

钢筋钢纤维高强混凝土板 冲切性能研究

谢晓鹏 著



黄河水利出版社

钢筋钢纤维高强混凝土板 冲切性能研究

谢晓鹏 著



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书通过 13 块无腹筋简支整浇钢筋钢纤维高强混凝土双向板试验,研究了钢纤维体积率、钢纤维掺加范围和混凝土基体强度等级对钢筋局部钢纤维高强混凝土板冲切受力性能、破坏形态、裂缝的发生和发展、开裂承载力和冲切极限承载力、钢筋和混凝土应变及冲切破坏机理等的影响;提出了适用于钢筋高强混凝土板、钢筋局部钢纤维高强混凝土板和钢筋钢纤维高强混凝土板冲切极限承载力的统一计算公式;建立了钢筋局部钢纤维高强混凝土板荷载—中心挠度曲线上升段挠度计算方法,并结合试验结果拟合了试验板荷载—中心挠度曲线上升段的计算公式。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋钢纤维高强混凝土板冲切性能研究/谢晓鹏著.

郑州:黄河水利出版社,2009.9

ISBN 978-7-80734-676-0

I. 钢… II. 谢… III. 钢筋混凝土结构 IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 108550 号

策划组稿:简 群 电话:66026749 E-mail:w_jq@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hsls@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:5.5

字数:148 千字

印数:1—1 500

版次:2009 年 9 月第 1 版

印次:2009 年 9 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

钢筋混凝土板结构由于形式简单、传力途径短捷、能充分利用净高空间、板厚较小,并能有效降低房屋的总高度,经济效益显著,具有良好的适用性和可变性等优点,已在工程领域得到了广泛应用。但是钢筋混凝土板在集中荷载作用下,处于典型的局部受力状态,存在剪切应力和弯曲应力的高度集中,一旦结构所承受的荷载效应超过材料容许应力,便可能发生沿斜截面的冲切破坏。

普通钢筋混凝土板存在易开裂、延性差、冲切承载能力相对较低等缺点,往往需要配置较多的钢筋来弥补,但过多的钢筋并不能有效地限制板的开裂,也不能显著改善其延性和耗能能力,反而会使施工条件变差。

钢纤维混凝土是在混凝土中掺入适量的乱向短钢纤维形成的一种高性能复合材料,它克服了混凝土和高强混凝土脆性破坏的弱点,具有较好的抗拉、抗裂、抗剪和抗冲击等性能,尤其具有很好的延性、韧性及优良的耗能能力,钢纤维的加入对混凝土结构的力学性能和变形能力的改善非常明显。国内外已将钢纤维混凝土应用于土木工程的有关结构中,以改善结构的受力性能,约束裂缝的开展,提高结构的刚度和极限承载力。同时,还能在结构接近破坏时吸收大量能量,使其具有塑性破坏性质,并具备良好的延性和变形性能,但在高性能钢纤维混凝土冲切板的理论和应用研究方面尚缺乏足够的试验依据,新修订的《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)也缺少相关的设计理论。另外,目前由于钢纤维生产工艺的复杂性,材料价格昂贵,钢纤维混凝土的优良性能所带来的材料节省往往不足以补偿钢纤维加入所引起的初始成本的提高。以上因素严重阻碍了这种同时具有高冲切极限承载力、高延性、高抗裂性能的平板体系的应用和

钢纤维高强混凝土结构理论的发展和完善。正是基于这些原因,本书对钢筋局部钢纤维高强混凝土板(本书将这种只在集中荷载附近掺加钢纤维的钢筋高强混凝土板称为钢筋局部钢纤维高强混凝土板)冲切性能进行了较为系统的研究(笔者认为只在受力较大的集中荷载附近掺入适量钢纤维是解决冲切钢筋引起施工困难以及降低初始成本的有效措施)之后,提出的计算方法和公式,力图保持与普通混凝土计算理论的连续性,并基本达到了预期的目的。

本书是作者攻读博士学位期间,在导师高丹盈教授的悉心指导下完成的学术成果。由于作者学识有限,书中疏漏、不当和错误之处,谨请读者批评指正。

谢晓鹏

2009年3月于郑州航空工业管理学院

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 板冲切性能试验研究综述	(2)
1.3 板冲切极限承载力理论研究分析方法综述	(10)
1.4 板冲切极限承载力计算方法规范应用综述	(13)
1.5 选题依据及主要研究内容	(17)
第 2 章 钢纤维高强混凝土基本力学性能试验研究	(21)
2.1 钢纤维混凝土及钢纤维高强混凝土	(21)
2.2 钢纤维高强混凝土原材料选择及配合比设计	(25)
2.3 钢纤维高强混凝土基本力学性能试验研究	(32)
2.4 小 结	(56)
第 3 章 钢筋局部钢纤维高强混凝土板冲切性能试验研究	(58)
3.1 引 言	(58)
3.2 试验概况	(59)
3.3 试验结果及分析	(67)
3.4 小 结	(87)
第 4 章 钢筋局部钢纤维高强混凝土板冲切极限承载力计算方法	(89)
4.1 概 述	(89)
4.2 试验板冲切极限承载力的影响因素	(90)
4.3 试验板冲切极限承载力的计算方法	(94)
4.4 小 结	(118)

第 5 章 钢筋局部钢纤维高强混凝土板冲切变形研究	(119)
5.1 引 言	(119)
5.2 试验板冲切变形分析	(119)
5.3 试验板冲切挠度计算方法	(122)
5.4 试验板冲切韧性分析及计算	(134)
5.5 小 结	(142)
第 6 章 钢筋局部钢纤维高强混凝土板冲切性能 ANSYS 分析	(144)
6.1 引 言	(144)
6.2 基于 ANSYS 分析的模型选择	(145)
6.3 ANSYS 分析构件受力的步骤	(154)
6.4 试验板冲切受力 ANSYS 模拟	(154)
6.5 小 结	(163)
第 7 章 结论与展望	(164)
7.1 主要结论	(164)
7.2 建议与展望	(166)
参考文献	(168)

第1章 绪论

1.1 引言

钢筋混凝土板由于结构形式简单、传力途径短捷、能充分利用净高空间、板厚较小,并能有效降低房屋的总高度,经济效益显著,具有良好的适用性和可变性等优点,已在工程领域得到了广泛应用。迄今为止,钢筋混凝土板已经被广泛应用于房屋、桥梁、港口、给水、海洋以及核反应等结构工程领域,如柱反力支承的无梁楼盖和平台、柱或局部荷载作用下的单独基础和桩基承台以及集中荷载(轮压)作用下的桥面板或高桩码头面板等。

钢筋混凝土板在集中荷载作用下,处于典型的局部受力状态,剪切应力和弯曲应力的高度集中,一旦结构所承受的荷载效应超过材料容许应力,便可能发生沿斜截面的脆性破坏,即通常所说的冲切破坏。这种破坏多发生在板较厚、纵向抗弯钢筋较高的情况下,破坏非常突然,毫无预兆性,在破坏以前没有形成一个完整的屈服机构。板在集中荷载作用下的冲切破坏是工程中经常遇到的问题。例如图1.1为某高速公路路面混凝土被路面下的柱子冲切破坏时的照片。

钢筋混凝土板的冲切问题已经受到人们的广泛关注。如何正确把握板冲切破坏机理和计算模式,找出冲切极限承载力合理而实用的理论分析方法,提出有效而符合实际情况的设计方法和构造措施,从而尽量避免冲切破坏的发生,是人们普遍关注的焦点之一。自20世纪初以来,国内外许多专家学者对这一问题进行了长期、大量的试验研究和理论分析,并分别提出了一些有价值的冲切极限承载力分析方法和计算公式。但是,由于冲切破坏属于典型的三维受力状态,其影响因素纷繁众多,且开裂后板破坏区的实际受力性能极其

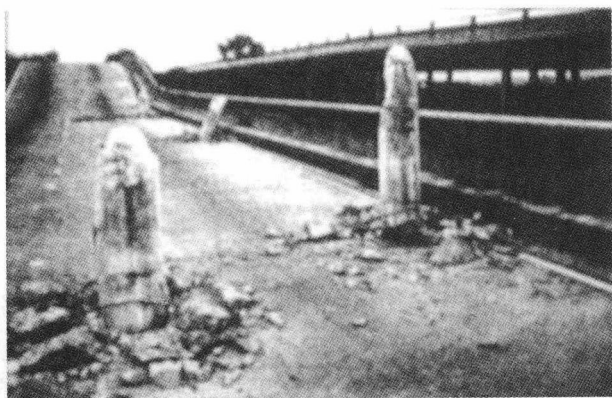


图 1.1 高速公路路面在柱顶处被冲切破坏的照片

复杂,因而到目前为止,并没有建立一套统一、完善的冲切破坏机理和分析方法。正是由于工程实际需要与理论研究现状之间的这种差异,决定了对钢筋混凝土板冲切问题进行进一步研究和拓广的必要性和重要性。

1.2 板冲切性能试验研究综述

1.2.1 国外试验研究现状

最早对冲切问题进行试验研究的是美国的 Talbot,他在 1907 年做了 200 多个基础试验,其中 20 个发生冲切破坏,并于 1913 年提出了第一个冲切极限承载力的计算公式,即用应力形式将冲切作用效应表示为:

$$v = \frac{V}{4(r + 2d)j_d} \quad (1.1)$$

式中, v 为名义剪应力, kN ; V 为冲切剪力, kN ; d 为板的有效高度, mm ; r 为柱宽(荷载作用边长), mm ; j_d 为截面的抗矩力臂, mm 。

当 v 大于混凝土抗拉强度时,试件便发生冲切破坏。虽然公式(1.1)形式简单、考虑因素少,但它用名义剪应力的形式提供了可能发生冲切斜拉破坏的指标值,以弹性梁的计算公式为基础,为后来

提出的大多数经验公式奠定了坚实的基础。

1915年,德国的Bach在致力于研究板的抗弯强度的试验中开始接触到简支板的冲切问题。1938年,C. Graf在其研究报告中描述了8块中心加载的简支板试验,认为随着混凝土强度的增加,板的抗剪切强度也随着增加;另外,弯曲裂缝对剪切强度也有一定影响。

1948年,美国的Richart发表了140个钢筋混凝土柱基和墙基的试验资料,列出了大量含各种参数的冲切极限承载力试验结果,其中99个试件呈现明显的冲切斜拉破坏。Richart认为柱下基础中破坏锥的形成是由板受拉面的弯曲裂缝向柱边斜向发展而引起的,破坏锥与水平面的夹角为 45° 。由于纵向钢筋的销栓作用,试验中可以看到剪力承载力随弯曲强度的增加而增加,但认为抗剪承载力并不随混凝土抗压强度成比例增加。

1956年,Elstner、Hognestad发表了简支方板的试验研究报告。通过对试验数据的统计分析,提出了经验公式,首次考虑了抗弯钢筋的影响,并引入经统计分析得到的系数。

1957年,Whitney重新估计了1948年Richart和1956年Elstner、Hognestad的试验结果,提出了确定板冲切极限承载力的新方法,认为试件抗剪强度是板单位宽度上极限抗弯能力的函数,给出了下面的极限剪应力公式:

$$v_u = \frac{V}{4d(r+d)} = 100\text{psi} + \frac{0.75M_u}{d^2} \sqrt{\frac{d}{l_s}} \quad (1.2)$$

式中, M_u 为极限抗弯承载力; l_s 为剪跨。

1961年,美国Moe公布了43块方板的试验结果。他研究了靠近柱边的板中开孔、在柱带处集中布筋、配置冲切钢筋、柱截面尺寸和形状、持续加荷与偏心加荷等因素对板冲切极限承载力的影响。其结果表明,试件的破坏表现为柱周附件剪压区的剪压破坏,而不是Richart等描述的斜拉破坏;同时,还统计分析了Richart、Elstner、Hognestad等的柱基和简支板的试验资料,回归了经验公式。最后总结出6条重要结论:①以 $\sqrt{f'_c}$ 表示混凝土抗压强度的影响;②在柱表

面处(荷载作用面)控制临界截面的剪切强度;③柱上集中弯曲钢筋不提供抗剪强度;④薄板中剪力筋难以锚固;⑤柱边开孔的影响根据危险截面的参数来估计;⑥约 1/3 内柱不平衡弯矩由不均匀剪力筋传递。Moe 首次引进 $\sqrt{f'_c}$ 和 c/h_0 两个参数作为影响板冲切极限承载力的重要因素,其研究对后来的研究工作及《美国混凝土结构设计规范》(ACI 318—05)的修订工作产生过重大影响。

1963 ~ 1965 年, Tashker 与 Wyatt、Andersson 以及 Taylor 与 Hayes 等先后发表了 16 块八角形平板、12 块方形平板以及 22 块简支板的试验结果,对钢筋混凝土平板的冲切极限承载力提出了设计建议。

1966 年, Yitzhaki 在分析前人试验资料的基础上,认为决定板冲切极限承载力的主要因素是板的有效高度 d 、钢筋强度 ρf_y 、混凝土强度 f'_c 、柱子尺寸(荷载作用面尺寸)与板有效高度之比 r/d ,并综合其影响提出了冲切极限承载力表达式(1.3);同时,提出板发生弯曲破坏还是冲切破坏主要取决于抗弯钢筋强度,如果板的抗弯钢筋强度小于平衡配筋强度,将发生抗弯破坏,反之发生冲切破坏。

$$v = 8(1 - \rho f_y / 2f'_c) d^2 (149.3 + 0.164 \rho f_y) (1 + \frac{r}{2d}) \quad (1.3)$$

式中, f_y 为钢筋屈服强度, MPa; ρ 为钢筋配筋率(%); f'_c 为混凝土棱柱体抗压强度, MPa。

1970 年, Herzog 分析了 Richart、Elstner 和 Moe 等的 160 个无冲切钢筋板和基础的试验资料,认为纵筋配筋率达到一定程度时,试件冲切极限承载力几乎不再增加。

1974 年, Hawkins、Criswell 和 Regan 分析了无抗剪钢筋的普通混凝土板、轻骨料混凝土板、多孔板、预应力板的冲切极限承载力,补充和修正了 Moe 设计公式的不足,给出了跨高比大于 3.23 和 4.38 情况下的冲切极限承载力表达式。

1974 年, 角田與史雄等对他们自己做的 60 块板的试验资料以及其他学者的 55 块板的试验资料进行分析研究后,得出了与试验结果吻合很好的经验公式:

$$V = 0.674(s_0 + 3\pi h_0)h_0\sqrt{f'_c}\left(1 + \frac{0.5\mu R_g}{\sqrt{f'_c}}\right)/(1 + \frac{h_0}{20}) \quad (1.4)$$

式中, s_0 为冲切荷载区域的周长, mm; h_0 为板截面有效高度, mm; μ 为纵筋配筋率(%); R_g 为纵筋屈服强度, MPa。

1974 ~ 1986 年, Regan 先后发表了几篇有关板的冲切设计及板的受力特性的文章。认为在大多数无抗剪钢筋的板中, 剪切斜裂缝的形成往往会立刻引起板的破坏, 给出了剪切裂缝出现后板的受力情况, 并根据试验提出了含有纵筋率影响的经验公式:

$$v = \frac{V_u}{b_v d} = 0.55 \sqrt[3]{\frac{100A_s}{b_v d} f_{cu}} \sqrt[4]{\frac{1}{d}} \quad (1.5)$$

式中, b_v 为荷载周长, mm; A_s 为纵筋面积, mm²; f_{cu} 为混凝土立方体强度, MPa。

在设计板厚不能满足冲切极限承载力的情况下, 可通过增设柱帽或局部加大板厚的方法来解决, 但出于建筑效果或使用要求的考虑, 希望有平整的天花板, 这时可通过配置冲切钢筋来满足承载力的要求。Wheeler(1930 年)在板柱节点冲切性能试验中首次采用“抗剪键”(由型材组合而成)作为冲切钢筋来提高冲切极限承载力。到 20 世纪末, 出现的冲切筋的形式有弯起钢筋、U 形箍筋、封闭式箍筋、钢梳、钢剪力销等。在此期间, Ghali、Dilger 等做了较多的尝试, 并力图解决冲切筋的锚固问题和施工中存在的困难。

当荷载存在偏心时, 板柱节点上既传递轴向荷载, 也传递不平衡弯矩。不平衡弯矩的传递使柱周围板内剪力分布不均匀, 并导致节点抗剪强度降低。20 世纪 60 年代初, Stasio 和 Buren 著文讨论了弯矩传递对冲切极限承载力的影响之后, Hawkins、Long、Park 和 Islam, Dilger 和 Ghali、Kanoh 等相继积极从事了这方面的研究。

20 世纪 60 年代末到 70 年代初, 国际上开始对边柱和角柱节点冲切极限承载力进行试验研究。

上述对中柱、边柱和角柱冲切极限承载力的研究都是针对单独

板试件进行的,虽然这种方法比较经济、简单、方便,但存在一些缺陷,文献[31]对此进行了较为详尽的评述。因此,Long 和 Masterson, Neth、Walker 和 Regan 等采取对板系的结构进行试验,并在边界模拟板系中内力连续条件的方法来研究冲切极限承载力。

在实际工程中,有时会遇到集中荷载的作用面积不规则的情况,文献[35]对这类冲切问题的计算方法有所介绍。1971 年 Hawkins 和 Fallsen 研究了矩形柱长、短边边长的比值对结点冲切极限承载力的影响。

为了满足设置各种管道的需要,有时必须在柱边或柱附近的板上开设孔洞,这些孔洞的存在降低了板的冲切能力。文献[37]对 Moe(1961)、Mowrer 和 Vanderbilt(1967)、Hanson(1970)等在这类冲切问题方面的研究做了介绍。

国际上对施加预应力对冲切极限承载力的影响也进行了研究。Brastrup 等在板柱连接中的柱子周围施加垂直于板面方向的预应力,而 Nilson 则是对布有无黏结张拉筋的板系进行研究。

综观以上评述,国外学者对板冲切性能的研究从 20 世纪初一直持续到现在,并仍在继续深入研究。

1.2.2 国内试验研究现状

我国在板冲切性能领域的研究起步较晚,直到 20 世纪 70 年代后期才开始这方面的研究。

1977 年,沙志国通过分析国外的试验资料,对我国《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74)做出了评价。认为《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74)关于板冲切极限承载力的计算公式,概念较为明确,但计算结果与试验结果相比较,离散性较大,说明在公式中反映影响冲切极限承载力的因素还不够全面。另外,计算中假定的破坏锥体的侧表面与板的底面成 45° 角,并且破坏时沿截面锥体表面的混凝土应力达到了极限抗拉强度,这与实际不完全相符。板冲切试验证实,当破坏锥体的受拉区出现裂缝后,冲切荷载并非由破坏锥体的整个表面承受,而是由裂缝以上荷载作用面积周边附近(剪压

区)的混凝土承受,这部分混凝土处于三向受压的复杂应力状态,并非受拉。

1980年,童启明在对国外试验结果进行分析的基础上,找出了板冲切极限承载力的影响因素,并提出了经验公式(1.6):

$$KQ_c \leq 0.7R_t sh_0 \sqrt{100\rho \frac{h_0}{r} \frac{l_1}{l_2}} \quad (1.6)$$

式中, K 为冲切极限承载力设计安全系数; R_t 为混凝土设计抗拉强度,MPa; l_1 、 l_2 分别为基础平面的短边和长边,mm; h_0 为板截面有效高度,mm。

从20世纪80年代开始,结合当时中华人民共和国国家建设委员会提出的《楼板及基础的冲切极限承载力计算》这一规范,我国成立了以湖南大学为主要牵头单位,联合哈尔滨建筑工程学院、同济大学和福州大学的“楼板和基础冲切极限承载力研究专题组”,开始致力于《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)有关内容的修订工作。通过多年努力,专题组分别进行了不配置和配置冲切钢筋的平板和基础的试验研究以及一定程度的理论分析,1985年8月,提出了《钢筋混凝土板和基础冲切极限承载力试验研究》综合报告,对我国GBJ 10—89规范中有关“冲切极限承载力计算”部分内容的制订提出了建设性的意见,其计算公式如下。

(1)对于无冲切钢筋的混凝土板,冲切极限承载力的计算公式:

$$F = \xi sh_0 f_t \quad (\text{当 } f_{cu} > 40 \text{ MPa} (f_t > 3.15 \text{ MPa}) \text{ 时,取 } f_{cu} = 40 \text{ MPa}) \quad (1.7)$$

式中, $\xi = \frac{\rho f_y}{0.744 f_t + 0.847 \rho f_y}$; s 为计算周长, $s = 4(c + \sqrt{3}h_0)$,mm; h_0 为板截面有效高度,mm; f_t 为混凝土抗拉强度设计值,MPa; ρ 为钢筋配筋率(%); c 为柱或荷载边长,mm; f_y 为钢筋屈服强度,MPa。

(2)对于有冲切钢筋的混凝土板,冲切极限承载力的计算公式:

$$F = 1.073 \xi sh_0 f_t + 0.312 A_{sv} f_y \sin \alpha \quad \left(\text{当 } \frac{A_{sv} f_y \sin \alpha}{\xi sh_0 f_t} \leq 2.0 \text{ 时} \right) \quad (1.8a)$$

$$F = 1.7\xi sh_0 f_t \quad \left(\text{当 } \frac{A_{sv} f_y \sin \alpha}{\xi sh_0 f_t} > 2.0 \text{ 时} \right) \quad (1.8b)$$

式中, A_{sv} 为与冲切破坏锥体截面成 45° 相交的全部冲切钢筋截面面积, mm^2 ; α 为冲切钢筋与板底面的夹角, rad 。

1986 年, 陈才堡在全面分析影响板冲切极限承载力的因素后, 对所收集到的试验数据进行统计回归, 提出了板冲切极限承载力的建议公式:

$$KQ_c \leq Q_{cp} = 1.25(1 + 10\rho) \sqrt{f_c} u h_0 \xi_1 \xi_2 \xi_3 \quad (1.9)$$

式中, u 为冲切计算周长, mm ; f_c 为混凝土轴心抗压强度, MPa ; ξ_1 为荷载位置影响系数; ξ_2 为加载边长与有效板厚之比的影响系数; ξ_3 为纵筋配筋率的影响系数。

式(1.9)考虑的因素较多, 有混凝土强度、纵筋配筋率、边界约束条件和板的双向性质, 但物理概念不很明确。

1986 年, 李定国等通过试验阐述了板的裂缝开展情况与冲切破坏特征, 认为抗弯钢筋对冲切极限承载力确有一定贡献, 其影响不仅与配筋率有关, 而且还与钢筋屈服强度有关, 并提出了与试验结果较吻合的经验公式:

$$F = \xi u h_0 f_t \quad (1.10)$$

式中, $\xi = \frac{\rho f_y}{0.835 \rho f_y + 1.1 f_t}$; $u = 4(2.05 h_0 + a)$ (a 为荷载作用面边长, mm), mm 。

1986 年, 周朝阳在对 327 块板和基础的试验结果和冲切性能影响因素全面分析的基础上, 提出的冲切极限承载力实用计算公式不仅适用于一般的大冲跨板, 也适用小冲跨板和基础, 而且吻合程度非常高。

1989 年, 丁自强、韩菊红等根据所做的 25 块集中荷载作用下钢筋混凝土简支双向板的试验结果, 分析了影响板抗剪强度的主要因素, 并统计回归了抗剪强度计算公式(1.11):

$$V_u = \xi_1 \xi_2 \xi_3 f_t s h_0 \quad (1.11)$$

式中, s 为距集中力作用面周边 $h_0/2$ 的周长, mm; f_t 为混凝土的抗拉强度, MPa; h_0 为板截面有效高度, mm。

1990 年, 曹宏杰和 W H Dilger 回归了前人的钢筋混凝土板柱节点冲剪试验结果, 分析了其所显示的裂缝开展过程和破坏形式, 并以这些分析为基础, 分别对高低配筋率的板柱节点, 用屈服线理论和板梁模型推导出中柱节点的承载力计算公式, 但此推导公式忽略了钢筋的销栓作用, 屈服线形式也较粗糙。

1992 年, 舒兆发通过试验研究, 阐述了板的破坏形态和特征, 讨论了柱边板中孔洞对冲切极限承载力的影响, 并提出了这类构件冲切极限承载力的计算方法。他指出, 孔洞的存在会减小平板的临界冲切截面, 降低板的冲切极限承载力。孔洞的大小、数量、布置和形状等都对承载力有影响。

1993 年, 黄相才等针对 104 块无箍板在对称集中荷载作用下的试验结果, 通过对其破坏形态、破坏机理以及受力特性的分析, 找出了影响抗剪强度的主要因素, 并提出了抗剪强度极限状态表达式。

1994 年, 安玉杰对 33 块钢纤维混凝土基体强度等级为 CF20 ~ CF40 的钢筋钢纤维混凝土板进行了冲切性能试验, 并分析了钢纤维的掺入对钢筋混凝土板冲切性能的影响。在对影响冲切极限承载力主要因素分析的基础上, 建立了适用于 CF40 以下的钢纤维混凝土板冲切极限承载力的计算公式 (1.12), 并对计算公式进行了可靠度分析。

$$F_f = 1.42 h_0 f_t (0.8s + 330) (0.7 + 0.06 \rho_f) (1 + \alpha_{ps} \frac{L_f}{d_f} V_f) \quad (1.12)$$

式中, α_{ps} 为钢纤维对钢筋混凝土板冲切极限承载力的增强系数; L_f 为钢纤维的长度, mm; d_f 为钢纤维的直径, mm; V_f 为钢纤维的体积率 (%)。

1999 年, 林旭健以钢纤维体积率和纵筋配筋率为变化参数, 对

15 块边长为 1 200 mm 的带短柱的配筋钢纤维高强混凝土方板(钢纤维混凝土基体强度等级为 CF60)和 3 块直径为 1 200 mm 的带短柱钢纤维高强混凝土圆板进行了冲切试验,并在试验基础上建立了包含板冲切能力和抗弯能力的极限承载力计算公式。

我国对混凝土板冲切性能的研究虽起步较晚,但近 30 年来研究发展较快,建立的板冲切极限承载力公式也由经验公式上升到半经验半理论公式、理论公式,对冲切机理、破坏特征及计算模式有了更深入的认识,所考虑的冲切极限承载力影响因素也越来越全面,但研究的范围还不够广泛,试验资料较少,要真正弄清楚板冲切破坏的本质还需进行大量的试验研究工作。

1.3 板冲切极限承载力理论研究分析方法综述

钢筋混凝土板的冲切研究进入 20 世纪 60 年代以后,人们在继续试验研究的同时,也开始从理论上探讨冲切极限承载力问题,这些理论研究分析方法大体上可以归纳为以下几种。

1.3.1 塑性极限分析法

塑性极限分析法假定钢筋和混凝土材料都是理想刚塑性材料,在所假定的破坏机构中,变形集中于塑性区,其他区域没有变形。破坏机构必须满足变形协调条件,根据内外虚功相等的原则建立平衡方程。

20 世纪 60 年代,丹麦的 M. P. Nilson 把塑性力学方法应用于钢筋混凝土构件的抗剪强度分析,得到了一些令人满意的解答。1976 年, M. W. Brastrup 和 M. P. Nilson 合作,基于错动机构假设,采用修正的 Mohr-Columb 材料破坏准则,提出了以塑性理论来分析板的冲切极限承载力的方法。我国的蒋大骅和沈景华、郑作樵和欧阳成生、周朝阳等均采用塑性极限分析方法对混凝土板冲切极限承载力进行了计算,对他们的研究成果将在第 5 章进行介绍和评述。

塑性铰线方法也属于塑性极限分析法,有的学者将它用于冲切问题的研究,如曹宏杰、Gesund 等,但从本质上来说,塑性铰线方法