

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220413003

逆断层作用下复合衬砌输水隧洞损伤演化分析*

史新伟¹, 冯新¹, 范哲²

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁大连116024; 2. 南水北调中线信息科技有限公司, 北京100176)

摘要: 复合衬砌是一种新型可承受高内压的输水隧洞衬砌结构, 在穿越断层带时会由于断层错动作用发生破坏。因此, 对复合衬砌输水隧洞穿越逆断层的损伤演化分析具有现实意义。通过考虑多重荷载和不同结构层间的分离模式, 建立复合衬砌输水隧洞-断层三维有限元模型, 研究逆断层不同错动位移下复合衬砌结构损伤演化的过程, 并对损伤状态进行量化评估。结果表明: 逆断层作用下复合衬砌结构的损伤分为剪切损伤、拉伸损伤和失效破坏三个阶段。滑动面拱腰边墙处钢管受弯曲变形和局部屈曲耦合作用发生破坏是复合衬砌结构的最终破坏形式, 破坏范围与滑动面呈“X”型分布向两盘延伸。由于不同材质性能和黏结特性的差异, 断层作用导致不同结构层间发生脱离现象, 脱离距离与错动位移呈正相关性。混凝土-钢管间脱离不同于混凝土-围岩间呈连续性分布, 主要集中在钢管加劲肋附近。钢管内衬降低了混凝土开裂造成的内水外渗风险, 增强了复合衬砌结构抵抗断层错动作用, 提高了输水隧洞结构的安全裕度。

关键词: 复合衬砌; 输水隧洞; 逆断层; 有限元模型; 损伤演化

中图分类号: TV672⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1132-09

Damage Evolution Analysis of Composite Lining Convey Tunnel under Reverse Fault

SHI Xinwei¹, FENG Xin¹, FAN Zhe²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Information Technology Ltd. of Mid-route of South-to-North Water Transfer Project, Beijing 100176, China)

Abstract: The composite lining is a new type of water conveyance tunnel lining structure that can withstand high internal pressure but may be damaged due to fault dislocation when crossing the fault zone. Therefore, it is of practical significance to analyze the damage evolution of composite-lined water conveyance tunnels passing through reverse faults. By considering multiple loads and the separation mode between different structural layers, a three-dimensional finite element model of composite-lined water conveyance tunnel-fault was established to study the damage evolution process of composite lining structures under different dislocation displacements of reverse faults, and to quantitatively assess the damage status. The numerical results show that the damage to composite lining structure under the action of reverse fault is divided into three stages: shear damage, tensile damage, and failure damage.

* 收稿日期:2022-04-13;修回日期:2022-06-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079024)资助

作者简介:史新伟(1983—),男,博士研究生。主要从事地下结构损伤机理研究。E-mail: 76517097@qq.com

通讯作者:冯新(1971—),男,教授,博导,博士。主要从事结构工程健康监测与安全评价、工程结构防灾等研究。

E-mail: fengxin@dlut.edu.cn

The failure of the steel tube at the sidewall of the sliding surface arch under the coupling effect of bending instability and local buckling is the final failure mode of the composite lining structure, the damage range and sliding surface extend to the two plates in the "X" distribution. Due to differences in the properties and bonding properties of different materials, the fault action leads to the detachment phenomenon between different structural layers, and the detachment distance is positively correlated with the dislocation displacement. The separation between concrete and the steel tube differs from the continuous distribution between concrete and surrounding rock, which is mainly concentrated near the steel tube stiffener. The steel tube reduces the risk of internal water leakage caused by concrete cracking, enhances the resistance of composite lining structure to fault dislocation, and improves the safety margin of water conveyance tunnel structures.

Keywords: composite lining; water conveyance tunnel; reverse fault; finite element model; damage evolution

0 引言

近年来为优化配置水资源,越来越多长距离、大直径的高内压输水隧洞开始建设,由于对内水压力要求的不断提高,需要采用高强高性能的新型复合衬砌结构,其构造由内部钢管和外部混凝土组成。由于长距离输水隧洞在建造过程中有时需要穿越地质断层带,因此,断层错动是造成输水隧洞结构损伤和破坏的一个主要因素^[1-2],且一旦发生将会带来严重的灾难,社会经济损失巨大。

目前,国内外学者针对穿越断层带隧道结构的响应特征和损伤状态进行了试验和数值研究。通过模型试验研究了不同影响参数对断层破裂路径和地表位移的影响,并确定了断层破裂的位置和影响带的宽度^[3-4]。M.Ahmadi等^[5]研究了黏性颗粒土中逆断层破裂的传播,表明内聚力的变化会影响断层的行为;刘学增等^[6]和孙飞等^[7]分别开展了断层对隧道破坏模式的影响试验,结果表明在断层滑动面处衬砌结构层间会发生脱离。然而由于试验条件和经济成本的限制,试验方法具有一定的局限性。

与模型试验不同,数值方法不仅可以考虑材料的非线性,而且可以模拟不同结构层间的相互作用,目前已经成为地下工程中重要的科研手段。Q.Wang等^[8]研究了不同类型断层对隧道的响应,得出了隧道易发生破坏的部位;焦鹏飞等^[9]分析了断层倾角对隧道的影响,结果表明逆断层作用下衬砌边墙处最容易发生拉裂和剪切破坏;Z.Zhong等^[10]提出了混凝土损伤的量化指标,考虑了不同因素的影响,分析了走滑断层对隧道损伤的演化过程,结果表明

损伤严重区域主要集中在断层滑动面和断层-围岩交界处;汪振等^[11]利用黏性界面模拟了断层带的错动作用,考虑断层不同错动量和倾角的影响,讨论了正断层对隧道的影响,结果表明断层倾角在 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 时对结构安全最为不利。

上述研究资料表明,目前的研究主要集中于单一衬砌的输水隧洞结构,而针对复合衬砌输水隧洞,由于结构层不同材质性能及层间黏结性能差异较大,增加了研究的难度和复杂性。尤其在断层和内水压力共同作用,且考虑结构层间黏结性能的变化时,开展复合衬砌输水隧洞结构性能受逆断层影响的研究还鲜有报道。基于此,本文建立复合衬砌输水隧洞-断层三维有限元模型,研究分析了逆断层不同错动位移作用下,复合衬砌结构在多重荷载下的结构响应特征,并对复合衬砌结构的损伤状态进行了量化评估,为复合衬砌输水隧洞的安全运行和维护提供了技术支持。

1 数值模型建立

1.1 有限元模型

基于ABAQUS有限元软件,以某引水工程采用的复合衬砌输水隧洞为研究对象,如图1所示。基本参数为:埋深50 m,内径4 m,工作内压0.9 MPa,混凝土衬砌厚度0.7 m(初衬+二衬),钢管厚0.024 m,加劲肋高度0.12 m间隔1.2 m焊接在钢管表面。模型中包括了移动盘和固定盘围岩、混凝土衬砌和加劲肋钢管4部分。其中,加劲肋钢管采用四节点减缩积分壳单元(S4R),围岩和混凝土采用减缩积分(C3D8R)六面体实体单元模拟。为

消除边界效应影响,模型尺寸确定为200 m×100 m×100 m。断层作用下输水隧洞衬砌结构滑动面处力学响应特征是重点关注区域。因此,在保证计算效率的前提下,为了提高计算精度,对滑动面附近和隧道开挖区进行了精细化网格划分,模型中约20万个单元和30万个节点,如图2所示。

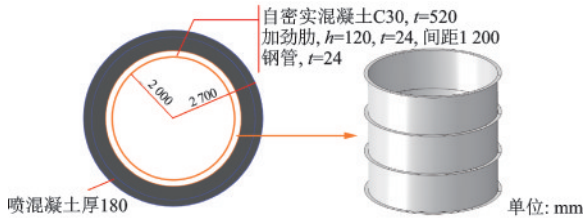


图1 复合衬砌结构示意图

Fig.1 Diagram of composite lining structure

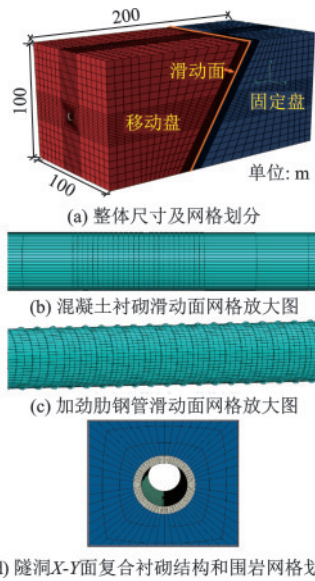


图2 三维有限元模型

Fig.2 Three-dimensional finite element model

模型中涉及了钢管、混凝土、加劲肋、和围岩多种材料间不同结构层的相互作用,通过设置不同的接触形式使模型能够真实地反映实际情况。考虑隧洞初衬在建设过程中采取了加固措施,认为初衬和围岩的变形一致,因此,采用Tie约束设置了初衬和围岩间的相互作用。同时,加劲肋采用嵌入设置在混凝土中;混凝土与钢管和围岩间的黏结作用采用接触对模拟,其中,法向采用硬接触,切向采用摩擦接触,遵循Mohr-Columb摩擦定律。混凝土-围岩以及钢管-混凝土之间的摩擦系数分别取0.4^[12]和0.7^[13],断层滑动面间的摩擦系数取0.63^[12]。

模型中围岩采用理想弹塑性Mohr-Coulomb本

构,模型参数由黏聚力、摩擦角、泊松比和膨胀角来确定,膨胀角取值为摩擦角的1/8^[10];钢管采用理想弹塑性本构;材料参数见表1。混凝土非线性行为采用损伤塑性本构,受拉和受压应力应变关系为:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad (2)$$

当混凝土进入软化阶段后,混凝土无损伤,应力-应变曲线按照斜率 E_0 卸载;当混凝土发生损伤后,应力应变曲线按照斜率 $(1-d_t)E_0$ 和 $(1-d_c)E_0$ 卸载。其中, d_t 和 d_c 为开裂混凝土的拉伸和压缩损伤因子; E_0 为弹性模量; $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ 和 $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ 为等效拉伸和压缩塑性应变。依据规范^[14]和Sidiroff提出的能量等价原理^[15]确定混凝土的塑性参数(表2)。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

类型	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模 量/GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
围岩	2 900	0.28	7.5	1.1	45
钢管	7 850	0.28	206	—	—
混凝土	2 200	0.2	30	—	—

表2 混凝土塑性参数

Table 2 Plastic parameter of concrete

膨胀角/ (°)	流动势 偏移量	双轴极限抗压强度/ 单轴极限抗压强度	不变量 应力比	黏滞 系数
40	0.1	1.16	0.667	0.000 5

1.2 加载及边界条件

复合衬砌输水隧洞在运行阶段增加了内部水重和高内压的作用,因此,有限元计算过程分6个荷载步进行加载:第一步采用生死单元移除衬砌结构,对围岩进行地应力平衡获得围岩初始应力;第二步利用软化模量法,模拟隧洞开挖过程中的应力释放;第三步施加衬砌结构的重力作用;第四步采用浮力与水重的换算公式进行水重荷载的施加;第五步假设模型计算段隧洞高程相同,采用均布压强对衬砌结构施加内压作用;第六步采用静力弹塑性有限元方法模拟断层错动,考虑逆断层运动特点在释放移动盘Y和Z向约束的同时,施加位移荷载使移动盘沿着滑动面向上移动,通过控制垂直方向上的位移来实现断层的错位移^[16](图3)。需要指出,模拟断层错动时没有考虑往复错动和不同错动速率的影响。

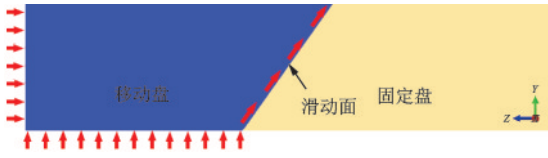


图3 断层错动位移加载图

Fig.3 Fault dislocation displacement loading

2 损伤量化指标

2.1 混凝土衬砌拉伸损伤量化分析

裂缝是混凝土损伤的表现形式,开裂宽度能反映混凝土的损伤程度,因此,常被用于结构安全性和耐久性评价的直接指标。Z.P.Bazant等^[17]基于有限元单元特征尺寸定义了混凝土开裂宽度(w_t)与开裂应变(ϵ_{cr})之间的关系:

$$w_t = \int_{h_c} \epsilon_{cr} dh_c \quad (3)$$

式中, h_c 为单元特征尺寸。ABAQUS中单元特征尺寸是基于单元的几何形式和公式进行定义的,其中八节点六面体单元将对角线作为单元特征尺寸^[10]。混凝土受拉开裂后等效塑性应变($\tilde{\epsilon}_t^{pl}$)和拉伸开裂应变(ϵ_t^{cr})之间的关系如式(4)。由于等效塑性应变是混凝土刚度退化变量的非减函数,因此,可以用 $\tilde{\epsilon}_t^{pl} = 0$ 来定义混凝土是否发生拉伸损伤。

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \epsilon_t^{cr} - \frac{d_t}{1 - d_t} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (4)$$

模型中混凝土假设为各向同性,因此,开裂应变 ϵ_{cr} 累计在单元特征尺寸上产生的裂纹宽度是相同的,联立式(3)和(4)可知:

$$d_t = \frac{w_t E_0}{h_c \sigma_t + w_t E_0} \quad (5)$$

D.A.Hordijk^[18]通过大量实验得出了混凝土拉应力和单轴抗拉强度之间的关系:

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left[1 + \left(c_1 \frac{w_t}{w_{cr}} \right)^3 \right] e^{-\left(c_2 \frac{w_t}{w_{cr}} \right)} - \frac{w_t}{w_{cr}} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad (6)$$

$$w_{cr} = 5.14 \frac{G_F}{f_t} \quad (7)$$

$$f_t = 1.4 \left(\frac{f_c' - 8}{10} \right)^{(2/3)} \quad (8)$$

$$G_F = (0.0469 d_a^2 - 0.5 d_a + 26) \left(\frac{f_c'}{10} \right)^{0.7} \quad (9)$$

式中, σ_t 为混凝土的拉应力; f_c' 为圆柱体抗压强度

(C30取值为20.1 MPa); f_t 为单轴抗拉强度; d_a 为骨料的粒径(本文取值20 mm); G_F 为单位面积上产生无应力裂纹所需的断裂能; w_{cr} 为应力或断裂能完全释放时的裂纹张开位移; $c_1=3.0$ 和 $c_2=6.93$ 为混凝土拉伸试验确定常数。根据规范^[19]中混凝土裂缝宽度限值以及过镇海和张秀琴^[20-21]试验结果,本文以0.04、0.2和0.4 mm作为混凝土开裂宽度的限值,定量划分了混凝土衬砌损伤等级(表3)。

表3 混凝土损伤等级划分

Table 3 Classification of concrete damage

裂缝宽 W_t/mm	损伤指数 (d_t)	损伤 等级	混凝土衬砌状态描述
≤ 0.04	≤ 0.42	I	轻微损伤,混凝土衬砌未发现可见裂缝
(0.04, 0.2]	(0.42, 0.79]	II	中度损伤,混凝土衬砌表面出现可见裂缝,在裂缝区域混凝土衬砌结构承载能力降低50%~75%
(0.2, 0.4]	(0.79, 0.88]	III	重度损伤,混凝土衬砌表面裂缝出现贯通,裂缝区域结构承载能力丧失约85%~90%
> 0.4	> 0.88	IV	完全破坏,混凝土衬砌结构已经发生破裂,局部衬砌结构完全丧失承载能力

2.2 钢管损伤极限状态

针对新型复合衬砌输水隧洞损伤研究中,目前尚未提出内部钢管损伤评价指标。因此,参考埋地钢管损伤研究成果,分析输水隧洞钢管内衬的损伤状态。虽然钢管具有较好的延展性,可承受一定的塑形变形,但从弹性变形发展到塑性变形的渐进破坏过程中,钢管壁会在断层错动位移较大区域达到其极限状态,进而发生局部破坏。以极限应变作为钢管衬砌失效的判断依据,不仅可以判断衬砌结构的局部开裂位置,还能描述损伤发展过程与程度的变化。

不同规范对埋地钢管的极限应变进行了定义,其值在1.5%~5%不等^[22]。欧洲标准化委员会制定的Eurocode8规范中,对陆上全埋钢管在地震作用下产生的损伤极限应变和承载能力极限应变值定义为^[23]:

$$\text{损伤极限状态: } \epsilon_{t,y} = \epsilon_{c,y} = 0.002 \quad (10)$$

$$\text{承载能力极限状态: } \epsilon_{t,u} = 0.03 \quad (11)$$

$$\epsilon_{c,u} = \min(-0.01, -0.4t/D) \quad (12)$$

式中, $\epsilon_{t,y}$ 和 $\epsilon_{c,y}$ 为轴向屈服应变; $\epsilon_{t,u}$ 和 $\epsilon_{c,u}$ 为最大极限应变; t 为钢管壁厚; D 为管径。依据上述应变极限状态, 对复合衬砌中钢管在断层不同错动位移下的损伤状态进行评估。

3 结果与讨论

3.1 阶段 I: 复合衬砌剪切损伤阶段

断层错动位移较小时, 两盘的相互位移对复合衬砌结构产生了较大的剪切作用。图4为错动位移 $\Delta f=0.85$ cm 时复合衬砌剪应变响应。由于复合衬砌结构内、外侧介质及黏结作用的差别, 峰值剪应

变出现在内侧拱腰处, 方向与滑动面一致。施士昇^[24]给出混凝土的抗剪强度(τ)约为抗压强度(σ_{cu})的0.095~0.121, Z.Paul^[25]建议混凝土的剪切模量(E_s)按其弹性模量(E_0)的40%取值, 由公式(13)计算混凝土的极限剪切应变 $\epsilon_s=203\mu\epsilon$ 。

$$\epsilon_s = \frac{\tau}{E_s} = \frac{0.121\sigma_{cu}}{0.4E_0} \quad (13)$$

由图4(b)可知, 当 $\Delta f=0.85$ cm 时, 混凝土拱腰内、外侧剪应变分别为 $416\mu\epsilon$ 和 $214\mu\epsilon$, 均超过其极限剪应变并发生剪切破坏, 对称分布在滑动面两侧。此时, 钢管拱腰处出现了应变突变, 峰值为0.022%。说明 $\Delta f < 0.85$ cm 时主要以混凝土拱腰处发生剪切破坏为主, 钢管只是发生较小的变形适应断层错动作用。尽管拱腰处混凝土受剪发生贯穿性开裂, 但钢管的存在降低了内水外渗的风险。

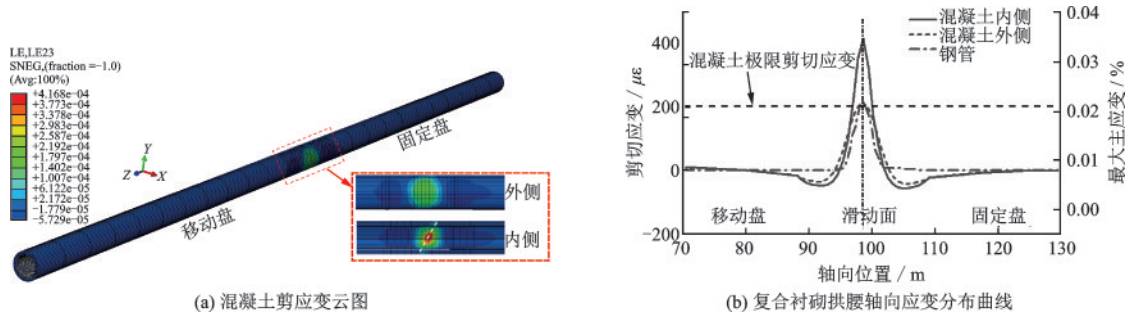


图4 复合衬砌剪应变响应($\Delta f=0.85$ cm)

Fig.4 Response of shear strain in composite lining($\Delta f=0.85$ cm)

基于 S.M.Munro 等^[26]提出的环形结构截面弯矩计算方法, 得到滑动面处截面在不同工况下的弯矩(图5(a))。移动盘拱顶和固定盘仰拱处产生了负弯矩效应, 当弯曲应变超过极限应变时会发生拉弯变形, 从而产生局部脱离现象。受断层错动位移和围岩约束作用, 拱腰产生了正弯矩效应。ABAQUS 中输出变量 COPEN 定义了接触面之间的接触状态, 当 COPEN 数值大于0时, 表示接触面

间脱离。根据 COPEN 计算结果(图5(b))可知, 脱离主要集中在拉弯变形区, 混凝土-围岩间最大脱离距离在近滑动面处为0.2 cm, 轴向影响范围在400 cm 左右。此时混凝土-钢管间的脱离距离为 10^{-7} 量级, 基本上等于0, 可认为钢管-混凝土黏结良好。这说明错动位移较小时, 混凝土-钢管变形一致, 共同抵抗断层错动作用, 围岩和混凝土的不协调变形, 导致混凝土与围岩之间发生脱离。

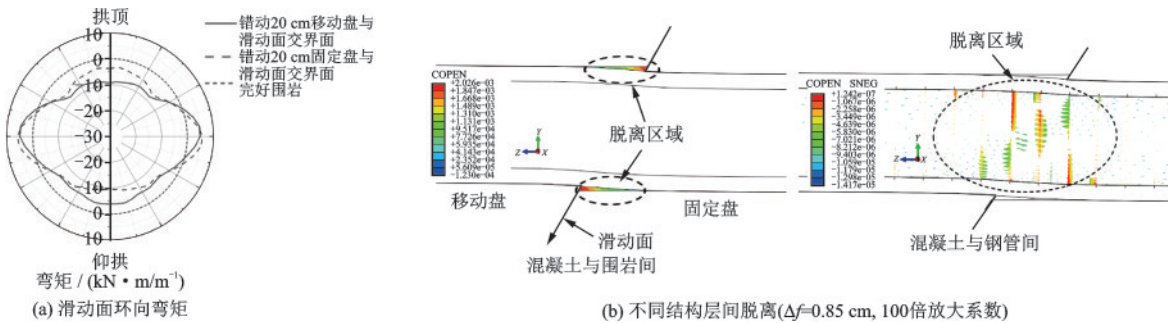


图5 复合衬砌环向弯矩和脱离分布

Fig.5 Distribution of ring bending moment and detachment in composite lining

3.2 阶段 II: 复合衬砌拉伸损伤阶段

随着错动位移的增大,滑动面拱腰处混凝土发生剪切破坏丧失承载力,此时复合衬砌结构环向上应力发生重分布,拉弯变形区混凝土衬砌出现开裂。图6为不同错动位移下混凝土拉伸损伤云图,复合衬砌结构受拉损伤沿滑动面反对称分布在拉弯变形区(图6(a)),以固定盘为例分析了混凝土受拉损伤演化。

由2.1节可知,混凝土拉伸损伤指数 $d_t > 0.42$ 时会产生可见裂缝, $d_t > 0.79$ 时基本上失去承载能力。因此,图6(a)中 $d_t > 0.79$ 的区域代表混凝土发生了Ⅲ级以上的损伤状态,表示混凝土已经丧失了90%的承载能力; $0.42 < d_t < 0.79$ 区域的损伤等级为Ⅱ级,表示出现可见裂缝;其余区域表示混凝土没有发生损伤。 $\Delta f = 2$ cm时,混凝土衬砌外侧拱脚出现可见裂缝,随着错动位移的增大逐渐向拱腰和径向延伸, $\Delta f > 8$ cm时轴向向上的损伤范围保持不变,损伤程度加深。钢管与混凝土轴向摩擦力及加劲肋和混凝土共同受力增强了混凝土的抗拉强度,因此在混凝土内侧未发现可见裂缝。说明钢管-混凝土共同受力有效减轻了外侧混凝土拉伸损伤程度在径向上的扩展。

如图6(b)所示,错动位移 $\Delta f = 3$ cm时拱脚处混凝土可见裂缝已贯通至钢管加劲肋附近,分别选取钢管拱腰、拱脚和仰拱位置绘制了最大主应变分布曲线(图7)。当混凝土拱腰和拱脚分别发生剪切和拉伸破坏后,相应位置钢管的应变出现突变,说明此时荷载逐渐开始由钢管承担。仰拱的峰值主应变为0.03%出现在固定盘侧并未出现在滑动面处,这是由于滑动面仰拱处发生脱离,环向和轴向上脱离临界面处出现了较大的应力集中现象导致的。

如图8所示,断层错动位移 $\Delta f = 3$ cm时,混凝土-围岩间脱离距离达到了1 cm,是 $\Delta f = 0.85$ cm时的5倍,轴向上的距离也增大到了880 cm左右,比 $\Delta f = 0.85$ cm增大了一倍。此时,钢管和混凝土的变形一致,没有出现脱离。说明当混凝土拱腰处发生剪切破坏后,滑动面处环向应力进行重分布,此时,主要以拉弯变形区受拉变形为主,由于仰拱和拱顶的负弯矩作用使外侧混凝土受到较大的拉应力,导致混凝土-围岩间脱离进一步发展。

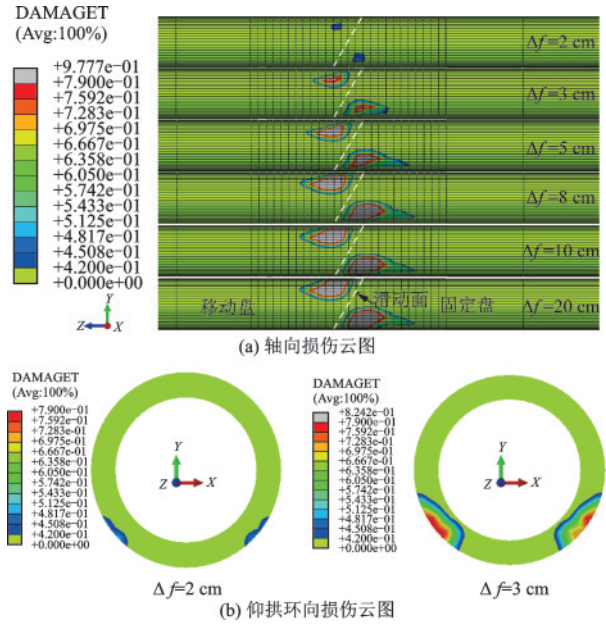


图6 不同错动位移下混凝土拉伸损伤云图
Fig.6 Concrete tensile damage nephogram under different dislocation displacements

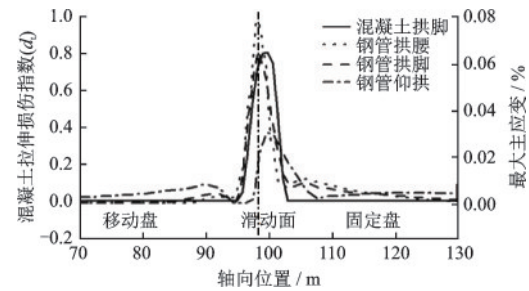


图7 混凝土拱脚拉伸损伤(d_t)和钢管特征位置应变曲线
Fig.7 Curves for tensile damage of concrete arch foot (d_t) and strain of steel tube characteristic position

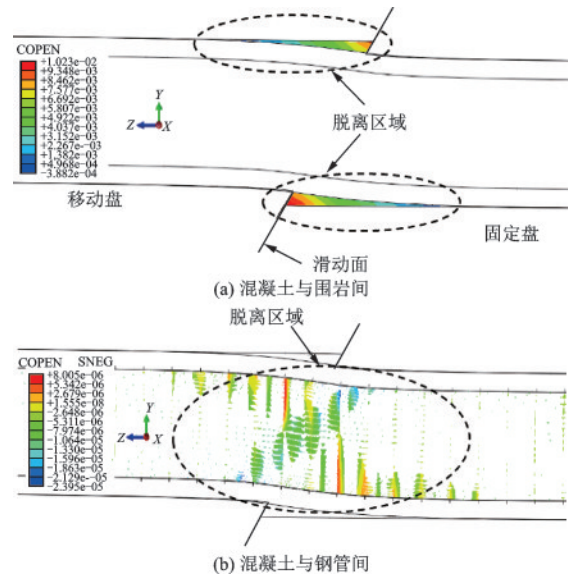


图8 不同结构层间脱离($\Delta f = 3$ cm, 20倍放大)
Fig.8 Separation between different structural layers ($\Delta f = 3$ cm, 20-fold amplification factor)

3.3 阶段 III: 复合衬砌失效阶段

钢管的损伤是复合衬砌结构最终损伤失效的直接指标。随着错动位移的增大,复合式衬砌结构的损伤逐渐从外侧混凝土向内侧钢管演化发展。如图9所示,在 $\Delta f=5\text{ cm}$ 时,拱脚外侧混凝土衬砌局部失去承载能力($d_1>0.79$ 区域),并逐渐向仰拱发展,且外侧损伤较内侧严重。这说明复合衬砌结构内侧钢管和混凝土共同受力能够有效减轻外侧混凝土拉伸损伤程度在径向上的延伸,增强其抵抗断层错动作用,提高了输水隧洞结构的安全裕度。

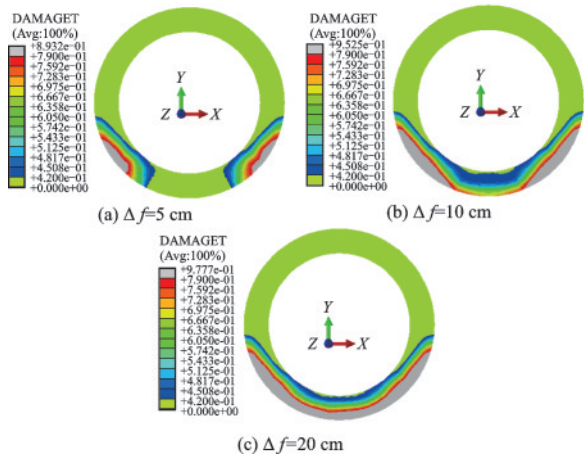
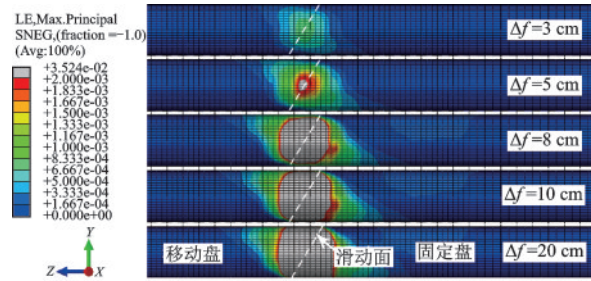


图9 不同错动位移下混凝土仰拱环向损伤云图

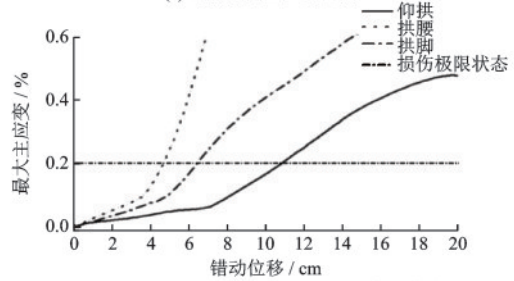
Fig.9 Circumferential damage nephogram of concrete inverted under different displacement

图10为钢管损伤发展趋势图,云图中最大主应变大于0.002的区域代表钢管发生损伤。由于断层错动作用,钢管的应变状态发生了变化,随着混凝土损伤程度和范围的扩展,钢管的影响范围和拉伸应变增加明显(图10(a))。由图10(b)可知,复合衬砌结构拱腰处由于受拉、压和剪等组合应力作用,在 $\Delta f=4.8\text{ cm}$ 时首先发生损伤。钢管的损伤范围随错动位移的增大逐渐向远离滑动面轴向和环向发展,反对称分布在滑动面两侧。最终拱脚和仰拱分别在6.4 cm和10.8 cm时发生损伤,此时,滑动面处复合衬砌结构整个环向均发生了损伤。

为进一步分析钢管损伤随错动位移的演化过程,选取滑动面受损最严重截面绘制不同方向应变曲线(图11)。由图11可以看出,钢管轴向和环向的应变受断层错动作用的影响显著,在正常运行时钢管环向发生椭圆化,轴向上未发生变形。当 $\Delta f=0.85\text{ cm}$ 时,复合衬砌结构拱腰处混凝土受剪破坏并



(a) 钢管最大主应变云图



(b) 典型部位最大主应变随错动位移变化曲线

图10 钢管损伤发展趋势图

Fig.10 Development trend of steel tube damage

丧失承载力,内、外荷载由钢管承担,此时,钢管拱腰处由受压变形转为受拉变形,受逆断层挤压作用轴向发生受压变形。随着错动位移的增大,拱肩和拱脚处由于混凝土-围岩间的摩擦力作用产生应力集中现象,混凝土在 $\Delta f=3\text{ cm}$ 时发生拉伸破坏,此时钢管在拱肩、拱脚处环向上的受拉和轴向受压变形比较明显,并逐渐向拱腰发展。当 $\Delta f=6\text{ cm}$ 时,拱脚处混凝土发生拉伸破坏失去承载力,此时,复合衬砌结构滑动面环向上内、外侧荷载由钢管承担。由于逆断层轴向挤压作用,拱腰边墙处钢管受弯曲变形和局部屈曲耦合作用达到承载能力极限状态并发生轴向压缩破坏,此时,复合衬砌结构整体发生失效。失效范围随错动位移的增大与滑动面呈“X”型分布在滑动面两侧(图11(c))。

图12显示了不同结构层间脱离随错动位移变化曲线。错动位移5 cm之前,钢管-混凝土间基本上没有发生脱离,而混凝土-围岩间脱离轴向范围在5 cm时达到最大,说明在5 cm之前围岩和混凝土间的黏结作用是抵抗断层产生拉弯变形的主要因素。随着混凝土损伤程度的加深和范围的扩大断层作用逐渐由钢管承担,由于钢管-混凝土的不协调变形,导致钢管-混凝土间发生脱离,加劲肋有效增强了混凝土-钢管的黏结作用,因此,钢管-混凝土间的脱离不太明显,主要集中在加劲肋附近,且不像混凝土-围岩间的脱离呈连续分布。

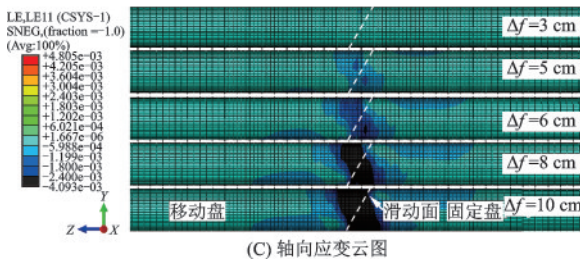
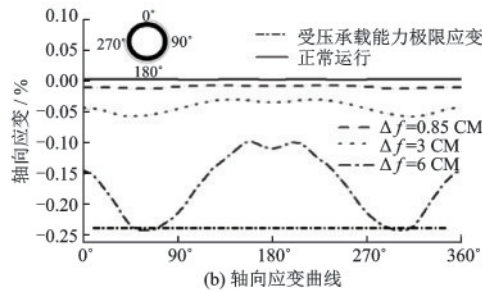
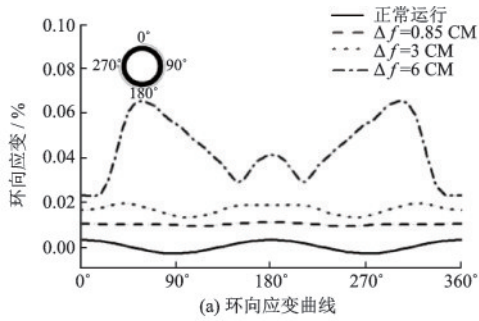


图 11 钢管不同方向应变曲线及轴向应变云图

Fig.11 Strain curves and axial strain profile of steel tube in different directions

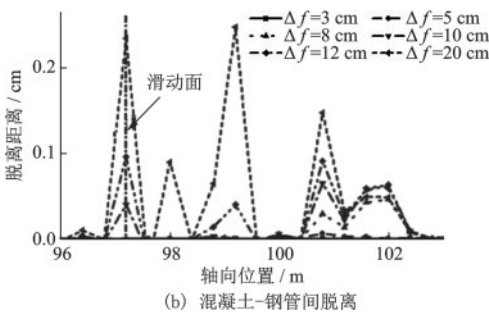
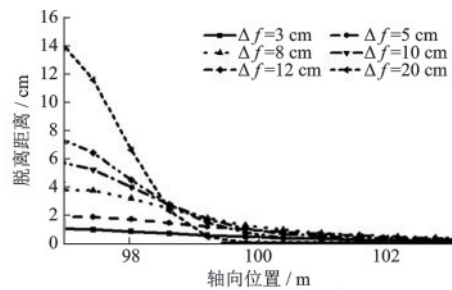


图 12 不同结构层间脱离随错动位移变化曲线

Fig.12 Curves of separation between different structural layers with dislocation displacement

4 结 论

通过考虑多重荷载作用和不同结构层间黏结性能分离模式的影响,建立复合衬砌输水隧洞-断层三维有限元模型,研究了逆断层不同错动位移对复合衬砌结构输水隧洞的损伤演化过程及不同结构层间的脱离情况。得出如下结论:

(1) 逆断层错动作用下,复合衬砌结构在滑动面拱腰边墙处损伤最严重。随着逆断层错动位移的增大,首先在拱腰处的混凝土发生剪切破坏,随后移动盘拱顶和固定盘仰拱混凝土发生拉伸破坏,最后在滑动面处混凝土丧失承载力后,钢管受弯曲变形和局部屈曲耦合作用发生轴向压缩破坏,与滑动面呈“X”型向两盘发展,使复合衬砌结构发生整体破坏。

(2) 逆断层错动作用下,由于不同材质性能和粘结特性的差异,导致不同结构层间出现脱离现象,脱离距离与错动位移呈正相关性。钢管外侧加劲肋的设计能够增强混凝土-钢管间的黏结作用,使其脱离分布不同于混凝土-围岩间呈连续性,主要集中在加劲肋附近,有效控制了轴向脱离范围的扩大。

(3) 钢管的存在有效减轻了外侧混凝土拉伸损伤程度在径向上的扩展,降低了因混凝土开裂造成内水外渗的风险,增强了复合衬砌结构抵抗断层错动作用,一定程度上提高了输水隧洞结构的安全裕度。

本文的研究结果不仅可为已通水复合衬砌输水隧洞的损伤评估提供参考,还可以为穿越逆断层复合衬砌输水隧洞的抗震设计提供思路。文中混凝土损伤等级划分标准是基于理论研究和数值分析,后续希望结合实际工程参数,对逆断层作用下复合衬砌输水隧洞的损伤进行试验研究。

参考文献:

- [1] Azizkandi A S, Ghavami S, Baziar M H, et al. Assessment of damages in fault rupture-shallow foundation interaction due to the existence of underground structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 222-237.
- [2] Sabagh M, Ghalandarzadeh A. Centrifugal modeling of continuous shallow tunnels at active normal faults intersection [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 22: 100325.
- [3] Cole D A, Lade P V. Influence zones in alluvium over dip-slip faults [J]. Journal of Geotechnical Engineering

- neering, 1984, 110(5): 599-615.
- [4] Baziar M H, Nabizadeh A, Jung Lee C, et al. Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 65: 151-164.
- [5] Ahmadi M, Moosavi M, Jafari M K. Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through wet granular soil[J]. *Engineering Geology*, 2018, 239: 229-240.
- [6] 刘学增,王煦霖,林亮伦. 45°倾角正断层粘滑错动对隧道影响试验分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(1): 44-50.
Liu X Z, Wang X L, Lin L L. Modeling experiment on effect of normal fault with 45° dip angle stick-slip dislocation on tunnel[J]. *Chinese Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(1): 44-50. (in Chinese)
- [7] 孙飞,张志强,易志伟. 正断层黏滑错动对地铁隧道结构影响的模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3037-3044, 3053.
Sun F, Zhang Z Q, Yi Z W. Model experimental study of the influence of normal fault with stick-slip dislocation on subway tunnel structure[J]. *Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3037-3044, 3053. (in Chinese)
- [8] Wang Q, Chen G, Guo E D. Analysis on characters of cross-fault tunnel under action of earthquake [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 166-169: 2016-2019.
- [9] 焦鹏飞,来弘鹏. 不同倾角逆断层错动对隧道结构影响理论分析[J]. *土木工程学报*. 2019, 52(2): 106-117.
Jiao P F, Lai H P. Theoretical analysis on the influence of different dip angle reverse faults' dislocation on tunnel structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(2): 106-117. (in Chinese)
- [10] Zhong Z, Wang Z, Zhao M, et al. Structural damage assessment of mountain tunnels in fault fracture zone subjected to multiple strike-slip fault movement [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 104: 103527.
- [11] 汪振,钟紫蓝,赵密,等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(10): 1876-1884.
Wang Z, Zhong Z L, Zhao M, et al. Simulation of normal fault rupture and its impact on mountain tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(10): 1876-1884. (in Chinese)
- [12] 赵坤,陈卫忠,赵武胜,等. 逆断层错动作用下隧道衬砌铰接设计参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增1): 3411-3421.
Zhao K, Chen W Z, Zhao W S, et al. Study on parameters of articulated design of tunnel lining under reverse fault dislocation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2018, 37 (Sup1): 3411-3421. (in Chinese)
- [13] American Concrete Institute Committee. ACI standard Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (318R-14) [R]. MI, USA: [S.n.], 2014.
- [14] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] Sidoroff F. Description of anisotropic damage application to elasticity [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1981: 237-244.
- [16] Joshi S, Prashant A, Deb A, et al. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(7): 930-940.
- [17] Bazant Z P, Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials[M]. [S.l.]: CRC Press, 1998.
- [18] Hordijk D A. Local approach to fatigue of concrete[D]. Delft: Delft University of Technology, 1991.
- [19] 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [20] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Guo Z H. Strength and constitutive relation of concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)
- [21] 过镇海,张秀琴. 砼受拉应力—变形全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1988, 9(4): 45-53.
Guo Z H, Zhang X Q. Experimental Investigation of complete stress-deformation curves of concrete in tension [J]. *Journal of Building Structures*, 1988, 9(4): 45-53. (in Chinese)
- [22] Xu L, Lin M. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion using the vector form intrinsic finite element method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 93: 61-83.
- [23] Eurocode 8, part 4: silos, tanks and pipelines, CEN EN 1998-4[S]. Brussels Belgium: [s.n.], 2006.
- [24] 施士昇. 混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量[J]. *土木工程学报*, 1994, 32(2): 47-51.
Shi S S. Shear strength, modulus of rigidity and Young's modulus of concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1994, 32(2): 47-51. (in Chinese)
- [25] Paul Z. Torsional strength of prestressed concrete member[J]. *ACI Journal*, 1961, 32(10): 1337-1359.
- [26] Munro S M, Moore I D, Brachman R W I. Laboratory testing to examine deformations and moments in fiber-reinforced cement pipe[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(11): 1722-1731.

(本文编辑:赵霞)