

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.009

钢筋混凝土牛腿结构拉压杆模型及配筋设计

李树山^{1,2}, 高丹盈², 解伟¹

(1. 华北水利水电学院 土木与交通学院, 郑州 450011; 2. 郑州大学 新型建材与结构研究中心, 郑州 450002)

摘要: 美国混凝土结构规范(ACI 318-08)将拉压杆模型设计方法作为规范性附录, 用于指导混凝土结构 D 区的设计。首先介绍拉压杆模型构成, 分析按中国规范(GB 50010-2010)的设计参数(荷载、混凝土强度、钢筋强度)设计时, 压杆、拉杆及节点区内力的计算, 提供了设计步骤。按照中国规范参数, 对牛腿结构进行拉压杆模型设计, 对比分析了按建议方法进行设计时与按 ACI 318-08 规范设计时安全度的差别。算例分析表明, 按建议的拉压杆方法进行牛腿结构设计, 力学概念清晰, 计算简便, 与中国规范规定设计方法的安全度水平相当, 可用于钢筋混凝土牛腿结构的设计。

关键词: 钢筋混凝土牛腿; D 区; 拉压杆模型; 配筋设计; 安全度

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0036-04

Strut-and-tie Model for Reinforced Concrete Corbels and Reinforcement Design

Li Shushan^{1, 2}, Gao Danying², Xie Wei¹

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, P. R. China; 2. Research Center of New Building Material and Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, P. R. China)

Abstract: In American code for design of Concrete Structures (ACI 318-08), the strut-and-tie model method was used as a normative appendix for D-region design of reinforced concrete members. The constituent of the strut-and-tie model was introduced. Calculation of internal forces in struts, ties and node zone were proposed according to the design parameters (loading, concrete strength, steel strength) of the current Chinese code (GB 50010-2010). Then the design procedure was provided. Strut-and-tie model design method for reinforced concrete corbels was proposed following Chinese code parameters which degree of safety was compared with in ACI 318-08 through an example. The compared result shows that the proposed method can be used for the design of reinforced concrete corbels with clearer mechanical concepts and easier calculations.

Key words: reinforced concrete corbels; D-region; strut-and-tie model; reinforcement design; degree of safety.

国际上现行混凝土设计规范中, 钢筋混凝土梁在受弯、剪、扭等荷载作用下, 结构设计采用了桁架模型理论。但是基于标准桁架模型的设计只适宜于结构的普通部分。在几何或荷载的不连续区域, 如集中力作用点、孔洞周围、框架节点、支托等, 桁架模型就不适用, 这些部位一般只能根据试验或凭经验设计。为了使结构的所有部分都按照有依据的和协调一致的设计思想来设计, 从桁架模型推广发展而来的拉压杆模型(strut-and-tie model)的方法逐渐成熟而被推荐应用^[1]。拉压杆模型由节点、压杆和拉杆组成, 可按结构的弹性主应力迹线建模, 充分发挥了桁架轴力计算的简便^[2]。根据截面的特性和受力情况, 截面可分为 B 区(B 表示梁或伯努利)和 D 区(D 表示不连续、扰乱)^[3]。实践表明, 拉压杆模型用于 D 区的计算具有相当好的工程精度^[4-11]。根据美国规范 ACI 318-08^[12], 介绍了拉压杆模型的设计计算方法, 并根据中国规范 GB 50010-2010^[13]的设计表达式, 建议了

采用国内规范参数表达的牛腿结构承载力的拉压杆模型计算公式, 并进行了安全度分析。

1 拉压杆模型介绍

图 1 为深梁结构的拉压杆模型, 由压杆、拉杆和节点组成。拉压杆模型以塑性理论为基础^[1], 拉杆代表钢筋的作用, 压杆代表受压混凝土的作用。拉杆和压杆轴力可通过节点平衡法或截面法等方法求得。下面根据 ACI 318-08 规范, 对拉压杆模型的组成及设计表达式进行介绍。

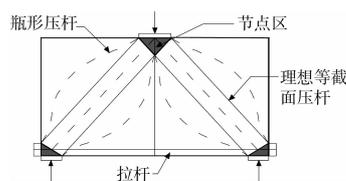


图 1 深梁结构的拉压杆模型

收稿日期: 2013-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779018); 郑州市科技领军人才计划(112PLJRC354)

作者简介: 李树山(1977-), 男, 副教授, 博士生, 主要从事混凝土材料与结构性能研究, (E-mail)lishushan@ncwu.edu.cn。

1.1 节点

拉压杆模型连接处的点,作用有拉压杆的轴力和作用于交点处的集中力,称之为节点,如图 2 所示,图 2(a)显示一个 C-C-C 节点模型,即 3 面受压的节点。节点周围的混凝土假定为可以通过节点传递拉压力,称之为节点区。按传统做法,采用流体静力学的节点区域,如图 3 所示。流体静力学节点区域含有垂直于作用于节点处的杆轴线的承载面,并在承载面上受均部力。如果节点区表面的压力等于 3 个压杆中的合力,节点区域 3 边的长度比例 $w_{n1} : w_{n2} : w_{n3}$ 的值应与 $C_1 : C_2 : C_3$ 的值相同。流体静力学节点区域表面垂直于作用于节点处的杆轴线。这些节点区被称为流体静力学节点区的原因是同一平面内的作用力在任何方向的作用都是相同的。严格来说,这一术语是不正确的,因为同一平面内的作用力并不等效于非同一平面的作用力。

$$\frac{C_1}{W_{n1}} = \frac{C_2}{W_{n2}} = \frac{C_3}{W_{n3}} \quad (1)$$

节点区标准抗压强度 F_{nn}

$$F_{nn} = f_{ce} A_{nz} \quad (2)$$

式中: f_{ce} 为节点区混凝土的有效抗压强度。ACI318-08 规定,除采用被实验分析研究验证的约束钢筋,拉压杆模型中节点区的任意表面积有效抗压强度不应超过下述规定:

$$f_{ce} = 0.85\beta_n f'_c \quad (3)$$

其中: β_n 可按表 1 规定取值; f'_c 为美国规范中圆柱体混凝土的抗压强度设计值; A_{nz} 为节点区垂直于拉杆或压杆的截面积。

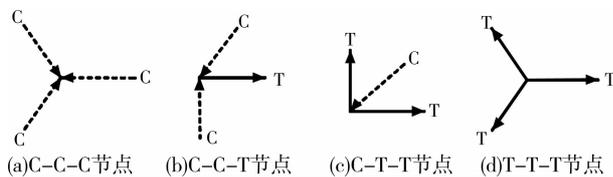


图 2 节点类型

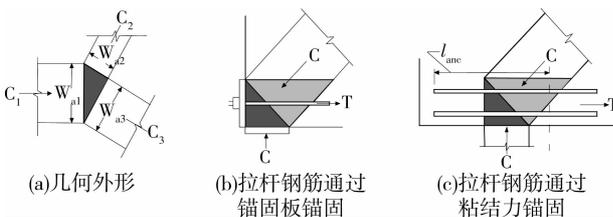


图 3 节点区示意图

1.2 压杆

在设计中,压杆通常被简化为等截面的压缩构件,若压杆两端节点区强度不同或有不同的支撑长度引起两端抗压强度 f_{ce} 不同时,压杆可简化为一均匀的变截面压缩构件。

无纵向钢筋的压杆标准强度应取压杆两端较小的 F_{ns} ,

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} \quad (4)$$

式中: A_{cs} 为压杆端部横截面积,计算 A_{cs} 时所取的压杆宽度 W_s ,应为压杆两端垂直于主轴方向的较小者。压杆宽度示意图见图 2(a)。在二维结构中,如牛腿,压杆厚度可取为构件宽度。 f_{ce} 为压杆或节点区混凝土有效抗压强度中的较小值。其中,压杆混凝土有效抗压强度 f_{ce} 取

$$f_{ce} = 0.85\beta_s f'_c \quad (5)$$

式中: β_s 按照表 1 取值; f'_c 为美国规范中的圆柱体混凝土的抗压强度设计值。

表 1 ACI 318-08 规定的压杆和节点有效抗压强度

部位	有效抗压强度
压杆	$f_{ce} = 0.85\beta_s f'_c$
	等截面压杆, $\beta_s = 1.0$;
	受拉构件或构件受拉翼缘中的压杆, $\beta_s = 0.4$;
	有控制裂缝钢筋的瓶形压杆, $\beta_s = 0.75$;
	无控制裂缝钢筋的瓶形压杆, $\beta_s = 0.6\lambda$, λ 是与混凝土品种有关的系数;
所有其他情况, $\beta_s = 0.6$	
节点	$f_{ce} = 0.85\beta_n f'_c$
	节点受到压杆或承载面积约束, $\beta_n = 1.0$;
	节点只锚固 1 个拉杆, $\beta_n = 0.8$; 节点锚固 2 个或多个拉杆, $\beta_n = 0.6$

1.3 拉杆

拉杆由钢筋或预应力筋及外包混凝土组成。外包混凝土也包括以上定义的用于拉压杆力锚固的节点区混凝土部分,拉杆中混凝土不参与拉杆受力。尽管在设计中不予考虑,外包的混凝土却能够减少荷载作用下特别是工作荷载作用下的拉杆延长率。

拉杆标准强度 F_{nt} 为

$$F_{nt} = A_{ts} f_y + A_{tp} (f_{se} + \Delta f_p) \quad (6)$$

其中: $(f_{se} + \Delta f_p) \leq f_{tp}$, 对非预应力构件 $A_{tp} = 0$ 。采用有粘结预应力筋时, $\Delta f_p = 420$ MPa, 采用无粘结预应力筋时, $\Delta f_p = 70$ MPa, 其余情况可根据实验分析确定。

拉压杆模型中拉杆主轴方向应与拉杆中钢筋主轴方向重合。设计拉杆有效宽度 W_t 时,可根据受拉钢筋的分布,采用以下规定:1)若拉杆配置单层钢筋,拉杆有效宽度取 5 倍钢筋直径,见图 4(a);2)拉杆宽度的最大值可取为与节点区相对应的宽度:

$$W_{t,max} = \frac{F_{nt}}{f_{ce} b_s} \quad (7)$$

其中: f_{ce} 为节点区混凝土有效抗压强度值。若拉杆宽度超过(1)计算值,拉杆钢筋应均匀分布在拉杆宽度和厚度范围内,见图 4(b)。

1.4 拉压杆模型设计步骤

拉压杆模型能够简化为桁架模型,应能将设计极限荷载转移至支座或相邻的 B 区域。结构构件中 D 区域的设计主要包括以下 4 个步骤:1)定义并规定 D 区域范围。2)计算 D 区域所有边界上所受合力。3)选择合理的桁架模型承受 D 区域所受合力。拉杆和压杆的主轴应分别近似的与压缩和张拉区域主轴重合。计算拉杆和压杆受力。4)应用第 3)步计算出的各杆件受力与有效混凝土强度,计算压杆和节点区的有效宽。应用拉杆区钢筋强度计算拉杆钢筋用量。

2 建议的拉压杆模型设计方法

2.1 设计表达式

美国规范 ACI 318-08 中承载力设计表达式不同于中国规范 GB 50010-2010,美国规范中 F_n 相当于中国规范的荷载效应设计值, ϕF_n 相当于中国规范的抗力设计值。因此,在进行拉压杆模型设计时,应考虑两国规范设计表达式

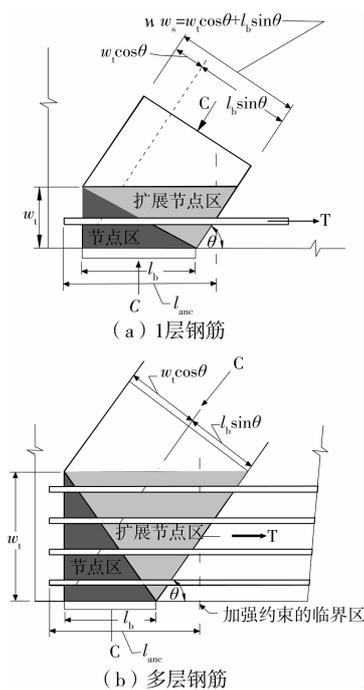


图 4 钢筋层数对拉杆有效宽度的影响

的差异性,进行必要转换。

根据中国规范规定,钢筋混凝土结构承载能力极限状态的设计应满足下式要求:

$$\gamma_0 S \leq R = R(f_c, f_s, a_k, \dots) / \gamma_{Rd} \quad (8)$$

式中: S 为承载能力极限状态的作用组合的效应设计值; $R(\ast)$ 为结构构件的抗力设计值; γ_0 是结构重要性系数; f_c 、 f_s 为材料强度设计值; a_k 为构件几何参数标准值。

2.2 荷载效应

GB 50010-2010 采用以可靠度为基础的分项系数设计法,荷载设计值为分项系数乘以效应标准值。ACI 318-08 规范采用基于可靠度的荷载系数,乘系数的荷载相当于中国规范的荷载设计值^[14]。因此,在参考 ACI 318-08 规范进行拉压杆模型进行设计时,荷载效应采用荷载效应设计值。

2.3 压杆和节点区的受压承载力

对于压杆和节点区,其承载力主要取决于混凝土抗压强度,根据文献[15]的研究, $\varphi \times 0.85f'_c$ 与中国规范中的 f_c 相近似,因此压杆和节点区的承载力计算公式可直接套用 ACI 318-08 规范公式,仅将其用 GB 50010-2010 规范中的符号表示。

按式(4)和(5),压杆乘系数的强度按下式计算

$$\varphi F_{ns} = \varphi f_{ce} A_{cs} = \varphi(0.85\beta_n f'_c) A_{cs} \quad (9)$$

因此,对于式(9)采用中国规范的符号表示,压杆的受压承载力 N_{su} 为

$$N_{su} = \varphi f_{ce} A_{cs} = \beta_n f_c A_{cs} \quad (10)$$

式中:折减系数 $\varphi = 0.75$; f_c 为中国规范中的混凝土抗压强度设计值; β_n 按表 1 取值。

按照式(2)和(3),节点区乘系数的强度按下式计算

$$\varphi F_{nn} = \varphi f_{ce} A_{nz} = \varphi(0.85\beta_n f'_c) A_{nz} \quad (11)$$

因此,对于式(11)采用中国规范的符号表示,节点区承载力 N_{nu} 为

$$N_{nu} = \varphi f_{ce} A_{nz} = \beta_n f_c A_{nz} \quad (12)$$

式中:折减系数 $\varphi = 0.75$; f_c 为中国规范中的混凝土抗压强度设计值; β_n 按表 1 取值。

2.4 拉杆的受拉承载力

按式(6),拉杆乘系数的强度按下式计算

$$\varphi F_{nt} = \varphi A_{ts} f_y + \varphi A_{tp} (f_{se} + \Delta f_p) \quad (13)$$

式中的 f_y 是 ACI 318-08 规范中的钢筋屈服强度规定值。

ACI 318-08 中抗力折减系数 φ 相当于 GB 50010-2010 规范中抗力分项系数 γ_R 的倒数,即 $\varphi = \frac{1}{\gamma_R}$ 。由于 ACI 318-08 规范认为“D 区”受剪破坏均为脆性破坏,故其拉压杆模型中压杆、拉杆或节点区的承载力计算统一取 $\varphi = 0.75$ 。对于拉杆,其承载力主要取决于钢筋受拉强度,因 $\frac{1}{\gamma_s} = 0.91 \sim 0.83$,与 ACI 318-08 规范的 $\varphi = 0.75$ 相差较大,故在抗拉承载力设计中引入抗力折减系数 φ_1 介于 0.82 和 0.9 之间,近似取 $\varphi_1 = 0.85$ 。

因此,对于公式(13)采用中国规范的符号表示,即拉杆的受拉承载力

$$N_{tu} = \varphi_1 [A_s f_y + A_p (\sigma_{pe} + \Delta f_p)] = 0.85 [A_s f_y + A_p (\sigma_{pe} + \Delta f_p)] \quad (14)$$

式中: f_y 是 GB 50010-2010 规范中钢筋屈服强度设计值,与公式(13)中的概念 f_y 不同。

2.5 安全度分析

针对钢筋混凝土牛腿结构,采用文中建议的拉压杆模型设计方法时,在 GB 50010-2010 规范中恒荷载、活荷载标准值、普通钢筋、预应力钢筋强度标准值与 ACI 318-08 规范中恒荷载、活荷载名义值、普通钢筋、预应力钢筋强度规定值相同的前提下,由于按 GB 50010-2010 规范计算的荷载效应小于 ACI 318-08 规范,但抗力设计值也小于 ACI 318-08 规范,因此,按文中方法设计的压杆安全度水平与按 ACI 318-08 规范方法大体相当;而按本文方法设计的拉杆和节点的安全度水平较按美国规范方法低,但仍与 GB 50010-2010 规范安全度水平相当。

3 算例

如图 6 所示的牛腿结构。承受的集中永久荷载 $G_K = 500$ kN,可变荷载 $Q_K = 250$ kN。采用拉压杆模型方法对牛腿构件进行设计。

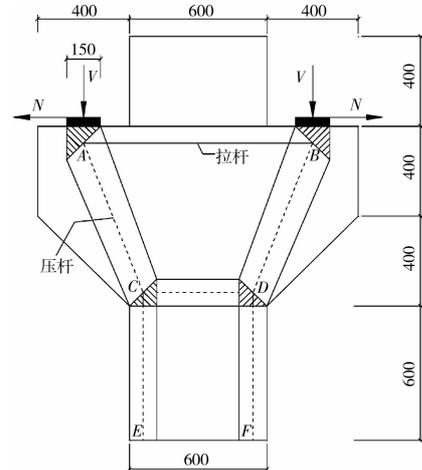


图 5 牛腿结构尺寸

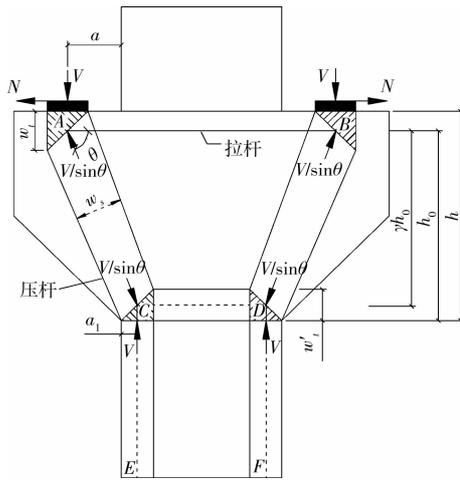


图 6 牛腿结构拉压杆模型

解:混凝土强度等级为 C50, $f_c = 23.1 \text{ N/mm}^2$; 纵向受力钢筋选用 HRB500 级, $f_y = 435 \text{ N/mm}^2$, 箍筋采用 HRB335 级, $f_{yv} = 300 \text{ N/mm}^2$, $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。保护层厚度 $c = 40 \text{ mm}$ 。竖向荷载设计值 $V = 1.2G_k + 1.4Q_k = 1.2 \times 500 + 1.4 \times 250 = 950 \text{ kN}$, 根据已有研究, 承受的水平荷载设计值可取为 $N = 0.2V = 190 \text{ kN}$ 。

1) 加载处承压板尺寸验算

支座承压板取为 $600 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。承压板面积 $A_c = 600 \times 150 = 90\,000 \text{ mm}^2$ 。

$$V = 950 \text{ kN} < \beta_n f_c A_c = \frac{0.8 \times 23.1 \times 150 \times 600}{1\,000} = 1\,663.2 \text{ kN},$$

满足要求。

2) 建立拉压杆模型, 进行内力和尺寸估算

建立如图 6 所示的拉压杆模型。假定拉杆 AB 的中心距离牛腿上表面 50 mm 。因此, $h_0 = 800 - 50 = 750 \text{ mm}$ 。

根据计算的宽度 a_1 确定压杆 CE 中心的位置。根据力的平衡, $N_{CE} = 950 \text{ kN}$ 。

$$\text{根据 } \varphi f_{ce} A_{cs} = \beta_s f_c A_{cs} = N_{CE}, \text{ 得 } a_1 = \frac{N_{CE}}{\beta_s f_c b} = \frac{950 \times 1\,000}{1.0 \times 23.1 \times 600} = 68.5 \text{ mm}$$

$$\theta = \arctan \frac{\gamma h_0}{a + \frac{a_1}{2}}, \text{ 根据压杆 CD 的承载力计算, 得到}$$

$$N_{CD} = \beta_s f_c b w',$$

求解得到, $w' = 22 \text{ mm}$ 。

通过静力分析求得的拉压杆模型中各杆件的内力如表 2 所示, 正号表示受拉, 负号表示受压。

表 2 静力分析得到的拉压杆内力

杆件	内力/kN
AB	492
AC 和 BD	997
CD	302
CE 和 DF	950

3) 拉杆设计

拉杆 AB 所需要的钢筋面积

$$A_s = \frac{N_{AB}}{0.85 f_y} = \frac{492 \times 1\,000}{0.85 \times 435} = 1\,330.6 \text{ mm}^2$$

选取 8D16 钢筋, 面积为 $1\,608 \text{ mm}^2$ 。

4) 节点区设计和锚固验算

为了锚固拉杆 AB, 采用端部焊接钢筋。为了满足节点区极限应力, 拉筋必须埋入混凝土的有效高度至少为

$$\frac{N_{AB}}{\beta_n f_c b} = \frac{492 \times 1\,000}{0.8 \times 23.1 \times 600} = 44.37 \text{ mm}$$

实际节点区高度为 100 mm , 满足要求。

5) 压杆验算

首先计算压杆宽度, 然后验算这一宽度是否符合实际空间要求。

斜压杆 AC 极限应力下的宽度要求

$$\frac{N_{AC}}{\beta_s f_c b} = \frac{997 \times 1\,000}{0.75 \times 23.1 \times 600} = 95.9 \text{ mm}$$

如图 6 所示, 斜压杆宽度符合牛腿区的外形尺寸。因此, 可以接受这一方案。

6) 裂缝控制要求的最小配筋

对于斜压杆, 为使 β_s 取为 0.75 , 箍筋最小配筋必须满足 $\sum \rho_{sv} \sin \alpha_i \geq 0.003$ 。另外, 规范要求闭合箍筋在拉杆 AB 邻近处的 $2/3$ 有效高度范围内均为布置, 即 $2/3 \times 750 = 500 \text{ mm}$ 。这些箍筋的面积必须大于 $0.5(A_s - A_n)$, 其中 A_n 为抵抗水平拉力的钢筋面积。因此, 所需最小面积为 $0.5(A_s - A_n) = 0.5$

$$\left(A_s - \frac{N}{0.85 f_y} \right) = 0.5 \times \left(1\,608 - \frac{190 \times 1\,000}{0.85 \times 435} \right) = 512.8 \text{ mm}^2$$

取用 8 - B10 的闭合箍筋, 平均间距为 $500/8 = 62.5 \text{ mm}$ 。

$$\sum \rho_{sv} \sin \alpha_i = \frac{2 \times 78.5}{600 \times 62.5} \times \sin 72.4^\circ = 0.0039 > 0.003$$

这一钢筋量满足二者的要求, 配置箍筋为 B10@62.5, 保护层厚度为 30 mm 。

4 结 语

中国混凝土设计规范中关于牛腿的设计方法, 都是根据试验回归统计而来, 缺少理论模型的支持, 而拉压杆模型能够较好地解决“D 区”的受力问题。笔者根据 ACI 318-08 规范, 采用 GB 50010-2010 规范设计参数, 提出了适用于中国规范中牛腿结构的拉压杆设计方法。算例分析表明, 该方法具有受力机理明确、概念清晰的特点, 设计过程易于理解与掌握, 便于设计人员灵活掌握牛腿结构设计。

参考文献:

- [1] Schlaich J, Schäfer K, Jennewein M. Toward a Consistent Design of Structural Concrete [J]. PCI Journal, 1987, 32(3): 74-150.
- [2] 王田友, 苏小卒, 方江生. 拉压杆模型方法在钢筋混凝土框架节点计算中的应用研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 36-40. Wang T Y, Su X Z, Fang J S. Application of STMs for calculation of reinforced concrete frame joints[J]. Journal of Civil Engineering, 2007, 40(11): 36-40.
- [3] 叶列平, 孟杰, 王宇航. 拉-压杆模型在钢筋混凝土深梁设计中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 81-86.

(下转第 61 页)

4 结 语

通过本文的研究可得结论如下:

1)对于像广州新电视塔这样的超高层柔性钢结构,其基频为 0.093 7 Hz,且模态频率非常密集,要准确识别其模态参数,须运用 2 种以上的方法进行相互校对,同时工作者也须具备一定的工程经验。

2)本文运用的 3 种模态参数识别方法,其频率识别结果非常吻合,但阻尼比识别结果差异较大。再一次验证了大型工程结构的阻尼机制复杂,难以精确识别其阻尼比的问题。

3)结合遗传算法对 GNTVT 的初始有限元模型进行动力模型参数修正,虽然结果尚可接受,但优化迭代的过程需要花费很长的计算时间,且精度不是十分高。要想获得更精确的有限元模型,需全面考虑结构的参数误差、结构误差和模型阶次误差。

参考文献:

- [1] 张瑞云,曹双寅. 结构模型修正的遗传算法方法研究[J]. 桥梁建设,2008,1:23-26.
- [2] 陈伟欢,吕中荣,陈树辉,等. 高耸结构建造阶段环境振动测试与模态分析[J]. 中山大学学报:自然科学版,2010,49(5):34-

- 40.
- [3] GNTVT benchmark[DB/OL]. <http://www.cse.polyu.edu.hk/benchmark/index.htm>.
- [4] Ye X J, Yan Q S, Wang W F, et al. Modal identification of Canton Tower under uncertain environmental conditions [J]. Smart Structures and Systems, 2012;10(4/5): 353-373.
- [5] Faravelli L, Ubertini F, Fuggini C. Subspace Identification of the Guangzhou New TV Tower [C]//Proceedings of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo: 2010.
- [6] 何少宁. 广州新电视塔竖向地震作用分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006.
- [7] 李春林. 高耸结构风振响应分析研究[D]. 广州:广州大学,2007.
- [8] 钟颖. 基于静力测试数据的桥梁结构有限元模型修正[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [9] 梁文广. 框架结构模型修正与损伤识别研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- [10] 闫桂荣,段忠东,欧进萍. 遗传算法在结构有限元模型修正中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2007, 39(2): 181-186.

(编辑 罗 敏)

(上接第 39 页)

- Ye L P, Meng J, Wang Y H. Application of strut-and-tie model in design of reinforced concrete deep beam [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009,26(2):81-86.
- [4] Cai C S. Three-dimensional strut-and-tie analysis for footing rehabilitation [J]. Pract. Period. Struct. Des. Constr. 2002,7(1):14-25.
- [5] Sritharan S. Strut-and-Tie analysis of bridge tee joints subjected to seismic actions [J]. ACI Struct. Eng. J, 2005, 131(9): 1321-1333.
- [6] Leu L J, Huang C W, Chen C S, et al. Strut-and-Tie design methodology for three-dimensional reinforced concrete structures [J]. ACI Struct. Eng. J, 2006, 132(6):929-938.
- [7] Campione G, La Mendola L, Mangiavillano M L. Steel fiber-reinforced concrete corbels: Experimental behavior and shear strength prediction [J]. ACI Struct. J., 2007, 104(5), 570-579.
- [8] Yun Y M, Kim B H. Two-dimensional grid strut-tie model approach for structural concrete [J]. ACI Struct. Eng. J, 2008, 134(7):1199-1214.
- [9] Park S, Aboutaha R S. Strut-and-Tie method for CFRP strengthened deep RC members[J]. ACI Struct. Eng. J., 2009, 135(6):632-643.
- [10] Yang K H, Ashour A F. Strut-and-Tie model based on crack band theory for deep beams[J]. ACI Struct. Eng. J, 2011, 137(10):1030-1038.
- [11] 高丹盈,赵军,朱海堂. 钢筋纤维混凝土牛腿受剪承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2006(2):100-106.
- Gao D Y, Zhao J, Zhu H T. Experimental study on shear capacity of reinforced concrete corbel with steel fiber [J]. Journal of Building Structure, 2006(2),100-106.
- [12] ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete [S]. American Concrete Institute. 2008.
- [13] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [14] 魏巍巍,贡金鑫. 按我国规范的压杆—拉杆设计方法[J]. 建筑结构学报,2008(Sup1):287-293.
- Wei W W, Gong J X. Strut-and-tie design method based on Chinese code[J]. Journal of Building Structure, 2008(Sup1): 287-293.
- [15] 贡金鑫,魏巍巍,胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- Gong J X, Wei W W, Hu J S. Design of concrete structures in Chinese, American and Europe[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2007.

(编辑 王 宣)