

文章编号:1671-8879(2008)01-0077-04

大桥隧道锚碇三维粘弹塑性数值模拟

韩 冰^{1,2}, 王芝银², 丁秀丽³, 黄正加³

(1. 中国石油管道公司, 河北 廊坊 065000; 2. 中国石油大学 城市油气输配技术
北京市重点实验室, 北京 102249; 3. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘 要:为了解某大桥隧道锚碇及围岩体在张拉荷载下的变形状态及时效特性,采用三维显式有限差分软件 FLAC^{3D}对该大桥隧道锚碇系统进行三维粘弹塑性数值模拟。根据地质资料以及混凝土锚碇结构尺寸,建立隧道锚碇的三维计算模型,对岩体与锚碇之间的相互作用以及锚碇结构在长期荷载作用下的破坏模式进行研究,分析了由于施工开挖引起的锚碇和隧道围岩的位移及其应力变化。分析结果表明:当考虑岩体的流变力学特性后,在设计荷载作用下,锚碇和隧道围岩的变形均有所增加;与弹塑性计算结果比较,施加荷载后经流变分析得到的隧道顶拱和底板的切向应力有所降低,拉应力的量值及拉应力区的范围减小,塑性区体积进一步扩大。

关键词:桥梁工程;隧道锚碇;粘弹塑性;三维数值模拟

中图分类号:U441.12; TU279.72 **文献标志码:**A

3D visco-elasto-plastic numerical simulation for tunnel-anchorage of bridge

HAN Bing^{1,2}, WANG Zhi-yin², DING Xiu-li³, HUANG Zheng-jia³

(1. Pipeline Company, Petro China, Langfang 065000, Hebei, China; 2. Beijing Key
Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249,
China; 3. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: In order to study the deformation state and time-dependent characteristic of surrounding rock and tunnel-anchorage under tensile stresses, the 3D visco-elasto-plastic numerical simulation is performed on the anchorage system of a certain bridge by using the FLAC^{3D}. Based on the geological information and the structure size of concrete anchor, the simulation model is set up for analyzing the interaction of tunnel-anchorage and surrounding rock and the failure mode of anchorage system under long-term load. The variations of displacement and stress of anchorage and surrounding rock due to the influences of excavation are studied. The results indicate that the deformations of tunnel-anchorage and surrounding rock increase under design load when the rheological characteristic of rock mass is considered. Compared with the results which only considering elasto-plastic effect, the tangential stresses of the tunnel roof and floor decrease after rheological calculating, the tensile stress and the area of tensile stress zone become less, and the plastic zone is expanded. 3 tabs, 7 figs, 10 refs.

Key words: bridge engineering; tunnel-anchorage; visco-elasto-plasticity; 3D numerical simulation

收稿日期:2007-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50374049)

作者简介:韩 冰(1979-),男,山东潍坊人,中国石油管道公司工程师,中国石油大学(北京)博士,E-mail:kjhanbing@petrochina.com.cn.

0 引言

某特大桥拟采用隧道锚碇钢桁梁悬索桥,全长 560 m,最大净空 288 m,设计主缆双索载荷高达 2×160 MN。悬索桥主缆巨大的水平拉力将通过索缆与锚杆传到隧道中填充的混凝土锚碇上,再通过混凝土与隧道岩体的粘结力传递给锚洞围岩。因此,锚洞围岩变形与稳定性是大桥建设的关键问题之一。文献[1-3]对岩体与锚碇之间的相互作用、锚碇结构和岩体变形机制以及可能的破坏模式做了研究。由于岩体是一种蠕变体,在悬索桥主缆力的作用下,锚洞围岩将产生时效变形,应对岩体与锚碇结构在长期荷载作用下的稳定性进行研究。

悬索桥是一种柔性结构,为满足主塔以及整个桥梁体系的稳定要求,除要求锚碇必须满足稳定性要求外,还必须将锚碇的最大位移控制在一定范围内。因此,研究锚碇的长期变形显得十分重要。新版 $FLAC^{3D}$ (Version 2.1) (Three Dimensional Fast Lagrangian Analysis of Continue)^[4] 在 Version 2.0 的基础上,新增了 3 种适用于复杂岩体介质的粘弹塑性分析模型及考虑应变极限的屈服准则,在模拟岩土体或其他材料的长期流变力学行为等方面具有一定的优势。为此,本文以某特大桥锚碇与锚洞围岩为研究对象,根据岩体流变数值分析的基本方法^[5-9],采用国际通用的三维有限差分软件 $FLAC^{3D}$ (Version 2.1),对锚碇和锚洞围岩在施工及运行过程中的长期变形与稳定性进行分析,以期得到工程可参考的信息。

1 数值模型

1.1 计算条件与基本力学参数

根据工程地质初勘资料,桥址位于构造溶蚀峰丛槽谷中山区,山顶高程为 1 415 m,河床高程为 660 m,相对高差 755 m。河西两岸斜坡陡坡和陡壁构成折线型,总体为凸型坡,大桥轴线方向近东西,岩层横向河流向下游,且倾角为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。东岸岩层产状 $140^{\circ}\sim 170^{\circ}\angle 20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。西岸岩层产状 $210^{\circ}\angle 25^{\circ}$,其走向与河谷近于垂直,构成层状横向坡结构。层状灰岩为坚硬岩类,岩石强度高。大桥后段位于受上述裂隙控制形成的平行于陡壁 $115^{\circ}\angle 75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 裂缝构成的约 $50\times 10^4\text{ m}^3$ 危岩体上,稳定性较差。考虑实际地形、地貌、工程岩体特性和锚碇实际结构尺寸,以及施工开挖与建造过程,锚碇混凝土施工建造采用添加混凝土实体单元模拟,预应力采用在锚碇前后端

面施加一对反向面力荷载模拟;考虑到锚碇混凝土建造过程,以及与岩体胶结面的结合程度,对混凝土胶结面采用薄层单元模拟,主缆荷载按荷载作用方式通过面力施加在混凝土锚碇前端面上。

沿桥梁中心线取为 X 轴,指向河流为负;铅直方向取为 Z 轴,向上为正;Y 轴与 X、Z 轴构成右手坐标系。计算模型范围取 $390\text{ m}\times 300\text{ m}\times 514\text{ m}$,X 轴从桩号 K120+526.5 取至 K120+915.6,Y 轴前后各取 150 m,Z 轴正向以底部高程为 700 m 为起点。地表最高点高程约为 1 214 m,底部高程为 700 m。根据地质资料,边坡岩体划分为强风化带(厚度约为 49 m)、弱风化带(厚度约为 16 m)和微新岩体三带。边界条件采用底面三向约束,侧面法向约束,地表自由。网格剖分规模为 329 676 个四面体单元,节点总数为 58 009 个。其工程地质剖面示意图和网格剖分图如图 1、图 2 所示。

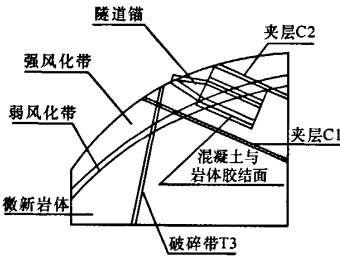


图 1 地质剖面

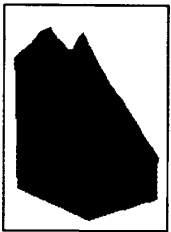


图 2 网格剖分

计算采用 $FLAC^{3D}$ 的内嵌语言 FISH 读入有限的网格,并输入单元参数。计算域内共采用 5 种材料,其力学特性见表 1。

表 1 岩体与混凝土基本力学参数

材 料	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	抗剪强度		抗拉强度 R_t/MPa
				c/MPa	f/rad	
强风化带	22.0	2	0.330	0.40	0.6	0.33
弱风化带	24.0	4	0.260	1.00	0.9	0.20
微新岩体	26.0	8	0.220	1.30	1.1	0.60
破碎带 T3	22.0	2	0.330	0.02	0.3	0.03
夹层 C1	22.0	2	0.330	0.03	0.4	0.03
夹层 C2	22.0	2	0.330	0.03	0.4	0.03
锚碇混凝土	24.5	30	0.167			
混凝土胶结面	26.0	8	0.220	1.00	0.9	0.60

注: c 为粘聚力系数; f 为内摩擦角 φ 所对应的弧度值。

1.2 蠕变模型和屈服准则

隧道开挖后,围岩变形并不是瞬时达到最终值,而是随时间而变化发展的。此时,围岩应力亦将随着变形持续增长而不断调整变化。为了考虑这种粘性效应,蠕变模型采用 $FLAC^{3D}$ 软件提供的 Cvisc 粘弹塑性模型,由马克斯韦尔模型、开尔文模型和一个

塑性元件串连而成,并结合莫尔-库仑剪切破坏和拉破坏的复合准则,对岩体在应力峰值后进入屈服或达到破坏后的力学行为做进一步的分析。流变模型如图3所示。

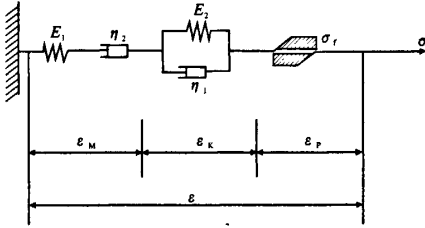


图3 流变模型

注:σ为岩体应力;E₁、E₂、η₁、η₂分别为弹性模量、粘弹性模量、开尔文粘性系数、马克斯韦尔粘性系数;σ_r为岩体材料的屈服强度;ε_M、ε_K、ε_P分别为马克斯韦尔体应变、开尔文体的应变和塑性应变;ε为总应变。

塑性准则采用莫尔-库仑剪切破坏和拉破坏的复合准则,莫尔-库仑准则的屈服函数 f^s 为

$$f^s = \sigma_3 - \sigma_1 + (\sigma_3 + \sigma_1) \sin \varphi - 2cc \cos \varphi \quad (1)$$

最大拉应力准则屈服函数 f^t 为

$$f^t = \sigma_3 - \sigma_t \quad (2)$$

式中: c 为材料的粘聚力系数; φ 为内摩擦角; σ_t 为拉应力; σ_1 、 σ_3 分别为最小、最大主应力。

2 流变力学参数的选取及分析

2.1 确定流变力学参数

目前,根据室内试验数据及曲线确定流变参数的方法主要有取点法、绘图法、回归分析法、优化分离法、最小二乘法以及曲线分解法等。这里采用文献[10]提出的粘弹性参数优化分离法求取流变参数。首先给出设计变量与目标函数,以待反演的参数为设计变量,根据蠕变试验资料所给的 n 个 ϵ 试验数据,计算应变残差平方和取最小值作为目标函数进行参数优化分离。因此设计变量为

$$\mathbf{X} = (E_1, E_2, \eta_1, \eta_2) = (X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (3)$$

目标函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [\epsilon(t_i)_c - \epsilon(t_i)_m]^2 \quad (4)$$

式中: $\epsilon(t_i)_c$ 、 $\epsilon(t_i)_m$ 分别为 t_i 时刻通过计算和试验所得的应变值; E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 见表2。

对广义开尔文模型,目标函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t_i}) - \epsilon(t_i)_m \right]^2 \quad (5)$$

对伯格模型,目标函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t_i}) + \right]$$

$$\frac{\sigma}{\eta_2} t_i - \epsilon(t_i)_m]^2 \quad (6)$$

为了使上述优化问题得以简化,可根据工程经验类比给出设计变量的可能上、下限估计值,从而建立约束条件

$$a_i \leq X_i \leq b_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

式中: X_i 为第 i 个设计变量; b_i 、 a_i 分别为 X_i 的上、下限值。

由式(3)、式(5)、式(6)、式(7)建立的数学模型,可用多约束优化法,逐步逼近最优优点 \mathbf{X}^* ,求解目标函数的极小化问题,这时的 \mathbf{X}^* 即为待求的岩体特征参数向量。按照上述方法,确定的流变参数见表2。

表2 岩体流变参数

岩体材料	流变参数			
	E_1 /GPa	E_2 /GPa	η_1 /(GPa·h)	η_2 /(GPa·h)
强风化带	2	25	7 300	630
弱风化带	4	52	9 600	940
微新岩体	8	65	13 000	1 900

2.2 施工方案与计算步骤

(1)施工方案。隧道开挖—锚碇建造—施加锚碇预应力—模拟主缆荷载作用力。

(2)计算步骤。①由于隧道锚碇位于山体地表浅层,初始应力场主要以自重场为主,因此计算分析时采用自重场,在未开挖的情况下让模型计算至平衡状态,然后对开挖前位移赋0;②将开挖区域内的所有单元定义为空单元,模拟锚碇隧道的施工开挖,继续计算至平衡状态,得到新的释放位移;③将回填区域内的单元重新赋予混凝土的力学参数,对锚碇隧道进行混凝土回填模拟;④在锚碇前后端面施加一对反向面力荷载,模拟施加锚碇预应力;⑤在锚碇前端面施加主缆荷载,荷载方式采用面力,计算至平衡;⑥打开蠕变开关,进行蠕变计算,至蠕变变形达到稳定值。

3 计算结果分析

3.1 位移与变形时效

在流变分析中,隧道围岩的变形包括因卸荷产生的瞬时弹塑性变形和粘弹塑性蠕变变形两部分,围岩在开挖和施加荷载后任意时刻的位移矢量场都是这两种位移相互叠加的结果。计算时:在计算步骤②模拟过程,受开挖释放荷载的影响,围岩变形以顶拱下沉和底板回弹为主,左右洞壁岩体变形很小;在计算步骤⑤模拟过程,锚碇与山体围岩以朝山外沿桥梁轴线方向变形为主,此时位移增量较大;在计

算步骤⑥模拟过程,围岩的最大变形主要受岩体蠕变变形的影响,位移增量达到最大值。图 4、图 5 分别为隧道开挖及施加主缆荷载后(约 15 d)洞室断面的位移矢量。



图 4 隧洞开挖后的位移矢量

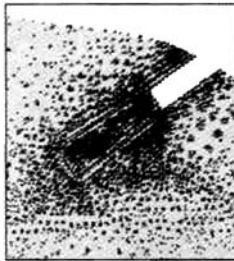


图 5 施加荷载后的位移矢量

3.2 应力与塑性区分布

计算时:在计算步骤②模拟过程,洞周围岩切向处于受压状态,最大主压应力出现在隧道隔墙部位,洞周径向应力在底板和顶拱部位受拉,塑性区主要出现在锚碇隧道底板及顶拱强、弱卸荷部位(图 6);在计算步骤⑤模拟过程,沿轴线方向的应力值在锚碇混凝土前端较大,出现一定范围的拉应力区,在锚碇前、后端和中间锚碇隧道底板出现小范围的塑性区(图 7),最大主拉应力值达到最大值;在计算步骤⑥模拟过程,顶拱和底板的切向应力减小,隧道锚碇周边围岩出现较大范围的塑性区,塑性区体积增加了 2.6%,混凝土胶结面塑性区出现部分贯通,锚碇洞周围岩破坏模式以剪切破坏为主,其次为拉剪破坏,塑性区的出现降低了隧道锚碇对主缆的锚固作用。计算结果见表 3。

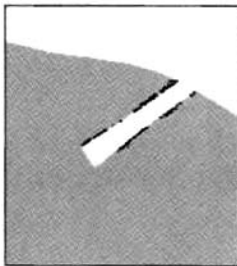


图 6 隧洞开挖后的塑性区分布



图 7 施加荷载后的塑性区分布

表 3 计算结果比较

模拟施工过程	最大增量位移/mm	位移方向	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	塑性区体积/m ³
计算步骤②	3.58	朝洞内方向	1.199	18.593	5 443.3
计算步骤⑤	3.94	沿主缆拉力方向	2.742	18.590	6 088.2
计算步骤⑥	5.02	沿主缆拉力方向	2.740	18.392	6 244.3

4 结 语

(1) 采用 FLAC^{3D} 软件提供的 Cvisc 粘弹塑性

模型,对某特大桥隧道锚碇及其围岩进行三维粘弹塑性数值模拟分析。计算结果表明,该模型能较好地反映山体围岩在隧道开挖和施加主缆荷载后的蠕变特性。

(2) 隧道锚碇开挖形成后,洞周岩体的变形量值一般不大。在本文的计算模型及相关条件下,当考虑岩体的流变特性后,施加荷载所引起的围岩最大变形增加 1.08 mm。

(3) 与弹塑性计算结果相比,施加荷载后流变分析得到的隧道顶拱和底板的切向应力有所降低,拉应力区的范围及量值有所减小,塑性区体积增加。

(4) 在隧道锚碇设计中,目前尚无现成的规范可循,参照混凝土重力坝设计规范,结合该工程具体的地质条件和围岩特性,上述施工方案具有可行性。

(5) 本文结论是在数值分析模型的基础上得出的,实际开挖和张拉过程中,由于施工开挖爆破等原因,岩体原裂隙张开或新的裂隙产生,实测位移比计算位移偏大。为了确保安全,施工和运行过程中进行岩体变形监测是很重要的。

参考文献:

References:

- [1] 汪海滨,高波,孙振.悬索桥隧道式锚碇系统力学行为研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(15): 2 728-2 735.
WANG Hai-bin, GAO Bo, SUN Zhen. Study on mechanical behaviour of tunnel anchorage system for suspension bridge [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (15): 2 728-2 735.
- [2] 肖本职,吴相超,彭朝全.重庆鹅公岩大桥隧道锚碇围岩稳定性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增 2): 5 591-5 597.
XIAO Ben-zhi, WU Xiang-chao, PENG Chao-quan. Stability of the anchorage wall rock of tunnel for Chongqing Egongyan bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S2): 5 591-5 597.
- [3] 邵国建,苏静波,胡强.润扬大桥悬索桥北锚碇基础接触应力仿真分析[J].中国工程科学,2006,8(6): 28-34.
SHAO Guo-jian, SU Jing-bo, HU Qiang. Numerical simulation of contact stresses under north anchor foundation of Runyang suspension bridge [J]. Engineering Science, 2006, 8(6): 28-34.

(下转第 96 页)

参考文献:

References:

- [1] HMSO. Research on road traffic[R]. London: Road Research Laboratory, 1965.
- [2] Ortúzar J D, Willumsen L G. Modelling transport [M]. 3rd ed. London: Wiley & Son, 2003.
- [3] 石飞, 陆建, 王伟, 等. 居民出行调查抽样率模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 72-75.
SHI Fei, LU Jian, WANG Wei, et al. Sampling methods of resident trip investigation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 72-75.
- [4] 李志瑶, 隗志才, 宗芳. 居民出行时间选择及拥挤收费政策[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 5-10.
LI Zhi-yao, JUAN Zhi-cai, ZONG Fang. Resident travel time choice and congestion pricing policy[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 5-10.
- [5] Dial R B. A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration [J]. Transportation Research, 1971, 5(2): 83-111.
- [6] 俞礼军, 严宝杰. 两类交通分配模型算法的关系及其应用[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(2): 74-76.
- YU Li-jun, YAN Bao-jie. The relation between two types of traffic assignment models' algorithm and it's application [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(2): 74-76.
- [7] 许良, 高自友. 基于路段能力可靠性的城市交通网络设计[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 86-90.
XU Liang, GAO Zi-you. Urban transport network design based on link capacity reliability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 86-90.
- [8] 张生瑞, 周伟, 姜彩良, 等. 城市客运结构评价体系及评价方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(4): 59-62.
ZHANG Sheng-rui, ZHOU Wei, JIANG Cai-liang, et al. Evaluation indices and model of urban passenger transport system[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 59-62.
- [9] Yuhwa L, Mark H, Simon W. Household type and structure, time-use pattern, and trip-chaining behavior [J]. Transportation Research: Part A, 2005, 39(1): 60-65.
- [10] Anett Ehlert, Michael G H, Bell S G. The optimisation of traffic count locations in road networks [J]. Transportation Research: Part B, 2006, 40(6): 460-479.

(上接第 80 页)

- [4] 刘波, 韩延辉. FLAC 原理、实例和应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [5] 朱昌星, 阮怀宁, 朱珍德, 等. 锦屏深埋长大引水隧洞围岩蠕变特性仿真分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 921-925.
ZHU Chang-xing, RUAN Huai-ning, ZHU Zhen-de, et al. Simulation analysis on creep character of large and long watertransfet tunnel surrounding [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 921-925.
- [6] 刘建华, 朱维申, 李术才, 等. 小浪底水利枢纽地下厂房岩体流变与稳定性 FLAC~(3D) 数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 484-2 489.
LIU Jian-hua, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, et al. Analysis of rheological characteristics and stability of surrounding rock masses of Xiaolangdi hydrojunction underground caverns by using FLAC~(3D) [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 484-2 489.
- [7] 长江科学院. 沪蓉国道主干线宜昌至恩施段某特大桥隧道锚碇岩体力学性质试验研究报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2003.
- [8] 朱苦竹, 李青麟, 朱合华. 某水电站引水隧道三维粘弹塑性有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 717-720.
ZHU Ku-zhu, LI Qing-qi, ZHU He-hua. 3-D visco-elasto-plastic FEM calculation for the stability of the excavation structure of one hydropower station diversion tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 717-720.
- [9] 王芝银, 杨志法, 李云鹏, 等. 石窟顶板流变断裂过程的数值模拟与反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 9-14.
WANG Zhi-yin, YANG Zhi-fa, LI Yun-peng, et al. Numerical simulation and back analysis of rheologic fracture process of longyou grotto roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 9-14.
- [10] 王芝银, 李云鹏. 地下工程位移反分析方法及程序[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993.