

初始缺陷对钢管混凝土混合柱高墩极限承载力的影响研究

闫少敏, 刘爽, 刘力博, 张永宾

(天津市交通科学研究院, 天津 300300)

摘要: 施工误差、材料性能不均匀等因素必然导致钢管混凝土混合柱高墩存在一定的初始缺陷。文中以四川干海子特大桥为工程背景, 运用一致缺陷和改进随机缺陷理论, 考虑材料非线性、几何非线性, 对钢管混凝土混合柱高墩进行极限承载力分析, 得到其极限承载力特征参数, 进而研究初始缺陷对钢管混凝土混合柱高墩极限承载力的影响, 并采用随机有限元法对初始材料缺陷进行极限承载力敏感性分析。结果表明, 钢管混凝土混合柱高墩属于缺陷敏感结构, 对于干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合柱桥墩, 初始缺陷限值按现有规范取值风险较大, 其初始缺陷限值建议取墩高的 1/2 000; 与一致缺陷模态法相比, 结构初始缺陷值控制在较小范围内时, 采用随机缺陷模态法计算所得钢管混凝土混合柱高墩的极限承载力偏小; 沿墩高方向缺陷对结构极限承载力的灵敏度变化较大, 呈现下部结构大于上部结构、两端大于中间的规律; 干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合柱桥墩对顺桥向缺陷最敏感; 钢管混凝土混合柱高墩材料缺陷对极限承载力的敏感性从大到小依次为纵向连接杆件外径、纵向连接杆件钢管壁厚、核心混凝土弹性模量、柱肢杆件外径、核心混凝土密度、钢材密度、柱肢杆件钢管壁厚。

关键词: 桥梁; 钢管混凝土混合柱; 高墩; 极限承载力; 一致缺陷; 随机缺陷; 敏感性分析

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0132-07

受河流、峡谷等复杂地形条件限制, 中国西部地区公路建设中需要修建大量高墩桥梁, 钢管混凝土劲性骨架柱、钢管混凝土格构柱在解决西部山区桥梁高墩需求方面发挥了重要作用。应用实践表明, 钢管混凝土劲性骨架柱施工复杂、混凝土用量大, 钢管混凝土格构柱缀杆剪切变形对柱的稳定系数有较大不利影响。为此, 在两者的基础上提出钢管混凝土复合柱和混合柱。钢管混凝土复合柱以钢筋混凝土板代替传统钢管混凝土格构柱中的钢管缀杆, 在高墩中, 底部采用钢管混凝土复合柱, 上部采用钢管混凝土格构柱, 形成钢管混凝土混合柱^[1-2]。国内外学者对钢管混凝土混合柱静动力性能、稳定性进行了相关理论分析和试验研究^[3-13]。由于钢管混凝土混合柱高墩构造较复杂, 受环境变化、原材料差异、施工工艺影响, 实际结构和设计相比必然存在各种形式的初始缺陷。目前涉及初始缺陷对结构性能影响的研究大多局限于空间网架结构方面^[14-17], 有关初始缺陷对钢管混凝土混合柱承载力影响的研究未见报道, CECS 28:90《钢管混凝土结构设计与施工规程》^[18] 对这类结构初始缺陷的要求也不明确。

西部山区桥梁钢管混凝土混合柱桥墩高度往往超过百米, 施工中必然存在的初始缺陷如何影响其承载力, 初始缺陷最大值如何取值, 这些问题直接影响其使用安全及质量。揭示初始缺陷对钢管混凝土混合柱承载力的影响, 对完善相关规范, 进而指导设计、施工, 确保工程质量、运营安全具有重要理论意义和实用价值。

1 理论方法

1.1 一致缺陷模态法

屈曲模态是临界点处结构位移趋势, 一致缺陷模态法用最低阶屈曲模态模拟结构最不利几何缺陷分布, 并认为最低阶屈曲模态所对应临界荷载就是该结构的最小临界荷载^[11]。

运用一致缺陷模态法考虑结构初始几何缺陷对结构进行非线性有限元分析时, 首先对结构进行特征屈曲分析, 预测一个理想线性结构的理论屈服强度, 为非线性屈曲分析提供可参考荷载上限值和屈曲模态。控制方程为:

$$[K_L] + \lambda_i [K_G] \cdot \{\delta\} = 0 \quad (1)$$

式中: $[K_L]$ 为结构总体弹性刚度矩阵, 即小位移的线性刚度矩阵; λ_i 为屈曲特征值或屈曲荷载因子; $[K_G]$ 为结构总体几何刚度矩阵, 也称初始应力刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为特征值位移向量。

一致缺陷模态法通过一次非线性计算就能求出结构最小临界荷载值, 计算量少是其显著优点。但在分析中直接应用一致缺陷模态法存在理论上的不足和操作上的困难, 须采用随机缺陷模态法进行验证。

1.2 随机缺陷模态法

随机缺陷模态法认为结构的初始缺陷是随机的, 结构的初始缺陷受管理水平、材料质量、工人熟练程度等因素的影响, 其大小和分布形式无法预知。然而从概率统计角度来看, 无论结构缺陷分布如何复杂, 节点的安装误差应近似服从正态分布。基本假定如下^[19]:

(1) 由于影响实际结构初始安装误差的因素非常多, 且广义节点内各节点间的缺陷非常小, 假定广义节点内各节点缺陷为零, 节点位置偏差相互独立。

(2) 计算中以 3 倍均方差作为节点误差最大值。假定实际工程中每个节点在坐标轴 3 个方向存在坐标偏差, 最大允许偏差为 $+R$, 则每个节点的误差随机变量为 $RX/3$, 其中随机变量 X 服从标准正态分布, 误差随机变量的取值范围为 $[-R, +R]$ 。将结构所有节点的位置偏差作为一个多维独立的随机变量。

2 计算模型

2.1 工程概况

干海子特大桥是国家交通干线京昆(北京—昆明)高速公路控制性工程, 该桥钢管混凝土混合柱桥墩最大高度为 110 m, 采用 4 根 $\phi 813 \text{ mm} \times (12 \sim 16) \text{ mm}$ 钢管, 内灌 C50 混凝土, 纵向采用平行单肢钢管连接, 横向采用平行钢管桁架连接。在桥墩底部 30 m 高度范围内, 纵桥向采用厚 40 cm 钢筋混凝土板连接各钢管混凝土柱肢, 横桥向增加倒 V 形钢管撑进行连接, 同时在墩顶增设钢管斜撑托架与主梁连接(见图 1)。本文分析对象为干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合柱桥墩。

2.2 桥墩的简化模型

本文研究钢管混凝土混合柱桥墩轴向受压极限承载力, 根据桥墩的受力形式, 把桥墩近似简化为一端固定一端自由, 受轴向力 N (恒载、汽车荷载等)、

水平力 P (车辆制动力、温度应力等)、自质量 S 作用的悬臂柱(见图 2)。

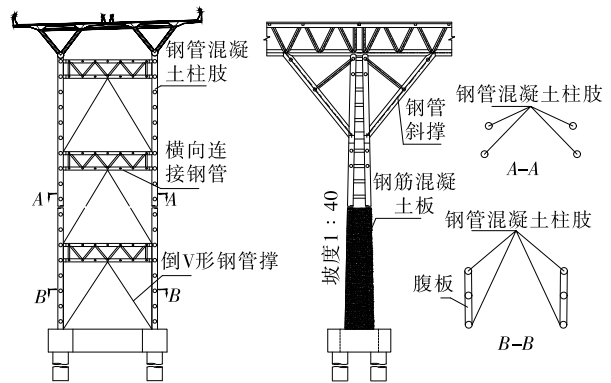


图 1 干海子特大桥钢管混凝土混合柱高墩的结构

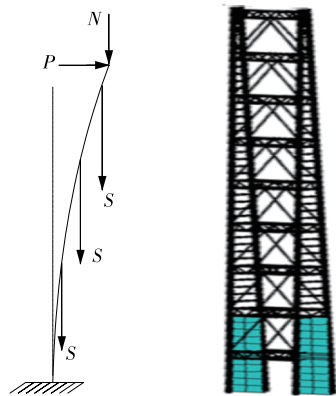


图 2 桥墩简化模型与有限元模型

2.3 材料本构关系

考虑钢管混凝土中钢管对核心混凝土的套箍作用, 核心混凝土处于三向受压状态, 其本构关系采用文献[20]中约束混凝土本构模型, 核心混凝土应力 σ_c —应变 ϵ 关系方程见式(2), 钢管混凝土本构关系曲线见图 3。

$$\begin{cases} \sigma_c = 0.027\epsilon - 4.09 \times 10^{-6} \epsilon^2; & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \sigma_c = -0.85 + 4.35\epsilon^{0.284}; & \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_0 = 2748.4 \times 10^{-3}$ 。

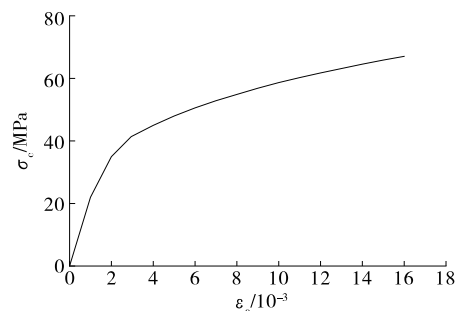


图 3 约束混凝土本构关系

假定钢材为理想弹塑性材料,其弹性属性采用各向同性材料,塑性属性采用双线性随动强化模型BKIN。双线性随动强化模型采用 Mises 屈服准则和随动强化准则,以两条直线段描述材料的应力—应变关系,通过弹性模量、屈服应力和切线模量定义应力—应变关系曲线^[21]。

3 基于一致缺陷模态法的缺陷分析

CECS 28:90 规定钢管混凝土中钢管组装结构纵向弯曲允许偏差为杆件长度的 $1/1\ 000$ ^[18]; BS EN 10210—2:2006 规定钢结构纵向弯曲允许偏差为杆件长度的 $1/500$ ^[22]; BS EN 1993—1—1 规定热轧钢的纵向弯曲允许偏差为杆件长度的 $1/300$ ^[23]。根据上述规范确定初始缺陷幅值,为充分考虑结构对初始几何缺陷的敏感性,缺陷幅值按墩高 L 的 $1/3\ 000$ 、 $1/2\ 000$ 、 $1/1\ 000$ 、 $1/500$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 考虑。初始缺陷影响下墩顶轴向荷载与竖向位移的关系见图 4,极限承载力的变化见图 5,初始缺陷对极限承载力的影响见表 1。

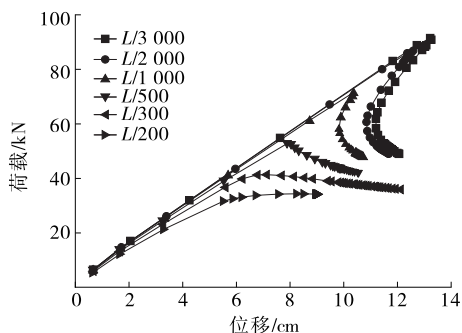


图4 不同初始缺陷影响下钢管混凝土混合柱的轴向荷载—竖向位移关系

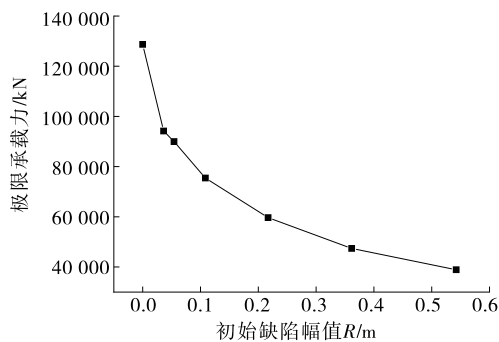


图5 极限荷载随初始缺陷的变化

从图 5、表 1 可以看出:随着初始缺陷的增大,钢管混凝土混合柱桥墩的极限承载力下降。按照 CECS 28:90 规定的 $L/1\ 000$ 施加初始缺陷,极限承载力减小 41.46%;按 BS EN 10210—2:2006 规定施

表 1 初始缺陷对钢管混凝土混合柱桥墩极限承载力的影响

初始缺陷幅值 R	极限承载力/kN	减小比例/%
0	12.88×10^4	—
$L/3\ 000$	9.42×10^4	26.86
$L/2\ 000$	9.10×10^4	29.35
$L/1\ 000$	7.54×10^4	41.46
$L/500$	5.97×10^4	53.65
$L/300$	4.73×10^4	63.28
$L/200$	3.89×10^4	69.80

注:减小比例为相对于缺陷值为零的理想结构极限承载力的下降幅度。下同。

加 $L/500$ 初始缺陷,极限承载力减小 53.65%;按 BS EN 1993—1—1 规定施加 $L/300$ 初始缺陷,极限承载力减小 63.28%。初始缺陷对钢管混凝土混合柱桥墩极限承载力的影响较大。在钢管混凝土混合柱高墩设计中,初始缺陷按现有规范取值将造成钢管混凝土混合柱桥墩的极限承载力显著降低。

4 基于改进随机缺陷模态法的缺陷分析

4.1 随机缺陷模态法的改进

传统随机缺陷模态法在计算模型所有节点上随机产生节点偏差,以此模拟安装过程中的误差^[8]。钢管混凝土混合柱施工中,先制作一定长度钢管节段,然后将各节段钢管焊接成整体结构。节段钢管采用工厂预制,质量有保证,且后期混凝土灌满整个钢管,将抑制局部屈曲发生,节段钢管本身线形缺陷对结构稳定影响不大。整体结构的现场拼装施工质量离散性较大,会引入整体初始挠曲。有限元计算过程中,将结构离散为若干直梁单元,单元之间通过节点连接。若按照传统随机缺陷模态法对钢管混凝土混合柱施加初始缺陷,可能使钢管节段构件出现锯齿状分布缺陷,与实际不符。为此,根据钢管混凝土混合柱的特点,对传统随机缺陷模态法进行改进,使其更适用于本文研究结构。改进方法如下:1) 沿柱肢在节段拼装处节点设置几何缺陷 a_{ij} ($i=1,2,3,4,\dots,10$,表示沿墩高在 10 m、20 m、30 m、40 m、 \dots 、100 m 处施加初始缺陷; $j=X,Y,Z$,顺桥向设为 X 方向,横桥向设为 Y 方向,墩高方向设为 Z 方向),按线性插值方法得到柱肢杆件、纵向连接杆件、横向连接杆件等节点在 3 个坐标方向的缺陷值。2) 为考虑各类随机输入参数对极限承载力的灵敏

度,将随机输入参数灵敏度分别相加,得出各类随机输入参数对结构极限承载力的灵敏度值 b_{ij} 。由于灵敏度的正负号只代表输入变量对输出变量变化的响应,取灵敏度值的绝对值进行累加,计算公式为:

$$B = \sum_1^N |b_{ij}|$$

(3)

假设在坐标 3 个方向节点偏差最大值均相同,各方向偏差相互独立,且都是服从正态分布的随机变量,并对产生的随机数进行截尾处理。同样按照

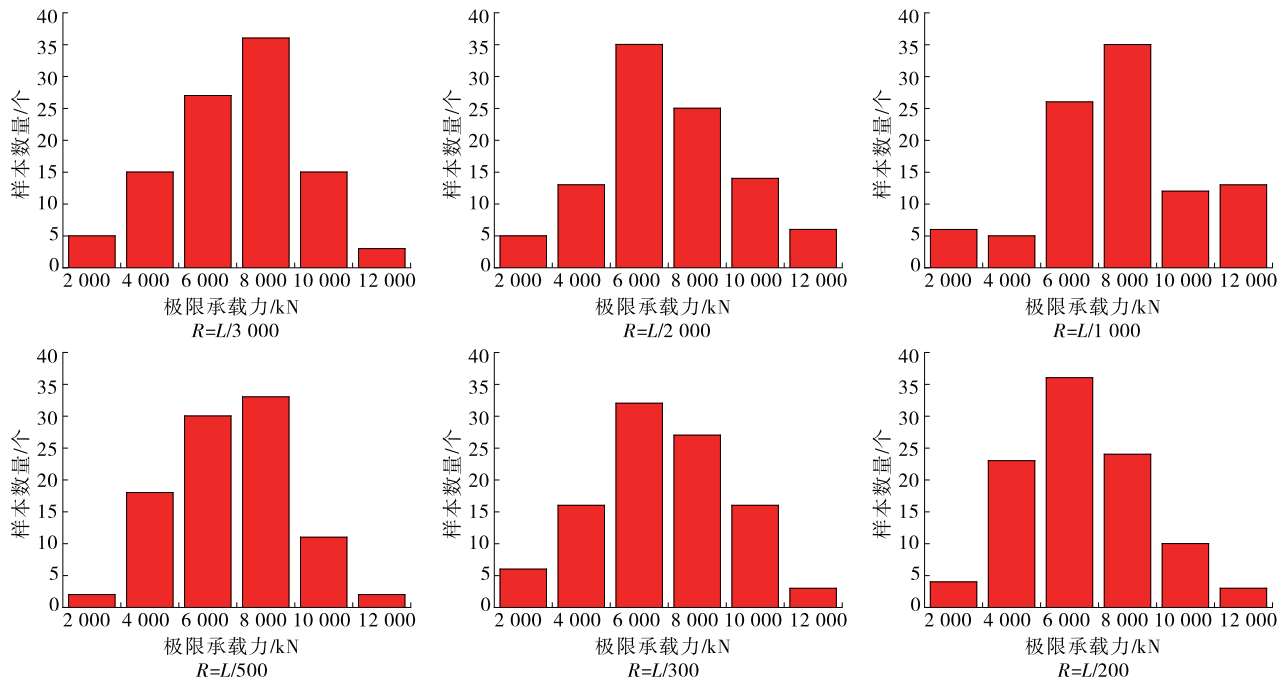


图 6 施加不同初始缺陷时结构的极限承载力分布

将以上 6 种情况下极限承载力的均值 μ 与方差 σ 代入式(4),得到钢管混凝土混合柱桥墩具有 95%保证率的极限承载力 N_{cr} (见表 2)。由表 2 可知:随机缺陷对钢管混凝土混合柱桥墩的承载能力有非常明显的影响。

$$N_{cr} = \mu - 1.645\sigma$$

(4)

式中: $\mu = \sum_{i=1}^{100} \mu_i / 100$; $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{100} (\mu_i - \mu)^2 / 99}$ 。

按改进随机缺陷模态法研究钢管混凝土混合柱桥墩结构承载力对随机缺陷的敏感性,对墩高的灵敏度见图 7,对不同方向缺陷的灵敏度见图 8。由图 7、图 8 可知:沿墩高方向缺陷对钢管混凝土混合柱桥墩极限承载力的灵敏度变化较大,呈现下部结构大于上部结构、两端大于中间的规律;顺桥向缺陷对钢管混凝土混合柱桥墩极限承载力的灵敏度大于横桥向缺陷,墩高方向缺陷的灵敏度最小。

$L/3\ 000$ 、 $L/2\ 000$ 、 $L/1\ 000$ 、 $L/500$ 、 $L/300$ 、 $L/200$ 考虑缺陷幅值,基于 ANSYS-PDS 概率设计模块生成随机缺陷模型。

4.2 随机缺陷分析结果

按改进随机缺陷模态法对结构施加不同初始缺陷,得到结构极限承载力分布(见图 6)。由图 6 可知:结构的极限承载力近似服从正态分布;在缺陷最大值为不同取值的情况下,结构极限承载力均值随着缺陷最大值的增大而减小。

表 2 不同随机缺陷下钢管混凝土混合柱桥墩的极限承载力

初始缺陷幅值 R	极限承载力 N_{cr} /kN	减小比例/%
0	128 800	—
L/3 000	81 500	36.72
L/2 000	81 100	37.03
L/1 000	78 600	38.98
L/500	77 100	40.14
L/300	66 100	48.68
L/200	53 200	58.70

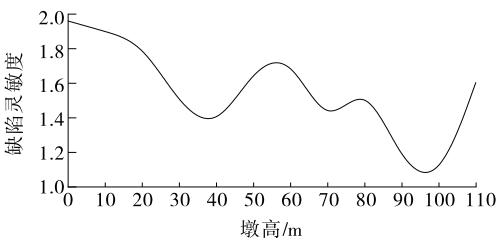


图 7 钢管混凝土混合柱桥墩结构承载力对沿墩高方向缺陷的灵敏度

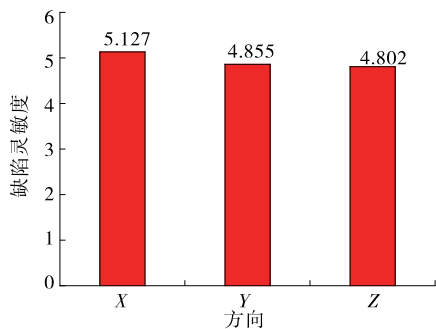


图 8 钢管混凝土混合柱桥墩结构承载力对不同方向缺陷的灵敏度

4.3 初始缺陷限值合理取值的建议

文献[24]的研究表明,初始缺陷可使结构的临界荷载下降 35%,结构稳定性分析中须考虑缺陷的影响。对于干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合柱桥墩,缺陷值取 $L/2\ 000$ 时,按一致缺陷模态法分析得到的极限承载力下降 29.35%,按改进随机缺陷模态法分析得到的极限承载力下降 37.03%,两者偏

差不大;缺陷取值较大($L/1\ 000$ 、 $L/500$ 、 $L/300$ 、 $L/200$)时,两种分析方法得到的极限承载力均偏于不安全,且两者偏差较大。因此,从经济性、安全性等方面综合考虑,建议其初始缺陷限值取墩高 L 的 $1/2\ 000$ 。

5 材料缺陷灵敏度分析

将柱肢杆件外径、纵向连接杆件外径、横向连接杆件外径、柱肢杆件钢管壁厚、纵向连接杆件钢管壁厚、横向连接杆件钢管壁厚、钢材弹性模量、核心混凝土弹性模量、腹板混凝土弹性模量、钢材密度、核心混凝土密度、腹板混凝土密度作为材料缺陷的随机输入参数。对于结构的安装几何偏差,运用一致缺陷模态法,将一致缺陷的最大值作为随机输入参数,结构的极限承载力作为输出变量,采用蒙特卡罗法进行随机抽样模拟分析。随机缺陷分布规律见表 3。

表 3 随机缺陷的分布规律

参数类型	参数名称	分布规律	均值	变异系数
钢管外径	柱肢杆件外径	正态分布	406.5 mm	0.02
	纵向连接杆件外径		228.5 mm	
	横向连接杆件外径		203.0 mm	
钢管壁厚	柱肢杆件钢管壁厚	正态分布	16 mm	0.01
	纵向连接杆件钢管壁厚		12 mm	
	横向连接杆件钢管壁厚		10 mm	
弹性模量	钢材弹性模量	正态分布	206 GPa	0.05
	核心混凝土弹性模量		345 GPa	
	腹板混凝土弹性模量		30 GPa	
密度	钢材密度	正态分布	8 010.2 kg/m ³	0.05
	核心混凝土密度		2 551.0 kg/m ³	
	腹板混凝土密度		2 551.0 kg/m ³	
几何偏差	一致缺陷的最大值	正态分布	$L/1\ 000$	0.05

5.1 输出变量概率分布

对随机输入变量进行 400 次抽样,得到随机输出变量概率分布(见图 9)、累积分布函数(见图 10)、输出变量特征值(见表 4)。由于输入变量都服从正态分布,当抽样次数足够大时,输出变量也应该满足正态分布。

5.2 敏感性分析

输入参数与输出变量的敏感性分布见图 11。将输出参数的影响水平在 2.5% 以下的输入参数归为影响不大的因素,影响水平在 2.5% 以上的输入参数归为有显著影响的因素。输入参数与输出变量的关系通过散点图显示,图 12 为对输出变量有显著影

响的输入参数与输出变量的相关性散点图,表 5 为输入参数对输出变量的线性相关系数。

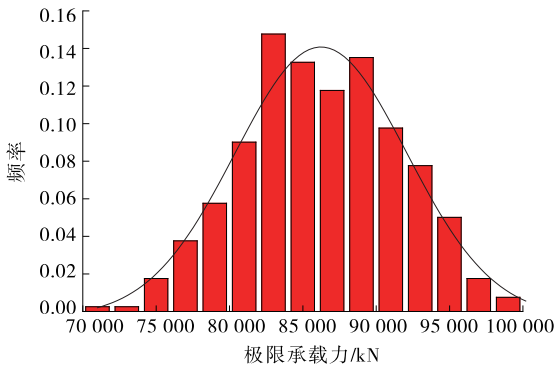


图 9 结构的极限承载力分布直方图

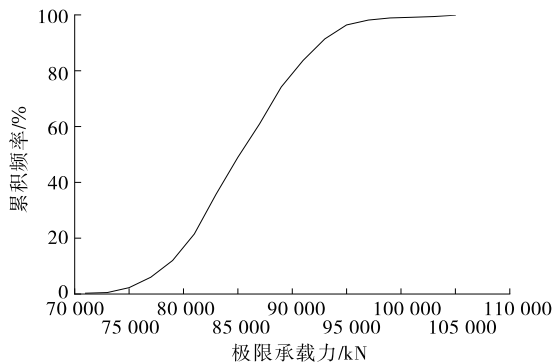


图 10 结构的极限承载力累积分布函数

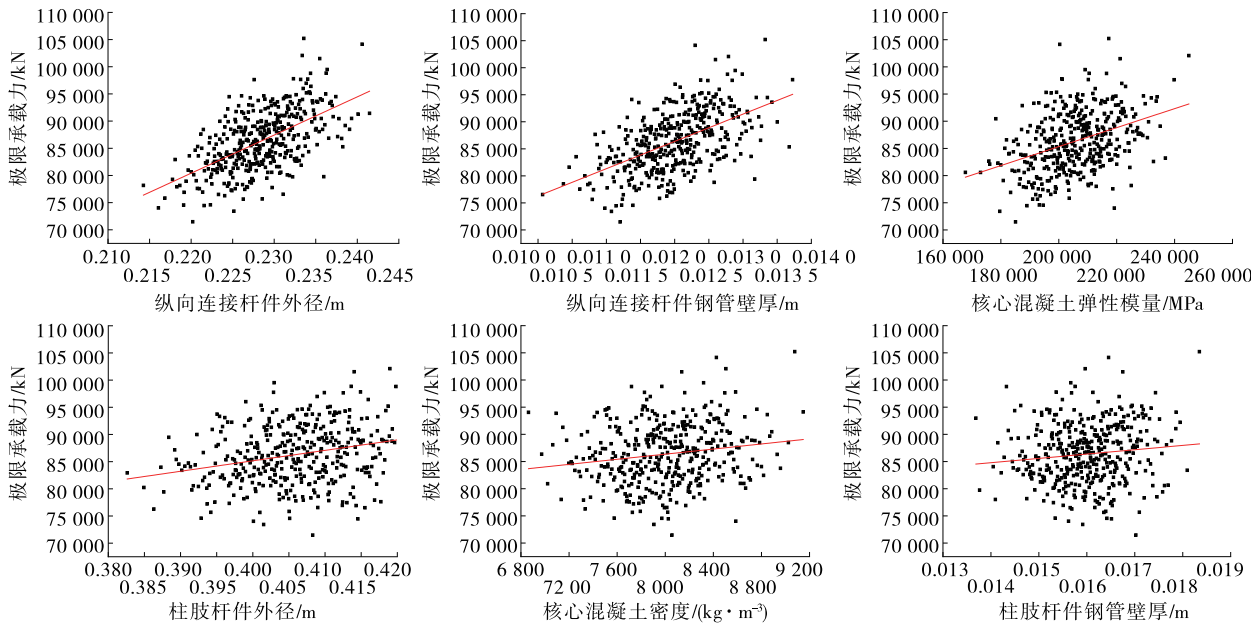


图 12 输入参数与结构极限承载力的相关性散点图

根据各输入参数对输出变量(极限承载力)的灵敏度分析结果,即使按照 $L/1\,000$ 对干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合柱桥墩施加初始几何缺陷,

表 4 输出变量特征值			
项目	取值	项目	取值
均值/kN	0.824×10^5	峰度	0.332×10^{-1}
标准差/kN	0.552×10^4	最小值/kN	0.715×10^5
斜偏度	0.213	最大值/kN	0.105×10^6

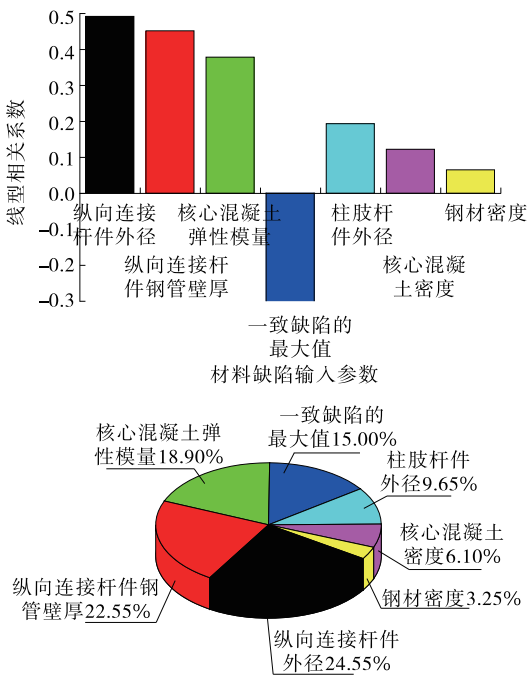


图 11 材料缺陷的敏感性分布示意图

材料缺陷依然是影响其极限承载能力的最主要因素;材料缺陷对极限承载力的敏感性从大到小依次为纵向连接杆件外径、纵向连接杆件钢管壁厚、核心

混凝土弹性模量、柱肢杆件外径、核心混凝土密度、钢材密度、柱肢杆件钢管壁厚。

表5 输入参数对输出变量的线性相关系数

参数类型	参数名称	与极限承载力的相关系数
钢管外径	柱肢杆件外径	0.261
	纵向连接杆件外径	0.566
	横向连接杆件外径	0.040
钢管壁厚	柱肢杆件钢管壁厚	0.118
	纵向连接杆件钢管壁厚	0.553
	横向连接杆件钢管壁厚	0.019
弹性模量	Q235 钢材弹性模量	0.025
	核心混凝土 C50 弹性模量	0.382
	腹板混凝土 C30 弹性模量	0.092
	Q235 钢材密度	0.125
密度	核心混凝土 C50 密度	0.165
	腹板混凝土 C30 密度	-0.055
几何偏差	一致缺陷的最大值	-0.364

6 结论

(1) 钢管混凝土混合柱高墩属于缺陷敏感性结构。对于干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合柱桥墩,初始缺陷限值按现有规范取值将显著降低其承载能力。与一致缺陷模态法相比,初始缺陷取值较小($L/3\ 000$ 、 $L/2\ 000$)时,按改进随机缺陷模态法分析得到的极限承载力偏小,两者偏差较大;缺陷取值较大($L/1\ 000$ 、 $L/500$ 、 $L/300$ 、 $L/200$)时,按随机缺陷模态法分析得到的极限承载力偏大,且两者偏差较大。

(2) 沿墩高方向缺陷对结构极限承载力的灵敏度变化较大,呈现下部结构大于上部结构、两端大于中间的规律;结构极限承载力对顺桥向缺陷最敏感。

(3) 钢管混凝土混合柱高墩材料缺陷对结构极限承载力的敏感性从大到小依次为纵向连接杆件外径、纵向连接杆件钢管壁厚、核心混凝土弹性模量、柱肢杆件外径、核心混凝土密度、钢材密度、柱肢杆件钢管壁厚;材料缺陷是影响结构极限承载力的重要因素,即使按照 $L/1\ 000$ 对干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合柱桥墩结构施加初始几何缺陷,材料缺陷依然是影响其极限承载力的最主要因素。

(4) 对于干海子特大桥 110 m 钢管混凝土混合

柱桥墩结构,根据以往研究成果及本文分析结论,初始缺陷限值建议取墩高 L 的 $1/2\ 000$ 。施工过程中应特别控制纵向连接杆件尺寸、核心混凝土质量、钢管柱肢尺寸等,确保其承载能力。

参考文献:

- [1] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等.我国钢—混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J].建筑结构学报,2013,34(增刊1):1—10.
- [2] 刘明虎.桥梁钢—混凝土结合技术工程实践与展望[J].桥梁建设,2022,52(1):18—25.
- [3] 蒋丽忠,周旺保,伍震宇,等.四肢钢管混凝土格构柱极限承载力的试验研究与理论分析[J].土木工程学报,2010,43(9):55—62.
- [4] 聂建国,廖彦波.四肢钢管混凝土格构柱轴压受力试验[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(12):1919—1924.
- [5] DUAN L,RENO M,UANG C M.Effect of compound buckling on compression strength of built-up members[J].Engineering Journal,2002,39(1):30—37.
- [6] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春.钢管混凝土组合桁梁—格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J].工程力学,2014,31(9):89—96.
- [7] LI N,LU Y Y,LI S,et al.Slenderness effects on concrete-filled steel tube columns confined with CFRP[J].Journal of Constructional Steel Research,2018,143:110—118.
- [8] 赵晖,张颖,王蕊.内钢板中空方形钢管混凝土叠合柱轴压力学性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(6):53—62+141.
- [9] EKMEKYAPAR T,AL-ELIWI B J.Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns and design specifications[J].Thin-Walled Structures,2016,105:220—230.
- [10] LAI M H,SONG W,OU X L,et al.A path dependent stress-strain model for concrete-filled-steel-tube column[J].Engineering Structures,2020,211:110312.
- [11] 张艳霞,刘梓洋,徐斌,等.矩形钢管混凝土柱—混凝土梁穿筋节点力学性能试验研究[J].工程力学,2022,39(4):138—150.
- [12] 刘祖强,任甬优,薛建阳.高强型钢超高性能混凝土梁受弯性能试验研究及有限元分析[J].工程力学,2023,40(4):102—115.
- [13] 冯帅克,郭正兴,倪路瑶,等.钢管混凝土柱—混合梁节点抗震性能试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(8):1464—1472.

(下转第 143 页)

最优顶升方案。

4 结论

本文以钢桁梁桥为例,模拟计算不同顶升方案下钢桁梁桥的受力状况。方案一采用从悬臂端头向主塔支座方向依次顶升的方法,顶升过程中产生的最大应力为 -112.9 MPa ,出现在顶升 B 、 I 时3号点;最大反力为 $3\ 885\text{ kN}$,出现在顶升 C 、 H 时节点 H 。方案二采用从主塔支座向悬臂端头方向依次顶升的方法,顶升过程中产生的最大应力为 96.7 MPa ,出现在顶升 A 、 J 时2号点;最大反力为 $6\ 756\text{ kN}$,出现在顶升 E 、 F 时节点 E 。方案三采用先从悬臂中间向悬臂端头方向顶升,再向主塔支座方向顶升的方法,顶升过程中产生的最大应力为 90.3 MPa ,出现在顶升 A 、 J 时3号点;最大反力为 $6\ 078\text{ kN}$,出现在顶升 C 、 H 时节点 C 。采用方案三顶升时,整体应力比方案一、方案二下的小,且最大节点反力满足施工要求,方案三为最优顶升方案。

参考文献:

- [1] 颜海,陈亮,邵长宇,等.公铁两用钢桁架桥原位拓宽改建设计关键技术[J].桥梁建设,2019,49(3):91-96.
- [2] 李清鑫,刘小燕,张华,等.裂缝宽度的提取及在桥梁承载力评估中的应用研究[J].长沙理工大学学报(自然

科学版),2020,17(1):60-64.

- [3] 杜鑫,闫佳磊,陈佩,等.后增钢桁架体外预应力加固新方法应用研究[J].河南科技,2018(29):103-106.
- [4] 刘振华,张玲君,王涛,等.某钢桁架桥加固改造技术研究[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会,中国建筑科学研究院.第十五届空间结构学术会议论文集.中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会,2014:699-703.
- [5] 肖勇刚,熊晨.组合加固法在钢筋混凝土T型梁桥中的应用[J].交通科学与工程,2021,37(2):36-40.
- [6] 张建仁,张智伟,彭晖,等.表层嵌贴碳纤维板混凝土试件疲劳性能研究[J].交通科学与工程,2020,36(4):1-9.
- [7] 石华军.城市高架桥梁体顶升及桥墩更换技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [8] 刘二柱.通车条件下桥梁支座更换[J].施工技术,2015,44(增刊2):234-236.
- [9] 袁冠锋.桥梁上部结构整体顶升风险评价及防护措施研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.
- [10] 肖宏宇,刘薇.桥梁整体同步顶升及监测技术[J].公路与汽运,2021(5):121-124+132.
- [11] 吴云涛,顾赛辉.混凝土连续箱梁高架桥整体顶升抬高改造设计研究[J].公路与汽运,2023(3):132-135+140.

收稿日期:2021-10-19

(上接第138页)

- [14] 蔡健,贺盛,姜正荣,等.单层网壳结构稳定分析中初始几何缺陷最大值的研究[J].建筑结构学报,2015,36(6):86-92.
- [15] MOST T, BUCHER C, SCHORLING Y. Dynamic stability analysis of non-linear structures with geometrical imperfections under random loading [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276 (1-2): 381-400.
- [16] 郭佳民,董石麟,袁行飞.随机缺陷模态法在弦支穹顶稳定性计算中的应用[J].工程力学,2011,28(11):178-183.
- [17] 蔡建国,涂展麒,冯健,等.初始缺陷对三向张弦梁结构整体稳定性影响研究[J].工程力学,2012,29(8):220-227.
- [18] 哈尔滨建筑工程学院,中国建筑科学研究院.钢管混凝土结构设计施工规程:CECS 28:90[S].北京:中国计划出版社,1990.
- [19] 沈世钊,陈昕.网壳结构稳定性[M].北京:科学出版

社,1999.

- [20] 钟善桐.钢管混凝土统一理论:研究与应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [21] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [22] British Standards Institution. Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels Part2: Tolerances, dirnensions and sectional properties: BS EN 10210-2:2006[S].British Standards Institution, 2006.
- [23] British Standards Institution. Eurocode3: Design of steel structures part 1-1:General rules and rules for buildings:BS EN 1993-1-1[S].British Standards Institution,2005.
- [24] MORRIS N F. Effect of imperfection on lattice shells[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991,117(6):1786-1814.

收稿日期:2022-09-18