

文章编号:1000-582X(2004)12-0052-04

工字形截面延性剪力墙肢抗震抗剪性能试验*

傅剑平,吴雁江,皮天祥,白绍良

(重庆大学土木工程学院,重庆 400030)

摘要:为了弥补我国国家标准《混凝土结构设计规范》中抗震剪力墙肢抗剪公式至今未经试验验证这一缺陷,作者承担了该规范编制组组织的对抗震延性剪力墙抗剪性能的试验研究任务。在对所用的特定试验控制条件及试件设计原则作讨论的基础上,介绍了所完成的第1组尺寸较大的试验轴压比为0.2的工字形截面剪力墙肢试件在低周交变加载下纵筋屈服后的抗剪性能试验结果,并对此结果作了分析讨论。

关键词:钢筋混凝土;抗震设计;剪力墙;抗剪性能

中图分类号:TU375

文献标识码:A

在高层建筑的钢筋混凝土剪力墙结构体系、框架-剪力墙结构体系和框架-核心筒结构体系中,剪力墙肢和核心筒壁是抵抗地震作用的关键构件。近年来通过试验研究和震害分析已经认识到,墙肢和筒壁只要设计得当,完全可以以延性方式(即在保持抗地震能力不退化的前提下具有良好的塑性变形能力)参与抗震。为了使墙肢和筒壁(以下统称墙肢)具有良好的延性,需要同时满足以下3个基本前提:1)加强对墙两端“边缘构件”的约束;2)控制墙肢轴压比,使之不致过大;3)在达到预估的大震非弹性变形状态之前使墙肢不发生剪切破坏。因此,通过抗震抗剪设计把墙肢的抗剪能力维持到预估的足够大的屈服后变形状态,就成为保证延性墙肢抗震性能的关键措施之一。

我国迄今为止未进行过抗震延性剪力墙肢抗剪性能的试验研究。国家设计标准《混凝土结构设计规范》GB50010-2002^[1]中抗震剪力墙肢的抗剪计算公式是在剪力墙肢静力抗剪承载力计算公式基础上由专家裁定的,即将静力抗剪能力表达式中的各分项普遍乘以0.8的降低系数后得出的。为了弥补这一缺口,笔者在该国家标准经建设部批准组织的第6批研究课题中承担了延性剪力墙肢抗剪性能试验研究任务,介绍已经完成的第1组2个较大尺寸试件的试验结果,并对其作初步分析讨论。

1 制定试验方案和设计试件时需考虑的问题

在制定抗剪试验方案和设计试件之前需要澄清以下2个问题:

第1个问题是需根据墙肢在地震中预计达到的受力状态确定不同的抗剪试验条件^[2]。其中的第一种受力状态是,工程中的大部分墙肢其受拉纵筋预计会在地震反应达到一定程度后进入屈服后受力状态。针对这类剪力墙肢的抗剪试验试件应设计成在纵筋进入屈服之前不发生剪切破坏,而是在屈服后交替非弹性变形增加到一定程度后发生剪切破坏。从而可以得出具有不同抗剪能力的墙肢在发生剪切破坏时分别达到的延性水准。以此为基础,即可根据非线性动力反应分析识别出的墙肢在大震下需要具备的延性能力反推出抗震抗剪设计要求。若在试件设计时将抗剪能力设计过高,试件将直到正截面失效都不发生剪切破坏。这类试验虽可证明试件具有足够的抗剪能力,但对于按延性需求给出合理的抗震抗剪设计公式却没有意义。因此,针对第1种受力状态的抗剪试件,其设计难度在于需要较正确预估试件的正截面抗力和纵筋屈服后的剪切抗力,以使所设计试件的剪切破坏发生在纵向受拉钢筋屈服之后到正截面失效的非弹性交替变形逐步增大的过程中。抗剪试验针对的第2种受力状态

* 收稿日期:2004-09-20

基金项目:教育部博士学科点专项基金(20010611021)

作者简介:傅剑平(1953-),男,辽宁本溪人,重庆大学副教授,主要从事钢筋混凝土结构研究。

是,工程中有少数剪力墙肢或核心筒壁,由于长度过大且按构造要求配置了最低数量的纵筋而使纵筋直至大震仍未进入屈服。针对这种状态,抗剪试件应设计成在纵筋不屈服的前提下发生低周交变加载下的剪切破坏。这类试件的设计难度不大,关键是要把纵筋加够。试验中需要测定的只是相应设计条件下的抗剪能力,从而可以根据累积的试验结果给出适用于这一受力状态的抗震抗剪设计公式。由于纵筋不屈服,针对这种状态的抗剪公式是不需要与延性需求挂钩的。

第 2 个问题是高层建筑中联肢墙墙肢的高宽比一般偏大,例如可从 4 到 20 以上,即不属于“低矮剪力墙”。但实际剪力墙震害表明,即使高宽比很大,剪切破坏也总是发生在底层。只有少数震害中斜裂缝可能发展至例如第 2 层。其原因主要在于剪力墙肢中的剪力分布总是从上至下逐层增大,即按楼层呈阶梯状变化,与受集中荷载作用的梁中剪力沿跨保持不变的情况有实质性区别,从而导致即使由墙底截面计算出的广义剪跨比已大于底层层高,剪力墙的剪切破坏仍发生在底层范围内。这可能也是国外剪力墙抗震抗剪试验多用模拟底层的低矮试件的主要理由。

笔者所完成的试验计划中的第 1 组试件在第 1 个问题上针对的是纵向受拉钢筋先进入屈服的情况,在第 2 个问题上采用的是模拟底层的低矮构件。

2 试件设计及试验方案

考虑到国外曾进行过的试验中单片墙所占比重较大,而实际工程中带翼墙的情况较多,故首批试件选用工字形截面^[3],下一步计划再考虑 T 形截面墙肢和单片墙肢。试件 W-1 和 W-2 的外形、尺寸相同,如图 1 所示;其中试件下部端块是为了形成下端固定的受力状态,上端块是为了使由竖向作动器施加的集中力能均匀分布在工字形截面上,也是为了使水平作动器集中力较均匀分布在试件腹板高度上;试件翼缘宽度是大概根据有效翼缘宽度规定选定的。

国外曾进行过的试验中不少都未加轴力。考虑到我国工程中剪力墙高度偏大,加之短肢墙的应用中,轴压比有增大趋势,因此试验中必须施加轴压力。鉴于工程中考虑可靠性要求后用轴压力设计值和混凝土抗压强度设计值计算出的设计轴压比大致在 0.1 到 0.6 之间变动,而试验中用实际施加的轴压力 N 及混凝土实测轴压强度 f_c 计算出的轴压比只相当于设计轴压比的一半(换算关系从略),即 0.05 ~ 0.3 左右,故文中第 1 批 2 个试件选用的轴压比均定为 $n = N/f_c A_c = 0.2$,其中 A_c 为工字形截面的毛面积。

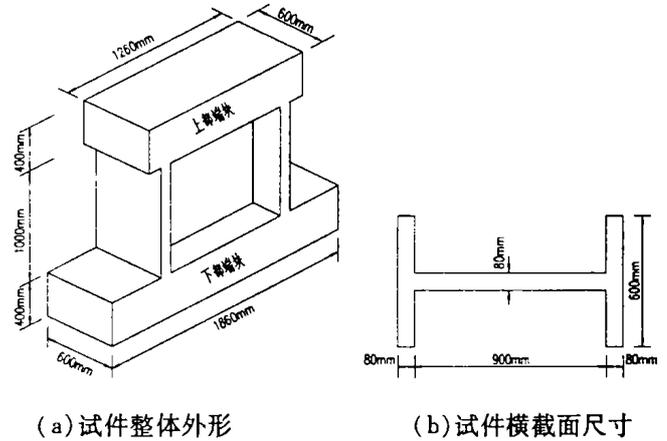


图 1 试件外形及尺寸

W-1 和 W-2 2 个试件的差异是 W-1 的混凝土强度比 W-2 偏低(见表 1),为了使试件剪切破坏均发生在纵筋屈服后,弥补试件 W-1 混凝土强度偏低可能给抗剪强度造成的缺口,故将其抗剪钢筋(腹板水平钢筋)用量取成比试件 W-2 适度偏大(见表 1、表 2)。此外,2 个试件除去在腹板与翼缘交界处设置的 4 根纵筋相同外(见图 2),试件 W-2 翼缘竖向分布筋数量也稍大于试件 W-1,即试件 W-2 的正截面承载力可能略高于试件 W-1。试件各部位配筋构造均符合设计规范基本要求。

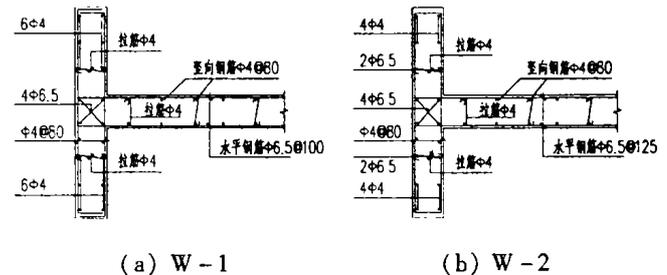


图 2 试件 W-1 和 W-2 的墙肢配筋

表 1 各试件基本参数 N/mm^2

构件名称	轴压比	f_{cu}	f_c	f_t	翼缘配筋率/%		腹板配筋率/%	
					ρ_{fh}	ρ_{fv}	ρ_{wh}	ρ_{wv}
W-1	0.2	18.8	14.3	1.84	0.39	0.59	0.83	0.39
W-2	0.2	24.0	18.2	2.16	0.39	0.76	0.66	0.39

说明: 1) 混凝土的 f_{cu} 取为 1 组 3 个与试件同条件养护并在试验前一天测得的 150 mm 立方体试块抗压强度平均值,取 $f_c = 0.76f_{cu}$, $f_t = 0.26f_c^{2/3}$ 。

2) 表中 ρ_{fh} 和 ρ_{fv} 分别为翼缘水平分布筋和竖向分布筋配筋率, ρ_{wh} 和 ρ_{wv} 分别为腹板水平分布筋和竖向分布筋配筋率。

表 2 钢筋实测力学指标 N/mm^2

构件名称	钢筋类别	屈服强度	极限强度	弹性模量 $\times 10^5$
W-1	$\Phi 6.5$	271.0	451.0	1.86
	$\Phi 4$	341.0	485.5	1.62
W-2	$\Phi 6.5$	300.0	447.9	1.92
	$\Phi 4$	341.0	485.5	1.62

文中试件设计的难点在于,根据上述试验基本要

求,剪切破坏应发生在试件纵筋屈服后到试件正截面失效之间的不大范围内,故必须准确预估试件的屈服荷载和剪切破坏荷载(以水平力表示),并通过调整腹板水平钢筋数量使后者略高于前者,目前各国设计规范已有剪力墙肢正截面承载力和抗剪承载力计算公式均因带有一定经验性和偏于安全,故即使用其去除可靠性因素后的原型公式也难以准确预测本文所需承载力。为此,笔者通过自编的正截面非线性有限元分析程序预测了正截面屈服强度,并用购于加拿大多伦多大学 F. J. Vecchio 教授研究所基于斜压场理论的二维非线性有限元分析程序 VecTor2 预测了试件抗剪承载力(对用 VecTor2 程序预测抗剪承载力问题将在另文中讨论^[4])。试验结果表明,预测结果是令人满意的。所试验的 2 个试件都达到了剪切破坏发生在正截面屈服后和失效前的基本要求。

试验装置如图 3 所示。对试件施加轴向压力并在整个试验过程中保持恒定。水平荷载首先按“力控制”思路分别在正反向完成屈服荷载下的 2 个循环,并确定屈服水平位移,然后逐步按“位移控制”增大正、反方向的水平位移,并以每增大一倍屈服位移循环 2 周的方式直加到试件产生剪切破坏。

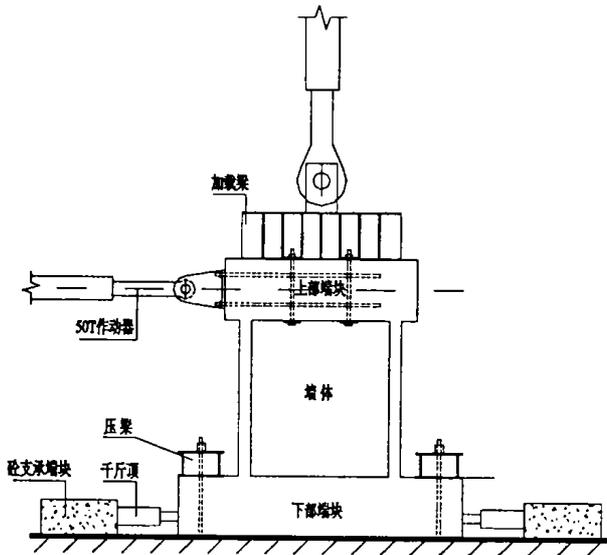


图 3 试验装置

在试验中除测得图 4 所示二试件荷载 - 位移滞回曲线外,还通过应变片测定了各关键部位各类钢筋的应变,并通过专用仪表量测了翼缘的竖向应变(判断弯曲弯形)和腹板的对角变形(以筛分出剪切变形)。

3 试验结果分析

试件 W-1 和 W-2 分别在 0.80 倍和 0.88 倍屈服荷载下出现第 1 条大致沿 45° 方向的斜裂缝,并分别在 0.86 倍和 0.88 倍屈服荷载下出现沿工字形墙肢底

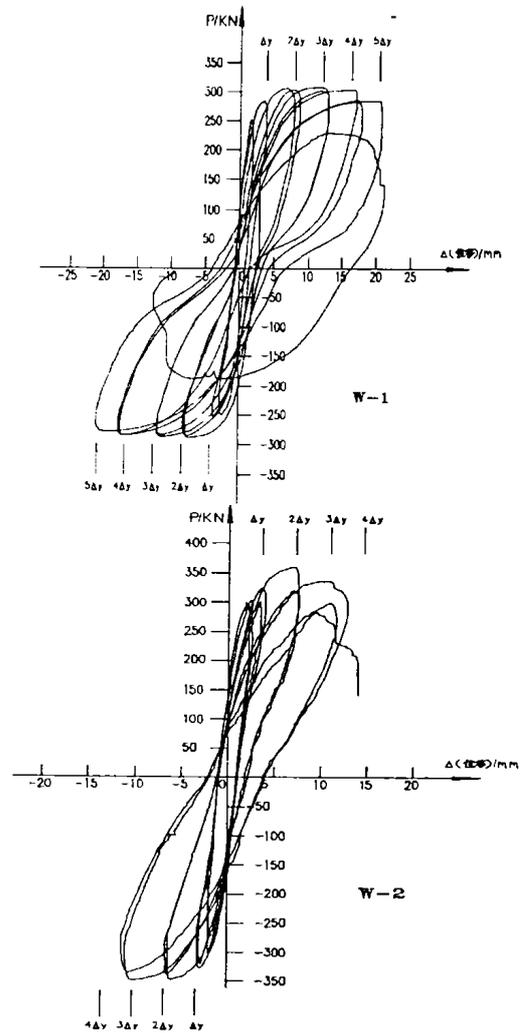


图 4 试件 W-1 和 W-2 的水平荷载 - 水平位移滞回曲线边的第 1 条正截面裂缝。在纵筋屈服后随着试件正、反向非弹性水平位移的逐步增大,斜裂缝根数增多,加宽,细小裂缝增多。2 个方向斜裂缝仍有分别从下角部向斜上方放射的一定趋势。从图 4 可以看出,曲线有一定的捏拢现象,主要由裂缝交替开闭所引起,但不严重,表明试件刚度保持较好,耗能性良好。

试件破坏后的外观如图 5(a)、(b)、(c)、(d) 所示,其中试件 W-1 由于腹板下角被斜裂缝分割的混凝土斜向压溃而发生剪切破坏(见图 5(a)),几乎同时,同一侧翼缘混凝土也被压碎(沿翼缘底部压碎后的混凝土见图 5(b))。此时试件达到的位移延性系数为 5.0。试件 W-2 的正截面屈服弯矩比试件 W-1 偏大,其混凝土强度虽比试件 W-1 略强,但腹板水平抗剪钢筋偏少(见表 1),因此这些因素未完全起到使抗剪能力随正截面屈服弯矩相应提高的效果,从而使试件在水平位移延性系数为 3.3 时发生剪切破坏,其剪切破坏面为图 5(c) 所示宽度最大的腹板对角斜裂缝,从图 5(c) 和放大后的图 5(d) (局部) 可以看出右侧翼缘也被全部剪断。

虽然试验只测得了 2 个试件的抗震抗剪能力,而

且 2 个试件混凝土强度和抗剪钢筋的配置数量拉开的幅度也不是太大,但因这 2 个试件的试验较成功,仍想将试验结果与各知名设计规范推荐设计方法的原型公式计算结果作一对比,以对各国公式效果作初步验证。

在表 3 中分别给出了用加拿大多伦多大学 VecTor2 软件模拟出的抗剪能力和按各有关设计规范原型公式用试件 W-1、W-2 的实际几何参数和力学参数算得的抗剪能力。

表 3 实测抗剪能力与计算机模拟分析结果及对比

kN

试件 编号	V_u (实测值)	V_u^* (VecTor2 计算值)	V_u' (各国规范计算值)			
			中国规范 GB50010-2002	美国规范 ACI318-02	加拿大规范 CSA-A23-3-94	日本 AIJ 设计指南
W-1	303.0	316.7	246.9 (162.5 + 60.1 + 24.3)	272.6 (189.9 + 82.7)	222.8 (189.9 + 32.9)	270.8 (190.6 + 80.2)
W-2	355.0	386.3	231.4 (130.0 + 70.5 + 30.9)	261.4 (168.8 + 92.6)	206.0 (168.8 + 37.2)	309.4 (168.8 + 140.6)

说明:括号内 2 项分别为钢筋项和混凝土项,其中在按中国规范计算一栏中增加了第 3 项轴力项。

力试验结果留有余地,即由设计公式算得的抗剪能力应比 W-2 的实测结果略偏低一个幅度。

4 结 论

1) 首次完成了施加恒定轴力的工字形截面剪力墙肢在纵筋屈服后的抗剪性能试验。试验结果判明这类墙肢可能以沿斜裂缝发生包括将受压翼缘全部剪断或腹板下角被斜裂缝严重分割的局部腹板混凝土被斜向压溃的 3 种剪切失效方式。

2) 与各国已有设计方法相比后表明,在日本建筑学会抗震抗剪公式中参照中国规范方案增加轴压力抗剪能力项后,能得到反映本文试验结果的最佳效果。

3) 与试验结果对比后初步证明,加拿大多伦多大学建立在“斜压场理论”基础上的 VecTor2 非线性二维有限元分析程序能很好模拟本文给定受力条件下剪力墙肢抗震抗剪能力,待本学科点再完成更多试验并与该程序相应模拟结果对比后证明这一结论陆续有效后,将有可能利用该程序对不同参数墙肢的抗震抗剪能力进行广泛的系列模拟,并将其与试验结果一起作为建立剪力墙肢更有效抗震抗剪设计公式的依据。

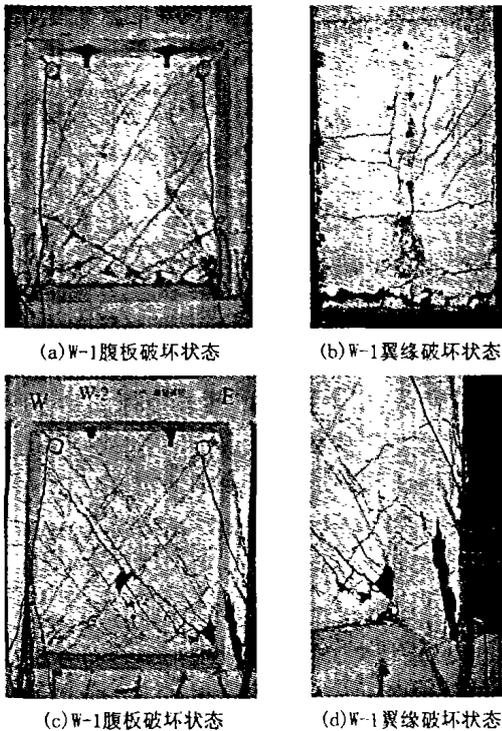


图 5 试件 W-1 和 W-2 破坏后外观

从表 3 中可以看出,VecTor2 程序计算出的结果虽比实测值略偏高,但偏高幅度不大,总体趋势能很好反映试验值。这表明虽只进行了 2 个试件的试验,但试验结果比较稳定。

各国规范的计算结果中,中国和加拿大规范^[5]所得抗剪能力偏低,美国 ACI318 规范^[6]和日本 AIJ(建筑学会)设计规范所得抗剪能力则相对偏高,与试验结果差距偏小。而且,除去中国规范外,其它 3 本规范的剪力墙肢抗震抗剪公式中均不考虑轴压力的有利影响。这表明中国规范所给抗剪公式中如果去掉轴压力项后再与另 3 本规范相比,则中国规范公式是最偏安全的。若将中国规范考虑的轴压力有利影响加到日本 AIJ 公式上,则将得出与本文试验最接近的计算结果。当然,在与试件 W-2 试验结果对比时,还必须考虑到,试件 W-2 所达到的延性能力不高,应对其抗剪能

参考文献:

[1] GB50010-2002. 混凝土结构设计规范[S].
 [2] 吴雁江. 工字型截面钢筋混凝土剪力墙抗震抗剪性能试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
 [3] 傅剑平. 钢筋混凝土框架节点抗震性能与设计方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2002.
 [4] 杜静. 钢筋混凝土剪力墙抗震抗剪性能研究及有限元模拟[D]. 重庆:重庆大学,2004.
 [5] CSA STANDARD A23.3-94. Design of Concrete Structures [S]. 1994.
 [6] ACI COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318 R-02)[S].

(下转第 67 页)

Deductive Models of Concentration Field for Locating the Death in Mine and Its Application

ZHOU Xin-quan, XU Min, ZHANG An-qi

(School of Resource & Safety and Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the idea of locating the death in the collapsed area of mine by the gas released from the organism decomposition proposed by the authors, this paper presents the Least Multiply Square (LMS) model for the location and develops two kinds of ANN models for the locating computation. The results of the organism decomposition experiment indicates that the Back Propagation (BP) is better for locating the death in mine. Above works are set up the foundation of the theoretical analysis and the technical development for locating the death by analyzing the concentration distribution of the marker gas, mercaptans, in mine. Based on the technology developed, the period, for the rescue team members staying in that risk area, can be shorten. The rescue work achieve a step forward for more reasonable, feasible and efficient.

Key words: organism decomposition; location; artificial neural networks; mine disaster rescue

(编辑 姚 飞)

(上接第 55 页)

Experimental Research on Seismic Shear Capacity of I-Shape Ductile Reinforced Concrete Structural Walls

FU Jian-ping, WU Yan-jiang, PI Tian-xiang, BAI Shao-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The shear design formula for seismic shearwalls in the Chinese standard (Code for Design of Concrete Structures) have not been verified by tests yet, In order to compensate for it, the authors undertake the task of testing on the shear behavior of seismic shearwalls organized by the Code association. After discussing on the particular conditions controlling tests and philosophy in specimen designing, the results of the first group of tests on the seismic shear behavior of shearwalls, which are I-shaped and with relatively large scale and axial force ratio of 0.2 and tested under reversed cyclic horizontal forces, are introduced. The results are analyzed and discussed.

Key words: reinforced concrete; seismic design; shearwalls; seismic shear behavior

(编辑 姚 飞)