

大跨径 PC 梁桥参数敏感性分析与识别

徐潇檬¹, 李元松¹, 罗志伟², 杨宏印¹

(1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073; 2. 中铁大桥局集团第五工程有限公司, 江西 九江 332000)

摘要: 为研究大跨径 PC 梁桥在悬臂施工过程中, 不同设计参数对主梁线形和受力状态的影响, 进而实现关键参数的识别, 以南昌西二环某 4 跨连续梁桥施工工程为依托, 基于 Midas/Civil 软件建立的有限元模型和现场监测监控数据, 采用正交设计理论和误差识别方法, 对影响主梁线形和受力状态的参数进行敏感性分析。结果表明: 当以主梁线形作为控制目标时, 应将混凝土容重、混凝土弹性模量和预应力设为主要设计参数, 环境相对湿度设为次要设计参数; 当以主梁截面应力作为控制目标时, 应将预应力和混凝土容重设为主要设计参数, 环境相对湿度设为次要设计参数。据此结论指导实际施工后, 取得了良好效果。

关键词: PC 梁桥; 悬臂施工; 状态参数; 敏感性分析

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)08-0255-07

0 引言

随着我国交通事业的蓬勃发展, 以预应力混凝土连续梁桥为主的高墩大跨桥梁因整体性好、刚度大、容易养护、通车平顺性好以及外形美观等诸多优势^[1]而得到了长足发展。大跨径连续梁桥一般采用悬臂浇筑法施工建造^[2], 并辅以数值模拟技术进行跟踪计算^[3]。

自上世纪 80 年代以来, 桥梁监控技术研究就受到了广泛关注^[4]。参数识别作为桥梁监控的核心内容之一, 已有众多学者提出了许多研究方法^[4], 为桥梁施工做出了巨大贡献。

殷志祥等^[5]根据实际桥梁工程施工情况, 选取特定温度场下箱梁截面作为研究对象, 研究了混凝土悬浇桥梁在 E 、 α 参数变化情况下对桥梁应力、应变影响的大小, 揭示了桥梁截面应力变化的敏感性规律, 并总结出了提高桥梁使用安全度所需关注的温度-应力敏感性因素。李海鸥^[6]以巴河大桥作为工程依托, 运用有限元方法和仿真计算软件, 就主梁悬臂施工过程中施工控制参数对桥梁结构线形和应力的影响进行了深入分析, 并利用正交试验设计法确定各因素与梁端位移之间的关系, 结果表明: 主梁线形受预应力损失的影响最为显著, 结构线形受基础不均匀沉降的影响呈现出抛物线的分布形态, 各参

数对主梁挠度的影响大于对主梁截面应力的影响。唐启^[7]采用 TDV RM 2006 建立桥梁有限元模型, 分别计算了桥塔、钢梁、桥面板的弹性模量和重量等参数对桥塔塔偏、主梁线形、桥面板应力和斜拉索索力的影响, 研究发现: 桥塔塔偏、主梁线形和斜拉索索力受到桥面板和钢梁重量的显著影响, 混凝土桥面板应力则受到钢梁弹性模量、桥面板弹性模量、桥面板重量等敏感性参数的显著影响; 在此基础上, 结合桥型特点提出了相应的施工控制措施。

由于施工环境、施工工艺和计算参数等存在不确定因素^[8], 同时施工设备也在不断改进, 导致施工监控面临诸多亟待解决的新问题。为了确保施工过程中桥梁的变形、内力都在合理范围内, 使成桥状态更逼近设计状态^[9-10], 对大跨径桥梁进行参数敏感性分析和识别, 意义重大。

1 施工参数分析和识别

1.1 设计参数的选取

在实际桥梁施工过程中存在大量不确定因素, 需要有针对性地选取参数^[11]。对于预应力混凝土连续梁桥而言, 主要是保证施工过程中主梁线形良好并避免截面应力过大^[12]。基于此, 本文选取混凝土容重、混凝土弹性模量、预应力和环境湿度作为主要研究因素, 对其进行敏感性分析。

1.2 参数敏感性分析方法

以设计成桥为基础, 利用 MIDAS Civil 软件建立有限元模型, 通过前进分析法进行桥梁实际施工的仿

收稿日期: 2023-06-03

作者简介: 徐潇檬(1997—), 男, 硕士研究生, 从事桥梁结构研究工作。

真模拟计算。主要分析步骤如下:

(1)以挠度和截面应力作为控制目标,建立所选设计参数为改变量的控制目标方程^[13]:

$$y_0 = f(x_0) \tag{1}$$

$$y = f(x) = f(x_0(1 + \Delta x)) \tag{2}$$

式中: x_0 为参数基准值; Δx 为参数变化量; y 为所选参数控制目标输出值。

在上述方程基础上,建立相应的敏感性方程:

$$\beta = \frac{\max\{y - y_0\}}{\Delta x} \tag{3}$$

式中: β 为敏感性参数。 β 值越大,说明该设计参数对结构响应程度越敏感。

(2)在 MIDAS Civil 中,对选定的设计参数进行 5%~10% 的幅度调整。

(3)观察控制目标在参数调整后的变化程度,并通过对比分析,分别确定影响主梁挠度和截面应力的主要设计参数和次要设计参数。

2 数值模拟分析

2.1 工程背景

南昌市某 4 跨变截面预应力混凝土连续箱梁,采用 C55 混凝土,单幅桥宽 16.55 m,断面形式为单箱双室,跨径组合为 60 m+2×90 m+60 m。主梁采用悬臂浇筑法,共分 3 个悬浇 T 构,一个 T 构单侧共分 11 个梁段。连续梁桥桥跨布置见图 1。

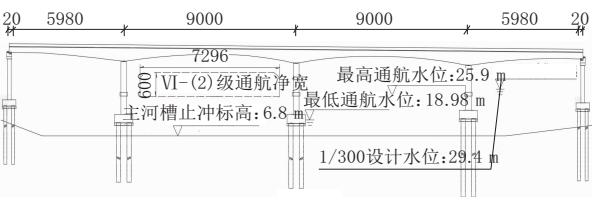


图 1 60 m+2×90 m+60 m 连续梁桥桥跨布置(单位:cm)

2.2 有限元模型

本文主要采用 MIDAS 进行结构分析计算。采用平面梁单元建立结构纵向计算模型,共 135 个节点,106 个单元。纵向计算模型见图 2。

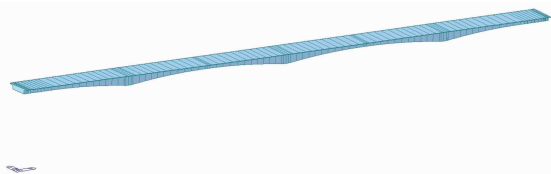


图 2 计算模型结构图

2.2.1 计算假定

(1)主梁为全预应力构件,不考虑普通钢筋参与结构受力;不考虑横向和竖向预应力。

(2)悬臂施工和边跨现浇阶段边界采用临时固结处理,待合龙再进行体系转换。

(3)支座底按固定约束(连续梁约束)考虑,支座按弹性连接考虑。

(4)结构计算按直线桥计算,未考虑纵坡影响。

2.2.2 材料参数

主桥箱梁采用 C55 混凝土。C55 混凝土力学性能指标见表 1。混凝土徐变收缩参数按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)考虑,构件的理论厚度按每个单元的实际截面特性计算。

表 1 C55 混凝土力学性能指标

指标	数值
弹性模量 E_c /MPa	3.55×10^4
泊松比 μ_c	0.2
抗压强度标准值 f_{ck} /MPa	35.5
抗压强度设计值 f_{cd} /MPa	24.4
抗折强度标准值 f_{tk} /MPa	2.74
抗折强度设计值 f_{td} /MPa	1.89
容重 γ /(kN·m ⁻³)	26

结构预应力钢筋力学性能指标见表 2。

表 2 预应力索力学性能指标

指标	数值
弹性模量 E_p /MPa	195 000
抗拉强度标准值 f_{pk} /MPa	1 860

2.3 计算结果分析

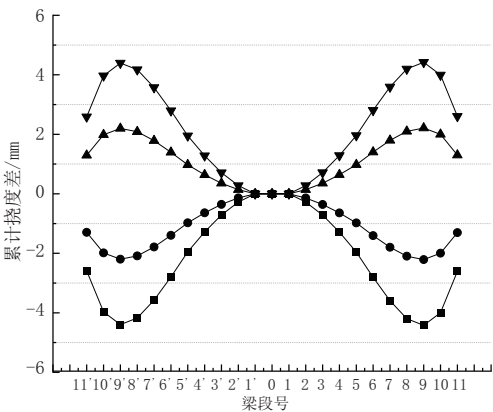
本文以依托工程方案所建模型为基准,各影响因素的基准值为设计值,对影响施工控制目标的主要因素进行分析。

2.3.1 混凝土容重

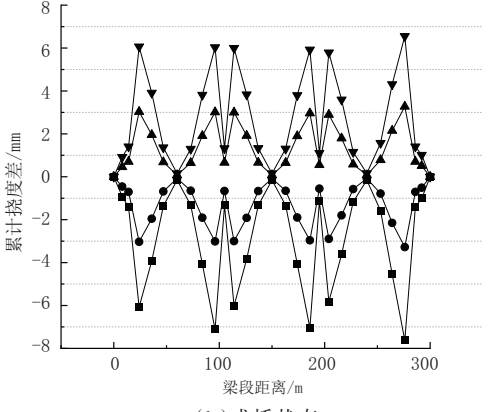
桥梁施工过程中,或多或少会出现混凝土配合比变化、混凝土缺损、超方和胀模等问题。本文通过设置混凝土容重变化幅度为 -10%、-5%、5%、10%,来模拟施工中可能出现的现象。

(1)基于有限元模型,计算混凝土容重变化所对应的主梁挠度值,然后将不同容重变化幅度下的主梁挠度值减去初始挠度值,得到累计挠度差值。计算结果列于图 3 和表 3。

由图 3 和表 3 可知,在最大悬臂状态和成桥状态下,随着混凝土容重变化幅度的增大,主梁各梁段累计挠度差值也随之变大。其中:主墩(0# 块)附近受混凝土容重变化的影响最小,距离主墩 36 m(9# 块)附近受混凝土容重变化的影响最大;自主墩至合



(a)最大悬臂状态



(b)成桥状态

容重变化幅度: ■ 10%; ● 5%; ▲ -5%; ▼ -10%

图 3 混凝土容重变化幅度对主梁挠度差值的影响

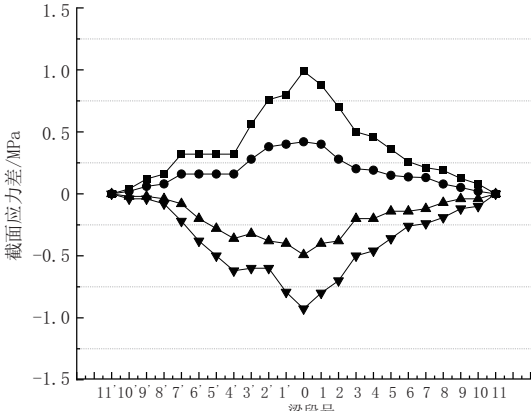
表 3 混凝土容重变化幅度对主梁挠度差值和敏感性参数的影响

容重变化 幅度 /%	最大悬臂状态		成桥状态	
	挠度差值 /mm	β 值	挠度差值 /mm	β 值
10	-4.42	-0.44	-7.63	-0.76
5	-2.19	-0.44	-3.28	-0.64
0	0	0	0	0
-5	2.26	0.44	3.28	0.64
-10	4.38	0.44	6.55	0.66

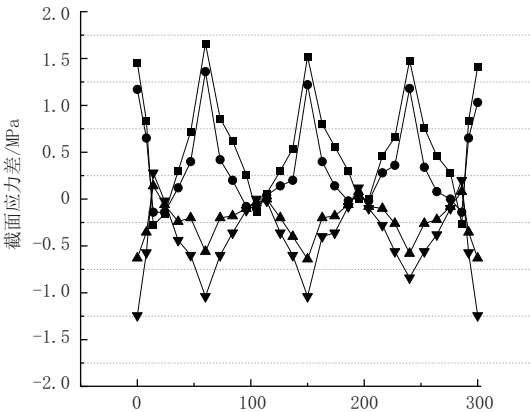
龙段,随着悬臂的增长,混凝土容重变化幅度对主梁挠度差值的影响呈先增大后减小趋势。混凝土容重变化幅度为 -10%、-5%、5%、10%时,最大悬臂状态和成桥状态下所对应的主梁挠度变化最大值分别为 4.38、2.26、-2.19、-4.42 mm 和 6.55、3.28、-3.28、-7.63 mm。显然,对于大跨径 PC 梁桥而言,成桥状态下的主梁挠度比最大悬臂状态下的主梁挠度对容重变化更为敏感。

(2)基于有限元模型,计算混凝土容重变化所对应的主梁各梁段截面应力值,然后将不同容重变化幅度下的主梁截面应力值减去初始截面应力值,得

到截面应力差值。计算结果列于图 4 和表 4。



(a)最大悬臂状态



(b)成桥状态

容重变化幅度: ■ 10%; ● 5%; ▲ -5%; ▼ -10%

图 4 混凝土容重变化幅度对主梁截面应力差值的影响

表 4 混凝土容重变化幅度对主梁截面应力差值和敏感性参数的影响

容重变化 幅度 /%	最大悬臂状态		成桥状态	
	应力差值 /mm	β 值	应力差值 /mm	β 值
10	1.00	0.10	1.66	0.17
5	0.42	0.08	1.32	0.26
0	0	0	0	0
-5	-0.49	-0.10	-0.64	-0.15
-10	-0.93	-0.09	-1.04	-0.10

由图 4 和表 4 可知,在最大悬臂状态和成桥状态下,随着混凝土容重变化幅度的增大,主梁各梁段截面应力差值也随之变大。其中:主墩(0# 块)附近受混凝土容重变化的影响最大,合龙段(12# 块和 13# 块)附近受混凝土容重变化的影响最小,自主墩至合龙段,随着悬臂的增长,混凝土容重变化幅度对主梁截面应力差值的影响逐步减小。混凝土容重变化幅度为 -10%、-5%、5%、10%时,最大悬臂状态和成桥状态下所对应的主梁截面应力变化最大值分别

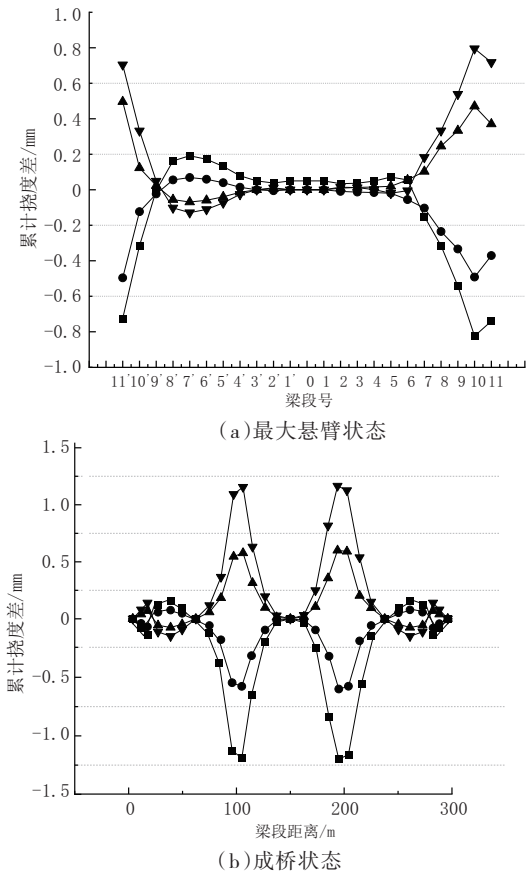
为 -0.93 、 -0.49 、 0.42 、 1.00 MPa 和 -1.04 、 -0.64 、 1.32 、 1.66 MPa。显然,对于大跨径 PC 梁桥而言,成桥状态下的主梁应力与最大悬臂状态下的主梁应力受混凝土容重影响的情况类似,但前者更为敏感。

2.3.2 混凝土弹性模量

桥梁施工过程中,混凝土实际的弹性模量很难与设计方

案完全一致。本文通过设置混凝土弹性模量变化幅度为 -10% 、 -5% 、 5% 、 10% ,来模拟施工中可能出现的现象。

(1)基于有限元模型,计算得到混凝土弹性模量变化后的主梁挠度值,然后将不同弹性模量变化幅度下的主梁挠度值减去初始挠度值,得到累计挠度差值。计算结果列于图 5 和表 5。



弹性模量变化幅度: ■ -10% ; ● -5% ; ▲ 5% ; ▼ 10%

图 5 混凝土弹性模量变化幅度对主梁挠度差值的影响

表 5 混凝土弹性模量变化幅度对主梁挠度差值和敏感性参数的影响

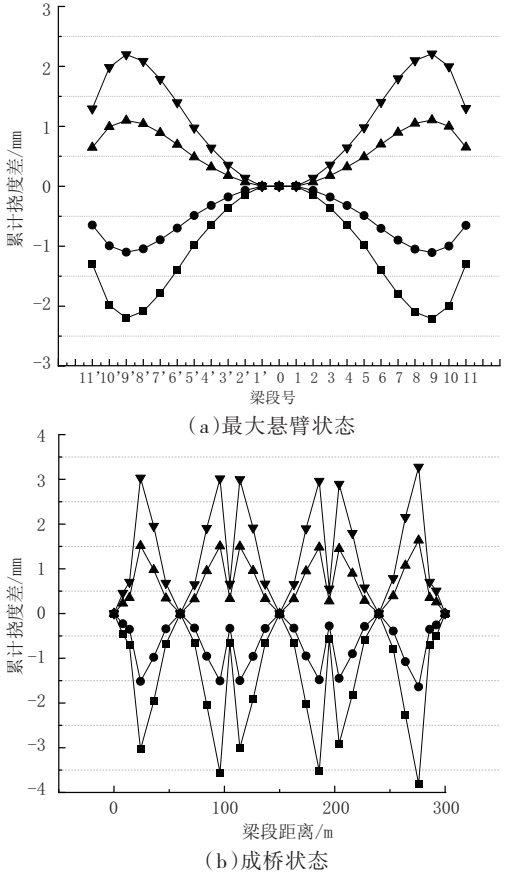
弹性模量变化 幅度 / %	最大悬臂状态		成桥状态	
	挠度差值 / mm	β 值	挠度差值 / mm	β 值
10	0.79	0.08	1.17	0.12
5	0.47	0.09	0.60	0.12
0	0	0	0	0
-5	-0.49	-0.09	-0.60	-0.12
-10	-0.82	-0.08	-1.20	-0.12

由图 5 和表 5 可知,混凝土弹性模量的改变对桥梁结构挠度变化有一定影响。随着混凝土弹性模量变化幅度的增加,主梁下挠程度减小。混凝土弹性模量对最大悬臂状态下悬臂两端的挠度影响最大,成桥状态下跨中挠度受混凝土弹性模量的影响最大且中跨变形远远大于边跨。混凝土弹性模量变化幅度为 -10% 、 -5% 、 5% 、 10% 时,最大悬臂状态和成桥状态下所对应的主梁挠度变化最大值分别为 -0.82 、 -0.49 、 0.47 、 0.79 mm 和 -1.20 、 -0.60 、 0.60 、 1.17 mm。显然,对于大跨径 PC 梁桥而言,成桥状态和最大悬臂状态下的主梁挠度对混凝土弹性模量变化的敏感程度较低,但也会对桥梁线形有一定影响,不容忽视。

2.3.3 预应力误差

桥梁施工过程中,预应力张拉初始控制应力误差、预应力损失等问题难以避免。本文通过设置预应力钢筋初始张拉控制应力变化幅度为 -10% 、 -6% 、 6% 、 10% ,来模拟在施工中可能出现的现象。

(1)基于有限元模型,计算得到预应力钢筋初始张拉控制应力变化后的主梁挠度值,然后将不同预应力钢筋初始张拉控制应力变化幅度下的主梁挠度值减去初始挠度值,得到累计挠度差值。计算结果列于图 6 和表 6。



预应力变化幅度: ■ -10% ; ● -6% ; ▲ 6% ; ▼ 10%

图 6 预应力变化幅度对主梁挠度差值的影响

预应力变化 幅度 /%	最大悬臂状态		成桥状态	
	挠度差值 /mm	β 值	挠度差值 /mm	β 值
10	2.21	0.22	3.28	0.33
6	1.10	0.18	1.64	0.27
0	0	0	0	0
-6	-1.11	-0.19	-1.64	-0.27
-10	-2.21	-0.22	-3.81	-0.38

由图 6 和表 6 可知,在最大悬臂状态和成桥状态下,随着预应力初始控制应力变化幅度的增大,主梁各梁段挠度差值减小。其中,受预应力影响最大处是最大悬臂状态下的悬臂中部和成桥状态下的跨中。预应力初始控制应力变化幅度为 -10%、-6%、6%、10% 时,最大悬臂状态和成桥状态下所对应的主梁挠度变化最大值分别为 -2.21、-1.11、1.10、2.21 mm 和 -3.81、-1.64、1.64、3.28 mm。显然,对于大跨径 PC 梁桥而言,预应力荷载的添加极大地约束了主梁受到自重荷载、临时荷载和通车后活载而产生的下挠现象,预应力的误差对于桥梁线形有着极大的影响。因此在施工时应该严格按照施工方案执行,保证预应力充足,这是 PC 梁桥建造的一个重要指标。

(2)基于有限元模型,计算得到预应力钢筋初始张拉控制应力变化后的主梁各梁段截面应力值,然后将不同预应力钢筋初始张拉控制应力变化幅度下的截面应力值减去初始截面应力值,得到截面应力差值。计算结果列于图 7 和表 7。

由图 7 和表 7 可知,在最大悬臂状态和成桥状态下,随着预应力初始控制应力变化幅度的增大,主梁各梁段截面应力差值也随之变大。其中:主墩(0# 块)附近受预应力影响最大,合龙段(12# 块和 13# 块)附近受预应力影响最小;自主墩至合龙段,随着悬臂的增长,预应力对截面应力的影响逐步减弱。预应力初始控制应力变化幅度为 -10%、-6%、6%、10% 时,最大悬臂状态和成桥状态下所对应的截面应力变化最大值分别为 -1.46、-0.94、0.94、1.45 MPa 和 -2.67、-1.66、1.51、2.40 MPa。显然,对于大跨径 PC 梁桥而言,成桥状态下的主梁截面应力与最大悬臂状态下的主梁截面应力受预应力影响的趋势类似,但成桥状态下的主梁截面应力对预应力初始控制应力的变化更为敏感。

2.3.4 环境相对湿度

本文将结合南昌本地全年气候变化情况,通过

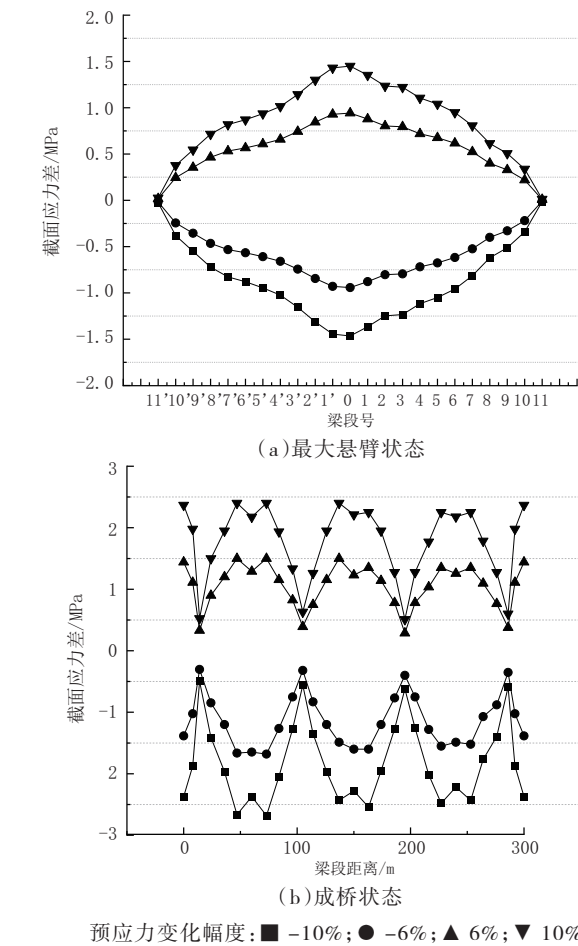


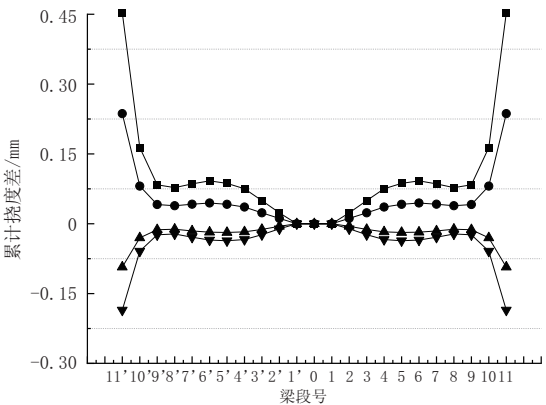
图 7 预应力变化幅度对主梁截面应力差值的影响

预应力变化 幅度 /%	最大悬臂状态		成桥状态	
	应力差值 /mm	β 值	应力差值 /mm	β 值
10	1.45	0.15	2.40	0.24
6	0.94	0.16	1.51	0.25
0	0	0	0	0
-6	-0.94	-0.16	-1.66	0.28
-10	-1.46	-0.15	-2.67	-0.27

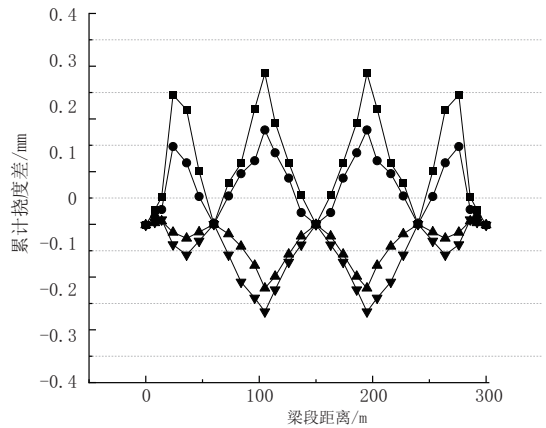
设置环境相对湿度为 60%、70%、85%、90%,来模拟在施工中可能出现的现象。

(1)基于有限元模型,计算得到环境相对湿度变化后的主梁挠度值,然后将不同环境相对湿度下的主梁挠度值减去初始挠度值,得到累计挠度差值。计算结果列于图 8 和表 8。

由图 8 和表 8 可知,在最大悬臂状态和成桥状态下,随着环境相对湿度的增加,主梁各梁段变形减小。随着主梁长度的增加,环境相对湿度对主梁挠度的影响越来越大。环境相对湿度变化幅度为 -25.0%、-12.5%、6.0%、12.5% 时,最大悬臂状态和成桥状态



(a)最大悬臂状态



(b)成桥状态

环境相对湿度: ■ 90%; ● 85%; ▲ 70%; ▼ 60%

图 8 不同环境相对湿度对主梁挠度差值的影响

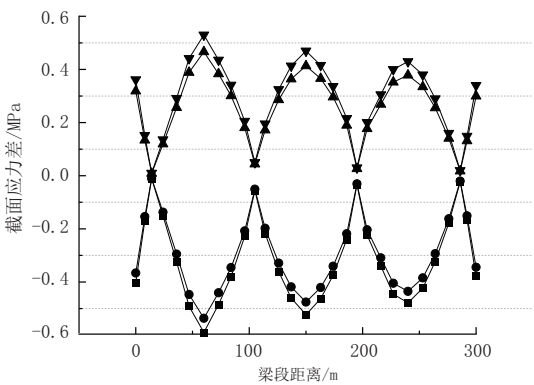
表 8 环境相对湿度变化幅度对主梁挠度差值和敏感性参数的影响

环境相对湿度变化幅度 /%	最大悬臂状态		成桥状态	
	挠度差值 /mm	β 值	挠度差值 /mm	β 值
12.5	0.45	0.04	0.29	0.02
6.0	0.24	0.04	0.18	0.03
-12.5	-0.09	-0.01	-0.12	-0.01
-25.0	-0.19	-0.01	-0.17	-0.01

下所对应的主梁挠度变化最大值分别为 -0.19、-0.09、0.24、0.45 mm 和 -0.17、-0.12、0.18、0.29 mm。显然,对于大跨径 PC 梁桥而言,环境相对湿度的增加可以尽可能地减少混凝土中水分的蒸发,以此来保证水泥水化的足够彻底,减弱混凝土收缩徐变带来的影响,从而减小主梁的变形。

(2)基于有限元模型,计算得到环境相对湿度变化后成桥状态下的主梁各梁段截面应力值,然后将不同环境相对湿度下的截面应力值减去初始截面应力值,得到截面应力差值。计算结果列于图 9 和表 9。

由图 9 和表 9 可知,在成桥状态下,主墩附近受环境相对湿度影响最大;随着主梁长度的增加,受到的影响慢慢减弱,合龙段附近受环境相对湿度的影



环境相对湿度: ■ 90%; ● 85%; ▲ 70%; ▼ 60%

图 9 不同环境相对湿度对成桥状态下主梁截面应力差值的影响

表 9 环境相对湿度变化幅度对成桥状态下主梁截面应力差值和敏感性参数的影响

环境相对湿度变化幅度 /%	应力差值 /MPa	β 值
12.5	-0.49	-0.04
6.0	-0.45	-0.08
-12.5	0.39	0.03
-25.0	0.44	0.02

响最小。环境相对湿度变化幅度为 -25.0%、-12.5%、6.0%、12.5% 时,成桥状态下所对应的主梁截面应力变化最大值分别为 0.44、0.39、-0.45、-0.49 MPa。环境相对湿度对主梁截面应力的影响较小,可以作为次要因素考虑。

2.3.5 参数对比分析

对上述 5 种设计参数计算结果进行整合排序,以主梁挠度和截面应力作为参考对象,总结出最大悬臂状态和成桥状态下的主要设计参数和次要设计参数。

根据表 3~9 中 β 值的大小,可得出各设计参数在最大悬臂状态和成桥状态下的敏感性排序,如表 10 所示。

表 10 设计参数敏感性排序

设计参数	最大悬臂状态		成桥状态	
	挠度	应力	挠度	应力
混凝土容重	1	2	1	2
混凝土弹性模量	3		3	
预应力	2	1	2	1
环境相对湿度	4		4	3

由表 10 可知:最大悬臂状态下,混凝土容重、预应力和混凝土弹性模量对主梁挠度的影响都较大,环境相对湿度的影响则较小,在主梁截面应力方面,预应力和混凝土容重仍然是主要影响因素;成桥状态下,各参数敏感程度排名与最大悬臂状态下的排

名相比变动并不明显,在主梁挠度方面,混凝土容重影响最大,预应力和混凝土弹性模量次之,环境相对湿度的影响虽然较小但也需注意,在主梁截面应力方面,预应力影响最大,混凝土容重和环境相对湿度次之。

由上述分析可知,在大跨径 PC 梁桥施工过程中,应将混凝土容重、混凝土弹性模量和预应力作为主要设计参数,环境相对湿度作为次要设计参数。施工过程中应严格按照标准执行,及时测量上述参数的实际数值,并将这些参数与模型计算结果相对比,若发现存在误差,应及时调整模型,保证数值模拟结果与现场施工情况基本一致,为顺利施工做出有效指导。

3 结 语

(1)以主梁挠度作为控制目标时,应将混凝土容重、混凝土弹性模量和预应力设为主要设计参数,环境相对湿度设为次要设计参数;以主梁截面应力作为控制目标时,应将预应力和混凝土容重设为主要设计参数,环境相对湿度设为次要设计参数。

(2)施工参数对主梁的影响并非一成不变,随着主梁跨径的改变,对参数的敏感程度也在发生变化。对于主梁挠度而言,主梁合龙段处敏感程度最大;对于主梁截面应力而言,主墩两侧敏感程度最大。同时,各施工参数对于成桥状态下的桥梁结构响应程度更高。

(3)在变化幅度在 10%之内时:主梁挠度与混凝土容重呈正比关系,与预应力和混凝土弹性模量呈

反比关系;主梁截面应力与混凝土容重呈正比关系,与预应力呈反比关系。施工时应着重关注混凝土容重和预应力,尽量减小实际值与设计值之间的误差。

参考文献:

- [1] 何雄君,范立础,李丽平,等.大型桥梁施工预测控制系统研究[J].中国公路学报,2006,19(1):53-57.
- [2] 李新,周国华,董世斌.大跨径连续梁桥大节段现浇设计关键技术——以汉宜高速公路桥主桥为例[J].工程技术研究,2022,7(4):8-11.
- [3] 韩向奎.预应力混凝土连续桥梁施工应力监控分析[J].交通世界,2023(增刊2):263-265,274.
- [4] 杜克非.佳木斯大桥施工监控技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.
- [5] 殷志祥,朱巍.混凝土参数变化的预应力悬浇箱梁温度应力敏感性分析[J].土木建筑与环境工程,2012,34(增刊1):32-35.
- [6] 李海鸥,宋川,陈平,等.大跨径 PC 连续刚构桥施工控制参数敏感性分析[J].西华大学学报(自然科学版),2020,39(1):54-59.
- [7] 唐启.泉州湾跨海大桥钢混组合梁施工控制参数敏感性分析[J].世界桥梁,2016,44(5):57-61.
- [8] 田方.大跨径预应力混凝土连续刚构桥施工监控线形研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [9] 赵立珍,何先龙.基于倾角仪测试铁路桥梁静态挠度[J].中国测试,2012,38(1):22-24.
- [10] 罗力军.排调河一号特大桥施工计算和监控[D].长沙:中南大学,2012.
- [11] 陈宇.有限元模型修正技术在桥梁工程中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [12] 闫强强.大跨径预应力混凝土连续梁桥的施工控制研究[J].交通世界,2022(21):32-35.
- [13] 张忠杭,余洋.预应力混凝土连续梁桥参数敏感性分析[J].天津建设科技,2022,32(2):14-18.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com