

# 石膏+水泥联合改良软黏土的水稳定性研究

王丙杰<sup>1</sup>, 贺诚<sup>2</sup>, 崔东<sup>3</sup>

(1. 河北机电职业技术学院, 河北 邢台 054000; 2. 邢台城乡房地产开发有限公司; 3. 河北建工集团有限责任公司)

**摘要:**制备了不同石膏和水泥掺比的软黏土试样,开展了不同干湿循环次数下的无侧限抗压强度试验,获取了石膏掺比及干湿循环次数对改良软黏土强度、干密度、含水率等指标的影响规律,探讨了干湿循环作用下石膏+水泥联合改良软黏土的水稳定性。研究表明:石膏的掺入对软黏土强度的提高起到了积极作用,而且降低了强度随干湿循环的衰减程度,但是 $B/S$ (石膏掺量比) $\geq 20\%$ 才能得到较为明显的改良效果;随着 $B/S$ 的增加,各个干湿循环周期下土的含水率有所降低,干密度有所增加,干湿循环几乎对改良土的含水率和干密度没有影响。石膏+水泥改良提高了软黏土在力学性质和物理性质两方面的水稳定性。

**关键词:**软黏土;石膏;改良;干湿循环;无侧限抗压强度

石膏板是一种重要的建筑材料,随着中国经济的快速发展,据相关数据统计,截至2014年,全中国石膏板产量已达35亿 $m^2$ ,由此也产生了大量的建筑石膏废料,而且石膏(烧石膏)还是磷酸盐等一系列工业应用的副产品。将石膏废料露天堆放,不仅占用大量土地,还对环境造成污染。若能利用石膏的化学特性,将其作为公路沿线软黏土的改良添加剂,则既能降低缺乏优质填料地区公路路基建设的成本,又寻求到了一条解决石膏废料固体污染问题的有效途径。

关于石膏用于公路路基建设,国内外均做过一些尝试性研究。Ahmed等发现,在软黏土中若仅掺入石膏粉末,改良土在干燥状态下具有可靠的强度,但是在潮湿环境下强度衰减十分严重,因为石膏微溶于水;Kemi等发现,石膏粉末改良软黏土的机理之一是可以降低土的渗透指数,抑制水分在土孔隙中的迁移,从而降低外部环境对土体内部湿度的影响,提高水稳性;李章峰等的研究较具有代表性,其对不同配合比的石膏改良土进行了击实试验、CBR试验和无侧限抗压强度试验,发现纯石膏由于水稳定性差和亲水性强,不适合直接用于不良填料改良,但是采用别的固化材料(水泥等)进行配合使用后,可具有良好的水稳性,其CBR值能满足路基填料的要求,适宜用作路基填料;唐庆黔等通过室内和现场试验,研究了磷石膏应用于路基路面工程的可行性和相关力学性能,指出掺入适量磷石

膏对石灰粉煤灰基层的强度有提高作用;苟勇在水泥中掺入了适当的工业石膏废料作为改良土的联合改良剂,发现石膏掺入对土的强度提升有明显的效果,大大节约了工程造价;沈卫国、周明凯等通过系列配合比试验,建立了一套以体积分析法为基础的石膏改良土配合比设计方法。

由于路基暴露在自然环境中,从严格的角度考虑,一种路基填料改良方案能否应用的前提之一在于其能否适应湿度的季节性周期变化,以避免路基长期性能衰减造成的路基路面过早破坏,但目前针对废弃石膏+水泥联合改良土在干湿循环作用下性能演变的研究开展较少。该文制备不同石膏和水泥配合比的软黏土试样,开展不同干湿循环次数下的无侧限抗压强度(UCS)试验,获取石膏配合比及干湿循环次数对改良软黏土强度、干密度、含水率等指标的影响规律,探讨干湿循环作用下废弃石膏+水泥联合改良软黏土的水稳定性。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

中国黄河中下游沿线分布有液限高、孔隙大、压缩性强、水稳性差的软黏土,多年来该地区公路工作者一直针对各个工程案例开展改良研究,试图找到能够利

用当地土为主要原料的廉价路基填筑材料。该文使用的材料取自河南省某高速公路建设现场,软黏土天然含水率高达51.2%,黏粒含量占64.7%,粉粒含量占35.3%,其基本物理性质见表1,其中,黏粒粒径 $d \leq$

0.005 mm,粉粒粒径 $0.005 \text{ mm} < d \leq 0.075 \text{ mm}$ ,砂粒粒径 $0.075 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ ,该软黏土属于高塑性黏土(CH)。

表1 试验用土的基本物理性质

土类型	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	天然含 水率/%	天然重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	含量/%		
						砂粒	粉粒	黏粒
CH	71.1	36.7	34.4	51.2	17.6	0	35.3	64.7

目前,根据以往研究,单独在土(S)中加入石膏(B)改良效果并不理想,因此需要与水泥等固化胶凝材料配合使用。该文中的水泥选用普通硅酸盐水泥(C),细度为1.2%,烧失量为1.02%,初凝时间为265 min。水泥本身可与水进行强烈的水解和水化反应,改善土的性质,还可以对土和石膏产生固化胶凝作用,减少石膏粉末在水中溶解。水泥的质量掺入比(C/S)分别为5%和10%。

使用的回收石膏来自郑州市附近的垃圾填埋场,白色固体,属于生石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),将其风干粉碎,随后进行过筛去除多余固定杂质及碎纸,再将其加热一段时间,使其脱去大部分结晶水而形成熟石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )。

## 1.2 试样制备

在烘干后的土中加入蒸馏水,使其达到天然含水率,然后采用自动搅拌机进行长时间搅拌,使配置的软黏土结构和含水程度均匀。在两种水泥掺量比(C/S:5%和10%)的基础上,各设置了4组石膏的掺量比(B/S:0%、10%、20%和40%),具体见表2。水泥和石膏在干燥状态下被均匀混合,随后被掺入软黏土中搅拌30 min。将改良土在圆柱体模具中进行制备,试

样尺寸为直径50 mm,高度100 mm,将模具置于密封塑料袋中,保持20℃的温度,放置24 h后脱模。再将试样放在密封塑料袋中,保持20℃的温度,进行14 d的养护。为了提高研究成果的可靠度,每个试验条件设置了3组平行试样,试验结果取平均值。每个试样的密度是根据整个试样的质量和模具的内体积求出的。

## 1.3 试验过程

当试样完成养护后,先完全浸泡在蒸馏水中24 h,再在28℃室温下风干24 h,一个干湿循环过程总共需要48 h。在完成指定的干湿循环次数后,将试样进行无侧限抗压强度(UCS)试验,完成试验后再测定含水率以掌握水分的变化,计算得出干密度的变化。为了更好地描述改良土耐久性,定义了耐久性指数,该指数等于经历干湿循环后试样的无侧限抗压强度除以未经干湿循环试样的无侧限抗压强度。无侧限抗压强度试验参照JTG E51-2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,具体试验过程在此不做详述。

## 2 试验结果分析

### 2.1 应力—应变关系

图1为UCS试验中, $B/S=0\%$ 时土的应力—应变关系,图2、3为 $C/S=5\%$ 和 $C/S=10\%$ 条件下,再掺入石膏进行改良后土的应力—应变关系,不同的曲线代表了试样所经历不同的干湿循环次数。由图1~3可以看出:改良土总体上呈现应变软化特征,应力具有“峰值”,随后随着应变的增长应力下降至残余强度。

根据图1~3得出改良土无侧限抗压强度 $q_u$ 如表3所示,少量数据缺少规律性,可能是试验误差所致。结合表3、图1可以看出:水泥的掺入对软黏土强度的提升具有显著的作用, $C/S=10\%$ 改良土的 $q_u$ 达到同条件下 $C/S=5\%$ 改良土 $q_u$ 的2倍以上,该现象可以

表2 试样制备

试验组	水泥掺量比 (C/S)/%	石灰掺量比 (B/S)/%	干湿循环 次数/次
1	5	0	0、1、3、5
2	5	10	0、1、3、5
3	5	20	0、1、3、5
4	5	40	0、1、3、5
5	10	0	0、1、3、5
6	10	10	0、1、3、5
7	10	20	0、1、3、5
8	10	40	0、1、3、5

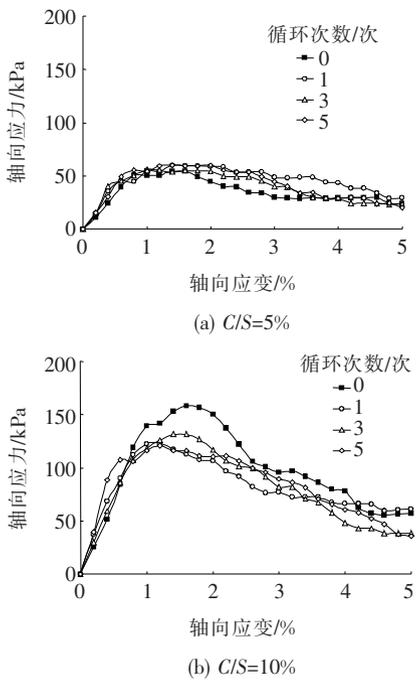


图1 只掺入水泥条件下改良土的应力—应变关系( $B/S=0$ )

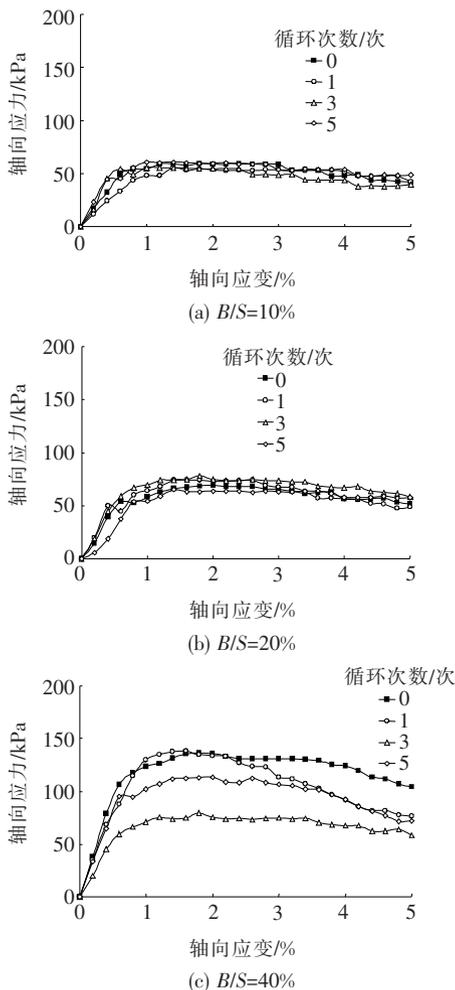


图2  $C/S=5\%$ 条件下掺石膏改良土的应力—应变关系

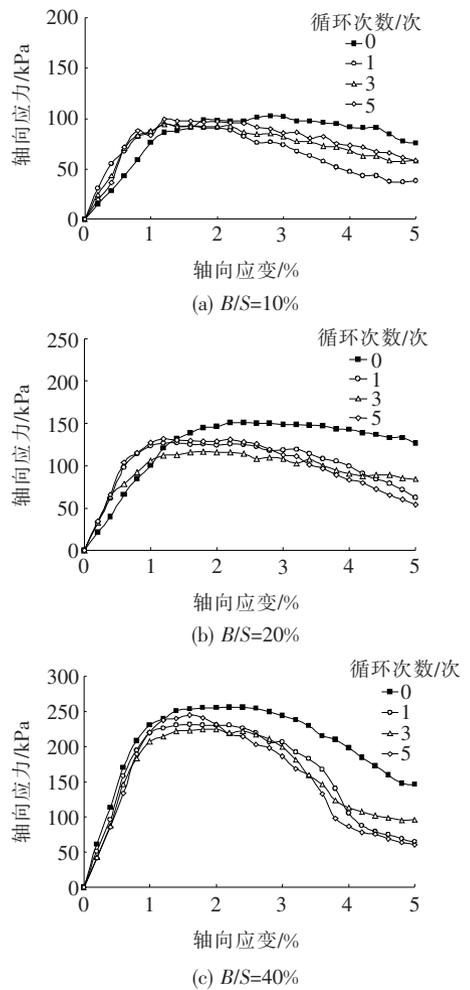


图3  $C/S=10\%$ 条件下掺石膏改良土的应力—应变关系

解释为:随着水泥含量的增加, $C/S=10\%$ 改良土水解和水化反应更加充分,在土颗粒间形成坚固的联结,强度提高得更多。结合表3和图2、3可以看出:石膏的掺入也对强度提高起到了积极作用, $q_u$ 随着 $B/S$ 的增大而上升,但是 $B/S=10\%$ 时石膏的改良效果并不明显,甚至在 $C/S=10\%$ 时导致 $q_u$ 有所下降,因此根据该试验结果 $B/S \geq 20\%$ 才能得到较为明显的改良效果。

$q_u$ 总体上随着干湿循环次数的增加而逐渐减小,其中干湿循环对 $C/S=10\%$ 改良土的影响更显著,循环5次后 $q_u$ 普遍降低了近20%,但对于 $C/S=5\%$ 的改良土 $q_u$ 几乎没有改变,这是由于水泥掺量越多,水化作用越充分,同时也消耗了更多土中原有的水分,导致其在浸水饱和过程中又再次吸收了更多的水分,其在干湿循环过程中的含水率变化幅度可能更大,因此 $q_u$ 的变化更加明显。

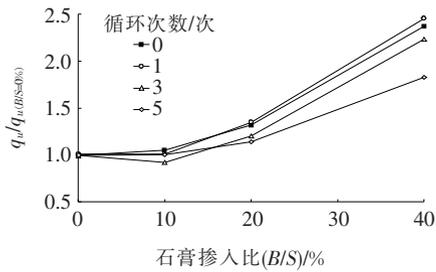
## 2.2 耐久性指数

为了说明添加石膏对耐久性提升的效果,图4显

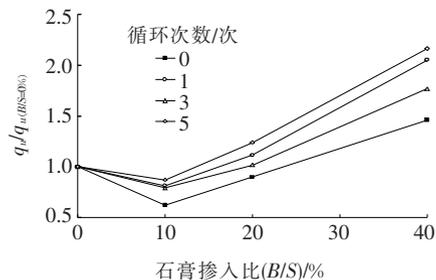
表3 不同干湿循环次数下改良土的  $q_u$  值

干湿循环 次数/次	$q_u$ (C/S=5%) /kPa				$q_u$ (C/S=10%) /kPa			
	B/S=0%	B/S=10%	B/S=20%	B/S=40%	B/S=0%	B/S=10%	B/S=20%	B/S=40%
0	54	57	71	132	151	101	159	254
1	53	49	75	131	126	93	131	229
3	55	57	75	76	131	86	136	219
5	54	58	68	108	121	91	125	230

示了耐久性指数与石膏掺入比  $B/S$  的关系。很明显,当  $B/S$  从 0% 增加到 10% 时,耐久性指标略微降低,随后又随  $B/S$  的增加而快速上升,这意味着石膏的掺入使试样更能够抵抗干湿循环的不利影响。当石膏粉末掺入软黏土中时,石膏中  $\text{Ca}^{2+}$  与黏土中负二价离子结合,黏土矿物形成坚硬的黏土块,有助于延缓水在土中的渗透。此外,钙离子与土中硅、氧化铝等成分发生化学反应,生成复杂的硅酸盐、铝酸盐,也促进了土强度和耐久性的提升。



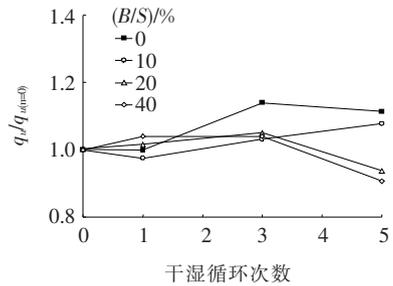
(a) C/S=5%



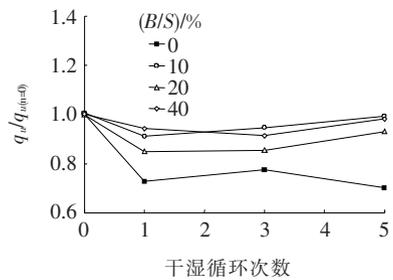
(b) C/S=10%

图4 石膏掺入比对耐久性指数的影响

图5为耐久性指数与干湿循环的关系。对于  $C/S=5\%$  的改良土,可以认为干湿循环对试样的耐久性没有显著影响,耐久性指数在 0.9~1.1 的范围内小幅波动,当  $C/S=10\%$  时耐久性略差,这与  $q_u$  的结果类似。根据文献[2]和[11]对类似土的研究,未改良土的  $q_u$  在经历 5 次干湿循环后可能衰减 50% 以上,因此可以看出,石膏+水泥联合改良大大提高了土的水稳定性。



(a) C/S=5%



(b) C/S=10%

图5 干湿循环次数对耐久性指数的影响

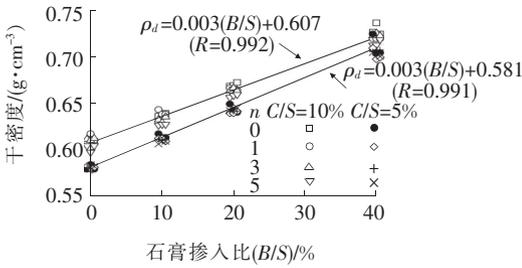
### 2.3 干密度及含水率

石膏掺入比  $B/S$  对干密度和含水率的影响如图6所示。由图6可以看出: $B/S$  的增加降低了各个干湿循环周期下土的含水率,同时增加了干密度。因为石膏粉末中熟石膏成分 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) 吸收水分形成水合硫酸钙 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),即生石膏。

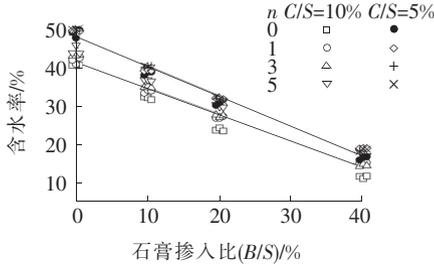
图7、8分别为干湿循环对干密度和含水率的影响,由图7、8可以看出影响程度很小,由于此次试验中软黏土以高岭石矿物成分为主,其水敏性低于蒙脱石,遇水脱水时体积胀缩不明显;同时,石膏粉末也与土颗粒发生絮凝作用,缩小了土颗粒之间的孔隙,限制了水分在土中的迁移,因此干湿循环对含水率和干密度的影响很小。故石膏+水泥改良从物理性质角度也提高了软黏土的水稳定性。

## 3 结论

(1) 水泥的掺入对软黏土强度  $q_u$  的提升具有显

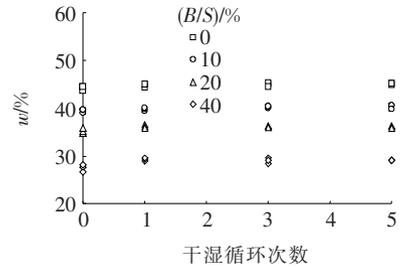


(a) 干密度

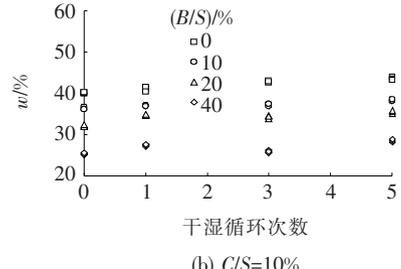


(b) 含水率

图 6 石膏掺入比对干密度和含水率的影响



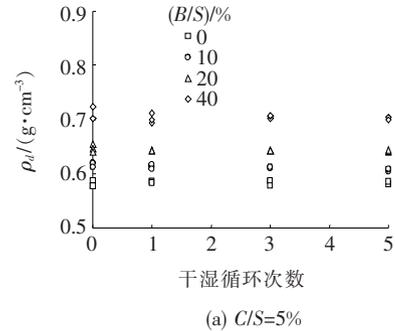
(a) C/S=5%



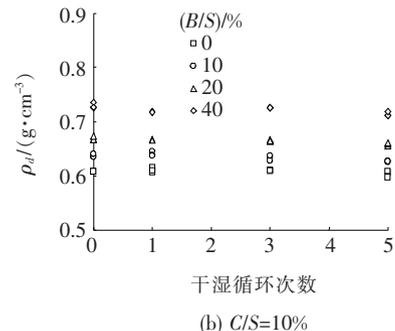
(b) C/S=10%

图 8 干湿循环对含水率的影响

图 6 石膏掺入比对干密度和含水率的影响



(a) C/S=5%



(b) C/S=10%

图 7 干湿循环对干密度的影响

著的作用, C/S=10%改良土的  $q_u$  达到同条件下 C/S=5%改良土  $q_u$  的两倍以上。

(2) 石膏的掺入也对  $q_u$  的提高起到了积极作用, 但是  $B/S \geq 20\%$  才能得到较为明显的改良效果。

(3) 对于 C/S=5%的改良土, 可以认为干湿循环对试样的耐久性没有显著影响, 耐久性指数在 0.9~1.1 的范围内小幅波动, 当 C/S=10%时耐久性略差, 根据与以往类似未改良土的数据对比得到: 石膏+水泥联合改良大大提高了软黏土的水稳定性。

(4) 随着 B/S 的增加, 各个干湿循环周期下土的含水率有所降低, 干密度有所增加。干湿循环几乎对改良土的含水率和干密度没有影响。石膏+水泥改良提高了软黏土力学性质和物理性质两方面的水稳定性。

参考文献:

[1] 曹其斌, 陈顺先, 屈财魏, 等. 基于回归分析的土体改良方案优化研究[J]. 2018(6).

[2] 姜彤, 李艳会, 张俊然. 干湿循环对豫东路基粉土无侧限抗压强度的影响[J]. 华北水利水电大学学报, 2015(2).

[3] 叶观宝, 徐超, 李束, 等. 水泥土添加剂的室内研究[J]. 中国公路学报, 2006(5).

[4] Ahmed, A., Ugai, K. Environmental Effects on Durability of Soil Stabilized with Recycled Gypsum[J]. Journal of Cold Regions Science and Technology, 2014, 66(2): 84-92.

[5] Kamei, T., Horai, H. Development of Solidification Technology for Fluorine Contaminated Bassanite Using Portland Blast - Furnace (B) Cement[J]. Japanese Geotechnical Journal, 2017, 4(1): 91-98.

[6] 李章锋, 曹新文, 王春雷. 磷石膏改良土作路基填料可行性试验研究[J]. 路基工程, 2008(5).

[7] 唐庆黔, 凌天清. 工业废料磷石膏在路基路面工程中的应用[J]. 山东交通学院学报, 2002(2).

[8] 苟勇. 含工业废料的水泥系固化剂加固软土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000(2).

[9] 沈卫国, 周明凯. 水泥粉煤灰稳定粒料基层的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2003(2).

[10] JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[11] 彭小平, 陈开圣. 干湿循环下红粘土力学特性衰减规律研究[J]. 工程勘察, 2018(2).