

文章编号:1671-6833(2004)02-0048-06

部分剪力连接组合梁疲劳性能的实验研究

王 硕¹, 张 钰²

(1. 南阳市公路交通规划勘察设计院, 河南 南阳 473000; 2. 南阳市公路工程处, 河南 南阳 473000)

摘 要: 通过8根部分剪力连接组合梁的静载和重复加载试验, 在对试验过程、试验现象以及试验结果分析的基础上研究了重复加载对部分剪力连接组合梁受力性能的影响。试验结果表明, 重复荷载作用下的部分剪力连接组合梁具有良好的抗疲劳性能; 在焊接质量有保证的情况下, 处于正常使用范围内的疲劳荷载作用下的部分剪力连接组合梁几乎不会发生疲劳破坏。因此必要的情况下在建筑结构和桥梁结构中采用部分剪力连接来承受疲劳荷载的作用是可行的, 并可带来良好的经济效益。

关键词: 部分剪力连接; 组合梁; 疲劳

中图分类号: TU 375.1 **文献标识码:** A

0 引言

目前流行的规范大都要求承受疲劳荷载的组合结构构件采用完全剪力连接, 然而有时采用部分剪力连接也是很有意义的。通常情况下使用组合结构主要是为了增加结构刚度, 而完全剪力连接可能会引起抗力过剩, 即不经济。在实际工程中, 当使用压型钢板组合楼板时按照施工的要求只能得到有限的空间来布置剪力连接件, 很难得到理想的完全剪力连接。本文的试验表明, 必要的情况下, 在建筑结构和桥梁结构的工程中采用部分剪力连接来承受疲劳荷载的作用是可行的。

1 试验概况

1.1 试件的制作

为了研究部分剪力连接钢-混凝土组合梁在重复荷载作用下的疲劳性能, 按照简化塑性极限状态方法设计了8根钢-混凝土组合梁试件, 剪力连接件为柔性剪力连接件栓钉, 试件具体情况见表1。其中, 栓钉尺寸为16 mm×90 mm, 栓钉间距为132 mm, 实际个数为30个; 纵向配筋为Φ6@20; 跨度及剪跨长度分别为4 000 mm, 1 600 mm; 混凝土翼缘板尺寸700 mm×100 mm; 钢梁的屈服强度362.89 MPa, 极限强度458.03 MPa; 拉剪连接程度 $r = 0.916, r_{实} = 0.682$ 。

表1 组合梁试件主要参数

Tab. 1 Parameter of composite beams sample

构件	FSCB-0	FSCB-1	FSCB-2	FSCB-3	FSCB-4	FSCB-5	FSCB-6	FSCB-7
砼强度 f_c /MPa	23.66	23.66	24.65	24.39	28.01	30.36	23.03	23.06
栓钉抗拉强度 f_u /MPa	479.96	470.01	457.57	198.95	375.51	477.47	373.02	404.64
横向配筋	Φ6@85	Φ6@67	Φ6@67	Φ6@85	Φ6@85	Φ6@115	Φ6@85	Φ6@85
横向配筋率/%	0.61	0.77	0.77	0.61	0.61	0.45	0.61	0.61

抗剪连接程度 r , $r_{实}$ 分别为试验开始前的理论计算结果和按照材性试验结果计算得到的结果, 二者之间的误差比较大, 因此建议有条件的研究者在试验开始之前提前做材性试验, 以使试验

结果更接近于预期目标。

1.2 加载方案

试验均在1 000 kN 加载架下进行, 试件简支, 跨中两点对称加载, 加载设备由一台500 kN 疲劳

收稿日期: 2003-12-10; 修订日期: 2004-02-28

作者简介: 王 硕 (1976-), 女, 河南省南阳市人, 南阳市公路交通规划勘察设计院工程师, 主要从事道路桥梁的设计与研究。

机的油压千斤顶加载. 荷载通过与千斤顶相连的传感器量测, 千斤顶施加的荷载由一分配梁分配

到直接作用在混凝土翼缘板上的两个垫梁上, 如图 1 所示.

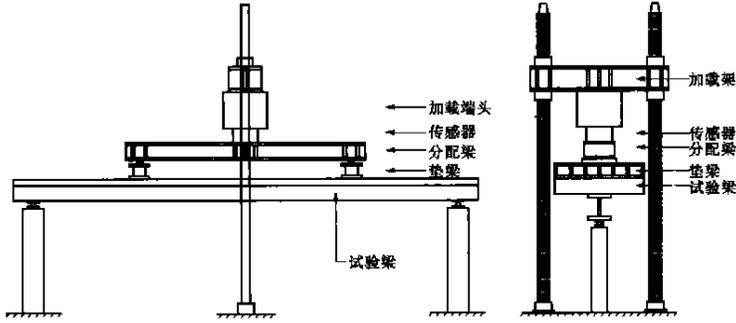


图 1 疲劳试验加载装置

Fig. 1 Loading equipment of fatigue test

在疲劳试验开始之前, 先进行预静载试验. 为了能在预期的 200 万次疲劳寿命期内发生破坏, 本次试验的荷载幅比工程实际中梁承受的荷载幅要大很多. 利用文献 [2, 3] 中组合梁的静力极限强度, 估算出试验的疲劳荷载上限为 $Q_{max} = 130 \text{ kN}$ 左右, 荷载下限值定为 $Q_{min} = 20 \text{ kN}$ 左右. 将估计值的 10%~15% 作为预加荷载, 观察所布置的仪表是否正常工作, 然后卸载至零, 再开始正式加载. 紧接着进行静载试验. 按照 $Q_{max} = 130 \text{ kN}$ 的 20% 为一级进行荷载分级. 加载时分为五级, 直至加到最大荷载, 但在经过荷载下限 Q_{min} 时, 增加一级. 卸载时也宜分为五级卸载到零, 但在经过荷载下限时增加一级 (见图 2), 最后施加疲劳荷载.

本次试验以 200 万次为目标, 如果构件在 200 万次未发生破坏, 则采用下列 3 种方案: ①保持荷载幅继续进行疲劳试验, 直至构件发生疲劳破坏; ②增大荷载幅 ($Q_{max} - Q_{min}$) 继续进行疲劳试验, 直至构件发生疲劳破坏; ③如果构件没有破坏征兆, 使用静力法使构件破坏.

关于加载频率对梁受力的影响, 文献 [4] 提到, 只有当荷载频率变化到与结构频率相等时, 结构才会发生共振现象. 本次试验疲劳加载机的加载频率是 4.1 Hz (250 次/min), 与试验梁本身的自振频率相比差了很多, 因此由加载频率引起的共振的影响可以忽略不计.

1.3 测点布置及测试内容

本次试验梁测点布置基本上如图 3 所示, 个别试验梁根据具体情况有所调整. 图中 C_i 表示在混凝土翼板上粘贴的电阻应变片; S_i 表示在钢梁上粘贴的电阻应变片; D_i 表示量测混凝土翼板与钢梁之间相对滑移的导杆引伸仪; N_i 表示测梁跨中挠度的位移计; H_i 表示测梁端相对滑移和支座沉降的端部位移计.

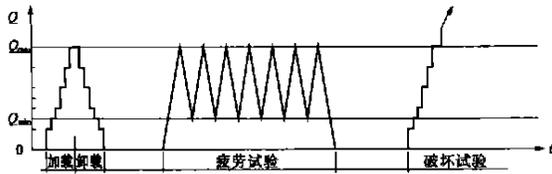


图 2 疲劳加载程序

Fig. 2 Fatigue loading procedure

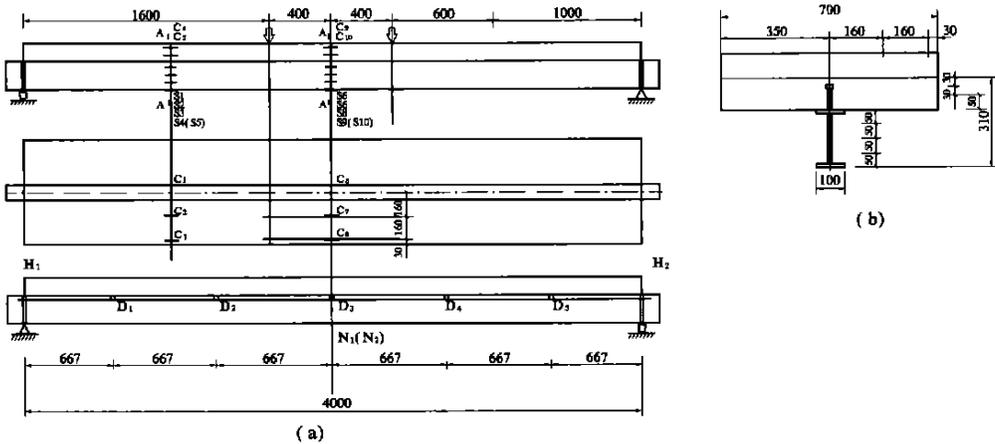


图 3 测点布置图

Fig. 3 Distribution of measure point

2 破坏过程及主要试验结果

梁的破坏过程基本上随着疲劳荷载作用次数的增加,混凝土板和钢梁上翼缘之间的自然粘结首先破坏,同时栓钉的抗疲劳强度也不断降低,降低的速率取决于作用在栓钉上的疲劳荷载幅,荷载幅越大,栓钉静力极限强度下降也越快.当某个部位的栓钉强度不足以抵抗疲劳荷载上限产生的剪力时,此处栓钉就被剪断,从而发出摩擦声.于是荷载引起的剪力在尚未发生疲劳破坏的栓钉之间重新分布,使这些栓钉承受的剪力增大.随着疲劳次数的增加,断裂部位的栓钉和混凝土逐渐被磨平,摩擦声也逐渐减弱直至消失.随后随着栓钉强度的进一步降低,又有栓钉被荷载上限引起的剪力剪断,于是又引起剪力重分布现象.当由于某个栓钉发生断裂造成的梁整体承载力不足以抵抗疲劳荷载上限时,疲劳破坏发生,荷载上限便开始下降,而荷载下限仍然保持不变.此时观测梁的一个加载点下方,能发现混凝土板出现了几条沿着梁横向方向发展的宽度很小的裂缝,裂缝很快贯穿混凝土翼缘板底面,并在板侧面向上发展,其余部分无裂缝出现.在焊接质量有保证的情况下,从疲劳破坏发生前的一个栓钉被剪断发出摩擦声到疲劳破坏发生是一个比较短的发展过程,需重复加载 1.5 万次左右.

因此可以认为,听到摩擦声(不久会伴随有钢梁和混凝土翼缘板发出的撞击声)是疲劳破坏发生的预兆,混凝土板出现裂缝即为疲劳破坏发生的标志.同时可以断定,疲劳荷载上限对组合梁的疲劳强度的影响在后期比在前期要大,荷载上限越大,栓钉在加载后期越易被剪断;荷载上限越大则混凝土板越易出现裂缝,同时裂缝发展越迅速.疲劳破坏发生时,只有半个剪跨的栓钉发生被剪断,其余部分栓钉保持正常工作.试验梁侧残余承载力加载至破坏时较为典型的混凝土翼缘板侧面及底面裂缝状况如图 4、图 5 所示.残余承载力是指梁在经历疲劳荷载作用后能承受的极限荷载值.

试验梁的主要试验结果见表 2. 疲劳破坏次数是指疲劳破坏发生时梁所经历的重复加载次数,而实振次数是指每根梁在其整个试验过程中所经历的疲劳加载次数的总和.梁 FSCB-0 只承受静载,而梁 FSCB-2 经历 206 万次重复加载仍未发生疲劳破坏.



图 4 裂缝比较图

Fig. 4 Crack comparison

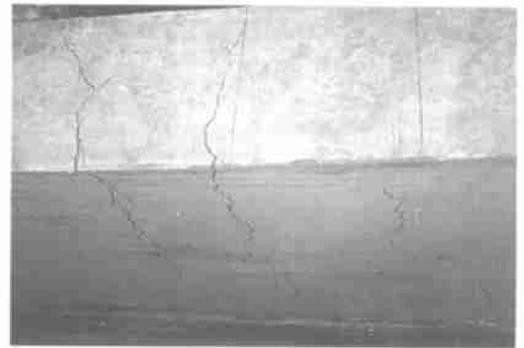


图 5 混凝土板裂缝分布图

Fig. 5 Distribution of crack in concrete plank

表 2 试验结果

Tab. 2 Test result

编号	荷载/kN		剪应力幅 (N/mm^2)	疲劳次数 $\times 10^4$		残余承 载力/kN	
	上限	下限		幅度	破坏		实振
FSCB-0	—	—	—	—	—	237.0	
FSCB-1	120.0	20	100.0	140.85	38.0	42.0	144.0
FSCB-2	114.0	30	84.0	118.31	—	206.0	221.4
FSCB-3	128.7	30	98.7	139.02	68.5	73.0	132.2
FSCB-4	118.0	30	88.0	123.95	170.0	177.0	130.8
FSCB-5	114.6	30	84.6	119.16	207.0	213.0	154.5
FSCB-6	110.0	20	90.0	126.77	34.8	35.0	159.7
FSCB-7	101.1	20	80.1	112.82	22.0	22.5	172.3

3 截面纵向应变特征及分析

图 6(a), (b) 荷载—应变特征曲线的数据是由疲劳加载过程中的静载试验测得的. 试验结果发现, 混凝土翼板和钢梁疲劳残余应变的总体发展趋势是随疲劳加载次数的增加而不断增加. 图中曲线的斜率在疲劳试验前后变化很小, 基本上保持一致. 这说明梁的刚度在疲劳破坏发生以前虽有下降, 但还不足以对梁的受力产生大的影响. 疲劳破坏发生以前, 在疲劳荷载范围内, 混凝土翼板和钢梁始终保持为线弹性状态, 这充分说明组合梁具有良好的抗疲劳性能.

从全截面应变分布图 6(c) 可以看出, 随着疲劳加载次数的增加, 截面应变在梁高范围内的分布情况前后变化不大. 有的梁在疲劳加载过程中混凝土翼缘板和钢梁之间的相对滑移不断变大的情况下, 全截面应变仍能保持很好的线性, 体现了良好的抗疲劳性能. 有的梁截面应变分布的线性不是很好, 但是考虑到整个剪跨段的平均应变, 仍然符合平截面假定的要求. 因此组合梁在疲劳破坏发生以前, 采用基于平截面假定的正截面强度计算方法是可行的.

从图 6(d) 可以看出, 混凝土翼板截面的应变总的发展趋势是随着疲劳加载次数的增加而不断增加, 而钢梁应变变化则相对平缓, 靠近中和轴的部位甚至出现应变减少的现象. 分析其原因, 是因

为虽然疲劳残余应变仍在不断增加, 但是由于混凝土截面刚度的下降引起截面中和轴逐渐向下即钢梁截面移动, 使力在混凝土翼缘板和钢梁截面重新分布, 混凝土翼缘板受力增大而钢梁受力减小从而使钢梁应变减小. 当钢梁某个部位中和轴移动对总应变的影响超过疲劳残余应变对钢梁总应变的影响时, 该处钢梁应变就呈现减少的趋势, 反之则截面应变增大. 从图中可以观察到, 混凝土翼缘板和钢梁交接面部位的应变变化最大, 造成这种结果的原因是随着疲劳加载次数的增加, 交接面处的相对滑移不断增加, 再加上梁整体刚度的降低, 使得截面中和轴位置不断变化, 而中和轴的变化对其周围的应变影响也最大, 本次试验梁的截面中和轴位于交接面附近混凝土翼缘板内.

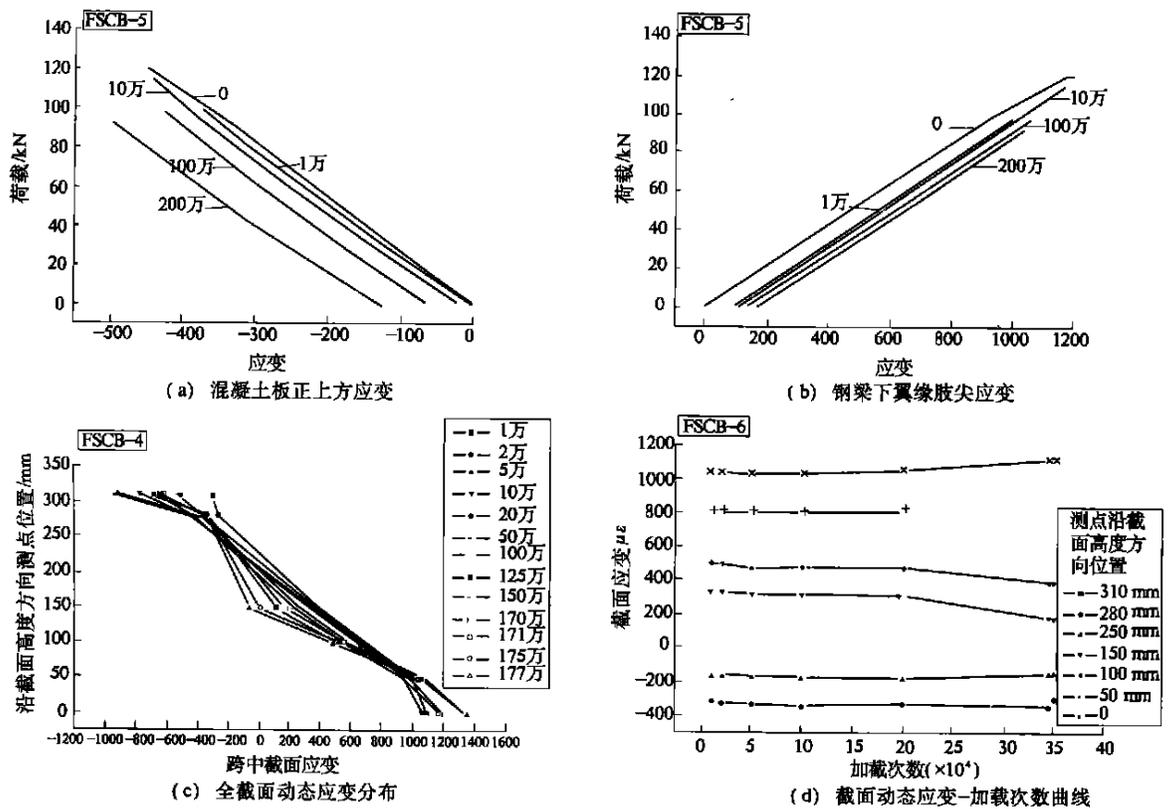


图 6 应变特征曲线

Fig. 6 Characteristic curve of strain

4 界面滑移特征及分析

混凝土翼缘板和钢梁之间的纵向滑移是由剪力连接件本身的变形和其周围混凝土的压缩变形所致. 图 7(a) 中最右一条曲线为 70 万次后停机 20h 测得的. 开始加静载时的滑移变化是由于混凝土翼缘板和钢梁之间自然粘结局部破坏造成的. 原因是静载的最大值为疲劳荷载上限值, 此荷

载范围梁处于弹性状态, 荷载引起的栓钉纵向剪力也远小于栓钉的极限承载力, 在焊接质量良好的情况下, 不可能出现疲劳加载开始前栓钉被剪断而引起滑移的情况. 从图中还可以发现, 荷载-滑移曲线关系在荷载较小的情况下也不是线弹性的, 但是目前普遍采用的假定其为线弹性的关系是可行的. 观察端部荷载-滑移曲线的变化可以发现, 在每次加载初期都存在残余变形, 有的甚至

是负的变形,并且是越到加载后期残余变形量越大.造成这种结果的原因是随着加载次数的增加,混凝土翼缘板和钢梁之间的自然粘结首先发生破坏,加之混凝土板的收缩徐变,当荷载卸下以后滑移就有可能是负的.不断的重复加载使自然粘结在后期破坏得更充分,意味着组合梁整体工作性能的下降;重复加载也使柔性连接件栓钉的变形

更加充分,同时还有刚度下降等其它方面的原因,使总的相对滑移量越到加载后期越大,直到疲劳破坏发生出现滑移量异常.总之,随着荷载的增大,端部滑移量增加;随着疲劳加载次数的增加,疲劳残余滑移增大.在疲劳破坏发生以前,总的滑移量始终保持增加.

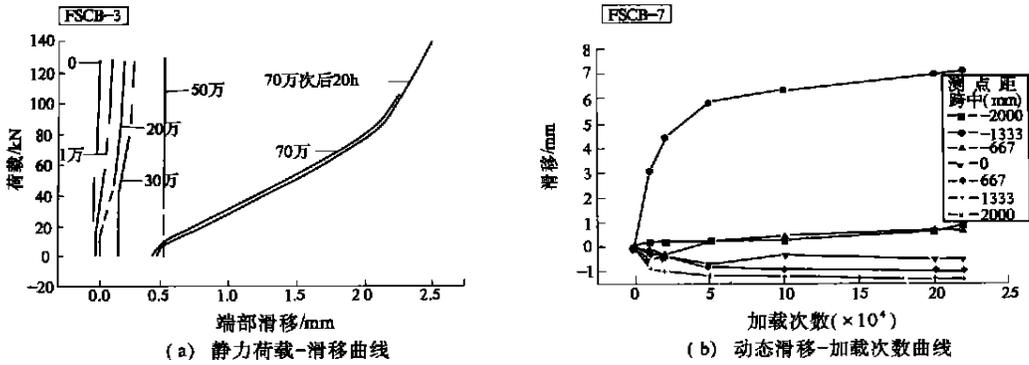


图7 滑移特征曲线
Fig.7 Characteristic curve of slip

从图7(b)中可以看出,疲劳加载开始后,梁最后发生疲劳破坏的一端某个部位的滑移量将由于混凝土翼缘板和钢梁之间自然粘结的破坏和栓钉变形的增加而迅速增加,引起混凝土翼缘板和钢梁的组合作用减弱.不久滑移进入稳定增长阶段,直到疲劳破坏发生才有更大的变化.而未发生疲劳破坏的一端及跨中纯弯段的滑移量在整个疲劳加载过程中都相对较小,梁的整体工作性能保持良好.

5 荷载—挠度曲线特征及分析

从图8(a)中可以看出,随着疲劳加载次数的增加,疲劳残余挠度逐渐加大.组合梁截面刚度则逐渐减小,这说明疲劳荷载引起的弯曲变形随着加载次数的增加而不断增加,梁总的挠度也相应地随加载次数的增加而增长.试验得到的最大疲劳残余挠度的平均值为2.45mm,静载对比梁FSCB-0的屈服荷载对应的挠度为12.66mm,可以得到疲劳残余挠度变形在整个挠度中所占的百分比为19%,此数值已经相当大了.由此可见,在实际工程中承受动荷载如吊车梁、铁路桥等采用组合梁的结构,重复荷载引起的附加挠度变形应当引起足够的重视.

图8(b)中,发生疲劳破坏的梁FSCB-7的残余荷载—挠度曲线和其它几根发生疲劳破坏梁的

曲线规律有所不同,而与未发生疲劳破坏的梁在某些部分有些相似.主要原因是因为该梁在疲劳破坏发生即混凝土板出现裂缝以后只继续加了很短一段时间的重复荷载.混凝土板与钢梁的组合作用还未完全丧失,混凝土板开裂以后还能起一定抗弯作用,因此屈服后存在明显的上升段.梁FSCB-5同样在疲劳破坏发生后继续加了比梁FSCB-7稍长的一段时间,因此梁屈服后也存在上升段;而其它几根梁在疲劳破坏发生后仍继续加载了相对较长的一段时间,所以疲劳破坏的程度更深一些,混凝土板与钢梁的组合作用基本丧失,梁一旦屈服就进入屈服流动阶段,荷载不再增加或增加很少而变形则增加很快.从图中可以看出,组合梁在承受疲劳荷载之前与之后的屈服荷载值比较接近,即重复加载对梁的屈服承载力的影响并不十分明显.从静载对比梁FSCB-0与经历206万次重复加载未发生疲劳破坏的梁FSCB-2的比较可以看出,随着加载次数的增加,梁截面刚度虽然有下降,但是下降不多,即重复加载对组合梁截面刚度的影响在疲劳破坏没有发生的情况下不是很明显,这从另一个角度充分说明组合梁具有良好的抗疲劳性能.疲劳破坏一旦发生,则组合梁截面刚度迅速下降,从而梁截面的抗弯承载力也跟着减小.疲劳破坏越严重,截面刚度下降越多,至混凝土翼板和钢梁的组合作用完全丧失

则保持稳定. 进入屈服阶段以后, 经历了疲劳破坏的组合梁承载力提高很少, 极限荷载和屈服荷载

相差不多, 基本保持不变, 而未发生疲劳破坏的组合梁承载能力仍有很大的提高.

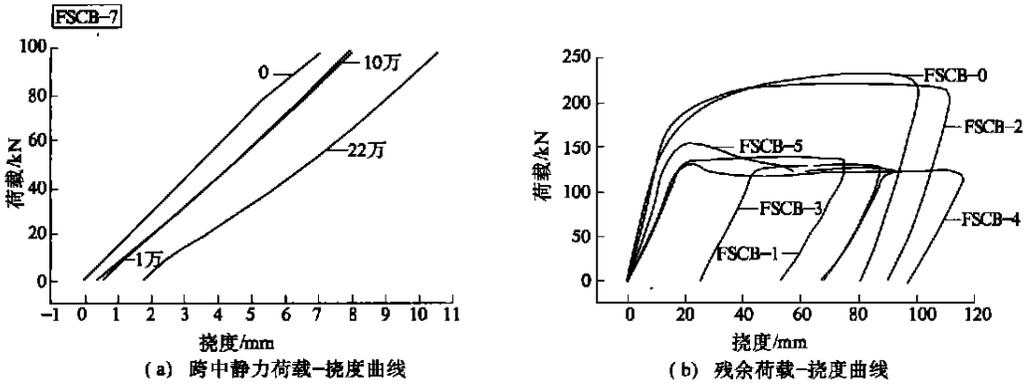


图 8 荷载-挠度曲线

Fig. 8 Curve of loading-flexibility

6 结束语

通过以上分析, 可以得出结论: 在疲劳荷载作用下, 部分剪力连接组合梁具有良好的抗疲劳性能; 随着组合结构在我国工程中的应用越来越广泛, 在保证施工焊接质量的前提下推广部分剪力连接组合梁, 会减少连接件的用量, 并将带来较好的经济效益.

参考文献:

[1] 朱聘如. 钢-混凝土组合梁设计原理 [M]. 北京: 中

国建筑工业出版社, 1989.

[2] ANDRA Hans -Peter. Economical shear connectors with high fatigue strength [J]. IABSE Symposium Brussels , 1990, 60: 167~172.

[3] 郑州工学院土建系. 钢-混凝土栓钉连接件压型钢板组合梁动载疲劳性能试验研究 [R]. 郑州: 郑州工学院土建系, 1990.

[4] 李建军. 钢-混凝土栓钉连接件压型钢板组合梁动载疲劳性能试验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002.

[5] 胡少伟, 聂建国, 陈 淮. 共振与类共振 [J]. 工业建筑, 1999, 29(4): 37~39.

Fatigue Research of Composite Beams with Partial Shear Connectors

WANG Shuo¹, ZHANG Yu²

(1. Nanyang Highway Plan and Reconnaissance Institute , Nanyang 473000, China ; 2. Nanyang Road Engineering Department , Nanyang 473000, China)

Abstract : Through testing eight composite beams with partial shear connectors under dead load and repeated load , the effect that repeated load acts on composite beams is analyzed on the basis of the test process , phenomena and result . The result proves that composite beams with partial shear connectors have better performance to support fatigue load in that they can hardly be destroyed under general fatigue load if the welding quality is reliable . So the application of partial shear connectors in the building and bridge structure to supporting the fatigue load is feasible and will bring considerable economic benefits .

Key words : partial shear connector ; composite beam ; fatigue