

# 铁路工程路基填料改良技术研究

师毓强<sup>1</sup>, 何昌荣<sup>2</sup>, 张兴德<sup>1</sup>, 雷茂鑫

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司; 四川 成都 611730; 2. 四川大学 岩土研究所, 四川 成都 610065)

**摘要:**根据南广地区地层特点,通过对膨胀性黏土物理和化学改良前后及不同的改良参数下的击实试验、膨胀性试验、崩解性试验、压缩试验、直接剪切试验等力学性能指标进行对比分析,总结得出了最有利的改良方式,为该地区后续类似的工程施工提供指导。

**关键词:**铁路工程;膨胀性黏土;改良技术;研究;南广铁路

**中图分类号:**

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2013)06-0060-04

## 1 概述

南广铁路 NGZQ-5 标段起自广西桂平 (IDK120+000),止于藤县 (IDK202+810.23),全长 82.73 km,其中路基长度 55 km。沿线地层主要为 Q4 冲积平原和浅丘,上层为粉土、粉质粘土和粘土,层厚在数米至十余米之间;下伏灰岩地层,岩溶较发育。由于沿线用于路堤填筑的 A/B 组填料严重匮乏,只能使用地表广泛分布的以粉、黏粒为主的细粒土为基质土,在对其进行改良后再用于路堤填筑。

细粒土的改良方式分为化学改良和物理改良两种。

(1)化学改良是在以粉、黏粒为主的基质土中掺入不同重量百分比的水泥,使混合土料发生物理化学变化,可以改变其物理力学性质,进而大幅提高压缩性能,降低乃至基本消除胀缩性,基本或完全消除崩解性。膨胀土的工程特性主要表现在胀缩性、崩解性、多裂隙性、风化特性及强度衰减性。膨胀土含有较多的黏粒及亲水性强的蒙脱石、伊利石和高岭土等矿物成分,具有超固结性和多裂隙性。一般认为:膨胀土的膨胀与收缩机理是:具有晶层结构的蒙脱石或蒙脱石混层矿物在电解质溶液的作用下,土中的水分子受到层间交换阳离子的静电势,形成晶层的正负离子的静电作用,氢键、渗透压、层间相互作用力、层间阳离子与晶层间作用力、范德华力和同处于非饱和状态下的基质吸力等共同作用,具有溢出层间的收缩势和使孔隙水份进入层间的膨胀势,使得膨胀土

失水收缩、吸水膨胀。水泥的掺入改变了膨胀土的结构和化学成分,从而改良了膨胀土的物理力学性质。通过水泥与膨胀土的离子交换及团粒化作用、硬凝反应及碳酸反应,可以有效地减弱或消除土的膨胀性。

(2)物理改良是在粉、黏粒基质土中掺入不同重量比(30%~50%)的砾、碎石土,通常称之为“细掺粗”,这种方式能明显减弱乃至基本消除其胀缩性、崩解性,数倍乃至数十倍提高压缩性能,明显或成倍提高抗剪性能。“细掺粗”工艺在很多地方使用过,细掺粗后,原料中的一部分细料被粗料代替,粗料形成骨架,细料起填充作用,从而大大地改善了土体的压缩性能。剪切时,由于剪切面上粗料相互嵌套、咬合,较大程度地提高了粘聚力( $C$ )、最大内摩擦角( $\varphi$ )。随着掺加量的增多,土的力学性质会越来越越好。

## 2 主要研究内容

### 2.1 原状细粒土(不掺加砾、碎石及水泥)矿物、化学成分分析及物理力学性质试验研究

研究选择沿线有代表性的几种粉黏土,进行常规物理性质(颗分、比重、液塑限)试验,矿物、化学成分试验,力学性质试验(击实、压缩、剪切、渗透、崩解、无侧限压缩等),掌握原状土的各种性质和特点。

### 2.2 改良土力学性质试验研究

在原状细粒土的基础上,向细粒土中分别掺加不同百分含量的水泥或砾、碎石,研究改良后土体的物理力学性质。同时,广西地区广布膨胀性土,考虑到本施工区段内有相当数量的路基处于

收稿日期:2013-10-25

水位变化区,因此,除进行一般的物理性能试验外,还需对改良土进行膨胀性试验和崩解性试验。

### 3 取得的主要技术成果

#### 3.1 细粒土分布情况调查及代表性土样物理性质试验结果

经过对沿线土体进行勘探、取样、试验后发现,沿线土体大致可以分为四类:

第一类是绛红色高液限粘土,该土黏粒含量高,自由膨胀率分别为 94%、82%,为强膨胀性土,遇水发生强崩解,性质极差;

第二类是黄色低液限粉黏土,细粒含量略少,

自由膨胀率为 28%,没有膨胀性,遇水不发生崩解;

第三类是低液限黄色黏土,遇水发生弱崩解,自由膨胀率为 47%,为弱膨胀性土;

第四类是褐色粉黏土,遇水不发生崩解,自由膨胀率为 34%。

其中第一类土体最具典型性和代表性,因此选择第一类土体做为重点研究对象。为便于表述,将第一类土体土样简称为 K201。

K201 土样物理性质及筛分成果见表 1、2。

#### 3.2 路基土料改良室内试验成果

表 1 土料物理性质试验结果表

土样	颜色	塑限 $W_p$ /%	塑性指数 $IP$ /%	崩解性情况	自由膨胀率/%	比重 $G_s$	液限 $W_L$ /%
K201	绛红色	34	26	强崩解	94	2.71	60

表 2 土样颗粒分析试验成果表

土样	粒径(mm)/粒组含量(%)					
	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
K201	0.006	0.01	0.04	18.94	24.21	56.79

以 K201 为基质土分别进行化学改良和物理改良试验研究。化学改良是在基质土中分别掺入 4%、5%、6% 的水泥(按基质土的重量百分含量计),考察掺入不同量水泥后土料的各种物理力学性质。物理改良是在基质土中分别掺入 30%、40%、50% 的细角砾土(按混合料重量百分含量

计),考察改良后土料的各种物理力学性质。

化学改良用水泥为 P. O42.5 普通硅酸盐水泥;物理改良所用砾碎石为大安分界料场细角砾土(母岩为页岩)。

##### 3.2.1 基质土和物理改良土的类别判定

基质土和物理改良土类别判定情况见表 3。

表 3 基质土和物理改良土类别判定表

土样	比重 $G_s$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	分类定名	组类划分
大安料	2.68	25	2.81	级配好的细角砾	A 组填料
掺砾 0%	2.71			高液限粘土( $W_L=60%$ , $W_p=34%$ , $IP=26$ )	D 组填料
K201 掺砾 30%	2.7	90	8.71	土质砾砂	B 组填料
掺砾 40%	2.69	222.2	6.81	土质砾砂	B 组填料
掺砾 50%	2.69	6 250	0.5	土质砾砂	B 组填料

##### 3.2.2 击实试验

采用标准击实仪进行击实试验,确定压实状态下基质土、掺加水泥和砾碎石土的最大干密度和最优含水率。

所有试样均平行进行了 7 个不同含水率的击实试验,以研究相同击实功下基质土掺加水泥、砾碎石后的干密度与含水率的关系。试验成果见图 1、2。

击实成果表明:

(1)对于 K201 基质土,掺砾碎石量增大,土样击实后的最大干密度增大,而最优含水率减小且变化幅度增加较快。

(2)基质土及掺水泥后的击实曲线均较陡

峻,表明随含水率( $w$ )的增减,干密度( $\rho_d$ )的增减明显。例如:压实系数 0.98 的含水率范围为 10.2%~11%,即施工时基质土及掺和土的含水率如果不在最优含水率  $w_{op} \pm 2.5%$  的范围内,碾压结果将达不到 0.98 的压实度。基质土掺砾碎石的击实曲线要平缓一些,相应的 0.98 的压实度的含水率为  $w_{op} \pm 4%$ 。即在最优含水率上下 4% 时,才能碾压到大于 0.98 的压实系数。

##### 3.2.3 自由膨胀率

自由膨胀率是反映黏性土膨胀性的指标之一,与黏土矿物成分、胶粒(粒径  $<0.002$  mm)含量、化学成分和水溶液性质等有着密切的关系。自由膨胀率试验的目的是测定黏性土在无结构力

影响下的膨胀潜势, 以此评定黏土的胀缩性。

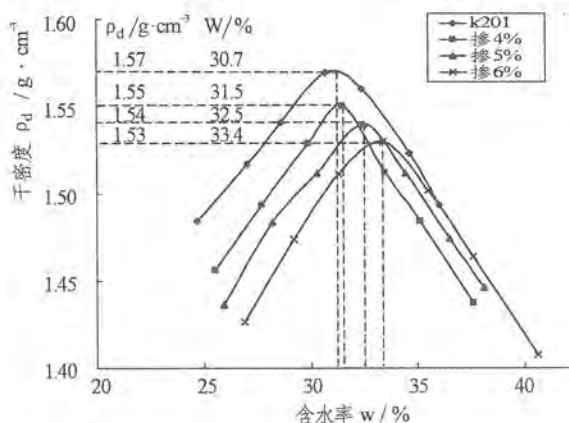


图 1 K201 基质土及掺加水泥击实试验  $\rho_d \sim w$  关系曲线图

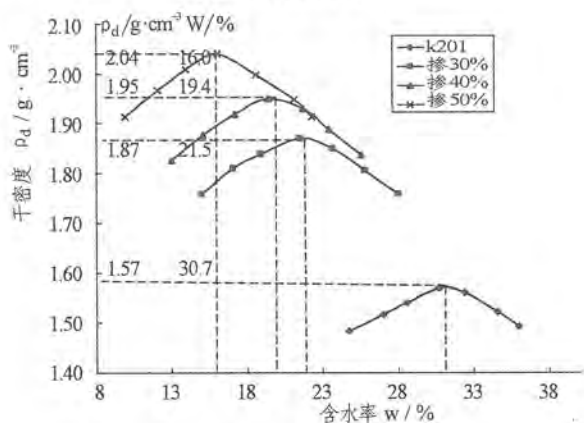


图 2 K201 基质土及掺加砾石上击实试验  $\rho_d \sim w$  关系曲线图

自由膨胀率为 94%, 根据《公路路基设计规范》规定该土为强膨胀土, 掺加水泥 4%、5%、6% 后, 其自由膨胀率分别减少 68%、47%、42%, 掺加水泥 4% 后为中等膨胀性土, 超过 5% 后变成弱膨胀性土。

由此可知: 强膨胀性土掺加水泥量超过 5% 后才能使膨胀性变为弱性。

### 3.2.4 崩解性及无侧限抗压强度

试验方法: 将 K201 基质土及掺加 4%、5%、6% 水泥后的土样分别按最大干密度制成直径为 5 cm、高 5 cm 的 6 个平行试样。其中基质土试样直接放在水箱里浸泡 24 h, 掺加水泥后的试样在标准养护条件下养护 6 d 后在水箱里浸泡 24 h, 浸泡后观测试样是否崩解。试验结果如图 3、4 所示。

K201 基质土制成试样放入水中后, 试样表面

有气泡溢出, 且有少量土颗粒以散粒和片状形式从试样表面脱落, 慢慢的气泡越来越多, 在试样表面浸湿的过程中开始以块状形式脱离, 试样变得越来越小, 整个试样被浸湿, 最后整个试样以黏塑状的形式塌落, 变成图 3 的样子, 表明 K201 是完全崩解性土。将基质土掺加 4% 以上水泥、养护 6 d 后的试样放入水中 24 h 后, 偶尔有少量土颗粒以散粒等形式脱离母体, 未见崩解现象。

由此可见: K201 基质土崩解现象强烈。但当原完全崩解土掺加 4%、5%、6% 水泥后崩解性得到了极大地改善, 基本不见崩解现象, 说明掺加水泥后改善崩解性效果较好。



表 3 K201 素土试样崩解性试验图

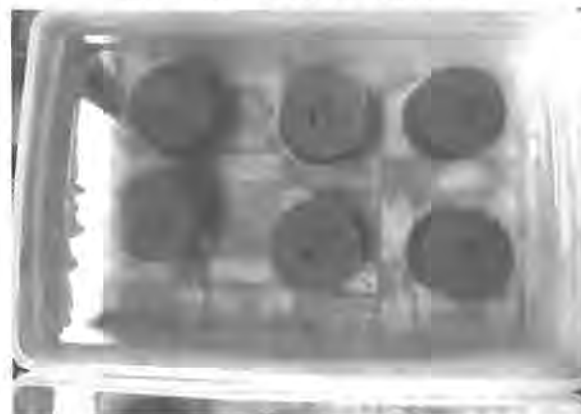


图 4 K201 素掺 4% 水泥试样崩解性试验图

取未崩解的试件进行无侧限抗压强度试验, 试验结果见表 2。

表 2 无侧限抗压强度成果表

项目	土的种类			
	K201	掺 4% 水泥	掺 5% 水泥	掺 6% 水泥
无侧限抗压强度 / kPa	已崩解	148.8	188.4	220.9

由表 2 试验成果可以看出: 未掺水泥时,

K201 基质土试样不能自稳而发生崩解;掺加水泥后,硬凝反应和碳酸反应有利于改良土的骨架形成,增强粒间连接力,促使抗压强度增大。由于水泥自身具有硬化胶结能力,随着水泥含量的增加,强度提高将更加明显,而且二者具有一定的线性相关性,即无侧限抗压强度随着水泥掺量的增加呈线性增长。

### 3.2.5 压缩试验

采用单向固结仪( $\phi 61.8 \times 20 \text{ mm}^3$ )对素土和掺水泥试样进行饱和状态下的压缩试验。饱和方法采用自由入渗法。最大压力加至 400 kPa,加压荷载分别为 50、100、200、400 kPa(其中水泥试样在标准条件下养护 7 d 后进行试验)。

采用单向固结仪( $\phi 500 \times 210 \text{ mm}^3$ )对掺砾碎石试样进行饱和状态下的压缩试验。试样分 3 层制备,饱和方法采用自由入渗法。最大压力加至 1.6 MPa,加压荷载为 0.05、0.1、0.2、0.4、0.8、1.2、1.6 MPa。

试验结果表明:基质土改良以前均为高压缩性土,掺水泥和砾碎石对两种基质土的压缩性均有较大改善,强膨胀性土 K201 掺水泥后被改良为中等压缩性土,掺砾碎石 50% 后被改良为低压缩性土;掺水泥后不但消除了 K201 基质土的崩解性和膨胀性,还将其改变成中等压缩性土和低压缩性土,掺砾碎石后,基质土均被改良成中等压缩性土,从降低压缩性效果看,经物理和化学改良后的土料均可用做路基填料。

### 3.2.6 直接剪切试验

K201 基质土和掺水泥试样采用  $\phi 61.8 \times 20 \text{ mm}^3$  直接剪切仪进行剪切试验,试样为扰动样,采用慢剪试验,试验饱和试样采用真空饱和及水头饱和法联合饱和,固结时间为 12 h,剪切速率为 0.02 mm/min(其中水泥试样在标准条件下养护 7 d 进行试验。)

K201 基质土掺砾碎石试样采用大型直剪仪进行剪切试验,试样分 5 层制备,采用快剪试验,饱和采用自由水头饱和法,固结时间为 2 h,剪切速率为 1.4 ~ 1.5 mm/min。

剪切试验结果表明:K201 掺水泥后, $c$  值提高 37.5% ~ 166.7%, $\varphi$  值提高 38.4% ~ 56.6%;掺砾碎石后, $c$  值提高 30.6% ~ 205.6%, $\varphi$  值提高 36.4% ~ 66.7%。因此,基质土掺水泥和砾碎

石后改良效果较好, $c$ 、 $\varphi$  值提高较多,但总体上掺砾石比掺水泥的  $c$ 、 $\varphi$  值提高程度更为明显。

## 3.3 改良结果初步分析

### 3.3.1 掺水泥土

K201 掺 4%、5%、6% 水泥后的结果如下:

- (1) 崩解性消失;
- (2) 膨胀性变成中等及弱膨胀性;
- (3) 无侧限抗压强度达到 148.8 kPa、188.4 kPa、220.9 kPa;
- (4) 压缩性由高压缩性变成中等至低压缩性土;
- (5)  $c$  值提高 5.3 ~ 24 kPa,即提高 37.5% ~ 166.7%, $\varphi$  值提高 3.8° ~ 5.6°,即提高了 38.4% ~ 56.6%。

满足工程要求的水泥掺加量建议超过 5%。

### 3.3.2 掺砾碎石土

崩解性和膨胀性试验主要是针对细料土的,特别是以黏粒为主的黏性土,因此,掺砾碎石土一般不进行崩解性、膨胀性和无侧限压缩试验。

K201 掺砾碎石 30%、40%、50% 后的结果如下:

- (1) 压缩性由高压缩性变成中等至低压缩性土;
- (2)  $c$  值提高 4.4 ~ 25.6 kPa,即提高 30.6% ~ 205.6%, $\varphi$  值提高 3.6° ~ 6.6°,即提高 36.4% ~ 66.7%。

综合室内试验成果和铁路路基不同部位的压实指标要求,建议在现场填筑时,基床以下非浸水路路基砾碎石掺加量采用 50%,基床底层路基砾碎石掺加量采用 60%。

## 4 结 语

研究表明:南广铁路沿线路基开挖过程中产生的黏性土通过化学和物理改良均可满足设计和规范要求。但是,黏性土具有湿成团、干成硬块的特性。掺加水泥的拌和工艺,即使使用专门的路拌机械,也较难使其达到足够均匀。对于大方量施工现场而言更不容易达到,不便于施工、监理等单位控制施工质量。按掺水泥 6% 计,化学改良成本达 70 ~ 80 元/ $\text{m}^3$ 。若采用物理改良,拌和场地可结合施工进度情况选取,拌和方法简明,拌和质量易于为多方控制,拌和方量大,造价约为掺水

(下转第 111 页)



按规划分类使用。将有效的砂砾石用于道路基础填筑,余下部分含泥的混合废弃渣料则可用于弃渣场道路填筑和生活营地临建设施的基础回填,这样实施可以有效节约砂石骨料的使用量和道路降坡及基础换填弃渣的产出,降低砂石骨料的生产成本和车辆运输费用,提高施工效率。

### 3.4 资源利用范围

热带丛林施工可利用的原始资源很多,因此,施工项目不能因为赶工期进度而忽略了对现场可利用资源的统计确认和范围界定:被砍伐树木、地表植物、表层腐殖土和回填砂砾石的分类回收和利用。

(1)树木在施工区域被砍伐后,可以按照生产、生活设施木材需用计划分为4~6m长度不等的原木,以直径40cm为界分类。直径在40cm或以上的原木可作为工程设施需要和房舍、食堂、办公场所修建的主要型材使用;直径40cm以下的圆木可依据现场各种需要改造成木板、木条、木方等作为工程临建设施、办公桌椅、文件柜、储物架、衣柜、医务室药品存放货架、食堂餐桌等的制作原料。

(2)余下的树桩、树根等还可以作为员工娱乐设施、环境美化修建的园林艺术辅助材料,规划修建一些亭、台、廊道的陪衬设施等。把施工生活区、办公区建造的更加人性化、舒适化、艺术化,形成良好、舒适的人文环境。

(3)地表植物(草本、种子、树苗等)保留和存储、移栽都是工程后期环境治理的关键项目,按照相关要求,绿化的植物移植不能超越50km范围。

(上接第63页)

泥法的一半。因此,最终推荐使用物理改良方式。

在对粘性土实施物理改良过程中需要注意以下问题:

- (1)必须严格控制含水率;
- (2)必须确保掺合料的掺入量;
- (3)必须拌和均匀。

若实际含水率偏离、最优含水率过大或砾碎石掺量过低都会严重影响改良土的压实效果。若搅拌不均匀,粘性土成团成块聚集,掺入的砾碎石在局部起不到骨架作用,成型后的路基面极易产生不均匀沉降,从而给列车的安全运行留下隐患。

参考文献:

- [1] 铁路工程土工试验规程, TB10102-2004[S].

因此,现场区域内的植被要进行系统分类收集和选择,避免绿化项目实施过程中因植被物种的区域限制绿化和环境恢复工程及时实施。

(4)表土使用的工程环境恢复至关重要。在弃渣区域实施绿化,要覆盖不少于30cm厚度的腐殖土,并且要经过6个月时间的养土,其目的就是要让腐殖土在覆盖渣场经过自然生长的草科植物生育阶段和渣场回填料充分融合后具备植物生长的基本特性。移栽后的植物能够生长良好,覆盖土达到熟化,为移栽的植物根系提供能够生长发育的舒适环境。

### 4 结语

虽然热带丛林施工可利用的原始材料品种繁多,但是资源也是有限的。若不能充分利用现有的资源,就会在后期环境检验中产生制约因素。如何有效地利用好丛林中的原始资源,发挥丛林原始资源的价值,减少和降低生产施工成本,建设人性化的施工生活环境,编制一套切实可行的施工计划非常必要。有效、细致的原始资源再利用计划和实施,可以进一步规范工程施工程序,减少环境破坏,是降低丛林施工成本投入的有效方法。

作者简介:

张国(1978-),男,湖南邵阳人,厄瓜多尔 CCS 项目部总工程师,工程师,从事水利水电工程施工组织与技术管理工作;

张思福(1963-),男,四川都江堰人,注册安全工程师,从事工程施工安全、卫生、健康和环境保护监管工作。

(责任编辑:李燕辉)

[2] 土工试验规程, SL237-1999[S].

[3] 铁路路基设计规范, TB10001-2005[S].

[4] 杨进良. 土力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009年.

[5] 余 頌. 膨胀土的自由膨胀比实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3325-3330.

[6] 李喜安. 黄土崩解性试验研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3207-3213.

[7] 李红炉. 水泥改性膨胀土干密度与自由膨胀率实验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 216-219.

作者简介:

师毓强(1979-),男,陕西眉县人,工程师,学士,从事水利水电工程及铁路施工技术与管理工

作;何昌荣(1953-),男,四川成都人,主任,教授,硕士,研究方向:岩土工程;

张兴德(1970-),男,四川仁寿人,高级工程师,学士,从事水利水电工程及铁路施工技术与管理工

作;雷茂鑫(1986-),男,重庆石柱人,在读硕士研究生,研究方向:岩土工程。

(责任编辑:李燕辉)