

新型柱端反力量测装置开发

沃中原¹, 覃俊宁¹, 林楷奇¹, *陆新征²

(1. 清华大学北京市钢与混凝土组合结构工程技术研究中心, 北京 100084;

2. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 清华大学土木工程系, 北京, 100084)

摘要: 本文提出了一种新型的柱端反力量测装置, 可用于结构试验中的柱端弯矩和轴力的量测。根据试验时柱端反力的测量要求, 通过初步设计, 确定反力量测装置的基本选型。在此基础上, 设计了两种不同的柱端外力加载装置及反力测量方案(圆形底座方案及方形底座方案), 并根据柱端的应变分布规律推导了柱端弯矩、轴力的计算公式。通过变换不同的外荷载输入, 根据计算公式, 以试验得到的柱端应变分布对柱端的轴力与弯矩进行反算, 并将试验实测值和计算值进行了对比。结果表明, 上述两种新型柱端反力量测装置均可以准确测量结构试验时柱端的弯矩及轴力大小, 且方形底座方案的量测结果与试验值更接近。

关键词: 结构试验 柱端反力 新型量测装置

DEVELOPMENT OF A NEW MEASURING DEVICE FOR COLUMN BOTTOM REACTION FORCES

WO Zhong-yuan¹, QIN Jun-ning¹, LIN Kai-qi¹, *LU Xin-zheng²

(Beijing Engineering Research Center of Steel and Concrete Composite Structures, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, P.R. China, 100084;)

Abstract: A new force measuring device is proposed in this study to measure the reaction force at the bottom of a column in the structural test. Based on the measuring requirement of the column bottom reaction forces, the profile of the force measuring device is firstly determined. Then, two different load-applying devices and force measuring schemes (circular column base and square column base) are proposed. The calculation formulae for the moment and axial force at the bottom of the column are also derived based on the strain distribution. A series of tests are conducted to validate the proposed force measuring method. The strain distribution at the bottom of the column for different loading situation is measured. The column reaction forces are calculated according to the proposed calculation formula and compared with the actual value. The results show that the proposed force measuring device is able to accurately measure the reaction forces at the bottom of a column and the square column base scheme provides a more satisfied result.

Key words: structural test; column bottom reaction force; new force measuring device

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(No. 2013BAJ08B02)

作者简介: 沃中原(1996—), 男, 安徽人, 本科生, 修读结构工程专业(Email:wozy13@mails.tsinghua.edu.cn)

覃俊宁(1996—), 男, 四川人, 本科生, 修读结构工程专业(Email:tjn13@mails.tsinghua.edu.cn)

林楷奇(1990—), 男, 福建人, 博士生, 从事结构工程研究(Email:linjq13@mails.tsinghua.edu.cn)

*陆新征(1978—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 清华大学防灾减灾工程研究所所长, 从事结构工程研究(Email:luzx@tsinghua.edu.cn)

1 研究背景

在试验和实际使用中，结构体系的受力模式会发生显著的变化，使得结构中产生显著的内力重分布现象，如何准确计算构件的内力变化成为研究中的关键难点问题^[1]。在复杂空间结构中，由于柱底的空间限制或者结构试验加载速率的影响，其反力往往难以量测^[2-4]。但是，准确的测量构件的内力变化过程，对于理解结构系统的破坏机理及内力分布规律有着重要的意义；同时，一系列复杂结构抗力模型建立，也依赖于准确的反力测量。为此，本文提出一种新型的柱端反力量测装置，基于结构柱底的应变分布规律，实现了结构柱底的反力大小的测量。

2 试验总体思路

本装置针对的是复杂的空间结构试验中，子结构柱端的反力测量。对于空间结构而言，试验柱体可能位于结构中的不同区域，一般而言其柱端都会同时存在轴力与弯矩。基于上述的测量目的，本文研究的总体思路可以用图 1 表示：

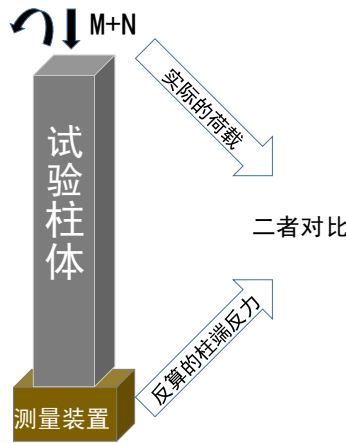


图 1 研究总体思路

3 试验方案

3.1 测量装置设计

测量装置的设计是研究的核心内容。考虑到实际使用的环境，测量装置需要产生应变以进行计算，需要满足以下几个基本条件^[5]：

1. 可以产生足够大的应变，防止应变片自身数据漂移对于试验结果产生较大干扰；
2. 因为实际中的弯矩方向并不确定，设计为中心对称结构；
3. 方便贴片与加载试验。

基于以上三点考虑，本文设计了两种形式的测量装置，如图 2-4 所示。

两型测力装置的上下板基本相同，其上布置有螺栓孔，分别与上部柱体和下部基础连接。考虑到加载弯矩的多方向特性，装置的上板均布置有圆形分布的螺栓孔，使得上部结构可以变动角度转动，实现多方向加载。

3.2 加载方案与整体结构设计

加载方案的确定涉及到上部柱体的设计，因此加载方式与整体结构形式是紧密相关的^[6]。

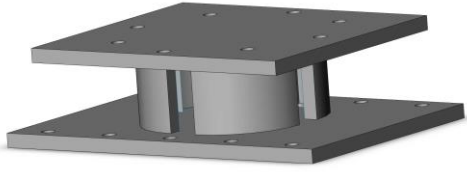


图2 圆形测力装置

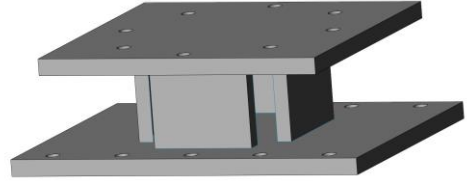


图3 方形测力装置

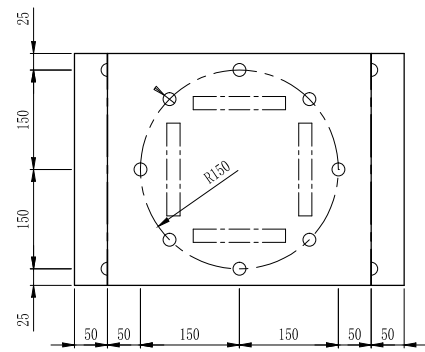
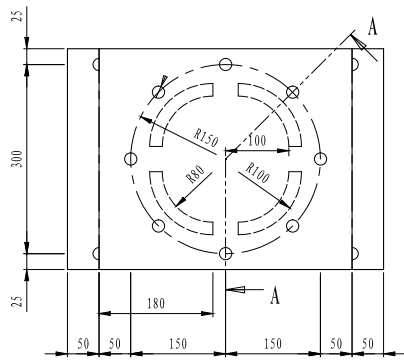
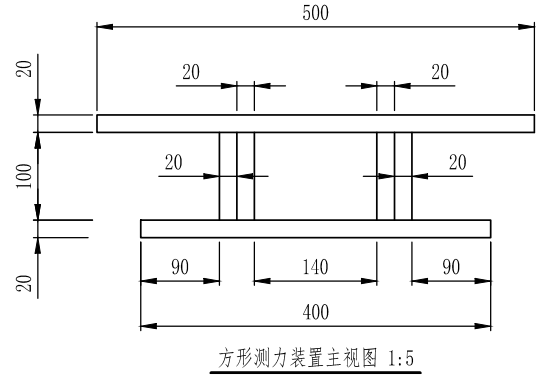
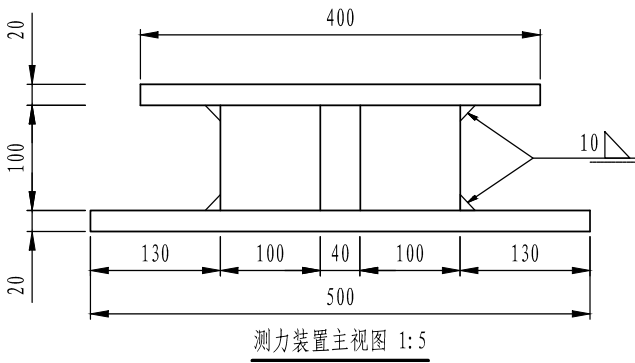


图4 两型装置平面图（单位：mm）

3.2.1 加载方案

采用悬臂柱的形式传递弯矩与轴力。通过力臂的改变，实现多种轴力-弯矩组合的加载，模拟实际工况。

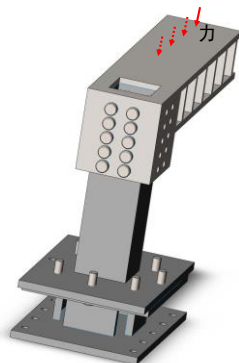


图5 一型试验装置

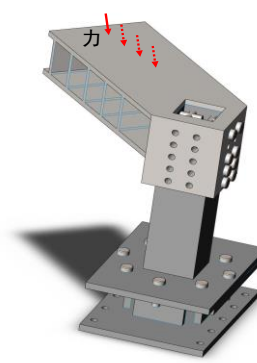


图6 二型试验装置（夹角45度）

3.2.2 整体结构设计

基于以上加载方案，设计拼装式的两型整体结构，由以下三个部分组成：

- 1.悬臂构件：用于加载，用螺栓固定于柱体上；
- 2.柱体：模拟实际结构柱，上端与悬臂构件连接，下端用螺栓和测力装置连接；
- 3.测力装置：上部与柱体相连，下端用螺栓和基础底板相连。

整体试验结构如图 5 和图 6 所示。

3.2.3 材料与尺寸

钢材强度等级为 Q345，连接处使用摩擦型高强螺栓。尺寸确定的原则为刚度等效于 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的 C30 混凝土柱。

4 贴片方案

贴片方案需要考虑以下两点^[7]：

- 1.过多的贴片将导致实际使用的不便；
- 2.数据量的增加将提高结果的准确性。

综合考虑，试验时测力装置上总计布设 12 枚应变片。计算时，选取不同的应变片数据进行计算，并分析至少选用几枚应变片可以较为准确的测量柱端的反力。

4.1 贴片图示

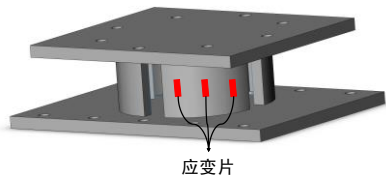


图 7 圆形测力装置贴片方式

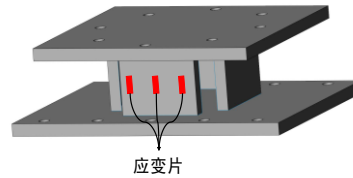


图 8 方形测力装置贴片方式

如图 7 所示，圆形装置共有 4 块分离的板件，在一个 90° 的区域内，布设 3 枚应变片，并量取实际贴片的角度。图 8 所示为方形测力装置的贴片方式，在每一个板件上布设 3 枚应变片。

5 应变反算公式

试验过程中，整体装置保持在弹性段，且不存在剪力作用，因此公式推导中引入了基本假定：测力装置截面保持平截面^[8]。

5.1 圆形计算公式推导

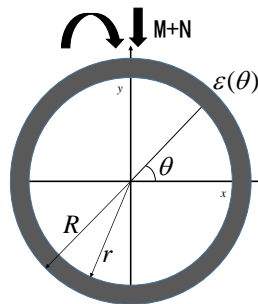


图 9 圆形装置计算示意图

如图 9 所示，圆形装置相对于作用力 $M + N$ 而言，恒定存在对称轴，以此对称轴作为 x 轴，建立直角坐标系。根据对称性，可以取任意一边进行计算，此处以 y 轴正半部分来推导。

设截面任意处应变为 $\varepsilon(\theta)$ 。根据平截面假定，应变 $\varepsilon(\theta)$ 应和 x 成线性关系，亦即

$$\varepsilon(\theta) = kx + b = k \cdot \cos\theta + b \quad (1)$$

根据不同角度所贴的应变片，可以拟合得到(1)式的具体表达形式。

在转角 θ 处取一微小转角 $d\theta$ ，对应的微元面积为 $(R^2 - r^2)d\theta/2$ ，微元力为

$$dF = \frac{E \cdot \varepsilon(\theta) \cdot (R^2 - r^2)}{2} d\theta \quad (2)$$

微元处对 y 轴的弯矩为

$$dM = dF \cdot \frac{R+r}{2} \cdot \cos\theta = \frac{E \cdot (R^2 - r^2)(R+r) \cdot \varepsilon(\theta) \cdot \cos(\theta)}{4} d\theta \quad (3)$$

在 $\theta \in [0, \pi]$ 内积分，得到计算公式如下

轴力：

$$N_0 = 2E \int_0^\pi \varepsilon(\theta) \cdot \frac{(R^2 - r^2)}{2} d\theta \quad (4)$$

弯矩：

$$M_0 = \frac{(R^2 - r^2)(R+r)}{2} \cdot E \int_0^\pi \varepsilon(\theta) \cdot \cos(\theta) d\theta \quad (5)$$

上式中 R, r 分别为环形外径与内径， $\varepsilon(\theta)$ 则由离散的应变测点数据对 θ 线性拟合得到，如式(1)所示。

5.2 方形计算公式推导

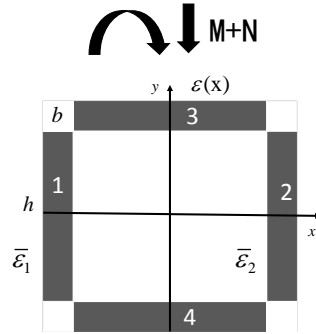


图 10 方形装置计算示意图

如图 10 所示，方形装置仅用来测量弯矩作用面和 x 轴平行的工况。

在编号为 1、2 的板件上，应变沿 y 方向为常数。因此，取其上三个应变片测量均值，定义为其竖向应变，分别记作 $\bar{\varepsilon}_1$ 和 $\bar{\varepsilon}_2$ 。

对于编号 3、4 的板件，根据对称性与平截面假定，应变 $\varepsilon(x)$ 应是关于 x 的线性函数，即

$$\varepsilon(x) = kx + b \quad (6)$$

上式同样根据应变片数值线性拟合得到。

根据对称性，积分得到计算公式如下

轴力：

$$N_0 = Eb \left(h(\bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2) + 2 \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon(x) dx \right) \quad (7)$$

弯矩：

$$M_0 = Eb \left(\frac{h^2}{2} (\bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_1) + 2 \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon(x) \cdot x dx \right) \quad (8)$$

式中的 b 和 h 表示一块矩形测板的宽和长， $\bar{\varepsilon}_1$ 和 $\bar{\varepsilon}_2$ 表示关于 y 轴对称两板的平均应变， $\varepsilon(x)$ 则由关于 x 轴对称的板上测点的应变数据线性拟合而来，如式(6)所示。

6 试验结果

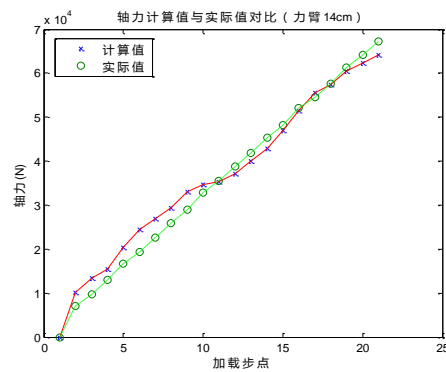
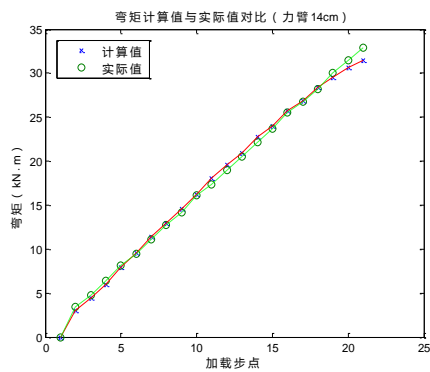
本文分别对上述圆形测力装置及方形测力装置进行多个力臂下的弯矩与轴力量测。每个力臂下测量多组数据，使用平均值代入上述计算公式计算柱底的反力值。

6.1 计算结果

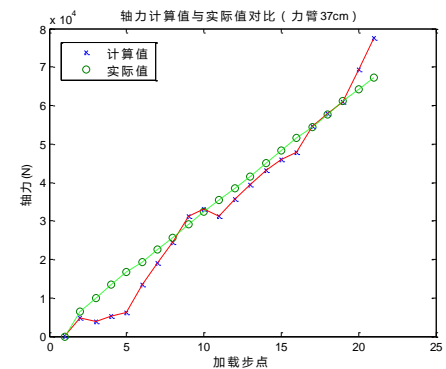
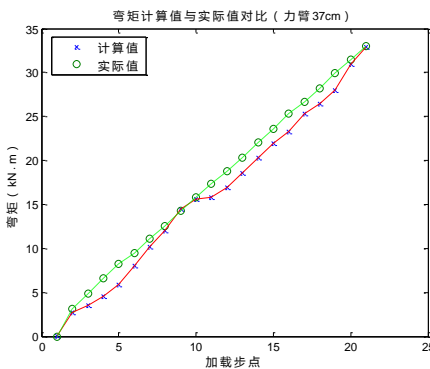
选取的力臂数值与所测数据组数如表 1 所示。数据组数指重复测量的次数，加载步数指测量荷载的个数，间隔约 3kN，最大值约 70kN。部分的计算结果与实际值对比见图 11-12 所示。

表 1 加载数据信息

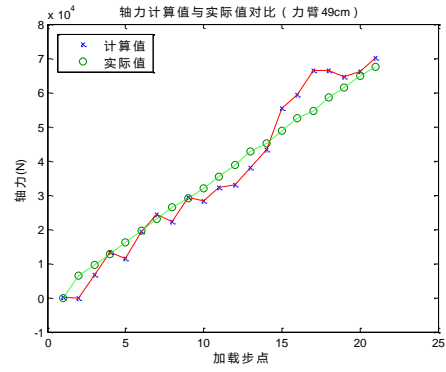
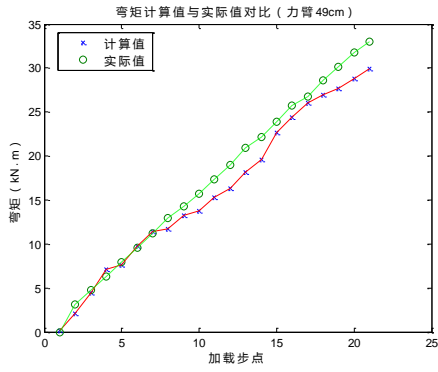
圆形装置力臂	数据组数	加载步数	方形装置力臂	数据组数	加载步数
14cm	2	21	16cm	2	16
27cm	2	21	26cm	2	16
37cm	2	21	36cm	2	16
49cm	2	21	46cm	2	16
60cm	2	21	57cm	2	16



(a) 力臂 14cm 时柱底反力计算与实际值对比

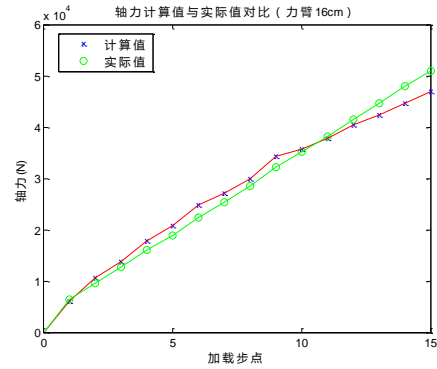
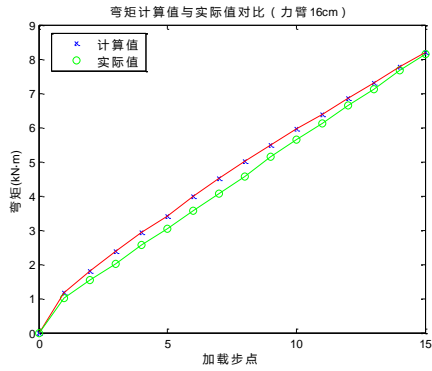


(b) 力臂 37cm 时柱底反力计算与实际值对比

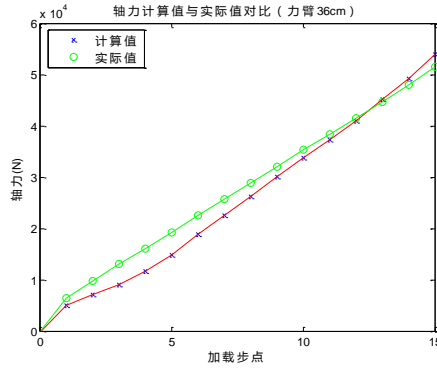
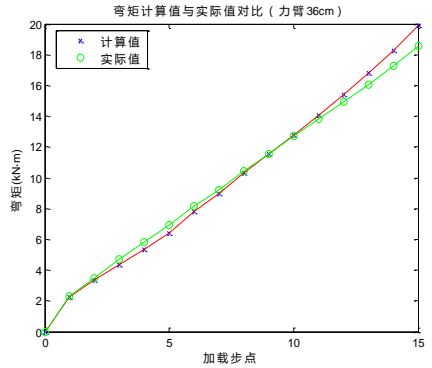


(c) 力臂 49cm 时柱底反力计算与实际值对比

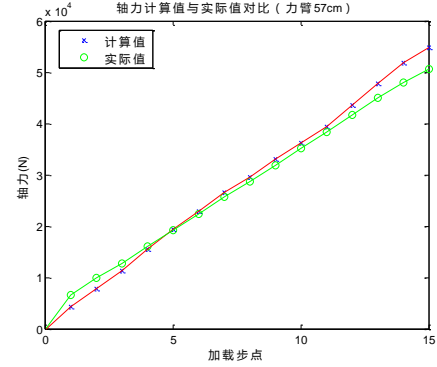
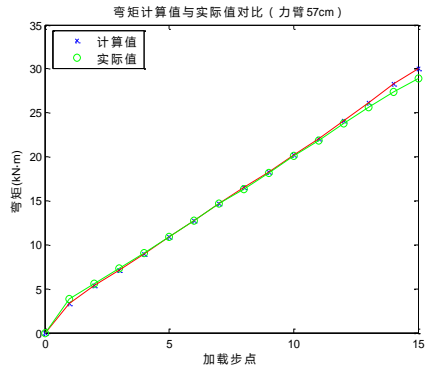
图 11 圆形底座方案反力计算结果与实际值对比



(a) 力臂 16cm 时柱底反力计算与实际值对比



(b) 力臂 36cm 时柱底反力计算与实际值对比



(c) 力臂 57cm 时柱底反力计算与实际值对比

图 12 方形底座方案反力计算结果与实际值对比

6.2 数据使用

以上的圆形装置反算，只取用了对称的半边 4 枚应变片的数据进行应变拟合；方形测力装置的反算，则取用中心对称的 6 枚应变片数据。

7 结论

通过对两型测力装置在各个力臂大小下的测量试验，经计算分析得到了以下结论：

- (1) 两型测力装置可以较好地测量出柱端的弯矩与轴力大小，可以用于实际试验测量；
- (2) 对于圆形测力装置，任取对称的一侧，布设 4 枚应变片可测出准确的柱端反力；
- (3) 对于方形测力装置，取图 10 中板 1、板 2 和板 3 上的 9 枚应变片可测出准确的柱端反力；
- (4) 相比而言，方形测力装置的量测结果更加准确，各应变片的布设也更加方便；圆形测力装置所需要的应变片数量较少，但是精度稍差，布设操作较难；
- (5) 本装置可以适用于不同轴力-弯矩组合的工况，均能给出较为准确的结果。

参考文献

- [1] 董承全,陈辉,胡在良,秦成超.混凝土板破坏预报模型试验研究[C].第 24 届全国结构工程学术会议论文集 (第 I 册), 2015.
- [2] 刁梦竹,李易,陆新征,闫维明.钢筋混凝土楼板连续倒塌的一种简化模拟方法[C].第 24 届全国结构工程学术会议论文集 (第 I 册), 2015.
- [3] 易伟建,何庆锋,肖岩.钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J].建筑结构学报,2007,05:104-109+117.
- [4] 田相凯.局部火灾引起钢结构倒塌的初始破坏机理及简化分析方法[D].北京工业大学,2014.
- [5] 李炳生,汤海林,张其林.结构试验与加载检测技术的发展及其应用[J].结构工程师,2011,S1:69-75.
- [6] 沈德建,吕西林.地震模拟振动台及模型试验研究进展[J].结构工程师,2006,06:55-58+63.
- [7] 王进廷,金峰,张楚汉.结构抗震试验方法的发展[J].地震工程与工程振动,2005,04:37-43.
- [8] 范钦珊,蔡新.材料力学(土木、水利类)[M].北京:清华大学出版社,2006,128-129.