

名古屋大学工学部 松澤 宏
 ○杉村 昌広
 名古屋大学大学院 木村 吉彦

まえがき： 土留め構造物近傍の地盤では、地震時において、構造物の受ける地震力によってもたらされる地盤に対する強制変位により、地盤は地震動による動的载荷と同時に、構造物による強制的な累積変形を受ける。このような地盤の動的挙動は、地震動の周期とその地震動の継続時間中に地盤に生じる累積変形量の影響を受けると考えられる。筆者らは、このような地盤での土の動的特性を知るために、動的三軸試験機により、一定速度の軸ひずみと一定振幅の繰返しせん断応力を作用させた場合（以下、「静的+繰返しせん断」）の飽和砂のせん断特性を調べてきた^{1), 2)}。ここでは、繰返し載荷周波数が、「静的+繰返しせん断」を受ける飽和砂の非排水せん断特性に及ぼす影響について報告し、さらに筆者らの提案する砂の応力～ひずみ関係式による検証を行う。

「静的+繰返しせん断」での非排水せん断挙動： 「静的+繰返しせん断」試験¹⁾では、飽和豊浦砂を用い、2.82%/minの軸ひずみと0.10Hzおよび0.20Hzの繰返し応力を、同時に供試体に作用させている。このときの非排水挙動については、載荷周波数が0.10Hzおよび0.20Hzの場合ともに、砂の初期密度およびせん断応力振幅により、①液状化が発生し、強度を失う場合、②液状化が発生するが、その後強度を回復しせん断破壊に至る場合、③液状化を起こさずにせん断破壊に至る場合の3種類の異なる様相を示した。

載荷周波数が非排水状態の「静的+繰返しせん断」特性に及ぼす影響： 繰返しせん断応力振幅比 $\Delta\sigma_d/2\sigma_{30}$ 、初期液状化までの繰返し載荷回数 N_{11} 、初期間隙比 e_0 を軸にとり、「静的+繰返しせん断」試験および「両振りせん断」試験での液状化強度面を表すと、図-1のようになる。(a)および(b)図はそれぞれ、「静的+繰返しせん断」における0.10Hzおよび0.20Hzの場合の液状化強度面であり、(c)図には、比較のため「両振りせん断」での液状化強度面を示した。

「静的+繰返しせん断」での液状化強度面は、 e_0 の変化に対して、0.10Hzの場合には約60°、0.20Hzの場合には、約90°のねじれが見られるが、「両振りせん断」での液状化強度面には、それほどねじれは見られない。また、「静的+繰返しせん断」での液状化強度面は図中のG'H'で示される境界があるが、「両振り

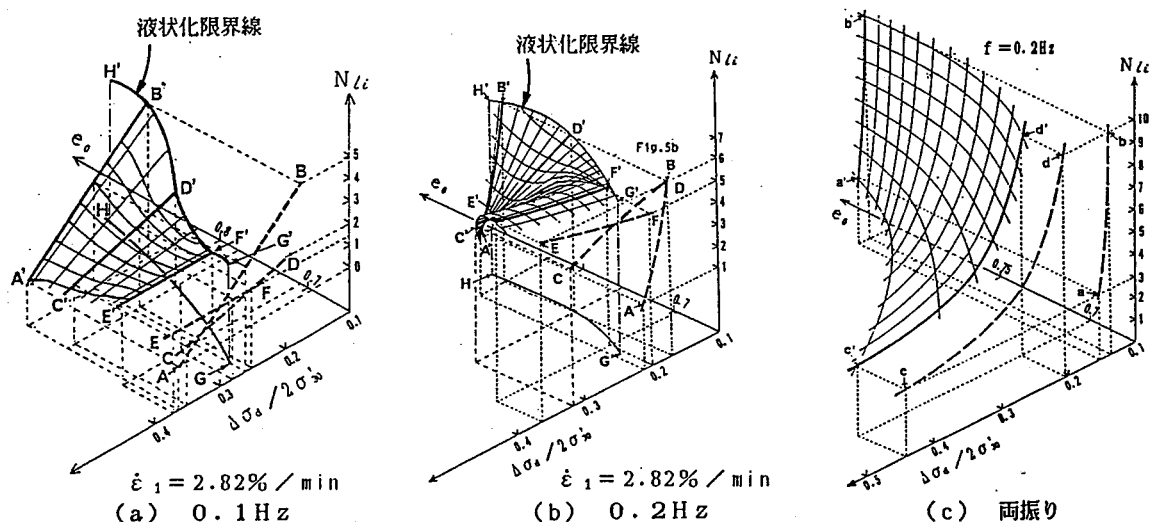


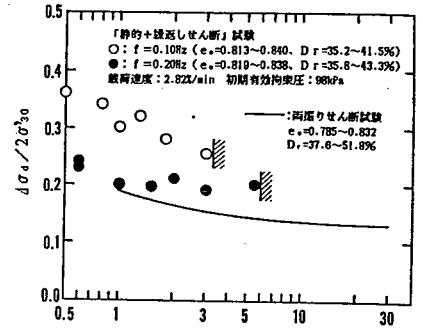
図-1

りせん断」の液状化強度面にはこのような境界線はない。

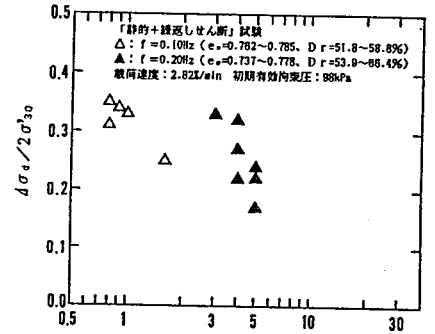
図-2に $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{11}$ 関係を示すが、これらの図は図-1のAB, CDおよびEFの $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{11}$ 平面への投影線に相当する。緩詰め砂の場合、0.10Hz, 0.20Hzともに右下がりの傾向を持つが、液状化強度は0.10Hzの方が0.20Hzのものよりもやや大きな値をとる。また、静的載荷速度 $\dot{\epsilon}_1 = 2.82\%/min$ の下では、0.10Hzの場合は $N > 3$ 、0.20Hzの場合は $N > 6$ での液状化の発生は見られなかった。さらに、「静的+繰返しせん断」での液状化強度は、「両振りせん断」でのものよりも全体が大きくなっている。密詰め砂の場合、0.10Hzでは、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ によらず、 N_{11} は一定の値になり、0.20Hzでは急な右上がりの傾向を示したが、いずれの場合にも「両振りせん断」での傾向とは異なっている。また初期液状化の発生は、0.10Hzでは $N = 2 \sim 3$ 、0.20Hzでは $N = 5 \sim 7$ に限られており、これ以外の繰返し載荷回数での液状化の発生は見られなかった。中密度の砂の場合、緩詰め砂と密詰め砂の中間的な傾向となった。

図-3は、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ を縦軸に、 e_0 を横軸にとり、「静的+繰返しせん断」時の初期液状化の発生の有無を表した図である。図中の○印は、完全液状化を生じた場合、●印は初期液状化後に強度回復をした場合、×印は液状化に至らずせん断破壊した場合を表す。各データに付した数字は、初期液状化までの繰返し載荷回数を表す。図中の実線は初期液状化を生じる限界強度を表すものであり、図-1の液状化強度面の境界線G'H'の $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim e_0$ 平面への投影線GHに対応する。図-3(a)および(b)より、液状化限界線は、0.10Hzの場合の方が、0.20Hzの場合に比べて上方に位置している。

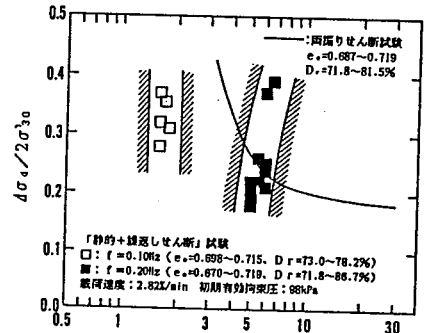
これらの傾向は、静的軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ が $2.82\%/min$ で同じとき、0.10Hzの場合は0.20Hzの場合に比べて、同一載荷回数の繰返しせん断における発生せん断ひずみが大きくなり、砂のダイレイタンスー効果がより顕著になるためと考えられる。



(a) 緩詰め砂

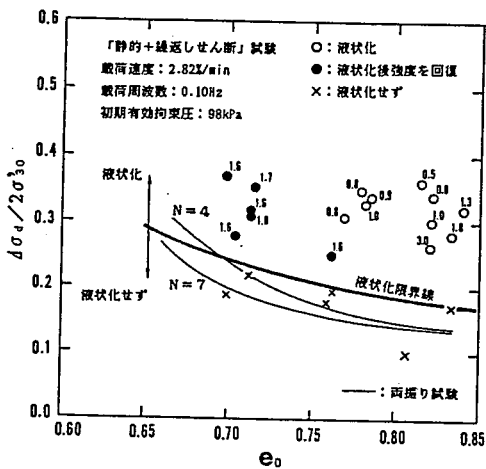


(b) 中密度の砂

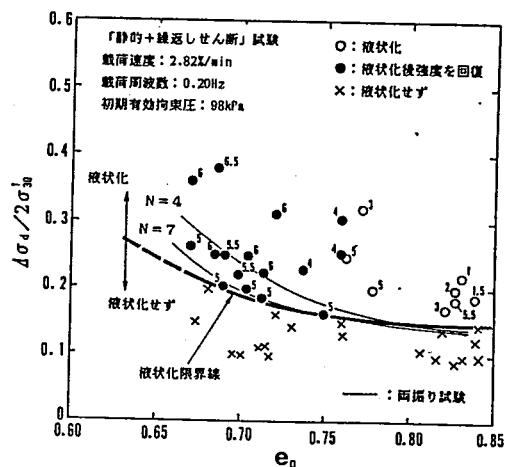


(c) 密詰め砂

図-2



(a) 0.1 Hz



(b) 0.2 Hz

図-3

砂の応力～ひずみ関係式： 筆者らの提案した砂の繰返し応力～ひずみ関係式は、軸対称状態において、次式で表される³⁾。

$$\tau = \int \mu(z-z') \frac{\partial \gamma^p}{\partial z'} dz' = \sqrt{\frac{3}{2}} \int \mu(z-z') (-1)^n f(z') dz' \quad (1)$$

- ここに、 τ : せん断応力, p' : 有効平均応力, γ^p : 塑性せん断ひずみ
 $\mu(z)$: 接線弾性係数に相当する関数 ($\mu(z) = G_0 p'^m (\rho_0 \delta(z) + \sum \rho_1 e^{-B_1 r z})$)
 $f(z)$: 硬化関数 ($f(z) = \beta + (1-\beta) e^{-\kappa z}$)
 z : intrinsic time scale ($dz = \sqrt{de^{p_{ij}} \cdot de^{p_{ij}}} / f(z)$)
 n : 偶数の時、載荷。奇数の時、除荷。
 $G_0, \rho_0, \rho_1, B_1, \beta, \kappa$: 材料パラメータ¹⁾ (値を表-1に示す)。

また、せん断による塑性体積ひずみ増分は次式のように表される¹⁾。

$$d\varepsilon_d = \frac{\sqrt{2}}{3} \{ \lambda(\xi) - \sqrt{8}(\tau/p') \} d\gamma^p \quad (2)$$

排水状態および非排水状態での「静的繰返しせん断」試験による検討の結果、非排水状態での間隙水圧は次式で表現される。

$$d\varepsilon_v = A \frac{dp'}{p'} \quad \text{あるいは} \quad d\varepsilon_v = A \frac{dp - du}{p'} \quad (3)$$

ここに、Aは間隙水圧パラメータであるが、これについてはせん断応力レベル q/p' によって、表-2に示すような値を用いた。

表中の $(q/p')_{PT}$ は変相応力比である。

「両振りせん断」および「静的+繰返しせん断」への適用： 式(1)~(3)を「両振りせん断」および「静的+繰返しせん断」に適用した例をそれぞれ、図-4および図-5, 6に示す。(a)図はせん断応力～せん断ひずみ関係、(b)図は間隙水圧～せん断ひずみ関係、(c)図は有効応力経路を表す。これらの図に示す実測値と計算値は、いずれの載荷経路においても良く合致している。

次に、繰返し載荷周波数が「静的+繰返しせん断」時の液状化特性に及ぼす影響について、式(1)~(3)を用いて予測した結果を示す。図-7は、繰返しせん断応力比 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{v0}$ と初期液状化までの繰返し載荷回数 N_{11} の関係について、実測値と計算値を表したものであり、(a)~(c)図はそれぞれ、緩詰め砂、中密度の砂および密詰め砂の場合である。これらの図より、式(1)~(3)は、載荷周波数による液状化強度の違いをかなり良く表現していることがわかる。

さらに図-8は、図-3の初期液状化を生じる限界強度線について、式(1)~(3)による計算値を表したものであるが、載荷周波数による液状化強度の違いはかなり良く表現されている。

表-1 材料パラメータ

| | |
|----------|----------|
| G_0 | 1000 |
| ρ_0 | 0.000001 |
| ρ_1 | 0.15 |
| B_1 | 390 |
| ρ_2 | 0.020 |
| B_2 | 40 |
| β | 55 |
| κ | 250 |

表-2 間隙水圧パラメータA

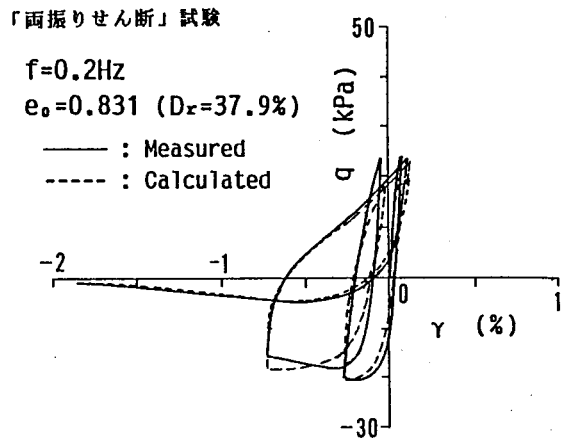
| | q/p' | A |
|---------|------------------------|--------------------|
| 処女載荷過程 | $0.0 \sim (q/p')_{PT}$ | $0.46 e_0 + 0.45$ |
| | $> (q/p')_{PT}$ | $-3.70 e_0 + 2.81$ |
| 繰返し載荷過程 | $0.0 \sim (q/p')_{PT}$ | $0.70 e_0 - 0.68$ |
| | $> (q/p')_{PT}$ | $-0.22 e_0 + 0.24$ |
| | $(q/p')_{PT} \sim 0.0$ | $0.65 e_0 - 0.52$ |
| | $0.0 \sim -0.3$ | $2.31 e_0 - 1.63$ |
| | $-0.3 \sim 0.0$ | $0.04 e_0 - 0.65$ |

あとがき：「静的+繰返しせん断」を受ける飽和砂の非排水せん断特性は、繰返し载荷周波数の影響を強く受けることが明らかになった。試験での载荷周波数は、実地震動に比べてかなり小さいが、本研究で明らかになった飽和砂の非排水せん断特性の周波数依存性が、土留め構造物近傍の地盤においては地震動周期および累積変形量に依存する形で現れる可能性があり、今後の検討課題である。

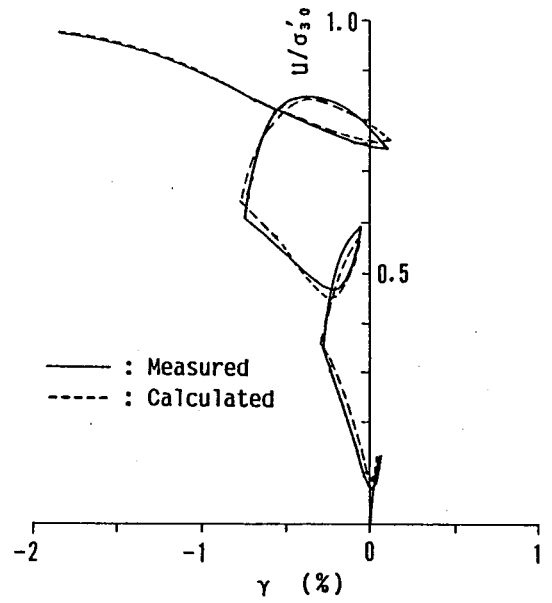
式(1)~(3)によって、「静的+繰返しせん断」を含む種々の载荷経路での砂の挙動が表現されるようになった。今後は、この構成式を動的解析などに適用し、その有効性を検討していく必要がある。

<参考文献>

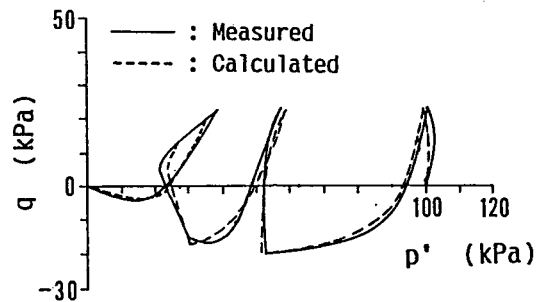
- 1)松澤・杉村・山田：「静的+繰返しせん断」を受ける飽和砂の液状化特性、第25回土質工学研究発表会、pp.729-732, 1990.
- 2)松澤・杉村・山田：繰返し载荷経路が飽和砂のせん断特性に及ぼす影響、第25回土質工学研究発表会、pp.733-736, 1990.
- 3)松澤・杉村：ひずみ履歴を考慮した砂の繰返し応力~ひずみ関係、土木学会第42回年次学術講演会, 3, pp.242-243, 1987.



(a)



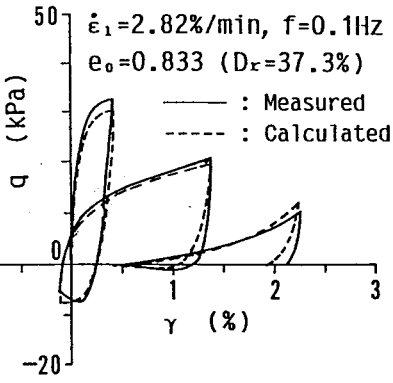
(b)



(c)

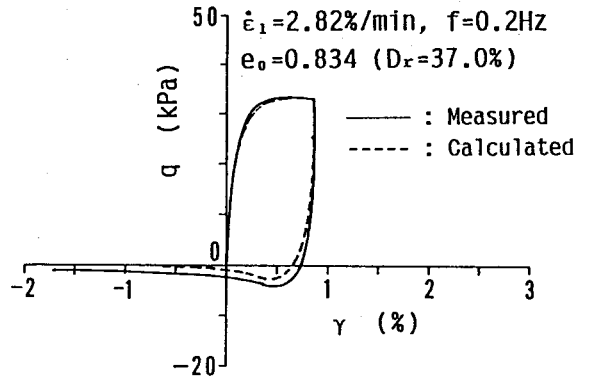
図-4

「静的+繰返しせん断」試験

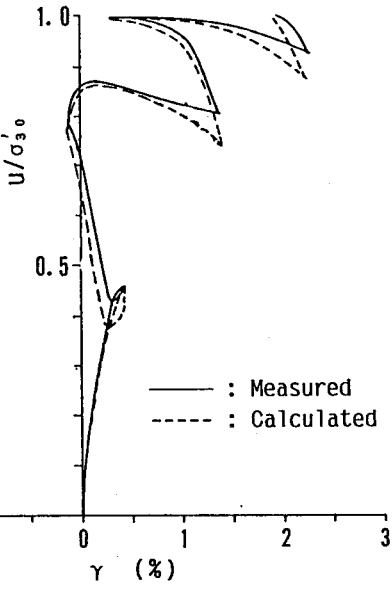


(a)

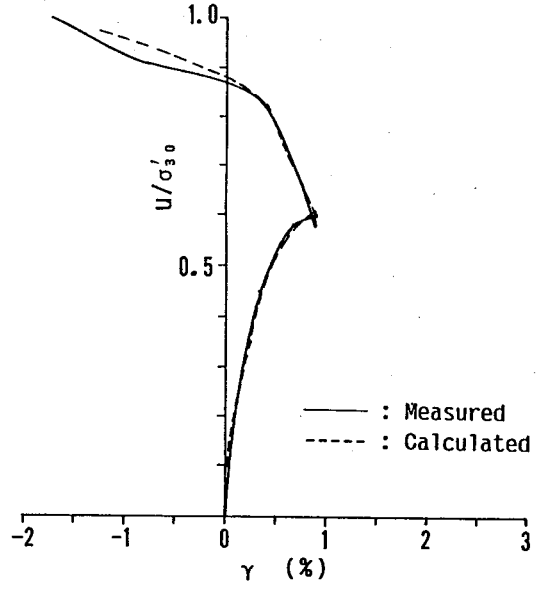
「静的+繰返しせん断」試験



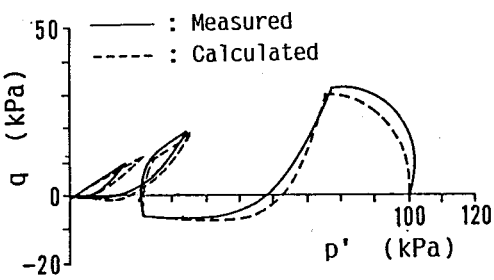
(a)



(b)

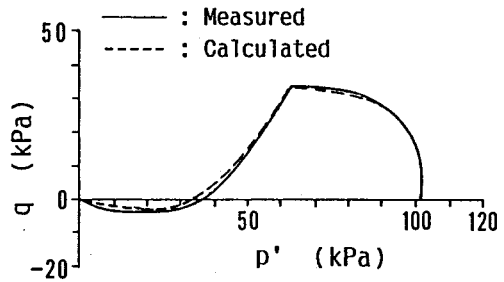


(b)



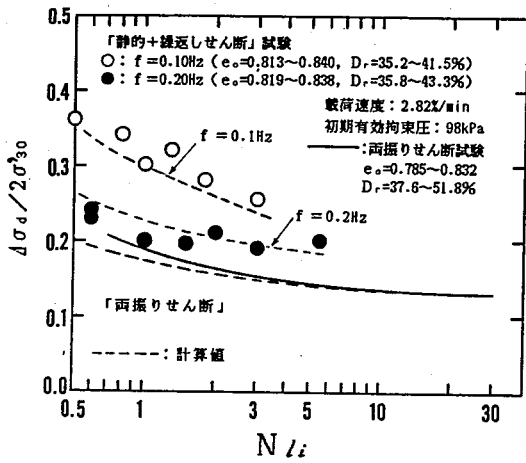
(c)

☒-5

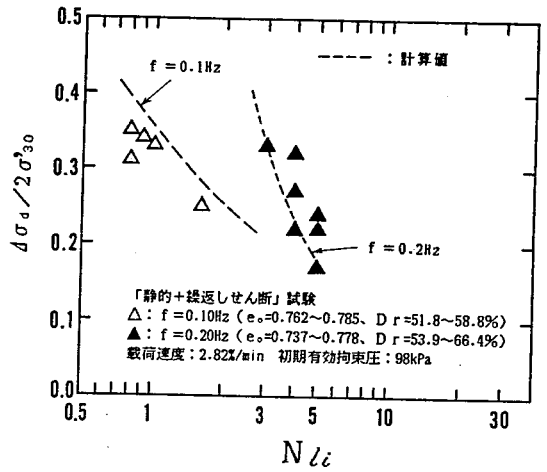


(c)

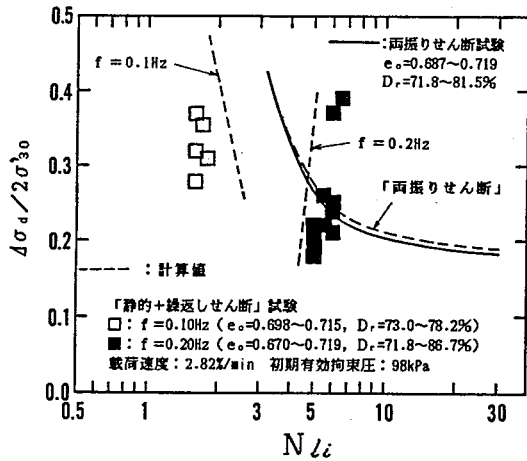
☒-6



(a) 緩詰め砂

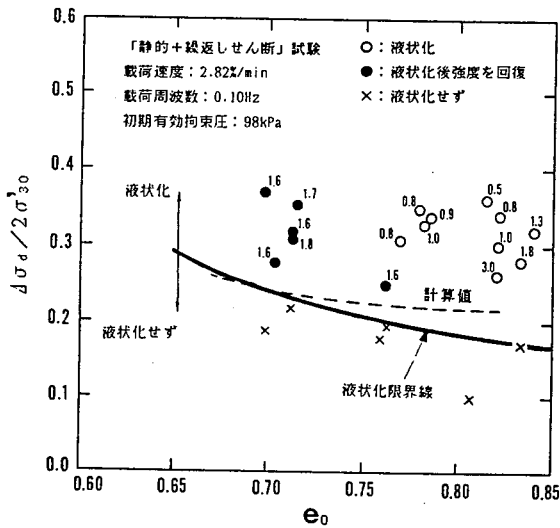


(b) 中密度の砂

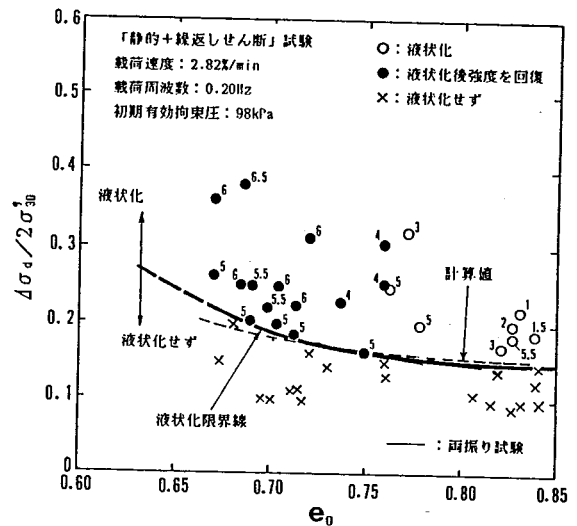


(c) 密詰め砂

図-7



(a) 0.1 Hz



(b) 0.2 Hz

図-8