

# 大断面深埋高水压盾构隧道实测内力反算与分析

周顺华<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1,2</sup>, 李雪<sup>1,3</sup>, 金浩<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 3. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 结合南京地铁 3 号线大直径盾构隧道工程, 对隧道管片钢筋应变进行了现场测试, 基于既有的管片内力反算方法, 考虑混凝土非线性性质及管片接头, 提出了适用于深埋高水压盾构隧道的内力改进算法, 并对改进算法反算内力与结构设计计算内力进行了对比分析. 结果表明: 改进算法更能反映管片的实际受力状态, 更适用于荷载模式复杂且接头传力机制多变的大断面深埋高水压盾构隧道; 采用设计方法计算的深埋高水压盾构隧道管片及接头内力与改进算法反算内力的分布规律基本一致, 但在量值上具有一定的差异; 采用设计方法计算的管片及接头轴力为改进算法反算轴力的 1/2 左右, 反算的管片弯矩在拱底位置与惯用法计算弯矩接近, 在拱腰及拱顶位置与梁-弹簧法更为接近, 反算的接头弯矩大于梁-弹簧模型计算接头弯矩. 研究成果可为大直径深埋盾构隧道设计提供参考.

**关键词:** 盾构隧道; 现场监测; 实测应变; 管片内力反算

**中图分类号:** TU921

**文献标志码:** A

## Reverse Calculation and Analysis of Measured Internal Force of Deeply Buried Shield Tunnels with Large Cross-section Under High Water Pressure Conditions

ZHOU Shunhua<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1,2</sup>, LI Xue<sup>1,3</sup>, JIN Hao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute(Group)Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** A field monitoring program was performed to measure the steel strain in segments of a shield tunnel deeply buried with high pore water pressure of Nanjing Metro Line 3 project. Concerning the nonlinear properties of concrete and segment joint of tunnel, an improved algorithm was proposed to compute the internal forces of deeply buried shield tunnels

under high water pressures based on three existing reverse calculation methods, and the results were compared to the ones computed in structural design. The results show that the improved algorithm can reflect the actual stress state of segments, especially the lining of shield tunnels deeply buried with high pore pressure; the distribution of internal forces calculated in design is almost equal to the one computed by the improved algorithm, but there are some quantitative discrepancies; the axial forces of segments and joints calculated in structural design are approximately half of the back-calculation results; the bending moments of segments calculated by the proposed algorithm are close to the results of the modified routine method at the bottom of the tunnel while approximate the results of the beam-spring model at the roof and haunch of the tunnel, and the bending moments of segment joints are greater than the results of the beam-spring model. The insights provided from this study can contribute to the improvement of large-section shield lining design.

**Key words:** shield tunnel; field monitoring; measured steel strain; reverse calculation of internal force in segments

为了解隧道真实的受力变形状态, 许多工程都对盾构隧道的土压力、管片内力及管片变形情况进行现场量测, 以评价结构的安全与稳定性. 对于断面较大且荷载模式复杂的深埋高水压盾构隧道, 合理计算评价衬砌结构的水-土压力及管片内力尤为重要.

对于盾构隧道管片的现场试验及内力反算研究, 国内外学者已取得了较多成果. 唐孟雄等<sup>[1]</sup>以广州地铁 2 号线赤岗—鹭江盾构区间为背景, 量测了隧道管片从拼装阶段至变形稳定阶段的钢筋应变, 分析了外径为 6 m、埋深在 8~16 m 且位于半岩半土的盾构隧道管片在不同工况下的受力特性. 周济

收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51478353)

第一作者: 周顺华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通工程. E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘畅(1990—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为岩土工程和隧道工程. E-mail: lcdhjh@sina.cn

民等<sup>[2]</sup>以直径为 6 m 的西安地铁 2 号线穿越老黄土地层盾构隧道为研究对象,利用中埋段管片土压力盒及钢筋计的现场实测数据分析了施工过程中盾构机动态掘进及后期稳定后的土-水压力对管片结构受力的影响.吴世明等<sup>[3]</sup>对杭州庆春路大直径过江盾构隧道的管片进行长期健康监测,得到穿越砂性土层大断面浅埋高水压盾构隧道在运营期的横断面受力和变形特性,分析了隧道上部潮位变化和河床冲刷对隧道管片钢筋内力的影响.此外,何川等<sup>[4]</sup>、廖少明等<sup>[5]</sup>、Li X 等<sup>[6]</sup>、张君禄等<sup>[7]</sup>均对盾构隧道管片实测内力进行了研究,但多数都以小断面浅中埋盾构隧道为研究对象,各隧道所处地层也各有不同,而且以上学者均没有对根据现场实测钢筋应变反算管片内力的问题进行深入讨论.

目前,基于实测钢筋应变反算盾构管片内力的计算方法主要有 3 种,分别为张厚美<sup>[8]</sup>提出的偏压短柱法、钟小春<sup>[9]</sup>提出的薄壳法,以及 Emilio Bilotta<sup>[10]</sup>的简化算法.以上 3 种方法均取单环管片

微段作为计算单元,不考虑管片的弧度并忽略管片外侧的水-土压力.此外,3 种方法均假设管片处于弹性受力状态,管片截面的混凝土应力呈线性分布,且钢筋与混凝土不发生相对滑移.表 1 总结了 3 种反算方法的反算模型、基本假定及反算原理,并给出了管片内力反算公式.表中: $b$ 、 $h$  分别为管片的宽度和厚度; $a$ 、 $a'$  分别为钢筋内、外侧保护层厚度; $A$  为管片横截面面积; $A'_{s1}$ 、 $A'_{s2}$  分别为管片内、外侧环向主筋截面积; $\mu$  为混凝土泊松比; $E_c$  为混凝土的弹性模量; $I$  为管片横截面惯性矩; $n$  为管片内(外)侧环向主筋数量; $N$ 、 $M$  分别为管片轴力及弯矩; $\sigma_x$  为管片横截面混凝土正应力; $\sigma_s$ 、 $\epsilon_s$  分别为钢筋应力及应变; $\sigma_c$ 、 $\epsilon_c$  分别为混凝土应力及应变; $\sigma_{c1}$ 、 $\sigma_{c2}$  分别为管片内、外侧钢筋位置处的混凝土应力; $\sigma_{s1}$ 、 $\sigma_{s2}$  分别为管片内、外侧钢筋应力; $P_1$ 、 $P_2$  分别为管片内、外侧单根钢筋集中力; $P_c$  为管片截面混凝土应力合力; $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别为管片内、外侧钢筋应变.

表 2 管片内力反算方法汇总

Tab.1 Reverse calculation methods

方法	反算模型	基本假定及反算原理	反算公式
偏压短柱法		将隧道衬砌考虑成偏心受压短柱,考虑钢筋的作用; 钢筋的应力-应变关系呈线性; 混凝土应力-应变关系为线性或非线性; 建立力与力矩平衡方程: $\sum X = 0$ , $\sum M = 0$	$N = \frac{1}{2}(\sigma_{c1} + \sigma_{c2})A + \sigma_{s1}A'_{s1} + \sigma_{s2}A'_{s2}$ $M = n(P_2 - P_1) \left( \frac{h}{2} - a' \right) \pm \frac{1}{6}hP_c$ 管片外侧钢筋压应变大于内侧钢筋时取“+”,反之取“-”. $P_c = \frac{1}{2}(\sigma_{c1} + \sigma_{c2})A$
薄壳法		将隧道衬砌考虑成纵向无限长的混凝土薄壳,忽略钢筋; 钢筋和混凝土应力-应变关系都呈线性; 引入两个边界条件: $\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x b dy = N$ , $\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x b y dy = M$	$N = \frac{E_c b h}{2(1-\nu^2)}$ $\left[ \epsilon_1 + \epsilon_2 + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{h-a-a'}(a-a') \right] M =$ $\frac{E_c b h^2}{12(1-\nu^2)} \left[ \epsilon_2 - \epsilon_1 + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{h-a-a'}(a+a') \right]$
简化法		将隧道衬砌考虑成线弹性梁,忽略钢筋; 钢筋和混凝土应力-应变关系都呈线性; 总变形为轴向压缩变形和弯曲变形的组合,则任一点 O 的正应力为: $\sigma_x = \frac{N}{A} \pm \frac{M y}{I}$	$N = E_c A \frac{\epsilon_1 \left( \frac{h}{2} - a' \right) + \epsilon_2 \left( \frac{h}{2} - a \right)}{h - a - a'}$ $M = E_c I \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{h - a - a'} \right)$

其中,偏压短柱法考虑了管片中钢筋的作用,其反算模型与管片的实际受力情况比较接近.薄壳法和简化法都忽略了钢筋,但反算模型简单明确,内力反算公式也更为简洁.然而,采用以上 3 种方法反算的管片内力是否有较大差异,应采用哪种方法反算

大断面深埋高水压盾构隧道的管片内力,尚未有学者进行过深入研究.

本文依托南京地铁 3 号线大直径盾构隧道工程,对隧道管片钢筋应变进行了现场测试,基于已有的 3 种管片内力反算方法,考虑混凝土的非线性性

质及管片接头,提出了适用于深埋高水压盾构隧道的内力改进算法,并对改进算法反算内力与惯用法、梁-弹簧法计算内力进行了对比分析,研究成果可为后续类似大直径盾构隧道设计提供参考。

### 1 工程背景

南京地铁 3 号线穿越长江段,为了避免江底联

络通道的施工风险,将常规的 2 个  $\phi 6.2\text{ m}$  的并行盾构隧道改为 1 个  $\phi 11.2\text{ m}$  的单洞双线大直径盾构隧道,区间线路全长约 3.3 km,江中段长约 2.1 km,线路纵断面如图 1 所示. 全线覆土变化大,隧道最大埋深达 40 m,在 300 年一遇的冲刷条件下,江底深切槽段隧道埋深仅有 5 m,沿线水头压力高,隧顶最高水压达 0.6 MPa.

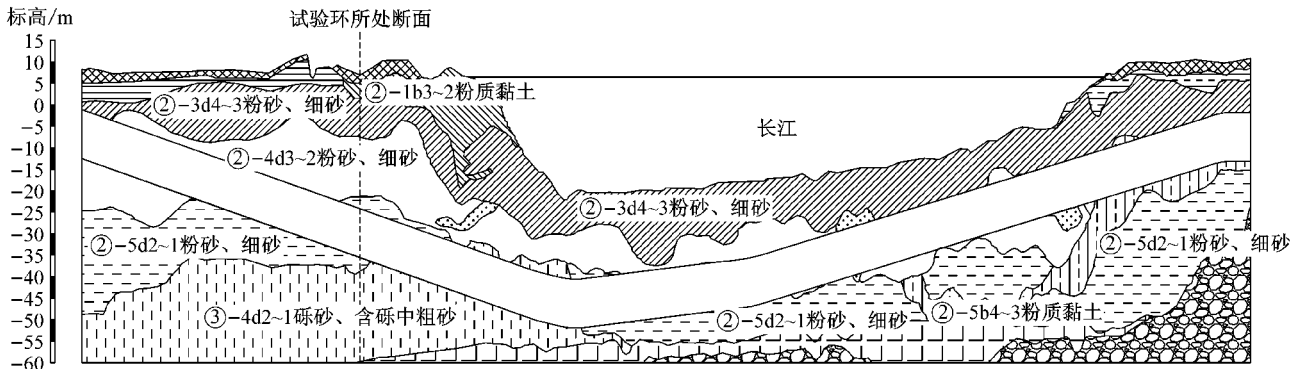


图 1 南京地铁 3 号线穿越长江段区间隧道纵断面图

Fig.1 Longitudinal section of Yangtze River tunnel in Nanjing Metro Line 3

为了反算与分析大断面深埋高水压盾构隧道的管片内力大小及分布,在试验环管片内埋设了钢筋计,现场对试验环管片钢筋应变进行长期监测. 试验环所处地质断面如图 2 所示,隧顶上覆土埋深  $h_0$  为 34.0 m,隧顶地下水位高度  $h_w$  为 30.7 m,该断面位置处隧顶埋深与盾构衬砌外径之比高达 3,隧顶静水压力高达 0.3 MPa,盾构穿越土层主要为粉细砂,相应地层主要物理力学指标如表 2 所示.

隧道管片采用 C60 混凝土预制,管片宽度 2 m,厚度 0.5 m,每环管片由 5 块标准块(SB)+2 块邻接块(SL)+1 块封顶块(SF)组成,纵缝接头采用 2 根 T36 螺栓连接,纵向错缝拼装,环缝接头采用 33 根 T30 螺栓连接,管片材料参数见表 3. 试验环钢筋

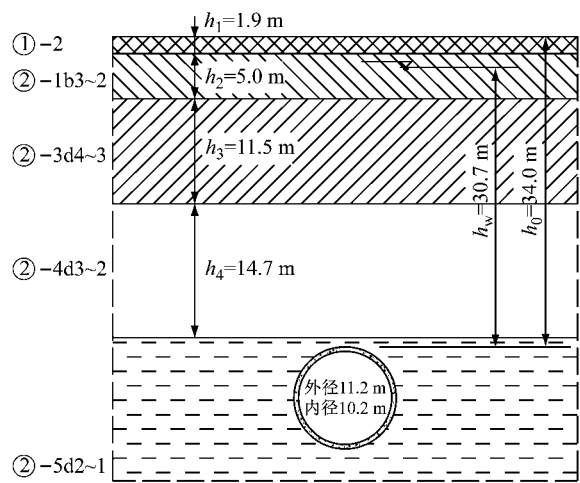


图 2 试验环地质断面图

Fig.2 Geological profile of monitoring section

表 2 地层主要物理力学指标

Tab.2 Physico-mechanical indexes of soils

土层	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	含水率/ %	孔隙比	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	基本承载力/ kPa
①-2 素填土	19.2	27.3	0.795	9.98	22	22.3	—
②-1b3~2 粉土	19.1	32.5	0.893	4.17	20	11.7	110
②-3d4~3 粉砂、细砂	19.5	24.8	0.717	14.68	11	31.4	110
②-4d3~2 粉砂、细砂	19.3	25.0	0.734	14.78	10	31.3	160
②-5d2~1 粉砂、细砂	19.5	23.9	0.705	14.32	11	31.5	190

计(D)布置于管片内、外侧环向主筋位置,封顶块 2 个,其余每块 6 个,总计 44 个,试验环管片分块方式

及钢筋计布置如图 3 和图 4 所示.

钢筋计成对布置,分别焊接于管片内侧及外侧

表 3 管片材料参数

Tab. 3 Parameters of segment material

参数	取值
形心半径 $R_c/m$	5.35
管片厚度 $h/m$	0.5
管片宽度 $b$	2
横截面面积 $A/m^2$	1.0
管片混凝土弹性模量 $E_c/GPa$	36
混凝土峰值应变 $\epsilon_0$	0.002
管片横截面惯性矩 $I/m^4$	$2.083 \times 10^{-2}$
混凝土抗压强度 $f_c/MPa$	27.5
混凝土泊松比 $\mu$	0.167
钢筋保护层厚度 $a(a')/mm$	60
管片内(外)侧环向主筋直径 $d/mm$	25
管片内(外)侧环向主筋数量 $n$	20
钢筋弹性模量 $E_s/GPa$	210

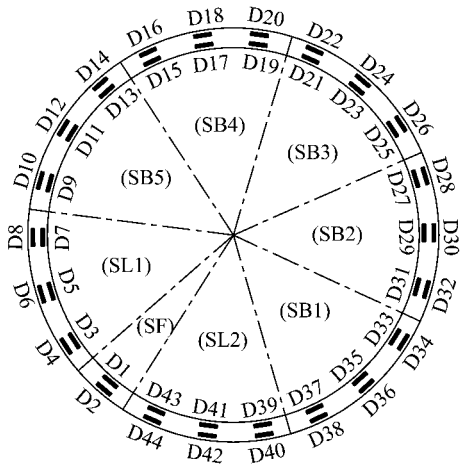


图 3 试验环管片测点布置示意图

Fig.3 Layout of strain gauge in testing segment

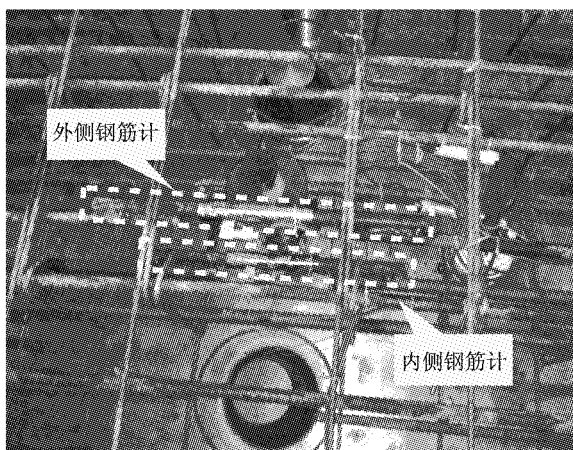


图 4 管片浇筑前钢筋计安装图

Fig.4 Installation of reinforcement meters

主筋位置,当作主筋的一段,焊接过程中须对钢筋计焊接端进行淋水冷却,以免仪器过热损坏.电子设备对传感器的测量数据进行定时自动采集,并计算显示出各测点的钢筋应变值,后存贮于数据库中.

## 2 大断面深埋高水压盾构隧道管片及接头内力反算方法

由于本工程为深埋高水压盾构隧道,衬砌所受的水土压力较大,分布也更为复杂,管片混凝土及钢筋会产生较大的内力与形变,因此改进算法沿用了偏压短柱法的反算模型,考虑了管片中钢筋的作用.

为了更真实地反映管片的实际受力状态,还应考虑混凝土的非线性特性.虽然偏压短柱法可以将混凝土的应力-应变关系视为非线性,但根据平截面假定,管片截面压应力也应为非线性分布,这与其反算模型假设管片截面应力呈线性分布相矛盾.因此,对偏压短柱法的反算模型进行了改进,如图 5 所示,认为混凝土轴心受压应力-应变关系曲线上升段为抛物线,即  $\epsilon_c \leq \epsilon_0$  时,混凝土应力-应变关系为

$$\sigma_c = f_c \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

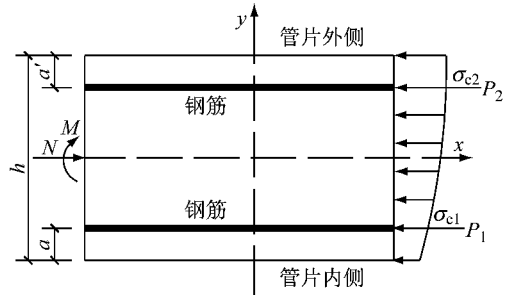


图 5 改进算法反算模型图

Fig.5 Calculation model of proposed algorithm

由图 5 建立力与力矩平衡方程,分别为

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x b dy + nP_1 + nP_2 = N \quad (2)$$

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x b y dy + nP_2 \left( \frac{h}{2} - a' \right) - nP_1 \left( \frac{h}{2} - a \right) = M \quad (3)$$

沿用薄壳法与简化法的应变表示方法,从应变的角度推导内力反算公式.由平截面假定可知管片截面的应变分布,如图 6 所示.

已知管片内、外侧钢筋应变  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ ,假设钢筋与混凝土不发生相对滑移,则管片截面任意一点的混凝土正应变为

$$\epsilon_x = \epsilon_1 + \left( y + \frac{h}{2} - a \right) \tan \alpha = C + y \tan \alpha \quad (4)$$

其中

$$C = \epsilon_1 + \left( \frac{h}{2} - a \right) \tan \alpha$$

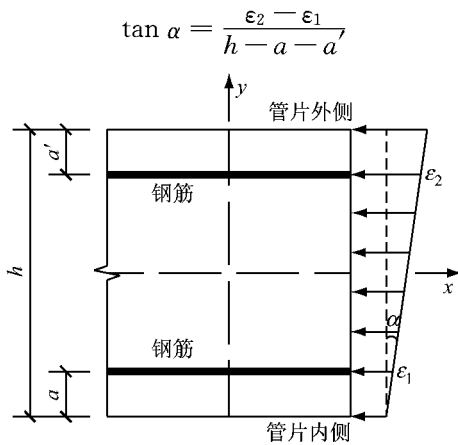


图 6 管片截面应变分布图

Fig.6 Strain distribution in cross section of segment

将式(1)、(4)代入式(2)中,可得管片轴力反算公式为

$$N = 1\,000(1 - 250C)Cf_c b h - \frac{62\,500}{3}f_c b h^3 \tan^2 \alpha + E_s \varepsilon_1 A'_{s_1} + E_s \varepsilon_2 A'_{s_2} \quad (5)$$

再将式(1)、(4)代入式(3)中,可得管片弯矩反算公式为

$$M = \frac{250}{3}(1 - 500C)f_c b h^3 \tan \alpha + E_s \varepsilon_2 A'_{s_2} \left( \frac{h}{2} - a' \right) - E_s \varepsilon_1 A'_{s_1} \left( \frac{h}{2} - a \right) \quad (6)$$

此外,既有的管片内力反算方法只能反算钢筋布置位置的管片内力,无法反算管片接头的内力。而管片接头常常是盾构隧道的薄弱环节,结构的破坏也由管片接头塑性发展而成<sup>[11]</sup>,而直径 10 m 以上大断面深埋高水压盾构隧道又具有荷载模式复杂及接头传力机制多变的特点<sup>[12]</sup>。因此改进算法加入了接头内力的反算方法。

取管片接头至相邻钢筋计之间的单环管片弧段作为计算单元,对应圆心角为 2θ,同样认为管片截面的应力呈非线性分布,水-土压力等效为管片外侧的径向均布压力 q,管片接头内力反算模型如图 7 所示。

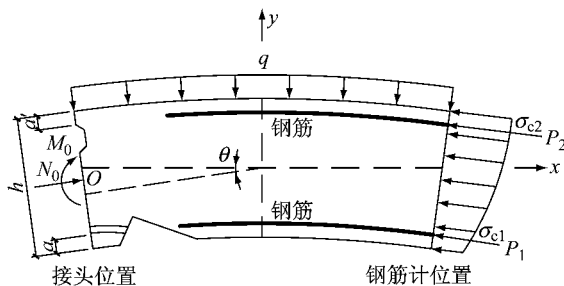


图 7 管片接头内力反算模型

Fig.7 Internal force calculation model of segment joint

考虑力平衡条件和力矩平衡条件,可得

$$\sum X = N_0 \cos \theta - (P_c + nP_1 + nP_2) \cos \theta = 0 \quad (7)$$

$$\sum Y = N_0 \sin \theta + (P_c + nP_1 + nP_2) \sin \theta - P_q = 0 \quad (8)$$

$$\sum M = M_0 + M_q - M_c - M_s = 0 \quad (9)$$

式(7)~(8)中:  $N_0$ 、 $M_0$  分别为管片接头轴力及弯矩;  $P_c$  为钢筋计所在截面的混凝土应力合力;  $P_q$  为均布力  $q$  的合力;  $M_q$  为均布力  $q$  对管片接头中心点  $O$  之矩;  $M_c$  为管片截面混凝土应力对  $O$  点之矩;  $M_s$  为管片截面钢筋作用力对  $O$  点之矩。

由式(7)可得管片接头轴力为

$$N_0 = P_c + nP_1 + nP_2 \quad (10)$$

不难看出,在水-土压力  $q$  为均布力的理想情况下,接头轴力与邻近钢筋计位置管片轴力相等。

联立式(8)、(9)可得管片接头弯矩为

$$M_0 = \left[ (2R_c \sin^2 \theta + \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\sigma_c \rho d\rho}{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c d\rho} \right] P_c + \left( 2R_c \sin^2 \theta - \frac{h}{2} + a \right) nP_1 + \left( 2R_c \sin^2 \theta + \frac{h}{2} - a' \right) nP_2 - 2R_c N_0 \sin^2 \theta \quad (11)$$

式(10)、(11)也可用实测钢筋应变表示,此处不再赘述。

### 3 大断面深埋高水压盾构隧道结构设计内力计算方法

均质圆环法又称惯用法,其计算简单、受力明确,是目前国内外设计经常采用的一种方法。模型将隧道考虑成均质圆环,假定水平地基抗力为三角形分布,计算模型见图 8。梁-弹簧模型算法可以真实地反映管片的分块数、分块位置、管片接头转动弹簧刚度的大小,环间接头的配置及其剪切刚度的大小、由错缝拼装方式不同引起的拼接效果的差异<sup>[13]</sup>,其隧道顶部垂直荷载的确定同惯用法,但建立地层弹簧来评价地层抗力,计算模型见图 9,模型计算参数见表 4。

在结构设计中,确定隧道承受的水-土压力是计算管片内力的关键,而水-土压力又和隧道埋深及地层条件有关。本工程中隧道上覆土主要为砂性土,且厚度大于隧道外径,可以形成拱效应,因此隧道顶部垂直土压力应采用松驰土压力计算<sup>[14]</sup>。李雪等<sup>[15]</sup>以

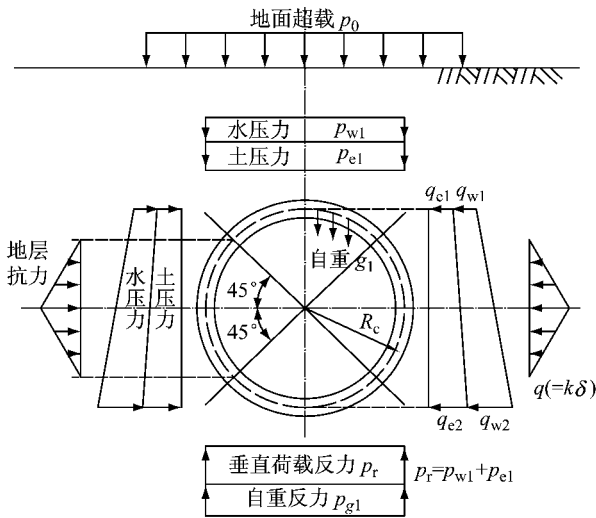


图 8 惯用法计算模型

Fig. 8 Calculation model of the routine method

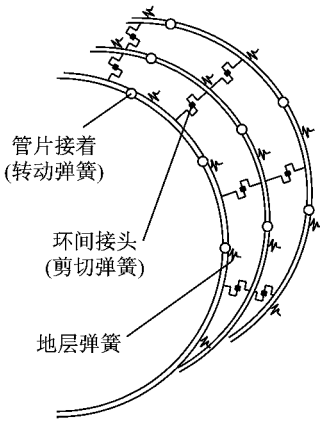


图 9 梁-弹簧结构计算模型

Fig. 9 Calculation model of the beam-spring method

表 4 模型计算参数

Tab. 4 Parameters for calculation model

穿越土层地 土体侧向压 基抗力系数 力系数 λ	均质圆环横 向抗弯刚度 有效率 η	管片接头弹 簧抗弯刚度 k1/(MN · m · rad <sup>-1</sup> )	环间接头剪 切弹簧刚度 k2/(MN · m <sup>-1</sup> )
0.42	28	98	525

本工程为背景,对试验环所受荷载进行了现场测试,分析了深埋高水压粉细砂地层中盾构隧道管片土压力大小及分布特征.结果表明,隧道顶部实测土压力更接近于太沙基松动土压力,约为太沙基松弛土压力的 80%,隧道上方存在土拱;实测水压力大小基本与理论静止水压力大小一致,且随时间变化幅度很小.

松弛土压力的计算一般采用单一地层法,但深埋高水压盾构隧道上覆土层较多,不同土层的力学性质有所差异,采用均一化处理时,设计计算的精度得不到保证,因此从复杂地层的角度进行设计计算.

考虑有地下水和多层情况的太沙基松弛土压力公式<sup>[13]</sup>如下:

$$\sigma_{v1} = \frac{B_1 \left( \gamma_1 - \frac{c_1}{B_1} \right)}{K_0 \tan \varphi_1} \cdot \left( 1 - \exp \left( -K_0 \tan \varphi_1 \cdot \frac{H_1}{B_1} \right) \right) + p_0 \exp \left( -K_0 \tan \varphi_1 \cdot \frac{H_1}{B_1} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_{vi} = \frac{B_i \left( \gamma_i - \frac{c_i}{B_i} \right)}{K_0 \tan \varphi_i} \cdot \left( 1 - \exp \left( -K_0 \tan \varphi_i \cdot \frac{H_i}{B_i} \right) \right) + \sigma_{vi-1} \exp \left( -K_0 \tan \varphi_i \cdot \frac{H_i}{B_i} \right) \quad (13)$$

$$B_1 = R_0 \cot \left( \frac{\pi/4 + \varphi_v/2}{2} \right) \quad (14)$$

式(12)~(14)中: $\sigma_{vi}$ 为各层土顶部的松动土压力; $K_0$ 为水平土压力与垂直土压力之比(一般取  $K_0 = 1$ ); $p_0$ 为上部超载; $\varphi_i$ 为各层土的内摩擦角; $c_i$ 为各层土的黏聚力; $H_i$ 为各层土的厚度; $\gamma_i$ 为各层土的天然重度(地下水以下为浮重度); $\varphi_v$ 为隧道所在土层的内摩擦角.

根据试验环断面各土层的物理力学参数,采用水土分离的算法计算隧道衬砌承受的水土荷载,如表 5 所示.

表 5 衬砌结构承受荷载

Tab. 5 Load on lining structure					
隧道顶部 垂直土 压力	隧道顶部 垂直水 压力	隧道顶部 水平水土 压力	隧道底部 水平水土 压力	水平地 层抗力	自重 反力
196.0	306.5	392.3	542.0	43.8	40.8

## 4 计算结果对比与分析

为了进一步研究大断面深埋高水压盾构隧道的管片内力大小及分布,分别采用设计中广泛应用的均质圆环法及梁-弹簧法计算隧道衬砌内力,并与改进算法反算的管片及接头内力进行比较.

本文提取了盾尾脱出试验环 10 个月后的钢筋计应变数据.图 10 和图 11 为采用两种设计方法计算的衬砌内力与基于实测反算的管片及接头内力对比图.安装与实测过程中有部分测量元器件损坏无数据,也有部分测点的测量误差过大,故图中部分位置没有计算结果.

计算结果表明,梁-弹簧模型中建立的接头对整个环刚度有削弱作用,管片弯矩比不考虑接头的惯用法要小,但轴力相差不大.采用惯用法和梁-弹簧法计算深埋高水压盾构隧道管片及接头内力与基于实

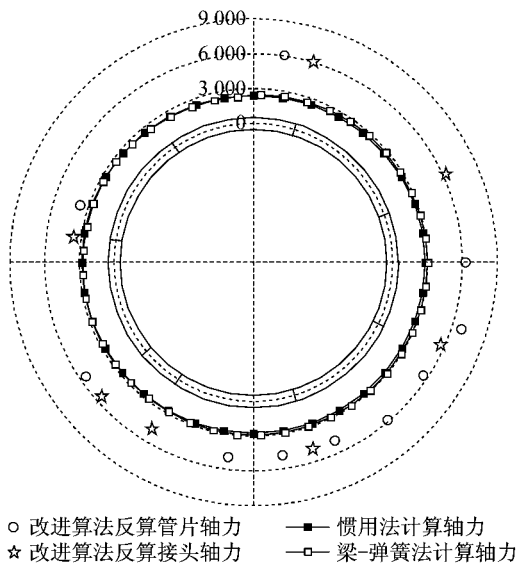


图 10 盾构隧道轴力分布(单位:kN)

Fig.10 Axial force distribution (unit: kN)

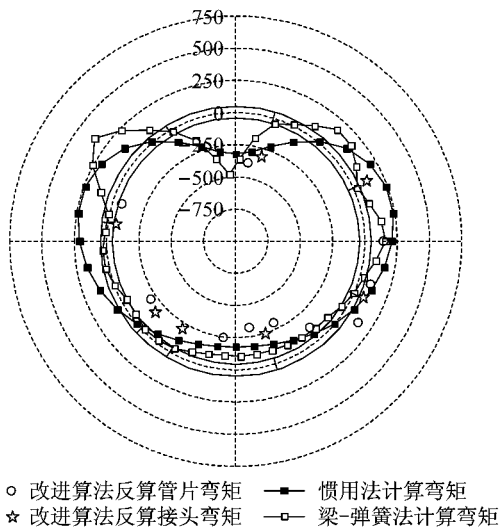


图 11 盾构隧道弯矩分布(单位:kN·m)

Fig.11 Distribution of bending moment (unit: kN·m)

测反算的管片内力分布规律基本相同,但在量值上具有一定的差异性,主要表现为惯用法和梁-弹簧法计算的管片轴力偏小,计算弯矩在隧道顶、底位置偏小,而在隧道起拱位置偏大。

从轴力计算结果可以看出,采用惯用法和梁-弹簧法计算的管片轴力是改进算法反算结果的 1/2 左右。这一结论与外径为 15 m 的上海长江公路隧道<sup>[6]</sup>和荷兰绿心隧道(green heart tunnel)<sup>[10]</sup>的研究结果基本一致。此外,采用改进算法反算的接头轴力与相邻钢筋计位置反算的管片轴力相近。因此,该深埋高水压盾构隧道在管片拼装完成且注浆稳定后,管片与接头的实际轴力较设计轴力偏大,在结构设计过程中应特别注意。

从弯矩计算结果可以看出,采用改进算法反算的管片弯矩在拱底位置与惯用法计算结果接近,而在拱腰及拱顶位置与梁-弹簧模型计算结果接近。此外,采用改进算法反算的接头弯矩大于梁-弹簧模型计算结果,略小于相邻钢筋计位置反算的管片弯矩。整体而言,隧道顶部及底部附近管片内侧受拉较明显,而隧道起拱线位置处管片外侧受拉不明显。产生这一结果可能是因为该深埋高水压盾构隧道顶部水土压力较大,且穿越的砂性土层水平抗力较大,致使隧道竖向变形较大,水平变形较小。

## 5 结论

(1) 改进算法继承了偏压短柱法、薄壳法和简化法的优点,但对计算模型及基本假定进行了改进,同时还考虑了管片接头。因此,改进算法更能反映管片的实际受力状态,更适用于荷载模式复杂且接头传力机制多变的大断面深埋高水压盾构隧道。

(2) 采用惯用法和梁-弹簧法计算深埋高水压盾构隧道管片及接头内力与改进算法反算结果的分布规律基本一致,但在量值上具有一定的差异性。主要表现为惯用法和梁-弹簧法计算的管片及接头轴力偏小,计算弯矩在隧道顶、底位置偏小,而在隧道起拱位置偏大。

(3) 采用惯用法和梁-弹簧法计算的管片及接头轴力偏小,为改进算法反算结果的 1/2 左右,在深埋高水压盾构隧道结构设计中需要特别注意。采用改进算法反算的管片弯矩在拱底位置与惯用法计算结果接近,在拱腰及拱顶位置与梁-弹簧法更为接近,而反算的接头弯矩大于梁-弹簧模型计算结果。

## 参考文献:

- [1] 唐孟雄,陈如桂,陈伟. 广州地铁盾构隧道施工中管片受力监测与分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 118.  
TANG Mengxiong, CHEN Rugui, CHEN Wei. Stress monitoring and internal force analysis of Guangzhou metro shield tunnel segment during construction [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 118.
- [2] 周济民,何川,方勇,等. 黄土层盾构隧道受力监测与荷载作用模式的反演分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 165.  
ZHOU Jimin, HE Chuan, FANG Yong, et al. Mechanical property testing and back analysis of load models of metro shield tunnel lining in loess strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 165.
- [3] 吴世明,王湛,王立忠. 大断面过江隧道运营期受力变形健康监测分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(4): 595.

- WU Shiming, WANG Zhan, WANG Lizhong. Monitoring and analysis of the force and deformation of large section crossing-river tunnel during operation period[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(4): 595.
- [4] 何川, 曾东洋. 砂性地层中地铁盾构隧道管片结构受力特征研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 909.
- HE Chuan, ZENG Dongyang. Research on mechanical characteristics of metro shield tunnel segment in sandy strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 909.
- [5] 廖少明, 门燕青, 张迪, 等. 钱江隧道管片拼装过程中的力学行为实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 156.
- LIAO Shaoming, MEN Yanqing, ZHANG Di, *et al.* Field tests on mechanical behaviors during assembly of segmental linings of Qianjiang tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 156.
- [6] LI X, TIAN Z, YANG Z, *et al.* Observed ground pressures and internal forces of the Shanghai Yangtze River tunnel[J]. Tunneling and Underground Construction, 2014. DOI: 10.1061/9780784413449.098.
- [7] 张君禄, 段峰虎, 廖文来, 等. 湛江湾跨海盾构隧道管片现场监测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 2878.
- ZHANG Junlu, DUAN Fenghu, LIAO Wenlai, *et al.* Field monitoring experimental study of sea-crossing shield tunnel segment in Zhanjiang Bay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2878.
- [8] 张厚美. 地铁盾构工程设计与施工过程的若干问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- ZHANG Houmei. Research on design and construction process of subway shield engineering[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2004.
- [9] 钟小春. 盾构隧道管片土压力的研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- ZHONG Xiaochun. Research on earth pressure for shield tunnel lining[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [10] Bilotta E, Russo G. Internal forces arising in the segmental lining of an earth pressure balance-bored tunnel[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(10): 1765.
- [11] 毕湘利, 柳献, 王秀志, 等. 通缝拼装盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 57(10): 117.
- BI Xiangli, LIU Xian, WANG Xiuzhi, *et al.* Experimental investigation on the ultimate bearing capacity of continuous-jointed segmental tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 57(10): 117.
- [12] 郭瑞, 何川, 封坤, 等. 大断面水下盾构隧道管片接头抗弯刚度及其对管片内力影响研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 46.
- GUO Rui, HE Chuan, FENG Kun, *et al.* Bending stiffness of segment joint and its effects on segment internal force for underwater shield tunnel with large cross-section[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 46.
- [13] 小泉·淳. 盾构隧道管片设计——从容许应力设计法到极限状态设计法[M]. 官林星, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- KOIZUMI Atsushi. Segment design for shield tunnel—from allowable stress design method to limit state design method [M]. Translate by GUAN Linxing. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [14] 周顺华, 崔之鉴. 城市轨道交通结构设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- ZHOU Shunhua, CUI Zhijian. Structural design and construction of urban rail transit [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [15] 李雪, 周顺华, 宫全美, 等. 大断面深埋高水压地铁盾构隧道周边土压力作用模式评价[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1415.
- LI Xue, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, *et al.* Evaluation of earth pressure around a deeply buried metro shield tunnel with a large cross-section under high water pressure conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1415.
- [14] 陈再现, 王凤来, 杨同盖, 等. 底框砌体剪力墙震损房屋抗震加固拟动力子结构试验[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(6): 1.
- CHEN Zaixian, WANG Fenglai, YANG Tonggai, *et al.* Experimental analysis of seismic performance of strengthening frame supported reinforced concrete masonry short-leg shear wall structure damaged by earthquake using the substructure [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(6): 1.
- [15] 陈再现, 姜洪斌, 张家齐, 等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟动力子结构试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 41.
- CHEN Zaixian, JIANG Hongbin, ZHANG Jiaqi, *et al.* Pseudodynamic substructure test on precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 41.

(上接第961页)