

现场发泡夹心墙内外叶墙协同工作性能

张延年^{1,2}, 李恒², 刘明², 张洵², 李立东²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

摘要:为研究现场发泡夹心墙的稳定性和钢筋混凝土挑耳和拉接件参与变形能力、夹心墙的破坏形态和受力性能,寻求改善墙体的变形能力和整体性能的有效手段。制作了 13 片发泡夹心墙和 1 片实心墙,进行了平面内的抗震性能试验,分析了一些构造措施对墙体受力性能和变形性能的影响,并分析了竖向压力和保温层厚度对相对位移差的影响,最后,分析了钢筋混凝土梁挑耳和拉接件对协调内外叶墙体工作的能力。试验研究结果表明构造柱的存在可以有效改善墙体的变形能力,并且现场发泡保温浆料具有较高的黏结强度、抗剪强度和抗压强度,对墙体承载力有一定有利影响。钢筋混凝土梁挑耳在加强内外叶墙连接中起主要作用,而且在保证外叶墙平面外稳定性方面也起主要作用。当墙体严重破坏开裂时,拉接件可以起到对墙体支撑或拉接的作用,有效防止墙面倒塌掉落。拉接件与钢筋混凝土挑耳在夹心墙中分工不同,是协调夹心墙内外叶墙体工作的主要构造措施,应合理设计使各自充分发挥作用。

关键词:夹心墙;抗震试验;稳定性;构造措施;变形能力

中图分类号:TU362 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0014-08

Interaction Working Behavior About the Internal and External Wall of Foam-in-place Cavity Wall

ZHANG Yan-nian^{1,2}, LI Heng², LIU Ming², ZHANG Xun², LI Li-dong²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jian Zhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to study the stability of foam-in-place cavity wall, the capacity of reinforced concrete strip ear and tie involving in cavity wall deformation, the broken shapes and mechanical performance of the cavity wall, the effective measures was seaked to improve deformation capacity and overall performance of the cavity wall. 13 patches of cavity wall and 1 patch of solid wall were built and seismic tests of which were carried out. The Influence of some constructional measures on mechanical behavior and deformation properties of the wall and vertical pressure and insulation layer thickness on the relative displacement difference of the internal and external wall of foam-in-place cavity wall was analyzed. Finally, the capability of reinforced concrete strip ear and tie working interactively between the internal and external wall of foam-in-place cavity wall was analyzed. It is found that deformation capacity of the cavity wall is improved efficiently with constructional column and the high bonding strength, shearing strength and pressure strength of foam-in-place insulating mortar have certainly a positive influence on the bearing capacity of the wall. The reinforced concrete strip ears play the leading role in reinforcing connection of the internal and

收稿日期:2009-12-27

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划课题(2007BA10011A-5);建设部研究开发项目(2008-k3-10);省级重点实验室开放基金资助(JG-200911)

作者简介:张延年(1976-),男,副教授,博士后,主要从事防灾减灾和建筑节能等方面的研究工作,(E-mail)zyntiger@163.com。

external wall of foam-in-place cavity wall and guaranteeing out-plane stability of the external wall. When walls crack seriously, the ties can play an important role in supporting and drawing the wall and preventing wall collapse. Furthermore, the reinforced concrete strip ears and ties which are the main construction measures to coordinate the internal and external wall work together perform a great variety of tasks. Therefore, the reinforced concrete strip ears and ties should be designed rationally to guarantee playing their respective roles.

Key words: cavity wall; seismic test; stability; constructional measure; deformation capacity

据统计,我国建筑单位面积能耗仍是气候相近发达国家的3~5倍^[1]。建筑节能是各种节能途径中潜力最大、最为直接、有效的方式,是缓解能源紧张的最有效措施^[3]。建筑能耗中,通过外墙造成的能耗约占建筑总能耗的50%以上^[4],因而墙体保温是实现建筑节能的关键^[5-7]。

节能墙体有单一节能墙体和复合节能墙体两种形式。单一节能墙体以加气混凝土墙为代表,由于安全性、耐久性和使用功能等问题阻碍其使用和发展^[8]。复合节能墙体主要包括外墙内保温、外墙外保温和夹心墙技术。外墙内保温由于裂缝问题严重,难以避免热桥等缺点,所占比例逐年降低,已成为一种过渡的、落后的构造形式^[9]。目前,国内外应用最广的节能墙体是外墙外保温^[10]。中国外墙外保温工程的耐久性问题十分严重,无法保证在正确使用和正常维护条件下25年的使用年限,部分工程仅可使用3~5年^[11]。越来越多的专家认识到外墙外保温工程耐久性问题,担心在未来几年或十几年后外墙外保温工程出现全国性的大面积或整体破坏的灾难性后果^[12]。夹心墙是唯一能达到集承重、保温(隔声)和装饰于一体、适于不同地区的耐久性节能墙体^[13-15]。目前,夹心墙采用填充苯板等方式,施工复杂、工期长,在实际施工中容易出现多种质量问题,这已经影响了该技术的进一步推广应用。节能墙体保温层耐久性问题已成为中外建筑节能专家面临的主要问题,寻求一种经济、施工简单快捷、节能效果好、保温层与建筑同寿命的耐久性节能墙体技术刻不容缓。

因此提出一种新型节能墙体——现场发泡节能夹心墙。采用现场发泡浇筑技术,在内外叶墙砌筑过程中不需考虑保温材料的填充,使施工经济、简单、快捷;并且接缝处缝隙大、贴和不严密、存在保温薄弱部位等问题得到有效解决。目前现场发泡保温浆料的导热系数一般在0.06 W/m·K左右,如果达到50%或65%以上的节能目标,保温层厚度将达到80~120 mm之间,将超过中国规范规定厚度(100 mm)。中国的夹心墙主要采用内叶墙承重,外

叶墙自承重。而国外的夹心墙与中国的有明显差异,内外叶墙等厚度,采用内外叶墙均承受荷载。因此夹心墙的工作机理,尤其内外叶墙协同工作性能需要深入研究。

1 试件设计

试验共设计13片夹心墙试件,1片实心墙对比试件。为研究各因素对夹心墙抗震性能影响,按以下不同参数分组:拉接件形状、间距、保温层厚度、竖向压应力 σ_0 (见表1)。试件尺寸宽 $B=2\ 100\ \text{mm}$,高 $H=1\ 600\ \text{mm}$,内叶墙厚240 mm,外内叶墙厚120 mm,实心墙厚370 mm。试件顶部设有钢筋混凝土压梁,内叶墙两端设240 mm厚构造柱。

表1 试件分组

试件编号	接件形状与间距 (水平×竖向)/mm	保温层 厚度/mm	σ_0 /MPa	f_1 /MPa	f_2 /MPa
WH84-1	环形:800×400	100	1.0	10	8.2
WH84-2		120	1.0	10	8.0
WH83-1	环形:800×300	80	1.0	10	7.7
WH83-0		100	1.0	10	8.5
WH83-2	环形:600×400	120	1.0	10	8.1
WH64-2		80	1.0	10	7.9
WH64-0	环形:600×400	100	1.0	10	8.2
WH64-1		120	1.0	10	7.8
WZ83-1	Z形:800×300	120	1.0	10	8.4
WZ64-2		120	1.0	10	7.9
xWZ64-2	Z形:600×400	120	0.7	10	7.7
xWH64-2		120	0.5	10	7.7
xWH83-2	环形:800×300	120	0.3	10	7.5
W	实心墙	0	0.7	10	8.4

2 加载装置

测试系统简图如图1所示,竖向用两个量程600 kN的千斤顶在钢分配梁顶面滑板上按四分区施加竖向荷载,使用稳压器保持试验过程中竖向压

力恒定,通过分配梁传力使内叶墙均匀受压;滑板的作用是保证墙体在受荷时尽量无约束滑移;水平拉压往复荷载用美国 MTS 公司的液压伺服作动器施加,并联机实现加载控制和试验数据采集。试件安装时,为保证试件水平面平整,在试件底座下面,压梁顶部与钢分配梁之间分别用一层厚约 10 mm 细砂找平;为保证加荷点正确,进行前后对中,使竖向荷载、水平荷载、墙体在同一铅垂面内。试件找平对中后,将其固定牢固。

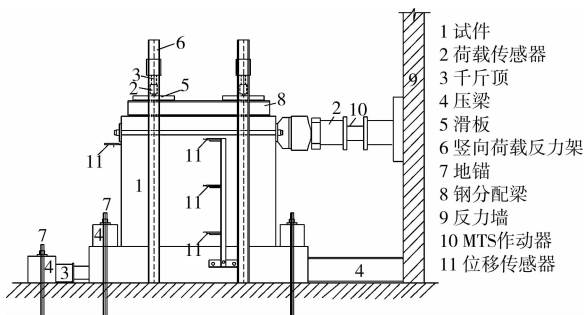


图 1 测试系统简图



图 2 试件加载

3 加载方案与加载制度

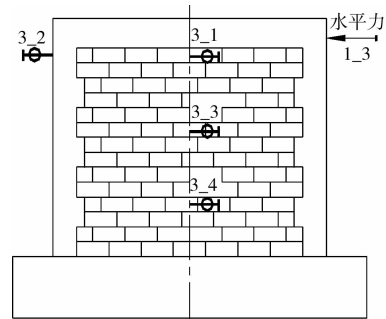
试验前,先施加竖向荷载,试加几次,待观察墙片受力正常无平面外偏心后,将竖向荷载一次加至要求值,并恒载 15 min,在整个试验中,竖向荷载值保持不变。垂直荷载施加完后,检查测试仪表和试件均正常,则开始施加水平荷载。按《建筑抗震试验方法规程》JGJ101-96 的要求,先进行预加反复荷载试验 2 次,取开裂荷载的 20%,此次试验预估 100 kN。正式加载采用变力变位移加载方案。以荷载增量控制加载阶段,一次性加载至墙体开裂,循环一次;墙体开裂后,以位移增量控制加载,以墙体开裂荷载对应的位移 Δ_c 为控制位移,分别以 $1\Delta_c$ 、 $2\Delta_c$ 、 $3\Delta_c$ 为级差控制加载,每级循环 3 次, $4\Delta_c$ 以上每级循环 1 次。当试件裂缝急剧扩展和增多,荷载明显下降时即认为试件丧失承载能力而达到破坏状态。

4 量测内容及测点布置

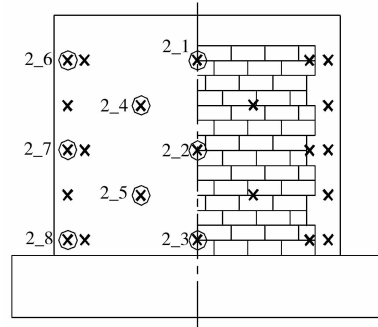
1) 试件的滞回曲线:用位移传感器 3-1 测量内叶墙中线顶点的水平位移,用荷载传感器 1-3 测量水平荷载以绘制滞回曲线。位移传感器的表架固定在试件底梁上,目的是消除底座移动的影响,所测位移为墙体相对底座的位移。位移传感器 3-3,3-4 沿内叶墙竖向均匀布置,测量不同高度处的水平位移。如图 3 所示。

2) 内叶墙与外叶墙相对侧移:相对侧移反映不同受力阶段内、外叶墙共同工作情况,用位移传感器 3-2 测量。

3) 拉接件应变值:应变值体现墙体不同受力阶段,拉接件受力和变形情况。由于试件的对称性,仅测量试件对称轴一侧的拉接件应变值,观测应变值的变化。将电阻应变片 2-1~2-8 粘贴在夹心墙保温层内拉接件表面测量拉接件应变。



(a) 荷载与位移传感器布置图



(b) 间距 800 x 300 拉接件应变片布置图

图 3 测点布置

5 试验现象分析

加载全过程中,构造柱一直有效发挥约束作用,加强墙体变形能力,增加耗能,主要体现在(见图 4):1)内叶墙与外叶墙相比,脆性破坏性质明显改善;2)内叶墙产生较大位移和开裂时始终保持裂而不倒;3)内叶墙裂缝的闭合现象。在构造柱开裂前,内叶墙裂缝闭合现象很明显,卸荷后裂缝宽度减少

70%左右。随构造柱裂缝开展,闭合作用有所下降,但构件破坏时裂缝宽仍可减少 30%左右。外叶墙

无构造柱,裂缝闭合现象不明显。

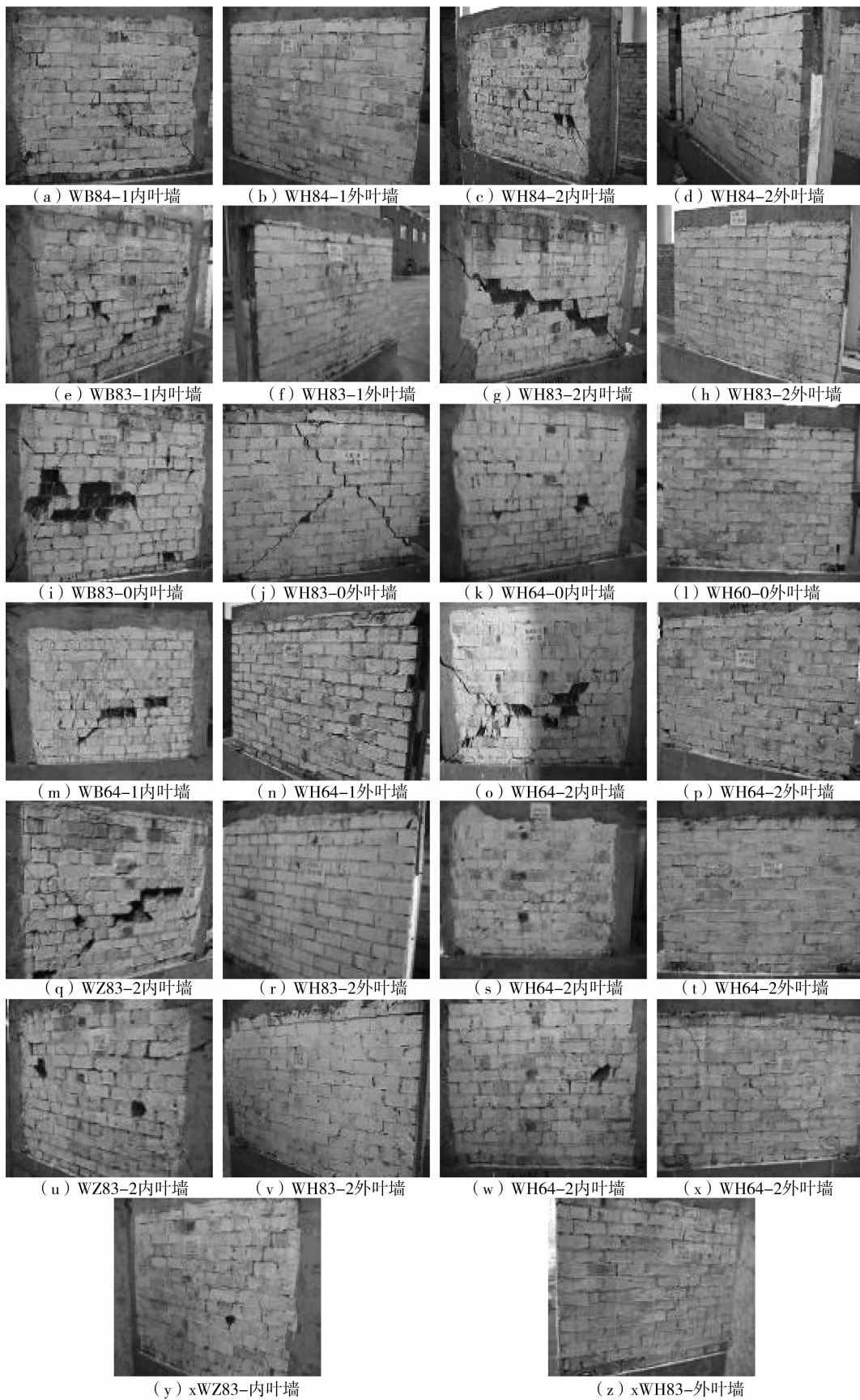


图 4 墙体破坏

6 试验结果与分析

试件在水平荷载作用下各阶段实测荷载值和相应位移值见表 2。表中 P_c 为开裂荷载, P_U 为极限荷载。实测位移为内叶墙体中线顶点相对于试件底

座的水平位移。其中 Δ_c 为开裂位移, Δ_u 为极限荷载对应的位移, $\Delta_{0.85}$ 为荷载下降到极限荷载的 85% 时的位移。开裂荷载与极限荷载分别取两个方向的平均值, 开裂位移与极限位移分别取两个方向的平均值。

表 2 试件受力各阶段荷载值和相应位移值

试件 编号	水平荷载 P							内叶墙位移 Δ								
	P_c /kN			P_U /kN			P_c/P_U	Δ_c /mm			Δ_u /mm			$\Delta_{0.85}$ /mm		
	正方向	负方向	平均值	正方向	负方向	平均值		正方向	负方向	平均值	正方向	负方向	平均值	正方向	负方向	平均值
WH84-1	455	514	484	633	624	629	0.77	1.47	1.56	1.51	5.75	5.88	5.82	7.63	7.95	7.79
WH84-2	425	479	452	542	522	532	0.85	1.70	1.82	1.76	5.88	5.78	5.83	7.27	7.26	7.27
WH83-1	506	460	483	653	570	612	0.79	2.01	2.04	2.03	5.67	6.03	5.85	7.19	7.87	7.53
WH83-0	578	528	553	695	722	709	0.78	1.92	1.96	1.94	5.71	5.78	5.75	15.4	14.1	14.8
WH83-2	433	483	458	580	538	559	0.82	1.92	1.59	1.76	5.02	5.76	5.39	7.42	7.78	7.60
WH64-2	437	470	454	531	548	540	0.84	1.96	1.79	1.88	5.26	5.48	5.37	15.4	15.3	15.4
WH64-0	490	526	508	616	638	627	0.81	2.13	2.07	2.10	7.38	7.37	7.37	14.6	14.9	14.8
WH64-1	425	431	428	554	572	563	0.76	2.11	2.23	2.17	7.05	7.74	7.40	13.9	13.5	13.7
WZ83-1	496	548	522	657	665	661	0.79	1.64	1.81	1.73	5.88	6.08	5.98	12.7	13.1	12.9
WZ64-2	402	443	423	484	521	503	0.84	1.44	1.13	1.29	4.89	4.88	4.89	9.12	9.44	9.28
XWZ64-2	406	374	390	452	465	459	0.85	1.11	0.96	1.04	4.30	4.37	4.34	9.14	9.66	9.40
XWH64-2	320	364	342	371	424	398	0.86	1.69	1.97	1.83	6.10	7.02	6.56	12.3	12.7	12.5
XWH83-1	302	253	278	339	373	356	0.78	2.10	1.87	1.99	6.69	7.40	7.05	11.5	11.6	11.6
W	406	443	425	550	570	560	0.76	1.52	1.59	1.56	5.02	5.53	5.28	15.2	13.4	14.3

夹心墙比实心墙抗剪承载力有一定降低, 竖向压应力相同时保温层墙体极限荷载与同样截面厚 (370 mm) 实心墙相比降低 18%, 开裂荷载仅降低 5%。开裂荷载与极限荷载之比 P_c/P_u 为 76%~86%。夹心墙体开裂荷载比同样截面 370 厚实心墙开裂荷载降低较少, 说明连接构造措施较有效地加强了两叶墙整体工作能力, 从而缩小了夹心墙受力性能与实心墙受力性能的差距, 夹心墙试件有较高的抗震承载力。

压应力对墙体抗剪承载力影响较大, 压应力分别为 0.7 MPa、0.5 MPa、0.3 MPa 的夹心墙极限荷载为压应力 1 MPa 夹心墙极限荷载平均值的 77%、67%、60%。试件的拉接件形状与布置间距的变化对抗剪承载力影响较小, 说明拉接件对提高承载力的作用不大。保温层厚度变化对抗剪承载力有一定影响。100 mm 保温层厚度开裂荷载比 80 mm 保温层厚度开裂荷载平均下降 10%, 120 mm 保温层厚度开裂荷载比 100 mm 保温层厚度开裂荷载仅下降 3%。100 mm 保温层厚度极限荷载比 80 mm 保温

层厚度极限荷载下降 13%, 120 mm 保温层厚度极限荷载比 100 mm 保温层厚度极限荷载下降 6%。虽然保温层厚度增加对抗剪承载力有不利影响, 但是由于所采用的发泡保温浆料具有较高的黏结强度、抗剪强度和抗压强度, 对抗剪承载力有一定有利影响。

7 内外叶墙协同工作性能研究

由于内外叶墙片厚度不同, 并且内叶墙有构造柱约束, 外叶墙无构造柱约束。造成地震作用下内外叶墙振动特性不同, 受力性能也不同。试验参考规范关于夹心墙连接构造做法, 设计拉接件和钢筋混凝土挑耳连接。通过实测内外叶墙片位移差、拉接件应变来研究夹心墙协同工作性能。

7.1 内外叶墙片位移差

图 5 为部分试件的荷载—内外叶墙位移差曲线, 夹心墙在开裂荷载前, 内外叶墙位移差基本为零。在接近极限荷载时, 内外叶墙位移差仍较小, 未超过 2 mm。说明试件采取的连接措施对加强夹心

墙协同工作性能比较有效,夹心墙抗剪承载力考虑外叶墙有利作用比较合理。内叶墙开裂后,内外叶墙变形开始不协调,外叶墙位移滞后。此后随墙

体弹性变形加大,内外叶墙位移差逐渐加大,卸载后残余变形差加大,破坏时内外叶墙位移差在 6 mm 左右。

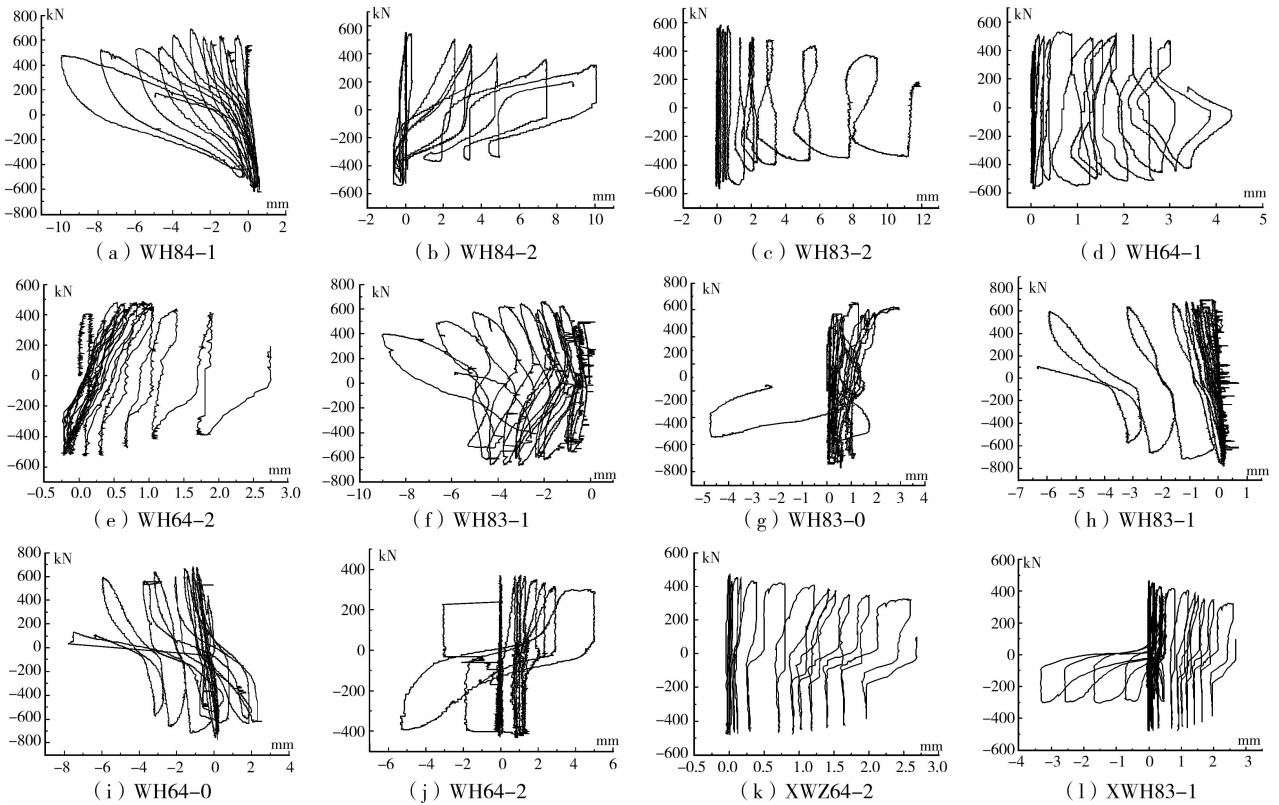


图 5 夹心墙荷载-内外叶墙位移差曲线

7.2 内外叶墙协同工作影响因素分析

夹心墙试件协同工作性能可以按相对位移差对比,相对位移差定义为破坏荷载对应的内外叶墙位移差 δ 与内叶墙位移值 Δ 之比。相对位移差可以反映弹塑性后期夹心墙共同工作情况。 δ/Δ 值小说明外叶墙位移滞后程度小,试件共同工作性能较好。由表 3 可见,各试件相对位移差 δ/Δ 有一定差别,范围在 0.25~0.58。总体上看,竖向压力小的试件或保温层厚度小的试件 δ/Δ 相对较小,而拉接件形状参数对试件的 δ/Δ 影响很小。

表 3 相对位移差

试件编号	δ /mm	Δ /mm	δ/Δ
WH84-1	6.4	13.6	0.47
WH84-2	7.1	14.0	0.51
WH64-1	4.1	12.1	0.34
WH64-0	4.9	14.8	0.33
WH83-2	8.0	13.9	0.58
WZ83-1	9.0	16.0	0.56
WH83-1	5.6	14.1	0.40
WH83-0	6.4	15.9	0.40
WH64-2	7.8	15.1	0.52
XWH64-2	5.8	16.3	0.36

续表 3

试件编号	δ /mm	Δ /mm	δ/Δ
XWZ64-2	3.6	14.3	0.25
XWH83-2	4.5	16.4	0.27

7.2.1 竖向压应力对协同工作的影响

随竖向压力的降低,试件的 δ/Δ 也降低了。1.0 MPa,0.7 MPa,0.5 MPa 和 0.3 MPa 试件的相对位移差 δ/Δ 比例为:1:0.78:0.54:0.59。说明竖向压应力较高时(1.0 MPa)内外叶墙协同工作性能减弱。由于实际工程的夹心墙竖向压应力不超过 0.5 MPa,在此范围夹心墙协同工作能力相对较强。

7.2.2 保温层厚度对协同工作的影响

保温层厚度达 120 mm 时 δ/Δ 有所提高,80 mm,100 mm 和 120 mm 的试件相对位移差 δ/Δ 之比为:0.63:0.65:1。100 mm 和 120 mm 试件的相对位移差 δ/Δ 之比为:0.92:1。保温层厚度为 120 mm 的夹心墙仍有较好的整体协同工作性能。

7.3 拉接件应变值

表 4 为夹心墙在开裂荷载与极限荷载时的应变值。不同位置的拉接件受力有一定差别,开裂荷载时墙中心钢筋应变值较大;墙体形成交叉裂缝后,上半部拉接件应变值大于下半部,靠近中间裂缝处的拉接件作用较大。

表 4 拉接件应变值

试件编号	荷载	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
WH84-1	P_c	89	21	0	4	3 711	30		
	P_u	-1 047	114	75	138	屈服	-170		
WH84-2	P_c	33	1		23	37	78		
	P_u	31	-79		-45	779	95		
WH83-0	P_c	-63		60	42	-31		21	12
	P_u	-247		-245	402	屈服		57	40
WH83-1	P_c	63	-557	-117	42	116	65	55	4
	P_u	334	-539	-789	162	67	107	145	-30
WH83-2	P_c	102	94	70	53	12			26
	P_u	293	150	-455	589	211			60 701
WH64-0	P_c	46	148	116	-24 331	23	19	19	-374
	P_u	350	屈服	376	屈服	140	206	-24	-496
WH64-1	P_c	-70		207	58		148	3	103
	P_u	-30		389	145		264	-273	-307
WH64-2	P_c			7	16			50	216
	P_u			283	73			113	
WZ83-2	P_c	244			297	186	-52 869	68	
	P_u	屈服			770	461	屈服	-405	
WZ64-2	P_c	-61	-8	379	-81		-79	-60 426	6 713
	P_u	238	26	375	-306		154	-67 587	屈服

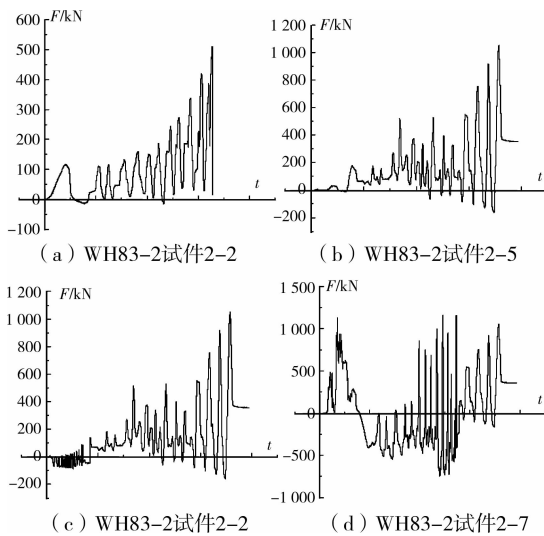


图 6 拉接件应变时程曲线

图 6 为环形与 Z 形拉接件应变时程曲线。在弹性阶段,钢筋应变值很小,这是由于钢筋混凝土梁挑耳比拉接件刚度大得多,基本是梁挑耳起作用,拉接件作用很小。墙体开裂进入弹塑性阶段,钢筋应变值有所增加。内外叶墙产生变形不协调,拉接件作用增大。墙体进入塑性阶段,钢筋应变值增幅较大。

这是由于外叶墙上部出现水平剪切裂缝削弱了梁挑耳传递水平力的能力,水平力传递途径改变,拉接件作用有较大增加。

7.4 拉接件的作用与设置建议

试验结果表明钢筋混凝土梁挑耳在加强内外叶墙连接中起主要作用,而且在保证外叶墙平面外稳定性方面也起主要作用。当砂浆层被剪切开裂,拉接件与砂浆仍然牢固粘结。说明拉接件粘结锚固性能很好,当墙体严重破坏开裂时,拉接件可以起到对墙体支撑或拉接的作用,有效防止墙面倒塌掉落,并且拉接件对加强外叶墙平面外稳定性也起一定的作用。夹心墙采用拉接件与钢筋混凝土挑耳相结合的连接措施对改善保温层墙体受力性能,加强其整体工作能力是有效的。拉接件与钢筋混凝土挑耳在夹心墙中分工不同,是夹心墙不可或缺的抗震构造措施,应合理设计使各自充分发挥作用。

8 结论

通过 13 片夹心墙和 1 片实心墙平面内的抗震性能对比试验,主要得到以下结论:

1) 虽然保温层厚度增加对抗剪承载力有不利影响,但是发泡保温浆料具有较高的黏结强度、抗剪

强度和抗压强度,对抗剪承载力有一定有利影响。

2) 竖向压力和保温层厚度对相对位移差有一定影响,实际工程中夹心墙仍具有协同工作能力。

3) 不同位置的拉接件受力有一定差别,开裂荷载时墙中心钢筋应变值较大;墙体形成交叉裂缝后,上半部拉接件应变值大于下半部,靠近中间裂缝处的拉接件作用较大。

4) 在弹性阶段,钢筋应变值很小,这是由于钢筋混凝土梁挑耳比拉接件刚度大得多,基本是梁挑耳起作用,拉接件作用很小。墙体开裂进入弹塑性阶段,钢筋应变值有所增加。内外叶墙产生变形不协调,拉接件作用增大。外叶墙上部出现水平剪切裂缝削弱了梁挑耳传递水平力的能力,水平力传递途径改变,拉接件作用有较大增加。

5) 钢筋混凝土梁挑耳在加强内外叶墙连接中起主要作用,而且在保证外叶墙平面外稳定性方面也起主要作用。当墙体严重破坏开裂时,拉接件可以起到对墙体支撑或拉接的作用,有效防止墙面倒塌掉落,并且拉接件对加强外叶墙平面外稳定性也起一定的作用。拉接件与钢筋混凝土挑耳在夹心墙中分工不同,是夹心墙不可或缺的抗震构造措施,应合理设计使,各自充分发挥作用。

参考文献:

- [1] FONG KF, HANBY VI, CHOW TT. HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(3): 220-231.
- [2] 江亿.我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. *暖通空调*, 2005, 35(5): 76-86.
JIANG YI. Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures [J]. *Journal of Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2005, 35(5): 76-86.
- [3] 顾天舒,谢连玉,陈革.建筑节能与墙体保温[J]. *工程力学*, 2006, 23(S2): 167-184.
GU TIAN-SU, XIE LIAN-YU, CHEN GE. Building energy conservation and wall thermal insulation [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(S2): 167-184.
- [4] POEL B, VAN C G, BALARAS CA. Energy performance assessment of existing dwellings [J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(4): 393-403.
- [5] 陶有生.干粉砂浆在加气混凝土建筑中的应用[J]. *墙材革新与建筑节能*, 2007, 13(3): 53-56.
TAO YOU-SHENG. Application of dry dust mortar in aerated concrete building [J]. *Wall Materials Innovation and Energy Saving in Buildings*, 2007, 13(3): 53-56.
- [6] DANNY HARVEY. Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples[J]. *Energy Efficiency*, 2009, 2(2): 139-163.
- [7] Optimal structure for heat and cold protection under transient heat conduction [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2008, 36(4): 355-363.
- [8] 顾同曾.积极推广外墙外保温技术[J]. *墙材革新与建筑节能*, 2000, 6(2): 13-15.
GU TONG-ZENG. Technology of outer insulation for exterior wall [J]. *Wall Materials Innovation and Energy Saving in Buildings*, 2000, 6(2): 13-15.
- [9] 张芳,周汉万.冬冷夏热地区内外综合保温复合墙体的应用探讨[J]. *施工技术*, 2007, 52(10): 62-64.
ZHANG FANG, ZHOU HAN-FANG. Application of the inside and outside insulating compound wall in cold winter and hot summer regions [J]. *Construction Technology*, 2007, 52(10): 62-64.
- [10] MARCELO I, MARIA V, JOSE DM, et al. Life Cycle and Optimum Thickness of Thermal Insulator for Housing in Madrid [C]//The 2005 World Sustainable Building Conference. Tokyo, 2005: 418-425.
- [11] 顾道金,朱颖心,谷立静.中国建筑环境影响的生命周期评价[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2006, 46(12): 1953-1956.
GU DAO-JIN, ZHU YING-XIN, GU LI-JING. Life cycle assessment for China building environment impacts [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2006, 46(12): 1953-1956.
- [12] 李珠,张泽平,刘元珍.建筑节能的重要性及一项新技术[J]. *工程力学*, 2006, 23(S2): 141-149.
LI ZHU, ZHANG ZE-PING, LIU YUAN-ZHEN. The importance of energy efficiency in buildings and introduction of a new technique [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(S2): 141-149.
- [13] 李宏男,张景玮,刘莉.多孔砖保温夹心墙体抗震性能试验与分析[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(6): 73-80.
LI HONG-NAN, ZHANG JING-WEI, LIU LI. Experiment and Analysis of Seismic Behavior of Hollow Brick Insulating Cavity Walls [J]. *Journal of Building Structures*, 2001, 22(6): 73-80.
- [14] 张延年,张洵,刘明.夹心墙用环型塑料钢筋拉结件锚固性能试验研究[J]. *沈阳建筑大学学报:自然科学版*, 2008, 24(4): 543-546.
ZHANG YAN-NIAN, ZHANG XUN, LIU MING. Experimental study on anchorage performance of ring shaped plastics steel tie for cavity wall [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2008, 24(4): 543-546.
- [15] KUMARI M, NATH G. Unsteady Natural Convection Flow in a Square Cavity Filled with a Porous Medium Due to Impulsive Change in Wall Temperature [J]. *Transport in Porous Media*, 2009, 77(3): 463-474.

(编辑 胡玲)