

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.01.010

# 隧道内预埋槽道的有限元分析及结构优化研究\*

杨福芹,王学志,万 震

(青岛科技大学 机械工程学院,山东 青岛 266061)

**摘要:**针对预埋槽道技术受到国内各施工单位的重视并被逐渐采用,但是存在理论研究滞后于工程实际应用的问题,以某预埋槽道为研究对象,进行了有限元分析和结构优化研究。通过对预埋槽道的有限元计算模型进行了承载力分析,得出了预埋槽道的两种加载方式下的应力应变云图,然后基于 ANSYS 软件,对预埋槽道进行了结构尺寸优化设计。研究结果表明:两种加载方式下预埋槽道的受力和变形仿真分析结果显示预埋槽道的变形量和等效应力都较大,尺寸优化后预埋槽道质量减小 6%,最大变形值减少 30%,减轻了重量,提高了预埋槽道的承载能力。

**关键词:**预埋槽道;有限元分析;结构优化设计

**中图分类号:**TH122;U238

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2019)01-0044-03

## Finite element analysis and structural optimization of pre-buried channel in tunnel

YANG Fu-qin, WANG Xue-zhi, WAN Zhen

(School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the pre-buried channel was used by the construction unit of the domestic and adopted gradually, but its theoretical research lagged behind the practical application of the project, the under construction of pre-buried channel was researched, and the finite element analysis and structural optimization were carried out. Through the bearing capacity analysis of the finite element calculation model for the pre-buried channel, the stress strain cloud maps of two kinds of loading modes of the pre-buried channel were obtained. Then based on ANSYS, the structural dimensions of the pre-buried channel were optimized. The results indicate the deformation amount and the equivalent stress of the buried channel under two loading modes, and after the size optimization, the quality is reduced by 6%, the maximum deformation value is reduced by 30%, the weight is reduced, and the bearing capacity of the pre-buried channel is improved.

**Key words:** pre-buried channel; finite element analysis; structural optimization design

## 0 引 言

预埋槽道技术作为城际轨道交通电气化铁路接触网安全运行的保证,目前已越来越受到国内各施工单位的重视并被逐渐采用。国外专家 PERTOLD J 和 XIAO R Y<sup>[1]</sup>研究了锚固与钢结构柱基础上的锚固筋的各项性能;KHALIL A A<sup>[2]</sup>为了解决先前数值仿真分析上单元的处理难题,在研究粘结锚固系统里预埋筋时,采用了新颖的等参单元概念;NILSON<sup>[3]</sup>和 HAWKINS<sup>[4]</sup>提供了钢筋与混凝土的粘结应力与滑移本构关系的推导公式;国内专家靳世鹤等人<sup>[5]</sup>研究了预埋槽道的抗碱性能

力,提高了预埋槽道表面层的绝缘和防腐能力;张伯阳等人<sup>[6]</sup>提出了预埋槽道隧道接触网施工控制技术,能较好地解决接触网预埋槽道定位不准等关键问题,并且简化了施工工艺;秦志斌<sup>[7]</sup>、王小明<sup>[8]</sup>、白金林<sup>[9]</sup>等人介绍了预埋槽道安装、拆除工艺以及特殊问题的处理心得。目前预埋槽道存在理论研究滞后于工程实际应用的现象,颁布的标准和规范随着理论研究和工程实践的深入,需要进一步调整和修正。目前关于城市轨道交通预埋槽道的研究大部分都集中在实践。

本研究将以正在施工的青岛蓝色硅谷城际轨道“HC01”的预埋槽道为研究对象,进行有限元分析和结

收稿日期:2018-05-11

基金项目:山东省重点研发计划项目(2018GGX103015)

作者简介:杨福芹(1972-),女,山东烟台人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事机械传动设计理论及方法的研究。E-mail:astart@126.com

构优化研究。

## 1 预埋槽道的基本结构及承载力分析

预埋槽道主要包括槽道本体(锚板)、锚杆、与之相配套的 T 型螺栓、T 型螺栓相配合的紧固件,如图 1 所示。



图 1 预埋槽道

受拉时发生两种破坏形式:预埋槽道的锚杆被拉断或槽道本体发生功能失效和混凝土结构发生破坏。因此预埋槽道承载力应该为槽道本体破坏的极限载荷和混凝土结构发生破坏时的最大载荷中的较小者<sup>[10]</sup>。预埋槽道实际工况下的受拉受力与锚板刚度有很大关系。锚板刚度较大时,简化示意图如图 2 所示。锚板刚度较小时,简化示意图如图 3 所示。

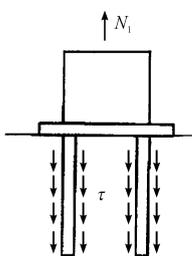


图 2 刚度大时受力

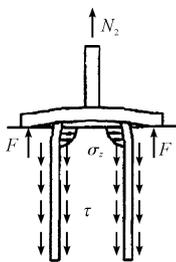


图 3 刚度小时受力

## 2 预埋槽道的三维建模

本文利用 PRO/E5.0 软件对上述预埋槽道进行建模。

编号 HC01 预埋槽道的槽道本体壁厚为 4 mm、槽口深度为 34 mm、槽道本体长度为 450 mm,槽道本体宽度为 52 mm、槽道本体高度 34 mm、字型锚杆间距 250 mm、锚杆壁厚 6 mm、锚杆长度 120 mm,预埋槽道材质选用 Q235B,密度为 7.85 g/cm<sup>3</sup>,抗拉强度极限为 460 MPa。混凝土选用 C30 型号,受拉强度极限为 3 MPa,受压强度极限为 30 MPa。

## 3 预埋沟槽的求解结果与分析

本研究按照图(2,3)受力分析对预埋槽道选用两种加载方式加载 22 kN:加载方式 1 为在两个锚杆之间的对称中心处施加载荷;加载方式 2 为沿着预埋槽道锚杆轴向方向施加载荷。通过有限元分析测量其应力、应变等情况。

当采用第一种加载方式,即在两个锚杆之间的对称中心处施加载荷时,槽道本体发生明显弯曲变形,在加载部位最为明显,最大变形量达到 0.32 mm,变形量较大。Y 向最大变形量为 0.21 mm,加载部位最大等效应力为 561.77 MPa。变形部位主要集中在受力加载位置,此时受力变形受锚杆的作用关系影响较小,受锚板刚度的影响很大。

当采用第二种加载方式,即沿着预埋槽道锚杆轴向方向施加载荷时,锚杆也受到很大的拉力作用,槽道本体与锚杆根部接触位置的总变形量达到 0.34 mm。沿着锚杆部位施加拉力载荷作用时,锚杆部位受拉作用非常明显,此时锚杆与混凝土之间的锚固粘结力起主要承载作用。继续加载载荷,会导致锚杆被拉断或者加载受力部位发生破坏。

从两种加载方式下的结果可以看出:预埋槽道的变形量和等效应力都较大,因此需要对预埋槽道结构尺寸进行优化设计,提高其承载能力。

## 4 预埋槽道的结构优化

### 4.1 输入输出参数的设置

基于 ANSYS,创建模型的输入参数和输出参数如图 4 所示。

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
	ID	Parameter Name	Value	Unit
1				
2		Input Parameters		
3		Geometry (A1)		
4	P1	DS_1	5.83	
5	P2	DS_2	102.83	
6	P3	DS_3	123.4	
7	P4	DS_4	33.037	
8	P5	DS_5	53.473	
*		New input parameter	New name	New expression
10		Output Parameters		
11		Static Structural (B1)		
12	P6	HC01[64] Mass	3.0826	kg
13	P9	Total Deformation Maximum	0.32584	mm
14	P10	Directional Deformation Maximum	0.2117	mm
15	P11	Equivalent Elastic Strain Maximum	0.0028369	mm mm <sup>-1</sup>
16	P12	Equivalent Stress Maximum	561.77	MPa
*		New output parameter		New expression
18		Charts		

图 4 输入参数和输出参数

输入参数  $P_1 \sim P_5$  - 数学模型中的设计变量;输出参数  $P_6$  - 预埋槽道模型的质量; $P_9$  - 最大总形变; $P_{10}$  - Y 向最大总形变; $P_{11}$  - 最大等效应变; $P_{12}$  - 最大等效应力目标函数值

### 4.2 优化分析项目创建

创建 Response Surface 和 Goal Driven Optimization 两个优化分析项目,并使之相关联在响应曲面优化(Response Surface)项目下,输入输出参数的关系能通过图表的形式显示出来,在目标驱动优化(Goal Driven Optimization)项目下,可以进行最优参数组的筛选<sup>[11]</sup>。

### 4.3 响应曲面分析项目结果与查看

笔者通过预览和更新,得到 27 个设计点。分析可以得知:在 27 组设计点中,最大等效应力是在第 22 组

设计点,最大变形量也发生在第 22 组设计点,变形量在 0.03 mm~0.68 mm 的范围内变化,预埋槽道质量在 2.9 kg~3.17 kg 的范围内变化。

笔者通过 Response Point 查看输入参数和输出参数之间的关系,从而得出:各输入参数与质量成正比关系,与最大等效应力和最大总形变值成非线性关系;杆径、杆距、杆长对最大总变形的影响效果不明显,影响不大,而锚板高度和锚板宽度对最大总变形的影响作用大;杆径、杆距与等效应力之间不呈线性关系,杆径和杆距与等效应力之间几乎无影响,锚板宽度对等效应力的影响作用很小。

各个输入参数与输出参数之间的关系如图 5 所示。

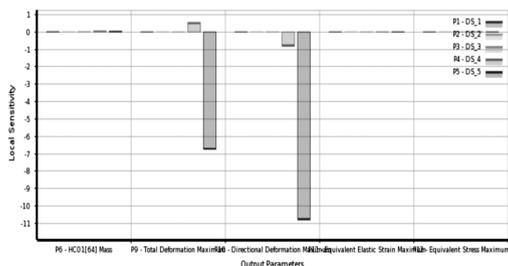


图 5 敏感度曲线

从图 5 可以看出:各输入参数对质量影响基本一致,对总变形影响较大的因素排在前两位的是锚板的宽度和高度,其中锚板的宽度值对变形的影响最大。

#### 4.4 优化结果

利用 Response Surface Optimization 项目来对预埋槽道结构进行优化设计,更新设计点之后得到 3 组候选优化设计点如图 6 所示。

Title of Sheets 24 - Optimization - Candidate Point															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	Reference	Name	P1 - D5.3	P2 - D5.2	P3 - D5.3	P4 - D5.4	P5 - D5.3	P6 - H30(34) Max (kg)	P7 - Total Deformation Maximum (mm)	P8 - Directional Deformation Maximum (mm)	P9 - Equivalent Elastic Strain Maximum (mm/mm)	P10 - Equivalent Stress Maximum (MPa)			
2								Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Candidate Point 1	5.2407	102.84	119.3	31.058	49.639	2.9499	-1.05%	21.663	-9.66035%	0.40311	0.008347	946.52	
4	●	Candidate Point 2	5.2557	116.56	124.78	32.444	48.35	2.9815	0.89%	17.2284	0.67%	0.392716	0.008347	946.52	
5	○	Candidate Point 3	5.2721	106.06	115.64	32.115	48.786	3.0072	0.78%	19.4611	-4.26218%	0.39268	0.008347	946.52	
*		New Custom Candidate Point	5.61	122.67	123.4	33.027	33.477								

图 6 优化候选设计点

笔者通过对比图 6 的 3 组候选设计点可以看出: Candidate Point 2 是最符合本研究要求的,最大等效应力值和最大总形变值最小,重要程度最高。最优设计点的质量为 2.9 kg, Y 向最大总变形为 0.09 mm,最大总形变值为 0.23 mm。此时预埋槽道尺寸为:锚杆直径为 5.2 mm,锚杆间距为 229.9 mm,锚杆长度为 124.8 mm,锚板高度为 32.6 mm,锚板宽度为 48.4 mm。

与受力分析结果相比,可以得到:预埋槽道尺寸优化后质量减小 0.2 kg,减少 6%;最大变形值减小了 0.1 mm,减少 30%;Y 方向变形值为 0.09 mm,较优化前的 0.21 mm 减少了 0.12 mm。

## 5 结束语

本研究通过对预埋槽道的有限元计算模型进行承载力分析,得出了预埋槽道的两种加载方式下的应力应变云图,通过预埋槽道的受力和变形仿真分析结果可以直观地看出最大等效应力和最大变形量,为预埋槽道结构尺寸的优化设计提供了依据。

基于 ANSYS 软件,对预埋槽道进行了结构尺寸优化设计,在质量减小的情况下,预埋槽道的刚度和强度有较大的提高,大大减少了结构钢的用量,减轻了重量,提高了预埋槽道的承载能力。

## 参考文献 (References):

- [1] PETROL J, XIAO R Y. Embedded steel experiments and numerical simulation[J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2002,56(8):239-247.
- [2] KHALIL A A. New special finite elements for modeling reinforcement and steel-concrete interface [J]. **Engineering and Reputations**, 2001, 36(5):429-441.
- [3] NILSSON A H. Internal measurement of bond-slip [J]. **ACI**,1972,69(7):39-42.
- [4] HAWKINS M H. Local bond strength of concrete for cyclic reversed loadings[J]. **Bond in Concrete**, 1999,33(2):31~35.
- [5] 靳世鹤,严松宏,梁庆国. 盾构隧道衬砌管片预埋槽道抗碱性试验研究[J]. **铁道工程学报**,2016,33(5):55-58.
- [6] 张伯阳,严少发,任浩. 高速铁路隧道接触网预埋槽道施工控制技术[J]. **铁道工程学报**,2012,29(9):75-78.
- [7] 秦志斌. 大岭山隧道出口端埋设接触网预埋槽道技术[J]. **山西建筑**,2010,36(18):331-333.
- [8] 王小明,李冬立. 武广铁路客运专线战后预留接口施工质量通病及防治方法[J]. **铁道标准设计**,2010,53(1):196-199.
- [9] 白金林,刘伟,朱海斌. 客运专线隧道接口施工管理与工程实践[J]. **铁道标准设计**,2010,53(1):200-204.
- [10] 冶金工业部包头钢铁设计研究院. 冶金工业厂房钢筋混凝土结构中的预埋件设计规程(YS11-79)[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.
- [11] 刘江. ANSYS14.5 Workbench 机械仿真实例讲解[M]. 北京:机械工业出版社,2015.

[编辑:周昱晨]

#### 本文引用格式:

杨福芹,王学志,万震. 隧道内预埋槽道的有限元分析及结构优化研究[J]. **机电工程**,2019,36(1):44-46.

YANG Fu-qin, WANG Xue-zhi, WAN Zhen. Finite element analysis and structural optimization of pre-buried channel in tunnel[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019,36(1):44-46.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>