

基于层次分析法的高液限土改良方案的确定

郭士升¹,高 萍¹,程 涛^{2,3},龙 森^{2,3}

(1. 中铁二十四局集团安徽工程有限公司,安徽 合肥 230000;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
3. 河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:综合考虑理论可行性、实际可操作性、经济适用性以及对环境的影响等因素,对高液限土掺不同材料(20%砂、2%水泥、1.5%水泥和15%砂的混合料、5%熟石灰、5%生石灰)的改良处理方案进行对比分析。利用层次分析法构建复杂多准则、多目标的决策系统,由专家分别给出各判断矩阵中各影响因素的标度值,计算各层的组合权重,按递阶层次结构获得各改良方案的组合权重值,从而得出最佳处理方案为掺5%生石灰的高液限土改良方案。现场试验结果表明,掺5%生石灰的改良高液限土在碾压8遍后,其质量满足规范要求。

关键词:高液限土;改良方案;层次分析法;生石灰改良

中图分类号:TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)06-0052-04

Determination of improvement method for high liquid limit soil//GUO Shisheng¹,GAO Ping¹,CHENG Tao^{2,3},LONG Sen^{2,3}(1. Anhui Construction Engineering Co., Ltd., China Railway 24th Bureau Group, Heifei 230000, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geotechnical and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the factor of theory feasibility, practical operational, economy applicability and environmental influence, the treatment scheme of high liquid limit soil mixed with different materials (20% sand, 2% cement, 1.5% cement and 15% sand, 5% hydrated lime, 5% quick lime) were analyzed. Using the analytic hierarchy process (AHP) to construct a complicated, multi-attributive and multiobjective decision making system, the scale values among judgment matrix for the influence factors are given by experts, the value of combination weighting of each layer is calculated, and the combination weights for each improvement scheme according to the recursive structure is obtained. High liquid limit soil mixed with 5% quick lime was supposed as the best treatment scheme. Field test shows that the quality of high liquid limit soil mixed with 5% quick lime can meet the requirements of specification under compacted for 8 times.

Key words: high liquid limit soil; improvement program; analytic hierarchy process (AHP); soil improvement by quick lime

高液限土是一种细颗粒含量较高、液限较大的黏性土,其矿物成分主要以蒙脱石、伊利石、高岭石为主,基本特征是液限高($W_L \geq 50\%$)和塑性指数高($I_p > 26$)^[1]。高液限土的力学行为表现为透水性差,不易压实,干时坚硬不易挖掘,毛细现象显著,浸水后能较长时间保持水分,承载力较小,稳定性差,若不加处理,可能会出现不均匀沉降、开裂、滑坡、水稳定性等工程问题^[2]。国内对高液限土的改良处理方法有以下几类:隔水防护、改善颗粒级配、改善施工工艺、掺入无机结合料、掺入新型化学改良剂等^[3]。本文讨论掺入无机结合料的高液限土改良

方法。无机结合料主要包括石灰、水泥、砂及它们的组合。在方案选取时应综合考虑技术适用性、经济适用性和环境影响,从而得出最佳的改良方案。

层次分析法(AHP)^[4,6]是美国著名运筹学家Saaty于20世纪70年代中期提出的一种基于定性分析的定量分析决策方法,是解决多准则、多目标决策问题的行之有效的方法。层次分析法将复杂决策系统化、模型化、层次化、数学化,通过逐层比较各种关联因素的重要性来为决策提供定量依据,其分析问题的基本思想是基于问题的性质及需达到的目标将问题按层次分成各组成因素;再按层次关系分组

形成有序的递阶层次结构;对同一层次的因素,通过两两比较的方式确定因素之间的相对重要性(权重);下一层次因素的重要性既要考虑本层次又要考虑到上一层次的权重;逐层计算下去得出最后一层各方案的权重,并按权重大小进行排序、决策。

1 影响因素定性分析

高液限土作为路堤填料需要解决以下几个方面的问题:①天然含水率、液限和塑性指数高;②强度低、压缩性高和渗透性低;③细颗粒含量高、颗粒级配差;④稳定性和压实性能不佳。对高液限土改良方案的选择,要围绕着解决这几个问题展开。在满足理论可行性及实际可操作性的前提下,综合考虑经济适用性及对环境的影响,从而选定高液限土改良方案^[7]。

a. 理论可行性:当掺 5% 生石灰或熟石灰、掺 2% 水泥、掺 20% 砂以及掺 1.5% 水泥与 15% 砂混合料时,虽均能满足路堤填料的要求,但考虑到研究区域昼夜温差较大,早上雾多,回潮现象较严重等因素,从降低含水率的角度来看,掺生石灰效果最好,虽然掺水泥与砂混合料也能使土体含水率得到一定程度的降低,但效果不理想。而从改善颗粒级配的角度看,掺砂能明显提高土体中粗颗粒的含量,从而改良土体颗粒级配的效果最佳。

b. 实际可操作性:由于石灰和水泥的掺量相对较低,拌和时易产生不均匀现象,因此现场施工时在条件许可的情况下尽量使用场拌法施工;同时水泥和石灰多为粉状结构,密度较小,大风天气时易形成扬尘现象,且应避免雨季施工时因雨水与其发生反应而产生变质现象。砂的密度相对较高,拌和次数过多,砂易沉底;拌和次数过少,砂不均匀。因此,就实际可操作性而言,场拌法施工时,掺生石灰和水泥最好,掺熟石灰改良效果相对较差;路拌法施工时,掺砂最好,掺石灰和水泥效果相对较差。在降雨大风相对比较频繁的南方热带地区,可优先采用掺砂改良方案,以避免天气对掺石灰和水泥改良的不利影响。

c. 经济适用性:从经济适用性角度来看,掺砂和掺水泥及掺水泥与砂混合料改良的材料费用均较低,而掺水泥和石灰改良的材料费用相对较高。场拌法施工时因机械工作量的增加造成场拌法费用较路拌法有所增加。

d. 对环境的影响:主要考虑施工过程中产生的固体废弃物、水土流失等对生态环境的影响,以及空气污染、噪音等对居住环境的影响。石灰和水泥中的固体废弃物处理不当会对大气、水体和土壤造成

二次污染。另外,施工时的水泥和石灰粉粒易损害施工人员及附近居民的身体健康,因此运输时必须加盖帆布;而掺砂引起的环境问题相对较小,其他掺料改良方案均会对环境造成不同程度的不利影响。

综合以上几个方面因素,掺生石灰、掺水泥与砂混合料、掺熟石灰、掺砂和掺水泥改良高液限土各有优势,很难评价各改良方案的效果,因此需定量分析,从而为设计、施工提供理论依据。

2 方案选择定量分析

a. 明确问题,建立递阶层次结构。根据上文分析,高液限土改良方案的选择可绘制成如图 1 所示的结构图。图中第一层为目标层,即高液限土改良方案,记为 A;第二层为准则层,包含技术适用性、经济适用性和对环境的影响这 3 个因素,分别记为 B_1 、 B_2 、 B_3 ,其中技术适用性受理论可行性和实际可操作性两方面控制,分别记为 D_1 和 D_2 ;第三层为指标层,包含掺 20% 砂、掺 2% 水泥、掺 1.5% 水泥和 15% 砂的混合料、掺 5% 熟石灰、掺 5% 生石灰这 5 个指标,分别记为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 。方案选择首先要考虑技术适用性,在此基础上再考虑经济适用性和对环境的影响。这些因素相互制约、相互影响,进而形成一个复杂多准则、多目标的决策系统。

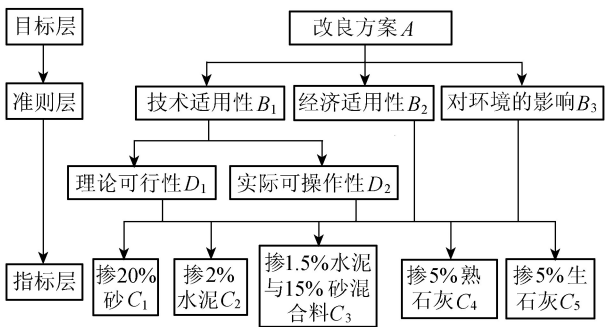


图 1 高液限土改良方案影响因素结构

b. 确定权重。权重的确定是综合评价中的核心问题。权重的确定方法可分为主观赋权法、客观赋权法及综合赋权法,本文采用主观赋权法来确定权重。在层次分析法的递阶层次结构中,假定上一层元素 P_k 作为准则,对下一层次元素 Q_1 、 Q_2 、 $\dots$ 、 Q_n 有支配关系。在准则 P_k 下按它们的相对重要性赋予 Q_1 、 Q_2 、 $\dots$ 、 Q_n 相应的权重,一般采用 1~9 的标度赋值:若 Q_i 与 Q_j 同等重要,则标度值为 1;若 Q_i 比 Q_j 稍重要,则标度值为 3;若 Q_i 比 Q_j 重要,则标度值为 5;若 Q_i 比 Q_j 重要得多,则标度值为 7;若 Q_i 比 Q_j 绝对重要,则标度值为 9;而标度值 2、4、6、8 为上述相邻判断中值。则在准则 P_k 下,可得到元素 Q_1 、 Q_2 、 $\dots$ 、 Q_n 的 $n \times n$ 阶判断矩阵 $Q = (q_{ij})$ 。

c. 构造两两比较判断矩阵。根据高液限土改良效果影响因素分析,由专家对下层因素相对于上层某一因素的重要性进行仔细判断,得到判断矩阵中各影响因素的标度值^[8]。各因素 A 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 D_1 、 D_2 的判断矩阵 K_1 、 M_1 、 M_2 、 M_3 、 N_1 、 N_2 分别为

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 4 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$N_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/4 & 1 & 1/5 \\ 1 & 1 & 1/4 & 1 & 1/5 \\ 4 & 4 & 1 & 5 & 1 \\ 1 & 1 & 1/5 & 1 & 1/5 \\ 5 & 5 & 1 & 5 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 1/5 & 1/4 \\ 1 & 1 & 3 & 1/5 & 1/4 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1/6 & 1/5 \\ 5 & 5 & 6 & 1 & 1/2 \\ 4 & 4 & 5 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

d. 计算单一准则下的相对权重。构造好判断矩阵后,需要计算单一准则下的相对权重。对于判断矩阵 $Q=(q_{ij})$,根据线性代数的理论可知,存在方程:

$$QW = \lambda_{\max} W \tag{7}$$

由式(7)计算得到特征值 λ_1 、 λ_2 、 $\cdots$ 、 λ_n ,以及所对应的特征向量 w_1 、 w_2 、 $\cdots$ 、 w_n ,则存在 $\lambda_{\max}$ 为矩阵 Q 唯一存在的最大实特征根。当 $\lambda_{\max}$ 确定后,所对应的特征向量 W 的各个分量经归一化处理后即作为元素 Q_1 、 Q_2 、 $\cdots$ 、 Q_n 在准则 P_k 下的权重值。方程 $QW = \lambda_{\max} W$ 变形后得线性方程组:

$$(Q - \lambda_{\max} I)W = 0 \tag{8}$$

式中: I 为单位矩阵。

直接求解方程(8)一般比较复杂,常用的简化解法有方根法与和积法,本文采用方根法进行计算,得出计算结果见表 1,则最大特征值时判断矩阵的

单位特征向量即为各层判断矩阵的权重值。

表 1 判断矩阵的最大特征值及单位特征向量

准则	$\lambda_{\max}$	判断矩阵的单位特征向量
A	3.065	$(0.731, 0.188, 0.081)^T$
B_1	2.000	$(0.167, 0.833)^T$
B_2	5.041	$(0.348, 0.274, 0.225, 0.081, 0.073)^T$
B_3	5.067	$(0.460, 0.187, 0.172, 0.108, 0.072)^T$
D_1	5.008	$(0.083, 0.083, 0.362, 0.079, 0.395)^T$
D_2	5.192	$(0.090, 0.100, 0.052, 0.349, 0.409)^T$

e. 一致性检验。对于判断矩阵 $Q=(q_{ij})$,要求具有满意的一致性,否则需调整判断矩阵。一致性检验的步骤如下:

步骤 1 计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{9}$$

式中: n 为判断矩阵的阶数。

步骤 2 根据矩阵 Q 的阶数及表 2 找出随机一致性指标 RI 的值。

表 2 RI 的取值^[9]

n	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

步骤 3 计算校验系数 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{10}$$

步骤 4 一致性判别:根据以上方法计算,对判断矩阵进行一致性检验,其检验结果见表 3。由计算结果可知:5 个判断矩阵的 CR 均小于 0.1,具有满意的一致性。而以 B_1 为准则的判断矩阵为 2 阶矩阵,2 阶矩阵为一致矩阵,具有良好的 consistency。

表 3 判断矩阵的一致性检验

准则	CI	RI	CR	一致性检验结果
A	0.031	0.58	0.056	良好
B_2	0.010	1.12	0.009	良好
B_3	0.015	1.12	0.015	良好
D_1	0.002	1.12	0.006	良好
D_2	0.048	1.12	0.043	良好

f. 计算各层元素的组合权重,进行排序并决策。计算各层的组合权重,权重按递阶层次结构传递直至最后一层得到各改良方案的组合权重(式(11)),并依据各方案的组合权重进行决策。

$$W = \begin{bmatrix} 0.083 & 0.090 & 0.348 & 0.460 \\ 0.083 & 0.100 & 0.274 & 0.187 \\ 0.362 & 0.052 & 0.225 & 0.172 \\ 0.079 & 0.349 & 0.081 & 0.108 \\ 0.395 & 0.409 & 0.073 & 0.072 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.122 \\ 0.609 \\ 0.188 \\ 0.081 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.168 \\ 0.138 \\ 0.132 \\ 0.246 \\ 0.317 \end{bmatrix} \tag{11}$$

由式(11)可见, C_5 的权重最大,即由理论分析

和定量计算可知,掺5%生石灰的改良方案为最优方案。

g. 现场试验评价。以下为按最优改良方案进行的试验路现场填筑试验,对改良方案及其改良效果进行评价。高液限土掺5%生石灰后的各项物理力学性质见表4,由表4可知,改良土的液限、塑性指数、最优含水率较未改良时降低,而 CBR 值、最大干密度较未改良时有所增大,因此改良效果较为明显。

表4 掺5%生石灰后的改良高液限土物理力学性质

土体	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	CBR值/%
素土	33.7	75.9	35.6	40	22.0	1.61	4.1
改良土	28.5	59.2	34.8	24	18.2	1.66	13.3

路拌法施工时,当松铺厚度为30 cm,压路机吨位分别为11 t、18 t、22 t,压实含水率差在-2%~4%之间时,压实度随碾压遍数的关系见图2。由图2可知:在相同碾压遍数下,压实度随碾压吨位增大而增大,因此碾压吨位提高对压实度的提升效果明显;在相同碾压吨位下,压实度随着碾压遍数的增加而显著提高,一般在碾压8遍后,压实度等各项质量检验指标满足要求,故掺5%生石灰改良高液限土为最优方案。

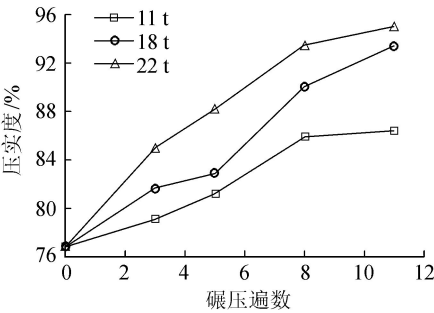


图2 不同碾压吨位下压实度与碾压遍数的关系

3 结 论

- a.** 当高液限土含水率较大时,应优先考虑掺生石灰改良方案;而土体中细颗粒含量较高时,应优先考虑掺砂改良方案;从减少工程造价的角度出发,应优先考虑掺砂或水泥的改良方案。
- b.** 影响高液限土改良效果的因素较多,施工时应根据当时当地的情况,综合考虑技术适用性、经济适用性、对环境的影响等因素确定高液限土的改良方案。
- c.** 掺生石灰改良高液限土的效果最明显,在满足规范要求时,掺5%生石灰改良方案为最优方案。
- d.** 在降雨大风相对比较频繁的南方热带地区,可优先采用掺砂改良方案,避免天气对掺石灰和水泥改良时的不利影响。

参考文献:

[1] 刘鑫,洪宝宁.高液限土工程特性与路堤填筑方案[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):436-443. (LIU Xin, HONG Baoning. Engineering characteristics and construction schemes of high liquid limit soil in embankment filling [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(4):436-443. (in Chinese))

[2] 车竞.高液限土路堤病害机理分析及处治措施[J].广东交通职业技术学院学报,2010,9(2):11-14. (CHE Jing. Analysis on the disease mechanisms of high liquid limit soil embankments and the treatment suggestions [J]. Journal of Guang Dong Communications Polytechnic, 2010, 9(2):11-14. (in Chinese))

[3] 吴立坚,钟发林.高液限土的路用特性研究[J].岩土工程学报,2003,25(2):193-195. (WU Lijian, ZHONG Falin. Study on road made by high liquid limit soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2):193-195. (in Chinese))

[4] 张伟.基于人工免疫系统的多目标优化算法和偏好多目标决策[D].西安:西安电子科技大学,2011.

[5] 孙习祥,兰肇华.品牌延伸的影响因子分析及评估模型[J].武汉理工大学学报,2010,32(7):182-187. (SUN Xixiang, LAN Zhaohua. Impact factors analysis and evaluation model on brand extension [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(7):182-187. (in Chinese))

[6] 方可,马萍,杨明.仿真可信度评估中的AHP超越权重[J].北京航空航天大学学报,2011,37(5):584-588. (FANG Ke, MA Ping, YANG Ming. AHP ultra weight for simulation credibility evaluation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011,37(5):584-588. (in Chinese))

[7] 程涛,洪宝宁,刘鑫,等.高液限土最佳掺砂比的确定[J].西南交通大学学报,2012,47(8):580-585. (CHENG Tao, HONG Baoning, LIU Xin. Determine of optimal sand content for improving high liquid limit soil [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012,47(8):580-585. (in Chinese))

[8] 李虹,李彦萍.基于AHP-SOM方法下的风险投资项目选择研究[J].天津工业大学学报,2008,27(6):85-88. (LI Hong, LI Yanping. Research on AHP-SOM-based methods of venture capital investment projects selection [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2008, 27(6):85-88. (in Chinese))

[9] 檀丁,李明峰,李永义,等.基于加权区间层次分析法(WIAHP)的高速公路救援预案优选研究[J].公路,2011(12):115-119. (TAN Ding, LI Mingfeng, LI Yongyi, et al. A study on optimization of expressway rescue plans based on weighted interval analytic hierarchy process (WIAHP) [J]. Highway, 2011(12):115-119. (in Chinese)) (收稿日期:2013-01-09 编辑:骆超)