

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0011-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.003

## 预应力锚索对大跨度扁平地下洞库开挖稳定的影响研究

袁伟泽<sup>1,2</sup>, 徐干成<sup>2</sup>, 徐景茂<sup>3</sup>, 邢义川<sup>1</sup>, 魏迎奇<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100038; 2. 空军研究院工程设计研究所, 北京 100068;  
3. 军事科学院国防工程研究所, 洛阳 471023)

**摘要:** 为研究预应力锚索对大跨地下工程开挖稳定的影响, 以大跨度扁平地下洞库开挖稳定为例, 采用数值模拟的方法对锚索预应力值和间距两个因素进行分析研究, 获得不同锚索预应力值和间距下地下工程的拱顶位移、衬砌最大主应力的分布规律, 结果表明: 随着锚索预应力值的增加, 拱顶位移、衬砌最大主应力在逐渐降低, 而锚索最大应力呈现先增加后减小的趋势; 随着锚索间距的增加, 拱顶位移、衬砌最大主应力在逐渐升高, 而锚索最大应力同样呈现先增加后减小的趋势; 建议锚索预应力值取 200 t、间距取 5 m 较为适宜。

**关键词:** 预应力锚索; 地下工程; 开挖稳定; 数值模拟; 拱顶位移

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

## Research on the effect of prestressed cable on excavation stability of large-span underground engineering

YUAN Weize<sup>1,2</sup>, XU Gancheng<sup>2</sup>, XU Jingmao<sup>3</sup>, XING Yichuan<sup>1</sup>, WEI Yingqi<sup>1</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038;  
2. Engineering Design and Research Institute, The Air Force Academy, Beijing 100068; 3 National Defence Engineering Institute, Academy of Military Sciences PLA China, Luoyang, 471023)

**Abstract:** In order to analyze the effect of prestressed cable on the excavation stability of super-span underground engineering, taking a large span underground engineering as the example, the prestress value and space of prestressed cable were analyzed by numerical simulation. The principle of vault displacement and liner maximum principal stress under different prestress value and space of prestressed cable were obtained. The results show that with the increase of the anchor cable prestress the vault displacement and liner maximum principal stress decrease gradually, however, the maximum stress of the anchor cable shows a trend of increasing at first and then decreasing. With the increase of the space of anchor cable, the vault displacement and liner maximum principal stress increase gradually, the maximum stress of the anchor cable shows a trend of increasing at first and then decreasing. It is recommended that the prestress value of the anchor cable should be 200 tons and the space should be 5 m.

**Key words:** Prestressed cable; underground engineering; excavation stability; numerical simulation; vault displacement

随着经济的飞速发展, 地下空间的开发利用逐渐受到重视, 地下结构如地下水工程、地下油库、地下 LPG 库、地下场馆等逐步向大跨度的方向发展<sup>[1-3]</sup>。大跨度地下结构具有体型高大、扁平, 自振频率低, 支护结构的质量与刚度分布不均匀、承受荷

载复杂等特点。预应力锚索支护作为一种柔性结构具有容易调节围岩变形, 发挥围岩自承能力的特性, 在国内外大跨地下工程中得到了广泛应用<sup>[4-6]</sup>。尽管国内、外在预应力锚索支护设计方面积累了一定的理论和施工经验<sup>[7-10]</sup>, 但是对应用于大跨度地下工

收稿日期: 2018-06-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (BLY211L021); 军队重点课题资助项目 (51809290)

作者简介: 袁伟泽 (1981-), 男, 河北保定人, 博士, 博士后, 工程师, 主要从事地下工程方面的研究工作。

程支护的研究仍处于一种经验和半经验的状态,特别是针对结构的承载能力较差的大跨度扁平地下工程的支护设计。

本文参照文献 [11] 中 60 余米大跨度扁平地下洞室模型并假定地形参数,采用数值模拟的方法对锚索预应力值和间距两个因素进行了分析研究,获得了不同锚索预应力值和间距下大跨扁平地下工程的拱顶位移、衬砌最大主应力的分布规律以及锚索预应力值和间距的合理支护方案,研究结果对于大跨度扁平地下工程的支护设计具有一定参考价值。

### 1 数值模型

采用有限差分数值计算程序 FLAC3D 建立数值模型,该程序中包括了反映岩土材料力学效应的特殊计算功能,可以模拟支护结构,如砌衬、锚杆、锚索或板壳等与围岩的相互作用。

数值模拟过程中计算范围取洞库轴线左右各 300 余米、底板下方 100 m、前方 50 m、后方 100 m,数值模型见图 1。计算中将岩体简化为均质体,根据《工程岩体分级标准》、RMR 分类及

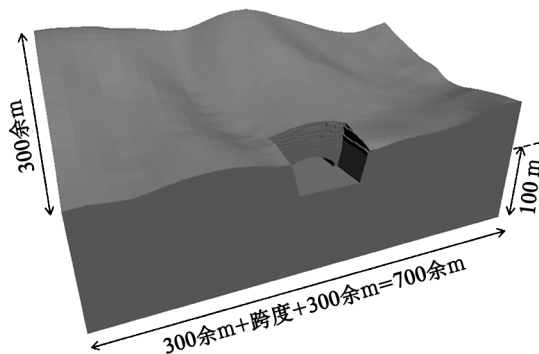


图 1 数值模型  
Fig.1 Numeral model

Hoek-Brown 经验准则综合考虑,Ⅲ级均质岩体的粘聚力  $c=80 \sim 1\,500$  kPa,取值范围较大,而  $c$  值是影响洞库开挖支护稳定性的重要参数,因此模拟计算时我们选取偏于保守的粘聚力 ( $c=180$  kPa),对洞库开挖支护开展数值模拟。岩体采用 Mohr-Coulomb 本构模型;锚索均为全长注浆预应力锚索,采用 cable 结构单元模拟;锚杆均为全长注浆锚杆,采用 pile 结构单元模拟;C30 喷层采用 shell 结构单元模拟,具体材料参数见表 1。

数值计算过程中洞库横断面的开挖顺序如图 2 所示。侧导洞和每个开挖区域按先后顺序开挖,且间隔 10 m 左右。洞库未开挖时的自重应力及洞库口部开挖后的位移场如图 3、图 4 所示。本次数值模拟主要是分析锚索预应力值和间距对洞库开挖支护

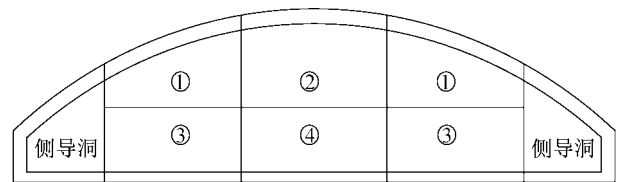


图 2 横断面开挖顺序

Fig.2 Alternate excavation sequence in the longitudinal direction

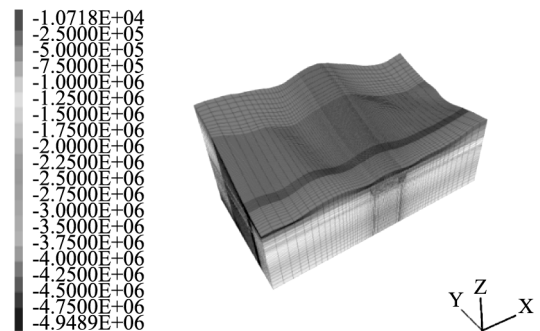


图 3 自重应力场

Fig.3 Gravity stress field

表 1 主要材料参数及本构模型

Tab. 1 Material parameters and constitutive model

材料名称	密度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模型 /GPa	泊松比	抗拉强度 /kPa	粘结力 /kPa	内摩擦角	膨胀角	本构模型
Ⅲ级岩体	2 500	12	0.25	1 000	1 000	$30^\circ$	$0^\circ$	Mohr-Coulomb
C30 喷层	2 500	30	0.25					Isotropic Elastic
材料名称	筋体	弹性模型 /GPa	屈服力 /kN	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	截面积 / $\text{mm}^2$	注浆剪切模量 /GPa	粘结强度 /MPa
锚索	7- $\phi$ 15.2 钢绞线	180	220	—	1 860	139	9	3
锚杆	$\phi$ 22 螺纹钢	200	—	540	835		9	2

的影响，数值模拟工况如表2所示。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 锚索预应力值的影响

为分析锚索预应力值对洞库开挖的影响，将数值模型中锚索的预应力值分别设定为1 000、2 000、3 000和4 000 kN四种情况进行比较。不同预应力值且洞库内有、无衬砌时拱顶位移曲线见图5，有衬砌时洞库围岩位最大剪应变分布情况如图6所示。

通过上述计算结果对比可知：随着锚索预应力值的增加，洞库拱顶各监测点的位移均呈现减小的趋势，预应力值4 000 kN与1 000kN时相比，无衬砌时约减小5~10 cm，有衬砌时约减小0.6~1.0 cm；随着锚索预应力值的增加，洞库围岩的最大剪应变值逐渐变小；预应力值为1 000 kN时，围岩最大剪应变为 $2.8786E-2$ ，预应力值为4 000 kN时，围岩最大剪应变为 $2.2932E-2$ 。

四种预应力值下锚索应力、锚杆受力以及衬砌应力情况对比见表3，锚索应力分布如图7所示。

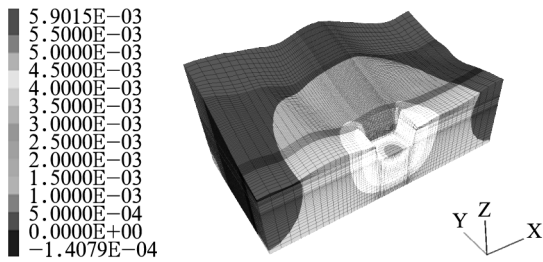
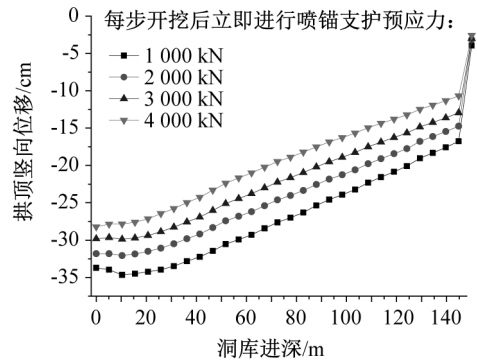


图4 口部开挖后位移场

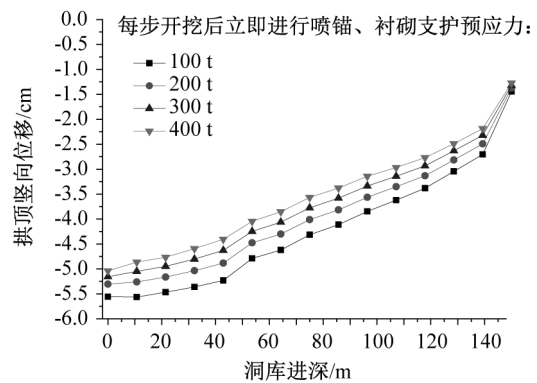
Fig.4 The displacement field after mouth excavation

将不同锚索预应力值时锚索、锚杆以及衬砌受力情况进行比较可知，随着预应力值的增加锚杆拉力、衬砌最大主应力在逐渐降低但锚索最大应力呈现先增加再减小的趋势。

图8为不同锚索预应力值加固洞库后锚索的轴力分布图，可以看到靠近拱肩处锚索轴力明显增大，锚索预应力值1 000~4 000 kN依次增大了49.8%、



(a) 无衬砌时洞顶位移曲线



(b) 增加衬砌后洞顶位移曲线

图5 不同预应力值时洞库拱顶位移曲线

Fig.5 The vault displacement curves under different prestress value

表2 数值模拟计算工况

Tab.2 calculation cases of numerical simulation

工况	锚索			Φ22 系统锚杆		C30 喷层厚度/cm	衬砌
	预应力/kN	间距/m	长度/m	间距/m	长度/m		
1	1 000	5	30	1	6	20	无
2	2 000	5	30	1	6	20	无
3	3 000	5	30	1	6	20	无
4	4 000	5	30	1	6	20	无
5	1 000	5	30	1	6	20	1.5 m C40
6	2 000	5	30	1	6	20	1.5 m C40
7	3 000	5	30	1	6	20	1.5 m C40
8	4 000	5	30	1	6	20	1.5 m C40
9	3 000	4	30	1	6	20	1.5 m C40
10	3 000	6	30	1	6	20	1.5 m C40

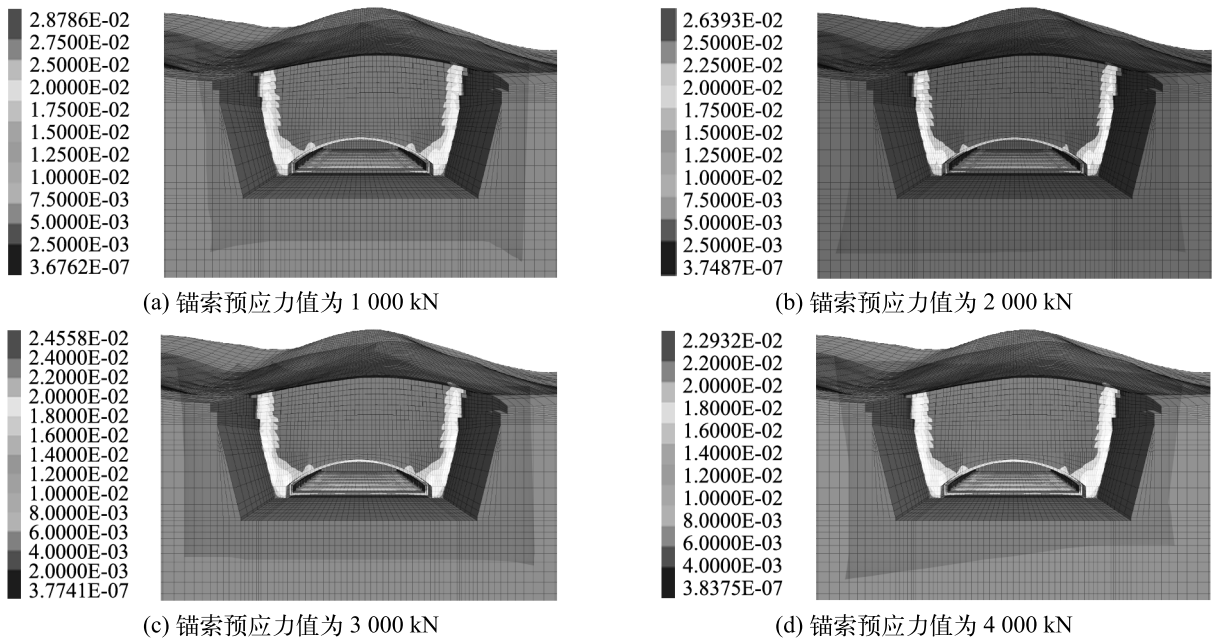


图6 洞库围岩位最大剪应变分布

Fig.6 Maximum shear strain comparison of surrounding rock

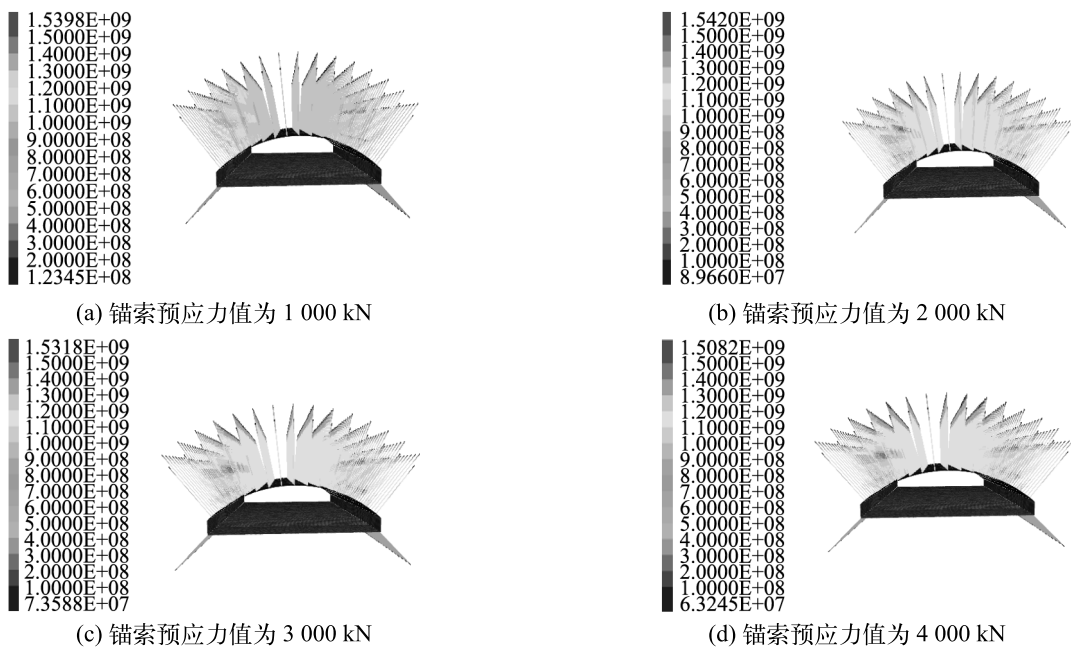


图7 锚索应力分布图

Fig.7 Stress distribution of prestressed cable

表3 不同锚索预应力值时锚索、锚杆和衬砌受力最大值

Tab.3 The max vaule of prestressed cable, rock bolt and tunnel ling under different prestress value

预应力值 /kN	锚索最大应力 / $\times 10^9$ Pa	锚杆最大拉力 值 / $\times 10^5$ N	衬砌最大主应力 / $\times 10^6$ Pa
1 000	1.539 8	2.043 9	5.421 7
2 000	1.542 0	1.917 6	5.246 9
3 000	1.531 8	1.910 7	5.090 4
4 000	1.508 2	1.877 2	4.967 5

39.3%、34.8%、31.0%。

综合上述分析,建议锚索预应力值取2 000 kN较为合理。

### 2.2 锚索间距的影响

为分析锚索间距对洞库开挖的影响,将数值模型中锚索的间距分别设定为4、5和6 m,三种不同间距的锚索分布情况如图9所示。预应力值为

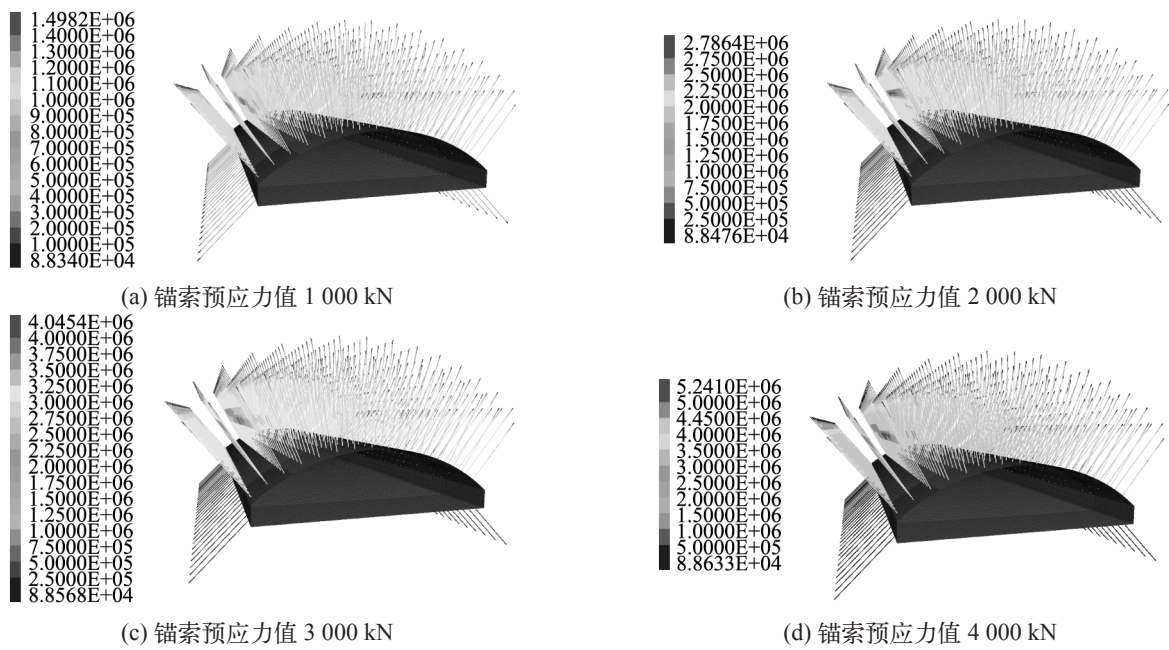


图 8 锚索轴力分布图

Fig.8 Axial force distribution of prestressed cable

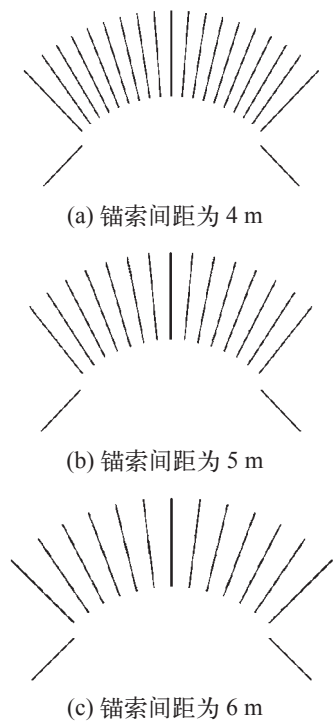


图 9 三种不同间距的锚索分布情况  
Fig.9 The distribution of prestressed cable

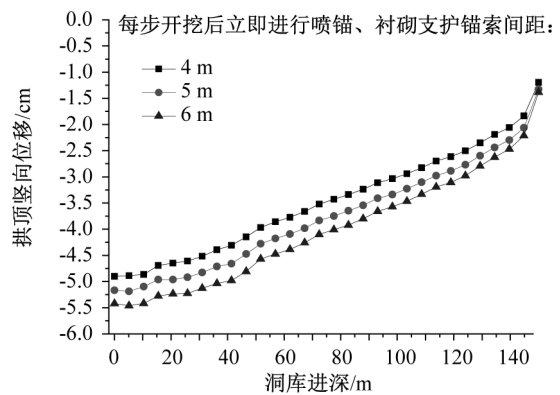


图 10 不同锚索间距时洞库拱顶位移曲线  
Fig.10 The vault displacement curves under different cable space

表 4 不同锚索间距时锚索、锚杆以及衬砌受力情况  
Tab.4 The max vaule of prestressed cable, rock bolt and tunnel ling under different cable space

锚索间距 /m	锚索最大应力 / $\times 10^9$ Pa	锚杆最大拉力 值 / $\times 10^5$ N	衬砌最大主应力 / $\times 10^6$ Pa
4	1.485 1	1.880 0	4.884 5
5	1.531 8	1.910 7	5.090 4
6	1.521 5	1.924 4	5.234 4

3 000 kN 时，将三种锚索间距开挖洞库时的洞库拱顶位移曲线如图 10 所示。

由图 10 可知：随着锚索间距的增加，洞库拱顶各监测点的位移均呈现增大的趋势，与锚索间距为 6 m 相比，锚索间距为 4 m 时拱顶位移减小约 5 mm。

三种锚索间距下衬砌应力、锚索应力以及锚杆受力情况对比如表 4 所示。

将不同锚索间距时锚索、锚杆以及衬砌受力情况进行比较可知，随着锚索间距的增加锚杆拉力、衬砌最大主应力在逐渐升高，但锚索最大应力呈现先增加再减小的趋势。

综合上述分析，建议在施工过程中锚索就间距采用 5 m 较为合理。

### 3 结论

1) 随着锚索预应力值的增加, 洞库围岩拱顶各监测点的位移、最大剪应变以及锚杆拉力、衬砌最大主应力均呈现减小的趋势, 但锚索最大应力呈现先增加再减小的趋势, 建议锚索预应力值取 2 000 kN 较为合理。

2) 随着锚索间距的增加, 拱顶位移、衬砌最大主应力在逐渐升高, 而锚索最大应力同样呈现先增加后减小的趋势, 建议锚索间距取 5 m 较为适宜。

#### 参考文献:

- [1] EINAR B, ARNE M M, GSILE S. Support of large rock caverns in Norway [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1996, 11(1): 11-19.
- [2] SAGEFORS I, DAERGA P A. An excavation method for large vertical cylindrical caverns [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1996, 11(3): 279-285.
- [3] 孙博, 胡功笠, 刘新宇, 等. 大跨度洞库施工开挖稳定性研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2005(5): 689-

692.

- [4] 肖从苗. 深埋大跨地下工程稳定性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [5] 李友华, 黄应军, 李景元. 溪洛渡水电站左岸地下厂房大跨度高边墙开挖施工技术 [J]. *水力发电*, 2008, 34(9): 9-14.
- [6] 王晓伟. 龙滩水电站地下厂房大跨度高边墙开挖施工技术 [J]. *广东科技*, 2009, 221: 267-268.
- [7] 刘保国, 徐干成. 大跨度高边墙地下洞室分层间隔施工方法 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2759-2764.
- [8] 杨明举, 常艸东. 超大型地下洞室群施工开挖程序及围岩稳定分析 [J]. *西南交通大学学报*, 2000, 35(1): 32-35.
- [9] 赵奎银. 大跨度高边墙地下工程施工技术 [J]. *铁道建筑技术*, 2004(4): 34-36.
- [10] 朱维申, 李术才, 陈锋. 能量耗散模型在大型地下洞群施工顺序优化分析中的应用 [J]. *岩土工程学报*, 2001, 3(3): 333-336.
- [11] 段建立, 孙炎光, 尤峻. 特大跨度扁平洞室开挖施工离散元数值模拟 [J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(Z2): 1882-1885.

(责任编辑 王利君)

(上接第 10 页) 均降低。相应的混凝土起裂荷载和峰值荷载也下降。海水拌制对混凝土断裂参数的影响大于海水养护条件。海水养护条件下, 起裂断裂韧度降幅范围为 3.2%~23.4%, 失稳断裂韧度降幅范围为 13.7%~20.8%; 海水拌制条件下, 起裂断裂韧度降幅范围为 33.1%~52.6%, 失稳断裂韧度降幅范围为 16.6%~25.5%

2) 受海水环境的影响, 四种工况的混凝土断裂能降幅范围在 14%~28.1%。相比于海水养护条件, 在海水拌制条件下, 混凝土受海水侵蚀更严重, 对断裂能的影响也更为明显。海水对混凝土立方体抗压强度影响较小。

#### 参考文献:

- [1] FERRETTIE. A discussion of strain softening in concrete [J]. *International Journal of Fracture*, 2004, 126(1): 3-10.

- [2] 徐世焯. 我国混凝土断裂力学发展三十年 [J]. *水利学报* 2014, 45(Z): 1-9.
- [3] 朱榆. 混凝土断裂及阻裂理论的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [4] XU S L, REINHARD H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasibrittle fracture Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three point bending notched beams [J]. *International Journal of Fracture*, 1999(98): 151-177.
- [5] 徐世焯. 混凝土断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] BAZANT Z P, KIM J K, PFEIFFER P A. Determination of fracture properties from size effect tests [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1986(112): 289-307.
- [7] JCI-S-001-2003, Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam [S].

(责任编辑 王利君)