

高层建筑结构在水平荷载作用下楼板应力分析与设计

魏 琰^{1,2}, 王 森^{1,2}, 陈兆荣^{1,2}, 曾庆立^{1,2}, 杨仁孟^{1,2}

(1 深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034;

2 深圳市力鹏建筑设计事务所, 深圳 518034)

[摘要] 楼板作为主要水平构件, 不仅需要承受和传递荷载, 而且需要协调各抗侧力构件之间的变形。高层建筑结构楼板设计时, 目前只考虑竖向荷载引起的面外弯矩, 而忽视了水平荷载作用下产生的楼板面外弯矩和面内应力的影响。对高层建筑楼版面内应力分析与设计进行了探讨, 介绍了常用计算程序中分析应力的方法, 给出了楼板承载力验算方法。通过工程案例说明了方法的应用。

[关键词] 面外弯矩; 面内应力; 水平荷载; 计算程序; 楼板承载力

中图分类号: TU318.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2017) 01-0010-07

Slab stress analysis and design of high-rise building structure under horizontal load

Wei Lian^{1,2}, Wang Sen^{1,2}, Chen Zhaorong^{1,2}, Zeng Qingli^{1,2}, Yang Renmeng^{1,2}

(1 Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China;

2 Shenzhen Li Peng Building Structure Design Institute, Shenzhen 518034, China)

Abstract: As the main horizontal member, slab not only needs to bear and transfer load, but also has to coordinate the deformation between the horizontal resisting members. Only out-of-plane moment caused by vertical load is considered in the current design of high-rise building slabs, while ignoring the influence of out-of-plane moment and in-plane internal force under horizontal load. The in-plane stress analysis and design of slabs of high-rise building were discussed, and the stress analysis methods of the slab in calculation program were introduced and the checking method of slab bearing capacity was provided. Finally an engineering example was given to explain the application of the method.

Keywords: out-of-plane moment; in-plane stress; horizontal load; calculation program; slab bearing capacity

0 前言

对于高层建筑结构, 需由水平和竖向构件组成的抗侧力体系抵抗和传递水平力。楼板作为主要水平构件, 不仅需要承受和传递竖向荷载, 而且需要把地震作用及风荷载等引起的水平力传递和分配到各竖向抗侧力构件, 从而协调各抗侧力构件之间的变形。

随着高层建筑结构的迅速发展, 平面不规则、楼板不连续、竖向不规则、框架边筒(筒偏置)、一向少墙的剪力墙结构等纷纷涌现, 此类结构的楼板在水平荷载作用下将产生较大的楼板平面内轴力、剪力以及面外附加弯矩, 在结构设计中必须加以考虑。

现行计算程序对楼板设计主要考虑了竖向荷载的作用, 并未涵盖水平荷载对楼板平面内和平面外作用的内容。为了考虑水平荷载对楼板的作用, 工程界现已逐渐推广采用楼板应力分析的有限元方法进行补充验算, 但是如何应用程序进行楼板的应力分析和设计尚存在一些困惑, 规范对此也没有相应的规定。因此, 在楼板承载力验算时, 如何考虑水平荷载作用下楼板受力是工程界亟待解决的问题。本文对此进行研讨并提出相应的建议。

1 楼板应力的主要形式与意义

1.1 楼版面内受力的应力形式

对于楼板不连续、大开洞、平面不规则等结构, 在水平荷载作用下, 面内可能会产生较大的轴向力和剪力。在轴向力作用下, 楼板可能全截面受拉也可能全截面受压。假设楼板的轴向正应力为 σ_N , 其应力分布如图1所示。

在楼版面内的剪应力与轴向正应力共同作用下, 楼板的主拉应力较轴向正应力大, 此时楼板的抗裂性由主拉应力控制。对于平面不规则结构, 楼板常常存在弱连接部位, 此处楼板的面内剪力需由楼板抗剪承载力来抵抗。

1.2 楼板面外受力的应力形式

在水平荷载作用下, 楼板除产生一定的面内轴向力和剪力外, 楼板面外会产生一定的弯矩, 如一向少墙的剪力墙结构, 此时楼板受力特征与受弯梁相似。楼板上表面的弯曲正应力 σ_M^T 与下表面的弯曲正应力 σ_M^B 形成抵抗力矩, 在满足平截面假定的情

作者简介: 魏琰, 研究员, Email: wl2002111@163.com。

形下,其应力分布呈现以截面中性轴为界,楼板上下表面一侧受拉、一侧受压,楼板中性轴所在面应力为 0 的情形,如图 2 所示。

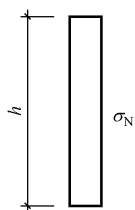


图 1 平面内轴向受力
应力分布

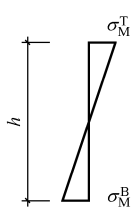


图 2 组成平面外弯矩的
弯曲应力分布

1.3 楼板应力的意义

虽然在水平荷载作用下,楼板应力存在面内的轴向正应力、剪应力、主拉应力以及面外弯曲正应力等几种形式,但在进行楼板应力分析时,对不同的结构,每一种应力的重要性以及意义不同。

楼板轴向正应力的主要意义在于用于判断楼板可能发生受拉破坏的部位及严重程度,并根据计算结果,对薄弱部位采用面内轴向合力进行楼板配筋计算。由于弯曲正应力与轴向正应力同时存在,此时楼板配筋应取弯曲正应力配筋结果与轴向正应力配筋结果之和。

对于弱连接楼板,如平面布置为角部重叠的狭窄部位、平面布置为细腰形的中部细腰等弱连接部位,在水平荷载作用下,可能产生较大的面内应力,导致弱连接部位的楼板可能先于抗侧力构件发生受拉或者受剪破坏。因此对于弱连接楼板,应首先根据轴向正应力以及剪应力判断其薄弱位置及范围,然后选定薄弱位置分别进行全截面受拉以及全截面受剪承载力验算。

主拉应力的主要作用在于定性判断楼板裂缝开展情况,并根据主拉应力云图判断需要采取加强措施的薄弱位置。由于主拉应力方向的不一致,一般不宜根据主拉应力迹线的走势进行楼板配筋设计,宜按照轴向应力方向进行。

弯曲正应力形成楼板面外弯矩,此时楼板的受弯配筋设计应由竖向荷载产生的面外弯矩配筋和水平荷载产生的面外弯矩配筋叠加组成;同时,如平面大开洞、弱连接楼板等结构,在水平荷载作用下,楼板的的面内受力较大,需根据面内计算结果另行进行配筋计算。

2 常用程序关于楼板应力分析与设计的应用

现行程序主要输出的是楼板上下表面的应力结果,然而对于不同的结构而言,需要提取的应力结果不同,在使用程序计算结果时,需加以区分和处理。

目前楼板应力分析的程序主要有 ETABS 和 MIDAS/Gen,以下探讨如何应用 ETABS 和 MIDAS/Gen 获得所需要的楼板应力。

2.1 楼板建模建议

为了得到较精确的应力结果,在 ETABS 和 MIDAS/Gen 建模时,宜尽量采用四边形单元少用三角形单元进行楼板精细化网格划分;同时为了提高计算分析的效率,对于较规则的楼板,可采用较大的网格尺寸,如尺寸较大的楼板,可采用 1.5 ~ 2 m 的网格,关键部位应采用 0.5 ~ 1 m 左右的小网格尺寸。

2.2 ETABS 的应用

ETABS 通过壳单元并设置不同的膜厚度(提供面内刚度)以及弯曲厚度(提供面外抗弯刚度)来模拟楼板的平面内拉压、剪切、弯曲以及平面外的弯曲与剪切等行为^[1]。对于分析结果,可以提取板顶、板底正应力、剪应力和主拉应力。ETABS 输出的板顶正应力 σ_s^T 、板底正应力 σ_s^B 是图 1 以及图 2 叠加的结果,如图 3 所示。此处假定由轴向力引起的正应力大于弯曲正应力。结合 1.3 节分析可知,对于需要考虑楼板面内力的影响时,程序给出的楼板上、下表面的应力结果不能直接用于楼板面内的设计。因此为了正确应用楼板应力分析结果,需要从程序输出的应力结果中分离出弯曲应力及轴向正应力。

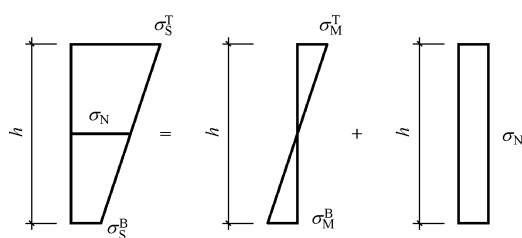


图 3 ETABS 输出的楼板应力结果

为了从 ETABS 程序的输出结果中分离出面内轴向力对应的面内轴向正应力,可以通过以下两种方式来实现:一是通过对楼板顶面和底面的正应力结果取平均值来获得,然而由于复杂高层建筑结构需要分析的楼板数量较多,采用此方法效率较低;二是通过设置一个较小的楼板弯曲厚度,即忽略楼板平面外的刚度,此时 ETABS 输出的楼板顶面和底面的正应力结果与实际的楼板轴向正应力接近,此方法的优点在于可以直接从程序输出的结果中获得楼板的轴向应力,直观且方便快捷。

将弯曲正应力与轴向正应力分离后,可根据轴向正应力的计算结果,判断楼板薄弱部位,并对相应位置截面切割求取合力进行楼板面内承载力验算。

2.3 MIDAS/Gen 的应用

MIDAS/Gen 通过板单元并设置不同的平面内厚度(提供面内刚度)及平面外厚度(提供面外抗弯刚度)来模拟楼板的平面内拉压、剪切、弯曲以及平面外的弯曲与剪切等行为^[2]。对于分析结果,可以提取板顶、板底正应力、剪应力和主拉应力;MIDAS/Gen 输出的板顶正应力 σ_s^T 、板底正应力 σ_s^B 与 ETABS 一样是图 1 以及图 2 叠加的结果。对于不同的结构,需要提取的应力结果不同,为了实现弯曲正应力与轴向正应力的分离,可以在 MIDAS/Gen 原有的楼板中间部位添加一层面内、面外厚度较小如 1mm 厚的薄膜,虽然此时薄膜的面内厚度较小,但由于共节点的原因,此薄膜在平面内的位移与原楼板一致,故此时薄膜的顶面和底面的正应力结果与实际的楼板轴向正应力接近。

需要指出的是,MIDAS/Gen 输出的应力云图可显示具体的单元应力数值,但此单元应力数值为单元各节点应力数值中的最大值,不能反映在一定尺寸范围内的楼板受力状况,不宜直接采用此最大值进行楼板承载力设计;建议采用网格划分尺寸内的应力平均值进行设计。选择显示单元应力数值的实际意义在于有助于直观快速地初步判断楼板的应力集中部位。

2.4 楼板应力分析校核

为确保楼板应力分析结果的可靠性和准确性,建议采用反应谱分析法根据两个不同的程序分析校核楼板应力。尚可采用同一程序应用弹性时程分析法和反应谱分析法进行楼板应力校核。

2.5 楼面梁轴向承载力验算

目前工程界主要是把楼板作为水平构件,验算了楼板在竖向和水平荷载作用下的承载力。实际上,楼板与楼面梁整体浇筑,水平力作用下楼面梁同样会产生轴向变形和弯曲变形。

一般而言,采用 ETABS、MIDAS/Gen 等有限元软件建模时,梁、柱、斜撑等构件采用梁(线)单元,剪力墙、楼板等构件采用壳(板)单元。梁(线)单元与壳单元通过相交的结点进行连接,ETABS 中可以通过指定线约束来协调梁与板的变形,MIDAS/Gen 需细分网格,通过网格与梁单元相交的结点协调变形。壳单元的实质是一层薄膜,ETABS 与 MIDAS/Gen 默认的处理方法是把楼板中面作为薄膜,即梁与楼板的相交结点均在楼板中面上。图 4、5 分别是 ETABS 与 MIDAS/Gen 中默认的楼板与梁的计算模型。

从图 4 可以看出,ETABS 程序默认是梁顶面中

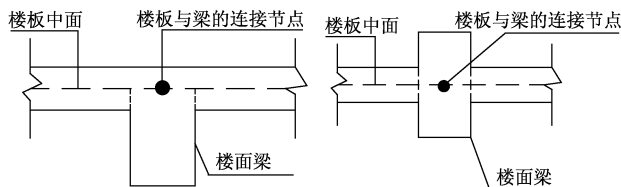


图 4 ETABS 默认计算模型 图 5 MIDAS/Gen 默认计算模型

心点与楼板的中面连接,此模拟方法较符合实际,但程序在计算梁的内力时,只对线单元的截面进行积分,而忽略了楼板翼缘,此时计算得到的梁内力不符合实际;从图 5 可以看出,MIDAS/Gen 程序默认是梁的截面中心(几何中心)与楼板的中面连接,此模拟方法计算得到的梁轴力较接近实际,但计算得到的梁弯矩失真,此时可以考虑通过人工输入梁刚度放大系数来解决。综上,建议采用 MIDAS/Gen 默认建模方法,同时人工输入梁的刚度放大系数以考虑楼板翼缘的贡献。

采用简化计算方法,梁弯矩由钢筋承受;考虑梁顶部、底部及腰筋等纵向贯通筋及可能内置钢板共同承受轴向拉力,轴向承载力按下式验算:

$$A_{s1} f_{yk1} + A_{s2} f_{yk2} \geq N \quad (1)$$

式中: A_{s1} 、 A_{s2} 分别为纵向钢筋以及型钢的面积; f_{yk1} 、 f_{yk2} 分别为纵向钢筋以及型钢的材料强度标准值。

3 楼板设计承载力验算方法

进行楼板截面配筋和承载力设计时,应同时计入竖向荷载和水平荷载作用的影响。一般较规则的高层建筑竖向荷载作用下楼板仅产生弯曲应力,楼板面内应力可忽略不计。但对于有斜撑、斜柱、加强层、腰桁架等的高层建筑,竖向荷载下楼板除产生较大的面内应力和一定的面外弯曲应力,在进行配筋设计时,应将其与水平荷载作用下的相应计算结果相加。结合上述分析和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[3],对楼板承载力验算方法提出如下建议:

(1) 小震或风荷载作用下楼板面内主拉应力验算。荷载组合为:

$$S_k = S_{GE} + S_{Ehk}^* + 0.4 S_{Evk}^* + \psi_w S_{wk} \quad (2)$$

式中: S_k 为荷载标准组合的效应设计值; S_{GE} 为重力荷载代表值的效应,当竖向荷载作用下,楼板不出现面内应力或数值很小时,取为零; S_{Ehk}^* 、 S_{Evk}^* 分别为水平和竖向地震作用标准值的构件内力; S_{wk} 为风荷载效应标准值; ψ_w 为风荷载的组合值系数,取 0.2,无地震参与组合时取 1.0。

按楼板小震或风荷载作用下混凝土不开裂要求验算, σ_{max} 应满足下式:

$$\sigma_{\max} \leq f_{tk} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为楼板面内最大主拉应力; f_{tk} 为混凝土轴心抗压强度标准值。

需指出此处的面内主拉应力是通过本文 2.2 节与 2.3 节所述忽略楼板面外刚度后提取的主拉应力, 不是楼板上、下表面处的应力。对于局部有应力集中的单元, 建议取 1.0m 左右范围内平均应力, 设计时可在应力集中处采取局部加强防裂配筋措施。

(2) 小震或风荷载作用下抗拉钢筋验算, 控制抗拉钢筋弹性。荷载组合为:

$$S_d = \gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk}^* + \gamma_{Ev} S_{Evk}^* + \psi_w \gamma_w S_{wk} \quad (4)$$

式中: S_d 为荷载和地震作用组合的效应设计值; γ_G 为重力荷载分项系数; γ_{Eh} 为水平地震作用分项系数; γ_{Ev} 竖向地震作用分项系数; γ_w 为风荷载分项系数。

楼板小震或风荷载作用下钢筋弹性的验算方法为:

1) 轴力引起的配筋(双层双向配筋)应满足下式:

$$A_{s1} = \frac{\gamma_{RE} N}{2f_y} \quad (5)$$

2) 弯矩引起受拉侧的配筋(单侧配筋)应满足下式:

$$A_{s2} = \frac{\gamma_{RE} M}{\gamma_s f_y h_0} \quad (6)$$

式中: γ_s 为内力矩的力臂系数, 可取 0.85 ~ 0.9; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数, 可取 0.85。

单侧楼板实际配筋应满足 $A_s \geq A_{s1} + A_{s2}$ 。

(3) 中震抗拉钢筋不屈服验算, 控制抗拉钢筋不屈服。荷载组合为:

$$S_{GE} + S_{Ehk}^* + 0.4 S_{Evk}^* \leq R_k \quad (7)$$

式中 R_k 为截面承载力标准值, 按材料强度标准值计算。

楼板中震不屈服的验算方法为:

1) 轴力引起的配筋(双层双向配筋)应满足下式:

$$A_{s1} = \frac{N}{2f_{yk}} \quad (8)$$

2) 弯矩引起的配筋(单侧配筋)应满足下式:

$$A_{s2} = \frac{M}{\gamma_s f_{yk} h_0} \quad (9)$$

单侧楼板实际配筋应满足 $A_s \geq A_{s1} + A_{s2}$ 。

(4) 中震抗拉钢筋弹性验算, 控制抗拉钢筋弹性。荷载组合为:

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk}^* + \gamma_{Ev} S_{Evk}^* \leq R_d \quad (10)$$

式中 R_d 为楼板承载力设计值。

楼板抗拉钢筋弹性的验算方法为:

1) 轴力引起的配筋(双层双向配筋)应满足下式:

$$A_{s1} = \frac{N}{2f_y} \quad (11)$$

2) 弯矩引起受拉侧的配筋(单侧配筋)应满足下式:

$$A_{s2} = \frac{M}{\gamma_s f_y h_0} \quad (12)$$

单侧楼板实际配筋应满足 $A_s \geq A_{s1} + A_{s2}$ 。

中震抗拉钢筋弹性的另一种算法, 荷载组合应满足式(7), 楼板抗拉钢筋弹性的验算方法为:

1) 轴力引起的配筋(双层双向配筋)应满足下式:

$$A_{s1} = \frac{N}{2\xi f_{yk}} \quad (13)$$

2) 弯矩引起的配筋(单侧配筋)应满足下式:

$$A_{s2} = \frac{M}{\gamma_s \xi f_{yk} h_0} \quad (14)$$

式中 ξ 为弹性系数, 取 0.85。

单侧楼板实际配筋应满足 $A_s \geq A_{s1} + A_{s2}$ 。

(5) 大震抗拉钢筋不屈服验算, 控制抗拉钢筋不屈服。荷载组合为:

$$S_{GE} + S_{Ehk}^* + 0.4 S_{Evk}^* \leq R_k \quad (15)$$

楼板大震抗拉钢筋不屈服的验算方法为:

1) 轴力引起的配筋(双层双向配筋)应满足下式:

$$A_{s1} = \frac{N}{2f_{yk}} \quad (16)$$

2) 弯矩引起受拉侧的配筋(单侧配筋)应满足下式:

$$A_{s2} = \frac{M}{\gamma_s f_{yk} h_0} \quad (17)$$

单侧楼板实际配筋应满足 $A_s \geq A_{s1} + A_{s2}$ 。

(6) 大震抗剪不屈服验算, 楼板剪力由截面剪应力求和得到。选定楼板薄弱连接处, 控制薄弱处混凝土楼板全截面抗剪承载力。荷载组合为:

$$S_{GE} + S_{Ehk}^* + 0.4 S_{Evk}^* \leq R_k \quad (18)$$

楼板大震抗剪不屈服验算可参照剪力墙抗剪计算公式, 楼板全截面剪力标准值应满足下式:

$$V_k \leq 0.2 \beta_c f_{ck} b_f t_f \quad (19)$$

式中: b_f 、 t_f 分别为楼板验算截面宽度和厚度; β_c 为混凝土强度影响系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 1.0。

楼板全截面抗剪配筋应满足以下公式, 全截面

受压时:

$$V_k \leq 0.4f_{tk}b_f t_f + 0.1N + 0.8f_{yhk} \frac{A_{sh}}{s} b_f \quad (20)$$

式中: N 为楼板截面轴向压力标准值, N 大于 $0.2f_{ck}b_f t_f$ 时, 应取 $0.2f_{ck}b_f t_f$; f_{yhk} 为楼板水平分布钢筋的抗拉强度标准值; A_{sh} 为楼板水平分布钢筋的全截面面积; s 为水平分布钢筋间距。

全截面受拉时:

$$V_k \leq 0.4f_{tk}b_f t_f - 0.1N + 0.8f_{yhk} \frac{A_{sh}}{s} b_f \quad (21)$$

式中 N 大于 $4f_{tk}b_f t_f$ 时, 应取 $4f_{tk}b_f t_f$ 。

对于框架-核心筒结构, 一般是先施工核心筒后施工楼板。核心筒外周边楼板抗剪, 其荷载组合应满足式(18) 楼板全截面剪力标准值应满足式(19) 楼板全截面抗剪配筋应满足式(22) [4] 或式(23) [4]:

$$V_k \leq 1.85n_d A_{D0} \sqrt{f_{ck} f_{yk}} \quad (22)$$

式中 n_d A_{D0} 分别为销栓钢筋根数和单根销栓钢筋面积。

$$V_k \leq 0.6f_{yk}A_s + 0.8N \quad (23)$$

式中: A_s 为销栓钢筋总面积; N 为楼板截面轴向力标准值, 压力取正值, 拉力取负值。

当楼板与钢边框架梁通过抗剪栓钉连接时, 控制栓钉大震抗剪不屈服。其荷载组合应满足式(18), 栓钉剪力标准值应满足下式 [5]:

$$V_k \leq \min(0.43A_s \sqrt{E_c f_{ck}}, 0.7A_s \gamma f) \quad (24)$$

式中: A_s 为栓钉钉杆截面面积; γ 为栓钉材料抗拉强度最小值与屈服强度之比。

考虑到目前软件无法直接给出配筋结果, 楼板配筋设计可以采用如下简化方法: 对薄弱部位, 可按近似算法计算竖向荷载作用下的受拉侧弯矩配筋, 再按有限元方法计算水平力作用下的受拉侧弯矩配筋, 两者相加确定楼板所需受拉侧弯矩钢筋量 A_{s2} ; 用有限元方法计算水平力、竖向荷载作用下楼板轴力, 确定楼板所需单侧轴向力钢筋量 A_{s1} 。将单侧弯矩配筋量与单侧轴向力配筋量相加确定楼板单侧实配钢筋量 $A_{s1} + A_{s2}$, 并应满足构造配筋要求。对于非薄弱部位, 水平力影响较小、竖向荷载引起的轴力也较小时, 楼板实配钢筋量可接近似算法计算竖向荷载作用下的受拉侧弯矩配筋。

4 案例分析

某高层建筑剪力墙结构, 地上 49 层, 结构高度 148.0m, 裙楼 2 层, 地下 2 层。楼板混凝土强度等级采用 C30, 钢筋采用 HRB400。楼板厚度为 100mm 和 120mm, 电梯井附近弱连接部分采用 150mm。其效果图和标准层结构平面见图 6。



图 6 效果图和标准层结构平面图

图 6 阴影部位板厚为 150mm, 采用 MIDAS/Gen 进行楼板分析, 全楼楼板均采用弹性假定, 楼板采用板单元模拟, 应力集中部位的板单元网格尺寸为 0.5 ~ 1.0m。楼板性能目标见表 1。

楼板性能目标		表 1
工况名称	荷载工况	性能目标
小震或风荷载作用	式(2)	混凝土不开裂
	式(4)	抗拉钢筋弹性
中震作用	式(10)	抗拉钢筋弹性
大震作用	式(15)	抗拉钢筋不屈服
	式(18)	全截面抗剪不屈服

(1) 小震或风荷载作用验算

小震或风荷载作用下楼板面内主拉应力分布见图 7。从图中可以知道, 大部分主拉应力值小于混凝土强度标准值 2.01MPa。由于应力集中处已达 3.5MPa, 且提供的数值为最大点值, 通过截取该位置的网格尺寸 0.75m 的平均应力为 0.18MPa, 满足要求。

小震或风荷载作用下抗拉钢筋弹性。根据式(4) (5) 在网格尺寸 0.84m 内的轴力为 230kN, 单位长度楼板轴力引起的计算配筋为 325mm^2 , 另一方

向为 229mm^2 。整块楼板考虑楼板轴力进行双层双向配筋为 $\Phi 10@200$ ($A_s = 392\text{mm}^2$)。

$$A_{s1} = \frac{\gamma_{RE} N}{2f_y} = \frac{0.85 \times 23 \times 10^4}{2 \times 360 \times 0.84} = 325\text{mm}^2$$

考虑复杂楼板弯矩引起的配筋差异较大,现划分为 3 块小楼板进行计算,见图 8。

弯矩引起受拉侧的配筋应满足式(6),结合支座单侧配筋(同时考虑跨中底部弯矩),对于板 1(与板 3 相同),在 1.45m 内积分的弯矩为 $42.6\text{kN}\cdot\text{m}$,则:

$$A_{s2} = \frac{0.85 \times 42.6 \times 10^6}{0.85 \times 360 \times 135 \times 1.45} = 605\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 325 + 605 = 930\text{mm}^2$$

支座计算配筋为 $930 - 392 = 538\text{mm}^2$,选用 $\Phi 12@200$ ($A_s = 565\text{mm}^2$),面筋 $\Phi 12@200$ 双向布置可按照规范配置至支座 $1/4$ 即可。同时考虑跨中底部楼扳抗弯底筋,可配为 $\Phi 12@200$ 双向布置。

对于板 2,在支座 0.9m 内积分的最大弯矩为 $10.0\text{kN}\cdot\text{m}$,则:

$$A_{s2} = \frac{0.85 \times 10.0 \times 10^6}{0.85 \times 360 \times 135 \times 0.9} = 229\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 325 + 229 = 554\text{mm}^2$$

实配配筋为 $554 - 392 = 164\text{mm}^2$,选用 $\Phi 8@200$ ($A_s = 251\text{mm}^2$)。楼板抗弯底筋 $\Phi 8@200$ 双向布置,面筋 $\Phi 8@200$ 双向布置可按照规范配置至支座 $1/4$ 即可。

综上,楼板配筋方式见图 9。

(2) 中震抗拉钢筋弹性验算

1) 轴力验算。根据式(10)、(11)可知,轴力引起配筋处于弹性。具体计算过程如下:

$$A_{s1} = \frac{14.3 \times 10^4}{2 \times 360 \times 0.9} = 222\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ (392mm^2),可见满足设计要求。

2) 弯矩验算。根据式(12)计算可知,弯矩引起的配筋不屈服。

板 1、3:

$$A_{s2} = \frac{34.7 \times 10^6}{0.85 \times 360 \times 135 \times 1.45} = 580\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 222 + 580 = 802\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ 和 $\Phi 12@200$ ($392 + 565 = 957\text{mm}^2$),可见满足设计要求。

板 2:

$$A_{s2} = \frac{12.2 \times 10^6}{0.85 \times 360 \times 135 \times 0.9} = 328\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 222 + 328 = 550\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ 和 $\Phi 8@200$ ($392 + 251 = 643\text{mm}^2$),可见满足设计要求。

亦可根据另一方法验算中震抗拉钢筋弹性。

3) 轴力验算。根据式(7)、(13)可知,轴力引起配筋处于弹性。

$$A_{s1} = \frac{11.9 \times 10^4}{2 \times 400 \times 0.85 \times 0.9} = 194\text{mm}^2$$

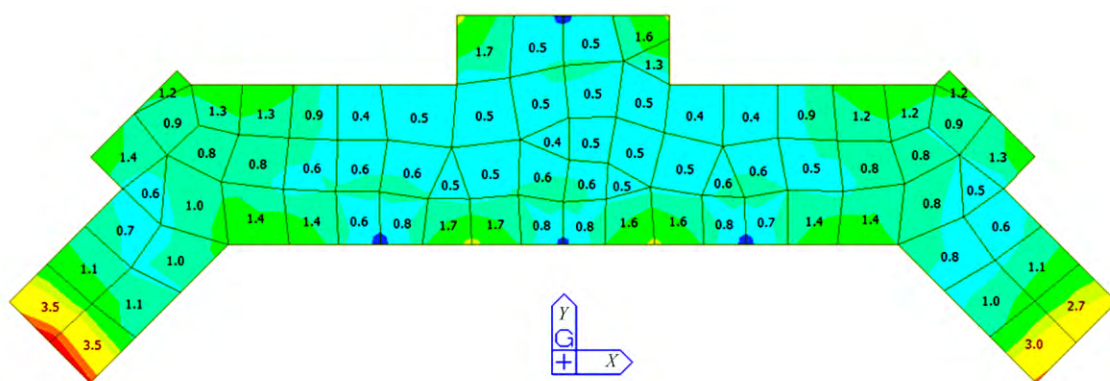


图 7 小震或风荷载作用下楼板面内主拉应力云图/MPa

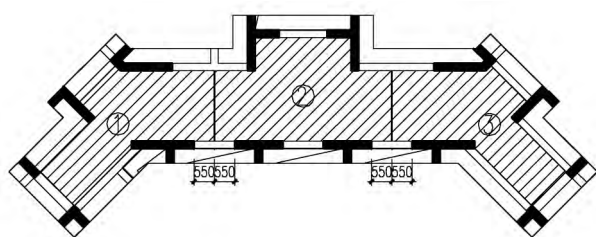
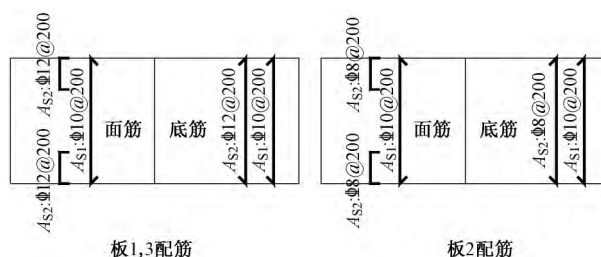


图 8 楼板区域划分



板 1、3 配筋

板 2 配筋

图 9 楼板配筋图

所选配筋为 $\Phi 10@200$ ($A_s = 392\text{mm}^2$), 可见满足设计要求。

4) 弯矩验算。根据式(14) 计算可知, 弯矩引起的配筋不屈服。

板 1 3:

$$A_{s2} = \frac{33.8 \times 10^6}{0.85 \times 0.85 \times 400 \times 135 \times 1.45} = 597\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 194 + 597 = 791\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ 和 $\Phi 12@200$ ($392 + 565 = 957\text{mm}^2$), 可见满足设计要求。

板 2:

$$A_{s2} = \frac{8.7 \times 10^6}{0.85 \times 0.85 \times 400 \times 135 \times 0.9} = 248\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 194 + 248 = 442\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ 和 $\Phi 8@200$ ($392 + 251 = 643\text{mm}^2$), 可见满足设计要求。

(3) 大震抗拉钢筋不屈服验算

1) 轴力验算。根据式(15), (16) 可知, 为抗拉钢筋处于不屈服。

$$A_{s1} = \frac{1.1 \times 10^5}{2 \times 400 \times 0.9} = 154\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ ($A_s = 392\text{mm}^2$), 可见满足设计要求。

2) 弯矩验算。根据式(17) 计算可知, 弯矩引起的配筋不屈服。

板 1 3:

$$A_{s2} = \frac{38.4 \times 10^6}{0.85 \times 400 \times 135 \times 1.45} = 577\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 154 + 577 = 731\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ 和 $\Phi 12@200$ ($392 + 565 = 957\text{mm}^2$), 可见满足设计要求。

板 2:

$$A_{s2} = \frac{30.8 \times 10^6}{0.85 \times 400 \times 135 \times 0.9} = 746\text{mm}^2$$

$$A_{s1} + A_{s2} = 154 + 746 = 900\text{mm}^2$$

所选配筋为 $\Phi 10@200$ 和 $\Phi 8@200$ ($392 + 251 = 643\text{mm}^2$), 可见不满足设计要求。此时板 2 弯矩所需计算配筋量为 $900 - 392$ (平衡轴力所选配筋量) $= 508\text{mm}^2$, 可选用 $\Phi 12@200$ ($A_s = 565\text{mm}^2$)。故楼板抗弯底筋 $\Phi 12@200$ 双向布置, 面筋 $\Phi 12@200$ 双向布置可按照规范配置至支座 $1/4$ 即可。

楼板大震抗剪不屈服。楼板选择截面验算薄弱位置见图 6 中截面 A-A 和 B-B 所示, 剪力标准值满足式(19), 结果表示于表 2。

楼板截面抗剪验算

表 2

剖面	长度/m	板厚/m	承载力/kN	剪力 V_k /kN	验算结果
A-A	4.72	0.15	2 850	182.6	满足
B-B	1.20	0.15	724	28.1	满足

考虑楼板配筋率 0.2%, 在 A-A 处配置 $\Phi 10@200$ 双层双向钢筋, B-B 处配置 $\Phi 10@150$ 双层双向钢筋。验算抗剪钢筋, 剪力标准值满足式(20), 结果见表 3。

楼板全截面抗剪钢筋验算

表 3

剖面	轴力/kN	长度/m	板厚/m	钢筋验算/kN	剪力 V_k /kN	验算结果
A-A	108	4.72	0.15	1 744.9	182.6	满足
B-B	41.1	1.20	0.15	442.2	28.1	满足

5 结论

(1) 目前楼板设计时只考虑了竖向荷载引起的面外弯矩, 仅适用于水平荷载下楼板面内应力可以忽略的规则结构。对于不规则结构的楼板, 在水平荷载作用下产生的楼板平面内轴力、剪力以及面外附加弯矩不容忽视, 设计时必须考虑在内。

(2) 在水平荷载作用下, 楼板应力分析应区分面内轴向应力与面外弯矩的弯曲应力的作用。

(3) 介绍了常用有限元软件 ETABS 和 MIDAS/Gen 在楼板应力分析中的正确应用, 提出了获得轴向正应力的方法。

(4) 介绍了梁在常用有限元软件 ETABS 和 MIDAS/Gen 的建模方法, 提出了梁轴向承载力的验算方法。

(5) 根据楼板不同性能目标, 给出了楼板承载力验算方法。文中给出工程案例说明了方法的应用。

参 考 文 献

- [1] CSI分析参考手册[M]. 北京: 北京筑信达工程咨询有限公司 2014.
- [2] Midas-gen 建筑结构通用有限元分析与设计软件-分析设计原理技术手册[M]. 北京: 北京迈达斯技术有限公司, 2013.
- [3] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2011.
- [4] 预制装配整体式钢筋混凝土结构技术规范: SJG 18—2009 [S]. 深圳: 深圳市住房和建设局 2009.
- [5] 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社 2003.