

DOI: 10.11779/CJGE201506013

模型盾构隧道管片纵缝接头设计方法

黄大维^{1, 2}, 周顺华¹, 王秀志³, 刘洪波³, 张润来¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 克莱姆森大学土木工程系, 克莱姆森 SC29634;
3. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 上海 201103)

摘要: 考虑到拼装的缩尺模型管片环与原型管片环的纵缝接头刚度相似性难以满足要求, 建议缩尺模型隧道采用开槽模型接头, 并分别得到了采用两侧同时开槽、内侧开槽及外侧开槽的模型接头设计计算方法。通过开槽模型接头的管片环模型与梁—弹簧模型的计算结果比较, 表明开槽模型接头的设计方法可行, 开槽模型接头能很好地模拟拼装管片接头。在综合考虑开槽模型接头的开槽宽度对管片环结构内力与变形的影响与开槽模型接头的加工可行性的基础上, 建议开槽模型接头对应的管片环中心角取值为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。提出的开槽模型接头设计计算理论可用于缩尺模型管片环的纵缝接头设计及在惯用法均质圆环的基础上进行局部抗弯刚度折减的数值模型隧道的建模。

关键词: 盾构隧道; 接头刚度; 管片接头; 开槽模型接头

中图分类号: U455 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)06-1068-09

作者简介: 黄大维(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构与岩土工程研究。E-mail: gddthdw@126.com。

Design method for longitudinal segment joints of shield tunnel model

HUANG Da-wei^{1, 2}, ZHOU Shun-hua¹, WANG Xiu-zhi³, LIU Hong-bo³, ZHANG Run-lai¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Glenn

Department of Civil Engineering, Clemson University, Clemson SC29634, USA; 3. The Technical Center of Shanghai Shentong Metro
Group Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: In consideration of the similarity between the bending stiffness of longitudinal joint of an installed scale model segment ring and that of the corresponding prototype one which is difficult to be satisfied, application of grooved model joints for a scale model for shield tunnel is proposed. The design method for the grooved model joints, slotted at both sides, slotted internally and slotted externally, is obtained. By comparing the calculated results of a model segment ring with grooved model joints with those of a beam-spring model, it is verified that the design method for the grooved model joints is feasible, and that the grooved model joints can simulate the installed ones well. After the analysis of influence of slotting on the internal width force and deformation of the segment ring, it is proposed that the corresponding central angle of the grooved model joints should be 3° to 5° . The proposed design theory of the grooved model joints is applicable for the design of a longitudinal joint of the scale model segment ring and for the numerical simulation based on uniform rigidity ring with bending rigidity to be reduced locally.

Key words: shield tunnel; joint stiffness; segment joint; grooved model joint

0 引言

预制管片通过螺栓连接所形成的管片环因纵缝接头位置抗弯刚度的削弱, 导致其结构力学性能与惯用法的均质圆环完全不同。然而, 管片环的纵缝接头刚度作为拼装管片环的关键参数, 其特性一直受到盾构隧道工程界的关注, 也开展了多种方法的研究, 包括理论分析法^[1]、有限元法^[2-4]、模型试验法^[5]、接头原型试验法^[6]等。由此可见, 管片接头刚度对结构内力与变形分析极其关键, 其研究手段的多样性、假设条件的多变性及研究成果的差异性足以说明影响管片接

头刚度的因素是复杂多变的^[7-8]。

为了减小试验难度, 并方便地改变外部条件以便获得多工况下的隧道结构内力与变形以及地层土压力, 在盾构隧道研究中缩尺的模型试验得到了较为普遍的应用。当采用相对较大比例尺的模型试验时, 模型管片间采用螺栓连接在实际操作上是可行的, 但模型隧道管片接头抗弯刚度的影响因素较多, 如管片材

基金项目: 上海市科学技术委员会科技攻关项目(13231200200)

收稿日期: 2014-09-04

料、连接螺栓、弹性衬垫、止水密封垫、连接螺栓的预紧力等。为了确保模型接头与原型接头的抗弯刚度具有良好的相似性, 则必须保证各影响因素都具有良好的相似性。由此可见, 保证缩尺的螺栓连接管片接头与原型管片接头的抗弯刚度相似性的难度极大。而当采用小比例尺的模型试验时, 模型管片间采用螺栓连接在实际操作上难度极大, 要设计出具有良好相似性的拼装管片隧道模型的难度将更大。为此, 在现有研究中缩尺的模型隧道的管片接头采用其他的处理方式, 如文献[9]设计了几何相似比为38.75的聚乙烯材料的模型隧道, 将均质聚乙烯管在接头位置切开, 内、外侧再用两片塑料片连接进行组装。采用该方法虽达到了抗弯刚度削减的效果, 但所形成的模型接头的抗弯刚度难以得到精确的定量计算公式, 且内、外侧塑料片及模型管片的螺栓孔大小、连接时螺栓的拧紧程度及连接质量等直接影响模型接头的抗弯刚度。然而, 采用开槽的方式模拟管片接头时可使所模拟的接头刚度稳定, 影响因素简单明确。如文献[10]设计了几何相似比为12的特种石膏材料模型隧道, 管片环的纵缝接头采用开槽模型接头, 即在接头位置开一定深度的槽以弱化该部位的抗弯刚度。但所涉及的开槽模型接头设计方法复杂, 并需要利用有限元法进行反复计算得到开槽深度, 对开槽模型接头的设计方法并无明确的分析, 也并未得到明确的开槽宽度与开槽深度的设计计算方法, 以及与所模拟的原型接头刚度之间关系无定量关系表达。

在众多的管片环分析计算模型中, 梁-弹簧模型因其内力与变形的计算结果与工程实际更为接近而得到了广泛地应用^[11-12]。但在数值计算时考虑到梁-弹簧模型建模相对复杂, 学者们也早已意识到通过对惯用法均质圆环进行局部刚度折减来模拟管片接头的可行性, 如文献[13]提出在数值计算中采用的局部抗刚度修正法模拟管片纵缝接头, 即对刚度修正区域的材料弹性模量乘以修正系数。但葛世平等^[13]提出的修正系数需要通过室内足尺试验实测相关参数方可计算得到, 且并未分析修正区域范围对数值结果的影响, 也未建立修正系数与管片接头刚度及修正范围等参数的关系; 文献[14]提出的在惯用法的均质圆环模型基础上对接头部位的刚度进行折减后用于数值计算, 但并未分析刚度折减区的范围以及折减系数的取值依据, 仅对折减系数进行了试算并给出了对应的结构内力与变形结果。

由此可见, 采用开槽法模拟管片接头时的设计机理缺乏理论依据, 且开槽接头模型的设计暂无解析设计计算方法; 同时对数值计算中的局部抗弯刚度折减

法也无理论依据, 因此有必要对上述问题展开研究。本文提出了基于合理假设的管片开槽模型接头设计计算方法, 并推导出了采用两侧开槽、内侧开槽及外侧开槽的原型隧道管片环的模型接头设计计算方法, 并对设计理论的可行性及开槽宽度的影响进行了分析。本文提出的开槽模型接头设计计算理论概念明确, 计算依据清楚, 计算方法简单, 可用于缩尺模型隧道的纵缝接头设计与基于惯用法均质圆环的局部刚度折减模型的数值模型隧道的建模中。

1 管片纵缝模型接头设计计算

管片纵缝接头刚度分为拉压刚度、剪切刚度和转动刚度, 由已有的研究可知^[1,12], 拉压刚度与剪切刚度对结构的内力与变形计算结果影响不大。因此, 在模型隧道设计时, 纵缝接头刚度只考虑转动刚度是可行的。在模型接头位置进行开槽, 目的就是减小开槽段曲梁的抗弯刚度, 以此代替螺栓连接的管片接头导致的抗弯刚度削弱。但开槽段的曲梁与螺栓连接的管片接头有所不同: 开槽段为曲梁结构, 本身具有一定长度; 而螺栓连接接头近似为转动弹簧结构, 本身是没有长度的。

1.1 两侧等深度开槽的纵缝模型接头分析

为了阐述开槽模型接头的设计方法, 在此假设模型管片环的内、外径与实际管片环相同, 分析开槽模型接头与螺栓连接的管片接头的等效性。开槽范围内对应的管片环中心角为 α (rad), 开槽模型接头的内、外开槽面为与管片环具有相同中心轴的圆柱面。假设在开槽模型接头的开槽段曲梁两端作用纯弯矩 M , 同时在具有相同中心角 α 且含有螺栓连接接头的对应管片环曲梁的两端作用相同的纯弯矩 M , 两种受弯曲梁(以下简称为开槽段曲梁与接头曲梁)的长度均以其弯曲时的中性轴弧长进行计算, 分别为 L_1 与 L , 如图1所示。在此, 以纯弯矩 M 作用下两种曲梁两端截面的相对转角相等作为开槽模型接头与螺栓连接的管片接头等效理论假设。

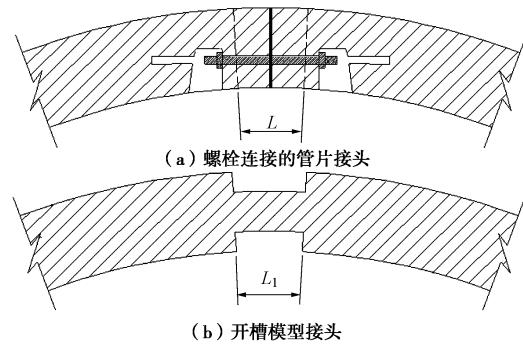


图1 螺栓连接管片接头与开槽模型接头

Fig. 1 Segment joint connected by bolts and grooved model joints

假设模型接头采用内、外侧同时开槽（如图 1 所示），且两侧开槽深度相同。则开槽段曲梁在开槽前后弯曲中性轴不变，开槽段曲梁长度与接头曲梁长度相等，即为

$$L_1 = L = \frac{D_1 + D_2}{2} \alpha \quad . \quad (1)$$

由胡克定律可知，在纯弯矩 M 作用下，开槽段曲梁两端的相对转角为

$$\theta' = \kappa L_1 = \frac{ML_1}{EI'} \quad . \quad (2)$$

式(1)、(2)中 D_1 为管片环的外径； D_2 为管片环的内径， E 为管片材料的弹性模量； EI' 为开槽模型接头的开槽段截面抗弯刚度； I' 为开槽模型接头的开槽段的截面惯性矩； L 为接头曲梁的长度； L_1 为采用两侧等深度开槽时开槽曲梁的长度， M 为作用在曲梁两端截面上的纯弯矩； α 为开槽模型接头的开槽段对应的管片环中心角； κ 为弯曲应变，即单位长度所产生的转角； θ' 为开槽段曲梁两端在纯弯矩作用下的两端截面相对转角。

接头曲梁在纯弯矩 M 作用下两端截面产生的相对转角由两部分导致，一部分是由螺栓连接部位管片接缝张开导致，另一部分是由接头曲梁弯曲导致。设管片接头刚度为 k ，由螺栓连接部位管片接缝张开以及由接头曲梁弯曲导致的转角可分别表达为

$$\theta_1 = \frac{M}{k} \quad , \quad (3)$$

$$\theta_2 = \frac{ML}{EI} \quad . \quad (4)$$

接头曲梁两端截面产生的相对转角 θ 可表达为

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \frac{M}{k} + \frac{ML}{EI} \quad . \quad (5)$$

式中 EI 为管片环横向截面抗弯刚度； I 为管片环横向截面惯性矩； k 为管片环的纵缝接头刚度； θ 为接头曲梁在纯弯矩作用下两端截面产生的相对转角； θ_1 为由螺栓连接部位管片接缝张开导致接头曲梁两端截面产生的相对转角； θ_2 为由接头曲梁弯曲变形导致接头曲梁两端截面产生的相对转角。

因此，开槽接头模型与螺栓连接的管片接头等效理论假设可表示为

$$\theta = \theta' \quad . \quad (6)$$

把式(2)、(5)代入式(6)得到

$$\frac{M}{k} + \frac{ML}{EI} = \frac{ML_1}{EI'} \quad , \quad (7)$$

解得开槽段截面的抗弯刚度 EI' 为

$$EI' = \frac{EIkL_1}{EI + kL} \quad . \quad (8)$$

设开槽模型接头的开槽段厚度 h' ，因 $I = \frac{bh^3}{12}$ ，

因此可得到

$$h'^3 = \frac{12I'}{b} = \frac{12kL_1}{b(EI + kL)} \quad , \quad (9)$$

解得

$$h' = \sqrt[3]{\frac{12L_1kI}{b(EI + kL)}} = \sqrt[3]{\frac{12Ik\alpha(D_1 + D_2)}{2bEI + bk\alpha(D_1 + D_2)}} \quad , \quad (10)$$

式中， b 为管片环的纵向宽度， h 为管片的厚度， h' 为开槽模型接头的开槽段厚度。

1.2 单侧开槽的纵缝模型接头分析

以上分析开槽法进行开槽模型接头设计时为采用两侧等深度开槽。然而，在模型试验时，有时为了方便布设测试元件或其他考虑，也可以选择在管片环的内侧或外侧开槽进行开槽模型接头设计，如图 2 所示。因在开槽段曲梁长度应以开槽后的开槽段曲梁的弯曲中性轴弧长进行计算，管片环的内侧或外侧进行开槽时开槽后的曲梁长度分别为

$$L_2 = \frac{D_1 - h'}{2} \alpha \quad , \quad (11)$$

$$L_3 = \frac{D_2 + h'}{2} \alpha \quad . \quad (12)$$

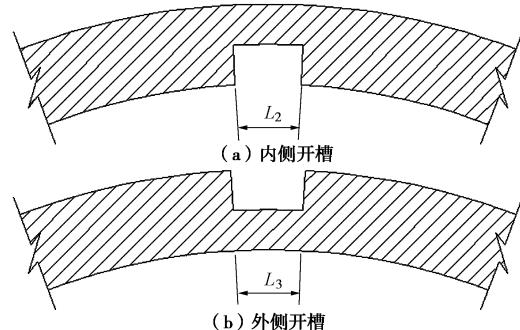


图 2 单侧开槽的模型接头

Fig. 2 Grooved model joints slotted internally and externally

将式(11)、(12)分别代入式(7)，得到采用内侧或外侧进行开槽时开槽段曲梁厚度的一元三次方程：

$$(EI + kL)bh'^3 + 6kI\alpha h' - 6D_1kI\alpha = 0 \quad , \quad (13)$$

$$(EI + kL)bh'^3 - 6kI\alpha h' - 6D_2kI\alpha = 0 \quad , \quad (14)$$

式中， L_2 为采用内侧开槽时开槽曲梁的长度， L_3 为采用外侧开槽时开槽曲梁的长度。

从方程(13)、(14)中可以看出，方程中二次项系数为 0，开槽段曲梁厚度 h' 的有理解是唯一的。

1.3 数值模型的纵缝接头设计

以上分析时是考虑实体模型管片环设计，接头位置采用开槽法进行抗弯刚度折减，在减小 EI 时通过减

小开槽模型接头的厚度来减小 I , 即 $I' < I$ 。然而, 在数值模拟计算时, 为了方便建模, 也可以通过减小 E 来减小 EI , 即 $E' < E$, 其中 E' 为抗弯刚度折减区的材料弹性模量。因此式(7)变换为

$$\frac{M}{k} + \frac{ML}{EI} = \frac{ML_1}{EI'}, \quad (15)$$

则抗弯刚度折减区的材料弹性模量计算式为

$$E' = \frac{EkL_1}{EI + kL}, \quad (16)$$

将式(1)代入式(16)后得

$$E' = \frac{Ek(D_1 + D_2)\alpha}{2EI + k(D_1 + D_2)\alpha}. \quad (17)$$

式中, E' 为刚度折减区的材料弹性模量。

从式(17)可以看出, 在数值模型中, 通过局部弹性模量折减模拟管片纵缝接头时, 弹性模量的数值与所模拟的接头刚度有关, 同时与管片环的刚度折减区宽度有关。此处, 在模拟过程中, 所模拟的接头刚度是一个恒定的接头刚度, 若需要考虑管片接头的非线性变化时, 通过相关迭代计算进行即可。

2 设计理论的验证分析

2.1 验证实例的选取

在上文分析中得到了根据管片接头刚度设计开槽模型接头的方法, 为了验证方法的可行性, 以上海地铁通缝拼装盾构隧道管片环为例进行验证分析, 其外径 6.2 m, 管片厚度 0.35 m, 管片宽度 1.2 m。管片采用高强混凝土模筑, 其强度等级为 C55, 对应的弹性模量为 35.5 GPa, 泊松比为 0.18。管片环由 6 块管片拼接而成, 其分块方式及角度位置确定规则如图 3 所示。管片环的环向与纵向均采用 M30 直螺栓连接, 其机械性能等级为 5.8 级。

为了得到管片的接头刚度, 通过某结构荷载足尺试验进行反演分析。足尺试验通过 24 个均匀分布的加载点施加集中荷载来模拟盾构隧道周围土体的分布荷载, 所有集中荷载分成 3 组, 分别为 P_1 (6 个加载点)、 P_2 (10 个加载点) 与 P_3 (8 个加载点), 如图 1 所示^[15-16]。反演分析时选取了试验的 4 个不同加载工况下的位移实测结果作为参考依据, 如表 1 所示^[15] (文中所有的

位移值以该点向外侧移动为正, 反之亦然)。

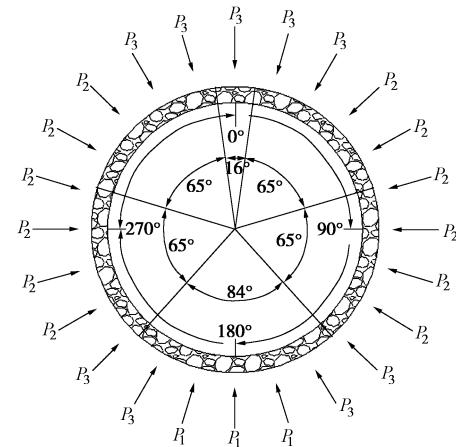


图 3 集中荷载分布与管片环分块方式^[15-16]

Fig. 3 Force distribution and division of segment ring^[15-16]

反演分析时在 ANSYS 有限元模拟软件中建立梁-弹簧模型 (建立了结点 366 个, 曲梁单元 360 个, 弹簧单元 6 个, 弹簧单元的只考虑转动刚度)。考虑到隧道结构与荷载的对称性, 设 8° 与 352° 位置的管片纵缝接头刚度为 k_1 , 73° 与 287° 位置的管片纵缝接头刚度为 k_2 , 138° 与 222° 位置的管片纵缝接头刚度为 k_3 ; 在 0° 与 180° 位置 (即顶部与底部) 加水平向约束, 在 90° 与 270° 位置加竖向约束 (如图 4 所示)。反演分析所得的管片环接头刚度在不同加载工况下的结果如表 2 所示。

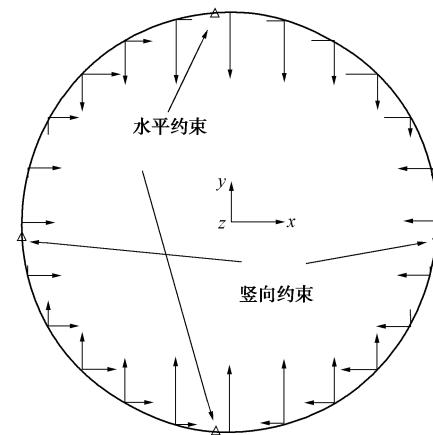


图 4 梁-弹簧模型

Fig. 4 Beam-spring model

表 1 足尺试验位移实测结果^[15]

Table 1 Displacements measured in full-scale tests^[15]

加载工况	实测 P_1/kN	实测 P_2/kN	实测 P_3/kN	不同测点位置对应的位移/mm					
				0°	74°	105°	180°	255°	286°
1	95.32	45.98	71.49	-6.44	6.45	3.93	-2.48	2.03	4.78
2	163.15	76.83	122.36	-22.18	21.51	12.48	-7.30	8.66	18.54
3	213.02	99.97	159.76	-63.09	55.66	32.18	-18.79	28.72	55.21
4	248.92	119.24	186.69	-107.89	94.36	55.21	-31.54	48.01	92.55

表 2 反演分析得到不同加载工况下的纵缝接头刚度

Table 2 Bending stiffness of joints obtained through back analysis

(MN·m·rad⁻¹)

加载工况	k_1	k_2	k_3
1	34	28	50
2	13	10	21
3	6	4	9
4	4.2	2.5	7

2.2 模型接头设计方法的验证结果分析

管片环为封闭的环结构，本身为超静定结构，管片环结构的刚度分布情况必然影响结构内力分配与结构变形。因此，为了验证本文提出的开槽模型接头设计计算方法的可行性，通过在 ANSYS 有限元软件中建立开槽模型接头的管片环模型，建模方法与反演分析时的梁—弹簧模型类似，但未设置弹簧单元。其中开槽模型接头的开槽段对应管片环中心角为 4°，采用内、外侧等深度开槽方式设计。不同加载工况下的各模型接头的所模拟的接头刚度根据表 2 进行取值，开槽段厚度按式 (10) 计算，结果如表 3 所示。当各开槽模型接头的管片环施加表 1 所示的不同加载工况下的荷载时，得到相应的结构弯矩与变形，并与反演分析时的梁—弹簧模型的对应计算的结果进行比较，如图 5 与图 6 所示（文中所有的弯矩值以隧道内侧受拉为正，反之亦然）。

从图 5 可以看出，两种管片环模型在 4 个不同加载工况下 0°，90°，180° 及 270° 位置的弯矩数值结果极其接近。图 6 为对应的变形结果，为了更明显地看到结构变形形状，将变形结果相对隧道的实际尺寸放大了 15 倍。考虑到数值模型结点的约束特点，竖向位移以 90° 与 270° 位置为参考点，水平位移以 0° 与 180° 位置为参考点。从图 6 可以看出，两种管片环模型的变形结果也极其接近。

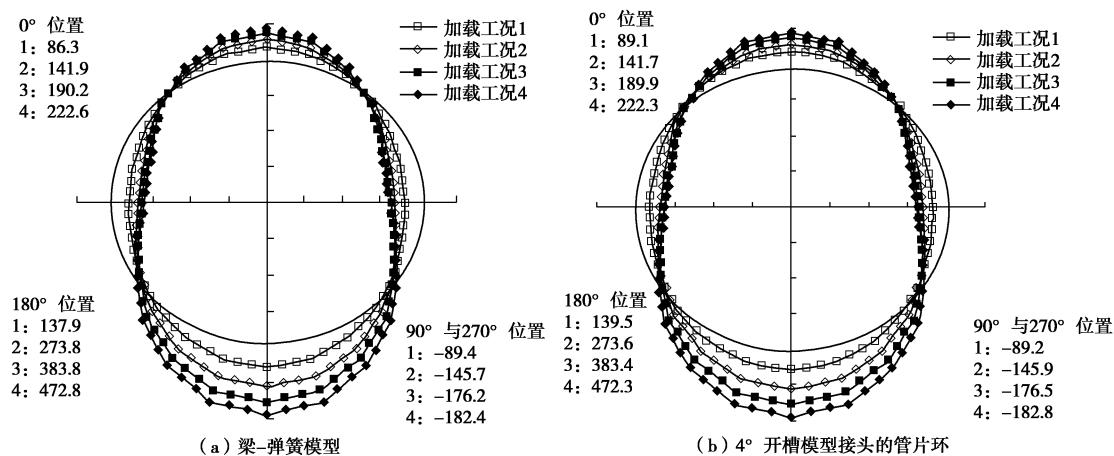


图 5 不同加载工况下管片环的弯矩

Fig. 5 Bending moments of segment rings under different loading conditions

表 3 中心角为 4° 时不同加载工况下各模型接头开槽段的厚度

Table 3 Thickness of grooved model joints with corresponding central angles of 4° under different loading conditions (mm)

加载工况	k_1 对应的模型接头	k_2 对应的模型接头	k_3 对应的模型接头
1	123.21	115.79	139.17
2	90.24	82.80	105.52
3	69.96	61.17	79.98
4	62.17	52.33	73.61

对单侧开槽接头模型设计方法进行了验证分析，其他计算结果与两侧等深度开槽结果基本相同，仅在开槽部位的弯矩有突变。开槽部位的弯矩突变与开槽段的中性轴与未开槽段的中性轴不在同一半径圆内有关，结构的轴力在开槽段产生了附加弯矩，但开槽段的附加弯矩不影响其他主截面的内力与结构变形。因此，当采用单侧开槽时，开槽段的弯矩结果要进行适当修正，或不考虑开槽段的弯矩结果。此外，对减小抗弯刚度折减区的材料弹性模量的方法也进行了验证，其中抗弯刚度折减区的材料弹性模量 E' 通过式

(16) 计算，其计算结果与两侧等深度开槽法的计算结果相同。由此说明，为了模拟管片拼装时接头导致的抗弯刚度削弱，通过对与管片等厚度的均质圆环在接头的位置进行局部开槽或局部弹性模量折减，并采用本文提出的相关局部刚度折减理论计算方法是可行的。

以上开槽模型接头设计计算方法是以原型管片环为例进行分析的，对于缩尺的模型隧道管片环的开槽模型接头设计计算，其原理完全相同，仅需要通过缩尺后的螺栓连接接头的与开槽模型接头之间进行等效计算即可，其中接头刚度要采用通过相似关系减小后的模型管片环的接头刚度。开槽模型接头的设计流程

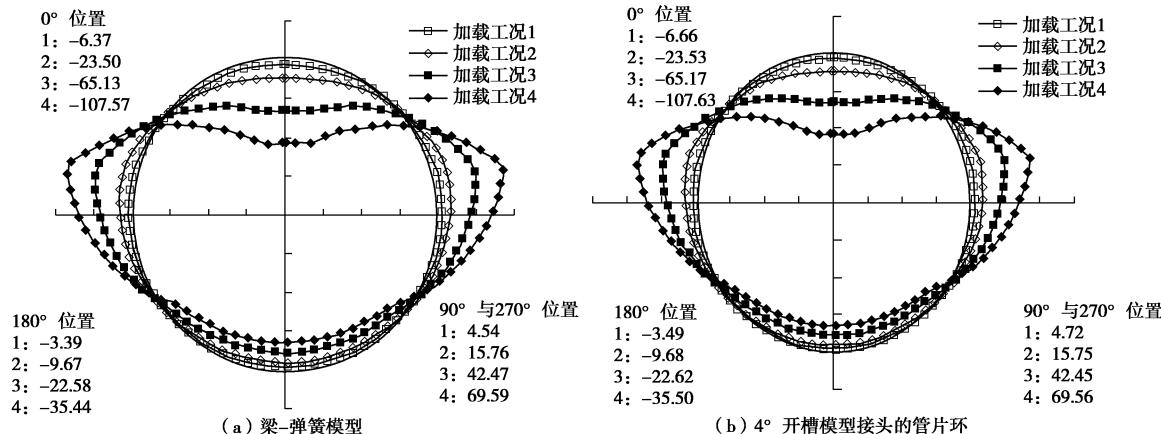


图 6 不同加载工况下管片环的变形

Fig. 6 Deformations of segment rings under different loading conditions

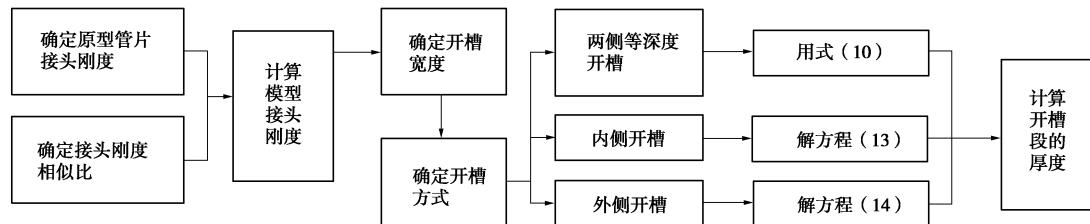


图 7 开槽模型接头设计流程图

Fig. 7 Flow chart of design of grooved model joints

图如图 7 所示。

3 模型接头的开槽宽度影响分析

由式 (10) 可知, 在其他参数不变时, 开槽模型接头对应的管片环中心角 α 越小, 开槽段的厚度也越小。然而, 对开槽宽度的增大将在多大程度上影响结构的内力与变形需要进行分析。为此, 设计几何尺寸与原型管片环相同的开槽模型接头的管片环模型, 选择开槽模型接头对应的管片环中心角为 4° , 8° , 12° 及 16° , 并选择足尺试验的加载工况 3 时的荷载及其对应的管片接头刚度, 对应的开槽段厚度如表 4 所示, 管片环数值模型如图 8 所示。最后将各种不同开槽宽度的开槽模型接头的管片环模型与反演分析时的梁-弹簧模型的计算结果进行比较, 如图 9 所示。

从图 9 可看出, 不同开槽宽度的开槽模型接头的管片环模型与梁-弹簧模型的弯矩与结构变形计算结果接近, 由此可见, 开槽模型接头的开槽宽度对内力与变形计算结果总体影响很小。但从具体数值看, 开槽宽度越大, 内力与变形计算结果与梁-弹簧模型计算结果相差越大。由此可见, 在开槽模型接头设计时, 开槽宽度不宜过大, 但也不宜过小, 否则在开槽段无

法满足材料的强度要求, 且在开槽模型接头加工时不方便操作。当数值计算中采用局部材料弹性模量折减时, 折减区的宽度一样不宜过小, 否则建模时不方便操作。通过综合比较分析表明, 当开槽模型接头对应的管片环中心角为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 时, 材料强度上完全可满足要求, 实际加工与数值建模时都方便操作, 且结构变形与内力的计算结果偏差值完全可控制在 0.2% 以内。

表 4 加载工况 3 时不同中心角对应的各模型接头开槽段厚度

Table 4 Thickness of grooved model joints with different corresponding central angles under 3rd loading conditions

开槽段 中心角/(°)	k_1 对应的 模型接头	k_2 对应的 模型接头	k_3 对应的 模型接头
4	69.96	61.17	79.98
8	87.91	76.93	100.36
12	100.36	87.91	114.44
16	110.18	96.59	125.47

图 10 为按相关相似理论所设计的模型隧道管片环, 其几何相似比为 1:10, 加工材料为尼龙。管片环的纵缝接头即按本文提出的计算方法所设计的。考虑到模型隧道内侧需要布设位移计, 当管片内侧为一

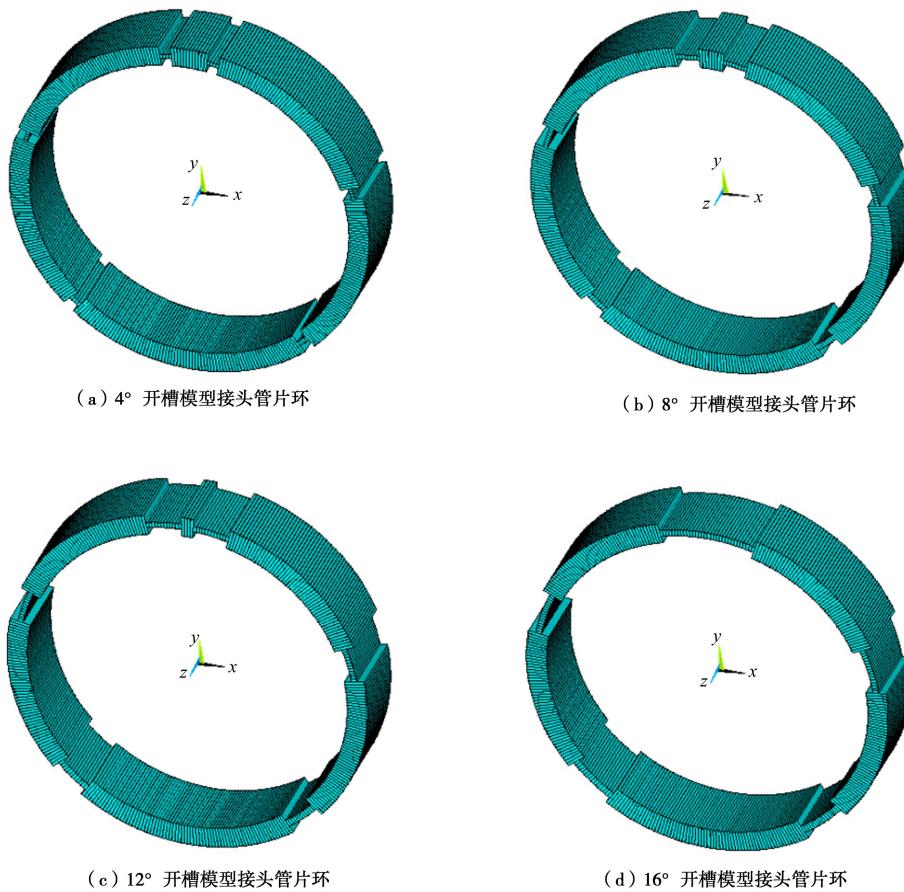


图 8 不同管片环中心角的开槽模型接头的管片环

Fig. 8 Segment rings with grooved model joints of different corresponding central angles

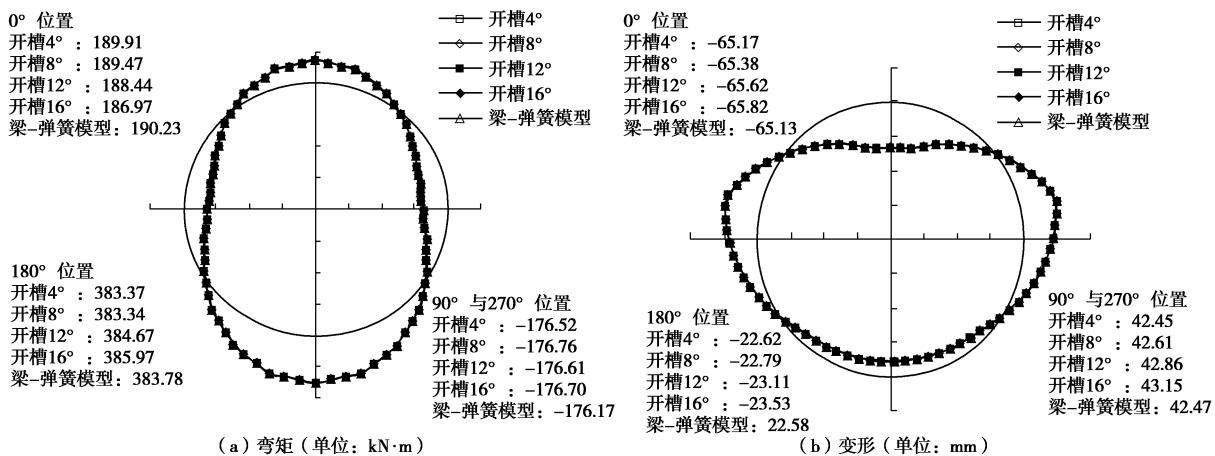


图 9 不同中心角的开槽模型接头的管片环与梁-弹簧模型的弯矩与变形

Fig. 9 Bending moments and deformations of segment rings with grooved model joints of different corresponding central angles and beam-spring models

个完整的曲面时相对更方便进行内侧位移记布设操作。为此, 模型隧道管片环的纵缝接头采用了外侧开槽进行模拟, 开槽范围所对应的管片环中心角为 4° , 各开槽模型接头所对应的原型接头抗弯刚度为表 2 所

示的第 1 加载工况下所对应的接头刚度。对整个模型隧道的相关相似设计及具体参数在此不再具体叙述, 将考虑在以后相关期刊论文中对整个相似设计过程中所进行创新的相似设计方法进行全面分析。



图 10 外侧开槽的模型管片环

Fig. 10 Scale model segment rings with external grooved model joints

4 结 论

(1) 要使拼装管片环的缩尺管片接头与原型管片接头具有良好的相似性, 则必须保证影响管片接头的各影响因素都具有良好的相似性。然而, 管片接头刚度影响因素复杂, 具有良好相似性的缩尺模型管片接头的制作难度也极大。为此, 本文提出了在缩尺模型隧道设计时管片纵缝接头采用开槽模型接头。验证分析表明, 开槽模型接头能很好地模拟拼装管片接头。

(2) 通过原型管片环的开槽模型接头与螺栓连接接头的等效假设, 分别得到了采用两侧等深度开槽、内侧开槽及外侧开槽时的原型管片环的开槽模型接头设计计算方法, 并对其可行性进行了验证。对于缩尺的模型隧道的开槽模型接头, 采用与原型管片环的开槽模型接头同样的设计方法即可, 但此时模型管片环螺栓连接接头的接头刚度要采用通过相似关系减小后的接头刚度。

(3) 开槽模型接头相当于惯用法的均质圆环在接头位置进行局部抗弯刚度折减, 因此, 在数值模型建模时采同相同的计算理论考虑对纵缝接头局部范围内进行刚度折减。为了方便建模可不必建立开槽结构, 可直接对刚度折减区的材料弹性模量进行降低即可。

(4) 分析表明, 开槽模型接头对应的管片环中心角大小对结构的内力与变形影响总体不大, 但随着开槽段曲梁中心角的增大, 结果偏差值越大。综合比较分析表明, 当开槽模型接头对应的管片环中心角为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 时, 材料强度上完全可满足要求, 实际加工与数值建模时都方便操作, 且结构变形与内力的计算结果偏差值完全可控制在0.2%以内。为此, 建议开槽模型接头对应的管片环中心角取值设计为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1574 - 1577. (JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. Theoretical study of rotating stiffness of joint in shield tunnel segments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1574 - 1577. (in Chinese))
- [2] 张 鹏. 地铁盾构隧道管片接头的理论分析与应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. (ZHANG Peng. Research on the theoretical analysis and application of the metro shield tunnel segment joint[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [3] 曾东洋, 何 川. 地铁盾构隧道管片接头刚度影响因素研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(4): 90 - 95. (ZENG Dong-yang, HE Chuan. Study on factors influential in metro shield tunnel segment joint bending stiffness[J]. Journal of The China Railway Society, 2005, 27(4): 90 - 95. (in Chinese))
- [4] 彭益成, 丁文其, 闫治国, 等. 修正惯用法中弯曲刚度有效率的影响因素分析及计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1): 495 - 500. (PENG Yi-cheng, DING Wen-qi, YAN Zhi-guo, et al. Analysis and calculation method of effective bending rigidity ratio in modified routine method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 495 - 500. (in Chinese))
- [5] YE F, GOU C F, SUN H D, et al. Model test study on effective ratio of segment bending rigidity of shield tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014(41): 193 - 205.
- [6] 张厚美, 过 退, 付德明. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 309 - 314. (ZHANG Hou-mei, GUO Chi, FU De-ming. A study on the stiffness model of circular tunnel prefabricated lining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 309 - 314. (in Chinese))
- [7] TEACHAVORASINSKUN S, CHUB-UPPAKARN T. Influence of segmental joints on tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010(25): 490 - 494.
- [8] ZHONG X C, ZHU W, HUANG Z R, et al. Effect of joint structure on joint stiffness for shield tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 406 - 407.
- [9] 黄宏伟, 徐 凌, 严佳梁, 等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 11 - 18. (HUANG

- Hong-wei, XU Ling, YAN Jia-liang, et al. Study on transverse effective rigidity of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(1): 11 - 18. (in Chinese))
- [10] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 85 - 89. (TANG Zhi-cheng, HE Chuang, LIN Gang. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 85 - 89. (in Chinese))
- [11] KOYOMA Y, NISHIMURA T. The design of lining segment of shield tunnel using a beam-spring model[J]. Quarterly Report of RTRI, 1998, **39**(1): 23 - 27.
- [12] Working Group No.2, ITA. Guidelines for the design of shield tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, **15**(3): 303 - 331.
- [13] 葛世平, 谢东武, 丁文其, 等. 盾构管片接头简化数值模拟方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1600 - 1605. (GE Shi-ping, XIE Dong-wu, DING Wen-qi, et al. Simplified numerical simulation method for segment joints of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,
- 2013, **35**(9): 1600 - 1605. (in Chinese))
- [14] 侯公羽, 杨悦, 刘波. 盾构管片接头模型的改进及管片内力的数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 2): 4284 - 4291. (HOU Gong-yu, YANG Yue, LIU Bo. Improved joint model of shield tunnel segments and numerical calculation of inner forces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 4284 - 4291. (in Chinese))
- [15] 鲁亮, 孙越峰, 柳献, 等. 地铁盾构隧道足尺整环结构极限承载能力试验研究[J]. 结构工程师, 2012, **28**(6): 134 - 139. (LU Liang, SUN Yuefeng, Liu Xian, et al. Full-ring experimental study on the ultimate bearing capacity for the lining structure of the metro shield tunnel[J]. Structure Engineers, 2012, **28**(6): 134 - 139. (in Chinese))
- [16] 柳献, 张浩立, 鲁亮, 等. 超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 地下空间与隧道, 2013(4): 10 - 15. (LIU Xian, ZHANG Hao-li, LU Liang, et al. Experimental study on the bearing capacity for the lining structure of the metro shield tunnel under overloading condition[J]. Underground Engineering and tunnels, 2013(4): 10 - 15. (in Chinese))

更正

本刊 2015 年第 37 卷第 1 期刊载的“单锚板桩结构的工作机理研究”一文中（页码 29~34）及第 2 期刊载的“20 万吨级卸荷式板桩码头数值分析”一文中（页码 218~224），因作者疏忽，单位标注有误，特此更正。更正以后的内容分别如下：

蔡正银¹, 侯伟^{2,1}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

CAI Zheng-yin¹, HOU Wei^{2,1}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

蔡正银¹, 侯伟^{2,1}, 周健², 徐光明¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

CAI Zheng-yin¹, HOU Wei^{2,1}, ZHOU Jian², XU Guang-ming¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)