

DOI: 10.11779/CJGE202104007

# 地震下大断面盾构隧道接缝力学及防水性能研究

张稳军<sup>1, 2</sup>, 曹文振<sup>1, 2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300354)

**摘要:** 为研究大断面盾构隧道在地震条件下接缝力学及防水性能, 利用 ABAQUS 分别建立了地层-结构三维有限元模型及密封垫二维有限元实体模型, 研究了在不同地震强度下管片接缝的力学性能及错台量与张开量, 基于不同位置接缝变形结果讨论了隧道防水性能退化情况。结果表明: ①中震与大震下左侧拱腰下侧接缝处的最大主拉应力已超过混凝土最大抗拉强度, 混凝土出现一定损伤; ②不同地震强度下纵缝错台量分布规律及大小基本相同, 呈“眼镜”状分布, 拱顶与拱底错台量相对较小, 拱腰与拱脚处错台量较大; ③拱顶右侧接缝防水能力保持最好, 可达 2.77 MPa, 相比正常情况仅削弱 16%, 环内拱腰附近接缝防水能力削弱严重, 防水性能削弱达到 40%。

**关键词:** 盾构隧道; 地震作用; 力学性能; 防水性能; 管片接缝

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)04-0653-08

作者简介: 张稳军(1975—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事隧道与地下工程施工与设计研究。E-mail: wjzhang@tju.edu.cn。

## Mechanical and waterproof performances of joints of shield tunnels with large cross-section under earthquakes

ZHANG Wen-jun<sup>1, 2</sup>, CAO Wen-zhen<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical and waterproof performances of joints of large-section shield tunnels under seismic conditions, ABAQUS is used to establish a 3D stratum-structure finite element model and a 2D sealing gasket finite element solid model. The mechanical properties, offset, and openings are studied for the segmental joints. Based on the deformation results of the joints at different positions, the deterioration of the waterproof performance of the tunnel is discussed. The results show that: (1) The maximum principal tensile stress of the joints at the lower part of the arch waist under moderate and large earthquakes exceeds the maximum tensile strength of concrete, leading to damage on the concrete. (2) The size of longitudinal joints keeps basically the same under different earthquakes, and their distribution is like a “glass” shape. The amount of misalignment between the arch top and the arch bottom is relatively small, while the amount of misalignment at the arch waist and arch feet is relatively large. (3) The joints at the right side of the dome have the best waterproof capacity of 2.77 MPa, which is only 16% weaker than that under the normal situation. The waterproof performance is severely weakened by 40% at the joints near the arch waist.

**Key words:** shield tunnel; seismic action; mechanical property; waterproof performance; segment joint

## 0 引言

中国是地震频发地区, 尤其在汶川地震发生后, 大量的地下结构遭到严重破坏, 给人民的生命财产安全带来巨大威胁。近年来, 高烈度地区所建盾构隧道数量不断增多, 这对隧道的抗震性能提出了更高要求。因此, 研究地震作用下盾构隧道的响应特征是十分必要的。

刘晶波等<sup>[1]</sup>为研究地铁盾构隧道的地震反应, 采用复反应分析法研究了并行隧道间距离、衬砌厚度、材料性质等因素对地震反应的影响。Mizuno 等<sup>[2]</sup>考虑接

缝剪应力的传递作用以及弯曲刚度折减, 并结合振动台试验研究了盾构隧道横向地震响应及其动力特性。潘佳春<sup>[3]</sup>采用 ANSYS 数值分析软件, 通过建立相关计算模型, 针对盾构隧道的地震响应、双线隧道在受洞间距影响时的响应变化情况和相关减震措施的减震优劣性等问题进行了分析研究。朱彤等<sup>[4]</sup>建立了一种精细化装配式管片结构计算模型, 采用弹塑性有限元动力时程分析, 分析了盾构隧道在可液化场地中的地

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51978460, 51778412)

收稿日期: 2020-08-14

震响应特征及规律。郭凯<sup>[5]</sup>采用有限元分析软件建立了等刚度圆环模型和考虑接头效应的模型,对比分析了不同模型间内力分布规律与数值大小的异同。张稳军等<sup>[6]</sup>通过建立大尺寸复杂地层地震动模型,分析了各地层加速度放大倍数和不同区间段风险,并划分了地震破坏灾区。禹海涛等<sup>[7]</sup>提出了一种用于模拟盾构隧道纵向地震响应的宏-细观多尺度分析方法,并成功将该方法应用于世界首个特高压 GIL 电力盾构隧道。为研究盾构隧道的地震响应,前人依靠数值模拟和震动台试验进行了广泛研究并取得极为丰硕的成果,各种理论也逐渐成熟。但在地震响应的相关数值模拟中对管片接缝常采用等效刚度处理,关于地震后大断面盾构隧道接缝力学性能研究极少,而接缝作为盾构隧道衬砌结构薄弱点,其在地震条件下的力学性能对整体结构的安全而言非常重要。

管片接缝处是盾构隧道发生地下水渗漏的主要途径,因而接缝防水是盾构管片设计与研究的重点<sup>[8]</sup>。金跃郎等<sup>[9]</sup>为解决某工程超高水压盾构隧道接缝防水设计这一关键问题,利用数值分析设计并筛选得到内外双道密封垫断面型式,并结合试验研究了该接缝防水性能。张稳军等<sup>[10]</sup>研究了复合型密封垫不同错台量对管片防水能力的影响,并预测了在不同错台量下复合型密封垫长期防水性能。Ding 等<sup>[11]</sup>为研究管片接缝张开量和错台量对结构防水性能影响,利用研制的新型三向加载防水性能试验系统进行试验研究。Gong 等<sup>[12]</sup>提出一种基于试验和计算联合的防水设计框架,并将该设计程序实际运用至国内某水下盾构隧道。李拼等<sup>[13]</sup>分析了典型错台及张开工况下管片接缝防水性能,揭示大张开量条件下管片接缝密封垫错台及张开时的变形与接触应力分布特性。杨贵生等<sup>[8]</sup>提出了一种密封垫断面形式和不同密封槽尺寸对应的密封垫修改方法,通过数值计算分析了密封槽尺寸对密封垫防水性能的影响规律。Li 等<sup>[14]</sup>以南京地铁 10 号线盾构隧道密封垫设计为研究对象,研究了双道密封垫的防水性能。地震发生后盾构隧道常出现较大的错台量与张开量,这对管片接缝防水性能造成较大削弱,但关于地震作用如何影响管片接缝防水性能的相关研究较少。因而研究大断面盾构隧道在地震下接缝力学及防水性能具有重要现实意义,可为管片抗震设计和灾害预测提供参考意见。

为研究大断面盾构隧道在地震条件下接缝力学及防水性能,利用 ABAQUS 分别建立地层-结构三维有限元模型及密封垫二维有限元实体模型,研究在不同地震强度下管片接缝的力学性能及接缝错台量与张开量,并基于不同位置接缝变形结果讨论隧道防水性能退化情况。

## 1 工程概况及地震波选取

某大断面盾构隧道管片衬砌外径为 15 m, 管片厚度为 0.65 m, 环宽 2 m, 衬砌混凝土等级为 C60, 环间以 48 根 8.8 级 M39 纵向螺栓相连, 环内管片间以 2 根 8.8 级 M39 环向螺栓紧密相连。所研究区间地层土质情况及材料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	动剪切模量 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
粉质黏土	42	126	0.49	1.97
混凝土	—	36000	0.2	2.6
螺栓	—	210000	0.3	7.8

选择地震安评报告中所提供的 3 种地震波进行时程响应分析,3 种地震波分别为:50 a 超越概率为 63%,即小震(峰值加速度为 0.21 m/s<sup>2</sup>);50 a 超越概率为 10%,即中震(峰值加速度为 0.60 m/s<sup>2</sup>);50 a 超越概率为 2%,即大震(峰值加速度为 1.2 m/s<sup>2</sup>)。3 种地震波的基岩加速度时程曲线如图 1 所示。

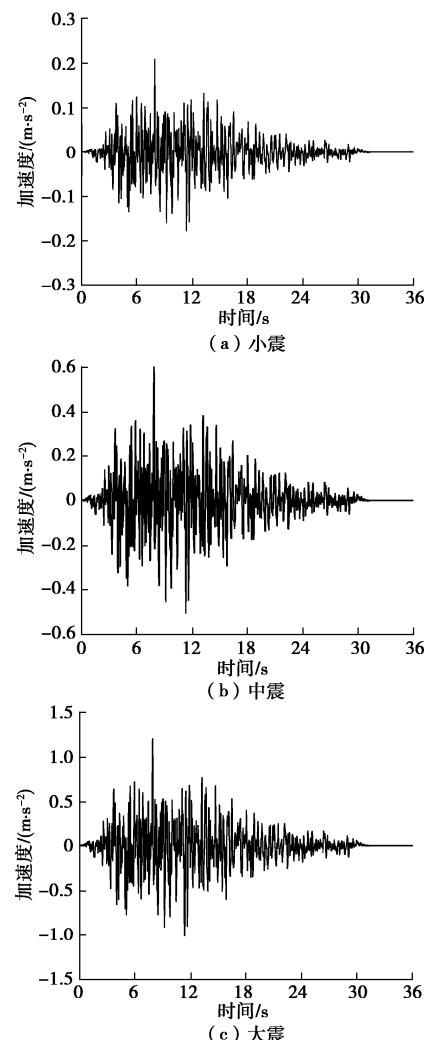


图 1 加速度时程曲线

Fig. 1 Time-history curve of acceleration

## 2 地震作用下管片接缝力学性能分析

### 2.1 三维地层-结构模型

依托大型通用有限元软件 ABAQUS 建立了地层和盾构隧道结构的三维精细化模型(如图 2 所示)。地层模型尺寸为 146 m(长)×88 m(高)×80 m(宽), 其中长为 Z 方向, 高为 Y 方向, 宽为 X 方向。隧道埋深 23 m, 隧道外径为 15 m, 管片厚度为 0.65 m, 环宽 2 m。隧道管片环布置如图 3 所示。

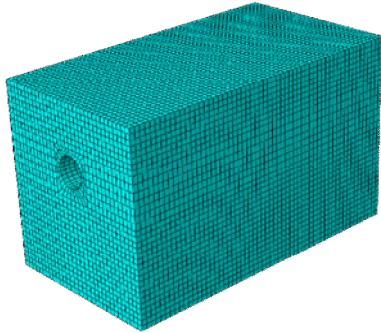


图 2 地层-结构模型

Fig. 2 Stratum-structure model

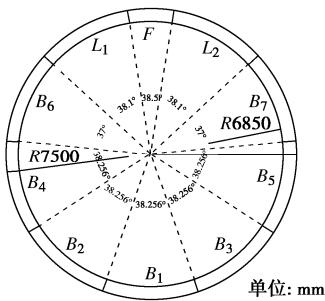


图 3 隧道管片环布置图

Fig. 3 Layout of segment rings of tunnel

为研究管片接缝处力学性能及变形特性, 在简化计算的同时并尽可能保证计算精度, 对隧道结构中间三环衬砌环建立精细化模型(如图 4 所示)。模型考虑了螺栓的存在, 采用梁单元进行模拟。两侧其余衬砌环采用纵向等效刚度<sup>[15]</sup>进行简化处理, 由于在纵向地震激励下隧道发生的变形以弯曲为主, 故本文主要基于纵向抗弯刚度有效率对衬砌环材料进行折减, 其中纵向抗弯刚度有效率为等效抗弯刚度/正常抗弯刚度, 经计算可得到纵向抗弯刚度有效率为 0.082, 即等效抗弯刚度为  $2.952 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。隧道整体结构如图 5 所示。

### 2.2 本构关系与接触关系

螺栓采用梁单元进行模拟, 材料本构模型采用双折线塑性强化模型, 其塑性加强段弹性模量取为弹性阶段的 1/100。

管片混凝土强度等级为 C60, 为反映混凝土的非线性变化规律, 混凝土材料本构模型选用 ABAQUS

内置的 Drucker-Prager 塑性模型, 剪胀角取为 30°, 内摩擦角取为 54°, 混凝土材料在压缩条件下的应力-应变曲线依据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[16]</sup>确定。

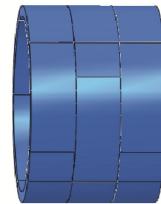


图 4 衬砌环精细化模型

Fig. 4 Refined model of lining ring



图 5 隧道整体结构

Fig. 5 Overall structure of tunnel

模型中共存在 3 种接触关系, 其中管片与管片之间、地层与管片之间的接触均设为硬接触, 且允许发生接触后分离; 管片与螺栓之间采用嵌入式接触, 即将螺栓嵌入实体管片中。

### 2.3 边界条件和地震动输入

为有效模拟半无限空间介质的辐射阻尼效应, 同时还能较好的模拟半无限地基的弹性恢复性能, 本文采用在实际工程中广泛应用的黏弹性人工边界, 通过在边界上设置连续分布的弹簧阻尼系统实现人工边界的施加。在 ABAQUS 内以 interaction 中的 spring 和 connect points to ground 分别模拟弹簧和阻尼。弹簧与阻尼力学参数计算公式为<sup>[17]</sup>

$$K_{BT} = \alpha_{BT} \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_s \quad , \quad (1)$$

$$K_{BN} = \alpha_{BN} \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_p \quad . \quad (2)$$

式中  $K_{BT}$ ,  $K_{BN}$  分别为切向弹簧和法向弹簧的刚度系数;  $C_{BT}$ ,  $C_{BN}$  分别为切向阻尼器和法向阻尼器的阻尼系数;  $\alpha_{BN}$  为法向弹簧刚度的修正系数,  $\alpha_{BT}$  为切向弹簧刚度的修正系数;  $G$  为介质的剪切模量,  $\rho$  为介质的密度;  $R$  为波源至边界结点的距离;  $C_s$ ,  $C_p$  分别为介质剪切波速和纵波波速, 计算方法可参考文献[17]。

本文采用基岩输入实现地震动输入, 即在整体模型底部施加安评报告中所提供的基岩地震加速度时程曲线(如图 1 所示), 沿隧道纵向输入地震波。

### 2.4 网格划分与计算工况

整体模型网格划分如图 2 所示, 隧道结构网格划分如图 6 所示。

### 2.5 接缝应力分析

图 7 为不同地震强度作用下的最大弯矩时刻接缝

处最大主应力分布云图, 拉应力为正值, 压应力为负值。由图可知, 在不同地震强度下接缝最大主应力分布规律基本一致, 主要以受拉为主, 受压区域较小; 最大主压应力最大值出现在环缝与纵缝交界处, 但值较小, 最大值出现在小震作用下, 仅为 1.327 MPa, 不会对管片造成损伤; 接缝内最大主拉应力最大值出现在左侧拱腰下侧接缝附近, 小、中、大震下最大主拉应力最大值分别为 2.0, 2.66, 2.826 MPa, 中震与大震下拱腰下侧接缝处的最大主拉应力已超过混凝土最大抗拉强度, 此时混凝土已发生一定程度损伤, 在一定程度上削弱了接缝震后的防水能力。



图 6 隧道结构网格划分

Fig. 6 Grid division of tunnel structure

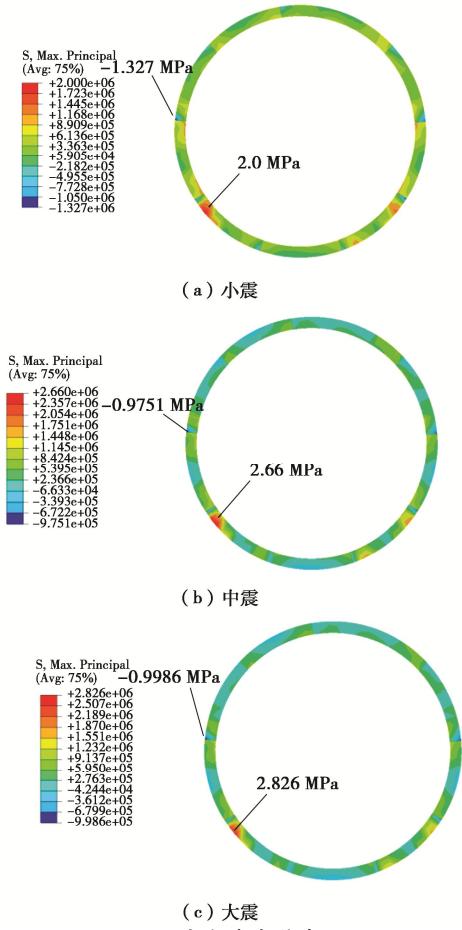


图 7 最大主应力分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of distribution of maximum principal stress

在 ABAQUS 中, 以  $X$  轴作为 1 轴,  $Y$  轴作为 2 轴, 故下文中  $S_{11}$  即为  $X$  轴向应力,  $S_{22}$  即为  $Y$  轴向应力。图 8 为接缝处  $S_{11}$  应力分布云图, 图 9 为接缝

处  $S_{22}$  应力分布云图。由图可知, 不同地震强度不会改变接缝处的  $S_{11}$  应力和  $S_{22}$  应力分布规律; 由图 8 可知, 接缝处  $X$  轴向应力以受压为主, 且在不同地震强度下  $X$  轴向最大应力值基本相同;  $X$  轴向最大压应力可达 13.5 MPa 左右, 出现在拱脚纵缝附近,  $X$  轴向最大拉应力为 1.55 MPa 左右, 出现在拱腰纵缝附近。由图 9 可知, 接缝  $Y$  轴向应力以受压为主,  $Y$  轴向拉应力仅出现在拱顶和拱底处; 拱腰接缝外侧的  $Y$  轴向压应力最大, 约为 14.5 MPa, 接缝内侧压应力仅为 1 MPa 左右, 因而拱腰接缝处张开量会大于其余位置。

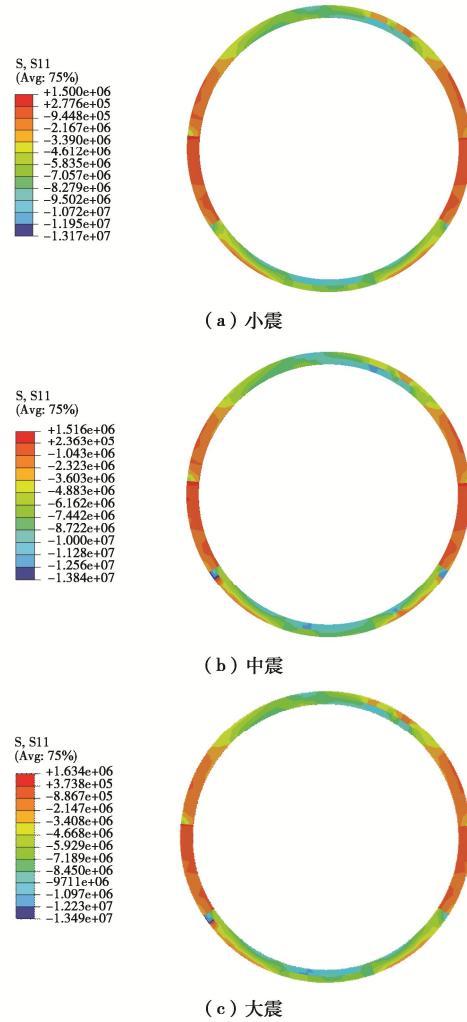


图 8  $S_{11}$  应力分布云图

Fig. 8 Cloud diagram of  $S_{11}$  stress distribution

## 2.6 接缝变形分析

接缝作为盾构隧道衬砌结构的薄弱点, 在地震作用后常会出现变形, 这对衬砌结构的力学及防水性能具有重要影响, 因而研究地震作用下的接缝变形具有十分重要意义。为研究地震作用下的接缝变形, 提取了地震结束后接缝的张开量与错台量。可以发现, 纵向地震激励作用下环缝张开量与错台量极小, 错台量最高仅为 2 mm, 基本无张开, 相对纵缝错台量而言较小, 故本文主要研究纵缝错台与张开变形。图 10 为不

同地震强度下纵缝错台量玫瑰图, 纵缝张开量较小, 最大仅为拱腰上侧纵缝部位存在的 2.2 mm 张开量, 其余部位张开量可忽略, 这与 2.5 中的分析结论吻合。

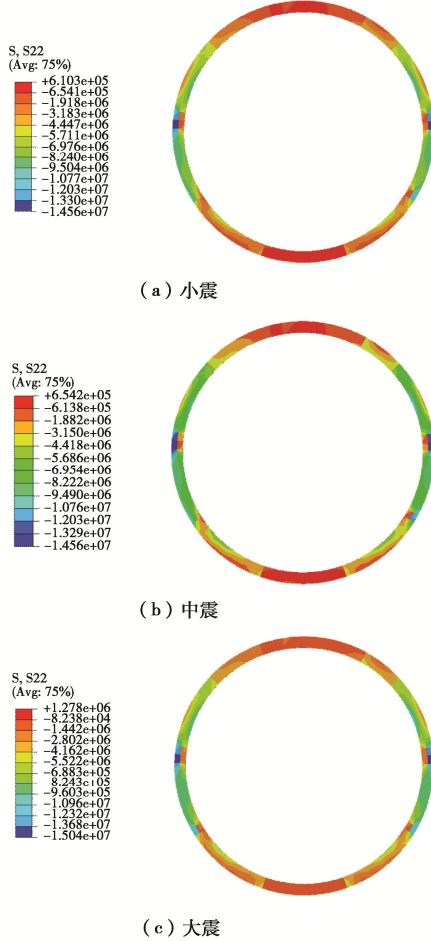
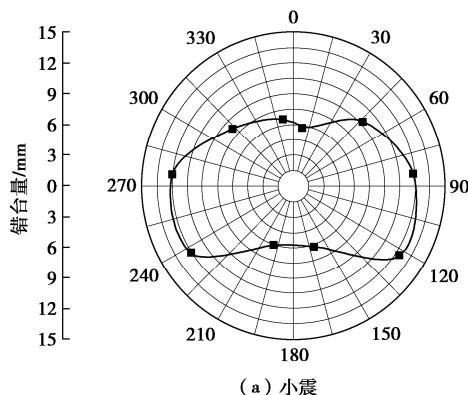


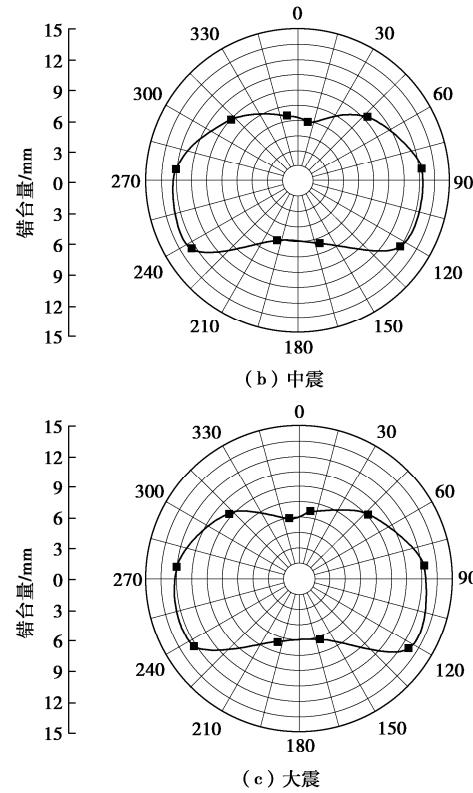
图 9 S22 应力分布云图

Fig. 9 Cloud diagram of S22 stress distribution

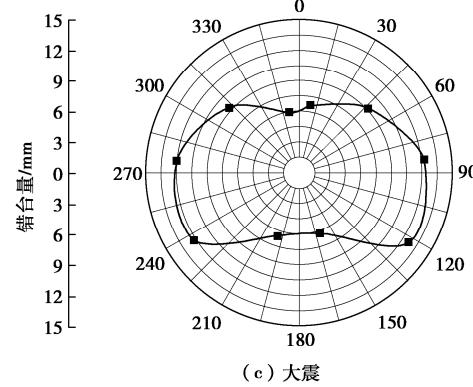
由图 10 可知, 不同地震强度下纵缝错台量分布规律及大小基本相同, 呈“眼镜”状分布, 拱顶与拱底错台量相对较小, 约为 6 mm; 拱腰与拱脚处错台量较大, 可达 12 mm 左右, 且由 2.5 分析可知, 拱腰下侧纵缝附近管片受损严重, 故拱腰下侧纵缝防水性能在大错台与管片损伤的同时作用下削弱严重; 拱腰上侧接缝除了存在较大错台量外, 还存在 2 mm 张开量, 对接缝防水性能削弱也较严重。



(a) 小震



(b) 中震



(c) 大震

图 10 纵缝错台量玫瑰图

Fig. 10 Rose chart of longitudinal seam stagger amount

### 3 地震作用下管片接缝防水性能分析

盾构隧道在发生地震后, 常会在管片接缝处出现严重渗漏水现象, 导致隧道被水淹没, 严重影响隧道结构安全和运营安全, 因此研究地震作用下管片接缝防水性能变化对提高结构安全性具有重要意义, 管片接缝防水性能改变主要原因是接缝的错台与张开, 因为本文依据 2.6 节中所得接缝变形数据对接缝防水性能展开研究, 由 2.6 节结果可知, 纵向地震激励作用下环缝张开量与错台量极小, 相对纵缝而言可忽略不计, 故本节仅对纵缝防水性能进行相应研究。

为实现研究目的, 利用 ABAQUS 建立了密封垫二维有限元实体模型。为解决密封垫在压缩模拟中出现严重的网格畸变问题, 采用了网格间求解变化技术<sup>[18]</sup>。

#### 3.1 网格划分与接触关系

依据本工程中密封垫与密封槽截面尺寸图(如图 11 所示), 建立了密封垫二维有限元实体模型, 如图 12 所示。其中密封垫模型采用线性平面应变划分网格, 管片密封槽以二维解析刚体实现模拟。

密封垫与密封垫、密封垫与密封槽接触关系设为表面与表面接触, 密封垫开孔部分接触关系设为自接触。接触属性中切向行为采用罚函数摩擦, 摩擦系数取 0.5, 法向行为设为硬接触, 允许接触后分离。其中接触参数根据参考文献[8]进行取值。

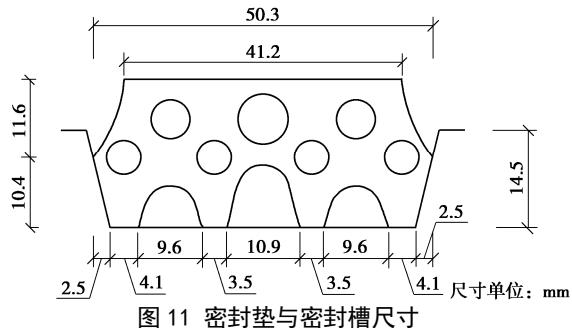


图 11 密封垫与密封槽尺寸

Fig. 11 Dimensions of gasket-seal groove

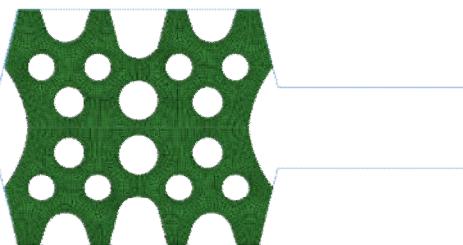


图 12 密封垫-密封槽二维实体模型

Fig. 12 Two-dimensional solid model for gasket-seal groove

### 3.2 材料本构与边界条件

本工程密封垫材料为三元乙丙橡胶材料, 为超弹体材料, 超弹体材料应力应变的非线性主要利用应变能函数定义, 本模型采用工程中常用的 Mooney-Rivlin 二参数模型<sup>[19]</sup>, 应变能函数表达式为

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (3)$$

式中  $U$  为应变势能;  $I_1$ ,  $I_2$  为应变不变量;  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  为材料参数。

经最小二乘法计算,  $C_{10}$  取 0.59238,  $C_{01}$  取 0.14809。密封垫橡胶硬度设为邵氏硬度  $H_A = 67$ 。

为使管片完全对称受压, 下侧管片约束  $X$ ,  $Y$  方向自由度, 上部管片约束  $X$  方向自由度并施加  $Y$  方向位移荷载。通过移动上部管片和密封垫来实现错台模拟。

### 3.3 计算工况

本工程在未发生地震时, 环间接缝错台量为 0 mm, 张开量为 2 mm, 为研究接缝在地震作用下防水性能, 基于 2.6 节中所得接缝变形数据设立工况。由于在不同地震强度下各处接缝变形基本相同, 且变形主要为纵缝变形, 故本文依据小震作用下环内各处纵缝变形设立 11 组工况, 各工况参数如表 2 所示。其中工况 3 与工况 12 张开量为 4.2 mm, 其余工况张开量皆为 2 mm。

### 3.4 结果分析

已有研究表明<sup>[20]</sup>, 密封垫接触面平均接触应力可作为密封垫防水性能指标。将各工况下接触面接触应力曲线积分后除以接触面长度得到平均接触应力, 将

各工况下平均接触应力进行处理, 得到图 13 和图 14, 其中未发生地震时接缝平均接触应力可达 3.28 MPa。

图 13 为小震作用后环内各接缝平均接触应力; 用各位置平均接触应力/初始状态平均接触应力与 1 作差的结果来评价防水性能削弱, 图 14 为小震作用后环内接缝的防水性能削弱情况。

表 2 计算工况

Table 2 Working conditions

工况	位置(顺时针度数)	错台量/mm	工况	位置(顺时针度数)	错台量/mm
1	9.26	5.77	11	237.384	12.10
2	47.36	9.28	12	275.64	12.05
3	84.36	11.96	13	312.64	8.27
4	122.616	12.50	14	350.74	6.60
5	160.872	6.26	15	初始状态	0
6	199.128	6.14	20	—	—

由于地震作用后接缝变形各异, 因而接缝防水能力都存在不同。由图 13, 14 可知, 拱顶和拱底两侧接缝防水性能较好, 其中拱顶右侧接缝防水能力最好, 可达 2.77 MPa, 相比正常情况仅削弱了 16%; 环内拱腰附近接缝防水能力削弱严重, 接缝间平均接触应力皆小于 2.0 MPa, 防水性能削弱达到 40%, 且由 2.5 节分析结果可知, 此处管片损伤严重并存在一定的张开量, 故此处是环内接缝防水最薄弱位置, 在抗震设计中可考虑采取构造措施来加强此处防水性能, 在地震发生后应当对此处是否出现渗漏水进行重点监测。

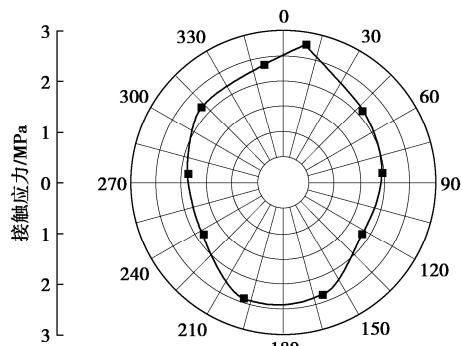


图 13 环内接缝平均接触应力

Fig. 13 Average contact stress of joints in rings

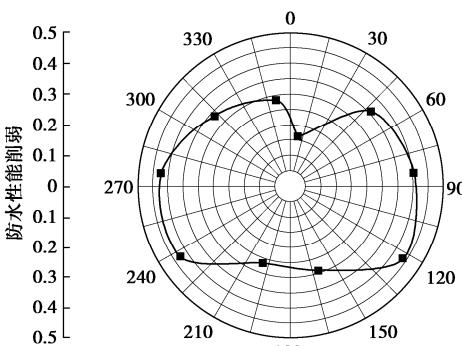


图 14 环内接缝防水性能削弱程度

Fig. 14 Degrees of weakening of waterproof performance of joints in rings

## 4 结 论

为研究大断面盾构隧道在地震条件下接缝力学及防水性能, 本文利用 ABAQUS 分别了建立地层-结构三维有限元模型及密封垫二维有限元实体模型, 研究了在不同地震强度下管片接缝的力学性能及管片接缝错台量与张开量, 基于不同位置接缝变形结果讨论了隧道防水性能退化情况。主要结论如下:

(1) 不同地震强度下接缝最大主应力分布规律基本一致, 主要以受拉为主, 最大主压应力最大值出现在拱脚左侧偏上的环缝与纵缝交界处, 接缝内最大主拉应力最大值出现在拱腰附近, 中震与大震下拱腰下部接缝处的最大主拉应力已超过混凝土最大抗拉强度, 此时混凝土已出现一定程度损伤, 在一定程度上削弱了接缝震后的防水能力。

(2) 不同地震强度下纵缝错台量分布规律及大小基本相同, 呈“眼镜”状分布, 拱顶与拱底错台量相对较小, 约为 6 mm; 拱腰与拱脚处错台量较大, 可达 12 mm 左右; 拱脚纵缝附近管片受损严重, 故拱腰下侧纵缝防水性能在大错台与管片损伤的同时作用下削弱严重; 纵向地震激励作用下环缝张开量与错台量极小。

(3) 拱顶和拱底两侧接缝防水性能较好, 其中拱顶右侧接缝防水能力最好, 可达 2.77 MPa, 相比正常情况仅削弱了 16%; 环内拱腰附近接缝防水能力削弱严重, 接缝间平均接触应力皆小于 2.0 MPa, 防水性能削弱达到 40%, 在抗震设计中可考虑采取构造措施来加强此处防水性能, 在地震发生后对此处是否出现渗漏进行重点监测。

## 参考文献:

- [1] 刘晶波, 李彬, 谷音. 地铁盾构隧道地震反应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 757–760. (LIU Jing-bo, LI Bin, GU Yin. Seismic response analysis of subway shield tunnel[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2005, 45(6): 757–760. (in Chinese))
- [2] MIZUNO K, KOIZUMI A, et al. Dynamic behavior of shield tunnel in transverse direction considering effects of staggered-jointed ring[C]// Title of Host Publication Wind and Earthquake Engineering-Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2010, Bangkok.
- [3] 潘佳春. 地铁盾构隧道的地震响应分析与减震隔震研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019. (PAN Jia-chun. Seismic Response Analysis and Shock Absorption and Isolation of Subway Shield Tunnel[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019. (in Chinese))
- [4] 朱彤, 王睿, 张建民. 盾构隧道在可液化场地中的地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 57–60. (ZHU Tong, WANG Rui, ZHANG Jian-min. Seismic response analysis of shield tunnel in liquefiable site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 57–60. (in Chinese))
- [5] 郭凯. 盾构隧道管片静力和动力响应特性的有限元模拟分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (GUO Kai. Finite Element Simulation Analysis of Static and Dynamic Response Characteristics of Shield Tunnel Slices[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [6] 张稳军, 焦亚磊, 张高乐. 复杂地层条件下大断面盾构隧道纵向地震响应分析[J]. 施工技术, 2019, 48(9): 48–51. (ZHANG Wen-jun, JIAO Ya-lei, ZHANG Gaul-le. Analysis of longitudinal seismic response of shield tunnel with large cross-section under complex stratum conditions[J]. Construction Technology, 2019, 48(9): 48–51. (in Chinese))
- [7] 禹海涛, 吴胤翔, 涂新斌, 等. 盾构隧道纵向地震响应的多尺度分析方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 138–144, 152. (YU Hai-tao, WU Yin-xiang, TU Xin-bin, et al. Multi-scale analysis of longitudinal seismic response of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Highways, 2020, 33(1): 138–144, 152. (in Chinese))
- [8] 杨贵生, 李宏亮, 丁超, 等. 地铁盾构隧道衬砌管片密封槽尺寸优化分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 93–98, 232. (YANG Gui-sheng, LI Hong-liang, DING Chao, et al. Optimization analysis of the sealing groove size of subway shield tunnel lining[J]. Journal of Civil Engineering, 2019, 52(S1): 93–98, 232. (in Chinese))
- [9] 金跃郎, 丁文其, 肖明清, 等. 苏通 GIL 综合管廊超高压盾构隧道接缝防水性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(4): 538–544. (JIN Yue-lang, DING Wen-qi, XIAO Ming-qing, et al. Experimental study on waterproofing performance of shield tunnel joints with ultra-high water pressure in sutong GIL comprehensive pipe gallery[J]. Tunnel Construction (in Chinese and English), 2020, 40(4): 538–544. (in Chinese))
- [10] 张稳军, 丁超, 张成平, 等. 不同错台量对复合型密封垫影响及长期防水预测[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 337–345. (ZHANG Wen-jun, DING Chao, ZHANG Cheng-ping, et al. Influence of different fault sets on

- composite gasket and long-term waterproof prediction[J]. *Tunnel Construction* (in Chinese and English), 2020, **40**(3): 337 – 345. (in Chinese))
- [11] DING W Q, GONG C J, MOSALAM K M, et al. Development and application of the integrated sealant test apparatus for sealing gaskets in tunnel segmental joints[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, **63**: 54.
- [12] GONG C J, DING W Q, KHALID M, MOSALAM. Performance-based design of joint waterproofing of segmental tunnel linings using hybrid computational/experimental procedures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, **96**: 103172.
- [13] 李 拼, 谢宏明, 何 川, 等. 基于有效接触应力的大张开量盾构隧道密封垫防水性能分析[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, **39**(12): 1993 – 1999. (LI Pin, XIE Hong-ming, HE Chuan, et al. Analysis of waterproof performance of large opening shield tunnel gasket based on effective contact stress[J]. *Tunnel Construction* (in Chinese and English), 2019, **39**(12): 1993 – 1999. (in Chinese))
- [14] LI X, ZHOU S H, DI H G, et al. Evaluation and experimental study on the sealant behaviour of double gaskets for shield tunnel lining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, **75**: 81 – 89.
- [15] 焦亚磊. 软硬突变地层大直径盾构隧道纵向地震响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2018. (JIAO Ya-lei. Longitudinal Seismic Response of Large-Diameter Shield Tunnels in Soft and Hard Abrupt Formations[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese))
- [16] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 2016. (Code for Seismic Design of Buildings: GB50011—2010[S]. 2016. (in Chinese))
- [17] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(7): 1445 – 1457. (MA Sheng-jie, CHI Ming-jie, CHEN Hong-juan, et al. Realization of viscoelastic artificial boundary in ABAQUS and comparative study of ground motion input methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(7): 1445 – 1457. (in Chinese))
- [18] 张稳军, 李宏亮, 高文元, 等. 防控盾构隧道渗漏灾变的管片密封垫尺寸优化[J]. *施工技术*, 2019, **48**(9): 43 – 47. (ZHANG Wen-jun, LI Hong-liang, GAO Wen-yuan, et al. Optimization of segment gasket size for prevention and control of shield tunnel leakage[J]. *Construction Technology*, 2019, **48**(9): 43 – 47. (in Chinese))
- [19] 欧阳文彪. 盾构隧道橡胶密封垫力学性能试验及数值分析[J]. *隧道建设*, 2013, **33**(11): 933 – 936. (OUYANG Wen-biao. Mechanical test and numerical analysis of elastic gaskets of shield tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2013, **33**(11): 933 – 936. (in Chinese))
- [20] 赵 明, 丁文其, 彭益成, 等. 高水压盾构隧道管片接缝防水可靠性试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2013, **50**(3): 87 – 93. (ZHAO Ming, DING Wen-qi, PENG Yi-cheng, et al. Experimental study on the reliability of shield tunnel segment joints to remain watertight under high water pressure[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2013, **50**(3): 87 – 93. (in Chinese))