

浅谈岩溶地层地铁隧道超浅埋下穿桥梁和河流风险控制及数值分析

曹师铭

成都华丰工程勘察设计有限公司 四川 成都

摘要：本文以在建贵阳市轨道交通2号线观水路站~油榨街站区间隧道下穿南明河及团坡桥工程为背景，对可溶岩地层隧道超浅埋下穿南明河及近距离下穿团坡桥桥墩基础面临岩溶涌水、河床坍塌、渗水及开挖扰动引起地表沉降甚至危及桥梁安全等风险，有针对性的进行下穿风险分析和控制，并通过数值分析计算对比不同的隧道开挖顺序对下穿南明河及团坡桥的影响，检验下穿措施以及支护参数的安全性、合理性，为设计和施工方案提供必要的技术支持。

关键词：岩溶隧道 下穿 团坡桥 南明河 风险控制 数值计算

1 引言

随着城市化进程加速，城市规模逐渐扩大，汽车数量激增，交通问题日益突出。面对拥挤的城市交通，地铁已成为城市便捷、准时、经济、舒适的重要出行工具。而地下施工技术的发展与创新，使地下空间的大范围开发、利用和大规模地铁修建成为可能。贵阳市作为典型的喀斯特地貌山地城市，在特殊的、复杂的地形及地质条件下修建地铁，建设过程中面临大规模下穿既有建（构）筑物的巨大难题，如何有效控制隧道开挖风险和保障周边环境的安全，是贵阳地铁下穿工程的难点和重点。

本文结合贵阳地铁2号线观水路站~油榨街站区间小

净距隧道沿横向超浅埋下穿南明河，沿纵向近距离下穿团坡桥桥墩基础项目的设计和数值模拟分析，摸索适合贵阳特殊地质条件和环境的建（构）筑物保护措施及岩土加固方法，可为今后同类型工程的设计和施工提供参考。

2 工程背景

2.1 工程概况

贵阳市轨道交通2号线观水路站~油榨街站区间隧道全长805m,采用双洞单线马蹄形断面结构，暗挖法施工，复合式衬砌。区间在YDK36+382~+461段下穿团坡桥、团坡桥截污沟、南明河及南明河逆断层。该段线间距13.5m，隧顶埋深9.6~16.5m，围岩至上而下依次为圆砾土（分布于南明河河床范围内）和中风化白云岩，岩溶

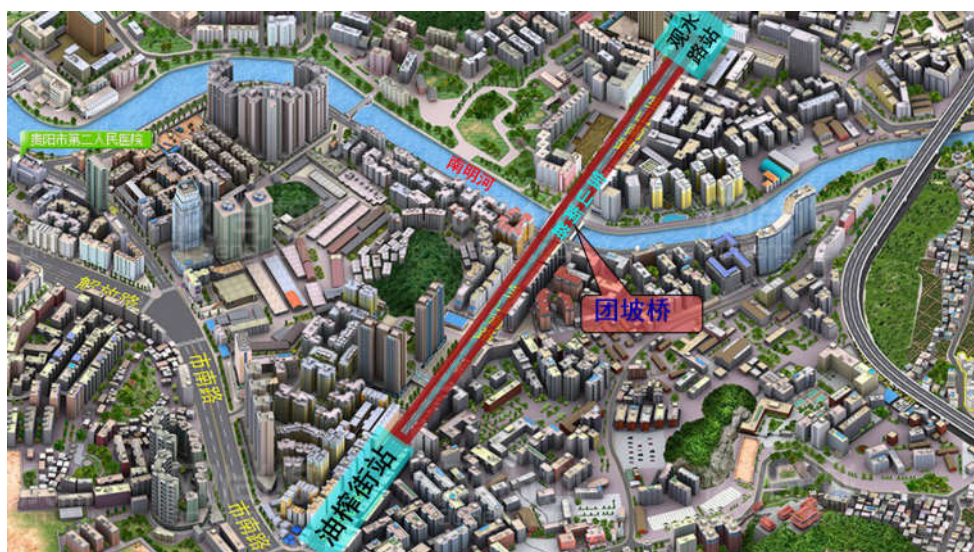


图2-1 区间总平面图

强烈发育，洞身位于中风化白云岩中，隧顶基岩厚度为4.2~14m。

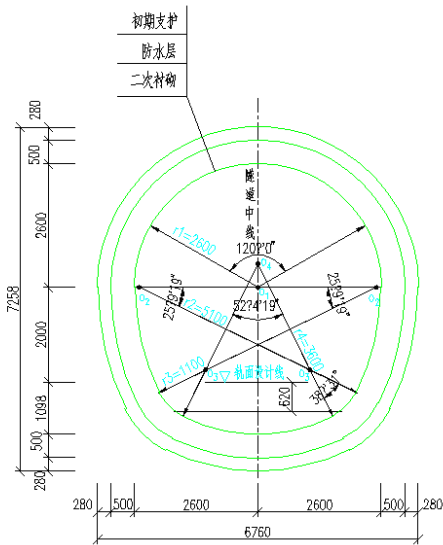


图2-1 区间总平面图

明河两侧截污大沟，截污沟位于桥墩及桥台中间，沟宽*高=3*3.4（钢筋砼U型槽），沟底标高为1044.07,沟底距隧顶最小距离为10m。

团坡桥由中幅改造部分和两侧拓宽部分组成，左、中、右三幅总宽45m，桥墩前墙边线沿南明河河堤边线布设。改造部分为净跨径14.045+39.278+17.045m变截面预应力连续箱梁；拓宽部分为净跨径35m的肋拱桥,净矢高8.75m,矢跨 $F_0/L_0 = 1/4$ ，拱轴系数 $m = 1.167$ 。

区间隧道主要下穿改造部分桥墩基础，改造部分的桥墩基础是在既有肋拱桥桥墩基础上加高而成（既有桥墩基础建成于1964年，基础新旧土工接触面标高

2.2 下穿团坡桥及两侧截污沟

区间在YDK36+382~+461段沿纵向下穿团坡桥及南

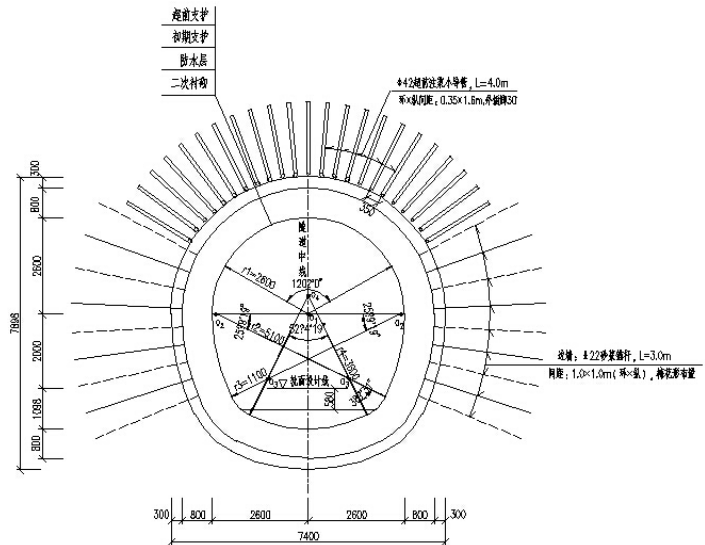


图2-2 区间典型衬砌断面图

为1048.85m），桥墩基础为混凝土扩大基础，基础宽4.4m，无配筋，隧顶与基底最小距离7.6m；桥台为承台下桩基，基桩直径为1.4m。

2.3 下穿南明河及南明河逆断层

区间在YDK36+402~+437段沿横向下穿南明河及南明河断层，断层影响宽度4~6m，河宽35m，河水距隧顶10m（枯水期），枯水期流量为13m³/s，根据地勘资料，洞身穿越中风化白云岩，隧顶基岩厚度4.4~8.7m。围岩总体属较破碎至完整岩体，围岩属较硬岩，地下水丰富，具弱至中等透水性，岩层倾角较陡（43°~55°），河道水与地下水存在一定水力联系，施

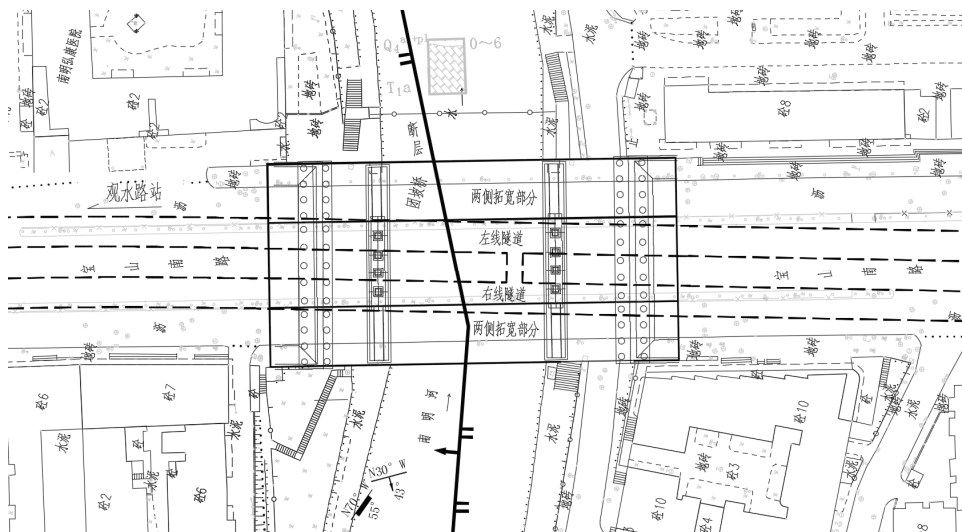


图2-3 区间下穿南明河段总平面图

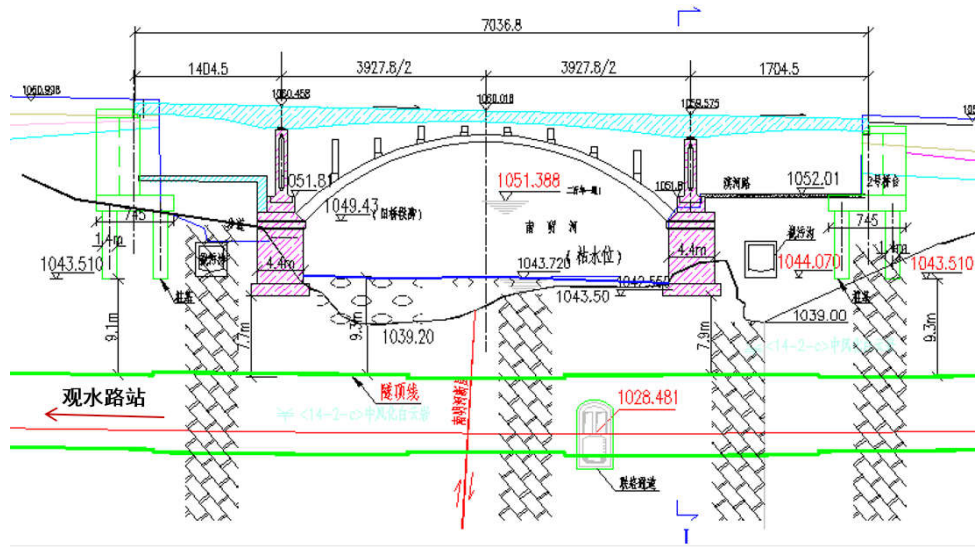


图2-4 区间下穿南明河段左线纵断面图

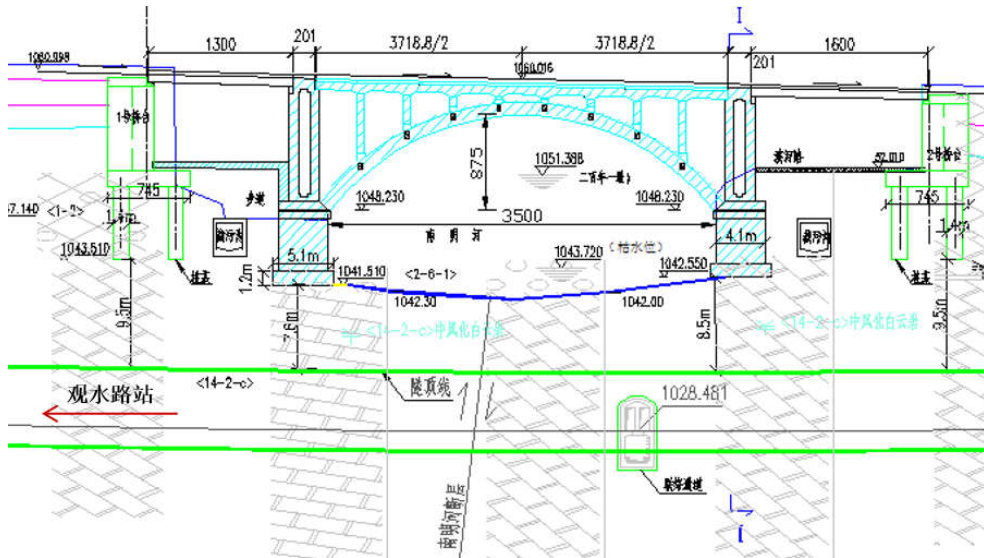


图2-5 区间下穿南明河段右线纵断面图

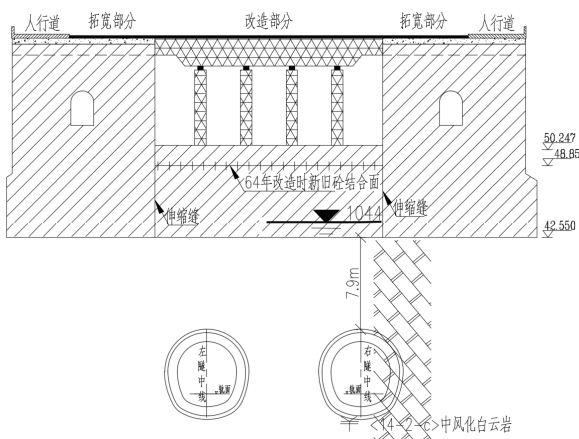


图2-6 区间下穿南明河段横断面及现状照片

工时河道水易沿层面及节理、裂隙面下渗，局部易产生涌水现象。

3 区间隧道下穿风险控制

由于区间下穿团坡桥及南明河段属于超浅埋小近距隧道，地质条件差，岩溶强烈发育，周边环境复杂，桥墩及桥台基础距离隧道开挖轮廓线较近，肋拱桥和连续梁桥对沉降和变形控制严格，且同时面临河床坍塌、渗漏甚至河水倒灌的风险。本工程设计和施工过程中，针对下穿团坡桥及南明河段施工可能引起的围岩扰动、河床渗漏、开挖震动、洞内拱顶沉降、净空收敛以及地面沉降等对河床、桥墩桥台基底产生的影响进行重点控制。

3.1 近距离下穿团坡桥桥墩基础风险控制

控制地表、桥墩、桥台基础沉降及桥梁差异沉降是下穿团坡桥桥墩及桥台基础段的重点和难点。下穿设计时严格遵守浅埋暗挖法的“十八字”原则，并对一下原

则做了特殊设计：

管超前：采用 $\phi 159$ 大管棚进行超前支护，管棚内设4 $\phi 18$ 钢筋笼以增加管棚的强度。大管棚采用跟管钻进技术进行施工，以防止因管棚钻孔扰动围岩、引起沉降；

严注浆：结合下穿南明河方案，对下穿桥墩基础段采用全断面超前帷幕注浆方式改善和加固桥墩基础下方岩体；

少扰动：采用台阶法施工，非爆破开挖，严格控制围岩扰动和震动；

强支护：初支按承担全部基本荷载设计，确保初支沉降及收敛安全可控；

快封闭：左右线不能同时进行下穿施工，初支达一次二衬施作长度时，应停止开挖，及时施作二衬。

3.3 超浅埋下穿南明河风险控制

下穿段为可溶岩地层，河床侵蚀严重，岩溶强烈发

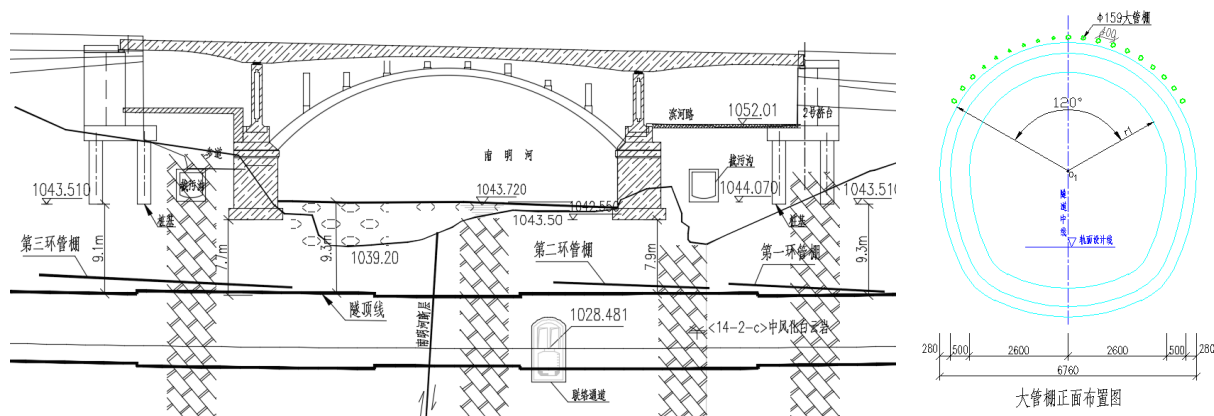


图3-1 区间下穿团坡桥措施

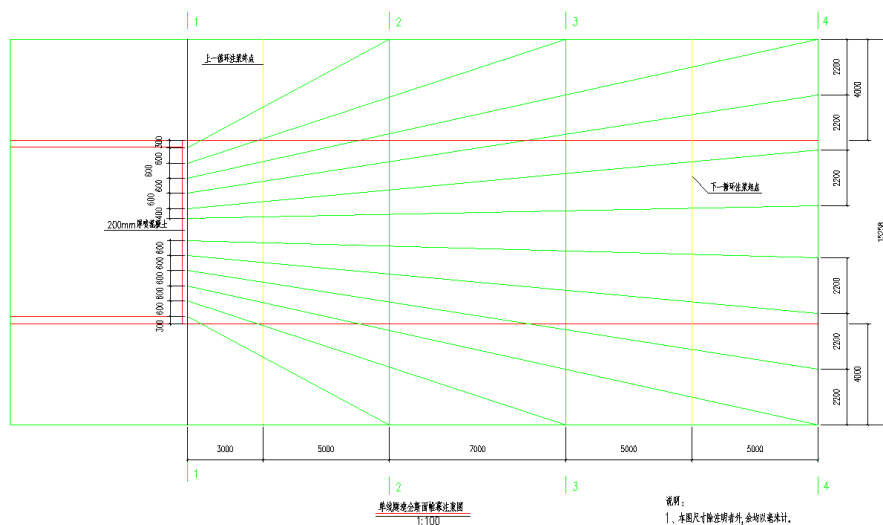


图3-2 帷幕注浆孔布置图

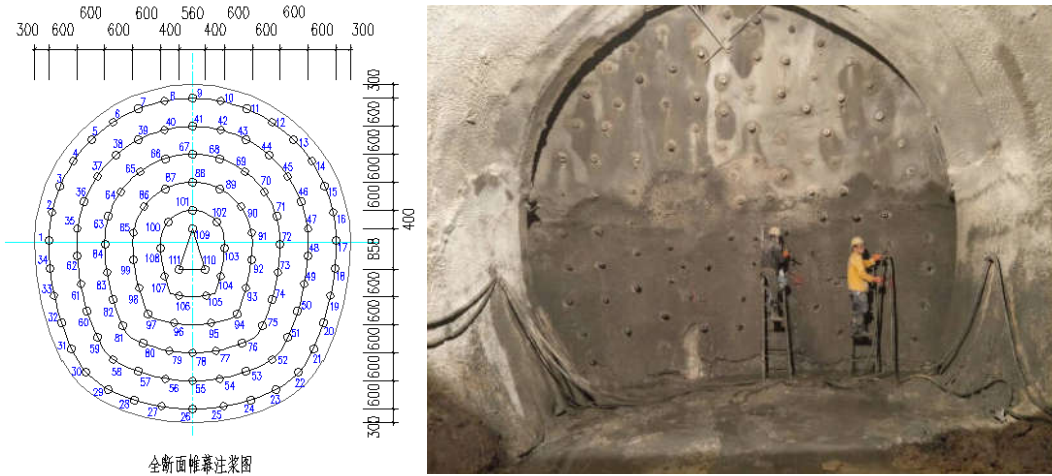


图3-3 注浆孔布置及注浆

育，且局部基岩面低于桥墩基础2.3m，下穿施工时可能危及桥墩安全。为避免岩溶突水，确保桥梁结构及洞内施工安全，下穿南明河段隧道结构采用洞内全断面超前帷幕注浆的方式，以减少围岩透水性和及时封堵岩溶管道。注浆范围为开挖洞径以外4m，帷幕注浆孔平面布置见图5-99，注浆孔布置及现场注浆见图3-3所示。

由于隧顶基岩厚度最薄处仅4.1米，帷幕注浆质量难以控制，采用全断面帷幕注浆、河床换填、河底铺砌和大管棚超前加固等措施，形成一个综合配套的下穿方案，不仅保证了洞内帷幕注浆止水地质改良的效果，同时又避免了注浆时河底冒浆污染河道的风险。

4 数值模拟计算与现场实测分析

4.1 模型的建立及参数选择

(1) 模型的建立

鉴于隧道处于半无线地层中，根据一般的力学原理，分析范围的选取以边界效应对隧道的影响可以忽略为前提。模型建立时应考虑隧道开挖、上部结构各类荷载的影响范围建立二维平面模型和三维实体模型，采用岩土与隧道有限元分析软件（GTS NX）和空间有限元

分析软件（MIDAS/Civil），支护结构均采用弹性实体单元，地层采用莫尔-库伦准则，地应力场按自重应力场考虑，模拟中除了岩土体在自重情况下的应力场、桥梁自重，还应考虑作用在桥面的车辆荷载。其中，车辆荷载采用“中—活载”的技术方法将其简化为恒定不变的静荷载，并换算成线荷载作用在桥墩基础顶面。下穿桥墩基础施工模拟及肋拱桥三维计算模型（见图4-1~图4-4）。

2) 边界条件

在整体计算模型中，采用位移边界条件，底面为竖向约束，四周为法相约束。

3) 计算参数的选取

计算模型所取土层深度范围内的岩土层计算参数选取如表4-1所示，结构计算参数如表4-2所示。

岩土层计算参数 表4-1

荷载计算 围岩	围岩重度 (KN/m ³)	摩擦角θ (°)	侧压系 数k0	弹性抗力系 数 (MPa)	
				垂直	水平
杂填土	18.5				
可塑红粘土	17.9	30	0.56	32	35
泥质白云岩	25	45.6	0.18	1000	1000

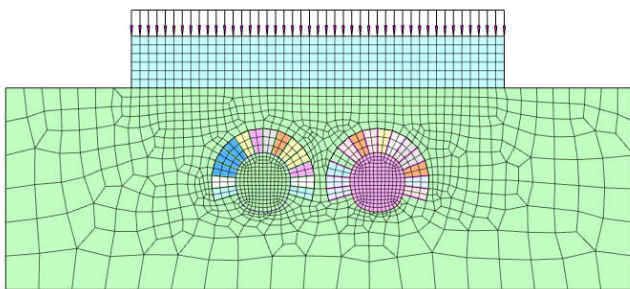


图4-1 下穿桥墩基础施工计算模型

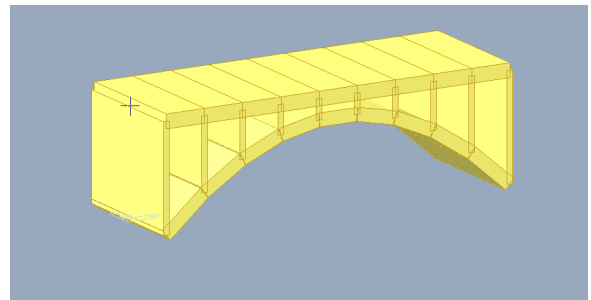


图4-2 肋拱桥三维计算模型

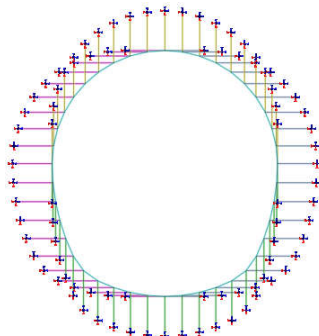


图4-3 二衬衬砌计算模型

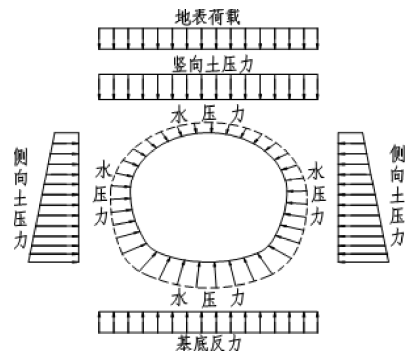


图4-4 二衬荷载分布示意图

结构计算参数 表4-2

材料	弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	容重 γ (KN/m ³)
C25 喷砼	23	0.23	22
C35 钢筋砼	32	0.2	25
C25 素混凝土	29.5	0.2	23

4.2 桥面荷载计算

采用空间有限元分析软件 (MIDAS/Civil), 建立三维实体模型, 通过模拟计算, 肋拱桥拱脚处荷载和连续梁桥支座处荷载如图4-5/6所示。

4.3 初支计算结果与分析

初期支护按“地层—结构”模型进行模拟, 采用最不利工况, 即左、右隧同时下穿桥墩基础进行模拟计算, 左隧先行, 右隧滞后。计算基本参数为: C25混凝土结构, 厚30cm; I22b型钢架保护层厚度内、外侧均为40mm; 桥墩扩大基础长 \times 宽 \times 高 = 44 \times 4.1 \times 6.1m, 桥面荷载及自重作用在桥墩基础顶面的线荷载为468.7kN/m。开挖及初支计算结果如图4-7 ~ 12所示:

通过模拟计算, 隧顶最大位移为-0.91mm, 隧底最大位移为0.79mm, 且均位于先行隧道 (左隧), 桥墩基础顶面最大沉降为-0.59mm。施工时通过大管棚超前支

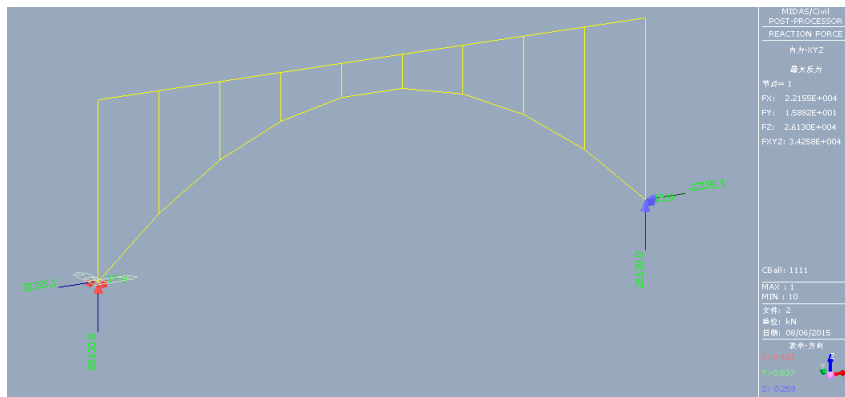


图4-5 肋拱桥拱脚处荷载

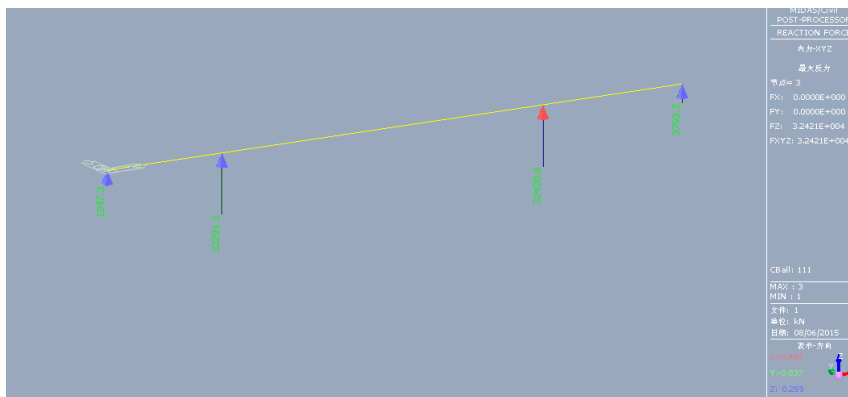


图4-6 连续梁桥支座处荷载

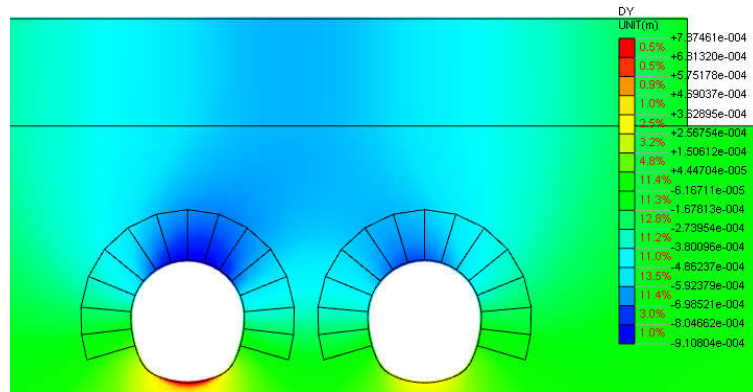


图4-7 Y方向位移图

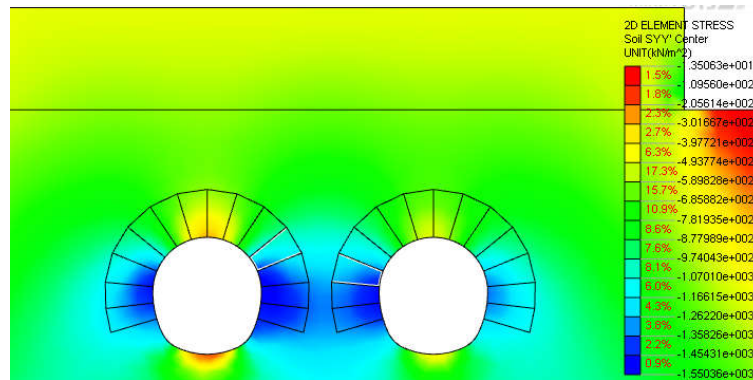


图4-8 Y方向应力图

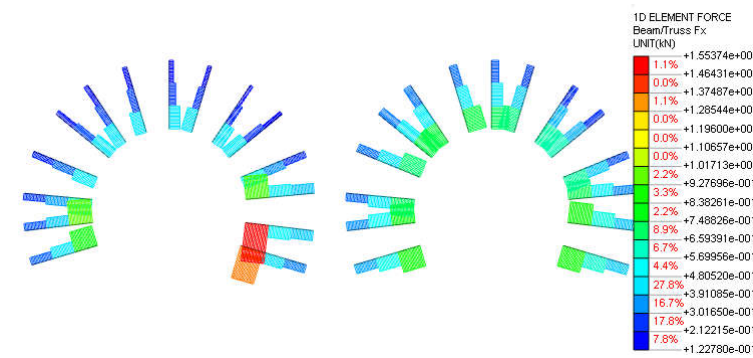


图4-9 锚杆轴力图

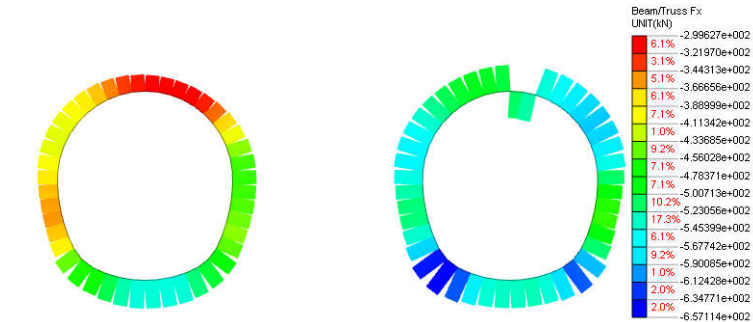


图4-10 初支轴力图

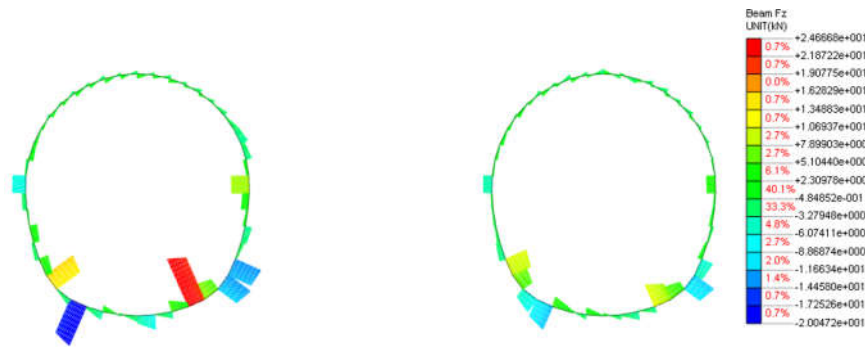


图4-11 初支剪力图

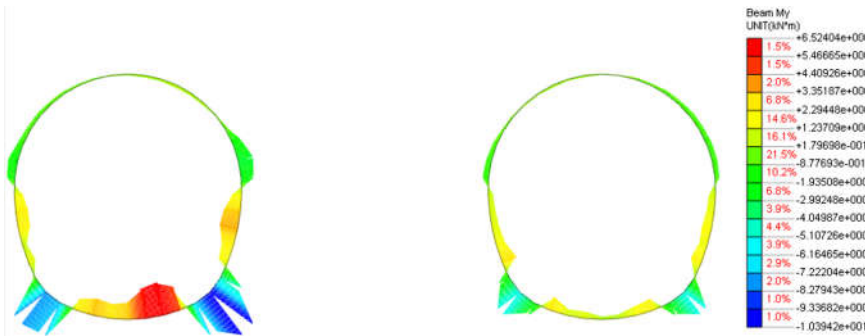


图4-12 初支弯矩图

护，全断面超前帷幕注浆对掌子面前方岩体进行注浆加固后，隧道开挖时对围岩的扰动和沉降几乎可以忽略，不会对桥梁结构及地面交通产生影响。

根据左、右隧应力分布图，锚杆轴力以及初支结构弯矩、剪力均较小，初支结构主要承受轴力。右隧施工时对先行隧道沉降和应力分布均产生不利影响，因此，左、右隧不能同时进行下穿施工，严格控制施工步序，初支及时封闭成环且初支达一次二衬施作长度时，立即施作二衬。

4.4 二衬计算结果与分析

采用“荷载—结构”模型对下穿桥墩基础段二衬结构进行模拟计算，采用梁单元模拟混凝土衬砌，仅受弹簧模拟衬砌与岩土的作用。桥墩基底荷载按应力

扩散后直接作用在二衬结构上，根据围岩力学参数及隧道埋深，二衬计算结果如图4-13 ~ 16所示。

通过模拟计算，隧道二次衬砌结构受压类型既有大偏心又有小偏心受压。轴力值从拱顶至拱脚向两侧呈逐渐增大的趋势，且两侧基本对称，拱脚处出现最大轴力。隧道衬砌结构强度安全系数、抗剪强度、裂缝宽度检算满足规范要求，隧道衬砌结构安全系数最小值出现在拱脚处，其值为9.1，满足要求。

4.5 现场实测数据分析

目前，已成功完成下穿段隧道施工，为了进一步验证设计参数的安全、合理性，数值模拟计算的正确性，将设计参数、理论计算结果与现场施工情况及监测数据进行对比。

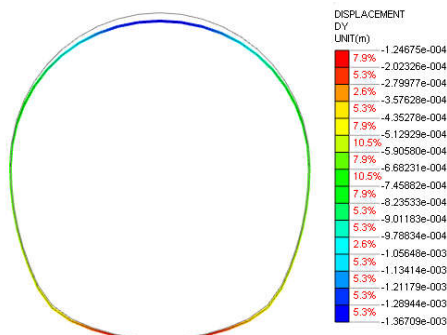


图4-13 图竖向衬砌变形图

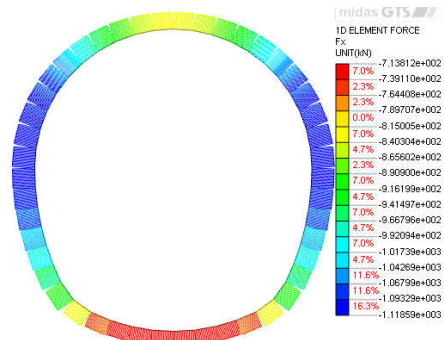


图4-14 衬砌轴力图

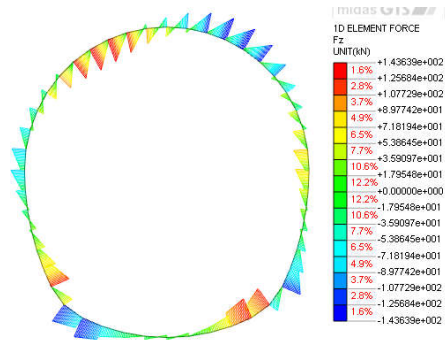


图4-15 衬砌剪力图

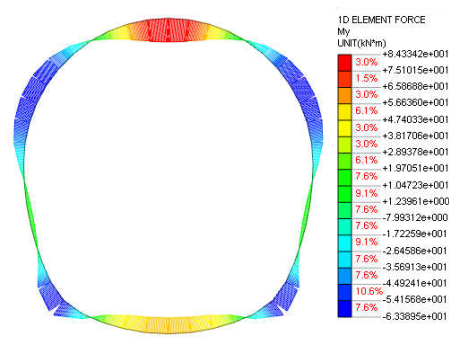


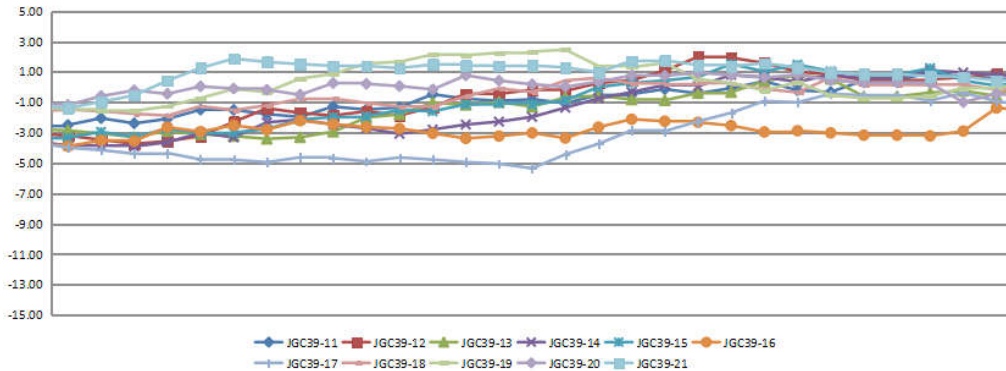
图4-16 衬砌弯矩图

现场施工揭示的注浆效果及监测数据均满足设计要求，证明下穿方案是安全可靠的。有限元计算结果与实测数据较吻合，计算值约小于实测值。因此，经过实测数据检验，本下穿方案及参数设置安全、合理、可靠。

5 结论

贵阳地铁2号线观水路站~油榨街站区间隧道下穿团坡桥及南明河段是贵阳地铁下穿建（构）筑物的重难点之一，具有环境及安全风险高、地质条件差、工程技术

观油区间团坡桥桥墩沉降时间-变化曲线图



复杂、施工难度极大等特点。本文针对可溶岩地层小净距隧道超浅埋下穿河流帷幕注浆止水及围岩加固方案，近距离下穿拱桥和连续梁桥桥墩基础沉降控制措施及数值模拟分析等进行了研究，主要得到以下结论：

可溶岩地层下穿大型河流，采用全断面超前帷幕注浆的方式是最富有成效的围岩加固与止水措施，可有效避免岩溶突水、河水渗漏、河床坍塌引发河水倒灌等风险。当隧道埋深较浅时，为确保注浆质量，防止河床冒浆污染河道，优化调整注浆工艺的时还需对河床进行处理或铺砌。

近距离下穿建（构）筑物时，围岩扰动和沉降控制是重点，改造地质条件是前提，合理、可靠的施工方法是成功下穿的关键。采用全刚性支撑，非爆破开挖，初支按承担全部基本荷载设计，严格制开挖进尺，减小临空面，充分发挥围岩的自承能力和初期支护的支护作用，能有效控制开挖引起的沉降和变形。

下穿桥墩基础段开挖及支护采用有限元模型进行数值分析，并与实测数据进行了对比，注明所设置的支护

参数安全可靠，采用的计算方法准确、可行，可为今后同类型工程的设计提供参考。

参考文献：

- [1] GB 50157 地铁设计规范[S].
- [2] TB 10003 铁路隧道设计规范[S].
- [3] GB 50010 混凝土结构设计规范[S].
- [4] 覃任辉.隧道工程[M].重庆：重庆大学出版社；乌鲁木齐：乌鲁木齐出版社，2001.12.
- [5] 林宗元.岩土工程治理手册[M].北京：中国建筑工业出版社，2005.
- [6] 王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].安徽：安徽教育出版社，2004.
- [7] GB 50086-2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
- [8] 刘义.软弱围岩全断面帷幕注浆技术研究[D].北京工业大学,2013
- [9] 黄陵武.水下隧道全断面超前帷幕注浆理论及可靠性分析[D].中南大学,2010.