

预制带肋薄板混凝土叠合板件受力性能试验研究

吴方伯¹, 黄海林^{1,3}, 陈伟¹, 周绪红^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000;

3. 湖南高岭建设集团股份有限公司, 长沙 410153)

摘要:为便于工业化生产及现场拼装,对预制薄板(预制预应力混凝土矩形肋薄板)进行规格设计。进行 2 种不同跨度的 4 块预制薄板的静载试验,重点研究预制薄板的极限承载力、刚度及抗裂性能,结果表明:预制薄板满足施工阶段承载力要求,可作为无支撑体系模板。进行 2 块单跨叠合板件和 1 块两跨连续叠合板件的静载试验,重点研究叠合板件的整体受力性能、叠合面的抗剪性能以及连续叠合板件在支座处的弯矩调幅值,结果表明:叠合板件可按整浇板的计算方法进行承载力计算,连续叠合板件受力性能与现浇板相似。进行混凝土叠合板件两阶段受力截面应变分析,建议取底板厚度作为预制薄板考虑二次受力影响的计算高度。

关键词:组合结构;预制混凝土;预应力混凝土;叠合板;矩形肋薄板;肋上开孔

中图分类号:TU375.2;TU378.5 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2011)04-0007-06

Experimental Analysis on the Mechanical Properties of Concrete Composite Slabs with Precast Prestressed Rectangular Rib Panels

WU Fang-bo¹, HUANG Hai-lin^{1,3}, CHEN Wei¹, ZHOU Xu-hong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China;

3. Hunan Gaolin Construction Group Stock Limited Company, Changsha 410153, P. R. China)

Abstract:For the convenience of industrialized production and site operation, specification design of PPCRP (precast prestressed concrete ribbed panels) is discussed. In order to obtain ultimate bearing capacity, bending rigidity and crack resistance, four PPCRP with two types of spans are studied, and the results show that PPCRP can satisfy the requirements of bearing capacity in construction phase and can serve as stay-in place formwork. To verify the mechanical property, shear behavior on contact interface of composite member and moment redistribution factor of continuous composite member, two single-span composite members and one two-span continuous composite member are studied. It is indicated that computational method for bearing capacity of composite member can be the same as cast-in-situ concrete slab. Besides, section strain analysis for composite member in two-loading is conducted, which suggests that thickness of bottom board can be used as calculated height with the consideration of two-loading.

Key words: composite structures; precast concrete; prestressed concrete; composite slabs; ribbed panels; preformed holes in the rib

预应力混凝土实心平板为不带肋预制板件,在运输及施工中易折断,预应力反拱度难以控制,施工过程中需设置支撑、施工工艺复杂。现行国家标准《叠合板用预应力混凝土底板》GB/T 16727-2007、

收稿日期:2010-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(50978090);湖南省研究生科研创新项目(CX2010B143)

作者简介:吴方伯(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事组合结构研究及新型结构体系开发,(E-mail) wfbprof@163.com。

国家建筑标准设计图集《预应力混凝土叠合板》06SG439 中叠合板的预制部分均为平板,施工时需设置支撑,不宜双向配筋,自重大,降低了这种结构的经济效果,影响了其推广使用。为此,近年来中国学者在预制实心平板的基础上,针对预制板件的结构形式作了大量的创新研究,主要有:预制键槽形混凝土芯板^[1]、预制单矩形肋部分叠合混凝土底板^[2]、预制双矩形肋混凝土底板^[3]、预制单 T 形肋混凝土底板^[4]、预制双 T 肋混凝土底板^[5]、预制夹心混凝土底板^[6]、预制空腹混凝土底板^[7]、自承式钢筋桁架混凝土底板^[8]、预制波形底板^[9]。同时期国外的研究主要集中于新型材料在叠合板中的应用及不同材料的组合,如:纤维增强复合材料混凝土叠合板^[10]、纤维增强水泥混凝土叠合板^[11]、活性粉末混凝土叠合板^[12]、复合砂浆钢丝网混凝土叠合板^[13]、钢纤维混凝土叠合板^[14]、轻骨料混凝土叠合板^[15]、压型钢板-混凝土叠合板^[16]、橡胶集料混凝土叠合板^[17]、木-混凝土叠合板^[18]及竹-混凝土叠合板^[19]。

中国学者将预制混凝土实心平板改进为带肋的薄板,提高了薄板的刚度和承载力,增加了薄板与叠合层的粘结力,且可将底板变得更薄,减轻自重。但由于只能单向配筋,垂直于底板板长方向的抗裂性仍然不好,且荷载采用单向板传力模式,计算模型仍不合理。为此,文献[20]提出以预制预应力混凝土矩形肋薄板(以下简称预制薄板)为永久模板(图 1),在板肋预留矩形孔洞中布设横向穿孔钢筋及在底板拼缝处布置折线形抗裂钢筋,再浇筑混凝土叠合层形成预制带肋薄板混凝土叠合板(图 2)。为了解这种新型楼板的受力性能,对预制薄板进行规格设计,从中选取典型跨度进行叠合板件及其连续叠合板件的试验研究。

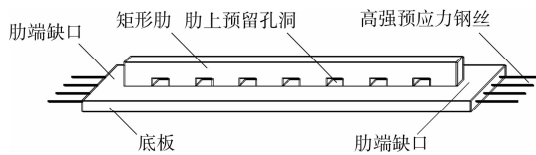


图 1 预制薄板

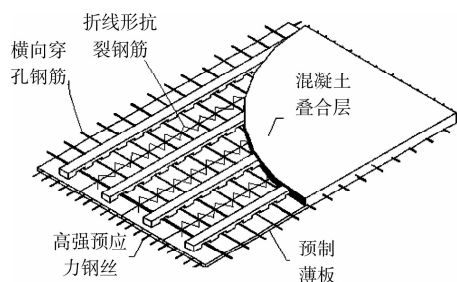


图 2 预制带肋薄板混凝土叠合板

1 预制薄板规格设计

为便于工业化生产和现场拼装,将预制薄板作为产业化的产品,进行标准化、定型化,采用 1 种截面、2 种标志宽度、13 种标志跨度。截面形式如图 3 所示,2 种标志宽度为 400 mm 与 500 mm,预制薄板几何参数如表 1 和表 2 所示。预制薄板混凝土设计强度不宜小于 C50,底板高强预应力钢丝受拉截面中心距板底 17.5 mm,预应力张拉控制系数可取 0.5、0.55、0.60 及 0.63,矩形肋内普通钢筋截面重心距上边缘 20 mm,钢筋配置情况及力学性能见表 3。预制薄板底板厚度为 30 mm,肋端缺口长度为 40 mm。

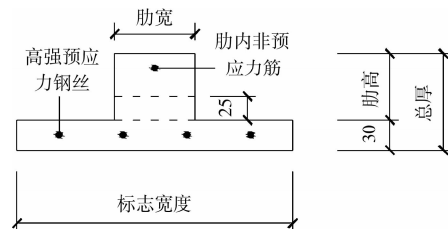


图 3 截面形式

表 1 400 mm 宽预制薄板几何参数 /mm

长度	2 400	2 700	3 000	3 300	3 600	3 900	4 200	4 500	4 800	5 100	5 400	5 700	6 000
肋高	55	55	55	55	55	65	65	75	75	85	85	95	95
肋宽	80	80	80	80	100	100	110	110	120	120	120	120	130
总厚	110	110	110	110	110	120	120	130	130	140	140	150	150

表 2 500 mm 宽预制薄板几何参数 /mm

长度	2 400	2 700	3 000	3 300	3 600	3 900	4 200	4 500	4 800	5 100	5 400	5 700	6 000
肋高	55	55	55	55	55	65	65	75	75	85	85	95	95
肋宽	100	100	100	100	120	120	130	140	140	140	150	150	150
总厚	110	110	110	110	120	120	130	130	140	140	150	150	150

表 3 钢筋配置情况及力学性能

钢筋类别	标志跨度/mm	钢筋设计	设计强度	弹性模量/MPa
高强预应力螺旋肋钢丝	2 400~3 600	4 ϕ^H 5	1 570	2.05×10^5
	3 600~4 200	5 ϕ^H 5		
	4 200~4 800	6 ϕ^H 5		
	4 800~5 400	8 ϕ^H 5		
	5 400~6 000	10 ϕ^H 5		
非预应力钢筋	2 400~4 800	1 ϕ 6	210	2.0×10^5
	4 800~6 000	2 ϕ 6		

2 预制薄板试验

2.1 板件制作及加载方案

1) 板件制作:为了研究预制薄板的极限承载力、

刚度及抗裂性能,从表 2 中选取 2 种不同跨度的 4 块预制薄板进行了试验研究,板件设计如图 4、图 5 所示。预制薄板采用 C50 混凝土。钢丝采用 ϕ^{H5} , $f_{ptk}=1\ 570\ \text{MPa}$, $f_p=1\ 110\ \text{MPa}$,受拉截面中心距板底 17.5 mm,张拉控制应力 $\sigma_{con}=0.55 f_{ptk}$ 且超张拉 3%。板件实际几何参数及主要材料基本参数见表 4。

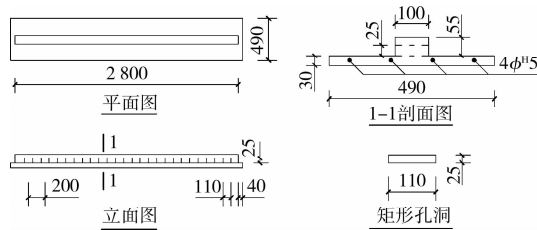


图 4 2 800 mm 板件设计图

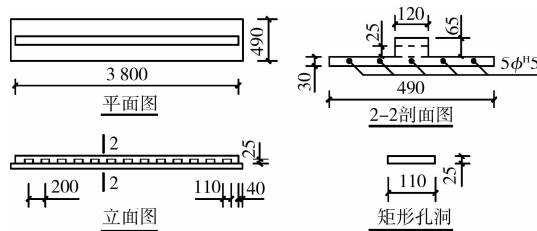


图 5 3 800 mm 板件设计图

表 4 板件实际几何参数及主要材料基本参数

板件编号	板长/mm	肋高/mm	肋宽/mm	底板厚/mm	底板宽/mm	混凝土强度/MPa	钢筋板限强度/MPa
YZB-1	2 800	56	105	30	500	50	1 564
YZB-2	2 800	57	103	30	500	50	1 564
YZB-3	3 800	66	125	30	500	50	1 564
YZB-4	3 800	64	124	30	500	50	1 564

2)加载方案:板件两端简支,采用粘土砖实行均布加载,加载装置如图 6 所示。首先模拟施工荷载作用下的受力特征,再继续加载至预制薄板破坏。预制薄板施工阶段所受荷载如表 5 所示,预制薄板自重 G_{k1} ,后浇层混凝土重 G_{k2} ,施工荷载 G_{k3} ,正常使用状态荷载 $Q_s=G_{k1}+G_{k2}+G_{k3}$,承载力状态荷载取 $Q_d=\gamma_g(G_{k1}+G_{k2})+\gamma_Q G_{k3}$ 与 $Q_d=\gamma_g(G_{k1}+G_{k2})+\gamma_Q \psi_c G_{k3}$ 较大值。

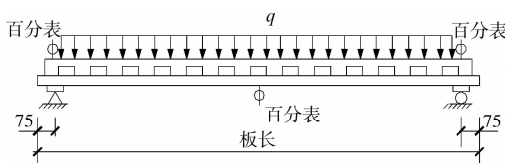


图 6 加载装置

表 5 预制薄板施工阶段所受荷载 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)

板件编号	G_{k1}	G_{k2}	G_{k3}	Q_s	Q_d
YZB-1	1.03	1.72	1.0	3.75	4.7
YZB-2	1.03	1.72	1.0	3.75	4.7
YZB-3	1.08	1.92	1.0	4.0	5.03
YZB-4	1.08	1.92	1.0	4.0	5.03

2.2 试验结果与分析

试验测得的荷载-挠度曲线如图 7 所示。加载前期,荷载与挠度呈线性关系,在正常使用状态荷载 Q_s 作用下实测挠度不超过跨度的 1/300, YZB-1、YZB-2 均未开裂, YZB-3、YZB-4 刚好开裂。YZB-1、YZB-2 开裂荷载 $Q_{cr}=6.12\ \text{kN/m}^2$,为正常使用状态荷载 Q_s 的 1.63 倍,承载力状态荷载 Q_d 的 1.3 倍。YZB-3、YZB-4 开裂荷载 $Q_{cr}=5.14\ \text{kN/m}^2$,为正常使用状态荷载 Q_s 的 1.26 倍,承载力状态荷载 Q_d 的 1.02 倍。

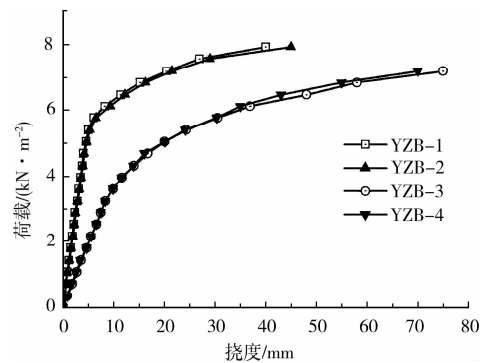


图 7 预制薄板荷载-挠度曲线

1)承载力分析:加载后期,2 种跨度板的破坏形态相同,首先是跨中及附近出现裂缝,继续加载,则板底裂缝增多(图 8),挠度变形加快,破坏时,跨中挠度达到跨度的 1/50 以上,均呈现明显的延性特征,钢筋与混凝土之间的粘结锚固性能良好。其实测承载力检验系数 γ_u^0 大于《混凝土结构工程施工质量验收规范》要求的 1.35,因此,预制薄板能满足施工阶段承载力要求。

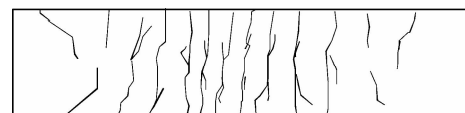


图 8 典型板底裂缝分布

2)抗裂分析:测得预制薄板的抗裂检验系数均比《混凝土结构工程施工质量验收规范》规定的抗裂检验系数大,开裂荷载均能达到施工设计荷载标准值,满足施工时预制构件下不设支撑的要求。

3)刚度分析:开裂之前,荷载-挠度曲线近似为直线,说明刚度几乎不变。挠度实测值比按《混凝土结构设计规范》公式 $B_s = 0.85E_c I_0$ 计算的结果小很多,构件实际刚度大于 $0.85E_c I_0$ 接近于 $E_c I_0$ 。

3 叠合板件试验

3.1 叠合板件制作及加载方案

1)为了研究叠合板件的整体受力性能、叠合面的抗剪性能以及连续叠合板件在支座处的弯矩调幅值,对 2 块单跨叠合板件和 1 块两跨连续叠合板件进行静载试验研究,板件设计分别如图 9、图 10 所示。预制薄板受力主筋采用 $6\phi^5$, $f_u = 704 \text{ MPa}$,混凝土采用 C50 混凝土,后浇混凝土采用 C20,连续叠合板件支座配筋 $3\phi^8$ 。板件实际几何参数及材料基本参数见表 6。板件两端简支,采用粘土砖进行均布加载,单跨叠合板件以及两跨连续叠合板件挠度、应变测点分别如图 11、图 12 所示。

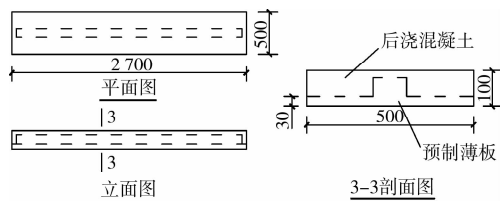


图 9 单跨叠合板件设计图

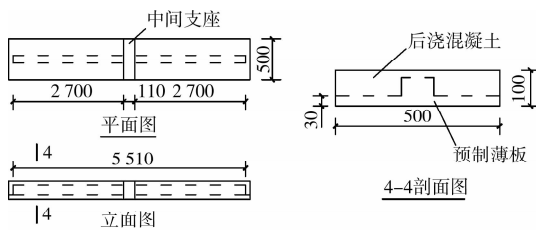


图 10 两跨连续叠合板件设计图

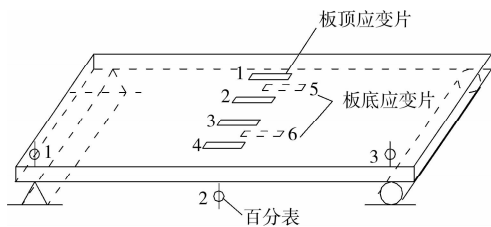


图 11 单跨叠合板件挠度、应变测点布置

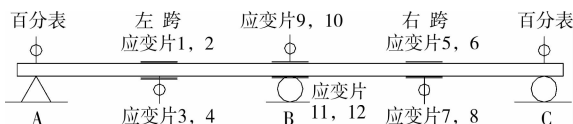


图 12 两跨连续叠合板件挠度、应变测点布置

表 6 板件实际几何参数及材料基本参数

板件编号	板长 /mm	板宽 /mm	板高 /mm	混凝土强度 / MPa		钢筋极限抗拉强度 / MPa	
				预制薄板	后浇层	预制薄板受力主筋	支座负筋
DHB-1	2 730	500	110	50	20	704	320
DHB-2	2 750	500	105	50	20	704	320
DHB-3	5 510	490	100	50	20	704	320

注释:表中支座负筋的屈服强度为 250MPa。

3.2 试验结果与分析

1)刚度与承载力分析:试验测得的荷载-挠度曲线如图 13 所示,加载前期为弹性变形,挠度呈线性增长,DHB-1 与 DHB-2 荷载-挠度曲线差别不大,DHB-3 左跨与右跨荷载-挠度曲线基本重合。根据荷载-应变曲线(图 14),连续叠合板件在荷载为 12.6 kN/m^2 时开裂,而单跨叠合板件在荷载为 9.1 kN/m^2 时就开裂了,开裂前挠度均小于 3 mm 。2 块单跨叠合板件均在 15 级荷载,即 10.5 kN/m^2 时出现可见裂缝,裂缝位于跨中截面附近,从预制部分向叠合面延伸。单跨叠合板件直到破坏,未出现沿叠合面的水平裂缝,表明叠合面粘结完好,自然粗糙叠合面完全满足抗剪要求,极限承载力为 16.8 kN/m^2 。两跨连续叠合板件在荷载为 14.0 kN/m^2 时出现可见裂缝,极限荷载为 20.3 kN/m^2 ,板加载至破坏,未出现沿叠合面的剪切破坏,表明自然粗糙叠合面具有足够的抗剪能力,能保证叠合板两部分混凝土共同工作。单跨叠合板件的荷载-挠度曲线同预应力构件类似,较好的反映了叠合板件刚度大和延性好的特点。对于连续叠合板件,支座截面开裂对跨中挠度的影响很小,跨中截面开裂后,挠曲线出现一个并不明显的转折,随着荷载继续加大,支座裂缝宽度逐渐增大,挠度曲线才有所偏转。

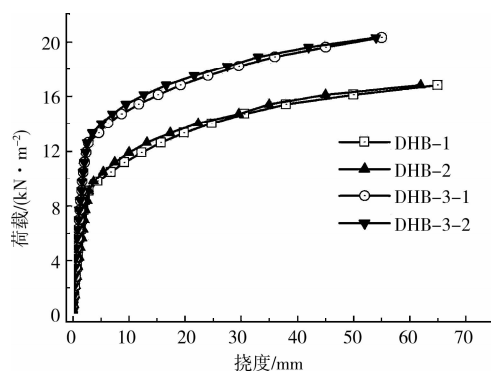


图 13 叠合板荷载-挠度曲线

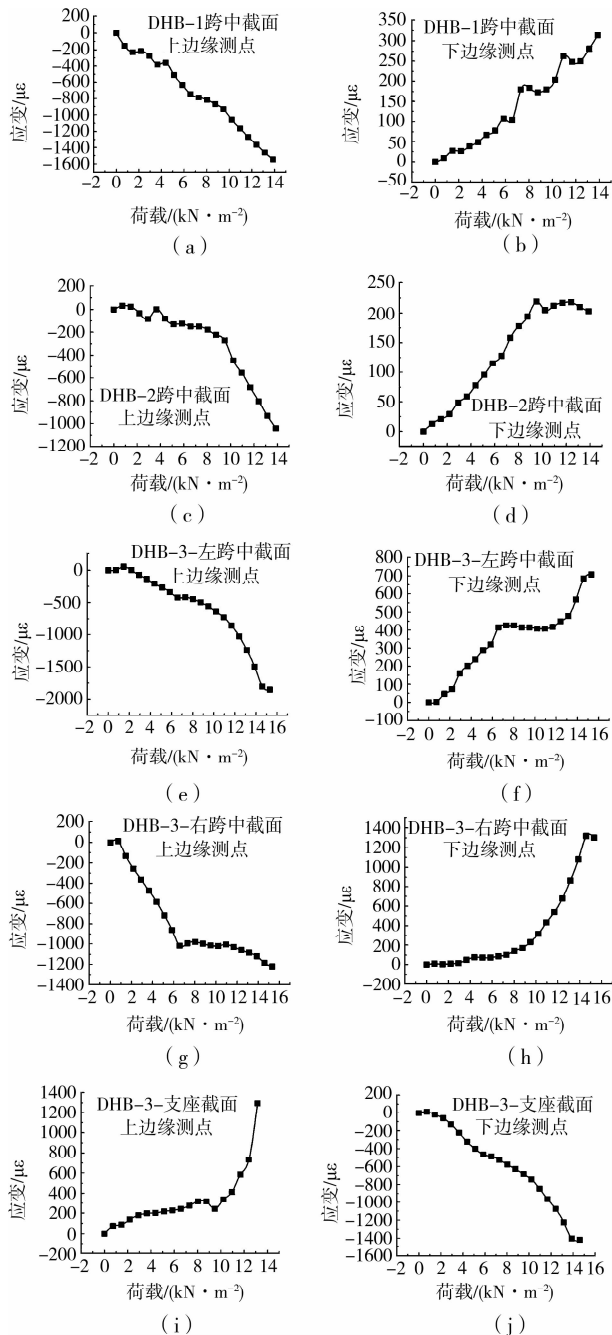


图 14 各截面荷载-应变曲线

2) 截面应变分析: 跨中截面的应变基本满足平截面假定, 但是中性轴在一定的范围变动, 在开裂前的低应力状态, 拉区、压区的应变较小, 基本对称而压应变稍大, 这是由于拉区受到预应力钢丝的约束作用。根据图 14, 在 13.87 kN/m^2 荷载作用下, 单跨叠合板件 DHB-1、DHB-2 跨中截面上边缘测点压应变分别在 $1100 \mu\epsilon$ 、 $1500 \mu\epsilon$ 左右, 受压区混凝土没有被压坏, 跨中截面下边缘测点拉应变较小, 分别在 $300 \mu\epsilon$ 、 $200 \mu\epsilon$ 左右。在 15.33 kN/m^2 荷载作用下, 连续叠合板件 DHB-3 左跨、DHB-3 右跨跨中截面上边缘测点压应变在 $1800 \mu\epsilon$ 、 $1300 \mu\epsilon$ 左右, 受

压区混凝土没有被压坏, 跨中截面下边缘测点拉应变较小, 分别在 $700 \mu\epsilon$ 、 $1200 \mu\epsilon$ 左右。可见, 连续叠合板件跨中截面上、下边缘荷载-应变变化情况与单跨叠合板件相似。

3) 抗裂分析: 受拉区预压应力使叠合板件的抗裂性能大大提高。由图 13 可知, 单跨叠合板件开裂荷载接近承载力设计值, 可以认为叠合板在标准荷载作用下是不开裂的。试验中连续叠合板件在外荷载作用下, 裂缝首先在支座处产生, 说明控制支座裂缝是连续叠合板件抗裂的关键, 故应该控制支座的调幅值, 建议支座调幅值取 25%, 其目的是为了更好的控制支座裂缝宽度。叠合板件跨中开裂后, 裂缝即向后浇层延伸, 整个试验过程中, 叠合面未出现水平裂缝, 说明预制薄板叠合面的粘结和咬合力大。

4) 塑性内力重分布规律: 当支座与跨中均未出现裂缝时, 连续叠合板件处于按弹性工作状态。当支座出现裂缝而跨中尚未出现裂缝时, 支座因开裂而刚度下降, 因而使支座弯矩增速减慢, 跨中弯矩增速加快; 但当跨中出现裂缝, 而支座钢筋未达到屈服时, 跨中刚度下降, 弯矩增速减慢, 使支座弯矩增速又加快; 当支座钢筋达到屈服形成塑性铰时, 支座弯矩基本稳定, 弯矩向跨中转移, 使跨中弯矩增速加快, 直至跨中钢筋达到流限。试验表明连续叠合板件塑性内力重分布规律和现浇连续板类似, 都是有裂缝产生而引起的, 板随裂缝发展及塑性铰的产生不断调整各部位的内力。

4 叠合板件截面应变分析

叠合板件为 2 阶段受力, 第 1 阶段是浇注叠合层混凝土的施工阶段, 荷载由预制薄板承担; 第 2 阶段是叠合层混凝土强度达到设计值之后, 荷载由叠合板件承担。预制薄板在第 1 阶段荷载作用下和叠合板件在第 2 阶段荷载作用下的正截面平均应变均符合平截面假定, 正截面受力也存在“预应力钢筋应力超前”和“受压混凝土应变滞后”现象。但与一般叠合板件不同的是, 预制薄板采取倒“T”形截面形式, 叠合板件上表面仅比预制薄板矩形肋高出 25 mm, 在预制薄板制造完毕后由于预应力大小的不同, 矩形肋上部存在拉应力, 在第 1 阶段弯矩 M_1 作用下预制薄板会出现全截面受压或底板受拉两种情况, 分别见图 15、图 16, 在第 2 阶段弯矩 M_2 作用于全截面时矩形肋大部分或全部会位于截面的受压区, 由于 M_1 和 M_2 各自作用的截面高度不同, 导致 M_1 产生的部分受压区与 M_2 产生的部分受拉区重叠, 重叠区的拉压应变及相应的拉压应力相互抵消,

在第 1 阶段重叠部分的压应力即为荷载预压力,这一过程称为叠合截面的内力转移,图 15 和图 16 反映了 2 种情况下叠合板件 2 阶段受力截面应变变化的整个过程。

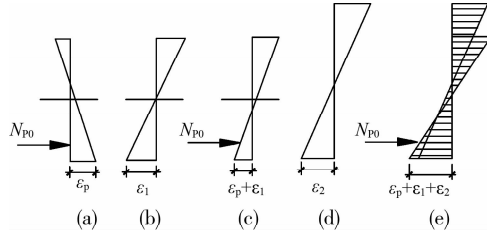


图 15 截面应变分布 (I)

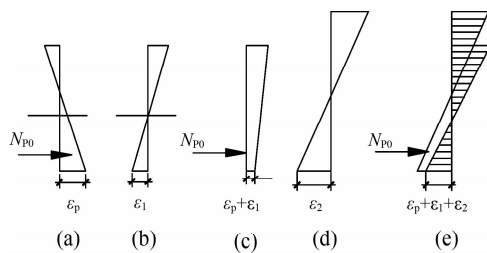


图 16 截面应变分布 (II)

注:a)为预制薄板在预应力 N_{p0} 作用下,b)为预制薄板为在第 1 阶段弯矩 M_1 的单独作用下,c)为第 1 阶段荷载作用下应力叠加,d)为叠合截面在第 2 阶段弯矩增量 ΔM_2 的作用下,e)为在第 2 阶段叠合截面的总应变分布。

对于采用预制实心平板的二次叠合式受弯板件,二次受力的影响与 h_1/h_2 (预制实心平板与叠合后高度之比)、 $M_1/[M_1]$ ($[M_1]$ 为预制实心平板的计算破坏荷载除以强度设计安全因素 K) 有关,在 $M_1/[M_1]$ 一定的情况下,叠合截面高度之比 h_1/h_2 越小,内力转移系数 β 越大。与普通预应力混凝土叠合板不同的是,由于预制薄板带肋,板肋部分伸入后浇层混凝土,叠合面不是水平面,叠合截面的高度仅高出矩形肋 25 mm,矩形肋的截面宽度仅为预制薄板底板宽度 500 mm 或 400 mm 的 $1/4 \sim 1/3$,叠合前计算高度值 h_1 应介于 30 mm 或预制薄板截面总高度两者之间,因此二次受力对这种叠合板受力的影响较厚度相等的实心平板叠合板要弱。该文建议取底板厚度 30 mm 作为考虑二次受力影响的预制薄板计算高度 h_1 ,但预制薄板的施工阶段承载力验算仍按实际截面高度进行。

5 结语

1)采用高强混凝土及施加预应力,预制薄板能满足施工阶段承载力要求,可作为无支撑体系模板;

叠合板有较好的刚度、裂缝控制能力和承载力。

2)根据试验结果,可按整浇板的计算方法进行叠合板的承载力计算;连续叠合板件整体受力性能与现浇板相似,建议按 25% 进行支座弯矩调幅,以及在支座处配筋考虑连续板受力,以减小挠度,提高板件的抗裂能力和承载力。

3)预制薄板带肋,增加了预制薄板与叠合层的粘结力;肋内设矩形孔洞,提高了预制薄板与叠合层的咬合力;试验中没有出现沿叠合面的裂缝和滑移现象,表明采取自然粗糙面的叠合面具有足够的抗剪能力,能保证叠合板两部分混凝土共同工作。

4)2 次受力对这种新型叠合板受力的影响较厚度相等的实心平板叠合板要弱,建议取底板厚度作为预制薄板考虑 2 次受力影响的计算高度,预制薄板施工阶段承载力验算按实际截面高度进行。

参考文献:

- [1] 姜忻良,岳建伟. 陶粒叠合层叠合板的承载能力研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2006,38(6):6-12.
JIANG XIN-LIANG, YUE JIAN-WEI. Bearing capacities of ceram site concrete composite slabs with trough bottom plate [J]. Journal of Sichuan University: Engineering and Science Edition, 2006, 38(6): 6-12.
- [2] 刘汉朝,蒋青青. 倒“T”形叠合筒支板的试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2004,35(1):147-150.
LIU HAN-CHAO, JIANG QING-QING. Experiment of inverted “T” simply supported composite slab [J]. J. CENT. SOUTH UNIV: Natural Science. 2004, 35(1): 147-150.
- [3] 沈春祥. 预应力混凝土双向叠合板试验研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [4] 陈科. 大跨度 PK 预应力混凝土叠合板的试验研究与理论分析[D]. 长沙:湖南大学,2009.
- [5] 吴方伯. 一种带肋预应力钢筋混凝土预制构件板:中国,200410046665.2 [P]. 2005-3-23.
- [6] 朱茂存. 大跨夹芯叠合板的试验研究与施工分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001.
- [7] 赵成文,陈洪亮,高连玉,等. 预应力混凝土空腹叠合板性能研究与工程应用[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2005,21(4):297-301.
ZHAO CHENG-WEN, CHEN HONG-LIANG, GAO LIAN-YU, et al. Study on behaviors and applications of pre-stressed concrete hollow core laminated slab [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(4): 297-301.

(下转第 19 页)

- [J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 46-52.
CAO GUO-HUI, FANG ZHI. Mechanical behaviors test of RC continuous box girder with wide flange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 46-52.
- [14] 祝明桥, 方志, 胡秀兰. 体外预应力高强混凝土薄壁箱梁试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 25-30.
ZHU MING-QIAO, FANG ZHI, HU XIU-LAN, et al. Experimental research on the externally prestressed high-strength concrete thin-walled box girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 25-30.
- [15] YANG CHUN, CAI JIAN. Experimental study on box shape steel reinforced concrete beam [J]. Journal of Southeast University, 2005, 19(2): 25-36.
- [16] 牛斌, 杨梦蛟, 马林. 预应力混凝土宽箱梁剪力滞效应试验研究[J]. 中国铁路科学, 2004, 25(2): 25-30.
NIU BIN, YANG MENG-JIAO, MA LIN. Shear lag effect test and study of PC wide box beam[J]. China Railway Science, 2004, 25(2): 25-30.
- [17] 刘光伟. 小跨高比剪力墙洞口连梁抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [18] JTGD 62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [19] GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- (编辑 王秀玲)

.....

(上接第 12 页)

- [8] 刘轶. 自承式钢筋桁架混凝土叠合板性能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [9] 王春平. 复合砂浆钢丝网叠合板抗弯性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [10] BIDDAH A. Structural reinforcement of bridge decks using pultruded GFRP grating [J]. Composite Structures, 2006, 74(1): 80-88.
- [11] BRANDT A M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering[J]. Composite Structures. Fourteenth International Conference on Composite Structures - ICCS/14, 2008, 86(1-3): 3-9.
- [12] HASSAN A, KAWAKAMI M. Steel-free composite slabs made of reactive powder materials and fiber-reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 709-718.
- [13] BAYASI Z, KAISER H, GONZALES M. Composite slabs with corrugated SIMCON deck as alternative for corrugated metal sheets [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(10): 1198-1205.
- [14] ROBERTS-WOLLMANN C L, GUIROLA M, EASTERLINA W S. Strength and performance of fiber-reinforced concrete composite slabs [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 520-528.
- [15] KANEKO Y, OKAMOTO H, KAKIZAWA T, et al. Flexural characteristics of super-lightweight reinforced concrete slab [J]. Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, 1999, 48(10): 1187-1192.
- [16] BIANCOLINI M E. Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board [J]. Composite Structures, 2005, 69(3): 322-328.
- [17] WILLIAMSON N. Concrete floors [M]. Butterworth-Heinemann, 2003: 3-38.
- [18] LUKASZEWSKA E, FRAGIACOMO M, JOHNSON H. Laboratory tests and numerical analyses of prefabricated timber-concrete composite floors [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(1): 46-55.
- [19] GHAVAMI K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(6): 637-649.
- [20] 曾垂军, 吴方伯, 刘锡军, 等. 新型叠合结构体系的设计与施工[J]. 建筑科学, 2006, 22(4): 67-71.
ZENG CHUN-JUN, WU FANG-BO, LIU XI-JUN, et al. Design and construction of a new type composite structure system [J]. Building Science, 2006, 22(4): 67-71.
- (编辑 胡玲)