

水涧山隧道衬砌型式受力机理分析

崔帅帅

广东省公路建设有限公司博深分公司, 广东 广州

收稿日期: 2026年7月25日; 录用日期: 2026年8月16日; 发布日期: 2026年8月26日

摘 要

水涧山隧道包含深埋单洞分离式、浅埋小净距两类隧道区段, 围岩等级覆盖II、III、IV级, 分别配套分离式II级衬砌、分离式III级衬砌、小净距IV级加强型衬砌。为验证各衬砌型式在最不利工况下的结构安全性, 依据规范, 采用荷载结构法开展运营阶段二次衬砌极限承载验算, 结合地层结构法同步验算初期支护、二次衬砌施工及长期运营受力, 兼顾衬砌厚度不足病害影响。研究表明: 三类衬砌在各自控制埋深下安全系数均满足规范要求; 深埋II、III级衬砌安全储备充足, 浅埋小净距IV级加强衬砌局部存在大偏心受力薄弱区, 安全余量偏低; 荷载结构法偏保守适用于病害校核, 地层结构法贴合围岩-支护协同受力真实状态。研究明确了各衬砌型式适用条件、受力控制部位, 可为隧道衬砌设计、施工质量管控及病害治理提供参考。

关键词

水涧山隧道, 衬砌型式, 荷载结构法, 地层结构法, 安全系数, 小净距隧道

Mechanical Mechanism Analysis of Lining Types in Shuijianshan Tunnel

Shuaishuai Cui

Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Boshen Branch, Guangzhou Guangdong

Received: July 25, 2026; accepted: August 16, 2026; published: August 26, 2026

Abstract

The Shuijianshan Tunnel consists of two types of tunnel sections: deep buried single hole separation type and shallow buried small clearance type. The surrounding rock grades cover level II, III, and IV, and are respectively equipped with separated level II lining, separated level III lining, and small clearance level IV reinforced lining. To verify the structural safety of each lining type under the most unfavorable working conditions, according to the specifications, the load structure method is used

to carry out the ultimate bearing calculation of the secondary lining during the operation stage. Combined with the geological structure method, the initial support, secondary lining construction, and long-term operation stress are synchronously calculated, taking into account the impact of insufficient lining thickness and diseases. The research results indicate that the safety factors of the three types of lining meet the regulatory requirements under their respective controlled burial depths; There is sufficient safety reserve for deep buried Grade II and III lining, while for shallow buried Grade IV reinforced lining with small clearance, there are locally weak areas with large eccentricity and low safety margin; The load structure method is conservative and suitable for disease verification, while the geological structure method conforms to the true state of the coordinated force between the surrounding rock and support. The study has clarified the applicable conditions and stress control parts of various lining types, which can provide reference for tunnel lining design, construction quality control, and disease control.

Keywords

Shuijianshan Tunnel, Lining Type, Load Structure Method, Stratigraphic Structure Method, Safety Factor, Small Clear Distance Tunnel

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水洞山隧道为山区高速公路关键控制隧道，沿线围岩条件分段差异显著，同时包含深埋单洞分离式段落与浅埋小净距并行段落。隧道按围岩等级划分三类衬砌标准型式：II级围岩深埋分离式衬砌、III级围岩深埋分离式衬砌、IV级围岩浅埋小净距加强衬砌。隧道运营阶段易出现二次衬砌厚度不足病害，直接削弱初支与二衬协同承载能力[1]-[3]，因此亟需对原设计衬砌型式开展多方法力学验算，明确不同衬砌结构受力薄弱部位、安全储备水平，验证各衬砌型式适配本工程地质埋深条件的合理性。

当前公路隧道衬砌验算主要分为荷载结构法与地层结构法两套体系[4]-[7]。荷载结构法将衬砌作为主要承载体，围岩简化为主动松动荷载与弹性约束，计算简洁、适用性广，多用于运营阶段二衬承载力校核；地层结构法将围岩、初期支护、二次衬砌视为整体协同受力体系，可还原开挖应力重分布、围岩自承效应，更贴合隧道真实受力状态，适合施工全过程分析[7]-[11]。龙炼彬等[12]基于数值模拟的方法，研究了饱和软黏土中矩形顶管荷载模式和变形特征，分析了地层-结构法与荷载-结构法的差异。张斌等[13]基于复合地层中的顶管工程，采用荷载结构法和地层结构法，对比分析了管侧不同地质条件下的管节内力变化规律。梁杰等[14]采用有限元软件建立三维数值模型，研究了双洞净距与软弱夹层参数的共同作用效应。徐晋英和杨嘉乐[15]通过数值模拟和理论计算，探讨了超浅埋小净距隧道施工对既有高速公路路面沉降的影响及控制基准。张旭等[16]开展了1:40大比例物理模型试验，完整复现了拱顶、拱肩衬砌减薄病害从开裂到整体失稳全过程，分析了衬砌厚度不足对结构安全影响。文竞舟等[17]基于荷载-结构法建立多病害衬砌数值模型，量化单一病害与耦合病害安全系数降幅差异。综上所述，现有研究多针对单一围岩、单一埋深隧道开展衬砌分析，针对同一隧道同时覆盖深埋II、III级围岩分离式衬砌与浅埋IV级小净距加强衬砌的对比验算案例较少，难以指导分段衬砌选型与病害评估[18]-[21]。

基于此，本文以水洞山隧道为研究对象，通过荷载结构法、地层结构法两种数值验算方法，对比II、III、IV级围岩的三类衬砌内力分布、安全系数与破坏控制模式，论证各衬砌型式的适配性。研究结果可

为隧道衬砌设计、施工质量管控及病害治理提供参考。

2. 荷载结构法

(1) 分离式 II 级衬砌

根据隧道施工图资料,取 II 级围岩深埋段,隧道埋深取深浅埋分界深度 4.36 m。按照最不利埋深 279 m 计算,通过前文公式可知围岩与衬砌共同承受的荷载为:

竖向均布荷载: $q_1 = 54.52 \text{ kN/m}^2$;

顶部或底部侧压力: $e_{li} = \lambda q = 0 \text{ kN/m}^2$ 。

根据《公路隧道设计细则》[18]规定,II 围岩二衬作为安全储备,在原设计中不考虑承担荷载,但为了探究厚度不足的病害对该衬砌承载性能的影响,在本次计算中假定二次衬砌承担 30%的围岩荷载。

分离式 II 级衬砌在深埋段(埋深 279 m)的验算结果如图 1 所示,计算结果表明,二次衬砌整体安全性良好。各关键节点安全系数在 6.68~31.99 之间,均满足规范要求,其中拱顶安全系数 6.68 为最小值,但仍具有较大安全储备。从破坏形式看,拱顶受拉强度控制,其余位置均为抗压强度控制,结构受力状态合理。尽管本次验算假定二衬承担 30%围岩荷载,但结果显示即使在承载状态下,衬砌仍具有充足的安全裕度,能够满足深埋段使用要求。

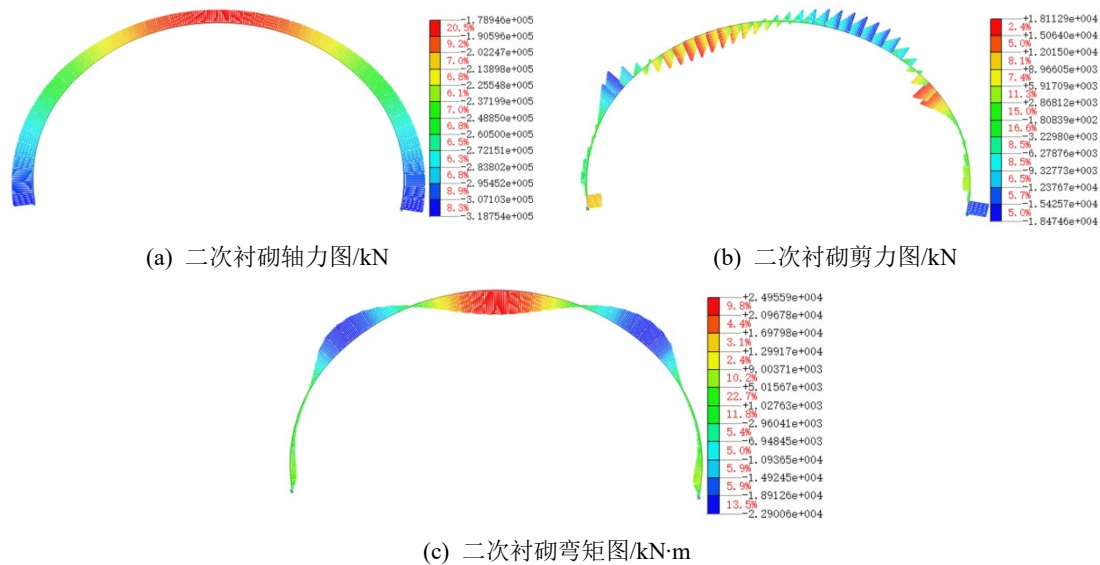


Figure 1. Calculation results of secondary lining for separated grade II lining

图 1. 分离式 II 级衬砌二次衬砌计算结果

(2) 分离式 III 级衬砌

根据隧道施工图资料,取 III 级围岩深埋段,隧道埋深取深浅埋分界深度 8.72 m。按照最不利埋深 112.875 m 计算,通过前文公式可知围岩与衬砌共同承受的荷载为:

竖向均布荷载: $q_1 = 109.04 \text{ kN/m}^2$;

顶部或底部侧压力: $e_{li} = \lambda q = 16.36 \text{ kN/m}^2$ 。

根据《公路隧道设计细则》规定,在本次计算中假定二次衬砌承担 30%的围岩荷载。

分离式 III 级衬砌在深埋段(埋深 112.875 m)验算结果如图 2 所示,计算结果表明,二次衬砌整体安全性良好。各关键节点安全系数在 3.93~25.26 之间,均满足规范要求,拱顶安全系数 3.93 为最小值。拱

腰位置呈现明显不对称特征,左拱腰 6.14,右拱腰 5.47。从破坏形式看,拱顶和左拱腰受拉强度控制,其余位置为抗压强度控制,结构受力状态合理,能够安全承受深埋段围岩压力。

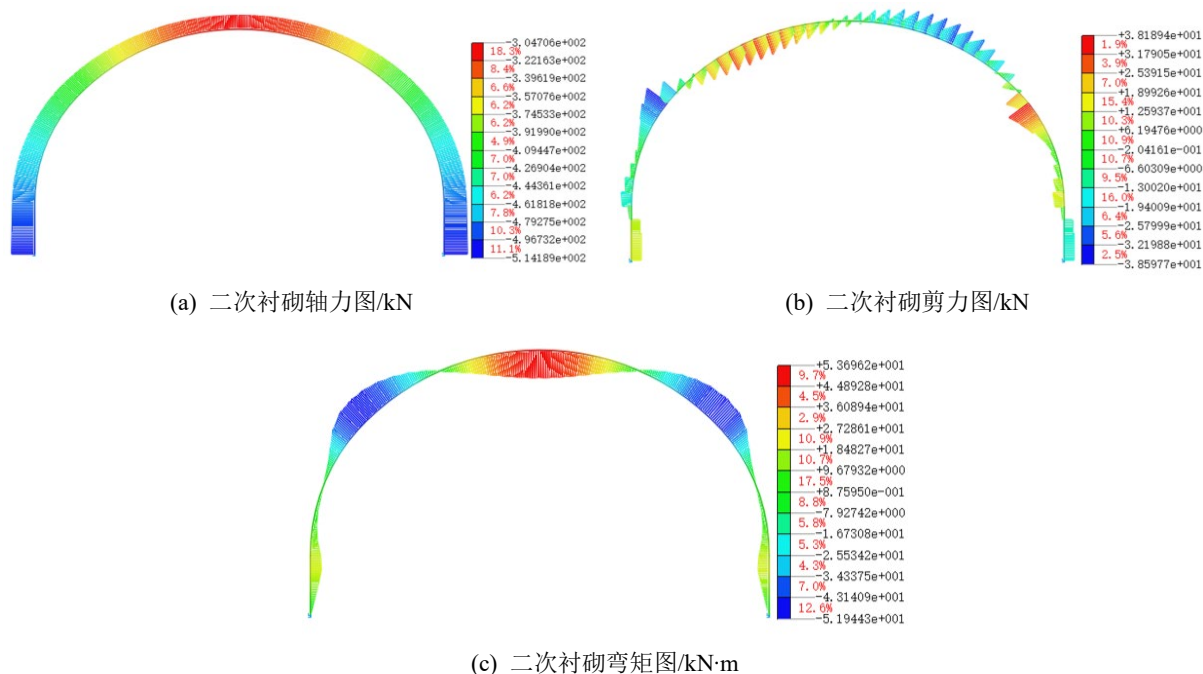


Figure 2. Calculation results of secondary lining for separated grade III lining
图 2. 分离式 III 级衬砌二次衬砌计算结果

(3) 小净距 IV 级加强型衬砌

根据隧道施工图资料,取 IV 级围岩浅埋段,隧道埋深取深浅埋分界深度 60.50 m。按照最不利埋深 38.28 m 计算,通过前文公式可知围岩与衬砌共同承受的荷载为:

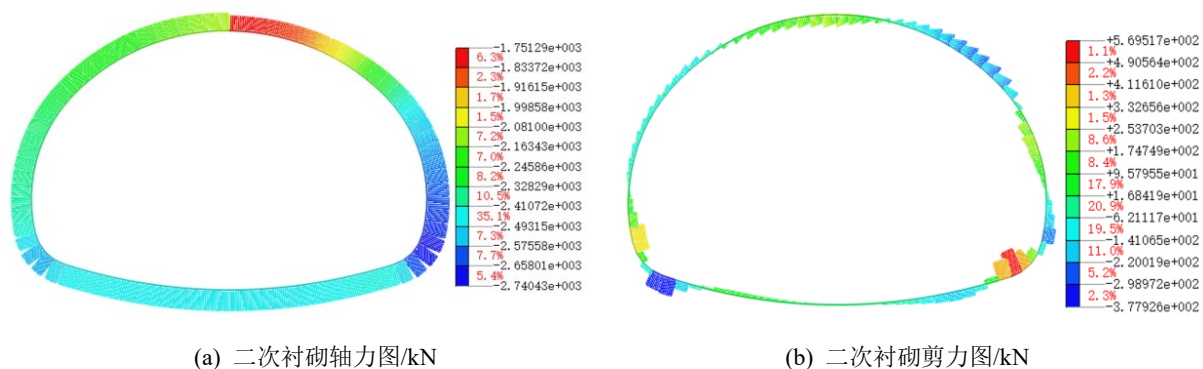
拱顶外侧压力荷载: $q_1 = 383.41 \text{ kN/m}^2$;

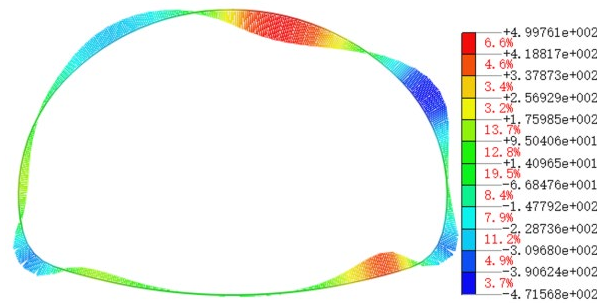
拱顶内侧压力荷载: $q_2 = 626.56 \text{ kN/m}^2$;

外侧水平侧压力荷载: $q_2 = 262.12 \text{ kN/m}^2$;

内侧水平侧压力荷载: $q_2 = 203.61 \text{ kN/m}^2$ 。

根据《公路隧道设计细则》规定,在本次计算中假定二次衬砌承担 50%的围岩荷载。





(c) 二次衬砌弯矩图/kN·m

Figure 3. Calculation results of secondary lining for strengthened grade IV lining of closely-spaced tunnels

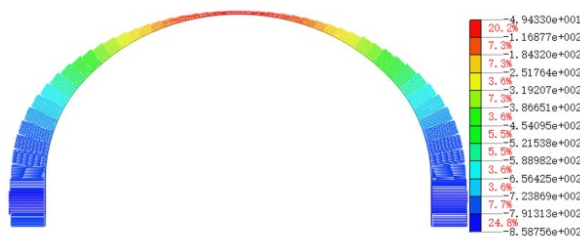
图 3. 小净距 IV 级加强型衬砌二次衬砌计算结果

小净距 IV 级加强型衬砌在深埋段(埋深 38.28 m)的荷载结构法验算结果如图 3 所示,计算结果显示,二次衬砌整体安全性能满足设计要求。各关键节点的压弯验算安全系数在 2.481~6.050 之间,其中右拱肩位置为大偏心受力状态,安全系数 2.481 为全断面最小值,但仍高于规范要求的最低安全系数。除右拱肩和右拱腰外其余位置均为小偏心受压状态,安全系数较高。抗剪验算方面,所有节点均按构造配筋即可满足要求,其中右拱脚(内侧拱脚)位置的抗剪安全系数为 3.1,为相对薄弱环节。裂缝宽度验算显示各节点均不需要进行裂缝宽度验算,表明结构在正常使用状态下不会出现有害裂缝。总体而言,从原设计左洞的小净距 IV 级加强型衬砌结构承载能力的验算结果来看,其能够安全承受深埋段的围岩压力及其他荷载作用。

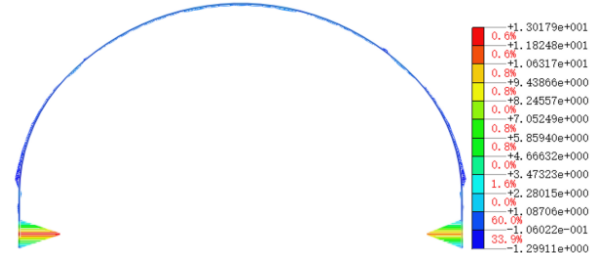
3. 地层结构法验算原设计

(1) 分离式 III 级衬砌 - 初期支护

隧道初期支护的弯矩和轴力的分布情况如图 4 所示。并结合隧道初期支护的钢架抗拉、钢架抗压、喷射抗压安全系数验算结果可知,喷射混凝土安全系数在 3.50~49.03 之间,左、右拱脚 3.50 和 3.70 为最小值,但仍大于规范允许值。钢架受压安全系数在 2.05~70.33 之间,左、右拱脚 2.09 和 2.05 为最小值,是初期支护的关键控制部位。拱腰位置安全系数处于中等水平,拱顶由于围岩自稳能力较好安全系数较高。



(a) 二次衬砌轴力图/kN



(b) 二次衬砌剪力图/kN

Figure 4. Internal force of tunnel primary support structure

图 4. 隧道分离式初期支护结构内力

(2) 分离式 III 级衬砌 - 二次衬砌

图 5 给出了隧道二次衬砌的弯矩、轴力及剪力的分布情况。结合隧道二次衬砌的偏心状态、裂缝宽

度和安全系数压弯验算结果,分离式 III 级衬砌二次衬砌验算显示出优异的安全性能。各节点均为抗压强度控制,安全系数在 10.00~86.34 之间,拱顶 86.34,拱肩 36.02~36.72,右拱腰 10.00 为最小值。地层结构法充分考虑了围岩自承作用和应力重分布过程,计算结果更真实反映围岩-支护相互作用下的实际受力状态,验算表明原设计 III 级衬砌结构安全可靠,能够满足隧道长期运营要求。

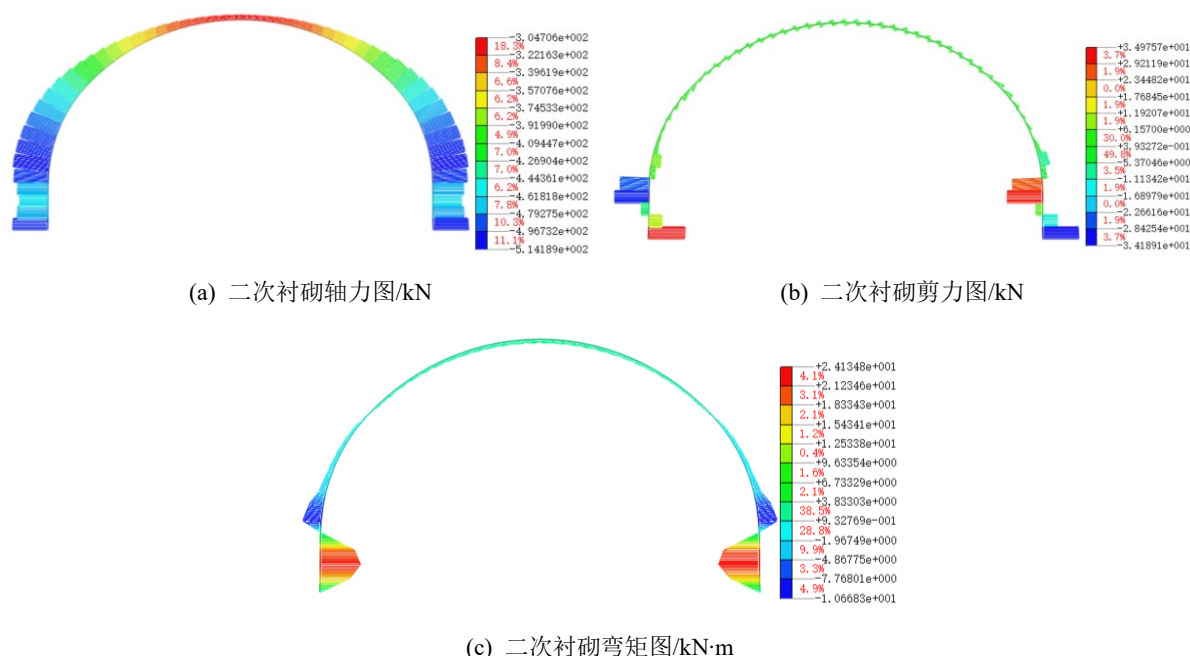


Figure 5. Calculation results of secondary lining for strengthened grade III lining

图 5. III 级加强衬砌衬砌二次衬砌计算结果

(3) 小净距 IV 级加强型衬砌 - 初期支护

隧道左线初期支护的弯矩和轴力的分布情况如图 6 所示。结合隧道初期支护的钢架抗拉、钢架抗压、喷射混凝土抗压安全系数验算结果,IV 级加强型衬砌初期支护验算结果表明安全性能良好。喷射混凝土安全系数在 2.85~58.03 之间,左拱腰位置安全系数 2.85 为最小值,其值满足规范要求,工字钢受压安全系数在 4.76~89.37 之间,右拱脚受压安全系数 4.76 为最小值。拱腰和拱脚受力较大,是初期支护的关键控制部位。

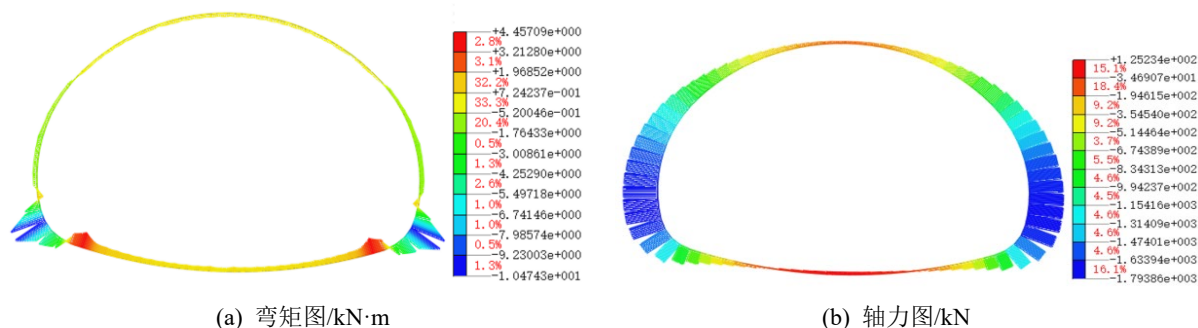


Figure 6. Internal forces of tunnel primary support structure

图 6. 隧道初期支护结构内力

(4) 小净距 IV 级加强型衬砌 - 二次衬砌

隧道左线二次衬砌的弯矩、轴力及剪力的分布情况如图 7 所示, 结合隧道二次衬砌的偏心状态、裂缝宽度和安全系数压弯验算结果, 得出了 IV 级加强型衬砌二次衬砌验算显示出优异的安全性能。各关键节点均为小偏心受压, 压弯安全系数在 6.82~49.885 之间。各节点均不需要进行裂缝宽度验算。地层结构法考虑了围岩 - 支护相互作用, 计算结果更符合实际受力状态, 验算表明原设计二次衬砌结构安全可靠, 能够满足隧道长期运营要求。

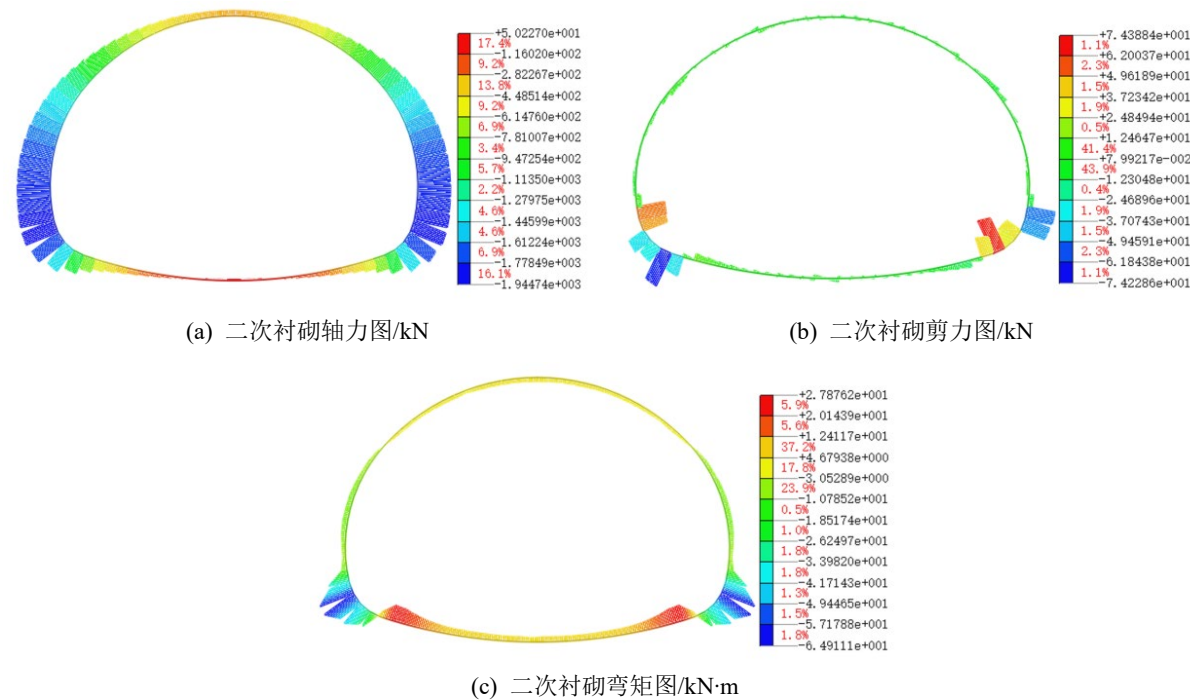


Figure 7. Calculation results of secondary lining for strengthened grade IV lining
图 7. IV 级加强衬砌二次衬砌计算结果

4. 结论

- 1) 水洞山隧道分离式 II 级、III 级、小净距 IV 级加强型衬砌, 在各自最不利埋深、极限荷载分担工况下安全系数均满足 JTG 3370.1-2018 规范要求, 原衬砌型式选型合理, 可保障隧道长期运营安全。
- 2) 深埋分离式 II、III 级衬砌围岩自承效应突出, 安全储备充足, 衬砌厚度缺陷耐受能力强; 浅埋小净距 IV 级加强衬砌存在局部大偏心受力截面, 极限工况下安全余量偏小, 施工与运维管控标准需提高。
- 3) 荷载结构法适用于衬砌厚度不足等病害极限工况校核, 地层结构法能够真实反映围岩 - 支护协同受力状态, 两套方法联合验算可全面评价衬砌安全性能, 可推广至同类多分段山岭隧道。
- 4) 小净距 IV 级衬砌拱肩、拱腰、拱脚为结构薄弱区域, 可通过配筋优化、严控衬砌浇筑厚度、长期变形监测等手段降低衬砌开裂、承载力不足风险。

参考文献

[1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
[2] 关宝树. 隧道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
[3] 朱合华, 黄伯麒, 李晓军, 等. 盾构衬砌管片接头内力-变形统一模型及试验分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12):

- 2153-2160.
- [4] 孙毅, 张顶立, 于富才, 等. 高速铁路隧道二次衬砌的变形特性与极限承载能力[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 60-70.
 - [5] 潘峰, 伍小方, 吕中玉. 硕龙隧道超小净距段围岩稳定性及加固方案研究[J]. 公路, 2025, 70(9): 357-364.
 - [6] 何进江, 刘洋, 蒋康, 等. 不同施工方法浅埋非对称小净距隧道围岩变形规律研究[J]. 岩土工程技术, 2026, 40(2): 254-262.
 - [7] 周伟锋. 严重劣化隧道二衬拆换力学响应及其影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2023.
 - [8] 陈子全. 高地应力层状软岩隧道围岩变形机理与支护结构体系力学行为研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.
 - [9] 吴绍勇. 突水作用下深埋公路隧道衬砌受力特征及安全性分析[J]. 云南水力发电, 2022, 38(12): 56-59.
 - [10] 蒋宗鑫, 吴斌. 小净距浅埋偏压软岩隧道支护结构受力实测分析[J]. 铁道建筑, 2015(7): 50-53.
 - [11] 交通运输部. JTG 3370.1-2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
 - [12] 龙炼彬, 黄茂松, 时振昊, 等. 软黏土矩形顶管土压力分布与结构响应分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(S2): 6-10.
 - [13] 张斌, 陈孝湘, 龚建伍. 复合地层大口径顶管管道结构内力影响因素分析[J]. 电力勘测设计, 2023(S2): 40-45.
 - [14] 梁杰, 陈铁, 李逸凡, 等. 软弱夹层空间参数对小净距双洞隧道开挖影响分析[J]. 山西建筑, 2026, 52(15): 140-145+187.
 - [15] 徐晋英, 杨嘉乐. 超浅埋小净距隧道下穿段路面沉降控制基准分析[J]. 公路, 2026, 71(5): 510-518.
 - [16] 张旭, 董烨炜, 许有俊, 等. 衬砌厚度不足影响下通透肋式连拱隧道破坏规律试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(3): 1202-1214.
 - [17] 文竞舟, 李友河, 杨新泽, 等. 多病害耦合作用下钢带加固隧道衬砌的安全性评价[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(4): 291-300.
 - [18] 招商局重庆交通科研设计院. JTG/T D70-2010 公路隧道设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
 - [19] 吴铭芳, 曾仲毅, 黄义雄, 等. 运营高速公路隧道衬砌裂损处治方案研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S2): 942-954.
 - [20] 曹敏, 王丽君. 隧道复合式衬砌初支与二衬相互作用机理研究[J]. 广东水利水电, 2025(12): 68-72+86.
 - [21] 杨剑, 龚伦. 运营隧道拱顶脱空型衬砌厚度不足整治技术研究[J]. 公路, 2022, 67(2): 321-329.