

# 数量工程技术在南京长江隧道工程中风险 辨别及事故防范的应用研究

钱 维<sup>1</sup>, 金先龙<sup>2</sup>, 沈建奇<sup>2</sup>

(1. 南京市发展改革委员会, 南京 210008; 2. 上海交通大学高性能计算中心, 上海 200240)

[摘要] 以南京长江隧道工程为背景,提出了基于数量工程技术的风险提示及事故防范方法,即运用数值仿真方法,借助超级计算机的并行计算能力,建立盾构机进出洞,盾构机穿越长江大堤及穿越江中最浅覆土层,两台盾构机同时施工影响,盾构机穿越复合土层等工程关键问题的数量分析模型。基于该模型,对地表沉降过大、盾构机姿态偏移、开挖面失稳等工程风险进行了提示;分析了风险产生的机理、后果;提出了事故防范的措施,评价和验证了防范措施的有效性和合理性。

[关键词] 南京长江隧道;数量工程技术;风险辨别与防范

[中图分类号] TB115 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)10-0022-09

## 1 前言

南京长江隧道项目为国家级重点工程,是国务院批准的南京城市规划中确定的“五桥一隧”过江通道的重要内容,是南京市跨江发展的重大项目。工程采用直径达 14.93 m 泥水盾构机,是当今世界最大直径盾构机之一。该隧道工程地下穿越段地质结构复杂、建设条件差、现有水下工程建设标准和规范难以涵盖。同时在世界范围内,亦没有可供借鉴的成功经验,隧道工程面临着诸多世界级技术难点和施工风险。第一,江底水压很高。目前世界上已实施的高水压盾构项目中超大直径盾构工作压力为  $6 \text{ kg/cm}^2$  以上的实例较少,而南京长江隧道盾构机工作压力高达  $6.5 \text{ kg/cm}^2$ ,在同等直径及更大直径盾构项目中是目前世界上最大的。第二,地层透水性特强。长江南京河段的江中地层主要为松散、稍密~中密的粉细砂地层,以及部分砾砂、卵石层,砂层透水系数是黏土层的千倍以上,所有的水头压力均直接作用在隧道上。第三,盾构机始发和接收超浅埋、江底盾构覆土厚度浅。盾构机始发和接收覆土厚度一般不宜小于 1 倍盾构机直径,而南京隧道

工程在权衡了深基坑和盾构出洞双重困难后,选择了盾构机始发埋深仅为 0.37 倍盾构直径(5.5 m),在国内是埋深最浅的超浅覆土层。然而,在工程施工中,无法在真实状态下组织静态试验和工况模拟。为了提高对工程风险的预测及事故防范,项目组提出采用数量工程技术,建立了工程施工的数量模型,并应用相应分析理论,结合数值仿真方法,借助超级计算机,实现对最大风险区域的判断、比较和诊断。

数值仿真方法,特别是有限元法相对于传统解析法、经验方法能针对不同水文地质、施工方法进行全场耦合求解;相对于模型试验法,具有简便、快速的优点,便于不同方案的比较分析,同时也节约了大量的人力、物力。盾构法隧道施工过程是复杂的力学作用过程,数值仿真的难点在于如何采用数学、力学关系来表达各种施工因素的力学作用。孙钧院士采用 Ansys 软件仿真了两条隧道交叠施工情况下土层位移及地表沉降的变化规律,并基于该数值仿真结果,提出了控制地表沉降的施工方法<sup>[1]</sup>。张海波提出了仿真盾构机超挖、千斤顶推力、注浆作用、土体与结构的接触等施工因素<sup>[2]</sup>。Maynar 在对马德里地铁延长段的三维数值仿真中,提出了盾构机超

[收稿日期] 2008-6-20

[作者简介] 钱 维(1970-),女,江苏南京市人,南京市长江隧道工程前期办公室副主任,副研究员,博士

挖、盾尾空隙、注浆等施工因素的仿真方法<sup>[3]</sup>。实际上,盾构机本身的结构特性、工作特性对土层的扰动具有重要影响<sup>[4]</sup>。Broere 采用容积缩减的方法仿真了盾构机机身坡度对地表沉降的影响<sup>[5]</sup>。Kasper 基于 Marc 软件,提出盾构法施工的仿真方法,细致考虑了机身结构与土体的相互作用、机身坡度、注浆时空效应、拖车作用、盾尾空隙、推进千斤顶等盾构结构及施工因素<sup>[6]</sup>。随后,其在文献[7]中研究了盾构机的结构参数(如盾构机机身坡度、重量、长度等)以及施工参数(开挖面泥水压力、注浆压力、拖车重量)对地表沉降、盾构机姿态、隧道自身的影响关系。需要注意的是,限于计算能力的限制,目前的盾构法施工数值模型在网格尺寸、模型规模都较为保守,对仿真精度产生了较大负面影响<sup>[8]</sup>。近年来,随着并行算法理论的成熟和并行计算技术的发展,对盾构法隧道施工进行大规模细致仿真成为可能。

笔者将数量工程技术置于更一般的逆散射领域条件,以南京长江隧道工程水下施工风险段识别及防范提示为研究对象,运用这一原理记录工程设定段施工过程中各种工况、参数、地质的变化;并借助超级计算机的计算能力,运用数值仿真方法,从数值上确定出工程风险段范围内的曲面表达形态和变化轨迹,在工程尚未开工之前分析出风险段的表述及提示。从而指导工程设计进一步优化完善、突破现有理论和传统方法的缺陷,指导工程施工能够有的放矢地进行风险控制,为我国超大直径盾构机在今后工程建设中提供示范和积累经验。

## 2 原理与方法

### 2.1 数量工程技术

数量工程技术是一个跨学科的综合体,它集结相关参数、运用物理学所衍生的模型、数学计算和计算机技术,对特定的参数体系中一些难以预知的盲点和盲区提供一种类似可见光的识别方法。根据南京长江隧道这一水下复杂工程的特点,将工程段的地质资料、土体物理力学参数、设备运行工况等施工参数输入数量模型,运用相应的分析理论,结合数值仿真方法,借助超级计算机并行计算平台,对工程中可能发生的风险区域进行提示,对最大风险区域进行判断、比较和诊断,并可进一步对提出的事故防范措施进行评价及验证。

### 2.2 数值仿真基本方法

对南京长江隧道进行泥水盾构法施工实际上是

连续稳态推进的过程。在每一时刻盾构机与土体的相互作用下,系统内部各结构都处于宏观平衡状态。而采用有限元方法,利用刚度迁移原理对盾构机掘进过程进行的逐步开挖仿真,实际上是将真实掘进的连续稳态过程离散成以特定步长为一个掘进单位的逐步稳态过程。这种简化方法,在保证一定分析精度的基础上,节约了计算时间,满足了工程实际应用的需要。

刚度迁移法,即“单元生死”,是有限元分析中用来仿真材料消失、产生的一种方法,已经广泛用于焊接熔池、大坝浇筑、基坑开挖等场合的数值仿真。实际上“单元生死”并不真正从有限元模型中删除或添加某些单元,而是通过在总刚度矩阵  $[K]$  中,对需要“杀死”或者“激活”的单元的刚度矩阵  $[K_i]$  上乘以一个退化系数  $s$ ,使其在总体结构中失去作用或者恢复正常,如方程(1)。

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} K_1 & & & & & 0 \\ & \ddots & & & & \\ & & s \cdot K_i & & & \\ & & & \ddots & & \\ 0 & & & & & K_n \end{bmatrix}^{-1} \{\sigma\} \quad (1)$$

当退化系数  $s$  取一个接近于 0 的数值,即  $s = 1 \times 10^{-6}$ ,单元即被“杀死”,同时,该单元具有的质量、阻尼、应变等都将置零。在计算过程中该单元几乎不提供任何刚度、质量、能量。当结构产生变形时,单元也跟随作相应变形,但不产生应变。当退化系数  $s$  恢复至 1 的时候,被“杀死”的单元即刻被激活,单元各项参数恢复正常,同时单元保留了处于“死”状态时产生的变形,以新的空间位置作为起点,并以零应变的初始状态重新开始参与计算。

盾构机与土体接触模型可采用无厚度接触单元。该单元法向与切向接触均采用罚函数方式来描述,如式(2)

$$\begin{cases} F_N = K_N \cdot x_p \\ F_T = K_T \cdot x_s \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $F_N$ ,  $F_T$  分别为法向力与切向力;  $K_N$ ,  $K_T$  为法向刚度和切向刚度;  $x_p$ ,  $x_s$  分别为接触渗透位移和切向滑移位移。考虑到接触刚度的取值对有限元计算结果及计算的稳定性具有重要影响。较大的接触刚度可以减少渗透位移,更符合实际接触行为,能提供更高计算精度;然而也可能导致模型在接触表面来回振荡,影响了数值计算的稳定性。为提高接触表面数值计算稳定性及计算精度,笔者采用自适应

接触刚度调节方案。

法向接触刚度自适应方案分两步进行,如式(3)、式(4)。首次刚度迭代基于向前的收敛设置

$$K_N^1 = \begin{cases} 0.75 \times K_N^0 & i > 10 \text{ 或 发散} \\ K_N^0 & 5 < i \leq 10 \\ 2 \times K_N^0 & i \leq 5 \end{cases} \quad (3)$$

随后刚度迭代基于穿透值  $g_N$

$$K_N^{i+1} = \begin{cases} 2 \times K_N^i & g_N^{i+1} > 0.25g_N^i \\ K_N^i & g_N^{i+1} \leq 0.25g_N^i \end{cases} \quad (4)$$

式中,上标  $i$  表示每载荷子步收敛需要迭代的次数;  $g_N$  表示法向穿透值;  $K_N$  表示法向接触刚度。

切向接触刚度自适应调节基于当前法向压力  $p_N$ ,如式(5)。

$$K_T = \frac{\mu p_N}{l_{crit}} \quad (5)$$

式中,  $\mu$  为摩擦系数;  $l_{crit}$  为所允许的最大滑移位移。

土体采用弹塑性材料模型,屈服准则服从 Drucker - Prager 准则,其表达式为<sup>[9]</sup>

$$F = 3\beta\sigma_m + \sqrt{J_2} - \sigma_y = 0 \quad (6)$$

式中,  $\sigma_m$  为静水压力;  $J_2$  为应力偏张量第二不变量;  $\beta$  为材料参数,由内摩擦角  $\phi$  决定。

### 2.3 拟实建模技术

南京长江隧道盾构法施工过程本身是一融合多结构、多物质相互力学作用的过程。从盾构法本身来看,其涉及到开挖面泥水压力施加、盾尾注浆、拖车对隧道的作用、盾构机机身与土体的相互作用、刀盘对开挖面的掘削作用、管片拼装等施工因素;从隧道设计角度来看,隧道穿越的土层分布复杂、隧道轴线呈空间曲线特性、隧道沿线有如长江大堤等复杂构筑物。因此,为实现对南京长江隧道细致的三维模拟,需要采用拟实的建模技术。图1为盾构法越江隧道三维有限元模型,其土层分布按照实际地质勘探资料呈空间分布状态。图2所示为对各施工因素的细致建模图。笔者在模型中考虑了开挖面泥水压力、盾构机机身结构特性、地下水压力、注浆材料时空效应、实体衬砌单元、刀盘扭矩、油缸推进力、拖车作用力等施工因素。

### 2.4 并行计算方法

南京长江隧道工程风险区段数量之多、范围之广,以及数值模型的高细致度要求已经超出了微机的计算能力。因此,有必要以超级计算机为平台,基

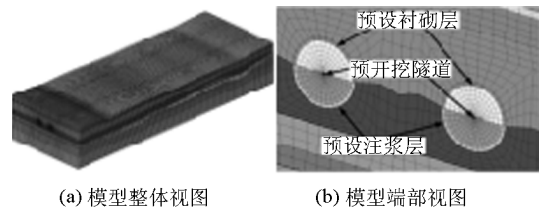


图1 盾构法隧道三维有限元模型  
Fig.1 3D FE model for tunneling process simulation

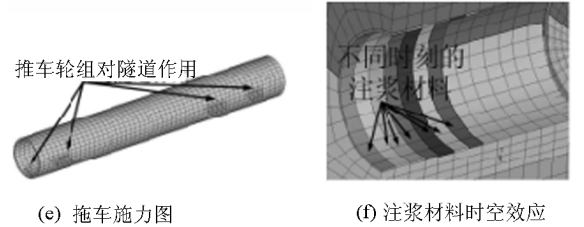
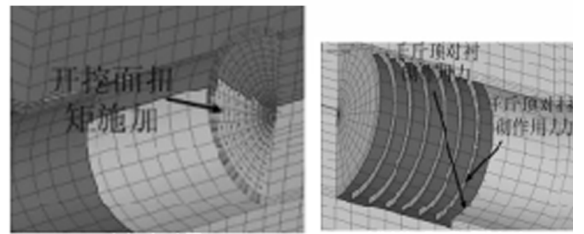
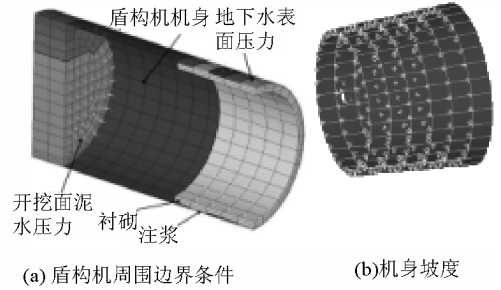


图2 盾构法数值仿真局部详细视图  
Fig.2 Detailed map of FE model

于并行算法对大规模复杂模型进行快速求解。笔者采用并行预处理共轭梯度法(DPCG),对盾构法掘进数值模型并行迭代求解。其优点在于将模型计算任务分布给多个CPU进行同步求解时,仍可避免或减少同步控制,进一步加快了计算速度。DPCG并行计算方法的主要计算流程如下。

1) 对于问题  $Kx = f$  给定初始条件:当迭代次数  $k = 0$  时,有  $x^0$ ;并初始化  $r^0 = f - Kx^0$ ,  $d^0 = M^{-1}r^0$ ,  $p^0 = d^0$ ,其中  $r, d$  和  $p$  分别是残余矢量、预条件调整残余矢量和搜索方向矢量,  $M$  为预条件矩阵,  $K$  为刚度矩阵。

2) 任务分配以后,在任一标号为  $i$  的单CPU

上,计算  $nu_i^\alpha = r_i^k d_i^k$  和  $de_i^\alpha = \bar{p}_i^k \bar{K}_i^k p^k$ , 其中  $nu_i^\alpha$  和  $de_i^\alpha$  表示该 CPU 对沿搜索方向标量距离  $\alpha$  的影响, 而  $r_i^k$ ,  $d_i^k$  和  $\bar{p}_i^k$  等则表示按行分配到单个 CPU 中的各对应项。

3) 利用各 CPU 之间的通信集成得到  $\alpha^k = \sum nu_i^\alpha / \sum de_i^\alpha$ 。

4) 在单个 CPU 上, 按顺序依次求得  $r_i^{k+1} = r_i^k - \alpha^k \bar{K}_i^k p^k$ ,  $d_i^{k+1} = \bar{M}_i^{-1} r_i^{k+1}$ , 以及  $nu_i^\beta = r_i^{k+1} d_i^{k+1}$ ,  $de_i^\beta = r_i^k d_i^k$ 。

5) 利用各 CPU 之间的通信集成得到  $\beta^k = \sum nu_i^\beta / \sum de_i^\beta$ 。

6) 计算  $x_i^{k+1} = x_i^k + \alpha^k p_i^k$ , 并判断是否收敛; 收敛则结束; 不收敛, 则计算  $p_i^{k+1} = d_i^{k+1} + \beta^k p_i^k$ 。

7) 利用各 CPU 之间的通信集成得到  $p^{k+1}$ , 并返回第 2 步。

## 2.5 数值仿真步骤

为了将南京长江隧道工程中泥水盾构法施工的稳态推进过程进行力学离散, 同时兼顾每一平衡时刻, 反映各施工因素、物理环境之间的力学作用关系, 特以一环衬砌的施工长度作为每一载荷步前进距离, 逐步向前开挖, 图 3 所示为泥水平衡盾构机掘进过程数值仿真的详细步骤。

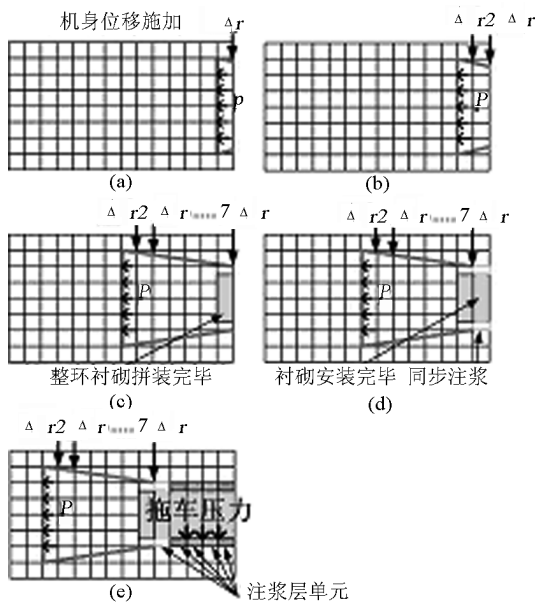


图 3 盾构机掘进过程仿真示意图

Fig. 3 Sketch map of simulation of tunneling process

图 3(a) 为盾构机开挖第一环距离示意图, 此时相应位置土体单元被“杀死”以仿真土体被挖掘过

程, 同时“激活”预设机身壳单元, 机身与土体接触单元随之“激活”。并在如图位置机身壳单元环向节点上施加径向位移  $\Delta r$ , 如式(7); 综合仿真盾构机超挖及机身坡度, 同时施加开挖面泥水压力  $P$ , 如式(8)。通过在预设机身壳单元上施加位移来仿真该坡度, 并且建立机身与土体的相互作用模型, 近似仿真了实际开挖过程中, 由于机身坡度的存在, 机身周围土体与机身相互作用并不断向隧道轴线方向偏移的复杂力学过程。

$$\Delta r = \frac{H_i \times (D - d)}{2L_{TBM}} \quad (7)$$

式中,  $D$  为盾构机刀盘超挖刀外直径;  $d$  为盾尾外直径;  $L_{TBM}$  为盾构机总长度;  $H_i$  表示一环衬砌长度。

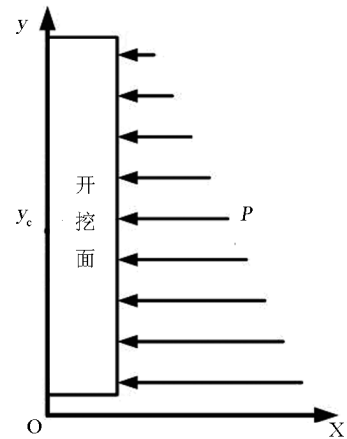


图 4 开挖面泥水压力施加

Fig. 4 Sketch map of cutting face support pressure

$$P = P_c - \rho_s g (y - y_c) \quad (8)$$

其中  $P_c$ ,  $y_c$  分别为开挖面中心点位置设定泥水压力和竖直向坐标,  $\rho_s$  为泥水密度,  $g$  为重力加速度,  $y$  为压力施加位置竖直向坐标。

图 3(b) 为盾构机开挖至第二环距离时, 盾构机身相应位置施加位移  $\Delta r, 2\Delta r$ 。(c) 为盾构机完全进入土层后, 超挖及机身坡度综合位移施加图, 此时在盾构机机尾已完成拼装一环衬砌。

图 3(d) 为第一环衬砌安装完毕, 同时进行同步注浆。此时, 将注浆单元层位置的机身单元“杀死”, 仿真盾尾前移, 并解除该处机身与土体的接触。考虑到注浆力学性质随时间和空间逐步变化, 因此将注浆考虑成非线性弹性材料, 其弹性模量随时间的变化曲线见图 5。实际上, 注浆材料在随时间变化的过程中, 要经历液态到固态的转变, 通过在

有限元模型中改变注浆层单元弹性模量的方法,一定程度上反映了在液态阶段注浆与土体相互融合作用,产生较大变形;在固态阶段随着水合作用不断加强,注浆变形趋于稳定的过程。

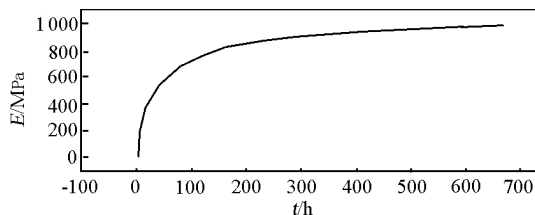


图5 注浆材料弹性模量变化曲线  
Fig. 5 Time - dependent elastic stiffness of grout material

图3(e)为盾构机开挖一定距离后,盾构机后方拖车对已安装衬砌的施力示意图,随着盾构机前行,拖车施力位置也随之前行。实际施工过程中,拖车随着盾构机一起前行,然而其前进速度非常缓慢,可认为拖车对衬砌作用为连续静载荷。通过逐步开挖仿真,将连续静载荷离散成以一环衬砌距离为步长逐步前进的静载荷,一定程度上反映了拖车不断前行对衬砌的作用过程。图6为拖车施力图。

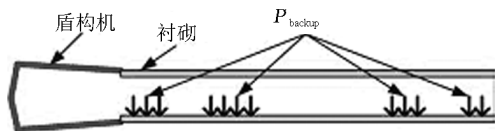


图6 拖车施力图  
Fig. 6 Loading scheme to represent the back - up trailer

图中,  $P_{backup} = W_t \cdot S^{-1}$ ,  $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$ , 其中,  $W_t$  ( $t$ 表示拖车)为拖车总重量,  $S$ 为拖车轮组对衬砌的总作用面积,  $S_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )为单个轮组的作用面积。按照每个轮组的空间分布,在相应作用面积上施加压力  $P_{backup}$ 。

### 3 典型工况数量分析

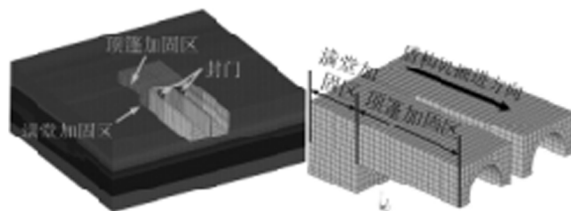
针对南京长江隧道工程的特点,根据工程技术人员建议,对工程关键施工段进行高性能数值仿真。所有计算基于上海超级计算中心曙光4000A超级计算机平台。

#### 3.1 盾构机进出洞

南京长江隧道进出洞段由于覆土超浅,加上隧道直径超大,工程拟采取旋喷桩进行土体加固。加固强度过大容易导致刀盘掘进困难,加固强度过小

容易引起塌方及地下水涌入。同时,盾构机出洞时的姿态对后续沿预设隧道轴线施工具有重要意义,因此,在施工对盾构机进出洞进行数值仿真,以此来提高进出洞的风险预测及事故防范。

整个进出洞模型由原始土层、加固区、封门、引道段等组成,图6为出洞段的三维有限元模型,其中加固段分为满堂加固区及顶篷加固区,分别长约18 m及38 m。封门共有两层组成,每层有8块封门块及井字架组成,如图7(b)所示。通过对封门打开至盾构机穿越加固区的整体数值仿真,研究了封门打开顺序、土体加固强度对土层稳定性的影响关系,盾构机穿越加固区时的姿态变化规律,开挖面泥水压力对地表沉降、开挖面稳定性的影响关系。



(a) 始发段有限元模型 (b) 始发段加固图

图7 始发段数值仿真

Fig. 7 Numerical simulation of shield departure

图8为盾构机穿越加固区时,盾构机姿态的变化曲线,定义盾构机竖直向姿态参数  $\kappa =$  盾首中心竖直向位移 - 盾尾中心竖直向位移。由图可见,盾构机位于满堂加固区时,  $\kappa$  值比较稳定。当从满堂加固区进入顶篷加固区时,  $\kappa$  迅速减小,这主要由于顶篷加固区下半部分原状土土性较软,使得机头刚进入该区时,出现较大叩头。当盾构机逐渐从顶篷加固区进入原状土区时,叩头量减小,  $\kappa$  逐渐稳定。

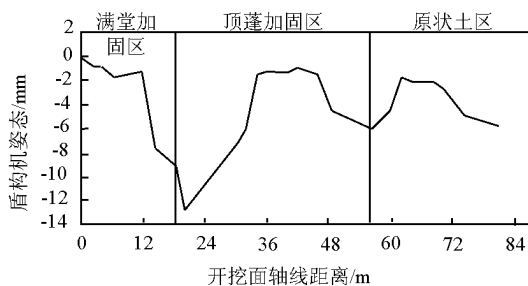


图8 盾构机始发段姿态变化

Fig. 8 Behavior of shield machine at the departure of shield

### 3.2 盾构机过大堤

根据现有的法律法规,盾构机穿越长江大堤时,必须对大堤变形进行监测,及时控制大堤的变形<sup>[10]</sup>。这是由于,一方面由于大堤与底下土层的不均匀沉降可能导致大堤开裂等险象发生;另一方面,大堤处覆土层厚度变化较大,对开挖面稳定性有重要影响。因此,对盾构法施工穿越大堤进行数值仿真,为提前预测盾构法施工对大堤的影响关系,保障沿江人民生命财产安全具有重要意义。

如图9所示,整个有限元模型包含原始土层、预设隧道、长江大堤等组成,具体分为原状土段、水塘段、大堤段及大堤堤表段。其中考虑到大堤与土层之间的特殊接触关系,采用多点约束 MPC 方式进行建模,对大堤与土层这两种具有不同网格密度的物体之间建立了力学联系,见图9(b)。该模型主要模拟右线盾构机先行穿越大堤时,不同开挖面泥水压力、油缸推进力与大堤变形之间的关系,并分析了盾构机在穿越大堤过程中的姿态以及开挖面稳定性的变化规律。

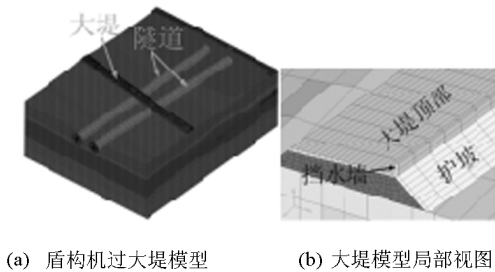


图9 盾构机过大堤有限元模型

Fig. 9 FE model for crossing over flood levee

图10所示为盾构机穿越大堤过程中,各区段的地表沉降曲线。由图可见,开挖面前方地表均表现为略微隆起,盾构机掘进过后,地表沉降逐渐稳定,其中原状土段的沉降最大,大堤表面的沉降最小。

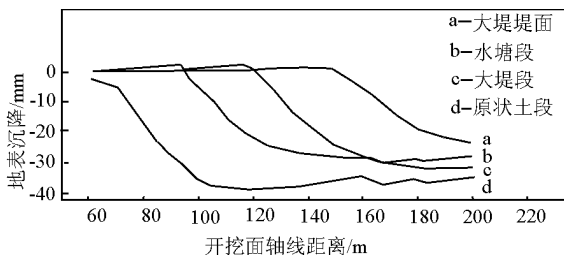


图10 盾构机穿越大堤过程中地表沉降变化

Fig. 10 Surface settlements during crossing the flood levee

### 3.3 盾构机过江中最浅覆土层

为减小隧道线路坡度,南京长江隧道江中浅覆土段覆土厚度仅为0.7倍隧道直径,且土层具有一定透水性,抗剪强度不高,容易导致冒顶通透水事故发生,同时,较薄的覆土层,容易导致隧道轴线上浮,难以控制。因此,有必要对盾构机通过浅覆土区这一过程进行数值仿真。

图11所示为江中浅覆土段的三维有限元模型,其中包括浅覆土段土层及预设隧道组成。其覆土厚度变化如图12所示,最浅处覆土仅为10m左右。通过该模型,研究了江中浅覆土段隧道上浮、盾构机姿态、土层位移、开挖面稳定性等变化规律。预测了浅覆土段的风险位置,并提供了事故防范建议。

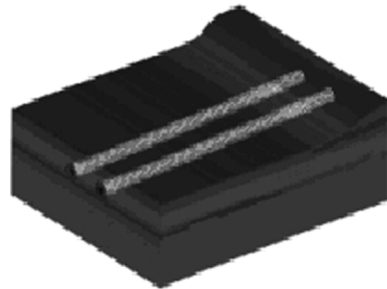


图11 江中浅覆土层段有限元模型

Fig. 11 FE model for section with shallow cover

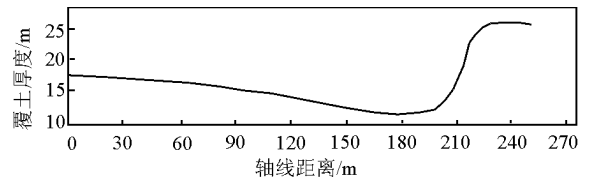


图12 覆土厚度沿隧道轴线变化

Fig. 12 Cover depth varies along the tunnel

为研究盾构机穿越江中浅覆土段时的开挖面稳定性,以开挖面处土体的隧道轴向位移判断开挖面处的力学平衡状态。如图13所示,当盾构机开挖面位于约200m位置时,开挖面处轴向位移由正转负,开挖面平衡状态产生较大改变。这主要由于200m位置处覆土的厚度突然改变所致。

当位于浅覆土段时,盾构机穿越过程中受到土层反力及高压水作用,其轴线会出现一定偏移。图14所示为盾构机在自然状态下掘进时(不考虑推进油缸的作用)的姿态变化曲线。由图14可见,盾首、盾尾均出现上浮,在开挖面到达200m位置时,上浮量减小,这是主要由于覆土厚度增加所致。

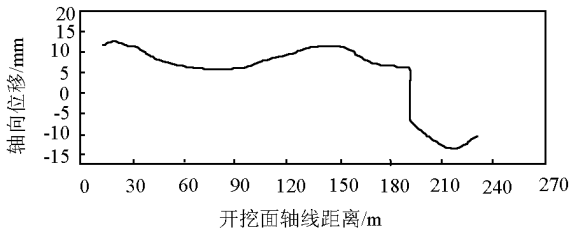


图 13 开挖面土体轴线向位移

Fig. 13 Soil displacement at cutting face

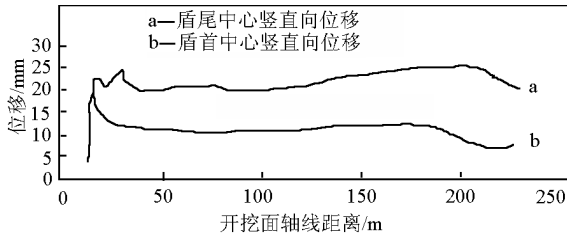


图 14 竖直向盾构机轴线偏移

Fig. 14 Movement of shield machine at vertical direction

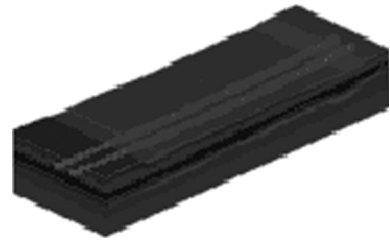


图 15 双线隧道掘进有限元模型

Fig. 15 FE model for double tunneling

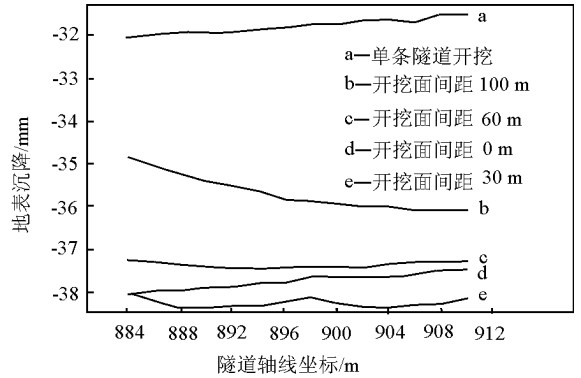


图 16 不同开挖面间距下纵向沉降槽对比

Fig. 16 Comparison of longitudinal settlements

### 3.4 双线隧道掘进相互影响

南京长江隧道采用双线隧道方式,隧道间距无论对盾构法施工过程及今后运营安全都具有重要作用。在施工阶段,当先行盾构机速度减缓或者停顿时,后行盾构机在逐渐超越右线盾构机过程中,临近隧道受到的影响程度对后行盾构机超越前行盾构机的可行性产生重要影响。因此,为研究这一工程假设的可行性,对江中某区段进行了双线盾构机超越过程的数值仿真。

图 15 为双线盾构机超越过程有限元模型,该模型包括原始土层、双线预设隧道等组成。为研究方便起见,分别以双线盾构机开挖面间距 0 m, 30 m, 60 m, 100 m 作为仿真工况。通过仿真,研究了后行盾构法施工对先建隧道的影响、后行盾构法施工对先行盾构机姿态影响、地表沉降在盾构机超越过程中的变化关系以及盾构机开挖面稳定性的变化关系。

图 16 为不同开挖面间距下,两台盾构机均掘进通过后,形成的最终纵向沉降槽对比图。由图可见,随着开挖面间距的减小,沉降值也随之增大,直到相距 30 m 时,形成了最大纵向沉降槽。在齐头并进情况下其沉降槽未必最大。这主要跟后行盾构机对先建成隧道的二次扰动大小有关。

图 17 所示为后行盾构机对先行盾构机姿态的影响,由图可见,当开挖面相距 60 m 以外时,盾构机

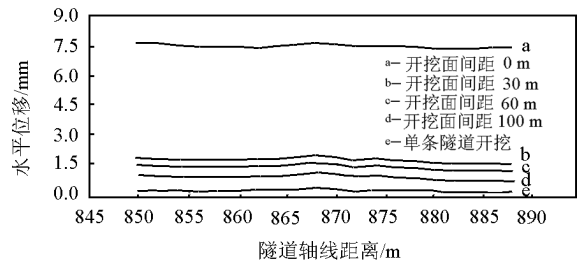


图 17 盾构机水平向偏移

Fig. 17 Movement of shield machine at horizontal direction

之间的影响比较微小,当齐头并进时,后行盾构机对先行盾构机的影响最大。

### 3.5 盾构机过复合土层

由于南京长江隧道江底地质条件非常复杂,隧道轴线穿越较多不同土层,这对开挖面稳定性控制、盾构机姿态控制、地表沉降控制都提出了较高的控制要求。为了提高在复杂地质段的盾构法施工适应性,根据工程施工预设条件,进行盾构机穿越复合土层的数值仿真。

图 18 为复合土层段三维有限元模型,该模型根据复合土层的复杂地质状况进行建模。由于其模型规模非常庞大,在仿真结果处理中,根据不同监测位

置分别进行处理。图 19 所示为复合土层段,不同监测位置地表沉降发展曲线。由图可见,整个复合土层段,地表沉降较为稳定,不同位置沉降值较为接近。



图 18 复合土层段有限元模型

Fig. 18 FE model for section of composite soil layers

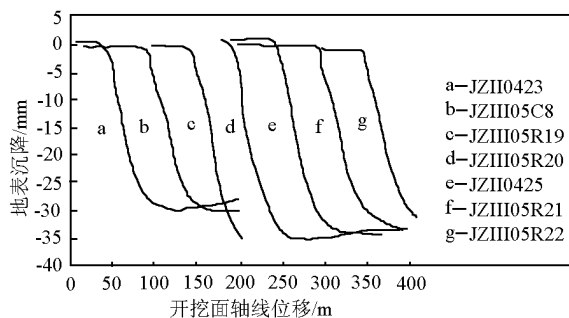


图 19 复合土层段地表沉降

Fig. 19 Surface settlements at section of composite soil layers

## 4 工程应用

### 4.1 盾构机出洞段

从工程施工角度存在以下难点:覆土层超浅,约 0.37 倍隧道直径,土体的稳定性控制难度较大;超大直径开挖面,使得开挖面泥水平衡控制技术及洞口止水技术要求较高。工程拟采取旋喷桩进行加固,然而旋喷桩的加固强度、加固范围、加固形状的优选是一个需要反复认证、对比分析的过程。如果加固不当,可直接导致土层开裂、塌方、冒浆、盾构机过度偏移等工程事故,严重影响工程进度、安全性、经济性。针对现有加固方案,以数值仿真盾构机始发过程,利用数量工程分析得到以下方案。

1) 在破洞前应及时调整洞门密封方案,提出了在洞门前段实施冷冻加固措施,并预测了需加固土体的强度取值。

2) 在自然状态下(不考虑推进油缸作用),盾构机穿越加固区过程中,地表仍有一定数量的隆起;盾构机在穿越加固区时,均以叩头方式前进,特别是从

满堂加固区进入顶篷加固区时,出现较大的叩头量。这是由于在自然状态下,盾构机机身重量分布不一致导致,当其穿越不同加固区时,由于地基刚度落差导致了盾构机的过量叩头。

3) 为进一步控制地表隆起及盾构机的过量叩头,提出了改进的盾构机推进千斤顶推力分布、推力作用曲线以及开挖面泥水压力作用曲线。经过数值仿真及数量工程分析后,表明地表隆起、盾构机叩头量都大为减小。

### 4.2 盾构机穿越长江大堤段

从工程安全性角度,在盾构机穿越大堤时,土层与大堤的不均匀沉降容易导致大堤局部开裂;大堤处覆土厚度的较大变化,使得开挖面泥水平衡不容易控制。实际上,大堤及地表的过量沉降或者隆起,是大堤风险出现的表象。通过对盾构机穿越大堤处数值仿真及对结果的数量分析发现:

1) 大堤沉降得到控制且小于原状土段、水塘段及大堤附近处地表沉降;

2) 盾构机从原状土段进入水塘段时,其竖直向姿态发生较大变化,抬头量增大。

为进一步控制大堤沉降,防止高渗水扰动层对盾构机穿越大堤的影响,通过优化推进千斤顶作用力分布及开挖面泥水压力、注浆量等施工参数及盾构机工作参数使得盾构机安全通过大堤。

## 5 结语

以南京长江隧道工程为背景,提出了基于数值仿真方法的数量工程分析技术,借助于超级计算机,完成了对工程关键段的风险识别及事故防范措施评价,并得到了工程掘进的实践验证,得到了以下几点认识。

1) 基于数值仿真的数量工程技术,能够对南京长江隧道工程中不可预见的风险进行识别、甄别、比较和诊断;对提出的施工方案进行比较、验证、评价。通过南京长江隧道工程的应用,一方面大大提升了此类水下工程的施工标准;另一方面,提供了对大型水下工程风险辨别、事故防范的新思路。为类似的大型水下隧道工程的设计和施工控制提供了依据,形成新领域的技术成果,具有学习借鉴和推广应用价值。

2) 基于南京长江隧道工程的盾构法施工仿真方法,能够对盾构法施工因素、盾构机工作参数、盾构机结构特性及周围环境构筑物进行细致模拟。仿



真结果较好地预测了地表沉降、盾构机姿态、开挖面稳定性的变化规律。

3) 大规模细致模型,一方面提高了数值仿真精度;另一方面,扩展了同一模型的研究内容。特别是超级计算机的应用,DPCG 并行算法的引入,进一步缩短了数值仿真时间,加快了方案对比、风险预测的速度。

运用课题成果,南京长江隧道自 2008 年 3 月 27 日正式掘进以来,截止到 6 月 20 日,右线盾构已推进 450 环,前行 900 m,盾构机已顺利破除洞门和穿越长江大堤,预计到 2009 年元月即可实现贯通。

#### 参考文献

[1] 孙 钧,刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J]. 同济大学学报,自然科学版. 2002, 30(4): 379 - 385

[2] 张海波,殷宗泽,朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2005, 24(5): 755 - 760

[3] Maynar M M, Rodriguez L M. Predicted versus measured soil movements induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42: 1160 - 1172

[4] Construction (daub) G C F U. Recommendations for design and operation of shield machines[J]. tunnel, 2005, (7): 54 - 76

[5] Broere W, Brinkgreve R B J. Phased Simulation of a Tunnel Boring Process in Soft Soil[C]. Paris: 2002

[6] Kasper T, Meschke G. A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2004, 28(14): 1441 - 1460

[7] Kasper T, Meschke G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2006, 21(2): 160 - 171

[8] Franzius J N, Potts D M. Influence of Mesh Geometry on Three - Dimensional Finite - Element Analysis of Tunnel Excavation[J]. International Journal of Geomechanics. 2005, 5(3): 256 - 266

[9] 张学言. 岩土塑性力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993

[10] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 中国铁道出版社, 1991

## Research on the application of quantitative engineering in risk identification and prevention in Nanjing Yangtze River Tunnel project

Qian Wei<sup>1</sup>, Jin Xianlong<sup>2</sup>, Shen Jianqi<sup>2</sup>

(1. Nanjing Municipal Development & Reform Commission, Nanjing 210008, China;

2. High Performance Computing Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

[Abstract] In Nanjing Yangtze river tunnel project, quantitative engineering was applied to identify and prevent the risk. The numerical simulation method and supercomputing were employed to model the tunneling process in key sections. These key sections including departure and reception of shield machine, crossing flood levee, tunneling through river bed with shallow cover, interaction between two working shield machines, tunneling through composite soil layers were modeled according to the real geological profile. Quantitative analysis of the numerical results forecasted the risks in ground settlements, behavior of shield machine, and stability of cutting face, etc. The causes and consequences of the risks were discussed. After that, methods to prevent the risks were proposed, evaluated, and validated.

[Key words] Nanjing Yangtze River Tunnel; quantitative engineering and technology; risk identification and prevention