

文章编号: 1674—8247(2025)02—0062—08
DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.010

轨道约束对近断层简支梁桥纵向地震响应影响

李天铭

(中铁一局集团科创产业发展有限公司, 西安 721000)

摘要:随着我国铁路路网规模的不断扩展,高速铁路在近断层地区架设桥梁已成为不可避免的趋势。本文以一座近断层铁路简支梁桥为研究对象,通过有限元分析软件 Opensees 对该桥梁进行精细化建模,重点研究了扣件纵向阻力、滑动层摩擦系数以及剪力齿槽刚度等因素对铁路简支梁桥在地震作用下响应的影响。研究表明,随扣件纵向阻力增大,墩底剪力呈现增大趋势,墩底弯矩则呈现减小趋势,且中墩地震响应大于边墩;随滑动层摩擦系数增大,桥梁地震响应呈现减小趋势,且对边墩的影响较中墩更为显著;随剪力齿槽刚度的增大,桥梁地震响应呈现先增大后趋于稳定;在不同轨道约束作用的影响下,近断层脉冲地震动会显著增加主梁的纵向位移和墩底内力,但并未明显改变地震响应的总体规律。

关键词:轨道约束;近断层;脉冲地震动;纵向地震响应

中图分类号:U448.21⁺7 文献标志码:A

62

Influence of Track Constraints on Longitudinal Seismic Response of Near-fault Simply Supported Beam Bridge

LI Tianming

(Science and Innovation Industrial Development Co., Ltd of China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an 721000, China)

Abstract: With the continuous expansion of China's railway network, it is inevitable to build high-speed railway bridges in near-fault areas. This paper took a near-fault railway simply supported beam bridge as the research object, and employed the finite element analysis software Opensees to finely model the bridge. The study focused on the impact of such factors as the longitudinal resistance of fasteners, friction coefficient of sliding layer and shear alveolar stiffness on seismic response of railway simply supported beam bridge. The results show that with the increase of the longitudinal resistance of the fastener, the shear force at the pier bottom tends to increase, while the bending moment at the pier bottom tends to decrease. Additionally the seismic response of the middle pier is greater than that of the side pier. With the increase of the friction coefficient of the sliding layer, the seismic response of the bridge tends to decrease, with a more significant impact on the side pier compared to the middle pier. With the increase in the stiffness of shear alveolar, the seismic response of the bridge increases first and then stabilizes. Under the influence of different track constraints, near-fault pulse ground motion has a significant amplification on the longitudinal displacement of the main beam and the internal force of the pier bottom, but it does not significantly change the seismic response law.

Key words: track constraints; near fault; pulse ground motion; longitudinal seismic response

收稿日期:2024-11-10

作者简介:李天铭(1976-),男,高级工程师。

引文格式:李天铭.轨道约束对近断层简支梁桥纵向地震响应影响[J].高速铁路技术,2025,16(2):62-69.

LI Tianming. Influence of Track Constraints on Longitudinal Seismic Response of Near-fault Simply Supported Beam Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):62-69.

我国铁路建设正处于高速发展时期,高速铁路呈现出桥隧比高的显著特点,以京沪高速铁路为例,其线路桥梁总长达到1 000 km以上,占线比达80.4%,其中简支梁桥占主要部分。同时,我国地处全球最活跃的地震区之一,地震区分布密度大,地震发生频率高,尤其是近断层地震效应对桥梁结构及轨道系统的影响尤为显著。从国内外地震观察到,桥梁在地震中出现了多种损坏情况,包括主梁横纵向错位、梁体坠落,墩柱开裂、压溃、剪断及倾斜偏移,以及桥梁支座纵向滑移等病害。因此,深入研究近断层地震对铁路桥梁纵向地震响应的影响,特别是在轨道约束条件下的作用机制,更重要的现实意义及科学价值。

地震会对工程建筑等结构造成严重破坏,因此国内外众多学者对此开展了大量研究。谢旭等^[1]建立了地震作用下桥梁与轨道共同作用的线桥一体化计算模型,并进行了弹塑性地震响应分析,研究指出轨道对桥梁纵向地震位移和减隔震装置变形的影响呈现增大和减小两种现象,设计应充分考虑轨道约束的作用。CHEN L等^[2]探讨了高速铁路桥在近场有脉冲地震动作用下的响应,发现与远场地震动相比,主梁和墩顶位移、墩底弯矩在近断层有脉冲地震动作用下均有所增加。张宝剑^[3]开发了3种板式无砟轨道桥梁地震反应分析的简化模型,认为在多遇地震及罕遇地震下,轨道约束作用能够降低大多数桥墩的地震响应。王晓昱^[4]通过梁轨相互作用一体化模型研究了轨道约束对桥梁抗震性能和轨道变形的影响,研究指出轨道约束主要影响结构的低阶频率,扣件阻力的增加可以减小轨道位移和梁轨的相对位移,同时降低墩顶位移等。张永亮等^[5]通过建立的轨道体系纵向约束及摩擦效应的线桥一体化计算模型,发现轨道体系纵向刚度约束效应对桥梁下部结构地震反应影响显著,但摩擦效应影响较小。韩国庆等^[6]针对不同典型单线铁路简支梁桥,研究了有砟轨道对桥梁周期和振型及地震响应的趋势和程度。吕佳伟^[7]通过考虑轨道结构和路基边界条件的梁轨一体化有限元模型,从频谱特性角度探究了近断层脉冲地震动的响应影响,认为桥墩的变形随扣件纵向阻力增加而降低,扣件阻力增加对桥墩抗震有利,但对轨道不利。SHAMSI M等^[8]则通过建立土-桩-桥-车分析模型,比较了具有和不具有隔震系统的单轨桥梁,结果表明常规铁路桥梁中的隔震系统在抗震能力上优于单轨桥梁。JIANG H等^[9]基于一个精细化耦合模型,探讨了八跨高速列车与CRTSⅢ型板式无砟轨道及桥梁系统在近断层地震作用下的安全运行速度,并进行了扣件刚度和隔离层摩擦系数的参数优化设计。叶毅滔^[10]研究了桥梁系

统和CRTSⅢ型无砟轨道-桥梁系统有限元模型在顺桥向地震作用下的响应和破坏机理,研究表明其轨道-桥梁系统的地震破坏特征主要表现为桥墩刚度退化、梁体残余滑移和轨道附加不平顺。石岩等^[11]建立了考虑轨道约束和相邻构件碰撞效应的动力分析模型,探究了铁路连续梁拱桥在地震作用下轨道约束对桥梁整体响应的影响,研究认为考虑轨道约束会减小主梁的位移响应。焉瑞鑫^[12]通过考虑轨道系统的线-桥系统模型研究发现,CRTSⅡ板式无砟轨道系统的纵向刚度约束可提高地震作用下高速铁路桥梁上列车安全行驶的阈值。杨彭钧等^[13]建立了轨道约束下的线桥一体化模型,探讨纵向阻力、桥墩刚度、支座类型及行波效应对梁轨系统地震响应的影响,结果表明轨道约束会提升结构低阶纵向自振频率,对竖向及横向频率影响较小,小阻力扣件对减小钢轨纵向力作用显著。刘尊稳等^[14]基于Workbench及Simpack平台建立车-线-桥一体化计算模型,研究表明考虑轨道约束作用可使列车的脱轨系数、轮重减载率及轮对横向力降低,从而提高行车安全阈值。方宜等^[15]针对某高速铁路地震后桥梁受损情况及修复方案,研究了修复桥梁工程的顶梁工作对轨道结构稳定性及强度的影响,从减少轨道结构受扰动和缩短修复工作时间的角度,提出了不同顶梁方案在不同轨温下顶梁高度的理论建议值。袁宇航等^[16]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。

综上所述,以往研究主要集中在桥梁整体结构本身,对轨道约束作用的考虑较少,尽管对关键参数(如扣件刚度、摩擦系数等)进行了优化研究,但多以定性分析为主,缺乏轨道系统的参数敏感性分析。此外,关于高速铁路桥抗震的研究多集中于普通远场地震下的研究,关于不同类型地震对轨道-桥梁系统响应的研究较少,尤其是近断层地震作用下考虑轨道约束的简支梁桥纵向地震响应的研究较匮乏。本文基于Opensees软件建立了轨道-桥梁精细化动力计算模型,着重研究了近断层地震作用下,轨道纵向阻力、滑动层摩擦系数及剪力齿槽刚度对铁路简支梁桥地震响应的影响。

1 工程概况及计算模型

1.1 工程概况

本文选取某高速铁路的一座5跨32 m双线简支梁桥为研究对象,其轨道结构采用CRTSⅡ型板式无砟轨道。主梁采用C50混凝土预制的单箱单室等高箱

梁,桥面宽 12.6 m,高 3.035 m,相邻主梁之间伸缩缝间距 0.1 m。桥墩为圆形实体桥墩,墩身采用 C35 混凝土现浇而成。桥墩横向支座中心距为 4.5 m,设计最高运行速度为 350 km/h。桥梁平面如图 1 所示,轨道结构断面如图 2 所示。

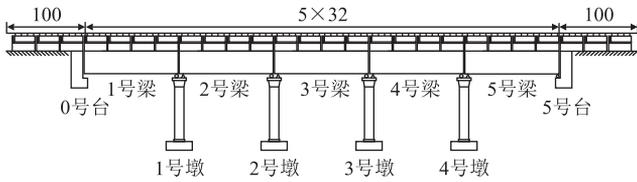


图1 桥梁平面图(m)

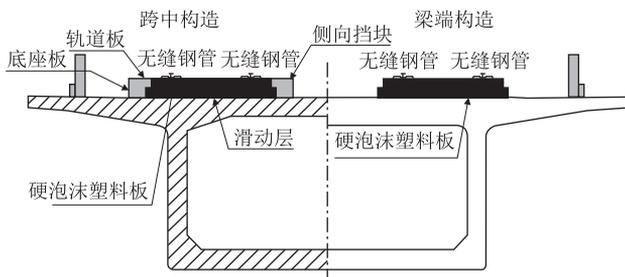


图2 轨道结构横断面图

1.2 动力计算模型

本文采用 Opensees 有限元分析软件对桥梁动力计算模型进行精细化建模,梁体、底座板、轨道板和钢轨均使用 BeamColumnElement 单元模拟。扣件、CA 砂浆层^[17]、滑动层、侧向挡块、剪切钢筋、剪力齿槽均采用 TwoNodeLink 单元模拟,其中扣件为 WJ-8 型小阻力扣件。根据 TB 10015 - 2012《铁路无缝线路设计规范》^[18]中所规定的理想弹塑性模型,扣件竖向刚度取 50 kN/mm,横向不易发生变形,纵向刚度取桥上竖向活载存在时,每根钢轨上扣件的极限纵向阻力为 38 kN/m,扣件纵向屈服位移为 2.0 mm。盆式橡胶支座采用零长度单元模拟,活动支座的摩擦系数取 0.02,屈服位移取 2 mm^[19]。桩基则采用 p-y 法来模拟桩土共同作用。桥梁有限元模型如图 3 所示。

2 地震动输入

2.1 地震动选取

本文从 PEER 强震库中选取了有脉冲近断层地震动、无脉冲近断层地震动和远场地震动数据各 6 条,并在计算过程中将各条地震动 PGA 均调整至 0.3 g,最

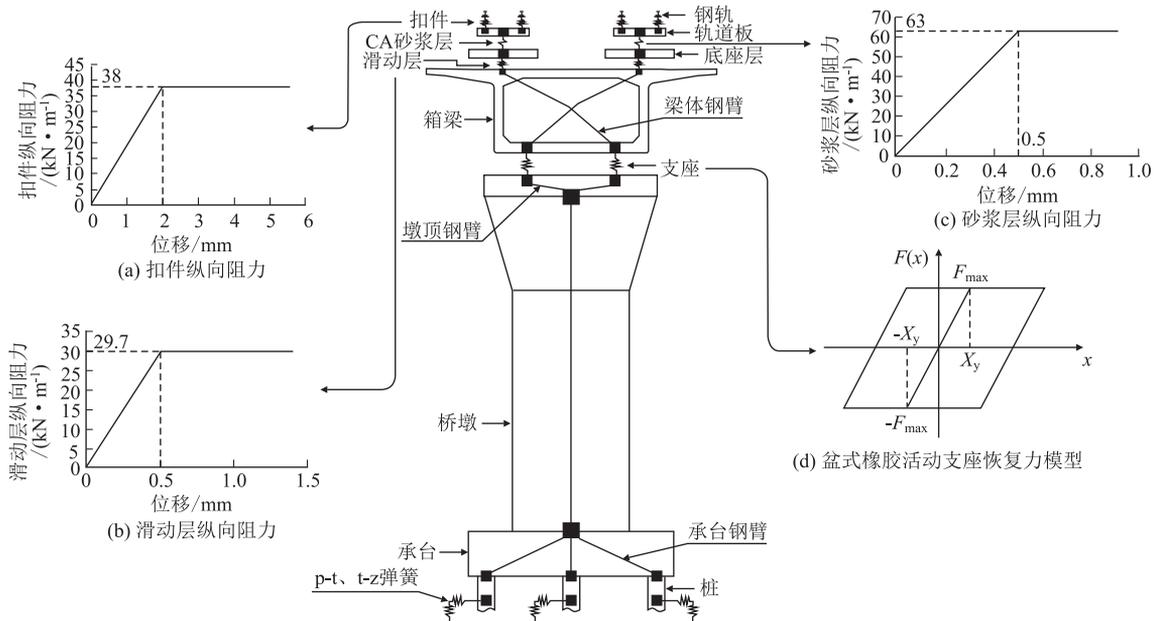


图3 桥梁有限元模型示意图

终的计算结果取 6 条地震动结果的平均值,地震响应的输入方向采用纵桥向输入。地震动详细信息如表 1 所示。

2.2 频谱特性分析

近断层有脉冲、无脉冲以及远场地震动的加速度平均反应谱曲线如图 4 所示。由图 4 可知,近断层无脉冲地震动和远场地震动加速度波形变化趋势较为相

似,两者的加速度幅值均在结构周期小于 1 s 时均处于较高水平,这表明无脉冲近断层和远场地震动均含有较为丰富的高频成分。然而,当近断层无脉冲和远场地震动超过 1 s 后,速度幅值逐渐降低,而含脉冲的近断层地震动的速度幅值仍保持较高的幅值水平,且显著高于近断层无脉冲和远场地震动,这可能会对中长周期结构产生较大的影响。

表1 地震动选取表

类型	地震编号	地震名称	地震震级	台站分量	PGA/g	PGV/(cm/s)	PGV/PGA	断层距/km
近断层有脉冲	No. 1	Northridge	6.69	JEN022	0.411	111.25	0.271	5.43
	No. 2	Northridge	6.69	SCS052	0.623	118.50	0.190	5.35
	No. 3	Kobe	6.90	TAK000	0.618	123.01	0.200	1.47
	No. 4	Kobe	6.90	PRI000	0.348	92.42	0.266	3.31
	No. 5	Chi-Chi	7.62	TCU051E	0.157	54.88	0.350	7.64
	No. 6	Chi-Chi	7.62	TCU054E	0.146	46.00	0.315	5.28
近断层无脉冲	No. 7	Northridge	6.69	CWC180	0.308	21.64	0.007	7.89
	No. 8	Northridge	6.69	ARL090	0.345	41.91	0.012	8.66
	No. 9	Kobe	6.90	AMA000	0.276	34.22	0.012	11.34
	No. 10	Kobe	6.90	NIS000	0.483	4.89	0.010	7.08
	No. 11	Chi-Chi	7.62	CHY034	0.103	9.58	0.010	14.82
	No. 12	Chi-Chi	7.62	TCU067	0.020	3.71	0.019	0.62
远场	No. 13	Northridge	6.69	BPK090	0.150	9.71	0.006	61.96
	No. 14	Northridge	6.69	LAC180	0.316	14.03	0.004	36.62
	No. 15	Kobe	6.90	HIK090	0.150	15.00	0.100	95.72
	No. 16	Kobe	6.90	TDO00]	0.296	25.00	0.008	31.69
	No. 17	Chi-Chi	7.62	ILA007	0.033	1.81	0.006	81.65
	No. 18	Chi-Chi	7.62	TAP095	0.017	1.54	0.009	107.80

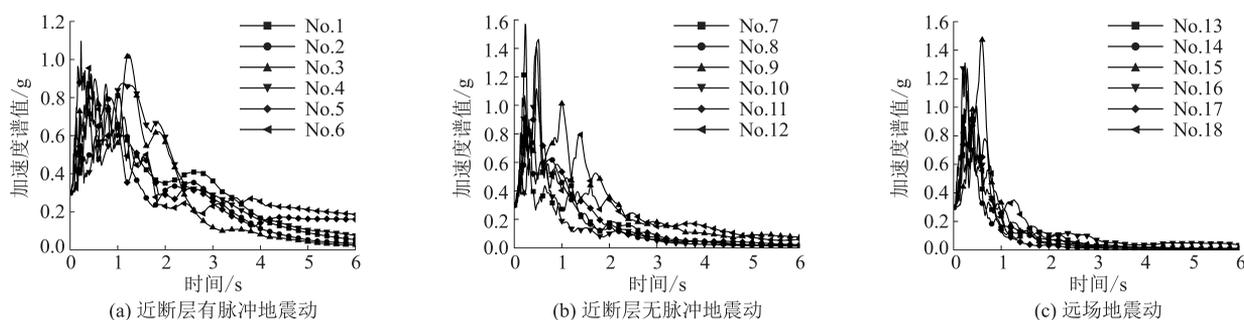


图4 加速度平均反应谱图

3 桥梁结构地震响应

3.1 扣件纵向阻力对铁路简支梁桥地震响应影响

为研究轨道纵向阻力对铁路简支梁桥的地震响应

影响,本文针对桥梁在不同地震动作用下地震响应进行了分析。扣件纵向阻力分别选取 8 kN/m、16 kN/m、24 kN/m、32 kN/m 和 40 kN/m 5 个等级,计算结果如图 5 ~ 图 7 所示。

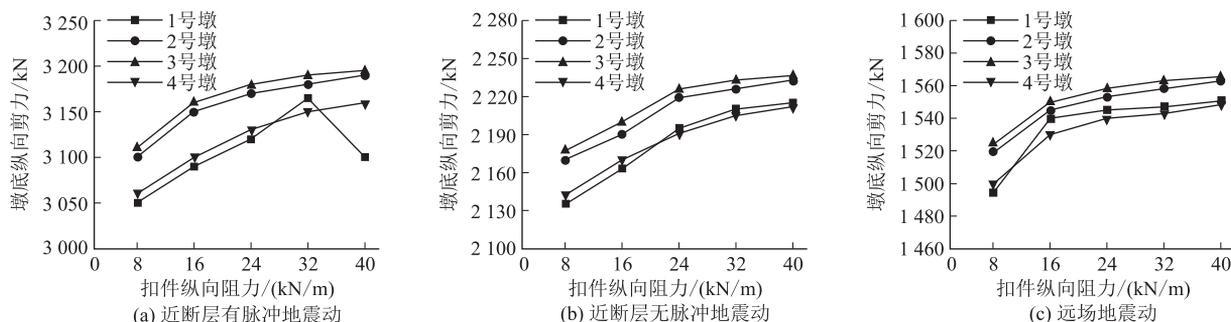


图5 扣件纵向阻力对墩底纵向剪力影响图

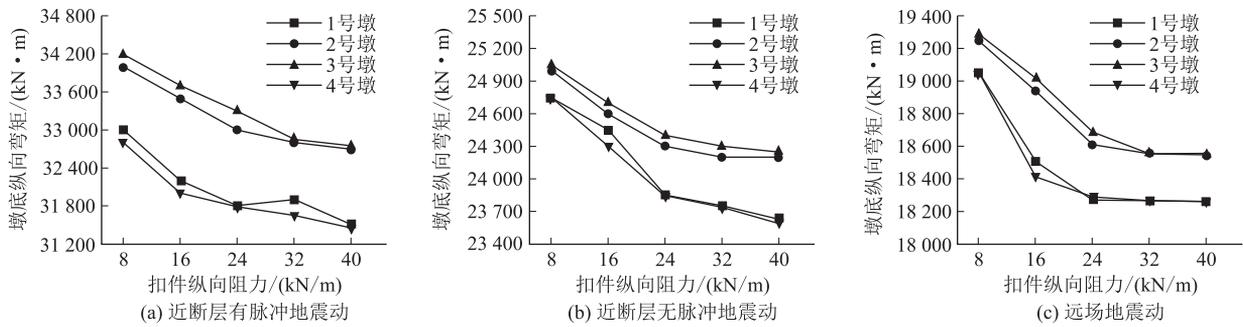


图6 扣件纵向阻力对墩底纵向弯矩影响图

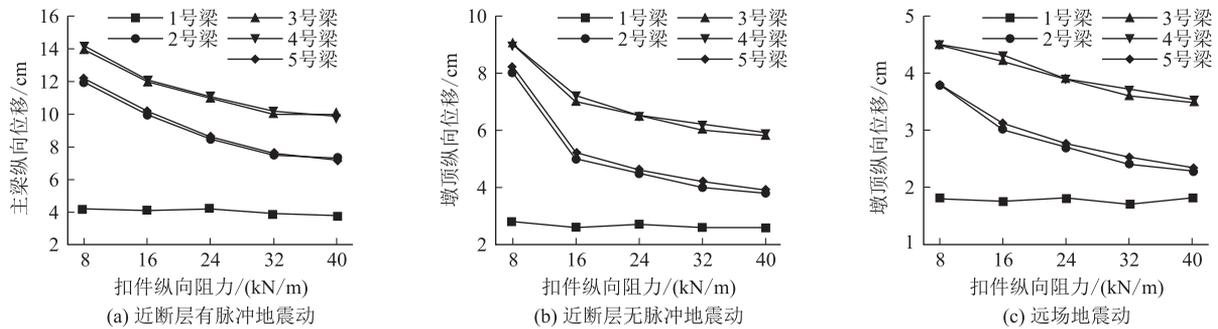


图7 扣件纵向阻力对主梁纵向位移影响图

由图5可知,随着扣件纵向阻力的增加,桥梁墩底剪力总体呈现上升趋势。然而,在近断层有脉冲地震动作用下,1号墩墩底纵向剪力在5~32 kN/m之间呈增加趋势,增幅为3.2%,但当阻力增大到32 kN/m时,剪力出现减小。由图6可知,在地震动作用下,随着扣件纵向阻力的增加,桥梁墩底的纵向弯矩有所降低,且这种降低趋势随着扣件纵向阻力的增大逐渐趋于平缓。然而,墩底纵向弯矩变化范围相对有限,这表明扣件纵向阻力对墩底纵向弯矩的总体影响较小。通过对3种不同地震动作用类型下的墩底纵向弯矩进行比较,可以发现,近断层地震动作用下墩底纵向弯矩大于远场地震动作用下的值,尤其是脉冲型地震动作用时差异更为显著。由图7可知,在地震动作用下,2号~5号主梁的纵向位移随着扣件纵向阻力的增加呈现下降趋势,而1号主梁的纵向位移则保持相对稳

定,变化不大。

综上所述,在不同类型地震动作用下,随着扣件纵向阻力的增加,桥梁墩底剪力呈现增长趋势,墩底弯矩则呈现减小趋势,主梁位移整体上也呈现下降趋势,但1号主梁位移变化较小,基本保持稳定。在3种地震动类型中,近断层有脉冲地震动对桥梁地震响应的影响最为显著,其次是近断层无脉冲地震动,而远场地震动作用下的桥梁地震响相对较小。

3.2 滑动层摩擦系数对铁路简支梁桥地震响应影响

为研究滑动层摩擦系数对铁路简支梁桥地震响应的影 响,本文分析了不同地震动作用下桥梁的地震响应。摩擦系数分别设定为0.3,0.5,0.7和1四种情况^[3],对应的等效弹簧刚度计算结果分别为 8.50×10^5 kN/m、 0.96×10^6 kN/m、 1.15×10^6 kN/m和 1.30×10^6 kN/m,计算结果如图8~图10所示。

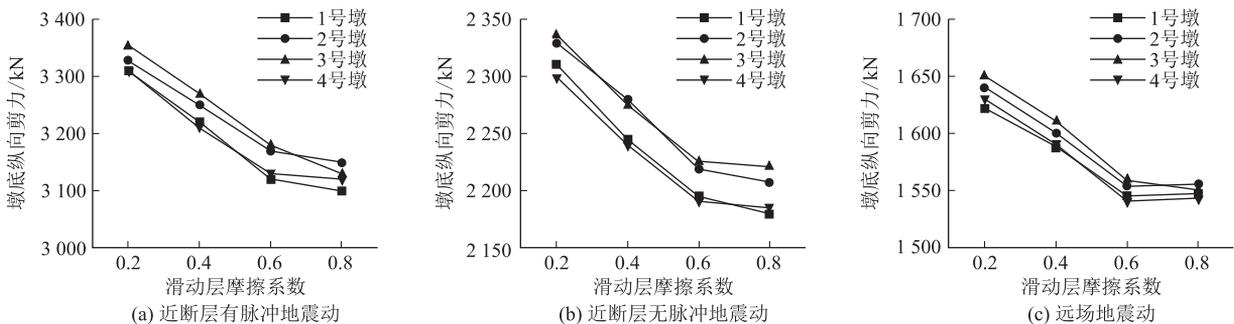


图8 滑动层摩擦系数对墩底纵向剪力影响图

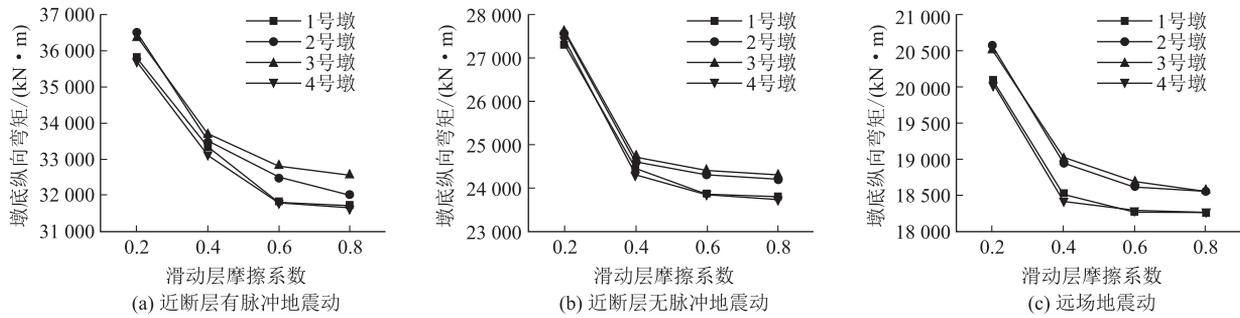


图9 滑动层摩擦系数对墩底纵向弯矩影响图

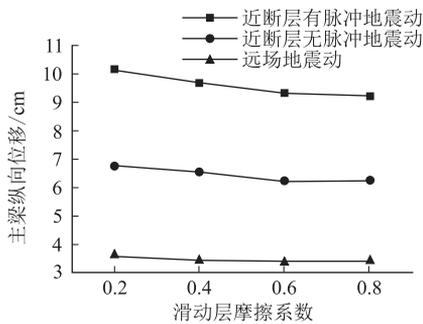


图10 滑动层摩擦系数对主梁纵向位移影响图

由图8可知,在地震动作用下,1号~4号桥墩的墩底纵向剪力随着扣件纵向阻力的增加呈现下降趋势。总体来看,墩底纵向剪力在2号和3号墩处最大,当滑动层摩擦系数大于0.6后,1号~4号桥墩墩底纵向剪力降幅减缓,当摩擦系数由0.2增加到0.8时,2号和3号中墩墩底纵向剪力减幅为4.8%,1号和4号边墩减幅则为5.4%。在不同类型地震动作用下,摩擦系数的增加对墩底纵向剪力的影响呈现出一定的规律性且基本保持一致。随着摩擦系数的增大,墩底纵向剪力逐渐减小,但整体变化幅度较小。

由图9可知,在地震动作用下,1号~4号桥墩墩底纵向弯矩随滑动层摩擦系数的提高呈现减小趋势。当滑动层摩擦系数在0.6~0.8范围内时,墩底纵向弯

矩降幅减缓,其中2号和3号中墩处墩底纵向弯矩最大。由图10可知,当滑动层摩擦系数在0.2~0.8区间内增大时,各种地震动作用下的主梁纵向位移普遍呈现下降趋势,且减少幅度不超过6%。当摩擦系数超过0.6后,主梁纵向位移基本保持稳定。在近断层有脉冲地震作用下,主梁的纵向位移相较于近断层无脉冲地震动和远场地震动分别增加了47.3%和185.7%。尽管如此,不同类型地震动对主梁纵向位移的影响规律并不明显。

综上所述,不同类型地震动作用下,随着滑动层摩擦系数的增加,墩底地震响应呈现减小趋势,但整体变化幅度相对较小。此外,与中墩相比,边墩对摩擦系数的变化更为敏感。在近断层地震动作用下,墩底纵向弯矩较远场地震动作用下更大,尤其是脉冲型地震动作用时,这种差异更为显著。近断层有脉冲地震动对桥梁地震影响相较于其他两种地震动略大,而摩擦系数对桥梁地震响应的影响表现为边墩大于中间墩。

3.3 剪力齿槽刚度对铁路简支梁桥地震响应影响

为研究剪力齿槽刚度对铁路简支梁桥的地震响应影响,本文对不同地震动作用下桥梁的地震响应进行分析,剪力齿槽刚度分别取值为 1×10^2 kN/mm、 1×10^3 kN/mm、 1×10^4 kN/mm、 1×10^5 kN/mm、 1×10^6 kN/mm^[3],计算结果如图11~图13所示。

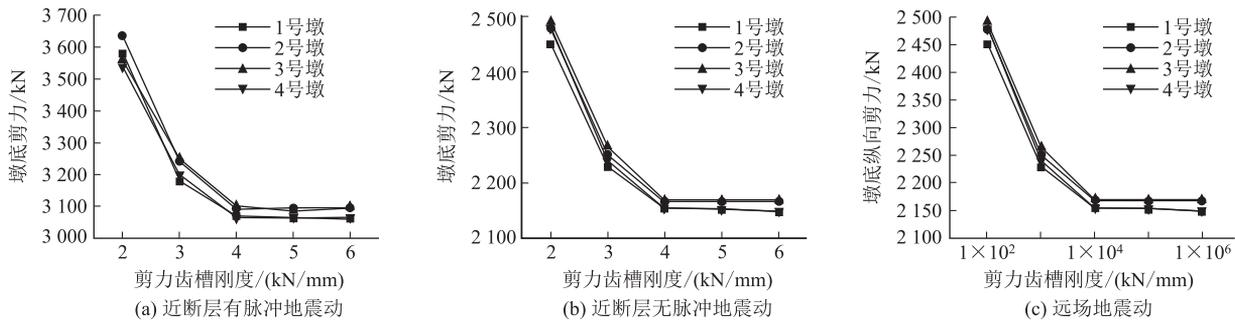


图11 剪力齿槽刚度对墩底剪力影响图

由图11可知,在近断层有脉冲地震动作用下,1号~4号桥墩的墩底纵向剪力随剪力齿槽刚度增大

呈减小趋势,但当剪力齿槽刚度超过 1×10^4 kN/mm时,墩底纵向剪力基本保持稳定。其中,墩底纵向剪力

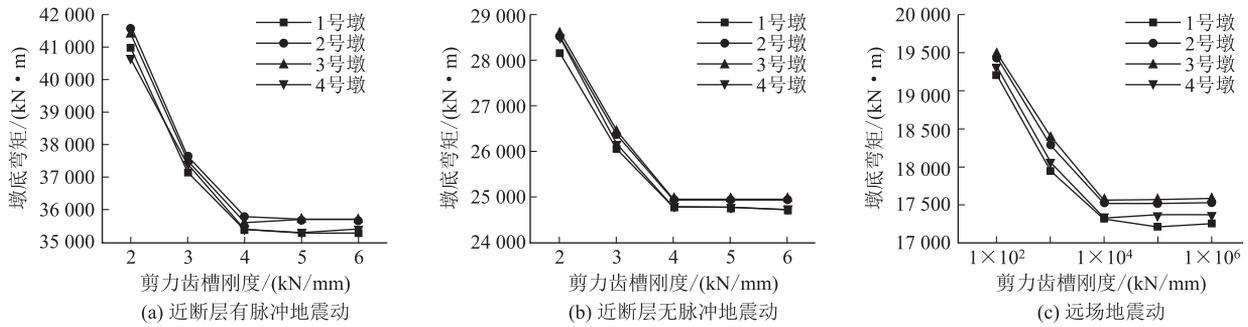


图 12 剪力齿槽刚度对墩底弯矩影响图

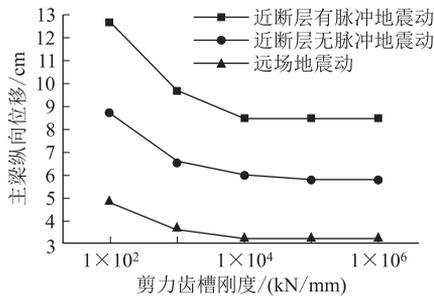


图 13 剪力齿槽刚度对主梁纵向位移的影响图

在 2 号和 3 号墩处最大。近断层地震动作用下墩底纵向剪力较远场地震动作用下更大,且脉冲型地震动的影响更显著,受剪力齿槽刚度影响降幅更大,且不同类型地震动作用下墩底纵向剪力随剪力齿槽刚度变化规律基本一致。

由图 12 可知,近断层有脉冲地震动作用下,随着剪力齿槽刚度从 1×10^2 kN/mm 增大至 1×10^6 kN/mm, 1 号~4 号桥墩的墩底纵向弯矩整体呈现下降趋势。随着剪力齿槽刚度从 1×10^2 kN/mm 增加至 1×10^4 kN/mm 时,墩底纵向弯矩的减小速度较为显著。然而,当剪力齿槽刚度超过 1×10^4 kN/mm 时,其对桥墩墩底纵向弯矩的影响几乎可以忽略不计。

由图 13 可知,随着剪力齿槽刚度从 1×10^2 kN/mm 增大至 1×10^4 kN/mm,各类型的地震动作用下的主梁纵向位移均呈现减小趋势,降幅在 30%~35% 之间,一旦剪力齿槽刚度超过 1×10^4 kN/mm,主梁的纵向位移基本保持稳定。在近断层有脉冲地震作用下,主梁纵向位移相较于近断层无脉冲地震动和远场地震动分别增加了 46.1% 和 164.5%,且近断层有脉冲地震动作用下的主梁纵向位移更大,降幅略快于近断层无脉冲地震动和远场地震动。

综合上述分析可知,在不同类型地震动作用下,各墩的地震响应基本呈现随剪力齿槽刚度增加而减小并趋于稳定的规律。在近场有脉冲地震动作用下,地震

响应相较于近场无脉冲地震动和远场地震动作用下地震响应显著增大,且 2 号墩和 3 号墩的地震响应最大。

4 结论

本文基于 Opensees 软件建立了铁路简支梁桥动力计算模型,探讨了不同轨道约束对近断层铁路简支梁桥纵向地震响应影响。得到主要结论如下:

(1)地震动类型对桥梁和轨道地震响应随扣件纵向阻力变化规律影响不显著,近断层脉冲型地震动下桥梁地震响应更大。

(2)滑动层摩擦系数增大使墩底纵向剪力、纵向弯矩、主梁纵向位移均有减小且变化幅度随滑动层摩擦系数的增大逐渐放缓。其中,滑动层摩擦系数对墩底纵向弯矩的影响较为明显,而对主梁纵向位移的影响则相对较小。

(3)剪力齿槽刚度对控制地震作用下桥墩内力和桥梁位移有积极作用,尤其是对近断层地震动下的控制效果更加显著。因此,在近断层地区进行抗震设计时,应综合考虑主梁位移和墩底内力,建议将剪力齿槽刚度设置在较大值,以保证结构安全。

参考文献:

[1] 谢旭,王炎,陈列. 轨道约束对铁路减隔震桥梁地震响应的影响[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 75-82.
XIE Xu, WANG Yan, CHEN Lie. Effect of Rail Restraints on Seismic Responses of Cushioning Railway Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 75-82.

[2] CHEN Lingkun, ZHANG Nan, JIANG Lizhong, et al. Near-fault Directivity Pulse-like Ground Motion Effect on High-speed Railway Bridge[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(6): 2425-2436.

[3] 张英剑. 板式无砟轨道桥梁的抗震计算模型及地震反应研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
ZHANG Yingjian. Study on Seismic Calculation Model and Seismic Response of Slab Ballastless Track Bridge[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.

[4] 王晓昱. 考虑轨道约束的高速铁路桥梁抗震分析[D]. 北京: 北

- 京交通大学, 2016.
- WANG Xiaoyu. Seismic Analysis of High-speed Railway Bridges Considering Track Constraints [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [5] 张永亮, 于伟栋, 马华军, 等. 板式无砟轨道系统对不同抗震体系铁路桥梁纵向地震响应的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2738-2744.
- ZHANG Yongliang, YU Weidong, MA Huajun, et al. Influence of Slab Ballastless Track on Longitudinal Seismic Response of Railway Bridge with Different Seismic Systems [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2738-2744.
- [6] 韩国庆, 蒋丽忠, 魏标, 等. 有砟轨道对典型单线铁路简支梁桥地震响应的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(3): 690-697.
- HAN Guoqing, JIANG Lizhong, WEI Biao, et al. Effects of Ballast Track Structure on Seismic Responses of Simply Supported Bridges in a Single Line Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(3): 690-697.
- [7] 吕佳伟. 近断层脉冲地震作用下高速铁路简支梁桥梁-轨系统动力性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- LV Jiawei. Study on Dynamic Performance of Beam-rail System of Simply Supported Beam Bridge of High-speed Railway under Near-fault Pulse Earthquake [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [8] SHAMSI M, ZAKERINEJAD M, VAKILI A H. Seismic Analysis of Soil-pile-bridge-train Interaction for Isolated Monorail and Railway Bridges under Coupled Lateral-vertical Ground Motions [J]. Engineering Structures, 2021, 248: 113258.
- [9] JIANG Hui, ZENG Cong, PENG Qiang, et al. Running Safety and Seismic Optimization of a Fault-crossing Simply-supported Girder Bridge for High-speed Railways Based on a Train-track-bridge Coupling System [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(8): 2449-2466.
- [10] 叶毅滔. 高速铁路轨道-桥梁系统地震破坏特征及震后行车分析[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- YE Yitao. Seismic Damage Characteristics of Track-bridge System of High-speed Railway and Analysis of Running after Earthquake [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [11] 石岩, 赵翔宇, 焦应乾, 等. 考虑轨道约束的连续梁拱桥地震反应及减震控制研究[J]. 世界地震工程, 2022, 38(1): 148-157.
- SHI Yan, ZHAO Xiangyu, JIAO Yingqian, et al. Seismic Response and Control Study of Continuous Beam Arch Bridges under Track Constraint [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(1): 148-157.
- [12] 焉瑞鑫. 地震下考虑轨道约束的高速铁路桥梁行车安全性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- YAN Ruixin. Study on Traffic Safety of High-speed Railway Bridges Considering Track Constraints under Earthquake [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [13] 杨彭钧, 刘琦, 吴斐璠, 等. 考虑轨道约束的连续梁桥地震响应分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38(2): 125-131.
- YANG Pengjun, LIU Qi, WU Feifan, et al. Seismic Response Analysis of Continuous Girder Bridges Considering Orbital Constraints [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2024, 38(2): 125-131.
- [14] 刘尊稳, 李欣婧, 邓永杰, 等. 多遇地震下无砟轨道多跨简支梁桥行车安全性研究[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 1-9 [2025-01-15]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20240526001>.
- LIU Zunwen, LI Xinjing, DENG Yongjie, et al. Research on Traffic Safety of Ballastless Track Multi-span Simply-supported Beam Bridge under Frequent Earthquakes [J/OL]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 1-9 [2025-01-15]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20240526001>.
- [15] 方宜, 卓建成, 陈丽. 高速铁路桥梁病害整治顶梁工作对轨道结构的影响分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(5): 29-33.
- FANG Yi, ZHUO Jiancheng, CHEN Li. Analysis on the Impact of Girder Jacking for High-speed Railway Bridge Defects on Track Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 29-33.
- [16] 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.
- [17] 国巍, 王阳, 葛苍瑜, 等. 近断层地震动下高速铁路多跨简支梁桥震致破坏特征[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 210-218.
- GUO Wei, WANG Yang, GE Cangyu, et al. Seismic Failure Features of Multi-span Simply Supported Girder Bridges of High-speed Railway under Near-fault Earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(17): 210-218.
- [18] TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范[S].
- TB 10015-2012 Code for Design of Railway Continuous Welded Rail [S].
- [19] 黄宇辰, 王军文, 王少君. 无砟轨道约束对高铁FPS隔震简支梁桥纵向地震反应的影响[J]. 铁道建筑, 2015, 55(9): 24-28.
- HUANG Yuchen, WANG Junwen, WANG Shaojun. Influence of Ballastless Track Constraint on Longitudinal Seismic Response of FPS Isolated Simply Supported Beam Bridge of High-speed Railway [J]. Railway Engineering, 2015, 55(9): 24-28.