

文章编号: 1000-7598-(2006) 03-0353-07

弱膨胀土工程特性及其路基处治对策

陈善雄^{1,2}, 李伏保³, 孔令伟¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2.华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074; 3. 湖北省投资公司, 武汉 430071)

摘 要: 针对湖北襄一荆高速公路膨胀土, 在室内开展了弱膨胀土的压实特性、胀缩性状、力学特性试验研究, 发现压实膨胀土的工程性状受含水率与压实度的影响, 胀缩特性是膨胀土的固有特性, 其大小取决于起始湿度和密度; 击实膨胀土的最佳含水量和最大干密度随击实功变化而变化, 压实功愈大, 土的最大干密度也愈大, 而对应的最佳含水量愈小; 膨胀土的 *CBR* 值随其含水率的变化规律类似于击实曲线, 但 *CBR* 峰值含水率大于最佳含水量, 为深入认识膨胀土的工程特性提供了帮助。因此, 利用弱膨胀土填筑路堤时, 不仅要考虑经过击实后的土的性质, 而且还要考虑在填方建成、条件改变后土的性能; 膨胀土路堤填筑除考虑压实度与 *CBR* 值要求外, 尚需考虑胀缩总率的影响。最后, 推荐了弱膨胀土路堤结构型式, 并提出了弱膨胀土用于路堤填筑的控制标准。

关 键 词: 弱膨胀土; 工程特性; 压实特性; 胀缩性状; 力学特性; 路基; 处治

中国分类号: TU 411

文献标识码: A

Engineering behaviors of weak expansive soil and its treatment measures for roadbed filling

CHEN Shan-xiong^{1,2}, LI Fu-bao³, KONG Ling-wei¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Hubei Provincial Investment Corporation, Wuhan 430071, China)

Abstract: Compacting properties, swelling-shrinkage behavior and mechanical behavior of compacted sample for weak expansive soils in Xiang-Jing Expressway of Hubei Province are investigated. It is discovered that the engineering behavior of weak expansive soils is controlled by the coupled action of water content and degree of compaction, while the swelling-shrinkage behavior is inherent property of weak expansive soils and its value depends on the initial water content and dry density; the optimum moisture content and maximum dry density of expansive soils depends on tamping effort, bigger tamping effort; bigger the maximum dry density, and smaller the optimum moisture content correspondingly; the variation of California bearing ratio(*CBR*)of the expansive soils with water content is similar to the compaction curve. However, the water content of soil corresponding the maximum *CBR* is higher than the optimum water content. In the construction of expansive soil embankment, the influence of total swell-shrink ratio should be considered besides the degree of compaction and *CBR* value; and it is helpful to understand the engineering properties of expansive soils. At last, the structural shape of weak expansive soil embankment and the standard of controlling compaction of weak expansive soil for constructing embankment are suggested.

Key words: expansive soil; engineering properties; compacting properties; swelling-shrinkage behavior; mechanical behavior; embankment; disposal

1 引 言

膨胀土是颗粒高分散、成分以黏土矿物为主、对环境的湿热变化敏感的高塑性黏土。它是一种吸

水膨胀软化、失水收缩干裂的特殊土。正是由于这种土的显著胀缩特性, 使膨胀土地区的房屋建筑、铁路、公路、机场、水利工程等经常遭受巨大的破坏, 因此, 给世界各国造成巨大的经济损失, 且这

收稿日期: 2005-05-30 修改稿收到日期: 2005-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50279050)。

作者简介: 陈善雄, 男, 1965 年生, 博士研究生, 研究员, 主要从事非饱和土土力学和地基处理的理论与工程应用研究工作。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

种危害随着工程建设事业的迅速发展而更加严重^[1,2]。随着国民经济建设的发展和大量基础设施的兴建,对膨胀土的工程特性认识和相应的工程处理措施提出了新的要求,因此,结合实际工程研究膨胀土的工程特性,提出了相应的工程措施与施工控制标准具有重要的理论意义和工程应用价值。

湖北省襄—荆高速公路沿线膨胀土分布广泛,膨胀土路段累计长度达 124.688 km,其中弱膨胀土路段约 92.028 km,中膨胀土路段约 32.660 km,膨胀土问题是困扰该段路大量填方路基和挖方路基的工程技术难题。由于土地资源匮乏,不得不利用膨胀土作为路堤填料。为解决膨胀土的工程技术难题,系统地开展膨胀土工程特性试验研究,并在此基础上探讨了相应的工程措施与施工控制标准,以指导襄—荆高速公路沿线膨胀土的处治与施工。

以往,国内水利堤坝、铁路和公路填方路堤填筑控制主要以压实度为标准。近年来,公路建设对路基填料提出更为严格的要求,公路路基填筑除了要满足压实度控制标准外,同时还要满足强度指标要求。公路有关规范明确将 *CBR* 作为路基填料强度指标的控制参数和路基填料选择的依据。《公路路基设计规范》^[3]对填料 *CBR* 值做了强制性规定,要求填方路基不同部位的填料强度 *CBR* 值不得小于相应的规定值,一旦 *CBR* 值达不到规定要求,填料就应作改性处理,同时,对填方路基不同部位的压实度要求也作了规定。

迄今国内仅有少数研究者结合 *CBR* 值研究过膨胀土工程特性及其路基填筑标准^[4~7],但还远远不够系统。本文对膨胀土的工程特性与 *CBR* 值的关系开展了系统的研究,试图找出影响膨胀土 *CBR* 值的主要控制因素及变化规律,提出了弱膨胀土路基处治对策建议。

2 试验土料与试验方法

试验土样取自襄—荆高速公路 k102+192 附近(湖北省钟祥市胡集镇)。人工挖探坑取样,探坑长 2.0 m,宽 1.0 m 和深 2.0 m。根据膨胀土特征,采用肉眼鉴别、手触方法,对探坑土层进行了现场鉴别、分类、分层,并在地面线以下 1.6~1.8 m 深度处采集了黄褐色黏土。

室内土工试验按《公路土工试验规程》^[8]执行,击实试验采用重型击实试验法,采用干土法备样(土不重复使用),加州承载比(*CBR*)试验采用南京土壤仪器厂生产的 *CBR*-1 型承载比试验仪。

3 基本物理力学性质

对所取土样进行了基本特性试验,土的物理性质指标见表 1,颗粒分析试验成果见图 1,用 X-射线衍射仪测定的矿物组成见表 2。

表 1 膨胀土物理性质指标

Table 1 Physico-mechanical properties of expansive soils

取土深度 / m	天然含水量 / %	比重	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	自由膨胀率 / %	土定名
1.6~1.8	24.6	2.74	49.0	24.2	24.8	49	CH

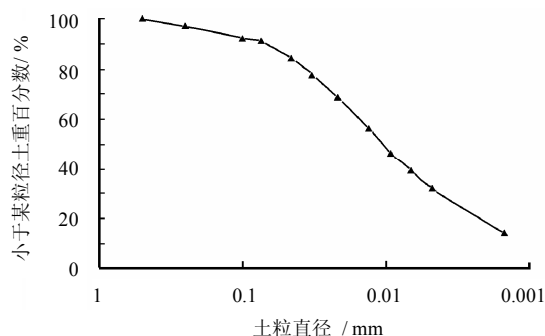


图 1 膨胀土颗粒分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curves for expansive soil

表 2 膨胀土矿物组成

Table 2 Mineral component of expansive soils

矿物	伊利石	蒙-伊混层	高岭石	石英
含量 / %	35±	5±	40±	20±

根据工程实践经验,参照文献[9]提出的分类判别标准,并对照以上基本物理力学性质指标,可以发现试验土样为一种典型的弱膨胀土。

4 压实性状

击实试验按《公路土工试验规程》^[8]执行,采用干土法备样,击实功通过调整每层击数来控制。

不同击实功下弱膨胀土干密度与含水量的关系曲线见图 2 (*N* 为每层击数)。由图可知,以干密度作为表征土密实度的指标。在同等压实功作用下,某一含水量之前即土的含水量偏干时,土的干密度随含水量增加而提高,这主要是因为土处于疏松状态,此时土的结构为片架结构,土中孔隙大都相互连通,土中含水少,含气多。击实时,土孔隙中气体易被排出,水在土颗粒之间起润滑作用,土粒间阻力减小,压实时土粒易于移动、挤紧变为较紧的片堆结构,孔隙减小,干密度得以提高;当干密度达到最大值后,含水量再继续增大,土中孔隙被过

多的水所占据,含水量愈大占的体积愈多,击实时水不能压实,更不易被挤出,击实时土内产生的孔隙气压力将减低击实功的作用,因之土的干密度随含水量增加而降低。从图2可得到弱膨胀土在不同击实功条件下的最佳含水量和最大干密度,如表3所示。

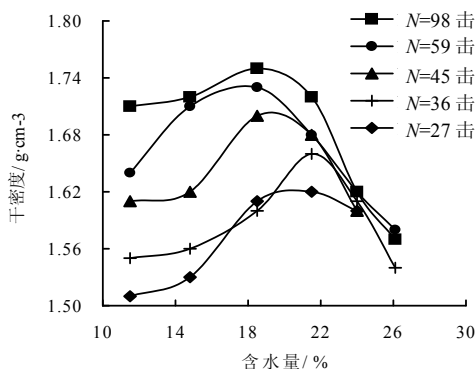


图2 不同击实功下弱膨胀土击实曲线

Fig.2 Compaction curve of expansive soils under different tamping efforts

从图2和表3可以看出,含水量、压实功能显著影响其压实效果,膨胀土击实的最佳含水量和最大干密度随击实功变化而变化,压实功愈大,土的最大干密度也愈大,而对应的最佳含水量愈小。

表3 不同击实功条件下弱膨胀土的最佳含水量与最大干密度

Table 3 The optimum moisture contents and maximum dry densities of expansive soils under different tamping efforts

每层击数 / 击	最佳含水量 / %	最大干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
98	18.5	1.75
59	18.5	1.73
45	18.5	1.70
36	21.5	1.66
27	21.5	1.62

在路基压实施工中,为了便于制定统一压实标准以及检查和控制压实质量,土基的密实程度常用压实度表示。取98击条件下的最大干密度为土的最大干密度,将图2中的纵坐标换算成压实度,便可得到弱膨胀土在不同击实功条件下压实度与含水量的关系曲线,如图3所示。从图可以看出,膨胀土在最佳含水量 $\pm 3.0\%$ 附近,只要控制好压实功,可以取得较高的压实度值,能满足《公路路基设计规范》对压实度的要求,但采用膨胀土填筑路堤,仅仅满足压实度的要求是不够的,对于具有胀缩性的膨胀土,如采用低于或等于最佳含水量对膨胀土进

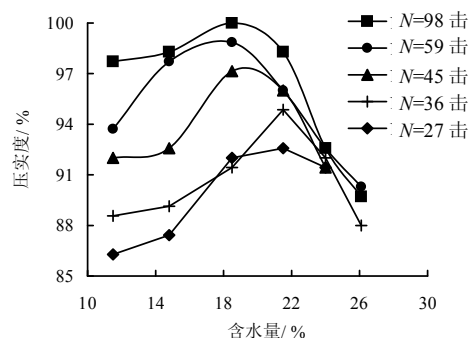


图3 不同击实功的弱膨胀土含水量与压实度关系

Fig.3 Relations between degree of compaction and water content of expansive soils under different tamping efforts

行压实,其压实度虽然能满足要求,但一旦浸水后,土体会出现显著膨胀,致使强度随之降低;如采用高于最佳含水量来进行压实含水量控制,在路基运行过程中则易失水收缩,为雨水入浸开启方便之门,同样危害路基。因此,采用膨胀土填筑路基还需要考虑膨胀土的胀缩特性。

5 胀缩特性

为找出影响击实膨胀土胀缩特性的主要因素,分别制备了不同含水量的弱膨胀土样品,在同一含水量条件下采用不同击实功进行击实,同时进行50 kPa荷载条件下的膨胀量试验与收缩试验,来揭示含水量、压实度对膨胀收缩特性的影响。图4和图5分别为50 kPa荷载下弱膨胀土的膨胀量随干密度和含水量的变化关系。试验表明:击实弱膨胀土的胀缩特性主要取决于含水量与干密度,击实后的含水量愈大,膨胀量愈小;控制含水量一定时,膨胀率随干密度的改变而变化,但含水量对膨胀量的影响比干密度显著,因此,要想控制路基填方不致产生过大的胀缩变形,必须同时兼顾填筑含水量与干密度两个条件。从膨胀土的膨胀特性角度看,只有当填筑含水量控制在较最佳含水量稍大,干密度较最大干密度低的条件下,填筑膨胀土的膨胀和孔隙压力可以获得均衡,对于填土的稳定性比较有利。

图6~11为弱膨胀土收缩指标随含水量与干密度的变化关系。不难看出,缩限是土固有的特性,含水量与干密度对其影响不显著;但体缩率随含水量增加而增大,近似成直线关系,缩限系数也随含水量增加而增大;干密度对收缩指标影响较小。因此,从膨胀土的收缩特性角度考虑,膨胀土路基填筑含水量又不宜超过最佳含水量过多。

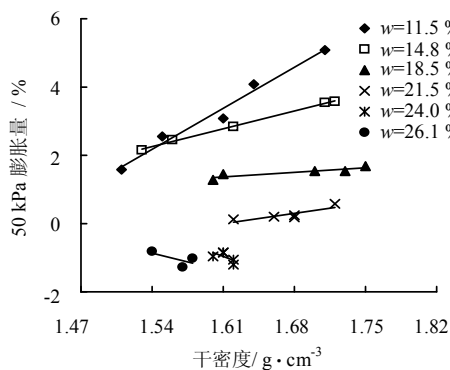


图4 50 kPa 荷载下弱膨胀土膨胀量与干密度的关系
Fig.4 Relations between expansion quantum and initial dry density of compacted expansive soil

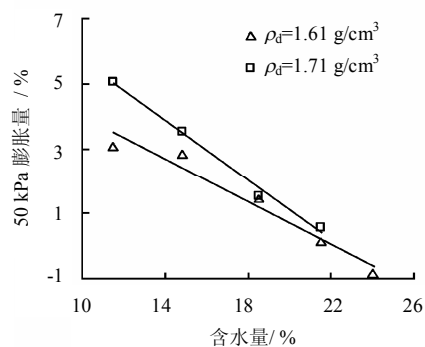


图5 50 kPa 荷载下弱膨胀土膨胀量与含水量的关系
Fig.5 Relations between expansion quantum and initial water content of compacted expansive soil

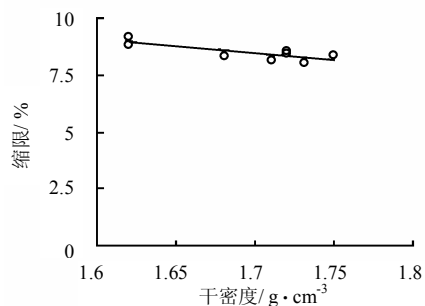


图6 弱膨胀土缩限与干密度的关系
Fig.6 Relation between shrinkage limit and initial dry density of compacted expansive soil

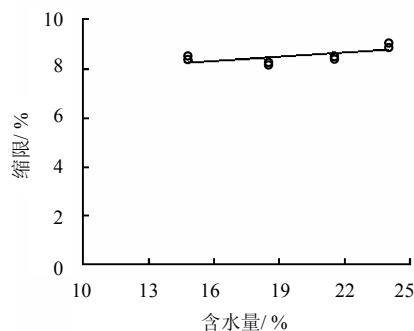


图7 弱膨胀土缩限与含水量的关系
Fig.7 Relation between shrinkage limit and initial water content of compacted expansive soil

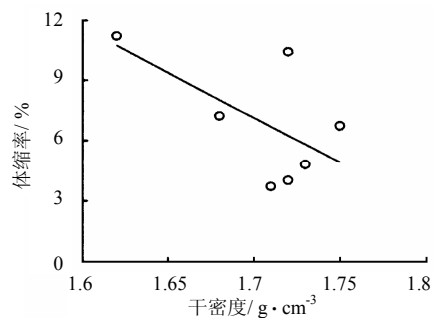


图8 弱膨胀土体缩率与干密度的关系
Fig.8 Relation between volume shrinkage ratio and initial dry density of compacted expansive soil

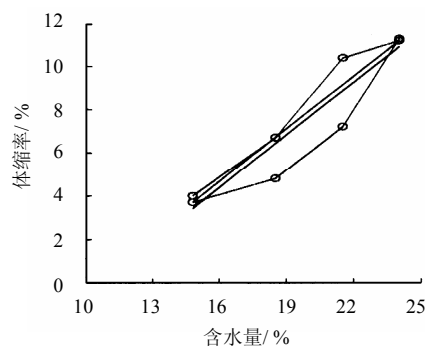


图9 弱膨胀土体缩率与含水量的关系
Fig.9 Relation between volume shrinkage ratio and initial water content of compacted expansive soil

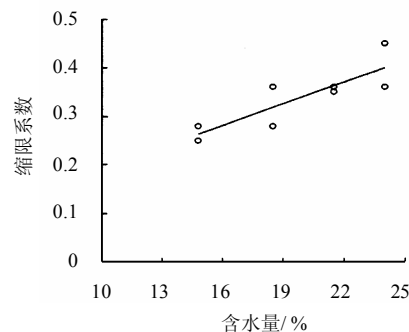


图10 弱膨胀土缩限系数与含水量的关系
Fig.10 Relation between shrinkage coefficient and initial water content of compacted expansive soil

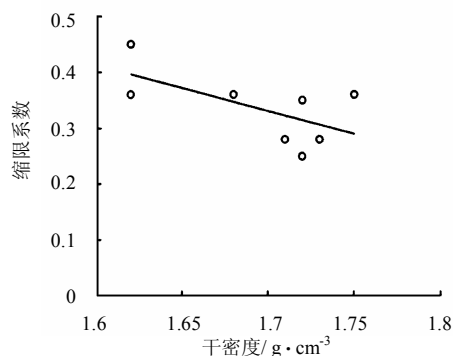


图11 弱膨胀土缩限系数与干密度的关系
Fig.11 Relation between shrinkage coefficient and initial dry density of compacted expansive soil

通过上述的试验研究, 可以得出这样的结论: 膨胀土的压实效果与胀缩特性主要决定于土质本身; 同时, 压实特性还取决于含水量和压实功, 胀缩特性则取决于起始湿度和密度, 综合膨胀土的压实性状和胀缩特性, 膨胀土路基填筑含水量宜控制在比最佳含水量稍大, 干密度较最大干密度略低。

6 强度特征

为找出影响击实膨胀土 CBR 特征的主要因素, 制备了不同含水量的弱膨胀土样品, 在同一含水量条件下采用不同击实功进行击实, 进行相应的承载比 (CBR) 试验, 来研究弱膨胀土 CBR 值随含水量、压实度以及膨胀收缩特性等影响因素的变化规律。 CBR 值随制备 (浸水前) 含水量与干密度变化曲线见图 12 和图 13。

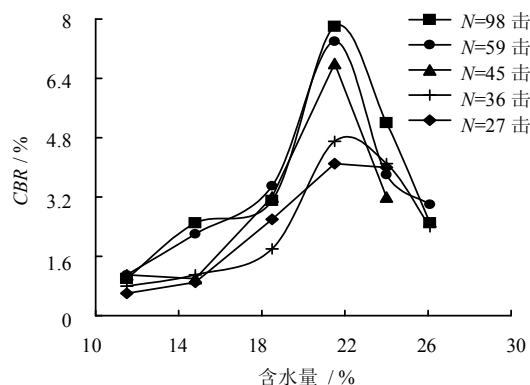


图 12 不同击实功下弱膨胀土 CBR 与含水量的关系
Fig.12 Relations between soaking CBR value and initial water content of expansive soils under different tamping efforts

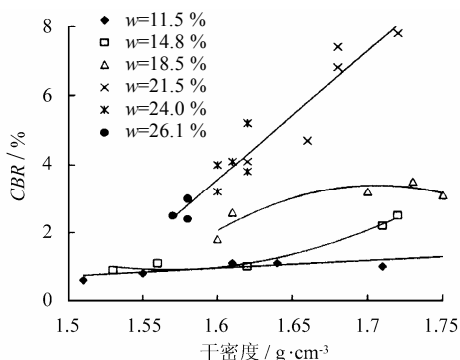


图 13 击实弱膨胀土 CBR 与干密度的关系
Fig.13 Relations between soaking CBR value and initial dry density of expansive soils under different tamping efforts

从图 12 可以看出, 采用不同击实功获得的 CBR 值随含水量的变化规律类似于击实曲线, 但在

击实功较大时 (每层击数 $N = 98, 59, 45$ 击), 其 CBR 最大值所对应的含水量比最佳含水量大 3.0 %; 只有在击实功相对较小时 (每层击数 $N = 36, 27$ 击), CBR 最大值所对应的含水量才与最佳含水量相等, 不同击实功下 CBR 特征指标如表 4 所示。为比较起见, 表 4 同时给出了不同击实功下与最大干密度相对应的 CBR 值。

表 4 不同击实功下弱膨胀土 CBR 值特征指标
Table 4 Soaking CBR indexes of expansive soils under different tamping efforts

每层 击数 / 击	最大 CBR 值			最大干密度下的 CBR 值		
	含水量 / %	干密度 / $g \cdot cm^{-3}$	CBR / %	最佳含水量 / %	最大干密度 / $g \cdot cm^{-3}$	CBR / %
98	21.5	1.72	7.8	18.5	1.75	3.1
59	21.5	1.68	7.4	18.5	1.73	3.5
45	21.5	1.68	6.8	18.5	1.70	3.2
36	21.5	1.66	4.7	21.5	1.66	4.7
27	21.5	1.62	4.1	21.5	1.62	4.1

从表 4 可明显看到, 对于弱膨胀土而言, 并非压实度最大其对应的 CBR 值越大, 起始含水量对 CBR 值影响显著; 图 13 进一步表明, 不同含水量条件下, CBR 值随干密度的变化幅度是不同的, 含水量大于最佳含水量时, CBR 值随干密度增加而增大的幅度要比最佳含水量显著得多。在最佳含水量条件下进行压实、压实度超过 95 % 的弱膨胀土 CBR 值仅接近满足填筑下路堤的 CBR 不得小于 3.0 % 的要求; 但在超过最佳含水量 3.0 % 的填筑含水量 ($w = 21.5\%$) 进行压实, 只要压实功能满足要求, 其压实度不难达到 95 %, CBR 值能达到 6.0 % 以上, 不仅能用于填筑上、下路堤, 尚能用于直接填筑下路床; 甚至当填筑含水量为 24.0 % (大于最佳含水量 5.5 %) 时, 压实度能达到 90 %~95 %, 其 CBR 值能满足填筑上、下路堤的要求; 但当含水量小于最佳含水量时, 虽然压实度易满足要求, 但其 CBR 值均小于 3.0 %, 不适按此含水量控制压实。

7 弱膨胀土强度特性机制分析

弱膨胀土的强度特性之所以具有上述特征, 主要是由于膨胀土固有特性——膨胀性引起的, 真正决定 CBR 值大小的是弱膨胀土浸水后的含水量和干密度, 从图 14 和图 15 可以发现, 弱膨胀土的膨胀量随含水量增加而迅速减小, 在最佳含水量处, 击实弱膨胀土仍有较大的膨胀量; 而当含水量大于最佳含水量时, 其膨胀量较小, 且随干密度变化不显著; 但含水量小于最佳含水量时, 其膨胀量急剧

上升, 且随干密度增大而明显增大。因此, 最佳含水量和最大干密度的弱膨胀土, 浸水膨胀后含水量并非最低, 干密度也并非最大。从图 16 和图 17 可以明显看到, 在含水量等于最佳含水量+3.0%时, 浸水膨胀后土体的含水量最低, 干密度最大, 浸水前后干密度降低较小, 含水量增加较小, 使其 *CBR* 值在浸水前后下降不多, 具有较好的水稳定性。

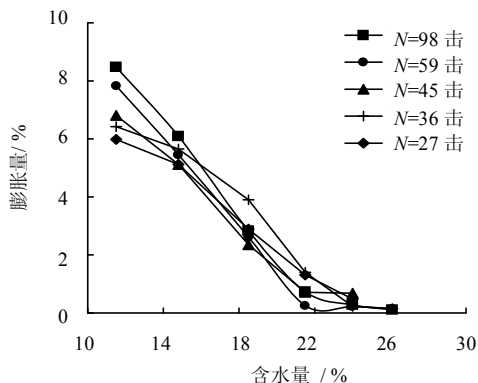


图 14 不同击实功下弱膨胀土膨胀量与含水量的关系
Fig.14 Relations between soaking expansion quantum and initial water content of compacted expansive soil under different tamping efforts

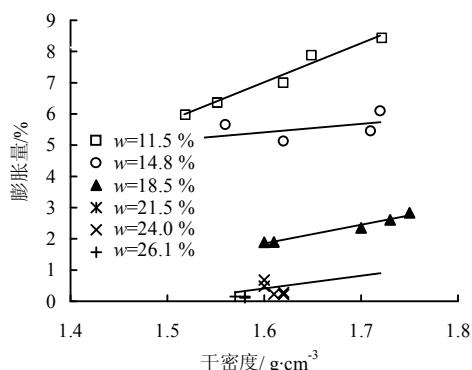


图 15 击实弱膨胀土膨胀量与干密度的关系
Fig.15 Relations between soaking expansion quantum and initial water content of compacted expansive soil under different tamping efforts

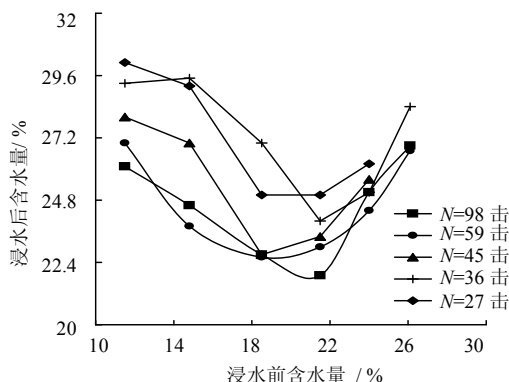


图 16 不同击实功下弱膨胀土浸水前后含水量的变化
Fig.16 Variations of water content of compacted expansive soil before and after soaking under different tamping efforts

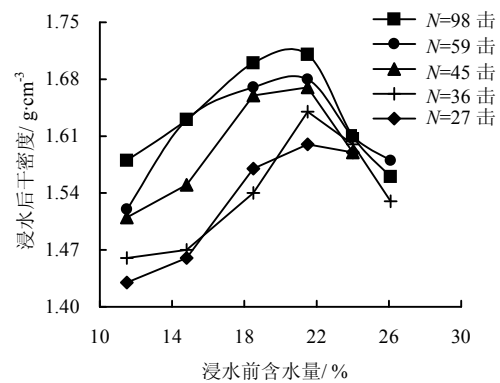


图 17 不同击实功下弱膨胀土浸水后干密度与浸水前含水量的关系

Fig.17 Variations of water content of compacted expansive soil before and after soaking under different tamping efforts

8 弱膨胀土路基处治对策

8.1 弱膨胀土路堤结构型式

弱膨胀土工程特性研究表明: 土的性质会随其所在的条件转变而发生变化, 利用弱膨胀土填筑路堤时, 不仅要考虑经过击实后的土的性质, 而且要考虑在填方建成、条件改变后土的性能。由上述结果可以认为, 弱膨胀土 *CBR* 值与水稳定性主要受控于含水量和干密度, 弱膨胀土在最佳含水量下压实, 虽然可获得很高的压实度, 且具有初始强度高的优点, 但存在着膨胀量大以及强度衰减大的缺点, 对施工而言, 天然含水量常比最佳含水量高出较多, 按最佳含水量控制并非易事, 用此标准进行路堤填筑, *CBR* 值相对偏小, 因而用于实际路段施工并不适宜, 而采用稍大于最佳含水量的填筑标准, 只要压实功控制得好, 同样可获得较高的压实度, 具有比较高的初期强度, 并且浸水后的膨胀量以及强度衰减都比较小, 有较好的水稳定性, 针对科研路段弱膨胀土, 如填筑含水量采用最佳含水量 ($w=18.5\%$), 其 *CBR* 值仅接近 3.0% , 只能用于填筑下路堤; 当填筑含水量大于最佳含水量较多时 ($w=24.0\%$), 由于其接近塑限, 压实度能达到 $90\%\sim 95\%$, *CBR* 值大于 4.0% , 可直接用于填筑上、下路堤; 而采用填筑含水量大于最佳含水量 3.0% ($w=21.5\%$) 时, 压实度不难达到 95% , 而且其 *CBR* 值可达到 6.0% 以上, 不仅可直接用于填筑上、下路堤, 还可以用于填筑下路床, 但要慎重对待, 因为作为下路床其 *CBR* 值安全储备不大。

基于以上分析, 弱膨胀土路堤可以采用直填法, 当路堤较高时, 在路堤中部增加 $1\sim 2$ 层石灰改性土层。具体方案见表 5 及图 18。

表5 弱膨胀土路堤结构型式建议

Table 5 The suggested structural shape of weak expansive soil embankment

序号	路堤高度 / m	结构型式	结构参数
1	≤2	全断面改性	坡比 1:1.5, 掺灰比 4 %
2	3~6	直填法	坡比 1:1.5, 顶部封层厚度 80 cm, 底封厚度 40 cm, 采用改性土
3	≥6	直填法	坡比 1:1.75, 顶部封层厚度 80 cm, 底封厚度 40 cm, 按高度每 3 m 设 40 cm 厚改性土层, 封层采用改性土

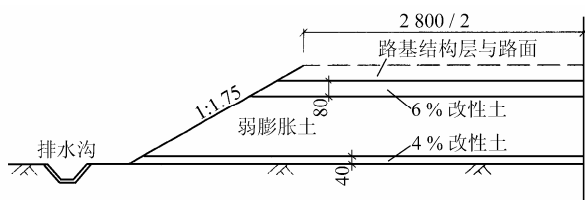


图18 弱膨胀土直填路堤横断面图 (单位: cm)

Fig.18 Transverse chart of weak expansive soil embankment (unit: cm)

8.2 路基填筑控制标准

膨胀土填方路基既要满足压实度的要求, 又要满足 *CBR* 值的规定, 同时还要考虑胀缩特性的影响。因此, 在制定膨胀土路堤填筑标准时应综合考虑以上 3 方面的要求, 方可达到预期的目的, 从根本上保证路堤填筑质量。

弱膨胀土路堤压实应采用重型压实标准, 并按规范要求执行, 不宜降低标准。压实含水量宜控制在最佳含水量+3 %, 用于 95 区回填要严格控制这一标准, 用于 90 区回填时此标准可略放宽。现场碾压是保证回填土压实度的又一关键环节, 应予以充分重视。

9 结 语

笔者进行了系统的弱膨胀土物理力学试验, 试验结果表明, 弱膨胀土具有一定的吸水膨胀软化特性, 但只要合理控制压实含水量, 弱膨胀土 *CBR* 值可超过 3 %, 可满足路基对填料的强度要求。在自然状态下, 膨胀土含水量约在塑限左右波动 (表面风化层除外), 路堤填筑完毕, 填料将吸水, 其含水量将逐渐趋于塑限 (自然状态下的含水量)。因此, 路基压实如按最优含水量控制, 工后填料吸水量大, 含水量波动大, 相应膨胀变形亦较大, 强度降低幅度大, *CBR* 不能满足规范要求; 路基压实如按最优含水量适当提高 3 %~4 % 进行控制, 工后填料含水量波动小, *CBR* 可满足规范要求。弱膨胀土可直接

用于填筑路堤, 压实含水量宜按最佳含水量+3 % 控制。

本文所推荐了弱膨胀土路堤结构型式在襄—荆高速公路得到了全面推广应用, 并被工程实践所验证, 具有较高的工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑业出版社, 1997.
- [2] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [3] JTJ013—95, 公路路基设计规范[S].
- [4] 张丽娟, 汪益敏, 苏卫国, 等. 加固土的 *CBR* 试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版). 2002, 30(7): 78—82.
ZHANG Li-juan, WANG Yi-min, SU Wei-guo, et al. Experimental research on the *CBR* values of the reinforced earth[J]. *Journal of South China University of Technology, Natural Science Edition*, 2002, 30(7): 78—82.
- [5] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[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 Jingmen expansive soils and their mechanical effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 727—732.
- [6] 陈善雄, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土工程特性及其石灰改性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊): 9—12.
CHEN Shan-xiong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Experimental research on engineering properties of expansive soil and lime stabilized soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(Supp.): 9—12.
- [7] 郭兴伦, 秦诗平. 膨胀土作为路堤填料的应用探讨[J]. 交通科技与经济, 2004, (6): 13—14, 17.
GUO Xing-lun, QING Shi-ping. Discussion of application of expansive soil to the road bank padding[J]. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2004, (6): 13—14, 17.
- [8] JTJ051—93, 公路土工试验规程[S].
- [9] 陈善雄, 余颂, 孔令伟, 等. 膨胀土的判别与分类方法探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 895—1 900.
CHEN Shan-xiong, YU Song, KONG Ling-wei, et al. Study on approach for identification and classification of expansive soils. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1 895—1 900.