

装配式建筑组合楼板研究现状

谢常风

安徽工业大学, 建筑工程学院, 安徽 马鞍山

收稿日期: 2022年3月22日; 录用日期: 2022年4月11日; 发布日期: 2022年4月21日

摘要

装配式建筑作为近年来热门建造方式之一, 在国家相关政策扶持与推动下得到了全方位的推广和发展。而楼板作为装配式建筑体系中重要构件, 楼板的合理选用对结构体系的施工进度和工程造价有着至关重要的作用。组合楼板作为楼板的的形式之一, 凭借免支模、施工速度快且能够大幅提升装配式预制率等优势, 在装配式建筑中得到较为广泛的应用。因此本文从试验研究、理论分析以及数值模拟等方面对整浇楼板、压型钢板-混凝土组合楼板、钢筋桁架混凝土叠合板以及不同构造形式的叠合板发展历程研究现状进行总结, 对比四种不同类型楼板优缺点, 从而为后续研究工作提供进一步参考。

关键词

装配式建筑, 组合楼板, 研究现状

Research Status of Prefabricated Building Composite Floor

Changfeng Xie

College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan Anhui

Received: Mar. 22nd, 2022; accepted: Apr. 11th, 2022; published: Apr. 21st, 2022

Abstract

As one of the popular construction methods in recent years, prefabricated building has been promoted and developed comprehensively under the support and promotion of relevant national policies. The floor slab is an important component in the prefabricated building system. The reasonable selection of floor slab plays a vital role in the construction progress and cost of the whole structure. As one of the forms of floor slab, composite floor slab has been widely used in prefabricated buildings by virtue of its advantages of free formwork, fast construction speed and greatly improved prefabrication rate. Therefore, from the aspects of experimental research, theoretical

analysis and numerical simulation, this paper summarizes the development process and research status of concrete slab, profiled steel plate-concrete composite floor slab, reinforced truss concrete composite slab and composite slab with different structural forms, and compares the advantages and disadvantages of four different types of floor slab, so as to provide further reference for follow-up research work.

Keywords

Prefabricated Buildings, Composite Floor, Research Status

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城镇化进程的快速推进,住宅产业作为国民经济支柱产业的重心,从而得到了快速发展。现有的建筑方式因其周期长、建造成本高,发展模式粗放化、工业化、信息化偏低等缺陷逐渐暴露出大量的弊端,大力推动建筑业产业现代化是实现可持续发展的重要战略之一。

装配式建筑作为新型建造方式是实现建筑产业现代化的有效途径方式之一。而楼板又在装配式建筑中主要承受竖向荷载和分隔竖向空间的作用,因此在结构体系中占据重要的地位。

现浇混凝土楼板具有整体性好,耐久性和防火性能好的优点;但在实际现场施工浇筑时需要在楼板底部设置大量脚手架和模板,层层递进浇筑混凝土,从而不可避免地影响装配式建筑施工速度。

压型钢板-混凝土组合楼板的出现是为了克服传统钢筋混凝土楼板逐层浇筑,施工速度慢等缺陷。组合楼板底部放置压型钢板,一方面起到免支模板的作用,另一方面能够替代部分受拉钢筋的作用。因此使得该组合楼板具有施工方式简便、施工进度快以及经济效益显著等特点。但在长期使用过程中,因其压型钢板大多采用镀锌钢板且长期暴露在空气中,已有研究表明,镀锌钢板可能存在锈蚀等耐久性问题;并且压型钢板板底还需涂刷防火涂料,也将无形增加工程造价。

为了持续改进压型钢板-混凝土组合楼板出现的问题,钢筋桁架混凝土叠合楼板应运而生。钢筋桁架混凝土叠合板不仅具有上述组合楼板免支模板、施工速度快等优势;而且还拥有整体性好、工程造价低等优点。但不可避免的是钢筋桁架叠合板也具有不足一面,钢筋桁架作为叠合面抗剪构造形式也存在着钢筋用量多,成本过高等不足,学者为了丰富叠合板样式,为此开展构造形式不同的叠合楼板。

综上所述,本文通过对上述不同类型楼板研究进行总结并归纳上述组合楼板的优缺点,为其下一步组合楼板研究和发展提供依据。

2. 整浇钢筋混凝土楼板研究现状

整浇钢筋混凝土楼板(如图1所示)是指在现场依照设计图纸,搭建脚手架、支模、钢筋绑扎、混凝土浇筑,等一系列施工流程而形成。该整浇楼板具有整体性、耐久性和抗火性能较好等优点。

从试验研究方面,为提高现浇钢筋混凝土楼板在实际工程中的应用。曹万林[1]开展了钢筋混凝土夹芯双向板在静力荷载作用下试验研究,重点研究了试件的挠度变形、钢筋和混凝土应变发展、裂缝分布等基本力学性能。试验结果表明:该钢筋混凝土楼板的强度以及变形均能够满足现行《混凝土结构设计规范》规定。为了对钢筋混凝土楼板耐久性能进行研究,Spathelf [2]开展了钢筋混凝土板在特定弯曲线

件下疲劳性能试验,对两组不同方位的正交配筋布置试验进行循环加载。结果表明,试件疲劳性能与循环荷载水平有关,单个钢筋失效可以作为试件发生疲劳损伤的特征。

从理论研究方面,为了简化建筑楼板的分析模型, Moon [3]提出了一种考虑板内柔性多层建筑结构分析模型,引入楼层柔度指标,简化平面内楼板柔度估算。考虑了板内柔性对楼盖位移、基底剪力和基底剪力分布的影响。结果分析表明:在预计楼板平面内变形较大的情况下,宜将楼板平面内变形纳入建筑结构抗震分析中,以便进行经济安全设计。狄生奎[4]基于极限状态下挠度功能函数和可靠度计算理论,对混凝土楼板可靠度分析与指标进行了验算,并对极限状态下的楼板可靠度、灵敏度及失效概率进行分析。研究表明,混凝土强度、跨度以及荷载效应比等因素对楼板可靠度会产生影响。

从数值模拟研究方面,王洪涛[5]基于假设的均质材料,选择壳单元模型对混凝土楼板进行非线性数值模拟,该模型能够适用于钢筋混凝土楼板的弹塑性变形整体分析。刘晓娟[6]采用数值模拟方法研究了温度收缩应力对钢筋混凝土楼板受力状态和抗裂性能的影响。从设计、施工以及构造措施等方面提出了控制预防裂缝的方法。

由上述可知,国内外学者对钢筋混凝土楼板抗弯性能、耐久性、可靠度以及有限单元的选取等方面进行深入系统研究,取得了丰富研究成果。且基于大量的工程实践经验,编制了钢筋混凝土结构相关设计规范。随着建筑方式不断完善发展,新型结构的应用也在迅速蔓延,混凝土结构设计方法需要不断适应当今结构体系的发展。这些丰富的研究成果都在为新型组合楼板快速发展奠定了理论基础。但整浇楼板因自重大、抗裂性差、施工复杂、工序多等缺点,使其无法运用在装配式建筑中。因此采用轻质、施工快捷的新型楼板代替整浇楼板是装配式建筑发展的必然趋势。



Figure 1. Concrete slab
图 1. 整浇楼板

3. 压型钢板 - 混凝土组合楼板研究现状

压型钢板 - 混凝土组合楼板(如图 2 所示)的构造形式主要由底部镀锌钢板、两者材料之间的栓钉抗剪连接件和上部现浇混凝土三部分组成。压型钢板在整个组合楼板当中既可以充当永久模板使用,还可以部分替代底部受拉钢筋的作用。两者材料通过栓钉的抗剪连接起到共同协调工作。压型钢板 - 混凝土组合楼板既拥有整浇楼板的整体性好、刚度大和耐久性好等优点的同时,而且拥有免支模板,施工流程简便等优势,因此更加适用于大空间建筑和装配式建筑。

从试验研究方面, Kataoka [7]对新型钢板 - 混凝土组合楼板进行了抗弯性能试验研究。结果表明:新型钢板 - 混凝土组合楼板不仅具有良好的复合性能,而且还具有纵向抗剪性能。为了改变压型钢板表

面传统的压痕方式, Ferrer [8]提出了一种新的粘连技术。结果表明:压型钢板与混凝土材料之间的粘结性能较好,试件没有产生相对粘结-滑移;相比较于传统压型组合楼板,试验组合板的破坏形态均为弯曲破坏,且试件承载力有所提高;组合板的纵向抗剪性能也有所改善。

从理论研究方面,为了研究两种材料之间的间隙产生的隔热效果, Shivam [9]对压型钢板与混凝土之间的间隙采用顺序耦合迭代法和全耦合传热与应力分析两种不同的分析方法进行了预测。结果表明,考虑压型钢板与混凝土板间隙的保温效果能够显著改变预测混凝土板耐火等级。此外又提出了基于该参数混凝土温度预测经验公式。该研究能够对组合楼板实用性提供参考依据。陈世鸣[10]通过对单跨以及连续两跨组合楼板进行试验研究,分别提出了组合楼板叠合面纵向抗剪承载力计算公式以及连续跨组合楼板承载力计算方法。通过上述研究,可以拓宽叠合板在大跨度空间建筑体系中的使用。

从有限元研究方面, Hossain [11]对压型钢板分别与高性能混凝土和自密实混凝土组成的组合板体系进行了非线性有限元模拟,对试验组合楼板的性能进行了验证。研究表明,有限元模型的荷载-挠度曲线、强度和抗剪粘结能力与试验结果吻合较好。Fewer [12]利用 ANSYS 有限元软件对压型钢板-混凝土组合楼板进行推出试验研究。考虑了界面摩擦系数、压痕样式、钢板厚度等因素对推出试验的力学性能影响。结果表明,摩擦系数及压痕样式对界面剪切滑移关系影响最大。

目前,学者主要考虑了压型钢板种类不同、钢板厚度、混凝土厚度、强度等级、剪跨比以及抗剪连接件的间距等因素[13][14][15]对压型钢板-混凝土组合楼板的基本力学性能的影响,揭示了该组合楼板的受力机理与破坏模式,提出了相关承载力计算模型和设计方法。为压型钢板-混凝土组合楼板运用在实际工程奠定了基础。

由上述可知,对于压型钢板-混凝土组合楼板的设计方法,我国现行设计与施工规范是基于完全黏结塑性理论计算模型,提出了压型钢板-混凝土组合楼板正截面承载力设计方法。但经过试验研究发现,受弯破坏、支座受剪破坏形态是压型钢板-混凝土组合楼板常见的破坏形态之外,还伴随着因纵向滑移而产生的纵向剪切破坏。关于这方面的受力机理以及设计理论还有待完善与补充,两者之间抗剪连接件界限率如何划分且如何保持两种不同材料之间的协同变形工作还需学者进一步深入研究。由于该组合楼板独特的构造样式,钢板与空气中的水分氧化产生表面锈蚀问题,影响构件的耐久性以及美观性,因此叠合楼板开始成为研究热点。

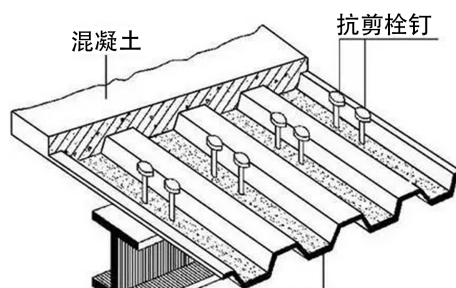


Figure 2. Profiled steel sheet-concrete composite floor slab

图 2. 压型钢板-混凝土组合楼板

4. 钢筋桁架混凝土叠合板研究现状

钢筋桁架混凝土叠合板(如图 3 所示)由预制层和叠合层两部分组成。预制层在预制工厂浇筑养护形成,待现场拼装完成后,浇筑上部叠合层混凝土形成整体叠合板。预制底板即充当施工底部模板的作用,又承担叠合板受力作用。钢筋桁架主要起到上下层连接作用以及叠合面抗剪作用,保证上下层界面之间不

发生粘结滑移现象。该类型楼板具有施工便捷、建设周期短,大幅提升装配式建筑预制率的优点。

从试验研究方面, Li [16]对钢筋桁架混凝土叠合板进行了试验研究,试验结果表明,叠合板在施工阶段的变形满足规范要求,试件在正常受力时,整体处于弹性工作阶段,安全储备性较高。为了研究节点对楼板受弯性能影响以及节点处传递受力机理, Liu [17]对钢筋桁架混凝土叠合板进行抗弯性能试验,结果表明,钢筋桁架能够起到避免叠合板出现脆性破坏的作用,钢筋桁架间距和钢筋搭接长度对叠合板的承载力产生较大影响。

从理论研究方面,黄新宇[18]对钢筋桁架混凝土叠合板进行静载试验,基于弹性理论,提出叠合板挠度计算模型。刘运林[19]考虑了格构钢筋等因素对叠合板刚度变形和强度的影响,通过对现有的粘结滑移曲线对比并对其粘结滑移曲线进行修正;基于子结构理论提出了刚度计算公式,经过验证得知,计算结果与试验结果吻合较好;为了拓宽叠合楼板力学性能研究,还对不同拼缝连接形式的叠合板受力性能进行了深入探讨。

从有限元研究方面, Nikhil [20]采用线性弹簧层模型模拟两层之间的界面并将零厚度界面单元纳入数值模拟中。提出了一种无需对位移场或应力场作任何假设的平面应变公式。推导的公式可用于单向叠合板、对称正交叠合板和反对称正交叠合板等层压复合材料,该模型相比其它方法准确性更好。Majdi [21]对叠合楼板体系进行了有限元数值模拟。对叠合板进行非线性分析,将有限元分析结果与试验数据进行了比较。此外,还进行了一系列参数化研究,以确定剪力连接件对降低此类楼层系统极限强度和初始刚度的影响。

由上述可知,经过国内外学者一系列试验研究与探讨,对叠合楼板的设计和构造形成相当成熟规范设计,例如:《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1-2014) [22]、混凝土结构规范(GB 50010-2010) [23]等,这些规范的出现为了叠合楼板设计和施工措施提供了一定理论支撑。此外《钢筋桁架混凝土叠合板应用技术规程》(T/CECS 715-2020) [24]介绍了钢筋桁架叠合楼板在单向受力、双向受力两种情况下的构造样式以及提出预制底板可以采取不出筋样式。上述这些规范都为叠合楼板在实际工程中的应用与发展具有相对指导意义,使叠合楼板不断朝着现代建筑体系发展。

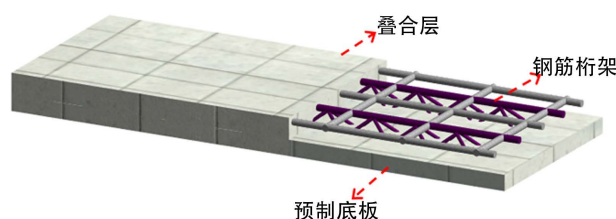


Figure 3. Reinforced truss concrete composite floor
图 3. 钢筋桁架混凝土叠合楼板

5. 不同构造形式混凝土叠合板研究现状

为了避免钢筋桁架混凝土叠合板单一化和趋同化,学者不断积极探寻新型抗剪连接件替代钢筋桁架,从而使叠合板朝着多元化方式发展。

黄炜[25]开展了不同预制底板板肋样式对钢纤维绿色混凝土受弯性能的研究,研究表明,钢纤维绿色混凝土叠合板与普通混凝土叠合板破坏过程相似,均具有较好的延性。此外,对不同预制底板板肋样式组成的叠合板受力性能比较得知,带肋的钢筋桁架叠合板综合受力性能更好。Liu [26]提出了一种预制倒“T”形肋板并对该叠合板的弯曲性能进行了研究。试验结果表明,这种倒“T”形肋板组成的叠合板能够满足规范要求的基本力学性能,且预制底板和叠合层可以复合协同变形工作。李明[27]将弧形混凝土试

块作为抗剪连接件放置在叠合板中, 并对该叠合板进行试验研究。研究表明, 放置一定数量的弧形混凝土试块能够保证叠合板界面连接性能, 且试件整体受力性能较好, 但当这种弧形混凝土试块达到一定数量时, 试件各项基本力学性能提高不在明显。蒋昭奕[28]提出了抗剪钢筋对叠合面的试验研究, 研究表明, 叠合板的承载能力主要取决于叠合面的粘结程度, 叠合板极限承载力随着抗剪钢筋数量的增加而增加。

综上所述, 国内外研究学者为了拓宽钢筋桁架叠合板构造形式, 提出了叠合面新型抗剪连接措施。例如, 弧形混凝土试块、垂直钢筋、马镫筋和 Z 形钢筋等形式, 这些研究成果的出现都是为了丰富叠合板构造形式。但这些新型构造形式的叠合板目前只针对试验开展了相关研究, 揭示了新型抗剪连接件叠合板的破坏模式和破坏形态, 对该种形式的叠合板理论研究缺乏系统深入研究。

6. 总结

在今后发展体系中, 装配式建筑体系不可避免会成为建筑行业的主流趋势, 与此同时组合楼板的发展也不断朝着多元化发展, 不过仍存在相对应的问题亟须进一步深入研究。针对组合楼板目前开展的试验研究, 构件大都集中在静力荷载作用下的受弯、抗剪、耐久性能研究, 在相关动力荷载作用下的研究较少; 其次组合楼板在叠合界面处如何采取简便、综合性能较好的构造措施, 避免叠合面出现粘结滑移现象也是学者今后探讨的主要方向; 最后叠合板拼接节点处, 应当是楼板的薄弱区域, 学者应当对叠合板节点处的受力机理与破坏模式加强研究, 拼缝处的应力如何有效传递, 避免节点交接处发生破坏, 均可以作为未来研究发展方向。

参考文献

- [1] 曹万林, 张洁, 董宏英, 乔崎云, 周中一. 中强再生混凝土楼板抗弯性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 112-119.
- [2] Spathelf, C.A. and Vogel, T. (2018) Fatigue Performance of Orthogonally Reinforced Concrete Slabs: Experimental Investigation. *Engineering Structures*, **168**, 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.058>
- [3] Moon, S.K. and Lee, D.G. (1994) Effects of Inplane Floor Slab Flexibility on the Seismic Behaviour of Building Structures. *Engineering Structures*, **16**, 129-144. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0141-0296(94)90038-8)
- [4] 狄生奎, 杨万辉, 王立宪, 项长生. 考虑挠度影响的钢筋混凝土楼板可靠度分析[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(1): 122-126.
- [5] 王洪涛, 刘嫻春, 邵新妍, 李爽. 钢筋混凝土楼板均质化有限元模型[J]. 特种结构, 2017, 34(3): 21-26.
- [6] 刘晓娟, 袁康. 现浇楼板温度收缩裂缝的有限元分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2007, 25(3): 361-363.
- [7] Kataoka, M.N., Friedrich, J.T. and El Debs, A.L.H.C. (2017) Experimental Investigation of Longitudinal Shear Behavior for Composite Floor Slab. *Steel and Composite Structures*, **23**, 351-362. <https://doi.org/10.12989/scs.2017.23.3.351>
- [8] Ferrer, M., Marimon, F. and Casafont, M. (2018) An Experimental Investigation of a New Perfect Bond Technology for Composite Slabs. *Construction and Building Materials*, **166**, 618-633. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.104>
- [9] Shivam, S., Varun, T.V. and Anil, A. (2019) Insulation Effect of the Concrete Slab-Steel Deck Interface in Fire Conditions and Its Influence on the Structural Fire Behavior of Composite Floor Systems. *Fire Safety Journal*, **105**, 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.02.006>
- [10] 陈世鸣. 压型钢板-混凝土组合楼板的承载能力研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3): 19-26.
- [11] Hossain, K.M.A., Attarde, S. and Anwar, M.S. (2019) Finite Element Modelling of Profiled Steel Deck Composite Slab System with Engineered Cementitious Composite under Monotonic Loading. *Engineering Structures*, **186**, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.008>
- [12] Fewer, M., Marimon, F. and Crisinel, M. (2006) Designing Cold-Formed Steel Sheets for Composite Slabs: An Experimentally Validated FEM Approach to Slip Failure Mechanics. *Thin-Walled Structures*, **44**, 1261-1271. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.01.010>
- [13] 王森军, 杨俊杰, 郑懿, 邹传仁. 压型钢板混凝土组合板抗弯承载力影响因素的分析[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 43(1): 122-126.

- 2006, 34(5): 580-583.
- [14] Gholamhoseini, A., Gilbert, R.I., Bradford, M.A. and Chang, Z.T. (2014) Longitudinal Shear Stress and Bond-Slip Relationships in Composite Concrete Slabs. *Engineering Structures*, **69**, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.008>
- [15] 郝家欢. 压型钢板-混凝土组合楼板剪切粘结滑移性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [16] Li, Y.X., Jiang, L., Yu, Z.Q., Li, J. and Li, Y.W. (2012) Test Research on the Behaviors of Steel Bar Truss and Concrete Superimposed Floor Slabs. *Applied Mechanics and Materials*, **166-169**, 3-8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.3>
- [17] Liu, Y.L., Huang, J.Q., Chong, X. and Ye, X.-G. (2021) Experimental Investigation on Flexural Performance of Semi-Precast Reinforced Concrete One-Way Slab with Joint. *Structural Concrete*, **22**, 2243-2257. <https://doi.org/10.1002/suco.202000676>
- [18] 黄新宇, 郝彬, 吴胤, 熊梦雅. 钢筋桁架混凝土叠合板变形理论研究及试验分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(s1): 650-654.
- [19] 刘运林. 双向叠合楼板拼缝处受力机理试验研究与数值模拟[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [20] Nikhil, G., Das Chakladar, N., Gangadhara Prusty, B., Song, C. and Phillips, A.W. (2020) Modelling of Laminated Composite Plates with Weakly Bonded Interfaces Using Scaled Boundary Finite Element Method. *International Journal of Mechanical Sciences*, **170**, Article ID: 105349. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105349>
- [21] Majdi, Y., Hsu, C. and Zarei, M. (2014) Finite Element Analysis of New Composite Floors Having Cold-Formed Steel and Concrete Slab. *Engineering Structures*, **77**, 65-83. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.030>
- [22] 李晓明, 黄小坤, 蒋勤俭, 田春雨, 赵勇, 朱茜, 等. JGJ 1-2014. 装配式混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 8.
- [23] 赵基达, 徐有邻, 黄小坤, 朱爱萍, 王晓峰, 傅剑平, 等. GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [24] 程志军, 田春雨, 李然, 赵勇, 赵作周, 谢旺兰, 等. T/CECS 715-2020. 钢筋桁架混凝土叠合板应用技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [25] 黄炜, 罗斌, 李斌, 徐学坤, 苏衍江. 不同构造形式绿色混凝土叠合板受弯性能试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(7): 35-44.
- [26] Liu, J.P., Hu, H.F., Li, J., Chen, Y.F. and Zhang, L. (2020) Flexural Behavior of Prestressed Concrete Composite Slab with Precast Inverted T-Shaped Ribbed Panels. *Engineering Structures*, **215**, Article ID: 110687. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110687>
- [27] 李明, 王浩然, 赵唯坚. 单向带抗剪键叠合板的受力性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 654-667.
- [28] 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]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.