

早稲田大学

正員

木

鹿井

○ 学生員

田村

昌仁

1. まえがき

固結砂の強度は、砂と薬液(ゲル)の強度の和より大きい。その相互作用が重要となるが、薬液による土の強化のメカニズムに関する研究は少なく、明らかでない部分が多い。固結砂がせん断されると粒子充填型のゴム材料と同様に、ヒステリシスのような形でダイレタンシーが生じるため、本研究ではこの現象に注目し、薬液による強化のメカニズムについて考察を行なうことにした。又、ゲル自身の不透水性の程度も固結砂の強度特性に影響を与えると考えられるので、水ガラス系の薬液に比べ全く不透水性といえるゲルとしてアクリルアミドゲルを用いて実験を行なった。

2. 実験方法

固結砂と砂の強度・変形特性を比較するため、3軸室にセメントされた砂に下部より薬液を浸透させ、供試体間げきの約2倍の薬液が通過後、所定の側圧を加えて固結させ、供試体を作製した。又、極めてゆるい状態の固結砂を作製する場合、モールドを用い薬液中に砂を落させて固めた。3軸試験は全て側圧一定で行ない、ゲル強度 G_0 (kg/cm²)は一面せん断試験により求めた。なお、供試体の体積変化はセル内の水の出入りにより求め、使用した試料等を下に示す。

砂：豊浦砂($G_s=2.64$, 粒径 $0.25 \sim 0.11$ mm) 相馬砂($G_s=2.64$, 粒径 $0.84 \sim 0.42$ mm), 変形速度: $\dot{\epsilon}_1 = 0.5\%/min$.

薬液：アクリルアミド 濃度 $N(\%)$ $N=10\%$ ($C_0=0.09$ kg/cm³), $N=20\%$ ($C_0=0.39$ kg/cm³), 供試体寸法: $\phi=5$, $H=10$ (cm)

3. 固結による強度の構成成分

固結砂の強度は主に、1) 摩擦角、2) ダイレタンシー成分、3) ゲル強度の3者より構成されると考える。

1) 摩擦角 $[F]$, 間げきゲル自身は $\phi=0^\circ$ であるが、固結砂では砂粒子が接触しているため摩擦角が動員される。但し、固結砂の一面せん断による残留強度は、砂と等しいために摩擦に起因する ϕ は砂と等しいと考えられる。間げきゲルは間げき水と異なり、せん断力を伝えるため、応力状態は複雑となるが、ゲルと砂粒子の相互作用による有効圧の増加(σ_g)が摩擦角を動員し、 σ_g はゲル強度が大きい程大きくなる。又、ダイレタンシーにより生じた空げき内で発生する負圧(U)と側圧(σ_3)と摩擦角を動員するものとして考えられる。

2) ダイレタンシー成分 $[D]$, 固結砂においてもダイレタンシーが生じるが、この傾向は側圧が小さく、濃度 N が大きい程著しくなる。間げきゲルは、粒子のまわりで吸着水的な吸着ゲル(不動域)を形成しており、 N が大きい程この吸着ゲルの膜厚が増加し、見掛けの密度増加作用が生じ、ダイレタンシーが大きくなるのであろう。

3) ゲル強度 $[G]$, 間げきゲルの強度 G は、一面せん断で得られるゲル強度より数倍大きくなる。この理由として、ゲルが薄膜状になっていること、又このため間げきゲルのせん断速度はゲル強度 C_0 を決定した試験に比して十分大きい事が考えられる。このゲル強度は、せん断初期においてダイレタンシーに抵抗するが、粒子が隣接する粒子を乗り越える際には、不動域を形成しているゲルをも乗り越える必要性が生じ、固結砂のダイレタンシーは砂より大きくなる事が考えられる。

4. 実験結果及び考察

外力の向きと逆に体積が膨張する際、体積仕事に基づきダイレタンシー補正が提案されており、Bishop式(1), Poorbooshasp-Roscoe式(2)を用い、飽和砂(豊浦砂)排水試験より求めた ϕ_d , 補正した ϕ_B (式(1)), ϕ_P (式(2)), 及び残留状態での ϕ_{cu} を

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_r = (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \sigma'_3 \frac{d\nu}{d\epsilon_1} \quad (1)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_r = (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \sigma'_m \frac{d\nu}{d\epsilon_1} / \left(1 - \frac{d\nu}{3d\epsilon_1}\right) \quad (2)$$

表1に示す。表1より飽和砂の強度を $[F]$ 成分と $[D]$ 成分に分けるには(2)式が適当であり、密度差による強度への影響も $[D]$ 成分の差として考えることができる。固結砂(豊浦砂, $N=10\%$)でも密度が大きい程強度が増大するため、密度差(Den-se $\gamma_d=1.60$ kg/cm³, Loose $\gamma_d=1.45$ kg/cm³)による強度の差 S_d (kg/cm²)と $[D]$ 成分の差 D_d (kg/cm²)と(2)式により求め、その比 $R = \frac{D_d}{S_d} \times 100\%$ と側圧 σ_3 の関係を図1に示す。但し、固結砂の $[D]$ 成分は σ_g, U が実測できないため、全応力により求めた。固結

砂においても密度の増加は強度を増大させるが、図1より強度の増加分は[D]成分の増加にほぼ等しいと考えられる。

表2には、固結砂(豊浦砂 Dense $\gamma_d=1.60\text{g/cm}^3$)の強度(軸差応力) $S(\text{kg/cm}^2)$ とダイレタンシー係数 $D_f (= \frac{d\sigma_1}{d\sigma_3})$ 、側圧 $\sigma_3(\text{kg/cm}^2)$ の関係を示す。図2には、固結砂(豊浦砂 $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$)の D_f とゲル濃度 $N(\%)$ 、 σ_3 の関係を示す。表2、図2より固結作用は濃度 N が小さい場合はむしろ D_f を低下させ[D]成分を減少させることも考えられる。事実表2で $\sigma_3=5\text{kg/cm}^2$ の場合、固結砂の強度は、砂の強度(CD)と大差なく、これは[D]成分の減少が原因であろう。

図3には、極めてゆるい固結砂(豊浦砂 $\gamma_d=1.40\text{g/cm}^3$, $N=10\%$)の応力-ひずみ曲線を示す。この場合、側圧が 1kg/cm^2 から 5kg/cm^2 に増加しても強度はあまり増大しておらず、体積は逆に収縮している。これは、側圧の大部分は摩擦に対して有効となっておらず、正のゲル圧が発生したと考えられる。なお、図表2において $N=0(\%)$ は、飽和砂CD試験である。

固結作用は、一般に濃度 N の小さい場合を除いて不動域を形成するため、 D_f を増加させると考えられる。相馬砂($\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$, $N=10, 20\%$)においては、表3に示すように D_f は固結により増加している。この D_f の増加は初期密度の増加と等価であると考えられるため、図4に γ_d を変化させた場合のCD試験における D_f と γ_d 、 σ_3 の関係を示す。 $N=10\%$, $\sigma_3=1\text{kg/cm}^2$ の場合 D_f は固結により0.26となっており、図4よりダイレタンシー特性でみた等価密度(γ_{de})は 1.45g/cm^3 より、 1.52g/cm^3 に高められたことがわかる。等価密度は側圧により若干異なるが、 $N=10\%$, 20% においてそれぞれ $\gamma_{de}=1.52\text{g/cm}^3$, 1.62g/cm^3 となり、固結による密度増加作用が明らかとなった。

図5には、固結砂(豊浦砂 $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$, $N=10, 30\%$)の軸差応力と体積ひずみ E_v の関係を示す。 $(\sigma_1 - \sigma_3) - E_v$ の関係において、固結砂はせん断初期に弾性的な挙動を示しており、降伏点(●)での軸差応力は N にあまり左右されず、又この降伏点でのMohrの包絡線より求めた粘着力 C_f はほぼゼロであるが、摩擦角 ϕ_f は、砂の ϕ_{cv} とあまり差のないことがわかった。

従って、この降伏点までは収縮中にも拘らず正のゲル圧は少なく、主に σ_3 による摩擦が發揮されると考えられる。さらに図5より、固結砂においてはCD試験と異なりダイレタンシーがすぐには生ぜずゲルにより遅らされたことがわかった。

5. ま と め

- 1) 間げきゲルがダイレタンシー特性に対して果たす役割は、せん断初期のダイレタンシーへの抵抗と不動域を形成しているゲルがちぎれる際の D_f の増加にある。
- 2) 密度が増加すると固結砂の強度は増加するが、この強度の増加分は、ほとんど[D]成分の増加に等しい。

参考文献 1) R. J. Farris, Journal of Applied Polymer Science (1964) P. 25~35

2) H. B. Poorooshasb, K. H. Roscoe, Proc. 5th Int. Conf. SMFE (1961) P. 297

表-1 摩擦角 ϕ と密度の関係

γ_d	ϕ_d	ϕ_B	ϕ_P	ϕ_{CV}
1.45	35	32	31.5	31
1.60	38	35	32	31

表-2 強度 $S(\text{kg/cm}^2)$, D_f と $\sigma_3(\text{kg/cm}^2)$ の関係

σ_3	1		5	
$N(\%)$	S	D_f	S	D_f
0	3.16	0.52	15.78	0.48
10	6.61	0.50	16.14	0.33

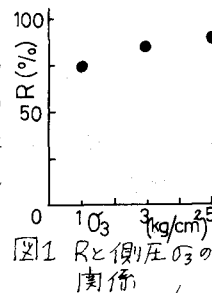


図1 R と側圧 σ_3 の関係

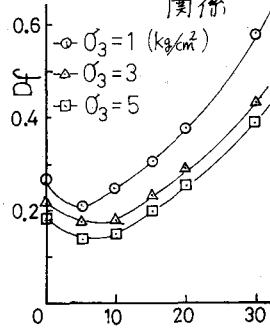


図-2 D_f とゲル濃度 $N(\%)$ の関係

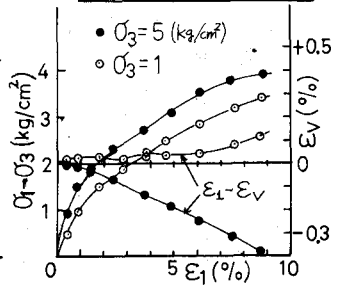


図-3 固結砂($N=10\%$, $\gamma_d=1.40\text{g/cm}^3$)の応力-ひずみ曲線

表-3 相馬砂($N=10, 20\%$)の D_f と σ_3 の関係

σ_3	N	0	10	20
1		0.18	0.26	0.40
3		0.09	0.19	0.30
5		0	0.09	0.20

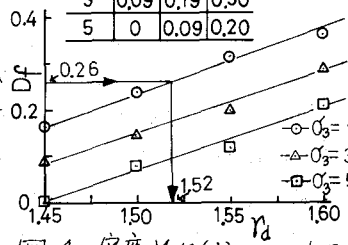


図-4 密度 $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$ と D_f の関係

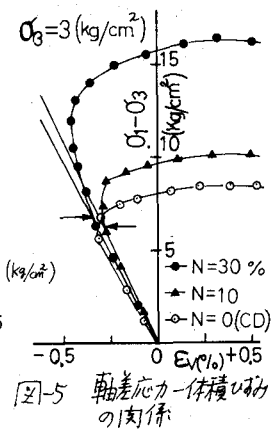


図-5 軸差応力-体積ひずみの関係