

钢-混凝土组合扁梁楼盖承载性能有限元分析

杨璐, 王元清, 石永久

(清华大学土木工程系, 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:钢-混凝土组合扁梁楼盖的采用可以降低结构层高,改善钢结构的防火性能,形成无柱大空间与“无梁楼盖”的建筑效果;组合扁梁楼盖具有良好的力学性能,在多高层结构中,既能做框架梁受力,又能承载楼面的作用荷载;同时深肋压型钢板的采用可以降低楼板自重同时可作为永久模板使用,大大提高施工速度,带来很好的经济效益,在多高层钢结构建筑中有广阔的应用前景。论文采用有限元软件 ANSYS 建立钢-混凝土组合扁梁整体楼盖三维实体模型。对组合扁梁楼盖在竖向荷载作用下的承载性能、变形特点以及楼板自振频率进行了分析,同时对组合扁梁的有效宽度及肋部混凝土的影响进行了计算分析。分析结果表明:钢-混凝土组合扁梁楼盖具有良好的承载性能并能较好地满足正常使用的要求;肋部混凝土及配筋对楼盖的承载力有较大的影响;楼盖主梁的有效宽度分析应建立在整体模型和试验的基础之上。

关键词:组合扁梁楼盖;承载性能;自振频率;有效宽度;有限元分析

中图分类号:TU391 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)05-0047-06

FEA of the Loading Capacity of Monolithic Composite Slim Floors with Deep Decks

YANG Lu, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu

(Department of Civil Engineering, The Key Laboratory of Structure Engineering and Vibration of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: Steel-concrete composite slim floors with the steel beam encased in concrete floor slabs have many advantages, including low structural height, high fire resistance and rapid construction times. These features make such floors a promising for use in multi-storey steel buildings. We established a 3D finite element model of a monolithic composite slim floor using the ANSYS software package. We analyzed the loading capacity, deformation behavior, natural vibration frequency, the influence of reinforcement, and the concrete in the floor rib under a uniformly distributed vertical load. We calculated the effective width of mid-girder and secondary beams. The following conclusions can be drawn from the analysis results: First, monolithic composite slim floors possess high loading capacity for common buildings. Second, the concrete rib and reinforcement ratio in the rib have significant effects on floor loading capacity. Third, calculation of effective primary beam width should be based on analysis of monolithic floors rather than single beams.

Key words: composite slim floor; loading capacity; natural vibration frequency; effective width; FEA

1 概述

钢-混凝土组合扁梁将钢梁内嵌于混凝土楼板之中,利用钢梁与混凝土之间的粘结力实现了两者的共同工作,其最早出现在北欧的 Scandinavia,当时楼盖中所采用的钢梁截面形状酷似绅士的礼帽,所以这些

钢梁也被称为“帽梁”(Hat Beam),如图1。到目前,已经出现了较多此形式的产品,形式上主要有组合扁梁在工程的应用主要有叠合板组合扁梁^[1]、深肋组合扁梁^[2]、拱形组合扁梁^[3],见图2。采用组合扁梁楼盖,主要有以下两个方面的突出优点:一是可以增加建筑净空,降低结构的层高;另一方面,由于钢梁大部分埋

* 收稿日期:2008-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50578083)

作者简介:杨璐(1982-),男,博士生,主要从事钢结构及钢-混凝土组合结构研究。(E-mail)lyangoo@mails.tsinghua.edu.cn

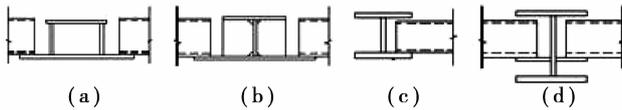


图1 帽梁

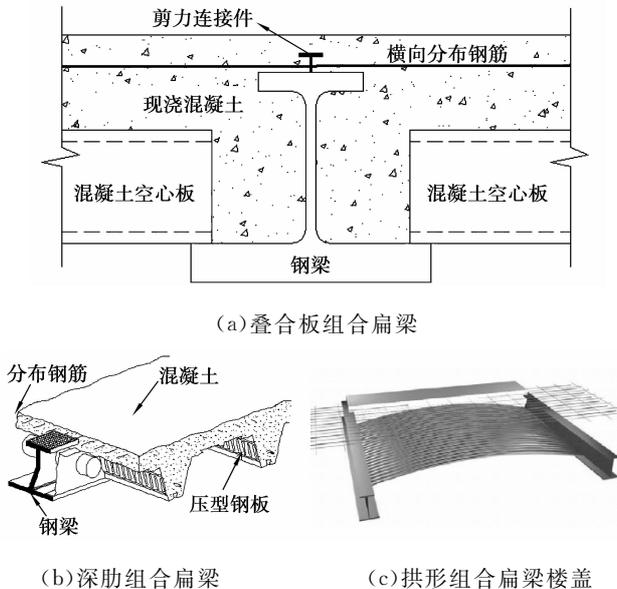


图2 不同类型组合扁梁

在混凝土中,可大大改善钢梁的防火性能。从而带来很好的经济效益。

国内外对组合扁梁结构形式的受力性能进行了一定的研究。1995年,芬兰赫尔辛基理工大学钢结构试验室为了研究各种因素对半组合扁梁刚度和强度的影响,主要探讨了各种连接形式对组合扁梁的刚度和强度的影响^[4];1999年,又进行相关试验对影响组合扁梁的节点的性能的参数、裂缝发展规律、纵向钢筋应力分布规律和破坏模式等进行了研究^[5]。1995年,意大利 Trento 大学研究了配筋率和柱类型对组合扁梁的节点的性能影响;1998年,英国钢结构研究所(The Steel Construction Institute)设计了跨度为7.5 m 三根筒支压型钢板组合扁梁试件,采用4点加载模拟了实际工程中简支组合扁梁的受力性能^[2]。清华大学近年来对简支、框架以及悬臂叠和板组合扁梁^[6]以及简支、框架深肋组合扁梁的承载性能进行了试验研究^[7-8]。从目前笔者有限的资料搜集,尚未发现对于组合扁梁整体楼盖的试验研究,而对于其它形式的楼盖研究中,楼盖的边界支撑条件多为四边简支或角点支撑^[9-10]。

论文主要通过有限元方法,对深肋压型钢板组合扁梁整体楼盖在竖向荷载作用下的承载性能进行了分析,重点研究了楼盖的变形特点、肋部配筋对楼盖承载力的影响、自振频率以及组合扁梁的有效宽度进行了分析,并与相关文献进行了比较。

2 有限元模型建立

2.1 研究对象

通过有限元软件 ANSYS 建立了深肋组合扁梁整体楼盖模型并对其在楼面均布荷载作用下的受力性能进行了模拟分析。整体楼盖共两跨 $6\text{ m} \times 12\text{ m}$,跨中设一道次梁,主梁与柱刚接,次梁与主梁铰接。柱子总长度3 m,中点位于钢梁腹板中点处,两端铰接。其整体布置情况及肋部情况如图3。柱上下端、与主梁相连处及主梁与次梁相连处设10 mm厚加劲肋。

钢梁采用非对称工字钢,上下翼缘厚10 mm,腹板厚度8 mm,截面尺寸如图4,采用 $300 \times 300 \times 12$ 箱形柱,压型钢板详细尺寸以及与扁梁搭接情况详见图4。考虑主梁负弯矩影响,楼板盖板沿主梁方向配置钢筋($12@100$,与主梁垂直方向配置钢筋楼($6@100$;板下部沿板跨方向每个肋部配置钢筋 $2(20)$,如图4。采用C30混凝土,钢材强度Q235,钢筋为I级。

为了分析肋部混凝土配筋对楼盖承载性能的影响,在其它参数不变的情况下,另外计算了肋部不配钢筋的有限元模型。

2.2 单元选用及界面处理

在有限元模型中采用 SOLID65 模拟混凝土的受力,肋部混凝土配筋、表面配有钢筋网混凝土覆盖层以及其余地方素混凝土在建模中采用具有不同配筋率的弥散钢筋单元组成的整体式钢筋模型来模拟配筋混凝土和素混凝土的压溃、开裂。采用 SOLID45 模拟钢梁。该单元是三维八节点六面体单元,与 SOLID65 单元匹配使用。

考虑施工中压型钢板并没有与钢梁进行可靠连接以及闭口处理,在建模过程中忽略了压型钢板的贡献。

根据文献[7]和文献[8]的研究成果,在对于组合扁梁的试验加载过程中没有量测到混凝土与钢梁粘结界面之间的相对滑移,所以在建模过程中界面采用了共用节点,不考虑钢梁与混凝土界面相对滑移。

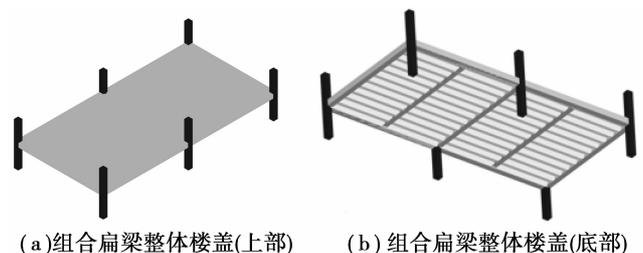


图3 组合扁梁布置情况

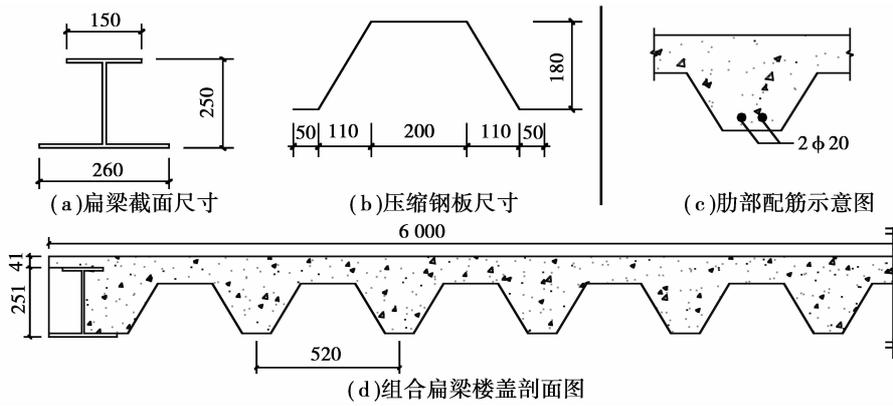


图 4 组合扁梁详细尺寸

2.3 材料本构关系

计算中混凝土的单轴受压应力-应变关系采用过镇海^[11]建议的模型:

$$y = \begin{cases} \alpha x + (3 - 2\alpha)x^2 + (\alpha - 2)x^3 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha(x-1)^2 + 1} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

文中 $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$, $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ 。 σ_0 、 ϵ_0 分别为混凝土峰值应力、应变。混凝土的屈服准则采用 Drucker-Prager 准则,强化法则采用各向同性强化,破坏准则选用 Willam-Warnker 的五参数模型。

钢材的单轴本构关系均采用理想弹塑性模型,屈服准则采用 von Mises 准则,强化法则为各向同性强化。

2.4 边界条件及荷载施加

在钢柱端部施加铰接约束,楼面施加均布荷载向下,单元划分及有限元模型如图 5 所示。

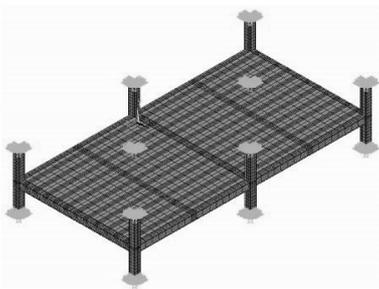


图 5 组合扁梁整体楼盖有限元模型

3 有限元计算结果

3.1 位移荷载曲线

楼盖在均布荷载作用下的竖向变形呈现出马鞍型,最大竖向位移对称地出现在两跨板中,图 6 给出了楼面荷载为 8 kN/m²情况下楼盖的竖向变形情况。荷载-挠度曲线最能体现结构的受力特性,是最重要的数据,常常可以将荷载-挠度曲线作为设计的依据。图 7 给出了楼盖跨中位移荷载曲线与最大位移荷载曲线。

从图 6、图 7 可以看出,在竖向荷载低于 10 kN/m²时,楼盖挠度小于 8 mm,当楼面荷载达到 15 kN/m²时,楼盖塑性变形增大,挠度增长速度增加。对于一般的普通建筑,楼面设计荷载一般在 12 kN/m²以内,该组合扁梁楼盖具有足够的承载能力和良好的变形能力。

3.2 楼盖应力分布情况

图 8、图 9 分别给出了楼面均布荷载为 10 kN/m²的情况下,混凝土翼板的 X 向、Z 向应力分布情况。从中可以看出,由于板肋的存在,混凝土的应力分布呈条带状。由于剪力滞后的影响,混凝土的应力在沿板跨方向分布不均匀,在靠近钢梁的地方应力水平较高,在远离的地方应力水平较低。在钢柱附近,混凝土翼板承受拉应力,在配筋时应予以考虑。图 10 给出了楼面均布荷载为 10 kN/m²时钢结构部分的 von Mises 应力。

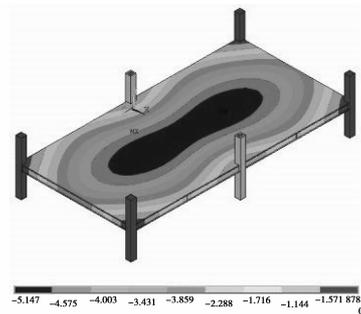


图 6 楼盖竖向变形情况

3.3 肋部混凝土的影响

图 11 分别给出了在楼面均布荷载为 10 kN/m²的情况下,楼盖肋部混凝土 Z 向应力分布情况。图 12、图 13 分别给出了楼盖肋部是否配筋的跨中位移荷载曲线与最大位移荷载曲线对比情况。由图 12 可以看出,肋部配筋对组合扁梁楼盖跨中位移的影响较小。由图 13 可以看出,当楼面荷载达到 8 kN/m²,无肋模型楼板变形进入弹塑性阶段,楼板位移突然增加;当楼面荷载达到 9 kN/m²时,有肋但肋部不配筋的模型楼板进行弹塑性变形阶段,而无肋模型楼板变形迅速增

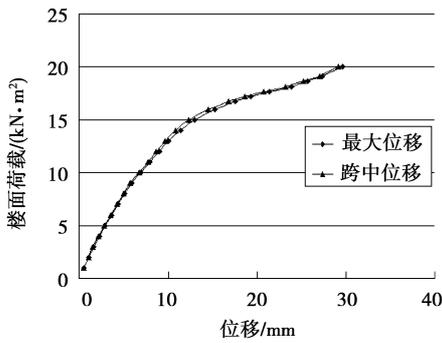


图 7 楼盖位移荷载曲线

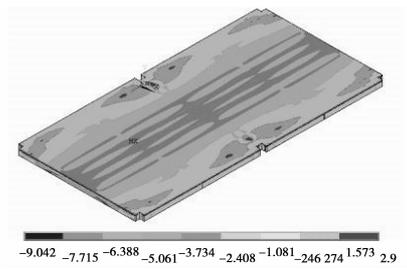


图 8 混凝土翼板 X 向应力分布

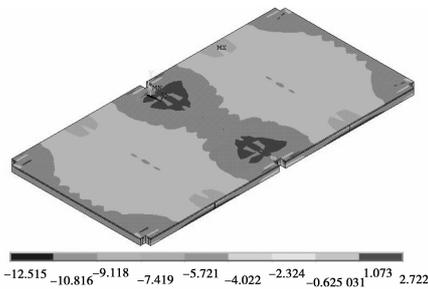


图 9 混凝土翼板 Z 向应力分布

加。由图 13 可以看出,3 个模型中梁跨中竖向变形在荷载小于 9 kN/m^2 是几乎相同,当荷载大于 9 kN/m^2 后,含肋模型的位移荷载曲线仍然很相似,但无肋模型的中梁位移反而减小。也就是由于混凝土翼板进入弹塑性阶段,将进行内力重分布,混凝土楼板横向刚度降低,传递给中梁的荷载减小。

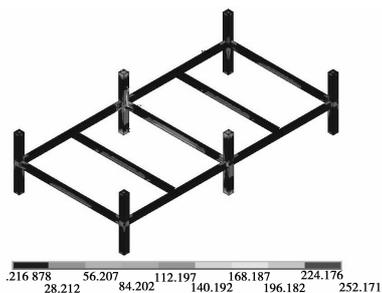


图 10 楼盖钢结构部分 von Mises 应力分布

对于组合扁梁而言,从上面的分析可以看出,混凝土肋部的存在以及肋部配筋对组合扁梁承载力以及刚度的贡献并不明显,这相关文献的结论一致^[12];对于组合楼盖整体以及组合楼盖楼板而言,由于其双向传

力的性质,肋部的存在以及肋部配筋的数量对整体楼盖的承载性能以及混凝土楼板的承载性能的影响明显,不可忽略肋部及其配筋的影响。

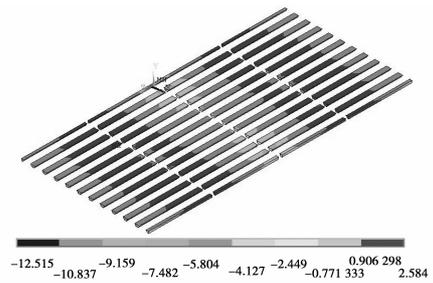


图 11 肋部混凝土 Z 向应力分布

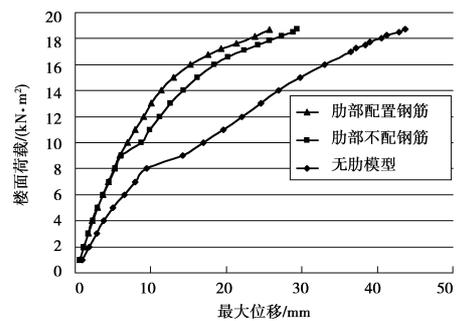


图 12 跨中位移荷载曲线对比

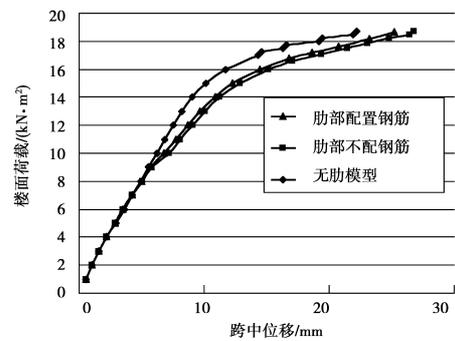


图 13 最大位移荷载曲线对比

3.4 自振振型与频率

通过有限元分析得到组合楼盖的前 4 阶自振频率如表 1,前 4 阶振型如图 14 所示。

在楼盖实际应用中,由于存在其他楼面附加恒荷载以及楼面活荷载的作用,同时,楼盖在正常使用状态下混凝土带裂缝工作,楼盖刚度降低,楼盖的实际振动频率将稍低于楼盖第 1 阶自振频率。

表 1 组合楼盖前 3 阶自振频率

阶数	自振频率/Hz
1	11.739
2	13.140
3	16.316
4	17.018

我国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-98)(下文简称《规程》)对压型钢板组合楼板的振动采用限制其自振频率的办法,其自振频率按照公式(2)进行计算,并要求 $f \geq 15\text{Hz}$:

$$f = 1/(0.18 \sqrt{w}) \quad (2)$$

式中: w 为永久荷载产生的挠度,cm;

对于《规程》中对于 15 Hz 要求的限制,何文汇等人^[13]通过计算和试验研究指出该要求过于严格,高于加拿大国家规范 5 Hz 以及欧洲规范 9 Hz,无法合理指导工程设计,并建议参考外国相关对定与实测分析,将一般工程的组合楼板自振频率控制在 9 Hz 即可满足使用要求。从这种意义上来说,组合扁梁楼盖的自振频率能够满足正常使用的要求。

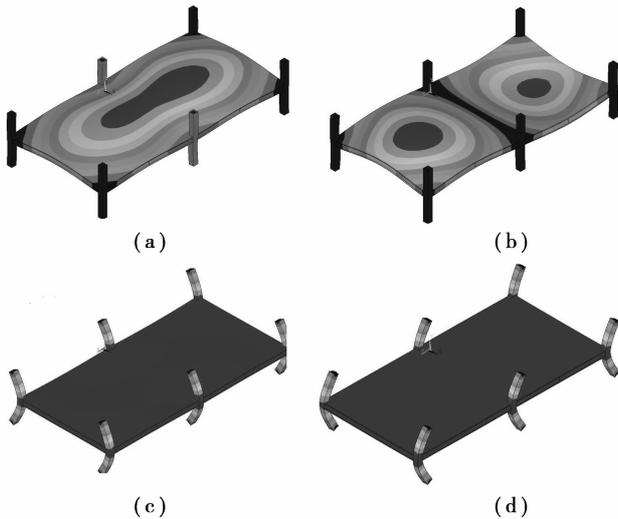


图 14 组合扁梁整体楼盖前四阶振型

3.5 有效宽度分析

对于楼盖中主梁以及次梁,其跨中有效宽度 b_e 可采用以下公式计算¹⁴:

$$b_e = \frac{\int_{-b/2}^{b/2} \sigma_{cx} dz}{|\sigma_{cx}|_{z=0}} \quad (3)$$

式中, b 为混凝土板的跨度, σ_{cx} 为混凝土上表面压应力。

图 15 给出了楼面荷载为 10 kN/m^2 时楼盖宽度方向中线的混凝土翼板表面压应力分布情况。从图中可以明显地观察到主次梁附近混凝土翼缘板中存在的剪力滞后现象,主梁相对于次梁剪力滞后现象更加突出。按照式(3)计算不同荷载水平下的各楼板中梁跨中有效宽度 b_e 值如表 2。与参考文献[15]中翼板宽度为 3 m 的情况对比^[14],次梁的有效宽度计算结果很接近,但主梁的有效宽度值较小,对于组合扁梁楼盖框架主梁的有效宽度取值,需要建立整体模型或进行整体试验进行研究,若采用简支梁的结果将偏于不安全。

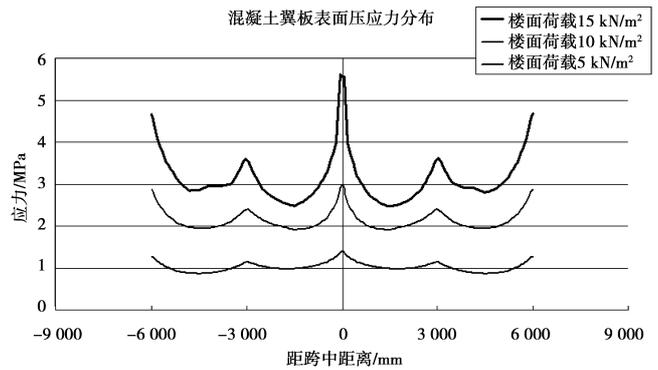


图 15 跨中混凝土翼板压应力分布情况

表 2 有效宽度 b_e /mm

楼面荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)	中主梁 b_e /板跨	次梁 b_e /板跨
5	2 378	0.793
10	2 171	0.724
15	1 732	0.577

4 结 论

1) 在对于普通楼面的设计中,该文设计的组合扁梁整体楼盖具有足够的承载能力并能较好地满足正常使用的要求;

2) 对于组合扁梁整体楼盖而言,混凝土肋及肋部配筋对跨中位移影响较小,可以忽略;但对于楼盖整体承载性能及最大位移存在较大的影响,不可忽略;

3) 整体楼盖中主梁的有效宽度较次梁小,其研究应建立在整体模型和试验的基础上以获得更加准确的结果。

参考文献:

[1] D L MULLETT. Slim floor design and construction. Berkshire[M]. The Steel Construction Institute, 1992.

[2] R M LAWSON, H BODE, J W P M BREKELMANS, P J WRIGHT, D L MULLETT. Slimflor and slimdek construction: European developments [J]. The structural Engineer, 1999,77(8):22-30.

[3] W Siokola, E Ringsmuth. Trapezblechbogen-Verbunddecke Eine altbekannte Bauweise mit modernen Baustoffen neu entdeckt [J]. Stahlbau Rundschau, 1997, (89): 33-34.

[4] X H LU, P MAKELAINEN. Parametric studies on steel-concrete composite beams in slim floors [P]. Proceedings of the 1st European Conference on Steel Structures, EUROSTEEL'95, Athens, May,1995: 18-20.

[5] MIKKO MALASKA. Behavior of a semi-continuous beam-column connection for composite slim floors [D]. Doctoral Thesis, Helsinki University of Technology, 2000.

- [6] 陈全. 组合扁梁受力性能分析[D]. 北京:清华大学, 2002.
- [7] 李秋喆. 简支深肋组合扁梁抗弯刚度和承载力研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- [8] 张如杭. 框架深肋组合扁梁抗弯刚度和承载力研究[D]. 北京:清华大学, 2006.
- [9] 沈蒲生, 朱建华. 四边简支钢筋混凝土双向密肋楼盖极限荷载与挠度计算方法的理论与试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(8): 7-11.
SHEN Pu-sheng, ZHU Jian-hua. Theoretical and experimental research on calculating methods for ultimate load and deflection for four sides simply supported RC waffle floor slab [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(8): 7-11.
- [10] M S HASHIM, ABDUL WAHAB, MOHAMMAD H KHALIL. Rigidity and strength of orthotropic reinforced concrete waffle slabs [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 2: 219-227.
- [11] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [12] 张如杭, 王元清, 石永久, 等. 深肋组合扁梁肋部混凝土受力分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 59-62.
ZHANG Ru-hang, WANG Yuan-qing, et al. Stress distribution analysis of concrete in deep deck flange of composite slim beam [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 59-62.
- [13] 何文汇, 马智刚. 组合楼板自振频率的计算与试验研究[J]. 钢结构, 2005, 20(3): 57-59.
HE Wen-hui, MA Zhi-gang. Experimental studies and calculation of natural vibration frequency of composite Floors [J]. Steel Construction, 2005, 20(3): 57-59.
- [14] 聂建国, 田春雨. 简支组合梁板体系有效宽度分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 8-12.
NIE Jian-guo, TIAN Chun-yu. Effective widths of simply supported composite beams with transverse end girders [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2): 8-12.
- [15] 杨璐, 王元清, 石永久. 简支组合扁梁有效宽度的影响因素分析[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(3): 3-6.
YANG Lu, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu. Factors analysis on effective width of simply supported composite slim beam [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2006, 23(3): 3-6.

(编辑 王秀玲)