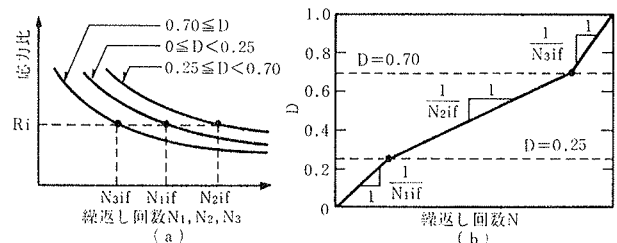
$$D = 0.70 + \sum_i \frac{1}{N_{3if}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $N_{1if}$ 、 $N_{2if}$ 、 $N_{3if}$ は、図二に模式的に示すが、重みを考慮した液状化強度曲線で応力比  $R_i$  に対応するそれぞれの繰返し回数である。したがって、図二(a)の曲線群を用いて正弦波荷重に対する累積損傷度を求めると図二(b)のようになり、一般的な液状化実験の間隙水圧の蓄積過程に比較的類似している。

次に、累積損傷度を求める場合、不規則荷重の振幅を定義する必要がある。前報では、図三(a)に示すように不規則荷重のゼロクロッシング点と次のゼロクロッシング点までの最大値を振幅として解析している。しかし、この定義によれば、例えば、片側にのみ大きな荷重が起



図一 修正後の液状化曲線



図二 強度曲線と累積損傷度の模式図

このような場合に振幅が大きくなり過ぎて過剰な損傷度を与える可能性がある。そのため、もう一つの振幅の定義として、同図の定義(B)に示されているように、定義(A)で求められる隣り合う二つの振幅の平均を考えた。したがって、定義(B)によれば、図-3のゼロクロッシング点1での損傷度は応力振幅  $R = \frac{1}{2}(R_1 + R_2)$  を使って求められる。

なお、いずれの定義を用いても、式(1), (2), (3)は荷重1サイクルに対する損傷度を与えるため、求めた値を半分にして半サイクルに対する値としなければならない。

また、正弦波荷重による液状化実験は、損傷度を求めるための基本となる強度曲線を決定するが、半サイクルあるいは1サイクルで液状化するような大きな応力比で実験していないため、この近傍での応力比-繰返し回数の関係は不明である。したがって、非常に大きな振幅をもつ応力が存在する場合の損傷度は推定値となるが、余り大きな値となるのも不自然なので、限界値を0.5/半サイクルと決めている。

#### 4. 実験結果および考察

不規則荷重を用いて液状化実験した場合に、供試体に作用する応力比 ( $\sigma_a/2\sigma'_0$ )、発生する間隙水圧比 ( $u/\sigma'_0$ )、および軸歪の経時変化の一例を示したのが図-4である。同図には、損傷累積度も間隙水圧と比較しやすいように併記している。ただし、応力の振幅の定義の違いによって2本の累積損傷度曲線が存在する。

これらすべての実験の概要について示したのが表-2

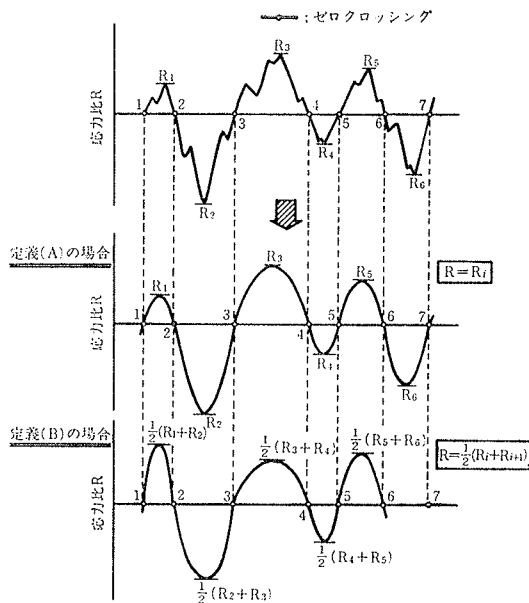


図-3 不規則荷重の振幅の定義

である。どの解析結果も定義(B)を用いた場合よりも定義(A)を用いた場合の方が累積損傷度は大きくなる。

次に、これらの実験において、間隙水圧と累積損傷度の両者の上昇過程についても観察できるように、横軸に間隙水圧比、縦軸に累積損傷度をとって結果を地震波別にプロットしたのが図-5～図-10である。また、これらの図は、応力振幅の定義別に分けて示してある。もし、間隙水圧比と累積損傷度が全く同様な蓄積過程であれば、この図では、原点を通る傾き 45° の直線となる。

以下に、それぞれの地震波を載荷した場合の間隙水圧と累積損傷度について示す。

宮古-S地震波を載荷したときの間隙水圧比と累積損傷度の関係を示したのが図-5である。図中の○印および●印は載荷応力が比較的小さいために最後まで液状化に至らなかった実験結果である。同図からわかることは、どちらの振幅の定義を用いて解析しても、液状化点 ( $u/\sigma'_0 = 1$ ) では、間隙水圧比と累積損傷度の両者は比較的良好一致する。しかし、液状化に至るまでの過程をみた場合には、やや定義(B)の方が合っているような感じもするが、実験データのバラツキを考えると、どちらが良

地震波名	実験回数	最大応力比 ( $\sigma_d/2\sigma'_0$ )	最大間隙水圧比 ( $u/\sigma'_0$ )	最大累積損傷度(D)	
				定義(A)による	定義(B)による
1 宮古-S	4	0.207 ~0.244	0.37 ~1.0	0.44~1.05	0.38~0.92
2 開北橋	3	0.265 ~0.292	1.0	0.46~1.02	0.33~0.42
3 新潟	4	0.379 ~0.444	1.0	1.18~1.31	0.99~1.11
4 板島橋	4	0.272 ~0.306	1.0	0.99~1.22	0.43~0.86
5 八戸	3	0.293 ~0.343	1.0	0.86~1.01	0.38~0.81
6 人工地震波	4	0.221 ~0.272	1.0	0.90~1.08	0.30~0.82

表-2 液状化実験解析結果の概要

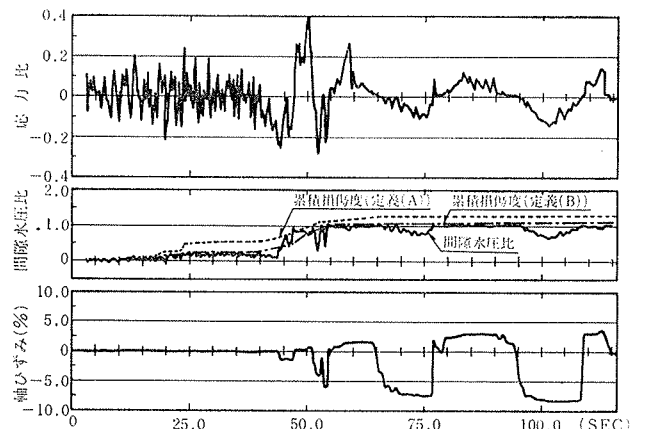


図-4 不規則荷重による液状化実験例 (新潟)

いとも言えない。

開北橋地震波を載荷したときの結果を示したのが図一6である。定義(A)による応力振幅を用いて解析すると、○印以外は液状化点で非常に良く合っている。ただし、液状化に至るまでの過程については、間隙水圧に比べて累積損傷度の方が大きくなっている。これは、時間的に累積損傷度の方が間隙水圧に比べて早く上昇することを示す。

新潟地震波を載荷したときの結果を示したのが図一7である。定義(A)の振幅を用いて解析すると液状化点および液状化に至る過程のどちらについても累積損傷度の方が大きくなる傾向がある。特に、液状化点 ( $u/\sigma'_0 = 1.0$ ) での累積損傷度  $D \approx 1.2 \sim 1.3$  と大きな値が得られた。

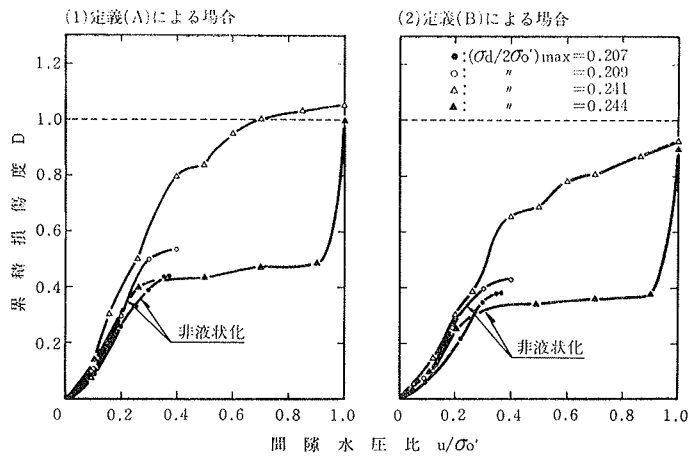
ところが、定義(B)の振幅を用いて解析すると、図からも明らかのように液状化点および液状化に至る過程のどちらについても両者は非常に良く一致している。これは、図一4に示す荷重の波形をみてもわかるように約50秒前後に非常に大きな波があり、その前後は比較的小さい波となっている。つまり、定義(A)を用いることによって、この大きな波が損傷度に過大に影響しているものと考えられる。

板島橋地震波を載荷したときの結果を示したのが図一8である。この場合も定義(A)を用いた解析によって、多少、液状化に至る過程で、間隙水圧と累積損傷度は上下するものの両者に比較的良好一致がみられる。

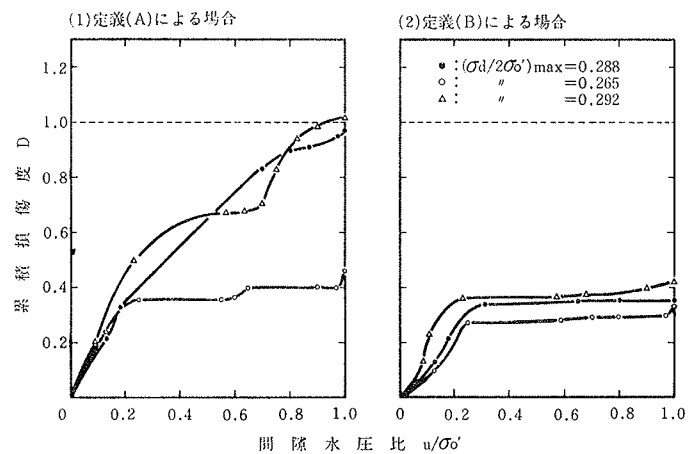
八戸地震波を載荷したときの結果を示したのが図一9である。この場合も、定義(A)によって解析すると、○印の結果を除いては、液状化点および液状化過程ともに両者の対応が良い。

最後に、前報でも用いた人工地震波を載荷したときの結果を示したのが図一10である。ただし、荷重を時間軸に伸ばしてあるため、応力の再現性あるいは、間隙水圧の上昇してきたときの追従性は非常に良くなっている。その結果、前報では間隙水圧比が70%を越える頃から、応力の追従性が原因で、累積損傷度はほとんど上昇しない傾向があったが、図からも明らかのように今回の実験では、間隙水圧が70%を越えても累積損傷度は上昇し続けている。なお、液状化点での累積損傷度は、 $D = 0.86 \sim 1.0$  と非常に合っており、かつ、液状化過程についても、他の不規則波載荷の場合以上に良い結果が得られている。

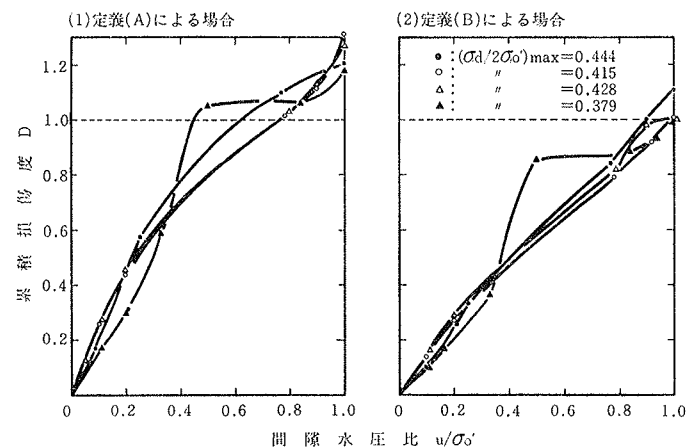
以上、6種類の地震波を用いた実験から、液状化過程における間隙水圧の推定に累積損傷度が適用できると言えそうである。なお、新潟地震波のような片側に特に大



図一5 間隙水圧比と累積損傷度の関係 (宮古-S)



図一6 間隙水圧比と累積損傷度の関係 (開北橋)



図一7 間隙水圧比と累積損傷度の関係 (新潟)

きな波が存在する場合には、定義(B)を用いて解析する方が良く、それ以外の比較的両側にちらばっているような波の場合には、定義(A)の振幅を用いて解析する方がよく合う。もし、実際の地盤において液状化を検討する

場合には、定義(A)を用いる方が累積損傷度は大きな値が得られ、安全側となって適用性も大きいであろう。

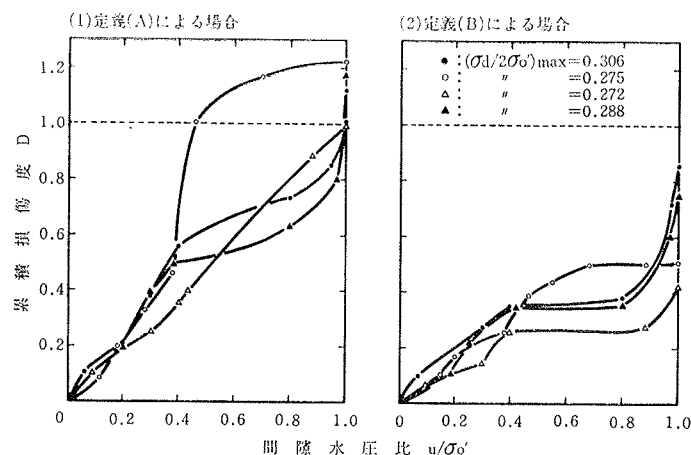
### 5. あとがき

昭和58年度より実施してきた不規則荷重を用いた液状化実験から、間隙水圧の蓄積過程を累積損傷度(材料の疲労の程度を表わすもの)によって推定できることが明らかとなった。また、不規則荷重の波形によっては応力振幅の定義をかえて解析することによって両者の対応がより良くなることもある。ただし、液状化に至る過程で両者の累積過程にかなりのバラツキのあること、あるいは、実験に用いた供試体の相対密度が60%のみであり、他の密度、例えば、非常に緩い場合とか非常に密な場合についても、この累積損傷度が適用できるかどうかなどは、今後の課題となる。

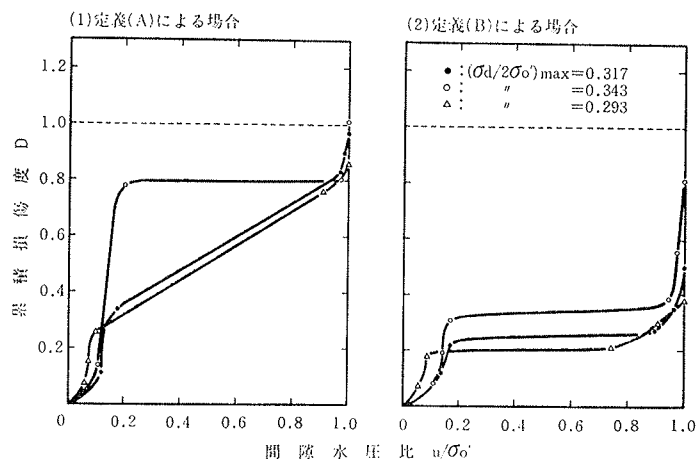
なお、実験あるいはデータ整理にあたっては、川崎地質(株)宮永良一、安部松昭充両氏の尽力に依るところが多い。末筆ながら深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

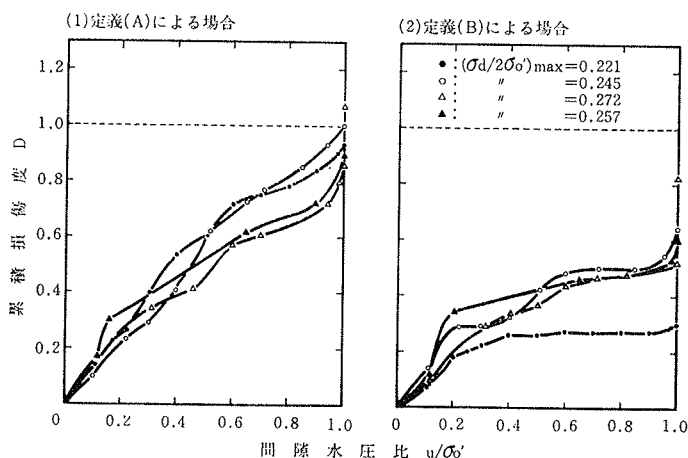
- 1) 平間, 松本: 不規則荷重条件下における液状化特性について, 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 124~128
- 2) 平間, 鳥井原, 松本: 間隙水圧の蓄積・消散を考慮した液状化解析について, 大林組技術研究所報, No. 31, (1985), pp. 69~103
- 3) Seed, H. B. and Martin, P. P.: APOLLO—A Computer Program for the Analysis of Pressure Generation and Dissipation in Horizontal Sand Layers during Cyclic or Earthquake Loading, EERC Report No. UCB/EERC-78/21, (Oct. 1978)
- 4) 吉見, 桑原, 橋場: 液状化した砂地盤における構造物の挙動と被害防止対策, 土と基礎, Vol. 23, No. 6, (1975), pp. 17~22
- 5) 龍岡, 他: 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



図—8 間隙水圧比と累積損傷度の関係 (板島橋)



図—9 間隙水圧比と累積損傷度の関係 (八戸)



図—10 間隙水圧比と累積損傷度の関係 (人工地震波)