

文章编号:1673-2049(2008)04-0088-05

预应力混凝土空心叠合板试验

吴方伯, 陈立, 刘亚敏

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对现有的一般预应力空心叠合板楼盖板较厚、自重较大等缺点,提出了一种新型的预应力混凝土空心叠合板。通过对3块简支板、3块简支叠合板和1块两跨连续叠合板进行静力荷载试验,分析了这种叠合板在静力荷载作用下的裂缝、承载力、挠度等特点,研究了其开裂荷载和极限承载力较高的原因。结果表明:这种预应力空心叠合板具有良好的抗裂性能和较高的极限承载能力;其开裂弯矩、极限承载力、挠度可按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)进行计算,为这种叠合板的设计和工程应用提供了依据。

关键词:预应力空心板;叠合板;裂缝;承载力;挠度

中图分类号:TU378.5 **文献标志码:**A

Experiment on Prestressed Concrete Hollow-core Composite Slabs

WU Fang-bo, CHEN Li, LIU Ya-min

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: The existing prestressed concrete hollow-core composite floor had some disadvantages, such as thicker slab, larger weight, etc. A new kind of prestressed concrete hollow-core composite slab was put forward. Based on the results of static loading test of 3 prestressed concrete hollow-core slabs, 3 prestressed concrete hollow-core composite slabs and 1 composite continuous slab, the crack, ultimate bearing capacity and deflection were analyzed. The reasons of higher crack load and ultimate bearing capability were investigated. The results indicate that this kind of prestressed concrete hollow-core composite slab has better anti-crack behavior and higher ultimate bearing capacity. According to the *Code for Design of Concrete Structures* (GB 50010—2002), the crack moment, ultimate bearing capacity, deflection can be calculated, which provide a basis for the design and application of this kind of composite slab.

Key words: prestressed hollow-core slab; composite slab; crack; bearing capacity; deflection

0 引言

一般的预应力混凝土空心叠合板是在预制预应力空心板顶面现浇一层混凝土,在支座处加配负弯矩钢筋而形成的连续装配整体式叠合结构^[1-12]。这种形式的空心叠合板往往楼盖板较厚、自重大。为此,笔者提出了一种新形式的预应力混凝土空心叠

合板,这种叠合板的预制预应力空心板厚度已达到叠合板的最终设计厚度,后浇混凝土只浇注在安装后的预应力空心板肋间的凹槽内,形成装配整体式连续结构时,只需在支座处的凹槽内配置负弯矩钢筋。本文中通过试验研究了这种新形式的预应力空心叠合板的结构性能,对预应力混凝土空心叠合板的裂缝、承载力、挠度等进行了分析,为这种空心叠

合板的推广使用提供了试验依据。

1 试件设计与试验方法

1.1 试件设计

试验用试件均采用足尺寸设计,预应力钢筋采用消除应力螺旋肋钢筋 Φ^H5 ,其标准强度为 $f_{ptk}=1\,570\text{ MPa}$,设计强度为 $f_{py}=1\,110\text{ MPa}$,张拉控制应力为 $0.40f_{ptk}$;横向钢筋为 HPB235 级,直径为 6 mm;纵向负弯矩钢筋采用 HPB235 级,直径为 8 mm;预制预应力空心板混凝土强度等级为 C40,后浇混凝土强度等级为 C30。预制空心板截面尺寸及配筋如图 1 所示。

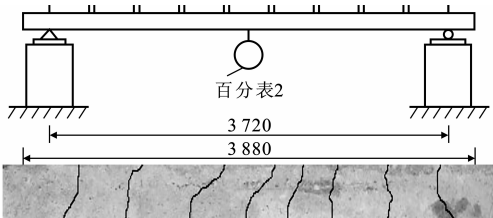


图 1 预制空心板截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.1 Dimensions of Section and Reinforcements for Precast Hollow-core Slab (Unit:mm)

预制空心板在工厂采用先张法工艺制造,混凝土强度达到设计强度的 75%时放入张预应力钢筋,每批试件各制作了 3 个混凝土立方体试块,以确定混凝土的实际抗压强度。叠合面均为自然粗糙面,两跨连续叠合板在中间支座处考虑弯矩调幅配置了

4 Φ 8。试件参数及材料强度见表 1。

1.2 试验方法

试验采用均布加载方式,分级加载,直到试件破坏。考虑到试件极限承载能力可能较大,采用沙袋加载方式,每袋沙为 0.5 kN。加载级差为每级 1.5 kN,折算成均布荷载为 0.82 kPa(简支板)。每级荷载加完后,持荷 5~10 min,待仪表数据基本稳定后再进行读数,同时观察裂缝的发展情况。简支及简支叠合试验板加载装置见图 2,连续叠合板加载装置也与图 2 相似,只是多了一跨和一连续支座。

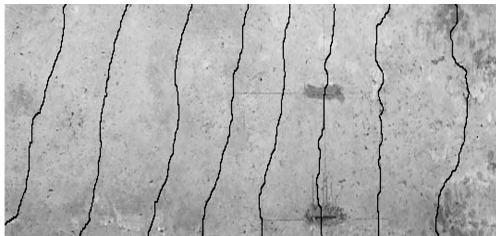


图 2 加载装置(单位:mm)

Fig.2 Loading Equipment (Unit:mm)

试件的挠度采用百分表量测,简支和简支叠合试验板跨中截面的混凝土受拉区和受压区分别布置了混凝土应变片,以测量混凝土的应变变化;两跨连续叠合板中间支座处的负弯矩钢筋上贴有钢筋应变片,每根钢筋布置了 1 片,以测量钢筋的应变变化;所有应变片数据采用 DH3815 静态电阻应变仪采集。

表 1 试件参数及材料强度

Tab.1 Parameters and Material Strengths of Specimens

试件类型	试件编号	试件长/mm	试件宽/mm	试件高/mm	计算长度/mm	实测预制混凝土强度等级	实测后浇混凝土强度等级
简支板	YKB-1	3 880	490	120	3 720	C47.3	
	YKB-2	3 880	490	120	3 720	C47.3	
	YKB-3	3 880	490	120	3 720	C47.3	
简支叠合板	YKDB-1	3 880	490	120	3 720	C47.9	C30
	YKDB-2	3 880	490	120	3 720	C47.9	C30
	YKDB-3	3 880	490	120	3 720	C47.9	C30
连续叠合板	LDB-1	7 840	490	120	3 720	C47.9	C30

2 试验结果与分析

试验结果见表 2。以下对该叠合板的裂缝形态与开裂弯矩、极限承载力、挠度等进行分析。

2.1 裂缝形态与开裂弯矩

简支板加载至开裂荷载以后,先在板底跨中区域出现 1 条垂直于板跨方向的裂缝,裂缝宽度很小,在 0.02~0.08 mm 之间,增加一级荷载后,在第 1

条裂缝的附近又出现 2~3 条垂直裂缝,随着荷载的增加,裂缝数量增多,沿板宽方向开展,但裂缝宽度的发展比较缓慢。在荷载标准值下,除试件 YKB-3 外,其他试件均没有开裂。当简支板加载至极限承载力时,裂缝分布均匀,裂缝间距较小,其裂缝开展情况如图 3 所示。

简支叠合板的裂缝开展情况基本同简支板,当开展至叠合层时,裂缝直接进入叠合层,未发现沿叠

表 2 试验结果
Tab.2 Test Results

试件类型	试件编号	实际开裂弯矩 $M_{cr}^*/(\text{kN}\cdot\text{m})$	计算开裂弯矩 $\bar{M}_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{cr}^*/(\bar{M}_{cr})^{-1}$	实际极限弯矩 $M_u^*/(\text{kN}\cdot\text{m})$	计算极限弯矩 $\bar{M}_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u^*/(\bar{M}_u)^{-1}$
简支板	YKB-1	10.60	8.08	1.31	12.63	12.29	1.03
	YKB-2	8.28	8.08	1.02	12.80	12.29	1.04
	YKB-3	9.42	8.08	1.17	12.80	12.29	1.04
简支叠合板	YKDB-1	10.65	8.64	1.23	13.36	12.31	1.09
	YKDB-2	10.65	8.64	1.23	14.04	12.31	1.14
	YKDB-3	10.65	8.64	1.23	14.04	12.31	1.14
连续叠合板	LDB-1	5.46	3.66	1.49	9.09	10.54	0.86

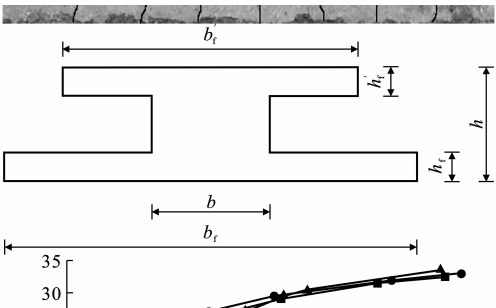


图 3 板底裂缝情况
Fig.3 Situation of Floor Crack

合层水平裂缝,表明叠合面具有足够的抗剪能力。

对于两跨连续叠合板,第 1 条裂缝出现在中间支座,沿预制空心板与后浇混凝土结合的交界面处开裂,随着荷载的增加,在中间支座的后浇混凝土表面又相继出现了几条微裂缝,以后裂缝的发展和延伸明显集中在第 1 条裂缝上,跨中截面开裂以前,中间支座处裂缝发展缓慢,显示出内力重分布现象。跨中截面开裂以后,支座裂缝宽度发展较快,跨中则不断出现新的裂缝,裂缝间距分布均匀细密,裂缝宽度和间距都很小。

在试验过程中测得的实际开裂弯矩见表 2。计算开裂弯矩则根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002,以下简称规范)^[13]中的公式求得,计算时对空心板横截面进行简化,简化的原则是横截面积相等和惯性矩相等。横截面的计算模型如图 4 所示。

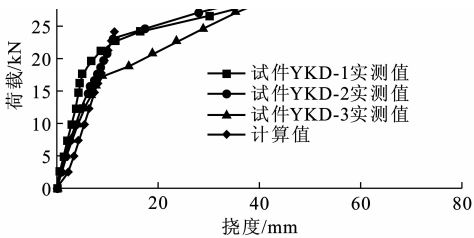


图 4 横截面的计算模型
Fig.4 Calculation Model of Section

规范中开裂弯矩 M_{cr} 的计算公式为

$$M_{cr}=(\sigma_{pc}+\gamma f_{tk})W_0 \tag{1}$$

$$\sigma_{pc}=\frac{N_{p0}}{A_0}+\frac{N_{p0}e_{p0}}{I_0}y_0 \tag{2}$$

$$\gamma=(0.7+\frac{120}{h})\gamma_m \tag{3}$$

式中: σ_{pc} 为扣除全部预应力损失后,由预加力在抗裂验算边缘产生的混凝土预压应力; γ 为混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数; γ_m 为截面抵抗矩塑性影响系数基本值; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值; N_{p0} 为混凝土法向预应力等于 0 时预应力钢筋及非预应力钢筋的合力; e_{p0} 为换算截面重心至预应力钢筋及非预应力钢筋合力的距离; h 为截面高度; W_0 、 A_0 、 I_0 分别为换算截面的受拉边缘弹性抵抗矩、面积、惯性矩。

从表 2 可以看出,实际开裂弯矩比计算开裂弯矩大,表明这种预应力空心叠合板具有良好的抗裂性能,其原因有 2 点:①预应力钢筋采用消除应力高强螺旋肋钢筋,锚固性能好,有利于钢筋和混凝土的黏结;②预制试件和叠合后的试件截面高度相同,截面高度小,应变梯度大,增大了混凝土的极限拉(压)应变。因此,预应力空心叠合板的开裂弯矩可按规范进行设计和计算。

2.2 极限承载力

试件 YKB-1~YKB-3、YKDB-1~YKDB-3 加载到承载能力的极限状态时,都是因为挠度过大而达到破坏,挠度已达到跨度的 1/50。达到破坏之前,该试件已呈现出较大的变形特征,预应力筋已接近或达到屈服应变,属于大挠曲塑性破坏。

试件 LDB-1 在加载到跨中截面开裂后,由于试验过程中加载不上而停止了试验,表 2 中的实际极限弯矩是按加载的最终荷载计算而得的。

极限承载力按规范的公式进行计算,简支板和简支叠合板的跨中横截面计算见图 4。为了便于设计和计算,对于简支叠合板,在横截面的简化过程中没有考虑后浇混凝土的作用。预应力空心叠合板的

极限弯矩 M_u 按式(4)计算

$$M_u = \alpha_1 f_c b'_f x (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (4)$$

$$x = \frac{f_{py} A_p}{\alpha_1 f_c b'_f} \quad (5)$$

式中: α_1 为系数; x 为混凝土受压区截面高度, $x \leq h'_f$; h_0 为截面有效高度; A_p 为预应力钢筋面积; f_c 为混凝土实测抗压强度; b'_f 为简化截面受压翼缘宽度。

从表2可以看出,实际极限弯矩比计算极限弯矩要大得多,按实际配筋反算的活荷载标准值达到8.6 kPa,而实际结构中同样跨高比的板类构件活荷载标准值一般不超过2.5 kPa。因此,这种板应用在实际结构中的强度储备比较大,其承载力较大的原因主要是采用了高强螺旋肋钢筋,钢筋的强度储备大,设计强度 $f_{py} = 1\,110$ MPa,而标准强度 $f_{ptk} = 1\,570$ MPa,实测的钢筋强度比标准强度还要大,这无疑增大了板的极限承载力。从总体上来讲,这种板的极限承载力可以按规范进行设计和计算。

2.3 挠度

简支板、简支叠合板和连续叠合板的荷载-跨中挠度曲线见图5。从图5(a)、(b)可以看出:对于简支板和简支叠合板,在加载初期,试件处于弹性阶段,其荷载-挠度曲线基本上为直线;加载到开裂荷载后,挠度增加明显加快,在图形上表现为曲线变得平缓,直到试件因挠度过大而破坏。由于简支叠合板在叠合前第1阶段承受的弯矩 M_1 很小(试件制作时第1阶段施工活荷载很小,几乎为0),叠合部分的面积也较小,荷载预应力的作用并不明显,因此其荷载-挠度曲线基本同简支试验板。

对于连续叠合板,加载至24.5 kN时,中间支座截面开裂。从图5(c)可以看出:中间支座截面开裂对跨中挠度几乎没有影响;加载至48 kN时,跨中截面开裂,荷载-挠度曲线的斜率有较大的偏转,挠度增长较快。

预应力空心叠合板的挠度计算按规范进行,采用其公式进行验证。根据抗裂性能分析,在正常使用状态时,该板处于未开裂状态,按规范中的公式,简支试验板的刚度采用 $B = 0.85 E_c I_0$ 计算, E_c 为简支试验板的弹性模量;简支叠合试验板的刚度采用 $B = 0.7 E_{cl} I_0$ 计算, E_{cl} 为简支叠合试验板的弹性模量;然后再用结构力学公式计算相应的挠度,并与试验值进行比较。简支板和简支叠合板开裂前的挠度计算曲线分别见图5(a)、(b)。从比较结果来看:简

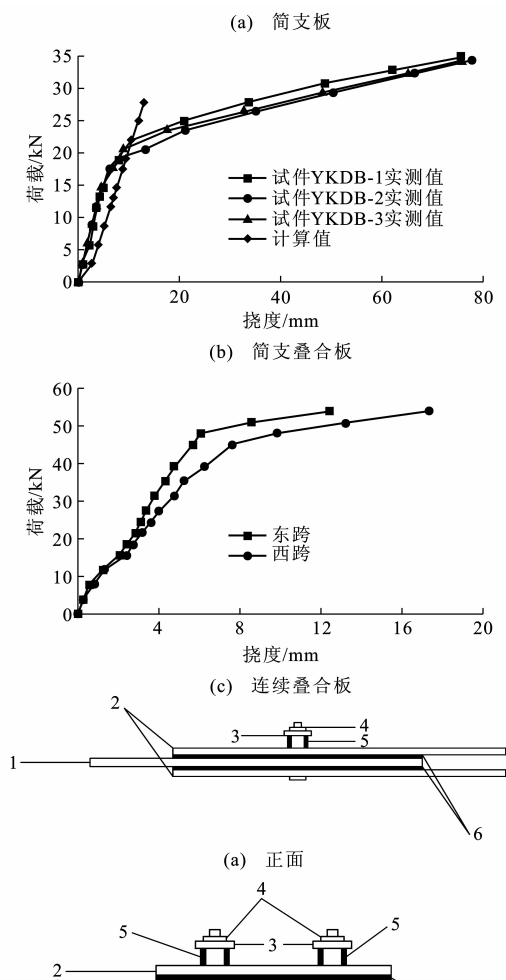


图5 试件荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load and Deflection Curves for Members

支板的强度试验值与计算值的比值 f^s/f^j 的平均值为 $\mu = 0.7085$, 标准差 $\sigma = 0.178$, 变异系数 $\delta = 0.2513$;简支叠合板 f^s/f^j 的平均值为 $\mu = 0.6119$, 标准差 $\sigma = 0.2386$, 变异系数 $\delta = 0.3898$ 。由此可见,试验值与计算值相差不大,且计算结果偏于安全,因此可以按规范计算预应力空心叠合板正常使用阶段的挠度。

两跨连续叠合板的跨中挠度明显比简支板的跨中挠度要小,在中间支座开裂时,跨中最大挠度只有3.6 mm,变形为1/1 033,故一般可不作挠度计算。

3 结语

(1)通过对预应力空心叠合板结构性能的试验研究,发现这种预应力空心叠合板具有良好的抗裂性能和极限承载力,其开裂弯矩和极限承载力均可按规范进行计算。

(2)预应力空心叠合板由于采用了高强螺旋肋钢筋和高强混凝土,钢筋与混凝土黏结良好,因此其

抗裂性能较好,极限承载力较高。

(3)在正常使用状态下,按规范计算预应力空心叠合板的挠度与试验值吻合较好,且偏于安全,因此可按规范计算其挠度。

(4)两跨连续叠合板的挠度较小,一般可不作验算,仅由该板的跨高比来控制。

参考文献:

References:

- [1] 郭彦林,张庆林.波折腹板工形构件截面承载力设计方法[J].建筑科学与工程学报,2006,23(4):58-63.
GUO Yan-lin, ZHANG Qing-lin. Design Method of Section Bearing Capacity of I-type Member of Corrugated Web[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 58-63.
- [2] 周旺华.现代混凝土叠合结构[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
ZHOU Wang-hua. Modern Concrete Composite Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.
- [3] GB 50204—2002,混凝土结构工程施工质量验收规范[S].
GB 50204—2002, Code for Acceptance of Constructional Quality of Concrete Structures[S].
- [4] 腾智明.钢筋混凝土基本构件[M].2版.北京:清华大学出版社,2001.
TENG Zhi-ming. The Basic Components of Reinforced Concrete[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [5] 田安国.冷轧带肋钢筋混凝土叠合板试验研究[J].建筑结构,2000,30(1):35-37.
TIAN An-guo. Experiment Research of Composite Floor with Cold-rolled Ribbed Steel Bars[J]. Building Structure, 2000, 30(1): 35-37.
- [6] 张会斌,赵世春,高新强.冷拔螺旋钢筋预应力空心板结构性能试验研究[J].建筑技术开发,2002,29(2):5-9.
ZHANG Hui-bin, ZHAO Shi-chun, GAO Xin-qiang. Study on the Structure Property of Hollow-core Slab Prestressed with Cold-draw Spiral Bar[J]. Building Technique Development, 2002, 29(2): 5-9.
- [7] 聂建国,易卫华,雷丽英.闭口型压型钢板-混凝土组合板的刚度计算[J].工业建筑,2003,33(12):19-21.
NIE Jian-guo, YI Wei-hua, LEI Li-ying. Rigidity Calculation of Closed Profiled Sheeting-concrete Composite Slabs[J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 19-21.
- [8] 周绪红,张微伟,吴方伯,等.预应力混凝土四边简支双向叠合板的设计方法[J].建筑科学与工程学报,2006,23(4):54-57.
ZHOU Xu-hong, ZHANG Wei-wei, WU Fang-bo, et al. Design Method of Prestressed Concrete Simply Supported on Four Sides of Two-way Composite Slab[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 54-57.
- [9] 周绪红,孔祥福,侯健,等.波纹钢腹板组合箱梁的抗剪受力性能[J].中国公路学报,2007,20(2):77-82.
ZHOU Xu-hong, KONG Xiang-fu, HOU Jian, et al. Shear Mechanical Property of Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 77-82.
- [10] 张岗,贺拴海,王新敏.混凝土箱梁悬臂板计算方法[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(6):58-62.
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, WANG Xin-min. Calculation Method for Cantilever Slab of Concrete Box Girder[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(6): 58-62.
- [11] 谭冬莲,宁立,游金兰.预制预应力混凝土空心板梁施工现场的静载试验研究[J].筑路机械与施工机械化,2007,24(4):51-55.
TAN Dong-lian, NING Li, YOU Jin-lan. Study on Static Load Test of PC Hollow Slab in Construction Field[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(4): 51-55.
- [12] 李世秋,汪厚植,胡新民.桥梁预应力钢筋混凝土结构耐久性影响因素及对策[J].筑路机械与施工机械化,2007,24(6):41-43.
LI Shi-qiu, WANG Hou-zhi, HU Xin-min. Influencing Factors on Durability and Counter Measure of Bridge Prestressed Concrete Structure[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(6): 41-43.
- [13] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].