引用格式：刘源，辛力，马思敏，等．界面处理对磷酸镁水泥砂浆-普通混凝土界面黏结性能的影响[J]．工业建筑，2025，55(5)：270-279．LIU Yuan，XIN Li，MA Simin，et al. Effects of Interfacial Treatment on Bonding Properties of MPC Mortar-NC Interface[J]. Industrial Construction，2025，55(5)：270-279 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG24071902

界面处理对磷酸镁水泥砂浆-普通混凝土界面黏结性能的影响

刘　源[1]　辛　力[1]　马思敏[2]　李　冉[2]　叶艳霞[2]

（1. 中国建筑西北设计研究院，西安　710018；2. 长安大学建筑工程学院，西安　710061）

摘　要　磷酸镁水泥(MPC)砂浆与普通混凝土(NC)的界面黏结强度和破坏机理对MPC砂浆加固NC结构性能至关重要。采用双面剪切试验，重点研究了光滑、凿毛、键槽和植筋4种界面类型对MPC砂浆-NC界面黏结性能的影响规律，观察了试件破坏过程，得到了黏结强度和滑移量之间的关系曲线，分析了试件的破坏模式和破坏机理，并通过试验对比了养护龄期分别为7 d、28 d，以及不同修补砂浆抗压强度(60 MPa、55 MPa)对界面黏结性能的影响。在理论分析的基础上，结合试验数据，提出了适用于不同界面处理条件的黏结界面抗剪承载力计算公式，建立了无植筋界面的双线型本构模型和植筋界面的三线型本构模型。

关键词　磷酸镁水泥砂浆；双面剪切试验；界面破坏机理；抗剪承载力；黏结-滑移本构模型

Effects of Interfacial Treatment on Bonding Properties of MPC Mortar-NC Interface

LIU Yuan[1]　XIN Li[1]　MA Simin[2]　LI Ran[2]　YE Yanxia[2]

(1. *Northwest Design & Research Institute of Architecture*, *Xi'an* 710018, *China*; 2. *School of Architecture and Engineering*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710061, *China*)

Abstract: The interfacial bonding strength and failure mechanism of magnesium phosphate cement (MPC) mortar and ordinary concrete (NC) are very important for the structural performance of MPC mortar to reinforce NC. In this paper, the double-sided shear test was used to study the influence of four different interface types on the bonding properties of the MPC mortar-NC interface, the failure process of the specimen was observed, the relationship curve between the bond strength and the slip amount was obtained, the failure mode and failure mechanism of the specimen were analyzed. The effects of curing ages(7 days and 28 days) as well as different compressive strengths (60 MPa and 55 MPa) on the interface bonding properties were compared. On the basis of theoretical analysis and combined with the experimental data, a calculation formula for the shear capacity of the bonded interface was proposed, suitable for different interface treatment conditions. In addition, a two-line constitutive model was established for the non-planting interface, and a three-line constitutive model was developed for the planting interface. This study provides theoretical support and design basis for the application of MPC in structural reinforcement engineering.

Keywords: magnesium phosphate cement mortar; double-sided shear test; interface failure mechanism; shear capacity; bond-slip constitutive model

第一作者：刘源，高级工程师，主要从事复杂结构设计、新型结构工程材料研发工作。

通信作者：叶艳霞，教授，主要从事钢筋混凝土、组合结构、复杂结构体系分析及结构抗震理论等方面的教学和研究工作，yeyanxia@chd.edu.cn。

收稿日期：2024-07-19

0　引　言

磷酸镁水泥（magnesium phosphate cement，MPC）材料由重烧氧化镁、磷酸盐（KH_2PO_4 或 $NH_4H_2PO_4$ 等）和缓凝剂按一定比例配置而成。相较于普通水泥（normal cement，NC）材料，MPC 材料具有更快的硬化和强度发展速度，更低的干燥收缩率和更佳的黏结性能[1-3]，以及较高的性能稳定性。因此，MPC 材料被认为是解决混凝土结构和道路快速修补加固问题[4]的理想材料。

近年来，采用 MPC 材料进行混凝土结构修补加固的相关研究和工程应用逐渐增多。Jiang 等[5]将 MPC 砂浆用来加固铁路无砟轨道混凝土底板，在修补加固 2 h 后试件的极限承载力便达到了原设计值的 88% 以上，完全满足了高速铁路快速加固需求。Liu 等[6]以 MPC 为黏合剂通过碳纤维增强织物对素混凝土柱进行了加固，加固后柱体最大承载力和刚度分别较原柱提高了 372.08% 和 130.15%。

加固材料（加固层）与原结构混凝土间的界面黏结性能是保证两者之间有效传递应力和加固结构完整性的重要影响因素[7-8]，且修补材料与混凝土之间的黏结界面是整体结构加固后相对薄弱部位，其破坏往往先于整体结构[9]。因此，界面的黏结性能是决定混凝土结构修补加固效果的关键，且其受修补材料性能、试验方法和界面处理方式等因素影响。

目前，混凝土修补界面黏结性能研究多集中于超高性能混凝土（UHPC）、地聚物混凝土等相对成熟、应用较多的加固材料。Zhang 等[10]通过推出试验研究了不同表面处理对 UHPC-石材界面黏结性能的影响。结果表明，表面处理方式对 UHPC-石材界面的抗剪强度影响最为显著。与凿毛相比，经键槽处理的试件抗剪强度提升了 189.4%。周建庭等[11]以键槽布置和形状为变量，分析了不同键槽构造对 UHPC-NC 界面黏结性能的影响。结果表明，正梯形键槽试件的界面黏结抗剪强度比直角形键槽试件高 25% 左右，倒梯形键槽试件的界面黏结抗剪强度比直角形键槽试件高 13%~15%。但其试验设计中并未考虑其他类型的界面处理方式对抗剪强度的影响，界面处理方式较为单一化。

MPC 作为混凝土结构加固材料的相关研究偏少。杜玉兵等[12]研究表明，混凝土界面处理方式对 MPC 砂浆界面黏结抗剪强度有显著影响，并认为采用人工凿毛外露骨料时的界面黏结性能最佳，且有销栓作用的界面抗剪强度提高幅度较大。然而，该研究仅考虑了 3 种凿毛处理界面情况，参数因素变化水平较少。因此，有必要针对不同界面处理方式展开对 MPC-NC 界面黏结性能的深入研究。

本文设计了光滑、凿毛、键槽、植筋共 4 种 MPC 砂浆-NC 界面处理方式，研究了无植筋界面和植筋界面的破坏机理，推导了界面黏结-滑移本构关系曲线模型和界面抗剪承载力统一计算公式，以期为实际工程应用提供一定的参考。

1　试　验

1.1　材料性能

采用市售海螺牌 P·O 42.5 级水泥与河砂、石子和水制备 NC 基底。河砂最大粒径为 0.38 mm，石子为连续级配，最大粒径为 25 mm。

MPC 砂浆组分：重烧氧化镁（MgO），其煅烧温度大于 1500 ℃，纯度≥95%。磷酸盐为工业级磷酸二氢钾（KH_2PO_4，KDP），纯度≥99%。矿物掺料为复掺 10% 硅灰和 10% 偏高岭土。复合缓凝剂由硼酸和葡萄糖复配而成，其质量比为 0.571。采用河砂作为细骨料，拌和用水为城市用水。NC 基底及 MPC 砂浆配合比如表 1 所示。

表 1　NC 基底及 MPC 砂浆配合比

Table 1　Mix proportions of NC substrate and MPC mortar

材料	镁磷比	水胶比	胶砂比	胶石比	缓凝剂	硅灰	偏高岭土
SMMPC1	6	0.23	1:0.5	—	0.03	0.10	0.10
SMMPC2	6	0.23	1:1	—	0.03	0.10	0.10
NC	—	0.44	1.225	1:2.485	—	—	—

表 1 中修补材料 SMMPC1、SMMPC2 为 2 种不同配合比的 MPC 砂浆，其抗压强度根据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》[13]进行测定，混凝土的抗压强度测定则依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法》[14]进行。表 1 中 3 种材料测试样品均在试件制作过程中分别预留 3 块同批次同条件养护试块。其中，MPC 修补砂浆材料分别测定了养护 7 d、28 d 的平均抗压强度，混凝土材料仅测定养护 28 d 时的平均抗压强度。SMMPC1 的 7 d、28 d 平均抗压强度分别为 48.9、60.4 MPa，SMMPC2 的 7 d、28 d 平均抗压强度分别为 43.7、56.5 MPa，混凝土 28 d 平均抗压强度为 44.2 MPa。

1.2　试件设计

为研究不同界面处理方式对MPC砂浆-NC界面黏结性能的影响,共设计制作了10组双面剪切试验试件,每组有3个重复试样。试件整体尺寸为150 mm×150 mm×150 mm(图1)。其中,NC基底尺寸为150 mm×150 mm×100 mm,占试件体积的2/3;MPC砂浆尺寸为150 mm×150 mm×50 mm,占试件体积的1/3,黏结界面面积为150 mm×150 mm。10组试件的修补MPC材料、界面处理形式和养护龄期详见表2。界面类型包括光滑、凿毛、键槽和植筋4种,试件M1-C-7和M2-C-7的养护龄期为7 d,其余试件为28 d。

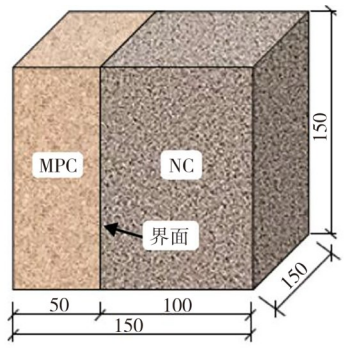


图1　剪切试件基本构造　mm

Fig. 1　The basic structure of the shear specimen

1.3　试件制作

试件制作流程包括:NC基底制作、界面处理、MPC砂浆层的浇筑,如图2所示,具体细节如下。

1)NC基底制作。模具选用150 mm×150 mm×150 mm标准模具,将150 mm×150 mm×50 mm的发泡聚苯乙烯(EPS)泡沫板放入模具一侧为MPC砂浆预留空间,之后将搅拌好的混凝土倒入模具中浇筑振捣成型,并在温度为(25±2)℃,相对湿度为95%左右的条件下养护28 d形成NC基底,拆模之后进行界面处理。

表2　双面剪切试件设计方案

Table 2　Design schemes for double-sided shear specimens

试件编号	黏结材料	界面形式	养护龄期/d
M1-C-7	SMMPC1	凿毛	7
M2-C-7	SMMPC2	凿毛	7
M1-S-28	SMMPC1	光滑	28
M1-C-28	SMMPC1	凿毛	28
M1-K-28	SMMPC1	键槽	28
M1-P-28	SMMPC1	植筋	28
M2-S-28	SMMPC2	光滑	28
M2-C-28	SMMPC2	凿毛	28
M2-K-28	SMMPC2	键槽	28
M2-P-28	SMMPC2	植筋	28

2)4种界面处理方式。光滑界面即NC界面不做处理;凿毛界面采用人工钻凿,需要使界面露出骨料,凿毛深度约为2 mm,露出80%以上的粗骨料;键槽界面通过电动锯盘切割而成,切槽宽度和深度均为10 mm;植筋试件中的钢筋需在混凝土浇筑前进行预埋,预埋钢筋采用HRB335级,直径为8 mm,钢筋布置为每个界面1根长度为110 mm,深入NC基底80 mm。

3)将经过界面处理后的NC基底表面清理干净,放入原模具后进行MPC砂浆层的浇筑。所有试件在温度为(25±2)℃,相对湿度为95%左右的条件下进行养护,养护龄期为7、28 d。

1.4　加载方案

按前述方法制作试件进行双面剪切试验加载测试(图3),使用WAW-1000型万能试验机(UTM)进行试验,试件下部和中部分别布置3个钢垫块进行加载。

加载过程中采用位移控制。首先进行预加载,使试件紧固并使黏结界面为主要受力部分,接着进

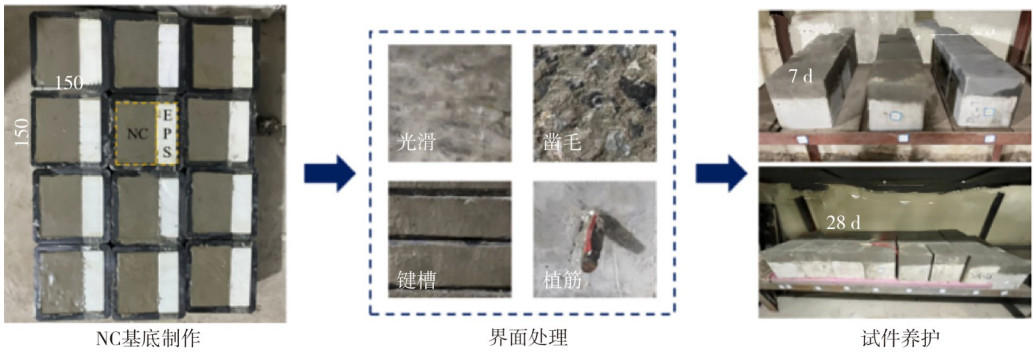


图2　试件制作流程

Fig. 2　Specimen preparation process

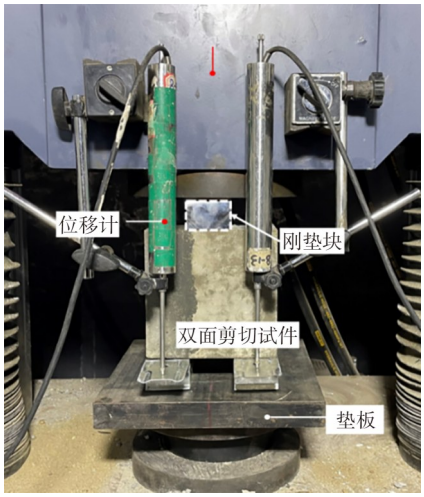


图 3　加载方案

Fig. 3　Loading scheme

行加载速率为 0.2 mm/min 的单向加载，并及时记录试件开裂时的荷载值。界面黏结强度通过试件破坏时的极限荷载和黏结界面的投影面积之比来计算，见式(1)。当试件破坏失效时停止加载，此时的荷载值为失效(极限)荷载。在 2 个剪切面处分别布置了 2 个竖向位移计来采集剪切面之间的相对滑移 S(mm)。

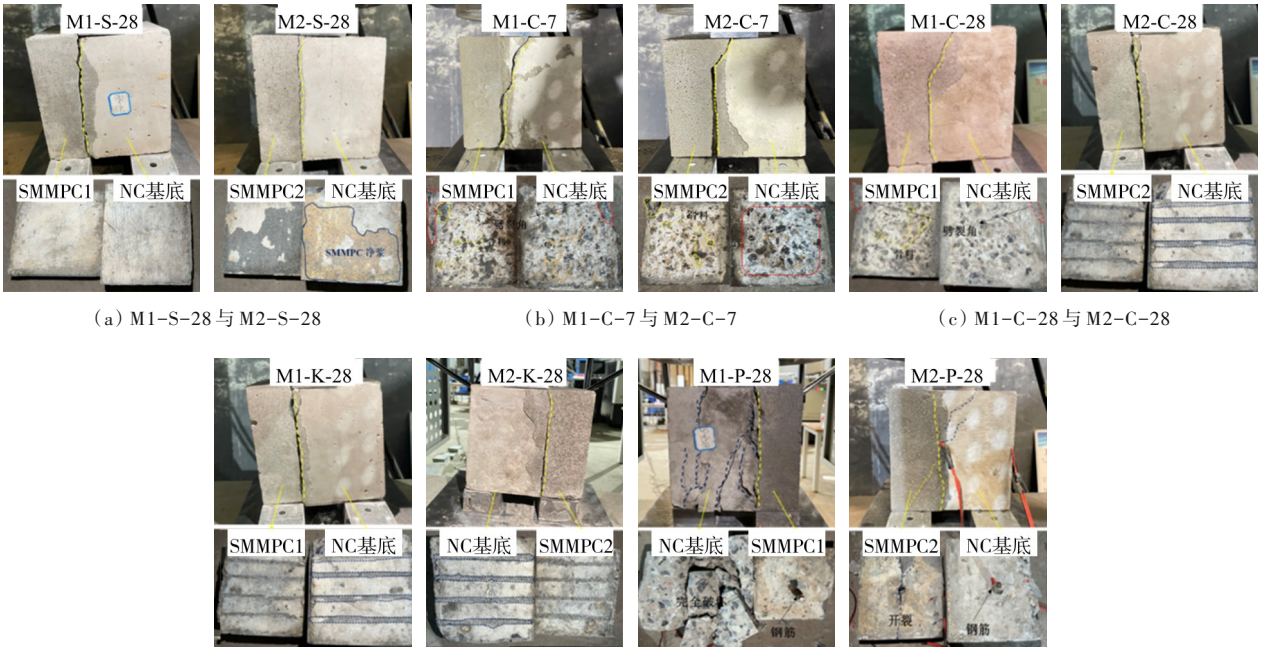
$$\tau = \frac{P}{2bd} \tag{1}$$

式中：τ 为界面黏结强度，MPa；P 为界面极限荷载，kN；b 和 d 分别为 NC 基底的黏结界面长度和宽度，mm，本试验均为 150 mm。

2　结果与分析

2.1　试验现象及破坏模式

各试件破坏模式分别如图 4 所示。可见：



(a) M1-S-28 与 M2-S-28　(b) M1-C-7 与 M2-C-7　(c) M1-C-28 与 M2-C-28

(d) M1-K-28 与 M2-K-28　(e) M1-P-28 与 M2-P-28

图 4　不同界面典型黏结失效模式

Fig. 4　Typical bond failure modes at different interfaces

1)光滑界面试件 M1-S-28 和 M2-S-28 组，养护 28 d 后分别进行双面剪切试验，两者分别加载至 36.4、27.1 kN 时发生界面滑脱破坏，且破坏界面为完整的光滑界面，M2-S-28 界面上的 MPC 净浆界面剂出现了部分剥离，表现为界面黏结失效，破坏发生在一瞬间，见图 4(a)。MPC 修补砂浆强度不同导致二者极限荷载相差 34%。同时，M1-S-28 和 M2-S-28 组试件破坏时对应的最大位移也因 MPC 修补砂浆强度不同而呈现差异(0.36、0.28 mm)。可见，选择强度较高的修补砂浆有利于提高 MPC 与 NC 间的黏结强度和剪切滑移量。

2)界面凿毛处理的试件分为 7 d、28 d 养护组。M1-C-7 组和 M2-C-7 组分别加载至 45.2、33.1 kN 时，伴随“噼噼”的声音，在黏结界面的中下部出现

微裂纹。当分别加载至49.2、39.6 kN时,“砰”的一声、MPC砂浆加固一侧突然与NC基底分离,试件破坏失效,见图4(b)。位移计记录的最大位移分别为0.64、0.47 mm。与光滑界面试件不同,凿毛界面试件的极限荷载明显远高于光滑界面试件,且破坏界面位于试件顶部加载端,出现明显劈裂角,并使混凝土骨料脱落。养护28 d的M1-C-28和M2-C-28组试件,其破坏过程与M1-C-7和M2-C-7无明显区别,破坏时的荷载较后者分别提高了9.3%和14.8%,破坏时界面顶部劈裂角更为明显。对比试验结果可知,较长时间养护及较高强度等级的MPC砂浆具备更优异的黏结性能,与NC基底的亲和性更好。

3)键槽界面试件M1-K-28组和M2-K-28组均养护28 d,当试件分别加载45.8、32.5 kN时,在其底部界面键槽附近首先出现MPC修补砂浆的剪切破坏,分别加载至46.7、37.2 kN时,界面很快完全失效,破坏后的试件见图4(d),可知该组试件和凿毛界面相同,也在界面顶部出现劈裂破坏。对比凿毛界面试件组,二者的抗剪承载力较为接近,破坏模式和最大位移也相仿,说明凿毛或键槽处理均可在一定程度提高MPC砂浆-NC界面的抗剪承载力。

从破坏过程、破坏现象及测试结果看,3种无植筋情况,即光滑界面、凿毛界面、键槽界面试件的破坏均发生在界面处,且均表现出脆性破坏特征。凿毛和键槽处理后,MPC-NC界面接触面积较光滑界面大,且在凹凸交界处形成一定咬合效应,因此可提供更高的黏结应力以抵抗试验中的剪切荷载,更好地发挥材料的性能。通过对凿毛和键槽的界面处理分析可知,若引入一个界面影响系数,其与键槽数量和键槽影响系数有关,由于键槽的数量以及开槽的宽度和深度较低,故其界面影响系数小于凿毛的处理方式。

界面植筋组试件为M1-P-28组和M2-P-28组。当M1-P-28组试件加载至57.3 kN时,形成了沿整个界面的竖向贯通裂缝,此时黏结界面并未失效。加载至61.5 kN时,基底混凝土也开始出现裂缝,在靠近黏结界面的一侧,裂缝沿中部向斜下方扩展,远离黏结界面一侧,裂缝出现于NC基底界面底部支座附近。当加载至100.5 kN时,试件仍未完全破坏,但承载力开始逐步下降,当荷载为70.2 kN时,由于基底混凝土突然破坏,试件达到完全失效状态,位移计对应数值为2.51 mm,同时钢筋牢固镶嵌在MPC修补砂浆内,修补砂浆部分的破坏并不严重,仍对其内植筋形成握裹效应。M2-P-28加载至45.4 kN时,微裂缝同样首先出现在了MPC砂浆-NC界面中部的植筋附近,并随着荷载增加该裂缝分别向下进入MPC修补砂浆部分,向上进入基底混凝土部分,当荷载达到61.6 kN时,修补砂浆部分随着裂缝的延伸突然从侧面断裂成两半,此时试件失效,对应的位移为2.08 mm。已有研究认为,植筋界面通过“扎钉效应”和“夹持效应”为黏结界面提供更好的抗剪承载力和延性[15]。钢筋优异的抗弯性能可为黏结界面提供抗剪能力。本试验中M1-P-28组和M2-P-28组的破坏模式差别较大,原因在于M1-P-28组修补砂浆强度较M2-P-28组的高,其与基底混凝土的黏结性能有一定优势,修补砂浆厚度为基底混凝土厚度的1/2,植筋附近易形成局部应力集中,故界面附近试件开裂始于植筋位置,并在试验施加的剪切应力和植筋附近的局部应力共同作用下,因材料强度和界面黏结性能的差异使试件的裂缝开展表现出不同的特点。从结构加固设计角度看,M1-P-28组的破坏过程所表现的延性、界面抗剪承载力及材料性能的发挥程度均优于M2-P-28组,因此建议实际应用中加固MPC砂浆的强度应高于原混凝土3个强度等级。从试验数据和破坏模式看,黏结界面植筋试件的承载力和变形性能均远优于前述3种无植筋界面情况。

其原因在于,界面黏结力包括化学胶结力、摩擦力、机械咬合力、植筋销栓作用[16]。当界面滑移为0时,界面抗剪承载力仅由界面之间的化学胶结力以及机械咬合力承担,随着结合面滑移量的增加,植筋的作用逐渐显现,此时在结合面的抗剪承载力中,界面摩擦力以及钢筋消栓作用占比开始增大,因此植筋界面抗剪承载力和剪切滑移量均明显高于无植筋界面试件。

2.2　界面抗剪性能对比分析

图5为各组试件的开裂荷载F_k与失效荷载F_s比值及滑移量S的对比情况。非植筋组试件开裂荷载约为失效荷载的83.6%~98.9%,说明试件开裂后很快失效,属于典型脆性破坏特征。其中,光滑界面试件M2-S-28表现出的脆性最明显,荷载安全储备(F_s-F_k)仅为0.3 kN。相较于其他非植筋试件组,凿毛界面试件M1-C-7、M2-C-7、M1-C-28和M2-C-28的荷载安全储备基本均大于1 kN。非植筋组的最大滑移量均较小,为0.22~0.66 mm。植筋组试件

M1-P-28 和 M2-P-28 相较于其他试件则表现出更好的延性和安全储备，开裂荷载分别为失效荷载的 57.0% 和 73.7%，F_s-F_k 值分别可达到 43.2、16.0 kN，最大滑移量为 2.27~2.52 mm>2 mm。

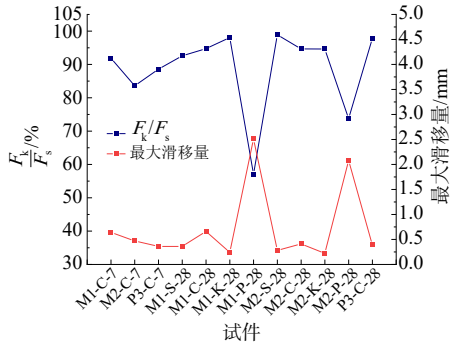


图 5　界面 F_k/F_s 值和最大滑移量

Fig. 5　Interface F_k/F_s values and maximum slips

根据黏结界面的失效荷载和最大滑移量的测定值，计算了各组试件的割线模量作为抗剪刚度（F_s/S），如图 6 所示。可知，植筋组试件 M1-P-28 和 M2-P-28 的抗剪刚度较小，分别为 28.03、20.73 kN/mm，非植筋组试件的抗剪刚度均大于 50 kN/mm，说明植筋黏结界面在受力滑移的过程中体现出了较好的变形能力，而无植筋黏结界面在剪应力下变形能力较差。

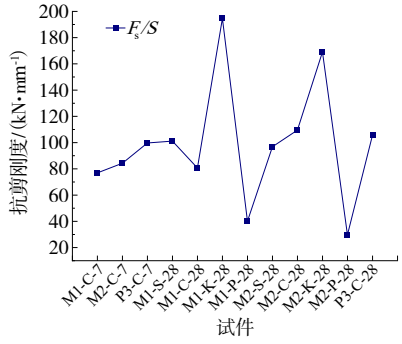


图 6　界面抗剪刚度

Fig. 6　Interface shear stiffness

3　界面抗剪承载力计算

黏结界面处的抗剪承载力 V_J 可分解为[16]：界面胶结力 V_b、界面咬合力 V_y、界面摩擦力 V_m 和界面销栓力 V_x。其中，界面胶结力主要由新旧材料间的黏结性能决定，界面咬合力主要由界面的粗糙度决定，界面摩擦力的产生则需要界面处存在一定的正应力，界面销栓力主要依靠界面处植入的钢筋等机械剪力键产生。

3.1　界面胶结力

当黏结界面未产生滑移时，界面处于弹性阶段，抗剪承载力主要由界面胶结力 V_b 提供。有学者通过基于混凝土材料的三维能量屈服准则，将新旧混凝土定义为刚性体，黏结界面被定义为塑性体，采用虚功原理推导出了适用性较高的新老混凝土界面胶结力计算式[17]，如式(2)所示。

$$V_b = 0.0319\kappa A(f_{cuo}^{0.851} + f_{cun}^{0.851}) \tag{2a}$$

$$\kappa = \frac{0.889 + 0.414h - 0.035h^2}{1 - 0.024h} \tag{2b}$$

式中：κ 为正应力和表面粗糙度的综合影响系数，可根据已有试验的数据采用差分法进行曲线拟合得到；h 为界面粗糙度；f_{cun} 和 f_{cuo} 分别为新旧混凝土立方体抗压强度标准值；A 为黏结界面面积。本试验在纯剪应力下进行，正应力 σ_n 为 0，在式(2b)中不进行体现。

无任何处理的光滑界面试件组 M1-S-28 和 M2-S-28 的界面抗剪承载力可按式(2a)进行试算，参考文献[18]考虑到试件尺寸效应影响，取尺寸效应系数 s=3，得到适合本文的界面胶结力计算公式：

$$V_b = \frac{0.039\kappa A(f_{cuo}^{0.851} + f_{cun}^{0.851})}{s} \tag{3}$$

3.2　界面咬合力

黏结界面在滑移量逐渐增大后，经凿毛或键槽处理的界面处开始产生界面咬合力 V_y，并与界面胶结力 V_b 共同承担剪切荷载。界面咬合力 V_y 由骨料互锁或界面凹槽产生，凹槽（键槽）内的混凝土会形成斜向的“压杆效应”[19]。此外，键槽界面处的界面咬合力 V_y 与键槽的尺寸和数量有关[11]。综上，得出界面咬合力 V_y 的计算式为：

$$V_y = n\eta\xi f_{cu} A_j \cos^2\theta \tag{4}$$

其中　$\eta = 0.7 - \frac{f_{cu}}{200}$

式中：n 为键槽数量；η 为混凝土开裂强度折减系数；ξ 为多键槽影响系数；f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度；A_j 为键槽横截面面积；θ 为斜压杆倾斜角，保守计算取为 45°。

本文中键槽界面凹槽数量为定值 n=4，ξ 取为 0.75，A_j=100 mm²。凿毛界面其实也可以简化成多个连续键槽形成的界面，用式(4)计算时取 n=8，ξ=0.67，A_j=100 mm²。引入界面系数 α=$n\xi$，对于键槽的数量和键槽影响系数可根据文献[11]获得。将以上系数代入式(4)，得到凿毛界面咬合力 V_{yc} 和键槽

界面咬合力V_{yj}的计算式：

$$V_{yc} = 5.4 f_{cu} A_j \left(0.7 - \frac{f_{cu}}{200}\right) \tag{5a}$$

$$V_{yj} = 3 f_{cu} A_j \left(0.7 - \frac{f_{cu}}{200}\right) \tag{5b}$$

3.3　界面摩擦力

植入钢筋的新老混凝土界面在受到剪切作用后，滑移量增大，锚筋在弯拉作用下使得界面处产生了压应力，从而产生摩擦力。有研究表明，界面摩擦力V_m仅与钢筋的力学性能和界面处的摩擦系数μ有关[20]（μ取0.3）。其计算见式(6)。

$$V_m = 0.3 \rho f_y A \tag{6}$$

式中：ρ为植筋率；f_y为钢筋屈服强度。

3.4　界面销栓力

当加载至界面完全开裂时，界面已基本失效，抗剪承载力均为钢筋的销栓力V_x。Randl[15]认为钢筋发挥销栓作用时，一般将其与混凝土看成地基梁，混凝土为弹性体，还给出了最大销栓力$V_{x,max}$计算公式，考虑到本文植筋在加载过程中已屈服，故销栓力可按最大销栓力来计算，见式(7)。

$$V_x = V_{x,max} = 1.5 A_s \sqrt{f_{cu} f_y} \tag{7}$$

式中：A_s为钢筋的截面面积。

3.5　MPC砂浆-NC界面抗剪承载力公式

综上，本文关于MPC砂浆-NC界面的抗剪承载力V_j可按式(8)计算，即：

$$V_J = V_b + V_y + V_m + V_x = \frac{0.039 \kappa A (f_{cuo}^{0.851} + f_{cun}^{0.851})}{s} + \alpha f_{cu} A_j \left(0.7 - \frac{f_{cu}}{200}\right) + 0.3 \rho f_y A + 1.5 A_s \sqrt{f_{cu} f_y} \tag{8}$$

将式(8)代入式(1)得到了MPC砂浆-NC界面的各组黏结强度计算值，如表3所示。可知，界面胶结力V_b是抗剪承载力的主要来源，其次是界面咬合力V_y和界面销栓力V_x，界面摩擦力V_m提供的抗剪承载力最小。界面咬合力V_y占抗剪承载力的50%以上，与实测结果相符。通过10组试件的黏结强度计算值与试验值的对比，说明计算值与试验值基本吻合，且大部分结果偏于保守，因此可采用式(8)进行MPC砂浆-NC界面的抗剪承载力计算。

表3　界面黏结强度计算值与试验值

Table 3　Calculated and test values of interface bond strength

试件编号	V_b/A	V_y/A	V_m/A	V_x/A	计算值	试验值	误差/%
M1-C-7	0.62	0.44	—	—	1.06	1.09	-2.75
M2-C-7	0.59	0.44	—	—	1.03	0.88	17
M1-S-28	0.69	—	—		0.69	0.81	-14.8
M1-C-28	0.69	0.44	—	—	1.13	1.18	-4.24
M1-K-28	0.69	0.25	—	—	0.94	1.04	-9.62
M1-P-28	0.97	—	0.22	0.48	1.67	2.23	-25.11
M2-S-28	0.66	—	—	—	0.66	0.60	10
M2-C-28	0.66	0.44	—	—	1.10	1.01	8.91
M2-K-28	0.66	0.25	—	—	0.91	0.83	9.64
M2-P-28	0.88	—	0.22	0.46	1.56	1.37	13.87

4　黏结-滑移本构模型

4.1　本构模型的建立

根据双面剪切试验数据，对SMMPC砂浆-NC界面的黏结-滑移本构关系曲线进行了线性回归。无植筋界面试件的破坏为脆性破坏，其黏结-滑移本构只有上升段。对于植筋组试件，钢筋在MPC砂浆-NC界面处产生“扎钉效应”和“加持效应”后与MPC砂浆的黏结性能一起承载，当界面所受剪力逐渐加大时，黏结界面植筋的销栓作用也逐渐增加，当荷载增加到峰值荷载后，钢筋的应变达到屈服应变，裂缝的宽度和结合面滑移显著增加，结合面的摩擦抗剪力随着结合面的剥离而逐渐减小，因而植筋组试件表现出延性破坏特征，故植筋界面的黏结-滑移本构曲线包括上升段和下降段。经过拟合后得到了MPC砂浆-NC界面在剪力作用下的黏结滑移-本构模型，如图7所示。

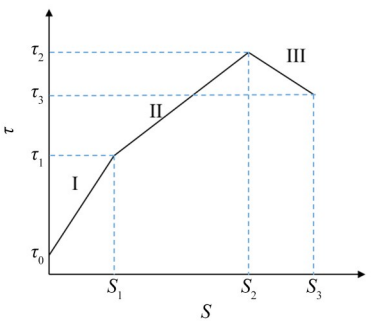


图7　界面黏结-滑移本构模型

Fig. 7　Interface bond-slip constitutive model

该模型的表达式为：

初始阶段：　$\tau = \tau_0$　　$S = 0$　(9a)

阶段I：　$\tau = K_1 S + a$　　$0 \leqslant S \leqslant S_1$　(9b)

阶段II：　$\tau = K_2 S + b$　　$S_1 \leqslant S \leqslant S_2$　(9c)

阶段III：　$\tau = K_3 S + c$　　$S_2 \leqslant S \leqslant S_3$　(9d)

式中：K_1、K_2和K_3分别为不同阶段的相对抗剪刚度，

即曲线的斜率；S_1、S_2和S_3分别为第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ阶段的滑移数值。结果表明，不同阶段的τ-S表达式均为线性关系。

由于预加载的影响，初始阶段存在初始剪应力τ_0。阶段Ⅰ为线性增长阶段，剪应力主要由界面胶结力提供。阶段Ⅱ为弹塑性阶段，但是塑性表现并不明显，裂缝在这一阶段产生，界面咬合力开始逐渐提供剪应力，该阶段也呈线性上升趋势。此外植筋组试件在该阶段还存在着界面摩擦力和销栓力，滑移量S增长迅速。阶段Ⅲ为下降段，为植筋组特有的线性阶段，破坏具有延性，阶段Ⅱ和阶段Ⅲ交点(S_2, τ_2)为界面破坏点。

4.2　本构模型参数分析

为研究式(9)各参数的取值范围，将各试件试验结果以及文献[21]的部分试验数据与上述本构模型进行对比。考虑围压作用[22]，对文献[21]中的数据进行了调整，得到了满足本文剪切滑移本构关系的参数值，具体数值见表4。

表 4　界面黏结-滑移本构模型参数

Table 4　Interface bond-slip constitutive model parameters

试件编号	K_1	K_2	K_3	τ_0/MPa	τ_1/MPa	τ_2/MPa	τ_3/MPa	S_1/mm	S_2/mm	S_3/mm
M1-C-7	0.83	2.80	—	0.03	0.32	1.08	—	0.35	0.64	—
M2-C-7	0.71	2.37	—	0.02	0.13	0.85	—	0.15	0.47	—
M1-S-28	2.11	1.94	—	0.02	0.35	0.68	—	0.15	0.28	—
M1-C-28	0.45	4.77	—	0.06	0.24	0.93	—	0.40	0.53	—
M1-K-28	4.00	4.48	—	0.05	0.53	1.03	—	0.12	0.23	—
M1-P-28	2.27	0.56	-0.97	0.01	1.85	2.27	1.42	0.81	1.48	2.25
M2-S-28	1.28	3.58	—	0.03	0.25	0.84	—	0.18	0.36	—
M2-C-28	1.10	3.26	—	0.03	0.20	1.03	—	0.15	0.42	—
M2-K-28	2.66	5.61	—	0.01	0.38	0.85	—	0.14	0.22	—
M2-P-28	1.61	0.38	-0.40	0.02	1.02	1.42	1.23	0.62	1.41	1.89
MPC-6h[21]	1.25	1.39	—	0.02	0.36	0.76	—	0.32	0.60	—
MPC-3d[21]	1.01	1.42	—	0.03	0.348	0.86	—	0.33	0.69	—
MPC-7d[21]	0.99	1.31	—	0.02	0.30	1.01	—	0.32	0.92	—

由表4可知，本试验的光滑界面为M1-S-28、M2-S-28，补充的试件MPC-6h、MPC-3d、MPC-7d也为光滑界面，其修补砂浆强度介于45~60 MPa，在此范围内可以提出K_1的取值范围为1.0~2.0，修补砂浆强度越大则取值越大；光滑界面K_2的取值范围为1.5~3.5。对于凿毛和开槽试件，剔除个别试验效果偏差较大的数值，其K_1的取值范围为0.7~2.5；K_2建议取3倍的K_1即$K_2 \approx 3K_1$。对于植筋试件，其K_1的取值范围为1.5~2.5；K_2的取值范围为0.3~0.5；植筋下降段K_3的取值范围为0.5~1。

图8为界面黏结-滑移本构模型与试验所得τ-S曲线的对比验证结果，可见各组试验数据与本构模型基本吻合。图8(a)~(h)所示非植筋试件符合阶段Ⅰ和Ⅱ线性上升的规律，图8(i)、(j)所示植筋试件符合阶段Ⅰ和Ⅱ上升、阶段Ⅲ下降的特点，各组本构模型特征点与试验数据基本吻合。结合表4中的参数值，可以发现植筋组试件阶段Ⅰ的相对抗剪刚度K_1大于阶段Ⅱ的相对抗剪刚度K_2，非植筋组则相反，这是因为随着界面处剪应力的增加，非植筋组试件的脆性也随之增大。综上，本文拟合的MPC砂浆-NC界面黏结滑移本构模型具有较高的适用性，对MPC砂浆加固和修补普通混凝土结构有一定的参考价值。

5　结　论

1)双面剪切试验结果表明，界面处理方式对MPC砂浆-NC界面的黏结性能影响较大。光滑、凿毛和键槽3种无植筋界面在加载过程中均表现出脆性破坏特征，界面粗糙程度、修补砂浆强度和养护时间均对其抗剪承载力、界面滑移量及试件最终的破坏形态有影响，建议采用凿毛和键槽界面处理方式，并采用较高的修补MPC砂浆强度。

2)NC基底通过植筋处理后，MPC砂浆-NC界面的黏结性能和延性均得到了大幅提高，表现出延性破坏的特征。其他条件相同时修补MPC砂浆强度是主要影响因素，建议修补砂浆强度应大于原混凝土强度2~3个强度等级。

3)本文推导的MPC砂浆-NC界面的抗剪承载

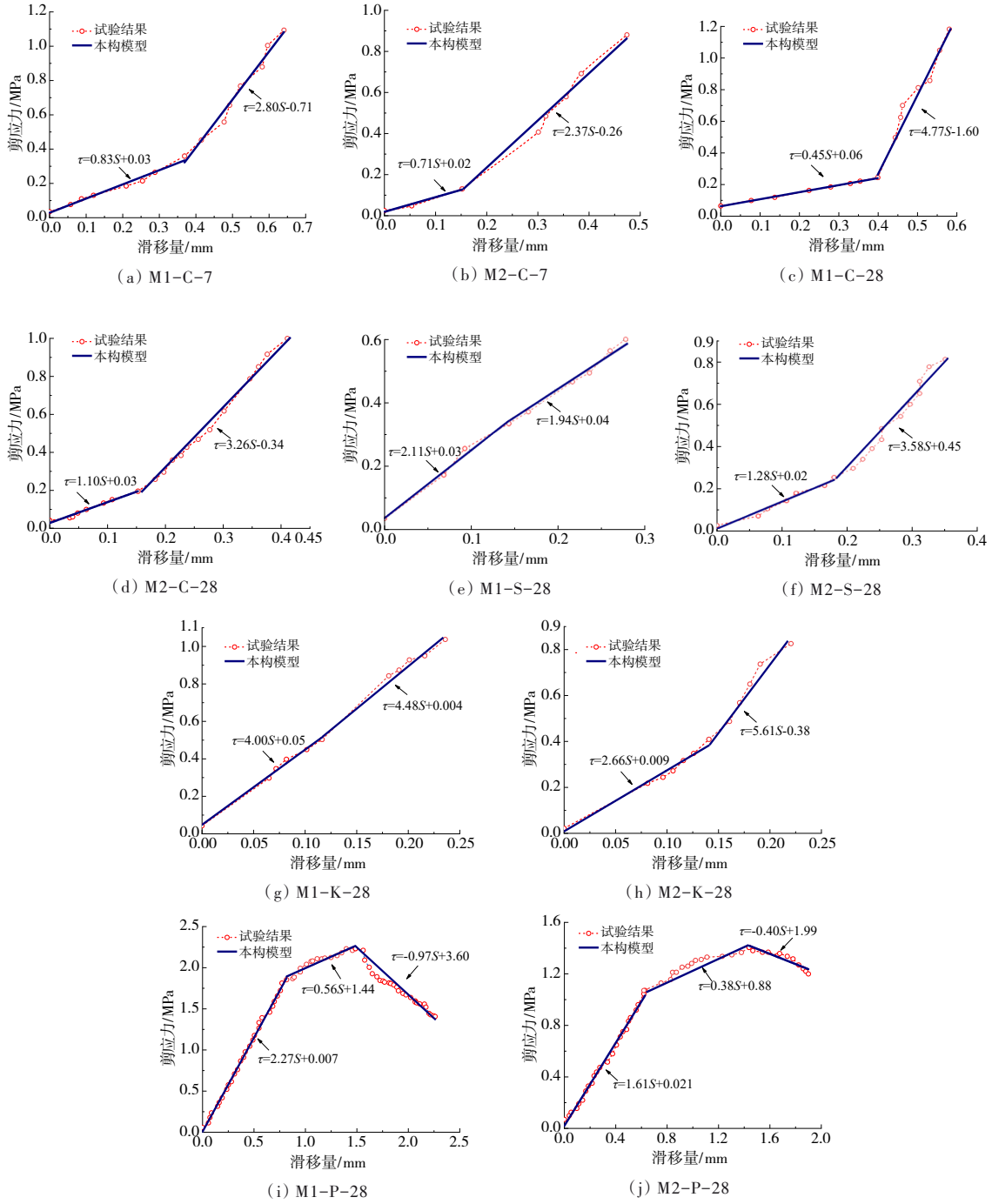


图 8　黏结滑移曲线与本构模型

Fig. 8　Bond-slip curves and constitutive models

力计算公式综合考虑了界面胶结力、界面咬合力、界面摩擦力和界面销栓力的作用,是一个统一承载力计算公式,具有较广的适用范围和较高的计算精度。

4)对试验数据进行了黏结-滑移关系曲线的线性拟合,并提出了适合无植筋界面的黏结-滑移本构的双线性模型和植筋界面的三线性模型,该模型可为MPC砂浆加固混凝土结构提供参考。

参　考　文　献

[1]　姜洪义, 周环, 杨慧. 超快硬磷酸盐修补水泥水化硬化机理的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002(4): 18-20.

[2]　范英儒. 磷酸镁水泥基材料的修补粘结性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

[3]　杨全兵, 张树青, 杨钱荣,等. 新型快硬磷酸盐修补材料性能

[J]. 混凝土与水泥制品, 2000(4): 8-11.

[4] BUJ I, TORRAS J, CASELLAS D, et al. Effect of heavy metals and water content on the strength of magnesium phosphate cements[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170(1): 345-350.

[5] JIANG H, ZHANG J, LI T, et al. Feasibility analysis of magnesium phosphate cement as a repair material for base slab of China railway track system II ballastless track[J]. Construction and Building Materials, 2022, 326, 126821.

[6] LIU X, LI Y. Plain concrete prisms externally strengthened by CFRP bonded with graphene oxide - modified magnesium phosphate cement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(5),04020069.

[7] 武芳文, 梅韵歌, 何岚清,等. 磷酸镁水泥混凝土-普通混凝土界面直剪性能试验研究[J/OL]. 工程力学,2024[2024-03-14]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2595. O3. 20231106. 1349. 008. html.

[8] 郭进军, 王少波, 张雷顺,等. 新旧混凝土粘结的剪切性能试验研究[J]. 建筑结构, 2002. 32(8): 43-45.

[9] 吴应雄, 郑新颜, 黄伟,等. 超高性能混凝土-既有普通混凝土界面粘结性能研究综述[J]. 材料导报,2023,37(16): 144-154.

[10] ZHANG Z, PANG K, XU L, et al. The bond properties between UHPC and stone under different interface treatment methods[J]. Construction and Building Materials, 2023, 365,130092.

[11] 周建庭, 胡天祥, 杨俊,等. 键槽构造UHPC-NC界面黏结性能试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16050-16057, 16064.

[12] 杜玉兵, 曹德万, 荀勇,等. 磷酸钾镁水泥砂浆与混凝土粘结抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(4): 36-38.

[13] 国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

[15] RANDL N. Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010[J]. Structural Concrete, 2013, 14(3): 230-241.

[16] 林拥军, 徐文强, 张显昭,等. 设置锚筋的新老混凝土结合面抗剪机理及黏结强度计算[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 72-83.

[17] 林拥军, 徐文强, 杨敏润,等. 基于三维能量屈服准则的新老混凝土无锚筋结合面抗剪强度统一计算方法[J]. 工程力学, 2022, 39(5): 119-132.

[18] 方志, 吴荣杰, 裴炳志,等. 新旧混凝土结合面抗剪性能的尺寸效应[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 92-103.

[19] 宋国华, 霍达, 王东炜,等. 装配式大板结构竖向齿槽接缝受剪承载力设计[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 61-64.

[20] MANSUR M A, VINAYAGAM T, TAN K. Shear transfer across a crack in reinforced high-strength concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(4): 294-302.

[21] 刘飞. 磷酸镁水泥砂浆与水泥混凝土界面行为研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.

[22] 过镇海, 史旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.