

III-347

水ガラス薬液による固結砂強度の推定(その2)

東洋大(正員) 加賀 宗彦
米倉 亮三

1、はじめに

注入材によって改良された砂の強度特性は、多くの研究者によって研究されてきた。しかしながら、研究結果は、必ずしも一致しない。例えば、固結砂強度と砂の密度の関係を検討して見ると、比例関係になる報告が多い。しかし、比例しない結果も報告されている。この結果、砂の密度、粒度および注入材強度をもっと広い範囲で検討する必要があると思われる。この考えにしたがって、実験を行った結果、砂の密度に比例する範囲と、比例しない範囲があった。この報告は、始めに、前述した広い範囲で、固結砂強度とホモゲル強度の関係を調べた。その結果、前報で報告した様に、固結砂とホモゲル強度は、次に示す指数関数で表す事が出来た。また、係数A、B、nの予測によって、一軸圧縮強度の推定も可能であった。

$$q_u = B + A (q_{uH})^n \quad (1)$$

上式の係数A、B、nを予測するため基本的には、モール・クーロンの破壊規準と粒子分散複合モデルを組合せることで検討出来た。本報告では、その検討結果を述べる。結果として、係数“A、B”は、砂の表面積に比例する値、“n”は、相対密度に逆比例する値で整理できた。

2、モールクーロンの破壊規準と粒子分散モデルによって検討された固結砂強度

注入材によって改良された砂の強度は、粘着力が付加されて強くなる。これに対して、砂の内部摩擦角は、ほとんど変化しない。この考えは、一般的な固結砂強度特性として良く知られている。この考えに基づいて、固結砂および砂の強度をMohr-Couloun's Failure Criterionで示せば、Fig-1の様に2本の平行な直線で示される。従って、 σ_3 の側圧を受けている砂の破壊応力円は、同図の点線で示される。また、改良された固結砂は、図中の実線で示される。この固結砂の破壊応力円は、 $\Delta\sigma_3$ および $\Delta\sigma_1$ が付加されたと考えることが出来る。従って、 σ_1 は、次ぎの式で示される

$$\sigma_1 = \sigma_3 \times K_p + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_1 \quad (2)$$

また、Mohr-Coulounの破壊規準から

$$\sigma_1 = \sigma_3 \times K_p + 2C/\sqrt{K_p} \quad (3)$$

で示される。従って(2),(3)式より粘着力(C)は次の様に示される

$$C = (\Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_1) / 2\sqrt{K_p} \quad (4)$$

次に固結砂の内部応力の釣合から(Fig-2参照) σ_1 は、次の様に示される。Fig-1

$$\sigma_1 = \tan\alpha (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) / \tan(\alpha - \phi) \quad (5)$$

(4)式の $\Delta\sigma_3$ の最大強度は固結した注入材そのものの引っ張り強度(T_f)と考えることが出来、また最大せん断面(α)= $45^\circ + \phi/2$ になることより

$$\sigma_1 = T_f \times K_p + \sigma_3 \times K_p \quad (6)$$

を得る。さらに(2)と(6)式より

$$\sigma_3 \times K_p + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_1 = T_f \times K_p + \sigma_3 \times K_p$$

$$\Delta\sigma_1 = T_f \times K_p - \Delta\sigma_3 \quad (7)$$

(7)式を得る。この(7)式を(4)式に代入すれば

$$C = T_f \times \sqrt{K_p} / 2 \quad (8)$$

結局、注入材によって付加された粘着力(C)は(8)式で示される。更に、(8)式の T_f に付いて検討するとこの(8)式の T_f は、間隙にある固結注入材の引っ張り強度であるので、粒子間の相互作用がない均質等方性のマトリックス相とそこに分散している粒子相から成る2相材料による引っ張り強度と考えることが出来る。2相材料では、ゴムに硬い球形粒子を混入した引っ張り強度変形に関するSmolwoodの式など多数ある。本実験で用いた注入材は、ゴムと性質が、大きく異なるので、高分子を母材としたUemura¹⁾の2相モデル

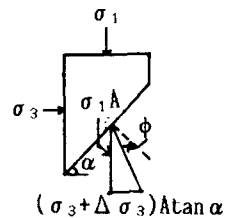
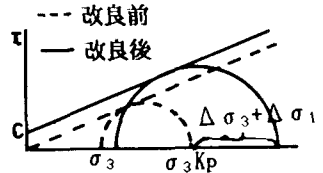


Fig-2

によって検討した。モデルは、次の様に示される。

$$\frac{G}{G_m} = 1 + \frac{15(1-\nu_m)}{(8-10\nu_m)} \nu_p \quad (9) \quad \begin{array}{l} G: \text{マトリックス全体の弾性率} \quad G_m: \text{マトリックス母材の弾性率} \\ \nu_m: \text{マトリックス母材のポアソン比} \quad \nu_p: \text{粒子の体積率} \end{array}$$

(9)式の弾性率の比は、 $G/G_m = E/E_m$ と考えることが出来(ポアソン比によって、いくぶん変わる)。また、マトリックスと全体の ϵ が同じとすれば $\epsilon = \sigma E$ から $G/G_m(E/E_m)$ は引張り強度の増加率となる。(9)式の $15(1-\nu_m)/(8-10\nu_m)$ の値は、ポアソン比が0.2~0.5の変化で、2.00~2.50となり、大きく変化しない。今、ポアソン比の値を0.3とし、また ν_p を n_p (間隙率)で表すと、 $n_p + \nu_p = 1$ より(9)式は

$$\frac{G}{G_m} = (3.1 - 2.1n_p) \quad (10)$$

となる。従って(8)式の T_f をマトリックス母材(注入材)の引張り強度とすれば、粘着力(C)は、次の様になる。

$$C = \sqrt{K_p}(3.1 - 2.1n_p)T_f/2 \quad (11)$$

さらに一軸圧縮強度(q_u)は、 $\sigma_1 = 2C/\sqrt{K_p}$ より次の様に表される。

$$q_u = K_p(3.1 - 2.1n_p)T_f \quad (12)$$

また、固結砂の破壊特性は、ダイレイタンスが常に正になることを考へがえれば、毛管水圧による粒子間の接触圧力による摩擦抵抗も考慮する必要がある。12式に毛管圧による接触圧($\theta=0$)を付加すれば、

$$q_u = K_p(3.1 - 2.1n_p)T_f + 2\pi TaK_p/d \quad (13) \quad \begin{array}{l} Ta: \text{表面張力} \quad d: \text{粒子の直径} \end{array}$$

となる。砂の内部摩擦角およびホモゲルの T_f を用い、(13)式によって強度を予測すると、Sm砂では、実測値にほぼ一致するが、他の砂では、よい結果を得られない。なぜならば、固結砂強度を解析的に表示するためには、弾性係数E、 E_m 砂と注入材の粘着力(C)、付着(C')、剥離(PI)強度、砂の内部摩擦角(ϕ)、形状(n)、粒度(g)を考慮した非常に複雑関数になるのである。しかしながら、前に示した実験式(1)式と(13)式を対比すると、次に示す関数となり、Aは、砂の間隙、Bは、砂の表面積の関数として取扱うことが可能と考えられる。 $A = f(K_p(3.1 - 2.1n_p))$, $q_{uH} = f(T_f)$, $B = f(4Ta \times K_p/d)$ (14)

係数Aについて、上式の $K_p \times 3.1 = K$, $K_0 \times 2.1 = m$ で表すと、係数Aは、次に示す、 n_p の関数となる。

$$A = K - m \times n_p \quad K, m: \text{係数} \quad (15)$$

(15)式の両辺を砂の間隙の平均厚さ(T)で割り、 $n_p = A_s \times T$ (A_s : 砂の表面積)

の関係から砂の表面積の関数となり、次の式を得る。 $\frac{A}{T} = m(A_s - A_{s0})$ (16)

(16)式に従って実測値を示したのが、fig-3である。図に示されるように、

(16)式は、よい適用性を示す。図より $m=41.3$ を得、 $n_p = A_s \times T$ の関係から(16)式を書き換えると次の様になる。

$$A = 41.3(1 - A_{s0}/A_s) \times n_p \quad A_{s0} = 213 \log(A_0/25) \quad (17)$$

結局、係数Aは、砂の種類に関係なく砂の表面積(比表面積)と間隙率で予測

できた。次に、係数Bについて検討する。係数Bは、(14)式から、 T_a, K_0, d の関数となるが、 q_u の値に比較して小さい値であることや、 T_a の値は、ほぼ一定と考えることが出来ることから、 d のみの関数とした。また、砂の表面積は、 d から計算できる事より、係数Bも砂の表面積で扱うことが出来る。係数Bと A_0 の関係をfig-4に示す。この結果係数Bは、次の様に示めされた。

$$B = 0.295 \times A_0/100 \quad (18)$$

最後に、係数nについて検討する。ホモゲルの引張りと圧縮強度の関係を実測した結果、指数関数で表す事ができたこと、強度の大きいホモゲルによって改良された砂(固結砂)の強度は、砂の密度に逆比例する事、係数nは、Log-Logの直線の勾配を表す事から、砂の相対密度(Dr)に逆比例することが推測される。この考えに従って、砂の相対密度とnの関係を示したのが、fig-5である。この結果より、つぎの式を得た。

$$n = 0.697 - 0.112Dr \quad (19)$$

結果として係数nは、砂の相対密度に逆比例する値で、 Dr によって予測できる事

がわかった。係数A、B、nの推定による、一軸圧縮強度の予測の精度は、前報告の通り、よい結果を得た。参考文献 1) Uenura, S. and Takayanagi, K.: Application of the theory of Elasticity and Viscosity of Two-Phase Systems to polymer Blends, J.A.P.S. Vol.10, '66, p113

