

震害预测仿真系统研究(二) —结构仿真参数研究*

李 杰

(化工部抗震防灾研究室)

摘 要: 在文献[1]的基础上,本文首先论述了三类基本的仿真参数,然后,以底部剪力法和只考虑第一振型的振型反应谱方法为基本工具,推证了五种常见建(构)筑物的系统仿真参数。

关键词: 地震、灾害、仿真

中国图书分类号: TU352

文献[1]在总结了国内、外现有震害预测研究成果的基础上,提出了建立震害预测仿真系统的设想。实现这一设想的第一个工作是如何根据城市系统的现状,从历史震害中抽取仿真样本集合。这要求首先建立一些基本度量参数,进而通过参数集划分,建立起真实系统的仿真预测系统来,我们称这些刻画系统内部结构和背景特征的参数为仿真参数。

仿真系统是真实系统的一个缩影。从震害反应的角度分析,仿真系统与真实系统之间要求(1)地震背景相似,(2)场地条件相似,(3)结构类型相似。考虑到目前地震工程的研究现状,采用单一的地震动参数来刻画地震背景是难以反映结构物地震破坏的种种复杂原因的。因此,我们认为:对地震预测而言,宜于采用地震烈度作为刻画地震背景的基本仿真参数。当然,希望充分利用历史震害资料,也是这种观点的一个依据。场地条件相似,则宜于采用场地类别作为仿真参数,这种选择主要是基于历史震害资料和新的《工业与民用建筑抗震规范 GBJ11-89》[2]。结构类型的相似则包括两方面的含义,第一是结构分类相同。一般可划分为多层砖房、单层砼柱工业厂房、单层砖排架建筑、框架与内框架结构、烟囱等工业构筑物、平房等,其中,对多层砖房和框架结构又可根据用途及结构特点作进一步的分类划分。如多层砖房划分为住宅类、办公楼、空旷类,框架结构划分为多层工业厂房、民用建筑等类别。第二,是同类结构的结构仿真参数的频次分布律相同,即两系统中同类建筑中不同抗震强度等级的比例基本保持不变。

地震烈度参数、场地类别参数、结构特征参数反映了影响结构震害的主要因素,可以推论,对于仿真参数集合相同的两个系统其震害分布规律也应该是相似的。在三类基本参数中,前两类参数属于背景特征参数,在实际应用中不难确立。因此,本文着重讨论结构

* 收稿日期: 1990.12.22

特征参数的导出问题。

1 结构仿真参数研究

在对结构形式做出了上述分类考虑之后,结构仿真参数的选取需考虑的基本因素是结构的基本尺寸和结构的抗震强度。即:结构仿真参数的选取原则是,既能反映结构的主要尺寸,又能反映结构的基本抗震强度,显然,这一基本参数只能利用地震工程的理论途径来寻取。众所周知,就基本的结构动力分析方法而言,主要有振型组合法、数值积分法、频域分析法。实际设计中则大量应用振型反应谱方法及其最简形式:底部剪力法。注意到我们的目的仅仅在于建立一种联系真实系统和仿真系统中结构的对应关系,因此,没有必要有意采取复杂的动力分析形式。对结构仿真参数而言,我们只要求它能基本正确地反映结构的最弱抗震强度,从这一角度出发,我们认为底部剪力法或仅考虑第一振型的振型反应谱方法比较适合于帮助我们推导出结构仿真参数。又由于底部剪力法中等效质量的计算牵涉到的常数对不同结构不同,因而易于造成误解,且涉及的顶部附加地震力也容易在真实系统与仿真系统中造成差异,故而,对多层结构我们采用仅考虑第一振型的振型反应谱方法来导出上述参数。而对单层结构则直接引用底部剪力法。这种推导的基本思路是把地震力分布与结构强度联系起来,然后从中分离出与地震力大小无关,只反映结构基本抗震强度的表达式,并定义这类表达式为各类结构的结构仿真参数。以下即具体导出主要类型结构的结构仿真参数。

1.1 多层砖房。

通常将一般多层砖房视为一个多质点体系,各质点集中于楼板高度处,仅考虑第一振型时,第*i*质点的地震力为:

$$F_i = \alpha_1 \gamma_1 \cdot x_{i1} W_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:

α_1 为相应于结构第一周期的地震影响系数;

W_i 为各质点集中质量的重量;

x_{i1} 为相应于第一振型*i*质点水平相对位移;

γ_1 为第一振型的振型参与系数。

对于以剪切变形为主的结构,其第一振型可取与质点高度成比例的直线(图1),即:

$$x_{i1} = \eta H_i \quad (2)$$

其中 η 为比例常数, H_i 为*i*质点高度。

因此有:

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \eta \cdot H_i G_i}{\sum_{i=1}^n \eta^2 \cdot H_i^2 G_i} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i}{\eta \sum_{i=1}^n W_i H_i^2} \quad (3)$$

以上述式代入式(1)有:

$$F_i = \alpha_1 W_i H_i \frac{\sum_{j=1}^n W_j H_j}{\sum_{j=1}^n W_j H_j^2} \quad (4)$$

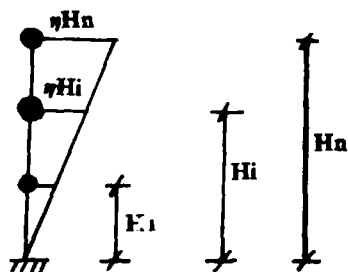


图1

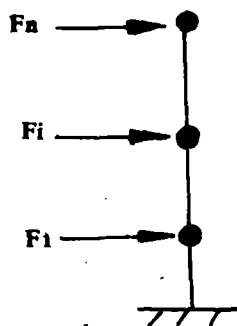


图2

按图2质点顺序, 容易算得第S层承受的剪力为:

$$V_s = \alpha_1 \frac{\sum_{i=1}^s W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i^2} \sum_{i=1}^s W_i H_i \quad (5)$$

上式应小于或等于该层的实有抗剪强度, 即应有:

$$V_s \leq \frac{\tau_s A_s}{\xi} \quad (6)$$

式中: ξ 为剪应力不均匀系数。

A_s 为所有有效抗震墙体截面积, 可取为纵横抗震墙净截面积之和。

τ_s 为砌体抗剪强度, 可取为:

$$\tau_s = 0.7(R_j + 0.7\sigma_0) \quad (7)$$

其中: R_j 为砂浆抗剪强度, σ_0 为墙体平均正应力。

(5) 式代入 (6) 有:

$$\alpha_1 \leq \frac{\tau_s A_s}{\xi} \frac{\sum_{i=1}^s W_i H_i^2}{\sum_{i=1}^s W_i H_i \sum_{j=s}^n W_j H_j} \quad (8)$$

记:

$$\lambda_{ds} = \frac{\tau_s A_s}{\xi} \cdot \frac{\sum_{i=1}^s W_i H_i^2}{\sum_{i=1}^s W_i H_i \sum_{j=s}^n W_j H_j} \quad (9)$$

则 λ_{ds} 反映了多层砖房第 S 层的基本抗震强度, 而与地震动大小无关。当 $\lambda_{ds} \geq \alpha_1$ 时,

第S层结构不会破坏, 当 $\lambda_{ds} \leq \alpha_1$ 时结构将产生破坏。进一步, 由于选取参数的目的在于结构仿真, 而非抗震计算, 因此, 其中统一的常系数可以去除, 即取:

$$\lambda_{ds} = \tau_s A_s \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i^2}{\sum_{i=1}^n W_i H_i \sum_{j=1}^n W_j H_j} \quad (10)$$

多层砖房破坏将首先发生于薄弱层, 所以我们取结构仿真特征参数

$$\lambda_d = \min(\lambda_{d1}, \lambda_{d2} \cdots \lambda_{dn}) \quad (11)$$

我们认为, 采用这种意义上的结构仿真参数, 既反映了影响结构震害的主导因素, 又扩大了震害经验的使用范围。可以推论, 对于 λ_d 相近的两个结构, 在相同的场地条件和相同的地震力作用下其震害不应有太大的差别。而对于 λ_d 频数分布相同的两个集合, 在场地条件和地震背景相同的条件下, 从统计规律上, 则应当属于同一个总体分布。

为了简化(10)式的计算工作量, 根据文献[3]提供的数据, 常见多层砖房按层集中质量的相应重量可统一表示为:

$$W_i = [(\alpha H_i + \beta) \frac{A_i}{F} + \gamma] F \quad (12)$$

其中: F 为楼层总面积, A_i 为第 i 层墙体净截面积; α 、 β 、 γ 为常系数, 常见结构的取值标准见表1。

表1:

类 型	α	β	γ	备注
住宅.办公楼.医院.楼层重	2094	-12	618	
教室.实验室.会议室.楼层重	2152	-20	611	
屋 顶 层	1084	-35	566	

在式(10)的支持下, 计算 λ_{ds} 只要知道层高、面积率、砂浆强度等级、层数等基本数据, 这无论是在震害资料和现存结构中都是容易取得的。

1.2 单层工业厂房

文献[4]在分析单层砼柱工业厂房时, 曾提出用三个基本系统来描述此类结构震害, 其震害指数预测公式形式表明, 其中最主要的因素是厂房排架柱的受弯指数。我们在选取单层砼柱厂房的结构特征参数时, 对该文的主要参数进行了进一步的分析。分析中发现, 围护系统中的墙高指数可以并入柱受弯指数的考虑之中去, 因此, 我们主要以排架柱受弯导出结构仿真参数。

采用底部剪力法, 单自由度体系的地震作用力

$$F = \alpha_1 W \quad (13)$$

排架柱中最大地震力为:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{F \cdot H_i \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{6\alpha_1 WH_i}{bh^2} \quad (14)$$

式中: H_i 为计算截面距柱顶高度, b 为排架柱宽, h 为排架柱高

设排架柱砼的抗压强度为 f_c^o , 则砼柱截面边沿抗裂度可表示为:

$$\sigma_c = k \cdot f_c^o \quad (15)$$

由结构破坏条件, $\sigma \leq \sigma_c$ 可给出:

$$\alpha_1 \leq k f_c^o \frac{bh^2}{bWH_i} \quad (16)$$

$$\text{取: } \lambda_a = \frac{k f_c^o bh^2}{bWH_i} \quad (17)$$

则 λ_a 反映了排架结构的抗震能力, 当 $\lambda_a \geq \alpha_1$ 时, 排架结构不产生破坏, 而当 $\lambda_a < \alpha_1$ 时, 排架结构将发生破坏. 从另一角度, 用仿真观点看, 仿真样本和真实系统按同一模式计算, 因此, 常系数不影响仿真, 故可以将其略去. 并且, 结构仿真参数的目的在于建立起仿真系统与真实系统的结构对应关系, 因此, 可以对排架体系统一取 H_i 为柱高, 这样, 即可同时考虑围护系统. 基于上述考虑, 我们取:

$$\lambda_c = \frac{f_c^o bh^2}{WH} \quad (18)$$

为单层砼柱工业厂房的结构仿真参数.

1.3 单层砖排架

单层砖排架既具有砖房的震害特点, 又具有排架结构的特点, 我们仍遵循前述的基本思想建立结构仿真参数. 砖排架结构, 其屋项一般为柔性结构形式, 结构整体空间作用较弱, 并且, 即使考虑空间作用, 最终结果也因空间作用系数为常数而可以略去, 所以, 我们取一个排架单元进行分析:

排架单元截面积.

$$A = 2[bh + (l - b)t] \quad (19)$$

式中: b 为排架柱宽, h 为排架柱高, l 为排架柱间距, t 为墙体厚度, 按底部剪力法, 单元内平均剪应力

$$\tau = \xi \frac{F}{A} = \xi \frac{a_1 W}{A} \quad (20)$$

由 $\tau \leq \tau_s$ 有:

$$a_1 \leq \frac{\tau_s A}{\xi W} = \frac{2\tau_s [bh + (l - b)t]}{\xi W} \quad (21)$$

取:

$$\lambda_b = \frac{\tau_s [bh + (1-b)t]}{W} \quad (22)$$

为砖排架结构的结构仿真系统, 此参数反映了砖排架结构的基本抗震能力。

式 (22) 中的 W 可取为 (12) 中的基本形式。在计算中, 可将两端横墙平均分配于各排架计算 W 值, 这样在 λ_b 中便同时反映了墙高、抗震横墙、跨度等因素的影响。

1.4 框架结构。

以多自由度体系来模拟框架结构, 且将同一层框架柱集中为一根等效柱, 则按只考虑第一振型的振型反应谱方法, 有各质点处的水平地震作用如前述式 (4), 第 S 层的层间剪力 Q_s 如前述式 (5)

考虑到震害预测的特点, 框架类结构层间屈服强度的计算, 可以统一按弱框型计算^[5], 并可假定柱上、下端弯矩相等, 如此, 则单根柱的屈服强度为:

$$Q_y = 2M_y / H = 2\zeta / f_{mc}^o bh^2 / H \quad (23)$$

式中: H 为柱高, ζ 为与配筋率大小有关的系数, b 为框架柱宽, h 为框架柱高。

假定同一层柱砼标号相同, 柱尺寸相同, 则第 S 层的层间屈服强度

$$Q_{ys} = 2\zeta f_{mc}^o A_s h_s / H_s \quad (24)$$

式中: $A_s = \sum_{i=1}^m b_i h_i$, m 为柱数量, 即 A_s 为同一层柱面积之和。由 $Q_s \leq Q_{ys}$ 得出:

$$a_1 \leq \frac{2\zeta f_{mc}^o A_s h_s}{H_s} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i^2}{\sum_{i=1}^n W_i H_i \sum_{j=1}^n W_j H_j} \quad (25)$$

令:

$$\lambda_{ks} = \frac{\zeta f_{mc}^o A_s h_s}{H_s} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i^2}{\sum_{i=1}^n W_i H_i \sum_{j=1}^n W_j H_j} \quad (26)$$

则 λ_{ks} 表示了第 S 层的基本抗震强度, λ_{ks} 越高, 则结构的抗震能力越好, 同时, λ_{ks} 也表示了结构的基本尺寸特征。当对常数配筋率取平均值时, ζ 值为一定值, 因此, 计算中亦可以将其略去。

$$\text{取 } \lambda_k = \min(\lambda_{k1}, \lambda_{k2}, \dots, \lambda_{kn}) \quad (27)$$

为框架结构的结构仿真参数, 当条件允许时, 可以进一步取纵、横墙两方向上的 λ_k 最小值为 λ_k 。

根据文献 [5] 的建议, 结构各层重可以按以下简化方式计算: 有填充墙框架, 各层重量取 14KN/m^2 , 空框架取 10KN/m^2 。且当楼面实际活荷载大于 2KN/m^2 时, 可按下式换算:

$$G_m = G_c + (G_l - 0.2) * 0.7 \quad (28)$$

式中: G_m 为每平方米的荷重, G_e 为按上述规定取值的楼面平均荷重, G_l 为实际荷重.

1.5 烟囱.

烟囱的特点是要考虑高振型影响和竖向地震应力的影响, 但作为基本抗震强度评定, 我们仍采用底部剪力法导出其结构仿真系数. 考虑为单质点系, 质点地震作用

$$F = \alpha_1 W = \alpha_1 \beta \pi d t H \omega \quad (29)$$

式中: β 为常数, d 为烟囱半高处的直径, t 为烟囱平均厚度, ω 为材料平均容重, H 为总高度

$$\text{烟囱中最大应力} \quad \sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{F \cdot H \cdot d / 2}{\pi d^3 t / 64} = \frac{32 \alpha_1 \beta H^2 \omega}{d} \quad (30)$$

$$\text{允许应力取为砂浆强度等级 } R \text{ 的比例值} \quad \sigma_c = k \cdot R \quad (31)$$

则由 $\sigma \leq \sigma_c$ 给出

$$\alpha_1 \leq \frac{k R_d}{32 \beta H^2 \omega} \quad (32)$$

$$\text{于是, 可令} \quad \lambda_y = \frac{R d}{H^2 \omega} \quad (33)$$

为烟囱的结构仿真参数.

在地震烈度、场地条件、结构强度等仿真参数的支持下, 真实系统和仿真系统可以分别描述为:

$$S = S(\lambda_1, \lambda_u, \lambda_d, \lambda_o, \lambda_b, \lambda_k, \lambda_y, \dots) \quad (34)$$

$$SS = SS(\lambda_1, \lambda_u, \lambda_d, \lambda_c, \lambda_b, \lambda_k, \lambda_y, \dots) \quad (35)$$

分析上述结构仿真参数, 可以看到这样一个事实, 实际上是以结构仿真参数代替了原结构, 或者说, 这儿取用了概念结构做为考虑的对象. 以多层砖房为例, λ_d 相等的实际结构, 可能有结构尺寸上的差异、层数上的差异, 材料强度上的差异, 但所有这些差异的综合, 归一于同一概念结构: 具有以 λ_d 为基本抗震强度的结构. 结构仿真参数的这种特点, 使由真实系统建立仿真系统的过程中避免了因分类过细而造成组合爆炸的危险, 使得有可能由有限的震害资料建立不同类型的仿真系统成为可能. 换句话说, 扩大了震害资料的使用范围. 同时, 还可能注意到, 由于 λ 相等的实际结构可能有各方面的差异, 其破坏方式与破坏形态可能会有较大的差异. 但是, 对于 λ 分布频数相同的两个集合, 在地震动参数一致, 场地条件相同的前提下, 其破坏的总体分布又应该是基本相同的. 这一点, 是由问题的客观背景所决定的. 建立仿真系统的目的, 正在于利用这种总体分布相同的规律, 而不在于真实系统与仿真系统的集合无素之间建立一一对应的联系. 这一思想, 是指导仿真系统应用的基本原则.

2 结 语

通过结构仿真参数的研究,我们建立了刻画系统内部结构特征的基本工具。仿真系统的建立,即是按地震烈度相同,场地条件相近,结构参数频次分布相等的原则,根据真实系统的特征,从震害资料中抽取的。这些基本限定,可称之为仿真条件或仿真三原则。然而,按这三条原则直接从震害中抽取的震害资料,还只能构成拟仿真系统。仿真系统则要根据城市的设防与加固因素,对拟仿真系统进行修正来得到。有关这方面论述,请参见后续研究文章。

参 考 文 献

- (1) 李杰. 震害预测仿真系统研究(一)—仿真预测的基本思想. 郑州工学院学报. 1991年第1期
- (2) 工业与民用建筑抗震规范GBJ11-89(送审稿)
- (3) 许期光. 多层砖混结构房屋地震荷载的简化计算. 工程抗震. 1986年第4期
- (4) 尹之潜等. 单层工业厂房震害估计方法. 地震工程与工程与工程振动. 1987年第4期
- (5) 高小旺等. 钢筋砼框架房屋的震害预测方法. 建筑科学. 1989年第1期

Research on the Simulation System of Earthquake Disaster Prediction (II)—Structural Simulation Parameters

Li Jie

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: This paper discussed three types of basic simulation parameters. Applying the base-shear method and the model response spectrum method, We have proposed five types of structural simulation parameters for some common buildings or structures.

Keywords: Earthquake, disaster simulation.