

引用本文:吴方伯,秦浩,文俊,等.新型叠合板力学性能试验[J].建筑科学与工程学报,2020,37(1):33-40.

WU Fang-bo, QIN Hao, WEN Jun, et al. Mechanical Properties Test of New Type of Laminated Slab[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 33-40.

DOI:10.19815/j.jace.2019.02026

新型叠合板力学性能试验

吴方伯¹, 秦浩¹, 文俊¹, 李博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 400045)

摘要:为了分析叠合板在使用阶段的性能,如挠度、钢筋应力-应变曲线等,进行了1块现浇板与1块新型叠合板的静力加载试验。试验采用大型反力架、液压千斤顶与两级分配梁作为加载工具,对带可拆桁架叠合简支板与现浇简支板进行四点加载,以模拟均布荷载作用下板的受力状态,并对试验数据进行对比。结果表明:叠合板挠度满足使用阶段的要求,延性性能良好;叠合板在最终加载结束时产生了与现浇双向板相似的裂缝;板底裂缝首先出现在4个加载点的下方,并随着后续加载由4个加载点向叠合板的4个角延伸,裂缝出现的形态表明叠合板在破坏时钢筋的受拉性能得到了充分利用;在最后一级加载完成后叠合板顶面混凝土没有被压溃,说明叠合板依然具有继续承载的能力;预埋件与混凝土的黏结性能良好,预埋件周边混凝土未出现大面积的破坏;在构件的侧面发现了若干条竖向裂缝,叠合面上未发现横向裂缝,说明表面刮毛可以满足叠合面的抗剪要求。

关键词:叠合板;力学性能;四点加载;挠度;承载力

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)01-0033-08

Mechanical Properties Test of New Type of Laminated Slab

WU Fang-bo¹, QIN Hao¹, WEN Jun¹, LI Bo¹, ZHOU Xu-hong^{1,2}

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

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to analyze the performance of laminated slab in service, such as deflection, stress-strain curve of steel bars, the static loading test of a cast-in-place slab and a new type of laminated slab was carried out. In the test, the large reaction frame, a hydraulic jack and a two-stage distribution beam were used as loading tools for four-point loading on the composite simply supported slab with detachable truss and the cast-in-place simply supported slab to simulate the stress state of the slab under uniform load, and the test data were compared. The results show that the deflection of the laminated slab meets the requirements of the use stage, and the ductility is good. At the end of the final loading, the cracks of the laminated slab is similar to the cast-in-place two-way slab. The cracks at the bottom of the slab first appear below the four loading points, and with the subsequent loading from four loading points to four corners of the laminated slab. The appearance of cracks indicates that the tensile properties of steel bars are fully utilized when the laminated slab are damaged. After the last stage of loading, the concrete on the top of

收稿日期:2019-03-21

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701308)

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。

the laminated slab is not crushed, this indicates that the laminated slab still has the capacity of continuous bearing. The bonding performance between the embedded parts and concrete is good, and the concrete around the embedded parts is not damaged in a large area. Several vertical cracks are found on the side of the component, and no transverse cracks are found on the laminated surface, which shows that the surface scratching can meet the shear requirements of the laminated surface.

Key words: laminated slab; mechanical property; four-point loading; deflection; bearing capacity

0 引言

叠合板刚度大,整体性能好,施工便利,在中国部分地区得到了应用^[1-3]。国内外对新形式的板带、新材料改良叠合板性能和新有限元方法做了相应研究^[4-10]。从叠合板的制作方法来看,现阶段叠合板绝大多数是将预制板制作作为板带,然后再到施工现场进行拼装。由于现场的不确定因素较多,如板的拼缝质量问题,横向钢筋的放置也增加了现场工作量,这些问题又进一步限制了叠合板在现实工程中的应用^[11-15]。随着对叠合板研究的深入,吴方伯等^[16]提出了一种蛇形钢筋处理拼缝,并进行了 1 组对照试验。试验表明在配筋率降低 24% 时蛇形钢筋依旧可以抑制裂缝延伸。丁克伟等^[17]提出了一种带有新型拼缝的叠合板,并采用试验、ANSYS 模拟对该种叠合板的性能进行了研究,试验表明该种带新型拼缝的叠合板性能良好。

本文的新型叠合板采用了由整板加可拆桁架的形式,有效解决了拼缝问题。同时下部使用螺栓将型钢与预埋件连接成整体节点使得型钢可以拆装,预制板在工厂制作完成。在实际使用时叠合板与一种由 U 形混凝土模块制作的叠合梁^[18-19]组合进行使用,该梁的 U 形模块在工厂预制,运输至施工现场后使用该模块作为模板浇筑叠合梁。

施工时桁架在预制板下方增加预制板的刚度,施工完成后浇层强度达标并与预制板形成整体,下部的型钢与螺栓可以拆下回收再利用,在解决叠合板拼缝问题的同时为叠合板的形式开辟了新的思路,本次试验为桁架拆除后叠合板使用阶段的整板静载性能试验,可为该类叠合板的实际使用提供参考。

1 试验方案

1.1 试件尺寸和试验材料参数

型钢与预埋件的连接方式如图 1 所示,预制板在工厂制作完成后的底面形式如图 2 所示。

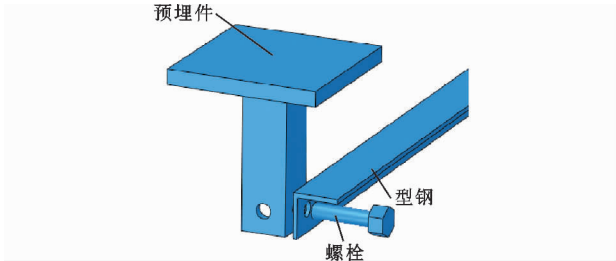


图 1 预埋件与型钢的连接

Fig. 1 Connection Between Embedded Parts and Section Steel

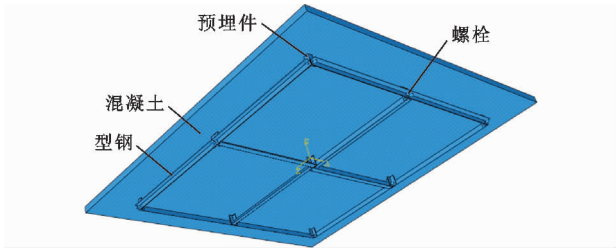


图 2 预制混凝土底板

Fig. 2 Prefabricated Concrete Floor

试验研究了 1 块新型叠合板与 1 块现浇板在简支条件下的使用性能,预埋件尺寸与成品见图 3。

施工阶段底部受拉型钢使用 50 mm×50 mm×5 mm 角钢。2 块板采用 C30 混凝土,用直径 8 mm 的 HRB335 螺纹钢进行双向配筋,预制板上部混凝土部分的尺寸为 2 300 mm×2 300 mm×35 mm,后浇层浇筑完成后的尺寸为 2 300 mm×2 300 mm×100 mm,浇筑过程如图 4 所示。

按《混凝土结构试验规范》^[20]进行混凝土强度测试,结果见表 1。由于使用阶段的桁架已经拆除,不与预埋件组合受力,本次试验仅观察预埋件与混凝土之间的黏结情况。

在试验室中使用计算机控制万能试验机来进行钢材试验,得到钢筋的屈服强度 $f_y=361$ MPa。

1.2 加载与测量方案

本次试验的加载制度包括 3 级预加载与后续的正式加载,预加载一级荷载折合成均布荷载的大小为 1.5 kPa,在预加载结束后卸载,准备进行正式

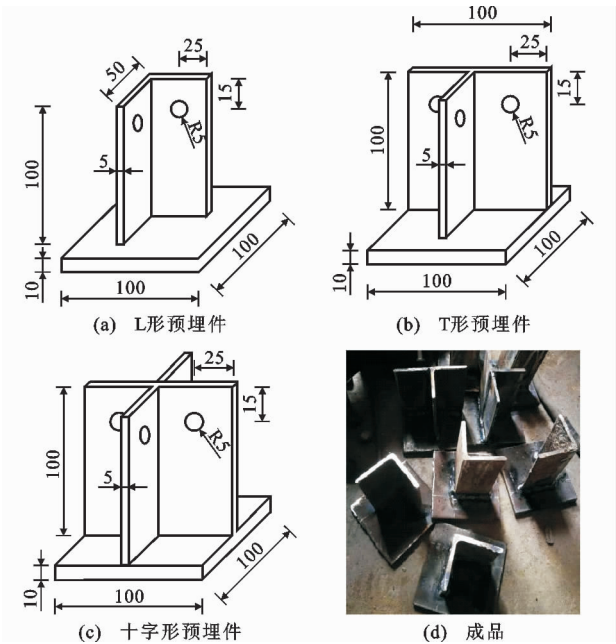


图 3 预埋件尺寸与成品 (单位: mm)
Fig. 3 Sizes and Finished Product of Embedded Parts (Unit: mm)



图 4 叠合板浇筑
Fig. 4 Pouring of Laminated Slab
表 1 混凝土抗压强度

材料性能	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa
预制层	31.5	23.94
后浇层	36.6	27.82

加载。

正式加载分为 2 个阶段,第 1 个阶段取开裂荷载的 1/10(折合均布荷载大小为 1.01 kPa)进行加载,在开裂之后的第 2 阶段采用极限荷载的 1/10(折合均布荷载大小为 3.95 kPa)进行加载直到最后一级荷载,加载制度如图 5 所示。

加载支座由 200 mm 宽的 H 型钢与 4 个由型钢制作的短柱焊接制作而成,支座高 1 m,在板与混凝土板之间使用油毡加细沙垫平,细沙与油毡减少

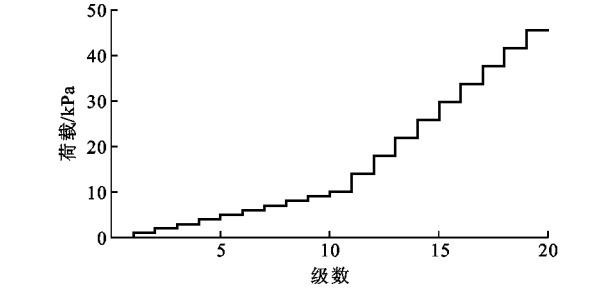


图 5 加载制度
Fig. 5 Loading System



图 6 加载装置
Fig. 6 Loading Setup

测量方案如图 7 所示(G 表示钢筋应变测点,W 表示挠度测点,HT 表示混凝土应变测点)。本次试验要对比叠合板与现浇板在使用阶段的挠度,在四点加载的加载制度下 2 块板的最大挠度在跨中位置,所以该处即为位移计布置点;在对比钢筋应力时对 1/4 跨的钢筋进行了应变片的张贴,应变片布置呈爪子形状的目的在于测量加载点四周与塑性绞线出现位置钢筋的应变;由于本次试验使用的板双向同性,叠合板在 2 个方向上的刚度一致,所以监测混凝土底部裂缝的应变片布置在楼板底部 1/4 处。

2 试验结果

在试验开始预加载阶段各仪器采集数值显现出线性关系,在预加载卸载后所有的数据基本上恢复到初始读数。正式加载前期的数据读数变化都较小,未发生钢筋应变有异常的变大现象,在加载到 12 级荷载(17.08 kPa)时板底出现斜向裂缝与平行于板边的平行裂缝,斜裂缝的方向大致是从四点指向板的 4 个角,2 种裂缝相交于 4 个加载点下。14 级荷载开始斜向裂缝向混凝土的角延伸,同时离混凝土 4 角较近的边上也出现裂缝,在后续的加载过程中板底的斜裂缝逐渐变多;最开始的斜裂缝发展

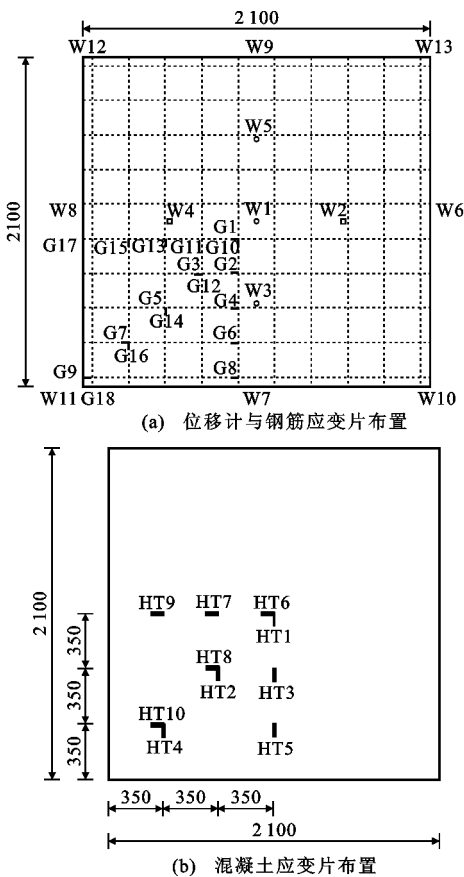


图 7 测量方案(单位:mm)

Fig. 7 Measuring Scheme (Unit:mm)

成了主要的裂缝,其宽度明显大于其他裂缝,4 个角所出现的裂缝开展方向也指向加载点,随着板底裂缝延伸板的侧面也出现了竖向裂缝,如图 8 所示。在加载到 16 级荷载时板的侧面出现了竖直方向的裂缝,下方主裂缝宽度达到 1.5 mm,板的 4 个角发生了明显的翘起,如图 9 所示。在荷载加载到 46.3 kPa 时,考虑到支座高度较矮影响试验人员进入板底的安全,故停止了对该板的加载。

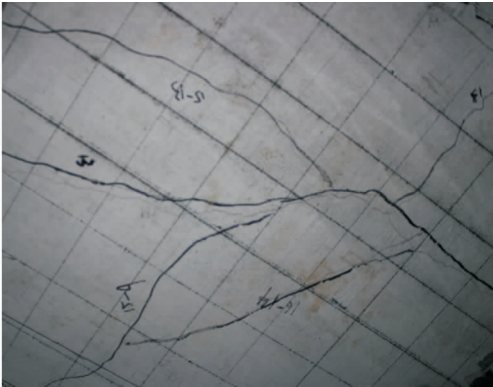


图 8 板底裂缝

Fig. 8 Cracks at Bottom of Slab



图 9 角部翘起

Fig. 9 Rise of Corner

2.1 荷载与钢筋应变

叠合板和现浇板钢筋应力-应变曲线如图 10 所示(XJB 表示现浇板,DHB 表示叠合板)。2 块板的钢筋应变有着明显的规律,通过叠合板与现浇板的对比可以发现 2 块板的钢筋荷载-应变曲线存在着一些相似的特征。叠合板钢筋的荷载-应变曲线在前期加载的过程中表现出了线性特征,曲线斜率很大。荷载达到 17.08 kPa 时钢筋的应变突然增大,这与试验现象中出现裂缝的级数相吻合,从图 10 可以看出曲线的斜率明显减小,标志着钢筋进入了塑性阶段。由于 G12 号测点处于主裂缝周围并且距离加载点最近,因此可以发现该点测得的钢筋应变明显大于其他位置。平行于板边的混凝土没有出现较大的裂缝,所以平行于板边的钢筋受力较小,部分测点并未达到屈服。在最后一级加载完成后,还有较多的钢筋未屈服,且板上表面混凝土并未压碎,故叠合板还有一定的承载能力。

2.2 荷载与挠度

叠合板与现浇板跨中挠度对比如图 11 所示,叠合板荷载-挠度曲线如图 12 所示。叠合板挠度在加载初期与位移保持着线性关系,在载荷达到 17.08 kPa 后挠度变化明显加大,说明此时结构的刚度降低。从加载开始到最后一级加载完成叠合板跨中挠度达到了 23.8 mm,叠合板中间可以看到明显凹陷,延性良好。

为了找到同一时间同一截面测点的挠度关系,取测点 W8, W4, W1, W2, W6 得到挠度曲线(图 13)。由图 13 可知:叠合板在开裂前同一截面的测点挠度分布比较均匀,曲线形状接近于等腰三角形,说明板在开裂前整个变形处于线性状态。开裂后,由于叠合板发生了塑性变形,各测点的连线不再为等边三角形,但是折线关于中线大致对称,叠合板表

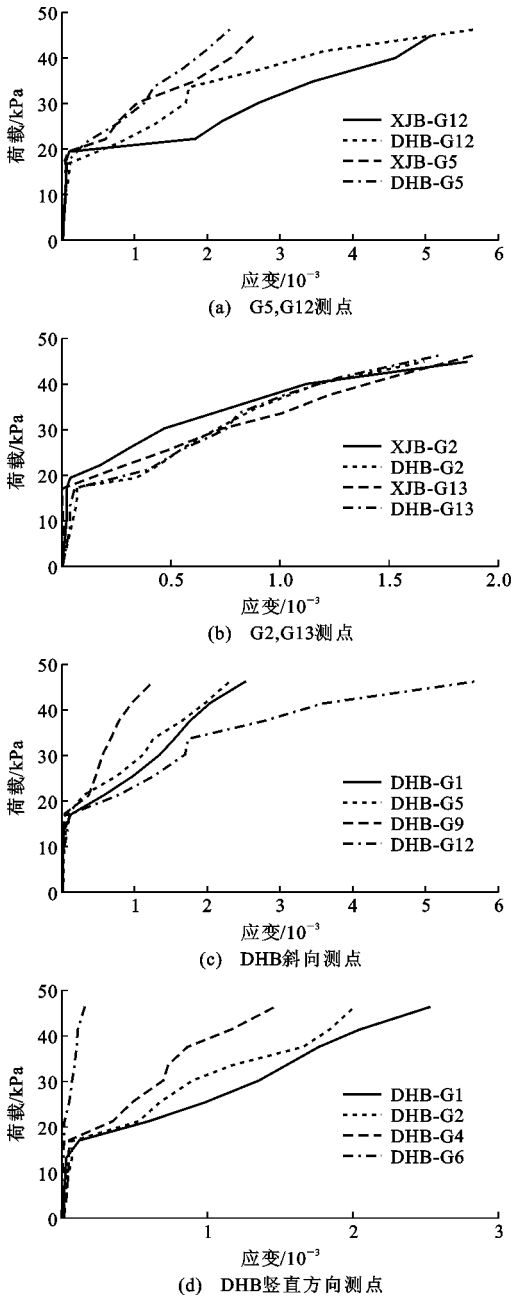


图 10 钢筋应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain Curves of Steel Bars

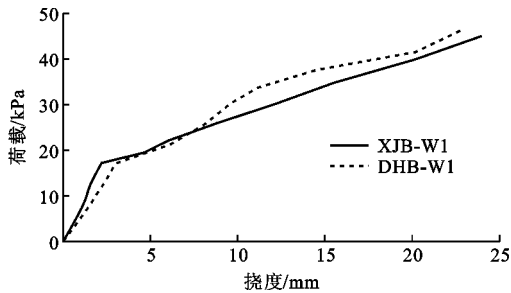


图 11 测点 W1 荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-deflection Curves of Measuring Point W1

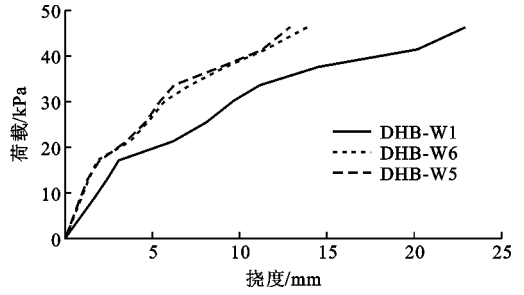


图 12 叠合板荷载-挠度曲线

Fig. 12 Load-deflection Curves of Laminated Slab

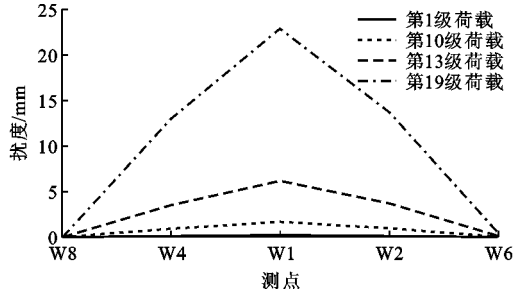


图 13 挠度曲线

Fig. 13 Deflection Curves

现出了良好的双向受力性能。

3 楼板的极限承载力

结构在荷载作用下会变成几个板块,假设各个板块为刚体的情况下,在荷载作用下结构在完全破坏变成几何可变体系前所能承受的最大荷载就是极限承载力。混凝土塑性分析方法可以分为上限、下限分析方法,普遍使用的塑性绞线法是上限分析法的一种,因此采用塑性绞线法求出的极限荷载往往比试验加载的实际荷载大。为了对比楼板的实际承载能力与计算承载能力,本次采用虚功原理对叠合板进行计算。试验板在停止加载时所产生的塑性绞线与实际均布荷载有所区别,其塑性绞线是从加载点向外辐射的破坏形式,具体破坏机制如图 14 所示,双向板的水平与竖直方向长度分别为 l_x, l_y ,假设 $l_y = al_x$, a 为比例系数。由于试验板两长度一致,故 $l_y = l_x = l_1$ 。设内部塑性绞线的长度为 $l_2 = bl_x, l_3 = cl_y$, b, c 为比例系数。 m_x, m_y 为单位板宽延塑性绞线 l_x, l_y 方向上承受正弯矩时的极限弯矩, m'_x, m'_y, m''_x, m''_y 为单位板宽支座处延塑性绞线 l_x, l_y 方向上承受负弯矩时的极限弯矩。 m_x, m_y 满足

$$m_x = A_{sx} f_{sx} \gamma_{sx} h_{0x} \quad (1)$$

$$m_y = A_{sy} f_{sy} \gamma_{sy} h_{0y} \quad (2)$$

式中: A_{sx}, A_{sy} 分别为板跨内截面沿 l_x, l_y 方向单位板宽内的纵向受力钢筋截面面积; γ_{sx}, γ_{sy} 分别为板

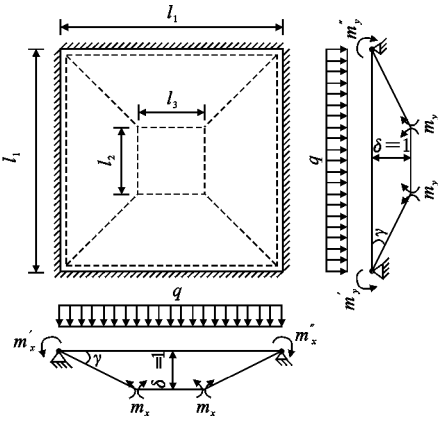


图 14 叠合板的破坏机制

Fig. 14 Failure Mechanism of Laminated Slab

跨内截面沿 l_x, l_y 方向单位板宽内的内力偶臂系数;
 h_{0x}, h_{0y} 分别为板跨内截面沿 l_x, l_y 方向单位板宽内的有效高度; f_{sx}, f_{sy} 为单位条带内钢筋的屈服强度。

设 α 为 2 个方向上极限内力矩的比值,则

$$\alpha = \frac{m_y}{m_x} \tag{3}$$

由于本次试验板为铰支座, $m'_x = m''_x = 0, m'_y = m''_y = 0$, 假设板在极限荷载加载后产生的挠度为 $\delta = 1$, 假设板转动的角度为 γ 。

虚功原理的等式两边为内外力所做的功, 没有其他外力的情况下等效均布荷载 q 所做的虚功即为外力所做的功 W_a , 则

$$\begin{aligned} \sum W_a &= q \sum_n \iint_{A_n} \omega(x, y) dA_n \\ &= \frac{q}{6} [l_1^2 + (l_1 + l_2)(l_1 + l_3) + l_2 l_3] \end{aligned} \tag{4}$$

式中: $\omega(x, y)$ 为叠合板变形的曲线方程; dA_n 为面积元素。

内力所作的虚功 W_b 为

$$\begin{aligned} \sum W_b &= \sum m_i l_i \gamma_i \\ &= 2 \left(\frac{2m_y l_2}{l_1 - l_3} + \frac{2m_x l_3}{l_1 - l_2} \right) + \\ &\quad 4 \left(\frac{m_x l_1 - m_x l_3}{l_1 - l_2} + \frac{m_y l_1 - m_y l_2}{l_1 - l_3} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\sum W_a = \sum W_b \tag{6}$$

式中: m_i 为沿塑性绞线上单位板宽内的极限弯矩; l_i, γ_i 分别为沿塑性绞线上单位板宽截面上发生转动边的长度及转动角度。

可以解得

$$q = 24m_x \left(\frac{\alpha}{1-n} + \frac{1}{1-m} \right) / [l_1^2 (2 + 2mn + m + n)] \tag{7}$$

由以上公式可以得出该板的极限荷载大小为

57.24 kPa, 实际加载达到 46.3 kPa 时停止加载。

4 叠合板的优化与使用建议

由于叠合板使用到实际工程中还有一段很长的路要走, 故结合本次试验对叠合板的桁架优化、质量检查、运输摆放等提出建议。

在桁架的优化上, 桁架的预埋部分可以采用圆形管状的预埋件桁架形式, 将型钢改为与预埋件配套的带圆管钢条, 圆形结构优势也较为明确, 拆装简单方便, 桁架较为美观。圆形预埋件可以有效减少预埋件四周混凝土的应力集中现象, 桁架可以使用强度较高的钢材进一步保证其刚度, 圆形预埋件大致设计如图 15 所示。

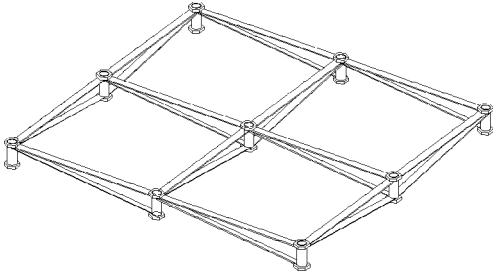


图 15 圆形预埋件桁架简图

Fig. 15 Truss Diagram of Round Embedded Parts

叠合板要承受荷载, 需要经过预制板的运输、堆放、后浇层浇筑等步骤, 所以应该在浇筑后浇层之前对预制板的质量进行检验, 其中包括外观检测与性能检测。外观质量的检验采用表面观察和测量等方式, 检查内容主要为板的厚度, 桁架是否定位准确和是否存在偏差, 混凝土是否存在蜂窝等振捣不均匀的情况, 叠合面是否粗糙, 是否存在裂缝等问题。同时在使用本次试验的预埋件时要保证预埋件周围的混凝土振捣充分。

预制板的堆放需要保证地面的平整度, 以防止地面不均匀导致预制板在运输与放置过程中断裂, 在堆放预制板时应该对地面进行清理, 保证地面的基本平整, 然后在预制板下部垫上矩形木方, 木方最佳高度为桁架露出预制板的高度, 使用木方与桁架一同受力保证预制板的安全, 如图 16 所示。除此之外当堆积多块预制板时应将各预制板在竖直方向上保持在同一平面内, 避免 2 块板的桁架相距过远, 而板的悬挑端过长导致空间浪费与预制板断裂。

5 结 语

(1) 对新型叠合板进行了试验研究, 结果表明该板整体性能良好, 承载能力较高, 刚度大, 适用于装

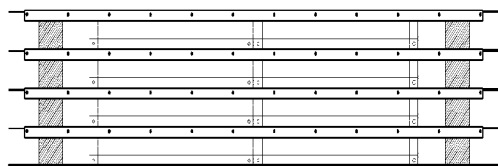


图16 运输堆放示意

Fig. 16 Diagram of Transportation and Stacking

配式楼盖体系。

(2)在加载过程中叠合板对角线方向与加载点之间形成了主要裂缝。在加载后期构件的侧面上发现了若干竖向裂缝,停止加载时未发现横向裂缝,说明表面刮毛可以满足叠合面的抗剪要求。停止加载时叠合板跨中挠度达到了2.38 cm,挠度与现浇板相近,板的延性良好。

(3)由于桁架形式、预制板质量、预制板运输等问题都会影响叠合板制作的质量,基于试验提出了圆形预埋件形式、预制板质量检查方法、预制板运输方法,可进一步保证叠合板的质量。

参考文献:

References:

- [1] 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 Chui-jin, 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.
- [2] 田国安.冷轧带肋钢筋混凝土叠合板试验研究[J].建筑结构,2000,30(1):35-37,29.
TIAN Guo-an. Experiment Research of Composite Floor with Cold-rolled Ribbed Steel Bars[J]. Building Structure, 2000, 30(1): 35-37, 29.
- [3] 聂建国,陈必磊,陈戈,等.钢筋混凝土叠合板的试验研究[J].工业建筑,2003,33(12):43-46,33.
NIE Jian-guo, CHEN Bi-lei, CHEN Ge, et al. Experimental Study on Shear Behavior of R. C. Laminated Slabs[J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 43-46, 33.
- [4] THANOON W A, YARDIN Y, JAAFAR M S, et al. Structural Behaviour of Ferrocement-brick Composite Floor Slab Panel[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11): 2224-2230.
- [5] EL-DARDIRY E, JI T. Modelling of the Dynamic Behaviour of Profiled Composite Floors[J]. Engineering Structures, 2006, 28(4): 567-579.
- [6] REX C O, EASTERLING W S. Behavior and Modeling of Reinforced Composite Slab in Tension[J]. Jour-

nal of Structural Engineering, 2000, 126(7): 764-771.

- [7] JEONG Y J. Simplified Model to Predict Partial-interactive Structural Performance of Steel-concrete Composite Slabs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(2): 238-246.
- [8] IZZUDDIN B A, TAO X Y, ELGHAZOU LI A Y. Realistic Modeling of Composite and Reinforced Concrete Floor Slabs Under Extreme Loading. I: Analytical Method[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(12): 1972-1984.
- [9] ELGHAZOU LI A Y, IZZUDDIN B A. Realistic Modeling of Composite and Reinforced Concrete Floor Slabs Under Extreme Loading. II: Verification and Application[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(12): 1985-1996.
- [10] 刘汉朝,蒋青青.倒“T”形叠合简支板的试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2004,35(1):147-150.
LIU Han-chao, JANG Qing-qing. Experiment of Inverted “T” Simply Supported Composite Slab[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2004, 35(1): 147-150.
- [11] 李杰,黄鹏飞,陈以一,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.
LI Jie, HUANG Peng-fei, CHEN Yi-yi, et al. Experimental Research on Mechanical Properties of Self-sustaining Steel Bar Truss and Concrete Superposed Slab[J]. Structural Engineers, 2013, 29(4): 132-139.
- [12] 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.
- [13] 张微伟. PK 预应力叠合楼板的试验研究与理论分析[D].长沙:湖南大学,2007.
ZHANG Wei-wei. Experimental Study and Theoretical Analysis of PK Prestressed Composite Slab[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [14] 黄海林. 预制带肋底板混凝土叠合楼板受力性能及设计方法[D].长沙:湖南大学,2013.
HUANG Hai-lin. Structural Behavior and Design Method of Concrete Composite Slab with Precast Prestressed Concrete Ribbed Panel[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [15] 王元清,袁霞,张延年,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,2014,30(3):385-391.
WANG Yuan-qing, YUAN Xia, Zhang Yan-nian,

et al. Analysis of Loading Capacity of Steel Bar Truss and Concrete Superimposed Two-way Slab[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2014, 30(3): 385-391.

[16] 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.

[17] 丁克伟,陈东,刘云林,等. 一种新型拼缝结构的叠合板受力机理及试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 64-69.
DING Ke-wei, CHEN Dong, LIU Yun-lin, et al. Theoretical and Experimental Study on Mechanical Behavior of Laminated Slabs with New Type Joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(10): 64-69.

[18] 左瑞. 免拆模混凝土梁的试验研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
ZUO Rui. Experimental Study and Analysis on Free Demoulding Concrete Beams[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

[19] 吴方伯,左瑞,文俊,等. 免拆模混凝土梁受弯性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 8-15.
WU Fang-bo, ZUO Rui, WEN Jun, et al. Experimental on Bending Performance of Concrete Beam Without Demoulding[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 8-15.

[20] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for Test Methods of Concrete Structures[S].