

基于实测位移的深埋工程隧洞地应力反演

王保东, 付晓耕, 唐志坚

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 某工程隧洞埋深大, 地应力高, 岩爆发生频繁, 为更好指导施工, 本文根据实测断面位移监测结果, 使用有限元软件对实测断面的地应力进行反演。根据地应力实测资料, 对隧洞整体和计算断面处岩爆风险做了评估, 结果表明计算断面处岩爆发生风险更高、等级更大, 表明了计算断面选择的合理性, 计算断面处岩石参数在反演分析中被使用; 以计算断面为例, 设计不同的地应力释放水平, 使用有限元计算软件对该断面围岩位移进行反演, 并与实测位移进行比较, 结果表明实际监测位移比计算位移小, 但从位移的顶、底、侧位移分布比例来分析, 计算位移值和实测位移基本符合, 也符合现有的地应力侧压力系数给定的规律。

关键词: 隧洞; 岩石参数; 地应力; 反演; 数值模拟

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 09—0151—03

随着地下工程向地球深部进军, 隧道建设朝着超长深埋方向发展, 工程建设中主要面临高地应力这一特殊的工程地质问题, 而高地应力常常诱发岩爆、巷道片帮、塌方等灾害, 给工程的施工、运行带来严重影响。地应力是评价围岩和支护结构稳定性的重要参数之一, 关于地应力反演方面前人做了大量研究, 研究思路可概括为利用实测地应力资料和采用数值模拟方法求解两种。任洋等^[1]利用地应力实测值, 采用线性回归法获得了地应力随埋深的分布规律并评估了岩爆发生风险; 汪波等^[2]基于苍岭隧道实测地应力值, 构建了地应力场多元线性回归计算公式; 吕庆等^[3]针对深埋特长公路隧道初始地应力场进行了三维有限元反演分析, 并在此基础上开展了综合多种岩爆判别准则的岩爆等级预测。

然而, 不同地质条件下地应力受到诸如褶皱、断层、河谷岸坡等因素的影响, 较小区域内地应力特征也可能呈现出一定的差异性, 很难使用某一地应力回归模型对工程区域的地应力分布规律准确概括。故本文以某工程隧洞实测断面为例, 使用有限元计算软件 (Phase2) 对

实测断面的岩石参数和地应力做反演计算, 验算隧洞设计参数取值是否合理, 以期计算结果能够为指导施工提供依据。

1 工程概况

某水电站工程是一座低闸坝、长隧洞、高水头引水式电站, 工程主要任务是发电。引水隧洞总长 15639.86m, 最大埋深 1720m, 埋深大于 1000m 的隧洞长度为 3.32km, 占隧洞全长的 21.2%。隧洞洞口段地层岩性主要为变质闪长岩、片麻状花岗岩, 隧洞出口段为斜长角闪板岩、片岩夹大理岩薄层, 洞身段围岩为似斑状片麻状花岗岩或花岗片麻岩。隧洞轴线穿越侵入岩地层, 隧洞埋深大, 在高地应力作用下, 坚硬的花岗岩及闪长岩具备发生岩爆的条件, 因此进行隧洞地应力场反演分析十分必要。

2 计算断面及相关参数确定

2.1 计算断面确定及实测位移

承台上抬最大约 +3.5mm; ④数值模拟分析结果与实测数据较吻合, 可为类似工程提供变形影响参考。

参考文献:

- [1] 嵇中. 超大矩形顶管近距离侧穿软土地区高架桥桩的影响研究 [J]. 隧道与轨道交通, 2019(02): 12-15+59.
- [2] 许冠, 安然, 成怡冲, 等. 软土地区基坑施工对邻近

地铁高架结构的影响分析 [J]. 城市住宅, 2021, 28(12): 249-250+252.

[3] 黄文彬, 王源, 孙国峰. 基坑开挖对邻近地铁高架影响的变形计算与监测分析 [J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(12): 46-50.

[4] 上海市城乡建设和交通委员会, 城市桥梁、隧道安全保护区技术标准 [S].

本次共布置 4 个监测断面，断面具体位置为：引水洞进口 Y1+445 断面；1# 支洞上游 Y2+580 断面；4# 支洞上游 Y10+135 断面；4# 支洞下游 Y12+342 断面。鉴于 4# 支洞上游 Y10+135 附近洞段有实测地质参数，且埋深较大，故选取 4# 支洞上游 Y10+135 断面作为计算断面。

在 4# 支洞上游 Y10+135 断面拱顶、拱肩和腰线处沿径向按 5m 和 2m 埋深分别布置 3 组测点，每个测点安装单点式位移计监测岩体变形，共计安装 3 组 6 只位移计。5m 埋深时，测点编号依次为 M3-1、M3-2、M3-3；2m 埋深时，相应测点编号为 M3-4、M3-5、M3-6。根据监测结果：M3-1、M3-2、M3-3 的总位移为 0.095mm、0.112mm、0.156mm；M3-4、M3-5、M3-6 的总位移为 0.076mm、0.061mm、0.221mm。

2.2 地应力分布计算

根据隧洞穿越地地应力测量结果，主应力随埋深呈线性分布^[4]，相应埋深处的最大水平主应力 σ_H 、最小水平主应力 σ_h 和垂直应力 σ_v 由下列公式计算：

$$\sigma_H = 0.0225H + 11.0561 \tag{1}$$

$$\sigma_h = 0.0088H + 6.7414 \tag{2}$$

$$\sigma_v = 0.0232H + 0.3479 \tag{3}$$

式中 H 为埋深，单位：m；应力单位：MPa。

2.3 围岩参数取值

本文对隧洞围岩物理力学参数进行了测定，表 1 列出了隧洞整体及计算断面处的围岩物理力学参数。由于隧洞轴线穿越花岗岩和闪长岩地层，岩体强度高、脆性强，在该地层中极可能发生岩爆，故本文对可能发生的岩爆做了评估，评估结果见图 1。

表 1 岩体主要物理力学参数值表

岩性	密度/ (g/cm³)	饱和单轴 抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模 量/ GPa	抗剪断强度		备注
					C / MPa	Φ / °	
片麻状花岗 岩	2.64~2.9	63.6	4.98	17.9	41.0	9.6	隧洞整体
变质闪长岩	2.74~3.0	62.2	6.7	27.7	45.4	12.5	
大理岩	2.70~2.7	33.6	2.36	49.5	54.8	10.4	
板岩	2.68~2.8	54.6	6.69	33.5	63.1	14.4	
片麻状花岗 岩	2.6~2.7	51.70	3.02	15.76	8.87	49.4	计算断面

根据规范^[5]，按照围岩强度应力比 R_c/σ_{max} 范围（饱和单轴抗压强度 R_c ，最大主应力 $\sigma_{max}=\sigma_H$ ）可将岩爆

等级进行划分。从图 1 可以发现，对于整个隧洞而言，变质闪长岩与片麻状花岗岩发生岩爆的可能性和等级相近，随埋深增大，发生岩爆的等级增加。对于计算断面而言，由于该处岩体强度较隧洞围岩整体强度低，在同一埋深条件下，相应的强度应力比较小，导致发生岩爆的可能性更高、岩爆等级更大。由此可知选择 4# 支洞上游 Y10+135 断面作为计算断面其结果对指导施工更安全，进一步说明了计算断面选取的合理性。

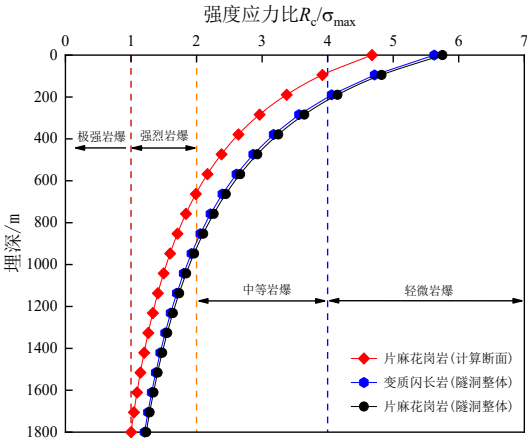


图 1 隧洞围岩岩爆风险评估

3 监测断面地应力反演

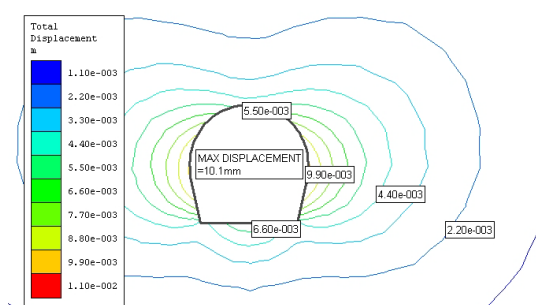
3.1 隧洞模型及其边界条件

本文采用有限元计算程序 Phase2 进行分析计算。根据工程实际情况，隧洞模型设为城门型，为避免周边约束对隧洞计算结果的影响，隧洞四周取为 3 倍洞径的正方形。模型左右两测约束水平位移，上下两测约束垂直位移。

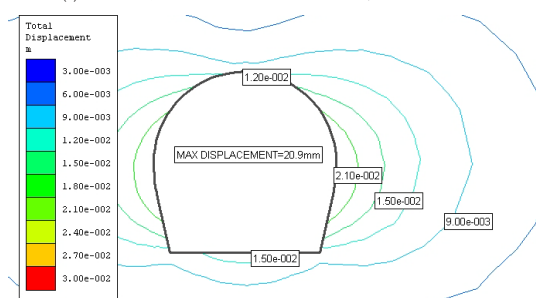
计算荷载仅考虑地应力，根据前述主应力计算公式 (1)、(2) 及 (3)，计算断面处埋深为 1047.7m，相应的垂直应力为 24.65MPa，最大水平主应力为 34.63MPa，最小水平主应力为 15.96MPa。假定岩石为均质岩体，岩体参数按前述计算断面处岩体参数大小赋值。

3.2 监测断面计算结果

本文按不同的地应力释放水平进行隧洞特征点的位移计算，共设计了 1%、2%、5%、10%、20%、50% 和 100% 七个地应力释放水平，重点监测 3 个特征点的围岩位移变化规律：拱顶处 M1，拱肩处 M2，腰线处 M3，3 个特征点分别与断面实际监测点 M3-1 和 M3-4、M3-2 和 M3-5、M3-3 和 M3-6 对应。图 2 展示了部分地应力释放水平下隧洞围岩位移计算结果，图 3 绘制了不同地应力释放水平下特征点位移的变化。



(a) 地应力释放水平为 1% 时围岩位移等值线图 (m)



(b) 地应力释放水平为 100% 时围岩位移等值线图 (m)

图 2 不同地应力释放水平下围岩位移等值线图

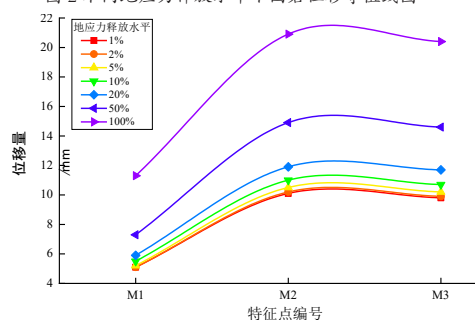
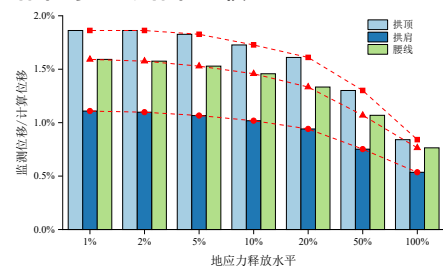
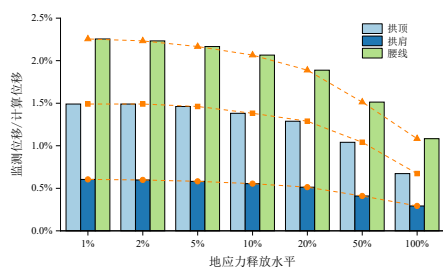


图 3 不同地应力释放水平下特征点位移变化

3.3 计算结果与监测结果比较



(a) 测点埋深 5m 时的监测位移与计算位移比较



(b) 测点埋深 2m 时的监测位移与计算位移比较

图 4 计算结果与监测结果比较

图 4 为计算结果与监测结果的比较。可以发现, 实际监测位移比计算位移小很多 (小于计算值的 3%), 原因是该洞段开挖后应力释放速度较快, 待监测开始时地应力已经基本释放, 导致后期监测到位移所占总位移的比例很小, 但是从位移的顶、底、侧位移分布比例来分析, 计算位移值和实测基本符合, 也符合现有的地应力侧压力系数给定的规律。

4 结论

(1) 由于隧洞埋深大且穿越高强度高脆性岩体, 发生岩爆可能性大, 本文评估了隧洞整体和 4# 支洞上游 Y10+135 断面处发生岩爆的风险, 结果显示后者发生岩爆的风险更大、等级更高, 使用该处的计算结果指导施工更安全, 故使用 4# 支洞上游 Y10+135 断面处岩体物理力学参数作为地应力反演分析的岩体参数。

(2) 以 4# 支洞上游 Y10+135 断面为例, 设计了不同的地应力释放水平, 使用有限元计算软件对该断面围岩位移进行反演, 并与实测位移进行了比较。结果表明实际监测位移比计算位移小很多, 但从位移的顶、底、侧位移分布比例来分析, 计算位移值和实测位移基本符合, 也符合现有的地应力侧压力系数给定的规律。

参考文献:

- [1] 任洋, 王栋, 李天斌, 等. 川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (01): 65-76.
- [2] 汪波, 何川, 吴德兴, 等. 基于岩爆破坏形迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 811-817.
- [3] 吕庆, 孙红月, 尚岳全, 等. 深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2982-2988.
- [4] 梁敏. 高温深埋引水隧洞围岩支护结构有限元分析 [D]. 河北工程大学, 2019.
- [5] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10003—2016 铁路隧道设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.