

文章编号: 1005-0523(2020)01-0015-08

管片厚度对大直径盾构隧道受力及变形的影响

黄式浩^{1,2}, 狄宏规^{1,2}, 王友文^{1,2}, 姚琦钰^{1,2}

(同济大学 1. 道路与交通工程教育部重点实验室; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要:针对大直径盾构隧道分块数多、厚度与外径比值偏小的设计特点,采用相似模型试验研究了管片厚度对大直径盾构隧道结构受力及变形的影响。结果表明:增大管片厚度能够有效减小超载工况下管片的收敛变形,但随着管片厚度的增大,增加相同的管片厚度对减小收敛变形的作用逐渐减弱;管片厚度增大,可减轻拱顶和拱底部位的混凝土开裂问题,但隧道截面受力状态会由小偏心向大偏心转变,过大的管片厚度并不利于隧道结构受力;管片厚度的增加,对隧道两侧拱腰位置的内力影响最显著,拱顶和拱底次之,对其它部位内力影响并不明显。

关键词:盾构隧道;模型试验;管片厚度

中图分类号: TU43

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.01.003

近年来,我国大直径($D > 10$ m)盾构隧道正处于快速发展阶段^[1-2],但目前大直径盾构隧道结构设计仍沿用传统盾构隧道衬砌设计方法^[3]。事实上,盾构隧道的大断面化会引起衬砌环分块数增多,导致管片环整体抗弯刚度下降^[4];同时,根据隧道柔性衬砌设计理论,出于优化设计及经济等因素的考虑,随着盾构隧道断面的增大,衬砌厚度与外径的比值在减小,结构抵抗外荷载能力也随之变差。研究表明,适当增大管片厚度有利于控制隧道结构变形^[5],但目前大直径盾构隧道管片厚度具体如何取值尚无明确方法。

根据文献[4]统计的国内外 22 条盾构隧道结构设计情况,直径小于 10 m 的盾构隧道管片厚度一般为外径的 5.0%~6.0%,而对于大部分直径达到 10 m 的盾构隧道,管片厚度与外径的比值下降到了 4.0%~4.6%。可见,盾构隧道管片厚度与外径的比例并不是取某一个固定值,可根据工程具体情况给予适当调整。以直径 6.2 m 的地铁盾构隧道为例,上海、南京等城市常采用 350 mm 厚的管片,而广州、深圳地铁则采用 300 mm 的管片。单从结构受力角度来看,厚度 300 mm 的管片足以满足直径 6.2 m 地铁区间隧道正常承载要求^[6],出于结构耐久性等角度可以适当加厚管片,若考虑卸载或超载等不利工况则可考虑将管片厚度增加到 400 mm^[7],但简单地加大管片厚度,会增大截面弯矩导致混凝土裂缝宽度增加^[8]。个别学者^[9]针对外径 6.2 m 的地铁盾构隧道,研究了不同管片厚度在侧压损失的情况下对隧道结构的影响,而目前针对大直径盾构隧道结构特点,研究管片厚度对结构受力及变形的影响规律的文献则很少见。

力学试验是研究盾构隧道结构受荷特征的重要手段。柳献等^[10],毕湘利等^[11-12],金浩等^[13-14]采用足尺试验的方式研究了地铁盾构隧道结构受力和变形特点,但是足尺试验成本高、周期长,并不适用于多组试验对比的情况。模型试验造价低、耗时短,也能较真实地反映试验结果,有学者基于地层-结构模型开展了小比尺盾构隧道结构模型试验。何川等^[15]研发了隧道-地层模拟试验平台,根据粘聚力和压缩模量等指标相似配制试验土层,并采用千斤顶推动传力面板的方式,使外荷载通过模型土体传递至模型隧道;黄大维等^[16]开展了超

收稿日期: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808405);中央高校基本科研业务费专项资金资助(22120180568)

作者简介: 黄式浩(1994—),男,硕士研究生,研究方向为城市轨道交通与铁道工程。

通讯作者: 狄宏规(1985—),男,助理教授,硕士生导师,研究方向为线路工程系统动力学。

载作用下盾构隧道室内模型试验,重点考虑土体压缩模量相似,采用沙袋堆载的方式模拟超载,并通过围岩传递到隧道结构。

针对大直径盾构隧道分块多、厚度与外径比值偏小的设计特点,考虑了管片厚度与外径比值介于 4.0%~6.0%之间的多种情况,并采用基于荷载-结构模型的相似试验方法,研究了管片厚度对隧道结构受力及变形的发展规律,最终结果可为大直径盾构隧道结构选型提供参考。

1 模型试验设计

1.1 相似关系

对于模型试验而言,模型的几何尺寸会随着相似比增大而增大,这样能减小试验误差,提高测试精度,同时也方便元件布设和试验操作;但相似比越大同样会带来试验规模、经济成本和试验周期增加的问题^[7],本次试验几何相似比取 1:15。由于采用的是卧式装置,可忽略重力对试验结果的影响;因此重度相似比取 1:1,并以此为基础,采用量纲分析法推导得到关键试验参数的相似常数如表 1 所示。

1.2 模型试验选材

原型隧道为杭州市香积寺路西延工程大直

径公路盾构隧道,衬砌外径 11.3 m,环宽 2.0 m,衬砌混凝土等级为 C60,其弹性模量为 36.0 GPa。全环分成 9 块,每块管片占圆心角 40°,采用错缝拼装方式。

根据相似常数 $C_E=15$ 的要求,试验需要弹性模量为 2.4 GPa 的材料制作模型隧道,但要在市场上找到弹性模量恰好 2.4 GPa 的材料难度较大。经调研,MC 尼龙的弹性模量为 2.7 GPa,该材料的弹性模量与原型管片的弹性模量相似比 $C_E=13.33$ 。这种弹性模量的差异会导致模型隧道和原型隧道之间的弯曲变形不满足相似关系;因此需要对管片厚度进行修正。现假定管片环在外荷载作用下发生纯弯曲变形,推导出管片厚度相似常数 C_t 表达式:

$$C_t = \sqrt[3]{\frac{C_M C_p}{C_E C_b}} = \sqrt[3]{\frac{C_t^4}{C_E}} = 15.61 \quad (1)$$

式中: C_p 为曲率相似常数; C_M 为弯矩相似常数; C_E 为管片环截面抗弯刚度相似常数; C_b 为管片环宽度相似常数; C_t 为管片环厚度相似常数。利用管片环厚度相似常数 $C_t=15.61$,对管片厚度进行修正,可得到模型隧道管片厚度。

1.3 模型隧道构造

管片接头是盾构隧道管片衬砌环的关键部位,影响着整个管片结构的力学性能^[8]。针对本试验,模型管片纵缝接头的模拟有两个思路:采用螺栓连接或开槽模拟。文献[19]针对拼装式模型管片环,研究了采用螺栓连接的纵缝接头模拟效果,结果表明该模拟方法的纵缝接头抗弯刚度较不稳定,还存在接头脆性断裂的风险。而采用开槽方式模拟管片纵缝接头时,接头刚度的可控性好。由于模型隧道内部需要布设相关传感器;因此选择在管片外侧开槽模拟纵缝接头,设计方法参考文献[20]。

对于管片环缝的模拟,唐志成等^[21]在研究地铁盾构隧道管片结构力学行为的模型试验中,认为各环管片在环缝接头处不发生错动。由于原型盾构隧道在环缝上布设了 36 条斜螺栓;因此模型试验中环缝接头采用 36 根均匀分布、长 4 cm、直径 3 mm 的钢棒代替,使环缝接头处管片不发生错动,但会使得试验结果稍偏安全。

模型试验共设计了 5 组,分别选择原型盾构隧道管片厚度 450,500,550,600 mm 和 650 mm 作为研究

表 1 相似常数表

Tab.1 Table of similar constants

物理量	相似常数
几何尺寸	$C_l=15$
弹性模量	$C_E=15$
应变	$C_\epsilon=1$
位移	$C_\delta=15$
弯矩	$C_M=50\ 625$
抗弯刚度	$C_{EI}=50\ 625$

对象,这些管片厚度在国内外大直径盾构隧道工程中均有应用^[4,22]。当调整 5 种管片厚度时,保持隧道外径不变,所对应的管片厚度与外径比值分别为 4.00%,4.42%,4.88%,5.31%和 5.75%,拼装完成后的模型隧道如图 1 所示。

1.4 试验装置与加载方案

模型试验采用卧式装置,由液压系统、数据采集系统和环形加载装置三部分组成,如图 2 所示。其中,环形加载装置的直径 1.65 m、高 1.5 m,主要由反力架、持荷梁及千斤顶三部分组成,试验时可实现自平衡状态。反力架由两个主体反力圆环与众多附属连接部件构成,反力圆环内侧焊接工字钢,用于固定液压千斤顶;模型管片与千斤顶之间布设了 24 个持荷梁,能将集中荷载转化为均布荷载作用与管片上,可更加真实地模拟管片在地层中的实际受力情况。试验中的液压系统由单向液压千斤顶、油路分配器和液压油泵等组成,其中千斤顶固定在反力架内侧,通过法兰上的螺孔与内环工字钢相连,千斤顶分为上、下两层共 48 个,最大量程为 1 t 且受高精度液压油泵控制。为了保证试验过程中荷载可读且易于控制,液压油泵采用电动、手动双重控制模式。



图 1 模型管片
Fig.1 Model segments

试验加载点数量是设计试验方案时需要考虑的重要参数。文献[10-14]针对上海、南京地铁盾构隧道结构开展足尺试验时,沿隧道环向布设 3 组共 24 个加载点模拟隧道结构所承受的外荷载。本文试验加载方案参考足尺试验,环向布设 24 处加载点,如图 3 所示。24 处加载点对称分布,分为 3 组并编号为 P_1 、 P_2 和 P_3 ,分别由 3 组液压千斤顶单独控制。其中 P_1 (6 处加载点)用于模拟隧道顶部所受的竖向荷载和隧道底部所受的地基反力; P_2 (10 处加载点)用于模拟隧道所受的侧向压力,取值为与侧压力系数的乘积; P_3 (8 处加载点)用于模拟过渡段压力,取值为 P_1 和 P_2 的均值。

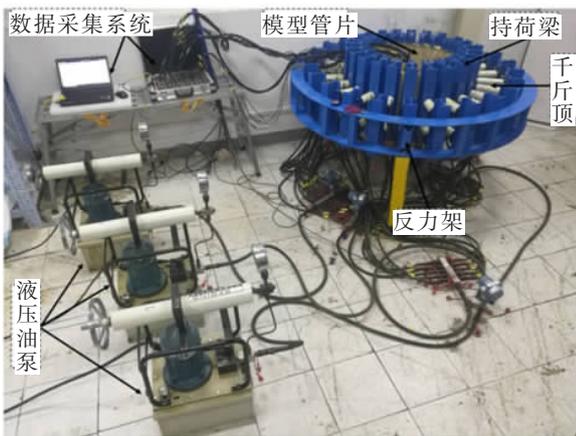


图 2 模型试验装置
Fig.2 Diagram of model test device

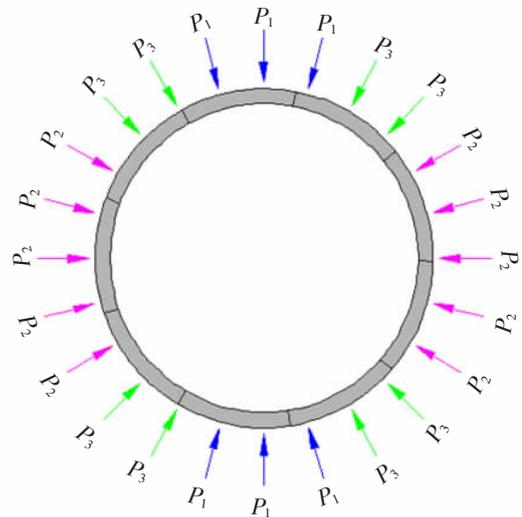


图 3 加载点布置
Fig.3 Layout of loading points

根据原型隧道所处地质条件,选取典型断面并根据土柱理论计算得到上方的垂向土压力为 367.5 kPa。依据相似关系 $C_r=15$ 得到对应的模型试验荷载 $P_1=24.50$ kPa,侧向压力系数则根据地勘报告取 0.65。试验过程参考足尺试验^[11],分为加载和超载两个阶段, P_1 、 P_2 和 P_3 之间的关系如下:① 加载阶段, P_1 由 0 kPa 逐级加载至 24.50 kPa, $P_2=0.65 \times P_1$, $P_3=0.5 \times (P_1+P_2)$ 。当 $P_1=24.50$ kPa 时,荷载 $P_2=15.93$ kPa;② 超载阶段,保持荷载 $P_2=15.93$ kPa 不变, P_1 由 24.50 kPa 逐级增加, $P_3=0.5 \times (P_1+P_2)$ 。

1.5 试验测试方案

试验测量内容包括模型管片收敛变形和内表面应变。其中收敛变形测量方法为:在管片内侧中环位置,以 90° 为间隔对称布设4个江苏东华公司生产的DH801-750拉绳式位移计,分别测量中环隧道拱顶、底和两侧拱腰的收敛变形;内表面应变测量方法为:在上、中、下三环的隧道内侧中央部位粘贴箔式电阻应变片,以 45° 为间隔呈放射状对称布置,共布设24个测点,测点统计情况如表2所示。应变数据与位移数据的采集使用DH3816N静态应变采集仪,同时试验过程中对环境温度进行补偿,以排除周边环境变化对试验结果的影响。图4为传感器布置实物图。

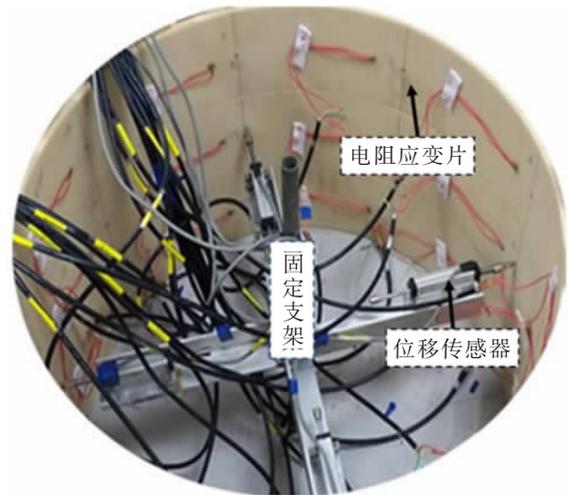


图4 传感器布置图
Fig.4 Layout of sensors

表2 测点统计表

Tab.2 Statistical table of measuring points

试验类别	位移测点/个	应变测点/个
原型管片厚度 450 mm	4	24
原型管片厚度 500 mm	4	24
原型管片厚度 550 mm	4	24
原型管片厚度 600 mm	4	24
原型管片厚度 650 mm	4	24

2 试验结果分析

2.1 隧道变形

将模型试验结果根据相似关系 $C_s=15$ 转化为原型隧道对应数据,如图5所示(变形背离圆心为正,指向圆心为负),其中 P_1 是指原型盾构隧道所受的竖向荷载。由图可知,在设计荷载以下,隧道各角度变形均小于10 mm,变形随外荷载增加而缓慢增大,两者呈线性关系。而在超载阶段,隧道各角度变形随外荷载增大快速增加,且增大速率呈现加快的趋势,两者呈指数型增大关系;当外荷载一定时,随着管片厚度的增加,隧道收敛变形随着管片厚度增大而明显减小,且减小速率逐渐变小。以外荷载超载量为73.5 kPa为例,管片厚度从450 mm增大至500,550,600 mm和650 mm时,管片水平收敛变形分别为13.6,10.2,7.3,5.9 mm和4.5 mm,后4种厚度管片的变形分别减小了25.0%,46.3%,56.6%和66.9%。

进一步分析可知,增加管片厚度能提升隧道抗变形能力的原因在于,变形后梁轴线曲率半径 $\rho=Ebt^3/12M$,与管片厚度 t 的3次方成正比,其中 M 为截面弯矩, E 为结构弹性模量, b 为管片宽度。因此,增大管片厚度能够有效减小超载工况下管片的收敛变形,但随着管片厚度的增大,增加相同的管片厚度对减小收敛变形的作用逐渐减弱。

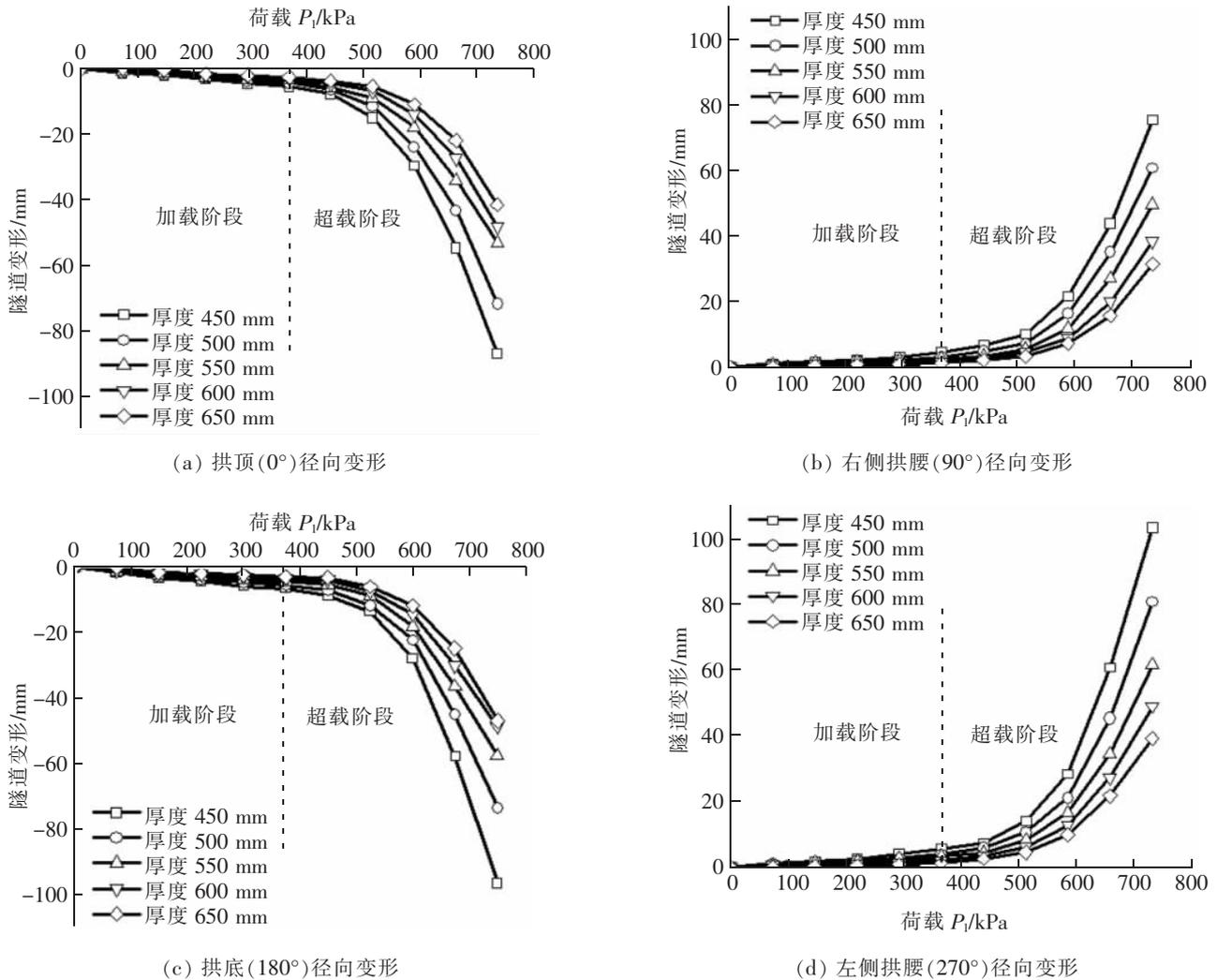


图 5 隧道径向变形
Fig.5 Radial deformation of tunnel

2.2 隧道应变

模型试验的应变数据根据相似关系 $C_\epsilon=1$ 可换算成原型隧道对应数据。根据三环隧道错缝拼装的特点, 中环管片最能代表实际工程中盾构隧道的受力情况, 现分析中环管片拱顶、两侧拱腰以及拱底应变, 如图 6 所示(管片内侧受拉为正应变, 受压为负应变)。在拱顶与拱底位置处, 随着管片厚度增大, 内表面存在由受拉向受压过渡, 最后再受拉的趋势; 且当外荷载相同时, 拱顶与拱底的拉应变值随管片厚度增大而减小。根据应力应变之间的相互关系, 拉应变越小对应的拉应力也越小。由此说明管片厚度增加, 不仅可以延缓拱顶及拱底内表面混凝土进入抗拉极限强度的过程, 而且能够减轻甚至避免这些部位的开裂问题。在两侧拱腰位置处, 内表面始终受压, 且随外荷载增加压应变先缓慢增大, 而进入超载阶段后应变的变化速率明显加快; 当外荷载相同时, 两侧拱腰的压应变值随着管片厚度增大而减小。

然而, 随着衬砌厚度的增加, 隧道截面弯矩会显著增大, 而轴力反而逐渐减小, 会使得隧道截面受力由小偏心向大偏心转变^[23]。由于小偏心受力时, 偏心距较小, 同一隧道截面处的拉应力与压应力值较接近; 而当结构出现大偏心受力时, 偏心距较大, 隧道截面内便会出现较大拉应力。而混凝土的抗拉强度明显低于其抗压强度, 受拉侧的应力极容易超过抗拉强度而导致混凝土裂缝出现。由此可见, 过大的管片厚度并不利于隧道结构受力。

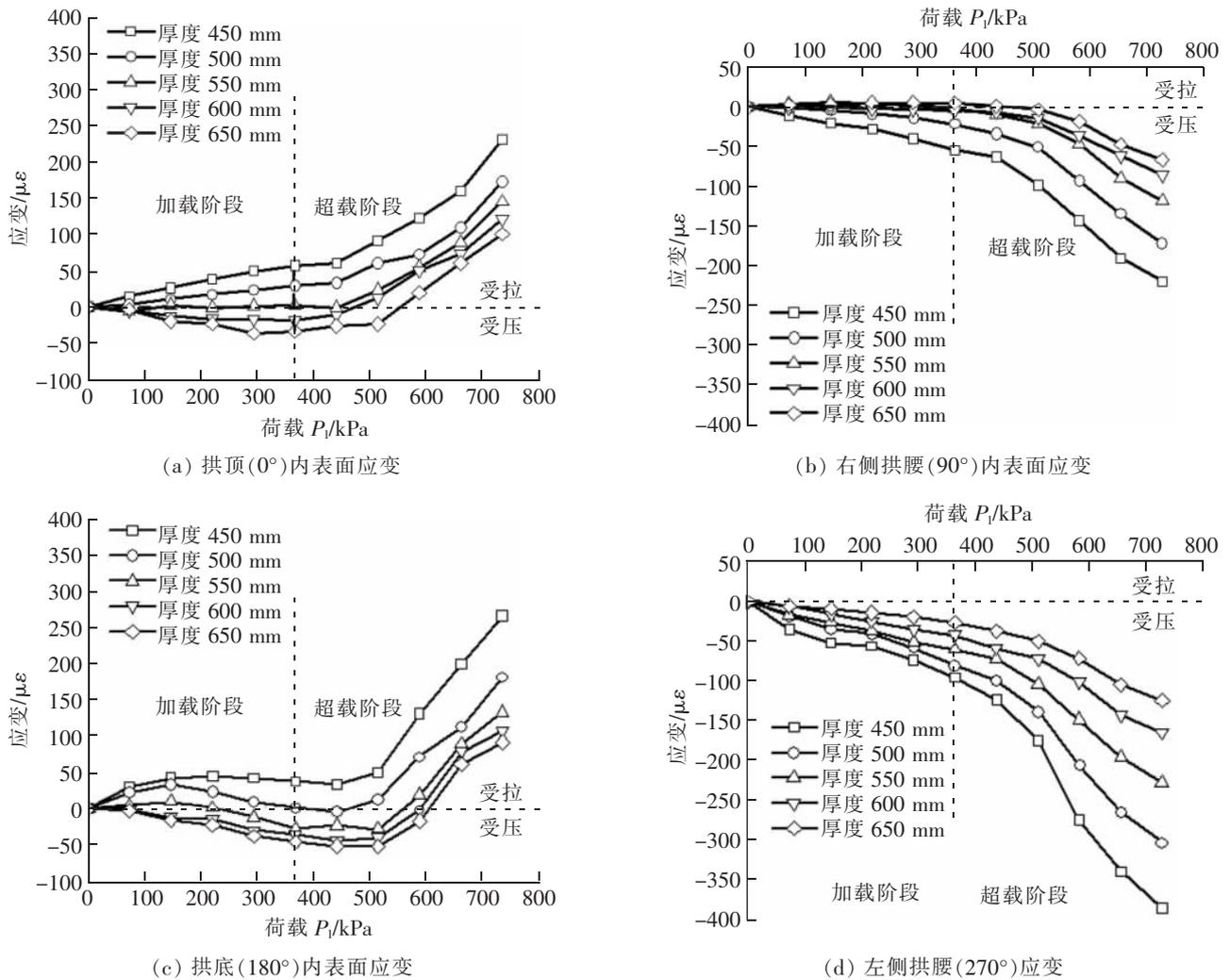


图6 中环管片内侧应变
 Fig.6 Strain on the inside surface of central segment

图7为上、中、下三环管片各角度内表面应变在外荷载 P_1 为441 kPa时的分布情况。对比三环隧道的应变分布情况,上、下两环隧道90°位置的应变明显大于其它角度处的隧道应变;而中环隧道的最大应变则出现在270°位置,该现象是由于模型隧道采用了三环错缝拼装的形式,上、下两环的结构及受力状态呈对称状态,而环间螺栓传递剪力所产生的错缝效应会改变隧道的局部刚度,导致衬砌环内力分布不均匀^[24],使得两侧拱腰位置应力集中。分析同一环隧道各角度应变特点可知,随着管片厚度增大,同一衬砌环不同位置的隧道应力增大幅度不一致,其中两侧拱腰位置的应力变化最显著,拱顶和拱底次之,而45,135,225°和315°位置处隧道应力变化不明显,说明两侧拱腰是隧道结构的主要持力部位,更容易出现混凝土裂缝、接缝张开等结构病害,在隧道运营维护阶段要重点关注。

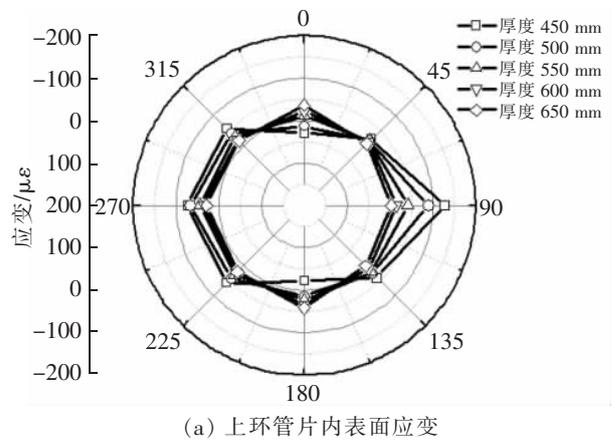


图7 隧道内表面应变

Fig.7 Strain on the inside surface of tunnel

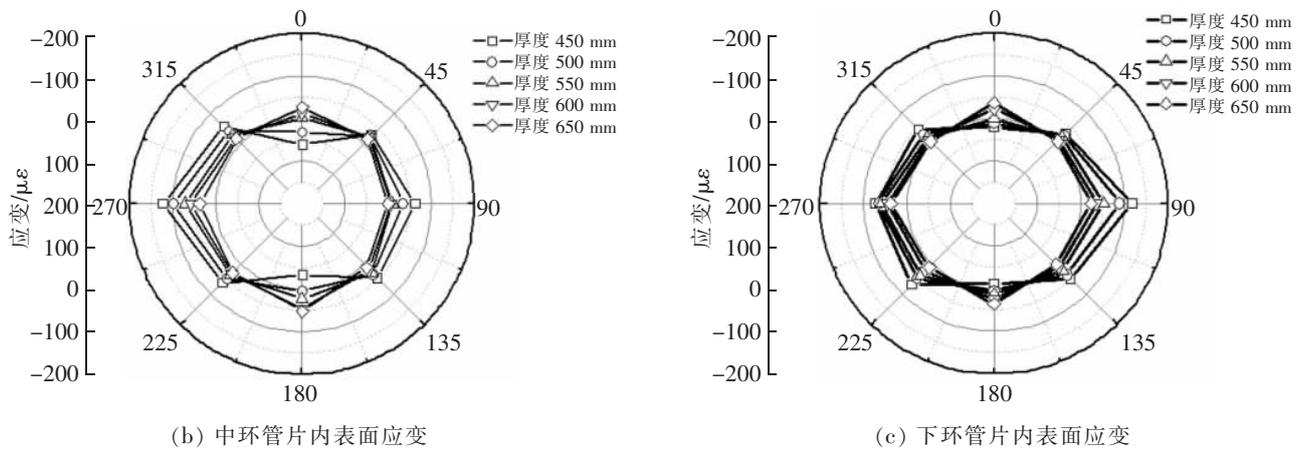


图 7 隧道内表面应变

Fig.7 Strain on the inside surface of tunnel

3 结论

针对大直径盾构隧道分块多、厚度与外径比值偏小的设计特点,考虑了多种管片厚度与外径比值的情况,并采用基于荷载-结构模型的相似试验,研究了管片厚度对隧道结构受力及变形的影响规律,得到以下结论:

1) 增大管片厚度能够有效减小超载工况下管片的收敛变形,但随着管片厚度的增大,增加相同的管片厚度对减小收敛变形的作用逐渐减弱。以超载量 73.5 kPa 为例,管片厚度从 450 mm 增大至 500,550,600 mm 和 650 mm 时,管片水平收敛变形分别减小了 25.0%,46.3%,56.6%和 66.9%。

2) 管片厚度增加,隧道拱顶及拱底的内表面存在由受拉向受压过渡,最后再受拉的趋势,可减轻这些部位的开裂问题;但随着管片厚度增大,隧道截面受力状态由小偏心向大偏心转变,过大的管片厚度并不利于隧道结构受力。

3) 错缝拼装会使得两侧拱腰位置应力集中,随着管片厚度增加,对隧道两侧拱腰位置的内力影响最显著,拱顶和拱底次之,对其它部位内力影响并不明显;两侧拱腰是隧道结构的主要持力部位,在隧道运营维护阶段要重点关注。

参考文献:

- [1] 李小奇,王宁. 超小净距双线隧道掘进对先建隧道的影[J]. 华东交通大学学报,2019,36(5):10-15.
- [2] 吴昌胜,朱志铎. 不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(12):2257-2265.
- [3] 叶宇航,王建,徐文田,等. 软土地基大直径地铁盾构隧道衬砌结构受力特性数值分析研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(S2):151-160.
- [4] 游晓敏. 考虑大直径盾构隧道结构特点的计算方法研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [5] 马晓波. 下穿黄河区间盾构隧道埋深和管片厚度的优选分析[J]. 铁道标准设计,2014,58(2):75-78.
- [6] 黄钟晖,廖少明,刘国彬. 上海软土盾构法隧道管片厚度的优化[J]. 岩土力学,2000,21(4):326-330.
- [7] 于凯文. 错缝拼装地铁盾构隧道结构承载性能数值模拟[D]. 上海:同济大学,2018.
- [8] 赵国旭,何川. 隧道管片设计优化分析[J]. 中国铁道科学,2003,24(6):62-67.
- [9] 梁东,金浩,肖军华,等. 软土地区侧压损失对盾构隧道受力及变形的影响[J]. 工程力学,2019,36(5):148-156.
- [10] 柳献,张浩立,鲁亮,等. 超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 地下工程与隧道,2013(4):10-15.

- [11] 毕湘利,柳献,王秀志,等. 通缝拼装盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(10):117-127.
- [12] 毕湘利,柳献,王秀志,等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(11):128-137.
- [13] JIN HAO,YU KAIWEN,ZHOU SHUNHUA,et al. Performance assessment of shield tunnel damaged by shield shell extrusion during construction[J]. International Journal of Civil Engineering,2019,17(7):1015-1027.
- [14] JIN HAO,YU KAIWEN,GONG QUANMEI,et al. Load-carrying capability of shield tunnel damaged by shield shell squeezing action during construction[J]. Thin-Walled Structures,2018,132:69-78.
- [15] 何川,封坤,杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007(11):2260-2269.
- [16] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 地表超载作用下软土地区既有盾构隧道与地层的相互作用分析[J]. 铁道学报,2018,40(10):95-102.
- [17] 黄大维. 软土盾构隧道竖向土压力作用模式研究[D]. 上海:同济大学,2015.
- [18] 郭瑞,何川,封坤,等. 大断面水下盾构隧道管片接头抗弯刚度及其对管片内力影响研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(5):46-53.
- [19] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 盾构隧道与地层相互作用的模型试验设计[J]. 铁道学报,2018,40(6):127-135.
- [20] 黄大维,周顺华,王秀志,等. 模型盾构隧道管片纵缝接头设计方法[J]. 岩土工程学报,2015,37(6):1068-1076.
- [21] 唐志成,何川,林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(1):85-89.
- [22] JAN V D H,WIN V D L. The westerscheldetunnel the netherlands[J]. Structural Engineering International,2003,13(1):43-46.
- [23] 黄钟晖,廖少明,刘国彬. 管片厚度对隧道受力及使用性能的影响[J]. 建筑技术,2000,31(7):471-472.
- [24] 王士民,申兴柱,何祥凡,等. 不同拼装方式下盾构隧道管片衬砌受力与破坏模式模型试验研究[J]. 土木工程学报,2017,50(6):118-128.

Influence of Segment Thickness on the Force and Deformation of Large-Diameter Shield Tunnel

Huang Shihao^{1,2}, Di Honggui^{1,2}, Wang Youwen^{1,2}, Yao Qiyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education;

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The large-diameter shield tunnel is usually designed to be many segment blocks and the ratio of thickness to diameter is smaller. A similar model test is conducted to study the influence of segment thickness on the force and deformation of a large-diameter shield tunnel. The results show that, increasing the thickness of segments can effectively reduce the convergent deformation of the tunnel under overload condition, while such effect will gradually decline with the increase of segment thickness. The increase of segment thickness can alleviate the problem of concrete cracking at the arch roof and bottom, but the stress state of tunnel section will be changed into large eccentric from small eccentric. And too large segment thickness is not conducive to bearing capacity for the tunnel structure. The growth of the segment thickness has the most obvious effect on the internal force of the arch waists, followed by the arch roof and arch bottom of the tunnel, and there is no significant influence of internal force on other parts of the tunnel.

Key words: shield tunnel; model test; segment thickness