

DOI: 10.7672/sgjs2026100001

橡胶混凝土的研究及应用现状分析*

马兵¹, 李坤鹏², 胡俊名², 朱伟勇¹, 杜轶赞¹, 袁书成², 王善云³

(1. 新疆塔建三五九建工有限责任公司, 新疆 阿克苏 843000; 2. 四川农业大学土木工程学院, 四川 都江堰 611830; 3. 中航建设集团有限公司, 四川 成都 610107)

[摘要] 橡胶混凝土作为回收废旧橡胶(尤其是废弃轮胎)的关键技术,不仅可实现橡胶废弃物的无害化处理,也能改善混凝土的性能,是实现可持续发展的重要措施。通过总结国内外关于橡胶混凝土的研究发展现状,介绍了橡胶混凝土的基本物理力学性能及其在结构构件中的应用表现;同时探讨了橡胶混凝土在组合结构构件中的应用前景及抗震性能。总结了橡胶混凝土研究和推广的可行性,以推动橡胶混凝土在建筑业中的规模化应用。

[关键词] 橡胶混凝土;组合结构;抗震性能;应用

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0001-07

Research and Application Status Analysis of Rubber Concrete

MA Bing¹, LI Kunpeng², HU Junming², ZHU Weiyong¹, DU Yibin¹,

YUAN Shucheng², WANG Shanyun³

(1. Xinjiang Tajian 359 Construction Engineering Co., Ltd., Aksu, Xinjiang 843000, China;

2. College of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan 611830, China;

3. Avic Const Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610107, China)

Abstract: Rubber concrete, as a key technology for recycling waste rubber (especially waste tires), not only realizes the harmless treatment of rubber waste but also improves the performance of concrete, which is an important measure to achieve sustainable development. This paper summarized the current status of research and development on rubber concrete at home and abroad, introduced the basic physical and mechanical properties of rubber concrete and its application in structural components. Additionally, the application prospects and seismic performance of rubber concrete in composite structural components were explored. The feasibility of rubber concrete research and extension work was summarized to promote the large-scale application of rubber concrete in the construction industry.

Keywords: rubber concrete; composite structure; seismic performance; application

0 引言

随着全球汽车工业的发展,每年产生大量废弃轮胎。据最新统计,全球每年产生的废弃轮胎已超过15亿条^[1],预计到2030年将突破50亿条^[2]。废弃轮胎因其复杂的化学组成(如硫化橡胶、炭黑等)和极低的生物降解率^[3],已成为威胁生态环境的黑色污染。传统的处理方式如露天堆放、填埋和焚烧,不仅占用大量土地资源,还易引起火灾、地下水

污染和有毒气体排放。废旧轮胎露天堆放存在火灾隐患,且成为细菌和蚊虫滋生的温床。地下填埋的废弃轮胎很难降解,且会污染地下水;焚烧废弃轮胎也将产生大量的有害气体,严重污染空气。因此,在混凝土生产过程中加入橡胶成为废弃轮胎无害化处理的一种理想方案。

橡胶混凝土(rubber concrete)是将橡胶制备成细小颗粒,取代部分细骨料而浇筑成的混凝土。通过在混凝土中添加橡胶有助于改善混凝土的韧性、降低混凝土弹性模量、减轻混凝土自重、增强隔声效果等,同时还能在一定程度上解决废弃轮胎引起的环境问题,对生态环境的可持续发展具有重要意义。

* 师市科技攻关计划(2023GJJ01);四川省省级大学生创新创业训练计划(S202510626098)

[作者简介] 马兵,正高级工程师, E-mail: mabingt2008@163.com

[通信作者] 袁书成,博士,讲师, E-mail: yuansc2020@163.com

[收稿日期] 2025-12-10

1 橡胶混凝土概况

1.1 研究现状

20 世纪末美国提出了橡胶混凝土,此后德国、英国等欧洲国家相继开展了关于橡胶混凝土的研究工作,重点聚焦橡胶对混凝土性能的影响,包括物理力学性能、耐久性、微观结构及结构抗震性能等。研究表明,橡胶混凝土在满足常规混凝土性能要求的同时具备独特优势,具有工程应用可行性^[4]。我国对橡胶混凝土的研究起步较晚,石河子大学、沈阳建筑大学、安徽理工大学等国内高校研究了橡胶混凝土的配制工艺,并针对橡胶混凝土强度较低的特点开展了改性研究,进一步保障了橡胶混凝土的力学性能^[5]。湖北工业大学、郑州大学、沈阳建筑大学等高校进行了橡胶混凝土结构构件和框架的抗震性能研究^[6-8],为持续研究橡胶混凝土的工程应用奠定了重要基础。

1.2 应用现状

橡胶混凝土的研究驱动了其在工程应用的发展。1999 年亚利桑那州立大学在校内铺筑了橡胶微粒掺量为 $23.7\text{kg}/\text{m}^3$ 的橡胶水泥混凝土人行道试验段。2005 年橡胶混凝土在泰国被用于铺设道路,橡胶取代率达 20%,表现出良好的路用混凝土性能^[9]。韩国在铁路改造中也应用了橡胶混凝土,将橡胶粉、砂子、石子、水泥混合,制成铁路枕木,不仅可以降低铁路的噪声也能减小火车经过路面时带来的振动^[10]。橡胶混凝土在国内工程实践应用起步较晚,2005 年我国首次在青银高速公路建设中部分使用橡胶混凝土,摊铺面积达 $2\,080\text{m}^2$,很好地满足了使用要求^[11]。2006 年首次将橡胶混凝土应用到桥梁工程领域,摊铺的桥梁路面全长 24m,宽 7m。由于橡胶混凝土具有较强的抗冲刷性能,也使得橡胶混凝土被应用于水工建筑物中,2015 年河南省济源市在水库泄洪洞建设中使用了橡胶混凝土。

2 橡胶混凝土性能研究

橡胶掺量是影响橡胶混凝土性能的关键因素。橡胶的柔软性、弹性变形特征及其憎水性会导致其与水泥砂浆界面结合薄弱,形成的界面效应成了制约材料力学性能的关键因素,降低了混凝土的抗压强度。橡胶与水泥砂浆的接触面如图 1 所示^[12]。

2.1 物理性能

由于橡胶颗粒堆积密度和表观密度均远低于混凝土中常用的细骨料,导致橡胶混凝土的密度低于普通混凝土,降低了混凝土结构自重,减少了施工和安装总成本^[13],同时,低密度的橡胶混凝土应用于结构构件有利于抗震^[14]。由于橡胶混凝土有

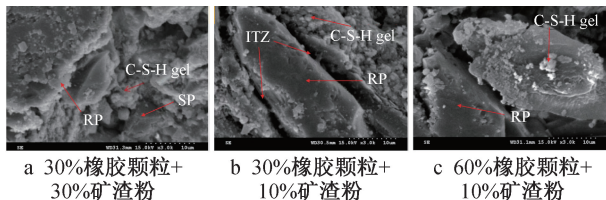


图 1 橡胶与水泥砂浆接触面

Fig. 1 Contact surface between rubber and cement mortar

较多孔隙,且混凝土密度较低,使混凝土的传热系数更小、热阻更大,具有更大的吸声系数和降噪系数,吸声系数测定结果如图 2 所示^[15]。

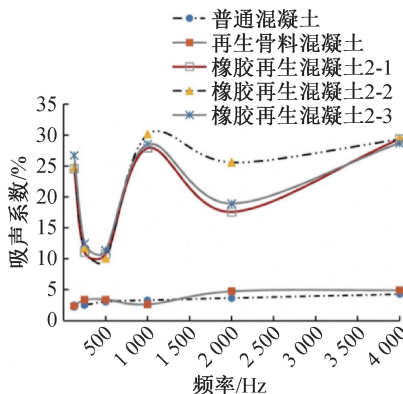


图 2 橡胶混凝土吸声系数测定结果

Fig. 2 Test results of sound absorption coefficient of rubber concrete

2.2 力学性能

橡胶颗粒的掺量、粒径是影响橡胶混凝土基本力学性能的主要因素。国内外开展了大量关于橡胶混凝土抗压强度的研究^[16-18],发现混凝土骨料被含有橡胶的水泥砂浆包裹,掺入橡胶导致水泥砂浆自身强度降低,受压时橡胶颗粒周边易形成应力集中区,促使橡胶颗粒周围裂缝快速扩展,且橡胶砂浆与骨料之间形成薄弱的界面过渡区,界面黏结力不足也导致了混凝土强度衰减。Najim 等^[19]研究了橡胶颗粒取代细骨料的混凝土性能,结果表明橡胶混凝土的抗压、抗折强度及刚度下降,且弹性模量显著降低,但混凝土的韧性和弹性变形能力提高了。通过合理的配合比设计,在满足强度要求的前提下,橡胶混凝土的动态力学性能优于普通混凝土,橡胶骨料在降低混凝土抗折强度的同时提高了混凝土变形能力,试验研究结果如图 3 所示^[19]。随着橡胶粒径增大,橡胶混凝土的抗压强度逐渐减小^[20-22]。

2.3 结构性能

橡胶混凝土应用于结构的力学性能研究是其工程实践应用的基础,国内外学者开展了有关橡胶混凝土结构包括梁、柱、梁-柱节点、框架及组合结构

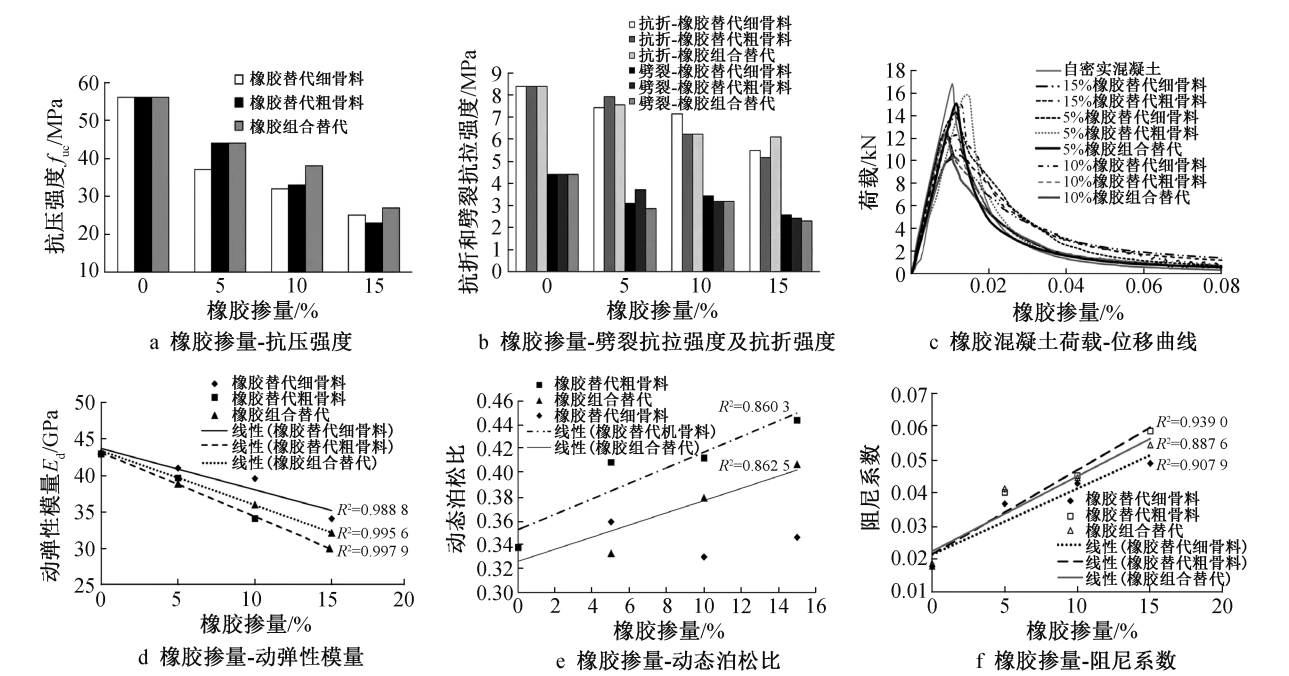


图 3 橡胶混凝土的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of rubber concrete

等构件的抗震性能研究,旨在探究橡胶混凝土在结构构件中应用的可行性。

2.3.1 梁

橡胶混凝土梁的受弯破坏过程与普通混凝土梁相似,主要分为弹性阶段、带裂缝工作阶段、破坏阶段 3 个阶段。

Mendis 等^[23]开展了橡胶混凝土梁弯曲试验,发现橡胶降低了混凝土强度,当混凝土强度相同时,橡胶对混凝土梁抗弯承载力影响较小,普通混凝土梁的承载力计算模型适用于橡胶混凝土梁,试验结果如图 4 所示^[24]。此外,橡胶混凝土改善了梁的压缩应变和挠度,使梁具有更好的变形能力。

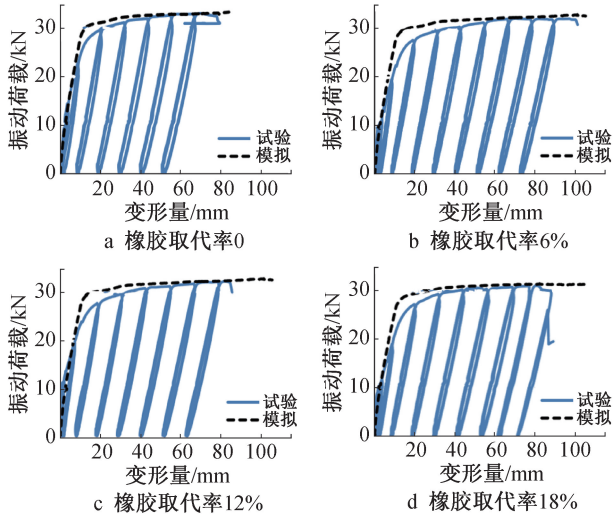


图 4 梁的荷载-位移响应曲线

Fig. 4 Load-displacement response curves of beams

2.3.2 柱

橡胶虽然降低了混凝土的强度和弹性模量,但提高了混凝土构件的耗能性能。研究发现橡胶混凝土柱在振动荷载下的变形行为强于普通混凝土柱,滞回曲线如图 5 所示^[25],橡胶混凝土能有效改善混凝土构件的抗震性能。Xue 等^[26]通过开展如图 6 所示的橡胶混凝土柱振动台试验探究橡胶混凝土柱在动力荷载作用下的性能及橡胶混凝土柱在地震振动下的响应。试验结果如图 7 所示^[26],结果表明橡胶混凝土的阻尼系数比普通混凝土提高了 62%,结构在地震响应下的加速度降低了 27%。

2.3.3 框架节点抗震性能

添加橡胶颗粒的橡胶混凝土梁-柱节点在地震荷载作用下破坏模式与普通混凝土梁-柱节点相似。由于橡胶混凝土自身材料性质的不同使混凝土梁-柱节点在能量耗散上相较于普通混凝土的梁-柱节点有明显区别。研究橡胶取代率(0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%)对混凝土梁-柱循环往复荷载响应的影响^[27],结果如图 8 所示。由图 8 可知,橡胶降低了梁-柱节点的极限承载力,由于橡胶混凝土具有较强的韧性,使构件在破坏后裂缝数量增加,裂缝宽度减小,增大了结构构件破坏时的延性。当橡胶掺量大于 15% 时,梁-柱节点的破坏模式发生了改变,柱中出现裂缝,构件的变形能力降低,对梁-柱节点延性、脆性指数和耗能产生了负面影响。

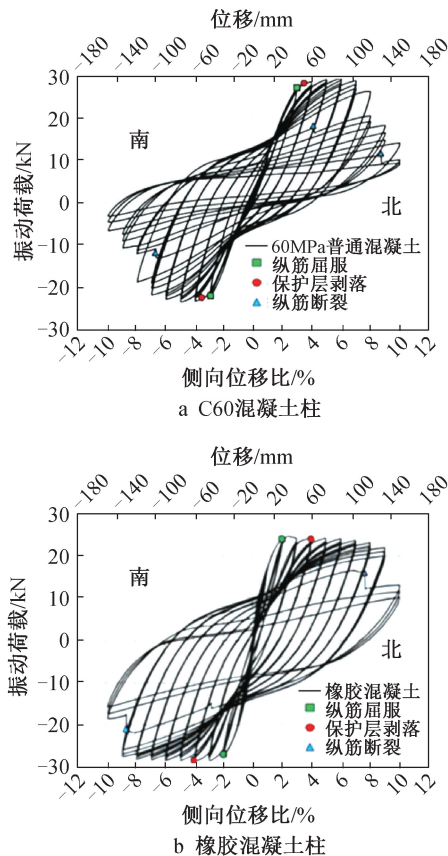


图 5 混凝土柱在荷载作用下的滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of the concrete column under load

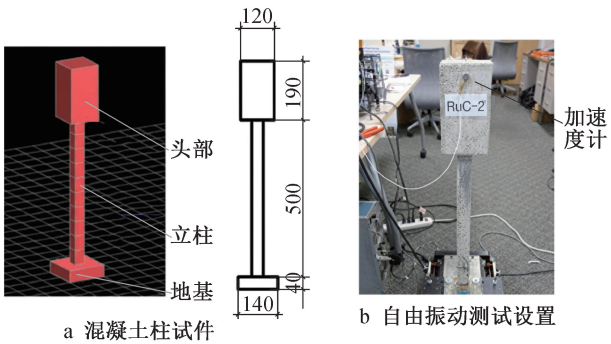


图 6 橡胶混凝土柱自由振动试验装置

Fig. 6 Rubber concrete column free vibration test equipment

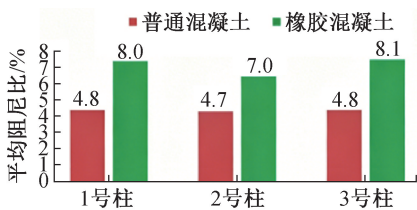


图 7 平均阻尼比

Fig. 7 Average damping ratios

2.3.4 框架抗震性能

橡胶混凝土框架试验如图 9 所示,通过开展单

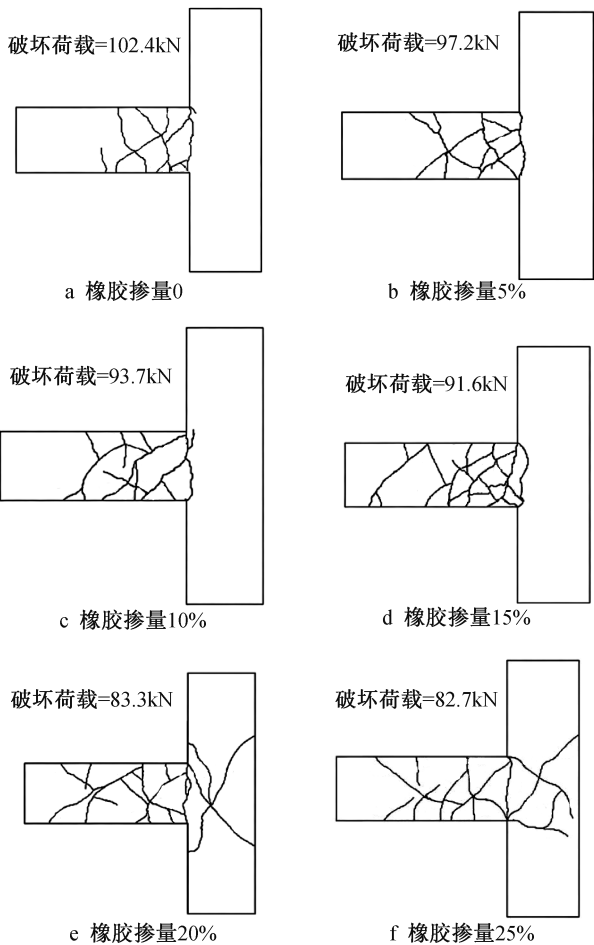


图 8 橡胶混凝土梁-柱节点的破坏模式

Fig. 8 Failure mode of rubber concrete beam-column joint

层或双层缩尺橡胶混凝土框架模型抗震性能试验^[28-29],揭示了橡胶混凝土对建筑抗震能力提升的影响规律。研究表明,当框架混凝土中混凝土橡胶取代率为 15%~20%时,其动力特性与抗震性能优于普通混凝土框架,橡胶混凝土框架结构自振周期延长,能有效避开地震主频,阻尼比提升,能量吸收能力倍增。在地震荷载作用下,橡胶混凝土框架的滞回耗能能达到普通框架的 2 倍,破坏时的位移延性提高约 50%,破坏模式从节点脆性剪切破坏转变为延性梁铰破坏,出现明显的结构倒塌延缓。主要归因于橡胶颗粒的弹性变形耗能机制,其低弹性模量特性可分散地震应力。试验表明橡胶混凝土适用于高烈度地震区的学校、医院等框架建筑,为提升结构抗震韧性提供了兼具环保性与功能性的材料解决方案。

3 橡胶混凝土在组合结构中的应用

3.1 应用背景

随着全球废旧轮胎堆积带来的环境压力加剧,

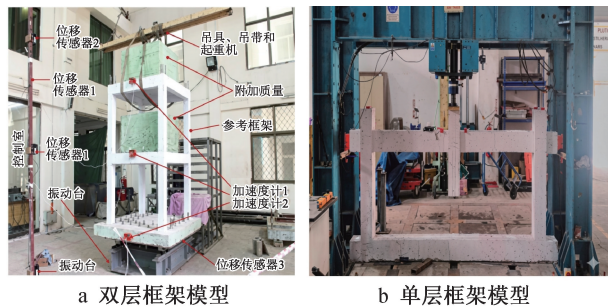


图 9 橡胶混凝土框架试验

Fig. 9 Rubber concrete frame test

将橡胶颗粒替代部分天然骨料掺入混凝土,实现了资源循环利用、减少生态破坏。虽然橡胶的掺入能提高混凝土的韧性降低混凝土弹性模量,但其对混凝土抗压强度、耐久性、耐高温性能等所产生的负面影响是不可忽视的,这成了制约橡胶混凝土推广和发展的重要障碍。橡胶混凝土在组合结构中的使用具有扬长避短的作用,其具备将 2 种或多种不同性质的材料组合在一起共同发挥材料优势的能力。尤其在钢-混凝土组合体系中,橡胶混凝土可弥补传统混凝土的脆性缺陷,与钢材协同增强结构延性和耗能能力,同时降低自重以实现轻量化设计。研究人员对常见的组合梁、组合柱、组合楼板等^[30-32]开展了大量研究,如图 10 所示。

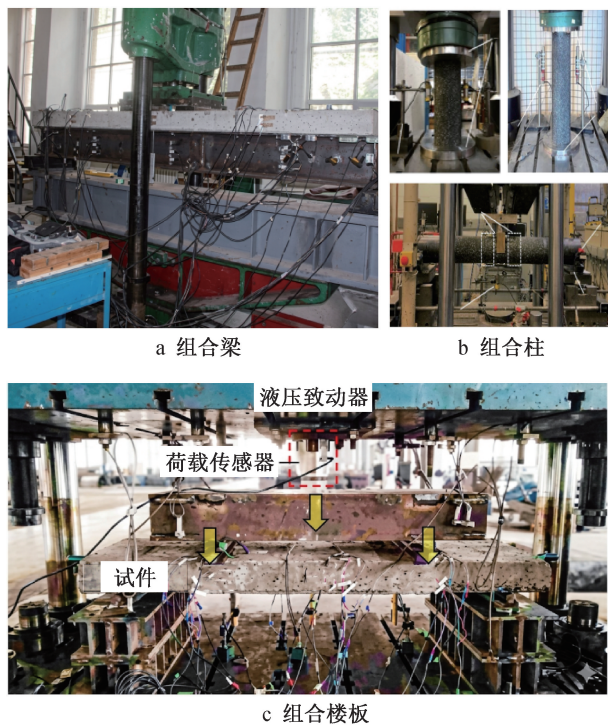


图 10 常见的组合结构类型

Fig. 10 Common composite structure types

3.2 研究现状

Elchalakani 等^[33]研究了橡胶混凝土双层方钢管柱的轴压力学性能,橡胶掺量变化为 0~30%,研究发现普通混凝土双层方钢管柱的承载力计算公式适用于橡胶混凝土钢管柱,钢管柱中橡胶混凝土从上部露出,如图 11 所示。

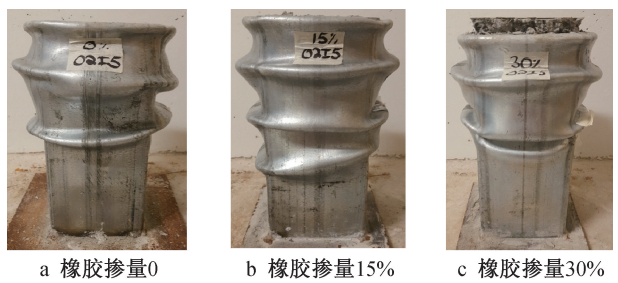


图 11 橡胶混凝土组合柱受压破坏模式

Fig. 11 Compression failure mode of rubber concrete composite column

刘保东等^[34]根据实际工程需要对波纹钢管-橡胶混凝土组合桥墩、波纹钢-橡胶混凝土组合板^[35]等组合构件开展了试验研究,总结了橡胶混凝土组合构件在实际工程应用背景下的工程特性,分析了装配式橡胶混凝土组合桥墩的地震反映、波纹钢-橡胶混凝土组合板中橡胶混凝土对楼板界面剪切滑移特性。此外多位学者将橡胶混凝土应用于钢管柱中,得到了橡胶对钢管橡胶混凝土柱的承载力^[36-37]、阻尼比^[38]、抗震性能^[39]等的影响规律。

3.3 应用展望

国内外大量学者的理论研究及工程应用研究表明,钢-橡胶混凝土组合结构是橡胶混凝土在结构应用中的一种重要形式。橡胶混凝土与钢结构在荷载作用下协同工作既有利于弥补橡胶混凝土强度降低的缺点,也有利于发挥橡胶混凝土韧性较强的优势,钢-橡胶混凝土组合结构在抗震和能量耗散上的优势使其不仅可应用于房屋建筑工程,也能应用于道路桥梁工程,具有较大的应用潜力。随着有关橡胶混凝土结构的研究逐渐深入,研究人员也发现橡胶混凝土具有高温后性能下降的劣势^[40-42],未来研究可考虑组合结构对橡胶混凝土高温后性能的改善作用,从而促进橡胶混凝土组合结构构件的推广和应用。

3.4 社会效益

橡胶混凝土在组合结构中的社会效益体现在环保、经济与工程实践的多维协同。环保方面,其大量消耗废旧轮胎,显著缓解黑色污染问题,减少填埋焚烧产生的有毒气体与土壤污染,契合无

废城市建设目标。同时替代天然砂石骨料可降低资源开采对生态的破坏,助力碳减排。经济方面,尽管初期材料改性成本较高,但轻质化特性可减少运输与施工能耗,延长结构使用寿命,尤其在抗震区生命周期成本优势显著;此外,还可推动建筑垃圾与工业固废协同利用的产业链,催生废旧轮胎回收、橡胶改性剂生产等新业态,创造绿色就业机会。社会效益上,其高韧性特征可提升基础设施抗灾能力,减少地震、爆炸等极端事件的人员伤亡与财产损失,而应用于轨道交通与建筑隔声层可改善人居环境质量,为可持续城市发展提供创新路径。

4 结语

1) 橡胶混凝土技术的推广能在极大程度上缓解由汽车工业发展带来的废旧轮胎难以处置的环境问题,既能处理废旧轮胎也能降低建筑行业对天然砂石料的过度依赖,减少能源消耗。

2) 国内外研究人员对橡胶混凝土的研究结果表明,橡胶混凝土相较于普通混凝土而言,在物理性能、力学性能等方面存在部分差异,但这部分差异既有对混凝土强度不利的一方面,也有改善混凝土性能的一方面,通过合理调整配合比,可使橡胶混凝土具备普通混凝土所不具备的性能优势。

3) 橡胶混凝土在梁、柱、梁-柱节点、框架等结构构件中表现出阻尼系数大、能量耗散性能优、自振周期大等优势,这对于钢筋混凝土结构抗震性能的提高具有重要研究意义。

4) 钢-橡胶混凝土组合结构能充分发挥两种材料的性能优势,两者的结合具有重要的工程应用价值,将两者性能优势最大化的结合及推广是未来高性能、高抗震结构构件设计的重要方向之一。

参考文献:

[1] MALARVIZHI G, SENTHIL N, KAMARAJ C. A study on recycling of crumb rubber and low density polyethylene blend on stone matrix asphalt [J]. Journal of scientific and research publications, 2012, 2(10): 1-16.

[2] THOMAS B S, GUPTA R C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 54: 1323-1333.

[3] KOBETIČOVÁ K, FORT J, ČERNÝ R. Toxic and biodegradation potential of waste tires for microorganisms based on two experimental designs [J]. Applied sciences, 2023, 13(8): 4871.

[4] 李汉军, 苏浩然, 于昊男, 等. 橡胶混凝土耐久性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(1): 180-194.

LI H J, SU H R, YU H N, et al. Research progress on durability of rubber concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2025, 44(1): 180-194.

[5] 徐国平. 聚丙烯纤维橡胶混凝土力学特性及其冻融性能试验研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.

XU G P. Experimental study on mechanical properties and freeze-thaw properties of polypropylene fiber rubber concrete [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2024.

[6] 李高举. 橡胶混凝土框架节点抗震性能试验与理论研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.

LI G J. Experimental and analytical study on seismic behavior of rubber concrete frame joints [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.

[7] 陶雨梅. 人工拌合橡胶混凝土在框架梁中的应用 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.

TAO L M. Application of artificial mixing rubber concrete in frame beam [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.

[8] 卢珊. 橡胶混凝土砖填充墙—框架结构体系的抗震性能分析 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.

LU S. Analysis on seismic performance of concrete rubber brick filler wall and frame-structure system [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.

[9] 范璐璐. 废旧轮胎橡胶颗粒水泥混凝土路用性能的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

FAN L L. The pavement performance study on the recycled tire rubber-filled cement concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[10] 申阳瑾. 路用橡胶混凝土研究现状及发展前景 [J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(3): 32-36.

SHEN Y J. State-of-the-arts of research on rubberized concrete and its development prospect for pavements [J]. Guangdong architecture civil engineering, 2019, 26(3): 32-36.

[11] 董建伟, 袁琳, 朱涵. 橡胶集料混凝土的试验研究及工程应用 [J]. 混凝土, 2006(7): 69-71, 78.

DONG J W, YUAN L, ZHU H. Experiment analysis and application of crumb rubber concrete [J]. Concrete, 2006(7): 69-71, 78.

[12] YANG S, QI B, AI Z B, et al. Mechanical properties and microcosmic properties of self-compacting concrete modified by compound admixtures [J]. Journal of renewable materials, 2022, 10(4): 897-908.

[13] ROYCHAND R, GRAVINA R J, ZHUGE Y, et al. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete [J]. Construction and building materials, 2020, 237: 117651.

[14] KHAN I, SHAHZADA K, BIBI T, et al. Seismic performance evaluation of crumb rubber concrete frame structure using shake table test [J]. Structures, 2021, 30: 41-49.

[15] WANG J Q, DU B. Experimental studies of thermal and acoustic properties of recycled aggregate crumb rubber concrete [J]. Journal of building engineering, 2020, 32: 101836.

[16] LIU F, ZHENG W H, LI L J, et al. Mechanical and fatigue performance of rubber concrete [J]. Construction and building materials, 2013, 47: 711-719.

[17] ASLANI F. Mechanical properties of waste tire rubber concrete [J]. Journal of materials in civil engineering, 2016, 28(3): 04015152.

[18] BISHT K, RAMANA P V. Evaluation of mechanical and

- durability properties of crumb rubber concrete[J]. Construction and building materials, 2017, 155: 811-817.
- [19] NAJIM K B, HALL M R. Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete[J]. Construction and building materials, 2012, 27(1): 521-530.
- [20] REDA TAHA M M, EL-DIEB A S, ABD EL-WAHAB M A, et al. Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete[J]. Journal of materials in civil engineering, 2008, 20(10): 640-649.
- [21] GESOGLU M, GÜNEYISI E, HANSU O, et al. Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties of concrete[J]. Construction and building materials, 2015, 101: 1113-1121.
- [22] RAFFOUL S, GARCIA R, PILAKOUTAS K, et al. Optimisation of rubberised concrete with high rubber content; an experimental investigation[J]. Construction and building materials, 2016, 124: 391-404.
- [23] MENDIS A S M, AL-DEEN S, ASHRAF M. Effect of rubber particles on the flexural behaviour of reinforced crumbed rubber concrete beams[J]. Construction and building materials, 2017, 154: 644-657.
- [24] HASSANLI R, YOUSSEF O, MILLS J E. Experimental investigations of reinforced rubberized concrete structural members[J]. Journal of building engineering, 2017, 10: 149-165.
- [25] YOUSSEF O, ELGAWADY M A, MILLS J E. Experimental investigation of crumb rubber concrete columns under seismic loading[J]. Structures, 2015, 3: 13-27.
- [26] XUE J, SHINOZUKA M. Rubberized concrete: a green structural material with enhanced energy-dissipation capability [J]. Construction and building materials, 2013, 42: 196-204.
- [27] ABDELALEEM B H, HASSAN A A. Influence of rubber content on enhancing the structural behaviour of beam-column joints [J]. Magazine of concrete research, 2018, 70 (19): 984-996.
- [28] KHAN I, SHAHZADA K, BIBI T, et al. Seismic performance evaluation of crumb rubber concrete frame structure using shake table test[J]. Structures, 2021, 30: 41-49.
- [29] ALSHAikh I M H, ABU BAKAR B H, ALWESABI E A H, et al. Progressive collapse behavior of steel fiber-reinforced rubberized concrete frames[J]. Journal of building engineering, 2022, 57: 104920.
- [30] YAN J B, LI Z X, XIE J. Numerical and parametric studies on steel-elastic concrete composite structures [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 133: 84-96.
- [31] MUJDECI A, GUO Y T, BOMPA D V, et al. Axial and bending behaviour of steel tubes infilled with rubberised concrete [J]. Thin-walled structures, 2022, 181: 110125.
- [32] LI F, LIU B D, SUN H B, et al. A novel corrugated steel plate-rubberized concrete composite slab: properties and application opportunities[J]. Structures, 2022, 43: 1492-1502.
- [33] ELCHALAKANI M, HASSANEIN M F, KARRECH A, et al. Experimental investigation of rubberised concrete-filled double skin square tubular columns under axial compression [J]. Engineering structures, 2018, 171: 730-746.
- [34] 刘保东, 刘宇, 冯明扬, 等. 装配式波纹钢管-橡胶混凝土组合桥墩抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(3): 143-149, 158.
- LIU B D, LIU Y, FENG M Y, et al. Seismic performance of rubber concrete-filled corrugated steel tubes composite bridge piers[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2023, 45(3): 143-149, 158.
- [35] 高猛, 潘睿雅, 冯明扬, 等. 波纹钢-橡胶混凝土组合板界面抗剪行为试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(6): 72-76.
- GAO M, PAN R Y, FENG M Y, et al. Experimental study on interfacial shear behavior of corrugated steel-rubberized concrete composite slab[J]. Railway engineering, 2022, 62(6): 72-76.
- [36] 刘振杰, 徐培葵, 韩琳, 等. 圆钢管橡胶混凝土短柱承载力分析[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(2): 1-9.
- LIU Z J, XU P Z, HAN L, et al. Bearing capacity analysis of rubber concrete filled steel tubular short columns[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(2): 1-9.
- [37] 吴瑕. 圆钢管橡胶混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- WU X. Experimental investigation on axial compression behavior of rubber concrete filled circular steel tubular short column[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012.
- [38] 张娜. 钢管橡胶混凝土柱的阻尼比及其抗震性能有限元分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- ZHANG N. Finite element analysis on the damping ratio and seismic performance of rubber concrete filled steel tubular columns[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013.
- [39] 邢焕森. 低周反复水平荷载作用下圆钢管橡胶混凝土柱的抗震性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- XING H S. The study on seismic behavior of rubber concrete filled circular steel tubular column under low-cycle repeatedly horizontal load [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013.
- [40] 姚新红, 成聪慧, 杜红秀. 高温后橡胶混凝土抗压强度变化及孔结构分析[J]. 混凝土, 2015(12): 28-29, 33.
- YAO X H, CHENG C H, DU H X. Compressive strength variation and pore structure analysis of rubber concrete after high temperature[J]. Concrete, 2015(12): 28-29, 33.
- [41] ABDULLAH W, ABDULKADIR M, MUHAMMAD M. Effect of high temperature on mechanical properties of rubberized concrete using recycled tire rubber as fine aggregate replacement [J]. Engineering and technology journal, 2018, 36(8A): 906-913.
- [42] SABERIAN M, SHI L, SIDIQ A, et al. Recycled concrete aggregate mixed with crumb rubber under elevated temperature [J]. Construction and building materials, 2019, 222: 119-129.