

某连续刚构桥体外预应力加固后承载能力评估

张恒¹, 罗雷²

(1.佛山市交通运输事务中心, 广东 佛山 528000; 2.佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

摘要: 某特大桥主桥连续刚构由于张拉底板预应力时发生混凝土保护层崩裂, 采用体外预应力代替部分原纵向预应力的方法进行维修加固处理。文中在收集相关设计、检测及维修加固资料的基础上, 进行针对性的专项检测和桥梁结构验算, 对加固后桥梁承载能力进行评定。

关键词: 桥梁; 连续刚构桥; 体外预应力; 承载能力; 桥梁加固

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)06-0122-05

由于施工过程中预应力管道定位不准确、未设计防崩钢筋等, 某新建预应力连续刚构桥张拉底板预应力时发生保护层崩裂, 设计单位采用体外预应力代替部分原纵向预应力的方法进行维修加固处理。本文结合某连续刚构桥现场实测材料参数对加固后交工状态、运营 14 年后状态进行验算, 评估桥梁整体承载能力, 验证加固措施的有效性。

1 工程概况

某特大桥主桥上部结构为四跨一联预应力混凝土连续刚构, 主桥跨径组合为 $(62+2\times 100+62)$ m (见图 1)。上部结构主梁为分离式单箱单室箱梁, 采用纵向、竖向及横向三向预应力体系。主桥主墩采用整体式承台, 墩身采用单薄壁分离式空心墩, 过渡墩采用分离式薄壁空心墩。

主桥主跨张拉底板预应力钢绞线 M7、M8 时, 主跨箱梁 10[#]~13[#] 块底板混凝土保护层崩裂。原

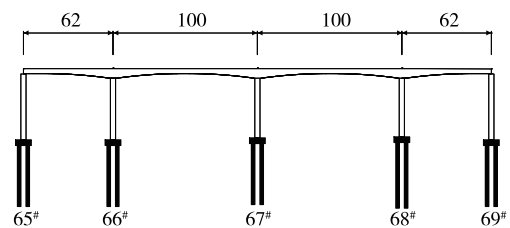


图 1 某连续刚构桥桥型布置示意图(单位: m)

因如下: 1) 底板预应力管道定位不准确, 竖向出现较大偏差, 局部产生较大径向力; 2) 施工中没有按设计要求布置防崩钢筋和连接底板上下缘横向钢筋的系筋, 底板无法实现整体受力。

为保证桥梁的质量和安全性, 防止后续施工中出现箱梁底板崩裂现象, 设计单位对底板采取将中跨底板管道存在较大偏差的 M6、M7、M8 的体内索 14 ϕ 15.24 钢绞线束替换为体外索 19 ϕ 15.24 钢绞线束及增设横隔板和加劲肋的措施进行加强处理。加固箱梁跨中截面预应力束布置见图 2。

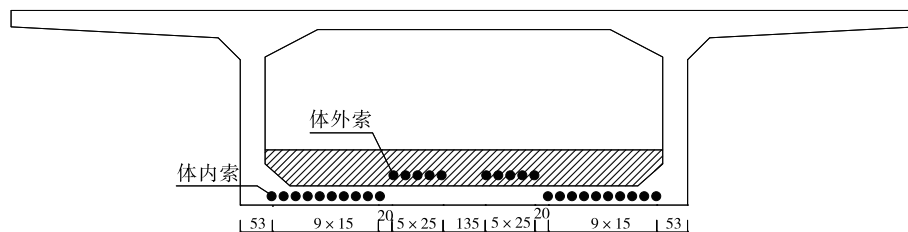


图 2 跨中截面预应力束布置示意图(单位: cm)

2 桥梁承载能力验算

2.1 桥梁模型参数

桥梁结构混凝土和钢绞线的力学指标分别见表 1、表 2。

结构验算主要考虑永久荷载(结构自重、二期恒载、加固荷载、收缩徐变、沉降)、可变荷载(汽车荷载、温度), 荷载组合如下: 组合 I 为恒载+汽车荷载; 组合 II 为恒载+汽车荷载+温度+基础沉降; 组合 III 为恒载+挂车荷载。

表 1 混凝土的力学指标

结构部位	混凝土 标号	弹性模 量/MPa	泊松比	线膨胀 系数	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉设计 强度/MPa	抗压设计 强度/MPa
连续刚构箱梁	C50	3.45×10^4	0.2	1.0×10^{-5}	26.0	1.83	22.4
主桥桥墩	C40	3.25×10^4	0.2	1.0×10^{-5}	26.0	2.15	23.0
承台及桩基	C25	2.80×10^4	0.2	1.0×10^{-5}	26.0	1.55	14.5

表 2 预应力钢绞线的力学指标

力学指标	指标值
弹性模量/MPa	1.95×10^5
泊松比	0.3
线膨胀系数	1.2×10^{-5}
容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	78.5
标准抗拉强度/MPa	1 860

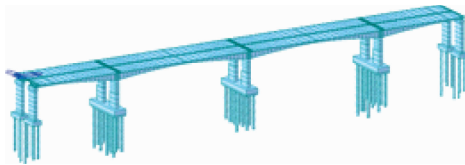


图 3 连续刚构桥主桥整体计算模型

2.2 计算模型

采用 MIDAS/Civil 2015 建立全桥杆系有限元模型(见图 3)进行验算,全桥离散为 1 567 个单元、1 642 个节点。边界条件为:66# 边墩和 70# 边墩设置两个纵向水平可动支座,约束竖向位移和横向位移;设置两个多向活动支座,约束竖向位移。67#、68#、69# 主墩为刚构墩,与梁体固结。

2.3 交工完好状态验算结果

2.3.1 承载能力极限状态验算

该桥交工完好状态时承载能力极限状态荷载组合作用下主梁弯矩、剪力验算结果见图 4、图 5,正截面抗弯、斜截面抗剪承载能力验算结果见图 6、图 7。由图 4~7 可知:在承载能力极限状态下,全桥最大正弯矩为 117 019.9 $\text{kN} \cdot \text{m}$,出现在边跨中间位置;最大负弯矩为 -533 185.1 $\text{kN} \cdot \text{m}$,出现在中间墩

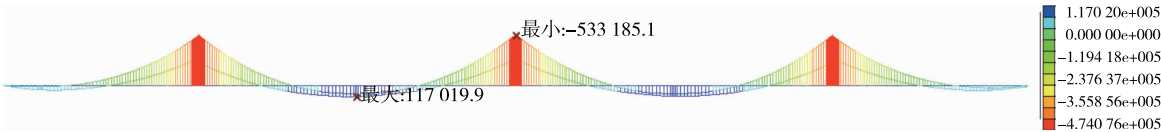


图 4 交工完好状态时承载能力极限状态下主桥主梁弯矩包络图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

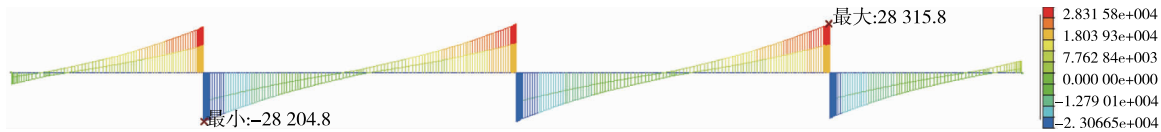


图 5 交工完好状态时承载能力极限状态下主桥主梁剪力包络图(单位: kN)

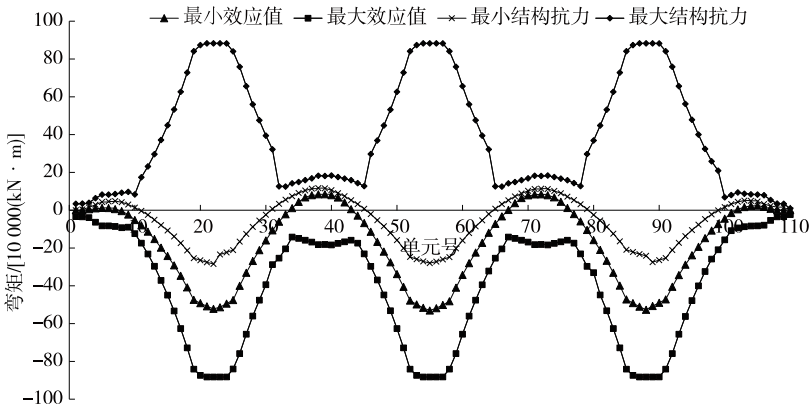


图 6 交工完好状态时承载能力极限状态下正截面抗弯承载能力验算结果

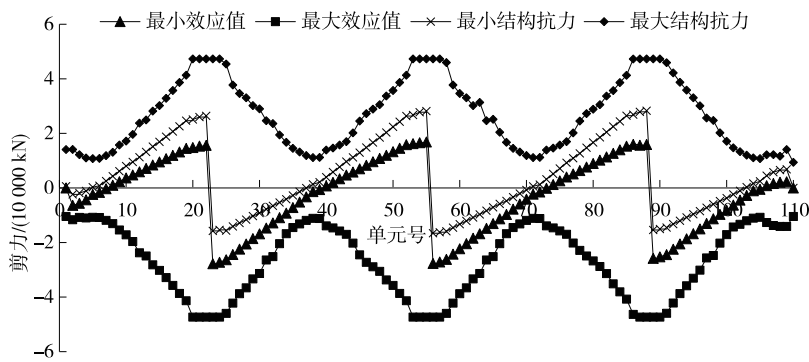


图 7 交工完好状态时承载能力极限状态下斜截面抗剪承载能力验算结果

墩顶处;最小剪力为-28 204.8 kN,出现在小里程侧刚构墩墩顶处;最大剪力为 28 315.8 kN,出现在大里程侧刚构墩墩顶处。

交工完好状态时承载能力极限状态下关键受力截面承载能力验算结果见表 3。由表 3 可知:主梁承载力抗弯和抗剪均满足JTG/TJ21—2011《公路

表 3 交工完好状态时关键受力截面承载能力极限状态验算结果

控制截面	作用效应		结构抗力		抗力/效应		是否符合规范要求
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	抗弯/(kN·m)	抗剪/kN	弯矩	剪力	
边支点	—	7 507.0	—	14 090.0	—	1.88	是
边跨 1/4L	48 384.9	—	87 176.3	—	1.80	—	是
边墩顶	-528 873.7	-28 204.8	-882 565.9	-47 319.7	1.67	1.68	是
中跨中	117 019.9	—	181 152.0	—	1.55	—	是
中墩顶	-533 185.1	28 193.1	-882 565.9	47 319.7	1.66	1.68	是

桥梁承载能力检测评定规程》的要求。

2.3.2 正常使用极限状态验算

(1) 挠度验算。根据 JTJ 023—85《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》对交工完好状态时正常使用极限状态下桥梁结构进行验算,结果见图 8。由图 8 可知:在使用阶段车道荷载作用下全桥产生的最大竖向挠度为 18 mm,考虑挠度长期增长系数(对于 C50 混凝土,挠度长期增长系数为 1.43)的长期挠度为 $18 \times 1.43 = 26 \text{ mm} < \text{规范限值 } 100 \text{ m}/600 = 167 \text{ mm}$ 。

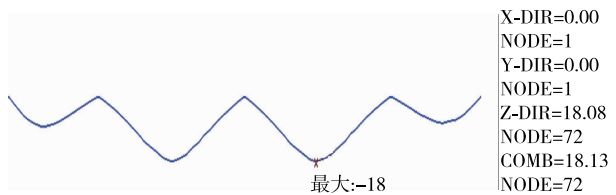


图 8 车道荷载作用下主梁下挠变形图(单位:mm)

(2) 荷载组合 I 应力验算。荷载组合 I 作用下截面上下缘正应力及主应力验算结果见表 4,均满足规范要求。

(3) 荷载组合 II 应力验算。荷载组合 II 作用下

截面上下缘正应力及主应力验算结果见表 5,均满足规范要求。

(4) 荷载组合 III 应力验算。荷载组合 III 作用下截面上下缘正应力及主应力验算结果见表 6,均满足规范要求。

表 4 荷载组合 I 作用下应力验算结果 MPa

项目	应力	允许值
上缘最大正应力	-0.17	<0.00
上缘最小正应力	-9.36	>-17.50
下缘最大正应力	-1.79	<0.00
下缘最小正应力	-10.13	>-17.50
主拉应力	0.98	<2.40
主压应力	-10.22	>-21.00

表 5 荷载组合 II 作用下应力验算结果 MPa

项目	应力	允许值
上缘最大正应力	-0.06	<0.00
上缘最小正应力	-9.53	>-21.00
下缘最大正应力	-1.64	<0.00
下缘最小正应力	-11.22	>-21.00
主拉应力	1.02	<2.70
主压应力	-11.32	>-22.75

表 6 荷载组合Ⅲ作用下应力验算结果 MPa

项目	应力	允许值
上缘最大正应力	-0.01	<0.00
上缘最小正应力	-8.93	>-21.00
下缘最大正应力	-3.12	<0.00
下缘最小正应力	-9.49	>-21.00
主拉应力	0.86	<2.70
主压应力	-9.51	>-22.75

综上,在承载能力极限状态下,桥梁主桥连续刚构正截面抗弯及斜截面抗剪均满足规范要求,承载力满足要求;在正常使用极限状态荷载组合Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ作用下,桥梁主桥连续刚构截面上下缘正应力、主拉应力、主压应力均满足规范要求,挠度变形满足规范要求。

2.4 当前状况验算结果

根据 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检

测评定规程》,配筋混凝土桥梁承载能力极限状态根据桥梁检测结果按下式进行计算评定:

$$\gamma_0 S \leqslant R(f_d, \xi_c \alpha_{dc}, \xi_s \alpha_{ds}) Z_1 (1 - \xi_c)$$

式中: γ_0 为结构的重要性系数; S 为荷载效应函数; $R(\cdot)$ 为抗力效应函数; f_d 为材料强度设计值; ξ_c 为配筋混凝土结构的截面折减系数; α_{dc} 为构件混凝土几何参数值; ξ_s 为钢筋的截面折减系数; α_{ds} 为构件钢筋几何参数值; Z_1 为承载能力验算系数; ξ_c 为承载能力恶化系数。

2.4.1 验算系数的确定

该桥经过体外预应力加固并运营 14 年后,桥梁结构现场检测结果见表 7~11。

2.4.2 承载能力验算评定结果

根据 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》进行结构承载能力验算,结果显示:当前技术状况下主桥主梁抗弯承载能力和斜截面抗剪承载能力均满足规范要求(见表 12)。

表 7 主桥承载能力验算系数评定标度 D

检测指标	权重 α_j	评定标度 D_j	$\alpha_j D_j$	评定结果
缺损状况	0.4	3	1.2	技术状况等级为 3 类
材质强度	0.3	1	0.3	$R_n/R=53.4/50=1.06 \geqslant 1.0$
自振频率	0.3	1	0.3	自振频率实测值/理论值>1.1
D			1.8	

注: R_n 为混凝土实测强度推定值; R 为混凝土设计强度等级。

表 8 主桥承载能力恶化系数评定标度 E

检测指标	权重 α_j	评定标度 E_j	$\alpha_j E_j$	评定结果
缺损状况	0.32	2	0.64	技术状况等级为 2 级
钢筋锈蚀电位	0.11	2	0.22	钢筋锈蚀电位 $\geqslant -200$
混凝土电阻率	0.05	1	0.05	未检测,评定标度取 1
混凝土碳化深度	0.20	1	0.20	主梁的保护层平均厚度 31.9 mm,碳化深度 1 mm
钢筋保护层	0.12	3	0.36	保护层厚度特征值为 24.2 mm/32 mm=0.758>0.7
氯离子含量	0.15	1	0.15	未检测时,评定标度取 1
混凝土强度	0.05	1	0.05	推定强度等级大于设计等级 C50
E			1.67	

表 9 主桥构件截面损伤的评定 R

检测指标	权重 α_j	评定标度 E_j	$\alpha_j E_j$	评定结果
材料风化	0.10	1	0.10	微风化
混凝土碳化	0.35	1	0.35	1.8 mm/53 mm=0.03<0.5
物理与化学损伤	0.55	1	0.55	构件表面较好
R			1.00	

表 10 主桥钢筋截面折减系数 ξ_s 。

结构部位	评定标度	钢筋截面折减系数 ξ_s	评定结果
主梁钢筋	3	0.9	钢筋锈蚀引起混凝土剥落,钢筋外露

表 11 桥梁活载修正系数

修正系数	取值		验算取值
	上行	下行	
交通量影响修正系数 ξ_{q1}	1.000	1.000	1.000
大吨位车辆混入影响系数 ξ_{q2}	1.078	1.080	1.080
轴荷分布影响修正系数 ξ_{q3}	1.400	1.400	1.400
活载修正系数 ξ_q	1.147	1.148	1.148

表 12 当前技术状况下主桥主梁承载能力验算结果

控制截面	作用效应		结构抗力		抗力/效应		是否符合规范要求
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	抗弯/(kN·m)	抗剪/kN	弯矩	剪力	
边支点	—	7 759	—	12 369	—	1.59	是
边跨 1/4L	50 717	—	76 531	—	1.51	—	是
边墩顶	-537 735	-28 660	-774 789	-41 541	1.44	1.45	是
中跨中	119 449	—	159 030	—	1.33	—	是
中墩顶	-542 686	28 653	-774 789	41 541	1.43	1.45	是

3 结论

该连续刚构桥在经过体外预应力加固并运营 14 年后,虽然桥梁结构主要材质状况出现一定程度缺损和退化后,但桥梁结构承载能力仍然满足原设计规范要求。承载能力极限状态下,主桥正截面抗弯承载能力和斜截面抗剪承载能力均大于作用组合,满足原设计规范要求;正常使用极限状态下,主桥正应力、主应力均小于规范限值,主跨最大挠度小于规范限值,满足原设计规范要求。

参考文献:

[1] 周建民,赵勇,王红军,等.体外预应力混凝土梁的受弯

承载力研究[J].力学季刊,2010,31(2):297—303.

[2] 吴泉.钢筋混凝土 T 梁体外预应力加固研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2015.

[3] 蔡惠菊,周建民.体外预应力加固低强度混凝土简支梁试验研究[J].建筑结构,2018,48(6):31—34+39.

[4] 中交公路规划设计院.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

[5] 中交公路规划设计院.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG D62—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

[6] 毛德均,许鹏,陈旭,等.体外预应力加固钢筋混凝土简支梁的设计参数研究[J].公路工程,2021,46(2):8—114.

收稿日期:2022—06—15

《中外公路》2023 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于 1980 年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办,邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业。属 RCCSE 中国核心学术期刊、首届中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊、湖南省十佳科技期刊、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008 年)湖南省优秀栏目,2009 年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖,多次被评为交通部、湖南省优秀期刊。

2023 年《中外公路》为大 16 开,每册定价 15.00 元,全年 6 期共 90.00 元。

邮发代号:42—63。读者也可通过邮局或银行汇款至杂志社直接订阅。

地址:长沙理工大学云塘校区 58 号信箱

邮编:410114

收款单位:《中外公路》编辑部

户名:长沙理工大学

账号:1901016009109888886

开户行:工商银行长沙银迅支行

电话:0731—85258033(带传真)

联系人:白雪

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com