

矿山法隧道初期支护中栓钉型钢与喷射混凝土界面黏结滑移本构模型与试验研究^{*}

杨宗林¹ 徐世文¹ 卢志凯¹ 路军富² 李杰芮²

(1. 中铁九局集团第五工程有限公司, 611730, 成都;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 610059, 成都)

摘 要 [目的] 为探明矿山法隧道初期支护中栓钉型钢与喷射混凝土界面黏结滑移本构关系。[方法] 以栓钉长度、直径和布置形式为变化参数, 设置4组不同工况, 进行腹板带栓钉的型钢-喷射混凝土短柱推出试验, 分析其破坏模式、荷载-滑移特性和承载力等。[结果及结论] 栓钉试件的破坏模式受栓钉数量和强度影响, 分为拉裂破坏和胀裂破坏两类; 典型的平均黏结强度-相对滑移曲线可分为无滑移段、曲线上升段、曲线下降段和水平残余段; 室内试验证明栓钉直径和布置形式是影响承载能力的主要因素; 根据受力机制建立带栓钉的型钢与喷射混凝土界面的黏结滑移本构模型, 并经室内试验和数值模拟双重验证, 表明提出的黏结滑移本构模型精度较高。研究结果可为矿山法隧道型钢与喷射混凝土支护结构设计提供理论支持。

关键词 隧道; 初期支护; 型钢-喷射混凝土; 栓钉连接件; 黏结-滑移本构关系

中图分类号 U455.7+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.031

Constitutive Model and Experimental Study of Stud Steel-Shotcrete Interface Bond-Slip in Mining Method Tunnel Initial Support

YANG Zonglin¹, XU Shiwen¹, LU Zhikai¹, LU Junfu², LI Minrui²

(1. Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway No. 9 Group Co., Ltd., 611730, Chengdu, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, 610059, Chengdu, China)

Abstract [Objective] It is aimed to elucidate the constitutive relationship of bond-slip at the interface between stud steel and shotcrete in the initial support of mining method tunnel.

[Method] Four different working conditions are set by varying the length, diameter, and arrangement of the studs. Push-out tests are conducted on steel-shotcrete short columns with studs

on web plate, analyzing failure modes, load-slip characteristics and bearing capacity. [Result & Conclusion] The failure modes of stud specimens are affected by the number and strength of studs, categorized into tensile splitting and bursting failure. The typical average bond strength - relative slip curve can be divided into four stages: no slip, ascending curve, descending curve, and horizontal residual stage. Laboratory tests demonstrate that the diameter and arrangement of the studs are primary factors affecting the bearing capacity. A bond-slip constitutive model for the interface between stud steel and shotcrete is established based on stress mechanism, validated through both laboratory tests and numerical simulations, showing high accuracy. The research results can provide theoretical support for the design of steel and shotcrete support structures of mining method tunnels.

Key words tunnel; initial support; stud steel-shotcrete; bolted connector; bond-slip constitutive relationship

0 引言

型钢拱架-喷射混凝土结构具有支护及时、操作灵活、抗震性能优越等优点, 在城市轨道交通隧道暗挖法施工中作为初期支护被广泛应用^[1]。

当线路穿越工程地质较复杂地层(例如富水软弱地层)时, 支护结构往往承受较大变形压力。由于型钢与喷射混凝土两种材料的力学性能差异较大, 二者接触界面间的黏结能力无法抵抗剪切应力, 型钢与混凝土间会产生相对滑移。随着相对滑移的增大, 喷射混凝土开裂剥落, 型钢拱架扭曲, 结构丧失协同变形能力^[2-3]。因此, 研究隧道支护型钢与喷射混凝土的黏结滑移性能以及如何提高其协同承载能力具有重要意义。

^{*} 国家自然科学基金项目(51978088); 国家重点实验室自主课题(SKLG2021Z007); 中铁九局集团有限公司重大项目(2020-重大-01)

近年来,一些学者通过在钢-混凝土接触面布置栓钉抗剪连接件来增强界面黏结滑移能力。文献[4]对焊接栓钉的型钢-混凝土短柱的黏结性能进行了研究并建立了抗剪承载力计算公式。文献[5]在推出试验结果的基础上,以非线性断裂力学思想为基础,通过断裂能推导出试件黏结承载力计算公式。文献[6]采用有限元分析方法,探究混凝土强度、高强螺栓直径和屈服强度等参数对高强螺栓连接件抗剪承载力的影响。文献[7]基于试验结果和力的扩散原则,分别提出了考虑栓钉影响的波形钢板-混凝土界面黏结滑移本构模型。文献[8]结合推出试验与有限元分析,建立了栓钉组合结构黏结行为的理论分析模型,揭示了栓钉组合结构钢-混凝土界面剪力传递机制。

综上所述,栓钉可以显著增强型钢与混凝土之间黏结性能,有效保证两者间协同工作。因此,本文提出在型钢-喷射混凝土初期支护中的型钢腹板布置栓钉以提高支护结构整体承载能力。然而,不同于房屋建筑和桥梁等地上结构领域的带栓钉的型钢-混凝土结构,用于隧道初期支护的型钢-喷射混凝土结构,并无纵筋和箍筋,喷射混凝土的力学性能与模筑混凝土相比也有差异^[9-11]。型钢-喷射混凝土隧道支护结构的界面黏结滑移机理并不清晰。因此,亟须探明带栓钉的型钢与喷射混凝土界面黏结滑移本构模型,为隧道初期支护安全提供支持。

本文开展了多组腹板焊接栓钉的型钢-喷射混凝土试件推出试验,分析试件的荷载-滑移关系、混凝土裂缝开展形式等;在此基础上,利用有限元软件建立试验模型,探究栓钉长度、直径、布置方式对黏结强度和抗滑移性能的影响,为实际工程设计提供参考依据。

1 试验概况

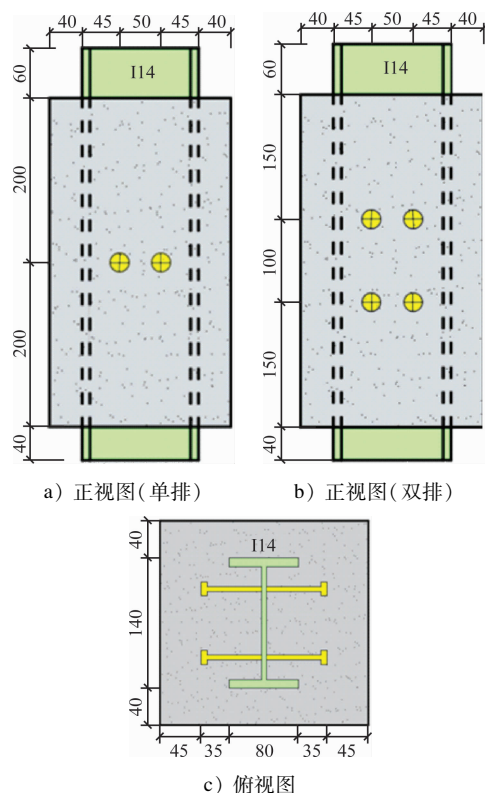
1.1 试件设计

本次试验共设计了4组型钢-喷射混凝土试件,试件的设计参数见表1,试件截面设计如图1所示。试件的主要变化参数为栓钉直径、长度、数量和布置方式。试件截面尺寸为240 mm×220 mm,型钢采用I14,规格为140.0 mm×80.0 mm×5.5 mm,锚固长度为400 mm,总高度为500 mm。依据隧道支护实际工况,试件不配箍筋。

表1 型钢-喷射混凝土试件参数

Tab. 1 Parameters of stud steel-shotcrete specimens

试件编号	栓钉规格	布置形式	栓钉横纵间距/mm	栓钉数量/个
SRSC1	13 mm×50 mm	单排平行布置	50(横)	4
SRSC2	13 mm×70 mm	单排平行布置	50(横)	4
SRSC3	16 mm×50 mm	单排平行布置	50(横)	4
SRSC4	13 mm×50 mm	双排平行布置	50(横)、100(纵)	8



尺寸单位:mm

图1 试件截面

Fig. 1 Specimen section

1.2 材料性能

根据试验方案中试件的设计工况,采用与隧道工程现场相同的型钢与混凝土材料加工制作试件,之后依据规范标准养护。型钢I14材质为Q345,栓钉材质为Q195,喷射混凝土强度等级为C20。参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》及GB/T 228—2010《金属材料室温拉伸试验方法》进行型钢和混凝土的材料性能试验,试验结果如表2和表3所示。

1.3 加载与监测方案

带栓钉型钢-喷射混凝土推出试验在地质灾害

表 2 钢材材料性能

Tab.2 Steel material properties

钢材种类	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
型钢翼缘	348.69	520.51	20.5×10^4
栓钉	190.40	316.40	19.8×10^4

表 3 喷射混凝土材料性能

Tab.3 Shotcrete material properties

混凝土强度等级	抗压强度/MPa	拉裂抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
C20	18.2	1.60	1.98×10^4

防治与地质环境保护国家重点实验室的 YAE-10000 电液伺服长柱压力试验机上进行。加载装置及监测布置如图 2 所示。加载方式采取等速位移加载,加载速率为 0.5 mm/min,直至试件完全失去抗滑移能力,停止加载。

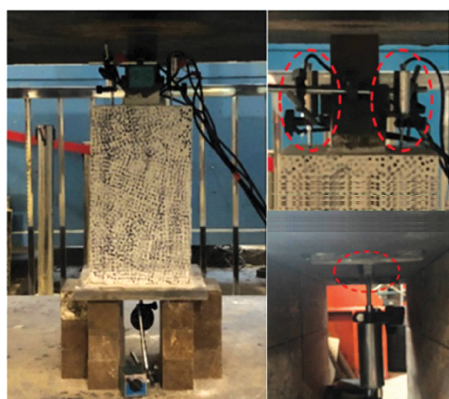
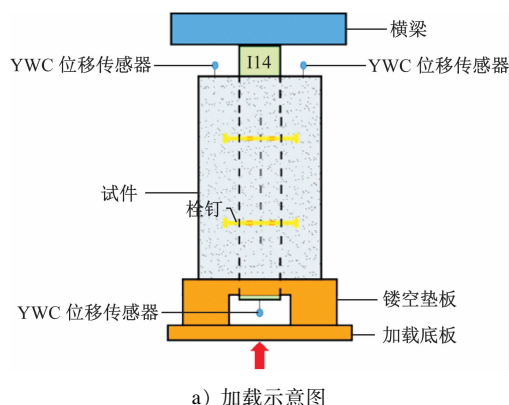


图 2 推出试验布置

Fig.2 Push-out test setup

为了保证试件各部分接触良好,所有试验正式加载前先施加轴向大小为 5 kN 的预压。试件加载端通过镂空垫板将荷载传递给喷射混凝土,然后通过黏结作用传递给型钢,出露型钢受到上部固定端横梁的作用从镂空垫块中被推出。在试件加载端

和自由端分别架设位移传感器来测量喷射混凝土被推出所产生的位移。

2 试验结果

2.1 试验现象

加载初期,当荷载小于 40% P_u (P_u 为极限抗滑力)时,没有产生相对滑移。随着荷载增大,界面化学胶结力开始局部失效,加载端出现滑移,在加载端底部出现裂缝,并沿着纵向发展。当荷载增大至 75% P_u 时,界面滑移缓慢增加,此时界面化学胶结力完全破坏,栓钉承担荷载,同时纵向中部裂缝沿着纵向 45° 方向发展至型钢翼缘肢尖,并在底部 1/4 和 3/4 处新增 2 条纵向裂缝。当荷载达到 100% P_u 时,荷载完全由栓钉承担,纵向中部裂缝贯通,在横向 1/4 处发展一条新的拉裂缝。加载后期,残余荷载稳定至 90% P_u 。最终,由于栓钉变形,引起喷射混凝土横向拉裂缝(位于试件中部最右端)宽度迅速增大,试件破坏失去抗滑力。

2.2 破坏模式

图 3 为试件破坏形态,通过观察可总结出两种典型破坏模式:拉裂破坏和胀裂破坏。

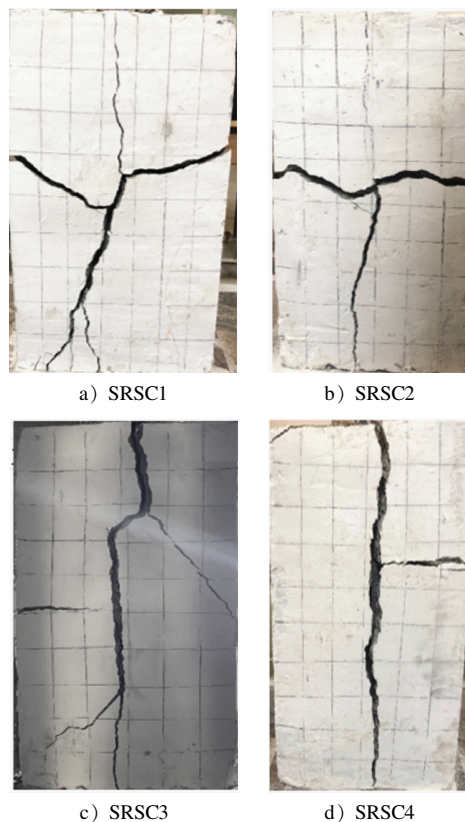


图 3 试件破坏形态

Fig.3 Failure modes of specimens

栓钉数量少 (SRSC-1)、栓钉强度低 (SRSC-2) 的试件,其破坏形式为拉裂破坏,如图 4 所示。

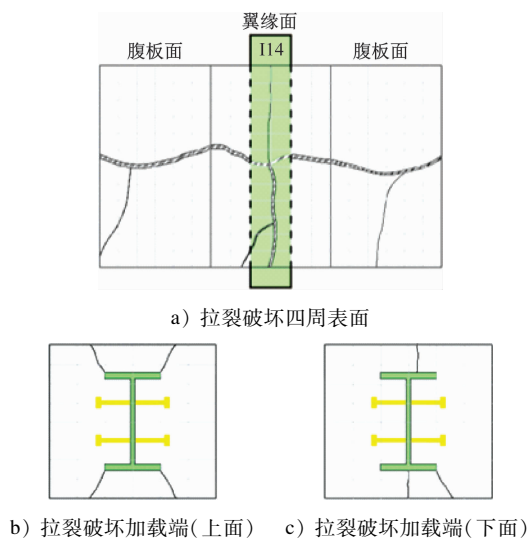


图 4 喷射混凝土拉裂破坏示意图

Fig. 4 Diagram of shotcrete tensile cracking damage

由图 4 可知:拉裂破坏试件,喷射混凝土四周表面的竖向黏结裂缝宽度明显小于横向的拉裂缝;型钢翼缘前、背面喷射混凝土形成一条纵向贯通裂缝;试件腹板左、右面的喷射混凝土在被推出的过程中由于受到栓钉的挤压作用沿着横向产生较大的拉裂缝,并没有引起喷射混凝土沿着竖向剥开现象。加载端与自由端的破坏模式均为喷射混凝土受到型钢剪切作用而导致的剪切破坏。

随着栓钉强度提升 (SRSC-3)、栓钉数量增加 (SRSC-4) 试件破坏形式变为胀裂破坏,如图 5 所示。

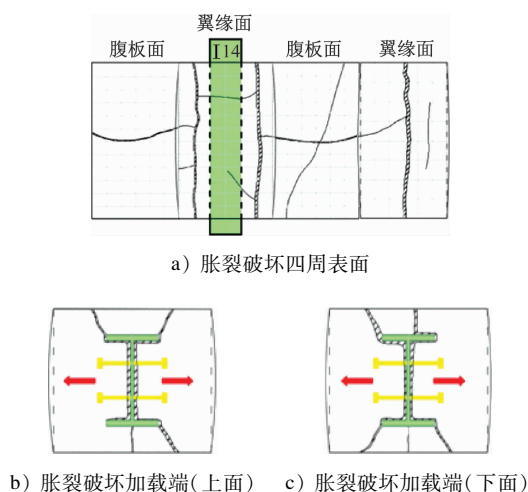


图 5 喷射混凝土胀裂破坏示意图

Fig. 5 Diagram of shotcrete expansive cracking damage

由图 5 可知:胀裂破坏试件,型钢翼缘前、背面喷射混凝土沿着纵向形成 2 条完全贯通的裂缝且宽度较大,明显大于腹板左、右面横向裂缝;腹板面裂缝虽贯通,但裂缝宽度较小,说明试件发生胀裂破坏。

2.3 荷载-滑移曲线

试件荷载-滑移曲线如图 6 所示。

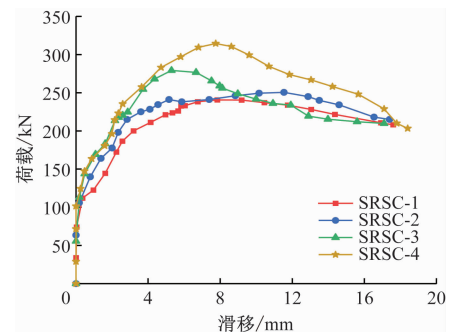


图 6 试件荷载-滑移曲线

Fig. 6 Specimen load-slip curves

由图 6 可知,SRSC2—SRSC3 的荷载-滑移曲线全过程的变化趋势基本一致,大致可分为 4 个阶段。当荷载小于 110 kN 时,型钢与喷射混凝土界面相对滑移基本为 0,两者处于完全黏结状态;当荷载大于 110 kN 时,型钢与喷射混凝土接触界面开始产生相对滑移,随着荷载的增加,与界面相对滑移关系呈双曲线函数增大,直至分别达到界面极限抗滑力 241 kN、251 kN 和 280 kN 后试件的抗滑移能力减弱,呈二次函数下降到 200 kN 基本保持不变;随着荷载作用时间的增长,界面相对滑移继续增大,最终荷载突然下降,滑移也突然增大,此时型钢与喷射混凝土界面完全失去抗滑移能力,试件破坏。

SRSC4 的荷载-滑移曲线大致可分为 4 个阶段。当荷载小于 125 kN 时,型钢与喷射混凝土接触界面的相对滑移基本为 0,两者处于完全黏结状态;当荷载大于 125 kN 后,型钢与喷射混凝土界面开始出现相对滑移,随着荷载的增加,与界面相对滑移关系呈双曲线函数增大,直至增长到极限抗滑力 318 kN;试件的抗滑移能力减弱,荷载呈二次函数下降,最终荷载稳定在 180 kN。

单排平行栓钉和双排平行栓钉试件的荷载-滑移曲线包括 4 个阶段。①无滑移段。加载初期,其界面抗滑移能力主要由型钢、栓钉与喷射混凝土相接触表面的化学胶结力提供。型钢与喷射混凝土界面相对滑移基本为 0,两者处于完全黏结状态。

②曲线上升段。随着荷载增大,型钢与喷射混凝土界面开始产生相对滑移,栓钉发挥抗滑移能力。荷载与界面相对滑移关系呈双曲线函数增大,直至分别达到界面极限抗滑力。③曲线下降段。到达极限荷载后,荷载-滑移曲线呈下降趋势。型钢截面和混凝土之间发生相对滑动。栓钉达到屈服强度并发生一定的延性变形,加载端喷射混凝土裂缝继续发展至整个试件。④水平残余段。滑移增大,荷载大小稳定在一定范围($90\% P_u$)不再下降。

本试验的荷载-相对滑移曲线与之前研究结果存在差异:下降段荷载并未骤降;并且试件达到极限抗滑力对应的相对滑移较之增大几倍。原因是试件没有箍筋,保护层较薄,侧向限制较弱,导致界面化学胶结力较小,同时栓钉缺少约束导致其变形过大。表4列举了不同试件的极限荷载。

表4 不同试件极限荷载

Tab.4 Ultimate loads of different specimens

试件	极限荷载/kN
SRSC1	240.4
SRSC2	249.9
SRSC3	280.7
SRSC4	318.9

分析可知,增加栓钉高度、直径和数量,试件的极限荷载均有不同程度的提高;同时,试件的极限滑移减小。这一现象说明钢腹板上焊接的栓钉剪力键增加了组合构件的黏结能力。

3 有限元模型

3.1 建立模型

仅室内试验不足以研究整个推出过程以及钢截面与带栓钉的混凝土界面之间的剪切传递。因此,使用有限元软件 ABAQUS 进行推出试验的有限元分析。带栓钉喷射混凝土试件有限元模型如图7所示。

型钢和栓钉与喷射混凝土需要建立相互接触作用面,因此需要在这3个部件进行布尔运算,使喷射混凝土内部切割成为型钢和栓钉的形状。所有装配部件单元均采用三维八节点实体线性减缩积分单元(C3D8R),因为该单元适用于接触、破坏等非线性有限元分析。

喷射混凝土选用混凝土塑性损伤模型,该模型

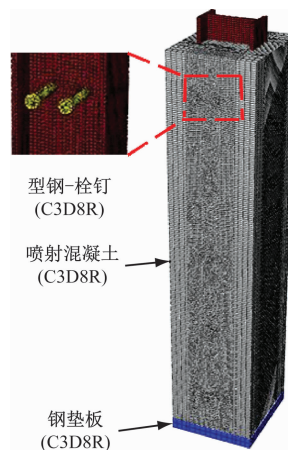


图7 带栓钉喷射混凝土试件有限元模型

Fig.7 Finite element model of shotcrete specimen with studs

能够反映材料在破坏过程中裂缝的发展行为、损伤程度变化以及受拉软化的过程。喷射混凝土的各种材料属性均通过室内试验获得。对于型钢以及栓钉本构模型均采用双斜线模型。界面间的平均黏结应力-相对滑移关系可以用相互作用属性里的黏结力接触行为来模拟。

3.2 验证模型

将试验得到的荷载-相对滑移曲线结果与有限元软件模拟计算结果对比,以试件 SRSC-4 为例,结果如图8所示。

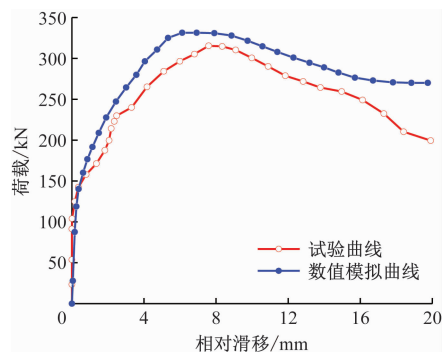


图8 试验曲线与数值模拟曲线对比

Fig.8 Comparison of test and numerical simulation curves

由图8可知,数值模拟与试验得到的荷载-滑移曲线符合较好,极限荷载较为接近,表明本文建立的模型能够较好地模拟型钢-喷射混凝土界面的黏结行为。曲线对比中,数值模拟的曲线上升段刚度比试验曲线的大,这主要是因为数值模型的边界条件是理想的,不存在缝隙与变形,这在试验中难以实现。数值模拟曲线残余段数值较大,这是由于无法模拟喷射混凝土开裂之后的剥落现象。

4 黏结滑移模型

4.1 本构模型建立

由于型钢与喷射混凝土界面受力状态复杂,且影响两者界面黏结强度的因素诸多,如喷射混凝土沿表面的密实程度等,故难以通过计量的方式得到不同表面处的黏结强度;因此,为了工程实际运用方便,取试件对应的荷载大小除以两者的接触面面积作为界面的平均黏结应力,不考虑黏结强度沿着接触面纵向变化。因此,采用平均黏结应力与相对滑移之间的相关关系,建立型钢与喷射混凝土界面的黏结滑移本构关系。平均黏结强度 τ 为:

$$\tau = \frac{P}{C_s L_a} \quad (1)$$

式中:

P ——试验时试件承受的荷载大小;

C_s ——型钢的截面周长,取值为 590 mm;

L_a ——型钢与喷射混凝土的锚固长度,取值为 400 mm。

根据试件的界面黏结滑移曲线,建立自然黏结试件和焊接栓钉试件的 τ - S (平均黏结强度-相对滑移) 曲线数学模型,如图 9 所示。图 9 中, τ - S 曲线各个特征黏结强度值点 A、B、C 分别为初始黏结强度 τ_s 、极限黏结强度 τ_u 和残余黏结强度 τ_r ,所对应的荷载分别为界面刚发生相对滑移的荷载 P_s 、达到极限抗滑力的荷载 P_u 和最终稳定荷载 P_r ,所对应的相对滑移为 S_s 、 S_u 和 S_r , S_c 为 τ_u 对应的最终滑移量;界面黏结刚度系数 K 表示 τ - S 曲线呈线性相关时的斜率。

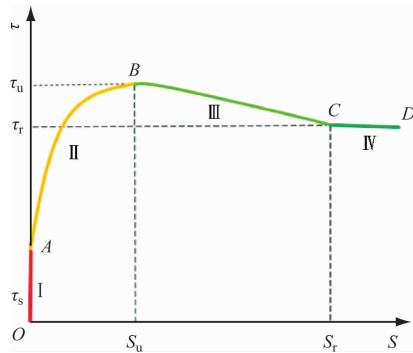


图 9 τ - S 曲线数学模型

Fig. 9 τ - S curve mathematical model

试件的 τ - S 曲线可分为以下几个阶段:

1) 无滑移段。

$$S = 0, 0 \leq \tau \leq \tau_s \quad (2)$$

2) 曲线上升段。 τ - S 曲线上升段上凸特征明显,且曲线斜率逐渐减小并趋于水平。

$$\tau = \frac{S}{mS + n} + t, 0 < S \leq S_u \quad (3)$$

其中: $m = 0.877, n = \frac{S_u}{\tau_u - \tau_r} - 0.877S_u, t = \tau_r$ 。

3) 曲线下降段。 τ - S 曲线下降段斜率变化较小,近似于下斜线,但存在一定的上凸特征,因此采用二次函数表达式。

$$\tau = aS^2 + b, S_u < S \leq S_r \quad (4)$$

其中: $a = \frac{\tau_u - \tau_r}{S_u^2 - S_r^2}, b = \tau_u - \frac{(\tau_u - \tau_r)S_u^2}{S_u^2 - S_r^2}$ 。

4) 水平残余段。栓钉提供的抗滑力保持不变而滑移不断增大的过程。

$$\tau = \tau_r, S \geq S_r \quad (5)$$

栓钉平行布置试件黏结滑移本构关系模型中,各特征值点的坐标由试验结果或计算得到,表达式为:

$$\tau = \begin{cases} \tau_s, & S = 0 \\ S / \left[0.877(S - S_u) + \frac{S_u}{\tau_u - \tau_r} \right] + \tau_r, & 0 < S \leq S_u \\ \frac{\tau_u - \tau_r}{S_u^2 - S_r^2} S^2 + \tau_u - \frac{(\tau_u - \tau_r)S_u^2}{S_u^2 - S_r^2}, & S_u < S \leq S_r \\ \tau_r, & S \geq S_r \end{cases} \quad (6)$$

4.2 本构模型验证

将本构模型计算结果与推出试验和数值模拟结果进行对比,以此来验证该计算方法的正确性。黏结滑移本构模型与型钢-喷射混凝土组合结构试件试验结果与数值模拟计算结果对比如图 10 所示。

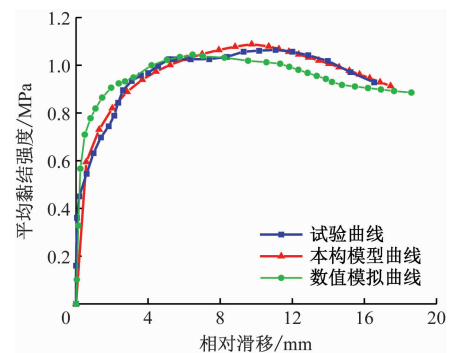


图 10 本构模型与试验曲线对比

Fig. 10 Comparison of constitutive model and test curves

由图 10 可知,试验曲线与本文建立的模型基本

吻合。因此本文所提出的本构模型能够精确反映带隧道支护栓钉型钢-喷射混凝土结构平均黏结强度-相对滑移的变化关系。

5 结语

隧道支护带栓钉型钢与喷射混凝土界面黏结滑移本构关系尚不明确,通过室内试验和数值模拟,对带栓钉型钢与喷射混凝土界面黏结滑移性能进行了研究,得到如下结论。

1) 腹板带栓钉的型钢-喷射混凝土构件的破坏形态主要分为拉裂破坏和胀裂破坏。带栓钉的型钢-喷射混凝土结构界面黏结滑移曲线可分为无滑移段、曲线上升段、曲线下降段和水平残余段。

2) 栓钉可显著增强型钢-喷射混凝土结构界面黏结性能,增强隧道支护结构整体性,提升隧道初支整体承载能力。栓钉高度对型钢-混凝土支护结构抗剪承载力影响较小,栓钉直径和布置形式是影响承载能力的主要因素。

3) 基于损伤滑移关系的内聚力接触模型可较好地模拟型钢与喷射混凝土的黏结滑移性能,具有较高的精确度,便于有限元数值计算的快速准确实现。

4) 在试验结果的基础上,建立了带栓钉的型钢-喷射混凝土试件的黏结滑移本构模型。模拟结果表明,所提出的本构模型与试验曲线拟合度较高,计算公式精确,可为城市轨道交通隧道工程设计提供理论支持。

参考文献

- [1] 张杰. 软弱富水地层浅埋暗挖隧道地表沉降和支护结构受力的模型试验[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(3): 107.
ZHANG Jie. Model test on ground settlement and stress of support structure of shallow excavated tunnel in weak water-rich layer[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(3): 107.
- [2] 张顶立, 孙振宇, 陶伟明. 隧道围岩大变形灾害特点与主动控制方法[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(1): 1.
ZHANG Dingli, SUN Zhenyu, TAO Weiming. Characteristics and active control methods of large deformation disaster of tunnel surrounding rock[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(1): 1.
- [3] 孔超, 张俊儒, 王海彦, 等. 深埋软岩大变形隧道支护变形特征及承载机理研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(6): 103.
KONG Chao, ZHANG Junru, WANG Haiyan, et al. Study on deformation characteristics and bearing mechanism of support in large deformation tunnel with deep buried soft rock[J]. China Railway Science, 2021, 42(6): 103.
- [4] 李俊华, 王国锋, 邱栋梁, 等. 带栓钉连接件型钢混凝土剪力传递性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 74.
LI Junhua, WANG Guofeng, QIU Dongliang, et al. Study on the force transfer behavior of SRC members with stud shear connectors[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 74.
- [5] 赵军. 带栓钉型钢 RPC 剪力传递性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
ZHAO Jun. Performance research on the shear transfer behavior of steel reinforced concrete with the stud[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [6] 陈俊, 汪威, 丁发兴, 等. 钢-混凝土组合梁高强螺栓抗剪连接件受剪性能[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2553.
CHEN Jun, WANG Wei, DING Faxing, et al. Shear bearing capacity of high-strength bolt connectors in steel-concrete composite beams[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(10): 2553.
- [7] 王威, 赵春雷, 苏三庆, 等. 带栓钉波形钢板混凝土组合构件黏结滑移性能与承载力试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 108.
WANG Wei, ZHAO Chunlei, SU Sanqing, et al. Experimental study on bond-slip behavior and bearing capacity of corrugated steel plate concrete composite member with stud[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9): 108.
- [8] DU H, HU X, MENG Y, et al. Study on composite beams with prefabricated steel bar truss concrete slabs and demountable shear connectors[J]. Engineering Structures, 2020, 210: 110419.
- [9] WANG X, LIU Y, LI Y, et al. Bond behavior and shear transfer of steel section-concrete interface with studs: testing and modeling[J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120251.
- [10] DONG H, ZHAO Y, CAO W, et al. Interfacial bond-slip behaviour between reinforced high-strength concrete and built-in steel plate with studs[J]. Engineering Structures, 2021, 226: 111317.
- [11] 胡锋, 刘晓东, 袁阳光, 等. 波形钢腹板组合箱梁带栓钉埋入式抗剪连接件承载力推出试验及有限元模拟分析研究[J]. 工程力学, 2021, 38(11): 43.
HU Feng, LIU Xiaodong, YUAN Yangguang, et al. The capacity of embedded shear connector studs of composite box girders with a corrugated steel web by push-out tests and fem analyses[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(11): 43.

· 收稿日期:2023-10-09 修回日期:2023-12-18 出版日期:2024-08-10
Received:2023-10-09 Revised:2023-12-18 Published:2024-08-10
· 通信作者:杨宗林,高级工程师,29698070@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license