

文章编号: 1674—8247(2024)05—0008—08

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.002

冲刷作用对考虑轨道约束的连续梁桥纵向地震响应影响分析

袁宇航¹ 薛小强¹ 吕龙¹ 刘力维²

(1. 成都理工大学, 成都 610059;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 铁路桥因冲刷作用减弱了桩-土间约束, 增大了地震作用下的安全风险。本文以某高速铁路连续梁桥为工程背景, 利用 OpenSees 建立梁-轨一体化计算模型, 研究了道床阻力系数和端刺对不同冲刷深度下桥梁地震响应的影响, 分析了轨道约束对桥梁地震响应及减震效果的影响, 探讨非一致冲刷作用对桥梁地震响应的影响。结果表明: (1) 不同支座下桥梁地震响应随冲刷深度变化受道床阻力系数影响较大; 端刺结构对冲刷作用下桥梁地震响应影响较为明显; (2) 轨道约束对冲刷作用下设置普通支座的桥梁地震响应影响显著, 而对设置摩擦摆式支座的桥梁地震响应影响较小; (3) 桥梁减震效果随冲刷深度增加而逐渐降低, 且冲刷深度越大, 轨道约束对桥梁减震效果影响越显著; (4) 非一致冲刷作用下轨道约束对桥梁地震响应影响较一致冲刷更显著。研究成果可为跨越河谷地区铁路桥抗震设计提供参考。

关键词: 铁路桥梁; 冲刷; 数值计算; 轨道约束; 地震响应
中图分类号: U442.5+5 文献标志码: A

Analysis of Scour Impact on Longitudinal Seismic Responses of Continuously Girder Railway Bridges Considering Track Constraints

YUAN Yuhang¹ XUE Xiaoqiang¹ LV Long¹ LIU Liwei²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Scour actions tend to weaken the pile-soil interaction in railway bridges, amplifying seismic risk. Based on a high-speed railway continuous girder bridge, this study employed OpenSees to establish an integrated girder-track computational model, and examined the influence of ballast resistance coefficient and rail anchors on bridge seismic responses under varying scour depths. It further analyzed the effect of track constraints on bridge seismic responses and damping effectiveness, and explored the impact of non-uniform scour on bridge seismic behavior. Findings indicate: (1) The seismic response of bridges under different bearings exhibits strong dependence on the ballast resistance coefficient as scour depth varies; rail anchor structures significantly affect bridge seismic response under scour conditions. (2) Track constraints have a pronounced effect on the seismic response of bridges with conventional bearings subjected to scour, whereas their influence is less pronounced for bridges equipped with friction pendulum bearings. (3) Bridge damping efficiency decreases with increasing scour depth, and the influence of track constraints on damping becomes more

收稿日期: 2023-02-20

作者简介: 袁宇航(1998-), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金项目(U1934207)

引文格式: 袁宇航, 薛小强, 吕龙, 等. 冲刷作用对考虑轨道约束的连续梁桥纵向地震响应影响分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(5): 8-15.

YUAN Yuhang, XUE Xiaoqiang, LV Long, et al. Analysis of Scour Impact on Longitudinal Seismic Responses of Continuously Girder Railway Bridges Considering Track Constraints[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5): 8-15.

substantial as scour deepens. (4) Non-uniform scour exerts a more pronounced influence on bridge seismic response compared to uniform scour under track constraints. These conclusions can serve as a reference for seismic design of railway bridges crossing river valleys.

Key words: railway bridge; scour; numerical computation; track constraints; seismic response

冲刷会削弱土体对桥梁的约束作用,改变动力特性^[1],进而影响桥梁的地震响应。冲刷作用对桥梁结构抗震性能的影响受到国内外学者的高度关注。

现有文献中针对桩基冲刷与地震响应的研究已较多^[2-3]。刘泳钢^[4]等研究了冲刷作用对连续梁桥地震响应的影响,结果表明冲刷作用对桩基纵向地震受力不利。部分学者研究了冲刷作用下桥梁地震易损性,得出在不同损伤状态下,随着冲刷深度的增大,桥梁桩基易损性增大,而桥墩失效概率减小^[5-6]。

以上文献主要针对考虑冲刷作用的公路桥梁地震响应和地震易损性,部分学者还研究了铁路桥冲刷防护与治理^[7-8]。靳志伟^[9]对铁路特大桥河段冲刷进行了研究,得出了最大冲刷深度,为后续桥墩埋深设计提供了参考;方理刚^[10]等研究了铁路桥墩在冲刷作用下的稳定性,结果表明合理增大桥墩周围土粒径能有效提高冲刷稳定性;李保龙^[11]通过振动试验分析了冲刷对铁路桥桥墩的自振特性影响,得出受到冲刷后,铁路桥桥墩自振频率明显下降。

本文以某高速铁路连续梁桥为工程背景,利用

OpenSees 建立梁-轨一体化计算模型,研究了道床阻力系数和端刺对不同冲刷深度下桥梁地震响应的影 响,分析了轨道约束对桥梁地震响应及减震效果的影响,探讨了非一致冲刷作用对桥梁地震响应的影 响。

1 桥梁模型

1.1 工程概况

以主桥跨径布置为(57+104+57)m的铁路连续梁桥为工程背景,主梁为预应力混凝土连续箱梁,采用单箱单室截面设计。梁高3.6~6.5 m,顶板宽12.6 m、底板宽6.7 m。桥墩为圆柱墩,墩高12 m,直径6 m,基础采用4根 $\phi 2$ m的钻孔灌注桩,桩长20 m。主墩处设置摩擦摆式支座。1号墩为固定墩。

两侧引桥为(2×32)m混凝土简支箱梁,采用单箱单室截面设计。梁高2.27 m。桥墩为圆柱墩,墩高15 m,直径5 m,基础采用4根 $\phi 2$ m的钻孔灌注桩,桩长15 m。引桥墩采用盆式橡胶支座。

桥梁总体布置如图1所示。

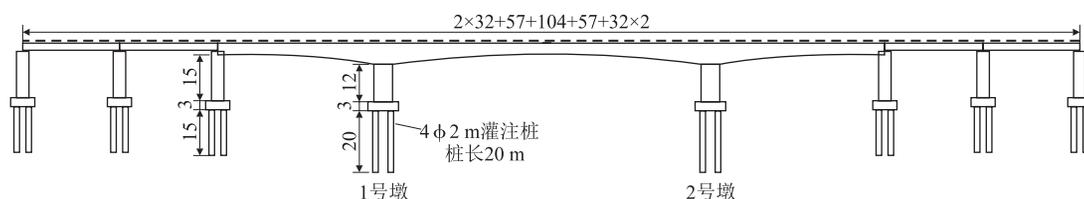


图1 桥梁总体布置图(m)

1.2 计算模型

利用 OpenSees 建立梁-轨一体化模型,轨道、主梁、桥墩和桩基础采用梁单元模拟,引桥墩底固结,仅

考虑主桥桩-土相互作用。摩擦摆式支座和线路阻力采用双线性模型,端刺采用线性弹簧模型,桩-土相互作用采用 $p-y$ 曲线法模拟。计算模型如图2所示。

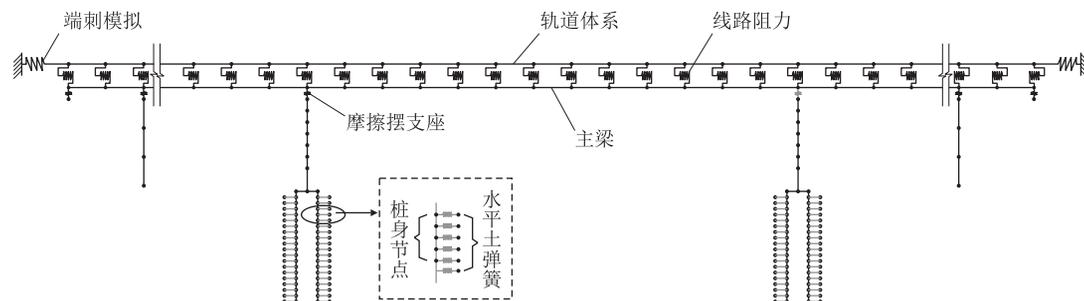


图2 桥梁有限元计算模型图

1.2.1 梁轨间作用

道床纵向阻力-位移关系如图3所示,OpenSees中采用Steel01材料模拟^[12],初始刚度根据式(1)计算。将100 m摩擦板与主端刺串联为刚度 7.6×10^5 kN/m的线性弹簧,并以此作为轨道边界^[13]。

$$K_a = F_a \times l / \mu \quad (1)$$

式中: K_a ——初始刚度(kN/mm);

F_a ——道床纵向阻力系数(单位长度纵向阻力),无载时约在10~20 kN/m之间;

l ——弹簧间距,取8 m;

μ ——相对位移,取2 mm。

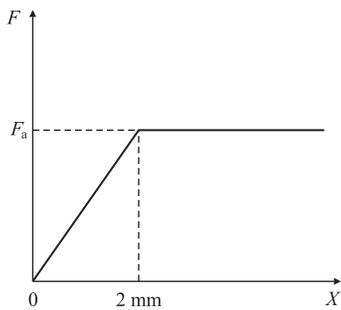


图3 道床纵向阻力-位移关系图

1.2.2 桩-土相互作用

桥址区土体为中砂,土体深度20 m,有效容重 30 kN/m^3 ,内摩擦角 30° 。砂土 p - y 曲线可按式(2)确定。OpenSees中采用PySimple1材料模拟。

$$P = \psi P_u \tanh\left(\frac{KZ}{\psi P_u} Y\right) \quad (2)$$

式中: P ——地面以下 Z 深度处水平土抗力(kPa);

ψ ——计算系数,动力计算取0.9;

Y ——地面以下 Z 深度处桩的侧向水平变形(mm);

K ——土抗力的初始模量(kN/m^3);

P_u ——地面以下 Z 深度处单位桩长的极限水平土抗力(kPa);

Z ——地面以下桩的任一深度(m)。

1.2.3 桥梁支座模拟

摩擦摆式支座采用双线性模型,恢复力如图4(a)所示^[14],OpenSees中选用Steel01材料。初始刚度 K_1 和屈后刚度 K_2 分别按式(3)、式(4)计算^[15]:

$$K_1 = \mu W / D_y \quad (3)$$

$$K_2 = W / R \quad (4)$$

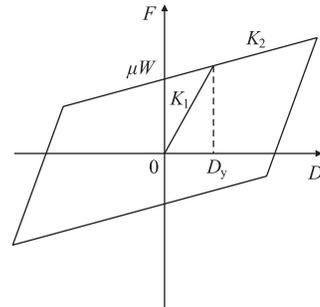
式中: μ ——摩擦因数,取0.005;

W ——竖向承载力,取45 000 kN;

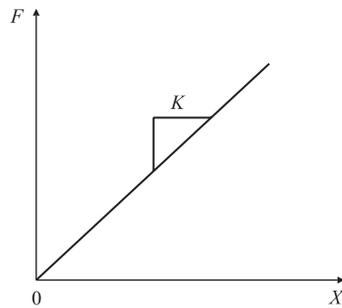
D_y ——屈服位移,取2 mm;

R ——有效半径,取2 m。

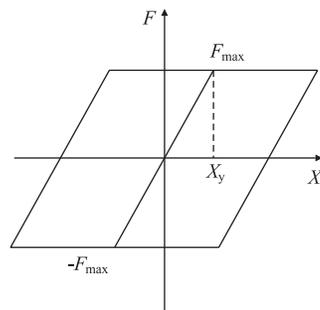
普通支座中固定支座采用线性模型,活动支座采用理想弹塑性模型,其力与位移关系分别如图4(b)、图4(c)所示,其中, F 为剪力(kN); X 为位移(mm); K 为线性弹簧刚度; X_y 为屈服位移。OpenSees中采用零长度单元(Zero Length Element)模拟。



(a) 摩擦摆式支座



(b) 固定支座



(c) 活动支座

图4 支座力与位移关系图

摩擦摆(FPB)支座和普通支座在主桥上的具体布置如图5所示。

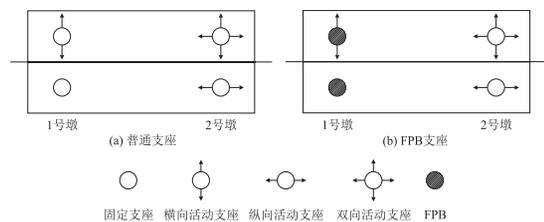


图5 主桥支座设置图

2 结构动力特性及地震动输入

2.1 结构动力特性

为研究轨道约束对冲刷作用下桥梁结构自振周期的影响,分析了设置普通支座后桥梁自振周期随冲刷深度的变化关系,如图 6 所示。

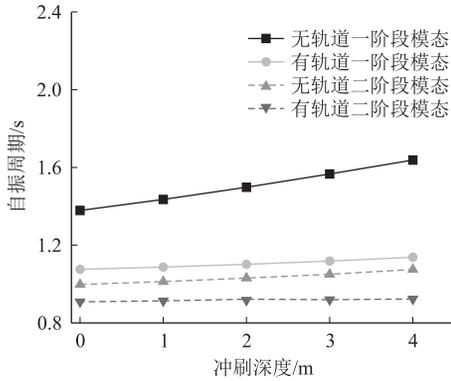


图 6 轨道约束对冲刷作用下桥梁结构自振周期影响图

由图 6 可知,桥梁结构前两阶自振周期均随冲刷深度增大而逐渐增大,且无轨道约束时其增幅较有轨

道约束更显著;与无轨道约束相比,考虑轨道约束后桥梁结构周期有所减小,这是因为轨道约束使得上部结构整体性增加、桥梁纵向刚度增大。

2.2 地震动输入

根据 GB 50111-2006《铁路工程抗震设计》^[16],按罕遇地震,设防烈度 8 度,场地类别 II 类,特征周期分区为 2 区,反应谱特征周期 $T_g = 0.4\text{ s}$,使用 SIMQKE_GR 地震波合成软件,生成 7 条人工地震波。地震动纵向输入,计算结果取 7 条地震波结果的平均值。

3 考虑冲刷作用的桥梁地震响应

3.1 道床阻力系数影响

为研究道床阻力系数对冲刷作用下桥梁地震响应的影 响,分析了不同道床阻力系数下设置普通支座和摩擦摆式支座的桥梁地震响应。道床阻力系数取 10 kN/m 、 15 kN/m 和 20 kN/m 。道床阻力系数对桥梁地震响应影响如图 7、图 8 所示。

由图 7 可知,普通支座下,随着冲刷深度增大,桥梁梁端位移增大,墩底剪力和墩底弯矩均减小,同一冲

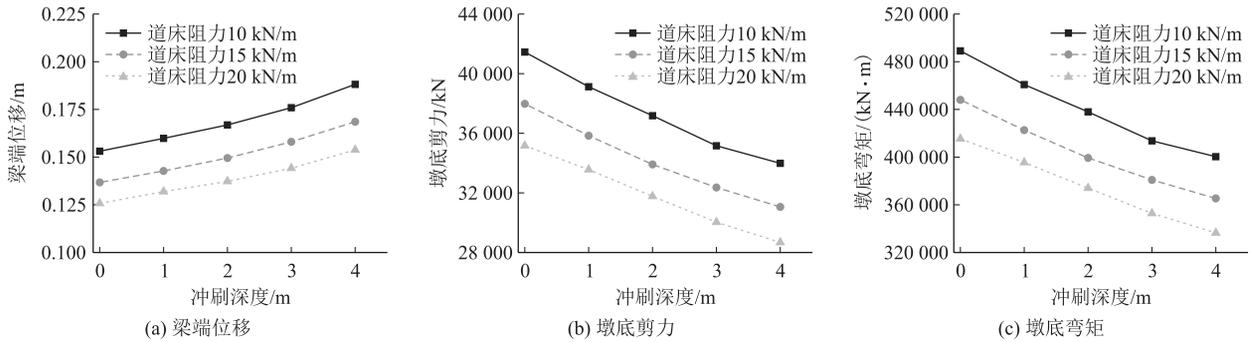


图 7 道床阻力系数对设置普通支座桥梁地震响应影响图

刷深度下,桥梁地震响应随道床阻力系数增大而逐渐减小。由图 8(a)可知,摩擦摆式支座下,桥梁梁端位移随冲刷深度增大而增大;由图 8(b)可知,不同阻力系数下墩底剪力变化规律不一致,当阻力系数为

10 kN/m 时,墩底剪力随冲刷深度增大而先增大后逐渐减小,当阻力系数为 15 kN/m 时,墩底剪力随冲刷深度增大而先减小后增大,当阻力系数为 20 kN/m 时,墩底剪力随冲刷深度增大而减小;由图 8(c)可

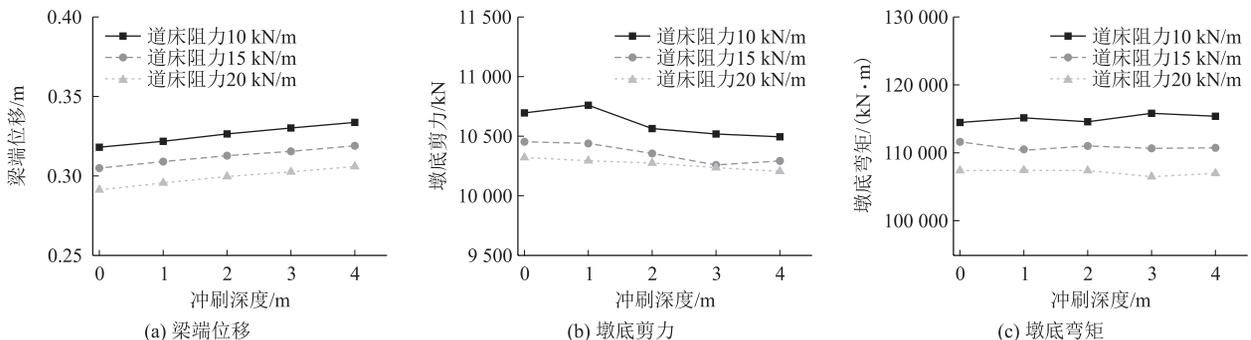


图 8 道床阻力系数对设置摩擦摆式支座桥梁地震响应影响图

知,墩底弯矩随冲刷深度增大而变化较小;同一冲刷深度下,桥梁地震响应随道床阻力系数增大而逐渐减小。

综上所述,不同支座下桥梁地震响应随冲刷深度变化规律不一致,普通支座下桥梁地震响应受冲刷作用影响较摩擦摆式支座更显著,这是因为冲刷延长了非隔震桥梁的周期,避开了反应谱卓越周期的平台

段,但隔震桥梁自身周期就较长,冲刷对其造成的影响不大。

3.2 端刺结构影响

为研究端刺结构对冲刷作用下桥梁地震响应影响,分析了有端刺、无端刺结构下设置普通支座和摩擦摆式支座的桥梁地震响应(道床阻力系数取 15 kN/m),如图 9、图 10 所示。

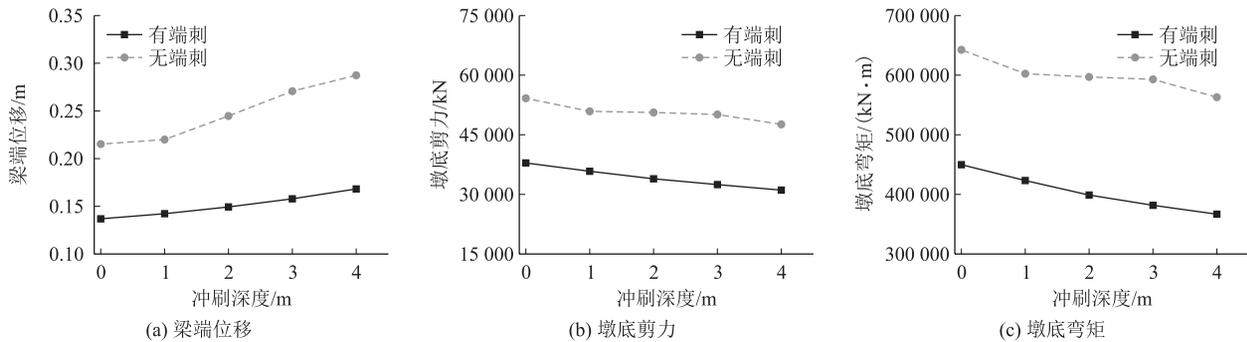


图 9 端刺结构对设置普通支座桥梁地震响应影响图

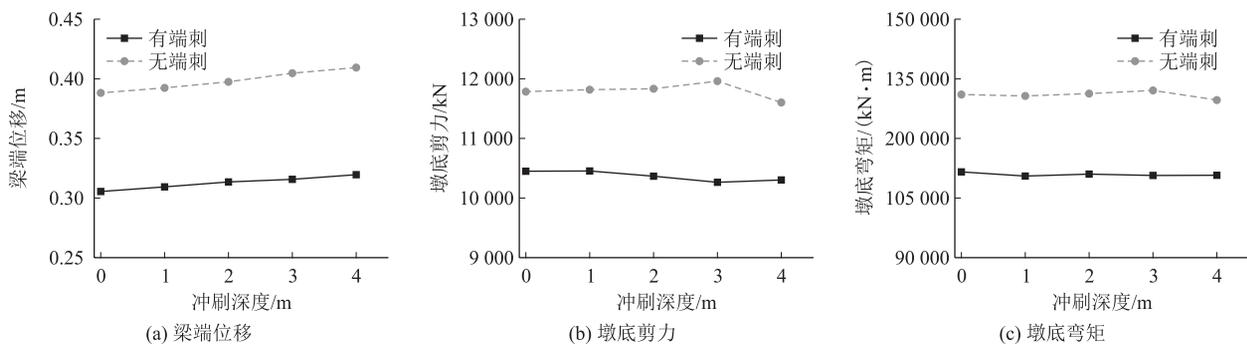


图 10 端刺结构对设置摩擦摆式支座桥梁地震响应影响图

由图 9 可知,普通支座下,当冲刷深度从 0 m 到 4 m 时,有端刺和无端刺的梁端位移分别增加了 33.7% 和 23.0%,墩底剪力分别减小了 12.3% 和 18.2%,墩底弯矩分别减小了 12.3% 和 18.5%;同一冲刷深度下,有端刺结构的桥梁地震响应小于无端刺桥梁地震响应,这是因为端刺结构能较好地分配地震力,从而降低桥梁地震响应。由图 10(a)可知,摩擦摆式支座下,桥梁梁端位移随冲刷深度增大而增大;由图 10(b)、图 10(c)可知,有端刺、无端刺结构下墩底地震响应变化规律不一致,当有端刺时,墩底剪力和墩底弯矩随冲刷深度增大而先增大后逐渐减小,当无端刺时,墩底剪力和墩底弯矩随冲刷深度增大而变化较小;同一冲刷深度下,有端刺结构的桥梁地震响应小于无端刺结构。综上所述,端刺结构对冲刷作用下桥梁地震响应影响较为明显。与摩擦摆式支座相比,

普通支座下桥梁地震响应受端刺结构影响更明显。

3.3 轨道约束对桥梁地震响应影响

为研究轨道约束对冲刷作用下桥梁地震响应的影 响,分析了有轨道、无轨道约束下桥梁的地震响应(道床阻力系数取 15 kN/m),如图 11 所示。

由图 11 可知,普通支座下,随着冲刷深度增大,桥梁梁端位移增大,墩底剪力和墩底弯矩均减小;同一冲刷深度下,有轨道约束的桥梁地震响应均大于无轨道约束,若不考虑轨道约束,在冲刷深度 4 m 时桥梁墩底剪力和墩底弯矩将分别被低估 16.5% 和 16.0% 左右。摩擦摆式支座下,桥梁梁端位移随着冲刷深度增大而增大,但墩底剪力和墩底弯矩随冲刷深度增大而变化不明显,同一冲刷深度下,有轨道约束时

桥梁墩底地震响应与无轨道约束时墩底地震响应基本一致。同一冲刷深度下,普通支座的桥梁地震

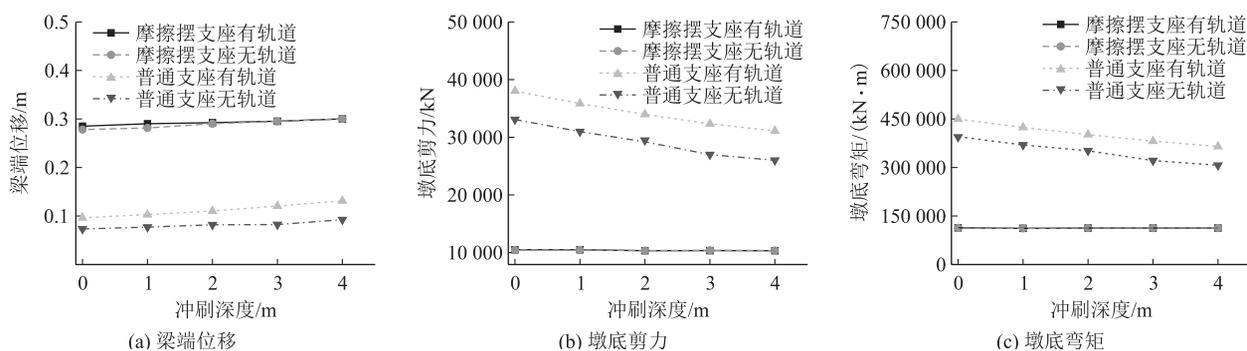


图 11 轨道约束对冲刷作用下桥梁地震响应影响图

响应大于摩擦摆支座, 因为摩擦摆支座利用摩擦耗能可以减小主梁传导给桥墩的地震力。综上所述, 冲刷作用下轨道约束对设置普通支座的桥梁地震响应影响较设置摩擦摆式支座的桥梁更大。

3.4 轨道约束对桥梁减震效果影响

为研究轨道约束对冲刷深度作用下桥梁的减震效果的影响, 分析了有轨道、无轨道约束下桥梁减震率, 即(普通支座下地震响应 - 减隔震支座下地震响应)/普通支座下地震响应, 如表 1 所示。

表 1 冲刷作用下桥梁减震效果表

冲刷深度	地震响应	无轨道约束			有轨道约束		
		普通支座	减隔震支座	减震率	普通支座	减隔震支座	减震率
0 m	墩底剪力 /kN	33 086	10 437	68.5%	37 952	10 456	72.5%
	墩底弯矩 /kN·m	392 868	110 444	71.9%	448 703	111 530	75.1%
1 m	墩底剪力 /kN	30 980	10 383	66.5%	35 835	10 446	70.9%
	墩底弯矩 /kN·m	369 116	110 760	70.0%	423 134	110 490	73.9%
2 m	墩底剪力 /kN	29 509	10 259	65.2%	33 901	10 359	69.4%
	墩底弯矩 /kN·m	351 130	111 360	68.3%	399 801	110 967	72.2%
3 m	墩底剪力 /kN	27 001	10 323	61.8%	32 347	10 261	68.3%
	墩底弯矩 /kN·m	321 164	112 052	65.1%	381 217	110 657	71.0%
4 m	墩底剪力 /kN	25 904	10 347	60.1%	31 033	10 300	66.8%
	墩底弯矩 /kN·m	307 155	112 477	63.2%	365 690	110 740	69.7%

由表 1 可知, 随着冲刷深度的增大, 有轨道约束和无轨道约束的桥梁减震效果均降低。由图 6 可知, 减震效果降低的根本原因在于冲刷对非隔震桥梁的影响; 同一冲刷深度下, 有轨道约束的桥梁减震效果优于无轨道约束。当冲刷深度从 0 m 到 4 m 时, 轨道

约束对桥梁墩底剪力和墩底弯矩的减震率的影响分别从 5.8% 增大到 11.4%, 4.5% 增大到 10.3%。综上所述, 冲刷作用对有轨道约束的桥梁减震效果影响较小, 而对无轨道约束的桥梁减震效果影响较大, 轨道约束对桥梁减震效果的影响随着冲刷深度增大越来越显著。

4 考虑非一致冲刷作用的桥梁地震响应

为研究轨道约束对非一致冲刷作用下桥梁地震响应的影响, 分析了有轨道、无轨道约束下桥梁的地震响应, 分别考虑一致和非一致两种冲刷形式(一致冲刷考虑双墩同时冲刷, 非一致冲刷仅考虑单墩冲刷), 结果如图 12、图 13 所示。

由图 12(a) 可知, 无轨道约束时, 随着冲刷深度的增大, 桥梁梁端位移逐渐增大; 由图 12(b) 可知, 随着冲刷深度的增大, 非一致冲刷作用下墩底剪力逐渐减小, 而一致冲刷作用下墩底剪力先减小后略有增大; 由图 12(c) 可知, 随着冲刷深度的增大, 非一致冲刷作用下墩底弯矩逐渐减小, 而一致冲刷作用下墩底弯矩逐渐增大。当冲刷深度较小时, 一致冲刷作用下桥梁地震响应小于非一致冲刷作用, 而当冲刷深度较大时, 一致冲刷作用下桥梁地震响应大于非一致冲刷作用。由图 13(a) 可知, 有轨道约束时, 当冲刷深度从 0 m 增加到 4 m, 一致冲刷和非一致冲刷的梁端位移分别增加了 3.3% 和 1.4%; 由图 13(b) 可知, 墩底剪力随冲刷深度的增大而先减小后略有增大; 由图 13(c) 可知, 墩底弯矩随冲刷深度的增大而先略有增大后减小; 同一冲刷深度下, 一致冲刷作用下桥梁地震响应大于非一致冲刷作用。综上所述, 不考虑轨道约束时, 不同冲刷形式下桥梁的地震响应受冲刷深度的影响, 冲刷深度较小时, 非一致冲刷较一致冲刷对桥梁地震响应更不利; 考虑轨道约束时, 不同冲刷深度下一致冲刷均较非一致冲刷对桥梁地震响应更不利。

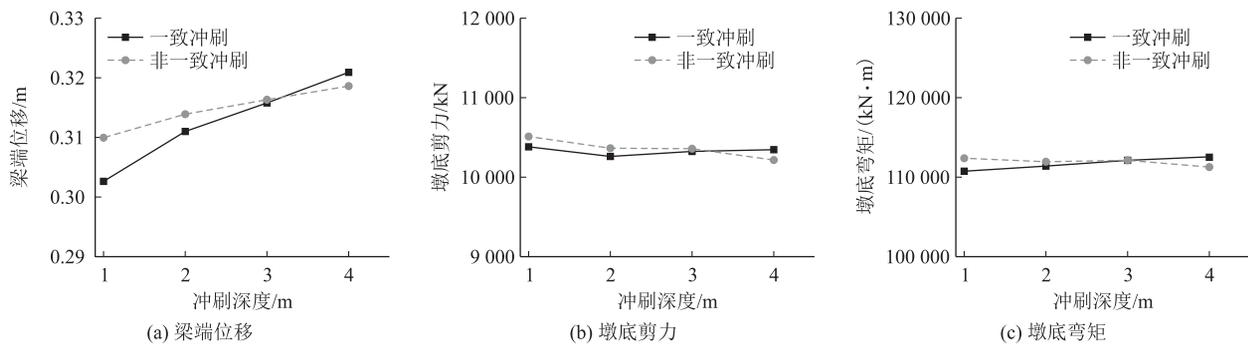


图 12 不同冲刷形式下无轨道约束时桥梁地震响应影响图

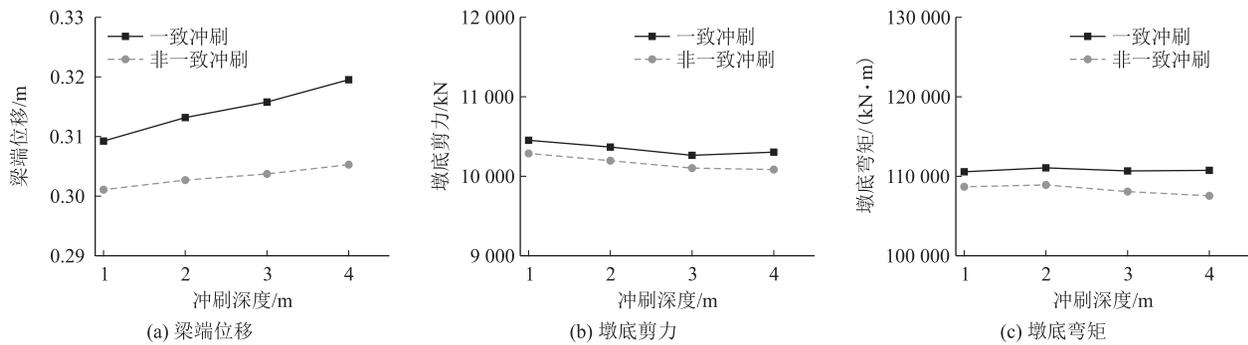


图 13 不同冲刷形式下有轨道约束时桥梁地震响应影响图

5 结论

本文以某铁路连续梁为背景,采用 OpenSees 软件建立桥梁计算模型,研究了冲刷作用下道床阻力系数和端刺对桥梁地震响应的影响,分析了轨道约束对桥梁地震响应和减震效果的影响,探讨非一致冲刷作用对桥梁地震响应的影响,得到主要结论如下:

(1) 普通支座下,桥梁地震响应随冲刷深度变化受道床阻力系数影响较小,摩擦摆式支座下,墩底剪力随冲刷深度变化受道床阻力系数影响较大,而墩底弯矩受其影响不显著。

(2) 端刺结构对冲刷作用下桥梁地震响应影响较为明显,考虑端刺时,随着冲刷深度的增大,普通支座下桥梁地震响应逐渐减小,摩擦摆式支座下桥梁地震响应先增大后减小。

(3) 考虑冲刷作用后,轨道约束对设置普通支座下桥梁地震响应较设置摩擦摆式支座后桥梁地震响应更显著;桥梁减震效果随冲刷深度增大逐渐降低,轨道约束对桥梁减震效果影响随冲刷深度增加而增大。

(4) 轨道约束对不同冲刷形式下桥梁地震响应影响明显,考虑轨道约束时,不同冲刷深度下一致冲刷均较非一致冲刷对桥梁地震响应更不利;在较小冲刷深度下,当不考虑轨道约束时,非一致冲刷较一致冲

刷对桥梁地震响应更不利。

参考文献:

- [1] GUO Xuan, WU Yingkui, GUO Ya. Time-dependent Seismic Fragility Analysis of Bridge Systems under Scour Hazard and Earthquake Loads [J]. Engineering Structures, 2016, 121: 52 - 60.
- [2] 叶爱君, 张喜刚, 刘伟岸. 河床冲刷深度变化对大型桩基桥梁地震反应的影响 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 58 - 62.
YE Aijun, ZHANG Xigang, LIU Weian. Effects of Riverbed Scouring Depth on the Seismic Response of Bridges on Pile Foundations [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 58 - 62.
- [3] 李静文, 龚恋, 徐略勤, 等. 桩基冲刷对近海大跨斜拉桥地震响应的分析 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2019, 38(5): 12 - 18, 29.
LI Jingwen, GONG Lian, XU Lueqin, et al. Effect of Pile Scouring on the Seismic Response of Large-span Offshore Cable-stayed Bridges [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2019, 38(5): 12 - 18, 29.
- [4] 刘泳钢, 吕龙. 冲刷作用对连续梁桥桩基地震响应影响 [J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(1): 17 - 21.
LIU Yonggang, LYU Long. Influence of the Scouring Effect on Seismic Responses of the Pile of the Continuous Girder Bridge [J]. Sichuan Building Science, 2019, 45(1): 17 - 21.
- [5] GANESH PRASAD G, BANERJEE S. The Impact of Flood-induced Scour on Seismic Fragility Characteristics of Bridges [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2013, 17(6): 803 - 828.

- [6] WANG Zhenghua, DUENAS-OSORIO L, PADGETT J E. Influence of Scour Effects on the Seismic Response of Reinforced Concrete Bridges[J]. *Engineering Structures*, 2014, 76: 202 – 214.
- [7] 饶露,朱华中,吴天群,等.山区普速铁路桥梁冲刷水害整治方案研究[J].*铁道建筑*,2021,61(10):65–68.
RAO Lu, ZHU Huazhong, WU Tianqun, et al. Study on Regulation Scheme of Scouring Water Damage of Ordinary Speed Railway Bridge in Mountainous Area [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61 (10) : 65 – 68.
- [8] 周外平.铁路桥梁浅基冲刷防护方案探讨[J].*铁路工程技术与经济*,2020,35(1):33–35.
ZHOU Waiping. Discussion on Shallow Foundation Scour Protection Scheme of Railway Bridge [J]. *Railway Engineering Technology and Economy*, 2020, 35 (1) : 33 – 35.
- [9] 靳志伟.养畜牧铁路特大桥河段冲淤分析与冲刷计算[J].*内蒙古水利*,2017(5):31–33.
JIN Zhiwei. Analysis and Calculation of Scouring and Silting in the Reach of Yangmu Railway Bridge[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2017(5): 31 – 33.
- [10] 方理刚,康家涛,沈周,等.湘黔铁路资水大桥冲刷稳定性计算分析[J].*中国铁道科学*,2008,29(1):41–45.
FANG Ligang, KANG Jiatao, SHEN Zhou, et al. Computational Analysis of the Scour Stability of Zishui Bridge on Xiang-Qian Railway [J]. *China Railway Science*, 2008, 29 (1) : 41 – 45.
- [11] 李保龙.通过探测基础刚度评估重载铁路简支梁桥冲刷的影响[J].*铁道建筑*,2019,59(7):12–16.
LI Baolong. Evaluation of Scour Influence for Simply-supported Girder Bridge on Heavy Haul Railway by Detecting Foundation Stiffness [J]. *Railway Engineering*, 2019, 59 (7) : 12 – 16.
- [12] 代丰,林红松,杨文茂,等.中美桥上无砟轨道设计荷载计算方法对比研究[J].*高速铁路技术*,2023,14(3):43–47.
DAI Feng, LIN Hongsong, YANG Wenmao, et al. Comparative Study on Calculation Methods for Design Loads of Ballastless Tracks on Bridges Based on Chinese and American Standards [J]. *High Speed Railway Technology*, 2023, 14 (3) : 43 – 47.
- [13] 张永亮,杨世杰,陈兴冲.基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁地震反应分析[J].*桥梁建设*,2016,46(4):23–28.
ZHANG Yongliang, YANG Shijie, CHEN Xingchong. Analysis of Seismic Responses of High-speed Railway Bridges Based on Integrated Track and Bridge Model [J]. *Bridge Construction*, 2016, 46 (4) : 23 – 28.
- [14] 李晓波.减隔震支座及黏滞阻尼器减震效果分析研究[J].*高速铁路技术*,2021,12(4):34–38.
LI Xiaobo. Analysis of the Damping Effect of Seismic Mitigation and Isolation Bearings and Fluid Viscous Dampers [J]. *High Speed Railway Technology*, 2021, 12 (4) : 34 – 38.
- [15] 黄树强,聂细锋,张大军,等.非对称铁路连续梁桥抗震设计研究[J].*高速铁路技术*,2023,14(2):38–42.
HUANG Shuqiang, NIE Xifeng, ZHANG Dajun, et al. A Study on the Seismic Design of Asymmetric Continuous Girder Railway Bridge [J]. *High Speed Railway Technology*, 2023, 14 (2) : 38 – 42.
- [16] GB 50111–2006 铁路工程抗震设计规范[S].
GB 50111–2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering[S].

(上接第7页)

- WANG Shixing, HE Ke, Yin Xiaokang, et al. One-dimensional Focusing Inversion of the Semi-airborne Transient Electromagnetic Method and Its Application[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(2): 410 – 419.
- [7] Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, et al. Development of Grounded Electrical Source Airborne EM (GREATE)[J]. *Exploration Geophysics*, 1998, 29: 161 – 164.
- [8] Mogi T, Kusunoki K, Kaieda H, et al. Grounded Electrical-source Airborne Transient Electromagnetic (GREATEM) Survey of Mount Bandai, North-Eastern Japan [J]. *Exploration Geophysics*, 2009, 40: 1 – 7.
- [9] 稽艳鞠,王远,徐江,等.无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用[J].*地球物理学报*,2013,56(11):3640–3650.
JI Yanju, WANG Yuan, XU Jiang, et al. Development and Application of the Grounded Long Wire Source Airborne Electromagnetic Exploration System Based on an Unmanned Airship[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56 (11) : 3640 – 3650.
- [10] 刘富波,李巨涛,刘丽华,等.无人机平台半航空瞬变电磁勘探系统及其应用[J].*地球物理学进展*,2017,32(5):2222–2229.
LIU Fubo, LI Jutao, LIU Lihua, et al. Development and Application of a New Semi-airborne Transient Electromagnetic System with UAV Platform[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32 (5) : 2222 – 2229.
- [11] 王仕兴,易国财,王绪本,等.基于分段二分搜索算法的半航空瞬变电磁电导率深度快速成像方法研究[J].*地球物理学进展*,2021,36(3):1317–1324.
WANG Shixing, YI Guocai, WANG Xuben, et al. Research on the Semi-airborne Transient Electromagnetic Conductivity Depth Rapid Imaging Method Based on Segmented Binary Search Algorithm[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36 (3) : 1317 – 1324.
- [12] DE GROOT-HEDLIN C, CONSTABLE S. Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-dimensional Models from Magnetotelluric Data [J]. *Geophysics*, 1990, 55(12): 1613 – 1624.
- [13] RODI W, MACKIE R L. Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion[J]. *Geophysics*, 2001, 66(1): 174 – 187.
- [14] 康敏,胡祥云,康健,等.大地电磁二维反演方法分析对比[J].*地球物理学进展*,2017,32(2):476–486.
KANG Min, HU Xiangyun, KANG Jian, et al. Compared of Magnetotelluric 2D Inversion Methods[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32 (2) : 476 – 486.
- [15] SMITH R S, ANNAN A P, MCGOWAN P D. A Comparison of Data from Airborne, Semi-Airborne, and Ground Electromagnetic Systems [J]. *Geophysics*, 2001, 66(5): 1379 – 1385.