

防衛大学校 正会員 藤本 一男

防衛大学校 正会員 竹田 仁一

防衛大学校 宮崎 光夫

1. まえがき

大地震時の土-構造物系の動的相互作用を考える場合、強い水平振動と、上下動も加わり、予想外の相互作用が生じることが推定される。また、大地震時には、地表面の最大変位は数センチ、最大地動速度も300%/secにも達すると考えられている。このような場合の土-構造物系の動的応答を解析するには、従来行われている微小ひずみだけでなく、特に軟弱地盤等の波動伝播速度の小さい所では、ひずみは 10^{-2} のオーダーにもなり、局部的には、それ以上になることが考えられ、大ひずみを対象とした非線型の応力-ひずみ関係を考慮に入れなければならないと思われる。さらに、ひずみ速度も、毎秒 10^{-1} のオーダーになると推定され、当然、土の応力-ひずみ関係を考える上で、ひずみ速度の影響も考慮しなければならない。本報告は、土-構造物系の動的相互作用を解析する上で必要な土の構成方程式に関する研究で、対象とするひずみが比較的大きく、かつ、ひずみ速度の影響を考慮した土の応力-ひずみ関係を、実験結果をもとにして考察したものである。

2. 実験

(1, 2, 3)

本実験は、筆者らが継続的に行なってきた、地中構造物の動的応答実験と同じ手法を用いて、特に土の応力-ひずみ関係を求めることを主眼にした実験であり、平面ひずみ状態で載荷できる透視砂槽を用いて、直接砂の変位を測定してひずみを求めた。透視砂槽は $70\text{cm} \times 60\text{cm} \times 70\text{cm}$ の鋼製箱で、測面はアクリル板で中が透視でき、中央に載荷中 $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の載荷棒があり、これが進入して載荷する。砂槽中には豊浦産標準砂を入れ、所要の位置にマーカー（砂と同程度の比重を持ち、周囲に樹脂を塗り砂をよぶしたアルミパイプ）を配置し砂の変位を、同時に微小上圧計を設置して砂中応力を測定した。載荷は速度を3段階に変化（静的；載荷速度 $\dot{\delta} = 0.1\text{mm/sec}$ 、準動的； $\dot{\delta} = 6\text{mm/sec}$ 、動的 $\dot{\delta} = 2000 \sim 5000\text{mm/sec}$ ）こせて、それぞれ写真撮影によってマーカー変位、および砂中応力を測定した。なお、動的載荷時は、高速度カメラ（撮影速度は毎秒約4000コマ）によって撮影し、マーカー変位を求めた。

3. 砂の応力-ひずみ、およびひずみ速度の関係

本実験においては、変形を拘束する側面の応力は主応力 (σ_3) であり、他の2つの主応力は載荷棒の進入する軸 (σ_1) と、それに直角で側面に平行な方向の軸 (σ_2) の応力が主応力となる。また、主応力軸と主ひずみ軸が一致するという等方性の仮定が成立するとし、平面ひずみ状態であるので、 σ_3 は、 σ_1 および σ_2 によって表わすことができ、ここでは、 σ_1 、 σ_2 、および、主ひずみ ϵ_1 、 ϵ_2 のみを考える。

まず、静的実験における、平均応力に相当する応力 $\sigma_{ms} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ と体積ひずみ $\Delta V = \epsilon_1 + \epsilon_2$ の関係を求めると図1に示すような関係が得られる。一方、応力比 $\alpha = (\sigma_1 - \sigma_2)/(\sigma_1 + \sigma_2)$ とせん断ひずみ $\gamma = \epsilon_1 - \epsilon_2$ との関係を求めると図2に示すような関係が得られる。図2は

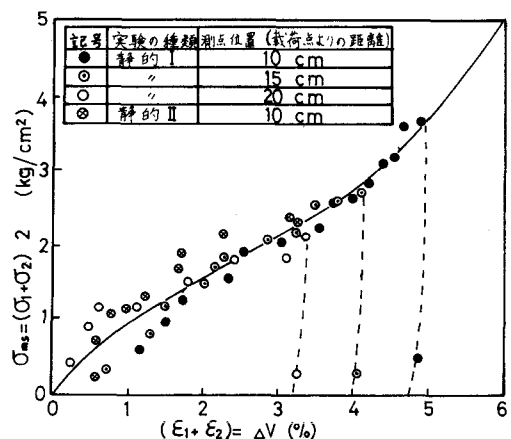


図1. 静的実験における応力 σ_{ms} と体積ひずみ ΔV の関係

り、静的な応力比は、せん断ひずみが2%以上になるとほぼ一定値(約0.7)になることが知られる。以上二つの関係から、与えられた二つのひずみに対して、二つの主応力が求められる。

準動的実験では、応力比 α と、せん断ひずみ γ の関係はほぼ同じ傾向であるが、体積ひずみ ϵ_v と、応力 σ_m との関係は、静的な場合に比較して、体積ひずみに対する応力は2~5%程度大きくなり、ひずみ速度の影響が生じることが知られた。

動的な場合は、応答時のひずみ速度の影響、および、応力波の存在によって、応力 σ_{mo} と体積ひずみ ϵ_v の関係は一意的には求められない。そこで、動的な応力 σ_{mo} および、その時の体積ひずみに対応する静的応力 σ_{ms} の関係 $(\sigma_{mo}-\sigma_{ms})/\sigma_{mo}$ すなわち動的応力増加率に相当する値と、体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ との関係を求めると図3に示すようになり、動的応力はひずみ速度の増加にともなう増加することが知られる。また、動的実験における応力比とせん断ひずみ γ の関係は図4に示すように得られる。図4で知られるように、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ をパラメーターとして、応力比 α とせん断ひずみ γ の関係は異なった経路を辿るが、せん断ひずみがある大きさに達するとはほぼ一定値になり、その値は静的実験の応力比と同様約0.7になることがわかる。これらの関係から、与えられた二つの主ひずみ、およびひずみ速度に対応する動的な主応力 σ_1, σ_2 が求められる。

また、応力波の波頭面が通過する瞬間の砂の応力ひずみ関係は、図3、および図4には含まれていない。この場合は、応力波の伝播速度から、初期割線係数を求めることによって、得られる。次に除荷時の応力-ひずみ関係は、図1の実線で示したようにひずみの回復はきわめて小さく、除荷の場合は線型応力-ひずみ関係を用いてもよいと思われる。

4. あとがき

本報告では、一種類の砂の構成方程式について述べたにすぎないが、今まで取り扱われていなかった、土の応力-ひずみ関係にひずみ速度の影響を考慮して、考察した。したがって、実用計算には、微分構成方程式を踏えて考える必要がある。

- (参考文献) 1) 竹田、藤本外「土-構造物系の動的相互作用に関する基礎的研究」, 土木学会全国大会要集 I 48.10
2) 竹田、藤本外「砂中埋設アーチの動的応答に関する実験的研究」, " 49.10
3) 竹田、藤本外「遠視刷槽による砂中構造物の動的応答実験」, " 50.10

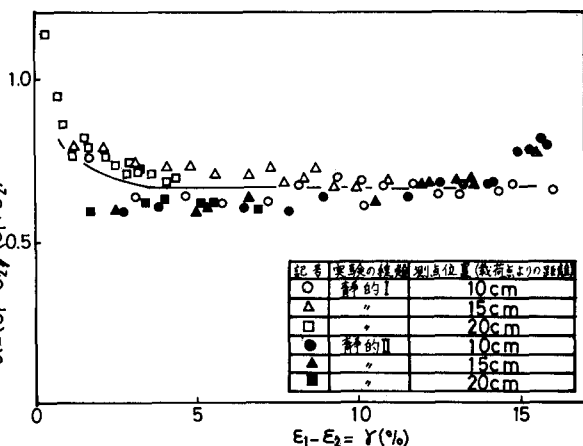


図2. 静的実験における応力比 α とせん断ひずみ γ の関係

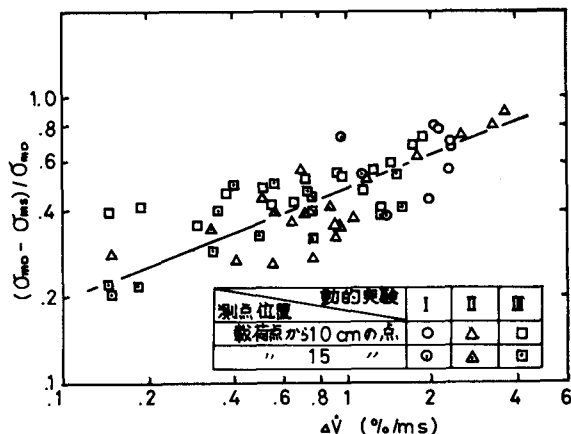


図3. 動的実験における応力増加率 $(\sigma_{mo}-\sigma_{ms})/\sigma_{mo}$ と体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ の関係

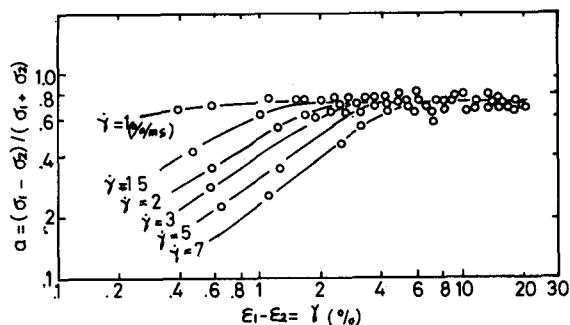


図4. 動的実験における応力比 α とせん断ひずみ γ の関係