

文章编号:1006-2106(2013)07-0001-05

黄土隧道明洞段临时边坡合理坡型研究^{*}

程文斌¹ 江新照^{2**}

(1. 中铁三局集团有限公司, 太原 030006; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要:研究目的:针对郑西客运专线函谷关隧道出口明洞段黄土临时边坡施工,为防止边坡滑塌,必须采取合理的开挖坡型,才能确保在无支护情况下边坡开挖安全、经济。

研究结论:通过数值计算,分析黄土边坡开挖过程中应力调整规律,监测坡体临空面及坡体内部的位移变化特征,分析不同的开挖边坡型式对开挖边坡稳定性的影响。结果表明:(1)直立边墙的存在对开挖边坡的稳定性不利,最大位移出现在直立边墙的顶部;(2)有直立边墙存在时,边坡的整体稳定性不仅受边坡的开挖深度影响,同时还受与直立边墙相邻的二级边坡坡比的影响,当边坡开挖深度相同时,二级边坡坡比越小,开挖边坡的整体稳定性越大;(3)采用直立边墙高 9 m,二级坡比 1:1 的直线形边坡,确保了郑西客专函谷关隧道出口明洞段黄土临时高边坡开挖施工安全。该研究成果可为黄土地区类似高陡边坡施工与设计提供科学依据。

关键词:黄土;边坡;坡型;数值分析

中图分类号:U213.1+3;U215.7 **文献标识码:**A

Study on Reasonable Slope Shape of Temporary Slope in Open Cut Area of Loess Tunnel

CHENG Wen-bin¹, JIANG Xin-zhao²

(1. China Railway No.3 Engineering Group Co. Ltd, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 2. China University of Mining And Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Research purposes: In order to ensure the slope safety during excavation under the condition of no supporting, save the cost and prevent the slope collapse, the reasonable excavation slope shape should be selected for the temporary slope in the open cut exit of the Hanguan Tunnel of the Zhengzhou - Xi'an High-speed Railway.

Research conclusions: By doing the numerical calculation, the analyses of the stress change regulation and the influence of the slope shape on the loess slope stability were made to monitor the displacement variation characteristics of the empty surface and internal parts of the slope body. The result showed: (1) The upright side wall was harmful to the slope stability, and the maximum displacement appeared on the top of the upright side wall. (2) The overall stability of the slope with the upright sidewall is not only affected by the slope of the excavation depth, but also by the slope ratio of the secondary slope adjacent to upright sidewall. When the slope excavation depths were the same, the small the slope ratio of secondary slope was and the better the overall stability of the excavation slope was. (3) To ensure the excavation safety of the temporary loess slope in the open cut exit of the Hanguan Tunnel of the Zhengzhou - Xi'an High-speed Railway, the straight slope was used, with the upright sidewall height of 9m and the secondary slope ratio of 1:1. The research results can provide the scientific basis for the similar works.

Key words: loess; slope; slope shape; numerical analysis

* 收稿日期:2013-01-21

** 作者简介:程文斌,1976 年出生,男,高级工程师。

1 工程概况

郑西客专函谷关隧道位于河南省灵宝市函谷关附近,隧道全长 7 851 m,最大埋深 220 m,开挖断面达 164 m²,是我国目前最长及断面最大的黄土隧道。隧道出口明洞段位于灵宝市稠桑村附近,属黄土台塬及斜坡地带,高程 370~590 m,相对高差近 220 m。地形起伏较大,自然横坡 10°~35°,横向冲沟发育。隧道出口明洞段中心里程 DK 278+046,明洞段全长 432 m,临时边坡高度最高达 28 m。隧道出口段均采用明挖法施工。本文研究的开挖临时边坡位于隧道出口明洞段 DK 277+940 里程处。左侧(面向大里程,以下同)

边坡高程为 384 m,右侧边坡高程为 375 m,底部高程为 356 m;左侧最大开挖深度 28 m,右侧最大开挖深度 19 m,底部宽 16 m。坡体右侧距开挖中心线 30 m 处发育一冲沟,冲沟宽约 5 m,深约 18 m。在隧道中心 DK 277+940 里程处,冲沟延伸方向与隧道走向基本平行。由于冲沟发育,边坡开挖后右侧单薄土体宽约 6 m。

隧道出口明洞段临时开挖边坡涉及到的主要地层为上更新统风积与冲积(Q_3^{col+al})黄土与中更新统(Q_2)黄土,根据地层新老关系由地表向下分为 4 层,其特征如表 1 所示。

表 1 黄土临时开挖边坡土体物理力学参数

层号	体积模量 K /Pa	剪切模量 G /Pa	内摩擦角 φ /(°)	内聚力 c /Pa	密度 ρ /(kg/m ³)	含水率 ω /%	孔隙比 e
黄土 L ₁	1.03×10^7	3.55×10^6	26.1	2.75×10^4	1540	8.5	1.024
黄土 L ₂	1.67×10^7	5.56×10^6	29.7	3.01×10^4	1 580	8.7	1.022
黄土 L ₃	1.89×10^7	6.04×10^6	31.3	3.48×10^4	1 743	10.8	1.025
黄土 L ₄	2.38×10^7	7.93×10^6	33.0	4.50×10^4	2 000	20.0	0.630

2 有限元模拟方案

在室内测试黄土物理力学性质的基础上,应用 FLAC 数值计算软件,建立边坡开挖有限差分模型,模拟边坡开挖过程,计算边坡中的位移、应力变化规律,评价边坡的稳定性与安全度。在确定开挖边坡型式的数值分析计算过程中,尽可能考虑坡比的变化,坡体中节理的发育,以及自然冲沟等影响因素。

考虑现场开挖施工采用的边坡型式,可建立 5 种边坡开挖的基本模型,用于数值计算,分析不同开挖边

坡型式对边坡稳定性的影响。这 5 种基本类型是:直线形边坡(A);折线形边坡(B);阶梯小平台边坡(C);阶梯大平台边坡(D);特殊类型边坡(E)。根据 5 种边坡开挖的基本模型,并考虑边坡顶部是否有垂直卸荷节理发育,边坡右侧是否有冲沟发育,以及边坡右侧土体物理力学参数降低等因素,可将 B 模型进一步细分为 B-1、B-2 两种工况类型,E 模型进一步细分为 E-1、E-2、E-3 三种工况类型,具体类型如表 2 所示。

表 2 边坡开挖模拟类型及其参数

模型分类			边坡参数					
			左侧高度/m	右侧高度/m	边墙高度/m	底部宽度/m	模拟坡比	平台宽度/m
A	边坡顶部无节理	-	19	10	9	16	1:1	-
B	边坡顶部无节理	B-1	19	10	9	16	1:1;1:0.75	-
	边坡顶部有节理	B-2	19	10	9	16	1:1;1:0.75	-
C	边坡顶部无节理	-	19	10	9	16	1:0.75	2
D	边坡顶部无节理	-	19	10	9	16	1:0.75	4
E	边坡顶部无节理	E-1	33	24	0	16	1:0.75	-
	右侧边坡外侧无冲沟	E-2	19	10	9	16	1:1;1:0.75	-
	右侧边坡强度参数折减	E-3	19	10	9	16	1:1;1:0.75	-

计算模型边界为:模型左边界距边坡开挖中心线 90 m,右边界以边坡右侧发育的冲沟中部为界,模型底部边界距开挖底部 25 m。以此为界,数值分析计算模型的网络节点数为 155(i) \times 60(j)。

3 计算结果分析

以 A 模型为例进行结果分析,开挖边坡左侧坡比为 1:1,开挖高度为 19 m;右侧坡比为 1:1,开挖高度为 10 m;直立边墙墙高 9 m;边坡底部宽 16 m(图 2)。

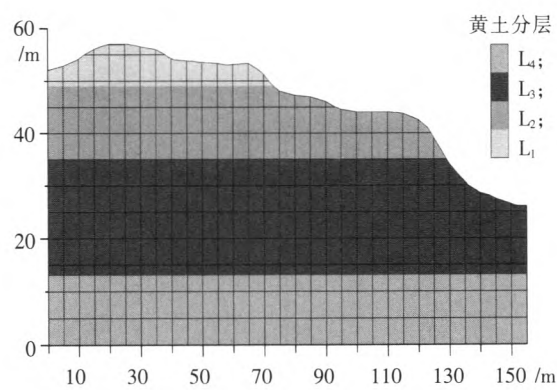


图 1 FLAC 有限差分模型图

本文规定开挖边坡水平位移向右为正,垂直位移向下为正。通过绘制边坡开挖过程中各监测点的位移变化曲线图、临空面位移变化曲线图、塑性区破坏分布图、边坡位移矢量图,以及达到极限开挖深度时边坡应力分布图,分析边坡开挖过程中位移变化及应力分布规律。

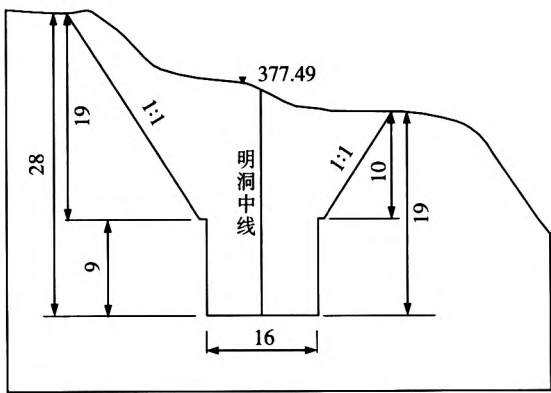


图 2 A 模型边坡开挖模型图(单位:m)

为分析坡体内部随开挖深度的增加其位移变化规律,在坡体内部选取具有代表性的 5 排监测点,共计 16 个。其中在左侧边坡的坡体上部、坡体中部、坡体下部各选取了 3 排监测点;在右侧边坡的坡体上部、坡体中部、坡体下部选取了 2 排监测点。为分析边坡底部随开挖深度增加而出现的垂直卸荷回弹特征,在边坡底部 1 m、2 m、3 m 深度范围内选取了 3 排卸荷回弹监测点,监测点间距 2 m,梅花型布置(图 3)。由于开挖边坡底部的卸荷回弹主要表现为边坡底部出现明显的底鼓现象,数据表现为监测点垂直位移增加(向上为正),因此本文在分析边坡底部卸荷回弹时,将监测点的垂直位移值作为监测点的卸荷回弹值。

3.1 应力分布

根据数值计算结果,采用直线形边坡,边坡开挖结束后,边坡最大主应力(σ_1)、最小主应力(σ_3)及剪应力(τ_{xy})分布特征分别如图 4 ~ 图 6 所示。

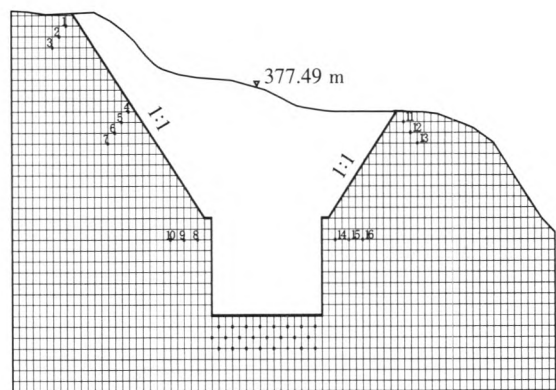


图 3 监测点位置示意图

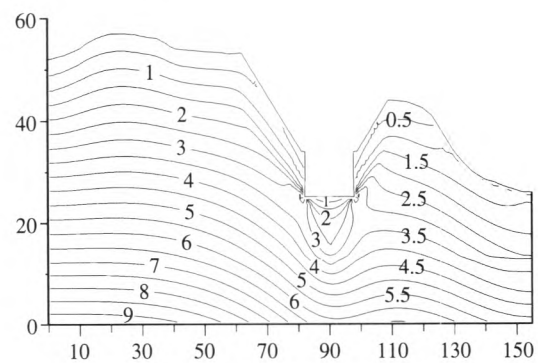


图 4 边坡开挖结束后最大主应力等值线图(单位:10² kPa)

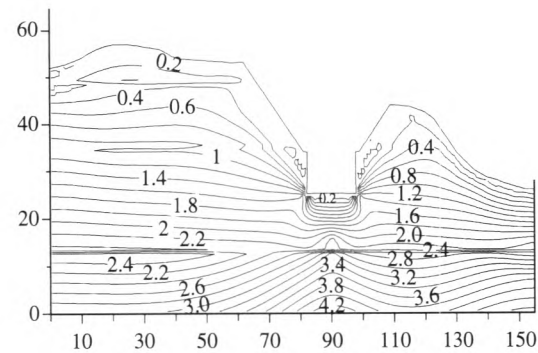


图 5 边坡开挖结束后最小主应力等值线图(单位:10² kPa)

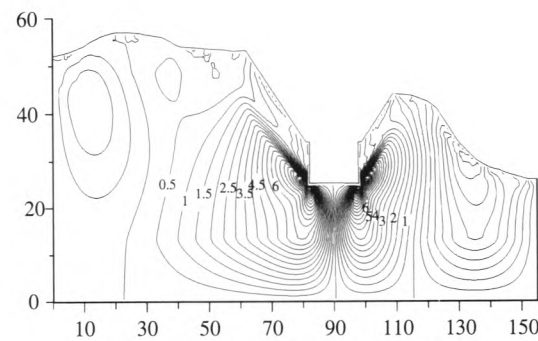


图 6 边坡开挖结束后剪应力等值线图(单位:10² kPa)

由图4~图6可见,在开挖坡脚附近范围内,最大主应力及剪应力出现一明显的应力集中梯度带,特别是 τ_{xy} 集中程度可达到0.12 MPa,与坡体其余部位相同深度内 τ_{xy} 值相差50~60 kPa。

3.2 位移特征及塑性区

边坡开挖过程中,坡体内部各监测点水平位移随开挖深度增加的变化规律如图7所示。左、右边坡同一高度的5、6、7号监测点与11、12、13号监测点,以及8、9、10号监测点与14、15、16号监测点,其水平位移随开挖深度的增加而变化的规律如图8所示。

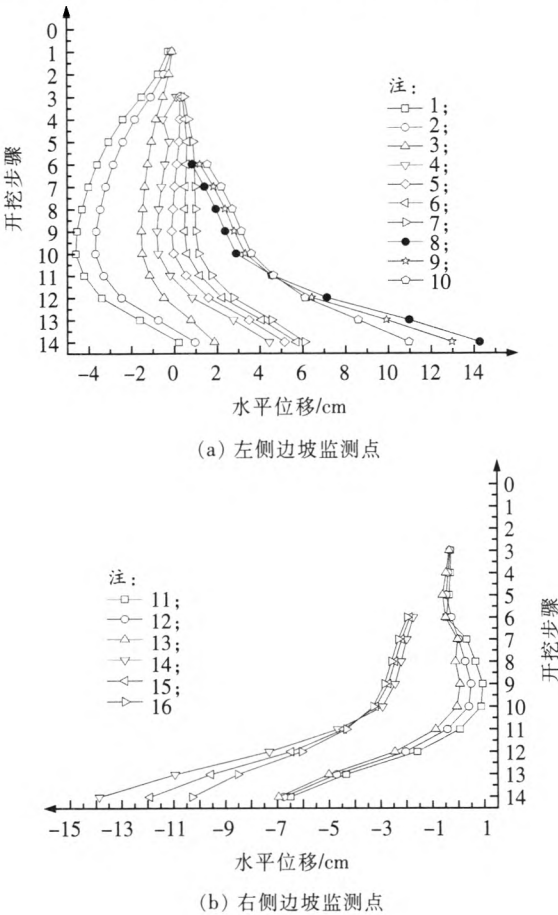


图7 边坡内部监测点水平位移变化曲线

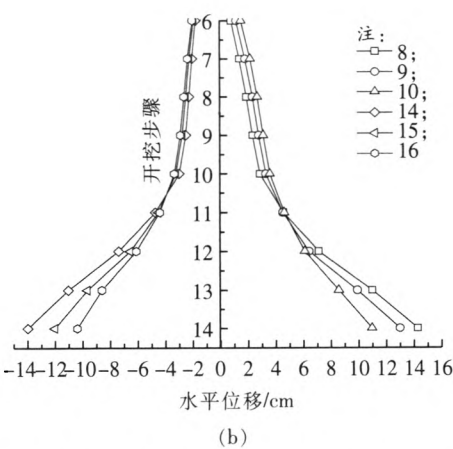
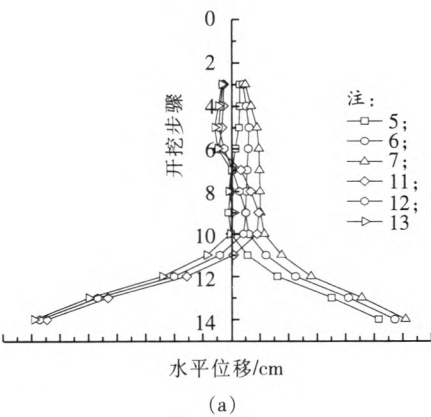


图8 左、右边坡同深度监测点水平位移随开挖深度变化对比

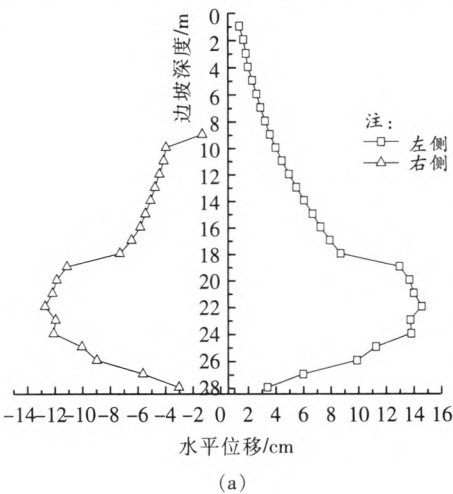
由图7~图8可见:

- (1)边坡开挖过程中,随开挖深度的增加,左、右边坡两侧各监测点的水平位移不断增加,且监测点水平位移增加速度逐渐加快,其中,当边坡开挖到下部直立边墙部位时,各监测点的水平位移增加最快;
- (2)边坡开挖过程中,随开挖深度的增加,左、右边坡最大水平位移均出现在直立边墙最外侧的监测点上,即左侧边坡最大水平位移出现在8号监测点,右侧边坡最大水平位移出现在14号监测点;
- (3)对比同一深度的监测点位移发现,左侧边坡各排监测点位移量均较右侧边坡各排监测点位移量大。

边坡开挖结束后,边坡临空面的水平位移、垂直位移变化特征如图9所示;边坡塑性区分布如图10所示;边坡位移矢量特征如图11所示。

综合分析图9~图11,可知:

- (1)开挖结束后,边坡最大位移出现在开挖深度22 m处,即上部边坡坡脚与直立边墙顶部接触部位;
- (2)开挖结束后,左侧边坡的最大水平位移为24.79 cm,右侧边坡的最大水平位移为23.45 cm。说明边坡高度越大,开挖结束后,边坡的水平位移越大;



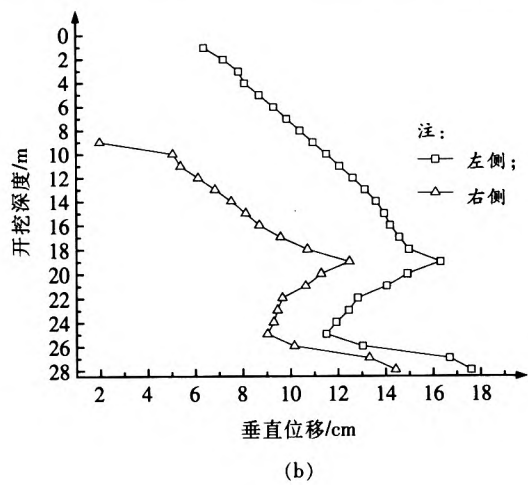


图 9 边坡开挖结束后临空面位移—深度曲线图

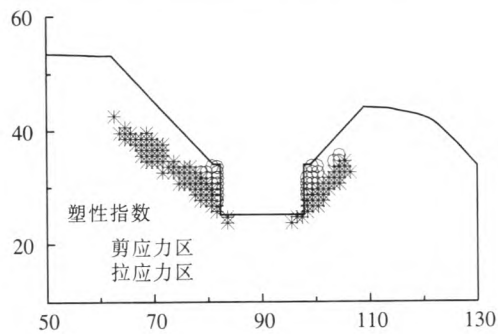


图 10 边坡达到极限开挖深度时塑性区分布图

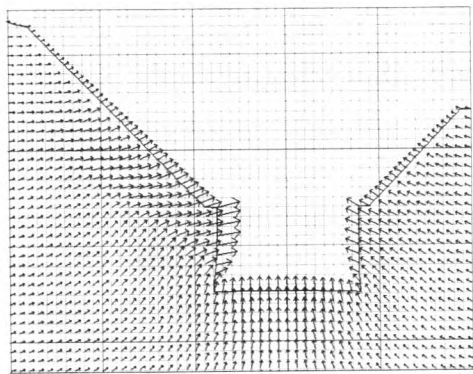


图 11 边坡达到极限开挖深度时位移矢量图

- (3) 开挖结束后,塑性破坏区的延伸长度在左侧边坡明显大于右侧边坡,左右边坡直立边墙的顶部均出现了拉应力集中区;
- (4) 开挖结束后,边坡的位移在直立边墙的顶部出现一个明显的陡增折点。

上述现象说明,在有直立边墙的直线形边坡进行开挖时,边坡高度越大,边坡的整体稳定性越小。直立边墙的顶部是开挖边坡变形破坏的薄弱部位。直立边墙的存在大大降低了边坡的整体稳定性。

3.3 边坡底部卸荷回弹

随着开挖深度的逐渐增加边坡底部出现明显的拱形卸荷回弹现象。由边坡底部卸荷回弹监测点的监测数据,得到边坡底部第一排监测点卸荷回弹值随开挖深度的变化曲线(图 12),以及开挖结束后边坡底部共三排监测点卸荷回弹变化曲线(图 13)。

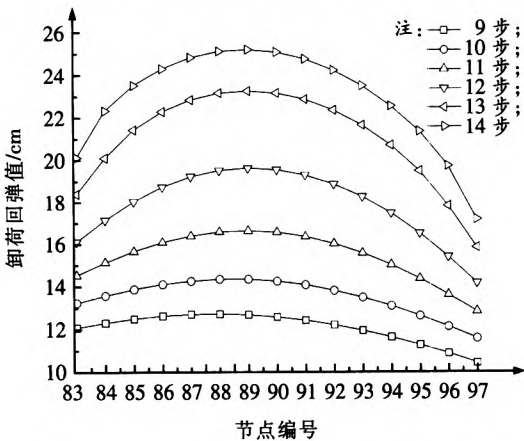


图 12 边坡底部第一排监测点卸荷回弹变化曲线图

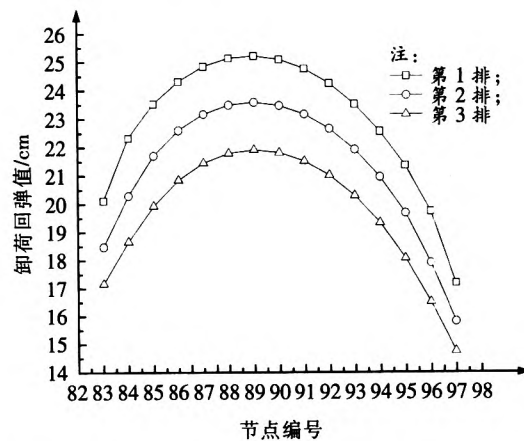


图 13 边坡底部三排监测点卸荷回弹变化曲线图

由图 12、图 13 可知:

- (1) 当边坡开挖到第 9 步时,即开挖深度达到 19 m 时,边坡底部出现明显的卸荷回弹现象(图 11);随开挖深度的增加,其卸荷回弹值也在增加,但边坡底部中间部位回弹值的增加速度大于两侧回弹值的增加速度;
- (2) 开挖结束后,边坡底部卸荷回弹曲线呈拱形,回弹值在中部比两侧大;同一排监测点中,回弹值在左侧比右侧大;不同深度的卸荷回弹监测点中,靠近临空面的卸荷回弹值大于深处卸荷回弹值。

4 结论

通过对边坡开挖的 8 种基本模型 14 种工况(不同坡型、开挖边坡右侧有无自然冲沟、右侧边坡有无垂直

(下转第 69 页)

- GB 50299—1999, Code for Construction and Acceptance of Metro Engineering (Version 2003) [S].
- [6] 铁道部第三设计院. 道岔设计手册 [K]. 北京:人民铁道出版社, 1975.
- The 3rd Railway Design Institute. Turnout Design Handbook [K]. Beijing: People's Railway Press, 1975.
- [7] 刘语冰. 道岔结构和设计 [M]. 北京:人民铁道出版社, 1974.
- Liu Yubing. Turnout Structure and design [M]. Beijing: People's Railway Press, 1974.
- [8] 于春华. 轨道论文集 [M]. 沈阳:沈阳出版社, 2007.
- Yu Chunhua. Track memoir [M]. Shenyang: Shenyang Publishing House, 2007.
- [9] 于春华, 刘道通. 地铁 3.4m 线间距单渡线总体方案研究 [J]. 铁道工程学报, 2006(9): 68–72.
- Yu Chunhua, Liu Daotong. Research on Overall Program of Laying Single Crossover with 3.4m Distance between Centers of Lines for Metro [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(9): 68–72.
- [10] GB 50157—2003, 地铁设计规范 [S].
- GB 50157—2003, Discussion about Some Items of Code for Design of Metro [S].
- *****

(上接第 5 页)

卸荷节理以及节理位置及发育深度不同) 类型, 进行数值分析计算, 得到的结论如下。

(1) 当工程地质条件相同时, 边坡的开挖深度越大, 位移越大, 整体稳定性也就越小。边坡开挖过程中最大位移出现在开挖边坡的中部; 有直立边墙坡型的模型, 最大位移出现在直立边墙的顶部。直立边墙的存在对开挖边坡的稳定性不利。

(2) 有直立边墙存在时, 边坡的整体稳定性不仅受边坡的开挖深度影响, 同时还受与直立边墙相邻的二级边坡坡比的影响。当边坡开挖深度相同时, 二级边坡坡比越小, 开挖边坡的整体稳定性越大。

(3) 开挖边坡右侧垂直卸荷节理的发育, 大大降低了右侧边坡的整体稳定性。垂直卸荷节理的发育增加了右侧边坡的垂直位移, 加剧了右侧边坡的下滑趋势, 降低了右侧边坡的整体稳定性。右侧边坡垂直卸荷节理的发育是右侧边坡发生失稳破坏的一个重要原因。

(4) 开挖边坡右侧自然冲沟的发育大大降低了右侧边坡的整体稳定性。自然冲沟的发育增加了右侧边坡的水平位移, 扩大了右侧边坡的塑性破坏范围, 增加了右侧边坡底部的卸荷回弹值。冲沟的发育也是右侧边坡发生失稳破坏的一个重要原因。

(5) 各类模型边坡开挖过程中, 坡脚为剪应力集中区, 坡度越陡, 坡脚剪应力集中程度越高, 边坡极限开挖深度越小。随着边坡开挖深度的增加, 剪应力在坡脚集中程度提高, 并逐渐向坡体上部及内部发展。当土体自身承受的上部土体自重压力超过土体自身弹性极限时, 土体进入塑性破坏阶段。塑性破坏首先出现在坡脚, 并随着剪应力逐渐向坡体上部及内部延伸, 与坡顶拉应力集中区共同构成边坡破坏时的潜在滑移面。

(6) 黄土临时边坡开挖, 在无支护的情况下, 无直立边墙的特殊类型坡型 (E-1 模型) 较其它类型边坡稳定, 边坡安全系数最大。但开挖量及临时占地明显增加, 综合考虑安全及经济因素, 在黄土隧道明洞段临

时开挖边坡中建议不采用此种类型的边坡作为放坡型式。当有直立边墙时, A 模型边坡极限开挖深度最大。当开挖深度相同时, A 模型边坡安全系数最大, 边坡位移变形量最小。建议函谷关隧道明洞段黄土临时开挖边坡, 采用 A 类直线形边坡作为开挖坡型, 边坡整体稳定性最高。

参考文献:

- [1] 中铁三局集团有限公司, 西南交通大学. 郑西客运专线黄土高陡边坡变形机理及施工关键技术研究 [R]. 太原: 中铁三局集团有限公司, 西南交通大学, 2009.
- The Third Engineering Group Co. Ltd. of China Railway, Southwest Jiaotong University. Deformation Mechanism and Key Construction Technology Research on Loess High Slope in Zhengzhou - Xi'an Passenger Dedicated Line [R]. Taiyuan: The Third Engineering Group Co. Ltd. of China Railway, Southwest Jiaotong University, 2009.
- [2] 王念秦, 罗东海, 姚勇. 铁路黄土高边坡变形破坏机理及稳定性研究 [J]. 铁道工程学报, 2009(7): 10–14.
- Wang Nianqin, Luo Donghai, Yao Yong. Research on the Deformation Failure Mechanism and Stability of High Loess Slope along Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(7): 10–14.
- [3] 伍俊, 郑全平. 复合土钉支护技术的有限元数值模拟及工程应用 [J]. 岩土工程学报, 2005(4): 388–392.
- Wu Jun, Zheng Quanping. Numerical Simulation in Finite Element and Engineering Application of Compound Soil Nail Support Technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(4): 388–392.
- [4] 于国新. 黄土及其边坡稳定的一些探讨 [J]. 铁道工程学报, 2011(6): 1–4.
- Yu Guoxin. Exploration on the Loess and the Stability of Slope [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(6): 1–4.

黄土隧道明洞段临时边坡合理坡型研究

作者: 程文斌, 江新照, CHENG Wen-bin, JIANG Xin-zhao
作者单位: 程文斌, CHENG Wen-bin(中铁三局集团有限公司, 太原, 030006), 江新照, JIANG Xin-zhao(中国矿业大学(北京), 北京, 100083)
刊名: 铁道工程学报 
英文刊名: Journal of Railway Engineering Society
年, 卷(期): 2013(7)

参考文献(4条)

1. 中铁三局集团有限公司;西南交通大学 郑西客运专线黄土高陡边坡变形机理及施工关键技术研究 2009
2. 王念秦;罗东海;姚勇 铁路黄土高边坡变形破坏机理及稳定性研究[期刊论文]-铁道工程学报 2009(07)
3. 伍俊;郑全平 复合土钉支护技术的有限元数值模拟及工程应用[期刊论文]-岩土工程学报 2005(04)
4. 于国新 黄土及其边坡稳定的一些探讨[期刊论文]-铁道工程学报 2011(06)

引用本文格式: 程文斌, 江新照, CHENG Wen-bin, JIANG Xin-zhao 黄土隧道明洞段临时边坡合理坡型研究[期刊论文]-铁道工程学报 2013(7)