

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.07.018

赵立财. 基于细微观结构的分级加载作用下预制管片变形破坏机制研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(7): 210-218.

基于细微观结构的分级加载作用下 预制管片变形破坏机制研究

赵立财

中铁十九局集团第三工程有限公司, 沈阳 110136

摘要: 随着城市隧道工程快速发展, 预制管片越来越多应用于地下工程当中. 该文采用颗粒离散元理论, 基于管片大型抗弯试验原理、力-位移准则及平行粘结接触本构模型, 建立了单轴压缩模型反演出混凝土的细观强度参数. 在颗粒离散元模型分析中, 综合考虑预制管片内部变形及力学各向异性, 基于随机算法开发随机骨料生成算法, 并将其应用于预制管片抗弯试验模型. 结果表明: 预制管片往往从最下部出现拉裂纹, 同时接触下部出现裂纹; 随着加载增大, 底部拉裂纹向上部扩展, 同时上部混凝土达到抗压极限值出现压裂纹, 接头底部由于旋转效应出现崩裂破坏, 导致管片整体失稳. 管片最上部加载位移达到 1.6 mm 时, 应力达到峰值 18.0 MPa, 随着加载继续, 由于混凝土出现压裂, 应力下降; 最下部始终处于拉应力状态, 当位移达到 0.8 mm 时, 达到最大拉应力 3.2 MPa, 由于拉裂纹扩展, 拉应力迅速降低, 并保持较小拉应力, 接头处剪切应力在加载位移为 1.6 mm 时达到峰值 10.4 MPa. 南京市地铁窑上村站-晓庄站区间隧道地质条件复杂, 通过抗弯试验确定其能满足承载力要求.

关键词: 预制管片; 颗粒离散元; 抗弯试验; 骨料; 裂纹

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)07-0210-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the Deformation and Failure Mechanism of Prefabricated Segments under the Action of Hierarchical Loading Based on Microstructure

ZHAO Licai

China Railway 19th Bureau Group Third Engineering Co. Ltd., Shenyang 110136, China

Abstract: With the rapid development of urban tunnel engineering, prefabricated segments are increasingly used in underground engineering. In this study, the particle discrete element theory was used, based on the principle of large-scale bending test of segment, the force-displacement criterion and the parallel bond contact constitutive model, a uniaxial compression model was established to invert the meso-strength parameters of concrete. In the particle discrete element model analysis, considering the internal deformation

收稿日期: 2022-02-02

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146).

作者简介: 赵立财, 博士, 正高级工程师, 主事从事岩土与结构相互作用、混凝土材料与结构基础理论研究.

and mechanical anisotropy of the prefabricated segment, a random aggregate generation algorithm was developed based on the random algorithm and applied to the bending test model of the prefabricated segment. The test results show that the prefabricated segment tended to have tensile cracks from the bottom, and at the same time, cracks appeared in the lower part of the contact. As the loading increasing, the bottom tensile crack expanded to the upper part, and at the same time, the upper concrete reached the compressive limit value and a compressive crack occurred. The bottom of joint was cracked and damaged, resulting in the overall instability of the segment. When the loading displacement of the uppermost part of the segment reached 1.6 mm, the stress reached a peak value of 18.0 MPa, as the loading continuing, the stress decreased due to the fracturing of the concrete. The lowermost part was always in a state of tensile stress, when the displacement reached 0.8 mm, the maximum tensile stress reached 3.2 MPa, due to the extension of the tensile crack, the tensile stress decreased rapidly and maintained a small tensile stress. The shear stress at the joint reached a peak value of 10.4 MPa when the loading displacement was 1.6 mm. The geological conditions of the tunnel in the section from Yaoshangcun Station to Xiaozhuang Station are complex. It is determined through the bending test that it can meet the bearing capacity requirements.

Key words: prefabricated segment; particle discrete element; bending test; aggregate; crack

随着中国人口逐渐由城镇向城市聚集,城市交通拥挤已成常态,地面及以上交通已不能满足城市群都市圈发展需求。近年来,国家花费大量资金开发地下空间,通过已有的地下工程(如城市地铁),极大地缓解了城市地面交通,解决了城市交通拥挤、汽车尾气排放等重大问题。

地下隧道施工技术极其复杂,目前城市地铁施工主要依赖于占地空间小、施工周期短及土壤扰动小的盾构技术。预制管片是盾构施工过程中赋予土壤支护作用的核心,同时也是后期对土体起支护作用的主要结构。在预制管片与土体相互作用过程中,其变形及力学机制极其复杂,大量学者主要从室内试验、理论研究及数值模拟角度揭示预制管片与土体相互作用的力学及变形机制。工程隧道管片由预制管片及管片接头组成,在理论研究及数值模拟中,目前主要采用以下几种模型:①将管片视为一个整体,忽略接头影响的等刚度模型^[1];②通过降低接头处刚度,考虑其整体预制管片刚度差的等效刚度模型^[2];③将接头处视为铰接模型,不考虑抗弯属性的多铰接模型^[3];④预制管片采用梁单元模型,接头采用弹簧结构模型的梁-弹簧模型^[4],较好地还原了实际工程中隧道管片的复杂应力环境,但机制较复杂,针对实际工程求解极其困难。张鹏^[5]建立了大型的三维地铁盾构隧道有限元模型,分别研究了竖向压力、注浆压力对管片力学及变形的影响,同时发现在加载过程中,隧道纵向变形差异较大,不同的拼接方法对隧道强度及变形影响较大。李守巨等^[6]建立了数值模型,发现轴力即围压对预制管片拼接裂缝的压缩作用明显,有利于减少管片拼接裂缝产生,并且研究了轴力对接头弯曲刚度的影响,对实际隧道工程设计具有指导作用。曾东洋等^[7]针对预制管片接头,重点研究了接头刚度对变形及力学的影响,并总结了不同因素下的不同接头转角及刚度规律。俞涛等^[8]建立了三维有限元模型,研究了预制管片强度、竖向压力等对预制管片接头抗弯刚度及抗转动的影响,得到了一定的规律。张厚美等^[9]、郭佳奇等^[10]建立了大型隧道预制管片室内试验模型,得到了管片应力应变分布规律,并建立了数值模型进行对比研究。

目前,国内外大量学者从理论、室内试验及数值模拟角度研究了预制管片的力学及变形特性,在管片理论研究方面取得了一些实用性成果,但室内试验局限于模型试验,工作量较大,进展较缓慢,数值模型均集中在有限元理论方面。在研究预制管片破坏工程中,传统有限元理论却很难准确地反映混凝土颗粒的位移变化全过程。本文首次采用颗粒离散元(PFC)理论,基于力-位移准则及运动法则,能够从大变形及细微观角度揭示预制管片的力学及变形机制,在分析中充分考虑预制管片各向异性,建立预制管片抗弯数值模型,研究混凝土预制管片抗弯性力学机制、管片受压弯曲变形及裂纹扩展变化规律。

1 工程概况及模型细观参数确定

1.1 工程概况与管片抗弯试验

南京市地铁窑上村站-晓庄站区间段长度为 6 144 m, 隧道顶板埋深为 8.0~22.9 m, 底板埋深为 14.1~29.0 m. 隧道起点里程为 CK25+080、终点里程为 CK26+100, 隧道洞身主要穿越中等风化砂岩层, 局部为半土半岩的复合地层. 砂岩抗压强度为 1.13~78.67 MPa, 钢筋混凝土管片为 4 800 环, 目前已完成 3 850 环的管片预制施工. 沿线岩土层分布性质变化较大, 由于岩土层软硬变化复杂, 完整性不同, 接触界面多变, 上软下硬, 施工难度较大, 盾构管片受力极其复杂, 关乎隧道稳定性问题, 因此每个单元的预制管片各项力学指标必须达标, 以确保后期地铁的运营安全. 管片室内抗弯试验如图 1 所示. 将管片平稳放在试验架上, 采用千斤顶分配梁系统加荷载, 加荷点标距为 0.46 m, 采用双点分级加载方式进行抗弯性能测试. 每次加荷 10 kN, 加荷完成后静停 1 min, 记录测试仪显示数据, 中心点、加荷点及水平位置变量; 当出现第 1 次裂缝后, 静停 10 min 观察裂缝的扩展情况, 并取该级荷载值为开裂荷载实测值^[11].

1.2 颗粒离散元理论

相较于有限元以划分单元格模式进行差分计算, 在颗粒离散元理论中模型全部由 3 个部分组成, 分别为颗粒单元、接触单元和墙单元. 其中, 颗粒单元有不考虑变形的圆球颗粒、不考虑变形仅考虑形状不规则性的刚性簇单元及既考虑变形又考虑形状不规则性的柔性簇单元. 模型中的接触单元是离散元理论的力及力矩传递的基础, 通过判断接触的变形, 计算模型受到的力的作用; 模型中的墙单元一般模拟工程模型的边界作用及加载作用, 可设置不同的刚度及摩擦属性等. 颗粒离散元可从大变形及细微观角度揭示模型变形及受



图 1 室内大型抗弯试验

力特点, 其计算原理主要基于力-位移准则及运动法则. 在颗粒离散元理论中, 颗粒或簇单元之间满足牛顿第 2 定律; 颗粒与颗粒、颗粒与墙单元之间接触需满足力-位移准则. 介质在外力作用下产生的运动状态, 结合力-位移准则及接触的本构模型进行计算, 得到作用于颗粒上的新的合力及合力矩; 有了颗粒上的合力及合力矩, 通过运动法则建立平移加速度、角速度与合力及合力矩的关系, 可得到颗粒更新后的位置和旋转信息, 从而不断更新颗粒位置及受力状态.

颗粒离散元理论与传统有限元及有限差分法不同, 其针对不同特性材料选用不同接触模型. 颗粒离散元软件中附带了大量接触本构模型, 如能很好地反映砂土摩擦属性的线性模型, 不考虑抗转动影响的点接触模型、考虑抗转动的平行粘结模型及平节理模型. 对于模拟岩石内部损失和节理的光滑节理模型, 大量学者研究发现, 颗粒离散元细观参数与材料的宏观参数不是一一对应, 其中平行粘结模型能较好地模拟岩石和混凝土材料的力学特性, 将混凝土材料看作由胶结颗粒组成的非均匀物质, 假定颗粒之间存在胶结, 能够传递拉、压、剪力及弯矩, 将颗粒之间的胶结破坏模式定义为拉破坏及剪破坏, 能较好地反映岩石的力学特性及变形特性. 混凝土材料与岩石类似, 颗粒受外力作用, 当其荷载超过极限荷载时, 接触模型中的法向接触强度和切向接触强度同时降为零, 模型退化成线性接触模型; 力矩与转角角度相关, 当达到抗弯极限时, 与抗弯属性相关的参数降低为零.

1.3 模型参数确定

颗粒离散元模型细观参数确定较繁琐, 大量学者研究发现, 对于混凝土材料一般采用平行粘结接触本构模型能较好地反映混凝土材料抗压、抗拉及抗弯属性. 通过建立标准化单轴压缩及巴西劈裂数值模型, 得到数字高程模型(DEM)峰值强度、弹性模量及抗拉强度, 同时不断调试平行粘结接触本构模型的变形模

量、法向接触强度及切向接触强度,直到与宏观强度数值对应或相差较小.

室内试验与 DEM 模型得到的宏观参数如表 1 所示,最终得到如单轴试验应力-应变曲线及混凝土破坏情况如图 2 所示.混凝土破碎模式由劈裂破坏及剪切破碎组成,与室内试验破碎模式一致,说明 DEM 模型的准确性.最终得到的弹性模量与室内试验基本一致,抗压强度误差在 5% 以内,受接触模型局限性影响,抗拉强度误差在 10% 以内,满足数值模拟精确度要求.标定的平行粘结模型细观接触参数如表 2 所示.

表 1 室内试验^[12]及 DEM 模型宏观参数

	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
室内试验	3.55	35.98	3.12	0.2
DEM 模型	3.42	34.59	3.45	0.2

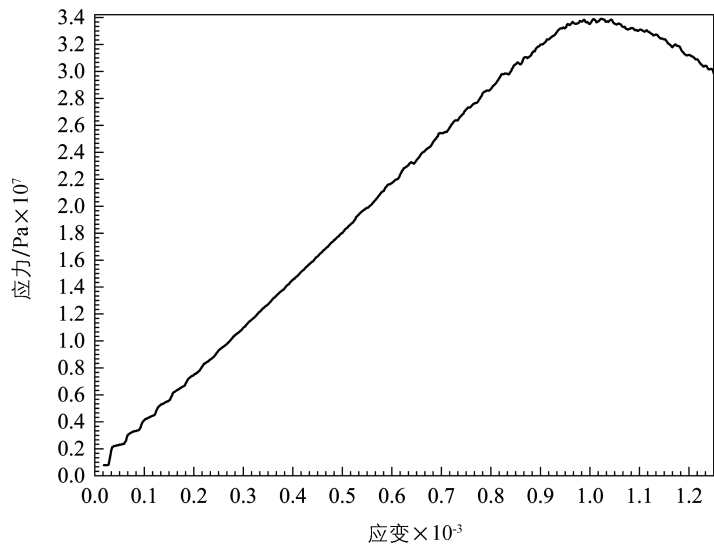


图 2 混凝土单轴应力-应变曲线及破坏情况

表 2 混凝土 DEM 模型细观强度^[13-14]

平行粘结模型	
接触模量/GPa	37.4
法向接触强度/MPa	13.3
法向接触强度/MPa	13.3
刚度比	1.8
摩擦系数	0.55
半径乘子	1.0

2 抗弯试验离散元模型建立

本文基于颗粒离散元理论建立抗弯试验的离散元模型,在实际工程中预制管片内部由于有碎石骨料,力学及变形呈现出各向异性.本文先考虑建立随机骨料算法(clump)模拟混凝土骨料轮廓,并在此基础上建立二维预制管片抗弯试验.

1) 随机 clump 颗粒建立.通过编程生成控制碎石骨料轮廓线的角度及坐标多组随机数,一组随机数确定一个点,通过内置 geometry 命令,将点连成线,最终形成碎石随机轮廓线,基于 PFC6.0 平台中 clump template 命令沿模型轮廓线生成刚性簇模板,且在实际模型中可随机调用该刚性簇模板,其随机轮廓如图 3 所示.通过随机算法可随机调用已生成好的模板库中的骨料模板.

2) 基于随机骨料模型建立抗弯试验数值模型如图 4 所示.预制管片内径为 2.75 m,外径为 3.1 m,管片厚为 0.35 m,管片角度为 68°,采用双点加载,间距为 0.46 m.混凝土管片内砂浆采用圆球(ball)模拟,骨料采用 clump 建立,可较好地还原预制管片内部变形及力学机制差异性.

3) 盾构管片在安装过程中利用螺栓将纵向和环向管片连接起来,其接头处刚度及接头方式对管片变形及受力影响较大,综合考虑到颗粒离散元程序计算特点,本文模拟铰接接头结构,其接头刚度与管片刚度一致.预制管片两端采用墙单元(wall)约束其法向边界,墙单元和管片单元接触强度设置与管片结构一致.

4) 在模型上、中、下分别设置了 3 排测量圆,监测应力云图及最大-最小主应力方向,并在加载过程中监测了加载荷载及位移情况.

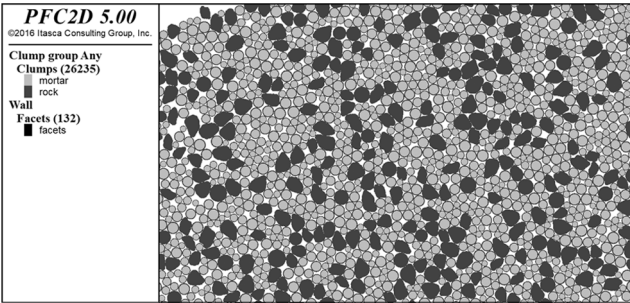


图 3 随机刚性簇模板轮廓

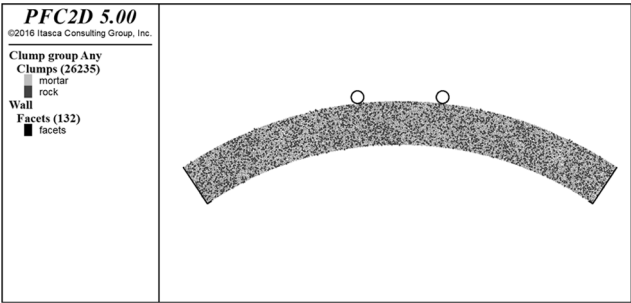


图 4 抗弯试验数值模型

3 计算结果分析

本文基于颗粒离散元理论,综合考虑混凝土内部变形及力学各向异性,建立二维预制管片抗弯试验数值模型,从荷载-位移曲线、管片内部应力演化及裂纹扩展模式,揭示了预制管片加载过程中的变形及力学传递机制。

3.1 荷载-位移曲线特征及裂纹扩展模式

在预制管片常规室内试验模型及有限元模型中,往往通过荷载-位移曲线表征管片强度及变形情况,且能够从宏观层面揭示管片的极限承载力,但是不能明确管片在土体强大压力作用下,管片最先发生损伤位置即起裂点位置,无法分析在极限承载作用下,荷载-位移曲线在不同位置状态下,管片内部损伤及裂纹扩展情况^[15]。图 5 为基于颗粒离散元的预制管片荷载-位移曲线。由图 5 可知,荷载-位移曲线呈现出先上升后降低的趋势,与实际过程一致。图 6 为不同加载位移下的裂纹扩展情况。

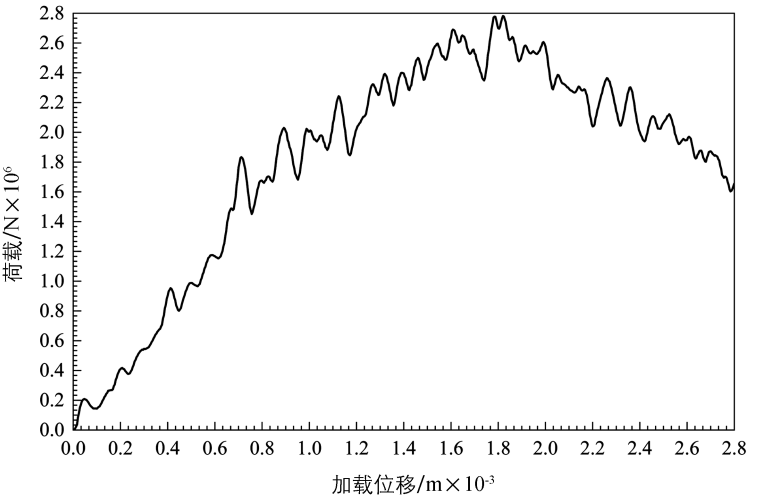


图 5 管片荷载-位移曲线

1) 加载位移为 0.2 mm 时,加载荷载达到 600 kN,荷载-位移曲线处于此位置时,呈现出线性增大趋势,在管片巨大的抗压及抗弯作用下,管片给予较大的反作用力于加载板,结合裂纹图 6(a)可见,管片并未出现明显开裂,在管片正下面出现较少的拉裂纹点,此位置张拉作用明显。

2) 加载位移为 0.8 mm 时,加载荷载达到 1 600 kN,管片承担较大荷载作用,从荷载-位移曲线可见,此位置曲线波动性较大,荷载继续增大,但增大速率明显降低。图 6(b)为裂纹扩展情况,在 0.8 mm 时发现裂纹有以下几点规律:① 裂纹起裂位置往往发生在骨料轮廓位置,骨料不规则形状对内部砂浆有翘曲作用,是管片破坏起裂点;② 管片下部承担巨大的拉应力,其最先达到管片极限拉应力,管片破碎往往集中在管片最下方,随着荷载增大,向上部扩展,③ 在加载过程中,管片接头处下部出现裂纹,说明预制管片薄弱点往往在管片下部和接头处。

3) 加载位移为 1.6 mm 时,荷载达到峰值点,最大荷载达到 2 800 kN,图 6(c)为裂纹发展情况,管片拉裂纹继续扩展,接头处底部混凝土逐渐呈现出压碎状态,预制管片由于接头处压碎及拉裂纹扩展,处于失稳状态。在压头位置混凝土出现压裂纹,说明预制管片达到了抗压极限值,管片上部局部被压碎。

4) 加载位移为 2.0 mm 时,荷载-位移曲线达到残余阶段,从图 6(d)可见,此时管片底部拉裂纹与管片底部压裂纹出现贯穿,接头底部处混凝土出现崩裂,管片失去承载作用^[16]。

张厚美等^[17]进行了多组钢筋混凝土管片接头荷载试验,其室内试验加载模式如图 7 所示。研究发现,加载界面处呈现出内侧受拉破坏状态,加载到一定程度,压头处出现压碎现象;接头处混凝土呈现出内弧面接缝混凝土受压破坏状态,加载到后期混凝土出现剥落,如图 8 所示。将本文图 6(d)与文献^[17]中混凝土破坏情况对比发现,管片呈现的破坏形式基本一致,进一步验证了数值模型的正确性^[18]。

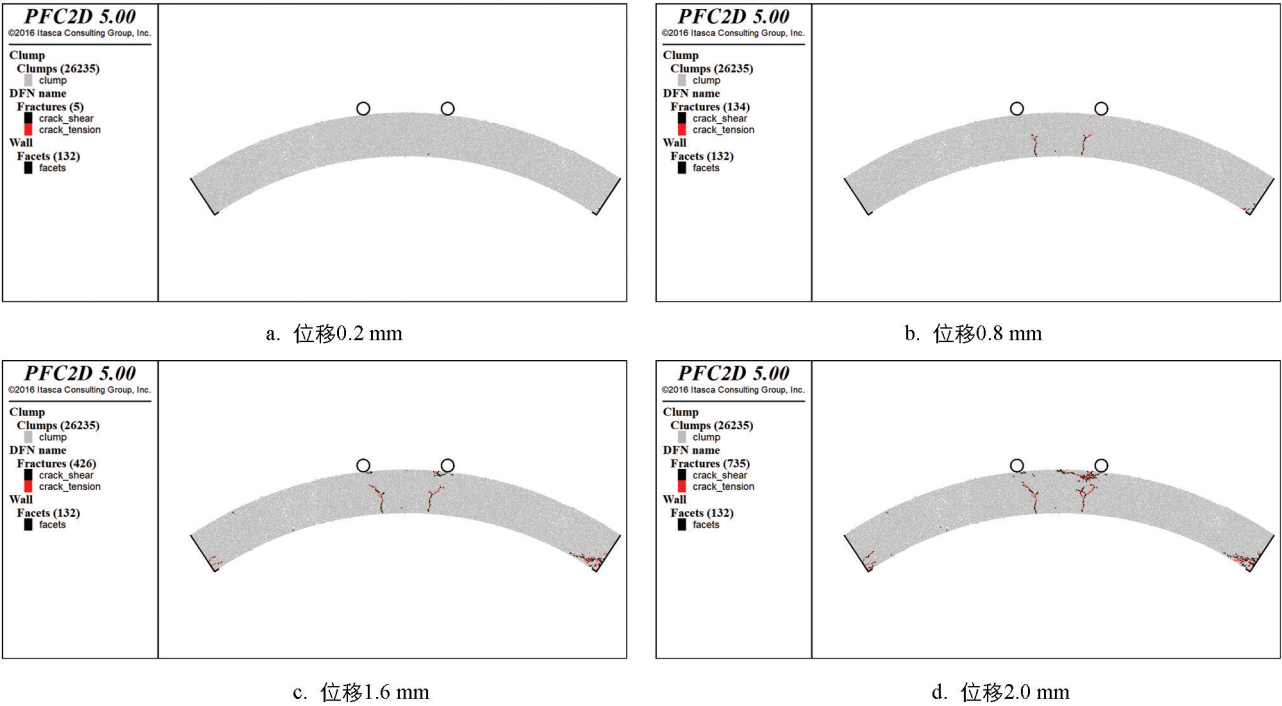


图 6 不同加载位移下裂纹扩展情况

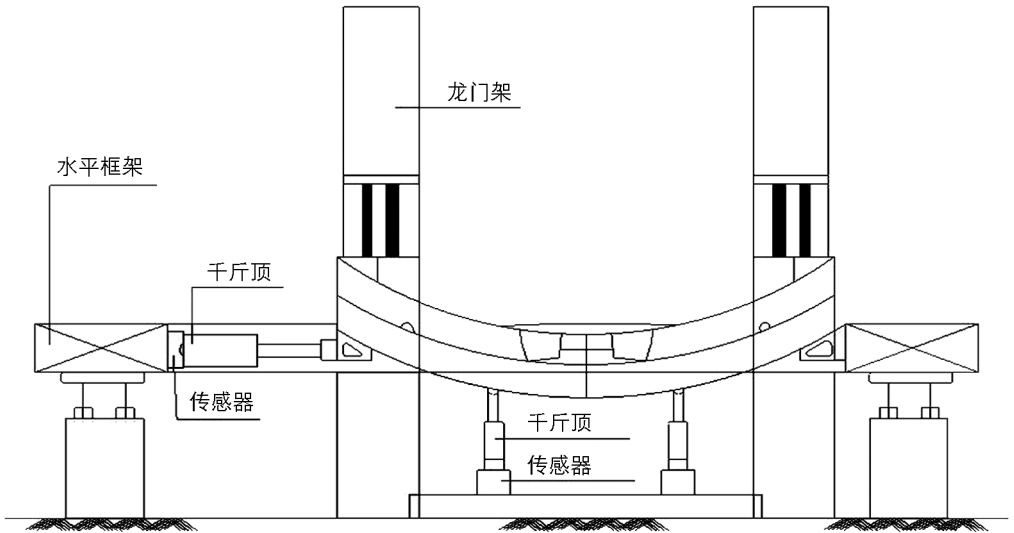


图 7 接头荷载试验加载示意图^[16]

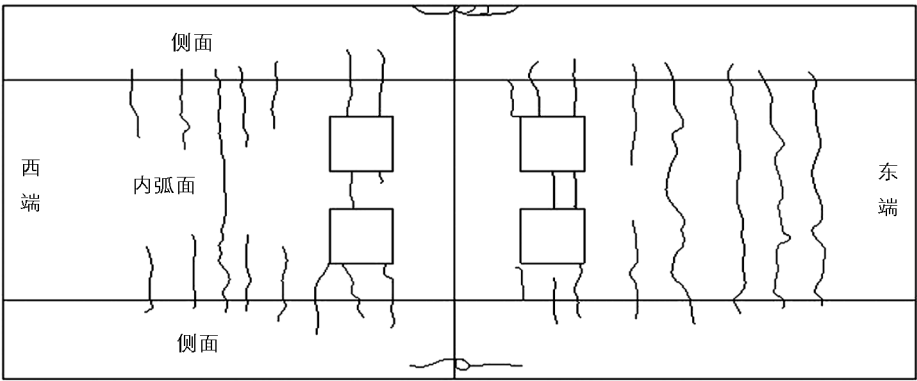


图 8 裂纹发展模式^[16]

3.2 应力分布情况分析

预制管片在分级加载抗弯试验中，其管片不同部位应力分布的差异性特征也受到研究者的格外关注。在颗粒离散元中，定义拉为正，压为负，不同加载位移下应力云图及最大、最小主应力矢量如图 9 所示。

由图 9 应力云图分析可知，在抗弯加载模型中，最大拉应力出现在中间最下部，最大压应力出现在中间最上部。当位移为 0.2 mm 时，最大拉应力为 3.6 MPa，最大压应力达到 10.3 MPa；当位移为 0.8 mm 时，由于管片下部出现拉裂纹，抗拉强度降低，最大拉应力为 1.0 MPa，最大压应力达到 15.7 MPa；当位移为 1.6 mm 时，随着荷载继续增大，拉压应力均有增加，最大拉应力出现在接头上部，达到 2.1 MPa，最大压应力达到 23.4 MPa；当位移为 2.0 mm 时，最大拉应力出现降低状况，为 1.9 MPa，最大压应力达到 10.3 MPa，出现在压头位置。从最大、最小主应力矢量图可以发现，最大主应力始终沿管片径向扩展，当混凝土压碎时会发生一定程度的偏转作用。

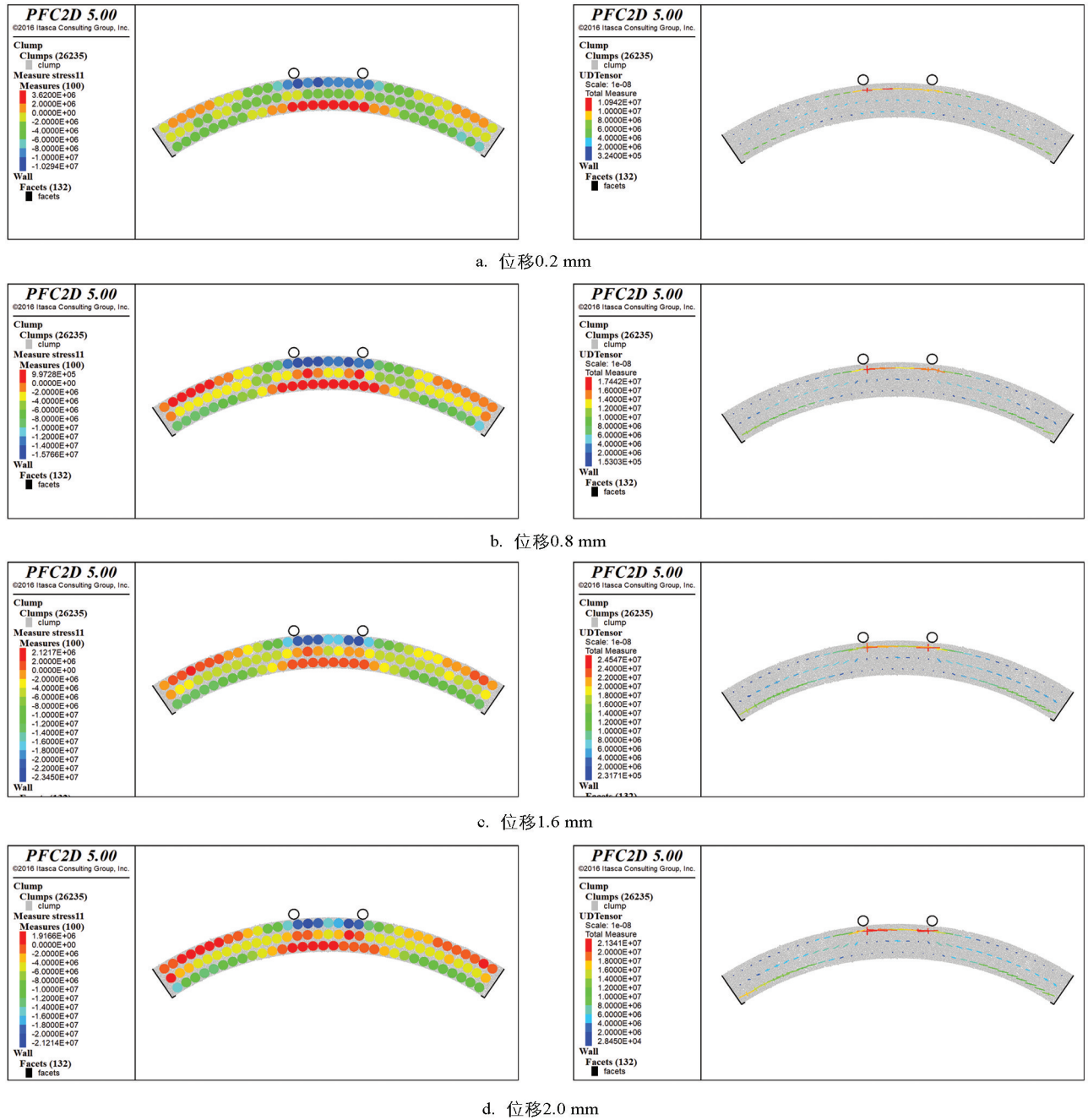


图 9 不同加载位移下应力云图及最大、最小主应力矢量

本文监测了预制管片中间上、中、下 3 个位置的应力-位移曲线, 如图 10 所示。由图 10 可知, 管片最上部始终处于较大的压应力作用状态, 在加载位移达到 1.6 mm 时, 由于混凝土出现压裂, 应力达到峰值, 随着加载继续, 应力下降; 最下部始终处于拉应力状态, 当位移达到 0.8 mm 时, 由于拉裂纹扩展, 下部拉应力迅速降低, 并保持较小的拉应力。

不同加载位移下剪切应力云图, 如图 11 所示。由图 11 可知, 管片剪切应力最大值集中在接头处, 随着加载位移不断增大, 当位移达到 1.6 mm 时, 接头处剪切应力达到最大值, 为 10.4 MPa; 随着加载位移继续增大, 由于接头处破坏, 剪切应力出现减小状况, 接头处抗剪强度降低。

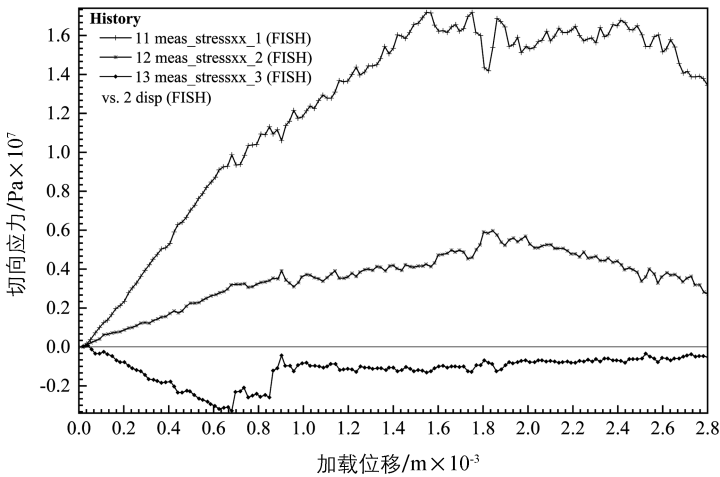


图 10 管片上、中、下位置切向应力-位移曲线

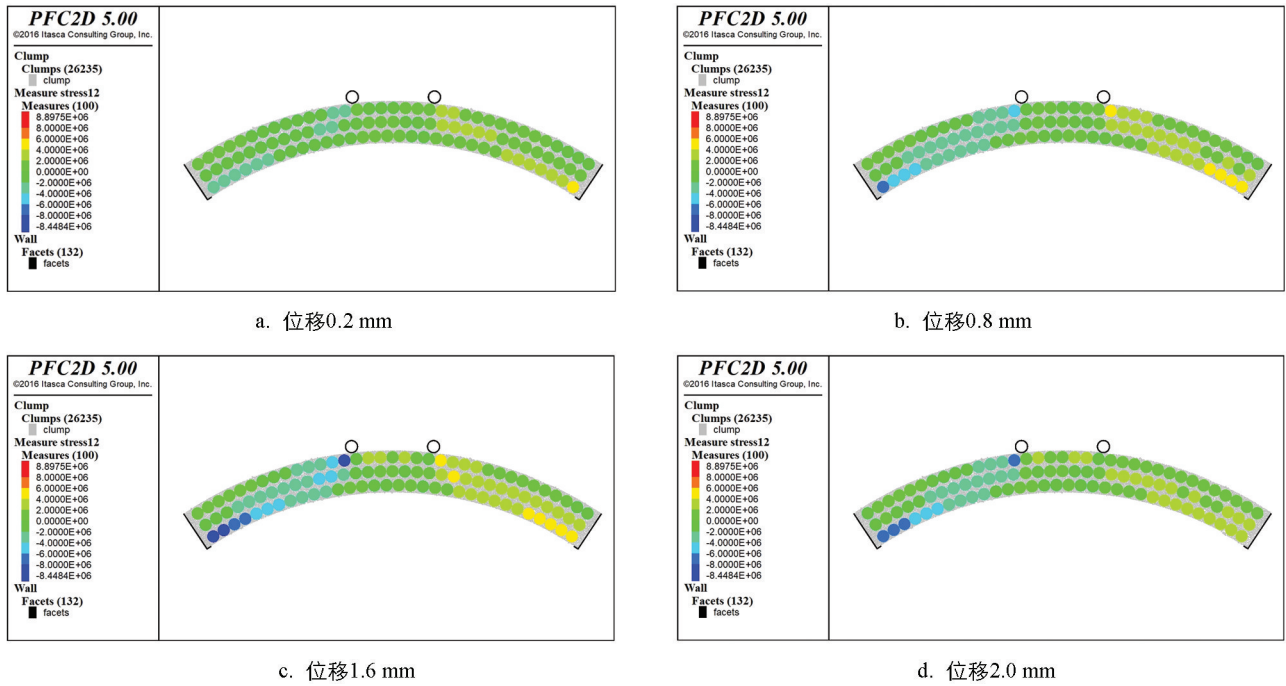


图 11 不同加载位移下剪切应力云图

4 结论

本文以南京市地铁窑上村站-晓庄站区段隧道管片工程为例, 首次采用颗粒离散元(PFC)理论, 得出如下结论:

- 1) 综合考虑颗粒离散元接触本构特性, 采用平行粘结接触本构模型模拟混凝土材料, 确定了混凝土的细观强度参数。考虑管片内部材料各向异性, 开发了骨料随机算法, 并应用于管片抗弯试验模型。
- 2) 建立预制管片抗弯试验模型, 分析了管片受压弯曲变形及裂纹扩展变化规律。研究表明, 预制管片往往从最下部出现拉裂纹, 同时接触下部出现裂纹; 随着加载增大, 底部拉裂纹向上部扩展, 同时上部混凝土达到抗压极限值出现压裂纹, 接头底部由于旋转效应出现崩裂破坏, 导致管片整体失稳; 颗粒离散元(PFC)理论能够准确预测混凝土管片内部各向异性颗粒位移变化的全过程, 而传统有限元理论分

析方法无法实现.

3) 监测了管片不同位置应力, 管片最上部加载位移达到 1.6 mm 时, 应力达到峰值 18.0 MPa, 随着加载继续, 由于混凝土出现压裂, 应力下降; 最下部始终处于拉应力状态, 当位移达到 0.8 mm 时, 达到最大拉应力 3.2 MPa, 由于拉裂纹扩展, 拉应力迅速降低, 并保持较小拉应力. 当加载位移达到 1.6 mm 时, 接头处剪切应力达到峰值 10.4 MPa, 随着接头处破坏, 剪切应力降低.

参考文献:

- [1] 徐海宾, 邓宗才. 新型 UHPC 应力-应变关系研究 [J]. 混凝土, 2015(6): 66-68, 79.
- [2] 何浩祥, 闫维明, 李晓飞. 基于 SIR 模型的工程材料统一单轴本构关系研究 [J]. 计算力学学报, 2014, 31(1): 84-90.
- [3] 曹万林, 朱可睿, 姜玮, 等. 高强再生混凝土应力-应变全曲线试验研究 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 167-172.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盾构隧道管片质量检测技术标准: CJJ/T 164—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] 张鹏. 盾构隧道管片接头力学性能三维数值计算研究 [J]. 铁道勘测与设计, 2012(2): 54-58.
- [6] 李守巨, 李雨陶, 上官子昌, 等. 混凝土管片及其接头承载力特性数值模拟分析 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 72-77, 117.
- [7] 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.
- [8] 俞涛, 何川, 曾东洋. 地铁盾构隧道管片接头的三维有限元分析 [J]. 市政技术, 2004, 22(增刊): 168-171.
- [9] 张厚美, 张正林, 王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析 [J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(4): 566-569.
- [10] 郭佳奇, 赵修成, 徐子龙, 等. 土与结构接触面单直剪试验力学性质研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 267-273.
- [11] 张晓光. 小直径盾构隧道管片抗弯承载试验研究 [J]. 隧道建设, 2015, 35(6): 521-526.
- [12] 朱阿祥, 高培伟, 徐少云, 等. 盾构混凝土管片抗弯性能模拟试验研究 [J]. 结构工程师, 2017, 33(3): 139-146.
- [13] 张彩亮, 张玉芳, 孔德顺, 等. 盾构法隧道预制混凝土管片弯曲试验台的研制与应用 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(30): 12582-12588.
- [14] 李世林, 姜会增, 孔德顺. 管片检漏和抗弯抗拔试验自控系统的优化设计及应用 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(3): 55-59.
- [15] 任天宇, 刘树亚, 柳猷. 波纹钢板加固盾构隧道衬砌管片抗弯性能试验研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 317-323.
- [16] 杨鄂川, 李映辉, 崔灿. 基于等效刚度法的裂纹梁振动特性分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 145-150.
- [17] 张厚美, 傅德明, 过迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究 [J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 28-33, 41.
- [18] 韩亮, 廖昌荣, 汪滨波, 等. 铁磁构件裂纹漏磁场分析及裂纹检测装置 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(7): 107-114.

责任编辑 夏娟