

基于应力反演的隧道衬砌病害快速诊断技术研究

陈 钊^{1,2}, 欧阳汛¹, 杨 松¹, 王进进¹, 艾祖斌¹, 吴顺川², 任 松³

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;

3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 隧道病害严重影响了隧道结构的稳定性、可靠性及安全性, 严重影响隧道的正常使用, 病害严重时甚至可引发安全事故。基于隧道信息检测及反分析方法, 提出采用一种隧道病害快速诊断及防治技术, 并以重庆某顶压隧道为工程依托进行应用, 得出以下结论: 1) 隧道病害快速诊断技术能快速获取隧道病害, 有利于快速及时预防治理隧道病害; 2) 通过隧道衬砌结构变形监测, 结合位移反分析及应力反演方法, 可准确确定隧道病害部位并提出针对性防治措施; 3) 诊断结果显示, 顶压隧道拱脚及拱底的衬砌结构受力最大, 提出对拱脚可进行嵌缝补强, 对拱底可采用先回填后注浆的病害防治措施。研究成果对隧道病害诊断及防治具有显著的工程意义及良好的经济价值, 可推广应用。

关键词: 隧道病害; 快速诊断; 智能位移反分析; 应力反演; 病害预防治理

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0776-07

Study on the rapid diagnosis and prevention treatment technology for tunnel lining deformation diseases

CHEN Fan^{1,2}, OUYANG Xun¹, YANG Song¹, WANG Jinjin¹, AI Zubin¹, WU Shunchuan², REN Song³

(1. Power China Road Bridge Group Co., Ltd. Beijing, 100048, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 China;

3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Tunnel diseases seriously affected the stability of the structure so that the safety and reliability are greatly reduced, which seriously affect the normal use, even cause safety accidents of the tunnel. A rapid diagnosis and its prevention and control of tunnel diseases was presented. Based on the engineering support of a top pressure tunnel in Chongqing for application and the conclusions were as follows: 1) The tunnel disease diagnosis technique can quickly get tunnel disease information and rapid diagnosis, which is good to prevent tunnel diseases timely; 2) Through the tunnel lining structure deformation monitoring, combined with the displacement back analysis and stress inversion method, and can be accurately predicted the tunnel diseases location and put forward the targeted prevention measures; 3) Through the diagnosis, it can be concluded that the arch foot and bottom of the tunnel are the largest force parts of top pressure tunnel lining structure, the tunnel arch foot should embedded sewing strong, while the arch bottom can be backfilled to prevent and control the tunnel diseases. Research results of tunnel disease diagnosis and its prevention has huge engineering significance and economic value and can be popularized.

Key words: tunnel disease; rapid diagnosis; displacement intelligent back analysis; stress inversion; disease prevention treatment

随着公路设计线形标准不断地提高, 建设里程数量也在不断增加, 公路隧道, 特别是山岭高速公路隧道也发展迅速。如今我国已成为隧道数量最多的国家, 特长隧道建设也居于世界首位, 这也使得我国也是隧道病害最严重的国家之一^[1]。

部分高等级公路隧道使用年限已长达十余年, 其中绝大部分出现了隧道病害, 隧道病害问题一方面严重影响行车安全^[2], 另一方面, 隧道病害整治费用高昂且难以从根本上进行治理。隧道病害问题多样且日益严峻, 其养护维修问题仍旧迫切,

收稿日期: 2017-07-13

修改稿日期: 2018-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074198); 国家自然科学基金资助项目(51304256); 重庆市研究生科研创新资助项目(CYB17046)

第一作者: 陈 钊(1972—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事隧道工程稳定性研究。E-mail: 355777914@qq.com

通信作者: 欧阳汛(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事隧道工程病害诊断及防治技术研究。E-mail: oyx-cqu@cqu.edu.cn

亟需有效、实用的技术方案来对隧道病害进行快速诊断^[3], 从而科学、有效且更具针对性地进行治理。随着隧道病害影响及其机理研究上的不断深化, 隧道病害诊断及其防治工作任重道远。

隧道病害诊断技术是一种通过进行隧道检测, 以查清病害产生原因及其危害程度的技术^[4]。朱苦竹等^[5]基于层次分析法, 分析衬砌裂缝、衬砌材质劣化、渗漏水、衬砌变形、衬砌背后、空洞、衬砌起层及剥落、洞门、洞口状态等 8 个主要影响因素权重, 对隧道洞口状态进行健康诊断, 为隧道洞口养护维修提供可靠的依据; 赵永贵等^[6]采用隧道地质超前预报结合地震 CT 技术进行病害诊断的手段来确保隧道工程安全; 姜耀东等^[7]基于地应力测量和三维建模技术, 对采煤工作面褶曲构造应力场进行了反演, 确定了构造应力区最小煤柱宽度; 贾善坡等^[8]根据监测的衬砌长期变形数据, 采用优化反分析法获得了蠕变损伤模型参数; 王媛等^[9]提出了裂隙岩体渗流与应力静态全耦合的参数反演方法, 并对岩质边坡的全耦合参数进行反演分析。

制定一个合理的隧道病害检测方案, 选择关键的测量技术对病害诊断成效具有重要影响。本文创新性地提出一种隧道病害快速诊断技术, 结合隧道衬砌位移反分析, 并进行应力反演, 旨在有效分析隧道病害情况并快速、及时地进行诊断, 进而建立相应的隧道病害检测预警体系, 并为隧道施工期的病害预防工作及其后期治理提供可靠依据, 保证隧道安全施工且运营通畅, 通过隧道检测反馈的信息, 还能实时改进并优化拟建隧道的设计方法和施工工艺。研究成果具有巨大的工程指导意义, 并可进行推广应用。

1 隧道病害快速诊断及预防治理技术

本文提出的隧道病害快速诊断及其防治技术, 能够快速反映出隧道病害情况, 有效遏制隧道病害的进一步劣化, 其基本路线如图 1 所示。

1.1 隧道信息快速获取

(1) 隧道衬砌变形快速监测技术

通过整理隧道病害相关文献^[10-12], 并对隧道病害进行分类后发现, 隧道大部分病害(除火灾外)基本都反映在隧道衬砌的变形或破坏。因此对隧道衬砌变形进行量测是实现隧道病害快速诊断技术实现的至关重要的一步。

隧道变形收敛监测, 传统的方法可通过钢尺

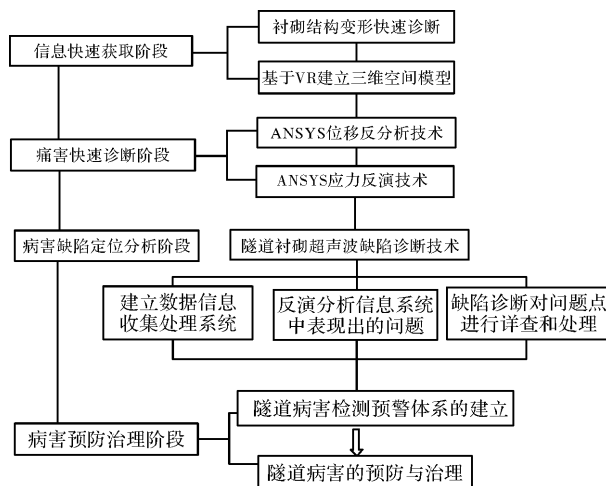


图 1 病害诊断技术程序图

Fig. 1 Sequence diagram of disease diagnosis technology

收敛计进行接触式测量, 或采用全站仪进行非接触式测量。传统方法操作相对简便, 但信息获取较慢且误差较大。采用三维激光扫描仪, 对隧道进行定期的三维扫描, 扫描原理如图 2 所示。三维扫描仪可以对现场施工情况进行跟踪检测, 通过对围岩表面变形情况反复进行扫描对照分析, 从而起到监测的功效, 得到不同工期下围岩的变形情况, 并能简单快捷地与原始状态进行比较, 获得的围岩变形量也更为精确, 进而准确分析围岩变化规律和稳定性。

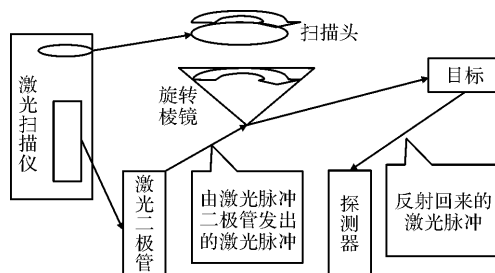


图 2 扫描原理

Fig. 2 Scanning principle

(2) 隧道虚拟现实系统技术分析

虚拟环境模型的建立, 是虚拟现实技术中的关键技术之一, 也是整个虚拟现实系统建立的基础, 同样也是整个虚拟现实系统质量的直接性保障。通过三维激光扫描仪, 如 FARO Photon 120, 进行现场量测, 定期收集数据, 对比分析在隧道断面上所发生的位移变化。其测距范围为 0.6 ~ 120 m, 测量点数为 976 000 个点/s, 测距误差在 ± 2 mm。再应用 VR 理论, 结合相应数据建立隧道三维空间模型, 将施工过程中隧道结构的变形情况更为准确直观地表现出来, 进而快速、及时

有效地处理隧道施工过程中可能存在的安全隐患。

综上所述,在隧道信息获取阶段,通过定期对隧道进行三维扫描,建立相应的三维模型和变形数据库,可以保证隧道结构变形准确、高效地监测,从而快速有效地发现隧道病害并及时进行诊断。

1.2 隧道病害快速诊断

通过前期对隧道进行三维激光快速扫描,定期更新隧道结构变形数据,结合虚拟现实技术进行三维建模,能够准确直观地分析得到隧道衬砌变形情况,基于现场测试进行位移优化反分析,得出围岩性态参数,再进行反演计算,得到隧道应力变化特征,有利于隧道病害的初步诊断。因此,在获取隧道信息的前提下,对衬砌结构位移优化反分析,是实现隧道病害诊断成果的关键。

(1) 衬砌智能位移优化反分析

地下工程反分析是通过前期获取的隧道信息,并结合给定的材料参数及相应模型,来反分析出实际施工过程中材料介质的性态参数及其初始荷载。反分析法通常可分为:位移反分析法、应变反分析法和应力反分析法。相对位移的测定较应力应变更为简便,也更具经济性。因此此处选择采用位移反分析方法。

在位移反分析过程中,如何确定相关反分析参数是问题的一大关键。反分析参数过多将影响结果的准确性,因此应尽可能地对反分析参数个数进行削减,还能减少工作量,并提高稳定性。在位移反分析计算中,可将衬砌结构上任意测点*i*的位移现场量测值 U_i ,作为输入信息,其与弹性模量 E 、泊松比 μ 及初始地应力分量 $\{p\}$ 之间关系如式(1)所示。

$$U_i = f_i(E, \mu, \{p\}) \quad (1)$$

上式在通常情况下难以演化为显式解析表达式,所以只能通过有限元法等数值计算方式,将其表示为离散式。演化后相应的基本方程如式(2)。

$$E[k]\{\sigma\} = \{F\} \quad (2)$$

式中: $[k]$ 为刚度矩阵; $\{F\}$ 为主节点荷载。

对于工程开挖问题, $\{F\}$ 与初始地应力 $\{p\}$ 存在一定关系。对于量测位移值,进行相应的插假变换后如式(3)所示。

$$\{U\} = \{L_M\}\{\sigma\} \quad (3)$$

且:

$$\{F\} = [M]\{P\} \quad (4)$$

式中: $\{L_M\}$ 、 $[M]$ 为与单元插值函数有关的系数矩阵。

将式(3)、式(4)代入式(2),可得:

$$\{U\} = \frac{1}{E} [L_M][K]^{-1}[M]\{p\} \quad (5)$$

令 $[T] = [L_M][K]^{-1}[M]$,可求得反分析结果如式(6)所示。

$$\frac{\{p\}}{E} = [T]^{-1}\{U\} \quad (6)$$

采用 ANSYS 有限元软件,进行智能位移优化反分析设计,步骤如下:

(1) 分析参数初始化:为给定分析模型中的相关材料指定初始参数值。

(2) 参数化建模:在 ANSYS 前处理器中,建立参数化分析模型,模型中参数暂取为初始值。建模分析过程与一般结构建模分析过程类似。

(3) 执行结构分析求解。

(4) 参数化结果提取。

(5) 指定状态变量及目标函数。

(6) 进入 OPT 优化后处理器,设置优化分析参数,并执行优化分析。

(7) 查看优化设计所得结果。优化过程中,数据流示意图如图 3 所示。

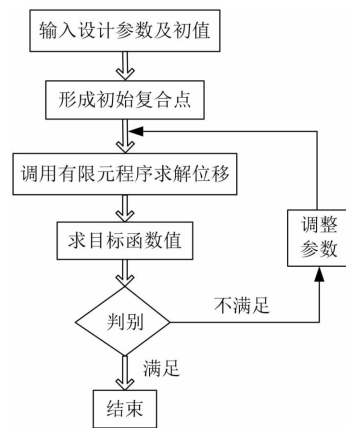


图3 优化过程

Fig. 3 Optimization process

(2) 隧道变形反演

根据位移反分析,得出衬砌结构现场位移测量值下的围岩性态参数,并对衬砌变形模拟结果进行验证,再根据变形反演,得出衬砌结构的受力情况。增量弹塑性理论对类属硬化材料的岩土介质的弹性和塑性变形相关表述包含了如下几个方面:

1) 存在一与变形历史和相应应力状态相关的

屈服函数, 在应力空间中, 可将其表述为 $f(\sigma_{ij}, K)$, 其中 σ_{ij} 为应力分量, K 为塑性内变量, 可知, 其屈服面表达形式如式(7)所示。

$$f(\sigma_{ij}, K) = 0 \quad (7)$$

式(7)定义了弹性区域边界, 即 $f(\sigma_{ij}, K) < 0$ 时, 介质材料变形表现为纯弹性变形。与屈服面上的点相对应的应力状态则为塑性应力状态, 且与之相应的外部荷载为无限小作用, 可分为加载、中性变载和卸载三种情况。介质仅在加载过程中才会产生新的塑性变形, 中性变载和卸载时, 介质变形则仍为纯弹性变形。因此, 需要建立一个区别不同条件和分别给出本构关系式的卸载判别准则。

2) 加载时, 可将无限小应变增量 $d\epsilon_{ij}$ 分解为弹性部分和塑性部分, 如式(8)所示:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (8)$$

其中弹性部分满足式(9)所示关系。

$$d\epsilon_{ij}^e = C_{ijk} d\sigma_K \quad (9)$$

式中: C_{ijk} 为四阶弹性系数张量。

3) 当应力空间与应变空间重合时, 存在弹性势能函数 $g(\sigma_{ij}, K)$, 且无限小塑性应变增量方向即为势能函数 $g(\sigma_{ij}, K)$ 的梯度方向。

4) 与应力状态相应的点在加载或中性变载过程中保持在屈服面上, 即: 一致性条件; 在卸载时, 应力点则退回到屈服面的内侧。

综上所述, 若将应力张量视为基本变量, 则在应力空间中, 弹塑性介质本构方程如式(10)所示。

$$\begin{cases} d\epsilon_{ij} = C_{ijk} d\sigma_K + \frac{1}{A_1} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} < \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_K > & f(\sigma_{ij}, K) = 0 \\ d\epsilon_{ij} = C_{ijk} d\sigma_K & f(\sigma_{ij}, K) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, A_1 、 σ_{ij} 和 K 均为已知函数, 其中,

$$A_1 = \frac{\partial f}{\partial K} h,$$

$$h = \begin{cases} \sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} & \text{当 } K = \omega^p \text{ (塑性功)} \\ \sigma_{ij} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} & \text{当 } K = \theta^p \text{ (塑性扩容)} \\ \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \times \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right)^{\frac{1}{2}} & \text{当 } K = \epsilon^p \text{ (等效塑性应变)} \end{cases} \quad (11)$$

式(10)中, 表达式 $< (\partial f / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_K >$ 即为加载区

分判据, 且函数 $< x >$ 性质如式(12)所示。

$$< x > = \begin{cases} x & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

介质屈服后, 上式可用作区分加载 ($x > 0$), 中性变载 ($x = 0$) 和卸载 ($x < 0$) 条件。另外, 该类准则仅适用于硬化材料。对于理想塑性材料, 加载和中性变载时则都有 $(\partial f / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_K = 0$; 对软化材料塑性屈服后加载和卸载时则都有 $(\partial f / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_K = 0$ 。因此, 对于岩土类介质的本构关系则需在应变空间中进行表述, 表达式如式(14)所示。

$$\begin{cases} d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\epsilon_{kl} - \frac{1}{A_1} D_{ijkl} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{nm}} < \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} D_{pqkl} d\epsilon_{kl} > \\ f(\sigma_{ij}, K) = 0 \\ d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\epsilon_{kl} & f(\sigma_{ij}, K) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: D_{ijkl} 为四阶弹性刚度系数张量; C_{ijk} 为四阶柔度系数张量, 与 D_{ijkl} 互逆。

采用 DP 准则, 并对流动法则进行关联, 并令势函数 $g = f$ 。材料进入塑性状态后, 其弹塑性应力—应变关系的增量表达式如式(14)所示。

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D_{ep}] \{d\epsilon\} = ([D] - [D_p]) \{d\epsilon\} \\ &= \left[[D] - \frac{[D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D]}{A_1 + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right] \{d\epsilon\} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: D_{ep} 为弹塑性矩阵; $[D]$ 为弹性矩阵; $[D_p]$ 为塑性矩阵。

1.3 隧道病害缺陷分析技术

依据位移反分析原理, 结合 ANSYS 软件进行应力反演, 可以确定给定条件下隧道衬砌的受力情况, 受力状态过大(应力集中等)通常是衬砌结构出现裂缝的根本因素。现如今, 无损检测技术已在混凝土测试体系中得到充分运用, 方法也越来越成熟, 混凝土无损检测常用方法及其原理分类如表 1 所示。在已知衬砌结构的受损部位后, 超声波无损探测技术可以更准确地确定衬砌损害的类型、深度等具体问题, 因此, 采用超声波检测仪最终确定病害缺陷, 检测系统原理如图 5 所示。发射换能器激发的脉冲声波通过混凝土后, 利用接收换能器进行数据接收, 脉冲声波的激发和接收都由仪器控制, 并可通过屏幕显示波形等数据。

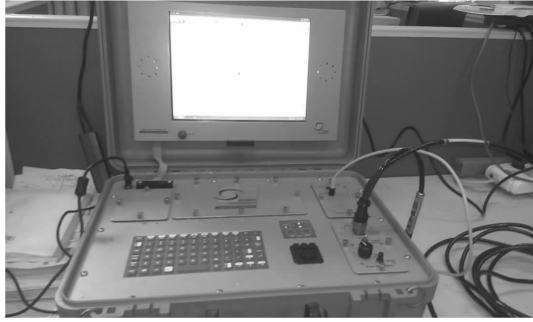


图 4 测试系统实物图

Fig. 4 Picture of test system

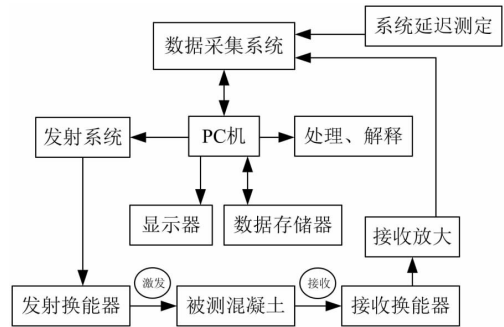


图 5 超声波缺陷仪测损原理图

Fig. 5 Sequence diagram of ultrasonic flaw detector

表 1 混凝土内部缺陷测损方法

Tab. 1 Internal failure measurement method of concrete

混凝土内部缺陷测损方法	测试量	监测分析原理
超声脉冲法	声时、波型、频率、反射波	波的绕射、衰减、叠加
声发射	声发射信号、事件数、能量分布	声发射源的定位
脉冲回波法	应力波的时频、频域图	从时域、频域综合分析确定应力波的反射源
射线法	穿透缺陷区域后射线强度的变化	不同介质对射线吸收的差异
雷达法	雷达反射波	不同反射物对雷达波反射的强度差异
红外热谱法	热发射	缺陷区热发射强度的变化

1.4 隧道病害预防治理技术

病害初期的相关特征主要在隧道衬砌的变形上进行反映,按照衬砌变形的不同位置进行分类,

可分为顶压、偏压、帮鼓和底鼓等不同类型.相应隧道衬砌变形病害预防治理主要措施如表 2.

表 2 衬砌变形病害预防治理主要措施

Tab. 2 Lining defect prevention measures

预防治理措施	应用条件
嵌缝补强	裂缝较少,裂缝宽度、深度也均较小,并对衬砌结构的完整性无影响,裂缝发展基本稳定
回填注浆	衬砌背后存在空洞或围岩破碎松动导致开裂的地段
局部断面补强	凿落处及衬砌断面缺损的地段
锚喷加固	裂缝较多,但深度较浅且发展缓慢的局部破损段
内表面补强	二衬材料劣化,比较狭窄的范围内存在衬砌掉块可能的地段
钢筋混凝土拱架加固	裂缝密集,深度和宽度影响混凝土整体性,有掉块,二衬发生较大变形、裂损且侵入建筑限界的地段
钢纤维混凝土补强	材料严重破损且需替换的地段

2 工程示例

以重庆某顶压隧道为工程示例建立反演模型,围岩岩性为西南地区常见的泥质砂岩,隧道的断

面形状采用五心拱形,如图 6 所示.

2.1 衬砌结构变形现场测试分析

在隧道施工段左右洞各选取 2 个断面进行拱顶衬砌结构变形测试,来获取隧道衬砌变形信息,

具体结果对比如表 3。通过现场测试, 得出 4 个断面拱顶衬砌变形, 得出其平均值为 14.905 mm。

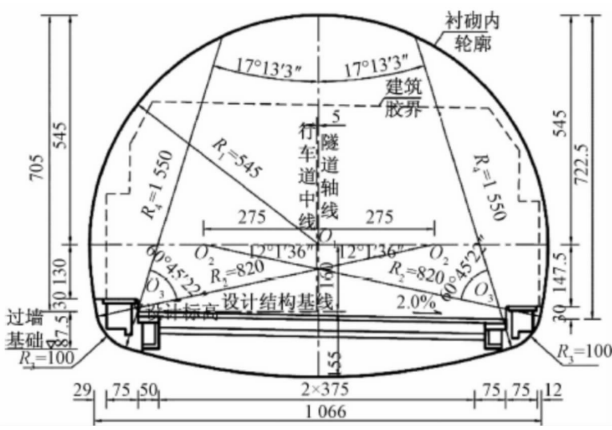


图 6 五心拱形隧道轮廓图

Fig. 6 The five-centered arch tunnel profile

表 3 衬砌位移实测值

Tab. 3 The measured displacement value of lining

		断面编号				均值
		A1	A2	A3	A4	
测试项目	拱顶衬					
	砌结构	15.61	15.17	14.29	14.55	14.905
	沉降/mm					

2.2 衬砌位移反分析

根据监测得出的衬砌变形数据, 对围岩参数进行位移反分析。示例中衬砌顶部出现最大变形数值为 14.905 mm 的沉降。因此建立如图 7 所示模型进行计算。岩土体本构关系采用弹塑性分析, DP 准则, 并对顶部施加 2.68 MPa 竖直应力模拟其上覆岩层荷载。将现场支护材料参数、岩层荷载及拱顶沉降结果作为输入值, 反分析输出得到围岩力学参数。进行模型求解所需的支护材料参数及反分析得到的围岩参数如表 4 所示, 该参数下衬砌结构变形如图 8 所示, 此时, 衬砌结构变形模拟数值与现场测试数据基本吻合。

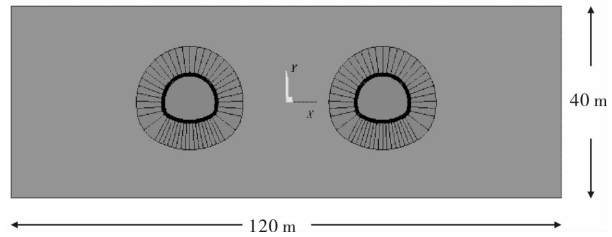


图 7 隧道几何模型图

Fig. 7 The tunnel geometry model

表 4 围岩及支护材料计算参数

Tab. 4 The calculated parameter of surrounding rock and support materials

	锚杆	初衬	二衬	围岩
弹性模量/GPa	170	21	33.5	4
泊松比	0.30	0.20	0.20	0.28
密度/g·cm ⁻¹	7.80	2.50	2.45	2.31
内摩擦角/°	—	50	36.02	54.9
粘聚力/MPa	—	0.20	2.65	3.18

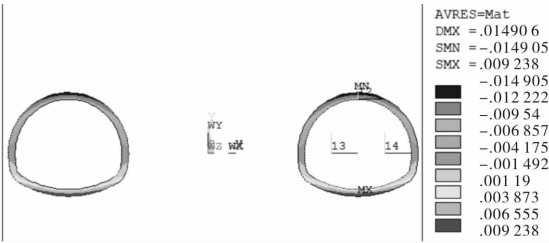
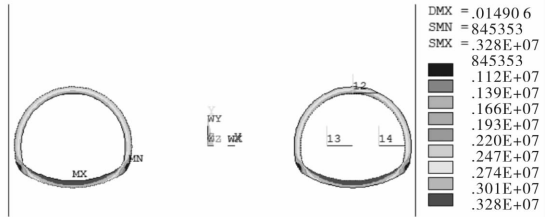


图 8 顶压隧道拱顶衬砌位移

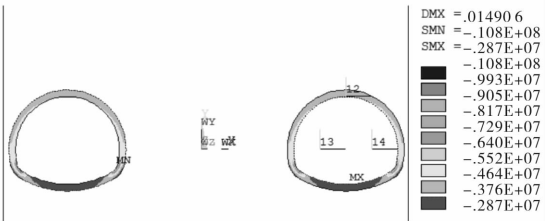
Fig. 8 The vault lining displacement of top pressure tunnel

2.3 衬砌应力反演分析

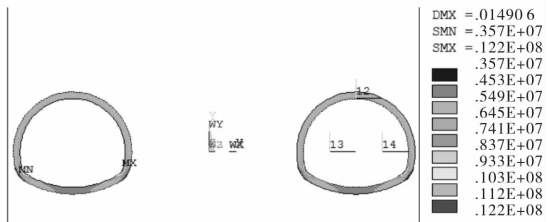
ANSYS 可以通过模型的变形结果, 反演出隧道衬砌相应的受力状况, 从而对病害可以提前预测和预警。经过反演分析计算, 得到衬砌的受力状况如图 9 所示。图中应力结果显示, 在出现顶压



(a) 顶压隧道衬砌第一主应力云图



(b) 顶压隧道衬砌第三主应力云图



(c) 顶压隧道衬砌冯密斯应力云图

图 9 顶压隧道衬砌应力云图

Fig. 9 The top pressure tunnel lining stress

时。虽然隧道的顶部下沉较大,但是受力较大的部位却主要在衬砌拱脚和拱底部位。

2.4 衬砌病害预防治理分析

根据不同的受力状况可以采用加固、泄压等处理方式对隧道病害的前期进行及时的补救和整修。顶压隧道应力反演得出的衬砌受力结果显示,隧道施工后衬砌结构受力正常,考虑到材料自身劣化使得隧道运营后围岩稳定性可能发生变化,因此提出如下隧道病害预防治理措施:

(1)对隧道拱脚进行嵌缝补强措施:沿拱脚延伸范围,将其凿成楔形槽,槽的宽度不小于5 cm,槽形状呈外窄内宽,槽形成后,用水进行冲洗,并用高强度水泥浆、膨胀性水泥浆、环氧树脂砂浆或者环氧树脂混凝土等对拱脚进行嵌补。

(2)对隧道拱底采用先回填后注浆措施:采取回填措施,可使围岩和衬砌贴得更为紧密,甚至还能使作用在衬砌上的地层荷载大小和分布产生有利转化;注浆则可以对围岩进行加固,疏散地下水,并防止地下水的浸入对围岩进行浸泡,进而形成一个人工固结圈并具有一定的厚度,有效地对岩体进行稳固。

3 结论

(1)基于应力反演的隧道衬砌病害快速诊断技术有利于隧道病害信息快速获取,及时诊断,分析缺陷,为隧道衬砌变形病害针对性预防治理提供合理技术措施。

(2)采用位移反分析结合现场测试进行衬砌结构应力反演的思路,能更加简便、准确得出隧道病害情况,并提出该隧道预防治理的具体措施具有良好的经济性,工程意义大且可推广应用。

(3)以重庆某隧道为工程依托,采用基于应力反演的隧道衬砌病害快速诊断技术分析得出,顶压隧道衬砌结构受力最大处位于隧道拱腰及拱底,进而提出针对性病害预防治理措施。

参考文献 References

[1] 陈洪凯,李明.隧道与地下工程健康研究及防治理念[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):213-217.
CHEN Hongkai, LI Ming. Research on health of tunnel and underground engineering & Its prevention and treatment Ideas[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2):213-217.

[2] 鲁金铭.新大成隧道基底脱空病害区动力特性分析及注浆加固研究[D].西安:长安大学,2015.
LU Jinming. Study on the dynamic features of base void area and grouting technology of Xindacheng tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

[3] 刘海京,夏才初,朱合华,等.隧道病害研究现状与进展[J].地下空间与工程学报,2007,3(5):947-953.
LIU Haijing, XIA Caichu, ZHU Hehua, et al. Studies on tunnel damage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5):947-953.

[4] 刘会迎.公路隧道病害成因机理及防治措施研究[D].成都:西南交通大学,2007.
LIU Huiying. Study on the highway tunnel disease formation mechanism and control measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[5] 朱苦竹,刘春龙,孙洋波,等.隧道洞口健康诊断AHP模糊评判及其可视化[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):803-809.
ZHU Kuzhu, LIU Chunlong, SUN Yangbo, et al. Tunnel portal health diagnosis based on AHP fuzzy evaluation method and its visualization [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3):803-809.

[6] 赵永贵,刘浩,孙宇,等.隧道超前预报与病害诊断技术[C]//全国公路工程关键技术与管理信息化学术会议.2003.
ZHAO Yonggui, LIU Hao, SUN Yu, et al. Tunnel advanced prediction and disease diagnosis technology [C]//The national highway engineering academic conference of key technology and management information, 2003.

[7] 杨正华,张文波,王卫东,等.浅析地震波法用于隧道病害的诊断与预测[J].灾害学,2004,19(1):27-30.
YANG Wenhua, ZHANG Wenbo, WANG Weidong, et al. Analysis on tunnel hazard diagnosis and forecast by seismic wave[J]. Journal of catastrophology, 2004, 19(1):27-30.

[8] 王薇,向延念.无损检测及其在隧道病害检测中的应用[J].铁道工程学报,2001,18(3):85-88.
WANG Wei, XIANG Yannian. Non-destructive testing and its application in tunnels[J]. Journal of railway engineering society, 2001, 18(3):85-88.

[9] 徐宏武.渝湘高速下塘口一号隧道突水病害诊断及处治[J].地下空间与工程学报,2010,6(4):845-849.
XU Hongwu. SGushing water diagnosis and treatment of Yuxiang speedway on Xiaotangkou No. 1 tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4):845-849.

- method of mechanical properties on ordinary concrete; GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building press, 2003.
- [12] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures (209R-92). America Concrete Institute, 1992.
- [13] BETONBAU. Fib model code for concrete structures [J]. Ernst & Sohn, 2013.
- [14] 王梦梦. C40 早龄期混凝土力学性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
WANG Mengmeng. Experimental study on mechanical behavior of C40 concrete at early age [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [15] 张健仁, 王海臣, 杨伟军. 混凝土早期抗压强度和弹性模量的试验研究[J]. 中外公路, 2003, 23(3): 89-92.
ZHANG Jianren, WANG Haicheng, YANG Weijun. Experimental study on compressive strength and elastic modulus of early age concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23(3): 89-92.
- [16] 朱伯芳. 混凝土的弹性模量、徐变度与应力松弛系数[J]. 水利学报, 1985(9):56-63.
ZHU Bofang. Elastic modulus, creep and stress relaxation coefficient of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985(9):56-63.
- [17] 林星平. 混凝土弹性模量及徐变度的计算[J]. 云南水利发电, 1999(4): 15-18.
LIN Xingping. Calculation of elastic modulus and creep of concrete [J]. Yunnan Water Power. 1999(4): 15-18.
- [18] HOGHESTAD E. Concrete stress distribution in ultimate strength design [J]. ACI, 1955(12): 455-479.
- [19] KENT D C, PARK R. Flexural members with confined concrete [J]. ASCE, 1971 (97): 1969-1990.
- [20] PARK R, PAULAY T. Reinforced concrete structure [M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building press, 2015.

(编辑 吴海西)

(上接第 782 页)

- [10] 张素磊, 张顶立, 刘胜春, 等. 基于对应分析模型的隧道衬砌病害主成因挖掘[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2):56-60.
ZHANG Sulei, ZHANG Dingli, LIU Shengchun, et al. Discovering the main causes of tunnel lining damage based on correspondence analysis model[J]. China railway science, 2012, 33(2):56-60.
- [11] 王文广, 代高飞, 朱合华, 等. 某公路隧道病害成因与治理[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(12):101-103.
WANG Wenguang, DAI Gaifei, ZHU Hehua, et al. Reasons of tunnel disease and disease management on highway [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition) 2005, 28(12):101-103.
- [12] 吴梦军, 张永兴, 刘新荣. 公路隧道病害处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5):967-971.
WU Mengjun, ZHANG Yongxing, LIU Xingrong. Research on disease treatment technology of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5):967-971.
- [13] 张云龙, 夏才初, 张国柱, 等. 基于虚拟现实的公路隧道病害可视化管理系统[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(s1):1740-1745.
ZHANG Yunlong, XIA Caichu, ZHANG Guozhu, et al. Visual road tunnel damage management system based on virtual reality[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (s1): 1740-1745.

(编辑 吴海西)