

不飽和土の変形・降伏挙動と構成式について

山口大学工学部 正 員 村田秀一 兵動正幸 安福規之
学生員○館上和史 山本浩志

まえがき： 飽和土の分野においては、有効応力の原理 ($\sigma' = \sigma - u$) の立場から、その力学挙動を表す構成式が数多く提案されている。それに対して不飽和土の領域では、その力学挙動は飽和土のそれに比べて複雑なものとなるため、いまだに明確な有効応力式が確立されていないのが現状である。そこで本研究では、異方圧縮除荷履歴を与えた後、 p 一定せん断あるいは q 一定 p 載荷試験を行うことにより、不飽和土の降伏曲線の形状を明らかにし、それに不飽和土の降伏関数について若干の考察を加える。

応力パラメータの定義と試験条件： 不飽和土においては、飽和土の場合と違い土の空隙に気泡が存在するため、空隙水圧 u_w と空隙空気圧 u_a の釣り合いから空隙圧として負圧が生じる。ここではこのことを考慮して以下の応力パラメータを用いていて実験的に検討を行っている。

$$\text{平均主応力} : p = ((\sigma_1 - u_w) + 2(\sigma_3 - u_w)) / 3 - u_a \quad (1)$$

$$\text{サクション} : Su = u_a - u_w \quad (2)$$

$$\text{軸差応力} : q = (\sigma_1 - u_w) - (\sigma_3 - u_w) \quad (3)$$

これらの応力パラメータとしての有効性は、実験的にも証明されているので¹⁾、本研究では主に u_w を大気圧に解放して $u_w=0$ として試験を実施した。

実験に用いた試験機は、従来の三軸圧縮試験機に上部ペダスタルから空隙空気圧 u_a を載荷させる機能を加えたものである。なお、体積変化は側液の出入りにより測定しており、側圧載荷に伴う側液自体の変化量やアクリル円筒の膨張量、温度変化によるリーク量を考慮に入れ、試験は恒温条件で行い、毎回試験の直前に実験に用いる脱気水を用いてリーク量検定を実施することにした。

また、試験に用いた試料はシルト質粘性土で、その指数的性質は表1に示している。

異方圧縮履歴試験：今回実施した試験の応力経路は、図1に示したとおり Su 一定 ($Su=25, 100\text{kPa}$)、 $\eta=0.9$ の条件で $p=320$, $q=288\text{kPa}$ まで異方圧縮履歴を与えた後に任意の応力点から p 一定せん断あるいは q 一定の p 載荷試験を実施するものである。また、比較のために履歴を与えない場合の同様の試験も行っている。なお、実施した試験の条件と得られた結果を表2に示している。

図2、3は、試験結果の一例として $p=200$, $q=180\text{kPa}$ からの p 一定せん断試験および p 載荷試験から求められた $q-\epsilon_1$ 関係、 $e-\log p$ 関係を履歴のある場合とない場合でまとめて示したものである。さらに、これらの関係から図中に示したように降伏応力点を決め、各降伏点を $p-q$ 平面にプロットしたのが図4である。この図には $Su=25, 100\text{kPa}$ の場合の降伏曲線の形状を併せて示している。この図から、降伏曲面は Su が大きくなると破壊包絡線に依存した形で q 軸方向に広がるのがわかる。

不飽和土の降伏関数：以上の実験結果から、最終的には不飽和土の構成式の提案することを目的として、ここでは降伏関数について考える。まずこれまでの研究成果¹⁾より、以下の降伏関数を仮定する。

$$f = (p + p_r)^2 - (p_0 + p_r)(p + p_r) + \frac{q^2}{M^2} = 0 \quad (4)$$

ここで、 p_r はサクション Su を見かけ上 p と等価な値に置き換えたパラメータで、破壊包絡線と p 軸の延長線との交点の値であり力学的には見かけ上の粘着力と考えられるものである。この p_r は図5に示した $Su-p_r$ 関係から Su の関数として表される。ここで $p_r=0$ とすると飽和土の場合の修正Cam-Clayモデルの降伏関数と等価なものとなる。この p_r は、不飽和土の応力ひずみ挙動を図5に示したように Su の値に依存しない形で評価することができるものである。また、 p_0 は飽和土の場合で言う先行圧密応力であり、不飽和土の領域においてこの p_0 をどのように考えるかが問題となってくる。特に Su 載荷除荷時にはサクション解放に伴うコラプスなどの問題もあり、その取り扱いが難しい問題となる。図6には、上の降伏関数から得られる降伏曲線の形状

を p - q 平面上に描いたものである。この図からは、図4の実験から得られた結果とは、形状が多少異なるものの、その傾向は似たものとなった。以上 S_u 一定条件での p - q 平面的降伏曲線の形状について述べてきたが、今後は S_u 方向も含めた p - S_u - q 空間での降伏曲面の形状について実験的検討を行ってきたい。

参考文献： 1) 村田・兵動・安福・館上：サクシオンに着目した不飽和土の弾塑性挙動について、第23回土質工学研究発表会、pp.567-658,1988

表1 試料の指数的性質

比重	G_s	2.690
液性限界	W_L (%)	62.40
塑性限界	W_p (%)	40.90
塑性指数	I_p	21.50
粒土組成	粗砂分 (%)	9.0
	細砂分 (%)	21.0
	シルト分 (%)	41.0
	粘土分 (%)	29.0

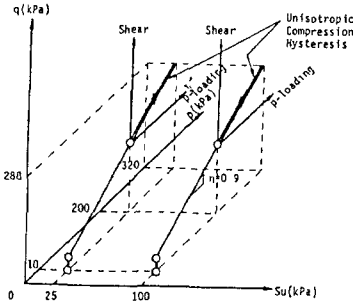


図1 p - S_u - q 空間応力経路図

表2 試験条件と結果

Test No	試験条件 (単位: kPa)				降伏応力	
	S_u	せん断開始応力 P	履歴	せん断方向	q_v or p_v (kPa)	破壊応力 q_f
AH-01	25	200	180	無	q 載荷	308
AH-02	25	200	180	有	q 載荷	357
AH-05	100	200	180	有	q 載荷	393
AH-06	100	200	180	有	q 載荷	390
AH-07	25	180	144	有	q 載荷	327
AH-08	25	180	144	有	q 載荷	287
AH-03	25	240	216	有	q 載荷	269
AH-10	25	240	246	有	p 載荷	354
AH-11	25	200	180	有	p 載荷	—
AH-12	25	200	180	有	p 載荷	—
AH-13	100	80	72	有	q 載荷	*
AH-14	100	80	72	有	p 載荷	225
AH-15	100	200	180	有	q 載荷	—
AH-16	100	200	180	有	p 載荷	—
AH-17	100	10	0	有	p 載荷	—
AH-18	25	10	0	有	q 載荷	—

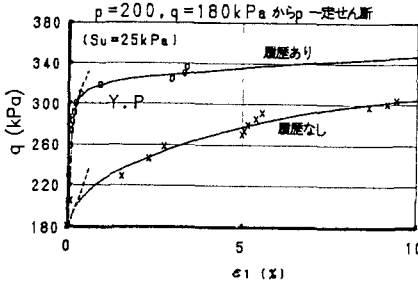


図2 軸差応力-軸ひずみ関係

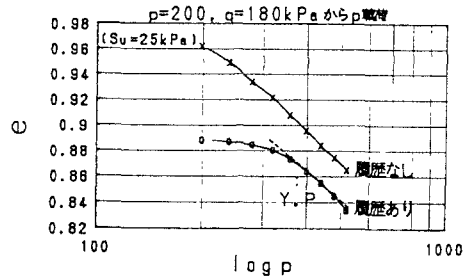


図3 e - $\log p$ 関係

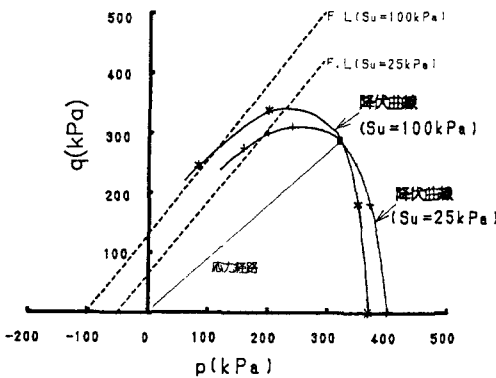


図4 p - q 平面上の降伏曲線の形状

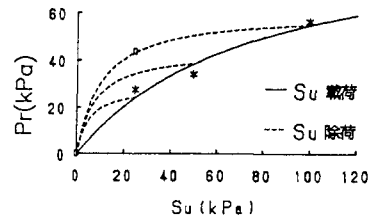


図5 S_u - P_r 関係

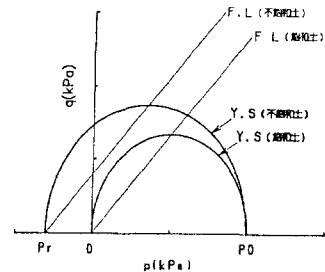


図6 降伏関数から得られる降伏曲線