

有压隧洞仰拱与边墙连接弱化对衬砌支护特性的影响研究

石钰锋^{1,2}, 傅琼华¹, 庄锦彬², 彭圣军¹

(1. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘 要: 仰拱与边墙连接处的施工质量对衬砌结构以及围岩的力学状态有重要影响。通过 FLAC^{2D} 有限差分软件, 建立仰拱与边墙连接弱化的隧洞模型对隧洞支护结构力学行为进行分析, 在 0.5 MPa 以下内水压工况的研究结果表明: (1) 衬砌按照弹性结构单元计算时, 仰拱与边墙连接弱化对衬砌受力影响有限, 弱化程度加深后影响有所增大, 但不显著; (2) 衬砌按照弹塑性实体单元计算时, 弱化区域附近围岩侧衬砌边缘随弱化程度加深出现压应力集中; (3) 衬砌在围岩压力及内水压力复合作用下, 衬砌内力随内水压力增大呈减小趋势。

关键词: 有压隧洞; 连接弱化; 支护特性; 数值模拟

中图分类号: TV651.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4701(2018)01-0001-05

0 引言

隧洞工程中, 因受施工水平差异及施工工序先后所引起混凝土浇筑间断性等因素的影响, 仰拱与后期浇筑的边墙连接处整体性较难保证, 结合处弱化现象普遍存在, 给隧洞能否长期安全、稳定地运行带来极大挑战。当前, 国内学者对仰拱与边墙不同联结方式下的隧道衬砌受力进行了相关研究, 比较有代表性的是李德武^[1]通过二维非线性有限元法得到的仰拱不同结构形式、仰拱与边墙不同联结方式下围岩应力分布规律提出列车振动下隧道基底较为合理的结构形式和措施; 陈克良^[2]基于仰拱与边墙固结、铰接两种连接方式, 采用数值模拟手段分析了仰拱、边墙不同连接方式对深埋隧道围岩、衬砌结构力学性状的影响; 刘尧军等^[3]对大跨公路隧道断面进行优化研究, 得出采用合适圆角在墙角过渡可改善隧道衬砌结构受力状态的结论; 陶德敬等^[4]对铁路隧道装配式衬砌结构下不同接头刚度和不同分块方式结构的内力进行比较, 提出装配式衬砌合理的分块方式; 李德武^[5]根据现场列车振动测试结果分析了隧道仰拱与边墙不同联结方式、不同刚度情况下, 隧道仰拱对列车振动衰减的影响。以上研究主要针对无压隧道在仰拱与边墙不同联结方式下支护体系受力及优

化分析, 而对有压水工隧洞仰拱与边墙联结处弱化情况衬砌结构的力学性状及变形规律有待进一步研究。本文借助 FLAC^{2D} 有限差分方法, 对江西水工隧洞仰拱与边墙连接处不同程度弱化、不同内水压作用下衬砌结构受力特征进行初步探索, 以期对设计和施工起到一定的指导作用。

1 案例

通过调研常见水工隧洞洞径大小、衬砌材料及厚度, 假定某圆形水工隧洞围岩为 III 类, 埋深 80.00 m, 洞径 6.00 m, 衬砌材料为 C30 双层钢筋混凝土, 厚 50 cm。依据《水工隧洞设计规范》(DL/T595-2004)^[6]可知, 该隧洞满足洞身部位岩体最小覆盖厚度防止水力劈裂的埋深要求及双层钢筋混凝土最小厚度不宜小于 40 cm 的衬砌厚度要求, 围岩材料采用等效连续介质的摩尔库伦塑性力学模型。物理力学参数见表 1。

表 1 物理力学参数

材料	密度 ρ / (kg/m ³)	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	粘聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / °
围岩	2 200	10	0.25	1	40
衬砌	2 400	24	0.17	4	45

收稿日期: 2017-08-09

项目来源: 江西省博士后科研项目一等资助(编号: 2015KY07); 江西省青年科学基金项目(编号: 20161BAB2016139); 江西省自然科学基金项目(编号: 20161BAB206159)。

作者简介: 石钰锋(1985-), 男, 博士, 讲师。

2 数值分析

2.1 数值模型

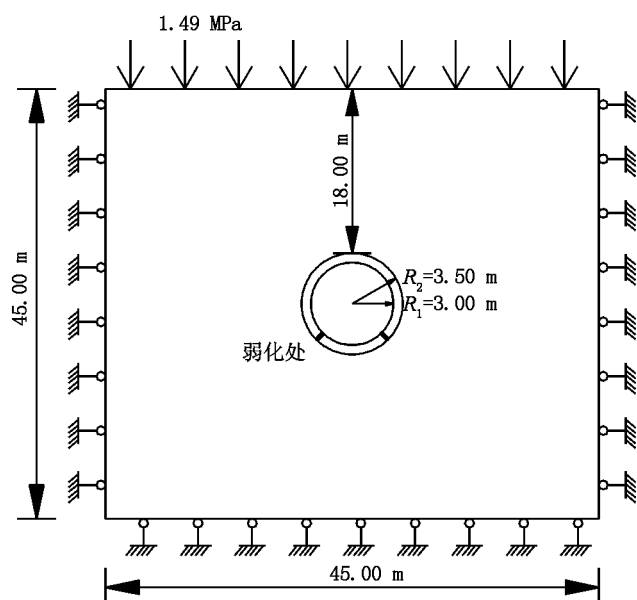


图1 连接弱化数值计算模型

基于以上案例,通过有限差分软件 FLAC^{2D},采用基于连续介质理论的摩尔库伦岩体屈服准则对隧洞某一截断面进行分析,隧洞轴向影响力可忽略,将仰拱与边墙连接不同程度弱化下有压隧洞衬砌的受力状态简化为平面应变问题建立数值模型,模型单侧边界取3~5倍洞径可消除边界影响,隧洞周边网格加密处理,内水压以面力形式垂直作用于隧洞内壁;模型左、右边界约束X方向位移,底部边界约束Y方向位移,施加上部岩体自重应力(1.49 MPa)作为顶部应力边界条件,衬砌采用结构单元与实体单元两种手段模拟,计算模型见图1,联系工程实践经验及相关文献调研知因仰拱与边墙混凝土前后浇筑的间断性,衬砌拱圈弱化位置通常位于仰拱与边墙连接处,具体位置见模型拱圈颜色加深部分。

考虑到江西水工隧洞大埋深较为少见,内水压选取针对省情考虑,本文讨论隧洞未充水及内水压为0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa时,仰拱与边墙连接不同程度弱化衬砌受力变化特点。通过折减相应材料参数模拟连接处弱化,弱化位置见图1,现拟定表2所示计算工况。

表2 工况列表

工况	工况一	工况二	工况三	工况四
仰拱墙角 连接弱化	0%	60%	80%	100%

本文暂不考虑衬砌开裂及流固耦合效应,隧洞开挖模拟过程:①岩体自重应力作用下计算得到初始应力场;②开挖隧洞一次成型后通过修改弱化处参数模拟连接弱化下衬砌作用效果,计算平衡;③采用面力施加均匀内水压力,计算平衡。

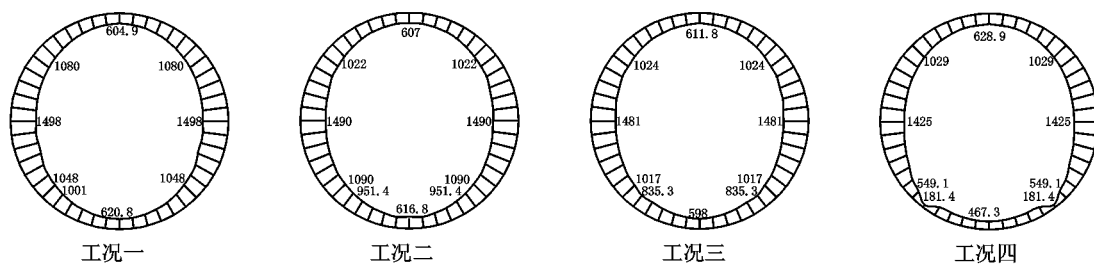
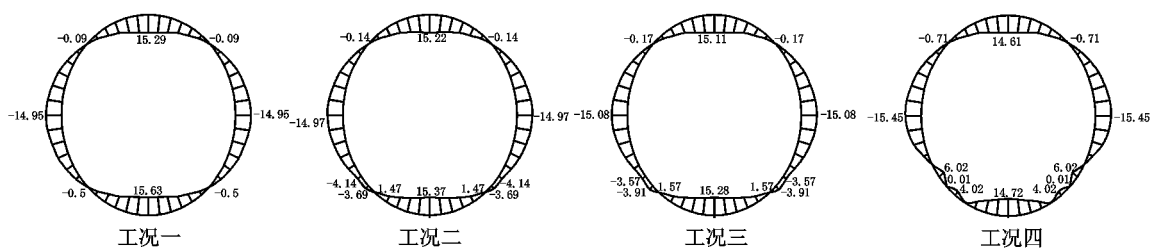
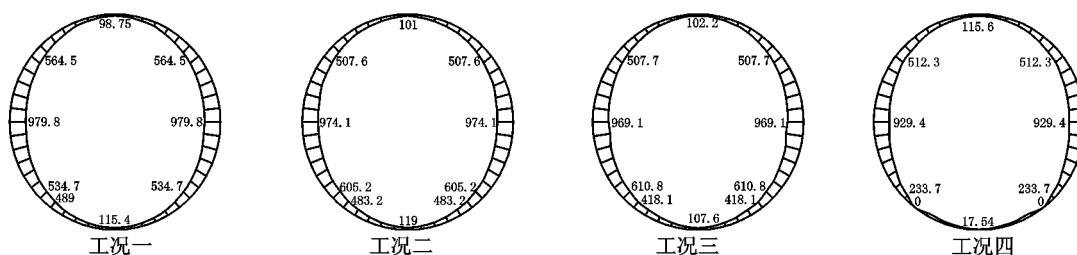
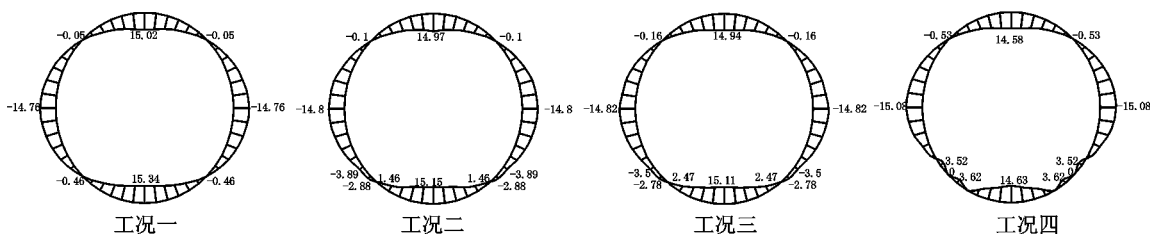
2.2 数值计算结果分析

借助有限差分软件 FLAC^{2D}对表2四种工况不同内水压下衬砌受力进行分析,结果显示不同内水压隧洞衬砌受力变化规律基本类似,选取代表性工况衬砌受力进行规律分析。

2.2.1 结构单元模拟衬砌

由图2、3可知内水压0 MPa时四种工况下,衬砌最大轴力均位于拱腰,其值分别为1 498 kN、1 490 kN、1 481 kN、1 425 kN,最大轴力随着弱化程度加深稍有减小,但影响极其有限;轴力变化最大幅度位于连接弱化处,连接弱化处轴力分别为1 001 kN、951.4 kN、835.3 kN、181.4 kN,工况四较工况一显著减小,减幅达81.9%;衬砌最大弯矩位于拱底,值分别为15.63 kN·m、15.37 kN·m、15.28 kN·m、14.72 kN·m,最大弯矩随着连接弱化程度加深而减小,但减小的最大幅度仅为5.8%;相较前面三种工况,工况四连接弱化处区域小范围外侧受拉转为内侧受拉,同时其他部位衬砌同位置弯矩变化不明显。说明:拱脚完全弱化对拱脚附近区域轴力影响显著,对衬砌弯矩影响则不明显。

对四种工况在充水状态下进行衬砌内力计算,不同内水压下衬砌内力变化规律基本类似,以内水压0.5 MPa下衬砌受力为代表进行规律分析。由图4、5可知:同一工况衬砌相同位置内力随着内水压力增大接近线性减小;衬砌最大轴力同样位于拱腰,四种工况最大值为979.8 kN、974.1 kN、969.1 kN、929.4 kN,内水压0.5 MPa隧洞最大轴力随弱化程度加深最大减小幅度仅5.1%,同一工况下相较无内水压时最大减幅达34.8%;衬砌最大弯矩与0 MPa内水压隧洞一致,位于拱底,值分别为15.34 kN·m、15.15 kN·m、15.11 kN·m、14.63 kN·m,内水压0.5 MPa隧洞最大弯矩随弱化程度加深变化极小,同一工况最大弯矩较无压隧洞最大减幅仅为1.8%。

图2 衬砌轴力分布(单位:kN) ($p=0$ MPa)图3 衬砌弯矩分布(单位:kN·m) ($p=0$ MPa)图4 衬砌轴力分布(单位:kN·m) ($p=0.5$ MPa)图5 衬砌弯矩分布(单位:kN·m) ($p=0.5$ MPa)

2.2.2 实体单元模拟衬砌

考虑到结构单元为弹性材料,连接弱化仅能对弹性模量 E 折减模拟弱化,若采用实体单元模拟衬砌,可调整连接弱化处实体单元弹性模量 E 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 进行模拟弱化,更能有效反应衬砌真实情况,但该方法后处理较为困难,计算得到的实体单元应力较难非常直观反应衬砌安全性和工作状态,故在此仅补充实体单元模拟衬砌相关应力分析,以期能更准确反映水工隧洞围岩及衬砌不同工况受力变形规律。衬砌实体单元细部见图6所示,对图中 ABCDEFG 位置提取应力进行分析,图中规定压应力为正,隧洞衬砌拱圈划分为48个块体,每个块体由6个单元网格构成,分块单元网格由围

岩侧衬砌边缘至洞内侧衬砌边缘编号为1~6,见图7。

通过七个关键点应力提取分析,结果显示不同内水压下隧洞衬砌受力变化规律基本类似,且不同工况下衬砌最不利受力及受力变化幅度最大主要集中于衬砌 C、D、F 三点,故本节仅对内水压 0 MPa、内水压 0.5 MPa 隧洞下这三点对应衬砌位置受力进行分析。

图8表明:同一工况、相同内水压衬砌 C 位置最大主压应力从围岩侧至洞内侧呈线性增大分布规律;相同内水压、不同工况下衬砌 C 位置同一网格单元最大主压应力随着弱化程度加深而稍有减小,且对围岩侧衬砌分块网格单元最大主压应力的影响更为明显;随着内水压增大,衬砌相同位置单元网格最大主压应力呈线性减

小趋势,0 MPa 内水压隧洞衬砌 C 位置分块单元网格最大主压应力位于洞内侧衬砌边缘网格单元 6,数值 5.38

MPa,0.5 MPa 内水压下同位置最大主压应力 4.05 MPa,减幅达到 24.8%。

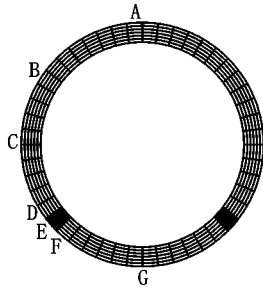


图 6 隧洞衬砌实体单元细部图

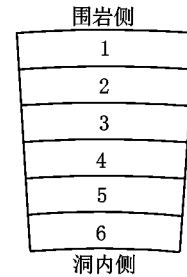


图 7 衬砌分块网格编号

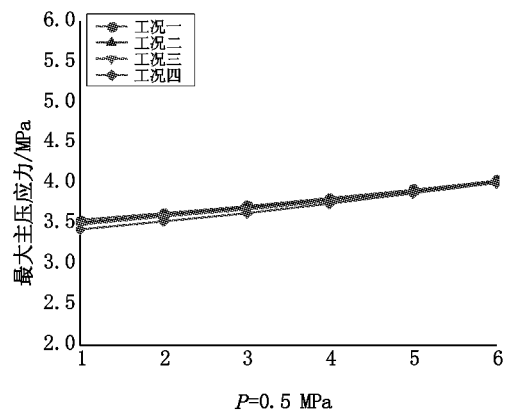
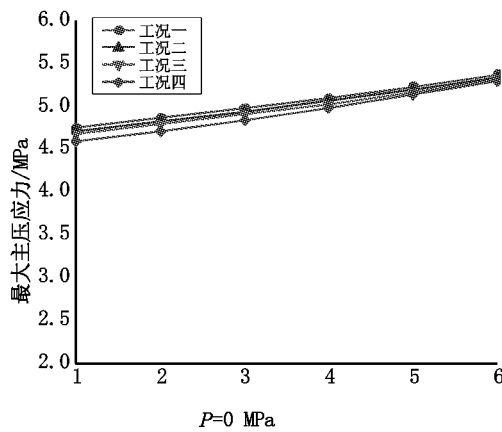


图 8 C 位置应力图

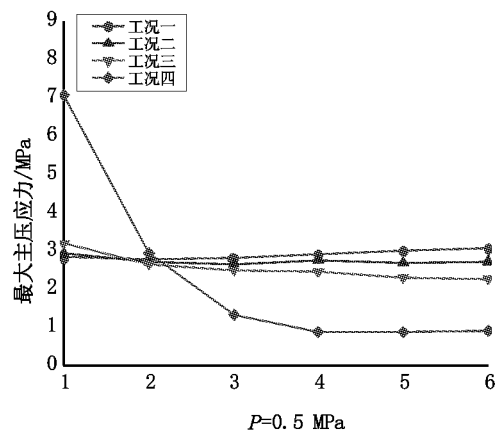
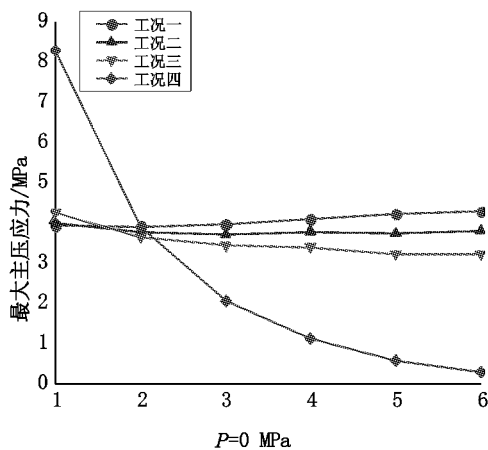


图 9 D 位置应力图

通过对衬砌弱化 E 处两侧 D、F 位置进行分析,由图 9、10 可知:同一内水压下工况一、二、三中衬砌 D、F 位置最大主压应力数值整体变化不大,但随着连接弱化程度加深,围岩侧衬砌网格单元最大主压应力小幅度增大;同一内水压下工况四较前面三种工况衬砌 D、F 位

置围岩侧分块网格单元 1 最大主压应力急剧增大,出现应力集中,此时内水压 0 MPa 隧洞衬砌 D 位置最大主压应力数值达到 8.28 MPa,内水压 0.5 MPa 下同位置最大主压应力 7.07 MPa,相比 0 MPa 内水压隧洞减小 14.6%,而内水压 0 MPa 隧洞衬砌 F 位置最大主压应

力数值 7.22 MPa, 0.5 MPa 内水压下同位置最大主压应力 6.01 MPa, 相比 0 MPa 内水压隧洞减小 16.8%, 即衬

砌 D、F 位置网格单元最大主压应力亦随内水压增大线性减小。

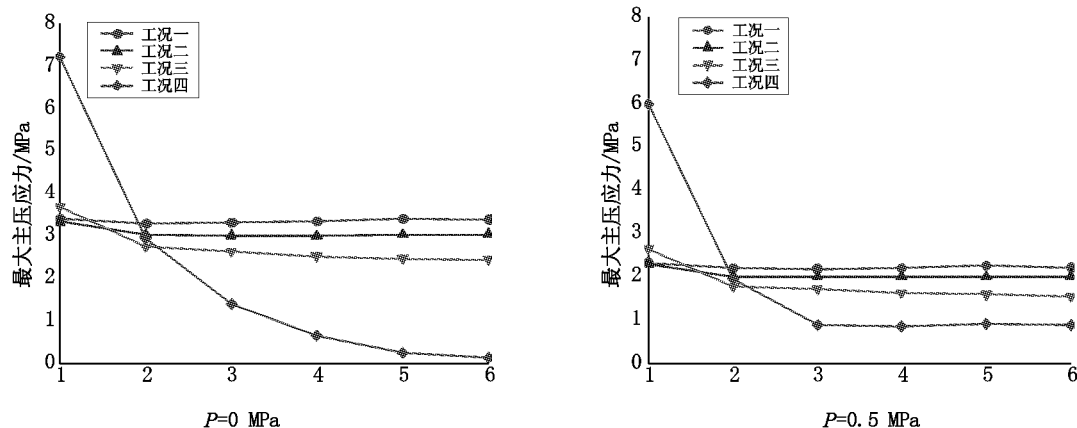


图 10 F 位置应力图

分析表明衬砌几个关键位置分块单元网格应力分布不尽相同, 仰拱与边墙连接完全弱化时 D、F 点围岩侧衬砌边缘出现压应力集中的现象, 受力不利, 而其他几个位置同一内水压、不同工况下最大主压应力分布规律基本一致。

以上不同工况不同内水压下衬砌受力规律相关结论均基于内水压范围 0 ~ 0.5 MPa 基础上, 极限水压力下衬砌屈服破坏有待进一步研究。由上分析可知: 不考虑衬砌开裂及流固耦合, 相同内水压、不同弱化程度对除弱化区域外衬砌其他位置最不利受力影响不明显, 但弱化区域内力变化较大; 相同弱化程度、不同内水压下, 相同位置内力随内水压增大而线性减小。

3 安全评估

考虑到本文案例实体单元模拟衬砌弱化引起的仰拱与边墙连接弱化处出现压应力集中, 极有可能出现混凝土压碎现象, 在这种特殊情况考虑以混凝土容许压应力为标准, 对内水压为 0 ~ 0.5 MPa 情况下实体单元模拟衬砌支护结构的安全性进行简单评估, 见图 11。

经分析可知: 隧洞在未考虑开裂和流固耦合情况下, 安全系数随着内水压 (0 ~ 0.5 MPa) 增大呈上抬走势, 但变化较为平缓, 工况一、二、三中安全系数曲线形态特征基本一致, 同一内水压下相同位置安全系数变化不大; 当仰拱与边墙连接完全弱化情况下, 工况四下安全系数有较为显著下降, 最大减幅达 42.9%, 且相较前面三种工况最不利位置从衬砌 C 位置转移至弱化区域

附近围岩侧衬砌边缘, 混凝土最大压应力愈来愈接近混凝土极限容许压应力, 对材料受力较为不利。

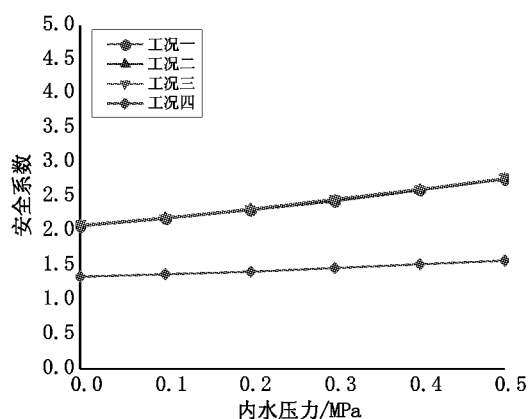


图 11 安全系数

4 结论

(1) 0.5 MPa 以下内水压力的内水压力工况下, 衬砌按照弹性结构单元计算时, 仰拱与边墙连接弱化对衬砌受力影响有限, 弱化程度加深后影响有所增大, 但不显著。

(2) 0.5 MPa 以下内水压力工况, 衬砌按照弹塑性实体单元计算时, 弱化区域附近围岩侧衬砌边缘随弱化程度加深出现压应力集中, 且仰拱与边墙连接完全弱化衬砌安全系数较前面三种工况有较为明显下降, 本文案例最大减幅达 42.9%。

(3) 0.5MPa 以下内水压力工况, 衬砌在围岩压力及内水压力复合作用下, 衬砌内力随内水压力增大呈减小趋势, 安全程度有所提高。

上述观点均基于不考虑衬砌开裂及流固耦合的假定下得到的, 仰拱与边墙连接不同程度弱化对衬砌及围岩的真实影响有待于考虑衬砌裂缝及流固耦合的精细化模型的进一步研究, 本文权当对此问题的初步探讨。

参考文献:

- [1] 李德武, 高峰. 列车振动下隧道基底合理结构型式的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2292 ~ 2297.

- [2] 陈克良. 深埋隧道仰拱边墙连接方式力学效应分析[J]. 四川建筑, 2012, 32(1): 85 ~ 87.
[3] 刘尧军, 高桂凤, 冯卫星. 大跨公路隧道断面优化设计研究[J]. 辽宁交通科技, 2004(2): 48 ~ 50.
[4] 陶德敬, 王长春. 铁路隧道装配式衬砌结构内力分析[J]. 四川建筑, 2006, 26(4): 105 ~ 106.
[5] 李德武, 高峰. 隧道仰拱对列车振动衰减影响的研究[J]. 铁道学报, 1999, 21(4): 60 ~ 63.
[6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工隧洞设计规范(DL/T595-2004)[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

编辑: 张绍付

Study on the influence of the lining support characteristics of the pressure tunnel which has the weakened connection between the inverted arch and the side wall

SHI Yufeng^{1,2}, FU Qionghua¹, ZHUANG Jinbin², PENG Shengjun¹

(1. Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The construction quality of the connection between the inverted arch and the side wall has an important influence on the lining structure and the mechanical state of the surrounding rock. The tunnel model which has a weakening connection between the inverted arch and the side wall is established through the FLAC^{2D} to analyze the mechanical behavior of the tunnel support structure. The results of the water pressure operating conditions under 0.5MPa of hydraulic tunnel are shown: (1) when the lining is calculated as elastic structure unit, the influence of the connecting weakening between the invert and the side wall on the lining is limited. The effect of the deepening of the weakening is increased, but not significant. (2) when the lining is calculated as elastic-plastic solid unit, the lining edge near surrounding rock within the weakening region appear compressive stress concentration when the weakening degree deepen. (3) Effected by the surrounding rock and internal water pressure, The lining internal force decreases when the internal water pressure increased.

Key words: Pressure hydraulic tunnel; Weakening connection; Supporting characteristics; Numerical analysis

翻译: 石钰锋