

1-10

钢筋砼连系梁静力受剪承载力

牛绍仁* 魏嘉渝
(重庆建筑大学)

容柏生[✓]
(广东省建筑设计研究院)

TU375.1

摘要 通过10根普通配筋和6根组合配筋剪力墙连系梁的静力试验,研究了两种配筋形式连系梁的静力性能。得出连系梁正截面受弯承载力在跨高比小于2时应乘以降低系数,而其斜截面受剪承载力不必考虑跨高比的影响,可采用统一计算公式的结论。

关键词 连系梁, 受剪承载力, 跨高比

中图法分类号 TU318.1

④

在开洞剪力墙中,连系梁起着联系墙肢和传递荷载的作用,它的强度、刚度和变形性能,对开洞剪力墙的抗震性能有明显影响。当建筑物遭受强烈地震时,若连系梁先行屈服产生塑性变形,耗散地震能量,则可有效地减轻墙肢结构的损害。连系梁一般为适应门窗洞口的要求,跨高比较小,尺寸接近深梁,且为满足“强剪弱弯”的要求,要使纵筋先屈服,所以连系梁的性能与普通细长的简支梁和连续梁不同,也与深梁不同,因为其边界条件有差别。国内外许多单位都对其构造细节进行过多方面的研究,根据 Paulay 的试验,跨高比小的连系梁采用交叉斜向钢筋骨架配筋时,其受力及变形性能最好,但因其施工复杂,在我国并没有采用,大量使用的还是普通配筋连系梁,但后者的变形性能较差。为了探讨变形能力好和施工方便的连系梁配筋形式,我们进行了普通直线钢筋与交叉斜向钢筋组合配筋的连系梁低周反复受力性能试验。试验表明,组合配筋连系梁的变形性能比普通配筋连系梁有明显的改善(见另文)。

砼结构设计规范 GBJ10-89 规定连系梁抗震的斜截面承载力为静力作用斜截面承载力的 0.8 倍^[1],国内外关于连系梁的研究也都集中于低周反复荷载作用下的受力性能,而作为抗震强度设计基础的静力试验则尚未见诸报道。本文对 10 个普通配筋连系梁和 6 个组合配筋连系梁试件进行了静力承载力试验,以探讨连系梁斜截面的静力受剪承载力。

1 试验概况

试件的外形尺寸及配筋情况详见图 1。

试件的主要设计参数为跨高比 (L/h), 配箍特征值 $\left\{ \mu_v \frac{f_{yv}}{f_c} \right\}$, 名义剪压比 ($V_c/f_c b h_0$) 和剪

* 收稿日期:1993-09-11.

** 牛绍仁,男,1934年生,教授,重庆建筑大学建筑工程学院(630045).

箍比(V_s/V_w)。其中跨高比分别为 1.0、1.75、2.5 和 3.5 四种,配箍特征值为 0.045~0.194;名义剪压比为 0.101~0.219,剪箍比为 0.747~1.074。所有试件的主要参数及材料性能见表 1。设计参数计算所需的公式见表 1 注。

试件垂直置于台座上,连系梁在开洞墙中一般受有弯矩、剪力和轴向力,由于轴力较小,一般均将其忽略,故用图 2 所示加载系统模拟连系梁的受力状态。荷载由 MTS 系统分级施加,直至试件破坏为止。

试验量测了试件的两端相对位移、纵筋及斜筋应变和箍筋应变,试验时用 $x-y$ 函数记录仪和 MTS 系统位移控制加载。

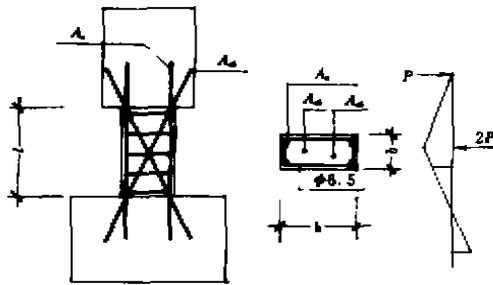


图 1 配筋示意图

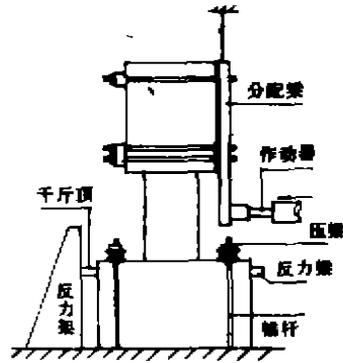


图 2 加载装置简图

2 试验结果

测试结果列于表 2。

2.1 裂缝及破坏形态

所有试件先在端部出现弯曲裂缝,加荷至极限荷载的 50% 左右出现斜裂缝,至 65% 左右斜裂缝宽度达到 0.2 mm。试件破坏前斜筋、纵筋均进入屈服阶段。破坏形态归纳起来可分为对角斜拉破坏、斜压破坏、剪压破坏及剪压-撕裂破坏,图 3 为四种破坏形态的示意图。

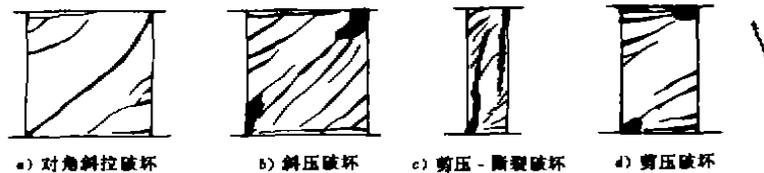


图 3 破坏形态示意

2.1.1 对角斜拉型破坏

试件 WB-S-1 跨高比为 1.0, $\rho_w \frac{f_{yv}}{f_c}$ 为 0.045,剪压比为 0.101,剪箍比为 0.883,未配斜

筋。该试件先在梁端出现弯曲裂缝和弯剪斜裂缝,加载至极限荷载的75%左右时,出现沿对角线的对角裂缝,该裂缝一出现即达0.6mm,以后裂缝继续发展,最后将梁分成两个三角形块体而破坏(图3a)。

2.1.2 斜压型破坏

试件WB-S-2跨高比为1.0, $\rho_w \frac{f_{sr}}{f_c}$ 为0.091,剪压比为0.142,剪箍比为0.88,未配斜筋。试件在荷载不大时出现弯曲裂缝和弯剪斜裂缝,加至破坏荷载的85%左右出现对角斜裂缝,以后又出现多条与该对角裂缝大致平行的斜裂缝,形成斜压破坏(图3b)。

从跨高比为1的3个试件的破坏来看,其破坏形态与配箍特征值有关。当配箍特征值小时产生对角斜拉破坏,配箍特征值较大时发生斜压破坏,且砼的压碎程度随配箍特征值的加大而加重。

2.1.3 剪压-撕裂破坏

试件WB-S-15跨高比为3.5, $\rho_w \frac{f_{sr}}{f_c}$ 为0.194,剪压比为0.219,剪箍比为0.831,未配斜筋。试件在荷载很低时即出现多条弯曲裂缝,加至50%破坏荷载时,在试件上出现斜裂缝,以后沿纵筋出现针脚状裂缝,接近极限荷载时,该裂缝彼此连通,沿纵筋发生撕裂破坏(图3d)。在本次试验的16个试件中,WB-S-15的砼强度最低, $\rho_w \frac{f_{sr}}{f_c}$ 最大。可见砼强度低时容易出现粘结破坏。

2.1.4 剪压破坏

除上述3根试件外;其它未配斜筋和配斜筋试件,跨高比1.75~3.5, $\rho_w \frac{f_{sr}}{f_c}$ 为0.046~0.156,剪压比为0.105~0.202,剪箍比为0.747~1.074都形成剪压破坏(图3c)。这些试件都先在梁端出现弯曲裂缝和弯剪斜裂缝,随荷载增大两种裂缝都有所发展,当某条斜裂缝形成临界斜裂缝,剪压区砼压碎时,试件达到极限承载能力。破坏时剪压区不象一般简支梁那样集中,范围较大,这是试件边界条件与集中加载梁不同所致。

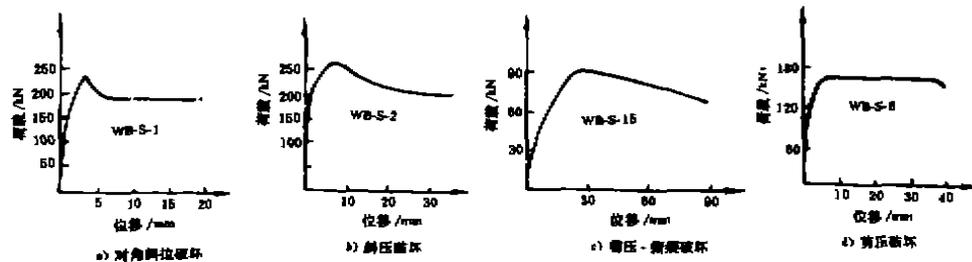


图4 不同破坏形态的荷载-位移曲线

以上四种典型破坏形态的荷载-位移曲线如图4所示。对角斜拉破坏的下降段最陡,延性最差(图4a)。斜压破坏和剪压撕裂破坏,荷载超过峰值后,其承载能力下降也较快(图4b、c)。剪压破坏的荷载-位移曲线与弯曲破坏的梁相似,荷载达到峰值后仍可维持相当长的水平段。产生这种现象的原因主要是连系梁的位移由弯曲和剪切两种变形引起,纵筋屈服后弯曲位移占的比例较大所致。

2.2 钢筋应变

2.2.1 纵筋应变

图 5 为部分不同跨高比试件的纵筋实测应变图。从图中可看出,纵筋应变重分布的程度与跨高比有关。

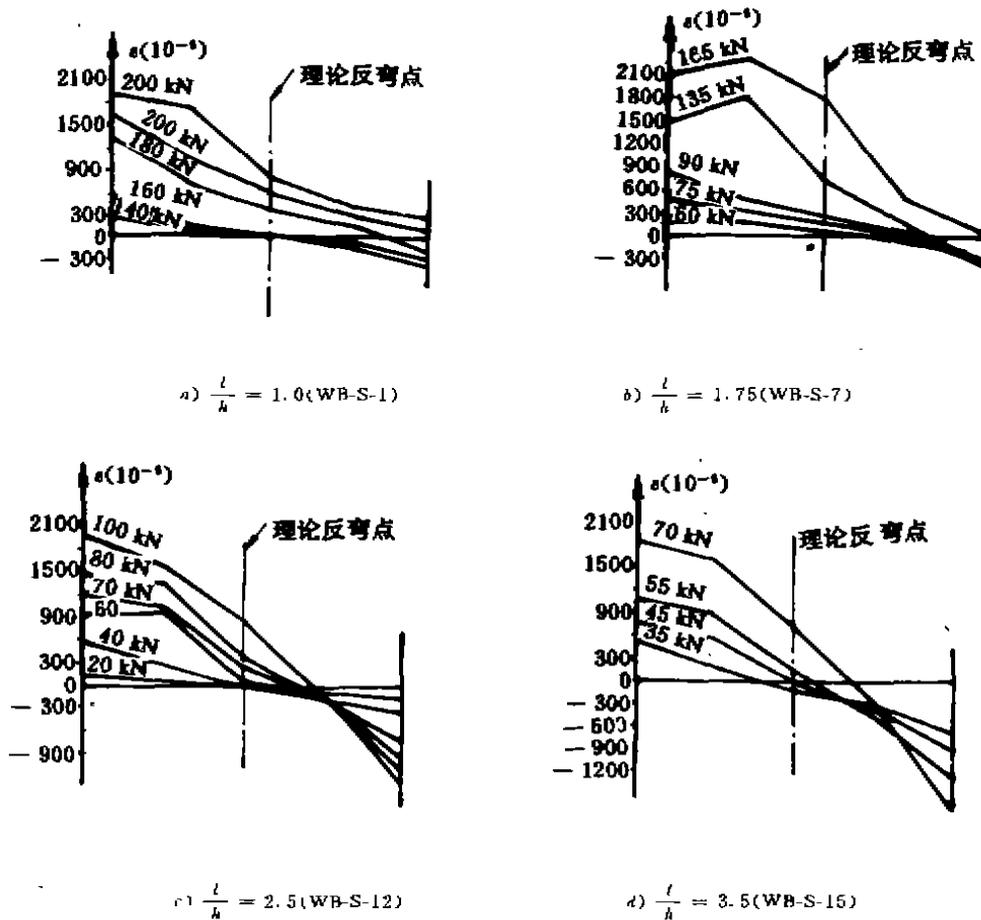


图 5 纵筋应变

跨高比为 1.0 的试件的纵筋应变重分布发生得较早,且很快在整个试件长度上使纵筋全长受拉,应变重分布的程度也最为严重。跨高比为 1.75 的试件也发生了较为严重的应变重分布,虽然发生速度较前者为慢,但在临近破坏荷载时,仍使纵筋沿全长受拉。跨高比为 2.5 与 3.5 的两类试件存在着一定的应变重分布,但发展缓慢,应变零点飘移不严重,至破坏时原处于压区的钢筋仍大部受压。由此可见纵筋应变重分布的程度随跨高比增大而减弱,这一结论与一般连续梁和约束梁的试验结果是一致的。跨高比小时,梁内纵筋全部受拉,砼所受压力自然比单筋梁为大,抗弯承载力会有所降低。表 2 中,跨高比为 1.0 和 1.75 的 10 根试件屈服弯矩与设计弯矩之比的平均值 $\left\{ \frac{1}{n} \sum \frac{M_j}{M_d} \right\}$ 为 0.92,而跨高比为 2.5 和 3.5 的 6 根试

件的相应值为 1.03。Park^[2] 曾建议对跨高比小的连系梁取 $M_u < 0.9(h_0 - a_s)A_s f_s$ 。本次试验验证了这一建议。

2.2.2 斜筋应变

测试结果表明,混合配筋试件中受拉斜筋在受拉纵筋屈服之前已达到屈服,个别试件(如 WB-S-9)还出现斜筋最后被拉断的状况,因此,在这类试件的抗剪计算中,认为充分发挥受拉斜筋其强度是正确的。至于受压斜筋主要是协助砼受压,在剪压型破坏中可不考虑其对受剪的贡献,故受剪计算中只需考虑受拉斜筋对受剪承载力的贡献。

2.2.3 箍筋应变

箍筋应变的大小与试件破坏形态、量测位置有关。图 6 绘出了不同跨高比、不同破坏形态的几根试件中,跨越斜裂缝处的箍筋应变。从图中可见,所有这些试件的箍筋最后都达到了屈服。但从应变发展趋势看,发生对角斜拉破坏(WB-S-1)的试件,裂缝出现使箍筋应变急剧增大,若配箍率过小,箍筋可能在对角裂缝出现后立即屈服,故应限制其最小配箍量。从本次试验来看,跨高比小的连系梁发生斜拉破坏的配箍特征值约为 0.04,比一般梁为大。剪压-撕裂破坏的 WB-S-15,其箍筋是在荷载进入下降段后才达到屈服的,箍筋在荷载达最大值时并未充分发挥作用。其余所有剪压破坏的试件,其箍筋在试件破坏时均已达到屈服。

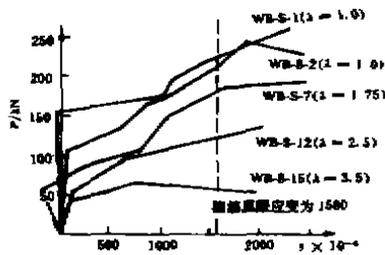


图 6 箍筋应变。

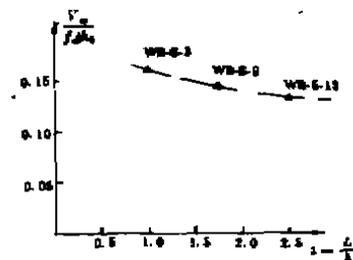


图 7 受剪承载力与跨高比关系

2.3 受剪承载力

2.3.1 跨高比的影响

图 7 绘出了配箍特征值基本相同的 3 根试件 WB-S-3, WB-S-9, WB-S-13 ($\rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c}$ 依次为 0.079, 0.074, 0.073; 跨高比依次为 1.0, 1.75, 2.5) 的试验结果, 3 根试件纵筋基本相同, 且都加配有斜筋, 图 7 表示扣除斜筋受剪贡献后的情况。从图中可见连系梁的静力受剪承载力随跨高比增大而降低, 与普通梁相同。

2.3.2 配箍特征值 $\rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c}$ 的影响

连系梁的受剪承载力一般随 $\rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c}$ 的加大而提高, 图 8 为 7 根跨高比相同试件的试验结果(已扣除斜筋承载力), 本实验再次验证了这一规律, 即无论是否配有斜筋, 增大配箍特征值, 受剪承载力都有所提高。

2.3.3 斜筋的影响

从图 8 已可看出,在 $\lambda = \frac{L}{h}$ 相同的情况下,即使扣除斜筋的受剪贡献,在相同配箍特征值下,配斜筋试件的受剪承载力也比普通配筋试件明显高出一些,其主要原因是所配斜筋有效地约束了斜裂缝开展,尽管斜筋对于提高试件的抗裂度无什么帮助(配斜筋试件的开裂荷载与破坏荷载比值的平均值与普通配筋试件相同),但在限制裂缝开展方面作用较为显著。表 2 中,普通配筋试件当裂缝宽达到 0.2 mm 时,其荷载与极限荷载比值的平均值为 0.57,而加配斜筋试件的同一比值则为 0.69,说明所配斜筋在一定程度上约束了裂缝的发展,增强了骨料咬合作用,从而提高试件受剪能力。图 9a, b 分别对两类配筋形式的试验结果进行了曲线拟合,该图表明,配有斜筋的试件提高了砼项的受剪能力,箍筋受剪作用相对有所减弱。

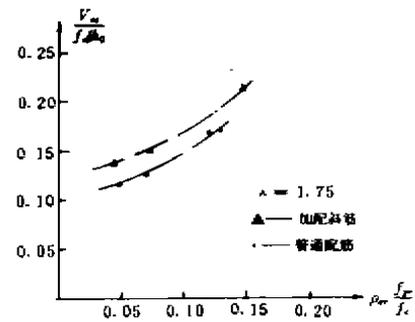


图 8 配箍特征值与受剪承载力关系

图 9a, b 分别对两类配筋形式的试验结果进行了曲线拟合,该图表明,配有斜筋的试件提高了砼项的受剪能力,箍筋受剪作用相对有所减弱。

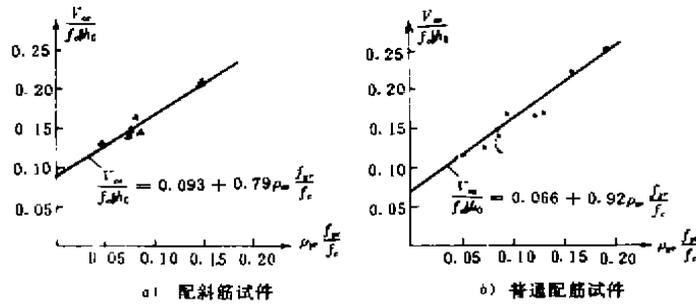


图 9 两种配筋形式的强度比较

2.3.4 连系梁的静力斜截面受剪承载力

将本次试验结果扣除斜筋受剪贡献,按跨高比 $L/h \geq 2.5$ 和 < 2.5 分别进行了统计, $V_u / f_c b h_0 - \rho_w \frac{f_y}{f_c}$ 的关系如图 10 所示。

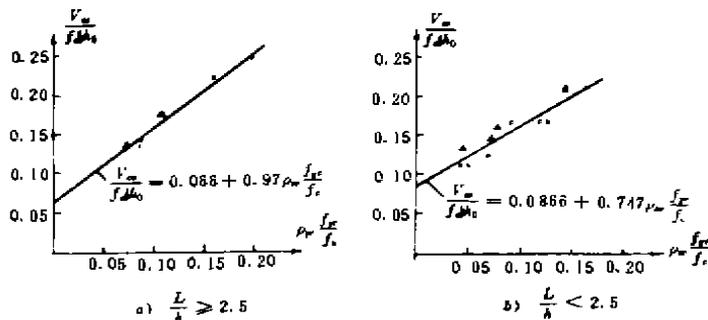


图 10 不同跨高比的强度比较

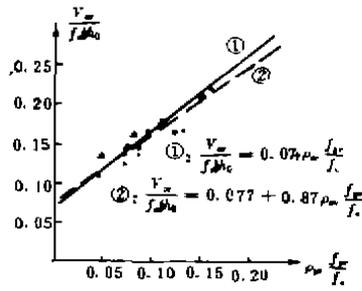


图 11 试验结果与规范公式的关系

当 $L/h \geq 2.5$ 时

$$\frac{V_{cs}}{f_c b h_0} = 0.066 + 0.97 \rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c} \quad (1)$$

当 $L/h < 2.5$ 时

$$\frac{V_{cs}}{f_c b h_0} = 0.0866 + 0.747 \rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c} \quad (2)$$

比较式(1)和式(2)可知,砼的受剪贡献在跨高比小时较大,而箍筋的受剪贡献较小,二者的综合效果差别不大。若不考虑跨高比的影响,将全部试验结果(图11)综合统计得

$$\frac{V_{cs}}{f_c b h_0} = 0.077 + 0.87 \rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c} \quad (3)$$

该式的标准差 $S = 0.012$, 相关系数 $r = 0.951$ 。在图11中还绘出了 GBJ10-89 $L/h > 0.25$ 的连系梁斜截面受剪承载力公式。当 $\rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c} > 0.08$ 时,式(3)略低于规范值,当 $\rho_{sv} \frac{f_{sv}}{f_c} < 0.08$ 时,式(3)略高于规范值,但差别并不大。规范公式与本次试验的标准差 $S = 0.014$, 相关系数 $r = 0.939$ 。故连系梁斜截面受剪承载力可不考虑跨高比的条件,统一取用规范的计算公式。

3 结论

通过本次16根静力试件的试验,探讨了连系梁的静力性能,可获得如下结论:

1) 连系梁的破坏形态与跨高比和配箍特征值有关。当跨高比等于1.0,配箍特征值较小时,可能发生对角斜拉破坏。跨高比等于1.0,配箍特征值中等时,发生斜压破坏。跨高比大于1.75,砼强度不太低时,都发生剪压破坏。但砼强度过低时可能发生剪压-撕裂破坏。

2) 连系梁纵筋应变重分布的程度随跨高比减小而加剧。跨高比小于1.75,纵筋在梁端达到屈服时,沿试件全长纵筋都受拉,使得纵筋屈服时,连系梁的受弯承载力有所降低。根据本次试验结果,建议连系梁的受弯承载力按下式计算:

当 $L/h \leq 2$ 时,

$$M_d = 0.9(f_s A_s + f_{sv} A_{sv} \cos \alpha)(h_0 - a_s) \quad (4a)$$

当 $L/h > 2$ 时,

$$M_d = (f_s A_s + f_{sv} A_{sv} \cos \alpha)(h_0 - a_s) \quad (4b)$$

3) GBJ10-89 连系梁的斜截面承载力公式,可推广用于跨高比小于2.5的连系梁。当梁配有斜筋时其斜截面承载力公式可写成

$$V_{cs} = 0.07 f_c b h_0 + f_{sv} \frac{A_{sv}}{S} h_0 + f_{sv} A_{sv} \sin \alpha \quad (5)$$

4) 为防止跨高比等于 1 时的对角斜拉破坏, 连系梁的最小配箍特征值应予提高, 建议取为 0.04。

5) 本次未对截面限制条件进行专门试验, 但跨高比为 1 的 WB-S-2 和 WB-S-3 发生斜压破坏的 $\frac{V_c}{f_c b h_0}$ 分别为 0.166 和 0.164, 远低于规范的有关规定。故今后还应对连系梁的截面限制条件进行研究。

参 考 文 献

- 1 混凝土结构设计规范 GBJ-10-89. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989
- 2 R·帕克, T·波利著. 秦文铨等译. 钢筋混凝土结构. 重庆大学出版社, 1986
- 3 龚炳年, 方鄂华. 反复荷载下联肢剪力墙结构连系梁的性能. 建筑结构学报, 1988, (1)

(编辑: 刘家凯)

STATICAL SHEAR STRENGTH ON COUPLING BEAMS OF REINFORCED CONCRETE

Niu Shaoren Wei Jiayu

(Chongqing Jianzhu University)

Rong Bosheng

(Guangdong Institute of Architecture Design and Research)

ABSTRACT On the basis of a statical test of 16 specimens of coupling beams in shear walls, which consist of 10 specimens with ordinary reinforcement and 6 specimens with composite reinforcement, the statical behaviors of the coupling beams with two different types of reinforcement are studied. It is concluded that the flexural strength of the beam should be multiplied by a reduction factor when the span-depth ratio is less than 2, and the shear strength is not influenced by the span-depth ratio and may be obtained with unified calculation formula.

KEY WORDS coupling beam, shear strength, span-depth ratio

表 1 试样配筋、材性及设计参数表

试件	L (mm)	b (mm)	h (mm)	h ₀ (mm)	L/h	砼		单侧纵筋		箍筋		斜筋		V ₀ (kN)	V ₀₂ (kN)	V _u /V ₀₂	M ₀ (kN-m)
						f _{cu} (N/mm ²)	f _c (N/mm ²)	数量	f _{sv} (N/mm ²)	Φ6.5@	f _v (N/mm ²)	数量	f _{sb} (N/mm ²)				
WB-S-1	700	120	700	675	1.0	36.3	27.6	2Φ14	396	Φ6.5@143	322	/	/	227	257	0.101	79.5
WB-S-2	700	120	700	675	1.0	26.1	19.8	2Φ14	396	99	322	/	/	227	258	0.142	79.5
WB-S-3	700	120	700	675	1.0	29.6	22.5	2Φ14	318	99	322	1Φ14	396	265	292	0.146	92.8
WB-S-4	700	120	400	375	1.75	34.1	25.9	2Φ14	396	143	322	/	/	122	138	0.105	42.7
WB-S-5	700	120	400	375	1.75	33.7	25.6	2Φ14	396	99	322	/	/	122	161	0.105	42.7
WB-S-6	700	120	400	375	1.75	29.1	22.1	3Φ14	318	66	322	/	/	147	191	0.148	51.5
WB-S-7	700	120	400	375	1.75	33.7	25.6	3Φ14	396	54	322	/	/	183	229	0.159	64.1
WB-S-8	700	120	400	375	1.75	35.8	27.2	2Φ14	318	143	322	1Φ14	396	153	169	0.124	53.6
WB-S-9	700	120	400	375	1.75	32.1	24.4	2Φ14	318	99	322	1Φ14	396	153	185	0.139	53.6
WB-S-10	700	120	400	375	1.75	29.2	22.2	3Φ14	318	54	322	1Φ14	396	202	246	0.202	70.7
WB-S-11	700	120	280	255	2.5	28.8	21.9	2Φ14	396	99	322	/	/	80	102	0.120	28.0
WB-S-12	700	120	280	255	2.5	27.8	21.1	3Φ14	396	54	322	/	/	120	146	0.186	42.0
WB-S-13	700	120	280	255	2.5	32.5	24.7	2Φ14	318	99	322	1Φ14	396	103	127	0.136	36.1
WB-S-14	700	120	200	175	3.5	28.7	21.8	2Φ14	396	99	322	/	/	52	70	0.114	18.2
WB-S-15	700	120	200	175	3.5	22.4	17.0	3Φ14	396	54	322	/	/	78	94	0.219	27.3
WB-S-16	700	120	200	175	3.5	23.7	18.0	2Φ14	318	99	322	1Φ14	396	68	79	0.179	23.8

注： 1. $V_s = 2[A_s f_r + A_{sv} f_{sv} \cos \alpha] (k_0 - a_s) / l$; 2. $V_{02} = 0.07 f_{cu} b_0 + \frac{A_{sv} l}{s} f_{sv} b_0 + A_s f_{sv} \sin \alpha$; 3. $M_s = V_s \cdot L/2$

表 2 试验结果表

试件	$\frac{f_r}{\rho_s f_c}$	V_{cr} (kN)	开裂剪力		裂宽 0.2 mm 剪力		破坏剪力		纵筋屈服		V_u $=0.077f_c b h_0$ $+0.87\rho_{sv} f_y b h_0$	V_u $=0.07f_c b h_0$ $+ \rho_{sv} f_y b h_0$	$\frac{V_u}{V_{cr}}$	$\frac{V_u}{V_{cr}}$	$\frac{M_y}{M_d}$	破坏形式
			V_1 (kN)	V_1/V_{cr}	V_2 (kN)	V_2/V_{cr}	V_u (kN)	V_u/V_{cr} (kN)	V_r (kN)	M_r (kN-m)						
WB-S-1	0.045	257	120	0.49	140	0.57	244	0.109	220	77.0	259	257	0.942	0.950	0.97	对角斜拉
WB-S-2	0.091	258	140	0.52	140	0.53	266	0.166	200	70.0	250	258	1.004	1.031	0.88	斜压
WB-S-3	0.079	292	180	0.53	210	0.62	340	0.164	270	94.5	266	271	1.120	1.100	1.02	斜压
WB-S-4	0.048	138	70	0.51	80	0.58	137	0.117	120	42.0	138	138	0.993	0.993	0.98	剪压
WB-S-5	0.070	161	60	0.42	60	0.42	142	0.123	110	38.5	159	161	0.893	0.882	0.90	剪压
WB-S-6	0.122	191	100	0.60	110	0.67	164	0.165	120	42.0	182	191	0.901	0.857	0.82	剪压
WB-S-7	0.129	229	75	0.38	110	0.56	195	0.169	150	52.5	218	229	0.894	0.852	0.82	剪压
WB-S-8	0.046	169	100	0.52	120	0.63	192	0.134	100	56.0	143	142	1.147	1.155	1.05	剪压
WB-S-9	0.074	185	100	0.53	120	0.64	188	0.146	140	49.0	155	158	1.039	1.019	0.91	剪压
WB-S-10	0.149	246	120	0.51	210	0.89	237	0.210	180	63.0	206	219	1.019	0.959	0.89	剪压
WB-S-11	0.082	102	50	0.54	70	0.76	92	0.137	83	29.1	99	102	0.929	0.902	1.04	剪压
WB-S-12	0.156	146	60	0.42	80	0.56	144	0.224	120	42.0	137	146	1.051	0.986	1.00	剪压
WB-S-13	0.073	127	50	0.41	80	0.65	123	0.138	110	38.5	106	108	0.981	0.903	1.07	剪压
WB-S-14	0.082	70	35	0.53	40	0.61	66	0.143	55	19.3	68	69	0.971	0.957	1.06	剪压
WB-S-15	0.194	94	35	0.39	40	0.45	89	0.248	80	28.0	88	94	1.011	0.947	1.03	剪压-撕裂
WB-S-16	0.106	79	30	0.38	55	0.69	80	0.178	65	22.8	64	66	1.047	1.015	0.96	剪压

注: 1. $V_{cr} = V_c - f_{sv} A_{sv} \sin \alpha$ 2. $M_y = V_y \cdot L/2$