

固化材の水和反応に着目した固化処理土の強度推定式

九州大学大学院○正 笠間清伸 正 善 功企 正 陳 光斉

1. はじめに

固化処理土の強度は、固化材の種類や固化材添加量などさまざまな要因によって影響を受ける。これら影響の度合いに関しては、これまでの研究によって明らかにされてきたが、その強度の推定には至っていないと思われる。本文では、固化材の化学反応による生成物の生成機構に基づくアプローチから固化処理土の強度推定式を提案する。

2. 固化処理土の強度推定式

2.1 固化処理土の破壊基準

Mohr-Coulomb の破壊基準より、土の強度は、以下の式で与えられる。

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (1)$$

c' は有効応力表示による見かけの粘着力、 ϕ' は有効応力表示によるせん断抵抗角である。固化処理土の強度定数については、 ϕ' はほとんど処理前の土と同じであり、 c' が固化材の混合量に比例して増加すると報告されている¹⁾。そこで簡単のために、固化処理土の強度定数のうち粘着力 c' が、固化材の固結作用により変化すると考える。

2.2 水和生成物に着目した強度パラメーター

Powers ら²⁾は、固化材の水和反応によって生成される水和物がコンクリート中の空間(空隙)に占める割合(空隙率)を用いて硬化コンクリートの強度評価を試みている。この考え方は、コンクリートの内部構造と強度発現機構を関係づけたより基本的な考え方である。同様に、固化処理土の空隙に占める水和生成物の容積の比 x (空隙率)に着目して、固化処理土の強度を検討する。

図1に示すように初期含水比 w の土に、固化材を土の乾燥重量 m_s に対して $a\%$ ($a/100 \times m_s$) 混合し、固化処理土を作製する場合を想定する。ここで、土の空隙水のうち土粒子に吸着し固化材との反応に無関係の水の量を土粒子の乾燥重量の $b\%$ ($b/100 \times m_s$) とする。また、 v_c は単位重量あたりの固化材の容積とし、全固化材に対する水和した固化材の割合(水和進行率)を $d\%$ とする。固化材 1cm^3 は、化学反応が終了すると水和反応により約 2.1cm^3 の容積を占める水和ゲルになるので、固化処理土中の各容積は、以下のように計算できる。

固化材の容積： $dm_s v_c a/100$

水和生成物の容積： $2.1 dm_s v_c a/100$

空気が占める容積： $\frac{em_s}{G_s \gamma_w} (1 - S_r / 100)$

水が占める容積： $\frac{m_s (w - b)}{100 \gamma_w}$

ここで、 $v_c = 0.319\text{cm}^3/\text{g}$ とすると、水和生成物が占める容積の比 x は、以下ようになる。

$$x = \frac{\text{水和生成物の体積}}{(\text{固化材} + \text{空気} + \text{水}) \text{の体積}} = \frac{0.607d}{0.319d + \frac{1 - S_r / 100}{S_r \gamma_w} \frac{w}{a} + \frac{w - b}{a} \frac{1}{\gamma_w}} \quad (2)$$

このとき、単相結晶よりなる材料の圧縮強度 C と材料の空隙率 x との関係が、 C_0 と m を実験定数として $C = C_0 \times x^m$ の形で実験的に与えられることを考慮すると、式(1)中の粘着力 c' は x を用いて、以下の式で表すことができる。

$$c' = c'_0 \times x^m \quad (3)$$

ただし、 c'_0 は $x=1$ としたときの強度であり、固化材と供試体の寸法できまる固有の値である。 m は固化材の内部結合、空隙の大きさと形状、粒子の大きさ、不純物の存在などに起因する定数である。

2.3 一軸圧縮強度の評価式

式(1)~(3)を用いて、固化処理土の一軸圧縮強度を評価する式として次の式が提案できる。

$$q_u = 2c'_0 \times x^m \times \tan(45 + \phi'/2) \quad (4)$$

式(4)に含まれる定数は、含水比 w 、固化材添加率 $c\%$ 、吸着水の割合 $b\%$ 、水和反応の進行率 d 、飽和度 S_r および固化材単体が結合した材料の強度定数 C_0 と m である。母材の物理的特性(w , b , ϕ' , S_r)、固化材添加率(c)および固化材の特性(C_0 , m , d)が含まれているのが式(4)の特徴である。

3. 評価式の特性

式(2)中のパラメーター x には、処理土の含水比 w 、吸着水の割合 b 、セメント添加率 a 、水和反応率 d および飽和度 S_r が含まれる。同じ母材(b が同じ)を使用し飽和($S_r=100\%$)している固化処理土であれば、同じ養生条件(d が同じ)で比較する場合、 x は w/a の比、つまり処理土の含水比とセメント添加率の比のみに依存するので、固化処理土の一軸圧縮強度の評価に w/a が有効であることを意味する。ここで、あくまでも含水比 w は、一軸圧縮強度測定時の含水比である。

図1(a),(b)に、母材の特性を変化させた場合の式(4)を用いた一軸圧縮強度の計算値を示す。図1では、横軸に処理土の含水比とセメント添加率の比を用いている。計算した一軸圧縮強度は、含水比とセメント添加率の比の増加とともに増加する。図2(a)より、土の間隙水中の吸着水が増加することで、一軸圧縮強度は増加する。この特性は、 w/a が小さいときに特に重要となっている。吸着水の割合は、土のコンシステンシーに関連するので、固化処理土の一軸圧縮強度が、母材の液性限界などに関連するとのこれまでの報告³⁾に一致するものである。また、図2(b)により母材の内部摩擦角の増加によっても一軸圧縮強度は増加する。このことは、粘性土を母材として用いて高強度な固化処理土を作製するには、砂などの内部摩擦角を有する材料を混合することが有効であることを示す。

4. 実測値との比較

図2(a),(b)は、有明粘土と珪砂を母材とした固化処理土の一軸圧縮強度を、処理土の含水比とセメント添加率の比に対してプロットしたものである。図3中には、式(4)を用いて評価した結果も示しているが、実測値の傾向とよく対応している。

5. まとめ

本文では、固化材の化学反応による水和生成物の生成機構に基づいて、固化処理土の一軸圧縮強度推定式を提案した。推定式は、これまで報告されている固化処理土の強度特性を表現できる。今後は、具体的なパラメーターを設定し、実験値との比較を行う予定である。本研究は、前田記念工学振興財団の援助を受けたものである。ここに記して感謝の意を示す。

【参考文献】1) 善功企、山崎浩之、佐藤泰: 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性、港湾技術研究所報告、第29巻、第2号、pp.85-118, 1990. 2) T.C. Powers & T.L. Brownyard: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, ACI, Vol.18, No.7, pp.845-864, 1947. 3) 馬場崎亮一、寺師昌明、鈴木健夫、前川淳、川村政史、深沢栄造: 安定処理土の強度に及ぼす影響因子、セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, pp.20-41, 1996.

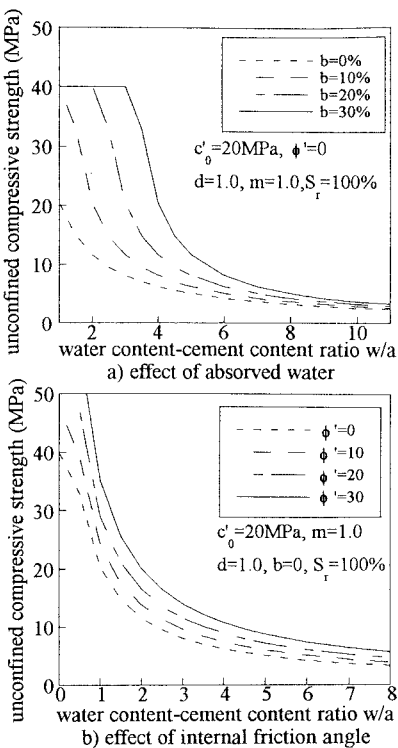


図1 評価式による一軸圧縮強度

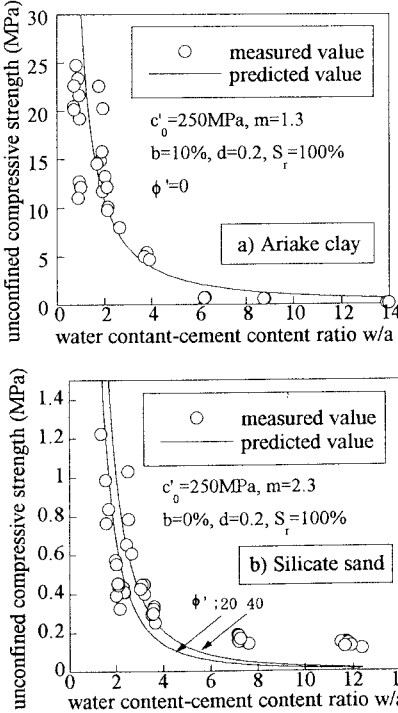


図2 予測値と実測値の比較