

文章编号: 1000-4750(2007)Sup.I-0134-07

# 预应力高强轻骨料混凝土连续刚构桥的试验研究

黄盛楠, 刘英奎, \*叶列平, 孙海林, 冯 鹏, 陆新征

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 强度等级在 CL40 以上的高强轻质混凝土(HSLWC)应用于大跨度桥梁结构, 具有减轻自重, 有效降低结构内力, 增大跨度, 减少桥墩数量等优点。以云南安宁至楚雄高速公路 14 号达连坝段公路桥为原型, 按照 1/4 比例设计了一个 3 跨预应力高强轻骨料混凝土连续刚构桥, 其桥面结构采用 CL50 混凝土, 进行了多种荷载工况的试验研究。结果表明, 预应力高强轻骨料混凝土连续刚构桥具有较好的受力性能, 1 倍和 1.5 倍等效车队荷载通过时, 各项指标均满足规范要求; 2 倍等效车队荷载通过时, 部分指标不满足使用要求, 但桥梁表现出了较好的延性; 在严重超载情况下, 桥梁虽破坏严重, 但仍可保持较好的承载力水平且不会发生跨塌。

**关键词:** 刚构桥; 模型试验; 高强轻骨料混凝土; 预应力; 残余变形

中图分类号: TU375 文献标识码: A

## EXPERIMENTAL STUDY ON PRESTRESSED-HIGH-STRENGTH-LIGHT-WEIGHT -CONCRETE CONTINUOUS RIGID FRAME BRIDGE

HUANG Sheng-nan, LIU Ying-kui, \*YE Lie-ping, SUN Hai-lin, FENG Peng, LU Xin-zheng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** High-strength-light-weight concrete (HSLWC) (with a cube strength higher than CL40) has a bright future in the application of large-span bridges due to its obvious advantages. It reduces the self-weight of the bridge, so that the internal stress can be smaller, the span can be larger and the number of piers can be reduced. An experimental research on a 3-span prestressed continuous rigid frame model bridge with a superstructure made of CL50 HSLWC is presented in this paper. The prototype of the bridge model is located in the 14th section of the highway connecting Anning and Chuxiong in Yunnan province. The model bridge was designed by the scale of 1/4 and was tested under 10 different load cases. The test results showed that the prestressed HSLWC continuous rigid frame model bridge had good mechanical performance. Under a traffic load which was 1.0 to 1.5 times of its design load, all indices of the bridge model satisfied the requirement of design standard. And under 2 times of design load, parts of indices were beyond the standard requirement but the bridge still showed good ductility. And under very large overload situation, the bridge was damaged seriously but it still could maintain the load capacity and did not collapse.

**Key words:** rigid frame bridge; model experiment; high-strength-light-weight concrete; prestress; residual deformation

收稿日期: 2006-06-19; 修改日期: 2006-12-04

基金项目: 交通部 2002 年西部开发交通科技项目(2002-318-767-31)资助

作者简介: 黄盛楠(1982), 女, 天津人, 博士生, 从事桥梁健康监测研究(E-mail: huangcn03@mails.tsinghua.edu.cn);

刘英奎(1976), 男, 黑龙江大庆人, 硕士生, 从事刚构桥的设计及受力分析研究(E-mail: lyk03@mails.tsinghua.edu.cn);

\*叶列平(1960), 男, 浙江温州人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土结构、结构抗震及 FRP 在土木工程中的应用研究(E-mail: ylp@mail.tsinghua.edu.cn);

孙海林(1978), 男, 山东诸城人, 博士生, 从事轻骨料混凝土长期性能研究(E-mail: sh197@mails.tsinghua.edu.cn);

冯 鹏(1977), 男, 陕西耀县人, 讲师, 博士, 从事 FRP 桥面板及 FRP 大跨编织网研究(E-mail: fengpeng@mail.tsinghua.edu.cn);

陆新征(1978), 男, 安徽芜湖人, 讲师, 博士, 从事复杂结构受力分析、结构非线性分析与仿真研究(E-mail: luxinzheng@263.net).

高强轻质混凝土(HSLWC)指采用高强轻骨料(主要是陶粒)配制的强度等级在 CL40 以上的轻骨料混凝土,其表观密度为  $1600\text{kg/m}^3\sim 1950\text{kg/m}^3$ ,比相同强度等级的普通混凝土轻 25%~30%,应用于大跨度桥梁结构,可以有效减小结构自重,增大桥梁跨度,减少桥墩的数量,降低基础处理的费用,而且对于地震区,可以降低地震作用,具有显著的综合经济效益<sup>[1~5]</sup>。

到目前为止,北美用 LWC 建造了 800 多座桥的桥面<sup>[6]</sup>,其中绝大部分为桥面板的新建或翻修。近十年来,挪威在大跨桥梁工程应用 HSLWC 方面发展迅速,成为世界上应用最先进的国家之一<sup>[7]</sup>。从 1966 年开始,我国先后建成了 32 座跨度在 16.0m~21.4m 的中、小跨度公路桥,既有钢筋轻骨料混凝土桥梁,还包括少量的预应力轻骨料混凝土桥梁<sup>[8]</sup>。

目前,我国轻骨料混凝土强度普遍较低,缺乏 HSLWC(CL 40)的相关研究资料和工程应用经验。为推动 HSLWC 在桥梁工程的推广应用,交通部西部科研项目《轻质混凝土用于大跨径桥梁的研究》专门对 HSLWC 在桥梁中的应用进行了研究。本文以云南安宁至楚雄高速公路 14 号达连坝段公路桥为原型,按照 1/4 的缩尺比例设计了一个 3 跨预应力高强轻骨料混凝土连续刚构桥的模型试验,模拟车队荷载对各种工况进行加载试验,考察其受力性能和使用性能,为高强轻骨料混凝土桥梁的工程应用提供依据。

## 1 试验概况

云南安宁至楚雄高速公路 14 号达连坝段公路桥见图 1,设计荷载为汽-20<sup>[9]</sup>,桥上部结构采用预应力高强轻骨料混凝土的箱形截面,按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 JTJ 023-85》<sup>[10]</sup>设计。

根据试验场地条件,模型桥按 1/4 缩尺比例制作,同时为便于制作,将截面简化为工字形,布置有一根屈服强度  $f_y$  为 1820MPa 的预应力钢绞线,为与实际结构吻合预应力筋采用曲线布筋(见图 2(d))。轻骨料混凝土的应力应变关系采用王振宇用

同样骨料的轻骨料混凝土试验后得到的修正曲线<sup>[11]</sup>如图 3(a)所示,峰值应变建议取为  $2500\mu\epsilon$ ;预应力钢筋及普通钢筋的实测应力应变曲线见图 3(b)~图 3(d),相关材料实测强度值参见表 1。

根据相似比例,模拟桥制作完成后,进行预应力张拉,经过一段时间的预应力损失后最终获得的有效预应力为 170kN。同时为保证模型桥与原桥处于相同的受力状态,设置 3kN/m 配重以模拟桥梁在自重下的实际应力状态,然后再施加荷载进行试验。

表 1 模型桥试验材料参数

Table 1 Material parameters of the model bridge

轻骨料混凝土		钢筋屈服强度 $f_y$ / MPa		
抗压强度 $f$ / MPa	弹性模量 / MPa	Φ10	Φ12	钢绞线 7Φ15.2
52.55	$2.27 \times 10^4$	342	400	1820

本试验共有 5 个加载点,其中中间跨 3 个加载点,两边边跨各 1 个。将汽-20 级车队按照相似比等效为 3 点集中荷载,等效后的单点荷载为 25kN(本文以下均以单点荷载值表示)。加载时,为了模拟桥梁在实际使用中的车队移动荷载,将 3 个千斤顶从南到北依次组合模拟车辆荷载进行分级加载,最后 5 个千斤顶同时加载直至破坏。整个加载分为 4 种工况,见图 4。试验加载过程如下:

(1) 模拟桥梁正常使用及轻度超载情况,依次按照工况 a、工况 b、工况 c 加载,最大荷载相当于 1.5 倍标准汽-20 级车队的等效荷载,即最大单点荷载为 37.5kN;

(2) 模拟桥梁严重超载情况,依次按照工况 a、工况 b、工况 c 加载,最大荷载相当于 2 倍标准汽-20 级车队的等效荷载,即最大单点荷载为 50kN;

(3) 按工况 d 加载直至破坏,该加载过程分为 4 个荷载步:正常使用(单顶最大荷载 37.5kN)、严重超载(中跨跨中挠度  $28.3\text{mm} = 1/300L$ )、严重损坏(中跨跨中挠度  $60\text{mm} = 1/135L$  和  $108\text{mm} = 1/75L$ )、最终无法继续加载。

整个加载过程如表 2 所示,每个荷载步单顶荷载加至预定最大荷载值或位移值后卸载,再进行下一个荷载步。实际加载过程中,考虑结构的对称性以及方便加载操作,将荷载步 4 与荷载步 6 对调。

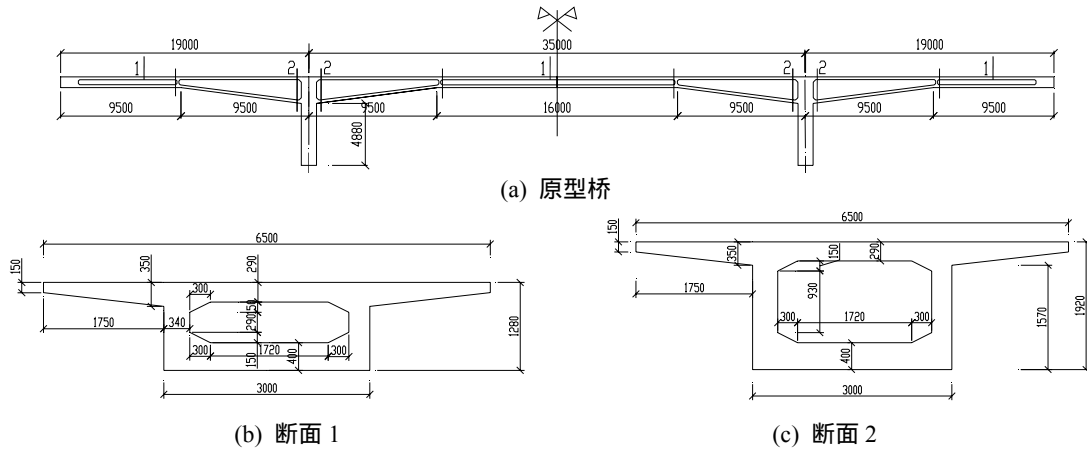
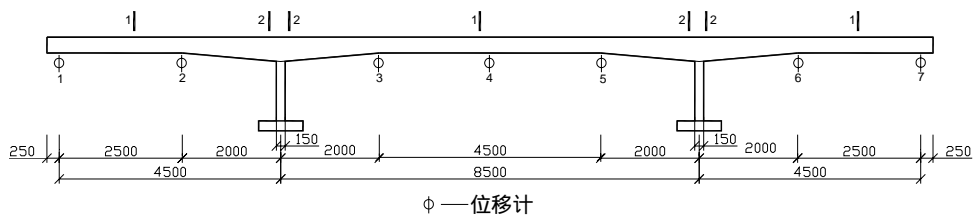
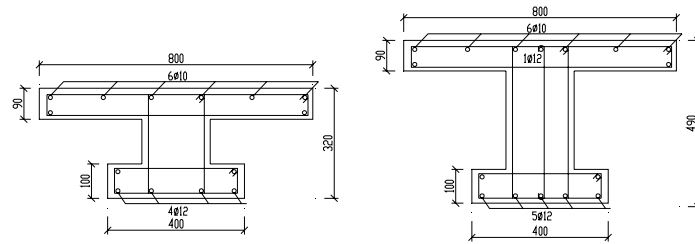


图1 原型桥梁及其截面

Fig.1 Original bridge and sections

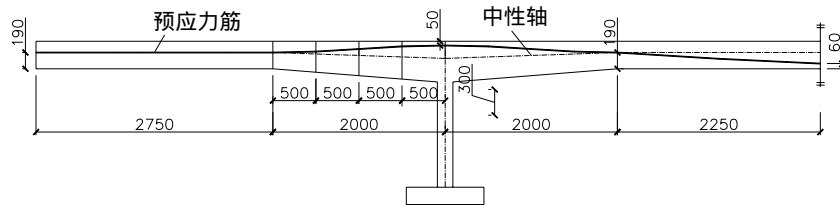


(a) 模型桥梁轮廓及位移计布置位置示意图



(b) 断面1

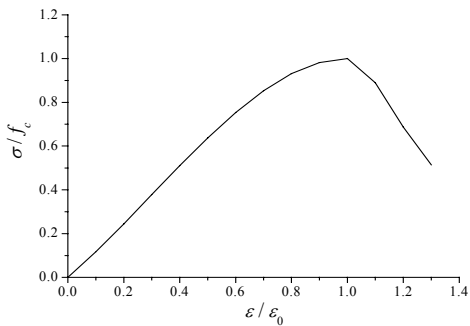
(c) 断面2



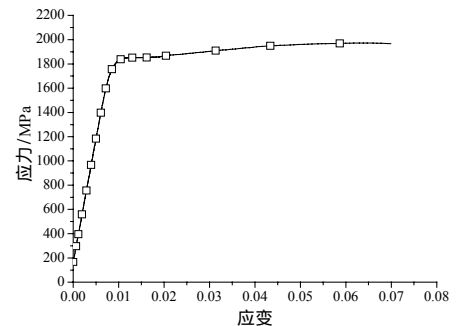
(d) 预应力筋布置

图2 模型桥

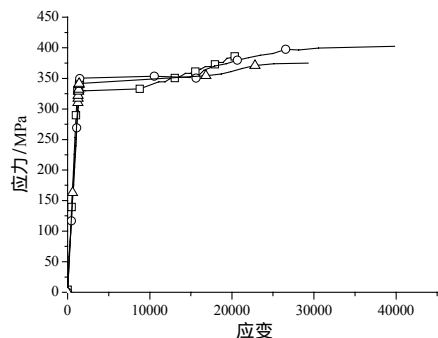
Fig.2 Model bridge



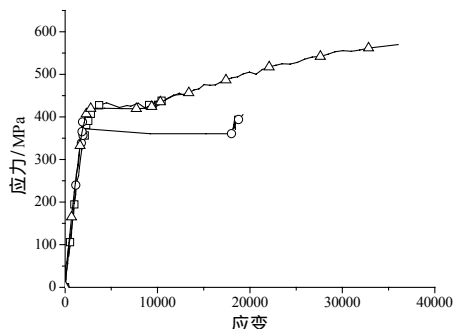
(a) 轻骨料混凝土应力应变关系



(b) 预应力钢筋应力应变关系



(c) 直径 10mm 钢筋应力应变关系



(d) 直径 12mm 钢筋应力应变关系

图 3 材料材性试验结果

Fig.3 Material testing results

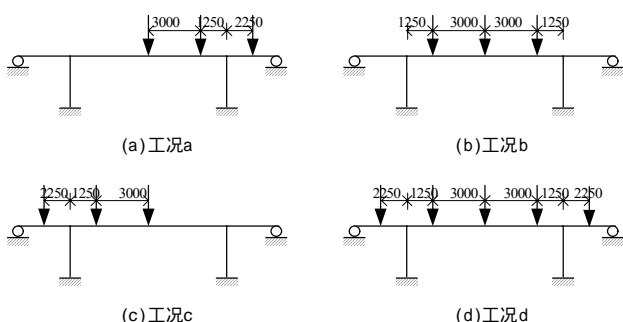


图 4 加载工况图

Fig.4 Load cases

表 2 试验加载方案

Table 2 Load schemes

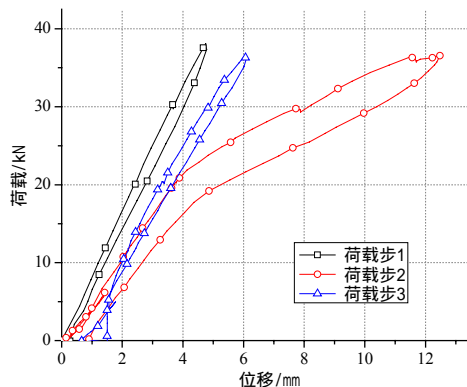
荷载步	加载工况	加载控制 (荷载控制或位移控制)	桥梁的工作状态
1	A	单顶荷载加到 37.5kN, 相当于 1.5 倍车辆荷载	正常使用
2	B		
3	C		
4	A	荷载步 5 单顶荷载加到 50kN, 相当于 2 倍车辆荷载, 荷载步 4 和 6 单顶荷载加到 55kN	超载
5	B		
6	C		
7		单顶荷载加到 37.5kN	正常使用
8		跨中位移为 28.3mm(跨度的 1/300)	超载
9	D	跨中位移为 60mm(跨度的 1/135)	严重破坏
10		跨中位移为 108mm(跨度的 1/75)	严重破坏
11		加载到破坏	最终破坏

## 2 试验结果

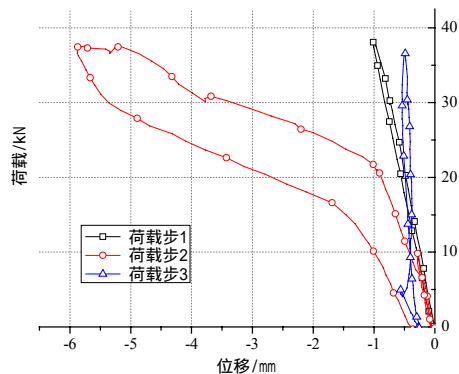
### 2.1 正常使用和 1.5 倍超载试验

加载步 1: 按工况 a 加载。在正常使用荷载作用下(25kN), 桥梁没有出现裂缝, 中跨跨中挠度 3.66mm; 在轻度超载下(37.5kN), 中跨跨中梁底出现 0.05mm 的微小裂缝, 但荷载-位移曲线仍基本为一直线, 中跨跨中挠度 4.75mm, 卸载后残余变形很小, 中跨跨中仅为 0.15mm(见图 5(a)), 且由于预应力筋的作用, 裂缝闭合; 在该荷载工况下, 左边跨跨中产生向上的位移(见图 5(b))(注: 位移计以向下为正)。

加载步 2: 按工况 b 加载。在正常使用荷载作用下(25kN), 没有裂缝重新出现, 中跨跨中挠度 5.30mm; 轻度超载时(37.5kN), 中跨跨中梁底最大裂缝宽度为 0.1mm, 中跨跨中挠度 12.48mm; 在 22kN 时, 两侧梁端翘起, 脱离支座, 使结构受力模式发生改变, 从而使整体刚度降低, 荷载位移曲线出现拐点。卸载后在预应力筋的作用下, 裂缝部分闭合, 残余变形为 0.65mm(见图 5(a)); 在该荷载工况下, 边跨跨中向上的位移更加明显(见图 5(b))。



(a) 中跨跨中挠度(位移计 4)



(b) 左边跨跨中挠度(位移计 2)

图 5 荷载步 1~荷载步 3 荷载-挠度曲线

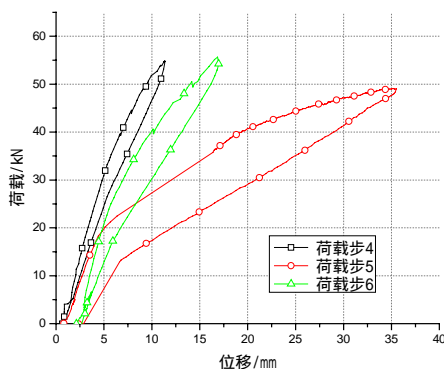
Fig.5 Load-deflection curves from load step 1 to load step 3

加载步 3:按工况 c 加载。由于在上一荷载步中裂缝的开展,使桥梁的刚度有所降低,在正常使用荷载下(25kN),中跨跨中挠度 3.98mm,在轻度超载下(37.5kN),中跨跨中挠度 6.10mm,但卸载后裂缝部分闭合,中跨跨中残余变形几乎没有增加(见图 5(a));在该荷载工况下,虽然左边跨有加载点,但左边跨跨中仍是向上的位移,其最大位移值比荷载步 1 小(见图 5(b))。

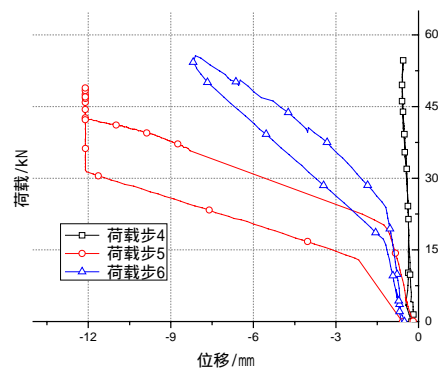
以上试验结果表明,在正常使用荷载下,模型桥在不同荷载工况作用时的裂缝和挠度均满足规范要求;在 1.5 倍设计荷载的轻微超载下,模型桥梁在不同荷载工况下已出现微小裂缝,仍满足规范要求的正常使用范围,但在荷载多次作用后,桥梁刚度有所降低,产生累积损伤,残余变形也有所增加。

## 2.2 严重超载试验

加载步 4:按工况 c 加载。加载至 25kN 时,最大裂缝宽度 0.1mm,中跨跨中挠度 4.13mm;加载至 50kN 时,最大裂缝宽度 0.15mm,中跨跨中挠度 9.50mm(图 6(a)),卸载后残余变形增大至 0.82mm,左边跨跨中产生向上位移(图 6(b))。



(a) 中跨跨中挠度(位移计 4)



(b) 左边跨跨中挠度(位移计 2)

图 6 荷载步 4~荷载步 6 荷载-跨中挠度曲线

Fig.6 Load-deflection curves from load step 4 to load step 6

加载步 5:按工况 b 加载。加载至 20kN 时,两端梁端翘起,荷载-位移曲线出现拐点。随着荷载的增加,达到 40kN 时,右侧柱顶外侧钢筋屈服,荷载-位移曲线再次出现拐点。本荷载步最大裂缝宽度 0.25mm,卸载后残余变形增大至 2.13mm,已出现明显损伤。

加载步 6:按工况 a 加载。加载到 25kN 时,最大裂缝宽度 0.1mm,中跨跨中挠度 5.74mm;加载至 50kN 时,最大裂缝宽度 0.2mm,中跨跨中挠度 14.1mm(约为跨度的 1/601),卸载后残余变形为 2.38mm。本荷载步的挠度和裂缝宽度都大于荷载步 4,且卸载后残余变形大于最不利工况的加载步 5,说明结构损伤进一步加大。

以上试验结果表明,在 2 倍设计荷载的严重超载情况下,模型桥的裂缝宽度和挠度都超过了规范的正常使用限值,且存在严重的损伤。但在严重超载后,如桥梁继续正常使用(不发生超载),裂缝宽度和挠度仍能满足要求。

## 2.3 破坏加载试验

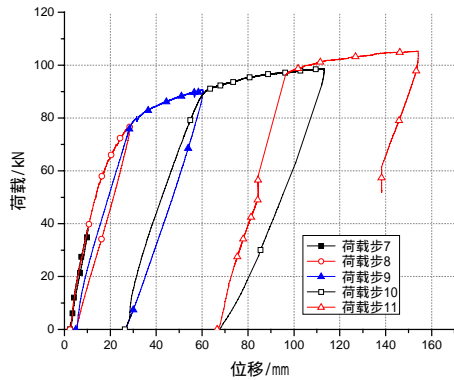
加载步 7~加载步 11:按工况 d 加载。加载步 7,最大荷载时中跨跨中挠度 10mm,中跨跨中梁底裂缝宽度 0.3mm;在此后的加载步中,裂缝不断开展,钢筋陆续屈服,结构刚度不断降低,裂缝不断开展,在 80kN 时,中跨跨中梁底钢筋出现屈服,桥梁刚度显著降低,荷载-位移曲线出现水平段,中跨梁根部混凝土破坏严重,出现贯通的裂缝,但由于预应力筋的存在,把各部分混凝土连接在一起,因此并未出现整体垮塌,仍能保持继续承载的能力,荷载位移曲线仍显示出上升的趋势,卸载后存在较大的残余变形(见图 7(a))。继续加载后,在 100kN 时,两个柱的柱顶右侧钢筋屈服,在 104kN 时,左侧柱底内侧钢筋屈服。随着荷载的增加,左边跨跨中的位移由向上变成向下,最终产生向下的残余变形(见图 7(b))。

为了进一步说明桥梁的受力性能,图 8 和图 9 分别给出了相同加载工况的不同荷载步的中跨跨中挠度曲线对比。

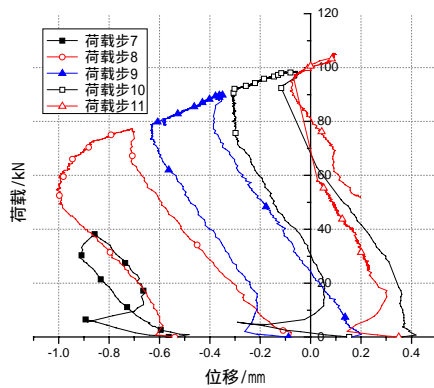
如图 8 所示,荷载步 1 和荷载步 6 的加载工况相同,但因中间经过多次加卸载,桥梁存在较大的残余变形和损伤,两个荷载步的加载曲线已不重合,但在荷载不超过 37.5kN 的范围,桥梁刚度降低并不显著,荷载步 4 与荷载步 3 的加载工况相同,荷载步 4 在荷载步 3 后马上进行,因此两者的加载

曲线在初期完全重合。

荷载步 5 与荷载步 2 的加载工况相同, 尽管经过中间的加载工况使桥梁产生一定残余变形, 但初期刚度仍基本一致(见图 9)。



(a) 中跨跨中挠度(位移计 4)



(b) 左边跨跨中挠度(位移计 2)

图 7 荷载步 7~荷载步 11 荷载-跨中挠度曲线

Fig.7 Load-deflection curves from load step 7 to load step 11

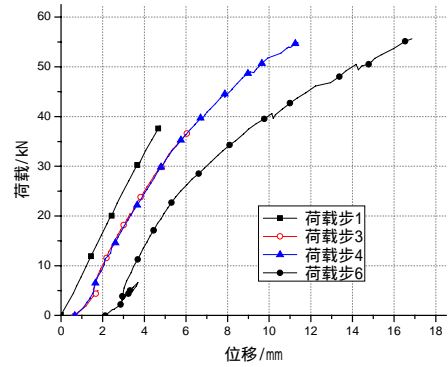


图 8 荷载步 1、荷载步 3、荷载步 4、荷载步 6 荷载-跨中挠度曲线

Fig.8 Load-deflection curves at the middle span in load step 1, load step 3, load step 4 and load step 6

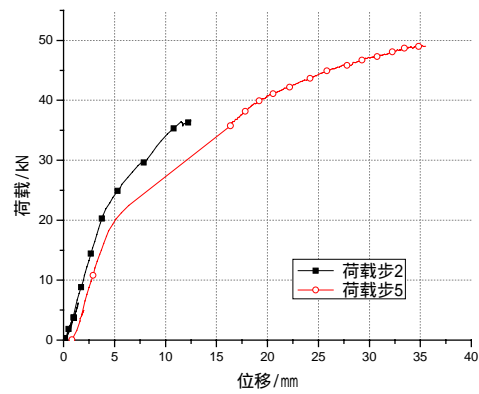


图 9 荷载步 2 和 5 荷载-跨中挠度曲线

Fig.9 Load-deflection curves at the middle span in load step 2 and load step 5

各荷载步桥梁的中跨跨中挠度和残余变形, 以及最大裂缝宽度汇总于表 3。

表 3 中跨跨中挠度、残余变形及裂缝宽度

Table 3 Deflection, residual deformation and crack width

荷载步	$1P_k / 25\text{kN}$		$1.5P_k / 37.5\text{kN}$		$2P_k / 50\text{kN}$		$3P_k / 75\text{kN}$		$4P_k / 100\text{kN}$		残余变形/mm
	$L/f$	$w_{\max} / \text{mm}$	$L/f$	$w_{\max} / \text{mm}$	$L/f$	$w_{\max} / \text{mm}$	$L/f$	$L/f$	$L/f$		
1	2322		1789	0.05							0.15
2	1605		681	0.1							0.65
3	2136		1394	0.05							0.66
4	2058	0.1			895	0.15					0.82
5	1051	0.1			239	0.25					2.13
6	1480	0.1			601	0.2					2.38
7	1251	0.2			857	0.3					2.43
8	1213	0.2			625		321				4.89
9	788				438		302				26.35
10	257				200		160		75		66.54
11	114				101				79		

注:  $P_k$  为设计车队荷载,  $P_k = 25\text{kN}$ ;  $L$  为中跨跨度,  $L = 8.5\text{m}$ ;  $f$  为中跨跨中挠度;  $w_{\max}$  为中跨最大裂缝宽度。

### 3 结论

本文通过预应力高强轻骨料混凝土刚构桥模

型的试验研究, 得到以下结论:

(1) 在正常使用荷载下(1 倍和 1.5 倍等效车队荷载), 桥梁的挠度和裂缝宽度都能满足规范正常使

用的要求,且卸载后在预应力的作用下,裂缝能够闭合,残余变形小;

(2) 在严重超载情况下(2倍等效车队荷载),裂缝宽度和最不利荷载工况下的挠度都已超过规范正常使用的要求。但在经历严重超载后,如仍控制荷载在正常使用范围内,桥梁依然能够满足规范规定的要求;

(3) 在严重超载直至破坏的过程中,尽管桥梁局部混凝土已经严重破坏,但由于预应力钢筋的整体拉结作用,桥梁并未出现整体的垮塌,表明预应力混凝土刚构桥梁具有较好的整体承载能力,可以避免整体垮塌事故的发生;

综上所述,根据现行规范设计的预应力高强轻骨料混凝土刚构桥能够满足预期的使用要求,具有较好的综合经济性能。

#### 参考文献:

- [1] 丁建彤,郭玉顺,木村薰. 结构轻骨料混凝土的现状与发展趋势[J]. 混凝土, 2000, (12): 23~26.  
Ding Jiantong, Guo Yushun, Kimura Kaolu. State-of-the-art of the application of structural lightweight aggregate concrete in foreign countries [J]. Concrete, 2000, (12): 23~26. (in Chinese)
- [2] 雷光宇,刘晓红,王季青. 轻骨料混凝土在大跨梁结构中应用的效益分析[J]. 中外建筑, 2004, (5): 144~145.  
Lei Guangyu, Liu Xiaohong, Wang Jiqing. The Benefit analysis of the light-bone-material-concrete used in big-span-girder-structure [J]. Chinese and Overseas Architecture, 2004, (5): 144~145. (in Chinese)
- [3] 戴竞. 轻骨料混凝土桥的现状与发展[J]. 公路, 2002, (12): 7~11.  
Dai Jing. The status quo and development of light-weight-concrete [J]. Highway, 2002, (12): 7~11. (in Chinese)
- [4] 曹诚 杨玉强. 高强轻集料混凝土在桥梁工程中应用的效益和性能特点分析[J]. 混凝土, 2000, (12): 27~29.  
Cao Cheng, Yang Yuqiang. The properties and benefit analysis about using high-strength light aggregate concrete on bridges [J]. Concrete, 2000, (12): 27~29. (in Chinese)
- [5] 朱聘儒,邓景纹,高永孚. 轻骨料混凝土工程实例简述[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2003, 16(1): 53~57.  
Zhu Pinru, Deng Jingwen, Gao Yongfu. A brief introduction to the use of LWAC in engineering projects [J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2003, 16(1): 53~57. (in Chinese)
- [6] Thomas A Holm, Theodore W Bremner. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments [R]. Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, 2000.
- [7] Melby Karl. Use of high strength LWAC in Norwegian bridges [C]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete. Kristiansand, Norway, 2000. 47~56.
- [8] 龚洛书. 轻骨料混凝土的研究和应用文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.  
Gong Luoshu. The research and application collections of light aggregate concrete [C]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1981. (in Chinese)
- [9] JTJ 021-89, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1989.  
JTJ 021-89, General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 1989. (in Chinese)
- [10] JTJ 023-85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.  
JTJ 023-85, Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridge and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 1985. (in Chinese)
- [11] 王振宇. 高强轻骨料混凝土的长期变形和力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.  
Wang Zhenyu. Long term deformation characteristics and mechanical properties of high strength LWAC [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)