几种结构试验竖向荷载稳压方法的效果分析

葛 雪 曹文清 鲁 亮*
（同济大学结构防灾减灾工程系，上海 200092）

摘 要 在进行结构或构件低周反复静载试验时，竖向荷载用来模拟试件所承受的重力荷载，一般要求荷载数值恒定、方向竖直不变且能随着试件顶部的移动而移动。目前大部分结构试验采用大吨位普通液压千斤顶来施加竖向载荷，受到试件变形的影响，要保持竖向荷载稳定十分困难。为了解决这个难题，试验技术人员在实践过程中探索了多种竖向加载的稳压方法，包括电液伺服加载法、机械杠杆式加载法、液压杠杆式加载法和油路连通蓄能器式加载法等。本文首先介绍了各种竖向加载方法的基本工作原理、装置特点和使用优缺点，再对杠杆式加载法和蓄能器式加载法的稳压效果进行案例分析，结果表明：在加载频率小于 0.1 Hz 情况下，杠杆式稳压方法的竖向荷载变化小于 2%；选择合适的蓄能器型号，可将蓄能器式稳压方法的竖向荷载变化控制在 3% 以内。

关键词 结构试验，竖向加载装置，液压千斤顶，杠杆式加载方法，蓄能器式加载装置
中图分类号：TU317+.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.20251016.001

Analysis of Effectiveness of Several Vertical Load Stabilization Methods in Structural Testing

GE Xue CAO Wenqing LU Liang*
（Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China）

Abstract In quasi-static reverse cyclic tests on structural members, the vertical load simulates the gravity load sustained by the specimen. This load must remain constant in magnitude with a fixed vertical direction, while accommodating the horizontal movement at the top of the structure. Currently, large-capacity conventional hydraulic jacks are predominantly employed for vertical loading. However, specimen deformation makes maintaining load stability challenging. To address this, technicians have developed various stabilization techniques, including electro-hydraulic servo systems, mechanical lever setups, hydraulic lever configurations, and accumulator-assisted jack systems. This paper first outlines the operational principles, device characteristics, and respective advantages and disadvantages of these methods. Subsequently, a comparative case study evaluates the stabilizing performance of the lever-based and accumulator-based approaches. Results indicate that the lever-type method maintains load fluctuations below 2% at frequencies under 0.1 Hz. Furthermore, by selecting an appropriate accumulator, the accumulator-type method can limit load variations within 3%.

Keywords structural testing, vertical loading device, hydraulic jack, lever-type loading method, accumulator-type loading device

收稿日期：2024-12-04
基金项目：国家自然科学基金项目（51678453）
作者简介：葛 雪（1986-），女，硕士，工程师，主要从事结构试验技术研究。E-mail：gexue@tongji.edu.cn
* **联系作者**：鲁 亮（1969-），男，博士，副教授，主要从事工程结构抗震和试验技术研究。E-mail：95010@tongji.edu.cn

0 引　言

在进行结构或构件低周反复静力试验时，为满足试件的轴压比要求，需要施加竖向荷载来模拟试件所受的重力荷载。地震作用下，模拟重力作用的竖向荷载在试验过程中应保持大小恒定、方向竖直，同时作用点应随着试件顶部的位移而移动。实际结构或构件所承受的重力荷载很大，即使是小比例模型试件，试件顶端的重力荷载往往有几十至几百吨，一般只能采用液压千斤顶加载。在进行静载试验时，大部分试验项目使用简便的普通液压千斤顶加载，千斤顶和竖向反力装置之间通过滚轴或导轨进行移动，这种方法能保证竖向荷载随着试件顶端移动，但是不能保证竖向荷载稳定不变，荷载变幅甚至达到预设值的50%以上，也就是不能保证轴压比恒定不变，严重影响试验结果数据，不能满足试验要求。造成这种情形下竖向荷载不能稳定的原因主要有：①液压油为近似不可压缩液体，活塞受到强制位移时，压强就有较大变化；②试件水平往复运动时，其顶部高度表现出波浪状变动，形成对千斤顶的反作用力；③试件损伤后会造成试件高度减小，这时的千斤顶压力会下降，而普通油压千斤顶的压力通过人工手动调节，在加载过程中无法及时调节压力。为解决这些问题，试验技术人员在长期的工作过程中研发了多种竖向加载稳压方法来满足试验需求。本研究经过文献检索和实验室调研，总结了几种实用并配置有相应装置的竖向加载稳压方法：①电液伺服竖向加载稳压方法；②三连杆仿重力加载方法；③机械杠杆式竖向加载稳压方法；④液压杠杆式竖向加载稳压方法；⑤连接蓄能器的加载稳压方法。

在以上提出的各种荷载稳定方法中，只有电液伺服稳压方法能完美地解决竖向荷载稳压问题，但是电液伺服稳压装置造价高、安装过程复杂、配套装置多。在普通油压千斤顶基础上研发的简便稳压装置都存在一些精度上的误差，使用过程中需采取一定的措施来增强稳压效果，比如：①杠杆式稳压方法一般采用平衡质量块来稳压，当加载速度较快时，惯性力会影响稳压效果；②采用蓄能器连接油路的稳压方法，由于气囊气体需满足气体状态方程，油路压力存在与要求压力的偏差。

本文先介绍几种常见的竖向荷载稳压方法及装置，再给出一个具体低周反复静载试验的稳压要求示例，示例参数作为不同荷载稳压方法误差分析的基准参数，最后对杠杆式加载法和蓄能器式加载法在常规加载频率下的荷载误差进行分析。

1 几种常见的竖向荷载稳压方法

1.1 电液伺服竖向加载系统

电液伺服加载系统是一项集合了电子控制、液压传动以及机械传动的高性能控制系统，该系统以液压动力元件作为执行机构，依据负反馈原理，使系统输出跟踪给定信号，具有结构简单、作用力大、快速频率响应等特点[1-3]。结构试验用电液伺服加载系统由泵源、作动器、控制器等组成，通过传感器、控制器、执行器形成闭环控制系统，精确控制位移、荷载的施加，已经成为结构试验的首选和必备设备。利用电液伺服加载系统的特点，可以实现竖向荷载稳定加载，常用的电液伺服竖向加载系统有两种配置，分别见图1所示的下拉式电液伺服加载系统和图2所示的上压式电液伺服加载系统。

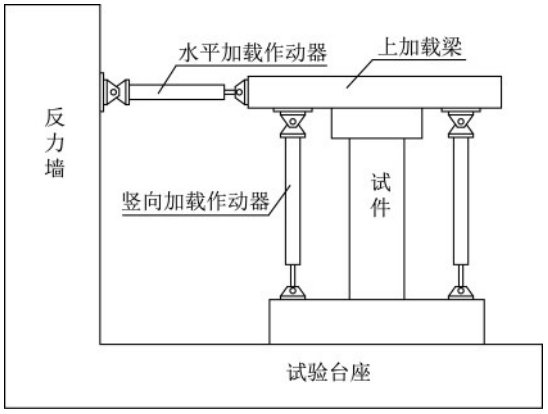


图1　下拉式电液伺服加载系统

Fig.1　Schematic diagram of pull-down type electro-hydraulic servo loading system

下拉式和上压式电液伺服竖向加载系统均能满足竖向荷载稳压要求：①竖向力恒定且保持竖直；②作用合力点随试件顶部变形而移动。具体使用时下拉式电液伺服竖向加载系统需要不断地调整作动器的出力，如图1所示，竖向加载作动器会随着试件水平加载位移而发生倾斜，与垂直向形成夹角θ，夹角θ随水平位移而变化，为确保竖

向力值稳定，需实时测试夹角来计算作动器出力，同时需要进行水平作动器的出力修正，使得施加在试件上的实际竖向力和水平力均为试验所需。

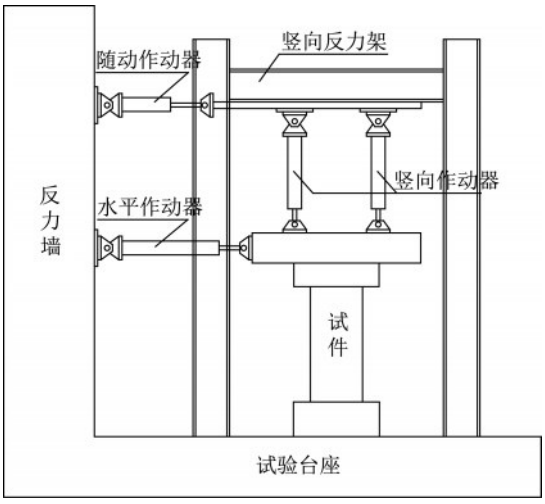


图2 上压式电液伺服加载系统

Fig.2 Schematic diagram of upper-press type electro-hydraulic servo loading system

图2所示上压式电液伺服加载系统，其一次性造价高于下拉式加载系统，需配备竖向反力装置和一台随动作动器。竖向加载作动器通过随动作动器可确保实时保持方向竖直，随动作动器接收来自水平加载作动器或外接位移计的反馈信号实现实时调整。图3为上压式竖向加载系统实例图片。



图3 上压式电液伺服加载系统实例

Fig.3 Setup of an upper-press type electro-hydraulic servo loading system

1.2 仿重力加载架稳压方法

参考《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152-92)第10.1.2条[4]，该标准提供了一种仿重力加载装置，见图4。仿重力加载装置可保证竖向千斤顶随试件顶部平动而不改变竖向荷载值。

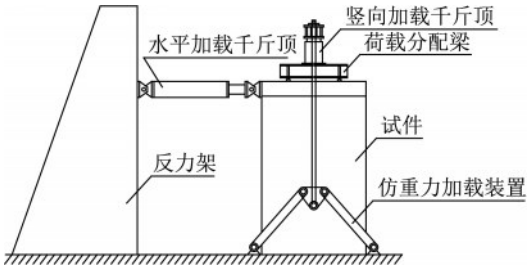


图4 结构试验用仿重力加载架

Fig.4 Gravity-mimic apparatus used in structural test

文献[5]使用仿重力加载架进行隔震结构试验，但是有关试验文献未描述这种装置的构造参数和设计方法，鲁亮等[6]对仿重力加载架的关键几何参数进行了分析，结论是当图4中的斜杆与水平面的夹角为70°时，装置的竖向稳压效果最好。

1.3 机械杠杆式竖向荷载稳压方法

试件顶部布置一个或数个竖向加载千斤顶，千斤顶的活塞总面积为A_1，油路压力为P_1，则在试件顶部施加的竖向压力为$F_1=A_1\times P_1$。机械杠杆式稳压方法的原理见图5，首先在加载油路中连接一个油压相同的千斤顶，称之为稳压千斤顶，稳压千斤顶的活塞面积A_s，则其出力为$F_s=A_s\times P_1$。杠杆两端分别为稳压千斤顶和质量块，稳压千斤顶和质量块的杠杆比为$L_1:L_2$。

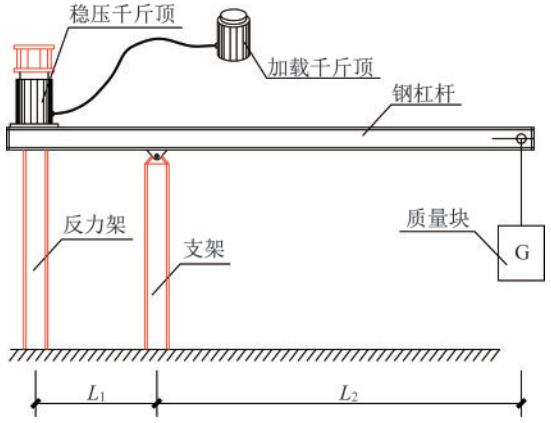


图5 机械杠杆式稳压方法的原理图

Fig.5 Schematic diagram of mechanical-lever-type stabilization

进行结构试验时，如果需要在试件顶部施加竖向恒荷载F_l，则能够计算出质量块的重量为

$$G=\frac{L_1}{L_2}\times F_s=\frac{L_1}{L_2}\times\frac{A_s}{A_l}\times F_l \qquad (1)$$

经过合理的参数设计，此套装置就可以用一

个较轻的配重质量块来保持试件顶部的荷载恒定。按照杠杆原理，当加载千斤顶有δ_1的竖向行程时，质量块的位移就会放大为

$$\delta_G = \frac{L_2}{L_1} \times \frac{A_1}{A_s} \times \delta_1 \tag{2}$$

机械杠杆式稳压方法原理明晰、结构简单，易于实施[7]，但是机械杠杆式稳压方法存在一定的使用缺陷，当试验加载速度较快时，质量块放大的运动会产生较大的惯性力，影响到竖向荷载的稳定。

1.4　液压杠杆式竖向荷载稳压方法

与机械杠杆原理类似，鲁亮[8]研制了一套液压杠杆式荷载恒压装置。液压杠杆的工作原理是利用增压油缸来替代机械杠杆，增压油缸具有高压和低压两个油腔，高压油腔连接加载千斤顶，压强为P_1，低压油腔连接称量千斤顶油腔，压强为P_c。由于各个油腔的面积不同，利用质量块向称量千斤顶施加较小的重力G，加载千斤顶就可以获得较大的压强P_1[6]。

1.5　蓄能器式竖向荷载稳压方法

常用蓄能器有气囊式[9]和活塞式两种，蓄能式竖向荷载稳压装置实例如图6所示。

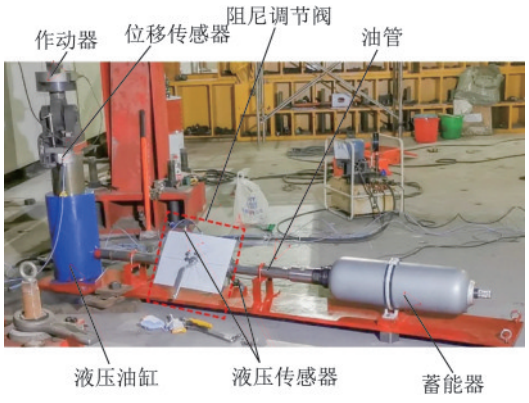


图6　蓄能式稳压装置实例

Fig.6　Setup of a vertical loading stabilizer with an accumulator

气囊内压缩气体（通常为氮气）的压力与油路压力相同。气囊初始体积为V_1、压力为P_1，P_1即为加载系统油路的油压，当加载千斤顶受到强制位移时，液压油路压力发生变化，由于气囊气体的可压缩性，液压油会被挤入或释放出蓄能器，此时气囊的体积和压力就会变为V_2、P_2，根据理想气体状态方程：$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$（玻意耳定律）[10]，油路的压力变化为

$$\Delta P = P_2 - P_1 = P_1 \times \frac{V_1 - V_2}{V_2} = P_1 \times \frac{\Delta V}{V_1 - \Delta V} \tag{3}$$

通常，在进行结构试验时，竖向加载油路油腔体积变化$\Delta V = V_1 - V_2$的量级一般为零点几升，对于一个常规体积的蓄能器来说，油路的压力变化可小于3%，这样就确保了系统稳压效果，加载油路的压力相对稳定，但是从式(3)可以看出，蓄能器式加载稳压方法无法绝对保持竖向荷载不变，但是能起到大幅度“削峰填谷”的作用。

对本节介绍的几种竖向加载稳压方法总结出各种方法的优缺点，见表1所示。

表1　不同竖向加载稳压方法的比较

Table 1　Comparison of different vertical load stabilization methods

稳压方法	优缺点
电液伺服竖向加载系统	优点：荷载实时稳定不变； 缺点：装置造价高、控制复杂
仿重力加载架稳压	优点：安装简便，水平随动效果好； 缺点：试件顶部高度变化大时不适用
机械杠杆式竖向荷载稳压	优点：装置易制作、原理简单； 缺点：有一定占地面积，加载速度快时存在惯性力的影响
液压杠杆式竖向荷载稳压	优点：占地面积小、控制精度高； 缺点：装置复杂、需专业定制；加载速度快时存在惯性力影响
蓄能器式竖向荷载稳压	优点：设备简单、占地面积最小； 缺点：无法做到绝对稳压

2　竖向荷载稳压方法的效果分析

2.1　未采取稳压措施时竖向荷载的变化（案例分析）

不同试验项目所要求的试件竖向荷载值从几十吨到几百吨不等，以一个钢筋混凝土剪力墙低周反复试验项目为例，试件设计施加竖向荷载为1 000 kN、水平作动器最大加载位移为±60 mm。在水平荷载作用下，测得的水平力和水平位移滞回曲线见图7。在不采取竖向荷载稳压措施的情况下，实测千斤顶压缩位移随水平位移的变化曲线见图8，实测竖向荷载随水平位移的变化曲线见图9，图中设千斤顶活塞的压缩位移为正。

从图8可以看出，试验过程中千斤顶活塞压缩位移与水平位移呈单象限线性变化关系，千斤

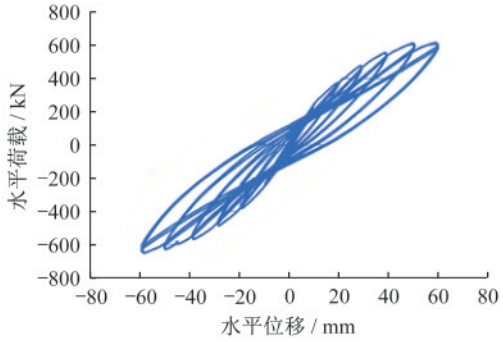


图7 水平荷载-水平位移滞回曲线

Fig.7 Hysteresis loops of horizontal force vs displacement

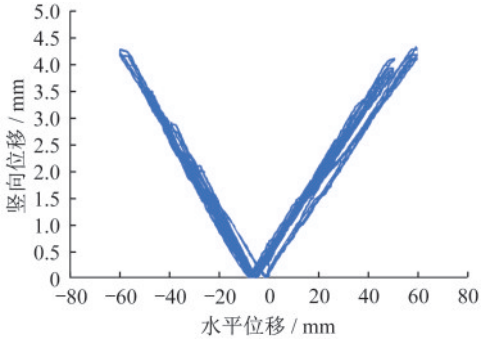


图8 千斤顶竖向位移-水平加载位移曲线

Fig.8 Curves of jack vertical displacement vs horizontal loading displacement

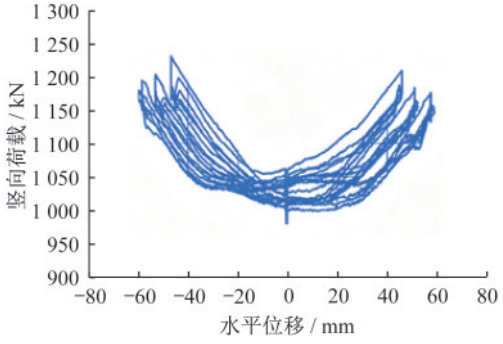


图9 千斤顶竖向荷载-水平加载位移曲线

Fig.9 Curves of jack vertical force vs horizontal loading displacement

顶最大压缩位移为4.3 mm。图9所示竖向千斤顶最大荷载为1 230 kN，比要求的竖向荷载大23%，竖向荷载的变化与水平位移呈非线性关系，综合图8和图9，说明普通千斤顶的压缩刚度为非线性。

前述的各类稳压方法，在水平加载速度很慢的情况下，均能保证竖向荷载基本不变，但是随着加载速度的变大，对各种稳压方法的稳压效果会产生一定的影响。下面仅以图7—图9的试验数据进行案例分析，在2.2节和2.3节中分析加载速度对机械杠杆式和蓄能器式稳压效果的影响。

本案例中水平位移表达式为

$$x = A\sin\omega t \tag{4}$$

式中：x为加载位移；A为某加载圈位移幅值；$\omega = 2\pi f$为加载频率。

图8所示试验数据表明，千斤顶竖向压缩位移可表达为

$$d = k|x| = kA|\sin\omega t| \tag{5}$$

式中：d为千斤顶压缩位移；k为比例系数，本案例中，$k = 4.3/60 = 0.072$。

2.2 机械杠杆式稳压方法的效果影响因素

以图5所示的机械杠杆式稳压方法为例，影响稳压效果的主要因素为：①配重G的惯性力的影响；②液压油流动时，产生的管路摩阻力。随着加载速度的增大，这两项因素均会增加竖向压力，对稳压效果造成不利影响。

管路摩阻力包括管道壁的摩阻力及接头部位的摩阻力，计算分析及测试均较为复杂，一个类似图5的普通管路的摩阻力最大仅为几个千牛[11]，对竖向荷载的影响很小，这里予以忽略。以下着重考察惯性力对竖向荷载的影响。

设计一个图5所示装置，参数为$\frac{L_2}{L_1} = 10$、$\frac{A_1}{A_s} = 10$，预加竖向荷载F_0为1 000 kN，依据式(1)、式(2)计算得到：配重G的质量m为1 000 kg、配重G的位移是加载千斤顶活塞位移的100倍。

以2.1节案例来分析，可以得到配重G的最大惯性力F_{max}与加载频率f计算公式：

$$F_{max} = 100 \times mkA(2\pi f)^2 \tag{6}$$

配重G的惯性力通过杠杆作用在试件顶部，所增加的竖向荷载为

$$F_{\Delta} = 100 \times F_{max} \tag{7}$$

计算不同频率下的试件顶部所增加的荷载F_{Δ}，结果见图10。

从图10可以看出：①随着加载频率的提高，惯性力引起的试件顶端附加竖向荷载的增加呈二次方增长，当加载频率为0.4 Hz时，附加荷载为272.6 kN，超出图10所示的230 kN（相当于置于0.37 Hz频率下附加惯性力）；②分析结果表明，采用机械杠杆式稳压方法时，加载速度不能过大。试验室低周反复加载试验的频率一般为0.05~0.1 Hz，本案例惯性力引起的竖向荷载变化在2%

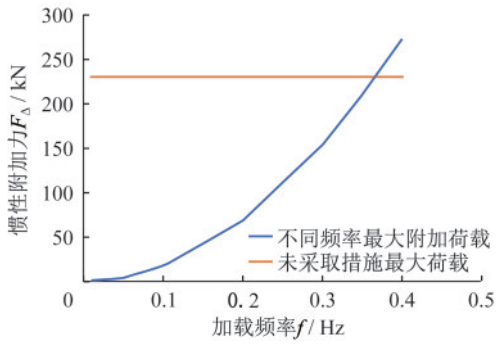


图 10　惯性附加力与加载频率曲线

Fig.10　Curve of inertial additional force vs loading frequency

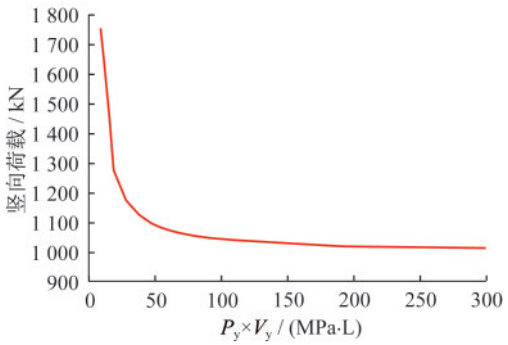


图 11　竖向荷载与蓄能器参数的关系曲线

Fig.11　Relationship curve between vertical loads and accumulator parameters

以内，是可以接受的。

2.3　蓄能器式稳压方法的效果影响因素

蓄能器式稳压方法稳压效果的主要影响因素为气囊自身的物理特性，基本原理见 1.5 节，此处以图 6 中的装置和 2.1 节案例数据进行分析。

图 6 中所用的千斤顶参数为最大 150 t、额定压力 39.5 MPa、活塞面积 0.038 m²（直径 220 mm），预加载压力为 1 000 kN，此时管路油压 P_1 为 26.3 MPa，此时蓄能器气囊内的压力同样为 P_1、体积为 V_1，试验所用的蓄能器型号为 NXQ-A-16/31.5-L-Y，预充气压力 P_y、公称容积 V_y=16L，以下公式成立：

$$P_1 \times V_1 = P_y \times V_y \tag{8}$$

试验过程中，由于千斤顶活塞受到强制位移，引起气囊体积的变化

$$\Delta V = V_1 - V_2 = A_0 \times d \tag{9}$$

这里的 A_0 为千斤顶活塞面积，d 为千斤顶活塞位移，见公式（5），ΔV 的最大值为固定值，从公式（3）可以看出气囊的 V_1 越大，油路压力变化 ΔP 越小，从式（9）可以得到，当 P_1 确定后，P_y、V_y 的乘积越大，则气囊的 V_1 越大，油路压力变化 ΔP 越小。

市场上常见蓄能器设计压力等级有 10 MPa、20 MPa、31.5 MPa 三种，蓄能器公称容积划分为 21 个等级：0.4L、0.63L、1.0L、1.6L、2.5L、4L、6.3L、10L、16L、20L、25L、32L、40L、50L、63L、80L、100L、125L、160L、200L、250L。

以蓄能器参数 $P_y \times V_y$ 为变量，考察 2.1 节实例中竖向荷载 P_2 的变化情况，见图 11 所示。

从图 11 可以看出：①随着蓄能器 $P_y \times V_y$ 值的增加，竖向稳压效果会变好，但达到一定值后，荷载变化缓慢；②对于本文案例，采用一个 10L 的蓄能器 NXQ-A-10/31.5-L-Y，就可以将竖向荷载的变化稳定在 3.0% 以内。

3　结　论

本文对常见的结构试验用竖向加载稳压方法进行了总结，特别对杠杆式稳压方法和蓄能器式稳压方法的影响因素进行了分析，得到如下结论：

（1）各种竖向加载稳压方法的原理及设计方法有所不同，技术人员可根据试验参数进行配置。

（2）由于受到惯性力的作用，杠杆式稳压方法的效果与加载频率关系最大，在常规 0.05~0.1 Hz 的加载频率下，竖向荷载被动变化的范围可控制在 2% 以下。

（3）蓄能器式稳压方法的关键在于蓄能器参数的选择，大容积、高压力的蓄能器效果更好，从经济性考虑，参数合理的蓄能器就能达到很好的效果，比如将竖向荷载的波动控制在 3% 以内。

参　考　文　献

[1] 卢林，王军政，陈彩可，等. 电液力控制系统在结构强度试验加载装置中的应用[J]. 液压与气动，2004(8)：57-59.
Lu Lin, Wang Junzheng, Chen Caike, et al. Application of electro-hydraulic force control system in structure intensity experimental facility[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004(8): 57-59.(in Chinese)

[2] 栾鹏. 电液伺服系统控制方法研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2021.
Luan Peng. Research on control method of electro-hydraulic servo system [D]. Shenyang: Shenyang

University of Technology, 2021.(in Chinese)

[3] 郑晓华.电液伺服控制系统的研究与应用[D].西安:西安科技大学,2010.
Zheng Xiaohua.The research and application of electro-hydraulic servo control system[D].Xi′an University of Science and Technology, 2010.(in Chinese)

[4] GB 50152—92 混凝土结构试验方法标准[S].
GB 50152—92 Standard methods for testing of concrete structures[S].(in Chinese)

[5] Cheng C T, Chao C H. Seismic performance of base-isolated structures with rocking bearing [C]// Proceeding of the 5th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Taipei, 2013.

[6] 鲁亮,黄子恒,卢文胜.结构抗震试验用各类竖向加载装置[J],结构工程师,2017,33(1):149-155.
Lu Liang, Huang Ziheng, Lu Wensheng. Various vertical loading apparatuses applied in the structural seismic test[J].Structural Engineer, 2017, 33(1): 149-155.(in Chinese)

[7] 张兴虎,赵建德,史庆轩,等.一种多功能拟静力试验装置[J].结构工程师,2011,27(S):249-254.
Zhang Xinghu, Zhao Jiande, Shi Qingxuan, et al. A multifunction pseudo-static test device [J]. Structural Engineer, 2011, 27(S): 249-254.(in Chinese)

[8] 鲁亮.液压加载油路恒压器:中国,ZL200820059483.2[P].2009-04-22.
Lu Liang.Loading stabilizer of hydraulic circuit: China, ZL200820059483.2[P].2009-04-22.(in Chinese)

[9] 毕超,陈正茂,张立斌,等.气囊式液压蓄能器的数学模型与仿真分析[J]. 航天制造技术,2017(2):11-15,43.
Bi Chao, Chen Zhengmao, Zhang Libin, et al. Mathematical model and simulation analysis of hydraulic bladder accumulator [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017(2): 11-15, 43.(in Chinese)

[10] 谢世标.理想气体及其状态方程的证明[J].广西民族学院学报(自然科学版),2002,8(1):18-20.
Xie Shibiao. The prove of state equation of ideal gas [J]. Journal of Guangxi University for Nationalities (Natural Science Edition), 2002, 8(1): 18-20.(in Chinese)

[11] 鲁亮,汪磊,夏婉秋,等.液压蓄能式竖向隔震装置性能试验及隔震参数分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(11):1-11.
Lu Liang, Wang Lei, Xia Wanqiu, et al. Experimental study and parameter analysis on the performance of vertical seismic isolation device with hydraulic jack and accumulator [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2024, 51(11): 1-11.(in Chinese)

[12] 朱海龙,张倩,肖晓蕾,等. 充气式蓄能器参数选型方法研究[J]. 航空工程进展,2023,14(2):121-128.
Zhu Hailong, Zhang Qian, Xiao Xiaolei, et al.Research on parameter selection method of gas-charged accumulator [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 121-128.(in Chinese)