

论水平地震作用下对称和规则结构的抗扭设计

魏 珽 王 森
(上海魏珽工程结构设计事务所深圳部 518034)

[提要] 根据 78 抗震规范、89 抗震规范以及抗震规范(GB50011—2001)、高规(JGJ3—2002)中有关结构抗扭设计的规定,对对称规则结构的定义、结构周期与位移的关系、结构偶然偏心的考虑、扭转周期比与扭转位移比的控制等进行了论述。澄清了当前设计中一些令设计者困惑的问题,为地震作用下对称规则结构的抗扭设计提供了理论依据与可行的设计方法。

[关键词] 地震作用 对称结构 规则结构 扭转

Torsional Design of Symmetrical and Regular Structures Under Horizontal Earthquake Actions/Wei Lian, Wang Sen
(Shanghai Weilian Structure Design Office Shenzhen Representative, Shenzhen 518034, China)

Abstract: Based upon rules about torsion resistance of structure in relevant different China design codes, some significant issues for symmetric and regular structure in both theory and design method, such as the definitions of symmetric and regular structure, the relationship between period and displacement, consideration of the occasional eccentricity, the control values of torsional period ratio and torsional displacement ratio, etc., are discussed. The design procedure provided is theoretically reasonable and applicable in design practice.

Keywords: seismic action; symmetric structure; regular structure; torsion

水平地震作用下对称和规则结构(指扭转规则结构)的抗扭设计是一个迄今仍有不少争议以及令结构工程师困惑的问题,如如何定义对称和规则结构,水平地震作用下对称和规则结构是否会发生扭转振动,又如结构的扭转周期究竟与位移存在什么关系,《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)(简称新抗震规范)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2002)(简称新高规)中引入偶然偏心影响的计算规定的作用是什么等。下面将对以上问题进行论述和分析,以期与广大结构设计与研究人员共同商讨。

一、规范有关规定的发展

《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11—78)(简称 78 抗震规范)在第一章总则第 4 条第四款中要求“抗震设计应力求建筑物体型简单,重量刚度对称和均匀分布”,第四章抗震构造措施第 79 条还规定“抗震墙(或抗震支撑)的布置应尽量使房屋的重心和刚度中心相重合。”以上规定表明 78 抗震规范已从概念设计上要求结构工程师注意结构在水平地震作用下可能发生的扭转问题,但尚不完善。

为了说明问题,以图 1 结构为例,图中 x, y 向均为 6 跨,跨度 6m,墙厚 200,柱截面尺寸为 800×800 ,梁尺寸为 300×500 ,梁、柱、墙混凝土等级为 C30~C40。图(a)中剪力墙沿周边布置,图(b)中剪力墙内移,逐步靠近结构楼层的形心、质心,这两种布置都符

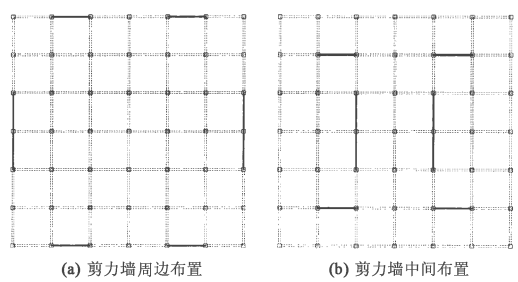


图 1 分析模型结构平面布置示意图

合抗震规范“重量刚度对称均匀分布,重心和刚心相重合”的要求,但二者的抗扭刚度有很大差别,图(a)结构抗扭刚度远大于图(b)结构,导致图(b)结构的扭转周期远大于图(a)结构,结构的抗扭能力大大减弱。表 1 为结构平动与扭转自振周期计算结果的比较,剪力墙内移后结构的扭转周期增大约 50%。

结构平动与扭转自振周期的计算结果比较 表 1			
模型	x 向平动周期(s)	y 向平动周期(s)	扭转周期(s)
(a)	2.011 3	1.632 0	1.249 6
(b)	1.995 9	1.611 5	1.890 7

由此可见,78 抗震规范未能指出抗震设计应在使结构尽量对称均匀的前提下,各抗侧力构件的布置应同时使结构具有较大的抗扭刚度和必要的抗扭能力,因而存在较大的缺陷。78 抗震规范也未能解决结构在水平地震作用下的抗震计算方法。

《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89) (简称 89 抗震规范) 对水平地震作用下的抗扭设计在总结唐山大地震经验教训以及一系列理论与试验研究的基础上有了很大的进步。提出了如下考虑扭转影响的反应谱振型分解法和 CQC 组合法, 地震作用计算公式为:

$$F_{xji} = \alpha_j \gamma_{ij} X_{ji} G_i \quad (1)$$

$$F_{yji} = \alpha_j \gamma_{ij} Y_{ji} G_i \quad (2)$$

$$F_{tji} = \alpha_j \gamma_{ij} r_i^2 \varphi_{ji} G_i \quad (3)$$

式中: F_{xji} , F_{yji} , F_{tji} 分别为振型 j 层 i 的 x , y 方向和转角方向的地震作用标准值($i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$); X_{ji} , Y_{ji} 分别为振型 j 层 i 质心在 x , y 方向的水平相对位移; φ_{ji} 为振型 j 层 i 的相对扭转角; r_i 为层 i 的转动半径; γ_{ij} 为计入扭转的振型 j 的参与系数。

但 89 抗震规范对水平地震作用下对称和规则结构的抗扭设计仍然没有提出明确的规定与要求。新抗震规范与新高规继续沿用了 89 抗震规范中结构的抗扭计算方法和概念设计, 但对于结构在水平地震作用下的抗扭设计补充了一系列新的规定, 对于提高对称和规则结构的抗扭能力及其抗震安全性有很大的帮助。下面将对此进行论述。

二、对称结构与规则结构的定义

对称结构较为科学合理的确定办法是从结构动力学理论计算的结构自振特性或地震反应结果来判断。对称结构可定义为水平地震作用下结构只在地震作用方向产生平动位移, 而不产生扭转。这从式(3)中也可看到, 对称结构的扭转地震作用必然为零。对称结构也可从结构自振特性中的振型及其相应的振型方向因子来判别。一个对称的结构, 其自由振动是解耦的, 即任一振型当出现平动振型时, 扭转振型为零, 相应的平动因子为 1, 扭转因子为 0; 反之, 当结构出现绕质心的扭转振型时, 沿另二主轴的平动振型必不出现, 相应的平动因子为 0, 扭转因子为 1。

实际工程中许多结构并不符合上述严格意义上的对称结构, 而是在一定程度上或较微弱的程度上存在平动与扭转耦合的现象, 有的建筑平立面并不对称, 但对结构布置的合理调整, 使其振动特性较接近于对称结构, 即只有不大或轻微的水平扭转耦合, 其相应的振型平动因子较大(接近 1.0), 扭转振动因子很小。反之, 有的振型当扭转振动因子很大(接近 1.0)时, 平动振动因子则很小。对于这种不对称结构, 其振动特性实际上与对称结构相近, 在水平地震作用下不会发生很大的扭转振动。

美国规范率先提出了规则与不规则结构的分类与界定, 具有工程意义和实用价值。这样, 规则结构不但可把对称结构自然归入其范畴, 还可以根据工程经验

人为划定一个范围, 将一些虽不对称但其振动特性与对称结构较为接近的结构归入规则结构的范围, 不但使设计便于进行, 并且对减小地震作用下结构的扭转效应, 提高结构的扭转能力也是比较有益的。

新抗震规范第 3 章第 3.4.2 条规定扭转不规则结构的定义为“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。”在相应的条文说明中明确是按刚性楼盖计算所得结果, 但未明确是在什么地震作用下求得的, 因而在实际执行中出现了不同的结果。

(1) 只考虑单向地震作用。按 89 抗震规范计算, 在水平地震作用下对称结构不产生扭转, 扭转角为零, 上述比值为 1.0, 显然属于规则结构范围。还有一些性质上是结构不对称, 在单向水平地震作用下将产生扭转, 但当结构的不对称性较微弱时, 计算的楼层的最大弹性水平位移(或层间位移)不大于该楼层两端弹性水平位移(或层间位移)平均值的 1.2 倍时, 也划入规则结构的范畴, 反之, 则划入不规则结构的范围。

(2) 单向水平地震作用加偶然偏心影响。新高规第 3.3.3 条规定计算单向地震作用时应考虑偶然偏心的影响(详见后文第五节讨论)。显然, 在考虑偶然偏心的水平地震作用下, 每楼层质心处都存在水平扭矩作用, 因此任何结构, 即使是严格意义上的对称结构, 也将产生扭转作用, 当对称结构或接近对称的结构扭转刚度较弱, 扭转周期较长时, 有可能产生较大的扭转位移, 使计算的楼层最大弹性水平位移(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, 对称结构也被列入不规则结构范畴, 这样的界定方法在物理概念上有所混淆, 扭转刚度不足的对称结构只是需要在结构设计布置上设法增大结构的抗扭刚度, 并不说明结构布置存在不对称性和不规则性。如图 2(a) 所示, 一 20 层的框架-剪力墙结构, 其结构平面及荷载布置完全对称, y 向考虑偶然偏心后, 楼层的最大弹性水平位移和层间位移, 均大于相应楼层两端弹性水平位移和层间位移平均值的 1.2 倍(二者之比为 1.21), 按新抗震规范第 3.4.2 条规定划为不规则结构, 如将剪力墙适当外移(图 2(b)), 结构仍然完全对称, y 向考虑偶然偏心后, 楼层的最大弹性水平位移和层间位移均小于相应楼层两端弹性水平位移和层间位移平均值的 1.2 倍(二者之比为 1.12), 按新抗震规范第 3.4.2 条规定划为规则结构。以上说明, 两个结构实际上都是对称规则结构, 只是抗扭刚度存在差异, 在考虑偶然偏心影响计算时, 结构扭转位移比相差较大, 从而得出结构对称规则与否的不同结论, 显然是不够合理的。

按作者的理解,美国规范与我国新高规界定扭转不规则的规定原意是在计算中只考虑单向水平地震作用而不考虑偶然偏心,因为两本规范都没有给出计算偶然偏心影响的具体规定与方法。因此两本规范对于结构扭转不规则的界定是企图将外因(水平地震作用)通过内因(结构的扭转位移比为 1.2)来确定,在概念上是清楚的,是比较合理的。

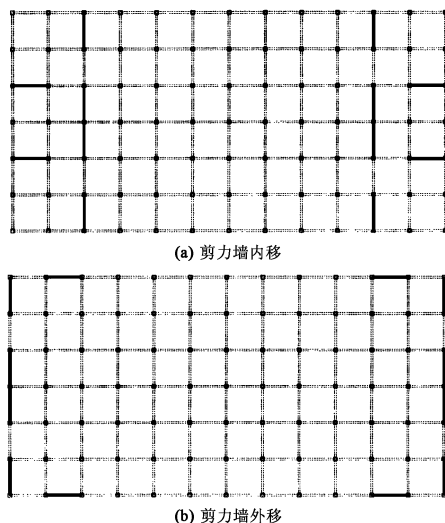


图 2 分析模型结构平面布置示意图

新高规引入了单向水平地震作用加偶然偏心影响的计算规定,对保证对称与规则结构的抗扭能力是有利的,但据此判断结构的扭转不规则性将使得一些对称和规则的结构被列为扭转不规则结构,则是不够合理的。根据相关规定,扭转不规则是超限审查的内容之一,这样将不必要地增多超限审查项目的数量。

实际结构有时在两个主轴 x, y 向可能存在一方向规则、另一方向不规范的情况,此时应针对 x, y 两个方向予以区别对待。

三、结构周期与位移的关系

从 89 抗震规范开始,各相关抗震设计规范都要求对结构在水平地震作用下的位移进行验算和控制,但新抗震规范与新高规还进一步提出了对结构扭转为主的第一周期与平动为主的第一周期之比的限制规定。实际上,控制周期和控制位移性质上是一样的,控制结构扭转周期就是控制结构在地震作用下的扭转位移。结构位移与结构自振周期息息相关,前者随后者的增大而单调增长。以单质点结构为例,质点在水平地震作用下的位移为

$$\Delta = \frac{\alpha(T) W}{K} = \alpha(T) g \frac{M}{K} = \frac{\alpha(T) g}{4\pi^2} T^2 \quad (4)$$

式中: $\alpha(T)$ 为地震影响系数,随周期 T 变化; K 为结构刚度, g 为重力加速度。

与此相应,结构扭转位移角也与扭转周期有类似关系,结构扭转周期愈长,其扭转位移角愈大。由结构动力学可知,在假定楼层为刚性水平横隔时,单层对称结构的扭转周期为

$$T_t = 2\pi \sqrt{I_m / K_t} \quad (5)$$

式中 K_t 为结构扭转刚度, I_m 为结构楼盖的转动惯量, $I_m = \int_A m r^2 dA$, r 为质点与质心的距离。在扭转地震动作用下,结构的扭转位移角可表示为:

$$\theta_t = \frac{\alpha_t(T) I_m g}{K_t} = \frac{\alpha_t(T) g}{4\pi^2} T_t^2 \quad (6)$$

式中 $\alpha_t(T)$ 为扭转振动地震影响系数。上式只是说明扭转地震动将引起结构的扭转位移角,但实际上由于缺乏地震动地面扭转分量的数据,这项扭转位移是无法求得的。此外,如结构顶部出现扭转力矩 M_t , 结构也将产生扭转位移角,由下式表示

$$\theta_t = M_t / K_t \quad (7a)$$

式中 K_t 为结构扭转刚度。利用式(5),上式可改写为:

$$\theta_t = 4\pi^2 M_t T_t^2 / I_m \quad (7b)$$

在式(6), (7b) 中, θ_t 表示在扭转地震动或顶部扭转力矩作用下结构楼层产生的扭转位移角,与此同时,离开质心处距离 $r_i(x_i, y_i)$ 的竖向构件将产生由扭转引起的附加水平位移

$$\Delta_i = \theta_t r_i \quad (8a)$$

相当于产生的 x, y 向位移为:

$$\Delta_{xi} = \theta_t y_i \quad (8b)$$

$$\Delta_{yi} = -\theta_t x_i \quad (8c)$$

由此可知,在扭转地震动或顶部扭转力矩作用下,结构将产生扭转位移,即楼层扭转角及竖向构件因扭转位移引起的附加位移,其值也是随着结构扭转周期的增大而单调增大。

因此为了控制结构的扭转位移,可通过控制结构的扭转周期 T_t , 使结构具备必要的抗扭刚度,保证结构满足地震作用下的抗扭要求,更好地满足结构的抗震安全性。

四、关于偶然偏心的考虑方法

对于对称结构,水平地震作用下结构振动是解耦的,结构只产生沿水平地震作用方向的平动位移,而不产生扭转位移。对于规则结构,平动与扭转有轻微的耦连,在水平地震作用下结构除产生平动位移外,还将产生一定的扭转,但计算结果一般不大。再考虑到抗震规范还未给出扭转地震动参数供设计使用,因而由可能的地扭转振动引起的结构扭转位移是无法求出的。由于以上原因,抗扭刚度较小的对称和规则结构情况,由于目前科学技术水平的限制和计算方法的不

完备有可能造成扭转变形计算结果偏小而对结构的抗震安全性带来隐患,这也是 78 抗震规范与 89 抗震规范仅对结构的对称性与规则性提出要求,而没有同时提出需保证结构一定的抗扭刚度和抗扭承载力所存在的主要缺陷和不足。

为了保证地震作用下结构不致因扭转引起的可能变形估计不足而发生破坏,新抗震规范和新高规均引入了考虑附加偏心矩的规定。新抗震规范并未直接引入偏心矩的计算,但在 5.2.3 条第一款规定“规则结构不进行扭转耦联计算时,平行于地震作用方向的两个边榑,其地震作用效应应乘以增大系数。一般情况下,短边可按 1.15 采用,长边可按 1.05 采用;当扭转刚度较小时宜按不小于 1.3 采用”,其内涵显然是考虑偶然偏心引起扭转对边跨抗侧力构件引起的内力的增大。这一条规定在执行中已发现存在以下主要问题。

(1) 该规定并未明确规则结构如进行耦联计算应怎样处理,实际上现行软件进行耦联计算是很容易的,但对称结构在进行耦联计算时扭转位移为零,规则结构中相当部分的轻微不对称性结构,按耦联计算求出的结构扭转位移可能很小,这时如不采取措施对结构进行必要的处理与加强,结构在地震作用下的抗扭安全性会有所降低,其结构抗扭设计是偏于不安全的。

(2) 该规定只对两个边榑的地震作用乘以增大系数 1.05~1.3,但在扭转作用下,边榑以内的相邻榑实际上也存在因扭转引起的一定的地震增大作用,完全不加考虑在一定条件下可能是不合适的。

(3) 该规定引用的地震作用增大系数 1.05~1.3 多出自经验考虑,依据尚不够充分,尤其是规定结构扭转刚度较小时宜不小于 1.3 采用,既不方便设计时掌握应用,也还需要更多理论和试验研究成果验证。

新高规引入了考虑偶然偏心的计算规定,第 3.3.3 条规定“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下式采用:

$$e_i = \pm 0.05L_i \quad (9)$$

式中 e_i 为层 i 质心偏移值(m),各楼层质心偏移方向相同; L_i 为层 i 垂直于地震作用方向的建筑物总长度(m)。”

新高规并未明确考虑偶然偏心时采用什么方法计算,在执行时存在疑问,有以下两种方法解决。

(1) 按偶然偏心 $0.05L_i$ 进行扭转耦联计算

新高规对偶然偏心距确定为 $e_i = \pm 0.05L_i$,但未同时明确相应的楼层质量分布,即只确定了楼层总质量 M_i 的新的质心位置(o')将偏离原质心位置(o) $0.05L_i$,如图 3 所示,但未提供新的质量分布状态。应

指出,满足质心位置 $x = 0.05L$ 的楼层质量分布状态理论上可以有无穷多种分布,而任一种质量分布对新质心有自己对应的转动惯量 I_m ,即在理论上是不确定的,不存在唯一解。试举一例说明,设图 3 所示矩形楼层质量均匀分布,单位面积质量为 m ,则总质量为

$$M = aLm \quad (10)$$

其质心在中心点 o ,相应的转动惯量 $I_m = aLm(a^2 + L^2)/12$,现取 x 向偶然偏心 $0.05L$,假设 y 轴左右侧质量均匀分布,但左侧单位面积质量为 m_L ,右侧单位面积质量为 m_R ,则总质量应不变,可以表示如下

$$M = aL(m_L + m_R)/2 \quad (11)$$

新质心位置为 $x = 0.05L$,令 $\eta = m_R/m_L$,则有

$$0.05L = \frac{0.5aL[m_L(-0.25L) + m_R(0.25L)]}{0.5aL(m_L + m_R)}$$

整理可得下式

$$1 + \eta = 5(\eta - 1)$$

可解得

$$\eta = 1.5 \quad (12)$$

比较式(10)与(11),(12),可求得质心在 x 向偏移 $0.05L$ 后新的质量分布为

$$m_L = 0.8m, m_R = 1.2m$$

由此可求出对新质心 o' 的转动惯量为

$$I_m' = aLm(a^2 + 0.73L^2)/12$$

显然 I_m' 小于 I_m ,二者之差为

$$I_m - I_m' = 0.0225aLmL^3$$

当质量偏心愈多,二者差值会愈大。由此可见,新高规仅给出楼层偶然偏心值而未明确造成此质心偏移的新的质量分布状态,则对应于新质心的转动惯量是求不出来的,在水平地震作用下结构的扭转振动也是求不出来的,因而这一途径是不可行的。

(2) 按静力法将作用力施加于偏心位置的方法

多年前美国规范就曾经规定,在水平力作用下用偏心距 $0.05L$ 考虑对结构造成的扭转作用,我国《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规程》(TJ102-79)中也规定当设防烈度为 7,8 度时,质心与刚心重合的建筑取计算偏心距 $0.05L$ 来考虑结构的扭转作用,这些规定都是求出结构在水平地震作用或风力后,将该力以静力方式施加于结构偏心处来计算结构的扭转作用。因此在执行新高规对对称和规则结构进行扭转计算时,可先不考虑偶然偏心,按扭转耦联方法求出结构各层的地震作用,然后将它施加在 $\pm 0.05L_i$ 偏心处进

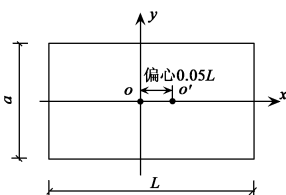


图3 规范偶然偏心计算

行计算,以求出结构的扭转影响。这一处理方法是切实可行的。

新高规偶然偏心取 $e_i = \pm 0.05L_i$ (L_i 为第 i 层垂直于地震作用方向的建筑物总长度),但并未明确不同建筑物平面,如三角形、圆形、工字形、T形、L形、十字形等的影响,一般理解为矩形平面,因此当平面形状对质心的位置有较大影响时,宜作适当修正。

五、对新高规中对称规则结构若干抗扭问题的讨论

(1)新高规第 3.3.3 条规定“单向地震作用时应考虑偶然偏心的影响”,要求所有楼层按同一方向偶然偏心 $\pm 0.05L$ 来计算水平地震作用下的结构抗扭。根据条文说明,规定主要是考虑结构由于施工、使用或地震地面运动的扭转分量等造成结构扭转的不利因素。这一规定对于对称结构和不对称性轻微的规则结构特别重要,因现行规范系沿用 89 规范提出的扭转耦连计算方法,在水平地震下求出结构的扭转位移为零或很小,容易在设计上疏忽结构抗扭能力的不足,显然不妥。

不难看出,新高规的规定实际上相当于在各层质心处施加了一个附加扭矩,以求出结构附加的扭转内力与位移。考虑了这一作用,相当于人为地赋予了结构一个最低限度的抗扭能力,即结构能抗御地震发生时不大于偏心距为 $\pm 0.05L$ 的附加地震扭转作用。从国外特别是美国等抗震技术发达国家的有关规定来看,这一规定有较多的实际经验为依据。

(2)新高规 3.3.3 条文说明中提出“当计算双向地震作用时,可不考虑质量偶然偏心的影响”。这对于对称和规则结构可能是不妥的。对称结构在双向地震作用下,计算扭转位移仍为零,与单向水平地震作用下考虑偶然偏心影响的计算结果相比较,显然偏于不安全。对于不对称性微弱的规则结构,当扭转内力与位移很小时,也可能小于由单向水平地震作用下考虑偶然偏心的计算结果而不起控制作用,因此这一说明不适用于对称和扭转规则结构。

(3)新高规第 4.3.5 条规定:“结构平面布置应尽量减少扭转影响。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本规程第 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。”同时第 4.3.5 条还规定:“结构扭转为主的第一自振周期 T_1 与平动为主的第一自振周期 T_1 之比, 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本规程第 10 章所指的复杂高层建筑不应大于 0.85。”

对于对称结构和规则结构,在水平地震作用下,前

者扭转位移比为零,后者小于 1.2。经过大量的工程设计实践,在附加偶然偏心的作用下,只要结构扭转周期值控制在一定范围内,控制结构扭转位移比不超过 1.5 或 1.4 的要求是不难满足的。该规定对结构扭转周期比给予限制,即限制扭转为主第一周期 T_1 与平动为主第一周期 T_1 的比值不超过 0.9 或 0.85,实际上起着控制结构扭转为主第一周期大小的作用,根据上述,控制结构的扭转周期实质上是保证结构具有一定的抗扭刚度,使结构在地震下的扭转位移不致过大。

与新规范相比较,78 与 89 抗震规范未明确提出对结构扭转位移和扭转周期的控制要求,后果是有可能导致扭转刚度很差、扭转周期过长等抗震设计不良的结构也获得通过,这在抗震设计中应引起注意。

致谢:在写作中韦承基教授、聂国隽博士、袁泉高工提供了宝贵意见,谨此致谢。

参 考 文 献

1. 工业与民用建筑抗震设计规范 (TJ11—78). 中国建筑工业出版社, 1978.
2. 建筑抗震设计规范 (GBJ11—89). 中国建筑工业出版社, 1989.
3. 建筑抗震设计规范 (GB50011—89). 中国建筑工业出版社, 2001.
4. 高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ3—2002). 中国建筑工业出版社, 2002.
5. 魏 珪. 钢筋混凝土高层建筑抗震设计手册. 地震出版社, 1991.
6. 魏 珪. 高层建筑结构位移控制研讨. 建筑结构, 2000, (6).
7. 魏 珪. 地震作用下建筑结构变形计算方法. 建筑结构学报, 1994, (4).
8. 魏 珪. 水平地震作用下不对称建筑的抗震计算. 建筑科学, 1990, (1).

(上接第 41 页)

转换板板底及板顶受弯纵筋的应变测量值与计算值分别如表 1 所示(限于篇幅,表中仅列出了部分结果)。表中“—”号表示受压。

从表 1 可见,除个别数据外(如表 1 中测点 5 板底测量值 $390\mu\epsilon$),总体上测量值与计算值符合较好。

五、结语

带板式转换层的高层建筑是一种复杂高层建筑,尤其是转换板的受力更为复杂,实际工程中虽有一些应用,但其设计计算方法仍有待进一步完善。工程完工近 2 年,使用情况良好,未出现异常现象。现场检测及实际使用情况表明其设计计算是合理的、可靠的,可供同类工程参考。

参 考 文 献

1. 吕志涛, 孟少平. 现代预应力设计. 中国建筑工业出版社, 1998.
2. 混凝土结构设计规范 (GB50010—2002). 中国建筑工业出版社, 2002.
3. 李培林, 吴学敏. 混凝土密肋及井式楼盖设计手册. 中国建筑工业出版社, 1994.
4. 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范 (GB50010—2002) 宣传培训教材, 2002.