

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.033

有压引水隧洞温度应力的三维有限元分析

丁少超, 赵廷红, 杨 淇

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 结合有压引水隧洞工程实例, 提出基于 Workbench 仿真平台建立围岩和衬砌的整体有限元模型, 模拟对应工况下的材料性质、地质和环境条件。并分析该模型在有、无温度应力的条件下, 衬砌的应力和应变分布情况及相应的极值。研究表明: 衬砌底部内侧出现拉应力最大值, 拉应力较为集中分布在底部与顶部, 衬砌两侧出现压应力最大值。计算结果显示, 温度降低产生的拉应力对衬砌结构稳定性的影响较大, 在设计衬砌和配筋时需充分考虑。

关键词: 引水隧洞; 温度应力; ANSYS Workbench; 仿真计算

中图分类号: TV67

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0169-05

3D Finite Element Analysis of the Temperature Stress of the Diversion Pressure Tunnel

DING Shaochao, ZHAO Tinghong, YANG Qi

(Lanzhou University of Technology, College of Energy and Power Engineering, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The temperature stress of the hydraulic tunnel is hard to calculate under the complex geological conditions, by using 3D finite element method this paper calculated the temperature stress of the diversion pressure tunnel lining produced by temperature change. Combining with the project example of the diversion pressure tunnel, based on the ANSYS workbench simulation platform this paper developed a whole finite element model of surrounding rock and lining to simulate the corresponding material properties, geological and environmental conditions. Analyzing the distribution and the corresponding extremum of stress and strain of the lining of the model with and without temperature-stress. The results prove that: the inside lining of the bottom produces the maximum value of tensile stress, tensile stress is concentrated distribution in the bottom and top, on both sides of the lining produce the maximum value of stress. Those calculations demonstrate that tensile stress caused by temperature decreasing greatly influences the stability of lining structure, so we should fully considered this issue in the design of lining and reinforcement.

Keywords: diversion tunnel; temperature-stress; ANSYS Workbench; simulating calculation

水工隧洞设计中, 经常遇到有压隧洞在温度荷载和均匀内水压力联合作用下的应力计算。隧洞衬砌升温时产生压应力, 降温时产生拉应力^[1]。混凝土是抗压强度远大于抗拉强度的材料, 故常难抵抗降温与荷载联合作用时产生的拉应力。因此对隧洞进行温度应力计算, 就成了设计中不可少的重要部分。

水工引水隧洞作为水利枢纽中一个重要组成部分, 它的路线必须与水利枢纽的建设任务协调一致,

同时还必须和环境自然条件充分配合^[2]。水工隧洞的安全稳定性受不同地质条件、环境变化的影响较大。对于围岩等级较低、半径大的有压隧洞, 根据《水工隧洞设计规范》^[3] (DL/T 5195 - 2004) 宜采用有限元方法分析。但目前采用有限元分析应力时往往忽略温度应力对隧洞的影响^[4-12]。

本文采用有限元分析法, 依据工程勘测资料与运行实测数据, 对某水电站引水隧洞进行温度与结构应力仿真分析。

1 计算原理及方法

当水工隧洞埋深较大时,离隧洞周围若干距离以外的岩石温度常年不变,不受地面气温变化影响。当隧洞建成通水后,在严冬水温和气温达到最低的季节里,越是靠近衬砌的岩石温度就越低。

热传导基本微分方程。对于均质各向同性体,采用直角坐标系 (x, y, z) 时,在时刻 t 物体内某一点的温度 $T(x, y, z, t)$,若采用柱坐标体系则由傅里叶热传导方程,可得

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} - a \nabla^2 T = \frac{W}{c\rho} \\ \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial^2 r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为导温系数; ρ 为物体的密度; c 为物体的比热; λ 为物体的导热系数; W 为物体内部热源强度。 $x = r \cos \phi, y = r \sin \phi$ 。

温度场边界条件。当两种不同的固体接触时,通常都假定接触时“完全的”^[13],则在接触面上温度和热流量都是连续的,边界条件为

$$\begin{cases} T_s = T_c \\ \lambda_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial n} \right) = \lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial n} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_s, T_c 分别为两种介质接触面上温度; λ_s, λ_c 分别为两种介质的导热系数。

2 有限元分析法

对于水工隧洞衬砌里应力的计算,传统上都把衬砌看做一个独立的研究对象,与围岩割裂开来,而仅用根据假设规律计算得来的外力代替围岩所起的作用^[14]。有限单元法是将隧洞衬砌与围岩看做一个完整体来分析。把单位厚度的衬砌与围岩断面当

作一个平面弹性连续体,划分平面体为许多离散的单元,对每一单元按照其几何与物理条件,求出节点力与节点位移。

2.1 计算模型

本文选取某水电站引水隧洞其引水发电系统全长约 17.2 km,引用流量 $Q = 260.5 \text{ m}^3/\text{s}$,洞内流速 3.01 m/s。为有压引水隧洞,纵向坡比为 0.19%。引水隧洞为圆形断面,Ⅲ类、Ⅳ类围岩采用钢筋混凝土全断面衬砌,衬砌外半径为 10.6 m,衬砌内半径为 10 m。围岩为花岗岩,岩石原始温度 $T = 12^\circ\text{C}$,冬季平均最低温度为 0.2°C (持续 165 d = 4 950 h),混凝土浇筑温度为 $T_1 = 12^\circ\text{C}$;混凝土在水中的膨胀现象相当于增加温度值为 $T_2 = 4.75^\circ\text{C}$ 。

2.2 计算工况

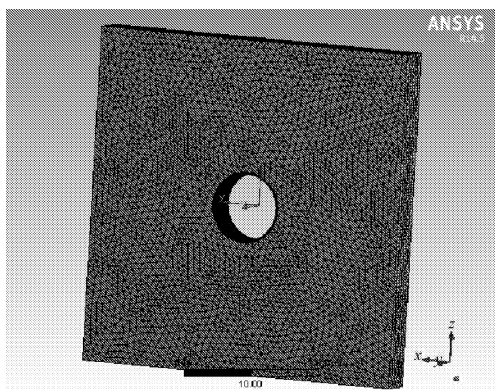
工况 1:围岩压力 + 衬砌自重 + 正常运行情况下的静水压力(最大库水位) + 地下水压力。

工况 2:围岩压力 + 衬砌自重 + 正常运行情况下的静水压力(最大库水位) + 地下水压力 + 温度应力。

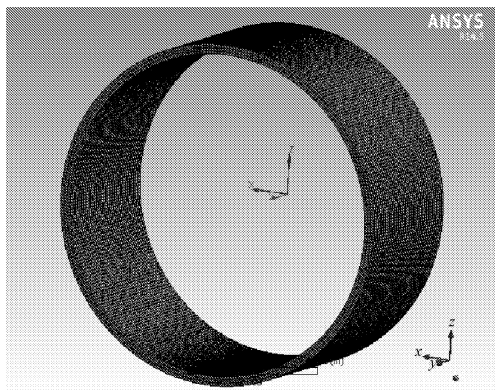
2.3 在 ANSYS Workbench 中实现

(1) 三维建模。利用 DesignModeler 建立围岩和衬砌三维模型^[15],使用 5 倍洞径作为围岩边界^[16]。有压圆形引水隧洞三维模型以下游断面圆心处为坐标零点, z 轴为高程方向,范围 -50 m 到地表面; y 轴为引水隧洞轴线方向,范围 0 m ~ 5 m; x 轴垂直于 zy 面方向,范围 -50 m ~ 50 m。

(2) 网格划分。全局网格控制中设定结构分析为物理优先选项,围岩网格采用四面体网格划分法。添加围岩和衬砌的体网格尺寸,围岩的网格尺寸为 1 m 大小,衬砌的网格采用六面体网格划分法尺寸设置为 0.1 m。隧洞整体有限元模型如图 1(a)所示,衬砌有限元模型如图 1(b)所示。



(a) 引水隧洞围岩及衬砌有限元模型



(b) 引水隧洞衬砌模型

图 1 有限元计算模型

(3) 编辑材料属性。添加围岩、钢筋和混凝土材料,设置相应的物理力学参数和材料热力学参数。

(4) 添加约束和载荷。对于水工隧洞计算区域,采取位移边界约束,左右为水平 x 法向约束,底部设置弹性地基,弹性地基系数查表插值法具体见文献[16]求得设置为 $8\ 600\ 000\ \text{kN/m}^3$,定义围岩与衬砌的接触关系为绑定。为所有模型添加重力加速度方向沿 z 轴负方向大小为 $9.80665\ \text{m/s}^2$ 的惯性载荷,按不同工况施加结构载荷:包括压力、静水压力、

力矩和线压力。最后添加温度载荷,温度条件可在结构分析和温度分析中插入已知的温度边界条件。根据工程地质资料,围岩的材料温度设置为 $T = 12^\circ\text{C}$,混凝土材料温度设置为 $T_1 = 12^\circ\text{C}$,环境温度为 17°C ,温度量级为冬季平均最低温度 0.2°C 。

(5) 分析设置。设置第一主应力、第三主应力、水平位移和数值位移为求解项。

2.4 计算参数

计算所需参数见表 1、表 2。

表 1 材料力学计算参数

材料名称	弹性模量 /GPa	泊松比	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	坚固系数	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa
C25 混凝土	28	0.167	25	—	1.3	12.5
钢筋	200	—	—	—	310.0	—
III 类围岩	10~15	0.210	26	1.0~0.9	4.0~6.0	40.0~60.0
IV 类围岩	5~6	0.230	26	3.0	3.0	30.0

表 2 材料热学计算参数

材料	导热系数 /($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	膨胀系数 /($10^{-6}\cdot^\circ\text{C}$)	比热系数 /($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
围岩	12.54	4.08	0.80
C25 混凝土	6.27	9.20	1.05

3 计算结果分析

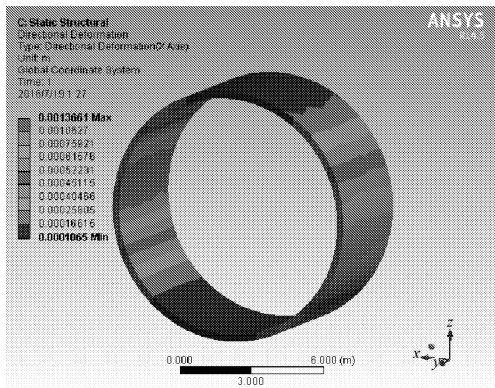
3.1 变形分析

衬砌水平位移分布云图如图 2(a)和图 2(b)所示,方向指向隧洞中心为负,反之为正。可以看出水平位移最大值发生在隧洞两侧,忽略温度应力时的最大值为 $1.3661\ \text{mm}$,考虑温度应力最大值为 $0.9915\ \text{mm}$,最大值相差为 $0.3746\ \text{mm}$ 。垂直位移分布云图见图 3(a)和图 3(b),最大值发生在顶部,忽略温度应力最大值为 $2.4347\ \text{mm}$,考虑温度应力最大值为

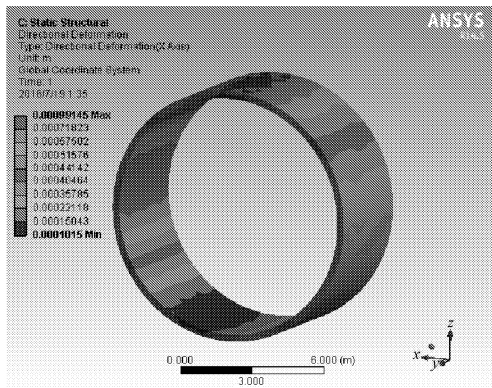
$2.8341\ \text{mm}$,最大值相差为 $0.3994\ \text{mm}$ 。

3.2 应力分析

第一主应力 σ_1 和第三主应力 σ_3 分布情况如图 4 所示,拉应力为正,压应力为负。计算结果显示出两种条件下应力分布基本相同。最大拉应力出现在衬砌底部内侧如图 3(a)和图 4(b)。最大压应力对称分布在衬砌两侧位置如图 4(c)和图 4(d)。在忽略温度应力情况下,主应力的范围是 $-4.12\ \text{MPa} \sim 1.49\ \text{MPa}$,在考虑温度应力时,主应力范围是 $-4.02\ \text{MPa} \sim 1.68\ \text{MPa}$ 。C25 混凝土轴心抗压强度和抗拉强度标准值分别为 $16.7\ \text{MPa}$ 和 $1.78\ \text{MPa}$ 。两种工况下的主应力均在允许范围内,故而隧洞衬砌设计满足要求。同时可以看出温度降低主要产生的是拉应力,最大拉应力增加了 12.8% 。前面提到混凝土属于抗压性质材料,因此隧洞设计计算时需要考虑温度应力的影响。

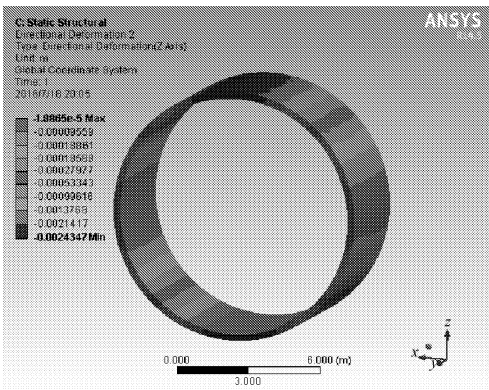


(a) 忽略温度应力

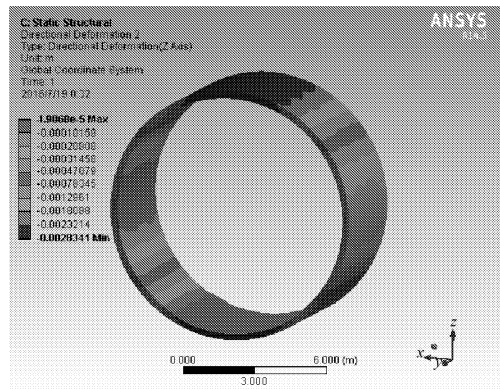


(b) 考虑温度应力

图 2 水平位移分布图



(a) 忽略温度应力



(b) 考虑温度应力

图 3 垂直位移分布图

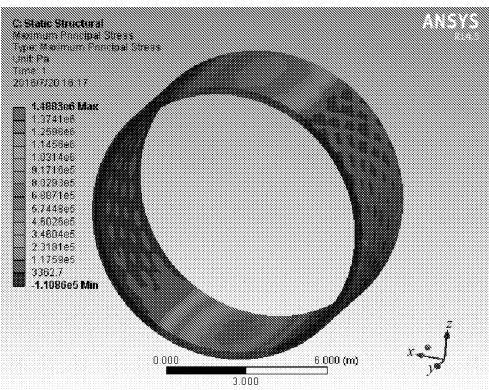
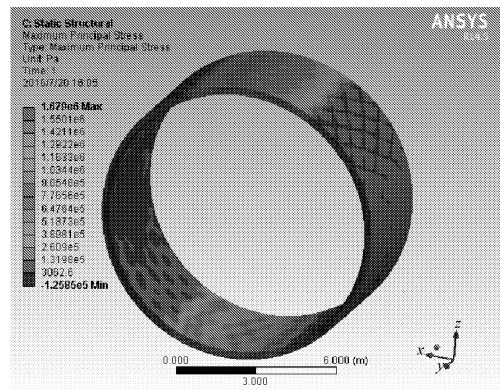
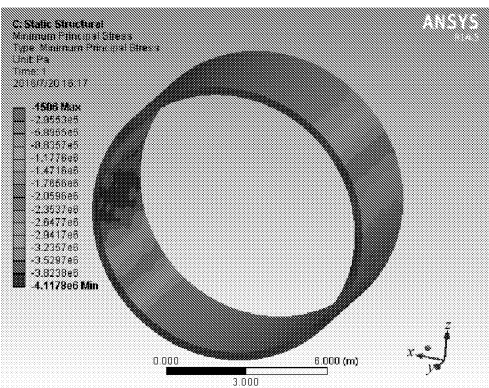
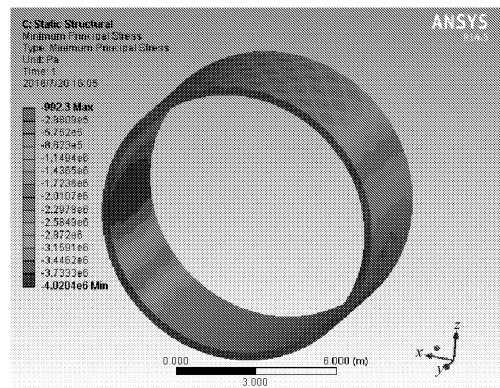
(a) 忽略温度应力 σ_1 (b) 考虑温度应力 σ_1 (c) 忽略温度应力 σ_3 (d) 考虑温度应力 σ_3

图 4 第一主应力和第三主应力分布图

4 对比分析

衬砌计算原理与假设^[3]:

(1) 衬砌为圆形整体式的衬砌,受均匀内水压力的计算方法,采用弹性厚壁圆筒法计算。

(2) 假定在内水压力作用下,隧洞混凝土衬砌沿径向开裂。

(3) 计算中考虑围岩的弹性抗力作用。圆形整体衬砌承受围岩垂直松动压力、衬砌自重及洞内满

水而无水头时的水压力,按弹性抗力为一固定规律变化,利用结构力学方法进行计算。

(4) 衬砌受力后,考虑围岩的弹性抗力,而不计衬砌与围岩的摩擦力。

根据弹性理论,当周围岩石受到温度下降后,开挖面半径减小 Δr_1 ,隧洞通水后最冷季温度降低 ΔT 使衬砌半径减小 Δr_2 ,最终温度应力对衬砌半径影响值 $\Delta r = \Delta r_1 - \Delta r_2$ 公式如下:

$$\begin{cases} \Delta r_1 = \frac{2r_1^2}{R^2 - r_1^2} a(T - t_0) \left[\frac{\frac{R}{r_1} - 1}{\ln \frac{R}{r_1}} - 1 \right] \\ \Delta T = T_1 - t_0 - T_2; \Delta r_2 = a \Delta T r_1; \Delta r = \Delta r_1 - \Delta r_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 为岩石原始温度, $^{\circ}\text{C}$; ΔT 为温度降低数, $^{\circ}\text{C}$; T_1 为混凝土浇筑温度, $^{\circ}\text{C}$; T_2 为混凝土在水中膨胀现象相当于增加的温度, $^{\circ}\text{C}$; r_1 为衬砌内半径, m ; t_0 为隧洞通水后最冷季节的平均水温, $^{\circ}\text{C}$; r_2 为衬砌的外半径, m ; R/r_0 是 $2c\tau/\beta r_1^2$ 的函数通过查表内插法求得^[17]; a 为混凝土线性膨胀系数; c 为热导系数; β 为比热系数; τ 为温差持续时间, h 。

混凝土衬砌的径向最大温度应力为拉应力公式如下:

$$\sigma_{r_{\max}} = \frac{aE_c(\Delta T - t_0)}{1 - \mu_c} \left\{ \frac{1}{2(m^2 - 1)} - \frac{1}{4\ln m} \left[1 + \ln \left(\frac{2\ln m}{m^2 - 1} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量; μ_c 为混凝土的泊松比; $m = r_2/r_1$

通过公式(3)计算出衬砌半径由温度降低后收缩值 $\Delta r = 0.348 \text{ mm}$ 。通过公式(4)计算出 $\sigma_{r_{\max}}$ 的值为 0.17 MPa 。采用有限元法计算出温度应力产生的水平和垂直位移最大值分别为 0.3746 mm , 0.3994 mm , 温度应力产生的拉应力在底部最大值为 0.19 MPa , 两侧拉应力值为 0.1 MPa 。采用伏尔科夫等效应力法^[18]计算出温度应力等效的均匀内水压力为 0.104 MPa 。文献[1]指出该方法的不足指出并提出了变位谐调法, 该法将应力分为轴向, 切向和径向并给出公式(4), 但该法在附加内水压力时难以找到最大应力点。

5 结 语

本文通过 ANSYS Workbench 仿真平台对有压引水隧洞进行结构静力学分析, 通过 Mechanical 编辑材料力学参数和材料热力学参数, 进行数值模拟。计算分析比较伏尔科夫等效应力法和变位谐调法, 有限元法分析温度应力可以综合考虑环境因素和地质条件的影响, 从而更加真实、准确的反应温度应力和结构应力的极值和分布情况。

从应力云图可以看出, 应力沿径向成非均匀分布, 衬砌底部内侧出现拉应力最大值, 拉应力分布较为集中在底部与顶部, 衬砌两侧出现压应力最大值。同时从数值上可以看出, 在设计衬砌和配筋时需充分考虑温度降低时产生拉应力对衬砌结构稳定性的影响。

参考文献:

- [1] 蔡晓鸿. 水工有压隧洞温度应力计算[J]. 水力发电学报, 1988(2): 67-70.
- [2] 蔡晓鸿, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 165.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工隧洞设计规范: DL/T 5195 - 2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] Zhong Denghua, Hu Nengming, Cheng Zhengfei. 3D Finite element analysis of TBM water diversion tunnel segment coupled with seepage field[J]. Transactions of Tianjin University, 2016, 22(1): 35-42.
- [5] Rohola Hasanpour, Jamal Rostami, Bahtiyar Ünver. 3D finite difference kodel for simulation of double shield TBM tunnelling in squeezing grounds[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40(2): 109-126.
- [6] Zhong Denghua, Tong Dawei. 3D Finite element simulation of tunnel boring machine construction processes in deep water conveyance tunnel [J]. Transactions of Tianjin University, 2009, 15(2): 101-107.
- [7] 王克忠, 唐雨蕾, 李伟平, 等. 渗流 - 应力耦合下深埋引水隧洞变形稳定性分析[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(2): 207-211.
- [8] 张全, 方朝阳. 基于 ANSYS 的水工压力隧洞配筋计算研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 109-111.
- [9] 邵潮鑫, 沈振中. 基于 ANSYS 的隧洞衬砌有限元分析配筋法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 116-119.
- [10] 宿辉, 马超豪, 马飞. 基于高地温引水隧洞的温度场数值模拟研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(4): 34-37.
- [11] 董正中, 肖明, 杨莹. 复杂隧洞衬砌结构的三维有限元分析及结构配筋[J]. 中国农村水利水电, 2016(1): 109-113.
- [12] 卞康, 肖明. 水工隧洞衬砌水压致裂过程的渗流 - 损伤 - 应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3769-3776.
- [13] Song F, Xu Y, Han C, et al. 3D Simulation and analysis on effect of construction process of urban shallow tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space & Engineering, 2013, 9(1): 141-146.
- [14] 董书明, 辛全才, 卢树盛. 断面形状对隧洞围岩稳定性的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 102-104.
- [15] 张豪, 杜志达. 基于 ANSYS 的寒冷地区大体积混凝土越冬保温研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 177-182.
- [16] 苏凯, 伍鹤皋. 水工隧洞钢筋混凝土衬砌非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1485-1490.
- [17] 汪胡楨. 水利隧洞的设计理论和计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1977: 77.
- [18] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护规程: JGJ 120 - 2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.