

極低圧下での砂の動的変形特性 III

— 経 験 式 —

Dynamic Deformation Properties of Sand at Extremely Low Pressures

— Empirical Relations —

孔 憲 京*・龍 岡 文 夫**・プラダシ, テーシ B. S. **・田 村 重 四 郎***

KONG Xian Jing, Tej B. S. PRADHAN, Fumio TATSUOKA and Choshiro TAMURA

1. は じ め に

前回^{13),14)}までに報告した実験結果に基づいて $G, h \sim \sigma'_m, e, \gamma$ 関係についての経験式を導びいて若干の検討を行った。あわせて不飽和供試体(含水比 $w_0=1.82 \sim 1.88\%$)と空気乾燥供試体($w_0=0.5\%$)の G の値の比較を行った。

2. せん断変形係数 G の経験式

$\sigma'_c=0.012 \sim 0.80 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲での空気乾燥砂($w_0=0.5\%$)の $G \sim \gamma$ 関係を求めた(図 13)。ただし、 $\sigma'_c=\sigma'_m=0.30 \text{ kgf/cm}^2$ では実験を 2 回行い、以降の解析ではこれらの平均値を用いた。図 6¹⁴⁾と図 13 から、 $\gamma=10^{-6}$ 、

$10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$ のときの G の値を読み取り、 $G / (2.17-e)^2 / (1+e) \sim \sigma'_m = (\sigma'_a + 2\sigma'_r) / 3 = (\sigma'_a + 2\sigma'_c) / 3$ 関係を両対数グラフ上にプロットした(図 14, 15)。これを見ると不飽和砂($w_0=1.82 \sim 1.88\%$)の場合は、 $\gamma=10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲では $\log G / (2.17-e)^2 / (1+e) \sim \log \sigma'_m$ 関係は大略 $\sigma'_m=0.3 \text{ kgf/cm}^2$ を境にして 2 つの直線関係

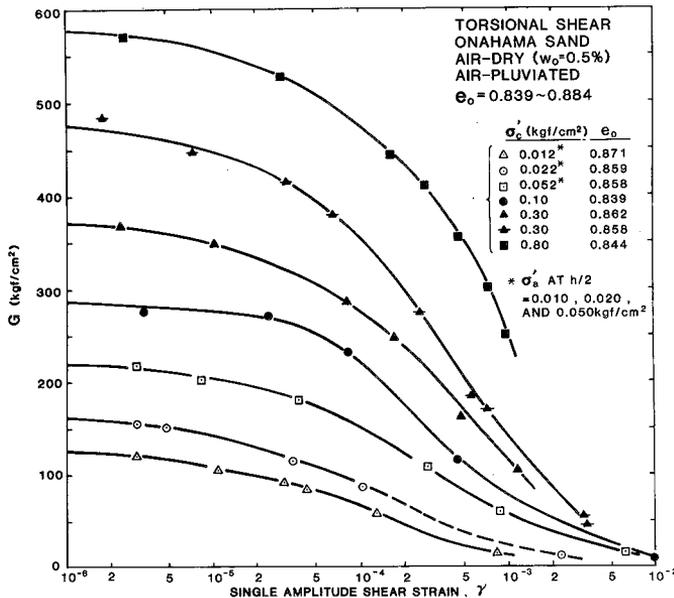


図 13 空気乾燥供試体の $G \sim \gamma$ 関係に与える拘束圧の影響

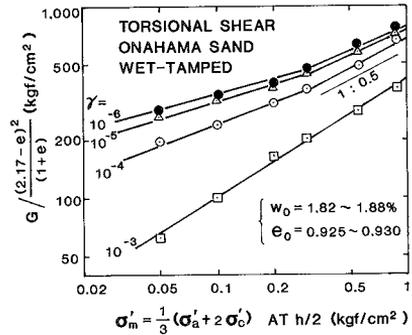


図 14 不飽和小名浜砂 ($w_0=1.82 \sim 1.88\%$) の $\log\{G / (2.17-e)^2 / (1+e)\} \sim \log \sigma'_m$ 関係

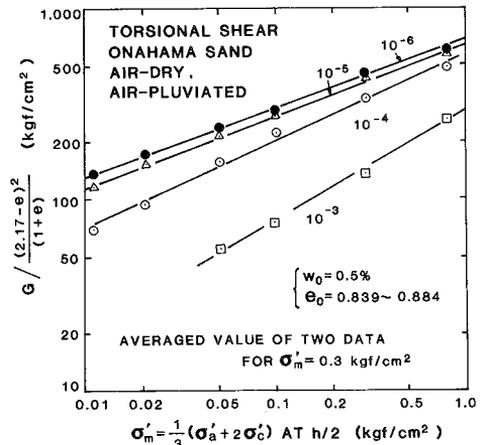


図 15 空気乾燥小名浜砂 ($w_0=0.5\%$) の $\log\{G / (2.17-e)^2 / (1+e)\} \sim \log \sigma'_m$ 関係

* 中華人民共和国大連工学院 (元客員研究員)

** 東京大学生産技術研究所 第 5 部

*** 東京大学生産技術研究所 第 1 部

研究速報

であらわされることがわかる。また、図14、図15を比べると全体的に同一の e, γ, σ'_m の値に対する G の値は $w_0 = 1.82 \sim 1.88\%$ (不飽和)のときのほうが $w_0 = 0.5\%$ (空気乾燥)のときよりもやや大きいことがわかる。両者の値の比は σ'_m が小さいほうが、やや大きくなるようである。

今、小名浜砂についても経験式として、 $A(\gamma), m(\gamma)$ を γ の関数として、

$$G = A(\gamma) \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma'_m m(\gamma) \quad (18)$$

が適用できるとする。この式は $\sigma'_m = 0.25 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の拘束圧に対して飽和および空気乾燥豊浦砂のねじりせん断試験から求めた経験式である¹²⁾。図16に今回の実験で求めた $m(\gamma)$ の値を示す。ただし、不飽和砂($w_0 = 1.82 \sim 1.88\%$)の $\sigma'_m = 0.3 \sim 0.84 \text{ kgf/cm}^2$ での $m(\gamma)$ の精度の高い値は求められなかったため、この値は図16にプロットしていないが、図14に示すように、 $\gamma = 10^{-4}$ で大略 $m(\gamma) = 0.5$ 前後になる。図16には上述の豊浦砂の

データも示してある(図17参照)。

図16から次のことがわかる。

(1) 不飽和小名浜砂の $m(\gamma)$ は $\sigma'_m < 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ のときは空気乾燥小名浜砂の $m(\gamma)$ よりも小さい。

(2) 空気乾燥小名浜砂の $m(\gamma)$ は $\sigma'_m = 0.11 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2, \gamma = 10^{-6} \sim \gamma = 10^{-4}$ の範囲で豊浦砂の $m(\gamma)$ の値とほぼ似た値となる。なお、岩崎・龍岡・高木¹⁵⁾によると中圧域での $m(\gamma)$ は砂の種類にあまりよらない。

したがって、 $\sigma'_m < 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ という極低圧下での空気乾燥小名浜砂の G の拘束圧(σ'_m)依存性は、 $\sigma'_m = 0.25 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ という中圧域での豊浦砂の G の拘束圧(σ'_m)依存性とよく似ているが、不飽和小名浜砂の G の拘束圧(σ'_m)依存性はより小さくなるといえる。

G のひずみ依存性は次の2つの形であらわしうる。

$$G/G_0 = f(\gamma) \cdot \sigma'_m m'(\gamma) \quad (19)$$

ただし、 G は γ に対する値、 G_0 は $\gamma = 10^{-6}$ のときの G の値、 $m'(\gamma) = m(\gamma) - m(\gamma = 10^{-6})$ である¹⁵⁾。

$$G/G_0 = g(\gamma/\gamma_{0.5}) \quad (20)$$

ただし、 $\gamma_{0.5}$ は $G/G_0 = 0.5$ になるときの γ の値であり、 σ'_m, e 等の関数である。仮に、 $G \cdot \gamma (= \tau) \sim \gamma$ 関係が双曲線関係であらわされれば、(20)式は、

$$G/G_0 = 1/(1 + \gamma/\gamma_{0.5}) \quad (21)$$

となる。

今、(20)式を用いる場合を考える。図18、図19に、不飽和小名浜砂と空気乾燥小名浜の $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係を示す。 $\gamma_{0.5}$ の値は図20に示す。図18と図19中の実線は同一のもので、岩崎・龍岡・高木¹²⁾が今回と同様な中空供試体を用いて、ねじり試験により豊浦砂を含む13種の砂について $\sigma'_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に対して求めた平均的関係である。不飽和および空気乾燥小名浜砂の $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$

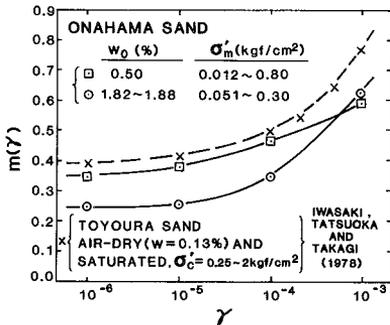


図16 小名浜砂の $m(\gamma)$

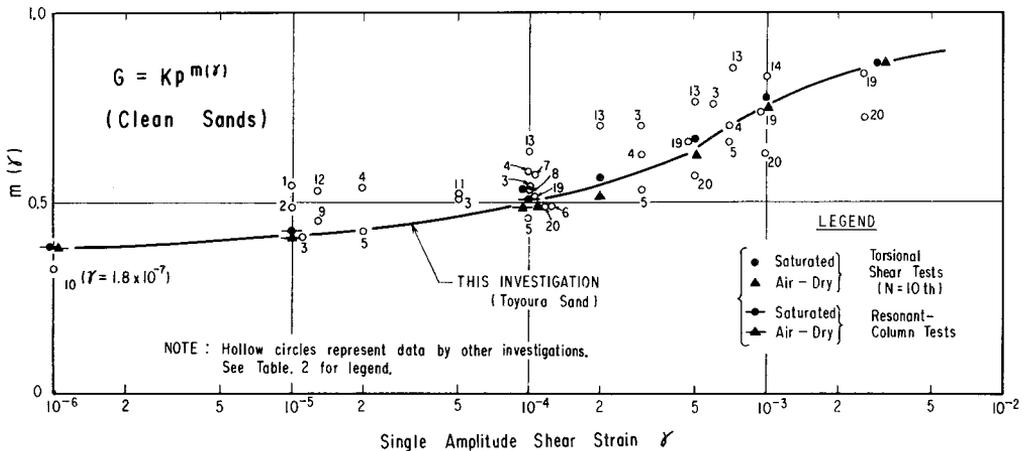


図17 中圧域での豊浦砂を含むきれいな砂の $m(\gamma)$ (岩崎・龍岡・高木¹²⁾の図12)

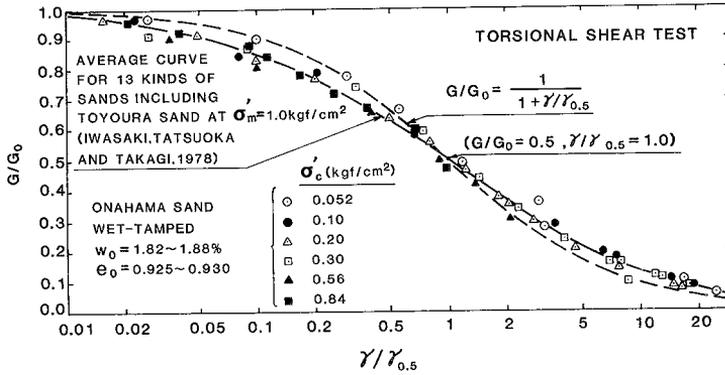


図 18 不飽和小名浜砂の $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係 (実線は岩崎・龍岡・高木¹²⁾の図 17 参照)

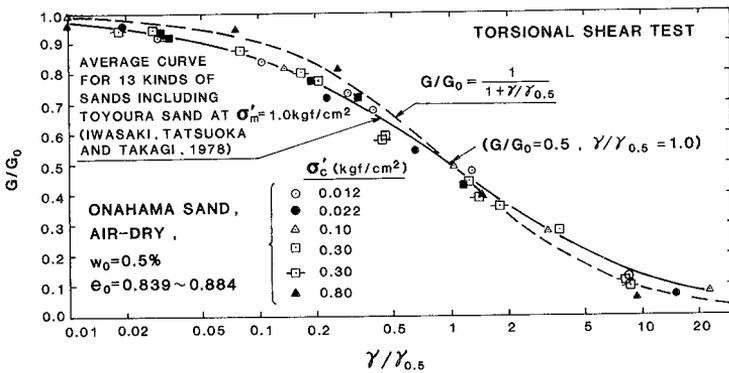


図 19 空気乾燥小名浜砂の $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係

関係は上述の関係と非常によく似ているといえよう。したがって、この $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係は拘束圧、 w_0 の値 (0.5% または 1.82~1.88%)、砂の種類によらないかなり安定した関係であることがわかる。したがって、この関係を利用すると好都合な場合が多いであろう。図 18、図 19 中の破線は双曲線関係 (21) 式をあらわしており、今回のデータはややこれとは異なっていることがわかる。

図 20 には $\gamma_{0.5}$ の値を示しているが、 $\gamma_{0.5} \sim \sigma'_m$ 関係は単純ではないことがわかる。今回得られたデータだけでは $\gamma_{0.5}$ と拘束圧、含水比の関係の全体像は把握できないが、豊浦砂の結果 (図中の×印) と合わせて考えると、次のように判断できよう。

(1) $w_0 = 1.82 \sim 1.88\%$ に対しては、 $\sigma'_m < 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で、また $w_0 = 0.5\%$ に対しては $\sigma'_m < 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で

$$\gamma_{0.5} = 0.00146 \times \sigma_m'^{0.58} \quad (\sigma'_m; \text{kgf/cm}^2) \quad (22)$$

が適用できそうである。この σ'_m に対するべき 0.58 は中圧域での空気乾燥と飽和豊浦砂に対しての値とよく似ている。

(2) σ'_m の増加に伴って、(22) 式をあらわす直線関係

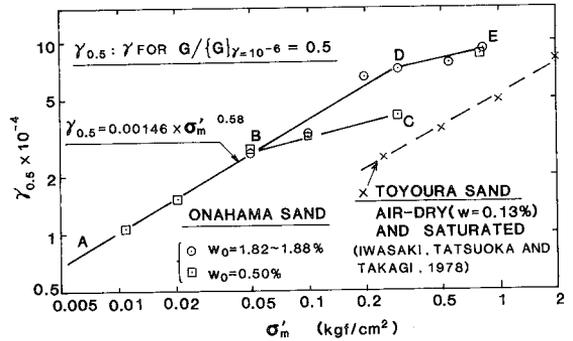


図 20 小名浜砂の $\gamma_{0.5}$

ABD から $\gamma_{0.5} \sim \sigma'_m$ 関係が逸脱する σ'_m の値は w_0 の値によるようである。

今後、さらに広い範囲の σ'_m, w_0 に対しての実験を行い、 $\gamma_{0.5} \sim \sigma'_m, w_0$ 関係の全体像を明らかにする必要がある。

一方、 e と σ'_m の値から (19), (20), (21) 式における G_0 の値を求めるには、図 16 から $\gamma = 10^{-6}$ に対する $m(\gamma)$ と、図 21 から $\gamma = 10^{-6}$ に対する $A(\gamma)$ の値を求めればよい。

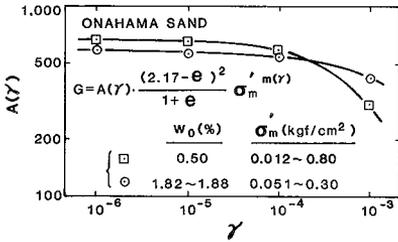


図21 小名浜砂の $A(\gamma)$ の値

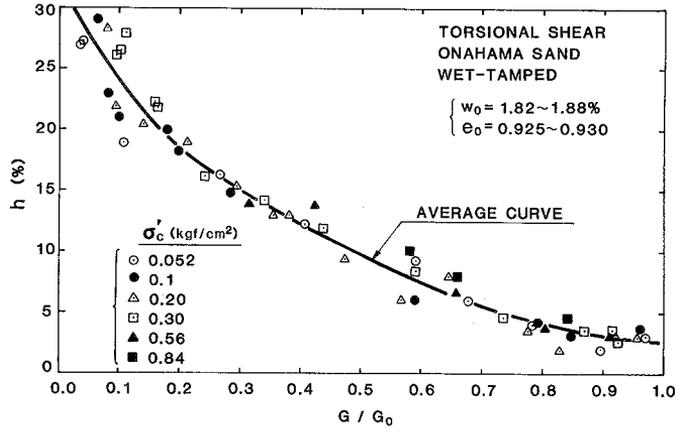


図22 不飽和小名浜砂の $h \sim G/G_0$ 関係

3. $h \sim G/G_0$ 関係

図22に $w_0 = 1.82 \sim 1.88\%$ の不飽和小名浜砂の $h \sim G/G_0$ 関係を示す。すでに豊浦砂について知らされているように、この場合も $G/G_0 \sim h$ 関係は σ'_m の値によらないといえる。したがって、 G/G_0 の値が求まっているときは、図22に示す平均的關係を用いて、 h の値を求めることができる。

4. ま と め

極低圧下における不飽和小名浜砂の微小変形時の繰り返し変形特性を、実験精度に特に注意を払って実験的に研究した。その結果、極低圧下においては上記の変形特性は含水比の影響を受けることがわかった。

- (1) 拘束圧が低いときほど、すなわち、少なくとも $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲で同一の σ'_m, γ, e に対する G の値は $w_0 = 1.82 \sim 1.88\%$ のときのほうが、 $w_0 = 0.5\%$ のときよりも相対的に大きくなる。
- (2) $\sigma'_m < 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ での G の拘束圧 (σ'_m) 依存性は $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲で $w_0 = 1.82 \sim 1.88\%$ のときのほうが $w_0 = 0.5\%$ のときよりも小さい。一方、 $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲での $w_0 = 0.5\%$ のときの拘束圧依存性は $\sigma'_m = 0.25 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ に対する空気乾燥 ($w_0 = 0.13\%$) と飽和の

豊浦砂を含む他の砂の拘束圧依存性と類似している。

一方、極低圧下の変形特性は次の点で中圧域での豊浦砂を含む多くの種類の砂の変形特性と類似していることがわかった。

- (1) 小名浜砂の $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係 (G_0 は $\gamma = 10^{-6}$ のときの G 、 $\gamma_{0.5}$ は $G/G_0 = 0.5$ になるときの γ) は、双曲線関係とやや異なっているが、拘束圧、 w_0 の影響を受けず、また、 $\sigma'_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ における13種の砂に対する平均的關係ときわめて似ている。
- (2) $h \sim G/G_0$ 関係は拘束圧の影響を受けない。
- (3) $w_0 = 0.5\%$ の小名浜砂の G の値は $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲で大略 $\sigma'_m^{0.4 \sim 0.5}$ に比例する。

(1985年11月19日受理)

参考文 献

- 13) プラダン, テージ B. S. ・孔憲京・龍岡文夫・田村重四郎 (1986), “極低圧下での砂の動的変形特性—実験方法の検討—”, 生産研究, 38巻2号, 24~27頁。
- 14) 孔憲京・プラダン, テージ B. S. ・龍岡文夫・田村重四郎 (1986), “極低圧下での砂の動的変形特性—実験結果—”, 生産研究, 38巻2号, 28~31頁。
- 15) Tatsuoka, F., Iwasaki, T. and Takagi, Y. (1978), “Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus,” Soils and Foundations, Vol. 18, No. 2, June, pp. 25-40.