

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S1.018

锚固加强植被系统约束膨胀土变形模型试验研究

鲜少华^{1,4}, 许英姿², 姚海林¹, 卢正¹, 李志勇³, 董城³

(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, 湖北 武汉 430071; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 3. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:利用锚固加强植被系统 (ARVS) 约束膨胀土变形是一种新的尝试。为研究 ARVS 系统对膨胀土变形的约束效果, 采用 ARVS 系统的室内简化装置, 对南宁中等膨胀土进行有、无防护措施的水浸模型对比试验, 对不同约束情况下膨胀土的变形进行对比分析, 并根据模型受力情况采用有限元方法验证膨胀力的传递规律。结果表明, 采用 ARVS 约束后膨胀土的吸湿变形过程仍然为 3 个阶段; ARVS 系统能使膨胀土的膨胀量大幅降低, 但 ARVS 系统在植草前后对膨胀土膨胀变形的约束效果差别不是很大, 植草后膨胀土的变形能够较快到达稳定阶段; 作用在高性能植被保护垫 (HPTRM) 上的膨胀力先通过锚头板传递至地锚, 地锚再将膨胀力传递到土层中。锚固加强植被系统 (ARVS) 为膨胀土边坡的防护和治理提供了新的方法。

关键词:锚固加强植被系统 (ARVS); 膨胀土; 变形; 膨胀力

中图分类号: TU 475

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0158 - 09

Model test study of constraint to deformation of expansive soil by anchor reinforced vegetation system

XIAN Shao-hua^{1,4}, XU Ying-zi², YAO Hai-lin¹, LU Zheng¹, LI Zhi-yong³, DONG Cheng³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 3. Hunan Communications Research Institute, Changsha, Hunan 410015, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is a new attempt to use the anchor reinforced vegetation system (ARVS) to constrain the deformation of expansive soil. To investigate the constraint effect of ARVS on the deformation of expansive soil, water immersion model tests with and without protective methods are performed adopting medium expansive soil in Nanning, using the simplified indoor ARVS device. The deformations of expansive soil under different constraints are analyzed; and then the transfer law of expansion force is verified by finite element method according the force conditions of two different models. The results show that: with the constraint of ARVS, the deformation of expansive soil can still be divided into three stages; the ARVS can reduce the amount of expansion of expansive soil significantly; but the constraint effect of ARVS on the deformation of expansive soil before and after planting vegetation, and after planning vegetation the deformation of expansive soil can quickly reach the stable stage; the expansive force acting on the high performance turf reinforcement mats (HPTRM) firstly is transferred to the earth anchor by the anchor plate, and then the expansive force is transferred to the soil layer by the earth anchor. Anchor reinforced vegetation system provides a new method for the protection and treatment of expansive soil slope.

Keywords: anchor reinforced vegetation system (ARVS); expansive soil; deformation; expansive force

1 引言

膨胀土吸水后产生膨胀变形和膨胀力对道路边坡工程的危害极大。传统的刚性防护措施如挡墙、

抗滑桩、锚杆框架梁等^[1]不允许膨胀土产生膨胀, 因膨胀土吸水后会对防护结构作用较大的膨胀力。许多学者研究利用土工合成材料进行膨胀土边坡的柔性防护^[2-3], 允许膨胀土产生一定的变形, 从而释

收稿日期: 2016-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41472286, No. 41672312, No. 41472290, No. 41402276, No. 51369006); 中国科学院青年创新促进会资助 (2015 年)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41472286, 41672312, 41472290, 41402276, 51369006) and the Youth Innovation Promotion Association of CAS (2015).

第一作者简介: 鲜少华, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事膨胀土方面的研究工作。E-mail: xianshaohua.1990@163.com

通讯作者: 姚海林, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事路基工程方面的研究工作。E-mail: hlyao@whrsm.ac.cn

放部分膨胀力^[4]，达到“以柔治胀”的目的，其中土工袋装土反压^[5]、土工格栅加筋反包膨胀土等^[6-7]方法在南水北调中线工程和广西膨胀土地区高速公路建设中发挥良好的作用，但对于经历滑坡后稳定的膨胀土缓坡采用上述方法治理工程量偏大。本文研究一种新的膨胀土边坡浅层防护方法——锚固加强植被系统 (anchored reinforced vegetation system, ARVS)，探究其对膨胀土坡面的防护效果。

ARVS 近年来在美国被作为一种边坡浅层抗滑防护、治理和永久性抗冲刷的新型植被防护系统。ARVS 主要由高性能植被保护垫 (high performance turf reinforcement mats, HPTRM) 和地锚 (percussion driven earth anchor, PDEA) 两部分组成，其中 HPTRM 可以与植被形成高韧性的复合三维土工网。关于该系统的研究主要集中在 HPTRM 的防堤坝侵蚀^[8]、HPTRM 对土质堤坝边坡稳定性加固^[9]等方面。国内虽有关于土工网-植被系统防冲刷效果的研究^[10-11]，仅存在于普通土质边坡领域，锚固加强植被系统在防护膨胀土边坡中的研究及应用几乎处于空白，研究 ARVS 系统约束膨胀土的效果具有重要的意义。

本次从膨胀土的基本特性-吸水膨胀出发，基于室内膨胀力试验的平衡加压法装置制作了室内 ARVS 约束膨胀土变形的系统，对南宁中等膨胀土进行有/无防护措施的浸水试验。无防护措施的试验模型为自由膨胀模型，有防护措施的试验模型为未植草 ARVS 模型和 ARVS 模型。通过 3 组模型中膨胀土的变形结果，探讨了 ARVS 系统约束膨胀土变形的效果，结合数值模拟研究膨胀力的传递规律。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

(1) 模型试验土样

试验土样取自南宁地铁 1 号线屯里车辆段附近边坡，基本物理指标见表 1。模型土样均为重塑土，故须预设含水率和干密度。通过击实试验得到土样的最大干密度为 1.73 g/cm³，最优含水率为 17%。按照 90% 的压实度，试验中压实膨胀土的干密度为 1.56 g/cm³，初始含水率定为 14%。土样自由膨胀率达到 70%，属于中等膨胀潜势的膨胀土^[12]。

表 1 土样物理参数

Table 1 Physical parameters of soil specimen

天然密度 / (g/cm ³)	干密度 / (g/cm ³)	天然含水率 / %	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	自由膨胀率 / %	渗透系数 / (cm/s)
2.01	1.70	18	48.91	26.46	22.45	70	5.53×10 ⁻⁸

(2) 高性能植被保护垫 (HPTRM)

HPTRM 是一种高韧性的聚酯纤维编织成的三维土工网，见图 1。本次试验 HPTRM 和地锚一起组成 ARVS 系统来约束膨胀土的变形。HPTRM 与普通三维土工网 EM5 两种材料的拉伸试验^[13]结果见表 2。



图 1 高性能植被保护垫

Fig.1 High performance turf reinforcement mats

表 2 土工材料力学指标

Table 2 Mechanical indices of geotechnical materials

材料名称	极限抗拉强度 F/(kN/m)	极限伸长量 ΔL/mm	弹性伸长量 Δl/mm
HPTRM	57.3×39.1	18.3×14.6	1×1
EM5	3.1×1.4	48.3×15.3	4×1

从试验结果可以看出，HPTRM 与普通三维土工网 EM5 相比，纵向和横向的抗拉性能均超出 10 倍以上。HPTRM 纵向和横向的抗拉性能相差较大，但纵向和横向的伸长量相差较小，并且均小于 EM5 的伸长量。此外，计算可得 HPTRM 在弹性阶段的纵横向伸长率均在 1% 以内，可见 HPTRM 拉伸过程中弹性阶段变形较小，塑性阶段可以产生较大的变形，表明 HPTRM 具有较大的变形储备能力，可以用来约束膨胀土的膨胀变形。

2.2 试验装置

试验装置实体图及示意图如图 2 所示。首先，制作钢承载台，上部安放直径为 100 cm、高度为 20 cm 的有底无盖的钢圆柱模型箱，用于填筑膨胀土。在承台与模型箱中心处穿插直径为 18 mm 的锚杆，锚杆上部安装有锚定板，下部挂有加载装置。在模型箱上部两个垂直的直径方向安装 16 个百分表测量土体表面位移，并在锚板位置处设置 2 个百分表监测锚板位移，见图 3。

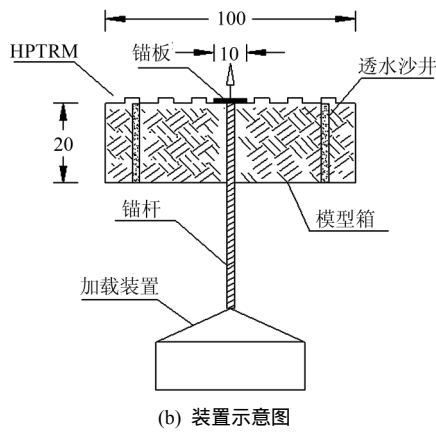
2.3 试验过程

自由膨胀模型、未植草的 ARVS 模型和 ARVS 模型的制作程序基本相同，这里仅详细介绍 ARVS 模型的制作过程。

模型填土前首先在底部铺一层透水无纺布以保



(a) 装置实体图



(b) 装置示意图

图 2 ARVS 试验装置

Fig.2 Test apparatus of ARVS



图 3 百分表布置

Fig.3 Layout of dial indicator

证底层土样水分能够均匀分布，然后在模型内部侧壁刷一层黄油，以减小膨胀土膨胀过程中与侧壁的摩擦力；最后在模型内部安装透水管，待土样填筑完毕后向管内填砂制作砂井。

填筑土样时采取人工击实和分层质量控制法使填筑土样的干密度达到要求。填筑过程中每层土均用环刀取样进行质量检测，如果不达标则进行修正。达标后在表面刮毛再进行下一层的土样填筑工作。土样填筑完成后的模型见图 4。

自由膨胀模型、未植草的 ARVS 模型制作完成后用塑料薄膜在表面覆盖，静置 7 d 待土体内超静



图 4 土样填筑完毕后效果

Fig.4 Soil filling is completed

孔隙水压力全部消散后再进行下一步操作。ARVS 模型因为有草种发芽的过程，在膨胀土击实完毕后可直接铺设 HPTRM 和植草。

根据肖衡林等^[14]关于三维土工网植草技术在土质边坡防护中的研究，本次采取先铺设 HPTRM，然后在 HPTRM 网上撒耕植土和草种的方法植草。具体步骤为

铺设 HPTRM 网，安装锚杆、锚板（注水试验开始后再安装加载装置，用以保持锚板不产生位移）并在模型箱侧壁上沿以及网与锚板接触处用钢箍和螺丝固定 HPTRM。

在网下凹处撒适量掺有复合肥的松散耕植土（含水率适宜），使耕植土填满网的下凹处。

将狗牙根草种和黑麦草草种按照 1:1 的比例混合均匀，然后再均匀地播撒在耕植土上面。

用适量耕植土将草种覆盖，本次试验的覆土厚度为 2 cm。

以上工作完成后，在耕植土上面洒适量水使覆盖层渗透，最后用塑料薄膜覆盖，保湿养护。待草长至 3 cm 高，即移去薄膜。

待草长至 5 cm 高，即可进行百分表的安装。静置一天，开始进行注水和加载试验。

ARVS 模型见图 5。3 个模型均用 PVC 管钻孔后装砂作为砂井。往砂井中注水使水分渗透至膨胀土中。模型中膨胀土的初始含水率为 14%，初始干密度为 1.56 g/cm³。取相同状态下的重塑土样，通过抽气饱和法测得饱和含水率为 26.2%。所以在注水开始阶段膨胀土的吸水速度很快，隔 3 h 注一次水，每次注水量以水注进砂井后不再快速下渗为准。24 h 以后 1 d 注水 3 次。膨胀土吸水膨胀后即对锚板作用向上的膨胀力，锚板产生向上的位移。此时在加载装置中放置砝码形成平衡荷载，使锚板位移恢复。当加载量过大时锚板产生向下的位移，应卸载使锚板位移恢复。



图 5 ARVS 试验模型植被的生长情况
Fig.5 Growth of vegetation of ARVS model

模型中的 HPTRM 网紧贴在膨胀土的表面，所以膨胀土的变形量也就是 HPTRM 网的变形量。试验过程中用百分表进行变形量的量测。百分表按照距模型表面圆心 10、20、30、40 cm（即半径分别为 10、20、30、40 cm）的间隔安装在十字形表架上，具体布置方式如图 6 所示。

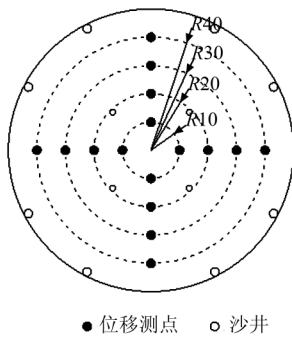


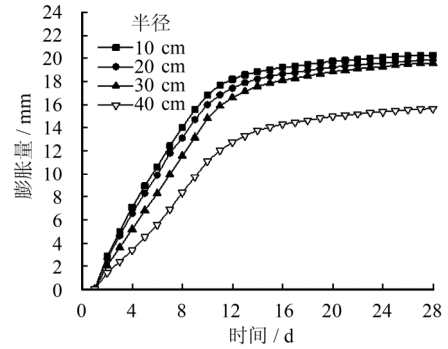
图 6 百分表布置示意图（单位：cm）
Fig.6 Sketch layout of dial indicator(unit: cm)

本次试验膨胀土变形量的采集间隔为 24 h。模型试验结束的标准，可借鉴平衡加压法测试膨胀力试验关于停止加载的判别方法。规定在 24 h 内模型的膨胀变形量不大于 0.05 mm，表明土样膨胀已经达到稳定状态，可停止注水和加载，结束试验。

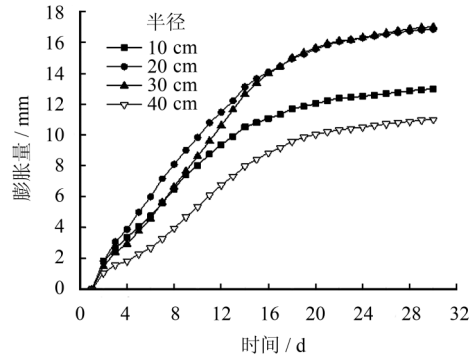
3 试验结果与数据分析

3.1 膨胀土膨胀变形过程分析

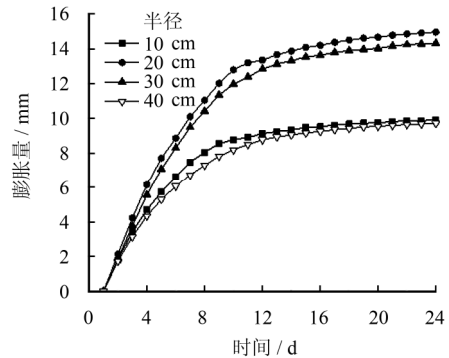
比较相同半径处的 4 个测点结果发现，膨胀土的膨胀量变化基本一致，故取其平均值，得到膨胀土的膨胀量随时间变化的结果如图 7 所示。从图中可以看出，自由膨胀模型、未植草 ARVS 模型和 ARVS 模型的膨胀变形达到稳定的时间分别为第 28、30、24 天。3 个模型不同半径处整个变形过程均呈现明显的 3 个阶段，即快速膨胀阶段、缓慢变形阶段和逐渐稳定阶段^[15]，选择半径为 20 cm 处膨胀土的变形分析结果见表 3。



(a) 自由膨胀模型



(b) 未植草 ARVS 模型



(c) ARVS 模型

图 7 模型不同位置变形时程曲线

Fig.7 Time-history curves of deformation at different locations of the model

表 3 膨胀土变形结果

Table 3 Deformation results of expansive soil

模型	变形阶段	持续时间 /d	变形量 /mm	变形比重 /%	日均变形量 /mm
自由膨胀模型	快速膨胀阶段	10	16.00	80.56	1.6
	缓慢变形阶段	10	3.25	16.36	0.325
	逐渐稳定阶段	8	0.61	3.07	0.076
未植草 ARVS 模型	快速膨胀阶段	14	13.12	77.86	0.937
	缓慢变形阶段	8	2.93	17.39	0.366
	逐渐稳定阶段	8	0.80	4.75	0.1
ARVS 模型	快速膨胀阶段	8	11.05	73.86	1.38
	缓慢变形阶段	7	3.03	20.25	0.43
	逐渐稳定阶段	9	0.88	5.88	0.097

从表 3 中可以看出，3 个模型各个膨胀阶段的持续时间均不相同。未植草 ARVS 模型的快速膨胀阶段持续的时间最长，ARVS 模型快速膨胀阶段持

续时间最短，并且最先达到稳定阶段。再比较3个模型变形各个阶段的膨胀量，可见快速膨胀阶段产生的变形量均占全部变形量的70%以上，此阶段膨胀土的膨胀速度是其他各阶段的3倍以上，表明膨胀土在最初吸水过程中的变形不仅速度快，总量也大。

对比图7(b)、7(c)中发现，半径为20、30 cm处膨胀土最终变形量相差不大且膨胀步调基本一致，但这两处与半径为10、40 cm处即HPTRM网约束端附近膨胀土变形量相差较大。无草ARVS模型和ARVS模型中HPTRM在模型侧壁上沿以及与锚板接触处均被固定住，靠近固定端的地方HPTRM的变形就小，相应地，HPTRM对膨胀土的约束作用就会大一些，那么膨胀土的变形就偏小。相反在远离固定端处，HPTRM对膨胀土的约束作用相对来说就小一些，膨胀土的变形就偏大。两个防护模型中的防护方式的差别，也导致了半径为10、40 cm处的变形量对比有不同的结果。

将3个模型相同半径处膨胀土的膨胀变形过程进行对比，如图8所示。从图中可以看出，沿模型半径方向均匀分布的4个测点，无草ARVS模型和ARVS模型的最终变形量均明显小于无防护模型的最终变形量，变形最大差值超过10 mm。而ARVS模型最终变形量只是稍微小于无草ARVS模型的变形量，最大差值2 mm左右。由此可见，采用无草ARVS系统作为防护措施的膨胀土模型的变形被很好的约束。此外，HPTRM网与植被结合后形成的复合防护网与单纯的HPTRM相比约束变形的效果有所增强，但增强的程度不是很大。考虑到生态环境以及防冲刷等功能的需要，宜用植被与HPTRM网组合成植被-土工网防护垫对膨胀土边坡进行治理和防护。

观察3个模型膨胀土变形时程曲线的发展趋势并对比表2发现，ARVS模型最先达到平稳阶段，为第15天左右；自由膨胀的模型次之，为第20天左右；无草ARVS模型最后才达到平稳阶段，为第22天左右，3个模型初始含水率、干密度相同，每天的注水量以及最终的注水量也基本一致。无草ARVS模型因为只铺设HPTRM网，网在膨胀土表面具有柔性约束作用，膨胀土变形的过程类似于“吸水膨胀-约束-吸水膨胀-约束”这样一个过程，一直到不再吸水膨胀为止，所以，这种模型在快速膨胀阶段和缓慢变形阶段持续的时间比较长，进入变形的平稳阶段就会晚一些。ARVS模型中不仅有HPTRM网的约束作用，植被生长的前期根系发达

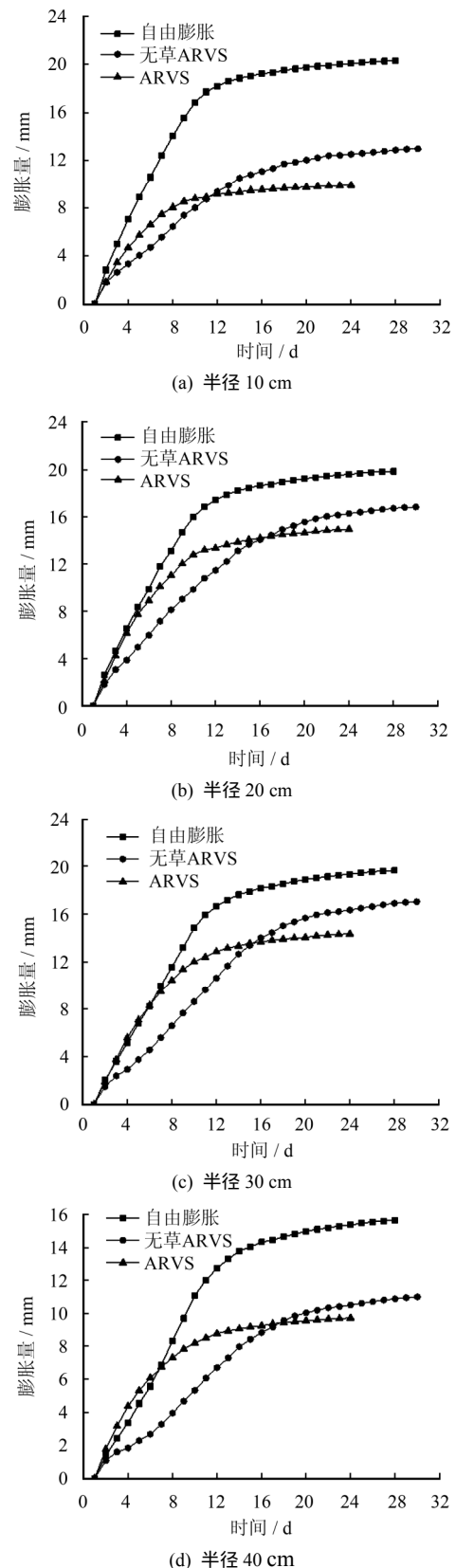


图8 模型相同位置处变形时程曲线

Fig.8 Time-history curves of deformation at same position of the model

能够使膨胀土中的裂隙扩张；枝叶旺盛，其光合作用和蒸腾作用又加速根系的生长，水分能够快速渗入土体中，使膨胀土的变形较快地进入稳定阶段。4

个位置处的变形在第 16 天左右均出现了 ARVS 模型与无草 ARVS 模型的重合的现象就与 ARVS 模型快速稳定有关。

将 3 个模型按照沿直径分布测点的最终变形情况进行对比，如图 9 所示。从图中可以看出，自由膨胀模型的最终变形除了靠近模型内壁的两个测点由于摩擦变形稍微小以外，其余几个测点的变形都比较接近。无草 ARVS 模型和 ARVS 模型采取防护措施后膨胀土变形减小，并且在 HPTRM 固定点之间的变形呈现出两端小、中间大的抛物线形式，验证了图 7(b)、7(c)中的变形差异。

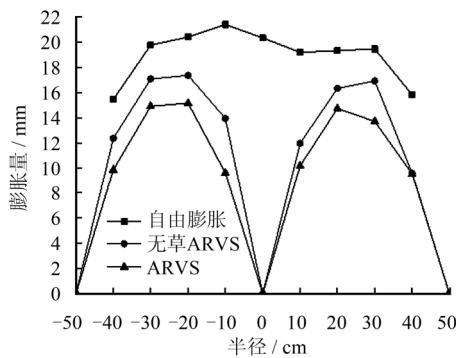


图 9 模型直径方向变形对比

Fig.9 Deformation contrast in diameter direction of model

需要说明的是，圆心处锚板的直径为 10 cm，实际上无草 ARVS 模型和 ARVS 模型在圆心周围 0 变形位置应是以圆心为原点，半径为 5 cm 的范围内。为了方便说明问题，图中将锚板简化为 0 坐标处的一点。

3.2 膨胀力传递分析

ARVS 室内模型的制作是从 ARVS 系统实际的工作状况和室内膨胀力试验等角度考虑制作而成。模型中膨胀力的传递途径是本次研究的重点，首先分析 ARVS 系统模型中膨胀土所产生膨胀力的传递机制。图 10 为膨胀土模型注水膨胀后的模型受力示意图，其中锚板和锚杆固定为一体。膨胀土吸水

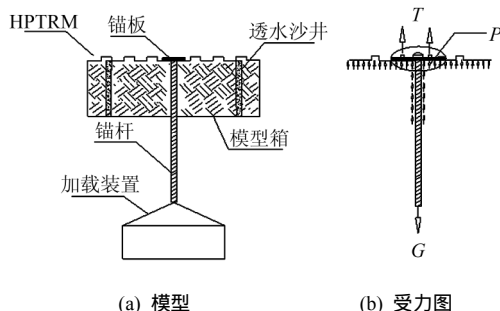


图 10 模型受力示意图

Fig.10 Sketch of farce model

后膨胀，因受到 HPTRM 的约束，会产生对 HPTRM 作用向上的膨胀力，在允许膨胀土产生微小变形的情况下对 HPTRM 网的作用力，称为微变形膨胀力。HPTRM 在膨胀力的作用下产生变形将会对锚头板产生向上的拉力，其合力为 T 。锚头板下部的膨胀力合力为 P ，为使锚头板不产生位移，锚杆下部加载量为 G 。以锚杆为研究对象，它的受力应满足(忽略土与锚杆接触部分的摩擦阻力)：

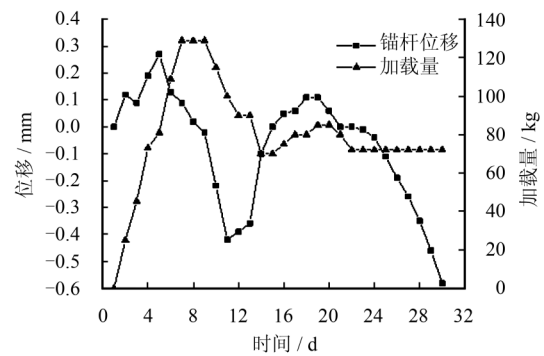
$$P + T = G \quad (1)$$

加载量 G 在模型试验中可以直接测得，膨胀力合力 P 可根据膨胀土室内试验测得的膨胀力和锚板的面积计算得到，拉力 T 在模型试验中不容易直接测试，可以利用有限元模拟，采用位移反演膨胀力的方式来计算。

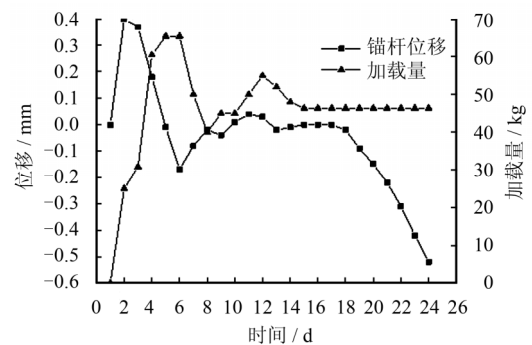
3.3 膨胀力结果的验证

在 ARVS 系统防护边坡的实际工程中锚杆锚固于土层中，不会产生位移，在铺网模型和植草模型中要保持锚杆不产生位移。

通过监测锚杆的位移与加载量研究膨胀力的传递途径，因锚头板和锚杆连为一体，模型中间百分表测得锚板的位移也即锚杆的位移。两个模型中锚杆位移变化与加载的情况如图 11 所示。



(a) 无草 ARVS 模型



(b) ARVS 模型

图 11 锚杆位移与加载量关系

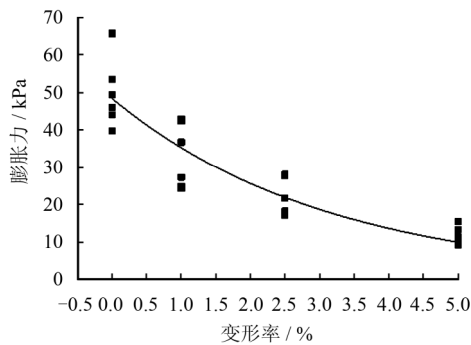
Fig.11 Relationships between anchor displacement and load

图 11 中取锚杆位移持续下降前的稳定阶段所对应的加载量作为最终加载量,可见铺网模型最终加载量 $M_1 = 72 \text{ kg}$,植草模型的最终加载量 $M_2 = 46.4 \text{ kg}$ 。

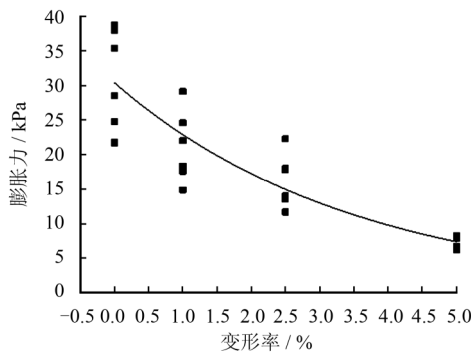
借助南宁重塑膨胀岩微变形膨胀力与微变形率的关系式^[16]:

$$P / P_0 = C_2 e^{D_2 \varepsilon} \quad (2)$$

本文研究了模型试验膨胀土样以及掺草根膨胀土的微变形膨胀力与微变形率的关系,对 12 组膨胀力-变形率数据进行拟合,结果如图 12 所示。



(a) 膨胀土膨胀力-变形率关系



(b) 草根膨胀土膨胀力-变形率关系

图 12 膨胀力与变形率的拟合曲线

Fig.12 Fitting curves of expansion force and deformation rate

拟合关系式为

$$\left. \begin{aligned} P_\varepsilon / P_0 &= 0.93e^{-0.281\varepsilon}, & (R^2 = 0.816) \\ P'_\varepsilon / P'_0 &= 0.973e^{-0.281\varepsilon}, & (R^2 = 0.767) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: P_ε 、 P'_ε 分别为膨胀土和草根膨胀土微变形膨胀力 (kPa); P_0 、 P'_0 分别为膨胀土和草根膨胀土的膨胀力 (kPa); $\varepsilon = \delta/h$ (%), δ 为膨胀土变形量, h 为土样厚度 (m)。可以利用式 (1) 用数值模拟的方法分别计算无草 ARVS 模型和 ARVS 模型产生的膨胀力。

按照模型试验中 HPTRM 的尺寸建立几何模型,因锚头板范围内 HPTRM 变形为 0,不予考虑,

几何模型为内径为 0.05 m,外径为 0.5 m 的圆环形。模型采用弹性壳单元 SHELL63,划分网格后的有限元模型如图 13 所示,通过一系列物理力学试验得到 HPTRM 的材料参数见表 4。

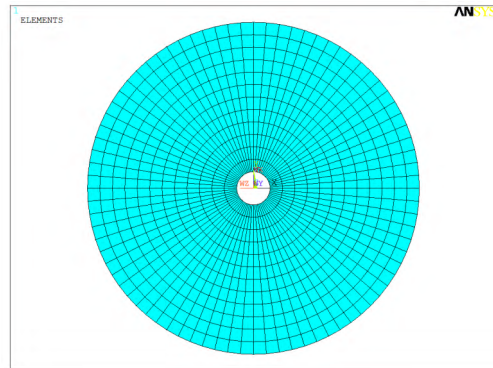


图 13 有限元模型

Fig.13 Finite element model

表 4 HPTRM 基本物理参数

Table 4 Basic physical parameters of HPTRM

厚度/mm	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
4	2	0.4	108

根据模型实际约束情况施加位移约束条件,按照以下步骤进行数值计算:

将初始膨胀力作为面力均匀地施加在每个单元上。

求解获得节点竖向位移 s_i 。

令膨胀土的变形 $\delta = s_i$,由微变形膨胀力公式求得膨胀力 p_i ;

将 p_i 作为节点力施加在模型节点上。

再次求解获得节点竖向位移 s_{i+1} 。

判断各节点竖向位移的最大差值是否满足 $|(s_{i+1} - s_i)_{\max}| \leq \varepsilon^*$, ε^* 为收敛容差。不满足则从第一步开始重新迭代计算,满足则说明 p_i 即为作用在 HPTRM 上的膨胀力,停止运算。

提取有限元模型内边界约束节点的竖向支反力,求得无草 ARVS 模型支反力之和为 -222.38 N (方向竖直向下),对应模型试验中 HPTRM 网对锚杆向上的拉力 $T = 222.38 \text{ N}$ 。

考虑膨胀土对锚板的膨胀力:

$$P = SP_0 = (\pi D_1^2 / 4 - \pi D_2^2 / 4) P_0 \quad (4)$$

得 $P = 378.42 \text{ N}$ 。式中: S 为锚板与膨胀土接触部分的面积 (m^2); P_0 为 0 变形时的膨胀力 (kPa),取室内试验值 49.82 kPa 。 $D_1 = 100 \text{ mm}$, $D_2 = 18 \text{ mm}$,则 HPTRM 网与土对锚杆向上的合力为 $T + P = 600.80 \text{ N}$,锚杆受到的向下拉力即加载量 $G = M_1 g =$

705.6 N。

同理，ARVS 模型支反力之和为-169.42 N（方向竖直向下），即对应模型试验中 HPTRM 网对锚杆向上的拉力 $T = 169.42$ N。

考虑草根膨胀土对锚板的膨胀力：

$$P' = SP'_0 = (\pi D_1^2 / 4 - \pi D_2^2 / 4) P'_0 \quad (5)$$

得 $P' = 236.91$ N。式中： P'_0 为草根膨胀土的膨胀力（kPa），取室内试验值 31.19 kPa。网与土对锚杆向上的合力为 $T' + P' = 406.33$ N，锚杆受到的向下拉力即加载量 $G' = M_2 g = 454.72$ N。

无草 ARVS 模型和 ARVS 模型中锚杆受到向上的拉力均小于锚杆受到向下的拉力，偏小 10% 左右，原因是计算锚杆受到向上的合力时没有考虑膨胀土在厚度范围内对锚杆向上的摩阻力，因为锚杆在加载重物的作用下有向下的运动趋势，故膨胀土会在锚杆周围产生向上的摩阻力，尤其是当模型注水后，在一定含水率界限内膨胀土含水率增加，对锚杆的摩阻力也会增大，若忽略此摩阻力，模拟值与模型试验值比较吻合。

4 结 论

（1）膨胀土的无防护模型和防护模型中膨胀土的变形均分为快速膨胀阶段、缓慢变形阶段和逐渐稳定阶段 3 个阶段，其中快速膨胀阶段的膨胀量占总膨胀量的 70% 以上，膨胀速率是其他各阶段的近 3 倍。

（2）与无防护措施的膨胀土变形量相比，采用无草 ARVS 系统防护膨胀土后膨胀土最大变形量减小超过 40%。在 ARVS 系统中考虑植被对膨胀土变形的影响后其变形会进一步减小，但减小幅度不是很大。

（3）膨胀土植草后，由于植被根系对膨胀土裂隙的扩张作用，水分能够在土体中快速渗透，从而使膨胀土的变形能够较快地进入稳定阶段。

（4）ARVS 系统约束膨胀土变形时，膨胀力的传递路径是首先膨胀力作用在 HPTRM 上，HPTRM 再将膨胀力传递给地锚，最后地锚通过锚固段将膨胀力传递到土层中。

参 考 文 献

[1] 袁从华, 周健, 杨明亮. 高速公路膨胀土边坡整治[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 27(增刊 1): 3073 - 3078.
YUAN Cong-hua, ZHOU Jian, YANG Ming-liang. Treatment of expansive soil slopes beside highways[J].

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 27(Supp.1): 3073 - 3078.

[2] AYTEKIN M. Numerical modeling of EPS geofoam used with swelling soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1997, 15(1): 133 - 146.

[3] VESSELY M, WU J. Feasibility of geosynthetic inclusion for reducing swelling of expansive soils[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2002, 1787: 42 - 52.

[4] 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(增刊 2): 59 - 64.
ZOU Wei-lie, CHEN Lun, XIE Peng, et al. Nonlinear strength property of remolded expansive soil and its stress-strain relationship for soaking after one-dimensional consolidation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Supp.2): 59 - 64.

[5] LIU S, LU Y, WENG L, et al. Field study of treatment for expansive soil/rock channel slope with soilbags[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(4): 283 - 292.

[6] 徐晗, 汪明元, 黄斌, 等. 土工格栅加筋膨胀土渠坡数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 599 - 603.
XU Han, WANG Min-yuan, HUANG Bin, et al. Numerical simulation research on canal slope of expansive soil strengthened by geogrid[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Supp1): 599 - 603.

[7] 杨和平, 王静, 湛文涛, 等. 南宁外环膨胀土路基处治技术及设计方案研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 359 - 365.
YANG He-ping, WANG Jing, ZHAN Wen-tao, et al. Study of treatment technology and design scheme of expansive soil subgrade for Nanning outer ring expressway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Supp2): 359 - 365.

[8] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. Full-scale HPTRM-strengthened levee testing under combined wave and surge overtopping conditions: Overtopping hydraulics, shear stress, and erosion analysis[J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 29(1): 182 - 200.

[9] LI L, AMINI F, WU J. Turbulence effect on slope stability of an earthen levee strengthened by HPTRM under

- overtopping conditions[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2015, 33(1): 1 - 13.
- [10] 肖成志, 孙建诚, 李雨润, 等. 三维土工网垫植草护坡防坡面径流冲刷的机制分析[J]. **岩土力学**, 2011, 32(2): 453 - 458.
- XIAO Cheng-zhi, SUN Jian-cheng, LI Yu-run, et al. Mechanism analysis of ecological slope protection against runoff erosion by grass jetting on 3D geomat[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 453 - 458.
- [11] 肖成志, 孙建诚, 刘熙媛, 等. 三维土工网垫植草护坡性能试验[J]. **重庆大学学报**, 2010, 33(8): 96 - 102.
- XIAO Cheng-zhi, SUN Jian-cheng, LIU Xi-yuan, et al. Experimental study of properties of slope protection through grass jetting on 3D geomat[J]. **Journal of Chongqing University**, 2010, 33(8): 96 - 102.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50112-2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50112-2013 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18744-2002 土工合成材料—塑料三维土工网垫[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 18744-2002 Geosynthetics-Plastic three dimensional erosion control mat[S]. Beijing: China Planning Press, 2002.
- [14] 肖衡林, 张晋锋. 三维土工网垫固土植草试验研究[J]. **公路**, 2005, 50(4): 163 - 166.
- XIAO Heng-lin, ZHANG Jin-feng. A study on erosion-resistance and seeding test of three dimensional geomat[J]. **Highway**, 2005, 50(4): 163 - 166.
- [15] 袁俊平, 陈剑. 膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究[J]. **河海大学学报(自然科学版)**, 2003, 47(5): 547 - 551.
- YUAN Jun-ping, CHEN Jian. Experimental research on swelling characteristics of expansive soil under one-side immersion and its application[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2003, 47(5): 547 - 551
- [16] 欧孝夺, 唐迎春, 钟子文, 等. 重塑膨胀岩土微变形条件下膨胀力试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(5): 1067 - 1072.
- OU Xiao-duo, TANG Ying-chun, ZHONG Zi-wen, et al. Test research on expansive force under small deformation of remolded expansive rock and soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(5): 1067 - 1072

城市轨道交通 BIM 应用研究与实践

著译者: 刘光武 版次: 第一版 出版时间: 2016-10 开本: 小 16 开

出版单位: 中国建筑工业出版社 装帧: 平膜 标准书号: 978-7-112-19868-9

【内容简介】本书作为“城市轨道交通 BIM 应用丛书”中的第一本, 通过对城市轨道交通工程特点和 BIM 技术发展现状及趋势的研究, 结合实际项目试点阐述了城市轨道交通 BIM 技术应用的实施策略、管理模式、实施标准、软硬件环境等几个关键环节。全书共 6 章, 包括: BIM 技术与发展, 城市轨道交通 BIM 技术应用实施策略, 城市轨道交通业主 BIM 应用管理模式, 城市轨道交通业主 BIM 应用标准, 城市轨道交通 BIM 应用信息技术环境, 项目案例分享。内容翔实, 具有很强的指导性, 可供城市轨道交通行业各业主单位、参建方等参考使用, 也可供相关专业师生学习参考。

【读者对象】城市轨道交通从业人员。

【目 录】第 1 章 BIM 技术与发展; 第 2 章 城市轨道交通 BIM 技术应用实施策略; 第 3 章 城市轨道交通业主 BIM 应用管理模式; 第 4 章 城市轨道交通业主 BIM 应用标准; 第 5 章 城市轨道交通 BIM 应用信息技术环境; 第 6 章 项目案例; 参考文献。

(信息来源: 中国建筑书店网站)