

考虑孔隙水作用的浅埋隧道围岩变形规律分析

凌涛¹, 孙望成^{1,2}, 刘翔¹, 彭学军¹, 张道兵^{2*}

(1. 中铁五局集团第一工程有限责任公司, 湖南长沙 410117; 2. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 为研究孔隙水作用下浅埋隧道围岩的变形规律, 以甘肃省平凉市潘城隧道为例, 采用 FLAC^{3D} 有限差分软件, 建立浅埋隧道三维数值模型, 分析隧道围岩垂直位移(顶板下沉量)和水平位移(边墙移近量)随孔隙水压力的变化规律, 获得不同孔隙水压力系数下的最大顶板下沉量和边墙移近量。并将数值模拟计算结果应用到潘城浅埋富水隧道施工中, 使隧道顶板下沉量和边墙移近量均控制在规范要求的安全范围内, 为潘城隧道右线施工提供了理论指导。

关键词: 浅埋隧道; 孔隙水压力; 数值模拟; 顶板下沉量; 边墙移近量

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)01-0016-05

Analysis of Surrounding Rock Deformation in Shallow Tunnel Considering Pore Water Action

LING Tao¹, SUN Wangcheng^{1,2}, LIU Xiang¹, PENG Xuejun¹, ZHANG Daobing²

(1. First Engineering Co., Ltd., China Railway No.5 Bureau Group, Changsha 410117, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the deformation law of surrounding rock of shallow buried tunnel under the action of pore water, taking Pancheng Tunnel in Pingliang City, Gansu Province as an example, a three-dimensional numerical model of shallow buried tunnel is established by using FLAC^{3D} finite difference software, and the changes of vertical displacement (roof subsidence) and horizontal displacement (side wall approach) of tunnel surrounding rock with pore water pressure are analyzed. The maximum roof subsidence and side wall movement under different pore water pressure coefficients are obtained. The numerical simulation results are applied to the construction of the shallow buried rich water tunnel in Pancheng, and the tunnel roof subsidence and side wall movement are controlled within the safety range required by the code, which provides theoretical guidance for the construction of the right line of Pancheng tunnel.

Keywords: shallow buried tunnel; pore water pressure; numerical simulation; roof subsidence; side wall approach

随着我国交通运输系统的建设和发展,大量的隧道工程应运而生。在隧道施工过程中,对隧道围岩稳定性的研究与控制一直是工程施工中的重点及难点^[1-2]。在雨季施工时,当雨水入渗至地层或有地下水存在时,岩体颗粒之间形成的孔隙水压力会使岩体的抗剪强度降低,进而影响隧道的稳定性^[3-4]。因此,研究浅埋富水隧道的稳定性具有较高的科研价值和工程意义。

目前,很多学者采用理论分析的方法研究浅埋隧道的稳定性。郭子红等^[5]利用极限平衡法研究浅埋隧道 3 种不同类型破裂面的稳定性,并对影响隧道破裂面分布的因素进行分析;赵炼恒等^[6]将偏压荷载系数

引入极限分析上限法中,讨论浅埋偏压隧道的围岩压力;李修磊等^[7]建立浅埋隧道三维破坏模式,并运用极限分析法计算得到极限支护压力,详细分析影响开挖面支护力的因素,为黏土地层隧道的支护提供了指导.还有学者采用数值分析的方法研究隧道的稳定性,并取得一定的成果.赵金鹏等^[8]将数值模拟和现场监测结合,对比分析管棚支护对围岩稳定性的影响及其作用机理;卢光兆等^[9]运用数值分析软件研究 3 种不同工法施工时隧道围岩应力分布情况,并选取最优的施工方法,有效地保证了施工时围岩的稳定性;文海家等^[10]基于数值模拟所得数据,运用 GIS-SVM(地理信息系统-支持向量机)联合手段研究山岭隧道围岩的稳定性,所得的隧道稳定性评价成果为现场施工提供了有效参考;王森等^[11]运用测震仪测量隧道爆破开挖时的数据并进行数值模拟,以此研究爆破震动对相邻隧道和开挖隧道稳定性的影响,并提出可行的优化支护方式.

上述文献在研究浅埋隧道的稳定性时没有考虑孔隙水的影响,然而众多工程实践表明孔隙水对浅埋隧道围岩的稳定性具有显著影响.因此,本文以潘城浅埋富水隧道为例,研究浅埋富水隧道的围岩变形规律及其稳定性,为今后类似隧道施工提供理论参考.

1 工程概况

潘城隧道位于甘肃省平凉市崆峒区潘城村,采用设计速度 80 km/h 的双向四车道高速公路标准,按分离式双洞布置.隧道右线 ZK0+755—+ZK2+837,总长 2 082 m,隧道埋深为 20.8~48.2 m,平均埋深为 35 m,属于浅埋隧道,隧道围岩全部为 V 级.隧道净高为 5 m,净宽为 6 m,断面形状为类矩形断面.经施工过程中检测,隧道围岩天然含水量为 25%~27%,有明显的流水现象.围岩变形模量 $E=1.5$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$ GPa,黏聚力 $c=0.1$ MPa,内摩擦角 $\varphi=20^\circ$,岩体重量 $\gamma=18$ kN/m³.局部段洞顶存在大冲沟,地质构造复杂,安全风险较高,施工难度较大.潘城隧道断面破坏模式计算模型如图 1 所示.

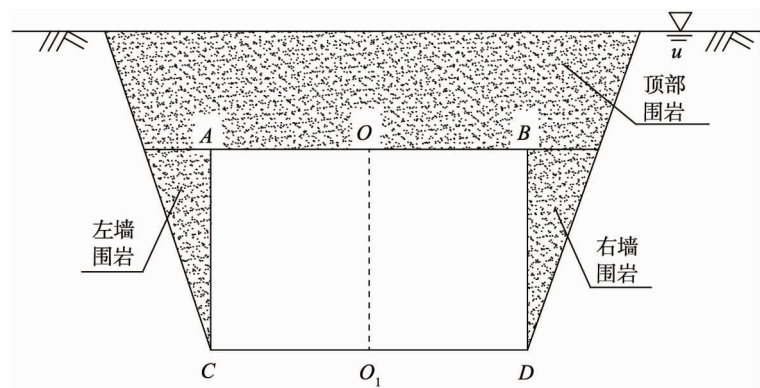


图 1 潘城隧道断面破坏模式计算模型

潘城隧道断面破坏模式计算模型如图 1 所示.

2 建立模型

将隧道断面近似为矩形断面,采用 FLAC^{3D}有限差分软件建立隧道三维数值模型,模型尺寸为 40 m×20 m×30 m(X×Y×Z),数值模型由 3 750 单元和 4 836 个节点构成,如图 2 所示.考虑孔隙水因素,把孔隙水压力看作重力的分量施加在数值模型中,孔隙水压力计算公式为^[12]

$$u = r_u \gamma z. \quad (1)$$

式中: u 为孔隙水压力; r_u 为孔隙水压力系数,一般取 0.1~0.5; γ 为岩体重量; z 为地下水水位线高度.

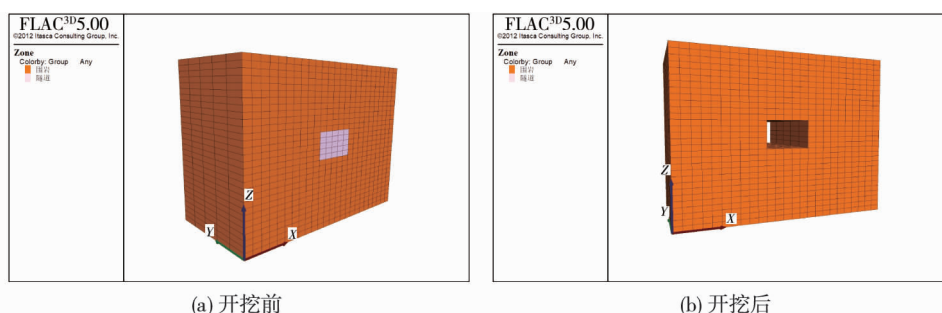


图 2 浅埋隧道数值模型

3 结果分析

3.1 数值模拟

以潘城浅埋富水隧道为背景,基于有限差分原理,采用FLAC^{3D}数值模拟软件,分析不同孔隙水压力作用下隧道围岩变形规律,获得了不同孔隙水压力系数下的顶板最大下沉量、边墙最大移近量以及位移变化曲线。

3.1.1 竖直位移变化规律

不同孔隙水压力系数下的隧道顶板竖直位移云图如图3所示,隧道顶板下沉量如表1所示.由图3a和图3b及表1发现,考虑孔隙水压力(如压力系数 $r_u=0.1$)时,顶板竖向位移为35.47 mm,不考虑孔隙水压力($r_u=0$)时,顶板竖向位移为9.83 mm,相对变化率为72.29%,这说明考虑孔隙水压力与不考虑孔隙水压力计算的结果相差甚远.因此,在进行隧道顶板围岩变形分析时应考虑孔隙水压力的作用,否则会严重低估顶板下沉量,造成计算结果精度不高.结合图3b~图3d以及表1发现,当孔隙水压力系数 r_u 从0.1增大到0.3时,隧道顶板最大下沉量从35.47 mm增大到85.56 mm,增大了50.09 mm;当孔隙水压力系数 r_u 从0.3增大到0.5时,隧道顶板最大下沉量从85.56 mm增大到156.09 mm,增大了70.53 mm.这说明孔隙水压力对隧道顶板围岩变形的影响极大,隧道顶部裂隙中富含的孔隙水越多,作用在隧道顶板的孔隙水压力越大,这就加快了顶板的下沉速度,当顶板下沉量达到极限值时会发生破坏,进而造成严重的塌方事故.因此,针对浅埋富水隧道施工提出建议:(1)在隧道相应位置修建合理的排水沟,及时排出顶部围岩中的裂隙水,避免隧道顶部因孔隙水压力过大造成顶板承受荷载达到极限而发生破坏;(2)采用锚杆、注浆、喷混凝土层等加固措施对隧道顶板进行支护,加强隧道顶板围岩的承载能力,避免顶板围岩变形过大而发生塌方事故。

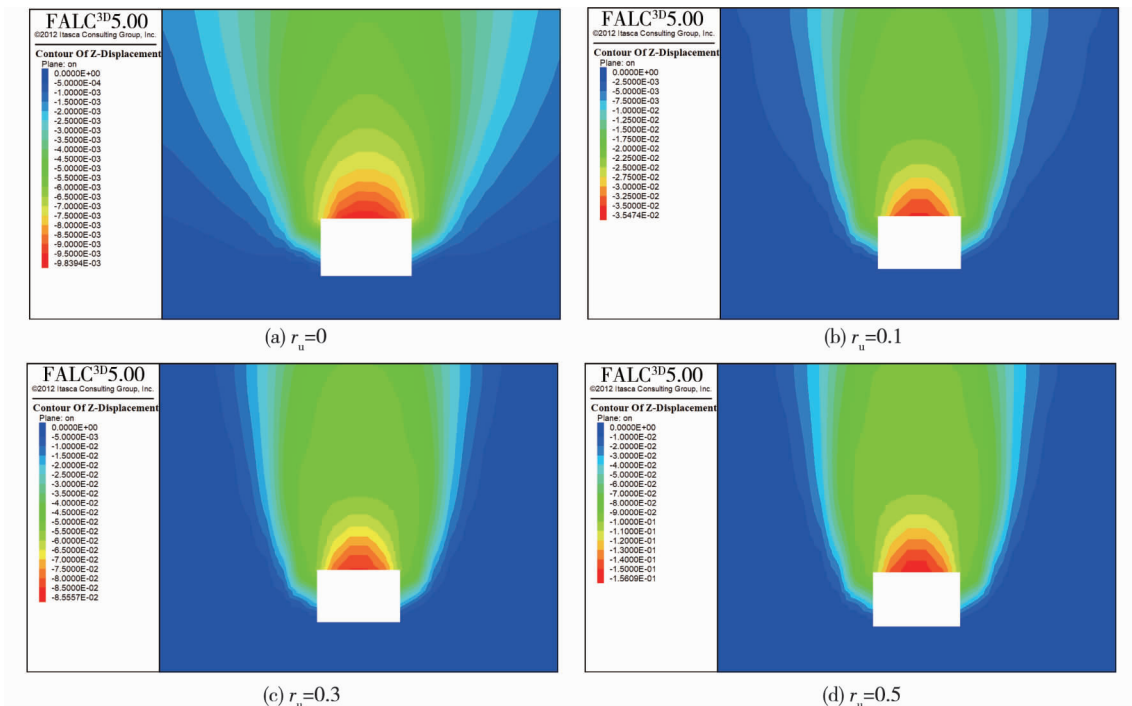


图3 不同孔隙水压力系数下的隧道顶板竖直位移云图

表2 不同孔隙水压力系数下的隧道顶板下沉量

孔隙水压力系数 r_u	0	0.1	0.3	0.5
竖直方向位移量/mm	9.84	35.47	85.56	156.09

3.1.2 水平位移变化规律

不同孔隙水压力系数下隧道边墙水平位移云图及移近量分别如图4和表2所示.观察图4a和图4b

可知,考虑孔隙水压力($r_u=0.1$)与不考虑孔隙水压力($r_u=0$)时的水平位移分别为 19.87 mm 和 6.13 mm,相对变化率为 69.15%。这说明在隧道边墙变形分析中必须考虑孔隙水压力的作用,否则会严重低估隧道边墙移近量,造成计算结果误差过大。从图 4b~图 4d 以及表 2 看出,当孔隙水压力系数 r_u 从 0.1 增大到 0.3 时,隧道边墙位移量从 19.87 mm 增加到 44.49 mm,增加了 24.62 mm;当孔隙水压力系数 r_u 从 0.3 增大到 0.5 时,隧道边墙位移量从 44.49 mm 增大到 76.92 mm,增大了 32.43 mm。由此可见,孔隙水压力对隧道边墙移近量具有显著影响,随着孔隙水压力系数逐渐增大,隧道边墙移近量也不断增大。这是由于富水隧道边墙裂隙富含的孔隙水越多,作用在隧道边墙区域的孔隙水压力越大,导致边墙移近量不断增大,当边墙承载能力达到极限时会发生片帮事故。因此,针对富水浅埋隧道施工提出建议:(1)加强隧道内尤其是两帮边墙的排水,最大限度减小隧道裂隙中的孔隙水,进而减小孔隙水压力对隧道边墙围岩的影响;(2)采用注浆、喷混凝土层、锚杆等对隧道两帮加强支护,提高隧道边墙围岩自身的承载能力和稳定性,避免边墙塌方事故的发生。

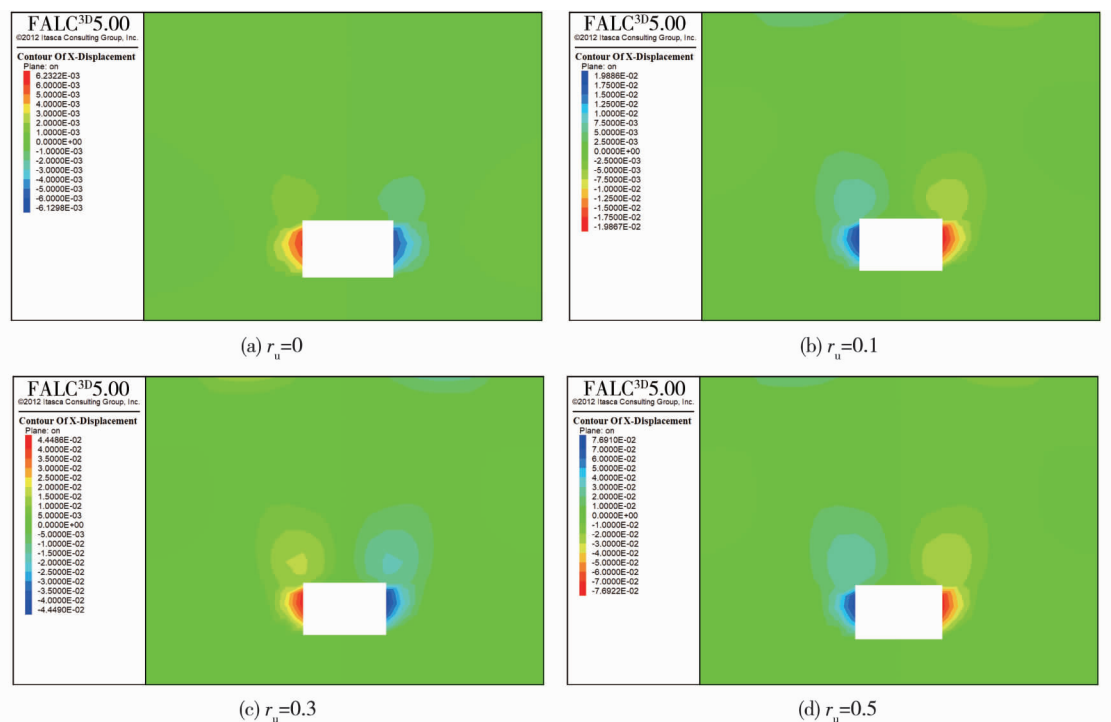


图 4 不同孔隙水压力系数下的隧道边墙水平位移云图

表 2 不同孔隙水压力系数下的隧道边墙移近量

孔隙水压力系数 r_u	0	0.1	0.3	0.5
水平方向位移量/mm	6.13	19.87	44.49	76.92

同时,对比图 3 和图 4 还可看出,隧道顶板和边墙处的竖直位移最大。以图 3b 中顶板下沉量为例进行分析,顶板处的位移最大值为 35.47 mm,且随着与顶板距离的增大,竖直位移逐渐减小,且减小幅度变缓;以图 4b 中边墙移近量为例进行分析,边墙处的最大移近量 19.87 mm,且越远离边墙区域,其边墙移近量就越小。这是因为隧道开挖打破了顶部和边墙围岩的原始应力平衡,导致顶部和边墙围岩应力重新分布,引起顶板和边墙处应力集中,进而顶板在顶部围岩自重以及上部荷载的作用下竖直向下移动,边墙在水平荷载作用下向隧道内部移动,情况严重时会造成顶板和边墙坍塌等事故。因此,建议在施工过程中采用锚杆、锚索、注浆等加强隧道支护,提高隧道顶板和边墙围岩的承载能力和稳定性,避免隧道发生塌方等突发性重大事故。

3.2 工程应用

在潘城隧道施工中,参考本文数值模拟结果进行开挖,对隧道内不同含水情况的区域采取不同的开挖

方法和支护措施,经过现场监测,发现隧道顶板下沉量控制在 10 mm 以内,左、右边墙移近量均控制在 5 mm 以内,监测结果如图 5 所示.根据《公路隧道施工技术规范》^[13] 要求可知,顶板和边墙围岩变形均在安全范围内,这说明本文数值模拟结果对隧道施工起到了较好的指导作用,也进一步验证了该数值模拟计算结果的合理性.

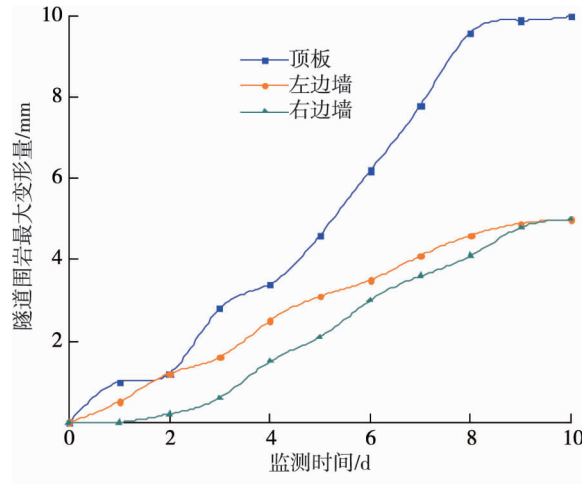


图 5 潘城隧道右线位移监测曲线

4 结论

1) 采用数值模拟方法分析有孔隙水压力和无孔隙水压力 2 种情况的顶板下沉量及边墙移近量,发现在浅埋富水隧道围岩变形及其稳定性分析时应考虑孔隙水压力作用,否则会严重低估顶板下沉量和边墙移近量的计算值.

2) 将数值模拟理论结果应用到潘城隧道施工现场中,隧道顶板下沉量和边墙移近量均达到规范要求,对施工起到了较好的理论指导作用,也为类似隧道的施工提供参考.

参考文献:

- [1] 田四明,王伟,巩江峰.中国铁路隧道发展与展望(含截至 2020 年底中国铁路隧道统计数据)[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):308-325.
- [2] 彭学军,孙望成,饶永强,等.盾构施工对周边建筑物影响及其保护技术[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2020,32(2):75-79.
- [3] 安永林,曾贤臣,赵丹,等.富水程度及饱水时间对隧道掌子面稳定性影响[J].铁道科学与工程学报,2019,16(5):1260-1265.
- [4] 孙望成,张道兵,蒋瑾,等.考虑 Hoek-Brown 准则的挡土墙主动土压力[J].吉首大学学报(自然科学版),2021,42(1):61-65.
- [5] 郭子红,刘新荣,朱占元.浅埋隧道围岩破裂面的极限平衡分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3217-3224.
- [6] 赵炼恒,黄阜,孙秋红,等.浅埋偏压矩形单洞隧道围岩压力极限上限分析方法[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3093-3103.
- [7] 李修磊,李金凤,杨超.黏土地层浅埋盾构隧道开挖面三维稳定性上限分析[J].铁道学报,2021,43(4):166-174.
- [8] 赵金鹏,谭忠盛,梁文广,等.超浅埋大跨隧道管棚支护机理及效果分析[J].土木工程学报,2021,54(增刊1):87-96.
- [9] 卢光兆,周博,徐锋,等.浅埋偏压隧道进洞施工围岩稳定分析[J].山东大学学报(工学版),2021,51(4):61-70.
- [10] 文海家,黄健豪,袁性涵,等.基于数值试验的山岭隧道围岩稳定性 GIS-SVM 预测[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1):2920-2929.
- [11] 王淼,安志晓,傅鸣春,等.爆破震动下地下工程围岩稳定与支护设计[J].地下空间与工程学报,2015,11(2):530-535.
- [12] YU L, LYU C, WANG M N, et al. Three-dimensional upper bound limit analysis of a deep soil-tunnel subjected to pore pressure based on the nonlinear Mohr-Coulomb criterion[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 293-301.
- [13] 中交第一公路工程局有限公司.公路隧道施工技术规范:JTG F60—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.