

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0851-05

红黏土路基填筑压实度控制指标探讨

谈云志^{1,2}, 孔令伟¹, 郭爱国¹, 冯欣¹, 万智³(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002; 3. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

摘 要: 红黏土属于一类典型的特殊土, 路基施工规范指出, 特殊填料进行填筑路基时可根据具体情况适当降低压实度要求, 并且规定有些高液限、高塑指黏土不能直接作为路基填料填筑。利用某高速公路处的红黏土进行了重型击实和承载比试验, 试验结果表明: 红黏土在最优含水率附近具有很强的水敏性。最优含水率点对应的 CBR 值并非最大值, 其最大 CBR 值对应的含水率大于最优含水率 3% 左右, 在此基础上结合土体的强度、压缩性、胀缩性、渗透性等指标随压实度变化的规律, 确定该桩号红黏土作为下路堤填料其压实度可降低 2.5%, 填筑含水率控制在 35% 左右。

关 键 词: 红黏土; 路基; 压实标准; 特殊土

中图分类号: TU 446 **文献标识码:** A

Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite

TAN Yun-zhi^{1,2}, KONG Ling-wei¹, GUO Ai-guo¹, FENG Xin¹, WAN Zhi³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

Abstract: Laterite soil is one of the typical and special soil. There are clearly states in the technical specification of highway subgrades that the compaction degree can be reduced according to the specific condition when the subgrade constructs with special fillings. Moreover, the subgrade can't be filled directly with high liquid limit and high plastic index soils. By using the laterite of one highway, a series of compaction and California bearing ratio (CBR) tests are carried out; the results indicate that laterite is sensitive to water strongly; the water content corresponding to the maximum CBR is 3 % greater than the optimal one. In addition, according to the rules that strength, compressibility, swelling-shrinkage, permeability indexes change with compaction degree, the compaction degree of laterite which is as sub-embankment filling can be reduced by 2.5 %, the water content is around 35 % during compaction.

Key words: laterite; subgrade; compaction standard; special soil

1 前 言

红黏土属于一种典型的特殊土, 具有高液限、高塑性指数、高天然含水率等持水特征, 其自身特点决定了某些红黏土不能直接作为路堤填料进行填筑。在我国大部分省、市和自治区都有红黏土分布, 其中以湖南、广西、贵州、云南等西南地区最为突出。随着西部大开发的强势推进, 交通基础设施建设遇到了前所未有的发展机遇。在该地区建设公路将会频繁地面临这类特殊土的困扰, 如何高效利用和处

理该类土是一个亟待解决的工程问题。

红黏土的形成具有特定的气候环境, 一般都在炎热多雨地区。因此, 其天然含水率很高, 大于塑限或最优含水率 6%~15%, 要想把它压实到规定的压实度标准极其困难。国外针对高含水率黏土的压实除制定重型、轻型标准之外, 英国还规定路基填料的含水率应低于塑限; 美国则容许填方路基的含水率可高达塑限的 1.2 倍, 同时规定黏土填料的液限不得超过 50%; 日本则根据不同土类采用不同的压实标准。国内, 针对潮湿多雨地区黏性土路基压

收稿日期: 2009-02-10

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (No. 200631878530); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (No. SKLZ0803)。

第一作者简介: 谈云志, 男, 1979 年生, 博士生, 主要从事非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

实问题也提出了相关的处理方法^[1]。这些情况说明,国内外路基压实标准并不完全统一,确定高含水率黏土路基的压实标准需要结合具体的填料特点。

《公路路基施工技术规范》(JTG F10-2006)中规定:①路堤采用特殊填料填筑或处于特殊气候地区时,压实度标准根据试验路在保证路基强度要求的前提下可适当降低;②液限>50%、塑性指数>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,如需使用应采取技术措施进行处理;③压缩系数>0.5 MPa⁻¹的红黏土不得直接用于填筑路堤。

针对上述要求,在工程实践中需要回答两个问题:①压实度依据什么降低、降低多少?②红黏土作为路基填料进行直接填筑的判断标准是什么?为此,依托西部交通建设科技项目,对湖南某高速公路的红黏土进行了较为系统的室内试验研究,阐明了降低压实度标准的依据并确定了降低的参考值。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

试验土样取自厦门至成都高速公路湖南省郴州段,为红褐色黏土,土的基本物理特性如表1所示。

表1 试验用红黏土的物理性质指标

Table 1 Physical properties of red clay used in test

| 天然含水率 /% | 天然湿密度 / (g/cm ³) | 土粒相对密度 | 液限 /% | 塑限 /% | 塑性指数 | 自由膨胀率 /% |
|----------|------------------------------|--------|-------|-------|------|----------|
| 39.9 | 1.61 | 2.564 | 59.5 | 41.2 | 18.3 | 32.5 |

2.2 试验方法

本次试验按如下思路开展:首先,参照《公路土工试验规程》(JTGE40-2007)进行了重型标准击实试验,确定填料的最优含水率与最大干密度。然后,选取最优含水率和天然含水率之间的5个含水率点(包括最优含水率点)分别按3种不同的击实功(分3层击实,每层击数98,50,30击)进行击实,进行相应的浸水承载比(CBR)试验。

3 试验结果及分析

3.1 击实试验

选取的红黏土风干后过5 mm筛,然后进行标准重型击实(98击),击实曲线如图1所示,其最大干密度为1.53 g/cm³、最优含水率为26.2%。

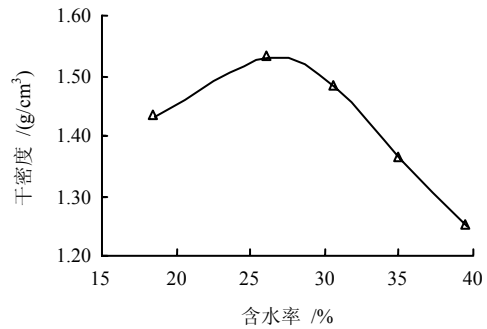


图1 击实曲线

Fig.1 Compaction curve of red clay

3.2 强度试验(CBR)

加州承载比试验(CBR)作为一项评价柔性路基填料强度的实用方法,现已被许多热带和亚热带国家用来评价使用红黏土和其他热带风化土填筑高速公路和机场的可行性^[2-4]。试验结果表明,该试验几乎可以用来评价从黏土到砂粒所有范围的红黏土^[5-8]。

按照干法备样,配置了5个不同含水率的试样,含水率处于最优含水率和天然含水率之间,进行浸水(4 d) CBR试验。其 CBR 值和压实度随含水率的变化趋势如图2所示,结果中所有压实度参考的标准(最大干密度)均为3.1节中确定的最大干密度。由图2可知:

(1)当含水率在26.6%~33.9%之间变化时,击实功对 CBR 值及其压实度的影响十分明显,含水率超过33.9%以后不同击实功对压实度的贡献差别不大,这也说明对于超出一定含水率范围的红黏土进行碾压时,靠增大击实功的办法提高压实度既不经济也不科学。最优含水率对应的 CBR 值都不是最大值,最大 CBR 值对应的含水率大于最优含水率约3%^[9-12]。观察浸泡后的试样发现,试样表层因强吸水而被浸泡软化,而进行 CBR 试验时贯入杆只压入7 mm左右,刚好处于软化层。换言之,路基填料偏干条件下碾压对其水稳定性非常不利。

(2)在最优含水率26.6%~30.5%之间,随着含水率的增大, CBR 值略有增加。但压实度在击实功(98击)的作用下减少,而在击实功(50击、30击)的作用下却增大。当含水率>30.5%以后, CBR 值和压实度出现急剧衰减,含水率增加3%,强度约减少12%、压实度约减少15%,表明在此含水率区间强度和压实度对水分十分敏感。也进一步佐证了红黏土属于一种水敏性强的特殊土^[13]。

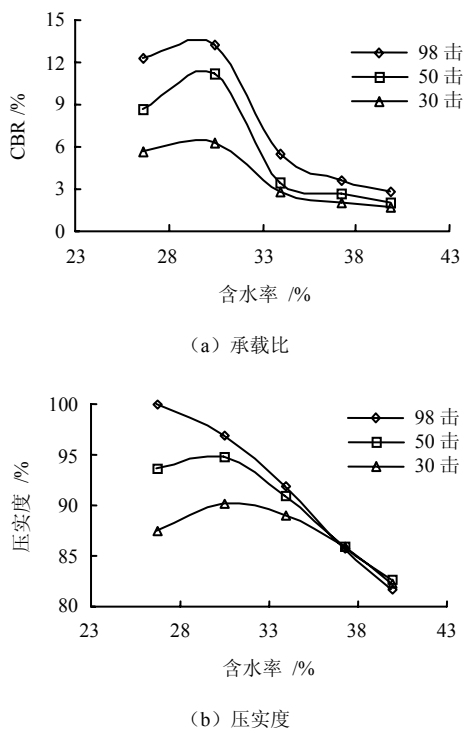


图 2 CBR 及压实度与含水率的关系
Fig.2 Curves of water content vs. CBR and compaction degree

(3) 超过最优含水率 3% 的试样，通过重型击实其 CBR 值可以高达 13.2%、压实度也能达到 96.9%，似乎完全可以直接作为路基填料进行填筑。但是其天然含水率约高出该点 10%，如在此状态下碾压，就须对土块进行击碎翻晒。不仅操作上困难，还将消耗大量的工期和成本，并且在此过程中极易导致土体含水率分布不均。所以，在保证 CBR 值满足要求的前提下能否对压实度标准进行降低值得进一步探讨。

4 红黏土路基压实相关问题探讨

4.1 填筑含水率

规范指出，现场土料的填筑含水率应达到最优含水率。认为在最优含水率时碾压水分起着润滑作用，达到同样密实度所需要的压实功最少；另外，该状态下压实得到的土体不仅最密实，而且侵水性能最稳定。这对于碾压达到最大干密度的情况是正确的，但当前利用压实度系数进行折减后，要求达到的干密度 ρ_d 降低了，碾压含水率 w 却并未相应地减少或增加。干密度的折减部分实际上都转化为孔隙，这些孔隙降低了压实土体的抗压缩性能，同时也为水分的浸入提供了空间。所以，在确定碾压含水率时，应在大于最优含水率的湿度碾压，该湿度对应的干密度与折减后的干密度相等。在压实度不

变的条件下，折减部分的孔隙也被水分充满。另外，红黏土属于一种典型的高液限土。在达到压实控制标准的前提下，如能在偏湿的状态下碾压还有利于缩短工期。从保证路基的长期稳定性和节约成本的角度，红黏土在偏湿状态下压实是经济可行的。如需减水填筑则降水范围宜控制在 5% 的差值内，否则废弃或进行改性处理。

4.2 降低压实度标准的依据及其范围

在偏湿的状态下碾压红黏土，压实度一般很难达到要求。对此，施工规范建议在保证达到强度要求的前提下压实度可适当降低。但降低的依据及降低标准都没有明确的规定。

压实度是控制路基填筑质量的关键指标，其根本目的是为了保证路基在运营期间具有良好的性能。而外部营力（交通荷载和环境气候）作用会对路基性能产生不利的影响。主要表现为：①交通荷载和自重导致路基产生工后沉降；②环境气候变化引起路基土体胀缩变形及强度的衰减。所以，可以从路基土体的强度水敏性、压缩性、胀缩性、渗透性等方面来评价路基性能的好坏。而上述评价指标又强烈地受路基的初始压实度影响。因此，可以把该系列指标随压实度的变化规律作为降低的依据，并把压实度降低后各指标值变化不敏感的临界点作为压实度降低的界限值。

4.2.1 强度（CBR 值）

图 2 (a) 表明，击实功（98 击）作用下，含水率在 33.9%~39.9% 范围内，其 CBR 值变化幅度非常小，且都能达到最低要求值（3%）。CBR 值随压实度的变化趋势如图 3。压实度 93% 和 82% 对应的 CBR 值分别为 6% 和 3%。可以看出，如果压实度降低至该范围内的任何值，强度都能满足要求。

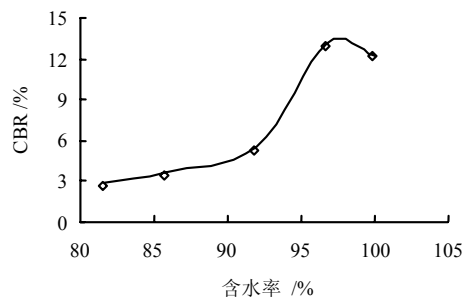


图 3 CBR 与压实度关系曲线
Fig.3 Curve of CBR vs. compaction degree

4.2.2 压缩性

利用初始含水率为 25.9% 扰动样，配置压实度分别为 93%、91%、89%、87% 环刀试样进行固结

试验, 压缩曲线如图 4 所示。其压缩系数 a_{1-2} 分别为 0.17、0.17、0.19、0.24 MPa^{-1} , 都远小于 0.5 MPa^{-1} , 适合在 6 m 以下的路堤填筑。从压缩系数来看, 压实度可以从 93% 降至到 89%。

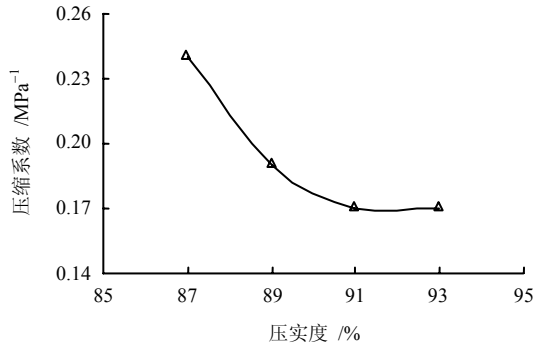


图 4 压缩系数与压实度关系曲线

Fig.4 Curve of compressibility vs. compaction degree

4.2.3 胀缩性

受降雨和蒸发的影响, 路基土体表层长年处于反复的胀缩效应。为了解路基土体在环境营力作用下的性能, 需掌握填料的胀缩性特征。在做浸水 CBR 试验时量测了试件泡水后的膨胀量, 压实度 93%、89% 对应的膨胀量都不超过 0.1%。由此可见, 该路段红黏土的膨胀潜势不强。为了探索不同压实度试样的收缩特征, 按照 4.2.2 中固结试验的制样方法制备了 4 种干密度的试样, 抽真空饱和后开展收缩试验。不同压实度下的收缩指标, 见表 2。压实度从 93% 降至 89%, 其缩限、收缩系数、体缩率指标变化不明显; 但降到 87% 后收缩系数变化比较显著。

表 2 胀缩性试验指标
Table 2 Indexes of swelling-shrinkage test

| 压实度 /% | 缩限 /% | 收缩系数 | 体缩率 /% | 膨胀量 /% |
|--------|-------|------|--------|--------|
| 93 | 21.8 | 0.32 | 5.38 | 0.13 |
| 91 | 22.1 | 0.35 | 5.93 | |
| 89 | 23.5 | 0.36 | 6.07 | 0.06 |
| 87 | 24.2 | 0.51 | 6.27 | |

4.2.4 渗透性

路基的长期稳定性能受水分的影响最为敏感, 压实度降低后, 增大了水分进入的空间。同样按照 4.2.2 中固结试验的备样方法也制备了 4 种压实度的环刀样进行渗透试验。渗透系数随压实度降低的变化规律如图 5。压实度从 93% 降到 91% 渗透系数差别不大, 但若降到 89% 则后者对应的渗透系数是前者对应值的 6 倍。

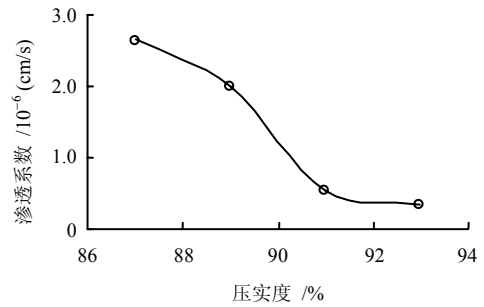


图 5 渗透系数与压实度关系曲线

Fig.5 Curve of permeability vs. compaction degree

压实度降低后, 路基土体的强度、压缩性、收缩性、渗透性指标都受到不同程度的影响。由此可见, 利用上述指标随压实度的变化是否显著作为压实度标准能否降低的依据是合理可行的; 并可以根据曲线的拐点对应值来确定压实度降低的界限值。综合上述指标的变化特征, 该红黏土直接作为下路堤的填料, 填筑含水率需要控制在 35% 左右, 压实度可降低 2.5%。

5 结论

(1) 红黏土在低含水率范围内 (26.6%~30.3%) 达到压实标准之后强度很高, 即使是击实功 (30 击) 下 CBR 值最小也能达到 5.7%, 但遇水后其强度急剧衰减, CBR 值减小到 3% 以下。当含水率超过 33.9% 以后, 强度的变化就不再明显。

(2) 分析红黏土的强度、压缩性、胀缩性等指标随压实度变化的规律, 利用其随压实度变化的敏感程度作为路基压实度能否降低的依据。

(3) 综合分析各指标随压实度变化的曲线, 将曲线上拐点的对应值作为压实度降低的临界值。该红黏土的压实度可降低 2.5%, 填筑含水率应控制在 35% 左右。

参考文献

- [1] 杨世基. 黏性土路基的压实和稳定性[J]. 中国公路学报, 1989, 2(3): 1-10.
- [2] HAYTER M A, CAIRNS H A. Field and laboratory investigation into the strength of a trial stretch of lime-stabilised soil pavement in Eastern Nigeria[R]. UK: British Road Research Laboratory, 1966.
- [3] CARTMELL H S, BERGH A O. Lime stabilization of soil for use as road foundation in Northern Rhodesia[R]. UK: Road Research Laboratory, 1969.
- [4] NIXON I K, SKIPP B O. Airfield construction on overseas

- soils[C]//Proceedings of British 5th Laterite Institute Civil Engineering, London: [s. n.], 1957, 8: 253—292.
- [5] ACKROYD L W. Engineering classification of some western nigerian soils and their qualities in road building[R]. British: Road Research Laboratory, 1959, 10: 32
- [6] HAMMOND A A. A study of some lateritic gravels from kumasi district[R]. Kumasi, Ghana: Build Road Research Institute, 1970.
- [7] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特征与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 369—373.
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 369—373.
- [8] DEGRAFT-JOHNSON J W, BHATIA H S, YEBOA S L. Influence of geology and physical properties on strength characteristics of lateritic gravels for road pavements[R]. Washington: Highway Research Board, 1972, 405: 87—104.
- [9] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 727—732.
- [10] 余飞, 陈善雄. 膨胀土 CBR 强度特性机制分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1113—1117.
YU Fei, CHEN Shan-xiong. Characteristics and mechanism of California bearing ratio of expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1113—1117.
- [11] 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, 2004, (11): 54—61.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shan-xiong, et al. CBR strength characteristics and mechanism analysis of expansive soils[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, (11): 54—61.
- [12] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰改性膨胀土施工最优含水率确定方法探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 517—521.
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian, et al. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 517—521.
- [13] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568—572.
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 568—572.

上接第 850 页

- [7] 葛宏伟, 梁艳春, 刘玮, 等. 人工神经网络与遗传算法在岩石力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1542—1550.
GE Hong-wei, LIANG Yan-chun, LIU Wei, et al. Applications of artificial neural networks and genetic algorithms to rock mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1542—1550.
- [8] 贾超, 刘宁, 肖树芳. 洞室岩体参数的位移正演反分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 450—454.
JIA Chao, LIU Ning, XIAO Shu-fang. Application of direct displacement inverse analysis to rockmass parameters of caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 450—454.
- [9] 蒋中明, 徐卫亚, 邵建富. 基于人工神经网络的初始地应力场三维反分析[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 52—56.
JIANG Zhong-ming, XU Wei-ya, SHAO Jian-fu. ANN-based 3-D back analysis of initial stress in rock masses[J]. **Journal of Hohai University**, 2002, 30(3): 52—56.
- [10] 郭明伟, 李春光, 王水林, 等. 优化位移边界反演三维初始地应力场研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1269—1274.
GUO Ming-wei, LI Chun-guang, WANG Shui-lin, et al. Study on inverse analysis of 3-D initial geostress field with optimized displacement boundaries[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1269—1274.
- [11] 贾善坡, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 大岗山水电站地下厂房区初始地应力场 Nelder-Mead 优化反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2341—2349.
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Nelder-Mead algorithm for inversion analysis of in-situ stress field of underground powerhouse area of Dagangshan Hydropower Station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2341—2349.