

膨胀土用作路基填料的分类指标体系研究

杨和平, 赵鹏程, 郑健龙

(长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410076)

摘要: 交通部西部“膨胀土路基设计、加固与施工技术研究”项目课题组在不同地区用不同胀缩等级膨胀土直接修筑了多段路堤实体工程已取得成功经验, 为促进这种处治新技术的推广并保证路基的强度和稳定性, 必须建立与之配套的填料分类指标体系。为此, 依据室内大量的膨胀土路用性能试验结果, 归纳总结已有的实体工程修筑经验, 遵循继承与创新相结合的原则, 探讨采用改进的 CBR 试验强度、CBR 膨胀量以及稠度三项指标建立膨胀土路堤填料分类指标体系, 并对三种典型膨胀土开展了相关指标的试验验证。结果表明: 该体系真正反映了膨胀土的本质特征及作为填料的工程特性, 且指标参数的获取测试简便、快捷, 能大大拓宽膨胀土用作填料的使用范围, 可供编制路基新规范和工程师们进行膨胀土路堤设计与施工时参考。

关键词: 膨胀土; 填料分类; 指标体系; 改进 CBR; CBR 膨胀量; 稠度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)02-0194-09

作者简介: 杨和平(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事路基路面工程、特殊土路基的教学科研工作。E-mail: cscuyang@163.com。

Classification of expansive soils used as embankment fills

YANG He-ping, ZHAO Peng-cheng, ZHENG Jian-long

(Key Laboratory of Road Structure and Material of the Ministry of Communications, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: The research group of project "Research on design, stabilization and construction technology of expansive soil subgrade" sponsored by Chinese Ministry of Communications has successfully built several trial embankments in some areas by directly using expansive soils with different swelling potentials and achieved valuable experience. In order to promote the application of the new technology and ensure the strength and the stability of the subgrade, it is necessary to establish the classification of expansive soils used as fills. Based on numerous laboratory results of engineering properties of expansive soils, summarization of the experience in building trial embankments with expansive soils and criticism of some old classification indices, a new classification of expansive soils used as embankment fills is put forward by use of three indices—CBR strength, swelling rate of CBR samples in modified CBR tests and consistency. The corresponding indices are verified through tests on three kinds of typical expansive soils. It is shown that the new classification can reflect the basic characteristics of the expansive soils and the engineering properties of embankment fills. Furthermore, it is very easy and convenient to obtain these indices, so that the application of expansive soils used as embankment fills can be enlarged, these indices may be and provide engineers with references in the design and construction of expansive soil embankments.

Key words: expansive soils; classification of fills; classification scheme; modified CBR; swelling rate of CBR samples; consistency

0 引言

众所周知, 膨胀土遇水膨胀, 失水收缩, 其工程性质较差, 不是一种好的筑路材料, 而我国是世界上膨胀土分布最广的国家之一, 出于经济和环保考虑, 在大量膨胀土分布区修路时不得不用它做路堤填料, 但必须辅以处治措施才能确保路基的使用品质。以往国内外多采用掺灰改性等化学处治方法, 这对施

工机械、工艺要求高, 造成工程成本大幅增加。在开展西部膨胀土路基项目研究时, 课题组注重实际, 力图提出技术可行且在西部欠发达地区能够推广应用的处治方法, 在云南楚大路、广西南友路、广西水南路

基金项目: 交通部西部交通建设重点资助项目(2002318000)

收稿日期: 2007-09-10

以及湖南常张路对不同成因和胀缩等级的膨胀土分别采用封闭包盖、土工织物加固、三明治互层等物理处治方案成功地修筑了九段路堤实体工程,产生了良好的工程、经济和环保效益^[1],为总结提出膨胀土路堤的物理处治技术奠定了基础。

膨胀土地区筑路不管用何种处治方法,为保证路基的强度和稳定性,首先都必须解决填料的分类问题,即定性和定量评价现场膨胀土路用性质的优劣,以确定其是否可用作填料以及改良方法。因此,长期以来不少专家学者以及设计部门热衷于这方面研究并给出过相应的评价方法。交通部于1995年和2006年颁布的两轮公路路基设计规范及施工技术规范中均采用胀缩总率指标来进行膨胀土填料分类,且规定胀缩总率不超过0.7%的土(改性土和天然土)才能作填料^[2-5]。由公路膨胀土的膨胀潜势判别标准^[2]可知这实际上是规定合格填料必须是非膨胀土,该分类标准的提出说到底是基于膨胀土不能直接用于路堤填筑这一基本思路,会带来以下问题:①凡膨胀土用作路堤填料必经掺灰或其它改性,西部贫困地区只能采取弃土换填;②评价指标单一,只考虑了填料的变形性能,无法反映其水理性质及强度特性;③指标参数获取困难。需完成土的膨胀率和收缩两大试验,此外计算公式中工作条件系数需有长期资料积累才能确定,周期长且在施工单位难实现;④分类指标对现场填筑施工起不到控制作用。而文献[6]研究指出,CBR膨胀量与胀缩总率之间存在一定相关关系且测试方便,主张用CBR膨胀量对膨胀土填料进行判别与分类。文献[7]提出用吸力、胀缩总率和CBR膨胀量进行分类。吸力能反映土的非饱和性质,但其测试更困难,不便于工程应用。文献[8]选用CBR、CBR膨胀量、液限、塑限四指标进行多因子模糊综合评判膨胀土填料等级。该指标体系的确是源于工程实践也能被工程接受,但同为水理性质指标的液限和塑指虽给出了填料的可塑范围,却也不能反映天然膨胀土填料能否满足施工可压实条件。

综上所述,有关膨胀土填料分类方法的研究虽多,但全面、系统、深入研究的还少见,已有的分类指标均存在局限性,尤其没有考虑可否直接用膨胀土做填料筑路这一关键技术,而这恰恰关系到能否真正解决弃土换填、水土流失等西部膨胀土地区筑路普遍存在的重大工程难题。针对上述状况,笔者探讨从工程实际出发,抓住膨胀土的工程特性以及直接用作路堤填料的各影响因素,研究提出膨胀土填料分类指标体系,使其能充分满足膨胀土填筑路基的充要条件:强

度,变形和施工性能,为工程师们进行膨胀土路堤设计与施工提供合理的依据和参考。

1 指标体系建立的原则

为了真正实现上述目标,新分类指标建立前先确立以下指标体系的建立原则。

(1) 继承与创新相结合。所谓继承是将目前已有分类指标体系中的精华或合理部分加以保留,它们都是长期研究和经大量工程实践的检验而积累的宝贵经验;而创新则是根据工程实际提出新的指标或对原有指标的内涵加以丰富和改进。

(2) 能反映膨胀土的本质特征以及作为填料的路用性能。即土体含水率的改变是引起胀缩变形造成路堤病害的直接肇因;足够的上覆压力能有效抑制膨胀土吸湿后的膨胀破坏作用;经施工碾压后膨胀土体的最大强度和水稳性对应于填料的一个最佳湿度状态和相应的击实功能。

(3) 填料分类指标的获取要求测试简单、便捷,在一般的工地试验室由施工单位的试验人员都能完成。

(4) 指标测试数据可靠,重现性好。最好选用土工试验规程所规定的常规必做试验,且不同的试验人员经多次试验后所测数据的误差不大。

(5) 所选指标对于路基设计与施工均有直接指导意义。既能反映膨胀土作为填料填筑在特定路堤部位后的强度、变形,又能满足进行路基施工的压实控制要求。

2 分类指标的选取

填料分类指标从膨胀土筑路后的胀缩性、强度、稳定性以及在填筑施工时压实要求出发,按建立分类指标体系的五原则来选取。为此,通过深入研究已有分类指标体系,总结大量室内外试验成果以及修筑实体工程的成功经验,开展分析比较进而提出具体的分类指标。

2.1 强度控制指标

公路路基在外载和自重作用下,路基体内将产生剪应力和相应变形,当总荷载超过其抗剪强度,路基土将发生剪切破坏。因而土体的抗剪强度对保证路基的稳定起至关重要的作用。而CBR试验就是测试试件在被贯入过程中,部分土体与整体之间发生相对位移时在剪切面上所提供的抗剪切力,选用它作控制指标能反映路基土在工作状态下的局部抗剪强度,比剪切试验所测得的抗剪强度更能客观合理地反映土体强

度。因此，在公路工程中它被广泛用来评定土基及路面材料承载能力。文献[2~5]均用 CBR 值作为路堤不同层位填料选取的控制依据，这是改革开放中引进国外先进技术的一个成果，对保证我国高速公路路基的建设质量起到了非常重要的作用。

对照建立分类指标体系的基本原则，必然选择 CBR 作为强度评价的指标。但在室内大量试验和室外实体工程修筑过程中发现，规范 CBR 试验方法并不适合膨胀土。按照规范方法进行试验，膨胀土试件顶部经水浸泡后表土极度饱水且完全泥化，导致其后贯入测试的结果往往达不到作填料的基本要求（ $CBR>3$ ）。而实体工程修筑中，膨胀土只用来填下路堤，其上覆盖有非膨胀土上路堤及路面结构层，加之封闭包盖及基底处理等技术的运用，填芯膨胀土不可能直接受水浸泡。

正因为如此，现行《公路土工试验规程》^[9]明确指出：“做 CBR 试验时，应模拟材料在使用过程中处于的最不利状态”，“使 CBR 试验更符合实际状况”。

基于对 CBR 试验方法的深入研究^[10]，笔者提出采用改进 CBR 试验方法进行膨胀土填料强度的测定：①试件在筒壁带孔的试验筒内进行侧向浸水，泡水时间仍为 4 d；②浸水时作用在试件上的上覆压力改为 20 kPa；③土样的制件含水率采用湿法重型击实标准确定的最佳含水率。如图 1 所示。



图 1 改进的 CBR 筒和施加荷载块的情况

Fig. 1 Modified CBR cylinders and blocks for imposing loading

采用改进方法对不同膨胀土进行 CBR 强度测试，其所得结果均有所提高，反映了路基工作时膨胀土的真实强度，也证明采用封闭包盖等物理处治措施修筑的膨胀土路堤其强度完全可以达到要求。因此，笔者选取改进 CBR 值作为填料强度评价指标，不仅能与现行规范相配套，体现指标选取的继承性，而且也是

一种创新。

2.2 变形控制指标

干缩湿胀是膨胀土区别于其它正常填料的显著特点和引起路堤破坏的主要原因。胀缩总率反映的就是膨胀土的变形特性，因此它可用作填料的分类指标。经扰动击实后的膨胀土填料其胀缩总率 e_{ps} 为

$$e_{ps} = e_{p50} + c_{sl}(w - Kw_p) \quad (1)$$

式中， e_{ps} 为胀缩总率， e_{p50} 为 50 kPa 压力下的膨胀率（%）， c_{sl} 为收缩系数， w 为填料的含水率， w_p 为土的塑限含水率； K 为工作条件系数，需要当地 10 a 的大气降雨量和蒸发量等统计资料方能确定。

不难看出，要获得 e_{ps} ，一方面要完成 50 kPa 下的膨胀率以及收缩系数两个周期较长的非常规试验，另一方面还必须收集 10 a 的气象资料，这要在工地试验室实现就非常困难。因此，不少研究者致力于寻求一种既能反映膨胀土的变形性能又能便捷获取的指标来加以替代。研究中发现扰动膨胀土的收缩变形对胀缩总率影响较小，其胀缩总率的计算结果近似等于土样在 50 kPa 下的膨胀率测试值^[6, 11-12]。而文献[6]通过进一步分析得出膨胀土在 50 kPa 压力下的膨胀率与 CBR 膨胀量呈良好的线性关系，笔者对文献[11]列出的相关试验数据进行分析整理后也得出同样的结论（见表 1、图 2）。

表 1 广西膨胀土试验数据表

Table 1 Test data of Guangxi expansive soils				
取样地点	塑限	重型击实 最佳含水率/%	50 kPa 膨 胀率/%	CBR 膨胀量/%
K56+480	25.5	15.3	10.2	15.96
K58+100	22.0	15.6	2.1	8.75
K12+350	20.9	15.8	7.8	13.86
K12+900	16.9	11.6	3.3	8.84
K114+300	35.9	27.1	-0.6	1.44
K131+580	33.7	19.7	5.5	11.63
AK1+440	31.6	19.7	6.7	14.58

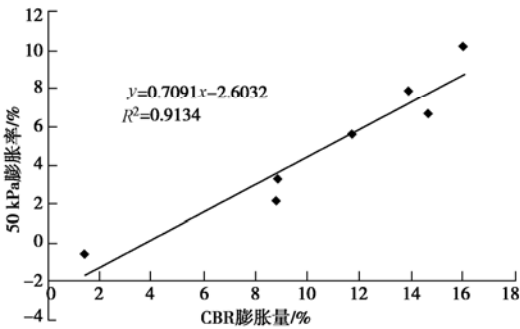


图 2 50 kPa 膨胀率与 CBR 膨胀量的关系

Fig. 2 The relationship between swelling rate and CBR swelling capacity under pressure of 50 kPa

上述研究表明:可用 CBR 膨胀量代替胀缩总率来判别填料的变形特性。另外,分析两种变形指标获取的试验条件对实际工况的模拟效果也不难看出这种代替的优越性:①试件尺寸,胀缩总率试验采用 $61.8\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ($d \times h$) 的小试件,而 CBR 试验采用的是 $152\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ ($d \times h$) 大尺寸试件,不言而喻,其测试结果的可靠性显然优于前者;②制件方法,胀缩总率试验中有荷膨胀量试验的制件方式是将环刀垂直下压至击实土内直至环刀土样厚度超过 1 cm ,由于击实土样高 12 cm ,击实各层密实程度不同,对不同层位取样结果存在较大差异。CBR 试验采用击实制件,与路基分层碾压施工过程更加吻合,并对整个试件进行试验,能较好模拟路基土整体变形状态。而文献^[7-8]也分别从工程实用出发研究提出用 CBR 膨胀量作为填料分类指标。基于上述,笔者选取 CBR 膨胀量作为填料变形控制指标。同样为使指标测试能真实反映膨胀土填路堤的实际工况并与强度指标的测试相配套,遵循继承和创新相结合的指标选择原则,决定采用改进试验方法下的 CBR 膨胀量作为填料分类指标。

2.3 满足施工性能的控制指标

某种土能否用作路堤填料,除了需符合强度和变形要求外,还必须满足施工可压实条件。若填料的天然含水率接近其在室内击实试验测得的最佳含水率,这种填料就具有良好的碾压施工性能。但最佳含水率是一相对值,它随填料土质和压实功能的变化而变化。天然含水率相同的两种土,由于塑限、液限不同,即使两者塑指相等,同一压实功下,其碾压效果也会大不相同,甚至其中某种土可能根本不能碾压(变成橡皮土),这完全取决于土的天然稠度,即土的液限与天然含水率之差和塑指的比值。稠度这一指标综合反映了土的相对含水率和软硬状态,非常适合用来指导细粒土填料的碾压施工。而天然含水率较高是膨胀土的基本特征之一。为说明这一点,对文献[13]中列出的 155 组土样进行了统计分析,结果见统计直方图(图 3)。

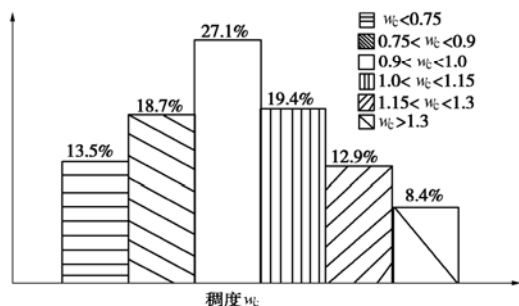


图3 中国膨胀土(岩)主要分布省区天然稠度统计图

Fig. 3 The statistics of natural consistency for expansive soils in main distribution provinces

分析图 3, 155 组膨胀土样中天然稠度小于 1.00 的占了近 60%, 而现行的路基施工机具和压实方法决定了填料的稠度只有在 1.00 以上, 即天然含水率小于塑限(呈固态)时才能进行有效碾压, 统计分析的膨胀土样中只有 40% 满足这个条件。可见弄清填料的天然稠度状况非常重要, 它成了判别该土能否直接用于填筑的必要条件。

膨胀土与一般细粒土在经压实后的强度特性方面还有所不同, 对一般细粒土而言, 天然含水率偏小, 压实功越大, 其获得的最大干密度会越大, 路基相应的强度和稳定性得到提高且能保持长久。而对膨胀土这种特殊土, 即使其天然含水率较低, 通过增大压实功使其获得较大干密度后, 对保证路基的长期强度和稳定性并非有利。众所周知, 膨胀土的含水率越低, 干密度越大, 饱和度越小, 吸湿后土体的膨胀潜势会更大, 更容易引起路基的形变破坏; 而大量的工程经验又表明, 受大气温度和土内水汽迁移流通以及周围环境的影响, 新修路堤经两三年后, 其填芯膨胀土的湿度会逐渐趋于某一稳定平衡状态, 此时的含水率接近土的塑限, 即稠度值在 1.00 附近。因此, 从保持路基的强度和稳定性考虑, 天然稠度过大(较干)的膨胀土也不适宜直接填筑路堤。当然由图 3 可看出, 这种情况出现的机率很小, 因为天然状态下的膨胀土多为过湿土。这样一来, 可以说膨胀土作填料存在的主要问题是湿黏土的压实问题。

为解决湿黏土作填料所遇到的问题, 国内杨世基等开展了大量的研究, 明确指出必须用稠度指标来控制路基的填筑压实^[7, 14], 这为我们选取膨胀土填料的分类指标提供了思路。为了确保膨胀土直接作填料的路用性能且真正能实施施工碾压, 合格填料的稠度范围必然会受到也必须加以限制。这样, 本着继承与创新相结合的原则, 真正从工程实用出发, 应该选择稠度作为膨胀土填料的施工性能控制指标。

综合上述, 从保证路基的强度、稳定性以及填筑施工的可操作性出发, 本研究最终将改进 CBR 试验方法的 CBR 强度、CBR 膨胀量和稠度三指标选取为膨胀土路堤填料的分类指标。

3 几种典型膨胀土填料分类指标的测试与分析

为了进一步论证 3 指标选取的合理性并为分析确定各自的分级界限值提供实际测试数据的支持, 选取广西宁明、广西百色和河南邓县 3 种典型膨胀土进行分类指标试验研究, 表 2 给出了 3 种土的基本性能, 参考文献[14]初步确定填料碾压施工的合适稠度范围

表 2 三种膨胀土的土性指标
Table 2 Soil properties of three expansive soils

土样	天然含水率 $w/\%$	液限 $I/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	天然稠度 w_c	湿法重型击实最佳含水率/ $\%$	线缩 $\delta/\%$	50 kPa 下膨胀量/ $\%$	自由膨胀率/ $\%$	颗粒组成/mm				膨胀势
									>0.075	0.075~0.005	<0.005	<0.002	
宁明膨胀土	24.9	52.91	25.45	1.10	21.0	7.5	0.80	45	1.48	56.04	42.48	40.12	中
百色膨胀土	21.0	51.03	27.65	1.09	15.8	2.0	1.10	87	0.30	51.84	47.84	46.72	中
邓县膨胀土	25.0	59.20	34.70	0.99	16.0	6.0	0.55	98	8.76	42.2	49.04	48.19	强

为 1.00~1.30。

3.1 CBR 强度

为便于分析比较，对 3 种膨胀土均分组按不同含水率制件，分别采用规范 CBR、改进 CBR、上覆荷载 2.7 kPa 侧向浸水的 CBR3 种试验方法测出各自的 CBR 强度并绘制 CBR 随制件含水率变化的关系曲线，见图 4。图中两虚线所辖区域为膨胀土碾压的初拟合适稠度范围 1.00~1.30。

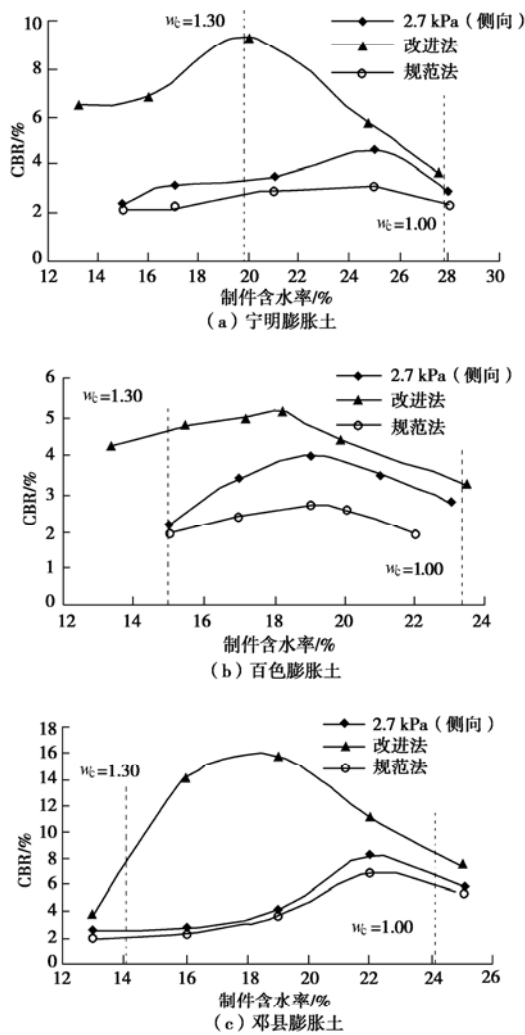


图 4 CBR 随制件含水率的变化曲线
Fig. 4 Variation of CBR with water content of specimens

分析图 4 可以看出以下 4 点。

(1) 不同胀缩等级的膨胀土经三种方法测试所获得的 CBR 变化曲线具有共同的规律：①均为单峰曲线；②侧向浸水的 CBR 值大于上部浸水试验的对应值；③增大上覆压力能明显提高其 CBR 强度；④改进试验方法测得的 CBR 曲线其峰值左移（稠度增大），所对应击实状态的填料湿度更接近于湿法重型标准最佳含水率。

(2) 不论何种初始制件含水率，宁明、百色膨胀土的规范 CBR 测试结果都小于 3%，但在初拟稠度的范围内测得的改进 CBR 值均大于 3%，而宁明膨胀土已成功地应用于多段实体工程路堤修建，说明改进法的测试结果能反映路堤的实际工况，选它作填料分类指标是合理的。

(3) 在初拟稠度范围为 1.00~1.30，3 种膨胀土 CBR 曲线均出现各自的最佳强度和水稳定状态，此时改进 CBR 测试结果均能满足作下路堤填料的强度要求（CBR>3%）。说明控制合适稠度范围的必要性。

(4) 膨胀土的 CBR 强度与其膨胀潜势的大小无直接联系，本次试验采用的三种土中，邓县土为强膨胀土，但在填料的合适稠度范围内，其 CBR 强度最大。

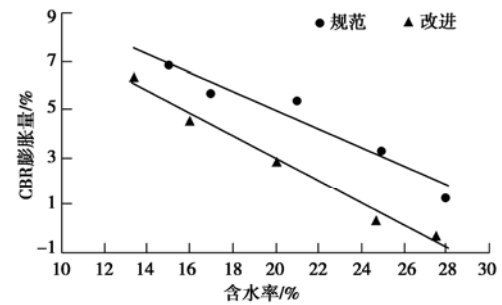


图 5 宁明土的 CBR 膨胀量随制件含水率的变化
Fig. 5 Variation of CBR swelling capacity with water content of Ningming expansive soils

3.2 CBR 膨胀量

为研究两种试验方法下土样 CBR 膨胀量随含水率的变化规律以及它们之间的相互关系，获得变形控

表 3 两种试验下不同制件含水率对应的 CBR 膨胀量

Table 3 CBR swelling capacity of specimens with different water contents in tests

土样	规范										改进									
	含水率					膨胀量					含水率					膨胀量				
宁明膨胀土	15	17	21	25	28	6.8	5.7	5.3	3.3	1.3	13.3	16.0	20.0	24.7	27.5	6.4	4.6	2.9	0.45	-0.2
百色膨胀土	15	17	19	21	23	6.7	5.5	3.8	2.7	2.0	13.4	15.5	17.2	18.3	19.9	6.4	5.3	4.2	2.60	1.1
邓县膨胀土	13	16	19	22	25	10.5	5.9	3.6	1.3	0.1	13.0	16.0	19.0	22.0	25.0	5.9	4.3	1.6	0.40	-0.1

制指标参数取值的参考依据, 将 3 种膨胀土在进行 CBR 试验过程中测得的 CBR 膨胀量数据分别加以分析整理, 结果见表 3。

(1) 宁明膨胀土

拟合方程: $y=-0.392x+12.789$ (规范法 $R^2=0.942$);
 $y=-0.468x+12.325$ (改进法 $R^2=0.988$)。

(2) 百色膨胀土

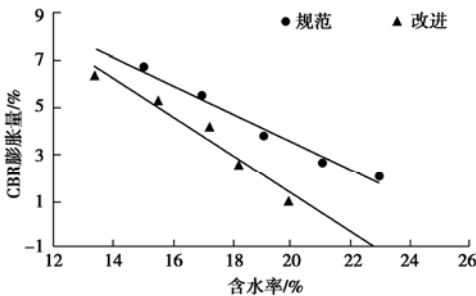


图 6 百色土的 CBR 膨胀量随制件含水率的变化

Fig. 6 Variation of CBR swelling capacity with water content of Baize expansive soils

拟合方程: $y=-0.61x+15.73$ (规范法 $R^2=0.981$);
 $y=-0.83x+17.83$ (改进法 $R^2=0.964$)。

(3) 邓县膨胀土

拟合方程: $y=-0.85x+20.37$ (规范法 $R^2=0.947$);
 $y=-0.53x+12.49$ (改进法 $R^2=0.945$)。

(4) 测试结果分析

分析表 3 和图 5~7 可知以下 3 点。

a) 不论采用什么试验方法, 所测得的 CBR 膨胀量均随含水率的增大而减小。这与规范方法规定上覆压力为 50 kPa 时测试的有荷膨胀量随含水率的变化规律相同^[15], 说明用改进 CBR 膨胀量替代 50 kPa 有荷膨胀量来评价填料的变形性质是合适的。

b) 不管何种胀缩等级的膨胀土, 同一土样用改进法获得的拟合直线均位于规范法拟合直线之下。表明对应于同一制件含水率, 改进法测试结果均小于规范法的对应值, 这与工程实际也能较好的吻合。

c) 3 种土样 6 条拟合直线的相关系数都大于 0.94, 相关性很好, 表明测试结果可靠。但同一土样测得的两条拟合直线并非平行线, 6 条拟合直线的斜率也相差很大, 一方面说明两种方法进行试验时试件

的吸水方式和变形范围存在较大差异, 另一方面也反映了膨胀土工程性质的复杂性。

3.3 分类指标间相互制约的相关分析

表 2 已给出土样天然稠度的计算值, 宁明土、百色土、邓县土依次为 1.10, 1.09, 0.99。以下着重分析在保证膨胀土路堤长期强度和稳定性的前提下, 填料稠度与改进法确定的强度和变形指标之间的制约关系, 以探究试验土样的合适稠度范围。

(1) 初拟合适稠度范围内的强度、变形特征值

对照图 4~7, 计算并归纳 3 种土样在改进试验下初拟合适稠度范围内边界稠度对应的含水率、CBR 与 CBR 膨胀量的特征值以及 CBR 峰值所对应的湿度和稠度状态, 并制成表 4, 以便于合理稠度范围的分析。

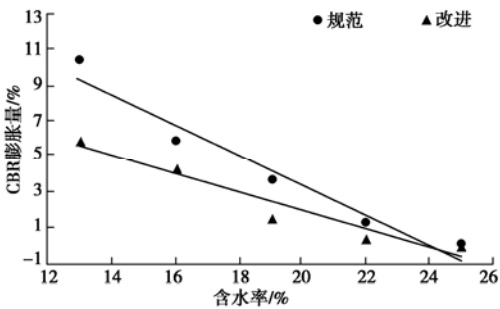


图 7 邓县土的 CBR 膨胀量随制件含水率的变化

Fig. 7 Variation of CBR swelling capacity with water content of Dengxian expansive soils

(2) 确定合理稠度范围的分析

由表 4 可看出以下 3 点。

a) 宁明、百色土 CBR 最小值均出现在 $w_c=1.00$ 处, 而邓县土 CBR 最小值出现在 $w_c=1.30$ 处, 说明膨胀土工程性质的复杂性, 不同成因和胀缩等级的膨胀土用作填料时有各自合适的稠度范围, 但为便于对实际工程的指导, 建立分类分级指标体系时, 必须给定能满足大多数填料要求的稠度限定范围。

b) 从强度方面考虑, 3 种土在初拟稠度范围内的 CBR 值均能满足现行规范要求。但对照图 4, 对邓县土进行分析时不难发现, 若填料的稠度由 1.30 增至 1.35 (含水率仅减少 1.6%), 其对应的 CBR 值已小于 3%, 因此合格填料的稠度范围必须有上限, 将其定为 1.30 是合适的。

表 4 三种土稠度范围内特征值对应各指标值及变化范围

Table 4 Corresponding values of indices and variation range of characteristic value in the range of consistency for three kinds of soils				
土样	稠度/ w_c	含水率 $w/\%$	CBR/ $\%$	CBR 膨胀量/ $\%$
宁明土	特征值	1.10	27.5	3.7
		1.30	19.8	9.0
		1.29	20	CBR _{max} =9.3
	变化范围	1.10~1.30	19.8~27.5	3.7~9.3
百色土	特征值	1.10	23.4	3.2
		1.30	15.1	4.6
		1.18	18.3	CBR _{max} =5.2
	变化范围	1.10~1.30	15.1~23.4	3.2~5.2
邓县土	特征值	1.10	24.5	8.3
		1.30	14.1	8.0
		1.16	19	CBR _{max} =16
	变化范围	1.10~1.30	14.1~24.5	8.0~16

c) 3 种膨胀土样的天然稠度基本都落在初拟稠度范围内, 其各自 CBR 强度峰值对应的稠度则完全位于初拟稠度区间中, 也表明初拟的合适稠度区间是合理的。

4 膨胀土填料分类分级建议指标体系

膨胀土填料分类采用三指标体系的合理性已得到充分论证, 建立分级标准时仍采取继承与创新相结合的原则, 即在确定填料的强度和变形分级界限值时, 仍以规范要求为基础, 但又充分考虑两种试验方法对同一土样测试同一指标时测试结果之间客观存在的差异, 分析建立它们之间合理的换算关系, 进而确定分级界限值, 使之既能满足规范的填料分级评价基本要求又能构建合理的新分类分级指标体系。本指标体系中, 合格膨胀土填料指标等级的划分仍沿用 I, II, III级。

4.1 确定分级指标界限值

(1) CBR 值

由于试验条件的改善, 在合适稠度范围内改进法测得的 CBR 值比规范法的对应值提高很多(见图 4), 因此, 取规范^[4]规定的下路堤、上路堤及下路床填料最小 CBR 值(3%, 4%和 5%)作为填料分级的基准界限值, 通过分析改进法测 CBR 所产生的增大效应, 确定合适的提高系数后对基准值进行换算。

文献[10]指出改进 CBR 试验既适用于膨胀土又适用于正常土, 而规范基准值是针对正常土提出的, 因此选择 3 种正常土(长沙黏土、校园土、S211 土)进行两种方法下的对比试验^[10], 通过对测试结果分析进而确定提高系数, 即同一土样两测试结果的差值与规范法测定值之比(见表 5)。

表 5 两种试验方法下膨胀土的 CBR 对比表

Table 5 Comparison of CBR of expansive soils between two tests			
土样	规范	改进	提高系数/ $\%$
校园土	25.7	33.3	29.6
S211	38.3	49.2	28.5
长沙黏土	16.7	20.0	19.8

由表 5 可知, 3 土样的提高系数分别为 29.6%, 28.5%, 19.8%。考虑工程的安全和可靠性, 将提高系数定为 30%, 这样 I, II, III、IV 级填料的强度界限值分别是 6.5%, 5.2%, 3.9%, 见表 8。

(2) CBR 膨胀量

路基设计规范^[2]已提供胀缩总率的分级界限值, 通过分析胀缩总率、50 kPa 膨胀量以及 CBR 膨胀量之间存在的相关关系, 已明确用 CBR 膨胀量替代胀缩总率作为填料变形的评价指标。利用指标间已建立的关系方程式($y=0.7091x-2.6032$), 同样可获得基于规范要求的 CBR 膨胀量分级界限值(见表 6)。

表 6 规范标准值的换算

Table 6 Conversion for standard values of specification		
填料等级	胀缩总率规定值	CBR 膨胀量换算值
I 级	<0.7	<4.7
II 级	0.7~2.0	4.7~6.5
III 级	2~4	6.5~9.3

由于笔者采用的分类指标是改进 CBR 膨胀量, 而表 6 所列为规范 CBR 膨胀量, 试验条件的改变使同一土样经改进法测试的结果要小于规范法的对应值。因此, 表 6 中所列分界值需乘以折减系数才能构成新的分级指标。

改进法试验中试样制件采用的含水率是湿法重型击实确定的最佳含水率, 分析图 5~7 可确定 3 种典型膨胀土对应该状态的膨胀量及其折减系数(折减系数

=1-规范法与改进法测试值之差/规范法测试值), 结果见表 7。

表 7 3 种膨胀土的 CBR 膨胀量变化对比表
Table 7 Comparison of variation CBR swelling capacity

土样	最佳含水率/%	规范法	改进法	折减系数/%
宁明膨胀土	21.0	4.56	2.54	56.0
百色膨胀土	15.8	6.09	4.72	77.4
邓县膨胀土	16.0	6.77	4.11	59.2

同样考虑到工程的安全和可靠性, 取折减系数为 55%, 从而确定变形指标的分级界限值, 见表 8。

(3) 稠度

根据三种膨胀土改进 CBR 试验下的测试结果, 结合现场施工经验以及文献[7], [14]的研究成果, $w_c \geq 1.00$ 是满足施工碾压的必要条件, 而 $w_c \leq 1.30$ 是保证部分填料修筑的路基保持强度和稳定性的附加限制条件。因此, 选定稠度区间 1.00~1.30 作为合适的填筑稠度范围。

4.2 膨胀土填料分类分级的建议指标体系

综合上述, 基于目前已有的试验研究成果, 参考国内外对膨胀土填料采取的分类方法, 笔者建议采用物理处治技术修筑膨胀土路堤时, 可按照如下填料分类分级指标体系进行填料的选择和取舍(表 8)。表中的等级级别由小到大表明填料的性质由好到差。

表 8 膨胀土填料分类分级指标
Table 8 Classification indices of expansive soils

填料等级	CBR 值/%	CBR 膨胀量/%	天然稠度	处理方式
I 级	>6.5	<2.6		
II 级	5.2~6.5	2.6~3.6	$1.00 \leq w_c \leq 1.30$	直接填筑
III 级	3.9~5.2	3.6~5.1		
IV 级	<3.9	>5.1	$w_c < 1.00$	改性或废弃

注: $w_c > 1.30$ 建议最好不采用。

4.3 指标体系的工程使用说明

(1) 首先按规范或国标提供的标准分类方法判断取土区内的土料是否为膨胀土, 然后对拟作填料的膨胀土进行水理性指标(液、塑限和天然含水率)和改进 CBR 试验。上述试验也是施工前对细粒土料场调查中的必做常规试验, 任何工地试验室都可以完成。

(2) 通过对试验结果的分析计算即可获得填料分类的三指标值: CBR、CBR 膨胀量、天然稠度。

(3) 进行填料等级评定、决定其取舍并初步确定合适的施工工艺及方法。当同一填料的 CBR 值、CBR 膨胀量分属于不同等级时, 选定其中较大(差)的等级作为其分类等级。若同一土料场中同时存在两个以上级别的膨胀土, 应优先选用等级小的做填料, 或将

等级小的填料填筑于膨胀土填芯下路堤的上部。

(4) 根据表 8 对 3 种典型膨胀土进行分类分级, 宁明土为 II 级, 百色土为 III 级, 两者均可用于填筑下路堤。邓县土因天然稠度为 0.99, 若用作填料, 需经摊铺晾晒蒸发失水后, 方可进行路堤填筑和压实。

5 结 论

(1) 从工程实际出发, 抓住膨胀土的工程特性以及直接用作路堤填料的各种影响因素, 全面、系统、深入地开展了膨胀土填料分类指标体系研究, 对解决膨胀土地区筑路所遇到的工程技术难题具有重要的理论意义和工程实用价值。

(2) 研究提出的建立膨胀土路堤填料分类指标体系的五项基本原则, 是膨胀土理论研究和长期工程实践经验的总结, 为新指标体系的建立奠定了基础。

(3) 依据室内大量的膨胀土路用性能试验, 归纳总结已有的实体工程修筑经验, 吸取多个评价指标体系的优点, 从保证路基的强度、稳定性以及填筑施工的可操作性出发, 提出以改进 CBR 值、CBR 膨胀量、稠度三个指标作为膨胀土填料的分类指标。三指标评价体系能真正解决膨胀土能否直接用作填料的评价问题。

(4) 基于改进 CBR 试验, 坚持继承和创新相结合的原则, 全面而详实地开展分级指标界限值的研究, 建立了填料的分类分级指标体系, 并对该体系的使用作了详细阐明, 可供编制路基新规范和工程师们进行膨胀土路堤设计与施工时参考。

(5) 本研究提出的膨胀土填料分类分级的建议指标体系是完善而严谨的, 但由于还缺乏在西北地区修筑膨胀土路堤实体工程的经验, 分级指标的界限值是否合适还有待积累更多的实际经验后加以评价或修改和补充。

参考文献:

[1] YANG He-ping, ZHENG Jian-long, ZHANG Rui. Addressing expansive soils[J]. Civil Engineering, 2007, 77: 62 - 69.
[2] JTJ013—95 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995. (JTJ013—95 Specification for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 1995. (in Chinese))
[3] JTJ033—95 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995. (JTJ033—95 Technical specification for construction of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 1995. (in Chinese))
[4] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出

- 版社, 2004. (JTGD30—2004 Specification for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [5] JTGF10—2006 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (JTGF10—2006 Technical specification for construction of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 方磊, 唐蓓华. 高速公路路基填料膨胀性判别和分类[J]. 公路交通科技, 2005, 22(4): 31 - 34. (FANG Lei, TANG Bei-hua. Expansive identification and classify of subgrade padding in expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(4): 31 - 34. (in Chinese))
- [7] 杨世基. 公路路基膨胀土的分类指标[J]. 公路工程地质, 1997, 15(1): 1 - 6. (YANG Shi-ji. Classified indexes of expansive soil in highway subgrade[J]. Highway Engineering Geology, 1997, 15(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [8] 邓家喜. 宾南高速公路膨胀土路基填料的评判方法[J]. 广西交通科技, 2000, 12: 72 - 75. (DENG Jia-xi. Evaluation method of expansive soils used as embankment fill in Binnan highway[J]. Guangxi Science and Technology of Communication, 2000, 12: 72 - 75. (in Chinese))
- [9] JTJ051—93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993. (JTJ051—93 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1993. (in Chinese))
- [10] 杨和平, 赵鹏程, 郑健龙. 膨胀土填料改进 CBR 试验方法的提出与验证[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1 - 7. (YANG He-ping, ZHAO Peng-cheng, ZHENG Jian-long. Suggestion and verification on modified CBR test method for expansive soils filler[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1 - 7. (in Chinese))
- [11] 中交第二公路勘察设计院. 膨胀土的物理力学性质试验研究报告[R]. 2004. (China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute. Research report on physical mechanics experiment of expensive soil[R]. 2004. (in Chinese))
- [12] 中交第二公路勘察设计院. 膨胀土地区勘察设计指南[R]. 2004. (China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute. Investigation and design guide in expansive soil regions[R]. 2004. (in Chinese))
- [13] 曲永新, 郭书太, 等. 国内外膨胀土工程地质信息集成[R]. 2000: 1 - 20. (QU Yong-xin, GUO Shu-tai, et al. Integration about engineering geological information of expensive soil at home and abroad[R]. 2000: 1 - 20. (in Chinese))
- [14] 杨世基. 湿黏土路基的压实与稳定性[R]. 1990. (YANG Shi-ji. Compaction and stability of excessive westsoil subgrade[R]. 1990. (in Chinese))
- [15] 杨和平, 等. 膨胀土公路路基稳定性研究报告[R]. 1995. (YANG He-ping, et al. Study report on stability for roadbed of expansive soils[R]. 1995. (in Chinese))

宏微观岩土力学与岩土技术国际研讨会（征文通知）

宏微观岩土力学与岩土技术国际研讨会将于 2010 年 10 月 10 日在上海举行。本会议旨在对宏微观岩土力学与岩土技术进行国际交流研讨, 反映土的宏微观特性、离散单元法数值模拟、岩土工程应用技术的最新国际研究成果与发展趋势, 会议将特邀国内外著名专家学者做专题学术报告, 出版正式论文集, 此外国际 SCI 源期刊 Granular Matter 将刊印 Special Issue。

主办单位: 国际土力学与岩土工程学会 TC35 分会, 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会。

承办单位: 同济大学, 山口大学 (日本)。

会议征文内容及要求: ①土体宏微观力学特性的最新进展; ②描述岩土、岩石、黏结材料宏微观发展的新试验新技术; ③利用离散单元法模拟土体特性的新发展、新技术; ④离散元、有限元在岩土工程中应用的最新发展趋势; ⑤离散元、有限元

在与岩土工程相关领域如隧道、水利、道路等的发展与应用。

本次会议拟采用语言为英语, 作者可就大会任一相关议题提交一篇 300 字左右的英文摘要, 并在摘要页首附上文章标题、作者姓名、详细通讯地址、Email、联系电话等信息。

重要日期: 提交摘要截至日期 2009 年 5 月 1 日, 摘要录用截至日期 2009 年 7 月 1 日, 提交全文截至日期 2010 年 1 月 1 日, 全文录用截至日期 2010 年 4 月 1 日, 会议时间 2010 年 10 月 10 日。

联系人: 蒋明镜教授 (上海市四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系, 200092); 电话 021-65980238, 13761404246; 传真 021-65985210; E-mail: mingjing.jiang@mail.tongji.edu.cn, Is-shanghai2010@163.com。

(大会组委会 供稿)