

型钢 - 高延性水泥基复合材料(ECC)界面粘结性能综述

许士博^{1,2}, 潘姣姣^{1,2*}, 黄镇斌^{1,2}

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年12月12日; 录用日期: 2024年1月16日; 发布日期: 2024年1月25日

摘要

利用高延性水泥基复合材料(ECC)良好的变形和控裂能力将其与型钢组合形成型钢 - ECC组合结构, 可以提高结构的延性和抗震性能。型钢 - ECC界面粘结是保证两种材料协同工作、共同承载的基础。本文综述了国内外关于型钢 - ECC界面粘结滑移性能的研究现状和进展, 介绍了型钢 - ECC及构件基本性能、型钢 - ECC界面粘结性能、型钢 - ECC界面粘结强度、型钢 - ECC粘结应力 - 滑移本构关系, 分析了目前存在的问题, 并对型钢 - ECC的未来发展前景进行展望, 以期为今后ECC材料在型钢 - ECC组合结构中的应用提供参考。

关键词

高延性水泥基复合材料, 粘结性能, 粘结强度, 本构关系

Review of the Interfacial Bond Behavior between Shape Steel and Engineered Cementitious Composites (ECC)

Shibo Xu^{1,2}, Jiaojiao Pan^{1,2*}, Zhenbin Huang^{1,2}

¹School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 12th, 2023; accepted: Jan. 16th, 2024; published: Jan. 25th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 许士博, 潘姣姣, 黄镇斌. 型钢-高延性水泥基复合材料(ECC)界面粘结性能综述[J]. 土木工程, 2024, 13(1): 72-80. DOI: 10.12677/hjce.2024.131011

Abstract

By utilizing the excellent deformation and crack control capabilities of high ductility engineered cementitious composites (ECC) and combining them with steel to form a shape steel-ECC composite structure, the ductility and seismic performance of the structure can be improved. The interface bonding between shape steel and ECC is the foundation for ensuring the collaborative work and joint bearing of the two materials. This article provides an overview of the current research status and progress on the bond slip performance of shape steel-ECC interface both domestically and internationally. It introduces the basic properties of shape steel-ECC and its components, the bond performance of shape steel-ECC interface, the bond strength of shape steel-ECC interface, and the bond stress slip constitutive relationship of shape steel-ECC. The existing problems are analyzed, and the future development prospects of shape steel-ECC are discussed, to provide a reference for the future application of ECC materials in shape steel-ECC composite structures.

Keywords

ECC, Bond Behavior, Bond Strength, Constitutive Relationship

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高延性水泥基复合材料[1] [2] (Engineered Cementitious Composites, 简称 ECC)是基于微观力学和断裂力学原理设计而成的一种新型结构材料, 其在拉伸荷载下表现出显著的多裂缝开展和应变硬化特性, 可以有效改善混凝土结构的抗剪性能、抗震性能和耐损伤能力。配制单位体积的 ECC, 约 50% 以上的水泥可用粉煤灰、硅灰等工业废料取代, 不仅节约了大量的资源和能源, 保护了生态环境, 还进一步强化了混凝土材料的各项关键性能, 提高了结构的耐久性[3]。ECC 材料的直接拉伸试验[4] [5]表明, 其拉伸应力 - 应变曲线表现出优异的应变硬化特性, 极限拉应变可达到 3% 以上; ECC 薄板弯曲时具有类似于钢材的塑性变形能力, 呈现出细密的多裂缝状态, 平均裂缝宽度在 100 μm 以下, 具有优异的裂缝控制能力[6]。

型钢混凝土组合结构(Steel Reinforced Concrete, 简称 SRC)是指在混凝土中配置型钢, 且还配有纵向钢筋和箍筋的一种结构, 施工工序繁多且构造连接复杂, 导致混凝土浇筑困难, 现场施工难度较大, 严重制约了其在重载、大跨度以及高层和超高层建筑中的应用(图 1)。

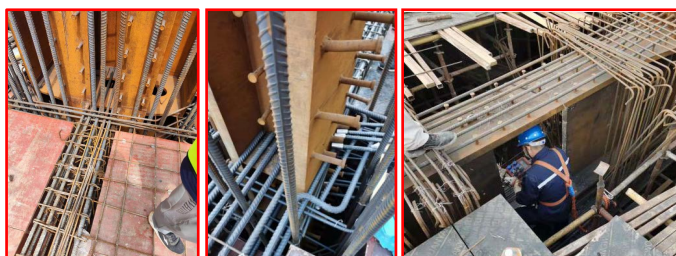


Figure 1. On-site construction of steel reinforced concrete components

图 1. 型钢混凝土构件现场施工

利用 ECC 良好的拉伸变形能力和裂缝控制能力, 将其用于型钢混凝土组合结构中, 替代传统的混凝土, 形成无配筋的型钢 - ECC 组合结构(Steel Reinforced Engineered Cementitious Composites, 简称 SRECC), 可以有效解决传统型钢混凝土结构的施工困难问题。且由于不设置钢筋, 型钢翼缘更贴近组合截面边缘, 有利于更充分发挥型钢翼缘的抗弯性能, 提高结构的承载能力(图 2)。推广应用型钢 - ECC 组合结构有利于提高和保证工程质量, 对推动建筑行业的预制化进程/建筑工业化进程, 降低工程全寿命周期的综合成本, 发展循环经济具有重要意义, 符合国家绿色环保和可持续发展战略需求。

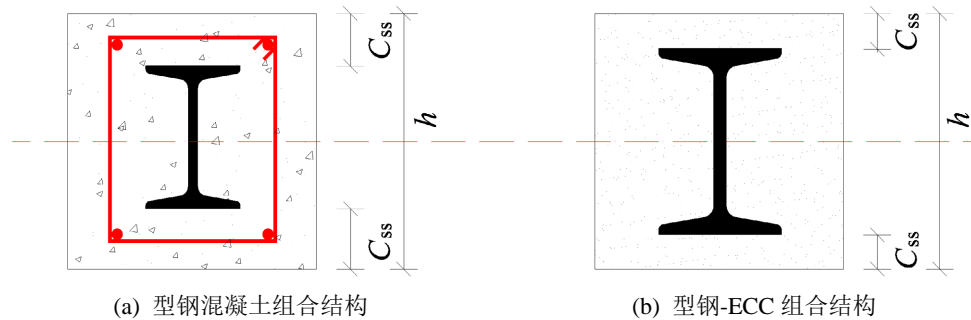


Figure 2. Combined cross-section form
图 2. 组合截面形式

型钢与混凝土界面间的粘结是保证这两种材料协同受力、共同工作的基础, 是研究型钢混凝土组合结构设计理论和分析方法的关键问题之一。对于型钢与混凝土界面间的粘结滑移理论, 国内外学者已经开展了系统深入的试验研究和理论分析工作。

2. 型钢 - ECC 界面粘结性能研究综述

近年来, 由于型钢 - ECC 具有高强度、高韧性和高耐损伤能力, 其在土木工程领域被广泛应用, 国内外学者围绕 ECC 材料及构件基本性能、型钢 - ECC 界面粘结性能、型钢 - ECC 界面粘结强度、型钢 - ECC 粘结应力 - 滑移本构关系等问题已经开展了相关研究。

2.1. 型钢 - ECC 材料及构件基本性能研究

工程纤维增强水泥基复合材料[1] [2] (Engineered Cementitious Composites, ECC)由美国密歇根大学的 V C Li 教授在 1992 年提出, 该材料以水泥浆或砂浆为基体, 以纤维为增强材料, 经微观力学和断裂力学原理设计而成。ECC 在承受单轴拉伸荷载时表现出显著的应变硬化和多裂缝开展特性(图 3), 其极限拉应变可以达到 3%, 约是普通混凝土的 200 倍以上[4]。目前国内外学者对 ECC 尚无统一命名, 日本称为“超高性能纤维增强水泥基复合材料”, 欧洲称为“应变硬化水泥基复合材料”。浙江大学称为“超高韧性水泥基复合材料” [6], 清华大学称为“高韧性纤维增强水泥基复合材料” [7] [8], 东南大学称为“高延性水泥基复合材料” [9], 西安建筑科技大学将其称为“高延性混凝土” [10] [11] [12]。

材料的力学性质是其应用的基础和首要问题, 因此自 ECC 材料出现后, 国内外学者针对其基本力学性能和耐久性开展了大量研究工作。Wang 等[13]研究了纤维表面特征和砂率对 PVA-ECC 单轴拉伸性能的影响; 张君等[14]研究了 PVA 纤维直径对 ECC 抗拉性能的影响; 邓明科等[11]研究了纤维体积掺量对高延性混凝土弯曲性能的影响; 郭丽萍等[15]采用工业废料和天然砂制备出绿色生态 ECC, 节约了大量的资源和能源; 徐世焯等[6]研究了超高韧性水泥基复合材料的基本力学性能和耐久性; Ahmaran 等[16]研究了氯盐侵蚀下 ECC 材料的耐久性; 李艳等[17]提出了高韧性 PVA-FRCC 的单轴受压本构模型; 潘金

龙等[18]研究了双轴压应力状态下 ECC 材料的破坏准则；康少波等[19]研究了 ECC 的抗剪性能；Qiu 等[20]研究了疲劳荷载对 ECC 内部纤维桥联作用和裂缝发展规律的影响。

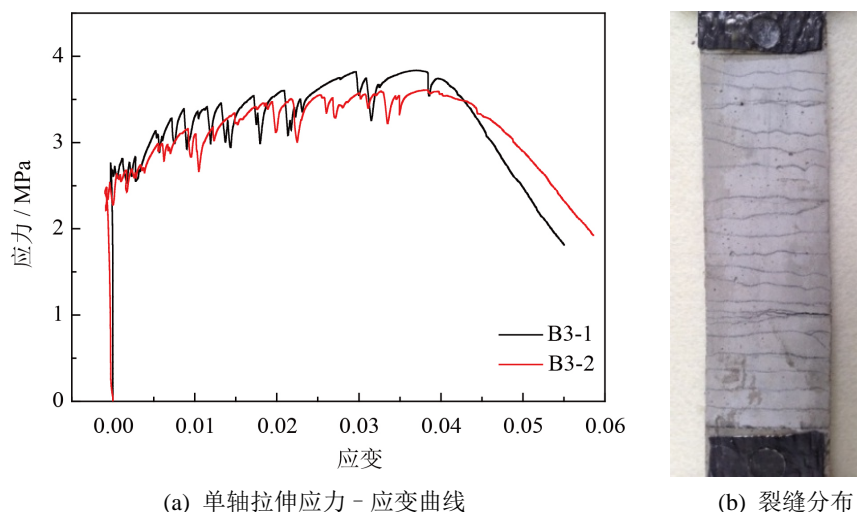


Figure 3. Uniaxial tensile test
图 3. 单轴拉伸测试

由于其良好的变形能力和裂缝控制能力，ECC 已被应用于型钢 - ECC 组合结构中，克服混凝土脆性带来的结构难题，提高结构的安全性和耐久性。邓明科研究了型钢 - ECC 短梁的抗剪性能[21]和型钢-ECC 短柱的抗震性能[22]，结果发现：ECC 材料的拉伸应变硬化特性可显著提高构件的变形能力，控制结构裂缝的发展，实现延性剪切破坏模式。潘金龙[23]研究了型钢增强 ECC 组合梁的受弯性能，发现界面滑移后对承载力影响很小；樊健生[24] [25]完成了钢 - ECC 组合梁在负弯矩作用下的静力加载试验，提出利用 ECC 高延展性以及受拉刚化的优点，减少组合梁桥的负弯矩区桥面板的受拉开裂。李庆华开展了型钢 - 超高韧性水泥基复合材料(Ultra High Toughness Cementitious Composites, 简称 UHTCC)组合节点[26]和组合梁[27]的静载受力性能试验，结果表明：UHTCC 在组合结构中能够发挥其良好的裂缝控制能力，提高型钢 - UHTCC 构件的开裂荷载，减小裂缝宽度，提高结构的延性和耐久性。

Kabir 等[28]研究了 ECC - 轻质混凝土包钢组合梁的弯曲性能；韩乐冰[29]研究了钢 - ECC 组合板的疲劳性能；Tian 等[30]研究了新型穿孔型钢 - ECC 连接件的抗剪性能；刘瑞强[31]研究了型钢超高韧性水泥基复合材料短柱的抗震性能。已有研究结果表明，ECC 在组合结构中能够发挥良好的变形能力，构件受力过程中 ECC 与被包裹的钢材能够协调变形和持续共同受力；相比型钢 - 普通混凝土组合构件，型钢 - ECC 组合构件的承载能力和变形能力均有显著提高。

综上所述，在 ECC 材料组分、力学性质、疲劳性能和耐久性等方面的研究已经取得了长足进步；静力作用下钢 - ECC 组合构件宏观受力性能方面的研究也取得了丰硕的成果，在一定程度上推动了 ECC 材料的工程应用。

2.2. 型钢 - ECC 界面粘结性能影响因素研究

型钢 - ECC 结构中，型钢和高延性混凝土这两种性能不同的材料能够协同工作、共同承载的基本前提是二者之间具有良好的粘结。由于型钢与高延性混凝土之间的粘结作用，型钢和高延性混凝土这两种材料元件才能协同工作、共同抵抗外部作用效应，组合成为一种“真正的组合结构”[32]。与光圆钢筋混

混凝土的粘结类似，型钢与混凝土之间的粘结作用主要由型钢与混凝土之间的化学胶结力、滑动摩擦力和机械咬合力三部分组成，其宏观表现为一种剪力，这种剪力是由于结构构件承受荷载时，型钢和混凝土之间的应变不协调所产生的。

董宇光[33]研究了粘结滑移对型钢混凝土剪力墙的影响，通过有限元模拟发现，考虑粘结滑移影响的模型，其极限荷载模拟值与试验值相差 2.3%；而不考虑粘结滑移的模型，其极限荷载模拟值与试验值相差 8.3%，说明考虑粘结 - 滑移关系的模型相比不考虑粘结滑移的模型更贴近试件的真实受力情况。隋选勋[34]对 12 根实腹式型钢混凝土组合梁进行了数值分析，分别对考虑粘结滑移和不考虑粘结滑移两种情况进行分析计算，结果表明：粘结滑移本构关系的确定比较复杂，型钢混凝土组合梁的粘结滑移通过非线性弹簧单元进行模拟是可行的。练其安[35]采用 ABAQUS 中零厚度 cohesive 模型模拟型钢与混凝土的粘结界面，将数值模拟结果与试验结果对比，发现吻合效果较好；以锚固长度和型钢形状为试验变量，模拟内置型钢管混凝土的拔出试验，结果发现：对于不同锚固长度试件，型钢纵向应变沿着锚固长度方向呈递减趋势，且分布规律相似。

西安建筑科技大学赵鸿铁团队[36]提出了型钢混凝土粘结滑移研究的基本问题，主要包含型钢混凝土结构构件计算的基本理论、剪力传递问题、有限元分析中的粘结 - 滑移本构关系问题和型钢锚固问题。

杨勇[37] [38]通过 16 个型钢混凝土试件的推出试验，分析了型钢与混凝土之间的粘结滑移机理，研究了混凝土强度、型钢保护层厚度、型钢埋置长度以及纤维体积掺量四个主要因素与特征粘结强度之间的相互关系。为研究高强高性能混凝土对型钢 - 混凝土界面粘结作用的强化机理，李磊[39]进行了 12 榀型钢高强高性能混凝土简支梁的单调静力加载试验，结果表明：硅灰和粉煤灰等矿物掺合料的加入可以有效改善界面层组成结构，减小界面层的不利影响，增强界面层混凝土的力学性能，从而改善其与型钢界面的粘结性能。

郑华海[40]研究了型钢再生混凝土界面粘结应力组成，并对化学胶着力和摩擦应力的影响因素进行分析，结果发现：增大混凝土强度、配箍率和保护层厚度可提高摩擦应力，增大保护层厚度可提高摩擦应力和化学胶着力。明铭[41]进行了型钢高性能纤维混凝土的推出试验，通过对有效粘结应力 - 滑移曲线进行全过程分析，得到粘结应力各组成部分的计算方法，结果发现：粘结应力组成中化学胶结力占比最大，摩擦阻力次之，机械咬合力最小，三者比值为：1:0.234:0.073。

为研究型钢翼缘内侧、外侧和腹板与混凝土粘结性能的区别，陈宗平[42]进行了型钢再生混凝土的单调静力推出试验，结果表明：不同粘结位置处型钢与混凝土的粘结应力不同，翼缘内侧粘结应力最高，翼缘外侧次之，腹板粘结应力最小。卜良桃[43]研究了型钢腹板和翼缘处型钢与活性粉末混凝土界面的粘结性能，结果发现：翼缘处粘结强度明显大于腹板处粘结强度。

近年来，关于静力推出荷载作用下无抗剪栓钉型钢与 ECC 界面的粘结性能，已有学者开始了初步探索，白亮等[44]分析了 PVA 纤维体积掺量、配箍率、保护层厚度和型钢埋置长度对 H 型钢与 PVA-ECC 界面粘结性能的影响；田黎敏等[45]研究了 ECC 强度、配箍率、保护层厚度和型钢埋置长度对 H 型钢与 PE-ECC 界面粘结性能的影响。

综上所述，型钢与混凝土界面粘结性能的研究成果已经比较丰富，现有研究初步探讨了无抗剪栓钉型钢 - ECC 界面粘结性能的影响因素，对带抗剪栓钉型钢 - ECC 界面粘结性能的研究工作鲜有涉及，ECC 材料组分及高延性性质对受力过程中粘结性能的影响机理尚不明确。

2.3. 型钢 - ECC 界面粘结强度研究

为实现型钢 - ECC 界面的应力传递，确保型钢和 ECC 这两种材料能够协同受力、共同承载，型钢 - ECC 组合结构通常存在两种连接模式：自然粘结和设置剪力连接件。推出试验结果表明：型钢与混凝土

土界面的粘结应力沿型钢埋置长度方向上是不均匀分布的,但为了方便计算,型钢混凝土界面的粘结应力平均值常被采用来反映界面的粘结强度。

林海量[46]分析了 ECC 强度、型钢埋置长度、保护层厚度和配箍率等因素对型钢 - ECC 界面粘结强度的影响,结果发现:随着 ECC 强度的增加,试件的极限粘结强度随之提高;型钢与 ECC 埋置长度越小,在粘结破坏过程中,裂缝发展越迅速;且极限粘结强度随着型钢保护层厚度和体积配箍率的增大而增加。Wang 等[47]探讨了保护层厚度对型钢混凝土界面粘结性能的影响,结果发现:随着保护层厚度由 90 mm 增加至 170 mm,初始粘结强度、峰值粘结强度和残余粘结强度分别增加了 79.6%、46.6% 和 97.2%。由于混凝土保护层的约束效应,随着保护层厚度的增大,粘结强度表现出显著上升的趋势。

伍凯等[48]研究了钢纤维掺量、粘结长度、混凝土保护层厚度等因素耦合作用下对型钢 - 钢纤维混凝土界面名义粘结强度的影响,结果表明:钢纤维通过约束裂缝发展提升型钢与钢纤维混凝土界面的粘结性能,在设置相同保护层厚度的情况下,钢纤维替代型钢混凝土中的钢筋笼具有较高的可行性;随着粘结长度的增大,名义粘结强度有规律地逐渐减小;随着保护层厚度的增大,名义粘结强度逐渐增大。

张蓝月[49]研究了配箍率对型钢与 UHTCC 界面粘结强度的影响,发现随着配置箍筋的增加,型钢与 UHTCC 界面的峰值粘结强度出现上升趋势,但提升幅度逐渐减小。因此,在实际工程中,当采用型钢 UHTCC 组合结构,只需采用较小横向配箍率即可满足承载力要求。杨磊[50]分析了 ECC 保护层厚度和型钢锚固长度对粘结强度的影响,发现增加 ECC 保护层厚度可以提高试件的极限粘结强度,但随着锚固长度增加,粘结强度呈降低趋势。

综上所述,目前研究主要集中于无抗剪栓钉型钢 - ECC 界面粘结强度的影响因素方面,对带抗剪栓钉型钢 - ECC 界面粘结强度的研究尚不充分。

2.4. 型钢 - ECC 粘结应力 - 滑移本构关系研究

在型钢 - ECC 组合结构中,型钢与高延性混凝土界面间的粘结应力 - 滑移本构关系是型钢-ECC 结构设计和有限元分析的重要基础,且粘结应力 - 滑移本构关系的合理性决定了有限元分析结果的准确性。因此,建立合理的型钢 - ECC 粘结应力 - 滑移本构关系至关重要。

关于型钢与混凝土粘结滑移性能的研究已相对完善,杨勇[51]进行了型钢混凝土标准试件的推出试验,通过统计回归分析,建立了考虑多因素的型钢混凝土特征粘结强度和特征滑移量的计算公式;基于锚固可靠度分析,提出了型钢锚固长度的设计建议;根据荷载 - 加载端滑移曲线的试验测试结果,建立了型钢混凝土基准粘结应力 - 滑移本构关系的数学模型;通过分析粘结应力和滑移量沿型钢埋置方向的分布规律,提出反映随锚固深度变化的含两个位置函数的局部粘结应力 - 滑移本构模型。

陈宗平[52] [53]进行了型钢高强混凝土界面粘结滑移推出试验,研究了再生骨料取代率、保护层厚度、纤维体积掺量、再生骨料母料强度、再生骨料粒径等因素对型钢与再生混凝土粘结强度的影响,通过分析沿型钢锚固方向型钢应变和界面粘结应力的分布规律,运用灰色关联理论,提出粘结应力 - 滑移本构关系的数学表达式。

郑华海[54]根据型钢再生混凝土粘结滑移试验结果,建立了型钢再生混凝土粘结应力分布的计算公式以及粘结应力 - 滑移本构关系表达式,为实现计算机精细化模拟提供了重要支撑。

3. 存在问题

型钢 - ECC 结构是一种新型组合结构形式,既具有普通型钢混凝土结构承载力高、刚度大和抗震性能好等优点,又发挥了 ECC 良好的裂缝控制能力和绿色环保的特点,不仅可以提高建筑结构的抗震防灾能力,降低型钢 - ECC 组合结构中型钢对保护层厚度的要求,有利于型钢 - ECC 组合结构形式的创新,

还符合国家绿色环保和可持续发展战略需求,在重载、大跨度以及高层和超高层建筑中体现出显著的优越性,可为地震区或腐蚀环境区的建筑结构安全提供一种新的保障,具有广阔的发展应用前景。

1) 目前关于型钢与普通混凝土界面粘结性能的研究已经比较完善,但对于型钢-ECC界面粘结滑移性能影响因素的研究尚不全面,尤其是对设置抗剪件型钢-ECC界面粘结性能的研究更是鲜有涉及。

2) 关于型钢-ECC黏结应力-滑移本构关系的研究鲜有报道,因此,为促进型钢-ECC组合结构的发展应用,这方面的研究工作仍需开展。

4. 结论

型钢高延性混凝土结构是一种新型组合结构形式,本文从型钢-ECC材料及构件基本性能研究、型钢-ECC界面粘结性能影响因素、型钢-ECC界面粘结强度及型钢-ECC黏结应力-滑移本构关系四个方面进行了综述分析,得到以下结论:

1) 型钢-ECC在组合结构中能够发挥其良好的裂缝控制能力,提高型钢-ECC构件的开裂荷载,减小裂缝宽度,显著提高构件的变形能力及结构的延性和耐久性。

2) 加入硅灰和粉煤灰等矿物掺合料,增大混凝土强度、配箍率和保护层厚度可以有效地改善型钢与混凝土界面的粘结性能。

3) 增加ECC强度、型钢埋置长度、保护层厚度和配箍率等可以明显提高型钢-ECC界面的粘结强度。

基金项目

陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202312715032);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-557)。

参考文献

- [1] Li, V.C. (1992) From Micromechanics to Structural Engineering—The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, **10**, 37-48.
- [2] Li, V.C., Horikoshi, T., Ogawa, A., et al. (2004) Micromechanics-Based Durability Study of Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite. *ACI Material Journal*, **101**, 242-248. <https://doi.org/10.14359/13120>
- [3] Li, V.C., Lepech, M., Wang, S., et al. (2004) Development of Green ECC for Sustainable Infrastructure Systems. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, 20-21 May 2004, 181-192.
- [4] Fischer, G. and Li, V.C. (2002) Influence of Matrix Ductility on Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composites (ECC). *ACI Structure Journal*, **99**, 104-111. <https://doi.org/10.14359/11041>
- [5] Li, V.C. (2011) Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-ECC. *ACI Material Journal*, **99**, 463-472.
- [6] 徐世焱, 蔡向荣. 超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1055-1063.
- [7] 张君, 居贤春, 郭自力. PVA纤维直径对水泥基复合材料抗拉性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 707-710.
- [8] 公成旭, 张君. 高韧性纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 361-366.
- [9] 庞超明, Leung, C.K.Y., 孙伟. 高掺量粉煤灰高延性水泥基复合材料的制备和性能[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2071-2077.
- [10] 邓明科, 孙宏哲, 梁兴文, 等. 延性纤维混凝土抗弯性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(5): 85-90.
- [11] 邓明科, 潘姣姣, 秦萌, 等. 高延性混凝土单轴受压本构模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(6): 826-831.
- [12] Deng, M.K., Pan, J.J. and Liang, X.W. (2018) Uniaxial Compression Test of High Ductile Fiber-Reinforced Concrete and Damage Constitutive Model. *Advance in Civil Engineering*, **2018**, Article ID: 4308084. <https://doi.org/10.1155/2018/4308084>

- [13] Wang, S. and Li, V.C. (2006) High Early Strength Engineered Cementitious Composites. *ACI Material Journal*, **103**, 97-105. <https://doi.org/10.14359/15260>
- [14] Zhang, J. and Ju, X. (2011) Investigation on Stress-Crack Opening Relationship of Engineered Cementitious Composites Using Inverse Approach. *Cement and Concrete Research*, **41**, 903-912. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.010>
- [15] 郭丽萍, 谌正凯, 陈波, 等. 生态型高延性水泥基复合材料的可适性设计理论与可靠性验证I: 可适性设计理论[J]. 材料导报, 2019, 33(5): 744-749.
- [16] Ahmaran, M. and Li, V.C. (2009) Durability Properties of Micro-Cracked ECC Containing High Volumes Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, **39**, 1033-1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.009>
- [17] 李艳, 刘泽军. 高韧性 PVA-FRCC 单轴受压力学性能及本构关系[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 606-612.
- [18] 潘金龙, 何佶轩, 王路平, 等. ECC 双轴压力学性能及破坏准则试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 186-193.
- [19] Kang, S.B., Tan, K.H., Zhou, X.H. and Yang, B. (2017) Experimental Investigation on Shear Strength of Engineered Cementitious Composites. *Engineering Structures*, **143**, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.019>
- [20] Qiu, J. and Yang, E.H. (2017) Micromechanics-Based Investigation of Fatigue Deterioration of Engineered Cementitious Composite (ECC). *Cement and Concrete Research*, **95**, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.029>
- [21] 邓明科, 卢化松, 杨开屏, 等. 型钢高延性混凝土短梁抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 73-80.
- [22] 邓明科, 卜新星, 潘姣姣, 等. 型钢高延性混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 163-170.
- [23] Dong, B.Q., Pan, J.L. and Lu, C. (2019) Flexural Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams. *Journal of Southeast University*, **35**, 72-82.
- [24] 樊健生, 施正捷, 苟双科, 等. 钢-ECC 组合梁负弯矩区受弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 64-72.
- [25] Fan, J.S., Gou, S.K., Ding, R., et al. (2020) Experimental and Analytical Research on the Flexural Behaviour of Steel-ECC Composite Beams under Negative Bending Moments. *Engineering Structures*, **210**, Article ID: 110309. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110309>
- [26] 孙超杰, 李庆华, 吕君锋. 型钢-UHTCC 组合节点静载受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(S1): 369-375.
- [27] 孙超杰, 李庆华, 吕君锋. 型钢-UHTCC 组合梁静载力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(z1): 62-66, 79.
- [28] Kabir, M.I., Lee, C.K., Rana, M.M. and Zhang, Y.X. (2019) Flexural and Bond-Slip Behaviours of Engineered Cementitious Composites Encased Steel Composite Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **157**, 229-244. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.032>
- [29] 韩乐冰. ECC 及其组合板弯曲疲劳性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2021.
- [30] Tian, L.M., Liu, T., Li, T.J., et al. (2020) Shear Resistance of Novel Perforated Shaped Steel-Engineered Cementitious Composite (ECC) Connectors. *Advanced Steel Construction*, **16**, 30-36.
- [31] 刘瑞强. 型钢超高韧性水泥基复合材料组合短柱抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [32] 薛建阳, 赵鸿铁. 型钢混凝土粘结滑移理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [33] 董宇光. 型钢与混凝土粘结——滑移关系及型钢混凝土剪力墙抗震性能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2006.
- [34] 隋选勋. 基于粘结滑移理论的型钢混凝土组合梁界面状态的模拟分析和设计构造[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [35] 练其安. 钢管混凝土内配型钢拉拔性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [36] 赵鸿铁, 杨勇, 薛建阳, 等. 型钢混凝土粘结滑移力学性能研究及基本问题[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 74-86.
- [37] 杨勇, 郭子雄, 薛建阳, 等. 型钢混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 1-9.
- [38] 郑山锁, 杨勇, 薛建阳, 等. 型钢混凝土粘结滑移性能研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 47-51.
- [39] 李磊. 型钢与高强高性能混凝土界面粘结滑移行为研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [40] 郑华海, 陈宗平, 苏益声. 型钢再生混凝土界面黏结应力组成及其强度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1504-1512.
- [41] 明铭, 郑山锁, 郑昊, 等. 型钢高性能纤维混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 148-157.
- [42] 陈宗平, 郑华海, 薛建阳, 等. 型钢再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5): 130-138.

- [43] 卜良桃, 罗恺彦. 型钢外包活性粉末混凝土(RPC)的界面黏结性能[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 307-312.
- [44] Bai, L., Yu, J.P., Zhang, M. And Zhou, T.H. (2019) Experimental Study on the Bond Behavior between H-Shaped Steel and Engineered Cementitious Composites. *Construction and Building Materials*, **196**, 214-232.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.117>
- [45] Tian, L.M., Kou, Y.F., Lin, H.L. and Li, T.J. (2021) Interfacial Bond-Slip Behavior between H-Shaped Steel and Engineered Cementitious Composites (ECCs). *Engineering Structures*, **231**, Article ID: 111731.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111731>
- [46] 林海量. 型钢-ECC 粘结滑移基本原理及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [47] Wang, X., Liu, Y., Yang, F., *et al.* (2019) Effect of Concrete Cover on the Bond-Slip Behavior between Steel Section and Concrete in SRC Structures. *Construction and Building Materials*, **229**, Article ID: 116855.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116855>
- [48] 伍凯, 徐佳楠, 陈峰, 等. 型钢-钢纤维混凝土黏结性能及界面损伤分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 572-580.
- [49] 张蓝月. 型钢 UHTCC 粘结滑移性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [50] 杨磊. 型钢-ECC 粘结滑移机理试验研究及有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.
- [51] 杨勇. 型钢混凝土粘结滑移基本理论及应用研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [52] 陈宗平, 陈宇良, 郑华海, 等. 型钢-再生混凝土界面黏结强度及其影响因素分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(9): 1-6.
- [53] 陈宗平, 应武挡. 型钢高强混凝土界面黏结滑移推出试验及其本构关系研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(2): 150-157.
- [54] 郑华海. 型钢再生混凝土粘结滑移性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2011.