

文章编号: 1000-6869(2006)02-0040-07

抗震设计中的平扭耦联问题

扶长生

(上海长福工程结构设计事务所, 上海 200011)

摘要: 偏心率、周期比(结构扭转为主的第 1 自振周期与平动为主的第 1 自振周期之比)和位移比(楼层最大水平位移(层间位移)与该楼层两端水平位移(层间位移)平均值之比)是平扭耦联问题中的三个关键参数。中美两国规范都把位移比大于 1.2 定义成平面不规则中的扭转不规则。但是,两国规范控制扭转效应的侧重点有所不同。美国规范不控制周期比,它对每层的动扭矩作了放大,以考虑扭转不规则对构件内力的影响,强调结构的地震反应和构件的内力;我国规范提出周期比不大于 0.85~0.90 的限值要求,强调结构的自振特性。本文详细地叙述了结构工程师关心的刚心和质心的定义和计算机求解方法,综合结构的自振特性和地震反应,以周期比、第 1 振型中的扭平分量比和位移比为控制指标,提出了结构动力规则性概念。明确指出结构的扭转不仅仅是几何规则性问题,本质上它更是一个动力规则性问题。结构可以是几何不规则的,但结构工程师要努力做到结构的动力特性是规则的。文中还列出了实现结构动力规则性的 9 条途径。同时建议规范在今后的修订中增设动力规则性的有关条款。

关键词: 抗震设计; 平扭耦联; 动力规则性

中图分类号: TU318.1 **文献标识码:** A

Seismic design of torsionally coupled buildings

FU Changsheng

(Shanghai CHINAFU Structural Design Inc., Shanghai 200011, China)

Abstract: With regard to the design of torsionally coupled buildings, the three key parameters are eccentricity, ratio of the uncoupled torsional period to the uncoupled lateral period and ratio of the maximum story drift to the average of the story drifts. Both American and Chinese codes define that the torsional irregularity shall be considered to exist when the maximum story drift is more than 1.2 times the average of the story drifts at the two ends of a building structure. However, there exists a difference between the codes when dealing with design and analysis of a torsionally irregular building. In IBC a torsional amplification factor, A_x , is required to account for the effects of torsional irregularity in calculating internal forces of the elements. In GB 50011—2001, however, the ratio of periods is required to be no more than 0.85–0.90 in modal analysis. This paper explains in detail the definition of mass center and rigidity center, and how to evaluate them by computer. It proposes a concept of dynamic regularity of a building structure in terms of the ratio of periods, the ratio of the maximum story drift to the average of the story drifts and the torsional content in the fundamental modal shape. The characteristics of torsional regularity of a structure are to be expressed not only in geometrical terms, but also in essence of dynamic. A structure could be irregular in geometry. The structural engineers, however, shall design the building to be dynamically regular. Several ways are presented in the paper on how to design and proportion a structure dynamically regular. The author also suggests that new provisions regarding structural dynamic regularity would be included in the current design code.

Keywords: seismic design; coupling of translational and torsional vibration; dynamic regularity

作者简介: 扶长生(1944—),男,上海人,教授级高工,上海长福工程结构设计事务所董事长。

收稿日期: 2005 年 9 月

1 平扭耦联的研究历史及现状

在水平力作用下高层建筑平扭耦联的力学特性—

直受到学者们的关注。早在上世纪 30 年代 Ayre 在美国地震协会通报中就提出了结构刚心和质心的概念。在研究了平扭耦联系统的自由振动后,提出了平扭振动的解耦条件,且用试验结果作了验证^[1]。50 年代以后,高层钢筋混凝土结构蓬勃发展。现浇钢筋混凝土楼板具有平面内几乎接近无限刚的物理力学性能,使平扭耦联对结构构件内力的影响显得更为突出。1951 年, Lin 利用结构刚心和质心的概念,第一次提出了刚心分析法,分析了平扭耦联对边缘柱、墙等抗侧力构件内力的影响^[2]。刚心分析法的基本假定有以下两条:(1)现浇钢筋混凝土楼板在自身平面内是无限刚性的,出平面外是无限柔性的。(2)刚心定义为在水平力作用下楼层平面仅仅发生平动而不发生转动的力的作用点,且刚心和结构的刚度中心及扭转中心重合。

这两条基本假定一直沿用至今。随着抗震理论的不不断发展和振型分解反应谱法的不断完善,刚心分析法和反应谱法结合,对于平扭耦联系统的研究重点逐渐倾向于它的动力特性和地震反应^[3~5]。研究平扭耦联系统地震反应的基本力学模型如图 1 所示。它是一个单层的偏心系统,刚性楼板假定,具有一个对称轴。其中 CM 为质心, CR 为刚心。质心和刚心都处在 x 对称轴上,它们之间的距离 e 为偏心距。坐标原点设在刚心。在地震作用下,沿 y 方向产生的水平位移为 y , 绕 z 轴旋转的转角为 θ 。当略去阻尼力,分别取 $\Sigma y = 0$ 和 $\Sigma M_z = 0$, 得

$$m [\ddot{y}(t) + \ddot{y}_g(t) + e\ddot{\theta}(t)] + k_y y(t) = 0 \quad (1)$$

$$me [\ddot{y}(t) + \ddot{y}_g(t) + e\ddot{\theta}(t)] + m\rho^2 \ddot{\theta}(t) + k_\theta \theta(t) = 0 \quad (2)$$

令 $\Omega^2 = \lambda_\theta/\lambda_y, \lambda = \omega^2$ 。其中, $\sqrt{\lambda_\theta} = \sqrt{k_\theta/m\rho^2}$, 表示对应的非耦联系统的扭转频率, $\sqrt{\lambda_y} = \sqrt{k_y/m}$, 表示对应的非耦联系统的平动频率, Ω 表示扭转频率与平

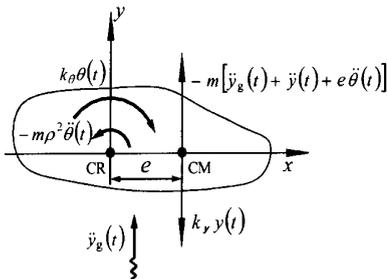


图 1 平扭耦联系统基本力学模型
Fig.1 Plan view of single mass model

动频率之比, ρ 为回转半径, k_y 为结构的抗侧刚度, k_θ 为结构的抗扭刚度。把上述变换代入式(1)和式(2), 且作变量代换, $\Theta = \Omega\rho\theta$, 写成矩阵的形式, 系统的控制运动方程为

$$\begin{bmatrix} \Omega^2 & \Omega e^* \\ \Omega e^* & (1 + e^{*2}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}(t) + \dot{y}_g(t) \\ \dot{\Theta}(t) \end{Bmatrix} + \lambda_\theta \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y(t) \\ \Theta(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

其中, $e^* = e/\rho$ 为系统的偏心率, 用振型分解反应谱法求解式(3), 可以得到平扭耦联系统在地震作用下的基本动力特性如下:

(1)当扭转周期和平动基本周期之比 T_t/T_1 (以下简称扭平周期比或周期比, 为 Ω 的倒数), 接近于 1 时, 即使是几乎对称的结构在地震作用下也会表现出严重的平扭动耦联。

(2)结构承受的动扭矩会超过水平剪力和结构偏心距之乘积。当扭平周期比接近于 1 时, 动扭矩会成倍地增加。

(3)平扭动的耦联会放大结构的地震反应, 对结构边缘构件的内力会产生实质性的影响, 造成边缘抗侧力构件较快地进入扭剪破坏状态。

简单地说, 当反映结构自振特性的扭平周期比等于或接近 1 时, 扭转效应就会剧烈地放大。震害调查也表明了, 由于扭转效应, 地震波的能量主要累积在边缘构件之中, 使边缘抗侧力构件较快地进入破坏状态, 以致发生局部倒塌。这些现象是结构工程师所不愿意看到的。上述研究成果大都已经体现在各主要地震国家的抗震规范有关偏心和扭转的条款之中。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001) (以下简称抗震规范) 和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002) (以下简称高规) 对扭转不规则、扭平周期比以及偶然偏心距等等也都作了详细的规定。

然而, 对于抗震设计中的平扭耦联问题, 在多、高层建筑中刚心的定义和位置的确定, 平扭振型的耦联程度及扭转不规则的意义和本质等方面尚有许多值得探讨之处。本文首先叙述质心、刚心的概念以及计算机求解公式。然后, 对规范中有关扭转的条款展开一些讨论, 提出结构动力规则性概念, 列出实现动力规则性的途径。最后给出一个工程实例, 供结构工程师参考。

2 质心 (Mass center) 和刚心 (Rigidity center)

质心为垂直荷载合力的作用点。它的确切定义是,各层的质心是所在层的竖向构件中轴向力的合力作用点。质心的坐标可用式(4)确定。

$$X_m = \Sigma(NX)/\Sigma N \quad Y_m = \Sigma(NY)/\Sigma N \quad (4)$$

其中, N 是竖向构件中的轴力, X, Y 是对应的坐标。 Σ 是本层的竖向构件求和。式(4)表明了第 i 层的质心位置不仅与本层的质量分布有关,而且与本层及其以上所有层的质量分布有关。这就是累积质量中心的概念。

刚心的严格定义是沿高度按层同时作用一组水平力,使结构在整体上只发生平动而不发生转动,按层分布的这组力的作用点。已经证明,对于一个单层结构,在刚性楼板的假定下,其刚心和刚度中心(Stiffness center),剪切中心(Shear center)和扭转中心(Twist center)是一致的。但是,对于一个二层及二层以上的结构,却无法证明刚心一定和扭转中心重合^[6]。考虑一个二层以上的结构,每层受到一个扭矩 T 和一个作用线通过刚心的水平力 F 作用。当加荷顺序是先施加一组水平力 $\{F\}$, 两块刚性楼板将发生平移 $\{\delta\}$, 而不发生扭转。其次施加一组扭矩 $\{T\}$, 结构将绕扭转中心转动 $\{\theta\}$ 。假定刚心和扭矩中心不重合,荷载矢量 $\{F\}$ 和扭矩矢量 $\{T\}$ 所做的总功为

$$W = 1/2\{F\}^T\{\delta\} + 1/2\{T\}^T\{\theta\} + \{F\}^T([X_R] - [X_T])\{\theta\} \quad (5)$$

式中, $[X_R]$ 和 $[X_T]$ 是对角矩阵,分别表示刚心和扭转中心的位置。当加荷顺序是先施加一组扭矩 $\{T\}$, 其次施加一组水平力 $\{F\}$, 扭矩矢量 $\{T\}$ 和荷载矢量 $\{F\}$ 所做的总功为

$$W = 1/2\{T\}^T\{\theta\} + 1/2\{F\}^T\{\delta\} \quad (6)$$

根据功的互等原理,有

$$\{F\}^T([X_R] - [X_T])\{\theta\} = 0 \quad (7)$$

若 $[X_R] - [X_T] = 0$, 刚心和扭转中心重合。很明显,这仅仅是式(7)的一个特解,而不是必要条件。

水平力沿高度分布的形式不同,得到的刚心位置都有可能是不相同的。更进一步,考察一个剪力墙不对称布置的框架-剪力墙结构。剪力墙和框架之间承受水平荷载的比例沿高度方向会发生变化。因此,尽

管每层的层高相同,结构布置相同,墙、柱、梁断面尺寸相同,但每一层刚心的位置也可以是不完全相同的^[7]。因此,确定多、高层建筑刚心的位置并不容易。

目前在抗震设计中,对结构刚心的确定有两种方法。方法1是把多、高层建筑当作是单层建筑的简单叠加,略去本层与上下各层之间的相互影响。方法2是对结构刚心的定义作出一些放松,即分层确定各层的刚心。结构第 i 层刚心的定义是,在刚性楼板的假定下当结构仅在第 i 层受到水平力作用,仅第 i 层不发生转动只发生平动而允许其它层同时发生转动及平动力的作用点。可以证明,按照放松定义求得的刚心位置和扭转中心是一致的,且具有唯一性。事实上,应用子结构概念分别把第 i 层以上和第 i 层以下的各层考虑为两个子结构进行节点凝聚,第 i 层就成为了一个带凝聚节点的单层结构。在程序中,第 i 层刚心的确定是按放松定义的要求,用下面的方法来实现的。设荷载工况1, $F_x = 1$, 荷载工况2, $F_y = 1$, 荷载工况3, $M_z = 1$, 分别作用于第 i 层的质心(或任意点),如图2所示。它们在第 i 层引起的转动分别为 θ_{xy}, θ_{yx} 和 θ_z 。刚心相对于质心(或任意点)的坐标 (X_R, Y_R) 为: $X_R = -\theta_{xy}/\theta_z, Y_R = \theta_{yx}/\theta_z$ ^[8]。根据上述放松定义确定的刚心,仅与结构的特性有关,而与荷载的性质无关。显然,方法2的模型比方法1更接近实际受力状况。采用方法2确定的层刚心和上述的累积质量中心之间的距离,即层偏心距,作为评估结构的扭转效应的几何参数显得更为合理。尽管在精确三维有限元分析中并不要求直接求出刚心和质心的位置,但是在程序的输出文件中还是给出了它们的位置和偏心率,以供结构工程师在评估和优化结构设计方案时参考。

3 中美规范中的扭转条文

我国2001年颁布的抗震规范属于基于承载力和构造保证延性抗震设计要求的范畴^[10]。规范以可靠

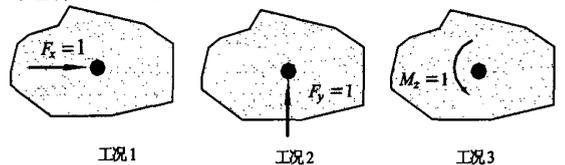


图2 求解刚心的三种荷载工况

Fig.2 Three load cases used to determine the center of rigidity

度理论为基础,以地震重现周期为设防目标提出了小震不坏、中震可修、大震不倒的三个概率水准。同时提出了弹性阶段承载力设计和弹塑性阶段变形验算的二阶段设计理论。规范吸收了延性设计的核心思想,明确了强柱弱梁、强剪弱弯和强节点等构造措施。同时,抗震规范还新增增加了对结构规则性的定量描述,规定了限值指标,第一次引入了扭转不规则的概念。抗震规范第 3.4.2 条规定,楼层的最大弹性水平位移(或层间位移),大于该楼层两端弹性水平位移(或层间位移)平均值的 1.2 倍属扭转不规则。第 3.4.3 条又规定,扭转不规则时,应计及扭转影响,且楼层竖向构件最大的弹性水平位移和层间位移分别不宜大于楼层两端弹性水平位移和层间位移平均值的 1.5 倍^[10]。2002 年颁布的高规对扭转的规定更为明确和严格。高规第 3.3.3 条明确规定,计算单向地震作用时应考虑偶然偏心的影响,每层质心沿垂直于地震作用方向的偏移值可按该层沿垂直于地震作用方向的建筑物总长度的 $\pm 5\%$ 采用。高规第 4.3.5 条规定,在考虑偶然偏心影响的地震作用下,楼层竖向构件的最大水平位移和层间位移,A 级高度高层建筑不宜大于该楼层平均值的 1.2 倍,不应大于该楼层平均值的 1.5 倍;B 级高度高层建筑、混合结构高层建筑及规程第 10 章所指的复杂高层建筑不宜大于该楼层平均值的 1.2 倍,不应大于该楼层平均值的 1.4 倍。结构扭转为主的第 1 自振周期 T_1 与平动为主的第 1 自振周期 T_1 之比(以下简称扭平周期比),A 级高度高层建筑不应大于 0.9,B 级高度高层建筑、混合结构高层建筑及规程第 10 章所指的复杂高层建筑不应大于 0.85^[11]。2005 年上海市颁布的《超限高层建筑工程抗震设计指南》中也作出了相应的规定^[12]。

我国规范对扭转不规则的判别与美国 IBC 基本上是协调的。IBC 第 1616.5 条中表 1616.5.1 规定,采用刚性楼板计入偶然偏心的影响,当楼层的最大弹性层间位移,大于该楼层两端弹性层间位移平均值的 1.2 倍,属扭转不规则。大于 1.4 倍时,属扭转特别不规则。对于偶然偏心的偏移值,IBC 的规定和我国高规是相同的^[13]。我国规范与 IBC 的不同之处是:

(1) IBC 没有对扭平周期比有所限制。

(2) IBC 对每层的动扭矩作了放大。我国规范仅仅规定了估计水平地震作用的扭转影响,按平扭耦联振型分析反应谱法时,应采用 CQC 法进行振型组合。

IBC 中的扭矩放大系数 A_x 定义为

$$A_x = (\delta_{\max}/1.2\delta_{\text{avg}})^2 \leq 3 \quad (8)$$

由此可见,中美规范对扭转效应控制的侧重点有所不同。我国规范的控制重点是结构的自振特性,而美国规范控制的重点是结构的地震反应和构件内力。

作者认为,经过几代学者们的努力,我国现行抗震规范和高规是具有世界先进水平的。高规对扭平周期比的规定不仅十分必要,而且是具有开创意义的。限制结构的扭平周期比符合研究成果,避免由于扭平周期过分接近而引起严重的平扭耦联,造成动扭矩的成倍放大。而且更重要的是要求结构工程师在初步设计阶段,首先要把握住结构的自振特性。这一点是非常重要的。中外学者的研究表明,对于偏心率小于 0.05 的结构,在扭平周期比等于 1 的附近,动扭矩的放大曲线相当敏感。当扭平周期比小于 0.75 时,曲线才趋向于平稳^[3~5,14]。因此,规范对 A 级高层建筑的扭平周期比限值规定为 0.9 似乎有一些放松。建议对 A 级高层建筑的扭平周期比限值规定为不宜大于 0.85,不应大于 0.90。事实上经过两年多时间的实践和经验的积累,设计中实现扭平周期比不大于限值 0.85 并不是很困难。

其次,刚性楼板的假定是合理的。我国规范应该予以明确。这一方面是扭转理论的需要;另一方面,判别扭转不规则的目的是使结构工程师对结构的整体抗扭能力作出一个合理的判断。弹性楼板的计算模型有时会由于局部变形而影响扭转变形指标,甚至会影响结构的自振特性,改变平动振型和扭转振型的次序。但是,对平面凹凸特别不规则、开通天大凹槽的结构或者采用刚性连接、平面形状呈哑铃式的连体结构,全刚性楼板假定是不能成立的。对此类结构,作者建议要采用分块刚性的计算模型,分别计算最大位移比。分块刚性模型把一个楼层平面模拟成为用弹性楼板连接的两块或若干块刚性隔板。它们有各自的质心和刚心。在连接板的协调下刚性隔板分别绕各自的刚心扭转。两块刚性隔板的示意图见图 3 所示,其中上标 1 和 2 分别表示刚性隔板的编号。刚性隔板间的位移差和扭转差对弹性楼板中平面剪应力的放大效应可以得到充分的反映。

4 动力规则性

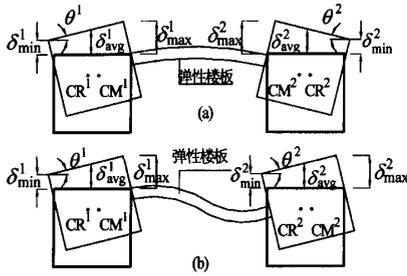


图3 分块刚性模型位移比示意图

Fig.3 Sketch of two separated diaphragms model

如上所述,我国规范对扭平周期比作出了限制。这就要求结构工程师在初步设计阶段,首先要把握住结构的自振特性。由于建筑的创新,结构可以是几何不规则的。但是抗震设计是一门艺术,它应用力学性质只能估计的建筑材料,建造只能作近似分析的结构物来抵抗具有许多不确定因素的地震作用。因此,结构工程师要努力做到结构的动力特性是规则的,使结构具有良好的抗震性能,避免设计动力特性为特别不规则的结构。对动力特性严重不规则的结构方案,一般不予采用。本文提出,用扭平周期比,第1振型中的扭转成分 P_1 (以下称扭平分量比)和最大位移比等三个方面作为判别结构动力规则性的依据。表1中的限值是根据作者的设计经验提出的参考数字,仅供讨论。

表中的扭平周期比和(第1振型中的)扭平分量比是结构自振特性的反映。其中扭平分量比,规范对此尚未进行控制。按照目前一般的理解,只要振型中的扭转成分不超过50%,就认为它仍是平动振型。这种规定过于粗糙。其实在工程实例中,当第1振型中的扭转成分超过10%时,结构往往会出现较大的扭转效应。而且,第1振型对结构反应的贡献最大。结构工程师应该避免把计算中未考虑的,事实上存在于地震波中的扭转分量在第1振型中得到放大。同时还要避免把结构的平面不规则和竖向不规则所引起的扭转不规则在第1振型中得到放大。因此,建议规范对此要

加以限制。在实际工程的初步设计阶段,当扭平周期比和扭平分量比不满足表1中动力规则性的要求时,不论最大位移比是多少,结构工程师首先要做的是尽量地调整结构布置。对于动力特性特别不规则的结构,不论它的几何规则性如何,都应该作为超限高层建筑进行抗震专项审查。对于动力特性严重不规则的结构方案,一般不予采用。当有特殊要求时,其抗震性能要进行专门的研究^[14]。

实现结构动力规则性的途径,可以大致归纳为以下9个方面。

(1)注意结构布置的对称性和均匀性,控制结构的偏心率。当偏心率足够小时,结构通常有清晰的平动主振型和清晰的扭转主振型,比较容易满足扭平分量比的要求。日本规范规定,对于偏心率大于15%的结构,都要进行弹塑性分析。

(2)注意抗侧力构件转换引起结构的不对称和刚心的偏移。

(3)注意累积质量的影响。当结构局部收进出现高低跨时,应合理布置剪力墙,以减小偏心距。

(4)当结构具有平面凹凸不规则时,在凹槽处应加强竖向构件和增设槽口拉梁。

(5)当由于连层设计引起楼板大面积缺失,造成长短柱时,一方面要加强短柱的延性,另一方面还要加强长柱的刚度。

(6)在满足侧向刚度的前提下,在刚心附近尽量减少剪力墙的布置。除了必要的门窗洞以外,尽量不要在剪力墙外墙上开洞。通过调节结构楼层面内外圈刚度的比例关系,加强结构的整体抗扭刚度,减少扭转效应。

(7)加强周边梁的刚度。可以采用增高周边连梁和加高加宽周边框架梁的方法来加强结构的整体抗扭刚度和调整刚心的位置。

(8)重视顶部小塔楼的结构布置。

(9)在满足建筑立面和使用功能的前提下,必要时

表1 结构动力规则性的判别

Table 1 Dynamic regularity and irregularity of structures

动力规则	扭平周期比	扭平分量比	最大位移比
动力规则	$T_1/T_2 \leq 0.85$	$P_1 \leq 10\%$	$\delta_{max}/\delta_{avg} \leq 1.2$
一般不规则	$T_1/T_2 \leq 0.85$	$10\% < P_1 \leq 15\%$	$1.2 < \delta_{max}/\delta_{avg} \leq 1.4$
动力不规则	$0.85 < T_1/T_2 \leq 0.9$	$15\% < P_1 \leq 20\%$	$1.4 < \delta_{max}/\delta_{avg} \leq 1.5$
严重不规则	$0.9 < T_1/T_2 \leq 0.95$	$20\% < P_1 \leq 30\%$	$1.5 < \delta_{max}/\delta_{avg} \leq 1.8$

可以考虑增设抗震缝。

5 工程实例

图4是上海锦麟天地工程项目的表现图,其中右侧的是住宅楼。它的主体结构为地下1层,地上26层。檐口标高90.20m。在两个建筑单元拼接处楼板开凹槽。凹进的一侧尺寸为相应投影方向总尺寸的47%。结构竖向,在标高4.7m处设通长的半夹层,开洞面积为楼面面积的43%。在8m标高处设结构转换层,局部钢筋混凝土框支剪力墙结构体系。转换层以上的楼板设计成无粘结预应力平板。住宅楼结构存在着平面凹凸不规则,楼板局部不连续和竖向抗侧力构件不连续等三项几何不规则,详见图5。

采用的抗震设计参数为:设防分类,丙类;设防烈度,7度;设计分组,第1组;设计基本地震加速度值,0.10g,设计特征周期,0.90s;场地,IV类;抗震等级,剪力墙:二级,钢筋混凝土框支框架:一级。

选用了SATWE,PMSAP和ETABS对住宅楼作了整体抗震分析。锦麟天地住宅楼自由振动特性参数见表2,位移比曲线见图6,图中 $x \pm 5%$, $y \pm 5%$ 为计入偶然偏心的影响。

结构工程师从结构方案定案开始就采取积极措施。楼板选用预应力平板,最大程度上减少内部剪力墙,加厚外部剪力墙,以调节结构楼层内外圈刚度的比例关系。凹槽口层层增设拉梁,且加强凹槽周边的竖向构件。加高周边连梁,在阳台范围之外连梁高度取相邻楼层的上窗台至下窗台。在允许的范围内加高框



图4 上海锦麟天地表现图

Fig.4 Shanghai Jin Lin Tian Di project

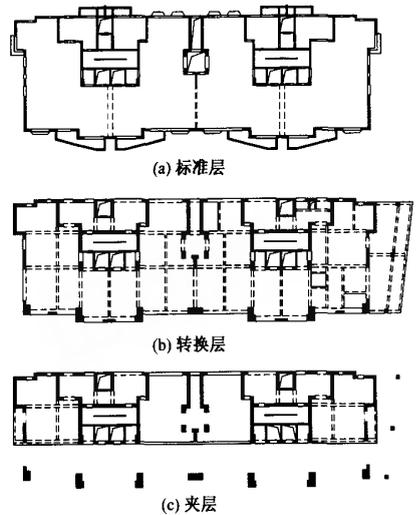
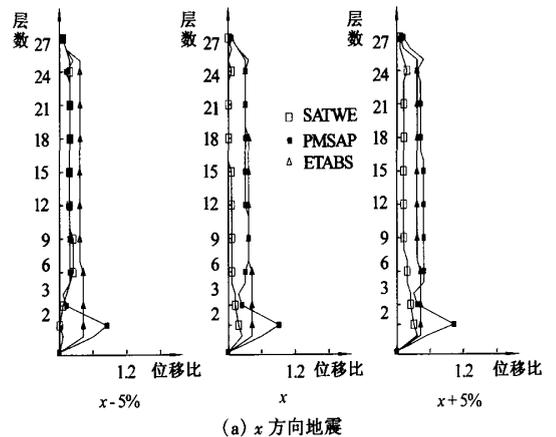
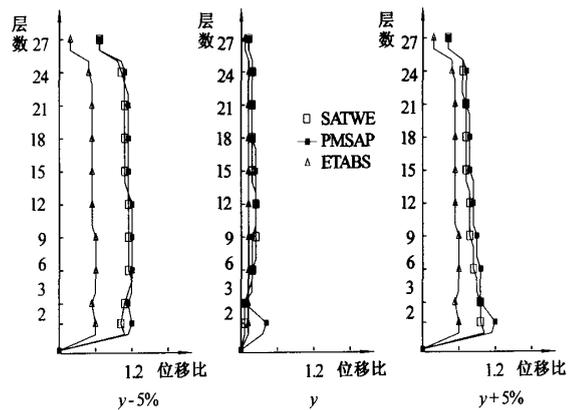


图5 锦麟天地住宅楼平面

Fig.5 Structural plans of Jin Lin Tian Di residential mansion



(a) x方向地震



(b) y方向地震

图6 位移比曲线

Fig.6 Torsional effects

表 2 锦麟天地住宅楼自由振动特性参数指标

Table 2 Results of modal analysis

		SATWE	PMSAP	ETABS	
自振特性	第 1 振型	周期/s	2.094	2.122	2.018
		扭平分量比	0%	0%	0%
	第 2 振型	周期/s	1.728	1.791	1.668
		扭平分量比	0%	1%	0%
	第 3 振型	周期/s	1.547	1.644	1.493
		扭平分量比	100%	99%	100%
	周期比(T_i/T_1)		0.74	0.77	0.74

支梁、加大框支柱,使框支柱尽量包住转换层以上对应的剪力墙。计算结果表明,尽管锦麟天地住宅楼具有平面、竖向多项特别不规则,但结构自振特性理想。1层顶板标高处的结构转换层,及夹层楼板通长缺失使位移比曲线沿 x 方向在底部加强区产生突变。其中以 PMSAP 的计算结果最为明显。在 $x + 5\%$ 时,第 2 层的最大位移比约为 1.18。沿 y 方向计入 $\pm 5\%$ 偶然偏心的影响时,各层的扭转效应都有明显的增大。最大位移比为 1.2。在本工程中努力做到了控制位移比不超过 1.2,结构具有规则动力特性,大部分的暗柱配筋均为构造配筋。在弹性分析的基础上,本工程还作了推覆分析,以把握结构弹塑性地震反应的全过程,验证了结构的抗倒塌性能^[9]。

6 结论与建议

本文系统地阐述了抗震设计中的累积质量中心和层刚心的定义及其计算机求解公式,提出了动力规则性概念,给出了动力规则性的判别条件和实现动力规则性的途径。结论与建议如下:

(1)结构工程师在初步设计阶段,首先要把握住结构的自振特性。在抗震设计中结构可以是几何不规则的,但要努力做到结构的动力特性是规则的,避免特别不规则的结构方案。

(2)建议规范增加结构动力规则性的有关条款:

①A 级高层建筑的扭平周期比限值规定为不宜大于 0.85,不应大于 0.9。

②与周期比对应,限制第 1 振型中的扭平分量比。

③增加对扭转一般不规则、特别不规则和严重不规则的判别条件。

④对于动力特性特别不规则的结构,当扭平周期比和扭平分量比都能得到满足时,建议高规对 B 级高

层建筑、混合结构高层建筑及第 10 章所指的复杂高层建筑最大位移比的限值放松到不应大于 1.5,与抗震规范取得一致。但是,在进行边缘构件的内力和配筋计算时,可参照国外经验适当考虑特别不规则楼层的水平剪力放大系数。例如, $A_x = (\delta_{\max}/1.4\delta_{\text{avg}})^2$,且当 $A_x < 1$ 时,令 $A_x = 1$ 。

致谢:感谢学术界的朋友们对文中的观点作出指点,进行讨论,提供无私的帮助和提出中肯的意见。感谢上海市超限高层建筑抗震审查委员会的同仁们,在百忙中仔细阅读了本文,对本文的完善起了很大的作用。感谢北京金土木软件技术有限公司刘春明副总裁、技术总监及李永双硕士用 ETABS 帮助完成部分计算。

参 考 文 献

- [1] Ayre R S. Interconnection of translational and torsional vibrations in buildings [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1938, 28(2): 89 - 130.
- [2] Lin T Y. Lateral force distribution in a concrete building story [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1951, 23(4): 281 - 296.
- [3] Kan C L, Chopra A K. Elastic earthquake analysis of a class of torsionally coupled buildings[J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1977, 103(4): 821 - 838.
- [4] Tso W K, Dempsey K M. Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity[J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1980, 8(3): 275 - 289.
- [5] 徐培福,黄吉锋,韦承基. 高层建筑结构在地震作用下的扭转振动效应[J]. 建筑科学, 2000, 16(1): 1 - 6.
- [6] Tso W K. Torsions in multistory buildings[A]. Proceeding of the Third International Conference on Tall Buildings [C]. Hongkong and Guangzhou, 1984: 1 - 7.
- [7] Paulay T, Priestley M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings[M]. New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [8] Computers and Structures Inc. ETABS Users Manual [M]. 1999.
- [9] 扶长生,应俊. 静力非线性分析方法在抗震设计中的应用[J]. 结构工程师, 2004, 20(3): 32 - 39.
- [10] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
- [11] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
- [12] 吕西林主编. 超限高层建筑工程抗震设计指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005.
- [13] International Code Council. International Building Code 2003 [S].
- [14] 徐培福主编. 复杂高层建筑结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

抗震设计中的平扭耦联问题

作者: 扶长生, FU Changsheng
 工作单位: 上海长福工程结构设计事务所, 上海, 200011
 刊名: 建筑结构学报 **ISTIC EI PKU**
 英文刊名: JOURNAL OF BUILDING STRUCTURES
 年, 卷(期): 2006, 27(2)
 被引用次数: 5次

参考文献(14条)

1. Ayre R S [Interconnection of translational and torsional vibrations in buildings](#) 1938(02)
2. Lin T Y [Lateral force distribution in a concrete building story](#) 1951(04)
3. Kan C L, Chopra A K [Elastic earthquake analysis of a class of torsionally coupled buildings](#) 1977(04)
4. Tso W K, Dempsey K M [Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity](#) 1980(03)
5. 徐培福, 黄吉锋, 韦承基. 高层建筑结构在地震作用下的扭转振动效应[期刊论文]-[建筑科学](#) 2000(01)
6. Tso W K [Torsions in multistory buildings](#) 1984
7. Paulay T, Priestley M J N [Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings](#) 1992
8. Computers and Structures Inc [ETABS Users Manual](#) 1999
9. 扶长生, 应俊. 静力非线性分析方法在抗震设计中的应用[期刊论文]-[结构工程师](#) 2004(03)
10. GB 50011-2001. [建筑抗震设计规范](#)
11. JGJ 3-2002. [高层建筑混凝土结构技术规程](#)
12. 吕西林. [超限高层建筑工程抗震设计指南](#) 2005
13. International Code Council. [International Building Code](#) 2003
14. 徐培福. [复杂高层建筑结构设计](#) 2005

相似文献(10条)

1. 学位论文 肖伟. 多塔高层建筑结构地震反应分析 2003

多塔结构是一种复杂的结构体系, 由于多个塔楼之间的相互耦联振动, 其抗震性能与传统结构体系有较大的不同。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)对作为复杂高层建筑结构之一的多塔结构的抗震设计做了一些规定, 但对其抗震分析方法和措施未做更深入、明确的规定, 可操作性不强。就目前的工程实践而言, 高层建筑结构大多不超过双塔, 3个及以上塔楼高层建筑结构的工程实践较少, 可借鉴的实践经验较为缺乏。因此, 深入研究具有3个及以上塔楼的复杂高层建筑结构的地震反应特性是很有必要的。

本文以具有3个塔楼的厦门东方时代广场为分析对象, 采用国际通用有限元分析软件SAP2000进行结构建模和分析, 考虑双向地震动输入, 研究结构的振动特性, 分析底盘与塔楼刚度比对结构的影响以及多塔之间的扭转效应和平扭耦联作用, 对比风荷载和地震作用下塔楼在两个结构主轴方向的层间位移、顶点位移以及塔楼底层的变形, 分析地震作用下转换层楼板的应力分布特点及主要竖向构件的正应力和剪应力分布特点。

通过上述分析, 得出以下主要结论: ①多塔楼结构存在频率密集现象, 各振型间耦联效应明显, 地震作用计算应采用CQC组合原则而不能简单地采用SRSS组合原则;

②非对称多塔结构的振型中, 扭转作用明显, 平扭耦联效应值得考虑;

③裙楼刚度对整体结构的抗震性能影响很大, 非对称多塔结构宜控制裙楼与塔楼刚度比在适宜的范围;

④非对称多塔易导致平面刚度分布不均匀, 结构扭转效应不仅在竖向抗侧构件中引起较大的扭转内力, 对转换层楼板应力有较大的影响, 且延续至相邻楼层, 对相应楼层均应采取相应的加强措施。

2. 学位论文 聂云靖. 具有粘滞阻尼器偏心结构的动力分析及优化设计 2003

该文对偏心结构的平扭—扭转耦联耗能减震问题进行了研究。根据结构振动控制的基本理论, 提出在结构的两正交方向同时设置粘滞阻尼器以控制结构的平动反应和扭转反应。同时研究了粘滞阻尼器在结构中的位置优化问题。采用剪切型平扭模型, 建立了地震作用下具有粘滞阻尼器偏心结构的平扭耦联运动方程。在减震和非减震情况下, 利用复模态分析法计算了结构模型的自振特性及地震响应, 并编制了相应的地震反应分析程序。对某工程实例, 运用上述理论与地震反应分析程序分析了传统非减震偏心结构和设置有粘滞阻尼器时的地震响应。并将分析结果与大型有限元分析软件ANSYS分析所得结果作了对照, 得到了较好的一致性。对于粘滞阻尼器在结构中的优化设置问题, 提出了基于结构灵敏度分析与结构动力学修改的被动控制策略, 并将其用于粘滞阻尼器对偏心结构的耗能减震控制。在所控制的振型阻尼比确定的情况下, 给出了粘滞阻尼器在结构中的位置优化算法, 并利用复模态分析法进行了具有粘滞阻尼器偏心结构的地震响应分析, 计算结果表明该方法简便明了、准确可靠, 适于在设计中推广。

3. 会议论文 扶长生. 抗震设计中的平扭耦联问题 2005

本文首先回顾了平扭耦联的研究历史及现状。以往的研究成果表明, 当反映结构自振特性的扭平周期比等于或接近1时, 即使是几乎对称的结构在地震作用下也会表现出严重的平扭耦联, 扭转效应会剧烈地放大。然后, 本文对规范中有关扭转的条款展开了一些有益的讨论。在此基础上, 提出了抗震设计的结构动力规则性概念。文中给出了动力规则性的判别条件和实现动力规则性的9条途径。笔者的观点是, 结构可以是几何不规则的, 但结构工程师要努力做到结构的动力特性是规则的。最后, 列举了由笔者的设计事务所承接的几个工程实例, 以供结构工程师参考。

4. 学位论文 **王丰 基于性能的结构多维抗震设计方法研究** 2007

理论研究及震害经验表明,扭转反应会加速偏心结构在地震作用下的破坏,在某些情况下甚至成为导致建筑物破坏的主要因素,平扭耦联是空间问题,不应简化为平面问题处理。目前,结构的抗震设计思想也由传统的基于力的强度设计方法发展到基于性能的延性抗震设计方法,但研究成果大都以单向地震输入的平面分析为前提,所以研究多维偏心结构在多维地震作用下的基于性能的抗震设计理论和方法具有重要现实意义。本文以基于性能的结构多维抗震设计思路为基础,着重完成以下几个方面的研究工作:

(1)提出了直接基于损伤性能目标的抗震设计方法。由于以往对累积耗能与最大位移关系的研究针对于单自由度系统,而不一定适用于层间反应,于是基于累积耗能参数推导了地震下层间最大位移与层间累积耗能的关系方程,并以Park双参数损伤准则为基础建立了结构层间损伤计算公式,将结构最薄弱楼层的预期损伤性能目标作为设计起点进行抗震设计,反推结构的刚度和强度。为满足小震下的使用要求,将小震不坏的承载力控制引入设计程序,并与中震、大震下的损伤控制有机结合起来,从而实现了多性能水准的设计思想。最后通过算例,证明了该方法具有一定的准确性。

(2)由于结构的总滞回耗能是反映结构整体累积损伤的重要参量,为此通过能量方程推导了结构与其等效单自由度系统的滞回耗能和变形能关系公式。建立了通过结构等效单自由度系统来估计地震下结构累积滞回耗能的方法。通过对结构剪切刚度分布和屈服剪力系数分布的均匀和不均匀等多个算例进行分析和比较,证明了该方法在一定范围内能够较为准确地估计地震下结构的滞回耗能。

(3)针对传统抗震设计中完全依赖于概念设计来设计构件截面尺寸的不合理性,提出了刚度设计思想。将传统的“两阶段抗震设计”发展为“三阶段抗震设计”,即刚度设计阶段、强度设计阶段、变形验算及调整加固阶段,其中后两阶段与传统方法相似。对经典的R- μ 设计谱进行分析,给出了长周期弹塑性位移谱的简化公式,并在此基础上提出了基于位移的刚度设计方法。定义了刚度调整系数,通过刚度调整系数可以一次性地调整好结构的构件尺寸,使结构能够满足预期的目标要求,从而避免了反复迭代的设计过程。针对三阶段设计中的刚度设计,首先给出了对称结构的刚度设计方法,并通过算例进行验证;而对于平面不对称结构的刚度设计,提出了基于pushover方法的平面刚度分布调整程序,通过该程序来调整不对称结构的刚度分布,尽可能的使刚心与质心重合,然后按对称结构进行刚度设计。而对于很难实现质心与刚心近似重合的结构,提出了偏心结构直接基于位移的刚度设计方法。最后,在以上研究成果的基础上给出了多维结构的三阶段抗震设计流程。

(4)建立了双向地震作用下单质点双自由度系统的等延性强度折减系数反应谱。通过硬土、中硬(软)土、软土地场的178条地震记录作为地震输入,采用了不同以往的建立强度折减系数设计谱的方法,建立了统计平均的等延性强度折减系数设计谱。分析了场地类别、延性系数、两水平主轴方向周期比对强度折减系数谱的影响。并根据统计结果,给出了便于工程应用的等延性强度折减系数简化设计谱公式。通过比较分析可知,该简化公式比较准确,且能够较合理的反应各参量对强度折减系数设计谱的影响规律。

(5)提出了考虑双向地震作用的多维结构振型pushover分析方法。采用弹性振型分解的思路,将非线性多维结构反应近似为结构多振型弹塑性反应的叠加,进而将多维结构按振型等效为多个等效方程。将每一等效方程转化为以双向实际地震记录的组合作为地震输入的等效单自由度系统,并通过弹塑性R- μ 关系谱的统计分析,得出其与实际地震记录输入的单一自由度系统具有近似的弹塑性反应特性。在此基础上给出了考虑双向地震作用的多维结构振型pushover分析程序,并阐述了该方法与传统pushover分析方法的差别,最后通过算例将该方法结果与时程分析方法结果进行比较,证明了该方法具有一定的准确性。

(6)在本文的双向地震下等延性强度折减系数设计谱和考虑双向地震作用的振型pushover分析的研究基础上提出了多维能力谱方法。提出了多维结构振型组合的分析思路。由考虑双向地震作用的多维结构振型pushover分析程序获得基于各振型的能力谱曲线;由双向地震下等延性强度折减系数设计谱和规范设计谱建立等延性弹塑性需求设计谱曲线;将能力谱曲线与需求谱曲线组合并通过一定算法即可获得双向地震下多维结构的目标位移。最后通过算例进行比较分析,说明了该方法能够比较准确地估计多维结构在双向地震下的反应需求。

5. 学位论文 **潘东辉 配筋砌块砌体剪力墙性能抗震设计几个关键问题的研究** 2007

配筋砌块砌体剪力墙是砌体结构设计规范(GB50003-2001)新增加的结构体系,这种结构体系是对我国沿用几十年多层砌体结构体系的一个较大跨越。研究配筋砌块砌体剪力墙的性能抗震设计方法不仅有利于抗震理论的发展,有助于该结构体系的推广应用,而且对我国经济和社会的发展也十分有益。

本文第一章简要介绍配筋砌块砌体剪力墙和性能抗震设计理论的背景和现状,概括了研究的重点和主要工作。剪力墙的延性是性能抗震设计所应具备的要素,第二章采用数值方法确定配筋砌块砌体剪力墙的位移延性比,通过对位移延性比的影响因素的研究,提出限制轴压比和设置约束边缘构件的建议;引入曲率延性增大系数反映约束边缘构件对曲率延性比的提高作用,对两种约束边缘构件的构造措施进行了分析。第三章根据材料性能的划分和高悬臂独立墙体的塑性铰区在受弯延性破坏过程中的状态,将剪力墙划分为四个性能等级;利用反应调整系数衡量各性能等级的抗震能力,通过极限状态下独立高悬臂剪力墙反应调整系数的研究,提出限制形状比来保证剪力墙的抗震能力;提出一个初步设计方法,可借助反应调整系数,用常规抗震设计方法实现性能抗震设计。

配筋砌块砌体剪力墙整体抗扭性能、抗剪和稳定都是实现性能的保障,也是抗震设计的重要内容,这些内容在其余三章中讨论。第四章针对配筋砌块砌体剪力墙结构侧向刚度大的特点,通过改变结构的偏心率、扭转刚度和侧向刚度等因素,分析平扭耦联和非耦联下结构的周期比的差别,分析并说明高层建筑混凝土结构技术规范(JGJ3-2002)对扭转控制措施的不足;为有效地控制扭转效应,引入平动变形和扭转变形能比值的概念,并根据现行规范对位移比的限值,在简化模型的基础上推导出能量比的限值。第五章引入双轴作用下砌体的强度准则,采用软化系数综合考虑砌块砌体受力各向异性的特点,提出了砌块砌体软化剪压模型理论;在该模型基础上计算剪力墙的剪压破坏承载力,并编制了相应的程序,计算结果与试验结果和抗剪设计公式的计算结果进行了比较。第六章研究了剪力墙在受拉裂缝出现后裂缝无法闭合而导致的失稳问题,建立了一集中弹簧联系的串联刚杆系,集中弹簧模拟裂缝处的钢筋变形,刚杆模拟裂缝间的混凝土(砌块),采用该串联刚杆系模型分析受拉后裂缝不闭合受压柱子的稳定问题,计算结果与Pauley公式和新西兰规范进行了比较,并针对实际工程情况,提出解决稳定的措施。在这三章最后部分都提出了性能抗震设计在该方面的具体做法。

通过本文六章的研究在理论上作出了以下新的发展:(1)提出保证配筋砌块砌体剪力墙延性的轴压比限值,并建议设置约束边缘构件,提出了相应的构造措施;(2)提出保证配筋砌块砌体剪力墙抗震能力的形状比限值;(3)提出直接基于性能配筋砌块砌体剪力墙的抗震设计方法;(4)提出我国规程对扭转控制措施的不合理之处,建议用能量比指标作为结构整体扭转不规则判断的依据;(5)提出砌块砌体的软化剪压模型,可用于配筋砌块砌体剪力墙的剪压破坏承载力的计算;(6)建立受拉应变影响墙稳定的力学模型,提出防止该类失稳应满足的要求。本研究针对配筋砌块砌体剪力墙性能抗震设计各个方面进行分析,得到一些有用的结论,提出的建议有较强的实用性,可直接运用于实际工程,对将来规范的修订有较大的参考价值。

6. 会议论文 **扶长生 抗震设计中的平扭耦联问题** 2005

本文首先回顾了平扭耦联的研究历史及现状。以往的研究成果表明,当反映结构自振特性的扭平周期比等于或接近1时,即使是几乎对称的结构在地震作用下也会表现出严重的平扭耦联,扭转效应会剧烈地放大。然后,本文对规范中有关扭转的条款展开了一些有益的讨论。在此基础上,提出了抗震设计的结构动力规则性概念。文中给出了动力规则性的判别条件和实现动力规则性的9条途径。笔者的观点是,结构可以是几何不规则的,但结构工程师要努力做到结构的动力特性是规则的。最后,列举了由笔者的设计事务所承接的几个工程实例,以供结构工程师参考。

7. 学位论文 **王学艳 偏心结构—地基土相互作用平扭耦联参数分析** 2007

土-结构相互作用(Soil-Structure Interaction,简称SSI)是近三十年来世界地震工程领域研究的重要课题之一。由于该课题涉及地震工程、结构工程、地基基础、随机振动、地震学等多门学科,属多学科交叉领域,研究难度较大,目前还有很多问题有待深入研究。

在这一领域,由于结构楼层中的质量和刚度分布的不规则,造成楼层的质量中心和刚度中心不重合,从而使在地震作用下结构各楼层受到的惯性力与楼层抗力不共线,由此而引起的偏心结构-地基土相互作用体系平动与扭转耦联的变形特征,目前国内外还没有进行系统深入的研究,因此,深入开展偏心结构-地基土相互作用体系地震反应规律的研究,为完善结构抗震设计规范中的相关条文提供依据,具有十分重要的理论意义与实用价值。

本文应用动力学理论研究了偏心结构-地基土相互作用体系平扭耦联反应中参数分析问题,主要工作如下:

- 1、从建立偏心结构-地基土相互作用模型入手,采用双线性的结构模型与地基土的分段线性模型,利用拉各朗日能量法得到偏心结构-地基土相互作用体系平动和扭转耦联运动的振动方程。
- 2、采用解析法对偏心结构-地基土相互作用体系的弹性影响参数进行确认,重点对考虑相互作用后偏心率B、扭平频率比 Ω 的取值范围,及不同地基土时各参数对结构反应的影响进行分析。
- 3、采用Matlab语言编制了弹性和弹塑性偏心结构-地基土相互作用体系平扭耦联反应中参数分析程序,进行弹性影响参数分析,并与解析法结果进行了比较,表明采用时程分析进行参数分析的可行性。

4、分析对比了偏心结构-地基土相互作用体系弹性地震反应时各参数对体系的影响, 得出了弹性时与弹性时参数呈现出来的不同特点, 得出了对实际工程有参考意义的结论。

8. 学位论文 [李春锋 高层连体结构动力特性及地震响应分析](#) 2008

高层连体结构是指两个塔楼或多个塔楼由设置在一定高度处的连接体(又称连廊)相连接而形成的一种复杂结构体。高层连体结构体系的特点是两个或多个塔楼间由于连体的存在而形成较强的空间耦联作用, 其分析模型、动力特性、受力性能、破坏形式以及计算方法均较一般的单塔高层建筑复杂的多。按照现行《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3-2003的定义, 连体结构属于“复杂高层建筑结构”, 应采取更为严格的抗震措施来进行设计。本文以典型的高层双塔连体结构为对象, 对其计算模型、动力特性、抗震设计方法与水平地震作用下结构地震响应, 并采用串并联质点系层模型对连接体刚度变化时连接体的位移响应方差的影响、连体结构扫频振动试验分析等做了较为系统的研究。主要内容如下:

1. 高层连体结构体系的分类及计算模型的研究。由于高层连体结构形式的多样性, 其各自的动力特性及抗震性能也大相径庭, 因此就必须首先进行分类, 而不能直接进行笼统分析; 在对连体结构分类的基础上, 研究了各种计算模型(串并联模型、三维有限元模型及连续模型等)在不同类型连体结构中的适用性。

2. 高层连体结构刚度矩阵、动力特性的研究。通过对高层连体结构采用“串并联刚片系层模型”刚度矩阵的分析, 揭示了这种结构体系存在严重平扭耦联的深层原因; 通过对其自由振动特征方程的分析, 推导了对称双塔连体结构的六种基本振型形态; 通过对这种结构体系振型参与系数的分析探讨了其振型参与系数与一般单塔结构体系存在较大差别的物理本质, 并给出了这种结构体系的振型选取原则; 最后通过几个算例分别采用前述各种模型对结构在连体位置发生变化时结构自振周期的变化做了分析。

3. 高层连体结构抗震设计方法及地震响应分析。对高层连体结构的抗震设计方法做了简单论述, 说明振型分解反应谱法仍然适用于这种复杂结构体系; 通过几个算例仍采用前述不同的计算模型分别研究了在水平单向、双向地震作用下结构的地震响应分析, 深入讨论了不同结构形式在水平地震作用下的动力响应及连接体设置位置对结构变形和内力影响。

4. 高层连体结构平稳随机振动分析。对平稳随机响应的常规算法与高效的虚拟激励法进行了论述。以此为基础, 运用我国学者林家浩提出的虚拟激励法, 先求出单体在连体位置的自谱值, 以单体的自谱响应作为连接体多点完全相干的平稳随机激励, 得出了在平稳随机响应下连体位移响应方差的解析表达式, 并对连接体在不同连接刚度、阻尼作用下的位移方差响应进行了详细讨论, 得出了连体刚度、阻尼变化对连接体位移响应方差在一定范围内有较大的影响。

5. 连体结构扫频振动试验分析。简单介绍了试验模型的设计与制作、加速度传感器的布置以及连接体的布置与选型, 并建立了SAP2000有限元模型。从结构的3阶自振频率与顶层加速度及顶层位移等三个方面, 将试验结果和有限元分析结果进行了对比。虽然扫频振动台的试验数据与有限元分析的计算结果存在一定的差异, 但两者随着连接体在结构间位置的变化, 其顶层的位移、加速度响应的变化规律基本一致。

9. 学位论文 [王耀伟 平面不规则结构非弹性地震反应规律研究](#) 2003

由于结构层中的质量和刚度等分布的不规则, 造成楼层的质量中心和刚度中心不重合, 从而使得在地震作用下结构各楼层受到的惯性力与楼层抗力不共线, 结构将会在不同程度上表现为平动与扭转耦联的变形特征。平扭耦联是一个空间问题, 不便简化为平面问题处理, 无论是试验研究还是计算分析, 尤其是非弹性动力分析, 都有很大的难度, 研究工作还不是很深入, 难以以为结构设计提供可靠的依据。目前国内外有关结构扭转的设计规定主要基于单框构件试验或振动台模型试验, 对于结构层次的规定更多的是基于震害经验, 缺乏定量分析的依据。因此, 深入开展平面不规则结构的地震反应规律的研究, 为完善结构抗震设计规范中的相关条文提供依据, 这项工作将是十分必要和有重要意义的。

本文结合国家自然科学基金资助项目“结构非线性地震扭转作用和扭转效应的研究”(项目批准号: 59978055), 对平面不规则结构的地震反应规律进行了深入研究, 明确了影响平面不规则结构地震反应的主要结构参数, 研究了不同地震动类型和双向水平地震输入对结构扭作用和扭转效应的影响; 采用基于有限元柔度法的纤维模型梁柱单元, 建立钢筋混凝土框架结构三维非弹性地震反应动力分析程序, 对依据我国建筑抗震设计规范(GB50011-2001)设计的不规则结构进行地震反应模拟分析, 讨论了现行设计方法的有效性。通过上述工作, 本文主要取得了以下一些主要成果:

1、以有限元分析程序FEAP(v. 7.3)作为平台, 分别编制了层间模型和基于纤维模型梁柱单元的杆系模型两种结构空间非线性动力分析程序。其中, 层间模型主要用于结构参数分析, 杆系模型用于代替不规则框架的结构动力试验。另外, 在开发平台中还添加了与地震反应分析相关的功能。

2、采用解析法对单层平面不规则结构的弹性影响参数加以确认, 分析了各参数对结构反应的影响; 采用模态分析法确定了多层平面不规则结构的影响参数, 研究了楼层强度偏心距对结构非弹性扭转耦联反应的影响, 由此提出控制结构非弹性扭转反应的相关措施。采用纤维模型梁柱单元模拟了单层与多层钢筋混凝土不规则框架结构的非弹性地震反应, 对该方法的有效性进行了分析。

3、根据地震动类型的划分标准, 考察了各种类型的地面运动对偏心结构非弹性反应的影响程度; 采用纤维模型梁柱单元分别模拟了单层和多层不规则结构在不同类型地面运动作用下的强震反应过程, 对结构的变形峰值与滞回耗能情况进行了考察。

4、对双向水平地震作用下均匀偏心结构的非弹性扭转耦联反应进行了分析, 考察了强度偏心距对结构非弹性扭转耦联反应的影响程度, 并采用纤维模型梁柱单元模拟分析了不规则钢筋混凝土框架结构在双向水平地震作用下的反应过程。

5、采用纤维模型梁柱单元模拟了典型建筑场地上不规则的钢筋混凝土框架结构的地震反应, 对不同强度地震作用下的结构反应状态进行了分析, 对当前建筑抗震设计规范中的相关设计条款满足抗震防水准要求的有效性进行了相关讨论, 得出了一些初步性的分析结果。

平面不规则结构在地震作用下的非线性扭转反应分析是结构抗震领域中研究的难点问题之一, 采用纤维模型梁柱单元的结构空间非线性分析程序, 结合抗震规范的设计要求, 开展对不规则结构的空间地震反应分析的研究与评估, 有利于提高结构的设计水平, 改进抗震措施, 从而减少实际扭转震害的发生。因此, 本文的研究不仅在结构分析理论上具有一定的前沿性, 而且具有广泛的工程实用价值。平面不规则

10. 学位论文 [于德湖 配筋砌块砌体剪力墙偏心结构地震响应及实用设计方法](#) 2003

该文作了以下几方面的工作:作为规范配套软件中抗震分析的一部分, 针对配筋砌块砌体剪力墙结构, 编制了平扭耦联(每楼层考虑两个平动自由度和一个转动自由度)的弹性时程分析以及振型分解反应谱法程序。为了利用以上时程分析结果对结构抗震安全性进行评价, 定义了结构的墙片及楼层易损性系数, 建立了利用楼层易损性系数对结构震害进行评价的方法, 并给出了不同震害等级对应的楼层易损性系数参考标准。从结构参数、地震动特性及刚度在楼层中的分配形式三个方面, 初步讨论了其对结构弹性地震反应特性的影响。为了给偏心配筋砌块砌体剪力墙结构的简化计算提供依据, 利用均匀设计计算试验, 给出了由底部剪力法结果确定偏心配筋砌块砌体剪力墙结构的各楼层设计剪力及扭矩的简化计算公式, 并讨论了应用于双向偏心情况的可行性; 给出了具体设计步骤和设计实例, 算例表明了所建议方法的安全可靠性和合理性。最后, 结合前面给出的偏心结构地震作用的简化计算方法, 以及多道设防的设计思想, 给出了偏心结构多道设防的抗震设计步骤, 通过真实结构给出了设计实例, 时程分析结果表明所提出的方法能有效的减轻大震下结构的震害。

引证文献(5条)

1. [张伟 T形平面布置框支剪力墙结构抗震设计](#)[期刊论文]-[建筑结构](#) 2009(3)
2. [刘军 水平地震作用下高层建筑结构的扭转破坏控制](#)[期刊论文]-[江苏建筑](#) 2009(1)
3. [蒋俊杰, 陈春雷 高层建筑结构扭转效应控制参数讨论](#)[期刊论文]-[广东土木与建筑](#) 2008(9)
4. [李永华, 李思明 武进金融大厦结构设计](#)[期刊论文]-[建筑结构](#) 2008(4)
5. [扶长生, 刘春明, 李永双, 应俊 高层建筑薄弱连接混凝土楼板应力分析及抗震设计](#)[期刊论文]-[建筑结构](#) 2008(3)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_jzjgxb200602007.aspx

下载时间: 2010年8月2日