

初始含水率和改良材料掺量对膨胀土抗剪强度的影响

杨俊^{1,2}, 童磊^{1,2}, 张国栋^{1,2}, 唐云伟³, 陈红萍⁴

(1. 三峡大学三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 宜昌市交通运输局, 湖北 宜昌 443002; 4. 宜昌市公路管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要:为研究不同初始含水率和不同改良材料掺量对膨胀土抗剪强度指标的影响, 分别在膨胀土中掺入水泥、石灰、粉煤灰、风化砂进行膨胀土的化学改良, 通过改变4种改良材料的掺量及调整膨胀土的初始含水率, 进行室内直剪试验。试验结果表明: 掺水泥、石灰和粉煤灰能显著提高膨胀土的黏聚力, 掺水泥提高黏聚力的幅度最大, 其次是掺石灰和粉煤灰, 掺风化砂会使膨胀土的黏聚力下降; 掺水泥、石灰、粉煤灰和风化砂均能提高膨胀土的内摩擦角, 其中掺水泥提高内摩擦角的幅度最大, 其次是风化砂。4种材料均可用作膨胀土的改良材料, 不同初始含水率及不同改良材料掺量对膨胀土抗剪强度指标的影响十分显著。

关键词:膨胀土; 抗剪强度; 初始含水率; 石灰; 水泥; 粉煤灰; 风化砂

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)03-0039-05

Effect of initial moisture content and improved material amount on shear strength of expansive soil//YANG Jun^{1,2}, TONG Lei^{1,2}, ZHANG Guodong^{1,2}, TANG Yunwei³, CHEN Hongping⁴ (1. Hubei Province Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in Three Groges Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Yichang Transport Bureau, Yichang 443002, China; 4. Yichang Highway Administration, Yichang 443002, China)

Abstract: To investigate the effect of initial moisture content and improved material amount on shear strength of expansive soil, indoor direct shear test have been done for improved expansive soil respectively mixed with cement, lime, fly ash, and weathered sand, with different improved materials amounts and different initial moisture contents. Tests results show that, soil mixed with cement, lime and fly ash can significantly improve the expansive soil cohesion, with cement having the best improvement effect, followed by lime and fly ash, while soil mixed with weathered sand causes a decline in soil cohesion; soil mixed with cement, lime, fly ash and weathered sand could improve the internal friction angle of expansive soil, and soil mixed with cement improves the internal friction angle most obviously, followed by weathered sand. All the above four materials can be regarded as modified materials for expansive soil, and the effects of different initial moisture contents on shear strength and internal friction angle of improved expansive soil are very significant.

Key words: expansive soil; shear strength; initial moisture content; lime; cement; fly ash; weathered sand

膨胀土在我国分布范围较广, 是一种由强亲水性矿物——伊利石和蒙脱石组成的高液限黏土, 具有超固结性、多裂隙性和显著的胀缩特性。由于膨胀土具有剧烈的吸水膨胀、失水收缩的特点, 其强度变化既有一般黏土的共性又有其特殊性, 抗剪强度极易随含水率的改变而波动, 这些不良特性通常会造路路基不均匀沉降、建筑物倾斜开裂、边坡垮塌等工程地质灾害。因此, 在工程建设中, 遇到膨胀土路基或将膨胀土用作路基填料时, 必须对膨胀土进行

改良处理, 使其满足路用标准。目前, 工程中应用最广的改良方法是在膨胀土中掺入石灰、水泥或粉煤灰等外加剂。国内外学者针对采用石灰、水泥或粉煤灰改良膨胀土的抗剪性能做了大量研究, 发现改良后膨胀土的抗剪强度有着不同程度的提高。崔伟等^[1]发现石灰改良膨胀土的抗剪强度与掺灰量、压实度和养护龄期均呈正相关。惠会清等^[2]通过石灰、粉煤灰改良膨胀土的对比试验发现: 两者改良膨胀土抗剪强度的效果不完全一样, 石灰剂量在2%

~4% 时改良效果最好,而粉煤灰剂量在 20% ~ 30% 时改良效果才比较明显。李东森等^[3]通过大量试验研究得知:掺入水泥之后,膨胀土的黏聚力及内摩擦角均大幅增大,且黏聚力的增大幅度比内摩擦角的增大幅度大。但大多数的研究局限于在最佳含水率下分析改良膨胀土抗剪强度的变化规律,并没有深入分析不同初始含水率对改良膨胀土抗剪强度指标的影响^[4]。再者,化学改良方法施工工艺复杂,现场拌和困难,且对环境污染较大。针对这些不足,本文结合湖北省宜昌市小溪塔至鸦鹊岭一级公路改建工程,对使用风化砂、水泥、石灰和粉煤灰改良的膨胀土抗剪强度进行比较,通过改变初始含水率,研究不同改良材料、不同初始含水率、不同改良材料掺量对膨胀土抗剪强度指标的影响,为工程建设中合理选择膨胀土改良材料提供参考。

1 试验材料与试验方案

1.1 膨胀土

试验所用膨胀土取自湖北宜昌小溪塔至鸦鹊岭一级公路改建工程工地。取土深度为地表以下 2 m 左右,土体形成于第四纪更新世晚期,颜色为棕黄色及灰白色。土体水平裂隙发育,裂隙呈闭合状,中间夹杂青色黏土,土体结构呈片状。膨胀土的颗粒级配组成及基本物理性质如下:2 ~ 0.075 mm 粗粒组质量分数为 26.58%,0.075 ~ 0.005 mm 中粒组质量分数为 56.28%,小于 0.005 mm 细粒组质量分数为 17.14%,自由膨胀率为 43%,液限为 70.53%,塑限为 24.09%,塑性指数为 46.44,属于弱膨胀土。

1.2 膨胀土改良材料

试验所用石灰等级为Ⅱ级,其中氧化钙与氧化镁质量分数大于 80%。水泥为三峡牌普通硅酸盐水泥,标号为 32.5,标准稠度 28%,安定性合格。粉煤灰取自宜昌某热电厂,其中氧化钙质量分数为 8%,为 F 类Ⅰ级粉煤灰,级配良好。试验用风化砂亦取自该工地现场,呈土黄色,粒径较小但强度较高,颗粒级配曲线见图 1。风化砂的基本物理性质如下:天然含水率为 11.54%,天然密度为 1.65 g/cm³,液限

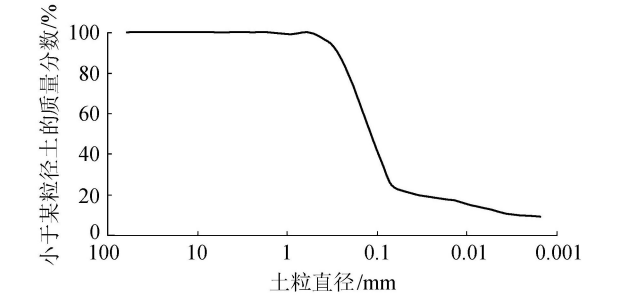


图 1 风化砂颗粒级配曲线

为 24.86%,塑限为 16.16%,塑性指数为 8.7,相对密度为 2.46。

1.3 试验方案

试验参考 JTGE 40—2007《公路土工试验规程》和 JTGE 51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行。试验中风化砂的掺量分别为 10%、20%、30%、40%、50%^[5-7];石灰、水泥的掺量分别为 3%、4%、5%、6%、7%;粉煤灰的掺量分别为 10%、12%、14%、16%、18%、20%。按照重型击实标准,确定以上 4 种改良材料各掺量下的最大干密度。由试验得出,这 4 种改良膨胀土最大干密度相差不大,集中在 1.9 g/cm³ 左右,故试验中所有试件均按干密度为 1.9 g/cm³ 来制样。采用静压法制样,制样时控制初始含水率 w 分别为 8%、10%、12%、14%、16%^[8-12]。

对于掺石灰、水泥或粉煤灰的试样,在标准恒温恒湿养护箱中养护 7 d 后进行直剪试验;掺风化砂的试样不需要养护处理,试样成型后立即进行直剪试验。试验采用应变控制式直剪仪,控制剪切速率为 0.8 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 初始含水率和石灰掺量对膨胀土抗剪强度指标的影响

不同初始含水率以及不同石灰掺量下改良膨胀土的内摩擦角如表 1 所示。由表 1 可以看出:①初始含水率和石灰掺量对膨胀土的内摩擦角有显著的影响。当石灰掺量为 5%、初始含水率为 14% 时,改良膨胀土内摩擦角达到最大值 34.33 rad。②在相同初始含水率下,石灰改良膨胀土内摩擦角随石灰掺量的增加先增大后减小,这是因为石灰中的钙离子与膨胀土颗粒表面的阳离子发生交换作用,使得土颗粒之间的吸引力增强,颗粒间的摩擦效应明显。再者,由于胶结作用,土体形成了具有较强黏结作用的胶凝物质如氢氧化钙和强氧化钙铝,大幅度提高了颗粒间的黏结效果,故随着石灰掺量的增加,改良膨胀土内摩擦角迅速增大。当石灰掺量继续增大

表 1 不同初始含水率和不同石灰掺量下改良膨胀土的内摩擦角

石灰掺量/%	内摩擦角/rad				
	$w=8\%$	$w=10\%$	$w=12\%$	$w=14\%$	$w=16\%$
0	21.67	23.58	22.25	19.47	11.75
3	25.39	25.46	27.11	26.89	26.05
4	26.35	27.43	30.84	31.20	30.12
5	30.54	30.64	33.88	34.33	32.14
6	29.83	30.13	33.58	34.12	33.62
7	28.61	29.08	31.61	31.89	31.78

时,试件中的石灰含量过剩,膨胀土含量减小,从而导致内摩擦角又有所下降。③在相同石灰掺量下,随着初始含水率的增加,改良膨胀土内摩擦角先增大后缓慢减小,产生这一现象的原因是石灰对膨胀土的沙化作用,土中沙粒增多,黏粒减少。随着初始含水率的增大,石灰与膨胀土颗粒间的化学反应进行得更加彻底,形成的沙粒更多,导致内摩擦角逐渐增大,但当初始含水率过大时,过多的自由水在剪切过程中会起到一定的润滑作用,从而引起内摩擦角降低。

不同初始含水率以及不同石灰掺量下改良膨胀土的黏聚力如表 2 所示。由表 2 可以得出:①初始含水率及石灰掺量对改良膨胀土的黏聚力影响很大。当石灰掺量为 6%、初始含水率为 14% 时,黏聚力达到最大值 292.57 kPa。②在相同初始含水率下,随着石灰掺量的增加,黏聚力先增大后减小,这是因为掺入石灰后土体发生一系列的化学反应,生成胶凝物质,增大了颗粒间的黏结作用,黏聚力逐渐变大。当石灰掺量超过某一值时,石灰含量相对过剩,存在大量的游离石灰,使膨胀土黏粒相对减少,黏聚力又随之下降。③在相同石灰掺量下,黏聚力随着初始含水率的增加先增大后减小,产生这一现象的主要原因是石灰和膨胀土通过水的促进作用而发生化学反应,生成胶凝物质,增大了改良土体间的吸附力,当含水量超过某一值时,所加入的水分相对过剩,减小了改良土的黏聚力。

表 2 不同初始含水率和不同石灰掺量下改良膨胀土的黏聚力

石灰 掺量/%	黏聚力/kPa				
	w = 8%	w = 10%	w = 12%	w = 14%	w = 16%
0	80.45	92.33	104.37	112.05	100.32
3	98.64	143.58	182.64	180.34	170.31
4	160.48	192.61	228.92	242.61	220.28
5	192.35	218.92	265.16	274.94	245.76
6	188.46	216.49	280.28	292.57	270.15
7	178.19	209.64	268.33	285.19	264.81

2.2 初始含水率和水泥掺量对膨胀土抗剪强度指标的影响

不同初始含水率及不同水泥掺量对改良膨胀土内摩擦角的影响如表 3 所示。由表 3 可以得出:①通过掺入适当比例的水泥以及控制初始含水率可以大幅度提高膨胀土的内摩擦角,当水泥掺量为 7%、初始含水率为 14% 时,内摩擦角达到最大,为 37.83 rad,较原状土最大内摩擦角增大了 94%。②在相同初始含水率下,随着水泥掺量的增加,膨胀土内摩擦角逐渐增大,这是因为水泥水化反应形成了一系列的胶凝物质,促进了土颗粒的团粒化,从而提高了土颗粒间的黏结强度,使得内摩擦角逐渐增大。③在相同水泥掺量下,随着初始含水率的增大,

内摩擦角先增大后减小,变化幅度总体很小,即掺入水泥对改良膨胀土内摩擦角的提高作用并不显著。

表 3 不同初始含水率和不同水泥掺量下改良膨胀土的内摩擦角

水泥 掺量/%	内摩擦角/rad				
	w = 8%	w = 10%	w = 12%	w = 14%	w = 16%
0	21.67	23.58	22.25	19.47	11.75
3	26.43	27.33	28.55	27.54	26.95
4	28.15	29.47	30.84	28.89	28.11
5	32.46	32.98	34.34	35.43	35.01
6	34.15	35.20	36.03	36.98	36.21
7	35.33	36.25	37.13	37.83	36.84

不同初始含水率及不同水泥掺量对改良膨胀土黏聚力的影响如表 4 所示。由表 4 可以看出:①掺入水泥之后,膨胀土黏聚力有了大幅度的增长,当水泥掺量为 7%、初始含水率为 14% 时,黏聚力达到最大值 386.55kPa,较原状土最大黏聚力增大了 245%,可见掺水泥对膨胀土黏聚力的增大效果十分显著。②在相同初始含水率下,随着水泥掺量的增加,黏聚力逐渐增大,这是因为掺入水泥后,水泥与膨胀土颗粒相互作用,通过离子交换作用、絮凝反应以及团粒化反应,形成了水化硅酸钙和水化硅铝酸钙等胶凝物质,改进了土颗粒的吸水性能,使得土体内部形成了较为稳定的结晶网状结构,提高了土颗粒间的黏结强度。但当水泥掺量超过 5% 后,黏聚力的增大速度变缓,继续增大水泥掺量对黏聚力的提高效果不明显,当初始含水率为 16%、水泥掺量由 6% 增长至 7% 时,黏聚力反而下降了 2.45 kPa。产生这一现象的原因是水泥掺量过大,致使水化反应需要大量的水,而制样时初始含水率是一定的,这就导致了化学反应还未完全进行,而土体内部因含水率过低产生收缩开裂,使得膨胀土整体的黏聚力下降。③在相同水泥掺量下,随着初始含水率的增大,膨胀土黏聚力快速增大后缓慢减小。产生这一现象的主要原因是随着初始含水率的增加,水泥与土的水化作用更加完全,生成的大量胶凝物质增大了土体的黏聚力,当含水量超过某一值时,多余的水在分子之间形成水膜,减小了分子间引力从而降低了膨胀土的黏聚力。

表 4 不同初始含水率和不同水泥掺量下改良膨胀土的黏聚力

水泥 掺量/%	黏聚力/kPa				
	w = 8%	w = 10%	w = 12%	w = 14%	w = 16%
0	80.45	92.33	104.37	112.05	100.32
3	110.32	150.18	203.34	220.16	201.84
4	170.34	210.34	261.44	278.46	258.91
5	221.19	275.61	310.46	352.19	312.16
6	242.55	308.52	325.81	374.83	316.88
7	268.49	318.94	342.15	386.55	314.43

2.3 初始含水率和粉煤灰掺量对膨胀土抗剪强度指标的影响

不同初始含水率以及不同粉煤灰掺量下改良膨胀土的内摩擦角如表 5 所示。由表 5 可以得出：①掺粉煤灰可以提高膨胀土的内摩擦角，但是效果不如掺石灰、水泥显著，最大内摩擦角出现在掺粉煤灰 20%、初始含水率为 14% 时，比原状土的最大内摩擦角增大 52.43%。②在相同初始含水率下，随着粉煤灰掺量的增大，内摩擦角先增大后快速减小而后又逐渐增大。这是因为类似石灰和水泥，粉煤灰与膨胀土发生离子交换、团粒化作用和胶凝作用，产生胶凝颗粒，同时使得土颗粒周围的水膜厚度降低，因而内摩擦角逐渐增大。粉煤灰与膨胀土颗粒反应后生成的水化硅酸钙和水化硅铝酸钙含有大量表面光滑的玻璃微珠，当掺入过多粉煤灰时，过多的玻璃微珠在土颗粒间起到了一定的润滑作用，造成内摩擦角快速减小。继续增大粉煤灰掺量，化学反应所产生的胶凝物质大量增加，离子交换作用以及团粒化作用效果进一步增强，故导致内摩擦角又缓慢增长。③在相同粉煤灰掺量下，随着初始含水率的增大，内摩擦角先增大后减小，这是因为初始含水率增大，促进了粉煤灰与膨胀土的化学反应，生成了胶凝物质，从而增大了内摩擦角，当含水率继续增大时，过多游离的水在膨胀土周围形成水膜，增大了润滑作用，减小了内摩擦角。

表 5 不同初始含水率和不同粉煤灰掺量下改良膨胀土的内摩擦角

粉煤灰 掺量/%	内摩擦角/rad				
	w = 8%	w = 10%	w = 12%	w = 14%	w = 16%
0	21.67	23.58	22.25	19.47	11.75
10	23.48	24.53	26.38	26.01	24.58
12	26.33	27.78	27.93	27.25	25.75
14	26.74	29.00	29.61	28.23	26.70
16	25.02	26.47	28.43	29.02	26.94
18	24.13	24.99	27.55	28.50	26.37
20	24.70	25.48	28.32	29.68	26.48

不同初始含水率以及不同粉煤灰掺量下改良膨胀土的黏聚力如表 6 所示。由表 6 可以得出：①掺入粉煤灰之后，膨胀土黏聚力逐渐增大，但是增长幅度不明显。当粉煤灰掺量为 20%、初始含水率为 14% 时，黏聚力最大为 152.48 kPa，较原状土的最大黏聚力增长 36.08%。②在相同初始含水率下，随着粉煤灰掺量的增加，黏聚力逐渐增大，但是增长速度较慢，这是因为粉煤灰中含钙量有限，导致水化反应所产生的水化物较少，因而胶结膨胀土颗粒的能力较弱，土颗粒团粒化程度不够彻底，因而随着粉煤灰的掺入，黏聚力增长速度较慢。③在相同粉煤灰掺量下，随着初始含水率的增大，黏聚力先增大后减

小，产生这一现象的原因是由于随着初始含水率的增大，水化反应更加彻底，生成的胶凝产物增多，土粒间的黏结作用增强，故黏聚力逐渐增大。当初始含水率进一步增大时，土颗粒间自由水增多，使得颗粒间的黏结作用减弱，剪切时自由水也起到了一定的润滑作用，因此黏聚力逐渐减小。

表 6 不同初始含水率和不同粉煤灰掺量下改良膨胀土的黏聚力

粉煤灰 掺量/%	黏聚力/kPa				
	w = 8%	w = 10%	w = 12%	w = 14%	w = 16%
0	80.45	92.33	104.37	112.05	100.32
10	85.37	93.89	118.74	116.23	105.95
12	91.83	95.43	125.83	123.15	107.92
14	98.62	101.63	130.67	131.05	113.64
16	104.87	107.75	131.52	135.49	118.25
18	115.72	120.21	141.82	146.09	127.43
20	126.85	130.49	149.67	152.48	130.58

2.4 初始含水率和风化砂掺量对膨胀土抗剪强度指标的影响

不同初始含水率以及不同风化砂掺量下改良膨胀土的内摩擦角如表 7 所示。由表 7 可以得出：①掺入风化砂之后，膨胀土的内摩擦角有明显的提高，其最大内摩擦角出现在风化砂掺量为 30%、初始含水率为 10% 时，较原状土最大内摩擦角提高 33.72%。②在相同初始含水率下，随着风化砂掺量的增加，膨胀土内摩擦角先增大后减小，风化砂掺量在 10% ~ 20% 时，内摩擦角增长幅度最大，当风化砂掺量超过 20% 后，内摩擦角增长速度变缓，甚至出现了减小的趋势。产生这一现象的原因是，风化砂表面粗糙且具有较多的棱角，风化砂颗粒与膨胀土颗粒形成较大的土团粒，从而增大了土体整体摩阻力，当风化砂掺量过大时，土体黏性降低，颗粒间的黏结作用减弱，故内摩擦角逐渐减小。③在相同风化砂掺量下，随着初始含水率的增大，内摩擦角先增加后急剧减小，从试验数据上看，各掺量下膨胀土内摩擦角峰值所对应的初始含水率比各自对应的最佳含水率略小 2% 左右。当初始含水率超过这一峰值时，内摩擦角值急剧下降。这是由于风化砂改良膨胀土基本上属于物理改良，所涉及的化学反应较

表 7 不同初始含水率和不同风化砂掺量下改良膨胀土的内摩擦角

风化砂 掺量/%	内摩擦角/rad				
	w = 8%	w = 10%	w = 12%	w = 14%	w = 16%
0	21.67	23.58	22.25	19.47	11.75
10	23.16	25.25	24.06	20.58	13.24
20	26.12	28.56	27.03	24.68	18.26
30	27.68	31.53	29.45	26.84	20.22
40	25.89	28.02	28.84	25.01	19.28
50	23.81	25.08	26.22	23.48	17.37

少,因此化学反应所需的水量不多;当初始含水率过大时,土孔隙间自由水过多,且无法通过化学反应来消耗,导致土颗粒间的水膜变厚,颗粒间的摩擦作用减弱,因而内摩擦角急剧减小。

不同初始含水率以及不同风化砂掺量下改良膨胀土的黏聚力如表 8 所示。由表 8 可以得出:①掺风化砂无法提高膨胀土的黏聚力。在相同初始含水率下,随着风化砂掺量的增加,黏聚力均大幅降低。这是因为风化砂基本上不具有黏性,掺入膨胀土之后,土体整体的黏性急剧下降。再者由于风化砂掺量过大,导致土体内部空隙增多,颗粒与颗粒间的挤压嵌挤作用减弱,最终导致黏聚力急剧衰减。②当风化砂掺量一定时,可以通过控制初始含水率来提高膨胀土的黏聚力。每种掺砂量下,黏聚力峰值所对应的初始含水率接近各自最佳含水率。初始含水率超过这一界限含水率时,黏聚力快速减小,这是因为随着初始含水率的增加,膨胀土颗粒所表现出来的黏性增强,黏聚力不断提高,当初始含水率超过一定限时,土颗粒空隙中的自由水增多,超孔隙水压力不断增大,致使颗粒间的黏聚力减弱。同时,由于膨胀土本身具有吸水软化的性质,故当初始含水率过大时,土体稳定性降低,黏聚力急剧减小。

表 8 不同初始含水率和不同风化砂掺量下改良膨胀土的黏聚力

风化砂 掺量/%	黏聚力/kPa				
	w = 8%	w = 10%	w = 12%	w = 14%	w = 16%
0	80.45	92.33	104.37	112.05	100.32
10	70.67	81.78	93.83	100.62	88.46
20	64.95	73.25	85.47	90.35	79.36
30	58.36	69.11	82.22	88.99	73.68
40	54.44	62.56	73.57	80.64	69.49
50	32.68	38.55	45.84	50.24	38.92

3 结 论

- a. 在膨胀土中掺入水泥、石灰和粉煤灰均能有效提高膨胀土的黏聚力,黏聚力提高幅度由大到小依次为水泥、石灰、粉煤灰,掺风化砂后会使得原状膨胀土的黏聚力显著下降。
- b. 在膨胀土中掺入水泥、石灰、粉煤灰和风化砂均能提高膨胀土的内摩擦角,其中掺水泥提高的幅度最大,其次是风化砂,掺石灰和粉煤灰对内摩擦角的提高作用并不十分明显。
- c. 在膨胀土中掺入水泥、石灰、粉煤灰和风化砂均能提高膨胀土的抗剪强度,且在标准直剪试验加载条件下,抗剪强度提高幅度由大到小依次为水泥、石灰、粉煤灰、风化砂。
- d. 水泥、石灰、粉煤灰、风化砂均可用于改良膨

胀土,但掺石灰、水泥和粉煤灰时,拌和均匀较为困难,且污染环境。在有条件的情况下,可以考虑掺风化砂的改良方法,有利于节约成本,方便施工。

参考文献:

[1] 崔伟,李华奎,穆乃敏. 石灰改性膨胀土工程性质的试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(4): 607-609. (CUI Wei, LI Hualuan, MU Naimin. Experimental research on engineering character of improved expansive soil with lime [J]. Rock and Soil Mechnaics, 2003, 24(4): 607-609. (in Chinese))

[2] 惠会清,胡同康,王新东. 石灰、粉煤灰改良膨胀土性质机理[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2): 34-37. (HUI Huiqing, HU Tongkang, WANG Xindong. Improved mechanism of expansive soils by lime and fly-ash [J]. Journal of Chang' an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 34-37. (in Chinese))

[3] 李东森,夏熙临,陈丛丛,等. 石灰、水泥及砂改良膨胀土工程特性的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 25-27. (LI Dongsen, XIA Xilin, CHEN Congcong, et al. Experimental study on engineering characteristics of expansive soils modified with lime, cement and sand [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 25-27. (in Chinese))

[4] 胡渐,洪宝宁,杜强,等. 含水率对煤系土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2009,30(8): 2291-2294. (HU Xin, HONG Baoning, DU Qiang, et al. Influence of water contents on shear strength of coal-bearing soil [J]. Rock and Soil Mechnaics, 2009, 30(8): 2291-2294. (in Chinese))

[5] 孔令伟,郭爱国,赵颖文,等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报,2004,26(6): 727-732. (KONG Linwei, GUO Aiguo, ZHAO Yingwen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect [J]. Journal of Rock and Soil Engineering, 2004, 26(6): 727-732. (in Chinese))

[6] 王珊珊,卢成原,孟凡丽. 水泥土抗剪强度试验研究[J]. 浙江工业大学学报,2008,36(4): 456-459. (WANG Shanshan, LU Chengyuan, MENG Fanli. An experimental study of shear strength of cement soil [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2008, 36(4): 456-459. (in Chinese))

[7] 林友军,薛丽皎,陈丽红. 石灰-粉煤灰改良汉中膨胀土试验研究[J]. 陕西理工大学学报:自然科学版,2010,26(1): 36-37. (LIN Youjun, XUE Lijiao, CHEN Lihong. Experimental research on lime-fly ash improved expansive soil in Hanzhong [J]. Journal of Shanxi University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 26(1): 36-37. (in Chinese))

(下转第 49 页)

- Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2007, 26 (3):26-29. (in Chinese))
- [3] XIE Wei, JI Changming, YANG Zijun, et al. Short-term power generation scheduling rules for cascade hydropower stations based on hybrid algorithm[J]. Water Science and Engineering, 2012, 5(1):46-58.
- [4] 路志宏,魏守平. 变状态空间动态规划法在水库优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2003, 21(2):55-57. (LU Zhihong, WEI Shouping. Status variable space dynamic programming and its application for optimal operation of cascaded hydroelectric systems [J]. Water Resources and Power, 2003, 21(2):55-57. (in Chinese))
- [5] 宗航,李承军,周建中,等. POA 算法在梯级水电站短期优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2003, 21(1):46-48. (ZONG Hang, LI Chengjun, ZHOU Jiangzhong, et al. Research and application for short-term cascaded hydroelectric scheduling based on progressive optimality algorithm[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(1):46-48. (in Chinese))
- [6] 周佳,马光文,张志刚. 基于改进 POA 算法的雅砻江梯级水电站群中长期优化调度研究[J],水力发电学报, 2010, 29(3):18-22. (ZHOU Jia, MA Guangwen, ZHANG Zhigang. Study on the mid-long term optimal dispatching of cascaded hydropower stations on Yalong River based on POA modified adaptive algorithm [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3):18-22. (in Chinese))
- [7] 刘攀,郭生练,李玮,等. 遗传算法在水库调度中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2006, 29(4):78-83. (LIU Pan, GUO Shenglian, LI Wei, et al. A review of application of genetic algorithm to reservoir operation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 29(4):78-83. (in Chinese))
- [8] 何向阳,周建中,张勇传,等. 基于改进 NSGA-II 的梯级水电站多目标发电优化调度[J]. 武汉大学学报:工学版, 2011, 44(6):715-719. (HE Xiangyang, ZHOU Jiangzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Multiobjective optimal dispatching of cascade hydropower stations using improved NSGA-II [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(6):715-719. (in Chinese))
- [9] 朱记伟,张洪波,辛琛,等. 水库调度 PSO 优化模型及求解方法[J]. 系统工程, 2010, 28(1):105-112. (ZHU Jiwei, ZHANG Hongbo, XIN Sheng, et al. PSO Model and calculation method to reservoir optimal operation[J]. Systems Engineering, 2010, 28(1):105-112. (in Chinese))
- [10] 向波,纪昌明,罗庆松. 免疫粒子群算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2008, 36(2):198-201. (XIANG Bo, JI Changming, LUO Qinsong. Immune particle swarm optimization algorithm and its application in reservoir operation optimization[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(2):198-201. (in Chinese))
- [11] 徐刚,马光文,梁武湖,等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3):397-400. (XU Gang, MA Guangwen, LIANG Wuhu, et al. Application of ant colony algorithm to reservoir optimal operation[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3):397-400. (in Chinese))
- [12] 权先璋,李承军,张士军,等. 水电站优化线性调度规则研究[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(12):36-38. (QUAN Xianzhang, LI Chengjun, ZHANG Shijun, et al. A study on the optimal linear dispatching rules for hydropower station[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, 27(12):36-38. (in Chinese))
- [13] 李承军,陈毕胜,张高峰. 水电站双线性调度规则研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1):11-15. (LI Chengjun, CHEN Bisheng, ZHANG Gaofeng. Study on bilinear dispatching rule of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1):11-15. (in Chinese))
- [14] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2001.
- (收稿日期:2013-05-07 编辑:骆超)

(上接第 43 页)

- [8] 查甫生,刘松玉,杜延军. 石灰-粉煤灰改良膨胀土试验[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2007, 37(2):339-344. (ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun. Experiment on improvement of expansive clays with lime-fly ash [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2):339-344. (in Chinese))
- [9] 陈爱军,杨和平. 石灰改良汉中膨胀土路堤的施工控制[J]. 中外公路, 2009, 29(4):185-188. (CHEN Aijun, YANG Heping. Construction control of lime improvement of expansive soil embankment in Hanzhong [J]. Chinese and Foreign Highway, 2009, 29(4):185-188. (in Chinese))
- [10] 魏永耀,孙树林,郑华章. 膨胀土-胶粉(ESR)强度特性室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4):543-547. (WEI Yongyao, SUN Shulin, ZHEN Huazhang. Laboratory tests on uniaxial compressive strength of expansive soil-rubber[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4):543-547. (in Chinese))
- [11] 肖杰,王保田,孙衣春,等. 水泥石灰复合改良膨胀土试验[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2):9-13. (XIAO Jie, WANG Baotian, SUN Yichun, et al. Experimental research on the stabilized lime-cement expansive soil [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2):9-13. (in Chinese))
- [12] 李庆鸿. 新建时速 200 公里铁路改良膨胀土路基施工技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007:13-19.
- (收稿日期:2013-04-12 编辑:骆超)