

文章编号: 1000-7598 (2010) 08-2353-08

隧道围岩稳定性正算反演分析研究 ——以厦门海底隧道穿越风化深槽施工安全监控为例介绍

孙 钧^{1,2}, 戚玉亮^{1,2}

(1. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 为了降低海底隧道施工风险, 确保隧道施工顺利穿越海底几处风化深槽和风化囊区域, 解决难以获得隧道围岩力学参数的技术难题, 采用位移反分析方法建立了动态反演预测模型; 作为比较, 还简单介绍了弹塑性反演的一种全局优化方法。根据隧道典型断面实际监控量测的围岩拱顶沉降量和周边收敛位移量, 结合先行服务隧道揭露的水文地质情况, 进行优化反演分析, 得到该类围岩初期支护后的等效弹性模量和等效侧压力系数。在相应的同类地质条件下, 对后续将开挖的左、右主洞围岩采用边界元法进行正演数值计算, 使之能为主洞施工方案比选以及支护设计参数调整与修正提供定量依据, 做到信息化动态设计与施工。工程实例分析表明, 利用正算反演分析法得出的围岩等效力学参数是可靠的, 可据此对类似地质条件下主隧道围岩进行正演计算分析, 预测主洞围岩的变形破坏模式, 判断其围岩稳定性。位移反分析法是隧道施工变形理论预测分析与工程实际相联系的有效平台, 为工程设计施工技术决策提供了一种切实有效的途径。

关 键 词: 海底隧道; 监控量测; 围岩稳定性; 位移反分析法; 优化方法; 弹塑性反演; 正算反演分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Normal calculation-back analysis of surrounding rock stability of subsee tunnel

SUN Jun^{1,2}, QI Yu-liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Education Ministry, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For reducing the construction risk of undersea tunnel, insuring the tunnel to smoothly pass through each weathering zone, and resolving the technical difficulties to obtain rock mechanical parameters, the dynamic back prediction model was established based on the displacement back analysis. As a comparison, an overall optimization method on elastoplastic back-analysis is briefly presented. Combining the hydrogeology exposed by advanced service tunnel, back analysis was carried out on the basis of the vault settlement and around convergence displacement by practical monitoring measurement. Then, the mechanical parameters would be obtained; that is, equivalent elastic modulus and confinement pressure coefficient of surrounding rock after primary support. Furthermore, in the similar geological conditions, boundary element method was used to normally simulate left and right main tunnels immediately after face advance and primary anchor bolt-shotcrete support. The normal calculation results could provide quantitative basis for comparison and selection of construction schemes of main tunnel, and adjustment and correction of support parameters of main tunnel. It realized the dynamic information design and construction. The analysis of engineering example indicates: it is reliable to obtain the equivalent mechanical parameters of surrounding rock by displacement back analysis. In similar geological conditions, the equivalent mechanical parameters can be used for normal calculation of main tunnels; furthermore, to forecast their deformations and failure modes, and estimate their surrounding rock stability. Displacement back analysis is a bridge which associates theoretical analysis with engineering during tunnel construction, and supplies a practical way for engineering design, construction and decision-making.

Key words: undersea tunnel; monitoring measurement; surrounding rock stability; displacement back analysis; optimization method; elastoplastic back-analysis; normal calculation-back analysis

1 海域风化深槽施工难点简介

厦门翔安隧道是一项规模宏大的跨海工程, 采

用钻爆暗挖法修建, 是中国大陆第一座大断面海底隧道, 也是目前世界断面最大的海底隧道。该隧道线路全长 5.9 km, 其中海域段 4.2 km, 为双向 6 车

收稿日期: 2010-02-03

第一作者简介: 孙钧, 男, 1926 年生, 同济大学资深荣誉教授, 中国科学院院士, 主要从事岩土力学和隧道与岩土、地下工程等方面的教学与研究工作。E-mail: junsunk@yahoo.com.cn

道双洞海底隧道,采用3孔隧道形式穿越海域,两侧为行车主洞,中间一孔为服务隧道。如图1所示。左右行车隧道测设线间距为52 m,中间设置服务隧道,左右行车隧道建筑内轮廓断面面积为122.09 m²(带仰拱),行车道以上净空断面面积为100.5 m²。服务隧道建筑内轮廓断面面积为30.87 m²。海域段隧道基本处于弱、微风化花岗岩岩层,其主要不良地质缺陷为全(W4)、强(W3)风化带,共4处穿越风化深槽/风化囊地段,风化槽(囊)地段围岩稳定条件差,一般为IV、V级围岩。

隧道海域风化槽地段地层内土、砂、石随机交杂,岩体与海水直接贯连,水力联系密切。按服务隧道风化槽开挖后的地质显露表明,风化槽全风化花岗岩内赋存含水量高,围岩自稳能力极差,其无侧限抗压强度几近于0,在开挖前进行了全断面帷幕注浆作围岩加固和止水处理。隧道穿越海域风化深槽/风化囊时的安全施工是工程成败的关键。

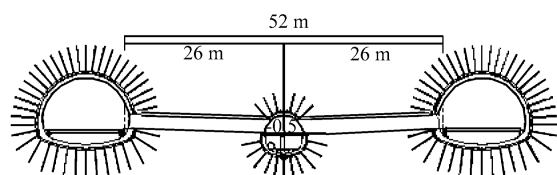


图1 厦门翔安海底隧道横断面图
Fig.1 Cross-section of Xiamen subsea tunnel

2 位移反演分析近况和存在的问题

隧道围岩的诸多复杂属性,有如:岩体介质材料的非匀质性、非各向同性、非连续性和各种非线性(物理上的与几何上的)等等,均能在围岩开挖后的变形位移量测值中得到综合反映,故而采用位移反分析法作研究就可有效地避免上述岩体众多复杂属性的困扰和给计算上带来的不便;此外,对岩体本构属性上的复杂性,由于反演和随后的正演均套用了同样的一种本构模型/本构关系进行计算,即使在本构问题的取用上有所偏差,它对后续计算的准确性却没有影响。由于该方法具备有上述两个方面无可比拟的优越性,使位移反分析研究工作多年来取得了许多积极进展,而在工程实践方面就更有极广泛的应用。

当前,位移反分析研究大体沿两个方向发展:

①从追求理论深度言,有如笔者已往曾作过研究的:逆问题信息理论、非线性反演、随机反演和智能反演分析等^[1-4];②有如本文所介绍的:采用简化计

算模型,着重解决工程应用中的实际问题,而又不失工程上要求的精度。

就现时的研究水平看,位移反分析力学模型的假设似尚缺乏严格的理论支持,具体反映在:(1)位移反分析的力学模型是基于固体力学的理论和方法(如弹性、弹-塑性、黏-弹-塑性模型等),需要以假定合理的、能正确反映围岩变形规律为基础^[5-15];(2)岩体介质材料本构属性、喷锚支护受力机理、开挖系统施工变形的控制理论与方法等对计算关系重大,而有效处理手段则不多;(3)工程地质和施工条件复杂多变,尚难以做到满意的定量描述。故而,严格的反演理论与方法,在实践应用中的价值受到一定限制,转而追求探讨一种工程上可以接受、而又有一定精度要求的有效算法,已成为一项当务之急。

本文从隧道工程实际问题出发,以系统分析的概念为指导,依靠原型观测资料的验证与反馈,走理论分析与经验判断相结合的路子,相信有广阔的应用前景。采用“典型工程类比”与“正算反演分析”相结合的方法,对围岩力学参数和施工稳定性进行分析,是本文介绍的主旨。

3 软弱破碎围岩弹塑性反演与全局优化

对软弱松散围岩言,就岩体初始地应力值和岩性参数(包括其抗剪强度指标 c , φ 值)按(在超前导洞中)实测洞周围岩的收敛位移值进行弹塑性反演分析是必要的。此处从非线性反演作全局优化,已可得到含 c , φ 等的唯一参数值。进而,由反分析所得的岩体和岩性诸等代参数再在主隧道中作正演,其结果与后续实测得的主洞洞周收敛值十分吻合,收效良好。

3.1 反演采用的目标函数

就弹塑性问题言,对岩体初始地应力和岩性诸等代参数的非线性反演,可视为是非线性最小二乘的最优化计算问题,其目标函数 Φ 可写为

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^n [f_i(x) - (u_i)]^2 \quad (1)$$

式中: $x = (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, E, \mu, c, \varphi)$; $f_i(x)$ 为洞周围岩沿 i 方向两点间收敛位移的计算值,它是初始地应力 (σ, τ) 和岩性参数 (E, μ, c, φ) 的函数; u_i 为沿 i 个量测方向实测的洞周围岩收敛位移; n 为收敛位移量测值的总个数,要求 $n \geq 7$,即不少于7条测线。

上项反演计算的任务在于要求找到一组最优参数 x^* 的值,它使上项目标函数的值为极小。

3.2 目标函数的求解—局部优化解和全局最优解

最小二乘问题的目标函数可用最优化方法求解。对非线性问题而言, 用优化方法计算目标函数极小值的解可以有无穷多组, 但其中只有一组(若干局部优化解极小值中的极极小值, 它是唯一的)才是所要求的真实解——全局最优解。

真实解应为全局最优解, 而其他若干非真实解则只是局部优化解。由于对优化计算结果的真解无法确切验证, 因此, 在实际求解过程中所得到若干组 x^* 的值, 就只能认为是极值问题中的局部极小点, 即局部优化解, 它们都不是真实解。

从以 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、 E 、 μ 、 c 、 φ 各值作为其变量的上目标函数中, 搜索得所要寻求的目标函数, 须解决全局最优解和局部优化解的判识, 而不能只沿用一般的优化方法来求解得到, 它是个从若干个局部优化解中逐次寻求全局最优解的问题。

3.3 用逐次优化方法求解初始地应力各岩体参数目标函数的全局最优(极小)解

初始地应力 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 值的同步优化

$$\Phi^I(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = \sum_{i=1}^n [f_i^I(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) - u_i]^2 \quad (2)$$

求解上一目标函数可采用迭代求解线性方程组的方法进行如下计算:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial f_i(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})}{\partial \sigma_x} \right]_k + \Delta \sigma_y^{k+1} \cdot \left[\frac{\partial f_i(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})}{\partial \sigma_y} \right]_k + \\ & \Delta \tau_{xy}^{k+1} \cdot \left[\frac{\partial f_i(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})}{\partial \tau_{xy}} \right]_k = f_i(\sigma_x^k, \sigma_y^k, \tau_{xy}^k) - u_i \\ & (i=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (3)$$

应该指出, 上式只是收敛位移平衡方程的一个表达式, 式中 n 为平衡方程式的个数, 同式(2)中的 n 。

由平衡方程组可建立与某一组岩性参数条件相应的目标函数, 通过对该目标函数及其平衡方程组的迭代求解, 可求得在该组岩性参数条件下初始地应力的最优解, 它使收敛位移的计算值和实测值之间的差值为最小。此时最优的初始地应力值即为其真实值。

3.4 岩性参数 φ 值的优化

对 φ 值的优化过程可与对 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 的优化同时进行; 因在对每一 φ 值计算其可能达到的极值(最小误差值)时, 需同时对 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 进行优化计算。由此, 其目标函数可写为

$$\Phi^II(\varphi, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = \sum_{i=1}^n [f_i^{II}(\varphi, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) - u_i]^2 \quad (4)$$

通过上述相同的方法, 可计算得该目标函数式(4)的全局最优解。

3.5 其他岩性参数 c 、 μ 、 E 值的优化

采用与以上计算 φ 值相类似的方法, 再对 c 、 μ 、 E 各值逐个进行一维优化计算, 最终可获得目标函数式(1)的全局最优解。

反演计算岩性诸参数值的程序框图(见图2)

3.6 岩性参数的反演结果

为了考虑开挖面的空间效应对收敛位移量测值的影响, 此处取平面问题计算时, 可将所有实测位移值均人为地乘以增大系数 1.2 (经验值)。从各量测断面实测的收敛位移值, 经上述反演分析所得出的诸等代岩体与岩性参数后, 与后续再按这些等代参数作正演得到的洞周位移各相应计算值, 其与实测值的吻合性良好。为了便于工程应用, 可将以上岩体应力值换算成最大/最小主应力和应力主向的各个值。以上分析值与现场实测地应力值的量级相当, 应力主向亦基本一致。按给定的岩体弹性模量值(对软岩, 在缺乏声波测试资料的情况下, 该值酌定取用为岩样室内试验相应值的 0.3~0.4 倍)进行反演计算; 对浅埋洞室, 一般地, 竖向地应力可按岩体自重应力场计算, 而水平向场域内则有时存在有较大的水平构造应力。

3.7 问题讨论

(1) 在以往计算时, 岩性参数都设定为不随岩体塑性屈服程度而衰减变化。事实上, 岩体在塑性变形过程中其岩性参数将随屈服程度的增加而减小; 在图2的反演程序计算中事实上已经计及了这种影响。因为, 反演计算的依据是用收敛位移的实测值, 而这种实测值是来自岩体实际发生的塑性变形及其屈服状态。在塑性计算分析中所用的收敛位移采用了由于岩性参数值降低而实际上已是各实测收敛位移增大了的数值, 故而反演得出的诸岩性参数也必将小于弹性状态下的相应各值。

(2) 由此处(在超前导洞中)反演得出的初始地应力和岩性诸参数只是在大的计算区域内宏观上的一个等代的、综合的指标值, 并不要求它与局部测点得到的实测地应力以及实验室所测定岩样的岩性参数相互吻合。需要说明, 尽管这些从反演所得的参数值只是“等代的”, 但用之于在后续的主隧道内再作正演所得到的主洞收敛位移则是真实的, 其与相应各实测值吻合良好。

(3) 这些宏观的等代指标值在提供作数值分析计算时, 如视岩体为匀质、各向同性、连续的弹塑

性介质材料进行分析采用, 以如前述, 它仍然是很合适的。

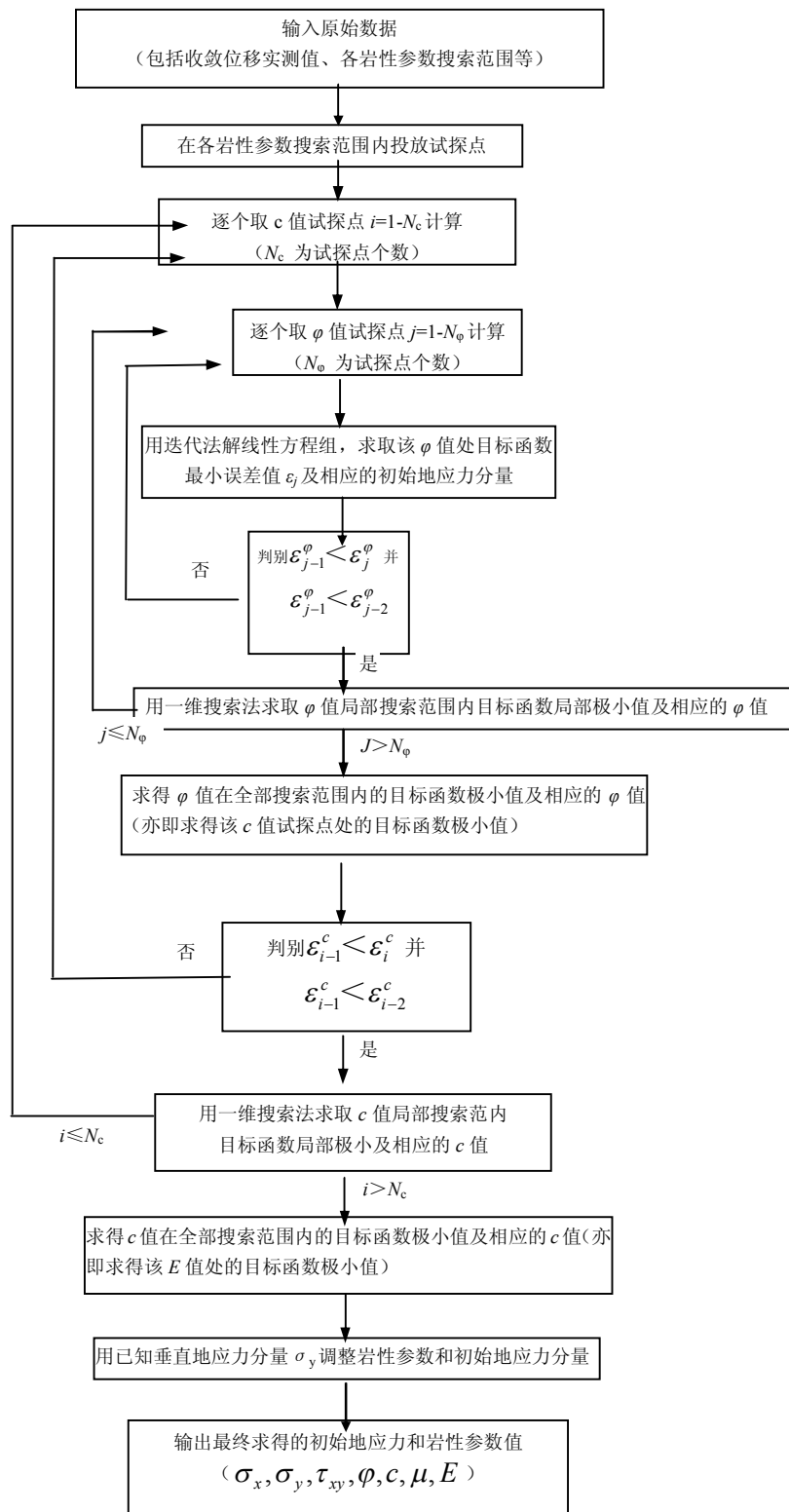


图 2 反演计算岩体和岩性诸参数的程序框图

Fig.2 Flowchart of rock parameters calculated by back analysis

反之, 对大节理呈组状分布明显、成层状岩体和非连续方向性强的某些特种岩体, 实践表明, 采用

此处所述反演方法的计算结果, 其偏差一般会相对地比较大。

4 线弹性反演的正算反分析方法

由于上述弹塑性反演方法对非线性问题优化解的运算过程比较繁复, 尽管有本文研制的反演程序软件, 但仍不便于工地现场的快捷运算。为此, 本文又衍生了此处建议的、作简化分析的“线弹性反演正算反分析”方法, 应用上更为快捷, 而又不失工程要求的精度。

以洞室开挖中围岩位移监控量测信息为基础输入依据, 通过超前导洞、地勘探洞或服务隧道等小断面洞室的实测值、如上述先反演计算围岩物理力学的诸等效参数值, 就左近的主隧道断面采用已求得的等效参数再做正演, 以安全监控并评价主隧道围岩的施工稳定性。通过近年来在厦门隧道的应用实践, 这一分析方法已经日趋完善。

经过在厦门翔安海底隧道现场3年来已进行的施工安全监控与险情预警的反演分析实践, 作为研究改进后的一种“正算位移反分析法”, 采用了直接逼近和迭代优化试算法, 将待定参数的反演分析问题转化为正演计算目标函数的寻优问题。该方法采用正分析的过程与格式, 利用最小误差函数迭代优化、并逐次修正待定参数的试算值, 直至逼近它的最优值而得出结果。

4.1 最小误差函数迭代优化法的理论基础

设模型数值分析中计算得的隧洞围岩位移向量

$$\mathbf{u} = \mathbf{f}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{f}$ 为理论模型的函数向量; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ 为未知参变量。

与式(5)对应的施工监控量测得的实测位移向量

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \quad (6)$$

依据式(5)所构造的模型进行数值模拟计算, 利用各测点位移向量计算值与实测值之间的差, 可建立如下的目标函数:

$$\delta = \sum_{i=1}^n [u_i - U_i]^2 \quad (7)$$

式中: u_i 为 i 测点隧洞围岩位移向量的数值计算值, 理论上它是反演参数向量的函数; U_i 为 i 测点相应的位移向量实测值, n 为测点个数。

将式(5)、(6)代入式(7)得误差函数

$$\delta = \delta(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \quad (8)$$

通过对式(8)求解各个未知参数的偏导数联立方程组:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \omega_j}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) = 0 \quad j=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

然后, 求出方程组(9)的全部解, 即其极值

点($\omega_{10}, \omega_{20}, \dots, \omega_{m0}$), 即可求得相应的变形位移 δ 的极值误差量。

此处最小 δ 值的大小, 反映了以上建模计算与实际问题的逼近程度。

4.2 几点说明

(1) “正算位移反分析法”借用了李世辉先生早年所研制的边界元法隧道围岩变形与破坏的简化实用分析程序 BMP2000, 经上述改进后进行正算数值分析^[16-18]。该分析程序能普遍适用于隧道工程中常用的多种断面、不同加载方式、几种常用的屈服准则、不同地应力侧压系数以及隧洞支护配置等各类型围岩施工稳定性的现场快速分析, 精度上可以满足工程使用要求。

(2) 上述正算位移反分析方法提供了一种计算可能性——采用简单的线弹性模型, 却能成功模拟十分复杂的岩体的宏观力学行为, 从而使位移反分析工作成为隧道设计施工中理论计算与工程实际相互联系的有效平台。

(3) 此处将岩体宏观上近似视为一种“似弹性介质”, 并只需选用均匀、各向同性、连续介质的线弹性模型。根据各类围岩的典型工程实测资料(从工程数据库内搜索查询后检得), 按照“位移等效原则”对模型进行综合修正。此处采用的综合性修正系数 K_c 反映了与洞室围岩具体实际经工程类比后的偏差程度, 从后述案例中的实际地质描述、由工程数据库中查用的所得值, 酌取 $K_c=1.17$, 为对计算各值乘以此值作放大考虑。

(4) 以线弹性理论为基础进行隧道围岩稳定性分析时, 最主要的和影响最大的两个设计参数是: 初始地应力侧压力系数 λ 和岩土体弹性模量 E 。这二者分别反映了水平地应力值和洞体变形位移量的大小。故而, 此处进行反分析的两个主要反演参数分别是: 等效的初始地应力侧压力系数 λ_{eq} 和岩土介质等效的弹性模量 E_{eq} 。

(5) 反演正算工作进行时, 基于对先行服务隧道开挖量测值为基础, 从位移正算反分析, 可进而对主洞开挖的围岩变形位移 δ 和各个时段的变形速度 $\dot{\delta}_t$, 以及各个时段变形速度的变化 $\ddot{\delta}_t \doteq \frac{\Delta \dot{\delta}_t}{\Delta t}$, 进行预测分析; 对可能存在的施工风险进行预报和预警, 从而为主隧洞的安全施工提供技术支持和理论依据。

4.3 隧道开挖施工时围岩稳定性的“变形速率比值”判别法

(1) 鉴于以洞周收敛值或拱顶下沉量或换用收敛速率作围岩稳定判别准则的不足、以及不易定量

化的缺点, 此处建议以该一时段与前面几个时段变形速率的变化——“减速”、“等速”和“加速”来定量判识是否应作工程报险。当有连续几个时段出现后两种情况时, 应即时作出工程险情预警。

(2) 方法的采用和进行步序示例, 如图3所示。

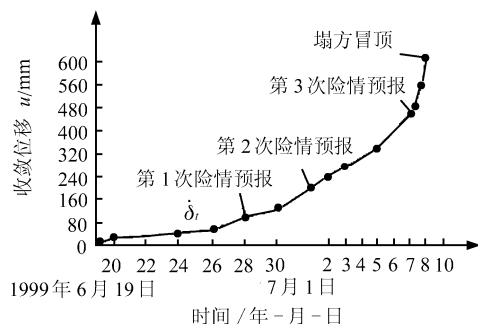


图3 隧道塌方冒顶段 YK7+210 断面
“收敛-时间”变化曲线

Fig.3 Convergence-duration curve of profile
YK7+210 at the tunnel collapse zone

5 正算反演分析法的应用实例

5.1 隧道围岩稳定性正算反演案例分析与评价

(1) 采用正交设计法来选用反演参数的初始试算值。

(2) 采用直接逼近、试算迭代的正算反分析法, 将待定参数的反分析问题转化为正演计算目标函数的寻优问题。该方法利用反复迭代不断修正未知参数的试算值, 当误差函数值减小到容许的误差限值以内时, 所得的试算值即为所求值。

(3) 采用经修改、完善的 BMP2000 边界元法软件程序进行计算。根据实测的拱顶沉降量和洞体围岩周边收敛位移量, 建立目标函数 $\delta(E_{eq}, \lambda_{eq})$ 。

(4) 采用最小误差函数迭代优化法, 找出使目标函数达到最小值(即全局最优值)的最佳参数组合。

(5) 通过正算优化反演分析计算, 可绘制得出洞室围岩的变形与破坏模式(分别见图4、5)。

(6) 通过以上分析, 获得了如表1所示的厦门翔安海底服务隧道围岩支护设计反演分析的结果; 进而, 再正演得主隧道围岩应力状态及其变形位移的预测值, 并使之与相应的各个实测值作比照分析(见表1、2)。

(7) 方法应用的5个子系统计算步序如后:

①按早前的地质资料先作预设计(平面应变、线弹性问题, 预作计算);

②施工开挖后的监测数据(变形位移为主), 收

敛测线不少于7条;

③按实测收敛位移作反演分析(得 K_{eq} 和 E_{eq} 的相应等效值);

④用所得的各等效设计参数, 按 BMP 程序正演判断洞室围岩稳定性, 并确认原设计的支护诸参数, 看需否调整和修正;

⑤典型的分类类比分析(按已建类似隧洞工程的统计资料作工程类比), 选用综合修正系数 K_c 。

5个子系统的组成并相互渗透。

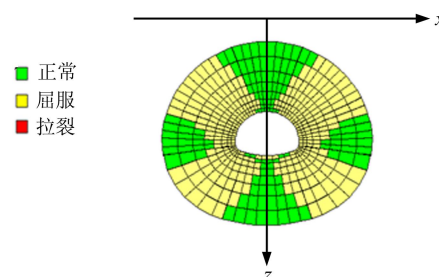


图4 主隧洞右线 YK7+265 断面围岩初支护后的塑性变形模式

Fig.4 Plastic deformation mode of surrounding rock at
cross-section YK7+265 after preliminary support

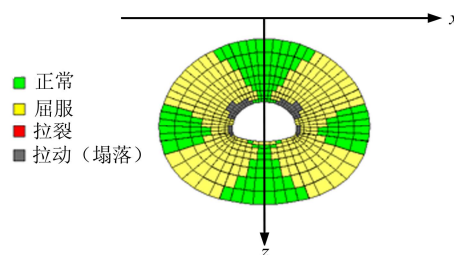


图5 隧洞围岩松动圈单元分布图(涂深灰色单元)

Fig.5 Distribution map of broken elements of tunnel
surrounding rock(the deeply gray elements)

5.2 洞周围岩“松动圈”

隧道围岩出现图4所示的塑性屈服区, 只是意味着塑性区内的岩体强度降低而变形增大; 而要引起重点关注的, 则是贴近洞周边缘的围岩“松动圈”(一般在拱顶和拱腰部分)。松动圈内岩体属剪切破坏区, 在开挖后将不能自稳, 如不及时加固或设置内衬, 则必然因区内岩块塌落而围岩失稳。

在三维复杂应力状态下, 从围岩各个单元体的计算主应力 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), 可按式(10) 计算得出各该单元的八面体剪应力 (τ_{oct}); 再使之逐一地与由试验得出的围岩介质材料的临界剪应力值 (τ_{cr}) 相对比, 可得出“隧洞围岩松动圈”的部位、大小和范围, 亦即“塌落拱”。而围岩松动圈就是需进一步作加锚、加喷和加网、或尽早构筑内衬的部位。

采用塑性力学有关公式计算，为

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (10)$$

当 $\tau_{\text{oct}} \geq \tau_{\text{cr}}$ 该单元即属破坏，谓之松动圈单元。

式中： τ_{oct} 为由(10)式计算得出的围岩八面体剪应力； σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为单元三维主应力； τ_{cr} 为由岩样试验得出的临界剪应力。

从式(10)可计算汇总得出所有上述松动圈内已剪切破坏的单元，而构成洞周围岩的松动圈，如图5中涂深灰色的各个单元所示。

5.3 计算结果与实测值的比较

服务隧道围岩计算与实测结果见表1，通过服务

隧道和左、右线主隧道典型断面围岩现场观测，采用正算位移分析结果见表2

表1 NK7+265号桩服务隧道围岩设计反演结果
Table 1 The back analysis results of surrounding rock of service tunnel at cross-section NK7+265

实测数据		数值模拟计算值		反演结果	
边墙收敛 /mm	拱顶沉降 /mm	边墙收敛 /mm	拱顶沉降 /mm	等效弹性 模量/MPa	等效侧压力 系数
30.44	80.52	30.38	82.84	50.13	0.36

表2 服务隧道和左、右线主隧道典型断面围岩施工变形与破坏模式分析
Table 2 The construction deformation and failure modes of surrounding rock from typical sections of service and main openings

断面 桩号	等效弹性 模量/MPa	等效侧 压力系数	铅垂向 地应力/MPa	初支后最大 屈服深度/m	最大主应力		最大竖向 位移/mm	边墙最大 收敛/mm
					$\sigma_{1\text{max}}$ /MPa	部位		
NK7+265	50.13	0.36	0.674	27.5	1.86	墙腰	82.84 (80.52)	30.38 (30.44)
ZK7+265	50.13	0.36	0.561	19	2.48	墙脚	105.80 (110.96)	49.66 (56.48)
YK7+265	50.13	0.36	0.519	19	2.30	墙脚	97.84 (90.47)	46.02 (51.95)

注：括弧内的值为实测数据。

6 结 语

(1)结合厦门翔安海底隧道工程海床下风化槽段施工的具体实践，提出了先行服务隧道的动态反演预测模型。通过服务隧道围岩现场监控量测位移的实测资料，采用“正算位移反分析法”，能够在工地现场快速地对其左、右侧相似地质条件下行车主隧道的围岩施工稳定性分别作出分析评价；进而为围岩初期支护内衬结构设计参数的合理性提供定量依据。从表2可见，方法具有较高的可靠性和应用精度。

(2)本文处建议的“正算反分析方法”可以比较准确地反演服务隧道围岩的等效弹性模量和等效侧压力系数等围岩主要等效力学参数；这些参数对后续的主洞正演工作极有助益。

(3)“正算位移反分析方法”能够对隧道围岩变形破坏模式进行预测，并据此对围岩施工稳定性做出合理评价；必要时，还可有根据地用于实时调整开挖施工步骤，修改原先不尽合理的支护设计参数。

参 考 文 献

[1] 孙 钧, 蒋树屏, 袁 勇, 等. 岩土力学反演问题的随机

理论与方法[M]. 汕头: 汕头大学出版社, 1996.

- [2] 孙 钧, 黄 伟. 岩石力学参数弹塑性反演问题的优化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 221—229.
SUN Jun, HUANG Wei. An optimization method for the elastoplastic inversion of parameters in rock mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1992, 11(3): 221—229.
- [3] 丁德馨, 张志军, 孙 钧. 弹塑性位移反分析的遗传算法研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 1—5.
DING De-xin, ZHANG Zhi-jun, SUN Jun. The genetic-algorithm-based approach to back analysis of displacement parameters of elasto-plastic model for rock mass[J]. **Engineering Mechanics**, 2003, 20(6): 1—5.
- [4] 丁德馨, 杨仕教, 孙 钧. 岩体弹塑性模型力学参数对位移的影响度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 697—701.
DING De-xin, YANG Shi-jiao, SUN Jun. Studies of influence degree of mechanical parameters on displacements in elasto-plastic model for rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 697—701.

- [5] 袁勇, 孙钧. 岩体本构模型反演识别理论及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 232—239.
- YUAN Yong, SUN Jun. Theory of model recognition for back analysis the constitutive relationship of rock mass and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, 12(3): 232—239.
- [6] 吕爱钟. 地下巷道弹性位移反分析各种优化方法的探讨[J]. 岩土力学, 1996, 17(2): 29—34.
- LV Ai-zhong. Discussion on six kinds of optimization methods on the application in back analysis of elastic displacement for underground tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(2): 29—34.
- [7] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [8] 张路青, 杨志法, 吕爱钟. 两平行的任意形状洞室围岩位移场解析法研究及其在位移反分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 584—589.
- ZHANG Lu-qing, YANG Zhi-fa, LÜ Ai-zhong. Analysis study on displacement field of surrounding rocks of two parallel tunnels with arbitrary shapes and its application to back-analysis of displacement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 584—589.
- [9] YANG Zhi-fa, C F LEE, WANG Shi-jing. Three-dimensional back-analysis of displacements in exploration adits-principles and application[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37: 525—533.
- [10] XIA-Ting FENG Zhi-qiang Zhang, QIAN Sheng. Estimating mechanical rock mass parameters relating to the Three Gorges Project permanent shiplock using an intelligent displacement back analysis method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37: 1039—1054.
- [11] YANG Zhi-fa, WANG Zhi-yin, ZHANG Lu-qing, et al. Back-analysis of viscoelastic displacements in a soft rock road tunnel[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38: 331—341.
- [12] ZHANG L Q, YUE Z Q, YANG Z F, et al. A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stress in tunneling—Illustrated with a case study[J]. **International Journal of Tunnelling and Underground Space**, 2006, 21: 636—649.
- [13] 戚玉亮, 王同旭, 张振宇, 等. 神经网络方法在位移反分析中的应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 92—95.
- QI Yu-liang, WANG Tong-xu, ZHANG Zhen-yu, et al. Application Study of the Neural Network Approach in Back Analysis of Displacements[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(1): 92—95.
- [14] YU Yu-zhen, ZHANG Bing-yin, YUAN Hu-in. An intelligent displacement back-analysis method for earth-rockfill dams[J]. **International Journal of Computers and Geotechnics**, 2007, 34: 423—434.
- [15] 焦春茂, 赵春风, 楼云, 等. 基于 Cauchy 积分解法与遗传算法的随机位移反分析研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 251—256.
- JIAO Chun-mao, ZHAO Chun-feng, LOU Yun, et al. Research on stochastic back analysis using of Cauchy integral method and genetic algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 251—256.
- [16] 李世辉. 隧道围岩稳定系统分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [17] 李世辉. 隧道支护设计新论——典型类比分析法的应用和理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] LI Shi-hui, YANG Jie, HAO Wei-dong, et al. Intelligent back-analysis of displacements monitored in tunneling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(2006): 1118—1127.