文章编号: 1000-7598 (2013) 增刊 2-0351-05

高液限土路基的沉降变形规律

吴立坚^{1,2},郑甲佳²,邓 捷²

(1.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2.交通运输部公路科学研究所,北京 100088)

摘 要:高液限土具有高天然含水率、高塑性、高孔隙比和低压实度的特点。明确高液限土路基的沉降变形规律成为其科学 合理利用的关键。为此,在明确高液限土路用特性的基础上,铺筑了1条26.5 m高的高液限土高填方路基试验段,并进行了 长期的沉降观测。结果表明,高液限土路基填筑期间的压缩变形量很大,填筑完成后自然沉降稳定期的固结变形量较小,路 面铺筑后的工后沉降量很小,约为高度的2‰;高液限土路基的沉降量与其竖向填筑厚度基本成正比。采用简化的非饱和土 固结理论对高液限土路基的沉降变形进行了模拟计算,计算结果与高液限土路基的实测沉降量基本一致,说明非饱和土固结 理论可用于高液限土路基的沉降计算。高液限土路基沉降变形规律的成果说明其工后沉降不会过大,为其在公路工程中的推 广应用提供了技术依据。

关 键 词:高液限土路基;沉降变形规律;非饱和土理论 中图分类号:TU 433 **文献标识码:**A

Settlement law of high liquid limit soil embankment

WU Li-jian^{1, 2}, ZHENG Jia-jia², DENG Jie²

Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
 Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: High liquid limit soil has some characteristics such as high natural moisture content, high plasticity, high void ratio, and low compactness. Finding the settlement deformation law of high liquid limit soil embankment becomes the key to use it scientifically and reasonably. Based on the mechanical properties of high liquid limit soil, a 26.5 m high embankment was constructed using high liquid limit soil and a long-term settlement observation was carried out. Observation results show that the road settlement value is very high during the subgrade construction; the settlement is smaller in the natural sedimentation time; and the settlement is very small after the pavement construction, about 0.2% of the height. The settlement value is proportional to the subgrade height. Adopting simplified unsaturated soil consolidation theory, the settlement and deformation of high liquid limit soil have been calculated; the calculation results is basically identical with the measured settlement of high liquid limit soil embankment settlement calculation. The results prove the post-construction settlement of high liquid limit soil will not be larger; so as to provide a technical basis for its popularization and application in highway engineering.

Key words: high liquid limit soil embankment; settlement deformation law; unsaturated soil theory

1 引 言

高液限土具有高天然含水率、高液限、高孔隙 比、吸水蓄水能力极强、失水开裂、上硬下软、低 压实度和一定条件下强度较高的特点。由于天然含 水率很高(一般在 30%~45%,高的甚至超过 70%), 路基压实度普遍较低(一般在 80%~90%,也有 70% 多一点的)^[1-3],碾压时塑性变形大,车辙深,人 们担心高液限土路基的工后蠕变变形量可能会较 大,变形持续时间长,这将极大影响高液限土在公 路路基工程中的应用。我国对高液限土的填筑技术 进行了较多的研究,但这些研究多集中于高液限土 的地质成因、矿物成份、物理力学特性、施工工艺、 压实标准等方面,而在高液限土路基的沉降变形规 律方面的研究成果不多,尤其是高液限土路基的长 期跟踪观测资料更少。为此,研究高液限土路基的

收稿日期: 2013-09-12

第一作者简介:吴立坚,男,1970年生,同济大学在职博士生,交通运输部公路科学研究所研究员,主要从事道路与岩土工程方面的科研工作。 E-mail: 1004500718@qq.com

沉降变形规律,确保高液限土路基的长期稳定成为 高液限土利用的关键。

本文结合福建泉三高速公路建设,在明确沿线 高液限土路用特性的基础上,对某高液限土高填方 的沉降变形进行了长期跟踪观测。采用非饱和土固 结理论对其沉降变形进行了计算分析,得到了高液 限土路基的沉降变形规律,为高液限土在公路工程 中的应用提供了宝贵的数据与技术支持。

2 高液限土的路用性质及路基填筑

福建泉三高速公路路基宽为 24.5 m,沿线有大量高液限土分布。高液限土路基沉降试验段位于 YK159+900~YK159+980 高填方段,路基最大填高为 26.5 m,中心最大填高为 13 m,采用 YK159+722 主线取土场高液限土填筑,如图 1 所示。



图 1 高液限土路基试验段 Fig.1 Testing road of high liquid limit soil

2.1 路用性质

除路床和上路堤(路基顶面下 1.5 m)采用风 化碎石土填筑外,路基其余部分全部采用高液限土 填筑。高液限土填料的物理力学特性如表 1 所示。 高液限土加州承载比(California bearing ratio, CBR, %)值在 3~12 之间,满足公路路基相关规范^[4-5] 的要求。

表 1 高液限土的物理力学特性 Table 1 Physico-mechanical parameters of high liquid limit soil

天然含水率 w	天然稠度 wc	相对密度 G	液限 wL	塑限 wp	塑指 I _P	细粒组(<0.075 mm)含量	最佳含水率	最大干密度
/ %			/ %	/ %	/ %	/ %	/ %	/ (g/cm ³)
40.6	0.75	2.715	61.3	33.8	27.5	91.4	21.0	1.55

2.2 路基填筑

试验段为侵蚀-剥蚀低山坡麓沟谷地貌,路基填 筑前对地表厚约2m的表层土进行了清淤处理,因 此,地基状况总体较好。路基填筑于2006年7月2 日开始,2007年7月31日完成,路基、路面的施 工过程如图2所示。



图 2 路基路面填筑过程 Fig.2 The construction procedure of subgrade and pavement

由于高液限土天然含水率较高,路基的碾压含 水率基本在 40%左右,每层的碾压厚度在 30~40 cm 之间,采用 40 t 振动压路机碾压,每层碾压 4 遍(来回算 2 遍),在路基出现弹簧前停止碾压,压 实度多在 83%~88%之间。

3 路基沉降观测

3.1 传感器埋设

路基横断面与仪器埋设如图 3 所示。路基沉降 观测采用 BF5515-1B 型滑动式沉降仪。监测断面位 于 YK159+960,最大填高为 26.5 m。沉降管埋设于 填高为 16.5 m 位置,距离路基顶面 10 m,埋设长 度为 29.5 m(其中距边坡最外侧的 6 m 为 2007 年 6 月路基加宽超填时接管埋设)。



3.2 沉降观测结果

分别选取边坡点 *A*、边坡台阶下位置 *B*、路肩下位置 *C*、行车道下位置 *D*等4个点(见图3),分析其沉降变形规律,4个点的填筑高度-沉降过程曲线如图4所示。开始沉降观测时,监测层位在半年

前已经填筑完成,因此,监测结果为后续路基填筑 所引起的总沉降量。从图可见,高液限土路基填筑 期间的压缩变形量很大,压缩变形量主要取决于上 覆荷载(路基填筑高度),施工期沉降占总沉降量的 绝大部分,并且沉降在半年内基本完成。高液限土 路基在260 d 的自然沉降量约为6 cm,路面铺筑后 1 a 时间的沉降量在3 cm 左右(见图 4(c)、(d)),并 不比其他填料的路基工后沉降量大,这点与人们对高 液限土在高含水率下填筑路基工后沉降量可能很大的想像完全不同。泉三线于 2008 年底通车,至今试验段高填方稳定性良好,未见路面开裂和行车道线波浪起伏等现象。2013 年 3 月对该高液限土试验段的沉降观测结果为 5.2 cm,该段路基高度为 26.5 m,因此,路面铺筑后的沉降率(沉降量与路基高度之比)约为 2‰。而一般填石路基的工后沉降率在 2‰~5‰。因此,一定条件下,高液限土路基是稳定的。



4 沉降计算与分析

路基的沉降计算一般采用分层总和法,分层总 和法是一种基于试验的计算方法,可得到最终沉降 量,但不能反映沉降过程。高液限土是典型的非饱 和土,对于其沉降固结机制目前尚未有定论,一般 认为高液限土路基的沉降变形是土内孔隙水缓慢排 出和土体塑性流变的结果。因此,采用非饱和土固 结理论进行高液限土路基沉降计算无疑是新的探 索。

在非饱和土理论方面,国内外有多种理论,但 Fredlund 固结理论无疑是较为成熟的^[6]。Fredlund 固结理论以外加应力($\sigma - u_a$)和吸力($u_a - u_w$) 这两个独立应力状态变量建立非饱和土各相体的本 构关系。同时考虑孔隙气和孔隙水流动,建立了孔 隙水压力和气压力消耗的偏微分方程,能很好地与 饱和土理论衔接。因此,本论文采用 Fredlund 固结 理论进行高液限土路基的沉降计算。压实后高液限 土的饱和度基本在 95%以上,因此,可以认为是孔 隙气、水近似组成的混合流体,高液限土即为具有 可压缩性流体的两相土,可以采用简化的非饱和土 固结理论进行分析。

为了模拟施工工况,首先计算地基在自重作用 下的初始应力,包括总应力和水压力,然后再模拟 路基填筑。路基填筑分4层进行,其填筑施工的进 度如图2所示。

计算软件采用著名的 GeoStudio 岩土计算软件,计算如下:

(1) 固结变形计算模型

高液限土路基计算断面如图 5 所示。根据实际 填筑情况,模型材料分 3 种,地基土为粉质黏土, 下路堤(路基顶面下 1.5 m)为高液限土,路基顶 层 1.5 m 为碎石土,由于其渗透系数大,因此,认 为是完全透水的,即不考虑该部分的固结作用。模 型变形边界条件为,地基底部固定,两侧为水平向固定、竖向可自由变形。因此,计算中假定地基底面不排水,仅在坡面排水,排水边界气压始终等于大气压,水压为-80 kPa,即吸力为 80 kPa。



图 5 路基有限元分析模型 Fig.5 The finite element analysis model of the subgrade

(2) 高液限土的本构关系

与饱和土的本构关系相比,非饱和土本构关系 中引进了模量 *H*,表征土体随着饱和度的下降而变 硬的特性,并采用(σ-u_a)和(u_a-u_w)的双应 力状态变量。非饱和土的应力-应变增量关系可以表 示为

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} - [D]\{m_H\}(u_a - u_w) + \{\Delta u_a\} \quad (1)$$

式中: $u_a 和 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力;$ [D]为刚度矩阵; $\{m_H\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{H} & \frac{1}{H} & 0 \end{bmatrix}$ 。

高液限土采用理想弹塑性模型,土体的弹性模 量随平均压力的增加而增加,其计算公式为

$$E = k_{\rm b} p_{\rm a} \left(\frac{\sigma}{p_{\rm a}}\right)^n \tag{2}$$

式中: k_b 和 n 为拟合参数; p_a 为标准大气压力; σ 为平均压力。根据三轴固结不排水试验结果,地基 土体的 k_b 和 n 分别为 130 和 0.50,高液限土的 k_b 和 n 为 35 和 0.88。土体的破坏准则采用 Mohr-Coulomb 破坏准则,地基土体、高液限土的内摩擦角和黏聚 力分别为 25°、20 kPa 和 30°、20 kPa。对于填筑 的碎石土,其模型采用线弹性,弹性模量为 40 MPa, 泊松比为 0.3。

非饱和土体的渗透系数采用 Green 和 Cored 公式^[6]:

$$k(\theta) = k_{s} \frac{30T^{2}}{\mu g \eta} \frac{\xi^{p}}{n^{2}} \sum_{j=i}^{m} \left[\left(2j + 1 - 2i \right) h_{i}^{-2} \right]$$
(3)

式中: $k(\theta)$ 为体积含水率为 θ 时的渗透系数; k_s 为 饱和渗透系数; h_i 为对应体积含水率的孔隙压力; T 为表面张力; μ 为水的密度; η 为水的黏滞系数; *p* 为表征空隙间相互关系的系数; g 为重力加速度;
 m 为试验土-水特征曲线上在饱和体积含水率与最小体积含水率之间等分的总数; *n* 为总的系列数,
 n=*m*-*i*+1; ξ 为饱和体积含水率。

计算时,高液限土和地基土在饱和状态下的渗透系数分别取 8.0×10⁻⁷、5.0×10⁻⁶ cm/s。

由室内采用张力计和渗透仪测得的水分特征曲 线和渗透曲线如图 6 所示。由于是土体失水固结过 程,土-水特征曲线采用脱湿过程曲线。



图 6 高液限土计算曲线 Fig.6 Curves of permeation coefficient and matric suction of high liquid limit soil

(3) 土体的初始条件

地基土体的天然重度取 21 kN/m³,填土的天然 重度取 18.5 kN/m³。根据勘察资料,地下水位为-8 m。在水位以上,地基土体的最小基质吸力为-80 kPa。根据填筑时高液限土的平均质量含水率为40% 以及水分特征曲线,高液限土的初始基质吸力取为 -20 kPa。

(4) 计算结果分析

图 7 为计算得到的监测位置的沉降值与实测结 果的对比图,须特别指出的是,图中的实测曲线在 距边坡 6 m 处出现了沉降突然增加,如前所述,这 是由于路基后来加宽超填 6 m 所致。从图中可以看 出,除了第 564 d 的计算结果略小于实测结果外, 其余的计算结果和实测结果较接近,这说明计算结 果可靠。

计算沉降量略小于实测值,这主要是因为计算 的结果中只包含高液限土路基渗流固结的部分,而 实测结果是高液限土的压缩变形,这包含部分土的 流塑性变形,从图中也反映出土的流塑变形不大。 高液限土路基的含水率的长期监测结果也表明,路 基填筑后其平均含水率是缓慢下降的。



5 小 结

(1)高液限土路基施工期沉降较大。高液限土路基在 260 d 的自然沉降量约为 6 cm,路面铺筑后 1 a 时间的沉降量在 3 cm 左右,并不比其他填料的路基工后沉降量大,说明高液限土在高含水率下填筑路基工后沉降量并不是很大。

(2)高液限土路基的沉降量与其竖向填筑厚度 基本成正比。高液限土路基的工后(指路面铺筑完成)沉降率约为2‰,并不比其他填料路基大,甚 至小于填石路堤(一般为 2‰~5‰)。表明高液限 土路基工后沉降变形小,长期稳定性较好。

(3)高液限土路基完成填筑后,宜经过6个月的自然稳定再铺筑路面。

(4)采用简化的非饱和土固结理论分析高液限 土路基沉降是可行的。

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 Li-jian, ZHONG Fa-lin, WU Chang-xing, et al. Study of road made by high liquid limit soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 193 -195.
- [2] 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 Li-jian, ZHONG Fa-lin, WU Chang-xing, et al. Study of subgrade construction from high liquid limit soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 32-35.
- [3] 吴立坚,陈礼彪,张燕清,等.高塑性土路基压实与压 实标准[J].公路,2007,3:33-35.
- [4] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D30-2004 公路路 基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [5] 中交集团第一公路工程局有限公司. JTG F10-2006 公 路路基施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.
- [6] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业 出版社, 1997.