

不均匀收缩方式对膨胀土工程性状影响试验研究

冯 欣, 孔令伟, 郭爱国

(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)

摘 要: 通过控制恒温恒湿箱的温湿度工作参数, 改变膨胀土试样的蒸发路径, 实现饱和膨胀土在不同脱湿速率下的不均匀收缩, 结合有荷膨胀率试验和直接剪切试验, 研究膨胀土不均匀收缩方式下胀缩特性和强度特性。试验结果表明, 脱湿速率越小, 膨胀土的胀缩性越大, 剪切强度越高; 对比不同收缩方式, 均匀收缩下膨胀土的收缩与膨胀变形和剪切强度均大于不均匀收缩下的收缩与膨胀变形和剪切强度。造成这些差异的主要原因是非均匀收缩试验中水分蒸发的路径不同, 沿深度方向的含水率不同, 基质吸力不同, 引起的应变也不同, 这种不均匀性改变了原有膨胀土的均一性, 限制了膨胀土胀缩特性和强度特性的发挥。

关 键 词: 膨胀土; 脱湿速率; 不均匀收缩; 膨胀性; 强度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental study of impact of non-uniform shrinkage on engineering behaviors of expansive soil

FENG Xin, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Through adjusting the working parameters of temperature and humidity in the constant temperature and humidity equipments and changing the expansive soil evaporation path, the non-uniform shrinkage test of saturated expansive soil under different drying rates is achieved, which combined with swelling test and direct shear test to research the expansion and contraction characteristics and strength properties of expansive soil under non-uniform shrinkage test. The experimental results indicate that the smaller the drying rates is, the larger the deformation of the expansive soil and the higher of the shear strength is. The contraction, shrinkage deformation and shear strength of the expansive soil under uniform shrinkage condition are larger than non-uniform shrinkage condition. The main reason for these differences is the different paths of evaporation in non-uniform shrinkage test, which leads to different water contents along the depth direction, different matrix suction and different strain. The non-uniform shrinkage changes the homogeneity of expansive soil and limits the expansion and contraction characteristics and strength properties of expansive soil.

Key words: expansive soil; drying rate; non-uniform shrinkage; expansion; strength

1 引 言

裂隙性是膨胀土的主要特性之一。裂隙的存在破坏了膨胀土的整体性, 提高了渗透性, 并引起了土体中应力集中, 加剧了强度的衰减, 是膨胀土地区许多工程事故和地质灾害的主要诱因^[1-3]。气候变化引起的干湿循环是膨胀土地区裂隙出现和扩展的主要原因, 而干湿循环中蒸发引起的膨胀土收缩

变形的不均匀性是裂隙出现的直接原因。因此, 有必要对不均匀收缩对膨胀土在膨胀、收缩和强度等方面的影响进行研究。

在常规室内收缩试验中, 水分可通过试样各个表面蒸发, 引起的收缩效应在各个方向基本一致, 称为均匀收缩试验; 在自然环境中, 场地膨胀土的水分一般只能通过地表蒸发, 沿深度方向发生的收缩不一致, 应用常用的室内试验方法难以真实反映

收稿日期: 2009-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 10872210); 中国科学院知识创新工程方向项目(No. kzcxz-yw-150); 交通部西部交通建设科技项目(No. 200631878530)。

第一作者简介: 冯欣, 男, 1984年生, 硕士, 主要从事特殊土方面的研究。E-mail: fxgump@163.com

实际膨胀土的收缩性能与裂隙扩展演化的规律。因此，改变蒸发路径，模拟真实工况中膨胀土体的收缩方式，使其更符合膨胀土的实际状态，对深入认知膨胀土的工程性状既有理论价值，也有工程应用意义。

文献[1-2]对不同脱湿速率下膨胀土的均匀收缩过程，以及收缩后膨胀土的膨胀和强度特性进行了系统的研究。在此基础上，本次采用恒温恒湿箱实现温度和湿度的变化，改变原有的收缩方式，进行不均匀收缩试验，并在不均匀收缩后进行膨胀和强度试验，类比分析不同收缩方式对膨胀土地收缩、

膨胀及强度的影响。

2 试验土样与方法

2.1 试验土样

土样取自广西南宁市郊外广西农业科学院水牛所草场坡地地表下 1.5~1.8 m，呈灰白色，可塑，黏性较强，天然含水率较高，裂隙面呈蜡状光滑，具有典型膨胀土的特征，其基本物理性质和胀缩特性见表 1、2，根据膨胀潜势等级判定标准^[4]，该灰白色黏土为强膨胀土。

表 1 膨胀土物理力学特性

Table 1 Physico-mechanical properties of expansive soil

土样	密度 (g/cm ³)	含水率 /%	干密度 (g/cm ³)	土的相 对必度	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	饱和和渗透系数 (m/s)	黏粒含量 /%(<5 μm)	饱和固结排水剪强度	
										黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
灰白色膨胀土	1.78	40.9	1.26	2.77	94.31	35.31	58.99	6.08×10 ⁻⁸	76	18.48	14.79

表 2 膨胀土胀缩特性

Table 2 Swelling-shrinkage properties of expansive soil

土样	自由膨 胀率/%	收缩 系数	缩限 /%	体缩率 /%	膨胀率 /%(50 kPa)
灰白色 膨胀土	98	0.44	20.0	20.4	-0.008 5

2.2 试验方法

脱湿设备采用恒温恒湿箱，根据常见气候条件，设定 4 种恒温恒湿箱的工作参数状态见表 3，从而实现饱和膨胀土在不同脱湿速率条件下的变化状态。

表 3 试样制备环境参数

Table 3 Surrounding parameters of soil samples

脱湿速 率方案	脱湿环境参数	
	温度/°C	湿度/%
方案1	25	30
方案2	25	60
方案3	25	75
方案4	25	90

2.2.1 膨胀土不均匀收缩特性

不均匀收缩试验与常规收缩试验有所不同，常规收缩试验中，水分通过试样的顶面、底面及侧面蒸发，体积收缩较均匀，土体几乎不出现裂隙。而在不均匀收缩试验中，水分只能通过顶面蒸发。对试样蒸发路径的限定，是不均匀收缩试验和均匀收缩试验的主要区别，除此之外，试验过程与均匀收缩试验相同。不均匀收缩试验和均匀收缩试验中的试样如图 1 所示。限定了蒸发路径，水分只能通过

顶面蒸发，与自然中膨胀土蒸发的路径相同。这一改进可以使室内收缩试验与实际工况更加吻合，更准确地反映自然中蒸发对膨胀土产生的收缩效应。

将含水率和密度相近的膨胀土样制成大环刀样，抽气饱和后，在侧面及底面用塑料薄膜覆盖，并用塑胶松紧带固定。固定后薄膜与试样之间应充分贴合（图 2）。然后，将试样分成 4 组，每组 2 个平行试样，按表 3 中方案 1~3 和方案 4 脱湿环境下开展不均匀收缩试验。

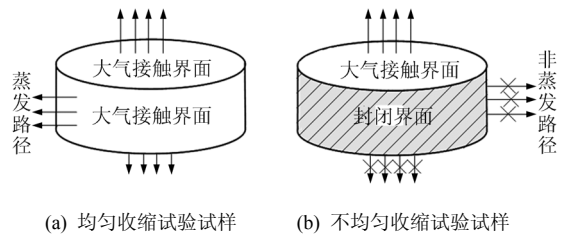


图 1 不同收缩试验中试样的对比
Fig.1 The comparison between samples in different shrinkage test



图 2 膨胀土不均匀收缩试验试样
Fig.2 The sample of expansive soil in uneven shrinkage test

2.2.2 不均匀收缩下膨胀土的膨胀特性

将含水率和密度相近的土样制成大环刀样，抽气饱和后，分成4组，按表4所列土样数量分组备样。

表4 试样制备方案(试样个数)
Table 4 Preparation solutions of sample

编号	土样脱湿试验方案	土样目标含水率/%			
		35	30	25	20
1	方案1	3	3	3	3
2	方案2	3	3	3	3
3	方案3	3	3	3	3
4	方案4	3	3	3	0

按照表3设置各方案的脱湿环境，采用不均匀收缩方式脱湿到预定4种含水率状态(35%、30%、25%和20%)。然后，在保湿器中陈化放置48h。再制成小环刀样，按土工试验规程^[5]进行上部荷载分别为12.5、25 kPa和50 kPa的侧限膨胀率试验。

2.2.3 不均匀收缩下膨胀土的强度特性

将有荷膨胀率试验完成的土样取出，放入直剪仪，在与膨胀率试验相同的上部荷载条件下进行直接剪切试验。

3 试验结果与分析

3.1 膨胀土不均匀收缩特性

图3和图4分别为不同湿度环境下的膨胀含水率随脱湿时间变化时程关系和线缩率与含水率变化关系。从图3可以看出，饱和膨胀土在不同湿度下的脱湿，均先经历线性脱湿变化过程，后呈现非线性变化过程。脱湿过程土体干重量不变，单位时间重力含水率的变化量实际上反映了脱湿速率的快慢。因此，在线性脱湿过程阶段，采用重力含水率与时间线性回归方程的斜率绝对值表述土体的脱湿速率。从图4不难发现，当膨胀土的含水率小于其缩限时，土体体积依然会发生一定的收缩变形，但在不同的脱湿环境条件下，试样的收缩性状呈现较大不同，说明脱湿速率对膨胀土的收缩特性影响较大。

上述总体变化规律与均匀收缩试验结果的变化规律类同^[1]，但在相同的湿度环境下，不均匀收缩方式对膨胀土的脱湿速率、收缩特性有所影响。通过对图3含水率线性变化阶段的线性拟合，可以得出土样在不均匀收缩方式及不同脱湿环境下的脱湿速率，与文献^[1]试验结果进行类比，具体结果见图5及表5。

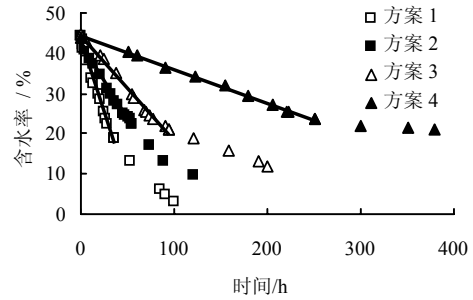


图3 膨胀土含水率变化时程曲线
Fig.3 Variation of water content of expansive soil with time

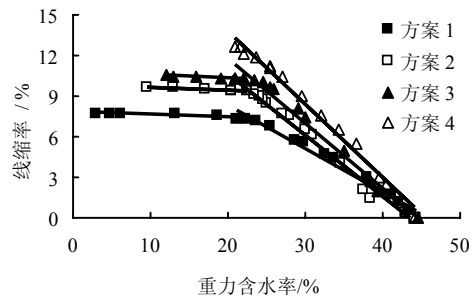


图4 膨胀土线缩率与含水率关系曲线
Fig.4 Relationship between linear shrinkage rate and water content of expansive soil

表5 不同试验方案中膨胀土的脱湿速率
Table 5 Drying rates in various experimental schemes of expansive soil

土样脱湿试验方案	脱湿方程	脱湿速率/(%/h)
方案1	均匀 $y = -1.49x + 42.89$	1.49
	不均匀 $y = -0.76x + 43.21$	0.76
方案2	均匀 $y = -0.56x + 43.96$	0.56
	不均匀 $y = -0.37x + 41.98$	0.37
方案3	均匀 $y = -0.33x + 44.28$	0.33
	不均匀 $y = -0.26x + 44.28$	0.26
方案4	均匀 $y = -0.08x + 45.01$	0.08
	不均匀 $y = -0.08x + 44.43$	0.08

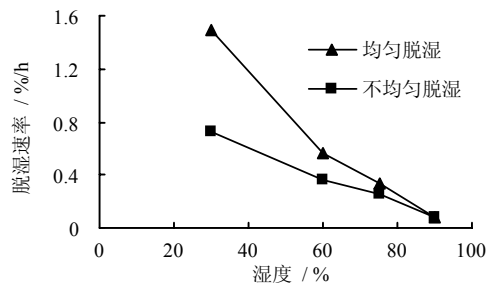


图5 湿度与脱湿速率的关系
Fig.5 Relationship between humidity and drying rate

通过分析图5得出，相同的湿度不均匀收缩时脱湿速率要小于均匀收缩的脱湿速率，是由于不均匀收缩试验在脱湿过程中水分蒸发的面积较小，单位时间内蒸发量较小，因此脱湿速率较小，且当湿度越小，不同蒸发面积对脱湿速率造成的影响越大。湿度为30%时，不均匀脱湿的脱湿速率仅为均

匀脱湿速率的 1/2，随着湿度的增加，不同收缩方式对脱湿速率的影响越来越小，湿度为 90 % 时，不同收缩方式下脱湿速率相等。

采用 λ_{s1} 和 λ_{s2} 表示在均匀收缩方式下膨胀土在缩限含水率前后的收缩系数，用 λ_{s3} 和 λ_{s4} 表示不均匀收缩方式下膨胀土在缩限含水率前后的收缩系数，可获得均匀及不均匀收缩方式下，收缩系数随脱湿速率的演化关系，见图 6 和表 6。由此可见，膨胀土的收缩系数与脱湿速率呈现较好的相关性，随着脱湿速率的增加，其均匀收缩系数以幂函数逐渐衰减，不均匀收缩系数以 2 次函数变化。

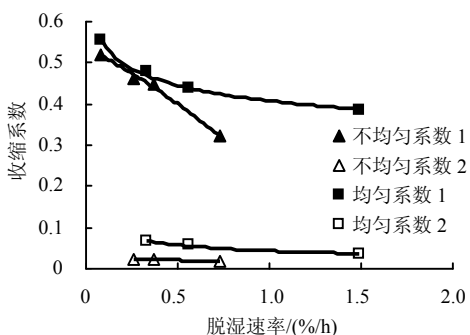


图 6 膨胀土收缩系数与脱湿速率的关系

Fig.6 Relationship between coefficient of shrinkage and drying rate of expansive soil

表 6 收缩系数与脱湿速率的关系

Table 6 Relationship between coefficient of shrinkage and drying rate

收缩系数	拟合方程	相关系数
λ_{s1}	$\lambda_{s1}=0.407 7v^{-0.126}$	0.99
λ_{s2}	$\lambda_{s2}=0.043 2v^{-0.4125}$	0.99
λ_{s3}	$\lambda_{s3}=-0.036 3v^2-0.308 4v+0.565 3$	0.99
λ_{s4}	$\lambda_{s4}=0.014v^2-0.018 1v+0.025 8$	1.00

从上述初步结果分析可以看出，膨胀土的收缩特性与脱湿速率、收缩方式密切相关。在相同的收缩方式下，脱湿速率越小，过程越缓慢，收缩变形越大，有利于其收缩变形的充分发挥。此外，在相同脱湿速率的影响下，在不同脱湿方式下土样的收缩性不一致，均匀收缩产生的收缩效应明显要大于不均匀收缩。造成这一区别的主要原因是非均匀收缩试验中水分蒸发路径的不同，使得膨胀土在脱湿过程中沿深度方向含水率不同，基质吸力不同，引起的应变也不同，这种不均匀性改变了原有膨胀土的均一性，限制了收缩效应的发挥。

3.2 不均匀收缩条件下膨胀土的膨胀特性

不均匀收缩膨胀土不同上覆荷载下的膨胀率试验结果见图 7，图中同时给出了文献[2]均匀收缩对应试验结果，以此类比。

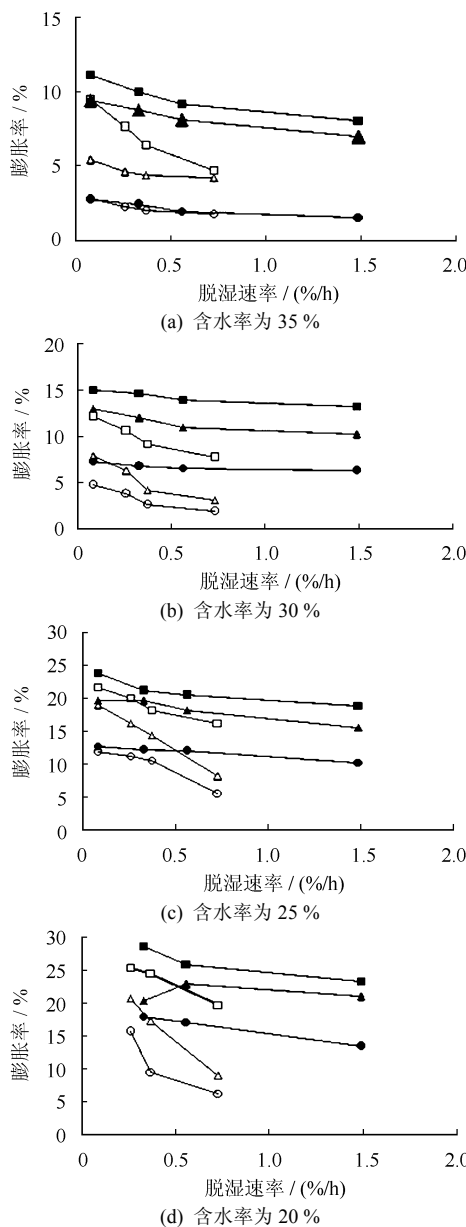


图 7 不同含水率下膨胀土膨胀率与脱湿速率关系

Fig.7 The relationship between expansive rate of expansive soil and drying rate in different water content

通过分析图 7 中得出，相同的脱湿条件下土样脱湿到同一预定含水率时，不同脱湿速率制备土样的膨胀率不尽相同，随着脱湿速率的增加土体的膨胀率均逐渐降低。可见脱湿速率，对土体的膨胀特性影响较大。含水率越小，上部荷载越小，脱湿速率对膨胀土变形的影响越大。这说明自然条件下湿度大的气候里，经过长期蒸发，表层土体的膨胀潜力会较大。

不同的收缩方式时膨胀土的膨胀效应也有所不同，在非均匀收缩条件下，土样的膨胀率要小于均匀收缩条件下土样的膨胀率，究其原因，非均匀收缩使得土体的沿深度方向含水率不一致，所产生

的膨胀变形也不一致，诱发了原有土体结构不均匀的变化。

3.3 不均匀收缩条件下膨胀土的强度特性

不同含水率下膨胀土样膨胀稳定后，在原上覆荷载下开展直接快剪试验。应力-应变曲线如图 8

所示。不难看出，膨胀土的应力应变关系均呈现出应变软化趋势；相同的脱湿速率下上覆荷载越大，剪切强度越高；土样膨胀前的含水率越低，膨胀稳定后的剪切强度越高。剪切峰值一般在应变发生至 1.5%~3.5%之间出现。

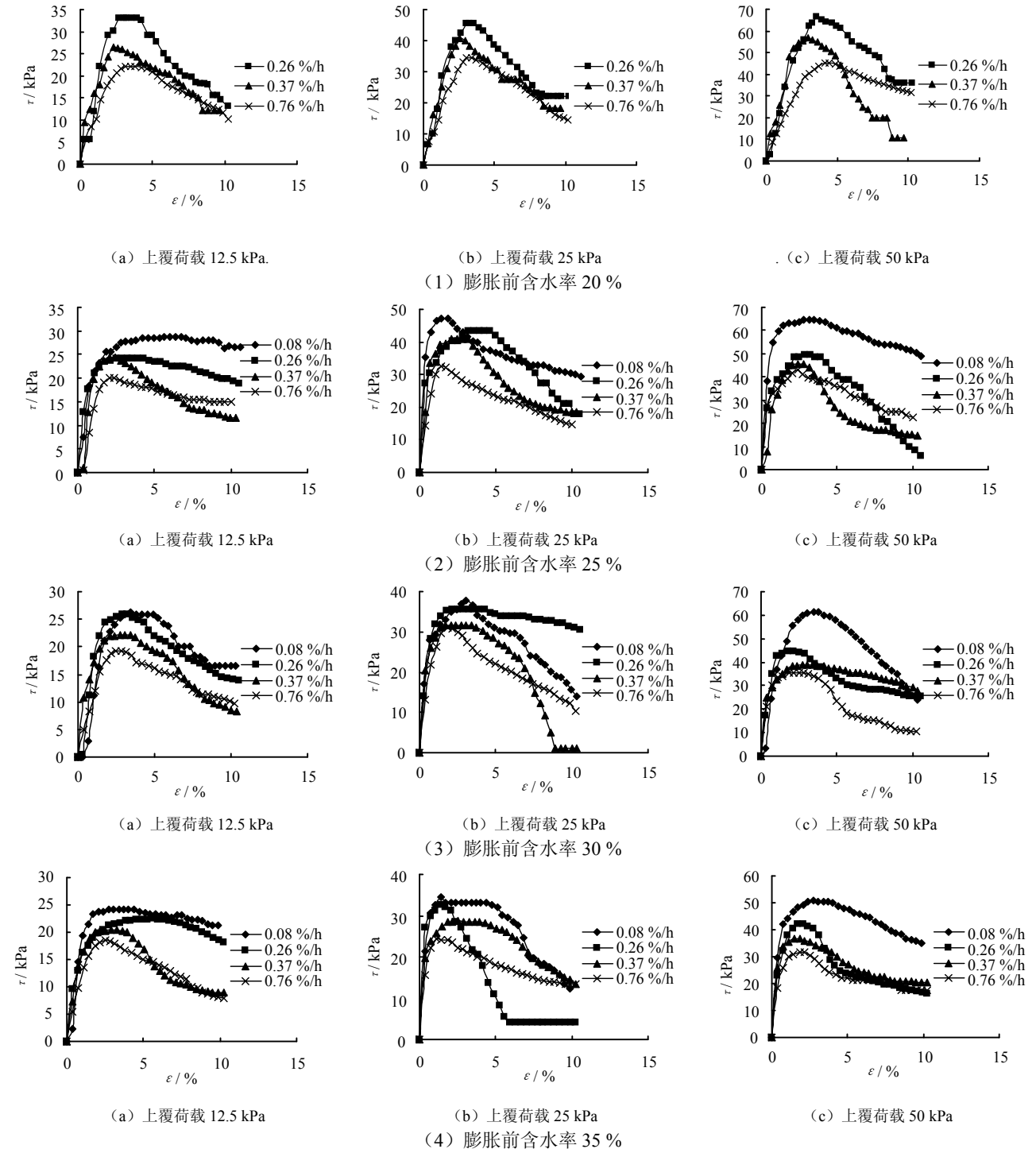


图 8 不同上覆荷载与脱湿速率下膨胀土应力-应变关系

Fig.8 Stress-strain curves of expansive soil under different upper load and drying rate conditions

分析图 8 可知，在相同的膨胀前含水率下，脱湿速率越慢，膨胀土的剪切强度越高。当上覆荷载为 12.5 kPa 和 25 kPa 时，脱湿速率不同所带来的剪

切强度差异虽然存在，但不是很大，如在膨胀前含水率为 25%，上覆荷载为 25 kPa 时，土样在脱湿速率为 0.76%/h 下剪切强度为 32.67 kPa，脱湿速

率 0.08 %/h 时剪切强度为 47.22 kPa，二者相差为 14.55 kPa，这已经是上覆荷载 12.5 kPa 和 25 kPa 范畴内由于脱湿速率引起剪切强度变化的最大差异。当上覆荷载提高到 50 kPa 时，脱湿速率造成剪切强度变化的幅度明显变大，如在膨胀前含水率为 25 %、上覆荷载为 50 kPa 的情况下，脱湿速率为 0.76 %/h 下剪切强度为 42.97 kPa，脱湿速率 0.08 %/h 时剪切强度为 64.74 kPa，二者相差 21.77 kPa，这是上覆荷载 50 kPa 下脱湿速率引起剪切强度变化的最小差异，可见脱湿速率越快，土样变形的不均匀性越强，引发了剪切强度的降低，而随着上覆荷载的增加，这种不均匀性对强度的影响越明显。

与文献[2]均匀收缩试验后所进行的直接剪切试验结果进行类比，结果见图 9。从图 9 中可以看出，不同的收缩方式下随着脱湿速率的增加，土样膨胀后的强度均出现不同程度的衰减。由于不均匀收缩给膨胀土结构带来的不均匀性，使得不同的收缩方式下膨胀土的强度特性区别很大。在相同的脱湿速率下，不均匀收缩后试样的剪切强度要小于均匀收缩后试样的剪切强度。从图中 9 也可以看出，由于不同收缩方式引起的剪切强度差异，随着上覆荷载的增大，而逐渐增大。

4 结 论

(1) 无论是均匀收缩还是不均匀收缩，脱湿速率对膨胀土的胀缩特性、强度特性都有较大影响。脱湿速率越小，膨胀土收缩变形越大，即使含水率小于其缩限，膨胀土依然会发生一定的收缩变形，其收缩系数与脱湿速率呈现一定的相关性，随着脱湿速率的增加而以 2 次形式逐渐衰减；脱湿速率越小，膨胀土失水后的吸湿膨胀变形也越大，这说明自然条件下湿度大的气候里，经过长期蒸发，表层土体的膨胀潜势会较大。在相同含水率条件下，膨胀土的剪切强度随着脱湿速率的减小而增大，说明脱湿速率对膨胀土边坡的表土强度特性影响较大。

(2) 不同的收缩方式对膨胀土的胀缩特性与强度特性均有显著影响。不均匀收缩方式使得膨胀土试样沿高度方向含水率分布不均，引起的变形也不同，加剧了膨胀土结构的不均匀变化。同时，变形分布的不均匀性也是导致裂隙出现的主要原因。在相同的脱湿速率下，相比于均匀收缩，不均匀收缩过程限制了膨胀土收缩性和膨胀性的发挥，降低了剪切强度。随着上覆荷载的增加，不同的收缩方式对膨胀土胀缩特性及强度的影响越大。

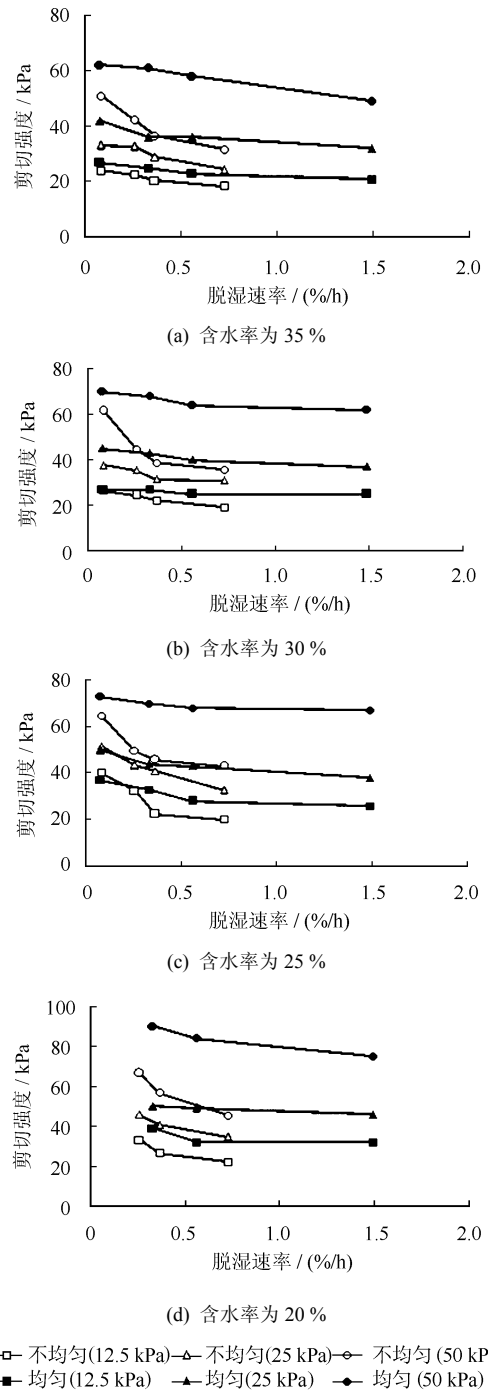


图 9 不同含水率下膨胀土剪切强度与脱湿速率关系
Fig.9 The relationship between shearing strength and drying rate of expansive soil

参 考 文 献

- [1] 孔令伟, 李雄威, 郭爱国, 等. 脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 335-340.
- [2] 李雄威. 膨胀土湿热耦合性状与路堑边坡防护机理研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [3] 胡卸文, 李群丰, 赵泽三, 等. 裂隙性黏土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(7): 81-88.
- [4] 交通部第二公路勘察设计院. 路基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996: 243-268.
- [5] 土工试验方法标准. GB/T 50123-1999 中华人民共和国国家标准[s]. 北京: 中国计划出版社, 1999.