

梅雨气候区膨胀土填芯路基设计研究

邓茜¹, 刘晓爽², 杨文迪², 马超¹

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 中铁十六局集团 铁运工程有限公司, 广东 广州 510540)

摘要:将膨胀土作为路基填料,可有效利用膨胀土路堑开挖产生的弃土。以铜陵江北港铁路专用线膨胀土路基工程为依托,提出了梅雨气候区膨胀土填芯路基的设计方法。首先,进行膨胀土的膨胀力试验;然后,研究梅雨季节膨胀土填芯路基内部体积含水量与包边黏性土种类、包边厚度、路基压实系数的关系,分析梅雨季节填芯膨胀土膨胀力发育情况;最后,确定了膨胀土填芯路基设计方案,并将膨胀力引入折线型滑动面安全系数计算公式进行稳定性验算。结果表明,铜陵江北港铁路专用线膨胀土填芯路基采用亚黏土包边,包边厚度取1 m,压实系数取0.92,不仅能减少浪费,安全系数也满足规范要求。

关键词:膨胀土填芯路基;梅雨气候区;膨胀力;体积含水量

中图分类号: U213.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0106-07

膨胀土具有失水收缩、吸水膨胀的特性。膨胀土路基易产生表层溜坍和不均匀沉降等病害。因此,膨胀土不宜用于填筑路基。但由于膨胀土地区往往缺乏其他填料,为有效利用膨胀土路堑开挖产生的弃土,可研究将膨胀土作为路基填料。在进行路基填筑时,膨胀土填筑在中间,外部包填黏性土填料以减小路基表面透水性。通过改变包边黏性土种类或调整包边厚度及压实系数控制降雨入渗并限制膨胀力作用。此方法能有效控制膨胀土的膨胀变形,并充分利用挖方膨胀土,适用于膨胀土地区路基工程。

20世纪90年代初,广西率先采用包盖法修筑南梧路南宁出口段膨胀土路堤。该方案的水平包边厚度仅取1 m,由于宽度不够,随后几乎所有路段都陆续发生破坏^[1]。文献[2]研究了云南楚大高速公路膨胀土路基土工格网加筋包边设计方案,该方案充分利用土工格网的抗拉强度和土体、格网间的咬合作用吸收膨胀土的收缩应力,包边厚度由路基边坡表面可能风化的范围(2 m)确定。文献[3]对襄荆高速公路石灰土包边膨胀土填芯工程进行了包边方案设计及验证,该方案考虑到路面结构对大气降雨-蒸发作用的减弱,将顶封层厚度定为40 cm,两侧包边厚度考虑到大气影响深度及植草防护和排水系统定为2 m。上述研究可见,目前膨胀土填芯路基设计方法并不成熟,尤其是路基压实系数设计理论依据不足。中国江南、江淮地区膨胀土分布广泛,该地区梅雨特征显著,长期降雨入渗是导致膨胀土路基灾变的重要因素。依托铜陵江北港铁路专用线膨胀土路基工程,进行了膨胀土的膨胀力试验研究,通过分析膨胀土填芯路基包边黏性土种类、包边厚度和压实系数对膨胀力的限制作用,研究梅雨气候区膨胀土填芯路基的设计方法。

1 工程概况及设计思路

1.1 工程概况

铜陵江北港铁路专用线位于铜陵市境内,正线全长52.11 km,膨胀土路段占线路全长16.8%。线路所在地区梅雨特征显著,梅雨季节常出现连绵阴雨天气,膨胀土地段路基开挖弃土量大。铜陵江北港站

收稿日期:2023-12-17 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230354

基金项目:集团公司科技研究开发计划(K2021-26C)

作者简介:邓茜(1998—),男,硕士研究生,研究方向为铁道与城市轨道交通。E-mail:280722019@qq.com

邓茜,刘晓爽,杨文迪,等.梅雨气候区膨胀土填芯路基设计研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(2):106-112.

前段位于长江一级阶地,该段路基面宽 6.8 m,边坡坡率为 1:1.5,膨胀土填芯路基高度在 4.3~2.4 m 之间。该路段路基填筑缺乏填料,长距离取土会导致工程造价增加,破坏沿线生态环境,也影响施工进度。因此,拟利用膨胀土路堑挖方弃土作为路基填料。若直接采用膨胀土进行路基填筑,梅雨季节长期降雨入渗会使膨胀土吸水膨胀,显著增加路基变形风险。因此,拟采用黏性土包边、膨胀土填芯的设计方案。膨胀土填料物理参数如表 1 所示。

表 1 膨胀土填料物理参数

最优体积含水量/%	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	塑限/%	液限/%	缩限/%	自由膨胀率/%
10	1.5	32	64	17	15

1.2 设计思路

于膨胀土填芯路基而言,当水分渗入膨胀土填芯部位时,将引起膨胀力发育,从而引发路基变形。但填芯膨胀土受上覆限制,上覆荷载大于膨胀力时,填芯膨胀土将不会膨胀变形。基于此,梅雨气候区膨胀土填芯路基设计思路是:首先,通过膨胀土的膨胀力试验确定膨胀力与体积含水量的关系;然后,利用数值仿真方法研究梅雨季节膨胀土填芯路基内部体积含水量与包边黏性土种类、包边厚度及压实系数的关系,并结合膨胀土的膨胀力试验结果确定填芯膨胀土膨胀力发育情况,确保梅雨期内上覆荷载都大于填芯膨胀土产生的膨胀力,并坚持节约用料、减少浪费的原则确定采用不同黏性土进行包边填筑时合适的包边厚度及压实系数;最后,验证提出的设计方案是否满足规范要求,并选出最优的设计方案。

2 膨胀土的膨胀力试验研究

膨胀土吸水膨胀,只有当膨胀土体积增加受阻时,才会产生膨胀力。本节参考文献[4]中的膨胀力测定方法研究膨胀力与体积含水量之间的关系。

2.1 试验方法

制作连续吸水膨胀力试验装置如图 1 所示,土样上部分别为不透水钢板、荷重传感器和反力螺栓,测力元件为荷重传感器。不透水钢板和反力螺栓具有足够的刚度,用以固定土样和测力元件。膨胀土吸水时反力螺栓提供相应反力,保证膨胀土不发生变形。通过控制膨胀土在增湿过程中的膨胀变形,测得约束膨胀土膨胀变形的上覆荷载值,来测定膨胀土的膨胀力。

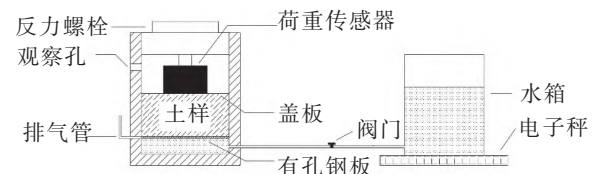


图 1 试验装置示意图

试验前制作 6 个直径为 8 cm、高为 4 cm 的土样,并称量土样的质量。土样的初始体积含水量取最优体积含水量 10%。按照图 1 所示组装仪器设备,旋紧反力螺栓,施加 0.5 kPa 的预压力使仪器各部件之间紧密接触,并将荷重传感器读数调零。然后,关闭阀门,往水箱内加入水,打开录像设备,记录荷重传感器读数,再打开阀门,待 2 h 内读数小于 0.1 kPa 时,停止试验。试验结束后,拆除装置,经吸水质量与吸水体积的简单换算,得到体积含水量与膨胀力的关系。

2.2 试验结果分析

采用相同方法进行 6 组试验,试验结果取平均值得到体积含水量与膨胀力的关系,如图 2 所示。膨胀土开始吸水时膨胀力迅速增长并到达最大值,膨胀力在土样体积含水量增加至 31% 时达到峰值 17 kPa,之后一直维持在 17 kPa。试验所用膨胀土属于弱膨胀土,吸水后土颗粒间产生的楔力较小,不足以使土颗粒重分布,不存在膨胀力衰减现象。

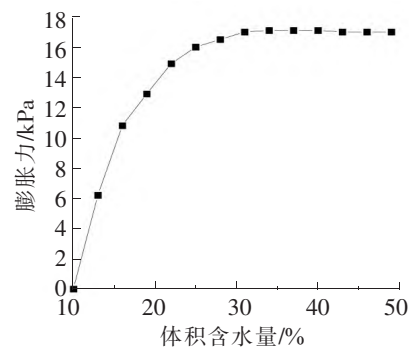


图 2 膨胀力变化特征曲线

3 膨胀土填芯路基降雨入渗数值仿真模型

根据膨胀土填芯路基的特征,运用有限元法建立膨胀土填芯路基降雨入渗数值仿真模型。据前期勘察资料,地下水不与路基土接触。模型网格剖分为尺寸为 0.1 m 的单元。根据试验数据,模型参数如表 2 所示。膨胀土填芯路基结构及数值仿真模型如图 3、图 4 所示,图 3 中 H 表示路基包边厚度, α 表示边坡坡度。

表 2 模型参数

压实系数	渗透系数/($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)				饱和体积含水量/%			
	膨胀土	黏土	亚黏土	亚砂土	膨胀土	黏土	亚黏土	亚砂土
0.90	23.32	14.12	29.31	37.72	58.72	46.50	41.71	38.02
0.92	9.05	5.47	17.89	27.81	56.43	45.02	40.33	36.73
0.94	2.65	1.59	12.97	19.78	55.11	43.83	39.22	35.61
0.96	1.36	0.83	10.11	17.91	54.52	42.92	38.51	35.02

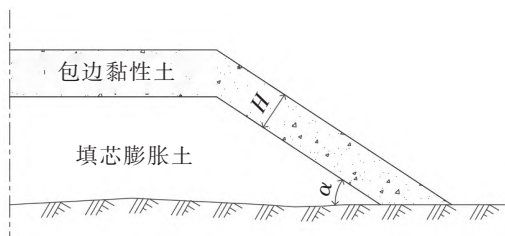


图 3 膨胀土填芯路基结构示意图

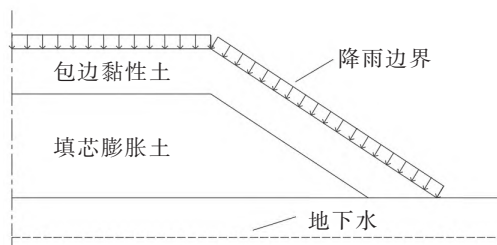


图 4 数值仿真模型示意图

填芯膨胀土初始体积含水量取最优体积含水量 10%。假设地下水位于路基底部以下 2.5 m 处。渗流情况采用瞬时渗流分析。2020 年,安徽省梅雨期持续 60 d,为历史第 1 位^[5]。因此,采用 2020 年梅雨期降雨情况为计算工况,假设降雨以一恒定强度 17.62 mm/d 平均分布在梅雨期内,坡面以上以 17.62 mm/d 降雨强度为流量边界。模型的非饱和土力学参数,采用 Van Genuchten 函数拟合土体体积含水量和非饱和渗透系数之间的关系。该函数表达式为

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (a\psi^n)^m} \quad (1)$$

式中, θ_w 为体积含水量; θ_r 为残余含水量; θ_s 为饱和体积含水量; ψ 为压力水头; a 、 n 为经验参数; $m = 1 - \frac{1}{n}$ 。

4 膨胀土填芯路基包边厚度研究

根据施工要求并考虑经济效益,包边厚度最小值取 1 m,最大值取 1.75 m。包边厚度分别选取 1.00、1.25、1.50、1.75 m 进行计算,压实系数取最小值 0.90^[6]。经数值仿真发现,对于填芯部位,其坡脚处体积含水量始终最大,产生的膨胀力也最大,为最易发生膨胀变形的部位。上覆荷载应为被浸润的黏性土与被浸润的填芯膨胀土荷载之和,不同包边厚度路基填芯坡脚处上覆荷载见表 3。

表 3 不同包边厚度路基填芯坡脚处上覆荷载

kN/m²

包边黏性土种类	包边厚度			
	1.00 m	1.25 m	1.50 m	1.75 m
黏土	134.1	137.6	181.1	214.7
亚黏土	128.4	159.2	169.3	193.4
亚砂土	119.9	130.3	137.8	174.3

4.1 模拟计算结果与分析

对数值仿真结果进行整理,统计出梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量变化情况,如图 5 所示。

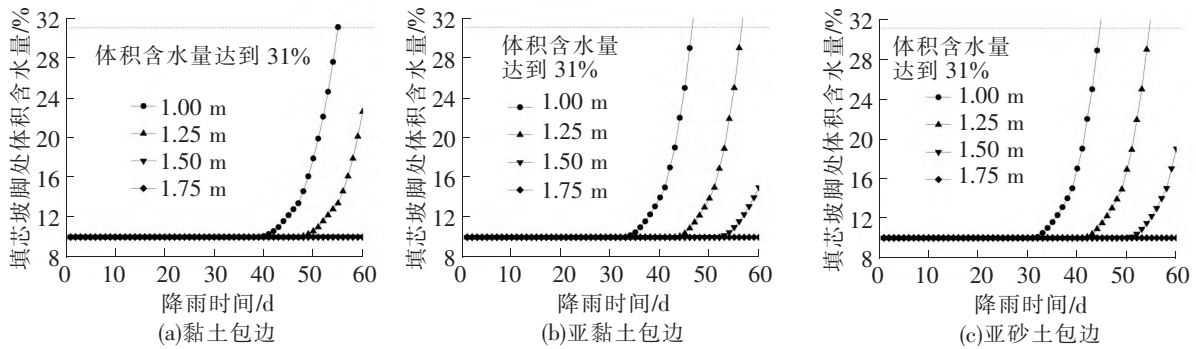


图 5 不同包边厚度路基填芯部位坡脚处最大体积含水量

膨胀力的计算采用离散积分的方法,膨胀力应为填芯膨胀土被雨水浸润部分不同体积含水量条块所产生膨胀力的离散积分值,公式为

$$p_e = \sum_{i=1}^n p_i \quad (2)$$

式中, p_e 为膨胀力; p_i 为第 i 条块所产生膨胀力。

压实系数满足规范最低要求。当使用黏土包边,路基包边厚度为 1.25 m 时,梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量为 22.6%,膨胀土产生的膨胀力为 95.8 kN/m²,上覆荷载为 137.6 kN/m²,填芯部位不会膨胀变形。当使用亚黏土包边,路基包边厚度为 1.25 m 时,梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量会在 58 d 超出 31%,膨胀土产生的膨胀力为 157.9 kN/m²,上覆荷载为 159.2 kN/m²,填芯部位不会膨胀变形。当使用亚砂土包边,路基包边厚度为 1.50 m 时,梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量为 19.1%,膨胀土产生的膨胀力为 60.5 kN/m²,上覆荷载为 137.8 kN/m²,填芯部位不会膨胀变形。

4.2 路基包边厚度的确定

压实系数取 0.90 时,可整理出 3 种方案:方案 1,路基包边土采用黏土,路基包边厚度取 1.25 m;方案 2,路基包边土采用亚黏土,路基包边厚度取 1.25 m;方案 3,路基包边土采用亚砂土,路基包边厚度取 1.50 m。

5 膨胀土填芯路基压实系数研究

根据施工要求,路基的黏性土填料与膨胀土填料取相同压实系数进行统一压实,压实系数最大值取 0.96,文献[6]规定路基压实系数最小值为 0.90。因此,路基压实系数分别选取 0.90、0.92、0.94、0.96 进行计算,包边厚度取最小值 1 m。经数值仿真发现,对于填芯部位,其坡脚处体积含水量始终最大,产生的膨胀力也最大,为最易发生膨胀变形的部位。上覆荷载应为被浸润的黏性土与被浸润的填芯膨胀土荷载之和,不同压实系数路基填芯坡脚处上覆荷载见表 4。

表 4 不同压实系数路基填芯坡脚处上覆荷载 kN/m²

包边黏性土种类	压实系数			
	0.90	0.92	0.94	0.96
黏土	134.1	117.1	124.9	131.2
亚黏土	128.4	113.5	120.7	126.1
亚砂土	119.9	117.8	120.4	102.7

5.1 模拟计算结果与分析

对数值仿真结果进行整理,统计出梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量变化情况,如图 6 所示。

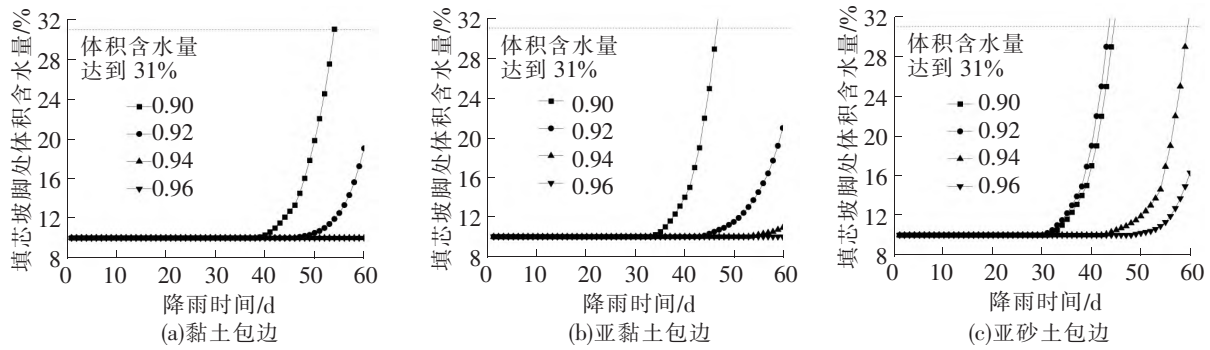


图 6 不同压实系数路基填芯部位坡脚处最大体积含水量

膨胀力的计算同样采用离散积分的方法,如式(2)所示。包边厚度满足最低要求。当黏土包边路基压实系数为 0.92 时,梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量为 18.9%,膨胀土产生的膨胀力为 58.3 kN/m²,上覆荷载为 117.1 kN/m²,填芯膨胀土不会膨胀变形;当亚黏土包边路基压实系数为 0.92 时,梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量为 21.0%,膨胀土产生的膨胀力为 79.8 kN/m²,上覆荷载为 113.5 kN/m²,梅雨季节填芯膨胀土不会膨胀变形;当亚砂土包边路基压实系数为 0.96 时,梅雨季节填芯部位坡脚处最大体积含水量为 16.3%,膨胀土产生的膨胀力为 34.3 kN/m²,上覆荷载为 102.7 kN/m²,梅雨季节填芯膨胀土不会膨胀变形。

5.2 路基压实系数的确定

包边厚度取 1 m 时,可整理出 3 种方案:方案 4,路基包边土采用黏土,路基压实系数取 0.92;方案 5,路基包边土采用亚黏土,路基压实系数取 0.92;方案 6,路基包边土采用亚砂土,路基压实系数取 0.96。

6 铜陵江北港铁路专用线膨胀土填芯路基设计方案及验证

6.1 设计方案

经过分析不同设计方案的膨胀土填芯路基在梅雨季节体积含水量变化情况与膨胀力发育情况,从节约建设费用的角度出发,能满足梅雨季节填芯膨胀土不发生膨胀变形的设计方案如表 5 所示。

表 5 膨胀土填芯路基设计方案

方案	包边土	压实系数	包边厚度/m
方案 1	黏土	0.90	1.25
方案 2	亚黏土	0.90	1.25
方案 3	亚砂土	0.90	1.50
方案 4	黏土	0.92	1.00
方案 5	亚黏土	0.92	1.00
方案 6	亚砂土	0.96	1.00

6.2 膨胀土填芯路基稳定性验算

根据工程经验,膨胀土边坡滑动面多为折线型。在折线型滑动面安全系数计算公式中引入膨胀力项可得到考虑膨胀力作用的折线型滑动面安全系数计算公式为

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \{ [W_i (\cos \alpha_i - A \sin \alpha_i) - N_{ui} - N_{ui} \sin \beta_i \sin(\alpha_i - \beta_i) - p_e l_i] \tan \varphi_i + c_i l_i \} \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} [W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) + N_{ui} \sin \beta_i \cos(\alpha_i - \beta_i) + p_e (h_{i1} - h_{i2}) \cos \alpha_i] \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j + T_n} \quad (3)$$

式中, K_f 为安全系数,应不小于 1.25^[7]; W_i 为第 i 条块质量; A 为地震加速度; α_i 为第 i 条块滑面倾角; β_i 为第 i 条块地下水流向; c_i, φ_i 分别为第 i 条块黏聚力和内摩擦角; N_{ui} 为孔隙水压力; ψ_j 为第 i 块段剩余滑坡推力传至第 $i+1$ 块段时的传递系数 ($j=i$); R_n 和 T_n 分别为第 n 条块的抗滑力和下滑力; h_{i1}, h_{i2} 分别为

土条受雨水浸润的膨胀土部分左右两侧高度; l_i 为土条底部长度; p_e 为膨胀力。

路基边坡的安全系数随降雨时长的增长而持续降低,因此计算降雨结束时路基边坡的安全系数是否满足规范要求即可。由数值仿真结果可知,梅雨季节结束时膨胀土填芯部位最大体积含水量为 21.0%,此时膨胀土产生的膨胀力为 79.8 kPa,为方便计算可假设膨胀力在均质膨胀土中沿深度均匀分布^[8],保险起见, p_e 取 79.8 kPa。计算中不考虑地震加速度。由数值仿真找出路基边坡最危险滑动面,获取滑动面上的土条信息。将各计算参数代入式(2)中得到降雨结束时膨胀土填芯路基安全系数如表 6 所示。

表 6 降雨结束时路基安全系数

设计方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
安全系数	1.02	0.91	0.85	1.13	1.41	2.06

经膨胀土填芯路基稳定性分析,方案 5、方案 6 均能满足规范的要求。经过方案比选,在黏性土填料价格相差不大的情况下,方案 5 更能够节约机械、人力和时间,因此拟采用方案 5 进行膨胀土填芯路基的设计。

7 结论

(1)降雨过程中,膨胀土填芯部位坡脚处最先受到降雨入渗的影响,该处膨胀力率先达到最大值。梅雨季节应提高膨胀土填芯部位坡脚处含水量的监测频率,或在该部位增设渗水井。

(2)梅雨气候区的膨胀土填芯路基设计,路基压实系数取最小值时,黏土或亚黏土包边路基的包边厚度需不小于 1.25 m,亚砂土包边路基的包边厚度需不小于 1.50 m,可保证梅雨季节的降雨入渗不会造成填芯膨胀土膨胀变形;包边厚度取最小值时,黏土或亚黏土包边路基的压实系数需不小于 0.92,亚砂土包边路基的压实系数需不小于 0.96,可保证梅雨季节的降雨入渗不会造成填芯膨胀土膨胀变形。

(3)从节约机械、人力和时间的角度进行分析,铜陵江北港铁路专用线膨胀土填芯路基宜采用亚黏土包边,包边厚度取 1 m,压实系数取 0.92。经计算路基的安全系数为 1.41,满足规范要求,设计方案合理。

参 考 文 献

- [1]杨和平,章高峰.包盖法填筑膨胀土路堤的合适包边宽度[J].公路交通科技,2008,25(7):37-42.
- [2]杨和平,郑健龙,宋蔚涛,等.土工格网用于膨胀土路堤边坡加固的探讨[J].公路,1999,44(3):42-46.
- [3]陈善雄,余颂,孔令伟,等.中膨胀土路堤包边方案及其试验验证[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1777-1783.
- [4]于琳茗.膨胀土的膨胀力及吸水过程的试验研究[J].铁道建筑,2018,58(2):68-71.
- [5]安徽省气候中心.安徽省 2020 年气候公报[EB/OL]. [2023-12-17]. http://ah.cma.gov.cn/zfxxgk/zwgk/qxbg/qxbg1/202205/t20220523_4847964.html.
- [6]国家铁路局.铁路路基设计规范:TB 10001—2016[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [7]国家铁路局.铁路特殊路基设计规范:TB 10035—2006[S].北京:中国铁道出版社,2007.
- [8]司光武,蒋良淮,罗强,等.膨胀土边坡稳定性影响因素的作用效应分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(增刊 1):386-392.

Design of Expansive Soil Filled Core Subgrade in Meiyu Climate Zone

DENG Xi¹, LIU Xiaoshuang², YANG Wendi², MA Chao¹

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China Railway 16th Bureau Group Tiedao Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510540, China)

Abstract: Using expansive soil as the filling material for subgrade can effectively utilize the abandoned soil generated from excavation of expansive soil ditches. Based on the engineering of expansive soil subgrade for Tongling Jiangbei Port Railway Special Line, a design method for expansive soil filled core subgrade in Meiyu climate zone was proposed. Firstly, the swelling force test of expansive soil was

conducted. Then, the relationship between the internal volumetric water content of expansive soil filled core subgrade in Meiyu season and the type of surrounding cohesive soil, the thickness of surrounding soil layer and the compaction coefficient of subgrade was studied, and the development of swelling force of filled core expansive soil in Meiyu season was analyzed. Finally, the design scheme for expansive soil filled core subgrade was determined, and the swelling force was introduced into the formula for calculating the safety factor of the broken-line sliding surface stability. The results show that using mild clay as the surrounding soil with a thickness of 1 m and a compaction coefficient of 0.92 for the expansive soil filled core subgrade of Tongling Jiangbei Port Railway Special Line not only reduces waste, but also meets the requirements of the specification.

Key words: expansive soil filled core subgrade; Meiyu climate zone; swelling force; volumetric water content

~~~~~  
(上接第 32 页)

## Calculation Method for Stiffness of Corrugated Steel Plate Culvert

LUO Guoxin<sup>1</sup>, FANG Xiaolin<sup>2</sup>, NIU Hongliang<sup>2</sup>, DUAN Baoshan<sup>2</sup>

(1. China Merchants Zhongyu Engineering Consulting(Chongqing) Co. Ltd., Chongqing 400000, China;

2. China Construction Institute of Advanced Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the elastic properties of corrugated steel plate culverts and the Canadian code for corrugated steel bridges and culverts, a calculation method for structural deformation of corrugated steel plate culverts was derived by taking the semi-circular arch as an example. Then, using this method, the vertical and horizontal deformation of typical sized circular corrugated steel plate culvert structures under the action of filling with the change of filling height was calculated, and the results were compared with the actually measured results. The comparison results show that the proposed calculation method can basically simulate the shape change of the corrugated steel plate culvert structure. Except for the large difference in vertical deformation of the arch crown when the filling height is small, the calculation results of this method are basically consistent with the measured values under other working conditions, indicating that the deformation calculation method of the corrugated steel plate culvert structure proposed in this paper is highly reasonable and can be used as a reference for the structural design of corrugated steel plate culverts.

**Key words:** corrugated steel plate culverts; calculation method; vertical deformation of arch crown; horizontal deformation of arch waist