

文章编号:1673-2049(2006)01-0059-04

混凝土密肋空心楼盖试验研究

吴方伯¹, 汪幼林¹, 周绪红², 王显都¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:对由现浇密肋梁和预制混凝土空心箱体组合而成的 WFB 混凝土密肋空心楼盖进行了分析。针对这种新型结构形式的抗弯刚度,进行了 9 m×9 m 的足尺模型静水加载试验;并通过有限元软件 ANSYS 分析了计入全部空心箱体刚度和不考虑空心箱体刚度的两种有限元模型。基于试验得到的荷载-挠度曲线和计入全部空心箱体刚度的有限元模型得到的荷载-挠度曲线吻合这一结果,得出了 WFB 混凝土密肋空心楼盖抗弯刚度的计算方法;并提出了 WFB 混凝土密肋空心楼盖的两种设计方法以及其挠度的近似计算方法。

关键词:钢筋混凝土;抗弯刚度;密肋空心楼盖;拟板法;拟梁法

中图分类号: TU338

文献标志码: A

Experimental Research on Hollow-Ribbed Concrete Floor

WU Fang-bo¹, WANG You-lin¹, ZHOU Xu-hong², WANG Xian-du¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The WFB cast-in-situ hollow-ribbed concrete floor, which composed by space beams and the prefabricated concrete box fillers, was analyzed. In order to study the flexural rigidity of this new structure, a WFB cast-in-situ hollow-ribbed concrete floor model of 9 m×9 m size had been tested. The FEM (finite element method) software ANSYS was used to analyze the two FEM models, one of which whole considered the prefabricated concrete box filler's rigidity while the other didn't. Depending on the load and deflection relation curve of the first FEM modules tallied with the load and deflection relation curve of the test, the mechanism of flexural rigidity for the WFB cast-in-situ hollow-ribbed concrete floor was set up. Two design methods of the structure and the method of calculating defection were given.

Key words: reinforced concrete; flexural rigidity; hollow-ribbed floor; pseudo-plate method; analogue beam method

0 引言

无梁楼盖 1906 年始创于美国,真正的大量应用是在二次世界大战以后,主要用于高层公寓建筑。无梁楼盖因能显著降低楼层高度、板底平整、施工方便而使其具有广阔的发展前景,然而它的不足之处

在于混凝土和钢材用量很大,所以在大跨度无梁楼盖中,设法减轻楼板的自重具有很大的经济效益,于是出现了多种楼盖形式,如在受拉区仅留下细长的肋,肋中放置钢筋(井肋楼盖);在楼盖中应力较小的那层混凝土用轻质、低强度的混凝土来构成(夹层无梁楼盖);在楼盖中预埋轻质的内模,浇筑混凝土形

成空腔(密肋楼盖、空心楼盖)。

中国在 20 世纪八九十年代逐步采用现浇混凝土空心楼盖建造公共建筑,并且空心楼盖的形式不断改进,现已有了多种空心楼盖形式。WFB 混凝土密肋空心楼盖是其中的一种,它由预制的空心箱体(图 1)在现浇混凝土板以前于现场敷设,并在空心箱体间的间隔内放置钢筋,此后在间隔内浇筑混凝土,这样就形成了单个的空心箱体相连成整体的十字交叉钢筋混凝土肋形系统,如图 2 所示。这种楼盖形式的传力路径简单清晰,楼面荷载通过空心箱体传给肋梁,肋梁传给主梁,主梁传给柱。空心箱体不仅起到了构件的作用,还充当了肋梁的侧模和楼盖底板的吊顶。与密肋楼盖相比,它的优点是不需要支肋梁侧模,不用吊顶;与无梁楼盖相比,它的优点是自重小,省材料;与其他空心楼盖相比,它的优点是只需浇肋梁混凝土,没有抗浮的问题。

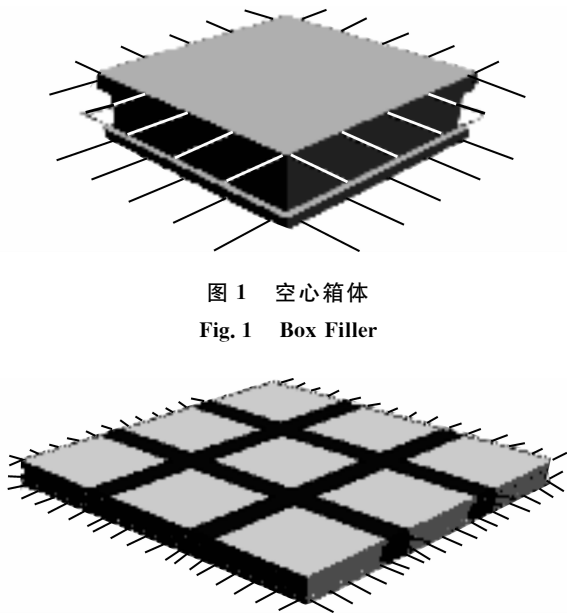


图 1 空心箱体
Fig. 1 Box Filler

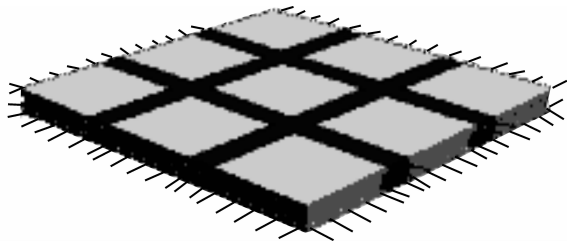


图 2 楼盖整体
Fig. 2 View of Floor System

为研究这种楼盖的性能,笔者与湖南长沙航凯建材有限公司研究人员合作,完成了 $9\text{ m}\times 9\text{ m}$ 野外足尺模型的弹塑性阶段试验,并根据该试验结果,提出了这种结构的刚度计算公式与设计方法。

1 试验及分析

1.1 试验概况

试验模型的楼盖厚度为 350 mm,密肋梁截面尺寸为 $200\text{ mm}\times 350\text{ mm}$,柱上主梁截面尺寸为 $600\text{ mm}\times 350\text{ mm}$,相邻肋梁间的净距为 800 mm,肋与肋之间敷设尺寸为 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times$

350 mm 的 WFB 空心箱体。现浇混凝土的强度等级为 C30,实测强度为 30.5 MPa;在楼盖上砌 500 mm 高的水池,用静水加载,每级加载 0.5 kPa,即 5 cm 的水深,每次加载间停歇 10 min,使其变形趋于稳定。试验模型、配筋与测点布置如图 3 所示。

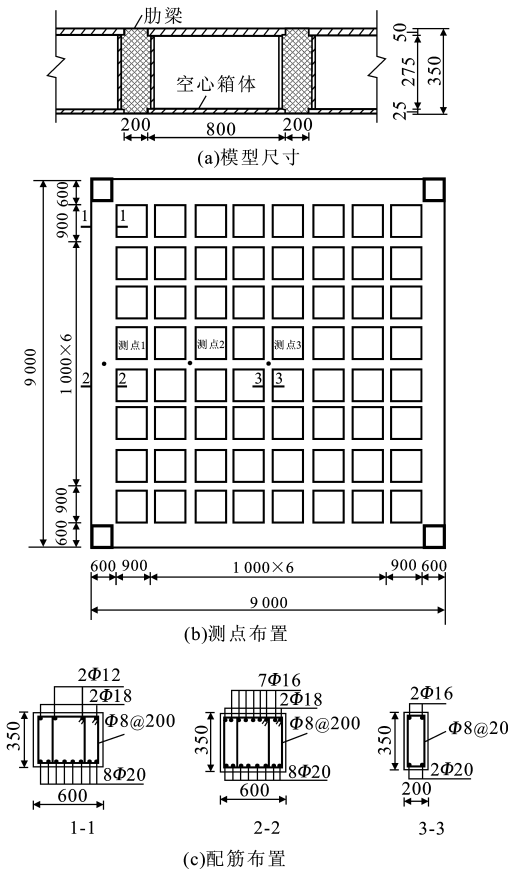


图 3 试验模型尺寸、测点与配筋布置(单位:mm)
Fig. 3 Dimensions, Reinforcements and Measuring Points Arrangement of Testing Model (Unit:mm)

1.2 试验结果

该试验共加载 9 次,共加水深 45 cm,加上试验模型楼盖自重产生的压强 5.69 kPa,实际加载为 10.19 kPa。此时中点挠度为 10.377 mm(不含拆模时的挠度),裂缝最大宽度为 0.12 mm。试验模型各测点挠度实测值如表 1 所示。

1.3 有限元分析

用 ANSYS Solid65 单元建模,分别模拟考虑空心箱体刚度的试验模型(空心楼盖)和不考虑空心箱体刚度的试验模型(交叉梁系),两个模型均以试验模型的尺寸为基准,且定义了相同的混凝土 W-W 破坏准则和缺省的混凝土本构关系。由于试验模型的结构和荷载均对称,只取 1/4 跨模型计算。将两个有限元模型计算得到的测点 3 荷载-挠度曲线同试验得到的测点 3 荷载-挠度曲线比较,如图 4 所示。

表 1 试验模型各测点挠度实测值

Tab. 1 Measured Values of Deflection at Measuring Points of Testing Slab

静水深度/cm	0	5	10	16	20	30	35	40	45
等效荷载/kPa	5.69	6.19	6.69	7.29	7.69	8.69	9.19	9.69	10.19
测点 1 挠度/mm	—	0.783	1.263	1.697	2.013	2.862	3.227	3.804	4.430
测点 2 挠度/mm	—	1.885	3.011	3.931	4.680	6.117	6.649	7.481	8.344
测点 3 挠度/mm	7.160	9.337	10.616	11.736	12.616	14.395	15.077	16.337	17.537

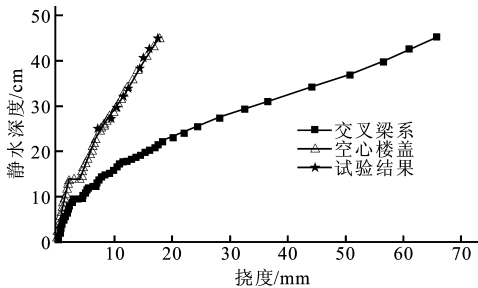


图 4 测点 3 有限元模型计算值与试验值比较

Fig. 4 Comparison of Tested and FEM Calculated Deflection at the Third Measuring Point

从图 4 可以看出:Solid65 单元模拟的空心楼盖模型计算值和试验值吻合良好,最大误差仅为 5%,该有限元模型的可靠性得到了证明;两个有限元模型在混凝土开裂前,均处于弹性阶段,挠度和荷载成线性关系。当荷载达到 10.19 kPa 时,空心楼盖模型的最大挠度为 18 mm,而交叉梁模型的最大挠度为 65 mm,可见如果忽略空心箱体的刚度,所得的挠度将远大于实际挠度。

1.4 楼盖刚度

由第 1.3 节的有限元分析,可知空心箱体的刚度可以全部计入楼盖体系中,并且文献[1]中也指出,应考虑填充材料与肋的共同作用,强度较高的填充材料(如素混凝土空盒)可全部算进去,所以 WFB 混凝土密肋空心楼盖的截面惯性矩可以按实际尺寸计算,即以与该楼盖同厚度的实心板截面惯性矩减去空心部分截面惯性矩,而其刚度则为截面惯性矩与弹性模量之积。它的截面惯性矩计算公式为

$$y_c = \frac{l_1 H^2 / 2 - \sum_{i=1}^n A_i y_i}{l_1 H - \sum_{i=1}^n A_i} \tag{1}$$

$$I = \frac{l_1 H^3}{12} + l_1 H \left(\frac{H}{2} - y_c \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left[\frac{l_i h_i^3}{12} + l_i h_i (y_i - y_c)^2 \right] \tag{2}$$

$$I_1 = I / l_1 \tag{3}$$

式中: y_c 为空心楼盖截面形心的高度; l_1 为计算跨度,单跨时为边梁边到边的距离,多跨时为柱中线到

中线的距离; H 为楼盖的厚度; n 为计算方向上的空腔个数; A_i 为计算方向上第 i 个空腔的面积; y_i 为第 i 个空腔形心的高度; I 为空心楼盖截面惯性矩; l_i 为第 i 个空腔在计算方向上的长度; h_i 为第 i 个空腔的高度; I_1 为单位宽度截面惯性矩。

2 楼盖的设计方法

2.1 拟板法

拟板法是以截面抗弯刚度的等价原则将离散的网肋结构连续化,模拟成等厚度的板。1933 年前苏联中央工业建筑科学研究院葛渥兹捷夫教授研究了类似的楼盖(嵌有轻质石料的无梁楼盖),设计方法与普通的无梁楼盖一样,只是进行了一些补充和改进:①将算得的钢筋面积乘以某一系数;②对板的跨度与厚度之比的规定与普通无梁楼盖不同。文献[2]中也给出了拟板法的基本假定,认为拟板法的一个必要条件是在一个柱距的跨度内肋梁的个数不宜少于 6 个,使得至少可以各有 3 个肋梁来替代柱上板带和中间板带,由此可以看出,WFB 空心楼盖满足拟板法的计算条件。楼盖的折算厚度

$$h_{f,eq} = \sqrt[3]{12I_1} \tag{4}$$

将 WFB 混凝土密肋空心楼盖等效成无梁楼盖后,可按等代框架法或直接设计法计算,将求得的柱上板带或中间板带弯矩按照肋间距的大小分配到各个肋,主梁承担柱上板带弯矩中的 85% 和全部的剪力;柱上板带其余弯矩由位于其中的次肋承担。

工程设计中发现,用无梁楼盖法算得的配筋偏小,又考虑到预制的空心箱体对楼盖抗扭刚度的削弱,空心箱体与空心箱体间的混凝土参加受拉区工作的部分要比相同情况下的整片板小得多,参照施泰耶尔曼在《无梁楼盖》中的方法,用拟板法求得的钢筋截面面积须乘以表 2 中的相应系数。

2.2 拟梁法

拟梁法是将 WFB 混凝土密肋空心楼盖离散成由井字梁组成的楼盖,密肋梁的抗弯刚度按工字形梁计算以考虑空心箱体的刚度,工字形梁的上下翼缘板宽度为肋梁的间距。利用现行的计算软件 PK-

PM、广厦 CAD、TBSA 等直接输入框架梁和密肋梁参数,板厚度取 0,可直接计算出楼盖中的梁柱配筋。

表 2 钢筋截面面积放大系数

截 面	板 带	
	柱 上	跨 中
支座的	1. 15	1. 2
跨度的	1. 20	1. 2

等效后的井字梁楼盖的挠度,可用文献[3]中计算井字梁楼盖和密肋楼盖跨中最大挠度的方法计算

$$f_{\max}=10^6\mu\frac{a^5q}{B}$$

(5)

式中: μ 为系数; a 为井字梁正方形网格的长度; q 为单位面积上的计算荷载; B 为井字梁刚度,按弹性理论计算, $B=EI$ 。

对于试验模型,等效后的井字梁的截面惯性矩

$$I_e=1.414\times10^9\text{ mm}^4$$

系数 μ 取 55.63,由式(5)计算得到试验模型测点 3 在各级等效荷载下的挠度,如表 3 所示。从表 3 可以看出:用式(5)计算的 WFB 混凝土密肋空心

表 3 测点 3 挠度实测值和计算值的比较

等效荷载/kPa		5. 69	6. 19	6. 69	7. 29	7. 69	8. 69	9. 19	9. 69	10. 19
挠度/mm	实测值	7. 160	9. 337	10. 616	11. 736	12. 616	14. 395	15. 077	16. 337	17. 537
	式(5)计算值	8. 940	9. 860	10. 780	11. 870	12. 610	14. 450	15. 360	16. 280	17. 200

参考文献:

References:

[1] 余安东. 升板结构设计原理[M]. 上海:上海科学技术出版社,1979.
YU An-dong. The Design Theory of Lift Slab Structure[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers,1979.

[2] 朱聘儒. 双向板无梁楼盖[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
ZHU Pin-ru. Two-Way Flate Slab Floor[M]. Beijing: China Architecture and Building Press,1999.

[3] 李培林,吴学敏. 混凝土密肋及井式楼盖设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
LI Pei-lin,WU Xue-min. Design Brochure for Concrete Ribbed Slabs and Cross Beams Structure[M]. Beijing: China Architecture and Building Press,1994.

[4] CECS 175, 现浇混凝土空心楼盖结构技术规程[S].
CECS 175, Technical Specification for Cast-in-Suit Concrete Hollow Floor Structure[S].

楼盖挠度值和实测值吻合。在实际工程中,虽然楼板的初始弹性挠度和长期挠度的预测很复杂,荷载特别是施工时的荷载对最终挠度有很大的影响^[4-8],但以式(5)作为估算方法,是可取的。对于长期挠度,一般将式(5)的计算结果乘以 3。

3 结 语

(1)WFB 混凝土密肋空心楼盖具有承载力大、刚度好、空心率高、自重轻、施工方便等优点,适合在跨度较大的多层和高层建筑中使用,目前已经在多项工程中得到应用。

(2)由试验结果和 ANSYS 软件分析可知:计算 WFB 混凝土密肋空心楼盖时应考虑空心箱体的刚度,并可以全部计入。

(3)WFB 混凝土空心楼盖厚度与刚度可用拟板法和拟梁法计算,式(5)可近似地计算该楼盖在短期荷载作用下的挠度。

(4)WFB 混凝土空心楼盖的破坏形态,空心箱体与现浇密肋的共同作用还有待进一步试验研究和理论分析,以使得设计更加合理。

[5] RODRIGUEI M E,SANTIAGO S,MELI S. Seismic Load Tests on Two Story Waffle Flat Plate Structure[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,1995,9(12):1 287-1 293.

[6] AJDUKIEWICZ A B,KLISCZEWICZ A T. Experimental Analysis of Limit States in a Six-Panel Waffle Flat Plate Structure[J]. ACI Journal,1986,6(83):909-915.

[7] 陆新征,江见鲸. 用 ANSYS Solid65 单元分析混凝土组合构件复杂应力[M]. 建筑结构,2003,23(6):22-24.
LU Xin-zheng, JIANG Jian-jing. Analysis of Complicated Stress of Concrete Composite Structures by ANSYS Solid65 Elements[J]. Building Structure,2003,23(6):22-24.

[8] 刘 群,杨进春. 大跨度空间密肋楼盖设计计算的拟板解法[J]. 建筑科学,1997,13(6):30-34.
LIU Qun, YANG Jin-chun. The Pseudo-Plate Method for the Design of Large Span Rib Floor[J]. Building Science,1997,13(6):30-34.