

# 下穿黄河盾构隧道管片衬砌结构 受力特征模型试验\*

方勇<sup>1†</sup>,汪辉武<sup>1</sup>,郭建宁<sup>1</sup>,王飞<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室,四川 成都 610031;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043)

**摘要:**针对兰州地铁穿河段盾构隧道穿越强透水砂卵石地层和承受较高外水压的特点,首先研制了外水压加载装置,该装置在衬砌模型内部创造了一个封闭的负压环境,通过控制模型内外气压差来实现外水压的等效加载,同时结合隧道-地层复合模拟试验系统开展了几何相似比为1:10的室内模型加载试验,实现了土压和水压的分别控制加载.研究了水压、土压、土体侧压力系数及拼装方式对管片受力特征的影响.研究表明,随着水压的增大,管片轴力明显提高,弯矩略有减小,偏心距则明显降低;随着隧道上覆土压的增大,管片衬砌结构的轴力、弯矩、偏心距均呈增大趋势,但总体上量值变化较小;在水压一定时,覆土厚度的增加对管片弯矩的影响越来越大,而轴力变化速率均比较稳定;正常水压条件下,随着土体侧压力系数的增大,管片衬砌结构的轴力增大,弯矩减小,偏心距减小,随着水压的增大,侧压力系数对于管片结构受力特征的影响越来越小;错缝拼装情况下,管片内力在部分环向及纵向接头处会产生较大突变,且管片内力较通缝拼装情况大.

**关键词:**水下盾构隧道;砂卵石地层;管片衬砌;模型试验

**中图分类号:**U452

**文献标志码:**A

## Model Test Study on the Mechanical Characteristics of Segment Linings for the Shield Tunnel Undercrossing the Yellow River

FANG Yong<sup>1†</sup>, WANG Huiwu<sup>1</sup>, GUO Jianning<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>

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

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co Ltd, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The shield tunnel of Lanzhou metro undercrossing the Yellow River was driven under through high permeability sandy cobble stratum and under high water pressure. A device for external loading test was therefore developed, which introduced a controllable air pressure between the linings and grouting layer, and by regulating the pressure difference, the equivalent water pressure can be then simu-

\* 收稿日期:2016-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278422, 51578460), National Natural Science Foundation of China(51278422, 51578460); 国家科技支撑计划项目(2012BAG05B03), National Key Technology Support Program(2012BAG05B03); 四川省青年科技基金资助项目(2012JQ0021), Sichuan Youth Science and Technology Foundation(2012JQ0021)

作者简介:方勇(1981-),男,四川大竹人,西南交通大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: fy980220@swjtu.cn

lated. Using this device together with a tunnel-ground simulation facility, a model test with a geometric similarity ratio of 1 : 10 was conducted. The device can reach the point that the water pressure and earth pressure were controlled separately. The mechanical characteristics of segment lining with different external water pressures, soil pressure, coefficient of side earth pressure and segment assembling methods was analyzed. The results suggest that, as external water pressure increased, a significant increasing trend of axial force and a gentle decrease trend of bending moment were observed while eccentricity decreased obviously; as soil pressure increased, a gentle increase of axial force, bending moment and eccentricity was observed; Given a fixed water pressure, increasing effects on the bending moment and decreasing effects on axial force were shown with the increase of soil pressure; Given a normal pressure level, axial force of segment linings increased while bending moment decreased when the coefficient of side earth pressure increased, which made the eccentricity decrease. In addition, the coefficient of side earth pressure shows decreasing effects on the mechanical characteristics of segment linings with the increasing of water pressure; Under staggered assembling, internal force of the segment will produce a mutation at some parts of circumferential and longitudinal joints, besides, internal force of the segment under staggered assembling is larger than that under straight joint assembling.

**Key words:** underwater shield tunnel; sandy cobble stratum; tunnel linings; model scale experiments

随着盾构法隧道施工技术的广泛应用,隧道采用盾构法穿越江河的施工案例也逐渐增多,在长江、珠江、黄浦江等江河底下均已建成了盾构法隧道。黄河由于其河流特殊性及其河床不确定性,目前黄河下修建的工程主要集中在输水、输气等工程领域,交通工程类下穿黄河的隧道很少。兰州地铁1号线黄河隧道是我国首座下穿黄河并用于城市轨道交通的水下隧道工程,主要穿越强透水砂卵石地层,工程地质条件罕见<sup>[1]</sup>,隧道埋深及水压均较大,对其管片受力特征的研究具有重要的理论和实践意义。

目前,许多学者对外水压下盾构隧道管片的力学行为进行了研究,受成本和时间等因素的限制,目前研究整环管片受力特性的原型试验较少,封坤等<sup>[2]</sup>对南京长江隧道超大断面原型管片衬砌结构进行了原型加载试验,研究了不同荷载条件与拼装方式对管片结构力学特征的影响。数值模拟及理论分析是较常采用的手段,李围等<sup>[3]</sup>采用梁-弹簧模型对通用管片结构进行有限元计算分析,研究了通用管片结构在不同拼装方式条件下的力学行为,并得出施工中的控制拼装方式。黄清飞等<sup>[4]</sup>推导了水位位于隧道断面内工况下管片内力的弹性解,结合已有修正惯用法,针对国内4种典型盾构隧道分析了不同覆土条件下水位变化对管片内力的影响。康石磊等<sup>[5]</sup>将强度折减法引入刚体平动运动单元上有限元并编制计算程序,针对椭圆形毛洞隧道围岩

稳定性和破坏模式开展计算分析,并探讨了围岩强度折减极限状态对应的刚性块体破坏模式的形态特征。

在外水压下盾构隧道力学行为研究方面,模型试验是一种较为可靠的研究手段,目前已在隧道模型试验的材料制备、模型制作、设备研制等方面积累了宝贵经验<sup>[6]</sup>,何川等<sup>[7-9]</sup>在相似模型试验中采用盾构隧道-地层复合体模拟试验系统结合自行研制的旋转式水压装置,重点讨论了外水压下各因素对管片力学行为的影响规律。唐志成等<sup>[10]</sup>同时考虑盾构隧道管片接头效应和管片与土体相互作用效应,用三维土-盾构隧道相似模型试验对盾构隧道管片结构在不同拼装方式下的力学行为进行了研究。但已有的模型试验绝大部分基于软土地层开展,未有针对外水压下砂卵石地层管片力学特性的模型试验,且模型试验中的水压加载方式存在较大问题,未能实现真实水压对管片力学行为影响的模拟。

本文针对兰州地铁穿河段盾构隧道穿越强透水砂卵石地层和承受较高外水压的特点,研制了外水压加载装置,通过控制模型内外气压差来实现外水压的等效加载,同时结合隧道-地层复合模拟试验系统开展了室内模型加载试验,实现了土压和水压的分别控制加载,研究了水压、土压、土体侧压力系数及拼装方式对管片受力特征的影响。

### 1 工程概况

兰州地铁 1 号线两次下穿黄河,是首条穿越黄河的地铁隧道工程。迎门滩~马滩区间在银滩大桥上游 38~49 m 处下穿黄河底部,区间长度 1 907m,下穿黄河河床长度为 404.0 m,其中黄河水面宽 200

m 左右,水深一般为 3~7 m,最深处可达 9 m。勘察期间,区间内黄河水面高程为 1 519.6~1 521.1 m,隧道顶板水位高度为 12.4~23.8 m。区间隧道主体均位于强透水砂卵石地层中,渗透系数约为 55 m/d,标准顶板埋深 18.1~24.1 m,均位于地下水位以下,各层土的埋藏条件及分布规律见区间地质剖面图 1。

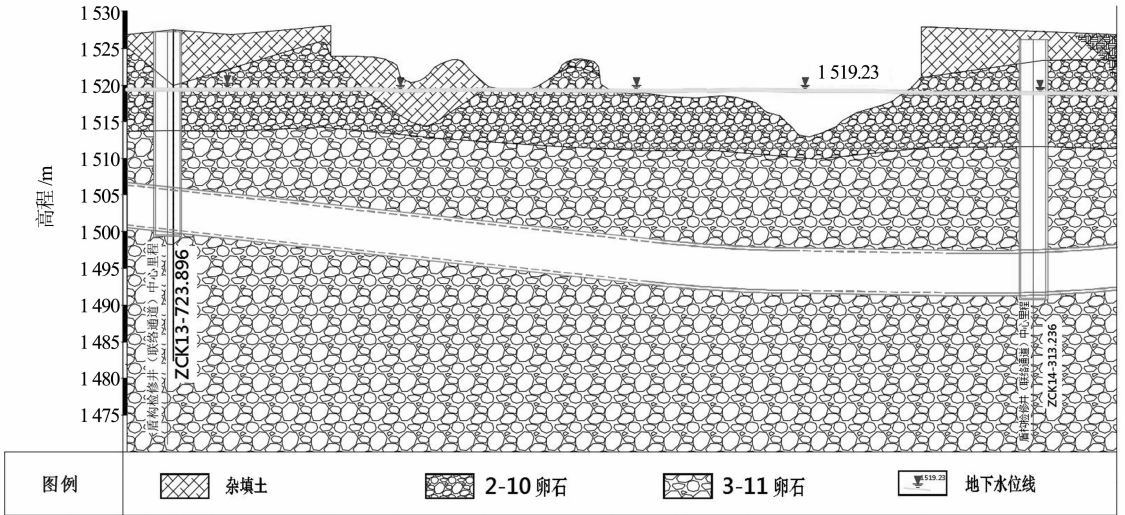


图 1 迎门滩~马滩区间地质剖面图  
Fig. 1 Geological profile of Yingmentan-Matan station

穿河段盾构隧道管片采用通用楔形衬砌环,管片直径 6.2 m,厚度 0.35 m,幅宽 1.2 m,楔形量 37.2 mm(双面楔形),衬砌环向分 6 块,即 3 块标准块(B1,B2,B3,中心角 67.5°),2 块邻接块(L1,L2,

中心角 68.75°),一块封顶块(F,中心角 20°),采用错缝拼装方式,每环纵缝采用 12 根 M30 弯螺栓连接,两环之间采用 16 根 M30 螺栓连接,衬砌圆环构造如图 2 所示。

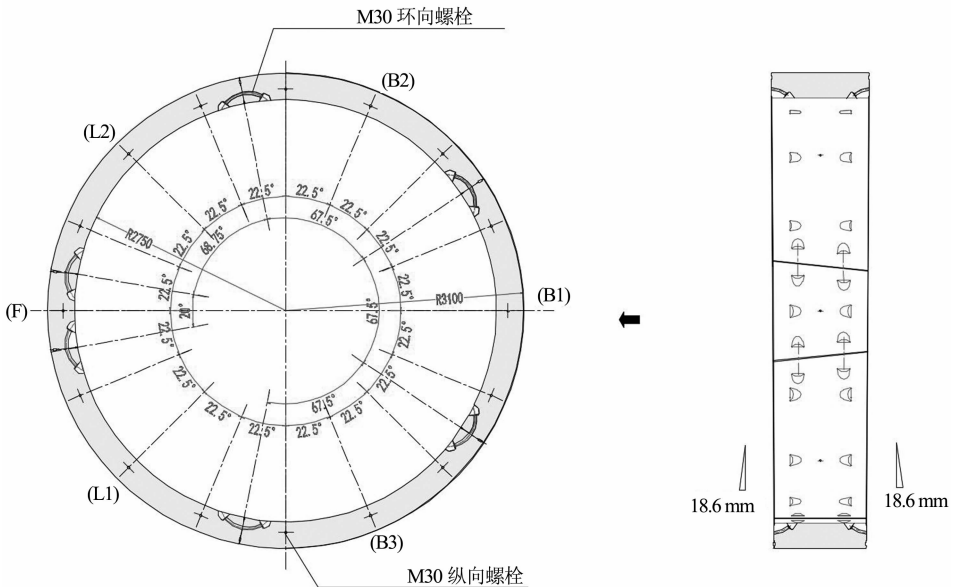


图 2 管片衬砌构造  
Fig. 2 Structure of segmental lining

## 2 试验方案

### 2.1 相似关系及试验材料

本次试验为 1g 下的物理相似模型试验,采用几何相似比  $C_L = 10$  和容重相似比  $C_\gamma = 1$  为基本相似比,在弹性范围内控制各关键物理力学参数的相

似性<sup>[6-11]</sup>,根据相似理论获得泊松比、应变、内摩擦角的相似比为  $C_\mu = C_\epsilon = C_\phi = 1$ ;强度、应力、黏聚力、弹性模量的相似比为: $C_R = C_\sigma = C_C = C_E = 10$ .

#### 1) 围岩材料

本次试验选择盾构隧道所处 3-11 卵石层土体作为模型试验的原型土体,由地勘报告可知其颗粒分布情况及物理力学参数见表 1 和表 2.

表 1 原型地层颗粒分布(3-11)

Tab. 1 Grain composition of the prototype(3-11)

颗粒大小 /mm	统计指标							
	>60	60~40	40~20	20~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075
平均值/%	5.61	35.64	23.28	14.82	6.35	5.36	5.06	3.88

表 2 原型土物理力学参数

Tab. 2 Physico-mechanical indexes of the field soil

土层	E/MPa	$\mu$	K	$\gamma/(g \cdot cm^{-3})$	C/kPa	$\varphi/(^\circ)$
3-11 卵石	50~65	0.15~0.25	0.18~0.33	2.18~2.30	15~20	35~45

试验模型土通过相似级配法配制<sup>[12]</sup>,通过几何相似原则等比例将土样粒径缩小,即其颗粒分布曲线按一定几何比尺平移,本次试验选取比例尺为 10. 试验所用砂卵石通过筛分实验筛分后得到各粒径区间的砂卵石,按照与原型土等比例原则配制试验土体.

混合后的试验砂卵石中再添加重晶石粉调节重度,添加粉煤灰与机油调节内摩擦角和粘聚力<sup>[13]</sup>. 为满足相似关系,反复调整添加物配比并进行压缩及直剪试验,最终确定模型土压缩模量为 11 MPa,黏聚力为 2.0 kPa、内摩擦角为 37°. 试验土样的内摩擦角及黏聚力基本满足相似,压缩模量不完全满足相似比. 但现有研究表明<sup>[14]</sup>,砂卵石地层中颗粒与颗粒之间通过点-点接触和点-点传力,颗粒级配对于砂卵石地层的传力机制影响较大,满足颗粒级配相似是实现模拟效果的关键. 因此研究首先保证模型土与原型土颗粒级配相似,在此基础上尽可能保证其力学性质的相似. 原型及试验配置土样颗粒级配曲线如图 3 所示.

#### 2) 管片衬砌

管片混凝土强度等级为 C50,采用质量比 1 : 1.1 : 0.1 的水、石膏、硅藻土复合材料来模拟,原型与模型材料参数见表 3.

表 3 管片混凝土物理力学参数

Tab. 3 Physico-mechanical indexes of the segment lining

项目	原型值	模型值	模型对应原型值
弹性模量/Pa	35.5e9	3.43e9	34.3e9
单轴抗压强度标准值/Pa	50e6	4.87e6	48.7e6

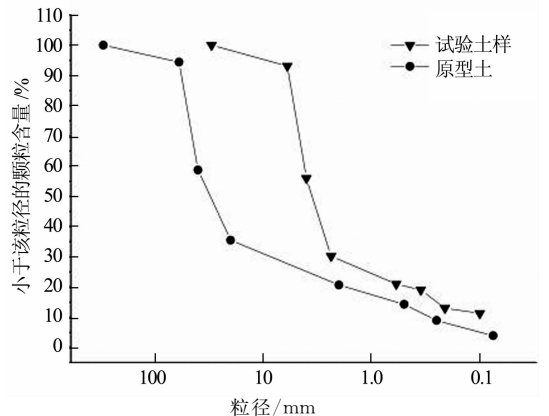


图 3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curve

#### 3) 管片衬砌环向主筋

管片衬砌环向主筋通过原型与模型的等效抗拉刚度 EA 完全相似的方法进行模拟. 此处采用直径为 0.711 mm 的 #22 铁丝,一环模型管片在内外侧分别布置 7 根铁丝模拟管片主筋. 环向主筋物理参数见表 4.

表 4 环向主筋物理力学参数

Tab. 4 Physico-mechanical indexes of hoop reinforcement

抗拉刚度	原型值	模型值	对应原型值
EA	5.026 e8	5.278 e5	5.278 e8

#### 4) 管片接头

(i) 环向接头. 根据国内外有关研究及我单位的前期研究成果<sup>[9]</sup>,具体模拟方法为:在环中需设

置接头的部位开一定深度的槽缝, 弱化该部位的抗弯刚度, 槽缝深度依据与原型接头抗弯能力等效的原则设置(见表 5), 其计算方法在文献[9-10]中有详细说明。

表 5 管片接头槽缝深度  
Tab. 5 Slot depth of segment joints

接头类型	弯曲刚度 / $10^7 (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	实体槽缝深度 /m	模型槽缝深度 /m
拱顶拱底接头	5.2	0.12	0.012
左侧右侧接头	2.5	0.15	0.015

(ii) 间接头. 在实际工程中, 管片在纵向接头处的错动很小, 故在试验中可将管片接头的径向抗剪刚度和切向抗剪刚度取为偏于安全的无穷大, 即认为各环管片在纵向接头处不产生错动. 在模型上相应纵向接头的位置用直径为 5 mm, 长度为 40 mm 的钢棒从纵向进行各管片环间的连接。

## 2.2 外水压模拟

在目前的模型试验中, 通常将外水压力等效为荷载作用于结构上. 较常用的施加外水压的方法即通过张拉环箍于隧道衬砌外表面的钢丝实现对隧道衬砌外表面径向压力的施加, 以该径向压力来等效代替外水压<sup>[7-11]</sup>, 但是该方法易产生应力集中, 无法准确模拟衬砌结构所受的外水压力, 且操作较为繁琐. 当圆形盾构管片结构处于透水地层时, 水压对结构直接产生径向压力, 当结构断面较小、水压较高时, 水压力对结构弯矩贡献很小, 而明显地提高了结构轴力水平, 此时作用在结构上的径向水压力可以简化为均匀水压力进行研究。

笔者采用自行研制的水压加载装置<sup>[15]</sup>, 较好地实现了圆形衬砌结构的均匀外水压模拟, 通过控制衬砌内外气压差, 以气压代替水压进行等效加载. 该装置主要由密封装置和抽气稳压装置两大部分组成, 如图 4 所示. 密封装置能为实验创造一个相对封闭的负压环境, 它主要包括: 形状、尺寸与隧道模型断面相同的有机玻璃板(上下各一个)、两玻璃板之间起支撑作用的立柱、内侧涂有黄油并紧贴于衬砌外表面起密封作用的软橡胶皮. 为保证模型的密封性, 在环向及环间接头均采用玻璃胶进行封堵。

抽气稳压装置包括抽气机、稳压控制机、负压传感器、电磁阀与辅助气压表等. 稳压控制仪可通过控制抽气机和电磁阀的开关来保障密封装置内的负压维持在预设值水平, 其精度为 0.1 kPa. 另设辅助气压表来直观的监测负压变化以及判断稳压装置是

否正常工作, 其精度为 0.2 kPa.

与以往的水压加载方法相比, 该装置的加载效果更符合实际, 实验数据更为可靠, 可以实现隧道结构外表面的均匀应力加载, 不会造成局部应力集中; 以气压代替水压的等效加载方法, 可以模拟水不抵抗剪切力的特性, 不会对隧道结构变形产生附加约束, 能真实反映外水压下隧道衬砌结构的受力特性; 操作简便且可避免应力损失。

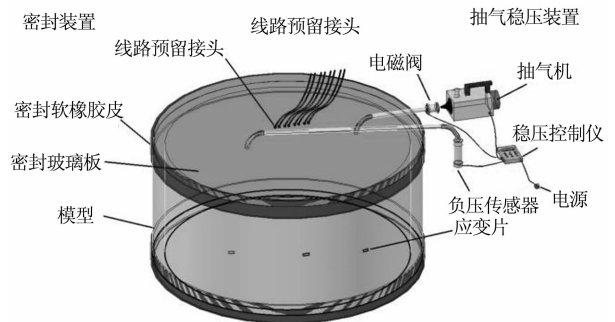


图 4 外水压模拟装置  
Fig. 4 Water pressure simulation device

## 2.3 模型试验装置及量测项目

本次试验采用西南交通大学研制的隧道-地层复合模拟试验系统平台进行模型试验, 试验系统如图 5 所示. 该系统采用卧式加载模式, 试体尺寸为 3.64 m × 3.64 m × 0.3 m. 通过控制水平面内的 4 组千斤顶推动传力面板来施加边界上的水平面力, 实现不同侧压力系数的地应力场模拟, 同时在竖直方向设置千斤顶和加载面板, 保证隧道在加载状态下处于平面应变状态. 加载剖面图如图 6 所示。

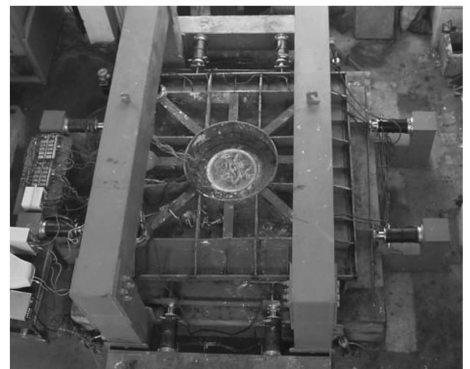


图 5 隧道加载试验平台  
Fig. 5 Load test platform of tunnel

模型由三环管片组成, 第一环和第三环的宽度为实际值的一半, 第二环为全宽, 试验均以第二环为量测、研究对象。

以 22.5°为间隔在环结构内、外侧对称布设环向电阻应变片, 测试内外侧应变值, 以此获得内外侧

的应变  $\epsilon_{内}$  与  $\epsilon_{外}$  后,通过式(1),(2)计算出管片环结构截面内力.单个管片环共布置 32 个测点,应变测点的布置与编号如图 7 所示.

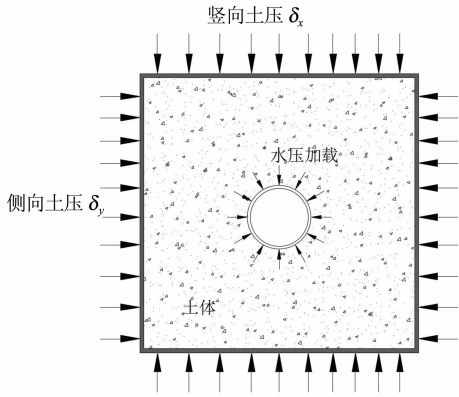


图 6 加载装置剖面图

Fig. 6 Cross-section loading device

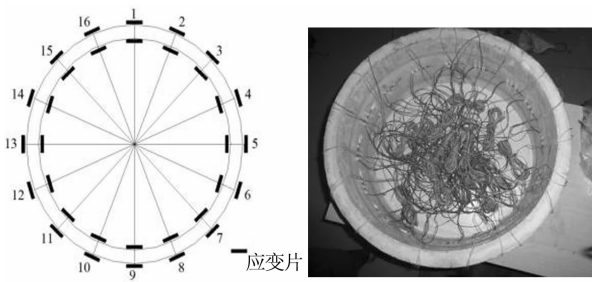


图 7 应变测点布置图

Fig. 7 Layout of strain gauges

单位长度衬砌的截面内力计算公式为:

$$N = \frac{1}{2}E(\epsilon_{内} + \epsilon_{外})bh \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{12}E(\epsilon_{内} - \epsilon_{外})bh^2 \quad (2)$$

式中: $b$  为单位长度; $h$  为衬砌厚度; $E$  为衬砌弹性模量.

试验中设置了 4 组补偿应变片来修正负压环境对模型内部电阻应变片可能带来的影响.

## 2.4 试验分组

兰州地铁穿河段隧道覆土厚度一般在  $2D$  ( $D$  为隧道直径 6.2 m) 以上,根据前人对隧道覆土压力计算的研究<sup>[16]</sup>可知在兰州地铁隧道埋深范围内按泰沙基公式、普氏公式以及铁路隧道规范中所给公式计算出的土压力差别不大,另外隧道主要穿越高压富水弱胶结大粒径砂卵石地层,因此隧道上方土体“土拱效应”比较显著,综合考虑后采取最不利原则:即对太沙基塌落拱高度与  $2D$  覆土厚度进行比较,

取较大土柱高度来计算隧道土压力<sup>[17]</sup>.由太沙基松动土压力公式计算可知,隧道上覆土体太沙基塌落拱高度仅为 6.17 m,远小于  $2D$  覆土厚度 12.4 m,因此兰州地铁穿河段隧道竖向土压应按  $2D$  土柱高度进行计算.

为进一步分析土压对管片衬砌结构受力特征的影响,本次试验竖向土压取覆土厚度(计算土柱高度)  $1D, 1.5D, 2D$  和  $3D$  共 4 种工况,隧道两侧水平向土压力按静止侧压力系数与拱顶竖向土压力的乘积考虑.试验中考虑了 4 种不同的土体侧压力系数 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5.水压采用逐级加载方式,由 0 m 增大至 30 m,以 1 m 进行递增.试验考虑了 4 种拼装方式(见图 8):通缝拼装 A(三环管片 F 块相对于拱顶角度为  $0^\circ + 0^\circ + 0^\circ$ );错缝拼装 B1(三环角度为  $-90^\circ, +90^\circ, -90^\circ$ );错缝拼装 B2(三环角度为  $-22.5^\circ + 0^\circ - 22.5^\circ$ );错缝拼装 B3(三环角度为  $-22.5^\circ + 0^\circ + 22.5^\circ$ ).

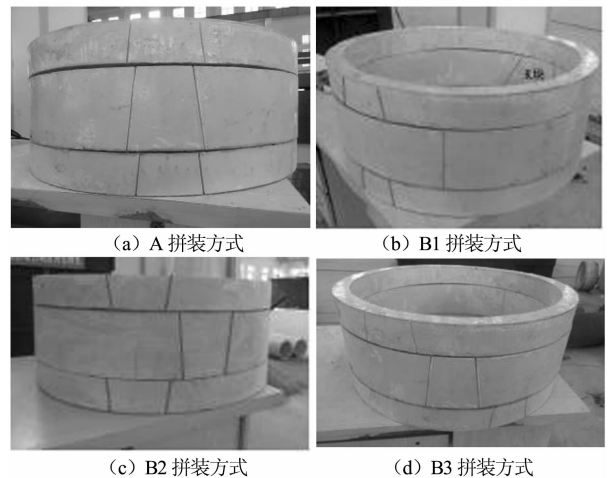


图 8 不同拼装方式示意图

Fig. 8 Schematic diagram of different segments erection

试验步骤大致如下:

清空试验台架;将已安装好水压加载装置的试验模型放入试验台架中;在模型周围放入配置好的试验砂卵石;加载使试验地层固结;开启液压系统,采用南北方向布置的 4 台千斤顶模拟竖向土压进行分级加载,采用东西方向的 4 台千斤顶模拟侧向土压力.使用水压加载装置对二衬施加均匀水压,内外气压差从 0 开始,以 1 kPa(0.1 m 水头,换算至原型中为 1 m 水头)递增,每级荷载稳定约 10 min,逐步加载至试验所需荷载.

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 水位对管片内力的影响

当拼装方式为 B1(直线段基本拼装方式)、侧压力系数为 0.28(地勘建议值)时,覆土厚度(下文中的覆土厚度均指计算土柱高度)分别为 1D, 1.5D, 2D 和 3D(D 为管片外径)条件下管片衬砌结构最大轴力及最大弯矩随水位升高的变化曲线如图 9, 图 10 所示(注:下文图中所示结果均已由模型试验值换算成原型值)。

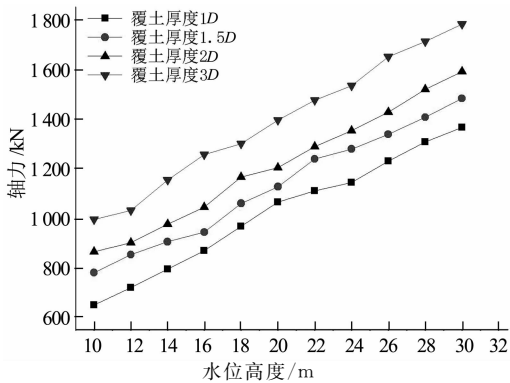


图 9 管片衬砌结构最大轴力随水位变化曲线  
Fig. 9 The relationship between maximum axial force and water level

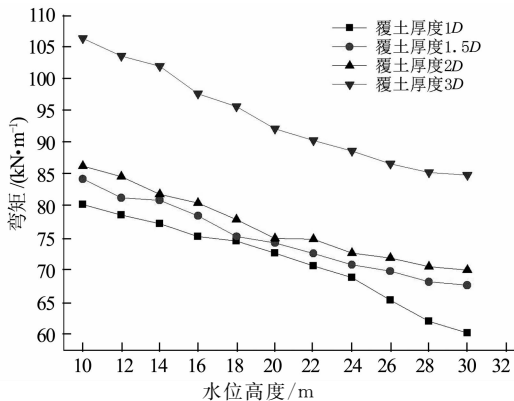


图 10 管片衬砌结构最大弯矩随水位变化曲线  
Fig. 10 The relationship between maximum bending moment and water level

由图 9 分析可知,在 4 种覆土厚度条件下,随着水位高度的增加,管片衬砌结构的轴力均增长迅速,且增长速率比较稳定,基本保持在 60~80 kN/m 之间.在水位一定条件下,随着覆土厚度的增加,管片衬砌结构的轴力也呈现出增长趋势。

由图 10 分析可知,在 4 种覆土厚度条件下,管片衬砌结构的弯矩随着水位高度的增加均逐渐减小,且增长速率仍比较稳定.在水位一定条件下,当

覆土厚度由 1D 增加至 2D 时,最大弯矩变化值为 8.54 kN·m,而当覆土厚度由 2D 增加至 3D 时,最大弯矩变化值增加至 20.07 kN·m。

为进一步分析水位变化对管片内力分布的影响,通过试验数据得到覆土厚度一定(2D)时 10 m, 20 m 和 30 m 水位高度情况下管片衬砌结构轴力及弯矩分布如图 11, 图 12 所示。

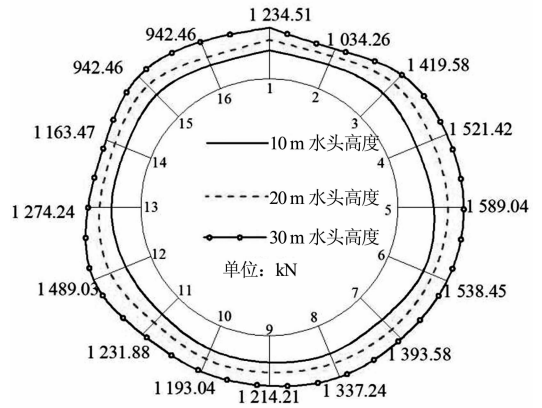


图 11 不同水位下管片衬砌结构轴力分布  
Fig. 11 Axial force distribution with different water level

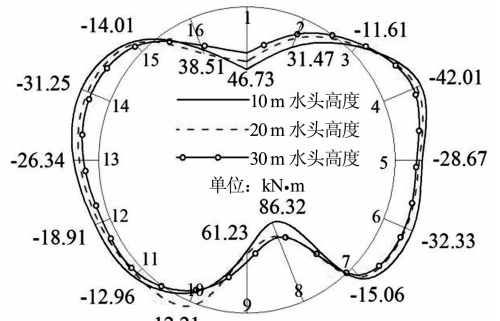


图 12 不同水位下管片衬砌结构弯矩分布  
Fig. 12 Bending moment distribution with different water level

由图 11 可知,当土压一定时,管片各部位轴力均随水压的增大而增大,当水位由 10 m 增大至 30 m 时,管片最大轴力由 863.26 kN 变化为 1589.04 kN.不同水位高度情况下管片轴力沿环向分布大致相同,管片顶部及底部轴力较小,左右两侧轴力较大。

由图 12 可知,当土压一定时,管片各部位弯矩均随水压的增大而减小,当水位由 10 m 增大至 30 m,管片弯矩最大值(正弯矩)由 86.32 kN·m 变化为 70.03 kN·m,大约减小 20%.不同水位高度下管片弯矩沿环向分布大致相同,管片顶部及底部区域内侧受拉外侧受压(结构正弯区),底部弯矩大于

顶部弯矩,左右两侧区域内侧受压外侧受拉(结构负弯区)。

由表 6 分析可知,土压一定时,随着上覆水深的增大,管片正弯区及负弯区偏心距显著降低.例如,当水位由 10 m 增大至 30 m,隧道正弯区最大偏心距由 0.119 m 减小为 0.052 m,减小 56%,负弯区最大偏心距由 0.037 m 减小为 0.014 m,减小 62%。

表 6 土厚度为 2D 时偏心距随上覆水深变化表

Tab. 6 The relationship between eccentricity and water level at soil thickness of 2D m

隧道上覆水深	10	15	20	25	30
正弯区最大偏心距	0.119	0.093	0.072	0.067	0.052
负弯区最大偏心距	0.037	0.029	0.022	0.021	0.015

综上可知,强透水砂卵石地层条件下,土压一定时,随着水压的增大,管片衬砌结构轴力迅速增大,弯矩减小,偏心距显著降低.因此在混凝土抗压强度允许情况下,较高的水压对衬砌结构配筋是有利的,在兰州砂卵石地层情况下应取黄河最低水位验算管片结构内力的安全性。

### 3.2 土压对管片内力的影响

为研究较高水位上上覆土压力对管片内力的影响,在拼装方式 B1、侧压力系数 0.28 不变,通过试验得到水位一定(30 m)时不同覆土厚度情况下管片衬砌结构轴力及弯矩分布如图 13,图 14 所示。

综合分析图 9 与图 13 可知,当水压一定时,管片各部位轴力均随土压的增大而增大,当覆土厚度由 1D 增大至 2D 时,管片最大轴力由 1 363.97 kN 变化为 1 589.04 kN,增大 16.58%;当覆土厚度由 2D 增大至 3D 时,管片最大轴力由 1 589.04 kN 变化为 1 780.75 kN,增大 12.02%;不同覆土厚度情况下管片轴力沿环向分布大致相同,土压变化对轴力分布规律未产生较大影响,管片左右两侧轴力大于顶部及底部轴力。

分析图 14 并结合图 10 中相关数据可知,当水压一定时,隧道上覆土压的变化对管片弯矩产生了较大影响,管片各部位弯矩均随覆土厚度的增大而增大,当覆土厚度由 1D 增大至 2D 时,管片弯矩最大值(正弯矩)由 62.18 kN·m 变化为 70.03 kN·m,增大 12.62%;当覆土厚度由 2D 增大至 3D 时,管片弯矩最大值(正弯矩)由 70.03 kN·m 变化为 84.90 kN·m,增大 21.23%;不同覆土厚度情况下管片弯矩沿环向分布大致相同。

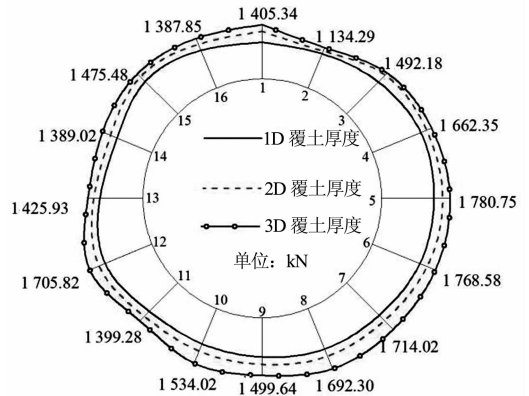


图 13 不同覆土厚度条件下管片轴力分布  
Fig. 13 Axial force distribution with different soil thickness

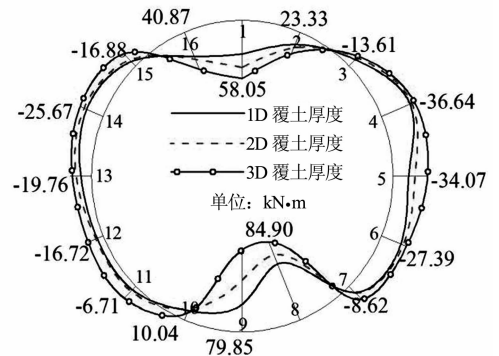


图 14 不同覆土厚度条件下管片弯矩分布  
Fig. 14 Bending moment distribution with different soil thickness

由表 7 分析可知,水压一定时,随着上覆土层厚度的增大,管片正弯区偏心距基本不变,正弯区偏心距则逐渐增大,但变化幅度较小,例如随着上覆土层厚度由 1D 增大至 3D,隧道正弯区最大偏心距由 0.052 m 减小为 0.050 m,负弯区最大偏心距由 0.012 m 增大为 0.019 m。

表 7 偏心距随上覆土层厚度变化表

Tab. 7 The relationship between eccentricity and soil thickness m

隧道上覆土层厚度	1D	1.5D	2D	3D
正弯区最大偏心距	0.052	0.053	0.052	0.050
负弯区最大偏心距	0.012	0.016	0.015	0.019

综上可知,水压一定时,随着土压的增大,管片衬砌结构轴力、弯矩均有较大增长,负弯区偏心距亦增大.另外,在水压一定时,覆土厚度的增加对衬砌结构弯矩的影响越来越大,增长速率逐渐加快,而衬砌轴力变化速率均比较稳定.因此在兰州强透水砂卵石地层情况下土压对于管片结构内力的影响较大,管片结构设计应考虑采用最大土压进行设计。



### 3.3 土体侧压力系数对管片内力的影响

在拼装方式 B1、上覆土体厚度为  $2D$  的前提下,着重研究在不同的水压情况下,管片衬砌结构的内力随着土体侧压力系数变化的特征.

通过试验数据得到覆土厚度为  $2D$  时,水位高度分别为  $0\text{ m}$ ,  $10\text{ m}$ ,  $20\text{ m}$  和  $30\text{ m}$  情况下管片衬砌结构轴力、弯矩和偏心距随土体侧压力系数变化曲线如图 15~图 17 所示.

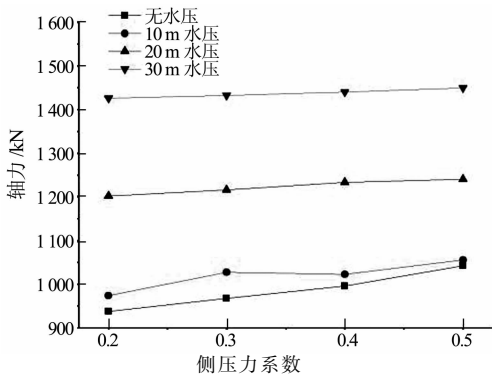


图 15 管片衬砌结构最大轴力随侧压力系数变化曲线

Fig. 15 The relationship between maximum axial force and coefficient of side earth pressure

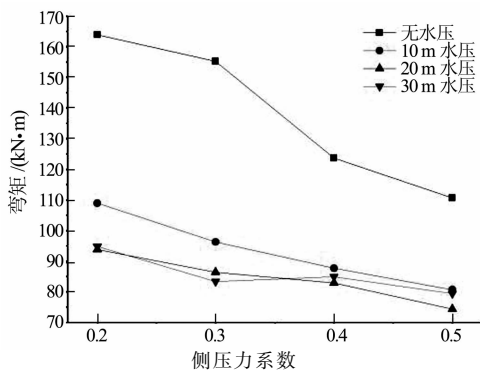


图 16 管片衬砌结构最大弯矩随侧压力系数变化曲线

Fig. 16 The relationship between maximum bending moment and coefficient of side earth pressure

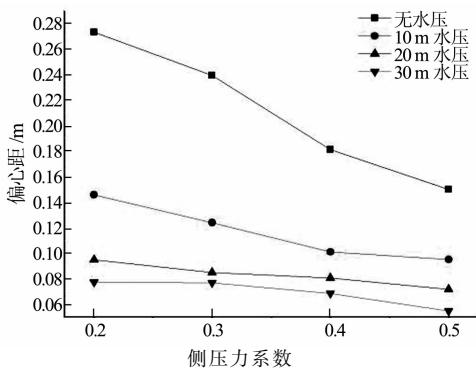


图 17 管片衬砌结构最大偏心距随侧压力系数变化曲线

Fig. 17 The relationship between maximum eccentric distance and coefficient of side earth pressure

由图 15~图 17 可以看出,随着土体侧压力系数的增大,管片衬砌结构的轴力略有增大,弯矩及偏心距明显减小.进一步分析图中各个曲线的斜率可知,随着水压的增大,管片轴力、弯矩和偏心距的变化幅度逐渐减小.例如,随着侧压力系数由  $0.2$  增大至  $0.5$ ,在无水压条件下,管片最大轴力由  $937.36\text{ kN}$  变化为  $1\ 042.34\text{ kN}$ ,增大  $11.2\%$ ,在  $30\text{ m}$  水压条件下,管片最大轴力由  $1\ 425.81\text{ kN}$  变化为  $1\ 449.64\text{ kN}$ ,增大  $1.7\%$ ;在无水压条件下,管片最大弯矩由  $163.87\text{ kN}\cdot\text{m}$  变化为  $110.69\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,减小  $32.5\%$ ,在  $30\text{ m}$  水压条件下,管片最大弯矩由  $94.85\text{ kN}\cdot\text{m}$  变化为  $79.41\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,减小  $16.3\%$ ,在无水压条件下,管片最大偏心距由  $0.27\text{ m}$  变化为  $0.15\text{ m}$ ,减小  $44.4\%$ ,在  $30\text{ m}$  水压条件下,管片最大偏心距由  $0.08\text{ m}$  变化为  $0.05\text{ m}$ ,减小  $37.5\%$ .由此可知,土压一定时,随着水压的增大,侧压力系数对于管片结构受力特征的影响越来越小.究其原因,水压较高情况下水压对管片内力的相对影响较大,而土压的相对影响较小,故而在较高水压下土体侧压力系数的改变对管片内力的影响较小.

### 3.4 拼装方式对管片内力的影响

在计算土柱高度  $2D$ 、侧压力系数  $0.28$ 、水压  $20\text{ m}$  保持不变的条件下,分别对 4 种不同拼装方式下的管片衬砌结构进行加载,管片衬砌结构的轴力及弯矩分布如图 18,图 19 所示.

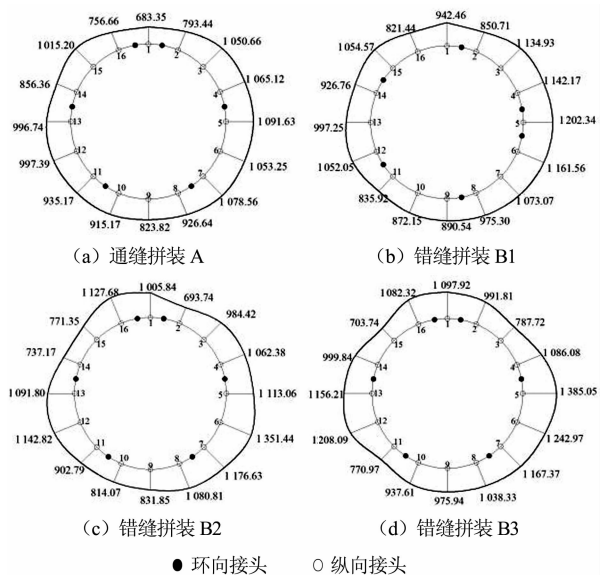


图 18 不同拼装方式下管片结构轴力分布图

Fig. 18 Axial force distribution with different segment erection

由图 18 可知,在相同的荷载条件下,不同拼装

方式下的管片轴力分布规律存在较大差异. 通缝拼装条件下, 轴力基本呈左右对称分布, 拱顶和拱底部位轴力较左右拱腰两侧小, 且轴力变化较为平顺, 错缝拼装条件下管片轴力总体分布规律与通缝拼装较为近似, 但在纵向及环向接头处产生突变.

拼装方式的差异会对管片结构轴力大小产生影响, 相同荷载下错缝拼装管片轴力大于通缝拼装. 通缝拼装情况下的管片结构轴力在拱顶处最小, 为 683.35 kN, 最大值为 1 091.63 kN, 位于右侧拱腰处; 三环一组 22.5° 错缝拼装 (B3) 条件下管片轴力较其他拼装方式大, 其最小最大值分别为 703.74 kN (左侧拱肩) 和 1 385.05 kN (右侧拱腰).

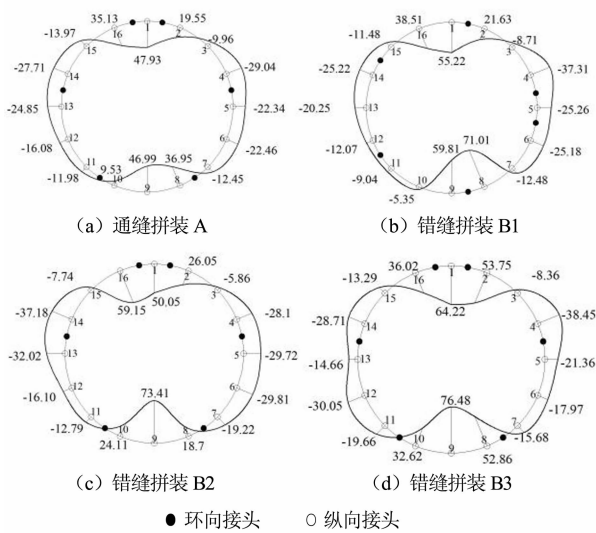


图 19 不同拼装方式下管片结构弯矩分布图  
Fig. 19 Bending moment distribution with different segments erection

由图 19 可知, 在相同的荷载条件下, 不同拼装管片结构中的弯矩分布均在拱顶和拱底处管片衬砌内侧受拉外侧受压 (正弯), 在左右拱腰处管片外侧受拉内侧受压 (负弯). 在通缝拼装条件下, 管片结构的弯矩基本呈对称分布, 弯矩在管片环结构中的变化是平滑过渡的, 受相邻管片弯矩传递和局部刚度增强的影响, 错缝拼装情况下管片环的弯矩与通缝拼装相比差异较大, 在接头处会产生较大突变.

拼装方式的差异对管片弯矩最大值产生较大影响, 相同荷载下通缝拼装最大正负弯矩均较错缝拼装小. 通缝拼装条件下管片正弯矩在拱顶处最大, 为 47.93 kN·m, 最大负弯矩为 -29.04 kN·m, 位于右拱肩处; 三环一组 22.5° 错缝拼装 B3 条件下的弯矩最大值较其他拼装方式大, 最大正弯矩为 76.48 kN·m, 位于拱底, 右拱肩处负弯矩最大, 为

-38.45 kN·m.

总体而言, 通缝拼装时内力基本呈左右对称分布, 变化较平缓; 错缝拼装时内力在部分环向及纵向接头处产生较大突变. 拼装方式的差异对管片轴力及弯矩最大值产生较大影响, 错缝拼装最大轴力及弯矩值比通缝式拼装内力值大, 错缝拼装 B3 情况下管片内力最大, 错缝拼装 B2 次之, 错缝拼装 B1 最小. 同时由已有研究成果<sup>[9]</sup>及笔者所做数值模拟可知, 通缝拼装情况下管片较错缝拼装刚度小, 变形量大, 接缝处的防水处理较难, 而穿黄河区间管片所受水压较大, 防水性能要求较高, 且较大的变形不利于结构防水, 故施工时应尽量避免采用通缝拼装方式, 建议施工中采用错缝拼装方式进行管片拼装. B3 错缝拼装情况下管片内力较其他错缝拼装方式大, 为较不利拼装方式, 应以其来进行管片控制设计.

## 4 结论

本文通过自行研制的外水压模拟加载装置, 通过控制模型内外气压差来实现了外水压的等效加载, 结合隧道-地层复合模拟实验系统, 研究了水压、土压、土体侧压力系数及拼装方式对管片受力特征的影响, 得到了以下结论:

1) 强透水砂卵石地层条件下, 土压一定时, 随着水压的增大, 管片衬砌结构轴力迅速增大, 弯矩减小, 偏心距显著降低, 因此在混凝土抗压强度允许情况下, 较高的水压对衬砌结构配筋是有利的, 在兰州砂卵石地层情况下应取黄河最低水位验算管片结构内力的安全性.

2) 水压一定时, 随着土压的增大, 管片衬砌结构轴力、弯矩均有较大增长, 负弯区偏心距亦增大. 另外, 在水压一定时, 覆土厚度的增加对衬砌结构弯矩的影响越来越大, 增长速率逐渐加快, 而衬砌轴力变化速率均比较稳定. 因此在兰州强透水砂卵石地层情况下土压对于管片结构内力的影响较大, 管片结构设计应考虑采用最大土压进行.

3) 正常水压条件下, 随着土体侧压力系数的增大, 管片衬砌结构的轴力增大, 弯矩减小, 偏心距减小, 随着水压的增大, 侧压力系数对于管片结构受力特征的影响越来越小.

4) 不同拼装方式下的衬砌环内力分布差异较大, 通缝拼装内力基本呈左右对称分布, 变化较平缓; 错缝拼装内力在部分环向及纵向接头处产生较大突变. 拼装方式的差异对管片内力最大值产生较大

影响,错缝拼装管片环最大轴力及弯矩值比通缝式拼装内力值大,错缝拼装 B3 情况下管片轴力及弯矩最大,错缝拼装 B2 次之,错缝拼装 B1 最小.另外考虑管片的刚度、变形量以及防水处理要求,建议施工中采用错缝拼装方式进行管片拼装.

## 参考文献

- [1] 王飞. 兰州地铁黄河隧道设计难点及方案论证[J]. 铁道工程学报, 2014, 191(8): 62-67, 83.  
WAN Fei. Research on design difficulties and project argumentation about the Yellow River tunnel of Lanzhou metro [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 191(8): 62-67, 83. (In Chinese)
- [2] 封坤, 何川, 苏宗贤. 南京长江隧道管片衬砌结构原型加载试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 135-143.  
FENG Kun, HE Chuan, SU Zongxian. Prototype loading test on segmental lining structure of Nanjing Yangtze River tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 135-143. (In Chinese)
- [3] 李围, 何川. 盾构隧道通用管片结构力学行为与控制拼装方式研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 77-82.  
LI Wei, HE Chuan. Study on mechanical behavior and controlling assembling modes of universal segment lining for shield tunnel [J]. Journal of the High Railway Society, 2007, 29(2): 77-82. (In Chinese)
- [4] 黄清飞, 袁大军, 王梦恕. 水位对盾构隧道管片结构内力影响研究[J]. 岩土工程报, 2008, 30(8): 1112-1120.  
HUANG Qingfei, YUAN Dajun, WANG Mengshu. Influence of water level on internal force of segments of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1112-1120. (In Chinese)
- [5] 康石磊, 杨峰, 张箭, 等. 基于强度折减和上限有限元的椭圆形毛洞隧道围岩稳定性分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(9): 104-109.  
KANG Shilei, YANG Feng, ZHANG Jian, *et al.* Finite element upper bound analysis of stability of unlined elliptical tunnel based on strength reduction method [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2015, 42(9): 104-109. (In Chinese)
- [6] 杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构相似模型试验与数值分析[D]. 成都: 西南交通大学 桥梁与隧道工程学院, 2007: 6-7, 17.  
YANG Xiong. Model test and numerical simulation of segment lining for Nanjing Chang Jiang tunnel [D]. Chengdu: College of Bridge and Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, 2007: 6-7, 17. (In Chinese)
- [7] 何川, 张建刚, 杨征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 85-90.  
HE Chuan, ZHANG Jiangan, YANG Zheng. Model test study on the mechanical characteristics of segment lining for the Wuhan Yangtze River tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 85-90. (In Chinese)
- [8] 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, 26(11): 2260-2269.  
HE Chuan, FENG Kun, YANG Xiong. Model test on segmental lining of Nanjing Yangtze River tunnel with super-large cross-section [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2260-2269. (In Chinese)
- [9] 何川, 张建刚, 苏宗贤. 大断面水下盾构隧道结构力学特性 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 133-136.  
HE Chuan, ZHANG Jiangan, SU Zongxian. Mechanical behavior of tunnel structure for underwater shield tunnel with large cross-section [M]. Beijing: Science Press, 2010: 133-136. (In Chinese)
- [10] 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.  
TANG Zhicheng, HE Chuan, LIN Gang. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 85-89. (In Chinese)
- [11] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005: 5-11.  
YANG Junjie. Similarity theory and structure model test [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005: 5-11. (In Chinese)
- [12] 范祚文, 张子新. 砂卵石地层土压力平衡盾构施工开挖面稳定及邻近建筑物影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2506-2512.  
FAN Zuowen, ZHANG Zixin. Model test of excavation face stability of epb shield in sandy cobble ground and adjacent building effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2506-2512. (In Chinese)
- [13] 方勇, 周超月, 刘书斌, 等. 上覆薄煤层采空区公路隧道开挖稳定性试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(7): 100-107.  
FANG Yong, ZHOU Chaoyue, LIU Shubin, *et al.* Model test of excavation stability for highway tunnel beneath mined-out thin coal seam [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2015, 42(7): 100-107. (In Chinese)
- [14] 陈东海. 砂卵石地层区间隧道盾构施工数值模拟及盾构选型研究[D]. 中南大学土木工程学院, 2013.  
CHEN Donghai. Numerical simulation of shield tunnel construction and the selection of shield in sandy pebble stratum [D]. School of Civil Engineering Central South University, 2013. (In Chinese)
- [15] 崔戈, 徐晨, 郭建宁, 等. 一种用于隧道结构模型试验的均匀水压模拟加载装置: 中国. CN 204101382 U [P], 2014-8-25.  
CUI Ge, XU Chen, GUO Jianning, *et al.* An apparatus to simulate the external water pressure on the model tunnel structure: China. CN 204101382 U, [P], 2014-8-25. (In Chinese)
- [16] 宋玉香, 贾晓云, 朱永全. 地铁隧道竖向土压力荷载的计算研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2240-2244.  
SONG Yuxiang, JIA Xiaoyun, ZHU Yongquan. Study on vertical earth pressure calculation of metro tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2240-2244. (In Chinese)
- [17] 戴志仁, 张莎莎. 考虑黄河冲刷要求的盾构法隧道最小覆土厚度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1712-1720.  
DAI Zhiren, ZHANG Shasha. The minimum buried depth of shield tunnel considering the erosion of yellow river [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1712-1720. (In Chinese)