

文章编号:1006-2106(2013)07-0011-05

递控式锚杆荷载传递规律的数值分析*

胡田飞^{1**} 朱本珍² 郑 静² 梁龙龙²

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100083; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

摘要:研究目的:既有高承载力锚杆普遍存在外锚结构物设计尺寸较大的问题,项目在研究荷载分散型锚杆基础上提出了一种边坡锚固新结构——递控式锚杆。采用三维显式有限差分法对其传力机制进行数值模拟研究。

研究结论:(1)锚杆受力时黏结段切应力不是均匀分布的,而是按单峰值指数曲线形式分布;递控式锚杆能将集中荷载分散成若干个较小的力作用于不同的滑体黏结段上,充分调用自由段自身的地层强度;(2)数值分析结果和定性分析、模型试验的结果基本吻合,表明数值模拟锚杆作用过程是可行的;(3)递控式锚杆克服了传统锚杆反力荷载全部由外锚结构物承担的缺陷,可有效减小反力结构尺寸;(4)该研究成果可应用于边坡加固和病害快速治理。

关键词:递控式锚杆;外锚结构物;黏结段;FLAC3D;切应力

中图分类号:U455.7+1 **文献标识码:**A

Numerical Analysis of Load Transfer Mechanism of Recursive Control Anchor

HU Tian-fei¹, ZHU Ben-zhen², ZHENG Jing², LIANG Long-long²

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Northwest Research Institute Co. Ltd of C. R. E. C, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Research purposes: Currently, the problem of the big size of external anchor structure often exists in the existing high strength anchors. On the basis of the study on the load dispersion-type anchors, a new structure of slope anchorage-recursive control anchor is presented and the 3-D explicit finite difference method is used for the numerical simulation and study on the load transfer mechanism of the recursive control anchor.

Research conclusions: (1) The shear stress in the bonding section is distributed in the light of exponential curve form of the single peak in stead of unevenly distributed form when the anchor is loaded. The recursive control anchor can disperse the concentrated load into several smaller loads on the different bonding sections among the sliding masses to make full use of the formation strength of the free segment. (2) The results of numerical simulation are basically consistent with the results of the qualitative analysis and model test. It shows that the numerical simulation of the anchor action process is feasible. (3) The recursive control anchor can overcome the traditional anchor's shortcoming that the counter-force load is entirely borne by external anchor structure and can reduce the size of external anchor structure effectively. (4) The research results can be applied in the slope reinforcement and quick treatment of the disease.

Key words: recursive control anchor; external anchor structure; bonding section; FLAC3D; shear stress

* 收稿日期:2013-03-20

基金项目:科技部科研院所技术开发研究专项资金(2009EG123201)

** 作者简介:胡田飞,1988年出生,男。

随着我国基础设施的兴建,锚固技术广泛应用在边坡、隧道、地下洞室、基坑、坝体及抗倾、抗浮等工程建设中,是解决岩土工程稳定性问题经济、有效的方法之一^[1]。但在工程实践中,当岩土介质强度特性较低或设计锚固力较高时,传统结构形式的锚杆难以达到设计的锚固效果,因此锚杆锚固力的提高方法是目前一个重要的应用研究课题。其中基于荷载分段传递原理研发的的压力和拉力分散型锚杆将荷载分散传递到不同的地层深处,极大改善了锚杆的锚固性能^[2-3]。而锚固力提高衍生的问题是外锚结构物的尺寸也随之增大,影响锚固工程的造价和生态美观。鉴于此,中铁西北科学研究院在荷载分散型锚杆思路研发的递控式锚杆通过将锚杆自由段设计为若干个连续的黏结单元,利用被加固体地层(滑体或潜在滑动体)的自身锚固性能反向锚固,有效减小了外锚反力结构的尺寸。为完善递控式锚杆的理论研究,本文在定性分析的基础上,利用有限差分软件 FLAC3D 提出了模拟递控式锚杆的合理计算模型。通过数值计算分析了锚杆自由段地层的荷载传递规律,并与室内光弹试验进行了对比,结果一致。

1 递控式锚杆

递控式锚杆是一种单孔复合锚固形式的锚杆,包括至少两根锚筋和与锚筋端头固结的外锚结构物。作用原理是通过分段黏结将荷载分散到不同的地层深度,依靠孔壁界面不同深度同时出现的黏结应力反向锚固。与普通荷载分散型锚杆不同的是将穿越被加固体段的锚杆自由段沿长度方向设计为若干个黏结单元,每个黏结单元锚筋包括 1~3 根不设套管的钢筋或钢绞线黏结段,除黏结段外其余段为外设套管的无黏结段。各黏结单元的黏结段长度根据锚孔界面黏结强度、锚孔孔径和被加固体厚度确定。黏结段依次交错连续分布在不同的锚筋上,包括多种布置方式,其中一种结构形式如图 1 所示。

2 数值模拟方法

为明确单孔复合锚固形式锚杆自由段地层的荷载传递规律,本文分别对自由段全长黏结、部分黏结、复合黏结三种锚固形式锚杆的周围岩土体切应力分布规律进行分析计算。

2.1 网格模型

为准确模拟锚固过程并观察锚杆表面应力变化规律,本文采用实体单元模拟锚杆,建立板状计算模型。全长黏结式锚杆的自由段和锚固段一样灌浆黏结。自由段计算模型的几何尺寸为 19 cm × 25 cm × 1 cm,划

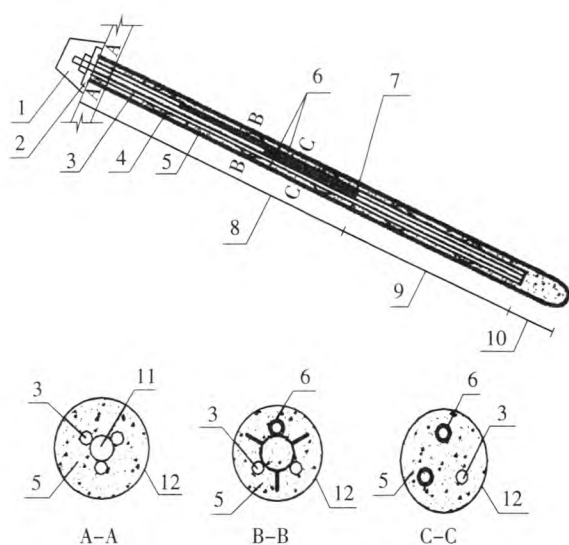


图1 递控式锚杆结构示意图

注: 1-混凝土封盖;2-反力钢板;3-锚筋;4-对中环;5-水泥砂浆;6-套管;7-套管端头封堵;8-自由段;9-锚固段;10-超钻段;11-螺帽;12-钻孔

分网格形式如图 2 所示。

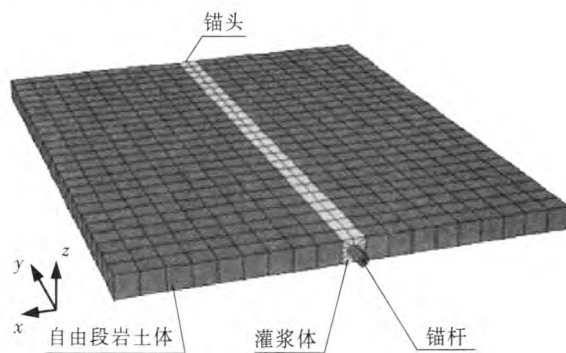


图2 全长黏结式锚杆计算模型

边界条件设置为模型左右(x 轴)边界 x 方向无位移,上下(z 轴)边界 z 方向无约束,前后(y 轴)边界 y 方向无约束。加载方式为前边界受到 y 向推力 100 kN,锚杆外伸处相应的反向荷载为 100 kN。

传统的预应力锚杆自由段结构形式为杆体经防腐处理后通过塑料套管与灌浆体隔开。部分黏结式锚杆计算模型的无黏结段采用锚杆与岩土体间没有灌浆体的简化处理方式,几何尺寸及网格划分形式与图 2 中全长黏结式锚杆相同,灌浆体长度缩短至 15 cm。递控式锚杆分段锚固在不同深度的自由段,将全长黏结和部分黏结的两个模型组合,形成如图 3 所示单孔复合锚固的结构形式,每根锚杆承担 50 kN 荷载。

2.2 材料本构模型及参数

锚杆变形认为在弹性范围内,实体单元定义为 Elás 弹性本构关系,灌浆体及岩土体定义为 Mohr - Coulomb 弹塑性本构关系。模型材料的物理力学参数

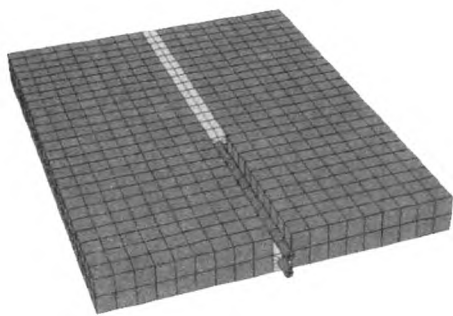


图 3 递控式锚杆计算模型

如表 1 所示。

表 1 模型中材料的计算参数

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 /MPa	内摩擦角 / $(^\circ)$
锚杆	210	0.25	7 850	—	—
灌浆体	21	0.23	2 600	1.6	42
岩土体	7	0.27	2 400	0.9	32

2.3 结构面模型及参数

采用两个不同性质的接触面单元分别模拟杆体 - 灌浆体和灌浆体 - 岩土体两个接触界面。Interface 单元的参数可以取接触面相邻区域“最硬”土层等效刚度的 10 倍^[4],即

$$k_n = k_s = 10 \max \left[\frac{(K + \frac{3}{4}G)}{\Delta z_{\min}} \right] \tag{1}$$

接触面模型参数如表 2 所示。

表 2 接触面模型的计算参数

接触面	切向刚度 / $(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	法向刚度 / $(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	黏聚力 /MPa	摩擦角 / $(^\circ)$
锚杆 - 灌浆体	15	15	5	25
灌浆体 - 岩土体	10	10	3	25

3 结果分析

3.1 数值计算结果分析

3.1.1 自由段全长黏结式锚杆

大量的锚杆破坏实例和理论研究表明锚杆在受荷时,不能将荷载均匀地作用于黏结段长度上,而是在近端出现严重的应力集中现象^[5]。全长黏结式锚杆周围地层切应力如图 4 所示。

由图 4 可知,自由段锚杆全长黏结时靠近滑面的土体切应力峰值位置后的切应力分布规律类似于逐渐趋于零的单峰值指数曲线形式,与理论分析和模型试验的结论一致^[6]。且图中锚杆近端 0~2 cm 范围内岩土体切应力基本为 0,峰值已离开锚杆近端,逐渐向深

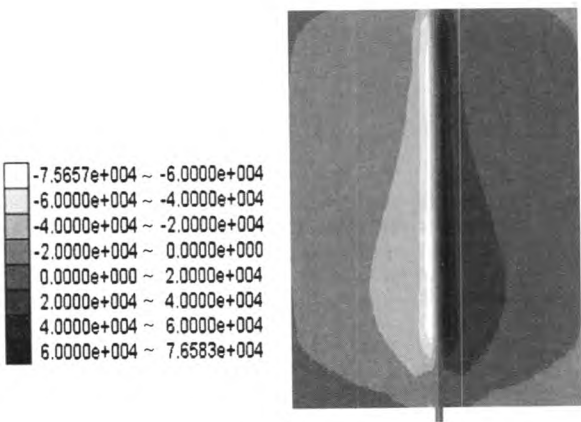


图 4 全长黏结式锚杆周围地层切应力云图

处传递,到达距荷载施加位置 7~8 cm 的位置。

图 5 为全长黏结式锚杆体轴向位移曲线。由图 5 可知,锚杆黏结段顶端变形量最大,沿杆体轴向逐渐减小。因此可以判断近端 0~2 cm 地层的锚孔黏结界面已拉裂破坏,3~6 cm 地层的锚孔黏结界面仅具有一些残余强度。这是由于组成锚固体系的杆体、灌浆体与岩土体的弹性力学参数及接触面黏结强度存在较大差异,弹性变形难以协调一致。当荷载传至锚固段长度最远端之前,锚固段前端灌浆体与岩土体界面的黏结应力已超出了极限值,从而导致灌浆体与岩土体界面上会出现黏结效应逐渐弱化或脱开的现象。在荷载达到极限值时,应力峰值传递到黏结段的远端。

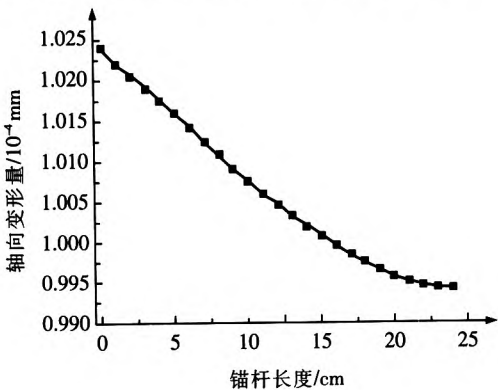


图 5 全长黏结式锚杆杆体轴向位移曲线

因此上述的渐进性破坏模式降低了锚杆周围岩土体强度的利用率,限制了自由段锚杆反向承载力的提高,并会引起锚杆蠕变的增加。

3.1.2 自由段部分黏结式锚杆

预应力锚杆自由段无黏结时,杆体与灌浆体没有黏结强度引起的剪切变形,起到的作用只是通过拉伸变形传递滑动荷载。因此自由段锚杆无黏结范围内周围滑体地层受剪切变形影响较小,只有靠近反力结构和滑面的土体由于变形产生一定的挤压和剪切应力。

部分黏结式锚杆周围地层切应力和轴向应力分别如图 6、图 7 所示。

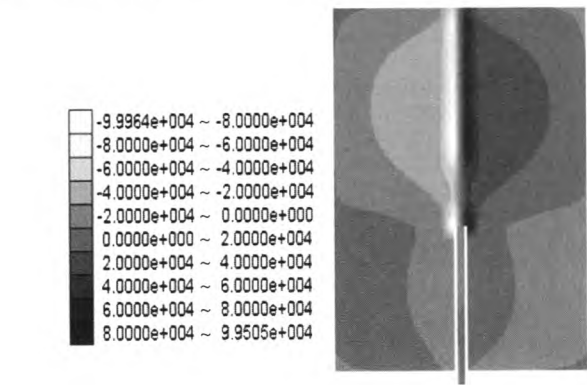


图 6 部分黏结式锚杆周围地层切应力云图

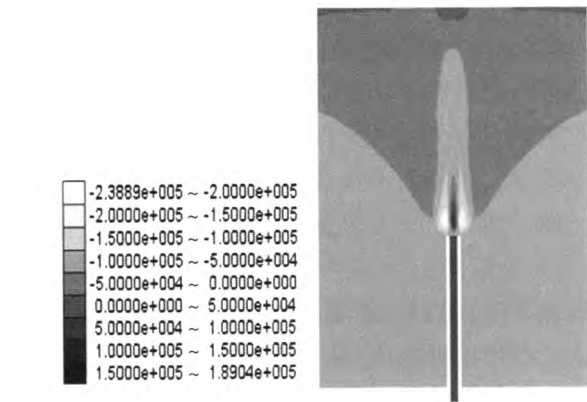


图 7 部分黏结式锚杆周围地层轴向应力云图

由图 6 可知,该锚杆黏结段地层应力分布形式与全长黏结式锚杆周围地层应力分布形式类似,只是由于锚固长度相对短,造成应力衰减速度较快,外锚结构物剩余荷载较大。未黏结段地层切应力较小,与定性分析结果一致,由于与锚杆界面无黏结,在荷载传递过程中界面剪切变形微小。

由图 7 可知,未黏结段锚杆只是通过轴向弹性伸长产生轴力将荷载完全传递至黏结段,并且黏结段近端产生应力集中现象。

提取锚杆黏结段轴向应力衰减数据,如图 8 所示,可知锚杆黏结段轴向应力的分布规律也类似于指数曲线形式,与文献[6]理论分析的结果一致。

3.1.3 递控式锚杆

荷载分散型锚杆安装时通过差异分步张拉,使各单元锚杆黏结段在锚头受拉时承受相同的荷载。即将较大的总拉力分散成几个较小的拉力荷载同时在按一定间距分布的黏结段上传递,使锚固段注浆体整体受拉变形,降低了注浆体与围岩孔壁间的剪应力峰值,提高了地层强度的利用率。递控式锚杆则基于这种原理把自由段锚杆也分段黏结,将外锚结构物承担的部分

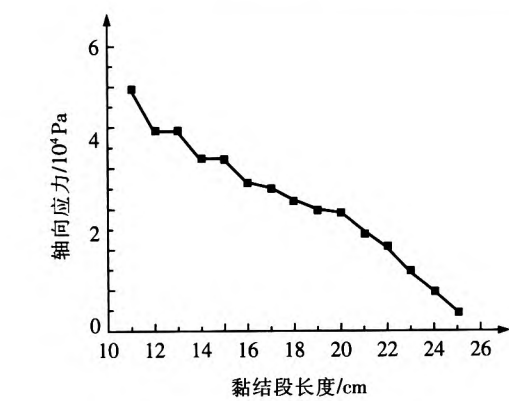


图 8 黏结段锚杆轴向应力分布曲线

荷载分散传递至自由段地层,受力时在自由段长度范围内产生应力响应。递控式锚杆周围地层切应力如图 9 所示。

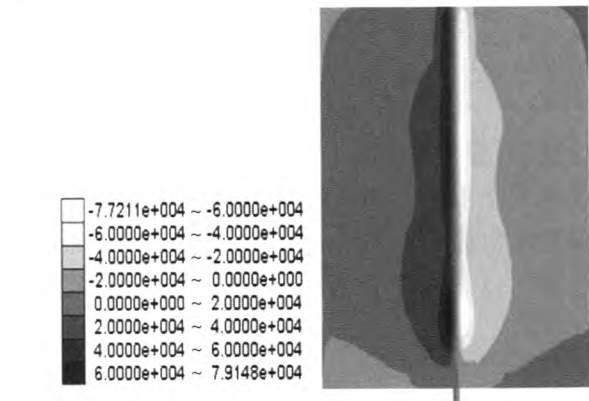


图 9 递控式锚杆周围地层切应力云图

由图 9 可知,分段黏结的锚杆受力时在自由段地层内出现了两个黏结应力峰值,增加了峰值的长度区间,改善了锚杆的应力分布形态,提高了锚杆的极限承载力。但应力分布并不是绝对均匀的,在不同深度黏结段近端还是存在应力集中现象,应力峰值则相比全黏结时降低,分布规律类似于双峰值指数曲线形式,与理论分析结果一致^[7]。

由此可推断,当在不同的锚筋上设置连续分布的多个黏结段时,在自由段地层的不同深度将出现多个应力峰值,有效调用整个自由段地层的抗剪强度。这样还减小了传递到外锚结构物的荷载,可将现浇式的框架或混凝土墩改为预制钢板等结构,实现对不稳定边坡、中小型边坡滑坡等的快速治理。

3.1.4 锚孔界面切应力分布对比分析

对比三种锚固形式锚杆灌浆体与岩土体界面应力分布规律,如图 10 所示。可知,相比自由段锚杆全长黏结和部分黏结两种形式的锚孔界面切应力分布曲线特征,递控式锚杆的应力分布曲线相对平缓均匀,且峰值最小。

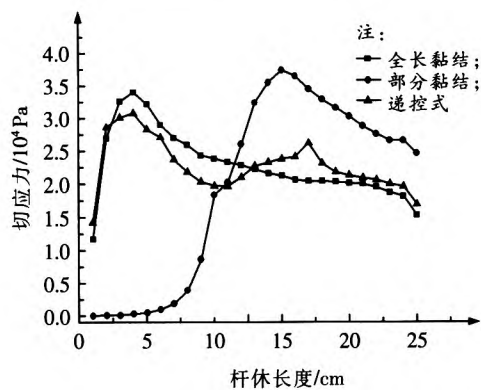


图 10 三种形式锚杆锚孔界面切应力分布曲线

曲线下方面积表示锚孔交界面的线黏结力 Q :

$$Q = \int_0^L \tau dy \tag{2}$$

式中 L ——锚杆长度。

与孔壁周长之积即为自由段地层提供的反向锚固力 P :

$$P = \pi d \cdot Q \tag{3}$$

式中 d ——锚孔直径。

计算图中各曲线下方面积,大小关系为:递控式锚杆 > 全长黏结式锚杆 > 部分黏结式锚杆。即在相同荷载下,递控式锚杆自由段地层提供的反向锚固力最大,对自由段地层的强度利用率最高,传递到锚头的荷载最小。

3.2 光弹试验结果的对比分析

项目根据递控式锚杆的结构特点,建立两根锚杆分段黏结的光弹试验模型。使用 WZF 型反射式光测弹性仪,测试拉拔荷载作用下杆体及其周围锚固区域的应力分布光谱图分布规律。试验模型尺寸与数值计算模型尺寸相同,采用 $\phi 6$ 铁丝模拟锚筋,玻璃胶模拟灌浆体,环氧树脂模拟岩土体,如图 11 所示。

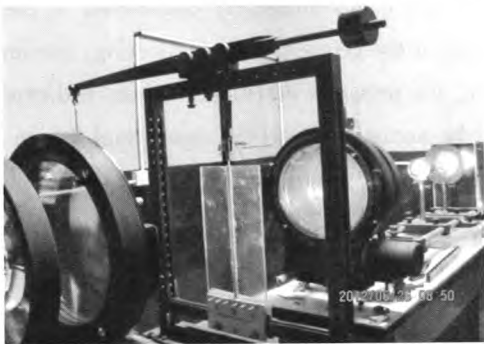


图 11 递控式锚杆室内光弹试验模型

施加荷载后,锚杆两个黏结段近端区域同时逐渐变亮,说明分段黏结的两根锚筋将拉拔荷载均匀分配,

并已通过界面黏结应力传递到周围区域。亮场逐渐扩大,说明荷载沿杆体轴向逐渐向黏结段远端传递。且靠近锚杆黏结段的区域亮度较高,亮度沿径向逐渐降低,说明同一高度区域的切应力沿径向逐渐变小。试验最后形成一条“葫芦状”的明暗分界线,如图 12 所示,表示杆周切应力分布范围,说明递控式锚杆周围应力分布类似于双峰值指数曲线形式。数值分析结果与室内光弹试验结果基本吻合,说明了数值分析的准确性。

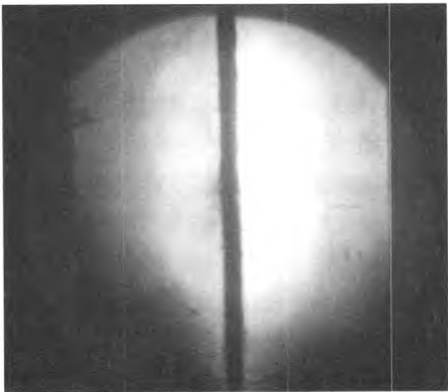


图 12 递控式锚杆光弹试验结果

因此,递控式锚杆充分利用了自由段内岩土体的抗剪强度,缓解了单锚产生的应力集中现象。可避免出现渐进性脱黏破坏产生的反力全部由外锚结构物承担的现象,防止反力结构附近应力集中,造成反力结构和附近土体的变形破坏,尤其适用于软岩和承载力较低的土体。递控式锚杆传递到锚头的荷载相对较小,外锚结构物可以灵活选择结构形式,缩短工期,实现对边坡病害抢险的快速治理。

4 结论

(1) 在定性分析的基础上,数值计算结果表明:全长黏结锚杆自由段切应力的分布规律类似于单峰值指数曲线形式;未黏结段锚杆仅起传递荷载的作用;递控式锚杆自由段切应力分布相对均匀,充分调用了整个自由段地层的抗剪强度。室内模型光弹试验验证了结果的准确性。

(2) 递控式锚杆是在荷载分散型锚杆结构形式思路发展的一种新型锚固结构。通过改进自由段锚杆黏结形式,克服了传统预应力锚杆和全长黏结锚杆自由段应力分布不合理的缺陷,有效利用被加固地层的自身锚固性能反向锚固,以减小反力结构而起到快速治理边坡病害作用。

(下转第 33 页)

5 道岔与区间线路刚度的过渡

道岔与区间线路的刚度不一致时,根据轨道整体刚度差引起的轨道挠曲变化率,考虑是否需要设置过渡段,一般可以设置 3~5 级过渡段,在刚度分级过渡时,刚度的级差不宜相同,在低刚度区域,级差应取较小值,而在高刚度区域级差可以适当增大。过渡段设置的长度一般为 0.5*v*(车辆 0.5 s 通过长度)距离。

6 结论

法国道岔刚度均匀化实现方法最简单,对道岔内刚度划分较粗,无需设置过渡段;德国通过硫化措施严格控制垫板的弹性,且刚度小、弹性高,根据各个节点分别计算各个区域硫化垫板的刚度,弹性垫板无论设计还是制造均复杂;我国客专道岔设计,根据道岔结构的不同对道岔划分了不同区域,根据不同结构区域进行有限元分析,通过硫化实现刚度均匀化。

道岔区刚度均匀化对高速铁路道岔的平顺性、安全性、舒适性及使用寿命尤为重要;目前掌握高速铁路道岔技术的中国、法国、德国均是通过调整板下橡胶垫板的刚度来实现刚度均匀化目的,虽然各国采取的具体方法各不相同,但是均实现道岔区刚度均匀化;我国高速道岔刚度均匀化的方法和措施,通过高速道岔上道动态检测和运营实践表明是合理的、可行的、可以生产实现的。

(上接第 15 页)

参考文献:

[1] 张乐文,汪稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002(5):627-631.

Zhang Lewen, Wang Ren. Research on Status Quo of Anchoage Theory of Rock and Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002(5):627-631.

[2] 程良奎,韩军. 单孔复合锚固法的理论和实践[J]. 工业建筑,2001(5):35-38.

Chen Liangkui, Han Jun. Theory and Practice of the Single Bore Multiple Anchor Method [J]. Industrial Construction, 2001(5):35-38.

[3] 郑静,朱本珍. 荷载分散型锚索差异补偿荷载的广义确定[J]. 铁道工程学报,2008(1):44-47.

Zheng Jing, Zhu Benzhen. The Method of Generally Determining Differential Compensative Load for Scatteredload Anchor Rope [J]. Journal of Railway Engineering Society,2008(1):44-47.

[4] 孙书伟,林杭,任连伟. FLAC 3D 在岩土工程中的应用

参考文献:

[1] 何华武. 无碴轨道技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2005.

He Huawu. Ballastless Track Technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

[2] 王平. 高速铁路道岔设计理论与实践[M]. 成都:西南交通大学出版社,2011.

Wang Ping. Design Theory and Practice for High-speed Railway Turnouts [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011.

[3] 赵国堂. 高速铁路无碴轨道结构[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.

Zhao Guotang. High-speed Railway Ballastless Track Structure [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.

[4] 卢祖文. 客运专线铁路轨道[M]. 北京:中国铁道出版社,2005.

Lu Zuwen. Railway Track for Passenger Dedicated Line [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

[5] 陈小平,王平,张瑶. 250km/h 客运专线无砟道岔的合理轨道刚度[J]. 铁道工程学报,2010(7):25-28.

Chen Xiaoping, Wang Ping, Zhang Yao. The Reasonable Stiffness of Ballastless Track Turnout of 250 km/h Passenger Dedicated Line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(7):25-28.

[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

Sun Shuwei, Lin Hang, Ren Lianwei. FLAC 3D Used in GeotechnicalEngineering[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2011.

[5] 尤春安,高明,张利民,等. 锚固体应力分布的试验研究[J]. 岩土力学,2004(S):63-66.

You Chunan, Gao Ming, Zhang Limin, etc. Experimental Research on Stress Distribution in Anchorage Body [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004 (S):63-66.

[6] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000(3):339-341.

You Chunan. Stress Analysis of Wholly Grouted Anchor [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(3):339-341.

[7] 尤春安. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005(6):925-928.

You Chunan. Distributing Characters and Analysis of Stresses in Prestressed Cables [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005(6):925-928.

递控式锚杆荷载传递规律的数值分析

作者：[胡田飞](#), [朱本珍](#), [郑静](#), [梁龙龙](#), [HU Tian-fei](#), [ZHU Ben-zhen](#), [ZHENG Jing](#), [LIANG Long-long](#)

作者单位：[胡田飞, HU Tian-fei \(中国铁道科学研究院, 北京, 100083\)](#), [朱本珍, 郑静, 梁龙龙, ZHU Ben-zhen, ZHENG Jing, LIANG Long-long \(中铁西北科学研究院有限公司, 兰州, 730000\)](#)

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(7条)

- [张乐文;汪稔](#) [岩土锚固理论研究之现状](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2002 (05)
- [程良奎;韩军](#) [单孔复合锚固法的理论和实践](#)[期刊论文]-[工业建筑](#) 2001 (05)
- [郑静;朱本珍](#) [荷载分散型锚索差异补偿荷载的广义确定](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008 (01)
- [孙书伟;林杭;任连伟](#) [FLAC 3D在岩土工程中的应用](#) 2011
- [尤春安;高明;张利民](#) [锚固体应力分布的试验研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2004 (S)
- [尤春安](#) [全长黏结式锚杆的受力分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2000 (03)
- [尤春安](#) [预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2005 (06)

引用本文格式：[胡田飞](#). [朱本珍](#). [郑静](#). [梁龙龙](#). [HU Tian-fei](#). [ZHU Ben-zhen](#). [ZHENG Jing](#). [LIANG Long-long](#) [递控式锚杆荷载传递规律的数值分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2013 (7)