

文章编号:1674-2974(2016)07-0032-11

部分剪力连接的橡胶集料混凝土-钢组合梁 疲劳性能试验研究*

邢颖¹,徐杰^{1,2},韩庆华^{1,2†},李自林¹,王一泓¹

(1. 天津大学 建筑工程学院,天津 300072;2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:为研究橡胶集料混凝土-钢组合梁的疲劳性能,对6个试件进行疲劳试验.试验考虑了橡胶集料混凝土、剪力连接程度、栓钉直径及截面尺寸对组合梁疲劳寿命、损伤累积及破坏模式的影响.试验测试并分析了组合梁在不同荷载循环次数下的混凝土应变、残余滑移、残余挠度、滑移刚度及弯曲刚度.试验结果表明:部分剪力连接的组合梁在疲劳过程中不符合平截面假定;组合梁的疲劳破坏模式为剪跨区栓钉剪断,破坏具有较大的延性;橡胶集料混凝土能有效减小裂缝宽度,明显提高疲劳寿命,并增大残余滑移,表现出更好的延性;增大剪力连接程度可提高组合梁的疲劳寿命,并降低刚度退化作用;较大的栓钉直径使组合梁疲劳性能降低,并表现出较大的塑性.研究成果可为橡胶集料混凝土在组合梁中的应用提供依据.

关键词:橡胶集料混凝土;组合梁;疲劳性能;部分剪力连接;栓钉

中图分类号:TU398

文献标识码:A

Experiment Study on the Fatigue Behavior of Partial Shear Connected Composite Beam with Crumb Rubber Concrete

XING Ying¹, XU Jie^{1, 2}, HAN Qing-hua^{1, 2†}, LI Zi-lin¹, WANG Yi-hong¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Univ, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin Univ, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the fatigue behavior of the crumb rubber concrete and steel composite beam, six fatigue tests were conducted. This study focused on examining the influence of the rubber particles, shear connection degree, stud diameter and sectional dimension on the fatigue life, accumulated fatigue damage and failure mode. Concrete strain, residual slip, residual deflection and bending stiffness of the composite beams at different loading cycles were measured and analyzed. The test results showed that the plain section assumption cannot be applied to the partial connected composite beams under fatigue loading; the fatigue failure was governed by the shank failure of the studs showing good ductility in the shear span; crumb rubber concrete decreased the crack width and improved the fatigue life effectively; larger residual slip due to the rubber particles improved ductility; larger shear connection degree increased the fatigue life and reduced the shear stiffness degradation; and larger diameter of the studs decreased the fatigue life and ductility. It is shown that this study is helpful for the application of crumb rubber concrete into the

* 收稿日期:2015-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408408), National Natural Science Foundation of China(51408408);国家杰出青年科学基金资助项目(51525803), National Science Fund for Distinguished Young Scholars(51525803)

作者简介:邢颖(1988-),女,山西太原人,天津大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: qhhan@tju.edu.cn

composite beams.

Key words: crumb concrete; composite beams; fatigue behavior; partial shear connected; studs

可再生橡胶集料混凝土(RRFC)由普通混凝土加入经过机械粉碎、碾磨并洗净的废旧轮胎橡胶颗粒所制成,是一种新型环保绿色材料.由于其具有较好的变形能力、抗裂性能及良好的疲劳性能,这种新材料已成为国内外的研究热点.早在1999年就被用于亚利桑那大学的路面铺装,目前已得到更为广泛的应用^[1-3]. Hernandez针对不同橡胶掺量的混凝土进行了一系列试验,测试其静力、动力和疲劳性能,指出橡胶集料混凝土具有较好的能量耗散性能和抗疲劳性能^[4].国内学者也进行了一些试验,如橡胶混凝土的三点弯拉疲劳性能,证明同等循环加载条件下,橡胶混凝土的疲劳寿命明显高于普通素混凝土^[5-6].

钢与混凝土组合梁能充分利用不同材料的性能,目前已被广泛应用于高层建筑、多层工业厂房和桥梁,并带来良好的经济与社会效益.钢和混凝土之间的组合作用由剪力连接件实现,由于施工方便,焊在钢梁翼缘上的栓钉成为最常用的剪力连接件.对于承受交通荷载的桥梁,结构长期处于循环荷载作用下,栓钉将直接承受疲劳荷载,其疲劳问题日益突出.为此,国内外学者进行了大量的静力与疲劳试验,研究了组合梁的疲劳破坏形式,及栓钉直径、疲劳荷载和混凝土强度等因素对疲劳性能的影响^[7-10].

基于橡胶集料混凝土良好的材性,将其应用于组合桥梁中,可有效提高行车舒适度,减少结构开裂,并可能改善组合桥梁的抗疲劳性能.此外,大直径栓钉的应用可以减小栓钉个数,降低焊接工作量,有效加快施工进度,而橡胶集料混凝土的应用也可能改善大直径栓钉的受力性能.目前已对组合梁和橡胶集料混凝土性能展开了大量研究,然而,尚缺乏对钢与橡胶集料混凝土组合梁疲劳性能的系统研究.本文为研究橡胶集料混凝土-钢组合梁抗疲劳性能,选取了混凝土种类、栓钉直径、剪力连接程度、钢梁尺寸4个影响因素,进行6个组合梁疲劳试验.研究了不同参数对组合梁疲劳寿命、抗裂性能、应力分布、残余变形及刚度退化的影响,并讨论橡胶集料混凝土在组合桥梁中的适用性.

1 试验概况

1.1 试件设计

文献^[11]研究了0%,5%,10%和15%四种不

同橡胶掺量下,组合梁推出试件的受力性能,结果表明掺量为15%的混凝土强度有较大削弱,而掺量为5%的混凝土塑性性能提高不明显.因此,本文在前期研究的基础上,选择橡胶掺量为10%的橡胶集料混凝土制作试件.在组合梁静力试验的基础上,本试验共设计6个与静力试验相同的组合梁试件,用于疲劳试验,编号为FBFT-1~FBFT-6.

钢与混凝土组合梁是由H型钢梁、加劲肋、焊钉、混凝土板和钢筋组成的空间受力体系,难以按比例制作相应的缩尺模型,特别是混凝土桥面板和钢板的厚度,而足尺模型成本较高.为此,按《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)^[12]制作组合梁的定型模型,模拟钢与混凝土组合梁的受力情况,对其进行研究.试件设计考虑试验条件的同时,保证所有试件的设计中性轴均位于钢梁截面,避免混凝土板受拉.组合梁全长4 000 mm,其中纯弯段700 mm,剪跨段1 500 mm,加载点及支座截面设置加劲肋.所有试件的设计中性轴均位于钢梁上翼缘.试件设计为2种截面尺寸,钢梁分别使用HW250×250和HW350×350,其中2个试件的混凝土板采用普通混凝土浇筑,4个试件的混凝土板采用掺量为10%的橡胶集料混凝土浇筑.钢梁上翼缘焊接单排栓钉,栓钉直径分为16,19,22 mm.本文的组合梁为部分剪力连接,栓钉个数较少,且推出试验结果表明,栓钉数量相同的情况下,单排栓钉受力性能较好,因此均采用单排均匀布置^[11,13].为研究部分剪力连接组合梁的疲劳性能,按规范设计0.5和0.68两种不同剪力连接程度,公式如下^[12].

$$r = \frac{n}{n_s}, \quad (1)$$

$$F_c = n_s V_u = b_{\text{eff}} h_c f_c. \quad (2)$$

式中: r 为剪力连接系数; n 为实际栓钉个数; n_s 为完全剪力连接时的计算栓钉个数; F_c 为混凝土板压力; b_{eff} 为混凝土板有效宽度; h_c 为混凝土板有效厚度; f_c 为混凝土抗压强度; V_u 为单个栓钉抗剪承载力,由静力推出试验获得^[11].

组合梁试件的参数见表1,试件具体尺寸及构造见图1和图2.

表 1 组合梁疲劳试件参数
Tab. 1 Parameters of composite beam specimens in fatigue test

试件编号	钢梁型号	混凝土板厚/mm	橡胶掺量/%	栓钉直径/mm	栓钉抗剪承载力/kN	栓钉个数	剪力连接程度	纵向钢筋
FBFT-1	HW250×250	130	0	16	72.8	25	0.5	
FBFT-2	HW250×250	130	10	16	77.7	25	0.5	
FBFT-3	HW250×250	130	10	16	77.7	33	0.68	Φ6@100
FBFT-4	HW350×350	160	0	19	90.1	25	0.5	
FBFT-5	HW350×350	160	10	19	90.8	25	0.5	
FBFT-6	HW350×350	160	10	22	142.3	18	0.5	

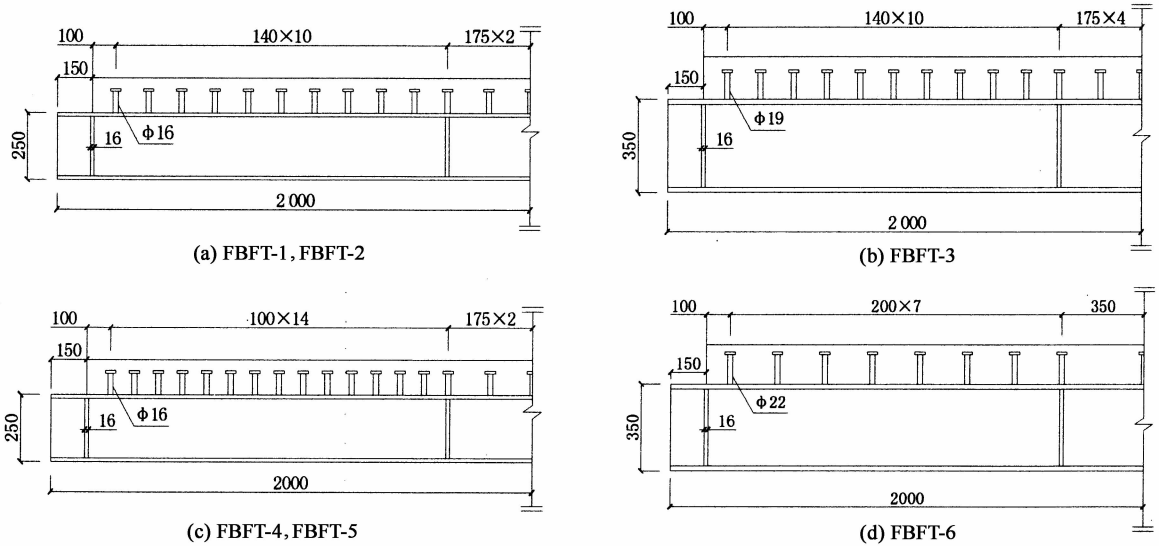


图 1 组合梁试件栓钉布置图(单位:mm)
Fig. 1 Layout of studs in specimens(unit:mm)

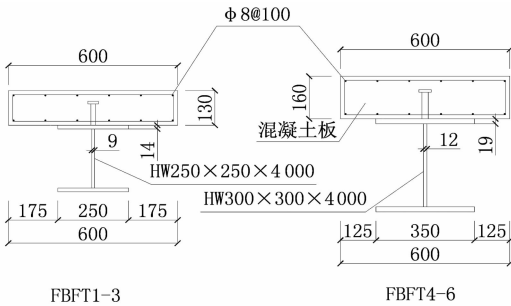


图 2 组合梁试件剖面图(单位:mm)
Fig. 2 Cross sectional of composite beam specimens(unit:mm)

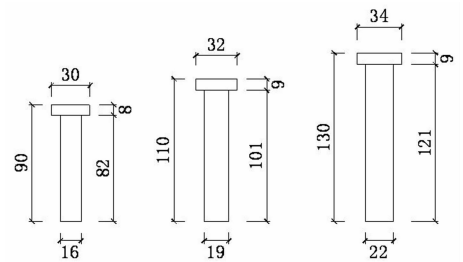


图 3 栓钉尺寸构造(单位:mm)
Fig. 3 Details of studs (unit:mm)

按照 GB/T 10432—2002, 栓钉选用 16 mm × 90 mm, 19 mm × 110 mm, 22 × 130 mm 三种规格, 长度与直径比值均大于 4, 细部尺寸见图 3. 试件在钢结构加工厂制作并养护, 模板及配筋见图 4.

1.2 材料属性

试件的混凝土设计强度为 C30, 通常情况下, 以橡胶颗粒代替部分细骨料, 但混凝土的强度和弹性模量都会有所下降^[3]. 为排除试验中混凝土强度对组合梁抗疲劳性能的影响, 经多次试验后, 改变粗骨料及水灰比, 确定最合适的配比, 使橡胶集料混凝土



图 4 FBFT-4 模板及配筋
Fig. 4 Formwork and bars of FBFT-4

与普通混凝土的强度和弹性模量基本相同. 在浇筑试件时,按规范制作 2 组 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试块,一组在标准养护条件下养护,另一组在与试件组合梁相同的条件下养护,抗压强度测试结果见表 2. 其中 $f_{cu,k}$ 为在标准养护条件下 28 d 的立方体抗压强度, $f_{cu,kt}$ 为在与试件相同的条件下养护,并于疲劳试验开始时测试的立方体抗压强度, E 为弹性模量.

表 2 混凝土力学性能指标

Tab. 2 Mean values of mechanical properties of concrete

橡胶掺量 /%	$f_{cu,k}$ /MPa	$f_{cu,kt}$ /MPa	E /MPa
0	38.97	44.3	3.37×10^4
10	37.48	42.51	2.87×10^4

试件所用型钢材料为 Q235 钢,从钢梁翼缘上切取标准板条进行拉伸试验,平均屈服强度和极限抗拉强度分别为 241 MPa 和 398 MPa. 栓钉的材料为 M15,其抗拉强度为 365 MPa. 钢筋选用 $\phi 6$ 的 HRB335 热轧钢筋,2 种组合梁截面的纵向配筋率分别为 0.87% 和 0.71%,经测试的钢筋屈服强度和极限抗拉强度分别为 348 MPa 和 455 MPa.

1.3 试验装置

疲劳试验采用 1 000 kN 电液伺服疲劳试验机加载,作动器在组合梁跨中施加等幅正弦脉冲疲劳

荷载,加载频率为 1.3 Hz,荷载通过分配梁传递给 2 个加载点,加载点间距为 700 mm. 试件两端简支,组合梁和分配梁的两端支座下均放置厚度为 40 mm 的钢板,以防止试件局部压力过大,试验装置如图 5 所示.

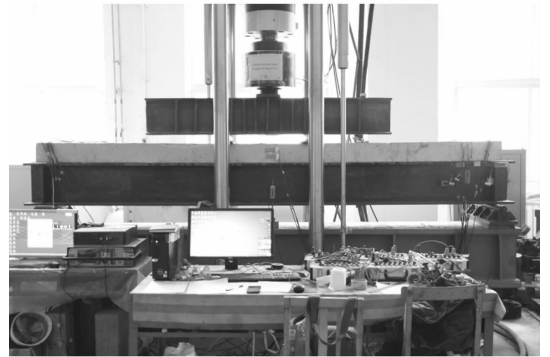


图 5 疲劳试验加载装置
Fig. 5 Setup of fatigue test

1.4 测点布置及加载制度

疲劳试验中,采用精度为 1/1 000 mm 的位移计测量跨中挠度,同时测量支座端钢梁与混凝土的相对滑移和掀起,以确定组合梁在疲劳荷载下的动位移. 采用混凝土应变片测量跨中截面混凝土板的应变,可判断组合作用的程度及中性轴位置的变化. 测点布置如图 6 所示,其中 D1~D3 为位移计,C1~C3 为应变片.

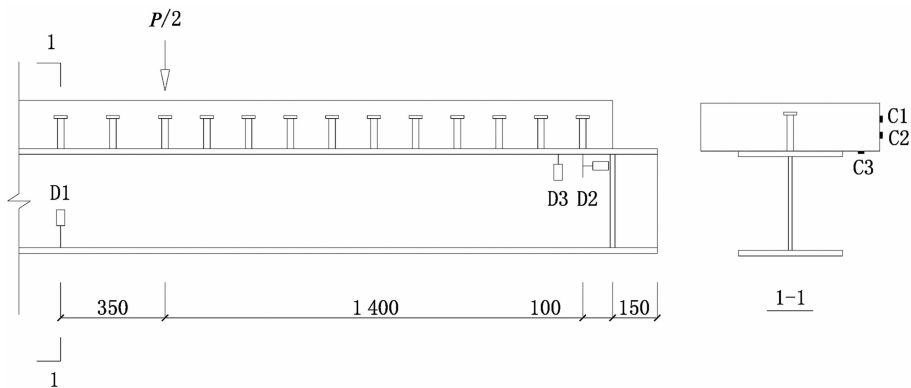


图 6 测点布置图
Fig. 6 Measuring point layout of specimens

在疲劳试验正式开始前进行 1~2 次静力预加载,以消除松动并确认仪器工作正常. 疲劳加载过程中,当加载至 0.03, 0.1, 0.5, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, ... 万次时,停止疲劳加载,进行一次静力加卸载循环,用于分析疲劳加载过程中的残余应变、残余变形及刚度退化的规律,所加荷载为疲劳荷载上、下限的平均值. 出现疲劳破坏的征兆时,适当减小采集间隔.

2 试验结果

2.1 疲劳寿命

对 6 个与疲劳试验相同的组合梁试件进行静力加载,测得其极限承载力,见表 3. 疲劳荷载的上、下限由极限承载力按比例计算得到. 为保证疲劳试件

不进入弹塑性阶段,疲劳荷载上限约为静力极限承载力的50%;根据实际经验,取疲劳荷载下限约为静力极限承载力的10%。根据静力试验可知FBFT-1~FBFT-3及FBFT-4~FBFT-6分别具有基本相同的承载力,为方便疲劳加载,按平均承载力计算,对FBFT-1~FBFT-3及FBFT-4~FBFT-6分别施加相同的疲劳荷载,以比较不同参数对组合梁疲劳性能的影响。主要试验参数及疲劳加载次数见表3。由表3中数据可见,使用橡胶集料混凝土的试件FBFT-2和FBFT-5分别比使用普通混凝土的FBFT-1和FBFT-4拥有较高的疲劳寿命,寿命分别增加50%和144%,表明橡胶颗粒具有较好的变

形性能,可有效降低应力集中作用,减缓组合梁的疲劳损伤发展。FBFT-2与FBFT-3相比,剪力连接程度增加36%后,疲劳寿命增加40%,这是因为组合梁的破坏标志为剪跨区栓钉疲劳剪断,因此在部分剪力连接的组合梁中,剪力连接程度对其疲劳性能有很大影响。对比FBFT-5与FBFT-6可知,剪力连接程度相同的情况下,疲劳寿命随栓钉直径的增加而降低,原因是直径增大后栓钉个数相应减少,易导致较大的应力集中,加速疲劳损伤的发展。但是,FBFT-4与FBFT-6具有相近的疲劳寿命,证明橡胶集料混凝土良好的抗疲劳性能可弥补大直径栓钉缺陷,进而为更大直径栓钉的应用提供可能。

表3 疲劳试验主要参数及结果
Tab.3 Main parameters and results of fatigue tests

构件编号	橡胶掺量/%	栓钉直径/mm	剪力连接程度	静力极限承载力/kN	平均极限承载力/kN	疲劳荷载/kN	疲劳荷载幅/kN	疲劳寿命/万次	破坏模式
FBFT-1	0	16	0.50	540				10.1	栓钉剪断
FBFT-2	10	16	0.50	534	546	55~275	220	15.3	栓钉剪断
FBFT-3	10	16	0.68	532				21.0	栓钉剪断
FBFT-4	0	19	0.50	1 274				28.6	栓钉剪断
FBFT-5	10	19	0.50	1 305	1 213	120~600	480	70.1	栓钉剪断
FBFT-6	10	22	0.50	1 158				30.9	栓钉剪断

2.2 试验现象及破坏模式

由于预加载时,钢与混凝土间的自然黏结已经失效,因此组合作用完全由栓钉提供。在疲劳加载初期,栓钉产生变形,支座处的钢梁与混凝土板首先出现相对滑移。此后,栓钉变形增大,支座端的滑移有所增加,加载点下方的混凝土板出现细小裂缝。随着疲劳加载次数增加,支座附近发出有规律的清脆响声,混凝土板掀起明显,可观察到支座处的栓钉已被剪断,剪跨区滑移由支座端向跨中发展,组合作用被削弱,加载点下方混凝土的裂缝贯穿板底。破坏时,混凝土裂缝宽度增大,滑移已由支座向跨中延伸至约1 200 mm处,掀起与滑移变形极大,可观察到剪跨区栓钉全部剪断,此时钢梁没有明显变形,但由于组合作用完全丧失,因此判定组合梁疲劳破坏,如图7所示。这也说明,疲劳破坏时,组合梁退化为钢梁,轧制钢材疲劳性能较好,且可以承受疲劳上限,所以结构具备较大的后续疲劳承载能力。因此,试验所测寿命仅为组合梁的疲劳寿命,而并非结构的全寿命。

组合梁疲劳破坏模式与静力破坏有很大差别。承受静力荷载时,组合梁跨中有明显挠曲变形,最终破坏形式为跨中钢梁屈服,混凝土板压碎,但栓钉基

本没有破坏,如图8所示。承受疲劳荷载时,6个试件的破坏模式均为剪跨区栓钉全部剪断,破坏时钢梁没有屈服,详见图9。



图7 混凝土板掀起
Fig.7 Uplifting of concrete slabs

试验中栓钉的疲劳剪断破坏模式主要有图10中的3种:栓钉杆中下部剪切破坏(图10(a))、栓钉根部钉杆剪切破坏(图10(b))、栓钉焊缝撕裂破坏(图10(c))^[14]。前两种破坏模式为正常疲劳破坏,第三种破坏模式是由焊接缺陷导致的,对栓钉疲劳性能有很大削弱。试验发现大部分栓钉发生第二种破坏,但仍有一定数量的栓钉发生第三种破坏。当栓钉发生前两种破坏时,钉杆均可产生图11所示截面,

从图中可以看出,疲劳源位于栓钉表面,疲劳裂缝扩展区内有明显的疲劳台阶,裂缝扩展区与瞬断区的面积比约为 5 : 1,表明栓钉有较好的塑性.

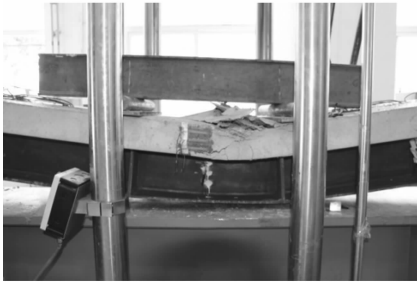


图 8 组合梁静力破坏模式

Fig. 8 Static failure mode of composite beams

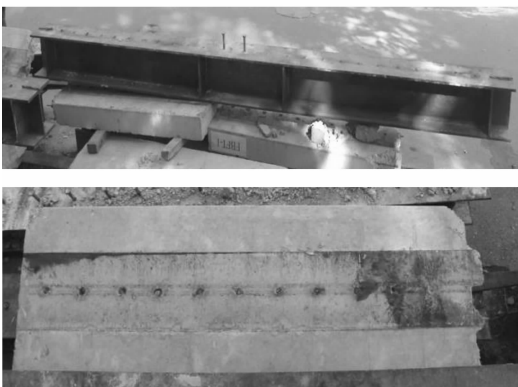
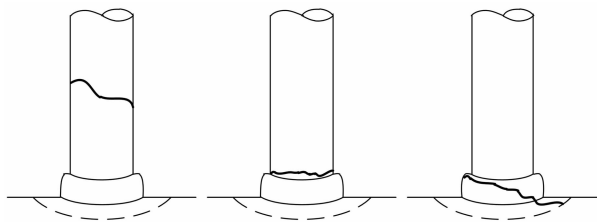


图 9 组合梁疲劳破坏模式

Fig. 9 Fatigue failure model of composite beams



(a) 钉杆破坏 (b) 焊趾破坏 (c) 焊缝破坏

图 10 栓钉疲劳破坏模式

Fig. 10 Fatigue failure mode of studs

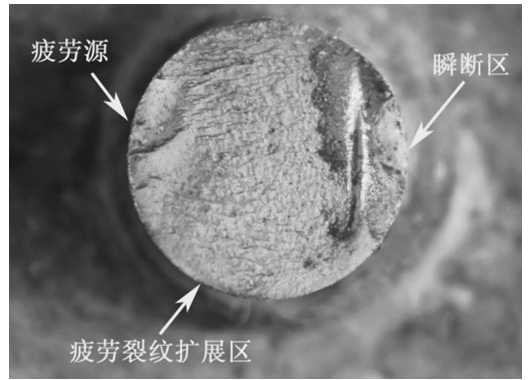
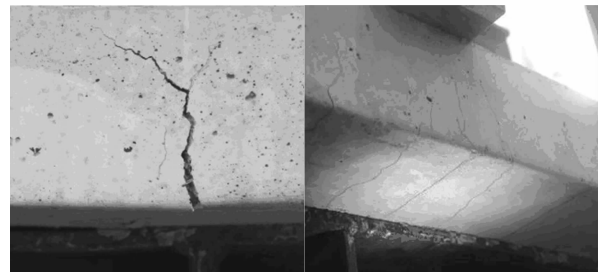


图 11 栓钉疲劳破坏截面

Fig. 11 Section of the stud with fatigue failure

在疲劳过程中,由于端部栓钉逐步剪断,剪跨区的混凝土板受力很小,趋于自由状态,因此仅在纯弯段的加载点附近受力较大并出现裂缝,裂缝分布如图 12 所示.图 12(a)与(b)~(e)对比可知普通混凝土组合梁的主要裂缝仅有一条,裂缝宽度较大,损伤严重,而橡胶集料混凝土组合梁的裂缝相对细小,且

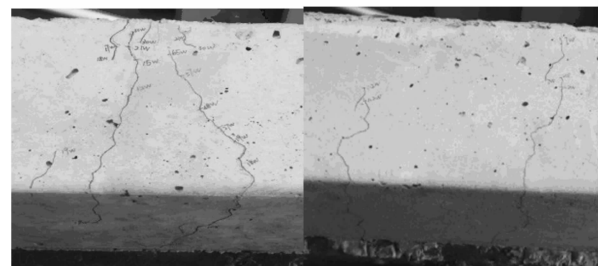


(a)FBFT-1

(b)FBFT-2



(c)FBFT-3



(d)FBFT-5

(e)FBFT-6

图 12 混凝土板裂缝

Fig. 12 Cracks of concrete slabs

分布均匀,没有发生致命的集中破坏;由图 12(b)与 (c)可以看出,当所用栓钉和混凝土相同时,剪力连接程度小的组合梁裂缝数量较多;由图 12(d)与 (e)比较可知,所用混凝土与剪力连接程度相同时,大直径栓钉会导致混凝土开裂时间过早,但对裂缝的数量没有明显影响。

3 试验结果分析

3.1 跨中截面混凝土应变沿梁截面高度变化规律

大量已有静力试验证明,组合梁在承受静力荷载且处于正常工作状态时,全截面均符合平截面假定,即混凝土板与钢梁可以共同受力,所受应力示意

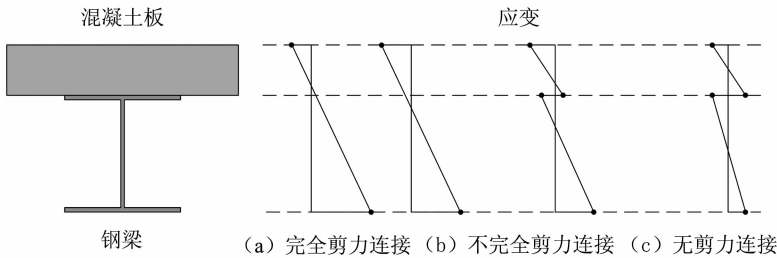


图 13 组合梁的剪力连接作用
Fig. 13 Shear connection of composite beams

图 14 所示为不同荷载循环次数下,FBFT-1 混凝土板的应变在跨中截面沿截面高度的变化规律。

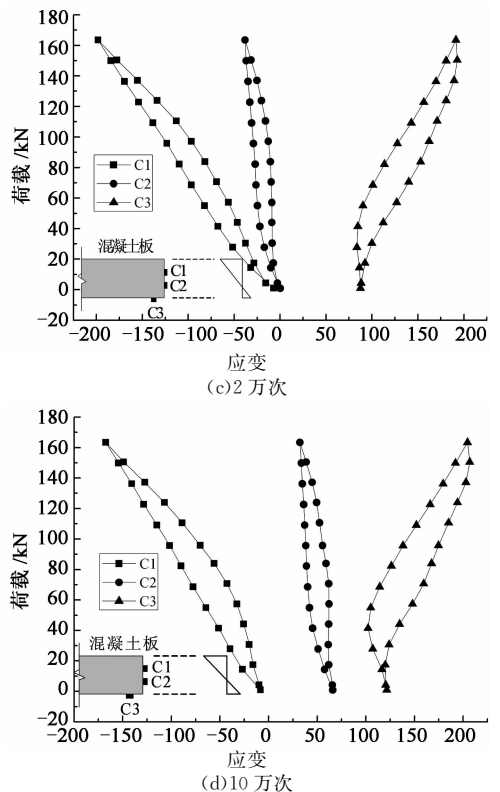
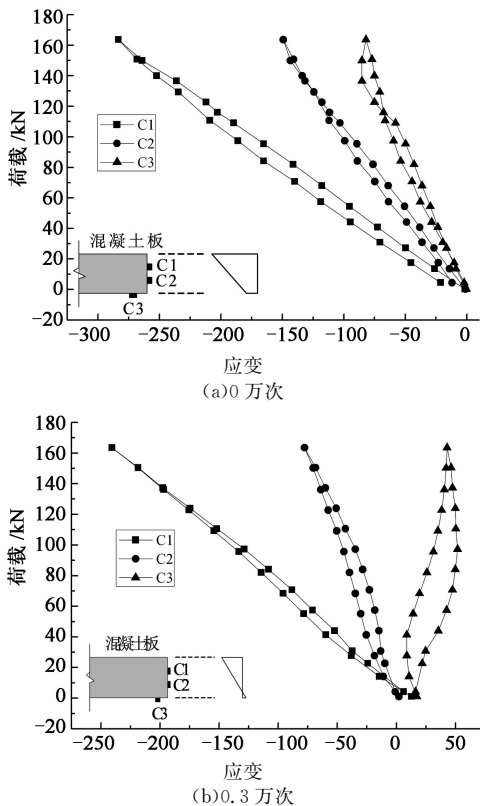


图 14 不同荷载循环次数下混凝土板的荷载-应变曲线
Fig. 14 Load-strain curves of concrete slab with various loading cycles

图见图 13(a);当静力构件进入塑性阶段或剪力连接件变形过大时,组合梁不符合平截面假定,混凝土板与钢梁不完全连接,并产生 2 个中性轴,受力状态如图 13(b)所示;当没有剪力连接时,混凝土板与钢梁完全独立工作,如图 13(c)所示。

为研究疲劳荷载下组合梁受力性能,在试件跨中混凝土板侧面粘贴应变片.由试件尺寸计算可知疲劳试验所用组合梁属于图 13(a)中所示第二种情况,相应的静力试验也可表明混凝土板在加载过程中全部受压,即中性轴位于钢梁截面内,因此若疲劳试验测得混凝土板受拉应力,则可判定组合梁处于不完全连接状态。

从图 14 中可以看出,应变沿混凝土板截面高度的分布基本为直线,表明疲劳过程中,平截面假定在混凝土板内可假设成立. 数据显示混凝土板在疲劳加载前全截面受压,板与钢梁可协同受力,但荷载循环仅 0.3 万次后,混凝土板底部出现拉应力,说明组合作用被削弱,板内中性轴位置接近板底;疲劳加载 2 万次后,剪力连接键进一步破坏,应变片 C2 所测数据基本为零,分析可知板内中性轴上移至 C2 处;试件发生疲劳破坏时的静力加载数据显示,中性轴继续上移,位置靠近混凝土板的中心轴,表明剪力连接键已基本失效,试件受力模式接近图 13(c)所示叠合梁.

试验数据显示,其余试件中混凝土板应变的变化规律基本与 FBFT-1 相同. 综上可知,部分剪力连接的组合梁在 0 万次静力荷载下组合作用完好,受到疲劳荷载后,组合作用迅速退化,在全部疲劳试验过程中,组合梁不符合平截面假定,处于不完全连接的状态. 此外,0 万次所测荷载-应变曲线呈线性分布,试件可沿加载路径卸载,表明试件在相应荷载下处于弹性阶段,但经历疲劳循环后,试件在相同荷载下出现明显的弹塑性阶段和“滞回现象”,且加载次数越大,试件的塑性特征越明显.

图 15 所示为混凝土板中性轴高度 h_n 随疲劳荷载循环次数的变化规律,其中 h_n 为中性轴位置与板底的间距,若混凝土板全截面受压,则中性轴高度为负. 由于试件 FBFT-3 的应变片在测量中损坏严重,采集数据变异较大,将其剔除. 由图 14 可以看出,试件 FBFT-1~FBFT-2 与 FBFT-4~FBFT-6 分别具有基本相同的曲线,表明若组合梁截面尺寸相同,则板内中性轴发展规律基本相同,栓钉直径、剪力连接程度和橡胶集料混凝土均未对其产生影响.

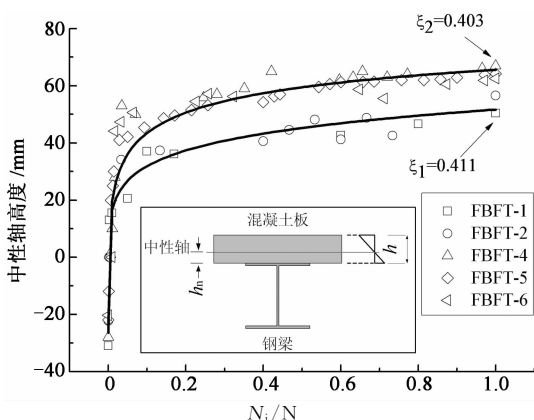


图 15 板内中性轴高度发展曲线

Fig. 15 Evolution of neutral axis of concrete slabs

3.2 疲劳破坏标准

虽然疲劳破坏一般为脆性破坏,但是与其他结构相比,混凝土组合梁疲劳破坏时有较大延性. 这是因为组合梁中栓钉从支座端向跨中依次破坏,构件中栓钉数量较多,且每个栓钉的破坏均需经历足够的荷载循环次数,因此结构可进行多次应力重分布. 此外,型钢钢梁的抗疲劳性能较好,在剪跨区栓钉全部剪断,混凝土板完全失效的情况下,只有钢梁单独受力也能承受最大疲劳荷载. 这也说明,以结构不能承受最大疲劳荷载来判定其最终破坏并不适用,试验中以剪跨段栓钉全部剪断为标准,认定结构破坏,但因该现象在实际结构中不易观察,故此判定方法缺乏广泛适用性.

通过试验数据可以发现,不同试件混凝土板的中性轴在疲劳过程中有相似的发展规律. 由图 15 可见,相同尺寸的组合梁试件在疲劳破坏前具有相近的中性轴高度. 为方便比较不同尺寸的试件,定义中性轴高度系数 $\xi = h_n/h$,其中 h 为混凝土板高度. 疲劳破坏时,FBFT-1~FBFT-2 的平均中性轴高度系数为 0.411,FBFT-4~FBFT-6 的平均值为 0.403. 在 5 个试件疲劳破坏前,中性轴高度系数都发展至一个定值,因此可将其作为辅助判定构件疲劳破坏的标准.

3.3 残余变形

虽然试验进行等幅疲劳加载,且疲劳上限小于比例极限荷载,即试件处于弹性阶段,但由于疲劳损伤不断累积,疲劳荷载同样使组合梁产生不可恢复的残余变形. 在疲劳试验中,加载至一定次数后停机,对组合梁施加不破坏的静力荷载,可得到不同加载次数下试件的滑移和挠度.

图 16 所示为一个典型试件的荷载-滑移曲线. 由图可知,由于疲劳损伤,试件在卸载后有不可恢复的残余变形. 由于位移计在疲劳加载过程中受到扰动,试件 FBFT-3 的测量结果误差较大,将其剔除后,剩余 5 个试件的残余滑移随加载次数的发展曲线如图 17 所示. 为方便比较,以试件最终寿命为参考,对荷载作用次数进行归一化处理,其中 N_i 为加载过程中的荷载循环次数, N 为破坏时荷载循环次数.

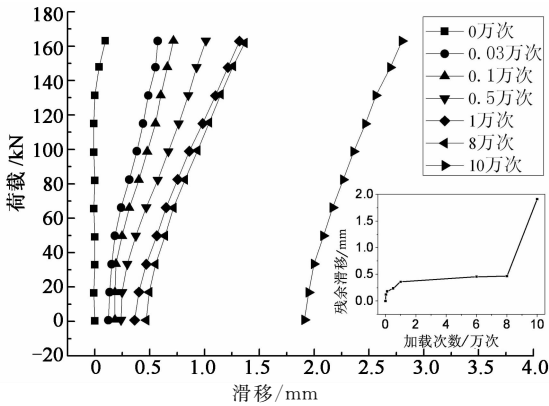


图 16 组合梁荷载-滑移曲线

Fig. 16 Curves of load versus slip of composite beams

度随加载次数的变化曲线如图 18 所示.

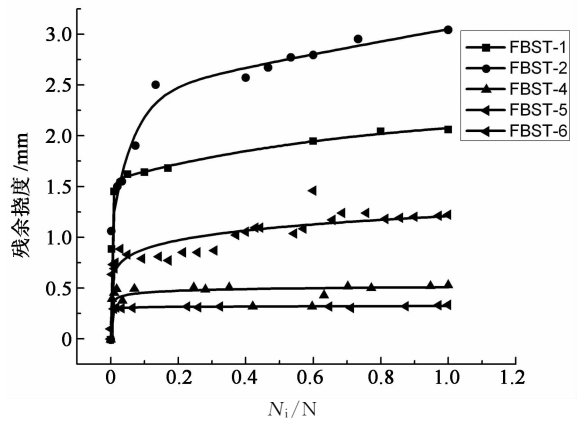


图 18 组合梁残余挠度发展曲线

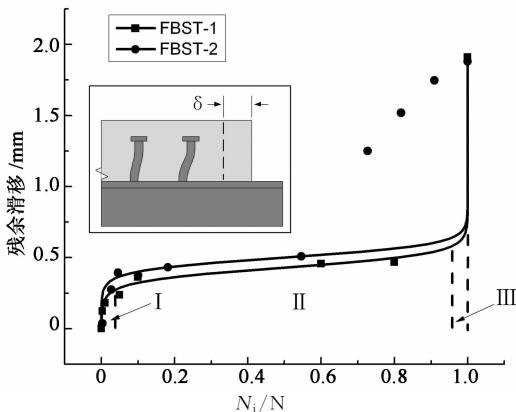
Fig. 18 Evolution of residual deflection of composite beams

残余挠度在试件开始经历循环荷载后(约 1 万次内)迅速增加,后进入稳定发展阶段,符合疲劳试验的一般规律.但与残余滑移不同,组合梁的残余挠度在试件疲劳破坏前没有发生明显增大,这是因为疲劳破坏时栓钉剪断,剪跨区混凝土板退出工作,但钢梁和纯弯段部分的混凝土板仍然可以继续承受疲劳荷载,因此试件挠度在破坏时没有突变.

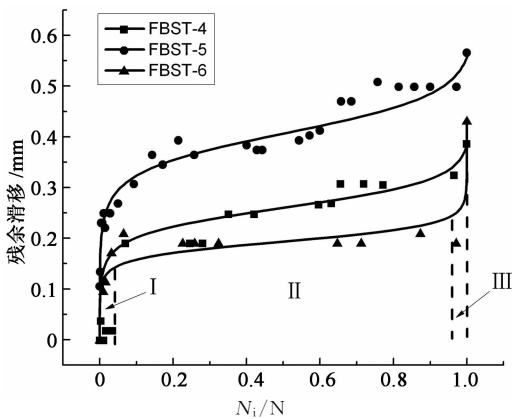
图 17 和图 18 中数据显示,FBFT-1 和 FBFT-2 的残余滑移和挠度均大于 FBFT-4~FBFT-6. 主要原因为钢梁截面相对较小,导致组合梁中性轴位置上移较多,则栓钉更靠近中性轴,所受剪力相对较大,因此试件更容易产生变形.分别对比 FBFT-1 与 FBFT-2,FBFT-4 与 FBFT-5,由于弹性混凝土有较好的变形能力,代替普通混凝土后,组合梁在第 II 阶段的残余滑移分别增大约 27% 和 56%,残余挠度增加约 45% 和 72%,体现出更好的延性.由 FBFT-6 与 FBFT-5 相比可知,抗剪连接程度相同的情况下,增大栓钉直径后,FBFT-6 第 II 阶段残余滑移和残余挠度均降低约 64%,说明大直径栓钉可导致组合梁延性的降低.此外,FBFT-6 比 FBFT-4 的残余滑移和残余挠度仅分别降低了 25% 和 38%,表明弹性混凝土的使用可以在一定程度上弥补大直径栓钉造成的脆性.

3.4 刚度退化

组合梁试件在疲劳加载过程中,滑移刚度和弯曲刚度都会发生不同程度的退化.根据疲劳加载过程中停机测得的静力数据,计算组合梁在不同荷载循环次数下的割线滑移刚度和弯曲刚度的退化程度,见表 4.



(a)FBFT-1~FBFT-2



(b)FBFT-4~FBFT-6

图 17 组合梁残余滑移发展曲线

Fig. 17 Evolution of residual slip of composite beams

由图 17 可知,残余滑移的发展过程明显可分为 3 个阶段:第 I 阶段为疲劳损伤萌生阶段,残余滑移在加载初期急剧增长;第 II 阶段为疲劳损伤发展阶段,试件进入稳定状态,滑移增长趋势较慢;第 III 阶段为疲劳破坏阶段,加载后期由于剩余的抗剪栓钉数量较少,且有效截面很小,残余滑移迅速发展,出现突变,随即发生疲劳破坏.第 I 阶段和第 III 阶段各占总寿命的约 5%,第 II 阶段约占总寿命的 90%.

试件的跨中挠度通过位移计定时采集,残余挠

表4 不同荷载循环次数下刚度的退化
Tab. 4 Degeneration of stiffness with various loading cycles

试件	初始滑移刚度 /(kN·mm ⁻¹)	滑移刚度退化程度/%		初始弯曲刚度 /(kN·mm ⁻¹)	弯曲刚度退化程度/%	
		2万次	破坏		2万次	破坏
FBFT-1	1 710.11	—	89.84	35.45	25.34	25.41
FBFT-2	1 419.71	88.71	89.65	31.40	32.72	37.23
FBFT-3	1 631.58	86.96	87.84	39.40	32.30	34.57
FBFT-4	3 113.30	77.78	81.95	93.25	25.03	29.04
FBFT-5	2 474.48	75.30	80.62	73.97	30.08	32.82
FBFT-6	2 668.51	75.00	79.79	87.95	27.00	29.04

组合梁在疲劳荷载下的弯曲刚度退化规律与滑移刚度相似,虽然各试件的寿命不同,但所有试件的滑移刚度退化均集中发生在2万次内.由于栓钉发生疲劳剪切破坏,而钢梁并没有明显的弯曲破坏,因此滑移刚度的退化程度远大于弯曲刚度.荷载循环2万次后,弯曲刚度基本保持不变,退化十分缓慢,且破坏时刚度与2万次时刚度基本相同,疲劳破坏前没有发生突变.

对于钢梁截面不同的FBFT-1~FBFT-3和FBFT-4~FBFT-6,钢梁截面较小的试件FBFT-1~FBFT-3具有明显较小的初始滑移刚度和弯曲刚度.此外,钢梁尺寸对刚度的退化幅度有一定影响.2万次时FBFT-1~FBFT-3的滑移刚度降低约87%,但FBFT-4~FBFT-6的刚度只降低约78%.这是因为钢梁尺寸不同,栓钉所受剪力不同.FBFT-1~FBFT-3的弯曲刚度降低约30%,而FBFT-4~FBFT-6的刚度降低约26%.弯曲刚度主要由钢梁截面控制,在试验中,疲劳荷载对混凝土及栓钉的损伤较大,对轧制钢梁的影响较小,因而钢梁截面相对较大的后3组试件能更好地抵抗损伤引起的弯曲刚度退化.

分别对比FBFT-1和FBFT-2,FBFT-4和FBFT-5可知,由于弹性混凝土的弹性模量降低,组合梁的初始滑移刚度和弯曲刚度降低15%~23%.弹性混凝土对组合梁滑移刚度的退化幅度基本没有影响,但会导致弯曲刚度退化加剧.

对比FBFT-2和FBFT-3可知,增大组合梁的剪力连接程度可有效增大初始弯曲刚度,增幅分别约为14%和25%.同时由于栓钉抗剪能力增强,可以使滑移刚度和弯曲刚度的退化分别降低2%~7%.

FBFT-5和FBFT-6的试验结果表明,如果剪力连接程度相同,栓钉直径对组合梁的滑移刚度退化程度基本没有影响.但较大直径的栓钉有利于提高组合梁的初始刚度,降低弯曲刚度的退化程度.

4 结论

本文对6个橡胶集料混凝土与钢组合梁试件开展了疲劳试验研究.在此基础上通过试验结果分析得出如下结论:

1)组合梁的疲劳破坏模式为栓钉剪断和混凝土开裂,试件可进行多次应力重分布,其疲劳破坏有一定的延性,且破坏后仍有较高的承载力,疲劳破坏后强度储备较大.

2)在疲劳过程中,部分剪力连接的组合梁不符合平截面假定,混凝土板与钢梁不能共同受力,分别具有一个中性轴.板内中性轴在疲劳作用下不断上移,当中性轴高度系数达到0.4时,试件发生疲劳破坏.

3)橡胶混凝土组合梁能有效推迟混凝土裂缝出现的时间,减小裂缝宽度,显著提高组合梁抗疲劳性能;较大的剪力连接程度对静力性能影响很小,却可增加组合梁的抗疲劳能力,因此承受较大疲劳荷载的结构宜采用剪力连接程度较高的组合梁;此外,较大的栓钉直径会加剧应力集中现象,导致组合梁疲劳寿命降低,但该不利影响可被橡胶集料混凝土降低,从而促进大直径栓钉的应用.

4)在疲劳试验初期,组合梁的残余滑移和残余挠度均有较大的发展,但在疲劳破坏前,残余滑移迅速增大,残余挠度没有发生明显变化,也说明组合梁的疲劳破坏具有一定的延性.橡胶集料混凝土可增大试件在损伤发展阶段的残余滑移和挠度,表现出更好的塑性;相反,使用大直径栓钉的组合梁在损伤发展阶段变形较小,延性略差.

5)滑移刚度和弯曲刚度在疲劳初期有较大退化,此后保持相对稳定,破坏前没有突然性的降低,说明在疲劳荷载作用下,组合梁有较好的保持刚度的能力.试验表明,剪力连接程度越高,则弯曲刚度退化越慢;橡胶集料混凝土可使组合梁初始刚度降

低,刚度退化略有增大,但由于其较好的抗疲劳性能,在刚度满足设计要求的情况下,仍可用于组合梁结构来改善其抗疲劳性能。

参考文献

- [1] 周梅,朱涵,薛忠泉. 橡胶集料塑性混凝土的抗压强度特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S1): 47-48.
ZHOU Mei, ZHU Han, XUE Zhong-quan. Experimental on compressive strength of rubber aggregate plastic concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(S1): 47-48. (In Chinese)
- [2] 亢景付,任海波,张平祖. 橡胶混凝土的抗裂性能和弯曲变形性能[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 158-162.
KANG Jing-fu, REN Hai-bo, ZHANG Zu-ping. Cracking-resistance and flexural property of rubberized concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 158-162. (In Chinese)
- [3] 张亚梅,王超,路宜,等. 普通混凝土和橡胶混凝土弯曲损伤过程的声发射研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2010, 37(11): 24-30.
ZHANG Ya-mei, WANG Chao, LU Yi, *et al.* Investigation of the damage process of ordinary concrete and rubberized concrete under bending load ant AE[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(11): 24-30. (In Chinese)
- [4] HERNANDEZ-OLIVARES F, BARLUENGA G, PARGALANDA B, *et al.* Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(10): 1918-1927.
- [5] 冯文贤,刘锋,郑万虎,等. 橡胶混凝土疲劳性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 469-473.
FENG Wen-xian, LIU Feng, ZHENG Wan-hu, *et al.* Test of fatigue performance of rubberized concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 469-473. (In Chinese)
- [6] 王立燕. 弹性橡胶混凝土的疲劳损伤特性研究[D]. 南京: 东南大学材料科学与工程学院, 2009: 22-30.
WANG Li-yan. Study on the fatigue damage properties of rubberized concrete [D]. Nanjing: College of Materials Science and Engineering, Southeast University, 2009: 22-30. (In Chinese)
- [7] SOHEL K M A, LIEW J Y R, YAN J B, *et al.* Behavior of steel-concrete-steel sandwich structures with lightweight cement composite and novel shear connectors [J]. Composite Structures, 2012, 94: 3500-3509.
- [8] 张阳,邱俊峰,唐重玺,等. 部分波形钢腹板预应力连续组合梁性能分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2013, 40(12): 14-20.
ZHANG Yang, QIU Jun-feng, TANG Chong-xi, *et al.* Analysis of the behaviors of prestressed steel-concrete continuous composite beam with partial corrugated steel webs[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(12): 14-20. (In Chinese)
- [9] WANG Yu-hang, NIE Jian-guo, Li Jian-jun. Study on fatigue property of steel-concrete composite beams and studs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 1-10.
- [10] LEE P G, SHIM C S, CHANG S P. Static and fatigue behavior of large stud shear connectors for steel - concrete composite bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(9): 1270-1285.
- [11] HAN Qing-hua, WANG Yi-hong, XU Jie, *et al.* Static behavior of stud shear connectors in elastic concrete - steel composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 113: 115-126.
- [12] GB 50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 108-119.
GB 50017-2003 Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2003: 108-119. (In Chinese)
- [13] HAN Qing-hua, XU Jie, XING Ying, *et al.* Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete composite beams [J]. Steel and Composite Structures, 2015, 19(4): 1270-1285.
- [14] 聂建国,王宇航. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究综述[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 1-11.
NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Research status on fatigue behavior of steel-concrete composite beams [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 1-11. (In Chinese)