

不同预制楼板适用性研究分析及工程案例

马俊杰 卢旦

(华东建筑设计研究院有限公司,上海 200002)

【摘要】目前,工程中常用的预制楼板主要包括SP空心板、双T板以及桁架钢筋混凝土叠合板等。本文首先概括了三种预制楼板的发展进展。然后,从受力性能、构造措施、计算方法等角度梳理总结各种预制板的适用性,并提出了桁架钢筋混凝土单向叠合板选用表。最后,给出了三种预制楼板的实际工程案例。本文得到的关于预制楼板适用性的一些结论,可为装配式建筑工程设计提供参考,帮助解决预制楼板选用问题。

【关键词】SP空心板;双T板;桁架钢筋混凝土叠合板

【中图分类号】TU375.2 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1674-7461(2018)01-0111-06

【DOI】10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2018.01.20

前言

近些年来,我国大力推进装配式建筑发展。2016年国务院发布《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》,明确指出,要“大力发展装配式混凝土建筑和钢结构建筑,在具备条件的地方倡导发展现代木结构建筑,不断提高装配式建筑在新建建筑中的比例。坚持标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用,提高技术水平和工程质量,促进建筑产业转型升级。”《住房城乡建设事业“十三五”规划纲要》的主要目标要求,到2020年装配式建筑面积占城镇新建建筑面积的比例达到15%以上。

装配式建筑成为我国未来建筑发展的主要方向。预制混凝土楼盖作为装配式建筑的主要构件和组成部分,不仅承担竖向荷载,还起到传递水平地震作用,增强装配式建筑的整体性,提高装配式建筑的抗震能力,起着至关重要的作用。目前,装配式建筑工程中常采用的预制混凝土楼盖主要有SP空心板、双T板、桁架钢筋混凝土叠合板等。

SPANCRETE 预应力混凝土空心板^[1-2],由美国 SPANCRETE 机械制造公司于1952年创制,生产线采取的工艺为干硬式混凝土冲捣和挤压成型工艺,

可连续大批量叠层生产,不需模板,不需蒸汽养护,一次成型,简称为SP空心板。1993年,我国从美国福霖公司引进SP板产品及相关技术,已先后引进了20多条SP预应力空心板的生产线,主要分布在北京、天津、山东、河南等省。

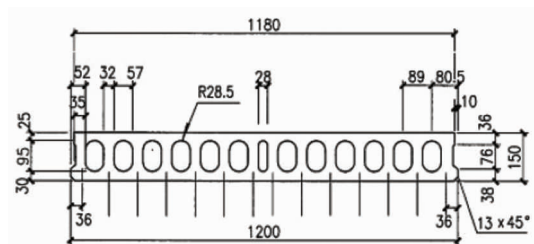


图1 SP空心板示意图

双T板^[3-5]的概念最初是由Harry Edwards提出的,主要应用在车库和工业厂房中。我国在1958年开始引进并应用双T板。上世纪70年代,我国双T板主要用于电力、油田工程中,并由编制了标准设计图集CG432;1978年,国内第一栋双T板体系工业厂房建成。目前双T板在我国主要用于各种工业厂房,并在一些公共建筑中有所应用,主要用作屋面板,部分工程中也作为楼面板使用。

桁架钢筋混凝土叠合板在日本得到了广泛应用,在国内研究较晚。2006年,刘铁等^[6]通过对桁

【基金项目】上海市科委课题“新型装配式混凝土高层建筑设计技术研究”(编号:16DZ1201801)

【作者简介】马俊杰(1991-),男,硕士,结构工程师,主要从事结构分析加固以及装配式建筑研究。

架钢筋混凝土叠合板的荷载试验,研究了桁架钢筋混凝土叠合板系统在施工阶段和正常使用阶段的刚度和极限承载能力,验证了施工阶段叠合板的理论计算模型。2007年,陈日涛^[7]通过 ANSYS 研究分析了钢筋桁架的上下弦轴心距离和钢筋桁架腹杆直径对该种叠合板短期刚度的影响。2013年,马兰^[8]在桁架钢筋混凝土叠合板的基础上,提出了带肋钢筋桁架混凝土叠合楼板,相对于普通钢筋桁架混凝土叠合板可以做到更大跨度,建筑平面布局灵活,适用性强。



图2 双T板预制构件

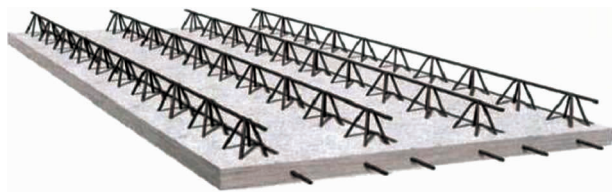


图3 桁架筋叠合板

目前,以上三种预制楼板研究已比较成熟。但关于三种预制楼板的比较分析以及适用性研究仍然较少,实际工程中,设计师在比较方案、选用楼板时仍然会产生困惑。因此,本文重点从受力性能、计算方法等方面,梳理、总结三种类型的预制楼板,并给出工程案例,帮助解决预制楼板选用问题,为工程设计提供参考。

1 受力性能与计算方法

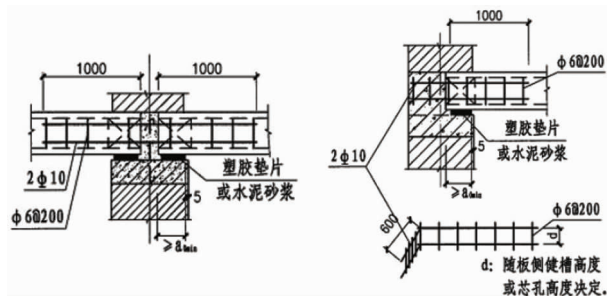
1.1 受力性能

(1) SP 空心板

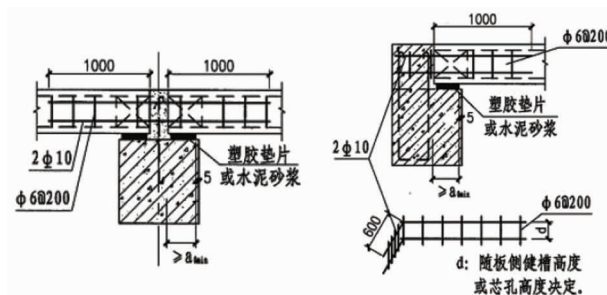
SP 空心板主要采用细石混凝土、预应力钢绞线以及预应力筋制成,受力方式为单向受力。预制板顶部作适当处理,可与顶部后浇混凝土共同组成叠合楼板,可增强楼板刚度,提高房屋结构整体性。在我国,SP 空心板的标准厚度为 100、120、150、180、

200、250、300 和 380mm,最大跨度已达到 18m。

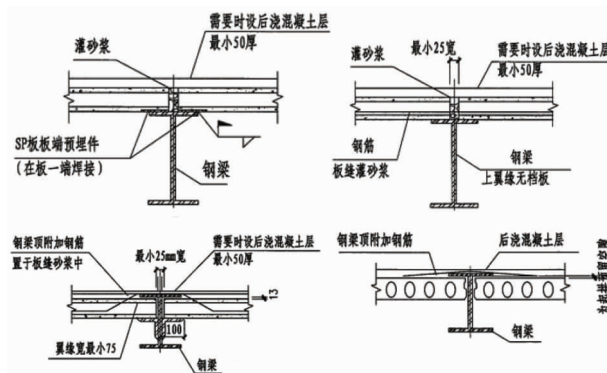
唐山地震和汶川地震中,SP 楼板倒塌造成严重伤亡。倒塌的主要原因是这些预制板多搁置在砖墙上,没有按规范要求采取任何连接构造措施,地震时往往没有约束的墙体倒塌后,引起搁置在墙上的预制板坠落。因此,为保证 SP 空心板良好的抗震性能以及房屋结构整体性,必须采取有效的连接构造措施。SP 空心板典型连接构造做法^[2]如图 4 所示。



(a) 与砌体墙连接



(b) 与混凝土梁连接



(c) 与钢梁连接

图4 SP 空心板典型连接构造做法

(2) 双T板

双T板由面板和两根肋组成,其面板既可以作为横向承重构件,又可以作为纵向承重肋的受压区,单向受力。双T板有等截面和双坡变截面两

种,跨度相对比较大,最大可以达到30m以上;板肋一般可以做到宽100mm,高度700mm甚至更高;面板则薄而宽,一般为50mm厚,宽可以达到2.4m。

双T板在受力的过程中,混凝土的受压高度一般都会在板面以内或者接近面板,受拉钢筋的力臂会比较大。双T板体型简洁美观,传力路线明确,通用性强,跨度大,便于工业化生产。

双T板主要连接构造方式^[9]如图5所示。

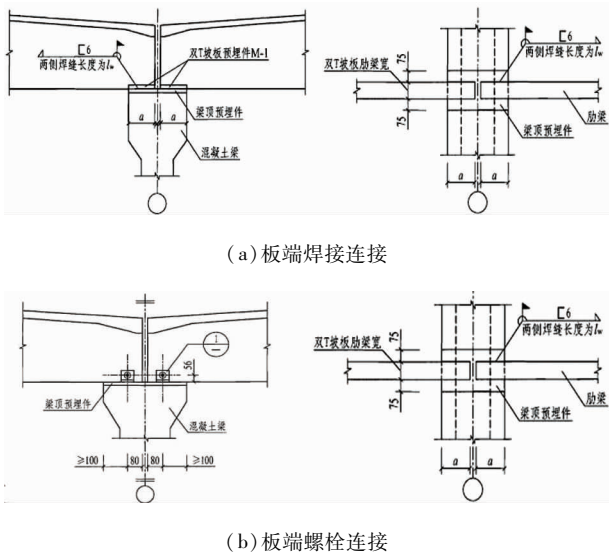


图5 双T板典型连接构造做法

(3) 桁架钢筋混凝土叠合板

桁架钢筋混凝土叠合板,包括预制层和叠合层。预制层,由钢筋桁架网及其下部的混凝土层组成,钢筋桁架主要由下弦钢筋、上弦钢筋和连接两者的腹杆钢筋组成。叠合层,位于预制层上部,其内埋设钢筋网,钢筋网连接预制层钢筋桁架的上弦钢筋,并与预制层钢筋桁架的上弦钢筋、腹杆钢筋现浇成一体。施工时不需要模板和支撑,在实际应用中,该板型跨度较小,多用于民用住宅建筑。

桁架钢筋混凝土叠合板可以做成单向板,也可以做成双向板,具有叠合楼板的“二阶段”受力特点。施工阶段由预制混凝土与钢筋桁架共同承受湿混凝土现浇层的重量以及施工荷载,使用阶段由预制部分与后浇叠合层形成整体共同承受后期各种荷载^[10]。钢筋桁架上、下弦钢筋参与受力计算,腹杆钢筋主要作为构造措施,提高叠合面的抗剪承载力^[11]。

桁架钢筋混凝土叠合板主要连接构造方式^[12]如图6所示。

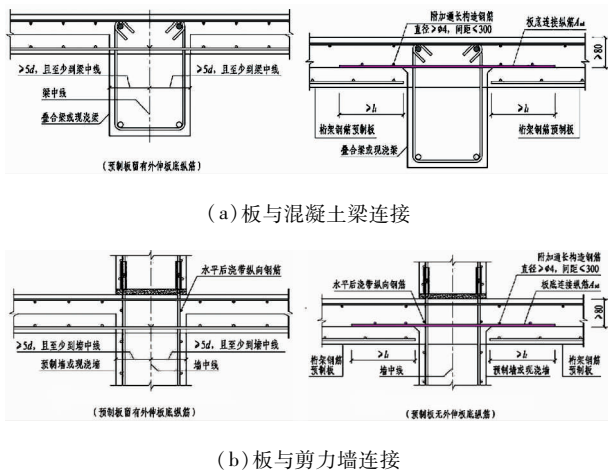


图6 桁架钢筋混凝土叠合板典型连接构造做法

1.2 计算方法

(1) SP空心板

SP空心板受弯承载力按照工字型截面,根据《混凝土结构设计规范》进行计算。为了保证SP空心板的破坏极限弯矩,与板的开裂弯矩之间有一定的间距,防止板在破坏前缺乏明显预兆,板的受弯承载力设计值宜控制为:

$$M_u / \psi_m \geq M_{cr} \tag{1}$$

$$M_u / \psi_m \geq M_{cr} = (1.5f_{tk} + \sigma_{pc})W_0 \tag{2}$$

式中, M_u 为板受弯承载力设计值, M_{cr} 为板开裂弯矩值, ψ_m 为板受弯承载力折减系数0.9, f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值, σ_{pc} 为扣除全部预应力损失后在抗裂验算边缘的混凝土预压应力, W_0 为预制构件换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

SP空心板中没有剪力钢筋和横向分布钢筋,无法直接采用现行规范中的计算公式。因此,SP空心板受剪承载力计算方法,是根据国内外试验资料与我国现行规范中的计算公式对比,乘以折减系数而形成的。

实际工程中,按承载能力极限状态和正常使用极限状态的要求,根据图集《SP预应力空心板》05SG408^[2]中的允许荷载表选择适当的SP板。如表1所示,为SP15C、SP15D板的允许荷载表。

(2) 双T板

双T板的承载能力极限状态计算、正常使用极限状态验算根据《混凝土结构设计规范》的有关规定进行。

由中国建筑科学研究院主编的《预应力混凝土双T板》系列图集^[9, 13-14],包括三部分:《预应力混

凝土双 T 板(坡板宽度 2.4m)》06SG432-1、《预应力混凝土双 T 板(平板,宽度 2.0m、2.4m、3.0m)》09SG432-2、《预应力混凝土双 T 板(坡板宽度 3.0m)》08SG432-3,是我国双 T 板工程应用的主要依据。设计时,可以根据荷载限值按以上图集中的表格选用双 T 板。如表 2 所示,为螺栓肋钢丝双 T 坡板选用表。

表 1 SPI5C、SPI5D 板允许荷载表

板型	SPI5D			SPI5C	
预应力筋	10-8.6	12-8.6	14-8.6	8-9.5	10-9.5
张拉控制应力	0.65 f_{ptk}	0.65 f_{ptk}	0.65 f_{ptk}	0.65 f_{ptk}	0.65 f_{ptk}
混凝土强度	C40	C40	C40	C40	C40
[M_{cr}]kN·m	42.6	48.0	53.2	53.4	62.6
允许弯矩 [M_u] kN·m	43.5	51.4	59.0	58.5	71.1
[M_k] kN·m	39.0	44.4	49.6	49.9	59.0
[M_q]	28.7	34.1	39.4	39.6	48.8
允许剪力 [V_u]kN	68.3			68.1	
板跨跨 m	允许均布荷载(不包括自重) [q_k]kN/m ²				
4.5	8.9	11.0	13.1	13.0	—
4.8	7.5	9.3	11.2	11.1	14.0
5.1	6.3	7.9	9.6	9.5	12.1
5.4	5.3	6.8	8.2	8.2	10.5
5.7	4.5	5.8	7.1	7.1	9.1
6.0	3.8	5.0	6.2	6.1	8.0
6.3	3.2	4.3	5.3	5.3	7.0
6.6	2.7	3.7	4.6	4.6	6.1
6.9	2.3	3.1	4.0	4.0	5.4
7.2	1.9	2.7	3.5	3.4	4.7
7.5	—	2.3	3.0	3.0	4.1

表 2 螺栓肋钢丝双 T 坡板选用表

编号	YTSa094	YTSa124	YTSa154	YTSa184	YTSa214	YTSa244	
荷载限值/ kN/m ²	$Q_{d,lim}$	7.25	7.01	7.07	8.03	9.03	9.50
	$Q_{k,lim}$	5.43	5.35	5.25	5.93	6.68	6.93
	$Q_{q,lim}$	4.61	4.60	4.60	5.21	5.82	6.06
弯矩 kN·m	$M_{u,lim}$	175.53	305.81	504.87	822.09	1250.05	1747.98
限值/ kN·m	端部	106.32	182.76	230.58	398.97	643.65	816.42
	$M_{k,lim}$	132.72	234.99	375.42	607.50	927.04	1279.55
	端部	75.64	133.68	170.99	294.29	472.76	589.55
	$M_{q,lim}$	112.04	201.15	328.10	531.89	804.30	1112.06
	端部	66.31	118.91	151.97	262.83	420.82	529.17
剪力限值 kN	V_{lim}	75.72	98.39	124.62	170.55	224.22	270.17
不上人屋面永久 荷载限值/kN/m ²		2.86	2.62	2.41	2.65	2.45	2.24
等效自重标准值/ kN/m ²		1.75	1.98	2.19	2.56	3.37	3.82

(3) 桁架钢筋混凝土叠合板

目前,国内对于桁架钢筋混凝土叠合板受力性能研究比较多,包括抗弯性能、抗剪性能以及刚度等^[15-17]。桁架钢筋混凝土叠合板由于施工过程中产生了二次受力,其受力过程较为复杂。经试验研究发现^[18],叠合面的粗糙处理和桁架钢筋的穿越能够保证新旧混凝土共同工作,可以认为预制层与叠合层作为整体共同受力。

本节依据《混凝土结构设计规范》GB50010-2010^[19]要求,按照承载能力极限状态和正常使用极限状态,将预制层与叠合层作为整体进行计算,参考 SP 板选用表形式,针对图集《桁架钢筋混凝土叠合板》15G366-1^[20]制作出桁架钢筋混凝土叠合板单向板选用表。如表 3 所示,为 DBD67-xx12-x 桁架钢筋混凝土单向叠合板选用表。

表 3 DBD67-xx12-x 桁架钢筋混凝土单向叠合板选用表

板型	DBD67-xx12-x			
钢筋代号	1	2	3	4
底板底部受力筋	8@200	8@150	10@200	10@150
现浇层顶部受力筋	8@200	8@150	10@200	10@150
混凝土强度等级	C30	C30	C30	C30
板结构自重 q_{dl} kN/m ²	3.38	3.38	3.38	3.38
允许弯矩 [M_u]kN·m	9.70	12.84	14.98	19.71
允许剪力 [V_u]kN	132.13	132.13	132.13	132.13
板跨 m	允许弯矩 [M_q]kN·m			
2.7	5.84	7.67	8.90	11.58
3	5.49	7.21	8.37	10.89
3.6	4.97	6.52	7.57	9.84
3.9	4.77	6.26	7.26	9.44
4.2	4.59	6.03	7.00	9.10

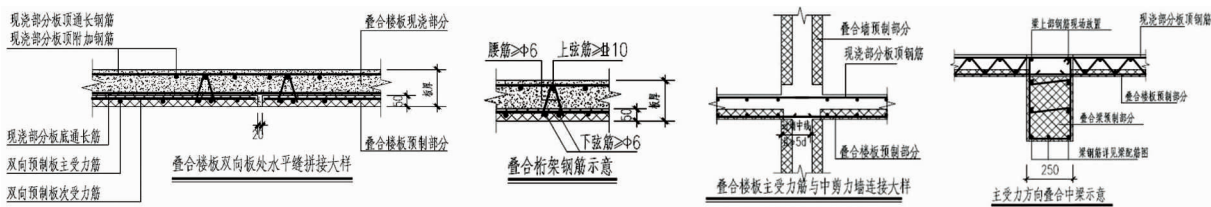
2 工程案例

(1) SP 空心板

SP 空心板在国内学校以及公共建筑中的应用情况,根据《预制预应力结构》^[21]整理汇总如下表 4 所示。从表中可以看出,SP 空心板多用于混凝土框架结构和钢框架结构,主要跨度在 6~9.6m 范围内,最大可达到 18m。

(2) 双 T 板

上海“颀桥万达广场”项目^[22],是国内首个双 T 板大型商业广场项目,位于上海市闵行区都市路与颀兴东路交接处,北临六磊塘,东临居住区。地上



(a) 叠合楼板拼缝详图 (b) 叠合楼板桁架筋详图 (c) 叠合楼板与剪力墙连接详图 (d) 叠合楼板与梁连接详图

图7 23#楼桁架钢筋混凝土叠合板详图

表4 SP 空心板应用案例

序号	项目	结构形式	工程面积 (m ²)	SP 板 跨度 (m)
1	虎振学院	框架结构	5 000	7~9
2	保定职业技术学院	框架结构	6 000	8-14.5
3	北京 12 中	框架结构	9 000	7.2-9
4	北京工商大学	框架结构	5 000	12
5	北京洋桥职业学校	框架结构	2 000	9
6	河北大学	框架结构	16 000	7.2-8.4
7	天津 45 中	框架结构	8 000	8.7
8	天津理工学院	框架结构	12 000	8.5
9	天津医科大学	框架结构	3 000	9.6
10	北京城外诚	钢框架结构	50 000	7-9
11	金五星批发市场	钢框架结构	40 000	5.9-7
12	经开万佳国际酒店市场	钢框架结构	6 000	6
13	大红门服装城	钢框架结构	20 000	8
14	金五星商贸集团综合购物广场	钢框架结构	7 000	7
15	廊坊金龙家具城	钢框架结构	10 000	7.6-13
16	香河华汇家具城	钢框架结构	9 000	4.5-8
17	百利威仓储物流	钢框架结构	200 000	6.3-18

建筑面积约 10.3 万 m²,地上 4 层(局部 5 层),主屋面高度为 20.9m,局部影厅屋面高度为 23.75m。

2~4 层标准层选用了预制双 T 板叠合板。标准跨度 8.1m(轴线 8.4m,支承梁宽 300mm),板宽为 2.7m,肋距 1.50m,肋高 450mm,叠合层厚度 60mm,标准板块重量 5 吨左右。设计前期,对双 T 叠合板和桁架钢筋混凝土叠合板+次梁两种预制方案进行了经济性对比,结果表明在同样的楼盖面积下,双 T 板方案每平方造价比桁架钢筋混凝土叠合板低 15% 左右,同时构件总数大幅减少,没有叠合次梁顶筋和主次梁节点的安装作业,施工效率高。

(3) 桁架钢筋混凝土叠合板

上海市浦东新区惠南镇 17-11-05/11-11-08 地块的 23#楼,为上海市工业化住宅示范楼。房屋建筑面积 9 801.51m²,地上 13 层,地下 1 层,建筑

高度 41.9m。采用叠合板式混凝土剪力墙结构体系,楼板采用桁架钢筋混凝土叠合楼板,预制率达到 30%。

桁架钢筋混凝土叠合板主要尺寸有 2500 × 5820、1800 × 3820、1140 × 2320、2320 × 2520 等,叠合板预制层厚 50mm,采用 C35 混凝土,现浇层厚 70mm、90mm、130mm,采用 C30 混凝土。本项目叠合楼板详图如图 7 所示。

3 结论

本文重点梳理总结了工程中常用 SP 空心板、双 T 板和桁架钢筋混凝土叠合板的受力性能、计算方法以及在工程中的应用情况。

(1) 双 T 板跨度最大,可以达到 30m; SP 空心板跨度次之,跨度多为 6~9.6m 范围内,最大可达到 18m; 桁架钢筋混凝土叠合板跨度较小,在 2.7~4.2m 之间。

(2) SP 空心板比较灵活,适用范围广,可用于学校、商场、厂房、仓库等建筑; 双 T 板跨度较大,多用于工业厂房、商场等大空间建筑; 桁架钢筋混凝土叠合板多用于装配式民用住宅建筑。

(3) 当保证节点构造可靠连接时,三种预制楼板均具有很好的抗震性能,可以保证房屋的整体抗震性能。

(4) 参考 SP 板选用表形式,针对图集《桁架钢筋混凝土叠合板》15G366-1 制作出桁架钢筋混凝土叠合板单向板选用表,可供设计参考。

参考文献

- [1] 庄伟国,等. SP 预应力空心板技术手册[M]. 北京:中国建筑标准设计研究所.
- [2] 05SG408 SP 预应力空心板[S]. 北京:中国建筑标准设计研究院,2005.
- [3] 庞瑞等. 国外预制混凝土双 T 板楼盖体系的研究[J].

- 工业建筑, 2011, 41(3) 121-126.
- [4] 李桃君. 预制预应力双 T 板的程序设计以及有限元分析[D]. 北京:北京建筑大学, 2012.
- [5] 邵紫阳. 新型多层框排架结构工业厂房的节点性能研究及抗震分析[D]. 南京:南京理工大学, 2012.
- [6] 刘轶, 童根树, 等. 钢筋桁架叠合板性能试验和设计方案研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2006(2) 57-60.
- [7] 陈日涛. 自承式钢筋桁架混凝土叠合板刚度有限元分析[J]. 山西建筑, 2007, 33(22) 76-77.
- [8] 马兰. 带肋钢筋桁架混凝土叠合楼板性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- [9] 06SG432-1 预应力混凝土双 T 板(坡板宽度 2.4m)[S]. 北京:中国建筑科学研究院, 2006.
- [10] 赵磊. 自承式钢筋桁架混凝土地和板设计计算方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2007.
- [11] 高云, 陈婷婷, 等. 钢筋桁架混凝土叠合板抗剪承载力的计算与研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2016. 3, 1959-1961.
- [12] G310-1~2 装配式混凝土结构连接节点构造(2015 年合订本)[S]. 北京:中国建筑标准设计研究院, 2015.
- [13] 09SG432-2 预应力混凝土双 T 板(平板, 宽度 2.0m、2.4m、3.0m)[S]. 北京:中国建筑科学研究院, 2009.
- [14] 08SG432-3 预应力混凝土双 T 板(坡板宽度 3.0m)[S]. 北京:中国建筑科学研究院, 2008.
- [15] 王元清, 袁霞, 等. 钢筋桁架混凝土双向叠合楼板承载性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 30(3) 385-391.
- [16] 李杰, 黄鹏飞, 等. 无支撑钢筋桁架混凝土叠合板受力性能试验研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(4) 132-139.
- [17] 李杰, 郭魏芬, 等. 无支撑钢筋桁架混凝土叠合板刚度研究[J]. 低温建筑技术, 2014, (6) 64-67.
- [18] 许东. 钢筋混凝土叠合板拼接构造试验研究与数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
- [19] GB50010-2010 混凝土结构设计规范(2015 年版)[S]. 北京:中国建筑科学研究院, 2015.
- [20] 15G366-1 桁架钢筋混凝土叠合板(60mm 厚底板)[S]. 北京:中国建筑标准设计研究院, 2015.
- [21] 预制预应力结构(微信公众号). SP 板应用系列[EB/OL]. (2017) http://mp.weixin.qq.com/mp/homepage?__biz=MzIxMjQzMTE4Mg==&hid=10&sn=7a11ca31cb1e8ae9e83001a3ed09d851#wechat_redirect.
- [22] 预制预应力结构(微信公众号). 国内首个双 T 板大型商业广场项目的设计施工实践[EB/OL]. (2016) http://mp.weixin.qq.com/mp/homepage?__biz=MzIxMjQzMTE4Mg==&hid=10&sn=7a11ca31cb1e8ae9e83001a3ed09d851#wechat_redirect.

Research on Applicability of Different Precast Concrete Slabs and Project Case Studies

Ma Junjie, Lu Dan

(East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: For the moment, the most common precast concrete slabs used in projects include SP prestressed concrete hollow slab, double-T plates, and composite slab by steel bar truss and concrete. This paper firstly briefly introduces the recent development of the three kinds of precast concrete slabs. Then the applicability of different precast concrete slabs was summarized in terms of the stress performance, construction measures, calculation methods, and so on. In addition, the selection table of the composite slab by steel bar truss and concrete was proposed in this paper. Lastly, different projects of the three common precast concrete slabs were given. Some conclusions about the applicability of precast concrete slabs obtained in this paper can be evidential references for the design of pre-fabricated buildings, and assist in solving the problems in selecting precast concrete.

Key Words: SP Prestressed Concrete Hollow Slab; Double-T Plate; Composite Slab by Steel Bar Truss and Concrete