

DOI: 10.11779/CJGE20220496

# 加载条件下浅埋盾构隧道承载状态定量判定方法

刘学增<sup>1</sup>, 李振<sup>\*1</sup>, 赖浩然<sup>1</sup>, 桑运龙<sup>2,3</sup>, 杨学良<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心, 上海 200092;  
3. 上海同岩土木工程科技股份有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 沿海地区往往地层起伏较大且软硬不均, 由于地层抗力的差异导致盾构隧道结构承载状态存在较大区别, 为此, 通过1:5精细化模型试验, 结合数值模拟研究了不同地层条件下错缝拼装盾构隧道结构承载状态的差异和结构承载状态定量判定方法。研究结果表明: ①竖向荷载作用下结构在试验加载过程中依次发生拱顶管片开裂、拱腰纵缝外侧明显张开、拱顶纵缝外侧混凝土挤压开裂、拱腰外侧和拱顶内侧钢筋屈服、拱底螺栓屈服; ②淤泥层、黏土层和填砂层的管片结构承载演化过程均存在6个关键节点, 但不同地层在管片裂缝、接缝张开、钢筋受力、螺栓受力等方面存在差异; ③根据管片损伤程度将结构承载状态分为4个等级, 确定了各等级对应的竖向收敛和剩余承载力控制值。以粉质黏土层为例, 各等级的竖向收敛控制值为2.0‰D, 3.9‰D, 15.3‰D, 剩余承载力比例控制值为88.0%, 76.9%, 19.7%。研究结论可为沿海城市地铁服役状态的评估提供参考。

**关键词:** 盾构隧道; 承载状态; 模型试验; 数值模拟; 定量判定方法

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)07-1357-08

**作者简介:** 刘学增(1971—), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事隧道加固设计、安全风险评估、健康诊断等方面的研究工作。E-mail: liuxuezeng@tongji.edu.cn。

## Quantitative determination method for bearing state of shallow buried shield tunnel under loading conditions

LIU Xuezeng<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, LAI Haoran<sup>1</sup>, SANG Yunlong<sup>2,3</sup>, YANG Xueliang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Underground Infrastructure Detection and Maintenance Equipment, Shanghai 200092, China; 3. Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In coastal areas, the soil strata often fluctuate greatly and are uneven in softness and hardness. Due to the difference in the resistance of the soil strata, the bearing state of shield tunnel structure varies greatly. The 1:5 fine model tests and numerical simulations are carried out to study the difference of structural bearing state of a staggered jointed shield tunnel under different stratum conditions, and a quantitative determination method for structural bearing state is proposed. The results show that: (1) The obvious cracking of the arch and the lateral opening of the longitudinal seam are obvious at the arch waist position, and the extrusion cracking of the joint outside the arch waist and inside the arch and the yield of the bolt at the bottom of the arch occur successively during the test loading process. (2) There are six critical bearing states in the segment bearing evolution process of silt layer, clay layer and sand-filled layer, but there are differences in the segment cracks, joint openings, reinforcement forces and bolt forces. (3) According to the damage degree of segment, the bearing state is divided into four grades, and the corresponding control values of vertical convergence and residual bearing capacity of each grade are determined. Taking the silty clay layer as an example, the control values of vertical convergence of each grade are 2.0‰D, 3.9‰D, 15.3‰D, and the proportion control values of residual bearing capacity are 88.0%, 76.9%, and 19.7%. The conclusion of this study may provide reference for the evaluation of the service status of metros in coastal cities.

**Key words:** shield tunnel; bearing state; model test; numerical simulation; quantitative determination method

## 0 引言

近年来, 中国部分沿海城市的轨道交通建设事业发展迅猛, 施工主要采用盾构施工工法。沿海地区有

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878497)

收稿日期: 2022-04-25

\*通信作者(E-mail: lz12201314@tongji.edu.cn)

别于其他地区,受海洋环境影响,地层起伏较大且软硬不均<sup>[1]</sup>,隧道穿越淤泥层、黏土层以及砂层等多种地层<sup>[2-5]</sup>,由于地层抗力的差异造成管片结构承载力不同,但目前缺少针对不同地层错缝拼装结构承载状态的定量判定方法。

专家学者们围绕盾构隧道承载状态的判定已开展了部分研究。刘学增等<sup>[6]</sup>采用有限元模拟方法,研究了不同荷载工况下错缝拼装管片结构的承载状态演化规律并提出了变形控制指标;柳献等<sup>[7-8]</sup>采用原型试验系统研究了管片在外荷载作用下的承载状态演化规律;王如路等<sup>[9]</sup>采用数值模拟方法,研究并建立超载作用下通缝拼装管片变形和混凝土受力、螺栓受力及接头张开量的关系,提出隧道横向变形控制指标;张旭辉等<sup>[10]</sup>基于弯矩作用下纵缝力学解析模型,提出以接缝张开量要求、螺栓屈服和结构裂缝为依据的结构横向收敛指标;王志良等<sup>[11]</sup>根据修正惯用法得到螺栓弹性极限状态下的截面弯矩值,进一步推导出管片变形后的曲率,从而可实现通过管片变形限制判断螺栓塑性状态。Wu 等<sup>[12]</sup>基于数值模拟,分析了上部卸载条件下的隧道横向变形响应特征并提出收敛变形控制指标;Li 等<sup>[13]</sup>提出了评价软土地层盾构隧道整体性能的综合判定指标 TSI。

综上所述,针对盾构隧道承载状态的判定已经取得一些成果,提出了诸多性能控制指标,对隧道安全服役具有重要意义,研究方法以数值模拟和理论推导居多,而试验类研究,尤其是错缝拼装盾构隧道精细化模型试验研究尚少。基于此,本文开展 1:5 精细化模型试验和有限元计算,系统研究不同地层条件下的错缝拼装管片承载状态演化规律,提出基于竖向收敛和剩余承载力的管片承载状态定量判定方法,以期为沿海城市地铁服役状态的评估提供参考。

## 1 模型试验

为探究错缝拼装盾构隧道在外荷载作用下的承载状态演化规律,设计并开展 1:5 精细化模型试验。

### 1.1 原型和相似比设计

依托工程为中国东部沿海地区某盾构隧道工程,埋深约 10.0 m,隧址区分布有黏土层、填砂层和淤泥层。管片衬砌外径 6700 mm,内径 6000 mm,厚度 350 mm。结构材料为 C55 混凝土和 HRB400 钢筋。衬砌由 6 块宽度 1500 mm 的管片组成,包括 1 个关键块 (K)、2 个邻接块 (B1、B2)、3 个标准块 (L1、L2、L3)。每条纵缝和环缝分别由 2 个环向螺栓 (M30) 和 16 个纵向螺栓 (M30) 连接。各环采用错缝拼装方式,环间错动 45°。整环衬砌构造如图 1 所示。

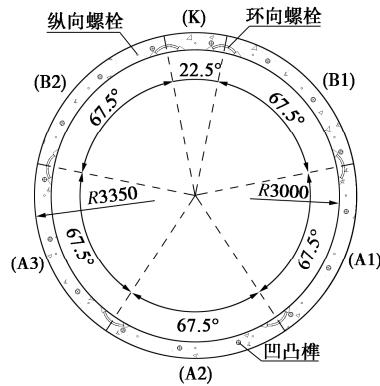


图 1 整环衬砌构造

Fig. 1 Integral ring lining structure

将几何相似比  $C_L = 1:5$ 、重度相似比  $C_\gamma = 1:1$  作为基础相似比,通过量纲分析确定其他相似比如表 1 所示。

表 1 相似比设计汇总

Table 1 Summary of similarity ratio design

物理量	相似比
几何尺寸 $C_L$	1:5
位移 $C_\delta$	1:5
弹性模量 $C_E$	1:5
泊松比 $C_\mu$	1
应力 $C_\sigma$	1:5
轴力 $C_N$	1:125
弯矩 $C_M$	1:625
弹性抗力系数 $C_k$	1

### 1.2 精细化试验模型

#### (1) 管片衬砌结构模型

本试验以“1/2+1+1/2”三环管片模型为研究对象。为精细模拟手孔及接缝构造,采用整环分隔式模具进行管片浇筑,如图 2。手孔为 3D 打印的铝合金材料,并通过放样的方式焊接于内膜上。接头采用机械加工的 M6 螺栓连接,严格满足几何相似比。管片内部钢筋骨架由铁丝绑扎而成。结构及材料参数如表 2 所示。

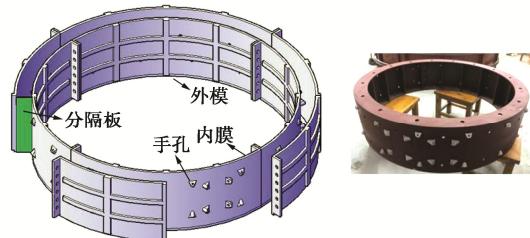


图 2 整环分隔式模具

Fig. 2 Whole ring split mould

#### (2) 地层作用模拟

采用多环盾构隧道模型加载装置来模拟地层压力及抗力作用。该装置由 12 个水平加载设备和 6 个垂直加载设备组成,如图 3。各加载设备包括液压千斤顶、

表 2 结构及材料参数

Table 2 Structural and material parameters

名称	管片外径/m	管片厚度/m	管片宽度/m	混凝土抗压强度/MPa	混凝土弹性模/GPa	钢筋直径/mm	钢筋屈服强度/MPa	螺栓直径/mm	螺栓屈服强度/MPa
原型	6.70	0.35	1.5	50	35.50	25	400	30	640
模型	1.34	0.07	0.3	9.88	6.28	5	65	6	110
比例	5.00	5.00	5.0	5.1	5.70	5.0	6.2	5.0	5.8

地层弹簧、荷载分配钢板。地层弹簧的选型需满足管片变形要求, 力学性能参数为: 极限压力为 2930 N, 最大压缩量为 30.28 mm, 刚度为 96.7 N/mm。

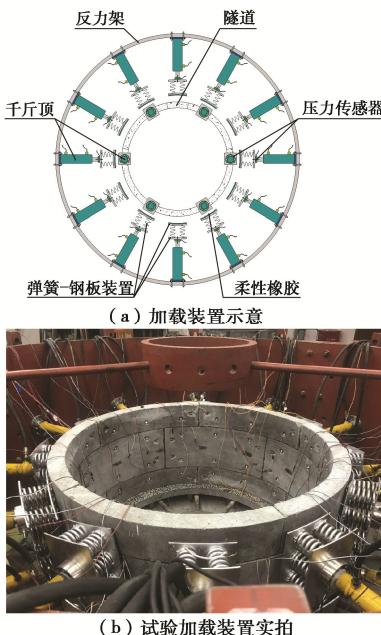


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading device

试验采用卧式静力全周加载方式。根据实际工程荷载分布特点, 将衬砌结构外表面分为 8 个区域, 并分别施加外荷载  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , 满足  $P_2 = 0.72P_1$ ,  $P_3 = 0.5(P_1 + P_2)$ , 荷载分布示意如图 4。在环向加载前, 将顶部 6 个千斤顶均加载至 1200 N, 以模拟盾构机残余顶力。在管片底部设置有滑动钢珠以避免与底座的摩擦, 保证管片在水平面方向自由变形。

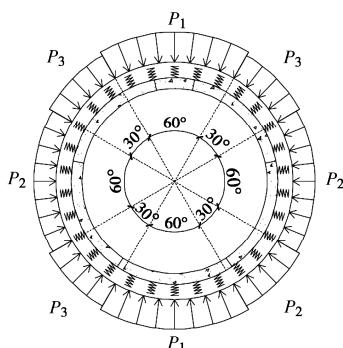
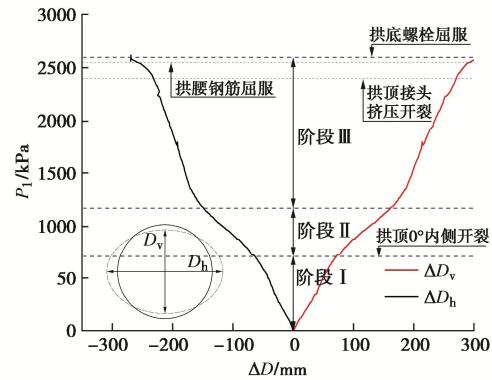


图 4 荷载分布示意

Fig. 4 Diagram of load distribution

### 1.3 测试及结果分析

图 5 为荷载  $P_1$  和管片变形  $\Delta D$  的关系曲线。 $\Delta D_v$  和  $\Delta D_h$  分别为垂直和水平方向的隧道外径变化量。

图 5 荷载  $P_1$  和管片变形  $\Delta D$  的关系曲线 (原型)Fig. 5 Relation curve between load  $P_1$  and segment deformation  $\Delta D$ 

根据结构变形和受力特征, 将管片破坏过程划分为 3 个阶段。

a) 阶段 I: 初始加载—管片明显开裂 (0~710 kPa)。

在本阶段初期, 由于荷载较小, 结构处于弹性阶段, 坚向收敛变形随加载呈线性发展。管片无明显损伤, 结构完整性良好。至本阶段后期, 中环内弧面 0° 位置的拉应变突增且超过一般混凝土极限拉应变, 当加载至 710 kPa, 该位置开始出现肉眼可见的明显裂缝 (如图 6 的裂缝 1), 此时管片坚向收敛变形 72.5 mm (10.8% $D$ )。

b) 阶段 II: 管片明显开裂—拱腰弹簧完全压缩 (710~1170 kPa)。

在本阶段初期, 管片裂缝进一步发展, 裂缝规模和密度增加, 截面刚度明显削弱, 管片变形速度提高。管片开裂区 (如中环 0° 内弧面和 270° 外弧面) 主要由钢筋承受拉应力, 造成钢筋应力近线性快速增长。在本阶段后期, 弹簧预留压缩量不足导致边界约束增强, 管片变形、钢筋应力及接缝张开量增速放缓。当加载至 1170 kPa, 边界弹簧完全压缩, 拱腰纵缝外侧最大张开量约 4.0 mm, 管片坚向收敛变形 162.5 mm (24.2% $D$ )。

c) 阶段 III: 拱腰弹簧完全压缩—结构失效 (1170~2600 kPa)。

随荷载增大, 管片裂损程度增加, 钢筋和螺栓应

力进一步提高,而接头变形量基本保持不变。当加载至 2400 kPa,接头外侧产生多条挤压裂缝,如图 7。随管片刚度不断削弱,拱腰外侧和拱顶内侧的钢筋以及拱底螺栓相继屈服,结构在加载至 2600 kPa 时失效,管片竖向收敛变形 293.0 mm (43.7%*D*)。



图 6 管片内弧面 0° 位置裂缝实拍

Fig. 6 Photo of crack at 0° of segment camber

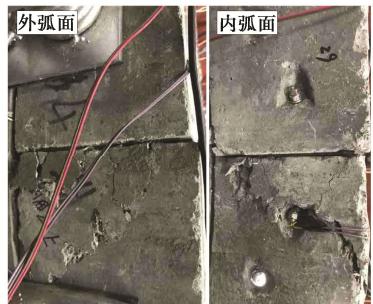


图 7 接头裂缝分布实拍

Fig. 7 Photo of distribution of joint cracks

## 2 数值模拟

受成本、人力限制,无法开展多工况精细化模型试验研究,并且 1.2 (2) 节所述装置在实现地层抗力方面尚存在局限性。为揭示不同地层条件下管片结构的承载状态演化规律,建立管片变形、螺栓和钢筋应力、接缝张开量与结构承载状态的对应关系,在模型试验基础上开展多工况数值模拟研究。

### 2.1 计算模型及参数

采用有限元软件 ABAQUS 建立错缝拼装管片衬砌结构的三维计算模型,如图 8 所示。管片采用 C3D8R 单元模拟,管片之间设置接触,摩擦因子取 0.6<sup>[14]</sup>。钢筋和螺栓采用 T3D2 单元模拟,并通过嵌入方式建立与混凝土间相互作用关系。混凝土采用塑性损伤本构,应力应变曲线参照《混凝土结构设计规范: GB 50010—2010》<sup>[15]</sup>确定,参数见表 3。混凝土受压损伤程度由 DAMAGEC 表征,取值介于 0~1.0。当 DAMAGEC 取值超过 0.9 时,认为混凝土基本失效<sup>[16]</sup>。钢筋和螺栓采用理想弹塑性本构,当应力达到屈服强度后不再增长,参数同表 2。在模型的前后端面设置 Z

向位移约束。

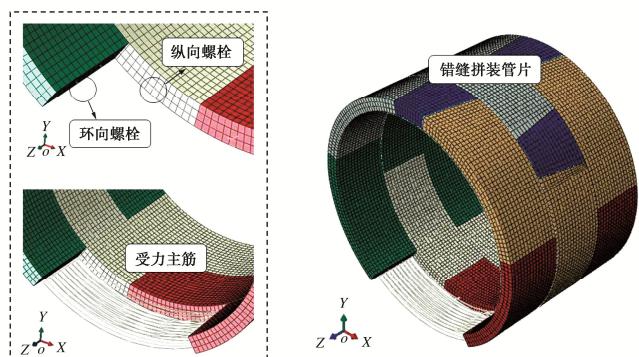


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

表 3 混凝土损伤塑性模型参数

Table 3 Parameters of plastic model for damage of concrete

剪胀角/ (°)	流动势偏 移量	双轴受压与单 轴受压极限强 度比	不变量应 力比	黏滞系数
30	0.1	1.16	0.667	0.0005

数模拟采用的加载方式与试验相同。将管片环外侧同样划分成 8 个区域,并分别施加相应荷载。地层采用非线性弹簧单元模拟,即仅能承压而不能承拉,并设置切向弹簧来约束结构旋转。非线性弹簧连接于结构外表面的网格节点处。弹簧刚度取决于地层抗力系数:

$$K = \frac{k \cdot S}{n} \quad . \quad (1)$$

式中: *S* 为衬砌结构分块的外表面积; *n* 为对应区域的网格节点数量; *k* 为地层抗力系数。

### 2.2 模型验证

为验证计算模型的准确性,得到管片位移变化曲线并与试验数据对比,如图 9 所示。对比可知:弹簧完全压缩(对应 1170 kPa)改变了管片外侧的约束条件,导致后续试验曲线与数值模拟曲线存在较大差异。在弹簧完全压缩前,数值模拟曲线与试验曲线较接近,说明计算模型可基本反映管片衬砌的变形特征。另外,试验加载过程中陆续出现的拱顶内侧开裂、拱腰外侧钢筋屈服、拱部环向螺栓屈服等损伤行为在数值模拟结果中也均有体现。因此,采用 2.1 节提出的计算模型分析管片在全加载过程的承载状态演化规律具备足够的合理性。

### 2.3 研究工况

依托工程沿线可能穿越淤泥、填砂、粉质黏土三种地层。由于覆土层厚度未超过 1.5 倍隧道直径,采用全覆土柱理论计算土压力<sup>[6]</sup>,地层条件对管片承载和变形的影响主要体现于侧压力系数和地层抗力系数。为揭示不同地层条件下管片结构的承载状态演化

规律, 建立损伤特征和承载状态的定量关系, 设置3组计算工况, 如表4。地层抗力系数和侧压力系数根据现场地勘资料确立。

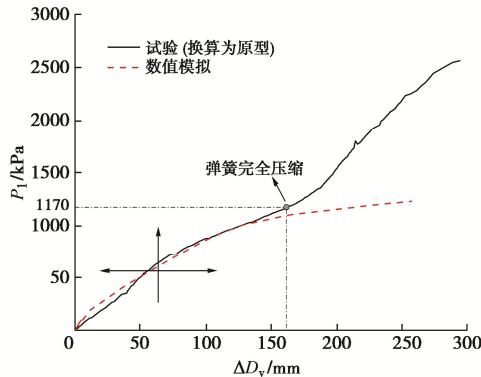


图9 模型试验结果与计算结果对比

Fig. 9 Comparison between model test and calculated results

表4 计算工况

Table 4 Working conditions

工况编号	地层抗力系数 $k/(MPa \cdot m^{-1})$	侧压力系数 $m$	地层岩性
No.1	5	0.72	淤泥
No.2	25	0.32	粉质黏土
No.3	15	0.52	填砂

### 3 错缝拼装隧道结构破坏规律

#### 3.1 淤泥层管片承载状态演化规律

隧道穿越淤泥质地层时, 结构上覆荷载值为190 kPa, 侧向荷载值为136.8 kPa。由初始状态加载至设计荷载, 管片竖向收敛变形7.0 mm, 水平扩张变形6.3 mm, 衬砌结构呈“横鸭蛋”状。图10为设计荷载作用下的管片承载状态。如图10(a), 隧道顶、底部的混凝土最大拉应力达1.67 MPa, 尚未超过抗拉强度。如图10(b), 中环拱顶承受较大的正弯矩, 导致该处钢筋受力相对明显, 最大拉应力约16.7 MPa。根据《盾构隧道工程设计标准: GB/T 51438—2021》<sup>[17]</sup>规定, 管片裂隙最大宽度允许值为0.2 mm。按照规范<sup>[15]</sup>提供的公式对拱顶内侧裂隙宽度进行验算, 其满足限值要求。如图11(c), 侧环拱腰部位承受负弯矩, 造成接缝外侧张开较明显, 最大张开量不足0.2 mm, 满足规范<sup>[17]</sup>规定的4 mm限值要求。

随荷载增加, 管片承载状态逐渐演化, 如图11。其中, 剩余承载力为结构极限承载力(取2426 kPa)与 $P_1$ 之差。当 $P_1$ 增至366.3 kPa, 管片竖向收敛变形为13.4 mm, 达到规范<sup>[17]</sup>规定的2.0% $D$ 限制要求。当 $P_1$ 增至823 kPa, 拱顶内侧裂隙达0.2 mm的限宽要求。当 $P_1$ 增至1906 kPa, 钢筋发生屈服。当 $P_1$ 增至2404 kPa, 负弯矩作用造成拱腰接缝外侧张开量达4 mm的

限制要求。当 $P_1$ 达到2426 kPa, 拱顶附近钢筋达极限拉应变0.01, 且外侧混凝土大面积压溃(DAMAGEC超过0.95), 标志着结构达到极限承载状态。

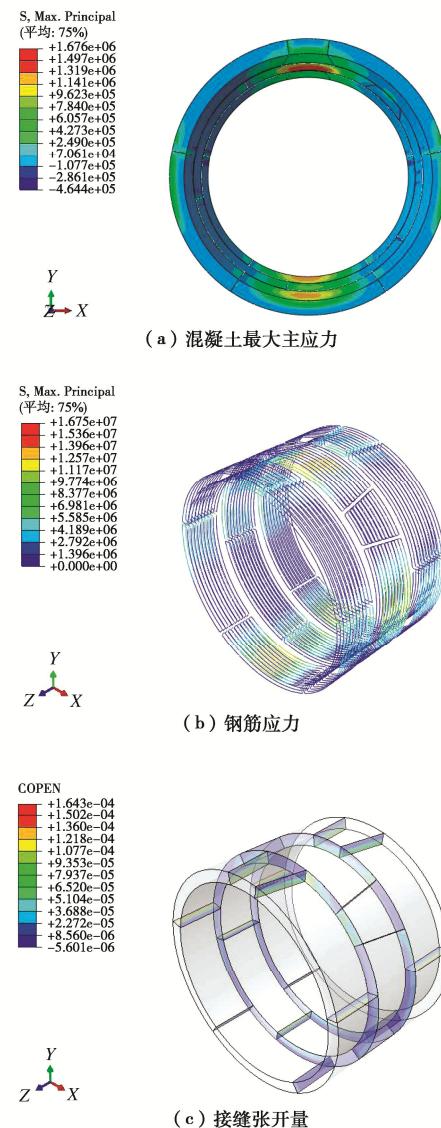


图10 设计荷载作用下管片承载状态

Fig. 10 Bearing states of segment under design load

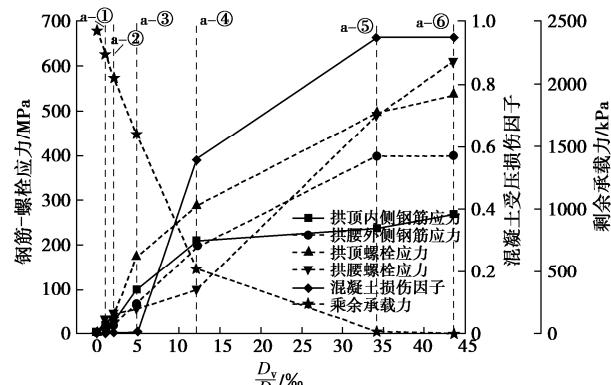


图11 淤泥层管片承载状态与竖向收敛变形对应曲线

Fig. 11 Corresponding curves of bearing state and vertical convergent deformation of segments located in silt strata

综合上述分析, 提出淤泥层错缝拼装隧道管片的 6 个临界承载状态: a-①设计荷载作用下的管片承载状态; a-②管片竖向收敛变形达  $2\%D$  (管片外径); a-③拱顶、底内侧或拱腰外侧裂缝发展至 0.2 mm; a-④拱顶内侧或拱腰外侧钢筋屈服; a-⑤拱腰接缝外侧张开量达 4 mm; a-⑥拱顶发生大偏心受压破坏, 结构失效。

### 3.2 填砂及黏土层管片承载状态演化规律

当隧道穿越黏土地层时, 由于地层抗力系数相对较大, 拱腰外侧受较强的变形约束作用, 导致结构承载能力提高。结构失效由拱顶大偏心受压破坏造成, 而拱腰外侧钢筋及螺栓在结构失效前未屈服。图 12 为黏土层管片承载状态与竖向收敛变形对应曲线。结合图 12 可知, 结构承载状态发展过程具体为: 设计荷载作用下, 管片竖向收敛 7.9 mm, 结构无损伤。当  $P_1$  增至 315 kPa, 管片竖向收敛达  $2\%D$  限制要求。当  $P_1$  增至 605 kPa, 拱顶内侧管片裂缝宽度达 0.2 mm。当  $P_1$  增至 2108 kPa, 拱顶、底内侧钢筋几乎同时屈服, 拱腰外侧钢筋应力仅 153 MPa。当  $P_1$  增至 2619 kPa, 左拱肩位置的纵缝张开量达 4 mm 限制要求, 各处纵缝均无明显张开。当  $P_1$  增至 2625 kPa, 拱顶内侧钢筋达极限拉应变 0.01, 外侧混凝土大面积压溃, 结构达到极限承载状态。

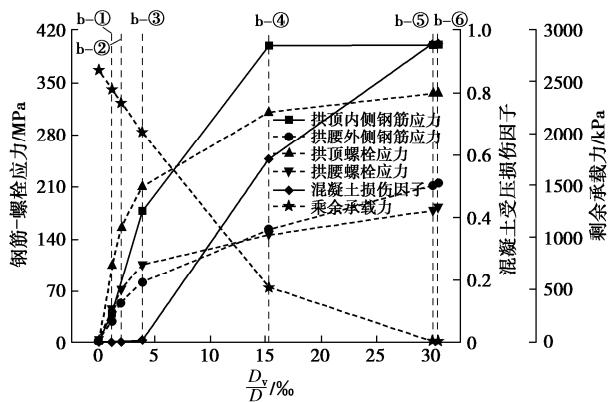


图 12 黏土层管片承载状态与竖向收敛变形对应曲线

Fig. 12 Corresponding curves of bearing state and vertical convergent deformation of segments located in clay strata

综合上述分析, 提出黏土层错缝拼装管片的 6 个临界承载状态: b-①设计荷载作用下的管片承载状态; b-②管片竖向收敛变形达  $2\%D$ ; b-③拱顶内侧裂缝发展至 0.2 mm; b-④拱顶、底内侧钢筋屈服; b-⑤左拱肩处纵缝张开量达 4 mm; b-⑥拱顶发生大偏心受压破坏, 结构失效。

当隧道穿越填砂地层时, 管片承载状态发展规律与穿越黏土地层时基本一致, 但临界承载状态对应的荷载及变形存在差异。图 13 为填砂层管片承载状态与竖向收敛变形对应曲线。结合图 13 可知, 结构承载状

态发展过程具体为: 设计荷载作用下, 管片竖向收敛 8.2 mm, 结构无明显损伤。当  $P_1$  增至 343 kPa, 管片竖向收敛达  $2.0\%D$  限制要求。当  $P_1$  增至 827 kPa, 拱顶内侧管片裂缝宽度达 0.2 mm。当  $P_1$  增至 2318 kPa, 拱顶、底内侧钢筋屈服, 拱腰外侧钢筋应力为 216 MPa。当  $P_1$  增至 2653 kPa, 左拱肩位置的纵缝张开量达 4 mm 限制要求, 各处纵缝闭合良好。当  $P_1$  达到 2664 kPa, 拱顶内侧钢筋拉断, 外侧混凝土压溃, 标志着结构达到极限承载状态。

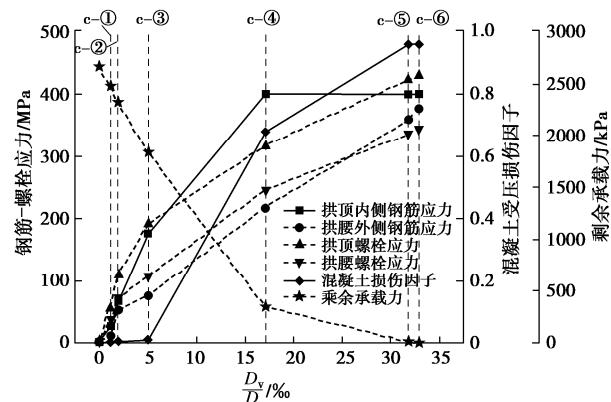


图 13 填砂层管片承载状态与竖向收敛变形对应曲线

Fig. 13 Corresponding curves of bearing state and vertical convergent deformation of segments located in filling sand strata

### 4 管片承载状态定量判定方法

本文根据管片承载状态发展演化规律, 将承载状态分为 4 个等级。各等级特征如下。

等级 I: 管片结构承载状态良好, 无明显结构损伤, 结构变形、裂缝宽度、接缝张开量等均满足控制要求。该等级对应 3 种地层条件下管片初始状态—临界承载状态②。

等级 II: 管片收敛变形逾  $2.0\%D$ , 超过行业标准<sup>[17]</sup>, 但尚未影响承载性能和运营安全。该等级对应 3 种地层条件下管片临界承载状态②~③。

等级 III: 管片裂缝宽度逾 0.2 mm, 导致内部钢筋耐腐蚀性变差, 对结构的耐久性和承载性能造成负面影响。该等级对应 3 种地层条件下管片临界承载状态③~④。

等级 IV: 主要承载构件 (钢筋和螺栓) 达到屈服强度, 结构进入塑性阶段, 短期刚度降低, 承载性能变差, 结构整体变形的非线性特征趋于明显; 或管片接缝张开量逾 4 mm, 可能伴随渗漏水、局部混凝土压溃等问题, 影响隧道结构和运营安全。该等级对应 3 种地层条件下管片临界承载状态④~⑥。

当管片承载状态处于等级 I, 结构服役状态正常, 可不做处理; 当处于等级 II, 应加强管片变形监测, 若变形继续发展, 需及时预警并做处理; 当处于等级

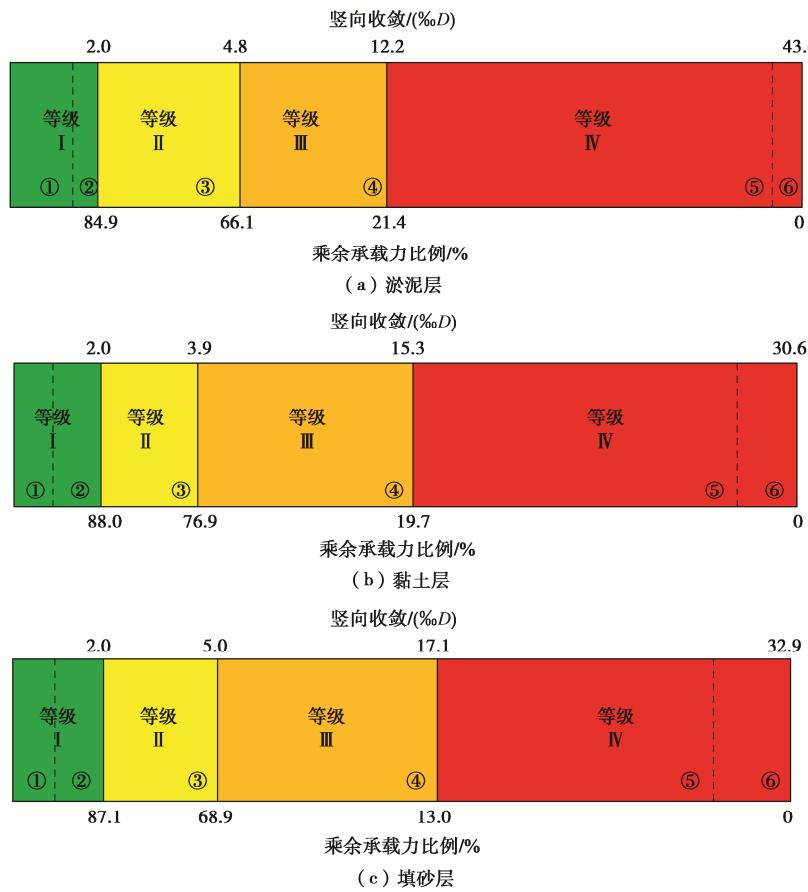


图 14 不同地层错缝拼装盾构隧道管片承载状态定量判定指标

Fig. 14 Quantitative evaluation index of segmental bearing state of staggered shield tunnel in different strata

III, 需封堵结构表面开裂部位, 避免造成钢筋锈蚀;  
当处于等级IV, 需对结构进行及时加固。

基于前述分析, 确定管片结构各承载等级对应的判定指标量化值, 如图 14 所示。图 14 将管片竖向收敛变形和剩余承载力作为管片承载状态的定量判定指标, 确定了不同承载状态对应的竖向收敛和剩余承载力的量值区间。根据管片变形或荷载检测数据, 可大致判断结构承载状态, 避免了以往判定方法存在的检测项目繁多、内部损伤检测难度大等问题, 对于提高沿海隧道管片健康度的判定效率, 降低检测成本有积极意义。

## 5 结 论

本文通过开展 1:5 精细化模型试验和数值模拟, 研究了沿海不同地层条件下的错缝拼装盾构隧道结构承载状态演化规律, 提出结构承载状态定量判定方法, 得到以下 4 点结论。

(1) 试验加载过程中, 管片依次发生拱顶开裂、拱腰纵缝外侧张开、拱顶纵缝外侧挤压开裂、拱腰外侧和拱顶内侧钢筋屈服、拱底螺栓屈服。在边界弹簧完全压缩前, 数值模拟和试验得到的管片变形曲线较接近, 且数值模拟结果可基本反映试验中的损伤现象,

说明采用本文计算模型分析管片承载状态演化规律具备参考价值。

(2) 淤泥层、黏土层和填砂层的错缝拼装管片承载演化过程均存在 6 个临界承载状态。由于地层抗力系数和侧压力系数不同, 不同地层的管片在裂缝和接缝明显张开、主要承拉构件屈服等损伤行为的发生位置及对应的管片变形和剩余承载力不同。

(3) 根据管片承载状态发展演化规律, 将承载状态分为 4 个等级: 等级I, 管片结构承载状态良好且无明显损伤; 等级II, 管片收敛变形逾  $2.0\%D$ ; 等级III, 管片裂缝宽度逾  $0.2\text{ mm}$ , 结构耐久性变差; 等级IV, 主要承载构件达屈服强度或接缝张开量逾  $4\text{ mm}$ 。

(4) 明确了 3 种地层条件下管片各承载等级对应的竖向收敛和剩余承载力控制值, 提出基于管片竖向收敛和剩余承载力的管片承载状态定量判定方法, 可提高隧道管片状态的判定效率, 降低检测成本。

本文提出的错缝拼装管片承载状态定量判定方法的工程实用价值尚需验证; 本文采用全覆土柱理论计算地层压力, 适用于浅埋软土隧道, 而对于深埋或硬质地层环境, 如何合理利用所提判定方法尚需进一步探讨。

## 参考文献:

- [1] 朱珂雨. 沿海地区高速铁路环境选线方案优选研究[D]. 西

- 南交通大学, 2020. (ZHU Keyu. Investigation of the Optimized Environmental Route Selection Scheme of the High-Speed Railway in the Coastal Regions[D]. Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [2] 周洁, 任君杰. 沿海组合地层人工冻结过程中的水分迁移及变形特性[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 675-683. (ZHOU Jie, REN Junjie. Water migration and deformation characteristics of coastal complex strata in artificial freezing process[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(5): 675-683. (in Chinese))
- [3] 施有志, 王晨飞, 赵花丽, 等. 海底盾构隧道掘进过程数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1887-1897. (SHI Youzhi, WANG Chenfei, ZHAO Huali, et al. Numerical simulation of subsea shield tunneling process[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1887-1897. (in Chinese))
- [4] 徐军政. 厦门地铁3号线跨海段主要工程地质问题及地质选线[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(11): 18-23. (XU Junzheng. Major problems in geological engineering and alignment of Xiamen metro line 3 cross-sea section[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(11): 18-23. (in Chinese))
- [5] 徐前卫, 唐卓华, 朱合华, 等. 盾构隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1234-1240. (XU Qianwei, TANG Zhuohua, ZHU Hehua, et al. Limit support pressure at excavation face of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1234-1240. (in Chinese))
- [6] 刘学增, 蔡光远, 杨帆, 等. 破碎围岩错缝拼装盾构隧道结构承载性能与变形控制指标[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 57-65. (LIU Xuezeng, CAI Guangyuan, YANG Fan, et al. Structural bearing behavior and deformation controlling indicators for staggered jointed shield tunnel lining in fractured surrounding rock[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 57-65. (in Chinese))
- [7] 柳献, 张蛟龙, 蒋子捷, 等. UHPC 加固盾构隧道衬砌结构试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 181-190. (LIU Xian, ZHANG Jiaolong, JIANG Zijie, et al. Experimental investigations of a segmental tunnel ring strengthened by using UHPC[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 181-190. (in Chinese))
- [8] 柳献, 赵子蓬, 叶宇航, 等. 类矩形盾构隧道结构极限承载力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 1283-1295. (LIU Xian, ZHAO Zipeng, YE Yuhang, et al. Ultimate bearing capacity analysis of quasi-rectangular shield tunnel structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(9): 1283-1295. (in Chinese))
- [9] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1092-1101. (WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092-1101. (in Chinese))
- [10] 张旭辉, 杨志豪, 洪弼宸, 等. 盾构隧道结构健康评价的变形指标研究[J]. 地下工程与隧道, 2014(4): 7-13, 53. (ZHANG Xuhui, YANG Zhihao, HONG Bichen, et al. Study on deformation index of shield tunnel structural health evaluation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2014(4): 7-13, 53. (in Chinese))
- [11] 王志良, 申林方, 刘国彬, 等. 基于弹性极限理论的盾构隧道收敛变形研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(2): 100-103. (WANG Zhiliang, SHEN Linfang, LIU Guobin, et al. Research on convergence deformation of shield tunnel with elastic limit theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(2): 100-103. (in Chinese))
- [12] WU H N, CHEN S, CHEN R P, et al. Deformation behaviors and failure mechanism of segmental RC lining under unloading condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 130: 104687.
- [13] LI X J, LIN X D, ZHU H H, et al. Condition assessment of shield tunnel using a new indicator: the tunnel serviceability index[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 98-106.
- [14] 刘庭金, 黄鸿浩, 许饶, 等. 粘贴钢板加固地铁盾构隧道承载性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 91-99. (LIU Tingjin, HUANG Honghao, XU Rao, et al. Research on load-bearing capacity of metro shield tunnel lining strengthened by bonded steel plates[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 91-99. (in Chinese))
- [15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [16] LI X Q, ZHANG T, DING Z D, et al. Numerical analysis of normal concrete lining strengthening methods under different damage levels[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(12): 1597-1611.
- [17] 盾构隧道工程设计标准: GB/T 51438—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021. (Standrd for Design of Shield Tunnel Engineering: GB/T 51438—2021[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2021. (in Chinese))