

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.06.002

圆宝山隧道松散堆积体的力学试验研究

田 莉

(中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘 要: 松散堆积体在隧道施工中普遍存在, 为研究其力学特性, 以丽香铁路圆宝山隧道为依托, 采用室内试验的方法, 对具有代表性的地段进行筛分试验、击实试验及直剪试验。研究表明: 圆宝山隧道松散堆积体颗粒级配离散性较大, 级配不连续, 粒径大于 2 mm 的颗粒质量分数约占 50%; 击实试验发现, 压实度是提高抗剪强度的重要因素, 圆宝山隧道松散堆积体的内摩擦角、黏聚力随着压实度的增大而显著增强, 压实度、法向应力与抗剪强度基本呈正相关。当压实度为 0.9、法向正应力为 250 kPa 时, 试样的抗剪强度达最大值, 为 298 kPa; 分析发现, 松散堆积体压实度偏小是导致滑坡的重要原因, 提高压实度是增大松散堆积体抗剪强度指标的重要手段。

关键词: 松散堆积体; 压实度; 直剪试验; 抗剪强度

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)06-0008-05

Study on Mechanical Properties of Loose Deposits in Yuanbaoshan Tunnel

TIAN Li

(China Railway 16th Bureau Group III Engineering Co., Ltd., Huzhou Zhejiang 313000, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of loose deposits, which are commonly found in the process of tunnel construction, by adopting indoor test methods, a compaction test and a direct shear test have been conducted in the representative area of the sampled Yuanbaoshan tunnel in Lixiang railway construction. The results show that the loose deposits of Yuanbaoshan tunnel is characterized with a large discreteness and discontinuous gradation of the grain composition, with its particle size greater than 2 mm, and the mass fraction approximately accounting for 50%. The results of compaction test show that the degree of compaction is an important factor to improve the shearing strength of the tunnel. The friction angle and cohesion of loose deposits in Yuanbaoshan tunnel increase remarkably with the increase of its compactness, with the degree of compaction, normal stress and shearing strength basically positively related. With the degree of compaction being 0.9 and the normal normal stress 250 kPa, the shearing strength of the sample reaches the maximum value of 298 kPa. The analysis shows that the compactness of loose deposits is an important contributing factors of landslide, and the increase of degree of compaction is an important means to increase the shearing strength index of loose deposits.

Keywords: loose deposit; degree of compaction; direct shear test; shearing strength

0 引言

近年来, 随着交通建设的发展, 隧道工程量越来

越大, 以东部地区施工经验在西南地区隧道建设施工时, 普遍存在松散堆积体塌方、软弱围、岩破碎等问

收稿日期: 2017-04-10

作者简介: 田 莉 (1981-), 女, 山西芮城人, 中铁十六局集团第三工程有限公司工程师, 主要研究方向为道路与桥梁,
E-mail: 837179919@qq.com

题。其中,松散堆积体又因其特殊的物理性质和力学性质,包括粒径不均匀、密实度多变、矿物成分复杂多样等,给隧道等的设计、施工造成诸多不便^[1]。

近年来,针对西南地区隧道建设的研究较多,也取得了较多的科研成果。谭儒蛟等^[2]通过对云南虎跳峡地区松散堆积体采用堆载式直剪试验测定了其抗剪强度,并通过原位试验于一定程度上验证了其有效性。刘衡秋等^[3]通过野外调查和资料对比研究,揭示了松散堆积体的形成机制和发育特征,其经过研究认为,松散堆积体是一种由崩塌和滑坡多期作用形成的复合地质体,为典型的内外动力耦合作用的地质产物。赵建军等^[4]采用二维有限元研究了典型松散堆积体区域边坡变形发展机理,发现坡顶位置由于剪切破坏首先出现张拉裂隙,边坡内部产生从坡脚部位向上发展的剪切变形,当滑面与坡顶张拉裂缝贯通时,边坡将发生整体失稳。以上研究为松散堆积体研究创造了有价值的理论依据,但缺乏相对系统的室内试验,结果较为理想化而具有一定的局限性。

本文基于丽香铁路圆宝山隧道3号横洞洞口松散堆积体,通过室内试验,有效分析了松散堆积体的力学特性,其研究结论对分析相似松散堆积体区域隧道滑坡原因具有一定的参考价值。

1 工程概况及研究方案设计

1.1 工程概况

丽香铁路圆宝山隧道设计为单线隧道,长约10.6 km,通过炭质板岩、千枚岩夹灰岩;隧道区位于区域性冲江河断裂北侧,属剥蚀构造高中山深切河谷地貌,相对高差过千米,岩体卸荷强烈,地质构造复杂。地下水主要为基岩裂隙水,不良地质有松散堆积体滑坡、大变形、顺层、瓦斯等。

1.2 研究技术路线

针对圆宝山隧道松散堆积体力学特性设计的研究技术路线如图1所示。

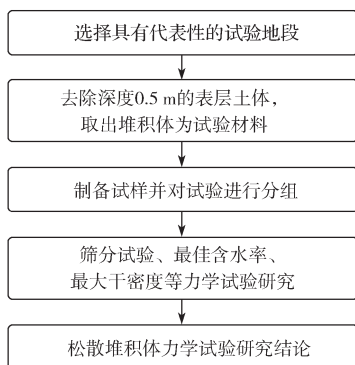


图1 技术路线

Fig.1 Technology road-map

2 松散堆积体物理力学试验研究

2.1 松散堆积体试样的选取

隧道的洞口概况见图2。现场取样选择具代表性的试验地段,在该地段去除表层土体,以获取更具普遍试验价值的松散堆积体材料。取样时,将现场的各类岩土体全部装入编织袋,且在取样过程中,为使取得的试样具备随机性、代表性,不进行选择性地剔除粒组不一致土体及岩石,取样现场见图3。



图2 洞口概况
Fig.2 Survey of
the tunnel entrance



图3 取样现场
Fig.3 A sampling site

2.2 筛分试验研究

松散堆积体的筛分试验采用常规土颗粒分析试验,即筛分法。首先,将现场采集的松散堆积体试样用电热鼓风干燥箱持续烘干,按照室内试验的标准,直至试样中水的含量不再变化,同时记录试样烘干前后的质量差,并通过计算得到所取回试样的含水质量分数;然后,将现场不同试验地段取回的土样编号分组;最后,对各组试样进行筛分试验。

试验采用标准土样筛,试验时,以标准土样筛对试样按不同粒径进行逐级筛选区分,最终可以得到该松散堆积体的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 的理论公式^[5]如下:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

式中, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为累计过筛颗粒质量分数为10%、30%、60%时的岩土体的颗粒粒径。

绘出各组松散堆积体级配曲线图(如图4所示)和松散堆积体平均级配曲线图(如图5所示)。

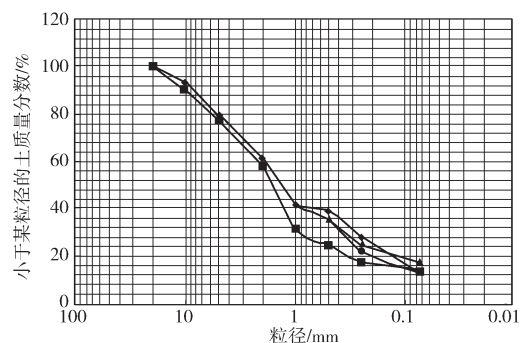


图4 各组松散堆积体级配曲线

Fig.4 Grading curve of groups of loose deposits

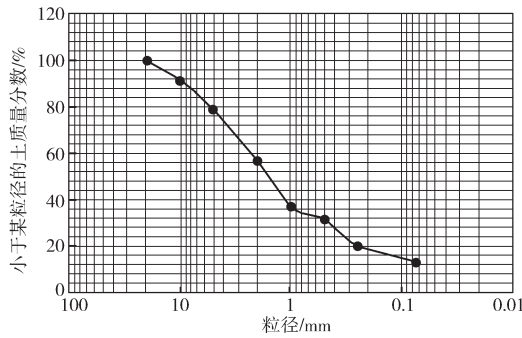


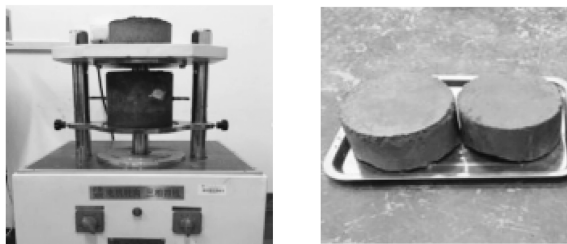
图5 松散堆积体平均级配曲线

Fig. 5 Curves of the average grading of loose deposits

由试验所得级配曲线得到 d_{10} 、 d_{30} 及 d_{60} ，进而求出所取试样的级配特征值。研究发现，该松散堆积体试样的曲率系数 C_c 为 1.06，不均匀系数 C_u 为 6.7。此外，试样中粒径小于 0.075 mm 的颗粒级配比较少，粒径大于 2 mm 的颗粒质量分数约占 50%，由此可知：4 组试样的平均值求得的级配特征值较大。因此，本松散堆积体与一般的土体相比较，堆积体的颗粒级配离散性较大，级配不连续^[6-7]。

2.3 击实试验研究

击实试验采用干土法制备试样，干土法（采集土样不重复使用）按照四分法至少准备 5 个试样，分别使试样达到不同的含水质量分数（按 2%~3% 含水质量分数递增），拌匀后使用^[8-9]。击实锤升高到规定高度，然后垂直自由落下，在击实过程中，把握每层装土高度的控制，均匀拌和土样。击实试验装置及所得完整试样如图 6 所示。



a) 击实试验装置 b) 试样

图6 击实试验装置及击实后的完整试样

Fig. 6 Complete samples of the compaction test

标准击实仪的主要参数设置见表 1。

表1 击实仪主要参数

Table1 Main parameter of compaction instrumentd

类别	锤底直径/cm	锤质量/kg	落高/cm	试筒尺寸			每层击数	击实功/(kg·m ³)
				内径/cm	高/cm	容积/cm ³		
1	5	4.5	45	10.0	12.7	997	27	2 687.0
2	5	4.5	45	15.2	17.0	2 177	98	2 677.2

结合击实试验所得数据，分别以干密度、含水质量分数为纵坐标及横坐标，绘制出两者的关系曲线

(如图 7 所示)，曲线极值点的横、纵坐标值分别对应试样试验所得最佳含水质量分数及最大干密度。

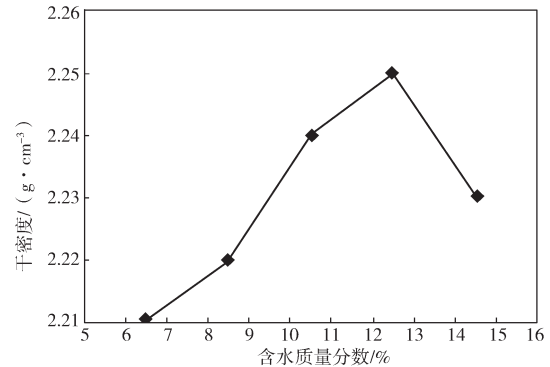


图7 干密度 - 含水质量分数曲线图

Fig. 7 Relation curve between the dry density and moisture content

按照公式 $\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w}$ ^[5] 计算试样的干密度，其中 w 为含水质量分数， ρ 为湿密度， ρ_d 为干密度。

由干密度与含水质量分数关系曲线可得试样最佳含水质量分数为 12.5%，最大干密度为 2.25 g/cm³，此结论可为室内直剪试验制样提供参考。

2.4 松散堆积体抗剪强度试验研究

本研究中采用自行研制的大型室内直剪仪进行抗剪强度试验，试验装置如图 8 及图 9 所示。

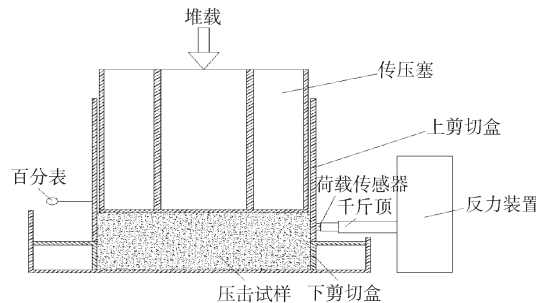


图8 大型水平剪切试验装置示意图

Fig. 8 Diagrammatic sketch of large horizontal shear test device



图9 自制大型水平剪切试验仪

Fig. 9 Large horizontal shear test

通过控制试样压实度的变化，可以得到不同的抗剪强度指标^[10]。通过这些指标，可研究在最佳含水水质

量分数下不同压实度的选取,对试样力学特性的作用和影响。圆宝山隧道3号横洞洞口处存在典型的较厚层堆积体分布,且大部分区域处于自然状态下未受人工扰动,施工采用超前管棚支护爆破开挖。根据场地条件,室内直剪试验采用快剪试验。选取最佳含水质量分数为12.5%的试样土,分成4组,每组4个试样,并充分浸润12h后再进行试样制备,运用标准击实仪对4组试样进行击实,使试样压实度分别达到0.6,0.7,0.8,0.9;运用室内直剪仪对试样进行直剪试验,4组直剪试验的法向正应力分别设置为100,150,200,250 kPa。

试验用堆载竖向加压大型水平剪切试验装置,可用于土体(或碎石)、各种不同土工合成材料之间界面以及土体(或碎石)的剪切试验。大型水平界面剪切试验装置的试验原理类似于应变式水平直剪仪。仪器由可移动的上剪切盒和固定的下剪切盒构成,试样位于上、下剪切盒之间。剪切盒的内腔为方形,且上剪切盒的内腔尺寸为500 mm×500 mm×500 mm,下剪切盒的内腔尺寸为500 mm×500 mm×100 mm。试样尺寸为500 mm×500 mm×200 mm。试验时,配重铁块通过传压塞对试样施加法向应力,由千斤顶对上剪切盒施加水平推力,使试样沿上、下剪切盒接触面产生剪切位移。剪应力由安装于千斤顶端部的荷载传感器读数后经换算确定,剪切位移由大量程百分表测定。

具体试验步骤如下:

- 1) 给上、下剪切盒间导轨及导向导轨滚珠涂抹一层润滑油,以减少上、下剪切盒之间的摩擦力;
- 2) 上、下剪切盒盒口对准固定,将试样放入盒中,置入传压塞,堆载预压24 h以上,至变形稳定,达到接近设计的压实度;然后在试验槽中注水,堆载预压期间对试样进行浸水以达到最佳含水率。
- 3) 试样经堆载预压达到设计要求的压实度后,增加或减少配重铁块,给试样施加竖向压力。竖向压力施加完毕,依次安装垫板、施加水平推力进行直剪试验,施加水平推力过程中,千斤顶活塞轴线与剪切盒中上半部分试样中心重合。
- 4) 待各种测试设备安装完毕,记录各起始读数;开始分级施加水平推力,控制千斤顶加荷速率使变形速率控制在1 mm/min左右,当试验进行到荷载传感器读数出现峰值,记录数值并继续加压;当荷载传感器不增反降,即认为试样已被破坏,停止加压。
- 5) 剪切结束,松开油阀释放油压,并且卸去配重铁块。

试验得到的压实度与力学参数的曲线关系图如图10~12所示。

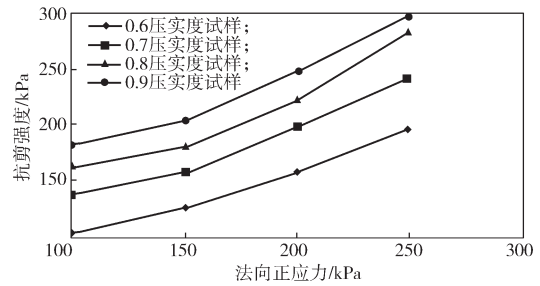


图10 抗剪强度-法向正应力曲线

Fig. 10 Relation curves between the shearing strength and normal stress

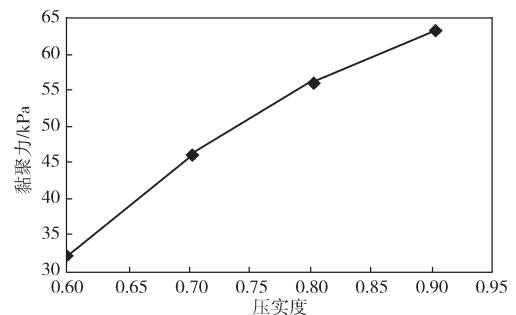


图11 黏聚力-压实度曲线

Fig. 11 Relation curve between the cohesion and compaction

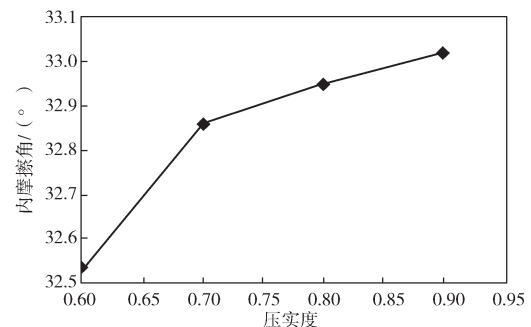


图12 内摩擦角-压实度曲线

Fig. 12 Relation curve between the internal friction angle and compaction degree

分析室内直剪试验所得各曲线可以得知:

1) 压实度与法向应力都是影响试样抗剪强度的重要因素,并且压实度、法向应力与抗剪强度基本呈正相关,当压实度为0.9且法向正应力为250 kPa时,抗剪强度达最大值,为298 kPa;

2) 内摩擦角、黏聚力随着压实度的增大而显著增强,但增强的幅度逐渐减小

由此可知,堆积体的颗粒级配离散性较大,级配不连续,因此,在实际施工条件中,应采用压实土体机械,这是提高堆积体压实度以保证边坡稳定的重要措施。

3 结论

1) 筛分试验结果表明,圆宝山隧道松散堆积体

不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 均较大, 粒径大于 2 mm 的颗粒组约占 50%, 与一般的土体相比较, 该区域松散堆积体是颗粒级配离散性大、级配不连续的特殊地质体。

2) 圆宝山隧道松散堆积体内摩擦角、黏聚力随着压实度的增大而显著增强, 压实度、法向应力与抗剪强度基本呈正相关, 当压实度为 0.9、法向正应力为 250 kPa 时, 抗剪强度达最大值, 为 298 kPa;

3) 压实度的提高是增大松散堆积体抗剪强度指标的重要手段。分层压实隧道区的松散堆积体, 并在压实过程中剔除松散堆积体中直径较大的石块, 能有效防止隧道洞口滑坡。

参考文献:

- [1] 胡伟. 松散堆积体区域隧道洞口段稳定性分析研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
HU Wei. Study on Tunnel Portal Stability Analysis of Loose Deposits[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016.
- [2] 谭儒蛟, 胡瑞林, 刘衡秋, 等. 虎跳峡工程区松散堆积体原位直剪试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 33(6): 53-55.
TAN Rujiao, HU Ruilin, LIU Hengqiu, et al. In Situ Direct Shear Tests of Incompact-Deposit Bodies in Tiger-Leaping Gorge Arer[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 33(6): 53-55.
- [3] 刘衡秋, 胡瑞林, 曾如意. 云南虎跳峡两家人松散堆积体的基本特征及成因探讨[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 100-106.
LIU Hengqiu, HU Ruilin, ZENG Ruyi. Analysis of the Basic Features and the Formation Mechanism of Liangjiaren Loose Deposits in Tiger-Leaping-Gorge, Yunnan[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 100-106.
- [4] 赵建军, 巨能攀, 涂国祥. 松散堆积体工程边坡变形机理分析及支护对策研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 611-615.
ZHAO Jianjun, JU Nengpan, TU Guoxiang. Deformation Mechanism and Supporting Measures of Man-Made Slopes in Loose Deposits[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 611-615.
- [5] 李广信, 张丙印, 于玉贞, 等. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 3-7.
LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen, et al. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 3-7.
- [6] HISATAKE M, OHNO S. Effects of Pipe Roof Supports and the Excavation Method on the Displacements Above a Tunnel Face[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2008, 23(2): 120-127.
- [7] OKADA Y. Shear Behaviour in Numerical Triaxial Compression Tests by 3D Fluid-Coupled DEM: A Fundamental Study on Mechanisms of Landslide Initiation[J]. Journal of Forest Research, 2011, 16(2): 116-127.
- [8] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 20-28.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for Soil Test Method: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999: 20-28.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑边坡工程技术规范: GB50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 55-57.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. The Professional Standards Compilation Group of Peoples Republic of China. Technical Code for Building Slope Engineering: GB50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 55-57.
- [10] 殷跃平, 张加桂, 陈宝荪, 等. 三峡库区巫山移民新城址松散堆积体成因机制研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 265-271.
YIN Yueping, ZHANG Jiagui, CHEN Baosun, et al. Formation Mechanism of Large-Scale Loose Sediment at the Relocation Sites of Wushan County on the Three-Gorges[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3): 265-271.

(责任编辑: 廖友媛)