

横系梁道数对现浇超高墩连续刚构桥抗震性能影响研究

孟玉晓¹, 陈作银², 刘少华², 彭光达², 张玉彬³, 田纲⁴, 张瑞朋⁴, 陈彦江¹

¹北京工业大学建筑工程学院, 北京

²北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京

³中国铁路北京局集团有限公司, 北京

⁴中铁一局集团第二工程有限公司, 河北 唐山

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

为研究不同类型横桥向地震作用下横系梁道数对双幅带系梁现浇超高墩连续刚构桥抗震性能的影响, 本文基于OpenSees软件建立了CRFB-SP-RC非线性纤维模型, 探究了非长周期地震动、长周期非脉冲型地震动和近断层脉冲型地震动作用下横系梁数量变化对超高墩连续刚构桥抗震性能的影响。结果表明, 不同类型横桥向地震动激励下, 横系梁道数对CRFB-SP-RC横桥向地震响应影响规律如下: 墩顶峰值位移: $Ld_{NLP} < Ld_{NPLP} < Ld_{NEPT(T_p \approx T_1)}$, 墩底峰值弯矩: $M_{NLP} < M_{NPLP} < M_{NEPT(T_p \approx T_1)}$; 同一类型地震动横桥向激励下, CRFB-SP-RC的横桥向墩顶峰值位移、墩底弯矩以及墩底截面耗能均随横系梁道数的增加而降低。

关键词

横向地震, 横系梁, 超高墩连续刚构桥, 抗震性能

Study on the Influence of the Number of Transverse Beams on the Seismic Performance of Cast-in-Place Super High Pier Continuous Rigid Frame Bridge

Yuxiao Meng¹, Zuoyin Chen², Shaohua Liu², Guangda Peng², Yubin Zhang³, Gang Tian⁴, Ruipeng Zhang⁴, Yanjiang Chen¹

¹College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Beijing National Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing

文章引用: 孟玉晓, 陈作银, 刘少华, 彭光达, 张玉彬, 田纲, 张瑞朋, 陈彦江. 横系梁道数对现浇超高墩连续刚构桥抗震性能影响研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1221-1227. DOI: 10.12677/hjce.2025.145131

³China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing⁴China Railway First Bureau Group No. 2 Engineering Co., Ltd., Tangshan HebeiReceived: Apr. 28th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

In order to study the influence of the number of tie beams on the seismic performance of cast-in-place continuous rigid frame bridge with super-high piers under different types of transverse earthquakes, this paper established a CRFB-SP-RC nonlinear fiber model based on OpenSees software, and explored the influence of the number of tie beams on the seismic performance of super-high pier continuous rigid frame bridge under non-long-period ground motion, long-period non-pulse ground motion and near-fault pulse ground motion. The results show that the influence of the number of transverse beams on the seismic response of CRFB-SP-RC transverse bridge under different types of transverse bridge ground motion excitation is as follows: The peak displacement of the pier top:

$Ld_{NLP} < Ld_{NPLP} < Ld_{NFPT}(T_p \approx T_1)$, the peak bending moment at the base of the pier:

$M_{NLP} < M_{NPLP} < M_{NFPT}(T_p \approx T_1)$. Under the transverse bridge excitation of the same type of ground motion, the peak displacement of the pier top, the bending moment of the pier bottom and the energy dissipation of the pier bottom section of CRFB-SP-RC decrease with the increase of the number of transverse beams.

Keywords

Lateral Earthquake, Transverse Beam, Super High Pier Continuous Rigid Frame Bridge, Seismic Performance

Copyright © 2025 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, 超高墩大跨连续刚构桥在西部山区得到广泛应用, 如云南省镇雄县的冯家寨特大桥(最高墩129米)等, 而该型桥梁的抗震性能是限制其在西部地区推广应用的关键[1]-[2]。

现阶段众多学者针对横系梁的设置对结构抗震性能及地震响应的影响开展了相关研究。兰峰[4]等人建立了某双柱式高墩连续梁桥有限元模型, 研究了横系梁的数量、布置方式及截面尺寸对桥墩关键截面内力的影响; 刘黎阳[5]等人以某双柱式框架墩的三跨连续梁桥为例, 研究了不同墩高下墩底横系梁和中横系梁的不同布置对结构的影响规律; 陈彦江[6]等人在考虑行波效应的基础上, 采用 IDA 方法分析了横系梁道数、刚度等对桥梁远场地震响应的影响; 庞兴[7]建立了不同墩高有盖梁双柱墩有限元模型, 探究了横系梁的道数、位置以及系梁与墩柱的刚度比值对双柱墩的抗震性能影响; 杨兴华[8]考虑桩土相互作用, 分析了横系梁的位置、截面尺寸等参数下桥梁结构的地震响应; 刘琦[9]以马蹄河大桥为背景, 建立了不同主墩高差和横系梁设置数量的模型, 分别研究了主墩高差和横系梁设置对其抗震性能的影响。既有研究成果表明, 值得关注的是, 超高墩大跨连续刚构桥的抗震性能参数影响规律尚不明晰, 特别是横桥向地震动激励条件下系梁道数对其抗震性能的影响研究尚处空白。

鉴于此, 本文基于 OpenSees 有限元软件, 建立双幅带系梁现浇超高墩连续刚构桥(CRFB-SP-RC)的

数值分析模型，探究了不同类型横向地震作用下横系梁道数对此类桥梁的地震响应影响规律。

2. 工程概况

以我国西南地区一座双幅带系梁现浇式超高墩连续刚构桥为原型。原型桥设计参数如下：上部结构采用二次曲线变化的单箱单室混凝土截面，跨径布置为 88 + 166 + 88 m，桥梁总长为 342 m。主梁采用 C55 混凝土浇筑，其中根部箱型截面梁高 10 m，跨中(端部)箱型截面梁高 3.5 m，桥面宽度为 12 m。下部结构为线性变截面钢筋混凝土空心薄壁墩，桥墩高度均为 100 m，采用 C40 混凝土浇筑，墩身与主梁采用墩梁固接形式连接。原型桥的主要几何信息如图 1 所示。

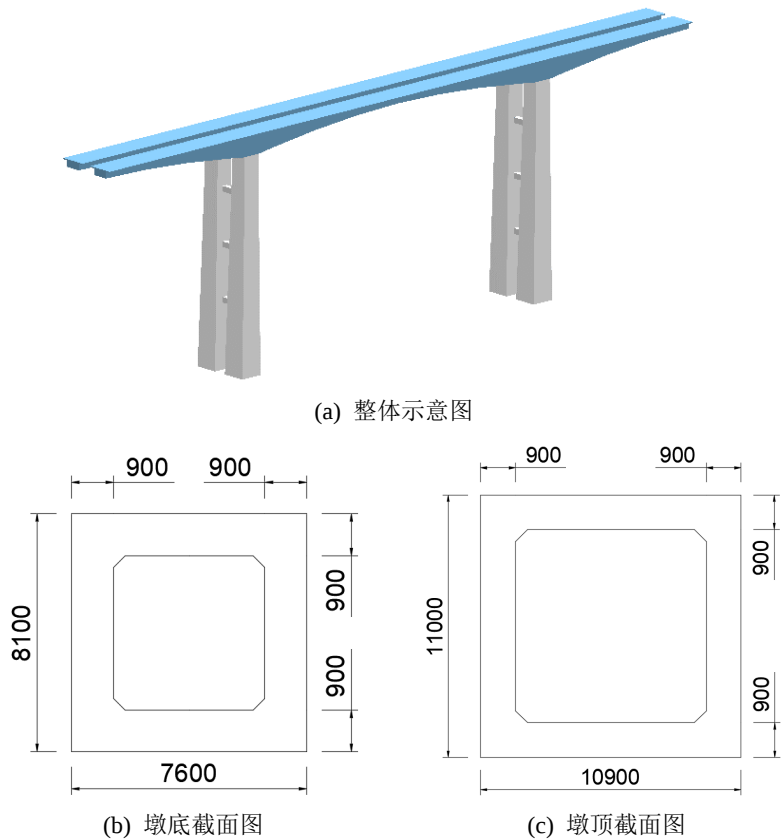


Figure 1. Structural dimensions of prototype bridge (mm)
图 1. 原型桥结构尺寸图(mm)

3. 有限元模型

3.1. 材料本构

本文中所建立的 CRFB-SP-RC 桥梁模型中，混凝土材料选用了 OpenSees 中 Concrete02 命令中提供的 Kent-Scott-Park 本构模型来定义约束混凝土和无约束混凝土[10]。钢筋材料选用 OpenSees 中 Steel02 命令提供的 Giuffré-Menegotto-Pinto 双折线钢筋本构模型，该模型既简单又能精确反应大多数钢筋材料在应变范围内的材料行为，同时参数 R 还能很好地反应钢筋的包辛格效应。

3.2. 模型建立

基于地震作用下桥梁上部结构通常保持弹性的特点[11]，本研究采用 OpenSees 中的弹性梁柱单元模

拟主梁(弹性模量 3.55×10^4 MPa, 泊松比 0.2)。通过设计图纸获取变截面主梁的截面面积 S 、惯性矩 I_y 和 I_z 参数构建刚度矩阵, 并按设计尺寸计算质量以集中质量法分配至各节点。

在抗震分析中, 桥墩往往进入弹塑性阶段, 因此本研究采用基于力的梁柱单元(Force-Based Beam-Column Element)和纤维截面(Fiber Section)对桥墩进行模拟。CRFB-SP-RC 建模时, 纤维截面由核心约束混凝土、保护层无约束混凝土和钢筋纤维组成。

本研究在墩身四等分点处设置三道 $250 \text{ cm} \times 250 \text{ cm}$ 横系梁, 采用纤维截面建模。为分析横系梁数量影响, 分别在墩高二等分点和三等分点设置 1 道和 2 道横系梁, 系统研究其对双幅带系梁现浇式超高墩连续刚构桥横桥向抗震性能的影响规律。

3.3. 地震波选取

本文基于原型桥的抗震类别(A 类桥梁)和所处的场地类型(II 类场地), 依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)的相关规定生成反应谱, 并从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库选取了 3 条非长周期地震动(Non-Long-Period Ground Motion, NLP), 3 条长周期非脉冲型地震动(Non-Pulse-Like Long-Period Ground Motion, NPLP)和 3 条($T_p \approx T_1$)近断层脉冲型地震动(Near-Fault Pulse-Type Ground Motion, NFPT)进行对比分析, 试验工况如表 1 所示。

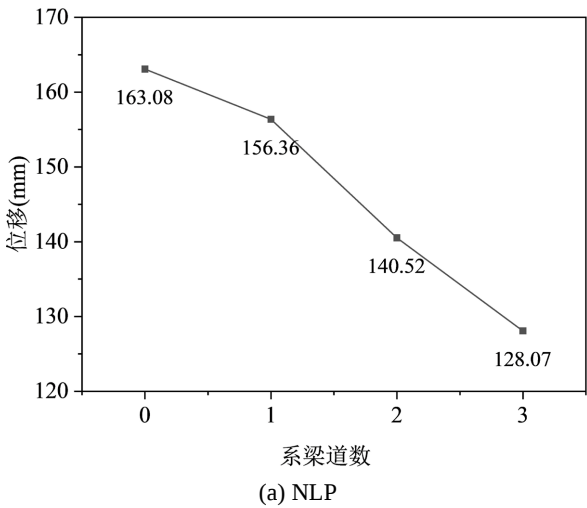
Table 1. Test conditions
表 1. 试验工况

地震波类型	地震波
NLP	RSN14, RSN40, RSN1159
NPLP	RSN55, RSN895, RSN1153
NFPT ($T_p \approx T_1$)	RSN159, RSN1086, RSN1182

4. 横桥向地震响应分析

4.1. 墩顶位移响应

不同类型横桥向地震波作用下, 对于布置不同系梁道数的 CRFB-SP-RC 整桥墩顶峰值位移(均值)具体的变化趋势如图 2 所示。



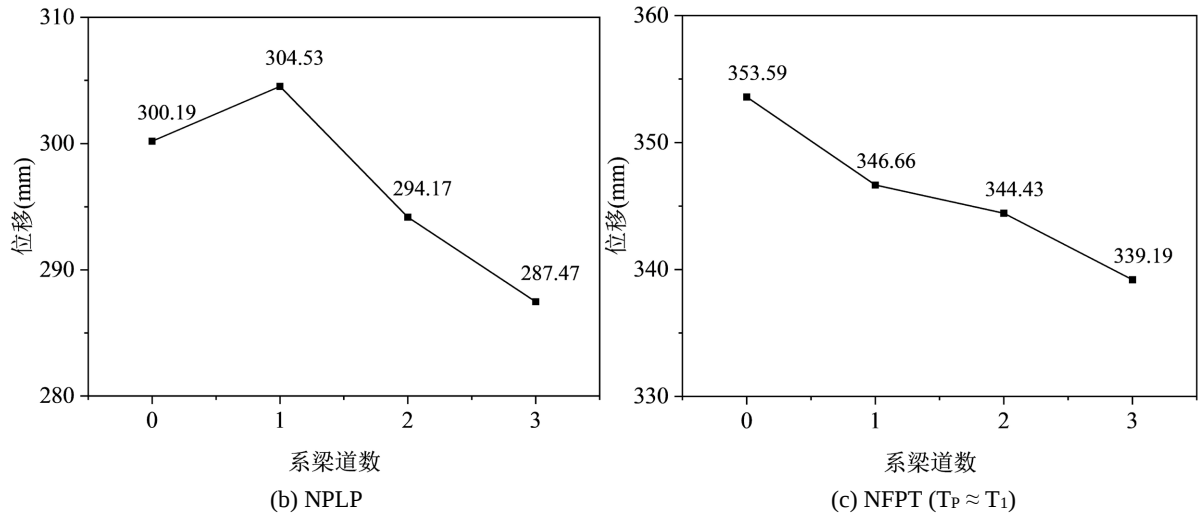
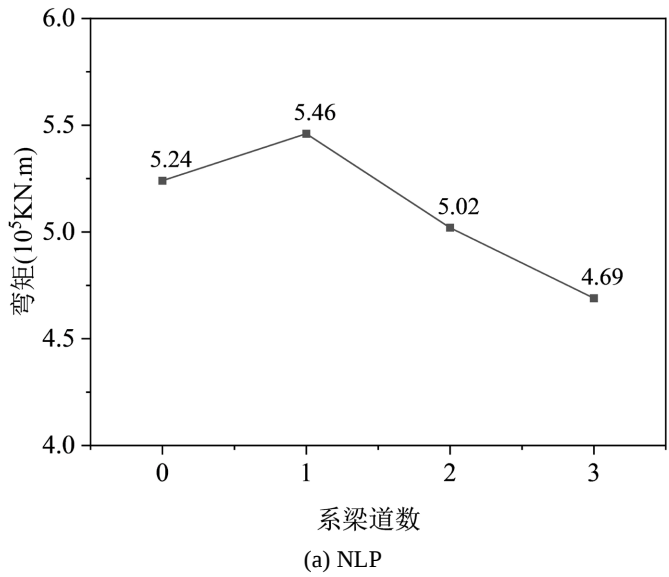


Figure 2. Mean peak displacement of the pier top
图 2. 墩顶峰值位移均值

由图 2 可以看出,在相同类型的地震波作用下,墩顶峰值位移呈现随横系梁道数增加而降低的规律,例如,在 NFPT ($T_p \approx T_1$)作用下,CRFB-SP-RC 在横系梁道数分别为 0、1、2、3 时的横桥向墩顶峰值位移为 353.59 mm、346.66 mm、344.43 mm、339.19 mm,由此可以得出横系梁道数的增加可以降低结构在地震作用下的横桥向位移响应。多道横系梁对结构形成约束作用,会显著限制墩身的弯曲变形,从而有效降低墩顶的水平位移。此外,在同一横系梁道数,不同类型地震动作用下,CRFB-SP-RC 墩顶峰值位移呈现以下规律: $Ld_{NLP} < Ld_{NPLP} < Ld_{NFPT(T_p \approx T_1)}$ 。例如,当结构有 2 道横系梁时,CRFB-SP-RC 在 NLP、NPLP 和 NFPT ($T_p \approx T_1$)作用时的墩顶峰值位移为 140.52 mm、294.17 mm 和 344.43 mm。

4.2. 墩底弯矩响应

不同地震动类型作用下,对于布置不同横系梁道数的 CRFB-SP-RC 整桥墩底弯矩峰值(均值)具体的变化趋势如图 3 所示。



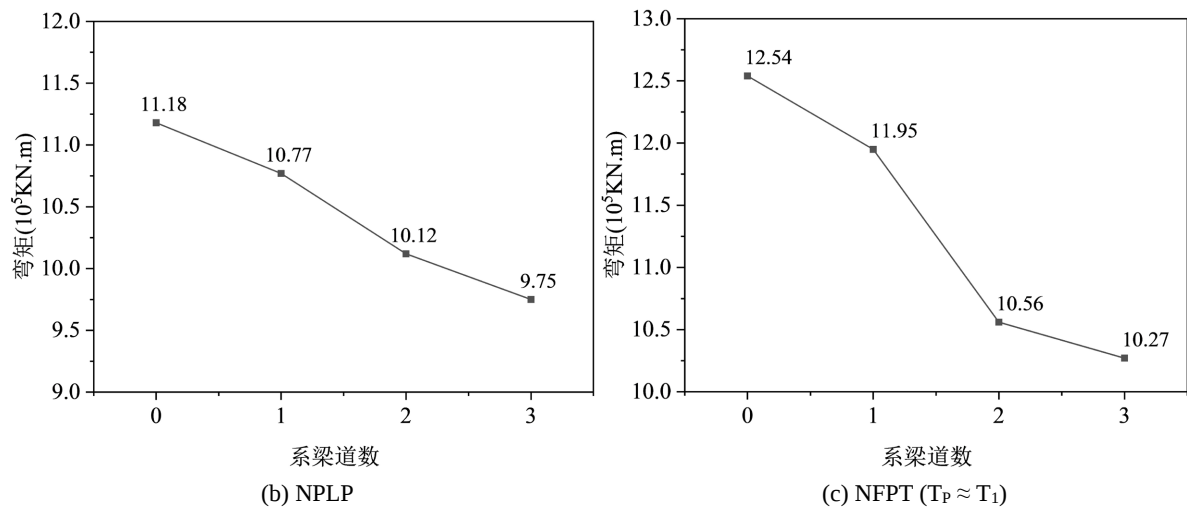


Figure 3. Mean peak bending moment of pier bottom
图 3. 墩底弯矩峰值均值

由图 3 可以看出,在同一横系梁道数,不同类型地震动作用下,CRFB-SP-RC 墩底峰值弯矩呈现如下规律: $M_{\text{NLP}} < M_{\text{NPLP}} < M_{\text{NEFT}(T_p \approx T_i)}$ 。例如,当结构有 3 道横系梁时,CRFB-SP-RC 在 NLP、NPLP 和 NEFT ($T_p \approx T_i$)作用下的横桥向墩底弯矩峰值分别为 $4.69 \times 10^5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 、 $9.75 \times 10^5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 、 $10.27 \times 10^5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 。在相同类型的地震波作用下,CRFB-SP-RC 的墩底弯矩峰值大致上呈现出随着横系梁道数的增加而降低的规律,例如,在 NPLP 地震波作用下,CRFB-SP-RC 在横系梁道数分别为 0、1、2、3 时的横桥向墩底弯矩峰值为 $11.18 \times 10^5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 、 $10.77 \times 10^5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 、 $10.12 \times 10^5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 、 $9.75 \times 10^5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 。横系梁通过连接相邻桥墩形成协同受力体系,提高整体刚度并协调墩身变形。多道横系梁会形成更强的弯矩分配能力,使墩身各截面共同承担外部弯矩,而非仅由墩底单独抵抗,因此墩底截面的弯矩相对减小。

4.3. 墩底弯矩 - 曲率响应

本小节通过分析墩底截面的弯矩 - 曲率探究 CRFB-SP-RC 在横桥向地震作用下墩底截面的耗能情况。

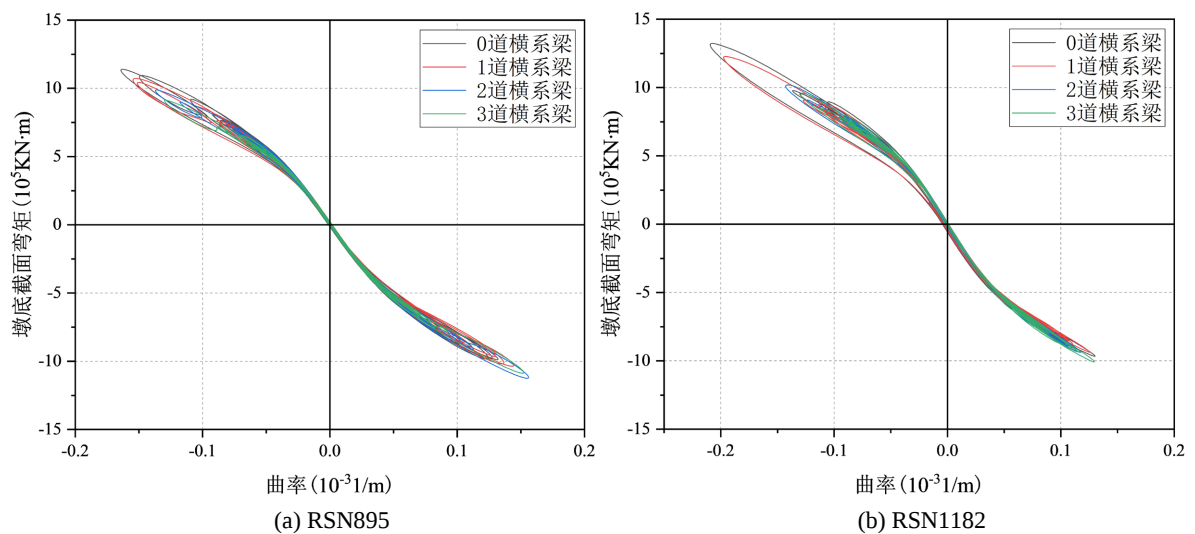


Figure 4. M- ϕ curves at the bottom section of the pier
图 4. 墩底截面 M- ϕ 曲线

由图 4 可以看出, 在 RSN895、RSN1182 典型地震波的激励下, 结构墩底截面刚进入弹塑性状态, 由于输入地震波峰值加速度较小, 弹塑性特征略不明显, 但从对比分析中可以看出, 随着横系梁道数的增加, CRFB-SP-RC 墩底截面弯矩 - 曲率所围成的面积减小。横系梁通过连接桥墩形成整体框架, 提高结构刚度和协调变形能力, 使荷载分布更均匀。由于墩底塑性铰的形成受到抑制, 能量更多地通过结构的弹性变形储存或由上部构件耗散, 而非通过墩底的非线性变形耗散, 因此墩底的能量耗散减少, 从而减少桥墩底部的损伤。同时, 在相同系梁道数下, RSN1182 (NFPT, $T_p \approx T_1$) 弯矩 - 曲率所围成的面积相对较大。

5. 总结

本文采用 OpenSees 软件建立了 CRFB-SP-RC 原型桥的纤维单元模型, 探究了不同类型横向地震波作用下横系梁道数对双幅带系梁现浇式超高墩连续刚构桥横桥向地震响应影响规律, 主要研究结论如下:

1) 相同横系梁道数, 不同类型地震动作用下 CRFB-SP-RC 的横桥向墩顶峰值位移呈现出相同的规律: $Ld_{NLP} < Ld_{NPLP} < Ld_{NFPT(T_p \approx T_1)}$ 。

2) 相同横系梁道数, 不同类型地震动作用下 CRFB-SP-RC 墩底峰值弯矩亦呈现出相同的规律: $M_{NLP} < M_{NPLP} < M_{NFPT(T_p \approx T_1)}$ 。

3) 随着横系梁道数的增加, CRFB-SP-RC 的墩顶峰值位移和墩底弯矩呈现降低的趋势, 墩底截面的耗能也随之降低, 即横系梁道数的增加可提高 CRFB-SP-RC 抗震性能。

基金项目

北京建工集团有限责任公司科技计划项目, (RZCA500620220001)、云教科教便〔2021〕91 号; 中铁一局集团第二工程有限公司科技项目(2022A-041)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 2231-01-2020 公路桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [2] 韩强, 贾振雷, 周雨龙, 等. 震后可恢复功能桥梁结构之摇摆桥梁研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 118-133.
- [3] 金如意, 申彦利. 桩-土相互作用下的桥梁高墩地震易损性复合参数分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1016-1023, 1056.
- [4] 兰峰, 王克海. 中小跨径双柱式高墩桥梁横系梁对抗震性能的影响[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 92-97.
- [5] 刘黎阳, 马健. 双柱框架式桥墩横系梁的合理布置方式研究[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 153-157.
- [6] 陈彦江, 郝朝伟, 李勇. 系梁设置对双肢薄壁刚构桥地震响应影响分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 63-70.
- [7] 庞兴. 横系梁设置对双柱墩的抗震性能影响分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [8] 杨兴华. 横系梁对超高墩大跨连续刚构双幅桥抗震性能的影响分析[J]. 世界桥梁, 2018, 46(4): 78-82.
- [9] 刘琦. 马蹄河(50 + 90 + 50) m 连续刚构桥地震响应分析[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [10] Yassin, M.H.M. (1994) Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures under Monotonic and Cycling Loads. Master's Thesis, University of California.
- [11] 王瑾, 许维炳, 杜修力, 等. 现浇及装配式超高墩连续刚构桥碰撞响应及其影响试验[J]. 中国公路学报, 2024, 37(9): 68-82.