

文章编号:1673-2049(2018)04-0001-10

新型叠合板拼缝构造静载试验

吴方伯¹,付伟¹,文俊¹,欧阳靖¹,周绪红^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400044)

摘要:采用蛇形钢筋研究叠合板拼缝的受力性能,并且与钢筋网片进行对比分析,综合评价蛇形钢筋的抗裂性能并判断是否能取代传统的钢筋网片;进行了叠合板带两点静力加载试验研究,通过此次试验形成了新型叠合板带拼缝抗裂系列试验;通过对比荷载-挠度曲线,分析了构件刚度变化过程和挠度发展过程,记录了裂缝出现和开展过程;分析了蛇形钢筋的受弯变形图,得出了蛇形钢筋在受弯变形后对混凝土产生的挤压力,并给出了构造措施的设计建议。结果表明:在配筋率降低的条件下,PK-S叠合板带整体刚度较强,荷载-挠度曲线屈服段较长,延性没有发生退化;裂缝发展缓慢,蛇形钢筋对裂缝开展有明显抑制作用,裂缝和对比组叠合板相差不多,甚至裂缝数量多于对比组叠合板,蛇形钢筋的抗裂效果优于钢筋网片;折角范围取为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,经过加工时最好在 60° 左右,可得出姿态良好的蛇形钢筋。

关键词:叠合板;蛇形钢筋;裂缝;挠度;静载试验;构造建议

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Static Load Experiment of New Type of Laminated Plate Joint Structure

WU Fang-bo¹, FU Wei¹, WEN Jun¹, OUYANG Jing¹, ZHOU Xu-hong^{1,2}

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

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The serpentine reinforcement was used to study the mechanical properties of laminated plate joint, and was compared with the steel mesh. The crack resistance of serpentine reinforcement was determined and comprehensively evaluated whether it could replace the traditional form of steel mesh. A two-point static loading test was carried out on the laminated plate. Through the test, a series of experiments of new type of laminated plate joint crack resistance were formed. By comparing the load-deflection curves, the stiffness change process and the deflection development process were analyzed, and the occurrence and development of cracks were recorded. The bending deformation diagram of serpentine reinforcement was analyzed. The extrusion pressure of serpentine reinforcement on the concrete after bending deformation was obtained, and the design suggestion of the construction measures was given. The results show that under the condition of lower reinforcement ratio, the overall stiffness of laminated slab PK-S is strong, the yield segment of load-deflection curve is longer, and the ductility does not degenerate. The development of cracks is slow, and the serpentine reinforcement has obvious inhibition on the development of cracks. There is not much difference between the cracks in the serpentine reinforced laminated slab and the contrast group, even the number of cracks is larger

收稿日期:2017-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(904201203)

作者简介:吴方伯(1954-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,E-mail:wfbprof@163.com。

than that in the contrast group. The anti cracking effect of serpentine reinforcement is better than that of steel mesh. The angle range is 40° to 60° . After processing, it is best to reach about 60° , so that the serpentine reinforcement with good posture can be obtained.

Key words: laminated plate; serpentine reinforcement; crack; deflection; static load experiment; construction suggestion

0 引言

建筑工程的高速发展使得新技术、新材料、新构造措施不断涌现,设计及施工的便利性大大提高,有效地节约了成本,提高了效率,国内外学者^[1-3]对叠合结构进行了大量研究。在中国可持续发展的政策要求下必须进行节能减排,绿色建筑的概念被提了出来,混凝土预制构件符合绿色建筑发展方向^[4-5]。新型预应力双向叠合楼板^[6-8]兼具受力性能的可靠性和施工运输的便利性,在实际工程中得到了大量的推广和应用。新型预应力双向叠合板整体具有强度高、挠度小的优点,但在非预应力方向上的拼缝是叠合板的薄弱环节。为了提高叠合板拼缝处的传力性能,徐天爽等^[9]提出了一种整体式拼缝,在拼缝位置预留一定的宽度,使板侧构造钢筋有一定的搭接长度和弯起角度,提高了拼缝处的传力性能。吴方伯等^[10-13]开发了一种带格构钢筋的预制叠合底板,利用 1 根上部钢筋、2 根底部钢筋和 2 根折线形钢筋斜撑组成具有桁架模型的格构钢筋梁,在预制场浇筑形成预制底板。姜海锋^[14]做了全尺寸叠合式双向板抗裂性能的研究分析,通过整浇板、一拼缝板、两拼缝板的对比分析,得出叠合式双向板的抗裂性能略低于整浇板,而承载力要大于整浇板的结论。文献^[13],^[14]提出了一种拼缝钢筋的传力形式,传力效果更好,并且解决了整体式拼缝施工工艺复杂和裸露钢筋不易保护的缺点。本文在此基础上,提出一种新型拼缝构造措施即蛇形拼缝防裂钢筋。研究了其抗裂机理、开裂过程和抗弯性能,提出了蛇形钢筋的平面桁架受力原理,探究蛇形钢筋构造措施的具体实施方案,并且与之前试验组做了对比分析,形成新型叠合板拼缝系列试验研究。

1 试验概况

1.1 蛇形钢筋的构造优势

文献^[13]做了 3 组试验(对比组),包括底板无拼缝的整浇叠合板 PK-ZJ、底板有拼缝无防裂钢筋叠合板 PK-W、底板有拼缝有防裂钢筋网片叠合板 PK-Y。本文做了 1 组试验,即蛇形防裂钢筋叠合板

PK-S。这里取 PK-1,PK-3 作为对比组来验证蛇形防裂钢筋的构造优势,拼缝处防裂钢筋构造如图 1 所示。

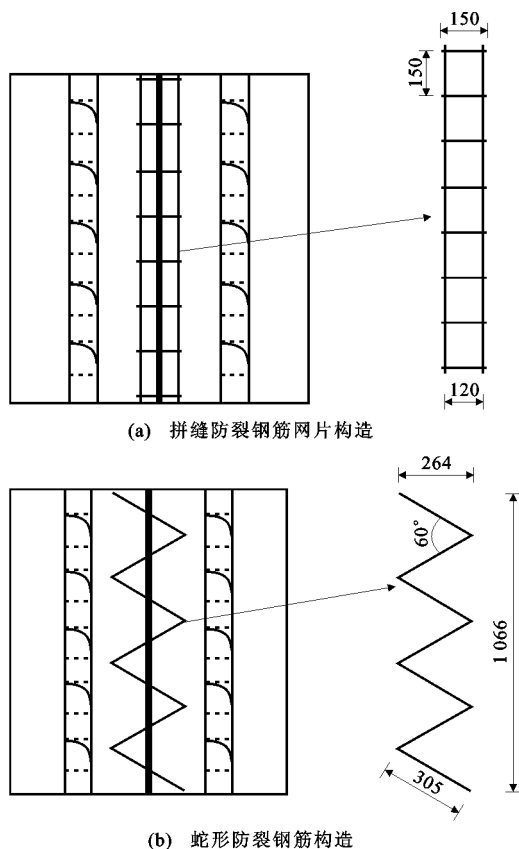


图 1 防裂钢筋构造(单位:mm)

Fig. 1 Anti-crack Reinforcement Structure (Unit:mm)

蛇形防裂钢筋的构造优势有:

(1)有端头弯钩锚固的优势,由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]可知,锚固长度比直钢筋更短,能满足受拉钢筋锚固长度要求。

(2)由 1 根钢筋弯折而成,配筋率更小,不需要防裂钢筋网片的绑扎,施工更方便。

(3)蛇形钢筋横向受拉形成平面桁架^[15]受力效果,能约束弯折三角区域的混凝土,对抑制裂缝的开展起到有利作用。

通过这次试验弥补了防裂钢筋网片构造缺陷,验证了蛇形钢筋具有优良的抗裂性能。确定蛇形钢筋的最佳构造形式,主要包括单折线的长度和两折

线的夹角,建议相应的最佳设计配筋率。

1.2 试件设计

本试验采用由 6 块预制小板块拼装而成的一个叠合板带(PK-S),延续了系列试验的编号方式。在拼缝处设置蛇形防裂钢筋,再放置横向穿孔钢筋,后浇混凝土形成一次受力叠合板带。预制小板块的基本情况为:单板尺寸为 1 090 mm×490 mm,板块混凝土强度等级为 C50,后浇层混凝土为 C30,板肋上开孔,尺寸为 110 mm×25 mm。叠合面采用自然粗糙面。试件设计详图如图 2~4 所示。

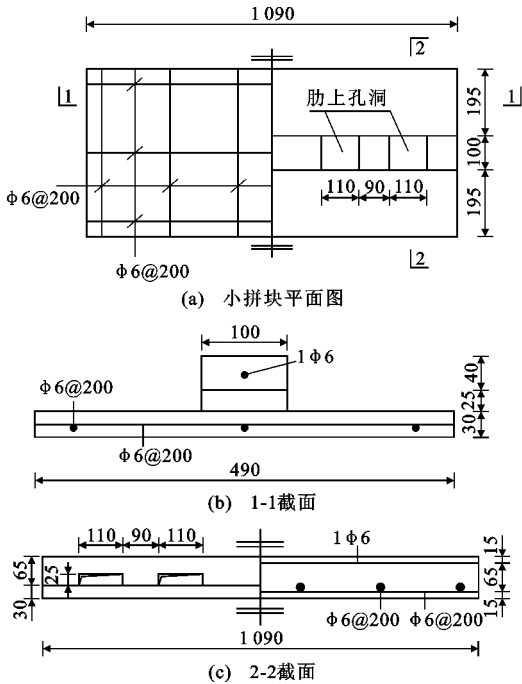


图 2 预制底板设计详图(单位:mm)

Fig. 2 Design Details of Prefabricated Floor (Unit:mm)

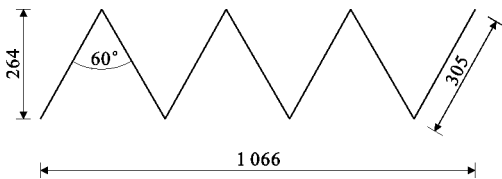


图 3 蛇形拼缝防裂钢筋详图(单位:mm)

Fig. 3 Details of Anti-crack Reinforcement of Serpentine Joint (Unit:mm)

1.3 加载方案

试验采用两点对称集中加载的方式进行静力加载(图 5)。试验板块长度为 2 990 mm,板端支座距次级支座的距离为 700 mm,拼缝位置避免直接受力,主要研究 1 300 mm 纯弯段内叠合板受弯性能。加载工具为反力架、刚性支墩、分载梁、分配梁、手摇式 16 t 螺旋千斤顶和 30 t 力传感器。加载制度按

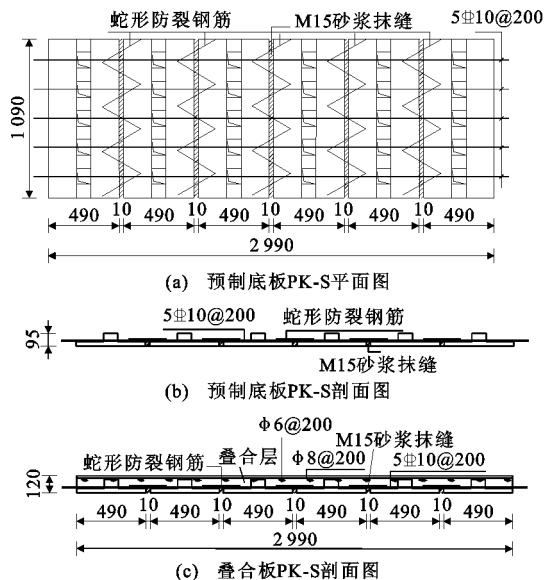


图 4 叠合板设计详图(单位:mm)

Fig. 4 Design Details of Laminated Plate (Unit:mm)

《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[16]规定进行加载,开裂前每级取开裂荷载计算值的 20%,预计叠合板拼缝处开裂较早,故每级加载 1 kN 左右,开裂后每级荷载取使用荷载(极限荷载的 2/3)的 20%进行加载,待加载到极限荷载的 2/3 时,由于塑性的发展,加载缓慢,每级取极限荷载的 10%。当外加荷载达到极限荷载的 90%以后,每级荷载取使用荷载的 5%,直至试验构件破坏。每级荷载加载完成以后,需要持荷 15 min 以上,待百分表和应变箱读数稳定后记录数据。加载装置和现场如图 5,6 所示。

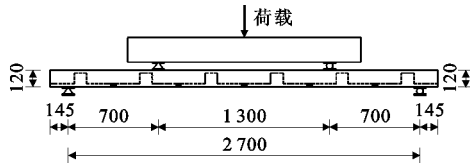


图 5 加载示意(单位:mm)

Fig. 5 Loading Schematic Diagram (Unit:mm)

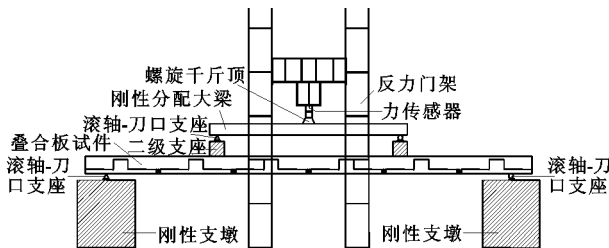


图 6 加载装置

Fig. 6 Loading Device



图 7 加载现场
Fig. 7 Loading Site

1.4 材性试验

1.4.1 钢筋材性试验结果

本试验对受拉钢筋进行拉伸试验,包括穿孔钢筋和蛇形拼缝防裂钢筋。采用 WAWE600-E 计算机控制电液伺服万能试验机进行钢筋材性测试,结果如表 1,2 所示。

表 1 钢筋力学性能

Tab.1 Mechanical Properties of Reinforcement					
钢筋型号	钢筋直径/mm	屈服荷载/kN	屈服强度/MPa	峰值荷载/kN	极限强度/MPa
HRB400	6	11.59	410	15.16	536
HRB400	10	34.52	440	40.00	643

表 2 钢筋变形性能

Tab.2 Deformation Properties of Reinforcement				
钢筋型号	钢筋直径 <i>d</i> /mm	断裂前测点 间距	断裂后测点 间距	钢筋伸长 率/%
HRB400	6	5 <i>d</i>	11.5 <i>d</i>	25
HRB400	10	5 <i>d</i>	12.3 <i>d</i>	30

1.4.2 混凝土材性试验结果

叠合底板混凝土强度等级取为 C50,叠合层混凝土强度等级取为 C30。每个等级混凝土浇筑时在现场预留 3 个标准立方体试块,试块尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,并在实验室同条件下养护 28 d。测试结果如表 3 所示。

表 3 混凝土力学性能

Tab.3 Mechanical Properties of Concrete				
混凝土等级	强度实测值/MPa			强度均值/ MPa
	试块 1	试块 2	试块 3	
C50	42.5	46.9	48.2	45.9
C30	31.0	32.5	33.1	32.2

1.5 测量方案

1.5.1 挠度测试方法

在支座处的百分表用以测量支座沉降,板底的百分表用以测量板挠度随荷载的发展和挠度随跨度的分布折线图。荷载-挠度曲线斜率变化反映了叠

合板刚度的退化和延性的发展,挠度-跨度分布折线图饱满程度反映了沿板长度荷载分布集中程度和柔性变形性能,位移测点分布如图 8 所示。

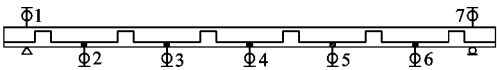
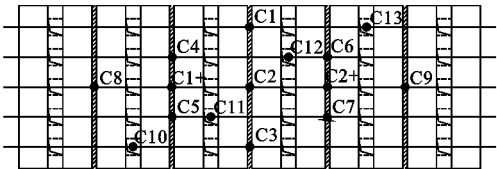


图 8 位移测点布置

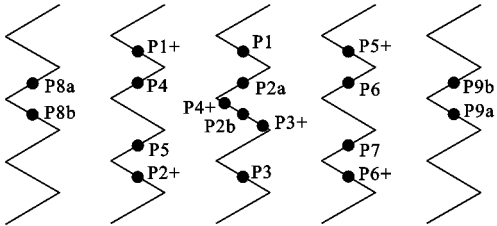
Fig. 8 Layout of Displacement Measuring Points

1.5.2 混凝土及钢筋应变测量方法

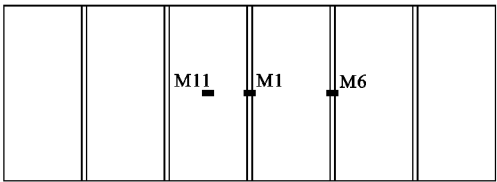
混凝土及受力钢筋在加载过程中的受力状态通过在相应部位粘贴应变片来测量,外接 DTS 静态应变测试仪和计算机收集应变数据,测点布置如图 9 所示,多出的测点考虑了应变片可能失效的问题。



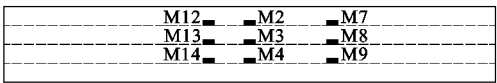
(a) 穿孔钢筋应变片分布



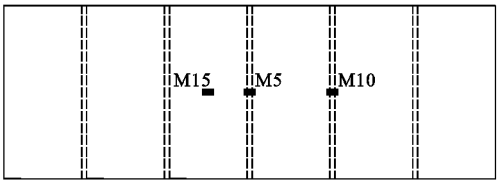
(b) 蛇形拼缝钢筋测点布置



(c) 板顶混凝土应变片布置



(d) 板侧混凝土应变片布置



(e) 板底混凝土应变片布置

图 9 钢筋及混凝土应变测点布置

Fig. 9 Arrangement of Strain Measurement Points for Reinforcement and Concrete

1.5.3 裂缝观察

在板侧及板底刷大白,表面分区格,以观测裂缝的发展趋势。用放大镜仔细观察板侧面受力主筋处是否出现裂缝,并记录该级荷载为开裂荷载 F_{cr} ,开

裂后用记号笔描绘裂缝分布和裂缝发展。用裂缝测宽仪探测裂缝的宽度,确定是否达到破坏标志。

2 试验结果

2.1 试验现象和破坏过程

PK-S板带由6块预制小板组成,叠合层为C30的现浇混凝土。拼缝处砂浆抹缝,由于板带就位后自重和试验设备的自重荷载接近1.5 kN,板底纯弯段的砂浆早已开裂,裂缝宽度肉眼可见,不能测量。加载采用缓慢加载方式,由于砂浆抗裂性能很差,当荷载加载到5 kN时,实际总荷载为6.5 kN,跨中拼缝截面处砂浆裂缝延伸至叠合层10 mm位置处,穿越了穿孔钢筋,故将该级荷载定义为开裂荷载。拼缝处截面有效高度为板厚减去底板,刚度有所削弱,纯弯段内3条拼缝处首先开裂。随着荷载的增加,纯弯段内拼缝向板顶发展,但宽度并没有变化,裂缝测宽仪不能测出宽度。待外荷载在14 kN(实际为15.5 kN)以后,跨中拼缝左侧拼块板中间位置处出现新裂缝,同时此处穿孔钢筋应力突增。跨中拼缝处裂缝宽度稍有增加,裂缝宽度为0.07 mm,依然很小,裂缝发展至板顶20 mm处。挠度继续发展,待荷载为34 kN(实际为35.5 kN)时,穿孔钢筋大部分已经屈服,挠度发展迅速,预制板底裂缝宽度发展很快,裂缝出齐,距离板顶30 mm以内不再有新裂缝出现,最终荷载为47.6 kN时,纯弯段裂缝宽度大于1.0 mm,跨中拼缝截面处最大裂缝宽度达到1.5 mm,挠度达到57.2 mm,超过了破坏标志挠度($L/50$, L 为受弯构件计算跨度),裂缝宽度和挠度同时达到破坏标志,至此宣告构件PK-S破坏。图10为最终破坏照片。



图10 最终破坏照片

Fig. 10 Photograph of Ultimate Damage

2.2 荷载-跨中挠度对比及分析

图11为各试件的荷载-挠度曲线。由图11可以看出,PK-Y,PK-S荷载-挠度发展曲线趋势几乎一致:第1阶段为弹性阶段,荷载-挠度曲线呈直线发展;第2阶段为屈服阶段,各钢筋以及钢筋各点陆

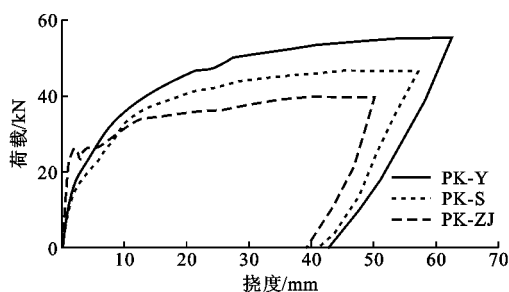


图11 荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-deflection Curves

续进入屈服状态,荷载增加变缓,但仍以较快速度增长;第3阶段为破坏阶段,钢筋屈服,挠度发展很快,并最终破坏。

弹性阶段由于PK-ZJ叠合板底板为一块带肋整板,后浇混凝土叠合成为整板,曲线斜率最大,前期刚度最高。PK-Y,PK-S底板为6块预制小板拼接而成,板与板之间存在拼缝,有一定程度的刚度削弱,故曲线斜率小于整浇板块PK-ZJ。PK-S前期刚度略小于PK-Y,由于预制底板养护期间距离构件场较远,没有及时浇水养护,强度略有下降,可见底板混凝土强度是影响叠合板前期刚度的因素之一。

PK-S,PK-Y叠合板带的开裂荷载几乎相同,在5~6 kN(无自重)之间,位置都在各板块跨中拼缝处,开裂即延伸到距离板底40 mm处。PK-ZJ叠合板带开裂荷载为26 kN,相对较高。可见在拼缝位置配置抗裂钢筋并不能增加开裂荷载,开裂荷载主要由叠合层受拉混凝土强度决定。

屈服阶段开裂荷载发展到最大荷载的80%。开裂后,混凝土退出工作,中和轴上升,主要由钢筋承担拉力。曲线逐渐偏向挠度一侧,斜率变小,叠合板刚度不断减小,PK-ZJ叠合板开裂后不久便屈服,刚度衰减剧烈,很快出现水平台阶,而PK-S,PK-Y叠合板块由于存在拼缝防裂钢筋,刚度衰减缓慢,荷载随着挠度不断增长,并且均能超过PK-ZJ,说明带拼缝板带有较好的柔性,钢筋陆续屈服能保证板带受力更加均匀以增加开裂后刚度。

PK-S配置蛇形防裂钢筋,净纵向配筋量相对PK-Y减少了24.3%,故开裂后刚度小于PK-Y,但裂缝发展和构件延性两者相差无几,说明配筋量影响开裂后刚度和最终承载力。蛇形钢筋能够满足限制裂缝发展和增加构件柔度的需要。

破坏阶段为最大荷载的80%到出现破坏标志状态,裂缝宽度达到1.5 mm或者挠度达到 $L/50$ 。这个阶段挠度发展很快,荷载基本不再增加,构件快

速进入破坏状态。最终 PK-S 挠度为 57.2 mm, 裂缝宽度为 1.5 mm; PK-Y 最终挠度为 62.5 mm, 裂缝宽度为 1.6 mm; PK-ZJ 最终挠度为 50.5 mm, 裂缝宽度为 1.5 mm。PK-S 延性好于整浇板块 PK-ZJ, 配筋率更小的情况下和 PK-Y 相当, 说明蛇形抗裂钢筋有很好的传力和抗裂性能。

2.3 挠度沿跨度的变化

试件在底板拼缝位置处布置 5 个百分表, 用以测量挠度差和跨中挠度, 在支座位置布置百分表用以测量支座沉降。各测点挠度与跨中挠度比值的大小代表了曲线的丰满程度, 比值越大说明曲线越丰满, 板构件受力性能越好。分别取前期荷载 10 kN、使用荷载 20 kN、屈服荷载 35 kN 和极限荷载 47.6 kN 处挠度比值, 如表 4 所示。

表 4 挠度比
Tab. 4 Deflection Ratio

荷载/kN	S ₂ /S ₃	S ₃ /S ₄	S ₄ /S ₀	S ₁ /S ₅	S ₅ /S ₆
10.0	0.442	0.661	1	0.740	0.426
20.0	0.469	0.820	1	0.881	0.458
35.0	0.536	0.838	1	0.863	0.516
47.6	0.537	0.850	1	0.846	0.540

注: S₂~S₆ 分别为百分表 2~6 所测挠度; S₀ 为跨中挠度。

图 12 为跨度-挠度曲线。从图 12 可以看出, PK-S 叠合板在各荷载阶段都保持了较为丰满的形态, 相邻测点挠度比值也保持高位。在破坏阶段整个构件仍保持了较好的挠度姿态, 挠度发展曲线比较丰满, 挠度曲线并未退化为三角形, 说明挠度分布比较均匀, 没有出现集中的大变形脆性破坏形态, 穿孔钢筋各段受力充分, 材料受力性能得到充分利用。

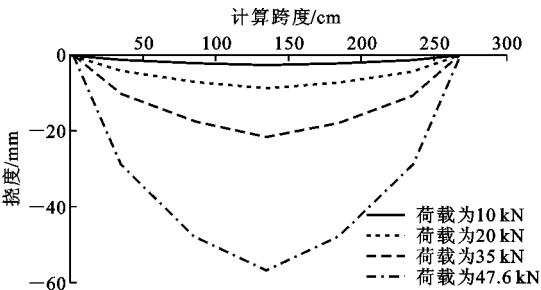


图 12 跨度-挠度曲线
Fig. 12 Span-deflection Curves

2.4 PK-S 混凝土的荷载-应变关系

叠合板 PK-S 开裂荷载前后, 构件刚度并未削弱很多, 沿截面高度混凝土应变基本呈线性关系, 预制小板开裂较晚, 故混凝土应变发展较慢, 跨中拼缝处的混凝土开裂较早, 但基本为弹性工作状态, 混凝土应变沿着截面高度符合平截面假定。

跨中拼缝处开裂较早, 因此混凝土应变发展较预制底板处快, 在 30 mm 板厚处混凝土应变有了一定的缩减, 可见蛇形防裂钢筋已经发挥了一部分作用。随着荷载的进一步增加, 拼缝处开裂混凝土陆续退出工作, 蛇形防裂钢筋应变突增, 跟随板挠度协调变形。图 13, 14 分别为荷载 1~9 kN 时预制底板和跨中拼缝混凝土应变沿高度变化, 图 15 为荷载 10~24 kN 时跨中拼缝混凝土应变沿高度变化。图 15 中距离底板 30 mm 处出现了明显的缩拢现象, 在荷载为 22, 24 kN 时, 60 mm 处混凝土应变超过了 30 mm 处混凝土应变, 出现了套箍现象, 说明蛇形拼缝抗裂钢筋对抑制裂缝宽度的发展起到了显著作用。

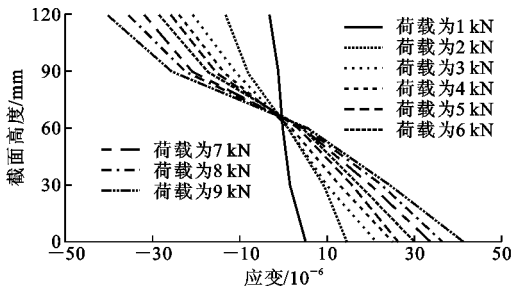


图 13 预制底板混凝土应变沿高度变化
Fig. 13 Changes of Concrete Strain Along Height of Precast Concrete Floor

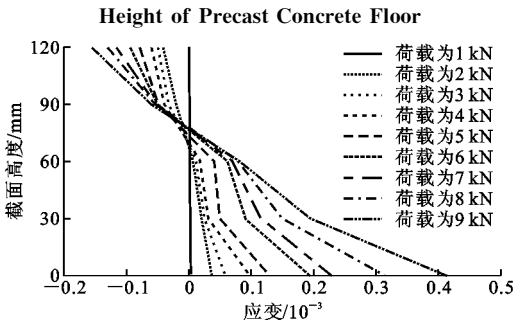


图 14 荷载为 1~9 kN 时跨中拼缝混凝土应变沿高度变化
Fig. 14 Changes of Concrete Strain of Mid-span Along Height when Load Is 1-9 kN

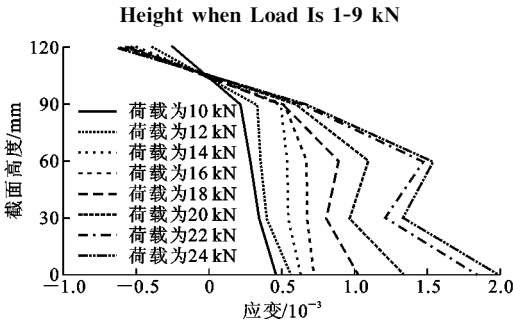


图 15 荷载为 10~24 kN 时跨中拼缝混凝土应变沿高度变化
Fig. 15 Changes of Concrete Strain of Mid-span Along Height when Load Is 10-24 kN

2.5 PK-S 钢筋的荷载-应变关系

PK-S 叠合板受力钢筋为 5 ￠10 的穿孔钢筋,蛇形拼缝防裂钢筋采用 ￠6 钢筋弯折而成,放在穿孔钢筋的下面,各级荷载钢筋应变采集结果如图 16~18 所示。

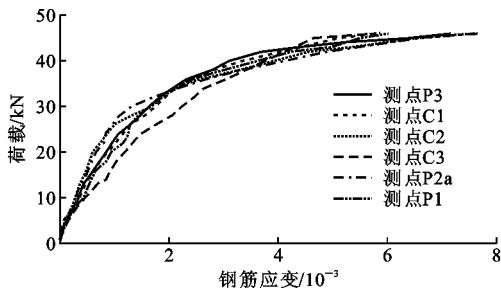


图 16 跨中钢筋荷载-应变曲线

Fig. 16 Load-strain Curves of Reinforcement at Mid-span

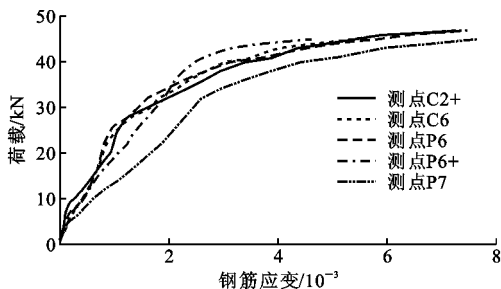


图 17 跨中右拼缝钢筋荷载-应变关系

Fig. 17 Load-strain Curves of Reinforcement at Right Joint of Mid-span

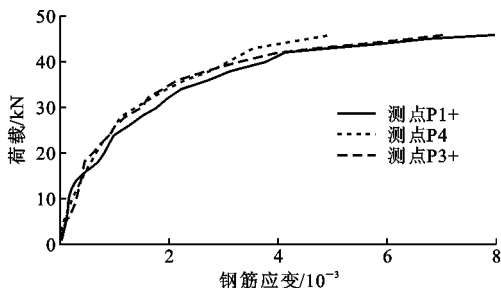


图 18 跨中左拼缝钢筋荷载-应变关系

Fig. 18 Load-strain Curves of Reinforcement at Left Joint of Mid-span

在自重以及设备自重作用下,纯弯段拼缝处 M15 砂浆早已开裂,在外加荷载加载到 5 kN(总荷载 6.5 kN)时,跨中拼缝处叠合层开裂,钢筋应变增加,斜率减小。荷载增加到 8 kN 以后,纯弯段其他 2 个拼缝截面开裂。此后,钢筋成为受拉主力,应变增长变快。荷载达到 34 kN(实际为 35.5 kN)以后,纯弯段大部分钢筋陆续进入屈服状态,钢筋应变超过 2×10^{-3} 。此后钢筋应变迅速增加,荷载增加缓慢,出现屈服台阶,应变发展很大,最终跨中挠度

达到 57.2 mm,超过 $L/50$,裂缝宽度超过 1.5 mm,达到 1.6 mm,构件进入破坏状态,此时拼缝处钢筋应变稳定在 $6 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$ 。大部分蛇形拼缝防裂钢筋应变超过穿孔钢筋应变,甚至超过了 1×10^{-3} ,说明蛇形拼缝防裂钢筋最早参与受拉,起到了充分的抗裂作用,将防裂钢筋放在穿孔下面起到了相对较好的防裂效果。

选取纯弯段 3 条拼缝处钢筋应变测点进行对比,如图 19 所示。纯弯段 3 条拼缝处大部分钢筋应变并无明显区别,发展过程曲线和最终稳定应变值都较为一致,与 PK-Y 叠合板有明显区别。蛇形拼缝防裂钢筋满足最小锚固要求,纵向投影长度为 265 mm,而拼缝防裂钢筋网片直锚长度不足,纵向长度为 150 mm。蛇形拼缝防裂钢筋在满足规范要求的锚固长度的同时,增加了非肋处叠合面的刚度,PK-S 叠合板纵向刚度分布更加均匀,各拼缝处钢筋应变差别不大。非拼缝处穿孔钢筋应变达到了 10.65×10^{-3} ,此处无拼缝钢筋,配筋率减小,开裂后钢筋应变不断增加,超过了拼缝处钢筋应变,故钢筋材料利用充分,挠度以及裂缝发展充分。

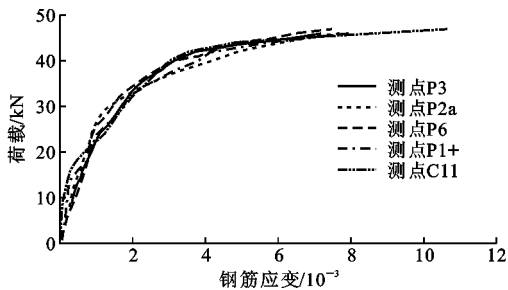


图 19 纯弯段不同钢筋荷载-应变曲线

Fig. 19 Load-strain Curves of Reinforcement at Pure Bend Section

3 PK-S 叠合板受弯性能分析

3.1 裂缝发展及对比分析

PK-S, PK-Y, PK-ZJ 叠合板裂缝分布如图 20 所示。PK-ZJ 底板为整浇板,整体刚度较高,裂缝出现较 PK-Y, PK-S 叠合板晚,跨中主裂缝一旦开裂就迅速向板顶发展,穿孔钢筋即屈服,裂缝宽度不断增加。PK-ZJ 叠合板裂缝数量明显少于 PK-Y, PK-S 叠合板,可见 PK-ZJ 叠合板挠度和应力发展过于集中,造成裂缝发展集中,最终裂缝宽度超过 1.5 mm 而破坏。有拼缝的叠合板由于叠合面刚度的削弱,开裂荷载较整浇板低,但开裂后裂缝宽度很小,一直到预制底板出现裂缝时跨中拼缝裂缝宽度小于 0.1 mm,故拼缝防裂钢筋能有效阻止混凝土应变的

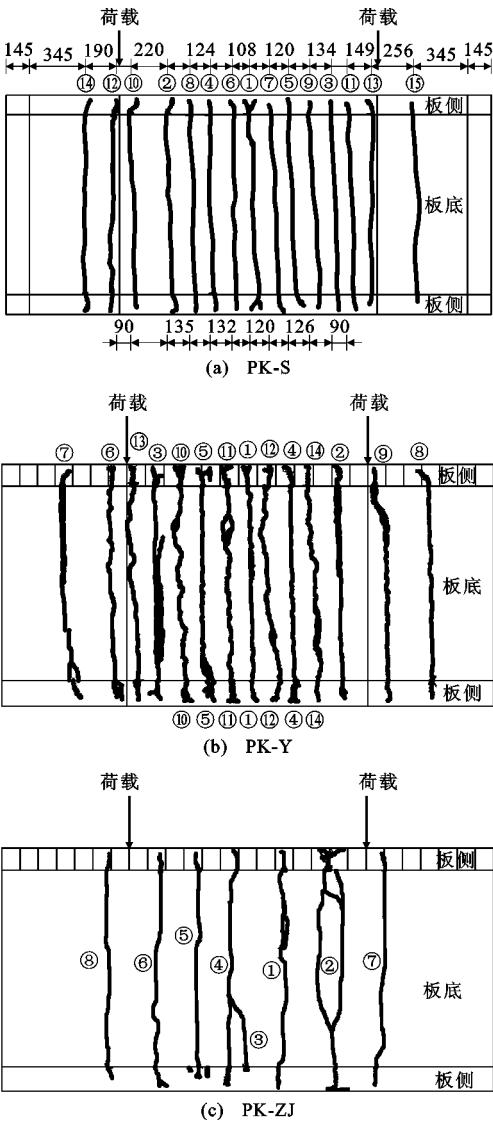


图 20 叠合板裂缝分布(单位:mm)

Fig. 20 Crack Distribution of Laminated Slab (Unit:mm)
发展,在钢筋屈服之前裂缝宽度一直没有突变式增长。

随着荷载的增加,PK-S 叠合板纯弯段内其他 2 条拼缝处裂缝②,③首先开裂,荷载 15 kN 以后,纯弯段跨中拼缝两侧预制底板中间位置出现裂缝④,⑤,此时跨中裂缝宽度为 0.07 mm。随后裂缝交替出现,在 20 kN 时,纯弯段外拼缝裂缝⑭,⑮出现,此时跨中裂缝宽度为 0.1 mm,由于此时荷载已经较大,裂缝出现即向板顶发展。荷载 30 kN 以后,裂缝数量不再增加,最终稳定在 15 条,纯弯段内共 12 条裂缝,其中②~⑨号裂缝宽度均发展到 1 mm 以上,裂缝分布更加均匀,裂缝出齐,距离板顶均在 30 mm 以内。2 条裂缝之间钢筋传递的黏结力小于混凝土抗拉强度,没有新裂缝出现,裂缝平均间距不再变化,板纵向裂缝数量已经饱和。荷载 35 kN 以

后,大部分钢筋包括蛇形钢筋已经屈服,板底和板侧混凝土应变增加迅速,裂缝宽度发展较快,荷载增加缓慢,最终在裂缝宽度为 1.6 mm 和挠度为 47.9 mm 时破坏,由于配筋率减小,最终承载力为 47.6 kN,要低于带有拼缝防裂钢筋网片的叠合板 PK-Y。

PK-S 叠合板蛇形拼缝钢筋配筋量为 171 mm², PK-Y 叠合板防裂钢筋网片配筋量为 226 mm²,配筋量对比如表 5 所示。从 2 种实际配筋量来说,蛇形拼缝防裂钢筋的配筋量为防裂钢筋网片的 75.7%,PK-S 和 PK-Y 的静载试验结果显示 PK-S 裂缝数量多于 PK-Y,说明蛇形拼缝防裂钢筋抗裂效果优于钢筋网片,PK-S 加强区域大于 PK-Y,增加了叠合板叠合面整体刚度,裂缝宽度也更加平均,最终破坏时纯弯段拼缝裂缝宽度和预制底板主裂缝宽度几乎都在 1.5 mm 左右,预制底板次生裂缝宽度要小于 1.5 mm,但也都大于 1 mm,与 PK-Y 叠合板破坏形态几乎相同,再次说明蛇形拼缝防裂钢筋抗裂性能优于防裂钢筋网片。

表 5 拼缝防裂钢筋配筋量对比
Tab.5 Comparison of Reinforcement Amount of Anti-crack Reinforcement of Joint

钢筋类型	蛇形钢筋	钢筋网片	受拉主筋
配筋量/mm ²	171	226	393
与主筋配筋量比值	0.435	0.575	1.000

3.2 承载力对比分析

拼接叠合板不同于整浇板,预制板块之间存在拼缝,成为受弯构件的薄弱部位,采取拼缝钢筋进行加强措施后,显著提高了拼接叠合板的抗弯承载力,改善了受弯构件的裂缝、挠度等受弯性能。拼缝处叠合面开裂后,预制底板与叠合面随着挠度的增加有相互远离的趋势,称为叠合面的剪切破坏,一般叠合板采用规范构造措施来增加叠合面之间的抗剪承载力,采用凹槽或者人工凿毛,桁架叠合板采用钢筋桁架充当剪力键来增加叠合板叠合面的抗剪承载力。带肋叠合板通过突肋、肋孔和穿孔钢筋形成连锁咬合效应,采用自然粗糙面即可保证有足够的叠合面抗剪承载力,从而省去了繁琐的构造工序。PK-S 叠合板到破坏时都没有出现沿着叠合面的水平裂缝,加强区域更大的蛇形钢筋同时也为叠合面的抗剪提供了有利作用。

拼缝抗裂钢筋提高了拼缝处弯矩的传力性能,增加了拼接板块之间的整体性,从而提高了整个板块的刚度。从试验结果来看,拼缝防裂钢筋并不能增加带有拼缝叠合板的开裂荷载,而是通过配筋加

强来减小裂缝间距和限制开裂后裂缝宽度的发展,蛇形拼缝防裂钢筋满足规范要求的抗拉钢筋锚固条件,配筋率更小,加强区域更大,通过加强与叠合面混凝土的黏结锚固来延缓裂缝的开展,跨中拼缝处裂缝宽度发展缓慢直到加强钢筋开始屈服。叠合板开裂荷载的计算遵从《混凝土结构设计规范》,计算过程中由于砂浆抗裂性能很差,忽略砂浆对开裂荷载的贡献作用,计算厚度取板厚减去预制底板厚度。开裂弯矩 M_{cr} 计算公式为

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

(1)

式中: σ_{pc} 为预应力钢筋应力,由于叠合层无预应力钢筋,故取 $\sigma_{pc}=0$; γ 为混凝土构件截面抵抗矩塑性影响系数,取 3.1; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值,按规范规定取为 1.43 MPa; W_0 为混凝土截面抵抗矩, $W_0=1\,471\,500\text{ mm}^3$ 。

极限弯矩同样按《混凝土结构设计规范》计算

$$f_y A_s = \alpha_1 f_c b x$$

(2)

式中: f_y 为受拉钢筋屈服强度; A_s 为受拉钢筋截面面积; α_1 为混凝土受压高度计算系数; f_c 为混凝土受压强度设计值; b 为混凝土截面宽度; x 为混凝土截面等效受压区高度。

对受拉钢筋取矩为

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

(3)

式中: h_0 为混凝土截面有效高度; M_u 为极限弯矩。

试件开裂荷载、极限荷载对比如表 6 所示。由表 6 可知,拼缝防裂钢筋对开裂荷载几乎没有影响,但是对极限荷载影响较大,实际是拼缝防裂钢筋增大了受弯钢筋的配筋率,防裂钢筋可以充分发挥其受拉作用,承载力分别增加了 34.8% 和 16.7%。

表 6 试件开裂荷载、极限荷载对比

Tab. 6 Comparison of Cracking Load and Ultimate Load

试件编号	开裂荷载/kN		极限荷载/kN	
	计算值	实测值	计算值	实测值
PK-ZJ	28.00	26.0	40	40.8
PK-Y	6.52	6.0	40	55.0
PK-S	6.52	6.5	40	47.6

3.3 蛇形拼缝防裂钢筋构造建议

蛇形拼缝防裂钢筋根据《混凝土结构设计规范》的规定,满足在跨度方向的锚固长度,保证钢筋受拉屈服时不会发生劈裂破坏或钢筋被拔出的脆性破坏,是蛇形钢筋实现防裂功能的重要基础。蛇形钢筋的构造形式在受拉过程中可以形成平面桁架的受力模型,受力空间简图如图 21 所示,受力模型简图如图 22 所示,其中 F 为钢筋弯折点受混凝土的挤

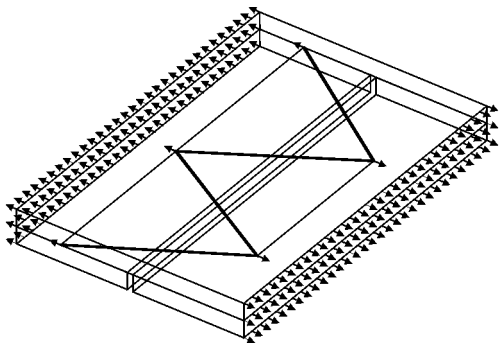


图 21 受力空间简图

Fig. 21 Diagram of Force Space

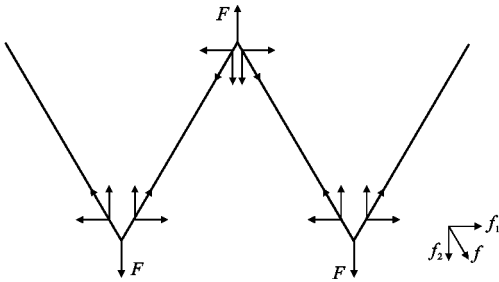


图 22 受力模型简图

Fig. 22 Diagram of Force Model

压力, f 为每根钢筋的拉力, f_1 为钢筋拉力的水平分量, f_2 为钢筋拉力的垂直分量。在此平面桁架模型中,蛇形钢筋充当腹杆,由于锚固充分,上下弦节点位置保持不变,三角形区受压混凝土充当腹杆。节点处受拉,节点受力平衡,蛇形钢筋受拉,对拉力进行分解,钢筋对混凝土形成压力,最终形成三角形区域的混凝土受压区。可见,在锚固长度一定的前提下,影响蛇形钢筋抗裂性能的主要因素在于折角的大小,决定了配筋率的大小,折角越小,配筋率越大,作用越接近于直锚钢筋,折角越大,配筋率越小,最终承载力会下降,因此需要一个最佳折角范围,根据试验结果,本文建议折角范围在 $40^\circ\sim 60^\circ$ 之间。既能保证承载力不会有太大降低,又能限制裂缝发展,充分发挥蛇形钢筋的构造优势。

4 结 语

- (1)加载前期,叠合板处于弹性阶段,荷载-挠度曲线呈直线上升,PK-S 和 PK-Y 刚度相比略小,混凝土底板强度对整体叠合板刚度有一定影响。
- (2)叠合板开裂荷载在 6~7 kN 之间,叠合层混凝土强度决定了开裂荷载,防裂钢筋并不能提高开裂荷载。
- (3)蛇形拼缝防裂钢筋配筋率比钢筋网片小了 24%,仍然能够限制裂缝发展,增加开裂后叠合板的

刚度,蛇形钢筋抗裂性能优于钢筋网片。

(4)PK-S 叠合板荷载-挠度曲线介于 PK-Y 和 PK-ZJ 叠合板之间,说明配筋率影响叠合板的最终承载力。

(5)PK-S 叠合板裂缝发展和 PK-Y 叠合板相当,裂缝数量甚至多于 PK-Y,最终裂缝宽度分布更加平均,说明蛇形防裂钢筋使叠合层刚度分布更加均匀。蛇形防裂钢筋桁架模型解释了其抗裂机理和优势,并提出构造建议。

参考文献:

References:

- [1] RYU H K, KIM Y J, CHANG S P. Crack Control of a Continuous Composite Two-girder Bridge with Prefabricated Slabs Under Static and Fatigue Loads[J]. Engineering Structures, 2008, 29(6): 851-864.
- [2] NIE J G, TANG L, CAI C S. Performance of Steel-concrete Composite Beams Under Combined Bending and Torsion[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(9): 1048-1057.
- [3] ACI-ASCE Committee 333. Tentative Recommendations for the Design of Composite Beams and Girder for Buildings[J]. ACI Journal, 1960, 57(6): 609-628.
- [4] 牛 犇. 绿色建筑开发管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
NIU Ben. Research on Development Management of Green Building[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [5] 刘春江. 绿色建筑评价技术与方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
LIU Chun-jiang. The Research of the Techniques and Methods of Green Building Assessment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [6] 陈赛国. 四边简支 PK 预应力叠合楼板试验与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
CHEN Sai-guo. Experiment and Analysis of PK Prestressed Concrete Composite Slab on Simple Support[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [7] 周鲲鹏. PK 预应力双向叠合楼板的试验研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
ZHOU Kun-peng. Experimental Study and Application of PK Prestressed Composite Two-way Slab[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [8] 吴方伯, 刘 彪, 邓利斌, 等. 预应力混凝土叠合空心楼板静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(12): 10-19.
WU Fang-bo, LIU Biao, DENG Li-bin, et al. Experimental Study on Static Behavior of Prestressed Concrete Composite Hollow Floors[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(12): 10-19.
- [9] 徐天爽, 徐有邻. 双向叠合板拼缝传力性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2003, 19(6): 11-14, 38.
XU Tian-shuang, XU You-lin. An Experimental Study on Transmission Properties of Joints Between Superposed Slabs[J]. Building Science, 2003, 19(6): 11-14, 38.
- [10] 吴方伯, 刘 彪, 李 钧, 等. 新型叠合板拼缝构造措施的试验研究及有限元分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(2): 50-56, 75.
WU Fang-bo, LIU Biao, LI Jun, et al. Experimental Study and Finite Element Analysis of Structural Measures for Joints Between New Type of Superposed Slabs[J]. Industrial Construction, 2015, 45(2): 50-56, 75.
- [11] 黄 璐. PK 混凝土拼接叠合板受力性能试验研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
HUANG Lu. Study of Load-bearing Properties of PK Non-prestressed Composite Slab[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [12] 叶献国, 华和贵, 徐天爽, 等. 叠合板拼接构造的试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 59-63.
YE Xian-guo, HUA He-gui, XU Tian-shuang, et al. Experimental Study on Connections of Superimposed Slabs[J]. Industrial Construction, 2010, 40(1): 59-63.
- [13] 刘运林, 叶献国, 种 迅, 等. 端拼缝叠合楼板受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(4): 85-89.
LIU Yun-lin, YE Xian-guo, CHONG Xun, et al. Experimental Study on Mechanical Performance of Composite Slab with End Joints[J]. Building Structure, 2015, 45(4): 85-89.
- [14] 姜海锋. 叠合式双向板抗裂性的试验研究与分析[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2014.
JIANG Hai-feng. Experimental Research and Analysis of Composite Floor Slab Crack[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2014.
- [15] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [16] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].