

砂のランダム繰返し入力に対する応力-歪関係の モデル化について (II)

Stress-Strain Relation of Sand for Irregular Cyclic Excitation (II)

龍岡 文夫*・福島 伸二*

Fumio TATSUOKA and Shinji FUKUSHIMA

1. ま え が き

前報告¹⁾では修正Ramberg-Osgood モデルのパラメータの決定法とランダムなせん断応力履歴に対して連続的な履歴曲線が描けるようにするための個々の履歴曲線の乗り移り法則を示した。今報告では、骨格曲線として双曲線を用いているHardin-Drnevich モデルをランダムな繰返し载荷に対して用いることのできるように修正した力学モデルの検討を行った結果を報告する。

2. 修正 Hardin-Drnevich モデル

このモデルの骨格曲線は次式で表される。なお、もとのモデルを、ここでは修正しているので、修正H-Dモデルと呼ぶことにする。(参考文献は前報告¹⁾を参照されたい)。

$$\tau = G_{\max} \gamma / (1 + |\gamma / \gamma_r|) \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで } \gamma_r &= \tau_{\max} / G_{\max}, \\ \tau_{\max} &\text{ は } \gamma \rightarrow \infty \text{ のときの } \tau, \\ G_{\max} &\text{ は } \gamma = 0 \text{ のときの } G \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

また(13)式から $G = \tau_0 / \gamma_0$ と G_{\max} の関係は

$$G / G_{\max} = 1 / (1 + |\gamma_0 / \gamma_r|) \quad (15)$$

となる。 γ_r は $G / G_{\max} = 1/2$ になるときの γ の値であることが分かる。(14)式から τ_{\max} と G_{\max} から γ_r が決まるが、これが実測の $\gamma_{0.5}$ (G / G_{\max} が 0.5 になるときの γ) と一致するとは限らないので次のようにして γ_r を決めるとよいであろう。

1) τ_{\max} が問題になるときは (たとえば大歪領域のとき) τ_{\max} を正確に決定し $\gamma_r = \tau_{\max} / G_{\max}$ とする。

2) $G / G_{\max} \sim \gamma$ 関係を正確に求めたい場合には (τ_{\max} を問題にしないとき) $\gamma_r = \gamma_{0.5}$ とする。

Fig. 5¹⁾ に $\gamma_r = \gamma_{0.5} = 4.2 \times 10^{-4}$ としたときのこのモデルの(15)式の曲線を示す。(*)は前報告¹⁾に載せてある。以下同様。) また、このモデルの履歴曲線の基本式は、

$$\frac{\tau - \tau_0}{2} = G_{\max} \frac{\gamma - \gamma_0}{2} / (1 + |\frac{\gamma - \gamma_0}{2\gamma_r}|) \quad (16)$$

で表される。したがって、修正H-Dモデルによる減衰比 h は多少の計算により

$$h = \frac{2}{\pi} \left[\frac{1+X}{1-X} + \frac{2X}{(1-X)^2} \ln X \right], \quad X = \frac{G}{G_{\max}} \quad (17)$$

となる。この関係を Fig. 4¹⁾ に示す。このモデルによる

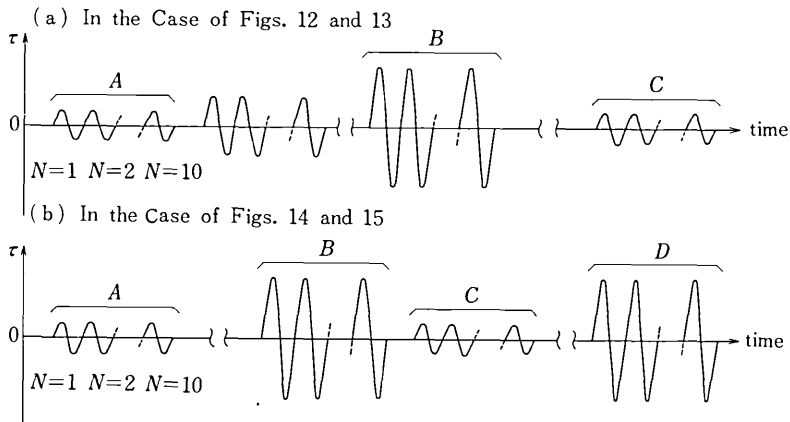


Fig. 11 繰返しせん断応力履歴の説明 ($f = 0.1$ cps)

* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報
 h と G/G_{max} の関係は一義的に決まり、 $G=0$ のときは $h=2/\pi$ となり、あり得る最大の h の値、すなわち剛完全塑性体の h と等しくなる。このモデルでは $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係は実測とよい一致をみせているが、 $h \sim G/G_{max}$ 関係は実測と比べると G/G_{max} が小さいと h が大きくな

りすぎる傾向があることがわかる (Fig. 4^{*)}。
 ランダム入力に対して解析するには修正 $R-O$ モデルと同様の方法で行うことができる (Fig. 6^{*)}, (Fig. 7^{*)}。またこのモデルでも履歴曲線の作るヒステリシスループの割線剛性率 G および減衰比 h はこのヒステリシスループ

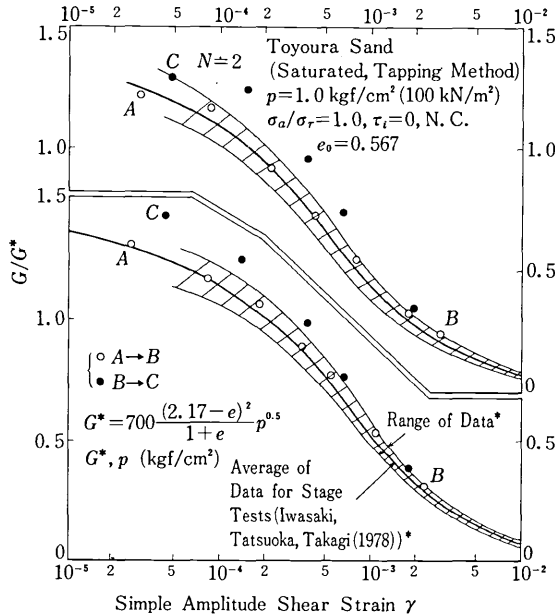


Fig. 12

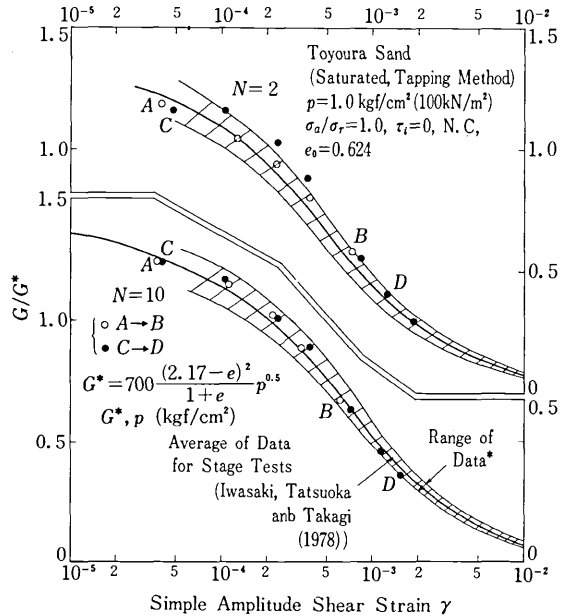


Fig. 14

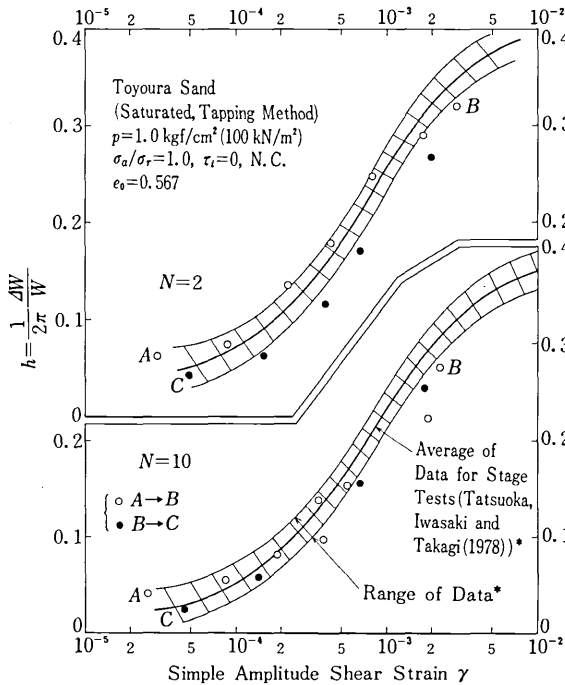


Fig. 13

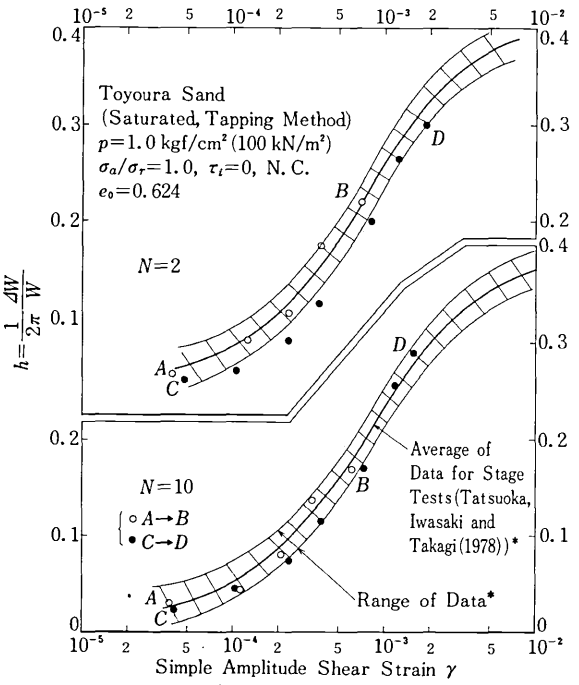


Fig. 15

プの位置によらないという結果になるので、この場合もこの点で実験結果と矛盾しない。

以上示した修正 $R-O$ モデル、修正 $H-D$ モデルの骨格曲線の基本式 (3) 式⁹⁾、(13) 式と履歴曲線の基本式 (4) 式⁹⁾、(16) 式は共に有効応力が変化する場合に変化してゆくことに注意しなければならない。たとえば、両者に共通のパラメーターである $G_{max} = \{G\}_r = 10^{-6}$ は、きれいな砂では平均的に、

$$\{G\}_r = 10^{-6} = 900 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} p^{0.4} \quad (18)$$

で表される。³⁾ ここで e は間隙比、 p は平均有効主応力 (kg/cm^2) である。また τ_{max} も p の関数である。

両モデルで p が一定の場合には骨格曲線の式および、履歴曲線の基本式に対する応力履歴、歪履歴の影響は以下に示すように重要ではないと考えられる。Fig. 12 ~ Fig. 15 は、Fig. 11 のような応力履歴に対する G と h の実測値を示すものである。この場合は $\sigma_a/\sigma_r = 1.0$ である。これらの図で \circ 印のデータは以前により大きな繰返しせん断履歴を受けていないときのデータで \triangle 印のデータは以前により大きな繰返しせん断履歴を受けているときのデータである。図から分かるように、以前に受けた大きな繰返しせん断応力履歴によって、 G はやや増加し、 h はやや減少する。特に繰返し回数が小さいほどこの傾向は強い。しかし、その変化量は一般の応答解析に取り入れなければならないほど大きくはないと思われる。換言すれば、 p 、 e が大きく変わらなければ両モデルの骨格

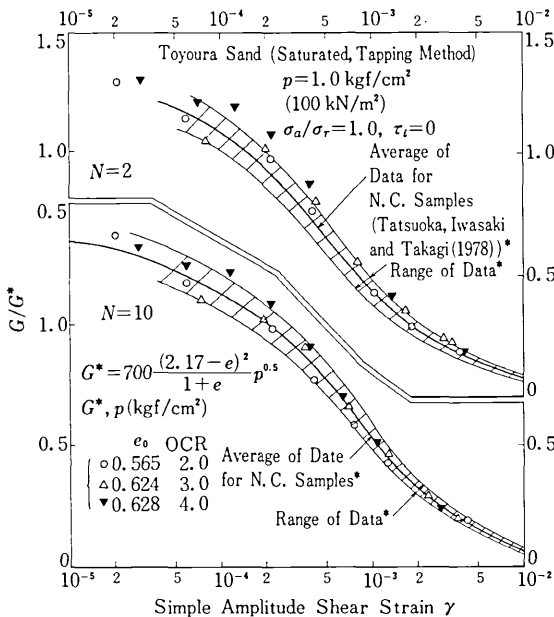


Fig. 16 せん断剛性率に及ぼす過圧密履歴の影響

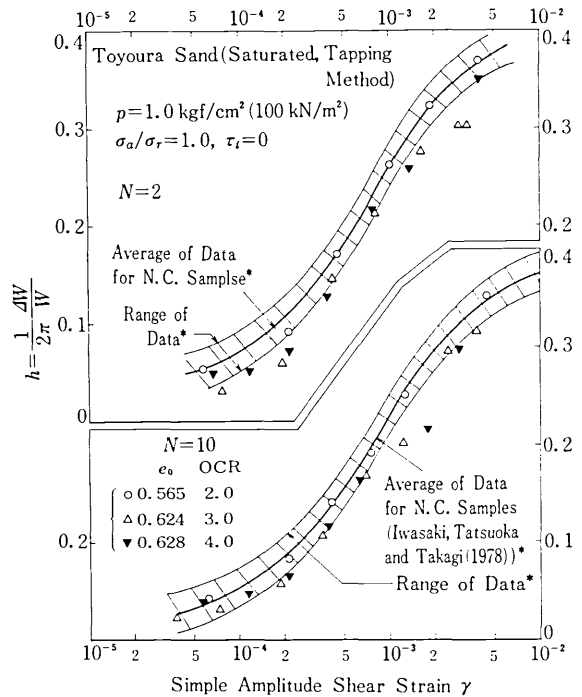


Fig. 17 減衰比に及ぼす過圧密履歴の影響

曲線・履歴曲線の式は変えなくてもよさそうである。

Fig. 16、と 17 は過圧密履歴の影響を調べた結果であるが、過圧密履歴によって繰返し載荷時の砂の G と h は e の減少によらない過圧密履歴そのものによる G の増加、 h の減少は少ないと考えてよいようである。

最後に、初期拘束応力条件と G および h の関数について述べる。Fig. 18 と Fig. 19 は平均有効主応力 $p = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_r)$ が一定のときの応力比 σ_a/σ_r (鉛直応力/水平応力) が変化したときの G と h の変化を示したものである。

(σ_a 、 σ_r の説明は前報告 Fig. 9¹⁾ 参照) $\sigma_a/\sigma_r > 1.0$ の三

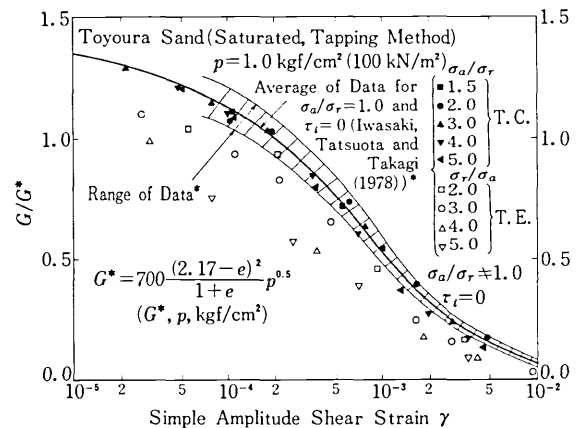


Fig. 18 せん断剛性率に及ぼす初期拘束応力条件の影響

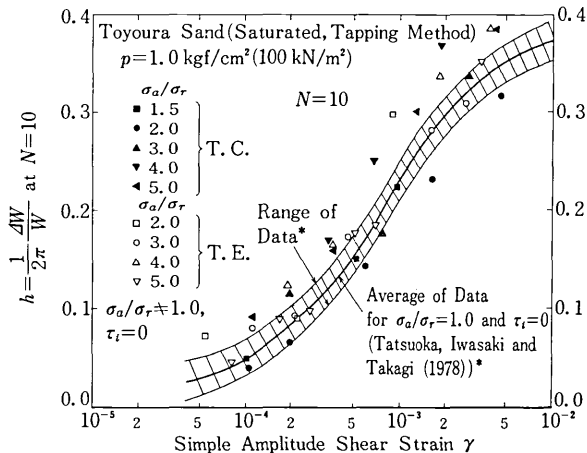


Fig. 19 減衰比に及ぼす初期拘束応力条件の影響

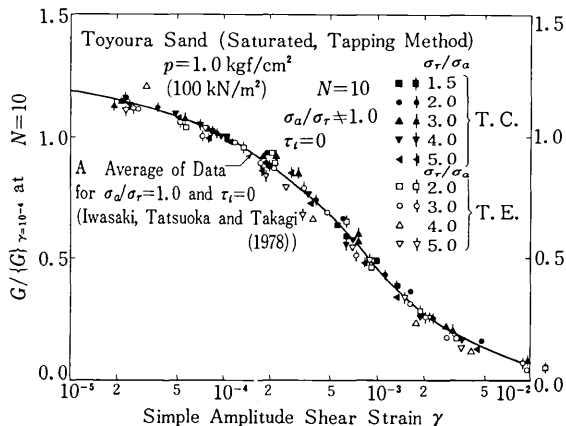


Fig. 20 Gの歪依存性に及ぼす初期拘束応力条件の影響

軸圧縮応力状態のときGはpが一定ならば $\sigma_a/\sigma_r=1\sim 4$ の範囲で σ_a/σ_r の影響をほとんど受けないが、 $\sigma_a/\sigma_r < 1.0$ の三軸伸張応力状態に対してはpが一定のとき、Gは σ_r/σ_a の増加と共に減少してゆく。一方、hは応力比の影響を強く受けない。したがって、通常の場合は $\sigma_a >$

σ_r のことが多いであろうから、平均有効主応力からGとhの絶対値を推定してもよいだろう。Fig. 20はFig. 18を書き換えたものであるが、Gの歪依存性は σ_a/σ_r の影響をほとんど受けないことがわかる。

以上のことから、 G_{max} の値の取り方に注意すれば、通常の場合は、 $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係は応力履歴や拘束応力状態の影響を強く受けないと考えられるから、両モデルの骨格曲線と履歴曲線の基本式に、これらの要因の影響を取り入れる必要は特にはないと思われる。

3. 結論

以上、前報告および今報告でみてきたように、両モデルは共に土の応力歪関係の非線型性を完全に表現しているとは言えないことがわかる。ここで両モデルの特徴をまとめると次のようになる。修正R-Oモデルは、

- 1) $\gamma \rightarrow \infty$ で $\tau \rightarrow \infty$ となるため、 τ_{max} の値が問題となるときはこのモデルは適さない。
- 2) $h \sim G/G_{max}$ 関係は $h = h_{max}(1 - G/G_{max})$ というように直線となり実際の $h \sim G/G_{max}$ 関係と必ずしも一致しない。
- 3) h_{max} 値を調節することにより曲線の形を変えることができる。

修正H-Dモデルでは、

- 1) $\gamma \rightarrow \infty$ で τ_{max} となり、大歪領域で $\tau \sim \gamma$ 関係に矛盾が生じない。
- 2) $0.3 < G/G_{max} < 1.0$ までは $h \sim G/G_{max}$ 関係は実験事実と合うが、 $G/G_{max} < 0.3$ ではhを過大評価し、 $h \sim G_{max}$ 関係は大歪領域で矛盾が生じる。

このように両モデル共に一長一短がある。しかし、どちらを用いても小歪領域では差がないように思われる。

(1978年7月24日受理)

参考文献

1) 龍岡・福島：生産研究，第30巻，第9号（1978）