袁慧子,许浒.水平地震作用下建筑顶层重力荷载能力研究[J].地震工程学报,2019,41(3):613-618.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.613

YUAN Huizi, XU Hu.Gravity Load Capacity of the Top Floor of a Building during Horizontal Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3):613-618.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.613

# 水平地震作用下建筑顶层重力荷载能力研究

# 袁慧子1,许 浒2

(1. 重庆工贸职业技术学院, 重庆 涪陵 408000; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 地震灾害的发生给人们的生命财产安全带来了极大的威胁,为了保障在地震发生时建筑的安 全,需要时刻对试件的荷载、初始刚度、延性系数、建筑模型的竖向位移等信息进行检测,一旦重力 荷载高于峰值荷载,建筑安全将不能得到保障。为分析水平地震作用下建筑的顶层重力荷载能力, 首先建立用于实验的一榀三层三跨式的房屋建筑模型,检测这种模型处于重力荷载作用情况下的 侧向刚度,用来了解在建筑顶层结构在处于水平地震作用情况下重力荷载对其检测刚度的影响程 度。然后从模型中选取5个试件,对这些试件的材料属性、实验结果、荷载位移进行分析,再通过实 验模型的重力荷载位移曲线确定建筑的峰值荷载为700 kN,即当建筑顶层的峰值荷载超过700 kN 时,建筑的安全性将难以保证。

# Gravity Load Capacity of the Top Floor of a Building during Horizontal Earthquake

YUAN Huizi<sup>1</sup>, XU Hu<sup>2</sup>

(1. Chongqing Industry & Trade Polytechnic, Chongqing 408000, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract**: The occurrence of earthquake disasters poses a great threat to the safety of human life and property. To ensure the safety of buildings during earthquakes, determination of the load, initial stiffness, ductility coefficient, and vertical displacement of buildings is required. If the gravity load is higher than the peak value, the building safety cannot be guaranteed. To analyze the gravity load capacity of the top floor of a building during a horizontal earthquake, we established a three-story, three-span building model to test the lateral stiffness of the building under gravity load. Then, we studied the influence of the gravity load on the detected stiffness of the top structure of the building during a horizontal earthquake. We selected five specimens from the model,

收稿日期:2018-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51408500)

**第一作者简介:**袁慧子(1983-),女,重庆涪陵人,研究生,讲师,研究方向:建筑结构设计、建筑结构加固、建筑工程技术、岩土工程等。 E-mail:xiaoxiaotuan0088@163.com。

通信作者:许 浒(1985-),男,江西南昌人,博士,讲师,研究方向:建筑结构抗震和抗倒塌、新型柔性防灾结构等。

and analyzed their material properties, experimental results, and load displacements. The peak load of the building, as determined by the gravity load displacement curve of the experimental model, was 700 kN. That is, when the peak load of the top floor of the building exceeds 700 kN, the safety of the building cannot be guaranteed.

Keywords: horizontal earthquake; top floor building; gravity load; displacement

# 0 引言

近年来,地震灾害时有发生,对很多建筑结构造成了极大的损坏<sup>[1]</sup>。地震的频发给建筑抗震设计带来了更大的难题和挑战。抗震设计是建筑结构设计中最重要的一个内容,能够提高建筑自身的抗震能力、增强其使用性能。其中,地震作用的取值是抗震设计的基础,而重力荷载的代表值与地震作用的取 值是紧密相关的<sup>[2-3]</sup>。

建筑顶层结构在水平地震作用下不仅会产生侧 移变形,还会遭到重力荷载的二次破坏,因此准确测 试出建筑顶层的重力荷载能力是非常重要的。由抗 震规范可知,当建筑的整体高度较低、质量及刚度沿 建筑高度均匀分布时,可以利用底部剪力法计算建 筑的水平地震作用力<sup>[3]</sup>。再结合水平地震剪力折减 系数、顶层重力荷载代表值的计算,对水平地震作用 力进行综合分析。本文测试了建筑模型在重力荷载 作用情况下的侧向刚度,对模型中试件的材料属性、 实验结果、荷载位移进行了分析,确定建筑的峰值荷 载,以期为提高建筑的安全性提供支持。

# 1 建筑顶层重力荷载能力分析

考虑水平地震作用力、水平地震剪力折减系数 和顶层重力荷载代表值三方面分析建筑顶层重力荷 载能力,并设计一个一榀三层三跨式的房屋建筑模 型,测试这种模型在重力荷载作用下的侧向刚度,以 此来分析重力荷载对其侧向刚度的影响,为下文的 建筑顶层重力荷载能力测试提供支持。

# 1.1 水平地震作用计算

水平地震作用是指建筑结构在水平地震分量的 作用下所产生的地震效应<sup>[4]</sup>。水平地震作用计算方 法主要分为底部剪力法和振型分解反应谱法两 种<sup>[5]</sup>,它们的计算方式如1.1.1和1.1.2节所述。

# 1.1.1 底部剪力法

在建筑的各楼层间选取一个自由度,建筑结构 的水平地震作用标准值为<sup>[6]</sup>:

$$F_{\rm Ek} = a_{\rm 1} G_{\rm eq} \tag{1}$$

$$F_{i} = \frac{G_{i}H_{i}}{\sum_{i=1}^{n}G_{j}H_{j}}F_{\mathrm{Ek}}(1-\delta_{\mathrm{n}})$$
(2)

$$\Delta F_{\rm n} = \delta_{\rm n} F_{\rm Ek} \tag{3}$$

式中: $F_{Ek}$ 、 $F_i$ 和 $\Delta F_n$ 分别表示顶层建筑部位组织、i点和顶部附加的三个处于水平地震状态下作用的标 准值; $a_1$ 指的是在水平地震状态下影响建筑构造中 基本自振周期的系数值; $G_{eq}$ 表示建筑结构的等效 总重力荷载; $G_i$ 和 $G_j$ 分别表示点i和j的重力荷载 代表值; $H_i$ 和 $H_j$ 表示点i和j的计算高度; $\delta_n$ 指的 是在顶层建筑部位的地震作用系数。

1.1.2 振型分解反应谱法

(1)不使用通过扭转耦联计算的建筑组织<sup>[7-8]</sup>, 需要按照以下方法计算其地震作用以及地震作用 效应:

顶层建筑部位组织 j<sup>'</sup> 振型 i 质点处于水平地震 状态下的作用标准值确定方式如下:

 $F_{ij'} = a_{j'} \gamma_{j'} X_{j'i} G_i (i = 1, 2, \cdots, n, j' = 1, 2, \cdots, m)$ (4)

$$\gamma_{j'} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_{j'i}G_i}{\sum_{i=1}^{n} X_{j'i}^2G_i}$$
(5)

式中: $F_{j'i}$ 代表j'振型i质点在水平地震状态下的标准值; $a_{j'}$ 指的是在j'振型自振周期中的地震影响系数,而 $\gamma_{j'}$ 代表的是在j'振型自振周期中的参与系数; $X_{j'i}$ 指的是在j'振型中点i的水平相对位移<sup>[9-10]</sup>。

(2) 水平地震作用效应确定方式如下:

$$\mathbf{S}_{\mathrm{Ek}} = \sqrt{\sum S_{j'}^2} \tag{6}$$

式中:S<sub>Ek</sub> 表示处于水平地震状态下作用的标准值 效应;S<sub>j</sub>,表示在j<sup>'</sup>振型中处于水平地震状态下作用 标准值的效应。

# 1.2 水平地震剪力折减系数计算

水平地震剪力的折减系数是指在进行结构抗震 计算时,建筑结构层间变形可根据折减后的楼层剪 力计算出来<sup>[11]</sup>。根据所计算的水平地震剪力折减 系数,可判断建筑顶层的形变,作为基础条件分析其 重力荷载能力。

$$\psi = (T_1 / (T_1 + \Delta T))^{0.9} \tag{7}$$

式中:ψ表示建筑结构的地震剪力折减系数;T<sub>1</sub>表示建筑结构的基本自振周期;ΔT表示建筑结构动力相互作用的附加周期。

#### 1.3 顶层重力荷载代表值计算

建筑的顶层重力荷载代表值主要包括屋面永久 荷载、屋面雪荷载、纵横梁自重、半层柱自重、半层墙 体自重。

(1) 屋面永久荷载标准值:

每平方米的 30 厚细石混凝土保护层的标准值 为:

$$22 \times 0.03 = 0.66 \text{ kN/m}^2$$
 (8)

每平方米的三毡四油防水层的标准值为 0.4 kN/m<sup>2</sup>。

每平方米的 150 厚水泥蛭石保护层的标准值为:

$$5 \times 0.15 = 0.75 \text{ kN/m}^2$$
 (10)

每平方米的100厚钢筋混凝土板的标准值为:

$$25 \times 0.1 = 2.5 \text{ kN/m}^2$$
 (11)

每平方米的 V 型轻钢龙骨吊顶的标准值为 0.25 kN/m<sup>2</sup>。

由上述内容可知,屋面永久荷载标准值为: 0.66+0.4+0.4+0.75+2.5+0.25=4.96 kN/m<sup>2</sup> (12) (2) 楼面永久荷载标准值:

每平方米瓷砖地面的标准值为 0.55 kN/m<sup>2</sup>。

每平方米的 100 厚钢筋混凝土板的标准值为 2.5 kN/m<sup>2</sup>。

每平方米的 V 型轻钢龙骨吊顶的标准值为 0.25 kN/m<sup>2</sup>。

由上述内容可知,楼面的永久荷载标准值为:

$$0.55 + 2.5 + 0.25 = 3.3 \text{ kN/m}^2$$
 (13)

#### 1.4 重力荷载下建筑模型侧向刚度测试

为分析水平地震作用下建筑的顶层重力荷载 能力,设计了一榀三层三跨式的房屋建筑模型,检 测这种模型处于重力荷载作用情况下的侧向刚度, 用来分析重力荷载对建筑结构刚度中的影响<sup>[12-13]</sup>, 作为基础条件为分析建筑顶层重力荷载能力提供 支持。

测试中,给出水平地震作用效应(建筑结构内力和位移)的计算过程如下:

$$S = \sqrt{\sum S_j^2} \tag{14}$$

式中:S为水平地震作用标准值的效应;S;为建筑 第;层结构水平地震作用标准值的效应。

1.4.1 测试条件设计

依据同样原理设计并建立实验模型,根据实验 所需要的试验场地和设备性能条件,假设了实验关 系以及图形框架,相似比如表1所列,框架几何尺寸 如表2所示<sup>[14]</sup>。

表1 相似比

	Table 1   Similarity ratio													
	弹性模量	长度	钢筋面积	质量	位移	剪力	轴力	应变	刚度	加速度	周期	线荷载	应力	弯矩
相似比	1	1/4	1/15	1/15	1/4	1/15	1/15	1	1/4	1	1/2	1/4	1	1/64

表 2 建筑的框架几何尺寸

Table 2 Frame geometry of the building

	原结构	模型	
跨度/m	5.6,3.0,5.6	1.40,0.750,1.40	
层高/m	4.5,3.5	1.125,0.875	
涩 載 面 /m <sup>2</sup>	$0.25 \times 0.60$	$0.063 \times 0.15$	
<b>木</b> 戦四/ III	$0.25 \times 0.40$	0.063×0.10	
柱截面/m <sup>2</sup>	$0.45 \times 0.45$	$0.113 \times 0.113$	

由表1和表2可知,建筑实验模型的相似比、框架几何尺寸的相关信息。

# 1.4.2 测试过程

实验装置如图 1 所示,第一层具有标准配重块 堆载,模拟一层楼板自重和活荷载,整栋楼的堆载重 量大约是 3 t,第三层以 5 个千斤顶作为导入进行 模拟三层,千斤顶与建筑结构使用滑动支座进行连





接,两边同时跨4个千斤顶进行导入,中跨1个千斤顶,在图中m<sub>1</sub>、m<sub>2</sub>、m<sub>3</sub>点设置一个位移计以及一个 超低频测振仪。

采用下述几种工作状态,进行建筑结构侧向刚 度的测试:

第一种状态:单榀框架,一、二层无竖直方向上 的作用,结构不与试验导入设备紧密连接。这种情 况下得到的侧向刚度是建筑无重力二阶效应时的实 际侧向刚度;

第二种状态:一层堆载重量为3t,二、三层无竖 直方向上的作用,建筑与试验导入设备连接;

第三种状态:一层堆载重量为3t,三层竖直方向千斤顶导入,建筑与试验导入设备连接<sup>[15]</sup>。

以上述 3 个工作状态为基础,根据以下模拟水 平地震作用的导入方式,计算并检查建筑结构中三 个不同 m<sub>1</sub>、m<sub>2</sub>、m<sub>3</sub>点水平位移与侧向刚度:

(1)令 m1 点不变,在 m2 点施力,记下其水平 位移值,测得建筑的二层与三层的层间侧向刚度 k2。

(2) 令 m<sub>1</sub> 点自由,在 m<sub>2</sub> 点和 m<sub>3</sub> 点施力,记下 其水平位移值,测得建筑的整体刚度 k<sub>3</sub>。

(3) 令 m<sub>2</sub> 点和 m<sub>3</sub> 点自由,在 m<sub>1</sub> 点施力,记下 其水平位移值,测得建筑的一层与二层的层间侧向 刚度 k<sub>1</sub>。

2 建筑顶层重力荷载能力测试与分析

# 2.1 测试试件

水平地震最大影响系数设为 0.12, 地震峰值加 速度设置为 0.3g。从上述的一榀三层三跨式模型 中选取 5 个足尺的组合墙试件,实验中所采用的面 板都是厚度为 0.8 mm 的 Q295 钢板,具体试验信息 如表 3 所列。实验中采用有限元分析软件对建筑试 件进行模拟分析。

表	3	实验参数	
	_		

Table 3	Experimental	parameters
---------	--------------	------------

编号	重力荷载	加载方法	立柱	导轨
43-M-N	无	低周反复	350S162-43	350T150-43
43-M-G	有	低周反复	350S162-43	350T150-43
54-M-G	有	低周反复	350S162-54	350T125-54
54-C-G	有	单调	350S162-54	350T125-54
68-M-G	有	低周反复	350S200-68	350T150-68

注:编号的第一个数字表示试件钢板厚度,第一个字母表示加 载方法,第二个字母表示有、无重力荷载。

由表 3 可知,试件的重力荷载情况、加载方法以 及未经处理过的钢板厚度等信息。

# 2.2 试件材料属性测试

对实验试件进行拉伸实验,每个建筑的试件均 取样3次,得到建筑试件的厚度、屈服/抗拉强度以 及屈服强度比,具体结果如表4所列。分析表4可 知5种试件和钢板的厚度、屈服强度、抗拉强度、屈 服强度比的详细信息。

表 4 建筑试件材料属性

Table 4 Material properties of specimens

讨仇	试件厚度	屈服强度	抗拉强度	屈服强
ЩП	/ cm	/MPa	/MPa	度比
钢板	0.91	286.94	371.47	1.30
350T150-43	1.07	297.15	383.33	1.29
350S162-43	1.09	328.18	379.90	1.15
350T125-54	1.41	365.14	472.08	1.29
350 <b>S</b> 162-54	1.40	268.19	378.09	1.41
350T150-68	1.83	366.44	483.10	1.31
350S200-68	1.80	379.27	490.03	1.29

### 2.3 实验结果分析

5种试件的峰值荷载、峰值荷载位移、初始刚度 以及延性系数等信息如表 5 所列。

表 5 建筑试件的实验结果

#### Table 5 Experimental results of specimens

试件编号	峰值荷载	峰值荷载	初始刚度	延性
11 - AU	/kN	点位移/mm	$/(kN \cdot m^{-1})$	系数
43-M-N	20.90	43.90	951.79	3.11
43-M-G	20.81	35.61	1199.93	3.80
54-M-G	34.73	42.65	2318.83	4.52
54-C-G	39.38	50.94	1845.80	3.13
68-M-G	40.23	71.66	1968.58	7.59

5种建筑试件的荷载位移曲线如图2所示。



图 2 几种试件的荷载位移曲线



将图 2 与表 5 对比,可得以下结论:

(1) 加重量前后的组合墙峰值荷载基本相同;

(2) 立柱与导轨的厚度会影响组合墙的抗剪 强度。

测试水平地震作用下建筑顶层的重力荷载能



图 3 是不同阶段每个楼层的竖直方向位移曲 线。可以看出不同阶段结构竖直方向变形及发展规 律以及标准建筑结构大致类似。建筑主体从建造到 投入使用 20 年时的,竖直方向最大位移分别是 9.8 mm(1 层),13.8 mm(2 层)和 15.7 mm (3 层)。

分析图 3 可知,随着楼层的增高,位移测试点的 竖向位移也逐渐增大;由于在装修的过程中一定会 对建筑本身造成一定程度的损坏,降低建筑的使用 寿命,因此装修后的建筑位移测试点的竖向位移比 封顶后的位移曲线向后偏移;由"使用 20 年"的位移 曲线位置可知,建筑在使用过程中位移值变动幅度 非常小,不是影响其使用寿命的主因。正常情况下, 20 年内建筑不存在安全问题。

建筑顶层建筑重力荷载能力与位移间的关系如 图 4 所示。

分析图 4 可知,建筑模型的峰值荷载为 700 kN。在弹性加载阶段,建筑模型的重力荷载与位移 之间处于线性变化,建筑结构的刚度基本维持不变。 当建筑模型的重力荷载趋近于 400 kN 时,建筑框 架开始屈服,随着重力荷载的增大,位移也随之增 大,模型荷载形态逐渐变小,刚度退化不够明显,随 着位移和荷载能力不断增加,建筑模型有开裂现象 发生,继续增加荷载,当重力荷载达到 700 kN 时, 测试节点的最大位移绝对值趋近于 60 mm。



图 4 某建筑模型的重力荷载能力位移曲线

Fig.4 Gravity load capacity-displacement curves of a building model

综上所述,建筑试件在使用过程中位移值变动 幅度较小,在水平地震作用下只要建筑顶层的重力 荷载不大于 700 kN,建筑试件处于安全状态。

#### 3 结论

地震是发生次数较多的一种自然灾害现象,为 了保障水平地震作用下建筑的安全性,研究建筑顶 层结构的重力荷载能力至关重要。因此,计算建筑 的水平地震作用力,结合水平地震剪力折减系数、顶 层重力荷载代表值的计算,对水平地震作用进行综 合分析,测试建筑模型在重力荷载作用情况下的侧 向刚度,并对模型中试件的材料属性、荷载位移进行 了分析,确定出建筑的峰值荷载为 700 kN。通过分 析,得出如下结论:

(1) 加重量前后的组合墙峰值荷载基本相同;

(2) 建筑材料属性会影响建筑的抗剪强度;

(3) 重力荷载与建筑使用时间的关联性很小;

(4)建筑的重力荷载低于峰值荷载的情况下, 建筑安全性较高。

鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的 技术环节不能做更多详述,有兴趣的读者可与作者 联系讨论。作者水平有限,文中遗漏之处及错误难 免,望批评指正为盼。

# 参考文献(References)

- [1] 沈新福.地震作用下钢管混凝土柱承载能力计算方法研究[J]. 建筑技术,2016,47(6):514-517.
   SHEN Xinfu.Study on Calculation Method iof Bearing Capacity of Concrete-filled Steel Tubular Columns under Earthquake
   [J].Architecture Technology,2016,47(6):514-517.
- [2] 贾蓬春,闫维明,虞诚.考虑重力荷载的冷弯薄壁型钢组合墙抗

震性能研究[J].工业建筑,2017,47(5):137-143.

JIA Pengchun, YAN Weiming, YU Cheng. Research on the Seismic Behavior of Cold-Formed Steel Shear Wall Subjected to Gravity Loading[J].Industrial Construction, 2017, 47(5):137-143.

[3] 杜晓丹.高层建筑结构抗震设计问题及优化策略[J].山西建 筑,2017,43(16):59-60.

DU Xiaodan. The Seismic Design Problem and Optimization Strategy of High-Rise Building Structure[J].Shanxi Architecture,2017,43(16):59-60.

- [4] 崔路苗,郭志宇.地震区居民建筑钢结构极限承载力测试与分析[J].地震工程学报,2018,40(1):54-59.
  CUI Lumiao,GUO Zhiyu. Test and Analysis of the Ultimate Bearing Capacity of Residential Building Steel Structures in Seismic Areas [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018,40(1):54-59.
- [5] 李杰,司培柱,郭巍芬,等.桁架钢筋混凝土叠合板-钢梁节点抗 震性能研究[J].结构工程师,2017,33(3):166-173.
   LI Jie,SI Peizhu,GUO Weifen, et al.Study on the Seismic Performance for Joints of Reinforced Concrete Superposed Slab and Steel Girder[J].Structural Engineers, 2017, 33(3):166-
- [6] 金亮,王高辉,卢文波,等.水下爆炸冲击荷载作用下重力拱坝 及坝后式厂房的破坏效应[J].水利与建筑工程学报,2016,14 (1):32-38.

JIN Liang, WANG Gaohui, LU Wenbo, et al. Damage Effects of Gravity Arch Dams and Powerhouse at Dam Toe Subjected to Underwater Explosion[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 32-38, 84.

- [7] 吴泽球, 伞冰冰. 多种荷载工况下的自由曲面结构形态创建
  [J].能源与环保,2017,39(4):113-116.
  WU Zeqiu, SAN Bingbing, WU Zeqiu, et al. Construction of Free-Form Surface under Various Loading Conditions [J].
  Zhongzhou Coal,2017,39(4):113-116,121.
- [8] 王刚.差异沉降下多层砖砌体建筑结构抗震加固技术优化[J].
   科学技术与工程,2018,18(30):194-200.
   WANG Gang.Optimization of Seismic Strengthening Technology for Multi-storey Brick Masonry Structure under Differential Settlement[J].Science Technology and Engineering,2018,18 (30):194-200.
- [9] 刘志强.高层建筑工程的抗震设计分析[J].价值工程,2016,35

(30):89-90.

LIU Zhiqiang,LIU Zhiqiang,Anti-Seismic Design and Analysis of High-Rise Building[J].Value Engineering,2016,35(30):89-90.

[10] 栾蔚,李元齐.轻钢屋面系统中冷弯薄壁型钢檩条承载性能研 究现状[J].建筑钢结构进展,2017,19(4):10-19.

LUAN Wei,LI Yuanqi,LUAN Wei,et al.State-of-the-art on Research of Bending Behavior of Cold-formed Purlins Supporting Lightweight Steel Roof Systems[J].Progress in Steel Building Structures,2017,19(4):10-19,52.

- [11] 丛苏莉.多维地震作用下钢筋混凝土建筑结构的抗连续倒塌 仿真分析[J].地震工程学报,2018(1):41-47. CONG Suli.Simulation and Analysis of the Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures under Multidimensional Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018(1):41-47.
- [12] 戈壁,威承志,陈昊祥,等.水平地震作用下地下结构考虑转动时的动力响应[J].北京建筑大学学报,2017,33(1):23-28.
  GE Bi, QI Chengzhi, CHEN Haoxiang, et al. Dynamic Response of Underground Structure with Consideration of Rotation under Horizontal Seismic Excitation[J].Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture,2017,33(1): 23-28.
- [13] 杨红,任小军,白绍良.双向水平地震下7度区框架结构的"强 柱弱梁"措施[J].振动与冲击,2016,35(13):42-50.
  YANG Hong, REN Xiaojun, BAI Shaoliang, et al. "Strong Column Weak Beam"Measures for RC Frame Structures in 7 Seismic Intensity Area under Bi-Directional Horizontal Seismic Excitations[J].Journal of Vibration and Shock,2016,35 (13):42-50.
- [14] 卢啸,陆新征,李梦珂,等.地震作用设计参数调整对框架结构 抗震设计及安全性的影响[J].工程力学,2017,34(4):22-31.
   LU Xiao,LU Xinzheng,LI Mengke,et al.Influence of Seismic Action Adjustments on Seismic Design and Safety of Rc Frames[J].Engineering Mechanics,2017,34(4):22-31.
- [15] 卢学臣,杨晓华,周磊.竖向荷载作用下短肢剪力墙结构承载 能力试验研究[J].湖南工业大学学报,2017,31(3):6-11. LU Xuechen, YANG Xiaohua, ZHOU Lei. Experiment Research on Bearing Behavior of Short Limb Shear Wall Structures under Vertical Load[J].Journal of Hnnnan University of Technology,2017,31(3):6-11.

173.