

渐增幅往复荷载下钢筋桁架楼承板 力学与声发射特性研究

陈徐东¹, 郑俊林¹, 杨杰², 施鑫², 吴瑾¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 210098 南京; 2. 中建三局集团有限公司上海分公司, 201206 上海)

摘 要:为探究钢筋桁架楼承板在疲劳荷载作用下的力学特性与损伤特征, 设计了2块相同的钢筋桁架楼承板试件、1种静力加载工况与1种渐增幅往复加载流程。结合声发射技术进行了单向板四点弯曲加载试验, 分析了往复加载对试件力学性能的影响与相关声发射参数特征。结果表明: 相比静力加载, 往复加载下的试件弹性工作性能基本不受影响, 极限承载力下降约11%但无明显脆性破坏特征, 反映了楼承板的可靠性; 桁架钢筋应变在加载过程中出现协同变化现象, 随着加载进行, 声发射振铃计数在不同时期呈现出3阶段损伤特征; R_A-A_F 值分布表明试件内部拉伸裂缝与剪切裂缝并存, 拉伸裂缝占主要比例, 而楼承板能在破坏阶段有效抑制混凝土的开裂。

关键词: 钢筋桁架楼承板; 渐增幅; 疲劳; 声发射; 损伤表征

中图分类号: O34; TU375.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.014

文章编号: 1000-4939(2026)01-0155-09 **CSTR:** 32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.014

Mechanical and acoustic emission characteristics of steel-bars truss deck under the impact of increasing amplitude cyclic loading

CHEN Xudong¹, ZHENG Junlin¹, YANG Jie², SHI Xin², WU Jin¹

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, 210098 Nanjing, China;

2. China Construction Third Engineering Group Co., Ltd. (Shanghai), 201206 Shanghai, China)

Abstract: To explore the mechanical characteristics and damage characteristics of steel-bars truss deck under fatigue load, two same steel bar truss deck specimens, one static loading condition, and one increasing amplitude cycle loading process were designed. By using acoustic emission technology, the four-point bend loading tests on one way slab were conducted, and the influence of cycle loading on the mechanical performance and acoustic emission parameters were analyzed. The results show that compared with static loading, the elastic working performance of the specimen under cycle loading is almost unaffected, and the ultimate bearing capacity is reduced by about 11%, with no obvious brittle failure feature, reflecting

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. SQ2021YFB2600031); 国家自然科学基金资助项目 (No. 52379124)

通信作者: 陈徐东, 教授. E-mail: cxdong1985@163.com

引用格式: 陈徐东, 郑俊林, 杨杰, 等. 渐增幅往复荷载下钢筋桁架楼承板力学与声发射特性研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 155-163.

CHEN Xudong, ZHENG Junlin, YANG Jie, et al. Mechanical and acoustic emission characteristics of steel-bars truss deck under the impact of increasing amplitude cyclic loading[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 155-163.

the reliability of the steel bar truss deck. In addition, the strain of truss rebar shows cooperative deformation. During the loading process, the AE ringing count of specimen presents three-stage damage features in different periods; the distribution of R_A-A_F value shows that the tensile cracks and shear cracks coexist in the specimens; the tensile cracks account for the main proportion, and steel bar truss deck can effectively inhibit the cracking of concrete in failure stage.

Key words: steel-bar truss deck; increasing amplitude; fatigue; acoustic emission; damage characterization

在城市现代化顺利推进的当下,我国大力推动建筑施工的标准化、产业化进程^[1],装配式建筑凭借其工业化生产、高效环保、优质便利等优点,得到世界各国的大规模推广应用^[2]。经历了两代楼承板发展的钢筋桁架楼承板性能优秀、经济方便,于近年来的工程项目中受到重视^[3]。国内外众学者对装配式楼承板进行了相关研究,KAVEH 等^[4]深入研究了钢结构楼承板系统在楼承板划分、板面厚度与组合梁方面的优化设计;FRAGIACOMO 等^[5]研究了木材混凝土复合楼承板系统的长期服役性能与耐久性;孙彤彤等^[6]提出了一种超薄细石混凝土为底板的新式钢筋桁架楼承板,给出了楼承板与钢梁及与混凝土梁连接的构造节点;安海玉等^[7]研究了以纤维水泥板作为底板的钢筋桁架叠合板受弯性能。目前我国对楼承板的研究主要聚焦于理论计算、新型材料、静力性能等方面,但在实际工程中,楼承板还会在长期服役中遭受动态荷载与往复荷载作用,使得结构内部产生并累积疲劳损伤,进而导致楼承板构件的性能劣化、安全性下降^[8]。建筑部品的疲劳特性在工程设计中往往得到重视,而关于钢筋桁架楼承板在疲劳荷载下的力学特性与开裂特征,目前整体研究成果仍然较少。

混凝土材料在受外部激励作用时,其内部压实、开裂等释放瞬态应变能的过程具备弹性波的形式^[9]。声发射技术(acoustic emission, AE)是通过声发射探头采集这类信号并进行存储,再对其进行分析以表征材料内部开裂与损伤特征的声学检测技术^[10-11]。凭借着实时监测、灵敏高、无损等优点,声发射技术近年来被广泛应用于土木工程材料的力学试验研究与结构检测^[12-13]当中。

为探究在疲劳荷载下钢筋桁架楼承板的力学特性与损伤开展特征,本研究设计了一种渐增幅往复加载流程,采用尺寸为 2 000 mm×600 mm,厚度为 140 mm 的单向楼承板试件进行四点弯曲疲劳试验研究,针对其疲劳力学特性进行分析的同时,结合试验结果与采集的声发射信号参数分析钢筋桁架楼承

板的疲劳损伤特性。

1 试验概况

1.1 试件设计

本研究设计了 2 块完全一样的钢筋桁架楼承板并浇筑为钢筋混凝土单向板,1 块进行渐增幅往复加载试验,1 块进行静力加载试验作为对照。楼承板几何尺寸为长度 2 000 mm,宽度 600 mm,单向板浇筑厚度为 140 mm,混凝土保护层厚度为 15 mm。楼承板的钢筋桁架节点间距为 200 mm,上弦钢筋间距为 200 mm,尺寸与构造详图如图 1 所示。

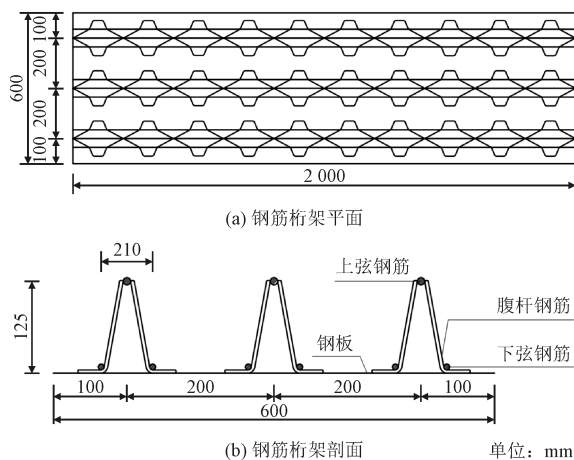


图 1 楼承板钢筋桁架详图

Fig. 1 Detailed drawing of steel bar truss deck

试件的浇筑采用强度等级为 C30 的混凝土,并在浇筑时以同批次剩余混凝土制作了 21 个尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块进行原材料抗压强度测试,得到结果如表 1 所示。

表 1 混凝土试件强度统计

Tab. 1 Strength statistics of concrete specimen

养护天数/d	F_{cu}/MPa	F_t/MPa
28	35.7	2.65

楼承板的上、下弦钢筋均采用热轧带肋钢筋 HRB400,直径分别为 8、10 mm;腹杆钢筋采用

CRB550 级冷轧钢筋,直径为 6 mm;楼承板底模采用镀锌钢板,厚度为 0.6 mm,双面镀锌量为 120 g/m²,楼承板配筋详情如表 2 所示。

表 2 桁架钢筋配置

Tab. 2 Configuration of steel bar truss

上弦钢筋	下弦钢筋	腹杆钢筋
Φ 8	Φ 10	Φ R6

1.2 试验方案

为研究钢筋桁架楼承板的疲劳特性,本研究对楼承板进行了渐增幅往复加载试验,即按不同荷载上限进行多级疲劳加载。在加载流程中,各级荷载的循环次数相同,且荷载上限将随着加载级数增大。渐增幅往复加载流程示意如图 2 所示。

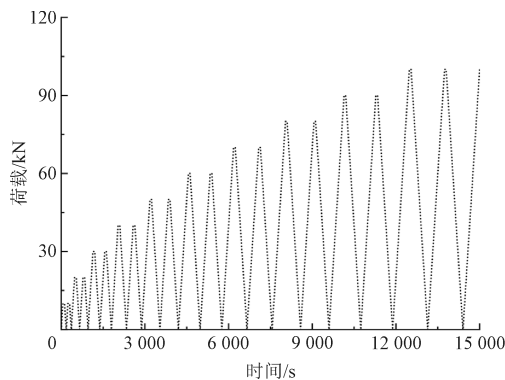


图 2 渐增幅往复加载流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the increasing amplitude cyclic loading process

基于此,本试验加载具体流程为:首先对试件进行 2 kN 的预加载,测试量测仪器响应;卸去预载后,根据所设计的荷载上限、荷载梯度与各级循环次数进行加载与卸载。各级加载、卸载速率均为 10 kN/min,每级加载于荷载上限持荷 1 min,直至试件发生破坏。具体的渐增幅加载流程方案如表 3 所示。对照组进行的静力加载试验同样采用 10 kN/min 的加载速率,每加载 10 kN 持荷 1 min,直至试件发生破坏。

试验的加载方式采用四点弯曲加载,加载设备由液压千斤顶、力传感器、分配梁、支座、反力架共同组成,其具体布置效果如图 3 所示。各级荷载上限 F 通过液压千斤顶直接施加到分配梁顶部,加载过程中产生的试验数据通过计算机自动采集。

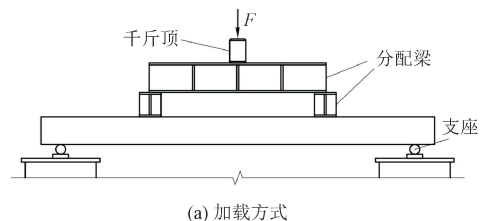
在试验过程中,对单向板的挠度变化与钢筋桁架楼承板的应变特征进行测量,从而研究楼承板的

变形与钢筋钢板受力情况。通过在单向板跨中、加载点底部等点位共设置 5 个位移计,测量试件的纵向位移变化;通过在楼承板底部钢板、桁架腹杆钢筋与上、下弦钢筋处粘贴应变片,测量钢筋桁架楼承板的受力变化。单向板的位移测点与底部钢板应变测点设置如图 4 所示,钢筋桁架楼承板的桁架钢筋测点设置如图 5 所示。

表 3 加载流程方案

Tab. 3 Loading process scheme

加载级次	荷载上限/ kN	荷载下限/ kN	增幅梯度/ kN	各级 循环次数
1	10	0	10	2
2	20	0	10	2
3	30	0	10	2
4	40	0	10	2
5	50	0	10	2
6	60	0	10	2
7	70	0	10	2
8	80	0	10	2
9	90	0	10	2
10	100	0	10	2
11	120	0	20	2
12	140	0	20	2
13	160	0	20	2
n	$160+20 \times (n-13)$	0	20	2



(a) 加载方式



(b) 加载装置

图 3 加载设备布置图

Fig. 3 Diagram of loading equipment layout

为采集加载过程中产生的声发射信号,在单向板顶面与板侧共安置 8 个型号为 PK6I 的声发射探头,测点布置如图 6 所示。数据采集系统采用美国物理声学公司生产的全天候结构健康检测系统,型号为 Sensor Highway III,信号采集阈值值设定为

40 dB。布置探头前,对试件测点表面进行打磨、清灰并均匀涂抹凡士林,确保探头接触面平整而达到较好的信号接收效果。

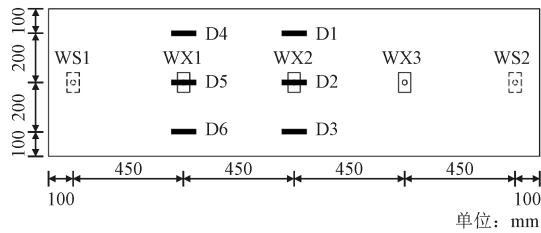


图4 位移与钢板应变测点设置

Fig. 4 Measuring point setting of displacement meter and plate strain

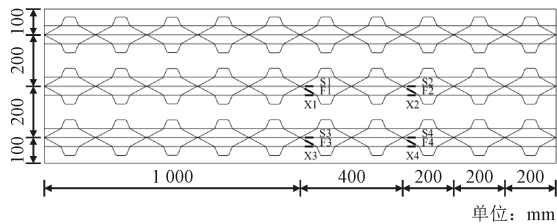


图5 钢筋桁架应变测点设置

Fig. 5 Measuring point setting of steel bar truss strain

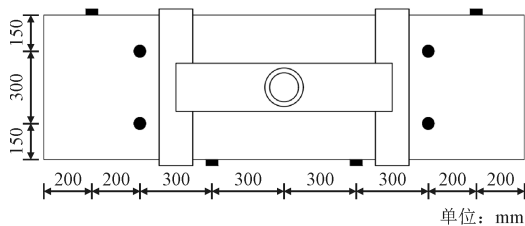


图6 AE探头测点布置

Fig. 6 Measuring point setting of AE probe



图7 试件裂缝形态图

Fig. 7 Cracks of the specimen

在荷载达到 160 kN 后,荷载几乎无法进一步增大,预示着楼承板钢材进入屈服阶段,继续对试件进行长时间持荷直至未有进一步试验现象,测得试件最大跨中挠度为 22.97 mm,最大残余挠度为 13.45 mm。

2.2 荷载-挠度曲线

荷载-跨中挠度曲线在一定程度上能反映试件的力学特性,在往复加载中,单次循环荷载上限时期的试件挠度被称为峰值挠度,该次循环卸载后的试

2 试验结果分析

2.1 试验现象

图7显示了试件在经历渐增幅往复加载流程后的板侧裂缝开展形态,板侧标注了各裂缝对应的加载级次。在加载结束后,可观察到试件跨中区域下凹,楼承板钢板产生一定曲度,板底混凝土出现部分剥落现象,但总体未与钢板发生分离;试件顶面则在跨中、分配梁附近形成垂直于长度方向的贯通长裂缝,并伴随加载产生混凝土压碎现象。

由板侧裂缝形态图可知,试件在荷载上限达到 40 kN 时的第 1 级加载结束,首先于跨中区域观察到 3 条较明显的裂缝,其从板底产生并沿着厚度方向发展。之后随着加载流程进行,跨中裂缝逐渐变宽、延长并呈 45° 水平夹角斜向发展,远离跨中的区域也逐渐发展出新的微小裂缝,这些裂缝向板两端呈现出一定的对称分布趋势。当荷载上限增加到 90 kN 时,于试件左侧支座处产生了向分配梁根部发展的斜向裂缝。在荷载上限达到 120 kN 后,该斜裂缝明显变宽、延长至分配梁根部,此阶段试件几乎不再产生新的裂缝;同时,能观察到试件板面裂缝宽度急剧发展,并不断发出混凝土压碎声响,试件底部能听到混凝土与钢板的剥落声响,试件的挠度发生急剧增长,残余挠度显著增大。

件挠度被称为残余挠度。依据实测挠度,将试件在往复加载中的峰值跨中挠度、残余跨中挠度与在静力加载中的跨中挠度进行对照,绘制荷载-挠度曲线如图8所示。

由图8可见,试件的荷载-挠度曲线大致呈现出三阶段特征,其中,残余挠度能直观反映往复加载中试件的刚度状态。在往复加载初期,荷载达到 40 kN 之前,试件的残余挠度没有明显的增长趋势,该时期伴随的现象多为混凝土孔隙、骨料压缩与受拉区微裂隙开展而产生的细微声响;荷载达到 40 kN 以后,

试件的残余挠度发生较稳定、缓慢的持续增长,该时期沿着试件长度方向的混凝土界面逐步开裂,有效截面面积逐渐减少,试件刚度逐步下降;荷载达到140 kN以后,试件残余挠度增长速率发生剧增,曲线斜率显著变大,这是因为随着后浇层混凝土累积了足够的疲劳损伤,楼承板钢筋与钢板开始作为主要受力构件,产生较严重的变形;荷载达到160 kN时,随着先期混凝土损伤累积,钢筋钢板进入屈服阶段,楼承板的刚度急剧降低,试件在荷载作用下发生严重弯曲,最终发生试件破坏。

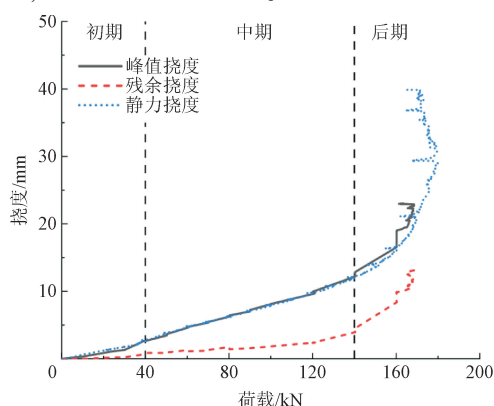


图8 试件荷载-跨中挠度曲线

Fig. 8 Curve of specimen load-mid span deflection

峰值挠度的性质与静力挠度相似,二者都表征了试件的力学性能,对比往复与静力曲线发现,荷载达到140 kN之前,两条曲线均呈现线性特征,并未发生分离,说明试件处于弹性状态,两种加载方式下的力学性能相近,荷载达到140 kN以后,两条曲线均呈现非线性特征,预示着钢筋钢板发生屈服。往复试件在荷载达到160 kN后便丧失力学性能,静力试件则随着荷载缓慢上升发生挠度剧增,最终因挠度过大发生破坏,显然往复加载试件破坏更早、承载力更低,这是因为静力加载的试件刚度损失主要发生在其破坏时期,而往复加载通过积累疲劳损伤使得试件刚度退化较早地发生。上述特征表明在往复荷载下,楼承板会由于疲劳损伤的积累发生承载力与刚度的退化,但其先期工作性能仍较良好,且没有明显的脆性破坏特征,这可能是楼承板整体性与其钢板底模产生的正面影响。

2.3 钢板应变特征

与峰值挠度、残余挠度相同,峰值应变与残余应变能反映钢材的力学特性,依据实测的跨中区域底部钢板在往复加载中的峰值应变、残余应变以及在静力加载中的应变,绘制荷载-应变关系曲线如图9所示。

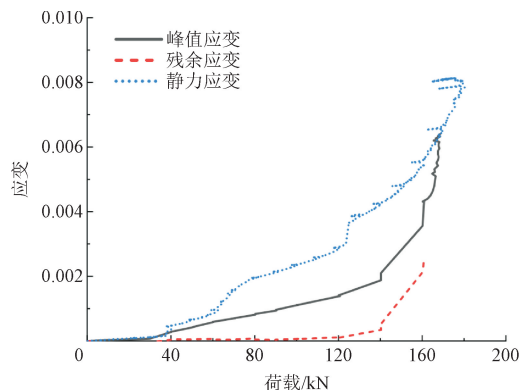


图9 底部钢板荷载-应变曲线

Fig. 9 Curve of bottom steel plate load-strain

可以看到,在荷载达到140 kN之前,底部钢板的峰值应变首先呈线性发展,残余应变几乎不发生变化,表明在此期间底部钢板一直处于弹性工作状态,产生的应变能随卸载较好地回弹;当荷载达到140 kN以后,曲线出现拐点,钢板的峰值应变与残余应变迅速发展,呈现明显的屈服特征;静力加载下钢板应变则表现出一条较平滑的弧线,与峰值应变曲线差异较大。

对比钢板应变曲线、试件挠度曲线,二者的特征存在显著区别:不同于试件残余挠度的缓慢增长,钢板残余应变在荷载达到140 kN以前变化极小,这是因为此时试件的变形趋势为板两端翘起、跨中区域下凹,跨中区域的钢板还未发生明显弯曲。同时,静力应变与峰值应变的曲线发展趋势有着较大的差异,原因在于静力加载中的混凝土虽然开裂,其没有立即破坏,而是通过黏结作用与楼承板共同受力,这使得曲线较为平滑,没有明显拐点出现;而往复加载中的混凝土经历反复受拉,虽然在加载初期充分发挥了其力学性能,破坏却也更为彻底,使得钢筋与钢板逐渐承受了全部拉力,因此往复曲线的早期应变低于静力曲线,并在后期表现出明显的屈服特征。

2.4 钢筋应变特征

由钢筋桁架测点得到的各钢筋杆件荷载-应变曲线如图10所示。

在荷载较低的时期,各钢筋的应变呈现线性发展特征,残余应变增长极缓慢,下弦钢筋作为主要受拉杆件应变增长较快,混凝土受压区的上弦钢筋在各级卸载中与下弦钢筋形成内力平衡,因此能观察到二者残余应变绝对值相近。当荷载达到140 kN,下弦钢筋与底部钢板成为主要受拉构件,应变增长速率进一步加快,残余应变的增长速率也明显提高,

在临近破坏时,下弦钢筋应变值超过钢材的屈服应变 0.001 942,其进入屈服阶段。在进入屈服阶段后,能观察到下弦钢筋的应变仍随着荷载继续增长,这可能是由于钢板通过与钢筋桁架的组合使楼承板拥有较高的整体刚度,并在加载中进一步承受了更多荷载。

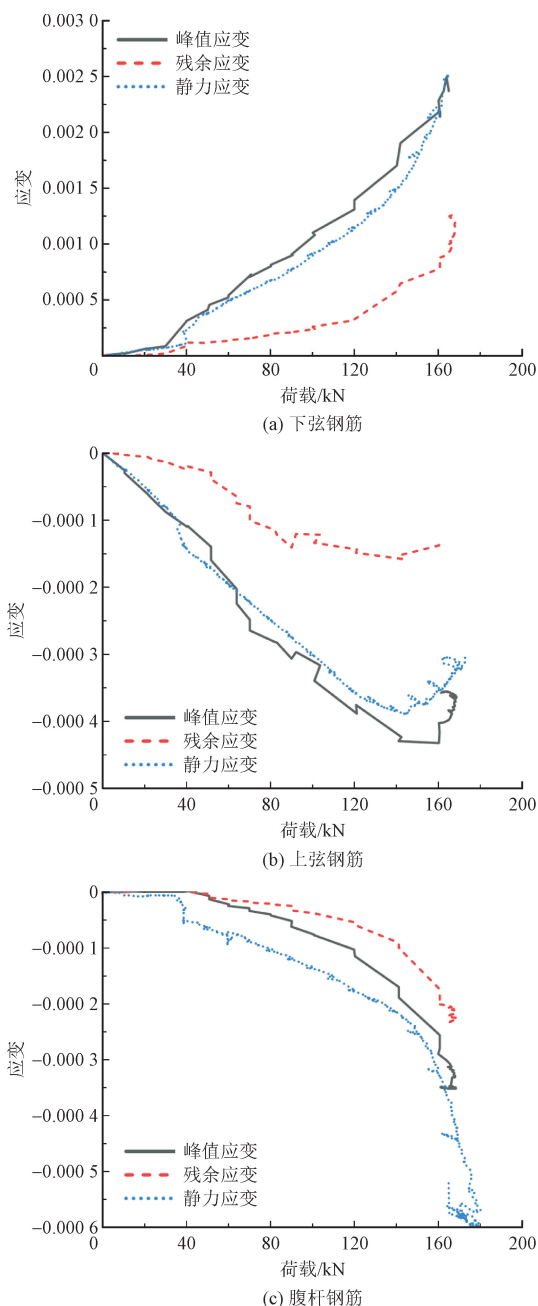


图 10 钢筋桁架荷载-应变曲线

Fig. 10 Curve of steel bar truss load-strain

在试件的破坏阶段,能由曲线观察到上弦与腹杆钢筋在远低于屈服应变时出现了屈服特征,这也是因为楼承板钢板与钢筋桁架的组合具备较好的整体性,使得上弦、腹杆钢筋与下弦钢筋、底部钢板在

加载中发生协同变形。

3 声发射特性

3.1 振铃计数

振铃计数是声发射检测过程中,对超过采集阈值的信号或振荡次数进行的计数。单位时间内振铃计数能反应试件声发射信号的活跃度,累计振铃计数能表征试件损伤的发展速度,二者都与试件的裂缝开展与损伤特征密切相关^[14-15]。图 11 为试件在加载过程中的各级荷载上限、振铃计数分布、累计振铃计数与时间关系曲线图。

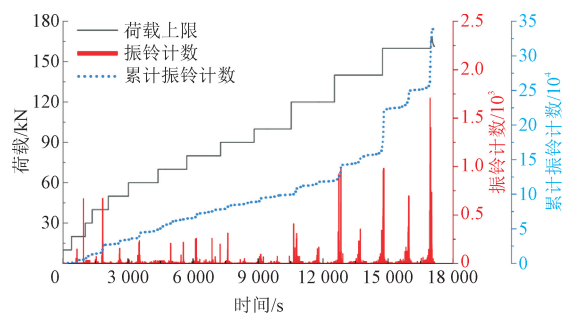


图 11 荷载上限-时间曲线、累计振铃计数-时间曲线与振铃计数-时间柱状图

Fig. 11 Curve of time-load upper limit, cumulative ring count-time and histogram of ring count

在加载过程中,振铃计数的分布与荷载-挠度曲线趋势相似,大致呈现出 3 阶段的特征。第 1 个阶段对应荷载较低的挠度曲线前期,此阶段振铃计数出现少数激增点,而累计振铃计数增长较缓;第 2 个阶段对应试件发生显著破坏前的挠度曲线中期,该时期累计振铃计数增长速率稳定、各时段振铃计数分布较为均匀,这是因为试件后浇层混凝土在此时期不断受拉开裂,受拉区面积减少,钢筋钢板还处于弹性工作状态;第 3 个阶段对应荷载达到 120 kN 以后的挠度曲线后期,累计振铃计数发生多次断崖式增长。由图 11 可见,该时期累计振铃计数初始值为 11×10^4 ,在加载结束后其达到最大值 35×10^4 ,是试件发生剧烈损伤的主要时期。随着振铃计数多次发生剧增突变,表明试件内部随加载发生多次剧烈破坏现象。

图 12 显示了加载前期与后期 2 个信号较为活跃的区间的荷载、振铃计数与累计振铃计数特征,可以看到在荷载较低时,振铃计数幅值与荷载上限呈错峰出现,原因可能是混凝土材料于此区间受外荷

载激励后,其自身产生内部孔隙密合、粗骨料挤压、微裂隙开展等现象,从而使得声信号的产生提前或滞后于荷载上限。同时,该区间内累计振铃计数虽有个别突增趋势,但突增点间的增长速率相对较为缓慢,说明此时期试件累积的疲劳损伤较少。加载后期的累计振铃计数曲线也显示出突增点多、突增点间增长较慢的特征,但二者的区别在于:此阶段振铃计数幅值的出现基本提前或临近荷载上限、累计振铃计数突增量远远高于前期。这是因为在加载后期,后浇层混凝土已经累积了大量疲劳损伤,当荷载再次达到荷载上限,试件内产生的声信号大部分来自混凝土压碎与楼承板挠度回弹后的进一步变形,同时由于此时期混凝土大部分开裂、钢筋钢板已经发生屈服,试件整体刚度流失严重,在荷载重新达到荷载上限前试件内都不会再有明显的损伤出现,各荷载上限间的累计振铃计数对应地没有明显的增长趋势,因此能观察到累计振铃计数曲线呈现明显的多级阶梯式特征。

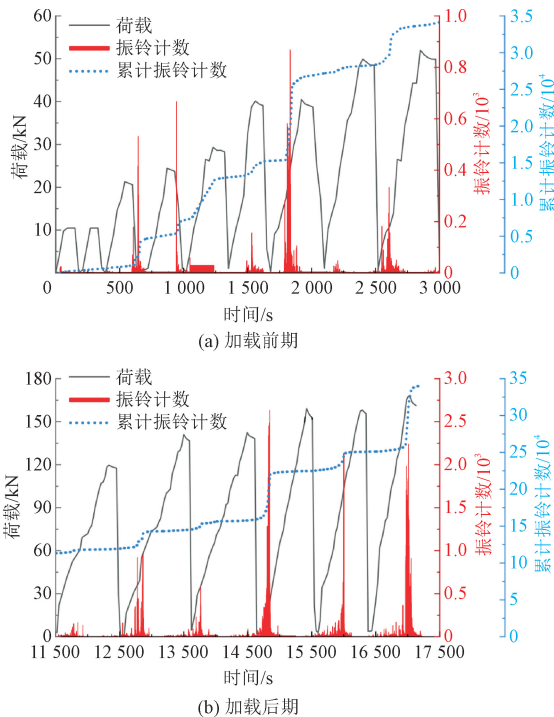


图12 活跃区间的荷载-时间曲线、累计振铃计数-时间曲线与振铃计数-时间柱状图

Fig. 12 Curve of time-load, cumulative ring count-time and histogram of ring count in active period

3.2 R_A - A_F 值

混凝土裂纹的开展一般有拉伸与剪切2种形式,拉伸引起裂纹2侧的运动产生的声发射信号波

形为纵波,具有较短的上升时间和较高的频率,而剪切破裂产生的声发射信号波形通常出现较长的波形,从而导致上升时间较长,信号频率较低^[16]。声发射参数中的 R_A 值为上升时间与幅值的比值, A_F 值为振铃计数与持续时间的比值。根据拉伸与剪切波的特征,使用这2个参数的比值可以区分拉伸裂纹和剪切裂纹,以进行裂纹类型判别: R_A 值高、 A_F 值低的特征对应剪切开裂,而 R_A 值低、 A_F 值高的特征对应拉伸开裂, R_A - A_F 值可用来分析试件的开裂形式。 R_A 值与 A_F 值的分界比例取值受到材料类型、传感器布设等条件的影响,本研究通过参考先期研究^[17-18],将比值10:1设为试件裂缝类型分界比例。

根据3.1节所述的三区间特征,图13为加载过程中各时期的试件 R_A - A_F 值示意图。

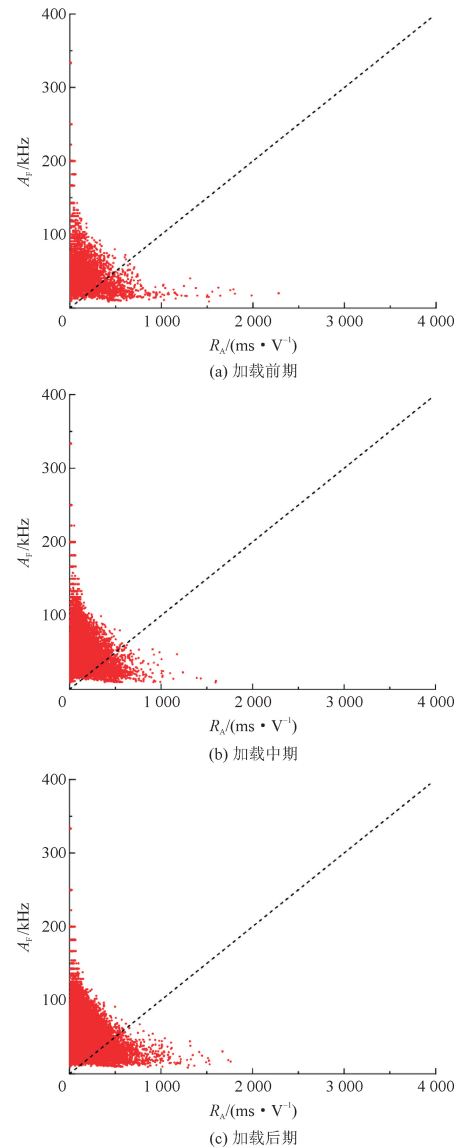


图13 往复加载各时期 R_A - A_F 值

Fig. 13 The R_A - A_F value of each period during cycle loading

根据 R_A-A_F 值与相关的声发射信号波形特征,图中分界线上部的信号为拉伸信号,分界线下部的信号为剪切信号。可以看到,钢筋桁架楼承板试件在往复荷载作用下的损伤特征是:随着往复加载流程进行,在荷载较低、混凝土发生密实为主的加载前期,声发射信号源明显较少,伴随骨料的受力与微裂隙的开展,剪切与拉伸信号并存且而拉伸信号占比较大;当荷载上限逐渐增大,混凝土在往复荷载作用下反复受拉、积累疲劳损伤,拉伸信号占比有所增大,且随着试件两侧剪弯段的剪力与弯矩增大,混凝土表面开始出现斜裂缝,桁架腹杆钢筋承受的剪力也逐渐增大;当试件进入破坏时期后,其声发射信号源明显增多,剪切信号占比明显增加,这是因为随着先前混凝土严重开裂、有效截面面积减少,混凝土内部剪应力随之增大,使得剪切信号的产生要多于拉伸信号。同时由于此时期楼承板承受了主要的荷载,不仅使混凝土承担的拉应力大幅减少,其还能通过自身的整体刚度、钢筋桁架与混凝土间的黏结作用来约束混凝土的过度变形,从而进一步抑制了拉伸信号的产生。

4 结 论

本研究对钢筋桁架楼承板试件开展了渐增幅往复加载试验,结合声发射技术探究了钢筋桁架楼承板试件在疲劳荷载作用下的力学特性,得出结论如下。

1) 往复荷载条件对钢筋桁架楼承板的弹性阶段工作性能几乎没有影响,但其导致了试件极限承载力的下降与延性的损失。

2) 在往复荷载作用下,底部钢板为主要受拉部件并发生屈服,桁架钢筋力学性能受往复加载的影响较小,并由于楼承板的焊接整体性出现了应变协同变化现象。

3) 楼承板的声发射振铃计数在加载过程中呈现出三阶段特征:加载前期、后期的累计振铃计数呈现多级阶梯跳跃增长,代表出现剧烈损伤;加载中期的累计振铃计数呈现线性增长,代表损伤稳定积累。

4) 分析试件的 R_A-A_F 值,发现在往复荷载作用下,试件内部同时存在拉伸与剪切裂缝,其中拉伸裂缝占主导地位,剪切裂缝的占比随着楼承板的损伤进程而有所增加。

参考文献:

- [1] 夏海山,李敏. 新型建筑工业化的模数协调与智能建造[J]. 建筑科学, 2019, 35(3):147-154.
XIA Haishan, LI Min. Modular coordinated and intelligent construction of new architectural industrialization[J]. Building science, 2019, 35(3):147-154(in Chinese).
- [2] 李慎,丁世豪,李晓蕾,等. 新型装配式梁柱节点有限元参数分析[J]. 应用力学学报, 2024, 41(2):453-465.
LI Shen, DING Shihao, LI Xiaolei, et al. Finite element parametric analysis of new assembled beam-column joints[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2):453-465(in Chinese).
- [3] 陈玲珠,李国强,蒋首超,等. 高温下钢筋桁架楼承板中栓钉抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5):116-123.
CHEN Lingzhu, LI Guoqiang, JIANG Shouchao, et al. Experimental studies on behavior of headed stud shear connectors embedded in steel bar truss floor slabs at elevated temperatures[J]. Journal of building structures, 2015, 36(5):116-123(in Chinese).
- [4] KAVEH A, GHAFARI M H. Optimum design of steel floor system; effect of floor division number, deck thickness and castellated beams[J]. Structural engineering and mechanics, 2016, 59(5):933-950.
- [5] FRAGIACOMO M, GUTKOWSKI R M, BALOGH J, et al. Long-term behavior of wood-concrete composite floor/deck systems with shear key connection detail[J]. Journal of structural engineering, 2007, 133(9):1307-1315.
- [6] 孙彤彤,常卫华,雷强,等. 装配式钢筋桁架楼承板力学性能试验及理论研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(11):105-111.
SUN Tongtong, CHANG Weihua, LEI Qiang, et al. Experimental and theoretical study on mechanical properties of assembled truss deck[J]. Building science, 2022, 38(11):105-111(in Chinese).
- [7] 安海玉,郑子硕,曹宇,等. 钢筋桁架纤维水泥叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(16):74-78.
AN Haiyu, ZHENG Zishuo, CAO Yu, et al. Experimental study on flexural performance of reinforced truss fiber cement composite slabs[J]. Building structure, 2022, 52(16):74-78(in Chinese).
- [8] 张俊,陈红鸟,王德强. 基于 DIC 技术的混凝土往复荷载下断裂力学特性研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4):1636-1643.
ZHANG Jun, CHEN Hongniao, WANG Deqiang. Study on fracture properties of concrete under cyclic loading by using DIC technique[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(4):1636-1643(in Chinese).
- [9] 卜静武,徐慧颖,羌宇杰,等. 橡胶混凝土轴拉破坏过程中声发射特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(2):78-86.
BU Jingwu, XU Huiying, QIANG Yujie, et al. Acoustic emission characteristics of rubber concrete in axial tension process[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2022, 39(2):78-86(in Chinese).

- Chinese).
- [10] 高文根, 段会强, 杨永新. 周期荷载作用下煤岩声发射特征的颗粒流模拟[J]. 应用力学学报, 2021, 38(1):262-268.
GAO Wengen, DUAN Huiqiang, YANG Yongxin. Particle flow simulation of acoustic emission characteristics of coal sample subjected to cyclic loading[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(1):262-268(in Chinese).
- [11] TANG Y, GUO Y Z, CHEN X D, et al. Acoustic emission characteristics of concrete cylinders reinforced with steel-fiber-reinforced composite bars under uniaxial compression[J]. Journal of building engineering, 2022, 59:105074.
- [12] VIDYA SAGAR R, BASU D J. Damage assessment of reinforced concrete structures under elevated-amplitude cyclic loading using sentry values based on acoustic emission testing[J]. Nondestructive testing and evaluation, 2023, 38(4):612-630.
- [13] ABDUL KUDUS S, MUHAMAD BUNNORI N, MUSTAFFA N K, et al. Investigation on acoustic emission parameters due to fatigue damage of concrete beams with variable notched depth[J]. International journal of concrete structures and materials, 2022, 16(1):29.
- [14] 王岩, 王瑶, 路桂娟, 等. 变幅循环荷载下混凝土轴拉声发射特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1):45-49.
WANG Yan, WANG Yao, LU Guijuan, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of concrete under variable amplitude cyclic tension loading[J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2014, 42(1):45-49(in Chinese).
- [15] 冯璐, 陈徐东, 张锦华, 等. 基于声发射技术的非标准自密实混凝土三点弯曲梁动态断裂特性[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2):630-640.
FENG Lu, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Dynamic fracture characteristics of non-standard three-point bending self-compacting concrete beams based on acoustic emission[J]. Acta materialiae compositae Sinica, 2021, 38(2):630-640(in Chinese).
- [16] LI S T, FAN X Q, CHEN X D, et al. Development of fracture process zone in full-graded dam concrete under three-point bending by DIC and acoustic emission[J]. Engineering fracture mechanics, 2020, 230:106972.
- [17] 范向前, 葛菲. 基于声发射技术的早龄期混凝土断裂性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(2):153-160.
FAN Xiangqian, GE Fei. Fracture performance of early-age concrete based on acoustic emission measurement[J]. Journal of building materials, 2024, 27(2):153-160(in Chinese).
- [18] CHEN C, FAN X Q, CHEN X D. Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission[J]. Construction and building materials, 2020, 237:117472.

(编辑 李坤璐)