

京都大学 工学部 正 員 島 旺治郎

同 学生員 〇太田秀樹

1. 一般式の誘導

飽和した粘土を排水せん断に伴う体積変化は非排水せん断に伴う間げき水圧の発生と表裏の関係にある。等圧力の微小変化による粘土の微小体積変化量は $e \sim \log \sigma'_m$ が直線的な関係にあることから、

$$\frac{dV}{V} = C(1-n) \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \quad (1)$$

で与えられる。正規圧密粘土では非排水せん断中に σ'_m が減少してゆくので C は swelling のときの $e \sim \log \sigma'_m$ の傾き C_s に相当する係数で、 n は間げき率である。正規圧密粘土のせん断変形に伴う体積変化 (ダイヤレイトンジー) に関しては、柴田¹⁾、野部・栗原²⁾ が与えた関係式がある。それを微分するととよんで、せん断応力の微小増加による微小体積減少が、

$$\frac{dV}{V} = D \frac{d\sigma'_{oct}}{\sigma'_m} - D \frac{\sigma'_{oct} - \sigma'_{nd}}{\sigma'_m} \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \quad (2)$$

で与えられる。ここで D は圧密圧力すなわち粘土の含水比に無関係な定数であり、 σ'_{nd} は σ'_{oct} がこれと等しい間はダイヤレイトンジーが起らないという限界を示し、 $\sigma'_{nd}/\sigma'_{mi}$ (σ'_{mi} は正規圧密粘土がせん断される前にうけていた平均主応力である。) は σ'_{mi} に関係しない一定値である。したがって正規圧密粘土を非排水状態でせん断した場合に有効応力が満足しなければならない関係式は、(1)、(2) 式を加えて $dV/V=0$ とおいたもので近似的に次のように与えられる。

$$\left(\frac{\sqrt{2}}{\mu} - \frac{\sigma'_{oct} - \sigma'_{nd}}{\sigma'_m} \right) d\sigma'_m + d\sigma'_{oct} = 0 \quad (3)$$

ここで係数 μ は、 $\mu = \sqrt{2} D / C(1-n)$ で与えられ、非排水せん断中は間げき率 n が変化しないので一定値を保つ。主応力の間に $\sigma'_1 \geq \sigma'_2 \geq \sigma'_3$ なる関係があるとし、中間主応力 σ'_2 は $N = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3)$ によって規定すれば、軸方向応力 σ'_a と軸対称円周圧 σ'_r とに与える通常の三軸試験にわたる σ'_1 は、compression が $\sigma'_1 = \sigma'_a$ 、 $\sigma'_3 = \sigma'_r$ 、 $N=0$ で、 σ'_1 extension が $\sigma'_1 = \sigma'_r$ 、 $\sigma'_3 = \sigma'_a$ 、 $N=1$ で示される。せん断中に N が変化せず一定値を保つとして、(3) 式を σ'_1 、 σ'_3 に関する微分方程式で書き換えると、その特異点 $(\sigma'_{10}, \sigma'_{30})$ は、

$$\sigma'_{10} = \frac{1}{3} (2-N) \sigma'_{nd}, \quad \sigma'_{30} = -\frac{1}{3} (1+N) \sigma'_{nd} \quad (4)$$

で与えられる。ここで $\sigma'_{nd} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1-N+N^2}} \sigma'_{nd}$ である。 σ'_1 、 σ'_3 に関する式を $S_1 = \sigma'_1 - \sigma'_{10}$ 、 $S_3 = \sigma'_3 - \sigma'_{30}$ なる変数で書き換え、さらに $k = S_3/S_1$ と置く。非排水せん断で間げき水圧が発生しはじめる瞬間の応力状態を $k=1$ なる条件で示すと、 $S_{1k} = S_{3k} = \sigma'_{mi}$ 、 $k=1$ なる関係が得られる。これを初期条件として、微分方程式を解くと、

$$\frac{S_1}{\sigma'_{mi}} = \frac{3}{(2-N)k + (1+N)} \exp \left\{ -\mu \frac{\sqrt{1-N+N^2} (1-k)}{(2-N)k + (1+N)} \right\}$$

$$\frac{S_z}{\sigma_{mi}} = \frac{3k}{(2-N)k + (1+N)} \exp \left\{ -\mu \frac{1-N+N^2(1-k)}{(2-N)k + (1+N)} \right\} \quad (5)$$

となる。

2. $\sigma_{nd} = 0$ の場合

$\sigma_{nd} = 0$ の場合、特異点 $\sigma'_1 - \sigma'_3$ 上に原点となり、 $k = \sigma'_3 / \sigma'_1$ である。等方圧縮された粘土をまわりの緩速せん断した場合に σ_{nd} が 0 になる傾向がある。レテが正圧縮粘土のせん断特性の最も基本的な性質を示すものであると考えられる。 $N = 0$ は通常の三軸圧縮試験に相当する応力状態を表すが、その時のストレスパスが μ 値によってどのようにかわるかを示したのが図-1である。

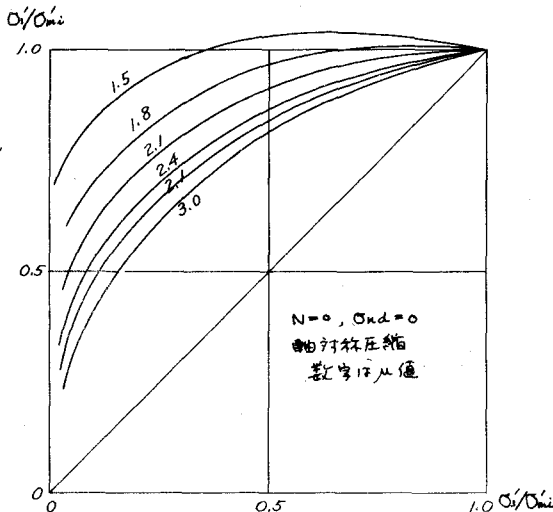


図-1 軸対称圧縮試験における理論曲線

3. $\sigma_{nd} > 0$ の場合

$\sigma'_1 - \sigma'_3 \geq \sigma_{nd} > 0$ の場合のストレスパスは $\sigma_{nd} = 0$ のストレスパスを σ'_1 方向に $(2-N)\sigma_{nd}/3\sigma'_{mi}$ 、 σ'_3 方向に $-(1+N)\sigma_{nd}/3\sigma'_{mi}$ だけ平行移動させることにより得られる。等方圧縮された粘土は圧縮終了時にはせん断応力を受けまい。このような粘土を非排水せん断すると $\sigma'_1 - \sigma'_3$ が σ_{nd} をこえるまではダイレイタションを起そうとしなかったの間けき水圧は発生せず、 σ'_{mi} は σ'_{mi} から変化しない。異方圧縮された粘土は圧縮終了時におい、すなわち σ'_1 のせん断応力より大きくなり、この主応力差はその後非排水せん断中の間けき水圧の発生に寄与しない。このような異方圧縮粘土の場合にもまわりの緩速せん断する場合にせん断初期から顕著な間けき水圧の発生がみられると思われるが、通常行われている程度のせん断は σ'_1 の主応力差が加えられるまで間けき水圧の発生量は小さい。しかし主応力差がある σ_{nd} より大きくなると急に間けき水圧が発生する。異方圧縮された粘土に対するこのような考察は今後より豊富なデータをもつて再検討すべきであると思われるが、現在の段階では充分な近似度を持つと考えられる。

4. 中間主応力の影響

$\sigma_{nd} = 0$ 、 $\mu = 1.5$ の場合のストレスパスに対する N の影響を示したのが図-2である。 μ が大きくなると $N=1$ (compression) よりも $N=0$ (extension) の場合の方が同じ $\sigma'_1 - \sigma'_3$ に対する間けき水圧の発生が大きくなり、またストレスパスにおける中間主応力の影響も大きい。多くの土構造物は2次元問題としてとりあつかわれ、また実際にも平面ひずみ状態で荷重に対して抵抗することが多いと考えられる。熊部・原田によれば、せん断中平面ひずみ状態を維持するために N が変化する範囲は、0.2-0.4 である。図-2のストレスパスはせん断中 N が変化しないことを条件にして得られたもので

あるが、 $N=0.2 \sim 0.4$ に対応する範囲は非常に小さい。図-3はいろいろの μ に対応する $N=0.2 \sim 0.4$ の範囲を示す。したがって平面ひずみ状態でのストレスパスモジュールの範囲から大きくはずれることは無いと思われる。野部・原田によって得られたストレスパスが図-2と同様の傾向を持つていることから以上のような近似が可能ではないかと思われる。

また、せん断中の N の変化を許して、 $\tau_{oct} \sim \sigma'_{mi}$ 関係を求めよう。式(4)において $\tau_{oct} \sim \tau_{nd} = \tau$ とおき、初期条件として $\sigma'_{mi} = \sigma'_{mi}$ で $\tau = 0$ を用いて解くと、

$$\frac{\tau}{\sigma'_{mi}} = -\frac{\sqrt{2}}{\mu} \frac{\sigma'_{mi}}{\sigma'_{mi}} \log_e \frac{\sigma'_{mi}}{\sigma'_{mi}} \quad (6)$$

が得られる。すなわち σ'_{mi} が同じであれば同一の μ に対応するストレスパスは、 $\tau_{oct} \sim \sigma'_{mi}$ 図上では τ_{nd} / σ'_{mi} だけ平行移動することによって τ_{nd} にかかわらず同一のカーブになり、中間主応力比 N のいかに左右されない。したがってまたゆるぎの少ないせん断され、 $\tau_{nd} = 0$ とみよせる場合には、 $\tau_{oct} \sim \sigma'_{mi}$ 図上におけるストレスパスは N に無関係に与えられる。

5. 粘土の骨組構造と μ 値

μ 値は膨潤指数 G_0 に反比例する⁴⁾ため、P.I.が高くて綿毛構造を持つ粘土ほど μ 値が小さく、したがって間隙水圧の発生が少ない傾向が予想される。

式(4)から同一の μ 値、 τ_{nd} / σ'_{mi} を持つストレスパスは $\sigma'_1 \sim \sigma'_3$ 図上で原点を中心として相似の関係にあることが導かれるが、多くの実験データは高い圧密圧力で圧密された粘土の μ 値が異なるものに較べていくらか大きいことを示している。このことは高い圧密圧力で圧密された粘土の骨組構造が変形に対して安定なものとあり、せん断に対してより著しいグレイテンションを起すことを意味している。図-4はHenkel and Sowa⁴⁾により得られたストレスパスと理論曲線との比較である。破壊点付近でストレスパスが急上昇しているのは圧密前の粘土ペーストの初期含水比が低かったためで、これと較べてずっと高含水比としておけばこのような乱れはみられずと仮定して述べられている。したがって、そのようにすれば理論値との一致はさらによくなるであろうと思われる。高圧密された粘土は等方圧密粘土に較べて粘土粒子が互面に平行に配列されやすく、変形に対して安定でグレイテン

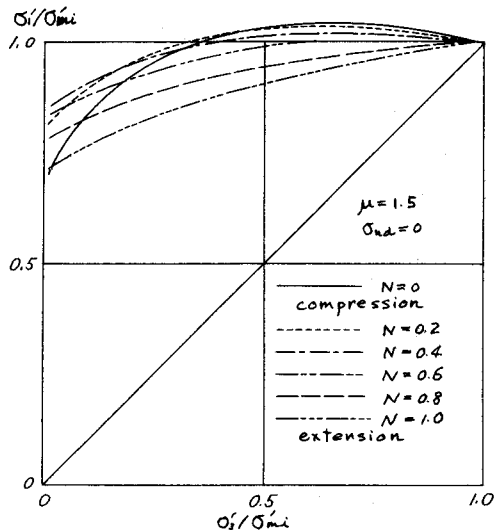


図-2 中間主応力の影響

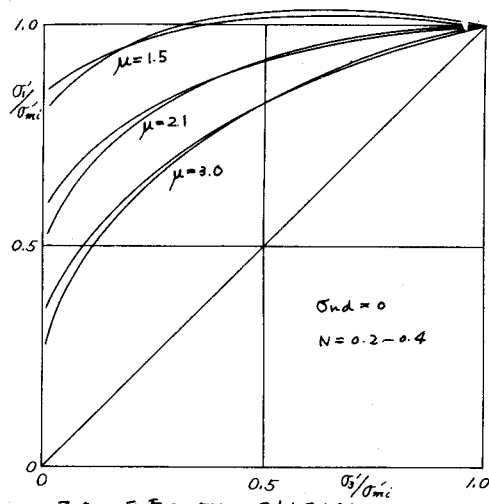


図-3 平面ひずみのストレスパス

ンシーが著しいと考えられる。K₀を圧入された粘土のμ値がかなり大きいことはこのよう推測を裏づけるものであるといえよう。また等圧圧入粘土でもσ_{nd}が大きいものはσ_{nd}=0のものに較べμ値が大きい。これはやはりせん断によつてせん断初期にダイレイタションシーも起こすことができなかった粘土がσ₁'-σ₃'≥σ_{nd}とびつて急激に間隙水圧を発生する下の、見掛け上大きいμ値をとると考えられる。

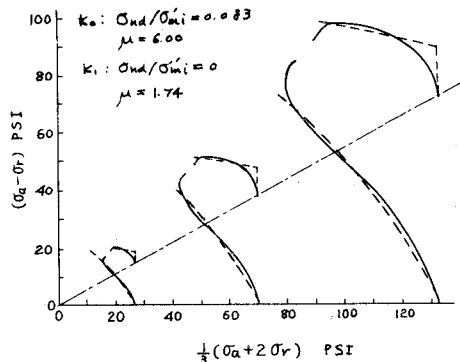


図-4 Henkel and Sawaによるストレスパス

6. 破壊に関する考察

式(7)をσ_m'/σ_{vi}'に関して微分し、0と置くこと

によつて(σ_{oct}-σ_{nd})_{max}の位置を求めると、σ_m'/σ_{vi}' = 1/e のとき

$$\left(\frac{\sigma_{oct} - \sigma_{nd}}{\sigma_{vi}'} \right)_{max} = \frac{\sqrt{2}}{\mu} \frac{1}{e} \quad (7)$$

となる。この場合、eは自然対数の底であるが、(σ_{oct})_{max}の位置はμの値いかにかわらずσ_m'/σ_{vi}'が一定値のところでたなる。μが小さい場合にはこれに相当するφ'は非常に大きい値となり、現実のストレスパスがそこのまゝのびまくとは考えられぬが、μが大きい場合にはこの式による(σ_{oct}-σ_{nd})_{max}に到達する可能性がある。このようにμが大きい正現在底粘土のピーク強度は式(7)、すなわちvon Mises 系の破壊応力条件に従うことになる。

7. 一面せん断機による等体積せん断

L.L. 51.5%, P.L. 31.2%のシルト質粘土を一面せん断機を用いて0.05 mm/min.のばやまで等体積せん断した結果が図-5にある。図中の理論線はN=0として与えられる応力状態を、その時点でφ'が最もモビライズされている面上でσ₁に変換して得られるストレスパスである。一面せん断中

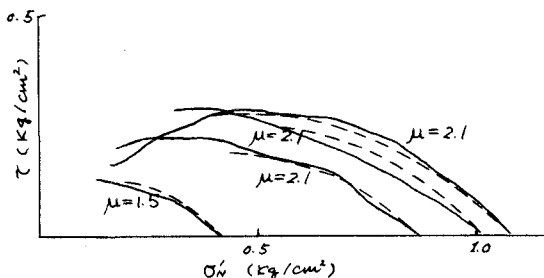


図-5 一面せん断によるストレスパス

の試料にかかる主応力に関するこのような推定は問題がある下の、特にμの値そのものの信頼性は保証できないが、これらのストレスパスがσ_{nd}=0とした理論曲線によく一致するのは事実である。

以上の諸端は図式から機械的に導かれるものである下の、さらに多くの実験的事実が得られれば再検討されるべきものであろう。しかし現段階ではせん断特性の近似的な表現として有用であると思われる。

参考文献

- 1) 柴田徹：粘土のダイラチンシーについで 京大防災年報中6号 5.38.7
- 2) 乾部孝康：繰り返し粘土のダイラチンとせん断強度についで、土木学会論文 135号
- 3) 乾部孝康：繰り返し粘土の平面変形条件についで、土木学会論文 147号
- 4) Henkel and Sawa: The Influence of Stress History on Stress Paths in Undrained Triaxial Tests on Clay, Laboratory Shear Testing of Soils, 1963, ASTM Special Technical Pub. No 361