

刘麟. 管片-豆砾石-围岩组合结构承载特性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 39-45.

LIU Lin. Analysis of the bearing characteristics of the segment-bean gravel-surrounding rock combination structure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 39-45.

# 管片-豆砾石-围岩组合结构承载特性分析

刘 麟

(湖北省水利水电科学研究院 水利水电科技推广中心, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 管片-豆砾石-围岩组合结构是TBM有压输水隧洞的主要承载结构,以湖北某输水隧洞TBM段为研究对象,建立管片-豆砾石-围岩组合结构三维有限元数值分析模型,研究考虑开挖荷载释放影响条件下组合结构内压承载特性。结果表明:考虑部分开挖荷载释放情况下管片整体应力、接缝开度、螺栓应力均较小,更有利于管片承担内水压力;斜螺栓附近为裂缝出现主要位置,是否考虑开挖荷载释放会影响裂缝分布;内水压力作用下,楔形封顶块位置会影响管片螺栓的应力分布,靠近封顶块同一接缝处螺栓应力差异明显;组合结构中内水压力主要由围岩承担,豆砾石几乎不承担内水压力,管片仅在内水压力较小时承担少量内水压力。

**关键词:** 管片-豆砾石-围岩组合结构; TBM; 承载特性; 内水压力; 围岩

**DOI:** 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.008

中图分类号: TV672+.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0039-07

## Analysis of the bearing characteristics of the segment-bean gravel-surrounding rock combination structure

LIU Lin

(Hubei Water Resources and Hydropower Science and Technology Information Center, Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** The combined structure of segment-bean gravel-surrounding rock is the main bearing structure of TBM with pressure water transmission tunnel. Taking the TBM section of the water transmission tunnel in Hubei as the research object, the three-dimensional finite element numerical analysis model of segment-bean gravel-surrounding rock combined structure is established, and the internal pressure bearing characteristics of the combined structure under the influence of excavation load release are considered. The result show that considering the overall stress, joint opening and bolt stress in the case of partial excavation load release, it is more beneficial to the segment to bear the inner water pressure; the main location near the inclined bolt will affect the crack distribution; the wedge cap affects the stress distribution of the segment bolt under the inner water pressure, and the internal water pressure under the inner water pressure.

**Keywords:** segment-bean gravel-surrounding rock combination structure; TBM; bearing characteristic; inner water pressure; surrounding rock

收稿日期: 2024-09-22

作者简介: 刘 麟(1976—),女,高级工程师,硕士,主要从事水工结构设计工作。E-mail: 444532802@qq.com

## 0 引言

水工隧洞区别于交通隧洞,往往需要承受较大的内水压力,衬砌与围岩等承载结构受力情况也更加复杂。传统的人工钻爆工法面临严峻的挑战与巨大的风险,TBM掘进法因其独特优势逐渐成为长距离引调水工程的重要选择,管片-豆砾石-围岩组合结构成为TBM隧洞的承载主体。管片-豆砾石-围岩组合结构受力比较复杂,且往往决定着工程成败,因此,对TBM有压输水隧洞管片-豆砾石-围岩组合结构的内压承载特性研究具有重要意义。

目前,输水隧洞多为无压隧洞,相关衬砌结构的研究已取得丰富的成果,而有压输水隧洞管片衬砌的研究相对较少。刘庭金等<sup>[1]</sup>开展了衬砌结构在内外载联合作用下的原型试验,研究外衬管片-自密实混凝土填充层(SCC)-内衬钢管组合衬砌结构的承载性能及破坏机理;孟庆辉等<sup>[2]</sup>对复合衬砌壳-弹簧模型进行改进,对内水压作用下双层衬砌结构力学行为进行分析;何灏典等<sup>[3]</sup>针对复合式双层衬砌开展了原位加载试验与三维有限元数值仿真,分析了结构的联合承载性能及受力变形规律;周龙等<sup>[4]</sup>对不同埋深的通缝和错缝拼装盾构衬砌结构在内水压作用下的力学响应开展研究,分析了内水压力、隧道埋深和衬砌拼装方式对盾构衬砌承载特性的影响规律;莫键豪<sup>[5]</sup>等针对隧洞单层衬砌结构开展了原位试验研究与三维有限元数值仿真,揭示了该结构在真实地层条件下承受内压的受力变形规律;张建伟等<sup>[6]</sup>基于内张钢圈-管片-围岩组合结构三维有限元模型,研究内水压力、围岩类型对组合结构力学特性的影响。

可以看出,现有针对内水压力作用下衬砌力学承载特性研究仍存在不足。在相关足尺实验与数值模拟过程中,为了方便计算,大多对于隧洞外侧土体进行简化,通过设置全周受压弹簧模拟围岩约束或以千斤顶进行等比例加压模拟围岩荷载,不能较好的模拟实际围岩荷载作用;而在TBM隧洞施工过程中,还需要考虑施工开挖围岩应力释放问题,即开挖洞周变形与围岩应力重分布,使隧洞衬砌结构应力分布发生改变。目前大部分有关TBM隧洞内水压承载特性分析中并没有考虑施工开挖过程中围岩初始地应力释放的影响。

鉴于此,本文以湖北某输水隧洞为例,构建管片-豆砾石-围岩组合结构的三维有限元模型,采用能反映混凝土开裂软化特性的塑性损伤模型,考虑施工开挖过程中围岩的应力释放,分析组合结构的内压

承载特性以及施工开挖产生的影响,以期为工程实践中类似衬砌结构的设计选型和结构优化提供参考。

## 1 基本理论

### 1.1 围岩特征曲线(GRC)

围岩特征曲线(GRC)反映隧洞开挖后开挖面位移与洞壁支护力的关系<sup>[14]</sup>,如图1所示。图中 $\sigma_0$ 为初始洞壁支护力, $u_M$ 为围岩位移最大值。随着围岩位移的增大,围岩应力逐渐释放,整体围岩特征曲线可分别为两部分,围岩应力开始释放时,此时洞周围岩为弹性阶段,开挖面变形量较小;围岩应力释放一定程度后,洞周围岩进入塑性阶段,开挖面变形量较大,当围岩应力完全释放后围岩位移达到最大值。

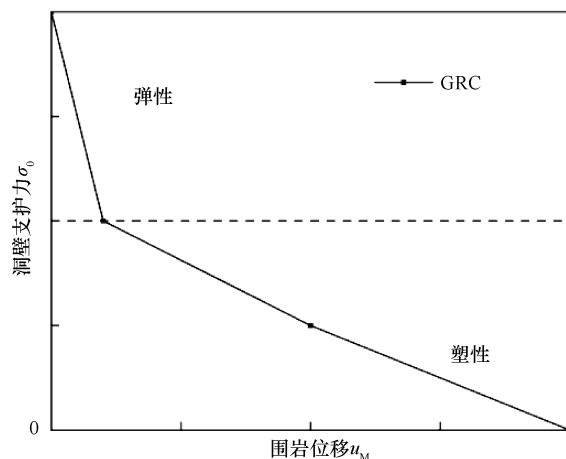


图1 围岩特征曲线(GRC)示意

### 1.2 混凝土塑性损伤模型(CDP)

混凝土塑性损伤模型是基于塑性应变描述混凝土破坏的连续损伤模型<sup>[15]</sup>,反映材料不可逆的损伤、软化和刚度退化特性,无需假定裂缝位置即可得到混凝土构件各部位的损伤开裂状态,该模型在工程分析中应用广泛。假定混凝土的主要破坏形式为拉裂和压碎,混凝土屈服面由等效塑性应变 $\varepsilon$ 决定,等效塑性应变表达式为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \sigma / [(1 - d)G] \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 、 $\varepsilon_0$ 和 $G$ 分别为混凝土应力、应变和初始弹性模量; $d$ 为混凝土损伤因子。在混凝土达到破坏应力 $\sigma_f$ 之前,应力应变曲线为直线,在应力高于破坏应力后出现材料软化,模型使用损伤因子 $d$ 描述该现象, $d$ 的取值范围为0~1。

## 2 工程背景与计算模型

### 2.1 工程背景

以湖北某输水隧洞TBM段为例,断面如图2所

示。隧洞埋深 76 m, 开挖洞径  $D=3.8$  m, 采用预制管片衬砌, 管片为“3+2+1”分块形式, 包含一个封顶块(K), 两个邻接块(B1、B2), 三个标准块(A1、A2、A3), 管片与围岩之间回填豆砾石并灌浆, 管片内设置有斜螺栓, 围岩打入系统锚杆作为支护。

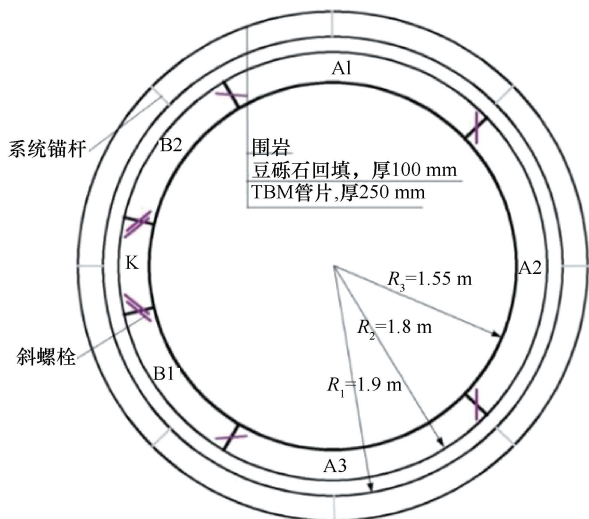


图2 细部构造断面

## 2.2 有限元模型

利用 ABAQUS 建立如图 3 所示的围岩-豆砾石-管片组合结构模型, 岩体长宽均取为 7 倍洞径<sup>[17]</sup>, 轴向长度取为单管片宽度, 岩体侧面采用法向约束, 底面采用全约束, 上部未建部分岩体采用压强形式施加在岩体模型顶面。岩体、豆砾石、管片均采用使用三维实体单元模拟, 系统锚杆与斜螺栓采用埋入式杆单元模拟。本文建立了管片接头间、管片与豆砾石灌浆料界面的面面接触单元、管片接头摩擦系数取 0.5, 管片与豆砾石界面摩擦系数取 0.8。豆砾石与围岩界面采用绑定约束。模型材料力学参数如表 1 所列, 管片采用混凝土塑性损伤 CDP 模型, 围岩采用摩尔库伦本构模型, 豆砾石、系统锚杆、斜螺栓均采

用弹性本构模型。由于本文主要考虑内水压力作用下结构的承载特性, 故不考虑管片重力和外水压力。

表 1 材料力学参数

材 料	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性 模量/GPa	泊松比	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa
围 岩	2 600	5	0.3	34.99	500
C50	2 750	34.5	0.167	—	—
豆砾石	2 650	3	0.27	—	—
锚 杆	7 850	206	0.3	—	—
螺 栓	7 850	206	0.3	—	—

## 3 初次支护时机的选择

在模拟隧洞开挖过程中, 本文基于虚拟支撑力理论, 对三维有限元模型采用一次挖穿分期释放的模拟方法, 通过一次性挖穿得到隧洞开挖后开挖面围岩瞬时的开挖荷载等效节点力, 将等效节点力作为支反力施加于开挖面洞壁相应节点位置处, 通过 ABAQUS 中幅值的形式对该分支反力进行等比例释放, 每次释放 10%, 模拟开挖过程中围岩随时间的变形情况。

选取开挖面洞顶洞底洞腰位置为测点位置, 分别为 P1—P4, 记录变形最大的洞顶测点 P1 的变形情况, 如图 4 所示。随着开挖荷载的逐步释放, 围岩变形逐渐增大, 且在释放初期两者呈线性关系, 此时围岩处于弹性阶段, 当开挖荷载释放 80% 时, 曲线斜率发生改变, 即洞周围岩进入塑性阶段。当开挖荷载完全释放时, 测点 P1 最大变形为 1.716 mm。

为了更直观地反映洞周围岩的变化过程, 通过开挖荷载等比例释放过程中的围岩位移增量来进一步反应荷载释放过程中的围岩变形, 选取 4 个典型测点处位移增量, 如图 5 所示, 当开挖荷载释放率达到 80% 时, 围岩出现位移陡增点, 即该时刻为初次支护的最佳时机。因此本文在开挖荷载释放 80% 时施加锚杆支护。

## 4 内水压力作用下的豆砾石-管片-围岩组合结构承载特性

### 4.1 内水压力对管片承载特性的影响

为反应豆砾石-管片-围岩组合结构的联合承载特性, 考虑开挖荷载的影响, 即管片与豆砾石均于开挖荷载释放 80% 时进行安装回填。即豆砾石与管片承担部分开挖荷载。当开挖荷载完全释放后, 考虑

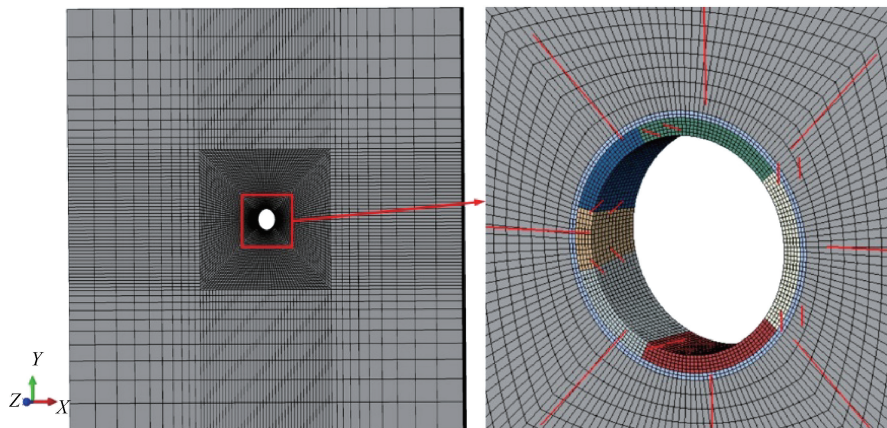


图3 有限元整体模型

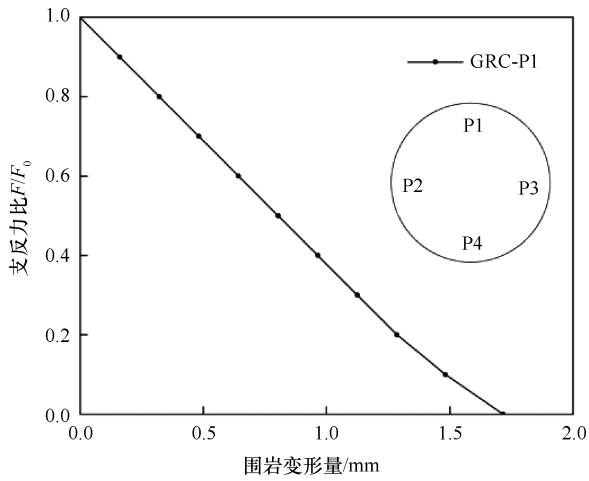


图4 测点P1 围岩特征曲线(GRC)

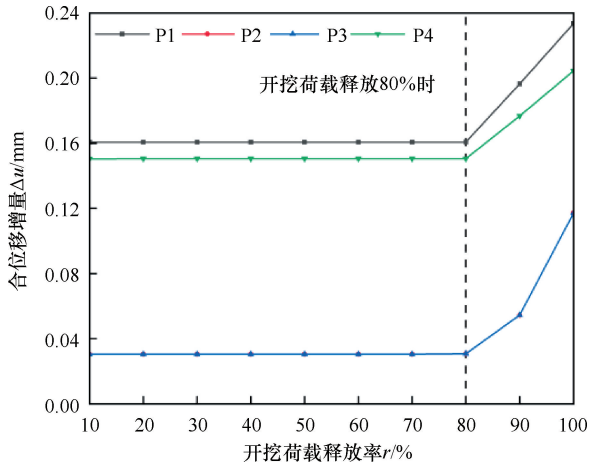


图5 围岩位移增量变化曲线

运行期内水压力。选取内水压 0.8 MPa。施加内水压前后管片径向位移分布如图 6 所示。未施加内水压时,管片需承担部分围岩开挖荷载,径向位移表现为两腰位置向外变形,洞顶洞底处向内变形。施加

0.8 MPa 内水压后,径向上管片整体向外变形,由施加内水压前后管片径向位移做差可知,在内水压作用下,管片顶部变形最大,达到 0.28 mm,有无内水压管片均呈现出横鸭蛋的变形规律。

内水压力作用下管片应力分布如图 7 所示,管片径向应力主要为压应力,分布较为均匀,仅在管片接缝位置存在应力集中。环向应力以拉应力为主,呈现对称分布,内表面顶端底端位置处拉应力较大,考虑最大拉应力为 1.661 MPa,位于斜螺栓位置附近,未超过混凝土抗拉强度设计值 1.89 MPa。

不同内水压力作用下管片最大拉应力-内水压力关系曲线如图 8 所示。考虑开挖荷载情况下管片最大拉应力明显小于未考虑开挖荷载情况,即部分开挖荷载释放有利于管片承担内水压力,考虑开挖荷载时在 内水压力较小情况下,管片最大拉应力随内水压力的增大而减小,考虑内水压力较小与围岩应力产生的影响相互折减。内水压力增大到一定程度后,管片最大拉应力随内水压力的增大而增大,当最大拉应力超过抗拉强度设计值时,管片出现塑性损伤。在混凝土塑性损伤模型中,当拉损伤因子  $d_t > 0.5$  时,混凝土产生微裂缝;当拉损伤因子  $d_t > 0.8$  时,混凝土产生宏观裂缝<sup>[21]</sup>。如图 9 所示,当内水压力达到 1 MPa 时,考虑开挖荷载情况下管片 A1, A3 靠近封顶块 K 端的管片接缝位置附近出现微裂缝;未考虑开挖荷载情况下接缝附近均出现裂缝,其中封顶块两端接缝附近为微裂缝,其余接缝附近裂缝均为宏观裂缝,且位于管片 A2 两条裂缝塑性损伤最严重。考虑有无开挖荷载会影响管片的应力分布,斜螺栓附近为裂缝出现的主要位置。

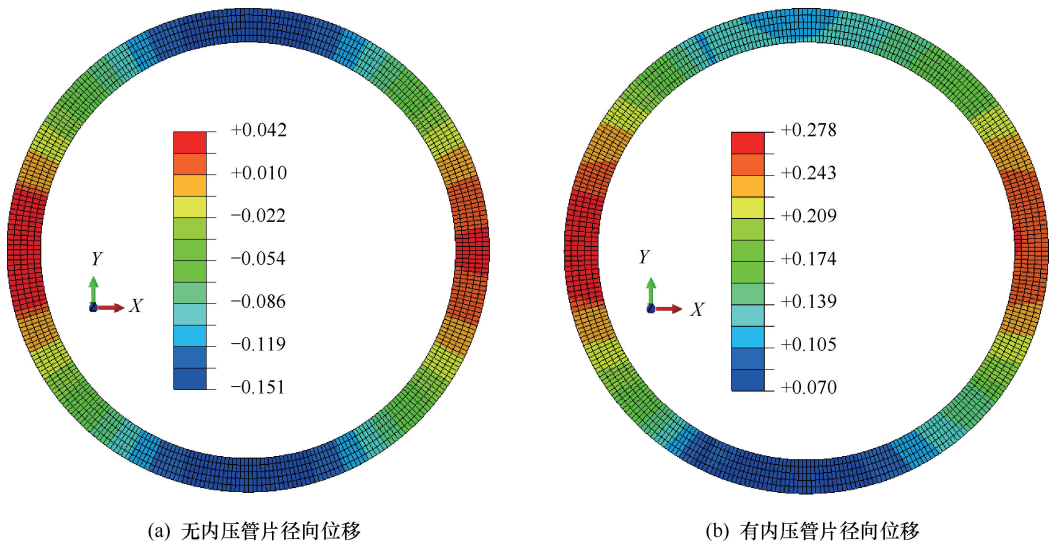


图6 管片径向位移(单位: mm)

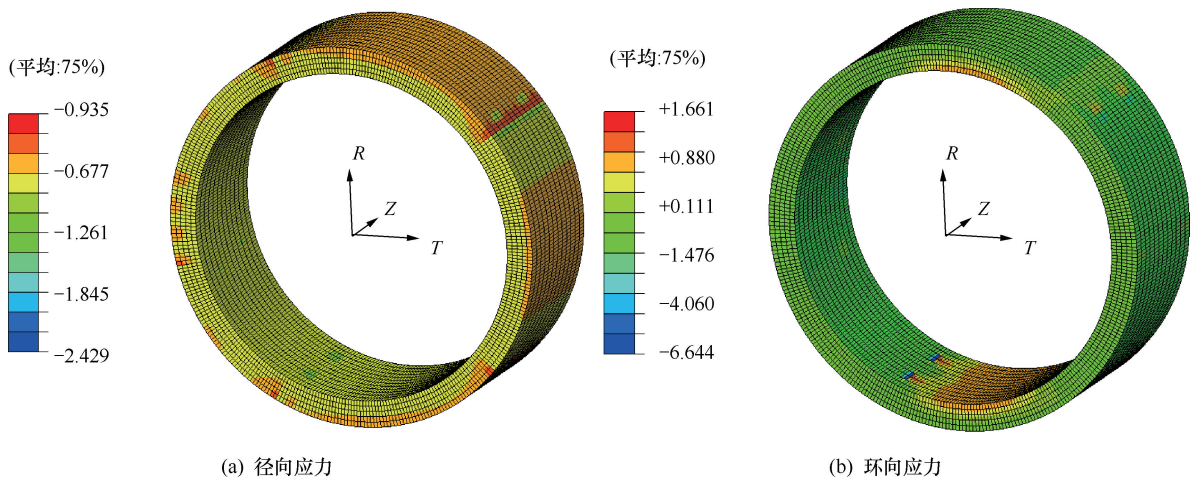


图7 内水压力作用下管片应力分布(单位: MPa)

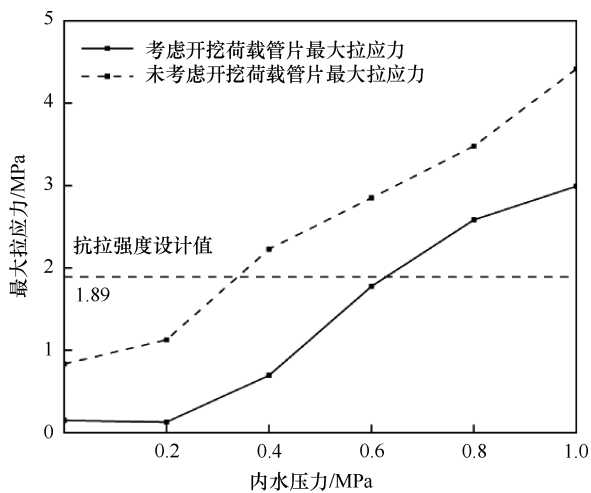


图8 最大拉应力-内水压力关系曲线

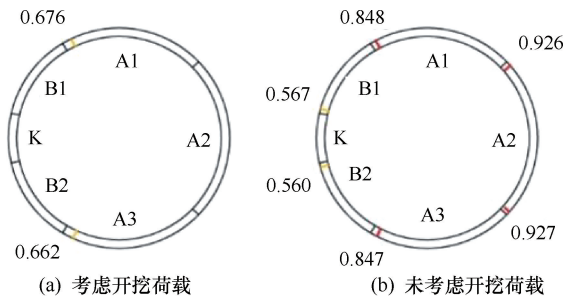


图9 裂缝位置分布

#### 4.2 内水压力对接缝张开度与斜螺栓应力的影响

对不同内水压力作用下管片接缝张开度及斜螺栓应力进行分析, 接缝依次编号 L1—L6, 如图 10 所示, 实线为考虑开挖荷载情况, 虚线为未考虑开挖荷载情况。接缝的平均张开度随内水压的增大而增大; 考虑开挖荷载情况下整体接缝张开度较小, 当内水压较小时, 管片平均张开度为 0, 考虑内水压与围岩应力相互折减; 整体接缝平均张开度关于封顶块 K 呈

对称分布, L1 与 L2、L3 与 L6、L4 与 L5 的平均开度值较为接近, 是否考虑开挖荷载影响接缝的开度分布, 即考虑开挖荷载情况下 L3、L6 开度值最大, 未考虑开挖荷载情况下 L4、L5 开度值最大。

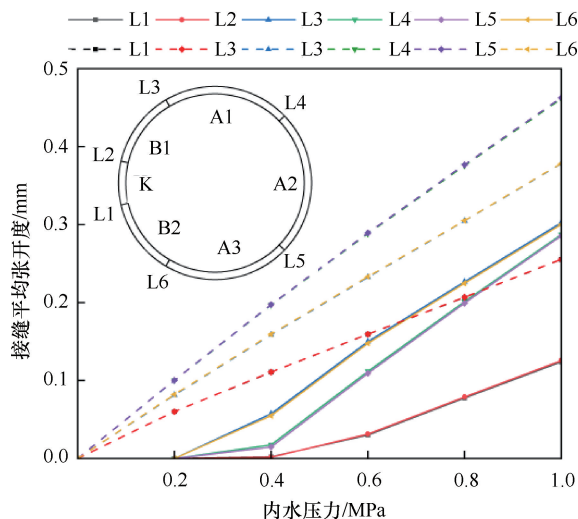


图10 内水压力与接缝平均张开度关系曲线

由于斜螺栓双层布置, 参照封顶块 K 长短边进行分层, 长边侧螺栓为 I 层, 编号 L1-1—L6-1, 短边侧螺栓为 II 层, 编号 L1-2—L6-2, 如图 11 所示。考虑开挖荷载情况下不同内水压对应斜螺栓应力值如表 2 所列。同一接缝位置处两层螺栓应力存在差异, 考虑为楔形管片的影响, 接缝位置距离封顶块 K 越近, 螺栓应力差异越大, L1, L2 接缝位置处螺栓应力差异最大, L4, L5 接缝位置处螺栓应力几乎一致, 参照接缝平均张开度曲线, 张开度越大, 螺栓拉应力越大, 与前文 L3, L6 接缝附近最先出现裂缝相对应, 整体应力较未考虑开挖荷载偏小, 规律一致, 故不对未考虑开挖荷载情况下螺栓应力进行展示。当内水压力达到 1 MPa 时, L3, L6 处螺栓拉应力约为

104 MPa, 未超过屈服强度 360 MPa。

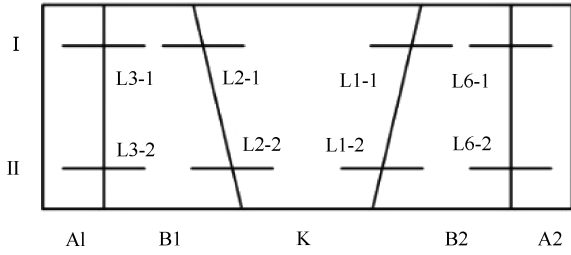


图 11 螺栓分层示意

### 4.3 内水压力作用下结构承载比分析

为了进一步量化分析内水压力作用下豆砾石-管片-围岩组合结构的荷载分配情况, 由于本文忽略了衬砌自重与水重的影响, 故提出式(1)、(2)分别计算管片、豆砾石和围岩的承载比  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ , 即

$$\eta_i = \frac{\sigma_{\theta i} S_i}{P b R} (i = 1, 2) \quad (1)$$

$$\eta_3 = 1 - \sum_{i=1}^2 \eta_i \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{\theta 2}$  分别为管片、豆砾石典型断面处的环向应力平均值;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  分别为管片、豆砾石典型

截面处构件截面面积;  $P$  为内水压设计值;  $b$  为单环幅宽;  $R$  为管片内径。不同内水压力作用下管片、豆砾石的环向应力平均值如表 3 所列。

内水压力作用下管片、豆砾石、围岩的荷载承担率如图 12 所示, 内水压主要由围岩承担, 豆砾石几乎不承担内水压力, 管片仅在内水压较小时承担一部分。随着内水压力的增大, 围岩的内水压力承载比进一步增大, 增大到一定程度后趋于稳定, 当内水压力达到 1 MPa 时, 围岩承载比达到 90%, 考虑此时混凝土管片出现拉裂及接缝张开的情况, 承载比低于 10%, 基本失去环向承载能力。

### 5 结论

(1) 内水压力作用下, 管片在径向上整体向外变形, 顶部变形最大, 径向应力为均匀压应力, 在接缝位置存在应力集中现象, 环向应力以拉应力为主, 在管片顶端底端内表面较大; 考虑开挖荷载情况下管片最大拉应力明显小于未考虑开挖荷载情况, 即部分开挖荷载释放有利于管片承担内水压力; 随着内水压力的增大, 管片最大拉应力呈现先减小后增大的趋势,

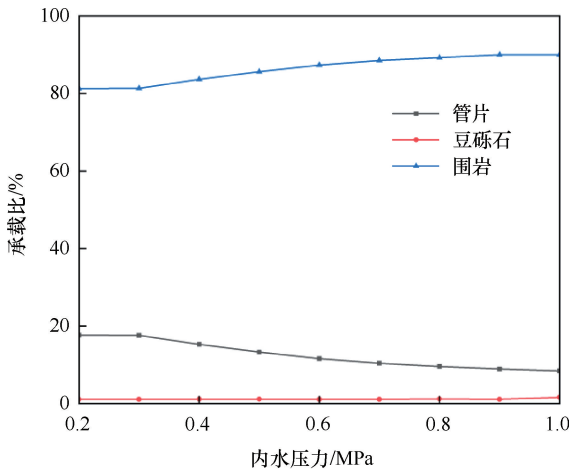
表 2 环向螺栓应力

MPa

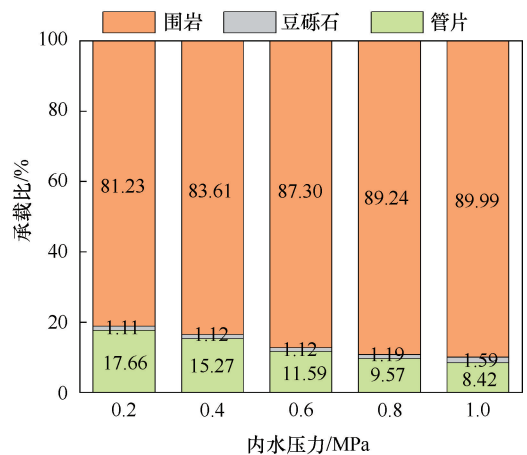
内水压力	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2	L4-1	L4-2	L5-1	L5-2	L6-1	L6-2
0.0	1.1	0.6	1.1	0.5	2.0	1.3	3.9	3.9	3.9	3.9	2.0	1.5
0.2	2.2	0.4	2.2	0.5	0.3	0.5	2.8	2.8	2.7	2.7	0.3	0.2
0.4	3.4	0.2	3.4	0.2	19.3	20.5	2.9	2.9	2.0	2.0	18.6	19.4
0.6	11.7	8.6	12.3	9.4	52.0	53.4	34.9	34.9	34.0	34.0	51.3	52.3
0.8	27.0	27.2	27.6	28.1	78.7	80.1	65.8	65.8	65.1	65.1	78.0	79.1
1.0	42.1	45.6	42.8	46.6	103.6	105.1	95.2	95.2	94.8	94.8	102.9	104.1

表 3 不同内水压力作用下结构环向应力平均值

内水压力/MPa		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
环向应力均值/MPa	管片	0.219	0.327	0.379	0.411	0.431	0.452	0.475	0.498	0.522
	豆砾石	0.004	0.006	0.009	0.012	0.013	0.012	0.027	0.016	0.106



(a) 内压与内压承载比关系曲线



(b) 内水压力承载比

图 12 组合结构内水压力承载比

考虑为内水压力较小时与围岩应力相互折减；当内水压力达到 1 MPa 时，考虑开挖荷载情况下管片 A1, A3 靠近封顶块 K 端的管片接缝位置附近出现微裂缝；未考虑开挖荷载情况下接缝附近均出现裂缝，其中封顶块两端接缝附近为微裂缝，其余接缝附近裂缝均为宏观裂缝。考虑有无开挖荷载会影响管片的应力分布，斜螺栓附近为裂缝出现的主要位置。

(2)考虑开挖荷载情况下整体接缝张开度较小，内水压较小时，内水压与围岩应力相互折减，接缝张开度为 0；管片接缝平均张开度随内水压的增大而增大，整体平均接缝张开度关于封顶块 K 呈对称分布；是否考虑开挖荷载影响接缝的张开度分布；靠近封顶块 K 的同一接缝处两层螺栓应力存在差异，考虑为楔形封顶块的影响，距离封顶块较远处双层螺栓应力较为一致。

(3)内水压力主要由围岩承担，豆砾石几乎不承担内水压力，管片仅在内水压力较小时承担少量内水压力。

## 参考文献：

- [1] 刘庭金, 陈高敬, 唐欣薇, 等. 高内压作用下叠合式衬砌结构承载机理原型试验研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 295-304.
- [2] 孟庆辉, 封坤, 杨国栋, 等. 内水压力对输水盾构隧道复合衬砌结构影响研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 33-42.
- [3] 何灏典, 唐欣薇, 严振瑞, 等. 复合式衬砌结构联合承载的原位试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 560-568.
- [4] 周龙, 朱合华, 沈奕, 等. 内水压盾构隧道管片衬砌受力与变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1763-1772.
- [5] 莫键豪, 唐欣薇, 严振瑞. 盾构输水隧道单层衬砌结构承载变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1365-1373.
- [6] 张建伟, 刘贺, 曹克磊, 等. TBM 有压输水隧洞内张钢圈-管片-围岩组合结构联合承载力学特性分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 1154-1169.

(责任编辑 王 璐)