



Two-way Shear
Strength Test
on Reinforced Concrete Frame
Columns Retrofitted with CFS

**斜向水平荷载作用下
碳纤维布增强钢筋混凝土框架柱的试验研究**

陈恒超 著

非
外
借



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

斜向水平荷载作用下碳纤维布增强 钢筋混凝土框架柱的试验研究

陈恒超 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书对两个主轴方向上配箍量不等的碳纤维布增强矩形截面钢筋混凝土框架柱进行了斜向水平低周往复荷载下的破坏试验,并对其受力性能和破坏机理等进行了研究。在试验的基础上,本书还对其延性性能、耗能能力和刚度退化等抗震性能进行了分析和研究。通过对已有抗剪理论模型的分析 and 总结,提出了碳纤维布增强钢筋混凝土框架柱双向受剪的受力理论模型——双向桁架—拱理论,分析研究表明该理论具有很好的适用性和理论价值。

图书在版编目(CIP)数据

斜向水平荷载作用下碳纤维布增强钢筋混凝土框架柱
的试验研究 / 陈恒超著. — 北京: 人民交通出版社股
份有限公司, 2017.9

ISBN 978-7-114-14218-5

I. ①斜… II. ①陈… III. ①碳纤维—纤维增强混
土—钢筋混凝土结构—试验研究 IV. ①TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 239055 号

书 名: 斜向水平荷载作用下碳纤维布增强钢筋混凝土框架柱的试验研究

著 作 者: 陈恒超

责任编辑: 王 霞 李 娜

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯鑫彩色印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 8

字 数: 118 千

版 次: 2017 年 9 月 第 1 版

印 次: 2017 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14218-5

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

在碳纤维布加固混凝土结构技术的研究中,对斜向水平荷载作用下碳纤维布加固混凝土框架柱的双向抗剪性能与抗震性能的研究还少有人问津。而实际上在地震区,钢筋混凝土框架柱在地震荷载作用下,将在构件的两个主轴方向上同时受到地震作用,因此对此问题的研究意义重大。

本书通过四个碳纤维布增强混凝土框架柱的双向水平低周往复荷载作用破坏试验,研究了碳纤维布增强混凝土框架柱的开裂、变形、受力破坏机理、失效模式、抗震性能等,提出碳纤维布增强混凝土框架柱双向抗剪承载力的计算公式,为以后的研究和设计提供依据和技术参考。

基于试验研究发现,碳纤维布提高构件斜截面承载力的作用机理与箍筋类似,碳纤维的存在使得钢筋混凝土框架柱由脆性剪切破坏变为延性较好的弯曲破坏。荷载—位移滞回曲线为倒S形,存在“捏缩”现象。随着加载角度从 0° 到 90° 的增大,构件的耗能性能越来越差。与未包碳纤维的构件相比较,粘贴碳纤维布不仅能提高钢筋混凝土柱的开裂荷载和极限承载能力,还可以提高混凝土柱的抗震性能。

本书通过对已有的各种单向受剪力学模型的分析研究,基于已有的研究成果,提出了碳纤维布增强钢筋混凝土框架柱双向受剪的受力理论模型——双向桁架—拱理论,通过该理论的分析计算结果与试验数据的对比表明,该理论具有很好的适用性和理论价值。基于试验

结果回归,得到钢筋混凝土框架柱双向偏心受压承载力满足曲线特征系数为3的类椭圆方程。

本书由遵义职业技术学院陈恒超博士、天津天咨拓维建筑设计有限公司郭永亮博士和天津大学王铁成教授编著。

本书在编辑出版过程中,得到人民交通出版社股份有限公司的大力支持。本研究得到了天津大学王铁成教授门下很多师兄兄弟的帮助,引用了很多前人的研究成果,在此一并表示感谢。

由于笔者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	3
1.2 国内外的研究现状	7
1.3 本书的主要研究工作	16
第2章 试验设计	19
2.1 试验目的	21
2.2 试件设计与制作	21
2.3 材料	25
2.4 剪跨比设计	26
2.5 轴压比及轴向力	27
2.6 试验数据量测	28
2.7 试验加载	31
第3章 试验现象及试验结果	35
3.1 C0 试件试验过程	37
3.2 C30 试件试验过程	40
3.3 C60 试件试验过程	44
3.4 C90 试件试验过程	47
3.5 试验结果综述	50
第4章 抗震性能分析	53
4.1 恢复力曲线	55
4.2 极限变形能力与位移延性比	60
4.3 耗能能力	64

4.4	强度退化与刚度退化	67
4.5	本章小结	71
第5章	承载力计算	73
5.1	受剪承载力计算方法的基本理论	75
5.2	单向桁架—拱模型的建立	87
5.3	双向桁架—拱模型的建立	91
5.4	试验值与计算值的比较	93
5.5	试件弯曲破坏验算	95
5.6	双向偏心受压承载力相关关系	97
5.7	本章小结	100
第6章	结论与展望	103
6.1	全书主要结论	105
6.2	创造性工作	106
6.3	研究展望	107
	参考文献	109

第1章

绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 框架柱双向受剪问题

钢筋混凝土框架柱是框架和框架—剪力墙结构中的主要承重构件,这些框架柱不仅要承受竖向荷载,将荷载传递给基础,在地震发生时还要承受水平荷载,通过梁、楼板与抗侧力结构进行空间协调。然而,在地震和风荷载的作用以及其他因素的影响下,由于钢筋混凝土框架柱的剪切破坏引起的结构物破坏甚至倒塌更为普遍,且难以控制。1968年日本十胜冲近海地震、1971年美国圣弗尔南多地震和1972年尼加拉瓜的马拉瓜地震以后,人们通过震害调查发现,最显著的破坏就是钢筋混凝土框架柱的剪切破坏,而且主要发生在剪跨比小于2.5的短柱以及受剪增强箍筋配置较少的构件中^[1-4]。一方面,由于窗间墙等非承重结构的存在减小了柱的高度;另一方面,由于高层建筑物的层高以及钢筋混凝土框架柱截面尺寸的限制,钢筋混凝土短柱在结构中的存在是不可避免的。

矩形截面钢筋混凝土框架柱的剪切破坏按照水平荷载作用方向的不同,可分为斜向水平荷载作用下(图1-1)钢筋混凝土框架柱的剪切破坏和正向水平荷载下(即水平荷载 V 的作用方向与柱截面的某个主轴平行)钢筋混凝土框架柱的剪切破坏两类。正向水平荷载是指水平荷载仅作用在柱截面的某个主轴方向上;斜向水平荷载称为双向水平荷载,这是因为,如果将斜向水平荷载 V 在柱截面的两个主轴方向上分解为 V_x 和 V_y ,那么,斜向水平荷载作用下钢筋混凝土框架柱如同在柱截面的两个主轴方向上分别同时承受水平荷载 V_x 和 V_y ,通常所说的双向受剪在分析上即斜向水平荷载作用下钢筋混凝土框架柱的受剪,因此可称之为“双向受剪”。

日前国内外的研究成果中,对钢筋混凝土框架柱在正向水平荷载作用下的受力性能和破坏机理积累了大量的试验结果,进行了比较深入的分析^[5-22],而对斜向水平荷载作用下的研究甚少。造成这一现状的原因,一方面是矩形截面钢筋混凝土框架柱在地震和风荷载作用下的剪切破坏机理较弯曲破坏机

理要复杂得多,而且矩形截面钢筋混凝土框架柱在斜向水平荷载作用下的受力性能和正向水平荷载作用下的受力性能又存在很大的差异,且更复杂,国内外学者虽然也对此进行了一些研究,得出了一些有益的成果,但至今还没有一个公认可行的方案;另一方面,在实际工程中,通过构造措施往往能够比较容易做到“强剪弱弯”,使结构发生延性较好的弯曲破坏,而避免延性较差的剪切破坏的发生。

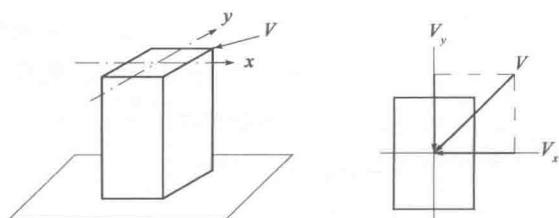


图 1-1 斜向水平荷载作用下钢筋混凝土框架柱的受剪

由于在实际工程中,矩形截面钢筋混凝土框架柱在地震和风荷载的作用下仅仅在一个主轴方向受剪的情况几乎是不存在的,因而有必要对钢筋混凝土框架柱在斜向水平荷载作用下的受力性能和破坏机理进行研究,并建立起合理的力学模型,进而提出切实可行的承载力计算公式。

矩形截面钢筋混凝土框架柱在斜向水平荷载作用下的受剪性能和在正向水平荷载下的受剪性能存在明显的差别^[23-27]。许多学者和研究机构对钢筋混凝土框架柱在斜向水平荷载作用下的双向受剪性能进行了试验研究与理论分析,并得出钢筋混凝土正方形柱的双向受剪承载力不受荷载作用方向的影响和矩形截面柱的双向受剪承载力随荷载作用方向的不同而会发生变化且服从“椭圆规律”的结论^[23],如图 1-2 所示。“椭圆规律”是指斜向水平荷载作用下,钢筋混凝土矩形截面构件两个主轴方向上的受剪承载力可用一个椭圆方程来近似描述,反映了钢筋混凝土构件双向受剪承载力因水平荷载作用方向不同而出现的强度降低现象。

上述大量的研究成果主要是对钢筋混凝土框架柱斜截面受剪承载力变化规律的总结,而对于矩形截面钢筋混凝土框架柱在斜向水平荷载作用下的斜截面受剪承载力的设计和校核方法,在此之前尚未有人提出过明确的建议。

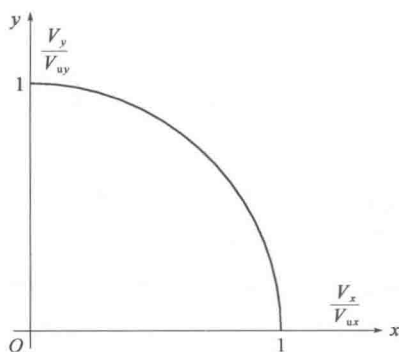


图 1-2 双向受剪承载力相关曲线

V_x -斜向水平荷载 V 在 x 轴方向上的分量; V_y -斜向水平荷载 V 在 y 轴方向上的分量; V_{ux} - x 主轴方向上的斜截面受剪承载力设计值; V_{uy} - y 主轴方向上的斜截面受剪承载力设计值

大量的试验结果表明,当矩形截面钢筋混凝土框架柱承受斜向水平荷载作用时,如果将斜向水平荷载 V 的作用等效为在柱截面的两个主轴方向上分别同时承受水平荷载 V_x 和 V_y ,然后据此在两个主轴方向上分别按照正向受剪进行设计,得到在两个主轴方向上的斜截面受剪承载力设计值 V_{ux} 和 V_{uy} (即按 $V_{ux} \geq V_x$ 、 $V_{uy} \geq V_y$ 在两个主轴方向上分别进行设计),则斜向受剪承载力设计值 $V_{u\theta} = \sqrt{V_{ux}^2 + V_{uy}^2}$,这样得到的斜向受剪承载力设计值 $V_{u\theta}$ 比实际的斜截面受剪承载力 $P_{u\theta}$ 大,如图 1-3 所示,从而过高地估计了受剪承载力,这在设计上是不安全的,在工程设计中是不允许的。因此,对于两个主轴方向上分别按照正向受剪进行设计的钢筋混凝土框架柱就需要进行加固补强。

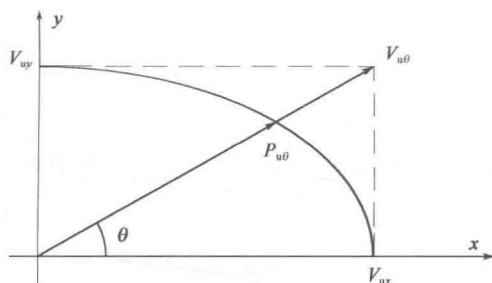


图 1-3 按正向受剪设计的受剪承载力设计值与实际受剪承载力的关系

1.1.2 碳纤维加固技术的优点

碳纤维按照生产原料的不同,可分为很多种类,并且不同种类有不同的特点。用于土木工程结构的碳纤维产品主要由 PAN 基碳纤维原丝制成,包括碳纤维布(Carbon Fiber Sheet)、碳纤维板(Carbon Fiber Plate)及碳纤维预应力筋(Carbon Fiber Prestressed Bar)。这些碳纤维产品的主要特点是:

①轴向抗拉强度高,纤维方向的抗拉强度为普通碳素钢筋的十几倍。

②密度小、轻而且薄,几乎不增加结构重量,几乎不占建筑体积。

③具有良好的抗疲劳、抗腐蚀、耐久、防水等性能。

④施工便捷,易于操作。

⑤弹性模量高,高弹型碳纤维的弹性模量略高于普通钢材,而高强型碳纤维的弹性模量可达普通钢材的 2 倍。

与传统的加固修补技术相比,碳纤维材料加固修补混凝土结构技术具有明显的技术优势,主要体现在以下几个方面:

(1) 高效高强

由于碳纤维材料具有优异的物理力学性能,在加固修补混凝土结构时可以充分利用其高强度、高弹性模量的特点来提高混凝土结构或构件的承载力和延性,改善其受力性能,达到高效加固修补的目的,这对于抗震加固修补具有尤其重要的意义。

(2) 良好的耐久性和耐腐蚀性

由于碳纤维材料的化学特性,决定了碳纤维加固修补的混凝土结构具有良好的耐久性和耐腐蚀性,可以抵抗建筑物经常遇到的各种酸、碱、盐等物质的腐蚀。应用碳纤维加固修补方法对结构进行处理后,不仅不需要如粘钢法所需要的定期防锈维护,从而节省昂贵的维修费用外,而且其本身就可以起到对内部混凝土结构的保护作用,达到双重加固修补的目的。

(3) 适用面广

碳纤维布加固修补技术可广泛应用于各种结构类型(如建筑物、构筑物、桥梁、隧道、涵洞、烟囱等),各种结构形状(如矩形、圆形、曲面结构等),各种结构部位(如梁、柱、板、拱、壳、墩等)的加固修补,而且不改变结构形状,不影

响结构的外观,这是目前任何其他结构加固方法都无法比拟的。尤其重要的是,对于一些大型的土木工程结构,如大型桥梁的桥墩、桥梁及桥板、隧道、大型筒体及壳体结构等,采用原有的传统加固方法几乎无法实施,而采用该技术都可以很顺利地解决。

(4) 施工便捷

施工工效高,没有湿作业,不需要大型施工机具,无需现场固定设施,施工占用场地少。成品的碳纤维加固材料是一种织物,其幅宽可以为20cm、30cm、50cm,甚至100cm不等,长度为50~100m,卷成卷,现场使用时可以根据需要用剪刀或刀片将其任意裁减,不像钢板那样需要专门的切割工具。据有关资料显示,粘贴碳纤维布是粘贴钢板施工工效的4~8倍。

(5) 施工质量容易保证

由于碳纤维材料是柔性的,所以在被加固的结构表面不平整时也基本可以保持近100%的有效粘贴率,而且即使粘贴后发现表面局部有气泡也容易处理,只要用树脂注射器将树脂注射进气泡中将空气赶走即可。

(6) 对结构无额外的负担

碳纤维材料质量轻而且很薄,粘贴后每平方米质量不到1.0kg(包括树脂质量),粘贴一层厚度仅为1.0mm左右,加固修补后,基本不增加原结构自重和原构件尺寸。

1.2 国内外的研究现状

1.2.1 斜向水平荷载作用下钢筋混凝土框架柱抗剪性能的研究现状

1975年,美国TEXAS大学进行了25根正方形截面柱和10根矩形截面柱在斜向水平荷载作用下的试验^[23];1983年,日本梅原秀哲等发表了9根正方形柱和10根矩形柱在斜向水平荷载作用下的试验结果^[24];1984年,Kyle A. Woodward等发表了12根正方形短柱在斜向水平荷载作用下的试验结果^[25];1984年,Kyuichi Maruyama等发表了18根正方形柱的试验结果^[26];1984年,Umehara, Hidetaka等发表了20根正方形和矩形柱的试验结果^[27]。上述几位

学者得出的主要结论是:正方形截面钢筋混凝土框架柱的受剪承载力不受荷载作用方向的影响,这类似于圆形截面钢筋混凝土框架柱在水平荷载作用下的受剪性能;而两个主轴方向上配箍量相等的矩形截面钢筋混凝土框架柱的双向受剪承载力相关方程随水平荷载作用方向而发生变化,并且服从椭圆规律。

1986年,上海同济大学结构理论研究所发表了24根两个主轴方向上配箍量相等的矩形截面钢筋混凝土柱在斜向水平荷载作用下的试验结果^[28],分析了几个主要参数对柱斜截面受剪承载力的影响,并对斜向水平荷载作用下矩形截面钢筋混凝土柱受剪承载力的设计和校核方法提出了建议,主要结论如下:

(1)斜向剪切破坏的钢筋混凝土柱与正向剪切破坏的钢筋混凝土柱可属于同一延性等级,斜截面受剪承载力设计时可靠度指标 β 可取相同的值。

(2)当两个主轴方向上配箍量相等时,无论是单调荷载作用下,还是反复荷载作用下,荷载作用方向对矩形截面钢筋混凝土柱受剪承载力的影响均服从椭圆规律。

(3)对于两个主轴方向上配箍量相等的矩形截面钢筋混凝土柱,可直接根据折算截面法进行斜截面受剪承载力的设计或校核。

对于两个主轴方向上配箍量相等的矩形截面钢筋混凝土柱,也可分别在两个主轴方向上按照“超强系数法”进行斜截面受剪承载力的设计^[28],如图1-4所示。为了保证斜方向的受剪承载力,将斜向水平荷载 V 在两个主轴方向上的分量 V_x 和 V_y 分别乘以大于1.0的某组系数 ζ_x 和 ζ_y ,框架柱在两个主轴方向上的斜截面受剪承载力设计值 V_{ux} 和 V_{uy} 按 $V_{ux} \geq \zeta_x V_x$ 和 $V_{uy} \geq \zeta_y V_y$ 取值,然后在两个主轴方向上分别进行正向受剪承载力的设计;或者减小两个主轴方向上的受剪承载力为 $V_x \leq V_{ux}/\zeta_x$ 和 $V_y \leq V_{uy}/\zeta_y$,然后在两个主轴方向上分别进行正向受剪承载力设计,以保证设计安全。图1-4中的系数 ζ_x 和 ζ_y 即分别为两个主轴方向上的超强设计系数。

在现有试验结果的基础上,我国一些学者对两个主轴方向上配箍量相等的矩形截面钢筋混凝土框架柱在斜向水平荷载作用下的斜截面受剪承载力的设计和校核方法进行了研究,得出了一些有益的成果^[29-33],其中除以上提到

的折算截面法和超强系数法外,还包括最小体积用钢量法以及其他一些简化方法^[30,33]。我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)[现已更新为《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),作者研究时系参考2002版规范,下同]中也增加了矩形截面双向受剪的钢筋混凝土框架柱斜截面受剪承载力的设计条文^[34]。

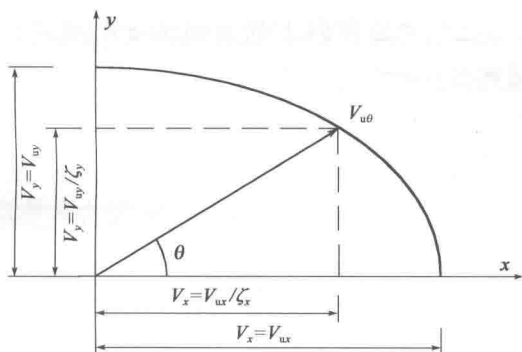


图1-4 超强设计的概念

到目前为止,对于矩形截面双向受剪的钢筋混凝土框架柱的斜截面受剪承载力分析,国内外仅有的试验依据是在两个主轴方向上配箍量相等的情况下,双向受剪承载力服从椭圆规律。但是在实际工程中,对于矩形截面的钢筋混凝土框架柱,由于构造要求或其他方面的原因,在两个主轴方向上的实际配箍量 A_{svx} 和 A_{svy} 往往并不相等(图1-5),实际配箍形式也可能有较大的差异。对于这些配箍形式的矩形截面钢筋混凝土框架柱,其双向受剪承载力的相关关系有待研究。

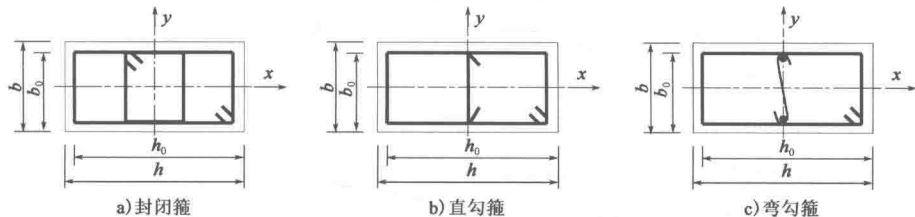


图1-5 两个主轴方向上配箍量不相等的配箍形式

研究表明^[35-44],在双向荷载作用下构件的抗震性能与单向荷载下的构件性能不同,表现出明显的双轴耦合效应。箍筋配置越多,其延性提高越显著;双轴同时加载互有影响,即使在一个主轴方向保持与最大荷载相应的位移不变,该主轴方向的承载力也会随着与之正交方向的变形的增加而减小。同时,构件在一个方向上的损伤积累也会对与之正交的另一个方向的性能产生相当不利的影响,这种不利影响表现在如果沿两个方向同时施加反复荷载,两个主轴方向上强度和刚度的退化程度要比单轴反复荷载的情形严重得多。

S. N. Bousias^[36]等采用了 11 种双向加载规则进行了钢筋混凝土柱的试验,在每个方向上也是采用单一控制模式,或者是力,或者是位移控制模式。K. Kobayashi^[37]等曾采用 6 种加载规则研究了圆形截面钢筋混凝土柱的双向加载问题。冈田恒男^[38]等也采用类似规则研究了恒定轴力下钢筋混凝土柱在双向加载时的破坏情况。S. S. Low^[39]曾经对 5 个钢筋混凝土柱进行过双向加载试验研究。Low 等研究表明,各种加载方式的不同对柱的抗力、刚度、破坏程度等有很大的影响。目前,国内对双向循环荷载下柱的抗震性能的研究还很少,大多是施加单方向循环荷载的研究。清华大学的杜宏彪等曾做过对钢筋混凝土悬臂柱按一定荷载角加载的试验^[42],以分析柱在斜向水平荷载作用下,不同轴压比、配箍率、配筋率和加载角对其抗震性能的影响。试验中轴压比为 0.443,加载角度分别为 16°、30°、45°。清华大学邱法维^[43]进行了 7 个钢筋混凝土柱的双向加载试验研究,分析比较了单向加载和双向加载时柱的变形能力和破坏特征,研究了不同加载路径下钢筋混凝土柱的累积滞回耗能的变化和累积损伤情况。研究表明,双向力的相互作用严重地影响柱的恢复力和滞回耗能能力,而且双向加载的塑性变形能力也明显低于单向加载时的能力。累积滞回耗能与加载路径的位置和长度有密切关系,但是双向加载的累积滞回耗能明显大于单向加载时的情况。不同的双向加载路径对试件的累积损伤影响很大。如果仅仅单独比较 x 方向或 y 方向的累积损伤,双向加载时某一方向的损伤一般小于单向加载时的累积损伤,但是双向加载时试件的总体累积损伤比单向加载时的累积损伤严重。大连理工大学的李宏南^[44]等人通过 6 根完全相同的钢筋混凝土柱,利用拟静力试验分别进行了不同轴压