

文章编号: 1002-0268(2002)01-0040-05

悬拼式预应力混凝土 T 型刚构桥病害成因的分析及其试验研究

项贻强, 黄志义, 薛静平

(浙江大学交通工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 结合一座典型的悬拼式预应力混凝土 T 型刚构桥存在的预应力损失过大、桥面开裂和桥梁悬臂端下挠等病害, 给出该桥型产生病害的成因分析和试验研究的主要结果, 提出了加固的方案。

关键词: 预应力混凝土; T 型刚构桥; 试验研究; 分析计算; 加固

中图分类号: U449.7

文献标识码: A

Analysis of Defect Causes of Precast Segmental Prestressed Concrete T-Frame Bridge and its Experimental Study

XIANG Yi-qiang, HUANG Zhi-yi, XUE Jing-ping

(Communication Science & Technology Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper describes the results of experimental study and theory analysis of a precast segmental prestressed concrete T-frame bridge, in which the defects such as prestressing force lossing, pavement cracking and cantilever end deflecting exist. Reinforcement scheme is proposed.

Key words: Prestressed concrete; T-frame bridge; Experimental study; Analysis; Reinforcement

0 概况

预应力混凝土 T 型刚构加挂梁结构是公路桥梁常用的一种桥梁结构型式, 这种桥型根据施工方法的不同可分为悬浇和悬拼。悬浇结构需采用挂篮施工, 优点是结构无干接缝, 整体性好, 刚度大, 施工占用场地少, 缺点是施工期间挂篮将影响桥下的通航通车, 施工周期长; 悬拼结构的优点是无需采用挂篮施工, 施工进度快, 对桥下的通航通车影响较小, 缺点是需占用较大的施工预制场地, 拼装接缝处理难度大, 结构整体性较悬浇差。

浙江嘉兴七星桥位于繁忙的杭申线航道上, 为不影响桥下通航、尽可能地降低桥面标高, 设计单位对该桥上部结构主桥采用 40 + 60 + 40m 悬拼式预应力混

凝土 T 型刚构加 20m 挂梁, T 型刚构截面形式为单箱双室箱梁, 箱顶宽 8.5m, 底宽 6.36m; 两侧引桥均采用 8 × 13m 钢筋混凝土空心板梁桥。预应力箱梁的混凝土设计标号为 C50, 预应力材料采用 $\phi 15.00$ 高强度钢绞线, 标准抗拉强度为 $R_y^b = 1500\text{MPa}$, 桥梁的桥面宽为净-7 + 2 × 1.0m 人行道, 设计荷载为汽-20 级、挂-100, 人群荷载为 3.5kN/m^2 。该桥从 1998 年建成到加固前, 桥面裂缝较为严重, 悬臂端还存在一定的下挠, 车辆通过时有明显的跳突感, 并不时有雨水下渗到箱体内部, 对桥梁的受力和安全构成威胁。

1 桥梁病害的调查与成因分析

1.1 桥梁病害的调查

为全面了解该桥梁的现状, 对该预应力混凝土 T

收稿日期: 2000-12-24

作者简介: 项贻强 (1959 -) 男, 浙江杭州人, 博士, 浙江大学教授, 主要从事大跨度桥梁、斜弯桥梁的空间分析理论、施工控制及桥梁的检测加固研究。

型刚构桥跨进行了相应的现况调查,发现 T 型刚构箱梁的外观及内模有相当部分的混凝土表面凹凸不平整,拼装接缝不密合,有些存在有较大的空隙,预应力混凝土 T 型刚构两悬臂端均有不同程度的下挠,其中以西侧第 11 # 墩的预应力混凝土 T 型刚构较为严重,此外该跨还存在有如下类型的裂缝: 2 # 箱块内外侧腹板接近上翼板底缘的斜裂缝,斜裂缝最大缝宽在没有荷载作用时为 0.16mm; 部分悬臂箱块的顶板沿横截面的裂缝,裂缝宽度较小; 箱块间沿箱拼接缝呈上宽下窄的竖向裂缝。

整个桥梁靠西侧试验跨的裂缝较东侧非试验跨的裂缝多,桥面铺装还可见用环氧树脂封闭的拼装接缝反射的横向通缝,经凿开两处典型的桥面横缝混凝土,未发现有预应力束锈蚀的情况。

1.2 成因初步分析

产生上述裂缝和病害的原因初步分析如下:

(1) 在建造施工预制块拼装过程中,施工单位对悬拼式预应力混凝土 T 型刚构的工艺缺乏足够的认识,预制的箱块体之间本身不够密合,当箱体悬拼时,为调整桥轴线和标高,人为在拼装缝隙间增垫了一些薄钢板,致使拼装缝隙更难以闭合,箱体受力不均匀,加之近 2 年的收缩和徐变等变形的作用,局部的预应力损失过大,不可避免使预应力混凝土 T 型刚构的两悬臂端有不同程度的下挠。

(2) 箱块间沿箱拼接缝呈上宽下窄的竖向裂缝主要是由于箱块间拼装缝粘接不牢、拼装缝隙较大,致使其在恒载和外荷载的负弯矩作用下产生上宽下窄的裂缝。

(3) 由于箱上缘预应力的损失,使箱梁的有效预压应力不足,致使其在弯拉应力的作用下,部分箱顶板的弯拉应力过大而产生沿横截面的裂缝,同时在弯拉应力和剪应力的共同作用下,斜截面的主拉应力过大也将产生斜裂缝。

(4) 进一步的理论分析和验算表明:该桥在汽-20 级、挂-100 的作用下,若在理想的施工工艺下,其正常使用极限状态下的混凝土应力均为压应力,且不超过规范的限值,极限强度也能满足设计规范的要求。但当其预应力损失在 20% 以上时,在 2 #、3 # 箱块体的腹板及顶板将产生大于混凝土抗拉强度极限的拉应力,实际存在的裂缝也说明了这一点。

2 试验研究

为进一步查明和确定裂缝等病害的成因及对现有桥梁工作性能的影响和严重程度,为加固桥梁提供试

验依据,对该桥进行了试验研究。

2.1 测点布置及测试内容

根据上述施工及存在的问题,考虑到第 11 # 墩的一侧预应力混凝土 T 型刚构在岸边,一方面箱体的裂缝展开及受力较为典型,另一方面又便于试验测试,故选取第 11 # 墩西侧的预应力混凝土 T 型刚构桥跨作为试验研究的重点观测对象。

在设计荷载作用下,预应力混凝土 T 型刚构悬臂端截面及悬臂端中部截面的挠度和 11 # 墩预应力混凝土 T 型刚构墩柱身的上下水平位移,即图 1 的 I~I、~、~、V~V 截面的位移。

预应力混凝土 T 型刚构箱梁控制截面的主要部位的应变或应力,即:~、~、V~V、~、~ 截面为应力观测截面,其余在预应力混凝土 T 型刚构的一侧端部距柱身 $h/2$ (h 为悬臂端根部截面梁高)的截面梁两侧腹板处布置应变花,以测定其在外荷载下截面的主拉应力的大小。

预应力混凝土 T 型刚构箱梁在试验荷载下,裂缝展开的宽度及拼装块的竖向相对变形。

测试时应随时注意观测各截面可能出现的裂缝及其展开值。各测试截面及测点布置见图 1。

2.2 试验研究测试方法

本试验研究采用 Y-22 静态电阻应变仪配接计算机联动测量混凝土的应变。应变测试中,通过在布片截面的梁底或箱内搁置贴有温度补偿的试块进行温度的补偿。

通过装置在刚性比较大的支撑上的数显式电子位移计或百分表直接测读挠度和位移;在观测梁的挠度时,同时观测柱身的水平位移和转动。

裂缝宽度用裂缝观测仪测读。

由于本预应力混凝土 T 型刚构以二列车队和挂-100 布载控制设计。因此,对预应力混凝土 T 型刚构模拟二列汽-20 级和挂-100 的内力效应较大的值布置加载。加载试验效率规范要求控制在 0.85~1.05,本试验研究,桥跨各截面的加载试验效率控制在 0.90~1.07。加载选用 2 辆日野和 2 辆太脱拉载重汽车,前轴重 60kN,后轴(中后轴)重 240kN,每辆车总重 300kN。太脱拉载重汽车一般前中轴距为 310cm,中后轴距为 140cm,日野载重汽车一般前中轴距为 295cm,中后轴距为 135cm,具体的加载载位布置已按静力等效原理等效为达到设计荷载所需的车辆间距。

2.3 试验研究结果

(1) 挠度 预应力混凝土 T 型刚构桥的理论分析

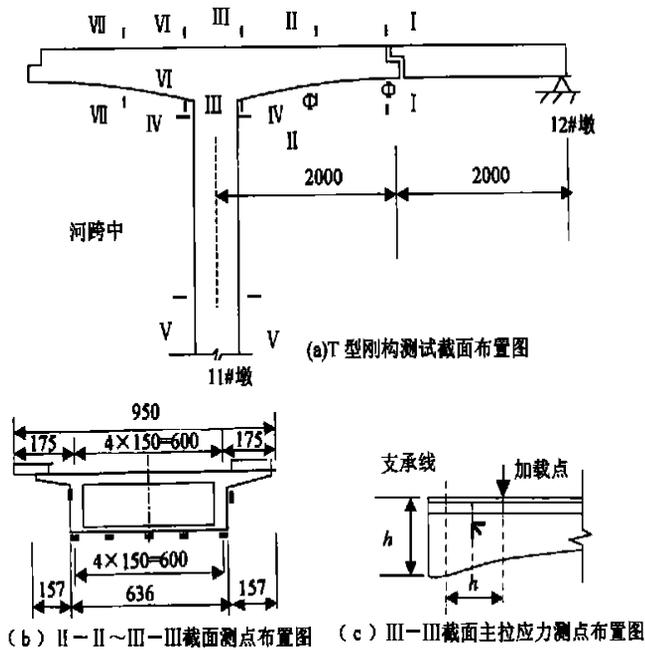


图 1 测试截面及测点布置图

采用杆系理论分析程序及其它设计分析程序，各个工况下各测试截面测点的实测变形及与理论计算变形的比较见表 1。

预应力混凝土 T 型刚构桥跨挠度测点实测挠度

与理论计算挠度的比较 表 1

加载截面	荷载等级	测点	弹性挠度		理论计算		校验系数 S_e/S_s	
			S_e (mm)	EI	$0.85 EI$	EI	$0.85 EI$	
~ 弯矩	—	1#	12.00	6.59	7.75	1.82	1.55	
		2#	12.54	6.59	7.75	1.90	1.62	
		3#	3.51	1.43	1.68	2.45	2.08	
		4#	3.53	1.43	1.68	2.46	2.08	
~ 弯矩	二正	1#	17.38	9.13	10.74	1.90	1.62	
		2#	18.15	9.13	10.74	1.99	1.69	
		3#	5.01	1.95	2.29	2.57	2.18	
		4#	5.02	1.95	2.29	2.57	2.18	
~ 弯矩	二偏	1#	17.97	9.13	10.74	1.97	1.67	
		2#	19.29	9.13	10.74	2.11	1.79	
		3#	5.31	1.95	2.29	2.72	2.31	
		4#	5.49	1.95	2.29	2.82	2.40	
~ 弯矩	三	1#	20.54	10.15	11.94	2.02	1.72	
		2#	20.82	10.15	11.94	2.05	1.74	
		3#	6.07	2.18	2.56	2.78	2.36	
		4#	6.03	2.18	2.56	2.77	2.35	
~ 剪力	三	1#	12.67	5.52	6.49	2.30	1.96	
		2#	13.25	5.52	6.49	2.40	2.04	
		3#	4.41	1.34	1.58	3.29	2.80	
		4#	4.35	1.34	1.58	3.25	2.76	

注:1#、2# 挠度测点为 I-I 截面的箱两侧腹板下缘的点,3#、4# 挠度测点为 - 截面的箱两侧腹板下缘的点。

(2) 应力 最大弯矩和最大剪力荷载下预应力混凝土 T 型刚构桥跨各测试截面测点的实测应力与理论

值的比较见表 2。

(3) 裂缝 试验时，由受力产生的斜裂缝最大缝宽在加载前为 0.16mm，在加载时展开的最大缝宽为 0.19mm，悬臂箱顶板由弯拉应力引起的裂缝和斜裂缝的长度在加载后无明显发展。

2.4 分析评价

(1) 变形挠度分析

从表 1 可以看出：在相当于汽-20 级、挂-100 荷载作用于预应力混凝土 T 型刚构桥跨柱身支点截面最不利载位时，悬臂端的实测挠度均大于刚度分别按其实际刚度和按桥规折减刚度计的理论计算挠度，校验系数均大于 1，且多数在 2 左右，说明上述跨径桥梁的实际刚度由于预应力的损失及桥面裂缝的存在，使原设计刚度大大降低。但由于悬臂端的最大实测挠度为 20.82mm，其相对挠度为 1/960，仍小于《桥规》规定的 $L/300$ 限值，说明裂缝等病害的存在并不影响该桥的极限承载刚度。

由原试验结果各加载工况下各测点的相对残余挠度在 20% 以内，且大部分测点的挠度在卸载后均能较好地回弹，说明上述桥跨的钢绞线弹性工作还是基本正常的。

(2) 应力应变分析

从表 2 可以看出：当最后一级荷载分别作用于预应力混凝土 T 型刚构桥跨柱身支点截面最不利载位时，预应力混凝土 T 型刚构桥跨各测试截面的实测应力除主拉应力外均小于理论计算应力，主要是在这些点附近竖向裂缝的存在使得截面的正应力部分已经释

放，故实测应力较小。

2# 箱块内外侧腹板的实测主拉应力大于理论计算的主拉应力，校验系数大于 1。已展开的斜裂缝和竖向裂缝除缝宽稍有增加外，其长度无明显发展，说明该预应力混凝土 T 型钢构桥跨在设计荷载作用下，通过原有裂缝的展开，已达到一种新的平衡。

从表 2 还可以看出：同一 T 构的非荷载直接作用

的悬臂部分，其测试截面的应力几乎为零，初步可以判断该桥梁原箱体内的预应力束孔道灌浆比较密实。

(3) 偏载效应分析

从表 1 可以看出，预应力混凝土 T 型钢构桥跨在偏载作用下的最大挠度约为相应正载下平均挠度值的 1.09 倍，说明剪力滞、扭转等产生的受力分布不均匀现象并不明显。

最后一级荷载下预应力混凝土 T 型钢构桥跨各测试截面实测应力与理论值的比较

表 2

测试截面	测点号	- 弯矩加载截面			- 剪力加载截面			备注
		实测应力 σ_e (MPa)	理论应力 σ_s (MPa)	检验系数 λ_s	实测应力 σ_e (MPa)	理论应力 σ_s (MPa)	检验系数 λ_s	
~	- 1	0.74	1.17	0.63	0.32	0.58	0.55	箱外腹板上缘
	- 2	- 2.87	- 3.44	0.83	- 1.61	- 1.72	0.94	
	- 3	- 2.98	- 3.44	0.87	- 1.75	- 1.72	1.01	
	- 4	- 2.94	- 3.44	0.85	- 1.51	- 1.72	0.88	
	- 5	- 2.77	- 3.44	0.81	- 1.54	- 1.72	0.90	
	- 6	- 2.84	- 3.44	0.83	- 1.61	- 1.72	0.94	
	- 7	0.77	1.17	0.66	0.39	0.58	0.67	箱内腹板上缘
	- 8	0.91	1.17	0.78	0.55	0.58	0.95	箱外腹板上缘
	- 1	0.11	1.64	0.07	0.07	1.15	0.06	箱外腹板
	- 2	0.28	0.0	-	0.07	0.0	-	
	- 3	0.98	0.65	1.51	0.95	0.78	1.22	主拉应力
	- 4	- 2.21	- 2.87	0.77	- 1.54	- 2.09	0.74	
	- 5	- 2.35	- 2.87	0.82	- 1.58	- 2.09	0.76	
	- 6	- 2.45	- 2.87	0.86	- 1.75	- 2.09	0.84	
- 7	- 2.49	- 2.87	0.87	- 1.65	- 2.09	0.79		
- 8	- 2.70	- 2.87	0.95	- 2.00	- 2.09	0.96		
- 9	0.18	1.64	0.11	0.35	1.15	0.30		
- 10	0.0	0	-	0.11	0.0	-		
- 11	0.67	0.65	1.03	0.91	0.78	1.17	主拉应力	
- 12	0.0	1.38	-	0.04	0.96	0.04		
- 13	0.60	0.0	-	0.49	-	-		
- 14	1.16	0.65	1.78	1.44	0.78	1.85	主拉应力	
-	- 1	- 0.04	0.0	-	0.0	0.0	-	箱内外腹板上
	- 2	0.0	0.0	-	0.0	0.0	-	下缘
	- 3	- 0.04	0.0	-	0.0	0.0	-	箱内内腹板上
	- 4	- 0.04	0.0	-	0.04	0.0	-	下缘
	- 5	- 0.07	0.0	-	0.0	0.0	-	箱内外腹板上
	- 6	0.0	0.0	-	0.07	0.0	-	下缘
	- 1	- 0.11	0.0	-	0.0	0.0	-	箱内外腹板上
	- 2	- 0.14	0.0	-	0.11	0.0	-	下缘
	- 3	- 0.04	0.0	-	- 0.04	0.0	-	箱内内腹板上
	- 4	- 0.04	0.0	-	0.0	0.0	-	下缘
	- 5	- 0.11	0.0	-	- 0.07	0.0	-	箱内外腹板上
	- 6	- 0.04	0.0	-	0.07	0.0	-	下缘
	V - 1	1.40	1.96	0.71	1.12	1.37	0.82	靠河中心侧
	- 2	- 0.14	-	-	- 0.14	-	-	截面中性轴
- 3	- 1.16	- 2.10	0.55	- 1.02	- 1.47	0.69	靠河岸侧	
V - 4	-	-	-	- 1.12	- 1.47	0.70		
V - 5	- 1.16	- 2.10	0.55	- 0.98	- 1.47	0.67	靠河岸侧	
V - 6	- 0.14	-	-	- 0.25	-	-	截面中性轴	
V - 7	1.16	1.96	0.59	0.81	1.37	0.59	靠河中心侧	

3 结论与加固建议

(1) 通过对一孔预应力混凝土 T 型刚构桥跨的病害调查、分析和实桥试验研究,发现该预应力混凝土 T 型刚构桥虽然抗弯、抗剪极限承载能力和极限承载刚度基本能满足汽-20、挂-100 的承载要求,但由于悬拼箱梁块施工不当,混凝土间存在有较多的拼装缝隙、箱体内预应力损失过大,造成预压应力不足、斜截面抗主拉应力不够,刚度下降,实测的挠度明显大于理论计算挠度。因而,该桥已不能满足桥梁正常使用极限状态的使用要求,应予加固处理。

(2) 预应力混凝土 T 型刚构箱梁桥跨的偏载系数约为 1.1,剪力滞、扭转等产生的受力分布不均匀现象并不明显。

(3) 为确保该桥的耐久性和桥梁的正常使用,建议有关部门针对该桥存在的问题及 T 构的特点进行必要的加固处理。包括对腹板斜裂缝用粘贴钢板补强。对拼装接缝用环氧砂浆灌浆、填实后,在贴近 T 型刚构的箱内上缘板适当补配一些体外预应力束,以部分弥补先期接缝引起的预应力损失,提高箱梁抵抗外荷

载引起的弯拉正应力和主拉应力的能力和整体刚度。在补配体外预应力束时,可对下述 2 种方案比较后选用:(a) 增设贯通整个箱梁的预应力束,锚固点可设在两个悬臂端的端部,为便于今后调束,应在一头设置可调锚具。(b) 在箱室顶板的附近,按需要分段在箱的体内布置预应力束,并在适当的位置向上弯起,穿过箱梁顶板,用扁锚锚具锚固在桥面铺装层内。在全桥预应力混凝土 T 型刚构桥跨部分,凿去原铺的桥面铺装混凝土,加设纵向直径较大的连续钢筋及铺装钢筋网,重新浇筑 C40 的桥面混凝土,以加强桥梁的整体性。加固改造好的桥梁还应注意定期观测检查桥梁的工作状况。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部.公路旧桥承载能力鉴定方法(试行).人民交通出版社,1988.
- [2] 中华人民共和国交通部.公路桥涵设计规范.人民交通出版社,1989.
- [3] 项贻强.桥梁结构分析的数值方法及程序.人民交通出版社,1993.
- [4] 项贻强等.斜交变截面预应力混凝土单悬臂 T 梁桥设计荷载下的试验研究.中国公路学报,1999(2).

(上接 39 页) 如果知道了 O_1 或 O_2 或交点 JD 在路线测量坐标系中的坐标和切线方位角,就能通过坐标旋转公式求出任意点 P 在路线测量坐标系中的坐标,采用极坐标法在测量控制点上放样出 P 点。

4 算例

图 5 为某互通立交中一匝道内的一段不完全缓和曲线,已知:

$JD(9\ 438.701, 4\ 722.546)$, $O_1-JD = 242\ 01\ 00\ 6$,
 $JD-O_2 = 305\ 29\ 48\ 0$, $A = 60$, $R_1 = 400$ 。

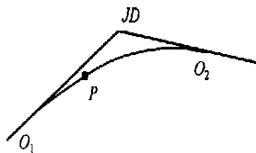


图 5

通过计算得

$$= 63\ 28\ 47\ 4$$

$$R_2 = 40, l_s = 81$$

$$l_{s1} = 9, l_{s2} = 90$$

切线长为 $T_{JD-O_1} = 55.868$, $T_{JD-O_2} = 33.426$
 外矢距为 $E = 11.091$, 曲线 $O_1Q = 51.994$
 则主点坐标 $O_1(9\ 464.915, 4\ 771.882)$,
 $O_2(9\ 458.268, 4\ 695.445)$

设 P 点到 O_1 的曲线长 $l = 23.19$, 则 $p = 7\ 36\ 04\ 4$

P 在 O_1 切线坐标中坐标为 $x_{1P} = 23.139$
 $y_{1P} = 1.248$
 P 在 O_2 切线坐标中坐标为 $x_{2P} = 46.754$
 $y_{2P} = 29.891$

P 在路线测量坐标系中的坐标为 $X_P = 9\ 455.162$
 $Y_P = 4\ 750.869$

上面都是通过电算程序计算所得。

本文所讨论的内容对于互通立交匝道的设计和施工放样有很大参考作用。

参考文献:

- [1] 张廷楷.道路路线设计.同济大学出版社,1990-09.
- [2] 西安公路学院公路系.公路测量.人民交通出版社,1979.
- [3] 闻道秋.复合曲线坐标计算及程序设计.工程勘察,1997(2).
- [4] 闻道秋.任意点到路线中线最短距离的计算.公路交通科技,1999(2).