

# 锚索预应力衰减与失效对结构的稳定影响分析

郝晓飞, 李守义, 李萌, 程帅, 黎康平  
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了研究预应力锚索的应力衰减和锚索失效对溢洪道右导墙结构稳定性的影响,以某工程中的实际情况为例,采用 ANSYS 有限元软件对溢洪道右导墙进行模拟计算,验证给定锚索加固方案的可行性,研究在锚索预应力不断衰减时对溢洪道右导墙稳定性和单排锚索失效对溢洪道右导墙稳定性的影响。研究结果表明:给出的锚索加固方案可行;随着锚索预应力的衰减,溢洪道右导墙稳定性不断降低,在锚索预应力由 3 000 kN 衰减至 500 kN 时,溢洪道右导墙的稳定性达到极限状态;最高层的锚索失效对溢洪道右导墙稳定性影响最大。

**关键词:** 预应力锚索; 锚索失效; 结构稳定性; 预应力衰减

中图分类号: TV314; TV34

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0169-05

## Influence of prestress attenuation and cable failure on the stability of structure

HAO Xiaofei, LI Shouyi, LI Meng, CHENG Shuai, LI Kangping

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study influences of force attenuation and cable failure of prestressed anchor on the stability of the right guide wall, taking the actual situation of a project as an example, the ANSYS finite element software was used to simulate the spillway right guide wall and to validate the scheme feasibility of the given anchor reinforcement, also to study impacts of the constant decrease of prestressed anchor cable and the failure of single row anchor on the structure stability of the right guide wall. The results showed that the given anchor cable reinforcement scheme is feasible. The structure stability of the right guide wall continues to decrease with the attenuation of the prestressed anchor cable, the structure stability of the right guide wall reaches ultimate bearing state when the prestressed anchor cable attenuation decreased from 3000kN to 500kN, the top anchor rope failure has the greatest effect on the structure stability of the right guide wall.

**Key words:** prestressed anchor cable; failure of anchor rope; stability of structure; prestress attenuation

## 1 研究背景

预应力锚索在提高岩土体承载力和稳定性方面表现卓越,其施工快捷、经济节约,被广泛地应用于工程的加固治理<sup>[1-3]</sup>。在三峡水利枢纽工程中,锚固体系由四千余根的预应力锚杆和上万根的高强锚杆组成,经系统加固和局部加固,阻止了不稳定块体的塌滑现象,抑制了塑性区的扩展,边坡的应力状态得到了改善,在提高边坡的整体稳定性方面发挥了

重要作用<sup>[4]</sup>。桥巩水电站二期导流时,纵向导墙不能满足深层抗滑稳定要求,因此采用预应力锚索对纵向导墙进行基础加固,并对锚固方案进行了设计验算,从而使纵向导墙满足了深层抗滑稳定要求<sup>[5]</sup>。在工程设计中,长期荷载作用下锚索的预应力损失是倍受关注的问题,锚索预应力损失是造成锚索失效的关键因素<sup>[6]</sup>。康红普等<sup>[7]</sup>、韩光等<sup>[8]</sup>研究了锚索预应力损失机理与规律以及相应的补偿措施。2008年,许明等<sup>[9]</sup>针对岩质边坡通过数值模拟

收稿日期:2016-06-20; 修回日期:2016-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51409207,51309190,51579208);中央财政支持地方高校发展专项(106-5X1205);陕西省重点学科建设专项(106-00X903)

作者简介:郝晓飞(1992-),男,陕西宝鸡人,在读硕士研究生,主要研究方向为水工结构应力分析及数值模拟。

通讯作者:李守义(1955-),男,甘肃庄浪人,教授,博士生导师,主要研究方向为水工结构应力分析。

试验,研究锚索预应力变化及失效在群锚中引起的荷载转移现象,探讨群锚失效后边坡稳定性的劣化过程和失稳形态等问题。2010年李英勇等<sup>[10]</sup>研究了在边坡加固工程中的预应力锚索的失效机制与失效效应。王欣等<sup>[11]</sup>以南水北调中线穿黄隧洞工程为例,采用三维有限元方法对隧洞内衬结构的应力分布进行模拟计算,假定不同部位的预应力锚索失效,分析其对隧洞内衬应力的影响。

总体来说,采用预应力锚索来加固结构的措施,主要用于岩质边坡以及基坑部位,用于溢洪道导墙的工程实例较少,而对于在溢洪道导墙结构中的锚索的预应力损失研究以及锚索失效的研究更少。

某水电站工程为Ⅱ等大(2)型工程,厂房坝段布置在主河床上,溢洪道位于厂房左侧。上游正常水位1 818.00m,校核洪水位1 818.9 m,死水位1 814.00 m。导流明渠底板与溢洪道右导墙整体浇筑,施工期,在溢洪道右导墙帷幕灌浆廊道桩号坝左0+103.80 m附近发现一条沿水流方向发展的环向裂缝。右导墙坝段导流期施工至1 802.5 m高程,运行期右导墙坝段顶高程为1 820.5 m。本文将针对该工程施工期遇到的溢洪道右导墙裂缝问题,探讨预应力锚索加固方案的可行性,并进一步研究锚索预应力损失和失效对溢洪道右导墙的稳定性的影响,为类似工程的锚索加固方案提供依据。

## 2 计算方法和模型

### 2.1 抗滑稳定计算方法

按国家能源局2014年颁布的新《混凝土重力坝设计规范》<sup>[12]</sup> NB/T 35026-2014中规定,对于基本组合,如果满足极限状态设计表达式(1),即满足抗滑稳定要求。在计算抗滑稳定时,采用承载能力极限状态法,即利用有限元计算得到的地基面上的正应力和剪应力值,通过积分求得地基面上总抗滑力(抗力)与总滑动力(作用效应),再考虑分项系数按照(1)式来判断其抗滑稳定。

基本组合承载能力极限状态设计表达式:

$$\gamma_0 \Psi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k) \leq \frac{1}{\gamma_{d1}} R\left(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k\right) \quad (1)$$

式中: $\gamma_0$ 为结构重要性系数,对应于结构安全级别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ结构及构件,可分别取用1.1、1.05、1.0。本工程永久性主要建筑物按2级建筑物设计,对应的结构安全级别为Ⅱ级,故 $\gamma_0$ 取1.05; $\Psi$ 为设计状况系数,对应于持久状况、短暂状况、偶然状况,可分别取用1.0、0.95、0.85; $S(\cdot)$ 为作用效应函

数; $R(\cdot)$ 为抗力函数; $\gamma_G$ 为永久作用分项系数; $\gamma_Q$ 为可变作用分项系数; $G_k$ 为永久作用标准值; $Q_k$ 为可变作用标准值; $\alpha_k$ 为几何参数的标准值; $f_k$ 为材料性能的标准值; $\gamma_m$ 为材料性能分项系数,摩擦系数 $f$ 的分项系数为1.3,黏聚力 $c$ 的分项系数为3.0; $\gamma_{d1}$ 为基本组合结构系数,计算中取1.2。

### 2.2 锚索模拟方法

锚索加固的模拟方法归纳起来大致分为两种思路<sup>[13]</sup>:(1)两点集中力方法,即采用1对反方向集中力模拟锚索作用,为了使模拟效果更加真实,可以将锚索的内锚固段采用杆单元进行模拟,与此同时自由段则采用在两点施加反向集中力或在锚头局部施加反压均布力的方法进行模拟;(2)对于只承拉不承压的整体锚索可用杆单元进行模拟,预应力施加采用等效应变或者等效降温法。

近年来以计算机为计算载体并结合有限元理论的各种有限元计算软件应运而生,其在各工程领域的应用也更加广泛而且手段也比较成熟,回顾以往国内外专家和学者的研究成果,发现在利用有限元方法解决锚固工程中遇到的问题时,经工程实验验证,用杆单元、梁单元对锚索进行模拟,模拟效果好且计算结果接近真实情况,因此这种模拟方法值得推广到实际工程的有限元计算中去<sup>[14]</sup>。有限元计算中,用ANSYS对预应力结构进行分析时,除了可以采用直接加载预应力外,还可采用等效力法、等效应变法、等效降温法3种间接的预应力加载方式<sup>[15]</sup>。

本文采用降温法模拟预应力,降温值可根据预应力锚索弹性模量、膨胀系数和预应力计算得到,其计算公式如下:

$$T = -\frac{F}{1000 \cdot \alpha EA} \quad (2)$$

式中: $T$ 为温降值,℃; $F$ 为预应力,kN; $\alpha$ 为锚索线膨胀系数,mm/(mm·℃); $E$ 为弹性模量,MPa; $A$ 为锚索截面面积,m<sup>2</sup>。本工程中, $\alpha$ 取 $1 \times 10^{-5}$ , $E$ 取 $2.1 \times 10^5$  MPa,单根锚索截面直径为0.1 m,截面面积 $A$ 为0.007 85 m<sup>2</sup>。采用平面有限元进行分析时,将预应力沿上下游单宽方向进行均化,当沿上下游方向每2.5 m布置一列锚索时,则表示每根锚索控制的范围沿上下游方向为2.5 m,以预应力3 000 kN为例,在每根锚索上需要施加的预应力为 $3 000 \div 2.5 = 1 200$  kN,按公式(2)计算得到应施加的温降值为-72.79℃。

### 2.3 接触分析

在本工程施工过程中,在溢洪道右导墙帷幕灌

浆廊道的桩号坝左 0 + 103.80m 附近有一条沿水流方向发展的环向裂缝, 导致溢洪道右导墙与导流底板发生分离, 使得溢洪道右导墙和导流底板之间仅能传递压力不能传递拉力, 因此以接触单元对裂缝进行模拟对溢洪道右导墙与导流底板进行联合受力分析, 裂缝示意图如图 1~3 所示。

接触问题在工程实际中普遍存在, 利用有限元法解决解析法解决不了的复杂接触力学问题在工程上已经得到了非常广泛的应用<sup>[16]</sup>; 其计算结果与工程实际情况较为符合<sup>[17]</sup>, 而且接触分析是一种很普遍的非线性行为<sup>[18]</sup>。在用 ANSYS 进行分析计算时, 需在导墙与溢洪道之间设置接触面单元, 这使得原本的线性运算变成了非线性计算, 其中敷在导墙上的面为目标面, 用 TARGE169 进行模拟; 敷在溢洪道上的面为接触面, 用 CONTA172 进行模拟。根据相关文献实验资料可知, 干燥状态下的混凝土接触摩擦系数在 0.55~0.75 之间<sup>[19]</sup>, 本次计算取 0.70。

### 2.4 计算模型

本次计算采用 ANSYS 模拟溢洪道右导墙在导流期的受力情况。由于开挖面在垂直于水流方向的变化复杂, 横断面形状沿顺水流方向基本一致, 故采用二维有限元沿顺水流方向选取控制断面进行分析。结构各控制断面图如图 1~3。

计算模型地基范围按照矩形选取, 深度方向取 80 m, 左、右方向各取 50 m。地基左右方向加法向约束, 地基地面加全约束。溢洪道导墙混凝土结构与地基均采用 plant42 单元模拟, 锚索用杆单元 link8 模拟, 导墙与溢洪道之间的裂缝利用接触单元模拟。以 0 + 35 m 断面为例, ANSYS 模型单元剖分图如图 4。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 锚索加固方案研究

根据工程经验, 为了研究锚索对导墙结构侧向

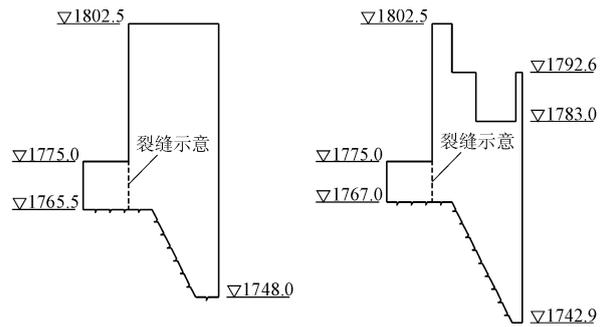


图 1 0 + 5 m 断面示意图

图 2 0 + 35 m 断面示意图

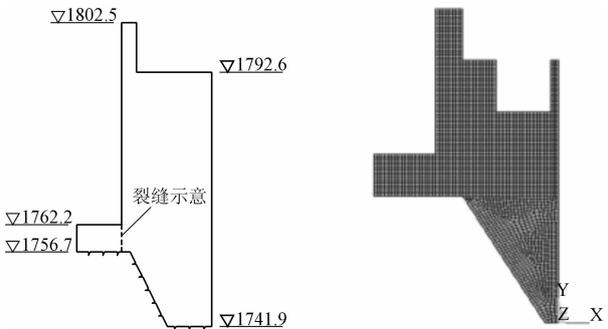


图 3 0 + 72 m 断面示意图

图 4 0 + 35 m 断面单元剖分图

抗滑稳定的影响, 确定按以下方案进行加固并计算在此加固方案下的导墙稳定性。

加固方案: 沿上下游方向每 2.5 m 布置一列锚索, 每一列采用 5 排锚索进行加固, 每两排锚索之间间隔 4 m, 锚固角度与水平方向成 20°。现以 0 + 5m、0 + 35m、0 + 72m 断面为研究对象。各断面锚索布置图如图 5。各断面抗滑稳定计算结果如表 1。

通过表 1 的计算结果可以看出, 当按以上加固方案进行加固时, 预应力按 3 000 kN 施加, 各控制断面的总抗力与总作用效应的差值分别为 2 104.78、1 357.31、4 827.80 kN, 其差值均远远大于 0, 根据公式(1)进行计算证明各断面抗滑稳定性均满足规范要求, 说明给定锚索加固方案的加固效果良好, 在

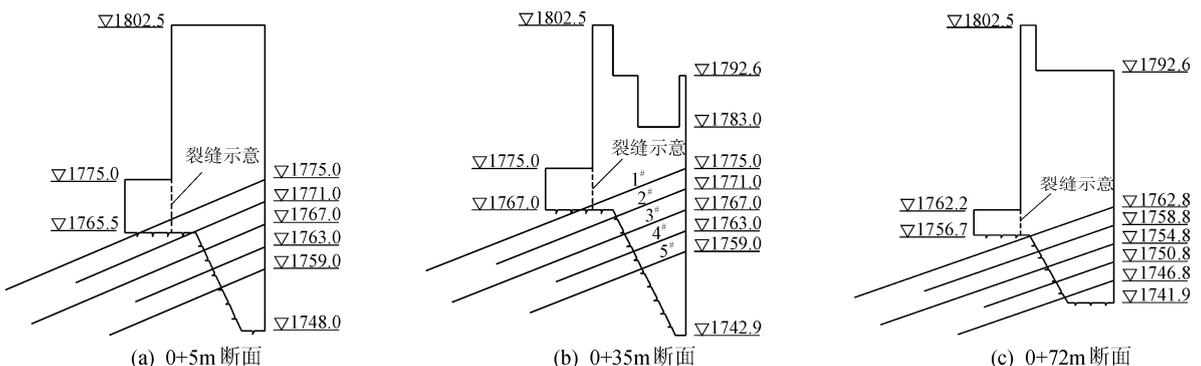


图 5 各断面锚索布置图

表1 各断面抗滑稳定计算表

| 计算项目        | kN      |          |          |
|-------------|---------|----------|----------|
|             | 0+5m 断面 | 0+35m 断面 | 0+72m 断面 |
| 总抗力         | 8870.98 | 5903.67  | 10928.41 |
| 总作用效应       | 6766.20 | 4546.36  | 6100.61  |
| 差值 $\Delta$ | 2104.78 | 1357.31  | 4827.80  |

满足抗滑稳定要求的同时,仍有较高的富余度。此外,通过比较各断面总抗力与总作用效应差值大小发现,0+35 m 断面的总抗力与总作用效应的差值

表2 各方案抗滑稳定计算表

| 计算条件与项目         | 方案1     | 方案2     | 方案3     | 方案4     | 方案5     | 方案6     | 方案7     |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 预应力/kN          | 3000    | 2500    | 2000    | 1500    | 1000    | 750     | 500     |
| 模拟温降/°C         | -72.79  | -60.66  | -48.53  | -36.40  | -24.26  | -18.30  | -12.13  |
| 总抗力/kN          | 5903.67 | 5885.40 | 5867.38 | 5849.66 | 5831.91 | 5822.78 | 5813.83 |
| 总作用效应/kN        | 4546.36 | 4659.44 | 4939.06 | 5214.66 | 5487.19 | 5622.10 | 5756.67 |
| 差值 $\Delta$ /kN | 1357.31 | 1225.96 | 928.32  | 635.00  | 347.72  | 200.68  | 57.16   |

从表2的计算结果可以看出,从方案1到方案7,当给锚索施加的预应力不断减小时,总抗力与总作用效应的差值也在不断减小,当预应力从3000kN一直衰减到500 kN时,总抗力与总作用效应的差值的减小速率也越来越快,从1357.31 kN下降到仅有57.16 kN,可以说明当预应力衰减到500 kN时,虽然按规范<sup>[12]</sup>要求溢洪道右导墙仍然满足抗滑稳定性要求,但此时安全余度极小,可认为溢洪道右导墙已经失稳,假定溢洪道右导墙已达到极限承受状态,500kN可以为溢洪道右导墙稳定需要的极限预应力。

由方案1到方案5和方案5与方案7之间每两个方案的预应力减小500 kN,当预应力每减小500 kN时,其总作用效应与总抗力的差值减小的幅度分别为131.35、297.64、293.32、287.28、290.56 kN。由此可知,当锚索预应力值不断减小时,总作用效应与总抗力差值的减小幅度呈先增大后减小再增大的

最小,其值为1357.31 kN,故0+35 m 断面为以上3个断面中的较危险断面。

### 3.2 锚索预应力衰减对结构稳定性影响研究

为了研究锚索预应力衰减对导流墙侧向抗滑稳定的影响,利用ANSYS有限元软件对0+35 m 断面进行抗滑稳定分析,令其每个衰减阶段的预应力分别为3000、2500、2000、1500、1000、750、500 kN,然后分析当预应力从3000 kN衰减到500 kN时各方案的结构稳定性。各方案计算结果如表2。

趋势,在预应力从500 kN增大到2500 kN的过程中,总作用效应与总抗力差值的变化幅度不超过10.4 kN,可见在该预应力值范围内,锚索预应力对其锚固效果的增加比较稳定;而当预应力值增大到3000 kN时,其总作用效应与总抗力的差值减小的幅度从297.64 kN直接降到131.35 kN(降低了55.8%),由此说明在预应力值达到一定峰值之后,其对于稳定性的增加幅度则不再明显。

### 3.3 单根锚索失效对结构稳定性影响研究

为了研究各锚索失效对结构稳定性的影响,以0+35 m 断面为例,其锚索布置图如图5(b)。分别假定该断面上各个锚索单独失效,当锚索失效时认为其仅像普通钢筋一样受力,利用ANSYS模拟时,对其不施加温降荷载,其他锚索按计算温降荷载施加。从上往下5排锚索依次编号为1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>。最终的计算结果如表3。

表3 各编号锚索单独失效时抗滑稳定计算结果

| 计算条件与项目         | 1 <sup>#</sup> 锚索失效 | 2 <sup>#</sup> 锚索失效 | 3 <sup>#</sup> 锚索失效 | 4 <sup>#</sup> 锚索失效 | 5 <sup>#</sup> 锚索失效 |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 预应力/kN          | 3000                | 3000                | 3000                | 3000                | 3000                |
| 模拟温降/°C         | -72.79              | -72.79              | -72.79              | -72.79              | -72.79              |
| 总抗力/kN          | 5799.54             | 5857.59             | 5916.28             | 5912.13             | 5923.71             |
| 总作用效应/kN        | 5018.16             | 4855.25             | 4694.90             | 4576.72             | 4593.97             |
| 差值 $\Delta$ /kN | 781.38              | 1002.34             | 1221.38             | 1335.41             | 1329.74             |

从表3中的各计算结果对比可知,在研究单排锚索失效过程中,发现当1#锚索失效时,总抗力与总作用效应的差值最小,这说明1#锚索对结构的稳定性影响最大。从1#到4#锚索的布置高程不断降低,当其依次单独失效时,总作用效应与总抗力的差值也不断增大,这说明当失效锚索布置高程不断降低时,锚索失效对导墙抗滑稳定的影响也越来越小,由4#、5#锚索失效的计算结果可知,当失效锚索布置高程降低到一定程度时,此现象略有反弹。总的来说,锚索位置越靠上其对结构的稳定性越有利。

## 4 结 论

本文针对某工程中遇到的溢洪道右导墙裂缝问题,以3个控制断面为研究对象,计算分析了现有锚固方案下导墙的加固效果,研究了锚索预应力衰减和失效对溢洪道导墙稳定性的影响。主要结论如下:

(1) 现有方案对溢洪道右导墙进行加固时,3个控制断面的抗滑稳定性均能满足规范要求,其中0+35 m断面的总抗力与总作用效应差值最小,为最危险断面。

(2) 随着预应力的衰减,导墙的稳定性的降低,当预应力从3 000 kN 衰减到500 kN 时,总抗力与总作用效应的差值从1 357.31 kN 下降到仅有57.16 kN。

(3) 随着失效锚索布置高程的降低,锚索失效对导墙抗滑稳定的影响也越来越小,最上部锚索失效对溢洪道右导墙的抗滑稳定性影响最大。

文中采用ANSYS软件对锚索预应力损失及锚索失效进行了数值模拟,分析了各个情况下导墙的抗滑稳定性,对预应力锚索的布置及加固时的预应力设计值的选取和类似工程的加固及工程建后的锚索失效问题提供参考。本文采用温降法对预应力锚索进行模拟,还可结合其他模拟方法以及通过实际工程试验对此问题做进一步研究。

### 参考文献:

[1] 黄熠辉,高雅芬,熊立刚.龙开口混凝土重力坝右坝头边坡处理措施[J].水力发电,2011,37(8):18-20.

[2] 李宁,张鹏,于冲,等.锦屏左岸拱肩槽边坡稳定性及预应力锚索加固措施研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):36-43.

[3] 曲宏略,张建经,朱大鹏.预应力锚索桩板墙抗震设计计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(z2):4149-4156.

[4] 程良奎.岩土锚固的现状与发展[J].土木工程学报,2001,34(3):7-12.

[5] 李兰秀,魏晶.桥巩水电站纵向导墙基岩预应力锚索设计[J].红水河,2012,31(6):1-4.

[6] 周永江,何思明,杨雪莲.预应力锚索的预应力损失机理研究[J].岩土力学,2006,27(8):1353-1356.

[7] 康红普,吴拥政,褚晓威,等.小孔径锚索预应力损失影响因素的试验研究[J].煤炭学报,2011,36(8):1245-1251.

[8] 韩光,朱训国,王大国.锚索预应力损失的影响因素分析及其补偿措施[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(2):176-179.

[9] 许明,张琴,唐树名,等.锚索失效对边坡稳定性影响的数值研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(5):865-869.

[10] 李英勇,张顶立,张宏博,等.边坡加固中预应力锚索失效机制与失效效应研究[J].岩土力学,2010,31(1):144-150.

[11] 王欣,曹生荣.环形预应力锚索失效对高内压隧洞内衬应力的影响[J].水电能源科学,2016,34(2):102-106.

[12] 国家能源局.NB/T35026-2014混凝土重力坝设计规范[S].北京:中国电力出版社,2014.

[13] 关浩斐.改进的预应力锚索模拟方法及数值验证[J].土工基础,2013,27(4):96-99.

[14] 曹国金,张建斌.锚固技术的支护机理和试验分析研究动态[J].地下空间与工程学报,2002,22(1):86-89.

[15] 陈玉峰.用ANSYS进行预应力加载时解决损失的方法[J].四川建筑,2004,24(6):106.

[16] 胡兆吉,淦吉昌,涂文锋.卡箍式快开门压力容器的有限元接触分析[J].压力容器,2012,29(3):12-16.

[17] 钱俊梅,江晓红,仲小冬,等.浅谈基于ANSYS软件的接触分析问题[J].煤矿机械,2006,27(7):62-64.

[18] 宁桂峰,满翠华.有限元接触分析应用研究[J].现代制造工程,2005(4):66-68.

[19] 陈富强,田唯,刘占国,等.匹配浇筑混凝土接触面摩擦系数试验研究[J].中国港湾建设,2014(12):34-38.