

製鋼スラグを用いた粘り強い地盤材料に関する解析的研究

その1：応力ひずみ曲線を双曲線モデルで近似した粘り強さの再現・考察

株式会社日建設計 正会員 ○由井 洋和
 日本製鉄株式会社 正会員 杉村 裕二, 篠崎 晴彦
 株式会社日建設計 正会員 加藤 亮輔

表-1 解析検討ケースの各材料諸元一覧

	最適配合	振動台配合	拘束圧依存性	G (kN/m ²)	σ' _m (kN/m ²)	c' (kN/m ²)	φ' (°)
①	●	●	有り	G _{ma} =70,300	σ' _{ma} =98	183	30
②			振動台スケールではG=18,160kN/m ² (σ' _{ma} =2.34kN/m ²)	2.6	30		
③	●	無し	G ₀ =557	-	4.5	0	

1. はじめに

昨今、国土強靱化の重要性が認識され、港湾構造物等に粘り強さを持たせるための検討が行われている(例えば¹⁾。その中で、杉村らは、カルシア改質土へ粘り強さを付加した地盤材料(以下、製鋼スラグ混合土)の配合を提案し²⁾、これを裏込めに利用した矢板式岸壁の模型振動実験から、相似則の再現性には課題が残るものの、その優位性を確認した³⁾。本稿では、有効応力解析プログラム FLIP (Finite element analysis program for Liquefaction Process)⁴⁾を用いて、製鋼スラグ混合土の粘り強さに関する解析的検討を行った結果を報告する。

2. 双曲線モデルによる製鋼スラグ混合土の材料特性のモデル化

(1) 材料諸元の設定

表-1の①は杉村らの提案する製鋼スラグ混合土(最適配合)²⁾の応力ひずみ曲線(図-1)をFLIPの双曲線モデルで近似した際の各材料諸元を示している。せん断剛性Gには、粒径に応じて粘り強さを発現する製鋼スラグ混合土の特性を踏まえ、(1)式に示す拘束圧依存性を与えた。この時、基準せん断剛性G_{ma}を設定する必要があるが、図-1に示す最適配合²⁾の圧密非排水三軸圧縮試験(以下、CUB試験)から得られた変形係数Eと拘束圧の関係からG_{ma}を設定した。具体的には、CUB試験の各拘束圧におけるEと、m=0.5とした際の(1)式から基準変形係数E_{ma}について表-2の通り整理し、比較的一致している有効上載圧σ'_m=100, 200kN/m²のE_{ma}を平均した結果からG_{ma}=70,300kN/m²(E_{ma}=186,950kN/m²)を決定した(基準上載圧σ'_{ma}'=98kN/m², ポアソン比=0.33とした)。以上の考えに基づき、(1)式とCUB試験から得られたEを比較した結果を図-2に示す。この結果より、(1)式を用いた算定結果はCUB試験より得られたEを概ね精度よく再現できていることが分かる。有効粘着力c'と有効摩擦角φについてはCUB試験結果の値をそのまま採用し、c'-φ材とした。

(2) 応力ひずみ曲線の比較と考察

上記の検討に基づき各材料諸元を設定した表-1の①について、要素シミュレーションとCUB試験からそれぞれ得られた応力ひずみ曲線を比較した結果を図-3に示す。要素シミュレーションの概要は図-4に示す通りである。CUB試験の最大三軸圧縮強さが得られた際の平均有効拘束圧を疑似的な等方圧密圧力とし、せん断力を作用させている。また、図-3を整理にするにあたり、CUB試験の軸ひずみを1.5倍してせん断ひずみに

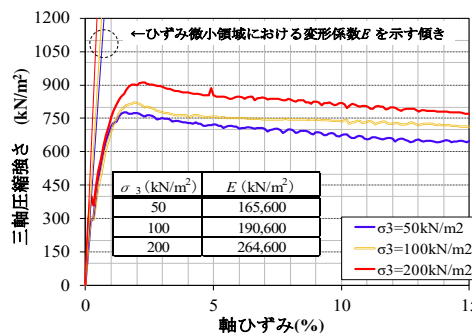


図-1 CUB試験の応力ひずみ曲線とE

$$E = E_{ma} \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} \right)^m \dots (1) \text{式}$$

E_{ma}: 基準上載圧での変形係数
 σ'_{ma}: 基準上載圧 σ'_m: 有効上載圧

表-2 基準せん断剛性G_{ma}の設定

σ' _m (kN/m ²)	E _{ma} (kN/m ²)	G _{ma}
50	231,900	≒ 70,300kN/m ² 平均 186,950
100	188,700	
200	185,200	

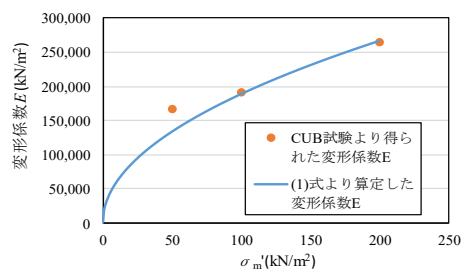


図-2 変形係数Eの比較

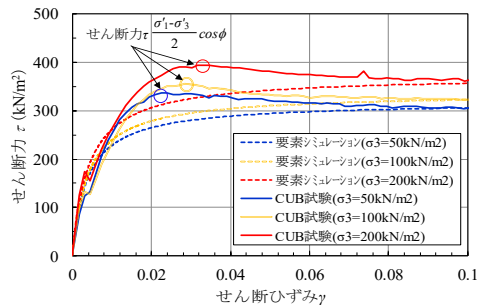


図-3 応力ひずみ曲線の比較

キーワード 製鋼スラグ, 粘り強さ, FLIP, 模型振動実験, 圧密非排水三軸圧縮試験

連絡先 〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1 E-mail:sugimura.t8m.yuji@jp.nipponsteel.com

するとともに、三軸圧縮強さ（軸差応力 $\sigma'_1 - \sigma'_3$ ）を図-5の幾何学的関係を用いてせん断力 τ に変換した。CUB試験において、最大三軸圧縮強さとなる点、すなわち、モール円が破壊線と接する時（図-3における○印の点）にこの幾何学的関係は成り立つ。その為、図-3中のCUB試験の曲線は○印の点以外は参考扱いとなるが、この点と要素シミュレーションの曲線が漸近する値の比較から、要素シミュレーションの結果はCUB試験を安全側に概ね再現できたものと考えられる。

3. 模型振動実験に用いた製鋼スラグ混合土の材料特性のモデル化

(1) 材料諸元の設定

前述の検討を踏まえ、矢板式岸壁の模型振動実験に用いた製鋼スラグ混合土とセメント改良土³⁾について、FLIPの双曲線モデルの各材料諸元を設定した。表-1の②、③がそれぞれ模型振動実験の製鋼スラグ混合土、セメント改良土に対応している。ここで、製鋼スラグ混合土は c' - ϕ' 材、セメント改良土は c' 材とし、 c' 、 ϕ' の値は両者とも一軸圧縮強さ q_u が 9.0kN/m^2 となるよう設定した⁵⁾。製鋼スラグ混合土の G や拘束圧依存性については表-1の①と同様である。セメント改良土は c' 材であるため拘束圧依存性は与えず、模型振動実験時に行った一軸圧縮試験から得られた変形係数 $E_{50}=800\text{kN/m}^2$ という値³⁾に基づき、ポアソン比=0.5として、双曲線モデルの形状から試行錯誤的に $E_{50} \doteq 800\text{kN/m}^2$ となる初期せん断剛性 $G_0=557\text{kN/m}^2$ を設定した。

(2) 応力ひずみ曲線の比較と考察

上記の表-1の②、③について、要素シミュレーション（概要は図-4と同様）から得られた応力ひずみ曲線を図-6に示す。模型振動実験に用いた製鋼スラグ混合土、セメント改良土共に高さが600mmであり、両ケースともに、高さ600mmの中央地点の $\sigma'_m=2.34\text{kN/m}^2$ （製鋼スラグ混合土の密度 2.062t/m^3 にて計算）にて等方圧密した上で、せん断力を与えている。また、 $\sigma'_m=2.34\text{kN/m}^2$ に相当する製鋼スラグ混合土の G は(1)式より $18,160\text{kN/m}^2$ となり、セメント改良土の $G_0=557\text{kN/m}^2$ より大きな値となった。せん断強度 τ は、せん断ひずみが約3%以上の領域で、セメント改良土の方が高い値を示すが、これは振動台スケールの結果であり、実モデルスケールでは ϕ' の効果により、製鋼スラグ混合土の方が大きい値を示すと考えられる。振動台実験では、改良体に生じたせん断ひずみが3%程度以下³⁾であり、その領域においては製鋼スラグ混合土のせん断強度 τ の方が大きな値を示す結果となる。

4. まとめ

製鋼スラグ混合土の特性を踏まえ、 c' - ϕ' 材として、せん断剛性 G に拘束圧依存性を与えた双曲線モデルによる応力ひずみ曲線の近似について検討した。続報⁵⁾では表-1の②、③の物性値を用いて、製鋼スラグ混合土とセメント改良土を裏込めとした矢板式岸壁の模型振動実験の結果³⁾を再現・考察した内容について報告する。

参考文献

- 1) 根木貴史：港湾における津波被害と粘り強い構造に関する一考察，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68，No.2，I_1-I_6，2012
- 2) 杉村ら：製鋼スラグと浚渫土を混合した粘り強い地盤材料の開発，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.77，No.2，pp.I_427—I_432，2021
- 3) 杉村ら：製鋼スラグを用いた粘り強い地盤材料で構成した矢板式岸壁の模型振動実験，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.77，No.2，pp.I_433—I_438，2021
- 4) 井合ら：サイクリックモビリティのモデルのパラメータの同定，港湾技術研究所報告 Vol.29，No.4，pp.57-83，1990
- 5) 杉村ら：製鋼スラグを用いた粘り強い地盤材料に関する解析的研究その2：矢板式岸壁の模型振動実験結果の再現・考察，令和4年度土木学会全国大会，投稿中，2022，9月

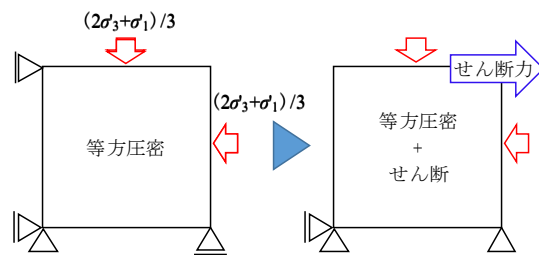


図-4 要素シミュレーションの概要

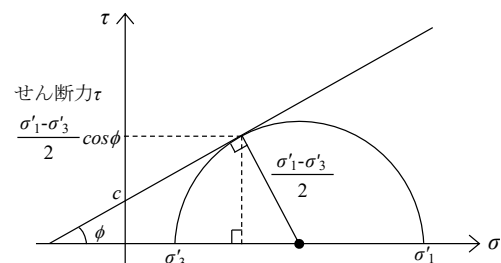


図-5 モールの応力円における幾何学的関係

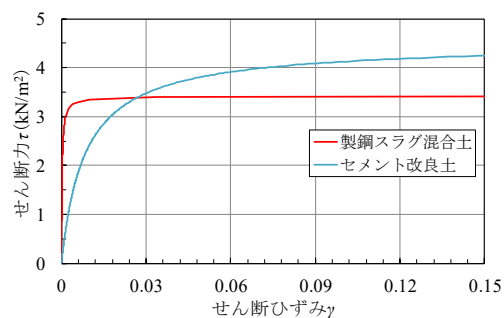


図-6 振動台スケールの要素シミュレーション