

基于三维非连续接触模型的管片接头静动力特性分析

艾辉军¹, 彭立敏^{1, 2*}, 施成华^{1, 2}

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

摘要: 基于非线性接触理论, 考虑盾构隧道结构的非连续性, 模拟管片接头结构和管片衬砌与围岩及道床之间的相互作用, 建立了道床-管片-围岩的三维非连续接触模型, 对盾构隧道管片接头在围岩静压、列车动载作用下的受力与变形进行了深入分析。研究表明, 围岩静压下拱顶和隧底处的纵向接头部分向内张开, 两侧拱腰处的接头部分向外张开, 拱顶处的封顶块与邻接块错台较大, 拱腰接头受压明显, 拱顶接头受压最小, 各环管片拱顶处的螺栓轴力最大, 隧底处的其次, 拱腰处的接头螺栓轴力最小, 旋转了一定拼装角度后位于拱肩上部接头螺栓, 其剪力最大; 列车动载作用下管片接头的张开错台、混凝土应力以及接头螺栓的内力均在动载施加初期迅速增加, 然后明显减小, 而后产生波动, 其中浅埋地铁隧道拱顶接头的动力响应较隧底接头明显, 螺栓剪力在列车动载作用下较螺栓轴力增加的多。

关键词: 盾构隧道; 管片接头; 三维非连续接触模型; 静动力分析

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)11-2023-07

作者简介: 艾辉军(1989-), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 研究方向为隧道动力学、隧道及地下工程结构精细化模拟。E-mail: aihui_civil@163.com。

Static and dynamic characteristic analysis of segment joints based on three-dimensional discontinuous contact model

AI Hui-jun¹, PENG Li-min^{1, 2}, SHI Cheng-hua^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory of High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the nonlinear contact theory and considering the discontinuity of shield tunnel structure, a three-dimensional discontinuous contact model for track bed-segment-surrounding rocks is established by simulating the segment joints and the interaction between the segment and the surrounding rocks as well as the track bed. The mechanical and deformation properties of the segment joints under the pressure of the surrounding rocks and the action of the subway train dynamic load are analyzed in depth based on this model. The results of numerical simulations show that under the pressure of the surrounding rocks, some longitudinal joints in arch crown area and arch bottom open inwards; some joints in haunch of shield tunnel open outwards; and the dislocations between the completed blocks and the adjacent blocks in arch crown area are comparatively large. The joints in haunch are compressed obviously and those in arch crown have the minimum pressure under the pressure of the surrounding rocks. The axial forces of joint bolts in vault area are relatively the greatest, those in arch bottom come second, and those in haunch are the smallest. The shearing forces of joint bolts in the top of arch foots are also the greatest when segment ring rotates to an angle so as to complete assembly. The opens and dislocations of the segment joints, concrete stress and internal forces of joint bolts all increase rapidly at the beginning of the dynamic load, then significantly decrease, and finally are fluctuant under the action of dynamic load of subway trains. The dynamic response of joints in arch crown is more obvious than that in arch bottom for shallow buried metro tunnels. The shearing forces of joint bolts increase more than the axial forces under the action of dynamic load of subway trains.

Key words: shield tunnel; segment joint; three-dimensional discontinuous contact model; static and dynamic analysis

0 引言

由于良好的可控性与对相邻环境影响较小等优点, 盾构法隧道在近年城市轨道交通建设中得到广泛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB013802); 国家自然科学基金项目(51278494); 高速铁路基础研究联合基金项目(U1134208)

收稿日期: 2013-04-10

*通讯作者

应用。地铁盾构隧道由许多管片拼装而成，管片是地铁盾构隧道最基本的结构单元，接头存在是其最显著的特征。这种特殊的形式使得盾构管片接头的受力与变形影响着整个盾构隧道结构，尤其在运营地铁引起的动力响应方面，管片接缝成为列车振动传播的关卡，振动波在接头处反射和透射，影响着盾构管片本身的动力响应^[1]。同时，管片间的接头是盾构隧道结构最薄弱的部分，在长期静动力作用下，常常发展为隧道的病害点。因此，盾构隧道衬砌应当被视为含有大量接缝的不连续变形体进行静力和动力分析，而管片接头作为盾构隧道的关键部位，其力学性能的研究显得尤其重要。国内外盾构隧道衬砌的常用计算方法主要有惯用法、修正惯用法、多铰环法与梁-弹簧模型法等^[2-4]。这些模型一般需要接头的转动刚度，压缩刚度或剪切刚度参数，而衬砌整环试验或管片接头试验成本与难度大，参数的确定一般只能凭经验或工程类比确定^[5-7]。同时，目前的模型大都将接头简化成弹簧单元等，难以真实地模拟管片接头处的相互作用，更难以表现接头在静力和动力作用下的张开，错台。因此，采用目前的常用分析模型，无法对管片接头结构在围岩压力下的受力变形以及列车动载作用下的动力响应进行深入分析。

本文基于非线性接触理论，采用梁单元模拟管片弯螺栓，实体单元模拟管片，将螺栓梁单元嵌入管片实体单元中，并在接头处设置挤压和摩擦关系模拟管片接头结构，建立了道床-管片-围岩的三维非连续接触模型，对地铁盾构管片接头在围岩静压和列车动载作用下的受力和变形进行了分析。

1 三维非连续接触模型

1.1 计算模型

ABAQUS 有限元软件建立的错缝拼装盾构管片模型见图 1。

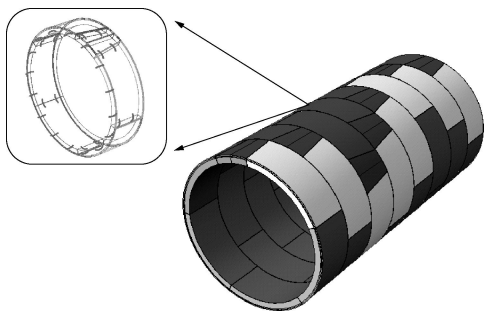


图 1 盾构管片模型

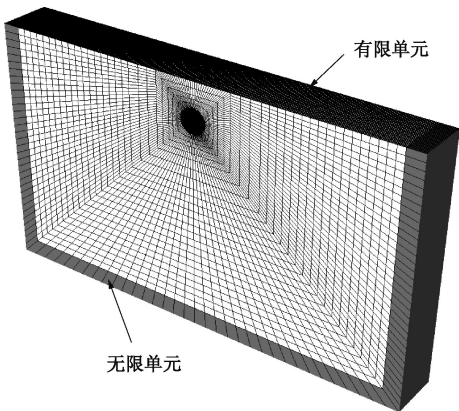
Fig. 1 Model for shield tunnel segments

管片全环分成一个封底块 K (21.5°)，2 个邻接块 B(68°)，3 个标准块 A(67.5°)。管片厚度 300 mm，

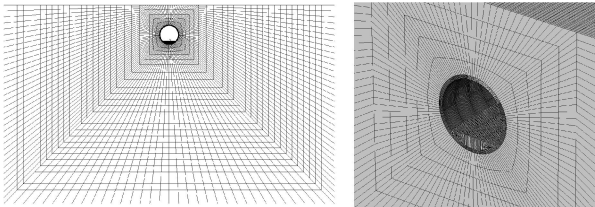
环宽 1.5 m，外径 6.0 m，内径 5.4 m，衬砌环的接缝连接包括 16 个环缝连接螺丝 (M27) 和 12 个纵缝连接螺栓 (M27)。

模型中，管片采用实体单元进行模拟，且考虑了管片嵌缝和 EPDM 弹性橡胶止水条。EPDM 弹性橡胶止水条采用超弹性实体单元模拟。管片弯螺栓采用梁单元来模拟，忽略螺母和垫圈，横截面取直径 27 mm 的圆，长度取螺栓的实际长度。螺栓考虑预紧力，以模拟高强度螺栓连接下的接头状态，本文中预紧力大小为 30 kN。

道床-管片-围岩的三维非连续接触模型如图 2 所示。隧道覆土 6 m，围岩沿隧道横向取 100 m，纵向取 12 m，竖向取 60 m。



(a) 有限元-无限元耦合的计算模型整体



(b) 计算模型正面网格图 (c) 道床-管片-围岩的网格划分
图 2 道床-管片-围岩的三维非连续接触模型

Fig. 2 Three-dimensional discontinuous contact model for track bed-segment-surrounding rocks

1.2 模型本构与材料参数

三维非连续接触模型中，围岩与道床采用莫尔-库仑屈服准则下的弹塑性本构模型，管片与螺栓采用线弹性本构模型，其基本材料参数见表 1。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials

材料类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	阻尼比系数	
						α	β
围岩	1.2×10^3	0.4	2.0	60	22	0.085	0.0045
道床	1.98×10^3	0.3	2.2	200	40	0.060	0.0300
管片	3.45×10^4	0.2	2.6			0.045	0.0025
螺栓	2.06×10^5	0.167	7.85			0.030	0.0020

EPDM 弹性橡胶止水条采用双参数的 Mooney-Rivlin 橡胶模型^[8]进行模拟：密度为 1.3

g/cm^3 , 常数 C_1 为 0.7 MPa, C_2 为 0.35 MPa, 阻尼比系数 $\alpha=0.1$, $\beta=0.05$ 。

1.3 三维接触计算

三维非连续接触模型中道床-管片-围岩的接触关系如图 3 所示。接触搜寻算法均采用主从接触面算法, 以缩短模型中大量接触的处理时间^[9]。

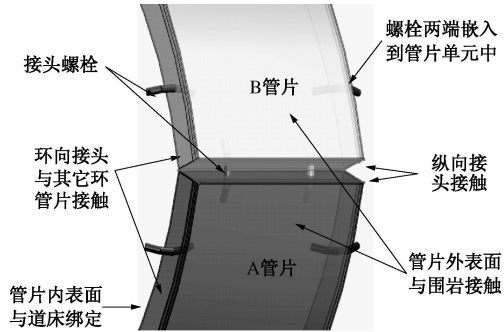


图 3 道床-管片-围岩的三维接触关系

Fig. 3 Three-dimensional contact relationship among track bed, segment and surrounding rocks

接头螺栓两端分别嵌入到 (embedded) 相应的管片单元中, 既可模拟接头的抗拉、压、剪力学性质, 也可表现接头在各受力条件下的变形状态。

隧道道床和管片衬砌采用绑定约束 (tie), 将从属表面的节点绑定到主控表面, 管片内表面和道床底面不发生任何相对位移, 共同受力变形。

管片接头的接触属性^[10], 在法向为“硬接触”(hard contact): 接触面之间能够传递的接触压力大小不受限制, 当接触压力变为零或负值时, 两个接触面分离, 并且去掉相应节点上的接触约束。对与切向, 采用库仑摩擦, 库仑摩擦的公式为

$$\tau_{\text{crit}} = \mu P \quad (1)$$

式中, τ_{crit} 是临界切应力, μ 是摩擦系数, P 是法向接触压强。本文中管片接头摩擦系数 μ 取 0.62, 在切向力达到临界切应力之前, 摩擦面之间不发生相对滑动。

管片与围岩之间的接触属性, 在法向采用惩罚刚度模型^[11]:

$$\begin{cases} p = 0 & (\Delta l < 0) \\ p > 0 & (\Delta l = 0) \\ p = f(k_{\text{in}}, \Delta l) & (\Delta l > 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中 p 为接触法向力; Δl 为嵌入量; k_{in} 为接触面嵌入惩罚刚度; f 为惩罚函数。

对于切向作用, 仍采用库仑摩擦, 摩擦系数取 0.88。

2 列车动载的施加

地铁列车在轨道上行驶, 竖向动荷载可以用一个

激振力函数来模拟^[12], 其表达式为

$$F(t) = p_0 + p_1 \sin(\omega_1 t) + p_2 \sin(\omega_2 t) + p_3 \sin(\omega_3 t) \quad (3)$$

式中 p_0 为车轮静载; p_1 , p_2 , p_3 分别为①按行车平顺性、②按作用到线路上的动力附加荷载和③波形磨耗 3 种控制条件的振动荷载典型值。

令列车簧下质量为 M_0 , 则相应的振动荷载幅值为

$$p_i = M_0 a_i \omega_i^2 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

式中 a_i ($i=1, 2, 3$) 为典型矢高, $i=1, 2, 3$ 分别对应于控制条件①, ②, ③; ω_i ($i=1, 2, 3$) 为对应车速下不平顺振动波长的圆频率, 故有

$$\omega_i = 2\pi v / L_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

式中, v 为列车的运行速度; L_i ($i=1, 2, 3$) 为典型波长。

根据资料, p_0 取 80 kN, M_0 取 750 Ns^2/m , $v=70 \text{ km/h}$, $L_1=10 \text{ m}$, $a_1=3.5 \text{ mm}$, $L_2=2 \text{ m}$, $a_2=0.4 \text{ mm}$, $L_3=0.5 \text{ m}$, $a_3=0.08 \text{ mm}$, 则地铁列车振动荷载时程曲线如图 4 所示。

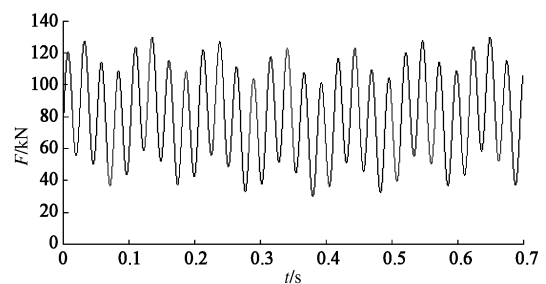


图 4 列车动载时程曲线

Fig. 4 Force-time curves of train load

地铁列车荷载作用于铁轨上, 再经过轨枕传给道床, 与此同时地铁列车荷载沿着隧道轴线方向移动。因此列车振动荷载是一个大小和作用点都随时间变化的面力。本文使用 Fortran 语言编写 ABAQUS 二次开发平台提供的 DLOAD 用户子程序施加该移动空间荷载, 荷载经轮载扩散换算后直接施加在简化的隧道道床上。

3 计算结果分析

3.1 接头张开和错台

道床-管片-围岩的三维非连续接触模型在围岩静压下的变形云图如图 5 (a) 所示, 在地铁列车荷载作用下某时刻的变形云图如图 5 (b) 所示。

从图 5 (a) 可以看出, 围岩静压下盾构隧道向隧道中心线收敛, 其中拱顶沉降最大为 17.65 mm, 水平收敛最大为 5.63 mm。盾构隧道衬砌横截面变形后成典型的“横鸭蛋”形状, 如图 6。将变形放大仔细观察, 考虑接缝的错缝拼装管片在部分接头处存在明显的错台和张开。为便于分析, 对管片环的纵向接头,

自拱顶封顶块起逆时针进行#1接头至#6接头的编号。

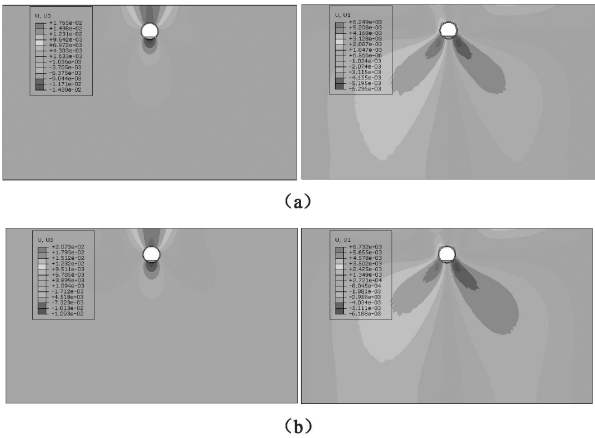


图 5 三维非连续接触模型整体变形云图

Fig. 5 Nephograms of deformation of three-dimensional discontinuous contact model

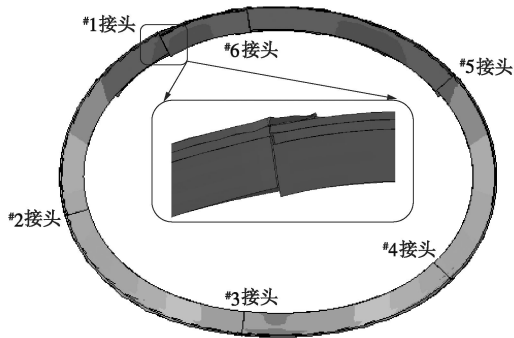


图 6 围岩静压下管片横向变形图

Fig. 6 Horizontal deformation of shield segment under pressure of surrounding rocks

拱顶和隧底的纵向接头有向内张开的趋势，两侧拱腰处的纵向接头则有向外张开的趋势，其中在部分拱腰处的接头形成了较小的向外张开角。对于管片错台，则主要集中在拱顶和隧底处，其中拱顶的封顶块与邻接块错台最明显，且值较大。

以图 1 中右数第②环管片(以下简称第②环管片)为例，其纵缝接头张开量为 0.12 mm，张开不明显，但位于拱腰接头 2，接头向外张开，对隧道防水不利。可以想见，当隧道埋深增大，围岩级别降低，该处接头的张开量变大时，则可能导致隧道漏水。另外，接头处管片错台最大量为 0.61 mm，发生在拱顶，可见拱顶处的封顶块与邻接块错台较大，是盾构隧道整体在围岩压力作用下的薄弱点。

从图 5 (b) 可以看出，在地铁列车动载作用下，盾构隧道及围岩的变形较围岩静压时产生了变化：拱顶沉降和水平收敛增大，拱底隆起减少。列车动载施加后不同时刻的隧道及周围土体横截面位移响应云

图如图 7 所示。

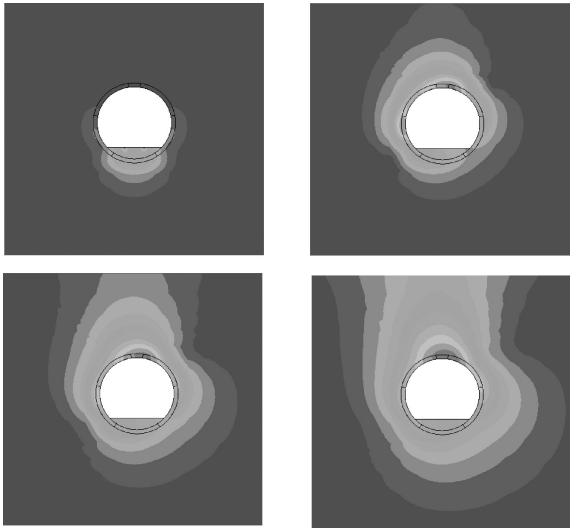


图 7 不同时刻下隧道及周围土体位移响应云图

Fig. 7 Nephograms of displacement response of tunnel and surrounding soil at different time

从图 7 中可以看出，在列车荷载施加的初期，最大的位移响应发生在隧道拱底处，而在拱顶处位移响应最小，随着列车荷载的施加，浅埋的地铁盾构隧道拱顶的位移响应不断增大，其中拱顶接头处的位移响应最大。同时，浅埋情况下，列车动载作用下的位移响应一直传至地表，对地面影响较大。

道床-管片-围岩的三维非连续接触模型中第②环管片#1 接头（以下简称接头②-1）在列车动载作用下不同时刻的变形状态如图 8 所示。显然，在列车动载作用下，接头位移响应明显。

取接头②-2 截面中线上外缘一点为控制点 A，其接头张开量在列车动载作用下的时程曲线如图 9 中的 A；取接头②-1 截面中线上内缘一点为控制点 B，其接头径向错台量在列车动载作用下的时程曲线如图 9 中的 B。

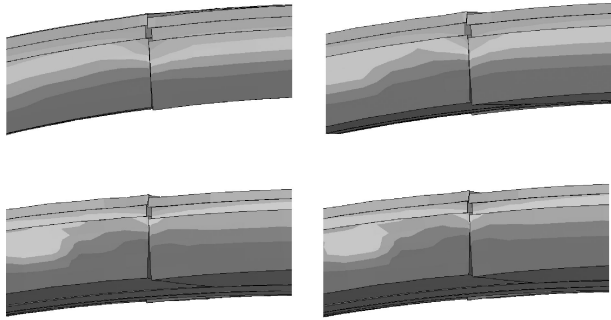


图 8 盾构管片接头②-1 在不同时刻下的变形响应

Fig. 8 Deformation responses of segment joint ②-1 at different time

列车动载作用下管片接头的变形在动载施加初期

迅速增加, 然后明显减小, 而后产生波动。显然, 在列车动载作用下, 盾构隧道管片接头的变形发生了明显增大, 其中接头②-2 的张开量最大增加了 0.13 mm, 约 1 倍; 接头②-1 的错台量最大增加了 0.17 mm, 约 28%。其中特别值得一提的是: 位移响应迅速增加的时刻并不是列车荷载直接作用在控制点所在横截面位置时, 而是列车动载影响控制点的初期, 在本模型中即列车动载刚施加时。

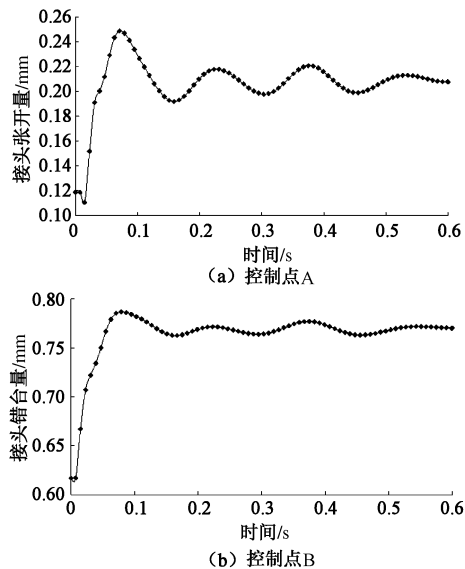


图 9 管片接头控制点变形时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of displacement of segment joint control points

3.2 接头处混凝土应力

道床 - 管片 - 围岩的三维非连续接触模型在围岩静压下的盾构管片最小主应力云图如图 10 (a) 所示, 在地铁列车荷载作用下某时刻的盾构管片最小主应力云图如图 10 (b) 所示。

从图 10 (a) 可以看出, 围岩静压下拱腰接头受压明显, 拱顶接头受压最小; 从图 10 (b) 可以看出, 地铁列车动载作用下, 管片衬砌的应力分布发生了变化, 管片混凝土的拉应力和压应力均增大, 同时接头螺栓嵌入处的混凝土发生了应力集中。

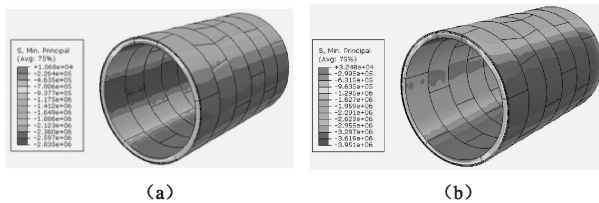


图 10 盾构隧道管片最小主应力云图

Fig. 10 Nephograms of minimum principal stress of shield tunnel segments

取接头②-2 截面中线上内缘一点为控制点 C, 其

最小主应力在列车动载作用下的时程曲线如图 11 所示。

从图 11 中可以看出, 在列车动载作用下, 管片的应力也在加载初期迅速增加, 然后明显减小, 而后产生波动。控制点 C 的最小主应力达到了 2.77 MPa, 较围岩静压情况下的最小主应力值增大了 0.36 MPa。

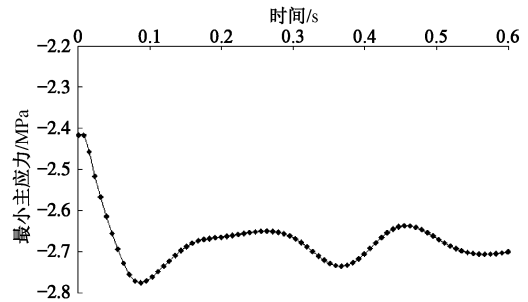


图 11 管片接头控制点 C 最小主应力时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of minimum principal stress of segment joint control point C

第②环管片各接头在围岩静压及列车动载作用下的混凝土最大压应力如图 12 所示。

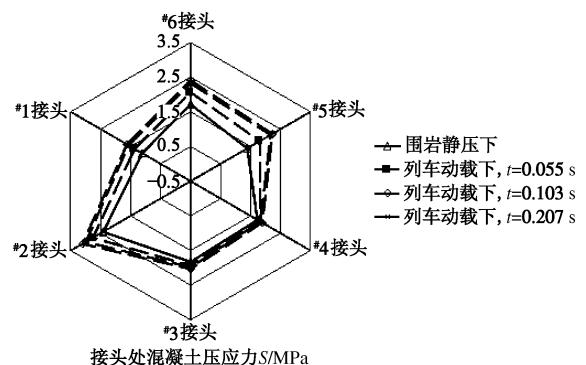


图 12 第②环管片各接头的混凝土压应力

Fig. 12 Compressive stress of joint concrete of segment ring ②

从图 12 中可以明显地看出, 围岩静压及列车动载作用下, 位于拱腰处的#2 接头受压均最明显。隧道拱顶区域的#1 接头、#6 接头和#5 接头, 混凝土压应力在列车动载作用下增加的较多, 而拱底区域的#3 接头和#4 接头, 混凝土压应力则在列车动载作用下增加不明显。因此, 在列车荷载作用下, 浅埋地铁隧道拱顶区域的接头, 其动力响应较拱底区域的接头更明显。

3.3 接头螺栓内力

道床 - 管片 - 围岩的三维非连续接触模型中环缝接头螺栓受力较小, 下面只分析纵缝接头螺栓的轴力与剪力, 其在围岩静压下的内力云图如图 13 所示。

从图 13 中可以看出, 围岩静压下, 各环管片拱顶处的螺栓轴力最大, 隧底处的其次, 拱腰处的接头螺栓轴力最小, 其中最大螺栓轴力为 53.3 kN, 最小螺栓

轴力为 31.5 kN。对于螺栓剪力, 主要产生于各螺栓的中部。拱顶处的螺栓剪力也较大, 尤其以旋转了一定拼装角度后位于拱肩上部的接头, 其螺栓剪力最大。螺栓最大剪力为 35.6 kN。

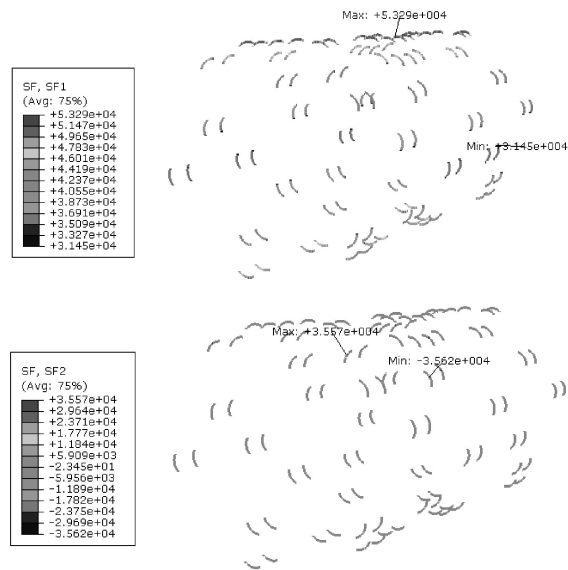


图 13 围岩静压下管片纵缝接头螺栓轴力与剪力云图(上图为螺栓轴力云图, 下图为螺栓剪力云图)

Fig. 13 Nephograms of axial force and shearing force of longitudinal joint bolts under pressure of surrounding rocks

道床-管片-围岩的三维非连续接触模型中接头螺栓在列车荷载作用下的动力响应同样可以选取相应的螺栓控制截面进行内力时程曲线的分析。取接头②-1的一螺栓中截面作为控制截面, 其轴力时程曲线如图 14 所示, 剪力时程曲线如图 15 所示。

从图 14, 15 中可以看出, 接头螺栓的内力随时间的变化规律也是在加载初期迅速增加, 然后明显减小, 而后产生波动。其中接头②-1 的螺栓在列车动载作用下, 轴力最大增加了约 7.3 kN, 剪力最大增加了约 19.5 kN。显然, 在列车动载作用下, 接头螺栓的剪力增加的更为明显。在长期的列车动载作用下, 需要关注拱顶接头螺栓可能发生的剪切疲劳损伤。

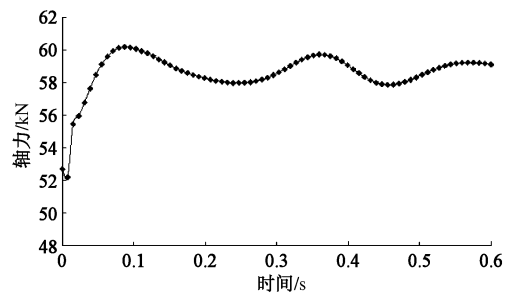


图 14 接头②-1 螺栓中截面轴力时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of axial force of bolt middle section of joint ②-1

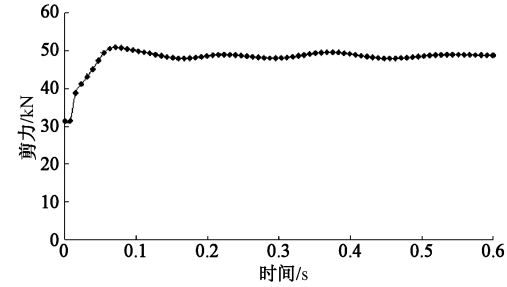


图 15 接头②-1 螺栓中截面剪力时程曲线

Fig. 15 Time-history curves of shearing force of bolt middle section of joint ②-1

4 结 论

考虑地铁隧道结构的非连续性, 合理模拟管片接头结构和管片衬砌与围岩及道床之间的复杂相互作用, 建立了道床-管片-围岩的三维非连续接触模型, 对地铁盾构管片接头在围岩静压和列车动载作用下的受力和变形进行了分析, 可以得到以下 3 点结论。

(1) 围岩静压下, 盾构隧道横向变形, 衬砌横截面成典型的“横鸭蛋”形状, 部分接头张开和错台。对于管片纵向接头, 拱顶和隧底的接头有向内张开的趋势, 两侧拱腰处的接头则有向外张开的趋势, 拱顶处的封顶块与邻接块错台较大。其中接头②-2 张开量为 0.12 mm; 接头②-1 错台量为 0.61 mm。列车动载作用下管片接头的变形在动载施加初期迅速增加, 然后明显减小, 而后产生波动, 其中接头②-2 的张开量最大增加了 0.13 mm, 增加了约 1 倍; 接头②-1 的错台量最大增加了 0.17 mm, 增加了约 28%。

(2) 围岩静压下, 拱腰接头受压比较明显, 拱顶接头受压最小。地铁列车动载作用下, 管片混凝土的拉应力和压应力均增大, 接头螺栓嵌入处的混凝土发生应力集中, 接头②-2 控制点的最小主应力达到了 2.77 MPa, 较围岩静压情况下的最小主应力值增大了 0.36 MPa。浅埋地铁隧道拱顶区域的接头, 其动力响应较拱底区域的接头更明显。

(3) 围岩静压下, 各环管片拱顶处的螺栓轴力最大, 隧底处的螺栓轴力其次, 拱腰处的接头螺栓轴力最小, 旋转了一定拼装角度后位于拱肩上部的接头螺栓, 其剪力最大。在列车动载作用下, 接头螺栓的内力随时间的变化规律也是在加载初期迅速增加, 然后明显减小, 而后产生波动, 其中接头②-1 的螺栓在列车动载作用下, 轴力最大增加了约 7.3 kN, 剪力最大增加了约 19.5 kN, 剪力增加的较多。

参考文献:

[1] 莫海鸿, 邓飞皇, 王军辉. 运营期地铁盾构隧道动力响应

- 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 2507 - 3512. (MO Hai-hong, DENG Fei-huang, WANG Jun-hui. Analysis of dynamic responses of shield tunnel during metro operation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 2507 - 3512. (in Chinese))
- [2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [3] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. 岩土力学, 1998, **19**(2): 26 - 32. (ZHU He-hua, TAO Lü-bin. Study on two beam-spring models for the numerical analysis of segments in shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(2): 26 - 32. (in Chinese))
- [4] 董新平. 极限荷载条件下盾构管片接头模型比较研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1178 - 1182. (DONG Xin-ping. A benchmark analysis of the segment joint model for segmented tunnel lining in the ultimate limit state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1178 - 1182. (in Chinese))
- [5] 张冬梅, 樊振宇, 黄宏伟. 考虑接头力学特性的盾构隧道衬砌结构计算方法研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2546 - 2552. (ZHANG Dong-mei, FAN Zhen-yu, HUANG Hong-wei. Calculation method of shield tunnel lining considering mechanical characteristics of joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2546 - 2552. (in Chinese))
- [6] 闫治国, 彭益成, 丁文其, 等. 青草沙水源地原水工程输水隧道单层衬砌管片接头荷载试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(9): 1385 - 1390. (YAN Zhi-guo, PENG Yi-cheng, DING Wen-qi, et al. Load tests on segment joints of single lining structure of shield tunnel in Qingcaosha Water Conveyance Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1385 - 1390. (in Chinese))
- [7] 闫治国, 丁文其, 沈碧伟, 等. 输水盾构隧道管片接头力学与变形模型研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1185 - 1191. (YAN Zhi-guo, DING Wen-qi, SHEN Bi-wei, et al. Structural model for radial joints of water-conveyance shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1185-1191. (in Chinese))
- [8] 陈俊生, 莫海鸿. 盾构隧道管片接头抗弯刚度的三维数值计算[J]. 铁道学报, 2009(4): 87 - 91. (CHEN Jun-sheng, MO Hai-hong. Three-dimensional FEM analysis on flexural rigidity of segment joints in shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2009(4): 87 - 91. (in Chinese))
- [9] 郭毅之, 金先龙, 丁俊宏, 等. 沉管隧道地震响应分析中的三维接触模型与算法研究[J]. 应用力学学报, 2006, **20**(1): 48 - 52. (GUO Yi-zhi, JIN Xian-long, Ding Jun-hong, et al. Three-dimensional contact model and algorithm for earthquake response of immersed tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, **20**(1): 48 - 52. (in Chinese))
- [10] 杨阜东. 高水压越江盾构隧道管片结构稳定性分析[D]. 济南: 山东大学, 2011. (YANG Fu-dong. Structural stability study for underwater shield-driven tunnel lining under high hydraulic pressure[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese))
- [11] 赵武胜, 何先志, 陈卫忠, 等. 盾构隧道地震响应分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2415 - 2421. (ZHAO Wu-sheng, HE Xian-zhi, CHEN Wei-zhong, et al. Method for analyzing seismic response of shield tunnel and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2415 - 2421. (in Chinese))
- [12] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, **21**(2): 84 - 88. (LIANG Bo, CAI Ying. Dynamic analysis of subgrade of high speed railways in geometric irregular condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, **21**(2): 84 - 88. (in Chinese))