

大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测方法

Prediction Method for Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundation of Long-span Highway Bridge

郑其华¹, 薛 齐²

(1. 云南交通职业技术学院, 昆明 650000; 2. 浙江交投交通建设有限公司, 杭州 310000)

摘 要: 为了提高预测结果精度, 提出基于灰色理论模型和非线性映射的大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测方法。根据大跨度公路桥梁桩基的受力区域计算荷载传递参数, 建立灰色理论模型对参数序列进行还原处理, 对还原后的参数进行非线性映射, 降低参数维度, 计算桩基承载力并基于计算结果进行预测。结果表明: 所提方法预测的均方误差较低, 均值仅为 0.042, 预测结果较为准确, 满足了大跨度公路桥梁桩基的施工设计需求。

关键词: 极限承载力预测; 大跨度公路桥梁; 桩基; 灰色理论模型; 非线性映射; 桥梁桩基承载力

中图分类号: TU473.1+6

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0160-04

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.027

ZHENG Qihua¹, XUE Qi²

(1. Yunnan Communications Vocational and Technical College, Kunming 650000, China;

2. Zhejiang Jiaotou Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Conventional prediction of the ultimate bearing capacity of long-span highway bridge pile foundation mainly uses the method of extracting characteristic parameters for iterative optimization to obtain the prediction results, ignoring the influence of characteristic parameter dimensions on the prediction results, resulting in a large Mean squared error of the prediction results. Therefore, a prediction method of the ultimate bearing capacity of long-span highway bridge pile foundation based on the grey theory model and nonlinear mapping is proposed. The load transfer parameters are calculated according to the stress area of the pile foundation of the long-span highway bridge, and the grey theoretical model is established to restore the parameter sequence. The restored parameters are nonlinear mapped to reduce the parameter dimensions, calculate the bearing capacity of the pile foundation, and predict based on the calculation results. The experimental results show that the mean squared error of the prediction results obtained after the proposed application is low, the average value is only 0.042, and the prediction results are relatively accurate, meeting the construction design requirements of long-span highway bridge pile foundations.

Key words: prediction of ultimate bearing capacity; large-span highway bridge; pile foundation; grey theory model; nonlinear mapping; bearing capacity of bridge pile foundation

0 引言

随着交通基础设施建设的快速发展, 对大跨度公路桥梁建设的需求日益增加。桩基作为桥梁结构的关键承重构件, 其极限承载力的准确预测直接关系到工程的安全性和经济性。由于大跨度桥梁桩基的荷载传递机理复杂, 难以充分反映桩土相互作用的非线性承载特性。特别是在复杂的地质条件下, 桩土相互作用

基金项目: 云南交通职业技术学院科学研究重点基金项目 (2023KJ002)。

作者简介: 郑其华 (1973—), 男, 硕士, 副教授/高级工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程勘察、设计、施工、检测等专业技术理论研究及实践应用。

收稿日期: 2023-08-18

的机理尚不清楚,迫切需要建立一个结合现场监测数据和智能算法的极限承载力预测体系,为大跨度公路桥梁桩基设计提供更科学可靠的技术支持。

针对公路桥梁桩基的相关问题,严新江等^[1]以非对称堆载影响的公路桥梁为例,分析桩基力学特性;唐钱龙等^[2]研究软土区桥墩-承台-桩基结构在堆载作用下的时效性偏移特性,阐明横向偏移机理;郭震山等^[3]针对灌注桩开式压浆技术注浆区域、压力及量难以控制的问题,增强桩端土体加固效果;李志伟等^[4]结合有限元模拟与现场检测,验算抗弯及抗剪承载力;廖立坚等^[5]提出静水、负摩阻力、膨胀土及地震液化土等特殊地质条件下的桩基耦合计算方法;陈慧芸等^[6]考虑竖向极限承载力、桩身稳定性及溶洞溶蚀量,建立岩溶区桥梁桩基嵌岩深度计算模型;冯忠居等^[7]利用 Midas GTS 建立桩-海床岩土体-断层耦合模型,分析加速度、位移、弯矩及剪力的动力响应特性;马迪等^[8]依托典型堆载致桥墩偏移案例,通过固结-蠕变试验揭示软土时效变形特征,评估微型隔离桩与应力释放孔的主动防控效果;祝彦知等^[9]建立钢筋混凝土桩基劣化-冲刷耦合模型,量化不同服役年限与劣化程度下的承载力衰减;廖立坚等^[10]提出旋挖挤扩灌注桩计算体系,建立等效地质参数法优化厚淤泥层桩基配筋;张聪等^[11]通过离心试验研究断层水平距离及埋深对桩基影响,显著降低近断层区竖向承载力;卞海丁等^[12]构建层次分析法评价体系,揭示非新建桥梁桩基在船撞作用下的动力损伤特性;程家军等^[13]以贵阳地铁3号线下穿工程为例,解析隧道施工与高架桥桩基的相互作用机制;冯忠居等^[14]通过干湿循环-盐蚀耦合试验测定混凝土性能劣化指标,分析阐明氯盐侵蚀微观机理;张高峰等^[15]建立库岸边坡-桥梁三维模型,模拟水位变动诱发的岸坡滑移过程,揭示桩基与滑移体动力相互作用规律。

但是大跨度桥梁桩基承受竖向荷载、水平推力、弯矩及循环动载(如风振、车桥耦合振动)的多维耦合作用,单向承载力理论难以准确反映实际受力状态,因此,提出了一种大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测方法。该方法通过计算荷载传递参数,建立灰色理论模型,再采用非线性映射进行参数降维,实现对大跨度公路桥梁桩基极限承载力的预测。

1 大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测方法设计

1.1 基于灰色理论模型还原参数序列

将桥梁桩基的荷载传递参数按照在公路桥梁中的位置生成参数的初始序列: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$,其中, P 表示序列集, m 表示公路桥梁的桩基数量。

基于序列集中的荷载传递参数具备指数特性的变化性质,建立参数对应的灰色理论模型,并对该模型进行求解:

$$f = \left(\frac{z}{\mu} \right)^{\zeta} \quad (1)$$

式中: f 为待估参数向量; z 为灰度背景值; ζ 为离散值。

对求得的 f 值进行一次累减处理,将其还原成初始参数序列:

$$\hat{P} = (1 - e^a) \left(f - \frac{f}{\mu} \right)^{-e} \quad (2)$$

式中: $\hat{P}$ 为还原的桩基荷载传递参数序列; e 为自然常数。

通过上述步骤,完成基于灰色理论模型的参数序列还原处理过程,完成对参数序列的预处理。

1.2 基于非线性映射预测桥梁桩基极限承载力

将还原得到的大跨度公路桥梁桩基的荷载传递参数序列在空间中进行映射。选取映射空间中的一个维点,以非线性映射的方式在低维空间中进行对应的映射处理^[12-13]。对高维至低维的非线性映射的目标函数进行定义:

$$H = \frac{\gamma}{\sum_{i < j}^m w_{ij}} \quad (3)$$

式中: i 和 j 分别为映射后的荷载传递参数和映射前的荷载传递参数; H 为非线性映射目标函数; w_{ij} 为权重系数; γ 为标准化因子。

经过非线性映射的处理,得到低维的大跨度公路桥梁桩基荷载传递参数^[14-15]。使用该参数对桩基的承载力进行预测:

$$Q = \sum P_H (l_o + u) R \quad (4)$$

式中: Q 为桩基承载力; P_H 为非线性映射荷载传递

研究与应用

参数; l_0 为桩基土层厚度; u 为桩基主体周长; R 为桩基底端面积。

根据计算所得的大跨度公路桥梁桩基承载力, 对桩基的极限承载力进行预测:

$$Q_{lim} = \partial Q \left(\frac{g + 4G/3}{\Delta z} \right) \tag{5}$$

式中: Q_{lim} 为桩基极限承载力; ∂ 为法向刚度; g 为桩基体积模量; G 为桩基剪切模量; Δz 为桩基连接尺寸。

为了更加直观地体现出预测方法的有效性, 使用均方误差对试验结果进行评价。预测结果均方误差公式为:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - p_i)^2 \tag{6}$$

式中: M 为预测结果均方误差; n 为公路桥梁桩基的数量; t 为预测试验进行的时间; v_i 为预测的极限承载力值; p_i 为实际的极限承载力值。

2 工程实例

2.1 工程概况

以某工程施工的大跨度公路桥梁作为数值模拟案例。该工程公路桥梁全长 4 502 m, 属于大跨度公路桥梁。其中主桥跨径 32 + 6 × 100 + 32 m, 引桥跨径 60 m。对主桥周围的岩土进行物理性质勘测, 见表 1。公路桥梁主要受到流量为 24 506 m³/s 的流水冲击, 河流的流量参数见表 2。

使用 Ansys 有限元软件建立大跨度公路桥梁桩基部分的有限元模型, 如图 1 所示。试验中, 桩基的主体结构采用线弹性模型的参数进行设定。桩基的直

表 1 大跨度公路桥梁主桥岩土勘测

Table 1 Geotechnical survey of main bridge of large-span highway bridge

物理力学指标	细砂	粗砂	中砂	低液限黏土	风化泥岩
容重/(g/m ³)	2.07	1.94	1.95	2.01	2.15
天然含水量/%	10.99	13.20	14.57	13.24	27.33
初始孔隙比	0.66	0.46	0.67	0.58	0.44
压缩系数/MPa ⁻¹	0.11	0.12	0.06	0.31	0.16
压缩模量/MPa	10.36	23.66	11.45	5.36	10.13
单轴抗压强度/kPa	420	745	430	1 160	1 710
弹性模量/MPa	10.33	14.34	12.36	25.45	14.57
泊松比	0.336	0.445	0.330	0.345	0.340
屈服强度/kPa	350	300	410	550	560

表 2 桥梁河流参数

Table 2 Bridge and river parameters

项目	参数
水位/m	133.64
壅水高度/cm	3
比降	1.47 × 10 ⁴
冲刷线高程/m	129.34
流冰尺寸/m ³	300 × 200 × 0.85
最高流冰水位/m	130.04
最低流冰水位/m	129.89

径参数设置为 2 000 mm, 顶部标高为 129.70 m, 底部标高为 64.20 m。将勘测的大跨度公路桥梁参数代入模型中, 对模型的仿真性能进行优化, 然后开展大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测试验。

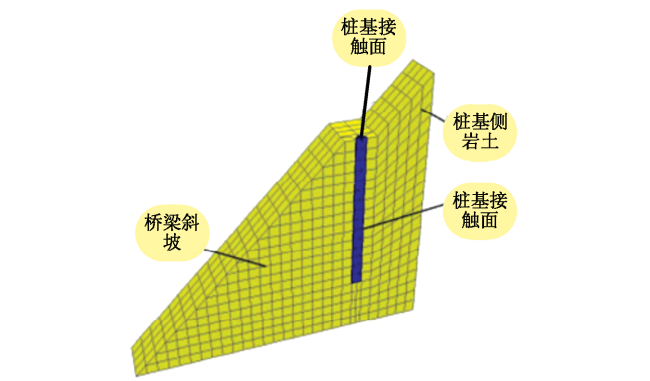


图 1 大跨度公路桥梁桩基有限元模型
Fig. 1 Finite element model of pile foundation for large-span highway bridge

2.2 大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测

试验以桩基顶端的沉降位移作为极限承载力预测结果的显示指标。在有限元模型中, 为桩基施加不同等级力度的桩顶荷载, 荷载范围为 0 ~ 80 000 kN。桩基极限承载力的预测结果如图 2 所示。预测值曲线与实际值曲线重合度较高, 说明所提出的预测方法对桩基极限承载力的预测较为准确。

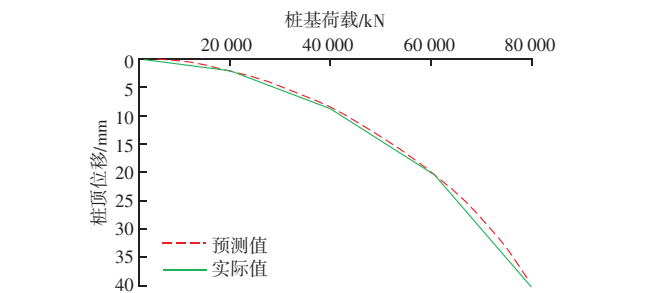


图 2 大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测
Fig. 2 Prediction of ultimate bearing capacity of pile foundation for long-span highway bridges

2.3 结果评价指标

将试验的结果评价指标设置为桩基极限承载力预测值与真实值之间的误差, 计算得到均方误差, 结果数值越小, 说明该方法的预测结果与真实结果一致程度越高, 预测结果越精确。

2.4 结果分析与讨论

为了验证预测方法的准确性, 分别与文献 [7] 和文献 [8] 所提出的承载力预测方法进行对比, 将三种方法预测结果的均方误差值进行横向对比。

采用有限元模型对大跨度公路桥梁桩基进行沉降变形量预测, 对桩基的极限承载力进行反映。每轮预测均为 10 d。每进行一个方法的预测试验后, 将桩基的有限元模型恢复到初始状态, 确保试验过程中变量的唯一性。每种预测方法均多次进行试验以减少试验结果的误差, 取多次试验结果的平均值进行预测分析。

不同方法的大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测结果如图 3 所示。在为期 10 d 的试验过程中, 本文预测方法的极限承载力预测结果的均方误差比较低, 最高仅为 0.058, 而文献 [7] 和文献 [8] 所提方法的最高均方误差值分别为 0.197 和 0.102。在全程的预测试验中, 本文所提方法预测结果的均方误差平均值为 0.042, 而其他两种方法预测结果的均方误差平均值则分别为 0.183 和 0.096。由此可见, 本文所提方法能够大幅度降低预测结果的均方误差值。

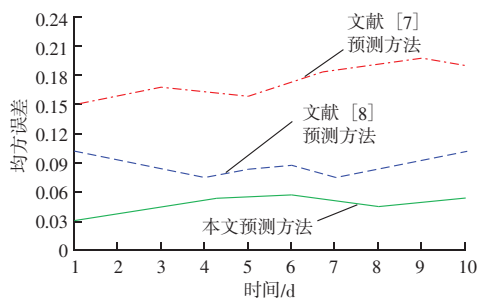


图 3 不同方法桩基极限承载力预测结果

Fig. 3 Prediction results of ultimate bearing capacity of pile foundation using different methods

3 结束语

提出一种基于灰色理论模型和非线性映射的大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测方法。该方法对大跨度公路桥梁桩基极限承载力的预测结果均方误

差较低, 预测结果精准度较高, 表明能够对大跨度公路桥梁桩基极限承载力进行预测, 满足实际需求, 具备较高的实践应用价值。

参 考 文 献

- [1] 严新江, 张华杰, 谢柯. 堆载作用下桥梁桩基偏移及处治分析 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (6): 148–155, 198.
- [2] 唐钱龙, 李双龙, 魏丽敏, 等. 软土区堆载对桥梁桩基偏位影响及纠偏措施 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2024, 46 (6): 126–134.
- [3] 郭震山, 陈汝先. 桩底复合式后压浆桥梁桩基承载特性试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 26 (6): 1952–1959.
- [4] 李志伟, 杨岳峰, 赵剑豪, 等. 高填方堆载对邻近桥梁桩基受力影响分析及处理 [J]. 桥梁建设, 2023, 53 (3): 143–150.
- [5] 廖立坚, 苏伟, 杨新安, 等. 复杂地质条件下铁路桥梁桩基通用计算方法 [J]. 中国铁道科学, 2024, 45 (2): 72–80.
- [6] 陈慧芸, 冯忠居, 谢富贵, 等. 穿越溶洞桥梁桩基嵌岩深度计算方法研究 [J]. 桥梁建设, 2024, 54 (3): 109–116.
- [7] 冯忠居, 李宇杰, 张聪, 等. 地震区跨活动断层桥梁桩基动力时程响应分析 [J]. 地震工程学报, 2023, 45 (4): 761–771.
- [8] 马迪, 李双龙, 魏丽敏, 等. 大面积堆载下软土区桥梁桩基变形机理及预防措施研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (11): 4151–4162.
- [9] 祝彦知, 赵雅纯, 田光辉, 等. 考虑冲刷和材料劣化耦合作用的钢筋混凝土桥梁桩基承载性能研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2023, 54 (3): 116–125.
- [10] 廖立坚, 杨新安, 王雨权, 等. 铁路桥梁桩基优化计算方法研究 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40 (2): 47–52, 65.
- [11] 张聪, 冯忠居, 王富春, 等. 基于离心模型试验的近断层桥梁桩基竖向承载特性研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56 (6): 108–116.
- [12] 卞海丁, 刘红平, 魏进, 等. 水平冲击作用下非新建桥梁桩基动力响应及损伤特性 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (5): 222–233.
- [13] 程家军, 刘远明, 郑滔, 等. 地铁隧道下穿桥梁桩基托换变形与力学特性 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (36): 15665–15675.
- [14] 冯忠居, 陈慧芸, 王富春, 等. 强盐沼泽区干湿循环作用下桥梁桩基腐蚀损伤 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23 (6): 156–167.
- [15] 张高峰, 姚国文, 孔国英, 等. 库水位循环下岸坡-桥梁桩基相互作用致损机理 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (6): 2317–2325.
- [16] 吴冬健, 叶若豪, 张浩. 桩端后注浆钻孔灌注桩承载特性及影响因素分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 73–78.