

吸力对弱膨胀土强度贡献的试验研究与预测分析

陈 伟¹, 孔令伟¹, 郭爱国¹, 陈建斌²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.武汉市市政工程设计研究院, 武汉 430023)

摘 要: 对部分应用土-水特征曲线来预测非饱和土抗剪强度的公式进行了归纳分析。应用压力板仪与非饱和三轴仪, 测试了荆门原状弱膨胀土的土-水特征曲线和控制吸力的非饱和三轴抗剪强度参数, 并将试验结果与各抗剪强度公式的预测值进行对比, 分析了各强度公式的局限性。试验结果表明, 非饱和原状膨胀土的净法向应力摩擦角随着吸力的不同而变化, 根据双应力变量理论确定的吸力对强度的贡献与围压有关, 不同围压下吸力对强度的贡献不同, 表观凝聚力 τ_{us} 与吸力间符合幂函数关系。

关 键 词: 非饱和土; 土-水特征曲线; 膨胀土; 吸力; 抗剪强度

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Experimental study and predictive analysis of contribution of matrix suction to shear strength of weak expansive soil

CHEN Wei¹, KONG Ling-wei¹, GUO Ai-guo¹, CHEN Jian-bin²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Municipal Engineering Design Institute, Wuhan 430023, China)

Abstract: Several formulas for predicting the shear strength of unsaturated soils by the soil-water characteristic curve (SWCC) are summarized and discussed. The SWCC and unsaturated shear strength parameters of intact weak expansive soil from Jingmen City, Hubei Province are measured by the pressure plate and unsaturated triaxial apparatus; based on the comparison of the test results with the predictive values of the several shear strength formulas, the limitations of the formulas are analyzed. The results show that the friction angle of the net normal stress varies with the change of matrix suction for the unsaturated intact expansive soil. According to the double stress variables theory, the contribution of matrix suction to the shear strength of unsaturated expansive soil is associated with cell pressure and different in different cell pressure levels; it is suitable that the variable characteristic of the apparent cohesion τ_{us} with suction is described by power function.

Key words: unsaturated soil; soil-water characteristic curve; expansive soil; suction; shear strength

1 概 述

工程中遇到的土大多处于非饱和状态, 应用非饱和土力学理论认识与解决工程问题十分必要。吸力对非饱和土变形与强度特性具有决定性作用, 是非饱和土力学的核心^[1], 由于非饱和土性状复杂、难测、多变, 其强度理论至今还不完善, 难以直接工程应用。为此, 以某些假设条件或大量试验数据为基础, 建立半经验性非饱和土抗剪强度公式, 是推动非饱和土力学理论工程应用的有效途径。

膨胀土富含亲水性黏土矿物, 其强度随含水率变化波动幅度大, 是一种严重的灾害性土, 给世界

各国的建筑、铁路、公路及水利等工程造成了巨大破坏。随着膨胀土地区工程建设的日益增多, 非饱和和膨胀土对工程建设的安全性产生重要影响, 其强度和变形特性已成为近年来的研究热点^[2]。

本文归纳了部分非饱和土抗剪强度预测公式, 并通过室内试验分别测定了原状弱膨胀土的土-水特征曲线(SWCC)和非饱和抗剪强度, 将试验结果与各强度公式的预测值进行了对比分析。

2 非饱和土抗剪强度公式

非饱和土强度理论以 Mohr-Coulumb 准则为基础, 目前有两类强度公式被岩土工程界广泛认可,

收稿日期: 2006-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40772185); 湖北省青年杰出人才基金项目(No. 2006ABB012)。

作者简介: 陈伟, 男, 1981年生, 硕士研究生。主要从事特殊土试验研究工作。E-mail: chenwei04@mail.gucas.ac.cn

一类是 Bishop 公式:

$$\tau = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (1)$$

另一类是 Fredlund 的双应力变量公式:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: c' 为有效黏聚力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; φ' 为有效内摩擦角; χ 为有效应力系数, 主要取决于饱和度; $(\sigma - u_a)$ 为破坏时在剪切面上的净法向应力; φ^b 为基质吸力引起的抗剪强度增量的摩擦角。

Bishop 公式是将非饱和土的有效应力代替饱和土的有效应力得到的, 单从有效应力的角度来考虑非饱和土的强度特性, 其实质仍旧是饱和土的 Mohr-Coulomb 强度公式。该理论不能很好地解释非饱和土的体变特性, 同时式中有有效应力参数 χ 难以确定。

Fredlund^[3]认为, 仅用有效应力这一应力状态变量难以系统认知非饱和土的力学性质, 建议引入基质吸力 $(u_a - u_w)$ 作为另一独立的应力状态变量来描述非饱和土的应力状态, 提出了强度公式 (2)。将其与式 (1) 对比, 不难得知 φ^b 将同系数 χ 一样与饱和度(吸力)相关, 同样需要由试验结果获得。

在式 (1)、(2) 都难于应用于工程实际的情况下, 许多学者根据某些理论假设或大量试验数据的统计分析建立了非饱和土强度的预测公式。

Oberg 等^[4]认为, χ 反映了土体剪切面上水相的面积占总孔隙面积的比例分数 A_w / A_{tot} , 并且用饱和度来代替该比例分数, 其误差是可以接受的。于是得到了用饱和度和吸力预测非饱和土抗剪强度的公式为

$$\tau = c' + (\sigma - A_w u_w / A_{tot} - A_a u_a / A_{tot}) \tan \varphi'$$

$$\text{即} \quad \tau = c' + [\sigma - S u_w - (1 - S) u_a] \tan \varphi' \quad (3)$$

按照双应力变量理论, 可组合为

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) S \tan \varphi' \quad (4)$$

式中: S 为土体饱和度。对于高进气值的黏性土, 由于随着吸力的增大其饱和度减小缓慢, 该式计算值往往比实际值大, 一般认为, 该式适用于砂土或粉土。

Khalili 等^[5]通过大量统计分析他人的试验数据, 建立起了有效应力系数 χ 同土体的吸力和进气值之间的经验关系式为

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0.55} \quad (5)$$

据称该式适用于所有种类的土, 其中 $(u_a - u_w)_b$ 为土体的进气值。

Vanapalli 和 Fredlund 等在文献[6]提出了用土-水特征曲线和饱和土抗剪强度参数来预测基质吸力引起的抗剪强度 τ_{us} 的经验性分析公式为

$$\tau_{us} = (u_a - u_w) \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \quad (6)$$

式中: θ_s 、 θ_r 分别为饱和与残余体积含水率; θ 为与各吸力相对应的体积含水率。对于高塑性、持水能力强的黏性土, 残余含水率难以测得, 若 θ_r 取值过大, 可能会导致预测值偏低。

孔令伟等^[7]认为, 含浅层气砂土的抗剪强度可用下述公式表述:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + \tau_{us} \quad (7)$$

式中: $\tau_{us} = a(u_a - u_w)^b$, a 、 b 为土性参数, 即砂土表观凝聚力 τ_{us} 与吸力符合乘幂函数关系。

此外, 还有诸多学者认为, 吸力对抗剪强度的贡献呈双曲线形式^[8, 9]。Orencio^[10]给出了用双曲线函数预测非饱和土抗剪强度的简单方法, 仅需用到饱和抗剪强度参数以及风干土样的残余抗剪强度参数, 该法虽简单, 但适用土类有限, 当吸力增大到一定程度, 砂性土的抗剪强度会减小^[11, 12], 双曲线型的强度公式并不能完全适用于砂性土。对于膨胀土乃至其他种类的特殊土, 还需要从其物质组成、物理化学性质、微观结构特征等角度出发来研究其力学特性^[13]。

事实上, 国内外在非饱和土力学研究中已取得多方面的研究成果, 取得了可喜的进展, 但真正距离形成科学完整理论体系还有许多难题有待深入探讨。由于吸力量测难度大, 很多学者从工程实用角度出发, 试图建立非饱和土的某些物性参数与其强度的关系式^[14, 15]。由于篇幅有限, 在此不再讨论。

3 试验研究

3.1 试验土样

试验用土取自湖北荆门, 黄褐色, 呈硬塑状态, 含黑色铁锰结核, 局部有白色填充物, 其基本特性见表 1 与表 2。由此可见, 该土的液限、塑性指数、自由膨胀率、黏粒含量、胀缩总率以及矿物组成均在膨胀潜势等级判定标准范围内^[16], 属弱膨胀土。

表 1 试验用土的物性参数

Table 1 Physical properties of the tested soil

指标	量值	指标	量值
天然含水率 / %	21.1~22.3	重度 / $kN \cdot m^{-3}$	19.9
比重	2.72	干密度 / $g \cdot cm^{-3}$	1.68
自由膨胀率 / %	42	液限 / %	42.1
收缩系数	0.26	塑性指数	21.2
缩限 / %	9.9	体缩率 / %	6.3
胀缩总率 / %	0.76		

表 2 矿物成分与颗粒组成

Table 2 Mineral compositions and particle component

矿物组成	百分比 / %	颗粒组成 / %	百分比 / %
伊利石	35 ±	<2 μm	15.0
蒙-伊混层	5 ±	<5 μm	29.5
高岭石	40 ±	0.075~0.005 mm	57.3
石英	20 ±	>0.075 mm	13.2

3.2 非饱和膨胀土的土-水特征曲线测定

土-水特征曲线试验是在陶土板进气值为 15 Bar 的压力板仪上进行的。根据轴平移原理，保持孔隙水压力为定值(通常为大气压)，对土样施加的气压即为所需的吸力值。该试验的关键在于试样与陶土板的接触紧密程度，陶土板应保持饱和并且与土体内水处于连通状态，以使得陶土板中的孔隙水压能够传递到土样中，否则所测吸力将比实际值低。

试验共制备 8 个原状土环刀样，在饱和土样的过程中对其膨胀变形加以限制。由于原状样土质不均匀，所测得的特征曲线差异性难以避免，尤其是在高吸力时含水率相差较大。图 1 为其中 4 个环刀样脱湿过程的土-水特征曲线，该结果已按照文献 [17]的方法进行修正，当吸力不超过 600 kPa 时，最终试验结果取其平均值。

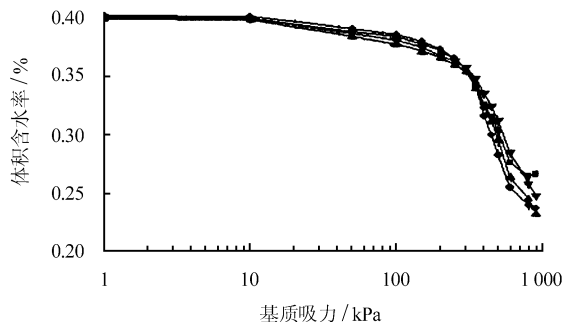


图 1 试验土样土-水特征曲线

Fig.1 Soil-water characteristic curve of the tested soil

土-水特征曲线上有两个特征点，即进气值和残余含水率对应值。一般来说，随着土颗粒粒径的减小及干密度、塑性的增加，土的进气值增加。粉质

黏土的进气值在 10~100 kPa，而黏性土的进气值可达几十至几百千帕，试验测得荆门膨胀土的进气值为 210 kPa。残余含水率是土-水特征曲线中另一个重要参数，以往文献中对残余含水率的解释并不统一，一般通过作图的方法来确定残余含水率^[3]。然而对于高塑性黏土，完整的土-水特征曲线难以测得。龚壁卫等^[18]提出，对于非饱和膨胀土可以考虑用工程中常用的塑限含水率替代残余含水率。后文按公式 (5) 预测抗剪强度时将采用此方法。

3.3 非饱和膨胀土的三轴试验研究

为了研究吸力对抗剪强度的贡献，在非饱和土的三轴试验剪切过程中，需要利用轴平移技术控制土样的吸力保持稳定，因此，在非饱和土三轴仪压力室底座上嵌有高进气值陶土板。考虑到将饱和膨胀土样置于三轴仪中脱湿到预期控制吸力耗时太长，并且原状土样经过吸湿、脱湿循环后，其结构性可能会受到损伤，影响试验结果。本研究在试验土样制备过程中，先以压力板试验测得的土-水特征曲线为参照，将天然含水率的土样采取室内风干脱湿或蒸汽增湿的方法使其提前达到预期吸力控制值所对应的含水率，放入保湿缸内保存以便含水率分布均匀，然后在剪切试验之前在非饱和三轴仪中控制吸力固结，以期加快试验研究进度。固结过程中吸力达到平衡状态的判别标准为 24 h 内试样的排水或吸水量小于试样体积的 0.02 %。试验土样直径和高度分别为 5.0 cm 和 10.0 cm，剪切速率为 0.0032 mm/min，取剪切过程中的峰值强度为破坏值，试验方案及结果如表 3 所示。

表 3 试验方案及强度指标

Table 3 Test program and strength parameters

基质吸力 / kPa_z	不同净围压下最大偏应力 / kPa_a			强度参数	
	50	75	100	c / kPa_a	$\phi / (^\circ)$
0	171.43	205.47	239.53	33.6	23.9
100	271.44	311.94	344.01	60.7	26.1
200	356.32	402.97	456.55	71.2	30.3
400	444.57	491.43	541.82	88.4	31.6
500	471.07	530.41	576.98	112.8	29.5
600	508.16	550.18	607.23	123.4	28.8

表中强度参数 c 、 ϕ 为相同吸力、不同净围压下土样破坏强度包线在抗剪强度与净法向应力二维平面上的投影^[3]。对于饱和和样， $c = c'$ ， $\phi = \phi'$ ；对于非饱和和样， $c = c' + \tau_{us}$ ， τ_{us} 为吸力对抗剪强度的贡献，即表观凝聚力，将其包含在黏聚力截距中并不是意味着它是黏聚力项的一个分量，而是便于将三维破坏包面移到二维图中； ϕ 为土处于非饱和状态

时净法向应力的摩擦角。试验结果表明，非饱和和原状弱膨胀土的净法向应力摩擦角与饱和样的摩擦角 ϕ' 不相等，并且随着含水率的改变而发生变化，即对于原状膨胀土，双应力变量公式 (2) 中的两个摩擦角都与吸力相关。

4 强度预测值与试验值对比分析

在测得土-水特征曲线和饱和土样的强度参数 c' ， ϕ' 后，根据公式 (4)~(6) 可对非饱和土的抗剪强度进行预测。为了方便，图 2 中仅给出了各公式对表观凝聚力的预测结果。由于非饱和膨胀土的静围压摩擦角与 ϕ' 不等，为了便于预测结果与试验值的对比，将试验结果按照围压的不同分为 3 组，仍旧按照 Fredlund^[3] 的双变量理论，假设净围压的摩擦角保持为 ϕ' 不变，仅探讨吸力单独变化时土样的强度变化情况。

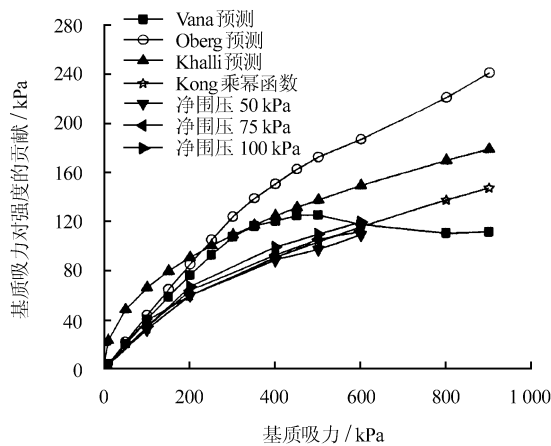


图 2 强度预测值与试验结果比较

Fig.2 The comparison of predictive values with test results of shear strength

从图 2 不难发现，对于荆门弱膨胀土，Oberg 等人提出的公式 (4) 明显不适用，其预测值大大高于实际值；Khalili 等提出的公式 (5) 预测出的强度随吸力增长的速率与实测情况相似，但由于试验用土的干密度大，所测得的土体进气值高，使得预测值也大于实际实测值，在吸力增长的起始阶段该式预测值比实测值高出很多，吸力的摩擦角 ϕ^b 也比净法向应力的摩擦角 ϕ' 大；Vanapalli 等提出的公式 (6) 预测值与实测值较为接近，并且其预测值受残余含水率取值的影响， θ_r 取值偏高可能会导致强度预测值过早出现衰减。另外，这 3 个公式预测值的差别是随着吸力的增大而愈加显著。

与此同时，图 2 也给出了按照式 (7) 得到的拟合结果，对于原状弱膨胀土， τ_{us} 与吸力之间的关系

仍旧符合乘幂函数关系，其中参数 $a = 2.582 5$ ， $b = 0.594 4$ ，与文献[7]中的试验结果对比（粉砂 $a = 0.758 5$ ， $b = 0.880 8$ ；细砂 $a = 1.009 8$ ， $b = 0.749 4$ ），膨胀土的 a 值较大，而 b 则较小。

对比图 2 中所示的不同净围压下吸力对抗剪强度贡献的实测值可以看出，不同围压下吸力对强度的贡献不同，如图 3 所示，即吸力对抗剪强度的贡献受净围压的影响，其内在机制为在较高的净围压下，土样孔隙减小、进气值增大， ϕ^b 的衰减得以延缓^[3]，故相同吸力时，净围压大的土样其强度也大。

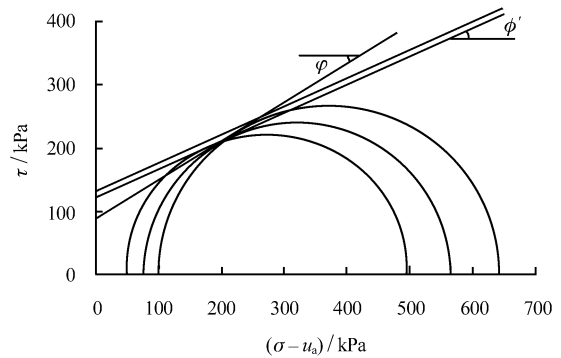


图 3 吸力对抗剪强度的贡献与净围压关系示意图

Fig.3 Sketch map of variable characteristic of τ_{us} with net cell pressure

实际上，上述是从双应力变量理论角度对表 3 中摩擦角发生变化做出的解释，其假设为式 (2) 净法向应力的摩擦角为常数，即饱和状态有效摩擦角。然而，吸力对抗剪强度的贡献还受净围压影响，该部分抗剪强度增量的主导因素是净围压，则不同净围压下式 (2) 中的第二项也不同，即式 (2) 中的两个摩擦角都是变化的。因此，借助双应力变量理论的解释是否找到了表 3 中 ϕ 值变化的实质原因还值得进一步探讨。

由文献[7]的试验结果可知，摩擦角 ϕ 值对于砂土变化并不明显。为此，笔者认为对于膨胀土而言，还应该从其颗粒间的相互接触关系及其联结形式来论证其机制。当吸力增高、含水率减小时，土体内的细微颗粒由于各种物理化学作用而胶结形成较大的团粒，团粒有效粒径大小的增大使得剪切试验中团粒间的滑动与滚动规律与过程发生了改变，从而导致表 3 中净围压摩擦角产生了显著变化。

5 结论

(1) 文中所述的各种利用土-水特征曲线来预测非饱和土抗剪强度的公式都有其局限性。由于膨胀土富含亲水性矿物成分，持水性强，上述各公式的

预测值都比实验值高,且由于吸力量测困难,这类公式依旧难以应用于工程实际。

(2) 膨胀土的净法向应力摩擦角随着土体吸力的改变而发生显著变化。根据双应力变量公式(2),可解释为吸力对强度的贡献受净围压的影响,即 ϕ^b 不但随着吸力的增大而改变,与净围压也相关。

(3) 与砂土的试验结果类似,原状弱膨胀土的表观凝聚力 τ_{us} 与吸力的关系用乘幂函数形式描述是合理可行的。

值得说明的是,对于膨胀土等特殊土类,需要加强对其微观结构特征的研究,建立各种切实有效的微观物理、力学模型进行数学处理,从而建立起微观结构与强度、变形等工程性质之间的定量关系。

致谢: 本文在试验实施过程中,承蒙长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室周武华和中国科学院武汉岩土力学研究所陈碧君的热情帮助,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] TOLL D G. A framework for unsaturated soil behaviour[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(1): 31—44.
- [2] GENS A, ALONSO E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1992, 29(6): 1 013—1 032.
- [3] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Unsaturated Soil Mechanics*[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] ANNA LENA, OBERG, GORAN, SALLFORS. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1997, 20(1): 40—48.
- [5] KHALILI N, KHABBAZ M H. A unique relationship for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. **Geotechnique**, 1999, 48(5): 681—687.
- [6] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUF AHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 379—392.
- [7] KONG LING WEI, GUO AI GUO, CHEN JIAN BIN, et al. On strength property of gassy fine sand and model tests of pile foundation[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Japan: Osaka, 2005: 2 009—2 012.
- [8] 沈珠江. 当前非饱和土力学研究中的若干问题[C]//区域性土的岩土工程问题学术论文集. 北京: 原子能出版社, 1996: 1—10.
- [9] MIAO L, LIU S, LAI Y. Research of soil—water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil[J]. **Engineering Geology**, 2002, 65(4): 261—267.
- [10] ORENCIO MONJE VILAR. A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(10): 1 088—1 095.
- [11] JULIAN K M, GAN D, FREDLUND G. Shear strength characteristics of two saprolitic soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(4): 595—609.
- [12] DRUMRIGHT E E, NELSON J D. The shear strength of unsaturated tailings sand[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils. Paris. 1995: 45—50.
- [13] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] YANG D Q, SHEN Z J. Laboratory investigation on the strength and stress—strain relationship of an unsaturated compacted clay[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Expansive soils. Dublin, 1992: 196—200.
- [15] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土的强度特性研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(7): 1 009—1 013.
- [16] TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Study on strength behavior of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(7): 1 009—1 013.
- [17] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [18] 张华, 陈守义, 姚海林. 用收缩试验资料间接估算压力板试验中的体积含水量[J]. *岩土力学*, 1999, 20(2): 22—26.
- [19] ZHANG Hua, CHEN Shou-yi, YAO Hai-lin. Estimation of volumetric water content in the pressure plate test by use of shrinkage test data[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 22—26.
- [20] 龚壁卫, 詹良通, 刘艳华. 非饱和膨胀土的残余含水率与缩限的关系[C]//第二次南水北调膨胀土渠坡稳定问题研讨会文集. 北京: 万国学术出版社, 1998.