

DOI: 10.11779/CJGE20211268

不同损伤程度下公路隧道粘钢加固效果试验研究

刘学增¹, 李振^{*1}, 游贵良², 杨芝璐^{3,4}, 杨学良¹, 桑运龙^{3,4}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 广州市花都区交通运输局, 广东 广州 510800; 3. 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; 4. 上海同岩土木工程科技股份有限公司, 上海 200092)

摘要: 衬砌裂损是隧道常见病害形式, 直接影响到结构承载力, 粘钢加固作为结构补强的方式应用较多, 但公路隧道粘钢加固后结构的承载性能和不同损伤程度下的粘钢加固效果研究较少。采用 1:10 模型加载试验, 研究了公路隧道在不同损伤程度下加固后结构的承载性能、受力变形特征和破坏过程, 分析了粘钢加固效果、加固时机。研究结果表明: ①原结构和加固结构在松动荷载作用下的变形过程均可分为 4 个阶段, 但破坏特征及形态存在差异。②剩余承载力为 50% F , 30% F (F 为原结构极限承载力) 时加固, 破坏荷载相对原结构提升 50%, 51%。在结构失效前施作钢板可有效提升其极限承载力, 且受加固点荷载影响较小。剩余承载力为 50% F , 30% F 时加固, 最终变形量比原结构增加 59%, 56%, 可降低脆性破坏风险。③加固结构破坏模式为拱顶大偏心受压破坏。④加固过晚时, 钢板会因衬砌的表面裂缝及变形速度而难以有效黏结或长时间协同变形, 导致加速破坏。建议将结构剩余承载力介于 62% F 至 50% F 作为公路隧道合理加固时机。

关键词: 公路隧道; 剩余承载力; 粘钢; 模型试验; 加固效果; 加固时机

中图分类号: TU43; U457.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)02-0243-09

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。

Experimental study on reinforcement effects of bonded steel plates of highway tunnels under different damage degrees

LIU Xuezeng¹, LI Zhen¹, YOU Guiliang², YANG Zhilu^{3,4}, YANG Xueliang¹, SANG Yunlong^{3,4}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Huadu District Transportation Bureau, Guangzhou 510800, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Underground Infrastructure Detection and Maintenance Equipment, Shanghai 200092, China; 4. Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The cracking damage of linings is a common damage form of tunnels, which directly affects the bearing capacity of the structure. The reinforcement of bonded steel plates is widely used as the structural reinforcement, but there are few researches on the bearing capacity of the highway tunnels after reinforcement and the reinforcement effects under different damage degrees. The 1:10 model loading tests are used to study the bearing capacity, mechanical deformation characteristics and failure process of the reinforced highway tunnel structure under different damage degrees, and the reinforcement effects and time are analyzed. The results show that: (1) The deformation process of the original and reinforced structures under loose loads can be divided into four stages, but the failure characteristics and forms are different. (2) When the residual bearing capacity is 50% F and 30% F (F is the ultimate bearing capacity of the original structure), the failure loads are strengthened and increase by 50% and 51% compared with those of the original structure. The steel plates applied before the failure of the structure can effectively improve its ultimate bearing capacity and are less affected by the loads at the reinforcement point. When the residual bearing capacity is 50% F and 30% F , the final deformations increase by 59% and 56% compared with those of the original structure, which can reduce the risk of brittle failure. (3) The failure mode of the reinforced structure is large eccentric compression failure of the vault. (4) When the reinforcement is too late, the steel plates will be difficult to effectively bond or cooperatively deform for a long time due to the surface cracks and deformation speed of the linings, resulting in accelerated failure. It is suggested that the residual bearing capacity of the structure should be between 62% F and 50% F as the reasonable reinforcement time for the highway tunnels.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878497); 上海市人才发展资金资助项目(2021051); 贵州省科学技术厅重大科技专项项目(黔科合重大专项字[2018]3011)

收稿日期: 2021-10-28

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

Key words: highway tunnel; residual bearing capacity; bonded steel plate; model test; reinforcement effect; reinforcement time

0 引言

随着中国运营公路隧道规模持续增大,衬砌病害问题日益突出,包括结构裂损、渗漏水等^[1-2],且结构裂损问题尤为突出。据调查统计^[3],70%的隧道均存在裂损问题,占全部病害数量的40%。为有效改善受损结构性能,保障隧道运营安全,常对衬砌结构进行补强。其中,粘钢加固因施作便捷、重量轻、能较好地适应弧形结构等特点,在隧道加固领域具有较广阔的应用前景^[4]。目前对粘钢加固结构的承载性能认识仍不足,加固设计和加固时机的选择缺乏理论依据。

国内外学者围绕公路隧道常用加固方法已经开展了一些研究。针对套拱加固和黏碳纤维布的研究主要涉及衬砌变形及受力特征^[5-9]、加固效果分析及对比^[10-12]、加固结构计算方法^[13]等,内容较全面。针对粘钢加固,何川等^[14]通过1:25模型试验对比分析了钢板和玻璃纤维对衬砌拱顶空洞的补强效果;Chen等^[15]采用FLAC研究了钢板间距、厚度、宽度等参数对加强效果的影响规律;张东等^[16]通过有限元计算探讨了粘钢对局部欠厚衬砌的补强效果;Kazuaki等^[17]结合工程实例讨论了钢板对隧道衬砌的加固效果。总体来说,目前关于公路隧道粘钢加固的研究内容比较片面,缺少针对松动荷载作用下粘钢加固结构的承载性能及损伤机理的深入研究,对公路隧道在不同损伤程度下的粘钢加固效果认识不足。另外,研究方法主要为数值计算,在模拟材料和结构的非线性行为方面存在局限,难以准确反映结构的破坏特征。

针对上述问题,本文开展1:10模型试验,将公路隧道原结构和不同损伤程度下加固后结构分别加载至破坏,系统研究各结构的承载性能、受力变形特征和破坏过程,对粘钢加固效果和合理加固时机进行分析。

1 模型试验设计

1.1 隧道原型

以国内常见的公路隧道为研究对象,并结合《公路隧道设计规范:JTG D70—2004》^[18]确定原型隧道的结构形式:衬砌宽11.86 m,高度9.63 m,厚0.5 m,见图1。二衬采用C30钢筋混凝土,钢筋型号HRB335,配筋率为0.62%。围岩级别为VI级。

1.2 相似模拟方案

按照量纲分析法进行模型试验相似比的设计^[19]。

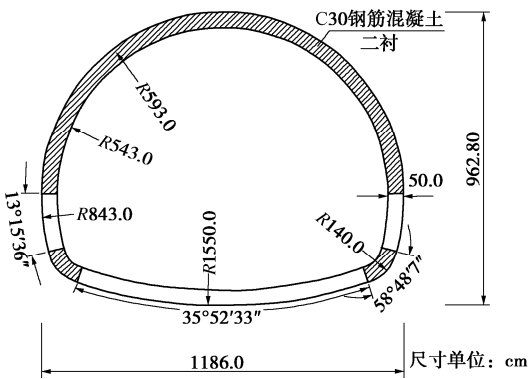


图1 原型隧道截面尺寸

Fig. 1 Dimensions of prototype tunnel section

表1 相似比设计汇总

Table 1 Summary of similarity ratio design

物理量	单位	相似关系	相似比
几何尺寸 C_L	m	—	10
弹性模量 C_E	N/m ²	—	19
应力 C_σ	N/m ²	—	19
位移 C_δ	m	$C_\delta = \frac{C_\sigma C_L}{C_E}$	10
面力 C_s	N/m ²	$C_s = C_\sigma$	19
体力 C_v	N/m ³	$C_v = \frac{C_\sigma}{C_L}$	1.9
力 N	N	$C_N = C_\sigma C_L^2$	1:1900
弯矩 C_M	N·m	$C_M = C_\sigma C_L^3$	1:19000
弹性抗力系数 C_k	N/m ³	$C_k = \frac{C_\sigma}{C_\delta}$	1:1.9

满足几何相似比 $C_L = 1:10$,结合试验材料配比结果,确定其他相似比如表1。主要材料模拟方法如下:

(1) 混凝土。

采用混合砂浆模拟C30混凝土。由水泥、黄砂、石灰膏、水按照质量比为187:1450:113:330配置,且养护后测得弹性模量为1.57 GPa。

(2) 钢筋。

采用低碳钢丝网来模拟原型钢筋。在衬砌截面的两侧分别布置11根直径1 mm的钢丝,且保护层厚度为5 mm。

(3) 钢板。

试验采用厚0.5 mm,宽50 mm的1070-O态铝板进行模拟。

(4) 钢板黏结剂及锚栓。为保证钢板和衬砌间的黏结强度标准^[20],采用HM-120结构粘钢胶充当黏结剂;锚栓采用普通螺丝钉模拟,间距8~15 cm。粘钢补强情况见图2。



图 2 衬砌内表面粘钢补强情况

Fig. 2 Reinforcement conditions of inner surface of linings with bonded steel plates

(5) 地层作用

地层对衬砌结构的约束作用通过地层抗力体现,并由弹簧施加。仰拱以上布置 11 组弹性抗力装置,每组并联 3 个 I 型弹簧,仰拱部位布置 5 组弹性抗力装置,每组 1 个 II 型弹簧,参数见表 2。设计弧形垫板以使衬砌和弹簧紧密贴合。模型弹性抗力系数为 1.58 MPa/m。

表 2 弹簧型号及参数

Table 2 Types and parameters of spring

型号	弹簧中径/ mm	自由高度/ mm	有效 圈数	刚度/ (N·mm ⁻¹)
I	65	100	4.5	32.7
II	60	130	4.5	101.6

1.3 试验装置

试验采用自行研制的全周加载装置,包括加载系统、反力系统和量测系统,如图 3 所示。加载系统由 11 只独立千斤顶组成,布置在仰拱以上位置,通过前端弹簧与加载曲板连接。千斤顶型号 HJD0.4D-100-4B,并装配限压阀,可防止操作失误导致的变形或损坏;反力系统用于承受千斤顶支座和弹簧的反力、固定百分表,由钢制承载圈及隧道底部的支撑板组成。为消除隧道与支撑板的摩擦力,对衬砌接触端面进行刷漆平整,并涂上润滑油;量测系统由衬砌表面电阻应变片、振弦式位移计、数码相机组成,可实时记录衬砌应变、变形和裂缝发展情况。

1.4 加固操作方法

当加载至指定荷载,需对带伤衬砌结构的内表面粘贴钢板进行补强。具体操作方法如下:①清理衬砌内表面,保证表面光滑整洁;②配置黏结剂,并涂抹于衬砌表面,满足中间厚边缘薄;③将钢板置于指定位置并适当加压,直至胶液从钢板边缘挤出,并采用器械固定;④养护 2~3 d 后拆除固定器械,并安装锚栓。

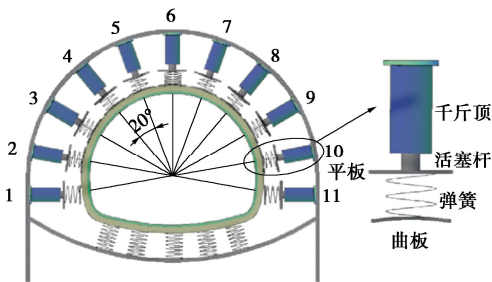
1.5 加载及量测方案

为模拟拱顶 60° 范围内的松动地压,对#5~#7 千斤顶进行主动同步加载,其余千斤顶被动承载。采用分级加载方式,每级荷载 60 N (对应原型荷载 18.454

kPa),持荷稳定 30 min 后进行下级加载,直至结构破坏。在衬砌外表面及起拱线布置 13 只百分表,用于测量外表面法向位移及起拱线下沉量,见图 4 (a)。在衬砌内、外侧沿环向布置 34 张应变片,见图 4 (b)。



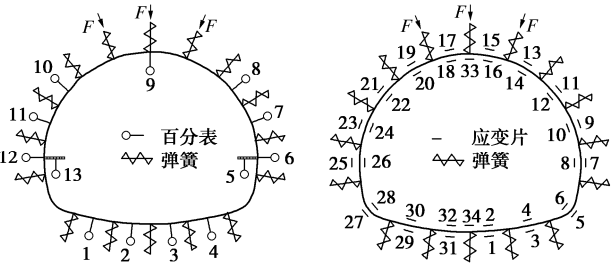
(a) 试验装置实拍



(b) 试验装置示意

图 3 试验装置

Fig. 3 Test apparatus



(a) 百分表布置示意

(b) 应变片布置示意

图 4 监测设备布置示意

Fig. 4 Layout of monitoring equipments

1.6 试验工况

设立一组不加固工况,用于测定原结构极限承载力,并作为基础对照。为对比公路隧道在不同损伤程度下的粘钢加固效果,通过剩余承载力对隧道损伤程度进行量化,设立 4 组加固工况,见表 3。各加固工况先逐级增至加固点荷载值并保持稳定,进行粘钢加固后继续加载至结构破坏。结构破坏判别标准为:衬砌截面的受拉侧钢筋屈服,受压侧混凝土压溃,结构基本丧失抵抗变形的能力。

2 公路隧道结构承载性能分析

2.1 荷载与位移关系

工况 1 的拱顶下沉与顶部荷载关系如图 5 所示,

表 3 试验工况详情			
Table 3 Details of test conditions			
工况	类型	剩余承载力百分比/%	加固点荷载/N
工况 1	未加固	—	—
工况 2	加固	100	0
工况 3		50	570
工况 4		30	810
工况 5		0	1170

注：剩余承载力是以未加固试验得到的极限承载力（下文用 F 表示）为基准，减去已加荷载得到的数值；剩余承载力百分比指加固时结构的剩余承载力与原结构极限承载力的比值；加固点荷载指结构进行加固时已加的荷载。由工况 1 确定原结构极限承载力为 1170 N，具体见 2.1 节。

编号 O 表示原结构。由图 5 可知，顶部荷载作用下，衬砌结构依次经历拱顶开裂（O-a）、拱腰外侧拉裂（O-b）、拱顶钢筋屈服（O-c）和结构破坏（O-d）4 个关键点。拱顶下沉过程分 4 个阶段：①拱顶开裂前，位移随荷载呈小幅线性增长；②拱顶开裂后，截面刚度降低，位移增速提高；③起拱线上方 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 范围的拱腰外侧开裂，位移持续快速发展；④拱顶内侧部分钢筋屈服，外侧混凝土压溃掉块，位移急剧发展，整体结构破坏。结构破坏荷载为 1170 N，对应原型松动压力 359.9 kPa。关键点 O-a 至 O-d 对应的拱顶下沉值依次为 1.4 mm（1.5‰ H ）、3.5 mm（3.6‰ H ）、8.4 mm（8.8‰ H ）、14.4 mm（15.1‰ H ）。

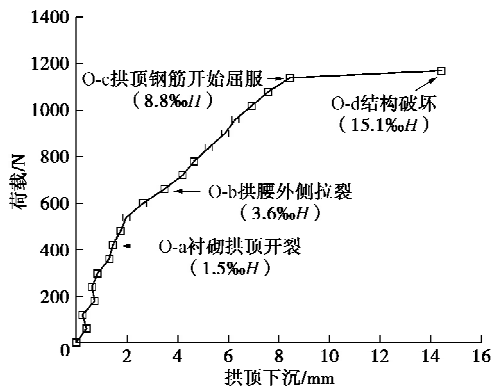


图 5 原结构拱顶下沉与顶部荷载关系

Fig. 5 Relationship between vault subsidence and top load of original structure

2.2 破坏过程及形态

通过#10、#16 应变片分别测得拱腰和拱顶内侧应变数据，如图 6。拉应变为正，压应变为负。

由图 6 可知，结构开裂初期，拱顶应变随顶部荷载呈近线性缓慢增长；加载至 300 N，拱顶裂缝数量增多，导致#16 应变急剧发展；加载至 1020 N，拱顶应变达峰值 2601×10^{-6} ，随后因保护层剥落掉块而迅速下降。

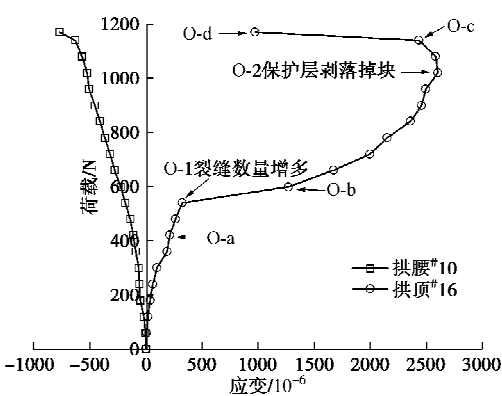


图 6 原结构衬砌应变与顶部荷载关系

Fig. 6 Relationship between lining strain and top load of original structure

原结构破坏过程为：拱顶内侧混凝土开裂→拱顶裂缝数量迅速增加→起拱线上方 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 拱腰外侧拉裂→拱顶内侧保护层剥落且部分钢筋屈服→拱肩外侧混凝土开裂→拱顶外侧混凝土压溃掉块→结构破坏。原结构最终破坏形态如图 7。

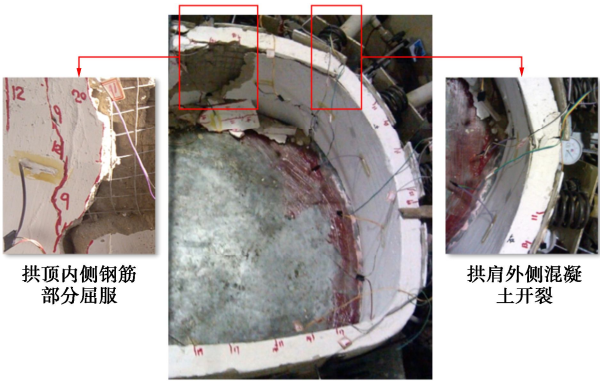


图 7 原结构破坏形态

Fig. 7 Failure modes of original structure

3 粘钢加固结构承载性能分析

3.1 粘钢加固结构受力变形特性

(1) 荷载与位移关系

各加固工况的拱顶下沉与顶部荷载关系见图 8~11。编号 α ， β ， γ ， λ 表示工况 2~5 的试验结构。

由图 8~11 可知，在顶部荷载作用下，衬砌结构经历加固点（ α -A 等）、衬砌开裂（ α -B 等）、拱顶黏结面剥离（ α -C 等）和结构破坏（ α -D 等）4 个关键点。拱顶下沉过程分 4 个阶段：①结构开裂前，位移随荷载呈近线性小幅增长；②结构开裂至加固前，裂缝数量和尺寸随加载不断发展，导致截面刚度减小，位移增长速度显著提升；③加固后，钢板与衬砌组成叠合结构，整体截面刚度增加，位移随荷载发展速度明显降低。继续加载，钢板与衬砌间的黏结剂和锚栓

开始失效, 拱顶处黏结面出现剥离; ④随着黏结面不断剥离, 叠合承载效应消失, 位移发展速度再次急剧增加。最后, 拱顶钢板大面积剥离皱起, 拱顶内侧部分钢筋屈服、外侧混凝土压溃, 结构失效。由于工况 5 的加固时机过晚, 钢板发生突发性剥离破坏, 加固结构同时失效。

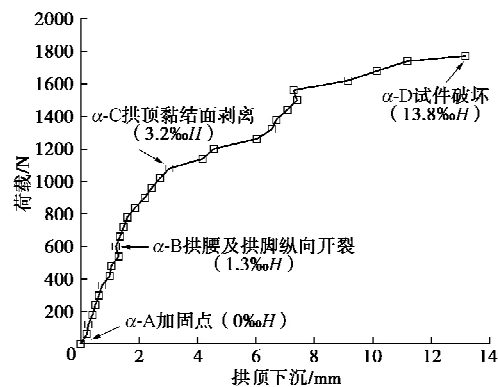


图 8 工况 2 (100%F) 拱顶下沉与荷载关系

Fig. 8 Relationship between vault subsidence and load in Case two (100%F)

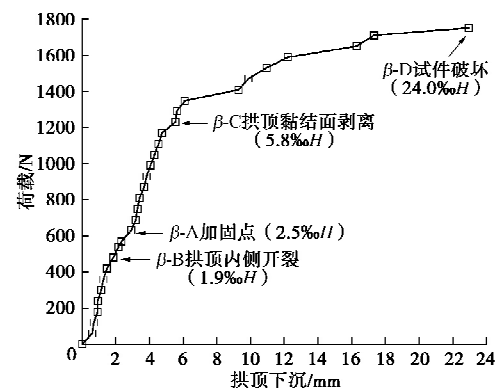


图 9 工况 3 (50%F) 拱顶下沉与荷载关系

Fig. 9 Relationship between vault subsidence and load in Case three (50%F)

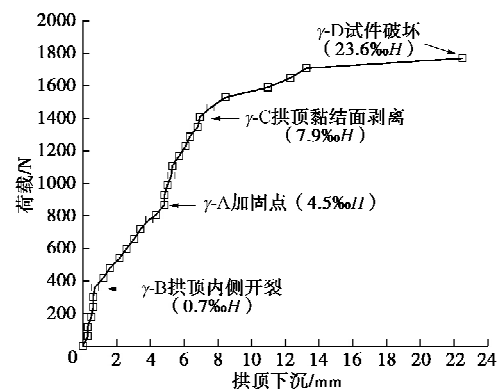


图 10 工况 4 (30%F) 拱顶下沉与荷载关系

Fig. 10 Relationship between vault subsidence and load in Case four (30%F)

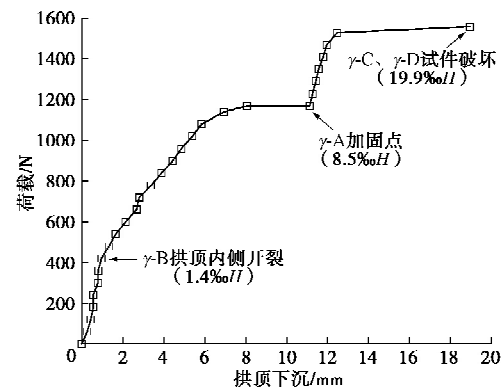


图 11 工况 5 (0%F) 拱顶下沉与荷载关系

Fig. 11 Relationship between vault subsidence and load in Case five (0%F)

根据关键点的位移值及加载值 (见表 4, 5) 可知, 工况 2 至 5 的破坏荷载依次为 1770, 1740, 1770, 1560 N, 对应原型松动压力 544.3, 535.2, 544.3, 479.8 kPa, 最终拱顶下沉量依次为 13.8‰H, 24.0‰H, 22.5‰H, 19.9‰H。

表 4 粘钢加固结构关键点拱顶位移

Table 4 Displacements of key points of reinforced structure with bonded steel plates

加固荷载	关键点拱顶位移/mm			
	加固点 A	衬砌开裂点 B	黏结面剥离点 C	结构破坏点 D
100%F	0 (0‰H)	1.2 (1.3‰H)	2.7 (3.2‰H)	13.2 (13.8‰H)
50%F	2.3 (2.5‰H)	1.9 (1.9‰H)	5.5 (5.8‰H)	22.9 (24.0‰H)
30%F	4.3 (4.5‰H)	0.7 (0.7‰H)	7.6 (7.9‰H)	22.5 (23.6‰H)
0%F	8.1 (8.5‰H)	0.9 (1.4‰H)	18.9 (19.9‰)	

表 5 粘钢加固结构关键点加载值

Table 5 Loading values of key points of reinforced structure with bonded steel plates

加固荷载	关键点加载值/N			
	加固点 A	衬砌开裂点 B	黏结面剥离点 C	结构破坏点 D
100%F	0	600	1020	1770
50%F	570	480	1230	1740
30%F	810	360	1470	1770
0%F	1170	420	1560	

(2) 破坏过程及形态

篇幅所限, 仅对工况 3, 4 进行探讨。通过#10, #16 应变片分别测得加固后的拱腰和拱顶内侧应变数据, 如图 12, 13。应变符号规定同前。

由图 12 可知, 在剩余承载力为 50%F 时加固, 拱顶应变随加载呈近线性小幅度增长, 拱腰应变无明显变化; 加载至 1230 N, 拱顶出现环向裂缝, 钢板逐渐剥离, 应变加速发展; 加载至 1350 N, 拱顶应变达

极值 1108×10^{-6} , 起拱线上方 40° 的拱腰外侧产生两条长裂缝, 应变由 -67×10^{-6} 突增至 -936×10^{-6} ; 继续加载, 拱顶钢板明显剥离并鼓出, #16 处钢板未能再发挥作用, 应变基本稳定。同时, 钢板剥离引起拱腰内侧混凝土保护层破坏并产生多条碎裂缝, 与外侧拉裂缝交织, 造成压应变增速提高; 由 1710 N 继续加载, 拱腰外侧钢筋屈服, 内侧压应变由 -1956×10^{-6} 突增至 -4496×10^{-6} 。工况 3 最终破坏形态见图 14, 表现为拱顶内侧钢板大面积剥离皱起、外侧混凝土压溃, 拱腰外侧钢筋屈服。

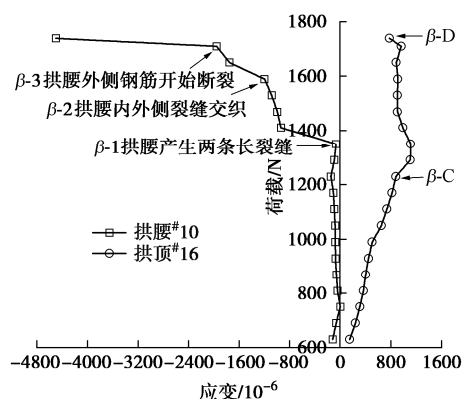


图 12 工况 3 (50%F) 衬砌应变与荷载关系

Fig. 12 Relationship between lining strain and load in Case three (50%F)

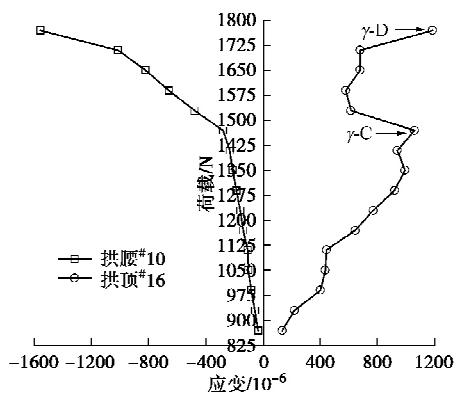


图 13 工况 4 (30%F) 衬砌应变与荷载关系

Fig. 13 Relationship between lining strain and load in Case 4 (30%F)

由图 13 可知, 在剩余承载力 30%F 时加固, 拱顶应变随加载呈近线性增长; 加载至 1470 N, 拱顶应变达极值 1058×10^{-6} ; 继续加载, 钢板发生剥离, 造成 #16 应变片松弛, 应变显著减小, 拱腰处压应变明显增加; 从 1710 N 继续加载, 拱顶钢板再次协助抗拉, #16 应变片重新拉紧, 应变小幅回升。同时, 拱腰外侧钢筋拉断, 造成内侧压应变由 -1011×10^{-6} 显著增至 -1558×10^{-6} 。工况 4 最终破坏形态见图 15, 表现为拱顶内侧钢板剥离且部分钢筋拉断、外侧混凝土压溃,

拱腰外侧钢筋屈服。

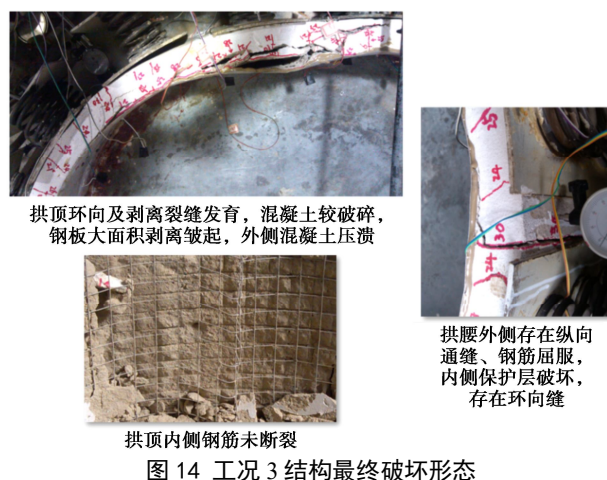


图 14 工况 3 结构最终破坏形态

Fig. 14 Final failure modes of structure in Case three



图 15 工况 4 结构最终破坏形态

Fig. 15 Final failure mode of structure in Case four

工况 2, 5 的破坏特征与工况 3, 4 存在局部差异。其中, 工况 2 的钢板在结构损伤前进行施作, 初始开裂位置由拱顶转移至拱腰; 工况 5 的钢板在结构临近破坏才施作, 钢板瞬间脱离且拱顶内侧钢筋全部屈服。工况 2, 5 的钢板加固时机较极端, 在实际工程中很少采用, 通常情况下粘钢加固结构破坏过程可总结为: 拱顶内侧纵向开裂→起拱线附近 60° 范围内的拱腰外侧纵向开裂→钢板加固→拱顶内侧环向开裂→拱腰内侧保护层破坏→拱顶内侧钢板剥离→拱顶黏结面失效, 内侧部分钢筋可能拉断、外侧混凝土压溃, 拱腰外侧钢筋屈服→结构失效。

根据试验现象, 钢板和衬砌之间的黏结面失效是结构破坏的直接诱因。完好的黏结面可有效传递剪应力, 使衬砌和钢板成为组合承载结构, 充分发挥“体外配筋”的抗拉作用。当钢板产生明显的径向剥离或切向滑移, 表明黏结失效, 叠合承载效应消失。因此, 新旧部分能否良好的协同工作, 受加固时机和黏结强

表 6 不同损伤程度下粘钢加固效果对比

Table 6 Comparison of reinforcement effects of bonded steel plates under different damage degrees										
工况	加固点荷载 /N	承载		变形		破坏 模式	黏结面剥离点		加固-黏结面剥离阶段	
		破坏荷 载/N	比例 关系	拱顶下 沉/mm	比例 关系		荷载/ N	拱顶下沉 值/mm	荷载增量/ N	拱顶位移 增量/mm
工况 1	未加固	1170	1.00	14.4	1.00	拱顶截 面大偏 心受压 破坏	—	—	—	—
工况 2	0 (100% F)	1770	1.51	13.2	0.92		1020	2.7	1020	2.7
工况 3	570 (50% F)	1750	1.50	22.9	1.59		1230	5.5	660	3.2
工况 4	810 (30% F)	1770	1.51	22.5	1.56		1470	7.6	660	3.3
工况 5	1170 (0% F)	1560	1.33	18.9	1.31		1560	18.9	390	10.8

注：将加固-黏结面剥离阶段近似视为钢板发挥作用阶段。

表 7 不同加固时机下的结构开裂及变形特征

Table 7 Cracking and deformation characteristics of structures under different reinforcement time				
工况	加固点荷载/N	拱顶裂缝密度/(m ⁻¹)	拱顶位移发展斜率/(N·mm ⁻¹)	
			加固前	加固后
工况 2	0 (100%F)	0	—	294.8
工况 3	570 (50%F)	5.9	103.6	153.6
工况 4	810 (30%F)	13.9	73.9	119.3
工况 5	1170 (0%F)	16.0	26.5	398.1

注：裂缝密度为拱顶正中 45° 范围单位面积内所有裂缝的累计长度；拱顶位移发展斜率由图 8 至 11 曲线得到。
度影响。

3.2 粘钢加固效果对比

原结构和粘钢加固结构拱顶下沉与顶部荷载的曲线对比见图 16，破坏荷载及最终位移对比见表 6。

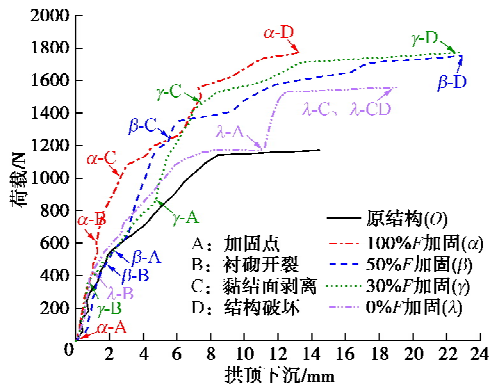


图 16 原结构和粘钢加固结构拱顶下沉与顶部荷载关系对比

Fig. 16 Comparison between vault subsidence and top load of original and reinforced structures with bonded steel plates

由图 16 和表 6 可知，各加固结构在加固点的曲线斜率显著增大，说明粘贴钢板可有效控制变形，改善受损结构刚度；相比原结构，工况 3，4 的破坏荷载分别提升 50%，51%。在结构失效前施作钢板可有效提升其极限承载力，且受加固点荷载影响较小；工况 3，4 的变形分别增加 59%，56%，对损伤结构施作钢板可提高其容许变形值，降低脆性破坏风险；原结构和加固结构破坏模式均为拱顶大偏心受压破坏，表现为内侧钢筋拉断、外侧混凝土压溃；工况 2~5 在钢板作用阶段的荷载增量逐渐减小、位移增量逐渐增大。这说明钢板施作越早，可承受的荷载增量越大，变形控

制效果越好。当加固过晚，钢板因衬砌表面裂缝及变形速度而难以有效黏结或长时间协同变形，性能得不到充分发挥。因此，钢板宜在结构承载力损失 70% 以内施作。

3.3 合理加固时机

统计不同加固时机下的结构开裂及变形特征如表 7。由表 7 可知，30%F 加固后的位移发展斜率增加 45.4 N/mm，小于 50%F 对应值，说明钢板加固效果减弱，且此时拱顶附近出现多条纵向贯通缝，最大深度达 38 mm（占衬砌厚度 76%），左、右拱腰外侧也多处开裂，裂缝总体较发育，加固时机较晚。50%F 加固后的位移发展速率增加 50.0 N/mm，刚度提升效果尚可接受，但此时拱顶裂缝密度为 5.9 m⁻¹ 且存在两条纵向贯通缝，最大深度 23 mm。原结构在 420 N（64%F）时出现开裂，但尚不明显。因此，建议将衬砌结构的剩余承载力介于 62%F 至 50%F 作为合理加固时机。在实际工程中，出于保守考虑也可适当提前加固。

4 结 论

本文开展了不同损伤程度下的公路隧道衬砌粘钢加固效果试验，系统探究了加固结构的承载性能、受力变形特征、破坏过程，对粘钢加固效果和合理加固时机进行分析，主要得到以下 4 点结论。

（1）在顶部松动荷载作用下，公路隧道原结构变形过程以拱顶开裂、拱腰外侧拉裂、拱顶钢筋屈服、结构破坏为关键点分为 4 个阶段；粘钢加固结构变形过程以钢板加固、衬砌开裂、拱顶处黏结面剥离、结构破坏为关键点分为 4 个阶段。二者的破坏特征及形

态均存在差异。

(2) $50\%F$, $30\%F$ 加固后的破坏荷载相对原结构提升 50% , 51% 。在结构失效前施作钢板可有效提升其极限承载力, 且受加固点荷载影响较小; $50\%F$, $30\%F$ 加固后的最终变形量相比原结构增加 59% , 56% 。对损伤结构施作钢板可提高其容许变形值, 降低脆性破坏风险。

(3) 原结构和加固结构破坏模式均为拱顶大偏心受压破坏, 表现为拱顶内侧钢筋屈服、外侧混凝土压溃。

(4) 钢板作用效果及性能利用率受加固时机影响。加固过晚, 钢板因衬砌表面裂缝及变形速度而难以有效黏结或长时间协同变形, 导致加速破坏。基于加固前的衬砌开裂情况及加固效果考虑, 建议将结构剩余承载力介于 $65\%F \sim 50\%F$ 作为公路隧道合理加固时机。

加固结构的黏结面破坏规律及机理有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 李彬, 雷明锋, 李文华. 运营公路隧道病害对衬砌结构安全性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(5): 40-45. (LI Bin, LEI Mingfeng, LI Wenhua. Safety influence of operating highway tunnel caused by sturcture disease[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(5): 40-45. (in Chinese))
- [2] 艾青, 王琨, 姜孝谟, 等. 基于损伤累积模型的公路隧道渗漏水病害诊断与预测[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(1): 37-47. (AI Qing, WANG Kun, JIANG Xiaomo, et al. Diagnosis and prediction of the leakage in highway tunnel based on damage accumulation model[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(1): 37-47. (in Chinese))
- [3] 刘永华. 高速公路隧道安全性评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004. (LIU Yonghua. Study on Safety Estimation of Expressway Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [4] YUAN Y, JIANG X M, LIU X. Predictive maintenance of shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 69-86.
- [5] 刘学增, 王煦霖, 何本国. 隧道不同损伤衬砌套拱加固对比试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4610-4617. (LIU Xuezheng, WANG Xulin, HE Benguo. Comparative experiment of reinforcement of lining under different damage states with arch surround for tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(12): 4610-4617. (in Chinese))
- [6] 刘学增, 刘文艺, 桑运龙, 等. 叠合式套拱加固带裂损衬砌的破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4244-4251. (LIU Xuezheng, LIU Wenyi, SANG Yunlong, et al. Research on failure mechanism of cracked lining reinforced with stacked inner lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4244-4251. (in Chinese))
- [7] 刘学增, 桑运龙, 包浩杉. 叠合式套拱加固带裂缝隧道衬砌受力机理分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(10): 127-134. (LIU Xuezheng, SANG Yunlong, BAO Haoshan. Analysis of bearing mechanism of cracked tunnel lining reinforced with stacked umbrella arch[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(10): 127-134. (in Chinese))
- [8] 苏臣宏, 安楠楠, 王志丰. 公路隧道喷射混凝土套拱加固结构力学特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 203-213. (SU Chenhong, AN Nannan, WANG Zhifeng. Mechanical characteristics of shotcrete arch reinforcement structure in highway tunnel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 203-213. (in Chinese))
- [9] 苏臣宏, 崔一纬, 吴亚磊, 等. 喷射混凝土套拱加固方法的现场测试与分析[J]. 西安工业大学学报, 2020, 40(2): 176-186. (SU Chenhong, CUI Yiwei, WU Yalei, et al. Field test and analysis of shotcrete arch reinforcement method[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2020, 40(2): 176-186. (in Chinese))
- [10] 李晓琴, 张田, 丁祖德, 等. ECC套拱加固不同损伤衬砌的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊2): 3654-3664. (LI Xiaoqin, ZHANG Tian, DING Zude, et al. Numerical study on ECC arch strengthened linings with different damaged levels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3654-3664. (in Chinese))
- [11] 吴启勇, 蔡叶澜. 碳纤维布在连拱隧道衬砌裂缝病害治理中的应用[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(6): 70-75. (WU Qiyong, CAI Yelan. Applying carbon fiber cloths to repair lining cracks in a doublearched tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(6): 70-75. (in Chinese))
- [12] 刘学增, 周若阳, 游贵良, 等. VI级围岩公路隧道衬砌粘贴钢板和粘贴碳纤维布加固方法对比试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(34): 130-135. (LIU Xuezheng, ZHOU Ruoyang, YOU Guiliang, et al. Comparative experimental

- study on reinforcement of highway tunnel lining by bonding steel plate and bonding carbon-fiber-reinforced plastics under VI grade surrounding rock[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 130-135. (in Chinese))
- [13] 罗立娜. 碳纤维补强条件下公路隧道衬砌计算方法的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (LUO Lina. On the Calculation Method of CFRP Strengthened Highway Tunnel Lining[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [14] 何川, 唐志成, 汪波, 等. 内表面补强对缺陷病害隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 406-412. (HE Chuan, TANG Zhicheng, WANG Bo, et al. Research on effect of inner surface reinforcing on structure bearing capacity by model test in defective tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 406-412. (in Chinese))
- [15] CHEN H, LAI H P, QIU Y L, et al. Reinforcing distressed lining structure of highway tunnel with bonded steel plates: case study[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 04019082.
- [16] 张东, 范蕾, 苟浩洋. 隧道局部欠厚衬砌对结构受力影响与加固技术研究[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(4): 106-109. (ZHANG Dong, FAN Lei, GOU Haoyang. Study on the influence of insufficient lining Thickness on bearing capacity of tunnel structure and the reinforcing technology[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2019, 15(4): 106-109. (in Chinese))
- [17] KAZUAKI K, MINORU K, TSUTOMU T, et al. Structure and construction examples of tunnel reinforcement method using thin steel panels[J]. Nippon Steel Technical Report, 2005, 92: 45-50.
- [18] 公路隧道设计规范: JTG D70—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (Code for Design of Road Tunnel: JTG D70—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [19] 郑涛. 岩土工程模型试验的理论与方法[J]. 矿业快报, 2008, 24(3): 18-21. (ZHENG Tao. Discussion on theory and method of model experiment in geotechnical engineering[J]. Express Information of Mining Industry, 2008, 24(3): 18-21. (in Chinese))
- [20] 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范: GB 50728—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Technical Code for Safety Appraisal of Engineering Structural Strengthening Materials: GB 50728—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))

第十四届全国土力学及岩土工程学术大会征稿日期变更通知

由中国科学院武汉岩土力学研究所和岩土力学与工程国家重点实验室承办的中国土木工程学会第十四届全国土力学及岩土工程学术大会将于2023年10月28日在武汉召开, 征文截稿日期变更为2023年5月31日, 特此通知!

征文内容: 会议主要研讨双碳战略下岩土工程理论与实践、新技术和新方法等。组委会接受全文投稿, 大会学术委员会将组织专家成立论文评审委员会。征文内容主要包括以下14个方面。

①岩土基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价; ③地基处理与基础工程; ④特殊土力学与工程; ⑤边坡工程与地质灾害; ⑥地下工程及能源储备; ⑦土动力学与岩土地震工程; ⑧海洋岩土力学与岛礁工程; ⑨环境岩土工程与固废处置; ⑩二氧化碳地质利用与封存; ⑪数值仿真与岩土工程大数据; ⑫岩土工程新材料、新装备与智能建造; ⑬岩土力学与工程前沿交叉; ⑭重大岩土工程实录。

(会议组委会)