

作者简介:柯敏勇(1970-),男,浙江台州人,高级工程师,博士,主要从事水工、港工结构研究. E-mail: myke@nhri.cn

1-2004)、《混凝土结构施工质量验收规范》(GB50204-2002)、《水闸施工规范》(SL27-91)等规范,采用现场取样法和回弹法进行混凝土结构现场调查和检测;酚酞酒精试剂喷洒方法测定混凝土碳化深度,采用读数显微镜或裂缝对比卡(裂缝宽度)和钢卷尺(裂缝长度)测量裂缝形态;采用钢筋保护层厚度测定仪测定钢筋保护层厚度;钢尺测量桥面宽度,桥面平整度采用高精度水准仪测定。

工程采用的钢筋分别由生产厂家提供钢筋产品合格证书,施工单位和质量检测机构提供抽查检测报告。结果表明,HRB335 钢筋屈服强度为 380~425 MPa,抗拉强度为 560 MPa,延伸率为 22%;经现场取钢筋样品检测表明钢筋屈服强度为 378.0 MPa,抗拉强度为 577.0 MPa,延伸率为 20%,满足《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB1499-1998)要求。工程所用粗砂和碎石均经施工单位自检合格,监理单位抽查检测,检测项符合规范要求;水泥质量检测项为水泥凝结时间、安定性、抗折强度和抗压强度,经第三方检测,水泥质量满足规范要求。

经检测,混凝土平均强度为 35.1 MPa,标准差为 3.45 MPa,离差系数为 9.8%,强度推定值 29.5 MPa,表明混凝土强度满足《水闸施工规范》要求,生产质量管理水平良好;混凝土碳化深度为 2.5~4.0 mm,深度较浅,离钢筋表面距离尚远,不会引起交通桥主筋锈蚀;混凝土保护层厚度和钢筋间距满足设计要求,偏差在允许范围内;桥面水准高程和宽度均满足设计要求,偏差在规范允许范围内。

原材料和钢筋混凝土空心板检测项表明,施工程序和施工质量均满足规范要求,东引桥空心板断裂和主桥开裂可以排除施工质量因素。

2 设计和运行荷载

2.1 设计荷载

根据《交通桥涵设计图》(JT/GQS023-80),采用《公路工程技术标准》(试行,1972 年)的汽-20、挂-100 作为设计标准,结构强度和配筋计算采用《公路桥涵设计规范》(试行,1972 年).8 m 空心板的设计参数和指标见表 1^[1]。

表 1 8 m 空心板的设计参数和指标

Tab. 1 Design parameters and characteristic for cored slab with span of 8 m

跨度 / m	预制板厚度 / mm	钢筋用量	混凝土标号	计算跨度 / m	计算采用值		跨中应力/ MPa		
					跨径中点弯矩/ (kN·m)	支点剪力/ kN	混凝土	钢 筋	支 点
8	40	24 Φ 16	250	7.60	309.5	189.8	11.0 (9.0)	185.0 (183.7)	82.5 (78.8)

注:()外为容许值,()里为实际值。

应当指出的是,《公路工程技术标准》(试行,1972 年)和现行规范的荷载组合、效应计算等方面存在重大差异,《公路工程技术标准》分别出现了 JTJ1-81、JTJ021-85、JTJ021-89 和 JTJ 001-97 四个版本,2003 年交通部颁布的 JTG B01-2003《公路工程技术标准》为最新标准,取消了原来汽-20、挂-100 的设计标准,将汽车荷载分为公路-I 级和公路-II 级两个等级。因此,《交通桥涵设计图》(JT/GQS023-80)是采用《公路工程技术标准》(试行,1972 年)的汽-20、挂-100 作为设计标准而形成的,虽然设计图仍然现行有效,但年代久远,标准(通用)图已经不适应交通发展的需要^[2]。

2.2 运行荷载

通过水闸交通桥的车型主要有农用三轮车、拖拉机、农用改装运输车、汽-20、挂-100、客车和各种重车等,装载的货物主要有煤炭、散装水泥和农用物资。分析重点主要针对各种汽-20 以上重载车。根据跨中等等效集中荷载和荷载效应(即弯矩)确定车的类型,分类标准见表 2。

表 2 车型分类标准和数量

Tab.2 Classification standard and amount of vehicles

车 型 类 别	等效跨中集中力/ kN		主梁跨中弯矩/ (kN·m)		车辆数量 * / 辆	参考车型
	整 桥	主 梁	西引桥	主 桥		
一类车	240 ~ 280	84 ~ 98	168 ~ 196	125 ~ 145	10	汽-20
二类车	280 ~ 500	98 ~ 175	196 ~ 350	145 ~ 260	18	汽超-20
三类车	500 ~ 600	175 ~ 210	350 ~ 420	260 ~ 312	2	挂-100
四类车	>600	>210	>420	>312	8	挂-120

注:统计时间为 3.5 h.

2.3 比 较 分 析

参考斯太尔 1291-28S38 车型^[3-6]的轴重分布,该车总重量 325 kN,自重 125 kN,载重量 200 kN;荷载分布为前轴 65 kN、中轴 100 kN,后轴 160 kN. 参考以上比例,超载车辆的总重量分配结果见表 3. 可见,后轴超载最为严重,高达 213.0% ,前轴达 154.3% ,中轴 95.6% .

表 3 超载情况分析

Tab.3 Pressure distribution of wheel for overload analysis

车 型	驱动型式	轴重/ kN			超载比例/ %		
		前轴	中轴	后轴	前轴	中轴	后轴
斯太尔	6×5	71.3	109.7	175.5	18.8	-8.6	46.2
		79.5	122.4	195.8	32.6	2.0	63.2
		83.7	128.7	206.0	39.5	7.3	71.6
		87.8	135.1	216.1	46.3	12.6	80.1
		91.9	141.4	226.3	53.2	17.9	88.6
		75.2	115.6	185.0	25.3	-3.6	54.2
	8×4	110.0	169.2	270.8	83.3	41.0	125.6
		113.9	175.2	280.3	89.8	46.0	133.6
		120.3	185.1	296.2	100.5	54.3	146.8
	10×4	152.6	234.7	375.6	154.3	95.6	213.0
解 放	6×6	67.2	103.3	165.3	11.9	-13.9	37.8
		78.8	121.2	193.9	31.3	1.0	61.6
		78.8	121.2	193.9	31.3	1.0	61.6
		99.7	153.3	245.4	66.1	27.8	104.5
欧 曼	8×4	152.6	234.7	375.6	154.3	95.6	213.0
		144.4	222.2	355.5	140.7	85.1	196.2
		136.2	209.6	335.3	127.1	74.7	179.5
		119.9	184.4	295.1	99.8	53.7	145.9
最大值		152.6	152.6	234.7	375.6	154.3	95.6
最小值		67.2	67.2	103.3	165.3	11.9	-13.9
平均值		103.0	103.5	159.3	254.9	72.6	32.8

3 现场荷载试验

开展交通桥荷载试验的目的是为了测定桥梁结构在试验荷载作用下控制截面的应力和挠度,并与理论计算值相比较,对结构实际使用性能和工作状态作出评价. 因交通桥为交通主干道,无法封闭公路交通开展荷载试验,须不中断交通情况下开展荷载试验. 荷载试验安排在晚上温度相对稳定的时段开展. 采用 BDI 封装传感器^[7]测量混凝土裂缝开展宽度,电测位移计测量挠度,测点布置在梁底面跨中、1/4 跨和 3/4 跨处. 分别开展了西引桥和主桥的不间断交通荷载试验,因限于篇幅,仅列出西引桥的主要试验成果.

3.1 试 验 结 果

二类车、三类车和四类车的挠度变化过程线分别见图 2。

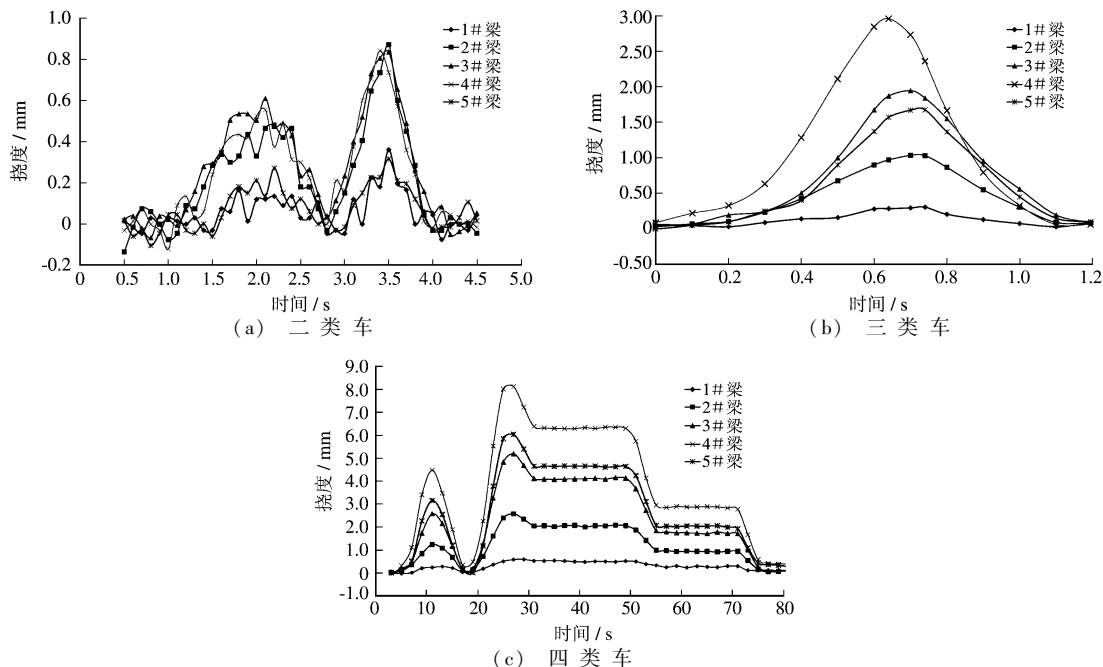


图 2 各类车作用下时间-挠度变化过程

Fig. 2 Relationship between deflection and time

可见,二类车的最大挠度为 0.82 mm,三类车为 2.92 mm,四类车为 8.03 mm. 第二类、第三类和第四类重车作用过程线见图 3。

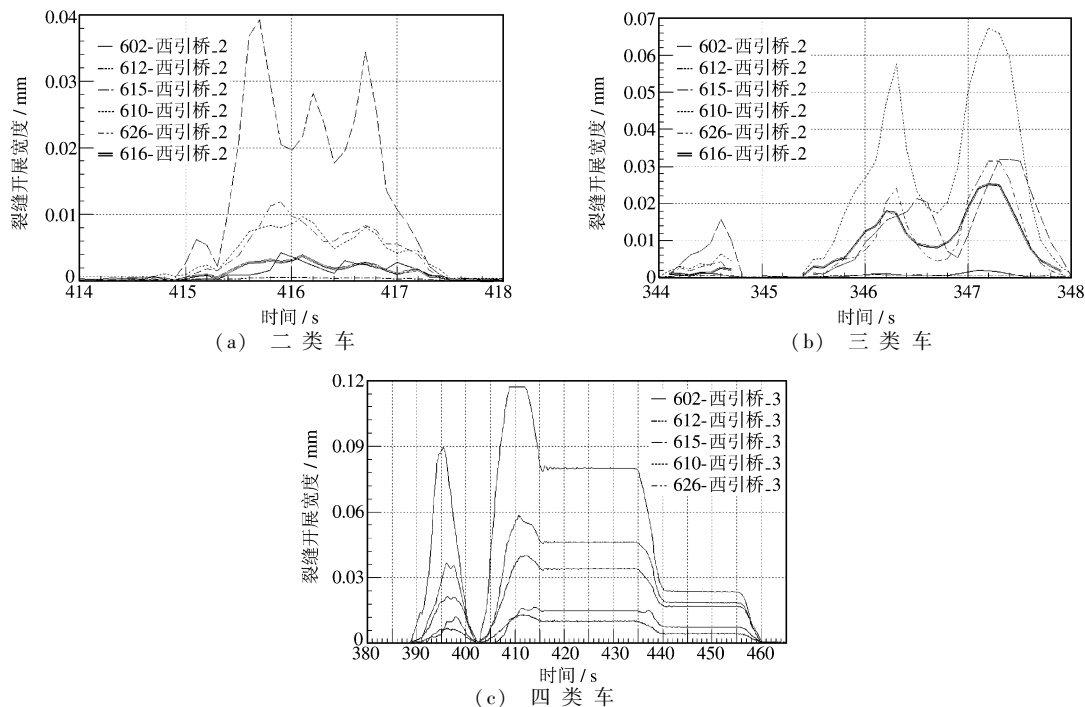


图 3 各类车作用下时间-裂缝宽度过程

Fig. 3 Relationship between crack width and time

3.2 试验结果分析

实际运行荷载作用下的裂缝开展宽度见表 5。结果表明,实际裂缝开展宽度小于计算值,表明交通桥混凝土抗裂性能较好。

表 4 裂缝开展宽度比较

Tab. 4 Crack width analysis (单位:mm)					
跨中弯矩/ (kN·m)	170	200	230	260	290
西引桥	—	—	0.057	0.072	0.077
交通桥主桥	0.029	0.041	0.055	0.062	—
理论计算值	0.098	0.114	0.131	0.148	0.165
Max(实测/理论)	0.300	0.360	0.440	0.490	0.470

表 5 西引桥及交通桥主桥荷载校验系数

Tab. 5 Loading verification coefficients for west approach bridge and main bridge					
车型类别	荷载效率	理论值/ mm	实测值/ mm	校验系数	校验常值
一类车	0.80/0.81	3.2/ 1.3	0.7/0.3	0.22/0.23	0.2~0.5
二类车	1.05/1.46	4.2/ 2.2	2.4/0.5	0.57/0.23	
三类车	1.69/1.84	9.3/2.9	5.5/0.8	0.59/0.27	
四类车	1.97/2.05	13.3/4.0	8.5/1.4	0.64/0.35	

注: /前为西引桥数值, /后为交通桥主桥数值。

采用等效跨中弯矩和设计跨中弯矩的比值作为静载试验荷载效率,则交通桥西引桥和主桥荷载效率和校验系数分别见表 5。西引桥由于跨度较大,在一类车作用下的结构校验系数为 0.22,其他均超过了校验常值 0.2~0.5 范围,说明结构强度储备已严重不足,在超载作用下随时会发生结构性破坏。主桥挠度校验系数分别为 0.23、0.23、0.27、0.35,均在挠度校验常值 0.2~0.5 范围之内,表明结构工作性能较好,抗弯承载力有一定富裕,结构尚存安全储备;但主桥空心板抗剪承载力仅为汽-20、挂-100 等级抗剪控制值的 95%,存在“强弯弱剪”的结构特点,在严重超载车作用下,极易形成没有明显征兆的支座附近剪切破坏,从而造成严重的安全事故。

4 破损成因分析

4.1 梁底开裂分析

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004),选跨中荷载组合最不利截面计算开裂弯矩,兼顾混凝土收缩的不利影响,计算得到的开裂弯矩为 144.97 kN·m,而在设计荷载组合下的 309.5 kN·m,实际运行荷载下的等效后轴弯矩值均大于 144.97 kN·m。因此,作为普通钢筋混凝土结构的空心板板底横向开裂是必然的,且实测混凝土裂缝开展宽度均小于允许开裂宽度 0.2 mm,不影响交通桥结构的正常使用。

4.2 抗弯和抗剪承载能力

钢筋混凝土空心板抗弯承载能力。不考虑铺装共同作用的计算结果见表 6。由表 6 可见,交通桥主桥抗弯承载能力满足 JTG D62-2004 要求;西引桥跨中及 1/4 跨抗弯承载能力则略低于该规范要求。

钢筋混凝土空心板抗剪承载力。不考虑铺装共同作用的计算结果见表 6。交通桥主桥和西引桥的支座截面抗剪均不满足 JTG D62-2004 要求,尤其是西引桥抗剪承载能力低于该规范要求值达 24%。

表 6 抗弯承载能力计算结果和抗剪承载能力计算结果

Tab. 6 Calculation results of bending capability and shearing capability

跨 别	抗弯承载力/ (kN·m)							抗剪承载力/ kN			
	72 规范	设计值		计算值		(3)/(1)	(4)/(2)	设计值		计算承载力	
		跨中	1/4 跨	跨中	1/4 跨			72 规范	JTJ 024-85(1)	JTJ 024-85(2)	(2)/(1)
(1)	(2)	(3)	(4)								
主 桥	/	318.8	255.5			1.39	1.47	/	265.5		0.95
西引桥	309.5	481.0	384.1	443.0	376.0	0.92	0.98	189.8	331.3	271.0	/

4.3 西引桥破坏分析

可根据 JTJ D62-2004 计算出空心板跨中等效集中荷载和等效后轴汽车荷载^[8].

(1)斜截面抗剪破坏的等效荷载和汽车荷载

根据 JTJ D62-2004,距支座中心 $h/2$ 处截面抗剪强度为:

$$V_{CS} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 0.45 \times 10^{-3} b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P) \sqrt{f_{cu,k} \rho_{su} f_{sv}}} = 251.42 \text{ kN}$$

除以试验实测的空心板荷载分配系数,则得等效后轴汽车荷载为 692.2 kN.

(2)正截面抗弯破坏的等效荷载和汽车荷载按照第一类 T 形截面计算跨中截面抗弯承载能力为 443.02 kN·m,若采用跨中等效集中荷载,则有:

$$P = \frac{4M}{L} = \frac{4 \times 443.02}{8.0} = 221.51 \text{ kN}$$

除以试验实测的空心板荷载分配系数,则得等效后轴汽车荷载为 609.9 kN.

根据反演计算得到的等效荷载和等效后轴汽车荷载,结合运行荷载调查与分析可以发现,东引桥结构性破坏是由于后轴等效荷载超过了钢筋混凝土空心板的抗弯和抗剪承载能力造成的,即严重超载引起的结构性破坏.

5 结 语

本次安全检测与评估分析,可得出以下几点结论:

(1)通过广泛调阅工程技术资料,钢筋混凝土空心板结构的现场调查与检测,交通桥工程检测项检测表明,施工质量满足规范要求,偏差均在规范允许范围内.交通桥断裂和破损可以排除施工质量因素;

(2)交通桥是普通钢筋混凝土结构,引桥和主桥设计荷载效应超过了空心板结构初裂弯矩,设计条件下是允许空心板带裂缝工作.因超载原因,实际运行荷载效应远大于设计荷载组合,加剧了空心板板底横向开裂;

(3)严重超载是引桥断裂和主桥开裂的最主要原因,在超高比例超载情况下,西引桥结构强度储备已严重不足,随时可能出现结构性破坏;主桥挠度校验系数虽然在挠度校验常值范围内,但斜截面抗剪强度不足,易产生支座附近脆性剪切破坏,存在严重的安全事故隐患.应在运行过程中严格限制超载车辆,并加强混凝土裂缝观测,以确保桥梁工程安全运行;

(4)采用 BDI 桥梁诊断系统可以在不间断交通情况下开展荷载试验,所得到的结果具有可信性,可以推广应用.

参 考 文 献:

- [1] JT/GQS023-80, 交通桥涵设计图[S]. (JT/GQS023-80, Construction design for transportation bridges[S]. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国交通部. 关于采用交通行业标准《公路桥涵标准图》有关问题的通知[G], 1999. (Ministry of Transport

- of the Peoples Republic of China. Notice on problem of transportation specification “standard design for highway bridges”[G]. (in Chinese))
- [3] 杨文渊,徐 犇. 桥梁工程师手册[M]. 北京:人民交通出版社,1997:391-404. (YANG Wen-yuan, XU Ben. Bridge engineering handbook[M]. Beijing: China Communications Press, 1997: 391-404. (in Chinese))
- [4] 洪晓林,柯敏勇,金初阳. 水闸安全检测与评估分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007. (HONG Xiao-lin, KE Min-yong, JIN Chu-yang. Safety inspection and assessment analysis for sluice[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 交通部公路科学研究所. 公路旧桥承载能力鉴定办法(试行)[M]. 北京:人民交通出版社,1988. (Capacity assessment method for old bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 1988. (in Chinese))
- [6] 金初阳,柯敏勇,洪晓林,等. 水闸病害检验与评估分析[J]. 水利水运科学研究,2000(4):73-76. (JIN Chu-yang, KE Min-yong, HONG Xiao-lin, et al. Inspection and assessment analysis of sluice[J]. Hydro-Science and Engineering, 2000(4): 73-76. (in Chinese))
- [7] 卢青法,柯敏勇,叶小强,等. 某港口钢引桥荷载实验和技术状况评价[J]. 水运工程,2008(8):105-108. (LU Qing-fa, KE Min-yong, YE Xiao-qiang, et al. Load test and technology assessment of steel truss bridge for port engineering[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(8): 105-108. (in Chinese))
- [8] 周盛初,李俊勇,王广生. 桥梁、小型结构物单板受力的破坏原理分析[J]. 华南港工,2005(2):48-49. (ZHOU Sheng-chu, LI Jun-yong, WANG Guang-sheng. An analysis on destructive theory of one-way slab for bridges and small structures[J]. South China Harbour Engineering, 2005(2): 48-49. (in Chinese))

Failure analysis of traffic bridge for a certain sluice

KE Min-yong^{1,2}, TU Qing-kui³, LIU Hai-xiang^{1,2}, YE Xiao-qiang^{1,2}, LONG Zhi-yong^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Key Laboratory of Water Science and Hydraulic Engineering, MWR, Nanjing 210029, China*; 3. *Sinohydro Bureau 13 Co., Ltd., Dezhou 315600, China*)

Abstract: Reinforced concrete cored slabs are adopted for the traffic bridge of a sluice, and the design standard is Qi-20 and Gua-100 according to Chinese bridge design standard. The bridge is composed of the east approach bridge, the main bridge and the west approach bridge. However, the slab of the east approach bridge was broken and the slabs of the main bridge and the west approach bridge cracked across the bottom. To investigate the failure and crack reason of the bridge, comprehensive engineering quantity inspection was carried out, operation loading was investigated and loading test was carried out without traffic held up. According to the loading test, the operation loading is classified into four grades, and safety assessment is brought out. The results show that engineering quantity meets the bridge construction specification demands; and the serious overloading is the main reason for the failure of the approach bridge and crack of the main bridge. It is necessary to restrict overloading vehicles.

Key words: field inspection; load test; safety assessment; traffic bridge