

中美钢结构货架抗震规范对比研究

北京科技大学机械工程学院 王 慧 程国全 王 转 兰得志

1 引言

地震时由于地震波的作用产生地面运动,通过地基基础影响上部结构,使结构产生惯性力,由于惯性力是地震时间接施加在结构上的,所以应称为地震作用。结构的地震反应包括速度、加速度和位移反应。水平传播的地震波使结构产生水平振动,竖向传播的地震波使结构产生竖向振动,在远离震中的广大区域仅水平地震起作用,所以设计中主要考虑水平地震作用,只有震中附近的高烈度区,才同时考虑竖向地震的作用。随着科技的发展,人们已经越来越多地偏向于使用动力学的手段来描述地震的作用,但是在工程中,只关心地震的最大值,因此,对一般的工程而言,如何将复杂的地震作用抽象为等效力成为关键。目前人们普遍采用地震反应谱来描述地震各种反应值与结构动力特性、场地特征周期之间的关系。

反应谱法是用动力学方法计算单质点体系地震反应,建立各种最大值反应谱,我国和世界各国都使用加速度反应谱。用加速度反应谱计算结构的最大惯性力作为结构的等效地震荷载。然后按静力方法进行结构计算及设计,所以又称为拟静力方法。

2 规范

随着现代物流中心的广泛建设,各种现代化的物流设备投入使用,对物流中心内部的主要设备——货架的安全提出了更高的要求。随着货架的广泛使用,高密度、全自动机械化的立体库货架逐渐成为人们评判物流发展水平的标志。因此,结构简单、承载复杂的高层立体货架的安全性能成为人们关注的焦点。货架是典型的桁架结构,其安全性与结构的强度和稳定性密切相关。只有货架的强度和稳定性达到许用标准时,货架的安全性才有保障。在正常的情况下,货架只承受货

物单元的重量和自身的重量,但是在地震情况下,受力情况复杂得多,也更危险,因此,计算货架在地震工况下是否满足设计要求成为现阶段的重点问题。

组装式货架结构通常由若干竖向框架及若干层与竖向框架连接的横梁组成,各层承载一定重量的货物,在简化货架结构的过程中,可将各层的货架重量和承载重量集中到1个质点,使之抽象成1个多质点体系。对多质点体系的设计是在单质点体系的基础上进行的,见图1。

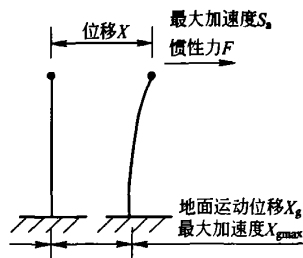


图1 单质点体系地震反应示意

目前,求解建筑结构在地震作用下构件内力的方法主要有2种:第1种是根据建筑结构在地震作用下的位移反应,利用刚度方程,直接求解内力,要求结构体系的动力学模型比较精确;第2种方法是根据地震作用下建筑结构的加速度反应,求出该结构体系的惯性力,将此惯性力视做一种反映地震影响的等效力,即地震作用,再进行结构的静力计算,求出各构件的内力,进行抗震验算,从而使结构抗震计算的动力问题转化成相当于静力荷载作用下的静力计算问题。

根据力学公式,地震惯性力

$$F = am = \beta G$$

式中 G ——结构的总重力

$$G = mg$$

β ——地震的影响系数

α ——地震加速度

因此,地震加速度和地震的影响系数之间的关系为

$$\beta = \frac{\alpha}{g}$$

中美 2 国的规范对地震影响系数有不同的求法。

2.1 中国规范

中国的《钢货架结构设计规范》在计算地震力时,将地震力转化为求水平方向上的地震作用力,即地震惯性力 F ,其影响因素主要是货架结构重量和地震影响系数,而直接决定地震影响系数的因素是货架的自震周期、场地类别、震源远近和地震烈度。

货架的自身结构特性决定其抗震性能的强弱,计算货架的地震反应时,首先要计算货架的自振周期。货架结构的基本自振周期

$$T_1 = 0.03H$$

式中 H —货架高度, m

地震影响系数可以通过下面 1 组公式计算:

当 $T_1 \leq 0.1 s$ 时, $\alpha_1 = (0.45 + 5.5T_1)\alpha_{\max}$

当 $0.1 < T_1 < T_g$ 时, $\alpha_1 = \alpha_{\max}$

当 $T_g < T_1 \leq 3 s$ 时, $\alpha_1 = \left(\frac{T_g}{T_1}\right)^{0.9} \alpha_{\max}$

其中, T_g 和 α_{\max} 是中间变量,其值见表 1 和表 2。

表 1 T_g s

远、近震	场 地 类 别			
	I	II	III	IV
近震	0.20	0.30	0.40	0.65
远震	0.25	0.40	0.55	0.85

表 2 水平地震影响系数的最大值 α_{\max}

烈度	6	7	8	9
α_{\max}	0.04	0.08	0.16	0.32

求解出地震影响系数后,可以进一步计算加载在货架结构上的载荷或载荷组合。

首先计算货架的重力载荷,包括货架的自重和加载到货架结构上的货物单元的重量。

《起重运输机械》 2009 (5)

$$G_E = \sum_{j=1}^n G_j$$

$$G_{eq} = 0.85G_E$$

其中货架结构第 j 层处的重力荷载代表值 G_j 取其自重的标准值和所有货物满载重量的 80%。

G_{eq} 表示货架结构的等效总重量。

加载在货架上的等效地震力

$$F_E = \alpha_1 G_{eq}$$

地震载荷组合

$$S = 0.9G_k + 1.4 \sum_{i=1,2} \psi_{Qi} Q_{ki} + 1.3F_E$$

式中 G_k ——重力载荷的标准值

Q_k ——活载荷的标准值

ψ_Q ——货架活载荷的组合值系数,按照实际情况考虑的货架各层活载荷,取 $\psi_Q = 1$;按照等效均布荷载考虑货架各层活载荷,取 $\psi_Q = 0.8$

F_E ——水平地震力作用的标准值

实际工程中,货架的货物堆码方式复杂多样,所以按照等效方式将货物堆码情况加以简化,因此,在实际计算中,取 $\psi_Q = 0.8$ 。

2.2 美国规范

在美国规范中,同样考虑将地震力当成基底剪力进行计算,基底剪力

$$V = C_s I_p W_s$$

式中 C_s ——地震灵敏度系数

I_p ——系统重要性系数,变化幅度 1.00 ~ 1.50;当系统为基础设备时, $I_p = 1.5$;当系统包含的部件一旦缺失,会产生重大危险时, $I_p = 1.5$;其他情况下, $I_p = 1.0$;对于设置在对公众开放地区的仓储式货架,如仓储式零售商场, $I_p = 1.5$,但计算时取 $I_p = 1.0$

$$W_s = (0.67 \times PLRF \times PL) + DL + 0.25 \times LL$$

$PLRF$ ——产品承载缩减量系数,地震力为 X 方向, $PLRF = 1.0$;地震力为 Y 方向, $PLRF = PL_{\text{平均}}/PL_{\text{最大}}$

$PL_{\text{平均}}$ ——在任一排(行)货架上产品最大总重量除以该排(行)货架层数

$PL_{最大}$ ——放在该排（行）任一层上产品的最大重量

PL ——加载在货架上的活载荷

DL ——静载荷

LL ——货架在运行时的动载荷

计算地震灵敏度系数 C_v 有 2 种不同的方法，本文介绍其中 1 种。

在计算货架结构的基础阶段，地震灵敏度系数

$$C_v = \frac{1.2C_v}{RT^{2/3}}$$

其中， C_v 为基于土壤剖面类型和 A_v 值求得的地震系数（见表 3）， A_v 可计算得出；对于高度超过 8 英尺（约 2.44 m）的货架结构，在被支撑的方向 $R=4.0$ ，在不被支撑的方向 $R=6.0$ ，在每一个考虑到的方向，货架结构基本周期 T 应采用合理实证分析（每层的地震力大小和位移在计算的初始阶段是没有的，也就是说，在 ANSI 标准中，货架的结构基本周期应该作为一个检验值来验证，而不是用于求解其他参数的桥梁，这是与中国的《钢货架结构设计规范》的很大的不同），根据支撑因素的结构性质和变形特征，予以确定。

表 3 地震系数 C_v

土壤类型	$A_v < 0.05$	$A_v < 0.05$	$A_v < 0.10$	$A_v < 0.20$	$A_v < 0.30$	$A_v < 0.40$
A	A_v	0.04	0.08	0.16	0.24	0.32
B	A_v	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
C	A_v	0.09	0.17	0.32	0.45	0.56
D	A_v	0.12	0.24	0.40	0.54	0.64
D	A_v	0.18	0.35	0.64	0.84	0.96

在 ANSI 标准中，可以使用 2 种计算方法考虑货架的载荷组合，1 种称为容许应力法，即 ASD 设计方法，另 1 种称为负荷系数及负荷和阻力系数设计法，即 LRFD 设计方法。规范中指出这 2 种方法均可作为计算载荷组合的方式，但是 2 种方法不能混用。

(1) LRFD 设计方法

载荷组合被分为 4 种形式，地震情况下的载荷组合为 $1.2DL + 1.5EL + 0.5LL + 0.85PL$ ，其中

DL 为静载荷； LL 为活载荷，不同于存储在货架上的托盘或货物； EL 为地震力； PL 为存储在货架上托盘或货物的最大载重。

(2) ASD 设计方法

考虑了 4 种载荷组合，地震工况下的载荷组合为 $DL + LL + EL + PL$ ，其中，各参数代表意义同上。不难看出，LRFD 方法将每种载荷组合中的各个分项因子都适当放大了，这种方式计算的载荷效应偏安全；ASD 设计方法中使用的均是各种载荷的标准值，计算的载荷组合值偏小，所以将这样的载荷组合加载到货架上后，需要采用较大的安全系数进行货架的安全性检验，从而决定货架是否满足强度设计值。

3 结论

中美 2 国的规范校核地震工况下的货架强度时整体思路相同，但也存在细微差异，这些差异的形成是由于 2 国的国情不同而造成的，在今后的学术发展中可以有所调整。

作者：王 慧

地址：北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学机械学院 637 号信箱

邮编：100083

收稿日期：2008-09-09

北京亚星航电子科技有限公司与 西班牙依托华有限公司合资

北京亚星航电子科技有限公司和西班牙依托华有限公司于近日成立合资公司，双方正式启动了中国生产基地，该基地位于北京市中关村科技园区，拥有现代化厂房和先进的检测、实验设施，产品将销往中国内地及亚洲各国。该公司引进了依托华公司的先进工业无线遥控器技术，全系列生产超载限制器、电子吊秤等工业无线遥控设备，并联合设计了新一代工业遥控器产品——灵智型自动变频遥控器。