

文章编号: 1000-7598-(2002)06-0795-05

信息化施工技术在地下工程中的应用

曹国金, 姜弘道

(河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 针对地下工程设计中“地质环境复杂, 基础信息匮乏”的基本特点, 结合具体隧洞工程, 对信息化施工技术进行了分析探讨。设计和编制了工程数据库信息管理系统。利用现场施工监测取得的位移资料, 用优化方法反演了围岩力学特性参数。利用反演分析求得的围岩力学参数, 应用有限元法对该工程的施工过程围岩稳定性进行了分析计算。

关 键 词: 信息化技术; 工程信息管理系统; 反演分析

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A

Application of information technique to construction of underground engineering

CAO Guo-jin, JIANG Hong-dao

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the character of bad geology surroundings and scarce basic information in process of underground engineering designs, the technology of information design is discussed and analyzed combining a tunnel project. A project-database information management system is designed and developed. With the offset data obtained by in-situ construction method monitoring, the mechanical feature parameters of surrounding rock are obtained with optimal back-analysis method. The displacement of surrounding rock is calculated and the stability of surrounding rock is analyzed during tunnel construction progress by three-dimensional nonlinear finite element method with these obtained mechanical feature parameters.

Key words: information design technique; project information management system; back-analysis

1 引 言

21 世纪是利用地下空间、大力开发长大隧道工程的时代, 信息化设计技术将广泛应用于地下空间的开发。要做到地下工程在施工开挖之前, 就能准确地确定各项支护参数以及最优的开挖支护方案并非易事。地下隧道的稳定性与许多因素有关, 如围岩的构造、岩土体材料的物理力学特性、初始地应力、地下水作用等等。现有设计方法是根据事先确定的因素, 建立某种物理、数学模型, 再利用各种解析方法、数值方法等进行稳定性判断并提出最优开挖方案。这往往与实际情况有一定差距。首先, 地应力的分布千差万别。其次, 岩土体的非均匀性、各向异性及非线性, 使得反映岩土体特性的本构关系模型难以与岩土体的实际性质完全一致。另外,

渗流与岩土应力耦合的关系很难得出较满意的结果。要解决上述问题必须提出一种新的围岩稳定评价方法和设计方法, 即信息化设计。与其相关的“信息化施工”概念在许多文献中都有叙述, 但多数是将信息化施工和施工监测等同起来。实际上施工监测只是信息化施工中的一部分, 如何根据施工监测得到的量测信息来检验勘测和设计的准确性以及如何对后续施工进行指导才是信息化施工的精髓所在。尽管有许多文章对其作了研究, 但在隧道工程中应用还不多。因此本文从信息的获取出发, 探讨隧道工程中的信息化设计思想, 并结合实际具体工程进行了论述。

2 信息化设计原理

信息化施工技术与原有的计算模型、计算方法

相结合,充分发挥各自的长处。以施工监测和信息反馈为显著特征的信息化设计,是将监测技术、力学计算及经验评估等结合成一体地下工程设计方法,其流程图如图1所示。与其它方法不同的是信息化设计要求在施工过程中布置监测系统,从围岩的开挖和支护过程获得围岩稳定性和支护设施工作状态信息。通过分析研究这些信息,可以间接地描述围岩的稳定性和支护的作用,以确定新的围岩及支护参数,并反馈于设计和施工决策。在隧道信息化施工过程中,量测信息可以作为输入量反演计算围岩的物理力学参数来检验地质信息的正确性,并利用反演分析求得的围岩力学参数,应用有限元等数值计算方法对工程施工过程围岩稳定性进行分析计算,进而指导工程的后续施工。

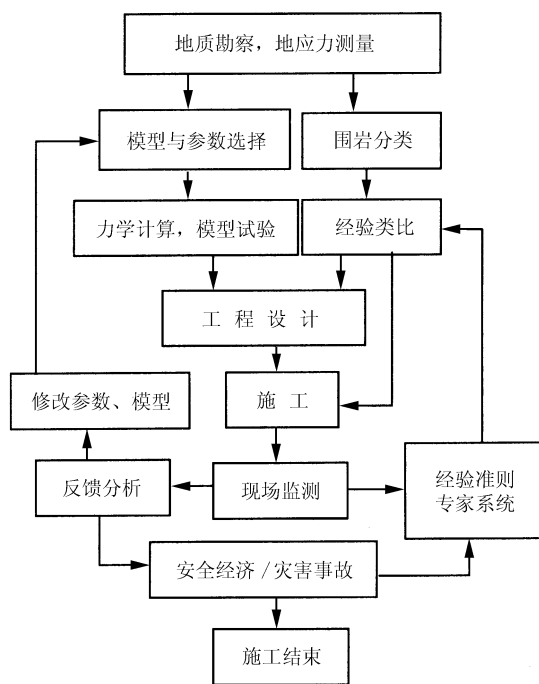


图1 信息化设计流程

Fig.1 The flow chart of information design

3 地下工程信息化设计技术的三个环节

3.1 信息采集—施工监测

施工监测把隧道开挖后围岩和支护系统力学形态的变化作为判断围岩稳定性和支护系统可靠性的依据,将施工监测所获得的信息加以处理,与工程类的经验方法相结合,建立一些必要的判断准则,依据量测结果(处理后)及时地调整、确定支护参数或进行施工决策。

隧道工程现场量测的主要内容有:① 围岩与衬

砌之间接触应力的量测;② 围岩应力-应变变量测;③ 地球物理探测;④ 位移量测。

在新奥法施工中,位移测量是最值得推荐的测试项目。隧道周边点的位移,最直接、最明显的反映围岩和支护系统力学形态的变化,易于建立一些准则来实现量测结果的反馈。

3.2 信息处理—反演分析

采用反演分析法将施工监测到的岩土体的一些基础信息,通过计算来求解岩土体的参数。其目的是把施工监测中采集到的新信息和资料以及由此通过反演分析获得的结果反馈到设计中去,对施工设计提出改进性意见或修改方案。

优化位移反演分析的一般方法:该方法将反演分析问题转化为一个最小二乘问题,建立如下的目标函数

$$\phi(X) = \sum_{i=1}^n (f_i(X) - u_i)^2 \quad (1)$$

式中 X 为包括初始地应力 σ^0 及各岩性参数 (E, μ, c, ϕ) 等的向量; $f_i(X)$ 为第 i 个观测点位移计算值; u_i 为第 i 个观测点位移实测值。 n 为观测点的总数。可以用优化的方法得到一组 X 的近似值,使位移计算值与实测值误差为最小。

3.3 信息反馈—稳定分析

隧道稳定问题主要是一个岩土体结构问题,应力状态则是通过岩土体结构的力学效应而表现出来的,因此,一方面通过观测或量测围岩的应力状态可以认识岩土体结构,另一方面,可将由反演分析得到的岩土力学参数,应用于稳定分析计算。评价隧洞围岩的稳定性,实质就是分析洞室围岩在工作过程中的应力和变形。对埋深大、围岩完好的隧洞,研究重点放在对围岩承载能力的研究上,以围岩实际的应力水平来作为围岩稳定的判据;对埋深浅、围岩较破碎的隧洞,研究重点应放在对围岩能允许多大位移的研究上,以围岩实际的位移多少来作为围岩稳定的判据。通过对围岩稳定性的分析,一方面以此来指导工程的后续施工,采取合理的支护措施,以最小的代价获得最合适的安全程度;另一方面可以为类似地质条件的工程提供第一手可靠的经验资料。

4 应用实例

4.1 工程概况

某一输水隧洞,隧洞全长 688.5 m,隧洞身净尺寸 $m: B \times H = 6.2 \times 5.6$,是一个三心拱截面,隧洞区大部分地段被第四系覆盖,工程北段岩性为灰

白色的、微带红色结晶灰岩, 白云质灰岩; 工程南段岩性以棕黄色、灰黄色以及灰色粘土为主, 夹薄层煤层、碎石角砾等。隧洞的主要功能为某水厂输送浑水, 排放净水厂雨污水, 铺设电力与通讯电缆, 并作为水源厂和净水厂联系的交通通道。

4.2 工程监测数据库管理系统的建立

建立工程监测数据库管理系统后, 可以对工程监测数据进行有效的管理, 随时监控施工过程中工程稳定状况, 确定新的围岩力学参数和支护结构参数, 并将这些信息反馈于设计和施工决策。

该系统能充分利用监测信息来掌握围岩和支护结构的动态信息, 保证工程的安全。它除具有一般数据库的特征外, 特别突出的是其“工程监测”功能:

(1) 作为工程状况的“信息仓库”, 能全面地将隧洞工程监测的各种信息以数据库的统一格式输入。

(2) 可在任意开挖阶段对隧洞支护结构的受力状态进行定量分析, 预测变化较大的项目参数的可能变化趋势, 能客观地评价监测项目的稳定状态。

(3) 可对输入的已知变型量自动进行数据处理, 得出相应的应力与时间、变形与时间等曲线以及制作各种报表, 还可以作为反演计算和预测的依据。

(4) 具有良好的友善性, 界面的设计尽量符合工程人员的习惯, 且简便易于操作, 一般工程技术人员均能根据屏幕提示依次对已有数据记录的结构和内容进行操作, 可任意调用其中一种功能方便查询和翻阅以及了解工程工作状态。

该系统设计由数据结构、功能设计两方面组成:

(1) 数据结构设计 首先确定采集的信息和现场量测项目。现场量测的主要项目为: ① 周边位移, 包括拱脚位移; ② 拱顶下沉; ③ 锚杆内力和抗拔力; ④ 地表下沉; ⑤ 钢筋拱架的内力和外力; ⑥ 支护、衬砌内应力、表面应力及裂缝量测; ⑦ 围岩压力及支衬层间压力。

(2) 功能设计 要能将现场量测获取的数据进行实时输入, 并能及时地将数据以表格、图形等直观形式反映出来, 以便及时地提交有关部门; 能随时存取、处理和翻阅; 也能将数据以拟定的格式传输给相应的计算软件。该系统主要由主控模块和4个子模块构成: 传感器管理模块; 监测数据管理模块; 计算模块; 输出模块, 各模块具有相互独立的功能。该系统结构示意图见图2。该系统的人机界面见图3所示。

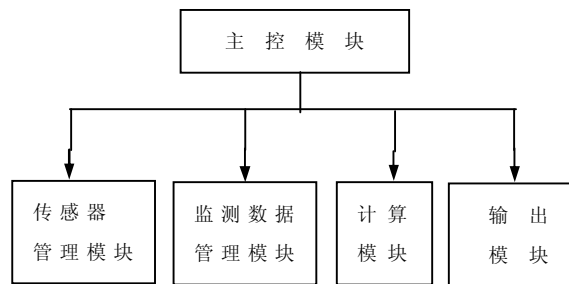


图2 监测信息数据库管理系统结构示意图

Fig.2 The structure of database information management system



图3 隧洞工程监测信息数据库管理系统的人机界面

Fig.3 The human-computer interface of database information management system

4.3 反演分析计算

依据监测到的位移信息对该隧道进行位移反演分析计算。岩土体本构模型: 根据工程实际, 选取了邓肯-张 E- μ 模型。反演目标函数的构造: 对于位移反演问题, 目标函数可以符合最小二乘准则的位移误差函数加以构造。根据原型监测资料测点数量, 具体采用了如下的目标函数形式:

$$F(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \Delta x'_i)^2} \quad (1)$$

式中 n 为反演测点数; Δx_i 、 $\Delta x'_i$: 分别为 i 点计算位移、实测位移。待反演参数选定为 k , R_f , n , G 。根据复合形法迭代步骤及正演模型, 编制了相应的优化反演分析程序 CGJOPT.FOR, 其流程图见图4。这样可以反演出邓肯-张模型中待反演的未知参数。依据工程类比, 参照经验值, 计算中预先规定各待反演参数取值范围如下: $1\,000 \leq k \leq 2\,000$, $0.2 \leq n \leq 1.0$, $0.3 \leq R_f \leq 0.9$, $0.1 \leq G \leq 0.6$ 。围岩岩土介质其它模型参数如下: $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$, $c =$

32.7 kPa, $\phi = 30.4^\circ$, $F = 0.1$, $D = 4.0$ 。隧洞衬砌混凝土材料的力学参数: 密度为 2.4 kN/m^3 , 抗压强度为 22 MPa, 抗拉强度为 1.75 MPa, 弹性模量为 $1.9 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.167。

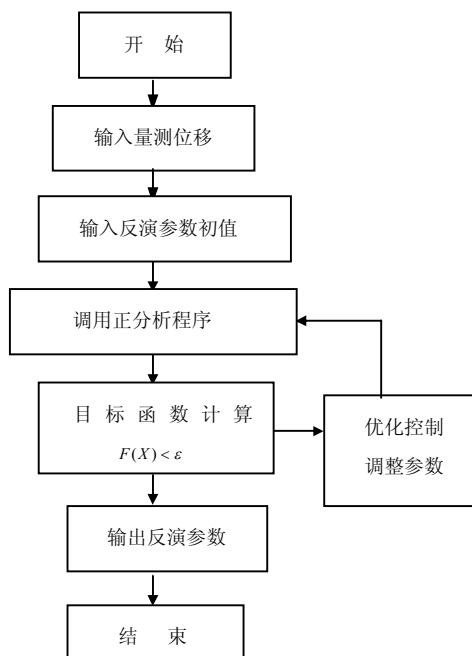


图 4 反演分析流程

Fig.4 The flow chart of back-analysis

表 1 S+75 m 断面处顶拱下 Z-向位移实测值

Table 1 The measured Z-displacements of section S+75 m (mm)

测点号	开挖长度 / m					
	2	4	6	8	10	12
A	-29.1	-43.5	-53.6	-63.8	-65.8	-67.3
B	-25.7	-42.8	-52.0	-60.0	-63.4	-66.3
C	-25.0	-42.2	-48.5	-58.3	-60.0	-62.0
D	-22.5	-41.5	-51.3	-61.1	-63.8	-64.2
E	-19.3	-38.5	-46.3	-57.4	-62.9	-65.0

经反演分析, 得到隧洞不同开挖长度时的各反演参数及目标函数的最优值, 如表 2。

表 2 参数反演结果

Table 2 The parameter back-analysis result

岩土参数	开挖长度 / m					
	2	4	6	8	10	12
k	1 521.0	1 515.4	1 515.0	1 511.9	1 567.4	1 480.6
R_f	0.584	0.563	0.583	0.645	0.581	0.554
n	0.906	0.862	0.886	0.894	0.938	0.944
G	0.287	0.330	0.279	0.314	0.259	0.283
$\text{Min}F(X)$ / mm	1.2	2.0	1.8	1.5	2.5	3.2

由反演得到的岩土介质物理参数作为正分析程序的输入参数, 对隧洞各开挖长度分别进行计算, 得到 S+75 m 处断面顶拱 A、B、C、D、E 点的下

沉位移如表 3。

表 3 S+75m 处断面拱顶 Z-向位移计算值

Table 3 The calculated Z-displacements of section S+75m (mm)

节点号	开挖长度 / m					
	2	4	6	8	10	12
2230 (A)	-31.4	-48.5	-55.6	-66.5	-68.5	-69.0
2167 (B)	-26.5	-45.8	-54.2	-61.2	-65.4	-66.8
2083 (C)	-26.0	-43.2	-50.5	-59.7	-62.0	-62.6
2015 (D)	-23.5	-42.3	-52.0	-62.3	-64.7	-65.2
1965 (E)	-20.8	-39.8	-48.2	-58.6	-63.5	-65.8

注: 表中节点号为有限元剖分网格节点号, 与括弧中位移实测点位置相对应。

从表 2 中的误差函数值(即目标函数的最小值)可知, $\text{Min}F(X)$ 不等于 0, 分析其原因有 3 个可能: ①由于土体本构模型不很完善; ②由于位移实测值与实际沉降值之间的误差; ③由于结构简化而失真及荷载分级简化时与实际施工过程的差距而引起。

从 A、B、C、D、E 5 点的位移可知, 计算值大于实测值, 这主要是由于在开挖至测点处之前, 因隧洞开挖引起该测点处岩土体扰动而产生了下沉位移, 而这部分位移没有量测到。计算值和实测值的变化趋势一致, 且计算值很接近实测值, 这说明由反演得到的岩土介质物理参数基本符合实际参数, 表明反演所应用的正演模型邓肯-张的 E- μ 模型适合本工程问题, 同时也表明采用最优化反演法来推求岩土介质物理力学参数, 只要选取的正演模型接近实际情况, 得到的成果是较可靠的。

4.4 稳定分析计算

该隧洞在施工过程中, 若中槽开挖过长, 可能导致围岩失稳, 为了合理加快施工进度, 保证隧洞安全, 必须对隧洞进行稳定分析, 并给出合理的中槽进尺方案。本工程围岩力学参数是事先进行反演分析得到的。隧洞不同开挖长度时的各参数目标优化值见表 2。

有限元计算结果及分析: 本文选用 S+105 m 的断面进行计算, 在不同进尺时各结点位移计算值见表 4。

表 4 S+105m 的断面拱顶 Z 向最终位移计算值

Table 4 The calculated Z-displacements of section S+105m (mm)

结点号	进尺 / m					
	2	4	6	8	10	12
2227	-32.4	-42.5	-52.6	-87.8	-113.2	-123.3
2155	-28.7	-38.8	-48.0	-85.0	-106.5	-121.3
2023	-27.6	-37.2	-44.4	-78.3	-100.0	-119.0
1855	-25.3	-36.5	-43.3	-77.1	-103.8	-118.2
1680	-20.3	-32.5	-40.3	-75.4	-100.9	-113.0

注: 本文规定位移下沉为负。

经过有限元计算分析,发现 Z 向位移最大, X 、 Y 向位移很小; Y 、 Z 向正应力大致相等, X 向正应力较 Y 、 Z 向正应力小。根据浅埋隧洞的围岩稳定性判断准则^[3, 4],计算得出中槽最佳进尺为6 m左右,当中槽进尺大于6 m时,若不及时进行支护和加固,隧洞就很可能因拱顶位移急剧增加而导致围岩失稳。

5 结 语

(1) 由于隧道工程的特殊性和复杂性,采用信息化技术施工是必要的和可行的,可以在一定程度上克服地质资料不详细的缺陷,特别是在地质情况复杂,工程质量要求高的隧道中,这种施工思路既可做到安全施工,也可带来经济效益和社会效益。

(2) 隧洞工程监测信息数据库管理系统,具有良好的人机界面,便于推广。它既能提高数据处理的精度和预测的时效性,又可缩短数据处理的时间。

(3) 一般而言,对那些通过试验方法难以准确测定,或因试验费用比较昂贵而不宜试验确定的特征参数,可以通过位移反演分析法求得其“综合参数”。对于岩土介质的大部分变形和强度特征参数,通过适当的现场或室内试验技术,还能将测试结果的偏差降低到较小的程度,给优化反演中待求的初值的设定提供了一个可靠的依据。

(4) 充分利用现场施工监测资料对隧洞围岩的特征参数进行反演分析,其结果的可靠性是高计算精度的保证,同时要选好恰当的计算模型。

(5) 利用反演分析得到隧洞围岩的特征参数对隧道施工过程的围岩进行稳定性分析,得出中槽的开挖会引起岩土体强度下降、承载力降低,随中槽进尺加长,洞周围岩竖向位移和水平位移增加,但竖向位移变化更显著。中槽极限进尺长度对工程安全施工意义很大,必须结合工程实际,对围岩进行稳定性计算分析,确定出中槽的最佳长度。

(6) 以施工监测和信息反馈为显著特征的信息化设计,是将监测技术、力学计算及经验评估等结合成一体地下工程设计方法,是一种理想的设计方法,是今后地下工程施工方法的发展方向。

参 考 文 献

- [1] 杨志法, 刘竹华. 位移反分析在地下工程设计中的初步应用[J]. 地下工程, 1981, (2): 9-14.
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1996. 54-60.
- [3] 王建宇. 隧道工程监测和信息化设计原理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990. 1-40, 65-78.
- [4] 李世辉. 隧道围岩稳定系统分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.

上接第794页

(4) 同时加紧对涵洞的施工,并对涵洞上部的空间及时回填。

所采取的这些措施,有效的改善了围岩的受力状况,避免了裂纹的进一步扩展。

4 结 论

通过对京珠高速公路担架哨隧道南口右线接近洞口段围岩的受力状况的监测,可得如下结论:

(1) 围岩的地质状况对隧道的受力状况影响巨大。

(2) 对于浅埋隧道,围岩的自重并不是决定隧道稳定的主要因素,而隧道围岩的地质应力和构造应力将成为决定隧道稳定性的决定因素。

(3) 锚杆是支护隧道的主要承载构件,但是其

安装效果对其作用的发挥有很大影响。

(4) 通过埋设测试元件对围岩进行实时监测预报,可以分析隧道围岩的稳定情况,从而为指导设计和施工,提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] 交通部第二勘察设计院. 京珠国道主干线粤境南段高速公路韶关甘塘至广州太和段担架哨隧道两阶段施工图设计[R], 1998.
- [2] JTJ043—94, 公路隧道施工技术规范[S].
- [3] JTJ063—85, 公路隧道勘测规范[S].
- [4] 俞茂铨, 汪惠雄. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991.