

高铁站房型钢混凝土梁疲劳性能试验

童乐为^{1,2}, 咸庆军¹, 周丽瑛^{1,3}, 陈以一^{1,2}

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 新加坡城市道路建设局, 新加坡 999002)

摘要: 鉴于型钢混凝土(SRC)梁在高铁站房应用的需要, 对 3 根尺度和构造细节与实际工程一致的 H 型钢混凝土梁进行了基于设计荷载的静力试验和 200 万次的疲劳试验. 在此基础上, 继续进行了增大荷载幅的疲劳试验. 介绍了 SRC 梁试件、加载和测试等方案以及试验结果, 比较了静力加载和疲劳加载阶段的结构性能, 阐述了 SRC 梁疲劳裂纹萌生和扩展的破坏特点. 研究表明: 在设计荷载静力作用和 200 万次循环作用下, SRC 梁保持完好, 处在弹性阶段, 混凝土表面最大裂缝宽度不超过 0.2 mm; 增大荷载幅之后, 这些 SRC 梁又经历了 31~146 万次寿命后发生疲劳破坏; 疲劳破坏之前, SRC 梁各组件协同工作良好, 应变分布符合平截面假定; 疲劳破坏起源于 H 型钢受拉翼缘与腹板的焊接部位, 焊接 H 型钢梁的疲劳性能对整个 SRC 梁的疲劳强度起着十分关键的作用. 最后提出了改善 SRC 梁疲劳强度的建议和未来需进一步研究的工作.

关键词: 焊接 H 型钢混凝土梁; 高周疲劳试验; 结构性能; 疲劳破坏模式与机理

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

Experiment Study on Fatigue Behavior of Steel Reinforced Concrete Girders at High-speed Railway Stations

TONG Lewei^{1,2}, XIAN Qingjun¹, ZHOU Liying^{1,3}, CHEN Yi^{1,2}

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Singapore Urban Road Construction Board, Singapore 999002, Singapore)

Abstract: For the sake of the application of steel reinforced concrete (SRC) girders to high speed railway stations, the static and 2 million-cycle fatigue tests were carried out on three H-section steel reinforced concrete girders with the same dimension and constructional detail as those of an engineering project under the designed loading.

Subsequently, some further fatigue tests were carried out under the higher loadings, and the specimens, loading and testing program as well as the experiment results were presented accordingly. A comparative study was also made of structural behavior under static and fatigue loading. The failure feature of SRC girders about fatigue crack initiation and propagation was described. Experiment study results show that the SRC girders remains in good condition and at the stage of elasticity when they are tested with the designed static loading and 2 million-cycle fatigue loading. The concrete surface crack develops within 0.2 mm. Fatigue failure occurs when higher loadings and another 0.31 to 1.46 million cycles being applied to the girders. Before the fatigue failure, all components of the SRC girders collaborate well and their strain distribution agree well with the assumption of plane cross section. The fatigue failure initiates from the welded connection between a flange and a web of the H-section steel. The fatigue behavior of the welded H-section steel beam plays a key role in the fatigue strength of SRC girders. The proposals for improving the fatigue strength of SRC girders and future research works are put forward finally.

Key words: welded H-section steel reinforced concrete girders; high cycle fatigue experiments; structural behavior; fatigue failure mode and mechanism

型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)结构, 是由核心部分的型钢与外部的钢筋和混凝土并结合一定数量的栓钉连接件而组成的一种新型钢-混凝土组合结构. 近年来我国高速铁路发展迅速, 与之配套的高铁客运站房需要大量地建造. 在一些大型多功能交通枢纽建设中, 高铁站房的楼面结构采用了 SRC 梁. 高铁列车的日常运营, 势必造成站房楼面 SRC 梁直接受到列车荷载的频繁作用, 因此, 在设计寿命期内, 必须考虑 SRC 梁的疲劳强度问题.

目前国内外虽然已进行了较多的 SRC 梁的研究,但主要是针对最基本的实腹式充满型 SRC 梁的静力性能及其承载力,涉及混凝土受压区、钢筋、型钢、栓钉连接件的受力性能,型钢与混凝土的共同工作能力,粘结滑移影响等问题,提出了一些设计计算方法,例如基于钢梁原理的方法、钢筋混凝土(RC)梁原理的方法、钢梁与 RC 梁叠加原理的方法、基于 SRC 梁极限状态的方法^[1-3].我国现行的《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)仅给出了 SRC 梁、柱、节点等的静力计算规定^[4].

有关 SRC 梁的疲劳研究,目前国内外几乎是个空白,查阅到的文献仅是 1990 年日本 Izumi 等^[5]进行了扭转和弯矩条件下少量 SRC 梁和 RC 梁的疲劳比较试验.该文献的报道非常简要,仅指出受弯 SRC 梁中的钢梁疲劳强度比钢筋疲劳强度低,SRC 梁疲劳裂纹的数量、宽度与 RC 梁没有什么差别^[5].

本文基于高铁站房建设的需要,进行了 3 根足尺的实腹式充满型 SRC 梁的疲劳试验研究,以期达到两个方面的目的:第一,考察所设计的 SRC 梁是否能达到 200 万次的疲劳寿命;第二,如果未达到 200 万次疲劳寿命,则如何改进设计;如果能达到 200 万次疲劳寿命,则进一步加大疲劳荷载幅促其破坏,考察 SRC 梁各组件的疲劳行为和规律及破坏特点.

1 试验方案

1.1 试件与加载方式

图 1 和图 2 为 SRC 梁试件的截面尺寸和构造细节,采用与实际工程一致的足尺模型.为了达到设计院对梁内最大内力(剪力和弯矩)设计值的要求,并结合实验室疲劳试验机千斤顶的加载能力,采用伸臂梁,支座 1 为受压的铰接支座,支座 2 为能抗拔的铰接支座.千斤顶荷载 P 作用在伸臂梁的端部上方,使其根部 a-a 截面达到内力设计值,剪跨比为 2.625,以受弯为主.与实际工程的简支 SRC 梁相比,不同之处在于试件上翼缘受拉、下翼缘受压,相当于对简支梁向上加载,实现内力等效的试验方法.梁试件共 3 个,长度和截面构造完全相同,分别称为 B1、B2 及 B3.

梁试件采用 C35 混凝土、HRB335 纵向钢筋及箍筋、Q345B H 型钢焊接钢梁(采用 K 形熔透对接焊缝)和 Q235 栓钉,各种材料的材性试验结果见表 1 和表 2.表 1 中 f_y 、 ϵ_y 、 f_u 均为平均值.表 2 中 f_{cu} 为平

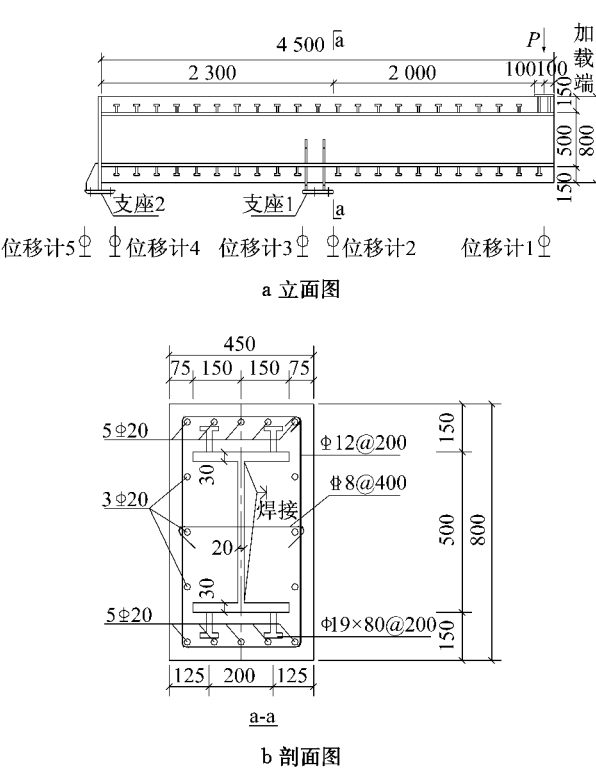


图 1 SRC 梁试件(单位:mm)
Fig.1 Specimen of SRC girders(unit:mm)

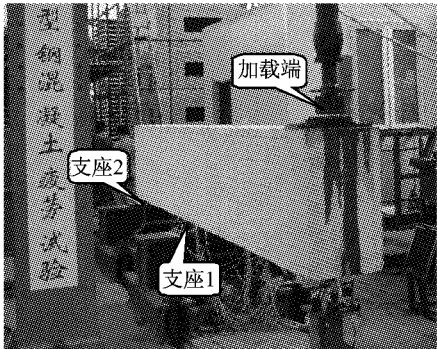


图 2 SRC 梁试验
Fig.2 Test of SRC girder

表 1 SRC 梁中钢材力学性能试验结果

Tab.1 Mechanical property of steel in SRC girder			
材料	屈服强度 f_y /MPa	屈服应变 $\epsilon_y/10^{-6}$	抗拉强度 f_u /MPa
H 型钢翼缘	331	1 607	513
H 型钢腹板	413	2 005	560
纵向钢筋	345	1 725	528

表 2 SRC 梁中混凝土力学性能试验结果

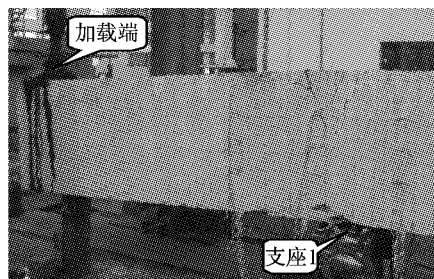
Tab.2 Mechanical property of concrete in SRC girder			
	SRC 梁		
	B1	B2	B3
立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	38.4	47.4	49.9
压应变 $\epsilon_0/10^{-6}$	2 000	2 000	2 000

(3) 在疲劳加载循环 200 万次以内性能没有变化;

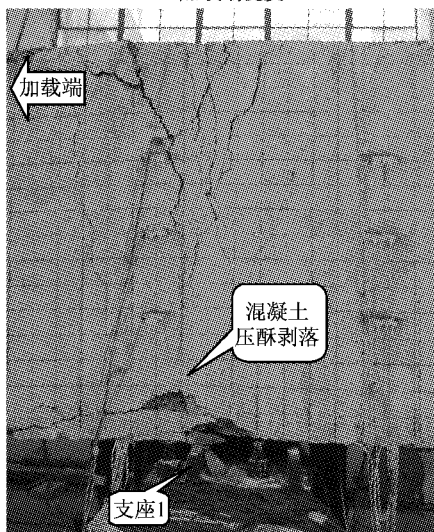
表4 SRC梁试验过程中的表现性状和破坏特征

Tab.4 Apparent and failure feature of SRC girders during experiments

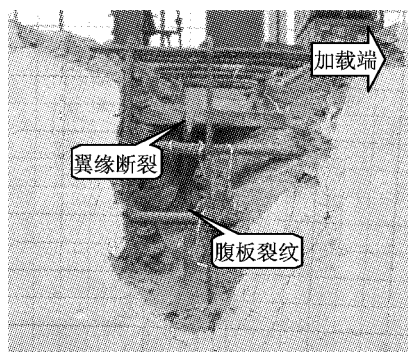
	B1	B2	B3
静力试验	3根梁具有类似的性状:支座1附近梁顶面及两侧面出现细微裂缝,其中部分裂缝正好处于梁内箍筋所在截面,最大裂缝宽度不超过0.1 mm.		
第一级疲劳试验	3根梁具有类似的性状:原有裂缝沿长度继续扩展,同时又出现许多新的细微裂缝,裂缝宽度及加载端挠度没有明显增大变化,加载200万次后的最大裂缝宽度不超过0.2 mm,满足设计要求.		
第二、三级疲劳试验	第二级疲劳试验的性状:累积加载至238万次时,支座1处梁顶面及两侧面又出现部分新裂缝,其中有几条裂缝在梁顶面贯通,宽度超过1 mm,并沿正截面迅速向下扩展,直到下部混凝土压酥剥落,加载端挠度增大至110 mm,为悬臂跨度的1/20,此时梁正截面疲劳破坏丧失承载力,见图4a、4b.	第二级疲劳试验的性状:特征同第一级疲劳试验,梁无破坏征兆. 第三级疲劳试验的性状:累积加载至360万次时,支座1处梁顶面及两侧面又出现部分新裂缝,其中有几条裂缝在梁顶面贯通,宽度超过1 mm,并沿正截面迅速向下扩展,直到下部混凝土压酥剥落,加载端挠度增大至112 mm,为悬臂跨度的1/20,此时梁正截面疲劳破坏丧失承载力.	第二级疲劳试验的性状:累积加载至286万次时,支座1处梁顶面及两侧面又出现部分新裂缝,其中有几条裂缝在梁顶面贯通,最大宽度约为2 mm,并沿正截面向下扩展,长度较短,下部混凝土压酥,加载端挠度增大至42 mm,为悬臂跨度的1/52,此时梁正截面疲劳破坏丧失承载力.
疲劳试验结束凿开混凝土	3根梁具有类似的破坏特征:支座1附近的H型钢上翼缘完全断裂,裂纹向下一直扩展至腹板中部,裂纹起源于翼缘与腹板之间的连接焊缝,断口平齐光滑,符合钢材疲劳断裂特征,但同一截面的纵向受拉钢筋未断裂,见图4c.		



a 加载端挠度



b 破坏截面



c H型钢上翼缘断裂

图4 SRC梁B1疲劳破坏特征

Fig.4 Fatigue failure feature of SRC girder B1

(4) 在疲劳前后,钢材与混凝土的性能变化有所不同,钢筋(图5a、5b)和型钢翼缘(图5c、5d)的应变都是先小后大,而受压侧的下表面混凝土(图5e)应变恰好相反,先大后小,这是因为受拉侧的混凝土疲劳后产生一些微小裂缝,导致内力有所调整,钢筋和型钢承受更多的荷载;虽然梁截面上下是对称的,但是,受拉侧的上部钢筋和型钢上翼缘的应变都对应地比受压侧的下部钢筋和型钢下翼缘的应变大,这也是因为受拉侧的混凝土开裂的影响,导致梁截面中和轴下移,上部的钢筋和型钢翼缘承受更多的荷载;

(5) 在疲劳前后,悬臂端的挠度(图5f)没有什么变化,最大挠度8.2 mm,为悬臂长度的1/266,由于混凝土局部开裂且裂缝较小,因此对SRC梁的整体刚度没有什么影响。

3.3 应变沿截面高度的分布

图6给出了疲劳试验前、疲劳试验阶段(即荷载循环分别为 $n=0$ 、66、126和200万次后)在 P_{\max} 静态加载时,SRC梁在截面a-a处各组件的应变.由于3根梁表现出相同的特性,因此,图6仅给出了梁B1的数据.由图6可见,各组件的应变连线基本上为一条直线,且不同的荷载循环次数下的连线几乎重合,表明无论是静力还是疲劳荷载作用下,SRC组合梁符合平截面假定,各组件能良好地共同工作。

3.4 疲劳全过程中各组件的变形发展规律

在梁B2和B3的疲劳试验直至破坏的整个过程中,采用了动态数据采集仪全程跟踪监测了a-a截面各组件的应变和悬臂端的挠度,自第二级疲劳加载开始(即循环200万次以后的数据)如图7和8所示.为图面清晰起见,图7和图8给出疲劳等幅荷载中最大荷载 P_{\max} 时应变和挠度随荷载循环次数的发

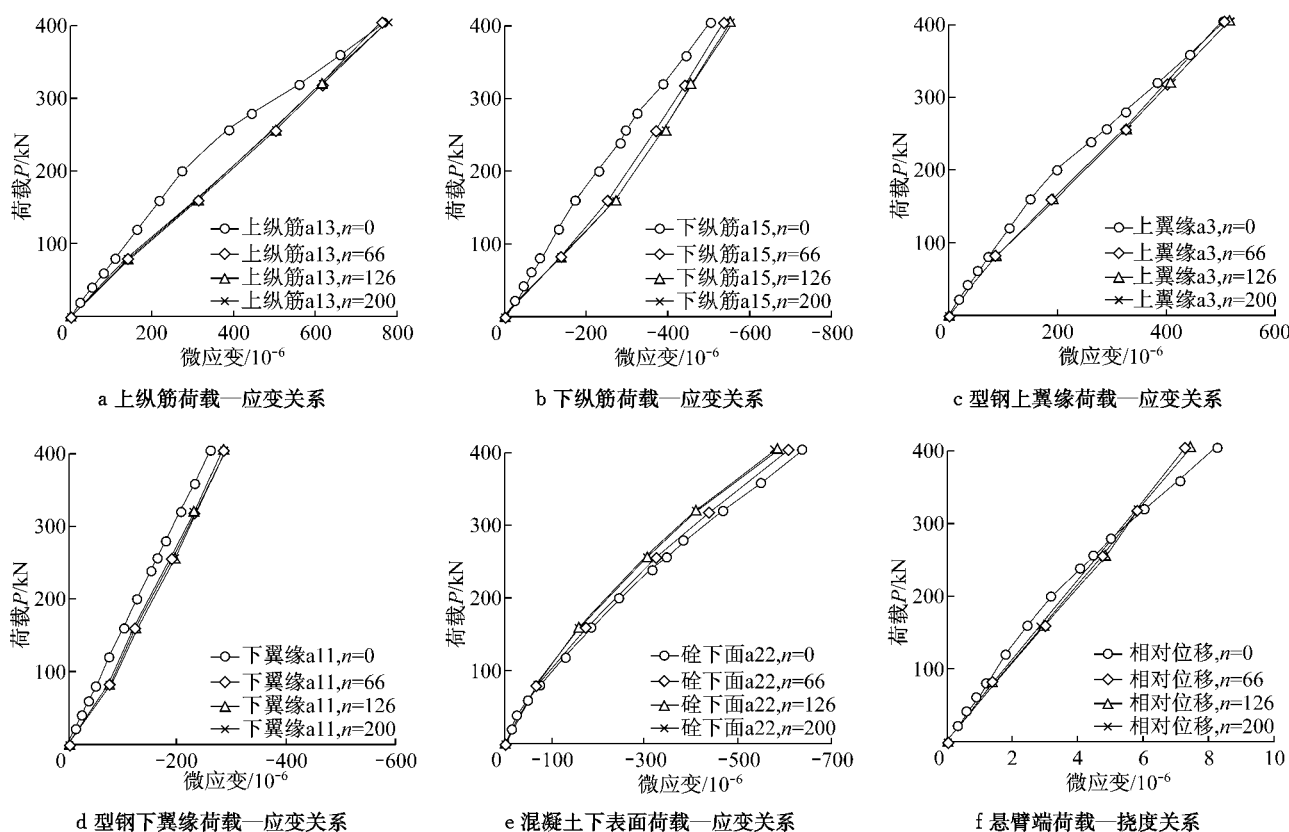


图 5 SRC 梁 B1 各组件的应变及悬臂端挠度随荷载的变化

Fig. 5 Variation of strains of components and deflection of cantilever end with loadings

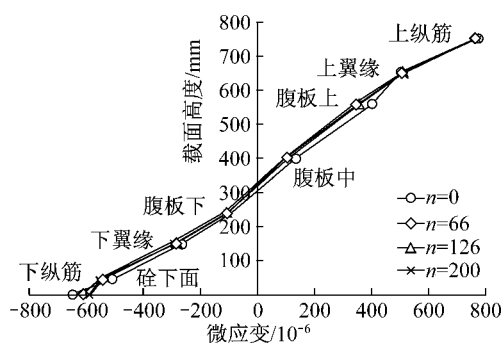


图 6 SRC 梁 B1 沿 a-a 截面高度的应变分布

Fig. 6 Strain distribution along the height of section a-a of SRC girder B1

展情况. 鉴于两根梁的特性类似, 本文着重分析图 8 梁 B3 的特性.

由图 8 可见以下规律:

(1) 随着荷载循环次数的增加, a-a 截面的上下钢筋、型钢下翼缘、下表面混凝土的应变以及悬臂端挠度都没有什么变化. 约在 254 万次以后, 型钢上翼缘的应变开始逐渐减小, 揭示疲劳裂纹开始在上翼缘产生, 并沿上翼缘宽度方向逐步扩展, 使截面内部产生缓慢的内力重分布. 由于挠度基本保持不变, 表明梁的整体刚度没有变化.

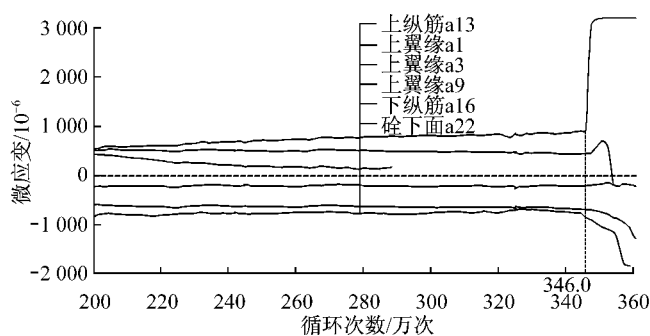
(2) 约在 280 万次时, 各组件的应变突变, 上下纵筋、下翼缘、混凝土下表面的应变以及悬臂端的挠度急剧增大, 钢筋和混凝土都快速进入塑性发展, 上翼缘的应变很快减小为零, 疲劳试验机的荷载读数也显示突然下降, 这些特征表明裂纹已贯穿整个上翼缘截面, 完全断裂, 并沿着型钢腹板截面扩展, 整个 SRC 梁丧失承载力.

(3) SRC 梁各组件发生疲劳破坏的先后顺序, 先是受拉上翼缘的疲劳断裂使 SRC 梁截面产生剧烈的内力重分布, 导致受拉上部纵筋达到屈服, 随后下部受压区混凝土逐渐压酥剥落.

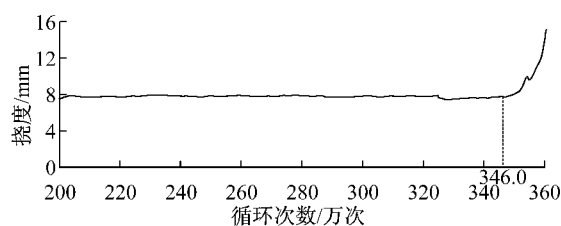
4 RC 梁疲劳破坏、SRC 梁静力及疲劳破坏特点的比较

针对正截面破坏的情况, 将 SRC 梁疲劳破坏的特点与以往一些学者研究获得的 RC 梁疲劳破坏、SRC 梁静力破坏的特点进行比较, 是非常有意义的. RC 梁正截面疲劳破坏的模式通常是某一根纵向受拉钢筋疲劳断裂, 或受压区混凝土压酥疲劳破坏, 最终丧失承载力^[7-8].

具有实腹型钢的 SRC 梁正截面静力破坏的模

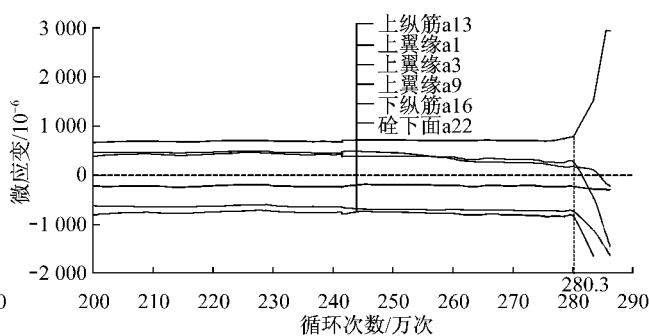


a 梁截面 a-a 处应变

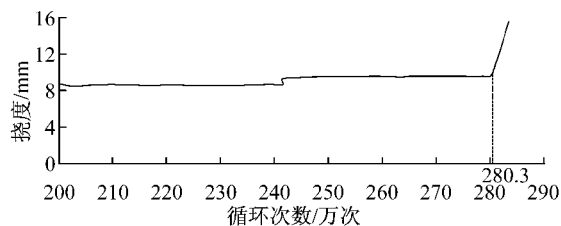


b 梁悬臂端挠度

图7 荷载循环200万次以后SRC梁B2各组件的变形发展
Fig.7 Deformation development of components of SRC girder B2 after 2 million-cycle test



a 梁截面 a-a 处应变



b 梁悬臂端挠度

图8 荷载循环200万次以后SRC梁B3各组件的变形发展
Fig.8 Deformation development of components of SRC girder B3 after 2 million-cycle test

式通常是型钢受拉翼缘首先屈服,然后逐渐沿着腹板高度塑性发展,最后由于受压侧型钢屈服,受压混凝土压碎而导致破坏,丧失承载力^[4,9]。

综观本文3根SRC梁的测试数据和外观特征,可以将型钢受拉翼缘截面断裂、纵向受拉钢筋屈服、受压混凝土压酥的破坏模式视作整个SRC梁正截面疲劳断裂的模式,其中,以型钢受拉翼缘截面疲劳断裂为最关键的破坏特征。焊接制造工艺难以避免产生残余应力和焊缝内外类似裂纹的缺陷,故焊接型钢是SRC梁中的薄弱环节,具有较低的疲劳强度或寿命。由于SRC梁未发生疲劳破坏时,各组件处在弹性工作阶段,因此,SRC梁的疲劳强度将远低于其静力强度,并且若需要SRC梁具有更高的疲劳寿命,其疲劳强度必将更低。

5 结论与建议及需深化的研究工作

本文进行了3根相同的、并与实际工程尺度和构造一致的SRC梁的疲劳试验研究,荷载为弯剪作用、以弯为主,获得以下结论与建议:

(1) 疲劳试验前的设计荷载静力试验中,SRC梁受拉侧的混凝土表面出现细微裂缝,但最大裂缝宽度不超过0.1 mm。在随后200万次设计荷载幅的疲劳试验过程中,原有混凝土裂缝继续扩展,同时又出现许多新的细微裂缝,但所有的混凝土裂缝宽度、

各组件的应变及挠度没有明显的增大变化,都处在弹性受力范围,混凝土最大裂缝宽度不超过0.2 mm,满足工程设计要求。

(2) 在后续荷载幅增大到设计荷载幅1.73倍的疲劳试验过程中,3根SRC梁分别新增31.8、146.0、80.3万次后发生正截面疲劳破坏,并具有相同的破坏模式:受拉侧的混凝土开裂,受拉侧的焊接H型钢翼缘和部分腹板截面完全断裂,受压侧的混凝土压酥,但是纵向受拉钢筋未断裂。焊接型钢梁的疲劳裂纹起源于受拉翼缘与腹板之间的焊接部位,是整个SRC梁疲劳强度的薄弱环节。型钢受拉翼缘截面的疲劳断裂是整个SRC梁疲劳破坏的重要特征和标志,是疲劳寿命结束的依据。

(3) 在疲劳破坏之前,SRC梁的刚度、各组件的受力性能保持稳定,应变符合平截面假定,能共同工作。在疲劳破坏之后,纵向受力钢筋和受压混凝土快速进入塑性发展,SRC梁刚度急剧降低。

(4) 鉴于SRC梁的疲劳强度比静力强度降低,承受日常重复荷载的SRC梁为了保证耐久性必须进行疲劳强度设计。确保SRC梁中H型钢梁具有较高的疲劳强度显得十分关键,因此保证焊接质量,或采用无焊接的热轧H型钢等措施,有助于改善H型钢梁的疲劳性能,从而提高整个SRC梁的疲劳强度。

(下转第482页)