

文章编号:1005-0523(2014)04-0082-08

冷轧带翼钢筋剪力墙结构抗震性能试验研究

陈妍^{1,3}, 禹厚勤², 陈忠范³

(1.国家知识产权局专利局专利审查协作江苏中心,江苏 苏州 215000;2.南京水务集团有限公司,江苏 南京 210002;
3.东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室,江苏 南京 210096)

摘要:冷轧带翼钢筋(CDB-W)是一种新型的冷轧变形钢筋,该钢筋是以普通低碳热轧钢筋(高线圆盘或棒条)为母材经专门的生产工艺加工而成。冷轧带翼钢筋具有强度高、粘结握裹力强、施工方便等优点,在建筑工程中得到愈来愈广泛的应用。制作了冷轧带翼钢筋混凝土剪力墙结构1/2缩尺模型进行了地震模拟振动台试验,分析了模型的破坏现象,研究了在不同的地震波形和不同的地震烈度下,试验模型的自振频率变化及加速度、位移和应变反应,检验了模型的抗震能力。在试验的基础上进行了相关的理论研究。利用有限元软件ANSYS建立了冷轧带翼钢筋剪力墙模型,进行了相应的结构非线性时程分析。计算结果与实测符合较好。

关键词:冷轧带翼钢筋;钢筋混凝土剪力墙;抗震性能;有限元分析

中图分类号:TU4

文献标志码:A

冷轧带翼钢筋的加工工艺是将牌号为HPB235或Q215低碳钢热轧高线圆盘条经冷轧或冷搓形成的麻花状变形钢筋,与冷轧扭钢筋不同的是,钢筋轧成矩形截面的同时,在矩形截面的短边刻有“双翼”,然后再进行冷扭,形成连续螺旋状的直条钢筋^[1],冷轧带翼钢筋的外形和截面形状如图1。

这种钢筋强度高、粘结握裹力强、锚固可靠、施工方便,而且,钢筋的延性也比其他冷加工钢筋好,是冷轧变形钢筋的一个新品种。冷轧带翼钢筋作为一种新型的冷轧变形钢筋,由于出现时间较晚,早在20世纪30年代,国外就已经出现了冷轧变形钢筋。奥地利和欧洲其他一些国家于1935年使用了“Tor”钢筋,它是将一根表面带有两条纵向对称肋条的热轧钢筋进行冷扭转,此后,德国也有了这方面的新品种,它是用四根热轧圆钢筋冷扭转后绞合在一起,目的是改善与混凝土的结合性能;荷兰的“Torma”钢筋是先将圆钢筋冷压刻痕,然后冷扭转和拉伸使其形成一条螺旋槽的冷加工钢筋^[2]。1985年英国颁布了英国标准技术规程《specification for cold reduced steel for the reinforcement of concrete》(BS 4482-1985)。

目前,有关的试验和理论研究较少,已有的研究成果如下。2005年东南大学的蓝宗建进行了冷轧双翼变形钢筋砼双向板受力性能试验研究^[3]。2005年同济大学的张钧林进行了冷扎双翼变形钢筋与砼粘结锚固性能试验研究报告^[4],推导出了钢筋的粘结锚固强度计算公式,计算出了钢筋的锚固长度,为冷轧带翼钢筋的构件设计提供了依据。2006年华南理工大学蔡健完成了冷轧带翼钢筋混凝土受弯构件纵向受拉钢筋最小配筋率的试验研究^[4]。

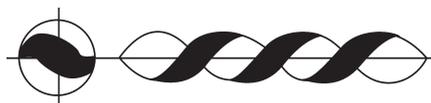


图1 冷轧带翼钢筋的外形和截面形状图

Fig. 1 Cross-section shape of CDB-W

收稿日期:2014-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50578039)

作者简介:陈妍(1985—),女,工程师,硕士,主要研究方向为土木工程结构设计,防震防灾;陈忠范(1961—),男,教授,博士,主要研究方向为工程结构防灾减灾。

已有的研究表明,冷轧带翼钢筋强度高、粘结握裹力强、锚固可靠、施工方便,适用于工业与民用建筑和一般构筑物中以受弯为主的现浇钢筋混凝土楼板,除去板柱结构中的板。因为无论在高层建筑或各抗震等级结构中,水平板类构件始终不属抗震构件。至于是否可以用作剪力墙分布筋使用,还需要做进一步的研究。本文对冷轧带翼钢筋混凝土剪力墙结构1/2缩尺模型进行振动台试验研究和理论分析。通过这一研究,分析冷轧带翼钢筋做为分布筋的抗震墙的抗震性能,为进一步推广应用冷轧带翼钢筋提供科学依据^[5]。

2 试件的设计与制作

2.1 模型结构概况

由于振动台承载能力有限,模型取为4个对称布置的、几何尺寸完全一致的L形截面剪力墙组成,4个L形墙肢之间通过连梁和楼板连接。模型的平立剖见图2、图3。模型按1/2(模型尺寸与原型尺寸之比)缩尺,层数为4层,层高1.45 m。水平两个方向墙肢中心轴距分别为2 100 mm,1 800 mm,墙肢厚度为60 mm。水平两向的连梁截面高度均为235 mm,连梁截面宽度均为80 mm。L形墙肢1~2轴间的墙肢截面高厚比(截面高度与厚度比值)为6.5,墙肢截面高度为520 mm,连梁跨度为840 mm,连梁跨高比为10.5;A~B轴间的墙肢截面高厚比为10.25,墙肢截面高度为820 mm,连梁跨度为540 mm,连梁跨高比为6.75^[6]。

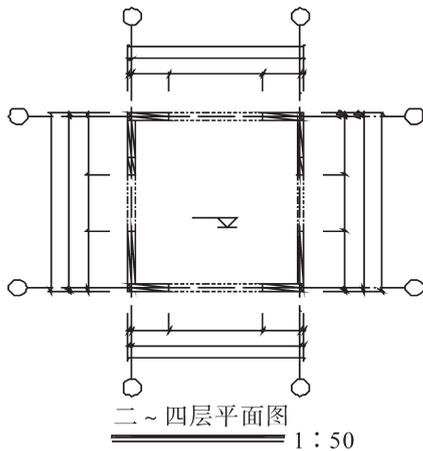


图2 模型平面图

Fig. 2 Plan of the model

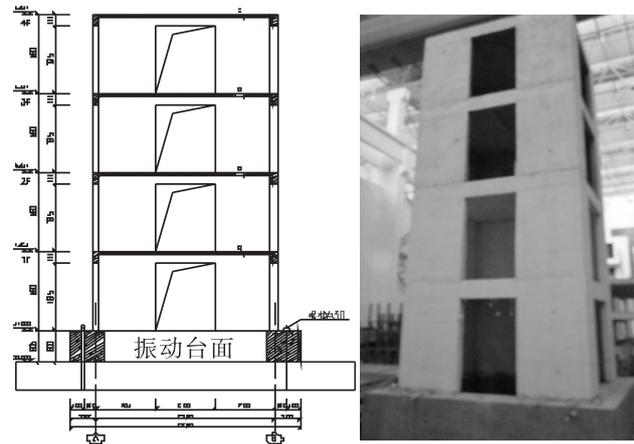


图3 试件模型

Fig. 3 Model specimen

2.2 模型相似常数初步确定

选取模型与原型的长度相似系数 $S_L=1/2$,由于制作模型所用的钢筋、混凝土等材料与原型相同,即弹性模量和剪切模量的相似系数 $S_E=S_G=1$ 。其中周期相似比 $S_T=0.707$,加速度相似比 $S_a=1$,模型结构本身的质量为9.8吨,基础自重为5.37吨,附加质量为9.2吨,附加人工质量后模型加底座的总重为24.37吨,小于振动台最大承载能力25吨,满足要求。模型四层附加质量为2吨,一~三层附加质量为2.4吨,每个质量块为20 kg,因此,屋面板上放100个质量块;其余三层每层屋面板上放120个质量块,总共460个质量块。本模型为满配重的地震模拟振动台试验缩尺模型。质量块只提供质量,不提供结构强度和刚度。本次试验采用水泥砂浆将质量块固定在模型上,然后用钢丝在把质量块在绑在一起不产生松动。

1) 钢筋的选取。本次试验基础纵向钢筋采用直径为20 mm的二级钢筋,主体结构的墙钢筋和板面钢筋采用直径为6.5 mm的冷轧带翼钢筋。

2) 混凝土的选取。本次试验模型基础采用抗压强度为C30的商品混凝土,上部主体采用小粒径(5~20 mm)骨料C25细石混凝土,塌落度控制在16~18 cm。

2.3 模型的配筋设计

从量纲的角度来说,构件的截面应力、混凝土的强度、钢筋的强度应该具有相同的相似常数,这时的相

似原则主要从把握构件层面上保证原型结构和模型结构的相似,即:对于正截面承载能力的控制,依据抗弯能力等效的原则;对于斜截面承载能力的控制,依据抗剪能力等效的原则,有以下相似关系^[7]:

原型结构

$$M^P = f_y^P A_s^P h_0^P \quad (1)$$

$$V^P = f_{yv}^P \frac{A_{sv}^P}{s} h_0^P \quad (2)$$

模型结构

$$M^m = f_y^m A_s^m h_0^m \quad (3)$$

$$V^m = f_{yv}^m \frac{A_{sv}^m}{s} h_0^m \quad (4)$$

弯矩相似常数

$$S_M = \frac{M^m}{M^P} = \frac{f_y^m A_s^m h_0^m}{f_y^P A_s^P h_0^P} = \frac{A_s^m}{A_s^P} S_l S_{f_y} \Rightarrow A_s^m = A_s^P \frac{s_{\sigma} S_l^2}{s_{f_y}} \quad (5)$$

剪力相似常数

$$S_V = \frac{V^m}{V^P} = \frac{f_{yv}^m \frac{A_{sv}^m}{s} h_0^m}{f_{yv}^P \frac{A_{sv}^P}{s} h_0^P} = \frac{A_{sv}^m}{A_{sv}^P} \frac{s_l}{s_s} S_{f_{yv}} \Rightarrow A_{sv}^m = A_{sv}^P \frac{s_{sv} S_s}{s_{f_{yv}}} = A_{sv}^P \frac{s_{\sigma} S_l S_s}{s_{f_{yv}}} \quad (6)$$

其中: S_s 表示箍筋间距相似系数。

根据式(5),(6)以及原型的配筋面积就可以算出模型的配筋面积了^[7]。

$$A_s^m = A_s^P \frac{s_{\sigma} S_l^2}{s_{f_y}} = (1 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{210}{210}) A_s^P = \frac{1}{4} A_s^P$$

$$A_{sv}^m = A_{sv}^P \frac{s_{sv} S_s}{s_{f_{yv}}} = A_{sv}^P \frac{s_{\sigma} S_l S_s}{s_{f_{yv}}} = (1 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{210}{210}) A_{sv}^P = \frac{1}{4} A_{sv}^P$$

模型配筋见图4~图6。

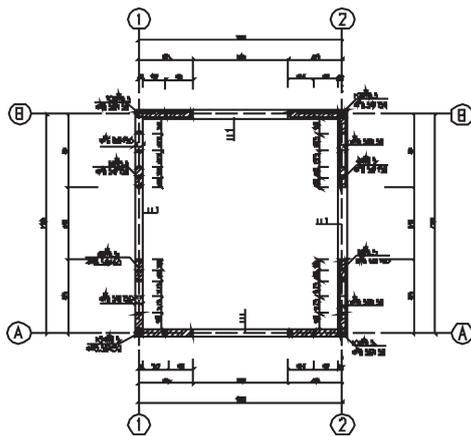


图4 模型墙体配筋图

Fig. 4 Wall reinforcements

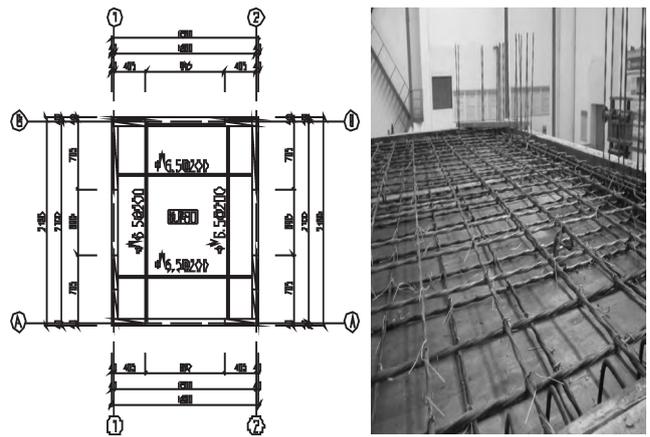


图5 模型楼板配筋图

Fig. 5 Floor reinforcements

注:冷轧带翼钢筋用于板的负筋时,宜在一端做90°的弯钩,并交错布置。

3 振动台试验方案

振动台的工作原理:把给定的地震波波输入计算机,计算机通过数字控制器控制油泵及电液伺服阀

使作动器按给定的波形振动,台面上的传感器将振动信号反馈给主机,计算机通过控制软件确保台面的振动波形一致。数据采集系统采集模型结构的振动反应数据,以供分析计算使用。以此按照所输入的工况改变地震波的振幅,使一直到模型破坏倒塌^[9-10]。

3.1 传感器

加速度计使用磁吸式加速度计传感器,布置6个。

位移计使用拉线式位移传感器,其中量程为1 000 mm的2个,量程为750 mm的4个。量程越大的位移器其精度也越低。

加速度计和位移计见图7,加速度计和位移计的校正因子见表1。

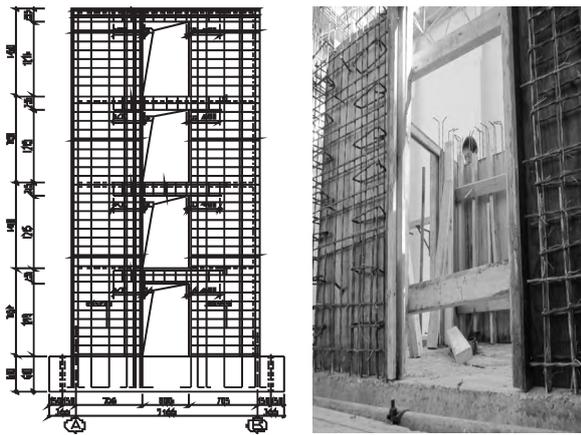


图6 模型配筋剖面图

Fig. 6 Profile of wall reinforcements

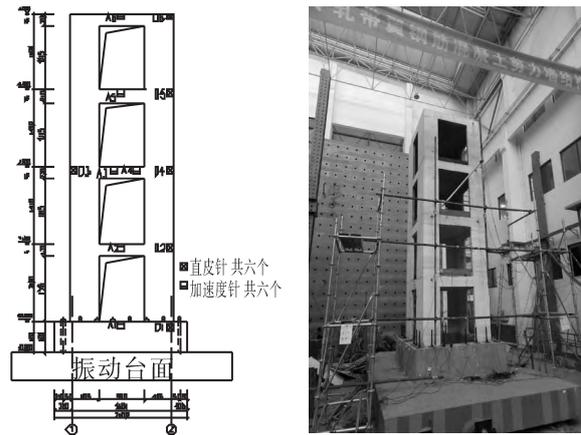


图7 传感器布置

Fig. 7 Sensors location

表1 加速度计和位移计的校正因子表

Tab. 1 Correction factor table

加速度传感器校正因子			位移传感器校正因子		
测点	加速度计编号	灵敏度(Mv/m*s ²)	测点	灵敏度	量程/mm
a1	29 859	10.02	D1	1.244 8	750
a2	29 838	10.22	D2	1.244 7	
a3	29 835	9.90	D3	1.244 3	
a4	29 837	10.22	D4	1.242 0	
a5	29 867	10.07	D5	0.919 6	1000
a6	29 842	10.26	D6	0.921 3	

3.2 传感器布置

在模型2轴-A轴处,楼盖标高、底座各布置位移传感器1个,在顶层楼盖位移传感器对角线位置布置位移传感器1个,共布置位移传感器6个。

在模型A轴中点,每层楼盖标高处、底座上各布置加速度传感器1个,共布置加速度传感器5个。

3.3 地震波

地震波的选取也是振动台试验成功与否的一个重要因素^[7-8]。根据现行《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)。试验选用的地震波形有El Centro波、Taft波、人工波。

试验进程为:

- 1) 采用白噪声对模型进行扫描,测出结构的频谱特性;

- 2) 依次按照工况输入 El Centro 波、Taft 波和上海波;
- 3) 重新进行白噪声扫频,对比结果试验前后的动力特性,检测模型损伤程度;
- 4) 继续输入下一个工况的 El Centro 波、Taft 波和上海波;
- 5) 如此反复,直至结构破坏倒塌。

4 试验现象和数据分析

现将试验现象进行详细叙述。

1) 加速度峰值在 35 gal 和 55 gal 工况下时,模型整体左右晃动不明显,肉眼几乎观察不到结构的振动,模型表面没有可见裂缝。用白噪声对模型进行频谱分析后发现,模型的自振频率也没有发生变化,由此可以判断模型在这个工况下基本没有任何损伤,仍处于弹性阶段^[8]。

2) 当加速度峰值达到 110 gal 和 140 gal 工况下时,模型在振动台面上的晃动开始趋于明显,肉眼可以看见比较明显的振动,仍然没有发现可见裂缝。但是经过白噪声的频谱分析后,发现自振频率有所下降,也就是说模型已经开始损伤,有了细微裂缝的开展,肉眼无法看见因为裂缝很小或者裂缝位置比较难以发现。

3) 当加速度峰值达到 310 gal 工况下时,模型振动已经非常明显。在 seismic 波停止后进行观察,已经发现了肉眼可以观察到的细微裂缝,位置出现在振动方向的第一层连梁的端部,裂缝宽度很小,要用照明灯才可能勉强观测。通过白噪声扫描后,发现模型的自振频率确实有不同程度的下降^[10]。

4) 当加速度峰值达到 620 gal 工况下时,台面振动已经非常剧烈,肉眼观测的模型振动幅度非常大,模型一层连梁两端裂缝发展明显。部分两段的竖向裂缝已经贯通,形成梁铰。二层及三层连梁的端部也出现了细微裂缝。墙根出现了第一根可见裂缝见图 4.1(c)。通过白噪声扫频后发现结构各阶自振频率都有不同程度的下降,模型结构的刚度降低,周期变长,已经积累了比较大的损伤。在 620 gal 工况 El Centro 波下,台面的振幅接近最大行程 250 mm,担心下一个工况 El Centro 波产生的台面振幅超过量程,研究决定从 700 gal 工况开始,输入 Taft 波和上海波,不再输入 El Centro 波。

5) 当加速度峰值达到 800 gal 和 1 300 gal 工况下时,振动过程中可以听到混凝土剥落的声音,此时发现模型墙根已经出现了不少裂缝,并且部分裂缝已经有了不同程度的延伸。底层墙角出现了明显的混凝土剥落现象,钢筋已经露出。在 1 100 gal 工况之后,取下了位移传感器,继续做试验^[11]。

6) 为了观测模型的抗震延性,在保证安全的情况下,加速度峰值继续增加,直至 2 000 gal 工况,此时梁端的竖向裂缝已经贯通,形成梁铰,底层墙端出现大量的水平向裂缝,为了安全起见,试验就此停止。

有关试验过程中及模型破坏状态时的照片见图 8。

4.1 模型结构动力特性

在开始振动台试验以前以及各种不同水准地震作用以后,均用白噪声对模型结构进行扫描试验,对加速度传感器采集的数据进行 PSD(频谱分析)^[11],以得到模型结构在不同水准地震作用前后的自振频率。模型的自振特性见下表 2。

从以上的数据分析可以得出,随着水平地震加速度输入的加大,模型结构的频率逐步降低。导致这一现象的原因是随着水平地震加速度峰值的增大,结构开始慢慢出现损伤。55 gal 和 110 gal 工况,自振频率相差不大,基本上可以判定模型处于弹性阶段;在 220 gal 工况开始,自振频率明显下降,加载到 310 gal,开始大幅度下降,这时观测到明显裂缝,说明结构出现损伤,周期变长。

4.2 模型结构的加速度反应

模型在其振动方向分别输入 El Centro 波、Taft 波、上海波,进行了地震加速度逐级增大的振动试验,利用各楼层布置的加速度传感器可以得到结构的动力反应时程。下面以 400 gal 地震烈度下 3 种波为例,将采集到得水平加速度数据处理成加速度曲线如下。



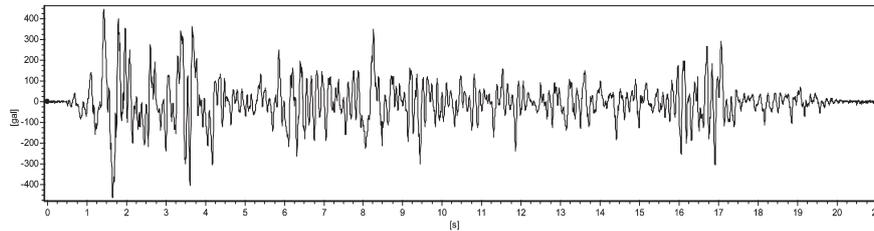
图8 结构试验过程照片

Fig. 8 Testing pictures

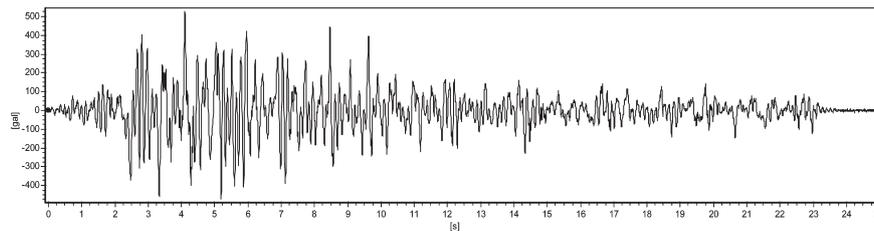
表2 模型频率及阻尼变化表

Tab. 2 Frequency and damping of shaking table tests

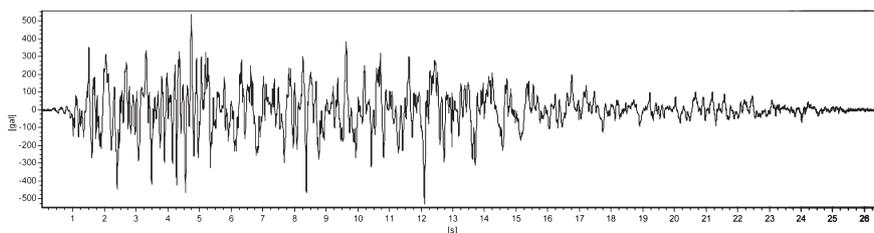
工况	动力特性	一阶	二阶	三阶
55 gal	频率/Hz	9.75	15.75	20.25
	周期/s	0.103	0.063	0.049
110 gal	频率/Hz	9.50	16.00	19.25
	周期/s	0.105	0.063	0.052
220 gal	频率/Hz	8.75	15.50	20.25
	周期/s	0.114	0.065	0.049
310 gal	频率/Hz	8.25	15.25	20.25
	周期/s	0.121	0.066	0.049
620 gal	频率/Hz	7.25	14.75	18.25
	周期/s	0.138	0.068	0.055
1200 gal	频率/Hz	4.25	13.25	17.0
	周期/s	0.235	0.075	0.059



(a) 400 gal 工况下 EI Centro 波第四层的加速度时程曲线



(b) 400 gal 工况下 Taft 波第四层的加速度时程曲线



(c) 400 gal 工况下上海波第四层的加速度时程曲线

图9 400 gal 工况下3种波各测点的加速度时程曲线

Fig. 9 The acceleration time history curve of observation points

4.3 动力放大系数^[12]

动力放大系数是指结构动力反应加速度峰值与输入地震动加速度峰值之比,是地震波作用的结果,它与模型的结构特性、非弹性变形的发展以及输入地震波的频谱特性有关,可以体现出模型动力反应的变化和模型破坏情况。

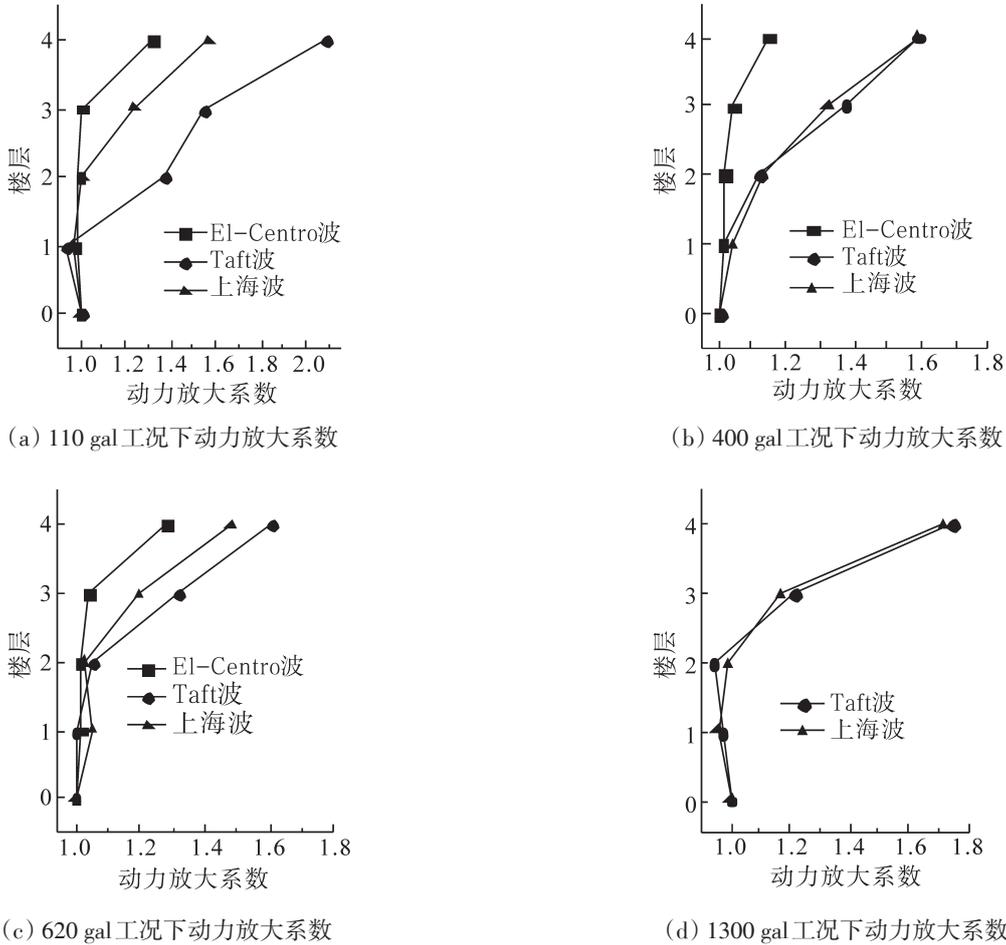


图10 各工况下动力放大系数

Fig. 10 Dynamic magnification of model

从以上图中可以看出,不同地震波以及不同强度作用时结构的加速度动力放大系数不同,这说明不同地震波由于其频率组成不同,对结构的作用效应亦不同,总的来说,Taft波和上海波下结构的加速度动力放大系数较大。随着输入地震烈度的提高,结构的加速度动力放大系数总体上有所减低,说明随着输入地震波的烈度的增加,结构开始慢慢损伤,进入塑性的程度加深,模型刚度退化,阻尼比增加,结构进入非线性。

4.4 与有限元结果对比

根据试验构件尺寸,建立 ANSYS有限元分析模型^[13],模型如图 11 所示。剪力墙均视为与地面固接,整个结构就其受力模型而言,是一嵌固于基础上的受侧向地震荷载作用的悬臂梁。模拟试验中的约束条

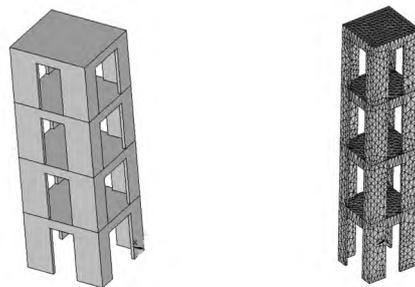


图11 模型有限元模型

Fig. 11 FEM of model

表3 模型频率计算值与实测值比较
Tab. 3 Frequency of calculated and measured values

振型	计算值/Hz	实测值/Hz	相对误差/%
一阶	10.599	9.75	8.01
二阶	14.274	15.75	9.37
三阶	18.467	20.25	8.80

件,墙板底面全部固结,限制其所有结点上的3个平移自由度,使其在 x, y, z 3个方向不发生移动。

考虑竖向重力荷载对模态的影响,采用兰索斯法进行模态求解,观察此模型结构的自振频率规律。

利用有限元软件 ANSYS10.0 建立了冷轧带翼钢筋剪力墙模型,并进行了分析,理论分析结果与实测值符合较好。

5 结论

根据本文试验研究及理论分析研究的结果,同时结合相关文献及我国现行规范和规程,对冷轧带翼钢筋用于钢筋混凝土房屋结构的剪力墙提出以下抗震设计建议。

参考文献:

- [1] 郑康平,梁志达.冷轧变形钢筋的开发[J].南方钢铁,1991(8):10-12.
- [2] 梁福康.冷轧扭钢筋混凝土结构的现状和发展前景[J].建筑技术,1999,29(8):531-533.
- [3] 蓝宗建,江红军.冷轧双翼变形钢筋混凝土板受力性能的试验研究[J].建筑技术,2006,37(11):830-83.
- [4] 张钧林.同济大学的冷轧变形双翼钢筋与混凝土粘结锚固性能试验研究报告[R].2005.
- [5] 蔡健.华南理工大学的冷轧带翼钢筋受弯构件纵向最小配筋率试验研究[R].2006.
- [6] 吕西林,等.复杂高层建筑结构抗震理论与应用[M].北京:科学出版社,2007.
- [7] FAFJAR P, KRAWINKLER H. Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete buildings[M]. London:Elsevier Applied Science,1997.
- [8] BORZI B, ELNASHAI A S. Refined force reduce factors for seismic design[J].Engineering Structure,2000,22(9):1244-1260.
- [9] 袁杨.空斗墙砌体结构房屋振动台试验研究[D].东南大学,2010.
- [10] 杜广辉.高层住宅短肢剪力墙振动台试验研究[D].河北工程大学,2009.
- [11] 李敏霞.地震模拟振动台试验系统频率特性估计的研究及应用[J].世界地震工程,1996(4):19-24.
- [12] XILIN LU, JIANBAO LI, MINGGAN WU. Test and analysis for a shaking table model of hybrid structures[C]//Structure and Extreme Events, Lisbon, 2005:134-135.
- [13] 邓凡平. ANSYS10.0有限元分析自学手册[M].北京:人民邮电出版社,2008.

(下转第94页)

Test Study on Strength Characteristics of Hyperstatic Geogrid

Chu Zhichao¹, Wei Junyang², Zheng Chengfeng³

(1. Jiangsu Zhenjiang Research Institute of Building Science Group Co., LTD., Zhenjiang 212000, China;

2. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: It is difficult to find a definite method for hyperstatic geogrid testing in current specifications. In order to conduct test study on the mechanical properties of hyperstatic geogrid strength, this paper adopts seven different tensile test schemes for hyperstatic geogrid. The test results show that: ① Uniaxial hyperstatic geogrids' multiple tensile stress increases about 90% of the upper level's single grid conversion strength; ② In calculating tensile strength with geogrid single method in current relevant specifications, the grid's sample maximum tensile strength should be multiplied by a coefficient, and in this hyperstatic geogrid test study the multiplication coefficient is about $10 \times (1 - 0.9^N)$ with N being the number of samples per meter in width; ③ Hyperstatic geogrids' hyperstatic effects make the single grid conversion strength increase about 1.03% ~ 14.06%, and the obvious effect suggests more hyperstatic geogrid can be produced and applied.

Key words: hyperstatic geogrid; tensile test; conversion strength; conversion coefficient



(上接第 89 页)

Experimental Study on the Seismic Behavior of Concrete Shear Wall with Cold-rolled Wing-deformed Bars

Chen Yan^{1,3}, Yu Houqin², Chen Zhongfan³

(1. Patent Examination & Cooperation Jiangsu Center of the National Patent Bureau, Suzhou 215000;

2. Nanjing Water Group Co., Ltd., Nanjing 210002; 3. Key Laboratory of RC & PC Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Cold-rolled wing-deformed bar (CDB-W), which is made of ordinary low-carbon hot-rolled steel bar by special production technology, is a kind of new-type cold-rolled deformed bar. This kind of bar has advantages of high tensile strength, and good capacity to bond with concrete, so it is widely applied in the constructional engineering. A 1/2-scale model of a building built with concrete shear wall and cold-rolled wing-deformed bars has been made and tested on the shaking table. The seismic performance of this model has been recorded and investigated in terms of the failure mechanism, crack development, natural frequency, damping ratios, floor accelerations, floor shifts, strain response and the cracking of the walls. Moreover, results of the experimental tests are further studied theoretically and the model of shear wall with cold-rolled wing-deformed is set up by using finite element software ANSYS. Nonlinear time history analysis is made and comparative analysis are carried out between the simulation and experiment results. The simulation results are in good agreement with the experiment results.

Key words: cold-rolled wing-deformed bar; RC shear wall; seismic behavior; finite element analysis