

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S1.033

高液限土路堤填筑的双指标控制方法研究

洪宝宁^{1,2,3}, 化君晖^{1,3}, 刘 鑫^{1,2,4}, 易进翔^{1,3}

(1. 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; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学 隧道与地下工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 对于高液限土(包括改良的高液限土)填筑的路堤只用单一的压实度指标控制常常易导致质量隐患。通过试验研究提出一个采用空气率 V_a 和压实度 D_c 双指标控制高液限土路堤填筑质量的方法, 并给出了具体的控制标准。当压实度控制指标 $D_c \geq 93\%$ 时, 高液限黏土和粉土空气率控制标准为 $4\% \leq V_a \leq 8\%$, 含砂高液限黏土和粉土空气率控制标准为 $6\% \leq V_a \leq 13\%$ 。通过系统的试验研究, 验证了双指标质量控制的可行性和有效性。研究结果表明, 采用空气率和压实度双指标控制, 不仅可以保证高液限土填筑路堤的强度和刚度, 而且具有较好的水稳定性, 为进一步充分利用高液限土作为路堤填料提供了技术支持。

关 键 词: 高液限土; 路堤填筑; 双指标控制; 空气率; 水稳定性

中图分类号: U 416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增1-0255-08

Research on quality control method with two indices for embankment filled with high liquid limit soil

HONG Bao-ning^{1,2,3}, HUA Jun-hui^{1,3}, LIU Xin^{1,2,4}, YI Jin-xiang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. Institute of Tunnel and Underground Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Great amount of engineering practices indicate that the single index D_c , degree of compaction could not well control the quality of embankment filled with high liquid limit soil (including the improved high liquid limit soil), and may cause quality hidden dangers. Through experimental study, this paper proposes a quality control method using two indices to control the quality of embankment filled with high liquid limit soil; and the two indices are the volume ratio of air V_a and the degree of compaction D_c . When D_c is more than 93%, the suggested value for high liquid limit soil (or silt) is $4\% \leq V_a \leq 8\%$, and the suggested value for high liquid limit sand soil (or silt) is $6\% \leq V_a \leq 13\%$. The feasibility and validity of this two indices quality control method was verified through tests in laboratory and test sections. The results show that adopting the two indices (V_a and D_c) could not only guarantee the intensity and stiffness, but also ensure better water stability, so as to provide technical supports for further full use the high liquid limit soil as embankment filler.

Keywords: high liquid limit soil; embankment filling; two indices control theory; volume ratio of air; water stability

1 引 言

随着我国高速公路建设不断的从沿海沿江地区向山地丘陵地区拓展, 不可避免地会遇到赋存高液限土地区, 以广东省为例, 目前在建的和已建的

高速公路中有超过 50% 的遇到高液限土问题, 公路路基设计规范^[1]中定义高液限土为液限(100 g 锥试验)超过 50% 的细粒土。按已有规范和工程经验, 高液限土常作为弃方处理, 随着人们环保意识的增强, 再加上这些地区一般借方的运距较远, 使得越

收稿日期: 2015-11-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2014B34414); 江苏省自然科学基金青年基金(No. BK20140848); 广东省交通运输厅科技项目(科技-2015-02-013, 科技-2015-02-015)。

This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014B34414), the Natural Science Youth Foundation of Jiangsu Province (BK20140848) and Scientific Program of Transport Department of Guangdong Province (S-2015-02-013, S-2015-02-015).

第一作者简介: 洪宝宁, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 主要从事土的基本性质及地基处理、微细结构试验及理论等方面的研究工作。E-mail: hongbaoning24@sohu.com

通讯作者: 刘鑫, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要从事微细结构试验及理论、软基处理与基础工程方面的研究工作。E-mail: liuxin100@hhu.edu.cn

来越多的高速公路开始直接或改良利用高液限土作为路堤填料^[2-5],以降低工程造价,提高环境保护。然而,由于高液限土具有天然含水率高、细颗粒含量高、液限高、塑性指数大、水稳定性差等特点,导致采用现有检测手段,常常很难评价路堤的填筑质量。虽然许多学者和工程技术人员已意识到在路堤填筑中不同种类的土采用单一的压实度控制存在不足,并开展了一些有益的工作。孙万青^[6]结合工程实践发现单一的压实控制标准是导致路基出现病害的关键问题之一。毛洪录等^[7]认为现行压实标准不够完善,各类土的压实标准应该不同。邹维列等^[8]对中美日土基压实控制标准进行比较,认为对不同颗粒组成的土,压实度控制指标并不能很好反映压实路基的稳定性等,但探索不同类土具体的质量控制方法和检测标准仍有待进一步的工作。本文在系统试验研究的基础上,提出一种适合高液限土路堤填筑的双指标控制质量方法,给出了具体的控制标准,通过室内试验和试验路试验论证本文方法和标准的有效性,按双指标控制不仅可使路堤满足强度和刚度要求,而且可以保证路堤具有较好的水稳定性。

2 双指标质量控制的必要性

路堤填筑的质量控制标准直接影响路基的长期工程特性和路面的使用性能,现行公路路基设计规范^[1]、公路路基施工技术规范^[9]和公路工程质量检验评定标准^[10]均以压实度 D_c (干密度比) 衡量路基填筑的质量标准,并没有区分土的种类,给工程实际应用带来一定盲区^[11]。因为不同性质、不同颗粒组成的土受压实含水率的影响程度不同,而压实度 D_c (干密度比) 并不能体现不同含水率对不同性质、不同颗粒组成的土质路堤的稳定性影响。砂性土的强度和稳定性受水的影响不大,压实后不易发生沉降变形,采用现行干密度比的方法控制压实度 D_c 是可行的,但对于黏性土和粉性土,特别高液限等不良土,由于含水率小、空气率大,路堤一旦受水影响,路堤就可能产生不同程度沉降变形,因此,对于高液限土路堤若以单一的压实度 D_c 衡量路堤填筑的质量,显然不全面、不合理,易因水稳定性不够而导致沉降变形,甚至出现翻浆现象。

广东地区的高液限土一般为高液限黏土、高液限粉土、含砂高液限黏土、含砂高液限粉土^[12],由于高液限土天然含水率高,填筑时的含水率往往大于最优含水率。广东地区干湿季节的交替频繁,高液限土水稳定性差等。因此,在选择填筑质量控制

指标时应考虑既能反映路堤干密度情况,又能反映含水率大小和水稳定性性能,以解决目前高液限土填筑质量控制的不足。可以通过分析选择增加空气率作为高液限土路堤填筑的一个质量控制指标,其原因主要是:(1) 空气率能反映高液限土路堤的含水率和水稳定性性能;(2) 对于高液限土这种细粒土含量高的土,空气率指标比压实度指标更适用于填筑路堤质量控制^[9-10];(3) 要使单位体积内固体颗粒增加,一般通过压实使土体内的空气和水排出,达到使单位体积内固体颗粒的数量增加,孔隙率减小的目的。由于孔隙中含有水和空气,不宜将孔隙率作为填料填筑质量的控制指标,而空气率(土体中空气的体积占总体积的百分比)能很好地反映土体单位体积内固体颗粒的数量,故能作评价填料填筑质量的控制指标。

高液限土路堤采用双指标控制方法是用压实度 D_c 指标反映路堤干密度情况,用空气率 V_a 指标反映路堤含水率大小和水稳定性性能。

3 双指标质量控制方法

3.1 双指标获取

按规范要求的压实度检测频率,在填筑碾压完成后进行质量控制双指标提取工作,压实度 D_c 的表达式为

$$D_c = \rho_d / \rho_{d_{\max}} \quad (1)$$

式中: ρ_d 为现场 2 次测得填料干密度的平均值; $\rho_{d_{\max}}$ 为实验室标准击实试验所得最大干密度。

目前现场压实度 D_c 的测量方法有环刀法、灌砂法、核子密度仪法等,在路堤检测中较为常用的是环刀法和灌砂法。

空气率 V_a (空气体积率) 的表达式为

$$V_a = 100 - \rho_d \left(\frac{100}{G_s \rho_w^{4^\circ\text{C}}} + \omega \right) \quad (2)$$

式中: G_s 为现场填料的相对密度; 土粒质量与同体积的 4°C 纯水的质量之比(无量纲); $\rho_w^{4^\circ\text{C}}$ 为水在 4°C 时的密度,为 1 g/cm^3 ; ω 为现场土的含水率(%); 空气率 V_a (%) 为间接量,需经计算得到,具体步骤为① 将现场压实度检测坑中的填料用塑料袋装好,作为室内进行干密度、填料的相对密度、含水率试验的试样。② 按公路土工试验规程的试验步骤进行填料的干密度、填料的相对密度、含水率试验,并获取相应的试验值。③ 根据式(2)计算出土样的空气率 V_a 。

在高液限土填筑路堤施工中,空气率检测主要用于碾压施工后填料填筑质量的评定,检测结果与压实度检测结果构成高液限土路堤填筑质量的双控指标。当压实度检测采用灌砂法时,空气率检测可与其同步进行。

3.2 质量控制标准

在双指标质量控制方法中空气率指标作为控制参数,我国还没有应用和论证,在英国、日本等国家已有较为成熟的规范,英国道路与桥梁施工规范(specification for road and bridge works, 1976)^[13]中对路堤压实状态是以土中的空气体积率控制的,要求路堤上层 $V_a \leq 5\%$,下层 $V_a \leq 10\%$ 。日本的路堤压实控制方法中对细颗粒含量高的土(0.075 mm 筛通过量大于 20%,相当于黏土和粉土),用空气体积率法控制;对细颗粒含量低的土(0.075 mm 筛通过量小于 20%的土,相当于砂性土),用密度比(压实度)法控制。空气率上、下限的确定需要根据不同的土质情况,通过大量的工程实测数据及现场试验验证。高液限土属于不良土,细颗粒含量和液、塑限高,根据工程实践经验和室内试验以及现场试验和理论分析,并参照了各国类似的标准,本文给出广东地区高液限土包括改良高液限土作为路堤填料的填筑质量控制标准见表 1。

表 1 高液限土路堤填筑质量控制标准
Table 1 Compaction standards of layered buried embankment with High liquid limit soil

土体分类	路面底面 以下深度	压实度 /%	空气率 V_a /%
高液限土(黏土、粉土)	1.5 m 以下	≥ 93	4~8
含砂高液限土(黏土、粉土)			6~13

注:含砂高液限土指高液限土填料中含砂量大于 25%。

对于高液限土路堤应以空气率控制为主,压实度控制为辅,若空气率 V_a 达不到要求,即高液限黏土(或粉土)空气率 V_a 上限值为 8%,含砂高液限黏土(或粉土)空气率 V_a 上限为 13%,应通过降低填料的含水率、提高碾压吨位和压实度等措施降低空气率,以保证路堤具有足够的强度和水稳定性。由于高液限土天然含水率较高和土性的特殊性,在合理的性价比条件下高液限土(包括改良高液限土)一般只用于高等级公路的 93 区填筑,其原因之一是希望通过提高压实度等措施来降低空气率比较困难,而且在相同的压实度条件下其强度和水稳定性方面较一般填料差。

对于一般的填料,在一定的击实功和最优含水率下压实可以达到最佳压实效果,此时的空气率即

为最优空气率,具有惟一性。在最优空气率下,土体可将能排出的空气基本排出,到达了最佳压实效果,若此时继续压实会出现“过压”现象。因此,最优空气率是土体在压实中空气率变化的下限,计算公式为

$$V_{a_{opt}} = V_{a_{min}} = 100 - \rho_{d_{max}} \left(\frac{100}{G_s} + \omega_{opt} \right) \quad (3)$$

式中: $V_{a_{min}}$ 为最小空气率,数值上等于最优空气率 $V_{a_{opt}}$; $\rho_{d_{max}}$ 为填料的干密度; ω_{opt} 为填料的最优含水率。不同土体空气率下限是不同的,根据现场试验路和室内试验的试验结果,在控制填筑含水率的情况,高液限黏土(或粉土)的空气率下限取 4%;含砂高液限黏土(或粉土)的空气率下限取 6%。另外,不同的压实度要求其对应的空气率控制标准也不一样,表 1 中给出的高速公路修建中最常见的情况,即高液限土(包括改良高液限土)一般用于 93 区以下的路堤填筑。

4 双指标控制的可行性验证

为了验证高液限土路堤填筑双指标质量控制的可行性和必要性,本次进行了室内试验和现场试验路段试验。

4.1 室内试验

以高液限黏土为例,试验所用高液限土取自广梧高速公路 18 标取土场,取样深度为 4.5 m。土的液限为 68.9%,塑限为 33.0%,塑性指数为 36,小于 0.074 mm 的细颗粒含量为 84.2%,自由膨胀率为 32.0%,最优含水率为 19.0%,最大干密度为 1.70 g/cm³,土的相对密度为 2.7。

为了研究在不同压实度和空气率情况下试样的强度、刚度和水稳定性的变化情况,在室内对该类高液限土共进行了 10 组的试验,5 组为相同压实度、不同空气率,5 组为相同空气率、不同压实度,分别分析试样的强度、刚度和水稳定性变化情况。

高液限土制样的干密度为 1.58 g/cm³,前 5 组按压实度为 93%,空气率分别为 5%、6%、7%、8%、10%进行制样,后 5 组按空气率为 8%,压实度为 85%、88%、90%、93%、96%进行制样。制样过程中通过调整含水率、增加碾压压力等手段,以保证试样能达到压实度和空气率要求。每组分别按土工试验规范要求进行直剪试验(4 个样、上覆压力为 100、200、300、400 kPa)、压缩试验(3 个样)和干湿循环试验(4 个样)。试验结果汇总见表 2、3。

表 2 压实度 93%、不同空气率下的强度指标
Table 2 Strength index of high liquid limit soil under different values of V_a

空气率 /%	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩系数 /MPa ⁻¹	水稳定性 系数
5	61.0	25.9	5.3	0.96
6	57.6	23.7	5.6	0.94
7	54.2	21.6	5.8	0.93
8	49.5	20.8	6.2	0.92
10	47.7	19.2	6.5	0.73

表 3 空气率 8%、不同压实度下的强度指标
Table 3 Strength index of high liquid limit soil under different values of D_c

压实度 /%	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩系数 /MPa ⁻¹	水稳定性 系数
85	48.7	19.3	7.2	0.82
88	51.8	20.2	6.9	0.84
90	54.2	21.6	6.5	0.89
93	49.5	20.8	6.2	0.92
96	56.1	22.7	5.8	0.95

注：表中压缩系数、水稳定性系数是取各组试验数据的平均值。

从表 2、3 中的试验数据变化情况可知，（1）在压实度一定的情况下，随着空气率的增加试样的强度指标、压缩系数和水稳定性系数均有不同程度的下降，其中水稳定性系数下降最快，约 25%；（2）压缩系数增大了约 18%，强度指标下降了 18% 左右。在空气率一定的情况下，随着压实度的增加试样的强度指标、压缩系数和水稳定性系数均有提高，其中压缩系数减小了约 20%，水稳定性系数上升了约 16%。试验结果表明，提高压实度可以改善高液限土的强度指标和压缩系数，但对高液限土的水稳定性影响不大，而高液限土路堤的许多病害均与水稳定性有关，其原因是高液限土空气率高意味着后期路堤的含水率大，而且空气率越高含水率越大，土体的基质吸力越小，毛细水现象越弱，负孔隙水压力逐渐消失，毛细水压力引起的摩擦阻力也越小，内摩擦角减小，最终导致路堤易发生沉降变形。

本研究将干湿循环试验^[14-17]作为对高液限土路堤长期水稳定性能的评价试验。表 2、3 中的水稳定性系数是借鉴广东省高液限土路基修筑技术指南^[18]中 13.4.4 规定，其表达式为

$$p = q_1 / q_0 \quad (4)$$

即 4 次干湿循环后其强度 q_1 与初始强度 q_0 的比值。在试验室内，每组按相应的压实度和空气率制备 4 个样。首先，将试样置于通风处自然风干 1 d，然后放入水槽中浸泡 1 d，为一次干湿循环，分别测定了不同试样经过 1~5 次干湿循环后的高度和强度。

强度测试采用自制仪器，大小通过标定性试验确定，图 1、2 为压实度为 85%、空气率为 12% 试样的干湿循环试验结果。

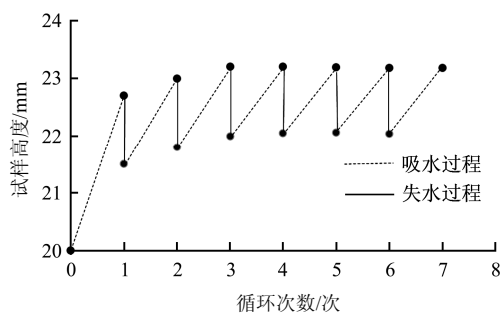


图 1 试样高度随干湿循环次数的变化
Fig.1 Variation of soil specimen height with different wetting and drying circles



图 2 干湿循环过程中试样表面变化
Fig.2 Variation of high liquid limit soil specimen surface after wetting and drying circles

分析试验数据可知，在第 1 次干湿循环过程中，

试样吸水时的高度变化要大于试样失水时的高度变化, 3 次干湿循环后高度变化趋于平稳, 根据图 1 的规律, 高液限土的干湿循环是个不可逆的过程^[19]。对照图 1、2 的试验结果, 第 1 次干湿循环时, 试样周围首先出现土粒和小块掉落, 然后逐渐向中间发展, 此过程试样高度变化最大, 强度开始衰减; 第 3 次干湿循环时, 结构变得松散, 表面土体开始剥落, 并由开始的细微裂隙逐渐发展, 此过程试样高度变化速率有所减缓, 强度衰减速度加快; 第 5 次干湿循环时, 边缘部位有不同程度的崩解和裂隙, 且裂隙发育和崩解速度较快, 此过程试样高度变化速率趋于 0, 但强度衰减速度仍再加快; 第 7 次干湿循环时, 边缘的裂缝已经相当明显, 并最终导致浸水后土体的崩解。试验结果说明, 在高液限土填筑中, 按照现有的单一压实度指标进行控制, 路堤的水稳定性不能得到保证, 即压实度 D_c 不能反映路堤遇水的这一特性。

4.2 试验路段试验

室内试验研究因受各方面因素限制, 有其局限性, 为了进一步论证压实度、空气率双指标控制方法的合理性, 在广-梧高速公路路堤填筑过程中进行了现场试验路段试验。具体工况为: 高液限黏土直接填筑路段 (试验路段 I)、生石灰改良高液限粉土填筑路段^[20] (试验路段 II)、生石灰改良高液限黏土填筑路段 (试验路段 III)、含砂高液限黏土直接填筑 (试验路段 IV) 以及掺石灰改良含砂高液限黏土填筑 (试验路段 V)。当各试验路段完成填筑碾压后, 沿路堤纵向每 100 m 不少于 3 点 (不足 100 m 取 3 点), 进行现场的压实度和空气率检测, 并在相应点取不少于 2 个试样进行水稳定性系数检测。

(1) 试验路段 I (高液限黏土直接填筑)

填料为高液限黏土, 其液限为 62.4%, 塑性指数为 29, 压缩系数为 0.47 MPa^{-1} , 细颗粒含量为 59.4%。按施工设计方案每层松铺厚度为 35 cm。22 t 振动压路机的碾压工艺为静压 1 遍→振 3 遍→静压 2 遍→振 2 遍→静压 3 遍, 若最后 2 遍静压所检测到的压实度差在 0.5% 以内即可停止, 否则继续静压。表 4 为试验路段 I 的压实度 D_c 、空气率 V_a 和水稳定性检测结果。

(2) 试验路段 II (生石灰改良高液限粉土填筑)

填料为高液限粉土, 其液限为 35.6%, 塑性指数为 40, 压缩系数为 0.45 MPa^{-1} , 细颗粒含量为 59.4%; 采用掺 5% 生石灰改良填筑。按施工设计方案每层松铺厚度为 30 cm。22 t 振动压路机的碾压工艺为静压 1 遍→振 2 遍→静压 1 遍→振 1 遍→静压

3 遍, 18 t 振动压路机的碾压工艺与直接填筑相同。表 5 为试验路段 II 的压实度 D_c 、空气率 V_a 和水稳定性检测结果。

表 4 试验路段 I 的检测结果

Table 4 Test results of indices from testing section I

压路机 /t	试验 点位	碾压遍数 /遍	压实度 /%	空气率 /%	水稳定性 系数
22	C1	6	86.8	12.6	0.53
		8	89.7	10.2	0.63
		11	93.1	7.7	0.92
	C2	6	85.5	11.2	0.57
		8	87.4	9.8	0.61
		11	91.8	7.6	0.87
	C3	6	88.4	13.6	0.62
		8	90.7	10.5	0.79
		11	93.2	8.4	0.85

表 5 试验路段 II 的检测结果

Table 5 Test results of indices from testing section II

压路机 /t	试验 点位	碾压遍数 /遍	压实度 /%	空气率 /%	水稳定性 系数
22	L1	8	93.2	7.3	0.92
	L2		92.4	7.6	0.91
	L3		93.5	6.8	0.93
18	L4	11	93.3	6.8	0.94
	L5		93.4	7.1	0.92
	L6		94.1	6.7	0.94

(3) 试验路段 III (生石灰改良高液限黏土填筑)

填料为高液限黏土, 其液限为 68.9%, 塑性指数 34, 压缩系数 0.52 MPa^{-1} , 细颗粒含量 60.1%; 采用掺 5% 生石灰改良填筑。施工设计方案和碾压工艺与生石灰改良高液限粉土填筑相同。表 6 为试验路段 III 的压实度 D_c 、空气率 V_a 和水稳定性检测结果。

表 6 试验路段 III 的检测结果

Table 6 Test results of indices from testing section III

压路机 /t	试验 点位	碾压遍数 /遍	压实度 /%	空气率 /%	水稳定性 系数
22	P1	8	93.3	8.3	0.89
	P2		94.1	6.9	0.94
	P3		93.5	7.5	0.93
	P4	11	93.3	7.8	0.91
18	P5		93.4	7.7	0.92
	P6		94.3	6.7	0.95

(4) 试验路段 IV (含砂高液限黏土直接填筑)

填料为含砂高液限黏土, 液限为 67.4%, 塑性指数为 36, 天然含水率为 29.5%, 最优含水率为 14.2%, 最大干密度为 1.91 g/cm^3 , 细颗粒含量为

67.4%, CBR 为 4.1%, 可以进行直接填筑。碾压机为 22 t 振动压路机, 每层松铺厚度取为 35 cm。试验路段 IV 的压实度 D_c 、空气率 V_a 和水稳定性检测结果见表 7。

表 7 试验路段 IV 的检测结果
Table 7 Test results of indices from testing section IV

压路机 /t	试验 点位	碾压遍数 /遍	压实度 /%	空气率 /%	水稳定性 系数
22	D1	6	83.5	11.2	0.55
		8	87.4	7.7	0.61
		11	89.3	6.2	0.69
	D2	6	87.3	9.7	0.64
		8	90.3	7.6	0.83
		11	92.1	6.4	0.87
	D3	6	87.9	12.1	0.65
		8	90.1	9.9	0.82
		11	93.1	7.4	0.91

(5) 试验路段 V (生石灰改良含砂高液限黏土填筑)

填料为含砂高液限黏土, 液限为 60.3%, 塑性指数为 28, 细颗粒含量为 53.0%, 素土的最大干密度为 1.84 g/cm^3 , 最佳含水率为 14.6%, 压实度为 93.4% 时, CBR 为 2.8%, 不能直接填筑, 需要进行改良处理。采用掺 5% 生石灰改良填筑, 混合料中粒径大于 0.074 的颗粒含量占 40%, 可以起到承载骨架的作用, 易于达到规定的压实标准。试验路段 V 的压实度 D_c 、空气率 V_a 和水稳定性检测结果见表 8。

表 8 试验路段 V 的检测结果
Table 8 Test results of indices from testing section V

压路机 /t	试验 点位	碾压遍数 /遍	压实度 /%	空气率 /%	水稳定性 系数
18	N1	4	89	16.8	0.62
	N2	5	90	15.9	0.69
	N3	6	92	12.0	0.78
	N4	7	93	13.1	0.89
	N5	8	93	8.3	0.95
	N6	9	94	9.3	0.94
	N7	10	94	10.2	0.92

按广东省高液限土路基修筑技术指南^[18]中 13.4.4 规定, 水稳定性系数 p 不宜小于 0.9。从 5 个试验路段的现场试验结果可知, (1) 当压实度小于 93%、空气率不满足控制标准时, 水稳定性系数均小于 0.9, 如高液限黏土直接填筑, 当碾压遍数小于 11 遍、压实度和空气率均不满足要求时, 水稳定性

系数均小于 0.9; (2) 当压实度大于 93%、空气率不满足控制标准时, 水稳定性系数也小于 0.9, 如高液限黏土直接填筑, 当碾压遍数达到 11 遍时 C3 点压实度为 93.2%、空气率为 8.4%, 水稳定性系数为 0.85; 高液限黏土改良填筑; 当碾压遍数为 8 遍时, P1 点压实度为 93.3%、空气率为 8.3%, 水稳定性系数为 0.89; (3) 当压实度小于 93%, 空气率满足控制标准时, 对于高液限土直接填筑, 水稳定性系数一般小于 0.9。对于高液限土改良填筑, 水稳定性系数一般大于 0.9, 如高液限黏土直接填筑, 当碾压遍数达到 11 遍时, C2 点压实度为 91.8%, 空气率为 7.6%, 水稳定性系数为 0.87; 高液限粉土改良填筑, 当碾压遍数为 8 遍时, L2 点压实度为 92.4%、空气率为 7.6%, 水稳定性系数为 0.91; (4) 当压实度大于 93%, 空气率满足控制标准时, 水稳定性系数均大于 0.9, 如高液限黏土直接填筑, 当碾压遍数达到 11 遍时, C1 点压实度为 93.1%、空气率为 7.7%, 水稳定性系数为 0.92, 高液限粉土和高液限黏土改良填筑, 除 P1 点外, 其他各试验点水稳定性系数均大于 0.9。

需要指出, 本文给出的结论适用于高液限土作为路堤填料的质量控制, 对于其他不良土是否适用, 还有待论证。尽管除本文给出的试验数据外, 笔者还获取了许多相关的试验数据, 并支撑着本文的结论, 但作为质量控制标准而言, 仍需不断地完善, 完善的质量检测手段和控制标准, 有利于高液限土的充分利用。

5 结 论

(1) 高液限土作为路堤填料用于填筑时, 采用压实度、空气率双指标控制, 不仅反映路堤干密度情况, 而且反映路堤含水率大小和水稳定性性能。

(2) 室内试验和现场试验的数据均论证了采用压实度、空气率双指标控制的可行性和可靠性, 可以有效地控制高液限土路堤填筑的质量, 保证路堤的水稳定性。

(3) 当压实度控制指标 $D_c \geq 93\%$ 时, 高液限黏土和粉土空气率控制标准为 $4\% \leq V_a \leq 8\%$, 含砂高液限黏土和粉土空气率控制标准为 $6\% \leq V_a \leq 13\%$ 。

(4) 当压实度和空气率双指标均满足要求时, 水稳定性系数均大于 0.9, 当压实度和空气率双指标均不满足要求时, 水稳定性系数均小于 0.9。当压实度满足要求、空气率不满足要求时, 水稳定性系数均小于 0.9。当压实度不满足要求、空气率满足要求

时, 采用高液限土直接填筑, 水稳定性系数一般小于 0.9。采用高液限土改良填筑, 水稳定性系数一般大于 0.9。

参考文献

- [1] 中交第二公路勘察设计院. JTG D30-2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute. JTG D30-2004 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 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, 55(4): 436—443.
LIU Xin, HONG Bao-ning. Engineering characteristics of high liquid limit soil and design project of filling subgrades with it[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2011, 55(4): 436—443.
- [3] 吴立坚, 钟发林, 吴昌兴, 等. 高液限土的路用特性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 24(2): 193—195.
WU Li-jian, ZHONG Fa-lin, WU Chang-xing, et al. Study on road made by high liquid limit soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 24(2): 193—195.
- [4] 吴立坚, 郑甲佳, 邓捷. 高液限土路基的沉降变形规律[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 351—355.
WU Li-jian, ZHENG Jia-jia, DENG Jie, et al. Settlement law of high liquid limit soil embankment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.2): 351—355.
- [5] 李方华. 高液限土填料改良的最佳掺砂砾石比试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 785—788.
LI Fang-hua. Experimental study of optimal proportion of gravel adopted to improve the properties of high liquid limit soil subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 785—788.
- [6] 孙万青. 高速公路压实标准问题探讨[J]. 科学之友(B 版), 2008, 29(7): 40—41.
SUN Wan-qing. Discussion for compaction criterion of highway[J]. **Friend of Science(B)**, 2008, 29(7): 40—41.
- [7] 毛洪录, 曹卫东, 商庆森, 等. 含砂低液限粉土路基压实标准的探讨[J]. 山东大学学报(工学版), 2003, (5): 593—596.
MAO Hong-lu, CAO Wei-dong, SHANG Qing-sen, et al. Study on compaction standard of subgrade with bearing sand silt of low liquid limit[J]. **Journal of Shandong University(Engineering Science)**, 2003, 33(5): 593—596.
- [8] 王钊, 胡海英, 邹维列. 路堤压实的影响因素和压实度要求[J]. 公路, 2004, 49(8): 91—96.
WANG Zhao, HU Hai-ying, ZOU Wei-lie. Factors influencing road embankment compaction and requirements of compaction degree[J]. **Highway**, 2004, 49(8): 91—96.
- [9] 交通部公路科学研究所. JTG F10-2006 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Ministry of Communications Highway Research Institute. JTG F10-2006 Specifications for Highway subgrades construction[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [10] 交通部公路科学研究所. JTG F80/1-2004 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Communications Highway Research Institute. JTG F801-2004 Quality inspection and evaluation standards for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [11] 孙淑勤, 李雯, 张佩旭. 中、日公路土质路基压实控制方法比较[J]. 国外公路, 2001, 21(2): 37—39.
SUN Shu-qin, LI Wen, ZHANG Pei-xu. Comparison for soil subgrade compaction methods of China and Japan highway[J]. **Journal of Foreign Highway**, 2001, 21(2): 37—39.
- [12] 兰青, 曹亮宏, 洪宝宁, 等. 高液限土路堤填筑施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
LAN Qing, CAO Liang-hong, HONG Bao-ning, et al. Construction technique for high liquid limit soil embankment filling[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [13] Great Britain, Department of Transport, GBW Office. Specification for road and bridge works(fifth edition)[M]. London: [s.n.], 1976.
- [14] GUNEY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J]. **Building and Environment**, 2007, 42(2): 681—688.
- [15] ALLAM M M, SRIDHARAN A. Effect of wetting and drying on shear strength[J]. **Journal of the Geotechnical**

Engineering Division, 1981, 107(4): 421—438.

- [16] AL-HOMOUD A S, BASMA A A, HUSEIN M A I, et al. Cyclic swelling behavior of clays[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 121(7): 562—565.
- [17] 程涛, 洪宝宁, 程江涛. 干湿循环下高液限土力学特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(6): 82—86.
- CHENG Tao, HONG Bao-ning, CHENG Jiang-tao. Mechanical properties of high liquid limit soil under different drying and wetting cycles[J]. **Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)**, 2013, 45(6): 82—86.
- [18] 广东省交通运输厅. GDJTG/T E01-2014 广东省高液限土路基修筑技术指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- Transport Department of Guangdong Province. GDJTG/T E01-2014 Technical guide for construction of high liquid limit soil subgrades in guangdong province[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [19] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41—46.
- ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 41—46.
- [20] 曾静, 邓志斌, 兰霞, 等. 竹城公路高液限土与红黏土路用性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 89—92.
- ZENG Jing, DENG Zhi-bin, LAN Xia, et al. Experimental study on properties of high liquid limit soil and red clay of Zhucheng highway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 89—88.
-
- 上接第 232 页
- [9] 戴国亮, 龚维明, 刘欣良. 自平衡试桩法桩土荷载传递机制原位测试[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1065—1069.
- DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, LIU Xin-liang. Experimental study of pile-soil load transfer behavior of self-balanced pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 1065—1069.
- [10] 聂玉东, 周儒夏. 富绥松花江大桥桩基静载对比试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1327—1332.
- LIE Yu-dong, ZHOU Ru-xia. Static loading comparative test for pile foundation of Fujin-Suibin Songhua River Bridge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1327—1332.
- [11] 戴国亮, 龚维明. 压桩和托桩摩阻力的原位试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(2): 58—60.
- DAI Guo-liang, GONG Wei-ming. Field test of friction resistance and negative skin friction of cast-in-situ piles[J]. **Building Structure**, 2009, 39(2): 58—60.
- [12] 史佩栋, 顾晓鲁. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 59—60.
- SHI Pei-dong, GU Xiao-lu. Pile and pile foundation handbook[M]. Beijing: China Communication Press, 2012: 59—60.
- [13] 穆保岗, 龚维明, 高芬芬. 自平衡法与锚桩法原位对比试验研究[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(3): 41—45.
- MU Bao-gang, GONG Wei-ming, GAO Fen-fen. Research on the in 2 situ tests between the self-balanced method and the anchor pile method[J]. **Journal of Transport Science and Engineering**, 2009, 25(3): 41—45.
- [14] 穆保岗, 肖强, 龚维明. 自平衡法和锚桩法在高铁工程中的对比试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版) 2012, 13(4): 414—418.
- MU Bao-gang, XIAO Qiang, GONG Wei-ming. Research on in-situ tests between self-balanced method and anchor pile method in high-speed railway[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology Natural Science Edition**, 2012, 13(4): 414—418.