

基于薄膜效应的钢筋混凝土楼板承载能力分析

赵宾,罗兆辉

(天津城建大学 土木工程学院,天津 300384)

摘要:薄膜效应有助于提高钢筋混凝土楼板的开裂荷载和极限承载力,但是目前还没有完善的理论能够精准的计算出薄膜效应的大小。本文采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立多组模型,通过对比分析发现薄膜效应对板开裂荷载和极限承载力均有一定提高作用,开裂荷载最大增幅系数可达 1.27,极限承载力的最大增幅系数可达 1.69。

关键词:ANSYS;薄膜效应;钢筋混凝土楼板;开裂荷载;极限承载力

中图分类号:TU375

文献标识码:A

Analysis on the carrying capacity of reinforced concrete floor based on membrane effect

ZHAO Bin, LUO Zhao-hui

(College of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: Membrane effect can improve the cracking load and ultimate bearing capacity of the reinforced concrete floor, but there is no complete theory to calculate the influence degree of the membrane effect. In this paper, a multi-group model by the finite element analysis software ANSYS was built. Through contrast analysis, it was found that the membrane effect have a certain improvement on the cracking load and ultimate bearing capacity, the largest of cracking load increase factor can be up to 1.27, the largest increasing factor of the ultimate bearing capacity can be up to 1.69.

Key words: ANSYS; membrane effect; reinforced concrete floor; cracking load; ultimate bearing capacity

有研究表明,在极限荷载作用下,钢筋混凝土板边由于边缘构件的水平刚性约束了板的侧向边界,那么当板产生较小竖向挠度时,板的边界处将在水平方向产生向外运动的趋势并反作用于板边缘构件,因而在板平面内产生了受压薄膜力。受压薄膜力会在板不是超量配筋的情况下有助于屈服线区域板截面抗弯强度的增强,由此使得板的极限承载力大于按照屈服线理论的计算值。当板竖向挠度较大时,板的边界处将产生水平向内移动的趋势并反作用于板边缘构件,因而在板平面内产生了受拉薄膜力。由于受拉薄膜力的存在使得板内钢筋产生悬链作用而使板能够承担很大的荷载^[1]。上述现象被称为“薄膜效应”^[2]。有学者们对薄膜效应进行研究,发现很难通过计算的方

式来找到混凝土板精确的荷载位移曲线。本文采用大型通用有限元软件 ANSYS 分析梁刚度对板薄膜效应的影响,进而分析其对板承载能力的影响分析。

1 工程概况

混凝土相关指标如下: $f_c = 17.8 \text{ N/mm}^2$, $f_t = 2.1 \text{ N/mm}^2$, 弹性模量 $E_c = 2.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 泊松比取为 0.2, 混凝土密度 $\rho_c = 2500 \text{ kg/m}^3$; 钢筋相关指标如下:弹性模量 $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 屈服强度 $f_y = 233 \text{ N/mm}^2$, 硬化斜率为 20000, 泊松比取为 0.3, 钢筋密度 $\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$ 。混凝土板为 $1.5 \times 1.5 \text{ m}$, 板厚为 60 mm, 双向配筋率均为 0.6%。

在模型中梁的底部位置施加约束限制梁竖向位移,保持梁与柱同宽取 150 mm,梁配筋率为 0.4% 不变,调整梁 h 值,形成五组梁截面尺寸如表 1 所示。定义 β 为梁的刚度比,即 $\beta = (EI_x)/(EI_y) = [Eb^3/12]/[Eb^3/12] = (h/b)^2$ 。

表 1 梁高及梁刚度比 β 值的选取表

Tab.1 The height and stiffness ratio

β value of beam selection table

板编号	B1	B2	B3	B4	B5	B6
梁高 h/mm	60	90	120	150	180	∞
β	0.16	0.36	0.64	1	1.44	∞

2 模型的建立

2.1 本构关系

本文的混凝土采用美国 E. Hognestad 建议的 Hognestad 应力 - 应变模型,破坏准则采用 W - W 五参数强度准则,其中混凝土的裂缝张开传递系数取 0.35,裂缝闭合传递系数取 1.0^[3]。

2.2 有限元模型建立

本文在建立 ANSYS 有限元模型时采用整体式钢筋混凝土模型,通过 Solid65 单元提供的实参数直接输入混凝土在三个不同方向的配筋率来模拟构件内部的配筋。为避免在支座处产生应力集中而造成突然破坏,在支座处加弹性垫块,在梁板固结边处垫块采用 Solid45 单元,弹性模量取为 210 GPa,泊松比取为 0.3。考虑到该模型双向对称,可以取 1/4 板,即 750 × 750 mm 建立模型(如图 1),在对称轴切分出的截面处施加对称约束,并施加重力场 9.8 N/kg。为排除梁在竖直方向上的截面抗弯刚度对计算结果的影响,在建立模型时在梁底部施加约束限制梁竖向位移。

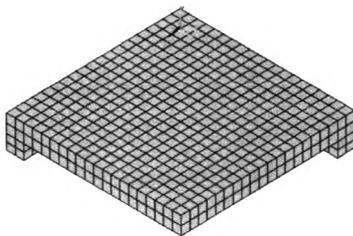


图1 1/4板的有限元模型

Fig.1 1/4 plate finite element model

3 计算结果与分析

对板的有限元模型进行非线性分析^[4-5],逐级加载,提取计算结果绘制荷载 - 中心挠度曲线见图 2 至图 6。

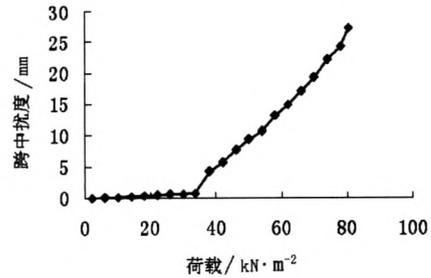


图2 B2荷载-跨中挠度曲线图

Fig.2 B2 load - midspan deflection curve

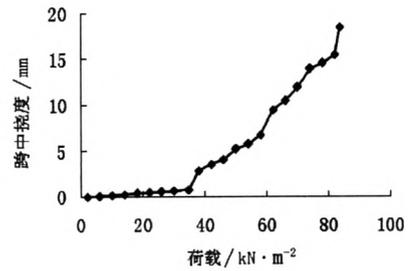


图3 B3荷载-跨中挠度曲线

Fig.3 B3 load - midspan deflection curve

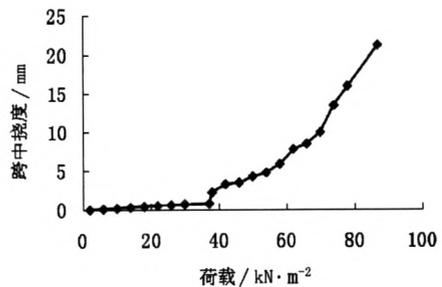


图4 B4荷载-跨中挠度曲线图

Fig.4 B4 load - midspan deflection curve

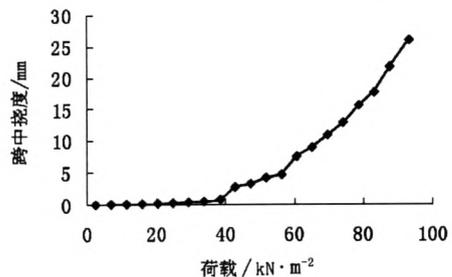


图5 B5荷载-跨中挠度曲线

Fig.5 B5 load - midspan deflection curve

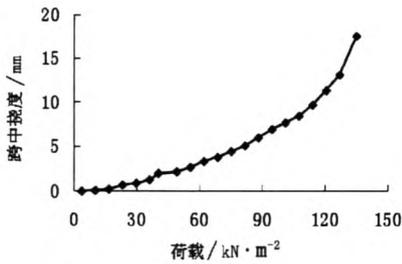


图6 B6荷载-跨中挠度曲线图

Fig. 6 B6 load - midspan deflection curve

结合图 2 至图 6 分析可知,混凝土板在弹性变形阶段时,薄膜效应并未对板的承载能力产生较大作用;当混凝土板进入弹塑性变形阶段时,薄膜效应才开始产生较大的影响;当混凝土板接近破坏时薄膜效应发挥最大作用^[4]。具体说来,以板 B2 和 B3 为例,当梁的刚度比 β 值较小时,板模型的荷载 - 跨中挠度曲线呈现出弹性和弹塑性两个不同的阶段(见图 2 和图 3),当荷载大于开裂荷载时混凝土板的裂缝发展速度很快,其承载能力迅速下降直至板破坏;以板 B5 和 B6 为例,当梁的刚度比 β 值较大时,板模型的荷载 - 跨中挠度曲线不出现明显弹性变形阶段,而是从加载开始直至破坏的全过程都呈现弹塑性变形的特征(见图 5 和图 6)。故分析可知,梁刚度比 β 值越大,则梁的水平截面抗弯刚度越大,板边约束越强,故板的薄膜效应越显著,越有利于板的塑性内力重分布,使得钢筋混凝土楼板获得更大的极限承载能力。将 ANSYS 分析得到的钢筋混凝土楼板开裂荷载、极限承载力及其增幅系数列于表 2 中。

表 2 各板的开裂荷载、极限承载力及其增幅系数

Tab. 2 Table of board cracking load, ultimate bearing capacity and the coefficient of increase

板编号	B1	B2	B3	B4	B5	B6
β	0.16	0.36	0.64	1	1.44	∞
开裂荷载/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	31.7	33.5	34.8	37.2	38.5	40.2
极限承载力/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	79.7	80.5	83.6	86.9	93.3	135
γ	1	1.06	1.10	1.17	1.21	1.27
η	1	1.01	1.05	1.09	1.17	1.69

$\gamma_i = B_i/B_1, \eta_i = B_i/B_1, \gamma_i$ 为板 B_i 开裂荷载相对无梁楼板 B1 的增幅系数, η_i 为板 B_i 极限承载力相对无梁楼板 B1 的增幅系数, i 为对应的板编号($i=1,2,3,4,5,6$)。

将钢筋混凝土楼板的开裂荷载、极限承载力及其相应的梁刚度比 β 绘制成曲线图,见图 7。结合表 2 和图 7 可知随着梁刚度比 β 值的增大,钢筋混凝土楼板的开裂荷载及其极限承载力都增大。刚度比 β 值对无梁楼板 B1 的极限承载力影响最小,刚度比 $\beta = 1.44$ 时的极限承载力比刚度

比 $\beta = 0.16$ 时(即梁高等于板厚时)的极限承载力提高了 1.17 倍,在极限状态下的板 B6 时,极限承载力增幅系数可达 1.69。而无论刚度比 β 值如何增大,即使在极限状态下的板 B6 模型时,板的开裂荷载的增幅系数也只有 1.27,这就说明梁的水平截面抗弯刚度对板的开裂荷载的影响幅度不大。

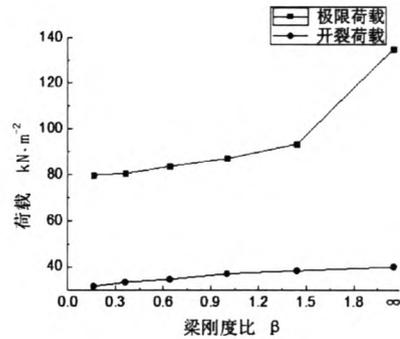


图7 荷载-梁刚度比 β 曲线图

Fig. 7 Load - beam stiffness ratio β curve

在设计时每块楼板都能承担一个具体的设计极限荷载,但在实际使用过程中,有些板格四周的板受到的荷载较小,则这些板格因相邻的梁和板格受荷较小,其中的钢筋可参与受荷较大的板格受力而产生薄膜效应,从而能够获得比原来设计的极限荷载更大的极限承载力。因此,在设计阶段将薄膜效应考虑在内既经济又合理^[6]。

4 结论

1) 当钢筋混凝土楼板在弹性变形阶段时,薄膜效应并未对板的承载能力产生较大作用;当钢筋混凝土楼板进入弹塑性变形阶段时,薄膜效应才逐步发挥作用,直至板破坏时薄膜效应发挥最大作用。

2) 当梁的刚度比 β 值较小时,板模型的荷载 - 跨中挠度曲线呈现出明显的弹性和弹塑性两个阶段;当梁的刚度比 β 值较大时,板模型的荷载 - 跨中挠度曲线已无明显的弹性变形,从开始加载至破坏都呈现弹塑性变形特征。

3) 随着刚度比 β 值的增大,板的薄膜效应显著,有利于板的塑性内力重分布,板开裂荷载及极限承载力都有所增大。但无论梁刚度比 β 值如何增大,板的开裂荷载的增幅系数也只有 1.27,这就说明梁的水平截面抗弯刚度对板的开裂荷载的影响幅度不大。相比之下,梁刚度比 β 值对板极限承载力的影响要大得多,在梁刚度比 $\beta = 1.44$ 时的极限承载力比梁刚度比 $\beta = 0.16$ 时(即梁高

等于板厚时)的极限承载力提高了 1.17 倍,在刚度比 β 趋于无穷大的极限状态下,板的极限承载力可提高 1.69 倍。

参考文献:

- [1] R 派克, W L 根勃尔. 钢筋混凝土板[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
 [2] 蒋琳. 钢筋混凝土空心板的薄膜效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.

- [3] 李围. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
 [4] 尚晓红, 邱峰. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
 [5] 李永春. 钢筋混凝土矩形板薄膜效应的有限元分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
 [6] R. 派克, W. L. 根勃尔. 钢筋混凝土板[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.

(责任编辑 刘存英)

(上接第 37 页)

混凝土在温度作用下的应变 $= \alpha_c * t$

当温度变化 1°C 产生的应变为 $10\mu\epsilon$; 在裂缝变化情况的测量过程中, 裂缝仪标距 100 mm。在裂缝仪的标距范围内每变化 1°C , 裂缝仪变化的长度为 0.001 mm。在 2012 年 4 月 1 日 0 时到 2012 年 4 月 4 日 0 时, 北京地区的最大温差为 20°C , 故裂缝的变化主要是由温度效应引起的。

4.5 桥面板局部承载力分析

结合双营桥大修计划, 为了验证桥面板的承载力性能, 荷载试验中对桥面板进行了轮压试验。轮压试验选择损伤较为严重的 T 梁间桥面板。

加载轮重: 60 kN。

加载位置: TL18、TL19 跨中桥面板。

加载位移: 3.0 mm。

根据《混凝土结构设计规范》GB50010 - 2010, 有特殊要求的受弯构件挠度限值为 $l/300$, 其中计算跨径 $l = 1\ 600 - 500 = 1\ 100\ \text{mm}$, 故其挠度限值为 $4.4\ \text{mm} > 3.0\ \text{mm}$ 。

5 结语

1) 桥梁荷载试验结果表明该桥的各项检测指

标均在正常的范围之内, 可以满足桥梁的正常运营和安全运营的要求。

2) 土工织物轻型桥台经过 20 多年的荷载作用, 已基本处于稳定状态, 但北桥台东侧防水设施部分或全部失效, 建议对该桥台进行防水和限水处理。

3) T 梁和盖梁裂缝较多, 建议对主梁裂缝采取封闭处理, 考虑到盖梁的裂缝宽且深的情况下, 建议对盖梁采用组合结构进行加固处理。

参考文献:

- [1] 周海俊, 吴永昌, 谭也平, 等. 桥梁荷载试验研究综述[J]. 中外公路, 2008, 28(4): 164 - 166.
 [2] JTG D60 - 2004, 公路桥涵设计通用规范[S].
 [3] JTG D62 - 2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
 [4] JTG/T J21 - 2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
 [5] JTG H11 - 2004, 公路桥涵养护规范[S].
 [6] JTG D60 - 2004, 公路桥涵设计通用规范[S].

(责任编辑 刘存英)