

セメント固化粘土の強度変形特性における不確定性を考慮したモデル化について

九州大学大学院 学○岡本弘基 フェロ 落合英俊 正 安福規之 正 大嶺 聖

1.はじめに

セメント安定処理土は、構造物の安定性や軟弱地盤改良などを目的として、従来から広く用いられてきた。近年では、浚渫粘土、建設発生土などの廃棄物の有効利用等の観点からも注目されている。しかし、その発現強度については、不十分もしくはばらつきが大きいことが多い。そのため、依然として設計および施工の際には、設計強度に対して大きく割増したセメント量を用いることで、かなり安全側の強度を採用しているのが現状である。この割増量の適正な決定法を確立することは、今後のさらなるコストなどの経済性を高めた合理的な設計法を確立するために必要である。

セメント固化粘土の特徴のひとつに、固化材の化学的結合作用によって土粒子間に固結力が備わる点が挙げられる。また、セメント固化粘土は、圧密時に過圧密粘土に類似した挙動を示すことがわかっている。本文では、このような固結力を有する地盤材料の強度変形特性をその過圧密性に着目した簡単なモデル¹⁾に、一連の室内試験による結果を用いたばらつきを加味した評価式を提案し検討している。

2.固結力を考慮した強度予測式

著者らは一連の研究²⁾に基づき、セメントを添加することによって発現される固結力を評価するために固結力を表すパラメータとして P_r を導入し、図1-(a)に示すような非排水有効応力経路を考えている。また、図1-(b)は、固結力を考慮した座標系、 $e-\ln(p'+P_r)$ 関係を示している。ここで、 $P_r=0$ の時の圧密降伏応力 P_y およびカムクレイパラメータ λ, κ に対して、セメント固化粘土($P_r>0$)の場合は $P_y^* (=P_y+P_r)$ 、 λ^*, κ^* と表す。以上に示した $e-\ln(p'+P_r)$ 空間において修正カムクレイモデルを適用すると非排水有効応力経路は以下の式で表される¹⁾。

$$\frac{p^*}{P_c^*} = \left\{ \frac{M^2}{(q/p^*)^2 + M^2} \right\}^{\Lambda}, \Lambda = \frac{\lambda^* - \kappa^*}{\lambda^*} \quad (1)$$

ここで、 P_c ：初期拘束圧である。限界状態において $p^*=p_s^*, q/p^*=M$ より、最大軸差応力 q_{max} は、

$$q_{max} = M p_s^* = M P_c^* \left(\frac{1}{2} \right)^{\Lambda} \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $e-\ln(p'+P_r)$ 空間上での過圧密比 R^* として、過圧密性を考慮すると、

$$\frac{q_{max(OCL)}}{q_{max(NCL)}} = \left(\frac{P_y + P_r}{P_c + P_r} \right)^{\Lambda} = R^{\Lambda} \quad (3)$$

であるので、非排水時の最大軸差応力 q_{max} の予測式は次のように表せる。

$$q_{max} = M P_c^* \left(\frac{1}{2} R^* \right)^{\Lambda} \quad (4)$$

表1に示す試料に対し、この予測式による値とCU試験による実測値を比較したのが図2である。この図より、予測値と実験値はほぼ一致しておりかなりの相関が見られる。

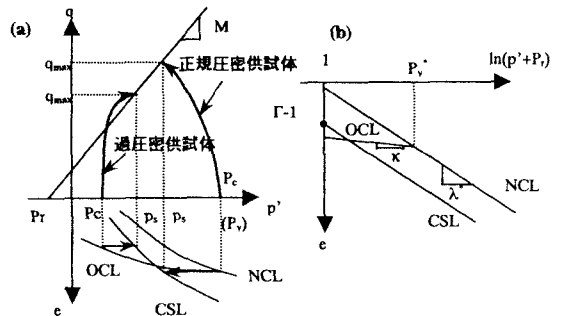


図1 非排水有効応力経路と $e-\ln(p'+P_r)$ 空間

表1 試料の物理特性

	粘土	$\rho_s(\text{Mg/m}^3)$	$W_L(\%)$	$I_p(\%)$	固化材
試料1	有明粘土	2.609	86.5	51.3	普通ポルトラ
試料2	有明粘土	2.582	102.8	55.4	ンドセメント

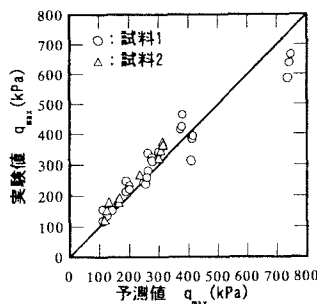


図2 最大軸差応力の比較

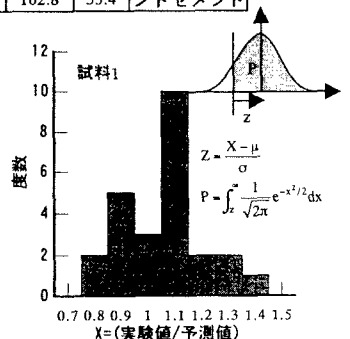


図3 度数分布と標準正規分布

3. 不確定性の評価

セメント固化粘土の強度の発現には、必ずばらつきがある。そこで、以降ではばらつきの評価について検討する。まず、実測値 $q_{\max(L)}$ と予測値 $q_{\max(C)}$ の比を X とすると、

$$q_{\max(L)} = X q_{\max(C)} = X M P_c \left(\frac{1}{2} R^* \right)^{\lambda} \quad (5)$$

と表せ、この X 値は予測値と実測値のずれを示す。試料1における X 値の度数分布を表したのが図3である。 X 値を確率変数と考え、正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うとすると、 $X \geq \mu + \sigma Z$ となる確率が P と言える。すなわち、 P 値の確率で（予測値 $\times X$ 値）以上の強度が発現すると考えられる。 $P=0.90, 0.95, 0.99$ とした場合それぞれについての予測強度を示したものが図4である。これより、 P が大きくなるほど安全側に強度を予測している様子をうまく表している。

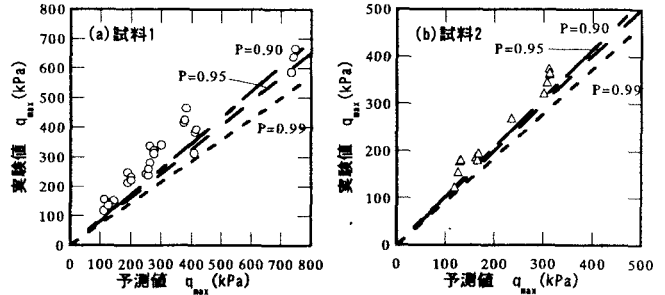


図4 強度の発現確率による評価

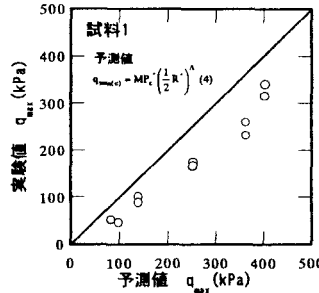


図5 式(4)による一軸圧縮強さの評価

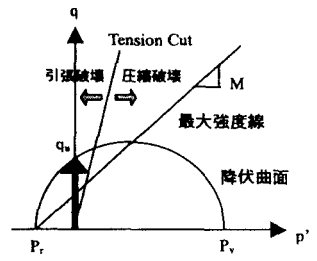


図6 一軸圧縮強さの考え方

4. 一軸圧縮強さについて

次に、一軸圧縮強さについて予測強度を求めることを考える。式(4)で求めた予測値は図5に示すように実験値に対して過大に評価しており、うまく表現できなかった。図6に示すように、セメント固化粘土の一軸圧縮試験では $\sigma_3 < 0$ となるために圧縮破壊よりも引張破壊が卓越することが一因として考えられる。そこで、ここでは一軸圧縮強さを降伏曲面との交点の強度とした。降伏曲面の式は以下のように表せる¹⁾。

$$f = p^*{}^2 - P_c^* p^* + \frac{q^2}{M^2} = 0 \quad (6)$$

この式に、 $(p^*, q) = (P_c, q_u)$ を代入し、さらに確率変数 X を考慮すると、一軸圧縮強さ q_u は次式で与えられる。

$$q_u = X M P_c \sqrt{R^* - 1} \quad (7)$$

式(7)を用いて図4と同様に強度評価を行ったものが図7である。図より、 $P=0.90$ の時と $P=0.99$ の時で大きく評価強度が異なる。造成する地盤の重要性によって P 値を熟考する必要があると言える。

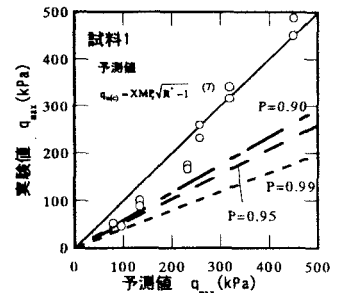


図7 一軸圧縮強さの評価

5. まとめ

本文では、固結力を有する粘土についてばらつきを考慮した強度予測式の提案を行い実験結果とその有効性を検討した。結論は以下のようである。確率変数 X を評価式に導入することで確率 P を安全率と考えることができる。また、図8に示すように評価式による非排水せん断強さ $S_{u(C)}$ に対して、 $X S_{u(C)}$ を設計基準強度に一致させることで割増係数を算定できる。

【参考文献】1) Yasufuku, N., Ochiai, H. & Kasama, K.: The dissipated energy equation of lightly cemented clay in relation to the critical state model, Proc. 7th International Conference On Computer Methods And Advances In Geomechanics, 917-922, 1997. 2) 森嶋武宏, 落合英俊, 安福規之, 笠間清伸: 固結力を有する地盤材料の強度特性に関する一考察, 第34回地盤工学研究発表会, pp869-870, 1999.

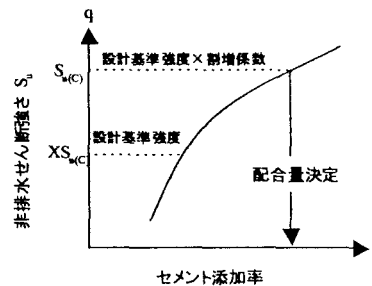


図8 設計強度とセメントの関係