

龚壁卫, 许晓彤, 胡波. 引江济淮工程膨胀土地段渠坡生态处治技术[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 1006-1012. GONG B W, XU X T, HU B. Ecological treatment of the channel in expansive soil section of the Water diversion project from the Yangtze to Huaihe River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 1006-1012. (in Chinese)

# 引江济淮工程膨胀土地段渠坡生态处治技术

龚壁卫<sup>1</sup>, 许晓彤<sup>2</sup>, 胡波<sup>1</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010;

2. 安徽省引江济淮集团有限公司, 合肥 230000)

**摘要:** 围绕引江济淮工程膨胀土地段河渠边坡水泥改性土换填层易碱化板结、植物难以生长和局部弱膨胀土渠坡的简化处理等工程实际问题, 以生态优先、技术创新为原则, 采用现场试验、室内单元体测试和数值分析等手段, 开展系统的研究工作。研发一种改善水泥改性土种植效果的生态基材, 提出一种新型膨胀土双层护坡结构, 并研究提出根据实际土层膨胀特性和含水状态进行弱膨胀土边坡的处理原则。现场中试和运用效果表明: 研发的生态基材能适应水泥改性土的种植需要, 使边坡实现良好的绿化效果, 双层护坡结构较好地实现了膨胀土边坡防止降雨入渗和水分蒸发的双重防护要求; 同时, 还可利用砂土层的压重效果, 抑制土层的膨胀变形。研究成果为引江济淮的工程设计和后期运行管理提供了技术支撑, 同时, 也为膨胀土地段渠坡生态处治探寻了新的方向。

**关键词:** 引江济淮; 膨胀土; 生态修复; 水泥改性土; 双层护坡结构

**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0096

自 20 世纪 30 年代以来, 工程界围绕膨胀土的研究工作从未间断, 岩土工程师从开始识别膨胀土到简单的定性测试, 逐渐建立了一套试验、分析及处治方法, 相关的研究工作也从经典的土力学理论, 延伸到非饱和土的理论研究领域<sup>[1-2]</sup>。从膨胀土边坡的处治技术发展来看, 早期关注到膨胀土的饱和强度极低的特征, 边坡处治以放缓边坡和设置支挡结构为主; 随着非饱和土理论的发展, 揭示了大多数黏性土从非饱和到饱和状态变化过程的强度衰减机制, 因此, 防止水分变化成为膨胀土处治的重要原则, 相应的措施包括换填黏性土和土体防渗等。进入 21 世纪, 随着南水北调中线工程建设所开展的系统的研究工作, 从理论上解决了膨胀土边坡失稳的力学机制问题, 同时, 也找到了膨胀土边坡治理的有效途径, 使膨胀土的工程处治技术上升到一个新的高度<sup>[3-8]</sup>。随着时代的发展, 边坡治理与环境的协调问题开始显现, 对膨胀土边坡处治提出了更高的要求, 即: 既要保证工程安全, 还要满足生态和绿色环保的需要。

引江济淮工程全长 723 km, 工程自南向北分为引江济巢、江淮沟通、江水北送 3 段, 其主要地貌形态为江淮低山丘陵、沿江冲积平原及淮北冲积平原, 地形坡度平缓, 一般小于 15°。其中, 淮河以南菜子湖线路和江淮沟通切岭地段及部分岗地, 约有 140 km 的膨胀土分布<sup>[9-11]</sup>。膨胀土地段地质结构多为上土下岩的二元结构, 局部软岩存在软弱夹层, 因此, 该工程膨胀土渠坡的稳定问题更为复杂, 治理难度更大, 是工程的主要技术问题之一。初步设计阶段有关设计和科研单位曾开展过试验工程的研究工作, 并取得了阶段性研究成果<sup>[12-15]</sup>。本文重点论述初步设计以后开展的水泥改性土生态修复、膨胀土地段生态护坡结构型式以及低河堤弱膨胀土河道的生态处治研究及主要成果。

## 1 引江济淮工程膨胀土分布及工程问题分析

### 1.1 膨胀土的分布

地质勘察显示, 引江济淮工程膨胀土主要为弱、中等膨胀性的黏性土及少量具弱膨胀性的泥岩。

收稿日期: 2023-06-08 修回日期: 2023-09-26 网络出版时间: 2023-10-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231007.1538.006>

基金项目: 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目(YJH-ZT-ZX-20191031216, YJH-ZT-ZX-20230118528); 中央级公益性科研院所基本科研项目(CKSF2023327/YT)

作者简介: 龚壁卫(1962—), 男, 重庆人, 正高级工程师, 主要从事土的工程特性研究。E-mail: [bwgong@126.com](mailto:bwgong@126.com)

其中:江淮沟通段膨胀土分布最长,约 63.03 km,膨胀土渠坡高度也最大;菜子湖线路膨胀土分布最短,约 37.85 km,但有约 1 km 强膨胀土分布;过巢湖线路膨胀土地段约 39.16 km,以中膨胀土居多。工程涉及的挖方地段渠坡高度以菜巢分水岭和江淮分水岭最高,分别达到 32 m 和 46 m,膨胀土层切深最大达到 23 m。各输水线路段不同膨胀等级膨胀土分布统计见表 1<sup>[9]</sup>。

表 1 输水线路膨胀土分布统计

Tab. 1 Distribution statistics of expansive soil in water transmission line

项目	弱膨胀土	中等膨胀土	强膨胀土	累计
菜子湖线路	31.35	5.5	1	37.85
膨胀土渠段				
过巢湖线路	27.06	12.1	0	39.16
长度/km				
江淮沟通段	54.725	8.3	0	63.025
合计	113.135	25.9	1	140.035
占比/%	80.8	18.5	0.7	100

从膨胀土的分布特征可见,本工程膨胀土大多以弱膨胀性为主,长度约占膨胀土渠段总长的 80.8%,仅有约 18.5% 的地段属于中膨胀土,强膨胀土地段不到 1.0%。

不同线路膨胀土的膨胀性指标见表 2<sup>[9]</sup>。分析各项指标可知,菜子湖和过巢湖线路膨胀土膨胀力最大值均较高,但平均值较低,说明个别点位的膨胀潜势较高,土层分布极不均匀。江淮沟通段与其类似,但膨胀力最大值仅 50 kPa。这表明上述地段膨胀土局部存在渠坡变形的隐患,但总体仍处于较低水平,这与本工程膨胀土自由膨胀率指标变幅较大是基本吻合的,同时,也符合该工程输水线路以弱膨胀土为主的特征。

表 2 输水线路膨胀土膨胀性指标

Tab. 2 swelling index of expansive soil of water transmission line

线路	数值	自由膨胀率/ %	膨胀力/ kPa	膨胀率/%	
				0	50 kPa
菜子湖线路	范围值	19~98	8.8~99.0	-0.85~-3.55	-2.21~-1.04
	平均值	43	27.3	0.83	-0.89
过巢湖线路	范围值	18~82	3.3~100.0	-0.15~5.09	-1.87~-0.51
	平均值	56	28.8	1.10	-0.21
江淮沟通段 (2单元)	范围值	11~86	6.1~50.0	-	-2.01~-0.37
	平均值	44*	22.0	-	-0.45
江淮沟通段 (3单元)	范围值	-	10.5~47.5	-	-1.08~-0.03
	平均值	-	25.3	-	-0.52

注: \*为江淮沟通段全段平均。

## 1.2 主要工程问题分析

对比南水北调中线等其他膨胀土地区工程可见,引江济淮工程的膨胀土地层呈现分段集中、同一地段不同部位、不同深度土体的膨胀性变幅较大的特点。其中,江淮沟通段的问题尤为突出,且土岩交互、土性多变。为此,初步设计阶段结合南水北调中线工程的经验,对全线膨胀土地段提出了超挖换填水泥改性土的处理措施,但同时产生了一些生态环境方面的问题,如:水泥改性土易碱化板结,回填碾压后植物难以生长,通常需要在渠坡表层再覆盖一层耕植土才能进行草皮护坡,由此,既增大了施工难度和投资,又给边坡的生态修复带来一定的困难。而且,超挖填筑还将产生大量的改性土削坡弃料,既造成水泥和土壤资源的浪费,对工程区域的生态环境也将造成不利影响<sup>[16-18]</sup>。此外,对部分坡高不足 10 m 的“低河堤”渠段,仍沿用换填水泥改性土的技术方案,对于局部弱膨胀性地段,是否必要?能否根据实际地层的天然含水率及膨胀性采用简化的处理措施?

上述问题都是新时期膨胀土边坡生态处治观念转变所带来的新课题,为此,研究人员秉承生态优先、技术先进的理念,在渠道膨胀土开挖料的利用以及水泥改性土的生态修复、膨胀土生态护坡结构、弱膨胀土地段边坡处理等方面展开了研究工作。

## 2 膨胀土地段渠坡生态处治技术研究

### 2.1 水泥改性土的生态修复

分析认为,水泥改性土中植物难以生长的主要原因在于土壤的酸碱度不适和营养成分不足等<sup>[19-20]</sup>。为此,分别采用现场盆栽和渠坡播种两种方式开展改性土酸碱度调节及生态基材的研究,见图 1。

盆栽种植选择在菜巢线 C006 标附近的平整开阔场地,用长 10 cm×宽 10 cm×高 14 cm 的长方体花盆,播种后统一放置在室外,保证其生长环境与现场一致,见图 1(b)。以现场推荐的水泥掺量为 4% 的水泥改性土为样本,测试其酸碱度 pH 值为 11.0。为此,先采用掺量 1.25% 的硫酸亚铁调节剂,将其 pH 值降低到 7.2。以该组水泥改性土为样本,采用正交试验法,以保水剂、有机肥、泥炭、土壤改良剂为生态基材,加上压实度设置 5 个主要影响因素,每个因素取 4 个水平,组合成 16 种试验方案,开展水泥改性土复合改良效果的影响试验。生态修复效果以播种 60 d 后的植物覆盖率、茎生长高度、最大出芽数、根系入土深度及含根量等作为评价标准。试验因素水平和影响因素组合见表 3。

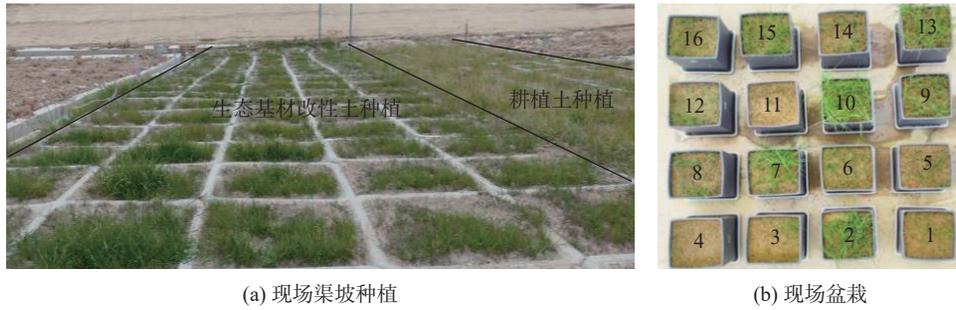


图 1 水泥改性土生态植被试验

Fig. 1 Field test of ecological vegetation of cement modified soil

表 3 试验因素水平  
Tab. 3 Test factor level %

水平	A泥炭	B保水剂	C有机肥	D土壤改良剂	E压实度
1	0	0	0	0	66
2	3	0.05	0.5	0.05	76
3	6	0.10	1.0	0.10	86
4	9	0.15	1.5	0.15	96

利用熵权法计算上述 5 项所占权重,再将各种配比的分值按对应的权重计算出综合分值进行对比分析<sup>[18]</sup>。图 2 为 16 种生态基材组合方案的评价分值情况。分析可见,在 16 组对比方案中,覆盖率较高的有 2、10、13 组,出芽数较高的有 5、10、13 组;而综合评价分值较高的为 10、13 组。

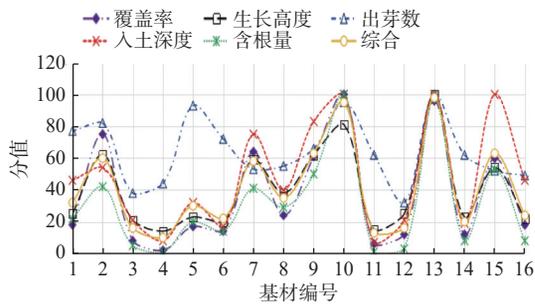


图 2 不同组合方案评价分值

Fig. 2 Evaluation scores of different combination schemes

将同一因素不同水平下的指标值进行极差分析,  $K$  为各因素下所对应的测试值之和,  $k_i = K_i / 4$ 。如: 泥炭的 4 组水平中对应第一组水平的生长指标综合分值分别为 32、60、16、10, 则第一组对应的综合分值  $k_1 = (32+60+16+10)/4=29.5$ 。将 4 组不同水平下的综合分值进行比较, 其中, 同一因素在不同水平下指标值的最大值与最小值之间的差值称为极差。极差是反映各因素影响大小的客观指标: 极差大表明该因素对试验结果的影响大, 是主要因素; 反之, 则是次要因素。正交试验极差计算成果见表 4, 根

据极差大小, 可知对狗牙根综合生长状况影响最大的因素是有机肥, 其次分别为压实度、保水剂、泥炭、土壤改良剂等, 即: 因素主次为  $C>E>B>A>D$ 。

表 4 正交试验结果分析  
Tab. 4 Analysis of orthogonal test results

综合分值	A泥炭	B保水剂	C有机肥	D土壤改良剂	E压实度
$k_1$	29.5	55.75	22.75	31.5	56.25
$k_2$	36.25	49.25	42.25	51.5	51.25
$k_3$	46.75	37.50	33.5	41.25	38.00
$k_4$	51.25	21.35	65.25	39.5	18.25
极差	21.75	34.50	42.50	20.00	38.00
因素主次	C>E>B>A>D				
最优水平	A <sub>4</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>
最优组合	A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub>				

通过对比不同配方下护坡植物的覆盖率、生长高度、出芽数(发芽率)、入土深度、含根量等综合评价指标, 结合极差分析, 最终确定综合生长指标最优的水泥改性土生态基材的最优配比为有机肥 1.5%、压实度 66%、保水剂 0.05%、泥炭 9%、土壤改良剂 0.05%。

现场中试在同一标段的渠坡进行 [图 1(a)], 草种选择当地适宜的狗牙根, 草种的播种量为  $10.0 \text{ g/m}^2$  (约  $300 \text{ 粒/m}^2$ )。从现场种植效果来看, 采用生态基材改性后的混合料种植 70 d 的效果与耕植土种植 90 d 的相当, 表明通过调整 pH 值, 并添加本文研究的生态基材, 控制填筑压实度, 可以有效改善水泥改性土不易种植的问题, 从而实现施工工序简化, 解决改性土层的生态修复难题。

## 2.2 膨胀土地段生态护坡结构型式

研究表明, 膨胀土边坡浅层滑动的力学机制是由膨胀变形在土层不同深度产生的剪应力所引起

的<sup>[21-22]</sup>。降雨入渗后,坡体一定范围内土体吸湿膨胀,产生顺坡向的剪切力,当剪切力超过土体的抗剪强度后产生局部应力集中,并逐步向周边扩散,最终导致滑坡。要防止此类边坡失稳,首先应防止雨水入渗保持土体含水率不变,其次是通过上覆荷载压重来抑制膨胀变形的产生。

新型护坡结构由低渗透性的细粒土和高渗透性砂土组成,其表层材料可选用具有防渗、绿化作用的黏性土、添加生态基材的改性土等,下层材料选用具有排水、隔温作用的粗粒土、砂土等。按照非饱和土渗流理论<sup>[23]</sup>,细粒土和粗粒土在非饱和状态下渗透性的差异可使得两者界面上产生一种毛细阻滞作用,该作用能使细粒土层的储水能力从田间持水量增加至接近饱和状态,细粒土层含水率的增大会进一步提升其防渗性能,而下层的粗粒土、砂土层则具有更好的排水作用。降雨发生时,雨水击

穿表层细粒土层以后,由于被保护的膨胀土层渗透系数远低于其上覆盖的粗粒土层,雨水的入渗会被阻挡,进而沿坡面在粗粒土层中向下流动,从而减少水分渗入膨胀土层;在干旱条件下,膨胀土层水分蒸发至粗粒土层后,由于表层的细粒土层的阻隔,蒸发水分在粗粒层封存,使被保护的膨胀土层不致干涸开裂,从而发挥隔绝膨胀土层与外界水汽交换的作用。同时,粗粒土层也不会因干湿循环产生老化和淤堵,其作用比常规土工膜防渗更具有有效性和长期性。目前,这种结构已经成功运用于垃圾填埋场的防渗工程中。

以引江济淮工程某渠段典型膨胀土断面为代表,采用文献<sup>[24]</sup>提出的膨胀模型,按照实测土层参数,进行了膨胀土渠坡新型生态护坡结构的有限元分析<sup>[25]</sup>,计算断面见图3,图中 $k$ 为渗透系数。

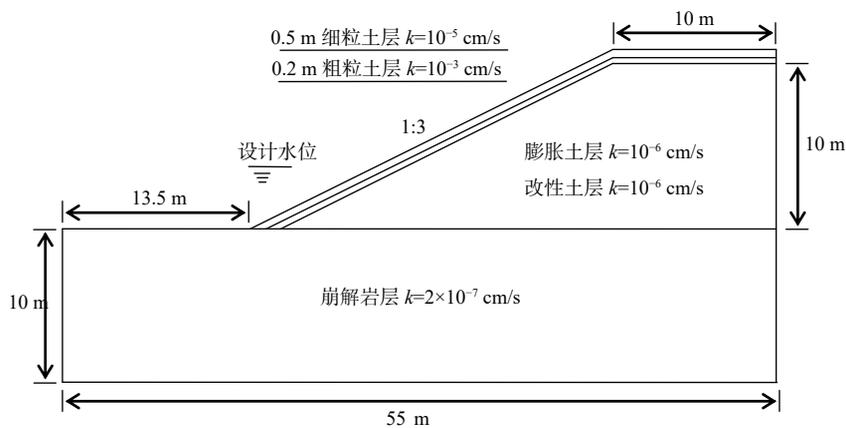


图3 新型生态护坡结构膨胀土渠坡计算断面

Fig. 3 Calculation section of expansive soil canal slope of the new ecological slope protection structure

图4为3种不同边坡结构、持续降雨72h以后渠坡塑性区分布图。图4(a)显示,原始膨胀土渠坡在降雨作用下,由于吸湿膨胀,渠坡浅表层已经形成了贯通的塑性区,意味着渠坡中下部已出现破坏迹象,即将从此处开始滑动;图4(b)为表层换填1.5m水泥改性土护坡结构,在换填层的保护作用下,渠坡浅表层塑性区域大面积减小,仅有较小的区域出现塑性平衡,渠坡破坏趋势明显减缓;图4(c)为新型双层生态护坡结构,尽管该结构总厚度只有0.7m(不到水泥改性土护坡结构的一半),但其防护效果与换填改性土相当,这是因为该结构利用粗粒土层及时将雨水排至坡脚,延缓了雨水聚集导致的坡面塑性区的形成,进而保护了渠坡的稳定,显示其结构性能的优越性。

进一步分析新型双层生态护坡结构中各层材料

渗透性和层厚差异对渠坡浅表层土体饱和度和塑性区域的影响。结果表明,随着粗粒土层渗透系数的降低,膨胀土内部含水率和塑性区分布范围随之增大。这是因为粗粒土层的渗透系数越低,毛细阻滞效果越弱,雨水击穿细粒土层以后向膨胀土层内部入渗的比例增多,含水率增大更多,形成的塑性区更大。当粗粒土层与细粒土层的渗透系数取值一致时,护坡结构退化为单层护坡结构,缺少了中间导排层导致其护坡能力最弱。反之,粗粒土层渗透系数越大其导排能力越强,更利于将雨水导排至渠坡底部。但粗粒土层的渗透性也不能过大,因为雨水入渗会较快使粗粒层达到储水上限,导致排水不畅,此时雨水则会更多地渗入至膨胀土层。分析认为,粗粒土层饱和渗透系数应高于细粒土层两个数量级最佳。

对比生态护坡结构厚度差异可见:当粗粒土层为 0.2 m 时,随着细粒土层厚度的增大,渠坡的塑性区分布范围逐渐减小;同理,随着粗粒土层厚度的增加,渠坡的塑性区分布范围也逐渐减小。这表明对于这类护坡结构,无论是细粒层还是粗粒层,厚度越大护坡结构的防护效果越好。分析细粒土的厚度下限可知,当细粒土层厚度降至 0.4 m 时,膨胀土渠坡内将出现贯通的塑性区,表明这种双层护坡结构对于细粒土层的厚度有一定要求,若细粒土层厚度太薄,将导致整个护坡结构防护效果大打折扣。

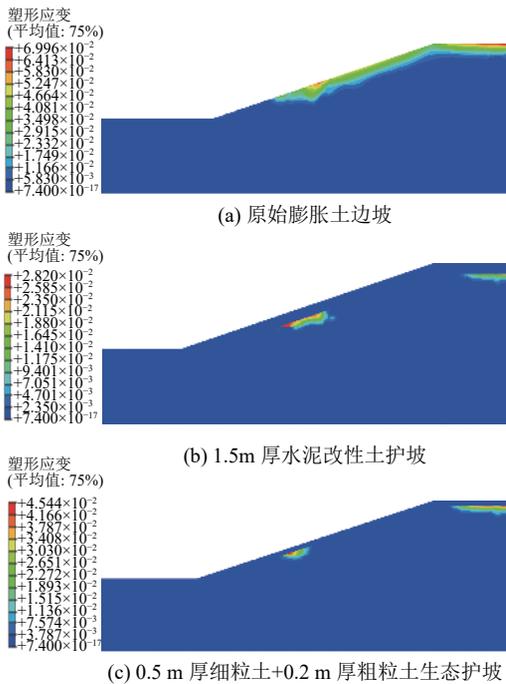


图 4 不同护坡结构膨胀土渠坡塑性区分布

Fig. 4 Distribution of plastic zone of expansive soil canal slope with different slope protection structures

对比生态护坡结构与水泥改性土换填层的效果发现,在图 4 所示的工况和参数条件下,0.5 m 细粒土层+0.2 m 粗粒土层组成的双层结构与 1.5 m 水泥改性土结构护坡效果相当,0.5 m 细粒土层+0.3 m 粗粒土层组成的双层结构的护坡效果与 2 m 水泥改性土效果相当。

通过上述计算分析,提出新型双层生态护坡结构的基本特征:该结构由渗透性较低的黏土层和渗透性较高的砂土透水层组成,其上层结构可以采用厚度不小于 0.4 m、渗透系数为  $10^{-6}$  cm/s 的细粒土层,细粒土材料可结合生态要求选用耕植土或本文提出的弱膨胀改性土等,下层结构可采用厚度不小于 0.2 m、渗透系数为  $10^{-3}$  cm/s 的粗粒土层,粗粒土在有条件的地方可采用砂土或渗透性相当的风化

岩、崩解岩等。生态护坡结构设计参数应通过相关的数值分析或试验确定。

### 2.3 弱膨胀土地段低河堤河道生态处治

引江济淮工程小合分线段为弱膨胀土段,开挖边坡高 7.0~8.7 m,初步设计定义此类河堤为低河堤段,其处理仍采用换填水泥改性土的措施。由于大部分渠坡位于水下,且水下部分膨胀土层长期处于饱和状态,为此,设计考虑取消该段改性土换填层,改用生态植草护坡。对此,应用室内单元体试验测试了不同含水率条件下土体的膨胀变形,并根据实测土体参数对渠段边坡进行了数值分析。

室内试验选用代表性土样,在相同密度条件下,以实测水上和水下天然含水率,按照《土工试验方法标准》进行有荷膨胀率试验,成果见图 5。由图 5 可见:随着上覆荷载的增大,土体的有荷膨胀率显著减小,表明土体的膨胀变形减小,由膨胀变形导致的渠坡失稳的几率降低。当土体由起始含水率 19.7% 吸湿到完全饱和状态时,需要有约 20 kPa 的上覆荷载即可使膨胀变形降低为零;当土体的起始含水率为 22.7% 时,随着土体吸湿膨胀,只需 10 kPa 的上覆荷载即可完全抑制土体的膨胀变形。

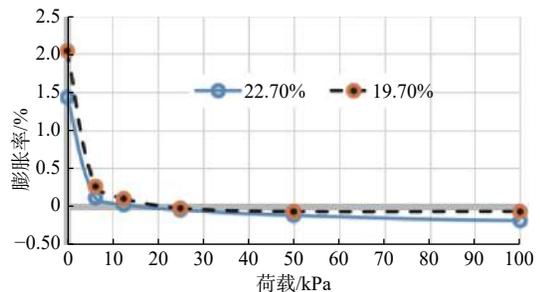


图 5 不同含水率条件下上覆荷载与膨胀率的关系  
Fig. 5 Relationship between overlying load and expansion rate

有荷膨胀率试验成果揭示,弱膨胀土在一定的上覆荷载作用下,可以从吸水膨胀转换为固结压缩,即:膨胀土在一定厚度的土层压重作用下,膨胀变形已被完全抑制,膨胀土的浅层失稳不再发生。考虑到上述地段水下部分土体含水率已处于饱和状态,膨胀土的含水率几乎不可能发生变化,因此,对本工程而言,高度小于 8 m 的低河堤河道的弱膨胀土渠坡水下部分可不作处理,水上部分渠坡可根据实际土层膨胀性的强弱,采用表层覆盖 50 cm 耕植土(约 20 kPa)植草处理即可。

采用有限元分析方法,以实测的膨胀变形参数对该段膨胀土渠坡进行了稳定复核<sup>[18,25]</sup>,研究表明:

对于坡高 8.7 m 的上述低河堤地段,当渠坡膨胀土从天然状态吸湿含水率增大至饱和状态时,河渠边坡仅在浅表层 30 cm 范围内可能产生塑性变形贯通区,坡顶竖向变形不超过 5.4 cm;若表层换填 30 cm 的耕植土植草,则塑性变形区将不复存在。数值分析进一步验证了取消原水泥改性土换填层,改用 30 cm 耕植土植草的可行性。该研究成果为今后类似的膨胀土渠道工程边坡处理提供了借鉴和工程实例。

### 3 结论

引江济淮工程膨胀土地段生态处治是新时期工程建设提出的新目标,研究成果为引江济淮的工程设计和后期运行管理提供了重要的技术支撑。通过对本工程膨胀土的试验研究,揭示江淮地区膨胀土的基本特性,从生态环保的角度,创新膨胀土河渠边坡处治技术,同时,还在土力学理论的工程应用、膨胀土边坡生态治理等方面取得突破。主要结论如下:

通过调整改性土酸碱度、添加生态基材和控制回填压实度等一系列措施,能够有效地解决改性土层植物难以生长问题,既简化施工工序,又可以直接在改性土层进行绿化种植。该措施还可充分利用改性土的削坡弃料,实现膨胀土河渠边坡的绿色生态防护。

采用渗透性较低的黏土和渗透性较高的砂土组成新型膨胀土护坡结构(黏土与砂土的渗透系数相差 2~3 个数量级即可),能较好地满足膨胀土边坡防排渗、防蒸发和抑制膨胀要求。在有条件的地区,还可以充分利用砂岩等开挖料。

充分利用膨胀变形随上覆荷载减小的特性,根据地层膨胀性和水位条件,可以合理地利用河渠边坡绿化层实现压重和生态护坡的双重作用,减少水泥改性土用量,实现膨胀土边坡的生态保护。

#### 参考文献:

- [1] 包承纲,程展林. 土工土力学研究[M]. 武汉:长江出版社, 2021.
- [2] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学[M]. 北京:科学出版社, 2021.
- [3] 程展林,龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [4] 蔡耀军,阳云华,赵旻,等. 膨胀土边坡工程地质研究[M]. 武汉:长江出版社, 2013.
- [5] 国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司. 膨胀土处理技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.
- [6] 李青云,程展林,马黔,等. 膨胀土(岩)渠道破坏机理和处理技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 13-19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.004.
- [7] 龚壁卫. 膨胀土裂隙、强度及其与边坡稳定的关系[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 1-7. DOI: 10.11988/ckyyb.20220271.
- [8] 刘斯宏,高从容,程德虎,等. 土工袋修复膨胀土边坡抗滑稳定分析与摩擦特性试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(3): 581-589. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0059.
- [9] 安徽省水利水电勘测设计院,等. 引江济淮工程可行性研究报告[R], 合肥, 2016, 11.
- [10] 李涛. 引江济淮工程江淮分水岭膨胀土治理方案优选[J]. 江淮水利科技, 2018(3): 12-14. DOI: CNKI:JHSL.0.2018-03-007.
- [11] 岳金刚. 引江济淮输水线路膨胀土影响分析[J]. 治淮, 2016(4): 20-22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9243.2016.04.009.
- [12] 吴建涛,伍洋,金科羽,等. 水泥+石灰复合改性膨胀土对水质的影响[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 82-87. DOI: CNKI:SUN:SLSD.0.2019-06-014.
- [13] 徐海波,宋新江,王佩,等. 水泥改性膨胀土强度与变形特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 172-177. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0098.
- [14] 李国维,李亚帅,袁俊平,等. 引江济淮工程河道边坡膨胀土开裂规律及影响因素[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 154-161. DOI: CNKI:SUN:NYGU.0.2018-12-018.
- [15] 陈圣刚,于威,李国维,等. 引江济淮试验工程河道边坡锚杆检测对比试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 69-75. DOI: CNKI:SUN:SLSD.0.2017-06-012.
- [16] 张恒晟,龚壁卫,文松霖,等. 水泥改性土削坡弃料利用问题研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(2): 86-92. DOI: 10.11988/ckyyb.20191480.
- [17] 马忠武,万康,胡波,等. 砂岩崩解岩改性弱膨胀性岩土试验研究[J]. 土工基础, 2022, 36(5): 10-12.
- [18] 长江水利委员会长江科学院. 引江济淮工程膨胀土地段生态河道关键技术研究总报告[R], 武汉, 2022, 5.
- [19] 陈品章,杨海浪,胡波,等. 基于植被恢复的水泥改性膨胀土换填土复合改良试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 112-118. DOI: 10.11988/ckyyb.20210063.
- [20] 陈品章. 水泥改性膨胀土植被修复试验研究[D]. 长江科学院, 2021. DOI: 10.26982/d.cnki.gcjky.2021.000029.
- [21] 甘旭东,龚壁卫,胡波,等. 引江济淮工程江淮分水岭软弱夹层对边坡稳定的影响研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 145-149. DOI: 10.11988/ckyyb.20211075.

- [22] 丁金华, 陈仁朋, 童军, 等. 基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S1): 159-168. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.027.
- [23] 张家发, 刘晓明, 焦赳赳. 膨胀土渠坡兼有排水功能的双层结构防护方案[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(11): 37-41. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2009.11.009.
- [24] 黄斌, 程展林, 徐晗. 膨胀土膨胀模型及边坡工程应用研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3550-3555. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.12.004.
- [25] 李从安, 许晓彤, 沈登乐, 等. 弱膨胀土三轴膨胀模型及其应用研究[J/OL]. *长江科学院院报*: 1-5. [2023-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20221212.1747.003.html>.

## Ecological treatment of the channel in expansive soil section of the Water diversion project from the Yangtze to Huaihe River

GONG Biwei<sup>1</sup>, XU Xiaotong<sup>2</sup>, HU Bo<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Anhui Provincial Group Limited from Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230000, China)

**Abstract:** Total length of the Yangtze-to-Huaihe Water Transfer Project is 723 km, more than 100 km of the river section is distributed with weak and medium expansive soil, and the maximum excavation depth of the canal is 46 m. The stability of the expansive soil section is one of the key technical problems of the project. In the preliminary design stage, the treatment measures of over digging, replacing and filling cement-modified soil were proposed for the expanded land section, but some ecological and environmental problems were generated, such as the cement modified soil is easy to be alkali, and makes it difficult for plants to grow. Moreover, slope overcutting would produce a large amount of waste soil which is adverse to the ecological environment. Whether simplified treatment measures can be applied to some weak expansion channels with slope heights less than 10 m is a question that needs to be addressed. Under the principle of ecological priority and technological innovation, the researchers carried out systematic research work using field experiments, indoor unit tests, and numerical analysis. The ecological restoration scheme using surface cultivated soil and grass was put forward through field sampling tests and numerical analysis for the low river embankment in the weak expansive soil around Chaohu Lake. An ecological substrate was developed to solve the problems such as soil alkali plate and plant growth difficulty in the medium expansive cement-modified soil replacement layer. The field pilot test proved that the ecological substrate is a new kind of ecological slope planting material. An ecologically friendly expansive soil slope protection structure is proposed using unsaturated soil theory based on the characteristics of a large difference in permeability coefficient between sand and clay. This structure can better solve the dual protection requirements of expansive soil slopes to prevent rainfall infiltration and water evaporation. At the same time, it can also use the compression effect of the sand layer to restrain the expansion and deformation of soil layer.

The field pilot test and application results show that the ecological substrate developed can adapt to the planting needs of cement-modified soil so that the slope can achieve a good greening effect. The double-layer slope protection structure can better solve the dual protection requirements of the expansive soil slope to prevent rainfall infiltration and water evaporation. The expansion and deformation of the soil layer can also be controlled by the compression effect of the sand layer.

The research results provide technical support for the engineering design and late operation management of the project, effectively solving the technical problems related to the expansion land section of the project, and provide a basis for the design and optimization of related river slope. Together, breakthroughs have been made in the engineering application of unsaturated soil theory and the ecological treatment of expansive soil slopes.

**Key words:** Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project; expansive soil; ecological treatment; cement modified soil; double-layer slope protection structure