

混杂纤维及钢纤维 自密实混凝土梁的 抗剪性能研究

Shear Behavior of
Hybrid Fiber and Steel Fiber Reinforced Self-compacting Concrete Beam

尤志国 韩建强 杨志年 徐国强 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

混杂纤维及钢纤维自密实 混凝土梁的抗剪性能研究

尤志国 韩建强 著
杨志年 徐国强



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

混杂纤维及钢纤维自密实混凝土梁的抗剪性能研究/尤志国等著. —武汉:
武汉大学出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-307-16284-6

I. 混… II. 尤… III. 混凝土—梁—抗剪强度—研究 IV. TU375.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 148121 号

责任编辑:王 睿

责任校对:方竞男

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:342 千字

版次:2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-16284-6 定价:75.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

混杂纤维自密实混凝土和钢纤维自密实混凝土是近年来建筑工程中发展起来的一种新型材料,结合了纤维混凝土和自密实混凝土的优点,有效地解决了新拌混凝土工作性能不良在结构配筋密集处或狭窄封闭区域引起的建筑工程质量的问题,增强增韧型的钢纤维和高性能合成粗纤维的存在改善了在施工现场钢筋配置不当引起的结构性裂缝的问题。用纤维增强自密实混凝土并部分替代钢筋(尤其指箍筋)目前是国内外专家、学者的一个重点研究方向。近年来,我们在这一领域进行了一些探索性的研究,取得了一些阶段性的研究成果,在此整理成书供读者参考。

本书在纤维自密实混凝土工作性能、抗弯性能理论及纤维-钢筋混凝土、钢筋混凝土构件抗剪基本理论的基础上,结合数据分析处理重点介绍了混杂纤维和钢纤维自密实混凝土矩形梁和 T 形梁的抗剪性能、抗剪承载力公式的建立。全书共分为 10 章。第 1 章绪论主要介绍混杂纤维-钢筋自密实混凝土研究背景及前景、混杂纤维-钢筋自密实混凝土矩形梁和 T 形梁的抗剪性能目前研究现状、存在的问题及后续的研究方向展望;第 2 章介绍了纤维自密实混凝土及纤维-钢筋混凝土梁抗剪基本理论;第 3 章介绍了纤维自密实混凝土的工作性能及抗弯性能;第 4 章介绍了钢纤维-钢筋自密实混凝土矩形梁的抗剪性能;第 5 章介绍了混杂纤维-钢筋自密实混凝土矩形梁的抗剪性能;第 6 章介绍了混杂纤维-钢筋自密实混凝土 T 形梁的抗剪性能;第 7 章介绍了纤维-钢筋自密实混凝土梁的剪切延性;第 8 章介绍了纤维替代箍筋的可行性;第 9 章介绍了钢纤维-钢筋自密实混凝土梁的抗剪强度经验公式;第 10 章介绍了混杂纤维-钢筋自密实混凝土梁的抗剪承载力。

本书内容系统、科学,具有较强的创新性和较高的学术价值,可供纤维混凝土技术人员、科研人员及教学人员参考、学习。

本研究工作得到了国家自然科学基金、河北省自然科学基金等项目的支持,同时得到了本领域许多专家、教授的教诲和指导,本书也引用了国内外专家、学者的研究成果,在此一并表示感谢。

由于著者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2015 年 5 月

于华北理工大学建筑工程学院
河北省地震工程研究中心

目 录

1	绪论	(1)
1.1	研究背景	(1)
1.2	纤维-钢筋混凝土梁抗剪性能的研究现状	(3)
1.3	研究内容	(6)
2	纤维自密实混凝土及纤维-钢筋混凝土梁抗剪基本理论	(7)
2.1	自密实混凝土介绍	(7)
2.2	纤维自密实混凝土介绍	(22)
2.3	纤维自密实混凝土抗弯性能研究	(27)
2.4	纤维-钢筋混凝土构件抗剪基本理论	(40)
3	纤维自密实混凝土的工作性能及抗弯性能	(77)
3.1	纤维自密实混凝土的配合比设计	(77)
3.2	纤维自密实混凝土的工作性能	(84)
3.3	标准立方体抗压强度	(87)
3.4	纤维自密实混凝土的抗弯强度及弯曲韧性	(89)
3.5	小结	(100)
4	钢纤维-钢筋自密实混凝土矩形梁的抗剪性能	(101)
4.1	试验设计	(101)
4.2	试验结果及分析	(104)
4.3	小结	(112)
5	混杂纤维-钢筋自密实混凝土矩形梁的抗剪性能	(113)
5.1	试验设计	(113)
5.2	试验结果及分析	(116)
5.3	小结	(128)
6	混杂纤维-钢筋自密实混凝土 T 形梁的抗剪性能	(130)
6.1	试验设计	(130)
6.2	试验结果及分析	(132)
6.3	小结	(164)

7	纤维-钢筋自密实混凝土梁的剪切延性	(165)
7.1	基于荷载-挠度曲线或剪力-位移曲线的延性分析	(165)
7.2	基于峰值后名义平均等效抗剪强度的剪切延性分析	(167)
7.3	小结	(176)
8	纤维替代箍筋的可行性	(178)
8.1	钢纤维替代箍筋的可行性	(178)
8.2	混杂纤维替代箍筋的可行性	(182)
8.3	经济可行性分析	(190)
8.4	小结	(191)
9	钢纤维-钢筋自密实混凝土梁的抗剪强度经验公式	(192)
9.1	纤维-钢筋自密实混凝土梁的抗剪机理	(192)
9.2	钢纤维自密实混凝土矩形梁的抗剪强度	(193)
9.3	钢纤维自密实混凝土 T 形梁的抗剪强度	(197)
9.4	小结	(204)
10	混杂纤维-钢筋自密实混凝土梁的抗剪承载力	(205)
10.1	应力-应变法	(205)
10.2	应力-裂缝口宽度法	(207)
10.3	考虑翼缘对抗剪有贡献作用的抗剪极限承载力	(211)
10.4	小结	(214)
	参考文献	(215)

1 绪 论

1.1 研究背景

裂缝是混凝土构件普遍存在的一种现象,裂缝的出现,降低了结构的抗渗性、耐久性,甚至影响结构的承载能力,也给结构的整体外观造成了不良影响。阻止或减缓裂缝的产生和发展,是一项紧迫而又复杂的系统工程^[1-7]。

裂缝产生的原因主要有设计、材料、施工、灾害等。混凝土原材料质量较差,会使新浇筑混凝土(比如 SCC,即自密实混凝土)流动性能低下或离析严重,影响建筑工程的质量。此时,混凝土振捣不密实、不均匀,那么硬化成型的混凝土就会出现众多的微孔隙、气穴和微裂缝,甚至出现蜂窝、麻面、空洞的现象。尤其是在结构配筋密集处,将会降低混凝土与钢筋的有效黏结性能,导致钢筋锈蚀或形成其他荷载裂缝的起源点,并减少钢筋的保护层厚度。火灾等灾害在结构中会引起裂缝,这直接影响到结构的安全度及耐久性^[1-7]。

虽然混凝土出现裂缝后的控制和处理措施日益完善,各国都已经制定了混凝土结构加固技术规范,但后期对裂缝的处理费用是巨大的^[6,7]。南非在 1981 年用于拆换桥梁、挡土墙、墩柱、路面、路缘、蓄水坝、系桩柱、防波堤、电杆基础等的经费就超过 2700 万英镑,上述这些结构物多是在建成后 3~10 年内就发现开裂的。加拿大魁北克省博赫尔洛依斯水电站于 1928 年开始兴建,至 1960 年全部建成。由于存在碱-集料反应,早在 1940 年就发现南部坝体因出现裂缝而渗漏,后来在进水系统和办公大楼发现开裂和变形。赵国藩院士^[7]总结了国内外混凝土建筑物中钢筋锈蚀破坏调查实例,有很多案例是由于混凝土出现裂缝造成钢筋锈蚀的。许多发达国家每年用于建筑维修的费用都超过新建的费用。

要想完全阻止裂缝的产生是不可能的,只能从设计配合比、施工工艺及材料等方面加以改进,尽可能地减少和细化裂缝。过去的重要建筑物(例如大跨度桥梁和高层建筑)常不敢采用混凝土结构,而宁愿采用造价和维修费用较高的钢结构。在 20 世纪 50 年代以前,钢筋混凝土建筑很少有超过 30 层的。直到 20 世纪 50 年代,混凝土均匀性得到改进且性能有显著提升后,混凝土结构才开始被广泛采用。而优良的工作性能是混凝土均匀性的保证^[6,8]。

目前,许多国内外学者都在致力于自密实混凝土(SCC)的研究。良好的工作性能是保证混凝土质量及耐久性的重要条件之一;SCC 较高的流动度与抗离析性能的结合使它除具有高性能混凝土(HPC)的优点外,还可保证结构中混凝土的密实、节约振捣费用、较

大地改善施工体系。

近年来,国内一些大跨度桥梁及工业与民用建筑结构中的梁板在投入使用后,相继出现了一些结构性斜裂缝,这严重降低了结构的安全性及适用性;其中许多斜裂缝是由弯起钢筋与箍筋配置不当及所使用混凝土的工作性能低下,没有与钢筋形成密实有效的握裹而引起的。南京水利科学研究院洪定海教授^[7]等专家在1963年对使用仅7年的湛江海港码头进行了调查,据调查结果显示,起重机轨道梁由于配筋过密,导致石粒卡住,漏浆包不住钢筋,从而造成钢筋锈蚀。图1.1为施工配筋图,可见,钢筋配置过密或不当,混凝土振捣困难,受力性能很差。

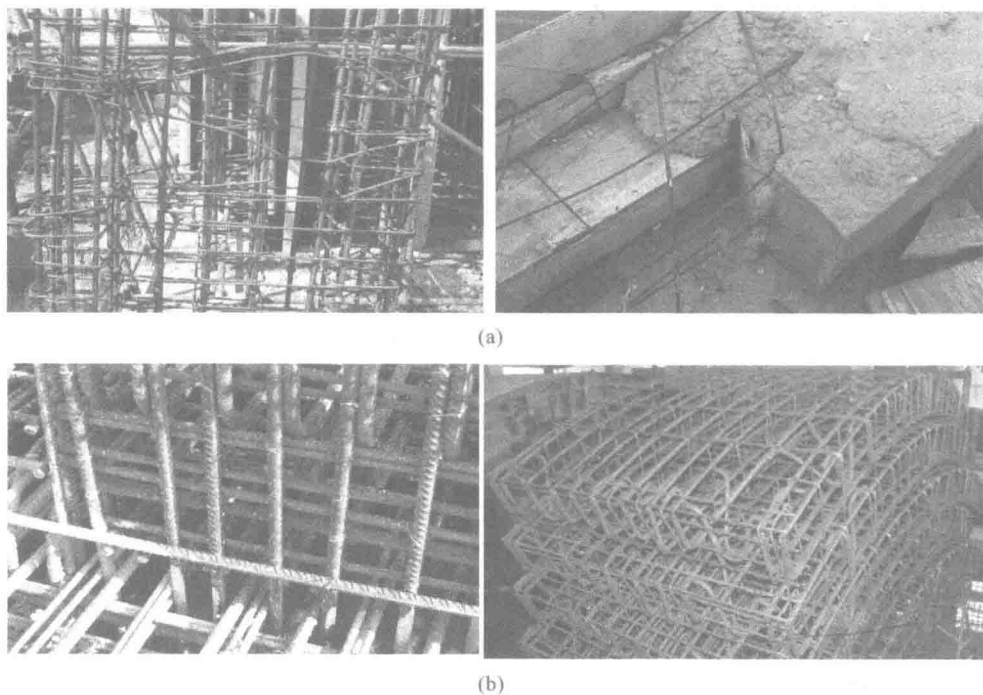


图 1.1 施工配筋图

(a)配筋不当;(b)配筋过密

在截面狭窄或封闭处(如大跨度桥梁结构中的T形截面梁,箱形截面梁^[17,18]、盾构管片端部等区域)准确布置弯起钢筋的难度非常大[图1.1(b)];此外,欧洲标准(Eurocode 2)^[19]在15年前就禁止使用弯起钢筋。以上因素对箍筋使用提出了更高的要求。现场调查表明,由于设计及施工等原因,在支座附近抵抗斜裂缝的抗剪箍筋的布置不可能很准确,例如,按照设计要求,箍筋间距应为10cm,而几乎所有施工现场的间距均为5~15cm,尽管总的箍筋数量在弯剪区满足设计要求。但这种情况一方面影响了混凝土的浇筑及振捣质量,另一方面在使用过程中易在构件的弯剪区产生应力集中,并产生斜裂缝且扩展较快甚至断裂。

钢筋混凝土承重构件在剪力和弯矩的共同作用下常产生斜裂缝,并沿斜截面发生脆性破坏。研究表明^[20-23],由于不同纤维在混凝土基体中的三维随机乱向分布,大量纤维可横跨或垂直于主拉应力,对于抵抗斜裂缝而言,纤维可发挥出比弯起钢筋或箍筋更好的效果,还可替代部分箍筋,这在一定程度上又可提高施工速度及质量。近年来在欧洲提出的

“false principle”就是基于以上设想提出的,即在钢筋设置过于密集处,适当扩大箍筋间距,浇入纤维增强的 SCC,用纤维替代部分箍筋,以达到提高构件抗剪强度及韧性,并有效控制斜裂缝产生和发展的目的。这也正是目前国际上正在探索及我们所要解决的主要问题之一。

纤维自密实混凝土(FRSCC)综合了自密实混凝土与普通纤维混凝土(FRC)的不同优点。但是,目前对 SCC 的研究与应用主要集中在材料特性、工作性能、强度上^[9 16,20]。对纤维自密实混凝土而言,还体现在对其抗弯韧性的研究上,但是这并不符合纤维自密实混凝土在承重构件中复合受力的情况。此外,还缺乏对 FRSCC 中大量纤维替代箍筋进行抗剪和替代纵筋进行抗弯的性能研究;同时,不同纤维,尤其是混杂纤维的效能被低估,这也限制了 FRSCC 的发展。

随着各类新型高性能增强增韧型粗纤维(长钢纤维、仿钢丝合成粗纤维等,合成纤维均为长度不小于 3cm 的增强增韧型仿钢丝粗纤维)的快速发展,为在具有复杂受力状态的构件中应用纤维自密实混凝土(FRSCC),并用高性能纤维替代箍筋和纵筋提供了较好的前提。但在研究中仍存在许多尚未解决的难题:①尚无标准的 FRSCC 工作性能测试与评价方法;②缺乏对纤维自密实混凝土和纤维与箍筋共同作用时的剪切强度、韧性、剪切破坏机理及不同纤维对剪切裂缝扩展影响的系统研究。从而限制了 FRSCC 在承重结构中的应用与发展。这使得纤维主要单独应用于工业地板、路面抵抗收缩裂缝等,因此,无法充分发挥纤维在复合受力状态下提高韧性及改善结构与构件破坏形态的优势。

实验表明^[24 29],在 SCC 中加入适量纤维可明显提高构件的抗弯及抗剪韧性。目前的研究主要集中在工作性能-强度方向,主要研究了 SCC 的材料特性,缺乏材料与结构的有机联系,尤其是承重结构的箍筋与纤维共同作用时对抗剪强度、韧性及斜裂缝的影响规律。

德国混凝土科技报告建议开展以下关于钢纤维、增韧型高性能合成纤维混凝土的研究:

- ①钢纤维、增韧型高性能合成纤维对提高自密实混凝土韧性的研究;
- ②在配筋过密处适当减少箍筋用量,而以纤维替代部分箍筋以提高施工质量及速度等为突破方向的研究;
- ③由于材料性能不同,混杂使用钢纤维及增韧型合成纤维对改善应力分布及破坏形态的研究。

1.2 纤维-钢筋混凝土梁抗剪性能的研究现状

1.2.1 矩形梁的研究现状

(1)国内研究现状

在我国,已有关于钢纤维混凝土梁抗剪承载力设计的规程——《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)^[30],它是在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[31]基础上建

立的。关于普通钢筋混凝土梁的抗剪承载力的设计及原理可参考相关规范或书籍^[32,33]。高丹盈^[34]、尤志国^[35,37]、赵顺波^[36]和张宏战^[38]等人对钢筋钢纤维混凝土矩形梁斜截面受力性能进行了相关的试验研究和分析,发表了多篇相关论文。研究表明:钢纤维可以承担剪力,其跨越斜裂缝形成“桥架作用”,减小了斜裂缝宽度,从而增大了骨料咬合力,增强了纵向受拉钢筋销栓作用,提高了钢筋-钢纤维混凝土梁的斜截面承载力,钢纤维对提高梁的斜截面抗裂度和控制斜裂缝发展效果显著,可以提高混凝土在剪压复合受力状态下的强度,提高混凝土的韧性和极限变形能力。

刘亚军^[39]、刘岳鑫^[40]等人进行了钢纤维对自密实钢筋混凝土梁受剪性能影响的研究,得到了一些有意义的研究成果。研究表明:增韧型钢纤维可以有效地改善无腹筋梁的抗剪性能,掺量为 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 的钢纤维使梁的极限承载力提高达 97%;钢纤维部分取代箍筋,二者协同作用具有更好的抗剪效果,0.183% 的配箍率协同 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 的钢纤维掺量共同抗剪使梁的抗剪承载力提高达 131%,变形方面也有较大的改善。纤维的存在能很好地控制裂缝的开展,使裂缝间距变得更加紧密,提高梁的刚度。

国内对混杂纤维(短切纤维)高性能自密实混凝土的研究还主要集中在工作性能^[7]、材料强度及韧性^[24-27]等方面,而对混杂纤维增强钢筋高性能自密实混凝土梁的斜截面受力性能的研究还是空白。本课题组在丁一宁^[24-27]的主持下,在工作性能试验研究的基础上,根据不同国际标准研究了不同类型纤维(钢纤维、聚丙烯纤维、合成纤维和混杂纤维)对自密实混凝土和传统混凝土强度与抗弯韧性的影响。研究结果表明:混杂纤维可显著提高自密实混凝土和传统混凝土的抗弯韧性并改善其破坏形态。混杂纤维可作为配制纤维自密实混凝土的最佳选择之一。

(2) 国外研究现状

1972 年, Batson 等人^[44]首次发表钢纤维混凝土无腹筋梁斜截面抗剪性能的研究报告,试验采用钢丝切断平直钢纤维和波形剪切钢纤维,纤维体积掺率 $\rho_f = 0.22\% \sim 1.76\%$,多数试件的剪跨比 $\lambda > 3.0$ 。由 24 根梁的试验结果表明,钢纤维可以有效地增强钢筋混凝土无腹筋梁斜裂缝处纵筋的销栓作用,显著降低大剪跨比梁斜拉破坏的脆性特征。进入 20 世纪 80 年代后,对钢纤维混凝土梁斜截面承载力的研究得到了重视, Niyogi^[45]、Swamy^[46]、Mansur^[47]、Sharma^[48]、Lim^[49]、Narayanan^[50]等人相继展开了钢纤维混凝土无腹筋梁的斜截面受力性能研究,使用的钢纤维种类有钢丝切断平直形、波形、表面刻痕形和普通剪切形,试验结果揭示了钢纤维对钢筋混凝土梁斜截面承载力的增强效果,以及梁的破坏形态由斜截面剪切破坏向正截面弯曲破坏的转化。

在 20 世纪 90 年代,又有大量的研究成果相继发表^[51-55],为钢筋混凝土梁的抗剪性能的研究积累了大量的样本空间。其中很多文献^[51-54]对钢纤维混凝土有箍筋梁进行了研究。其中 El-Niema^[51]的试验表明随着纤维特征参数 λ_f 的增大,梁初裂强度和受剪承载力有明显提高,梁的延性也得到显著改善。而 Tan^[52]证明用钢纤维替代部分箍筋,可以不影响梁的刚度、抗剪强度和开裂强度。Furlan^[53]的试验证明钢纤维提高了梁的抗剪强度,并使 4 根箍筋梁的破坏方式转化为弯曲破坏,掺入 2% 的钢纤维无腹筋梁的延性与箍筋梁相似,进一步证明了以钢纤维替代箍筋的可行性。而 Oh^[54]进一步对钢纤维混凝土箍筋梁的配箍率和钢纤维体积掺率进行了组合优化试验,结果表明,使用钢纤维可以减少

所需箍筋用量,综合使用箍筋和钢纤维可以达到梁的强度和延性要求。综合使用 $\rho_{sv}=0.9\%$ 的箍筋和 $\rho_f=1.0\%$ 的钢纤维,以及 $\rho_{sv}=0.7\%$ 的箍筋和 $\rho_f=2.0\%$ 的钢纤维,是能够达到梁的强度和延性要求的有效组合。

2000 年至今,国外学者对钢纤维混凝土梁斜截面受力性能继续进行研究^[56-65],其中 Eric J. Tompos^[60]等研究了横向钢筋的分布、箍筋锚固条件、箍筋强度的离散性、开裂角度不同时箍筋效率的比较。基于试验结果,作者提出了较为合理的抗剪承载力计算时的箍筋下限值。Cucchiara^[62]对箍筋和钢纤维作为抗剪钢筋的效率做了比较,试验证明,钢纤维混凝土梁的裂缝开展与箍筋梁相比是一个渐进的过程,钢纤维减小了裂缝的宽度;以足够掺量的钢纤维代替箍筋作为抗剪钢筋能够得到与箍筋梁相当的承载力,但钢纤维和箍筋组合使用更加合理,原因在于箍筋能够允许梁在弹性极限后发生更大变形;根据对荷载位移曲线下降段的分析,可知钢纤维能够使梁从脆性的剪切破坏转化为延性的弯曲破坏,从而大大提高耗能能力。A. Meda^[63]等人进行了足尺试验梁的抗剪性能的研究,结果表明无腹筋纤维混凝土梁的抗剪性能相似于或好于有箍筋的梁。Kyong-Kyu Choi、Hong-Gun Park^[64,65]等提出了普通混凝土梁和钢纤维混凝土梁抗剪计算的理论模型。在无腹筋梁中,作者假定剪力主要由未破坏的混凝土受压区承担,而不是受拉区;在有腹筋梁中,抗剪承载力由受压区和受拉区共同抵抗。受拉区的抗剪能力由 FRC 的裂后抗拉强度定义,所提出的抗剪模型用以前的试验结果进行了验证。

国外对混杂纤维混凝土梁抗剪性能的研究较少。K. Noghabai^[56]等人进行了混杂纤维混凝土高强混凝土梁在弯剪复合作用下的试验和理论研究,结果表明,混杂纤维相比单掺纤维能更好地提高梁的韧性性能,高强混凝土做基体时,混杂纤维 S30/0.6(长度/长径比)和 S6/0.15 的效果要优于直径为 8、间距为 130 的梁;普通混凝土做基体时,要低于直径为 8、间距为 130 的梁。K. Noghabai 所使用的纤维为长钢纤维和短钢纤维的混杂,国外还没有混杂纤维(钢纤维与仿钢丝合成粗纤维)增强钢筋高性能自密实混凝土梁斜截面受力性能的研究。

综合纤维-钢筋混凝土梁抗剪性能的研究现状,可见混杂纤维增强钢筋高性能自密实混凝土梁的斜截面受力性能的研究在国内还是空白,在国外也仅处于起步阶段,还没有混杂钢纤维和合成纤维增强的钢筋自密实混凝土梁的抗剪性能的相关研究。

1.2.2 T 形梁的研究现状

(1) 国内研究现状

从 20 世纪 80 年代开始,在我国对 T 形梁的斜截面受力性能的研究很少。仅季文玉^[66]、马晓蓉^[67]、吴昱^[68]、车惠民^[69]等进行了钢筋混凝土 T 形梁的斜截面受力性能的研究,而对纤维增强的钢筋混凝土 T 形梁的斜截面受力性能的研究还是空白。马晓蓉等人通过对 5 根钢筋混凝土矩形截面梁和 14 根 T 形截面梁的剪切破坏试验的对比,发现翼缘的变化并未对 T 形梁的斜截面抗剪承载力产生明显的影响。然而,车惠民对比了 4 片具有不同预应力值的无箍筋 T 形梁和矩形梁,结果表明:无箍筋预应力混凝土 T 形梁的抗剪强度比矩形梁的高,并且初步建议了 T 形梁抗剪强度的计算公式。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D 62—2004)^[70]中规定,当计算 T 形梁的抗剪承载力时,通常乘以受压翼缘的影响系数,取 1.1 倍,表征翼缘对 T 形梁抗剪承载力的贡

献。过镇海^[32]的研究表明:假设 $b_f=b$ 的矩形截面梁的抗剪极限承载力为 1, 那么 $b_f=2b$ 的试件抗剪承载力提高约 20%; 翼缘更宽的试件, 弯剪承载力几乎不再增大, 作者从材料弹性力学角度进行了简单的分析。

(2) 国外研究现状

在国外, 对 T 形梁或 I 形梁的斜截面受力性能, 有许多研究成果^[71-82], 研究人员包括 Phil M. Ferguson^[71]、A. Koray Tureyen^[80]、Ioannis P. Zararis^[81]、Youssef Choulli^[82]等。A. F. Al-Alusi^[72]研究了剪跨比、纵向钢筋的变化对 T 形梁的破坏模式、初裂抗剪承载力和极限抗剪承载力的影响, 发现 T 形梁受压翼缘中钢筋网和受压钢筋不影响极限抗剪承载力和初裂抗剪承载力; 剪跨比为 4.0~8.0 时, 极限荷载时的截面平均剪应力保持不变。Narayan Swamy and Shamsuddin A. Qureshi^[74], 进行了足尺 T 形梁和缩尺 T 形梁试验, 并对 T 形梁的抗剪性能进行了全方位对比, 研究表明: 缩尺 T 形梁试验能够全方位的模拟足尺 T 形梁的力学性能和变形特性。Craig Giaccio^[79]等人详细测量并分析了翼缘和腹板的混凝土应变随荷载的变化, 研究表明, 沿着翼缘深度和宽度采用线弹性分析是不合适的。A. Koray Tureyen^[80]等人给出了以下三种计算 T 形梁抗剪承载力的方法: ①shear funnel; ②form factor; ③ignoring flanges。与 ACI 抗剪承载力公式比较, 结果表明 ACI 公式的计算结果最保守。作者建议设计时采用 ignoring flanges, 但中和轴位置的计算应采用弹性开裂截面分析; 考虑翼缘对抗剪承载力的贡献时, 采用 shear funnel、form factor。Ioannis P. Zararis^[84]等提出了弯剪作用下 T 形梁的抗剪理论, 建立了 T 形梁抗剪强度的表达式。研究表明: T 形梁的抗剪强度远大于相同腹板的矩形梁抗剪强度, 这主要由翼缘引起的; 配箍率对 T 形梁抗剪性能的影响与矩形梁相比没有区别。最后, 在进行 T 形梁抗剪承载力计算时作者定义了翼缘的有效宽度表达式 $b_{ef}=A/c$ 。而对纤维增强的钢筋混凝土 T 形梁的斜截面受力性能的研究, 在国外也是空白的。

可见, 在普通钢筋混凝土 T 形梁抗剪性能研究的基础上, 纤维混凝土增强的 T 形梁抗剪性能、抗剪机理及斜截面抗剪承载力的研究还需要进一步深入和完善。

1.3 研究内容

针对新浇筑混凝土工作性能低下、混凝土出现裂缝、配筋过密或不当的工程问题, 采用纤维自密实混凝土是可行的。本书需要解决的科学问题包括: 确定钢纤维和混杂纤维(混杂不同类型的钢纤维及仿钢丝合成粗纤维)对自密实混凝土工作性能(流动性、抵抗离析性能及自流平性能)的影响规律。针对不同纤维, 确定可保证混凝土抵抗离析性能及较高流动度的最高纤维掺量和最优纤维含量范围; 以此纤维含量为基础, 确定纤维对自密实混凝土抗压强度、抗弯强度、抗剪强度、劈拉强度及各种韧性的影响规律。分析并确定用钢纤维或混杂纤维部分或全部替代抗剪钢筋, 以达到提高构件抗剪强度与韧性的目的, 改善脆性破坏作用, 并有效控制斜裂缝的产生和发展。建立钢纤维和混杂纤维混凝土梁的抗剪承载力公式。

2 纤维自密实混凝土及纤维-钢筋混凝土梁抗剪基本理论

2.1 自密实混凝土介绍

2.1.1 自密实混凝土的工作性能^[83]

工作性能也称工作性能或和易性,常用来定性描述混凝土拌和物的性质,是新拌混凝土最重要的特性之一。关于工作性能的定义,科学界和工程界之间已经争论了几十年。在我国,工作性能被定义为混凝土拌和物易于施工操作(拌和、运输、浇筑、捣实)并能获得质量均匀和成型密实的性能,包括流动性、黏聚性和保水性三个方面的含义。Saak、Jennings 和 Shah 认为工作性能通常指拌和物的稠度、流动性、可泵送性、密实性和干硬性。可见工作性能是一项综合的技术性质。

自密实混凝土(SCC)应该具有高工作性能。Okamura 和 Ozawa 认为新拌的 SCC 不仅要求浆体和砂浆具有高变形能力,同时要求混凝土流经钢筋限制区时具有抵抗粗骨料和砂浆离析的能力。Grunewald 等人认为 SCC 应该具有高流动性和中等黏度,流动时不发生堵塞,浇筑时混凝土能靠自身排除内部的空气。EFNARC 2002 标准认为 SCC 应具有满足要求的填充成型性能、间隙通过性能和抗离析性能。填充成型性能指 SCC 在自身重力作用下流进并完全填充模板内所有空间的能力,反映了新拌 SCC 在非限制状态下的流动性能。间隙通过性能指 SCC 流过钢筋间隙等狭窄开口不离析或堵塞的能力,反映了新拌 SCC 在受限制时的流动性能。混凝土离析是指新拌混凝土在运输、浇筑(动态)和凝结(静态)阶段,粗骨料颗粒从砂浆中分离出来的现象;抗离析性能指在运输和浇筑时 SCC 保持结构均质性的能力,反映了新拌 SCC 的稳定性。Khayat 等人认为自密实混凝土有三个基本的标准,即高变形能力、高通过能力或受限变形能力,以及高抗离析能力。

普通混凝土常用的工作性能评价方法包括坍落度试验、流动台试验、压实因子试验、Vebe 稠度仪试验和 Kelly 球穿透试验等,规范中通常规定使用两种或两种以上的上述方法共同评价混凝土的工作性能,作为混凝土生产和施工中质量控制的手段。但应该认识到这种试验方法的局限性,它们很大程度上是以随意定义的比例为基础的定性测量手段,每种试验只能测得一种值,所测值是特定试验下的特征值,各特征值彼此不同,每种测量结果都不是混凝土的基本特性。

为描述 SCC 工作性能各项性质指标,各国研究者已提出十余种测试方法。与普通混凝土工作性能评价时面临的问题类似,每种 SCC 工作性能试验方法都有其适用性和局限性,尚没有单一的试验方法可以全面描述 SCC 工作性能特性,所以应使用两种或两种以上的试验方法测试每种配合比的不同工作性能参数。表 2.1 所示为较为常见的 SCC 工作性能特性试验方法及其判断标准,其中坍落流动度试验、J 环试验、L 槽试验和 U 形管试验装置制作费用低,操作简单,适用于现场检验自密实混凝土拌和物的工作性能,应用较为普遍,如图 2.1 和图 2.2 所示。

表 2.1 自密实混凝土工作性能试验方法和判断标准

编号	试验方法	测量参数	单位	判断准则		所测工作性能
				最小值	最大值	
1	坍落流动度试验	D	mm	650	800	填充性能,抗离析性能
		T_{500}	s	2	5	填充性能,黏度
2	J 环试验	h	mm	0	10	间隙通过性能
		d	mm	650*	750*	填充性能,抗离析性能
3	L 槽试验	H_2/H_1	%	0.8	1.0	间隙通过性能
		T_{200}	s	1*	5*	填充性能,黏度
		T_{400}	s	3*	10*	填充性能,黏度
4	U 形管试验	h_1-h_2	mm	0	30	填充性能,间隙通过性能,黏度
5	V 形漏斗试验	流动时间	s	8	12	填充性能
		5min 后 流动时间	s	11	15	抗离析性能,填充性能
6	填充槽试验	平均填充率	%	90	100	间隙通过性能
7	GTM 屏稳定试验	离析率	%	0	15	抗离析性能
8	Orimet 试验	流动时间	s	0	5	填充性能

注: * 表示本书推荐值。

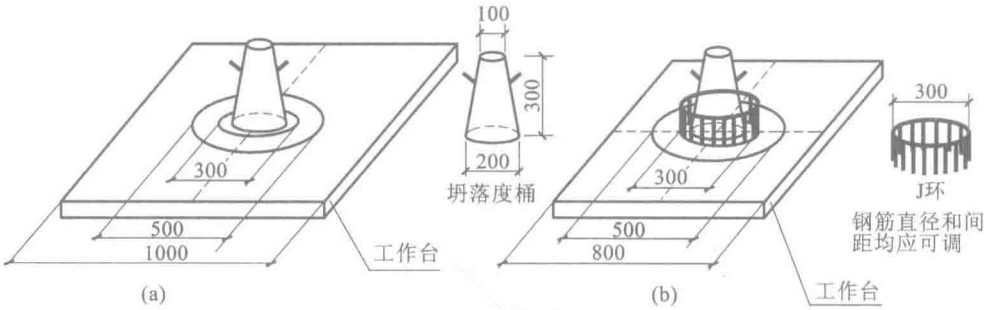


图 2.1 坍落流动度试验和 J 环试验装置示意图

(1)坍落流动度试验;(2)J 环试验

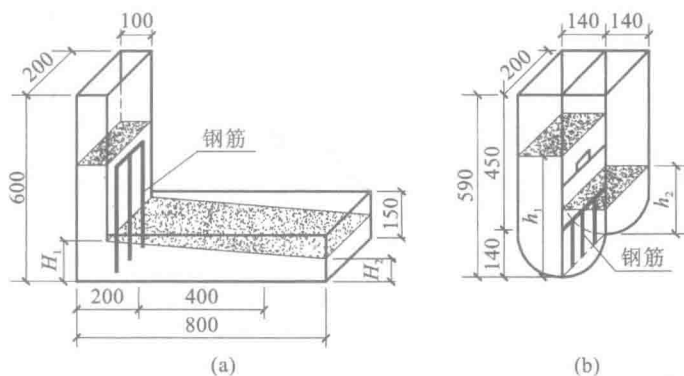


图 2.2 L 槽试验和 U 形管试验装置示意图

(a) L 槽试验; (b) U 形管试验

Van K. Bui 等人认为自密实混凝土的坍落流动直径应大于等于 600mm, 否则脱模后混凝土表面质量较差; 坍落流动时间 T_{500} 不宜超过 12s。Khayat 等人试验对比研究了评价自密实混凝土动态稳定性的现场试验方法, 包括坍落流动度试验、V 形漏斗流动时间试验、J 环试验、L 槽试验、U 形管试验及压力泌水试验, 得到如下结论: ①坍落流动度试验适于评价自密实混凝土非限制变形能力, 评价抗离析性能时须结合其他试验方法; ②J 环试验、L 槽试验、U 形管试验适于评价自密实混凝土限制性变形能力或通过钢筋间隙的能力, 三者试验结果具有较好的相关性; ③推荐使用 L 槽试验和坍落流动度试验进行施工现场质量控制, 评价自密实混凝土限制性和非限制性变形能力; ④J 环试验与坍落流动度试验也可用于评价自密实混凝土的变形能力和通过钢筋间隙的能力; ⑤与 J 环试验相比, L 槽试验可提供反映配合比黏度的流动时间值, 在中等流变学参数 ($g=0.3 \sim 1.7 \text{ N} \cdot \text{m}$, $h=17 \sim 27 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$) 下, 自密实混凝土 L 槽流动时间为 4~8s; ⑥ T_{500} 、V 形漏斗流动时间试验、L 槽试验及 U 形管试验均可用于评价黏性, 当变形能力一定时, 流动时间越长配合比黏性越高; ⑦压力泌水试验可用于评价悬浊液中浆体保持自由水的能力, 由于该实验仅耗时 10min, 适合于现场经常性质量控制及定量评价自密实混凝土稳定性。

EI-Chabib 和 Nehdi 认为, 坍落流动度、 T_{500} 、 T_{600} 、V 形漏斗流动时间、Orimet 流动时间和堵塞率等试验方法可测试自密实混凝土的填充能力和通过能力; T_{500} 和 V 形漏斗流动时间可评价自密实混凝土的黏度; L 槽试验、U 形管试验和 J 环试验可评价自密实混凝土通过钢筋间隙的能力。

坍落流动度试验、J 环试验、L 槽试验、U 形管试验等提供了一种依靠视觉观察判断离析的非定量方法, 例如对于坍落流动度试验, 可以观察坍落度筒提起后有没有砂浆析出或骨料堆积。目前尚没有类似测试流动性能和自密实性能的标准, 但已有广泛使用且相当可靠的试验方法测试自密实混凝土抗离析性能。最近出现的捕捉离析机理并定量评价 SCC 抗离析性能的试验方法有: 沉降柱试验 (settlement column test)、渗透仪试验 (penetration apparatus test) 和筛稳定性试验 (sieve stability test) 等。但这些试验方法有的要消耗大量的混凝土, 有的需要较长的时间且难于操作, 而且需更多的实验室和现场数据证明其结果的可靠性。

本书试验采用坍落流动度试验、J 环试验、L 槽试验和 U 形管试验四种方法,均按照欧洲自密实混凝土标准(EFNARC)进行^[9,10]。

下面对这四种方法进行详细的介绍。

(1) 坍落流动度试验

坍落流动度是衡量混凝土拌和物流动性能好坏的一个很直观的方法,而且从扩展的过程中还可以判断混凝土拌和物的抗离析性能。从流变力学的角度来看,扩展速度是可以反映混凝土拌和物的黏度系数 η ,但其对试验要求较高,试验中应注意坍落流动度筒的上提速度及时间的测量等因素。

① 试验装置及试验方法。

坍落流动度试验装置如图 2.3 所示。

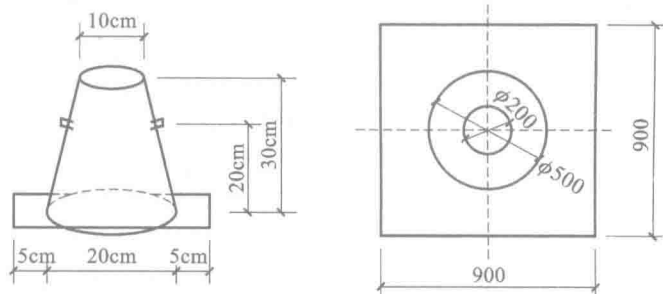


图 2.3 坍落流动度试验装置示意图

② 试验步骤。

a. 将坍落流动度台放于水平地面上。

b. 润湿坍落流动度筒内壁及工作台表面;将筒置于工作台的中心位置,与 200mm 直径圈周重合,踩住坍落流动度筒两边的脚踏板,使其在装料时保持固定位置,以保证没有混凝土浆体从底部漏出。

c. 向筒中逐次装料;无须振动或者插捣。使顶层自密实混凝土略高出筒口,刮去后用抹刀抹平;清除溅落于工作台上的混凝土。整个过程不得超过 30s。

d. 平稳、垂直地提起坍落度筒,计时开始,提起过程在 5~10s 内完成。

e. 记录混凝土流动到 500mm 刻度圈时所需的时间 T_{500} 。

f. 待混凝土流动稳定后,测量坍落流动度台上混凝土的水平流动最大直径 D_m 及其垂直方向的直径 D_r ,取其平均值为 $D = (D_m + D_r)/2$ 为坍落流动度值。

③ 试验需满足的要求。

a. $3s \leq T_{500} \leq 6s$ 。

b. $650mm \leq D, D_m, D_r \leq 800mm$ 。

(2) J 环试验

在进行坍落流动度试验的同时,对新拌高流态混凝土进行 J 环试验。使用 J 环测量自密实混凝土(SCC)和纤维自密实混凝土(FRSCC)的流动性,抗离析性及流经钢筋时的间隙通过能力。

本次试验所采用的 J 环的配筋形式为 16 根 $\phi 16mm$ 钢筋,钢筋间距 4.6cm,模拟了纵

向配筋率为 3.3% 的钢筋混凝土构件。由于纤维混凝土在流经钢筋时的阻塞情况不同, 所以拌和物在 J 环钢筋的中间与外围之间形成高差。试验需要测量 J 环中部与外围拌和物的高差 H 及拌和物的坍落流动扩展度 D 。

① 试验装置及试验方法。

J 环试验装置如图 2.4 所示。

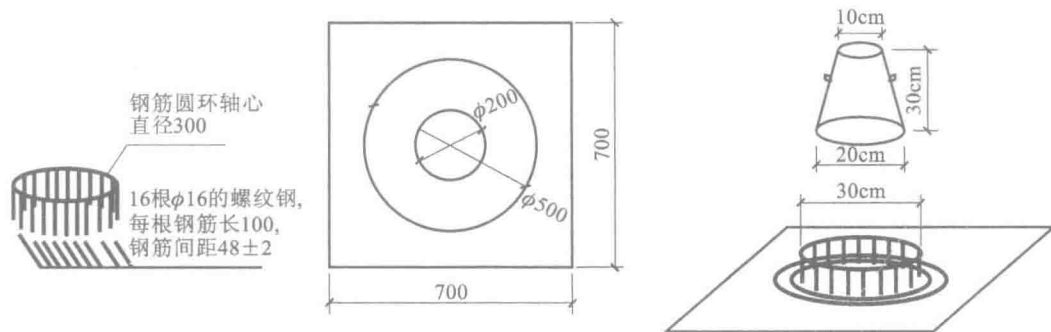


图 2.4 J 环试验装置

② 试验步骤。

a. 润湿坍落流动度筒内壁、J 环及工作台表面。

b. 将坍落流动度筒置于工作台的中心位置, 与 200mm 直径圈周重合, 牢牢地压住坍落流动度筒, 使其在装料时保持固定位置, 以保证不得有混凝土浆体从底部漏出; 将 J 环安装于工作台上的洞孔处, 使其稳定。

c. 向筒中逐次装料, 无须振动或者插捣。使顶层自密实混凝土略高出筒口, 刮去后用抹刀抹平; 清除溅落于工作台上的混凝土。整个过程不得超过 30s。

d. 平稳、垂直地提起坍落流动度筒, 使混凝土自由流动。

e. 待混凝土稳定后, 分别测量其最大流动直径 D_m 及与 D_m 相垂直的直径 D_r ; 取其平均值为 $D = (D_m + D_r)/2$ 为 J 环试验的坍落流动度值。

f. 测量 J 环内部与外围混凝土的高差, 分别测量四个点 h_1, h_2, h_3, h_4 ; 计算其平均值 $H = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)/4$, 作为自密实混凝土间隙通过能力评价参数。J 环内部与外围混凝土的高差不大于 15mm。

(3) L 槽试验

针对高流态混凝土的流动性特征, 为了综合反映它的变形能力、变形速度及在流动过程中的各组分能否保持均匀性, 采用 L 槽进行试验。

L 槽试验检查混凝土的通过钢筋间隙能力是很有代表性的。将混凝土装满立筒后, 打开活阀门, 混凝土通过钢筋间隙流出, 测定拌和物流动速度(流动距离/流至该刻度距离的时间)、立筒内混凝土坍落的高度和水平槽尾混凝土高度。通过这三个指标, 可以定量测定拌和物的填充性、间隙通过性及流动性, 能够综合评定自密实混凝土的流变性能。由立筒内混凝土坍落高度可评价拌和物的流动性, 由水平槽尾混凝土拌和物的高度和槽内混凝土的形状可判断拌和物的填充性, 筒内坍落度与传统坍落度法测定的坍落度差值应不大于 20mm, 水平槽尾混凝土高度与由筒内坍落而来的槽首混凝土高度之差也不应过大。