

斜陡横坡桥梁桩柱式下部结构设计关键点分析

杨 玲

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 山区桥梁下部结构设计往往面临着陡坡、斜坡、倾斜岩面较多,横桥向桥墩高差较大等难点,为避免承台大挖方,桩柱式下部结构成了很多山区桥梁下部结构的首选。南充市南海大道桥梁是一座典型的山区斜陡横坡条件下的桥梁,下部结构采用盖梁桩柱式框架结构。为了研究斜陡横坡对该桥下部结构设计的影响,通过工程经验结合理论分析研究了斜坡地形与倾斜岩面对桥梁桩基承载力计算、桩长及嵌岩深度的影响,通过有限元计算分析研究了斜陡横坡引起的横桥向高低墩对盖梁、墩柱内力分配的影响。最终通过设置桩基承载力起算点、桩基嵌岩深度起算点及合理配筋等方式,妥善解决了斜陡横坡对该桥下部结构设计的影响,可为同类山区桥梁下部结构设计提供有效参考。

关键词: 斜陡横坡;桩柱式下部结构;桩基承载力;嵌岩深度;高低墩

中图分类号: U443.2;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0047-05

Analysis on Key Points in Design of Pile-column Substructure of Bridges on Steep Cross Slopes

YANG Ling

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The design of bridge substructures in mountainous areas often encounters difficulties such as a large number of steep slopes, ramps and inclined rock faces, as well as a significant height difference between the piers in the transverse direction. To avoid the extensive excavation of base slabs, the pile-column substructure has become the preferred choice for many bridges in mountainous areas. The Nanhai Avenue Bridge in Nanchong City is a typical bridge under steep cross slope conditions, and its substructure is a bent-cap pile-column frame structure. To study the impact of steep cross slopes on the substructure design of this bridge, the influence of sloped terrain and inclined rock surfaces on the calculation of pile foundation bearing capacity, pile length, and rock-socketed depth is studied through engineering experience combined with theoretical analysis. The effect of transverse height differences between piers caused by steep cross slopes on the internal force distribution of bent caps and piers is analyzed using finite element computational methods. Finally, through setting the starting point for the bearing capacity of the pile foundation, the starting point for the rock-socketed depth of pile foundation, and the reasonable reinforcement, the influence of the steep cross slope on the substructure design of the bridge has been properly addressed, which provides a valuable reference for the substructure design of similar mountainous bridges.

Keywords: steep cross slope; pile-column substructure; bearing capacity of pile foundation; rock-socketed depth; variable-height piers

0 引言

山区桥梁建设往往面临着横断面高差较大的斜坡、陡坡地形以及倾斜岩面等难点,为避免承台大挖方,桩柱式下部设计成了很多山区桥梁下部结构的首选^[1]。斜坡、陡坡、倾斜岩面的特点给桥梁下部

结构设计带来了相对应的重点、难点。首先是斜坡地形下,桩基斜坡下侧土体缺失,桩侧摩阻力无法完全发挥,桥梁桩基设计计算不能满足平坡地形条件下的土体半无限体的计算假设^[2]。其次,倾斜岩面下桩基的锚固长度需要考虑临空面的影响^[3]。最后,横桥向地形高差大,两侧墩柱高差大,刚度差距大,影响盖梁墩柱的框架内力分配^[4]。赵明华、宁夏元、杨明辉、龚先兵等^[5-9]通过有限差分法结合室内模型试验与现场试验分析了高陡横坡段双桩基础内力及位移响应。张国平等^[10]采用 MIDAS GTS 对高

收稿日期: 2025-05-16

基金项目: 上海市交通委科研项目(JT2024-KY-001)

作者简介: 杨玲(1990—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

陡斜坡桥梁桩基的内力和变形进行建模分析,验证了幂级数法解答桩基内力和位移的合理性。蒋国龙、余波等^[11-12]研究了地震作用下高低墩力学行为。

本文在以上研究成果的基础上,针对工程设计领域对斜陡横坡桥梁桩柱式下部结构设计进行进一步研究。

1 工程概况

南充市南海大道桥梁工程属于典型的山区桥梁,上部结构采用30 m跨径标准小箱梁,结构简支,桥面连续;下部结构采用盖梁桩柱下部框架形式,如图1所示,盖梁长18.6 m,立柱间距10 m,横断面地面高差0~10 m,岩面最大倾角接近60°。

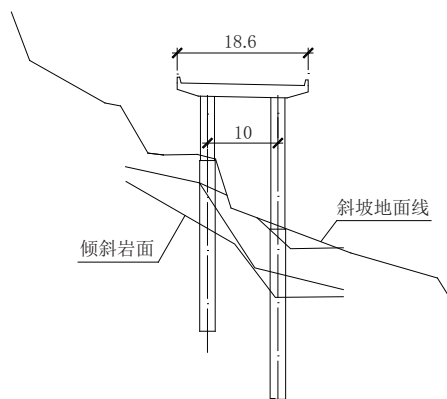


图1 南海大道桥梁下部结构典型横断面(单位:m)

本文以南充市南海大道桥梁工程下部结构设计为背景,研究上述山区斜坡、陡横坡条件下桥梁下部结构设计经常面临的几个关键点。

2 斜坡、陡横坡对桩基承载力计算的影响

与常规平坡上的桩基相比,斜坡上的桩基斜坡下侧土体缺失,桩顶以下一段范围内桩侧摩阻力无法完全发挥。随着桩基深度的增加,桩周土体越来越趋近半无限体,侧阻力得到充分发挥。因此,在本次南充市南海大道桥梁工程桩基设计计算时,采用“桩基承载力起算点”这一概念来解决斜坡对单桩承载力的影响问题,具体操作为控制起算点与斜坡面的水平距离 L ,如图2所示。参考《贵州山区复杂地质条件公路桥梁桩基设计指导书》,本次设计中 L 取值为 $\max\{5d, 8\text{ m}\}$, d 为桩基直径。

3 斜坡、陡横坡与倾斜岩面对桩长的影响

斜坡与倾斜岩面上的桩基,桩长与桩基嵌岩深度的确定不仅取决于桥梁上部结构传给桩基的反力大小,还要考虑桩基所在斜坡与倾斜岩面的稳定性

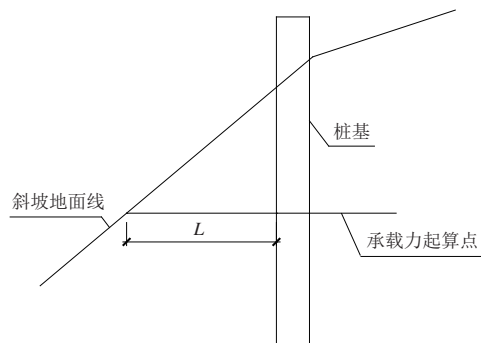


图2 斜坡对桩基承载力计算的影响

影响。嵌岩桩锚固侧壁岩石承受桩基弯矩和水平力^[13],为保证锚固侧壁岩石抗力的发挥,需控制稳定岩面与桩身外侧的水平距离 L_1 ,如图3所示。同时,临空面桩端距斜坡地面线的水平距离 L_2 必须保证一定的安全襟边。参考《贵州山区复杂地质条件公路桥梁桩基设计指导书》,中风化的硬质岩 L_1 取 $1.5d \sim 2d$,且不小于3.0 m;中风化软质岩 L_1 取 $3d$,且不小于5.0 m。对于斜坡地段,桩底处桩基边缘距斜坡地面线的距离 L_2 不得小于30 m;对于陡崖地段,桩底处桩基边缘距陡崖稳定边坡的距离 L_2 不得小于20 m。本次南充市南海大道桥梁工程桩长设计时, L_1 取 $\max\{3d, 5\text{ m}\}$, L_2 取30 m, d 为桩基直径。

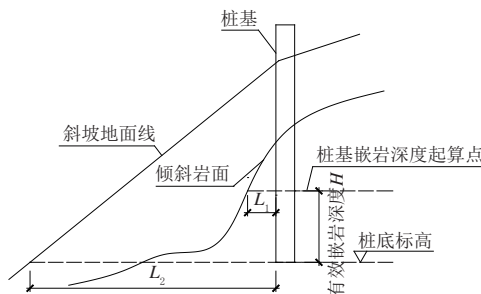


图3 斜坡、陡横坡与倾斜岩面对桩长的影响

4 横桥向高低墩对下部结构受力的影响

4.1 横桥向墩高参数设置

盖梁桩柱组成的下部框架结构,在斜坡、陡横坡的地形条件下,两侧墩柱高差大,刚度差距大,影响盖梁墩柱的框架内力分配。南充市南海大道桥梁工程盖梁长18.6 m,矩形截面,宽2.2 m,高1.8 m,立柱间距10 m,圆形截面,直径1.8 m,横断面地面高差0~10 m。为研究立柱高差对框架结构受力的影响,设计三种高差(0、5、10 m)分别建立有限元模型:模型4-①Pm-L墩高5 m,Pm-R墩高5 m,如图4所示;模型4-②Pm-L墩高5 m,Pm-R墩高10 m,如图5所示;模型4-③Pm-L墩高5 m,Pm-R墩高15 m,如图6所示。对活载、温度荷载、沉降荷载作用下盖梁、墩柱

内力进行比较。

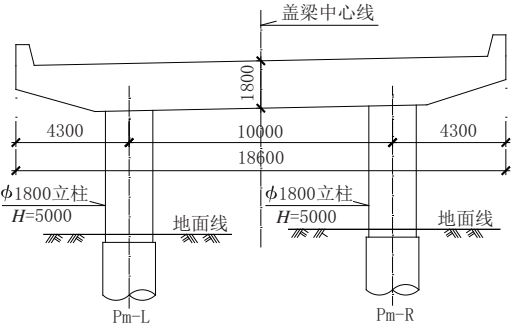


图4 模型4-①盖梁立柱框架构造(单位:mm)

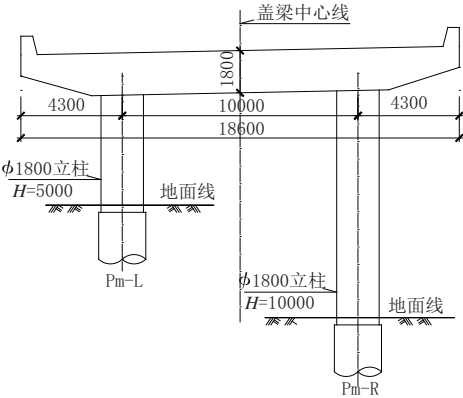


图5 模型4-②盖梁立柱框架构造(单位:mm)

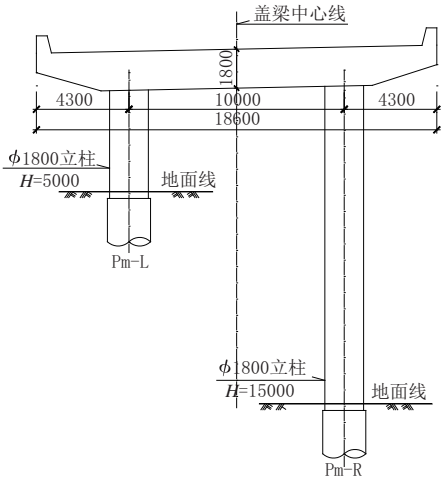


图6 模型4-③盖梁立柱框架构造(单位:mm)

4.2 活载效应分析

南充市南海大道桥梁工程跨径 30 m,单幅桥宽 19.5 m,汽车为公路 I 级,按 4 车道计算比较活载效应。采用 MIDAS Civil 2024 计算盖梁立柱框架结构内力,结果见表 1、表 2。

表 1 盖梁内力

模型 编号	弯矩/(kN·m)			剪力/kN	
	Pm-L 墩顶	跨中	Pm-R 墩顶	Pm-L 墩顶	Pm-R 墩顶
4-①	-1 874	1 779	-1 892	-1 145	1 133
4-②	-18 75	1 867	-1 866	-1 144	1 135
4-③	-1 870	1 955	-1 830	-1 144	1 133

当 Pm-L 立柱高度保持不变,Pm-R 立柱高度逐渐变大,盖梁立柱框架结构中立柱高差变大,活载作用下,Pm-L 墩顶盖梁负弯矩最大值基本不变,模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分别减小了 0%、0.21%;Pm-R 墩顶盖梁负弯矩数值下降,模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分别降低了 1.37%、3.28%;盖梁跨中正弯矩最大值增加较为明显,模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分别增加了 4.91%、9.64%。活载下模型 4-①~4-③,盖梁剪力基本不变。

表 2 立柱内力

模型 编号	弯矩/(kN·m)		剪力/kN	
	Pm-L 墩顶	Pm-R 墩顶	Pm-L 墩顶	Pm-R 墩顶
4-①	-875	878	117	-117
4-②	-726	810	83	-83
4-③	-615	720	57	-57

随着盖梁立柱框架结构中立柱高差变大,活载作用下,立柱 Pm-L、Pm-R 墩顶弯矩均显著减小,模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①,Pm-L 墩顶弯矩数值分别降低了 17.03%、29.71%,Pm-R 墩顶弯矩数值分别降低了 7.74%、18.00%。同时,立柱剪力自相平衡,数值逐渐变小,模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分别减小 29.06%、51.28%。

由上述计算结果可知,随着立柱高差的变大,框架结构内力不对称性增加。虽然随着 Pm-R 墩高的增加,立柱刚度降低,但短柱柱顶盖梁弯矩变化不大,对于盖梁配筋设计而言,盖梁顶缘受拉钢筋保持不变;反而由于盖梁、立柱框架结构中,立柱刚度减小,盖梁相对刚度增大,盖梁跨中正弯矩增加,对于盖梁配筋设计而言,盖梁底缘受拉钢筋需求增大。另外,随着 Pm-R 墩高的增加,立柱刚度降低,立柱墩顶弯矩下降明显,矮墩墩顶弯矩下降明显大于高墩,对于设计而言,矮墩墩顶配筋可少于高墩,并且当高差更大时,可以减小立柱尺寸以节约材料量。随着盖梁立柱框架结构中立柱高差变大,立柱剪力数值逐渐变小,有利于墩柱抗剪及桩基受力。

4.3 温度效应分析

考虑整体升温 30 °C,计算比较温度荷载效应,采用 MIDAS Civil 2024 计算盖梁立柱框架结构内力,结果见表 3、表 4。

当 Pm-L 立柱高度保持不变,Pm-R 立柱高度逐渐变大,盖梁立柱框架结构中立柱高差变大,整体升温 30 °C 作用下,Pm-L 墩顶盖梁弯矩减小明显,甚至出现了变号,模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分

表3 盖梁内力

模型 编号	弯矩/(kN·m)			剪力/kN	
	Pm-L墩顶	跨中	Pm-R墩顶	Pm-L墩顶	Pm-R墩顶
4-①	-662	-662	-662	0	0
4-②	-147	-487	-826	68	68
4-③	209	-361	-931	114	114

别降低了 77.80%, 131.57%; Pm-R 墩顶盖梁弯矩增加, 模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分别增加了 24.76%, 40.63%; 盖梁跨中弯矩最大值减小, 模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分别减小了 26.44%, 45.47%。整体升温工况下, 模型 4-①~4-③盖梁剪力逐渐变大, 盖梁抗剪需求增加。

表4 立柱内力

模型 编号	弯矩/(kN·m)		剪力/kN	
	Pm-L墩顶	Pm-R墩顶	Pm-L墩顶	Pm-R墩顶
4-①	662	-662	167	-167
4-②	147	-826	103	-103
4-③	-209	-931	77	-77

由表 4 计算对比可知, 随着立柱高差变大, 整体升温 30℃下, 立柱墩顶弯矩变化与对应的盖梁弯矩变化一致, 立柱剪力自相平衡, 数值逐渐变小, 模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①分别减小 38.32%、53.89%。

由上述计算结果可知, 随着 Pm-L、Pm-R 墩高差的变大, 立柱、盖梁弯矩差距越来越大, 对于设计而言, 框架结构受力的不均匀性较大, 需合理配筋。随着盖梁立柱框架结构中立柱高差变大, 立柱剪力数值逐渐变小, 有利于立柱抗剪及桩基受力。

4.4 沉降效应分析

考虑 Pm-L、Pm-R 不均匀沉降 3 mm, 采用 MIDS Civil 2024 计算盖梁立柱框架结构内力, 结果见表 5、表 6。

表5 盖梁内力

模型 编号	弯矩/(kN·m)			剪力/kN	
	Pm-L墩顶	跨中	Pm-R墩顶	Pm-L墩顶	Pm-R墩顶
4-①	513	0	-513	103	103
4-②	413	-40	-493	91	91
4-③	400	-45	-490	89	89

不均匀沉降属于反对称荷载, 高差 0 m 时, 盖梁、立柱框架结构为对称结构, Pm-L、Pm-R 墩顶处盖梁弯矩符号相反, 数值相同。随着 Pm-R 立柱高度的增加, 模型 4-①~4-③立柱高差逐渐变大, 不均匀沉降工况下, Pm-L、Pm-R 墩顶盖梁弯矩减小, 且矮墩处弯矩降幅大于高墩, 模型 4-②和模型 4-③相对模型 4-①, Pm-L 分别降低了 19.50%, 22.04%; Pm-R 分别

降低了 3.90%, 4.48%。不均匀沉降 3 mm 工况下, 模型 4-①~4-③盖梁剪力逐渐减小。

表6 立柱内力

模型 编号	弯矩/(kN·m)		剪力/kN	
	Pm-L墩顶	Pm-R墩顶	Pm-L墩顶	Pm-R墩顶
4-①	-513	-513	0	0
4-②	-413	-493	23	-23
4-③	-400	-490	26	-26

由表 6 计算对比可知, 随着立柱高差变大, 不均匀沉降 3 mm 工况下, 立柱墩顶弯矩变化与对应的盖梁弯矩变化一致, 立柱剪力自相平衡, 数值逐渐增大, 但增幅降低。

由上述计算结果可知, 随着 Pm-L、Pm-R 墩高差的变大, 不均匀沉降工况下立柱、盖梁弯矩差距逐渐变大, 对于设计而言, 框架结构受力的不均匀性较大, 矮墩配筋甚至截面尺寸可适当减小。

5 结 语

本文以南充市南海大道桥梁工程为背景, 研究了山区斜坡、陡横坡条件下, 盖梁桩柱式框架下部结构的设计要点。

(1)斜坡、陡横坡条件下桥梁桩柱式下部结构设计, 单桩承载力计算需考虑斜坡的影响, 通过控制“桩基承载力起算点”与斜坡面的水平距离 L 可有效解决设计中斜坡、陡横坡对桩基承载力削弱的影响, L 取值为 $\max\{5d, 8\text{ m}\}$, d 为桩基直径。

(2)斜坡、陡横坡条件下桥梁桩柱式下部结构设计, 桩长的选取需考虑斜陡地面与倾斜岩面的影响, 通过控制“桩基嵌岩深度起算点”, 桩底截面与倾斜岩面, 斜坡地面线的距离 L_1 、 L_2 , 可保证有效嵌岩深度及一定的安全襟边。中风化的硬质岩 L_1 取 $1.5d \sim 2d$, 且不小于 3.0 m; 中风化软质岩 L_1 取 $3d$, 且不小于 5.0 m, d 为桩基直径。对于斜坡地段 L_2 不得小于 30 m, 对于陡崖地段 L_2 不得小于 20 m。

(3)斜坡、陡横坡条件下桥梁桩柱式下部结构设计, 立柱高差对框架结构在活载、温度、不均匀沉降三种工况下受力均会产生明显影响。

(4)随着立柱高差的变大, 活载下盖梁内力变化较小, 弯矩变化幅度小于 10%, 剪力基本不变; 温度工况下盖梁弯矩急剧变化, 甚至出现正负变号, 剪力从 0 kN 增大到 114 kN; 不均匀沉降工况下盖梁弯矩不对称性增加, 墩顶弯矩绝对值差值从 0% 变化为 22.5%, 剪力对称且数值降低。

(5)随着立柱高差的变大,活载下立柱弯矩最大值降低 29.71%,剪力降低约 51.28%;温度工况下,立柱墩顶弯矩变化与墩顶盖梁处弯矩变化一致,墩身剪力减小;不均匀沉降工况下,立柱墩顶弯矩变化与墩顶盖梁处弯矩变化一致,均产生下降,且矮墩下降幅度更高,墩身剪力增加。

参考文献:

[1] 杨超伟,赵明华,陈耀浩,等.高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础受力分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):129-135.
[2] 尹平保.陡坡段桩柱式桥梁桩基设计计算方法及试验研究[D].长沙:湖南大学,2013.
[3] JTT 52/01—2015 贵州山区复杂地质条件公路桥梁桩基设计指导书(试行)[S].
[4] 杜晓菲,吴煜哲.山区高低墩梁式桥地震响应特性研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(10):45-48.
[5] 赵明华,彭文哲,杨超伟,等.高陡横坡段桥梁双桩内力计算有限

差分分解[J].中国公路学报,2019,32(2):87-96.
[6] 宁夏元,尹平保,谢上飞.高陡横坡段桥梁桩基设计计算方法及工程应用[J].公路工程,2012,37(4):56-61.
[7] 杨明辉,刘广轩,赵明华.高陡横坡段桥梁双桩结构计算方法研究[J].公路交通科技,2010,27(8):55-59;65.
[8] 赵明华,尹平保,杨明辉,等.高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础模型试验[J].中国公路学报,2013,26(4):57-63.
[9] 龚先兵,杨明辉,赵明华,等.山区高陡横坡段桥梁桩基承载机理模型试验[J].中国公路学报,2013,26(2):56-62.
[10] 张国平,陈维伟,王晨.斜坡桥梁桩基受力及变形分析[J].湖南交通科技,2022,48(1):66-71;83.
[11] 蒋国龙.地震作用下双柱式高低墩力学行为研究[J].国防交通工程与技术,2023,21(3):27-29.
[12] 余波,汤庆超,张隆顺,等.横向非对称高低墩桥梁地震响应分析及抗震措施研究[J].公路与汽运,2022(1):99-103;108.
[13] 蒋鹏飞,杨明辉,赵明华,等.陡坡段桥梁基桩嵌岩深度问题研究[J].公路工程,2007(5):10-13.

(上接第 46 页)

衰减,如何考虑碳化等多种侵蚀环境下的时变承载力,后续研究需要进一步完善。

参考文献:

[1] 牛荻涛.海洋环境下混凝土强度的经时变化模型[J].西安建筑科技大学学报,1995,27(1):49-52.
[2] 牛荻涛.一般大气环境下混凝土强度经时变化模型[J].西安建筑科技大学学报,1995,25(6):36-38.
[3] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete—Effect of fly ash and slag[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 487-495.
[4] 张劲泉,宋紫薇,韩冰,等.车辆荷载作用下公路混凝土桥梁疲劳问题研究进展[J].土木工程学报,2022,55(12):65-79.
[5] 李富民.氯盐环境钢绞线预应力混凝土结构的腐蚀效应[D].徐州:中国矿业大学,2008.
[6] 罗小勇,李政.无粘结预应力钢绞线锈蚀后力学性能研究[J].铁道学报,2008,30(2):108-112
[7] 彭建新,邵旭东,张建仁.考虑气候变化的受碳化腐蚀先张预应力

混凝土梁时变可靠性评估[J].长沙理工大学学报,2010,6(2):33-42.
[8] 杜斌,江刚,向天宇.既有预应力混凝土桥梁结构承载力时变可靠度研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(2):234-239.
[9] MORI Y, ELLINGWOOD B R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(5): 1600-1621.
[10] WANG X, XU D. An inverse gaussian process model for degradation data [J]. Technometrics, 2010, 52(2): 188-197.
[11] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZIANI R. Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1972, 55(10): 534-535.
[12] 罗大明,张桂涛.基于贝叶斯理论的氯离子扩散系数计算模型[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(5):710-716.
[13] 陈龙,黄天立.基于贝叶斯更新和逆高斯过程的在役钢筋混凝土桥梁构件可靠度动态预测方法[J].工程力学,2020,37(4):186-195.