

文章编号: 1002-0268 (2004) 11-0005-05

南-邓高速公路膨胀土路基设计

常兴文 李明元 韩文涛 周艳丽

(河南省交通规划勘察设计院, 河南 郑州 450052)

摘要: 结合南阳至邓州高速公路在建项目工程, 对目前膨胀土路基产生的病害进行分析, 找出了膨胀土路基产生各种病害的因素。通过室内试验对沿线弱、中膨胀土进行改性, 并依据石灰改良膨胀土后的各种物理、力学性质的变化, 确定合适的用灰量。根据室内试验得出的掺灰量并结合防水保湿防风化的原则, 探讨膨胀土路基处理、边坡防护和排水设计。

关键词: 膨胀土; 改性; 路基处理; 边坡防护; 排水设计

中图分类号: U416.1⁺67

文献标识码: A

Expansive Soils Subgrade Design of Nan-Deng Expressway

CHANG Xing-wen, LI Ming-yuan, HAN Wen-tao, ZHOU Yan-li

(Henan Provincial Communications Planning Survey and Design Institute, Henan Zhengzhou 450052, China)

Abstract: This article analysed the expansive soils subgrade diseases based on the project of Nanyang-Denzhou expressway being built and found out the reasons. It is decided to mix lime into expansive soils and enhance waterproof & keeping wet in order to ensure subgrade stability and weather-proof. The dosage of perfect fit lime is found throughout experiments of changing character to expansive soils according to changes of physics and mechanics after expansive soils having been changed. Expansive soils subgrade treatment and side slope protection & drainage design are discussed by chamber experiments results and the principle of waterproof & keeping wet.

Key words: Expansive soils; Change character; Subgrade treatment; Sideslope protection; Drainage design

1 概况

南阳至邓州(省界)高速公路为太原至澳门国家重点干线公路, 全长 91.070km。线路所经地区属南阳盆地, 为我国典型的膨胀土地区。该区属北亚热带季风型大陆性气候, 年平均气温 14.4~15.7℃, 最热为每年的 7 月份, 极端最高气温为 41.4℃, 年平均降雨量为 703.6~1 173.4mm, 且降雨多集中在 6~9 月, 占全年降雨量的 63.1%, 而全年大部分时间干旱少雨, 在这种条件下, 矿物分解减弱, 蚀变过程有足够的时间和水量, 并易于积聚碱土金属元素, 有利于膨胀性粘土矿物的形成。

据勘察资料, 路线弱、中膨胀土的分布长度占路线总长的 53.15%; 强膨胀土仅在局部深层中出现, 且路基多为填方, 平均填筑高度为 3.53m, 对路基影

响不大。因此, 大量膨胀土不可避免的要用于填筑路基, 所以, 弱、中膨胀土是设计考虑的重点所在。

2 膨胀土路基病害现象及原因分析

膨胀土是一种吸水膨胀软化、失水收缩开裂的特殊粘性土; 它不仅具有显著的湿胀干缩和反复湿胀干缩的性质, 而且具有崩解性、多裂隙性、超固结性、风化性及强度衰减性等特殊性质。正是由于膨胀土的这些工程特性, 使得膨胀土地区的公路经常遭受巨大的破坏, 主要表现在: (1) 在路堤填筑后, 因大气物理风化作用和湿胀干缩效应的影响, 路堤易产生不均匀下沉; (2) 路肩部位本身因压实不足, 同时受大气物理风化作用影响, 干湿循环频繁, 在路肩沿线方向常产生纵向开裂; (3) 因路幅内土基含水量的不均匀变化, 引起土体的不均匀胀缩, 从而产生幅度较大的

横向波浪变形；(4) 因道路防护、排水不当，雨季土基受水浸并软化，导致土基回弹模量下降较多，严重降低路面结构的承载能力；(5) 边坡表层土体受大气风化作用影响剧烈，降雨过后，沿坡面向下易产生塑流状塌移甚至形成滑坡，危及路基稳定和行车安全。

路基出现上述病害的原因主要有两点：

(1) 土体含有较多粘、胶细粒成分 ($< 0.005\text{mm}$)，其中胶粒成分 ($< 0.002\text{mm}$) 富含具强亲水性的蒙脱石或伊利石矿物及其本身特有的结构特征，胀缩的潜势大小决定于胶粒成分含量的多少，它是土体胀缩的内因；

(2) 土体经过压实、大气风化作用影响，湿胀干缩效应更为显著，反复地胀缩导致膨胀土体的松散并形成较多裂隙，破坏土体的完整性，为水的进出创造有利条件，因而易造成路面拱起和边坡坍塌，它是土体胀缩的外因。

内因是胀缩的决定因素，失去内因便失去了胀缩的先天条件；但如果防水保湿防风化处理得当，即使具备了内因也不一定会发生大的胀缩。只有当内、外因同时存在的情况下，土体才会发生较大的胀缩。因此，将消除土的膨胀性与防水保湿、防风化的设计原

则相结合，在对沿线弱、中膨胀土取样分析、试验的基础上，探讨膨胀土路基设计。

3 膨胀土改性试验

3.1 试验结果分析

遵照《公路土工试验规程》(JTJ 051-93) 的要求，将表 1 中 2 种典型的膨胀土土样风干碾碎后过 25mm 筛，按照土的重量，掺入不同配比的石灰，本次试验采用了 5 种掺灰量，分别为 2%、4%、6%、8%、10%。掺灰静置一昼夜后用击实功为 $2\ 687\text{kJ/m}^3$ 的重型击实仪制备土样，得到不同掺灰比下的击实曲线，确定最佳含水量和最大干密度。用击实土样制备做膨胀率、强度等试验的土样；同时还做了各种掺灰比下的液、塑限等试验，试验结果见图 1~图 9。

表 1 两种膨胀土的物理力学性质指标

土类	取样桩号	主要矿物成分及含量/%	塑性指数 /%	自由膨胀率 /%	$< 0.002\text{mm}$ 胶粒含量 /%
弱	K5+366	伊利石 21	20.6	54	20.53
		蒙脱石 13			
		高岭石 8			
		伊利石 35			
中	K85+600	蒙脱石 17	30.4	76	37.07
		高岭石 8			

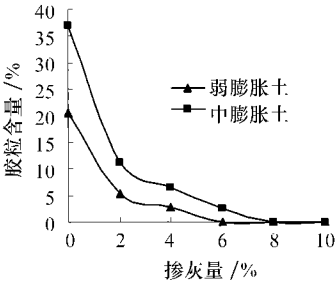


图 1 掺灰量-胶粒含量的关系

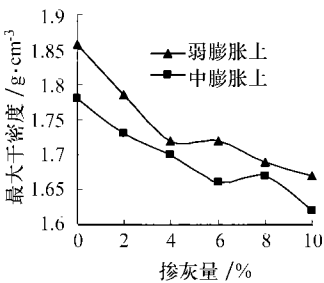


图 2 掺灰量-最大干密度的关系

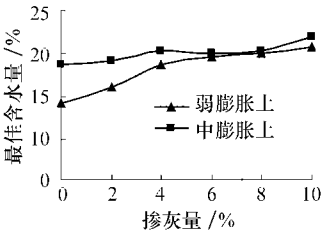


图 3 掺灰量-最佳含水量的关系

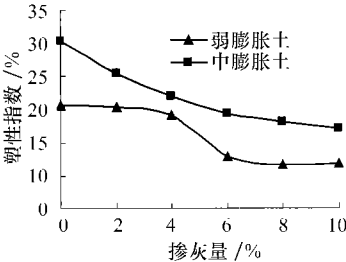


图 4 掺灰量-塑性指数的关系

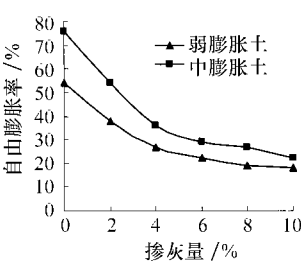


图 5 自由膨胀率-掺灰量的关系

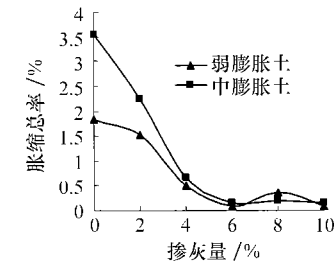


图 6 掺灰量-胀缩总率的关系

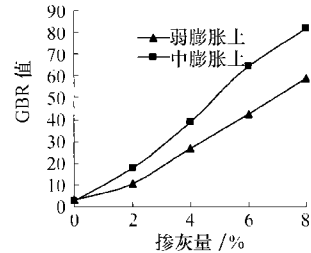


图 7 掺灰量-CBR 值的关系

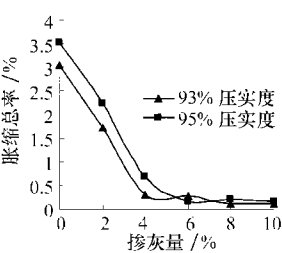


图 8 不同压实度下胀缩总率的比较
(中膨胀土)

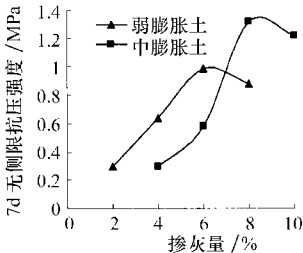


图 9 掺灰量-无侧限抗压强度的关系

(1) 物理性质的变化

随着掺灰量的不断增加，从图 1 ~图 4 中的曲线可以看出：

①膨胀土中的胶粒含量逐渐减少，土颗粒比表面积急剧下降，表征土的膨胀潜势不断减小。其中弱、中膨胀土在掺灰量为 4% ~6%和 6% ~8%时，胶粒含量较少；弱、中膨胀土在掺灰量为 6%和 8%时，胶粒含量为零。

②最大干密度呈下降趋势。其中弱、中膨胀土分别在掺灰量为 4% ~6%和 6% ~8%时，最大干密度下降趋势较为平缓；弱、中膨胀土的掺灰量大于 6%和 8%的条件下，最大干密度继续减小。

③最佳含水量呈上升趋势。弱、中膨胀土在掺灰量为 4% ~6%和 6% ~8%时，含水量上升的趋势较缓。当掺灰量继续增加时，含水量也继续增大。

④随着用灰量的增加，液限减小，塑限增大，塑性指数也相应下降。当掺灰量达到一定数值时，塑性指数变化较为平缓，说明加入的石灰与土反应充分，膨胀性几近消除，同样也说明合适用灰量的存在。掺灰量超过合适用灰量时，土的性质变化不大，但会影响石灰土后期强度的增长。这个规律类似于石灰稳定非膨胀土。

(2) 工程性质的变化

①图 5 中曲线表明：随着掺灰量的不断增加，自由膨胀率呈下降趋势。其中当掺灰量从 0 增加到 4%时，曲线较陡；膨胀土的掺灰量在 4% ~6%时，曲线下降较为平缓，此时的自由膨胀率已降为非膨胀土水平。

②图 6 中曲线表明：随着掺灰量的不断增加，胀缩总率呈下降趋势。其中当掺灰量从 0 增加到 4%时，曲线较陡；弱膨胀土的掺灰量在 4% ~6%时，曲线下降较为平缓；中膨胀土掺灰量在 6% ~8%时，胀缩总率接近为零。

③随着掺灰量的增加，改善后土的 CBR 值不断增加，远远满足路基填料最小强度的要求，石灰改善土不但可以减小甚至消除土的膨胀性，而且改善后土的自身强度提高较多，这对于膨胀土地区改善路基路面的受力状态，提高路面的整体承载能力具有重要意义。

④图 8 表明：在掺灰量较小的情况下（0% ~4%），压实度愈高膨胀性也愈大，说明在未消除土的膨胀性的条件下，增加压实度反而会加大膨胀性；膨胀土在掺灰量为 6% ~8%的情况下，压实度对膨胀性影响较小。

⑤图 9 表明：随着掺灰量的增加，掺灰土的 7d 无侧限抗压强度不断增大，其中弱、中膨胀土掺灰量分别在 6%和 8%左右时，强度最高，大于此掺灰量时强度有所减小。

3 2 合理灰量的确定

根据以上分析结果，参照《公路路基设计规范》（JTJ 013-95）消除膨胀性的指标，即胀缩总率小于 0.7%的规定，并结合改性后土的各种物理、力学性能，弱、中膨胀土的合理用灰量分别为 5%和 7%，考虑到施工过程中土块粉碎、石灰储存、灰土的拌和、压实及养护都达不到室内试验条件的要求，因此宜在此灰量的基础上增加 1%作为施工中的用灰量，即弱膨胀土用灰量为 6%，中膨胀土用灰量为 8%。

4 膨胀土路基设计

4 1 路基坡率及形式

设计时并未完全按照规范规定的坡率及形式进行选取，而是采用了同类工程地质比拟及力学分析检算相结合的方法，最终选择了变坡率设平台的形式，具体见表 2。

表 2 膨胀土路基边坡坡率一览表

膨胀土类别	路基高度 H/m	边坡坡率	变坡处平台宽度 $/m$
弱膨胀土 路堤	$H \leq 7$	1:1.5	/
	$H > 7$	5m 以上 1:1.5 5m 以下 1:1.75	1.0
中膨胀土 路堤	$H \leq 7$	1:1.75	/
	$H > 7$	5m 以上 1:1.75 5m 以下 1:2.0	1.0
中膨胀土 路堑	$H \leq 5$	1:1.75	/
	$H > 5$	5m 以上 1:1.75 5m 以下 1:2.0	2.0

路堑靠平台内侧设置 0.4m×0.4m 的浆砌片石截水沟，路堤平台不设置截水沟。

这种变坡度设平台的组合方式不仅可以减轻高边坡土体对坡脚的压力，而且平台对坡脚也有一定的支撑作用，对边坡的变形有减缓作用，同时对稳定边坡也是有利的。

4 2 排水沟及护坡道

根据水力计算结果，底宽 0.8m，深度为 0.8m，内外坡率均为 1:1 的倒梯形排水沟即可满足路基路面排水的需要，为减少排水沟内水对路基、路床的影响，膨胀土段的排水沟应适当加宽并尽可能加深，沟底应在路床顶面以下至少 40cm，考虑到路堑路床改性处理的实际状况，沟内水对路床干湿状态的影响相对较小，故将排水沟的底宽加大到 1m，深度由 0.8m 加深到 1m。

坡脚外缘均设置 2m 宽的护坡道,一方面可以防止边坡碎落的土体直接滚入排水沟内,堵塞沟体,另一方面可以减弱沟内水对坡脚的影响。

4.3 路基处理

依据勘察资料,南阳膨胀土分布地区大气影响深度在 3~5m 之间,大气急剧影响深度一般不超过 1.6m,而路基路面的变形、边坡的破坏多由大气急剧影响所致,因此膨胀土路基处理与路面结构层的总厚度不宜小于 1.6m。因路堤经过分层填筑和压实,土体结构虽被破坏,但膨胀土体的微结构和土质特性仍然保留,同时由于填筑和压实的影响导致含水量发生变化,膨胀的潜势非但没有减小,反而增大了,因此对路堤段的处理可结合路床、上路堤一并考虑;路堑段由于膨胀土的超固结性,在防水保湿的前提下可充分利用其初始结构强度高的特点,因此仅考虑路床处理。具体设计为:

(1) 当弱膨胀土段路基高度 $H \leq 1.52\text{m}$ (路面结构层总厚 72cm+路床厚度 80cm),下路床采用 5%石灰土,上路床采用 6%石灰土,压实度均 $\geq 95\%$;当路基高度为 $1.52\text{m} < H \leq 2.22\text{m}$ 时,路床掺灰量及压实度同前,若路床底面以下深度范围内的路基填料 CBR 值不满足路基填料最小强度要求时,此范围的路基填料掺 4%石灰进行处理,压实度 $\geq 93\%$,此掺量虽不能完全消除土的膨胀性,但粘、胶粒含量已大为减少,膨胀潜势得到有效遏制,同时掺灰后的 CBR 值也得到一定提高;当路基高度 $H > 2.22\text{m}$ 时,路床及上路堤的掺灰处理同前述。考虑到路基作用区一般在路面下 2m 左右,同时下路堤路基填料的强度要求不是很高 (CBR=3),弱膨胀土在增加含水量和压实度的情况下其 CBR 值一般均能满足要求,故下路堤可不进行处理。由于边坡土体处于强风化区,胀缩效应显著,极易因干湿循环造成边坡破坏,因此结合膨胀土路床、上路堤的处理,其边坡采用 50cm 的非膨胀土包边处理;而对下路堤未掺灰处理的路堤边坡采用内垂直厚度 60cm 的 6%石灰土包边,外采用垂直厚度 50cm 的非膨胀土包边处理。非膨胀包边土要与石灰处治土或弱膨胀土下路堤填料同层碾压,培路肩要求采用非膨胀土。

(2) 当中膨胀土段路基高度为 $H \leq 1.52\text{m}$ (路面结构层总厚 72cm+路床厚度 80cm),下路床采用 7%石灰土,上路床采用 8%石灰土,压实度均 $\geq 95\%$;当路基高度为 $1.52\text{m} < H \leq 2.22\text{m}$,路床掺灰量及压实度同前,原地面以上 0~70cm 范围内的路堤采用 6.5%石灰土处治,压实度 $\geq 93\%$;当路基高度 $H >$

2.22m,路床及上路堤的掺灰量、压实度同前述,下路堤填料从经济性、胀缩性考虑采用 4%石灰土处治,压实度 $\geq 93\%$,接近弱膨胀土的水平。边坡路面结构层以下的高度采用垂直厚度为 50cm 的非膨胀土包边处理,压实度及碾压要求同弱膨胀土段,培路肩要求采用非膨胀土。

(3) 填挖交界处,除按照膨胀性及路基高度按上述方案进行处理以外,路床范围内加设 3 层双向玻纤土工格栅 (强度不低于 60kN/m ,延伸率 $< 4\%$) 加强,以防止含水量的变化引起路基不均匀下沉,影响路基稳定。

(4) 对于地下水位较高的路堤段,基底清表后应设置 30~50cm 的碎石或砂砾垫层,对应路段的边沟可适当加深,以利于垫层内水的排出,原则上垫层底面应高于边沟底面 70cm。垫层以上的设计根据膨胀性、路基高度可参照 (1)、(2) 处理。

(5) 对于地下水位较高的路堑段,除按路床超挖 80cm 掺灰处理外,另需超挖 30~50cm 设置碎石或砂砾垫层,边沟下设置宽 60cm 深 50cm 的碎石盲沟并外包反滤土工布,盲沟底设内径 15cm 的纵向高密度聚乙烯双壁打孔波纹管。垫层以上的路床根据膨胀性的大小进行掺灰处理。

5 膨胀土路基边坡防护及排水设计

5.1 路堤防护及排水

路堤段采用了路床、上路堤处治、边坡包边的处理方法,降水对路基的影响较小,同时大气风化的影响也因边坡采用内灰土外非膨胀土的包边处理方式,而大为削弱。因此边坡在做好饱湿、排水的情况下,路基的强度、稳定性可以得到有效地保障。根据路堤高度、膨胀性的大小,分别采用了浆砌片石全防护、混凝土网格内植草及浆砌片石拱形骨架内植草的防护型式,结合路基采用分散排水的特点,在边坡浆砌片石拱沿设置凸出坡面 10cm 的混凝土眉沿板,阻隔路面水经边坡冲刷拱内植草,使水流大部分通过拱间形成的凸出坡面的排水槽排入沟中。

护坡道、排水沟均采用浆砌片石防护,排水沟下设置一层防渗土工布,不但可以防水下渗,而且可有效抑制下部土体胀缩的影响。

5.2 路堑防护及排水

防治膨胀土边坡的破坏必须坚持治坡先治水的原则。水是膨胀土的大敌,对于中、强膨胀土,遇水即软化、崩解,强度丧失较多,因此,路堑范围内的排水沟、截水沟及堑顶与截水沟之间必须采用浆砌片石

防护, 同时应做好排水沟、截水沟的纵坡设计, 及时、迅速地将路界范围内的降水排离路基。

路堑位于中膨胀土段, 土体多处于超固结状态, 路基开挖后将产生土体超固结应力释放, 边坡与路基面出现卸荷膨胀, 并常在坡脚形成应力集中区和较大的塑性区, 易使边坡破坏。因此, 坡脚设置浆砌片石护脚墙, 墙底面埋置深度在大气急剧风化层以下, 墙顶面高出碎落台 2m, 墙顶宽度 1m, 墙后设 15cm 的碎石垫层以调整边坡土体膨胀变形。

为适应边坡可能产生的不均匀胀缩和保持边坡土体含水量的相对稳定, 边坡采用柔性与刚性防护相结合的方式。边坡上先铺设反滤土工布其上再设置 15cm 厚的碎石垫层, 然后采用 30cm 厚的 M7.5 浆砌片石护坡, 护坡上每隔 2m 交错设置泄水孔。这种防护型式不但可以汇集、排流边坡土体后的自由水, 而且抵御不均匀胀缩的效果也较好, 可以起到防水、防风化, 保持土体相对含水量稳定的目的。

由于路堑边坡采用浆砌片石防护, 易给司乘人员造成呆板、压抑的感觉, 故边坡采用爬墙虎、爬壁藤等攀岩植物进行绿化、美化。

6 施工工点情况

本工程开工时间较晚, 从几个膨胀土路堤试验段情况来看, 膨胀土的性质、掺灰后的实际效果与试验状态较为接近, 但试验段灰剂量的检测较为繁复。因此, 根据室内外试验结果的分析, 采用无侧限抗压强度并结合膨胀试验来检验掺灰后的效果, 实施方便、准确。具体见表 3。

表 3 7d 无侧限抗压强度与对应掺灰量

石灰掺量/%	8	7	6	5	4
抗压强度 MPa	0.8	0.7	0.5 (0.7)	(0.6)	(0.5)

注: 抗压强度一栏中, 未加括号的数字适用于中膨胀土, 加括号的数字适用于弱膨胀土。

通过对路堑段边坡埋设的碎石垫层、边沟下设的纵向排水盲沟、路基范围内横向碎石垫层的调查, 发现该段于 7~8 月普降大雨, 盲沟内水流不断, 于 10 月份再次调查, 仍见有水源源不断从盲沟内排出, 证明排水设施是有效的。

7 施工中应注意的几个问题

(1) 路堤基底积水或淤泥未彻底清除, 往往成为

路堤病害产生的重要原因, 因此路堤填筑前应彻底清除淤泥, 并做好排水设施。

(2) 若地表土含水量大, 难以碾压成型, 可在路基两侧开挖排水沟, 降低地下水位, 在表土中掺加生石灰粉, 加强犁翻晾晒工作, 压实度为 85%。

(3) 强膨胀土坚决不能用于路堤的填筑, 应尽量选择膨胀性较弱的土填筑路堤, 中膨胀土在可能的情况下尽量不用, 若经过经济、技术等方面的比较非用不可, 须经处理后方可使用。

(4) 桥头填土由于界面效应等原因, 易产生不均匀沉落、开裂甚至塌滑等病害, 因此对弱膨胀土采用 6% 石灰处理, 对于中膨胀土采用 8% 石灰进行处理。

(5) 路堑施工应遵循先做排水, 后开挖边坡, 及时防护, 及时支挡的程序原则, 以防边坡土体暴露后因湿胀干缩效应和大气风化而破坏。

(6) 路堑施工过程中边坡不要一次挖到设计线, 以防边坡受水、大气风化的影响产生膨胀, 而是预留 0.5m 左右, 待路堑纵面全部完成后再挖至设计线, 并立即采用碎石垫层、浆砌片石防护。

8 结语

膨胀土在我国分布广泛, 与筑路关系极为密切, 随着高速公路的不断发展, 将遇到大量的膨胀土问题。本文结合南-邓高速公路, 通过石灰改性膨胀土试验, 找出合适的用灰量, 即弱膨胀土为 6%、中膨胀土为 8%。同时按照消除土的膨胀性和防水保湿、防风化的设计原则, 探讨了膨胀土地区路基处理方法和路基边坡防护、排水设计。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通部. 公路路基设计规范 (JTJ 013-95) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
[2] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册 (路基) 第 2 版 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
[3] 李生林, 等. 中国膨胀土工程地质研究 [M]. 江苏科学技术出版社, 1992.
[4] 廖世文, 等. 全国首届膨胀土科学研讨会论文集 [C]. 西南交通大学出版社, 1990.