

全强风化花岗岩富水地层隧道施工技术

马嘉霁

(西南交通大学茅以升学院,四川成都 611756)

【摘要】 小天都隧道洞身段左线 340 m、右线 290 m 范围内为全强风化花岗岩富水地层,开挖变形大。为在富水地层全强风化花岗岩中控制围岩变形,达到快速安全施工,以小天都隧道为研究对象,采用理论和现场监测等手段对全强风化花岗岩富水地层中的施工技术进行探究。研究表明,采用三台阶预留核心土环形开挖并施作超前支护能够有效控制围岩变形、减小隧道拱顶下沉;全强风化花岗岩遇水会显著降低自身强度,采用洞内引排水及洞外井点降水措施可有效降低围岩含水率,进而有效降低其遇水崩塌的危险性,保证施工安全与进度。所得结果可为大断面隧道在类似地质条件下的施工提供参考。

【关键词】 隧道工程;全强风化花岗岩;富水;理论研究;现场监测;降排水

【中图分类号】 U 45

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2018.03.008

Construction Technology of Fully Weathered Granite Water Rich Stratum in Tunnel

Ma Jiawei

(Mao Yisheng Honors College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

【Abstract】 Body section at a length of 340 m of left line and 290 m of right line of Xiaotiandu Tunnel is water-rich fully and strongly weathered granite stratum, which has a large deformation of excavation. Taking the above area as the object of study, exploring the construction techniques for water-rich fully and strongly weathered granite section of Xiaotiandu Tunnel, and controlling the deformation of surrounding rock. The results show that: Adopting the annular excavation of three steps reserved core soil together with advance support can control the deformation of surrounding rock effectively and reduce tunnel crown settlement; Water-rich fully and strongly weathered granite can significantly reduce its strength meeting with water, adopting the water diversion and drainage in tunnel and well-points dewatering outside of tunnel can reduce the water content of surrounding rock effectively, and then reduce the risk of water collapse effectively, guaranteeing the safety and schedule of tunnel construction. The obtained results can provide reference for the construction of large cross section tunnel under similar geological conditions.

【Key words】 tunnel; strongly weathered granite stratum; water-rich; theoretical research; field monitoring; water diversion and drainage

0 引言

近年来,我国的高速公路隧道建设朝向快速蓬勃发展,随着我国西部大开发战略的深入实施,高速公路隧道不断向西部山区建设和延伸^[1]。因建设需要,隧道穿越地段不断遇到地质条件极为复杂的地层^[2-4],尤其西部地区最常出现的昔格达地层^[5-6]、震旦系白云岩^[7]、煤系地质^[8]、富水粉细砂层^[9]和热害环境^[10]等相关不良地质。隧道施工过程中选择合

理的施工方法,以安全快速通过不良地质地层,对隧道施工进度、质量及成本具有重大意义^[11]。雅康高速公路全线多座隧道穿越多个不良地质地层,小天都隧道洞身段穿越全强风化花岗岩富水地层。该地层围岩虽然在结构上仍具有其原岩结构特征,但其受隧道开挖影响大、扰动后呈砂状,遇水软化且稳定性差,围岩自身结构的承载力降低较大,具有明显的软化崩解性^[12]。软化作用容易使得围岩的物理力

基金项目:教育部创新团队发展计划资助(IRT0955);中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU11ZT33)

作者简介:马嘉霁,男,1997年生,河南郑州人,大学本科,主要从事桥梁与隧道工程。E-mail:1170912360@qq.com

学性能降低,隧道开挖时掌子面易发生泥塑状流出,极易滑塌、坍塌,导致隧道大变形^[13]。隧道埋深较浅时,常伴随隧道开挖产生地表纵向及环向裂缝。处于该类地层中的隧道,如果施工方法选择及过程控制不当,极易出现变形无法控制情况,从而导致施工安全、质量和进度无法保障^[14]。

学者针对富水地层隧道和花岗岩地层隧道的变形机制以及施工关键技术进行研究,如袁敬强^[15]等人采用现场勘探、理论分析与室内试验等方法,对全强风化花岗岩隧道发生的突水致灾机制以及灾变特征进行研究;张慧峰^[16]等人采用高压固结灌浆施工方法对富水锦屏山隧道进行排水加固。鲁军良^[17]等人针对全风化千枚岩地层所遇到的大变形进行原因分析,同时根据现场施工技术提出了隧道周边收敛和拱顶沉降的变形控制原则与措施。

综上所述,大部分学者针对全强风化花岗岩地层隧道进行研究,或者针对富水地层隧道进行相关施工关键技术研究,少有学者对全强风化花岗岩富水地层长大公路隧道进行研究。因此本文以雅康高速公路小天都隧道为例,采用理论设计与现场监测相结合,对全强风化花岗岩富水围岩大断面隧道的施工技术进行探究,以期西部公路隧道的安全快速施工提供指导作用,也可为同类隧道工程施工提供借鉴。

1 工程概况

小天都隧道位于康定县境内,为双洞分离式长越岭隧道,左右线轴线相距约 23~30 m,走向平行。线进口位于康定县炉城镇柳杨村大丈桥沟左岸斜坡上,距炉城镇约 9 km;K 线出口位于康定县炉城镇升航村打柴坪上游陡斜坡上,距炉城镇约 6 km。隧道规模见表 1。

表 1 隧道规模

隧道名称	隧道长度 /m	进口桩号	出口桩号	最大埋深 /m	备注
小天都隧道	左线 3685	ZK125+271	ZK128+956	900	分离式隧道
	右线 3676	K125+259	K128+265	883	

隧址区内主要地层为新生界第四系全新统崩坡积层块石、第四系全新统泥石流堆积层块石及元古界晋宁-澄江第四期斜长花岗岩。隧道洞身段全强风化花岗岩遇水易软化、出现剥落掉块现象,拱脚处围岩液化迅速使得无法支立钢架,钢架背后极易形成空腔。隧址区地表水主要来自多条常年水量充沛的沟水,地下水主要为大气降水和地表水直接或间

接补给,水量较丰富。

2 施工方案

施工过程中严格按照“新奥法”施工原理,遵循“早预报、管超前、非爆破、短开挖、少扰动、严治水、强支护、早封闭、勤量测、紧衬砌”的原则,针对小天都隧道洞身深埋全强风化花岗岩富水段,采用三台阶预留核心土环形开挖工法进行施工。

2.1 隧道开挖

以弧形导坑开挖预留核心土为基本模式,分上、中、下三个台阶七个开挖面,各部位的开挖与支护沿隧道纵向错开、平行推进。预留核心土的存在利于掌子面的稳定,同时施作超前支护,控制掌子面及前方处于稳定状态;可以进行多作业面平行作业,便于机械化施工;当围岩变形较大时可尽快调整闭合时间,及时调整施工工法、转换施工工序。其开挖主要步骤见表 2,施工工艺流程图如图 1 所示。

表 2 小天都隧道开挖主要步骤

施工步骤	施工工艺流程简述	施工原则
1	上部弧形导坑环向开挖,施作拱部初期支护	施工时尽量缩短台阶长度,确保初期支护尽快封闭成环,仰拱和拱墙衬砌及时跟进,尽早形成稳定的支护体系
2	中下台阶左右错开开挖,施作墙部初期支护	
3	中心预留核心土开挖、隧底开挖,施作隧底初期支护	

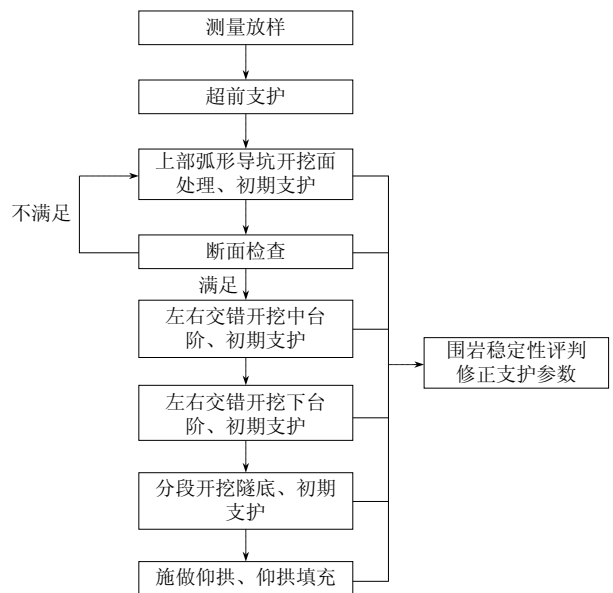


图 1 小天都隧道开挖施工工艺流程图

2.2 支护加强

隧道衬砌设计采用 Va 型支护,现场施工在原支护基础上采取了如下加强措施。

2.2.1 锁脚锚杆加强

锁脚锚杆采用 A22 mm、长度 4.5 m、间距 40 cm、壁厚 3.5 mm 的热轧无缝钢管。于上台阶左右拱脚、中台阶左右拱脚及下台阶永久支护侧拱脚处各分别打设 3 根砂浆锚杆,方向向下、与水平方向夹角约 30°,采用 U 型钢筋将其与工字钢焊接牢固。

2.2.2 超前支护加强

Va 复合式衬砌地段超前支护采用 A42 mm 注浆小导管支护。由于隧道所经地层为富水全强风化花岗岩,遇水会呈现出明显的软塑-流塑性质,故在原有的设计基础上需将注浆小导管加密加强。支护加强措施见表 3。

表 3 Va 型复合式衬砌支护加强参数

超前支护名称	支护部位	单根长/m	环向间距/cm	纵向间距/m
A42 注浆小导管	全环	4.5	40	1.5

利用风动凿岩机将小导管快速从型钢中部的导向孔中压送插入并进行填充注浆。设计注浆为水玻璃-水泥浆浆液。水泥浆水灰质量比 1:1,水泥浆与水玻璃体积比 1:0.5,水玻璃浓度 35 波美度,注浆压力 0.5~1 MPa。水泥浆的水灰比、水玻璃模数以及水玻璃与水泥体积比决定了双浆液的注浆效果,因此,为了保证现场注浆效果,进行超前支护注浆时应该判断围岩渗涌水情况后展开试验注浆,从而确定实际施工注浆的参数。

1) 临时仰拱。在现场进行必测和实测得到的拱顶沉降周边收敛情况以及围岩受力变化情况,在上台阶或中台阶设置临时仰拱。临时仰拱参数应采用 I18 工字钢,纵向连接钢筋为 A22 mm 螺纹钢,环向间距与主洞钢架间距相同,临时仰拱喷射厚度为 20 cm。

2) 其他辅助施工措施。围岩因富水而呈现软塑-流塑状态,开挖过程中容易出现坍塌。为此,在下台阶、仰拱开挖之前设置了钢管土钉、挂钢筋网喷射混凝土、砂袋叠放反压坡脚等以确保掌子面暂时稳定。

2.2.3 岩爆段衬砌支护参数设计

参考强度应力比法、《铁路隧道施工技术规范》与地应力及围岩性质判别,综合分析判定,隧道洞身段所经全强风化花岗岩以弱岩爆为主,局部发生中等岩爆。虽然从应力、地质等因素分析有可能发生岩爆的可能,但对于发生岩爆的段落范围及强弱程度很难在设计阶段予以确定,鉴于发生岩爆的因素较多,如应力、地层岩性、地质构造、地下水及开挖方式等,根据本项目隧道的实际情况,结合以往工程实

践经验,本次仅对隧道约 30% 的 III 级围岩段进行岩爆特殊处理,其余段落认为不发生岩爆或者发生的可能性较小。在施工阶段加强超前地质预报,对岩石饱和抗压强度超过 60 MPa 的地段加强岩爆的监测。岩爆段衬砌支护参数设计见表 4。

表 4 岩爆段衬砌支护参数设计

项目	单位	III 级围岩弱岩爆	III 级围岩中等岩爆	
喷射混凝土	C20 混凝土	cm	12	15
	直径	mm	A22	A22
径向锚杆	长度	cm	250	250
	锚杆布置	cm	100 * 90	100 * 90
模筑混凝土衬砌	C30 混凝土	cm	40	40
备注	1. 掌子面开挖后喷洒冷水; 2. 喷射混凝土封闭岩面			①掌子面开挖后喷洒冷水;②掌子面打应力释放孔;③ A22 掌子面超前药卷锚杆;④喷射混凝土封闭岩面

3 施工降排水

3.1 洞内排水

小天都隧道全强风化花岗岩具有相对隔水性,渗透系数相对较小、透水性差,地表水主要来自多条沟渠水补给,沟内常年有水且水量充沛,地下水主要为大气降水和地表水直接或间接补给,水量较丰富。隧道全强风化花岗岩遇水处于软塑状态。因此对于小天都隧道上述地层富水段,洞内以排水为主。对于掌子面及其前方围岩,采用钻孔排水,降低围岩含水率,提高围岩自身强度。钻孔排水实施步骤见表 5,钻孔排水现场施工图如图 2 所示。

表 5 钻孔排水实施步骤

步骤	流程	内容
步骤 1	确定单位时间排水流量	根据围岩水的来源,分别确定不降雨、弱降雨及强降雨期间的单位时间平均补给量,排水孔单位时间排水量应大于强降雨期间单位时间平均补给量
步骤 2	确定排水孔数量	根据流体力学满管承压水公式,代入小天都隧道全强风化花岗岩富水段最大水头,可得已知钻孔长度、已知孔径管径的单孔排水能力,进而得到其在某固定水头下的单孔排水能力 Q_0 ; 水头降至上述高度后遭遇已知强降雨 Q_{max} , 则可求出排水孔数量 $N_{max} = Q_{max} / Q_0$
步骤 3	排水实施	确定排水孔布设范围、间距及钻孔长度

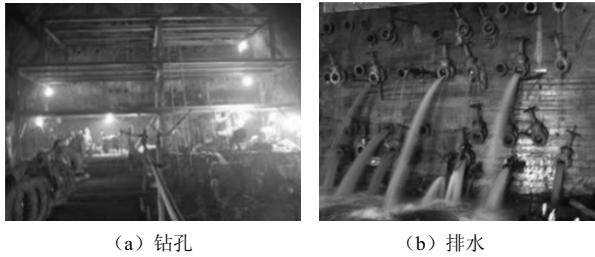
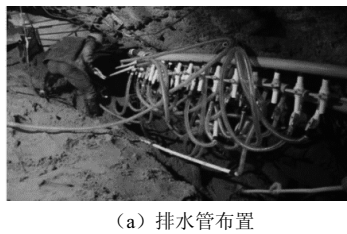
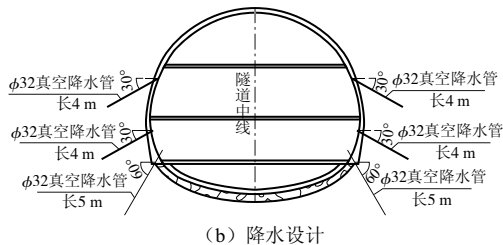


图2 钻孔排水现场施工图

对于地表水,采用降水施工,降水井采用无砂混凝土管,管径为 30 cm,外包滤网,井壁外填充粒径 4~16 mm的砂砾石。地表降水井钻至隧道仰拱填充层顶面标高以下 16 m 处。地表降水 8 天后进行掌子面开挖,掌子面钻孔排水随其开挖进度相应紧跟。施工中每半天进行一次含水率检测,待隧道全强风化花岗岩含水率降至 18%以下、施工现场人员用手抓围岩容易破碎但同时不易出水时,方可进行掌子面开挖。降水施工现场图如图 3 所示。



(a) 排水管布置



(b) 降水设计

图3 降水管路布置图及降水设计图

降水期间对全强风化花岗岩围岩含水率进行了统计分析,发现上述采取的洞内排水及地表降水措施能够有效降低围岩含水率,如图 4 所示。

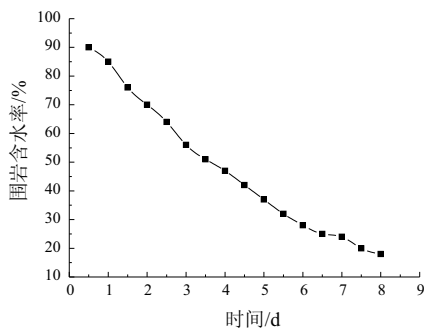


图4 围岩含水率随时间变化曲线

由图 4 可知,进行降水施工可以有效降低围岩的含水率,其随时间递增而递减,待降水施工到第 8 天,围岩含水率降至 18%,此时手握围岩不出水,证明第 8 天后围岩自身强度得到有效提高,可进行隧道开挖。

3.2 洞外井点降水

洞外进行井点降水,其最终目的是为降低洞内地下水位。根据小天都隧道现场施工情况,在隧道左线 ZK125+270~ZK125+315 区段设置 6 处井点降水孔。降水井于隧道开挖轮廓外侧 5 m 处呈单排设置,采用 150 mm 钢管,结合隧道仰拱底标高及地表标高确定,钻孔孔底探至隧道仰拱拱底下 10 m 处。采用内径 120 mm、具有高强度的 PVC 管作为降水管,安装完成后在水管与井壁间填充 4~6 mm 砂砾石反滤层。施作反滤层后,安装 80 m 高扬程自动水泵。施作降水井后,进行抽水试验,发现洞外井点降水施工后洞内渗水显著减少。洞外井点降水流程和洞外排水如图 5 和 6 所示,图 7 为日抽水量统计结果。

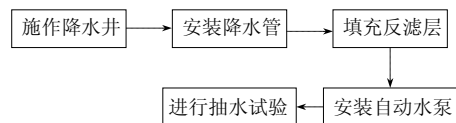


图5 洞外井点降水流程图



图6 洞外排水

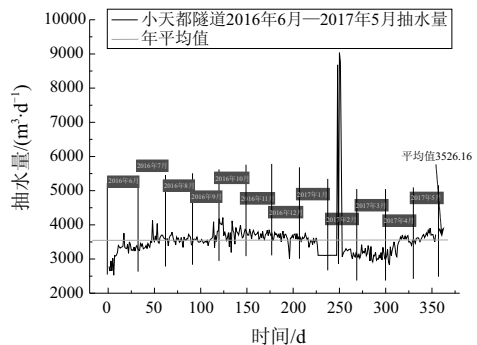


图7 日抽水量统计结果

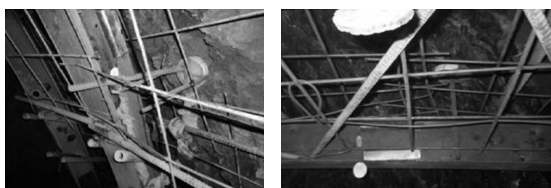
4 其他措施

4.1 超前地质预报

将超前地质预报技术作为施工工艺纳入小天都隧道施工管理工作中,作为一个必要手段,对掌子面前方的围岩及不良地质等进行判别预测。在小天都隧道全强风化花岗岩富水地层施工中,充分利用了超前水平钻孔、TSP 预报及地质雷达技术,并结合地质调查与勘探、结合钻探与物探、长距离及短距离结合的综合预报方法以提高掌子面前方围岩判别及预报的准确性及科学性,进行动态设计与施工,保证隧道安全快速施工。

4.2 监控量测

观察并记录掌子面工程与水文地质情况,做好地质素描。对围岩应力及应变进行量测,采用应变计、压力盒等监测钢架表面应变、锚杆轴力应变及围岩压力等,对隧道结构的支护效果及围岩稳定性进行评价,并采用位移分析法反演求得围岩初始应力及其主要物理力学参数,与实际结果、数值模拟结果进行对比分析。围岩压力盒布设及钢筋表面应变计布设如图 8 及图 9 所示。



(a) 围岩压力盒 (b) 压力盒连线

图 8 隧道现场围岩压力盒布设



(a) 应变计布置 (b) 应力计连线

图 9 隧道现场钢架表面应变计布设

从图 10 和图 11 可以看出,在花岗岩富水地层二次衬砌的轴力以受压为主,最大轴力出现在隧道的左拱腰位置,其值为 535.78 kN,对应的截面弯矩为 $-45.33 \text{ kN} \cdot \text{m}$,此处截面为承载力的控制面。

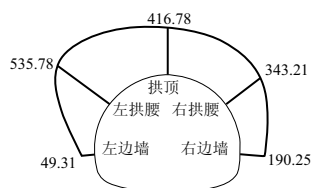


图 10 二衬最终轴力分布图

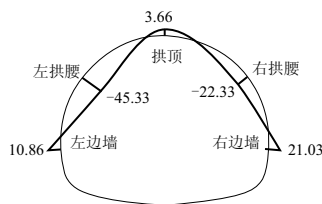


图 11 二衬最终弯矩分布图

5 结论

1) 小天都隧道穿越全强风化花岗岩富水地层施工过程中,通过采用三台阶预留核心土环形开挖、加强超前支护、转孔洞内排水及洞外井点降水等施工措施,结合超前地质预报及监控量测等技术手段,显著降低富水全强化花岗岩围岩的含水率。

2) 通过理论措施研究和现场监测可得到当降水施工至第 8 天,围岩含水率降至 18%,手握围岩无水流,可以进行隧道掌子面开挖,有效提高其自身承载能力,提高隧道施工的安全性施工进度,保证隧道安全快速通过。所得结果可为类似地层隧道施工技术提供参考。

3) 进一步可展开室内模型试验以研究富水全风化花岗岩地层隧道的突水变形机制和灾变特征,以及采取措施的效果,以验证现场试验结果。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.
- [2] 蒲会中, 蔡芸泽, 王卫花. 帷幕注浆施工技术在铜锣山隧道中的应用[J]. 岩土工程技术, 2014, 28(2): 73-75, 82.
- [3] 何振宁. 铁路隧道疑难工程地质问题分析——以 30 多座典型隧道工程为例[J]. 隧道建设, 2016, 36(6): 636-665.
- [4] 王晓峰, 董辉, 于清桦. 黄土边坡稳定性影响因素及分析方法[J]. 岩土工程技术, 2013, 26(1): 37-40.
- [5] 周平, 王志杰, 徐海岩, 等. 考虑含水率的昔格达地层隧道围岩稳定及亚级分级研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 97-110.
- [6] 王志杰, 周平, 徐海岩, 等. 昔格达地层隧道围岩灾变特征及致灾因子研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(11): 67-75.
- [7] 朱东亚, 金之钧, 张荣强, 等. 震旦系灯影组白云岩多级次岩溶储层叠合发育特征及机制[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 335-345.
- [8] 张沛杰. 留村隧道软岩施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(7): 88-91.
- [9] 张洋, 王志杰, 周平, 等. 富水粉细砂层隧道开挖坍塌的加固技术研究及效果分析[J]. 路基工程, 2017(3):

151-156.

- [10] 周平,王志杰,杨跃,等.玄武岩纤维喷射混凝土在热害环境下的性能试验研究[J].土木建筑与环境工程,2016,38(1):69-76.
- [11] 张顶立.隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J].力学学报,2017,49(1):3-21.
- [12] 张健儒.山岭隧道软弱围岩工程地质特性及施工对策[J].隧道建设,2014,34(8):749-753.
- [13] 王梦恕,谭忠盛.中国隧道及地下工程修建技术[J].中国工程科学,2010,12(12):4-10.
- [14] 燕全会.莲花山1号隧道富水全强风化花岗岩地段施工技术探讨[J].公路交通技术,2016,32(1):

105-108.

- [15] 袁敬强,陈卫忠,黄世武,等.全强风化花岗岩隧道突水灾害机制与协同治理技术研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):4164-4171.
- [16] 张慧峰,吴建文,张恒.已揭露高压地下水隧道注浆参数与工艺[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(8):47-52.
- [17] 鲁军良,宋新杰.全风化千枚岩围岩双连拱隧道变形控制技术[J].筑路机械与施工机械化,2012,29(1):67-71.

收稿日期:2018-04-02

(上接第126页)

$$\sigma_a = -\frac{F_{\text{res}}}{\pi R^2} - P_c \quad (4)$$

其中 F_{res} 表达式为

$$F_{\text{res}} = \int \sigma_z 2\pi r dr dz \quad (5)$$

图4给出了不同荷载条件下额外荷载应力与轴向应变之间的关系,对于同一边界约束下,额外荷载应力在一定轴向应变区间内呈递增的趋势;额外荷载应力达到一定值时,额外荷载应力不再随着轴向应变变化而变化;对于不同边界约束下,边界约束应力越大,其额外荷载应力稳定值越大。

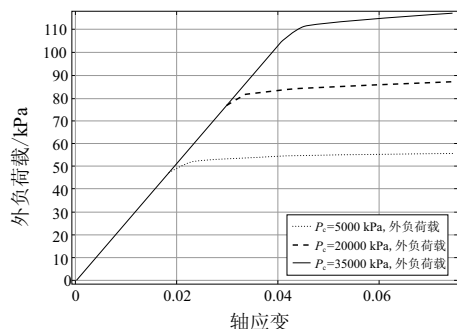


图4 不同围压下额外荷载应力-轴应力关系曲线图

3 结论

本文采用标准圆柱体试样,在轴对称压缩条件下,利用Drucker-Prager屈服准则作为土样的塑性条件,基于有限元软件模拟得到土体三轴压缩中应力-应变情况。同时,基于有限元软件的三轴压缩数

值模拟能真实反映土体的弹塑性变形情况^[6],因此可广泛应用于岩土工程中的其他弹塑性变形问题。如张晓波^[7]等人基于Drucker-Prager屈服准则利用有限元软件对圆形巷道围岩进行弹塑性分析,为判断巷道稳定性和进行巷道支护定量设计提供依据,使对巷道围岩的力学状态分析更加准确且接近实际是至关重要的。

参 考 文 献

- [1] 黄文熙.土的工程性质[M].北京:水利电力出版社,1983.
- [2] 郑颖人,沈珠江,龚晓南.广义塑性力学-岩土学塑性大学原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 王述红,唐春安,朱万成,等.数值试验在岩石力学实验教学中的应用[J].实验技术与管理,2003,20(6):140-143.
- [4] 张学言,闫澎旺.岩土塑性力学基础(第二版)[M].天津:天津大学出版社,2004.
- [5] 刘金龙,栾茂田,徐成顺.Drucker-Prager准则参数特性分析.岩石力学与工程学报,2006,25(2):4009-4015.
- [6] Potts D, Zdravkovic L. Finite element analysis in geotechnical engineering[M]. Thomas Telford Publishing 2001.
- [7] 张小波,赵光明,孟祥瑞.基于Drucker-Prager屈服准则的圆形巷道围岩弹塑性分析[J].煤炭学报,2013,38(S1):30-37.

收稿日期:2018-03-23