

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.004

低应力状态下干湿-冻融循环对 季冻区膨胀土强度的影响

高小云¹, 刘家国², 赵贵涛¹, 邹维列¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 深圳市地质局, 广东 深圳 518023)

摘要: 考虑渠道浅层土体的实际应力状态, 开展了一系列低围压下的三轴固结不排水剪切试验, 分别研究了干湿循环、冻融循环和干湿-冻融循环三种环境作用对取自黑龙江大庆的膨胀土的应力-应变关系和抗剪强度的影响。结果表明, 在低围压下: 未经历和经历了三种循环作用的试样, 其应力-应变曲线总体上表现为弱应变软化型或应变稳定型; 相同围压下, 经历了三种循环作用的试样均随作用次数的增加, 产生破坏强度明显降低的现象, 其中经历干湿-冻融循环的试样在作用8次后趋于稳定, 其试样破坏强度降低的幅度最大; 经历三种循环作用后, 试样黏聚力均呈指数型衰减, 而内摩擦角变化不大, 其中经历干湿-冻融循环作用的试样黏聚力衰减程度最大。

关键词: 膨胀土; 干湿-冻融循环; 低应力; 应力-应变关系; 抗剪强度

中图分类号: TU111

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)02-0024-05

Effects of Wetting - drying and Freezing - thawing Cyclics on the Strength of Expansive Soil in Seasonal Frozen Area

GAO Xiaoyun¹, LIU Jiaguo², ZHAO Guitao¹, ZOU Weilie¹

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Shenzhen Geological Bureau, Shenzhen, Guangdong 518023, China)

Abstract: Considering the actual stress state of shallow soil, a series of triaxial consolidated undrained shear tests were conducted on an expansive soil from a channel slope in Daqing, Heilongjiang Province, China under low confining stresses to investigate the influences of wetting-drying and freezing-thawing cycles on the stress-strain behavior, and shear strength of Daqing expansive soil. The results showed that: The stress-strain behavior of the expansive soil specimens is generally strain - softening. As the number of cycles increases, the shear strength of specimens decreases significantly. The shear strengths of the specimen softening undergoing eight wetting-drying and freezing-thawing cycles are basically stable, and suffering greatest alterations on shear strength. After cyclic treatments, the cohesion of samples decreases exponentially and those subjected to wetting - drying and freezing-thawing cycles suffer greater alterations on cohesion, while the internal friction angle remained relatively constant.

Keywords: expansive soil; wetting-drying and freezing-thawing cycle; low confining stress; stress-strain behavior; shear strength

黑龙江省属深季节冻土区, 其北部引嫩干渠乌北渠段地处松辽盆地中央拗陷区北部, 受蒙古内陆冷空气和海洋暖流季风的影响, 气温和降水的季节性变化较大, 表现为夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥,

特别是在西部松嫩平原地区, 以强冻胀性的粉质黏土、分散性黏土以及膨胀土等特殊土居多。由于膨胀土对环境中的温(温度)、湿(含水率)变化都极为敏感, 因此该地区膨胀土渠道发生滑坡、渠底隆起等

收稿日期: 2018-11-12

修稿日期: 2018-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779191)

作者简介: 高小云(1993—), 女, 广西玉林人, 硕士研究生, 研究方向为非饱和土特性。E-mail: yun23023@163.com

通讯作者: 刘家国(1970—), 男, 广东深圳人, 高级工程师, 主要从事非饱和土特性、地基处理等方面的科研工作。E-mail: zwilliam@126.com

破坏现象十分严重^[1],造成输配水工程不能正常发挥作用。

温、湿条件随季节的周期性变化,使得膨胀土体也经历着周期性的干-湿和冻-融作用,相应地引起膨胀土中液相水、固相冰与水蒸汽间发生相互转变,从而使得颗粒之间的结构、孔隙分布发生改变^[2-3]。已有的研究表明,反复的干湿和冻融作用易使膨胀土的力学性质发生衰变,从而影响工程的长期安全与稳定^[4-5]。

以往对膨胀土的研究主要针对南方地区^[6],侧重研究了膨胀土的力学特性和工程特性,以我国南水北调中线工程^[7-8]和公路工程^[9-10]建设中所面临的膨胀土问题、尤其是边坡稳定问题^[8,11-12]为主。近年来,大气影响深度范围以内干湿循环作用及其产生的干缩裂隙对膨胀土的影响受到重视,包括对膨胀土强度^[13-14]、胀缩变形^[14-15]和裂隙^[15-16]影响的研究。尽管我国已有学者开始关注冻融循环作用对膨胀土力学特性的影响^[5],但这些研究一般只针对单一的干湿循环或者单一的冻融循环作用的影响,因而不能全面地反映季冻环境中膨胀土强度特性的演化规律,尤其是对膨胀土边坡(包括渠道边坡)最容易发生的浅层滑坡土体的低应力特点关注不够^[4,17]。然而重大工程对其长期安全与稳定性的准确预测需求却在日益提高。因此,开展低应力状态下干湿和冻融循环作用对季冻区膨胀土强度特性

影响的试验研究,是有学术意义和工程价值的。

本文以季冻区输水渠道边坡的浅层膨胀土为对象,考虑当地气候的周期性变化条件,设计干湿循环、冻融循环以及干湿-冻融循环三种环境作用的试验方案,分别对受循环作用前后的膨胀土试样开展低围压状态下的三轴固结不排水剪切试验,以揭示三种循环作用对膨胀土渠道浅层土体应力-应变关系和抗剪强度的影响规律。

1 试样制备和试验方法

1.1 试样制备

试样于 5 月取自黑龙江北部引嫩干渠乌北 38 km 处的渠道边坡,其基本物理指标如表 1 所示。可见该膨胀土的天然含水率为 26.30%,干密度为 1.54 g/cm³,缩限为 15.3%;自由膨胀率为 67%,具有弱膨胀性。

将取回的土样风干碾碎,过 2 mm 筛,按照 26.3%的天然含水率向土样中加水,拌合均匀,密封静置 3 天后,按 1.54 g/cm³控制试样的干密度,制作直径 39.1 mm,高度 80 mm 的圆柱样,共 80 个,分为 16 组,每组 5 个样。

如果采用分层击实制样,则经历干湿循环、冻融循环和干湿-冻融循环作用后,在试样的分层层面容易产生裂缝,从而对试验结果造成影响。因此对试样采用静压法一次制作成型(不分层)。

表 1 引嫩干渠膨胀土样的基本物理指标

天然含水率 w /%	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	比重 G_s	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	缩限 w_s /%	塑性指数 I_p	自由膨胀率 δ_{ef} /%
26.30	1.54	2.68	22.40	42.84	15.30	20.44	67

1.2 试验方法

采用恒温恒湿试验箱对试样进行干湿、冻融以及干湿-冻融三种环境的循环作用,每种环境下的循环次数分别为 2、4、6、8、10。详细过程如下:

(1) 根据大庆地区的室外气象资料,设置恒温恒湿试验箱的温度为 23℃、湿度为 75%模拟当地 6 月至 10 月份的温、湿环境。将试样放入恒温恒湿试验箱中脱湿,至含水率降低至 15.3%的缩限附近时,停止脱湿,取出抽气饱和,再次放入恒温恒湿箱中脱湿至 26.3%的天然含水率,完成 1 次干湿循环。

(2) 分别设置 -20℃和 20℃为当地 11 月至次年 5 月的冻、融环境温度。将试样用保鲜膜包裹后再次放入恒温恒湿箱中,使试样在 -20℃温度的环境中冻结 12 h,在 20℃的环境中融化 12 h,完成 1 次

冻融循环。

(3) 综合(1)、综合(2)的步骤模拟当地全年的气候变化:将试样在温度为 23℃、湿度为 75%的环境中脱湿至含水率达到 15.3%,抽气饱和后,再脱湿至含水率为 26.3%;其后将试样用保鲜膜包裹,使试样在 -20℃的环境中冻结 12 h,在 20℃的环境中融化 12 h,则完成 1 次干湿-冻融循环。

(4) 将未经历和经历了环境循环作用的试样真空抽气饱和后,装入三轴压力室中,分别在 10 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa 和 50 kPa 的低围压下固结稳定后,保持围压不变,以控制应变的方式增大偏应力进行不排水剪切,剪切过程中控制剪切速率为 0.08 mm/min,轴向应变速率为 0.1%/min。当轴向应变达到 15%时停止加荷。

2 低围压下干湿 - 冻融循环作用对乌北膨胀土强度特性的影响

2.1 应力 - 应变关系

未经历和经历三种循环作用后的膨胀土试样,在不同低围压下的固结不排水三轴试验的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε_1 的关系曲线随循环次数的变化,如图 1 所示。由图 1 可以看出:

(1) 未经历循环作用的试样,其应力 - 应变关系曲线为应变软化型或稳定型。

(2) 经干湿循环作用的试样,在 10 kPa 围压下的应力 - 应变关系呈弱应变软化型,在 20 kPa ~ 50 kPa 范围内,其应力 - 应变关系则随围压增大而主要呈稳定型或弱应变软化型。

(3) 经冻融循环作用的试样,在 10 kPa 围压下的应力 - 应变关系主要呈稳定型,在 20 kPa ~ 50 kPa 范围内,则主要呈稳定型或应变软化型。

(4) 经干湿 - 冻融循环作用后的试样,在 10 kPa 围压下的应力 - 应变关系主要呈稳定型,在 20 kPa ~ 50 kPa 范围内,主要呈稳定型或弱应变软化型。

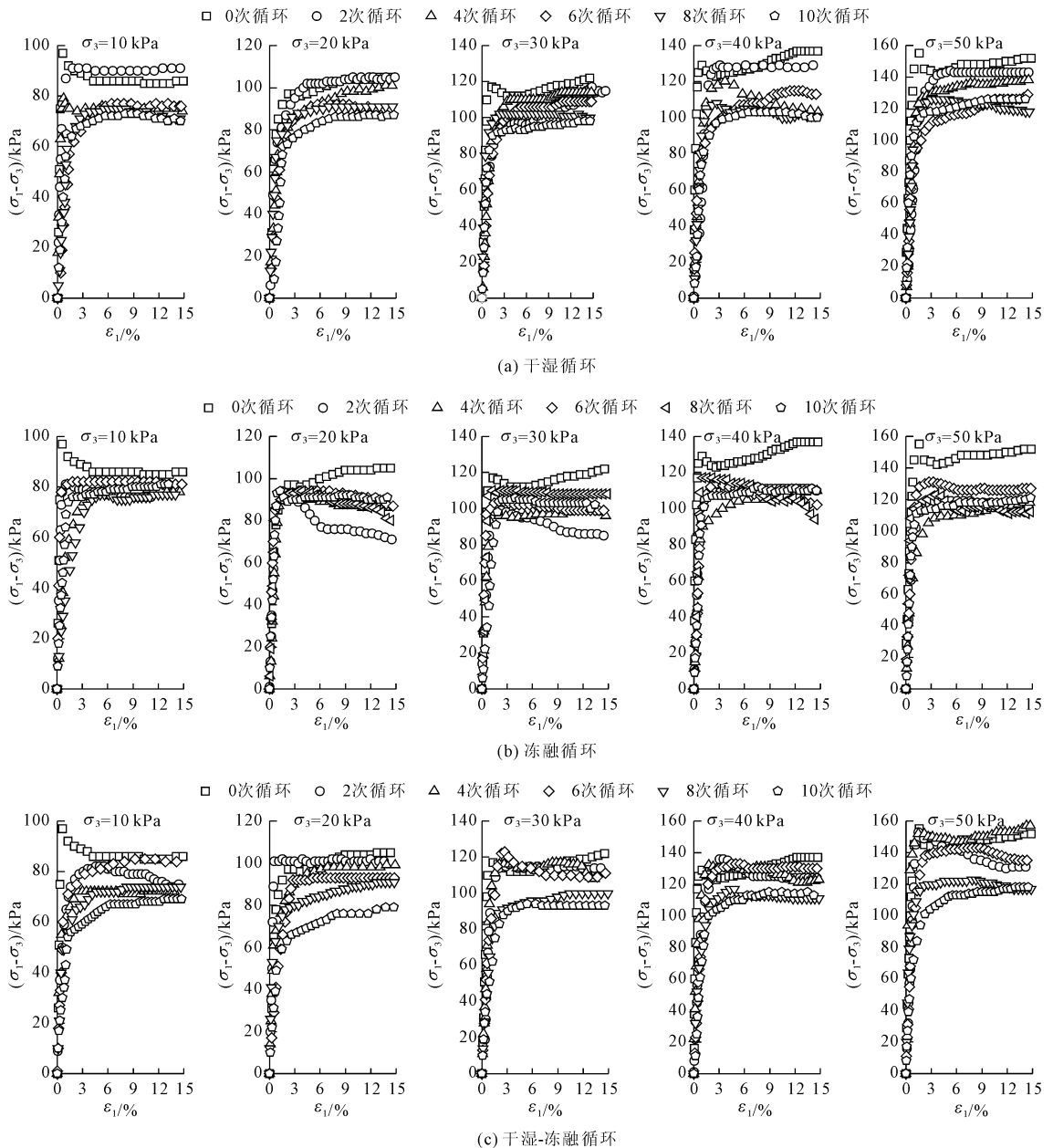


图 1 不同循环次数下试样的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε_1 之间关系

综合未经历和经历三种循环作用后膨胀土试样应力 - 应变关系曲线的变化,可以发现:循环作用之

前和之后,在低围压下其应力 - 应变曲线主要呈弱应变软化型和稳定型。

循环作用前、后试样的破坏强度如表 2 所示。

由表 2 可以发现:

(1) 三种循环作用下,试样的破坏强度均随循环次数的增加而减小。

(2) 试样在经历冻融作用后,破坏强度迅速降低,并在循环 2 次后基本达到稳定;经历干湿和干湿-冻融循环作用后的试样,其破坏强度随循环次数缓慢降低,在循环 8 次后,经历干湿-冻融循环的试样与经历冻融循环作用试样的强度基本一致;循环作用 10 次后,三种循环作用后的试样与未受循环作用的试样相比,相同围压条件下,经历干湿-冻融循环作用的试样破坏强度较未循环试样降低的幅度最

大,平均降低了 23.43%(因干湿-冻融循环处理中包含干湿循环和冻融循环操作,反复拆卸样过程繁杂且历时长,造成部分试样差异,使其中围压 40 kPa 的干湿-冻融循环作用数据不符合整体规律,不予考虑);经历冻融循环作用试样破坏强度的降低幅度最小,较未循环试样的破坏强度平均降低了 16.19%。这表明,长期的干湿和冻融的周期性循环作用会加剧膨胀土强度的衰变。因此,在季节性冻土地区的工程建设中,只考虑干湿或只考虑冻融循环作用,都不能全面地反映膨胀土强度特性的真实弱化情况。

表 2 不同循环作用后试样的破坏强度

单位:kPa

围压 σ_3	未受循环 作用的 破坏强度	干湿循环作用的破坏强度					冻融循环作用的破坏强度					干湿-冻融循环作用的破坏强度				
		2 次	4 次	6 次	8 次	10 次	2 次	4 次	6 次	8 次	10 次	2 次	4 次	6 次	8 次	10 次
10	97	92	79	78	75	73	81	80	82	77	81	82	72	84	74	69
20	105	105	102	92	91	87	94	91	94	94	94	102	99	93	91	79
30	123	113	114	109	102	98	100	100	104	110	106	116	121	117	100	94
40	137	129	120	115	108	103	112	110	114	117	112	136	132	133	117	115
50	155	144	138	129	126	126	119	118	131	123	121	153	157	143	123	118

2.2 抗剪强度

试样剪切强度根据图 1 中应力-应变曲线的类型加以确定:对于应变软化型曲线,取抗剪强度为试样破坏时的偏应力;对于应变硬化型曲线,则取轴向应变达到 15% 的偏应力。

三种循环作用后试样的抗剪强度参数,即黏聚

力 c 和内摩擦角 φ 随循环次数的变化,如图 2 所示。可以看出:

(1) 前 4 次循环作用使试样抗剪强度参数变化最明显,之后趋缓。未经历循环作用试样的黏聚力为 24.96 kPa,内摩擦角为 25.26°,随着循环次数的增加,试样黏聚力均逐渐减小,并逐渐趋于稳定。

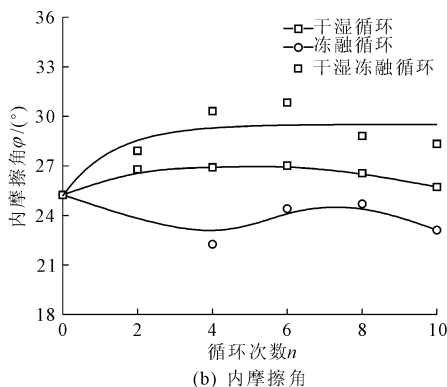
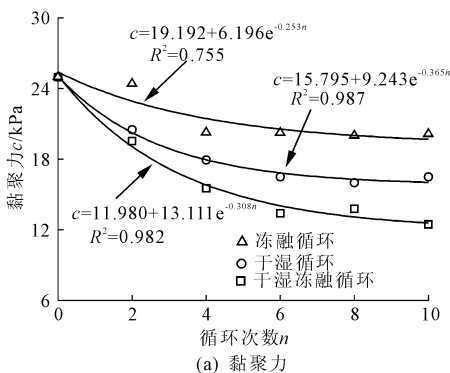


图 2 不同循环作用下,抗剪强度参数 c 、 φ 随循环次数 n 的变化

(2) 受干湿-冻融循环作用的试样黏聚力下降幅度最大,受冻融循环作用的试样下降程度最小;内摩擦角的变化则因循环作用类型的不同而有所不同:在冻融循环作用下,试样的内摩擦角有所减小;在干湿和干湿-冻融循环的作用下,试样的内摩擦角则有所增大,但变化并不明显。

分析其原因如下:

① 在冻融循环作用中,水分反复冻结和融化,破坏了试样颗粒之间的原有结构和排列^[3],粒间联结弱化,从而使黏聚力降低。同时,冻胀作用增大了土颗粒的间隙,使颗粒结构变得疏松,导致试样内摩擦角呈减小的趋势。

② 在干湿循环作用下,膨胀土试样反复的遇水膨胀和失水收缩作用破坏了试样的整体性,产生裂隙,并随循环次数的增多而增加,致使土体逐渐破碎,原有颗粒之间的联结被破坏,因而引起黏聚力降低。随着土体逐渐破碎、细颗粒逐渐增多,且在干湿循环的失水收缩过程中,基质吸力的作用拉紧颗粒,孔隙减小,使颗粒间的摩擦增加、相对位移的阻力有所增大,因而内摩擦角略微增加。

③ 在干湿与冻融循环的共同作用下,冻胀造成的颗粒间结构破坏、粒间距离增加,加之失水收缩引起的裂隙增加、土体破碎,二者共同作用加剧了试样的破坏,使受干湿-冻融循环作用的试样强度参数变化最为明显,黏聚力下降最大,抗剪强度降低最为严重,经历 10 次干湿-冻融循环后试样的黏聚力下降为 12.46 kPa,内摩擦角增加至 28.34°。因此,在三种环境中,干湿-冻融循环作用对试样抗剪强度的影响程度最大。

3 结 论

本文针对季冻区膨胀土渠道长期运营中容易发生的渠坡浅层滑动、渠底隆起等常见破坏问题,对取自黑龙江北部引嫩干渠乌北渠段的膨胀土试样,开展了经历干湿、冻融以及干湿-冻融三种循环作用后的一系列低围压状态下的三轴固结不排水剪切试验,得到以下结论:

(1) 未经历和经历干湿、冻融和干湿-冻融循环作用的膨胀土试样,在 10 kPa ~ 50 kPa 围压下,其应力-应变曲线总体上呈弱应变软化型和稳定型。

(2) 经历三种循环作用后,试样的破坏强度均随循环次数的增多而降低。其中,经历冻融作用的试样在循环 2 次以后基本达到稳定,干湿循环和干湿-冻融循环作用则随循环次数缓慢降低。与未循环试样相比,经历 10 次不同条件的循环作用后,受干湿-冻融处理的试样破坏强度降低的幅度最大,而受冻融处理的试样破坏强度降低的幅度最小。因此,在季节性冻土地区的工程建设中,膨胀土强度取值应同时考虑干湿与冻融循环的作用。

(3) 三种环境作用下,随着循环次数的增加,试样黏聚力均逐渐减小,其中受干湿-冻融循环作用试样的减小程度最大;内摩擦角则因受循环作用的类型不同而有所不同:随循环次数增加,受干湿和干湿-冻融循环作用的试样内摩擦角有所增大,而受冻融循环作用的试样内摩擦角则有所减小,但变化

均不明显。在前 4 次循环中试样抗剪强度参数变化最为显著,4 次循环以后逐渐趋缓。

参考文献:

- [1] 徐丽丽,张 滨,刘丽佳.土体膨胀冻胀联合测试装置及测试方法的应用[J].人民珠江,2017,38(6):16-19.
- [2] Liu J K, Chang D Y, Qian M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand[J]. Engineering Geology, 2016,210:23-32.
- [3] 张 泽,马 巍,齐吉琳.冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(6):1904-1914.
- [4] 杨和平,王兴正,肖 杰.干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J].岩土工程学报,2014,36(5):949-954.
- [5] 许 雷,刘斯宏,鲁 洋,等.冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J].岩土力学,2016,37(S2):167-174.
- [6] Shi B, Jiang H T, Liu Z B, et al. Engineering geological characteristics of expansive soils in China[J]. Engineering Geology, 2002,67(1):63-71.
- [7] 龚壁卫,程展林,郭熙灵,等.南水北调中线膨胀土工程问题研究与进展[J].长江科学院院报,2011,28(10):134-140.
- [8] 龚壁卫,程展林,胡 波,等.膨胀土裂隙的工程特性研究[J].岩土工程学报,2014,25(7):1825-1836.
- [9] 陈善雄,余 颂,孔令伟,等.中膨胀土路堤包边方案及其试验验证[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1777-1783.
- [10] 杨和平,章高峰.包盖法填筑膨胀土路堤的合适包边宽度[J].公路交通科技,2008,25(7):37-42.
- [11] 殷宗泽,袁俊平,韦 杰,等.论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J].岩土工程学报,2012,34(12):2155-2161.
- [12] 包承纲.非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J].岩土工程学报,2004,26(1):1-15.
- [13] 吕海波,曾召田,赵艳林,等.膨胀土强度干湿循环试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3797-3802.
- [14] 刘锦程,张艳美,张笑峰.干湿循环对非饱和土特性影响研究现状与展望[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):69-75.
- [15] 唐朝生,施 斌.干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J].岩土工程学报,2011,33(9):1376-1384.
- [16] 张家俊,龚壁卫,胡 波,等.干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2729-2734.
- [17] 邹维列,陈 轮,谢 鹏,等.重塑膨胀土非线性强度特性及一维固结浸水膨胀应力-应变关系[J].岩土力学,2012,33(S2):59-64.