

文章编号:1007-9629(2021)05-1066-07

自燃煤矸石砂轻混凝土单向叠合板的受弯性能

周梅^{1,2}, 张院强^{1,2}, 杨尚谕¹, 张渤群^{1,2}, 张凯^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学 辽宁省煤矸石资源化利用及节能建材重点实验室, 辽宁 阜新 123000)

摘要:以混凝土组合形式及预制底板自燃煤矸石砂轻混凝土(SSC)的强度等级为变量,制作了5块SSC单向叠合板,通过静力加载试验,对其变形特征、破坏形态和裂缝开展情况进行了分析.结果表明:5块单向叠合板表现出相似的变形特征;分形维数分析表明,适当提高预制底板SSC的强度等级,保证了叠合面不出现滑移;合理设计的半普通混凝土-半SSC和全SSC单向叠合板,均具有良好的整体性和较高的极限荷载,能够作为楼板使用.

关键词:自燃煤矸石;单向叠合板;受弯性能;荷载;挠度;裂缝

中图分类号:TU375.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.023

Flexural Behavior of Unidirectional Laminated Plate of Spontaneous Combustion Gangue Sand Light Concrete

ZHOU Mei^{1,2}, ZHANG Yuanqiang^{1,2}, YANG Shangyu¹, ZHANG Boqun^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Coal Gangue Resource Utilization and Energy Saving Building Materials, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Using the concrete combination form and the spontaneous combustion gangue sand light concrete (SSC) strength grade of the precast bottom plate as variables, five SSC unidirectional laminated plates were prepared. Through static loading tests, the deformation characteristics, failure modes and crack development were determined. The results show that the five unidirectional laminated plates show similar deformation characteristics. The analysis of fractal dimension shows that the strength grade of SSC with precast bottom plate is appropriately increased to ensure that the slip of superimposed surface does not appear. Reasonably designed unidirectional laminated plate prepared by half-ordinary concrete and half-SSC and all SSC both have good integrity and high ultimate load, and can be used as floor plates.

Key words: spontaneous combustion gangue; unidirectional laminated plate; flexural behavior; load; deflection; crack

随着全球资源缩减和工业固废引发的环境问题以及建筑工业化的发展,大掺量固废制备装配整体式预制构件是行业发展的必然选择.近年来,国内外一些学者开展了相关研究^[1-7],一般认为预制-后浇材料为同品种混凝土时制备的桁架钢筋叠合板具有良

好的整体性和较高的刚度及承载力,能够作为结构楼板使用.但预制-后浇材料为不同品种混凝土、特别是“固废”集料混凝土制备的桁架钢筋叠合板,叠合面处是否会出现滑移有待商榷^[8-11].事实上中国装配式建筑发展历程中有30 a的断档期,导致了目前

收稿日期:2020-02-26; 修订日期:2020-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1261122);辽宁省教育厅科学技术项目(LJ2019FL006);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-12)

第一作者:周梅(1964—),女,广东潮阳人,辽宁工程技术大学教授级高级工程师,博士生导师,硕士.E-mail:Zhoumei1108@126.com

中国装配式建筑无论是设计理论、技术标准,还是绿色建材的应用等跟发达国家相比有一定的差距.

自燃煤矸石作为一种次轻级集料,能够为实现混凝土轻质、高强、保温等提供技术途径.近年来,Zhou等^[12]、李少伟等^[13]对自燃煤矸石集料混凝土的本构关系进行了研究,为结构应用奠定了基础.闫亚杰等^[14]开展了装配式自燃煤矸石集料混凝土夹层楼板试验,丰富了装配式夹层楼板形式的多样化.本文利用自燃煤矸石粗集料取代天然碎石,制备了自燃煤矸石砂轻混凝土(SSC)单向叠合板,并开展单向叠合板(ULP)抗弯性能的静力加载试验,研究其承载力、变形特征破坏形态和裂缝开展情况,为SSC单向

叠合板设计、生产和应用提供参考.

1 试验

1.1 原材料

粗集料(CAG)为5~20 mm连续级配的花岗岩碎石(N)和自燃煤矸石(S),其主要化学组成¹⁾和基本性质见表1、2;胶凝材料为P·O 42.5级普通硅酸盐水泥(C)和Ⅱ级粉煤灰(FA);细集料(FAG)为细度模数3.06且级配合格的天然河砂;拌和水(W)、附加水均为普通自来水;外加剂为聚羧酸高效减水剂(WRA),掺量为1.5%~2.5%,减水率为20%~30%.

表1 粗集料的主要化学组成
Table 1 Main chemical components of coarse aggregates

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl ⁻	MnO ₂	w/%
N	58.85	29.23	4.35	1.52	1.30	1.09	1.90	2.51	0.33	0.10	0.06	
S	59.34	25.28	4.66	4.50	2.00	1.70	1.15	0.53	0.25	0.21	0.15	

表2 粗集料的基本性质
Table 2 Basic properties of coarse aggregate

Type	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Bulk density/(kg·m ⁻³)		Porosity (by volume)/%	Water absorption (by mass)/%	Sturdiness/%	Crushed value/%
		Loose	Tap				
N	2 743	1 520	1 680	45.66	0.83	1.3	11.18
S	2 276	1 075	1 220	52.77	7.55	8.3	21.20

1.2 单向叠合板的设计及制作

混凝土设计要求:SSC强度等级分别为C30、C35和C40,普通混凝土(NAC)强度等级为C30;混凝土拌和物坍落度为30~50 mm.由表2可知,自燃

煤矸石粗骨料吸水率较高,为满足混凝土拌和物施工的工作性要求,需要拌和前1 h按吸水率80%的附加水对其进行预湿处理.混凝土配合比及主要力学性能见表3.

表3 混凝土配合比及主要力学性能
Table 3 Mix proportions and main mechanical properties of concrete

Concrete	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						Compressive strength at 28 d/ MPa	Young's modulus at 28 d/ GPa
	C	FA	W	WRA	FAG	CAG		
NAC	320.0	80.0	184.0	3.3	950.0	870.0	33.6	17.1
	320.0	80.0	175.0	6.6	924.0	820.0	30.8	13.9
SSC	360.0	90.0	178.0	7.3	866.0	800.0	35.9	16.4
	376.0	94.0	171.0	7.4	769.0	710.0	41.2	17.4

采用预制-后浇混凝土组合形式,以预制底板混凝土强度等级为变量,设计5块相同配筋率的单向叠合板,尺寸为2 100 mm×600 mm×130 mm,其中预制底板层厚度60 mm,后浇面层厚度70 mm,计算长度为1 800 mm.单向叠合板设计参数及其配筋详图

分别见表4和图1.

所有单向叠合板均在当地预制构件厂成型.由图1可知:为提高叠合面的抗剪能力,单向叠合板预制层配有桁架钢筋,并在预制层顶面进行了机械拉毛处理.预制底板成型28 d后完成上部后浇层混凝土

1)文中涉及的组成、掺量等除特殊说明外均为质量分数.

表4 单向叠合板的设计参数

ULP	Precast concrete (strength grade)	Post-poured concrete (strength grade)
N-N-P	NAC(C30)	NAC(C30)
N-S-P1	SSC(C30)	NAC(C30)
N-S-P2	SSC(C35)	NAC(C30)
N-S-P3	SSC(C40)	NAC(C30)
S-S-P	SSC(C30)	SSC(C30)

土的浇筑,再养护28 d后运至实验室,进行室内静力加载抗弯试验.

1.3 加载制度

楼板一般承受均布荷载,试验设计时采取几个集中荷载代替均布荷载(等效均布荷载).支撑方式为

简支形式,支点距板端部距离为150 mm.竖向加载采用100 t液压千斤顶,采用静态数据采集仪采集压力传感器传递的荷载.

根据15G366—1《桁架钢筋叠合板》、GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》和GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》,采用分级逐步加载方式,每级加载完成后持续10 min,活荷载标准值取2.0 kN/m².当加载荷载小于2.0 kN/m²时,每级荷载为0.4 kN/m²;当加载荷载大于2.0 kN/m²时,每级荷载为2.0 kN/m²;当加载荷载接近单向叠合板的预估极限荷载时,每级荷载为1.0 kN/m².为分析单向叠合板跨中挠度、裂缝开展等变化特征,单向叠合板制备过程中在受力钢筋上粘贴钢筋应变片、在叠合板侧面和底面粘贴混凝土应变片,并在叠合板的跨中、1/3处和支座处布置了位移计,测点布置见图2.

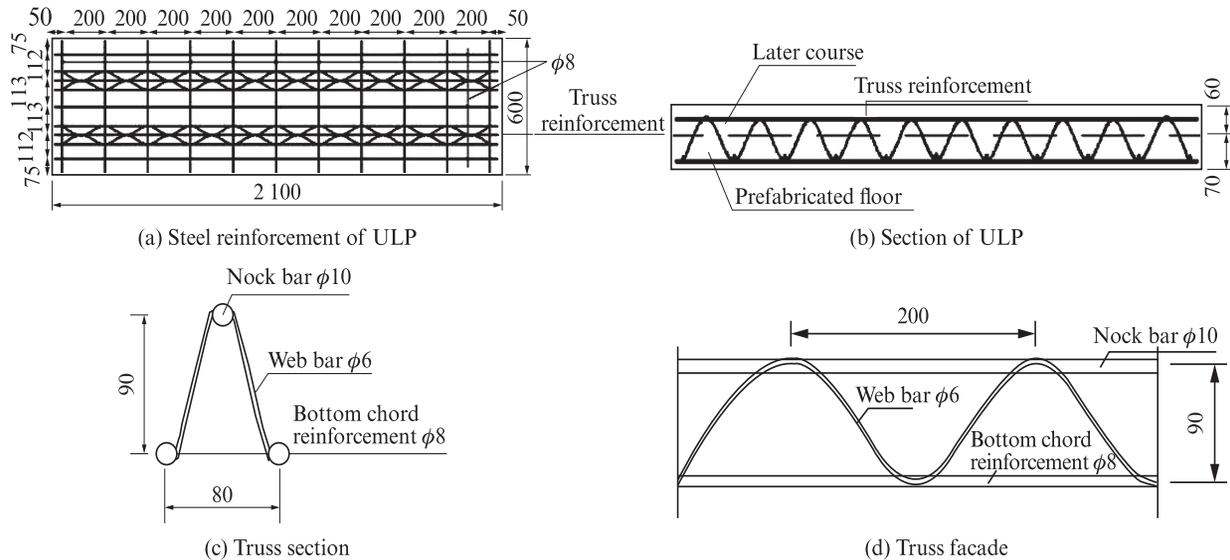


图1 单向叠合板配筋详图

Fig. 1 Cross section of reinforcement diagram of unidirectional laminated plate (size: mm)

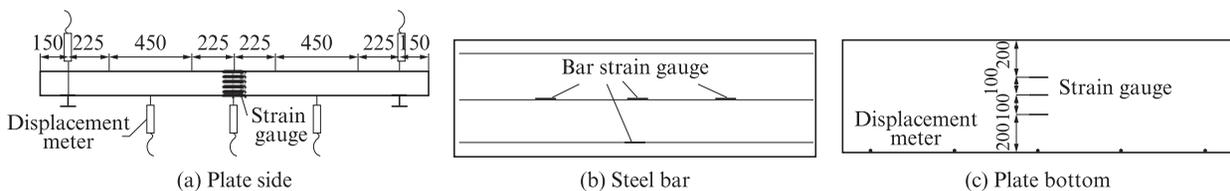


图2 测点布置

Fig. 2 Layout of measure points (size: mm)

2 结果与分析

2.1 组合形式及强度等级对叠合板承载力的影响

表5为单向叠合板抗弯试验结果,其中: f_{cr} 为开裂荷载, δ_{cr} 为挠度, f_u 为极限荷载.由表5可见:对于相同组合形式、不同预制底板强度的单向叠合板

(N-S-P1、N-S-P2、N-S-P3),预制底板混凝土强度等级越高,开裂荷载和极限荷载越大;对于预制底板与后浇混凝土同品种、同强度的混凝土单向叠合板(N-N-P、S-S-P),N-N-P开裂荷载和极限荷载高于S-S-P,即在相同强度等级条件下,NAC较SSC抗裂性能好;对于预制底板和后浇混凝土强度等级相同,

但组合形式不一定相同的单向叠合板(N-S-P1、N-N-P、S-S-P),同品种材料制备的单向叠合板开裂和极限荷载要大一些。

表5 单向叠合板抗弯试验结果

Table 5 Flectural test results of unidirectional laminated plates

ULP	$f_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	δ_{cr}/mm	$f_u/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$
N-S-P1	11.05	5.59	27.55
N-S-P2	13.07	3.85	31.88
N-S-P3	14.40	3.74	32.78
S-S-P	11.28	4.69	30.26
N-N-P	13.90	4.37	32.66

2.2 破坏特征及裂缝特点分析

单向叠合板破坏时板侧和板底裂缝形态见表6。

表6 单向叠合板破坏时板侧和板底裂缝形态及分形维数

Table 6 Morphology and fractal dimension of cracks on slab side and bottom of unidirectional laminated plates during failure

ULP	Image manipulation	Selected area	Location	Binary image	D_f
N-S-P1			Side		1.354 0
			Bottom		1.260 1
N-S-P2			Side		1.291 2
			Bottom		1.218 5
N-S-P3			Side		1.281 7
			Bottom		1.157 1
S-S-P			Side		1.255 7
			Bottom		1.114 4
N-N-P			Side		1.312 3
			Bottom		1.010 9

由表6可见:裂缝首先出现在弯矩较大的受拉区边缘,然后垂直向上穿过叠合面后逐渐向顶板发展;在N-S-P1上发现了一条延叠合面水平方向的微裂缝,长度约190 mm,之后该裂缝垂直向顶板发展;而N-S-P2和N-S-P3叠合面处均皆未发现水平微裂缝,说明只要适当提高预制底板SSC的强度等级,半NAC-半SSC单向叠合板的叠合面处就不会出现滑移;在活荷载标准值 $2.0 \text{ kN}/\text{m}^2$ 作用下,所有单向叠合板的挠度皆小于规范限值(9 mm).结合表5、6可知,5块单向叠合板的开裂荷载、极限荷载及挠度相差并不大,且都满足规范要求.通过合理设计的半NAC-半SSC单向叠合板、全SSC单向叠合板均表现出良好的整体性,所承受的极限荷载满足现有规范的要求。

由于自燃煤矸石组成复杂、均质性较差、离散性较大,使其制备的SSC非线性动力学行为显著.由表6可知,单向叠合板裂缝扩展形态具有一定的分形特征,为更好地揭示混凝土裂缝演变特征,采用分形维数表征了裂缝扩展的复杂程度^[15].选取等边长区域作

为研究对象,利用Matlab编程,首先对单向叠合板进行裂缝特征提取,包括降噪、灰度、二值化等步骤,然后采用盒维数法计算其分形维数,再通过改变预先设定的盒子尺度 r ,统计出在该尺度下具有裂缝像素点的盒子数目 $N(r)$,基于最小二乘法对 $\ln N(r)-\ln r$ 关系进行

线性拟合,由式(1)计算得到分形维数 D_f ,其结果见表6.

$$D_f = -\frac{d[\ln N(r)]}{d[\ln r]} \quad (1)$$

由表6还可见:(1)SSC裂缝多呈竖直扩展趋势,NAC裂缝多呈弯曲扩展趋势,故S-S-P侧面裂缝分形维数小,而N-N-P侧面裂缝分形维数较大.从N-S-P1中发现,虽然半NAC-半SSC单向叠合板预制底板和后浇混凝土强度等级相同,但由于混凝土品种不同,弹性模量相差较大,故在叠合面处出现了横向水平微裂缝,裂缝复杂程度增大,分形维数最大;而N-S-P2和N-S-P3提高了预制底板SSC强度等级,减小了与后浇NAC的弹性模量差,结果其叠合面处未发现横向裂缝,分形维数减小;(2)从底板裂缝来看,半NAC-半SSC单向叠合板,预制底板混凝土强度等级越高,单向叠合板的开裂荷载和极限荷载越大,分形维数越小;同品种、同强度混凝土制备的单向叠合板分形维数较小;(3)从单向叠合板卸载后裂缝的闭合程度及残余变形来看,由于NAC中天然碎石充分发挥着桥连闭合的作用,因此N-N-P破坏后整体性优于其他单向叠合板,卸载后的残余变形较大,底板板侧裂缝闭合程度较高,底板裂缝间距大,裂缝宽度小,因此分形维数最小.

2.3 荷载-挠度曲线

图3为单向叠合板的荷载(P)-挠度(δ)曲线.由图3可见:(1)所有单向叠合板挠度变化规律相似,具有明显的弹性工作、带裂缝工作和破坏3个阶段;弹性工作阶段荷载和挠度值均较小,带裂缝工作阶段混凝土慢慢退出工作,桁架钢筋承担了一部分荷载,挠度曲线未出现拐点;所有单向叠合板破坏前特征明显,属于典型延性破坏;(2)单向叠合板的挠度随

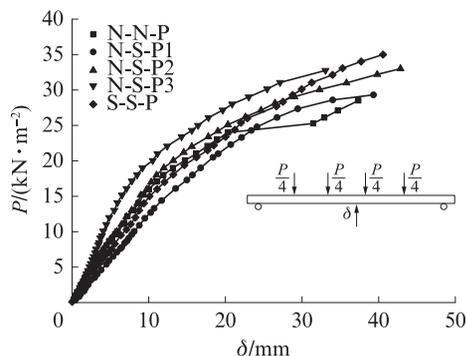


图3 单向叠合板的荷载-挠度曲线
Fig. 3 Load-deflection curves of unidirectional laminated plates

荷载增加缓慢增大,开裂后挠度增长速率逐步加快,底板荷载-挠度曲线的斜率逐渐减小;(3)从开始加载到破坏,N-S-P1挠度始终最大,开裂荷载和极限荷载最小,而N-S-P3的荷载最大、挠度最小,这说明预制-后浇混凝土组合形式及预制底板混凝土强度等级对单向叠合板抗弯和开裂确实存在影响,预制-后浇混凝土弹性模量差是保证二者能否协调工作的关键;(4)5块单向叠合板的荷载和挠度相差不大,说明配有桁架钢筋的半NAC-半SSC、全SSC单向叠合板都与普通混凝土制备的单向叠合板N-N-P受力性能相似,满足规范的要求.

2.4 荷载-混凝土应变曲线

单向叠合板的荷载-混凝土应变曲线见图4.由图4可见:预制底板SSC强度等级越高,上下2层混凝土的弹性模量越接近,二者协调工作可使混凝土拉应变减小;加载初期混凝土应变曲线基本重合,随荷载增大各单向叠合板的混凝土应变增大,但增幅不同,S-S-P增幅最大;所有单向叠合板荷载-混凝土应变曲线存在明显的卸载段(近似为直线).结合图3、4可知,N-S-P1开裂荷载和极限荷载最小,挠度和

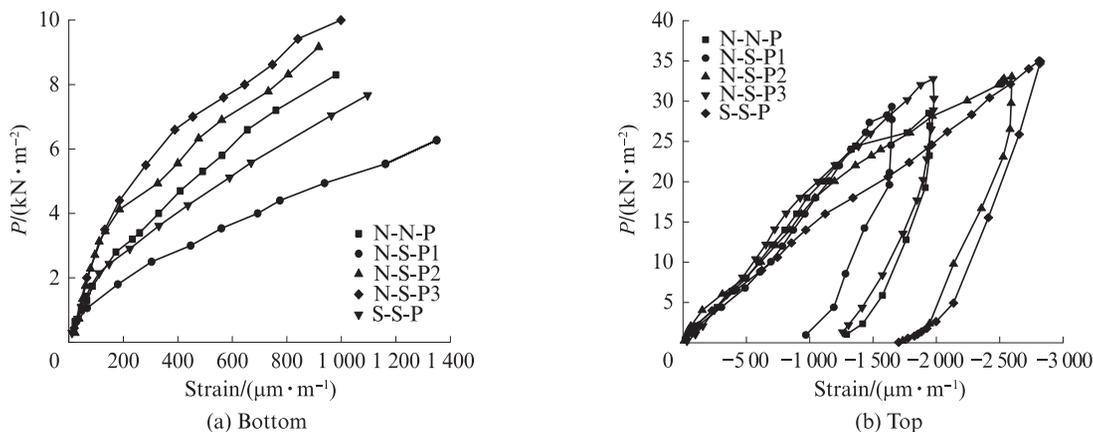


图4 单向叠合板的荷载-混凝土应变曲线
Fig. 4 Load-concrete strain curves of unidirectional laminated plates

底板混凝土应变最大,顶板混凝土应变最小.进一步说明不同品种混凝土组合形式制备的单向叠合板,不仅要关注混凝土强度等级,更应关注预制底板和后浇层不同混凝土的弹性模量差.

图5为单向叠合板板侧混凝土应变-截面高度曲

线.由图5可见:各单向叠合板板侧应变分布基本一致,板侧混凝土应变随截面高度均呈直线分布,而且中性轴位置不会随着荷载的增大而明显上移,始终保持在距板底端85 mm附近,故可以判定SSC制备的单向叠合板受力符合平截面假定.

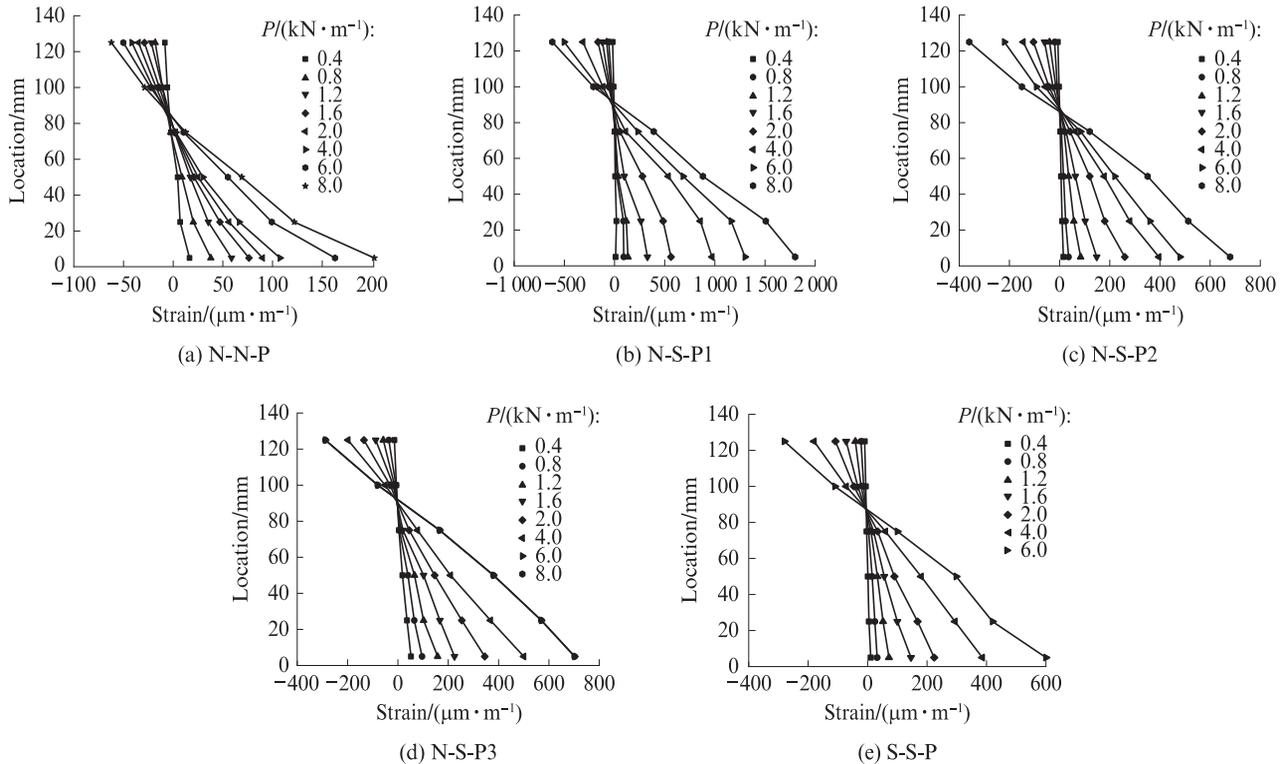


图5 单向叠合板板侧混凝土应变-截面高度曲线
Fig. 5 Curves of location-concrete strain of unidirectional laminated plates

2.5 荷载-钢筋应变曲线

图6为荷载-钢筋应变曲线.结合图4~6可见,荷载-钢筋应变曲线与荷载-混凝土应变曲线基本相似:加载前钢筋应变随荷载增大而增大,混凝土开裂后曲线没有出现明显的转折点,荷载增至极限荷载时,钢筋应变没有达到屈服状态,说明混凝土开裂

后桁架钢筋承担了一部分裂缝处的拉应力,同时也承担了一部分钢筋的拉应力,使得受拉钢筋的应变没明显增大.由此可见,适当提高SSC预制底板的强度等级,半NAC-半SSC单向叠合板荷载-钢筋应变曲线优于全NAC单向叠合板.说明只要设计合理,半NAC-半SSC单向叠合板用作结构楼板使用是安全的.

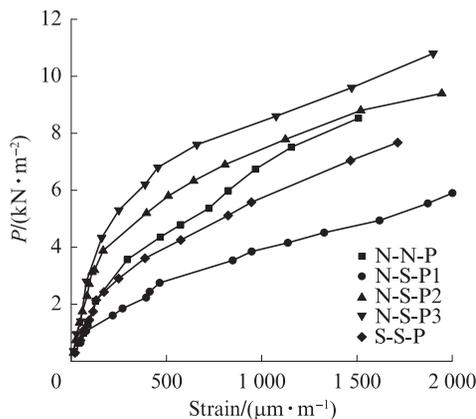


图6 荷载-钢筋应变曲线
Fig. 6 Load-steel bar strain curves

3 结论

(1)桁架钢筋半普通混凝土(NAC)-半自然煤矸石砂轻混凝土(SSC)、全SSC和全NAC制备的单向叠合板,具有相似的破坏特征和破坏形态.在达到极限荷载前,伴有裂缝数量增多及宽度增加的现象,挠度存在明显的发展过程,延性破坏特征明显.在楼面活荷载标准值下,挠度均满足现行规范的限值要求,SSC制备的单向叠合板作为结构楼板使用是安全的.

(2)单向叠合板裂缝分形维数分析表明,混凝土组合形式及SSC强度等级对单向叠合板裂缝发展有

一定影响,对半NAC-半SSC单向叠合板,更要关注预制-后浇混凝土弹性模量不同带来的变形差异,可以通过适当提高预制底板SSC混凝土强度等级来控制。

(3)桁架钢筋、叠合面处理及预制底板SSC的增强等共同作用下,半NAC-半SSC及全SSC单向叠合板都表现出良好的整体性和较高的极限荷载。合理设计的SSC单向叠合板作为楼板使用是可行的。

参考文献:

- [1] KOSTECKI T. Influence of backfill on coalpillar strength and floor bearing capacity in weak floor conditions in the Illinois basin[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76(1): 55-67.
- [2] ELGHAZOULI A Y, LZZUDDIN 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.
- [3] MOSALLAM A S, MOSALAM K M. Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(1): 43-54.
- [4] FOSTER S J, BAILEY C G, BURGESS I W, et al. Experimental behaviour of concrete floor slabs at large displacements [J]. Engineering Structures, 2004, 26(9): 1231-1247.
- [5] AWAD Z K, ARAVINTHAN T, YAN Z, et al. Geometry and restraint effects on the bending behaviour of the glass fibre reinforced polymer sandwich slabs under point load[J]. Materials and Design, 2013, 45: 125-134.
- [6] CRISINEL M, MARIMON F. A new simplified method for the design of composite slabs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3-5): 481-491.
- [7] LUBELL A S, BENTZ E C, COLLINS M P. Influence longitudinal reinforcement on one-way shear in slabs and wide beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(1): 78-87.
- [8] 黄超,谷倩,王朝晖,等.页岩陶粒混凝土叠合板原型堆载试验研究[J].武汉理工大学学报,2016,38(10):61-67.
HUANG Chao, GU Qian, WANG Zhaohui, et al. Imposed load test of full-scale shale-ceramsite concrete composite slabs [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(10):61-67. (in Chinese)
- [9] 吴瑞春,孟令帅,杜红凯,等.轻骨料混凝土叠合板受力性能试验研究[J].结构工程师,2017,33(6):103-109.
WU Ruichun, MENG Lingshuai, DU Hongkai, et al. Experimental study on mechanical properties of lightweight aggregate concrete superimposed slab[J]. Structural Engineers, 2017, 33(6):103-109. (in Chinese)
- [10] 黄炜,罗斌,李斌,等.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,2019,46(7):35-44.
HUANG Wei, LUO Bin, LI Bin, et al. Experiment on flexural behavior of green concrete composite slab with different structural forms [J]. Journal of Hunan University, 2019, 46(7):35-44. (in Chinese)
- [11] 谷倩,雷晓天,黄超,等.页岩陶粒轻质混凝土双向叠合楼板受力性能试验及挠度计算分析[J].建筑科学与工程学报,2018,35(6):102-110.
GU Qian, LEI Xiaotian, HUANG Chao, et al. Mechanical performance test and deflection calculation analysis of shale ceramsite lightweight concrete two-way composite floor slab[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(6): 102-110. (in Chinese)
- [12] ZHOU M, DOU Y W, ZHANG Y Z. Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 386-395.
- [13] 李少伟,周梅,张莉敏.自燃煤矸石粗集料特性及其对混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2020,23(2):334-340,380.
LI Shaowei, ZHOU Mei, ZHANG Limin. Properties of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate and its influence on concrete [J]. Journal of Building Material, 2020, 23(2):334-340, 380. (in Chinese)
- [14] 闫亚杰,赵强.装配式自燃煤矸石细石混凝土夹层楼板设计与试验研究[J].混凝土,2019(6):130-133,160.
YAN Yajie, ZHAO Qiang. Design and experimental study on assembled spontaneous combustion coal gangue fine stone concrete sandwich floor [J]. Concrete, 2019 (6): 130-133, 160. (in Chinese)
- [15] 杨尚谕,周梅,张玉琢,等.自燃煤矸石粗集料取代率对混凝土断裂韧性的影响[J].建筑材料学报,2020,23(4):858-864.
YANG Shangyu, ZHOU Mei, ZHANG Yuzhuo, et al. Effect of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate replacement ratio on fracties of three-point bending concrete beam [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 858-864. (in Chinese)