

文章编号:1009-3087(2013)06-0082-05

干湿循环下高液限土力学特性研究

程涛^{1,2},洪宝宁^{1,2},程江涛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 岩土工程研究所,江苏 南京 210098;3. 安徽省质量技术监督局,安徽 合肥 230051)

摘 要:路基填料的承载比大小反映土体局部抵抗剪切破坏的能力,是评价路基填筑质量的重要检测标准之一。以实际工程高液限土改良方案确定为背景,通过一系列的室内试验研究了具体明显地区特征的掺砂高液限粉土和高液限黏土的承载比影响因素,获得了高液限土在不同掺砂量下、不同干湿循环次数后的吸水量、膨胀率、脱水量对土体的 CBR 值的影响规律,得出结论:水是引起土体膨胀、收缩及 CBR 值差异的主要原因;在干湿循环初期以“砂化作用”为主,后期以“裂缝作用”为主;高液限土应填筑在较深的 93 区;掺砂改良后,其可以填筑在相对较浅的 94 区。

关键词:高液限土;砂;承载比;干湿循环试验;强度分析

中图分类号:TU431

文献标志码:A

Mechanical Properties of High Liquid Limit Soil Under Different Drying and Wetting Cycles

CHENG Tao^{1,2}, HONG Bao-ning^{1,2}, CHENG Jiang-tao³

(1. Key Lab. of Ministry of Education for Geotechnical and Embankment Eng., Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Inst., Hohai Univ., Nanjing 210098, China; 3. Anhui Bureau of Quality and Technical Supervision, Hefei 230051, China)

Abstract: CBR value which reflects the capacity of partial soil resisting shear failure is an important testing standard of embankment filling quality. Based on the background of improving project scheme of high limit liquid soil, a series of indoor tests was carried out to study bearing ratio influencing factors of the obvious regional characteristics of high liquid limit soil mixed with soil, and the influence rule of water content, swelling rate, dehydration rate of the high liquid limit soil in different sand content and different wet and dry cycles on CBR value was obtained. The results showed that water is the main reason of expansion shrinkage and differences of CBR value. The action of sand and fracture dominates at the earlier stage and the later stage of dry-wet circulation, respectively. The high liquid limit soil should be filling in the deep 93 area, but after improved by sand, it can fill in the relatively lower 94 area.

Key words: high liquid limit soil; sand; CBR; drying and wetting test; stress analysis

云罗高速公路(云浮至罗定)地处广东省西部丘陵地区,沿线分布着大量的高液限土,这些高液限土除具有弱膨胀性、裂隙性和崩解性等共性外,还有着明显的地区特点,反映在工程特性方面为透水性差,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。若不加改良直接用于路基填筑,将会诱发诸多质量隐患和病害,如:沉降不均匀、开裂、局部滑塌、水稳

定性差、压实困难等;若作为弃方处理显然不经济,且对环境影响较大。目前国内外学者进行了大量研究: Sand 等从结构方面分析粘性土在干湿循环下的强度和膨胀性的疲劳效应^[1-4]; Kong 等通过试验分析土体在各种条件下的力学行为^[5-7];朱冬梅等分析各种方案的改良效果和改良机理,发现掺砂改良方案的经济性较好、技术性可行、对环境影响较小,且掺 20% 砂的高液限土能够满足规范要求^[8]。然而,在方案实施前,有必要对衡量路用性能评价指标 CBR 值的影响因素进行深入分析,找出影响规律,以便确定具体的施工工艺。

评价高液限土改良效果的指标有液塑限、细颗粒含量、CBR 值、压缩系数等。其中 CBR 值是材料

收稿日期:2013-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51079052);广东省交通厅基金资助项目(200903005)

作者简介:程涛(1983—),男,博士生。研究方向:道路工程;边坡稳定。

能否用作路基填料的重要评判指标之一。进行 CBR 实验时,土体局部发生剪切破坏,因此 CBR 值的大小受抗剪强度的影响。而影响组成土体抗剪强度的粘聚力和摩擦力的重要因素为土体的含水量。由于广东地区夏季一般以暴雨与高温相伴,雨季时大气降水或地表径流会沿裂缝渗入,而在旱季又通过蒸腾或蒸发作用散失水分,致使路基含水量不断变化。因此作者选取代表性的高液限土进行干湿循环室内试验研究,分析掺砂量和干湿循环次数对土体 CBR 值的影响规律。

1 试验材料及方法

选取云罗高速沿线代表性的高液限粉土和高液限黏土各一处,其中高液限黏土表示为 G1,高液限粉土表示为 G2,掺砂 15% 表示为 P1,掺砂 20% 表示为 P2,掺砂 25% 表示为 P3,掺砂 30% 表示为 P4。则 G1P2 表示高液限黏土掺砂 20%。

1.1 砂的颗粒级配分析

优质的改良材料是保证改良试验成功的重要因素之一。广东地区水系较为发达,根据施工现场就

近取材原则,本试验所用砂均采自西江、北江、东江组成的珠江流域。

图 1 为试验用砂颗粒分析曲线。

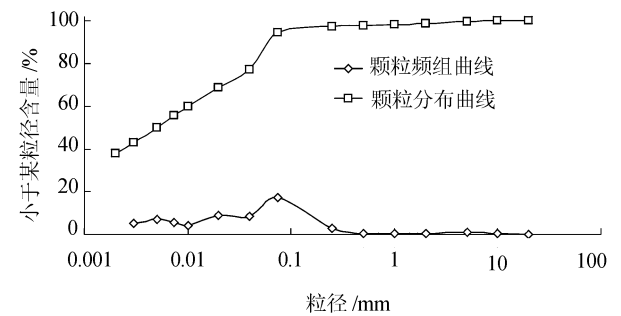


图 1 高液限土颗粒级配曲线

Fig.1 Grain-size distributions of high limit liquid soil
从试验结果来看,珠江流域河砂属于中粗砂, $C_u = 7.8 > 5$, $C_c = 2.1$ 在 1 ~ 3 之间,砂的级配良好。

1.2 土及改良土的物理性质

将高液限土分别掺砂 0%、15%、20%、25% 后,开展一系列室内试验研究^[9]。各土样物理性质试验结果见表 1,颗粒级配见图 2。

表 1 不同掺砂量下的高液限土物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of high liquid limit soil under different sand contents

	掺砂比例/ %	粗粒含量/ %	粉粒含量/ %	粘粒含量/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	比重 G_s	最优 含水量/%	最大干密度/ ($g \cdot m^{-3}$)
G1	0	5.6	44.4	50.0	63.1	28.3	34.8	2.793	18.3	1.698
	15	17.6	38.8	43.6	52.3	30.1	22.2	2.737	16.8	1.755
	20	21.0	37.2	41.8	48.2	30.8	17.4	2.823	16.0	1.803
	25	34.0	35.8	40.2	47.0	31.1	15.9	2.726	15.6	1.833
G2	0	13.7	47.1	39.2	53.0	25.4	27.6	2.738	17.6	1.758
	15	24.7	41.1	34.2	42.8	27.1	15.7	2.819	16.1	1.829
	20	33.7	33.5	32.8	42.3	27.8	14.5	2.754	15.1	1.847
	25	30.6	37.9	31.5	41.8	28.1	13.7	2.713	14.6	1.862

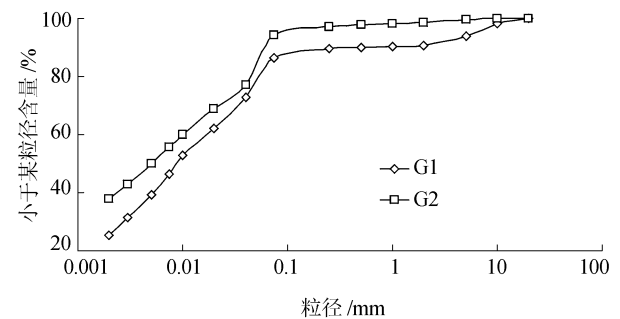


图 2 试验用砂颗粒级配曲线

Fig.2 Grain-size distributions of sand

黏性土的抗剪强度主要由黏聚力承担,而土体的黏聚力受颗粒间的水膜联结和胶结作用所控制。

当土体含水时,黏性颗粒周围产生一定厚度的结合水膜,并通过胶结作用连接在一起。当含水量较小的土体发生剪切位移时,由于水膜厚度较薄,较大的黏聚力仍能阻止因外力传递到其上的作用力而产生的颗粒间滑动,此时颗粒之间不够紧密。当水膜厚度因含水量增加而逐渐变厚时,水膜联结逐渐减弱;同时因矿物溶解而造成胶结物逐渐溶蚀,胶结作用逐渐丧失,此时颗粒间的相互滑动力刚好能克服较小的黏聚力,土体干密度达到最大值,所对应的含水量即为最优含水量。随着含水量的增加,较多的土颗粒间弱化黏聚力才能消耗施加的外力,即外力传

播范围较大,土体易出现弹簧现象,此时的含水量即为半固态到可塑状态的界限含水量(塑限)。当黏聚力因含水量增加而减小到不能克服因重力造成的颗粒之间的相互滑动时,此时的含水量即为可塑状态到流动状态的界限含水量(液限)。因高液限土具有亲水性矿物成份高、细颗粒含量较的特点,因此其液限较大,最优含水量大,最大干密度较小^[10]。表 1 中结果很好地反映了该类土这种独特的工程性质。

由表 1 可见:随着掺砂量的增加,土体的液限、塑性指数和最优含水量均减小,最大干密度增加。掺砂改良后,较少的黏粒杂乱地填充在粗颗粒周围,但不足以包裹粗颗粒,因粗颗粒的“隔离”效应造成黏聚力一般较小。粗颗粒之间由面与面接触逐渐转变成点与点和点与面接触,但土体发生剪切位移时,粗颗粒局部直接接触,摩擦力逐渐变大,因此剪切强度以摩擦力为主,黏聚力为辅。由于掺砂后细颗粒含量逐渐减小,在较小的含水量下,抗剪力就能克服颗粒间的相互滑动,因此其最优含水量较未掺砂时有所减小。而黏土颗粒很好的填充在粗颗粒周围,单位体积内土体质量较未掺砂时有明显提高。相应的液限、塑性指数均较未掺砂时也有所减小。

2 试验结果

2.1 CBR 值

试验选取代表性的 G1 和 G2 各 24 组,按质量百分比掺砂,按最优含水量掺水,经拌合均匀、闷料 1 d、击实、 N 次循环后分别测得不同掺砂量下高液限土的 CBR 值、吸水量、脱水量、膨胀率。一般将试样在初期以浸水 4 d、风干 2 d 为 0 次循环,接着以浸水 1 d 和风干 2 d 作为一个循环周期进行不同循环次数的试验研究。

按非饱和土强度理论,土体在脱湿、吸湿过程中的强度特征主要受含水量和裂隙性的双重影响^[11]。当土体在脱湿过程中因含水量减小造成黏土颗粒聚集成较大集聚体,土体发生“砂化现象”;随之发生的吸湿过程中,因荷载作用约束了土体的部分膨胀势,黏土颗粒相嵌于大颗粒周围,土颗粒的空间结构重新排列,骨架作用明显。因此在循环初期, CBR 值逐渐增大。达到峰值后,因干缩时应力不均匀造成试样表面出现较宽的裂缝,水分可自由进出土体,使得吸湿后的含水量增加,从而造成 CBR 值减小。

由图 3 和 4 可知:随着循环次数的增加,高液限土的 CBR 值先增加,后少量减小,呈现典型的“ Λ ”变化趋势。掺砂量越大,土体脱水、吸水速率越大,“砂化作用”和“裂缝作用”对土体的影响速率越快,故 CBR 值达到峰值所需的循环次数越小。当掺砂量为 0% 时,所需循环次数为 4 次;掺砂量为 15%、20% 时,次数为 3 次;掺砂量为 25% 时,次数仅为 2 次。由于 G1 的细颗粒含量及亲水性矿物成分大于 G2 中的,故 G1 的 CBR 值一般小于 G2 的。当循环次数大于 5 时,随着掺砂量的增加,强烈的“裂缝作用”造成吸湿时土体含水量也随之增加, CBR 值反而逐渐减小,因此掺砂量并不是越多越好。

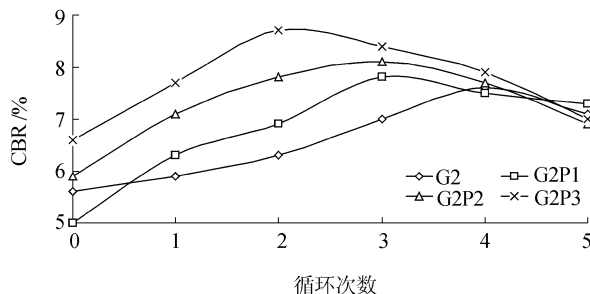


图 3 干湿循环高液限粉土 CBR 值

Fig. 3 CBR value of G1 with different cycle numbers

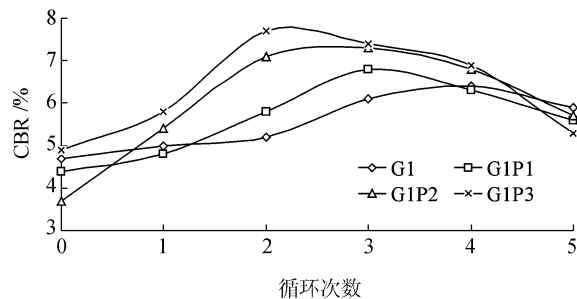


图 4 干湿循环高液限黏土 CBR 值

Fig. 4 CBR value of G2 with different cycle numbers

2.2 吸水量和脱水量

研究表明:含水量对压实黏土抗剪强度的影响主要是由于含水量变化引起土体结构和土中基质吸力发生变化所致^[12]。在循环初期,因干缩时裂缝开展深度有限,较宽的水膜使得土体表面细裂缝出现闭合,阻碍了水分自由进出土体,造成吸水时局部土体基质吸力较大。随着循环次数的增加,裂缝宽度逐渐增大,深度逐渐开展,水膜不足以使裂缝闭合,从而为水分自由进出提供了良好的通道,因此脱水量显著增加。吸水量和脱水量这 2 个因素相互影响,但脱水量较大时,随之的吸水量会较大;反之,吸水量较大时,随之的脱水量也会较大。

由图5和6可知:在循环0次时,较大的基质吸力造成吸湿时吸水量很大。循环到1次后,由于脱湿时脱水量较小,造成其后的吸水量也显著减小。因吸水时产生的膨胀量使微裂缝出现闭合,使水分仅渗透到试样有限深度,随着循环次数的增加,裂缝深度逐渐开展,故吸水量逐渐增大。大约循环2~3次后,因干缩时土体“砂化作用”较明显,细颗粒含量减小,土体的基质吸力下降,故吸水量又小量减小;当循环4次后,微裂缝整体发育并连通成大孔隙,水分自由进去土体,故吸水量显著增加。

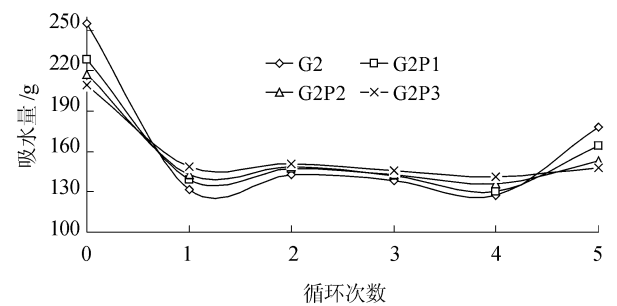


图5 高液限粉土中吸水量随循环次数的关系
Fig.5 Water sucking mass of G2 changing with cycle number

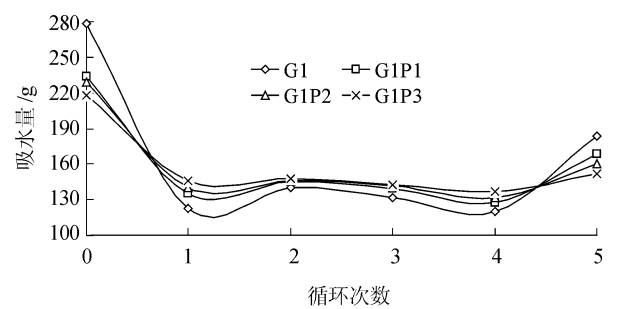


图6 高液限黏土中吸水量随循环次数的关系
Fig.6 Water sucking mass of G1 changing with cycle number

由于脱水量与吸水量互为影响,因此变化曲线大致与吸水量变化趋势吻合。不同的是:在循环早期,因微裂缝的闭合造成内部局部土体基质吸力较大,当再次脱湿时,少量水分以较小的渗透系数进入试样内部,水分无法轻易从试样内部蒸发出去,因此在同一循环等级下,平均吸水量均大于平均脱水量;随着循环次数的增加,微裂缝的逐渐发育,土体内部基质吸力趋于均匀,因此脱水量逐渐等于吸水量。因掺砂量增加,土体细颗粒含量减小,“砂化作用”及“裂缝作用”均有所弱化,因此相比较未掺砂时,其曲线变化趋势较缓,即循环次数对土体的吸、脱水行为不敏感。图7和8很好地反映了土体这种变化趋势。

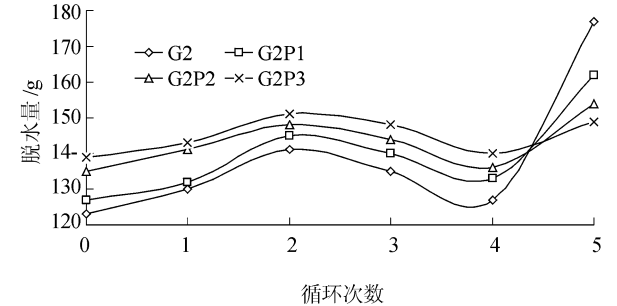


图7 高液限粉土中脱水量随循环次数的关系
Fig.7 Dehydration mass of G2 changing with cycle number

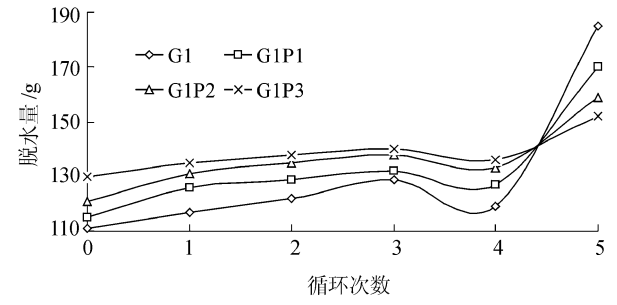


图8 高液限黏土中脱水量随循环次数的关系
Fig.8 Dehydration mass of G1 changing with cycle number

2.3 膨胀率

由于高液限土存在亲水性的矿物^[13]:蒙脱石、蛭石。单个黏土片的蒙脱石晶体一般仅由几层到十几层晶胞叠加而成,两层晶胞之间是以氧原子与氧原子相联,靠分子间的范德华力相连接,连接力很弱,水分子易进入晶胞间,使得晶胞之间的间距增大,造成高液限土吸水后体积膨胀,失水则体积收缩。因此含水量是影响高液限土变形的重要控制因素,其绝对膨胀率应与吸水量变化曲线相对应。在循环的初期,由于水分未渗透到土体内部,绝对膨胀率相对较小,随着循环次数的增加,裂缝深度逐步加深,水分充分渗透,造成绝对膨胀率增加。

由图9和10可知:高液限土的膨胀率随循环次数的增加而先减小,后小量增加,再显著增加。一般在循环1次和4次时的膨胀率最小。掺砂量越小,膨胀率变化值越大。一般高液限黏土的膨胀率明显大于高液限粉土,这主要是由于高液限黏土中细颗粒含量高、亲水性矿物成分高的原因。

3 讨论

按照非饱和土强度理论,土体在脱湿、吸湿过程中的强度特征主要受含水量和裂隙性双重影响。由于吸湿前的含水量较饱和时的含水量存在较大差值,在较强的基质吸力的作用下,水分逐渐进入亲水性矿物晶格之间,浸水后土体的含水量较配料时有

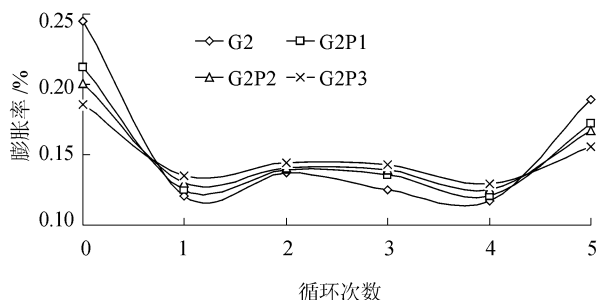


图 9 高液限粉土膨胀率随循环次数的关系

Fig. 9 Expansion ratio of G2 changing with cycle number

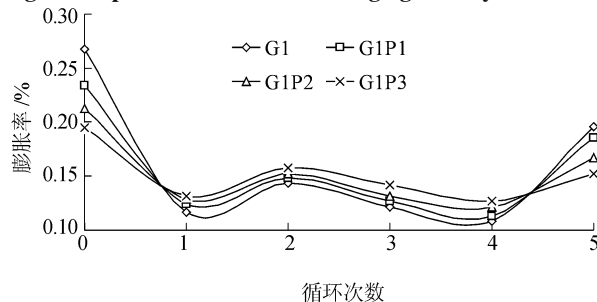


图 10 高液限黏土膨胀率随循环次数的关系

Fig. 10 Expansion ratio of G2 changing with cycle number
明显增加,因此试样在经历 0 次循环吸湿后,平均吸水量及膨胀率都出现先增大的趋势。由于亲水性矿物含量较高,颗粒间的结合水膜增厚,颗粒间距离的增加,黏聚力和摩擦力都显著减小,故 0 次循环时的 CBR 值较小。

当循环 1~2 次脱湿时,土体发生干缩造成含水量减小,黏粒之间在不可逆的范德华力作用下使黏粒聚集成较大集聚体,其结果是土中黏粒含量减小,比表面积减小,孔隙率增大,可塑性降低,同时颗粒定向性变差,同时由于干缩时应力的不均匀,造成试样表面出现微裂缝;在吸湿时,由于黏粒周围的水膜使得微裂缝出现闭合,阻碍水分的自由进入,使裂缝仅开展到试样的有限深度内,造成局部土体的基质吸力较大。随着土体孔隙率的增大和表面裂缝深度的开展,土体内部基质势趋于均匀,因此吸水量与脱水量均小量增加。水进入亲水性矿物颗粒的夹层后,在荷载的压力下,土体体积膨胀量有所减缓,细颗粒填充与粗颗粒间,大小颗粒相嵌,同时“砂化作用”造成土体粗颗粒含量增加,因此 CBR 值有所增大。

当循环 3~4 次后,土体干湿时微裂缝逐渐发育、加深,黏土颗粒水膜不足以使裂缝闭合,从而进一步加速了土体裂缝开展的速度,同时裂缝的开展破坏了土体的完整性和均一性,造成土体的抗剪强度减小。当因“砂化作用”造成 CBR 增加量与因

“裂缝作用”造成 CBR 减小量达到平衡时,土体的 CBR 值达到最大值。而土体的吸水量与脱水量因“砂化作用”造成粗颗粒含量的增加而小量减小。

当循环次数达到 5 时,干缩时的小裂缝贯穿形成大裂缝,从而为自由水进去土体提供了良好的通道,造成脱水量显著增加,“裂缝作用”显著增加,而“砂化作用”有所弱化。因此土体的 CBR 值逐渐增大。

4 结 论

通过试验研究 G1 和 G2 在不同掺砂量、不同干湿循环次数下,掺砂量、吸水量、脱水量、膨胀率对 CBR 值的影响,得出如下结论:

1) 粗颗粒含量越高,摩擦力越大,黏聚力越小,水敏感性越差;细颗粒含量越高,黏聚力越大,摩擦力越小,水敏感性越强。

2) 土体的吸水量总是于膨胀率成对应关系,即水是引起土体膨胀和收缩的主要原因。

3) 脱水量与吸水量是相互影响的。土体的脱水量的增大造成吸水量变大;反之,吸水量的增加也会造成脱水量的增加。

4) 土体的 CBR 值与含水量成反比例关系。因此含水量是影响 CBR 值的主要因素。

5) 在干湿循环初期以“砂化作用”为主,“裂缝作用”为辅;而在干湿循环后期是以“裂缝作用”为主,“砂化作用”为辅。

广东西部地区以热带、亚热带气候为主,路基填料不可避免地受到干湿循环作用,当高液限土用作路基填料时,在较重的荷载作用下,土体吸水后的膨胀率得到压制,在循环 5 次以上后, CBR 值较掺砂高液限土的大,且水敏性较强,因此应填筑在相对较深的 93 区,不易填筑在较浅的 94 区和边坡处。掺砂改良后,其水敏性降低, CBR 值较大,可以填筑在相对较浅的 94 区。

参考文献:

- [1] Sand U, Sandberg J, Larfeldt J. Numerical prediction of the transport and pyrolysis in the interior and surrounding of dry and wet wood log[J]. Applied Energy, 2008, 85(12):1208 - 1224.
- [2] Tang Chaosheng, Cui Yujun, Shi Bin. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. Geoderma, 2011, 166(1):111 - 118.