

文章编号:1671-8879(2016)01-0044-06

高液限土路基填筑技术研究

戴良军,朱大勇

(合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230001)

摘要:为解决高液限土直接用作路堤填料时出现压实困难、水稳定性差等工程问题,通过加州承载比(CBR)试验及现场碾压试验研究高液限土掺砂改良前后压实度、含水率、碾压遍数、CBR 值这几个参数间的关系,并从强度衰减和膨胀变形 2 个方面分析它们的变化规律。研究表明:压实度随碾压遍数先显著增加,后小量减小;CBR 峰值时的含水率一般大于最佳含水率;高液限土 CBR 值同时受含水率与压实度所控制,但含水率对高液限土 CBR 值的影响比压实度更显著;不同膨胀等级造成高液限土掺砂改良前后的 CBR 值变化特征差异显著;高液限土含水率应控制在 $\omega_{\text{opt}} + 2\% \sim \omega_{\text{opt}} + 6\%$ (ω_{opt} 为最优含水率),并采取包边处理及降低压实度标准的措施,可用作下路堤的填料;掺 20% 砂高液限土含水率应控制在 $\omega_{\text{opt}} \sim \omega_{\text{opt}} + 6\%$,可填筑于上下路堤。

关键词:道路工程;高液限土;掺砂改良;含水率;压实度;加州承载比;碾压遍数

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Filling technology research for high liquid limit soil roadbed

DAI Liang-jun, ZHU Da-yong

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: To solve engineering problems of compaction difficulty and poor water stability of high liquid limit soil when it was directly used as subgrade filling, the relationship among several parameters of compaction degree, water content, compaction times, and CBR value before and after sand improvement was studied though California bearing ratio test and field rolling test. The change rules were analyzed from two aspects of intensity attenuation and expansion deformation. The results show that compaction degree first increases greatly and then decreases slightly with increasing of compaction times, and water content at maximum CBR value is generally greater than optimal water content. CBR value of high liquid limit soil are controlled by water content and degree of compaction, but the influence of water content on CBR value is more significant than that of compaction degree. Different level of inflation leads to different characteristics of CBR value of high liquid limit soil before and after sand improvement. High liquid limit soil can be used as direct filling material in the upper embankment while water content should be controlled during the range of 2.0% lower and 2.0% higher than the optimum water content after using the surrounding conduction and reducing the standard of degree of compaction. High liquid limit soil modified by 20% sand can be used in upper and lower embankment after water content is controlled during the range of the optimum water content and

收稿日期:2015-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51378168)

作者简介:戴良军(1963-),男,安徽固镇人,教授级高级工程师,工学博士研究生,E-mail:2765095113@qq.com。

6.0% higher than the optimum water content. 2 tabs, 13 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; high liquid limit soil; improved by sand; water content; compaction degree; CBR; compaction times

0 引 言

广东云罗(云浮—罗定)高速沿线有大量的高液限土分布。由于此类土具有裂隙性、弱膨胀性和崩解性等特殊工程地质特性,若不经处理直接作为路堤填土会出现压实困难、水稳定性差等各项工程问题。目前,高液限土的处理方法有:隔水防护法、掺料改善颗粒级配法、改进施工工艺等。其中掺料改良方法中常用的改良材料有:砂、水泥、石灰等^[1]。国内外学者对此进行了大量研究:早在 1981 年 Al-lam 等通过试验得出含水量的变化将直接影响高液限土的特征^[2];Al-Homoud 等从结构方面分析高液限土在干湿循环作用下强度和膨胀性的疲劳效应^[3]。胡昕等进行了高液限土水敏感性研究,揭示了含水量变化对高液限土各项力学性能的影响^[4];程涛等通过试验获得了不同性能高液限土的最佳掺砂比例^[5];朱冬梅等对高液限土的改良填筑施工工艺进行了研究^[6];李方华研究了不同性质高液限土的最佳掺砂砾石比^[7]。然而基于经济性、技术可行性等因素发现掺砂改良最为经济,且掺砂 20%即能满足路堤各项力学性能要求。

根据高速公路路堤填筑质量控制标准,评价改良效果的主要因素有 CBR 值和填筑压实度。加州承载比(CBR)试验是一种评价基层材料承载能力的试验方法,其指标是衡量土体能否作为填料的依

据^[8]。压实度是表征土体密实效果的依据。压实度越大,单位体积内土体颗粒越多,颗粒之间距离越短,土体间越密实,其大小是路堤填筑时的质量控制标准^[9-12]。根据公路等级及填土深度,规范分别给出了不同深度的压实度和 CBR 值要求^[1],一旦达不到规定值,即视为不合格。因此,很有必要对高液限土用作路基填料的可行性及其填筑技术进行深入研究。本文结合广东省云罗高速公路工程,通过加州承载比试验及现场碾压试验研究高液限土掺砂改良前后压实度、含水率、碾压遍数、CBR 值这几个参数间的关系,并从强度衰减和膨胀变形 2 个方面分析其变化规律,探讨高液限土用作路堤填料的可行性,并揭示其内在变化机理,从而为高液限土路堤填筑质量控制提供理论依据。

1 试验材料

1.1 掺砂前后高液限土的物理力学性能

根据高液限土的工程地质特性,选取代表性的高液限土试样。优质的改良材料是确保改良试验成功的前提,根据就近取材原则选择珠江流域的河砂作为试验材料。本文将高液限土表示为 G1,掺砂 20%的高液限土表示为 G2,分别进行一系列液塑限试验、颗粒级配试验、击实试验、CBR 试验。表 1 为高液限土改良前后的基本物理力学指标,高液限土的颗粒级配曲线见图 1。

表 1 高液限土改良前后的物理性质指标

Tab. 1 Physical properties of high liquid limit soil before and after improved sand

土类	含水率 $\omega/\%$	相对密度 G_s	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	细粒含量/ $\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	压缩系数 E_s/MPa^{-1}	最优含水率 $\omega_{opt}/\%$	最大干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	膨胀率/ $\%$
G1	25.8	2.739	1.823	86.3	63.1	28.3	34.3	0.561	18.3	1.698	24.5
G2	20.9	2.754	2.019	72.2	48.2	30.8	17.4	0.428	16.2	1.803	6.64

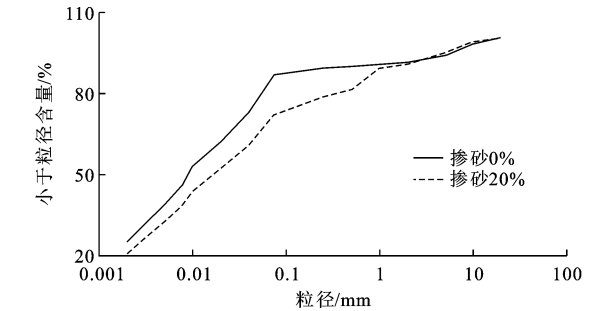


图 1 高液限土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of high limit liquid soil

由表 1 及图 1 可知,高液限土具有细粒含量高、液限大、压缩系数大等特点。因细粒在高液限土中含量较大,土水势高,大部分水为吸着水,导致孔隙水难以排出,土体渗透性较差,因此高液限土路堤在施工期及运营期均会出现诸多工程质量问题。而掺砂 20%改良后,其含水率、液限、塑性指数、压缩系数、膨胀率、最优含水率均大幅减小,最大干密度明显增大。细粒含量由 86.3%降低到 72.2%。随着粗粒含量的增加,水膜间的联结力逐渐减弱,自由水含量增大,土体的渗透性得到增强。同时,土颗粒的

空间结构重新排列,粗颗粒间细粒土的粘结作用致使土体形成密实的砂土结构,粗颗粒的骨架作用明显加强,工程性质得到改善^[13]。

2 CBR 试验及流程

CBR 试验:将烘干后的高液限土加入 20% 质量比的干砂,经拌和均匀,加入按不同含水率($\omega_{opt} - 2\%$ 、 ω_{opt} 、 $\omega_{opt} + 2\%$ 、 $\omega_{opt} + 4\%$ 、 $\omega_{opt} + 6\%$)计算得到的水,经拌和均匀后,闷料 24 h 后,击实、浸水 4 d 后测定土体的 CBR 值。试验按《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)执行, CBR 设备采用天津三思试验仪器制造有限公司生产的 CBR-1 型承载比试验仪^[14]。

现场试验流程为:室内试验→基底处理→上土平整→布格掺砂→旋耕机拌匀→压路机碾压→压实度检测→掺砂量检测。施工时根据室内试验获得 G1 及 G2 的最优含水率及 CBR 值,并进行施工前的准备工作。将 G1 松铺 20 cm 后,将按砂土质量比 20% 计算得到的河砂平铺在土上,把 5 组平行试验路段的碾压含水率大致控制在 5 种含水率,经旋耕机拌和均匀,整平后,用 20 t 压路机进行碾压,分别在碾压 3、4、5、6、7、8 遍后测得土体的压实度及掺砂量。

3 试验结果及分析

3.1 高液限土强度基本规律分析

图 2 和图 3 为不同含水率下压实度 K 和碾压遍数之间的关系;图 4 和图 5 为不同压实度下 CBR 值与含水率 ω 之间的关系;图 6 和图 7 为不同含水率下 CBR 值和压实度 K 之间的关系。

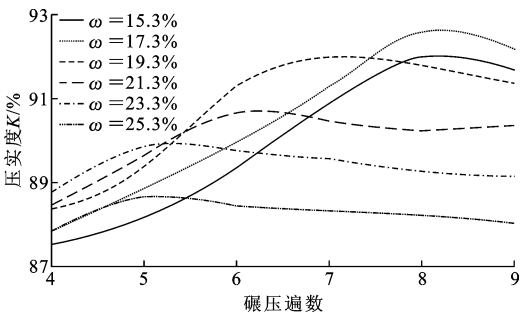


图 2 G1 的压实度与碾压遍数的关系

Fig. 2 Relationship between compaction degree and compaction times of G1

由图 2 及图 3 可知,随碾压遍数增加,土体压实度并不是一直增大,而是存在一个最大值,所对应的碾压遍数即为最佳碾压遍数。当碾压遍数小于最佳

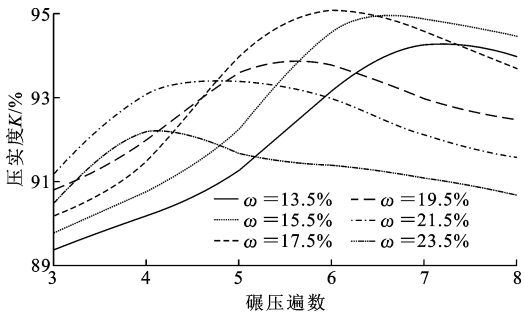


图 3 G2 的压实度与碾压遍数的关系

Fig. 3 Relationship between compaction degree and compaction times of G2

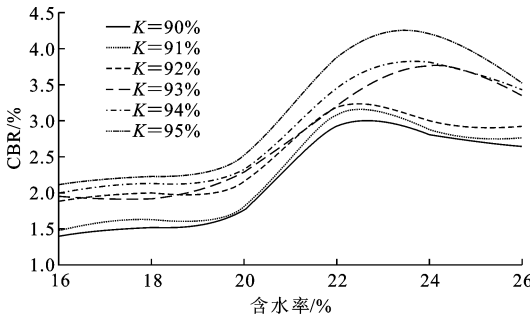


图 4 G1 的 CBR 值随含水率变化关系

Fig. 4 Relationship between CBR value and water content of G1

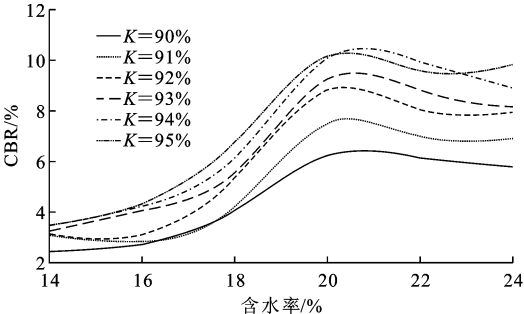


图 5 G2 的 CBR 值随含水率变化关系

Fig. 5 Relationship between CBR value and water content of G2

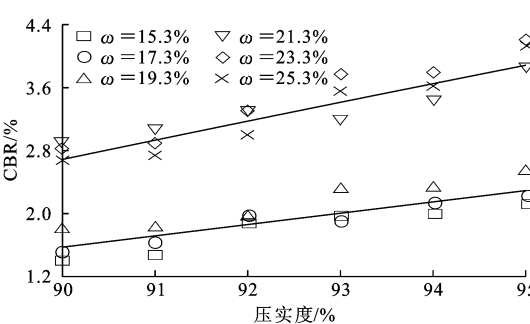


图 6 G1 的 CBR 值随压实度的变化关系

Fig. 6 Relationship between CBR value and compaction degree of G1

碾压遍数时,压实度增加幅度较大,大于最佳碾压遍数后,压实度小量减小。且最佳碾压遍数和峰值压实度均随含水率的增加而减小。但高液限土掺砂前

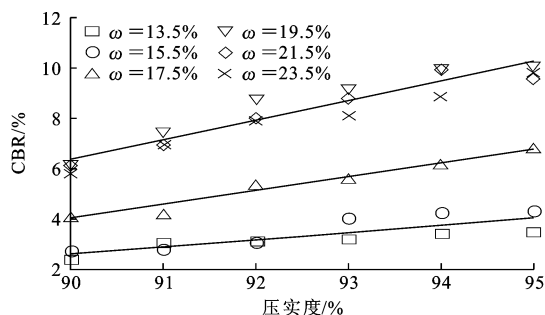


图 7 G2 的 CBR 值随压实度的变化关系

Fig. 7 Relationship between CBR value and compaction degree of G2 后的上述指标存在明显差异,相同碾压遍数下的掺砂高液限土的峰值压实度比未掺砂的大。对于 G1,在含水率较大(23.3%、25.3%)、中等(19.3%、21.3%)、较小(15.3%、17.3%)时,最佳碾压遍数分别为 5、6~7、8;而对于 G2,在含水率较大(21.5%、23.5%)、中等(17.5%、19.5%)、较小(13.5%、15.5%)时,最佳碾压遍数分别为 4、6、7。可见,颗粒级配、含水率、压实功均能显著影响压实效果。

由图 4 和图 5 可知:CBR 峰值随压实度的增加而增大,且 CBR 峰值含水率一般大于最佳含水率。在压实度较大时(93%、94%、95%),G1 的 CBR 峰值含水率比最佳含水率大 6.0%;在压实度较小时(90%、91%、92%),G1 的 CBR 峰值含水率比最佳含水率大 4.0%;而 G2 的 CBR 峰值含水率一般均比最佳含水率大 4.0%。

由图 6 可知,G1 的 CBR 值随压实度增加而增大,但变化幅度随含水率的变化而有所不同。当含水率大于最佳含水率较多时($\omega = 21.3\%$ 、 23.3% 、 25.3%),高液限土 CBR 值随压实度的增大幅度较大,虽然其 CBR 值易满足要求,但即使在最佳遍数 5~6 遍的碾压下,其峰值压实度仅为 90%,不能满足规范要求;而当 $\omega \leq \omega_{opt} + 2\%$ 时,其 CBR 值增加幅度相对较小,在最佳遍数 7~8 遍碾压后,虽然其压实度能达到 93%,但相应 CBR 值均小于 3.0%,无法满足路堤路用要求。

由图 7 可知,G2 的 CBR 值随压实度的变化则与 G1 不同,大于最佳含水率时 CBR 值随压实度增加而变化的幅度比等于或小于最佳含水率时显著的多。当 ω 为 $\omega_{opt} - 2\%$ 和 ω_{opt} 时,在碾压最优遍数 6~7 遍后,虽其压实度能达到 95% 以上,但其 CBR 值均小于 3.0%;当 ω 为 $\omega_{opt} + 2\%$ 时,只要合理控制压实功,其压实度易达到 95% 以上,CBR 值也大于 3.0%,能直接填筑于上下路堤中;甚至当 ω 为 $\omega_{opt} + 4\%$ 和 $\omega_{opt} + 6\%$ 时,在最优遍数 5~6 遍碾压后,压实度也能达到

94%~95%,CBR 值也能满足填筑上、下路堤的要求;当 ω 为 $\omega_{opt} + 8\%$ 时,虽然 CBR 值易满足要求,但压实度仅为 93%~94%,安全储备不足。

3.2 高液限土强度特性机理分析

高液限土的强度特性之所以呈现上述特征,根本在于土体浸水后的含水率与压实度以及结构所处状态的差异,含水率越大,压实度越低,结构的损伤越严重,则土体的 CBR 值就越小。由浸水后的膨胀量与含水率关系(图 8、图 9)可知,相同含水率条件时 G1 的膨胀幅度明显高于 G2,最佳含水率时 G1 具有高达约 10% 的膨胀量,而当含水率达到拐点含水率 21.3% 时,其平均膨胀量衰减到 1.14%,且衰减曲线存在明显拐点,其拐点含水率分别为 21.3% 和 19.5%,与 CBR 峰值含水率相对应。小于拐点含水量时,膨胀量随含水量增加而急剧减小;大于拐点含水量时,膨胀量衰减到 0.1% 数量级稳定值,因此,G1 和 G2 的 CBR 特征呈现显著差异主要是由于其膨胀幅度差异引起。

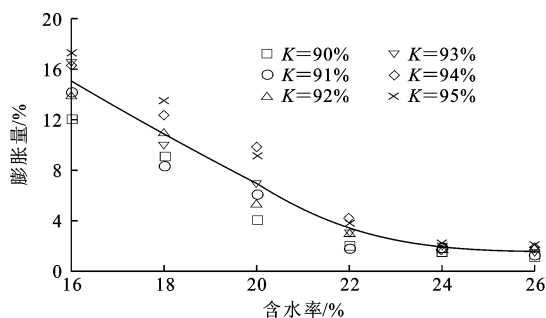


图 8 G1 的膨胀量随含水率的变化关系

Fig. 8 Relationship between swelling percentage and water content of G1

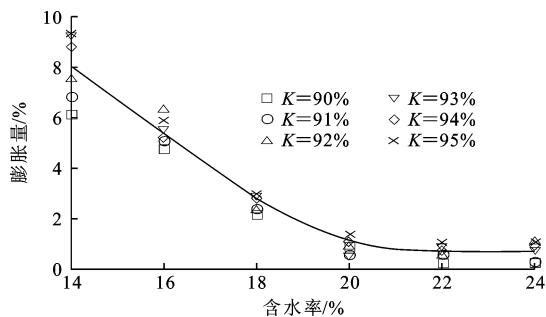


图 9 G2 的膨胀量随含水率的变化关系

Fig. 9 Relationship between swelling percentage and water content of G2

从浸水前后含水率的变化关系(下页图 10、图 11)可知,浸水后含水率随浸水前含水率的增加先减小后增大,其拐点含水率与 CBR 峰值含水率相对应。当含水率小于拐点含水率时,CBR 值同时受压实度和

含水率所控制,随着浸水前含水率的增大,浸水后含水率逐渐减小,因膨胀造成土体的压实度损失量降低,导致浸水前后结构的损伤逐渐减弱,CBR 值随着浸水前含水率的增大而逐渐增大;当含水率大于拐点含水率时,随着浸水前含水率的增加,膨胀量相对较小,且趋于一定值,造成压实度变化幅度不大,因此,此时 CBR 值主要由浸水后含水率所控制,而浸水后含水率随浸水前含水率的增加而增大,从而出现 CBR 值随浸水前含水率的增加而小幅减小的现象。

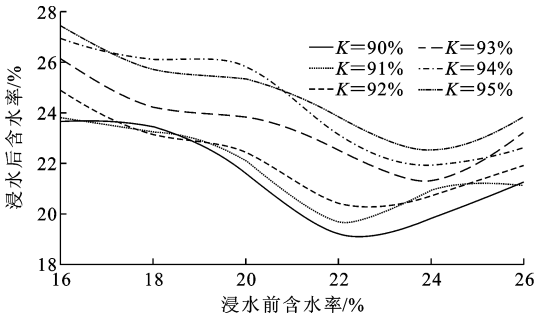


图 10 G1 浸水前后含水率的变化

Fig. 10 Changes of water content of G1 before and after immersion

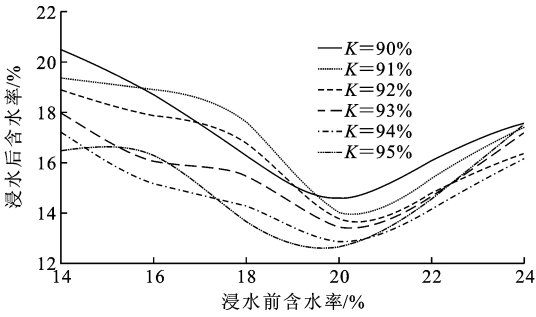


图 11 G2 浸水前后含水率的变化

Fig. 11 Changes of water content of G2 before and after immersion

虽然同一含水率下膨胀量随压实度的增加而小幅增大,但增大幅度有限,造成浸水后压实度降低量较小,因浸水膨胀造成的结构损伤也非常有限;而浸水后含水率随压实度的增加而大幅减小(见图 12、图 13),且减小幅度随浸水前含水率的增加而增大。因此,浸水前同一含水率下高液限土的 CBR 值主要由含水率所控制,压实度的影响相对很小,且浸水前压实度和含水率越大,则浸水后含水率越小,土体的 CBR 值也越大;浸水前土体含水率越大,则浸水后 CBR 值随压实度增加而增大的幅度越明显。

由此可见,高液限土的 CBR 值同时受含水率和压实度所控制,但含水率对高液限土 CBR 值的影响明显大于压实度,高液限土的胀缩性使得 CBR 特征不同于一般粉土或黏土,膨胀幅度的差异致使 G2 的 CBR 值高且随含水率及干密度的变化幅度不同于 G1。

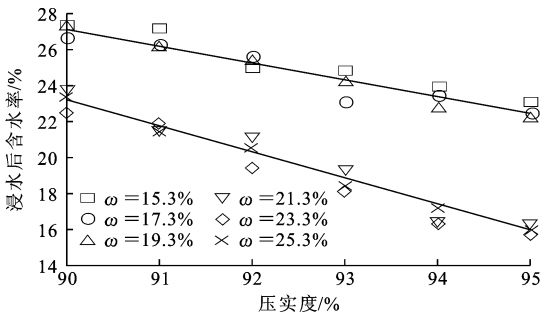


图 12 G1 浸水后含水率随压实度的变化

Fig. 12 Changes of water content of G1 along with changes of compaction degree after immersion

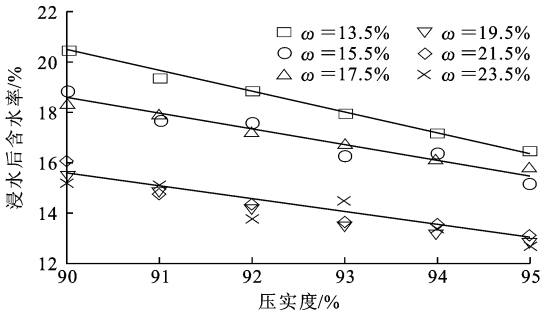


图 13 G2 浸水后含水率随压实度的变化

Fig. 13 Changes of water content of G2 along with changes of compaction degree after immersion

4 高液限土路堤填筑现场质量控制参数

《公路路基施工技术规范》(JTG F10—2006)中对路基不同深度部位的压实度和 CBR 值均提出明确要求,因此高液限土路堤填筑时必须控制填筑含水率及压实功^[1]。只有填筑含水率略大于最佳含水率,干密度略小于最大干密度时,路堤的填筑效果才最佳。高液限土在最佳含水率附近碾压时的压实度和初期强度虽满足要求,但通车一段时间后,路堤浸水膨胀将引起强度衰减、密实度降低,对水稳定性非常不利^[15-18],因此合理的高液限土路堤填筑含水率应介于最佳含水率与天然含水率之间。

当采用 G1 直接填筑,若将含水率控制在 $\omega_{opt} - 2\% \sim \omega_{opt} + 2\%$ 时,在碾压大于 6 遍后,其最大压实度与 CBR 值均不满足要求,且填筑后存在因含水率增加引起的较大膨胀变形和强度损伤,因此不能直接填筑;若控制含水率大于 $\omega_{opt} + 6\%$ 时,压实度储备不足,因此直接填筑的高液限土含水率应控制在 $\omega_{opt} + 2\% \sim \omega_{opt} + 6\%$,经压路机碾压 5~6 遍后,填筑在相对较深的下路堤,同时将压实度标准降低为 88%。但因 G1 的高液限、高细粒含量、水稳定性较差等不利因素,填

筑时应采取包盖法处理,且应降低压实度标准,以确保路堤满足长期稳定性与变形要求。

当采用 G2 填筑路堤时,若填筑含水率大于最佳含水率 6%,虽然通车后的膨胀变形及强度损失较小,且 CBR 值满足要求,但最佳碾压遍数时的最大压实度仅为 92%;若采用 $\omega_{opt}-2\%\sim\omega_{opt}$ 的含水率作为填筑标准,虽然压实度满足要求,但 CBR 值较小,且不能满足长期水稳定性要求;当采取 $\omega_{opt}\sim\omega_{opt}+6\%$ 的填筑标准,且合理控制压实功时,不但压实度与初期强度较高,浸水后的膨胀量与强度衰减较小,因含水率增加造成的结构损伤也非常有限,且具有良好的水稳定性,拥有较大的压实度与 CBR 值,能满足下路堤的填筑质量要求,因此 G2 的填筑含水率标准为 $\omega_{opt}\sim\omega_{opt}+6\%$,能填筑于上下路堤。不同含水率下高液限土填筑技术参数见表 2。

表 2 不同含水率下高液限土填筑技术参数
Tab. 2 Construction technical parameters of high liquid limit soil in different water contents

土样	含水率/%	最大压实度/%	相应 CBR 值/%	最佳碾压遍数	填筑部位
G1	$\omega_{opt}-2\sim\omega_{opt}+2$	91~93	2~3	7~8	无
	$\omega_{opt}+2\sim\omega_{opt}+6$	89~91	3~4	5~6	下路堤
	$>\omega_{opt}+6$	88~89	3~4	5	无
G2	$\omega_{opt}-2\sim\omega_{opt}$	94~95	3~4	6~7	下路堤
	$\omega_{opt}\sim\omega_{opt}+6$	93~95	6~10	5~6	全路堤
	$>\omega_{opt}+6$	91~92	6~10	4	无

高液限土路堤填筑施工时应综合考虑胀缩特性、强度特性、压实状态及水稳定性,合理控制填筑时的含水率,尽量减少干湿循环引起的强度衰减、压实度降低以及水稳定性变差^[19-20]。

5 结 语

- (1)高液限土一般具有细颗粒含量大、液限高、CBR 值小、膨胀率较大、压缩系数较大等不利工程特性。掺砂改良后,其各项力学性能得到改善。
- (2)同一含水率下,压实度随碾压遍数的增加先增,后小量减小。CBR 峰值时的含水率一般大于最佳含水率。
- (3)高液限土 CBR 值同时受含水率与压实度控制,但含水率对 CBR 值影响比压实度更显著,不同膨胀等级造成 G2 和 G1 的 CBR 值变化特征差异显著。
- (4)高液限土路堤填筑应综合考虑胀缩特性、强度特性、压实状态及水稳定性,填筑含水率应介于最佳含水率与天然含水率之间。
- (5)G1 的填筑含水率应控制在 $\omega_{opt}+2\%\sim$

$\omega_{opt}+6\%$,并采取包边处理及降低压实度标准的措施,能够用作下路堤的填料;而 G2 的填筑含水率应控制在 $\omega_{opt}\sim\omega_{opt}+6\%$,能填筑于上下路堤。
(6)本文基于压实度、CBR 值及长期稳定性获得了高液限土掺砂改良前后的路基填筑技术参数,而干湿循环效应及掺砂量变化对土体力学性能的影响将是下一步研究的重点。

参考文献:
References:

[1] JTG F10—2006,公路路基施工技术规范[S].
JTG F10—2006, Technical specifications for construction of highway subgrades[S]. (in Chinese)

[2] 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.

[3] AL-HOMOUD A S, BASMA A A, MALKAWI A I H, et al. Cyclic swelling behavior of clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1955, 121(7): 562-565.

[4] 胡 昕,洪宝宁,王海明,等. 高液限土和煤系土抗剪强度的水敏感性比较研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010, 42(1): 54-59.
HU Xin, HONG Bao-ning, WANG Hai-ming, et al. Comparative study on the water sensitivity of shear strength of high liquid limit soil and coal-bearing soil [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(1): 54-59. (in Chinese)

[5] 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(4): 580-586.
CHENG Tao, HONG Bao-ning, LIU Xin, et al. Determination of optimal sand content for improving high liquid limit soil[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(4): 580-586. (in Chinese)

[6] 朱冬梅,邓百洪,洪宝宁,等. 广东云浮高液限土路堤填料改良方案试验研究[J]. 公路交通技术, 2010, 4 (2): 5-10.
ZHU Dong-mei, DENG Bai-hong, HONG Bao-ning, et al. Test and study on filling improvement programs for Guangdong Yunfu high liquid limit soil embankment[J]. Technology of Highway and Transport, 2010(2): 5-10. (in Chinese)

[7] 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 Me-

- chanics, 2010, 31(3): 785-788. (in Chinese)
- [8] 杨广庆, 高民欢, 张新宇. 高速公路路基填料承载比影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 97-100.
YANG Guang-qing, GAO Min-huan, ZHANG Xin-yu. Study on influence factors of California bearing ratio (CBR) of expressway subgrade materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 97-100. (in Chinese)
- [9] DIMITROVA R S, YANFUL E K. Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy [J]. Engineering Geology, 2012, 125: 11-25.
- [10] YONG R N, OUHADI V R. Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils [J]. Applied Clay Science, 2007, 35(3/4): 238-249.
- [11] GUNNEY Y, AYDILEK A H, DEMIRKAN M M. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway sub bases [J]. Waste Management, 2006, 26(9): 932-945.
- [12] ZHANG W H, XI W Y, WANG B T, et al. Test study of high liquid limit clay modified by quick lime used as sub-grade material [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(S2): 126-130.
- [13] 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)
- [14] JTG E40—2007, 公路土工试验规程[S].
JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [15] SAND U, SANDBERG J, LARFELDT J, et al. 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.
- [16] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles [J]. Geoderma, 2011, 166(1): 111-118.
- [17] 熊承仁, 刘宝琛, 张家生. 重塑粘性土的基质吸力与土水分及密度状态的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 321-327.
XIONG Cheng-ren, LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng. Relation of matric suction with moisture state and density state of remolded cohesive soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 321-327. (in Chinese)
- [18] 胡海英, 王 钊. 含水量对压实粘土的变形及强度性能的影响[J]. 公路, 2007(2): 1-6.
HU Hai-ying, WANG Zhao. Effects of moisture content on compression deformation and shear strength of compacted clay [J]. Highway, 2007(2): 1-6. (in Chinese)
- [19] 孔令伟, 郭爱国, 陈善雄, 等. 膨胀土的承载强度特征与机制[J]. 水利学报, 2014(11): 54-61.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shan-xiong, et al. Characteristics and mechanism of bearing strength of expansive soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(11): 54-61. (in Chinese)
- [20] 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. (in Chinese)

(上接第 35 页)

- [17] 刘 斌, 席道瑛, 葛宁洁, 等. 不同围压下岩石中泊松比的各向异性[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 880-890.
LIU Bin, XI Dao-ying, GE Ning-jie, et al. Anisotropy of Poisson's ratio in rock samples under confining pressures [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(6): 880-890. (in Chinese)
- [18] 张清慧, 李行船, 薛世东. 致密砂岩储层泊松比的精确计算[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(1): 54-57.
ZHANG Qing-hui, LI Xing-chuan, XUE Shi-dong. Accurate calculation of Poisson ratio for compacted sandrock [J]. Journal of Shandong University of Technology; Natural Science Edition, 2010, 24(1): 54-57. (in Chinese)
- [19] 王建华, 周扬锐, 张 群. 一种测试动三轴试样泊松比的方法[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增): 23-27.
WANG Jian-hua, ZHOU Yang-rui, ZHANG Qun. Measuring method for Poisson ratio of cyclic triaxial specimens [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(S): 23-27. (in Chinese)
- [20] 单桂芳, 杨 伟, 冯建民, 等. 材料泊松比测试方法的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(3): 15-19.
SHAN Gui-fang, YANG Wei, FENG Jian-min, et al. Advances in test methods for Poisson's ratio of materials [J]. Materials Review, 2006, 20(3): 15-19. (in Chinese)