

高层框筒结构空心板楼盖有限元模拟及受力分析

孙仁范¹, 许璇¹, 魏琰^{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] 在高层及超高层建筑中, 空心板楼盖不但要传递竖向荷载, 还要在水平荷载作用下协调内筒和外框结构分担的剪力。对空心板楼盖的模拟方法进行了探讨, 通过与实体单元的对比研究, 提出了采用离散板单元的方法来模拟空心板。以 249m 前海国际能源金融中心 T1 塔楼为例, 结合实际空心板的构成, 详细介绍了空心板作为离散板与其他构件外框梁、外框柱、暗梁、核心筒外墙等的连接部位的模拟。指出了空心板楼盖在竖向荷载和水平荷载作用下暗梁不能为空心板提供有效的支撑, 外框巨柱边及核心筒外墙边空心板承受的弯矩和剪力较大。对于实际工程中空心板楼盖的高层框筒结构建议采用离散板的模拟方法并同时考虑竖向荷载及水平荷载的影响。

[关键词] 高层框筒结构; 离散板单元; 空心板楼盖有限元模拟; 受力特点

中图分类号: TU318 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2019)09-0007-06

Finite element simulation and mechanical analysis of hollow slab floor of high-rise frame-corewall structure

Sun Renfan¹, Xu Xuan¹, Wei Lian^{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: In high-rise and super high-rise buildings, hollow slab floor not only transmits vertical load, but also coordinates the shear force shared by inner corewall and outer frame structures under horizontal loads. The simulation method of hollow slab floor was discussed, and the discrete slab element method was proposed to simulate hollow slab by comparing with the solid element. The 249m Qianhai International Energy and Finance Center Tower T1 was taken as an example, and the actual structure of hollow slab was considered to detailed introduce the simulation of connecting part between hollow slab as discrete slab and other components such as outer frame beam, outer frame column, concealed beam and outer wall of corewall. The concealed beam of hollow slab floor could not provide effective support for hollow slab under vertical and horizontal loads, and the hollow slab at the side of giant column and outer wall of corewall bore large bending moment and shear force. For high-rise frame-corewall structure of hollow slab floor in practical engineering, it was suggested that discrete slab simulation method should be adopted and effects of vertical and horizontal loads should be taken into account.

Keywords: high-rise frame-corewall structure; discrete slab element; finite element simulation of hollow slab floor; mechanical characteristic

0 前言

近年来, 现浇空心板楼盖开始在高层及超高层建筑中获得应用, 176m 绿景 NEO 大厦及 249m 前海国际能源金融中心 T1 塔楼均为采用现浇空心板楼盖框筒结构的范例。由于空心板楼盖不但要传递竖向荷载, 还要在水平荷载作用下协调内筒和外框分担的剪力, 因此探讨这类结构合理的设计计算方法是亟待解决的问题。

传统设计方法主要采用等代框架法和拟板法。等代框架法将暗梁及其两侧一定宽度范围内的空心板根据抗弯刚度等代为一根梁, 即将二维面转化为一维线; 由此计算得到内力后, 再根据空心板、暗梁的相对刚度, 以及周边构件的约束情

况, 将内力按一定规则分配到空心板和暗梁上进行配筋设计^[1]。拟板法是按空心板的等弯刚度将其折算为单层板参与整体模型计算, 最后根据板边积分出来的弯矩进行配筋。此法较等代框架法有了一定的进步, 但两种方法均不能同时模拟空心板的抗剪刚度、轴向刚度及空心板纵肋方向和横肋方向刚度的差异, 因而在高层特别是超高层建筑中的应用尚存在困惑。

本文以 249m 前海国际能源金融中心 T1 塔楼为例, 采用通用有限元软件 MIDAS Gen V8.36, 结合实际空心板的构成, 研究了同时考虑空心板抗弯、抗

作者简介: 孙仁范, 硕士, 教授级高级工程师, Email: sunrenfan@163.com。

剪和轴向刚度的建模方法,并以此进行结构内力分析,提出了相应的设计建议。

1 工程概况

塔楼地上 54 层,地下 4 层,屋面高度 249m,结构平面为正方形,边长约为 46.8m。由于核心筒的长宽不同且位置不居中,造成无梁空心楼板的跨度为 9.5~12.3m 不等。塔楼效果图及典型楼层平面布置示意图分别见图 1~2。塔楼采用带加强层的巨柱框筒结构体系,巨柱沿竖向呈内八字倾斜,每边两个巨柱的轴线距离 L 由底层 26.6m 逐渐缩小至顶层 22.6m;内部核心筒尺寸约为 24.5m×21m;边框梁最大跨度 26.6m;建筑首层层高 19.5m,标准层层高 4.5m,沿竖向设置 4 个避难层(11、22、33、44 层,层高均为 5.1m);除 2 层楼面、避难层顶面楼板、屋面、22、44 层及其上下层外,办公区楼板均采用无梁空心板楼盖。

2 空心板模拟

本工程空心板剖面图及相关尺寸见图 3,最精确模拟空心板特性的方法应为实体单元有限元法。还有一种可行的方法是用板单元来分别模拟空心板的纵、横肋及肋间板,即离散板单元建模计算。

依据图 3 空心板相关尺寸,分别采用以上两种方法建立一个简单的悬挑空心板模型,当采用离散板单元方法建模时,由于空心板厚度为 0.4m,且上

下层板均为 0.07m 厚,上下层板中面的高差为 0.33m。纵肋方向的长度为 5.6m,横肋方向长度为 2.24m,空心板左端固接。两种模拟方法的模型如图 4 所示。分别对其施加竖向面荷载 10kN/m^2 ,横肋方向水平荷载 9.8kN/m ,纵肋方向水平荷载 1960kN/m (图 5),以检测两种模拟方法下空心板抗弯、抗剪及轴向刚度的差异。

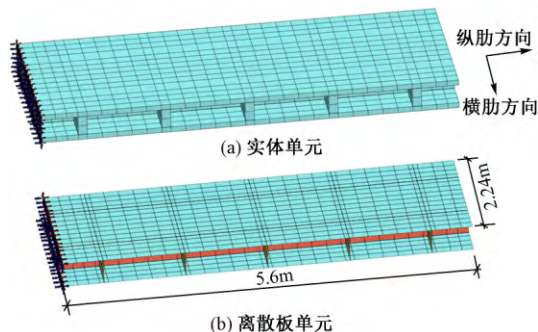


图 4 两种模拟方法的模型示意

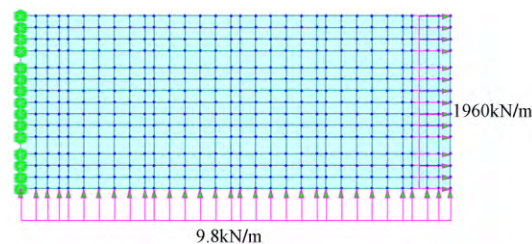


图 5 荷载施加示意图



图 1 效果图

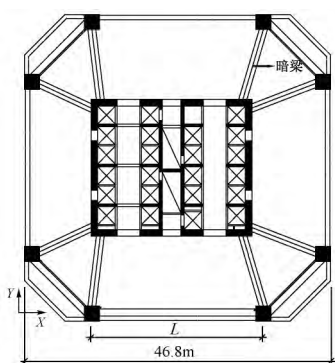


图 2 典型楼层平面示意图

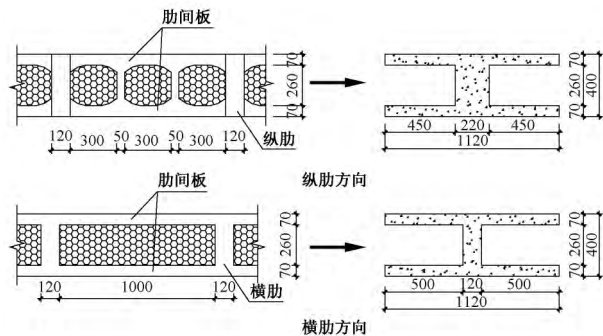


图 3 空心板剖面图及相关尺寸

由图 6 空心板变形图可以看出,离散板单元模型在横肋方向水平荷载作用下的变形分布情况与实体单元模型的结果一致,其在竖向荷载和纵肋方向水平荷载作用下变形分布情况也与实体单元模型的结果一致,由表 1 的计算结果可以看出,两种模拟方法的变形误差的绝对值在 5% 以内。由图 7、8 空心板应力分布图可以看出,离散板单元模型在横肋方向水平荷载作用下的应力分布情况与实体单元模型的结果一致,其在竖向荷载和纵肋方向水平荷载作用下应力分布情况也与实体单元模型的结果一致,由表 2 的计算结果可以看出,两种模拟方法的应力误差的绝对值在 5% 以内。以上结果表明采用离散板的模拟方法可以满足工程设计精度的要求。

两种模拟方法的变形最大值/mm 表 1

加载方式	竖向	水平向(横肋方向)	水平向(纵肋方向)
实体单元	-9.411	0.266	1.884
离散板单元	-9.117	0.266	1.822
误差	-3.10%	0.10%	-3.30%

注:误差=(离散板单元结果-实体单元结果)/实体单元结果,余同。

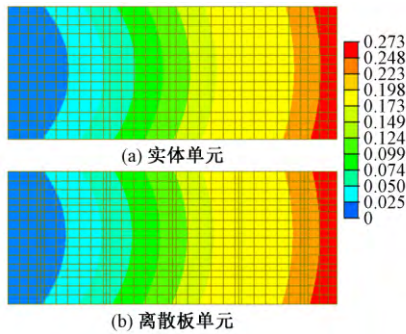


图 6 水平荷载(横肋方向)作用下的空心板变形图/mm

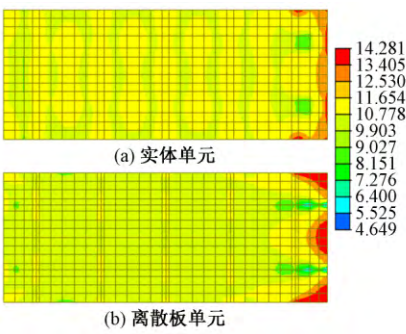


图 7 水平荷载(纵肋方向)作用下的板顶正应力分布图/MPa

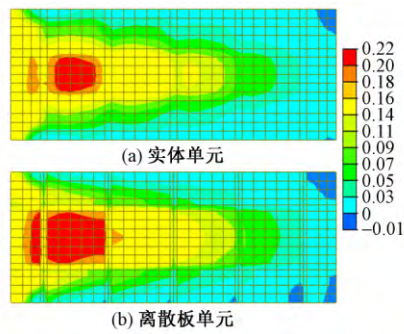


图 8 水平荷载(横肋方向)作用下的板顶剪应力分布图/MPa

两种模拟方法板顶应力最大值/MPa 表 2				
加载方式	正应力			水平向(横肋方向)剪应力
	竖向	水平向(横肋方向)	水平向(纵肋方向)	
实体单元	8.075	1.376	14.057	0.215
离散板单元	8.368	1.338	14.281	0.219
误差	3.63%	-2.76%	1.59%	1.86%

实际工程采用实体单元模型时,由于其建模单元数量巨大、极其复杂,且计算分析耗时较长,计算结果很难落实到构件内力设计上。由于离散板单元建模方法与实体单元误差的绝对值在 5% 以内,且建模方便,故本工程采用离散板单元模拟空心板。

3 实际工程建模

本工程整体结构的三维模型见图 9,因核心筒内梁板及悬挑板不与空心板直接相连,其模拟方法与普通结构一致,即核心筒内框架梁采用梁单元模拟,核心筒内楼板及悬挑板均采用板单元模拟。其他与空心板直接相连的外框巨柱、核心筒剪力墙、外框梁和暗梁均需做特殊处理,下文将一一进行介绍。

3.1 空心板与核心筒外墙的连接

核心筒外墙及连梁均采用板单元模拟,且核心筒外墙需在(每层标高 h -连梁高度)处进行剖分,以保证连梁与核心筒的变形和内力传递。

空心板与核心筒外墙的连接模拟见图 10,核心筒外墙与连梁需在($h-0.33\text{m}$)处进行分割,依据空心板的肋梁位置进行水平方向剖分,从而使空心板的顶面肋间板、底面肋间板均与核心筒外墙有连接。

本工程中剪力墙截面较厚,其厚度会对空心板的跨度及与核心筒相连的空心板内力有一定的影响,故将空心板在剪力墙截面范围边界处进行分割,并把墙上节点与分割处的节点按主从关系连接。

3.2 空心板与型钢混凝土外框梁的连接

本工程外框梁为型钢混凝土梁,为减少单元数量及建模难度,如图 11 所示,其混凝土部分采用实体单元,钢筋采用梁单元模拟。现建立一榀框架,以

对比此简化建模方法与混凝土及钢筋均采用实体单元建模方法的差异。

框架布置及荷载示意如图 12 所示,梁跨度为 20m,柱高为 10m,柱截面为 1 500×1 500,型钢混凝土梁截面为 600×1 300,钢筋截面为 H900×400×50×50,混凝土强度等级为 C60,钢筋材料为 Q345。在左柱顶施加 10 000kN 的水平荷载,梁上施加 1 000kN/m 竖向均布荷载。两种建模方式下框架梁

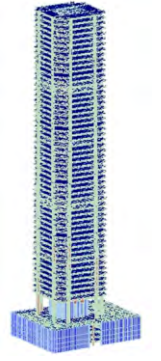


图 9 整体结构三维模型示意图

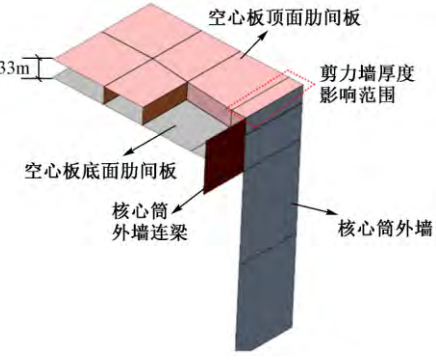


图 10 核心筒外墙与空心板连接示意图

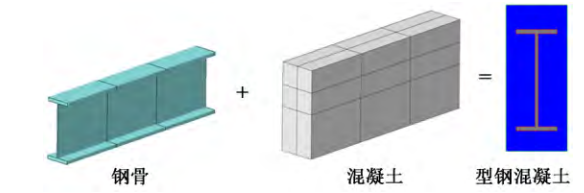


图 11 型钢混凝土梁模拟示意图

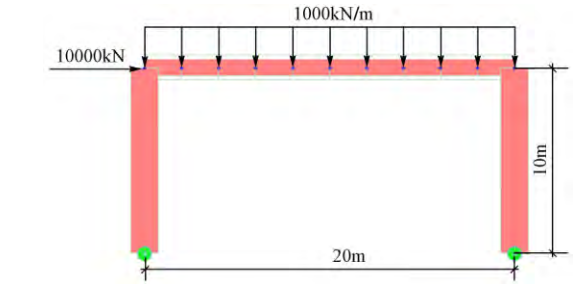


图 12 框架布置及荷载示意图

两种模拟方法框架梁最大变形/mm 表 3

钢筋模拟方式	水平荷载	竖向荷载
实体单元	74.7	105.5
梁单元	73.7	102.3
误差	-1.36%	-3.02%

在水平荷载及竖向荷载作用下的最大变形见表 3。

由表 3 可以看出,两种模拟方法的误差的绝对值在 5% 以内,表明型钢混凝土梁的简化建模方法可以准确模拟其各类刚度。

空心板与外框梁的连接如图 13 所示,为保证空心板与外框梁之间的变形和荷载传递。建模时,需以空心板肋板与其交界处的节点作为网格划分的关键点进行水平剖分;而竖向也需在空心板下层肋间板标高处进行剖分。

3.3 空心板与暗梁的连接

暗梁的尺寸为 $1\,200 \times 400$,采用实体单元模拟,空心板与暗梁的连接如图 14 所示,建模时,先在平面上划分出暗梁的截面范围,由于暗梁斜向布置,当正交布置的空心板网格与暗梁相交时,会直接被暗梁实体打断。为保证变形及荷载的传递,以空心板网格与暗梁截面范围的交点作为暗梁网格的控制点,对其进行水平剖分。

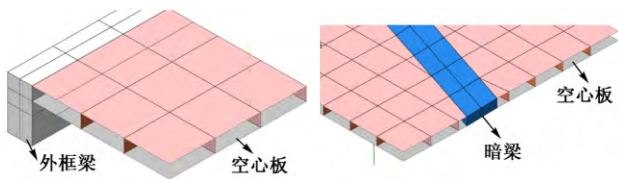


图 13 空心板与外框梁连接示意图

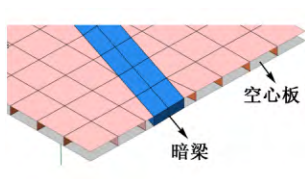


图 14 空心板与暗梁连接示意图

3.4 空心板与型钢混凝土巨柱的连接

外框型钢混凝土巨柱模拟参考型钢混凝土外框梁的模拟方法,在与外框梁相交及相交面以下 1m 范围内,混凝土采用实体单元模拟,型钢采用梁单元,其他位置仍采用梁单元模拟,见图 15。将柱梁单元段与实体单元段的交点作为主节点,其他相同标高的实体单元节点作为从节点,建立刚性连接。

空心板与型钢混凝土巨柱直接接触范围很小

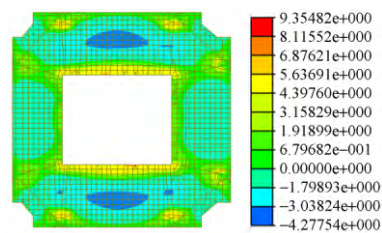


图 17 $D+L$ 作用下上层肋间板应力云图/MPa

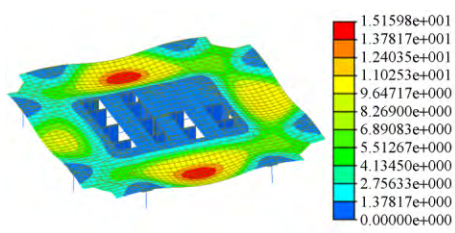


图 18 $D+L$ 作用下有暗梁空心板变形云图/mm

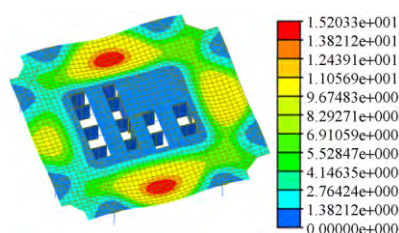


图 19 $D+L$ 作用下无暗梁空心板变形云图/mm

(图 16) 空心板上的荷载大部分通过外框梁和暗梁传递至巨柱。为保证巨柱与外框梁、空心板及暗梁的连接,将混凝土实体单元在外框梁梁底标高及空心板下层处进行竖向剖分;以巨柱与外框梁、空心板、暗梁交点作为其水平方向网格划分的关键点。

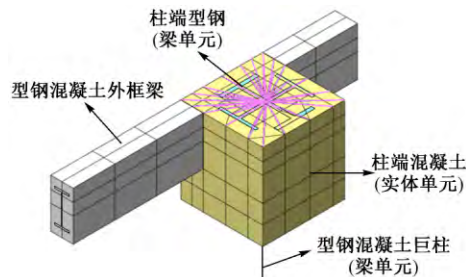


图 15 型钢混凝土巨柱模拟示意图

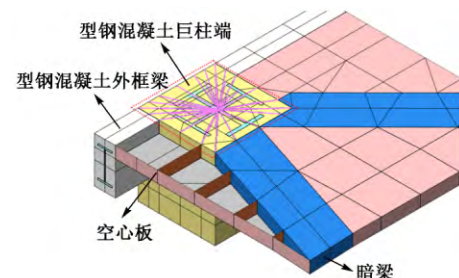


图 16 空心板与型钢混凝土巨柱连接示意图

4 计算结果及受力特点

由于空心板在水平及竖向荷载作用下的变形及受力特点不同,现分别介绍其在竖向及水平荷载作用下的分析结果。

4.1 竖向荷载作用

4.1.1 空心楼盖应力分布情况

图 17 为标准层楼板在竖向荷载的标准组合 $D+L$ (恒载+活载) 作用下上层肋间板的应力分布图,可以看出连接巨柱与核心筒的空心板,在墙端支座及柱端支座处的正应力水平相当且均为正值,而跨中部位正应力为负值(拉为正,压为负),且其应力水平约为墙端和柱端的一半。表明此部分空心板的受力情况相当于两端固支单向板。

连接外框梁跨中部位与核心筒的空心板最大正应力出现在墙端,跨中的正应力与墙端反号,且其应

力水平较小,而外框梁支座处的正应力接近于 0。表明此部分空心板的受力性能较接近一端固支,一端简支的单向板。

由上述分析结果可知,竖向荷载作用下空心板的受力情况为从两端固支(连接巨柱与核心筒的楼板)渐变成一端简支一端固支(连接外框梁跨中位置与核心筒的楼板)的单向板。

4.1.2 暗梁的作用

图 18,19 分别为标准层楼板在竖向荷载的标准组合 $D+L$ 作用下有暗梁和无暗梁的空心板变形云图。可以发现暗梁对空心板变形的分布基本没有影响;有暗梁时空心板的最大变形值约为 15.16mm (靠近外框梁处),无暗梁时空心板最大变形略微增加,其变形值约为 15.20mm(位置与有暗梁的情况一致)。而外框梁的最大变形值分别为 9.255mm 和 9.268mm,有暗梁模型和无暗梁模型的误差的绝对值均在 5%以内,表明暗梁可以与空心板协同受力,但不会形成板的支座。

图 20 为典型暗梁剪力分布图,在竖向荷载作用下暗梁支座处的剪力较大,所以支座处的暗梁对空心板抗剪发挥了很大作用。

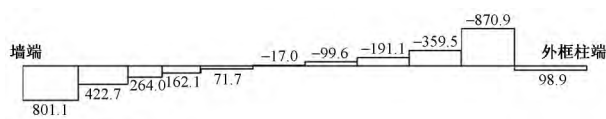


图 20 $D+L$ 作用下暗梁剪力变化图/(kN/m)

4.1.3 墙柱变形差的影响

经施工模拟分析发现,在竖向荷载作用下,巨柱的竖向变形比核心筒的竖向变形大,变形差最大值约为 6mm,位于结构的中下部(约 20 层附近)。此变形差造成楼盖在竖向荷载作用下,内力进一步向墙端支座处转移。

选取墙柱变形差较大的中部楼层(27 层),对图 21 所示的 6 个典型位置进行局部方向内力积分,求上述位置在竖向荷载作用下的弯矩及剪力,结果见表 4。

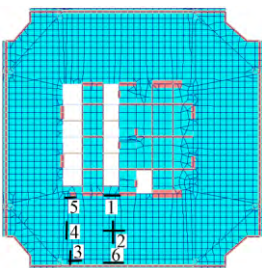


图 21 楼板内力关键位置示意图

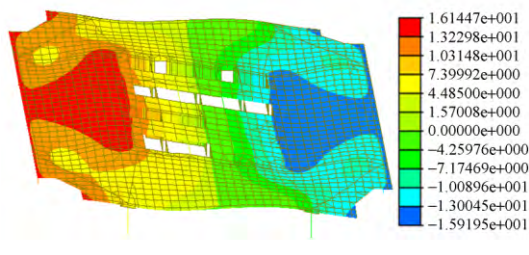


图 22 Y 向风荷载作用下空心板竖向变形云图/mm

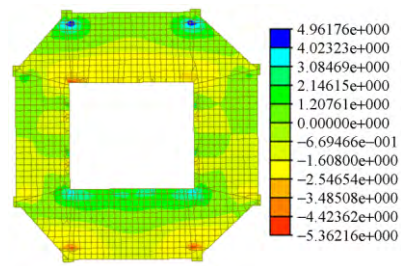


图 23 Y 向风荷载作用下上层肋间板应力云图/MPa

竖向荷载作用下楼板局部位置内力 表 4

位置	方向	荷载	弯矩/(kN·m/m)	单根肋板剪力/kN
1	Y	D	-240	70
		L	-104	34
2	X	D	61	1
		L	25	0
	Y	D	100	4
		L	50	0
3	X	D	-64	4
		L	-25	3
	Y	D	-49	53
		L	-26	23
4	X	D	-12	1
		L	-5	2
5	Y	D	-179	54
		L	-69	23
6	Y	D	10	25
		L	1	15

4.2 水平荷载作用

4.2.1 面外弯矩与剪力

在水平荷载作用下,标准层空心板内力最大位置约在 27 层(即整楼高度的一半处),故选取 27 层的空心板,研究其在水平荷载下的变形及内力分布情况。

由图 22 可以看出,空心板在水平荷载作用下有平面外变形,表明其参与抗侧。由图 23 可以看出,在水平荷载作用下空心板的应力集中在连接巨柱与核心筒空心板的柱端支座和墙端支座处。

选取图 21 所示的 6 个典型位置,利用 MIDAS Gen 求取这些位置在水平荷载下的弯矩及剪力。结果见表 5。

结合表 4 与表 5 可知,对于连接外框梁跨中与核心筒的空心板,在剪力墙端的支座位置(截面 1)内力最大,风荷载作用下产生的弯矩约为恒荷载作用下的 40%,小震作用下产生的弯矩约为恒荷载作用下的 25%;在外框梁跨中的支座位置(截面 6),竖向和水平荷载作用下的截面弯矩均较小,其对楼板的配筋设计不起控制作用。

对于连接巨柱与核心筒的楼板,在柱端支座(截面 3)及墙端支座位置(截面 5),风荷载作用下产生的弯矩约为恒荷载作用下的 67%,小震作用下

水平荷载作用下空心板局部位置的内力 表 5

位置	方向	荷载	弯矩/(kN·m/m)	单根肋板剪力/kN
1	YY	WX	49	32
		WY	-96	11
		EX	33	32
		EY	56	7
2	XX	WX	0	4
		WY	-11	0
		EX	0	3
		EY	7	0
	YY	WX	1	0
		WY	6	7
		EX	1	1
		EY	3	5
3	XX	WX	43	0
		WY	40	6
		EX	26	0
		EY	26	3
	YY	WX	29	10
		WY	121	35
		EX	23	6
		EY	94	22
4	XX	WX	-3	2
		WY	5	3
		EX	2	1
		EY	3	2
5	YY	WX	-36	30
		WY	-124	10
		EX	22	19
		EY	74	5
6	YY	WX	-2	0
		WY	18	4
		EX	1	0
		EY	11	2

注: WX 为 X 向风荷载; WY 为 Y 向风荷载; EX 为 X 向地震作用; EY 为 Y 向地震作用。

产生的弯矩约为恒荷载作用下的 40%。表明水平荷载对此处截面的影响较大,设计时不能忽略水平荷载的作用。水平荷载对柱端和墙端支座相连的跨中位置(截面 4)的影响较小。

4.2.2 面内剪力

框筒结构中现浇空心板楼盖不仅要把其承担的楼面、屋面荷载传递给周围的梁、墙、柱等构件,同时还起着联系框架与筒体、使之协同工作的作用^[2]。不同于普通梁板式楼盖,空心板楼盖主要靠空心板的面内剪力协调水平荷载作用下筒体与外框架之间的变形,使之协同工作。故选取图 24 中所示的位置,采用 MIDAS Gen 中的定义剖段线工具,显示在小震和 1.1 倍风荷载(50 年一遇)作用下此位置的面内剪应力分布情况。具体结果如图 25 所示,可以看出,在水平荷载作用下,空心板应力在连接外框柱和核心筒及连接核心筒和外框梁跨中部位较大,其他部位较小;面内剪应力很小,最大值为 0.64MPa,

小于 $0.7f_t$ ($0.7f_t = 1.099\text{MPa}$, f_t 为混凝土抗拉强度设计值),此结果仅为小震和 1.1 倍风荷载作用下的应力分布情况。设计时,需要计算空心板在中、大震作用下的应力情况并根据计算结果采取相应的加强措施。

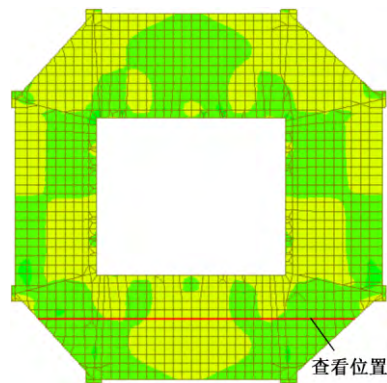


图 24 水平荷载作用下楼板剪应力查看位置

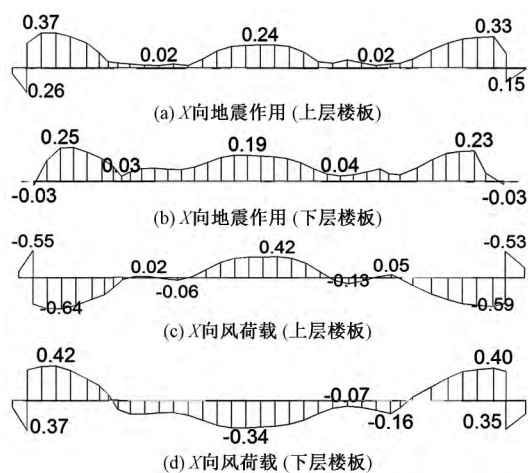


图 25 水平荷载作用下 27 层空心板剪应力分布/MPa

5 型钢混凝土外框梁的收缩徐变

由于混凝土有收缩和徐变的特性,组合梁在长期荷载作用下的挠度随时间增长不断增大^[3]。利用 MIDAS Gen 考察单层楼模型中外框梁收缩徐变引起的空心板的变形情况,见图 26,最大位移约为 -10.43mm。连接外框梁跨中和核心筒的空心板墙端支座处竖向变形差引起弯矩约为 $-34\text{kN}\cdot\text{m/m}$,约

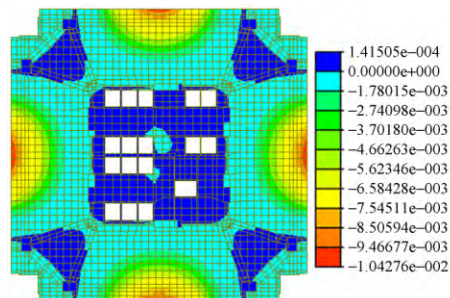


图 26 外框梁收缩徐变引起的楼板变形图/m

(下转第 76 页)

总用钢量为 29.92kg/m^2 。 φ 取 0.7 和 1.0 时的用钢量大于分部设计法,尤其以计算配筋占主导的第 2 层更为明显,当计算配筋所占比例更多时,用钢量将更加偏于保守。 φ 取 0.5 时的用钢量和分部系数法最为接近,差别主要体现在梁构件的用钢量上,但这种情况是由于上部结构随隔震层的平动而改善了不同构件之间的地震作用的分配方式,降低了部分中梁的受剪扭现象而造成的,故可以判断此时的配筋是合理的。

4 结 论

(1) 提出通过迭代计算确定隔震支座和隔震层等效参数的方法,并以两种不同的初值进行迭代验证。结果表明,隔震结构在同一个性能设防目标下以不同的初值起步迭代会得到相同的隔震支座和隔震层等效参数。

(2) 提出以中震弹性为基本性能设防目标的直接设计法,并对某剪力墙隔震结构分别采用该方法和传统的分部设计法取不同的结构性能系数(φ 取 0.5, 0.7, 1.0)的内力和配筋结果进行对比。结果表明,中震直接设计法可基于上部结构随隔震层的平动而改变不同构件之间的地震作用分配方式,减轻了中梁的受扭现象,使上部构件的受力更加合理。

(3) 对比两种设计方法的用钢量结果发现,剪力墙隔震结构采用中震弹性为基本设防目标的直接设计法时,通过引入结构性能系数进行配筋设计的调整具有一定的合理性和经济性。

参 考 文 献

[1] 薛彦涛. 建筑结构隔震技术现状与应用[J]. 建筑结

构 2011, 41(11): 82-87.

[2] 杜永峰, 李慧, 苏磐石, 等. 非比例阻尼隔震结构地震响应的实振型分解法[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 24-32.

[3] 杜永峰, 党育, 李慧, 等. 基于非比例阻尼模型的隔震结构动力分析软件[J]. 建筑结构, 2004, 34(6): 32-35.

[4] 龚微, 熊世树. 线性阻尼隔震与非线性隔震系统近断层地震反应分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 108-114.

[5] 杜东升, 刘伟庆, 王曙光, 等. SSI 效应对隔震结构的地震响应及损伤影响分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 19-25.

[6] 薛彦涛, 巫振宏. 隔震结构振型分解反应谱计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(4): 119-125.

[7] BECKER T C, YAMAMOTO S, HAMAGUCHI H, et al. Application of isolation to high-rise buildings: a Japanese design case study through a US design code lens[J]. Earthquake Spectra, 2015, 31(3): 1193-1199.

[8] TENA-COLUNGA A. Simplified method for the seismic design of low-rise, shear wall base-isolated buildings[J]. Open Construction & Building Technology Journal, 2014, 8(8): 22-33.

[9] CALUGARU V, PANAGIOTOU M. Seismic response of 20-story base-isolated and fixed-base reinforced concrete structural wall buildings at a near-fault site[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(6): 927-948.

[10] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.

[11] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[12] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(上接第 12 页)

为恒荷载作用下弯矩的 10%, 在设计中不可忽略其影响。

6 结 论 及 设 计 建 议

本文通过对空心板楼盖有限元模拟计算方法的研究, 及对空心板楼盖进行详细的受力分析, 对实际工程中采用空心板楼盖的高层框筒结构的设计得出以下几点结论及建议:

(1) 离散板单元的模拟方法能够准确模拟空心板的抗弯、剪切及轴向刚度, 建议实际工程中空心板的模拟采用离散板单元模拟方法。

(2) 空心板设计时需同时考虑竖向荷载与水平荷载作用的影响。

(3) 需考虑大跨度外框梁变形以及大跨度外框

梁混凝土收缩徐变的影响。

(4) 暗梁并不能为空心板提供有效的支撑, 但靠近巨柱及剪力墙处将产生很大的剪力, 设计时应注意其抗剪和抗冲切承载力的安全性。

(5) 外框巨柱边及核心筒外墙边空心板承受的弯矩和剪力较大, 设计时应根据计算结果予以加强。

参 考 文 献

[1] 陈龙, 黄文娜, 陈力波, 等. 应用 MIDAS 进行空心楼盖有限元设计的方法研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(S1): 419-423.

[2] 魏琰, 王志远, 王森, 等. 高层建筑框筒结构单向梁楼盖设计若干问题研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(12): 1-4.

[3] 邱文亮, 姜萌, 张哲. 钢-混凝土组合梁收缩徐变分析的有限元方法[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 162-166.