

混凝土-混凝土层间界面的性能及在组合混凝土结构中的应用评述

陈子璇¹, 肖建庄^{1,2}, 丁陶^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海200092)

摘要: 混凝土-混凝土层间界面普遍存在于混凝土结构中, 界面的抗剪性能是保障不同区域混凝土共同工作的基础。介绍了混凝土-混凝土层间界面的剪力传递机制、剪应力设计表达式、黏结性能及界面性能的影响因素, 探讨了混凝土-混凝土层间界面的耐久性。最后, 建立了组合混凝土结构中界面的概念设计框架。

关键词: 混凝土-混凝土层间界面; 界面性能; 耐久性; 组合混凝土结构; 概念设计框架

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Review on Behavior of Concrete-concrete Interface and Its Application in Composite Concrete Structures

CHEN Zixuan¹, XIAO Jianzhuang^{1,2}, DING Tao^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Concrete-concrete interface is commonly found in concrete structures. The shear resistance of the concrete-concrete interface is the basis for ensuring the integrity of different concrete parts in the structure. In this paper, we introduce the shear transfer mechanism, the design expression of shear stress, the bond behavior of the concrete-concrete interface and the factors affecting the behavior of the concrete-concrete interface. Then, we discuss the durability of the concrete-concrete interface. Finally, the conceptual design frame of the concrete-concrete interface is built.

Key words: concrete-concrete interface; interface performance; durability; composite concrete structures;

conceptual design frame

建筑业是我国国民经济的五大支柱产业之一。近百年来, 混凝土结构实现了快速发展与广泛应用, 在对人类社会的发展做出了巨大贡献的同时, 也对资源、能源和生态发展提出了新的要求, 可持续的混凝土结构设计是实现人类社会可持续发展的重要途径^[1]。基于此, 肖建庄等^[2]首次提出了“组合混凝土结构”的概念, 旨在综合考虑新型水泥基材料的特点, 根据性能需求的不同, 将不同种类混凝土在材料、构件以及结构等层次进行组合, 实现材料和结构的最优化配置。在组合混凝土结构中, 混凝土-混凝土层间界面的黏结性能是保障不同区域混凝土共同工作的基础, 一旦界面失效, 组合构件及结构的性能将显著下降, 因此混凝土-混凝土层间界面的安全性尤为重要。

混凝土-混凝土层间界面指由于浇筑时间不同或两部分混凝土种类不同而形成的混凝土结构内部的非连续浇筑界面, 广泛存在于混凝土结构中, 主要在施工过程中被引入, 如公路、桥梁、房屋中损伤混凝土结构的修补, 预制构件与现浇构件之间的连接及大体积混凝土的分段浇筑而形成的施工缝和后浇带^[3-5]。国内外对于混凝土-混凝土层间界面性能的研究已开展多年, 主要基于剪切-摩擦理论对普通混凝土层间界面的短期黏结性能开展试验及理论研究, 已形成了较为成熟的理论体系。组合混凝土结构中混凝土-混凝土层间界面与已有研究对象的显著差异表现为该界面是由设计时不同种类混凝土材料的结合而形成的, 应在现有研究的基础上进行修

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078358)

第一作者: 陈子璇(1996—), 女, 博士生, 主要研究方向为组合再生混凝土结构抗火。

E-mail: 1810761@tongji.edu.cn

通信作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为可持续混凝土结构。

E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

正和发展。

通过对国内外混凝土-混凝土层间界面性能的研究成果进行梳理与总结,系统回顾了混凝土-混凝土层间界面的剪力传递机制、剪应力设计表达式、黏结性能及界面性能的影响因素,并对混凝土-混凝土层间界面的抗高温、抗冻融和抗渗透等耐久性进行探讨。在此基础上,分析了组合混凝土结构中界面的特点及发展,并提出了组合混凝土结构中界面的概念设计框架,最后总结了混凝土-混凝土层间界面性能研究的发展方向。

1 混凝土-混凝土层间界面抗剪性能

1.1 剪力传递机制

1966年,剪切-摩擦理论由Birkeland等^[6]首次提出,该理论采用一个简单的锯齿模型(见图1, τ 为界面剪力, σ_n 为界面法向应力, σ_s 为钢筋销栓力)来说明混凝土-混凝土层间界面的剪力传递机制。剪切-摩擦理论适用于不同类型混凝土-混凝土层间界面的抗剪性能分析,如预制构件与现浇构件之间的界面、不同时间浇筑的混凝土之间的界面、既有结构与加固层之间的界面等,奠定了混凝土-混凝土层间界面抗剪性能研究的基础。

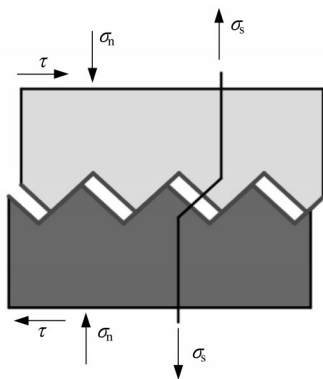


图1 剪切-摩擦理论模型

Fig.1 Shear-friction theory model

剪切-摩擦理论认为,混凝土-混凝土层间界面的剪力仅通过界面的摩擦来传递,界面性能被假定为由界面黏结力、摩擦力和界面钢筋三部分组成^[7]。随着界面相对滑移的增大,三部分作用的变化规律如图2所示。

当混凝土间相对滑移为 s 时,混凝土与混凝土界面处的剪应力 $\tau(s)$ 可以表示为

$$\tau(s) = \tau_a(s) + \tau_{sf}(s) + \tau_{sr}(s) \quad (1)$$

式中: $\tau_a(s)$ 指黏结力贡献的剪应力; $\tau_{sf}(s)$ 指摩擦力

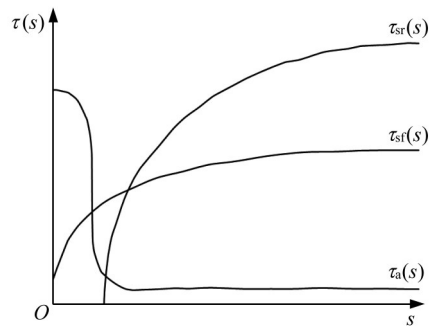


图2 混凝土-混凝土层间界面剪力传递机制^[7]

Fig.2 Shear transfer mechanisms of concrete-concrete interface^[7]

贡献的剪应力; $\tau_{sr}(s)$ 指界面钢筋贡献的剪应力。

界面黏结力首先由混凝土晶体微粒之间的化学作用产生,主要指范德华力及水泥水化反应产生的黏结力。当混凝土层间界面发生滑移后,黏结力迅速降低,转化为通过骨料咬合作用传递。

界面摩擦力与正应力和界面粗糙度相关,正应力为外力与钢筋反力的合力。当界面出现相对剪切滑移时,裂缝张开使得界面钢筋受拉后对界面施加反向压力,即为钢筋反力。

界面钢筋的贡献通常称为销栓作用,出现界面滑移后对界面的剪力传递起着重要作用,但界面滑移较小时,钢筋的变形较小,使得销栓作用的影响不明显。

1.2 界面极限剪应力设计表达式

过去的几十年中,一系列混凝土-混凝土层间界面极限剪应力的设计表达式被提出及修正。通过考虑更多的影响因素、更精确的定量化表征,来提高设计表达式的精度并不断扩大其应用范围,目前已形成了较为系统的界面剪切理论体系,并成功应用于工程结构的建设及加固中。然而,试验结果易受到试验条件、试件尺寸等影响,混凝土材料也具有明显的离散性,因此通过回归分析得到的表达式缺乏普适性。对界面剪切性能的影响规律及设计表达式的研究,不应局限于试验分析,尤其是在混凝土种类和性能日益丰富的情况下,针对不同种类混凝土进行大量的试验研究,显然是不可行且不经济的,更应加强在理论方面的深入分析。

表1为按时间顺序列出的部分典型界面极限剪应力设计表达式。

1.3 影响因素

由如表1所示的界面极限剪应力设计表达式可得,对于混凝土-混凝土层间界面的分析,考虑的影

表1 混凝土-混凝土层间界面极限剪应力设计表达式

Tab.1 Design expression of ultimate shear stress for concrete-concrete interface

文献	界面极限剪应力设计表达式	备注
Birkeland等 ^[6]	$v_u = \rho f_y \tan \varphi = \rho f_y \mu$	最早提出的线性表达式
Badoux ^[8]	光滑界面: $v_u = \frac{13.76}{\left(11 + \frac{a}{d}\right)} + 137.9\rho$	考虑重复荷载 (a 为截面有效高度, d 为剪跨)
	粗糙界面: $v_u = \frac{24.14}{\left(11 + \frac{a}{d}\right)} + 137.9\rho$	
Mattock等 ^[9]	全轻质(骨料和砂)混凝土: $v_u = 1.38 + 0.8\rho f_y$ 砂轻质混凝土: $v_u = 1.72 + 0.8\rho f_y$	考虑混凝土密度 (轻骨料混凝土)
Raths ^[10]	$v_u = C_s 2.03 \sqrt{\rho f_y}$	引入与混凝土密度有关的常数
Loov ^[11]	$\frac{v_u}{f_c} = k \sqrt{\frac{\rho f_y + \sigma_n}{f_c}}$	最先考虑混凝土强度, k 为常数
Randl ^[12]	$v_u = \tau_{coh} + \mu \sigma_n + \alpha \rho \sqrt{f_c f_y}$	明确考虑了界面黏结力、摩擦力和界面钢筋三部分的作用 (τ_{coh} 为混凝土黏结力, α 为考虑钢筋销栓作用的系数)
Ali等 ^[13]	$\frac{v_u}{f_c} = 1.47a \sqrt{\frac{\rho f_y + \sigma_n}{f_c}} \leq 1.2b$	适用于高强混凝土 (a, b 为常数)

注: v_u 为界面极限纵向剪应力; ρ 为界面配筋率; φ 为内摩擦角; f_y 为钢筋屈服强度; f_c 为混凝土抗压强度; σ_n 为界面法向应力; μ 为摩擦系数; C_s 为与混凝土密度相关的常数。

响因素主要有表面粗糙度、法向应力、混凝土强度、混凝土密度、界面钢筋屈服强度及配筋率。近年来的研究表明,纤维掺量、界面含水率、界面处理剂、施工方法等一些其他因素也对界面极限剪应力产生一定影响。

1.3.1 表面处理

混凝土表面粗糙度被广泛认为是对于界面抗剪承载力影响最显著的因素^[14],工程上常用凿毛法、切槽法、喷砂法及高压水枪喷射法等人工提高界面粗糙度。界面粗糙度的表征主要通过视觉判断进行定性分类,如设计规范中将其分为非常光滑、光滑、粗糙、非常粗糙或自然表面、人为处理等,并由相应的黏结系数和摩擦系数引入设计表达式。为提高预测精度, Santos等^[15]提出了一种量化表面粗糙度的新方法,并首次将界面粗糙度以界面平均深度 R_{vm} 的形式引入设计表示式。传统的定量评定混凝土表面粗糙度的方法有灌砂法和分形维数法^[16]等,近年来结合数字图像技术及计算机建模技术,提出了一系列精度更高的方法,如激光扫描法^[17]、三维曲面分形维数法^[18]等。

此外,界面含水率对抗剪强度存在一定的影响。目前普遍认为,在新混凝土浇筑之前应将老混凝土表面润湿至饱和干燥状态,即充分润湿但表面不残留自由水,避免表面存在自由水而增加新混凝土的水灰比,或老混凝土吸收水分使水泥的水化反应不够充分^[19]。部分学者认为,对老混凝土表面进行预

润湿不会增加抗剪强度,在某些情况下反而会对抗剪强度产生负面影响^[20]。

1.3.2 混凝土强度及组分

混凝土的强度对混凝土-混凝土层间界面的剪切性能具有较大影响。1969年, Hofbeck等^[21]首次提出混凝土强度对界面抗剪强度存在影响;1978年, Loov^[11]在设计表达式中引入混凝土强度的影响。随后,适用于高强混凝土的设计表达式也被提出及修正^[13, 22-23],拓宽了界面抗剪强度设计表达式的应用范围。混凝土密度在部分设计表达式中有所考虑,引入了与混凝土密度相关的系数,主要是针对轻骨料混凝土。研究表明,相比于普通混凝土,轻骨料混凝土的界面摩擦力有一定程度的降低^[10, 24]。

近年的研究中,主要通过对混凝土组分的优化来提高混凝土-混凝土层间界面的抗剪承载力,如采用流动性较强的自密实混凝土或掺有纤维的纤维混凝土^[25-26]等。通过添加剂改变自密实混凝土的和易性,使其在自重作用下发生流动,以达到良好的密实效果;纤维混凝土中乱向分布的纤维增强了界面咬合力,同时还能提高混凝土的力学性能以改善构件的裂缝开展^[27]。

1.3.3 界面钢筋

由图2可知,在界面出现滑移后,界面黏结力迅速降低,钢筋的销栓作用承担了大部分的剪力,对滑移后的受力情况起着决定性作用,因此近乎所有的设计表达式均考虑了界面钢筋的配筋率及钢筋屈服

强度的影响。界面钢筋的布置可以改变界面破坏方式。不含界面钢筋的界面破坏是突然的、脆性的,安全性较低。布置界面钢筋后,界面破坏前存在一定的相对滑移,并且存在较稳定的残余承载力^[28]。Mansur等^[29]结合试验与理论分析提出了布置界面钢筋的界面黏结-滑移四阶段模型,如图3所示。

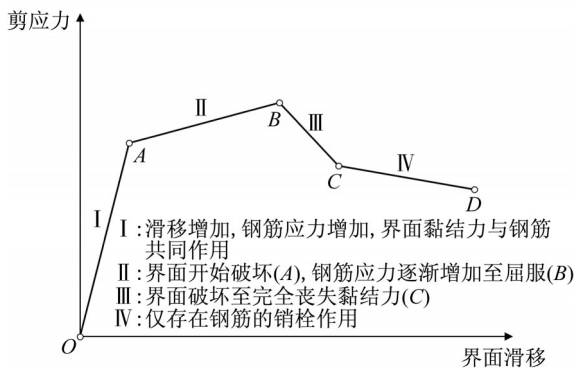


图3 混凝土-混凝土层间界面黏结-滑移模型^[29]

Fig.3 Bond-slip model of concrete-concrete interface^[29]

在既有结构修补时,以植筋的方式引入界面钢筋^[30]。植筋率及植筋长度等方面已经有相关行业规范。在预制构件中,界面连接钢筋还可通过横向箍筋预埋的方式布置,整体性更好,也避免了对老混凝土造成损伤。另外,新型界面连接形式,如李斌等^[31]提出的三维钢筋网垫连接(见图4),由高强度钢网和钢钉组合而成,可显著提高混凝土试件抗剪强度以及构件整体性和等效延性。

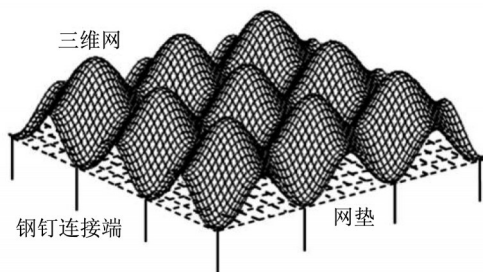


图4 三维钢筋网垫结构示意图^[31]

Fig.4 Schematic diagram of three-dimensional steel mesh pad^[31]

1.3.4 界面处理剂

界面处理剂的作用在设计表达式中没有体现,但大量试验证明界面处理剂可以改善新老混凝土黏结面的微观结构,从而提高界面黏结力^[32]。目前使用的界面处理剂按组分可分为有机类和无机类。有机类主要指环氧树脂类、丙烯酸类和聚氨酯类,强度

安全储备足够,有良好的耐老化和耐化学腐蚀性能;无机类主要指硅酸盐和磷酸盐类,具有与混凝土一致的物理变形特性,成本较低,施工工艺简单、安全^[33]。界面处理剂使用时,要限制最大涂刷厚度,过厚则使界面黏结性能下降^[34]。目前国内外的研究集中于通过对界面处理剂的改性,研制无毒、易涂刷、性能稳定且黏结效果好的新型界面处理剂,如掺有粉煤灰、硅灰等的硅酸盐水泥界面处理剂,利用粉煤灰、硅灰和Ca(OH)₂之间的火山反应减少Ca(OH)₂的生成。

1.3.5 施工方法

张建仁等^[35]通过对自密实混凝土-普通混凝土界面的试验研究得出,浇筑方向对于界面黏结性能的影响显著,新混凝土从老混凝土的顶面浇筑时抗剪性能最佳,侧面浇筑次之,底面浇筑最差。史长城等^[36]通过试验对比了侧面浇筑和顶面浇筑的界面劈拉强度,顶面浇筑的劈拉强度均远大于侧面浇筑的劈拉强度,其原因是浇筑时混凝土压力对界面区域的结构致密有积极作用。浇筑方向对界面黏结性能的影响如图5所示。

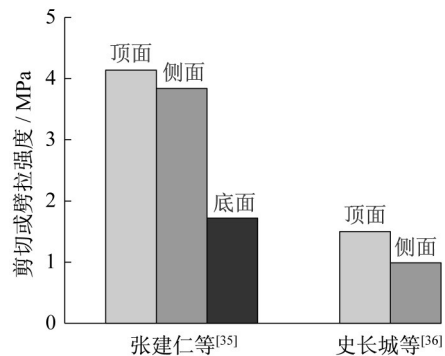


图5 浇筑方向对混凝土-混凝土层间界面黏结性能的影响^[35-36]

Fig.5 Effect of casting direction on bond behavior of concrete-concrete interface^[35-36]

浇筑时间间隔对界面的黏结强度也有一定影响,相关试验数据如图6所示。试验中劈拉强度试件的龄期为后浇混凝土浇筑后标准养护28天,界面处理方式为人工打磨,并分别对无界面剂、水泥净浆、水泥砂浆3种界面剂情况进行试验。不同界面剂情况下,浇筑时间间隔较短时(初凝至2倍初凝时间)界面的劈拉强度较其他试件有明显的提高^[36]。原因在于,老混凝土龄期较短时,老混凝土中还有大部分水泥未完成水化,使得界面形成时的化学作用力较强。老混凝土龄期在1天至7天时,界面的劈拉

强度呈现增长的趋势,原因可能是,对于浇筑时间间隔为7天及1天的混凝土试件,试件加载时先浇混凝土的龄期分别为35天、29天,先浇混凝土龄期的不同导致浇筑时间间隔为7天的试件强度略高一些,一定程度上提高了界面的劈拉强度。

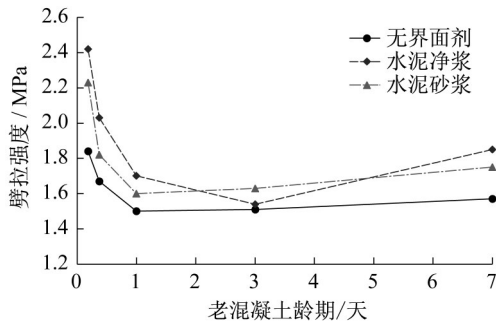


图6 老混凝土龄期对混凝土-混凝土层间界面黏结性能的影响^[36]

Fig.6 Effect of old concrete age on bond behavior of concrete-concrete interface^[36]

1.4 小结

(1) 总体上看,对混凝土-混凝土层间界面抗剪性能的研究存在“试验为主,理论滞后”的现状。现有研究主要基于剪切-摩擦理论,针对不同的影响因素开展了大量的界面试验,并通过回归分析获得界面极限剪应力设计表达式。考虑到混凝土种类的日益丰富,并且混凝土材料具有一定的离散性,仅由试验数据回归分析得到的剪应力设计表达式对于不同种类及强度的混凝土不具备普适性。对混凝土-混凝土层间界面抗剪性能进行深入的理论研究,获得水泥基材料的统一规律,是必要的研究方向。

(2) 提高混凝土-混凝土层间界面黏结性能的方法主要有:提高界面粗糙度,提高混凝土强度,使用合适的界面剂,优化混凝土材料及组分,增强界面钢筋的作用。其中,界面钢筋的作用应得到充分的重视。界面钢筋不仅可以显著提高混凝土-混凝土层间界面的承载能力,还可以优化界面的破坏形式,以提高构件整体安全性。然而,界面钢筋的引入导致钢材的增加以及施工工序的复杂化,从而提高造价。目前,对界面钢筋数量与界面等效延性的相关规律的研究不够完善,承载能力优异、施工便捷的新型界面连接形式也将为混凝土-混凝土层间界面连接提供新的思路。此外,以往的研究主要源自于既有结构修补的情况,施工方向基本为水平或近似水平,两部分混凝土之间的浇筑时间间隔也较长,多为3个月及以上,因此有关施工方向、浇筑时间间隔对

界面性能影响的试验数据十分有限。

2 混凝土-混凝土层间界面耐久性

混凝土-混凝土层间界面抗剪性能研究多集中于短期性能,对界面耐久性的研究较少。混凝土-混凝土层间界面耐久性是保证结构整体耐久性的关键,现有的界面耐久性研究主要关于高温环境、冻融循环下的界面黏结性能退化以及混凝土界面的抗渗性能和抗侵蚀性能。

2.1 高温作用

目前对高温作用下混凝土-混凝土层间界面性能的研究还比较欠缺,刘健^[37]最先进行了相关研究,但只考虑了200℃下的情况。郭进军^[38]和安然^[39]分别对常温至900℃及常温至550℃作用下混凝土-混凝土层间界面的黏结性能进行了试验研究,Xiao等^[40]对常温至800℃作用下整浇高强混凝土的剪切强度退化规律进行了探究,试验结果如图7所示。图7中, $f_{st}(T)$ 、 $\tau(T)$ 表示温度 T 下混凝土-混凝土层间界面的劈拉强度、剪切强度。高温作用下,黏结界面与整浇混凝土的剪切强度退化规律相似,下降趋势较为平缓,在700℃时仍具有约60%的剪切强度,但随后黏结界面的剪切性能出现陡降,800℃时已下降了80%。温度对界面劈拉强度的影响十分显著,总体趋势表现为在200℃以内时缓慢下降,温度升高到200~600℃时出现陡降,超过600℃后,界面近乎不具备承载能力。

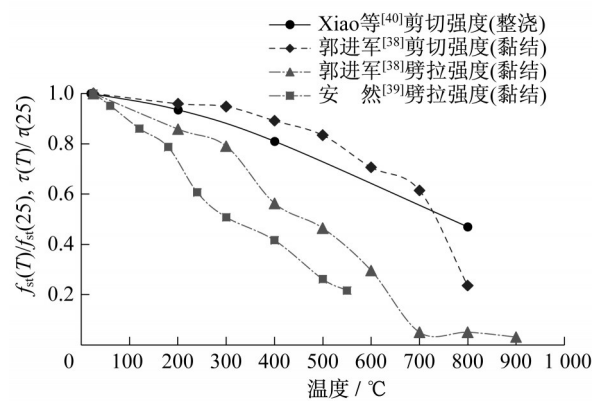


图7 高温作用下混凝土-混凝土层间界面黏结性能退化^[38-40]

Fig.7 Degradation of bond behavior of concrete-concrete interface under elevated temperature^[38-40]

高温作用对混凝土-混凝土层间界面性能的损伤主要由于水泥水化产物的分解及界面不同物质之

间变形不协调导致的较大内应力。增加界面粗糙度和使用界面处理剂在一定程度上可以减缓界面黏结强度的下降幅度,但效果并不明显。

2.2 冻融循环

在冻融循环作用下,整浇混凝土和黏结界面的性能退化如图 8 所示^[41-42]。图 8 中, $f_{st}(n)$ 、 $\tau(n)$ 表示 n 次冻融循环作用下混凝土-混凝土层间界面的劈拉强度、剪切强度。整浇试件的性能退化不明显,在 30 次冻融循环后其劈拉强度仅下降了 20%。然而,混凝土-混凝土层间界面的劈拉强度和剪切强度出现了明显的退化,尤其是剪切强度,在 5 次冻融循环作用后仅残余不足 40%,而劈拉强度在 20 次冻融循环作用后也仅剩余初始值的一半,在 30 次冻融循环作用后,界面已接近破坏,几乎不具备承载能力。这意味着在冻融循环作用下,界面将较结构其他部位先行出现性能退化,给含有混凝土-混凝土层间界面的结构带来显著的不安全性。

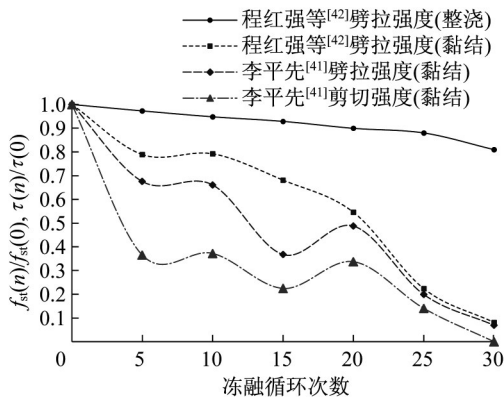


图 8 冻融循环作用下混凝土-混凝土层间界面黏结性能退化^[41-42]

Fig.8 Degradation of bond behavior of concrete-concrete interface under freeze-thaw cycles^[41-42]

试验证明,界面粗糙度和界面处理剂对界面抗冻融性能有一定的影响,界面处理剂的影响更为显著,如图 9 所示。在水泥净浆中掺入引气剂作为界面处理剂将减缓界面性能的退化,而使用环氧树脂作为界面处理剂的界面在冻融循环作用中表现出了接近整浇混凝土的优异性能,可作为冻融环境下混凝土-混凝土层间界面的优选界面处理剂^[43-44]。

2.3 抗渗与抗侵蚀性能

混凝土-混凝土层间界面的渗透性大于混凝土的整浇部分,如果处理不当会形成薄弱面,成为结构中的透水层,对结构抗渗及抗氯离子侵蚀性能产生

不利影响,如图 10 所示。

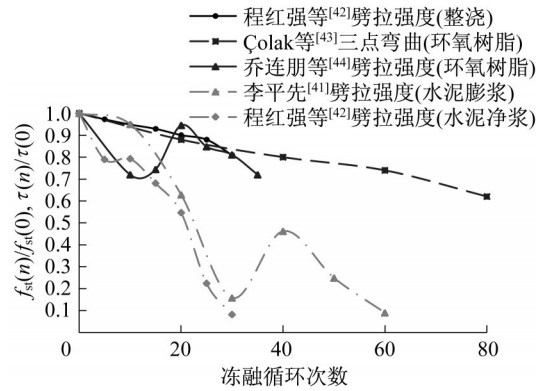


图 9 界面处理剂对冻融循环作用下混凝土-混凝土层间界面性能退化的影响^[41-44]

Fig.9 Effect of interface agents on degradation of bond behavior of concrete-concrete interface under freeze-thaw cycles^[41-44]

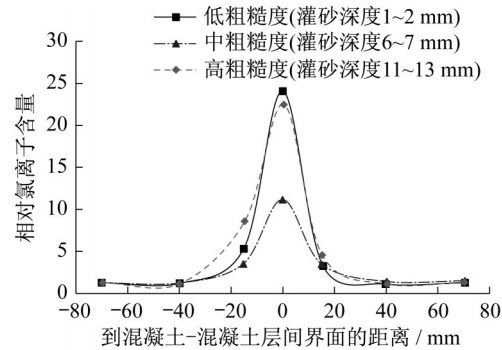


图 10 混凝土-混凝土层间界面区域相对氯离子含量(界面深度 55~63 mm, 试验时间 60 min)^[45]

Fig.10 Relative chloride ion content in concrete-concrete interface area (depth: 55 – 63 mm, test time: 60 min)^[45]

Li 等^[45]通过干湿循环对混凝土-混凝土层间界面的氯离子侵蚀性能进行了研究,界面区域的相对氯离子含量(由 GaussAmp 公式获得)较其他部位显著增加。增大界面粗糙度虽然提高了界面的黏结强度,但是粗糙度对抗渗及抗侵蚀性能的影响呈现先提高后降低的趋势,界面粗糙度较大且界面不均匀时会增大界面的渗透性,中等粗糙度且均匀刷毛时的效果较好。李平先^[41]通过试验得出界面处理剂可以提高界面抗渗性能的结论,但管大庆等^[46]的结论是界面处理剂的使用会对界面抗渗性能产生轻微不利影响,试验差异可能来源于界面刷毛处理情况的不同。界面处理方式对混凝土-混凝土层间界面抗渗性能的影响如表 2 所示。试验结果显示,对于界面抗渗性能,界面处理剂的效果为:水泥砂浆<水泥

净浆<水泥膨浆。综合考虑界面黏结强度和抗渗性能,选用表面均匀刷毛及水泥膨浆涂刷时,可达到较优异的界面性能。此外,超高性能纤维混凝土

(UHPFC)具有优异的抗渗性能,Tayeh等^[47]的研究结果表明,UHPFC-普通混凝土层间界面的抗渗及抗氯离子侵蚀性能均优于整浇普通混凝土。

表2 界面处理方式对混凝土-混凝土层间界面抗渗性能的影响

Tab.2 Effect of surface treatment on impermeability of concrete-concrete interface

表面处理方式	管大庆等 ^[46]		李平先 ^[41]	
	层间界面黏结强度与整浇混凝土黏结强度之比/%	实测抗渗标号	平均渗透系数/(10^{-9} cm·s ⁻¹)	
不作任何处理	17.70	S0		
刷毛	39.80	S12	3.884	
刷毛+水泥砂浆	61.80	S6	1.121	
刷毛+水泥净浆	77.80	S7	1.165	
刷毛+水泥膨浆	84.80	S8	0.949	
整浇混凝土	100.00	S9		

2.4 小结

(1) 总体上看,混凝土-混凝土层间界面的耐久性相较整浇混凝土呈现显著的劣化,在火灾或冻融情况下界面失效将使混凝土结构失去完整性,而混凝土抗渗性能降低将会加剧内部钢筋锈蚀。目前改进界面耐久性的方法主要从界面粗糙度和界面处理剂着手,但对高温下性能的优化效果不理想,因此应重视含混凝土-混凝土层间界面的混凝土结构在火灾下安全性的评估。

(2) 目前关于混凝土-混凝土层间界面耐久性的试验数据十分缺乏,试验数据受到混凝土强度、界面处理方式、试验方法等方面的影响,尤其是混凝土材料的离散性和对界面进行人工处理时引入的试验误差,致使试验数据之间的横向对比不够准确,还应完善进一步的试验研究。

(3) 对于高温及冻融环境下的研究,基本上仅针对混凝土-混凝土层间界面在环境作用下的性能退化进行试验,而未进行同等条件下整浇混凝土的性能试验。界面的性能退化规律应与同等条件下整浇混凝土的性能退化规律进行对比,以便评估含混凝土-混凝土层间界面的结构在高温、冻融环境作用下出现界面区域性能损失严重而导致的结构不安全性。

(4) 目前的研究针对的均为不含界面钢筋的混凝土-混凝土层间界面耐久性,而界面钢筋对承载力的影响是十分显著的,因此还应在此基础上对界面钢筋的作用进行考虑。

3 组合混凝土结构

3.1 组合混凝土结构中的混凝土-混凝土层间界面

对于以往的混凝土-混凝土层间界面,由于施工

的引入,主要考虑同种类混凝土之间的界面性能;组合混凝土结构中,混凝土-混凝土层间界面是由不同种混凝土材料的组合而形成的,因此组合混凝土结构中的混凝土-混凝土层间界面的研究,应着重考虑不同种类材料对界面性能的影响。不论应用在既有结构补强还是应用在组合混凝土结构中,混凝土-混凝土层间界面的本质均是水泥基材料之间的结合面,在界面剪力传递机制和影响因素等方面具有共性。

此外,现有研究主要针对界面短期性能,而对界面耐久性的研究还较少。组合混凝土结构具有较长的服役期,界面耐久性是保证结构整体耐久性的关键,应对混凝土-混凝土层间界面在高温和冻融环境中的性能退化、在沿海环境下的氯离子侵蚀和水工环境下的渗透问题进行更为深入的研究。现有的界面耐久性研究均未考虑界面钢筋的作用,与组合混凝土结构中界面情况不符,应予以完善。在高温和冻融循环作用下,界面黏结性能快速退化,界面钢筋对界面的应力传递起着重要的作用;界面处的抗渗性能较整浇部分差,对界面钢筋的锈蚀和氯离子侵蚀也会产生一定的影响。

有关混凝土-混凝土层间界面的试验及计算式主要建立在小尺寸试件的试验上,将研究成果应用到足尺组合混凝土试件上时,可能存在尺寸效应。对组合混凝土构件的足尺试验,可以在构件层面更直观地评估混凝土-混凝土层间界面对整体承载力的影响,直接观察试件受力全过程的裂缝开展、界面滑移和破坏模式,进而达成更为全面的力学性能分析。

3.2 混凝土-混凝土层间界面新发展

近年来,在传统混凝土材料的基础上,一系列既满足受力需求,又兼具再生、绿色、高性能、功能性的

新型水泥基材料等的出现,为混凝土结构优化设计提供了条件。在此基础上,适用于组合混凝土结构的新型组合形式及施工工艺的发展,也为混凝土-混凝土层间界面研究提供了新的方向。

3.2.1 新型水泥基材料

已有研究多集中于普通混凝土间的界面性能,随着新型水泥基材料如超高性能混凝土(UHPC)、纤维增强型水泥基材料(ECC)、再生混凝土(RAC)、海水海砂混凝土(SSC)等的发展,有关纤维混凝土-普通混凝土、自密实混凝土-普通混凝土层间界面性能的研究也逐渐丰富^[25-26,47],但仍不够充分,尤其是对再生混凝土和海水海砂混凝土等新型绿色可持续混凝土的界面性能研究比较缺乏。目前的研究主要集中于定性的对比分析,除高强混凝土、轻骨料混凝土外,其余混凝土材料均未有与之相对应的界面抗剪承载力设计公式,更无法与现行规范公式联系起来。对各类新型水泥基材料之间的界面

性能进行研究,并且形成一套可靠的界面承载力设计理论体系,将会成为今后的发展方向。

3.2.2 新型组合形式

在组合混凝土构件中可以存在新型组合形式,如图11所示。界面不局限于单一的水平或纵向平面,可能存在着弧形曲面或不规则结合面,也可能存在着多个界面,或通过施工及设计的方法减少界面的明显分层。在新混凝土浇筑后采用振捣棒对界面进行振捣,不形成明显的薄弱面^[48];引入梯度分布的想法,连续改变纤维混凝土中纤维体积分数^[49]或再生混凝土中再生骨料取代率^[50],减少混凝土材料的差异。

在界面层次,可以通过新型的界面组合形式来提高界面的黏结性能;在结构层次,可以通过不同材料在空间上的组合来达到结构的优化配置。目前,此方面的研究开展得还比较少,未来具有很大的发展潜力。

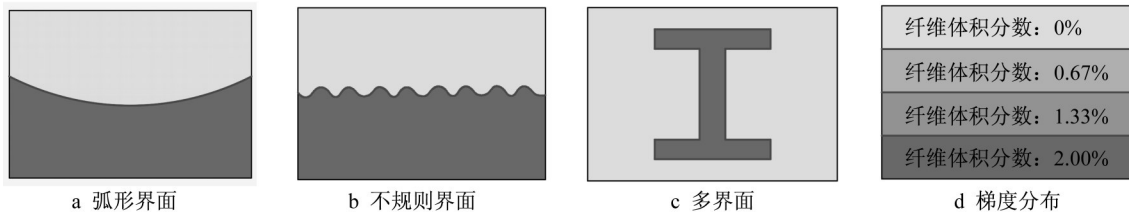


图11 新型组合混凝土界面形式

Fig.11 New forms of composite concrete interface

3.2.3 新型施工工艺

新型施工工艺,如3D打印混凝土技术,在不同种类混凝土材料之间的组合上具有良好的应用前景。3D打印混凝土技术是从机械喷嘴中一层一层将混凝土材料挤出,堆叠成型而形成混凝土结构,机械化及精细化程度高。通过更换打印的混凝土材料,得到不同种类混凝土材料的组合,而且不需要间断施工过程,可解决混凝土结构施工中需要多次组织混凝土浇筑的问题。目前,针对3D打印混凝土中混凝土-混凝土层间界面性能的研究才刚刚起步^[51]。

3.3 组合混凝土结构界面概念设计

组合混凝土结构界面概念设计中,界面的承载力、等效延性、相容性是保证界面设计安全可靠的关键,界面耐久性是在服役期内安全使用的保证。

界面承载力设计应保证界面失效所对应的结构荷载不小于引起其他位置失效的荷载,在正常使用状态下,不因界面黏结滑移失效而导致组合结构丧失整体性。在界面设计的过程中,应充分考虑界面粗糙度、界面处理剂、界面钢筋等因素对界面承载力

的影响,并优选界面施工方式,保证界面承载力具有一定的安全冗余。

界面的等效延性定义为含界面连接钢筋的混凝土-混凝土层间界面达到最大承载能力后的变形能力,主要取决于界面连接钢筋的布置。不含界面连接钢筋的界面破坏模式为典型的脆性破坏。界面剪力达到界面抗剪承载力后,界面两侧混凝土突然滑脱而导致构件损坏,无残余抗剪能力。这类脆性破坏在混凝土结构中会造成极大的不安全性,应予以避免。在满足界面承载能力的情况下,还应限制界面钢筋最小配筋率,使得界面出现相对滑移后界面连接钢筋仍可承受一定剪力,避免界面的突然破坏。界面钢筋最小配筋率指满足界面黏结力丧失的同时界面钢筋屈服的界面钢筋配筋率。

对于界面相容性,应考虑界面结合时新旧混凝土因水化反应产生的湿度和温度改变而导致混凝土的收缩和热膨胀,进而在混凝土-混凝土层间界面产生高应力^[52]。特别是当界面两侧材料的变形能力存在较大差异时,应力大于黏结强度而导致开裂。目

前界面相容性的测试手段主要有试样在干湿、冻融环境中暴露一段时间后的强度、渗透性能测试等^[53]。相比于混凝土与其他材料的组合形式,同为水泥基材料的不同混凝土间的组合更具有相容性^[54]。

对于组合形式较为简单、直观的组合混凝土结构,在正常使用小变形情况下,可假设构件满足平截面假定,考虑不同混凝土材料的性质,结合结构力学、材料力学以及混凝土结构理论,采用传统的混凝土构件计算方法进行设计,并计算界面的荷载效应。基于此设计思路,肖建庄等^[55]提出了组合混凝土结构的构建方法,并提出界面安全性分析公式、界面剪应力设计公式以及水平构件正截面受弯承载力、水平构件斜截面受剪承载力、竖向构件正截面受压承载力、竖向构件斜截面受剪承载力等计算公式。

组合混凝土结构应同时满足结构承载力和使用性能需求以及界面抗剪承载力、界面最小配筋率的设计要求,基本流程如图12所示。对于组合形式复杂、界面形状不规则或界面不明显的构件,无法采用传统的混凝土构件计算方法,应通过数值模拟方法进一步分析。

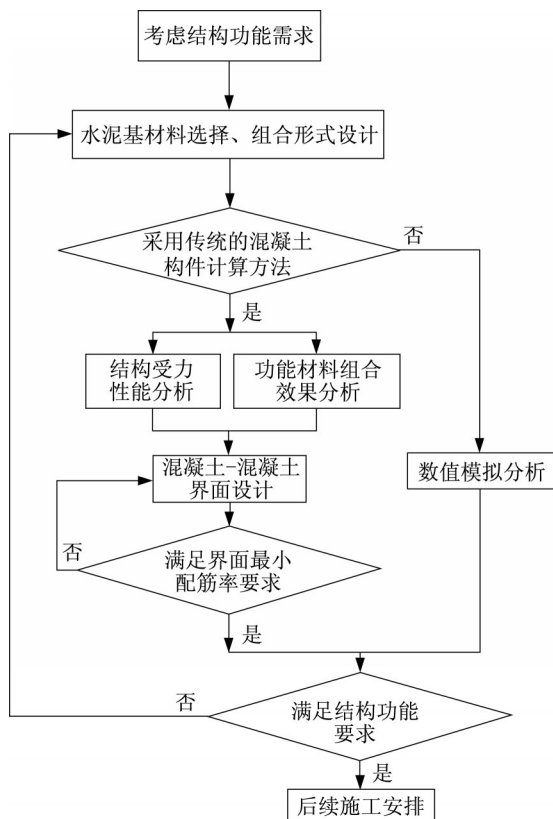


图12 组合混凝土结构概念设计流程

Fig.12 Conceptual design process of composite concrete structures

4 结语

对国内外关于混凝土-混凝土层间界面性能的研究成果进行了梳理与总结,系统回顾了混凝土-混凝土层间界面的剪力传递机制、界面极限剪应力设计表达式、黏结性能及界面性能的影响因素。目前混凝土-混凝土层间界面的研究主要集中于短期性能,对耐久性的研究比较欠缺。总体上看,混凝土-混凝土层间界面的耐高温、抗冻融、抗渗性能均较整浇混凝土呈现显著的劣化,可能引发组合混凝土结构长期使用的不安全。

总结了组合混凝土结构中的混凝土-混凝土层间界面特点,并提出了组合混凝土结构界面概念设计流程。界面的承载力、等效延性、相容性是保证界面设计安全可靠的关键,界面耐久性是在服役期内安全使用的保证。

结合组合混凝土结构特点,提出以下混凝土-混凝土层间界面性能的后续研究方向:①多种类水泥基材料间界面性能试验研究及理论分析;②混凝土-混凝土层间界面耐久性影响机理及改进措施;③界面性能的多层次分析,包括细观层次、界面层次及组合构件层次;④与新型水泥基材料、组合形式和施工工艺相关的组合混凝土结构创新性研究。

作者贡献说明:

陈子璇:具体研究工作的开展和论文撰写。

肖建庄:论文的选题、指导。

丁陶:论文的指导、修改。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 可持续混凝土结构导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
XIAO Jianzhuang. An introduction to sustainable concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 肖建庄, 张青天, 余江滔, 等. 混凝土结构的新发展: 组合混凝土结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 147.
XIAO Jianzhuang, ZHANG Qingtian, YU Jiangtao, et al. A novel development of concrete structures: composite concrete structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(2): 147.
- [3] MOMAYEZ A, EHSANI M R, RAMEZANIANPOUR A A, et al. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(4): 748.
- [4] SHANG X, YU J, LI L, et al. Strengthening of RC structures by using engineered cementitious composites: a review [J].

- Sustainability, 2019, 11(12): 3384.
- [5] ZHANG Y, LIU C, LU W, *et al.* Comparative study of RC members with strengthening using strain hardening cementitious composite and fiber reinforced mortar [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 47(1): 20170439.
- [6] BIRKELAND P W, BIRKELAND H W. Connections in precast concrete construction [J]. ACI Journal Proceedings, 1966, 63(3): 345.
- [7] ZILCH K, REINECKE R. Capacity of shear joints between high-strength precast elements and normal-strength cast-in-place decks [C]// PCI/FHWA/FIB International Symposium on High Performance Concrete. Orlando: [s.n.], 2000: 551-560.
- [8] BADOUX J. Horizontal shear connection in composite concrete beams under repeated loading [D]. Bethlehem: Lehigh University, 1965.
- [9] MATTOCK A, LI W, WANG T. Shear transfer in lightweight reinforced concrete [J]. PCI Journal, 1976, 21: 20.
- [10] RATHS C. Reader comments of paper "Design proposals for reinforced concrete corbels" [J]. PCI Journal, 1977, 22(2): 93.
- [11] LOOV R. Design of precast connections [R]. Singapore: Compa International Pt., Ltd., 1978.
- [12] RANDL N. Investigations on transfer of forces between old and new concrete at different joint roughness [D]. Innsbruck: University of Innsbruck, 1997.
- [13] ALI M A, WHITE R N. Enhanced contact model for shear friction of normal and high-strength concrete [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3): 348.
- [14] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A. Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite [J]. Materials and Structures, 2013, 46(5): 743.
- [15] SANTOS P M D, JULIO E N B S. Factors affecting bond between new and old concrete [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(4): 449.
- [16] 闫国新, 张晓磊, 张雷顺. 新老混凝土黏结面粗糙度评价方法综述 [J]. 混凝土, 2010(1): 25.
YAN Guoxin, ZHANG Xiaolei, ZHANG Leishun. Evaluation method review of the interfacial roughness of new to old concrete [J]. Concrete, 2010(1): 25.
- [17] SANTOS P M D, JULIO E N B S. Development of a laser roughness analyser to predict in situ the bond strength of concrete-to-concrete interfaces [J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(5): 329.
- [18] 张雄, 张蕾. 新老混凝土粘结面人造粗糙度表征及性能研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 753.
ZHANG Xiong, ZHANG Lei. Characterization and properties of artificial roughness of young on old concrete bonding interface [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(5): 753.
- [19] BEUSHAUSEN H. The influence of concrete substrate preparation on overlay bond strength [J]. Magazine of Concrete Research, 2010, 62(11): 845.
- [20] BEUSHAUSEN H, HÖHLIG B, TALOTTI M. The influence of substrate moisture preparation on bond strength of concrete overlays and the microstructure of the OTZ [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 92: 84.
- [21] HOFBECK J A, IBRAHIM I O, MATTOCK A H. Shear transfer in reinforced concrete [J]. ACI Journal, 1969, 66: 119.
- [22] ZHANG Y, ZHU P, WANG X, *et al.* Shear properties of the interface between ultra-high performance concrete and normal strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118455.
- [23] SEMENDARY A A, SVECOVA D. Factors affecting bond between precast concrete and cast in place ultra high performance concrete (UHPC) [J]. Engineering Structures, 2020, 216: 110746.
- [24] FANG Z, JIANG H, LIU A, *et al.* Horizontal shear behaviors of normal weight and lightweight concrete composite T-beams [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 55.
- [25] ZANOTTI C, BANTHIA N, PLIZZARI G. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 63: 117.
- [26] ROY M, RAY I, DAVALOS J F. High-performance fiber-reinforced concrete: development and evaluation as a repairing material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 26(10): 04014074.
- [27] HUSSEIN L, AMLEH L. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 1105.
- [28] GOHNERT M. Proposed theory to determine the horizontal shear between composite precast and in situ concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(6): 469.
- [29] 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.
- [30] 聂建国, 王宇航, 樊健生, 等. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥技术中组合横梁界面受力性能研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 99.
NIE Jianguo, WANG Yuhang, FAN Jiansheng, *et al.* Mechanical behavior of the interface of composite cross beam in old concrete bridges widened with steel-concrete composite beam [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 99.
- [31] 李斌, 肖成志, 孙文君. 新老混凝土界面连接形式对其界面剪切作用特性的影响分析 [J]. 河北水利电力学院学报, 2019(2): 22.
LI Bin, XIAO Chengzhi, SUN Wenjun. Analysis of the influence of the interface connection form of new and old concrete on the interface shear behavior [J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2019(2): 22.
- [32] MOHAMMADI M, MIR MOGHATAEI R, ASHRAF SAMANI N. Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete [J]. Construction and Building Materials,

- 2014, 51: 141.
- [33] 刘志栋, 曾力, 高珍. 新老混凝土界面修补现状综述[J]. 中国农村水利水电, 2010(6): 157.
LIU Zhidong, ZENG Li, GAO Zhen. Review of new and old concrete interfacial repairing status [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(6): 157.
- [34] 李泽雷. 新旧混凝土界面剪切试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
LI Zelei. The experimental research on new and old concrete interfacial shear[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [35] 张健仁, 罗育明, 张旭辉, 等. 自密实混凝土浇筑成型方向对新老混凝土界面黏结抗剪强度的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(3): 744.
ZHANG Jianren, LUO Yuming, ZHANG Xuhui, *et al.* The effects of casting direction of self-compacting concrete on shear strength between the new and old concrete interface [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(3): 744.
- [36] 史长城, 王大辉, 袁群, 等. 短龄期老混凝土与新混凝土粘结的劈拉强度研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(5): 15.
SHI Changcheng, WANG Dahui, YUAN Qun, *et al.* Study on bond splitting strength of the new-concrete-to-short-age-old-concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(5): 15.
- [37] 刘健. 高温后新老混凝土粘结的劈拉强度试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(2): 15.
LIU Jian. Experimental research on splitting tensile strength of the bonding of new and old concrete under high temperature [J]. Industrial Construction, 2001, 31(2): 15.
- [38] 郭进军. 高温后新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
GUO Jinjun. Study on mechanics performance of adherence of new and old concrete after high temperature [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [39] 安然. 高温作用后新老混凝土粘结的劈拉强度试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
AN Ran. Experimental research on splitting tensile strength of the bonding of new-to-old concrete after high temperature [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [40] XIAO J, LI Z, LI J. Shear transfer across a crack in high-strength concrete after elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 472.
- [41] 李平先. 新老混凝土粘结面抗冻和抗渗性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
LI Pingxian. Experimental research on freeze-thaw resistance property and impermeability for adherence of new-old concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [42] 程红强, 李平先, 张雷顺. 新老混凝土粘结面抗冻性能试验研究[J]. 河南科学, 2003, 21(6): 775.
CHENG Hongqiang, LI Pingxian, ZHANG Leishun. The study of ability of resisting freeze-thaw to the adherence face [J]. Henan Science, 2003, 21(6): 775.
- [43] ÇOLAK A, ÇOŞGUN T, BAKIRCI A E. Effects of environmental factors on the adhesion and durability characteristics of epoxy-bonded concrete prisms [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 758.
- [44] 乔连朋, 袁群, 冯凌云. 新型界面剂作用下新老混凝土黏结的耐久性能[J]. 公路, 2020(7): 33.
QIAO Lianpeng, YUAN Qun, FENG Lingyun. Durability of new and old concrete bonding under the action of new-type interface agent [J]. Highway, 2020(7): 33.
- [45] LI F, LUO X. Interfacial zone effects of chloride penetration in precast concrete member joints [J]. Advances in Cement Research, 2019, 31(6): 279.
- [46] 管大庆, 陈章洪, 石韞珠. 界面处理对新老混凝土粘结性能的影响[J]. 混凝土, 1994(5): 16.
GUAN Daqing, CHEN Zhanghong, SHI Yunzhu. The influence of interface treatment on the bonding behavior of new to old concrete interface [J]. Concrete, 1994(5): 16.
- [47] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, *et al.* Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 538.
- [48] 肖建庄, 林壮斌. 一种再生混凝土分段梁及其施工方法: 中国, 201410239781.X [P]. 2014-09-10.
XIAO Jianzhuang, LIN Zhuangbin. A kind of recycled concrete sectional beam and the construction method: China, 201410239781.X [P]. 2014-09-10.
- [49] SHEN B, HUBLER M, PAULINO G H, *et al.* Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: processing, microstructure, and properties [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(8): 663.
- [50] XIAO J, SUN C, JIANG X. Flexural behaviour of recycled aggregate concrete graded slabs [J]. Structural Concrete, 2015, 16(2): 249.
- [51] WANG L, TIAN Z, MA G, *et al.* Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: experiments and molecular dynamics studies [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 110: 103571.
- [52] MOMAYEZ A, EHSANI M R, RAJAIE H, *et al.* Cylindrical specimen for measuring shrinkage in repaired concrete members [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(2): 107.
- [53] QIAN Y, ZHANG D, UEDA T. Interfacial tensile bond between substrate concrete and repairing mortar under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2016, 14(8): 421.
- [54] QIAN J, YOU C, WANG Q, *et al.* A method for assessing bond performance of cement-based repair materials [J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 307.
- [55] 肖建庄, 张凯建, 张青天, 等. 一种组合混凝土结构的构建方法: 中国, CN201910359477.1 [P]. 2020-02-14.
XIAO Jianzhuang, ZHANG Kaijian, ZHANG Qingtian, *et al.* A construction method of composite concrete structure: China, CN201910359477.1 [P]. 2020-02-14.