

DOI: 10.11779/CJGE2022S2024

盾构隧道纵缝接头变形可恢复性足尺试验研究

张艳杰¹, 黄宏伟², 周鸣亮²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 进行了盾构隧道拱顶双缝接头和拱腰单缝接头的原型足尺试验, 探究两类接头在隧道上方堆载作用下的变形发展规律、以及卸载和土体微扰动注浆条件下的变形可恢复性。试验结果表明: 随着地表堆载增大, 接头张开变形呈非线性发展; 超载引起的变形可以通过卸载得到部分恢复, 既有变形越小, 恢复效果越好; 注浆作用下, 拱顶接头的变形恢复效果较拱腰接头更为显著。

关键词: 纵缝接头; 变形可恢复性; 微扰动注浆; 转动刚度; 足尺试验

中图分类号: U455.43; TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)S2-0112-04

作者简介: 张艳杰(1991—), 女, 博士后, 主要从事隧道结构及网络的性能易损性和可恢复性等方面的研究工作。E-mail: zhangyanjie@cug.edu.cn。

Full-scale tests on deformation recoverability of longitudinal joints of shield tunnel

ZHANG Yan-jie¹, HUANG Hong-wei², ZHOU Ming-liang²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A series of full-scale tests are conducted on the two-seam longitudinal joint at the shield tunnel crown and one-seam longitudinal joint at the shield tunnel waist, aiming to explore the deformation development laws of these two joints under the surcharge above the tunnel and the deformation recoverability under the conditions of unloading and soil micro-disturbance grouting. The test results show that the joint opening develops nonlinearly with the increase of the surcharge load. The deformation caused by the surcharge can be partially recovered by unloading. The smaller the deformation, the better the recovery effects. Under the action of grouting, the deformation recovery effects of the joints at the tunnel crown are better than those of the joints at the tunnel waist.

Key words: longitudinal joint; deformation recoverability; micro-disturbance grouting; rotational stiffness; full-scale test

0 引言

足尺试验是了解盾构隧道结构力学行为的有效方法。许多学者开展了足尺管片接头试验来研究纵缝接头的变形特征和力学特性^[1-3]。隧道管片纵缝接头在持续加载作用下的力学性能是以往研究的重点, 而很少研究在应用修复措施治理隧道大变形时纵向接缝的变形和力学特性、可恢复性以及恢复效率^[4]。

本文通过开展盾构隧道拱顶双缝接头和拱腰单缝接头的原型足尺试验, 旨在探究两类接头在隧道上方堆载作用下的变形发展规律, 分析盾构隧道管片在恢复过程中各性态特征的演化规律, 评价不同既有变形条件下隧道管片不同部位接头变形的恢复效果。

1 接头试件设计

本文针对上海地铁隧道运用的管片衬砌环中

的纵缝接头进行一系列室内结构原型试验, 隧道衬砌环和纵缝接头构造形式如图 1 所示。试验试件包括两类接头, 分别为位于隧道管片环拱顶位置受正弯矩作用的纵缝接头(即封顶块和邻接块连接处接头, 以下称为拱顶接头)和位于隧道管片环拱腰位置受负弯矩作用的纵缝接头(即邻接块和标准块连接处接头, 以下称为拱腰接头), 如图 2 所示。弯矩以衬砌环内侧受拉为正, 轴力以受压为正。

值得注意的是, 隧道拱腰和拱脚纵缝是径向平直面, 而拱顶纵缝是与径向斜交平直面, 拱顶纵缝接头是楔形结构, 见图 1(a)。然而, 以往研究中采用的是简化的如拱腰一样的直缝结构, 不能准确描述拱顶处实际的斜接缝构造的力学行为。本文采用隧道拱顶双接头形式进行试验研究。

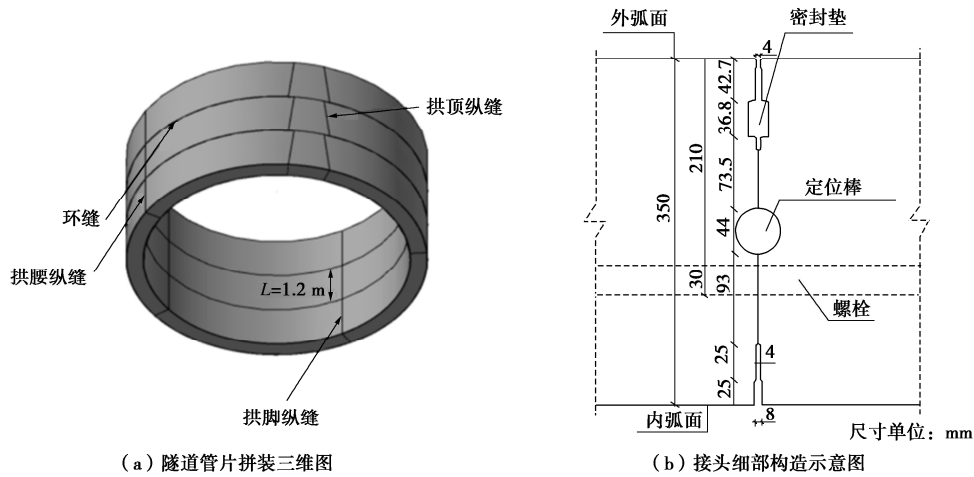


图 1 上海地铁盾构隧道管片衬砌结构

Fig. 1 Structure of segment linings of shield tunnel in Shanghai Metro

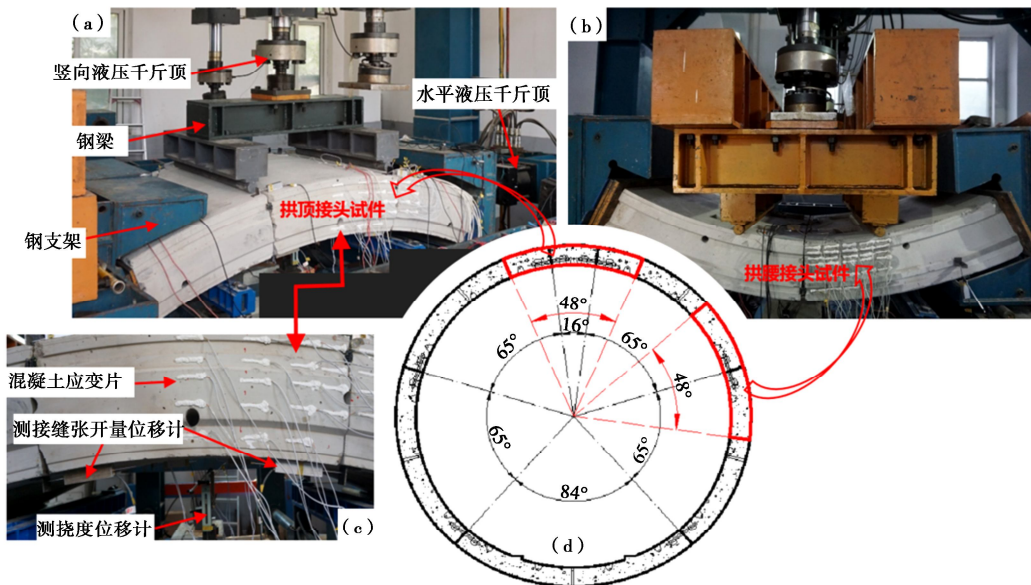


图 2 试验现场照片: (a) 拱顶接头试件; (b) 拱腰接头试件; (c) 位移传感器布置; (d) 隧道衬砌环横截面图

Fig. 2 Photos of test set-up: (a) Specimen of longitudinal joint at tunnel crown, (b) Specimen of longitudinal joint at tunnel waist, (c) Arrangement of displacement sensors, (d) Cross-sectional view of tunnel lining ring

2 管片接头内力计算

采用考虑接头非线性刚度的盾构隧道衬砌分析模型^[5]计算接头内力(弯矩、轴力和剪力)。如图 3 所示,隧道埋深 15 m,周围土体为典型的上海软土,饱和重度(γ)为 18 kN/m³,静止侧压力系数(K_0)为 0.65,地层抗力系数(K_s)为 6000 kN/m³。该模型首先通过对隧道结构施加竖向压力来模拟地面超载对隧道变形的影响。然后,通过移除竖向压力来模拟卸载。最后,通过对隧道结构施加侧向压力模拟注浆对隧道变形的恢复作用。根据接头内力计算结果可以确定足尺试验中对应不同工况的加载路径。

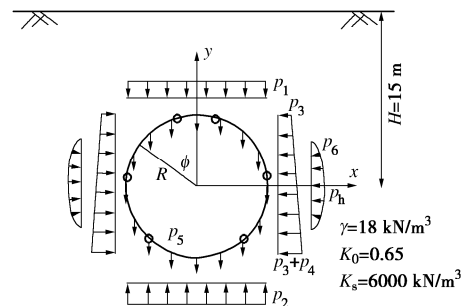


图 3 接头内力计算模型

Fig. 3 Computational model for internal force of joints

试验中,通过水平和垂直液压千斤顶向试件施加水平载荷和垂直载荷,以模拟接头内力(即弯矩、轴力和剪力),见图 2 中 (a) 和 (b)。图 4 和图 5 分别

为试验中拱顶接头和拱腰接头的受力分析图。根据力矩平衡方程，拱顶接头试件和拱腰接头试件的外部载荷和内力之间的关系可由式(1)和式(2)分别推导得到。

$$\begin{cases} M = G \cdot L_2 + P \cdot (L_2 - L_1) - N' \cdot h \\ N = N' \cdot \cos \theta + \frac{1}{2} G \cdot \sin \theta \\ Q = N' \cdot \sin \theta + \frac{1}{2} G \cdot \cos \theta \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} M = P \cdot L_2 - G \cdot (L_1 - L_2 - L_3) - N' \cdot h \\ N = N' \end{cases}. \quad (2)$$

式中 G 为管片重力; M, N, Q 分别为接头处弯矩、轴力和剪力; N' 和 P 分别为由水平液压千斤顶和竖向液压千斤顶施加的水平向荷载和垂向荷载, 通过 POP-M 工控 PC 电液伺服多通道控制器实现试验进程的自动控制。

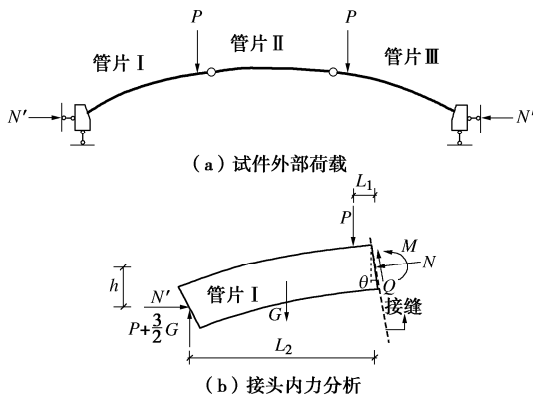


图4 拱顶接头试件受力分析

Fig. 4 Stress analysis of longitudinal joints at tunnel crown

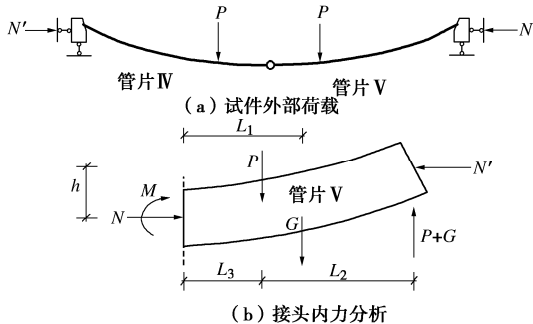


图5 拱腰接头试件受力分析

Fig. 5 Stress analysis of longitudinal joints at tunnel waist

3 试验加载方案

针对拱顶接头和拱腰接头共开展了6组试验, 工况 I~III 和工况 IV~VI 分别研究拱顶接头和拱腰接头超载变形后通过卸载和注浆的变形恢复过程, 具体试验过程见表1。试验在同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室进行, 采用 TJ-GPJ2000 盾构管片接头

试验加载系统。试验过程中接缝张开量由线性位移传感器 (LVDT) 测得, 如图2中(c)所示。

表1 试验工况

Table 1 Test design

工况编号	接头类型	试验内容	加载过程	试验控制变量	变量值	正常荷载水平
工况 I					$M=178 \text{ kN/m}$, $N=593 \text{ kN}$, $Q=88 \text{ kN}$	
工况 II	拱顶接头		加载至正常荷载水平→	超载程度/接头内力; 弯矩 M , 轴力 S , 剪力 Q	$M=278 \text{ kN/m}$, $N=927 \text{ kN}$, $Q=134 \text{ kN}$	拱顶接头: $M=118 \text{ kN/m}$,
工况 III		变形恢复过程	施加超载→ 卸载至正常荷载水平→ 注浆过程模拟		$M=378 \text{ kN/m}$, $N=1260 \text{ kN}$, $Q=181 \text{ kN}$	$N=590 \text{ kN}$, $Q=87 \text{ kN}$
工况 IV					$M=155 \text{ kN/m}$, $N=968 \text{ kN}$	拱腰接头: $M=98 \text{ kN/m}$,
工况 V	拱腰对接				$M=171 \text{ kN/m}$, $N=1068 \text{ kN}$	$N=816 \text{ kN}$
工况 VI					$M=188 \text{ kN/m}$, $N=1175 \text{ kN}$	

4 试验结果与分析

4.1 拱顶接头

图6对比显示了受正弯矩作用的隧道拱顶接头在工况 I~III 中接缝张开增量的变化。在超载过程中, 接头张开量随着荷载的增加而增大。当3 工况试件达到最大荷载时, 接头变形也达到峰值。在卸载过程中, 试验结果表明卸载能在一定程度上恢复接头变形, 但不能完全恢复。接头变形卸载恢复百分比, 即卸载减少的接缝张开增量与卸载前接缝张开增量的比值, 分别为 68%, 56%, 43%。这表明超载越小即变形程度越小, 接头变形的可恢复性越好。

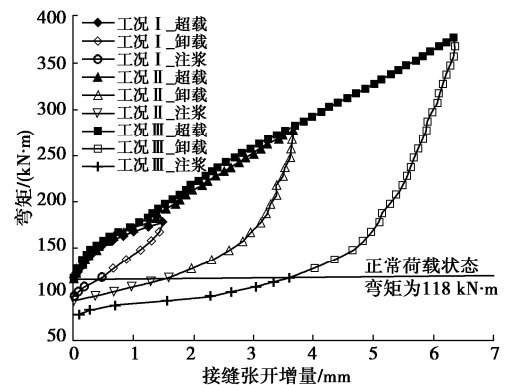


图6 工况 I~III 中拱顶接头在超载、卸载和土体注浆过程中的荷载 - 变形关系曲线

Fig. 6 Load-deformation curves of longitudinal joints at tunnel crown during overloading, unloading and soil grouting conditions for test cases I~III

针对土体注浆对拱顶接头变形恢复的试验模拟, 试验结果表明, 其荷载 - 变形曲线的斜率比卸载过程小得多。减小相同的弯矩, 土体注浆可使接头变形得到更有效的恢复, 这是因为土体注浆引起的拱顶弯矩

减小和轴力增大导致偏心距减小。为了在卸载后将接头变形完全恢复到正常荷载状态下的水平, 工况 I~III 需要通过模拟土体注浆分别减小弯矩值为 20, 25, 40 kN·m, 如图 6 所示。

4.2 拱腰接头

图 7 对比显示了受负弯矩作用的隧道拱腰接头在工况 IV~VI 中接缝张开增量的变化。在超载阶段, 相同荷载水平下, 3 工况的接缝张开增量几乎相同。荷载-变形曲线斜率的减小表明拱腰接头试件的抗弯刚度随着超载水平的增加而降低。在此基础上, 研究了卸载和注浆作用下的变形恢复效果。接头变形卸载恢复百分比分别为 65%, 42%, 36%。显然, 与拱顶接头呈现的特性一样, 变形程度越小卸载恢复效果百分比越大。

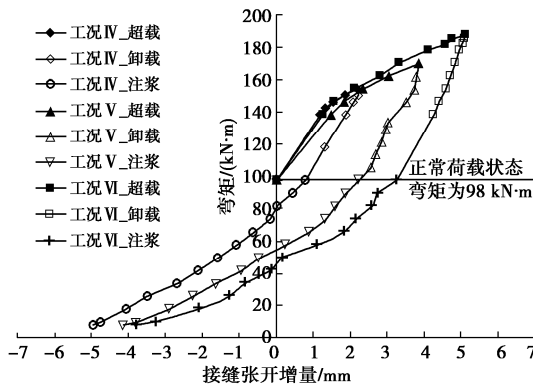


图 7 工况 IV~VI 中拱腰接头在超载、卸载和土体注浆过程中的荷载-变形关系曲线

Fig. 7 Load-deformation curves of longitudinal joints at tunnel waist during overloading, unloading and soil grouting conditions for test cases IV~VI

在试验模拟土体注浆阶段, 荷载-变形曲线的斜率明显小于卸载阶段。在隧道两侧注浆产生的侧向挤压压力的作用下, 接头偏心距减小。因此, 通过减少相同的弯矩, 土体注浆比卸载获得更有效的恢复。此外, 为了将变形恢复到正常荷载状态的水平, 即将接缝张开增量减小到零, 试验结果显示工况 IV~VI 分别需要减少弯矩为 16, 42, 48 kN·m。

从两类接头的试验结果可知: 超载作用下接头张开变形呈现出非线性发展规律, 总体上, 两类接头的抗弯刚度随着接头已有张开变形的增大而降低; 超载引起的变形可以通过卸载得到部分恢复, 既有变形越小, 恢复效果越好, 但不能完全恢复到超载之前状态; 注浆作用下, 拱顶接头的变形恢复效果较拱腰接头更为显著, 这是由于注浆产生的横向挤压作用在减小拱顶接头弯矩的同时亦增大了其轴力, 即有效降低了拱

顶接头处的偏心距。

5 结 论

本文介绍了上海地铁隧道管片衬砌纵缝接头的一系列室内足尺试验结果, 初步探究了卸载和土体注浆对超载引起接头变形的可恢复性, 得出以下结论:

(1) 在地面超载作用下, 衬砌环发生较大的横向变形, 拱顶接头向隧道管片内侧张开, 拱腰接头向隧道管片外侧张开, 导致渗漏水等隧道病害发生的概率增大。

(2) 超载引起的变形能够通过卸载恢复部分变形, 既有变形越小, 恢复效率越高。当减少相同的弯矩时, 土体注浆比卸载能实现更有效的恢复。

(3) 由于隧道衬砌环中的所有纵缝接头钢螺栓均靠近管片内侧, 拱腰接头抗弯能力较拱顶接头差, 转动刚度较小, 变形较大, 变形恢复效果较差。此外, 注浆作用下, 拱顶接头的变形恢复效果较拱腰接头更为显著, 其原因是注浆有效降低了拱顶接头处的偏心距。因此, 建议加强拱腰接头处结构设计, 增强其抗弯强度, 从而提升隧道衬砌的整体安全性能。

参考文献:

- [1] 夏海平. 上海地铁盾构隧道纵缝接头的破坏试验及三维数值模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2014. (XIA Hai-ping. Research on Bending Test and 3D Numerical Model of Longitudinal Joint of Shield Tunnel of Shanghai Metro[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese))
- [2] LI X J, YAN Z G, WANG Z, et al. Experimental and analytical study on longitudinal joint opening of concrete segmental lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 46: 52 - 63.
- [3] 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.
- [4] HUANG H W, SHAO H, ZHANG D M, et al. Deformational responses of operated shield tunnel to extreme surcharge: a case study[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(3): 345 - 360.
- [5] LEE K M, HOU X Y, GE X W, et al. An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(4): 365 - 390.