富水砂化白云岩隧洞防突结构临界安全厚度预测

李　庆[1,2]，董家兴[1]
（1.昆明理工大学电力工程学院，云南 昆明 650504；2.北部湾大学建筑工程学院，广西 钦州 535011）

摘　要：富水地区砂化白云岩隧洞在开挖掘进时易发生涌水涌砂等地质灾害，确定其临界防突安全厚度对隧洞的顺利实施尤为关键。文中以滇中引水工程玉溪段小扑隧洞为背景，运用 FLAC^{3D} 中的渗流模型进行受力分析，探讨不同参数对防突结构临界安全厚度的影响规律。结果表明：防突结构临界安全厚度与内摩擦角、内聚力呈负相关性，与隧洞中心水头高度呈正相关性；数值模拟分析结果与工程实际差值较小，具有一定的工程参考意义。

关键词：滇中引水工程；砂化白云岩；临界安全厚度；预测公式
中图分类号：P642　　文献标识码：A　　文章编号：1006-7973（2023）01-0117-03

引言

在岩溶地区修建隧道时，往往会遇到溶洞、断层、暗河等不良地质构造，容易导致突水突泥灾害的发生。重大突水突泥事故的发生，往往会引发许多问题，比如工程工期延误、设备损毁、建设费用增加、线路被迫改线、人员伤亡及破坏环境等，对社会生活也会产生许多负面的影响。洞内突水突泥的预测与防治，是当前地下工程建设研究的热点。

针对突涌灾变防突结构临界安全厚度的研究，许多专家学者开展了大量的工作，取得了许多重要的成果。杨子汉等[1]基于极限分析上限原理提出两种新的防突岩墙厚度计算方法。孟凡树等[2]基于筒仓理论和极限平衡条件建立断层破碎带突水力学模型并推导出防突岩盘厚度预测公式。徐光黎等[3]、陈泽龙等[4]，利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件，建立预测模型，开展突水突泥安全厚度的预测研究。

以上防突结构临界安全厚度的研究多集中于溶腔压力或断层破碎带作为主要作用荷载分析得到的成果，研究岩性参数及水头变化对防突结构临界安全厚度的影响较少。细晶白云岩砂化程度不同，在岩体宏观结构上存在一定的差异性，岩体物理力学性质指标也有所不同。基于此，文中旨在通过研究富水砂化白云岩隧洞水头及岩性参数变化对防突结构临界安全厚度影响规律的基础上，提出防突结构临界安全厚度预测公式，为工程实际预防突涌灾害提供参考。

一、工程概况

滇中引水工程玉溪段小扑隧洞总长 32.10km。小扑隧洞埋深普遍为 100~300m，地下水位普遍高于隧洞顶板 100~200m，地下水类型主要有松散岩类孔隙水、基岩裂隙、空隙水及岩溶水三类。

二、数值模拟

1. 基本假定

以岩体物理力学性质指标赋值代表不同砂化程度的白云岩岩层进行模拟分析，模拟过程中，作如下基本假定：（1）砂化白云岩为均质连续各向同性的渗透介质；（2）地下水位线以下岩体处于饱和状态，孔隙水压为静水压力；（3）隧洞开挖后，渗流服从达西定律；（4）采用 Mohr-Coulomb 本构模型；（5）采用壳单元模拟初期支护，不考虑施作二次衬砌影响；（6）隧洞断面尺寸一致；（7）采用全断面法开挖工艺进行模拟，不考虑施工振动扰动影响。

2. 模型尺寸及边界条件

隧洞断面形状依据云南省水利水电勘测设计研究院设计的某隧洞Ⅳ型初期支护断面图确定，隧洞洞高 5.74m，洞宽 5.90m，加挂钢筋网喷射 160mm 厚 C20 混凝土作为初期支护。

以模型正面隧洞中心为坐标零点，沿纵向开挖。考虑隧洞开挖半径的影响范围，从中心向两侧取洞径 3 倍以上距离，水平方向左、右取 20.0m；垂直方向，上、下各取 20m；隧洞轴线方向取 60m。模型外部整体尺寸为 40m×40m×60m，见图 1。模型沿洞轴方向 20~40m 范围为剧烈砂化白云岩，其余为强烈砂化白云岩，见图 2。

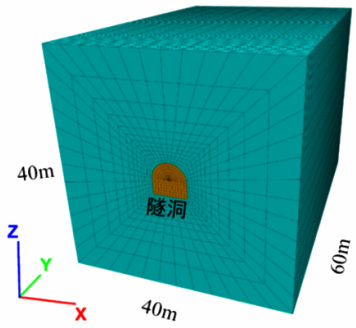

图 1　模型整体尺寸

收稿日期：2022-03-01
作者简介：李　庆（1982-），男，昆明理工大学，硕士生。
通信作者：董家兴，昆明理工大学电力工程学院。
基金项目：国家自然科学基金地区科学基金项目（42162026）；长江水利委员会长江科学院开放研究基金资助项目（CKWV 2021882/KY）；云南省重大科技专项计划（202002AF080003-33）。

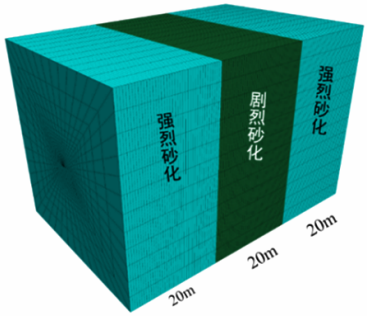

图 2 强烈、剧烈砂化白云岩分布

在模型底面施加三向速度约束，前后左右施加法向速度约束，上表面为自由表面。初始孔隙水压力为静水压力，按梯度分布。掌子面和未施作初期支护的隧道表面及模型上表面为透水边界，其余边界为不透水边界。通过施加顶面水压和法向应力的方法，模拟隧洞中心水头和埋深。沿纵向开挖施工，开挖进尺以 0.5m 为一循环，初期支护滞后掌子面 0.5m。

3. 条件参数选取及模拟工况

根据砂化白云岩物理力学性质研究成果[5-6]，设定模型隧洞中心水头、埋深及岩体参数范围见表 1，模拟过程中，设置因素变化分析 5 种，工况变化设置 21 种。

表 1 模型参数取值范围

白云岩砂化程度	强烈砂化	剧烈砂化
容重（KN/m^3）	23	19
弹性模量（GPa）	1.9	0.3
泊松比	0.35	0.4
内摩擦角（°）	28~36	16~27
内聚力（MPa）	0.1~1.2	0.05~0.09
渗透系数（m/s）	2.0×10−6	8.0×10−6
孔隙率	0.3	0.5
隧洞中心水头（m）	80~160	
埋深（m）	160	

三、结果分析

1. 参数影响分析

以防突结构塑性区贯通为突变判据[5]，贯通时对应的岩墙厚度定义为防突结构临界安全厚度，见图 3。

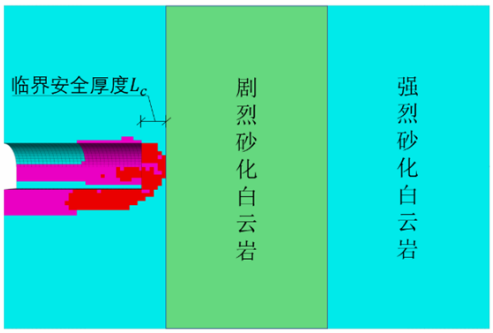

图 3 防突临界安全厚度

由图 4 可知，防突结构临界安全厚度与隧洞水头呈正线性相关，水头的提高，增大了作用在防突结构上的水压力，孔隙水压变大，使岩土体有效应力减小，岩体强度降低，也可能出现渗透破坏的现象，因而需要更大的厚度来抵抗防突结构前端的作用力。由图 5 可知，防突结构临界安全厚度与强烈砂化白云岩内聚力呈对数负相关，与强烈砂化白云岩内摩擦角负线性相关，根据库伦公式，岩体土抗剪强度与两者呈正相关关系，防突结构岩体强度增加，需要的防突临界安全厚度减小。

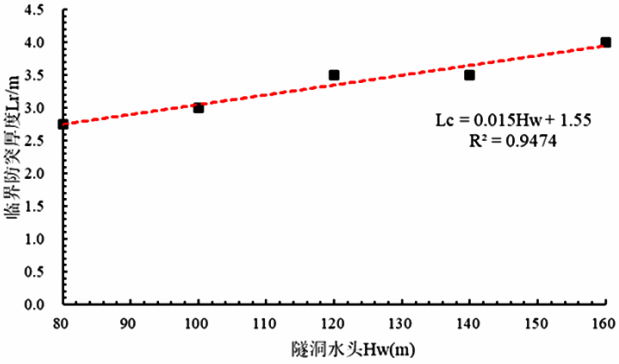

图 4 水头对临界厚度影响规律

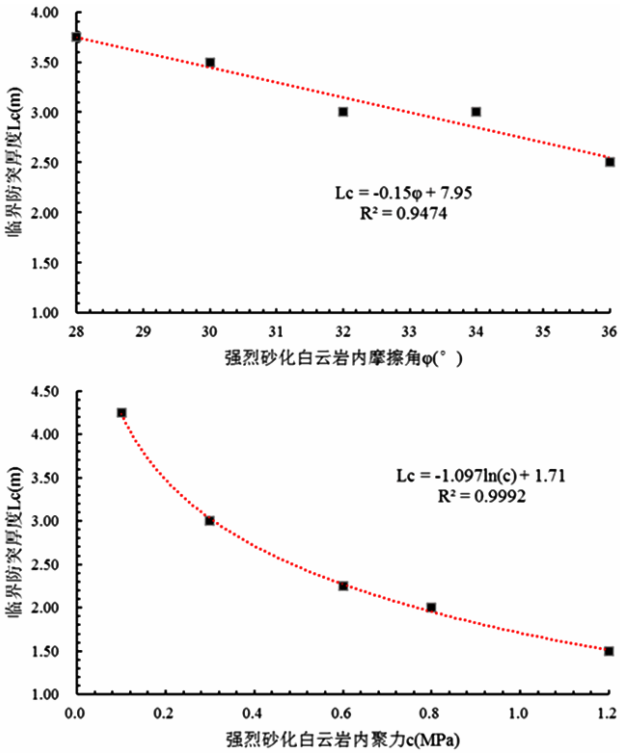

图 5 强烈砂化白云岩抗剪参数对临界厚度影响规律

图 6 为剧烈砂化白云岩抗剪指标对掌子面最大挤出位移的影响规律。以塑性贯通为判据，得出剧烈砂化白云岩抗剪指标对临界安全厚度影响较小，临界厚度均为 3.0m。从图中也可以看出，在进尺 17.0m 临界点前，掌子面最大挤出位移几乎是共线的，说明剧烈砂化白云岩对强烈砂化白云岩的作用距离是有限的，只有抵进时才显现出来。进尺超过 17.0m 后，掌子面最大挤出位移虽然均呈增大的趋势，但增幅各异。主要原因是当岩体受卸荷作用产生变形后，不同的

内摩擦角和内聚力赋予了剧烈砂化白云岩不同的抗剪能力，使得作用在岩盘上的作用力大小各异，抗剪能力越大，位移值增幅越小。在临界点前各进尺最大挤出位移相等，亦可证明采用塑性贯通作为灾变判据是合理的。

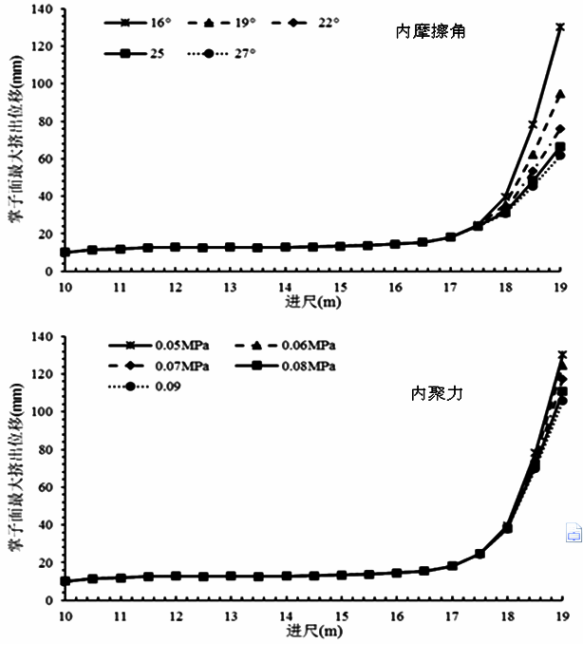

图 6 剧烈砂化白云岩参数对最大挤出位移的影响

2. 临界厚度预测公式

假定各因素对模拟结果的影响之间存在线性关系，据此建立如下拟合公式：

$$L_c = AH_w + B\varphi + C\ln(c) + L_0 \quad (1)$$

式中：A、B、C 为待定系数；L_0 为待定常数项；H_w 为隧洞中心水头；φ、c 分别为强烈砂化白云岩内摩擦角和内聚力。

将各工况模拟结果对式（1）进行多元拟合，得到防突结构临界安全厚度预测公式为：

$$L_c = 0.016Hw - 0.129\varphi - 1.074\ln(c) + 4.445 \quad (2)$$

相关系数 R^2=0.9767，拟合效果较好。

现场工况为：埋深 160m，隧洞中心水头 120m，强烈砂化白云岩内摩擦 32°，内聚力 0.3MPa。将参数带入预测公式计算，防突结构临界安全厚度结果为 3.46m。根据现场施工经验，一般预留的防突结构临界安全厚度为 5.0m。若将文中预测值加爆破开挖扰动损失带 L=1.5m[7]，所得结果与现场预留的灾变临界厚度值是十分接近的，说明模拟拟合预测公式具有很好的适应性和可靠性。

四、结论

文中以滇中引水工程玉溪段某隧洞为背景，基于 FLAC^{3D} 数值软件，分析不同参数对防突结构临界厚度的影响，构建预测公式，得到以下结论：

（1）强烈砂化白云岩内摩擦角、内聚力对防突结构厚度影响较大，呈负相关性；隧洞中心水头与防突结构临界安全厚度呈正相关性；剧烈砂化白云岩内摩擦和内聚力对临界厚度影响较小。

（2）防突结构临界厚度预测公式与实际工程有较好的一致性，具有一定的工程应用价值。

参考文献

[1] 杨子汉，杨小礼，许敬叔等. 基于上限原理的两种岩溶隧道岩墙厚度计算方法[J]. 岩土力学，2017，38（3）：801−809.

[2] 孟凡树，王迎超，焦庆磊等 . 断层破碎带突水最小安全厚度的筒仓理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2020，52（2）：89−95.

[3] 徐光黎，储汉东，李维娜等 . 岩溶隧道隔水岩盘安全厚度预测模型[C]//2016 年全国工程地质学术年会论文集，2016：865−871.

[4] 陈泽龙，崔江余，王军等. 富水断层带隧道突水突泥的临界判据[J]. 铁道建筑，2020，60（11）：53−55+63.

[5] 李建国，沐红元，米健. 砂化白云岩工程地质特性初步研究[C]//. 水工隧洞技术应用与发展，2018：52−58.

[6] 田启文，岳朝林. 坪头水电站岩溶砂化细晶白云岩的特性及围岩分类[J]. 水利水电科技进展，2014，34(5)：45−49.

[7] 李术才，袁永才，李利平等. 钻爆施工条件下岩溶隧道掌子面突水机制及最小安全厚度研究[J]. 岩土工程学报，2015，37（2）：313−320.

（上接第 65 页）

[3] Chang I，Im J，Prasidhi AK，Cho G−C，Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. Construction and Building Materials[J]. 2015，74：65−72.

[4] Koester，J.P.，The inflfluence of fines type and content on cyclic strength，ground failures under seismic conditions. Geotechnical Special Publication[J]. 1994，44：17−33.

[5] Polito，C.P.，Martin，J.R.，Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands.Geotechnical and Geoenvironmental Engineering[J]. 2001：408 − 415.

[6] Georgiannou，V.N.，Hight，D.，Burland，J.B.，Behaviour of clayey sands under undrained cycle triaxial loading. Geotechnique[J]. 1991，41（3）：351 − 415.

[7] A.F. Cabalar，R.A，Hasan，Compressional behaviour of various size/shape sand−clay mixtures with different pore fluids.Engineering Geology[J]. 2013，164：36−49.

[8] Monkul，M.M.，Ozden，G.，Compressional behavior of clayey sand and transition fines content. Engineering Geology[J]. 2007，89，195−205.