

库尉输水工程富水土质洞段的流固耦合分析*

刘乃飞¹, 李宁¹, 邓边员¹, 李国锋¹, 张岩²

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘 要:库尉输水隧洞前段位于库鲁克山北侧倾斜砾质平原区, 地下水位埋深较浅(最浅处仅为 1.4 m), 且远高于设计洞顶, 给设计和施工带来了巨大的困难和挑战。在深入分析水文地质条件的基础上, 采用大型有限差分软件 FLAC3D 对 3 个典型断面进行了流固耦合分析。研究表明, 地下水对隧洞受力及变形特性影响显著, 耦合条件下低液限粉土洞段拱顶变形约为不考虑渗流影响时的 5.6 倍, 且与实测值更为接近; 不同围岩类型和水文地质条件下各洞段的变形差异较大, 耦合条件下低液限粉土洞段的拱顶变形为 90 mm、而粉土夹砂和粉细砂夹砾石洞段的变形分别为 36 mm 和 26 mm; 耦合条件下各典型断面支护结构受力均超过了素喷混凝土的设计抗拉强度(1.1 MPa), 需尽快施做二次衬砌。以上研究成果可为本工程及类似工程的设计与施工提供参考。

关键词: 输水工程; 土质隧洞; 地下水; 流固耦合

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)02-0402-08

Fluid-solid Coupling Analysis of Water-riched Soil Tunnel for the Kuyu Water-transportation Project

Liu Naifei¹, Li Ning¹, Deng Bianyuan¹, Li Guofeng¹, Zhang Yan²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R. China;
2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, P.R. China)

Abstract: The front part of Kuyu water-conveyance tunnel is located in the gravel plains of the north Kuluke mountain, where the groundwater level is very shallow (the shallowest is only 1.4 m) and far above the tunnel roof. So the groundwater brings tremendous tragedy and challenge to the tunneling design and construction. Based on deep analysis of hydro-geological conditions, the fluid-solid coupling characteristics of several typical models of this tunnel was studied using three-dimensional finite-difference software-FLAC3D. It shows that the groundwater has a significant effect on the deformation properties of this tunnel. The vault settlement under coupling condition is approximately 5.6 times as that without considering the seepage effect and it is closer to the field test data. There is greater difference for the deformation of different alternatives under coupling condition, which has different country rocks and groundwater conditions. The vault settlement of low liquid limit silt is 90 mm, and that for the stratum of silt-sandmark and fine silt with gravel is 36 mm and 26mm, separately. The spray stress of the different alternatives in coupling condition are greater than the design strength of plain concrete, so the secondary lining should be applied as soon as possible. The research results have certain reference values for this and similar project.

Keywords: water-transportation project; soil tunnel; underground water; fluid-solid coupling

* 收稿日期: 2016-11-20. (修改稿)
作者简介: 刘乃飞 (1985-), 男, 陕西榆林人, 博士生, 主要从隧洞工程和多场耦合方面的研究。
E-mail: liunaifei1985@126.com
基金项目: 国家自然科学基金 (51179153, 51509200); 西安理工大学博士学位论文创新基金 (207-002J1306); 西安科技大学培育基金 (2014036)

0 引言

随着不可再生资源的不断减少和城市化进程的持续加快,迫使人类的许多工程建设选址于环境恶劣、人迹罕至的区域,其各物理场间存在强烈的耦合作用^[1],最常见的就是水分场和应力场的耦合问题(又称流固耦合)。

国内外学者在该方面做了大量的研究工作。仵彦卿^[2]建议在建流固耦合分析模型时采用机理分析法、混合分析法和系统辨识法。柴军瑞等^[3]对裂隙化岩体渗流场与应力场的耦合问题展开了研究。陈宇等^[4]基于有限差分法研究了双圆盾构隧道施工的力学行为。赵乐之等^[5]采用FLAC3D软件研究了流固耦合条件下地下储油洞库的稳定性。罗晓辉^[6]将渗流场的水分作用加入应力场分析中,并对深坑开挖过程中渗流场的变化规律及其对应力场产生的影响进行了探讨。李培超等^[7]将基于多孔介质的有效应力原理引入流固渗流中,建立了饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型。王建强等^[8]对流固耦合作用下水平定向孔壁的稳定性进行了研究。平扬等^[9]将Boit固结理论扩展应用于弹塑性分析领域,将渗流力作用与应力场耦合。陈波和李宁等^[10-12]在推证多孔介质三场耦合数学模型微分控制方程的基础上,系统地推导了六节点三角形单元的固液两相介质的温度场、渗流场和变形场三场耦合问题的有限元格式。王媛^[13]以Boit固结理论为基础,提出了以结点位移和孔隙水压力为未知量的渗流场与应力场的耦合计算方法。李廷春等^[14]采用流固耦合分析方法验证了厦门海底隧道最小顶板厚度比设计厚度减小时隧道的稳定性。孙闯等^[15]则对高水压越江隧道的渗流应力特性进行了研究。上述研究成果对我国复杂地区的岩土工程建设作出了巨大的贡献,对同类工程具有较大的参考价值,但是却鲜有针对富水土质输水隧洞的研究文献见刊。

本文以新疆库尉地区某输水工程为依托,使用FLAC3D软件研究流固耦合作用下高地下水土质洞段围岩及支护结构的受力和变形特性,以优化施工方案,指导富水土质洞段的设计施工,为同类工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

在建的库尉地区输水工程位于巴音郭楞蒙古自治州开都河—孔雀河流域境内,以向库尉地区输

水为主,兼顾库尔勒市经济技术开发区工业供水。输水线路由引水闸(桩号0+077)始,由北向南横穿近东西走向的库鲁克低山区,至库尔勒市工业开发区白鹭河首端北侧蓄水池(桩号13+700)止,全长13.7 km,沿线地形地貌为博湖-塔什店断陷盆地、库鲁克山北麓倾斜砾质平原区、库鲁克构造侵蚀低山区、库鲁克山南麓倾斜砾质平原区。

其中,输水隧洞长9.8 km,隧洞进口段洞身(桩号0+750~4+085段,简称土质洞段)分布有第四系中更新统洪积物(Q_{pl}^2),岩性为第四系含土碎石、含砾砂层及低液粉(粘)土层,含土碎石胶结差,钻孔岩芯呈散体状,地下水位均在设计洞顶10 m以上(如图1),受地下水影响,该段成洞条件极差。



(a) 地层岩性

(b) 地下水

图1 库尉隧洞土质洞段水文地质条件

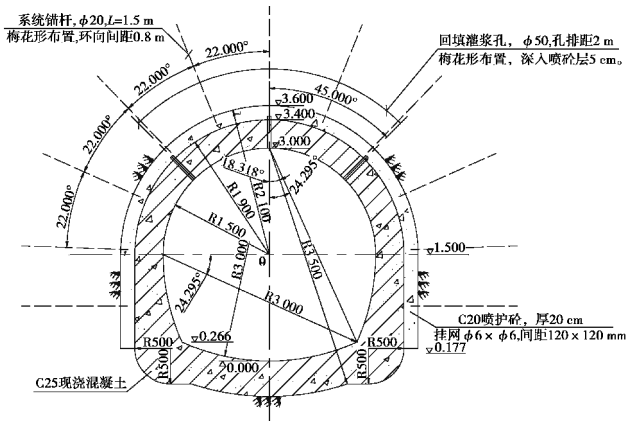
Fig. 1 Hydrogeological condition of Kuyu tunnel

土质洞段设计断面形式为马蹄形,隧洞跨度4.10 m,高跨比接近于1.0。采用上下台阶法进行开挖,台阶长度为0.8~2.0 m。隧道初期支护参数:15 cm厚C20喷射混凝土;直径 $\phi 6$ mm,间距12 cm \times 12 cm的钢筋网片; $\phi 20$ mm系统锚杆,长1.5 m,梅花形布置,环向间距0.8 m。其中1+130~2+200洞身段采用纵向间距0.8~1.0 m的格栅拱架,而2+200~4+085洞身段采用I14钢拱架(如图2)。

2 流固耦合分析原理

FLAC3D基本的流体渗流模型提供了渗透各向同性和各向异性的流体传导,以及在渗流区内模拟不可渗透材料的流体渗流的空模型,不同区域可以采用不同的渗流模型以及材料特性。该软件不仅可以模拟流体的变形,同时可以模拟饱和材料的压缩性,因此能够较好地模拟富水岩土材料的耦合特性。

FLAC3D模拟岩土材料的流固耦合机理时将其视为多孔介质,且流体在孔隙介质中的流动满足



参数。

表 1 流固耦合分析方案

Table 1 Analyzing alternatives for fluid-solid coupling

方案 编号	围岩 类型	埋深 /m	地下水 位/m	支护条件	耦合 情况
①	低液限 粉 土	30	21.0	钢拱架+系统锚杆+ 喷混凝土厚 20 cm	无渗 流场
②	低液限 粉土	30	21.0	钢拱架+系统锚杆+ 喷混凝土厚 20 cm	流固 耦合
③	粉 土 夹 砂	60	16.4	钢拱架+系统锚杆+ 喷混凝土厚 20 cm	流固 耦合
④	粉细砂 夹砾石	90	8.9	钢拱架+系统锚杆+ 喷混凝土厚 20 cm	流固 耦合

注:地下水位是指地下水位线高于洞顶的高度。

3.3 分析参数及边界条件

根据库尉输水工程地质勘察报告及反演分析确定的各典型断面相关分析参数如表 2 所示。

表 2 各分析方案参数

Table 2 Parameters of each alternatives

围岩类型	低液限粉土	粉土夹砂	粉细砂夹砾石
弹性模量 E/GPa	0.115	0.12	0.19
泊松比 μ	0.30	0.28	0.25
粘聚力 c/kPa	15.0	18.0	20.0
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	25.0	32.0	37.0
干密度 $\rho_d/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 530.0	1 650.0	2 040.0
渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.23×10^{-4}	1.5×10^{-4}	31×10^{-4}

模型力学边界条件:底部为固定端约束,四周为法向位移约束。

渗流边界条件:模型各边界均为不透水边界,开挖后,洞周及开挖面为透水边界。

4 流固耦合分析结果

为了系统了解库尉输水隧洞工程在高地下水条件下的变形及受力特性,本文根据 FLAC3D 软件计算结果,从开挖渗流场、应力场、围岩位移场及塑性区等几个方面进行了详细分析。

4.1 围岩渗流场分析

开挖完成后各方案的渗流场分布如图 4 所示,由于方案①不考虑地下水影响,因此不对其分析。

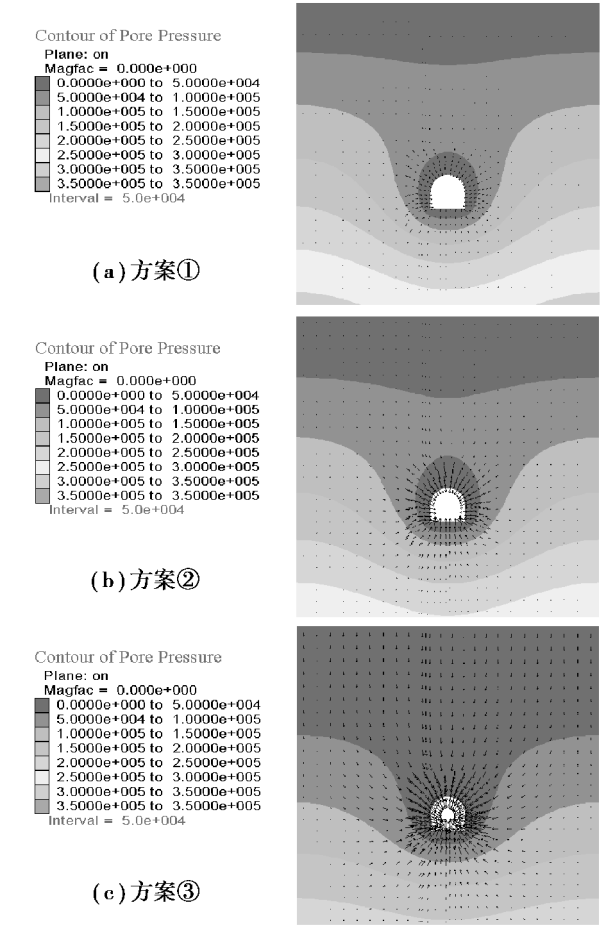


图 4 各方案围岩孔压场及渗流矢量图

Fig.4 Pore pressure and seepage vector of each alternatives

由图 4 可知,考虑流固耦合作用时,各方案渗流场分布趋势大致相同,只是随着围岩渗透系数的增大,渗透现象越显著。开挖改变了围岩原有的渗流边界,使得开挖后地下水不断涌入洞内,且随着掌子面的推进,围岩孔压不断降低,尤以隧洞顶部围岩降低最为明显。各典型洞段(方案)拱顶和边墙部位的初始孔压分别为(0.19 MPa,0.22 MPa)、(0.16 MPa,0.19 MPa)和(0.09 MPa,0.12 MPa),而开挖完成后洞周轮廓线各点的孔压全部消散。

4.2 围岩应力场分析

各方案开挖完成后所得应力场分布情况如图 5 所示,本文以竖直应力(σ_{zz})为例进行分析。

由图 5 可知,由于开挖改变了洞周围岩的渗流和应力边界条件,致使洞周围岩应力场进行了重分布,局部区域出现了应力集中现象。对比图 5(a)

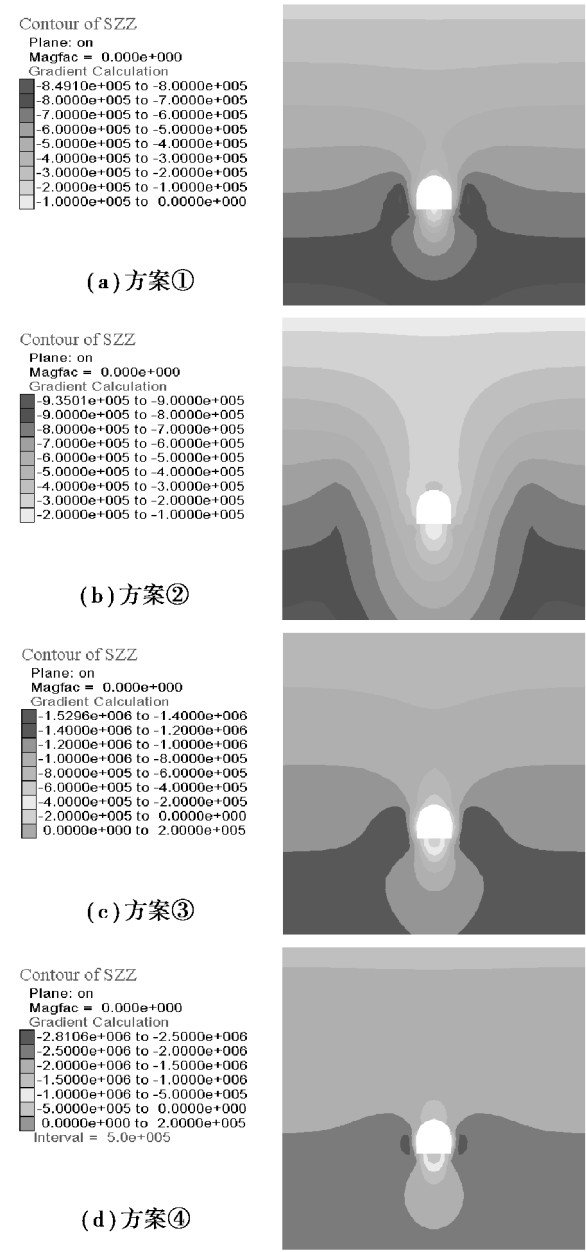


图 5 各方案围岩应力场 σ_{zz}

Fig.5 Stress field (σ_{zz}) of each alternatives

和图 5(b)可以看出,渗流场对应力场的影响显著,不考虑渗流场的影响时,拱顶压应力值为 0.26 MPa,而耦合分析所得值为 0.32 MPa。此外,由图 5 中的后 3 个图对比可以看出,随着水文地质条件和埋深的变化,虽然各洞段的应力场分布规律基本相同,但量值有较大差异,方案③和④拱顶的压应力分别为 0.44 MPa、1.00 MPa。可见,地下水和隧洞埋深对洞周围岩受力影响显著。

4.3 围岩位移场分析

各方案开挖完成后所得位移场分布情况如图 6 所示,本文以总位移场(Disp)为例进行分析。

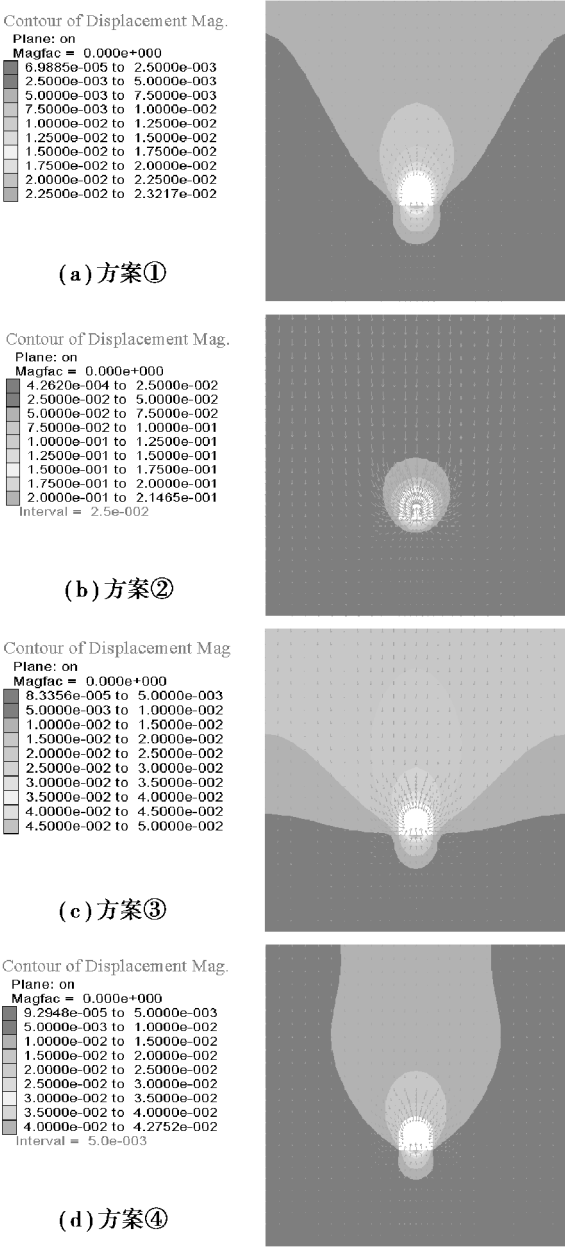


图 6 各方案围岩位移场图

Fig.6 Displacement field of each alternatives

由图 6 可知,各方案洞周围岩变形规律基本相同,均表现为向洞内的收敛变形,只是考虑地下水影响时围岩变形明显大于无地下水影响时的变形。同时,由于地下水不断涌入隧洞,致使隧洞上部土体孔隙水压力大量消散,进而增加了土颗粒的有效应力,使得隧洞上部变形影响范围明显大于无地下水方案。对于低液限粘土,考虑耦合效应时的变形约为不考虑耦合(16 mm)的 5.6 倍。此外,耦合条件下各方案的具体变形情况差异也较大,低液限粘(粉)土洞段拱顶的变形约为 90 mm,而粉土夹砂和粉细砂夹砾石洞段的拱顶变形分别为 36 mm 和

26 mm。可见,地下水对围岩变形影响显著,在隧洞的设计和施工中必须考虑地下水的影响,以保证工程安全。

图7为各分析断面拱顶实测变形,由于监测手段和施工条件的限制,洞内收敛监测断面布设较晚,仅收集到了掌子面通过一定距离后的变形。其中方案②监测断面布设时距掌子面4.5 m,方案③为3.0 m,方案④为3.5 m。

图7中各断面监测到的变形分别为6.90 mm、4.82 mm和3.10 mm,结合工程经验和本文数值模拟结果可知其约占总变形的7.8%、14.6%和11.4%。据此可以得到各断面的总变形分别为88.5 mm、33.0 mm和27.2 m。同数值模拟结果对比可知,实测变形与耦合条件下的分析结果基本相符。可见,富水土质隧洞模拟必须考虑地下水的影响,否则会导致分析结果失真,严重影响支护结果

设计的可靠性。

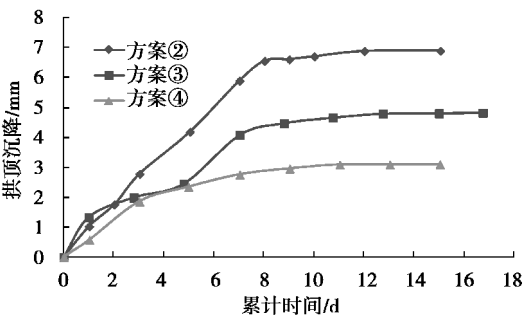


图7 各方案拱顶实测变形

Fig.7 Measured deformation of arch crown for each plans

4.4 围岩塑性区分析

上节系统分析了各方案围岩位移场分布情况,下面结合围岩塑性区分布图(图8),对各方案的变形场进一步进行分析。

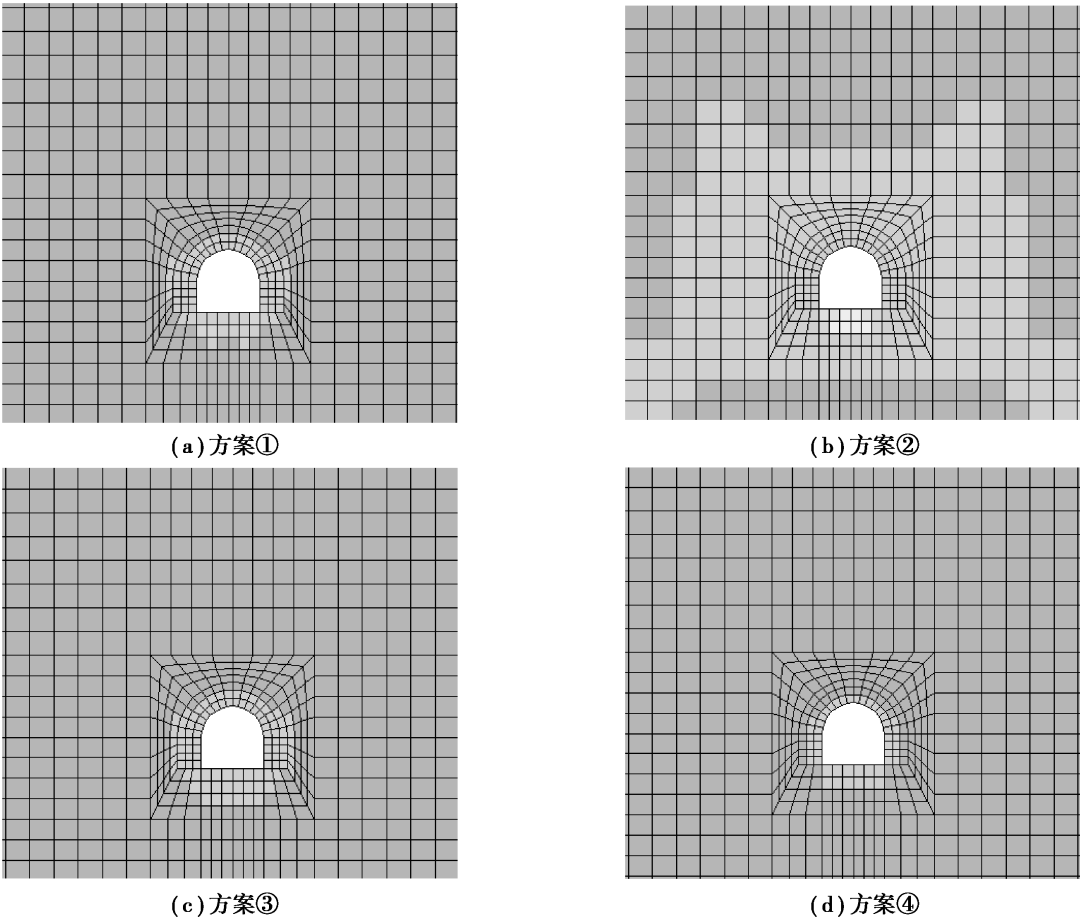


图8 各方案围岩塑性区图

Fig.8 Plastic range of each alternatives

由图8可知,由于开挖扰动致使洞周围岩出现了大片的塑性区。由图8(a)和(b)的对比可以看

出,地下水对洞周围岩塑性区的发展影响显著,不考虑地下水影响时塑性区深度仅为1.9 m,而考虑

地下水影响时隧洞周围大片范围内(8.9 m)均有塑性变形产生,这与变形场分布情况相吻合。对比后 3 张图可以看出,由于各洞段岩性逐渐变好且地下水位逐渐降低,使得洞周围岩的塑性区逐渐减小。方案③塑性区深度约为 2.0 m,而方案④仅出现了少量(1.0 m)的塑性区。

4.5 支护结构受力分析

各方案开挖完成后监测断面处支护结构的受力情况如表 3 所示。

表 3 支护结构受力分析表
Table 3 Force situation of primary supporting structure

方案	锚杆轴力/kN		喷层应力/MPa					
	拱顶	边墙	拱顶			边墙		
			σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3
①	4.68	17.07	-2.81	-0.03	0.34	-3.58	-0.01	0.65
②	9.11	14.65	-4.35	-1.00	0.02	-4.28	-0.01	1.31
③	5.63	18.63	-3.89	-0.03	1.42	-5.57	-0.01	0.51
④	16.14	34.60	-8.36	-0.02	2.71	-8.13	-0.01	0.40

由表 3 可以看出,各方案情况下锚杆受力均以拉为主,随着洞顶埋深的增加锚杆轴力不断增大,埋深为 90 m 时,锚杆的最大轴力出现在边墙中部,约为 34.6 kN,超过了锚杆的允许轴力 23 kN。同时,从表中可以看出各方案第一主应力均为压应力,且方案④的量值最大(约为 8.36 MPa)。但各方案第三主应力均为拉应力,且耦合条件下各方案的受力均超过了 C20 素喷混凝土的设计抗拉强度 1.1 MPa。由于隧洞实际支护为挂网喷射混凝土并安装有型钢拱架,故将初期支护结构的允许抗拉强度增大为设计抗拉强度的 1.2 倍(约为 1.32 MPa)。此时,后两个断面的喷层受力仍大于允许抗拉强度,可能导致支护结构发生破坏开裂,这也与工程实际中观察到的情况相符,如图 9。

此外,对比表 3 中的前两个方案还可以看出,水-力耦合条件下喷层应力明显大于不考虑地下水的情况,边墙部位喷层的最大拉应力近似增加了 1.0 倍,并有发生破坏的危险,可见,对于富水土质隧洞,必须考虑地下水对洞室围岩变形和支护结构受力的影响。同时,由方案②③④可以看出,随着埋深增加、水位降低、岩性变好,支护结构的受力逐渐增加,因此,在支护结构设计中必须根据以上各

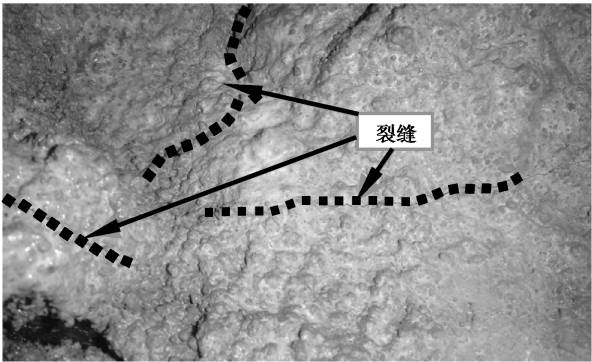


图 9 喷层开裂图
Fig.9 Pictures of spray layer cracking
因素在各洞段选取不同的支护方案。

5 结论

库尉输水隧洞地下水位远高于洞顶(均在 10 m 以上),给隧洞施工带来严重不利影响,增加了安全隐患。本文采用 FLAC3D 有限差分软件,对几个典型洞段进行了系统分析,主要取得了以下认识:

(1)地下水对围岩和支护结构的受力及变形情况影响显著,在高地下水区域进行地下工程设计时必须考虑地下水的影响,且应进行专门的耦合分析。

(2)对于低液限粉(黏)土,洞段耦合条件下拱顶变形约为不耦合时的 5.6 倍,由于开挖后洞周土体孔隙水压力的大量消散,使得其塑性影响区域明显大于无地下水情况。

(3)由于围岩类型、埋深及地下水位差异较大,各分析断面变形规律虽然大致相同,但量值上存在较大差异,低液限粉土段拱顶变形约为 90 mm、而粉土夹砂和粉细砂夹砾石洞段拱顶的变形分别仅为 36 mm 和 26 mm。

(4)各典型洞段支护结构在水-力耦合作用下均产生了较大的拉应力,部分洞段超过了喷层的允许强度,即便有钢筋网和钢拱架的存在,仍有发生破坏的危险。因此,对于土质富水隧洞必须做好降排水工作,并尽快施做二次衬砌,以确保隧洞安全稳定。

参考文献(References)

[1] 钱七虎. 地下空间开发利用的第四次浪潮以中国的现状、前景和发展战略[M]. 北京:中国科学技术出

- 版社,2000.(Qian Qihu. The fourth tide to utilize and develop underground space and its present state, prospect and development strategy in china [M]. Beijing:China Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [2] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 303-310. (Wu Yanqing. Groundwater flow and geological hazards[J]. Underground Space, 1999, 19(4): 303-310.(in Chinese))
- [3] 仵彦卿, 柴军瑞. 裂隙网络岩体三维渗流场与应力场耦合分析[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(1): 1-5.(Wu Yanqing, Chai Junrui. Analysis of 3-D model of coupled seepage and stress fields in fracture network of rock mass [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(1): 1-5.(in Chinese))
- [4] 陈宇, 朱继文. 双圆盾构隧道的流固耦合分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 21-27. (Chen Yu, Zhu Jiwen. Coupled fluid mechanical analysis of DOT shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 21-27.(in Chinese))
- [5] 赵乐之, 刘保国, 赵峰. 考虑流固耦合的地下储油洞库稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 155-162. (Zhao Lezhi, Liu Baoguo, Zhao Feng. Research on stability of underground petroleum storage caverns with consideration of fluid-solid coupling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 155-162.(in Chinese))
- [6] 罗晓辉. 深基坑开挖渗流与应力耦合分析[J]. 工程勘察, 1996(6): 37-41. (Luo Xiaohui. The seepage-normal stress coupling analysis of deep foundation pit excavation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1996(6): 37-41.(in Chinese))
- [7] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合的数学模型[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003, 18(4): 419-426. (Li Peichao, Kong Xiangyan, Lu Detang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect[J]. Chinese Journal of Hrdrodmnatics (A), 2003, 18(4): 419-426.(in Chinese))
- [8] 王建强, 李国民, 赵洪波, 等. 流固耦合作用下水平定向孔壁稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 796-801. (Wang Jianqiang, Li Guomin, Zhao Hongbo, et al. Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling in fluid-solid coupling condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 796-801. (in Chinese))
- [9] 平扬, 白世伟, 徐燕平. 深基坑工程渗流-应力耦合分析数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 37-41. (Ping Yang, Bai Shiwei, Xu Yanping. Numerical simulation of seepage and stress coupling analysis in deep foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanicas, 2001, 22(1): 37-41.(in Chinese))
- [10] 陈波, 李宁, 糕瑞花. 多孔介质的变形场-应力场-温度场耦合有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 467-472. (Chen Bo, Li Ning, Zhuo Ruihua. FEM analysis on fully coupled thermo-hydro-mechanic behavior of porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 467-472.(in Chinese))
- [11] 李宁, 陈波, 陈飞熊. 寒区复合地基的温度场、水分场与变形场三场耦合模型[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 66-71. (Li Ning, Chen Bo, Chen Feixiong. Heat-moisture-deformation coupled model for composite foundation in cold zone [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 66-71.(in Chinese))
- [12] 李宁, 徐彬, 陈飞熊. 冻土路基温度场、变形场和应力场的耦合分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 1-7. (Li Ning, Xu Bin, Chen Feixiong. Coupling analysis of temperature, deformation and stress field for frozen soil roadbed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 1-7.(in Chinese))
- [13] 王媛. 多孔介质渗流与应力耦合的计算方法[J]. 工程勘察, 1995(2): 33-37. (Wang Yuan. Coupling method of stress and fluid field for porous medium [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1995(2): 33-37.(in Chinese))
- [14] 李廷春, 李术才, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 397-401. (Li Tingchun, Li Shucai, Chen Weizhong, et al. Coupled fluid-mechanical analysis of Xiamen subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 397-401.(in Chinese))
- [15] 孙闯, 林增华, 王晨. 高水压越江隧道联接通道渗流应力耦合分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(11): 57-61. (Sun Chuang, Lin Zenghua, Wang Chen. Coupled seepage-stress in the connection aisle of cross-river tunnel under high water pressure [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(11): 57-61.(in Chinese))