

DOI: 10.11779/CJGE201810003

# 层状围岩中管片衬砌受力特征的模型试验研究

胡雄玉, 杨清浩, 何川\*, 曹淞宇

(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 深部层状围岩结构强度具有各向异性特点, 此类地层中修建盾构隧道, 管片衬砌易受偏压作用, 对结构安全构成挑战。开展层状围岩与盾构管片衬砌相互作用关系的相似模型试验研究, 研究不同层理倾角下管片衬砌壁后围岩压力、管片衬砌内力和变形分布规律。研究结构表明: 管片衬砌受力和变形特征受层理面控制明显, 管片衬砌受力极不均匀, 弯矩、轴力和变形呈现非对称分布; 管片衬砌壁后围岩压力最大值集中在强度最弱的层理面法线方向, 该方向上管片衬砌的弯矩最大, 轴力最小, 变形最大; 层理倾角对管片衬砌的受力和变形影响显著, 层理倾角不仅影响管片衬砌壁后围岩压力分布形状还影响其量值大小; 均质地层中, 管片衬砌裂缝主要出在封顶块接头处和其他环向接头处, 层状地层中管片衬砌裂缝出现位置受接头位置影响减弱, 而受层理倾角影响明显, 管片衬砌裂缝出现位置主要集中在层理面法向。研究结果对层状围岩中修建盾构隧道的支护结构型式设计具有一定参考价值。

**关键词:** 盾构隧道; 层状围岩; 模型试验; 围岩压力; 管片衬砌; 内力; 变形

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1773-09

**作者简介:** 胡雄玉(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事盾构隧道技术方面的研究工作。E-mail: 564291084@qq.com。

## Experimental study on behaviors of segment linings in an anisotropically jointed rock mass

HU Xiong-yu, YANG Qing-hao, HE Chuan, CAO Song-yu

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** As the structural strength in the deep layered rock is of anisotropic characteristics, the segment lining is susceptible to unsymmetrical pressure when the shield tunnel is constructed in such formations. Similar model tests are carried out to study the interaction between layered surrounding rock and shield segment lining, and the pressures on the surrounding rock behind the segment lining, internal forces and deformations of the segment lining are investigated. The research results indicate that the stress and deformation characteristics of the segment lining are obviously controlled by bedding plane, the segment lining is pressed very unevenly, and the axial forces, bending moments and deformations exhibit asymmetrical distribution. The maximum pressures on the surrounding rock behind the segment lining are concentrated in the normal direction of the weakest plane, and in this direction, the bending moments of the segment lining are the largest, the axial forces are the smallest and the deformations are the largest. The bedding angle has significant influence on the stress and deformation of the segment lining as well as the distribution and size of pressures on the surrounding rock. In the homogeneous surrounding rock, the fractures of the segment lining are mainly located at the joints of the key segment and other annular joints, while in the layered surrounding rock, the location of fractures of the segment lining is weakened by the influence of the position of joints, and the influence of the bedding dip is obvious. The location of fractures of the segment lining is mainly concentrated in the normal direction of the weakest plane. The results of this study have certain reference value for the design of the supporting structure type of shield tunnels in layered surrounding rock.

**Key words:** shield tunnel; layered surrounding rock; model test; pressure on surrounding rock; segment lining; internal force; deformation

## 0 引言

近年来, 随着中国装备制造业升级和施工技术水平的提升, 盾构隧道趋向大埋深发展。以越江跨海隧道和深部煤矿巷道为代表, 是今后大埋深盾构隧道的

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0802201); 国家自然科学基金项目(U1361210); 2016年度西南交通大学博士研究生创新基金项目(13017019)

**收稿日期:** 2017-05-16

**\*通讯作者** (E-mail: chuanhe12@163.com)

发展方向。隧道进入大埋深后围岩地质条件更加复杂,围岩不只是单一的各向同性特征,时常会遇到各向异性特征明显的层状围岩。层状岩体由于沉积形成过程中的沉积作用和矿物颗粒的择优取向,具有显著的层理结构特点<sup>[1]</sup>。在平行于层理方向上力学性质比较相近,而在垂直于层理方向上的物理力学性质则差异较大<sup>[2]</sup>。在此类地层中修建隧道易引起地质偏压,喷层开裂、型钢拱架或格栅扭曲、支护侵限等大变形破坏现象<sup>[3]</sup>。盾构工法以预制的管片衬砌为支护结构,管片衬砌同样会受到层状围岩各向异性特征的影响,其结构安全面临挑战。因此,开展层状围岩中盾构隧道管片衬砌力学响应特征研究意义重大。

目前,国内外学者针对层状围岩力学特性和隧洞变形破坏特征通进行了大量的研究。层状围岩力学特性多以三轴与单轴压缩试验为主,主要针对千枚岩<sup>[4]</sup>、片麻岩<sup>[5]</sup>、板岩<sup>[6]</sup>、页岩<sup>[7]</sup>等,试验结果表明,岩石抗压强度与角度 $\theta$  ( $\theta$  定义为加载方向与层理面的夹角)的关系曲线有 3 种形态,即 U 形、波浪形、和肩形。同时,抗压强度的最大值一般在 $\theta$  为 $0^\circ$  或者 $90^\circ$  时取得,最小值一般在 $\theta$  为 $30^\circ \sim 45^\circ$  之间取得,且岩石强度的各向异性特征随着围压的增加而减弱;沙鹏等<sup>[8]</sup>对高地应力条件下层状岩体地层隧道的挤压变形与支护受力特征进行了研究,结果显示受围岩结构强度的各向异性控制,隧道开挖后支护受力极不均匀。空间上与围岩变形集中部位一致,时间上变化历时长,且由于开挖方式的影响不易稳定。初期支护钢拱架局部荷载过大而发生侧向扭曲失稳;夏彬伟<sup>[9]</sup>对采用物理实验方法深埋隧道层状岩体破坏失稳机理进行了研究;李晓红<sup>[10]</sup>等结合共和隧道现场监测和数值模拟相结合的方法对层状岩体的破坏特征进行了分析,研究表明:围岩的变形位移、破坏区都主要集中隧道拱顶右侧,即层理垂直方向;李树忱等<sup>[11]</sup>采用大尺度三维模型相似试验系统,分析具有一定倾角的多组裂隙的岩体在高地应力下开挖变形破坏规律。试验结果表明:隧道上下侧围岩主要呈现大变形现象,左右侧围岩呈现分层破裂现象,裂隙倾角与破坏区分布形态有一定相关性;杨松林等<sup>[12]</sup>将加锚层状岩体作为等效

连续介质推导了加锚层状岩体的本构方程,该本构模型可对节理岩体中锚杆的加固作用做出合理的定量评价;马腾飞等<sup>[13]</sup>采用大尺度三维模型相似试验系统,分析具有不同倾角的多层节理的岩体在高地应力下开挖变形破坏规律。试验结果表明:裂隙倾角较小时,隧道上、下侧围岩主要发生大变形,左、右侧围岩呈现分层破裂现象;Bossart 等<sup>[14]</sup>在隧道中向围岩内部钻孔,通过内窥式摄像机,得到隧道开挖方向与层理面走向平行时岩石的破坏形态,即岩石的破坏主要发生在与岩石层理面垂直的方向;Blumling 等<sup>[15]</sup>提出了层状岩体中隧道开挖破坏的概念模型,即破坏由层理面的分层弯曲破坏与非层理面的伸展断裂构成;Fortsakis 等<sup>[16]</sup>采用有限元软件 Phase2 v.6 分析了不同 GSI 参数的层状围岩中不同节理面倾角对围岩变形和塑性区范围的影响;Sagong 等<sup>[17]</sup>采用模型试验和数值模拟手段研究了双轴压力作用下节理岩体的节理倾角和侧压力系数对隧洞的变形和破坏特征的影响。

然而,上述研究多针对层状围岩力学特性和隧洞变形破坏特征,极少涉及隧道支护结构,关于盾构隧道中层状围岩与管片衬砌的相互作用关系研究更是未见报道。基于此,采用大比例尺相似模型试验开展层状围岩与盾构管片衬砌相互作用关系研究,分析不同层理倾角下管片衬砌壁后围岩压力、管片衬砌内力和变形分布规律。研究结果对层状围岩中修建盾构隧道的支护结构型式设计具有一定参考价值。

## 1 工程概况

本次试验依托新街台格庙矿区#1 斜井工程。新街台格庙矿区位于鄂尔多斯市境内,矿区规划总面积为 $734.5 \text{ km}^2$ ,煤炭资源量为 $13884.46 \text{ Mt}$ ,目前已规划采用 TBM 法修建 6 条长距离斜井,这是中国首次采用 TBM 法修建煤矿斜井。其中,#1 斜井总长 $6519 \text{ m}$ ,倾角 $6^\circ$ ,最大埋深 $600 \text{ m}$ 。斜井衬砌内径 $6.6 \text{ m}$ ,外径 $7.3 \text{ m}$ ,厚度 $35 \text{ cm}$ ,幅宽 $1.8 \text{ m}$ 。管片衬砌采用 C40 钢筋混凝土管片。衬砌采用 1 个底拱块,3 个标准块,2 个邻接块,每环内设置纵向螺栓 23 颗,采用错缝拼装,斜井穿越的地层示意图如图 1 所示。

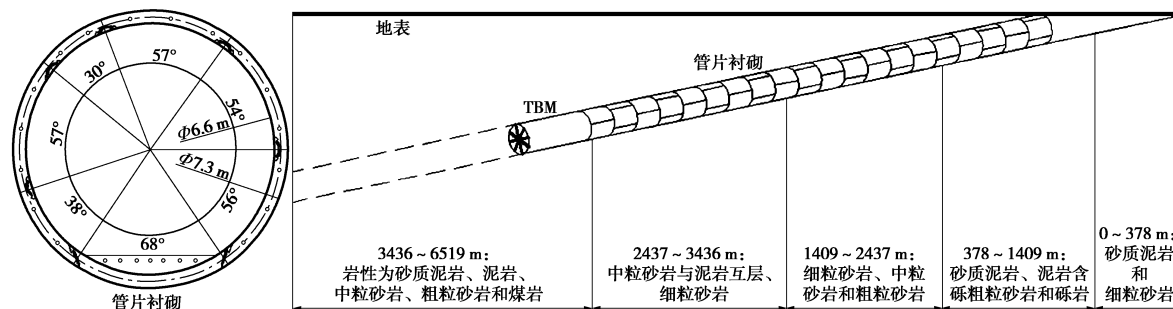


图 1 斜井穿越地层示意图

Fig. 1 Sketch of strata with inclined shaft

斜井主要穿越地层为砂质泥岩和砂岩, 其中 500~600 m 深处段穿越煤岩层。该段煤岩层节理裂隙发育, 岩体完整性差。节理走向与洞轴向呈 7° 交角, 倾角 45°。片状层理的集中分布使围岩整体呈现结构的各向异性。

2 试验方案

2.1 试验材料

(1) 围岩

试验以几何相似比  $C_L=12$  和重度相似比  $C_\gamma=1$  作为基础相似比, 根据相似理论原理推导出各物理力学参数原型值与模型值的相似比: 泊松比、应变、内摩擦角相似比  $C_\mu=C_\epsilon=C_\phi=1$ , 强度应力、黏聚力、弹性模量相似比  $C_R=C_\sigma=C_c=C_E=12$ 。选取煤岩层为原型土体, 以重度、弹性模量、抗压强度为试验模型土的主要控制参数。围岩模型以石膏、河砂和重晶石粉为基材, 同时添加一定比例的环氧树脂对模型土弹性模量、抗压强度等进行调节, 模型土体材料物理力学参数取值如表 1 所示, 各组成成分配比为石膏: 河砂: 重晶石粉: 环氧树脂=1: 1.2: 0.2: 0.01。

表 1 原型及模型围岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rocks

名称	弹性模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	泊松比
原型值	25.0	2530.2	45.2	0.30
模型值	1.96	2380.3	3.5	0.32

(2) 管片衬砌和注浆材料

管片衬砌材料采用特种石膏材料通过改变水膏比试制, 水膏比为 1.0: 1.1; 混凝土管片主钢筋通过原型与模型抗弯刚度等效原理采用直径为 1.5 mm 的铁质材料模拟; 管片混凝土力学参数如表 2 所示。管片衬砌环通过模具预制加工而成, 脱模后在一定温湿度条件下养护管片衬砌环向接头, 通过开凿一定深度的凹槽模拟该部位抗弯刚度的弱化, 凹槽深度根据与原型接头抗弯能力等效原理通过计算予以确定<sup>[18]</sup>, 管片环向接头对应槽缝深度如表 3 所示。纵向接头采用一定直径的钢棒模拟, 钢棒长度根据纵向接头的影响范围进行确定。管片环向接头采用在管片外侧割槽的方式进行模拟, 其割槽深度依据与原型环向接头正负抗弯刚度等效原理通过计算予以确定。管片衬砌通过模具预制加工而成, 脱模后在一定温湿度条件下养护, 为考虑管片衬砌结构纵向拼装效应的影响, 模型试验采用 1 个管片整环+2 个管片半环形式进行研究, 以中间整环管片为研究目标环, 其力学行为是本次试验关注的重点所在, 如图 2 所示。采用 1.5: 1.0 水膏比的

石膏来模拟单轴抗压强度为 15 MPa 的管片衬砌壁后注浆材料。管片衬砌壁后注浆会在一定程度上影响衬砌内力和形变量值, 但对管片的内力和形变分布规律影响极小。

表 2 管片混凝土力学参数对照表

Table 2 Mechanical parameters of segment concrete

名称	单轴抗压强度标准值/MPa	弹性模量/GPa
原型值	26.8	32.5
模型值	2.15	2.63
对应原型值	25.8	31.56

表 3 管片环向接头对应槽缝深度一览表

Table 3 Gap depths due to segment joint

弯曲类型	弯曲刚度/(N·m·rad <sup>-1</sup> )	槽缝深度/m	备注
正弯曲	$3.23 \times 10^8$	0.01	正弯矩区域
负弯曲	$2.12 \times 10^8$	0.013	负弯矩区域

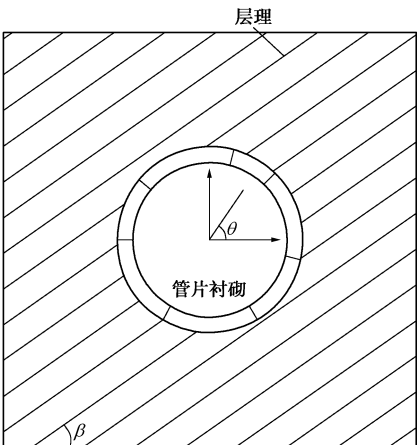


图 2 管片衬砌相似模型

Fig. 2 Similarity model for segment lining

2.2 层状围岩模型

试验中通过将模型围岩沿不同的层理方向锯出 2.0 mm 的间隙来模拟层状围岩的层理面。如图 3 所示, 其中,  $\beta$  为层理面倾角。



(a) 模型试验示意

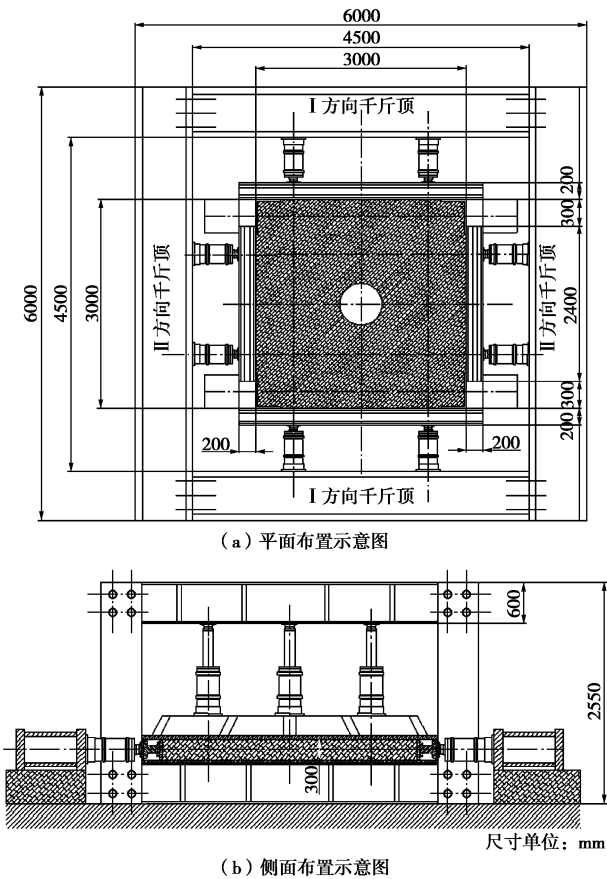


(b) 试验模型  
图 3 层状围岩模型

Fig. 3 Model of layered rock

2.3 试验装置及量测方法

试验采用盾构隧道-土层复合体模拟试验装置进行加载,如图 4 所示。该试验装置采用卧式加载方式,可以方便地对自重应力场及构造应力场的模拟。在试验加载过程中,采用 I 方向布置的 4 台千斤顶模拟竖向土压分级加载;采用 II 方向布置的 4 台千斤顶模拟侧向土压力;垂直管片横断面方向(III方向)通过竖向千斤顶及加载面板保证管片在加载状态下处于平面应变状态。



(a) 平面布置示意图  
(b) 侧面布置示意图  
图 4 模型试验加载装置

Fig. 4 Loading equipment of model tests

试验中主要量测围岩与管片间接触压力、管片衬砌内力和关键点的位移。

(1) 管片衬砌后围岩压力

沿洞周方向均匀布设 12 个高精度精密土压力盒来测量围岩与管片间接触压力。具体布置位置和布置方式见图 5。

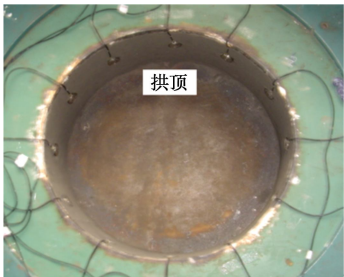


图 5 土压力盒布置

Fig. 5 Loading equipment of model tests

(2) 管片衬砌关键点的位移

布设了 8 个高精度差动式数显位移计(精度为 0.01 mm)测量管片衬砌关键点的位移,分别布置于拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和拱底,具体布置位置和布置方式见图 6。

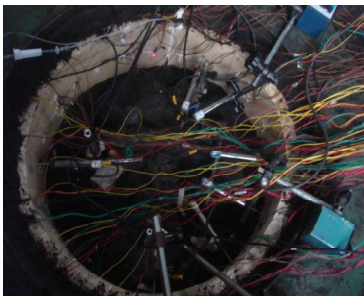


图 6 位移计布置图

Fig. 6 Arrangement of convergence gauges

(3) 管片衬砌内力

在管片衬砌模型内外 19 个点对称布设了 38 个电阻应变片(图 7),通过静态应变采集仪获得试体在加载过程中的应变值,并最终换算成内力值。

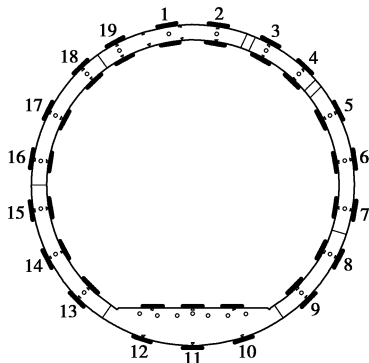


图 7 应变片布置图

Fig. 7 Arrangement of strain gauges

2.4 试验分组和加载方案

为研究层理面倾角对管片衬砌受力影响, 设置以下 6 种工况, 并与均质地层下管片衬砌受力特征予以对比。

工况 A: 层理面倾角变化的影响: 层理间距 14 cm (对应原型值约为 1.7 m), 不同层理倾角: 0°, 15°, 45°, 75°, 90°, 对应工况: A1, A2, A3, A4, A5。

工况 C: 均质地层

试验加载过程中, 维持围岩侧压力系数为 1.0, 均匀施加各个方向千斤顶压力至 2.0 MPa (换算至原型 24 MPa), 逐级加载并每级荷载稳压约 5 min。

3 试验结果分析

3.1 管片衬砌内力分布特征

(1) 弯矩

由于本次试验中管片衬砌相似模型是基于弹性阶段与原型结构相似, 因此, 管片衬砌结构弯矩和轴力在弹性阶段的试验结果与原型结构是呈比例关系<sup>[19]</sup>。以下管片衬砌内力分析均为模型值换算成原型后的结果。

图 8 为不同层理倾角下管片衬砌弯矩图。由图 8 可见, 管片衬砌内力分布特征受层理面控制明显, 且分布极不均匀, 弯矩呈现非对称分布。工况 A1 下管片衬砌最大正弯矩出现在 90° 位置, 最大负弯矩出现在 180° 位置; 工况 A2 下管片衬砌最大正弯矩出现在 105° 位置, 最大负弯矩出现在 195° 位置; 工况 A3 下管片衬砌最大正弯矩出现在 135° 位置, 最大负弯矩出现在 225° 位置; 工况 A4 下管片衬砌最大正弯矩出现在 165° 位置, 最大负弯矩出现在 255° 位置; 工况 A5 下管片衬砌最大正弯矩出现在 180° 位置, 最大负弯矩出现在 270° 位置; 工况 C 下管片衬砌最大正弯矩出现封顶块位置, 最大负弯矩出现在 135° 位置。

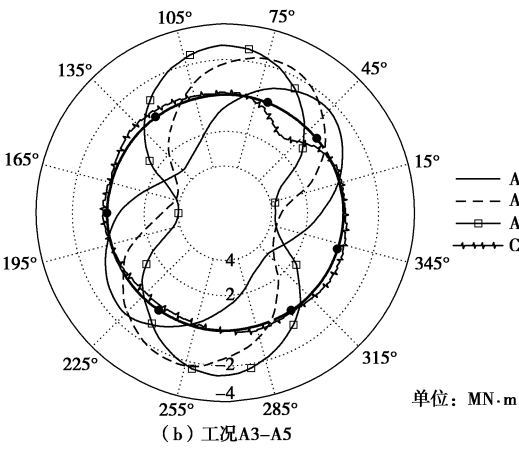
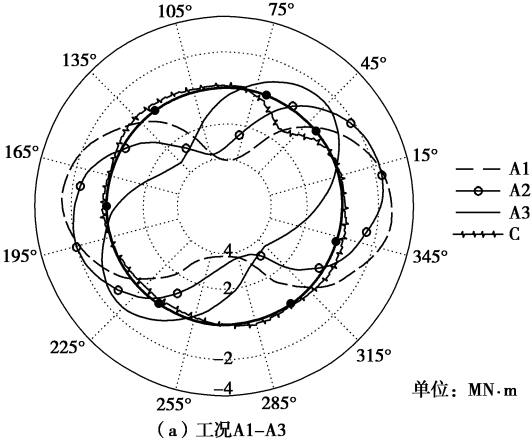


图 8 管片衬砌弯矩图

Fig. 8 Bending moment of segment linings

图9为不同层理倾角下管片衬砌弯矩分布曲线。由图可见, 层理倾角的变化不仅影响管片衬砌弯矩分布形状, 还影响其量值的大小。层理倾角从15°到45°变化时, 管片衬砌弯矩最值呈现递减趋势, 层理倾角从45°到90°变化时; 管片衬砌弯矩最值呈现递增趋势, 即层理倾角45°时, 管片衬砌弯矩量值最小。

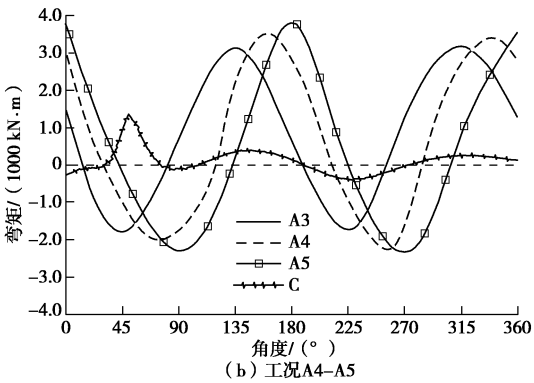
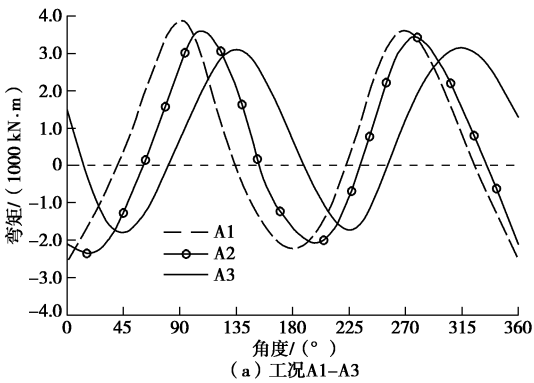


图 9 管片衬砌弯矩分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of bending moment

综上所述, 均质地层中管片衬砌最大正弯矩出现在封顶块位置, 而在层状地层中, 管片衬砌弯矩受层理面控制明显。随着层理倾角变化, 管片衬砌最大正弯矩向层理面法线方向偏移, 最大正弯矩集中在强度

最弱的层理面法线方向,最大负弯矩集中在层理面切方向;层理倾角的变化不仅影响管片衬砌弯矩分布形状,还影响其量值的大小,层理倾角 $45^\circ$ 时,管片衬砌弯矩量值最小。

## (2) 轴力

不同工况下管片衬砌轴力分布雷达图和曲线如图10, 11所示。由图可见,层理倾角的变化同样影响管片衬砌轴力分布形态。与弯矩分布形态不同,层理面法向附近管片衬砌轴力值最小,层理面切向附近管片衬砌轴力值最大。

对比还可见,层理倾角从 $15^\circ$ 到 $45^\circ$ 变化时,管片衬砌轴力最大值呈现递增趋势,层理倾角从 $45^\circ$ 到 $90^\circ$ 变化时;管片衬砌轴力最大值呈现递减趋势,即层理倾角 $45^\circ$ 时,管片衬砌轴力量值最大。

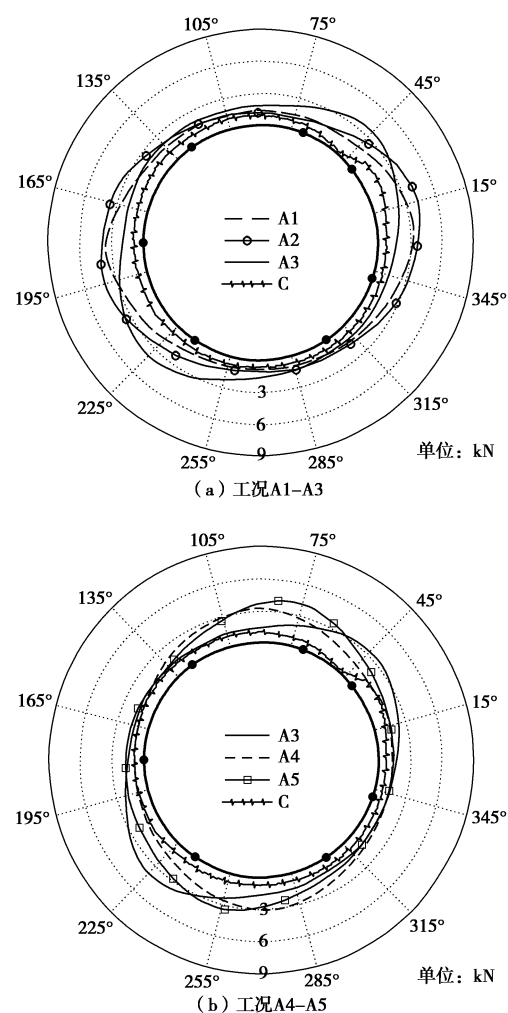


图10 管片衬砌轴力图

Fig. 10 Axial forces of segment linings

## 3.2 管片衬砌壁后围岩压力分布特征

图12为不同层理倾角下管片衬砌壁后围岩压力分布特征。由图可见,管片衬砌壁后围岩压力分布特征受层理面控制明显。工况A1下管片衬砌壁后围岩压力最大值出现在 $90^\circ$ 位置,最小值出现在 $180^\circ$ 位

置;工况A2下围岩压力最大值出现在 $105^\circ$ 位置,最小值出现在 $195^\circ$ 位置;工况A3下围岩压力最大值出现在 $135^\circ$ 位置,最小值出现在 $225^\circ$ 位置;工况A4下围岩压力最大值出现在 $165^\circ$ 位置,最小值出现在 $255^\circ$ 位置;工况A5下围岩压力最大值出现在 $180^\circ$ 位置,最小值出现在 $270^\circ$ 位置;工况C下壁后围岩压力分布较为均匀。

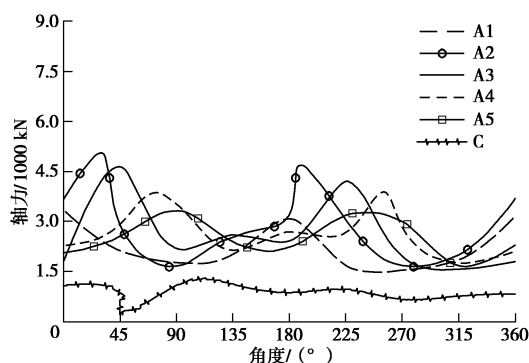


图11 管片衬砌轴力分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of axial force

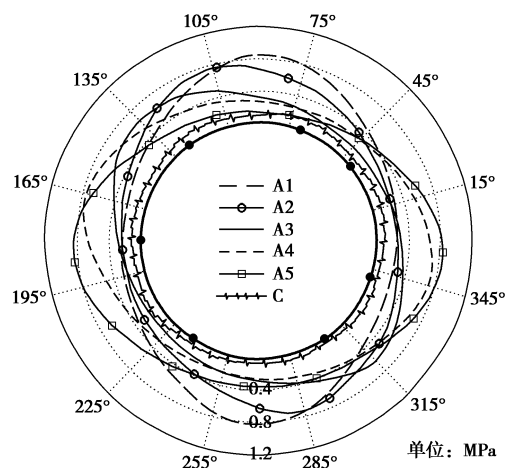


图12 管片衬砌壁后围岩压力分布

Fig. 12 Radial contact forces behind segment linings

由图还可见,层理倾角的变化不仅影响管片衬砌壁后围岩压力分布形状,还影响其量值的大小。层理倾角从 $15^\circ$ 到 $45^\circ$ 变化时,管片衬砌壁后围岩压力最大值呈现递减趋势,层理倾角从 $45^\circ$ 到 $90^\circ$ 变化时;管片衬砌壁后围岩压力最大值呈现递增趋势,即层理倾角 $45^\circ$ 时,管片衬砌壁后围岩压力最小,这与管片衬砌内力分布形式相互印证。

综上所述,均质地层中管片衬砌壁后围岩压力分布较为均匀,而在层状地层中,管片衬砌易受偏压作用。同管片衬砌弯矩分布类似,管片衬砌壁后围岩压力受层理面控制明显,随着层理倾角变化,围岩压力最大值向层理面法线方向偏移,即最大值集中在强度最弱的层理面法线方向。层理倾角 $45^\circ$ 时,管片衬砌壁后围岩压力最小。

3.3 管片衬砌变形分布特征

图 13 为不同层理倾角下管片衬砌变形分布特征。由图可见，均质地层中，管片衬砌封顶块位置变形较大；层状围岩中，受层理面影响，管片衬砌发生不同程度的椭变，且最大椭变量位于层理面法线方向，这与管片衬砌壁后围岩压力和弯矩分布特征相印证。

对比还可见，层理倾角的变化同样影响管片衬砌变形量。层理倾角从 15° 到 45° 变化时，管片衬砌变形量呈现递减趋势，层理倾角从 45° 到 90° 变化时；管片衬砌变形量呈现递增趋势，即层理倾角 45° 时，管片衬砌变形量最小。

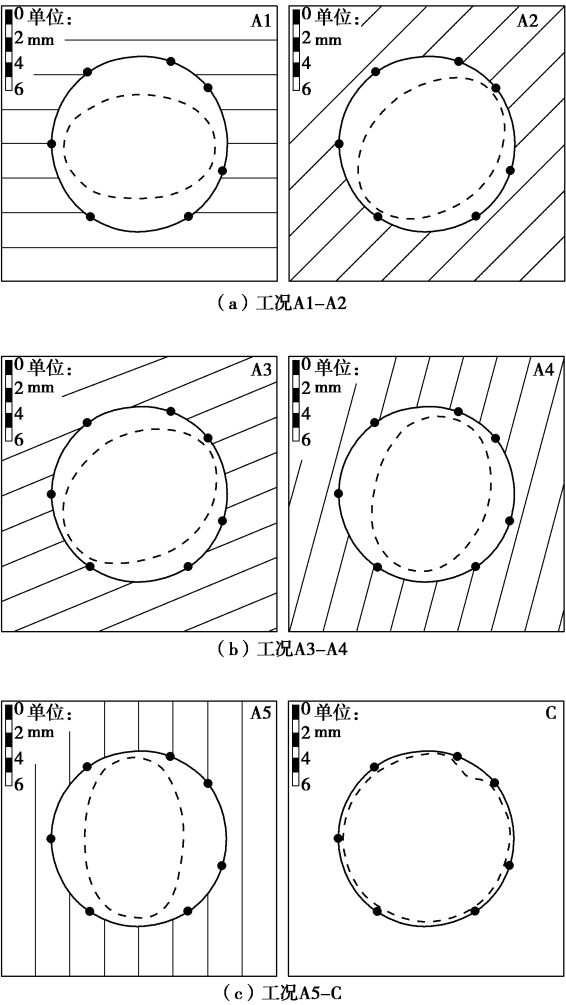


图 13 管片衬砌变形图

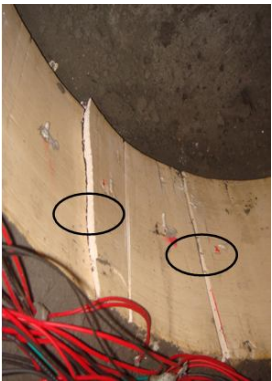
Fig. 13 Deformation of segment linings

3.4 管片衬砌破坏特征

将均质地层和层状地层（层理倾角 45°，0°）下管片衬砌模型加载至同一破坏荷载，定义裂缝宽度超过 2 mm 为主裂缝，裂缝宽度 0.5~2 mm 为次裂缝。管片衬砌主裂缝分布图如图 14 所示，整体裂缝素描图如图 15 所示。

由图 14, 15 可见，均质地层中管片衬砌的主裂缝

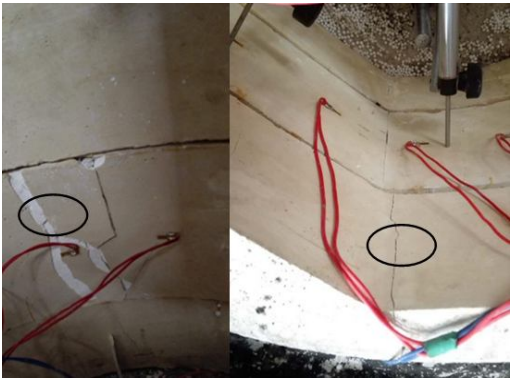
出现在封顶块的接头处，次裂缝沿环向分布，分别出现在左拱腰和左拱脚侧接头处、拱顶和右拱腰处。层理倾角 45° 时，管片衬砌的主裂缝出现在右拱脚接头处和左拱肩接头处，次裂缝主要集中在主裂缝周围。层理倾角 0° 时，管片衬砌的主裂缝出现在拱顶内侧和拱脚接头处，次裂缝集中在主裂缝周围。



(a) 均质地层



(b) 层理围岩—层理倾角 45°



(c) 层理围岩—层理倾角 0°

图 14 管片衬砌主裂纹分布图

Fig. 14 Main cracks of segment linings

综上可见，均质地层中，管片衬砌裂缝主要出在封顶块接头处和其他环向接头处，层状地层中管片衬砌裂缝出现位置受接头位置影响减弱，而受层理倾角影响明显，管片衬砌裂缝出现位置主要集中在层理面法向。

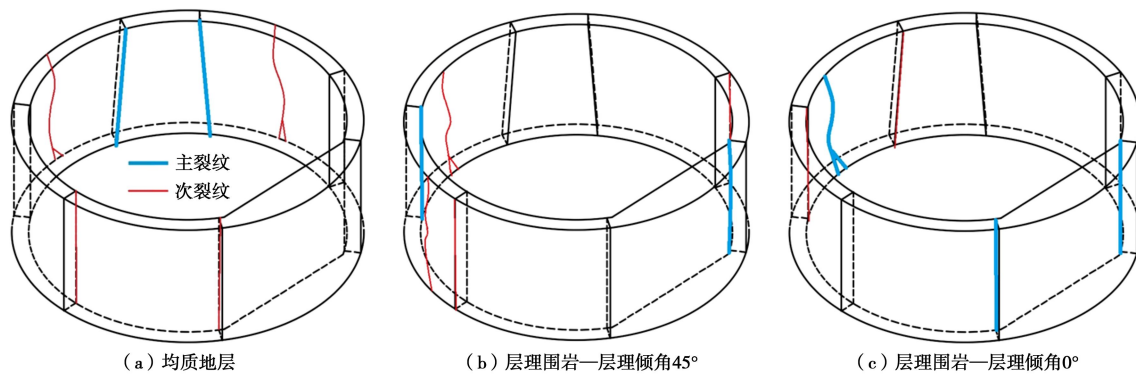


图 15 管片衬砌裂纹素描图

Fig. 15 Sketch of cracks of segment linings

## 4 结 论

深部层状围岩结构强度具有各向异性特点, 此类地层中修建盾构隧道, 管片衬砌易受偏压作用。开展层状围岩与盾构管片衬砌相互作用关系的相似模型试验研究, 得到了层理面倾角对管片衬砌壁后围岩压力、管片衬砌内力和变形分布的影响规律, 获得了如下4点结论。

(1) 管片衬砌受力和变形特征受层理面控制明显, 管片衬砌受力极不均匀, 轴力、弯矩和变形呈现非对称分布。层理倾角对管片衬砌的受力和变形影响显著, 层理倾角不仅影响围岩压力分布形状还影响其量值大小。

(2) 层理倾角不同, 管片衬砌壁后围岩压力、弯矩、变形分布形态及最大值出现的位置均不相同, 随着层理倾角变化, 管片衬砌最大正弯矩值、最大变形量、壁后围岩压力最大值向强度最弱的层面法线方向偏移, 即最大值集中在强度最弱的层面法线方向。

(3) 层理倾角的变化同样影响管片衬砌轴力分布形态及量值。与弯矩分布形态不同, 层理面法向附近管片衬砌轴力值最小, 层理面切向附近管片衬砌轴力值最大。层理倾角从 $15^\circ$ 到 $90^\circ$ 变化时, 管片衬砌壁后围岩压力、管片衬砌内力和变形最大值呈现先减小后增大趋势, 层理倾角 $45^\circ$ 时, 管片衬砌壁后围岩压力、管片衬砌内力和变形最值均最小。

(4) 均质地层中, 管片衬砌裂缝主要出在封顶块接头处和其他环向接头处, 层状地层中管片衬砌裂缝出现位置受接头位置影响减弱, 而受层理倾角影响明显, 管片衬砌裂缝出现位置主要集中在层理面法向。

## 参考文献:

[1] 彭焱森. 陡倾层状岩体隧道开挖稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012. (PENG Yan-sen. Study on the stabilization of excavating the steep-dipping rock mass

Tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))

- [2] 刘恺德, 刘泉声, 朱元广, 等. 考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 308 - 316. (LIU Kai-de, LIU Quan-sheng, ZHU Yuan-guang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under brazilian splitting and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(2): 308 - 316. (in Chinese))
- [3] 朱永全, 李文江, 赵 勇. 软弱围岩隧道稳定性变形控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (ZHU Yong-quan, LI Wen-jiang, ZHAO Yong. Deformation control technology of weak surrounding rock tunnel stability[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [4] RAMAMURTHY T, VENKATAPPA G R, SINGH J. Engineering behavior of phyllite[J]. Eng Geol, 1993, **169**: 80 - 90.
- [5] CHO J W, KIM H, JEON S, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeongshale, and Yeoncheon schist[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2012, **50**: 158 - 169.
- [6] KARAKUL H, ULUSAY R, ISIK N S. Empirical models and numerical analysis for assessing strength anisotropy based on block punch index and uniaxial compression tests[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2010, **47**: 657 - 665.
- [7] 侯 鹏, 高 峰, 杨玉贵, 等. 考虑层理影响页岩巴西劈裂及声发射试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(6): 1603 - 1612. (HOU Peng, GAO Feng, YANG Yu-gui, et al. Effect of bedding plane direction on acoustic emission characteristics of shale in Brazilian tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(6): 1603 - 1612. (in Chinese))
- [8] 沙 鹏, 伍法权, 李 响, 等. 高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征[J]. 岩土力学, 2015,

- 36(5): 1407 - 1414. (SA Peng, WU Fa-quan, LI Xiang, et al. Squeezing deformation in layered surrounding rock and force characteristics of support system of a tunnel under high in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1407 - 1414. (in Chinese))
- [9] 夏彬伟. 深埋隧道层状岩体破坏失稳机理实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (XIA Bin-wei. Experimental study on the mechanism of instability of layered rock mass in deep tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))
- [10] 李晓红, 夏彬伟, 李 丹, 等. 深埋隧道层状围岩变形特征分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1163 - 1167. (LI Xiao-hong, XIA Bin-wei, LI Dan, et al. Deformation characteristics analysis of layered rockmass in deep buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1163 - 1167. (in Chinese))
- [11] 李树忱, 马腾飞, 蒋宇静. 深部多裂隙岩体开挖变形破坏规律模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 987 - 995. (LI Shu-chen, MA Teng-fei, JIANG Yu-jing, et al. Model tests on deformation and failure laws in excavation of deep rock mass with multiple fracture sets[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 987 - 995. (in Chinese))
- [12] 杨松林, 朱焕春, 刘祖德. 加锚层状岩体的本构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 427 - 430. (YANG Song-lin, ZHU Huan-chun, LIU Zu-de. A new constitutive model of the layered rock mass reinforced with bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 427 - 430. (in Chinese))
- [13] 马腾飞, 李树忱, 李术才, 等. 考不同倾角多层节理深部岩体开挖变形破坏规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2899 - 2908. (MA Teng-fei, LI Shu-chen, LI Shu-cai, et al. Model experimental study of deformation and failure law in excavation of deep rock mass with multi-cleftiness of different angles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2899 - 2908. (in Chinese))
- [14] BOSSART P, WERMEILLE S. The stress field in the Mont Terri region-data compilation[M]. Bern: Swiss Geological Survey, 2003: 65 - 92.
- [15] BLÜMLING P, BERNIER F, LEBON P, et al. The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment[J]. Phys Chem Earth Parts A/B/C, 2007, 32: 588 - 599.
- [16] FORTSAKIS P, NIKAS K, MARINOS V, et al. Anisotropic behaviour of stratified rock masses in tunnelling[J]. Engineering Geology, 2012(141/142): 74 - 83.
- [17] SAGONG M, PARK D, YOO J, et al. Experimental and numerical analyses of an opening in a jointed rock mass under biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(7): 1055 - 1067.
- [18] 地盘工学会. シールドトンネルの新技术[M]. 东京: 鹿岛出版社, 1997. (Research Association on New Shield Tunnology. New technology in shield tunneling[M]. Tokyo: Kajima Institute Publishity Co. Ltd. 1997. (in Japanese))
- [19] 王士民, 于清洋, 彭 博, 等. 封顶块位置对盾构隧道管片结构力学特征与破坏形态的影响分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 123 - 132. (WANG Shi-min, YU Qing-yang, PENG Bo, et al. Analysis of mechanical characteristics and failure pattern of shield tunnel segment with different position of key block[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 123 - 132. (in Chinese))