文章编号:1006 - 2106(2013)04 - 0026 - 04

埃塞俄比亚玄武岩残积土工程特性初探*

张 昆 李建强 徐正宣**

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 研究目的:结合埃塞俄比亚轻轨(一期)工程,通过测绘、勘探及室内试验综合勘察手段,全面了解玄武岩残积土地层岩性特征及物理力学性质,并对比国内工程做法及当地施工经验,探究玄武岩残积土的工程处理方案。

研究结论:(1)玄武岩残积土不同于花岗岩残积土及一般黏性土,具有天然密度小、含水量大、孔隙比大、自由膨胀率、离散性较大等特性;(2)现场勘察宜采用原位测试、室内试验及工程物探等多种手段;(3)对玄武岩残积土进行岩土工程分析与评价可参照国内规范,但不宜照搬,施工中应搜集当地岩土勘察资料,借鉴其工程经验及做法;(4)该研究成果可应用于火成岩地区地下铁道及轻轨交通的岩土工程勘察。

关键词: 埃塞俄比亚;轻轨;玄武岩残积土;地层岩性;工程特性

中图分类号: TU449 **文献标识码:** A

Preliminary Discussion on Engineering Characteristics of Ethiopian Basalt Residual Soil

ZHANG Kun, LI Jian - qiang, XU Zheng - xuan

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Research purposes: Combined Ethiopia light rail transmit investigation project (phase one), the stratum lithology characteristics and physical and mechanical properties of basalt residual soil is analyzed by the comprehensive methods of mapping, exploration and laboratory tests. Comparison of domestic usual measures and local construction experience, engineering schemes of basalt residual soil are provided preliminarily.

Research conclusions: (1) Basalt residual soil is different from granite residual soil and common cohesive soil. Laboratory test result shows that it has some special traits such as smaller natural density, larger water content and void ratio, the free expansion rate greatly changes. (2) It is better to take many methods, such as in - site, laboratory test and engineering prospect, to make geotechnical analysis and evaluation of basalt residual soil in field investigation processing. (3) Chinese codes can be referred during investigation, but it can not be directly used, the local geotechnical investigation data, engineering experiences and methods should be collected in construction period. (4) This research results can be applicated for investigation of geotecnical engineering of metro and light rail transit in igneous area.

Key words: Ethiopia; light rail transmit; basalt residual soil; stratum lithology; engineering properties

1 概述

埃塞俄比亚轻轨以地面线为主,部分地段采用高架和地下线路,目前实施的一期工程包括东西线和南北线,线路总长约 31.3 km,共轨段长约 2.63 km,共设 34 座车站(含 1 座地下车站)。全线分布第三 ~ 第四

* 收稿日期:2012 - 10 - 19

** 作者简介:张昆,1980 年出生,男,工程师。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系凝灰岩及玄武岩,其风化后未经搬运而残留于原地的玄武岩残积土具有许多不同于一般黏性土的工程特征,本文就玄武岩残积土与国内花岗岩残积土的勘察方法及工程特性做了对比分析,提出埃塞俄比亚玄武岩残积土的工程解决方案。

2　玄武岩残积土分层依据

鉴于对埃塞俄比亚本地岩土工程性质缺乏足够的认识,考虑到玄武岩及花岗岩均为火成岩,且国内花岗岩地区地铁及轻轨岩土工程勘察技术较为成熟、经验较丰富,在埃塞轻轨的初勘阶段,暂按花岗岩风化程度及残积土的分类方法来划分埃塞玄武岩残积土及风化层,并对残积层分为软塑、可塑及硬塑三个亚层,具体标准如表 1 所示,该划分标准是否合适,可根据室内试验、波速测试等资料对比后进行调整。

表 1　标贯划分玄武岩残积土及风化层

分层依据	强风化岩	全风化岩	残积土
实测标准贯入击数 N	$N \geqslant 50$	$30 \leqslant N < 50$	$N \leqslant 8$ 软塑
			$8 < N < 15$ 可塑
			$15 \leqslant N < 30$ 硬塑

3　玄武岩残积土的特性

玄武岩的主要矿物为斜长石、辉石、角闪石及橄榄石,玄武岩残积土中的长石、角闪石已完全风化呈土状,地质勘察中基本未发现石英矿物残留的石英角砾,钻探取出的岩心断面湿润,裂面可见光滑镜面、擦痕,用手很容易搓成细土条,黏性较强,其物理力学指标如表 2 所示。

表 2　玄武岩残积土室内试验结果

试验项目	天然密度 ρ/(g/cm^3)	天然含水量 ω/%	孔隙比 e	液限 ω_L/%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	自由膨胀率 F_s/%	压缩系数 a	压缩模量 E_s/MPa	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
软塑	1.60 ~ 1.83	28.5 ~ 74.6	0.92 ~ 1.52	50.3	13.2 ~ 33.7	1.08 ~ 1.42	2 ~ 82	0.65	3.5	12	8
可塑	1.59 ~ 1.86	21.3 ~ 75.4	0.94 ~ 1.51	57.8	15.2 ~ 40.9	0.17 ~ 0.68	9 ~ 135	0.26	4.82	24	10
硬塑	1.65 ~ 1.87	23.1 ~ 55.1	0.95 ~ 1.55	54.6	12.7 ~ 36.7	0.06 ~ 0.74	12 ~ 146	0.32	7.46	38	14

根据文献[1]的研究,花岗岩残积土与母岩的矿物成分、结晶体大小有直接关系,属于由细粒土和粗粒土混杂且缺乏中间颗粒的混合土,兼有砂土和黏性土的性质,中~粗粒花岗岩风化而成的残积土多为砾质黏性土,砂质黏性土由中~细粒花岗岩风化而成,黏性土基本为岩脉风化而成。从深圳地铁花岗岩残积土的分布来看,砾质黏性土大约占了 80% ~85%,砂质黏性土约占 15%,黏性土只占不到 3%。

埃塞轻轨初步勘察阶段共取玄武岩残积土 86 组,其中只有 5 组土样塑性指数 I_p 小于 17,黏性土约占 94%,其具有天然密度小、含水量大,孔隙比大、塑性界限大及自由膨胀率值差异大等特点,多为高液限土。

4　综合评价

4.1　岩土分层

黏性土的塑性状态国内相关规范按表 3 来划分,其主要参考的指标是液性指数 I_L 及各土层的实测平均标贯锤击数 N。

表 3　黏性土的塑性状态划分

塑性状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑
《岩土工程勘察规范》	$I_L \leqslant 0.00$	$0.00 < I_L \leqslant 0.25$	$0.25 < I_L \leqslant 0.75$	$0.75 < I_L \leqslant 1.00$	$I_L > 1.00$
《铁路工程地质原位测试规程》	$N > 32$ $I_L \leqslant 0.00$	$8 < N \leqslant 32$ $0.00 < I_L \leqslant 0.50$	–	$2 < N \leqslant 8$ $0.5 < I_L \leqslant 1.00$	$N \leqslant 2$ $I_L > 1.00$

由表 3 可以看出,铁路工程中的黏性土没有考虑可塑状态,这个状态下的标贯划分标准是缺失的,除了坚硬及流塑状态下两种规范的液性指数判别一致外,其余三种状态都存在差异。从岩土工程勘察的流程来看,不管是铁路还是地铁、轻轨项目,野外辨别及原位测试是在室内试验之前进行的,也是地质技术人员进行岩土分层的主要依据。埃塞地区玄武岩残积土室内实验结果表明,其液性指数 I_L 多分布在 0.25 ~ 0.75 之间,98% 为可塑状,即使现场用标贯判别为硬塑状的层位,取样室内试验做出来的液性指数值也多为可塑状。因此,根据实验结果及对现场岩心的辨别综合来看,埃塞轻轨玄武岩残积土可划分为两个塑性状态,即软塑和可塑,之前由标贯判定的硬塑状结合室内试验,可合并至可塑层。结合钻孔声波测井剪切波速的结果来看,玄武岩全风化层的剪切波速 V_s 多在 250 ~ 350 m/s之间,与国内相关规范较为吻合。因此,现场以实测标贯锤击数来划分全风化层是可行的。

4.2　承载力

从文献[2]~文献[7]可以看出,国内铁路、地铁及轻轨相关规范及规定中,对于一般黏性土的基本承载力、承载力特征值等多用土的物理力学指标孔隙比 e 及液性指数 I_L 来综合确定,国家标准、行业标准及地

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方标准承载力在数值上差别不大。以文献[5]为例，在液性指数 I_L 不变的情况下，一般黏性土承载力特征值 f_{ak} 随孔隙比 e 的增大而减小，孔隙比 e 在 0.9～1.1 之间时，可塑状态下承载力特征值 f_{ak} 在 110～200 kPa 之间，如图 1 所示；若根据标准贯入试验锤击数 N 来判定，一般黏性土和花岗岩残积土承载力特征值 f_{ak} 随 N 的增大而增大，如图 2 所示，可塑状黏土承载力特征值 f_{ak} 在 160～400 kPa 之间，明显要比由 e 及 I_L 得出的值高出许多。

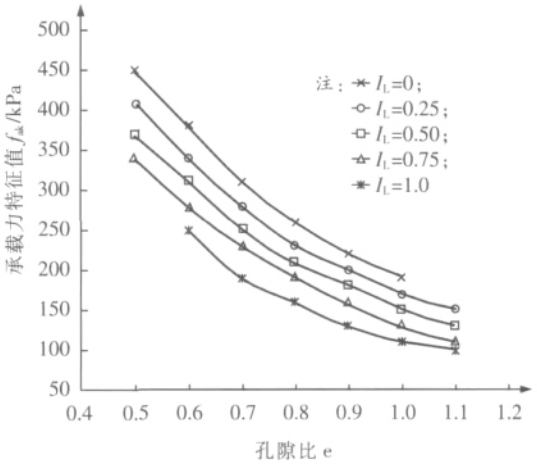

图 1 f_{ak} 与 e、I_L 关系

我国西南地区广泛分布碳酸盐类岩石的残积层红黏土，虽然在母岩及其形成的气候条件与玄武岩残积土有所不同，却有较多类似的地方，如天然含水率 ω、饱和度 S_r、塑性界限（液限 ω_L、塑限 ω_p 及塑性指数 I_p）及天然孔隙比 e 等指标都很高，且这些指标变化幅度很大。但红黏土却具有较高的力学强度和较低的压缩性，这与具有类似指标的一般黏性土力学强度低、压缩性高的规律完全不同，对于玄武岩残积土来说，有较好的参照性。根据文献[2]的研究，红黏土压缩模量 E_s 与基本承载力 σ_0 的关系如表 4 所示，拟合表明 σ_0 与 E_s 存在很好的对数关系，关系式为 $\sigma_0 = 96.265\ln E_s + 51.715$，相关系数 $R = 0.998$。

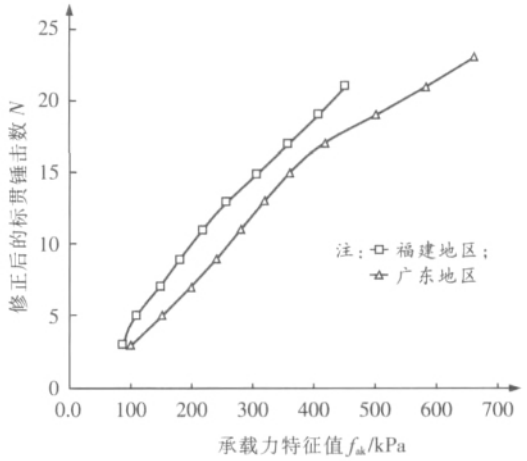

图 2 f_{ak} 与 N 关系

表 4 残积层红黏土地基基本承载力 σ_0

压缩模量/MPa	4	6	8	10	12	14	16	18	20
基本承载力/kPa	190	220	250	270	290	310	320	330	340

可塑状红黏土的液性指数 I_L 在 0.33～0.67 之间，与可塑状的玄武岩残积土差异不大，根据表 4 的结果来判别，可塑状的玄武岩残积土基本承载力 σ_0 在 200～240 kPa。由于玄武岩残积土在不同地段、不同深度所取的样品在孔隙比及液性指数室内试验指标上差异较大，单一从孔隙比 e 及液性指数 I_L 这两个指标来确定玄武岩残积土承载力结果可能会比实际要偏小很多，应结合实测标贯锤击数、载荷试验及其它力学指标来综合判定其承载力，其基本承载力 σ_0 取值宜在 100～200 kPa 之间。

4.3 变形模量

玄武岩残积土在钻进过程中干钻易钻进，容易取得原状土样进行室内压缩试验得到压缩模量 E_s，变形模量 E_0 可以利用旁压试验得出，也可利用标贯击数来估算。由于缺乏埃塞当地资料，可参照国内计算公式，花岗岩残积土难于取得原状土样进行室内压缩试验，其变形模量主要是通过载荷试验方法取得，并通过标准贯入试验和载荷试验对比资料进行了统计分析，得到了花岗岩残积土变形模量 E_0 与标贯实测击数 N 或修正后的击数 N' 的经验关系式，如表 5 所示。

表 5 E_0 与 N 的经验关系式

资料来源	Decourt (1989)	日本	深圳地区	福建地区
计算公式	$E_0 = 3N$	$E_0 = 0.4 \sim 1.4N$	$E_0 = 2.2N'$	$E_0 = 1.167N' - 1.053$

应该指出的是，花岗岩残积土的颗粒组成属于由细粒土和粗粒土混杂且缺乏中间颗粒的混合土，含有较多的未风化残留的石英颗粒，兼有砂土和黏性土的性质，而玄武岩残积土经勘探、试验表明多为黏性土，不含或含有很少的石英颗粒。用 Decourt 及深圳地区经验公式估算玄武岩残积土的变形模量可能要比实际高出很多，而福建地区经验关系式仅适用岩土工程勘察等级为乙级及以下的工程，应慎用这 3 个公式，日本的经验公式来自一份较为全面的资料总结，但如何取值宜结合旁压试验、标贯试验等测试结果综合分析评价，建立对应的统计关系式。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.4　抗剪强度与边坡稳定性

经统计分析，埃塞轻轨工程玄武岩残积土直剪强度凝聚力 c 标准值为 36.5 kPa，内摩擦角 φ 标准值为 14°。轻轨地下段拟采用明挖法施工，最大挖深约 15 m，勘探未揭示地下水，其玄武岩残积土及全风化层厚约 10 m，勘察期间当地正好有一个公路基坑在开挖，该基坑长约 2 km，宽 10 ~ 15 m，深 8 ~ 10 m，几乎近于直壁开挖，未采取任何支护措施，坡面未见地下水活动迹象，边坡较稳定。因此，用直剪强度值可作为边坡稳定的主要依据，若施工过程中发现有软弱结构面，应在软弱面上取样做三轴剪切试验，分段评价边坡稳定性。

5　工程解决方案

5.1　岩土分层

钻孔波速测试结果表明，玄武岩全风化层的剪切波速值与国内花岗岩残积土较为吻合，由此反推可以得出，标贯实测击数 N 小于 30 击可定名为残积土，但 N 值在 15 ~ 30 击之间的残积土其剪切波速值离散性较大，仍有一部分数值在全风化层取值范围内。因此，在勘察过程中可以根据 N 值在 30 ~ 50 击或者剪切波速 V_s 值在 250 ~ 350 m/s 之间判定其为全风化层，N 值在 8 ~ 30 击范围内判定其为残积土。

5.2　地基沉降

埃塞轻轨玄武岩残积土分布于地表黏土质及碎石素填土之下，厚 2 ~ 10 m，受风化程度及岩性等控制，表现出同一岩性在不同地段、不同深度的强度及变形模量变化很大，轻轨线路多为地面线，应重视残积土地基不均匀沉降对工程的影响。

勘察期间宜加强原位测试及室内试验工作，使多种手段和方法得出的勘察资料相互验证，合理选取物理力学指标，施工时应借鉴当地工程的经验及做法，改善、加固残积土地基。比如，人工挖探的探坑显示，当地既有运营的公路路面以下在 0.5 ~ 2.8 m 深度内用碎石土对残积土进行了换填，且压实至中密 ~ 密实状态，满足了地基土承载力及变形要求。

5.3　基坑及边坡稳定

玄武岩残积土属弱透水层，具有在一定临空面遇水易软化、崩解、强度急剧降低等特点，当动水压力过大时，边坡容易产生坍塌现象。地下区间及高架段桥基基坑开挖应加强地表防排水措施，避免雨水井、污水井等外来动水流进入基坑，条形基坑开挖宜根据不同地段、不同深度残积土的膨胀潜势等级逐段设计，并进行稳定性计算。

6　结论

(1) 室内试验结果表明，埃塞轻轨玄武岩残积土为黏性土，可塑状，多为高液限土，具有透水性弱、膨胀性离散较大、不同深度的力学指标差异较大等特点，不同于花岗岩残积土及一般黏性土。

(2) 施工中宜加强现场载荷试验，结合室内试验及当地经验数据，来综合确定玄武岩残积土的物理力学指标，做到勘察资料相互验证，合理选值。

(3) 玄武岩残积土地基处理及基坑边坡开挖、维护设计可参照国内规范，也应该重点借鉴当地相关工程经验，满足工程需要的前提下，做到经济合理，符合埃塞基本国情，切不可照搬国内标准及规定。

参考文献:

[1] 鲍晓东. 深圳地区花岗岩残积土工程特性的研究 [J]. 铁道勘察，2004(2): 72 - 74.
Bao Xiaodong. Engineering Geological Properties of the Remainder Soil from Weathering Granite in Shengzhen District [J]. Railway Investigation and Surveying, 2004(2): 72 - 74.

[2] TB 10012—2007，铁路工程地质勘察规范 [S].
TB 10012—2007, Code for Geology Investigation of Railway Engineering [S].

[3] TB 10018—2003，铁路工程地质原位测试规程 [S].
TB 10018—2003, Code for In - site Measurement of Railway Engineering Geology [S].

[4] GB 50307—1999，地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范 [S].
GB 50307—1999, Code on Geotechnical Investigations for Metro and Light Rail Transit [S].

[5] DBJ 15—31—2003，建筑地基基础设计规范 [S].
DBJ 15—31—2003, Design Code for Building Foundation [S].

[6] DBJ 13—07—2006，建筑地基基础技术规范 [S].
DBJ 13—07—2006, Technical Code for Building Foundation [S].

[7] DBJ 13—84—2006，岩土工程勘察规范 [S].
DBJ 13—84—2006, Code for Investigation of Geotechnical Engineering [S].

[8] 张昆，郭菊彬，李建强. 埃塞俄比亚新建铁路主要工程地质问题及对策 [J]. 铁道工程学报，2011(10): 38 - 41.
Zhang Kun, Guo Jvbin, Li Jianqiang. Countermeasure and Primary Engineering Geological Problems of Newly - built Ethiopian Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(10): 38 - 41.

[9] 姚裕春. 海东线花岗岩全风化层沉降计算参数试验研究 [J]. 高速铁路技术，2011(6): 48 - 52.
Yao Yuchun. Experimental Study on Calculation Parameter of Settlement for Completely Weathered Granite Foundation of Hainan Eastern Passenger Dedicated Line [J]. High Speed Railway Technology, 2011(6): 48 - 52.

(编辑　赵立兰)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net