

文章编号: 1671-6833(2002)02-0074-05

装配式大板结构竖缝抗剪机理研究

柳炳康¹, 宋国华², 王东炜²

(1. 合肥工业大学建筑工程系, 安徽 合肥 230009; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 设计、试验了 18 榀试件, 分析了装配式大板结构竖缝在反复荷载作用下的抗剪机理. 爆裂前, 接缝的抗剪机理为斜压杆机制和压力摩擦机制, 抗剪承载力随接合筋直径的增大而增大; 爆裂后, 抗剪机理为削弱的斜压杆机制和接合筋的销栓作用, 抗剪承载力随接合筋直径及接缝宽度的增大而增大. 据此提出的计算接缝抗剪承载力的建议公式与试验结果吻合较好.

关键词: 装配式结构; 接缝宽度; 接合筋; 抗剪承载力

中图分类号: TU 317 **文献标识码:** A

众所周知, 结构越具有连续性和整体性, 就会有更多的塑性铰吸收能量以及更多的剪力和轴力的传递路线, 而预制装配式大板结构恰恰在这方面存在着薄弱环节和不利因素. 结构体系如能提供充分的纵向、横向和竖向的周边连系, 就能使大板结构具有抵抗连续倒塌的能力. 此类结构主要依赖于接缝的销键作用传递剪力, 其连接构造在地震作用下的强度、刚度和延性直接关系到整体结构的可靠性. 实践证明^[1], 在连接部位设置均匀密布的小键槽, 通过后浇混凝土连成整体, 能够保证剪力均匀的传递. 这也是目前各国趋于一致的做法. 因此, 研究关键部位的小键槽的剪力传递和抗震性能, 对保证装配式大板结构的整体性具有十分重要的意义. 很多学者已经通过试验找到了键槽设置的合理尺寸^[2], 而对键槽在反复荷载作用下的受力机理还缺乏系统的研究, 使得装配式结构还不能成为一种完善的结构体系. 另外, 在水平地震作用下, 装配式大板结构的竖缝受纯剪的作用, 而且剪应力达到最大. 因此, 本文探讨了竖缝在纯剪作用下的抗剪机理.

1 试验概况

本次试验设计的试件为三齿矩形齿槽, 每齿内有一根接合筋, 齿槽高深比为 5, 试验参数为接合筋直径及接缝宽度. 考虑试验条件, 试件设计为倒“T”型, 共 18 榀, 配筋如图 1 所示. 试件下部两侧留有预留孔洞, 上部套钢箍. 试验时, 预留孔洞

里插入螺栓将试件固定于试验台上, 采用拟静力加载方案, 在与接缝中分线共线的两端钢箍点上反复加载, 以模拟接缝受纯剪时的受力状态, 由位移控制, 控制位移为: (±) 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 mm. 加载装置如图 2 所示.

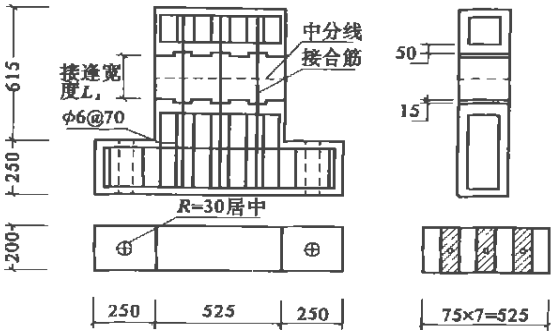
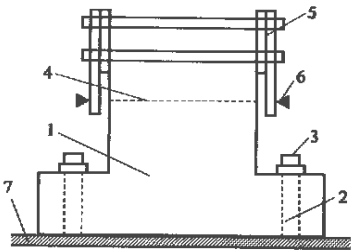


图 1 三矩形齿试件配筋图

Fig. 1 Reinforcement of a three-rectangle-keeled specimen



1. 试件; 2. 预留洞; 3. 螺栓; 4. 中分线;
5. 钢箍; 6. 加载点; 7. 工作台

图 2 加载装置图
Fig. 2 Loading equipment

收稿日期: 2002-01-10; 修订日期: 2002-03-20

作者简介: 柳炳康 (1952-), 男, 安徽省凤阳县人, 合肥工业大学教授, 主要从事钢筋混凝土结构抗震方面的研究.
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

试件一览见表 1. 图 3 为试件 RJ 100—12 的裂缝开展图. 缝开展图, 图 4 为其中 3 个试件的荷载—位移滞

表 1 试件一览表
Tab. 1 General view of specimens

编号	试件名	L_j /mm	d /mm	编号	试件名	L_j /mm	d /mm
1	RJ 20-10	20	10	10	RJ 100-12	100	12
2	RJ 40-10	40	10	11	RJ 160-12	160	12
3	RJ 60-10	60	10	12	RJ 200-12	200	12
4	RJ 100-10	100	10	13	RJ 20-14	20	14
5	RJ 160-10	160	10	14	RJ 40-14	40	14
6	RJ 200-10	200	10	15	RJ 60-14	60	14
7	RJ 20-12	20	12	16	RJ 100-14	100	14
8	RJ 40-12	40	12	17	RJ 160-14	160	14
9	RJ 60-12	60	12	18	RJ 200-14	200	14

说明: L_j 为接缝宽度; d 为接合筋直径;各试件接合筋均为 3 根,加反复荷载.

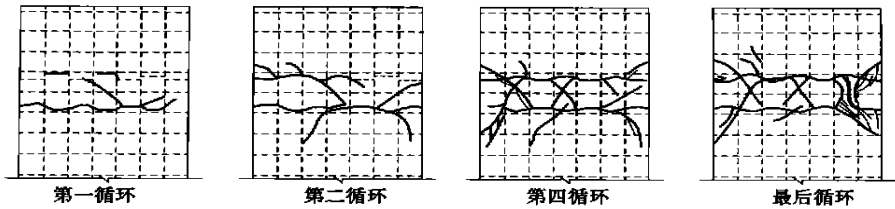


图 3 试件 RJ 100—12 的裂缝开展图
Fig. 3 The crack development of specimen RJ 100—12

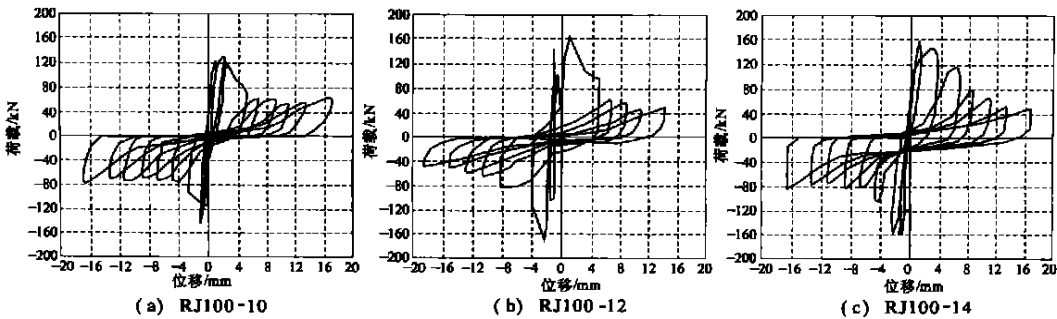


图 4 荷载—位移滞回曲线

Fig. 4 The lag curves of load against displacement

2 试验结论

- (1) 各试件的滞回曲线均出现了明显的捏缩现象,这主要归结于接缝严重的交叉斜裂缝的出现和接合筋的粘结滑移.
- (2) 爆裂时接缝达到极限承载力,其值随接合筋直径的增大而增大,与接缝宽度几乎没有关系.爆裂后接缝的抗剪承载力随接缝宽度以及接合筋直径的增大而增大.但其延性均较差.
- (3) 反复荷载作用下,接缝抗剪承载力下降,其延性随接缝宽度的增大而减小,随接合筋直径

的增大而增大.
(4) 反复荷载作用下,各试件在爆裂以前,每次循环下的承载力均有增加的趋势.爆裂后急剧下降,以后循环承载力下降缓慢.

3 受力模型及建议公式的建立

以上只是定性结论,本文主要从受力机理上分析.因接缝在爆裂前和爆裂后承载力相差很大,受力机理也不同,故分爆裂前和爆裂后两种情况讨论.

3.1 爆裂前接缝的抗剪机理

3.1.1 斜压杆机理

加荷时齿槽的受力情况如图 5 所示. 在水平力作用下, 齿槽的顶部和侧部受压, 即齿槽内混凝土受到一个斜向压力和一个与之正交的斜向拉力. 这样, 接缝混凝土就会在齿槽内形成一个斜压杆. 当接缝宽度较小时, 斜压杆在一个齿槽内形成(图 5(a)); 当接缝宽度较大时, 斜压杆在两个齿槽内形成(图 5(b)). 从斜压杆的 A, B, C 三点(图 5(a)) 内分别取出一个正方形单元体, 它们的受力分析如图 7. 由图可知, B 点受纯剪作用, 斜向压力与竖直线的夹角 $\theta_B = 45^\circ$. A, C 两点因处于受压状态, 故 θ_A, θ_C 均小于 45° . 因此斜压杆方向与接缝中分线法线的夹角大致在 45° 左右, 不会超过 45° , 但也不会太小.

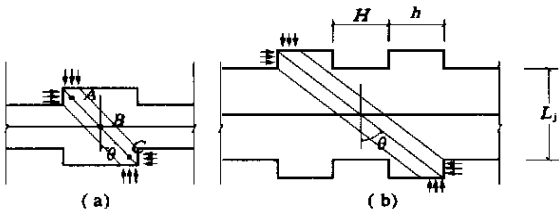


图 5 斜压杆机理

Fig. 5 Mechanism of diagonal compressive rod

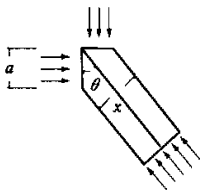


图 6 斜压杆受力平衡条件

Fig. 6 Equilibrium condition of diagonal compressive rod

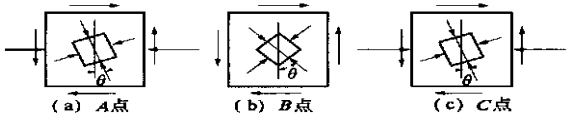


图 7 A, B, C 点应力分析

Fig. 7 Stress analysis for points A, B and C respectively

斜压杆的受力平衡条件如图 6 所示, 设斜压杆混凝土的抗压强度为 f_c , 考虑到试验条件和实际工程条件的差异, 应对 f_c 适当折减. 参照日本规范, 取折减系数 $= 0.7 - f_c / 200$, 设斜压杆的宽度为 x , 求得 $x = 2a \sin \theta$, 则由力的平衡条件可得:

$$V'_a = f_c x b \sin \theta = 2 f_c a b \sin^2 \theta,$$

式中: V'_a 为一个斜压杆对接缝抗剪承载力的贡献. 假设接缝共有 n 个齿槽, 应对 V'_a 乘以 n , 并

乘上一个折减系数 ζ 以考虑多齿共同工作时的影响. 故斜压杆机制对试件抗剪承载力的总贡献为

$$V_a = 2 f_c a b \sin^2 \theta \zeta, \tag{1}$$

式中: f_c 为接缝混凝土抗压强度; a 为齿深; b 为齿厚; θ 为斜压杆方向与接缝中分线法线的夹角; ζ 为多齿共同工作影响系数. 参照文献 [1], ζ 取值如表 2.

表 2 群键共同工作系数 ζ 值

Tab. 2 The correlation coefficient of ζ

$n_k + n_j$	1~2	3	4	≥ 5
ζ	1.00	0.85	0.75	0.67

说明: n_k, n_j 分别为接缝中混凝土销键及节点个数.

下面讨论 $\sin^2 \theta$ 的取值. 因 $\sin^2 \theta = \frac{\tan^2 \theta}{1 + \tan^2 \theta}$, 因此只需讨论 $\tan \theta$ 的取值即可. 当斜压杆在一个齿槽内形成时, 如图 5(a) 所示 $\tan \theta = \frac{h}{2a + L_j}$; 当斜压杆在两个齿槽内形成时(图 5(b)) $\tan \theta = \frac{2h + H}{2a + L_j}$. 二者的临界值为: $(L_j + a) / (2h + H) = 2a / h$, 即 $L_j = a(3h + 2H) / h$. 故当 $L_j < a(3h + 2H) / h$ 时, $\tan \theta = \frac{h}{2a + L_j}$; 当 $L_j \geq a(3h + 2H) / h$ 时, $\tan \theta = \frac{2h + H}{2a + L_j}$. 其中: L_j 为接缝宽度; h, H 分别为齿宽和齿间距. $\tan \theta$ 是不大于 1 的正数, 当 $\tan \theta > 1$ 时, 取 $\tan \theta = 1$.

3.1.2 压力摩擦机理

对试件加荷时, 接合筋受拉, 对接缝混凝土产生一种加紧力, 这种加紧力在剪切摩擦系数 μ 的作用下产生剪力. 因爆裂前接合筋并未屈服, 故应对接合筋的拉伸力进行折减. 则爆裂前由压力摩擦机制对接缝抗剪承载力的贡献为

$$V_b = \mu \sum \alpha A_s f_y. \tag{2}$$

式中: μ 为剪切摩擦系数, 参照美国《ACI 建筑规范》318—83, 整体式混凝土, $\mu = 1.4$; 专门粗糙化的混凝土接触面, $\mu = 1.0$; 未处理的混凝土接触面, $\mu = 0.6$. 本次试验 $\mu = 0.6$. α 为接合筋强度折减系数 [3], $\alpha = 0.758$; A_s, f_y 分别为接合筋横截面积及屈服强度.

3.1.3 接缝极限抗剪承载力

综上所述, 爆裂前接缝总的抗剪承载力, 即极限抗剪承载力为

$$V_u = V_a + V_b. \tag{3}$$

3.2 爆裂后接缝抗剪承载力的计算

3.2.1 削弱的斜压杆机理

爆裂后,交叉裂缝的出现及材料接触面的磨损等使斜压杆作用受到削弱.由试验可知,接缝宽度越小的试件,斜裂缝出现越多,接缝混凝土压碎现象越严重,对斜压杆作用的发挥削弱得越厉害.因此,爆裂后应对斜压杆的抗剪予以折减.因斜裂缝开展方向与接缝中分线法线的夹角基本为 45° ,所以任何一条贯通斜裂缝在接缝内的长度投影在中分线上等于接缝宽度 L_j ,假设接缝长度为 L ,故理论上接缝共 L/L_j 有条斜裂缝(单向).考虑反复加载,取折减系数 $\xi=\sqrt{L_j/L}$.则爆裂后削弱的斜压杆机制对接缝抗剪承载力的总贡献为

$$V_c=2f_cab\sin^2\theta\zeta\sqrt{L_j/L}=\sqrt{L_j/L}V_a. \tag{4}$$

3.2.2 销栓作用机理

根据文献 [4],纯剪作用下,接合筋的销栓作用主要通过剪切机理发挥出来.剪切机理中, $V=\frac{Af_y}{\sqrt{3}}$.爆裂后,受混凝土的开裂及接合筋的滑移等影响,接合筋的销栓作用受到削弱,所以应乘以折

减系数 β .则接合筋的销栓作用对接缝抗剪承载力的贡献为

$$V_d=\beta\sum\frac{Af_y}{\sqrt{3}}. \tag{5}$$

根据文献 [5], $D_{n,d}=0.5D_{u,d}$,式中: $D_{n,d}$ 为反复荷载作用下钢筋销栓作用提供的抗剪承载力; $D_{u,d}$ 为单向加载时钢筋销栓作用提供的抗剪承载力.故 β 取 0.5.

3.2.3 爆裂后接缝总抗剪承载力

综上所述,爆裂后接缝的总抗剪承载力为

$$V'_u=V_c+V_d. \tag{6}$$

3.3 试验值与计算值的比较

为了验证所建公式的可靠性,将 18 个试件的试验值与用建议公式计算的数值进行对比.图 8 为爆裂前接缝最大承载力试验值与计算值的对比,图 9 为爆裂后接缝混凝土即将剥落时(位移为 6 mm 或 8 mm),正反向荷载的平均值与用建议公式的计算值的对比.因为此时能代表接缝在反复荷载作用下承载力的降低情况.通过对比,可得如下结论.

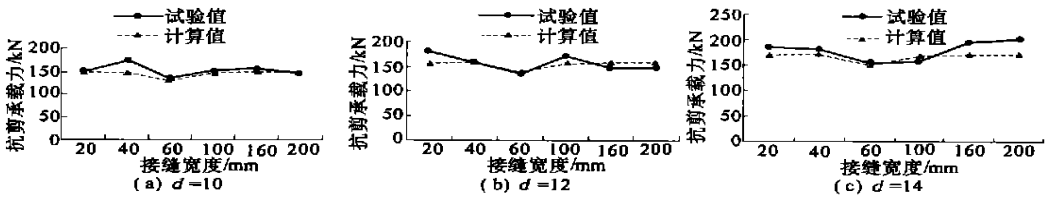


图 8 爆裂前最大抗剪承载力的对比
Fig. 8 Comparison between the shear resistances before sudden cracking

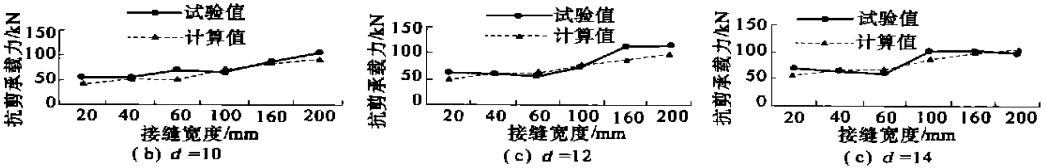


图 9 爆裂后抗剪承载力的对比
Fig. 9 Comparison between shear resistances after sudden cracking

(1) 爆裂前斜压杆机制对接缝抗剪承载力的贡献对接缝的抗剪起主要作用.斜压杆机制所提供的剪力主要与接缝混凝土的抗压强度有关,与接合筋没有关系.压力摩擦对接缝抗剪也起到一定作用,随接合筋直径的增大而增大.爆裂前接缝宽度对接缝抗剪一般没有关系,只有当斜压杆方向与接缝中分线法线的夹角小于 $45^{\circ}(\text{tg } \theta < 1)$ 时,

接缝宽度才有影响,使斜压杆作用降低,接缝抗剪承载力减小.

(2) 爆裂后斜压杆机制仍然发挥作用,但受到削弱,随接缝宽度的增大而减小;接合筋的销栓作用通过剪切机制表现出来.随着荷载的增大和位移的增加,接合筋对接缝的抗剪作用越来越大.

(3) 接合筋直径相同时,接缝宽度为 60 mm

的试件抗剪能力最低,这与斜压杆方向有关.

(4) 对比发现,爆裂前后,各曲线吻合较好.故所建议公式较为可靠.

4 结束语

(1) 爆裂前,接缝混凝土的抗剪承载力通过斜压杆机制和压力摩擦机制表现出来.当接缝宽度较小时,斜压杆在一个齿槽内形成;接缝宽度较大时,斜压杆在两个齿槽内形成.斜压杆方向与接缝中分线法线的夹角大致为 45° ,且不大于 45° .

(2) 爆裂时,接缝达极限抗剪承载力,且随接合筋直径的增大而增大,与接缝宽度几乎没有关系.

(3) 爆裂后,接缝的抗剪承载力通过削弱的斜压杆机制和接合筋的销栓作用表现出来.随接缝宽度的增大而增大,随接合筋直径的增大而增大.

(4) 爆裂前、后,抗剪承载力的计算值与试验值吻合较好,故所建议公式较为可靠.

参考文献:

[1] JGJ 1-91,装配式大板居住建筑设计和施工规程

[S].

[2] 南京工学院.装配式钢筋混凝土框架梁柱齿槽接头的试验研究[A].中国建筑科学研究院.钢筋混凝土结构报告选集(2)[C].北京:中国建筑工业出版社,1980.

[3] 谷本 清治,水上 明,小野寺知子.シアキーを有するPca 构造接合面におけるせん断伝達に関する研究[D].横滨:关东学院大学印刷所,平成10年.128-129.

[4] PARK R,PAULY T.Reinforced Concrete Structures[M].New York :A Wiley -Interscience Publication ,1975.

[5] TSOUKANTAS S G,TASSIOS T P.Shear Resistance of Connections between Reinforced Concrete Liner Precast Elements[J].ACI Structural Journal .1989,86(3) :242-249.

[6] 日本建筑学会.壁式プレキャスト构造の鉛直接合部の挙動と設計法[M].横滨:昭和工业写真印刷所,1989.

[7] 《装配式大板建筑》编写组.装配式大板建筑[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.

Study on Shear -resistance Mechanisms for
Vertical Connections of Precast Reinforced Concrete Structures

LIU Bing -kang¹,SONG Guo -hua²,WANG Dong -wei²

(1.Department of Civil Engineering ,Hefei University of Technology ,Hefei 230009,China ;2.College of Civil Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract : 18specimens are designed and tested the shear resistance mechanisme of vertical connections in precast reinforced concrete structures under repeating cyclic loading is analyzed . The shear resistance of vertical connection before sudden cracking is diagonal compressive rod mechanism and compression friction mechanism the bigger the diameter of connection rod the stronger the resistance .After sudden cracking the mechanismis weakened diagonal compressive rod mechanismand dower action of connection rod the bigger the connection rod and connection width , the stronger the resistance .What ' s more equations based on above mechanisms are accordance with test result .

Key words : precast structure connection width connection rod shear resistance