

DOI: 10.11779/CJGE20240871

循环加卸载作用下大断面黄土隧道衬砌结构受力 试验研究

洪秋阳^{1,3}, 来弘鹏², 周阳²

(1. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 3. 安徽建筑大学建筑健康监测与灾害预防技术国家地方联合工程实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 浅埋大断面黄土隧道修建后极易出现地表裂缝, 在季节性降雨或农业灌溉的周期性入渗作用下, 衬砌结构经历反复加卸载作用, 引发严重结构病害。鉴于此, 探究了循环加卸载作用下大断面黄土隧道衬砌结构受力规律, 分析了不同荷载峰值、不同循环加载次数下衬砌结构力学响应特征和破坏机制。研究结果表明: 循环加卸载作用下隧道衬砌结构呈现弹性变形、渐进开裂、裂缝扩展3种响应模式, 对应外荷载分别为小于53.2%, 79.8%~100%以及大于开裂值。弹性变形模式中衬砌结构内力值稳定, 轴力小于-932 kN, 弯矩为-233~230 kN·m; 渐进开裂模式中结构经历多次加卸载后表面出现裂缝, 最小安全系数由0.34~0.42下降至0.23以下; 裂缝扩展模式中结构已开裂部位在加卸载过程中出现应力集中, 裂缝迅速扩大, 未损伤部位内力值保持稳定。

关键词: 隧道工程; 浅埋黄土隧道; 循环加卸载; 模型试验; 衬砌结构; 受力特征

中图分类号: TU456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)12-2571-10

作者简介: 洪秋阳(1993—), 男, 安徽合肥人, 博士, 讲师, 从事岩土与隧道工程方面的研究工作。E-mail: quiyanghong@ahjzu.edu.cn。

Experimental study on stress of large-section loess tunnel lining structure under cyclic loading and unloading

HONG Qiuyang^{1,3}, LAI Hongpeng², ZHOU Yang²

(1. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. School of Highways, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. National Local Joint Engineering Laboratory for Building Health Monitoring and Disaster Prevention Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Surface cracks have a high propensity to emerge in shallowly buried large-section loess tunnels. The lining structure endures repeated loading and unloading actions due to periodic infiltration of seasonal rainfall or agricultural irrigation, thereby giving rise to severe structural diseases. In light of this, this article delves into the stress law of the lining structure of large-section loess tunnels under cyclic loading and unloading. It also analyzes the mechanical response characteristics and failure mechanism of the lining structure under diverse load peaks and cyclic loading times. The research findings disclose that the lining structure manifests three response modes under cyclic loading and unloading, namely elastic deformation, progressive failure, and direct cracking. The external loads fall within the ranges of less than 53.2%, 79.8%~100%, and greater than the loading failure value respectively. In the elastic deformation mode, the internal force value remains stable. The axial force is within the range below -932 kN, and the bending moment spans from -233 kN·m to 230 kN·m. During the progressive failure stage, cracks appear on its surface after multiple loading and unloading cycles. The minimum safety factor declines from 0.34~0.42 to below 0.23. In the crack propagation mode, stress concentration occurs in the cracked portions of the structure during loading and unloading, and the cracks expand rapidly. The internal force in the uncracked area stays stable.

Key words: tunnel engineering; shallow buried loess tunnel; cyclic loading and unloading; model testing; lining structure;

基金项目: 国家自然科学基金项目(52308386); 安徽省高校自然科学重点项目(2023AH050186); 建筑健康监测与灾害预防国家地方联合工程实验室开放基金项目(GG23KF005) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52308386), National Natural Science Foundation of Anhui Province (Grant No. 2023AH050186) and Open Fund for National Local Joint Engineering Laboratory of Building Health Monitoring and Disaster Prevention (Grant No. GG23KF005).

收稿日期(Received): 2024-08-28 **修回日期(Revised):** 2024-12-04 **接受日期(Accepted):** 2024-12-06 **网络出版日期(Online):** 2024-12-07

© Editorial Office of Chinese Journal of Geotechnical Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

force characteristics

0 引言

黄土是一种特殊土，具有水敏性和垂直节理发育的特性^[1-2]。过去数十年来，中国黄土地区隧道建设迅猛发展，但由于黄土结构与性状的独特性，已建黄土隧道存在和出现了各种病害。特别是因农业灌溉、季节性降雨等地表水分入渗导致的黄土隧道运营养护问题更是屡见不鲜，存在结构性能退化^[3]、衬砌开裂^[4]、渗漏水^[5]、底板隆起^[6]等结构病害。“十隧九漏”“十隧九裂”的说法就表明在役黄土隧道结构劣化的严峻性。

由于黄土特殊的水敏性，黄土隧道结构病害与围岩赋水环境密切相关，针对富水黄土隧道结构病害问题，众多学者进行了详细研究。李骏等^[7]采用砂井浸水现场试验和试坑浸水现场试验对黄土隧道地基湿陷变形特征以及衬砌结构响应进行分析，结果表明，隧道开挖影响了围岩的渗透系数，地表浸水能深入隧道仰拱以下；浸水后黄土围岩表现出更大的湿陷变形，拱脚下沉、仰拱开裂。朱才辉等^[8]研究了黄土围岩含水率增大对隧道围岩压力的影响，结果表明，地表水入渗或地下水位抬升会引起隧道拱肩和拱脚处围岩压力增大。Song 等^[9]采用模型试验研究了黄土隧道二次衬砌的开裂机理和破坏过程，结果表明，衬砌结构的变形破坏有拱顶开裂和仰拱开裂两个分界点，拱顶和拱脚内侧的裂缝主要是受拉引起的。此外，针对隧道衬砌结构，众多学者对衬砌结构破损机理^[10]、服役性能^[11]、力学响应^[12]等内容也进行了详细研究，然而目前针对循环加卸载作用下隧道衬砌结构受荷性能的研究尚未见报道。

1 试验概况

1.1 试验平台与装置

模型试验依托课题组自主研发的隧道结构力学性能测试平台^[13]，见图 1。该平台由驱动装置、控制系统、加载系统和数据采集装置 4 部分组成，采用卧式加载模式，试验系统最小加载速度为 0.5 mm/min，加载精度为 90 Pa，最大加载误差为 1.60 kPa。

鉴于此，本文基于课题组自主研发的隧道结构力学性能测试平台，开展了循环加卸载作用下大断面黄土隧道衬砌结构受力试验研究，分析了不同荷载峰值、不同循环加卸载次数下的衬砌结构力学响应特征和破坏机制，同时进行了轴对称均压工况和偏压工况的对比分析。研究结果对提升黄土隧道结构长期服役性能、增强黄土隧道结构韧性、黄土隧道灾害的防治都具有十分重要的意义。

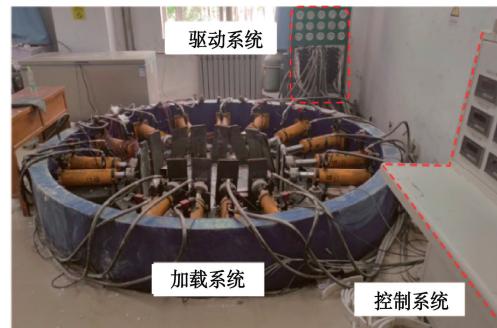


图 1 衬砌加载平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of lining loading platform

1.2 模型设计

衬砌结构原型采用典型大断面黄土隧道形式^[14]。衬砌采用 C35 钢筋混凝土结构，跨度 14.1 m，高度 11.8 m，厚度为 45 cm，主筋为直径 20 mm 的螺纹钢，间距 200 mm。混凝土的弹性模量为 31.5 GPa，钢筋弹性模量取 210 GPa，根据等效刚度法^[15]折算衬砌等效刚度为 33.7 GPa。考虑试验平台尺寸以及隧道断面形式，确定模型试验几何相似比 $C_L=16$ ，并以几何相似比 $C_L=16$ 和重度相似比 $C_\gamma=1$ 为基础相似比，控制材料的强度相似，采用量纲分析法得到模型各物理量间的相似常数如表 1 所示。

表 1 模型相似常数

Table 1 Model similarity constants

物理量	相似关系	相似比
长度 L	$C_L = 16$	16
重度 γ	$C_\gamma = 1$	1
应力 σ	$C_\sigma = C_L$	16
应变 ε	$C_\varepsilon = 1$	1
强度 R	$C_R = C_L C_\gamma$	16
力 N	$C_N = C_\sigma C_L^2$	1 : 4096
弯矩 M	$C_M = C_\sigma C_L^3$	1 : 65536
抗弯刚度 EI	$C_{EI} = C_\sigma C_L^3$	1 : 65536

经室内配比试验，当石膏与水的质量比为 1 : 1.2 时，石膏试件的弹性模量为 2.3 GPa。模型尺寸取原型的 1/16，跨度为 88 cm，高 74 cm，考虑加载系统高度设置模型轴向长为 25 cm。基于结构弯曲变形相似准则^[16]按照抗弯刚度相似计算衬砌石膏模型厚度：

$$h_m = \frac{h_p}{n} \left[\frac{E_c (1 - \nu_m^2)}{E_m (1 - \nu_p^2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中： E_m 为模型弹性模量； ν_m ， ν_p 分别为模型、原型材料泊松比； n 为相似常数。通过计算得到衬砌试验模型厚度为 7.65 cm。

1.3 加载方案

为真实还原地表水入渗引起的外荷载变化对黄土隧道衬砌结构的影响，试验加卸载目标值取自新庄

岭和白虎山两座黄土隧道典型断面二衬压力实测变化数据^[17-18], 隧道衬砌压力与降雨入渗的关系背景如图2所示。因黄土特殊的垂直结构性, 浅埋大断面黄土隧道施工修建完成后极易出现地表裂缝^[4-5]。近年来, 强降雨等极端气候事件频发以及农业用水需求量的增大, 地表水易沿围岩裂缝发生下渗。由于黄土特殊的水敏特性, 浸水后围岩强度降低明显, 围岩承载能力几乎丧失, 衬砌结构受到的荷载迅速增加。在经历一定时间后, 随着围岩水分的进一步下渗和排出, 衬砌结构受到的附加荷载又会迅速减小。这就可能导致隧道衬砌结构会随着季节性的变化经历周期性的加卸载作用, 发生循环加卸载的现象。

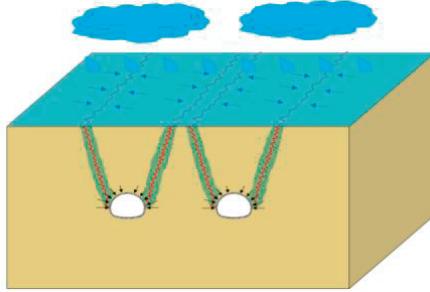


图2 隧道衬砌压力与降雨入渗的关系背景图

Fig. 2 Background diagram of relationship between tunnel lining pressure and rainfall infiltration

典型断面二衬荷载随时间变化如图3所示, 由图可知, 两座隧道在第233天后所有监测点的压力都出现了显著的增加, 两座隧道边墙二衬压力值在一个月内从30~40 kPa迅速增加至500 kPa以上。随着围岩水分的排出, 在监测的第370天后, 隧道二衬压力值开始明显减小, 随后又达到新的稳定状态。这种反复的加卸载作用会引发隧道衬砌结构的严重病害。

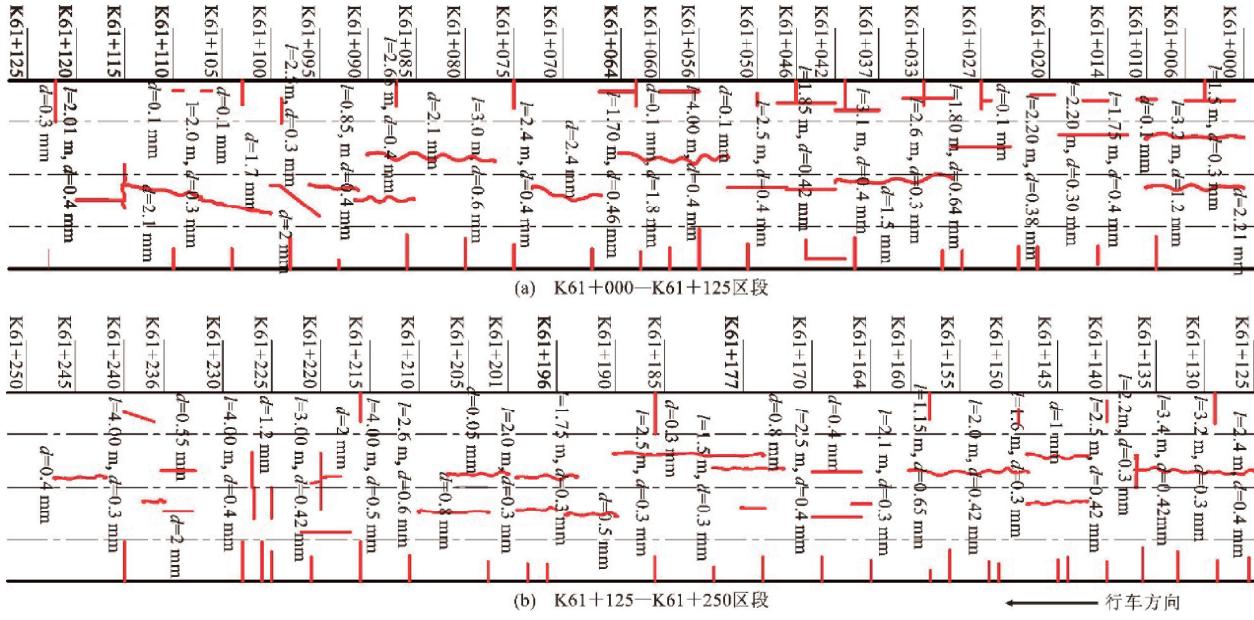


图3 初支与二衬接触压力随时间变化图^[17-18]

Fig. 3 Variation law of contact pressure between initial support and secondary lining over time^[17-18]

新庄岭隧道衬砌裂缝分布展开图如图4所示, 由图4可知, 隧道区段衬砌每隔0~3 m就有1条裂缝, 宽度集中在0.5 mm之内, 个别超过1 mm。拱部以纵向裂缝为主, 边墙处以环向裂缝为主, 长宽不一且有向拱部发展的趋势。

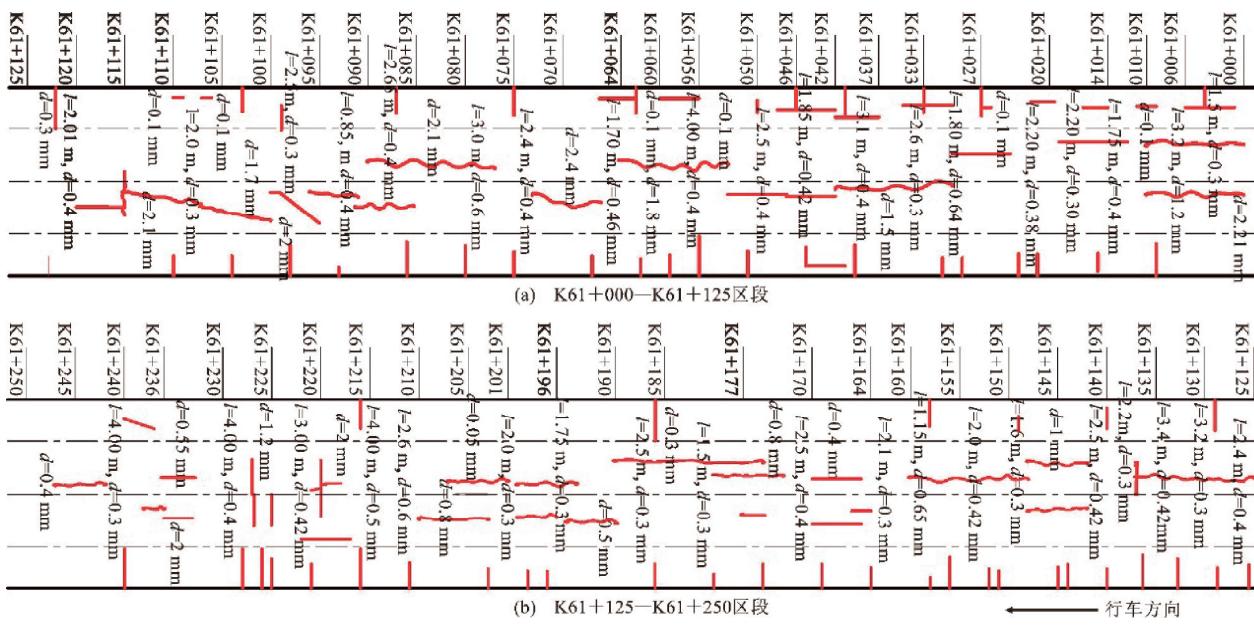


图4 衬砌裂缝分布展开图^[5]

Fig. 4 Expansion diagram of lining crack distribution^[5]

为减小偶然误差, 试验中取两座隧道衬砌实际受荷平均值作为加卸载目标。因水分入渗从地表向下主要影响隧道上部结构, 在隧道底部实测数据缺失的情况下, 隧道底部提供必要的支反力。试验过程中对隧道模型进行加载共分 5 级。为保证数据稳定, 每级加载后保持一段时间, 加卸载速率控制在 2 kPa/min。

1.4 监测系统

试验量测包括模型内外表面应变和内侧位移, 共设置 8 个监测点, 分别设置在隧道模型拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和仰拱中心位置。其中, 外侧 W1~W8 监测点测量模型外表面应变, 内侧 N1~N8 监测点测量模型内表面应变和位移。应变片、位移计现场布置图如图 5 所示, 在加载前将应变计和位移计初始数据清零。

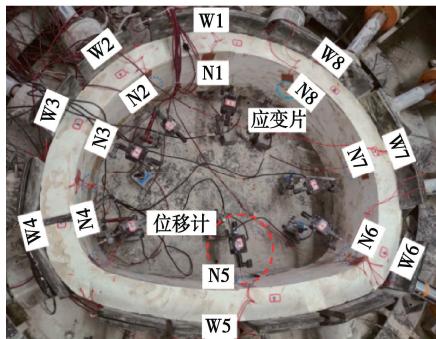


图 5 应变片、位移计现场布置图

Fig. 5 Layout diagram of strain gauges and displacement gauges on site

1.5 工况设计

为研究不同荷载峰值、不同循环加载次数以及不同荷载形式下的衬砌结构力学响应特征, 设置如表 2 所示的 8 种试验工况。其中, 工况 1 加载至目标值后, 若构件完好则继续等比加载至破坏。

表 2 试验工况

Table 2 Working conditions

工况	加载方式	荷载形式	荷载峰值
1	等比例加载	偏压	100% 目标值
2	循环加卸载	偏压	50% 目标值
3	循环加卸载	偏压	75% 目标值
4	循环加卸载	偏压	100% 目标值
5	循环加卸载	轴对称均压	50% 目标值
6	循环加卸载	轴对称均压	75% 目标值
7	循环加卸载	轴对称均压	100% 目标值
8	循环加卸载	轴对称均压	125% 目标值

其中, 工况 2~工况 8 的循环加卸载方案如图 6 所示, 其中偏压加载数据是两个断面实测数据取均值得到的。由图 6 (a) 可知, 最外围蓝色数据显示的是 100% 目标荷载的加载数值, 红色数字为卸荷目标值, 工况 2 和工况 3 荷载峰值分别对应 50% 和 75% 目标值,

加载次数以构件受到破坏或数值稳定为止。由图 6(b) 可知, 图中最外围蓝色数据显示的是 125% 目标荷载的加载数值, 红色数字为卸荷目标值, 工况 5~工况 7 荷载峰值分别对应 50%, 75% 和 100% 目标值。

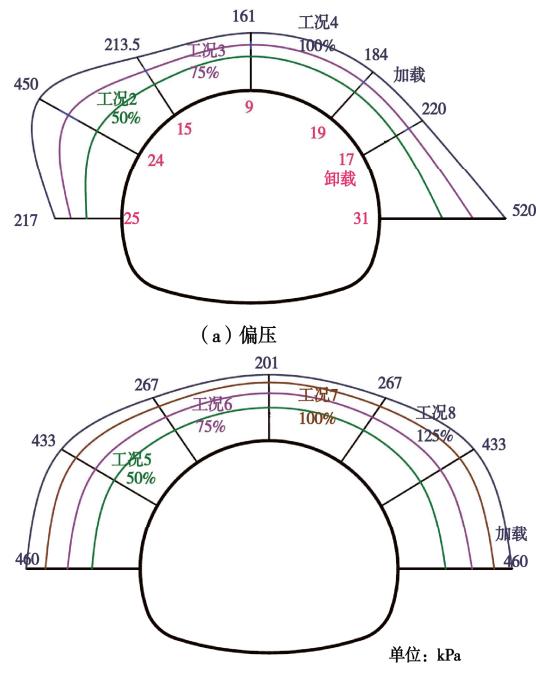


图 6 循环加卸载围岩压力包络图

Fig. 6 Pressure envelope diagram of target surrounding rock under cyclic loading and unloading

2 试验结果与分析

2.1 等比偏压加载

工况 1 在加载过程中试件的变形随载荷的增大而增大。当载荷增加到 94% 时, #3 点 (左拱肩) 内侧衬砌首先发生开裂, 能观察到内表面细微裂缝, 试件左拱肩处开始出现压缩弯曲变形; 当载荷增加到 100% 时, #3 点内侧裂缝宽度开始扩大, #7 点 (右拱腰) 内侧和 #4 点 (左拱脚) 外侧也有细微裂缝出现, 为便于进行分析, 按照相似关系将计算数据返还到原型, 衬砌变形分布和开裂情况如图 7 所示。

由图 7 可知, 受左拱肩偏压影响, 外荷载向试件挤压导致左拱肩 (#3 点) 处位移量最大, 加载完成后位移达到 19.1 mm, #3 点内表面也最先出现裂缝。受左拱肩弯曲变形的影响, 左拱脚处试件发生翘曲, 裂缝从外侧开始向内发展, 位移达到 13.1 mm。受右拱腰外荷载的影响, 试件向内变形使得衬砌内表面出现明显裂缝, 但 #6, #7 点的位移量没有同样发生开裂的 #3, #4 点位移量大, 分别为 9.0, 10.5 mm。衬砌拱腰位置的曲率半径较大, 在相同的位移条件下更容易出现裂缝。除此之外拱顶 (#1 点)、隧底 (#5 点) 和右

拱肩 (#8 点) 位置位移量较小。由变形数据和衬砌开裂情况可知: 试件呈现左拱肩、右拱腰开裂的局部破坏模式, 左拱肩、右拱腰在外荷载作用下向内挤压明显, 左拱脚处由于压缩弯曲损伤产生裂缝。

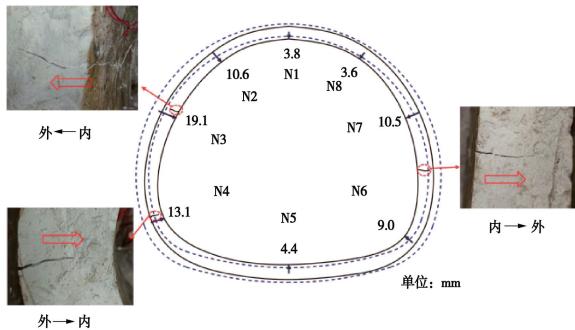


图 7 试件变形分布和开裂情况

Fig. 7 Deformation distribution and cracking of test specimens

通过各监测点应变数据计算得到结构轴力和弯矩, 模型内力变化情况如图 8 所示, 为便于进行分析, 按照表 1 的相似关系将计算数据返还到原型。换算公式如下所示, 设衬砌的内外侧应变值分别为 ε_1 和 ε_2 根据材料的本构关系及平截面假定, 可得

$$N = \frac{1}{2} E_c (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) b h \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{12} E_c (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) b h^2 \quad (3)$$

式中: b 为单位长度; h 为衬砌厚度; E_c 为二衬的等效弹性模量。

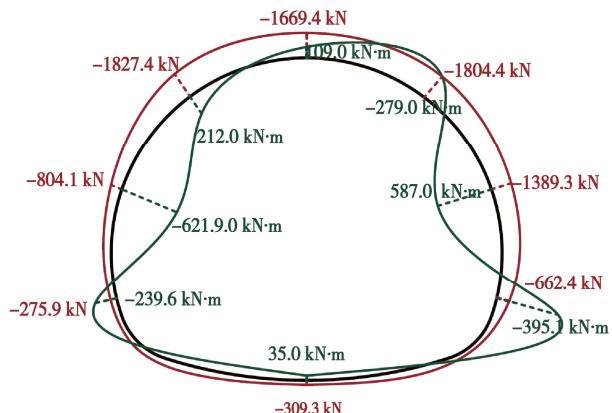


图 8 模型内力变化情况

Fig. 8 Change of model internal force

由图 8 可知, 各监测点处衬砌结构轴力均为负值, 其中拱部位置和右拱腰处的轴力值较大, 拱顶为 1669.4 kN, 左右拱肩处均在 1800 kN 以上, 其余监测点轴力值均在 1000 kN 以下。衬砌结构拱顶、右拱肩、左右拱脚处的弯矩值为负值, 其余均为正弯矩。最大正弯矩位于左拱腰, 达到 621.9 kN·m, 右拱腰处也有 587.0 kN·m。最大负弯矩位于右拱脚处, 达到 -395.1 kN·m。

继续以等比加载的形式进行加载, 当荷载达到

270% 时, 衬砌试件破坏图如图 9 所示, 按裂隙出现先后依次编号。由图 9 可知, 在外荷载作用下, 结构拱腰处发生明显变形且呈现出偏压性状, #3 点裂隙贯穿导致结构完全破坏。

按照隧道仰拱中点处开始, 顺时针转动一周得到隧道模型失稳破坏后最终的裂隙分布素描展布图如图 10 所示, 包括模型内侧、外侧和表面。

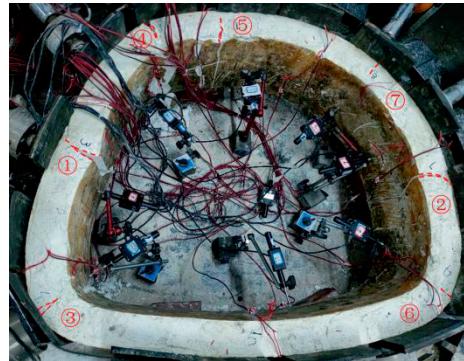


图 9 衬砌试件破坏图

Fig. 9 Failure diagram of lining specimens

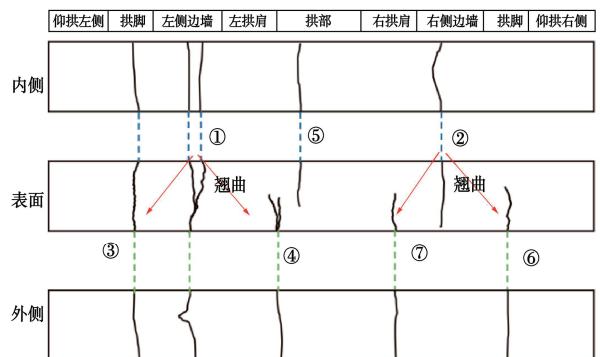


图 10 试件裂缝展布图

Fig. 10 Crack distribution

结合图 9、10 可知, 衬砌左拱肩位置受外荷载挤压导致结构破坏, 过大的变形量使得 #3 点内侧开裂, #2, #4 点外侧翘曲开裂。右侧边墙处也有明显的挤压变形, 右拱肩和右拱脚位置也发生翘曲开裂。裂缝发展方向 “由表及里”, 过程为拱腰内表面 → 拱脚外表面 → 拱肩外表面 → 拱顶内表面 → 拱腰及拱脚处开裂加剧、贯穿 → 结构失稳破坏。由于拱脚裂缝是从外侧向内侧发展, 因而现场难以观察, 隧道现场表现出大量衬砌边墙、拱肩环向裂缝, 与试验结果基本一致, 试验还原了现场裂缝产生过程和发展规律。

2.2 循环加卸载

通过试验可知, 在循环加卸载过程中衬砌试样会出现无损伤、多次加卸载开裂、直接开裂 3 种现象, 荷载峰值和荷载形式对响应模式都会产生影响, 本文按照上述 3 种试验现象进行对比分析。

(1) 弹性变形

工况 2、工况 5 和工况 6 在多次循环加载中衬砌

结构内外侧各监测点应变保持稳定或趋于稳定, 处于弹性变形模式。工况 2 经历了 12 次循环加卸载, 取最后一次加载数据, 计算得到工况 2 轴力和弯矩包络图见图 11, 由图 11 可知, 衬砌试件轴力值为 $-765\sim-932$ kN, 各点的轴力值相差不大。弯矩值的分布状态与等比加载一致, 弯矩值相比有所减小, 左拱肩、左拱腰、仰拱、右拱腰处的弯矩值为正值, 其余均为负弯矩。

加载时工况 5 内力变化情况如图 12 所示。由图可知, 在 5 次加卸载循环作用下, 各监测点位置内力值在加载时基本保持稳定。拱肩位置正弯矩值最大, 为 $217\sim230$ kN·m; 拱脚处负弯矩最大, 为 $-212\sim-233$ kN·m。各点的轴力值基本一致, 最大为拱肩处, 为 $-850\sim-873$ kN, 最小在拱腰处, 为 $-701\sim-732$ kN。

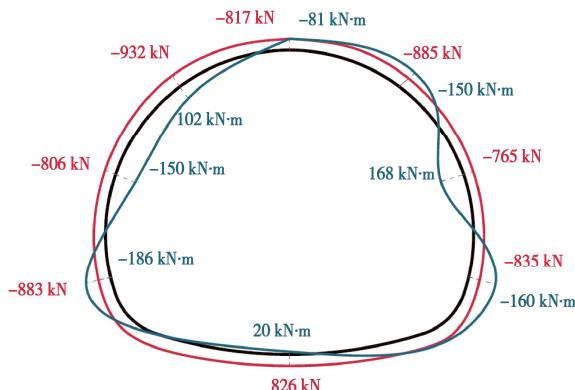


图 11 工况 2 衬砌内力变化情况

Fig. 11 Change of model internal force in working condition 2

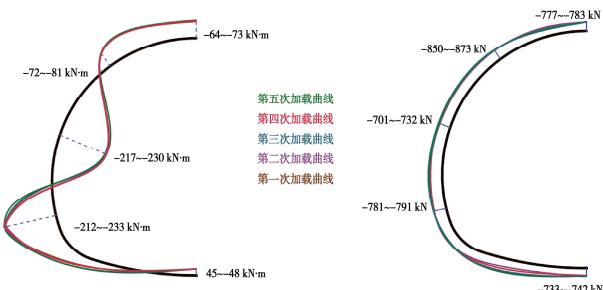


图 12 加载时工况 5 内力变化情况

Fig. 12 Change of model internal force in working condition 5

加载时工况 6 内力变化情况如图 13 所示。由图可知, 在 5 次加卸载循环作用下, 各监测点位置内力值在加载时也基本保持稳定, 分布形式与工况 5 一致, 没有出现监测点内力值逐渐增大, 或衬砌结构开裂的现象。拱肩处的弯矩值为 $271\sim305$ kN·m, 比工况 5 大 30%, 各点的轴力值相比于工况 5 大 32%~44%。

采用《公路隧道设计细则: JTGD70—2010》^[19] 中综合安全系数法计算工况 2、工况 5、工况 6 的混凝土受压安全系数, 因不同循环加卸载次数下衬砌结构安全系数可能会发生变化, 为了对比分析, 取第一

次加载时衬砌结构最小衬砌安全系数进行对比分析。工况 3、工况 5 和工况 6 第一次加载时安全系数分别为 1.17, 2.2, 0.69。根据试验结果, 弹性变形阶段衬砌加卸载处于弹性的范围内, 各监测点弯矩和轴力值保持在稳定范围, 第一次加载时安全系数大于或等于 0.69 时在后续加卸载过程中则不会出现开裂现象。

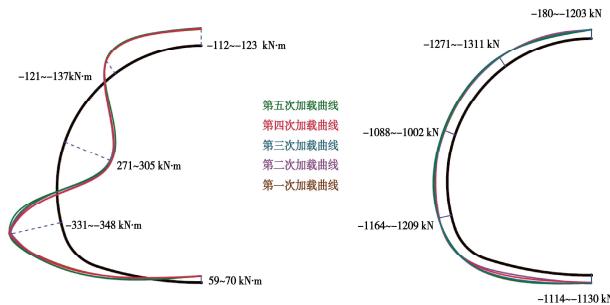


图 13 加载时工况 6 内力变化情况

Fig. 13 Change of model internal force for working condition 6

(2) 渐进开裂

工况 3、工况 7 和工况 8 在第一次加载后衬砌表面完好, 但结构内部有损伤, 多次加卸载后出现裂缝, 处于渐进开裂模式。工况 3 在第一次和第二次加卸载过程中并未发现衬砌试件出现开裂现象, 在进行第三次加载时, 在左拱腰和左拱脚位置同时发现裂缝。工况 3 加载时结构轴力包络图和弯矩包络图如图 14, 15 所示。由图 14 可知, 在不同加载循环下 #3, #4 点弯矩值迅速增大, #3 点由初次加载的 402 kN·m 增长至 637 kN·m, #4 点也从 -312 kN·m 增长至 -439 kN·m。相比于工况 6 而言, 虽然加卸载目标值均为目标荷载值的 75%, 但第一次对称加载时拱肩处弯矩值要比偏压加载大 32%, 且在后续加载过程中逐渐增大。其余点弯矩值变化不大, 除了 #1 点弯矩值增长了 -112 kN·m 之外, 其余各点的弯矩变化绝对值不超过 50 kN·m。

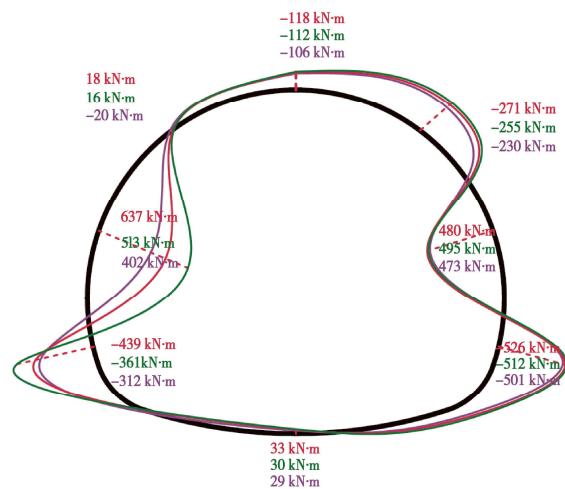


图 14 工况 3 加载阶段弯矩变化图

Fig. 14 Bending moment variation diagram during loading stage in working condition 3

由图 15 可知,第一次加载后除隧底轴力值为-738 kN 外,其余各点轴力值相差不大,均在-1074~-1389 kN。随后在加载过程中, #3 点因为结构产生裂缝,轴力值从-1301 kN 在第三次加载时迅速减小至-688 kN; #4 点轴力值从-1282 kN 在第三次加载时迅速减小至-238 kN,其余各点轴力值变化不大。

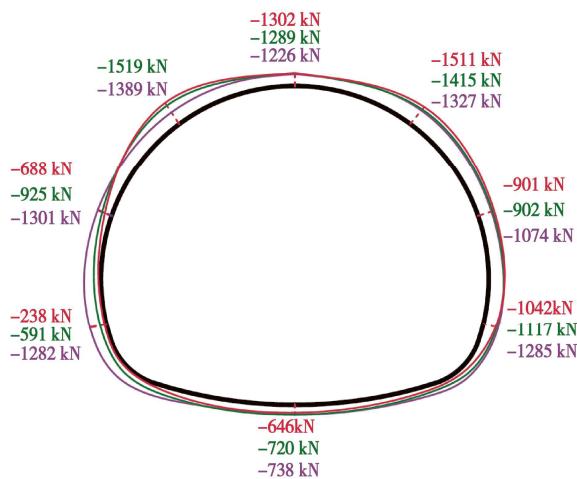
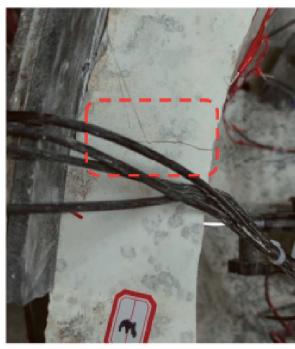


图 15 工况 3 加载阶段轴力变化图

Fig. 15 Axial force variation during loading stage in working condition 3

衬砌试件破坏图如图 16 所示, 由图可知, 在 #3 点内侧和 #4 点外侧出现了裂缝, #3 点裂缝较为明显, 从正视图看裂缝从上而下贯穿, 裂缝深度大约为衬砌厚度的 76%。#4 点裂缝为微小裂缝, 深度大约为衬砌厚度的 51%。



(a) 拱腰裂缝俯视图



(b) 拱腰裂缝正视图



(c) 拱脚裂缝俯视图

图 16 工况 3 衬砌试件破坏图

Fig. 16 Failure diagram of lining in working condition 3

工况 7 内力变化情况如图 17 所示。由图 17 可知，在加卸载循环作用下，拱顶和仰拱处的内力值变化不大，拱肩、拱腰、拱脚弯矩值和轴力值均有较大变化。拱肩处的弯矩值由负转正，从 $-126 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 变化至 $12 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，轴力值由 1695 kN 逐渐减小至 1306 kN 。在进行第四次加载时，在左拱腰位置出现开裂现象，拱腰弯矩值由 $423 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 增大至 $626 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，增长速率由 10% 迅速增加至 18% 。拱脚处的弯矩值由 $-436 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 增加至 $-522 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。受开裂影响，拱腰处的轴力值由 -1451 kN 迅速减小至 -733 kN ，拱脚处的轴力值也由 -1552 kN 迅速减小至 -841 kN ，其余各点轴力值变化不大。

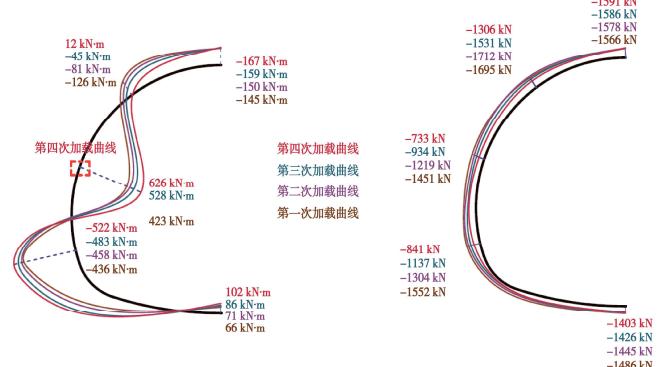


图 17 工况 7 内力变化情况

Fig. 17 Change of model internal force in working condition 7

衬砌试件破坏图如图 18 所示, 由图 18 可知, 在 4 次加卸载作用下#3 点出现了一条长分叉裂缝, 上部分较为明显, 下部分为细微裂缝。由于衬砌结构内部在多次加卸载作用下损伤累积, 达到一定程度后损伤部位相互贯通形成可见裂缝, 因此可能出现此类裂缝分叉现象。

工况 8 内力变化情况如图 19 所示。由图 19 可知，在经历两次加卸载作用后，衬砌出现了开裂现象。第一次加载后，拱腰处的弯矩值达到 $549 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，在进行第二次加载后，拱腰位置出现裂缝，弯矩值达到 $662 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，比第一次加载时增大了 20.5%，轴力值为 1245

kN, 比第一次加载时减小了 31.3%。

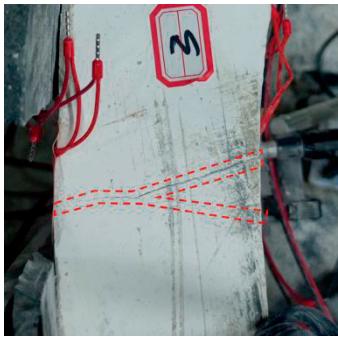


图 18 工况 7 衬砌试件破坏图

Fig. 18 Failure diagram of lining of working condition 7

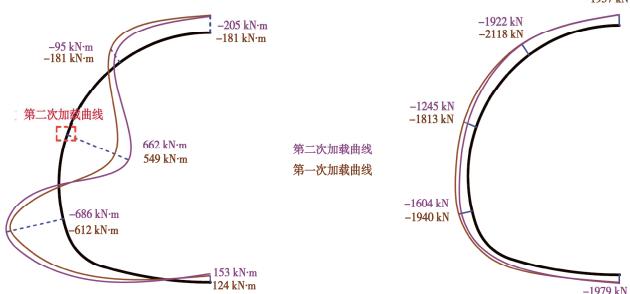


图 19 工况 8 内力变化情况

Fig. 19 Change of model internal force in working condition 8

衬砌试件在试验过程中 #3 点上部出现了一条细微裂缝, 裂缝深度大约为 6.0 cm, 但裂缝宽度不大。从破坏情况来看, 等比加载与循环加卸载作用下衬砌结构开裂方式不同: 等比加载作用下若某位置拉力大于衬砌抗拉强度则出现开裂现象, 裂缝由外向内发展; 而循环加卸载作用下衬砌裂缝是由于内部损伤累积, 由内部向表面扩展, 因此裂缝表现出的深度较深而宽度较浅。

工况 3、工况 7、工况 8 在加卸载过程中出现渐进开裂现象, 经历多次加载之后才出现裂缝。第一次加载时结构内部首先出现损伤, 工况 3、工况 7、工况 8 破坏部位衬砌安全系数分别为 0.42, 0.41, 0.32, 其余部位仍处于弹性变形阶段。随着衬砌内部损伤的累积, 表现为弯矩值显著增大, 轴力值迅速减小, 安全系数逐渐减小, 例如工况 7 共 4 次加载过程中安全系数分别从 0.41, 0.35, 0.28 减小至 0.23, 随后衬砌表面出现开裂, 裂缝发展方向“由内而外”。一旦衬砌出现内部损伤或明显裂缝, 在后续反复加卸载过程中, 带裂缝的部位更容易发生应力集中, 使得衬砌结构偏向于已经开裂的部分进行破坏, 而不发生损伤的部位则在后续加卸载过程中一直处于弹性加载范围, 轴力和弯矩值保持稳定。

(3) 裂缝扩展

工况 4 在第一次加载过程中左拱肩和左拱脚已经

出现裂缝, 衬砌试件破坏图如图 20 所示。由图 20 可知, 在第一次加载时, #3, #4 点位置出现的裂缝长度分别为 4.5, 3.9 cm, 宽度较细。第二次加载后裂缝宽度明显扩大, 长度增加至 6.8, 6.9 cm。在第三次加载之后, 裂缝出现了贯穿, 衬砌结构发生了破坏, 裂缝发展方向“由表及里”。在加卸载循环过程中, 除左拱肩和左拱脚位置外, 其余部位并没有出现开裂的现象, 未开裂位置的监测应变值振幅也较为稳定。这是因为开裂后的衬砌试样卸载后再经历加载过程相当于带裂缝的工作状态, 已破损位置更容易发生应力集中从而承担更多的荷载迅速发生破坏。

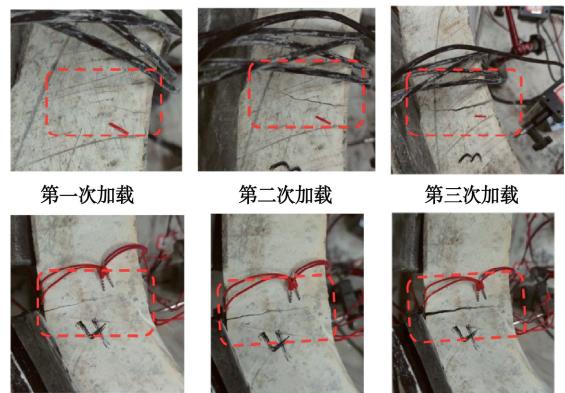


图 20 工况 4 衬砌试件破坏图

Fig. 20 Failure diagram of lining in working condition 4

2.3 总结与分析

第一次加载时混凝土受压最小安全系数表如表 3 所示, 其中工况 1 最小安全系数按照 94% 偏压加载时开裂部位的受力数据计算得到。

表 3 混凝土受压安全系数

Table 3 Concrete compression safety factor

工况	加载方式	开裂方式(次数)	最小安全系数
1	偏压等比加载	挤压变形开裂	0.28
2	50%偏压加卸载	未开裂	1.17
3	75%偏压加卸载	渐进开裂(三次)	0.42
4	100%偏压加卸载	裂缝扩展	0.23
5	50%轴对称加卸载	未开裂	2.20
6	75%轴对称加卸载	未开裂	0.69
7	100%轴对称加卸载	渐进开裂(四次)	0.41
8	125%轴对称加卸载	渐进开裂(两次)	0.34

由表 3 可知, 循环加卸载作用下隧道衬砌结构呈现出弹性变形、渐进开裂、裂缝扩展 3 种响应模式, 荷载形式和荷载峰值对响应模式都会产生影响。在相同荷载比的情况下, 轴对称加载比偏压加载安全系数大 64%~78%。按 94% 偏压荷载峰值作为加载开裂值, 弹性变形、疲劳开裂模式分别处于小于 53.2% 开裂值以及 79.8%~100% 开裂值区间; 按 125% 均压荷载峰值作为加载开裂值, 外荷载分别处于小于 60.0% 开裂值以及 80.0%~100% 开裂值区间。因此, 从不利角度考虑, 弹性变形、渐进开裂、裂缝扩展 3 种响应模式

外荷载分别处于小于 53.2% 加载开裂值、79.8%~100% 加载开裂值之间以及大于加载开裂值的区间。

3 结 论

(1) 等比偏压加载作用下, 衬砌拱腰、拱肩内侧和拱脚外侧发生开裂, 拱腰处弯矩值和轴力值分别为 $621.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$, -804.1 kN , 拱脚处为 $-395.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$, -239.6 kN 。加载至破坏时, 结构拱肩处发生明显变形且呈现出偏压性状, 破坏过程为拱腰内表面→拱脚外表面→拱肩外表面→拱顶内表面→拱腰及拱脚处开裂加剧、贯穿→结构失稳破坏。

(2) 循环加卸载作用下衬砌结构响应模式与等比加载明显不同, 按照荷载值从小到大依次呈现出弹性变形、渐进开裂、裂缝扩展 3 种响应模式: 当外荷载小于 53.2% 加载开裂值, 衬砌结构处于弹性变形状态; 当外荷载处于 79.8%~100% 加载开裂值之间, 衬砌结构出现损伤开裂; 当外荷载值大于加载开裂值, 已开裂部位裂缝会迅速扩展。

(3) 循环加卸载作用下衬砌结构不同响应模式的力学特征明显不同: 弹性变形模式下衬砌结构各处内力值稳定, 轴力在 -932 kN 以下, 弯矩在 $-233 \sim 230 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 衬砌安全系数在 0.69 以上; 渐进开裂阶段裂缝发展“由内而外”, 经历多次加卸载循环后损伤累积导致表面出现裂缝, 衬砌安全系数从 $0.34 \sim 0.42$ 降至 $0.22 \sim 0.23$, 其余部位仍处于弹性变形; 裂缝扩展模式中结构已开裂部位在加卸载过程中出现应力集中, 裂缝发展“由表及里”, 破坏部位衬砌安全系数降至 0.28 以下, 未开裂位置内力值保持稳定。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 来弘鹏提出研究理念, 洪秋阳获取分析研究数据, 周阳对最终提交版本进行确认。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by HONG Qiuyang, LAI Hongpeng and ZHOU Yang. The research concept was proposed by LAI Hongpeng. The research data were collected and analyzed by HONG Qiuyang. The final submitted version was confirmed by ZHOU Yang. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission

参考文献:

[1] 李鹏, 胡再强, 焦黎杰, 等. 水敏性黄土的湿剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1434-1438. (LI Peng, HU Zaiqiang, JIAO Lijie, et al. Wet shear test study on water sensitive loess[J]. Journal of Geotechnical Engineering,

2010, 32(9): 1434-1438 (in Chinese))

[2] 邵生俊, 陶虎, 许萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 42-50. (SHAO Shengjun, TAO Hu, XU Ping. Study and application of structural mechanical properties of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 42-50. (in Chinese))

[3] HONG Q Y, LAI H P, LIU Y Y. Failure analysis and treatments of collapse accidents in loess tunnels[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 145: 107037.

[4] QIU J L, LIU D D, ZHAO K, et al. Influence spatial behavior of surface cracks and prospects for prevention methods in shallow loess tunnels in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 143: 105453.

[5] LAI H P, SONG W L, LIU Y Y, et al. Influence of flooded loessial overburden on the tunnel lining: case study[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(6): 04017108.

[6] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度湿陷性黄土隧道现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1395-1404. (SHAO Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, et al. Field immersion tests on tunnel in large-thickness collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1395-1404. (in Chinese))

[7] 李骏, 邵生俊, 李国良, 等. 黄土隧道的湿陷变形规律及其对衬砌结构的作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 251-260. (LI Jun, SHAO Shengjun, LI Guoliang, et al. Collapse deformation of loess tunnel and its effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 251-260. (in Chinese))

[8] 朱才辉, 贺豪楠, 兰开江, 等. 黄土地层含水率增大对大跨度隧道围岩压力影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 93-98. (ZHU Caihui, HE Haonan, LAN Kaijiang, et al. The effect of increased water content in loess strata on the surrounding rock pressure of large-span tunnels [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 93-98. (in Chinese))

[9] SONG W L, LAI H P, LIU Y Y, et al. Field and laboratory study of cracking and safety of secondary lining for an existing highway tunnel in loess ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 88: 35-46.

[10] 刘啸, 张晓君, 魏金祝, 等. 循环加卸载下直墙拱形巷(隧)道应力松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 476-484. (LIU Xiao, ZHANG Xiaojun, WEI Jinzhu, et al. Experimental study on stress relaxation characteristics of

straight wall arch roadway (tunnel) under cyclic loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, **44**(S1): 476-484. (in Chinese))

[11] 刘昌, 张顶立, 张素磊, 等. 考虑围岩流变及衬砌劣化特性的隧道长期服役性能解析[J]. 岩土力学, 2021, **42**(10): 2795-2807. (LIU Chang, ZHANG Dingli, ZHANG Sulei, et al. Analytical solution of the long-term service performance of tunnel considering surrounding rock rheology and lining deterioration characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(10): 2795-2807. (in Chinese))

[12] 周阳, 来弘鹏, 王兴广, 等. 长锚杆/锚索改善深埋大跨度隧道初支结构受力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(4): 853-863. (ZHOU Yang, LAI Hongpeng, WANG Xingguang, et al. Experimental study on improving mechanical characteristics of initial support structure of deep buried large-span tunnels with long bolts or cables[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(4): 853-863. (in Chinese))

[13] 刘禹阳, 来弘鹏, 王敏星, 等. 隧道衬砌多点独立加载试验系统研发与应用[J]. 现代隧道技术, 2020, **57**(4): 43-51. (LIU Yuyang, LAI Hongpeng, WANG Minxing, et al. Development and application of multi-point independent loading testing system for tunnel lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, **57**(4): 43-51. (in Chinese))

[14] LI P F, ZHAO Y, ZHOU X J. Displacement characteristics of high-speed railway tunnel construction in loess ground by using multi-step excavation method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **51**: 41-55.

[15] 马晓斌, 王士民, 刘畅, 等. 地层侧压力系数对盾构隧道双层衬砌结构力学特性影响模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2025, **47**(4): 725-735. (MA Xiaobin, WANG Shimin, LIU Chang, et al. Experimental study on influence of lateral pressure coefficient of soil strata on mechanical properties of double-layer lining structure in shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, **47**(4): 725-735. (in Chinese))

[16] 谭忠盛, 孙晓静, 马栋, 等. 浅埋大跨隧道管幕预支护技术试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(增刊 1): 429-434. (TAN Zhongsheng, SUN Xiaojing, MA Dong, et al. Experimental study on pipe curtain pre support technology for shallow buried large-span tunnels[J]. Journal of Civil Engineering, 2015, **48**(S1): 429-434. (in Chinese))

[17] 康军. 黄土公路隧道设计与施工技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2006. (KANG Jun. Study on Design and Construction Technology of Loess Highway Tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese))

[18] 赵占厂. 黄土公路隧道结构工程性状研究[D]. 西安: 长安大学, 2004. (ZHAO Zhanchang. Study on Structural Engineering Characteristics of Loess Highway Tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese))

[19] 公路隧道设计细则: JTGT D70—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (Guidelines for Design of Highway Tunnel: JTGT D70—2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))