

混凝土结构的新发展—组合混凝土结构

肖建庄^{1,2}, 张青天¹, 余江滔², 丁陶¹, 李岩², 沈军²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 首次提出组合混凝土结构的基本概念, 其基本思想是在不同的层次上(材料、构件、结构)组合不同种类的混凝土, 对混凝土材料以及结构进行优化设计, 从而使其性能提升, 更好满足安全性、适用性和耐久性, 实现可持续性。围绕这一创新思路, 针对组合混凝土梁、柱、板以及框架结构等, 对组合混凝土结构的设计与施工原理进行了阐述。最后对组合混凝土结构存在的科学问题及其发展趋势, 包括界面设计、3D 打印施工与可持续性评价进行了分析与展望。

关键词: 组合混凝土结构; 界面性能; 优化设计; 3D 打印; 可持续性

中图分类号: TU375

文献标志码: A

A Novel Development of Concrete Structures: Composite Concrete Structures

XIAO Jianzhuang^{1,2}, ZHANG Qingtian¹, YU Jiangtao², DING Tao¹, LI Yan², SHEN Jun²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The present paper firstly introduces a fundamental concept for a novel structure, namely, the composite concrete structure, according to which, concretes can be combined at different levels, such as materials, components and structures and the safety, serviceability and durability of concrete structures improves significantly. As a result, the sustainability of concrete structures achieves. Based on the proposed new concept, case studies were carried out on the composite concrete beams, columns, slabs and frame structures. Finally, the scientific problems and future development of the composite concrete structures, including interface design method, 3D printing construction technique and the sustainability evaluation were proposed and analyzed.

Key words: composite concrete structures; interfacial

properties; optimization design; 3D printing; sustainability

建筑业是我国经济支柱产业之一, 混凝土作为建筑业的主要结构材料, 用量在近 20 年快速增加, 2015 年我国商品混凝土用量已达 16 亿 m³, 跃居世界第一^[1]。混凝土的制备会排放大量 CO₂, 能耗总量大^[2]。考虑资源、能源和生态协调发展, 混凝土材料和结构迫切需要可持续发展和创新, 以应对建筑业下一个 100 年的需求和应用。

目前, 再生混凝土材料与结构技术作为混凝土结构可持续发展的途径之一, 已有较为成熟的研究^[3], 经过合理设计和科学施工, 再生混凝土可以作为结构混凝土用于实际工程中。需要指出的是, 无论是普通混凝土还是再生混凝土结构, 目前的结构设计通常仅关注其受力状态, 功能主要通过设置外墙等围护结构来满足。整个构件与结构通常只采用单一的混凝土材料, 常常造成不必要的浪费。

然而, 纵观自然界生物进化过程, 为适应自然界的变化, 各生物不断优化和完善自身的组织结构与性能, 其特点突出表现在选用合适的组合与复合形式, 最大限度地减少材料消耗, 来满足自身的功能需求。随着一系列新型水泥基材料, 如海水海砂混凝土、纤维混凝土、轻质混凝土、橡胶混凝土和纤维增强型水泥基材料(engineered cementitious composites, ECC)等, 以及新型施工方式(3D 打印、可拆装施工等)的出现, 完全可以结合不同水泥基材料的特点, 设计出优化的混凝土构件与结构。基于此, 本文提出了“组合混凝土结构”(composite concrete structure)的新概念。

1 组合混凝土结构基本概念

将混凝土和其他材料, 如钢材和纤维增强复合

材料(fiber reinforced polymer, FRP), 组合一起的结构形式已得到深入研究^[4-5], 钢-混凝土组合、FRP-混凝土组合以及 FRP-混凝土-钢组合结构形式已在工程中得以应用. 这些“组合”将混凝土和其他材料各自的优势充分发挥了出来.

近年来, 随着对混凝土材料研究的不断深入, 诞生了一系列由特殊材料组成的、具有特殊功能的水泥基材料. 其中, 随着纤维混凝土与 ECC 这类具有高延性的水泥基材料的出现, 逐渐克服了普通混凝土受拉性能较差的缺点. 钢纤维混凝土拉伸延性达 0.5%~1.0%; 经特殊设计的聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)抗拉强度约为 3 MPa~7 MPa, 拉伸极限应变约为 2%~4%. 研究表明^[6-7], 新型聚乙烯纤维增强高延性水泥基复合材料(PE-ECC)的抗压强度在 30 MPa~150 MPa 之间, 抗拉强度介于 5 MPa~20 MPa, 是普通混凝土的 3~10 倍, 平均拉伸应变达 8%, 最大拉伸应变达到 12% 以上, 接近建筑钢材水平, 这使混凝土自身即可通过这些材料的组合满足各种受力要求. 综合考虑这些特种水泥基材料的特点, 根据性能需求的不同, 将其在材料、构件以及结构等层次进行组合, 可以实现材料和结构的最优化配置, 形成“组合混凝土结构”. 相对于混凝土与其他材料的组合形式, 不同混凝土间的组合更具有相容性, 经过适当处理, 不同混凝土间的界面可以达到良好的整体性^[8]. 混凝土至少可从 3 个层次上进行组合, 分别为:

(1) 材料层次: 组合不同材料制备混凝土, 包括骨料(天然骨料、再生骨料、轻骨料、金属骨料)、功能性材料以及外加剂等;

(2) 构件层次: 构件截面和纵向上的组合. 在构件截面上组合不同强度或功能混凝土, 形成梯度或者分层, 组合类型包括强度(高强、低强混凝土)、种类(再生混凝土、海水海砂混凝土)、组分(纤维、橡胶)、功能(防水、抗火、隔音)等; 在构件纵向上组合不同的混凝土, 组合方式包括按受力区域分段组合(梁塑性铰区以及中间段)、按约束情况分段组合(变形转动要求不同的区域)等;

(3) 结构层次: 组合不同混凝土构件, 将最合适的构件放在最需要(受力上和功能上)的地方.

凡是符合上述组合特点的结构均可称为“组合混凝土结构”. 其概念与当前“组合结构”以及“混合结构”有一定区别, “组合结构”是指由组合结构构件组成的结构, 以及由组合结构构件与钢构件、钢筋混凝土构件等组成的结构, 其中组合结构构件是由钢

材或其他非水泥基材料与钢筋混凝土组合能整体受力的结构构件. 这种组合是将混凝土以及与混凝土性能相差较大材料(如钢材、FRP 材料)组合, 而“组合混凝土结构”的组合均为水泥基材料. “混合结构”是相对于单一结构如钢筋混凝土结构、木结构、钢结构而言的概念, 是指由多种结构形式组合而成的共同承受水平和竖向作用的建筑结构, 其中各结构可构成独立的受力系统, 例如钢框架与钢筋混凝土核心筒组成的框筒结构. “组合混凝土结构”与之区别在于组合材料的性能相容性, 同时, 各水泥基材料共同形成受力体系.

2 组合混凝土结构原理

组合混凝土结构中存在着混凝土-混凝土的界面, 这与钢-混凝土界面在性质上存在着较大不同. 通常认为, 新老混凝土结合面黏结力的主要来源包括范德华力、骨料咬合力、化学作用力和表面张力. 有黏性的水泥浆渗透到老混凝土的表面空隙中, 硬化后的新老混凝土相互交错黏合, 包括 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、Aft、C-S-H 在内的水化产物在老混凝土的孔隙或裂缝中生长, 从而形成一定的黏结强度. 从宏观的角度看, 结合面黏结力主要受混凝土表面粗糙度的影响, 可以通过涂刷界面剂来提高界面的化学作用. 同时, 由于混凝土结构本身配筋的存在, 穿过叠合面的箍筋会因为销栓作用而提供额外的界面抗力. 传统钢-混凝土组合结构叠合面的抗剪性能十分薄弱, 通常通过增加剪力键来提供结合面的抗剪强度^[9]. 因此, 从某种角度上说, 在实际应用时, 组合混凝土结构在界面抗剪性能上, 比钢-混凝土结构有明显优势.

目前, 国内外尚未有针对“组合混凝土结构”的概念与研究, 但有一些新颖的构件与结构形式, 符合本文提出的组合混凝土结构的雏形, 现对其进行剖析并对组合混凝土结构的原理进一步阐述.

2.1 组合混凝土材料

2.1.1 组合骨料混凝土

合适的骨料组合, 可使混凝土在使用功能上得以提升. 例如, 为降低大坝混凝土因碱硅酸反应而产生的膨胀, 刘文潮等^[10]进行了设计优化, 采用组合骨料混凝土(砂岩粗骨料+大理岩细骨料)比全砂岩骨料混凝土具有更良好的变形性能、热学性能以及抗渗性能. 严雄凤等^[11]选择天然沸石、钢渣和浮石作为原材料形成组合骨料, 优选出最佳组合, 制备出脱氮除磷效果良好的植生混凝土. 不仅在使用功能

上,合适的骨料组合也可改善混凝土力学性能.李坛等^[12]提出了大粒径再生骨料(最大粒径为 80 mm)与一般骨料的组合骨料混凝土.由于大粒径再生骨料尺寸比一般再生骨料(粗骨料 4.75 mm~37.5 mm、细骨料 0.075 mm~4.75 mm)粒径增大,破碎效率得到了显著提升,同时,采用大粒径的骨料,可使骨料总表面积减小,从而减少水泥的用量.如图 1a 所示,通过立方体与棱柱体试块的试验,表明其抗压强度相比废混凝土明显提高.吴波等^[13]也提出了更大尺寸的废混凝土块体(特征尺寸约 50 mm~400 mm)与新混凝土的组合物,如图 1b 所示,而使用 FRP 约束可以显著提升其性能^[14].

由组合骨料混凝土建造的结构,可从力学性能和功能上,实现优化结构的目的,形成组合混凝土结构,也可实现对绿色环保材料的应用与推广.

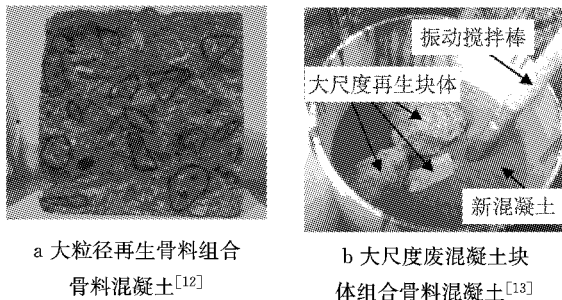


图 1 组合骨料混凝土
Fig.1 Composite aggregate concrete

2.1.2 组合功能材料混凝土

由于材料和施工等问题,混凝土表面会出现开裂、坑洞、蜂窝麻面、粗骨料外露等现象,严重影响建筑物的使用和安全,尤其是在严酷环境中的结构,表现出内强外弱的现象.因此,混凝土的面层质量越来越受到关注和重视.对于混凝土的表面处理,针对提升表面强度、抗渗性能以及修复裂缝,目前已有许多表面强化与修复材料,包括纳米 SiO₂ 等纳米技术,应用于新建和在用混凝土的面层强化以及破损混凝土面层的修复^[15].传统的混凝土防护涂料仅在混凝土表面形成隔离膜,随着时间的推移,涂料的附着力会降低,缩短了防护寿命.为提高混凝土的防护寿命,产生了外渗表面强化与修复材料的混凝土组合形式^[16].如图 2 所示,外渗型防护剂等活性材料,利用混凝土具有可渗透性的特点,渗入内部并与内部组分发生复杂的化学反应生成新的物质,自适应地与混凝土结合在一起,从而强化表面以及阻止外界有害物质进入混凝土.这种组合方式,对新建混凝土结构的加强以及旧混凝土建筑的修补与加固都适用.

外渗表面强化与修复材料,是从混凝土“外部”的保护,这种思路,提供了一种新的混凝土组合方式,在混凝土“内部”保护(配合比、外加剂、掺合料等)基础上,可以组合各类功能材料对混凝土外表的性能进行提升,这也是一种混凝土组合形式.组合功能性材料,可对结构起到强化加固以及耐久维护的作用,同样可以形成组合混凝土结构.

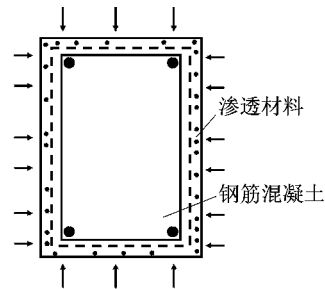


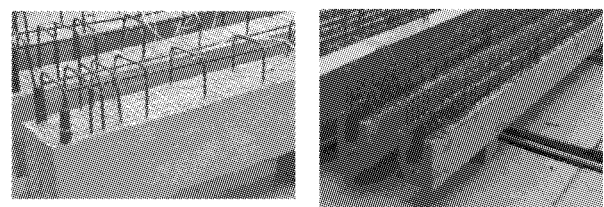
图 2 混凝土外渗功能材料原理图
Fig.2 The principle diagram of the concrete with exosmosis functional materials

2.2 组合混凝土构件

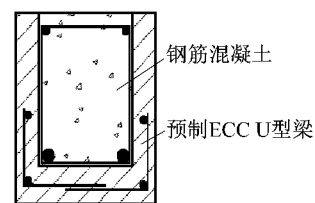
2.2.1 组合混凝土梁

根据梁的受力特点,一般采用的是在截面层次上下组合的形式,作为受压和受拉区域转换的界面,梁的中性轴刚好可以作为组合混凝土构件间界面.设计时叠合面需满足一定的抗剪承载力要求,主要由新老混凝土间黏结强度和箍筋配置数量确定,还与梁的破坏形态、叠合面沿梁高位置的变化、剪跨比和剪应力二次受力影响等因素有关,叠合梁的受力行为已有较为系统的研究^[17].

结合再生混凝土特点,肖建庄等^[18]提出了再生混凝土叠合梁,如图 3a、3b 所示,完成了 C 型叠合梁与 U 型叠合梁的抗弯与抗剪试验.预制梁段由于受



a C 型梁预制段^[18] b U 型梁预制段^[18]



c ECC-RC 组合梁截面^[19]

图 3 组合混凝土梁

Fig.3 Composite concrete beams

力与耐久性考虑,采用较低的再生粗骨料取代率.抗弯试验中,预制段为普通混凝土,后浇段为再生粗骨料取代率为 100% 的再生混凝土;抗剪试验中,预制段取代率为 70%,后浇段为 100%.结果表明,再生混凝土叠合梁截面的形状与梁的力学性能无明显相关,叠合面未发生对承载力和变形不利的破坏,连接完好.

ECC 与普通混凝土梁的组合试验表明^[19],与 ECC 组合可使叠合梁设计方式更加灵活,甚至可以做到无筋形式;还可以结合新型的 3D 打印施工方式,将 ECC 外壳进行打印,再浇筑构件内部混凝土.相比于一般混凝土,ECC 能够更好地与增强筋材协同变形,使得构件整体受力效率更高.同时 ECC 组合梁能在荷载较大时依然保持裂缝宽度在较小的一段范围内,可有效保护梁内部钢筋或 FRP 筋材不受外部有害介质侵蚀,提高梁的耐久性,其具体构造如图 3c 所示,构件外壳受拉区域采用 ECC 预制构件,内部采用普通钢筋混凝土.

另外,在构件纵向,由于梁端塑性铰区域受力情况较梁中段复杂,可将塑性铰区域与梁中段交界面作为组合界面,形成分段梁^[20].结合再生混凝土,根据受力情况,将梁划分为一个弯矩控制段和两个剪力控制段,在弯矩控制段采用再生粗骨料取代率大于 30% 的再生混凝土,在剪力控制段采用取代率不大于 30% 的再生混凝土;施工时,在初凝后终凝前,使用振捣棒将分界面两处分属不同区段的混凝土振捣成一体,不形成明显的薄弱面.这种创新构造不仅可以使再生混凝土构件力学性能得以提升,还能拓展再生混凝土的应用范围.

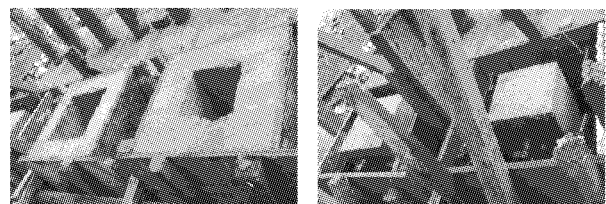
2.2.2 组合混凝土柱

组合混凝土柱的一般构造为,首先浇筑柱的口型外壳或内芯,再浇筑柱的其余部分.这样根据混凝土材料的不同,即可形成组合混凝土柱.一般柱的柱芯位置受力较小,因此柱在截面层次上通常采用内外组合的方式.外部形成口字型,采用力学性能相对较好的混凝土,并配置钢筋进行加强,可以在工厂预制保证其质量,内部可浇筑相对较差的材料并利用口字型外壳作为模板,同时外壳也会对内部混凝土产生一定的约束作用,提高内部混凝土的力学性能.由于约束作用,内部和外部混凝土间的界面性能也得到加强.

结合柱截面的受力特点,柱芯处采用再生混凝土,肖建庄等^[21]完成了半预制再生混凝土柱的抗震试验与分析,如图 4a、4b 所示,柱的口型外壳采用普

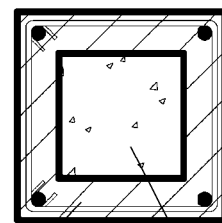
通混凝土并配置钢筋,柱芯采用再生混凝土.试验结果表明:普通混凝土柱、再生混凝土柱和半预制叠合柱,在低周反复荷载作用下,破坏模式均表现为明显的弯曲破坏特征,即柱子根部受拉纵筋屈服,受压区混凝土压碎破坏.各类柱的刚度退化趋势相似,全现浇混凝土柱的初始刚度略高于其他试件.改变芯柱大小会影响柱承载力,而外部预制或内部预制的施工方式对承载力影响不大,各类柱均具有良好的耗能性能.可以看到,组合柱的形式可以改善再生混凝土的力学性能,起到施工改性的作用.

如图 4c 所示,结合 ECC 材料的组合混凝土柱试验表明^[22],试件在反复荷载的作用下,出现许多细密裂缝,平行裂缝带相互交叉,表现出了明显的多缝开裂特征;在破坏时,未出现保护层剥落,构件完整性良好;ECC 对构件耗能能力有显著提升,组合柱各方面指标均呈现出良好的抗震性能.



a 外部预制口型柱^[21]

b 内部预制口型柱^[21]



c ECC 组合混凝土柱^[22]

图 4 组合混凝土柱

Fig.4 Composite concrete columns

2.2.3 组合混凝土板

梯度材料的基本概念早在 1984 年已提出^[23],其设计原理是根据构件的使用要求,通过连续改变材料的组成和结构,使材料成为性能和功能均呈连续平稳变化的一种非均质复合材料,从而保证其物理、力学、化学甚至生物特性的连续变化,以适应不同环境特殊功能的要求.将梯度材料的这种原理应用在混凝土构件中,可形成另一种组合混凝土构件的设计思路.

Shen^[24]提出了一种水泥基功能梯度材料,如图 5a 所示,采用纤维体积分数作为梯度参数,试验结果显示,按梯度分布的各层材料之间具有良好的黏结

性能,梯度分布可以很好地减小界面的应力与开裂,且分层数量越多,效果越明显,这一结果也被其他学者证实^[25].肖建庄等^[26]利用再生粗骨料取代率这一指标,在混凝土板截面上将取代率按一定梯度分布,开展了再生混凝土梯度板的试验研究.如图 5b 所示,梯度板在厚度方向上分为了 3 层,再生粗骨料取代率从上至下分别为 50%、100% 和 0.试验结果显示,不同混凝土层间没有发生滑移,仍符合平截面假定.一般再生混凝土的弹性模量随着再生粗骨料取代率的增加而降低,当受压区浇筑的混凝土弹性模量较高时,板的刚度会有所提升.

可以看到,根据构件截面上受力情况的不同,以一定参数为指标(如纤维体积分数、再生粗骨料取代率),组合力学性能合适的混凝土,可以显著提升构件的性能,如在受压区浇筑弹性模量较大的混凝土,中性轴区域浇筑性能略差的混凝土,受拉区浇筑延性好的混凝土,其中中性轴区域可采用全再生混凝土,受拉区可采用普通或掺有再生粉体的 ECC,这样可达到构件受力性能最优化,降低成本.另外,梯度分布是解决组合混凝土构件中各混凝土间界面问题的有效方法,为组合混凝土构件的设计提供了新的路径.

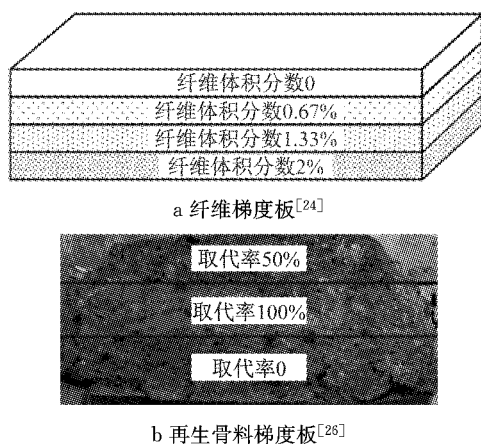


图 5 组合混凝土板

Fig.5 Composite concrete slabs

2.3 组合混凝土结构

2.3.1 组合混凝土超长结构

混凝土收缩徐变所致开裂问题会严重影响建筑物的使用性能及耐久性能.超长屋面与地下室结构需要严格的裂缝控制,考虑到防水要求,这些超长结构通常不设永久伸缩缝.因此,采用掺加膨胀剂的补偿收缩混凝土,用膨胀加强带取代后浇带,不仅能够解决超长混凝土结构的收缩裂缝问题,实现结构的连续浇筑,而且具有施工方便,周期短,结构整体性

较好等优点.

图 6 展示了设置膨胀加强带后,混凝土结构内部应力变化情况^[27].未设置膨胀加强带的普通混凝土结构,在温度收缩作用下,其应力分布曲线为 ABCDE,应力由两端向中部逐渐增大,在 B、D 两点处,达到极限状态,裂缝产生;当超长结构整体采用小掺量膨胀剂的补偿收缩混凝土时,其收缩应力得到一定程度降低,应力分布曲线变为 FGHIJ,在 G、I 两点处,应力达到极限状态,裂缝产生;当整体采用小掺量补偿收缩混凝土,并在合理部位 G、I 处采用大掺量补偿收缩混凝土设置膨胀加强带时,结构内部应力状况得到有效改善,应力分布曲线变为 FKLMNPJ.由于加强带处加大了膨胀剂掺量,化学膨胀能转化为构件预压应力,很大程度抵消了收缩应力,使得应力曲线从 L、N 两点处重新增长,大大降低了结构最大应力,使其控制在混凝土抗拉强度范围内.

可以看到,组合混凝土结构不仅可以在受力上得到优化,通过适当组合具有不同功能的混凝土,也可有效提升结构的使用性能.

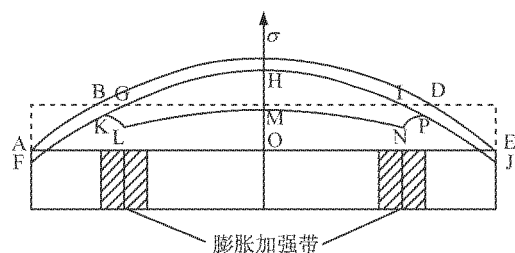


图 6 膨胀加强带补偿收缩应力原理图^[27]

Fig.6 The principle diagram of the expansion reinforcing band

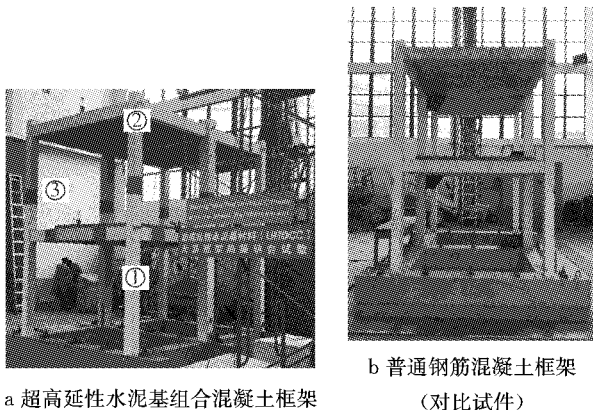
2.3.2 组合混凝土框架结构

在结构层次上选取合适的预制构件,并通过各类节点将其沿高度方向组合,达到结构的最优设计,同样符合组合混凝土结构的概念.余江滔等^[28]进行了组合混凝土框架的尝试,并采用自主研发的超高延性水泥基复合材料(ultra-high ductility cementitious composites, UHDC)完成了无筋建造.组合混凝土框架模型如图 7a 所示,主要特点如下:

(1)利用 UHDC 优异的拉伸延性和耗能能力提升关键部位的抗震性能.在框架制作中采用 UHDC 浇筑框架的①区域(包括底层柱脚和一层框架节点区域),即地震易损部位.为了验证无筋建造和组合混凝土结构的理念,①区域没有配置纵向和横向钢筋.

(2) 框架非关键部位采用普通钢筋混凝土预制. 图 7a 中的②区域(主要包括二层梁、板和柱)为普通钢筋混凝土构件, 是组合混凝土框架的预制部分.

(3) 采用工作性能良好的高强度聚合物砂浆完成预制拼装. 如图 7a 所示, 框架③(深色)部分为 UHDCc 构件与普通钢筋混凝土构件的连接节点, 通过高流动性聚合物砂浆实现二次浇筑和拼装.



a 超高延性水泥基组合混凝土框架

b 普通钢筋混凝土框架
(对比试件)

图 7 组合混凝土框架的振动台试验^[28]

Fig.7 Shaking table tests of the composite concrete frame structures

除 UHDCc 组合混凝土框架外, 还制作了一个几何尺寸完全相同的钢筋混凝土框架试件(图 7b). 两个框架均按设防烈度 7 度(0.15g)、丙类混凝土框架进行设计, 并进行了 3 种地震波、7 度多遇(0.105g)到 9 度罕遇(1.178g)的模拟地震振动台试验. 在 7 度地震作用下, 组合混凝土框架的层间位移角(除 7 度(0.15g)罕遇上海人工波 2 工况)均小于普通混凝土框架. 在 7 度(0.15g)多遇地震动激励下, UHDCc 组合混凝土框架的层间位移角满足 1/550 的要求, 而在 7 度(0.15g)罕遇地震动激励下, UHDCc 组合混凝土框架的层间位移角满足 1/50 的要求. 此外, UHDCc 组合混凝土框架经受了 8 度(0.2g)罕遇、8 度(0.3g)罕遇和 9 度罕遇的地震考验. 结束试验时, 一层楼面和二层楼面的残余层间位移角分别为 1/299 和 1/282. 试验结果说明, 在结构层面上适当地组合不同性能的梁、板、柱、节点等构件可获得良好的整体结构性能, 证明了组合混凝土结构的整体安全性.

3 组合混凝土结构问题与趋势

3.1 组合混凝土结构设计

(1) 界面设计

由于组合混凝土结构是各种水泥基材料的组

合, 因此界面是设计的关键问题. 过去在混凝土结构设计中, 新老混凝土界面仅作为构造处理, 而在组合混凝土结构中, 由于需要保证构件的整体性, 其设计的重要性颇为显著. 在设计时就要考虑不同混凝土间的界面结构、形成过程以及不同混凝土间界面的处理方式. 在组合混凝土结构的界面设计中, 建议也采用界面的外部受力作用(S)不大于界面本身的抗力作用(R)的计算理论以达到定量的设计, 即 $S \leq R$.

可以借鉴新老混凝土界面的研究成果^[29], 提高组合混凝土结构的界面性能. 一般来讲, 界面粗糙度越大, 新旧混凝土黏结强度越高, 但是也有试验表明过大的粗糙度并不能获得较高的黏结剪切强度. 因此, 需要定量评估黏结粗糙度^[30]和采用膨浆界面剂和聚合物界面剂等^[31]. 采用特殊构造的钢筋(或复合材料筋)连接也可以有效地加强不同混凝土间的作用. 不同混凝土间界面的受力示意图如图 8 所示, 影响界面的外部受力作用 S 特征参数包括, 界面的压应力、界面的剪应力以及界面的形状等, 其作用可以通过计算得来; 界面本身的抗力作用 R 的影响因素包括, 界面两侧混凝土的基本性质, 不同混凝土黏结时水化机理, 界面粗糙度, 界面剂的使用情况以及界面处的配筋情况等, 其作用与施工方法和材料性质相关, 工程设计时的抗力量化也还存在一定困难. 从目前的研究成果来看, 其基础理论研究还有待深入, 需进行后续深入的试验与分析, 以明确组合混凝土结构界面受力和劣化机理.

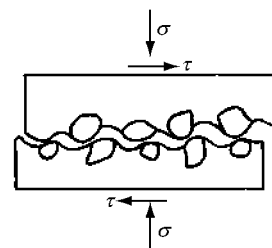


图 8 混凝土-混凝土界面分析示意图

Fig.8 Schematic diagram of concrete-to-concrete interfaces

(2) 计算方法

普通混凝土结构在截面上、构件上可看作均匀单一的材料, 因此可以采用结构力学、材料力学以及混凝土结构理论进行设计. 而组合混凝土结构由于在各层次(材料、构件、结构)上进行了组合, 材料的参数均有较为显著的不同, 需要重新建立本构关系, 并对计算方法进行改进. 可以运用弹塑性力学的理论, 通过有限元等方法进行计算设计. 基于柔度法且沿单元长度积分的弹塑性纤维单元^[32], 可以模拟截

面特性复杂、参数沿纵向连续变化的构件,可作为组合混凝土结构设计的一种方法;不同混凝土间界面的模拟也是计算分析的关键问题。目前各常用的设计软件,如 PKPM 等,在参数输入上设置较为单一,材料的组合无法表达和体现。因此为推广组合混凝土结构的设计,如何将此计算部分合理简化并准确应用也是后续研究的方向。

(3)设计理念

组合混凝土结构的设计理念是一种精细化、一体化的设计过程,需要考虑力学性能的设计与使用功能结合,做到结构-功能一体化设计;在设计时,同时需要考虑施工的过程,相对于一般的混凝土结构,组合混凝土结构的施工过程对组合构件、结构的力学性能有更大的影响,尤其对不同混凝土间的界面形成有着直接影响,因而设计时也需要做到设计-施工一体化设计。因此,组合混凝土结构设计需要建立一套新的设计体系,可以结合 BIM (building information modle)^[33]等新型技术,符合可持续性设计的新要求。

3.2 组合混凝土结构施工

传统现浇式施工方式中的新老混凝土浇筑以及高低强混凝土的组合,已经包含了组合混凝土结构的雏形。预制装配式的施工方式,为组合混凝土结构的施工提供了便利,预制混凝土构件间的连接形式、构造细节以及施工方式可直接应用在组合混凝土结构中,相对于钢-混凝土以及 FRP-混凝土组合构件间复杂的节点型式,其施工更为简便。同时,随着新型施工技术发展,组合混凝土结构的形式将会更加优化。近年来诞生了一系列新型的施工技术,包括有 3D 打印施工技术和可拆装施工技术。

3D 打印技术,是一种增材建造技术^[34],它通过将材料逐层叠加的方式完成实体部件的制造,如图 9 和图 10 所示。与传统的去除材料加工技术(减材制造)不同,3D 打印没有剪裁过程,因此不会产生边角料,从而使原材料的使用率增加。目前运用较多的方



图 9 建筑墙体外轮廓的 3D 打印过程^[34]

Fig.9 The process of 3D-printing the outer contour of walls

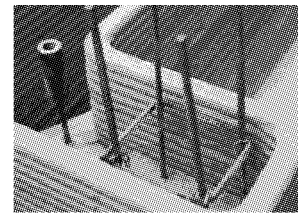


图 10 3D 打印轮廓内配筋^[34]

Fig.10 The reinforcements in 3D-printing

法为挤压法以及铺层法,前者是利用机械喷嘴将“油墨”材料挤压喷出,循环往复成型;后者则是将“油墨”材料一层一层地堆叠成型。随着超高延性水泥基材料的出现,无筋建筑的 3D 打印成为了可能。3D 打印这种新型的施工方式可以有效地解决组合混凝土结构施工难的问题,运用不同的“油墨”材料,即不同种类的混凝土,可以很容易的形成组合混凝土结构在材料以及构件层次上的组合。

另外,可拆装技术^[35-36]是将可拆装设计(Design for Deconstruction, DfD)的概念引入混凝土中,这样在混凝土构件需要拆除时,可以将可拆装构件再次运用到新建建筑中,从而赋予混凝土构件的二次生命。这种方式,在结构设计时就考虑到拆卸和再安装过程,由于可拆装技术拆卸时效率高,构件的利用率高,因此是对预制装配式施工方式的进一步提升。利用这种可拆装结构思想,可以形成组合混凝土结构在结构层次上的组合,并能提高混凝土结构的可持续性。

3.3 组合混凝土结构可持续性评价

对于混凝土结构的可持续性定义,肖建庄^[37]认为:混凝土结构可持续性是指在从混凝土材料开采与运输、混凝土结构设计与建造、混凝土结构使用与维护一直到混凝土结构拆除与资源化的生命周期内,混凝土结构在满足安全性和适用性的前提下,具备资源消耗最小、环境影响最低、经济和社会因素相协调的总能力。

组合混凝土结构在其材料设计、构件设计、结构设计以及施工上,均是对混凝土的优化处理,其概念完全符合混凝土结构可持续性的要求,可持续性评价主要包括以下几点:

(1)组合混凝土结构的结构性能评价。根据前述的一些组合混凝土结构的原理及案例分析,经过合理的设计以及施工,可以达到现行混凝土结构的标准,并能得到优化的效果。

(2)组合混凝土结构的生态环境评价。组合混凝土结构,在材料使用方面,可以根据需求广泛地应用再生材料技术(再生混凝土、再生纤维等)以及绿色

环保的材料(地聚合物、海水、海砂等);在施工方面,预制装配式施工等新型的施工工艺,对环境负荷小,结合可拆装技术,还能使构件循环使用。

(3)组合混凝土结构的经济效能评价.组合混凝土结构在材料方面,可以更容易地做到就地取材,减小运费;在施工方面,相对于一般混凝土结构可以缩短工期,减少模板、脚手架等措施费,均表现出良好的经济效益。

综合上述结构、环境、经济上的评价,组合混凝土结构相对于一般混凝土结构,具有更好的可持续性,其具体分析还需结合结构生命周期 LCA (life cycle assessment)、LCC (life cycle cost) 等方法^[38-39],对混凝土结构的可持续性进行更为具体地评价。

4 结论

(1)组合混凝土结构的基本思想,可以通过在不同的层次上(材料、构件、结构)组合不同种类的混凝土加以实现,是混凝土材料与结构发展的一次新飞跃。

(2)利用组合混凝土结构的概念和原理,对新混凝土材料与结构进行优化设计,对旧混凝土材料与结构加固增强,对施工技术进行创新,从而使混凝土结构性能提升,满足安全性、适用性、耐久性,实现可持续性。

(3)不同类型混凝土结合界面的形成机制、损伤机理与受力过程规律以及组合混凝土结构界面的设计与施工方法,将是今后研究的重点。

(4)梯度化以及仿生设计等新颖的方法也可为组合混凝土结构的设计开拓思路.在再生混凝土材料与结构的基础上,组合混凝土结构将会成为实现混凝土结构可持续发展的又一重要途径。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
State Statistics Bureau. China statistical yearbook—2015 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [2] MAGEE L, SCERRI A, JAMES P, *et al.* Reframing social sustainability reporting: towards an engaged approach [J]. *Environment Development & Sustainability*, 2013, 15(1):225.
- [3] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [4] TENG J G, YU T, WONG Y L, *et al.* Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behavior [J]. *Construction & Building Materials*, 2007, 21:846.
- [5] 曾岚, 李丽娟, 陈光明, 等. GFRP-再生混凝土-钢管组合柱轴压力学性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2014, 47(增 2):21.
ZENG Lan, LI Lijuan, CHEN Guangming, *et al.* Experimental study on mechanical behavior of GFRP-recycled concrete-steel tubular columns under axial compression [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(S2):21.
- [6] 林建辉, 余江滔, LI C V. 超高韧度水泥基复合材料经亚高温处理后的性能 [J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(5): 604.
LIN Jianhui, YU Jiangtao, LI C V. Performance of engineered cementitious composites after treated at sub-high temperatures [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(5): 604.
- [7] YU K Q, WANG Y C, YU J T, *et al.* A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8% [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 137: 410.
- [8] 王标, 王凯, 王真. 新老混凝土黏结性能的提高途径 [J]. *建筑技术*, 2010, 41(1):26.
WANG Biao, WANG Kai, WANG Zhen. Method for improving bonding property between new and old concrete [J]. *Architectural Technology*, 2010, 41(1):26.
- [9] 史晓宇, 陈世鸣, 裘子豪. 组合板剪切-黏结机理及承载能力试验 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(5):666.
SHI Xiaoyu, CHEN Shiming, QIU Zihao. Experimental investigation on shear-bond mechanism and strength of composite with steel profiles [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(5):666.
- [10] 刘文潮, 蔡华龙. 浅析不同骨料组合对大坝混凝土性能的影响 [J]. *人民长江*, 2009, 40(18):88.
LIU Wenchao, CAI Hualong. Analyses of the influence of different aggregate combination of dam concrete performance [J]. *Yangtze River*, 2009, 40(18):88.
- [11] 严雄风, 刘迎云, 魏清伟, 等. 脱氮除磷植生混凝土组合骨料优选研究 [J]. *混凝土*, 2016(1):93.
YAN Xiongfeng, LIU Yingyun, GUO Qingwei, *et al.* Research of composite aggregate optimization of planting concrete with nitrogen and phosphorus removal [J]. *Concrete*, 2016(1):93.
- [12] LI T, XIAO J Z, ZHU C M, *et al.* Experimental study on mechanical behaviors of concrete with large-size recycled coarse aggregate [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 120:321.
- [13] WU B, ZHANG S, YANG Y. Compressive behaviors of cubes and cylinders made of normal-strength demolished concrete blocks and high-strength fresh concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 78:342.
- [14] TENG J G, ZHAO J L, YU T, *et al.* Behavior of FRP-confined compound concrete containing recycled concrete lumps [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(1):04015038.
- [15] 杨欣美. 混凝土表面强化与修复材料研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
YANG Xinmei. Study on concrete surface hardening and repair materials [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [16] 王雨, 丁高升, 张桂媛. 渗透型混凝土保护剂的应用 [J]. *新型建筑材料*, 2008, 35(3):69.

- WANG Yu, DING Gaosheng, ZHANG Guiyuan. Application of protective agent for permeable concrete [J]. *New Building Materials*, 2008, 35(3):69.
- [17] 薛伟辰,杨云俊. 混凝土叠合梁受力性能与设计方法研究进展[J]. *混凝土与水泥制品*, 2008(1):44.
- XUE Weicheng, YANG Yunjun. The research progress of the mechanical performance and the design method of concrete composite beam [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2008(1):44.
- [18] XIAO J Z, PHAM T L, WANG P J, *et al.* Behaviors of semi-precast beam made of recycled aggregate concrete [J]. *Structural Design of Tall & Special Buildings*, 2013, 23(9):692.
- [19] HUNG C C, CHEN Y S. Innovative ECC jacketing for retrofitting shear-deficient RC members [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 111:408.
- [20] 肖建庄,林壮斌. 一种再生混凝土分段梁及其施工方法. 中国, CN104032892A[P]. 2014-09-10.
- XIAO Jianzhuang, LIN Zhuangbin. A kind of recycled concrete segmented beam and its construction method: China, CN104032892A[P]. 2014-09-10.
- [21] XIAO J Z, HUANG X, SHEN L. Seismic behavior of semi-precast column with recycled aggregate concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 35(10):988.
- [22] WU C, PAN Z F, MENG S P. Seismic behavior of steel reinforced ECC columns under constant axial loading and reversed cyclic lateral loading [J]. *Materials and Structures*, 2017, 50(1): 1.
- [23] KOIZUMI M. FGM activities in Japan [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1997, 28(1): 1.
- [24] SHEN B, HUBLER M, PAULINO G H, *et al.* Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: processing, microstructure, and properties [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2008, 30(8):663.
- [25] YANG J J, HAI R, DONG Y L, *et al.* Effects of the component and fiber gradient distributions on the strength of cement-based composite materials [J]. *Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science*, 2003, 18(2):61.
- [26] XIAO J Z, SUN C, JIANG X H. Flexural behavior of gradient slabs with recycled aggregate concrete [J]. *Structural Concrete*, 2015, 16(2):249.
- [27] 黄威,潘钻峰,沈雷鸣,等. 膨胀加强带在超长混凝土结构中的应用[J]. *建筑施工*, 2016, 38(9):1222.
- HUANG Wei, PAN Zuanfeng, SHEN Leiming, *et al.* Application of expansion reinforcing band to ultra long concrete structure [J]. *Building Construction*, 2016, 38(9):1222.
- [28] 余江滔,詹凯利,俞可权,等. 超高延性混凝土的无筋框架振动台试验超高延性混凝土的无筋框架振动台试验研究报告[R]. 上海:同济大学, 2017.
- YU Jiangtao, ZHAN Kaili, YU Kequan, *et al.* Research report of shaking table test on UHDC frame without steel reinforcement [R]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [29] 谢慧才,李庚英,熊光晶. 新老混凝土界面黏结力形成机理[J]. *硅酸盐通报*, 2003, 22(3):7.
- XIE Huicai, LI Genying, XIONG Guangjing. Experimental study of old and new concrete interface mechanism of paste [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2003, 22(3):7.
- [30] 韩菊红,袁群,张雷顺. 新老混凝土黏结面粗糙度处理实用方法探讨[J]. *工业建筑*, 2001, 31(2):1.
- HAN Juhong, YUAN Qun, ZHANG Leishun. Research on practical treating method for the interfacial roughness of new to old concrete [J]. *Industrial Construction*, 2001, 31(2):1.
- [31] 潘东芳,乔运峰,夏春,等. 新老混凝土界面处理材料的试验研究[J]. *混凝土*, 2006(9):60.
- PAN Dongfang, QIAO Yunfeng, XIA Chun, *et al.* Experimental research on the interfacial agent bonding of the new-old concrete [J]. *Concrete*, 2006(9):60.
- [32] 聂利英,李建中,范立础. 弹塑性纤维梁柱单元及其单元参数分析[J]. *工程力学*, 2004, 21(3):15.
- NIE Liying, LI Jianzhong, FAN Lichu. Elastic-plastic fiber beam-column element and its parametric analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(3):15.
- [33] 刘照球,李云贵,吕西林,等. 基于 BIM 建筑结构模型集成框架应用开发[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(7):948.
- LIU Zhaoqiu, LI Yungui, LÜ Xilin, *et al.* BIM-based integrated information framework for architectural and structural design model [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(7):948.
- [34] 马义和. 3D 打印建筑技术与案例[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2016.
- MA Yihe. 3D printing architectural technology and application [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2016.
- [35] CROWTHER P. Design for disassembly—themes and principles [J]. *BDP Environment Design Guide*, 2005.
- [36] 肖建庄,丁陶,张青天. 一种可拆装的混凝土构件施工方法: 中国, ZL 20150507741[P]. 2017-08-25.
- XIAO Jianzhuang, DING Tao, ZHANG Qingtian. The construction method of a DfD concrete beams: China, ZL 20150507741[P]. 2017-08-25.
- [37] 肖建庄. 可持续混凝土结构导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- XIAO Jianzhuang. An introduction to sustainable concrete structures [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [38] 顾道金,朱颖心,谷立静. 中国建筑环境影响的生命周期评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(12):1953.
- GU Daojin, ZHU Yingxin, GU Lijing. Life cycle assessment for China building environment impacts [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(12):1953.
- [39] 崔云华,陈柏昆. 基于生命周期成本分析的多层宿舍经济评价[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2016, 34(4):104.
- CUI Yunhua, CHEN Bokun. Economic evaluation of multi-story dormitories using Life Cycle Cost Analysis [J]. *Journal of Qinghai University (Natural Science Edition)*, 2016, 34(4):104.