文章编号: 0253-374X(2024)11-1720-11

超高性能混凝土加固盾构隧道结构试验与数值研究

柳 献¹,纪汉卿¹,甘海杰¹,孙雪兵²,王金龙²

(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司,武汉 430063)

摘要: 在应用超高性能混凝土(UHPC)加固既有盾构隧道的 基础上,提出优化的钢板-UHPC组合加固方法。将钢板作 为隧道内衬并在钢板与管片之间填充UHPC,采用植筋、化 学锚栓以及栓钉等作为界面连接件,形成共同受力的整体。 开展极限承载力足尺试验并建立非线性数值模型,探究组合 加固结构的破坏机理以及影响受力性能的关键因素。结果 表明,组合加固结构破坏模式具有较好的延性特征;组合加 固结构刚度主要受管片及加固体刚度控制,承载力水平主要 受管片强度控制,极限承载力相比UHPC加固结构提升 28%;极限状态下,顶部和腰部等位置的钢板发生屈服、主筋 受拉屈服。数值参数分析结果表明,组合加固结构性能指标 受加固层厚度和界面黏结性能影响较大,可适当增大钢板厚 度并保证界面连接件的数量。

关键词:隧道工程;盾构隧道;加固;足尺试验;超高性能混凝土(UHPC);极限承载力
 中图分类号:U457.3
 文献标志码:A

Experimental and Numerical Study on Shield Tunnel Strengthened by Ultrahigh Performance Concrete

LIU Xian¹, JI Hanqing¹, GAN Haijie¹, SUN Xuebing², WANG Jinlong²

 College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
 China Railway SiYuan Survey and Design Group Co.,Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the application of ultra-high performance concrete (UHPC) in the shield tunnel strengthening, the steel plate-UHPC reinforced structure of shield tunnels was proposed. Steel plates were utilized as the inner linings of shield tunnels, with UHPC filling between steel plates and segments. Planting reinforcing bars, chemical anchors and struts served as the interface connectors, forming a community capable of

withstanding external load. By conducting the full-scale ultimate load test and establishing the nonlinear numerical model, the failure mechanism of the reinforced structure was investigated, and key factors affecting the reinforcement performance were analyzed. The results indicate that the failure mode of the reinforced structure exhibits superior ductility characteristics. The stiffness of the reinforced structure is primarily dominated by the stiffness of the segments and the reinforcement, while the bearing capacity of the reinforced structure is crucially influenced by the strength of segements, and the ultimate bearing capacity increases by 28% compared to the structure only reinforced by UHPC. In the event of the limit state, a few steel plates located at the top and waist of the structure yield, with main reinforcements yielding The numerical parameter in tension. analysis demonstrates that the performance indexes of the reinforced structure are significantly influenced by the thickness of reinforcement layers and the bonding interfaces. performance of Consequently, it is recommended that the thickness of the steel plate be increased and that the interface connectors be secured.

Keywords: tunnel engineering; shield tunnel; strengthening; full-scale test; ultra-high performance concrete (UHPC); ultimate bearing capacity

随着我国城市化进程的不断加快,地下空间的 开发与利用成为城市发展的重点。目前,超过半数 的地铁隧道均采用盾构法施工¹¹。然而,地铁隧道 所处环境较为复杂,邻近工程施工、列车振动、火灾 爆炸等不确定性因素均会对在建或已建盾构隧道结 构产生不利影响,一旦出现局部超载或侧方卸载等 意外情况,就会使隧道产生较大变形而进入非线性

通信作者:王金龙,高级工程师,硕士,主要研究方向为隧道健康评价及病害综合治理技术。 E-mail:003180@crfsdi.com



收稿日期: 2022-11-10

基金项目:国家自然科学基金(52078376,52478409)

第一作者:柳 献,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为隧道及地下结构服役行为、相关机理与性态控制。 E-mail: xian. liu@tongji. edu. cn

受力状态^[2]。同时,运营时间较长的盾构隧道结构 性能也在逐步退化,发生管片开裂、接头处渗漏水等 病害^[3],严重威胁隧道的安全性和耐久性。

对于受损盾构隧道,主要通过粘贴材料进行结 构加固,即在衬砌内侧粘贴钢板^[4]、纤维增强复合材 料(FRP)^[5-6]、复合腔体(PWP)^[7]等。粘贴加固法能 够增大结构刚度和承载力,但采用环氧树脂胶或结 构胶的黏结界面为薄弱环节,黏结界面失效后结构 各自承载并迅速丧失承载力,呈现脆性破坏的特征, 加固材料的利用率较低^[8]。为此,进一步发展了钢 板-混凝土组合加固法^[9],通过植筋和栓钉等界面连 接件将混凝土与钢板构件结合为共同受力的整体, 充分发挥钢板和混凝土各自的性能优势。随着对超 高性能混凝土(UHPC)研究的不断深入^[10],部分学者 开始探索UHPC在盾构隧道加固中的应用,UHPC 和管片在合理的界面黏结后能够协调变形、共同受 力,具有较好的承载能力。然而,UHPC的刚度和极 限承载力均低于钢板-混凝土组合加固结构[11]。配 筋的UHPC加固法能够提高加固层的抗裂性能和韧 性[12],但存在经济性较差、养护和施工条件严格等问 题。为了解决现有UHPC加固法的不足,综合考虑 UHPC 优异的材料性能以及钢板-混凝土组合加固 法的高效性,发展出钢板和UHPC组合加固法。

钢板--UHPC组合加固在桥梁和建筑工程领域 已有一定的应用,大多数研究关注组合构件的抗弯 性能和界面黏结性能。Yan等^[13]对钢板-UHPC夹 芯梁开展抗弯试验,增大钢板厚度能够显著提升结 构的极限承载力,但抗剪连接件间距对性能的影响 不大。邵旭东等^[14]研究了钢-超薄UHPC组合桥面 结构的抗弯力学性能,UHPC抗拉性能、钢板厚度和 强度对结构极限承载力影响较大。Zhu等[15]通过数 值和理论分析探究了钢板-UHPC组合梁的抗弯性 能,得到了各参数对组合结构极限承载力的影响程 度。部分学者针对组合界面的黏结特性开展研究, 为钢板--UHPC 加固结构的界面黏结设计和数值模 拟提供参考。邵旭东等[8]通过界面剪切试验揭示了 各参数对界面破坏形式、抗剪强度的影响规律,并建 立了抗剪黏结强度的预测公式。孙启力等[16]对钢 板-UHPC界面进行受拉和剪切性能试验,研究了直 接黏结、花纹处理、黏结胶以及栓钉等界面形式下的 结构力学特性。Yan 等^[17]对钢板-UHPC-钢板组合 梁的界面剪切特性进行数值模拟,提出界面黏结滑 移本构模型。

UHPC在盾构隧道加固中的应用尚处于发展阶段,针对钢板-UHPC组合加固隧道整环结构受力性

能的研究尚少。本文在UHPC加固盾构隧道的研究 基础上,开展钢板-UHPC组合加固衬砌结构整环足 尺试验和数值分析,探讨优化后的钢板-UHPC加固 结构的破坏机理和极限承载力,并研究各关键因素 对结构受力性能的影响。

1 试验与数值方法

1.1 整环足尺试验

1.1.1 试件

采用某城市地铁隧道衬砌圆环,原衬砌结构外 径为6.2m、内径为5.5m、管片厚度为0.35m、环宽 为1.2m。衬砌全环分为6块,包括1个封顶块(F 块)、2个邻接块(L1、L2块)和3个标准块(B1、B2、 B3块),从封顶块右侧接缝起顺时针方向采用通缝 拼装,各接缝对应角度为10.75°、78.75°、146.25°、 213.75°、281.25°、349.25°。管片采用C55混凝土、 HRB335带肋钢筋,每条纵缝布置2根5.8级M30弯 螺栓。试件为原整环衬砌圆环的半结构,即环宽为 0.6m,接缝螺栓数量、配筋量等均相应减半。

钢板--UHPC组合加固结构在UHPC加固和钢板--混凝土组合加固的基础上进行优化,采用UHPC和钢板作为联合加固材料,化学锚栓作为抗拔连接件,植筋和栓钉作为抗剪连接件。UHPC加固层的厚度为55.5 mm、宽度为600 mm,钢板标号为Q235。8.8级M10化学锚栓从钢板内侧打入结构中,UHPC加固层和原混凝土管片间植入HRB400弯曲带肋钢筋,钢板和UHPC之间通过焊接于钢板表面的4.8级M10栓钉连接。钢板--UHPC组合加固盾构隧道衬砌结构试件如图1所示。



图1 试件横截面示意图



试件中所采用的自来水、预混料、钢纤维的质量 比为0.0940:1.0000:0.0984,其中钢纤维的长度为 15 mm、直径为0.24 mm。由于加固试验现场的养 护条件与标准养护环境存在一定差异,考虑到为后 续数值模拟分析提供可靠的材性依据,因此分别按 照2种条件进行试件养护。UHPC受力性能如图2、 3所示。









图 3 UHPC 拉应力-应变曲线 Fig.3 Tensile stress-strain curves of UHPC

1.1.2 加载装置

试验采用24点水平径向加载方式,以模拟盾构 隧道衬砌结构所受的外部水土压力。24点水平加载 装置通过在衬砌圆环外部施加对称荷载构成自平衡 系统,各加载点角度间距为15°,均关于圆心对称。 每个加载点由1个加载环梁、1个千斤顶和1个控制 油泵组成。单点最大水平荷载为1000~2000 kN, 单点最大行程为400 mm。加载装置及试件如图4 所示。

1.1.3 加载方案

采用一次受力的整环足尺试验,即在加载前对 管片加固从而形成钢板-UHPC组合加固衬砌结构。 如图5a所示,24个加载点共分为3组,组内各点的荷 载值相同且同步。其中,P₁包括6个加载点,用来模



图 4 试验加载装置及试件示意图 Fig.4 Diagram of loading devices and specimen

拟竖向水土压力;P₂包括10个加载点,用来模拟水 平水土压力;P₃包括8个加载点,用来模拟拱肩和拱 脚部位的水土压力。试验加载方案参考已有加固整 环试验^[4,7,9,11]中的加载制度,以模拟某城市地铁隧道 15 m埋深的顶部超载工况。各点荷载值根据内力等 效原则由隧道实际荷载工况计算得出,且试验荷载 下的结构响应更加不利。



如图 5b 所示,试验加载路径分 3 个阶段:第一阶段, P_1 逐级增加至 150.0 kN,保持 P_2 =0.65 P_1 , P_3 = $(P_1+P_2)/2$,模拟某地区 15 m 埋深的设计工况,其中

0.65为该地区常见的侧向土压力系数;第二阶段, P_1 继续增大至211.5 kN,此时 P_2 达到被动土压力 137.5 kN,加载过程中保持 P_2 =0.65 P_1 , P_3 =(P_1 + P_2)/2,模拟顶部超载工况直至侧向力达到被动土压 力;第三阶段, P_1 继续增大并保持 P_2 为被动土压力 137.5 kN不变,在此过程中 P_3 =(P_1 + P_2)/2,模拟极 限工况,直至结构最终破坏。

1.1.4 测试方案

试验测点布置在结构响应较大和控制截面,测 试内容包括结构整体变形、混凝土表面应变、主筋应 变、纵缝张开、纵缝螺栓应变、钢板应变、界面滑移及 剥离、锚栓和植筋应变等,混凝土表面应变测点布置 在管片外弧面和上端面,钢板应变测点布置在钢板 内弧面。测点布置情况如图6所示。



Fig.6 Layout of measuring points

1.2 非线性数值模拟

采用Ansys软件的非线性模块对组合加固结构 受力过程进行模拟。分层积分Hughes-Liu纤维梁单 元(Beam161)模拟管片、UHPC和钢板;管片纵缝接 头通过刚性板和离散梁弹簧单元模拟,充分反映纵 缝构造(边缘和核心区混凝土、接缝螺栓等)及非线 性受力特征;加固结构的2层界面则通过在各层衬 砌之间设置法向和切向弹簧进行模拟。钢板-UHPC组合加固盾构隧道衬砌结构的非线性数值计 算模型如图7所示。

管片混凝土采用 Park& Paulay 本构模型,钢筋 采用三阶段应力-应变曲线,UHPC本构同时考虑抗 压和抗拉性能,钢板采用各向同性弹塑性本构模型, 材料参数根据材性试验结果^[11,18]取值,具体如表1、2 所示。

接缝模型中混凝土抗压弹簧和螺栓抗拉弹簧分 别根据接缝混凝土受压影响深度^{119]}和实际螺栓材性 进行本构设置,如图8所示。界面模型考虑加固结



图7 数值模型

Fig.7 Numerical model

表1 混凝土材性参数

Tab.1 Material property parameters of concrete

材料	立方体抗压 强度/MPa	屈服拉应 力/MPa	极限压 应变	残余压 应变	残余强 度因子
C55混 凝土	54.62		0.00192	0.0028	0.45
UHPC	135.50	10.6	0.00271		
	表2	钢筋及氧	网板材性参	對	

	· • • • •	11111111111111					
Tab.2	Material	property	parameters	of			
	rainforcement and steel plate						

remor	cement	anu	steer	plate

材料	等级	弹性模 量/GPa	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa	屈服 应变	极限 应变
钢筋	HRB335	202	319	400	0.0017	0.021
钢板	Q235	170	238		0.0014	

构实际构造,管片-UHPC界面弹簧的抗拔、抗剪本构由植筋的UHPC-混凝土界面黏结本构和化学锚 栓本构根据作用范围内的连接件数量叠加得到,钢板-UHPC界面弹簧的抗拔、抗剪本构则由栓钉和化 学锚栓本构叠加得到^[20],如图9所示。

2 结果与讨论

2.1 试验结果

2.1.1 结构破坏链

结合钢板--UHPC加固衬砌结构在极限工况加载下的荷载--顶底收敛变形曲线(见图10)和结构整体破坏情况(见图11),总结出以下结构破坏过程和破坏链:

当 P_1 =250 kN时,腰部管片本体外弧面混凝土 受拉开裂,此后结构刚度下降,定义为弹性极限点。 当 P_1 =300 kN时,管片顶部10.75°和349.25°纵缝位 置的钢板–UHPC界面出现剥离脱开现象,结构整体 性下降。随后,腰部78.75°和281.25°纵缝内弧面混 凝土受压破坏,结构整体刚度显著降低。当 P_1 =



图8 管片接缝弹簧本构曲线





图9 层间界面黏结弹簧本构曲线







330 kN时,顶部10.00°~30.00°范围内出现较明显的新-老混凝土界面脱开,底部180.00°附近钢板--UHPC界面脱开。当P₁=340 kN时,底部新-老混凝 土界面也出现脱开,管片顶部10.75°和349.25°纵缝 核心区混凝土压裂,结构刚度水平较低。当P₁= 374 kN时,顶部10.75°纵缝外弧面混凝土压碎掉块, 底部170.00°管片外弧面混凝土压碎掉块,结构基本 丧失承载能力、即将变为可变机构,将该荷载定义为



图 11 结构破坏情况 Fig.11 Damage of the structure

结构的极限承载力^[21]。当 P_1 =384 kN时,结构达到 极限状态后持续变形,最终腰部78.75°纵缝位置钢 板出现受压屈服。

2.1.2 结构整体变形

对于一次受力的钢板--UHPC组合加固结构,在 试验荷载作用下产生"横鸭蛋"状的收敛变形,即顶部 向内侧变形、腰部向外侧变形,结构在弹性极限点和 承载力极限点时的收敛变形如图12所示。弹性极限 下结构顶底和腰部收敛变形分别为9.03、8.79 mm, 承载力极限下结构顶底和腰部收敛变形分别为 113.30、126.24 mm。受试验加载的不完全对称性、 管片初始拼装误差以及加固施工误差的影响^[22],衬砌 结构收敛变形未呈现完全对称状态,并出现非对称响 应,如两侧对称纵缝位置的破坏时机存在差异。



图 12 结构收敛变形 Fig.12 Convergent deformation of the structure

2.1.3 钢板应变(应力)

由图13可知,组合加固结构中钢板应变随荷载增 大而增大,且从弹性极限点后开始迅速增加,直至部分 位置的钢板达到屈服状态。最终结构破坏时的钢板应 力分布如图14所示,结构正弯矩区对应的钢板承受拉 应力作用(见图13),极限状态下底部接缝附近202.50° 的钢板受拉屈服(拉应力276 MPa),而顶部接缝附近 0°的钢板则在第47级荷载(P₁=330 kN)时便发生屈服, 早于顶部10.75°接缝破坏;结构负弯矩区对应的钢板 承受压应力作用(见图13),腰部78.75°接缝附近钢板 受压屈服,压应力为253 MPa。





2.1.4 界面剥离与滑移 承载力极限状态(P₁=374 kN)下界面径向剥离





与切向滑移分布如图15、16所示,图中填充区在圆环内侧表示数值为正、外侧表示数值为负。界面剥离为正表示UHPC层相对管片向内剥离、钢板相对UHPC层向内剥离,界面滑移为正表示UHPC层相对管片逆时针滑动、钢板相对UHPC层逆时针滑动。



- 图 15 承载力极限状态(P₁=374 kN)下管片-UHPC界面剥 离与滑移分布
- Fig.15 Peeling and slip distribution of segment-UHPC interface under bearing capacity limit state (P₁=374 kN)



- 图 16 承载力极限状态(P₁=374 kN)下钢板-UHPC界面剥 离与滑移分布
- Fig.16 Peeling and slip distribution of steel plate-UHPC interface under bearing capacity limit state (P₁=374 kN)

界面剥离与滑移均始于界面裂缝的出现,在结 构进入弹塑性阶段后发展迅速。界面剥离主要出现 在结构顶部和底部附近,界面滑移则主要出现在结 构顶部和腰部附近,且钢板-UHPC界面要普遍大于 管片-UHPC界面,这也与结构首先在钢板-UHPC 界面出现裂缝并持续发展相一致。管片-UHPC界 面剥离最大值在10.75°纵缝附近,为9.89mm,如图 15a所示;界面滑移最大值则在112.50°处,滑移值为 14.04 mm, 如图 15b 所示。钢板-UHPC 界面剥离最 大值在0°和180.00°附近,剥离量为9.67mm,如图 16a所示;顶部349.25°纵缝附近则出现较大的钢板--UHPC界面滑移,最大值为40.12 mm,如图16b所 示。最终状态下,结构20.00°、78.75°等位置处的栓 钉根部断裂并与钢板分离脱开,如图17a所示,导致 钢板-UHPC界面剥离与滑移进一步增大,如图17b 所示,进而造成2.1.3节所述对应位置的钢板 屈服。

2.2 模型验证与结构破坏机理

组合加固结构在极限工况下荷载--位移曲线、结 构关键性能点的试验与数值结果对比如图18和表3 所示。两者具有较好的一致性,各性能点出现的顺 序和时机基本一致,验证了数值模型的合理性。

组合加固结构具有较好的延性破坏特征,破坏 过程分为弹性阶段(止于管片外弧面开裂,性能点 ①)、弹塑性阶段(结构相继出现多个塑性铰,足尺试 验为性能点②~③、数值模拟为性能点②~④)以及 塑性阶段。在荷载水平较低时,管片与加固层协调 变形、共同受力。进入弹塑性阶段后,管片受拉区混 凝土相继退出工作,各截面中性轴向受压侧移动,应 力重分布导致钢板和UHPC受力迅速增大。同时, 管片接缝变形产生内外衬间的不协调变形。正弯矩 区接缝两侧的界面连接件应变迅速增加,产生径向



a 栓钉根部断裂脱开



b 钢板-UHPC界面剥离

图17 最终状态下20.00°附近栓钉断裂与钢板-UHPC界面 剥离

Fig.17 Stud fracture and peeling of steel plate-UHPC interface near 20.00° in final state

剥离应力和剪切应力;负弯矩区接缝两侧的界面处 于相对压紧的状态,界面剥离较小而滑移较大,结构 整体性和刚度下降。当界面出现剥离与滑移裂缝 后,连接件承受后续的抗剪和抗拔作用,加固结构叠 合程度大大降低,结构体系转变为管片承受外荷载、 加固体承受非协调变形产生的被动荷载为主。此 后,管片接缝和本体薄弱位置因强度不足而发生破 坏,结构逐步出现4个以上的塑性铰,达到承载力极 限。进入塑性阶段后,结构实际已失去承载能力,收

				-			
足尺试验结果				数值模拟结果			
性能点	现象描述	P_1/kN	顶底收敛变形/mm	性能点	现象描述	P_1/kN	顶底收敛变形/mm
1	100.00°、270.00°管片外弧面开裂	250	9.03	1	90.00°、270.00°管片外弧面材 料达到抗拉强度	248	9.36
2	78.75°、281.25°纵缝内弧面受压破 坏(第1、2个塑性铰)	298	20.36	2	78.75°、281.25°纵缝螺栓弹簧 达到屈服强度(第1、2个 塑性铰)	294	22.01
3	10.75°纵缝外弧面混凝土压碎掉 块,170.00°管片外弧面压碎(第3、4 个塑性铰)	374	111.50	3	180.00°管片外弧面材料达到抗 压强度(第3个塑性铰)	365	94.69
				4	10.75°、349.25°纵缝外缘混凝 土弹簧达到抗压强度(第4个塑 性铰)	378	105.40

表3 结构关键性能点验证 Tab.3 Verification of crucial performance points





Fig.18 Verification of load-convergent deformation curve

敛变形在短时间内迅速发展,在加载装置的约束下,加固体由于应力重分布而承担后续增加的荷载。结构顶部、底部和腰部等位置出现界面栓钉断裂,对应位置钢板屈服,结构150.00°、345.00°位置的UHPC层由于非协调变形引起的应力集中而发生拉剪破坏。

2.3 结构破坏模式

不同于粘钢加固结构在界面结构胶破坏后迅速 到达承载力极限的脆性特征^[4],钢板-UHPC组合加 固结构采用化学锚栓、植筋及栓钉等抗剪和抗拔界 面连接件来增强衬砌间的黏结作用,使界面具有较 高的强度和延性。组合加固结构的破坏模式可以归 纳为延性破坏,具体表现为管片和加固体的破坏。 管片破坏集中在纵缝接头和本体薄弱位置,UHPC 由于材料强度不足而出现拉剪或压剪破坏,钢板则 发生受压或受拉屈服,材料利用率较高。结构整体 刚度在管片出现多个塑性铰后迅速降低,结构整体 刚度的主要控制因素为接头刚度和加固体刚度;同 时,在管片相继出现4个塑性铰而变为可变机构后, 加固结构便丧失承载能力,而加固材料强度远大于 管片本体。这表明钢板--UHPC 加固结构的极限承 载力水平主要受管片承载力和界面黏结作用控制, 而加固体强度则对其起到承载力储备作用。

总体来说,钢板和UHPC增大了结构刚度,界面 抗剪和抗拔连接件也使结构的整体性和叠合程度更 高。如图19所示,参考未加固结构足尺试验结果^[12], 相同条件下,组合加固结构的弹性刚度约为未加固结 构的2.55倍,极限承载力提升67%。相比UHPC加 固结构在接缝处较早出现UHPC开裂的现象,组合 加固结构中钢板内衬在内部提供了较好的受拉作用, 使得UHPC层受拉开裂发生较晚且基本无贯穿性裂 缝,延性特征更加显著,组合加固结构极限承载力比



3 结构受力性能参数分析

以隧道加固现状为基础,针对钢板和UHPC层 厚度、界面黏结性能等开展参数化数值分析(UHPC 强度受钢纤维掺量、配合比等影响较大^[10],在此不作 讨论)。对于外径6.2m、内径5.5m的盾构隧道管 片,考虑规范中的最小建筑限界(5.2m)和极限收敛 变形(125mm),将加固层厚度控制在80mm之内。 界面抗拔和抗剪作用由锚栓、植筋和栓钉共同提供, 考虑到滑移与剥离的相互影响^[22],分别对界面抗拔 和抗剪连接件数量,按照试验值的不同比例进行参 数分析,如表4所示。选取弹性阶段刚度和极限承 载力进行分析,弹性阶段刚度定义为弹性极限荷载 *P*₁与顶底收敛变形的比值,极限承载力定义为极限 状态的荷载*P*₁。

表4 参数分析取值 Tab.4 Values of parametric analysis

计算参数	参数取值
钢板厚度/mm	4.5(试验值)、8.0、12.0、16.0、20.0
UHPC 层厚度/mm	35.0、45.0、55.5(试验值)、65.0、75.0
界面抗拔性能/%	50、75、100(试验值)、125、150
界面抗剪性能/%	50、75、100(试验值)、125、150

3.1 钢板厚度的影响

不同钢板厚度下,结构破坏过程基本一致(见图 20)。弹性刚度和极限承载力均随钢板厚度增大而 增大,钢板厚度由4.5 mm 增加至 20.0 mm,极限承 载力由 378 kN增加至 538 kN,相对于未加固结构提 升率为 69%~140%(见图 21)。钢板厚度由4.5 mm 增加至 12.0 mm,结构性能提升效果明显;当厚度大于 12.0 mm后,提升效果相对不明显,结构破坏时底 部钢板未屈服,结构性能受管片本体控制(加固材料 利用率较低)。当钢板厚度过小时,钢板屈服先于管

片破坏出现(如本试验中顶部接缝位置钢板屈服先 于接缝破坏产生),对组合加固结构受力不利。为了 提升结构性能,可适当增大钢板厚度,但不宜超过 12.0 mm。









图 21 不同钢板厚度下结构性能



3.2 UHPC层厚度的影响

从图 22、23 可以看出,UHPC 层厚度对加固结构破坏模式无明显影响,结构弹性刚度和极限承载力随UHPC 层厚度的增大而提高。UHPC 层厚度由 35.0 mm 增加至 75.0 mm,承载力相对于未加固结构的提升率由 47%增加至 81%;当UHPC 层厚度大于 55.0 mm 后,其对弹性刚度影响较大而对极限承载力影响较小。综合考虑结构性能和隧道限界等因素,UHPC 层厚度为 55.0 mm 是较为合理的参数。

3.3 界面抗拔性能的影响

从图24、25可以看出,当界面抗拔连接件不充 分(≪50%试验值)时,结构破坏模式发生变化。界 面较早黏结失效使得组合加固结构内外衬变为各自 受力变形的状态,结构弹性刚度和极限承载力均大 幅下降;当界面抗拔性能充分(>50%试验值)时,加 固结构破坏过程一致,结构极限承载力随界面抗拔 性能提升由365 kN增加至384 kN;当界面抗拔性能



图 22 不同 UHPC 层厚度下荷载-收敛变形曲线 Fig.22 Load-convergent deformation curves under different UHPC thicknesses



Fig.23 Structural performance under different UHPC thicknesses

超过试验值后,结构极限承载力和弹性刚度提升率 基本维持在70%和144%。正如2.2节破坏机理所 述,当结构进入弹塑性阶段、管片与加固体之间产生 不协调变形后,界面抗剥离能力对结构承载性能影 响较大。因此,需要保证界面抗拔性能以使得2.1.4 节中所述界面栓钉剪切破坏等现象较晚发生,进而 提升结构整体性的维持能力和加固材料利用率。





3.4 界面抗剪性能的影响

如图26、27所示,与界面抗拔性能的影响类似,





当界面抗剪性能较弱(<50%试验值)时,结构破坏 模式发生变化,界面较早的剪切失效导致结构刚度 和极限承载力明显减小;当界面抗剪性能>50%试 验值时,结构破坏模式基本一致,界面抗剪性能由 75%试验值提至150%试验值,极限承载力相对于 未加固结构的提升率在60%~71%之间,弹性刚度 的变化始终较小。因此,界面抗剪性能影响结构在 出现非协调变形后的叠合程度维持能力,进而影响 承载力,足够的抗剪连接件数量是界面不过早发生 剪切失效的重要保证。











4 结论

(1)在一次受力超载工况下,组合加固结构的破坏分为弹性、弹塑性和塑性阶段。弹性阶段终于管片腰部外弧面开裂;管片受拉区混凝土退出工作后截面中性轴向受压侧移动造成应力重分布,各层不协调变形导致界面剥离和滑移发展;管片腰部纵缝处内弧面压碎出现塑性铰后,结构刚度大幅度下降。最终,管片顶部纵缝及底部本体相继出现塑性铰,结构达到承载力极限,破坏过程呈现较好的延性特征。

(2)钢板-UHPC组合加固结构界面通过化学锚 栓、植筋和栓钉等进行黏结,最终状态下,顶部、底部 和腰部位置钢板屈服,顶部纵缝处的UHPC发生拉 剪破坏,多个位置的管片主筋和纵缝螺栓屈服,材料 利用率相比UHPC加固结构更高。

(3)在界面可靠的黏结前提下,钢板-UHPC组 合加固结构的刚度主要受管片及加固体刚度控制; 承载力水平主要受管片强度控制,相比未加固结构 提升67%、相比UHPC加固结构提升28%。

(4)加固结构性能随钢板厚度、UHPC层厚度以 及界面黏结性能的增大而提升,为了保证结构不出 现脆性破坏,可适当增大钢板厚度(但不宜超过 12.0 mm)并保证界面抗拔和抗剪连接件的数量。

作者贡献声明:

柳 献:提出研究思路与方法,指导试验的开展及模型的建立,指导试验与数值分析,论文撰写。

纪汉卿:建立数值计算模型,完成参数分析、论文初稿整 理、稿件修改等工作。

甘海杰:参与整环足尺试验、试验数据处理工作以及论 文初稿撰写。

孙雪兵:参与整环足尺试验和数据分析工作以及论文初 稿撰写。

王金龙:提出研究思路与方法,指导试验的开展与论文 撰写。

参考文献:

[1] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社, 1991.

LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Shield tunnel method [M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 1991.

[2] LIU X, JIANG Z, YUAN Y, et al. Numerical investigation of the mechanical behavior of deformed segmental tunnel linings, strengthened by epoxy-bonded filament wound profiles [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 78: 231.

- [3] 朱旻,陈湘生,王雪涛. 盾构隧道衬砌结构性能演化分析与思考[J]. 工程力学, 2022, 39(3):33.
 ZHU Min, CHEN Xiangsheng, WANG Xuetao. Analysis and thinking on structural performance evolution of shield tunnel lining[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(3):33.
- [4] 毕湘利,柳献,王秀志,等.内张钢圈加固盾构隧道结构极限 承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47
 (11):128.
 BI Xiangli, LIU Xian, WANG Xiuzhi, *et al.* Experimental

study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 128.

- [5] 李宇杰,王梦恕,徐会杰,等.纤维布补强地铁隧道结构的数 值分析[J].土木工程学报,2014,47(8):138.
 LI Yujie, WANG Mengshu, XU Huijie, *et al.* Numerical analysis of metro tunnel structure reinforced with fiber cloth material [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (8):138.
- [6] 柳献,张晨光,张宸,等.FRP加固盾构隧道纵缝接头试验研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(2):9.
 LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Chen, et al. Experimental study on the longitudinal joint in shield tunnel reinforced with FRP material [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2):9.
- [7] 柳献,张乐乐,李刚,等.复合腔体加固盾构隧道衬砌力学行为的宏观分析模型[J].现代隧道技术,2014,51(5):78.
 LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, *et al.* A macroscopic analysis model for the mechanical behaviors of a shield tunnel segment lining reinforced with a composite cavity [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5):78.
- [8] 邵旭东,方恒,李文光.钢-超薄UHPC组合桥面板界面抗剪 性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(5):44. SHAO Xudong, FANG Heng, LI Wenguang. Research on the interfacial shear resistant performance of the composite deck system composed of orthotropic deck and ultra-thin UHPC layer [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(5):44.
- [9] 柳献,蒋子捷,刘树亚.钢板-混凝土组合结构加固盾构隧道 衬砌结构极限承载力足尺试验[J].中国公路学报,2020,33 (1):128.
 LIU Xian, JIANG Zijie, LIU Shuya. Experiment of deformed shield tunnels strengthened by steel plate-concrete composite structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020,
- 33(1):128.
 [10] 陈仁朋,鲁立,张阳,等. 盾构管片 UHPC 加固技术及力学性 能分析[J]. 工程力学, 2019, 36(11):41.
 CHEN Renpeng, LU Li, ZHANG Yang, *et al.* Reinforced technology and mechanical properties of shield tunnel lining with UHPC[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11):41.
- [11] 柳献, 张姣龙, 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):10.
 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):10.

- [12] LUO J, SHAO X D, FAN W, et al. Flexural cracking behavior and crack width predictions of composite (steel+ UHPC) lightweight deck system [J]. Engineering Structures, 2019, 194: 120.
- [13] YAN J B, GUAN H, WANG T. Steel-UHPC-steel sandwich composite beams with novel enhanced C-channel connectors: tests and analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106077.
- [14] 邵旭东,张松涛,张良,等.钢-超薄UHPC层轻型组合桥面 性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35 (1):22.
 SHAO Xudong, ZHANG Songtao, ZHANG Liang, et al.

Performance of light-type composite bridge deck system with steel and ultra-thin UHPC layer [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2016, 35(1): 22.

- [15] ZHU J S, GUO X Y, KANG J F, et al. Numerical and theoretical research on flexural behavior of steel-UHPC composite beam with waffle-slab system [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 171: 106141.
- [16] 孙启力,路新瀛,聂鑫,等.非蒸养UHPC-钢板结构界面的 受拉和剪切性能试验研究[J].工程力学,2017,34(9):167. SUN Qili, LU Xinying, NIE Xin, et al. Experimental research on tensile and shear behaviour of the interface between nonsteam-cured UHPC and steel plate structure [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9):167.
- [17] YAN J B, GUAN H, WANG T. Numerical studies on steel-UHPC-steel sandwich beams with novel enhanced C-channels[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106070.
- [18] LIU X, JIANG Z, ZHANG L. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded filament wound profiles [J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2017, 13 (10/ 12): 1268.
- [19] 柳献,郭振坤,伍鹏李.考虑接头非线性的壳-接触盾构隧道 衬砌计算模型研究[J]. 隧道建设, 2021, 41(S1): 54.
 LIU Xian, GUO Zhenkun, WU Pengli. Shell-contact model with nonlinear joints for shield lining design [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 54.
- [20] ZHANG J L, LIU X, REN T Y, et al. Structural behavior of reinforced concrete segments of tunnel linings strengthened by a steel-concrete composite[J]. Composites, 2019, 178: 107444.
- [21] LIU X, ZHANG C, ZHANG C, *et al.* Ultimate load-carrying capacity of the longitudinal joints in segmental tunnel linings[J]. Structural Concrete, 2017, 18(5): 693.
- [22] ZHANG J, SCHLAPPAL T, YUAN Y, et al. The influence of interfacial joints on the structural behavior of segmental tunnel rings subjected to ground pressure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 538.