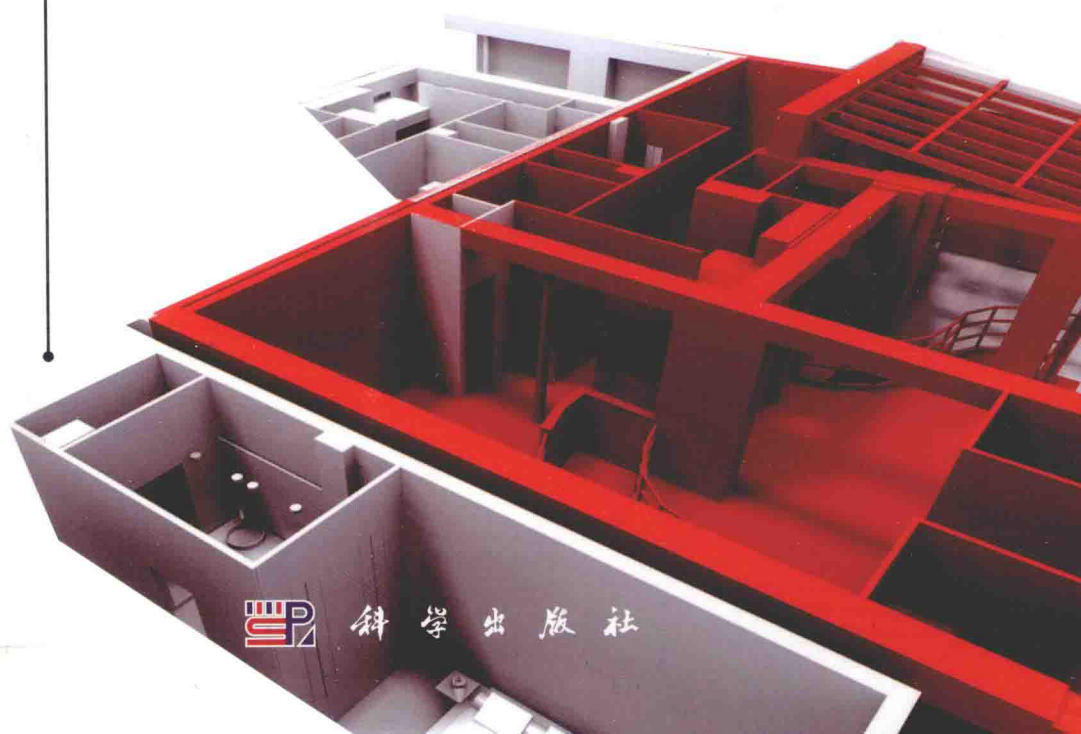


# 型钢再生混凝土组合结构 基本受力性能与抗震设计方法

薛建阳 马辉 任瑞 陈宗平 著



科学出版社

# 型钢再生混凝土组合结构 基本受力性能与抗震设计方法

薛建阳 马 辉 任 瑞 陈宗平 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统研究和阐述型钢再生混凝土组合结构的基本受力性能与抗震设计方法。全书共 12 章:第 1 章阐述再生混凝土及其结构、型钢混凝土结构的研究背景及相关研究现状,提出本书主要研究内容及重点;第 2 章阐述型钢再生混凝土推出试验及其黏结滑移性能;第 3 章阐述型钢再生混凝土梁正截面受弯及斜截面受剪性能;第 4 章介绍型钢再生混凝土柱轴心受压及偏心受压力学性能;第 5~6 章阐述型钢再生混凝土柱抗震性能及其承载力计算方法;第 7~8 章阐述型钢再生混凝土梁柱节点拟静力试验、有限元分析及其抗剪承载力计算方法;第 9~11 章阐述型钢再生混凝土框架结构拟动力试验、拟静力试验及其滞回性能有限元分析;第 12 章介绍型钢再生混凝土框架结构基于位移的抗震设计方法。

本书可供从事土木工程领域研究的科技人员及高等院校相关专业的研究生和高年级本科生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

型钢再生混凝土组合结构基本受力性能与抗震设计方法/薛建阳等著. — 北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-045703-5

I. ①型… II. ①薛… III. ①型钢混凝土—再生混凝土—组合结构②型钢混凝土—再生混凝土—组合结构—防震设计 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 220616 号

责任编辑:童安齐 王杰琼 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1 000)

2015 年 9 月第一次印刷 印张: 22

字数: 425 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62130750

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

进入 21 世纪,我国基础设施建设规模之大、速度之快前所未有,由此带来的巨大能源和资源消耗也逐渐成为制约我国经济社会发展的重要问题。混凝土结构作为土木工程的主要结构类型在基础设施与城镇化建设中有着广泛的应用。而大量混凝土和钢材的使用造成大量天然不可再生资源过度的开采和使用,并对河床、植被造成严重破坏。与此同时,地震、火灾、爆炸、海啸、洪水、台风等灾害造成许多混凝土结构倒塌破坏,产生大量的建筑废弃物,且对自然环境造成严重污染。因此,如何合理、有效地利用这些建筑废弃物,以实现建设资源节约型和环境友好型社会及国民经济的可持续发展,已成为世界各国必须面对和解决的问题之一。我国住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会等部委已出台了各种政策,以加快废弃混凝土的再生利用及绿色建筑发展的步伐。在这种形势下,开发既具有良好抗震性能,又环保生态的新型结构体系就有着非常重要的理论意义和工程实用价值。

再生混凝土是将废弃混凝土块经破碎、清洗、分级并按一定比例与级配混合,部分或全部代替天然骨料制成的混凝土,它具有节省天然骨料和解决废弃混凝土的优点。而由钢结构和混凝土结构复合而成的“组合结构”由于兼有两种结构共同的优点,得到了越来越广泛的应用。型钢混凝土结构是钢与混凝土组合结构的一种重要形式,具有良好的承载能力和延性变形性能,较单独采用钢结构有更大的刚度,更好的局部和整体稳定性,更好的防腐蚀和防火性能,可节约钢材。基于此,作者及其课题组结合型钢混凝土结构和再生混凝土的各自特点,将再生混凝土应用于型钢混凝土结构中,从而提出“型钢再生混凝土组合结构”的概念。型钢再生混凝土组合结构是指在截面中主要配置型钢,并配有一定的纵向钢筋和箍筋,再浇注再生混凝土而形成的一种新型组合结构。它融合了普通型钢混凝土结构承载能力高、抗震性能好的优点和再生混凝土节能环保的显著特点,不但可以提高建筑结构的抗震防灾能力,还符合国家绿色环保和可持续发展的战略,因此具有广阔的发展应用前景。

为使型钢再生混凝土组合结构得以早日推广应用,有必要对这种新型结构展开研究,揭示型钢与再生混凝土之间的黏结滑移机理及其破坏机制,掌握型钢再生混凝土梁、柱构件及框架节点的破坏形态、承载能力、延性变形及抗震性能等力学行为,建立型钢再生混凝土框架结构抗震设计计算方法等。这些都是型钢再生混凝土结构研究和应用中所必须解决的关键问题。因此,对型钢再生混凝土组合结构的研究势在必行,通过研究为这一新型组合结构的设计和应用提供理论依据和技术支持。

本书作者及其课题组自 2007 年开始陆续对型钢再生混凝土结构的基本力学性能及设计方法进行了试验及理论研究。首先对再生混凝土材料的基本力学性能及型钢再生混凝土黏结滑移性能进行了研究,获得了再生混凝土的配合比及基本力学性能指标,以及型钢再生混凝土黏结强度、黏结滑移本构关系模型等。2010 年对型钢再生混凝土梁的正截面受弯及斜截面受剪性能进行了试验及理论分析,揭示了型钢再生混凝土梁抗弯及抗剪机理,推导了梁正截面抗弯及斜截面抗剪承载力计算公式。2011 年对型钢再生混凝土柱的轴心受压和偏心受压性能进行了试验及理论分析,给出了型钢再生混凝土柱受压承载力计算公式及设计方法。2012 年对型钢再生混凝土柱抗震性能及承载力计算方法进行了研究,通过低周反复荷载试验,研究了型钢再生混凝土柱抗震性能,并提出了其在水平荷载作用下的承载力计算公式。在此基础上,于 2013 年对型钢再生混凝土梁柱节点抗震性能及抗剪承载力进行了研究,并对型钢再生混凝土框架结构进行了拟静力、拟动力试验及有限元分析;获取了型钢再生混凝土梁柱节点及其结构的抗震性能指标,并结合地震设防水准,给出了型钢再生混凝土框架的抗震性能最高目标、重要目标和基本目标,结合试验研究结果提出了型钢再生混凝土框架对应四个性能水平的层间位移角限值,最终给出了型钢再生混凝土框架基于位移的抗震设计方法。本书的研究工作将为型钢再生混凝土结构的推广应用提供一定的技术参考,这也是我们编著这本书的宗旨和出发点。

本书由薛建阳、马辉、任瑞、陈宗平执笔撰写。作者的历届博士和硕士研究生,包括王秀振、崔卫光、刘锦禄、王成、王运成、张杰、敖翔、孟刚、鲍雨泽、王刚、崔蔓蔓、林建鹏,以及郑华海、王妮、覃文月、张向冈等在试验研究及理论分析中做了大量工作。本书的研究工作得到国家自然科学基金(项目编号:51178384、51408485)、住房和城乡建设部科学技术项目(项目编号:2012-K2-12)、陕西省留学人员科技活动择优资助项目(陕外专发[2010]26 号)、广西自然科学基金重点项目(项目编号:2013GXNSFDA019025)、陕西省教育厅科研计划项目(项目编号:12JK0902)、教育部创新团队发展计划项目(项目编号:IRT13089)、陕西省重点科技创新团队项目(项目编号:2014KCT-31)和西安建筑科技大学创新团队发展计划项目的资助和大力支持,在此表示衷心的感谢。

限于作者水平和时间紧迫,书中难免存在不妥之处,同时书中部分内容具有一定的探索研究性质,敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                 | 1  |
| 1.1 研究背景及意义              | 1  |
| 1.2 国内外相关研究现状            | 2  |
| 1.2.1 再生混凝土研究应用现状及基本力学性能 | 2  |
| 1.2.2 型钢混凝土结构研究应用现状      | 8  |
| 1.3 本书的主要工作              | 10 |
| 1.3.1 型钢再生混凝土黏结滑移性能研究    | 11 |
| 1.3.2 型钢再生混凝土梁、柱构件静力性能研究 | 11 |
| 1.3.3 型钢再生混凝土柱抗震性能研究     | 11 |
| 1.3.4 型钢再生混凝土梁柱节点抗震性能研究  | 11 |
| 1.3.5 型钢再生混凝土框架抗震性能研究    | 12 |
| 1.3.6 型钢再生混凝土框架结构性能化设计   | 12 |
| 1.4 本章小结                 | 12 |
| 第 2 章 型钢再生混凝土黏结滑移性能研究    | 13 |
| 2.1 型钢再生混凝土黏结滑移试验方案      | 13 |
| 2.1.1 试验原理               | 13 |
| 2.1.2 试验测量方案             | 13 |
| 2.1.3 试件设计与制作            | 14 |
| 2.1.4 材料力学性能指标           | 17 |
| 2.1.5 试验加载装置及加载制度        | 19 |
| 2.2 型钢再生混凝土黏结滑移试验结果      | 20 |
| 2.2.1 试验过程描述             | 20 |
| 2.2.2 试件裂缝图              | 22 |
| 2.2.3 荷载-滑移曲线            | 23 |
| 2.2.4 试件 $P-S$ 曲线描述      | 26 |
| 2.2.5 荷载上升段应变分布实测结果      | 29 |
| 2.3 型钢再生混凝土黏结强度研究        | 31 |
| 2.3.1 试件 $\tau-S$ 曲线类型   | 31 |

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 2.3.2 | 无抗剪件试件的黏结强度研究        | 32 |
| 2.3.3 | 带抗剪栓钉试件的黏结强度研究       | 42 |
| 2.3.4 | 黏结应力沿埋置长度的分布规律研究     | 45 |
| 2.4   | 型钢再生混凝土黏结滑移机理分析      | 50 |
| 2.4.1 | 型钢再生混凝土黏结力组成分析       | 50 |
| 2.4.2 | 型钢再生混凝土黏结滑移破坏机理      | 51 |
| 2.4.3 | 型钢再生混凝土各部分黏结应力比重分析   | 57 |
| 2.5   | 本章小结                 | 58 |
| 第3章   | 型钢再生混凝土梁受力性能及承载力分析   | 60 |
| 3.1   | 型钢再生混凝土梁抗弯性能试验研究     | 60 |
| 3.1.1 | 试验目的                 | 60 |
| 3.1.2 | 试件制作                 | 60 |
| 3.1.3 | 加载制度及测量方案            | 62 |
| 3.2   | 型钢再生混凝土梁受弯试验过程及结果分析  | 65 |
| 3.2.1 | 试验过程描述               | 65 |
| 3.2.2 | 破坏形态和特征              | 66 |
| 3.2.3 | 试验结果分析               | 68 |
| 3.2.4 | 裂缝开展与分布分析            | 72 |
| 3.2.5 | 影响抗弯强度的因素            | 73 |
| 3.3   | 型钢再生混凝土梁正截面受弯承载力分析   | 74 |
| 3.3.1 | 型钢混凝土梁正截面受弯承载力计算理论概述 | 74 |
| 3.3.2 | 我国现行标准的计算方法          | 75 |
| 3.3.3 | 型钢再生混凝土梁受弯承载力计算分析    | 76 |
| 3.4   | 型钢再生混凝土梁抗剪性能试验研究     | 78 |
| 3.4.1 | 试验目的                 | 78 |
| 3.4.2 | 试件设计与制作              | 79 |
| 3.5   | 型钢再生混凝土梁抗剪试验现象及结果分析  | 82 |
| 3.5.1 | 试验现象                 | 82 |
| 3.5.2 | 破坏形态与特征              | 83 |
| 3.5.3 | 试件变形特征               | 86 |
| 3.5.4 | 剪切破坏分类               | 88 |
| 3.5.5 | 抗剪强度的影响因素            | 89 |
| 3.6   | 型钢再生混凝土梁斜截面受剪承载力分析   | 90 |
| 3.6.1 | 型钢混凝土梁受剪承载力计算方法      | 90 |
| 3.6.2 | 普通型钢混凝土梁受剪承载力理论分析    | 91 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 3.6.3 | 现有型钢混凝土梁受剪承载力计算公式比较 .....  | 93  |
| 3.6.4 | 型钢再生混凝土梁受剪承载力的实用计算公式 ..... | 96  |
| 3.7   | 型钢再生混凝土梁裂缝宽度分析 .....       | 97  |
| 3.7.1 | 裂缝的发展过程 .....              | 97  |
| 3.7.2 | 型钢再生混凝土梁的裂缝特征 .....        | 99  |
| 3.7.3 | 型钢再生混凝土梁弯曲裂缝宽度分析 .....     | 100 |
| 3.7.4 | 型钢再生混凝土梁斜裂缝宽度计算 .....      | 102 |
| 3.8   | 本章小结 .....                 | 103 |
| 第 4 章 | 型钢再生混凝土柱受压性能研究 .....       | 105 |
| 4.1   | 型钢再生混凝土柱受压性能试验概述 .....     | 105 |
| 4.1.1 | 试验目的 .....                 | 105 |
| 4.1.2 | 试件设计及制作 .....              | 105 |
| 4.1.3 | 试验材料特性 .....               | 107 |
| 4.1.4 | 测试方法及加载 .....              | 109 |
| 4.2   | 试验结果及分析 .....              | 113 |
| 4.2.1 | 试验结果 .....                 | 113 |
| 4.2.2 | 试件破坏形态 .....               | 113 |
| 4.2.3 | 试验结果分析 .....               | 117 |
| 4.3   | 型钢再生混凝土柱偏心受压正截面承载力分析 ..... | 126 |
| 4.3.1 | 概述 .....                   | 126 |
| 4.3.2 | 正截面承载力计算的基本假定 .....        | 126 |
| 4.3.3 | 承载力公式建立原则 .....            | 128 |
| 4.3.4 | 破坏形式及特征 .....              | 128 |
| 4.3.5 | 型钢再生混凝土偏心受压柱正截面承载力计算 ..... | 129 |
| 4.4   | 型钢再生混凝土轴心受压柱正截面承载力分析 ..... | 142 |
| 4.4.1 | 基本假定 .....                 | 142 |
| 4.4.2 | 承载力计算 .....                | 143 |
| 4.4.3 | 计算值与试验值的比较 .....           | 143 |
| 4.5   | 本章小结 .....                 | 144 |
| 第 5 章 | 型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究 .....     | 145 |
| 5.1   | 试验目的及内容 .....              | 145 |
| 5.2   | 试件的设计及制作 .....             | 145 |
| 5.2.1 | 试验参数设计 .....               | 145 |
| 5.2.2 | 型钢和钢筋的选择 .....             | 146 |

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 5.2.3 | 试件数量的确定            | 147 |
| 5.2.4 | 型钢及钢筋骨架的制作         | 149 |
| 5.2.5 | 再生混凝土的制备           | 150 |
| 5.3   | 试验测试方案与测点布置        | 153 |
| 5.3.1 | 试验测试内容             | 153 |
| 5.3.2 | 测点布置及量测方法          | 153 |
| 5.3.3 | 试验数据采集与现场记录        | 154 |
| 5.4   | 试验加载装置及方案          | 155 |
| 5.4.1 | 试验加载装置             | 155 |
| 5.4.2 | 试验加载方案             | 156 |
| 5.5   | 试件裂缝分布规律与破坏形态      | 157 |
| 5.5.1 | 试件裂缝分布规律           | 157 |
| 5.5.2 | 试件破坏过程描述           | 159 |
| 5.5.3 | 试件的破坏形态及特征         | 163 |
| 5.6   | 型钢再生混凝土柱抗震性能试验结果分析 | 164 |
| 5.6.1 | 滞回曲线               | 165 |
| 5.6.2 | 滞回曲线影响参数分析         | 167 |
| 5.6.3 | 骨架曲线               | 169 |
| 5.6.4 | 刚度退化               | 174 |
| 5.6.5 | 延性                 | 177 |
| 5.6.6 | 侧移角                | 181 |
| 5.6.7 | 强度衰减               | 183 |
| 5.6.8 | 耗能能力               | 186 |
| 5.7   | 本章小结               | 189 |
| 第 6 章 | 型钢再生混凝土柱水平承载力计算方法  | 191 |
| 6.1   | 引言                 | 191 |
| 6.2   | 型钢再生混凝土柱水平承载力试验研究  | 191 |
| 6.2.1 | 试验概况               | 191 |
| 6.2.2 | 试件破坏形态             | 192 |
| 6.2.3 | 影响水平承载力的主要因素       | 192 |
| 6.3   | 型钢再生混凝土柱的受力机理分析    | 196 |
| 6.3.1 | 剪切斜压破坏的抗剪机理        | 196 |
| 6.3.2 | 弯剪破坏的受力机理          | 197 |
| 6.3.3 | 弯曲破坏的受力机理          | 198 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 6.4   | 型钢再生混凝土柱水平承载力计算方法研究         | 200 |
| 6.4.1 | 剪切斜压破坏的受剪承载力计算              | 200 |
| 6.4.2 | 弯曲破坏的水平承载力计算                | 209 |
| 6.5   | 型钢再生混凝土柱水平承载力实用计算方法         | 213 |
| 6.6   | 本章小结                        | 215 |
| 第 7 章 | 型钢再生混凝土梁柱节点抗震性能试验研究         | 216 |
| 7.1   | 试件设计及制作                     | 216 |
| 7.1.1 | 试件设计                        | 216 |
| 7.1.2 | 试件制作                        | 217 |
| 7.1.3 | 材料性能                        | 219 |
| 7.2   | 试验测试                        | 220 |
| 7.2.1 | 试验测试内容及采集方法                 | 220 |
| 7.2.2 | 测点布置                        | 220 |
| 7.3   | 试验加载                        | 222 |
| 7.3.1 | 加载装置                        | 222 |
| 7.3.2 | 加载制度                        | 222 |
| 7.4   | 试验过程及现象                     | 223 |
| 7.4.1 | 试件 JD-1                     | 223 |
| 7.4.2 | 试件 JD-2                     | 224 |
| 7.4.3 | 试件 JD-3                     | 225 |
| 7.4.4 | 试件 JD-4                     | 225 |
| 7.5   | 试验结果及分析                     | 226 |
| 7.5.1 | 滞回曲线                        | 226 |
| 7.5.2 | 骨架曲线                        | 228 |
| 7.5.3 | 层间位移角及延性                    | 229 |
| 7.5.4 | 能量耗散能力                      | 230 |
| 7.5.5 | 刚度退化                        | 231 |
| 7.5.6 | 强度退化                        | 231 |
| 7.5.7 | 应变分析                        | 232 |
| 7.6   | 本章小结                        | 234 |
| 第 8 章 | 型钢再生混凝土梁柱节点非线性有限元分析及受剪承载力计算 | 235 |
| 8.1   | 引言                          | 235 |
| 8.2   | 材料本构关系模型                    | 235 |
| 8.2.1 | 再生混凝土本构关系模型                 | 236 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 8.2.2 型钢及钢筋本构关系模型 .....             | 238        |
| 8.3 型钢再生混凝土梁柱节点有限元模型建立 .....        | 238        |
| 8.3.1 单元类型选取 .....                  | 238        |
| 8.3.2 网格划分 .....                    | 239        |
| 8.3.3 定义相互作用 .....                  | 239        |
| 8.3.4 加载方式及边界条件 .....               | 240        |
| 8.3.5 非线性方程求解 .....                 | 241        |
| 8.4 有限元分析结果和试验结果对比分析 .....          | 241        |
| 8.4.1 节点变形图 .....                   | 241        |
| 8.4.2 节点应力云图 .....                  | 242        |
| 8.4.3 节点荷载-位移骨架曲线 .....             | 244        |
| 8.5 参数影响分析 .....                    | 246        |
| 8.5.1 轴压比 .....                     | 246        |
| 8.5.2 再生混凝土强度 .....                 | 247        |
| 8.5.3 型钢屈服强度 .....                  | 249        |
| 8.5.4 型钢腹板厚度 .....                  | 250        |
| 8.6 型钢再生混凝土梁柱节点受剪承载力计算 .....        | 251        |
| 8.6.1 节点受力分析及节点核心区水平剪力计算 .....      | 251        |
| 8.6.2 节点核心区受剪承载力计算 .....            | 256        |
| 8.7 本章小结 .....                      | 260        |
| <b>第9章 型钢再生混凝土框架结构拟动力试验研究 .....</b> | <b>262</b> |
| 9.1 引言 .....                        | 262        |
| 9.2 模型设计与制作 .....                   | 262        |
| 9.2.1 模型选择 .....                    | 262        |
| 9.2.2 试件设计 .....                    | 262        |
| 9.2.3 试件制作 .....                    | 263        |
| 9.3 试验方法和测试内容 .....                 | 264        |
| 9.3.1 试验方法原理 .....                  | 264        |
| 9.3.2 试验测试内容 .....                  | 265        |
| 9.4 加载方案 .....                      | 266        |
| 9.4.1 加载装置 .....                    | 266        |
| 9.4.2 加载制度 .....                    | 267        |
| 9.5 试验结果及分析 .....                   | 269        |
| 9.5.1 试验过程及现象描述 .....               | 269        |
| 9.5.2 位移及恢复力时程曲线 .....              | 272        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 9.5.3 峰值加速度-位移曲线、峰值加速度-恢复力曲线        | 278 |
| 9.5.4 层间变形                          | 280 |
| 9.6 本章小结                            | 284 |
| 第 10 章 型钢再生混凝土框架结构拟静力试验研究           | 285 |
| 10.1 引言                             | 285 |
| 10.2 试验概况                           | 285 |
| 10.3 试验结果与分析                        | 286 |
| 10.3.1 试件破坏过程                       | 286 |
| 10.3.2 破坏机制                         | 288 |
| 10.3.3 滞回曲线                         | 289 |
| 10.3.4 骨架曲线                         | 290 |
| 10.3.5 承载力、位移延性及刚度退化                | 291 |
| 10.3.6 耗能能力                         | 292 |
| 10.4 本章小结                           | 292 |
| 第 11 章 型钢再生混凝土框架结构滞回性能分析            | 294 |
| 11.1 引言                             | 294 |
| 11.2 有限元软件 OpenSees 概述              | 296 |
| 11.3 有限元模型建立                        | 296 |
| 11.3.1 单元类型选择与截面划分                  | 296 |
| 11.3.2 再生混凝土本构关系模型                  | 298 |
| 11.3.3 钢筋和型钢本构关系模型                  | 300 |
| 11.3.4 加载方式及分析求解                    | 301 |
| 11.4 计算结果与试验结果对比分析                  | 301 |
| 11.4.1 荷载-位移滞回曲线对比分析                | 301 |
| 11.4.2 荷载-位移骨架曲线对比分析                | 302 |
| 11.5 柱端及梁端弯矩-曲率计算滞回曲线               | 303 |
| 11.5.1 柱端弯矩-曲率计算滞回曲线                | 303 |
| 11.5.2 梁端弯矩-曲率计算滞回曲线                | 305 |
| 11.6 $P-\Delta$ 效应对型钢再生混凝土框架滞回性能的影响 | 306 |
| 11.7 型钢再生混凝土框架滞回性能参数影响分析            | 307 |
| 11.7.1 轴压比影响                        | 308 |
| 11.7.2 再生混凝土强度影响                    | 309 |
| 11.7.3 型钢强度影响                       | 310 |
| 11.8 本章小结                           | 311 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第 12 章 型钢再生混凝土框架基于位移的抗震设计 ..... | 312 |
| 12.1 引言 .....                   | 312 |
| 12.2 型钢再生混凝土框架的性能水平及其量化 .....   | 312 |
| 12.2.1 性能水平和性能目标 .....          | 312 |
| 12.2.2 性能指标的量化 .....            | 314 |
| 12.3 型钢再生混凝土框架目标侧移的确定 .....     | 315 |
| 12.4 多自由度体系的等效转化 .....          | 316 |
| 12.5 位移反应谱 .....                | 319 |
| 12.6 基于位移的抗震设计步骤 .....          | 320 |
| 12.7 算例及其分析 .....               | 321 |
| 12.7.1 按“暂时使用”性能水平设计 .....      | 322 |
| 12.7.2 按“正常使用”性能水平校核 .....      | 327 |
| 12.7.3 按“接近倒塌”性能水平校核 .....      | 328 |
| 12.8 本章小结 .....                 | 330 |
| 主要参考文献 .....                    | 331 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

人类社会进入近代以来,建造技术与建筑材料得到了迅猛的发展,特别是英国人 J.Aspsdin 于 1824 年发明了波特兰水泥后,生产混凝土的胶凝材料得到了巨大的进步,以混凝土材料为主的建筑结构迅速增加,混凝土的需求量急剧增长且使用范围不断扩大,从最开始的普通混凝土发展到如今的高强混凝土、高强高性能混凝土以及绿色混凝土等,已成为目前使用最多的人造建筑材料,且在各个建造领域中起着十分关键的作用,成为人类社会现代文明的重要物质基础。然而,随着人类社会城市化进程的加快,建筑业的急剧发展,带来了砂石材料的长期过量开采,甚至有时滥采滥用,造成严重的山体滑坡以及河床改道,严重地破坏了自然生态环境,而且天然砂石属于不可再生资源,其形成是需要漫长的时间,因此无限制地开采将会带来严重的建筑材料资源危机,与人类的可持续发展背道而驰。与此同时,地震、火灾、爆炸、海啸、洪水、台风等灾害造成大量混凝土结构倒塌破坏,如 2008 年汶川大地震中,仅四川省倒塌和损坏的房屋就达 400 多万间,部分城镇几乎被夷为平地,产生大量的建筑废弃物并造成自然环境严重污染。

由上可知,一方面是大量天然不可再生资源的过度开采利用;另一方面是建筑废弃物对自然环境带来的严重污染。因此,如何科学、合理、高效地利用这些建筑废弃物,以实现建设资源节约型和环境友好型社会及国民经济的可持续发展,已成为世界各国必须面对和解决的问题之一。为了最大限度地减少对天然不可再生资源的过度开采,就必须最大限度地加大对建筑废弃物的再生利用,故针对建筑废弃物的处理方法及应用技术的研究势在必行。对此,我国住房和城乡建设部、国土资源部、国家发改委等部委已出台了各种政策,以加快废弃混凝土的再生利用及绿色建筑发展的步伐。在这种形势下,开发既具有良好抗震性能,又环保、生态、可持续发展的新型结构体系就有着非常重要的理论意义和工程实用价值。

事实上,建筑废弃物中废弃混凝土和砖石的含量较多,将其分拣、破碎、清洗以及分级后可作为粗细骨料再次回收利用,重新配置混凝土(即再生混凝土),这样不但可以减少了对天然不可再生资源的过度开采,还能减少建筑废弃物对自然环境的污染。所谓再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)是将废弃混凝土块破碎后形成的再生骨料按一定比例与级配混合,部分或全部代替天然骨料制成的混凝土。它既能节省天然骨料、保护骨料产地的生态环境,又可以解决废弃混凝土堆放、占地和因处理不当引起的环境污染问题,具有良好的推广价值。

此外,由钢结构和混凝土结构复合而成的“组合结构”或“混合结构”由于兼有两种结构共同的优点,因此得到了越来越广泛的应用。型钢混凝土(英文简称为 SRC)结构是钢与混凝土组合结构的一种重要形式,具有良好的承载能力和变形性能,较单独采用钢结构有更大的刚度,更好的局部和整体稳定性,更好的防腐蚀和防火性能,可节约钢材;而在大跨重载结构中,由于内部配置了型钢,它较普通钢筋混凝土结构有更高的强度和延性以及更好的适用性,符合我国基本国情,社会效益和经济效益均较好。

基于此,本书结合型钢混凝土结构和再生混凝土的各自特点,将再生混凝土应用于型钢混凝土结构中,提出了“型钢再生混凝土组合结构”的概念。型钢再生混凝土组合结构是指在截面中主要配置型钢(轧制型钢或焊接钢骨),并配有一定的纵向钢筋和箍筋,再浇注再生混凝土而形成的一种新型组合结构。它融合了普通型钢混凝土结构承载能力高、抗震性能好的优点和再生混凝土节能环保、可再生利用的显著特点,不但可以提高建筑结构的抗震防灾能力,还符合国家绿色环保和可持续发展的战略,因此具有广阔的发展应用前景。

为了使型钢再生混凝土组合结构得以早日推广应用,有必要对这种新型结构展开研究。本书以型钢再生混凝土结构为研究对象,深入研究型钢再生混凝土黏结滑移性能;型钢再生混凝土梁柱构件、型钢再生混凝土梁柱节点以及型钢再生混凝土框架结构基本受力性能和抗震性能。通过试验研究和理论分析,揭示型钢与再生混凝土之间的黏结滑移机理及其破坏机制,掌握型钢再生混凝土组合构件及框架结构的承载能力、变形性能、抗震性能等力学行为,提出该新型组合结构的设计方法。

## 1.2 国内外相关研究现状

### 1.2.1 再生混凝土研究应用现状及基本力学性能

#### (1) 再生混凝土研究应用现状

对于再生混凝土的研究,最早见于第二次世界大战期间,多年的战争给当时欧洲许多国家的建筑物带来了严重的破坏,产生了大量的建筑废弃物,因此如何处理这些大量建筑废弃物是战后各国最为棘手的问题之一。为了处理这些大量建筑废弃物,同时也为战后重建提供新的建筑材料,战后各国陆续开展了对再生混凝土的应用研究。1946年,苏联学者 Glunzhge 利用废弃混凝土破碎后形成的再生骨料配置了再生混凝土。1948年,德国学者研究了废弃混凝土中石膏浆含量对再生混凝土性能的影响。此后,美国、荷兰、德国、英国、日本、韩国等也相继对再生混凝土开展了较为深入的研究,且相应地给出了各自的再生骨料或再生混凝土的应用规定。

与发达国家相比,我国对废弃混凝土的回收再利用研究工作起步较晚。近些年,国内一些高校和科研单位已对废弃混凝土的回收利用技术展开了研究,目前仍然处于试验研究探索和谨慎使用的初级阶段。这主要是因为我国对建筑废弃物的回收再利用缺乏较为完善的政策引导、规范以及有关技术标准,同时对建筑废弃物的试验研究非常分散,缺乏系统的归纳整理。2008年汶川“5.12”特大地震不但使灾区百姓遭受了巨大的生命财产损失,还由此产生大量的建筑废弃物,为了有效地处理和回收利用这些大量建筑废弃物,国家科技部将灾区建筑废弃物的处理和回收利用研究列为国家“十一五”科技支撑计划项目。2009年,这一国家科技支撑计划项目下属的两个科研子课题项目:“地震灾区建筑垃圾资源化及其示范生产线”和“灾区重建用再生砌块砌体与再生混凝土结构体系房屋示范”已分别通过了科技部的验收。项目的成功验收为再生混凝土在灾区建筑工程中的推广应用做出了典型示范,同时也为灾区房屋建筑重建提供较为实用的技术途径,有效地推动了建筑废弃物回收利用与再生混凝土结构抗震节能房屋建筑的进一步研究发展。

## (2) 再生混凝土基本物理力学性能

再生混凝土是指将废弃混凝土块经破碎、清洗、分级和按一定的比例与级配混合、部分或全部代替天然骨料制成的混凝土。它既能节省天然骨料,保护骨料产地生态环境,又可以解决废旧混凝土的堆放、占地和因处理不当引起的环境污染问题。近年来世界各国都十分重视再生混凝土的研究,美国、日本、欧洲共同体等经济发达国家以及我国对其均开展了一定研究。再生粗骨料存在着某些与天然粗骨料不同的特性,如破碎过程引起的损伤、较大的孔隙率、残留水泥基、较高吸水率等,导致其配制而成的再生混凝土在力学性能、耐久性能等方面与普通混凝土有所不同。各国学者对此进行了大量的研究,也取得了一定的成果。在本构关系方面,Bairagi、Topcu等曾进行过相关研究,指出不同再生粗骨料取代率的再生混凝土本构关系具有相似性,但下降段有所不同;通过试验获取了不同再生粗骨料取代率下再生混凝土的应力-应变曲线,给出其数学表达式。国内学者如肖建庄、李秋义、陈宗平等做了大量的相关研究,也取得了一定成果,这些研究为认识再生混凝土结构的性能奠定了坚实基础。下面就再生混凝土材料的基本物理力学性能进行总结阐述。

1) 再生混凝土强度。研究表明,再生混凝土的强度主要与再生粗骨料的掺入量、再生混凝土的配合比、再生粗骨料的来源、再生骨料的生产过程以及原始混凝土的强度等因素有关。从国内外学者对再生混凝土强度的研究结果看,再生混凝土强度离散性很大,不同学者所得出的结论也不尽相同。Nixon在对再生混凝土早期研究结果的综合分析基础上认为:与普通混凝土抗压强度相比,再生混凝土的抗压强度降低幅度在20%以内。Hanso对1945年至1985年这段时间内再生混凝土的研究结果进行综合分析认为,与普通混凝土抗压强度相比,再生混凝土

的抗压强度降低幅度在 5%~24%。邢振贤等试验研究结果表明,与普通混凝土情况相比,再生混凝土的抗压强度、抗拉强度分别降低了 9%、7%,且再生混凝土的弹性模量降低幅度明显大于其抗压强度降低幅度,即表明再生粗骨料使得混凝土的脆性降低,而韧性得到了增加。王武祥等试验研究认为,与普通混凝土情况相比,再生混凝土的抗压强度相差不大,但再生混凝土的收缩量却比普通混凝土的收缩量高出 30%~50%。

与此相反,Yoda 等的试验研究结果表明:与普通混凝土情况相比,再生混凝土的抗压强度增长了 8.5%;Ritual 等通过试验研究则认为:与普通混凝土情况相比,再生混凝土的抗压强度提高幅度为 2%~20%;而柯国军等研究结果表明,与普通混凝土情况相比,再生混凝土的抗压强度提高幅度则为 15%~25%。Limbachiya 等利用再生粗骨料配置了抗压强度大于 50 MPa 的高强混凝土,研究结果表明,当再生粗骨料取代率为 30%时,再生粗骨料对混凝土抗压强度的影响不明显,但随着再生粗骨料取代率的不断增大,再生混凝土抗压强度将逐渐降低;研究结果还表明:通过合理调整再生混凝土水灰比等方法,可以配制出在强度、耐久性等方面与普通高强混凝土相媲美的再生混凝土材料。

同济大学肖建庄教授对再生混凝土的基本物理力学性能进行了一系列的试验研究,结果表明:与普通混凝土情况相比,当再生粗骨料取代率分别为 30%、70%、100%时,再生混凝土的抗压强度分别降低了 24%、28%、30%;当再生粗骨料取代率为 50%时,再生混凝土的抗压强度却提高了 3.1%。

从上述可知,再生混凝土强度离散性很大,不同学者的研究成果存在较大差异。由于再生粗骨料的特殊性,导致再生混凝土在强度方面劣于普通混凝土,这一结论基本被众多学者所接受,但经合理配合比设计的再生混凝土强度仍可以得到保证。

2) 再生混凝土弹性模量。Bairagi 等研究结果认为:与普通混凝土相比,再生混凝土弹性模量降低了 33%;Kakizaki 等试验研究结果表明:与普通混凝土相比,再生混凝土弹性模量的降低幅度为 25%~40%;Caïms 则认为再生混凝土的弹性模量较普通混凝土情况降低了 15%。邢振贤等试验研究结果表明:与普通混凝土相比,再生混凝土抗压弹性模量和抗拉弹性模量分别降低了 28%、34%。Nagaoka 试验研究结果表明:与原始混凝土相比,再生粗骨料取代率为 100%的再生混凝土抗压模量和抗拉模量分别降低了 8.9%、6.9%;再生混凝土的弹性模量随着水灰比的降低而增加,当再生混凝土的水灰比从 0.8 降至 0.4 时,其抗压弹性模量增加了近 53.7%。同济大学肖建庄教授领导的课题组对再生混凝土弹性模量的试验研究结果表明,再生混凝土的弹性模量随着再生粗骨料取代率的增大而降低;当再生粗骨料取代率为 100%时,与普通混凝土相比,再生混凝土的弹性模量降低幅度高达 45%。

3) 再生混凝土长期性能与耐久性。再生混凝土长期性能主要包括再生混凝土