

文章编号:1673-2049(2019)06-0035-11

单向带抗剪键叠合板的力学性能及设计方法

李明,王浩然,赵唯坚

(沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:针对现有钢筋桁架叠合板钢筋用量多、成本偏高的不足,提出了一种新型带混凝土抗剪键的叠合板,并通过对1块现浇板和6块叠合板的静力加载试验,分析了有无抗剪键、抗剪键沿横向个数和抗剪键结构形式对叠合板力学性能的影响。采用有限元软件ABAQUS模拟了试验中部分试件的受力过程,验证了有限元模拟方法的可行性。结果表明:与无抗剪键叠合板相比,设置一定数量抗剪键的叠合板和现浇板力学性能相近;抗剪键个数越多,叠合板的极限承载力与现浇板越接近,其破坏特征也与现浇板基本相同;不同结构形式的抗剪键均能保证预制底板与现浇层间的有效连接;预制底板与现浇层的接触面间采用绑定接触时有限元模拟结果与试验结果更加接近;考虑到结构设计的可靠性,在有限元模拟过程中,当叠合板的预制底板与现浇层间设置为摩擦接触时,改变抗剪键沿横向个数、抗剪键沿纵向个数和抗剪键截面面积,叠合板的屈服荷载和屈服位移均发生变化,但当三者增加到一定程度时,变化趋势不再明显;改变现浇层混凝土强度等级、抗剪键混凝土强度等级和接触面摩擦因数,叠合板的屈服荷载和屈服位移基本未发生变化;建立了带抗剪键叠合板的抗弯承载力和屈服位移简化计算式。

关键词:叠合板;抗剪键;静载试验;力学性能;抗弯承载力;屈服位移;简化计算式

中图分类号:TU375.2

文献标志码:A

Mechanical Properties and Design Method of One-way Laminated Slab with Shear Keys

LI Ming, WANG Hao-ran, ZHAO Wei-jian

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: In view of the shortcomings of large amount of reinforcement and high cost for existing laminated slabs of reinforced truss, a new type of laminated slab with concrete shear keys was proposed. The effects of shear keys, number of shear keys along the transverse direction and structural forms of shear keys on the mechanical properties of laminated slabs were analyzed through static loading tests on one cast-in-place slab and six laminated slabs. In addition, the finite element software ABAQUS was used to simulate the stress process of some specimens in the test, which verified the feasibility of the finite element simulation method. Finally, the simplified calculation equations for the bending capacity and the yield displacement of the laminated slab with shear keys were established. The results show that the mechanical properties of the laminated slab with a certain number of shear keys are similar to those of the cast-in-place slab compared with the laminated slab without shear keys. The more the shear keys in number are put, the closer the ultimate bearing capacity of the laminated slab is to that of the cast-in-

收稿日期:2018-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51278312);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701402)

作者简介:李明(1979-),男,辽宁沈阳人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:297531635@qq.com。

place slab, and it has almost the same failure characteristics as the cast-in-place slab. The shear keys of different structural forms can ensure effective connection between the prefabricated base plate and the cast-in-place layer. When the tie contact is used between the prefabricated base plate and the cast-in-place layer, the finite element simulation results are closer to the test results. When the friction contact is used between the prefabricated base plate and the cast-in-place layer in the finite element simulation process considering the reliability of structural design, the change of the number of shear keys along the transverse direction and the longitudinal direction and the section area of shear keys enables the change of both the yielding load and the yielding displacement of the laminated slab. However, when the three increase to a certain extent, the change trend is no longer obvious. When the strength grade of cast-in-place layer concrete, the strength grade of shear key concrete and the friction coefficient of surface are changed, the yielding load of the laminated slab and the displacement are basically unchanged.

Key words: laminated slab; shear key; static load test; mechanical property; bending capacity; yield displacement; simplified calculation equation

0 引言

装配式混凝土结构具有施工方便、装配简单、绿色节能等优点,在实际工程应用中得到了快速推广^[1]。混凝土叠合楼板作为装配式混凝土结构重要的水平方向承重构件,以良好的整体性和连续性、灵活的布置尺寸以及高效的生产方法已成为装配式领域的关键研究对象之一。

国外的混凝土叠合结构始于 20 世纪 20 年代,最早出现在混凝土桥梁上^[2],直到 20 世纪 40 年代,才开始逐渐应用于房屋建筑当中,并在 20 世纪 50 年代后得到较快发展。波兰曾采用过一种 DMSZ 叠合楼面,即在预应力梁上填充砌块,再浇筑混凝土,使三者能够共同工作。与此类似,英国采用的“什塔而唐”叠合楼面在特制的黏土空心砌块中施加预应力,并在其上搁置混凝土空心块,最后浇筑混凝土。同一时期,英国也出现过一种“比藏”式预应力混凝土板^[3],这种板在施工时被用作底部模板,并通过“燕尾”型的沟槽来保证新旧混凝土结合。20 世纪 60 年代初期,苏联借鉴英国的“Myko”式楼面,不用沟槽,将预应力薄板作为底板,仅靠人工粗糙面来保证新旧混凝土共同工作^[4]。20 世纪 70 年代以后,德国和法国在采用预应力薄板作为底板的基础上,在底板内设置抗剪钢筋^[5],以增强楼板的整体性。到了 20 世纪 90 年代,日本采用了多种形式的 PC 叠合板构件并广泛应用于不同类型和使用功能的建筑结构当中^[6]。

中国于 20 世纪 50 年代开始使用叠合结构,主要以预应力棒、预应力薄板和空心小梁为主。到了

20 世纪 70 年代,在华东和华南等发达地区的城市,相继建设了一批采用装配整体式结构的房屋,为行业标准的制定提供了参考,一些设计方法也被列入规范中。进入 20 世纪 80 年代后,由于采用了预应力混凝土叠合楼板,叠合结构开始应用于高层建筑中。21 世纪以来,随着科学技术的进步和中国工业化的迅速发展,学者们对各种不同结构类型的叠合楼板开展了一系列深入研究:朱茂存等^[7]对预应力混凝土夹心叠合板进行了试验,并验算了该种板的承载力;李耀庄等^[8]研究了倒 T 形叠合连续板在二阶段浇筑混凝土共同工作时的可靠性,以及试件开裂和破坏的形态规律;郭乐工等^[9]通过理论分析与试验,提出了预应力混凝土薄板与叠合板抗弯极限承载力相关关系模式与计算方法;周绪红等^[10]对预应力混凝土双向叠合板进行了抗弯刚度分析,基于弹性薄板原理,按照正交各向异性板推导了四边简支单向预应力矩形板的相应计算公式;岳建伟等^[11]进行了单向带肋预应力叠合板的试验研究,深入讨论了该种板的力学性能和破坏机理;朱永明等^[12]研究了再生混凝土叠合板的受弯力学性能,通过试验得到了挠度和裂缝发展规律以及破坏特征;陈东等^[13]采用试验验证和数值模拟技术,对带桁架钢筋的足尺拼接双向自支承叠合板的破坏机理及桁架钢筋与叠合板的共同工作机理进行研究;吴方伯等^[14]对采用蛇形钢筋的叠合板进行了两点静力加载试验,并与传统钢筋网片叠合板进行对比,分析了蛇形钢筋的受弯变形图,并给出了构造措施的设计建议。

叠合板的预制底板通常在工厂制作完成,待运输到施工现场后再浇筑现浇层混凝土。为了避免因

混凝土二次浇筑导致预制底板与现浇层连接不紧密,二者的接触面应人工设置划痕或进行粗糙处理^[15-16]。然而,单位面积叠合板内划痕的数量和深度缺乏统一规定与标准,划痕数量过少,叠合板上下板间无法紧密连接,整体性差;划痕数量较多时,又可能导致叠合板的承载力下降。综合国内外的研究现状来看,在叠合板内设置填充物或刚性构件是解决此类问题的主要方法。目前,钢筋桁架叠合板在中国应用较多^[17-18],这种叠合板通过三角锥形状的钢筋桁架来连接预制底板和现浇层,成型后的叠合板刚度较大,能满足不同条件下的使用需求,但缺点是钢筋用量多,成本偏高。为此,课题组提出了一种新型叠合板^[19],即采用预制的混凝土抗剪键来代替钢筋桁架,以期达到减少钢筋用量,降低工程成本的目的。以此为基础,课题组针对不同类型的 7 块单向板进行了静力加载试验,并对试件的破坏形态、裂缝特征和抗弯承载力进行研究,以为该种板在实际工程中的设计和应用提供依据。

1 试验研究

1.1 试件设计与制作

课题组提出的新型叠合板构造见图 1。本次试验共制作了 7 块试件板,包括 1 块现浇板和 6 块叠合板。7 块试件板的长度均为 2 410 mm,宽度均为 1 220 mm,厚度均为 100 mm。其中,叠合板的预制底板与现浇层厚度相同,均为 50 mm。试验过程中,为研究不同因素对带抗剪键叠合板承载力的影响,将 7 块试件板分为 3 个对照组,分别为:是否布置抗剪键(SJB-1,SJB-3,SJB-5)、抗剪键沿横向个数(SJB-2,SJB-3,SJB-4,SJB-5)和抗剪键结构形式(SJB-3,SJB-6,SJB-7)。试件板的具体参数如表 1 所示。

叠合板在制作过程中,抗剪键先在特制的模具中浇筑成型,脱模后摆放在预制底板的钢筋网内,然后浇筑混凝土,待混凝土凝固后形成带抗剪键的预制底板。现浇板和叠合板的现浇层均一次浇筑成型。板内钢筋由底筋和支座负筋组成,钢筋的强度等级为 HRB335,钢筋直径为 8 mm,图 2 为 SJB-2 的叠合板内钢筋和抗剪键布置示意图。经实测,抗剪键的混凝土立方体抗压强度为 27.4 MPa,预制底板和现浇层的混凝土立方体强度分别为 21.9 MPa 和 24.8 MPa;钢筋的屈服强度为 355 MPa,极限强度为 470 MPa,弹性模量为 2.1×10^5 MPa。

1.2 加载装置与加载方案

图 3 为试验的现场加载装置。加载台的两侧分

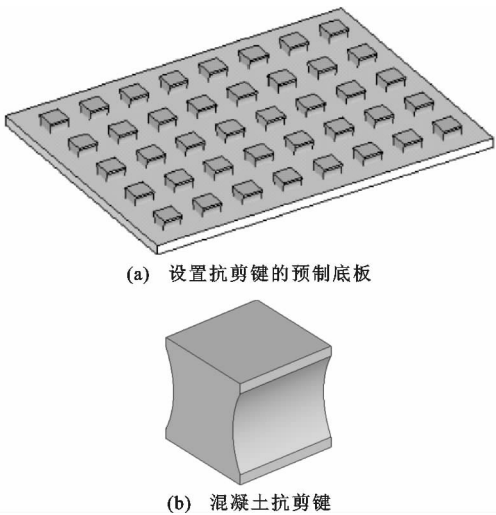


图 1 带抗剪键叠合板的构造形式

Fig. 1 Structural Form of Laminated Slab with Shear Keys

别放置实心钢圆柱和三角钢棱,并与试件通过钢垫板接触,从而模拟两端简支的受力情况。试验采用跨中四分点的加载方式,荷载分配梁上用液压千斤顶加载,荷载 P 的大小由压力传感器控制,逐级加载直至试件受弯破坏。试件板的跨中挠度 Δ 由事先布置在板底跨中和两侧四分点处的位移计测得,布置在四分点处的位移计可对跨中挠度进行修正。混凝土的裂缝由粘贴在板侧面的混凝土应变片监测,钢筋应变则通过粘贴在底板中点和四分点处的钢筋应变片测得。

1.3 试验结果与分析

1.3.1 裂缝特征和破坏形态

在静力荷载作用下,单向带抗剪键叠合板属于受弯构件,其裂缝特征与一般简支实体受弯构件的裂缝特征相似,即板底最先出现裂缝,并随荷载的增加向板侧面发展。图 4 为 7 块试件板在弯曲破坏后的板侧面裂缝分布示意图。由图 4 可以看出,带抗剪键叠合板的裂缝分布区域与现浇板基本一致。试验中可观测到,裂缝首先出现在弯矩较大的受拉区边缘,垂直向上穿过叠合面后向板顶发展,这一阶段的裂缝发展速度较快。随着荷载的增加,裂缝发展速度变缓,在纯弯区域形成若干条大致平行的主裂缝,且主裂缝分布较均匀。当达到屈服荷载时,主裂缝周围开始出现许多细小的斜向分叉裂缝。继续加载,裂缝宽度继续发展,裂缝数量基本不再发生变化,板跨中的最大挠度值达到板有效跨度的 $1/50$ 时达到承载力极限状态^[20]。此时,通过刻度放大镜测得 7 块试件板板底主筋处的最大裂缝宽度均已达到 1.5 mm。各试件板的极限承载力如表 2 所示。

表 1 试件板的主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Specimen Slabs

试件组别	试件编号	试件类别	有无抗剪键	抗剪键结构类型	混凝土强度等级			抗剪键间距/mm	
					抗剪键	预制底板	现浇层	沿横向	沿纵向
第 1 组	SJB-1	现浇板	无						
	SJB-3	叠合板	有	弧形	C30	C25	C25	350	200
	SJB-5	叠合板	无			C25	C25		
第 2 组	SJB-2	叠合板	有	弧形	C30	C25	C25	320	200
	SJB-3	叠合板	有	弧形	C30	C25	C25	350	200
	SJB-4	叠合板	有	弧形	C30	C25	C25	460	200
	SJB-5	叠合板	无			C25	C25		
第 3 组	SJB-3	叠合板	有	弧形	C30	C25	C25	350	200
	SJB-6	叠合板	有	正方体	C30	C25	C25	350	200
	SJB-7	叠合板	有	弧形内置钢筋笼	C30	C25	C25	350	200

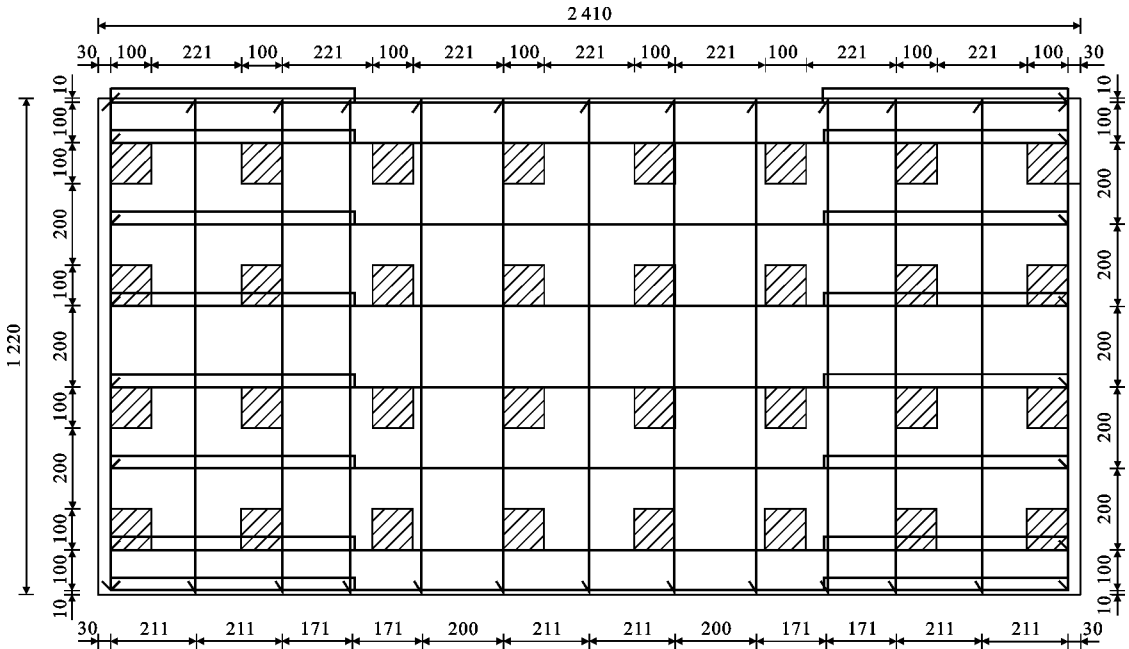


图 2 SJB-2 叠合板内钢筋和抗剪键布置 (单位: mm)

Fig. 2 Arrangement of Steel Bars and Shear Keys in Laminated Slab SJB-2 (Unit: mm)



图 3 试验加载装置

Fig. 3 Loading Equipment of Experiment

1.3.2 承载力对比分析

图 5~7 为 3 组试件板在四分点加载下的跨中荷载-挠度($P-\Delta$)曲线对比。由表 2 和图 5 可知,不设置抗剪键的叠合板 SJB-5 极限承载力较现浇板

SJB-1 低 11%;设置一定数量的抗剪键后,叠合板 SJB-3 的极限承载力明显增加,较现浇板 SJB-1 低 4%,同时较不设置抗剪键的叠合板 SJB-5 提高 7%。由图 6 可知,随着抗剪键个数的不断增加,叠合板的极限承载力也逐渐提高。对于设置 4 行 8 列抗剪键的叠合板 SJB-2,极限承载力仅比现浇板 SJB-1 低 3%,且二者的 $P-\Delta$ 曲线变化趋势基本一致。由此说明,设置抗剪键后的叠合板与同尺寸条件下的现浇板表现出相似的力学性能,抗剪键个数越多,叠合板的极限承载力与现浇板越接近,其破坏特征也与现浇板基本相同,因此可按照现浇板的计算方法,对带抗剪键叠合板的正截面受弯承载力进行计算。

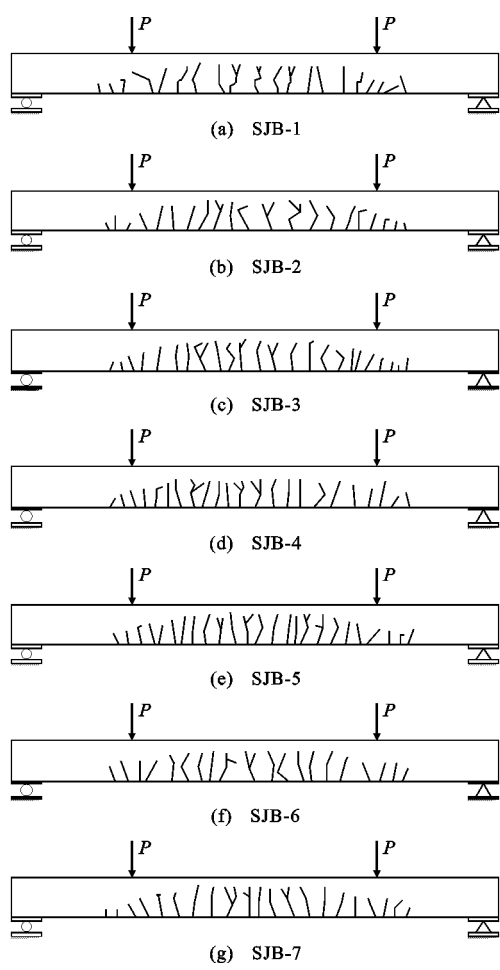


图 4 板侧面裂缝分布

Fig. 4 Crack Distribution at Side of Slabs

表 2 各试件板的极限荷载

Tab. 2 Ultimate Load of Each Specimen Slab

试件组别	试件编号	极限荷载/kN
第 1 组	SJB-1	32.4
	SJB-3	31.0
	SJB-5	28.9
第 2 组	SJB-2	31.6
	SJB-3	31.0
	SJB-4	29.7
	SJB-5	28.9
第 3 组	SJB-3	31.0
	SJB-6	31.3
	SJB-7	32.1

在第 2 组试件中,设置抗剪键的叠合板 SJB-2, SJB-3 和 SJB-4 极限承载力均高于不设置抗剪键的叠合板 SJB-5,且抗剪键沿横向个数越多,叠合板的极限承载力越大。叠合板 SJB-3 与 SJB-4 间极限承载力相差 4%,而 SJB-2 与 SJB-3 间极限承载力仅相

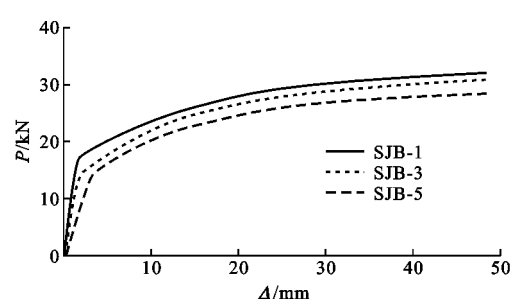


图 5 有无抗剪键的试件板 $P-\Delta$ 曲线对比

Fig. 5 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Specimen Slabs with or Without Shear Keys

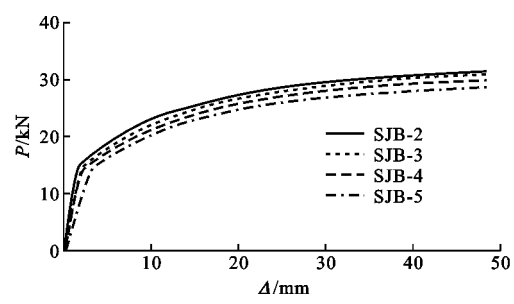


图 6 抗剪键沿横向个数不同的试件板 $P-\Delta$ 曲线对比

Fig. 6 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Specimen Slabs with Different Shear Key Number Along Transverse Direction

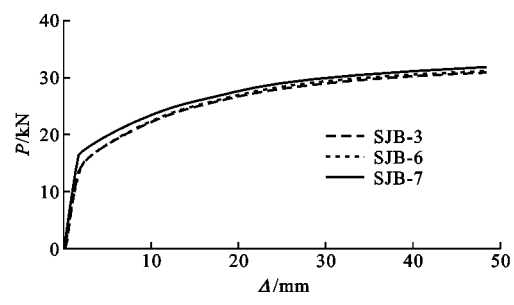


图 7 不同结构形式抗剪键的试件板 $P-\Delta$ 曲线对比

Fig. 7 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Specimen Slabs with Different Structural Form Shear Keys

差 2%。由此可以看出,增加抗剪键沿横向个数能够提高叠合板的承载力,但达到一定程度后,这种趋势不再明显。

由表 2 和图 7 可知,抗剪键结构类型不同的叠合板 SJB-3, SJB-6 和 SJB7 极限承载力相差不大。如设置弧形抗剪键的叠合板 SJB-3 与设置正方形抗剪键的叠合板 SJB-6 极限承载力仅相差 1%。这是因为在浇筑预制底板的混凝土时采用了自然振捣,即预制底板与现浇板接触面间的粗糙度较大,不同结构类型的抗剪键均能保证上下板间的有效连接,使其具有相似的力学性能。在这种情况下,正方形抗剪键制作相对方便,可在实际工程中优先使用。

2 有限元数值模拟分析

2.1 有限元模拟方法与验证

有限元软件采用 ABAQUS。建立模型时,混凝土采用损伤塑性本构,单元类型为 C3D8R;钢筋采用双折线模型,单元类型为 T3D2^[21]。为了保证模型的计算收敛,提高计算效率,钢筋与混凝土间采用 Embedded Region(嵌入区域)的方式,并忽略其黏结滑移;模型的边界条件与试验相同,支座两端一侧约束 X, Y 方向的位移,另一侧约束 Y 方向的位移;加载方式为静力加载,即将集中荷载以耦合分配的方式施加在模型的四分点位置处;整个计算过程采用 Full Newton(全牛顿迭代法)求解。

对于叠合构件,有限元模拟时可根据实际条件设置不同的接触方式。当预制构件与现浇混凝土间连接紧密,无明显的相对错动时,该条件下可将连接设置为 tie(绑定)接触;若预制构件与现浇混凝土间连接性较差,如存在光滑叠合面时,则应将连接设置为 Friction(摩擦)接触,并通过 Penalty(罚函数)来定义切向的摩擦因数,摩擦因数取值为 0.8^[22]。

为验证有限元模拟方法的准确性,分别采用绑定接触和摩擦接触计算了现浇板 SJB-1 和叠合板 SJB-2, SJB-6 及 SJB-7 共 4 块试件板的 $P-\Delta$ 曲线,并与试验曲线进行对比,结果如图 8 所示。由图 8 可以看出:2 种接触条件下模拟与试验的 $P-\Delta$ 曲线变化趋势基本一致,界面间设置为绑定接触时,模拟与试验最多相差不足 7%;设置为摩擦接触时,模拟与试验最多相差不足 20%。为进一步分析不同接触方式对叠合板力学性能的影响,提取了叠合板 SJB-2 在极限荷载状态下的板底混凝土应力云图和板底受拉钢筋应变云图,如图 9,10 所示。可以看出,在极限荷载状态下,采用不同的接触方式,板底混凝土第一主应力跨中部分均超出了混凝土的抗拉强度;同时,板底受拉钢筋的应变也均超过 0.01,表明此时叠合板已发生破坏。

对比不同接触方式下混凝土应力和钢筋应变值大小,采用摩擦接触比采用绑定接触大 10% 左右,说明采用摩擦接触的叠合板先发生破坏。尽管绑定接触条件下模拟与试验的 $P-\Delta$ 曲线更加吻合,但在叠合板浇筑现浇层混凝土时,可能会受到养护时间、人工误差等因素的限制,上下板的接触面间无法完全保证连接紧密,绑定接触偏不安全。为此,考虑到结构设计的可靠性,以下的有限元模拟过程中,接触面间均偏安全地设置为摩擦接触。

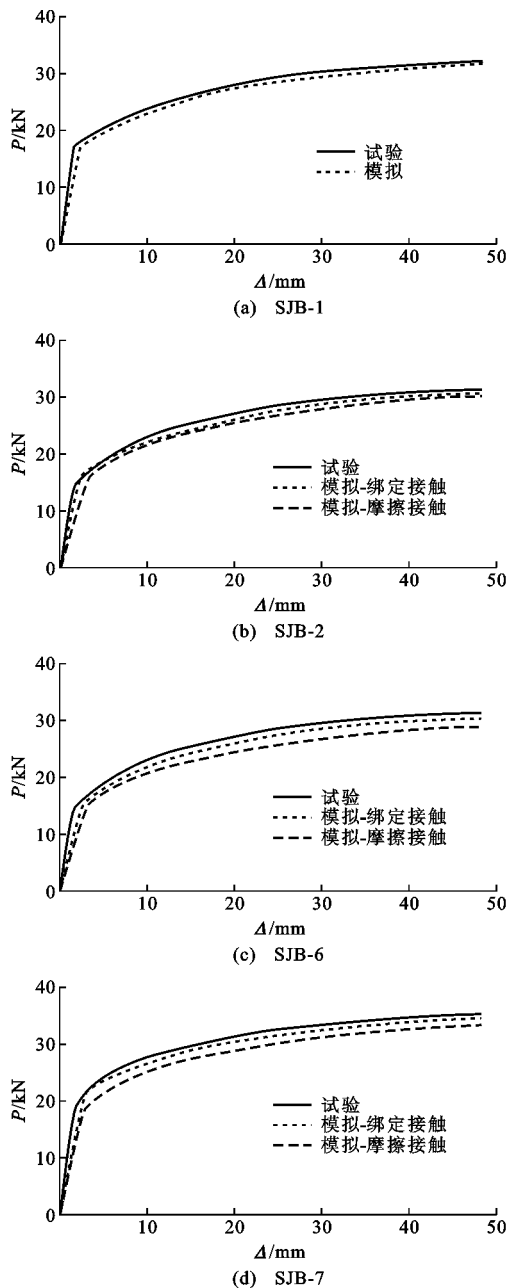


图 8 试件板的试验与模拟 $P-\Delta$ 曲线对比

Fig. 8 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Specimen Slabs Between Experiment and Simulation

2.2 影响叠合板力学性能的因素分析

试验过程中,第 2 组试件板内的抗剪键沿纵向个数相同,沿横向个数不同,结果表明其极限承载力有所差异,说明抗剪键沿纵向个数的变化对叠合板的力学性能存在影响。为进一步研究影响叠合板力学性能的主要因素,通过改变抗剪键沿纵向个数、抗剪键沿横向个数、抗剪键截面面积、现浇层混凝土强度等级、抗剪键混凝土强度等级、接触面摩擦因数 6 个因素,模拟了 DHB-0~DHB-17 共 18 块叠合板的受力过程,并计算了每块叠合板对应的屈服荷载和

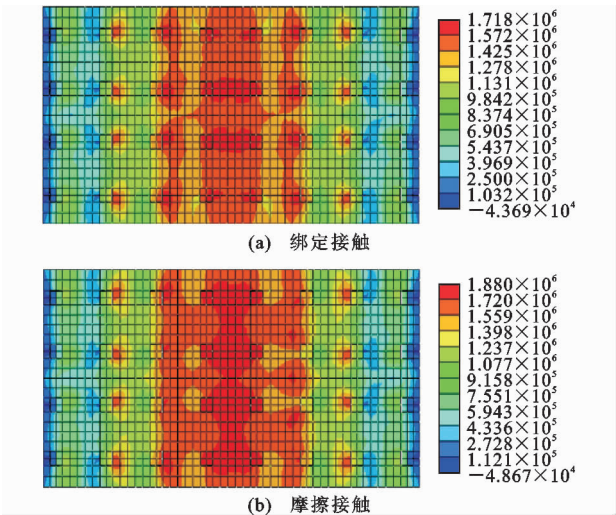


图 9 板底混凝土应力云图(单位:Pa)

Fig. 9 Stress Nephogram of Concrete at Bottom (Unit:Pa)

屈服位移。叠合板 DHB-0 为参照板,尺寸与试验中的试件板相同,抗剪键为正方形,截面尺寸为 80 mm×80 mm,预制底板现浇层混凝土强度等级为 C25,抗剪键混凝土强度等级为 C30,钢筋强度等级

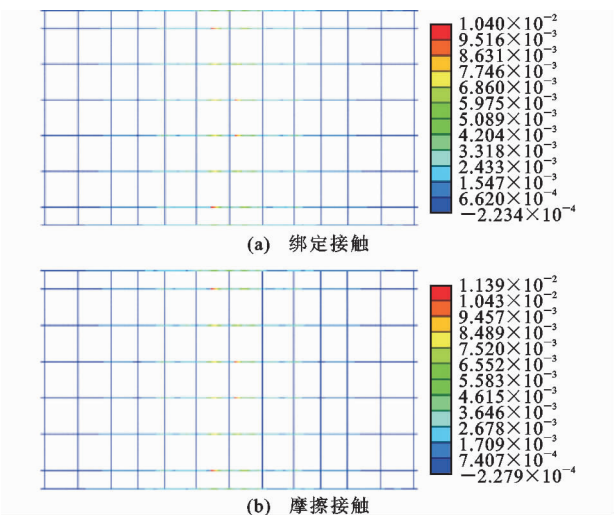


图 10 板底受拉钢筋应变云图

Fig. 10 Strain Nephogram of Tensile Reinforcement at Bottom

为 HRB335,直径为 8 mm,接触面摩擦系数为 0.8。其余 17 块叠合板均在 DHB-0 叠合板的基础上改变某一参数,所有叠合板的具体参数及每块板对应的屈服荷载和屈服位移见表 3。

表 3 改变不同参数的叠合板

Tab. 3 Laminated Slabs by Changing Different Parameters

试件编号	抗剪键个数		抗剪键间距/mm		抗剪键截面尺寸	混凝土强度等级		接触面摩擦系数	屈服荷载/ kN	屈服位移/ mm
	沿纵向	沿横向	沿纵向	沿横向		现浇层	抗剪键			
DHB-0	5	7	125	275	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	19.7	10.5
DHB-1	6	7	80	275	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	20.1	10.2
DHB-2	4	7	200	275	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	19.2	11.3
DHB-3	2	7	800	275	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	17.6	14.3
DHB-4	5	9	125	180	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	20.3	7.8
DHB-5	5	8	125	220	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	19.2	8.9
DHB-6	5	6	125	350	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	18.8	12.8
DHB-7	5	5	125	460	80 mm×80 mm	C25	C30	0.8	17.3	20.2
DHB-8	5	7	125	230	140 mm×140 mm	C25	C30	0.8	20.2	8.6
DHB-9	5	7	125	250	120 mm×120 mm	C25	C30	0.8	19.9	9.4
DHB-10	5	7	125	350	100 mm×100 mm	C25	C30	0.8	18.9	12.3
DHB-11	5	7	125	320	60 mm×60 mm	C25	C30	0.8	17.5	15.5
DHB-12	5	7	125	275	80 mm×80 mm	C20	C30	0.8	19.7	10.6
DHB-13	5	7	125	275	80 mm×80 mm	C30	C30	0.8	19.8	10.6
DHB-14	5	7	125	275	80 mm×80 mm	C25	C25	0.8	19.8	10.5
DHB-15	5	7	125	275	80 mm×80 mm	C25	C35	0.8	19.9	10.6
DHB-16	5	7	125	275	80 mm×80 mm	C25	C30	0.6	19.6	10.4
DHB-17	5	7	125	275	80 mm×80 mm	C25	C30	0.4	19.7	10.5

2.3 不同参数叠合板间的 P-Δ 曲线对比

图 11 为改变抗剪键沿纵向个数后,叠合板 DHB-0,DHB-1,DHB-2 和 DHB-3 的 P-Δ 曲线对比。由图 11 和表 3 可以看出,抗剪键沿纵向个数不

同的叠合板屈服荷载和屈服位移均不相同。抗剪键沿纵向个数越多,叠合板屈服荷载越大,屈服位移越小,但这种趋势随着抗剪键沿纵向个数增加到一定程度后不再明显,如 DHB-2 叠合板与 DHB-3 叠合

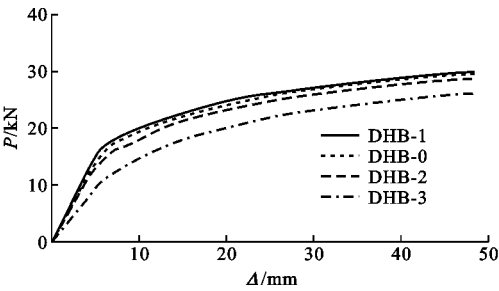


图 11 抗剪键沿纵向个数不同的叠合板 $P-\Delta$ 曲线对比
Fig. 11 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Laminated Slabs with Different Shear Key Number Along Vertical Direction

板间屈服荷载相差 9.2%，屈服位移相差 26.5%，而 DHB-1 叠合板与 DHB-0 叠合板间屈服荷载和屈服位移仅分别相差 1.6% 和 3.1%。出现这种现象的原因在于，在竖向荷载作用下，叠合板因上下板间相对错动会产生平行于板面方向的剪切力，当抗剪键沿纵向个数增加到一定程度时，作用在抗剪键上的剪切力逐渐达到最大值，继续增加抗剪键，叠合板的力学性能不再发生变化。

图 12 为改变抗剪键沿横向个数后，叠合板 DHB-0, DHB-4, DHB-5, DHB-6 和 DHB-7 的 $P-\Delta$ 曲线对比。由图 12 和表 3 可以看出，抗剪键沿横向个数不同的叠合板屈服荷载和屈服位移均不相同。抗剪键沿横向个数越多，叠合板屈服荷载越大，屈服位移越小，但这种趋势随着抗剪键沿横向个数增加到一定程度后不再明显，如 DHB-6 叠合板与 DHB-7 叠合板间屈服荷载相差 11.6%，屈服位移相差 57.8%，而 DHB-4 叠合板与 DHB-5 叠合板间屈服荷载和屈服位移仅分别相差 5.7% 和 14.1%。与抗剪键沿纵向个数相比，改变抗剪键沿横向个数，叠合板的屈服荷载和屈服位移变化更大。这是因为叠合板的横向为长边的受弯方向，弯矩值较大，在弯矩和剪切力的共同作用下，抗剪键抵御上下板间相对错动的程度更大，抗剪键的作用也就更加明显。

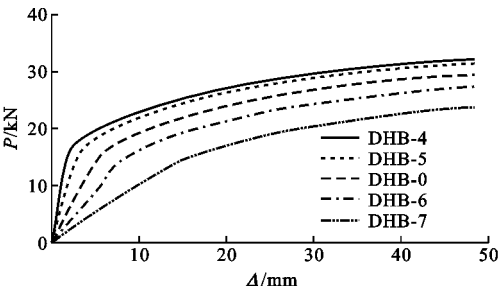


图 12 抗剪键沿横向个数不同的叠合板 $P-\Delta$ 曲线对比
Fig. 12 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Laminated Slabs with Different Shear Key Number Along Transverse Direction

图 13 为改变抗剪键截面面积后，叠合板 DHB-0, DHB-8, DHB-9, DHB-10 和 DHB-11 的 $P-\Delta$ 曲线对比。由图 13 和表 3 可以看出，抗剪键截面面积不同的叠合板，屈服荷载和屈服位移均不相同。抗剪键截面面积越大，叠合板屈服荷载越大，屈服位移越小，但这种趋势随着抗剪键截面面积增加到一定程度后不再明显，如 DHB-0 叠合板与 DHB-11 叠合板间屈服荷载相差 10.5%，屈服位移相差 32.2%，而 DHB-8 叠合板与 DHB-9 叠合板间屈服荷载和屈服位移仅分别相差 1.7% 和 4.3%。出现这种现象的原因在于，增加抗剪键截面面积，等效于增加了抗剪键的数量，从而表现出与改变抗剪键沿纵向或横向个数时相同的变化趋势。

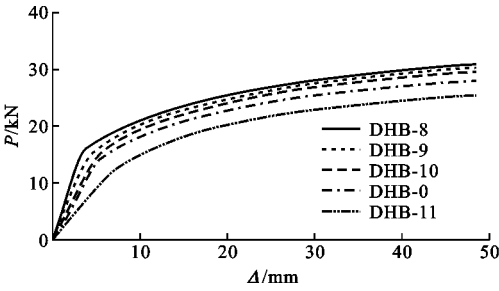


图 13 抗剪键截面面积不同的叠合板 $P-\Delta$ 曲线对比
Fig. 13 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Laminated Slabs with Different Shear Key Section Areas

图 14 为改变现浇层混凝土强度等级后，叠合板 DHB-0, DHB-12 和 DHB-13 的 $P-\Delta$ 曲线对比。由图 14 和表 3 可以看出，现浇层混凝土强度等级不同的叠合板， $P-\Delta$ 曲线呈重合状态，屈服荷载和屈服位移也基本相同。3 块叠合板间屈服荷载最大仅相差 1%，屈服位移最大仅相差 1.6%。因此，在浇筑现浇层混凝土时，其强度等级不低于预制底板即可。

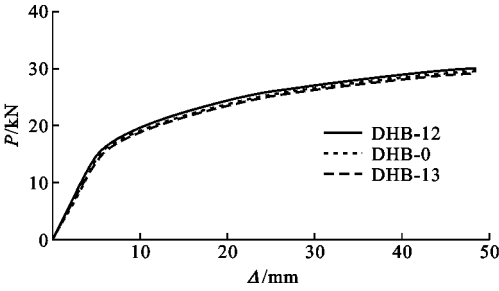


图 14 现浇层混凝土强度等级不同的叠合板 $P-\Delta$ 曲线对比
Fig. 14 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Laminated Slabs with Different Cast-in-place Concrete Strength Grades

图 15 为改变抗剪键混凝土强度等级后，叠合板 DHB-0, DHB-14 和 DHB-15 的 $P-\Delta$ 曲线对比。由图 15 和表 3 可以看出，抗剪键混凝土强度等级不同

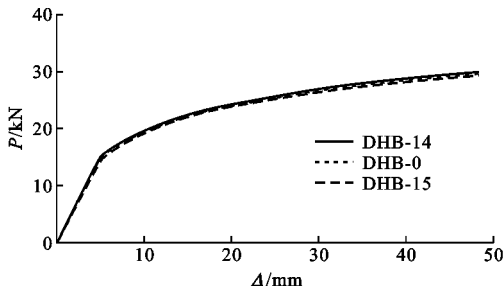


图 15 抗剪键混凝土强度等级不同的叠合板 $P-\Delta$ 曲线对比
Fig. 15 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Laminated Slabs with Different Shear Key Concrete Strength Grades

的叠合板 $P-\Delta$ 曲线呈重合状态,屈服荷载和屈服位移也基本相同。3 块叠合板间屈服荷载最大仅相差 1.3%,屈服位移最大仅相差 1.8%。因此,抗剪键可以采用与预制底板相同强度等级的混凝土制作。

图 16 为改变接触面摩擦因数后,叠合板 DHB0,DHB16 和 DHB17 的 $P-\Delta$ 曲线对比。由图 16 和表 3 可以看出,接触面摩擦因数不同的叠合板 $P-\Delta$ 曲线呈重合状态,屈服荷载和屈服位移也基本相同。3 块叠合板间屈服荷载最大仅相差 0.9%,屈服位移最大仅相差 1.2%。由此可以看出,设置一定数量的抗剪键后,改变接触面间的摩擦因数,叠合板的力学性能几乎没有变化。

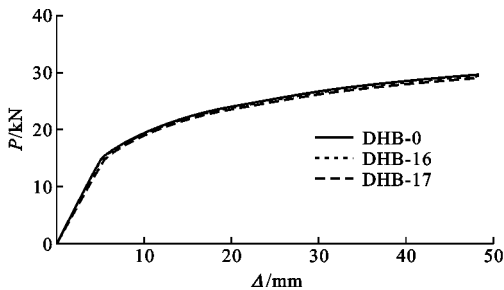


图 16 接触面摩擦因数不同的叠合板 $P-\Delta$ 曲线对比
Fig. 16 Comparison of $P-\Delta$ Curves of Laminated Slabs with Different Friction Coefficients of Surface

3 叠合板抗弯承载力及屈服位移简化计算式的回归与验证

3.1 简化计算式的回归

有限元方法不利于工程应用,为此,以下采用回归方法,回归叠合板抗弯承载力和对应挠度简化计算式。从上述分析可以看出,影响叠合板力学性能的因素主要包括抗剪键沿横向个数、抗剪键沿纵向个数和抗剪键截面面积。为便于回归分析,将这 3 个因素统一用抗剪键面积率 r 考虑,提出带抗剪键叠合板抗弯承载力 M_r 和屈服位移 f_r 的简化计算式

$$M_r=R_m M \tag{1}$$

$$f_r=R_f f \tag{2}$$

式中: r 为抗剪键截面面积之和与叠合板面积的比值; R_m 、 R_f 分别为抗弯承载力和屈服位移回归系数,需要通过回归确定; M 、 f 分别为现浇板的抗弯承载力和屈服位移。

根据式(1),在现浇板屈服弯矩已知的条件下,已知抗剪键的面积率可求得同条件下叠合板对应的屈服弯矩;根据式(2),在现浇板屈服位移已知的条件下,已知抗剪键的面积率可求得同条件下叠合板对应的屈服位移。

为回归 R_m 和 R_f ,计算了表 4 中各叠合板抗弯承载力 M_r 、屈服位移 f_r 及抗剪键面积率。同时,也计算了与叠合板同条件现浇板的抗弯承载力和屈服位移,分别为 6.15 kN·m 和 6.87 mm。

表 4 回归选用数据

Tab. 4 Data for Regression

试件编号	$M_r/(\text{kN}\cdot\text{m})$	f_r/mm	R_m	R_f	r
DHB-0	5.91	10.4	0.959	1.516	0.082
DHB-1	5.99	10.1	0.974	1.472	0.122
DHB-2	5.69	11.2	0.926	1.626	0.061
DHB-3	5.27	14.2	0.877	2.070	0.041
DHB-4	6.09	7.7	0.989	1.220	0.136
DHB-5	6.03	8.8	0.979	1.320	0.109
DHB-6	5.63	12.7	0.916	1.842	0.068
DHB-7	5.18	20.1	0.892	1.927	0.054
DHB-8	6.06	8.5	0.984	1.243	0.184
DHB-9	5.96	9.3	0.969	1.360	0.118
DHB-10	5.66	12.2	0.912	1.768	0.052
DHB-11	5.24	15.3	0.852	2.234	0.013

R_m 和 R_f 的计算结果和回归曲线见图 17,回归简化计算式如下

$$M_r=-6.42r^2+2.13r+0.81 \tag{3}$$

$$R_f=40.45r^2-14.23r+2.47 \tag{4}$$

简化计算式的判定系数 R^2 分别为 0.95 和 0.91,表明拟合规律较好。

3.2 简化计算式的验证

为验证简化式的准确性,随机设计了 3 块不同面积率的叠合板,采用有限元模拟方法和简化计算式,分别计算了各板的抗弯承载力和屈服位移,并进行了对比,见表 5。从表 5 可以看出,简化计算式计算结果与模拟结果相差不足 8%,验证了简化计算式的准确性。

3.3 简化计算式的应用方法

在设计带抗剪键叠合板时,首先按现浇板的计算理论,估算除抗剪键以外叠合板的尺寸配筋等参

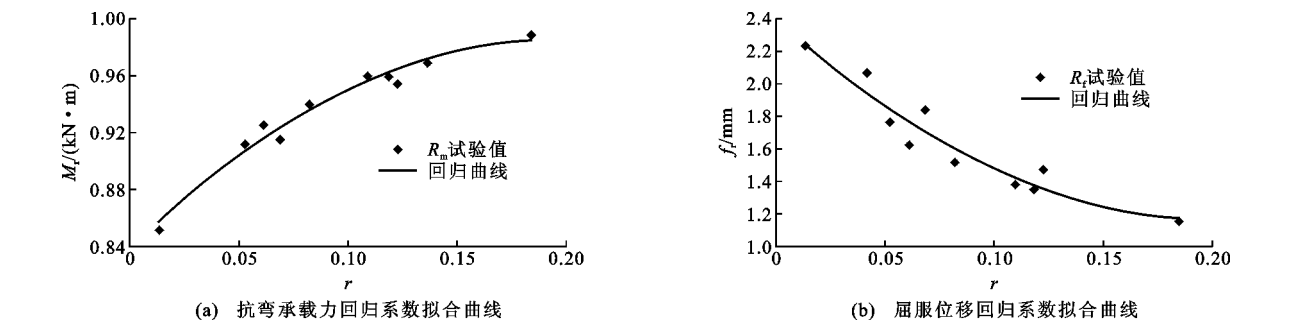


图 17 抗弯承载力和屈服位移回归系数拟合曲线

Fig. 17 Regression Coefficient Fitting Curves of Flexural Capacity and Yield Deflection

表 5 叠合板模拟结果与计算结果对比

Tab. 5 Comparison of Simulation Results and Calculation Results of Laminated Slabs

试件编号	抗剪键间距/mm		抗剪键截面尺寸	r	M_r 模拟值/ (kN·m)	M_r 计算值/ (kN·m)	M_r 相对 误差/%	f_r 模拟值/ mm	f_r 计算值/ mm	f_r 相对 误差/%
	沿纵向	沿横向								
1	125	275	100 mm×100 mm	0.119	5.84	5.98	2.4	9.69	9.27	4.3
2	350	275	100 mm×100 mm	0.071	5.92	5.71	3.5	11.89	11.43	3.8
3	340	1015	120 mm×120 mm	0.045	5.80	5.49	5.3	14.21	13.13	7.6

数,然后计算该尺寸配筋现浇板的抗弯承载力 M 和屈服位移 f ,再根据带抗剪键叠合板设计需要满足的抗弯承载力 M_r 和屈服位移 f_r ,计算回归系数 R_m 和 R_f ,最后根据 R_m 和 R_f 确定抗剪键的布置情况,如假设抗剪键的行间距和横截面面积,根据 R_m 和 R_f 计算列间距,完成叠合板的设计。

4 结 语

(1)与无抗剪键叠合板相比,设置一定数量抗剪键的叠合板与现浇板力学性能相近。抗剪键沿横向个数越多,叠合板的极限承载力与现浇板越接近,其破坏特征也与现浇板基本相同。

(2)不同结构形式的抗剪键均能保证预制底板与现浇层间的有效连接,在实际工程中可采用制作相对方便的正方形抗剪键。

(3)预制底板与现浇层的接触面间分别设置为绑定接触和摩擦接触时,有限元模拟与试验的 $P-\Delta$ 曲线变化趋势基本一致。采用绑定接触条件下的模拟结果与试验结果更加接近。

(4)考虑到结构设计的可靠性,在有限元模拟过程中,当叠合板的预制底板与现浇层间设置为摩擦接触时,改变抗剪键沿横向个数、抗剪键沿纵向个数和抗剪键截面面积,叠合板的屈服荷载和屈服位移均发生变化,但当三者增加到一定程度后,变化趋势不再明显。改变现浇层混凝土强度等级、抗剪键混凝土强度等级和接触面摩擦因数,叠合板的屈服荷载和屈服位移基本未发生变化,说明抗剪键的面积率是影响叠

合板力学性能的主要因素。

(5)根据抗剪键面积率建立的带混凝土抗剪键叠合板的抗弯承载力和屈服位移简化计算式准确性较好,能够实际工程中的设计与应用提供借鉴。

参考文献:

References:

[1] 曹诗定,王 伟. 装配式建筑优点、技术难点剖析与监管重点探索[J]. 工程质量,2015,33(11):24-27.
CAO Shi-ding,WANG Wei. Advantages and Technical Difficulties and Emphases of Supervision of Assembly Building Projects[J]. Construction Quality, 2015, 33 (11):24-27.

[2] COOK J P. Composite Structure Methods[M]. New York:McGraw-Hill Book Company Inc,1976.

[3] DAVID C S, AMIN E. Partially Composite Sandwich Panel Deflections[J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(4):778-783.

[4] BOZZO L M, TORRES L. A Proposed Semi-prefabricated Prestressed Composite Steel-Concrete Slab[J]. Structures and Buildings,2004,157(5):309-317.

[5] REDZUAN A W, SAMUEL E. Determination of Composite Slab Strength Using a New Elemental Test Method[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(9):1268-1277.

[6] LUDOVICO M D, PROTA A, MANFREDI G, et al. FRP Strengthening of Full-scale PC Girders[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(5):510-520.

- [7] 朱茂存,刘宗仁,陈忠汉. 预应力混凝土夹芯叠合板的性能分析[J]. 混凝土与水泥制品,2001(5):47-49.
ZHU Mao-cun,LIU Zong-ren,CHEN Zhong-han. Performance Analysis on the Prestressed Concrete Sandwich Laminated Slab[J]. China Concrete and Cement Products,2001(5):47-49.
- [8] 李耀庄,蒋青青,黄赛超,等. 混凝土倒T形叠合连续板的试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2003,34(6):695-698.
LI Yao-zhuang,JIANG Qing-qing,HUANG Sai-chao, et al. Experimental Study on the RC Invertible T Slab-continuous Composite Slab[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2003, 34(6):695-698.
- [9] 郭乐工,郭乐宁,杨艳春. 预应力混凝土叠合板与薄板抗弯承载力相关关系分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(10):1440-1441.
GUO Le-gong,GUO Le-ning,YANG Yan-chun. Correlation Model of Bending Bearing Capacity Between Prestressed Slab and Laminated Slabs[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2005,37(10):1440-1441.
- [10] 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):54-57,94.
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):54-57,94.
- [11] 岳建伟,彭燕伟,魏 钊. 带肋预应力叠合板在钢结构中的应用[J]. 建筑技术,2010,41(12):1090-1093.
YUE Jian-wei,PENG Yan-wei,WEI Kun. Application of Precast Composite Slab with Trough in Steel Structure[J]. Architecture Technology,2010,41(12):1090-1093.
- [12] 朱永明,高歌,肖建庄. 再生混凝土叠合板受弯力学性能试验[J]. 混凝土与水泥制品,2012(6):49-52.
ZHU Yong-ming,GAO Ge,XIAO Jian-zhuang. Bending Mechanical Properties Test of Recycled Concrete composite Slab[J]. China Concrete and Cement Products,2012(6):49-52.
- [13] 陈 东,沈小璞. 带桁架钢筋的混凝土双向自支承叠合板受力机理研究[J]. 建筑结构,2015,45(15):93-96.
CHEN Dong,SHEN Xiao-pu. Study on Loading Mechanism of Bidirectional Self-supporting Concrete Composite Plates with Truss Rebar[J]. Building Structure, 2015,45(15):93-96.
- [14] 吴方伯,付 伟,文 俊,等. 新型叠合板拼缝构造静载试验[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(4):1-10.
WU Fang-bo,FU Wei,WEN Jun, et al. Static Load Experiment of New Type of Laminated Plate Joint Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018,35(4):1-10.
- [15] 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 Li-xin, YU Chun, LUAN Wen-bin, 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.
- [16] JGJ 1—2014,装配式混凝土结构技术规程[S].
JGJ 1—2014, Technical Specification for Precast Concrete Structures[S].
- [17] 汤 磊,郭正兴,丁桂平. 新型钢筋桁架混凝土叠合双向板刚度和挠度计算方法研究[J]. 建筑结构,2013,43(19):30-32.
TANG Lei, GUO Zheng-xing, DING Gui-ping. Research on Calculation Method of Stiffness and Deflection of the New Steel Bar Truss Concrete Superimposed Two-way Slab[J]. Building Structure, 2013, 43(19):30-32.
- [18] 商忠韬,凤俊敏,顾 艳,等. 新型预制预应力钢筋桁架翼缘加劲肋叠合双向板试验研究[J]. 施工技术,2015,4(21):60-63,67.
SHANG Zhong-tao, FENG Jun-min, GU Yan, et al. Experimental Analysis on the Prestressed Two-way Composite Slab with Steel Truss Flange Ribbed Panels[J]. Construction Technology,2015,4(21):60-63,67.
- [19] 王立国. 带抗剪键叠合板的力学性能及影响因素研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2015.
WANG Li-guo. Study on Mechanical Behavior of Laminated Slab with Shear Connectors[D]. Shenyang:Shenyang Jianzhu University,2015.
- [20] 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].
- [21] 蒋昭奕. 叠合面粘结程度对混凝土叠合板承载性能影响研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2017.
JIANG Zhao-yi. Study on the Influence of the Bonding Degree of the Overlapped Surface on the Bearing Performance of the Concrete Laminated Plate[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology,2017.
- [22] 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(12):34-38.
CHEN Fu-qiang, TIAN Wei, LIU Zhan-guo, et al. Experimental Study on Friction Coefficient of Concrete with Matching Pouring Surface[J]. China Harbour Engineering,2014(12):34-38.