

# 货架的抗震性

王凤林 编译

## 一、概述

有关货架的抗震性研究,日本首先在1972年9月对实尺寸货架进行了人工加振的自由振动实验,后来1978年美国在大型振动台上对实尺寸货架进行了模拟地震波的破坏性振动实验,随后日本也在大型振动台上进行了较大规模的多课题的振动实验。

货架的型式可按其功能以及使用在何种自动仓库来区分,其种类如表1所列。随着贮存形式的多样化,货架的设计方式也复杂起来,尤其是高度超过10米(相当三层楼房)的货架,必须考虑地震时的安全来加以设计。

就抗震设计规范来说,在日本关东大地震后的1924年,静态震级法规定水平震度系数K为0.1以上,曾得到广泛沿用。之后,由于1950年建筑法规的制订,从材料强度和安全系数的角度考察,直至目前水平震度系数规定为0.2。

另一方面,近20多年地震研究取得了显著的成果,可以用数值来确切掌握实际地震时的性状,同时由于电子计算机的发展,有可能对结构物进行动态的分析,以至能够计算地震时结构的振动性状。在此基础上,对建筑法规进行了大幅度修改,制订了新抗震设计规范,并从1981年6月起实行。

目前,建筑法规适用于结构上与屋顶和外墙结合的整体式货架,而安装在建筑物内的分离式货架则按照日本工业标准《立体自动仓库系统设计通则》(JIS B8940—78)和《托盘货架的种类以及主要尺寸》(JIS B8930—71)由各设计人具体考虑进行设计。

托盘货架的日本工业标准规定,应按货架的满载率为0.8和水平震度系数 $K=0.1$ 来计算作用于货架的水平力。这就是说,以货架自重及其满载荷载之和的 $8/100(=0.8 \times 0.1)$ 作为

货架水平方向的作用力。该标准还规定,在此水平力作用下货架立柱的偏斜,应在各货格高度的 $1/50$ (开间方向)和 $1/100$ (进深方向)以下。以上规定仅限于高度不大于4.8米的托盘货架,对于整体式货架应以建筑法规规定的 $K=0.2$ 作为计算基准。

采用电子计算机对货架及其贮存物进行动态分析时,关键在于建立货架的计算模型和选定衰减系数。由于都是在假设条件下进行的分析,所以还必须通过实尺寸货架的振动实验来加以验证。

货架的型式 表1

按结构功能分	按所设置的立体自动仓库分
普通格式货架	整体式或分离式立体自动仓库
阁楼式货架 <sup>(1)</sup>	整体式或分离式穿流式立体仓库
托盘货架	整体式或分离式叉车作业的立体仓库
悬臂式货架	整体式或分离式自动分类贮存立体仓库 <sup>(4)</sup>
驶入式货架 <sup>(2)</sup>	特殊仓库
穿流式货架 <sup>(3)</sup>	
移动式货架	
特殊货架	

注(1)具有两层以上作业平台的货架,在结构上一般底层货架是平台和上层货架的支承结构。

(2)货架的多排纵深立柱上设有多层悬臂支承梁,可允许叉车之类设备进入每个货架开间内进行存取作业。

(3)一种纵深大的货架,每个货格内设有的贮存兼移动货物的重力式或驱动式输送机;设有重力输送机的也称重力式货架。

(4)一般采用穿流式货架,货物经设定自动存入各地址货格内,每个隧道式货格贮存一个品种。出库时可根据要求的品种和各品种的数量自动选取并送出。

## 二、振动实验的目的

货架的动态分析，一般参照建筑结构的方式建立多质点系的计算模型，并采用由各种实验获得的建筑结构的衰减系数来进行计算。可是货架及其贮存物的形态和一般建筑结构的形式大不相同。具体地说，贮存物的重量占总体重量的比例很大，具有跟一般建筑物的活载相反的比例，即货架总体重量的80%以上是贮存物。因此，采用一般建筑结构的衰减系数进行动态分析，是很难获得跟实际接近的结果的。

振动实验的目的是为了掌握分析所必需的资料(即固有周期、衰减系数、振动模式等)，验证理论计算值，发现未预计的现象以及掌握将来进一步设计的资料。货架振动实验的目的也不例外。

## 三、振动实验的方法

振动实验的方法有下列四种：

- (一) 由振动台加振；
- (二) 由起振器施加水平力进行加振；

(三) 由牵绳、千斤顶等施加的水平力进行自由振动；

(四) 特殊(爆破等)的方法。

就实验来说，(一)项可以获得最确实的数据，并能再现自然界的地震波进行加振实验。日本在1982年3月竣工的原子能工程试验中心的振动台是日本最大的一座，其最大载重量1000吨，台面尺寸15×15米，可以在水平和垂直方向同时加振。(一)项的缺点是费用较大。简便的方法是(三)项，可利用建成的货架结构物来进行。但是，这种单纯水平力加振的方法跟实际地震波产生的水平和垂直方向同时振动的情况不完全相同。因此，选择符合实验目的的方法是重要的。货架的振动实验，采用(一)项的方法在日本有3件，在美国有1件；(三)项的方法在日本有2件。

## 四、实验报导

表2按年代顺序列出了日本和美国进行过的货架振动实验。现按照其顺序说明各实验的情况和结果。

货架振动实验一览表

表2

实验主持单位	供试货架尺寸(米) (宽×长×高)	实验方法	进行年月	备注
日本产业机械工业会	2.9×5.8×18.7	自由振动(人工加振)	1972.9	
美国货架制造业协会	2.6×4.9×7.8	振动台	1978.2	在加利福尼亚大学
	2.3×2.9×4.6			
日本 Filing 公司	2.5×4.2×4.0	振动台	1979.9	在国立防灾技术中心
	1.5×2.1×3.0			
川铁 Interlak 公司	1.1×2.6×9.0	自由振动(牵绳加振)	1980.8	
日本产业机械工业会	4.0×2.5×7.0	振动台	1981.1	在国立防灾技术中心
川崎制铁公司	1.4×1.4×9.0	振动台	1981.4	在构造技术研究所

### (一) 日本产业机械工业会的实验

1972年进行的第一次实验，是在厂房内装配的一座实尺寸货架上由人工在其顶部进行加振。这次实验测量了货架的固有周期，并与理论计算值加以比较。

第二次实验，是在1981年1~2月由加入日本产业机械工业会的12家公司在汽车振兴基金的资助下进行的实尺寸货架振动实验。现将这次实验的较详细情况介绍如下。

### 1. 实验设施

#### (1) 振动台

本次实验使用了日本国立防灾技术中心的振动台，其台面尺寸为12×12米，最大载重量为500吨，最大加速度500厘米/秒<sup>2</sup>，最大振幅±150毫米。

#### (2) 供试载荷

实验用单元载荷有两种，一种是码放盒装件的木托盘(图1)，350公斤/托盘；另一种

是装有砂袋的箱式托盘（图 2），650 公斤/托盘。前一种载荷是用于研究地震时贮存件的错位和倒塌的实验，后一种载荷则用于研究货架构件应力的实验。

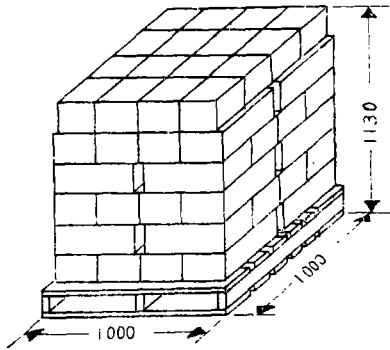


图 1 码放盒装件（内装旧杂志）的木托盘

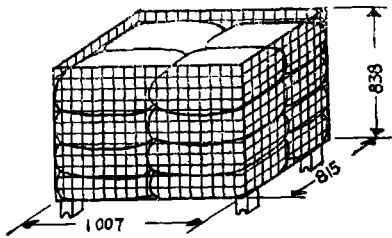


图 2 内装砂袋的箱式托盘

### （3）货架的尺寸和布置

由于振动台的加振方向是在一个方向，为了同时试验货架结构 X 方向（垂直货架巷道的方向）和 Y 方向（货架巷道方向）的两个轴向上的振动性状，制造了图 3 所示的相同两组货架，并如图 4 所示布置在 12×12 米的振动台面上。

### （4）检测设备

为测量货架固有周期、加速度响应、构件轴向力和变位，本实验设有下列检测装置：加速度计（2~5G）21 个，测力传感器 15 个，变位计（200 毫米）2 个，动应变放大器 5 台，数字式记录器（DR-100）、模拟数据记录器（R-280）各一台，描笔式记录器 5 台。

## 2. 实验方法

### （1）实验 I

供试货架只用了图 3 所示货架的单排，在其上存满了 8 个图 1 所示的码放盒装件的木托盘。货架自重约 1 吨，载荷总重量为 2.8 吨。实

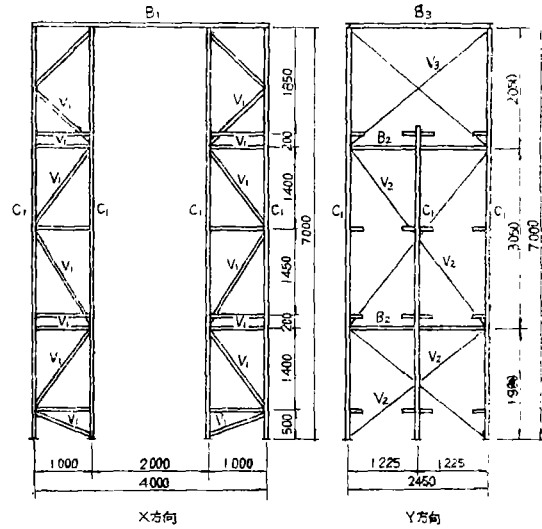


图 3 货架的结构尺寸和构件表

构件表

C <sub>1</sub>	方钢管 60×60×2.3
B <sub>1</sub>	工字钢 100×100×6×8
B <sub>2</sub>	圆钢管 48.6×2.3
B <sub>3</sub>	圆钢管 60.5×2.3
V <sub>1</sub>	圆钢管 34.0×2.3
V <sub>2</sub>	棒钢 φ16
V <sub>3</sub>	棒钢 φ13
托盘支承梁	方钢管 50×50×2.3

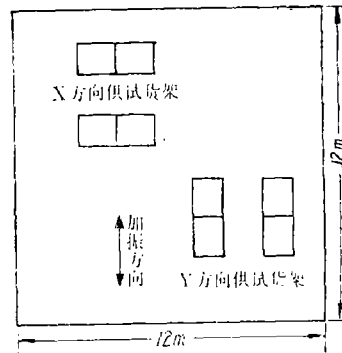


图 4 货架的实验布置图

验项目如表 3 所列，图 5 为进行实验时的情形。

### （2）实验 II

贮存物为图 2 所示装有砂袋的箱式托盘，供试货架为图 3 所示的双排，自重约 2 吨，存满 16 个托盘，载荷总重为 10.4 吨。进行的实验项目如表 4 所列，图 6 为实验时的情形。

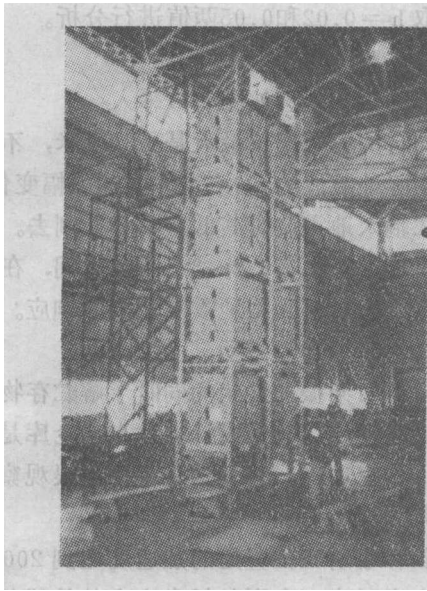


图5 实验 I, 供试载荷为盒装件托盘 (日本产业机械工业会)

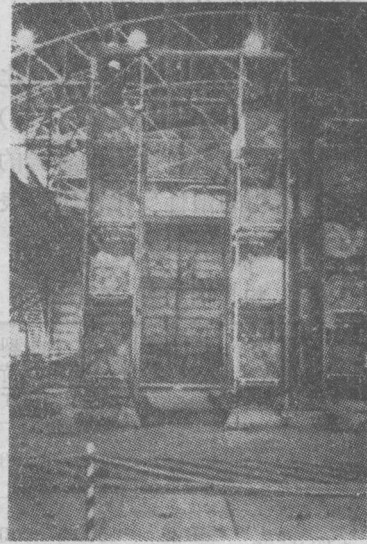


图6 实验 II, 供试载荷为装有砂袋的箱式托盘 (日本产业机械工业会)

表3 实验 I (盒装件木托盘) 的项目 (1gal = 1 厘米/秒<sup>2</sup>)

实验号	实验波形	加振级	研究项目	检测方法
1	正弦波振动试验	20gal, 1~10Hz 变幅 1mm	共振曲线, 振动模式 $1/\sqrt{2}$ 法衰减 第一阶振动数的衰减	加速度计 铅锤 肉眼检查
2	振动台变幅步进加振			
3	正弦波振动台紧急停止			
4	地震波 TAFT (1952东西)	80gal	货架结构的加速度响应	
5~6	地震波官城县冲 (1978北南及东西)	80gal	货架结构的加速度响应	
7~11	地震波 EL CENTRO (1940 北南)	80~400 gal	货架结构的加速度响应	
12~13	地震波 TAFT (1952东西)	300, 400 gal	货架结构的加速度响应	

表4 实验 II (装砂袋箱式托盘) 的项目 (1gal = 1 厘米/秒<sup>2</sup>)

实验号	实验波形	加振级	研究项目	检测方法
1~2	正弦波振动试验	30gal, 1~13Hz 变幅 1mm	共振曲线, 振动模式 $1/\sqrt{2}$ 法衰减 第一阶振动数的衰减	加速度计 测力传感器 变位计 铅锤 肉眼检查
3	振动台变幅步进加振			
4	正弦波振动台紧急停止	30gal, 3~25Hz	自由振动的衰减	
5	地震波 TAFT (1952 东西)	80gal	货架结构的加速度响应	
6	地震波官城县冲 (1978北南)	80gal	货架结构的加速度响应	
7~12	地震波 EL CENTRO (1940北南)	200~600gal	货架结构的加速度响应	

### 3. 预备试验和实验结果分析

#### (1) 预备试验

为了事先掌握货架结构的弹性变化范围和塑性变化范围,进行了货架的斜撑( $V_1$ )和拉杆( $V_2$ )的拉伸试验,以便对比振动实验的数据,从而确定货架结构的塑性变化范围。表5为材料强度试验结果。

表5 构件强度

构件	尺寸(毫米)	材料	屈服载荷(公斤)	断裂载荷(公斤)	备注
斜撑( $V_1$ )	圆管 $\phi 34 \times 2.3 \times 400$	SS41 <sup>(1)</sup>	5500	7200	
拉杆( $V_2$ )	棒钢 $\phi 16 \times 500$	SR24 <sup>(2)</sup>	4500	8100	螺丝接头式

注(1) 普通结构用轧制钢材。  
(2) 钢筋混凝土用棒钢。

#### (2) 加速度响应分析

为了分析振动实验的货架的加速度响应,并跟实验值加以比较,采用了日本石川岛播磨重工公司的计算机分析程序(ISTRN/FD)进行动态分析,得到表6和表7所示的振动特性。

表6 第一阶固有周期和衰减系数

供试货架	固有周期 T (秒)		衰减系数 h		
	分析值	实验值	紧急停止法	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ 法	地震波分析
X方向	0.24	0.31	0.061	0.083	0.15~0.20
Y方向	0.27	0.26	0.041	0.077	

表7 供试货架顶部的加速度响应放大率

供试货架	分析值(倍)	实验值(倍)
X方向	3.5~4.3	1.5~3
Y方向	3.6~3.4	1.5~2.5

在进行分析时,货架计算模型的建立和衰减系数的取值是关键。计算模型是把货架结构简化为弯曲剪切杆,在Y方向,质点在各层水平梁的位置上;在X方向,质点在各立柱贮存物位置上。在一般钢结构计算时衰减系数  $h = 0.02 \sim 0.03$ ,在货架结构中考虑到贮存物的水

平移动取  $h = 0.02$ 和 $0.05$ 两值进行分析。

### 4. 实验结果

#### (1) 关于地震波的有效输入

振动台的振幅变位最大是 $\pm 30$ 毫米,不可能实现实际地震波约100毫米左右的振幅变位,因此,在输入地震波时其低频部分被削去。货架的固有振动频率在 $3.2 \sim 3.5$ 赫兹之间,在弹性变化范围内对得到跟地震波相同的响应。

#### (2) 贮存物的举动

在掌握货架振动性状的同时了解贮存物在地震时的举动,这对于设计立体自动仓库是必要的重点研究项目。其测量是根据肉眼观察和照相来判断。

当贮存物所在位置处的加速度达到200厘米/秒<sup>2</sup>左右时尚不会引起托盘上盒装件错位,在达到300厘米/秒<sup>2</sup>时则引起严重的错位现象。盒装件开始塌落是在其位置上的加速度达到700厘米/秒<sup>2</sup>左右时才发生。

防止货物错位的方法有一定的效果,例如在码盘盒装件上层用绳捆扎一圈后可在一定程度上防止塌落。码盘盒装件上层有捆扎或在各层盒装件之间涂有粘结剂的单元货物跟普通无任何防止错位措施的托盘货物相比,它们的塌落比例为 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ 。此外,输入地震波不同,其塌落情况也有差异,TAFT地震波引起的塌落较多。

#### (3) 固有周期

如表6所示,在X方向实验值比分析值大得多,这可认为是弯曲型振动的效果。在Y方向的实验值和分析值差别很小,但在实验值中X方向的固有周期比Y方向的大,这可认为是由于X方向有两排货架的影响所造成。一般钢结构的固有周期的概算值为  $T = 0.028 H$  ( $H$ 为结构高度米),如按此公式,本试验货架的固有周期应为  $T = 0.028 \times 7 = 0.196$ 秒,但实验值远大此值,这说明货架结构是一种具有大变形能力的弹性结构。

#### (4) 衰减系数

由于振动时贮存物水平移动产生的附加衰减,实验所获得的衰减系数要比原先推算的

0.05 一值大。在正弦波振动实验时为 0.04~0.08, 在地震波振动实验时为 0.15~0.20, 比一般钢结构的衰减值约大 10 倍。

从理论分析可以知道, 衰减系数仅增加 0.03 就可使钢结构构件内产生的应力减少 20%, 因此, 贮存物本身在地震时的水平移动有较大的减震效果。

(5) 加速度响应放大率和振动模式

货架的加速度响应放大率, 其实验值比一般的结构物稍小, 分析值和实验值见表 7 所列。实验值比分析值小的原因, 也可认为是由于前项所述的贮存物水平移动。

货架的振动模式表现为在 Y 方向第三层部分出现最大加速度。这可认为该部分为拉杆框架无水平系梁, 惯性力较大的缘故。X 方向是框架结构, 分析值和实验值无差异。

(二) 美国货架制造业协会的实验

1978 年美国货架制造业协会在美国科学技术财团的资助下委托 John Bloom 研究所使用加利福尼亚大学的大型振动台(台面 6 × 6 米), 进行了实尺寸货架的振动实验。

供试载荷是装载混凝土块的托盘(1360 公斤/托盘), 供试货架为管壁有孔的管材组装的双排货架(图 7), 三层高, 每个货格存放两件供试载荷, 双排两列共存放 24 件。

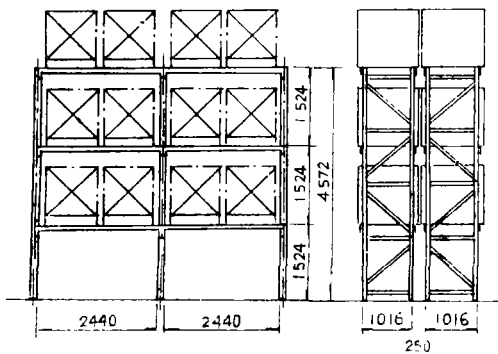


图 7 组装式供试货架

实验的波形为美国代表性的地震波 EL CENTRO 和 PARKFIELD (图 8 和图 9), 由电子计算机模拟再现, 对供试货架进行水平和垂直的同时加振, 直至货架倒塌破坏。实验的

项目如表 8 所列。

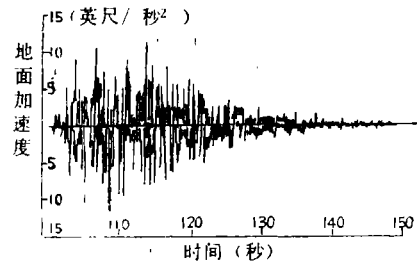


图 8 EL CENTRO 地震波(距断层 4 英里记录, 1940 年加利福尼亚州 EL CENTRO, 里氏震级 7.1 级)

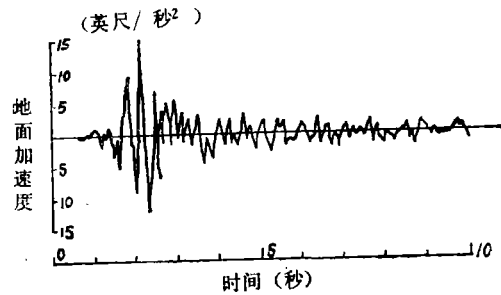


图 9 PARKFIELD 地震波(距断层 200 英尺记录, 1966 年加利福尼亚州 PARKFIELD, 里氏震级 5.5 级)

表 8 美国组装式托盘货架振动试验

实验号	实验波形	振动台最大加速度		备注
		水平	垂直	
1	地震波 EL CENTRO	0.04 g	无输入	仪表检测
2	地震波 EL CENTRO	0.08 g	无输入	
3	地震波 PARKFIELD	0.08 g	无输入	
4	地震波 EL CENTRO	0.15 g	无输入	有电影记录
5	地震波 PARKFIELD	0.16 g	无输入	有电影记录
6	地震波 EL CENTRO	0.20 g	0.11 g	有电影记录, 西北角立柱位移 1 英寸
7	地震波 EL CENTRO	0.31 g	0.17 g	有电影记录, 西北角立柱位移 1/4 英寸多一些
8	地震波 EL CENTRO	0.44 g	0.20 g	有电影记录, 结构完全倒塌

g —— 重力加速度

从货架整体结构来衡量，由于柱和梁采用螺栓连接，使人觉得缺乏刚性，易遭受破坏，可是实际上在货架的Y方向用 EL CENTRO 地震波加振至240厘米/秒<sup>2</sup>时才引起局部损坏，加振至440厘米/秒<sup>2</sup>时才完全破坏。

实验的结果得到固有周期：在货架Y方向（列方向）为0.43秒，X方向（排方向）为0.96秒。衰减系数：Y方向为0.04~0.05，X方向为0.038~0.063。

总的说来，固有周期长和衰减系数也比一般建筑物大3倍的货架结构，具有相当大的抗震能力。

这次实验除有现场的电影实况记录外，还获得由计算机记录的大量实验数据，可供进一步分析用。

### （三）日本 FILING 公司的实验

在国立防灾科学技术中心的振动台上，对该公司的7种产品（托盘货架、阁楼式货架、电动式移动货架、手动式移动货架、书架、搁板式货架和小型立体仓库）进行了正弦波振动试验（加速度控制在50厘米/秒<sup>2</sup>，振动频率从1到11赫兹），以及模拟日本宫城县冲地震波的振动试验，以便掌握货架结构体的固有振动频率，加速度响应放大率和应力等。为了进一步了解货架结构体的极限强度，进行了振动数接近货架固有振动频率、最大达1000厘米/秒<sup>2</sup>的加振实验。

### （四）川铁 INTERLIK 公司的实验

自由振动实验用的货架，采用了不同于市售的型钢，是由钢板成形的75×75×4的方钢管构件组成。用牵绳加振的方式试验货架的实际破坏，以掌握其极限强度。

虽然按理论计算拉力达3.2吨时部分构件要产生屈曲，可是在实验中拉力达5吨时一部分斜撑才产生屈曲，这时的挠度约为100毫米左右。屈曲首先在斜撑上发生，然后逐渐扩大，在立柱下部约1/3高度处产生弯折变形，直至最后破坏。

货架构件连接部分的空心截面连接件，在弯曲时起板簧的作用，具有相当大的粘附性。

尽管连接件的空心截面使理论上的分析困难，但其足够的强度是值得注意的。

此外，在钢结构中一向考虑应使构件的重心重合以便消除局部弯矩，可是，这次实验跟理论有所不同，它证明：即使货架钢结构存在偏心也有足够强度。当然，在计算上构件的偏心等于是增加局部弯矩，使计算值部分增大，这在弹性理论上不好解决，可是在实际上局部弯曲是由结构总体来承受的，同时相当于板簧的各连接部分也同样承受局部弯曲。理论分析既难于解决，就必须用实验来证实。每次实验经济上负担大，因此，以大批量生产为目标的标准型货架，一旦进行实验，所增添的实验成果就应作为制订设计规范的重要参考资料。

图10的右上方可见到加振用的牵绳。



### （五）川崎制铁公司构造技术研究所的实验

采用该公司的装配式货架在研究所的振动台（台面尺寸2×3米）上进行实验。供试贮存物为码放着钢板的托盘，重量1吨/托盘，存放在六层高的供试货架内。

实验的结果表明：当加速度达350厘米/秒左右时，贮存物开始滑动；加速度响应放大率达0.70后不再提高。此外，据说因贮存物为叠放在托盘上的钢板，附加衰减少，所以货架衰减系数和一般钢结构相同。

图11所示为实验的全景。由于这种高度9米的组装式货架是为了满足市场需求而设计制

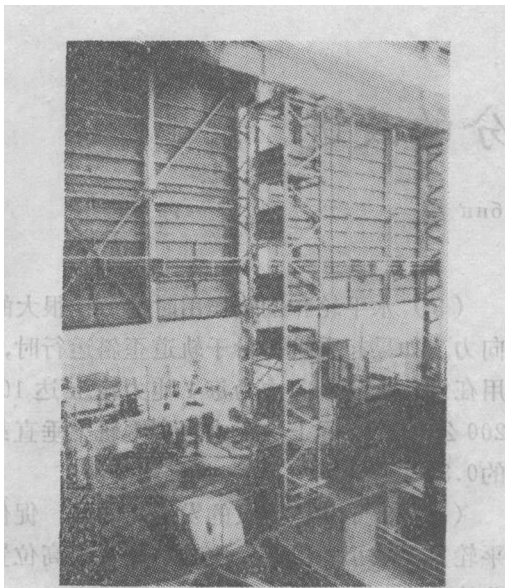


图11 组装式货架的实验 (川崎制铁公司构造技术研究所)

造的，具有标准的桁架节间，所以其斜撑的角度都是统一的，这就形成构件有偏心的结构。

除上述自由振动实验外，还在振动台上进行过模拟实际地震波的加振实验。

### 五、结 语

日本新耐震设计法已从1981年6月起实施，但对于在货架中具有拉杆的框架结构所掌握的实验资料还甚少。因为拉杆的破坏即有导致货架结构损坏的危险性，为此，规定以新法规计算的水平力乘1.5倍进行设计。这样做实际是安全上的权宜之计，并不是经济的设计。

象货架这样的特殊结构，今后势必还要进行多次实验，这对获得将来进一步的设计资料是必要的。现就迄今为止已进行过的实验内容加以归纳如下。

由于振动时贮存物有水平移动现象，其衰减影响比货架结构的还要大，因而作为货架总体的衰减也就变得相当大。当贮存物为难于

产生水平移动的钢板或混凝土块等供试荷载时，货架总体的衰减系数是一般钢结构的2倍左右；当贮存物为码放盒装件的托盘以及在贮存物的支脚部分允许水平移动时，附加衰减变大，货架总体衰减系数可达一般钢结构的7~10倍左右，因而可吸收地震能而不直接输入给货架结构体，比理论的计算值所表明的要安全。

跟地震能有直接关系的货架固有周期，也是实验值比理论计算值长，而且由于货架比一般钢结构具有更大的柔性变形量，所以能吸收地震能而不直接引起货架结构体的损坏。其一般的表现可如图12所示，当加速度达80~200厘米/秒<sup>2</sup>开始引起贮存物移动或错位时，在弹性变化范围内货架产生的实际应力值如图中的粗实线所示那样出现向水平折屈的现象，这就说明，即使继续增加地震的加速度，货架构件的应力也不再成比例增大。

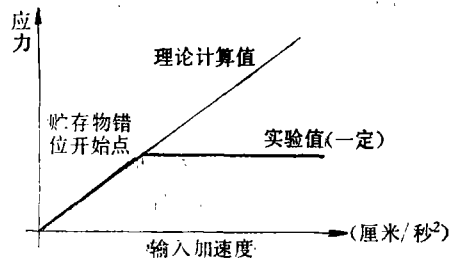


图12 典型加速度响应曲线

### 参 考 文 献

- [1] 持永恒美：パレットラックの耐震性について 生产と運搬，1980，№ 10，19—20
- [2] 廣重茂延：ストレージラックの耐震性研究。荷役と机械，1981，№ 12，18—22
- [3] 廣重茂延：耐震实验の成果と自动仓库设计の今后，生产と運搬，1982，№ 1，33—37

## 更 正

1985年第2期第24页公式(3)中“ $m(1+k)^2$ ”应改为“ $m+(1+k)^2$ ”。第24页右栏第5、6行的“ $C_1$ ”均改为“ $C_2$ ”，共两处。第28页右栏第10行的“如果 $\delta$ ”应改为“如果 $k$ ”。