

# 南京玄武湖下盾构过富水断裂施工的安全性评价

倪宏革<sup>1</sup> 罗国煜<sup>2</sup> 汪青葆<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中南大学铁道校区土建学院岩土室 长沙 410075) (<sup>2</sup>南京大学 南京 210093) (<sup>3</sup>南京地铁公司 南京 210024)

**摘要** 盾构在湖下松软层中通过,受到基岩深断裂承压水的威胁,这类施工难题尚未见报道。计算了南京玄武湖水下隧道盾构施工对其底部岩土层的扰动范围,认为采用泥水平衡盾构法施工比较安全;同时结合地质机制分析,运用 Ritz 法和虚功原理法建立了相应的底板突水预测综合判据,其结果可供类似条件下盾构施工设计参考。

**关键词** 泥水平衡盾构,水底隧道,富水断裂,安全

**分类号** U 455.43 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2001)03-0350-05

## 1 引言

玄武湖位于南京快速内环线以内的市中心地区,南北长为 3 km,东西宽为 2.1 km,湖面宽阔,风光秀丽,湖中四岛:梁洲、翠洲、樱洲、菱洲是南京著名旅游胜地。近年来,随着城市交通的日益繁忙,急需建设一条穿越湖底的东西向水下隧道。隧道通过湖下松软地层,受到基岩深断裂承压水的威胁,这类施工难题尚未见报道。由此对该隧道施工方案及环境效应进行评价成为重要课题<sup>[1]</sup>。本文对此进行了研究,研究结果可供类似条件下施工设计参考。

## 2 制约隧道建设的主要地质环境因素及施工方案的确立

城市水下交通隧道,既在城市,又在水下,是脆弱环境下典型地质工程。脆弱环境有两层含义:一是指玄武湖复杂的易受扰动影响的岩土水体;二是城市中心区易受施工损伤的多类因素,如高层建筑、地铁、地下管线、风景点等。

地质环境因素体现在:

(1) 土体种类分布不均,稳定性差。贯穿隧道全线的饱和粉砂、粉土和淤泥夹粉砂层,厚达 35~45 m,呈流塑~软塑状,易造成基坑翻砂涌水,不均匀沉降过大,连续挡土墙或锚索无处生根,或生根过深地压大,引起倾覆失稳。

(2) 三类水体威胁。湖水、湖区内大范围的地下

古河道水(与长江水贯通,补给条件好,微承压<sup>[2]</sup>)、下伏基岩水。湖中心巨大的基岩 F<sub>2</sub> 深断裂,在空间上与水底隧道正交,其切割基岩(闪长玢岩)深度为 20 km,张扭性,断面产状陡立,最新活动时代为燕山期晚期<sup>[3]</sup>。据优势面理论分析,初步确定它为具有一定承压性的富水优势断裂<sup>[4]</sup>,其对隧道工程底板突水有潜在威胁。

考虑到采用明挖搅拌桩挡土墙或锚喷网护降水等法施工,困难较大且对湖区人文环境及市中心环境影响大,决定选用对湖下软土层扰动小,对地面环境基本无影响的泥水平衡盾构法施工。根据湖底土层厚度及交通规则要求,参照上海延安东路复线隧道过黄浦江下施工经验<sup>[5]</sup>,选用盾构机型的直径为 11.22 m,能够保证盾构顶湖水作业和穿过古河道饱水土层区施工的安全。这样,盾构过富水 F<sub>2</sub> 断裂施工是否造成突水事故成为问题的焦点。

## 3 盾构过富水优势断裂突水危险性研究

盾构过富水优势 F<sub>2</sub> 断裂突水可能性研究应从三个步骤入手,首先是盾构在湖下古河道中施工对底部岩土层扰动范围计算,如扰动破坏区不致触及基岩,可认为施工安全;反之则需进一步研究基岩隔水带的物理力学性质、分布状况等,此为第二步地质机理研究;第三步为根据上述地质机制分析,建立适合于底板突水计算的力学模型进行解析计算,以确定隔水层厚度与极限承压水压之间的定量表达式。

2000年9月8日收到初稿,2000年10月27日收到修改稿。

作者 倪宏革 简介:男,34岁,1999年于南京大学水文工程地质专业获博士学位,现任讲师,主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。

### 3.1 盾构施工对底部岩土层扰动范围的确定

考虑到有限元在模拟泥水盾构施工中选取地层物理力学特性参数以及开挖面泥水压力和开挖面释放应力参数的模糊性和不确定性,按由众多施工监测结果总结的公式来对盾构施工基底扰动范围进行粗略的确定。

泥水盾构在湖下古河道软土层中施工所需的土层不排水抗剪强度为 28 ~ 120 kPa,在未受扰动时具有一定刚性。但盾构施工对土体扰动所引起的土体应力、应变和位移足以破坏土的抗剪强度,而在隧道周围形成一定范围的塑性区。在不良的施工条件和软弱灵敏性的淤泥质土层中受扰动塑性区的直径可达隧道直径的几倍。塑性区半径  $R_p$  是隧道开挖半径  $R$ 、隧道中心埋深  $Z$ 、盾构机头泥水平衡压力  $P_i$  以及土体不排水抗剪强度  $S_u$  的函数<sup>[6]</sup>。当  $\gamma = 0$  时,  $R_p$  为

$$R_p = R \exp \frac{cZ - P_i - S_u}{2S_u} \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为盾构中心上覆土容重。

泥水平衡盾构以其对灵敏软土层施工扰动影响小而著称,玄武湖下使用直径为 11.22 m 的泥水盾构机型进行施工,正常情况下,其开挖面土体稳定系数  $N_t$  应为 1 ~ 3。

$$\text{即 } 1 < N_t = \frac{P_z - P_i}{S_u} < 3 \quad \text{且 } P_z = cZ$$

则

$$S_u < \frac{P_z - P_i}{2S_u} \quad (2)$$

将不等式(2)代入式(1)得

$$1 < \frac{R_p}{R} < 2.72$$

由于  $R = \frac{11.22}{2} = 5.61 \text{ m}$ , 则施工时扰动围岩

$R_p$  值为

$$5.61 \text{ m} < R_p < 15.3 \text{ m}$$

这样求得泥水盾构经过  $F_2$  富水优势断裂施工时,对其底部软土层最大可能的施工扰动深度约为 15.3 m。

考虑到  $F_2$  断裂露头处理深为 38 ~ 41 m,而盾构顶距湖底为 10 m,盾构直径为 11.22 m,底部扰动深度为 15.3 m,共计 36.52 m,略小于  $F_2$  断裂埋深,说明正常情况下,采用泥水平衡盾构施工不会对  $F_2$  断裂产生较大扰动,施工较为安全。

### 3.2 盾构施工扰动较大时底板富水优势断裂突水预测

当泥水平衡盾构施工时,由于突发因素(如操作不当、地质条件突变等)影响,盾构开挖面土体稳定

系数  $N_t$  可能超过 3,这时,施工将对基岩  $F_2$  断裂带产生扰动破坏,假设盾构底部至  $F_2$  断裂承压水头  $P$  的距离为  $h$ ,盾构施工造成底部的扰动破坏范围深入到断裂带,达  $h_1$  厚度。这样可建立力学模型对突水危险性进行分析。

(1) 地质机制分析 玄武湖基底闪长玢岩中  $F_2$  张扭性断裂,规模巨大,其断裂破碎带较宽,一般由碎块状断层角砾岩及压碎岩构成。角砾岩呈棱角状和次棱角状,伴有粉末状物质,形成时胶结不好,孔隙率高,透水性良好,含水丰富,但随着地质年代的推移,破碎带内物质逐渐胶结,形成泥夹块、块夹泥的致密均一各向同性体,可将其看成为一块均质厚板。燕山运动后,随着地壳的抬升,闪长玢岩受到风化,而  $F_2$  断裂构造带处由于相对破碎,则风化更甚,风化结果使其形成大量的阻水物质,如长石类矿物转变为高岭石、蒙脱石等。这样这块厚板的上半部分又变为一块具隔水功能的薄板。假设盾构施工造成这块薄板的一部分破坏,失去隔水功能,如图 1(a),那么仍具有隔水功能的部分厚度变为  $h - h_1$ ,薄板底部承受  $F_2$  富水优势断裂的水压  $P$  作用。可以把底板隔水带  $h - h_1$  看成是四边固支的矩形平板,板的上部受盾构底部扰动破坏带重力  $\gamma h_1$  的作用,隔水带的体力看成是以  $(h - h_1)$  作用于板面的面力,如图 1(d)所示。

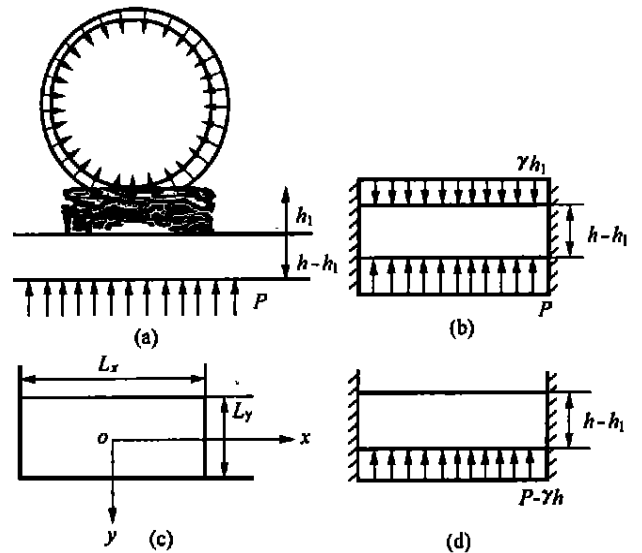


图 1 底板隔水带的力学模型

Fig. 1 Mechanics model of water-resisting zone in floor

由于底板隔水带未受到施工破坏,可看成是连续介质,且是均质各向同性的,符合弹塑性力学的假设条件。将板的理论应用于底板隔水带的计算中,应区分隔水带是属于薄板还是厚板。从板的理论可知,厚板理论在力学上尚不成熟,还没有得到考虑

各种边界条件的严格解。并且，即使板很厚时，可以取板中较厚的一层关键层进行分析，应用薄板理论能给出足够精确的解。所以，本次计算采用薄板理论。

(2) 底板隔水带的弹性理论解 对于四边固支受均布载荷  $q = p - h$  作用的矩形薄板可以采用 Ritz 法求解<sup>[7]</sup>。

假设板中面的挠曲函数为

$$W(x, y) = \frac{W_{mn}}{4} [1 - (-1)^m \cos \frac{2m-x}{L_x}] \cdot [1 - (-1)^n \cos \frac{2n-y}{L_y}] \quad (m = n = 1, 3, 5, \dots) \quad (3)$$

上式能够满足固支板的边界条件。

由于级数式(3)收敛很快，为了简化计算仅取式中的第一项 ( $m = n = 1$ )，它能满足精度要求。因此

$$W = \frac{W_{11}}{4} (1 + \cos \frac{2-x}{L_x}) (1 + \cos \frac{2-y}{L_y}) = W_{11} \cos^2 \frac{x}{L_x} \cos^2 \frac{y}{L_y} \quad (4)$$

所以，可以求得板挠曲时的应变能为

$$U = \frac{D}{2} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} (\nabla^2 W)^2 dx dy = \frac{D}{8} W_{11}^2 \left( \frac{3L_x^4}{L_x} + \frac{3L_y^4}{L_y} + \frac{2}{L_x L_y} \right)$$

外力势能为

$$V = -q \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} W dx dy = -\frac{1}{4} q W_{11} L_x L_y$$

由最小势能原理  $\frac{\partial(U+V)}{\partial W_{11}} = 0$ ，得

$$W_{11} = \frac{qL_x^4}{D^4 (3 + 3L_x^4/L_y^4 + 2L_x^2/L_y^2)}$$

将  $W_{11}$  代入式(4)，可得板中面的挠曲函数

$$W_{11} = \frac{qL_x^4 L_y^4}{D^4 [3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2]} \cos^2 \frac{x}{L_x} \cos^2 \frac{y}{L_y} \quad (5)$$

式中： $D$  为板的抗弯刚度， $D = \frac{E(h-h_1)^3}{12(1-\nu^2)}$ 。

从弹性理论可知，应力与挠曲函数的关系为

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{EZ}{1-\nu^2} \left\{ \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right\} \\ y &= \frac{EZ}{1-\nu^2} \left\{ \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right\} \\ xy &= \frac{EZ}{1-\nu^2} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \\ z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)即可得到底板隔水带内部的应力

表达式：

$$\left. \begin{aligned} x &= A \left\{ L_y^2 \cos \frac{2-x}{L_x} \cos^2 \frac{y}{L_y} + L_x^2 \cos \frac{2-y}{L_y} \cos^2 \frac{x}{L_x} \right\} \\ y &= A \left\{ L_y^2 \cos \frac{2-y}{L_y} \cos^2 \frac{x}{L_x} + L_x^2 \cos \frac{2-x}{L_x} \cos^2 \frac{y}{L_y} \right\} \\ xy &= \frac{1-\nu}{2} A \sin \frac{2-x}{L_x} \sin \frac{2-y}{L_y} \\ z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

通过式(7)即可求得底板岩体内部任意一点的应力值。通过计算可求出板中的最大主应力

$$\left. \begin{aligned} 1 &= \frac{12L_x^2 L_y^2 (L_x^2 + L_y^2) q}{2[3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2] (h-h_1)^2} \\ 2 &= \frac{12L_x^2 L_y^2 (L_y^2 + L_x^2) q}{2[3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2] (h-h_1)^2} \\ 3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据 H. Tresca 屈服准则，当板的危险点产生屈服时，主应力满足下式：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\sigma_0$$

将式(8)代入上式得

$$\frac{12L_x^2 L_y^2 (L_x^2 + L_y^2) q}{2[3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2] (h-h_1)^2} = 2\sigma_0$$

将  $q = p - h$  代入上式，可得底板所能承受的水压与隔水带各参数的力学关系式为

$$p_{10} = A_{10} (h-h_1)^2 \sigma_0 + h \quad (9)$$

式中： $A_{10} = \frac{2[3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2]}{6L_x^2 L_y^2 (L_x^2 + L_y^2)}$ ；

$p_{10}$  为底板所能承受的极限水压力；

$\sigma_0$  为底板岩层的平均抗剪强度；

$h_1$  为底板破坏导水裂隙带深度；

$h$  为底板岩层的厚度；

$\nu$  分别为底板岩层的容重及泊松比；

$L_x, L_y$  分别为盾构外径和长度， $L_x = \max(L_x, L_y)$ 。

从式(9)可知，底板所能承受的极限水压与底板岩层厚度成抛物线关系。

(3) 底板隔水带的塑性理论解 当底板隔水带处于将要破坏的极限状态时，可以采用塑性理论中板的极限分析法求其极限承载力。当隔水带达到破坏的极限状态时，形成图 2 所示的塑铰线(图 2(a)中的虚线及四个固支边)。图中  $x$  为未知数，假设线段  $A_1 A_2$  的挠度为 1。

由塑性理论可知，板将首先在塑铰线处破坏，但板在破坏前的瞬时仍处于平衡状态，因而可用虚功原理求解<sup>[8]</sup>。

外力总虚功等于图 2 中“四坡顶”的体积乘以均布载荷  $q$ , 即

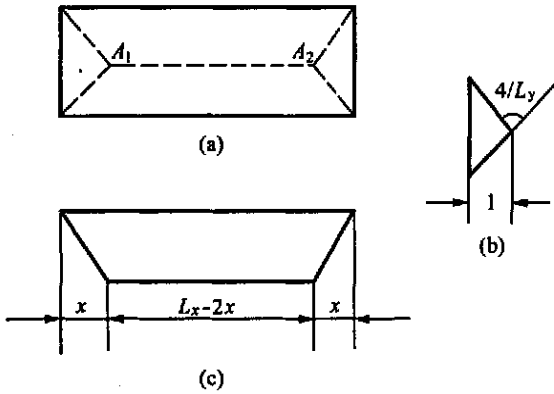


图 2 隔水带破坏时的塑铰线

Fig. 2 Plastic hinge line during fracture of water-resisting zone

$$V = \frac{2}{3} qL_y x + \frac{1}{2} L_y (L_x - 2x) q$$

总虚功应变能为塑铰线所做功的和, 计算后得

$$U = 8(L_y/2x + L_x/L_y) M_0$$

根据虚功原理  $V = U$ , 得

$$q = \frac{24(L_y^2 + 2xL_x) M_0}{L_y^2 x (3L_x - 2x)}$$

上式中的  $x$  由最小外载条件决定, 令  $dq/dx = 0$  得

$$x = L_y [ -L_y/L_x + \sqrt{(L_y/L_x)^2 + 3} ] / 2$$

因而, 可得到板所承受的极限载荷为

$$q = \frac{48L_x^2 M_0}{L_y^2 (\sqrt{L_y^2 + 3L_x^2} - L_y)^2}$$

将  $M_0 = S_t (h - h_1)^2 / 4$  及  $q = p - h$  代入上式, 可得底板所能承受的极限水压力  $p_{20}$ 。

$$p_{20} = A_{20} (h - h_1)^2 S_t + h \quad (10)$$

$$A_{20} = \frac{12L_x^2}{L_y^2 (\sqrt{L_y^2 + 3L_x^2} - L_y)^2}$$

式中:  $S_t$  为底板岩体的平均抗拉强度。

以上是采用弹塑性力学理论分别得出了以底板岩层抗剪及抗拉强度为基准的预测底板所能承受的极限水压力的计算公式, 可以看出, 两个公式形式上是相似的。

综合以上的分析可以得出, 为保证富水优势断裂承压水上盾构的安全施工,  $F_2$  断裂风化层所能够承受的极限水压力应大于其所承受的实际水压力

( $p$ ), 即

$$p_1 = A_1 (h - h_1)^2 + h > p \quad (11)$$

$$p_2 = A_2 (h - h_1)^2 S_t + h > p \quad (12)$$

上述两式即为底板突水预测的综合判据。当上述两式同时满足时不会发生底板突水, 否则发生底板突水。

## 4 结论和建议

(1) 计算结果表明, 泥水盾构过  $F_2$  富水优势断裂施工时, 对其底部软土层最大可能施工扰动深度约 15.3 m, 正常情况下, 泥水盾构施工不会对  $F_2$  断裂产生较大扰动, 施工较为安全。盾构在湖下施工时, 经过该断裂段应认真操作, 减少对基岩面的应力扰动, 同时加强施工前勘探, 详细摸清该段处水压状况, 其补给来源、径流情况, 必要时有针对性地注浆堵截封死其径流路径, 或对基岩风化带进行注浆加固, 以防基底突水造成施工事故。

(2) 盾构施工扰动较大时, 底板富水优势断裂突水预测可通过地质机制分析, 将断裂带中底板隔水带视为四边固支的矩形平板, 分别用 Ritz 法求其弹性理论解, 虚功原理法求其塑性理论解, 再取两者的极限解, 即为判断是否突水依据, 该过程力学概念和地质概念明确, 所需参数较少, 便于类似条件下推广使用。

(3) 本文研究结果对规划中的南京地铁二号环线过玄武湖古河道的设计施工具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 南京大学地球科学系. 玄武湖水下交通隧道方案工程地质分析 [R]. 南京: 1999
- 2 魏 琅. 南京地铁古河道区初步研究 [A]. 见: 南京地铁线路规划资料汇编 [C]. 南京: 南京大学出版社, 1987, 24~28
- 3 罗国煜, 王培清. 略论南京地铁建设工程地质研究的几个问题 [A]. 见: 南京地铁线路规划资料汇编 [C]. 南京: 南京大学出版社, 1987, 48~55
- 4 倪宏革. 城市地下工程的环境岩土工程研究 [博士学位论文] [D]. 南京大学地球科学系, 1999, 28~32
- 5 郑贤仁, 翁可儿. 延安东路隧道施工技术综述 [A]. 见: 软土地下工程施工技术论文集 [C]. 上海: 同济大学出版社, 1996
- 6 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991
- 7 铁摩辛柯, 古地尔. 弹性力学 [M]. 徐芝纶译. 北京: 高等教育出版社, 1978
- 8 Save M A, Massonnet C E. Plastic analysis and design of plates, shells and disks [J]. NHPG, 1972, 18(2): 107~116

## SAFETY VALUATION ON CONSTRUCTION OF SHIELD ACROSS THE WATERY FAULT UNDER NANJING XUANWU LAKE

Ni Hongge<sup>1</sup>, Luo Guoyu<sup>2</sup>, Wang Qingbao<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> College of Resources, Environment and Engineering, Central South University, Changsha 410075 China)

(<sup>2</sup> Nanjing University, Nanjing 210093 China) (<sup>3</sup> Nanjing Metro Engineering Company, Nanjing 210024 China)

**Abstract** The problem about the construction of shield menaced by confined water in prefound base rift across soft strata under the lake has not been reported. The extent of the floor strata disturbed by shield constructing under Nanjing Xuanwu Lake is calculated. The shield with balance of earth and water is fixed to make it safe to construct tunnel. An analysis is made on the geological mechanism, and the corresponding comprehensive criterion is found to forecast water irruption in floor with the laws of Ritz and principle of virtual work.

**Key words** shield with balance of earth and water, subwater tunnel, watery fault, safety

## 岩土力学中的几类非线性问题

郑 宏

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

**博士学位论文摘要** 研究了岩土力学中的一些经典非线性问题,其中,第2,3章分别是针对界面问题 and 无压渗流问题,属于几何非线性问题;而第4~6章则是关于弹塑性和弹脆塑性方面的问题,属于材料非线性问题。

第2章导出了界面问题的混合有限元法,就岩土力学中的一些特殊的技术性难题,如大面积、非光滑接触问题、刚体自由度问题以及病态问题等给出了相应的解决方案。对混合型提法在数学上的适定性也进行了详细的讨论。

第3章研究了无压渗流问题,亦即有自由面的渗流问题。经典的无压渗流问题要求自由面上每一点的压力和流量分布都为零,但是现在的数值方法没有一个能够精确满足后一条件。基于对渗流过程的分析,建议了无压渗流问题的一个弱形式,仅把自由面上的流量分布为零这一条件改为通过自由面的总流量为零。然后将弱问题的解定义为在满足所有弱形式的函数中具有最小流动区域的那个函数。从数学上严格证明了该弱问题是适定的,并基于变分不等式理论给出了一整套非常有效的解法。

第4,5章都是针对弹塑性问题的。第4章建立了弹塑性本构积分的自适应方法,利用这一方法可有效地控制本构积分的误差,并相应地提高了平衡迭代的收敛性。第5章利用不动点迭代的 Steffensen 加速方法构造了一个基于常刚度的平衡迭代格式。不同于其他加速方法,本章所建议的方法在理论上是一个二阶方法。

第6章详细讨论了脆塑性体的宏观本构理论和稳定性理论,并给出了相应的数值方法。

**关键词** 数值方法,非线性问题,有限元,岩土力学

## SOME NONLINEAR PROBLEMS IN GEOMECHANICS

Zheng Hong

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

2000年12月1日收到修改稿。

作者 郑 宏 简介:男,1964年生,2000年11月在中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位,导师是葛修润院士(中国科学院武汉岩土力学研究所)和李焯芬教授(香港大学土木工程系);现在中国科学院武汉岩土力学研究所工作,主要从事岩土力学数值方法的研究。