

文章编号:1671-8879(2018)01-0009-08

铁尾矿砂路基沉降及稳定性数值分析

牛玺荣^{1,2}, 孙延芳³

(1. 山西大学 土木工程系, 山西 太原 030013; 2. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术
交通行业重点实验室, 山西 太原 030006; 3. 太原理工大学 建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:为评价包边土和土工格栅处置铁尾矿砂路基的效果,充分认识铁尾矿砂填筑路基的适用性,并提高其利用率,对 4 种工况的铁尾矿砂路基(6 m 填高)的沉降和稳定性进行有限元数值计算。4 种工况分别为:无包边土,无土工格栅(工况 I);有包边土,无土工格栅(工况 II);有包边土,包边土与铁尾矿砂交接处铺设三向土工格栅(工况 III);有包边土,满面铺设三向土工格栅(工况 IV)。研究表明:工况 I、II、III、IV 的最大工后(600 d)沉降分别为 19.547、19.711、19.540、18.298 cm;固结阶段路面顶面中央处的沉降以工况 IV 最小,工况 II 最大;最大水平位移发生在坡脚下 7~8 m 处,其次发生在土路肩边缘处,坡脚下水平位移向路基外侧发展,而土路肩处水平位移向路基内侧发展;工况 IV 潜在滑移面贯穿至基底 5 m 深度处,工况 I 潜在滑移面位于路基边坡上,其抵抗滑移的能力最差;同时满面铺设土工格栅和设置包边土对提高路基稳定性的效果最为明显,安全系数可提高 0.9;铺设土工格栅可有效减小铁尾矿砂路基顶面边缘的侧向位移,对有效预防路基路面纵向开裂具有积极作用,但其不能有效减小基底侧向位移;黏土包边提高了铁尾矿砂路基的稳定性,但加大了路基的不均匀沉降;设置包边土和铺设土工格栅的处置措施对提高填方边坡稳定性效果比减小沉降效果明显。

关键词:道路工程;铁尾矿砂;数值计算;沉降;稳定性

中图分类号:U418.5 **文献标志码:**A

Numerical analysis on settlement and stability of iron ore tailings subgrade

NIU Xi-rong^{1,2}, SUN Yan-fang³

(1. Department of Civil Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Regions of Ministry of Transport, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of wrapping soil and geogrid on the treatment of iron ore tailings subgrade, fully understand the applicability of iron ore tailings filling subgrade and improve their utilization, settlement and stability of four kinds of cases of iron ore tailings subgrade (6 m embankment height) were analyzed by finite element numerical method, which

收稿日期:2017-08-29

基金项目:山西省自然科学基金项目(201701D121068);山西省交通科研计划项目(16-1-7);山西省交通建设科技项目(11-2-16);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金项目(KLTLR-Y12-9, KLTLR-Y14-17)

作者简介:牛玺荣(1976-),男,山西高平人,山西大学副教授,山西省交通科学研究院高级工程师,工学博士,博士后,
E-mail: niuxirong@sxu.edu.cn.

were as followed: no wrapping soil and no geogrid (case I); wrapping soil and no geogrid (case II); wrapping soil and three-way geogrid laid on the junction of wrapping soil and iron ore tailings (case III); wrapping soil and three-way geogrid laid on all the wrapping soil and iron ore tailings (case IV). The results show that the maximum settlement after construction (600 d) of case I, II, III and IV are 19.547, 19.711, 19.540 and 18.298 cm, respectively. The settlement of central place at the top of pavement are maximum in case I and minimum in case II in the consolidation stage. The maximum horizontal displacement occurs at the foot of slope with 7 to 8 m, which is followed by the edge of the soil shoulder. Horizontal displacement at the foot of slope occurs towards to the outside of subgrade and that of soil shoulder towards to the inside of subgrade. Potential slip surface of case IV develops into the depth of 5 m of basement. The potential slip surface of case I is located on the slope of subgrade, and its ability of anti-slippage is the worst, and case IV can evidently improve the subgrade stability which safety factor can be increased by 0.9. Laying geogrid can effectively reduce the lateral displacement of surface edge on the top of subgrade of iron ore tailings, which has a positive effect on the effective prevention of subgrade and pavement longitudinal cracking, but which can not effectively reduce the lateral displacement of the basement. Clay wrapping relatively improves the stability of iron ore tailings subgrade but increases the differential settlement of subgrade. Moreover, soil-wrapping and geogrid-laying measures are more effective to improve the subgrade stability than to reduce the subgrade settlement. 2 tabs, 10 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; iron ore tailing; numerical analysis; settlement; stability

0 引言

铁尾矿砂是选矿厂在特定经济技术条件下,将铁矿石磨细、选取特定组分后所排放的废弃物,其中含有一定数量的有用金属和矿物,具有粒度细、数量大、成本低、可利用性差的特点^[1-2]。铁尾矿砂一般通过填埋进行处理,处理过程中占用了大量土地资源,并且随意排放铁尾矿砂造成了严重的环境污染。矿石资源的开采利用面临日益短缺,甚至枯竭的局面,因此,铁尾矿砂的二次开发和利用已引起工程界的关注和重视。据不完全统计,中国选矿厂因受选矿技术水平和生产设备的制约,矿业生产中每年排出的 5×10^8 t以上的尾矿中,黑色冶金矿山尾矿量达 1.5×10^8 t,累计堆存的尾矿量近 5×10^9 t,其中铁尾矿量占全部尾矿堆存总量的近1/3,而中国目前尾矿的综合利用率仅为7%^[2]。为充分贯彻“资源循环利用、节约工程造价”的理念,建筑、公路、铁路等行业对铁尾矿砂的工程性质进行了较为全面的研究,并将其用于基础设施建设中^[3-7]。但为了工程上的安全可靠,以往主要将铁尾矿砂用在次要构件和小型项目中,很少将其用在主要构件和主体工程。在道路工程中,研究人员通过研究铁尾矿砂的路用性能,对铁尾矿砂进行改良或加固,或作为辅助

材料,将其用在路面基层和面层的铺筑中。杨青全面评价了水泥(或石灰)稳定铁尾矿砂的路用指标,提出了符合行业规范要求的低等级公路基层配合比^[8];Velasquez等研究了铁燧岩铁尾矿作为沥青混合料集料的路用性能及其适用性^[9];陈士忠等将铁尾矿砂和砂砾混合后,采用水泥和固化剂进行处治,将其用在低等级公路的基层中^[10]。Yisa等通过在铁尾矿砂中掺加红黏土,评价了红黏土稳定铁尾矿砂底基层材料的击实特性、无侧限抗压强度和加州承载比(California bearing ratio, CBR)^[11];王兴义用铁尾矿砂代替细集料,评价了农村公路路面用铁尾矿砂水泥混凝土的路用性能^[12];易龙生等在铁尾矿砂中掺配适量碎石和聚丙烯纤维,提出了适合于高等级公路路面基层的铁尾矿砂基层材料配合比,拓宽了铁尾矿砂在公路中的使用范围^[13];张铁志等在AC-13C和AC-16C这2种沥青混合料中掺入铁尾矿砂,评价混合料的路用性能,发现其指标均满足规范要求^[14]。科研人员研究了铁尾矿砂在公路路面中的应用,但是由于铁尾矿砂技术性能不符合公路行业规范对路基填料的要求,将其直接作为路基填料,特别是高等级公路路基填料的相关报道较少^[15-18]。

铁尾矿砂作为路基填料对改善矿产资源废物利

用率的现状具有重要意义。为了合理评价铁尾矿砂作为路基填料的路用性能和工程适用性,本文以矿物加工密集的山西省繁峙县产生的铁尾矿砂为研究对象,通过对铁尾矿砂路基在 4 种典型工况下的数值分析,计算了路基填筑过程和工后的沉降,并着重对比分析了包边土和土工格栅处置措施对路基沉降和稳定性的影响,分析结果可为将铁尾矿砂直接作为路基填料提供理论参考,为进一步拓宽铁尾矿砂在公路工程中的应用范围提供理论依据。

1 计算模型与工况

以山西省繁大(繁峙—大营)高速公路(K8+300~K18+000)段铁尾矿砂路基填筑工程为例进行数值分析。该段路基宽 26 m,边坡坡率 1:1.5,填高 6 m。为简化计算,将边坡 20 cm 厚的浆砌片石简化为包边土。有限元计算模型如图 1 所示。

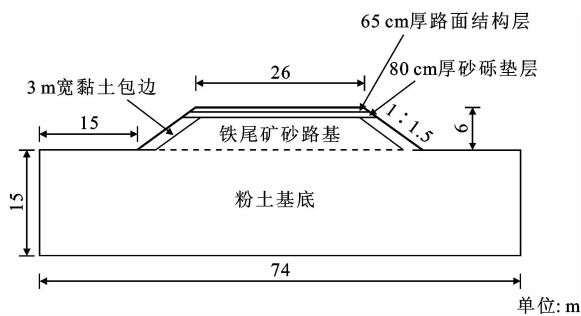


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

为了对比黏土包边和土工格栅对铁尾矿砂路基的加固效果,分 4 种工况对其进行数值分析:无包边土,无土工格栅(工况 I);有包边土,无土工格栅(工况 II);有包边土,包边土与铁尾矿砂交接处铺设三向土工格栅,交接处两侧各搭接 2 m,每隔 0.9 m 填高铺设 1 层(工况 III);有包边土,每隔 0.9 m 填高满面铺设 1 层三向土工格栅,土工格栅伸入包边土长度为 2 m(工况 IV)。

采用 Plaxis 有限元软件对铁尾矿砂路基的沉降和边坡稳定性进行数值分析,以评价铁尾矿砂填筑路基的可行性。上述各工况数值计算采用 5 节点平面应变模型,工况 I、II 单元数为 1 122,工况 III、IV 单元数为 1 274,节点数为 9 197~11 533,应力节点数为 13 464~15 288。

数值计算中涉及到基底粉土、铁尾矿砂、包边黏土、砂砾垫层、路面基层面层等材料,部分材料的物理学参数通过试验获得,部分参考了经验值,材料参数见表 1。计算中将基层和面层材料参数进行了

近似折中处理,其计算误差可忽略不计。土工格栅材料采用三向土工格栅,其割线模量为 245 kN/m。在数值计算过程中,所有材料均采用摩尔-库仑强度准则。

表 1 计算模型材料参数

Tab. 1 Material parameters of calculation model

材料参数	铁尾矿砂	包边黏土	砂砾垫层	粉土基底	路面
排水类型	排水	不排水	排水	不排水	不排水
天然重度/(kN·m ⁻³)	20	21	22	14	24
饱和重度/(kN·m ⁻³)	21	22	23	17	25
水平渗透系数 k_x /(m·d ⁻¹)	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0
竖向渗透系数 k_y /(m·d ⁻¹)	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0
弹性模量 E /MPa	25	30	400	8	1 000
泊松比 ν	0.36	0.35	0.35	0.25	0.30
黏聚力 c /kPa	5.0	24.0	0.5	27.0	150.0
内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	36	36	45	28	35
界面强度折减因子 R_{im}	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0
界面渗透性	中等	中等	中等	中等	中等

2 沉降计算

2.1 原理与步骤

计算原理采用 Plaxis 中的“固结分析”进行,其理论基础为比奥固结理论。附加计算步取 250,为充分模拟累计沉降,不对网格进行更新。

根据繁大高速公路路基填筑的实际情况,在进行铁尾矿砂路基填筑数值模拟过程中,各计算步采用如下页表 2 所示的计算过程。铁尾矿砂路基填筑约 4.5 m,按照现场填筑进度,耗时约 60 d。为了尽可能准确模拟填筑过程,每填筑 90 cm 平均时间按 2 d 计,然后进行 10 d 的固结沉降,填筑 80 cm 厚砂砾垫层进度按 2 d 计,随后进行约 300 d 的时间间隔(协调其他工序),然后采用 30 d 的工期进行路面铺筑。为了充分模拟路基的工后沉降,按照经验,认为其经过 600 d 即可基本完成工后沉降。

2.2 结果分析

按照前述计算原理和步骤,对 4 种不同工况下路基填筑过程和工后沉降进行了数值模拟,其沉降计算结果见下页图 2。工况 I、II、III、IV 的最大工后(600 d)沉降计算结果分别为 19.547、19.711、19.540、18.298 cm。由计算结果可知,对于 6 m 填高的铁尾矿砂路基,铺设土工格栅能有效减小路基沉降,特别是满铺土工格栅工况,减小路基沉降效果

表 2 沉降计算过程

Tab. 2 Settlement calculation process

工序	持续时间	累计时间
第 1 等效填筑层	2	2
平均施工间歇	10	12
第 2 等效填筑层	2	14
平均施工间歇	10	24
第 3 等效填筑层	2	26
平均施工间歇	10	36
第 4 等效填筑层	2	38
平均施工间歇	10	48
第 5 等效填筑层	2	50
平均施工间歇	10	60
铺筑砂砾垫层	2	62
协调其他工序	300	362
铺筑路面	30	392
预估工后固结	600	992

最为明显。由于包边黏土对路堤铁尾矿砂侧向约束导致基底产生应力集中,工况 II 的最大工后沉降略大于工况 I,路表的差异沉降增加,此分析结果与文献[19]中的研究结论相似。

为了分析路基填筑过程的沉降变化情况,计算了 4 种不同工况路堤中心下原地面和坡脚处原地面的沉降,计算结果见下页图 3。由图 3 可看出,路堤中心下原地面沉降明显发展期主要在路基填筑和随后的 300 d 固结这 2 个时间段,路面铺筑中产生的荷载对基底沉降产生显著影响,在约 1 000 d 后,路基沉降趋于稳定。虽然 4 种工况路堤自重荷载相同,但是由于满面铺设土工格栅的加筋效应提高了路堤土体的整体性,使得路堤底部的基底应力趋于均匀分布,有效减小了路堤土体整体性较差造成的应力集中,最终减小了基底沉降。由图 3 中坡脚处沉降变化过程可看出,在路基沉降发展期后的 300 d 内,坡脚处发生了明显的隆起现象,在路面荷载施加后,沉降趋于稳定。同样,由于包边土的约束作用和土工格栅的加筋效应,不同工况坡脚处的沉降有一定差别。此外还可看出,不同工况造成了地表沉降的差异:由于工况 IV 满面铺设土工格栅,增加了路基填料的整体性能,使得基底受力较均匀,其中央处的沉降最小;而工况 I 由于路基整体性最差,其基底中央处的沉降最大;对于工况 III,因为包边土侧向约束导致沉降增加的负面效应和土工格栅整体性增强导致沉降减小的正面效应相互抵消,造成了工况 III 基底中央沉降与工况 I 相当的现象;而工况 II 的沉降介于工况 I 和工况 IV 之间。

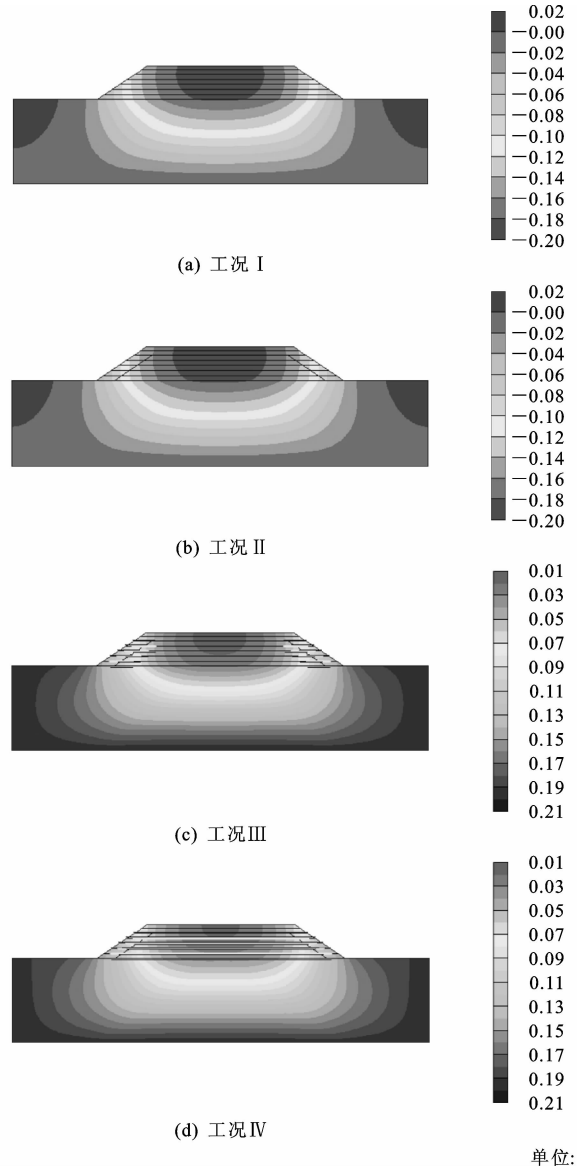


图 2 不同工况下的路基沉降

Fig. 2 Embankment settlement under different cases

下页图 4 为不同工况下路面顶面沉降的变化情况。由图 4 可看出,固结阶段路面顶面中央处的沉降以工况 IV 最小,工况 II 最大,路面顶面边缘(土路肩)处的沉降表现出与路面顶面中央处同样的规律。顶面边缘沉降较中央处沉降小 4 cm 左右。

为了解不同工况沉降随深度的变化情况,对 4 种工况路基中央处和土路肩处不同深度的累计沉降进行了数值计算,下页图 5 为计算结果。由图 5 可看出:相同位置同一深度处的沉降以工况 II 最大;路基中央处同一深度的沉降以工况 III 最小,土路肩处同一深度的沉降以工况 IV 最小。由此可知,只要满足稳定性要求,在包边土与铁尾矿砂交接处铺设土工格栅即可有效减小路基中央处的沉降。

下页图 6 为沉降分析后工况 IV 水平位移计算结

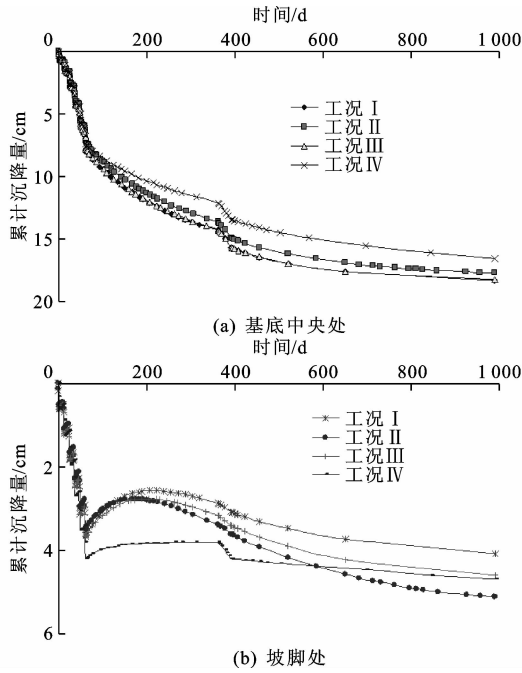


图 3 不同工况原地表沉降

Fig. 3 In-situ surface settlements under different cases

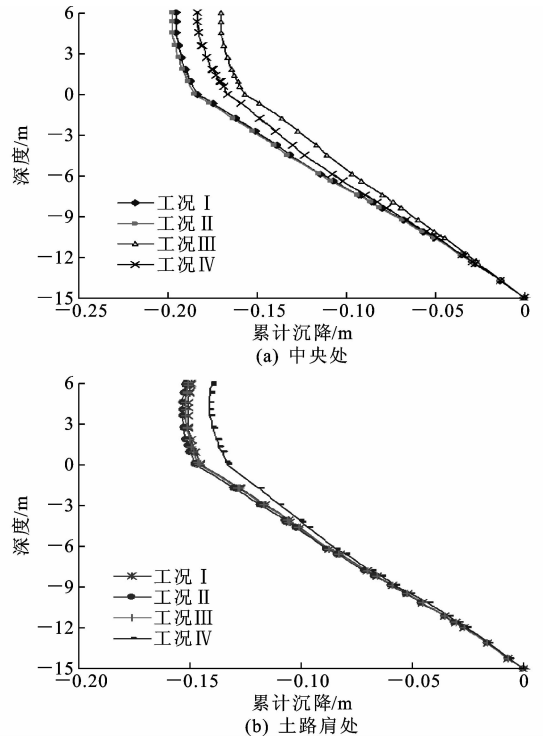


图 5 不同深度的累计沉降

Fig. 5 Cumulative settlements with different depths

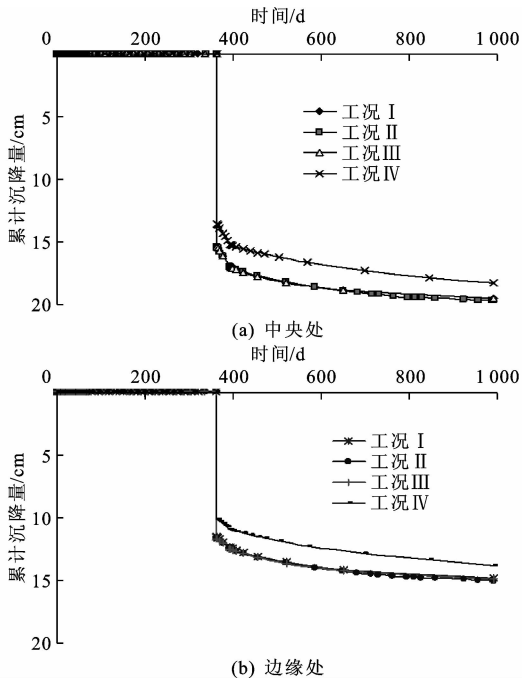


图 4 不同工况路面顶面工后沉降

Fig. 4 Post-construction settlements under different cases in top of pavement

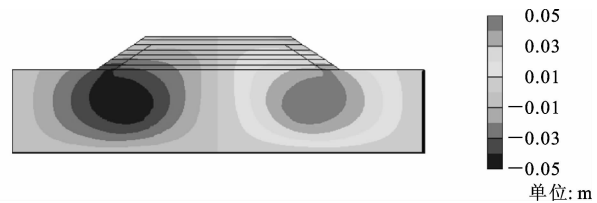


图 6 工况 IV 水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement under case IV

但并不能减小基底的水平位移(侧向位移),反而增加了侧向位移。

在沉降数值模拟过程中,以土路肩处不同深度为例,计算不同工况下水平位移变化情况,计算结果见下页图 7。从图 7 可看出,工况 IV 水平位移与其他 3 种工况相差约 0.5 cm,而其他 3 种工况水平位移基本相同。在路基填高范围内,工况 IV 水平位移在顶面 0.5 m 范围内向路基中央处发展,最大水平位移约 1 cm,而其下深度则向路基两侧发展,最大水平位移约 3 cm;其他 3 种工况路面顶面的水平位移约为 1.5 cm,路基底面约为 2.5 cm。由此可见,满面铺设土工格栅减小了路面顶面的侧向位移,可有效减小路基路面边缘纵向开裂的几率。

3 稳定性分析

3.1 原理与步骤

铁尾矿砂路基稳定性分析采用强度折减法^[20]。

果(其他工况类似)。通过计算发现,最大水平位移发生在坡脚下 7~8 m 处,其次发生在土路肩边缘处,坡脚下水平位移趋势向路基外侧发展,而土路肩处水平位移向路基内侧发展。4 种工况中以工况 IV 水平位移最大值最大,而其他 3 种工况相对较小。由此可知,满面铺设土工格栅虽然能减小路基沉降,

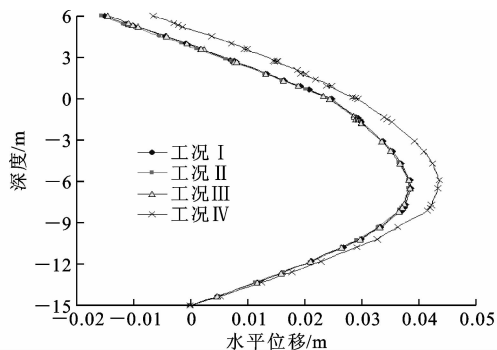


图7 不同工况下土路肩处水平位移随深度的变化

Fig. 7 Changes of horizontal displacement of soil shoulder with depth in different cases

实际抗剪强度和计算获得的保证土体平衡状态所需的最小抗剪应力之比即为土力学传统意义的安全系数。通过引入标准库仑规范,安全系数 K 可表示为

$$K = \frac{c - \sigma_n \tan(\varphi)}{c_r - \sigma_n \tan(\varphi_r)} \quad (1)$$

式中: c 、 φ 分别为输入的黏聚力和内摩擦角强度参数; σ_n 为实际的正应力分布; c_r 、 φ_r 均为不断减小到恰好能保持土平衡的抗剪参数。

此即为 Plaxis 程序中为计算整体安全系数而使用的 Phi/c 强度折减方法的基础。应用该方法,黏聚力和内摩擦角的正切将成正比减小,即

$$K = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\varphi_r)} = \sum M_{sf} \quad (2)$$

强度参数的减小由总乘子 $\sum M_{sf}$ 来控制,此参数将逐步增加,直到破坏。假定在失效后连续几步的计算大体给出一个常值的 $\sum M_{sf}$,则认为其为安全系数,此即为 Plaxis 中的稳定分析原理。

稳定分析在路基固结沉降基本完成后进行,即在开工的 992 d 后增加 Phi/c 强度折减计算,其计算过程同沉降计算过程(表 2)。

3.2 结果分析

在 Phi/c 强度折减计算中会产生附加位移,虽然计算总位移并无实际物理意义,但最后破坏的总增量位移可以表明破坏的机理。为了显示不同工况铁尾矿砂路基填筑的破坏机理,本文计算了 4 种工况下的总增量位移,如图 8 所示。由图 8 可看出,随着路基加固措施的加强,潜在滑动面逐渐向路基内部和基底深部发展,滑动面的增大有效抵抗了下滑力,路基安全性逐渐增大。

为进一步清楚显示不同工况潜在滑动面的位置,计算了 4 种工况的总剪应变,如下页图 9 所示。

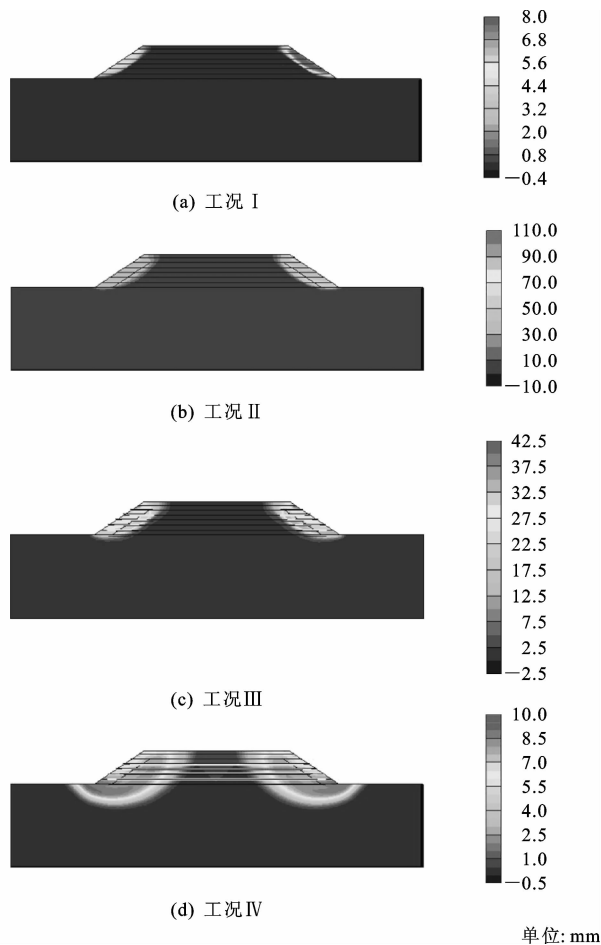


图8 总增量位移

Fig. 8 Total incremental displacements

从图 9 可看出,满面铺设土工格栅工况 IV 潜在滑移面贯穿了基底 5 m 深度处,而不采取任何措施的工况 I 滑移面位于路基边坡上,其抵抗滑移的能力最差。从图 9 还可看出,由于路面材料刚度加大,在其底边缘部存在应力集中现象,潜在滑移面并未贯穿路面,而是位于路面下。

采用强度折减法对 4 种工况在路基路面铺筑完毕(392 d)后固结 600 d 的边坡稳定性进行了分析,边坡稳定性分析过程中安全系数的变化见下页图 10。通过分析可知,对于填高 6 m 的铁尾矿砂路基,工况 I、II、III、IV 的安全系数分别为 1.787、2.404、2.494、2.583,均大于 1.3,边坡具有较高稳定性。可以发现,铁尾矿砂路基不设包边土与设包边土的安全性差别较大,安全系数相差 0.7,而其他 3 种工况之间的安全系数相差较小,约为 0.1。包边土对提高铁尾矿砂路基稳定性具有较明显的作用,而满面铺设土工格栅和设置包边土更能提高路基的稳定性,安全系数可提高 0.9。

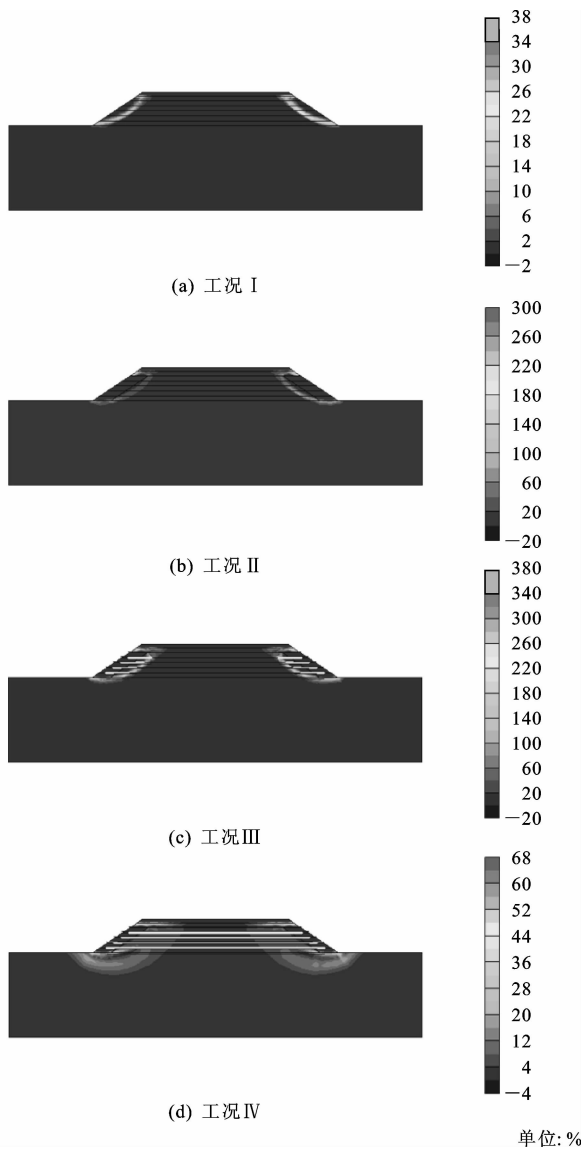


图 9 总剪应变

Fig. 9 Total shear strain

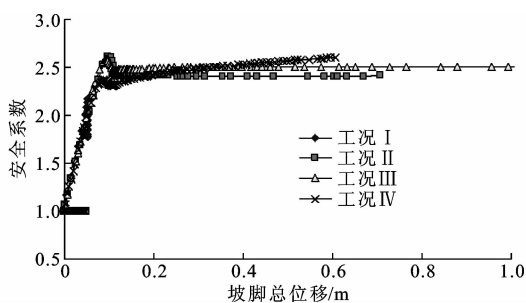


图 10 稳定性分析过程中安全系数变化

Fig. 10 Changes of safety factor of stability during stability analysis

4 结 语

(1) 满面铺设土工格栅的处置措施对减小路基沉降的效果最明显; 铺设土工格栅可有效减小路面

顶面边缘的侧向位移, 可减小路基路面纵向开裂的几率, 但并不能有效减小基底的侧向位移。

(2) 包边土和土工格栅均能有效提高路基的稳定性; 包边土提高了铁尾矿砂路基的稳定性, 但加大了路基的不均匀沉降。

(3) 设置包边土和铺设土工格栅的路基加固措施对提高边坡稳定性的效果比抑制沉降的效果明显。

(4) 本文仅分析了一定填方高度下不同工况路基的沉降和稳定性, 尚未计算不同填方高度对路基性能的影响, 且未分析同一工况不同设计参数(如包边土厚度、土工格栅铺设间距等)对路基沉降和稳定性的影响。因此, 下一步应全面深入研究路基断面尺寸和不同加固方案对铁尾矿砂路基性能的影响, 采用更加合理的计算模型进行参数敏感性分析, 并通过实体工程开展研究, 以评价数值分析的合理性, 为路基设计和施工提供理论参考, 并为充分贯彻“因地制宜、就地取材”的公路建设理念提供技术支撑。

参考文献:

References:

- [1] 孟跃辉,倪文,张玉燕. 我国尾矿综合利用发展现状及前景[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5): 4-9.
MENG Yue-hui, NI Wen, ZHANG Yu-yan. Current state of ore tailings reusing and its future development in China[J]. China Mine Engineering, 2010, 39(5): 4-9.
- [2] 朱欣然. 铁尾矿资源开发利用经济分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
ZHU Xin-ran. Economic analysis of exploitation and utilization of ore tailings[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [3] 薛建华. 铁尾矿砂在土木工程建造领域中的再生利用分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
XUE Jian-hua. Analysis on iron ore tailings recycling in construction field of civil engineering[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [4] GHOSH J, MONDAL A K, SINGH N E, et al. Evaluation of iron ore tailings for the production of building materials[J]. Industrial Ceramics, 2011, 31(2): 115-119.
- [5] SCHNAID F, BEDIN J, CORTE C. Evaluation of the geotechnical behavior of iron ore tailings dams using piezocone test[J]. Solose Rochas, 2006, 29(3): 391-394.
- [6] NORLAND M R. The effect of organic residues on

- the stabilization of coarse iron ore tailing materials [C]//SINGHAL R K, MEHROTRA A K. Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production. Rotterdam; Balkema, 1992: 495-513.
- [7] YU Lei, ZHANG Jin-xi, MU Kai. Relationships between compressive strength and microstructure in mortars with iron ore tailings as fine aggregate[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 188: 211-218.
- [8] 杨青. 无机结合料稳定铁尾矿砂的路用性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
YANG Qing. Research on pavement performance of iron tailings sand stabilized with inorganic binder[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [9] VELASQUEZ R, TUROS M, MOON K H, et al. Using recycled taconite as alternative aggregate in asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(9): 3070-3078.
- [10] 陈士忠, 时正武, 刘岩, 等. 水泥固化剂稳定铁尾矿砂路用性能研究[J]. 低温建筑技术, 2013(5): 8-10.
CHENG Shi-zhong, SHI Zheng-wu, LIU Yan, et al. Research on pavement performance of iron ore tailings stabilized with cement[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013(5): 8-10.
- [11] YISA G L, SANI J E. Reliability estimate of strength characteristic of iron ore tailing stabilized lateritic soil for road pavement sub-base materials[J]. Engineering Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 4177-4192.
- [12] 王兴义. 铁尾矿砂水泥混凝土路用性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
WANG Xing-yi. Research on pavement performance of iron ore tailings cement concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [13] 易龙生, 万磊, 汪洲. 金山店铁尾矿用作路基材料的研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(4): 88-91.
YI Long-sheng, WAN Lei, WANG Zhou. Application research of Jinshandian's iron tailings as subgrade materials [J]. Mining Research and Development, 2014, 34(4): 88-91.
- [14] 张铁志, 吴进. 铁尾矿砂在沥青混合料中的路用性能研究[J]. 公路, 2015(6): 207-210.
ZHANG Tie-zhi, WU Jin. Pavement performance of iron ore tailings asphalt mixture[J]. Highway, 2015(6): 207-210.
- [15] 易龙生, 李行, 齐莉娜, 等. 铁尾矿用于路面基层材料的研究进展及前景[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(10): 27-32.
YI Long-sheng, LI Hang, QI Li-na, et al. Research progress and application prospect of iron tailings for pavement base material[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(10): 27-32.
- [16] 肖力光, 伊晋宏, 崔正旭. 国内外铁尾矿的综合利用现状[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2010, 27(4): 22-26.
XIAO Li-guang, YI Jin-hong, CUI Zheng-xu. Iron tailings comprehensive utilization at home and abroad [J]. Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering, 2010, 27(4): 22-26.
- [17] 王海英, 常肖, 阮祺. 基于等间距修正拓展双曲线法的垃圾填埋路基沉降预测分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(6): 41-45.
WANG Hai-ying, CHANG Xiao, RUAN Qi. Settlement prediction of subgrade filled with construction waste based on equal-interval modified and extended hyperbolic method[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(6): 41-45.
- [18] 殷成胜. 低液限粉土路基碾压施工技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(5): 52-55.
YIN Cheng-sheng. Research on compaction technology for low liquid limit silt subgrade[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2015, 32(5): 52-55.
- [19] 雷剑, 王朝辉, 高志伟, 等. 高速公路煤矸石路基包边土厚度分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(1): 21-25, 58.
LEI Jian, WANG Chao-hui, GAO Zhi-wei, et al. Analysis on tipping soil thickness of coal gangue subgrade under freeway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(1): 22-25, 58.
- [20] 陈鹏, 徐博侯. 顺层岩质路堑边坡稳定性数值极限分析[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 38-45.
CHEN Peng, XU Bo-hou. Numerical limit analysis of stability for bedding rock cutting slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 38-45.