

高速铁路复杂箱形截面预应力 混凝土梁疲劳性能试验研究

华建民^{a,b}, 邹小波^a, 王剑越^a, 曹 晖^{a,b}, 李正良^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要:以武广高铁武汉站 36 m 跨复杂箱形截面预应力混凝土简支梁为原型, 制作 4 个 1/6 缩尺模型, 其中 1 个模型加入 13% 的高分子聚合物胶乳, 通过静力试验和疲劳试验, 考察了复杂箱梁在正常使用和超过设计值的循环荷载作用下的疲劳性能, 以及聚合物对箱梁疲劳性能的影响。试验结果表明, 根据运营阶段箱梁控制截面底部的最大和最小应力值确定的加载幅值作用下, 200 万次加载后表明模型的疲劳寿命满足要求, 并且对后期高幅值加载下的疲劳性能没有影响, 聚合物的加入对模型的疲劳性能没有负面影响。

关键词:疲劳; 复杂箱梁; 缩尺模型; 聚合物

中图分类号: U448.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)03-0008-05

Experimental Analysis of Bending Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Girders with Complex Box-type Section Used in High-speed Railway

HUA Jian-min^{a,b}, ZOU Xiao-bo^a, WANG Jian-yue^a, CAO Hui^{a,b}, LI Zheng-liang^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Based on a prestressed concrete girder with complex box-type section of 36m span, four models of 1/6 scale are made, and one of them is mixed with a kind of polymer latex. Experiments with monotonically and cyclically loading are carried out on the models to study bending fatigue behavior of the girder in service and under cyclic load exceeding the designed value, as well as the impact of polymer on fatigue performance of the girder. The results show that, under the cyclic load of value determined by the maximum and minimum stress at the key part of the girder in service, the fatigue performance is satisfactory and the fatigue behavior under a subsequent larger cyclic load is similar with that one under the same big cyclic load. Besides, the polymer has no negative effect on fatigue behavior of the model.

Key words: fatigue; box-type girder with complex section; reduced scale model; polymer latex

钢筋混凝土构件在循环荷载作用下的疲劳性能一直是研究者关注的问题。各国学者对规则截面(矩形或者 T 形)钢筋混凝土梁的疲劳性能做了大量的试验研究。李秀芬等^[1]通过对 11 片混凝土简支梁的静载和等幅疲劳荷载试验, 分析研究了受弯构件的疲劳特性, 得到了作为控制梁的疲劳承载能

力极限状态的 S-N 曲线, 并提出了高强混凝土受弯构件在等幅疲劳荷载作用下正截面疲劳设计方法。罗许国^[2]、宋旭明^[3]等对掺有高性能粉煤灰的混凝土铁路桥梁和粉煤灰预应力混凝土梁在重复荷载作用下的疲劳性能进行了研究。李子奇^[4]、童谷生^[5]、吕宏奎^[6]、Heffernan^[7]、Larson^[8]等对碳纤维布增

强的钢筋混凝土梁的疲劳性能进行了研究,表明碳纤维布可以较大地提高钢筋混凝土梁的疲劳性能。孔宪途^[9]、吴云泉^[10]在讨论混凝土疲劳寿命概率分布的基础上,进行了载荷与寿命关系的试验研究,得到了 $P-S-N$ 曲线。冯秀峰和宋玉普^[11-12]研究了随机变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁的疲劳寿命疲劳和疲劳荷载作用下预应力混凝土梁中钢筋应力的重分布。Roller和Russell^[13]最近进行了预应力高强度混凝土梁的疲劳试验。Konstantinos等^[14]对钢纤维布增强的混凝土构件的疲劳性能进行了研究,表明钢纤维布能显著地提高混凝土构件的疲劳性能。

上述已有的疲劳试验采用的构件截面规则,配筋简单。高速铁路复线桥梁的截面一般都非常复杂,加之高速运营的列车,给铁路桥梁的疲劳性能带来了新的问题。该文以武广高铁武汉站铁路桥的复杂截面箱梁为原型,进行大比例缩尺模型的疲劳试验,考察箱梁在正常使用和超过设计值的循环荷载作用下的疲劳性能,以及为增大阻尼添加高分子聚合物对混凝土疲劳性能的影响。

1 试验模型

武广高铁武汉站铁路桥为10条复线桥,每条复线除中间3跨为刚构外,其余均为箱形预应力筒支梁。箱梁跨度36m,宽15.5m,高5.08m。跨中典型截面为单箱5室(即5个孔洞),上部为槽形(中部为复线轨道,两侧为站台),底部为圆弧形,见图1。靠近支座部分截面孔洞逐渐变小,截面底部从圆弧逐渐变平。

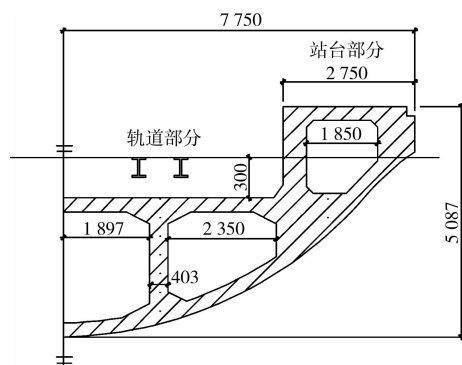


图1 预应力混凝土箱梁图

以该箱梁为原型,制作1/6模型4个,其中1个用于静载试验,编号为S-1;其余3个进行疲劳试验,编号分别为F-1、F-2和F-3。模型在几何形状上尽量与原型保持一致,但为了减小制作难度,在支座部

分进行了局部简化。4个模型混凝土的配比与原型一样为C50,其中F-3另外添加羧基丁苯胶乳(聚灰比为0.13)。模型的普通钢筋采用直径为8mm的Q235级光圆钢筋,预应力钢绞线采用抗拉强度标准值为 $f_{ptk}=1860$ MPa,公称直径为15.2mm的高强度低松弛钢绞线。模型跨中截面如图2所示。

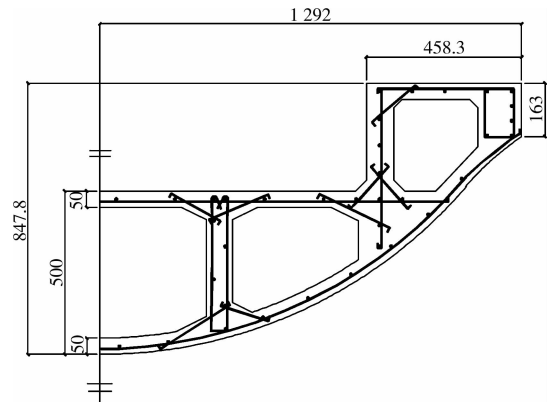


图2 模型跨中截面配筋图

F-3在拆模后,下部圆弧部分靠近底部两侧各约10cm宽度范围的混凝土沿纵向脱空,支座部分混凝土也有少量空洞,后经修补进行试验。

2 试验方案

静载试验采用10个20t油压千斤顶加载。疲劳试验采用MTS疲劳试验机,由硬件集装箱和系统软件FlexTest GT 2部分组成,可实现加载和监控的自动化。

静载和疲劳试验均采用三分点加载的方案,通过横向和纵向分配梁将作动器施加的荷载传递到模型长度的三分点位置,见图3。图中还示意了测试挠度的百分表布置。

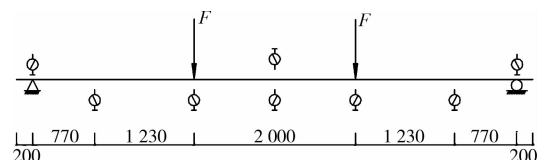


图3 模型梁加载位置和百分表布置

模型的顶部和底部均布置混凝土应变片,底部纵向普通钢筋上布置钢筋应变片。钢筋和混凝土的应变和模型的挠度等数据均通过动态测试分析系统3560-D、应变数据采集箱YE2902和程控静态应变仪YE2530T自动高速采集和储存,采样频率可达10kHz。

F-1采用超过设计荷载,即0.5倍极限承载力

为加载幅值的上限。F-2 分 2 阶段进行疲劳试验。第 1 阶段试验用于研究箱梁在正常使用情况下的疲劳性能,为了模拟箱梁的实际受力且考虑试验的方便,加载幅值的取值根据运营阶段箱梁控制截面底部的最大和最小应力值来确定,加载次数为 200 万次;第 2 阶段试验的加载幅值同 F-1,考察前期低幅值加载对后期高幅值加载疲劳性能的影响。F-3 的加载幅值同 F-1,考察为了增大结构阻尼而在混凝土中掺入聚合物后箱梁的疲劳性能。

S-1 的荷载从 0 级开始,以 10 t 为 1 级分级加载至极限荷载 140 t(计算值),靠近估计的开裂荷载(60 t)前荷载级数适当加密以观察受拉区混凝土应变的发展;截面开裂后,在每一加载间隔内借助放大镜量测裂缝宽度和长度。

F-1、F-2 和 F-3 的疲劳加载幅值和加载频率见表 1。

表 1 疲劳加载幅值和加载频率

	F-1	F-2		F-3
		前 200 万次	200 万次之后	
下限/t	10	5	10	10
上限/t	75	45	75	75
频率/Hz	1.6	3.5	1.6	1.6

3 试验现象和结果

S-1 的破坏属于受弯破坏,由该静载试验的结果可以得到其余模型的极限荷载和开裂荷载的参考值。当荷载加到 60 t 时,裂缝开始出现,主要集中在模型底部加载点所对应的区域;当荷载增加至 147 t 时,模型变形突然加大,下表面混凝土持续掉落,荷载无法继续增加。因此确定模型的极限承载力为 147 t。

F-2 在 0~45 t 静载循环后,没有裂缝出现,接着以 0~45 t 的低幅值加载 200 万次后,模型的基频和挠度与疲劳试验前相比,基本上没有变化。

F-1 和 F-3 在疲劳试验的前 20 万次加载中裂缝的长度没有发展,宽度的增量也比较小;20 万次到 50 万次加载之间,除裂缝的宽度和长度均有所增加外,数量也相应增加,受拉区混凝土以粉末状不断脱落;最后混凝土剥落处的普通钢筋发生断裂,模型疲劳破坏。F-2 的第 2 阶段试验,即高幅值加载下,裂缝的发展和挠度的变化情况与 F-1 和 F-3 类似。各模型疲劳试验结果如表 2 所示。由于 F-3 存在缺陷,后面的分析将其结果作为参考。

表 2 模型疲劳试验结果

模型	开裂弯矩/ (kN·M)	极限弯矩/ (kN·M)	加载 幅值/t	破坏次数/ 万次	破坏特征
F-1	600	1470	10~75	84.9	普通钢筋疲劳断裂
F-2	500	1470	5~45	200	未破坏,加大荷载
F-3	580	1470	10~75	69.7	普通钢筋疲劳断裂

4 结果分析

4.1 静载试验分析

图 4 为 S-1 跨中截面普通纵向钢筋应变值随荷载的变化曲线。由图可知,当荷载小于 65 t 时,钢筋的应变增长平缓,应变和荷载近似呈线性关系,模型在这个阶段处于线性工作状态。当荷载超过 65 t 后,受拉区混凝土开裂,中性轴上移,模型上表面压区混凝土应变增幅加大,普通钢筋应变值陡增。此后,随荷载的增加钢筋的应变增幅比 65 t 以前大得多。

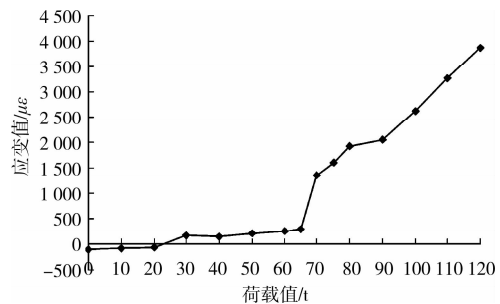


图 4 S-1 跨中截面普通纵向钢筋应变曲线

4.2 疲劳试验分析

4.2.1 正常使用情况下模型疲劳性能分析 图 4 为 F-2 第 1 阶段不同疲劳加载次数后,静载循环中跨中下部普通纵向钢筋应变曲线。对于全预应力混凝土梁,在比较低的正常使用荷载作用下,混凝土不出现拉应力,截面最大与最小应力之差,即应力幅 $\Delta\sigma_p = \sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}$ 很小(一般 30~50MPa),材料的疲劳强度较高。由图 5 可见,在各疲劳加载次数之后,钢筋应变在静载循环内的变化趋势是基本相同的,考虑到构件的抗疲劳性能与荷载水平密切相关,试验结果说明保持模型为全预应力状态的低幅值疲劳加载对模型受力性能的影响很小。

图 6 为在第 1 阶段 50 万次和第 2 阶段 50 万次疲劳加载后,0~45 t 静载循环下 F-2 的挠度对比。在加载次数相同的情况下,高幅值加载比低幅值加载导致模型的疲劳损伤大得多,表现为相同静载下挠度更大,并且随荷载的增加挠度增加的幅度更大。频率识别的结果也显示,高幅值加载后模型的基频

降低,而低幅值加载下模型的基频基本保持不变。因此,箱梁在正常使用情况下,其疲劳寿命满足设计的要求。

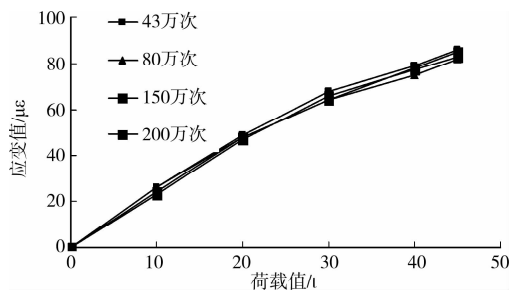


图5 F-2各静载循环中纵向钢筋应变曲线

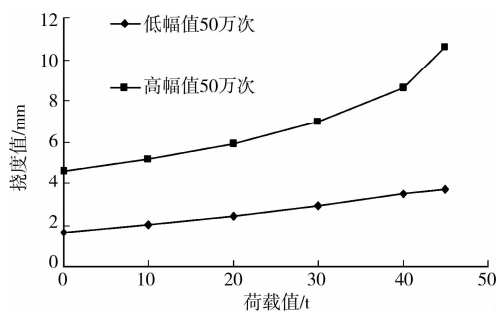


图6 F-2不同幅值50万次加载后静载循环中挠度随荷载变化曲线

4.2.2 高幅值加载下模型的疲劳性能分析 图7是不同加载次数后静载循环中F-1跨中挠度随荷载变化的曲线。可见,随疲劳次数的增加,相同静载下跨中挠度相应变大,但50万次内挠度变化趋势大致一致。临近破坏时,模型的挠度增加很快。

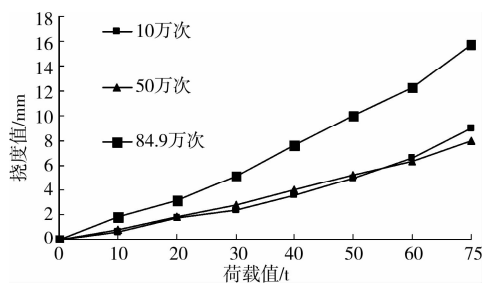


图7 F-1各静载循环中跨中挠度随荷载变化曲线

图8是F-3在不同加载次数后静载循环中跨中挠度随荷载变化的曲线。在40万次内,不同加载次数下的挠度变化趋势基本相同。随着疲劳次数的增加,挠度的变化趋势同F-1。

4.2.3 对比分析 图9为F-1、F-2和F-3模型在荷载幅值为10~75 t,50万次加载后静载循环中跨中上表面混凝土应变对比情况。通过图9可以看到,无论是加聚合物的模型F-3还是经过200万次低幅值疲劳加载后的模型F-2,在高幅值加载50万次后,模型上表面混凝土应变在一次静载循环内的

曲线基本一致。另外对比图7和图8可知,F-1和F-3在各静载循环中挠度随荷载变化基本一致。

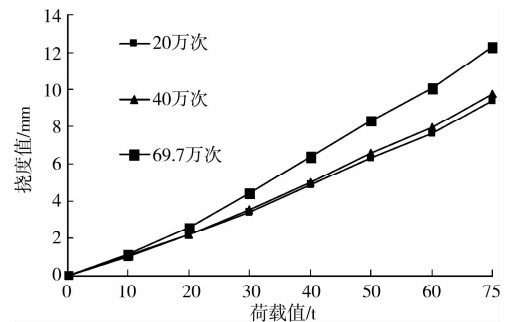


图8 F-3各静载循环中跨中挠度随荷载变化曲线

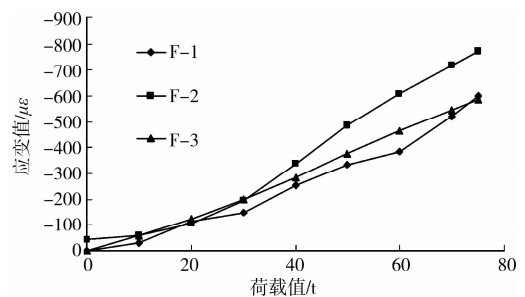


图9 静载循环中跨中上表面混凝土应变对比

图10为疲劳破坏以后,3个模型在静载循环中跨中挠度的对比。可见,F-1和F-2的挠度曲线非常接近。F-3的变形要小一些,说明其破坏后的刚度比其余2个模型更好。

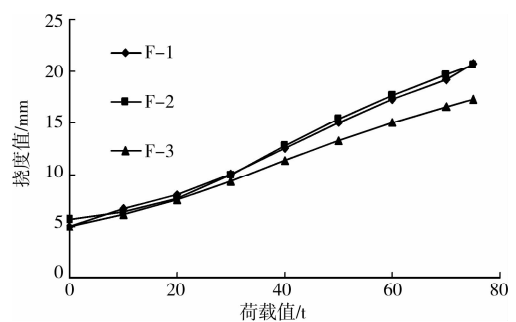


图10 疲劳破坏后静载循环中跨中挠度对比

表1给出的各模型的疲劳寿命虽然有差异,特别是F-3比F-1的疲劳次数少了近15万次,但考虑到F-3存在缺陷,再结合以上分析可以说明,加了聚合物的模型与普通混凝土模型的疲劳性能没有大的区别。试验掺加的羧基丁苯胶乳聚合物是一种高分子材料,它的掺入改变了普通混凝土的内部结构,在混凝土内部形成互穿网络结构,破坏了原有的无机物体系之间的离子键,而在一定的掺量下所加入的聚合物与无机物体系间所形成的离子键、氢键、范德华力及互交网络结构力尚不足以弥补所损失的键力,通常使抗压强度和弹性模量有一定程度的下降。

但在构件开裂后,掺加聚合物后梁的裂缝发展更均匀,构件位移更小。同时,聚合物的掺加可以提高混凝土的阻尼性能,快速耗散外部施加的振动能量。

通过表1看出,F-1和F-2的疲劳次数差别不大,再通过上述对比分析说明,经过200万次低幅值疲劳加载,模型的疲劳性能没有受到影响。

5 结论

论文通过4个模型静力试验和疲劳试验,考察了复杂箱形截面预应力混凝土简支梁在正常使用和超过设计值的循环荷载作用下的疲劳性能,以及聚合物掺加对箱梁疲劳性能的影响,得出结论如下:

1) 由模型的2阶段疲劳试验结果可知:加载中保持模型在全预应力状态,模型不会疲劳破坏,箱梁原型在正常使用情况下疲劳性能满足设计要求;全预应力状态下的200万次循环加载对后期高幅值加载下模型的疲劳性能没有影响。

2) 对比普通混凝土和聚合物混凝土模型的疲劳试验结果,可知聚合物的添加对模型的疲劳寿命没有负面影响。

参考文献:

- [1] 李秀芬,吴佩刚. 高强混凝土梁抗弯疲劳性能的试验研究[J]. 土木工程学报,1997,30(5):37-42.
LI XIU-FEN, WU PEI-GANG. Experimental research on bending fatigue behavior of high-strength concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5):37-42.
- [2] 罗许国,戴公连. 不同掺量高性能粉煤灰混凝土铁路桥梁试验研究[J]. 中国铁道科学,2007,28(6):35-40.
LUO XU-GUO, DAI GONG-LIAN. Experimental study on railway concrete bridges with different high performance fly ash[J]. Journal of China Railway Science, 2007,28(6):35-40.
- [3] 宋旭明,戴公连. 铁路超细粉煤灰预应力混凝土梁疲劳性能试验[J]. 铁道科学与工程学报,2008,5(4):38-43.
SONG XU-MING, DAI GONG-LIAN. Fatigue behavior test on railway prestressed concrete bridge with ultra-fine fly ash [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008,5(4):38-43.
- [4] 李子奇,薛兆锋. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[J]. 公路交通科技,2006,12:77-80.
LI ZI-QI, XUE ZHAO-FENG. Study on fatigue property test on carbon fiber fabric steel reinforced concrete [J]. Journal of Technology of Highway and Transport, 2006,12:77-80.
- [5] 童谷生,刘永胜. 碳纤维布加固部分预应力混凝土梁的疲劳性能研究[J]. 建筑科学,2008,24(9):19-23.
TONG GU-SHENG, LIU YONG-SHENG. Study on fatigue performance of partially prestressed concrete beams strengthened by CFRP-sheets [J]. Journal of Building Science, 2008,24(9):19-23.
- [6] 吕宏奎,刘炎海. 碳纤维布增强钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2006,25(4):10-13.
LV HONG-KUI, LIU YAN-HAI. Study on fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP-sheet [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006,25(4):10-13.
- [7] HEFFERNAN P J, ERKI A. Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic laminates [J]. Journal of Composites for Construction, 2004,8(2):132-140.
- [8] LARSON, RASHEED. Strength-fatigue behavior of fiber reinforced polymer strengthened prestressed concrete T-beams [J]. Journal of Composites for Construction,2005,9(4):313-326.
- [9] 孔宪途,徐人平. 混凝土疲劳寿命 P-S-N 曲线的试验 [J]. 江南大学学报,2009,8(3):327-330.
KONG XIAN-TU, XU REN-PING. Experimental research on P-S-N curve of concrete fatigue life [J]. Journal of Jiangnan University, 2009,8(3):327-330.
- [10] 吴云泉,顾红军. 混凝土受拉疲劳的 S-P-N 方程[J]. 混凝土,2005(1):46-48.
WU YUN-QUAN, GU HONG-JUN. The S-P-N equation of concrete flexural tensile fatigue [J]. Journal of Concrete, 2005(1):46-48.
- [11] 冯秀峰,宋玉普. 随机变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁疲劳寿命的试验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(9):32-38.
FENG XIU-FENG, SONG YU-PU. An experimental study on the fatigue life of prestressed concrete beams under random-amplitude fatigue loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(9):32-38.
- [12] 冯秀峰,宋玉普. 疲劳荷载下预应力混凝土梁中钢筋应力重分布的试验研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(2):94-99.
FENG XIU-FENG, SONG YU-PU. Experimental study on stress redistribution of reinforcing steel in prestressed concrete beams under fatigue loading [J]. Journal of Building Structures, 2006,27(2):94-99.
- [13] ROLLER JOHN J, RUSSELL HENRY G. Fatigue endurance of high-strength prestressed concrete bulb-tee girders [J]. PCI Journal,2007,52(3):30-42.
- [14] KATAKALOS K, PAPAKONSTANTINOUC G. Fatigue of reinforced concrete beams strengthened with steel-reinforced inorganic polymers [J]. Journal of Composites for Construction,2009,13(2):103-112.