

北海道大学 工学部 正員 ○ 鎌田 彰

〃 〃 〃 土岐 祥介

〃 大学院 学生員 下 倉 宏

[1] さえがき： 土の動的性質を研究する上で、地震のような不規則な大きさの繰返し載荷（不規則載荷。以後、I-載荷と呼ぶ）を、これと等価で規則的な一定の大きさの繰返し載荷（等価な規則載荷。以後、等価なR-載荷と呼ぶ）に換算する方法を調べることは重要な課題である。本報告は前報で報告した、I-載荷を体積変化の面からみて、これと等価なR-載荷に換算する方法の妥当性を実験的に確かめたものである。

[2] 実験方法： 繰返し載荷は、供試体の軸方向および半径方向に逆位相で大きさ σ_0 の矩形波形状繰返し応力を周期40秒で載荷するもので、詳細は参考文献1), 2)を参照していただきたい。ここで、ある初期間ゲキ ϵ_0 の処女供試体の静的排水（気）強度 $(\sigma_{vs}-\sigma_{vs0})$ と σ_0 とを、以下にかいては $R = \frac{\sigma_0}{(\sigma_{vs}-\sigma_{vs0})}$ で定義する無次元パラメーターで繰返し応力の大きさを表わすことにする。本実験では R を0.2~0.8の7種類とした。試料は気乾状態の豊浦標準砂 ($G_s=2.65$) で、供試体の ϵ_0 を0.72（密詰め、 $D_{r0}=71\%$ ）、0.82（緩詰め、 $D_{r0}=41\%$ ）の2種類とした。

[3] 実験結果と考察： 3-1. 繰返し載荷中の体積ヒズミ $\epsilon_{v,n}$ と載荷数 n との関係 R 一定の条件で、 n 回の繰返し載荷によつて生じる $\epsilon_{v,n}$ と n との間には、 a, b を定数として $\epsilon_{v,n} = a + b n \dots (1)$ と表わせる双曲線の関係が認められている。本実験では、この関係はおよそ30回まで認められた。^{(3), (4), (5)} 種々の R について、 a, b を求めると、それらの関係は C, p を定数として、 $b = C R^p \dots (2)$ 、 $a = 2b \dots (3)$ なる式で表わされる。従つて、式(1)は $\epsilon_{v,n} = R^{-p} \times \{2C(2+n)\} \dots (4)$ となる。 p は初期相対密度 D_{r0} に依らず-2.67で、 C は D_{r0} に依つて変わり、密詰めで24.7、緩詰めで7.5であった。種々の D_{r0} について、 $R=0.6$ の条件で行なつた実験から、 $p=-2.67$ として C を求めると、図-1に示すように C と D_{r0}^2 とは片対数紙上で直線関係にあり、 $C = 4.5 \times 10^{-1.42 D_{r0}^2} \dots (5)$ なる式で表わされる。式(4), (5)から明らかなように、 $\epsilon_{v,n}$ は R の2.67乗に比例して変化するので、 R の大小が $\epsilon_{v,n}$ に最も大きな影響を及ぼすことがわかる。

3-2. $\epsilon_{v,n}$ の面からみた等価な R と n との組合せの関係 $\epsilon_{v,n}$ の面からみて等価な R と n との組合せの関係を求める方法を次のように考えてみた。まず、式(4)から $\epsilon_{v,n}$ をパラメーターとして R と n との関係を計算する。これを模式図に示すと図-2のようになる。次に、同図の挿入図に示すように、 R_1, R_2, R_3 の順で変化する3波からなるI-載荷を考え、以下に示す手順で載荷数が同じで、体積ヒズミ ϵ_v の面からみて、これと等価なR-載荷に換算してみる。i), R_1 で1回の載荷を受けると $\epsilon_v = \epsilon_{v1}$ となり(A点)、これは R_3 で n 回の載荷(B点)と等価である。ii), 次に、 R_3 で1回の載荷を受けると $\epsilon_v = \epsilon_{v2}$ となり(C点)、これは R_2 で n 回の載荷(D点)と等価である。iii), さらに、 R_2 で1回の載荷を受けると $\epsilon_v = \epsilon_{v3}$ となる(E点)。iv), 結局、この3波からなるI-載荷を受けると ϵ_{v3} なる体積ヒズミが生じ、また、このI-載荷は R_{av} の3波からなるR-載荷(F点)と等価である。すなわち、これが上記のI-載荷と等価なR-載荷ということになる。しかし、上で述べた等価な R と n との組合せの関係を求めることができない場合がある。例えば、図-3の挿入図の $\epsilon_{v,n}$ をパラメーターとした R と n との関係を示す曲線形からわかるように、 $n = \infty$ 回でも R_0 で n 回の載荷が生じる $\epsilon_v = \epsilon_{v0}$ が生じない R がある。この限界の R を R_c とかくと、 R が R_c 以下の載荷では R_0 で n 回の載荷と等価な R と n との関係を求めることができない。この R_c と R_0, n との関係を示すのが図-4である。この図から、例えば、任意の R_0 で $n=6$ 回の載荷と等価な R と n との関係を求めるためには、 R が0.9 R_0 以上でなければならぬ。

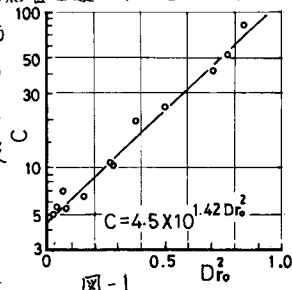


図-1

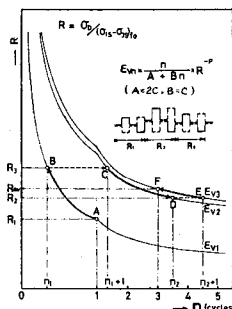
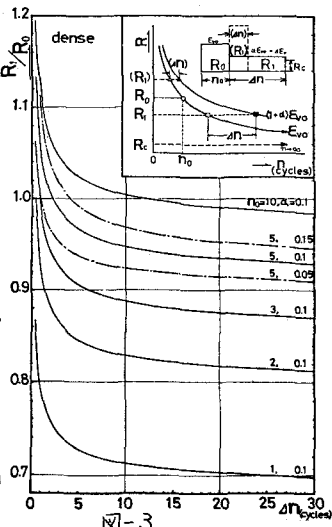


図-2

3-3, I-載荷における以前に受けたRとnの影響

これまで、I-載荷において大小の応力の順序はあまり考慮されていなかった。そこで、以前に受けたRとnとの影響を調べるために、図-3の挿入図に示すRが R_0 から R_1 に変化するI-載荷を考える。すなわち、最初の R_0 で n_0 回の載荷によ、て $E_{v0}=E_{v0}$ が生じ、次いでこれに引続く R_1 で Δn 回の載荷によ、て、さらに E_{v0} の α 倍の E_v が生じるとする。図-3は R_0, n_0, α および R_1 相互の関係を示したもので、実曲線は $\alpha=0.1, n_0=1\sim 10$ 回についての R_1/R_0 と Δn との関係を表わす。 α が同じ場合、同一の Δn における R_1/R_0 は n_0 が大きいほど大きくなる。 n_0, α を変えて計算した図-3と同様の図を用いれば、あるRでの繰返し載荷などのような E_v の増加をもたらすかと、以前に受けた R_0 と n_0 との関連において明らかにすることができる。この特別な場合が、3-2で述べた図-4に示す $\alpha=0, \Delta n=\infty$ 回とした場合である。



3-4, I-載荷における体積変化-実測値と推定値

図5の○印は密づめ供試体について行な、た、挿入図(a)に示すRが0.3, 0.5, 0.7の順でそれぞれ10回ずつ総計30回のI-載荷による E_v の実測値で、Rの変化に伴うメナレン補正を施してある。△印はこのI-載荷と等価なR載荷($R_{av}=0.675$)の実測値である。□印は挿入図(b)に示すRが0.7, 0.5, 0.3の順でそれぞれ10回ずつのI-載荷における実測値である。また、実線、一点鎖線、二点鎖線の曲線は各々のケースについての n と $E_{v,n}$ との関係を式(4)から求めた推定値である。多少の不一致はあるが、実測値と推定値とは比較的良く合、ており、○印と△印の $E_{v,30}$ もほぼ一致している。従、て、3-2, 3で述べた方法はほぼ妥当なように思われる。在来の方法は、液状化発生の面からみた繰返しせん断応力 τ_d と n との組合せの等価な関係を考察したものかほとんどである。例えば、Seedらは地震波の最大せん断応力 τ_{max} の0.65倍と等価平均せん断応力 $\bar{\tau}_d$ と考へた。小川らは τ_d と液状化発生に寄与する限界の (τ_{dc}) より大きな τ_d, n と液状化発生に要する τ_{dc} の載荷数とする時、 $\tau_{dc} = \frac{\sum (\tau_{di} \cdot \tau_{dc})}{\sum n_i \dots (6)}$ としている。その他、石原ら、Leeらの提案がある。本報告の方法は、総計 n 回のI-載荷で生じる体積ヒズミ $E_{v,n}$ が、同じく n 回の R_{av} なる大きさの繰返し載荷で生じるような等価なR載荷に換算するもので、式(4)から $R_{av} = \{C(2+n) \cdot E_{v,n} / n\}^{1/6} \dots (7)$ で表わされる。3-3で述べたように、図-3, 4からI-載荷にいて体積変化に貢献しないRの限界値を容易に決めることができ、式(4)で $E_{v,n}$ を決める過程にRの大小の順序も考慮し得る点に本方法の特色がある。例えば、図-5の挿入図(a), (b)に示すI-載荷の場合、 $E_{v,30}$ の計算値は(a)で0.0132, (b)で0.0130と僅かではあるが前者に差があり、式(7)から R_{av} は(a)で0.675, (b)で0.670とその値は異なる。しかし、Seedら、小川らの方法では本報告のRに相当する τ_d の大小の順序を考慮に入れることができないので、両者とも R_{av} は同一の値となる。等価な規則波に換算する在来の方法は、何れも関ゲキ水圧発生の面からみたもので、ここに述べた方法と直接比較することはできない。しかし、 Δu と E_v とは表裏一体にあるもので、この報告も液状化発生の限界等に関する基礎的資料として意味あるものと考えられる。

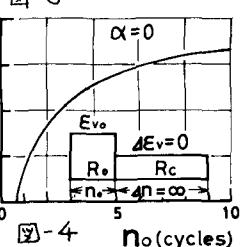


図5: A graph showing the relationship between E_v(n) and n (cycles) for different R values (0.3, 0.5, 0.7) and their average (0.675). The y-axis is E_v(n) (%) (0 to 2.0) and the x-axis is n (cycles) (0 to 30). The graph includes observed data points (circles, triangles, squares) and calculated curves (solid, dashed, dotted lines). An inset diagram shows the loading sequence: R0 for n0 cycles, then R1 for Δn cycles, resulting in a total of n0 + Δn cycles.

図-5の挿入図(a), (b)に示すI-載荷の場合、 $E_{v,30}$ の計算値は(a)で0.0132, (b)で0.0130と僅かではあるが前者に差があり、式(7)から R_{av} は(a)で0.675, (b)で0.670とその値は異なる。しかし、Seedら、小川らの方法では本報告のRに相当する τ_d の大小の順序を考慮に入れることができないので、両者とも R_{av} は同一の値となる。等価な規則波に換算する在来の方法は、何れも関ゲキ水圧発生の面からみたもので、ここに述べた方法と直接比較することはできない。しかし、 Δu と E_v とは表裏一体にあるもので、この報告も液状化発生の限界等に関する基礎的資料として意味あるものと考えられる。

(4) むすび: 体積変化の面からみて不規則載荷と等価な規則載荷との関係を求める方法について述べた。本報告は昭和52年本学卒業生高津忠、八谷好高両名の卒論研究の一部を取りまとめたもので、実験とデータ整理には両名に負うところが大きい。また、昭和51年度文部省科学研究費の補助を受けたことを記して謝意を表す。

(5) 参考文献: (1)土佐他(1976); 破産集 pp.85~86, (2)北澤他(1977); 通支部 技報集科 pp.13~22, (3)八木(1971); 研究発表会 pp.193~196
(4)八木(1972); 第7回土質工学会研究発表会 pp.297~300, (5)大岡(1975); 第10回土質工学会研究発表会 pp.193~196, (6)Seed et al (1971); ASCE, Vol. 97, SM 9, pp.1219~1273
(7)小川他(1976); 土質工学会論文報告集 No. 4, pp.77~83 (8)Ishihara et al (1975); Soils & Foundations, pp.45~59, (9)Lee et al (1972); Proc. ICHS-CRA, pp.609~627