

DOI: 10.11779/CJGE20231174

# 地表堆载作用下双圆盾构隧道破坏机制试验研究

柳 献<sup>1</sup>, 刘 震<sup>\*1</sup>, 李家平<sup>2</sup>, 王如路<sup>2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201102)

**摘 要:** 盾构隧道在服役期间, 易受周边工程活动影响导致较大的变形或内力响应。为研究双圆盾构隧道在周边环境扰动下的结构鲁棒性能, 为隧道运维提供理论依据, 设计并开展了双圆盾构隧道原型结构破坏性试验, 采用拟静力试验方法模拟了隧道结构在地表堆载意外作用下的外部荷载状态。基于对试验过程中结构和接头的变形响应演化分析, 揭示了双圆盾构隧道结构的破坏机制。研究结果表明, 双圆盾构隧道结构在地表堆载意外工况下呈现典型初始线性、塑性损伤快速累积和整体失稳 3 个阶段。当长轴收敛变形达到 25 mm 左右时, 6 号、8 号和 3 号负弯矩接头依次进入弹塑性阶段, 结构整体亦进入塑性损伤快速累积阶段 (第二阶段)。当左半环底部 7 号正弯矩接头外弧面混凝土压溃, 内弧面铸铁手孔板开裂后, 结构基本进入整体失稳阶段 (第三阶段)。最终随着左半环上部 B7 管片本体受弯破坏, 结构彻底丧失承载能力。结构鲁棒性评价表明, 双圆盾构隧道相比类矩形盾构隧道更好地利用了圆形隧道的优良受力性能, 整体鲁棒性评价指标也更高。研究进一步建立了结构整体收敛变形和接头转角、接头张开量的相互关系, 发现受结构、接头构造及材料性能影响, 双圆盾构隧道结构在地表堆载意外工况下初期变形主要来源于 3 号、6 号和 8 号负弯矩接头, 在第二阶段后期随着内力重分布, 7 号正弯矩接头迅速达到线性极限, 并进入塑性状态, 导致结构左半环收敛变形快速发展。根据结构及接头受力机制, 实际隧道运维期间重点监测的关键部位应包含结构长短轴收敛变形、腰部及小海鸥块侧负弯矩接头内弧面压碎及正弯矩接头内弧面张开情况。

**关键词:** 双圆盾构隧道; 原型结构试验; 地表堆载; 破坏机制; 鲁棒性评价; 监测部位

**中图分类号:** U451.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)03-0487-08

**作者简介:** 柳 献(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事隧道及地下结构服役行为、相关机理与性能控制方面的研究工作。E-mail: xian.liu@tongji.edu.cn。

## Experimental investigations on failure mechanisms of DOT shield tunnel subjected to extreme surface surcharge

LIU Xian<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, LI Jiaping<sup>2</sup>, WANG Rulu<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 201102, China)

**Abstract:** During the service lifespan of shield tunnels, the surrounding construction activities are easy to cause significant structural responses. To explore the structural robustness of double-o-tube (DOT) shield tunnels in the face of environmental disturbances and to provide a guidance for tunnel operation and maintenance, a failure test is designed and conducted on a prototype DOT shield tunnel structure. In this test, a quasi-static method is utilized to simulate the external loading conditions of the tunnel structures subjected to the extreme surface surcharge. Through an analysis of the evolution of deformation responses of the structures and longitudinal joints during the tests, the failure mechanisms of the DOT tunnel structures are revealed. The tests indicate that the failure process of the DOT tunnel subjected to the extreme surface surcharge can be divided into three typical stages: initial linear stage, rapid accumulation of plastic damage stage, and instability stage. As the convergence deformation of the long axis (from the left waist to the right waist) approaches approximately 25 mm, three negative moment joints (No. 6, No. 8, and No. 3) enter the elastoplastic state, and the structures simultaneously enter the second stage (rapid accumulation of plastic damage stage). Subsequently, with the extrados concrete of the No.7 positive moment joint being crushed and the intrados cast iron plate of that joint being fractured, the structures enter the third stage (instability stage). Ultimately, with the bending failure of the B7 block (segment), the structures completely lose their bearing capacity. The structural robustness evaluation indicates that the DOT tunnel, compared to the quasi-rectangular tunnel, better utilizes the good load-bearing performance of circular tunnels, resulting in

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078376)

收稿日期: 2023-11-29

\*通信作者 (E-mail: lhugospace@tongji.edu.cn)

a higher robustness performance. The relationships between the structural convergence deformation and the joint rotation angles as well as the joint opening deformations are also investigated. It is found that the structural deformation at the first stage mainly comes from three negative moment joints (No. 3, No. 6, and No. 8). Near the end of the second stage, with the redistribution of internal forces, the No.7 positive moment joint quickly reaches the linear limit and enters the plastic state, causing a rapid development of the structural convergence deformation. Based on these findings, the critical monitoring locations during the service lifespan of tunnels should include the structural convergence deformations of the long and short axes, as well as the crushing of intrados concrete of negative moment joints at the waist and the side of the small seagull block, and intrados opening of positive moment joints.

**Key words:** DOT shield tunnel; prototype test; surface surcharge; failure mechanism; robustness evaluation; measuring location

## 0 引言

随着城市地下空间资源愈发短缺及可持续性发展要求,如何高效安全地利用地下空间已成为当前大中型城市建设发展的重点难题。双圆盾构隧道相较常规圆形隧道可显著提高地下空间利用效率,且兼具圆形隧道力学性能的合理性和稳定性<sup>[1]</sup>,在开展系列结构设计及施工工艺研究后<sup>[2-3]</sup>,双圆盾构隧道也成功应用于上海地铁多个区间隧道工程建设中。然而,随着地下空间高强度高密度开发,已建成隧道将面对日趋复杂且频繁扰动的周边工程建设活动<sup>[4-5]</sup>。且双圆盾构隧道在面对周边工程活动导致的意外工况作用时,结构的鲁棒性、韧性、极限承载性能和破坏机制均不清晰。目前部分双圆盾构隧道最长服役时间已达 20 a 左右,缺少运维及加固等方面关键性指标的理论依据,亟待开展相关研究。

针对双圆盾构隧道结构设计状态下的力学性能及设计适用性,王如路等<sup>[6]</sup>通过系列缩尺模型试验,对比了通、错缝拼装双圆隧道结构力学性能的差异,发现错缝结构的承载性能显著提升,结构变形显著下降。宋博<sup>[7]</sup>、杨国祥等<sup>[8]</sup>通过单环 6 点加载足尺试验,验证了双圆隧道结构的设计适用性。考虑到 6 点加载试验条件对实际工况的模拟效果限制,郭智杰等<sup>[9]</sup>开展了三环错缝拼装足尺试验,采用 28 点径向加载和 30 点纵向加载以分别模拟周边水土荷载和隧道纵向力,揭示了结构在对称及非对称荷载状态下的结构响应,发现结构的薄弱部位是海鸥块,设计时需给予重视。针对双圆盾构隧道结构施工阶段力学性能,周文波等<sup>[10]</sup>基于结构内力现场监测试验,同样发现结构薄弱部位是海鸥块及隧道上角部 45 度位置,且脱出盾尾工况是结构最危险工况。郭璇等<sup>[11]</sup>通过地层-结构缩尺模型试验,获得了地层沉降特征,结合双圆盾构隧道纵向分析地层结构模型,对海鸥块、中柱等影响内力传递和结构整体变形的关键构件作用机制进行了分析研究。Shen 等<sup>[12]</sup>针对双圆盾构隧道施工过程中易出现的偏

转现象,结合数值模拟手段,分析了双圆盾构旋转纠偏过程导致的内力响应,发现双圆盾构施工中偏转是不可忽视的问题。针对双圆盾构隧道运营阶段,Liu 等<sup>[13]</sup>以 14 号线盾构下穿地铁 6 号线双圆盾构隧道区间为背景,研究了 2 次穿越过程双圆隧道产生的变形特征,发现周边近距离施工穿越易诱发双圆隧道结构的不均匀隆沉和扭转,对结构产生不利影响。针对双圆盾构隧道的既有研究主要关注了结构在不同荷载状态下的力学性能,但尚局限于结构在弹性阶段及弹塑性阶段初期的力学性能。而在周边施工、环境变化影响下,隧道结构往往容易进入弹塑性阶段甚至塑性阶段,这也涉及对双圆盾构隧道结构非线性力学行为的更深刻认知,尤其是针对隧道运营阶段经常面临的顶部超载<sup>[14]</sup>、周边卸载<sup>[15]</sup>等意外工况。因此,需通过系列研究进一步揭示双圆盾构隧道结构在意外工况作用下的力学行为及破坏机制。

本研究以地表堆载(顶部超载)意外工况为例,基于原型结构试验平台<sup>[16]</sup>开展了双圆盾构隧道结构原型破坏性试验。通过对结构薄弱点和破坏过程的分析,揭示了双圆隧道结构及接头的破坏机制和受力特征,分析了结构鲁棒性能和接头变形贡献,总结了隧道结构运营期间的关键监测部位,为实际工程运维提供了理论依据。

## 1 试验设计

### 1.1 双圆盾构隧道试验试件

本研究采用上海轨道交通 8 号线原型双圆盾构隧道管片作为试验试件。如图 1 所示,双圆盾构隧道由 8 块标准块(B1-B8 块)、1 块大海鸥块(A 块)、1 块小海鸥块(C 块)和一根中柱(D 块)组成。双圆隧道外径尺寸为 10900 mm(宽)×6300 mm(高)。管片宽度为 1200 mm,厚度为 300 mm。中柱中心宽度为 700 mm,厚度为 350 mm。左右两半环圆环的中心距为 4600 mm。混凝土强度为 C50。

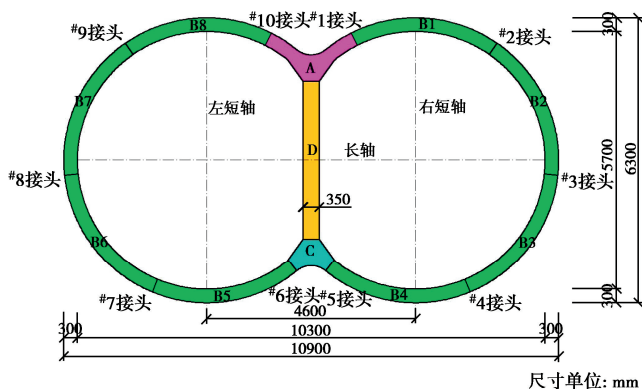


图1 双圆盾构隧道试件分块及尺寸图

Fig. 1 Schematic diagram of DOT tunnel specimen

双圆盾构隧道所有接头均采用预埋螺母型接头形式,即接头一侧为手孔,另一侧为预埋螺母,两块管片通过单头螺栓连接。用于连接标准块(B)和海鸥块(A、C)的接头,每个接头包含2个手孔,每个手孔采用3根M27单头螺栓连接,如图2所示。用于连接海鸥块(A、C)和中柱(D)的接头,每个接头包含4个手孔,每个手孔采用1根M27单头螺栓连接。所有手孔盒及预埋螺母均采用铸铁材料<sup>[1]</sup>。

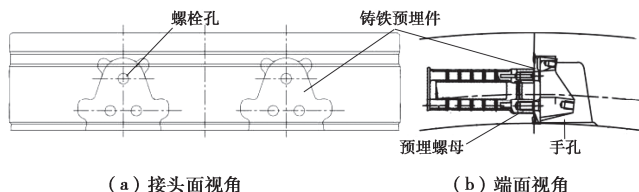
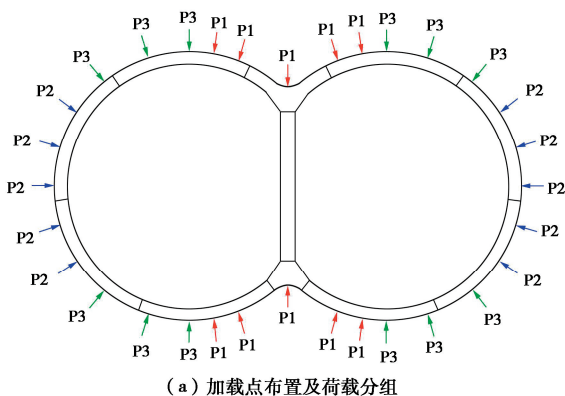


图2 环向接头(纵缝接头)布置图

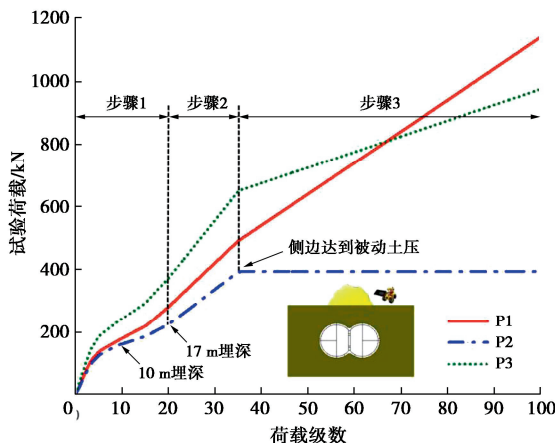
Fig. 2 Configurations of longitudinal joint

## 1.2 地表堆载工况加载方案

与郭智杰等采用的28点加载方案类似<sup>[9]</sup>,本研究中通过32点径向加载方案以模拟隧道结构外荷载状态,如图3(a)所示。其中32个试验加载点分为P1(10个加载点)、P2(12个加载点)、P3(10个加载点)3组。



(a) 加载点布置及荷载分组



(b) 试验荷载加载路径

图3 试验加载方案

Fig. 3 Loading procedure of failure tests

参考已有研究针对隧道结构顶部超载极限工况的模拟方法<sup>[17]</sup>,双圆隧道试验结构将依次经历正常运营工况(10~17 m)、侧边被动土压力工况和顶部超载极限工况,共3个步骤。步骤1从静止开始加载,结构将依次经历10,12,13,17 m埋深正常运营工况,模拟运营结构状态。步骤2试验荷载同步增大,直至侧压力达到被动土压力。步骤3保持侧边压力不变,顶部及腰部荷载保持固等比例上升,直至结构达到极限状态。试验荷载设计采用弹性阶段(设计阶段)综合考虑内力、变形等效,非线性阶段考虑荷载等效的设计原则<sup>[16]</sup>,3组荷载的加载路径如图3(b)所示。

## 1.3 监测方案

本次试验的研究指标及监测方案如下:

### (1) 衬砌环形状变化

沿隧道圆周均匀布设拉线位移计测量结构整体位移,在左右短轴、中柱及腰部位置布设拉线位移计测量结构收敛变形,共计28个测点。

### (2) 纵缝张开、错动变化

管片每个纵缝内、外侧各布置2个伸缩式位移计测量隧道纵缝内外侧张开与压缩,在外侧布置1个伸缩式位移计测量纵缝错台,共计50个测点。

### (3) 衬砌环管片本体及纵缝内力变化

在结构全环管片本体及接头附近上端面、内弧面和外弧面布设应变片测量混凝土应变,共计559个测点。

在试验过程中同时采用摄像机进行全过程整体和局部试验现象记录。本研究主要基于(1),(2)中的结构整体收敛变形和接头转动变形进行分析。

## 2 主要试验结果分析

### 2.1 结构薄弱部位



双圆盾构隧道结构在地表堆载工况下结构达到极限承载力后的最终状态时如图 4 所示。将接头、管片本体破坏视为结构的局部薄弱点破坏标志，在图 4 中以红圈圈出。最终结构右半环出现 2 个薄弱点，左半环出现 4 个薄弱点，且左半环结构整体变形、接头变形、破坏程度均大于右半环。

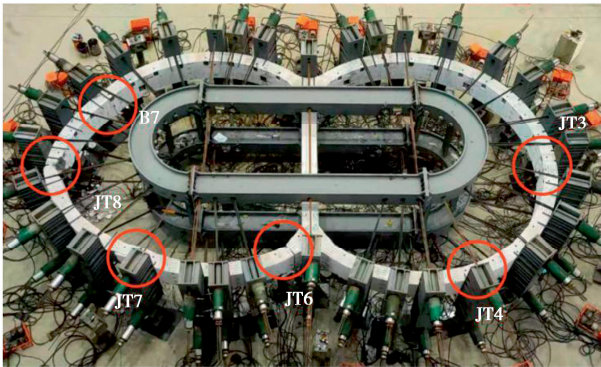


图 4 结构最终状态及薄弱点分布

Fig. 4 Final state of specimen and distribution of weak parts

如图 5 所示，最终状态下，左半环 6 号、8 号负弯矩接头与 7 号正弯矩接头均出现明显转动和破坏现象，3 个接头的受压侧均出现大范围混凝土受压掉块现象。其中 6 号和 8 号接头为负弯矩接头，因而铸铁预埋手孔盒出现明显受压变形，铸铁板向手孔方向变形弯曲。8 号接头的破坏程度更重，铸铁板变形逐渐累积直至出现局部断裂，如图 6 (a) 所示。7 号接头为正弯矩接头，其内弧面铸铁板受拉出现整体断裂，螺栓也彻底失去作用，如图 6 (b) 所示。

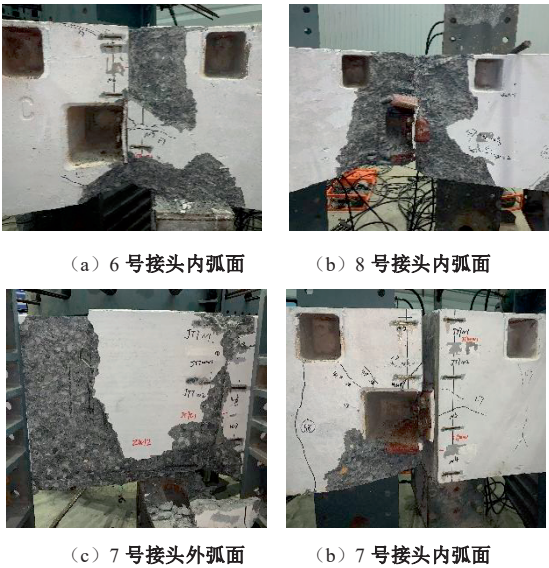


图 5 左半环接头破坏状态

Fig. 5 Failure states of joints at left half-ring

右半环结构破坏情况显著小于左半环，接头均无明显转动，接头仅出现轻微掉块和受压侧混凝土压裂现象，如图 7 所示的 3 号负弯矩和 4 号正弯矩接头。

接头 1、接头 2 和接头 5 虽然也有轻微压裂现象，但未出现掉块，破坏程度相对较轻。

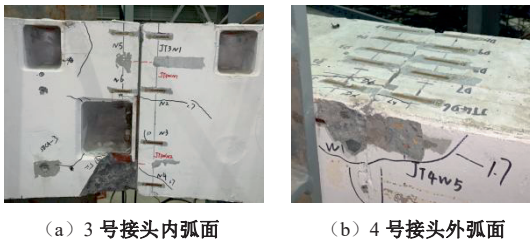


(a) 8 号接头

(b) 7 号接头

图 6 7 号、8 号接头预埋铸铁手孔盒破坏状态

Fig. 6 Failure states of cast iron hand hole boxes of No.7 and No.8 joints



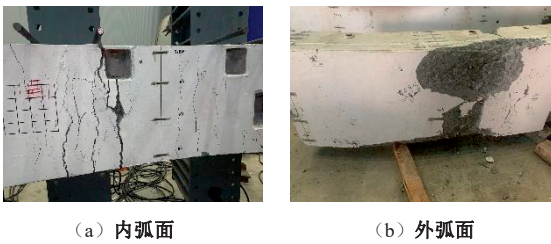
(a) 3 号接头内弧面

(b) 4 号接头外弧面

图 7 右半环接头破坏状态

Fig. 7 Failure states of joints at right half-ring

除接头破坏以外，左半环 B7 块管片中部管片本体位置出现严重破坏。内弧面受弯裂缝大量发展，外弧面大范围管片本体压坏并剥落、掉块，其内外弧面破坏情况如图 8 所示。该薄弱点位置也和现场试验结果较为匹配<sup>[10]</sup>。



(a) 内弧面

(b) 外弧面

图 8 B7 块管片本体破坏状态

Fig. 8 Failure state of B7 block (segment)

## 2.2 结构破坏（失效）过程

如图 9 所示，试验过程中荷载-结构长轴收敛变形（向外）关系呈现出典型的非线性力学特征。

试验加载初期，试验荷载依次经历 10~17 m 埋深运营工况至侧边被动土压力工况。到达侧边被动土压力工况时，长轴收敛变形为 19.12 mm，管片左右半环顶底位置内弧面裂缝控制在 0.25~0.3 mm 以内。且此阶段接头无明显开裂现象。



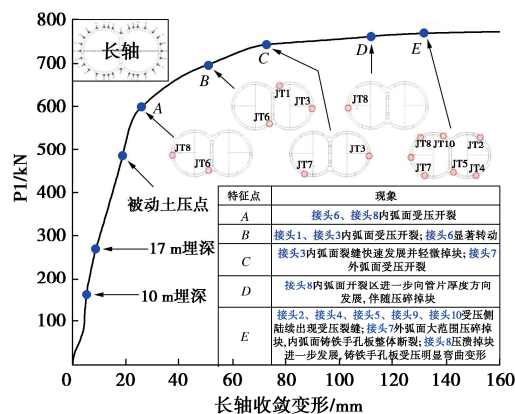


图9 结构长轴收敛变形发展及特征点出现过程

Fig. 9 Development of convergence deformation of long axis and emergence process of characteristic points

随荷载增大, 当长轴变形增大到 25.09 mm 时 (特征点 A), 6 号长轴收敛变形发展曲线出现明显拐点。该特征点下, 8 号负弯矩接头靠内环缝面出现受压裂缝, 8 号接头出现轻微混凝土受压鼓包现象。特征点 A 之前, 随试验荷载上升, 结构整体收敛及接头局部响应均基本呈线性发展趋势。特征点 A 之后, 结构整体刚度逐渐下降, 同时 6 号、8 号接头转角亦出现明显拐点, 接头转角变形发展逐渐加快, 刚度逐渐降低。

随长轴变形进一步增大至 51.03 mm (特征点 B), 1 号、3 号接头出现轻微受压裂缝。接头 6 和接头 8 转角则持续增大, 其中 8 号接头出现一定程度掉块。

当长轴变形达到 72.88 mm (特征点 C), 接头 3 开裂范围进一步发展并出现局部轻微掉块现象。7 号接头出现受压裂缝, 且此后 7 号接头变形迅速增大。

长轴变形继续发展至 131.52 mm (特征点 E), 2 号、4 号、5 号、9 号及 10 号接头相继出现受压裂缝。8 号接头内弧面压溃范围进一步扩大, 手孔铸铁盒也开始出现明显变形。7 号接头外弧面混凝土大面积压溃掉块, 而内弧面手孔铸铁板整体断裂。7 号和 8 号接头的内弧面手孔破坏状态均已在图 6 中展示。

特征点 E 后结构整体及接头局部变形均迅速发展, 变形难以稳定。至长轴变形达到 225 mm 左右时, B7 块本体发生受弯破坏, 内弧面裂缝加粗加深, 同位置外弧面大面积压碎并整体剥落。同时左半环 6 号、7 号、8 号接头变形也进一步发展并不断出现混凝土掉块现象。可以认为结构已无法继续承担外部荷载。

### 3 双圆隧道结构力学性能分析

#### 3.1 结构破坏机制及鲁棒性能

如 2.2 节所述, 结构试验全过程呈现出典型的 3 阶段发展趋势, 可分为初始线性、塑性损伤快速累积和整体失稳 3 个主要阶段。

第一阶段 (初始线性阶段) 以特征点 A 为界, 该阶段结构依次经历 10~17 m 埋深正常运营工况和侧边被动土压力工况。直至长轴变形达到 25 mm 左右时, 结构基本处于线性阶段。此时接头基本保持完好, 管片本体仅左右顶底 4 个位置内弧面出现裂缝。大海鸥块和腰部外弧面裂缝直至结构进入第二阶段中期左右才出现。该阶段中后期随着管片本体开裂, 塑性损伤已有一定累积, 对应管片刚度虽有一定下降, 但对整体结构力学性能的影响有限, 这也与盾构隧道结构变形主要来源于接头的认知是一致的<sup>[18-19]</sup>。

第二阶段 (塑性损伤快速累积阶段) 以特征点 A 和特征点 E 为界, 该阶段的显著特征是部分接头受压侧混凝土压裂, 且接头变形快速发展。该阶段始于左半环靠大海鸥块的 6 号、左腰部 8 号负弯矩接头内弧面首先出现压裂现象, 后随试验荷载上升, 接头转角发展显著加快, 右侧 3 号接头也出现压裂, 如图 10 所示。接头刚度的下降和塑性发展进而导致双圆隧道结构在第二阶段的刚度逐渐下降, 塑性损伤快速累积。

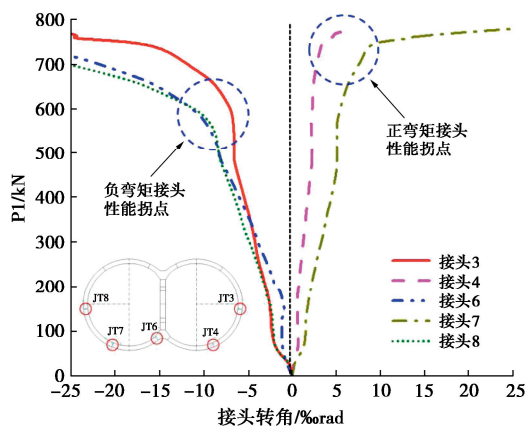


图10 接头转角发展

Fig. 10 Development of joint rotation angles

随荷载继续上升, 左半环底部 7 号接头和右半环底部 4 号接头等两个正弯矩接头响应继续发展, 直至外侧混凝土受压开裂。其中正弯矩接头中 7 号接头响应发展最快, 从结构特征点 C 至特征点 E, 较小的荷载增量下即导致压裂裂缝迅速发展至外弧面压溃, 同时内弧面手孔位置铸铁板破坏。随着 7 号接头的逐渐失效, 结构响应发展也进入平台阶段, 结构亦完全进入整体失稳阶段 (第三阶段)。

第三阶段结构变形发展已很快, 结构变形已基本无法稳定。继 6 号、7 号、8 号接头进入塑性阶段, 在左半环形成 3 个塑性铰后, 外荷载在较小增量情况下结构长轴变形继续发展, 当长轴变形达到 225 mm 左右时, 左半环 3 个薄弱点接头变形进一步发展, 裂缝宽度发展。最终在 6 号、8 号、3 号、7 号、4 号接头

先后形成塑性铰的基础上，B7 块管片本体受弯破坏，在左半环最终形成 4 个塑性铰点，右半环形成 2 个塑性铰点，结构成为几何可变机构，并失去承载能力，如图 4 标注所示。

参考 Liu 等<sup>[17, 19]</sup>提出的盾构隧道意外工况下鲁棒性评价方法，以 10 m 埋深作为设计特征点，特征点 A 作为结构首个塑性点，特征点 E 作为结构的承载能力极限点，并将双圆隧道结构与另一双跨异型盾构隧道结构类矩形盾构隧道（螺栓、配筋优化前）作对比，将鲁棒性指标汇总于表 1。结果表明双圆盾构隧道由于其几何参数直接根据圆形盾构隧道演化而来，因而充分保留了圆形隧道受力性能的优势。对比结果也表明，双圆隧道鲁棒性指标相较于类矩形盾构隧道是整体较高的。当然，仅基于 P1 荷载和长轴变形的鲁棒性能评价是不够全面的，后续仍将基于原型结构试验和宏观非线性力学性能分析模型，对隧道结构在更多几何参数及意外工况下的鲁棒性能进行综合评价。

表 1 双圆盾构隧道、类矩形盾构隧道鲁棒性指标对比

Table 1 Comparison of robustness indices between DOT tunnel and quasi-rectangular tunnel

鲁棒性指标	双圆盾构隧道	类矩形盾构隧道
超载系数 $K$	4.75	3.54
变形系数 $D$	25.61	28.75
延性系数 $\mu$	5.24	3.05
消能能力 $I$	299.03	162.12

3.2 接头受力特征及变形贡献

如图 10 所示，纵观试验全过程，6 号、8 号、3 号负弯矩接头均呈现出明显的弹性、弹塑性及塑性三阶段发展过程，混凝土受压开裂后的刚度退化也较为平缓。7 号正弯矩接头在结构受荷初期未体现出明显的弹塑性阶段，更偏向于刚塑性。在到达结构线性极限后刚度骤降并进入塑性阶段，伴随显著混凝土和手孔铸铁破坏现象。这样的受力特征区别主要由两方面因素决定：①结构本身的几何参数和接头分布。荷载状态和结构参数决定了当 7 号接头达到特征点时，整环结构已处于第二阶段（塑性损伤快速累积阶段）中后期，而此前与 7 号接头相邻的 6 号和 8 号负弯矩接头早已出现内弧面压裂现象。在 6 号和 8 号接头进入弹塑性阶段后，结构内力重分布，使更多的内力由 7 号接头承担。因而当 7 号接头特征点出现后，结构将不再具备足够的内力重分布能力，导致随着试验荷载的上升，7 号接头快速越过弹塑性阶段而进入塑性阶段。②接头构造及材料性质。如图 2 所示，双圆盾构隧道结构的正、负弯矩接头设计一致，螺栓整体布置于更为靠近内弧面的区域，因而 7 号正弯矩接头相比负弯矩接头应具备更高的弯矩承载性能。但由于试验

管片寿命已近 20 a，手孔内裸露铸铁预埋件长期受雨水冲刷及浸泡，使铸铁板表面出现明显锈蚀，导致性能劣化，服役性能降低<sup>[20]</sup>，直接导致了图 6（b）所示的手孔铸铁板破坏现象。该特性导致了 7 号接头刚度及承载性能的降低，并使 7 号接头的破坏具有脆性特征，进一步加速了 7 号接头和结构整体的损伤累积进程。

为研究不同接头对结构收敛变形的贡献，以长轴收敛变形作为对比指标，建立与薄弱点接头转角之间的相关性，见图 11。考虑到接头转角主要来源于接头受拉侧张开，故而该相关性也能反应结构宏观收敛变形和接头张开量的关系，进而明确接头的防水性能<sup>[21]</sup>。

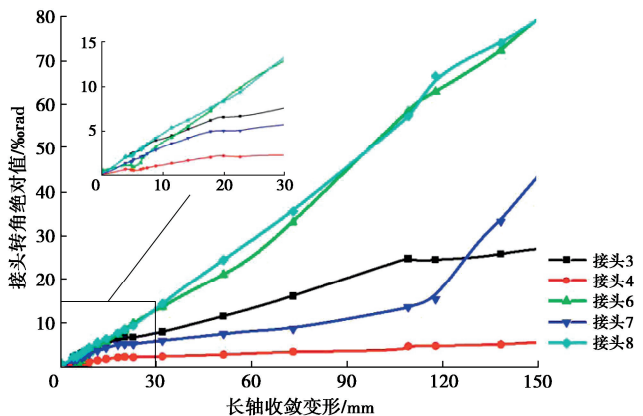


图 11 长轴收敛变形与接头转角相关性

Fig. 11 Relationship between convergence deformation of long axis and joint rotation angles

如图 11 所示，在结构变形发展第一阶段，3 号、6 号、7 号和 8 号接头对结构变形的贡献差异不大。结构进入第二阶段后，6 号和 8 号负弯矩接头对结构变形的贡献占比较为稳定，相较而言 3 号和 7 号接头的贡献相对而言则较小。直到结构收敛变形达到 100 mm 以上时，随着 7 号接头进入弹塑性阶段，其对结构收敛变形的贡献才快速提升，并超过 3 号接头。

将不同工况和特征点下结构收敛变形和 3 号、6 号、7 号和 8 号接头的受拉侧张开量汇总列于表 2。结果表明，与接头转角结果趋势相近，6 号、8 号接头张开量较大，7 号接头二阶段末张开量才高于 3 号接头。

根据《盾构隧道工程设计标准：GB(T)51438—2021》，以 2 mm 作为纵缝张开限制值，对应设计控制部位为 6 号接头外弧面，特征点为侧边被动土压点，设计 10~17 m 埋深下接头均满足要求，说明结构在设计工况下的适用性还是足够的。另一方面，由于双圆盾构隧道最为危险的 6 号和 8 号接头为负弯矩接头，张开侧靠接头外弧面，因而在防水性方面更应该予以重视。但实际工程中接头外弧面张开量难以测量，故而通过建立结构整体收敛变形和接头张开量的关系式<sup>[21]</sup>可



以有效预测负弯矩接头外弧面张开量, 评估接头防水性能, 进而准确评估结构当前服役状态。

表 2 不同工况、特征点下长轴收敛变形和接头张开量

Table 2 Convergence deformations of long axis and opening deformations of joints under different conditions and characteristic points

特征点	单位: mm				
	长轴收敛	接头 3 张开	接头 6 张开	接头 7 张开	接头 8 张开
10 m 埋深	5.14	0.51	0.31	0.25	0.43
17 m 埋深	8.80	0.79	0.76	0.42	0.81
被动土压点	19.12	1.32	1.99	0.78	1.67
A	25.09	1.32	2.68	0.87	2.28
B	51.03	2.38	4.93	1.33	5.51
C	72.88	3.46	7.53	1.62	7.86
D	111.79	5.30	12.44	3.25	13.29
E	131.52	5.45	13.97	7.82	17.85

3.3 结构服役状态关键监测部位

基于结构破坏机制分析及接头受力特征分析, 除结构长短轴收敛变形外, 亦需要关注接头响应。本研究发现小海鸥块所在侧 (本试验中为结构下半部分) 的接头相比于大海鸥块所在侧的接头更为危险, 因而关键监测部位应包含结构两侧腰部负弯矩接头及靠小海鸥块一侧的所有接头。考虑到实际隧道运维状态观测及检测条件, 故而双圆隧道在正常运维时若面临周边环境扰动工况, 应优先关注如下指标:

- (1) 结构长轴、短轴收敛变形;
- (2) 管片左右顶底部内弧面管片开裂;
- (3) 结构左右腰部及小海鸥块两侧负弯矩接头内弧面压碎情况;
- (4) 靠小海鸥块侧正弯矩接头内弧面张开及手孔铸铁板状态。

4 结论与展望

为探究双圆盾构隧道结构在地表堆载意外工况下的破坏机制, 开展了原型结构破坏性试验, 揭示了试验全过程结构受荷响应和失效过程, 分析了结构破坏机制和受力特征, 主要得到以下 6 点结论。

- (1) 双圆盾构隧道在地表堆载意外工况下的失效过程, 呈现出典型的初始线性、塑性损伤快速累积和整体失稳 3 个阶段。其中第二阶段的起始特征点为 6 号和 8 号接头内弧面受压开裂, 第二阶段的结束特征点为 7 号接头外弧面压溃, 内弧面铸铁手孔破坏。
- (2) 地表堆载 (顶部超载) 意外工况下, 双圆盾构隧道结构 6 号、8 号、3 号、7 号、4 号接头依次进入弹塑性阶段, 形成塑性铰, 最终 B7 块管片本体处发生受弯破坏, 结构左半环形成 4 个塑性铰, 使结构成为几何可变机构, 结构失去承载能力。
- (3) 双圆盾构隧道充分利用了圆形隧道的优良受

力性能, 其意外工况下的鲁棒性整体高于螺栓和配筋优化前的类矩形盾构隧道。

(4) 由于接头构造及耐久性原因, 双圆隧道接头受负弯矩作用下的刚度和承载能力均较低。试验过程中 6 号、8 号和 3 号负弯矩接头进入弹塑性阶段后, 结构收敛变形开始迅速发展。内力充分分布导致 7 号正弯矩接头结束弹性阶段后迅速进入塑性阶段, 并且接头破坏具有脆性特征。7 号接头的失效也直接导致了结构整体进入整体失稳阶段。

(5) 双圆盾构隧道意外工况下初期变形主要来源于 3 号、6 号和 8 号负弯矩接头, 在第二阶段后期 7 号接头的变形贡献也逐渐增大。试验表明设计状态下结构张开量满足设计要求, 而结构收敛变形和接头张开量相关性分析可用于隧道服役性能评价。

(6) 双圆盾构隧道运维阶段应重点关注结构长短轴收敛变形、左右顶底部内弧面管片开裂、腰部及靠小海鸥块侧负弯矩接头内弧面压碎情况及正弯矩接头内弧面张开及手孔铸铁板情况。

本文通过试验研究揭示了双圆盾构隧道意外工况下的破坏机制, 为实际运维时隧道变形控制指标提供了试验依据。后续将结合宏观非线性分析模型对双圆盾构隧道结构在不同意外工况下的破坏过程和破坏机制进行进一步研究。

参考文献:

[1] 狄永媚, 杨志豪, 袁金荣, 等. 上海市轨道交通双圆区间隧道衬砌圆环设计探讨[J]. 地下工程与隧道, 2004(3): 11-14, 56. (DI Yongmei, YANG Zhihao, YUAN Jinrong, et al. Lining ring design of DOT running tunnel section of Shanghai rail transit Yangpu line[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2004(3): 11-14, 56. (in Chinese))

[2] 沈秀芳, 杨志豪, 陈海龙, 等. 双圆(DOT)盾构法隧道综合技术应用研究[J]. 上海建设科技, 2005(5): 5-7, 17. (SHEN Xiufang, YANG Zhihao, CHEN Hailong, et al. Research on application of comprehensive technologies for tunnel constructed with DOT tunneling method[J]. Shanghai Coustruction Science and Technology, 2005(5): 5-7, 17. (in Chinese))

[3] CHOW B. Double-O-tube shield tunneling technology in the Shanghai Rail Transit Project[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 594-601.

[4] WEI Z. Simplified method for evaluating mechanical interactions between tunnel and soil due to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 139: 105205.

- [5] WEI G, ZHANG S M, XIANG P F. Model test study on the influence of ground surcharges on the deformation of shield tunnels[J]. *Symmetry*, 2021, **13**(9): 1565.
- [6] 王如路, 宋 博, 王 祺, 等. 双圆盾构隧道衬砌错缝拼装整环试验及结构分析[J]. *地下工程与隧道*, 2001(1): 12-15, 21, 47. (WANG Rulu, SONG Bo, WANG Qi, et al. Lining experiment and structure analysis of bi-circular shield tunnel with staggered joint splice on segments[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2001(1): 12-15, 21, 47. (in Chinese))
- [7] 宋 博. 双圆盾构隧道衬砌结构及施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2003. (SONG Bo. Research on Lining Structure and Construction Technology of DOT Shield Tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese))
- [8] 杨国祥, 林家祥. 双圆盾构隧道管片大整环拼装加载试验及结构分析[C]// 中国土木工程学会. 2003 上海国际隧道工程研讨会论文集, 上海, 2003: 173-179. (YANG Guoxiang, LIN Jiaxiang. Loading test and structural analysis of large scale DOT shield tunnel linings[C]// China Civil Engineering Society. Proceedings of the 2003 Shanghai International Tunnel Engineering Symposium, Shanghai, 2003: 173-179. (in Chinese))
- [9] 郭智杰, 鲁 亮, 刘祖华. 双圆盾构法隧道衬砌 1:1 结构试验加载方法研究[J]. *结构工程师*, 2004, **20**(3): 64-71. (GUO Zhijie, LU Liang, LIU Zuhua. Loading method of test for double-circular face shield-tunnel lining[J]. *Structural Engineers*, 2004, **20**(3): 64-71. (in Chinese))
- [10] 周文波, 郑宜枫, 滕 丽, 等. 双圆盾构隧道施工过程中管片力学性状的原位测试研究[J]. *力学季刊*, 2005, **23**(6): 59-463. (ZHOU Wenbo, ZHENG Yifeng, TENG Li, et al. Mechanics characteristics study of segment in Double-O-Tube tunnel under in-situ test method during its construction process[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2005, **23**(6): 59-463. (in Chinese))
- [11] 郭 璇, 朱 坤, 张晓新, 等. 双圆盾构隧道-软土层相互作用规律的模型试验及响应分析[J]. *铁道学报*, 2016, **38**(9): 101-108. (GUO Xuan, ZHU Kun, ZHANG Xiaoxin, et al. DOT model test and interactive response analysis of soft soil layer to double circular shield tunnel[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, **38**(9): 101-108. (in Chinese))
- [12] SHEN S L, HORPIBULSUK S, LIAO S M, et al. Analysis of the behavior of DOT tunnel lining caused by rolling correction operation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, **24**(1): 84-90.
- [13] LIU Y B, LIAO S M, CHEN L S, et al. Structural responses of DOT tunnel induced by shield under-crossing in close proximity in soft ground: part I field measurement[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, **128**: 104623.
- [14] 邵 华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(6): 1036-1043. (SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(6): 1036-1043. (in Chinese))
- [15] LIU X, BAI Y, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of continuously jointed segmental tunnel linings[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, **12**(10): 1364-1379.
- [16] 柳 献, 刘 震, 叶宇航, 等. 复杂受荷下盾构隧道原型结构试验平台的研发与实证[J]. *岩土工程学报*, 2024, **46**(5): 927-937. (LIU Xian, LIU Zhen, YE Yuhang, et al. Development and demonstration of prototype test platform for shield tunnel linings under complex loading scenarios[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, **46**(5): 927-937. (in Chinese))
- [17] LIU X, YE Y H, LIU Z, et al. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: first results from full-scale ring tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, **71**: 440-453.
- [18] ZHANG Y M, KARLOVŠEK J, LIU X. Identification method for internal forces of segmental tunnel linings via the combination of laser scanning and hybrid structural analysis[J]. *Sensors*, 2022, **22**(6): 2421.
- [19] LIU X, LIU Z, YE Y H, et al. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: further insights from full-scale ring tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, **79**: 304-318.
- [20] LAQUE F L. The corrosion resistance of ductile iron[J]. *Corrosion*, 1958, **14**(10): 55-62.
- [21] 郑光辉, 庞小朝, 王康任. 基于整环足尺试验的盾构隧道破坏机制及纵缝外弧面变形分析[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, **41**(增刊 2): 165-171. (ZHENG Guanghui, PANG Xiaochao, WANG Kangren. Failure mechanism of shield tunnel based on full-scale experiment and analysis of longitudinal joint's outboard deformation[J]. *Tunnel Construction*, 2021, **41**(S2): 165-171. (in Chinese))