

考虑持水能力的黄泛区高液限黏土路用压实标准

蒋红光¹, 曹让¹, 马晓燕², 陈思涵¹, 陈鲁川³, 姚占勇^{1†}

(1. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250061; 2. 山东交通运输厅公路局, 山东 济南 250002;

3. 齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要:黄河下游冲淤积在山东省形成了大量特殊的高液限黏土, 由于沿线平原区路基填料极度匮乏, 若弃之不用将造成极大损失. 本文从施工期和运营期2个阶段对土体的强度和模量进行了试验探讨. 黄泛区高液限黏土主要由高含量的磨圆粉粒及黏粒组成, 高于最优含水率压实时, 土体表现出空气体积率低、饱和度高的特点. 基于滤纸试验, 发现高进气值导致土体具有很强的持水性. 基于不排水、不排气的三轴试验, 获得了不同压实状态下土体归一化静强度和抗剪强度指标与饱和度、空气体积率的相关关系. 该类土存在的最优饱和度为79%(相应空气体积率为8%). 相较于土体的强度特征, 黄泛区高液限黏土回弹模量受含水率的影响更敏感, 含水率由20%增加至23%时, 尽管路基依然保持稳定, 但回弹模量的大幅衰减导致路基压缩应变增加近200%. 结合我国和日本的路基压实控制标准, 提出黄泛区高液限黏土的填筑含水率不应高于23%, 空气体积率不高于8%(即压实度控制在90%及以上), 以保证土体强度和模量的长期稳定性.

关键词:黄泛区高液限黏土; 持水能力; 饱和度; 空气体积率; 抗剪强度; 回弹模量

中图分类号:TU41

文献标志码:A

Subgrade Compaction Control Standard of High Liquid Limit Clay in Shandong Yellow River Flood Area Considering Its Water Retaining Characteristics

JIANG Hongguang¹, CAO Rang¹, MA Xiaoyan², CHEN Sihan¹, CHEN Luchuan³, YAO Zhanyong^{1†}

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Road Bureau, Shandong Provincial Department of Transport, Jinan 250002, China;

3. Qilu Transportation Development Group, Jinan 250101, China)

Abstract: Large area of special high liquid limit clay was formed due to the depositing in the downstream of Yellow River at Shandong province. Without the use of such clay in those plain areas in lack of filling materials, great resource waste would be caused. This paper experimentally examined the soil strength and modulus in both

* 收稿日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51608306), National Natural Science Foundation for Young Scientists of China(51608306); 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学)开放基金资助项目(2017P01), Open Fund of MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering(2017P01); 山东省科技厅科技发展计划项目(2011Y16, 2016B21), Shandong Transportation Science and Technology Foundation(2011Y16, 2016B21); 教育部博士后科学基金项目(2016M590636), China Postdoctoral Science Foundation(2016M590636); 山东大学基本科研业务费专项资金资助项目(2016GN026), Fundamental Research Funds of Shandong University(2016GN026)

作者简介: 蒋红光(1985—), 男, 山东临沂人, 山东大学助理研究员, 博士

† 通讯联系人, E-mail: zhanyong-yao@sdu.edu.cn

construction and operation periods. The high liquid limit clay in Yellow River flood area consisted of higher rounded silt particle and clay particle, which presented low volume ratio of air and high saturation degree when compacted above the optimum moisture content. Based on the filter paper tests, it was indicated that high air intake value resulted in strong water retention capacity. Through the unventilated-undrained triaxial test, the relationships between the normalized static strength, shear strength and saturation degree/volume ration of air were obtained at different compaction states. It was found that the soil had an optimum saturation ratio at 79% (volume ratio of air=8%). The soil resilient modulus was more sensitive to the moisture contents. Although the subgrade remained safe when moisture contents increased from 20% to 23%, the compression strain increased by almost 200% due to the sharp decrease in the resilient modulus. Considering the subgrade compaction standard specified in China and Japan, the high liquid limit clay in Yellow River flood area should be compacted lower than 23% moisture content and 8% volume ratio of air, i.e., no less than 90% compaction degree, to ensure the long-term stability of soil strength and modulus.

Key words: high liquid limit clay in Yellow River flood area; water retaining characteristics; saturation degree; volume ratio of air; shear strength; resilient modulus

黄河下游冲淤积在山东省鲁西南和鲁西北平原形成了大量特殊的黄泛区高液限黏土^[1]. 与我国南方和西南地区的高液限黏土相比, 该类土的粉粒含量高, 塑性分类图上位于低液限黏土与高液限黏土过渡区域, 土体表现出天然含水率高、保水性强、碾压过程易形成表层硬壳层等特点^[2-4]. 我国《公路路基设计规范》规定: 液限大于 50%、塑性指数大于 26 的高液限土不能直接用于路基填筑^[5]. 但是, 在山东省交通量繁重的黄泛平原区, 大量分布着这类高液限黏土, 且其他土类取土困难, 若弃之不用, 将造成巨大的经济损失和环境问题.

对于典型南方高液限黏土的路用性能, 我国很多学者开展了大量的室内外试验研究. 高液限土的力学性能受含水率的影响非常显著. 刘顺青等^[6]对广梧高速沿线的高液限土和红黏土开展了不同含水率下的土体强度试验, 发现对于高液限土, 其内摩擦角在含水率低于塑限时衰减缓慢, 而含水率高于塑限后, 内摩擦角快速减小; 对于红黏土, 粘聚力随含水率的变化同样呈现分段性; 同时, 由于高液限土表层失水速率比内部快, 表层易出现硬壳层. 吴立坚等^[7]对福建地区的高液限黏土进行了室内基本物性试验和现场填筑试验, 认为当控制合理的含水率范围 25%~32% (最优含水率为 25%)、并重型碾压 8~10 遍时, 可以保证压实后路堤的 CBR 值满足规范要求. 由于高液限土的天然含水率普遍比最优含水率

高 10% 以上, 通过晾晒的办法很难在短时间内将高液限土的含水率降至最优含水率的 $\pm 2\%$ 范围以内. 因此, 在较高含水率下降低压实标准, 通过控制压实工艺同样可以使路基性能满足规范要求. 刘鑫等^[8]通过对广梧高速公路河口至平台段高液限黏土的 CBR 值及沉降研究, 提出了高液限黏土和含砂高液限黏土的压实标准可降至 88%. 程涛等^[9]对广东云罗高速沿线高液限土路基进行了大量的室内试验和现场碾压试验, 发现对于该高液限土采用包盖法处理及降低压实度标准至 88% 后填筑路基的沉降满足规范要求. 除了压实度指标, 杨晶等^[10]提出将空气体积率控制在 6.5% 以下作为黄土压实的附加标准. 洪宝宁等^[11]参考日本压实度控制标准, 对南方高液限土提出了空气体积率不超过 8% 的附加标准. 张军辉等^[12]进一步对南方红黏土开展了不同含水率和压实度下的动三轴试验, 并提出了相应的临界动应力水平.

可见, 对高液限黏土路基填筑含水率、压实度甚至是空气体积率的控制标准仍然是工程实践中的难点. 我国规范中以击实试验确定的最佳含水率及压实度为控制标准, 但黏性土路基的现场碾压难以达到. 对于该类型的高液限黏土, 实际工程中经常存在含水率偏高、压实度偏低状态下碾压的路基却处于稳定工作状态的情况. 对此日本规范提出采用控制施工含水率及空气体积率来满足细粒土路基沉降量

的要求^[13-14]. 因此,针对山东黄河下游具有特殊成因的冲淤积高液限黏土,通过室内试验研究其基本物理力学特性,揭示其压实机理和强度变形特性,进而提出压实控制标准,对黄泛区高液限黏土路基现场碾压质量控制具有重要的工程实用价值.

1 高液限黏土的物理力学特性

试验所用的黄泛区高液限黏土取自济(宁)徐(州)高速公路沿线,典型的颗粒级配曲线如图 1 所示,颗粒组成统计结果如表 1 所示. 该类土主要由粉粒和黏粒组成,基本不存在粗粒土,粉粒含量最高,占 65.5%~72.2%;黏粒含量次之,占 22%~36.3%. 粉粒含量介于黄泛区粉土和南方高液限黏土之间,尽管该类土的粉粒占绝大部分,但土体的塑性表现出黏土的特性:液限 47.7%~54.9%,塑限 23.4%~30.1%. 按照细粒土分类的塑性图,土体属于高液限黏土的范围. 但是,与一般高液限黏土相比,该类土的粉粒含量明显偏高,导致其液塑限均偏低;而且,经电镜微观结构扫描发现山东黄泛区的粉粒颗粒不具备粉土常见的片状或针状结构,未见明显的棱角,颗粒的磨圆度更高,这主要是由于经黄河水流的长时间浸泡、颗粒撞击和水流冲刷作用,颗粒表层破碎、剥落严重,粉粒颗粒之间未形成互嵌结构,如图 2 所示. 由于粉粒含量较高,毛细孔隙发达,土体具有易吸湿性,遇水敏感;同时,小于 0.002 mm 的黏粒含量高于 22%,与水作用的界面效应强,表现出较高的粘聚力和保水性. 因此,较高含量的磨圆粉粒及黏粒组成,决定了山东黄泛区高液限黏土特有的强度和变形特性.

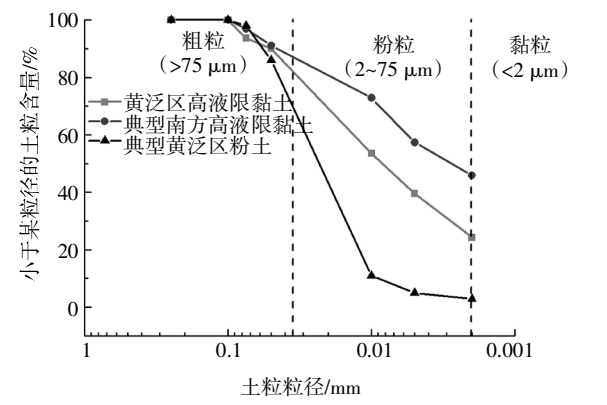
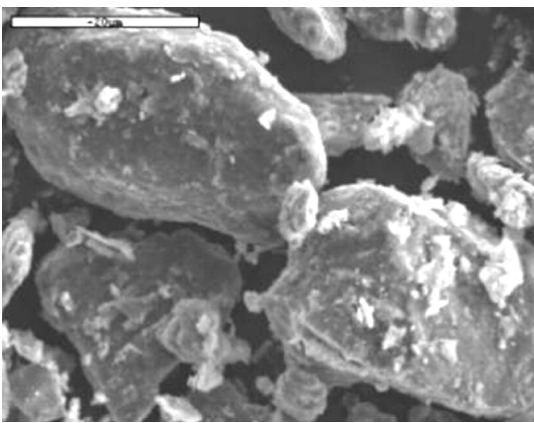


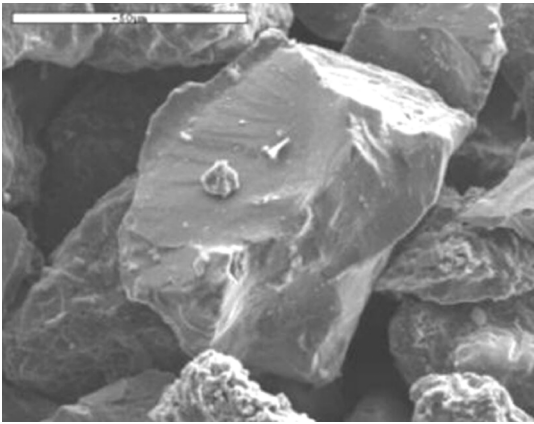
图 1 山东黄泛区高液限黏土典型级配曲线
Fig.1 Grain distribution of high liquid limit clay in Yellow River flood area

表 1 山东黄泛区高液限黏土的基本物理指标
Tab.1 Basic physical properties of high liquid limit clay in Yellow River flood area

土体类型	颗粒组成(质量分数)/%		液、塑限指标		
	粉粒	黏粒	液限/%	塑限/%	塑性指数
黄泛区高液限黏土	65.5~72.2	22~36.3	54.9	30.1	24.8
黄泛区粉土	95	3	27	17.2	9.8
南方高液限黏土	51	45.9	58.8	30.8	28



(a)黄泛区粉粒(20 μm)



(b)普通粉粒(50 μm)

图 2 不同土质的粉粒微观照片
Fig.2 Micrographs of different soil silt particles

图 3 所示为黄泛区高液限黏土重型击实结果. 该类土的击实曲线驼峰较宽,在最佳含水率左侧,击实曲线较宽缓,表现出粉性土的性状;在最佳含水率右侧,击实曲线趋于直线下降. 当击实含水率超过 20%后,随含水率增高,击实曲线趋近甚至重合于饱和线,干密度迅速下降,击实过程出现弹簧现象,但没有水分渗出,保水性强. 与普通粉土和黏土的压实曲线相比,该黄泛区高液限黏土在含水率较高时,压

实曲线非常接近饱和线,表明土体三相介质中的气相成分容易被压缩和排出,土体压实后的空气体积率要较普通粉土和黏土低。因此,高含水率压实下空气体积率低,是黄泛区高液限黏土区别于其他粉土和黏土的显著特点。

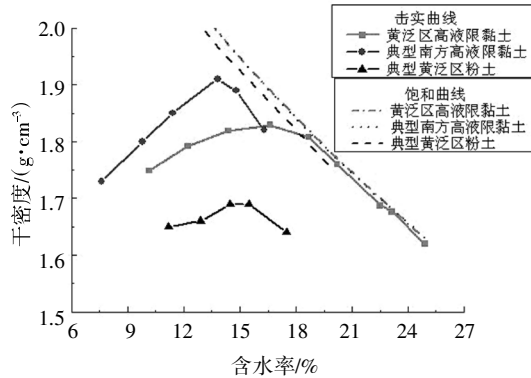


图 3 土样击实曲线

Fig.3 Soil compaction curve

2 持水能力

黄泛区高液限黏土的天然含水率普遍在 26% 以上,现场需要机械翻耕和 6~7 d 的充分晾晒才能将含水率降至最优含水率。现场取天然含水率状态的土样,室内根据湿法制备土样。采用滤纸试验对土体的持水特性进行研究,通过静压成型法制备直径 5 cm×高度 5 cm 的试样,试样含水率分别为 26%、23%、20%、17%、15%和 13%,目标压实度依次为 88%、90%、92%和 94%。采用双圈牌 No.203 型滤纸,两个土样中间放置 3 层滤纸,上、下层滤纸起保护作用,而后用绝缘胶带黏贴接缝处,并将制备完成的试件放置在密封罐中,最后置于恒温恒湿箱中(温度 25 ℃,湿度 95%)。根据美国 ASTM D5298-10 滤纸法试验规程^[15],测试得到密封 10 d 后吸湿滤纸的含水率,按照王钊等^[16]得到的率定方程式计算相应的基质吸力,如图 4 所示。Fredlund & Xing^[17]提出了体积含水率与基质吸力的 4 参数关系模型:

$$\theta_w = C(h_m) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right] \right\}^c} \quad (1)$$

$$C(h_m) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \quad (2)$$

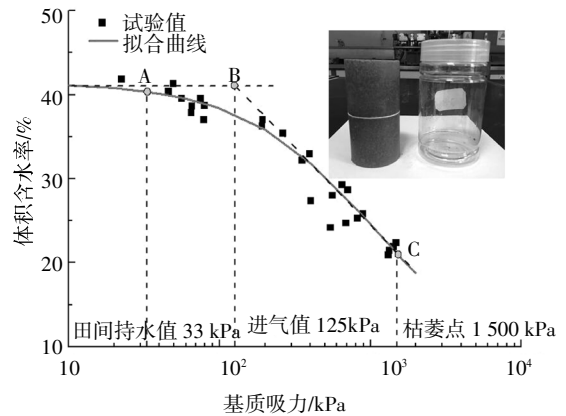
式中: a 、 b 和 c 为拟合系数; θ_s 为饱和状态下的体积含水率; $C(h_m)$ 为调整系数; h_r 为与残留体积含水率对应的基质吸力,它使曲线的干燥段转为水平向,可

参考 Zapata^[18]提出的经验公式计算:

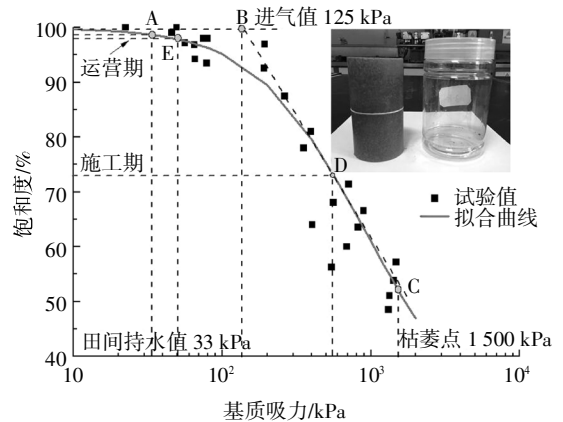
$$\frac{h_r}{a} = 32.44 e^{0.0186(u_{PI})} \quad (3)$$

式中:PI 为土的塑性指数。基于最小二乘法可以拟合得到上述系数为: $a = 596.8$, $b = 1.0$, $c = 1.3$,拟合得到的土水特征曲线如图 4(a)所示。同时,根据饱和度和体积含水率的关系式(4),可进一步得到饱和度与基质吸力的关系曲线如图 4(b)所示。

$$\theta_w = S_r \left(1 - \frac{r_d}{G_s \gamma_w} \right) \quad (4)$$



(a) 体积含水率-基质吸力



(b) 饱和度-基质吸力

图 4 土水特征曲线

Fig.4 Soil-water characteristic curves

黄泛区高液限黏土的田间持水率高达 40.4%(A 点,对应基质吸力 33 kPa),相应的饱和度为 98.6%,土体基本处于饱和状态。由斜率恒定部分的延长线与饱和时的基质吸力水平线相交于 B 点,可以得到对应的进气值为 125 kPa,当黄泛区高液限黏土路基的基质吸力高于该进气值时,土中孔隙开始进气(即减饱和),土体的含水率随之大幅度下降。但是,对于实际运营多年的填筑路基,在大气降雨入渗^[19]、蒸发作用和地下水毛细作用下其内部基质吸力多稳定在

0~100 kPa 以内. Smethurst 等^[20]对英国 Newbury 已运营 6 年的黏土路基(填高 8 m)开展了为期 5 年的持续监测,发现路基内部的持水状态与土层深度和季节变动密切相关. 对于路基浅层,当水分超过田间持水率时,重力水对吸力影响更大^[21],路基浅层 0.3 m 处土体的体积含水率和基质吸力随季节在 12%~45%和 0~100 kPa 范围内规律性波动;距路表 0.6 m 处土体的体积含水率和基质吸力在前 3 年随季节在 25%~45%和 0~80 kPa 范围内波动,但 3 年后其体积含水率稳定在 40%附近,基质吸力稳定在 0~30 kPa;距路表 0.9 m 处土体的体积含水率和基质吸力在 2 年后基本稳定在 45%和 0~10 kPa. 即使在蒸发作用强烈的地区,由于受路面覆盖效应的影响,路基的平衡湿度仍然远高于竣工时期. 冉武平等^[22]对通车近 10 年的 G315 新疆南疆路段进行了现场路基湿度调研,发现路基顶面以下 0.4~0.8 m 土体的含水率远高于裸露地面,并实测了路基内部的基质吸力:对于粉土和砂土路基,其基质吸力偏低,介于 0~50 kPa;黏土路基的基质吸力偏高,介于 30~80 kPa. 而且,当路基存在夹砂层时,会进一步阻隔水分的迁移^[23]. 黄泛区高液限黏土多分布在河流湖泊周围,地下水位距离地表 2 m 左右,由该类土填筑而成的路基,其湿度主要由地下水控制. 尽管路基施工时按照最优含水率填筑且压实度不低于 93%,相应的饱和度为 73%,如图 4(b)中的 D 点,此时的基质吸力约为 550 kPa,远高于进气值和现有路基的基质吸力实测值. 通过对运营多年的高液限黏土路基取样结果看,土体的含水率增大至 22%~24%,饱和度达到 98%,如图 4(b)中的 E 点,此时的基质吸力约 50 kPa,介于田间持水值和进气值之间. 因此,高液限黏土的高进气值导致了土体具有很强的持水性,在常年的降雨入渗和毛细水作用下,路基土体逐渐由施工阶段的低饱和度发展到高饱和度,且从路基的实际运营环境看,该过程一旦完成便很难逆转.

3 不同压实状态下的土体强度与回弹模量

3.1 三轴试验

根据现场土体含水率的变化范围,湿法制备含水率分别为 17%、20%、23%、26%和 29%的土样,大筒重型击实成型,压实度分别为 85%、90%、93%和 96%,如表 2 所示. 由于该土的渗透系数很小,施工期和交通荷载的短时作用过程中,土体多处于固水固气状态,因此进行三轴不固结不排水试验.

表 2 三轴试验工况

Tab.2 Experimental conditions of triaxial tests %			
含水率	压实度	饱和度	空气体积率
17	85	58.63	18.35
	90	67.02	13.55
	93	72.73	10.67
	96	79.05	7.79
20	85	68.98	13.76
	90	78.85	8.69
	93	85.57	5.65
	96	92.99	2.60
23	85	79.32	9.17
	90	90.68	3.83
	93	98.40	0.63
26	85	89.67	4.58
29	85	100	0

3.1.1 应力-应变曲线

图 5 为高液限黏土在含水率 $w = 23\%$, 压实度 $k = 90\%$ 时不同围压下的偏应力、孔隙水压力与轴向应变关系曲线. 对于非饱和的黄泛区高液限黏土,

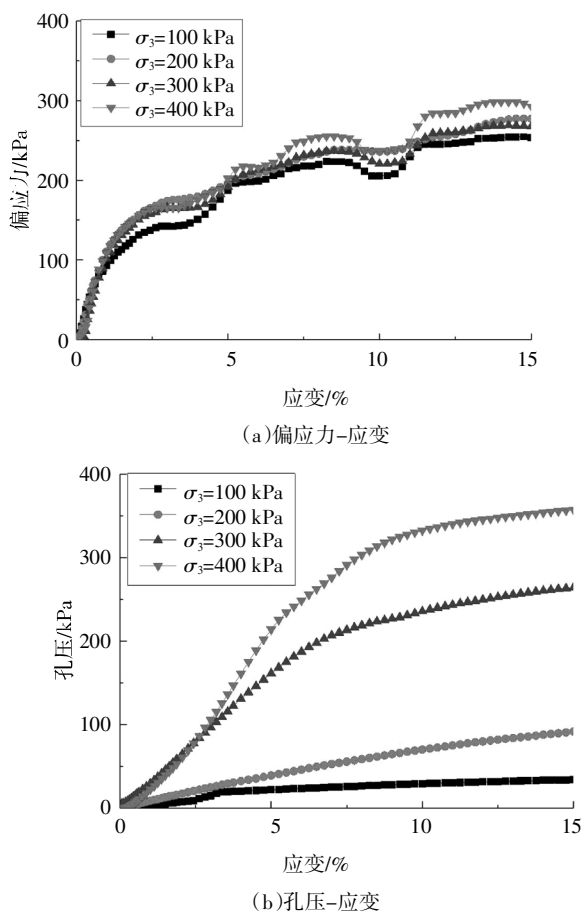


图 5 不同围压下的轴向应变发展曲线

Fig.5 Development of axial strain at various confining stresses

围压的增加对偏应力与轴向应变的影响并不显著. 在低围压条件下(100 kPa), 孔隙水压力随轴压的增长并未出现较大幅度的发展, 轴向施加的荷载大部分由土骨架承担, 有效应力增大, 土体强度提高; 随着围压的增大, 孔隙水逐渐承担较大的荷载, 当增加的围压完全由孔压承担时, 土体有效应力不再增加, 土体接近于饱和土的工作模式, 土体强度不随围压的增加而增大; 而对于三相体承担荷载的非饱和土而言, 会出现孔压的增加量超过围压的增幅的情况, 如围压由 200 kPa 增加至 300 kPa 时, 孔压增量超过 100 kPa, 此时土骨架的有效应力反而降低, 导致土体强度降低. 这也是非饱和土强度发展过程中所特有的现象, 即当荷载由土骨架和气相承担时, 有利于土体强度的提高; 而当荷载由气相承担变为孔隙水承担时, 土体强度将降低.

图 6 为高液限黏土在压实度 90%、围压 100 kPa 时不同含水率下的偏应力-应变关系. 含水率的提高将显著降低土体的偏应力水平, 峰值偏应力由 17% 含水率下的 560 kPa 降低至 23% 含水率下的 254 kPa. 而且, 高含水率下的土体更快由线性发展阶段转变为塑性屈服阶段, 对应的临界轴向应变和偏应力分别由 17% 含水率下的 1.7% 和 326 kPa 降低至 23% 含水率下的 0.6% 和 72 kPa. 然而, 压实度的提高对土体偏应力与轴向应变的关系几乎没有影响, 如图 7 所示, 表明在不排水、不排气条件下, 土体的强度主要受含水率的影响, 与压实度和围压的关系较小. 类似的规律也出现在非饱和残坡积土^[24]和砂性土中^[25].

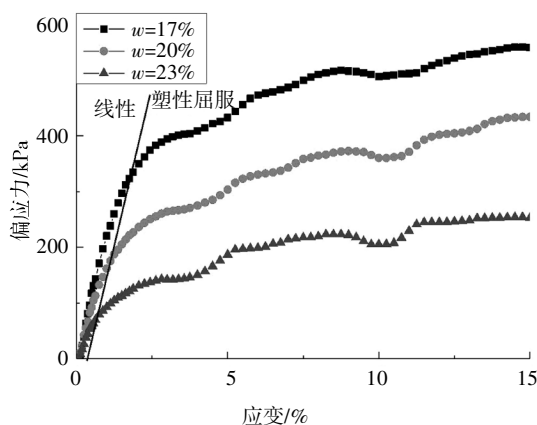


图 6 不同含水率下的偏应力-应变关系 ($k = 90\%$)

Fig.6 Stress-strain relationship under different water content

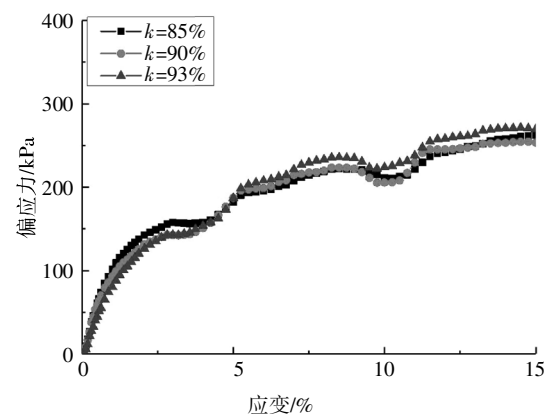


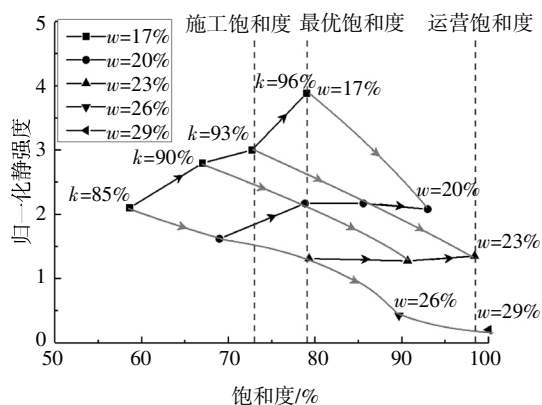
图 7 不同压实度下的偏应力-应变关系 ($w = 23\%$)

Fig.7 Stress-strain relationship under different compaction degree

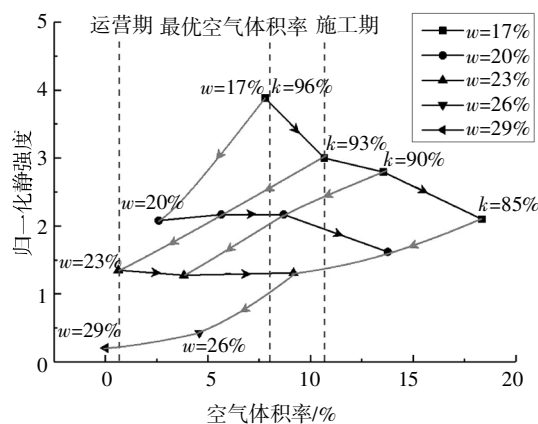
3.1.2 归一化静强度

取偏应力-应变曲线中的应力峰值点作为土体的静强度, 对于应变硬化型的土样, 静强度取值为轴向应变 15% 所对应的偏应力值. 定义归一化静强度为静强度与相应围压比值的一半, 近似表征路基某深度处附加应力与自重应力的比值. 图 8 为不同含水率和压实度下土体归一化静强度与饱和度、空气体积率的相关关系, 包括 3 条含水率等值线 ($w = 17\%$ 、 20% 和 23%) 和 4 条压实度等值线 ($k = 85\%$ 、 90% 、 93% 和 96%). 含水率和压实度的提高均会导致土体饱和度的增加和空气体积率的减小, 但饱和度或空气体积率的变化路径决定了归一化静强度的演化趋势. 从路基长期运营的角度, 在压实度恒定时, 由土体吸湿引起的饱和度增加(或空气体积率减小)将导致归一化静强度大幅衰减, 如归一化静强度由施工饱和度(相应 $V_a = 10.7\%$)时的 3.0 降至运营饱和度(相应 $V_a = 0.7\%$)时的 1.4, 此时的含水率稳定在 23%, 土体仍具有较高的静强度. 从路基施工压实角度, 在含水率恒定时, 由土体压实引起的饱和度增加会导致归一化静强度的提高, 但增长幅度受土体含水率状态的影响. 当土体以最优含水率 $w = 17\%$ 压实时, 归一化静强度随饱和度的增加而显著提高; 当土体以含水率 $w = 20\%$ 和 23% 压实时, 归一化静强度的增幅放缓, 尤其是饱和度超过 79% 后, 归一化静强度基本不再提高, 分别稳定在 2.1 和 1.4; 当含水率提高至 26% 及以上时, 土体的静强度已经非常小. 可见, 对于土体压实而言, 存在一个最优饱和度 $S_r = 79\%$ (相应 $V_a = 8\%$), 低于该值时, 土体强度随压实功的增加而增大; 高于该饱和度后, 继续提高压实功, 土体的强度不再有显著提高. Heitor

等^[26]在研究压实粉砂土的强度时,同样发现存在一个最优饱和度范围($S_r = 67\% \sim 80\%$)使得土体强度最大,称之为 Moderate aggregation region. Heitor 等对此解释为:尽管低饱和度下土体的基质吸力较高,但土颗粒的接触程度低、骨架结构不够密实,导致土体整体强度并不高,称之为 Extensive aggregation region;而在高饱和度下,尽管土骨架已足够密实,但此时基质吸力很低,同样导致土体强度不高,称之为 Insignificant aggregation region,因而存在一个最优的饱和度. 但是,对于黄泛区高液限黏土而言,当饱和度高于此最优饱和度后,土体静强度并未出现显著降低,这是由于土体的进气值很高,在高饱和度下仍具有较高的基质吸力,如图 4 所示. 另外,日本土质路基压实控制标准中,对于 0.075 mm 过筛量在 20% 以上的土按照空气体积率 $V_a \leq 8\%$ 作为压实标准,这也与本试验的结论一致. 而且,当土体含水率控制在 20%~23%、压实度 90%~93% 时,土体归一化静强度不会因运营期饱和度的增加或空气体积率的降低而衰减,具有良好的水稳定性.



(a) 饱和度与归一化静强度



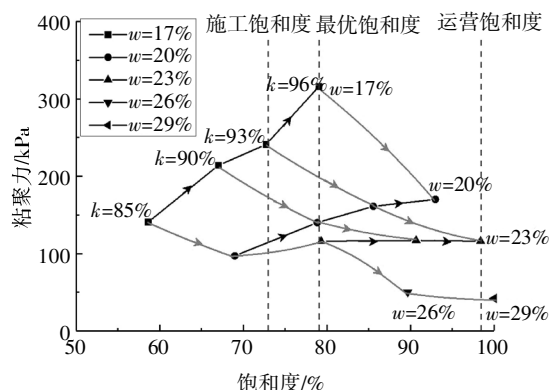
(b) 空气体积率与归一化静强度

图 8 不同压实状态下的归一化静强度

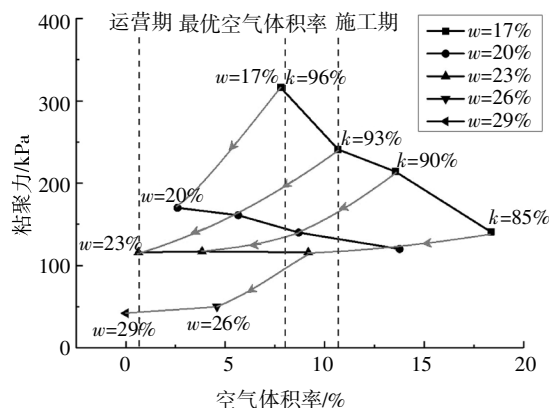
Fig.8 Normalized static strength at various compaction states

3.1.3 抗剪强度指标

基于三轴试验,可以得到黄泛区高液限黏土粘聚力与饱和度、空气体积率的相关关系如图 9 所示. 与土体归一化静强度规律相似,从施工压实的角度,按照最优含水率 $w = 17\%$ 、压实度标准 $k = 93\%$ 获得的土体粘聚力(241 kPa)低于按照空气体积率标准 ($V_a = 8\%$) 得到的粘聚力值(316 kPa),这也意味着需要更多的压实功以获得更高的强度. 但进一步提高压实功使得土体饱和度超过最优饱和度 79% (空气体积率低于 8%) 时,土体的粘聚力将不再增加,尤其是以含水率 20%~23% 压实时,压实度由 90% 提高至 96% 过程中,土体的粘聚力变化不大. 从长期运营的角度,因土体吸湿引起的饱和度增加均会导致土体粘聚力的减小,在饱和度不低于 90% 时,粘聚力逐渐衰减并稳定在运营饱和度 (相应含水率 23%) 时的 116 kPa.



(a) 饱和度与粘聚力



(b) 空气体积率与粘聚力

图 9 不同压实状态下的粘聚力

Fig.9 Soil cohesion at various compaction states

目前,我国高速公路在路基施工期严格控制含水率 $w_{opt} \pm 2\%$ 和压实度不低于 93%,路基设计时考虑运营期的强度折减影响,并以饱和度定量表征运营期的平衡湿度. 而日本和英国的土质路基压实采

用空气体积率指标,含水率以满足施工机械操作和路基长期水稳定性进行控制,因此在相同空气体积率下建议选择湿侧含水率.针对黄泛区高液限黏土,表 3 列出了我国和日本土质路基压实标准下土体施工期与运营期的强度值.其中,我国施工期的控制含水率 $w_{opt} = 17\%$ 、压实度 $k = 93\%$,运营期的含水率增加至 23% ,此时土体的粘聚力和内摩擦角分别由 241 kPa 、 12.9° 降至 116 kPa 、 4.8° .若按照日本路基压实空气体积率 V_a 不高于 8% 的标准,施工含水率分别取塑限以下的 17% 和 20% ,此时的压实度应不低于 96% 和 90% ,此时的粘聚力、内摩擦角分别为 316 kPa 、 15° 和 145 kPa 、 10.8° .可见,当采用空气体积率作为细粒土压实标准时,土体含水率越低,相应的压实度要求将越高,所需的压实功也将越高;含水率越高,相应的压实度会越低,但要以保证施工可操作性和水稳定性为前提.从黄泛区高液限黏土三轴试验抗剪强度结果看,土体的压实含水率不应高于 23% ,相应压实度不应低于 90% .根据黄泛区高速公路双向四车道典型横断面结构,路面结构为 18 cm 沥青混凝土面层+ 38 cm 水泥稳定碎石层+ 20 cm 二灰土,车辆荷载按照汽-20 级设计,路面自重和车辆荷载等效为 34 kPa 均布荷载施加于路床表面;路基采用高液限黏土作为填料,其粘聚力和内摩擦角根据表 3 中相应的工况进行取值;地基有效加固深度取 5 m ,含水率和压实度分别为 23% 和 90% ,地基有效加固深度以下 20 m 作为天然地基土,含水率和压实度分别为 29% 和 85% .按照 Bishop 方法,分别计算不同含水率状态下路基稳定安全系数.对于 k 不低于 90% 下的压实路基,其稳定安全系数普遍高于 1.35 的规范允许值;当按 k 不低于 93% 压实时,施工期的路基稳定安全系数明显高于运营期;当路基按照 $V_a = 8\%$ 、 $k = 90\%$ 控制压实时,运营期的稳定安

表 3 不同压实标准和土体状态下土体性能指标

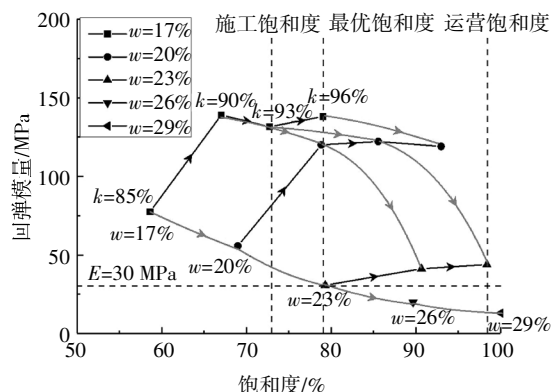
Tab.3 Soil properties at different compaction standards and various states

压实标准	状态	含水率/%	压实度/%	空气体积率/%	饱和度/%	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	回弹模量/MPa
中国	施工期	17	93	10.7	72.7	241	12.9	158
	运营期	23	93	0.6	98.4	116	4.8	42
日本	施工期	17	96	8	79.1	316	15	165
		20	90	8	78.9	145	10.8	79
	运营期	20	96	2.6	93.0	152	10.5	125
		23	90	3.8	90.7	117	4.3	40

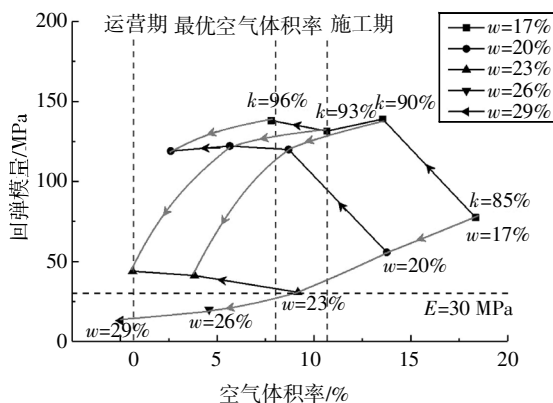
全系数不会较施工期产生显著的衰减,且与我国规范压实标准下的运营期稳定性相当,此状态压实的路基具有较好的水稳定性.

3.2 回弹模量

参考三轴试验,配制不同含水率和压实度的土样,闷料一昼夜后,采用室内承载板法测得其回弹模量如图 10 所示.在低于最优饱和度 79% 时,土体回弹模量随着饱和度的增大(压实度提高所致)而显著提高,如含水率 17% 和 20% 时,回弹模量由压实度 85% 下的 78 MPa 和 56 MPa 增加到 90% 下的 139 MPa 和 120 MPa ;超过最优饱和度后,回弹模量基本稳定.含水率增大引起的饱和度增加导致回弹模量快速衰减,尤其是超过最优饱和度后.相较于抗剪强度指标,回弹模量对含水率的变化更为敏感.在含水率由 17% 增至 20% 过程中,压实度 90% 和 93% 下的回弹模量由 139 MPa 和 132 MPa 降低至 120 MPa 和 122 MPa ;当含水率进一步增大至 23% 时,回弹模量分别衰减到 41 MPa 和 44 MPa ;当含水率进一步提高时,土体回弹模量低于 30 MPa .含水率在由施工期 20% 增加至运营期 23% 时,尽管路基稳定性并未降低,但回弹模量的大幅衰减将导致路基产生显著的附加压缩变形,压缩应变将增加近 200% .



(a) 饱和度与回弹模量



(b) 空气体积率与回弹模量

图 10 不同压实状态下的回弹模量

Fig.10 Resilient modulus at various compaction states

在路基实际碾压施工中,虽然按照最优含水率压实可以获得最大的土体强度,但此状态下土体的空气体积率较高,遇水后强度急剧降低,如图 8、9 和 10 所示,将会降低路基稳定性.而在含水率 20%增加至 23%时,土体的模量大幅衰减会导致路基顶面压应变的大幅增加,进而造成路面性能恶化.因此,当采用黄泛区高液限黏土作为路堤填料时,综合土体强度和模量的水稳定性,建议填筑含水率不高于 23%,压实度可控制在 90%及以上.

3.3 现场应用

在黄泛区某双向四车道高速公路 K50+655~K51+045 段,开展了高液限黏土的试验路填筑工作.路堤高度 5.4 m,填土控制含水率不超过 23%,施工压实度不低于 90%,根据现场多组施工机械组合和碾压次数的试验,最终确定黄泛区高液限黏土碾压工艺为:光轮压路机(型号:徐工 XSM222)静压 1 遍+凸轮压路机(型号:徐工 252)强振 3~4 遍+胶轮压路机(型号:徐工 301)收面 1 遍.路基填筑过程中,对桩号 K50+610 断面分层取样,压实后土体的含水率和压实度检测结果如表 4 所示.可见,路基的含水率稳定在 21%~24%,压实度为 89%~91%,基本满足设计要求.路基施工完成后选取 9 个断面,开展了为期 60 d 的路基工后沉降监测,如图 11 所示.路基的工后总沉降为 4~9 mm,在路基施工完成后的 40 d 左右达到稳定,路基整体性能良好.

表 4 现场实测路基土物理状态

Tab.4 Measured physical data of subgrade soil in the field

填筑高度/m	含水率/%	压实度/%	填筑高度/m	含水率/%	压实度/%
1	23	90	3.4	23	90
1.2	23	90	4.4	24	89
2.4	21	91	5.4	23	90

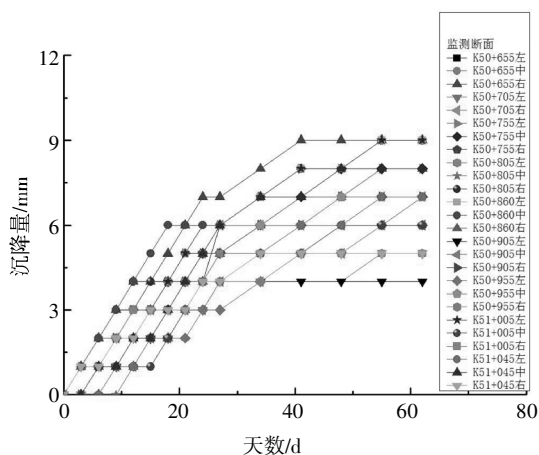


图 11 实测路基工后沉降

Fig.11 Measured subgrade post-settlement

4 结 论

1)黄泛区高液限黏土较普通的高液限黏土中的黏粒含量偏低而粉粒含量较高,较高含水率压实下空气体积率低,是黄泛区高液限黏土区别于其他粉土和黏土的显著特点.

2)该类土的进气值高达 125 kPa,远高于目前路基内部的基质吸力实测值.高进气值导致了土体具有很强的持水性,土体达到平衡湿度后,路基将保持高饱和状态而很难降低.

3)该类土存在最优饱和度 $S_r = 79\%$ (相应空气体积率为 8%),低于该饱和度时,土体强度随压实功的增加而增大;高于该饱和度后,继续提高压实功,土体的强度不再有显著提高.

4)相较于土体的强度特征,黄泛区高液限黏土回弹模量受含水率的影响更敏感.因此,建议填筑含水率不高于 23%,压实度可控制在 90%及以上,此时的空气体积率在 8%以下,以保证土体强度和模量的长期稳定性.在该压实标准下,开展了现场试验路填筑工作,路基总体沉降稳定.

参考文献

- [1] 欧钊元. 山东省裂隙粘土成因及水利工程应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学环境科学与工程学院, 2006:8—16.
OU Z Y. Cause of formation & water conservancy technical application research of crevasse clay in shandong province [D]. Qingdao: College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, 2006:8—16. (In Chinese)
- [2] 祝学勇, 胡文凯, 邢庆涛, 等. 黄河冲淤积非饱和和高塑性黏土的抗剪性状[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(1): 62—69.
ZHU X Y, HU W K, XING Q T, et al. Shear property of Yellow River's desposition in unsaturated and high plastic clay[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(1): 62—69. (In Chinese)
- [3] 姚占勇. 黄泛区公路土的处置技术研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013:6—22.
YAO Z Y. Improving technology research on road soil in Yellow River flooded area [M]. Beijing: China Communication Press, 2013:6—22. (In Chinese)
- [4] 姚占勇. 黄泛区公路地基压实标准的研究 [J]. 山东大学学报(工学版), 2007, 37(6): 79—82.
YAO Z Y. Research on the compaction standard of highway foundation in the flooding area of the Yellow River [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2007, 37(6): 79—82. (In Chinese)
- [5] JTG D30—2015 公路路基设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015:70—72.
JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades [S]. Beijing: China Communications Press, 2015:70—72. (In Chinese)

- nese)
- [6] 刘顺青,洪宝宁,方庆军,等.高液限土和红黏土的水敏感性研究[J].深圳大学学报(理工版),2013,30(1):78—83.
LIU S Q, HONG B N, FANG Q J, *et al.* Study on the water sensitivity of high liquid limit soil and red clay[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2013, 30(1): 78—83. (In Chinese)
 - [7] 吴立坚,钟发林,吴昌兴,等.高液限土路基填筑技术研究[J].中国公路学报,2003,16(1):32—35.
WU L J, ZHONG F L, WU C X, *et al.* Study of subgrade construction from high liquid limit soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1):32—35. (In Chinese)
 - [8] 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),2011,39(4):436—443.
LIU X, HONG B N. Engineering characteristics and construction schemes of high liquid limit soil in embankment filling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(4):436—443. (In Chinese)
 - [9] 程涛,洪宝宁,程江涛.降低压实度标准的高液限土填筑方案[J].水利水电科技进展,2014,34(4):70—74.
CHENG T, HONG B N, CHENG J T. Filling scheme of high liquid limit soil by reducing standard of compaction degree[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4):70—74. (In Chinese)
 - [10] 杨晶,王林浩,马富丽,等.黄土压实质量控制指标的科学性和合理性研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(5):1021—1025.
YANG J, WANG L H, MA F L, *et al.* Study on the scientific and reasonable expression of compaction quality control indicator of loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5):1021—1025. (In Chinese)
 - [11] 洪宝宁,化君晖,刘鑫,等.高液限土路堤填筑的双指标控制方法研究[J].岩土力学,2016,37(S1):254—262.
HONG B N, HUA J H, LIU X, *et al.* Research on quality control method with two indices for embankment filled with high liquid limit soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1):254—262. (In Chinese)
 - [12] 张军辉,尹志勇,郑健龙.南方湿热地区路基红黏土 Shakedown 临界应力水平试验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 45(4):1288—1292.
ZHANG J H, YIN Z Y, ZHENG J L. Research on critical stress level of Shakedown of red clay in southern hot and humid areas [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4):1288—1292. (In Chinese)
 - [13] 邹维列,叶照旺,潘小兵.中美日土基压实控制标准比较[J].国外建材科技,2006,27(1):39—42.
ZOU W L, YE Z W, PAN X B. Comparison of the compaction control standard of China, USA and Japan[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2006, 27(1):39—42. (In Chinese)
 - [14] 姚占勇,练继建,艾贻中,等.黄河冲(淤)积粉质二灰土的压实特性研究[J].岩土工程学报,2007,29(5):664—670.
YAO Z Y, LIAN J J, AI Y Z, *et al.* Compaction properties on Yellow River silty soil stabilized with lime-fly ash [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5):664—670. (In Chinese)
 - [15] Standard A D5298—10 Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003:52—54.
 - [16] 王钊,杨鑫鑫,况娟娟,等.滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J].岩土工程学报,2003,25(4):405—408.
WANG Z, YANG J X, KUANG J J, *et al.* Application of filter paper method in field measurement of matric suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4):405—408. (In Chinese)
 - [17] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4):521—532.
 - [18] ZAPATA C E. Uncertainty in soil-water characteristics curve and impact on unsaturated shear strength predictions[D]. Tempe: Ira A Fulton Schools of Engineering, AZ Arizona State University, 1999: 2—23.
 - [19] 刘小平,赵明华.降雨对非饱和土路基含水量的影响分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(8):9—13.
LIU X P, ZHAO M H. Analysis of the seepage of unsaturated roadbed with rainfall effect[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(8):9—13. (In Chinese)
 - [20] SMETHURST J A, CLARKE D, POWRIE W. Factors controlling the seasonal variation in soil water content and pore water pressures within a lightly vegetated clay slope [J]. Géotechnique, 2012, 62(5):429—446.
 - [21] 刘小平,赵明华,陈安.从饱和度再认识非饱和和表层土吸力[J].湖南大学学报(自然科学版),2007,34(7):22—26.
LIU X P, ZHAO M H, CHEN A. Reinspection of unsaturated surface soil's suction based on saturation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2007, 34(7):22—26. (In Chinese)
 - [22] 冉武平,李玲.考虑路面覆盖效应的路基平衡湿度分布及预估[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(6):58—62.
RAN W P, LI L. Distribution and prediction of equilibrium moisture of subgrade considering pavement blanketing effect [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(6):58—62. (In Chinese)
 - [23] 晏长根,邹群,许昱,等.砂夹层黄土路基水分迁移规律[J].交通运输工程学报,2016,16(6):21—29.
YAN C G, ZOU Q, XU Y, *et al.* Water migration rule of loess subgrade with sand interlayers [J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering, 2016, 16(6):21—29. (In Chinese)
 - [24] 肖治宇,陈昌富,杨剑祥.非饱和残坡积土强度随含水量变化试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2010,37(10):20—24.
XIAO Z Y, CHEN C F, YANG J X. Experimental studies of the strength variation of unsaturated residual soil with different water contents [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(10):20—24. (In Chinese)
 - [25] 王海东,高昌德,刘方成.含水率对非饱和砂土力学特性影响的试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(1):90—96.
WANG H D, GAO C D, LIU F C. Experimental study of the influence of water content on the mechanical characteristics of unsaturated sandy soil [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(1):90—96. (In Chinese)
 - [26] HEITOR A, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Laboratory study of small-strain behavior of a compacted silty sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(2):179—188.