

# 高液限土路基掺沙改良路用特性试验

徐奋强<sup>1</sup>,洪宝宁<sup>2</sup>,孟云梅<sup>1</sup>

(1. 南京工程学院建筑工程学院,江苏 南京 211167; 2. 河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了研究高液限土路基掺沙改良的长期水稳定性和强度特性,以最大干密度、界限含水率、浸水 CBR 强度值作为路用特性分析的控制参数,进行室内试验和现场试验。依据不同掺沙量和压实度条件下各控制参数的变化规律确定最优掺沙比;在最优掺沙条件下,进一步分析路用水稳定性与施工控制参数,即含水率、压实度、击实功的变化规律,获得水稳定性和强度兼顾的施工参数最佳组合。试验表明,以空气率和饱和度作为路基施工质量检测双指标控制方法,可以弥补现行规范仅以压实度作为单一质量评价标准的不足。

**关键词:** 高液限土路基;掺沙改良;路用特性;质量指标

**中图分类号:** U416.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2014)06-0076-06

**Experimental study on road properties of high liquid limit soil improvement by mixing sand**//XU Fenqiang<sup>1</sup>, HONG Baoning<sup>2</sup>, MENG Yunmei<sup>1</sup> (1. *Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China*; 2. *Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** In order to study road properties of mixing sand improvement, the high liquid limit soil, the maximum dry density, the limit moisture content and soaking CBR value all serve as control parameters for optimal sand ratio. Thus, the aim of the present study is to predict the optimal sand ratio with the change rule under condition of sand contents and degree of compaction taking into account economic benefit. The optimal construction control combination were obtained by varying characters of CBR value, water stability, the moisture content, degree of compaction and the compaction power in optimum sand content. Overall, the result suggested that air ratio and saturation can be used as a criterion of construction quality control. Further, this finds will improve the deficiency of the present standard, which used compaction solely as construction quality control.

**Key words:** high liquid limit soil subgrade; mixing sand improvement; road properties; the two-parameter control

我国高液限土分布广泛<sup>[1-2]</sup>,为提高工程质量,许多学者在高液限土改良方面进行了大量工作,取得了一些有益的成果:Tono<sup>[3]</sup>研究了高液限土中加入4%生石灰28d后的强度特点;Guney等<sup>[4]</sup>通过高液限土干湿循环试验,得到4个循环后强度趋于稳定的结论;曾静等<sup>[5]</sup>进行了高液限土掺石灰改良试验,获得了改良后高液限土的强度变化规律;李方华<sup>[6]</sup>通过试验,得到不同高液限土的最佳掺沙砾石比;程涛等<sup>[7]</sup>通过试验,获得了水泥改良高液限土的最佳配比等。然而由于问题的复杂性,如高液限土改良后作为路基填料的水稳定性以及填筑质量的检测等问题仍需进一步研究。本文以广东省某高速公路高液限土路基掺沙改良填筑工程为例,从高速公路对路基的强度和水稳定性要求出发,通过理论分析、室内试验和现场试验路段检测,研究以最大干

密度、界限含水率、浸水 CBR 强度值作为路用特性分析控制参数的掺沙比确定方法,明确施工控制参数含水率、压实度、击实功与施工检测双指标饱和度、空气率及路基合格验收标准压实度、CBR 强度之间的相互关系,确定评定路基长期水稳定性和强度的施工质量检测方法,为合理利用高液限土提供施工、设计依据。

## 1 样本的物理力学指标

高液限土取自拟作为某高速公路高液限土路基掺沙改良填筑试验段的填土场,其物理、力学指标试验按规范<sup>[8]</sup>测试6组,代表性结果如下:天然密度为:1.71 g/cm<sup>3</sup>,含水率为23.2%,干密度为1.39 g/cm<sup>3</sup>,土粒相对密度为2.68,液限 $w_L$ 为62.2%,塑限 $w_p$ 为27.6%,塑性指数 $I_p$ 为34.6,细粒质量分数为

84.93%, CBR 强度值为 2.8%, 不均匀系数  $C_u$  为 7.8(>5), 曲率系数  $C_c$  为 2.1, 在 1~3 之间, 级配良好。各粒径质量占总质量的百分比为: 小于 2 mm 的占 94%, 小于 0.5 mm 的占 58%, 小于 0.25 mm 的占 24%, 小于 0.074 mm 的占 12%。

2 最优掺沙比的确定

高液限土路基掺沙改良的相关研究多侧重于根据土体压实度和强度确定掺沙量, 如依据细颗粒含量<sup>[9]</sup>、干缩开裂<sup>[10]</sup>等, 少有考虑路基强度、长期水稳定性等工程特性的综合效应。高液限土路基掺沙改良主要解决路基强度和水稳定性问题, 具体工程特性为土体密实程度、强度特点、水环境平衡能力。本文以最大干密度、界限含水率、CBR 强度值并兼顾经济效益确定最优掺沙比。最大干密度  $\rho_d$  是公认的路基填筑密实控制的主要指标; 界限含水率是反映土体结构特性的参数, 能反映与自然水环境的适应程度, JTG F10—2006《路基施工技术规范》<sup>[11]</sup> 明确规定,  $w_L > 50\%$ ,  $I_p > 26$ , 含水率不适宜直接压实的细粒土, 不得直接作为路堤填料; 浸水 CBR 强度值本质上能反映路基浸水条件下的长期稳定性。

掺沙率  $m$  定义为干沙质量与干土质量之比。根据课题组在广东云罗高速公路进行的掺沙改良高液限土路基经验<sup>[12]</sup>, 并借鉴有关高速公路的做法, 进行以 0%、15%、18%、20%、25%、30% 6 种不同掺沙率条件下最大干密度、界限含水率、浸水 CBR 强度值的室内试验, 每项指标做 6 组平行试验, 舍弃 3 倍标准差意外数据并补做试验, 取其均值为试验成果。分析各指标的变化规律, 综合确定高液限土的掺沙率。

2.1 最大干密度

在实验室将高液限土烘干、过 2 mm 筛, 击实制备成不同掺沙率的试样, 测得最优含水率  $w_{opt}$  和  $\rho_d$ , 见表 1。由表 1 可知,  $\rho_d$  随着  $m$  的增加而呈线性增加:

$$\rho_d = 0.5m + 1.69 \quad (r = 0.97) \quad (1)$$

表 1 高液限土掺沙击实试验结果

| $m/\%$ | $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$ | $w_{opt}/\%$ | $w_L/\%$ | $w_p/\%$ | $I_p$ |
|--------|------------------------------|--------------|----------|----------|-------|
| 0      | 1.698                        | 18.3         | 63.1     | 28.3     | 34.8  |
| 15     | 1.755                        | 16.8         | 52.3     | 30.1     | 22.2  |
| 18     | 1.764                        | 16.3         | 51.6     | 30.5     | 21.1  |
| 20     | 1.803                        | 16.0         | 48.2     | 30.8     | 17.4  |
| 25     | 1.833                        | 15.2         | 47.0     | 31.1     | 15.9  |
| 30     | 1.841                        | 15.0         | 46.7     | 32.3     | 14.4  |

可见,  $m$  从 20% 到 25% 时,  $\rho_d$  增幅较大, 达到 2.2%;  $m$  从 25% 到 30% 时,  $\rho_d$  增幅变缓;  $m$  超过

30% 时对  $\rho_d$  的改良效果不佳, 也不经济。故从  $\rho_d$  的角度确定  $m$  为 20%~25% 时效益明显。

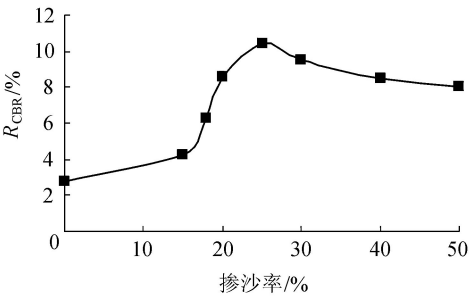
2.2 界限含水率

采用液限、塑限联合测定仪在实验室测定界限含水率。掺沙后, 粗颗粒增加, 土粒比表面积减小, 土体的  $w_p$  增加, 结果见表 1。当  $m$  达到 20% 时,  $w_L$  降幅明显, 相比 15% 降幅达 7.8%; 而  $m=25\%$  相比 20%,  $w_L$  降幅较小, 仅为 2.5%, 且  $w_L=47\%$  仍接近 50%, 说明  $m$  对于降低高液限土  $w_L$  效果并不显著。 $m>30\%$  时,  $w_L$  减小幅度更小, 经济上也不可行。故从液限角度确定  $m$  的上限为 25%~30% 相对合理。

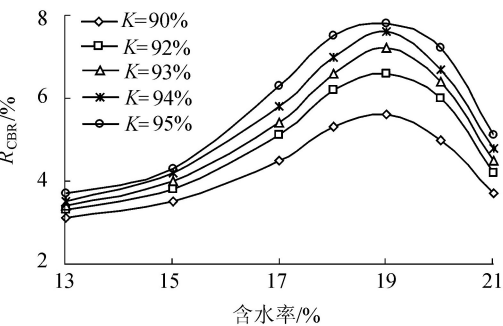
2.3 CBR 强度值

土样素土风干过 2 mm 筛。掺沙试样含水率控制为最优含水率, 采用南京土壤仪器厂生产的 CBR-1 型承载比试验仪测试土样 CBR 强度值。CBR 强度值与掺沙率的关系见图 1(a)。  $m$  在 15%~30% 时, CBR 强度值(以  $R_{CBR}$  表示)达到 10, 呈线性增加, 增幅明显, 强度较高, 完全满足工程强度需求。  $m$  为 15%~18% 时, 虽能满足路基强度要求, 但  $w_L > 50\%$  仍为高液限土, 未达 JTG F10—2006 的要求。  $m$  为 20%~25% 时,  $w_L$  为 47%, 虽低于 50% 但仍偏高。而  $m=30\%$  时  $w_L$  降幅相比 25% 仅降 0.6%, 因此继续增大掺沙率不经济。 CBR 强度值与  $m$  的关系为

$$R_{CBR} = 42.76m - 2.2 \quad (r = 0.99, \\ m = 15\% \sim 30\%) \quad (2)$$



(a) CBR 强度值与掺沙率的关系



(b) CBR 强度值与含水率关系

图 1 CBR 强度值与掺沙率及含水率的关系

由此可见: ①  $m$  的递增能够使细颗粒的作用减弱,  $\rho_d$  增加使得抗剪强度增大, 表现为  $m$  为 20%~

30%时强度增幅较突出,另外粗粒沙的增多可促进水分排出,压实度易于保证;② $m$ 为20%~30%时, $w_L<50\%$ ,满足规范,但从强度提高幅度和安全储备及经济效益角度考虑, $m$ 为25%~30%时较合理。

因高液限土路基掺沙改良的关键是最大干密度和浸水 CBR 强度值,如此虽满足了土体强度和水稳定性要求,但为使液限满足小于 50% 的规范硬性要求,并考虑一定的安全储备, $m$ 宜大于 25%,且界限含水率改善效果最佳的  $m$  为 25%。综合对比可见, $m$  为 25% 时各控制参数相对比较理想,可视为最优掺沙率。

3 改良土水稳定性和强度特点

高液限土毛细现象严重,干缩湿胀,具有裂隙性和崩解性的特点,其路基的破坏往往是雨后长期浸泡和自然环境干湿交替造成的,因此施工中含水率的控制问题比较关键。一方面,高液限土压实后 CBR 强度峰值所对应的含水率并不是最优含水率<sup>[13]</sup>;另一方面,高液限土最优含水率与其天然含水率相差悬殊,易受自然水环境影响,不利于路基水稳定性。含水率高,强度水平低;含水率低,水稳定性差,故高液限土路基掺沙改良采用何种含水率既能保证长期水稳定性和强度,又能保证最佳压实效果是研究的关键。

3.1 CBR 强度值与含水率的关系

试样含水率的选取参照规范,以  $w_{opt} \pm 2\%$  为基准扩展为: $w_{opt}-2\%$ 、 $w_{opt}$ 、 $w_{opt}+2\%$ 、 $w_{opt}+3\%$ 、 $w_{opt}+4\%$ 、 $w_{opt}+5\%$ 、 $w_{opt}+6\%$ 。压实度  $K$  取为 90%、92%、93%、94%、95% 的区域。击实试验依据击实桶体积、含水率和最大干密度的关系换算出土料质量,分 3 层击实制成不同压实度和含水率的土样。浸水 96 h 后测 CBR 强度值,结果见图 1(b)。

由图 1(b) 可见,试样的 CBR 强度值存在明显的峰值,其对应的含水率为  $w_{opt}+4\%$ ,主要是因为高液限土矿物成分(如蒙脱石、伊利石)细颗粒多,胶粒成分占优,持水性强所致;含水率为  $w_{opt}-2\%$  时, CBR 强度值仅为 3.1%~3.7%,安全储备较小,应予舍弃;对比含水率较低的  $w_{opt}$  和较高的  $w_{opt}+6\%$ ,不同压实度 CBR 强度值变化范围分别为 3.5%~4.6% 和 3.7%~4.5%,虽满足规范要求,但强度水平偏低,仅适于下路堤的填筑,即满足压实度为 90%~93% 的强度要求;含水率在  $w_{opt}+2\% \sim w_{opt}+5\%$  时, CBR 强度值达 5.4%~7.2%,可满足下路堤压实度为 93%~95% 的强度要求。故不同的施工含水率能满足的强度和压实度应区别对待。

3.2 CBR 强度值与水稳定性的关系

高液限土掺沙改良路基的水稳定性主要表现在两个方面:一是天气的曝晒和雨淋的交替作用,二是雨水长期浸泡作用。实验室可采用干湿循环和浸水试验来模拟。干湿循环以土样浸水 4 d、风干 2 d,计为 0 次循环,然后按浸水 1 d 和风干 2 d 为 1 次循环。浸泡试验设计为不同含水率土样击实后分别在室内浸水 1 d、4 d、6 d,再测试 CBR 强度值。因篇幅所限不列举平行试验数据,借鉴经验,试样含水率取 3 种: $w_{opt}$ 、 $w_{opt}+4\%$ 、 $w_{opt}+6\%$ ,压实度取 90%、92%、93%、94%、95%。试样风干以室温(约 30℃)自然风干,经 5 次循环后测得高液限土的 CBR 强度值。试验结果见图 2(a)(b)(c)所示。

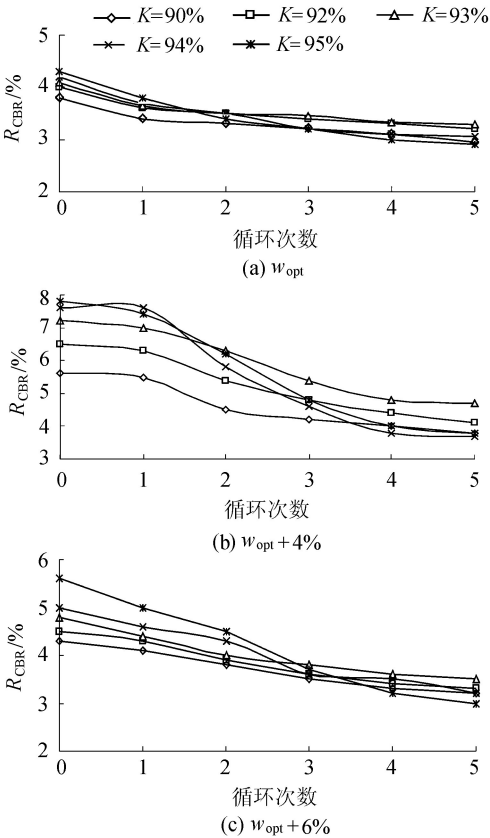


图2 不同含水率试样 CBR 强度值与干湿循环关系

试样经干湿循环,土体强度逐渐降低,经 4、5 次循环后,基本稳定, CBR 强度值为 3.3%~4.7%,满足下路堤压实度为 90%~93% 的要求,且有一定的安全储备。但对于上路堤压实度为 94%~95% 区域,干湿循环 5 次稳定后的土体 CBR 强度值为 2.9%~3.2%,不能满足要求。故掺沙改良高液限土不适合填筑压实度要求较高的上路堤,主要因为:①在干湿循环作用下,掺沙改良土体受脱水和吸水交替作用产生沙化和裂隙双重作用。压实度越大,沙粒骨架作用越明显,土体沙化和裂缝作用对土体的影响越显著, CBR 强度衰减越快。②在干湿循环初期,

高液限细粒土中基质吸力发挥作用,阻碍裂隙的扩展,土粒周边的水膜作用封闭裂隙,使得土体保持一定的强度;随着干湿循环次数的增加,裂隙和沙化作用减弱,裂隙扩大,沙粒间形成水道,水膜作用消失,细粒土内部基质吸力趋于均匀,强度趋于平衡。

由图 3 可知,试样在低含水率时无论浸泡时间长短,强度都很低,说明高液限土不适于低含水率施工;试样强度不仅与含水率有关,同时也与浸水时间密切相关,试样浸水 1 d 的强度在  $w_{opt}+2\%$  时达到峰值,浸水 4 d 时强度峰值发生在  $w_{opt}+4\%$  处,而浸水 6 d 的强度与 4 d 强度变化不大,基本趋于稳定。说明 CBR 强度值采用浸水 4 d 强度是合理的,既符合自然环境情况又偏于安全。故从水稳定性看,掺沙改良高液限土仅适宜填筑下路堤、压实度为 90% ~ 93%、含水率为  $w_{opt} \sim w_{opt}+6\%$  的情况。

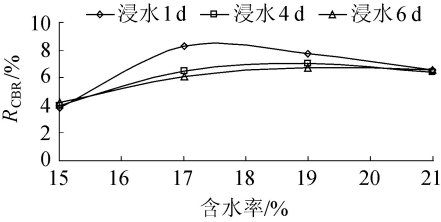


图 3 不同浸水时间含水率与 CBR 强度值关系

3.3 CBR 强度值、含水率与击实功的关系

对不同含水率的土样按不同击数进行击实,击实方式采用等能量递增方式,采用 24、49、74、98、112 击数,击实结果见图 4。

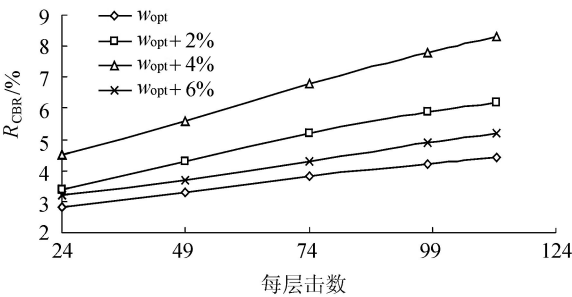


图 4 击实功与 CBR 强度值的关系

由图 4 可见,不同含水率的 CBR 强度值随击实功的不同有明显的差异。从曲线斜率看,含水率为  $w_{opt}+4\%$  时, CBR 强度值增幅明显;当含水率为  $w_{opt}$  时, CBR 强度值增大,但增幅偏小,强度偏低,为 3.0% ~ 4.4%,说明低含水率时,提高击实功可以得到较高的压实度和强度,但击实功效偏低,安全储备小,不建议采用;含水率为  $w_{opt}+2\%$  时,强度增幅稍大, CBR 强度值在 74 击以上能达到 4.0% ~ 6.0%,若提高击实功,击数达到 112 击也能提高强度,但击实功效不理想,故控制一定的含水率,可采用提高击实功方式提高 CBR 强度;当含水率达到  $w_{opt}+4\%$

时, CBR 强度值达到 8.3%,强度较高,增幅显著,击实效率较高且能耗较小,相对理想,推荐使用,但击数达到 112 击时,强度增幅缓慢,说明应同时控制含水率和击实功的大小,才能达到强度、水稳定性、施工效率最佳的状态;当含水率为  $w_{opt}+6\%$  时, CBR 强度较低,增幅变缓,能耗高,应予舍弃。由于超压或软弹现象,击实功过大可造成土体过击破坏,应慎重加大击实功和施工含水率。由此可见,检测评判指标 CBR 强度、水稳定性与施工参数击实功、含水率密切相关,相互制约。含水率控制不当,强度难以保障;盲目增大击实功,土体因超压变密,将吸水膨胀,导致路基水稳定性不良。故不同的施工含水率宜控制不同的击实(碾压)功。

综上所述,可获得高液限土路基掺沙改良的最佳施工参数组合含水率为  $w_{opt}+4\%$ , 压实度为 90% ~ 93%, 击实功为 74 ~ 98 击。

4 施工质量检测方法

高液限土区域性强,差异大,高液限土地区高速公路建设难以形成统一的设计和施工规范,更无相应的质量检测标准。现行规范仅以压实度作为路基质量检验标准难以反映水稳定性问题。土体压实过程实为气体挤密排出的过程,空气含量不可能减小至零,一般气体占土体体积不小于 3%<sup>[14]</sup>,所以气体的含量是决定压密的关键。而饱和度与含水率、气体含量有直接的关系,被相关学者用于高液限土的研究<sup>[15]</sup>。饱和度高,含水率高,气体量少,强度低;饱和度低,孔隙大,吸水量大,水稳定性差。故饱和度和空气率(定义为空气体积与土体总体积的百分比)双指标标准对高液限土检测具有很好的适用性,能反映压实度和水稳定性问题。因此,建议以空气率、饱和度作为检测指标,而以压实度和 CBR 强度值作为评价标准,形成施工、检测、评价的完整体系。高液限土掺沙改良土体的空气率、饱和度测试数据见表 2。

表 2 掺沙 25% 改良土空气率试验结果

| 含水率           | 不同压实度时的空气率/% |       |       |       |       | 不同压实度时的饱和度/% |       |       |       |       |
|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|               | K=90%        | K=92% | K=93% | K=94% | K=95% | K=90%        | K=92% | K=93% | K=94% | K=95% |
| $w_{opt}$     | 13.6         | 11.7  | 10.7  | 9.8   | 8.7   | 64.8         | 68.6  | 70.8  | 72.8  | 75.0  |
| $w_{opt}+2\%$ | 10.3         | 8.3   | 7.3   | 6.3   | 5.3   | 73.4         | 77.7  | 80.0  | 82.5  | 85.0  |
| $w_{opt}+3\%$ | 8.7          | 6.6   | 5.6   | 4.6   | 3.2   | 77.5         | 82.4  | 84.8  | 87.2  | 90.8  |
| $w_{opt}+4\%$ | 6.0          | 4.9   | 3.9   |       |       | 82.0         | 86.9  | 89.3  |       |       |
| $w_{opt}+5\%$ | 5.0          | 2.9   |       |       |       | 87.0         | 92.1  |       |       |       |
| $w_{opt}+6\%$ | 3.8          |       |       |       |       | 90.2         |       |       |       |       |

从表 2 可知,含水率为  $w_{opt}$  时:①压实度为 90% 时的饱和度偏低,仅为 64.8%,而空气率较大,达到 13.6%,土体易于压缩;②击实功增加,压实度增大,

空气率骤减,压实度从 90% 增至 93% 时,空气率减小 2.9%,减小幅度达 21.3%,但饱和度增幅偏低,增加 6%,增幅为 9.2%;③继续击实,压实度从 93% 到 95%,空气率仅减小 2%,持续击实则导致功效浪费,说明土体压实困难,也可以证实低含水率土体不宜填筑压实度要求较高的上路堤。

当含水率为  $w_{opt}+6\%$  时,土体在较小压实度(90%)就能达到较低的空气率(3.8%)和较大的饱和度(90.2%)。表明高含水率土体饱和度较高,空气率较低,土颗粒间润滑作用使土体易于压实,但强度不高,过压易导致结构破坏,说明土体施工含水率上限可为  $w_{opt}+6\%$ 。

当含水率在  $w_{opt}+2\% \sim w_{opt}+5\%$  时,空气率为 2.9% ~ 10.3%,饱和度为 73.4% ~ 92.1%,压实度、土体强度、水稳定性能够满足工程要求,并且在含水率为  $w_{opt}+4\%$ 、压实度 90% ~ 93% 时,空气率为 3.9% ~ 6.0%,饱和度为 82.0% ~ 89.3%,处于均衡水平,是较理想的施工参数。可见,理想状态应控制含水率为  $w_{opt}+4\%$  进行施工。

5 现场验证

某高速公路 K30+500—K30+800 路段,高液限土  $w_L=57.6\%$ ,  $w_p=27.6\%$ ,小于 0.074 mm 的细粒含量为 82.9%,为高液限粉土,素土  $\rho_d=1.78\text{ g/cm}^3$ ,在压实度为 99.7% 的条件下,CBR 强度值为 3.0%,不满足路基用土的技术条件,须进行改良处理。由于该高液限土细颗粒含量较高,较适合掺沙改良。控制  $m=25\%$ ,分段控制含水率为  $w_{opt}+2\%$ 、 $w_{opt}+4\%$ 、 $w_{opt}+5\%$  进行对比分析。碾压设备采用 22 t 压路机,碾压方式为:先静压一遍找平,再大振一遍,此后小振与静压循环依次碾压。选取代表性碾压遍数时各项参数进行对比分析,试验记录见表 3。

表 3 压实度、CBR 强度值与空气率和饱和度双指标检测结果

| 含水率           | 碾压遍数 | 压实度/% | CBR 强度值/% | 空气率/% | 饱和度/% | 工程建议             |
|---------------|------|-------|-----------|-------|-------|------------------|
| $w_{opt}+2\%$ | 7    | 94.0  | 5.3       | 6.00  | 83.2  | 强度低,宜 $K=93\%$ 区 |
|               | 8    | 94.6  | 5.4       | 5.36  | 84.8  |                  |
| $w_{opt}+4\%$ | 6    | 93.2  | 7.2       | 3.33  | 90.9  | 宜 $K=93\%$ 区     |
|               | 7    | 93.3  | 7.3       | 3.22  | 91.1  |                  |
| $w_{opt}+5\%$ | 5    | 91.0  | 6.5       | 3.93  | 89.7  | 宜 $K=90\%$ 区     |
|               | 6    | 91.2  | 6.5       | 3.98  | 90.0  |                  |

由表 3 可见,碾压 7 遍时,低含水率  $w_{opt}+2\%$  相比较高含水率  $w_{opt}+4\%$ 、 $w_{opt}+5\%$  的 CBR 强度值偏低,而空气率指标偏大,饱和度偏低;增加碾压 1 遍,强度增大,空气率和饱和度变化不大,说明土体孔隙较大,对水稳定性不利。施工中应做好防水和隔热

措施,如包边、绿化等。含水率为  $w_{opt}+4\%$  时,土体 CBR 强度值较高,空气率低至限值,饱和度达 90.9%,对水稳定性有利,继续碾压困难;在含水率为  $w_{opt}+5\%$  时,土体碾压 5 遍强度达较高值,但较  $w_{opt}+4\%$  时降低,继续碾压至 6 遍,空气率和饱和度变化较小,强度不再增加,但饱和度偏高,易导致土体过压反弹破坏,应注重检测,确保路基质量。现场碾压试验表明,高液限土高含水率掺沙改良土体填筑时,强度水平、压实度低,空气率小,饱和度高,路堤水稳定性较好,不宜超压;低含水率填筑时,强度水平低,压实度高,空气率大,饱和度小,路堤水稳定性低,可提高击实功以保证强度。而空气率和饱和度双指标与压实度和强度有较好的对应关系,能够反映土体的压密程度和水稳定性,可以作为路基填筑工程施工的检测指标。

6 结 论

- a. 掺沙改良高液限土,强度随含水率的增加呈先增加后减小的趋势,存在强度峰值。强度峰值对应的含水率为  $w_{opt}+4\%$ ,略大于最优含水率,这与高液限土体持水特征有关,不同类型的土需试验确定。
- b. 掺沙改良高液限土不适于填筑压实度要求较高的上路堤,其水稳定性偏低,但能满足下路堤强度和水稳定性的要求。
- c. 高液限土掺沙改良路基,  $m$  为 25%,含水率为  $w_{opt}+4\%$ ,压实度为 90% ~ 93%,击数为 74 ~ 98 击时,路基的强度、水稳定满足耐久性要求,较经济、节约,为最佳施工组合状态。
- d. 高液限土路基掺沙改良填筑施工,采用饱和度和空气率双指标检测施工质量时,饱和度宜为 73.4% ~ 92.1%,空气率为 2.9% ~ 10.3%,能够保证路基长期使用的强度和水稳定性需求。

参考文献:

[ 1 ] 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 Lijian, ZHONG Falin, WU Changxing, et al. Study on road made by high liquidlimit soil [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 ( 2 ): 193-195. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 曾胜. 高液限土室内改良试验研究 [J]. 中外公路, 2007,27(3):208-210. ( ZENG Sheng. Experimental study on improvement of high liquid limit soil [ J ]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27 ( 3 ): 208-210. ( in Chinese ) )

[ 3 ] TONNOZ M C. Effects of lime stabilization on engineering properties of expansive Ankara clay [ J ]. Earth and Environment Science,2004,104:466-474.

- [ 4 ] GUNEY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil [J]. Buildind and Envirment, 2007, 42, 681-688.
- [ 5 ] 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): 89-98. (ZENG Jing, DENG Zhibin, 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): 89-98. (in Chinese))
- [ 6 ] 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 Fanghua. 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. (in Chinese))
- [ 7 ] 程涛, 洪宝宁, 刘顺青, 等. 高液限土最佳掺水泥比的确 定[J]. 四川大学学报, 2012, 44(2): 64-69. (CHENG Tao, HONG Baoning, LIU Shunqing, et al. Determine the best ratio of mixed cement of high liquid limit soil[J]. Journal of Sichuan University, 2012, 44(2): 64-69. (in Chinese))
- [ 8 ] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
- [ 9 ] 曾宪新, 钟扬有. 掺砂改良高液限土修筑路基技术研究 [J]. 广东交通职业技术学院学报, 2005, 4(1): 13-19. (ZENG Xianxin, ZHONG Yangyou. Study on subgrade construction by mixing sand to improve high-liquid limit soil [J]. Journal of Guangdong Communications Polytechnic, 2005, 4(1): 13-19. (in Chinese))
- [ 10 ] 赵昌清, 蒋理珍, 刘银生. 高液限黏土的砂砾改良法 [J]. 湖南交通科技, 2004, 30(1): 25-27. (ZHAO Changqing, JIANG Lizhen, LIU Yinsheng. Gravel improvement method of the high liquid limit soil [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2004, 30(1): 25-27. (in Chinese))
- [ 11 ] JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S].
- [ 12 ] GDJTG/TE01—2014 广东省高液限土路基修筑技术 指南[S].
- [ 13 ] 施有志. 高液限土路堤填筑技术研究[J]. 铁道标准设 计, 2006(11): 7-10. (SHI Youzhi. Research on filling technology of the high-liquid limit soil embankment[J]. Railway Standard Design, 2006(11): 7-10. (in Chinese))
- [ 14 ] 李书华. 高液限土填筑及压实控制标准研究[D]. 南 京: 河海大学, 2009.
- [ 15 ] 张宁, 邓捷, 吴立坚. 福建高液限土的工程特性研究 [J]. 公路, 2009(12): 143-146. (ZHANG Ning, DENG Jie, WU Lijian. Study on road made by high liquidlimit soil of Fujian Province [J]. High Way, 2009(12): 143-146. (in Chinese))
- (收稿日期: 2014-03-06 编辑: 胡新宇)

+++++  
(上接第 75 页)

- [ 8 ] 孟庆山. 淤泥质黏土在冲击荷载下固结机理研究及应 用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1762. (MENG Qingshan. Research on mechanism of silty soft clay under impact loading and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1762. (in Chinese))
- [ 9 ] 孙丽云, 刘忠玉, 乐金朝, 等. 考虑非 Darcy 渗流时循环 荷载下饱和黏土一维固结分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 62-68. (SUN Liyun, LIU Zhongyu, YUE Jinchao, et al. One-dimensional consolidation of saturated clays under cyclic loading considering non-Darcy flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 62-68. (in Chinese))
- [ 10 ] 魏静, 王建华, 张力霆. 软黏土渗透诱发固结机理及固 结参数确定的研究[J]. 水利水电技术, 2003, 34(7): 16-18. (WEI Jing, WANG Jianhua, ZHANG Liting. Seepage-induced consolidation mechanism of soft clay and consolidation parameter determination [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(7): 16-18. (in Chinese))
- [ 11 ] 文海家, 张永兴. 超软土的排水固结机理分析[J]. 重庆 大学学报: 自然科学版, 2002, 25(9): 82-85. (WEN Jiahai, ZHANG Yongxing. Analysis on mechanism of drain and consolidation of super soft soil [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(9): 82-85. (in Chinese))
- [ 12 ] 王多垠, 兰超, 何光春, 等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩 横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1307-1313. (WANG Duoyin, LAN Chao, HE Guangchun, et al. Researches on lateral support behavior of large diameter rock-socketed cast-in-place piles at river port by laboratory model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1307-1313. (in Chinese))
- [ 13 ] ABERG B. Void sizes in granular soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(3): 236-239.
- [ 14 ] 齐添, 谢康和, 李西斌. 软土的一维非线性固结计算参 数及其测定[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(8): 1388-1392. (QI Tian, XIE Kanghe, LI Xibin. Laboratory determination of one-dimensional nonlinear consolidation computational parameters of soft soil [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(8): 1388-1392. (in Chinese))
- [ 15 ] 齐添, 谢康和, 应宏伟, 等. 基于 GDS 的萧山黏土非线性 压缩特性试验研究[J]. 科技通报, 2007, 23(4): 723-728. (QI Tian, XIE Kanghe, YING Hongwei. Experimental investigation on nonlinear compression behavior of xiaoshan clay [J]. Bulletin of Science And Technology, 2007, 23(4): 723-728. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013-09-29 编辑: 周红梅)