

钢管混凝土

结构模型试验与分析设计

GANGGUAN HUNNINGTU JIEGOU
MOXING SHIYAN YU

FENXI SHEJI

杨亚彬 著

中国环境出版社

钢管混凝土结构模型试验与分析设计

杨亚彬 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土结构模型试验与分析设计/杨亚彬著. —北京: 中国环境出版社, 2014.7

ISBN 978-7-5111-1225-5

I. ①钢… II. ①杨… III. ①钢管混凝土结构—结构模型—模型试验②钢管混凝土结构—结构模型—系统设计 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 137946 号

出品人 王新程
责任编辑 连斌 赵楠婕
责任校对 尹芳
封面设计 金喆

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 编辑管理部
010-67162011 生态(水利水电)图书出版中心
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2014 年 8 月第 1 版
印 次 2014 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 10.25
字 数 201 千字
定 价 30.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

钢管混凝土结构是在劲性钢筋混凝土结构及螺旋配筋混凝土结构的基础上演变和发展起来的。钢管混凝土结构具有承载力高、抗震性能好，施工方便等优点。经过几十年的发展，钢管混凝土结构已为广大工程技术界所接受，越来越显示出它广阔的发展前途。

国外钢管混凝土结构已有较长的应用历史，最早采用钢管混凝土的工程是1879年英国的 Severn 铁路桥桥墩，在钢管内填充混凝土以防止锈蚀并承受压力，随后，钢管混凝土又被用于单层或多层厂房结构柱的建设，1897年美国 John Lally 在圆钢管中填充混凝土作为房屋建筑的承重柱（称为 Lally 柱）并获得专利。

虽然钢管混凝土结构 100 多年前就已经出现，但对其力学性能进行较为深入的研究主要是在 20 世纪 60 年代以后。随着钢管混凝土结构技术在前苏联、西欧、北美和日本等工业发达国家受到重视，这些国家开展了大量的试验研究工作，曾在一些厂房建筑、个别的多层建筑和立交桥以及特种结构工程中加以利用。但终因钢管内浇注混凝土的施工工艺存在的问题尚未得到很好的解决，现场的施工操作繁琐，钢管混凝土结构在施工性能方面的优势没有得到应有的发挥。到 20 世纪 80 年代后期，由于泵送混凝土工艺的发展，解决了现场钢管内部浇灌混凝土的工艺问题，加上现代高强混凝土需要钢管约束来克服其脆性。因此，钢管混凝土结构在美国和澳大利亚等国的高层建筑中得到了广泛应用，被认为是高层建造技术的一次重大突破。

钢管混凝土结构技术在我国开发利用已有近 50 年的历史,它在我国的应用已日见广泛。我国主要集中研究内填型钢管混凝土结构。在这方面最早开展工作的是原中国科学院哈尔滨土建研究所。到 1968 年以后,国内许多研究院都先后对基本构件的工作性能、设计方法、节点构造和施工技术等开展了比较系统的研究。20 世纪 60 年代中,钢管混凝土开始在一些厂房柱和地铁工程中得到使用,如 1966 年北京地铁车站的建造中采用了钢管混凝土柱。进入 70 年代后,这类结构在冶金、造船、电力等行业的单层或多层工业厂房得到广泛的推广应用。80 年代后,工程应用也进一步推广迅速地进入了高层和超高层建筑、地铁车站工程以及大跨度桥梁工程中。据不完全统计,到目前为止,我国处于已建成或在建过程中的钢管混凝土结构的高层、超高层建筑已有 30 余座,公路和铁路桥 200 多座。并且建成了世界上全部柱子采用钢管混凝土柱的最高建筑物——深圳市的赛格广场大厦和跨度最大的桥梁——万州长江公路大桥。

本书作者结合目前钢管混凝土结构的研究进展,并在充分借鉴和参考了国内外其他研究者的研究成果基础上,阐述了钢管混凝土结构模型试验与分析设计的相关内容。

本书作者为华北水利水电大学讲师杨亚彬博士,研究工作得到了华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(201211)和河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A560701)的资助。在本书编写过程中,得到了华北水利水电大学同事们的大力支持,北京工业大学曹万林教授对本课题研究给予了具体指导,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中不当之处,敬请读者批评指正。

作者

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	钢管混凝土结构的特点	1
1.2	国内外研究现状	3
1.3	概述	12
第 2 章	钢管混凝土结构低周反复荷载试验研究	14
2.1	第一组试件	14
2.2	第二组试件	38
2.3	第三组试件	57
2.4	本章小结	77
第 3 章	钢管混凝土结构模拟地震振动台试验研究	79
3.1	试验概况	79
3.2	振动台试验方案	84
3.3	动力反应	88
3.4	破坏特征	112
3.5	结论分析	116
3.6	本章小结	116
第 4 章	钢管混凝土剪力墙有限元分析	117
4.1	引言	117
4.2	有限元模型的建立	117
4.3	有限元计算分析	128

4.4	工作机理分析	130
4.5	本章小结	131
第5章	钢管混凝土剪力墙力学模型与计算分析	132
5.1	弹性刚度计算模型及计算分析	132
5.2	承载力计算分析	134
5.3	恢复力模型及计算分析	138
5.4	本章小结	144
第6章	设计建议	145
6.1	引言	145
6.2	抗震设计建议	145
6.3	本章小结	148
参考文献		149

第1章 绪论

1.1 钢管混凝土结构的特点

钢管混凝土结构是在劲性钢筋混凝土结构及螺旋配筋混凝土结构的基础上演变和发展起来的。从20世纪80年代中期,钢管混凝土结构开始进入高层建筑领域,经过几十年的发展,钢管混凝土结构已为广大工程技术界所接受,越来越显示出它在高层和超高层建筑中广阔的发展前途^[1-4]。

钢管混凝土是由钢管内填充混凝土而形成的组合结构。按截面形式不同,分为圆钢管混凝土、方钢管混凝土和多边形钢管混凝土等。钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用,可以充分发挥两种材料的性能。一方面由于钢管对核心混凝土的约束作用,使得混凝土处于复杂的三向应力状态下,从而使其抗压强度、塑性和韧性性能大为改善;另一方面内部混凝土的存在在一定程度上可以避免薄壁钢管发生局部屈曲,从而保证钢材的材料性能充分发挥。此外,在钢管混凝土的施工过程中,钢管还可以作为浇筑其核心混凝土的模板,与钢筋混凝土相比,可节省模板费用,加快施工速度。总之,两种材料的组合不仅可以弥补彼此的弱点,而且能充分发挥各自的长处,这使得钢管混凝土结构与其他结构相比具有以下几个特点:

(1) 承载力高、抗震性能优越

对于薄壁钢管来说,其临界承载力通常很不稳定,因为它对局部缺陷非常敏感。在钢管中填充混凝土形成钢管混凝土结构后,钢管约束了混凝土,在轴心受压荷载的作用下,混凝土三向受压,可延缓其受压时产生的纵向开裂。同时混凝土也可以延缓或者避免薄壁钢管过早地发生局部屈曲,从而使得钢管混凝土具有相当高的承载能力(一般都会高于组成钢管混凝土的钢管柱和核心混凝土柱单独

的承载力之和)。

素混凝土单纯受压的破坏常属脆性破坏;但钢管内的核心混凝土在钢管的约束下,不但在使用阶段工作时增强了弹性性质,延长了弹性工作阶段,而且破坏时产生了很大的塑性变形。此外,钢管混凝土这种构件在水平荷载的反复作用下, $P-\Delta$ 滞回曲线十分饱满,延性好、吸收能力强,且刚度退化现象很小。构件在弯、压、剪的共同作用下,弯矩和曲率的关系没有下降段。从这一点来看,可以说钢管混凝土构件的抗震性能还强于钢构件。

(2) 制作和施工方便

与钢筋混凝土柱相比,采用钢管混凝土柱时没有支模和拆模、绑扎钢筋等工序,施工简便。此外,混凝土的浇灌也更为方便,特别是目前采用高位抛落免振捣混凝土、自密实混凝土和泵送混凝土等工艺,更可加速钢管混凝土构件的施工进度,特别是在钢管混凝土中能更为广泛地采用的薄壁钢管,因而在现场进行钢管的拼接对焊显得更为简便快捷。

和普通钢柱相比,钢管混凝土柱的柱脚零件少、焊缝短,还可以直接插入混凝土基层中的预留杯口中,柱脚构造显得更为简单。钢管混凝土本身的建造施工特点符合现代建造施工技术工业化的要求,可以降低工程造价、节约人工费用、加快建设速度。

(3) 经济效益显著

作为一种较为合理的结构组合形式,采用钢管混凝土可以非常好地发挥出钢材和混凝土这两种材料的特性和潜力,使它们的优点都得到更为充分和合理的发挥,因此,使用钢管混凝土施工一般都具有很好的经济效益。

例如 72 层、高 292 m 的深圳赛格广场大厦,是我国自行设计、自行加工制造、自行施工的第一个高层建筑,结构柱均采用了钢管混凝土柱,单柱最大设计压力为 90 000 kN,而钢管混凝土柱最大直径为 1 600 mm,管壁最大厚度仅为 28 mm,与钢筋混凝土柱相比,净增加使用面积 3 000 m²,取得了巨大社会效益和经济效益。

(4) 耐火性能比较好

火灾的情况下,由于核心混凝土可吸收钢管传递过来的热量,从而使其外包钢管的升温相应滞后,这样钢管混凝土中钢管承载力的损失要比纯钢结构的小,而钢管也可以保护核心混凝土不发生崩裂的现象。火灾作用下,随着外包钢管温度不断的升高,其承载能力会不断的降低,并把卸下的荷载传递给升温相对较慢,

且具有较高承载力的核心混凝土。这样由于组成钢管混凝土的钢管和其核心混凝土之间具有协同互补、相互贡献和共同工作的优势,使得这种结构具有较好的耐火性能。另外,火灾后,随着外界环境温度的降低,钢管混凝土结构已屈服截面处钢管的强度可以得到不同程度的恢复,截面的力学性能比高温条件下有所改善,结构的整体性也将会比火灾中有所提高,这就为结构的补强加固提供了一个较为安全的工作环境,也可相应减少补强的工作量,降低维修费用,这和火灾后的钢结构与钢筋混凝土结构都有所不同。这是因为,对于钢结构来说,其已发生扭曲和失稳的构件即使在常温下也不会比在火灾的时候更具安全性。而对于钢筋混凝土结构,其已破坏截面的力学性能和整体性能均不能因温度的降低而有所恢复或改善。

1.2 国内外研究现状

我国从1959年就开始研究钢管混凝土的基本性能和应用,20世纪60年代中,开始在一些厂房柱和地铁工程中采用。进入70年代后,这类结构在冶金、造船、电力等行业的单层或多层工业厂房得到进一步地推广应用。1978年,钢管混凝土结构第一次列入国家科学发展规划,从此,这一结构在我国的发展进入一个新阶段。80年代更进一步在多层建筑的框架结构中采用钢管混凝土柱。进入90年代以来,许多大型超高层建筑中都应用了钢管混凝土柱的技术。开始时在建筑物的部分柱中采用,后来发展到大部分柱甚至全部柱均采用钢管混凝土。

目前,国内采用钢管混凝土技术已建成了一些高层、超高层建筑,并取得了很好的经济效益和社会效益。另外,有关钢管混凝土结构的设计规程目前已有不少。日本目前在钢管混凝土房屋建筑方面的设计规程有AIJ(1997)^[5]等;美国的设计规程ACI 318—99、SSLC(1979)和LRFD(1999)^[6-9]都有钢管混凝土结构设计方面的规定;欧洲这方面的规范有EC4(1994)^[10]等。我国近年来先后颁布了许多有关钢管混凝土结构设计方面的规程,如国家建筑材料工业局标准1989颁布的《钢管混凝土结构设计与施工规程》(JCJ 01—89)^[11],中华人民共和国电力行业标准《钢—混凝土组合结构设计规程》(DL/T 5085—1999)^[12],中国工程建设标准化协会标准《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159—2004)^[13]都给出了钢管混凝土结构设计计算方面的规定。

1.2.1 钢管混凝土柱

对钢管混凝土力学性能的深入研究主要是在 20 世纪 60 年代以后。早期的钢管混凝土采用的钢管往往是热轧管,其钢管壁厚一般均较大,并且由于管内混凝土的浇筑工艺一直未能得到很好的解决,其经济效果并不明显,影响了钢管混凝土的推广应用。近年来,国内外学者对钢管混凝土构件的抗震性能进行了大量的试验及理论研究^[14-38]。Johansson 和 Gylltoft^[27]对不同加载方式下的圆钢管混凝土轴心受压构件进行了实验研究,加载方式共分为 3 种:①荷载仅作用在管内混凝土上;②荷载仅作用在钢管上;③荷载同时作用在钢管及管内混凝土上。研究结果表明:加载方式②的承载力和空钢管构件基本一样。加载方式①和加载方式③的极限承载力基本一样,但加载方式①作用下的构件延性更好,这主要是由于钢管不直接承受纵向压力,避免了其发生局部屈曲,从而充分发挥了钢材抗拉强度高的特性。Johansson^[28]同时采用 ABAQUS 对圆钢管混凝土构件的力学性能进行了弹塑性有限元分析,重点考察了钢管和混凝土之间的黏结强度、钢管约束作用以及不同加载方式对钢管混凝土力学性能的影响。混凝土单元分别采用 8 节点和 6 节点的实体单元 C3D8 和 C3D6,混凝土材料模型曲线的上升段由试验浇筑时预留的标准圆柱体试块轴压试验得到,曲线下降段部分来自于 CEB Bulletin d'Information 228。混凝土为弹塑性材料,符合 Drucker-Prager 屈服准则,并采用了相关流动法则和等向强化准则。钢管和加载板采用 8 节点的实体单元 C3D8,材料同为弹塑性材料,符合 Mises 屈服准则,等向强化和相关流动法则。钢材应力—应变关系曲线取自钢材单轴拉伸实验曲线。钢管混凝土界面接触采用法向“硬接触”和切向库仑摩擦。较好地模拟了试件荷载-变形关系曲线。

2003 年,福州大学陈宝春^[36]对 18 根钢管混凝土偏心受压短柱进行了相关研究。试验参数包括偏心率、含钢率和混凝土强度等,重点分析了偏心率对钢管混凝土偏压构件受力性能的影响,试验结果表明,偏心率大时,相同纵向应变所对应的钢管环向应变小,钢管紧箍力对混凝土强度的提升作用也随之降低,构件的承载力也明显下降,达到极限承载力时钢管受压边缘的应变值相应要大。但是偏心率对构件的延性系数影响不大。

2010 年,清华大学江枣,钱稼茹^[37]通过对 124 根轴心受压钢管混凝土短柱试验结果的总结分析,认为钢管混凝土短柱在达到轴心受压承载力时钢管的作用与钢管约束提高系数有关,钢管约束提高系数可由套箍指标和钢管屈服强度确定:

随着套箍指标和钢管强度的提高,钢管纵向承载力增大,对混凝土的约束作用减弱,并最终提出了引入钢管约束提高系数的钢管混凝土短柱轴心受压承载力计算公式。

福州大学黄宏等^[38]利用 ABAQUS 有限元软件对圆中空夹层钢管混凝土轴心受压构件的荷载—变形全过程进行了模拟计算,计算结果与试验结果符合良好。同时,对轴心受压时荷载—变形全过程中内外钢管和混凝土所分担的荷载及其相互作用力进行了分析,并且考虑了空心率、名义含钢率和材料强度等因素对相互作用力的影响。

近年来,随着再生混凝土研究的日趋完善,再生混凝土代替普通混凝土运用于钢管之中给研究者提供了一个新的研究方向。本书参考文献[39]至[43]将再生混凝土填入钢管内形成钢管再生混凝土,并对其进行了初步研究,结果表明,钢管再生混凝土的力学性能与钢管普通混凝土相似,钢管对混凝土的约束作用使核心再生混凝土的力学性能得到改善,这为废弃混凝土应用于实际工程中提供了新的途径。

1.2.2 钢管混凝土节点

在高层建筑中,钢管混凝土节点是钢管混凝土结构中的一个重要部位,对结构安全有着很重要的作用。节点设计的合理与否不仅直接关系到结构整体的可靠性,而且对结构的施工质量、工程进度以及整个工程的造价都有直接的影响。

根据受力特点的不同,钢管混凝土结构的梁柱节点可分铰接节点、半刚性节点和刚性节点。铰接节点的特点是梁只传递支座反力给钢管混凝土柱,而不能传递弯矩,梁将支座反力传递给钢管混凝土柱的一般构造措施是在钢管混凝土柱上设置牛腿,或采用将钢梁与钢管焊接等构造方式;半刚性节点的特点是受力过程中钢梁和钢管混凝土柱之间有相对转角位移,从而可能会引起梁柱的内力重分布,因此设计采用时需慎重对待;钢接节点的特点是在受力过程中梁和钢管混凝土柱之间没有相对转角位移,梁端的弯矩、轴力和剪力通过合理的构造措施可以安全可靠地传给钢管混凝土柱。

国内外学者对不同形式钢管混凝土节点进行了大量的研究^[44-61]。其中,Nishiyama 和 Fujimoto 等^[44,45]对 11 个采用高强钢材和高强混凝土的钢梁—钢管混凝土柱节点与采用普通材料的节点进行了对比实验,试验包括 7 个中柱节点、3 个边柱节点和 1 个空间实体节点。在试验的基础上分析研究了材料强度、节点构

造、轴压力和荷载作用方向等参数对其力学性能的影响。研究表明,在其他参数一致的情况下,混凝土强度的提高对节点承载力及刚度的影响不大,但却加剧了节点强度的退化程度;钢材强度的提高同样加剧了节点的强度退化、延性降低。轴压比越高,延性越低;采用两种不同的节点形式:穿心式内环板节点与外环板节点相比,二者刚度和承载力都比较高;在 x 向和 y 向对空间节点同时进行加载,与平面节点相比,承载力有所提高。

Alostaz 和 Schneider^[48]对普通焊接节点、外加强环板节点、内埋铆钉式节点、穿心焊接变形钢筋节点和穿心钢梁式等多种构造形式的钢管混凝土节点进行了三维非线性有限元分析,并对钢管的宽厚比、轴压比以及梁的弯矩剪力比等影响参数进行了理论分析。研究表明,设有钢梁内力传递给核心混凝土的组件的节点与钢梁直接焊接到钢管上的节点相比,前者减少了焊接所产生的应力集中,表现出更好的强度和刚度。

吕西林和李学平^[58]对方钢管混凝土柱外置式环梁节点进行了实验研究。研究表明,整个试件具有较好的承载力、延性和耗能能力,试件的破坏表现为梁端出现塑性铰。根据实验结果,提出了应用于工程的初步的设计方法。

湖南大学霍静思^[59]运用弹塑性有限元理论建立了钢管混凝土柱—钢梁节点的荷载-位移全过程有限元模型,在单元分析中采用了改进后的 AUL 表述推导得到梁柱单元刚度矩阵方程,建模的过程中考虑了材料的物理非线性和单元的几何非线性,并编写了非线性有限元程序 NLFEACFST。计算结果与实际试验结果比较表明,该模型具有很好的适用性和精度。作者同时对典型的中柱节点进行了荷载-位移全过程非线性有限元分析,并对影响节点承载力和荷载—位移骨架曲线的因素进行了参数分析,为进一步的研究创造了条件。

同济大学苏锋等^[61]采用大型有限元分析软件 ANSYS,计算模拟了深圳福田地下车站主体结构标准段的钢管混凝土柱顶—横纵梁、柱脚—底纵梁以及柱—地下1层梁等节点在梁端及柱端的弯矩、剪力和轴力等荷载作用下的力学性能。从钢管混凝土梁柱节点的受力状态出发,分析了在弯矩、轴力和剪力等荷载共同作用下节点模型各组成构件的应力分布、变形和各个截面的内力分布等,根据分析结果,给出了节点结构设计与加固方案。

1.2.3 钢管混凝土框架

钢管混凝土柱与钢梁组成的框架结构是钢管混凝土结构中常用的结构形式之

一。目前国内外很多学者对钢管混凝土柱、钢梁组成的框架体系整体性能进行了大量的研究^[62-72]。其中, Herrera 等学者^[62]对一个 5 层 4 跨的方钢管混凝土柱、宽翼缘 H 形钢梁的平面框架足尺模型进行了静力推覆分析和非线性动力时程分析, 研究了无支撑方钢管混凝土柱—钢梁平面框架的抗震能力, 同时依据试验结果验证现行美国抗震设计规范的适用性。动力分析共输入了 16 种不同的地震波数据, 理论计算和试验结果表明: 按照美国规范 IBC2000 设计的方钢管混凝土柱—钢梁平面框架模型具有较好的抗震性能。

Matsui^[63]进行了由方钢管混凝土柱和宽翼缘钢梁组成的单层框架的低周反复荷载实验, 实验中调整钢管混凝土柱的宽厚比参数、节点的加强环类型以及加载历史。试验所得的滞回曲线饱满, 刚度退化不明显。同时, 由于管内混凝土的存在, 延缓了钢管的屈曲。

2003 年, Tsai 等^[64]介绍了中国台湾地震工程研究中心的足尺钢管混凝土柱—钢梁平面框架模型的拟动力实验研究。该实验模型依据美国现行抗震规范, 基于性能的抗震设计原则设计, 输入的地震波为 1999 年中国台湾集集地震波和 1989 年 Loma Prieta 地震波, 分别采用 PISA2D 和 Opensees 程序对平面框架模型进行了动力时程分析。研究结果表明钢管混凝土柱—钢梁平面框架具有良好的抗震能力。

2000 年, 黄襄云、周福霖^[69]进行了一个 5 层圆钢管混凝土柱—钢筋混凝土梁框架模型的模拟地震振动台试验, 获取了小震、中震、大震下框架的频率以及各地震波下的加速度包络图, 试验结果表明钢管混凝土框架结构具有良好的抗震性能。在试验的基础上, 作者采用 Sap2000 对框架模型进行了有限元计算分析, 计算结果与实测符合较好。

2006 年, 王文达^[70]进行了 12 榀钢管混凝土柱-钢梁平面框架的低周反复荷载下滞回性能实验, 钢管混凝土柱分为圆形和方形两种, 重点考察了含钢率、轴压比、梁柱线刚度比等参数对其力学性能的影响规律。实验结果表明, 钢管混凝土柱—钢梁平面框架滞回曲线较为饱满, 没有明显的捏拢现象, 刚度退化慢, 具有良好的抗震耗能能力。

2006 年, 同济大学孟春光等^[71]对一幢高层方钢管混凝土框架结构模型进行了模拟地震振动台试验研究。该模型采用 1/15 缩尺, 结构中附加黏滞阻尼器。研究表明: 该结构未出现明显薄弱层, 各项参数指标均满足抗震规范要求, 黏滞阻尼器的消能减震作用进一步提高了结构的抗震性能。研究结果也建议增加周边

带状桁架的侧向支撑,以防止框架平面外失稳。

1.2.4 钢管混凝土组合剪力墙

组合剪力墙包括不同材料的组合以及不同受力体系的组合等多种组合形式。目前国内外对组合剪力墙的研究发展较快。

(1) 钢板混凝土组合剪力墙

钢板剪力墙结构是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型抗侧力体系。通过国内外学者对钢板剪力墙作为主要水平抗侧力体系的试验研究表明,其具有初始刚度较大、变形能力大和塑性性能良好等优点,但是其应用较少,主要原因是其平面外容易失稳、稳定性较差、防火好及耐久性不好,鉴于以上利弊因素,钢板混凝土组合剪力墙应运而生。组合以后,混凝土板对钢板起到了平面外的约束效应,同时也起到了防火、防腐蚀的效果,增强了剪力墙的抗震性能。钢板混凝土组合剪力墙根据钢板与混凝土板之间的位置不同可分为钢板外包混凝土组合剪力墙和钢板内填混凝土组合剪力墙。

国外在钢板混凝土组合剪力墙方面做了很多研究,也制定了相应的规范^[73-89]。其中,California 大学的 Astaneh-Asl 和 Zhao^[73, 74]提出了一种预制钢筋混凝土板—钢板的组合剪力墙,如图 1-1 所示。通过抗剪螺栓将预制混凝土板悬挂于钢板一侧,并且根据在受荷初期,预制混凝土板是否与周边框架紧密接触将其分为“传统型”和“改进型”两种,预制混凝土板的存在,为钢板提供了平面外支撑,防止钢板在屈服前的屈曲变形,试验研究表明其具有优越的延性和耗能能力。同时该组合剪力墙实现了工厂化装配式施工,大大缩短了工期。

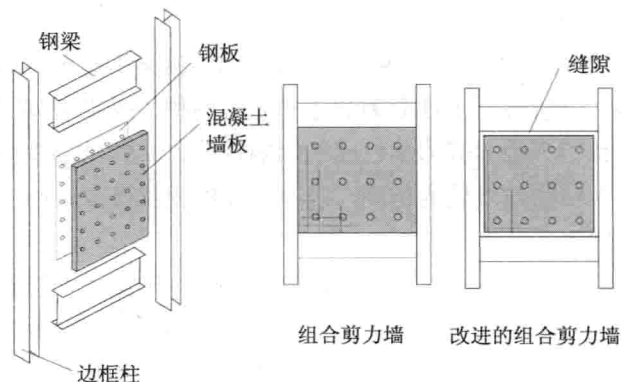


图 1-1 钢框架填充单侧钢板—混凝土组合剪力墙

2000年,日本九州大学的 Matsui、Hitaka 等学者^[77-78]在研究两边连接开缝钢板剪力墙的抗震性能时,通过在钢板两侧布置混凝土板的方式限制开缝钢板的整体屈曲,二者的协同工作保证了剪力墙具有较高承载力和延性。

2006年,哈尔滨工业大学的吴志坚^[82]运用 ANSYS 软件对钢板混凝土组合剪力墙进行了非线性有限元分析,通过对体系中框架梁受力及变形的分析,建立了钢板混凝土组合剪力墙的简化模型;利用该简化模型分析了不同预制混凝土板高厚比及跨高比对组合剪力墙抗剪静力性能的影响。研究表明:预制混凝土板的厚度是影响钢板混凝土组合剪力墙的决定因素。

2007年,同济大学的高辉^[83]对1块单侧布置预制混凝土板的钢板混凝土组合剪力墙进行了单调加载试验,对2块双侧布置混凝土板和1块单侧布置混凝土板的钢板混凝土组合剪力墙进行了低周反复荷载试验,模型的跨高比均为2.0,试验结果显示:当内嵌的钢板过薄时,钢板混凝土组合剪力墙易于发生平面外失稳,试验后期角部螺栓处钢板甚至出现撕裂,降低了试件的抗震性能;同时,作者在试验的基础上通过有限元方法对试验结果进行了计算分析,提出采用组合压杆模型模拟有初始缺陷压杆的极值失稳现象,同时与钢板剪力墙的斜拉杆模型相结合,提出了钢板混凝土组合剪力墙的简化模型。

2009年,马欣伯^[85]对6块钢板混凝土组合剪力墙和1块单排开缝钢板混凝土组合剪力墙进行了低周反复荷载试验,试验结果表明:角部设置短加劲肋的组合剪力墙具有较高的初始刚度和承载力,钢板基本保持在平面内工作,表现出良好的耗能能力和延性。经合理设计的混凝土板能够在后期承担荷载,进一步提高组合剪力墙的后期刚度和承载能力。

(2) 型钢混凝土组合剪力墙

常见的型钢混凝土剪力墙是在混凝土墙板边缘设置型钢混凝土边框,型钢混凝土边框的存在将承担相当一部分的剪力,同时型钢混凝土边框对墙板的约束也可提高墙板的抗剪能力,改善剪力墙的延性,发挥型钢和混凝土的组合效应,进一步提高剪力墙的抗震能力。

国内外对型钢混凝土组合剪力墙的研究较多^[90-106]。其中, Tong 等学者^[90]进行了一个1/3缩尺、轴压比为0的工字钢框架—钢筋混凝土墙板组合剪力墙的低周反复荷载试验。实验结果表明:在反复荷载作用下,钢筋混凝土墙板首先开裂,随后工字钢边框逐渐屈服,最后由于墙板角部混凝土被压碎而破坏,破坏时工字钢边框并未出现撕裂现象。试件的骨架曲线后期下降段较陡,说明试件的后期承

载力退化较快。该剪力墙受力分工明确,但钢框架对钢筋混凝土墙板的约束效应较弱,当钢筋混凝土墙板破坏而退出工作后,钢框架很难起到二道防线的作用。

Saari^[91]对连接钢框架和混凝土墙板的栓钉进行了力学性能的试验研究。研究表明:栓钉的承载能力和变形能力对试件的整体工作性能有很大影响。通过在栓钉的周围加设一些约束构造,可以有助于充分发挥栓钉的承载能力和变形能力。

清华大学魏勇、钱稼茹等^[96]通过对3片高宽比为0.95的试件进行低周反复荷载试验,研究了高轴压比钢骨混凝土低矮剪力墙的抗震性能,研究表明:试件呈剪切破坏,轴力较大时,墙体边缘纵筋、竖向分布钢筋和钢骨翼缘均被压曲,钢骨腹板出现塑性绞线。端部的钢骨提高了剪力墙的抗剪承载力,但对剪力墙的塑性变形能力影响不大,并在试验的基础上提出钢骨混凝土剪力墙的受剪承载力计算公式。

李一松、李国强、崔大光等^[97]进行了四个1/4缩尺剪力墙模型的单调和低周反复荷载试验。其中包括一个内置型钢桁架的型钢混凝土低矮剪力墙的单调加载试验;一个普通混凝土低矮剪力墙、一个型钢混凝土低矮剪力墙和一个内置型钢桁架的型钢混凝土低矮剪力墙的低周反复荷载试验,分析了各剪力墙试件的承载力、延性、刚度、变形和破坏形态。通过对比分析,型钢桁架混凝土组合低矮剪力墙具有较强的承载力、延性和耗能能力。

董宇光、吕西林等^[99]对型钢混凝土剪力墙的轴压比进行了计算研究,并对在不同轴力作用下的型钢混凝土剪力墙试件进行了编程分析,得到了墙底截面处型钢与混凝土的应力分布,进而推导出型钢混凝土剪力墙的轴压比计算公式。同时,通过对型钢混凝土剪力墙试件的低周反复加载试验以及计算机数值仿真技术,分析了型钢混凝土剪力墙试件的轴压比限值问题,并给出了设计建议。

(3) 钢管混凝土组合剪力墙

钢管混凝土组合剪力墙墙板采用钢筋混凝土墙板,边框采用钢管混凝土端柱,钢管混凝土端柱之间采用钢梁连接,在墙板和钢管混凝土柱之间加设一些构造措施以保证二者的协同工作。这种剪力墙具有以下优点:

- 1) 带钢管混凝土边框剪力墙与带型钢混凝土边框剪力墙相比,钢管混凝土边框对混凝土墙板的约束作用更强,可进一步抑制墙板中裂缝的开展,改善剪力墙的破坏模式,提高其承载力。

- 2) 钢管混凝土柱具有很好的后期承载力,当混凝土墙板由于地震作用破坏而