

DOI: 10.7672/sgjs2025160001

叠合板受力性能分析及桁架筋作用研究*

宋健松¹, 叶 赞², 黄 山¹, 叶云磊¹, 曹仁杰¹

(1. 中天建设集团有限公司, 浙江 杭州 310000;

2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

[摘要] 分析了叠合板不同阶段受力机理, 推导了单向叠合板叠合面在竖向荷载下竖向压应力、水平剪应力计算公式。发现叠合面剪应力随板跨的增加线性增大; 叠合面竖向应力与剪力斜率有关, 且板面荷载越小, 叠合面压应力越小, 甚至减小至拉应力, 但拉应力数值远小于新老混凝土叠合面黏结力。对有无钢筋桁架叠合板进行数值模拟, 对比发现, 在施工阶段钢筋桁架对底板刚度均有不同程度的提高, 但目前施工阶段板跨有限, 预制底板已足够承载, 钢筋桁架完全可以取消; 使用阶段钢筋桁架对叠合板刚度、叠合面相对滑移均有较明显改善, 但由于新老混凝土固有的黏结力、摩擦力, 无钢筋桁架叠合板也能满足承载力需要, 钢筋桁架也可取消。最后建议在确保新老混凝土叠合面结合质量的基础上, 可取消钢筋桁架, 减少用钢量, 方便现场施工。

[关键词] 叠合板; 预制底板; 钢筋桁架; 混凝土; 受力性能

[中图分类号] TU375.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)16-0001-07

Analysis on Stress Performance of Composite Slab and Study on Action of Reinforcement Truss

SONG Jiansong¹, YE Yun², HUANG Shan¹, YE Yunlei¹, CAO Renjie¹

(1. Zhongtian Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China; 2. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: The stress mechanism of composite slab at different stages is analyzed, and the calculation formulas of vertical compressive stress and horizontal shear stress of unidirectional composite slab composite surface under vertical load are derived. It is found that the shear stress of the composite surface increases linearly with the increase of the plate span. The vertical stress of the composite surface is related to the shear slope, and the smaller the plate load is, the smaller the compressive stress of the composite surface is, or even decreases to the tensile stress, but the tensile stress value is much smaller than the bonding force of the new and old concrete composite surface. The numerical simulation of the composite slab with or without steel bar truss is carried out. It is found that the steel bar truss improves the stiffness of the floor to varying degrees in the construction stage. However, at present, the slab span is limited in the construction stage, and the prefabricated floor has enough bearing capacity, so the steel bar truss can be completely cancelled. The stiffness of the composite slab and the relative slip of the composite surface are obviously improved by the steel bar truss in the use stage. However, due to the inherent bonding force and friction force of the new and old concrete, the composite slab without steel bar truss can also meet the needs of bearing capacity, and the steel bar truss can also be cancelled. Finally, it is suggested that on the basis of ensuring the bonding quality of the new and old concrete composite surface, the steel bar truss can be cancelled to reduce the amount of steel used and facilitate the on-site construction.

Keywords: composite plate; precast base plate; reinforcement truss; concrete; stress performance

* 中天建设集团有限公司科研项目(ZTYF-202307)

[作者简介] 宋健松, 高级工程师, E-mail: 45331561@qq.com

[收稿日期] 2025-02-21

0 引言

近年来, 装配式混凝土建筑在我国得到快速发

展。相应地,国家、地方行业主管部门也陆续颁布了装配式建筑评价办法,如 GB/T 51129—2017《装配式建筑评价标准》等。考虑装配率计算规则及施工便利性等,叠合板已成为装配式构件的首选。

在众多类型叠合板中,钢筋桁架叠合板因具有施工方便、标准化程度高等优点脱颖而出^[1],得到广泛应用,本文中叠合板均指此类板。目前,住宅常用叠合板一般厚 130, 140mm,其中预制底板 60mm,现浇层 70, 80mm;常用钢筋桁架型号一般为 A80, B80,典型预制底板及 A80 钢筋桁架如图 1 所示^[2]。

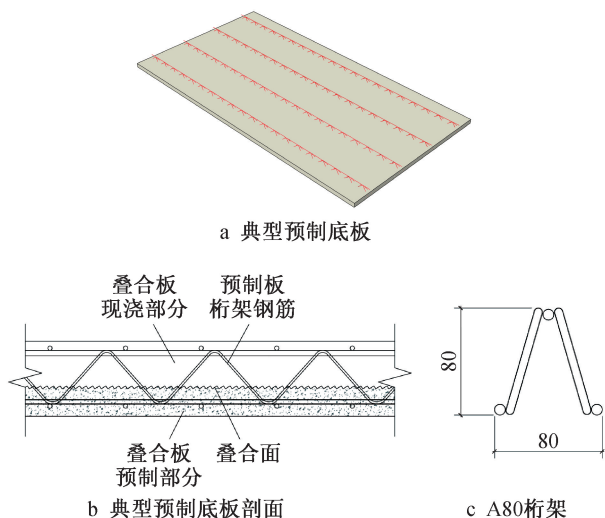


图1 叠合板及 A80 钢筋桁架

Fig. 1 Composite plate and A80 steel bar truss

1 问题分析

住宅项目叠合板施工流程一般为:支撑架搭设、钢筋桁架预制底板吊装、管线铺设、钢筋绑扎、混凝土浇筑。由于钢筋桁架上弦钢筋与板面间高度有限,民用管线需在钢筋桁架腹部穿过;而桁架上弦与叠合面之间净高也相对有限,管线在桁架处无法堆叠穿过,所以不同走向管线需避开在钢筋桁架处交叉,如图 2 所示。对于叠合板,管线铺设无法如现浇结构那样自由布线;除此之外,对于住宅公区等管线较多且极可能出现 3 层管线交叉的区域,上述“避让”办法却并不理想,目前较多采用增加现浇层厚度来增加桁架筋腹部净空。

针对上述施工难点,本文从钢筋桁架对叠合板受力性能的贡献入手,反向思考钢筋桁架替代方案,甚至取消钢筋桁架的可行性。聂建国等^[3]研究表明,60mm 厚预制底板配置钢筋桁架仅能增加 10% 的施工板跨,可见桁架筋的作用有限,建议 60mm 预制板采用带支撑施工时可取消钢筋桁架。而现阶段,设计院在计算叠合板受力时,均不考虑

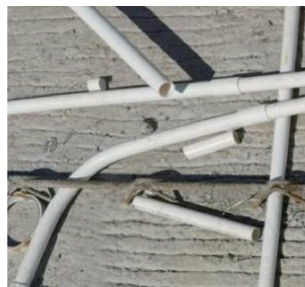


图2 管线铺设

Fig. 2 Pipeline laying

钢筋桁架对叠合板承载力的有利作用,仅仅将其作为增加新老混凝土叠合面抗剪强度的构造措施。

本文通过分析叠合板受力机理,对比有无钢筋桁架的叠合板受力差异,分析钢筋桁架对叠合板受力性能的影响。

2 叠合板受力机理分析

叠合板受力呈现出“等同现浇”的受力特性^[4-5]。构造措施主要包括两项:①根据装配式规范要求,叠合板预制底板板面拉毛,且粗糙度 $\geq 4\text{mm}$;②预制底板上设置钢筋桁架。两项措施是否缺一不可,或单项措施能否满足“等同现浇”最低要求,是本文研究的重点。

2.1 分析案例

为使分析结果更直观,以一个典型板跨的简支叠合单向板为对象进行定量计算。单向板宽 2150mm,板厚为 60mm 预制板+70mm 现浇板;受力钢筋为 $\phi 8$ 三级钢,间距 160mm;分布筋为 $\phi 8$ 三级钢,间距 200mm,混凝土强度等级为 C30,如图 3 所示。板自重 3.25kN/m^2 (重度按 25kN/m^3 计),后期使用荷载考虑装修荷载 2.0kN/m^2 ,使用活荷载 2.5kN/m^2 ,共计 4.5kN/m^2 ;恒荷载、活荷载分项系数分别为 1.3, 1.5。

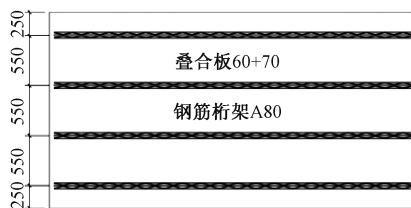


图3 计算案例平面

Fig. 3 Plane of calculation case

2.2 叠合面剪应力

将叠合板视作宽扁梁,取跨度方向长度为 d_z 的微段进行分析,如图 4 所示。

单跨梁任一截面位置剪应力分布如下:

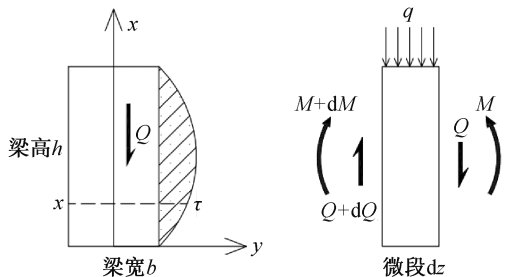


图4 矩形截面剪应力分布

Fig. 4 Shear stress distribution of rectangular section

$$\tau = \frac{QS}{It} = \frac{Qbx(0.5h - 0.5x)}{1/12bh^3 \cdot b} = \frac{6Qx(h-x)}{bh^3} \quad (1)$$

当 $x = 60\text{mm}$ 时,式(1)结果即为叠合面处竖向剪应力。根据剪应力互等定理,此剪应力与叠合面水平剪应力(由粗糙面及桁架钢筋承担)大小相等,且叠合面最大剪应力随板跨增加线性增大,支座处叠合面剪应力最大,跨中最小,呈线性变化。

2.3 叠合面竖向应力

同样,取 dz 微段,左侧剪力 Q_1 ,右侧剪力 Q_2 ,自截面底至截面高度 x 处,该面积剪应力之和为:

$$q_0 = \int_0^h \tau b dx = \int_0^h b \frac{6Qx(h-x)}{bh^3} dx = \int_0^h \frac{6Q}{h^3} x(h-x) dx \quad (2)$$

根据式(2)即可求得图5所示的剪力 q_1, q_2 ,二者之差即为叠合面处竖向应力。从式(2)可看出,叠合面处竖向应力仅与微段两侧剪力差(剪力斜率)相关,且为线性相关。

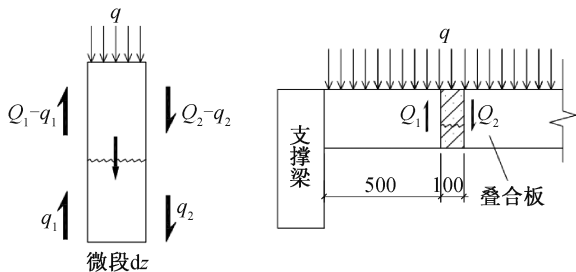


图5 矩形截面剪应力求解分析

Fig. 5 Analysis of shear stress solving in rectangular section

以3.5m板叠合板模型为例,取距支座500mm处 $dz = 100\text{mm}$ 微段(见图5),对不同工况、不同荷载组合下叠合面竖向应力进行计算,结果如表1所示。

由表1可知,板面荷载越小,叠合面压应力越小,甚至转变为拉应力,如第6个工况即自重标准值工况。另外,虽然拉应力的出现对叠合面抗剪不利,但总体应力较小。

表1 不同荷载工况下叠合面竖向应力

Table 1 Vertical stress of overlapping surface under different load conditions

荷载工况	叠合面竖向应力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	应力类型
1.3×自重+1.3× 装修荷载+1.5×活荷载	2.73	压应力
1.0×自重+1.0× 装修荷载+1.0×活荷载	1.93	压应力
1.3×自重+1.3× 装修荷载	1.07	压应力
1.0×自重+1.0× 装修荷载	0.82	压应力
1.3×自重	-0.08	拉应力
1.0×自重	-0.06	拉应力
1.0×装修荷载+ 1.0×活荷载	1.99	压应力

2.4 叠合面新老混凝土黏结力

目前较多学者在模拟叠合面受力时,仅考虑叠合面受压,摩擦力与压力成正比,不考虑受拉^[4-5]。

刘健^[6]展示了新老混凝土黏结面特性的试验结果,轴拉试验构件粗糙面采用凿毛处理,并选用与新混凝土同配合比的水泥净浆作为界面剂,老混凝土强度等级为C30,新混凝土强度等级为C35,在灌砂平均深度为1.244mm时,黏结轴拉强度可达1.59MPa,这个值已远超表1中拉应力 $0.08 \times 10^{-3}\text{MPa}$ 。本文还采用C25老混凝土与C40新混凝土进行拉剪试验,在0.22MPa的拉应力下,粗糙度为1.333mm时,剪应力可达1.4MPa左右,此值也远超本案例对应4m板跨简支板的叠合面最大剪应力(0.243MPa)。

国内外部分规范也提供了叠合面抗剪强度计算公式,在国内拉毛处理的前提下,抗剪强度最小可达到0.3MPa^[6-8];刘立新等^[9]通过试验发现,无论采用人工划痕还是自然粗糙面所形成的无筋混凝土叠合面,在划痕深度 $\geq 4\text{mm}$ 时,其叠合面抗剪强度值均满足GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015年版)允许剪应力值 $0.4\text{N}/\text{mm}^2$ 的要求,且有较大富余度。

所以叠合板受力分析应考虑新老混凝土黏结面固有黏结力、摩擦力,与硬接触模型综合考虑^[10]。

3 叠合板桁架筋作用研究

采用有限元软件分别对有(无)钢筋桁架的叠合板受力性能进行数值模拟,分析钢筋桁架对叠合板力学性能的影响。模型参数同上文,调整板跨进行多案例分析。模型为对称结构,取左半结构计算。

混凝土单元选取C3D8R,为规避沙漏现象,板厚度方向划分为4个单元;钢筋根据需要分别选用

三维桁架单元 T3D2 或梁单元。混凝土材料采用塑性损伤模型,钢筋采用双折线模型。钢筋与混凝土之间采用嵌入区域约束 embedded region 方式耦合。

3.1 施工阶段桁架筋作用

3.1.1 钢筋桁架稳定分析

对钢筋桁架预制底板受力性能进行数值模拟,对于钢筋桁架,由于非线性分析只能考虑其上弦受压钢筋轴力二阶效应,无法考虑其初始缺陷,故本节首先对钢筋桁架上弦钢筋进行非线性稳定分析。

以常用的 A80 钢筋桁架为例,将上弦钢筋视作多跨连续梁,利用有限元软件进行非线性屈曲分析,结果如图 6 所示。提取第一阶屈曲模态作为初始缺陷形态,峰值取跨度的 1/1 000,极限承载力荷载-位移曲线如图 7 所示,按挠度限值 1/200 控制,提取上弦钢筋受压极限承载力为 9 000N。

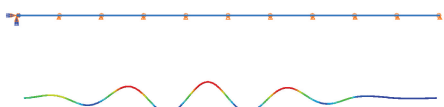


图 6 上弦钢筋分析模型及第一阶屈曲模态

Fig. 6 Analysis model and first-order buckling mode of upper chord steel bar

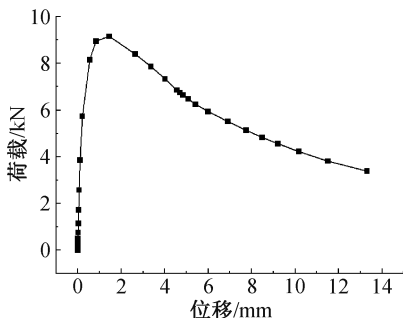


图 7 上弦钢筋受压荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of upper chord steel bar under compression

作为校核,按《混凝土结构设计规范》(2015 年版)中实腹构件的稳定公式计算,分别根据直径、回转半径两种方式查表 6.2.15 计算,承载力设计值分别为 9 823,9 772N。所以钢筋桁架上弦钢筋受压承载力取 9 000N。

3.1.2 预制底板受力计算

计算模型同上文,分别对 0.5, 1.0, 1.5, 2.0m 跨度的单跨简支板进行施工阶段受力计算,施工活荷载为 2.5kN/m^2 ;同一跨度板分别考虑有(无)钢筋桁架两种类型。为对比更清晰,将无钢筋桁架模型分为两种:①仅将钢筋桁架腹杆、上弦去除,下弦保留,作为对比模型;②将桁架筋取消,预制板底筋

按常规方式均匀布筋,为常规模型。对本文案例来说,常规模型要比对比模型少 4 根底筋。

分别取模型跨中截面边侧点(A点)与跨中截面中心点(B点)的计算结果进行对比,如图 8 所示。两点在荷载标准组合下挠度计算结果如表 2,3 所示。

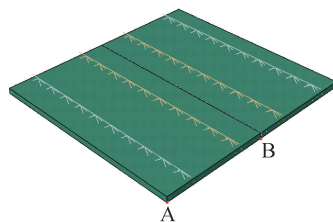


图 8 计算结果对比点位置

Fig. 8 The comparison point position of the calculation results

表 2 带桁架底板与对比模型挠度对比结果

Table 2 Comparison results of the deflection between the plate with truss and the contrast model

简支板 跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
0.5	A 点	0.009	0.010	111
	B 点	0.008	0.009	113
1.0	A 点	0.129	0.147	114
	B 点	0.117	0.133	114
1.5	A 点	0.68	0.806	119
	B 点	0.62	0.733	118
2.0	A 点	5.816	12.863	221
	B 点	5.644	12.480	221

注:板跨 2.0m 时,施工荷载施加至 1.65kN/m^2 时,上弦钢筋屈曲,挠度为此荷载下计算值

表 3 带桁架底板与常规模型挠度对比结果

Table 3 Comparison results of the deflection between the plate with truss and the regular model

简支板 跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
0.5	A 点	0.009	0.010	111
	B 点	0.008	0.009	113
1.0	A 点	0.129	0.146	114
	B 点	0.117	0.133	114
1.5	A 点	0.68	0.807	119
	B 点	0.62	0.734	118
2.0	A 点	5.816	15.205	261
	B 点	5.644	14.894	264

由表 2,3 可知,钢筋桁架对底板刚度均有不同程度的提高,且随着板跨的增加,钢筋桁架对刚度贡献增大。特别是当跨度达到 2.0m 时,由于板底混凝土开裂,钢筋桁架作用愈发明显,且此时若无钢筋桁架,板跨挠度已经超限,2.0m 跨度预制底板施工阶段荷载-挠度曲线如图 9 所示。

对比模型与常规模型在 0.5~1.5m 跨度时,钢

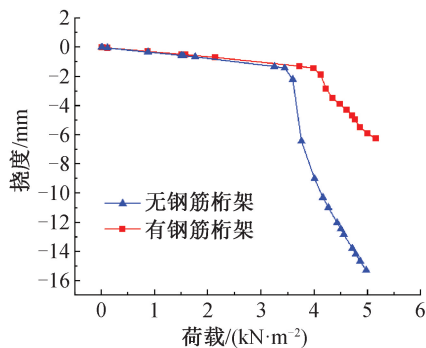


图9 预制底板(2.0m跨度)施工阶段荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curve of precast base plate (2.0m span) in construction stage

筋桁架作用非常一致,但当跨度为2.0m时,对比模型挠度要比常规模型小,这是因为对比模型底筋较多的缘故。

从挠度控制的角度来说,若按 $L/200$ (L 为跨度)控制构件挠度,那么不论有无钢筋桁架,单跨板跨度都应控制在1.5m左右。根据目前的施工习惯,板下支撑主要有满堂支撑架、铝模快拆支撑体系及独立三角支撑架,板跨均在0.9~1.2m,挠度可以满足。因此可得出结论:施工阶段钢筋桁架完全可以取消。

3.2 使用阶段桁架筋作用

3.2.1 软件参数选择

软件模拟时,预制底板与现浇层之间相互作用按接触考虑。最典型的接触模型为库伦摩擦模型,如图10所示。该模型假定新老混凝土结合面的摩擦力与正压力成正比,当交界面的剪切力大于摩擦力,则新老混凝土构件发生相对滑动。但实际叠合板新老混凝土结合面存在复杂黏结力,且即使二者之间没有压力,摩擦力也一直存在,所以库伦摩擦模型与实际受力特性不能完全吻合。

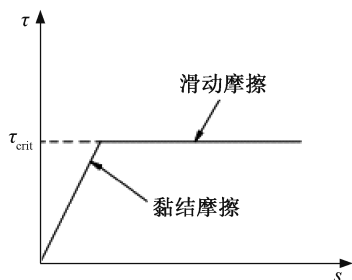


图10 库伦摩擦模型

Fig. 10 Coulomb friction model

周剑^[10]在模拟新老混凝土叠合面受力时选取了内聚力-摩擦混合模型,该模型可考虑切向应力随法向应力的变化,同时可考虑混凝土的黏结力作

用。软件开始计算时,内聚力模型先贡献抗剪承载力,摩擦模型不工作;当内聚力模型开始损伤,摩擦模型开始工作,二者共同作用;当内聚力模型完全失效后,摩擦模型单独工作。法向弹性刚度 K_m 取100 000MPa/mm,切向弹性刚度 K_{ss}, K_{tt} 取1.0MPa/mm,法向峰值应力为1.6MPa,切向峰值应力为0.8MPa,塑性有效相对位移取1mm。

参考上述研究成果,本文选择内聚力-摩擦混合模型来模拟叠合板预制底板与现浇层之间的相互作用,接触模型摩擦系数取0.6^[11],并偏安全地取法向峰值应力为1.0MPa,切向峰值应力为0.5MPa,塑性有效相对位移为1mm。

3.2.2 叠合板受力计算

计算模型同上文,分别对2.0,2.5,3.0,3.5m跨度的简支板进行使用阶段受力分析,考虑装修荷载2.5kN/m²,使用活荷载2.0kN/m²。同一跨度叠合板分别考虑有(无)钢筋桁架两种类型。同施工阶段,无钢筋桁架模型分为对比模型与常规模型两种。同样取模型跨中截面边侧A点与跨中截面中心B点的计算结果进行对比,如表4,5所示。

表4 带桁架叠合板(简支)与对比模型挠度对比结果

Table 4 Comparison results of the deflection between the plate with truss (simply supported) and the contrast model

简支板跨 度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A点	0.447	0.668	149
	B点	0.409	0.618	151
2.5	A点	1.008	1.426	141
	B点	0.932	1.333	143
3.0	A点	4.245	5.025	118
	B点	4.073	4.847	119
3.5	A点	15.078	16.100	107
	B点	14.655	15.753	107

表5 带桁架叠合板(简支)与常规模型挠度对比结果

Table 5 Comparison results of the deflection between the plate with truss (simply supported) and the regular model

简支板跨 度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A点	0.447	0.668	149
	B点	0.409	0.618	151
2.5	A点	1.008	1.429	142
	B点	0.932	1.335	143
3.0	A点	4.245	6.353	150
	B点	4.073	6.153	151
3.5	A点	15.078	19.583	130
	B点	14.655	19.214	131

由表4,5可知,钢筋桁架对叠合板刚度均有较明显的提高。从对比模型来看,随着板跨增加,钢筋桁架的作用降低,当跨度达到3.5m时,单跨板有

无钢筋桁架已区别不大;常规模型下,由于底筋本身就比有桁架模型少,3.5m跨时刚度相差仍较大,但并不是设置钢筋桁架所致。

由于在实际工程中,叠合板支座为固定约束较常见,故改变叠合板约束条件为两端固结,计算结果如表6,7所示。由表6,7可知,两端固结时,钢筋桁架对叠合板刚度提高也非常明显。进一步对比表5,7可知,除3.5m跨度外,板约束条件变化对钢筋桁架对叠合板的刚度贡献影响不大。

表6 带桁架叠合板(两端固结)与对比模型挠度对比结果

Table 6 Comparison results of the deflection between the plate with truss(fixed at both ends) and the contrast model

两端固结 板跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A点	0.141	0.196	139
	B点	0.132	0.184	139
2.5	A点	0.294	0.434	148
	B点	0.275	0.409	149
3.0	A点	0.543	0.838	154
	B点	0.512	0.796	155
3.5	A点	0.994	1.787	180
	B点	0.944	1.712	181

表7 带桁架叠合板(两端固结)与常规模型挠度对比结果

Table 7 Comparison results of the deflection between the plate with truss(fixed at both ends) and the regular model

两端固结 板跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A点	0.141	0.196	139
	B点	0.132	0.183	139
2.5	A点	0.294	0.434	148
	B点	0.275	0.409	149
3.0	A点	0.543	0.838	154
	B点	0.512	0.796	155
3.5	A点	0.994	1.789	180
	B点	0.944	1.714	182

综上,钢筋桁架对叠合板刚度提高较明显。两端固结时,有(无)钢筋桁架叠合板挠度均远小于规范规定的跨度的1/200;两端简支时,有无钢筋桁架的叠合板挠度比值较悬殊,可达150%。

考虑在实际项目中,叠合板或多或少受边梁约束,并非单向简支受力,所以可推断:常规跨度双向叠合板的钢筋桁架可取消。

3.2.3 叠合板叠合面滑移分析

对叠合板叠合面在竖向荷载作用下,预制底板与现浇层相对滑移量进行计算分析,考察钢筋桁架对叠合板上下板相对滑移的影响,计算模型同上节。取1/4板跨截面边侧A点与1/4板跨截面中心

B点的计算结果进行对比,如表8,9所示。

表8 带桁架叠合板(简支)与对比模型相对滑移量对比结果

Table 8 Comparison results of the relative slip between the plate with truss(simply supported) and the contrast model

简支板 跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A点	-0.016	-0.035	219
	B点	-0.012	-0.030	250
2.5	A点	-0.020	-0.049	245
	B点	-0.016	-0.043	269
3.0	A点	-0.025	-0.071	284
	B点	-0.016	-0.058	363
3.5	A点	-0.058	-0.076	131
	B点	-0.022	-0.065	295

表9 带桁架叠合板(简支)与常规模型相对滑移量对比结果

Table 9 Comparison results of the relative slip between the plate with truss(simply supported) and the regular model

简支板 跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A点	-0.016	-0.035	219
	B点	-0.012	-0.030	250
2.5	A点	-0.020	-0.049	245
	B点	-0.016	-0.042	263
3.0	A点	-0.025	-0.067	268
	B点	-0.016	-0.053	331
3.5	A点	-0.058	-0.093	160
	B点	-0.022	-0.063	286

同样也考虑两端固结叠合板计算模型,计算结果如表10,11所示。

表10 带桁架叠合板(两端固结)与对比模型相对滑移量对比结果

Table 10 Comparison results of the relative slip between the plate with truss(fixed at both ends) and the contrast model

两端固结 板跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A点	-0.011	-0.017	155
	B点	-0.010	-0.016	160
2.5	A点	-0.016	-0.029	181
	B点	-0.014	-0.026	186
3.0	A点	-0.021	-0.043	205
	B点	-0.018	-0.039	217
3.5	A点	-0.026	-0.064	246
	B点	-0.022	-0.058	264

由表10,11可知,钢筋桁架对叠合面上下板相对滑移影响较大,且随着板跨增大,钢筋桁架的抗滑移作用增加。同时,钢筋桁架抗滑移作用与叠合

表 11 带桁架叠合板(两端固结)与常规模型相对滑移量对比结果

Table 11 Comparison results of the relative slip between the plate with truss(fixed at both ends) and the regular model

两端固结 板跨度/m	位置	挠度/mm		比值/ %
		有桁架	无桁架	
2.0	A 点	-0.011	-0.017	155
	B 点	-0.010	-0.016	160
2.5	A 点	-0.016	-0.029	181
	B 点	-0.014	-0.026	186
3.0	A 点	-0.021	-0.043	205
	B 点	-0.018	-0.039	217
3.5	A 点	-0.026	-0.064	246
	B 点	-0.022	-0.058	264

板挠度有关,对两端固结叠合板的贡献明显小于两端简支板。这说明钢筋桁架极好地限制了预制底板与现浇层在叠合面的相对滑移,且叠合板变形越大贡献作用越明显。

但由于叠合面处粗糙面及新老混凝土黏结力的作用,无钢筋桁架叠合板也可较好地作为整体结构来受力。由表 8~11 可知,无钢筋桁架叠合板虽比钢筋桁架叠合板滑移大,但其本身滑移绝对值却并不大,例如对于 3.5m 跨简支单向板,最大滑移量为-0.093mm,根据前文确定的叠合面新老混凝土切向弹性刚度 K_{ss} , K_{tt} (1.0MPa/mm),滑移产生的剪应力约为 0.1MPa,考虑实际项目板的支撑形式及受力模式,此剪应力可能会更小,远小于叠合面的抗剪承载力。从这个角度来说,受力阶段钢筋桁架抗滑移作用明显,但也可取消。

4 结语

本文对叠合板叠合面受力进行了理论公式推导,利用有限元软件对叠合板施工阶段、使用阶段受力进行了数值模拟,得出以下结论。

1) 推导了单向叠合板叠合面剪应力与竖向应力,发现叠合面剪应力随板跨增加线性增大;竖向应力与剪力斜率有关,相同荷载下,不同跨度简支板的叠合面竖向应力是相同的。板面荷载越小,叠合面压应力越小,甚至减小至拉应力。

2) 施工阶段,钢筋桁架充当 T 形截面腹板,与预制底板共同承载施工荷载,可提高预制底板的承载力及刚度,且随着板跨增加,钢筋桁架对预制底板刚度贡献增大。但施工阶段预制底板板跨均控制在 0.9~1.2m 以内,此时预制底板已足够承载,钢筋桁架完全可以取消。

3) 使用阶段,对比有(无)钢筋桁架的叠合板受力,发现钢筋桁架对叠合板刚度均有较明显的提

高,随着板跨增加,钢筋桁架的作用逐步降低;钢筋桁架对叠合面处预制底板与现浇层的相对滑移影响较大,且随着板跨增加,钢筋桁架的作用逐步增大。但由于新老混凝土交界面固有黏结力、剪应力的有利作用,无钢筋桁架叠合板也能满足承载力需要,钢筋桁架在使用阶段也可以取消。

4) 综上所述,在采取有效措施确保新老混凝土叠合面施工质量及按规范要求设置必要的抗剪键等构造措施的基础上,建议取消钢筋桁架,减少用钢量,方便现场施工。

参考文献:

- [1] 李明,王浩然,赵唯坚. 带抗剪键叠合板的力学性能[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(5):1509-1520.
LI M, WANG H R, ZHAO W J. Mechanical properties of laminated slab with shear keys[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2019,49(5):1509-1520.
- [2] 中国建筑标准设计研究院,中国建筑科学研究院. 装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
China Institute of Building Standard Design & Research Co., Ltd., China Academy of Building Research. Technical specification for precast concrete structures:JGJ 1—2014[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2014.
- [3] 聂建国,姜越鑫,聂鑫,等. 叠合板中桁架钢筋对预制板受力性能的影响[J]. 建筑结构学报,2021,42(1):151-158.
NIE J G, JIANG Y X, NIE X, et al. Effect of truss reinforcement on mechanical properties of prefabricated slabs [J]. Journal of building structures, 2021,42(1):151-158.
- [4] 曹晨,郑志远,赵永强,等. 简支叠合板叠合面受力性能有限元研究[J]. 建筑结构,2022,52(S1):1762-1768.
CAO C, ZHENG Z Y, ZHAO Y Q, et al. Finite element study on mechanical properties of simply supported laminated plates[J]. Building structure, 2022,52(S1):1762-1768.
- [5] 马祥林. 桁架钢筋混凝土叠合板的受力性能研究[D]. 南京:东南大学,2017.
MA X L. Study on mechanical properties of truss reinforced concrete composite slab [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [6] 刘健. 新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2000.
LIU J. Study on the mechanics performance of adherence of young on old concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000.
- [7] 谢钰. 叠合梁叠合面抗剪机理分析及抗剪强度计算[J]. 邵阳学院学报(自然科学版),2006,3(3):48-51.
XIE Y. Analysis on anti-shear destroy mechanism and the calculation of shear resistance in the combined interface of composite beam[J]. Journal of Shaoyang University (science and technology), 2006,3(3):48-51.

导渗排水结构及雨水收集利用系统的实施。

2 实施效果

现有施工技术为先施工临设设施所有内容,室外工程施工时破除临时设施再行施工。存在临时设施及雨水系统一次性投入;投入设施在后期施工时需拆除,产生大量建筑垃圾;扬尘治理费用大;水资源利用率为20%~50%,污染物消减率为50%~60%。采用永临结合+海绵城市超前施工技术,合理规划场地,临时设施与永久设施合并施工,提前施工室外景观绿化及市政管网工程,可回收水资源、保护环境,降低施工期间临时设施及扬尘治理等费用投入;水资源利用率100%,污染物消减率在70%以上。该成果在工程建造过程中引入了“永临结合”的理念,通过海绵城市的超前实施,提高了施工现场雨水利用率,采取截污措施实现了水质净化,实现了绿色建筑与自然生态保护的完美融合,为社会带来了巨大的无形效益。某EPC工程建造时采用了该技术,在建造初期即完成了现场海绵设施及现场道路、绿化等施工,减少临时雨水系统投入58万元,减少临设投入113万元,减少环保及用水费用96万元,效果显著。

3 结语

海绵城市型永临结合低碳建造模式及形成的全过程水资源收集回用系统可实现建造全过程水资源有效回收利用及周边生态环境的保护。在建造全过程如何做到渗、滞、蓄、净、用、排、维,满足地面径流控制目标,实现建筑物建造阶段与周边环境、城市发展的完美融合,实现全过程绿色低碳建造还需不断进行研究。低碳技术日益受到世界各国的关注,研发低碳技术有助于建筑业高质量发展。

参考文献:

- [1] 马越,胡艺泓,姬国强,等.海绵城市雨水渗井系统建设关键问题探讨[J].给水排水,2022,58(4):13-20.
MA Y, HU Y H, JI G Q, et al. Discussion on some key issues in rainwater seepage well system construction for sponge city[J]. Water & wastewater engineering, 2022, 58(4): 13-20.
- [2] 范巍.再生透水混凝土主要性能及其影响因素综述[J].四川建材,2018,44(9):29-31.
FAN W. Summary of main properties and influencing factors of recycled permeable concrete [J]. Sichuan building materials, 2018, 44(9): 29-31.
- [3] 吴允红,李俊奇,张哲,等.渗排型透水铺装运行维护研究进展[J].给水排水,2022,58(8):151-159.
WU Y H, LI J Q, ZHANG Z, et al. Research progress on operation and maintenance of permeable pavement with permeable drainage[J]. Water & wastewater engineering, 2022, 58(8):

151-159.

- [4] 李龙,宋千勇,周为,等.憎水剂对透水混凝土抗堵塞性能及透水性能的影响研究[J].新型建筑材料,2024,51(2):11-16.
LI L, SONG Q Y, ZHOU W, et al. Study on the influence of hydrophobic agents on the anti clogging and permeable performance of permeable concrete[J]. New building materials, 2024, 51(2): 11-16.
- [5] 邓征宇,贺卫宁,罗楨,等.溢流雨水口型式对其过流及截污性能的影响[J].给水排水,2023,59(S1):616-620.
DENG Z Y, HE W N, LUO Z, et al. Influence of overflow rainwater mouth type on its overflow and interception performance [J]. Water & wastewater engineering, 2023, 59(S1): 616-620.
- [6] 许敏.基于海绵城市理念的市政道路低影响开发设施设计优化研究[J].工程建设与设计,2024(20):58-60.
XU M. Research on design optimization of low impact development facilities for municipal roads based on sponge city concept[J]. Construction & design for engineering, 2024(20): 58-60.
- [7] 褚彦杰.基于海绵城市理念的绿色建筑雨水设计[J].给水排水,2017,53(S1):228-230.
CHU Y J. Rainwater design of green building based on the concept of sponge city [J]. Water & wastewater engineering, 2017, 53(S1): 228-230.
- [8] 折帅,董高明,罗黑龙,等.基于SWMM模型的产业园区LID设施方案评估研究[J].施工技术(中英文),2025,54(4):151-156,166.
ZHE S, DONG G M, LUO H L, et al. Evaluation of LID facilities in industrial parks based on SWMM model [J]. Construction technology, 2025, 54(4): 151-156, 166.

(上接第7页)

- [8] 高云.混凝土叠合板叠合面抗剪承载力研究[D].济南:山东大学,2016.
GAO Y. Interface shear strength of composite slab[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [9] 刘立新,于春,栾文彬,等.预制混凝土叠合板的无筋叠合面抗剪性能试验研究[J].建筑施工,2013,35(1):80-82.
LIU L X, YU C, LUAN W B, et al. Test study on shear-resisting performance of precast concrete composite slab with unreinforced composite surface [J]. Building construction, 2013, 35(1): 80-82.
- [10] 周剑.预制混凝土空心模剪力墙应用技术研究[D].北京:清华大学,2015.
ZHOU J. Study on application technology of precast concrete hollow formwork shear wall [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [11] 陈富强,田唯,刘占国,等.匹配浇筑混凝土接触面摩擦系数试验研究[J].中国港湾建设,2014,34(12):34-38.
CHEN F Q, TIAN W, LIU Z G, et al. Experimental study on friction coefficient of concrete with matching pouring surface[J]. China harbour engineering, 2014, 34(12): 34-38.