

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.04.015

高液限土工程特性与路堤填筑方案

刘 鑫^{1,2}, 洪宝宁^{1,2}

(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.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 :通过室内试验研究了高液限土基本特性,并结合现场试验路填筑试验,研究了不同类别高液限土的直接填筑性能和最优改良方案.结果表明:高液限土黏土和含砂高液限黏土可用于路堤直接填筑,填筑压实度可按 88% 标准控制,填筑厚度不宜大于 8 m,路基整体填筑高度不宜大于 12 m,宜按规范用包盖法整体填筑.高液限粉土及含砂高液限粉土因 CBR 值(California bearing ratio)达不到要求,不宜直接填筑,应采用改良方法处理后填筑.高液限粉土宜掺生石灰改良,最优掺入比为 5%,含砂高液限粉土宜掺砂改良,最优掺入比为 25%.各标段试验路分析结果验证了高液限土各填筑方案的正确性.

关键词 :高液限土;工程特性;直接填筑;改良填筑;施工工艺

中图分类号 :TU449 **文献标志码 :**A **文章编号 :**1000-1980(2011)04-0436-08

高液限土是一种细粒土,具有 2 种分类特性 (a)小于 0.074 mm 的颗粒质量分数大于 50% (b)液限 50% 以上. JTJ F10—2006《公路路基施工技术规范》^[1]规定:液限大于 50%、塑性指数大于 26 的土以及含水量超过规定的土,不得直接作为路堤填料.需要使用时,必须采取技术措施进行处理.经检验满足设计要求后方可使用.为满足上述规范要求,一些学者^[2-4]对高液限土的改良利用问题进行了研究.这些研究为高液限土的利用提供了良好的基础,避免了弃土带来的损失,但这些改良方案费用昂贵,给工程的开展带来较大困难.如果高液限土直接填筑或以最低代价改良后填筑能达到良好的路用要求,势必会降低工程造价并提高工程质量.本文以广梧高速公路河口至平台段为研究对象,从高液限土基本特性出发,寻求其最佳路堤填筑方案,并通过各标段试验路分析来研究路堤填筑施工工艺.

1 高液限土性质

1.1 高液限土室内试验结果

广梧高速公路沿线高液限土分布较广,不同区域的土具有不同的性质.笔者通过现场钻孔选取 4 个有代表性的土样进行了室内试验,试验结果见表 1 和表 2.

表 1 高液限土常规试验结果

Table 1 Conventional test results of high liquid limit soil

土样编号	取土位置	天然含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	相对 密度 d	液限/ %	塑限/ %	孔隙比 e	压缩系数 a_v/MPa^{-1}
A	K121 + 460	33.2	1.75	20.2	1.31	2.72	70.1	34.9	1.07	0.54
B	K133 + 140	30.4	1.82	15.3	1.40	2.69	62.0	28.0	0.93	0.41
C	ZK10 + 120	34.1	1.78	21.6	1.33	2.70	65.4	39.5	1.03	0.58
D	K130 + 180	32.6	1.87	14.5	1.41	2.68	51.2	31.6	0.90	0.39

根据我国现行高液限土的分类标准^[5-6]以及表 1、表 2 结果,将上述土样分为高液限黏土(A)、含砂高液限黏土(B)、高液限粉土(C)和含砂高液限粉土(D) 4 个类别.针对分类结果,首先研究适宜直接填筑的高液限土.

表 2 高液限土筛分试验结果

Table 2 Sieve analysis results of high liquid limit soil

土样编号	质量/g						砾粒质量 分数/%	砂粒质量 分数/%	细粒质量 分数/%
	≥ 5 mm 粒径	< 5 ~ 2 mm 粒径	< 2 ~ 0.5 mm 粒径	< 0.5 ~ 0.25 mm 粒径	< 0.25 ~ 0.074 mm 粒径	< 0.074 mm 粒径			
A	4.2	9.0	22.6	31.4	90.6	842.2	1.3	14.5	84.2
B	19.3	100.2	88.5	50.7	117.9	623.4	12.0	25.7	62.3
C	0.2	8.4	12.2	10.8	71.0	897.0	0.9	9.4	89.7
D	17.3	128.1	119.7	46.7	138.3	549.7	14.5	30.5	55.0

由表 1 可以看出 ,该地区高液限土的天然含水率普遍比最优含水率高 10% 以上 ,通过晾晒的方法很难在短时间内将高液限土的天然含水率降到最优含水率 ± 2% 的区间内 ,在这样的含水率下路基压实度也难以达到设计要求 .如果将高液限土直接用于路基填筑 ,势必要降低压实度控制标准 ,而降低多少幅度 ,降低压实度后的路基承载力、沉降值及稳定性是否满足要求 ,成为亟待解决的问题.

1.2 降低压实标准后高液限土 CBR 值试验分析

CBR(California bearing ratio)是美国加利福尼亚州提出的一种评定基层材料承载能力的指标 ,本文选择标准试件在贯入量为 2.5 mm 时所施加的试验荷载与标准碎石材料在相同贯入量时所施加的荷载之比值作为 CBR 值 ,其值是填料能否用作路基填料的重要评判指标之一 .若要降低高液限土压实度填筑 ,必须先测定降低压实度时土的 CBR 值 .因此 ,对前文所取试样进行了试验 ,结果见表 3.

从表 3 可以看出 ,压实度从 93% 降为 88% 时 ,土样 A 及 B 的 CBR 值大于或等于 3% 的个数分别是 15 和 17 ,而小于 3% 的个数仅为 3 和 4 ,可见高液限黏土和含砂高液限黏土的 CBR 值在降低 5% 压实度的情况下大部分仍然符合大于或等于 3% 的标准 .然而 ,高液限粉土及含砂高液限粉土压实度降低后(93% 降为 88%)CBR 值几乎均小于 3% ,即使在不降低压实标准的情况下 ,CBR 值也很难达到大于或等于 3% 的要求 .从现场试验路各种土 CBR 值统计分析也可看出 ,只有高液限黏土和含砂高液限黏土才有可能降低压实标准进行直接填筑.

2 高液限土直接填筑

降低压实度填筑必须要了解压实度降低后路堤的自密沉降量情况 ,本文通过室内试验和理论计算对不同压实度下路堤自密沉降量进行分析.

2.1 计算思路

- a. 对高液限黏土进行室内固结试验以确定压缩系数^[7] .因高液限粉土及含砂高液限粉土降低压实度填筑 CBR 值达不到要求 ,而含砂高液限黏土的填筑性能比高液限黏土好 ,当高液限黏土符合填筑要求时 ,含砂高液限黏土也符合 ,所以本文以高液限黏土作为试验土样 ,分别模拟 88% ,90% 和 93% 的现场压实度制样.
- b. 进行固结试验 ,根据试验结果计算 3 种压实度所对应的压缩系数并画出 $e \sim p$ 压缩曲线.
- c. 采用分层总和法和积分计算法计算不同工况条件和不同压实度情况下的路堤填土自密沉降量.

2.2 计算方法

- a. 分层总和法 .根据路堤可能产生压缩的土层 ,按土的特性和应力状态的变化分为若干层 .设各土层厚度分别为 $h_1 , h_2 , h_3 , \dots , h_n$,按单向压缩量公式计算每层土的压缩量 $s_1 , s_2 , s_3 , \dots , s_n$,然后进行累加 .累加量即为路堤的最终自密沉降量 s (或称总的路堤自密沉降量)^[8].

b. 积分法. 将路堤降低压实度的高液限土看成整体, 计算基本公式为 $s = \frac{a_v}{1 + e_1} pH$. 根据条形基底竖向均布荷载作用模型, 路面宽 24.5 m, 路堤两侧坡比为 1:1.5. 计算压缩层上部荷载等效为 $p_{\text{等效}} = 25 \text{ kPa} + 20 \text{ kPa} + 20 \text{ kN/m}^3 \cdot H_1$ (车辆荷载 + 1 m 路面结构层荷载 + 上层路堤荷载), 在计算压缩层内沿深度 z 取微小断面 dz , 根据力的平衡原理, 微断面上部外荷载为 $p_n = \frac{24.5}{24.5 + 3z} p_{\text{等效}}$, 微断面上部土体自重荷载为 $\sigma = \rho gz$. 微断面所受总荷载为 $p = p_n + \sigma$. 最终路堤自密沉降量为

$$s = \int_0^h \frac{a_v}{1 + e_1} p dz = \frac{a_v}{1 + e_1} \int_0^h (p_n + \sigma) dz = \frac{a_v}{1 + e_1} \left[\frac{49}{6} p_{\text{等效}} (\ln(3h + 24.5) - \ln 24.5) + \frac{1}{2} \rho gh^2 \right] \quad (1)$$

式中: e_1 ——土粒初始孔隙比; a_v ——压缩系数, MPa^{-1} ; ρ ——土体密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, m/s^2 ; h ——计算压缩层厚度, m .

2.3 计算工况

根据现场实际情况, 本次计算将路堤填筑高度分为 12.0, 10.0, 8.0, 6.0 m 4 种情况, 具体如表 4 所示. 为便于计算, 将压缩层上部荷载等效为 25 kPa 车辆荷载、20 kPa 路面结构层荷载和上层土层的荷载. 其中, 上层土层厚度 H_1 为一般性土层厚度, 计算压缩层厚度 H_2 为高液限土土层厚度.

2.4 试验及计算结果

以高液限黏土 A 进行试验, 其最优含水率为 20.2%, 最大干密度为 1.65 g/cm^3 , 土粒相对密度为 2.72, 其压缩试验结果见表 5. 因为下路堤填筑压实度大于或等于 93% 即可, 所以 96% 压实度下固结试验结果仅供对比参考. 沉降计算结果见表 6. 从表 6 可知, 在各种工况条件下, 压实度从 93% 降为 90% 所引起的沉降量变化均较大, 而压实度从 90% 降为 88% 所引起的沉降量变化均较小.

表 5 室内试验结果

Table 5 Laboratory test results of high liquid limit soil

压实度/%	压缩系数 a_v/MPa^{-1}
88	0.391
90	0.358
93	0.279
96	0.182

本次计算最大填土高度为 12 m, 高液限土填筑压缩层最大厚度 10 m, 未考虑路床、上路堤非高液限填土的压缩量. 从计算结

果可知, 工况 1 情况下 88% 压实度时填筑沉降量达 29.21 cm, 考虑上层填土压缩量, 沉降量将超过 30 cm, 90% 压实度时也达 27.68 cm. 因此, 从安全角度及不同高液限黏土压缩性质差异考虑, 最大填筑高度拟采用表 6 工况 2 情况下 88% 压实度时的路基填筑高度, 即高液限黏土的填筑厚度应控制在 8 m 以内, 且此时路基填筑总高度不应超过 12 m. 按照 JTJ 017—96《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》^[9]中关于软土地基一般路段容许工后沉降小于或等于 0.30 m 的规定, 此时压实度降为 88% 时的沉降满足要求. 经稳定性验算, 稳定系数均大于 1.35, 稳定性也满足要求.

通过上述分析可知, 高液限土黏土和含砂高液限黏土可以用于路堤直接填筑, 填筑压实度可以按 88%

表 4 沉降计算工况

Table 4 Calculation conditions of settlement

工况	路堤填土高度 H/m	上层土层厚度 H_1/m	计算压缩层厚度 H_2/m	车辆及面层荷载/ kPa	上层土层等效荷载/ kPa	总荷载/ kPa
1	12	2	10	45	40	85
2	12	4	8	45	80	125
3	12	6	6	45	120	165
4	12	8	4	45	160	205
5	10	2	8	45	40	85
6	10	4	6	45	80	125
7	10	6	4	45	120	165
8	8	2	6	45	40	85
9	8	4	4	45	80	125
10	6	2	4	45	40	85

表 6 土层自密沉降量计算结果

Table 6 Calculation results of self settlement of soil layer

工况	分层法计算沉降量/cm			积分法计算沉降量/cm		
	88% 压实度	90% 压实度	93% 压实度	88% 压实度	90% 压实度	93% 压实度
1	27.60	26.08	16.32	29.21	27.68	22.77
2	24.92	23.72	15.15	25.70	24.27	19.85
3	20.83	19.93	12.80	21.63	20.36	16.57
4	15.31	14.72	9.49	16.53	15.52	12.58
5	19.89	18.58	11.61	21.13	20.00	16.41
6	17.05	16.07	9.95	17.95	16.91	13.80
7	12.79	12.15	7.63	13.86	13.02	10.57
8	13.28	12.22	7.29	14.26	13.47	11.02
9	10.27	9.57	5.86	11.20	10.53	8.56
10	7.76	7.00	4.09	8.53	8.03	6.55

标准控制 ,高液限土填筑厚度不宜大于 8 m ,路基整体填筑高度不宜大于 12 m ,并按 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》^[1]用包盖法整体填筑 ,高液限粉土及含砂高液限粉土因 CBR 值达不到要求 ,不宜直接填筑 ,应采用改良方法处理后填筑 .

3 高液限土改良填筑

3.1 高液限粉土改良

3.1.1 改良材料的选定

从改良材料角度而言 ,国内运用较多的是生石灰、熟石灰、砂和水泥等^[10-11] ,改良材料的选择离不开改良后土体含水率和 CBR 值等指标的控制 .因此 ,首先进行相关分析 ,然后根据分析结果选定改良材料 .

a. 各改良材料对高液限粉土含水率的影响 .高液限土填筑遇到的最大困难就是填筑含水量的控制 ,广梧沿线高液限土天然含水率普遍在 28%~35% 之间 ,比最优含水率高 10% 以上 ,因此改良的一个重点就是含水率控制 .各改良材料掺料率与含水率降低值的关系见图 1 .由图 1 可知 ,从强度和稳定性上考虑掺料率大致为 5% 生石灰、10% 熟石灰、20% 水泥、20% 砂时含水率降低值相当 ,所以在同等掺量情况下生石灰改良降低含水率值效果最好 .

b. 各改良材料对高液限粉土 CBR 值的影响 .CBR 值满足要求是土料用于路基填筑的必要条件 ,因此必须对改良土进行 CBR 值试验 ,进而分析各改良材料的优劣 .因为拟将改良土填筑于下路堤层 ,而下路堤压实度最小值应达到 93% ,压实度越大 ,CBR 值也越大 ,所以室内试验中 CBR 值为土体在 93% 压实度下所得 .各掺料改良土 CBR 值试验结果见图 2 .从图 2 可知 ,各改良材料在试验所给最低掺量下都能达到 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》^[1]对 CBR 值的要求 .其中生石灰、熟石灰改良土 CBR 值增幅较大 ,砂改良土 CBR 值增幅最小 ,而水泥改良土当掺量大于 2% 时 CBR 值增幅较大 .

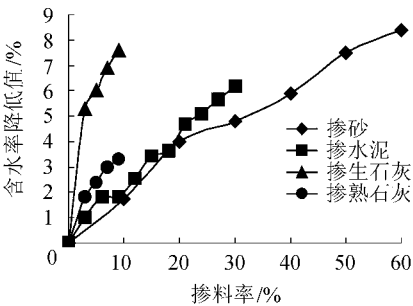


图 1 各改良材料掺料率与含水率降低值的关系

Fig. 1 Relationship between mixing ratio and reduction of water content of each improved material

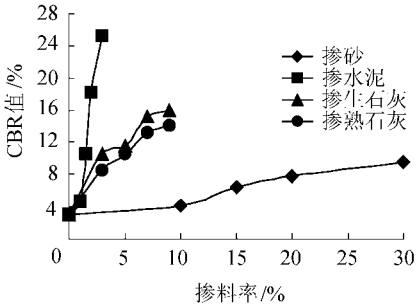


图 2 各掺料改良土 CBR 值试验结果

Fig. 2 CBR test results of each improved soil

c. 各改良材料对高液限粉土击实试验的影响 .降低填筑土的天然含水率是改良的一个重要方面 ,但是改良对含水率的最终影响是尽量降低压实含水率差 ,进行击实试验可以分析哪种改良材料对降低压实含水率差效果最好 .各掺料改良土击实试验结果见表 7 .从表 7 可知 :砂改良土和水泥改良土的最优含水率与素土相比都有不同程度的降低 ,这对于高含水率的高液限土填筑是不利的 ;生石灰改良土和熟石灰改良土最优含水率比素土最优含水率大 ,这对于高含水率的高液限土改良是有利的 ,而生石灰改良对含水率降低的影响又较熟石灰改良要好 ,因此生石灰改良能大幅度降低压实含水率差 ,对施工填筑非常有利 .

表 7 各掺料改良土击实试验结果

Table 7 Compaction test results of each improved soil

掺料	掺料比/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	掺料	掺料比/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	掺料	掺料比/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	掺料	掺料比/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
生石灰	0	21.6	1.47	熟石灰	0	21.6	1.47	砂	0	21.6	1.47	水泥	0	21.6	1.47
	3	22.3	1.46		3	22.0	1.45		10	19.4	1.53		1	20.3	1.50
	5	22.9	1.45		5	22.2	1.44		15	18.2	1.56		1.5	19.9	1.52
	7	23.2	1.45		7	22.5	1.43		20	17.5	1.59		2	19.2	1.55
	9	23.8	1.43		9	22.6	1.41		30	16.3	1.64		3	18.3	1.61

d. 各改良材料对高液限粉土界限含水率的影响.改良材料对土料液塑限、塑性指数的影响是判断改良材料改良效果的重要依据,因此应该对各改良土进行液塑限试验分析.各掺料改良土液塑限试验结果见表 8.从表 8 可知,砂土改良效果最好,其次是水泥,再次为生石灰,熟石灰改良效果最差.

表 8 各掺料改良土液塑限试验结果

Table 8 Liquid-plastic limit test results of each improved soil

掺料	掺料比/ %	液限/ %	塑限/ %	掺料	掺料比/ %	液限/ %	塑限/ %	掺料	掺料比/ %	液限/ %	塑限/ %	掺料	掺料比/ %	液限/ %	塑限/ %
生石灰	0	70.1	34.9	熟石灰	0	70.1	34.9	砂	0	70.1	34.9	水泥	0	70.1	34.9
	3	64.7	36.3		3	67.0	36.0		10	64.6	35.4		1	65.2	35.5
	5	62.1	37.1		5	65.3	36.7		15	60.2	36.4		1.5	63.0	37.3
	7	61.7	38.9		7	64.0	37.6		20	57.6	37.1		2	60.0	37.1
	9	60.8	40.1		9	63.1	39.6		30	53.8	38.1		3	57.7	38.2

通过上述分析可知,生石灰相比其他材料能够更好地减小压实含水率差,在改良效果差别不大的情况下,生石灰是高液限粉土改良材料的理想选择.

3.1.2 生石灰改良土掺灰率的确定

通过改良材料选定阶段各试验的分析,最终选择生石灰作为改良材料.为确定生石灰改良土的掺灰率,通过不同掺灰率下石灰土压缩系数、无侧限抗压强度和压实含水率差的变化进行研究.

生石灰改良土物理力学性质见表 9.由表 9 可见:压缩系数随掺灰率的增大而减小;掺生石灰改良能够大幅度提高土体无侧限抗压强度,掺灰率小于 5% 时幅度提升较大,大于 5% 时强度也有小幅提高;掺生石灰后压实含水率差随掺入比的增加不断减小,当掺灰率大于 5% 时,压实含水率差小于 5.2%,适宜路堤填筑.

表 9 生石灰改良土物理力学性质

Table 9 Physical-mechanical properties of soil improved with quicklime

掺灰率/ %	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	7 d 无侧限抗压 强度/MPa	28 d 无侧限 抗压强度/MPa	掺灰后土料 含水率/%	最优含水率/%	压实含水率差/%
0	0.54	0.08	0.08	34.1	21.6	12.5
3	0.49	0.41	0.72	28.8	22.3	6.5
5	0.44	0.73	0.95	28.1	22.9	5.2
7	0.43	0.87	1.14	27.2	23.2	4.0
9	0.41	0.98	1.25	26.5	23.8	2.7

因此,掺灰率为 5% 时,生石灰土塑性指数降为 25,压缩系数降为 0.44 MPa^{-1} ,符合填筑土的要求,从经济成本考虑,本文将最优掺灰率定为 5%.

3.2 含砂高液限粉土改良

由于含砂高液限粉土在粒径组成上有其特殊性,若对含砂高液限粉土掺入 25% 以上的砂则可以从根本上改变含砂高液限粉土的路用性能,即将含砂高液限粉土改良成粗粒土,而含水率大小对粗粒土的填筑影响远比高液限土小.因此,对于含砂高液限粉土,若经济条件允许,则可以用掺砂改良代替掺生石灰改良.

由表 10 可见,掺砂率在 25% ~ 30% 之间时,改良费用小于掺 3% 生石灰改良费用.由于粗粒土填筑对含水率的要求较低,大部分粗粒土经过短时间晾晒可以进行直接填筑,且粗粒土 CBR 值符合 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》^[1] 要求,所以从改良技术可行性来看掺砂改良也是合理的.因此,对于不能直接填筑的含砂高液限粉土采用掺 25% 砂方案在技术上和经济上都是可行的.

表 10 掺砂改良与掺生石灰改良经济适用性比较

Table 10 Comparison between economical applicability of soils improved with sand and quicklime

方案	3% 生石灰	5% 生石灰	25% 砂	30% 砂
单价/(元·m ⁻³)	29.74	45.35	24.68	30.82

注:单价为广东省郁南县 2009 年的单价.

4 试验路高液限土填筑分析

4.1 高液限黏土直接填筑试验路分析

广梧高速公路 LK132+445 ~ LK132+458 试验路土料主要物理力学性质指标见表 11.按施工设计方案,每层松铺厚度取为 35 cm;压路机吨位为 22 t;碾压工艺为静压 1 遍→振 3 遍→静压 2 遍→振 2 遍→静压 3 遍,

若未碾压至预定压实度则最后 2 遍静压所检测压实度差需在 0.5% 以内 ,否则继续静压 ,含水率控制采用晾晒法 ,按压实含水率差填筑区间晾晒至含水率满足填筑要求为止 .

表 11 试验路高液限黏土物理力学性质指标

Table 11 Physical-mechanical indexes of high liquid limit soil of test road												
天然含水率/%	细粒含量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/ (g · cm ⁻³)	天然稠度	饱和度/ %	空气率/ %	CBR 值/ %	压缩系数/ MPa ⁻¹	最大含水率差/%
31.5	82.1	68.9	34.6	34	19.8	1.67	1.05	91	4.4	4.2	0.52	6.3

最终的压实度检测结果见表 12^[12-14] .由表 12 可知 ,通过晾晒法将含水率控制在 $\omega - \omega_{op} \leq 6\%$ 后填筑 ,压实度均已大于 86.5% ,当碾压至 11 遍时压实度均达到了 90% ,填筑效果较好 .

4.2 含砂高液限黏土直接填筑试验路分析

RK132 + 462 ~ RK132 + 546 试验路土料主要物理力学性质指标见表 13. 按施工设计方案 ,每层松铺厚度取为 35 cm ;压路机吨位为 18 t ,碾压工艺为静压 1 遍→小振 2 遍→大振 2 遍→静压 1 遍→检测压实度→大振 2 遍→静压 1 遍→检测压实度→大振 2 遍→静压 1 遍→检测压实度 ;含水率控制采用晾晒法 ,按填筑区间压实含水率差晾晒至含水率满足填筑要求为止 .

表 13 试验路含砂高液限黏土物理力学性质指标

Table 13 Physical-mechanical indexes of sand-carrying high liquid limit soil of test road									
天然含水率/%	细粒含量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	CBR 值/%	90% 压实度最大含水率差/%	93% 压实度最大含水率差/%
29.5	67.4	67.4	31.2	36	14.2	1.91	4.1	5.7	3.8

最终压实度检测结果见表 14. 从表 14 可以看出 ,碾压时土的含水率在 17.2% ~ 19.1% 之间 ,压实含水率差在 3.0% ~ 4.9% 之间 ,含水率控制较好 , 18t 振动压路机碾压到 12 遍时 2 个检测点的压实度分别为 91.9% 和 93.1% ,压实含水率差分别为 4.9% 和 4.3% .碾压结果表明 ,含砂高液限黏土控制好碾压含水率差的条件下 ($\omega - \omega_{op} \leq 6\%$) 其压实度可以达到设计要求(90%) ,部分点可以达到 93% .

4.3 生石灰改良高液限粉土试验路填筑分析

LK132 + 470 ~ LK132 + 520 试验路填筑前 ,为降低改良高液限粉土含水率 ,进行了生石灰焖料和晾晒 ,并以晾晒后的土料作为试验路填料 .石灰土主要物理力学性质指标见表 15(闷料 3 d 后测量)^[15] .碾压时沿路纵向碾压 ,远离中央分隔带一侧用 22 t 振动压路机碾压 ,工序为静压 1 遍→振 3 遍→静压 1 遍→检测压实度→静压 3 遍→检测压实度 ,共碾压 8 遍 ,靠近中央分隔带一侧用 18 t 振动压路机碾压 ,工序为静压 1 遍→小振 2 遍→检测压实度→小振 1 遍→检测压实度→小振 1 遍→检测压实度→静压 3 遍→检测压实度→静压 3 遍→检测压实度 ,共碾压 11 遍 .

表 15 5% 生石灰改良高液限粉土主要物理力学性质指标

Table 15 Physical-mechanical indexes of high liquid limit silt mixed with 5% quicklime								
天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	CBR 值/%	最优空气率/%	93% 压实度最大含水率差/%
28.5	59.2	34.8	24	22.0	1.61	13.3	4.5	4.5

表 12 试验路压实度检测结果 1

Table 12 Results of degree of compaction of high liquid limit clay					
碾压 遍数	桩号	含水率/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	压实度/ %	压实 含水率差 /%
6	LK132 + 445	25.6	1.45	86.8	5.8
	LK132 + 450	25.2	1.46	87.3	5.4
	LK132 + 458	24.4	1.44	86.5	4.6
8	LK132 + 449	24.5	1.51	90.3	4.7
	LK132 + 456	24.7	1.50	89.7	4.9
11	LK132 + 445	24.3	1.51	90.6	4.5
	LK132 + 450	24.1	1.54	92.1	4.3
	LK132 + 458	24.3	1.52	91.2	4.5

表 14 试验路压实度检测结果 2

Table 14 Results of degree of compaction of sand-carrying high liquid limit clay					
碾压 遍数	桩号	含水率/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	压实度/ %	压实 含水率差/%
6	RK132 + 460	17.7	1.68	88.2	3.5
	RK132 + 455	17.2	1.77	92.4	3.0
8	RK132 + 493	17.6	1.76	92.2	3.4
	RK132 + 458	17.7	1.79	93.7	3.5
11	RK132 + 495	19.1	1.76	91.9	4.9
	RK132 + 462	18.5	1.78	93.1	4.3

最终压实度检测结果见表 16. 从表 16 可以看出,碾压时改良土的含水率在 24.3%~26.1% 之间,压实含水率差在 2.3%~4.1% 之间. 22t 振动压路机碾压到 8 遍时 3 个检测点的压实度分别为 93.1%、94.1%、93.5%. 18t 振动压路机碾压到 11 遍时 3 个检测点的压实度分别为 92.3%、93.4%、95.1%. 因此,控制压实含水率差 $\omega - \omega_{op} \leq 6\%$ 时,压实度可以达到 93% 标准.

4.4 掺 25% 砂改良含砂高液限粉土试验路填筑分析

LK132+570~LK132+620 试验路掺 25% 砂改良土物理力学性质指标见表 17. 掺 25% 砂改良后,该土为粉土质砂,填料采用晾晒法降低天然含水率. 晾晒 8d 后进行压实填筑. 碾压时沿路纵向碾压,远离中央分隔带一侧用 22t 振动压路机碾压,工序为静压 1 遍→振 3 遍→静压 2 遍→振 2 遍→静压 3 遍,共碾压 11 遍. 靠近中央分隔带一侧用 18t 振动压路机碾压,工序为静压 1 遍→小振 2 遍→大振 2 遍→静压 1 遍→大振 2 遍→静压 1 遍→大振 2 遍→静压 4 遍,共碾压 15 遍.

最终压实度检测结果见表 18. 由表 18 可见,掺砂后的含粗粒高液限粉土在较大的压实含水率差下也能达到 93% 的压实标准要求,含水率对掺砂后的含粗粒高液限粉土的填筑影响较小,在较大压路机吨位下压实度能够达到 94% 的标准.

5 结 论

a. 高液限土黏土和含砂高液限黏土可以用于路堤直接填筑,填筑压实度可以按 88% 标准控制. 填筑厚度不宜大于 8m,路基整体填筑高度不宜大于 12m,应按 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》^[1]包盖法整体填筑.

b. 高液限粉土及含砂高液限粉土因 CBR 值达不到要求,不宜直接填筑,应通过改良方法处理后填筑.

c. 高液限粉土宜掺生石灰改良,最优掺入比为 5%,含砂高液限粉土宜掺 25% 砂改良.

参考文献:

[1] JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S].
[2] 柳厚祥,余志江,李宁,等.高液限土工程特性改良的试验研究[J].西安理工大学学报,2008,24(2):144-148.(LIU Hou-xiang,YU Zhi-jiang,LI Ning,et al. Experimental research on engineering behaviors of high liquid limit soil improved[J]. Journal of Xi'an University of Technology 2008, 24(2):144-148.(in Chinese))
[3] 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):89-93.(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):89-93.(in Chinese))
[4] 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,2003,25(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, 25(2):193-195.(in Chinese))

表 16 生石灰改良高液限粉土压实度检测结果

Table 16 Results of degree of compaction of high liquid limit silt improved with quicklime							
压路机 吨位/t	碾压 遍数	桩号	石灰 掺量/%	含水率/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	压实含水 率差/%	压实度/ %
22	8	LK132+470	4.4	25.1	1.501	3.1	93.2
		LK132+490	4.9	25.3	1.515	3.3	94.1
		LK132+510	4.8	25.9	1.505	3.9	93.5
18	11	LK132+480	2.9	26.1	1.486	4.1	92.3
		LK132+490	4.6	25.8	1.504	3.8	93.4
		LK132+520	4.4	24.3	1.531	2.3	95.1

表 17 掺 25% 砂改良含砂高液限粉土主要物理力学性质指标

Table 17 Physical-mechanical indexes of sand-carrying high liquid limit silt mixed with 25% sand						
液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	粗粒质量 分数/%	最优含 水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	CBR 值/%
52.3	37.2	15	62	14.8	1.88	8.3

表 18 掺 25% 砂改良含砂高液限粉土压实度检测结果

Table 18 Results of degree of compaction of sand-carrying high liquid limit silt mixed with 25% sand						
压路机 吨位/t	碾压 遍数	桩号	含水率/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	压实 含水率差/%	压实度/ %
22	11	LK132+570	21.9	1.77	7.1	94.3
		LK132+590	20.7	1.78	5.9	94.5
		LK132+610	21.1	1.79	6.3	95.1
18	15	LK132+580	20.6	1.76	5.8	93.5
		LK132+590	20.9	1.77	6.1	94.2
		LK132+620	21.5	1.76	6.7	93.7

[5] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S].

[6] GBJ145—90 土的分类标准[S].

[7] GB/T10123—1999 土工试验方法标准[S].

[8] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:水利电力出版社,1996:58-62.

[9] JTJ 017-96 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].

[10] 邓东升,张铁军,张帅,等.南水北调东线工程高含水量疏浚淤泥材料化处理方法[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(4):559-562.(DENG Dong-sheng,ZHANG Tie-jun,ZHANG Shuai,et al. Technique for utilization of high-water-content dredged clayey soil as fill material for the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2008,36(4):559-562.(in Chinese))

[11] 桂跃,高玉峰,宋文智,等.高含水率疏浚淤泥生石灰材料化土闷料期内强度变化规律[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(2):185-190.(GUI Yue,GAO Yu-feng,SONG Wen-zhi,et al. Strength variation rules of filling soil improved from high-water-content dredged sludge with quicklime during delay time[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2010,38(2):185-190.(in Chinese))

[12] JTGF80/1—2004 公路工程质量检验评定标准[S].

[13] 黄凤姣,黄贵积.沥青路面设计与施工中弯沉值指标初探[J].交通标准化,2006,23(5):101-103.(HUANG Feng-jiao,HUANG Gui-ji. Elementary discussion on falling weight deflection indexes for design and construction of asphalt pavement[J]. Communications Standardization,2006,23(5):101-103.(in Chinese))

[14] 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. The compaction of control method of compaction of soil subgrade between China and Japan[J]. Journal of Foreign Highway,2001,21(2):37-39.(in Chinese))

[15] 吴志刚,王保田.高含水率黏土改良技术与改良土的力学性质研究进展[J].水利水电科技进展,2010,30(增刊1):166-169.(WU Zhi-gang,WANG Bao-tian. Improvement techniques of clay with high water content and mechanical properties of improved soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(Sup 1):166-169.(in Chinese))

Engineering characteristics and construction schemes of
high liquid limit soil in embankment filling

LIU Xin^{1 2}, HONG Bao-ning^{1 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the laboratory tests, the fundamental characteristics of high liquid limit soil were studied. The engineering characteristics of direct reclamation and the optimal improved schemes for different types of high liquid limit soil were investigated based on the embankment tests. The results show that high liquid limit clay and sand-carrying high liquid limit clay can be used directly as embankment filling using the pack-cover method, and the degree of compaction can be controlled at 88%, with the filling height no more than 8 m and the total height of embankment no more than 12 m. High liquid limit silt and sand-carrying high liquid limit silt are not suitable for fill directly because the California bearing ratio (CBR) cannot satisfy the requirement of greater than or equal to 3%. Therefore, they should be improved before use. High liquid limit silt ought to be improved with quicklime, and the best mixing ratio is 5%, while sand-carrying high liquid limit silt should be improved with sand, and the best mixing ratio is 25%. Through research and practice of experimental roads filled with high liquid limit soil, the construction techniques and key points of quality control in sub-grade construction with different schemes are put forward, and the results show that the schemes are correct.

Key words: high liquid limit soil; engineering characteristics; direct filling; improved filling; construction technology