

扭转不规则建筑竖向构件考虑扭矩影响的抗震验算方法

魏 琰 王 森

(上海魏琰工程结构设计事务所(深圳部) 深圳 518034)

[提要] 对水平地震作用下扭转不规则建筑竖向构件因层间扭转角引起的扭矩影响进行了分析,指出仅控制结构扭转位移比,并不能涵盖对于楼层及竖向构件产生扭转角,以及由此引起的扭矩不利影响的考虑和控制。提出了相应的竖向构件考虑扭转角影响在内的抗震验算方法,作为对新抗震规范和高规扭转不规则建筑抗扭设计方法的一点补充建议。

[关键词] 地震作用 扭转 设计方法 扭转角 扭转位移比

Aseismic Analysis on Torsion Angle Effect of Vertical Members in Torsionally Irregular Structure Wei Lian, Wang Sen
(Shanghai Wei Lian Structure Design Institute Shenzhen Office, Shenzhen 518034, China)

Abstract: Based upon the analysis on torsion angle effect of vertical members in torsionally irregular structure, it is pointed out that controlling torsional displacement ratio can not totally control the torsional angle of both the floor and the vertical members and disadvantageous effect on the member by torque aroused. It also provides methods on designing vertical members resisting torque as a supplementary suggestion to the torsion design methods described in the codes.

Keywords: seismic action; torsion; design method; torsional angle; torsional displacement ratio

0 前言

水平地震作用下不对称、不规则多高层建筑以及大底盘多塔楼结构塔楼各楼层可能产生明显扭转角变形,当假设楼层平面内无限刚,任意层 i 竖向构件上下端楼层扭转角之差,即层间扭转角将使该竖向构件产生同样的扭转角,并产生相应的扭矩,使在原来处于压、弯、剪的受力状态下的竖向构件又增加了扭矩作用,对构件的抗剪、抗弯承载力都带来不利的影响。对于可能产生较大扭转角变形的明显不规则的多高层建筑,在抗震设计时应充分考虑扭转角变形较大可能带来的各种不利因素,更好地保证结构的抗震安全性。在1972年南美洲马那瓜地震中,一座15层的中央银行大厦因电梯、楼梯间筒体设于西北隅一角,造成质心与刚心的严重偏离,在地震中扭转变形很大,造成了严重的震害,不仅筒体墙产生扭转与抗剪破坏,楼板斜裂缝贯通直至筒体的东面,裂缝宽度达10mm,结构濒临倒塌。又如1975年我国海城地震中大量L形不对称多层建筑在长翼端的端墙出现严重的斜裂缝并有明显的扭转变形。近年来发生的日本神户地震和台湾花莲地震等都不乏见扭转破坏的工程案例。

目前,按新抗规^[1]、新高规^[2]进行抗震设计时,对于水平地震作用下各楼层可能产生扭转角变形的结构,提出了结构扭转位移比与扭转周期比限值的规定,这比89规范有了进步。但两本规范和国外有关抗震规范都未提到结构各楼层在水平地震作用下产生的楼

层扭转角对于竖向构件造成扭转可能带来的不利影响,也未提出层间扭转角的限值或其不利影响应怎样控制,而新抗规、新高规规定的控制结构扭转位移比的要求,并不能涵盖对于楼层及竖向构件产生扭转角,以及由此引起扭矩不利影响的考虑和控制。下面对这一问题进行研究,提出一些设计建议,供今后规范修订和广大结构工程师实际设计时参考。

1 扭转位移比与层扭转角的关系

考虑到目前尚无充分的试验资料供确定层间扭转角的适宜限值,因此直接验算层间扭转角的做法目前尚不成熟,拟通过楼层层间扭转角造成竖向构件的扭矩计算与相应的截面控制、配筋计算、构件抗扭抗剪承载力的验算来达到控制楼层扭转角不致过大,满足结构抗震安全性的目的。

结构各不对称不规则楼层和竖向构件在水平地震作用下将产生扭矩和扭转角,现行抗规与高规规定扭转位移比的定义是楼层竖向构件的最大水平位移和层间位移 $\Delta_{\max}$ 与该层相应平均位移 Δ_a 的比值,可以表示为

$$\mu_t^* = \Delta_{\max} / \Delta_a \quad (1)$$

并规定该比值“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。”下面将重点探讨

μ_t^* 与层间扭转角 θ_t 的关系。

抗规规定采用楼层平面无限刚的假定, 则楼层平面内产生的层间扭转角用 θ_t 表示, $\Delta_{\max}$ 可改写为:

$$\Delta_{\max} = \Delta_a + \Delta_{\max} = \Delta_a + \theta_t x_m \quad (2)$$

故式(1)可相应改写为

$$\mu_t^* = 1 + \theta_t x_m / \Delta_a \quad (3)$$

式中 x_m 为转动中心至边端抗侧力构件的距离。

引入新的扭转转移比 μ_t , 其定义为边端抗侧力构件因楼层扭转在平均位移外引起的附加扭转位移,

$$\mu_t = \theta_t x_m / \Delta_a \quad (4)$$

现行高规规定 μ_t^* 为 1.4 ~ 1.5 (相应于 μ_t 为 0.4 ~ 0.5), 则由上式可得

$$\theta_t = \frac{(0.4 \sim 0.5) \Delta_a}{x_m} \quad (5)$$

由此可见, 层间扭转角 θ_t 与层间平均位移比 Δ_a 成正比, 而与距离 x_m 成反比, 它表明规范在规定扭转位移比限值 μ_t^* 时, 并不能同时控制层间扭转角 θ_t 的大小, 也必然满足设计要求, 因为对 μ_t^* 维持同一值 1.4 ~ 1.5 (或 μ_t 维持 0.4 ~ 0.5) 的条件下, 对 Δ_a 较大而 x_m 较小的情况, θ_t 值可能较大而在竖向构件内引起较大的扭矩; 而当 Δ_a 值较小而 x_m 较大的情况, θ_t 值可能较小, 两者可能相差若干倍。简单来说, 在相同 Δ_a 的情况下, θ_t 值与 x_m 值反比。由此可知, 当设计仅控制扭转转移比时, 对于长度不同的建筑, Δ_a 相差较多时, 二者的层间扭转角可以相差好多倍, 因此, 对楼层扭转角或层间竖向构件因附加扭矩引起的不利影响进行验算或控制是必要的。但目前尚无足够试验资料和工程经验来提出楼层扭转角的适宜限值, 因此直接通过楼层扭转角来验算和控制尚难以实现, 设计者应采取其他合适方法来验算楼层及竖向构件扭转角及由此引起的扭矩对构件承载力造成的不利影响, 这是抗震设计中需引起重视并予以合理解决的问题。

2 关于楼层扭转角的计算方法

考虑构件扭矩对其承载力的不利影响, 应先求出楼层(构件)的扭转角。竖向构件在 xy 平面内的扭转角在构件的单元刚度矩阵中已有反映: 当采用刚性楼盖假定时, 所有构件的扭转角与整个楼层的扭转角相同; 当采用弹性楼盖假定时, 各个竖向构件的扭转角不同, 不论是整个楼层的扭转角还是某个竖向构件的扭转角, 在形成结构总体刚度求解方程后均可求得。当前的 SATWE 分析软件没有给出结构的楼层扭转角和构件的扭转角, 但国外一些通用有限元分析软件, 如 SAP2000, ETABS 等均可以给出楼层和构件的扭转角, 从而也可求出竖向构件的层间扭转角。

3 水平地震作用下竖向构件扭矩公式

水平地震作用下不规则高层建筑竖向构件产生的扭矩与楼层扭转角息息相关。如图 1 所示, 一个不规则结构在水平地震作用下, 任一楼层 i 将产生扭转角, 当假设楼盖在平面内为无限刚时, 整个楼盖的扭转角均为同一值 θ_{ti}^* , 与此相应, 层 $i-1$ 也将产生相应的扭转角 θ_{ti-1}^* , 层 i 任一竖向构件 j 在上端及下端之扭转角差 θ_{tji} , 即楼层的层间扭转角为二者之差

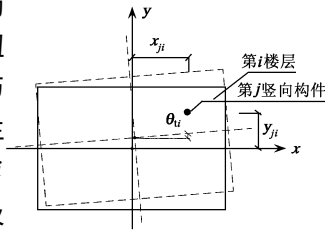


图 1

$$\theta_{tji} = \theta_{ti}^* - \theta_{ti-1}^* \quad (6)$$

该竖向构件 j 所产生的地震扭矩为

$$T_{tji} = K_{tji} \theta_{tji} \quad (7)$$

式中 K_{tji} 为层 i 竖向构件 j 的截面抗扭刚度。

当楼盖平面内为弹性变形时, 楼盖各竖向构件处的扭转角互不相同, 在计算构件的扭矩时, 应直接取构件 j 上下端的扭转角差 θ_{tji} 。

按照高层建筑抗震设计原则, 首先是控制多遇地震作用下的构件承载力满足规范要求, 同时要考虑结构的变形控制和抗震等级各项构造措施要求, 满足设防烈度地震作用下结构只产生可修的轻微破坏, 以及防止罕遇地震作用下结构倒塌。在竖向荷载和水平地震作用下, 高层建筑竖向构件柱或墙一般是处于压、弯、剪复合受力状态, 对于扭转不规则结构, 水平地震作用下结构各楼层可能产生明显的扭转角变形, 导致各竖向构件发生扭转, 因而处于扭、压、弯、剪的联合受力状态。根据新抗规第 5.4.2 条对结构构件的截面抗震验算, 采用下列设计表达式

$$S \leq R / \gamma_{RE} \quad (8)$$

式中 γ_{RE} 为承载力抗震调整系数, R 为结构构件承载力设计值。根据新抗规表 5.4.2, 截面抗扭设计时承载力抗震调整系数 γ_{RE} 可取 0.85 ~ 0.90。

4 竖向构件的抗扭计算

4.1 构件截面验算

根据《混凝土结构设计规范》^[4] 中第 7.6.1 条的弯矩、剪力、扭矩共同作用下的截面验算条件, 参照《混凝土结构设计规范》第 7.5.1 条对截面受剪验算条件及《建筑抗震设计规范》(50011—2001) 第 6.2.9 条和《高层建筑混凝土结构技术规程》第 6.2.6 条对地震作用组合工况下框架柱截面剪力设计值的要求, 建议地震作用组合工况下框架柱、剪力墙在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的截面验算条件: 对于剪跨比大于 2 的柱及

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.20\beta_c f_c / \gamma_{RE} \quad (9)$$

对于剪跨比不大于2的柱及剪力墙

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq 0.15\beta_c f_c / \gamma_{RE} \quad (10)$$

式中: T 为扭矩设计值; V 为剪力设计值; b 为矩形截面的宽度; h_0 为截面的有效高度; W_t 为受扭构件的截面受扭塑性抵抗矩, 按规范^[5]第7.6.3条的规定计算; β_c 为混凝土强度影响系数; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数, 取0.85~0.90。

4.2 截面的受扭塑性抵抗矩 W_t 的计算

《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002) 中对 $h_w/b \leq 6$ 的矩形、T形、I形截面和于 $h_w/l_w \leq 6$ 的箱形截面构件的截面受扭塑性抵抗矩 W_t 值进行了规定, 其中矩形截面的受扭塑性抵抗矩 W_t 值为

$$W_t = \frac{b^2}{6}(3h - b) \quad (11)$$

式中 b , h 分别为矩形截面的短边、长边尺寸。假设矩形截面面积一定, 变化截面长短边之比 h/b , 取 $h/b = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, 其相应的受扭塑性抵抗矩 W_t 分别为 $W_{t1}, W_{t2}, W_{t3}, W_{t4}, W_{t5}, W_{t6}$, 则 $W_{t6}:W_{t5}:W_{t4}:W_{t3}:W_{t2}:W_{t1}$ 为 0.578:0.626:0.688:0.770:0.884:1。由此可见, 相同截面面积条件下, 截面长宽比越大, 其受扭塑性抵抗矩值越小。

对于 T、I 形截面, 其截面受扭塑性抵抗矩值 W_t 为腹板、翼缘各部分受扭塑性抵抗矩之和, 腹板、翼缘受扭塑性抵抗矩值计算公式与矩形截面相同, 其分担的扭矩按相应截面受扭塑性抵抗矩比例分配。箱形截面的受扭塑性抵抗矩等于外矩形截面的受扭塑性抵抗矩与内矩形截面的差。

4.3 截面配筋计算

根据《混凝土结构设计规范》第7.6.13条中对于 $h_w/b \leq 6$ 的矩形、T形、I形截面和 $h_w/l_w \leq 6$ 的箱形截面构件对截面受扭承载力规定, 参照《混凝土结构设计规范》第7.5.12条及《高层建筑混凝土结构技术规程》第6.2.8条对矩形截面柱斜截面受剪承载力计算公式, 建议地震作用下矩形截面框架柱在轴向压力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下的钢筋混凝土矩形截面框架柱, 其受剪扭承载力应符合下列规定。

(1) 受剪承载力验算

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[(1.5 - \beta_t) \left(\frac{1.05}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 0.056 N \right) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \right] \quad (12)$$

(2) 受扭承载力验算

$$T \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[\beta_t \left(0.21 f_t + 0.056 \frac{N}{A} \right) W_t + 1.2 \sqrt{\zeta} f_{yv} \frac{A_{st1} A_{cor}}{s} \right] \quad (13)$$

其中: λ 为计算截面的剪跨比, 对各类结构的框架柱, 宜取 $\lambda = M/Vh_0$; 对于框架结构的框架柱, 当其反弯点位置在层高范围内时, 可取 $\lambda = H_n/2h_0$; 当 $\lambda < 1$ 时, 取 $\lambda = 1$, 当 $\lambda > 3$ 时, 取 $\lambda = 3$ (此处, M 为计算截面上与剪力设计值 V 相应的弯矩设计值); H_n 为柱净高; β_t 为剪扭构件混凝土受扭承载力降低系数, 按下式计算:

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.2(\lambda + 1) W_t / T b h_0} \quad (14)$$

当 $\beta_t < 0.5$ 时, 取 $\beta_t = 0.5$; 当 $\beta_t > 1$ 时, 取 $\beta_t = 1$; ζ 为受扭的纵向钢筋与箍筋的配筋强度比值, 按下式计算:

$$\zeta = f_y A_{st1} s / f_{yv} A_{st1} u_{cor}$$

应符合 $0.6 \leq \zeta \leq 1.7$ 的要求, 当 $\zeta > 1.7$ 时, 取 $\zeta = 1.7$ 。试验表明, 当 ζ 值在 0.5~2.0 范围内, 钢筋混凝土受扭构件破坏时其纵筋和箍筋基本能达到屈服强度, 当 ζ 为 1.2 左右时为钢筋达到屈服的最佳值; A_{cor} 为截面核心部分的面积: $A_{cor} = b_{cor} h_{cor}$, 此处 b_{cor} , h_{cor} 为箍筋内表面范围内截面核心部分的短边、长边尺寸; u_{cor} 为截面核心部分的周长, $u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor})$; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; A_{sv} 为同一截面内各肢竖向箍筋的全部截面面积; A_{st1} 为受扭计算中单肢箍筋的截面面积; f_{yv} 为箍筋强度设计值; s 为箍筋的间距; N 为与剪力设计值 V 相应的轴向压力设计值, 当 $N \geq 0.3 f_c A$ 时, 取 $N = 0.3 f_c A$, A 为构件的截面面积。

5 工程算例

[例1] 某27层商住楼, 地下2层, 地上裙房3层为商场, 上部为24层住宅, 结构形式为部分框支剪力墙结构。3层一框支柱截面为 1000×1000 , 层高4.8m, 混凝土强度等级 C50, 承受的地震作用组合力为: 轴压力8000kN, 剪力3000kN, 扭矩120kN·m, 该构件的扭转角约为 $1/4240$ 。经验算, 可不考虑扭转对构件承载力的影响作用。

[例2] 某24层的办公楼, 结构形式为框架剪力墙结构, 首层层高为5m, 混凝土强度等级 C45, 其中一框架柱截面为 1200×1200 , 承受的地震作用组合力为: 轴压力10000kN, 剪力4000kN, 扭矩400kN·m, 该构件的扭转角约为 $1/2310$ 。经验算, 该构件截面满足截面验算条件, 但应考虑扭矩对构件承载力的影响作用, 取受扭的纵向钢筋与箍筋的配筋强度比值 ζ 为1.2, 纵筋箍筋分别采用 HPB235 和 HRB335, 构件的抗扭承载力不足, 应附加纵筋 1342mm^2 , 附加箍筋面积/箍筋间距 $0.34\text{mm}^2/\text{mm}$ 。

(下转第20页)

提高位移延性后不同性能水平时的结构基底剪力 表 5

$[\theta]$	$\alpha_{\max}$	u_i (mm)	u_{eff} (mm)	M_{eff} ($N \cdot s^2/mm$)	μ	ζ_{eff}	T_{eff} (s)	K_{eff} (kN/mm)	V_b (kN)
1/500	0.08	38.856	29.679	637.819	1.0	0.05	2.050	5.993	177.877
1/200	0.23	103.052	77.127	604.610	2.0	0.109	2.251	4.711	363.353
1/50	0.50	382.153	267.724	554.512	4.0	0.15	3.550	1.737	465.104

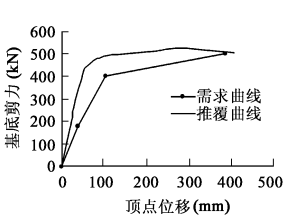


图 7 修正后的需求曲线与 Pushover 曲线

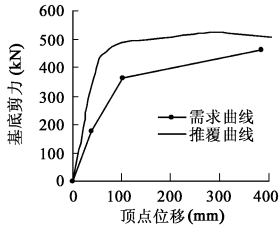


图 8 提高位移延性后的需求曲线与 Pushover 曲线

4.5 提高结构的抗震能力

若按上述方法调整后,仍不能满足大震时的性能目标要求,说明所设计的结构的抗震能力偏低,应提高结构的抗震能力。其具体的办法是:从图 4 所示塑性铰分布图中,找出出现塑性铰较早的构件,对其进行加强,尤其是加强柱脚出现塑性铰的部位,应增加构件的局部配筋或调整截面尺寸,进行重新设计,直到满足性能目标要求。

5 结论

(1) 对于框架结构,以层间位移角限值确定其目标侧移曲线;对剪力墙结构和框架-剪力墙结构,以剪力墙下端截面的曲率达到其屈服曲率为依据确定其目标侧移曲线。这样处理不仅考虑了不同结构各自的特点,而且反映了结构是在控制截面处首先达到某一极限状态的客观情况。

(2) 用 Pushover 分析结果中的相应侧移曲线代替初始目标侧移曲线进行计算,不仅收敛快,而且反映了结构的实际情况。

(3) 方法不仅能对结构在小震和大震情况下的性能进行控制,而且也能控制结构在中震时的性能。通过 8 层钢筋混凝土框架结构的算例分析表明,这种方法简单实用,便于操作,而且能够控制结构在不同强度水准地震作用下的性能。

(4) 在本算例中,对应于人身安全和防止倒塌性能水平,结构的基底剪力比使用良好时相应的基底剪力大很多,说明结构的初始刚度偏低,导致小震结构的抗震需求偏低。因此,按使用良好性能水平设计的结构应当有较大的富余,才能满足人身安全和防止倒塌性能水平时结构的抗震需求。

(5) 增大结构在人身安全和防止倒塌性能水平时的位移延性,可以有效地减小基底剪力。也就是说,提

高位移延性可以很有效地降低结构的地震反应,但应采取相应的措施保证其位移延性。因此,通过位移控制可以有效地控制结构在中震和大震作用下的行为,这是传统的基于力的抗震设计方法无法办到的,但正好与基于位移的抗震设计思想是统一的。

参 考 文 献

[1] KOWALSKY MJ, PRIESTLEY MJN, MACRAE GA. Displacement-based design of RC bridge columns in seismic regions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24: 1623-1643.

[2] MEDHEKAR MS, KENNEDY DTL. Displacement-based seismic design of building-theory[J]. Engineering Structures, 2000, 22: 201-209.

[3] 钱稼茹,罗文斌. 建筑结构基于位移的抗震设计[J]. 建筑结构, 2001, 31(4).

[4] 罗文斌,钱稼茹. 钢筋混凝土框架结构基于位移的抗震设计[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5).

[5] 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S]. 北京:中国建筑工程工业出版社, 2001.

[6] 童岳生等. 砖填充墙框架的变形性能及承载力[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1985(2).

[7] SEAOC VISION 2000 Committee. Performance-based seismic engineering. Sacramento, California, US, 1995.

[8] 郭子雄. 基于变形的抗震设计理论及应用研究[D]. 同济大学, 2000.

[9] 郭子雄,童岳生. 钢筋混凝土低矮剪力墙性能研究[J]. 工程力学, 1995(增刊).

[10] KOWALSKY MJ. RC structural walls designed according to UBC and displacement-based method[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127: 506-516.

[11] MIRANDA E, GARCIA JG. Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31: 539-560.

(上接第 10 页)

6 结语

针对现行国内外规范尚无对地震作用下楼盖扭转角变形较大时考虑竖向构件扭矩带来的不利影响的設計方法与限制规定,又鉴于现行技术发展水平也暂不可能提出扭转角适宜限值的规定,提出了考虑竖向构件扭矩影响在内的抗震强度验算方法作为补充建议,以更好地保证结构的抗震安全性。对于刚心和质心明显偏离的不对称结构,以及沿竖向层扭转刚度有明显不均匀和抗扭刚度薄弱层的结构,更应予以重视,应采取适当措施防止扭转角过大带来的可能危害。

参 考 文 献

[1] 建筑抗震设计规范(GB50011—89)[S]. 北京:中国建筑工程出版社, 2001.

[2] 高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ3—2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.

[3] 魏琰,王森. 论水平地震作用下对称和规则结构的抗扭设计[J]. 建筑结构, 2005, 35(5).

[4] 魏琰,王森. 水平地震作用下不对称不规则结构抗扭设计方法研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(8).

[5] 混凝土结构设计规范(GB50010—2002)[S]. 北京:中国建筑工程出版社, 2002.