

# 现浇超高墩连续刚构桥横桥向抗震性能分析

郭志鹏

北京工业大学城市建设学部, 北京

收稿日期: 2024年5月30日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月27日

## 摘要

为研究现浇超高墩连续刚构桥在横桥向地震动作用下的抗震性能,建立了某超高墩连续刚构桥OpenSees非线性仿真分析模型,并以此探讨了跨径、墩高等结构参数对其横桥向抗震性能的影响规律。结果表明: 1) 结构的墩底弯矩峰值随跨径的增大而呈减小趋势; 随墩高的增加而逐渐减小。2) 墩底剪力随结构跨径和墩高的变化规律与墩底弯矩具有相似的趋势。3) 结构的墩顶位移随跨径增加呈现出先降低后增大的变化趋势; 随着墩高的增大而逐渐增大。

## 关键词

超高墩, 连续刚构桥, 结构参数

# Analysis of Seismic Performance of Cast-in-Place Continuous Rigid Frame Bridge with Super-High Piers in the Transverse Direction

Zhipeng Guo

Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing

Received: May 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

To study the seismic performance of the cast-in-place continuous rigid frame bridge with super-high piers under the action of transverse seismic waves, the nonlinear simulation analysis model of a continuous rigid frame bridge with super-high piers using OpenSees was established. And the influence of structural parameters such as span length and pier height on its seismic performance

in the transverse direction was discussed. The results showed that: 1) The peak bending moment at the pier bottom of the structure decreased with the increase of span length, and gradually decreased with the increase of pier height. 2) The variation of shear force at the pier bottom with the span length and pier height of the structure showed a similar trend to that of bending moment at the pier bottom. 3) The displacement at the pier top of the structure decreased first and then increased with the increase of span length, and gradually increased with the increase of pier height.

## Keywords

Super-High Pier, Continuous Rigid Frame Bridge, Structural Parameters

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,“一带一路”倡议推动了西部地区高效、安全交通网络建设的蓬勃发展。面对普遍存在“U”形、“V”形峡谷等复杂地形的西部地区,超高墩连续刚构桥因其良好的整体性和大跨越能力,成为该地区交通建设的优选桥型。当桥墩高度达到及超过 100 米时,一般称之为超高墩[1]。与中矮墩不同,超高墩存在自振周期长、高阶振型参与多、受长周期地震动影响大等特点。超高墩桥梁抗震一直是国内外学者关注的重点。

陈志强[2]等学者建立了非线性随机地震响应分析方法,应用于某高墩桥梁,发现忽略桥梁结构的不确定性和随机参数相关性会高估其地震可靠度。陈旭[3]等指出在高阶振型影响下导致墩顶位移与墩底曲率并不同步。王少剑[4]等指出由于高阶振型的影响,墩顶位移峰值和墩底峰值曲率大小对应关系减弱。尹俊红[5]等基于传递矩阵法建立了高墩稳定性传递矩阵。郑史雄[6]和张默[7]等人分别对比分析了不同类型地震动作用下高墩桥梁的地震响应的不同。杜骞[8]等基于 OpenSees 软件建立自复位高墩模型,发现自复位桥墩不能消除高阶振型效应的影响。Rosario Ceravolo [9]等人通过非线性动力时程分析探究桥墩的破坏区与设计假设间的匹配关系。E. Tubaldi [10]等人按欧洲规范对高墩桥梁进行抗震设计,验证分布质量不同的桥墩其安全性差异。Xu Chen [11]和 Qiming Qi [12]等人通过振动台试验分别研究了高阶振型对桥梁抗震性能的影响和空心高墩在动力响应下的破坏模式。Yao Hu [13]等利用模型修正混合试验研究了刚构薄壁高墩桥的抗震性能,为相关研究提供了新的思路和方法。现有研究现状表明,超高墩抗震性能研究多聚焦于其纵桥向地震反应研究,超高墩及超高墩桥梁的横桥向地震反应研究相对较少。

有鉴于此,本文以某超高墩连续刚构桥为例,建立 OpenSees 非线性仿真分析模型,基于非线性时程分析考察不同结构参数下对应的地震响应规律,相关研究成果可为超高墩桥梁横桥向地震作用下的抗震设计提供支持。

## 2. 结构建模

本文通过 OpenSees 平台建立了某超高墩连续刚构桥,其跨径分布为 88 m + 166 m + 88 m,上部结构横截面为二次曲线变化的单箱单室混凝土截面,采用 C55 混凝土;下部结构采用钢筋混凝土箱型薄壁墩,桥墩截面沿墩高呈线性变化,墩高为 100 米,采用 C40 混凝土。通过 OpenSees 平台建立的全桥数值仿真

模型如图 1 所示。

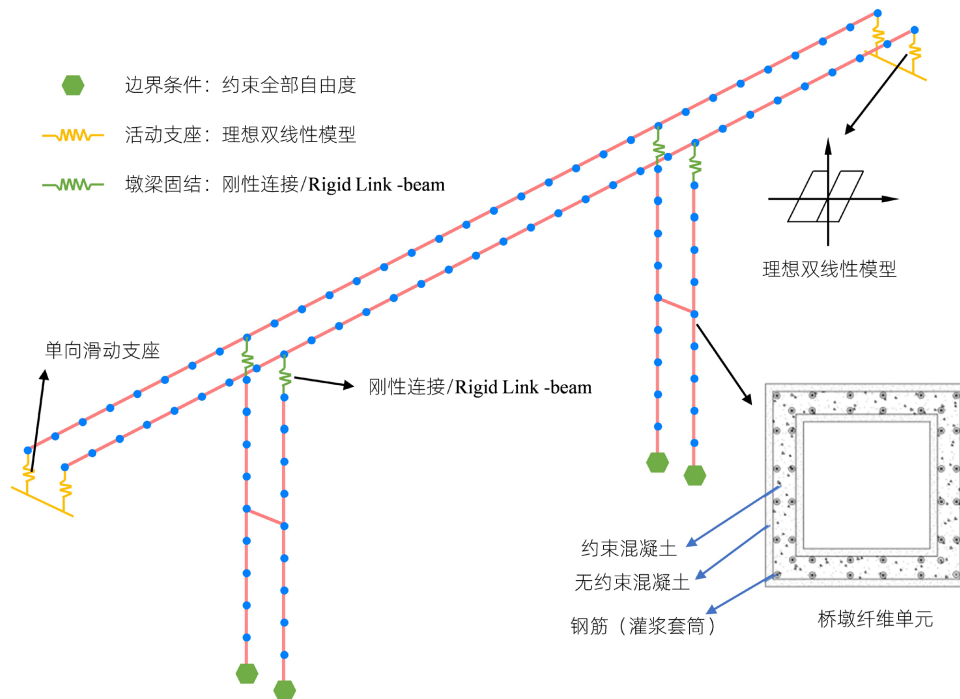


Figure 1. Overall finite element model of double-deck bridge

图 1. 双幅桥整体有限元模型

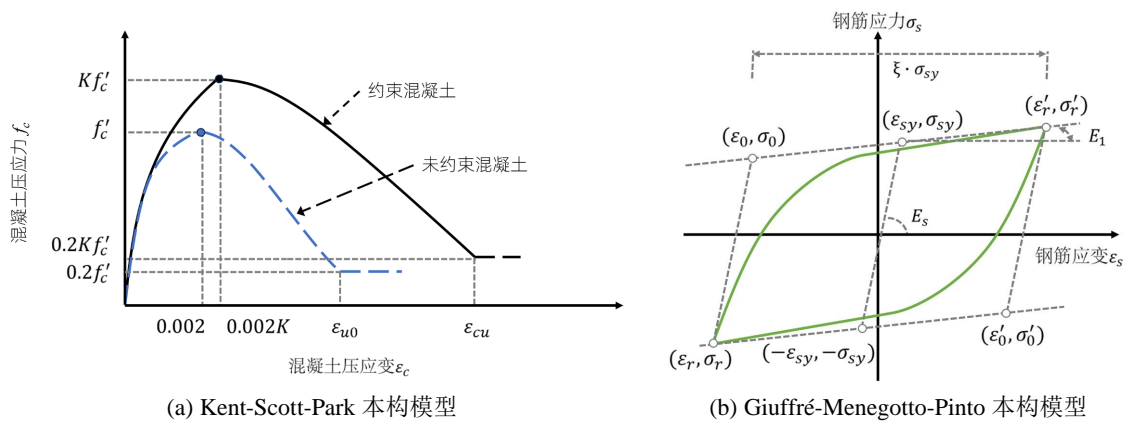


Figure 2. Constitutive model diagram

图 2. 本构模型示意图

在工程实践中，桥梁上部结构在地震作用下极少达到极限承载力而引发破坏，在数值模拟中假设其始终处于弹性状态，因此采用 OpenSees 中的弹性梁单元(elasticBeamColumn)对主梁进行模拟。作为本文的主要研究对象，与桥梁的上部结构相比，桥墩在地震激励下一般会发较大的变形，因此使用弹塑性的非线性梁柱纤维单元(Force-Based Beam-Column Element, FBE)对桥墩结构进行模拟，可以有效考虑桥墩结构在地震作用下的弹塑性变形。本研究中使用 Kent-Scott-Park 本构模型对桥墩的核心区混凝土和保护层混凝土进行模拟，使用 Giuffré-Menegotto-Pinto 本构模型来定义桥墩中的钢筋纤维，相应的本构关系模型见图 2。

原型桥所处的场地类型为 II 类场地，抗震类别为 A 类桥梁，按照地震基本烈度 8 度设防，根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)中相关规定生成反应谱。为对 OpenSees 软件建立的数值仿真模型展开时程分析，从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库中选取合适的地震波开展数值仿真计算。从数据库中选取了满足不同模型相对应的自振周期的近断层地震动。

### 3. 结构参数对桥梁抗震性能影响分析

根据实际工程背景，对超高墩连续刚构桥抗震性能进行参数影响分析，重点探究主桥跨径、桥墩高度等结构参数对超高墩连续刚构桥横桥向地震响应和抗震性能的影响规律。分析工况表如表 1 所示。图 3 给出了不同结构参数条件下墩底内力幅值变化图。

**Table 1.** Amplitude of internal force at the bottom of pier structure

**表 1.** 结构墩底内力幅值

工况	墩高 × 跨径(m)	墩底弯矩幅值(1012 kN·m)	墩底剪力幅值(107 kN)	墩底轴力幅值(108 kN)
工况 1	100 × 120	3.14	7.27	3.49
工况 2	100 × 166	3.03	7.07	3.44
工况 3	100 × 200	2.83	6.50	3.54
工况 4	130 × 120	3.08	7.00	3.69
工况 5	130 × 166	2.70	6.79	3.65
工况 6	130 × 200	2.41	5.71	3.13
工况 7	160 × 120	1.9	6.12	3.35
工况 8	160 × 166	1.89	6.08	3.68
工况 9	160 × 200	1.62	5.63	3.27

#### 3.1. 墩底弯矩

由表 1 和图 3 可知，横桥向地震动作用下，具有同一墩高，桥梁结构的墩底弯矩幅值随桥梁跨径增大整体上表现出逐渐下降的趋势。当桥梁跨径固定时，随墩高增大，墩底弯矩表现出逐渐减小的趋势。这是因为随着墩高的增加，高阶振型的贡献变得更加明显，这有助于减小墩底弯矩的幅值。

#### 3.2. 墩底剪力

由表 1 和图 3 可知，横桥向地震动的作用下，同一跨径下，超高墩连续刚构桥墩底剪力幅值随墩高的增加呈下降趋势。另一方面，当结构墩高不变时，随桥梁跨径的增大其墩底剪力幅值表现出减小的趋势。这是因为超高墩带来的高阶振型影响随着墩高的增加变的更加显著，对墩底剪力的需求也就更小。

#### 3.3. 墩底轴力

由表 1 和图 3 可知，在横桥向地震动的作用下，对于设置横系梁的超高墩连续刚构桥墩底轴力幅值随跨径和墩高的变化并无明显规律。当墩高固定为 100 m，随着跨径的增大，墩底轴力先下降后增大，总体呈增大趋势；当墩高固定为 130 m 时，随着跨径的增大，墩底轴力呈逐渐下降的趋势；当墩高固定为 160 m 时，随着跨径的增大，墩底轴力先升高后下降，总体呈下降趋势。另一方面。当结构的跨径固定为 120 m

时,随着墩高的增大,墩底轴力先增大后减小,总体呈减小趋势;当跨径固定为166 m时,随着墩高的增大,墩底轴力逐渐增大;当跨径固定为200 m时,随着墩高的增大,墩底轴力先减小后增大,总体上呈现出下降的趋势。这主要是地震动频谱特性与超高墩连续刚构桥的基本动力特性间的关系决定的。

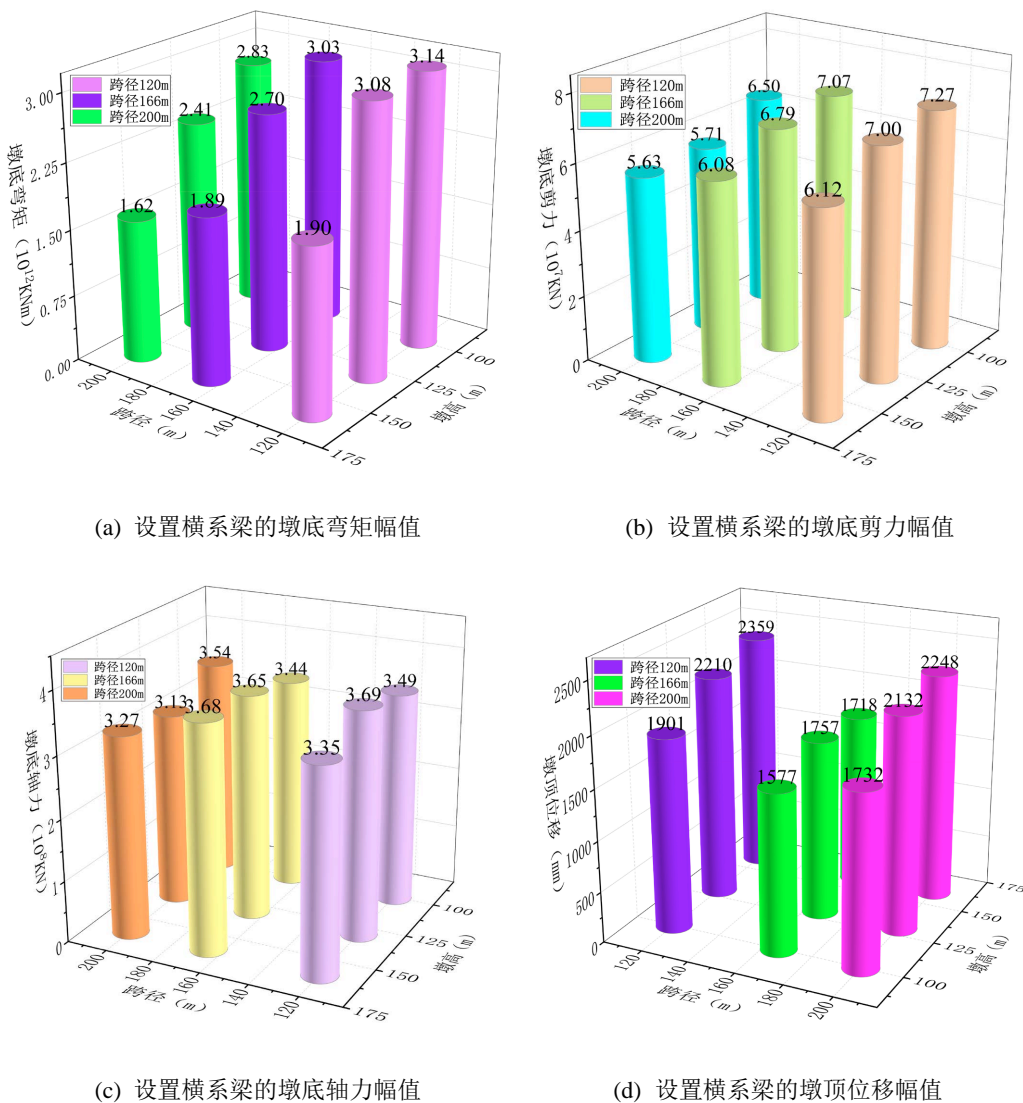


Figure 3. Internal force at pier bottom and pier top displacement with cross beam installed

图3. 设置横系梁的墩底内力、墩顶位移图

### 3.4. 墩顶位移

由表2和图3可知,在横桥向地震动的作用下,当桥梁墩高保持固定时,随着桥梁跨径的增大,结构的墩顶位移先减小再增大,总体上呈下降的趋势。当结构的跨径保持固定为120 m、200 m时,随着桥梁墩高的增大,结构的墩顶位移呈逐渐升高的趋势;跨径固定为166 m时,130 m墩高下的墩顶位移最大。这是因为桥梁跨径固定时,随着墩高的上升桥梁刚度逐渐下降,呈现出更为明显的高柔特性。另一方面,墩高增加还会使桥梁的周期发生改变,进一步影响反应谱值的大小。因此,桥梁的位移响应也会与相应的地震动反应谱产生密切关联。

**Table 2.** Amplitude of pier top displacement of the structure  
**表 2.** 结构的墩顶位移幅值

工况	墩高 × 跨径(m)	墩顶位移幅值(mm)
工况 1	100 × 120	3.14
工况 2	100 × 166	3.03
工况 3	100 × 200	2.83
工况 4	130 × 120	3.08
工况 5	130 × 166	2.70
工况 6	130 × 200	2.41
工况 7	160 × 120	1.9
工况 8	160 × 166	1.89
工况 9	160 × 200	1.62

#### 4. 结论

- 1) 横桥向地震动作用下, 结构跨径增加墩底弯矩峰值减小, 墩高增加则墩底弯矩减小。
- 2) 墩底剪力的变化趋势与墩底弯矩相似, 均随跨径和墩高的变化呈现相应的增减趋势。
- 3) 墩顶位移随跨径增大先减后增, 而墩高增大会导致墩顶位移增大。

#### 参考文献

- [1] 民用建筑设计统一标准: GB 50352-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [2] 陈志强, 郑史雄, 丁自豪, 张金. 基于部分分层抽样的高墩桥梁随机地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(7): 214-222+234.
- [3] 陈旭, 李建中, 刘笑显. 墩身高阶振型对高墩地震反应影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 159-166.
- [4] 王少剑. 现浇及装配式超高墩连续刚构桥抗震性能及设计方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2023.
- [5] 尹俊红, 李青宁. 高墩稳定性分析的传递矩阵法[J]. 工业建筑, 2013, 43(S1): 199-202.
- [6] 郑史雄, 陈志强, 陈志伟, 李晰. 近场多脉冲地震作用下高墩桥梁地震响应分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 897-907.
- [7] 张墨. 长周期地震动作用下高墩连续梁桥地震反应[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- [8] 杜赛, 夏修身, 陈兴冲, 孙学先. 近远场地震作用下自复位桥墩高阶振型效应研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 60-65.
- [9] Ceravolo, R., Demarie, G.V., Giordano, L., Mancini, G. and Sabia, D. (2009) Problems in Applying Code-Specified Capacity Design Procedures to Seismic Design of Tall Piers. *Engineering Structures*, **31**, 1811-1821. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.042>
- [10] Tubaldi, E., Scozzese, F., De Domenico, D. and Dall'Asta, A. (2021) Effects of Axial Loads and Higher Order Modes on the Seismic Response of Tall Bridge Piers. *Engineering Structures*, **247**, Article ID: 113134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113134>
- [11] Chen, X., Guan, Z., Li, J. and Spencer, B.F. (2018) Shake Table Tests of Tall-Pier Bridges to Evaluate Seismic Performance. *Journal of Bridge Engineering*, **23**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001264](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001264)
- [12] Qi, Q., Shao, C., Wei, W., Xiao, Z. and He, J. (2020) Seismic Performance of Railway Rounded Rectangular Hollow Tall Piers Using the Shaking Table Test. *Engineering Structures*, **220**, Article ID: 110968. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110968>
- [13] Hu, Y. and Guo, W. (2020) Seismic Response of High-Speed Railway Bridge-Track System Considering Unequal-Height Pier Configurations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **137**, Article ID: 106250. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106250>