

甘霖,郭恩栋,吴厚礼,等. 2024. 不同频谱特性地震动对高速铁路桥梁-轨道震后残余变形影响分析[J]. 地震研究,47(1): 027-036,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0027.

Gan L, Guo E D, Wu H L, et al. 2024. Geometrical irregularity of high-speed railway bridge tracks considering seismic spectrum characteristics[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 027-036, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0027.

不同频谱特性地震动对高速铁路桥梁-轨道 震后残余变形影响分析*

甘霖^{1,2}, 郭恩栋^{1,2,*}, 吴厚礼^{1,2}, 李长宏^{1,2}, 刘聪^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:以一座典型高速铁路五跨简支梁桥为例,建立了精细化高速铁路桥梁-轨道系统有限元模型。针对不同类型频谱特性选取了近场脉冲型、近场无脉冲型、远场长周期型和普通型地震动。输入不同频谱特性的地震动,对结构进行非线性时程响应分析,探究不同频谱特性地震动对轨道残余变形的影响规律及变形特点。结果表明:不同类型地震动对轨道残余变形的影响程度不同,轨道结构对近场脉冲型地震动的作用最为敏感;不同类型地震动作用下,轨道横向残余变形规律相似,均表现为全桥中间部分变形最大;每跨桥梁跨中竖向残余变形远大于桥墩(桥台)位置竖向残余变形;梁缝位置为轨道薄弱部分,轨距残余变形在每跨桥梁梁体连接处有明显尖刺状的突变。当 $PGA > 0.2\text{ g}$ 时,不同类型地震动作用下的轨道变形均随着 PGA 的增大而增大;当 $PGA = 0.38\text{ g}$ 时,桥梁已经进入塑性状态,地震动类型对于轨道残余变形的影响程度降低。

关键词:高速铁路桥梁-轨道;残余变形;频谱特性;非线性时程分析

中图分类号: U212.35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)01-0027-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0027

0 引言

铁路作为国民经济大动脉是国家最重要的基础设施之一,在我国经济社会发展中具有重要作用。截至2021年底,全国铁路营业里程突破15万千米,其中高速铁路运营里程超过4万千米。为保证行车稳定性和旅客乘车舒适性,防止路基沉降等问题,我国高速铁路大多采用以桥代路的方式修建(喻梅等,2021)。我国目前已建成的“四纵四横”高速铁路网中有“三纵两横”铁路网位于高烈度地震区,西部地区有大量在建以及已规划

的高速铁路网也不可避免地需要穿越大量断层和高烈度区(张凡等,2017)。列车高密度运行必然面临震时或震后行车问题,因此我国高速铁路桥梁安全受到严重的地震威胁(蒋丽忠等,2020)。高速铁路桥梁-轨道系统在地震作用下会产生残余位移和刚度退化等问题,该类问题的出现是不可避免的(冯玉林等,2022),因此研究震后轨道不平顺问题能宏观显示各种频谱特性地震动作用下轨道变形的规律,为震后列车限速通行提供理论依据。

国内外许多学者采用理论分析、有限元模拟和振动台试验等方法对地震作用下轨道变形特点

* 收稿日期: 2023-04-26.

基金项目: 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2021EEVL0204).

第一作者简介: 甘霖(1997-),硕士研究生在读,主要从事生命线工程抗震研究. E-mail: lingan971018@163.com.

通信作者简介: 郭恩栋(1966-),研究员,主要从事生命线工程抗震研究. E-mail: iemged@263.net.

进行了系统研究,如 Miura (1996) 研究发现轨道的变形特征主要与地震烈度、发生位置、震中距离和轨道下部结构支护条件有关;勾红叶等 (2019) 建立了桥梁竖向变形与轨面几何形态的通用映射解析模型;蒋丽忠等 (2022) 通过振动台试验,探究了横向地震作用后轨道残余不平顺的分布规律,构造了震致轨道几何不平顺样本。不少学者研究了特定地震动对于桥梁-轨道系统的影响,如喻梅等 (2021) 研究了近断层脉冲型地震作用下高速铁路桥梁-轨道系统的动力响应规律;吕佳伟 (2021) 建立了能考虑桥梁与无砟轨道相互作用以及路基段对轨道刚度和边界条件影响的精细化模型,并分析了近断层脉冲型地震动对高速铁路桥梁-轨道系统动力响应的影响;张树强 (2018) 对地震作用下轨道变形特征和原因进行了分析,提出了震后轨道变形的模拟方法,并将模拟的震后轨道变形与原有的轨道不平顺叠加,研究轨道残余变形对列车行车安全的影响,建立了列车行驶安全评估体系;张强 (2019) 以一座三跨高速铁路简支梁桥为研究对象,通过非线性时程法分析得到主梁在横向地震作用下的横向变形,并以此横向变形作为车-桥耦合振动模型的附加变形,研究了不同地震动、不同地震峰值加速度及列车行车速度对行车安全的影响;孙逊 (2020) 探究了不同地震动、地震强度和桥墩高度下的轨道动力响应,以及不同轨道变形形式和不同轨道变形量下轨道变形弦长对行车 3 项指标的影响,并对其安全性做出了评价。

考虑到高速铁路桥梁-轨道系统的复杂性,目前对于轨道不平顺的研究主要集中于桥梁几何变形对其的影响以及近断层地震动对于桥梁的动力响应研究,缺乏对梁-轨道板-轨道间非线性连接构件的考虑,并且缺少在震后桥梁未产生明显破坏时轨道残余变形对列车运行的影响分析,而有关不同频谱特性的地震动对轨道几何不平顺的影响规律的研究也比较少。不同的地震波含有不同的频谱特性,对轨道变形影响也不同。本文利用有限元软件建立了一个典型高速铁路五跨桥梁-轨道模型,分析了不同频谱特性地震动作用下轨道残余变形的形式与规律,为震后列车运行轨道维护及震后列车运行提供参考。

1 高速铁路桥梁-轨道模型

1.1 桥梁概况

本文以一座位于Ⅷ度区Ⅱ类场地(地震设计基本加速度为 $0.2g$),桥跨布置为 $5m \times 32.6m$ 的高速铁路双线简支梁桥为例,桥梁全长 $163.4m$,桥面宽 $12.6m$,箱梁高度 $3.05m$;箱梁上无砟轨道板的宽度为 $2.8m$ 、厚度为 $0.3m$,轨道板中心线距跨中 $2.5m$;轨道采用 CHN60 型,建立于轨道板之上;CRTSⅡ型板式无砟轨道主要由底座板、CA 砂浆层、凸型挡台、轨道板、扣件以及轨道等部件组成,其中底座板与主梁采用预埋钢筋的方式连接;底座板与轨道板之间通过 CA 砂浆层连接;轨道板与轨道之间通过扣件连接。桥墩高 $25m$,支座采用盆式橡胶支座。桥梁整体布置模型如图 1 所示。

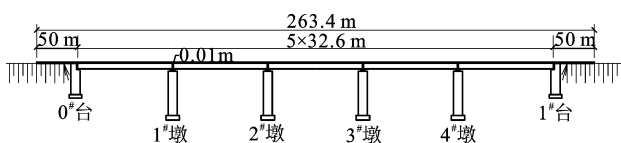


图 1 桥梁整体布置模型

Fig. 1 The layout of the bridge

1.2 材料参数选取

桥墩以及梁体采用 C50 混凝土,轨道板采用 C60 混凝土,底座板采用 C35 混凝土。参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对混凝土性能相关参数进行取值。

高铁桥梁通常采用的支座包括板式橡胶支座、盆式橡胶支座、球型钢支座以及特殊设计的减隔震支座等。本文研究桥梁采用的是盆式橡胶支座 KTPZ7000 系列。支座的竖向承载力为 $7000kN$,盆式橡胶支座屈服位移一般为 $2 \sim 5mm$,本文取 $3mm$ 。

扣件阻力模型主要包括常阻力模型、非线性阻力模型、理想弹塑性模型。我国高速铁路无砟轨道桥上一般使用 WJ-7 型、WJ-8 型扣件。通过对扣件阻力进行的大量试验和现场测试,发现我国扣件的阻力模型更加符合理想弹塑性模型。本文扣件为 WJ-8 型,每隔 $0.65m$ 布置一对扣件。

CA 砂浆为轨道板和底座板之间水泥沥青砂浆, 主要起到支承轨道板、缓冲高速列车对轨道作用的荷载与减振等作用。砂浆与轨道板厚度相同, 约为 50 mm。底座板宽 2.8 m、厚度 200 mm。非线性连接构件本构关系见表 1 (Jiang *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2021)。

表 1 非线性连接构件本构关系

Tab. 1 Constitutive relations between the nonlinear connection components

构件	屈服力/kN		屈服位移/mm		垂向刚度/ (kN·mm ⁻¹)	竖向承载力/ kN
	横向	纵向	横向	纵向		
固定支座	1 000	1 000	3	3	—	7 000
滑动支座	1 000	1 000	3	3	—	7 000
侧向挡块	453	—	2	—	—	—
扣件	24	9	2	2	35	—
剪切钢筋	23	23	0.08	0.08	—	—
CA 砂浆	42	42	0.5	0.5	—	—
滑动层	6	6	0.5	0.5	—	—
剪力齿槽	1 465	1 465	0.12	0.12	—	—

1.3 有限元模型的建立

本文以高速铁路五跨简支梁桥为背景,在 Opensees 平台上建立五跨简支梁桥-轨道一体化模型。采用纤维截面非线性梁柱单元模拟混凝土结构,采用 Steel02 材料本构模拟纵筋, Concrete02 材料本构模拟混凝土。桥墩截面划分为保护层混凝土、核心混凝土和纵向钢筋 3 种结构。箍筋对混凝土的约束作用通过 Mander 和 Priestley (1988) 的约束混凝土模型加以考虑。

柔度法单元在任意状态下的单元力平衡方程都不会产生有限元离散误差。与刚度法单元相比,在相同精度要求下柔度法单元需要的单元和结构总自由度更少,计算效率和计算效果也更优。因此本文采用柔度法单元为防止应变集中,采纳 Calabrese 等 (2010) 和 Kashani 等 (2016) 的建议,墩底单元采用 3 个截面积分点,其余单元采用 5 个高斯积分点。

轨道板、底座版、主梁和桥墩等结构均采用非线性纤维梁单元进行模拟。为减小边界条件对轨道梁端的影响,在轨道两端分别延长 50 m,模

拟路基部分的轨道。不考虑桩土作用,墩底固定并施加地震动作用。支座连接采用弹簧单元模拟支座对梁体的约束作用,采用非线性弹簧单元来模拟侧向挡块、扣件、剪切钢筋、CA 砂浆、滑动层和滑动齿槽等非线性连接构件。高速铁路桥梁-轨道系统有限元模型如图 2 所示。对所建立的有限元模型进行模态分析,模型前五阶的自振频率及周期见表 2。由表可知,高速铁路五跨简支梁桥属于短周期结构。

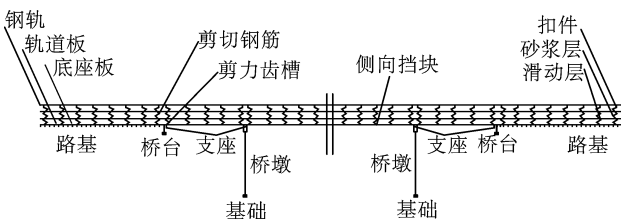


图2 高速铁路桥梁-轨道系统有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model of the track-bridge system of the high-speed railway

表2 有限元分析模型的动力特性

Tab. 2 Dynamic characteristics of the finite element analysis model

振型阶数	周期/s	频率/Hz	振型描述
1	0.63	1.59	梁体纵向振动
2	0.53	1.89	梁体纵向对称
3	0.46	2.17	梁体横向对称
4	0.40	2.50	梁体横向扭转
5	0.31	3.22	梁体反向扭转

2 地震动的选取

目前国内外主要以 5% 阻尼比加速度反应谱卓越周期 T_g 来反应地震动的频谱特征 (沈绍建等, 2013); 将断层距不超过 20 km 作为近场地震动的选择依据。张凡等 (2017) 在研究近断层脉冲效应和土 - 结构相互作用 (SSI 效应) 对大跨斜拉桥地震响应的影响规律时, 将 PGV/PGA 作为表征速度脉冲效应的脉冲参数, 认为 $PGV/PGA > 0.2$ s 时速度脉冲较为显著, 反之则无明显脉冲现象。

为了研究轨道变形在不同频谱特性地震动作

用下的响应,本文利用上述方法选取了近场脉冲型、近场无脉冲型、远场长周期型和普通型地震动共4种具有不同频谱特性的地震波各5条,其详细参数见表3。

采用90%能量持时作为地震动持续时间,以地震动总能量的5%时刻 $t_{0.05}$ 为开始,地震动总能量的95%时刻 $t_{0.95}$ 为结束(Trifunac, Brady, 1975)。为保证能够得到准确的轨道震后变形,在每一条地震波输入的结束时刻 $t_{0.95}$ 之后增加一段零值到60 s截止,以充分模拟地震停止后结构的自由振动。为节省篇幅,本文从4类地震动中各选一条为例,对其进行傅立叶变换得到频域信息(图3)。

近场脉冲型地震动加速度时程表现出峰值大、持时短的特点(图3a)。远场长周期型地

震动加速度时程呈现峰值较小、持时较长的特点(图3b)。近场无脉冲型地震动加速度时程峰值较大,且持时较近场脉冲型地震动更长(图3c)。普通型地震动加速度时程峰值加速度相对远场长周期较大,但其持时很短(图3d)。近场脉冲型地震动的速度脉冲为主要由破裂方向效应引起速度脉冲和滑冲效应造成地面永久位移引起的速度脉冲,但本文未考虑地震地面永久位移。

近场脉冲型与远场长周期型地震动低频成分丰富,主频均较小,主要分布在0~1 Hz,均小于普通型地震动。近场无脉冲型地震动的傅立叶谱主要分布在1~5 Hz,频带分布主要集中在较高频率的位置,近场无脉冲型与普通型地震动相对其它两种地震动频带分布更为广泛。

表3 所选地震动类型及其参数

Tab. 3 Types of the selected ground-motion records and their parameters

类型	地震名称	台站及分量	断层距/km	$PGA/(cm \cdot s^{-2})$	$PGV/(cm \cdot s^{-1})$	PGD/cm	$(PGV/PGA)/s$
近场脉冲型	Chi - Chi	TCU052 - E	0.66	350.76	151.21	210.44	0.44
	Chi - Chi	TCU087 - N	6.98	111.66	40.48	34.07	0.36
	Chi - Chi	TCU068 - EW	0.32	501.96	249.59	297.15	0.50
	Chi - Chi	TCU052 - NS	0.66	438.42	172.33	226.58	0.39
	Chi - Chi	TCU075 - EW	0.89	325.67	109.56	96.61	0.34
远场长周期型	Chi - Chi	TAP094 - E	108.95	63.06	—	—	—
	Chi - Chi	TAP003 - N	102.39	105.63	—	—	—
	Chi - Chi	KAU010 - N	98.16	30.89	—	—	—
	Chi - Chi	ILA003 - N	92.81	70.56	—	—	—
	Chi - Chi	ILA004 - N	88.89	62.72	—	—	—
近场无脉冲型	Chi - Chi	TCU078 - EW	8.20	438.81	40.24	30.28	0.09
	Chi - Chi	TCU089 - E	9.00	346.62	34.99	18.68	0.10
	NORTH009	TAR360	0.37	54.79	3.03	0.22	0.06
	Chi - Chi	TCU071 - EW	5.80	518.53	52.30	16.05	0.10
	Chi - Chi	TCU072 - EW	7.08	468.05	71.93	50.36	0.15
普通型	Northern Calif 07	PGS075	36.67	164.64	—	—	—
	KOBE	OKA000	87.00	77.27	—	—	—
	KOBE	OKA090	87.00	59.05	—	—	—
	Kern County	TAF111	38.89	176.40	—	—	—
	Northridge - 01	STM090	26.45	865.34	—	—	—

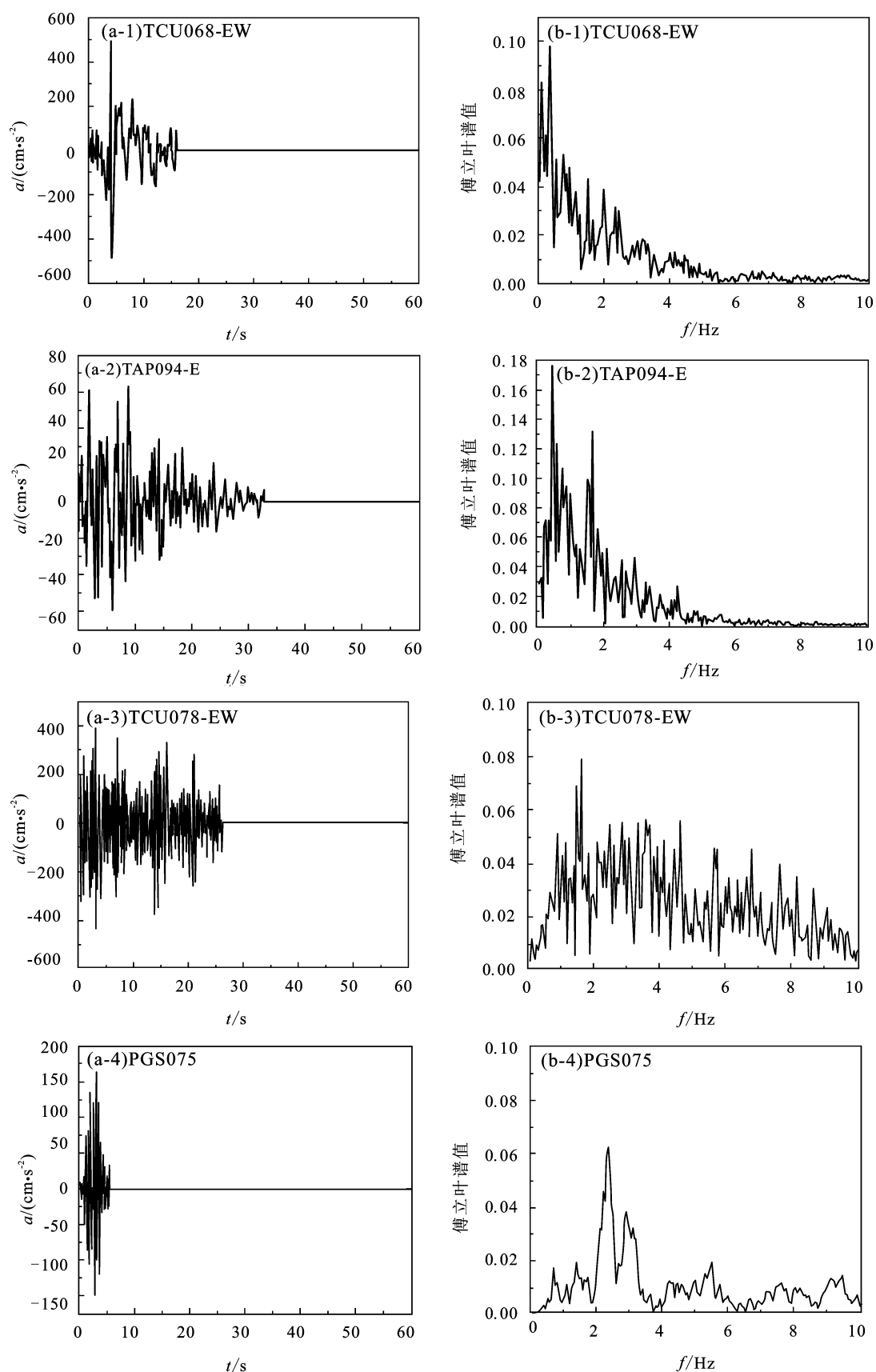


图3 所选地震动加速度时程 (a) 及其傅立叶谱 (b)

Fig. 3 The acceleration-time history of the selected records (a) and their Fourier spectra (b)

3 地震动作用下轨道残余变形分析

3.1 轨道残余变形

为了探究地震强度对轨道结构震后残余变形的影响,在确保其它条件不变的情况下,所选4条地震动的峰值加速度分别调整为0.05 g、0.1 g、0.15 g、0.2 g、0.3 g、0.38 g,并将地震动输入到有限元模型中,进行非线性时程响应分析,得到轨道的残余变形。参考《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006),本文模型在设计地震作用下需要达到抗震性能要求Ⅱ,即震后可能损坏,整体处于非弹性工作;在罕遇地震作用下达到抗震性能要求Ⅲ,即震后结构可能产生较大破坏,但不会出现整体倒塌,经抢修后可限速通车,结构

处于弹塑性工作阶段。

图4a~c为 $PGA = 0.3\text{ g}$ 时的震后轨道横向、竖向、轨距残余变形,图4d为不同 PGA 下的轨道横向最大残余变形。假设轨道初始状态为直线,横向残余变形是震后轨道横向偏移初始中心线的距离,竖向残余变形是震后轨道横向偏移初始竖向中心线的距离,轨距残余变形是震后左右两轨道之间距离相对于初始轨距的变化。位置坐标以第一跨简支梁最左侧的梁端为原点。

从图4a可见,在各类型地震动作用后,轨道的横向残余变形幅值较大且变形规律相似,均呈现出在全桥中间部分最大,越靠近桥台路基位置越小,并逐渐趋近于0的趋势,说明在靠近桥台路基区域轨道相对变形较小。这是由于桥台及路基相对跨中部分刚度更大,且对轨道板有更强的

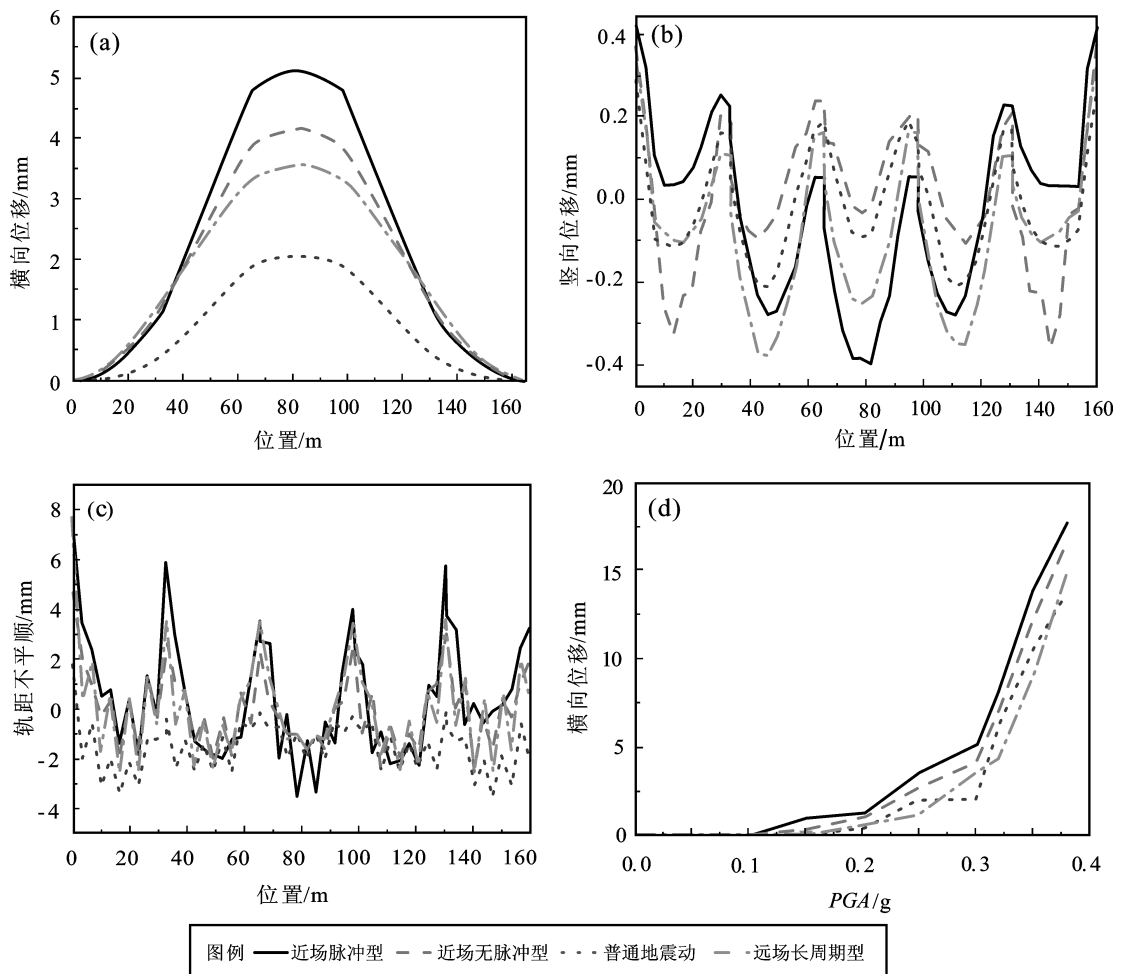


图4 震后轨道横向 (a)、竖向 (b)、轨距 (c)、横向最大 (d) 残余变形

Fig.4 Lateral (a), vertical (b), track gauge (c), the maximum lateral (d) residual deformation

约束力,在地震作用下位于桥梁结构上的轨道响应更为显著。在越靠近桥台的位置,不同频谱特性地震动导致的轨道横向残余变形量差别越小,越接近跨中位置横向残余变形差距越大,这会大大影响行车安全。不同频谱特性地震动对轨道残余变形的影响程度不同,轨道结构对近场脉冲型地震动的作用最为敏感(图4a)。近场脉冲型地震动有较大的速度脉冲,瞬时的能量输入很大,在同一方向上的惯性力持续作用的时间增加,大大增加了轨道的位移,相比于其它地震动,轨道在近场脉冲地震作用下会更早产生横向残余变形,这对轨道的塑性变形能力提出了更高的要求。

由于竖向地震动的作用,轨道产生了较大的竖向残余变形,每一跨竖向残余变形形式相近(图4b):在梁缝位置有较大的突变;在相同地震动作用下中跨梁缝位置竖向残余变形差距不大;在边跨梁与桥台路基连接位置产生的轨道竖向残余变形远大于中跨梁缝位置。近场脉冲型地震动会放大竖向地震动对竖向残余变形的影响,在靠近桥台路基位置,近场脉冲型地震动作用下轨道竖向残余变形分别为其它3种地震动作用下的1.12、1.26和1.49倍。

地震动对于轨距残余变形的影响区别不大,但是在每跨桥梁梁体连接处有明显尖刺状的突变(图4c)。受桥台和路基刚度影响,在梁体与路基连接处需要更大的变形来满足变形协调,在跨中部分梁体与梁体直接结构相似刚度相近,从而产生的突变更小,整体呈现越靠近桥台路基方向突变越大,而向中跨部分减小的趋势。

从图4d可以看出,当 $PGA=0.3\text{ g}$ 时,近场脉冲型、近场无脉冲型、远场长周期型和普通型地震动作用下的轨道横向最大残余变形分别为5.10、4.14、3.55和2.02 mm。相比于其它3种地震动,近场脉冲型作用下轨道横向残余变形分别增大23.16%、43.71%和149.04%。当 $PGA<0.2\text{ g}$ 时,在不同地震动作用下轨道横向最大残余变形并无明显差别。当 $PGA>0.2\text{ g}$ 时,各类型地震动作用下的横向最大残余变形均随着 PGA 的增大而增大。在罕遇地震($PGA=0.38\text{ g}$)时,桥梁已经进入塑性状态,横向最大残余变形分别增大5.3%、27.3%和18.9%。

3.2 轨道横向相对残余位移

梁缝位置为轨道薄弱部分,在地震动作用下,由于桥墩的运动和支座的变形会导致相邻梁体发生明显错位,梁体的错位会引起轨道在梁缝位置的横向相对位移从而影响震后行车安全。横向相对残余位移可表示为:

$$\delta = |y_1 - y_2| \quad (1)$$

式中: y_1 与 y_2 为梁缝位置两侧轨道横向位移。

本文选取在遭受罕遇地震($PGA=0.38\text{ g}$)作用下的梁缝处相邻位置轨道的横向残余位移,利用式(1)求得其横向相对残余位移(表4),研究不同频谱特性地震动对轨道横向相对残余位移的影响。从图5可以看出,在不同类型的地震动作用下,轨道横向相对残余位移变化趋势与轨道横向残余变形(图4a)相反,均在桥台与路基交界处出现极值,桥梁两端横向相对残余位移远大于中跨位置,交界处横向相对残余位移为中跨部分的5~8倍。由于地基桥台刚度比桥墩更大,高速铁路轨道为无缝焊接轨道,其位移受到其下部相邻构件的约束影响较大,在相同地震作用下地基与桥墩位移响应不同,因此在两者交界处需要更大的变形来协调这两部分结构。

近场脉冲型地震动造成的轨道横向相对位移大于其它类型地震动的影响。对在不同类型地震动作用下的轨道横向相对位移取平均值,发现相比于近场无脉冲型、远场长周期型与普通型地震动,在近场脉冲型地震动作用下,桥台与地基交界处的横向相对残余位移分别增加了18%、61%

表4 轨道横向相对残余位移

Tab. 4 Lateral relative displacement of the rail

梁缝位置	横向相对残余位移/mm			
	近场脉冲	远场长周期	近场无脉冲	普通地震动
0#台	3.10	2.62	1.92	1.28
1#墩	2.07	1.15	1.13	0.55
2#墩	0.51	0.31	0.33	0.27
3#墩	0.46	0.31	0.30	0.27
4#墩	1.82	1.00	0.91	0.54
1#台	3.02	2.54	1.88	1.44

和 141%。桥台与地基交界处的横向相对残余位移比跨中部位更为敏感,受不同类型地震动作用后差异明显。而在跨中位置,远场长周期型与近场无脉冲型地震动作用下的轨道横向相对位移并无明显差异。

综上所述,近场脉冲型地震动会显著增大轨道相对残余位移,在桥台位置与地基交界处,轨道的相对残余位移明显大于跨中位置处的残余位移,然而过大的相对残余位移可能会导致轨道失稳,影响行车安全。

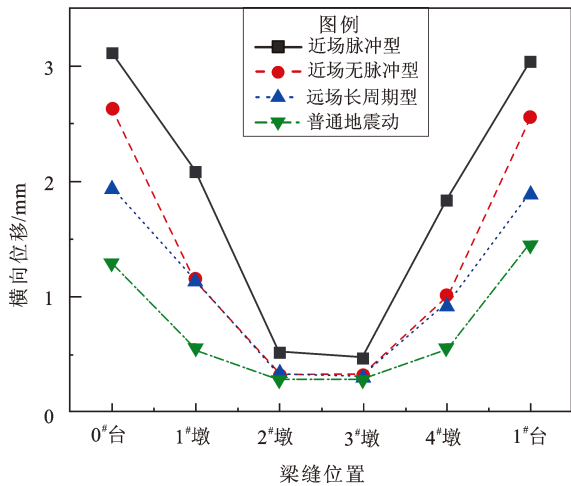


图 5 轨道横向相对位移

Fig. 5 Lateral relative displacement of the track

4 结论

本文建立了精细化典型高速铁路桥梁-轨道有限元模型,并选择不同频谱特性地震动,通过非线性时程响应分析得到了震后轨道残余变形,得出以下主要结论:

(1) 不同频谱特性地震动对轨道残余变形的影响程度不同,轨道结构对近场脉冲型地震动的作用最为敏感,最早产生残余变形,因此对轨道的塑性变形能力的要求更高。

(2) 在不同类型地震动作用下,轨道横向残余变形规律相似,均为在全桥中间部分最大。当 $PGA = 0.3 \text{ g}$ 时,相比于近场无脉冲地震动、远场长周期地震动和普通型地震动,在近场脉冲型地震动作用下轨道的横向残余变形分别增大约 23.16%、43.71% 和 149.04%。

(3) 受竖向地震动的作用时,轨道会产生较大的竖向残余变形。每一跨竖向残余变形形式相近,在梁缝位置有较大的突变。靠近桥台路基位置,近场脉冲型作用下轨道竖向残余变形分别为其它 3 种地震动作用下的 1.12、1.26 和 1.49 倍。

(4) 不同类型地震动对于轨距残余变形的影响区别不大,但是在每跨桥梁梁体连接处轨距残余变形有明显尖刺状的突变。

(5) 梁缝位置为轨道薄弱部分。在桥台位置与地基交界处轨道横向相对残余位移明显大于跨中位置。相比于近场无脉冲型地震动、远场长周期型地震动与普通型地震动,在近场脉冲型地震动作用下,桥台与地基交界处横向相对残余位移分别增加了 18%、61% 和 141%。

(6) 当 $PGA > 0.2 \text{ g}$ 时,不同类型地震动作用下的轨道变形均随着 PGA 的增大而增大;当 $PGA = 0.38 \text{ g}$ 时,桥梁已经进入塑性状态,地震动类型对于轨道残余变形的影响程度降低。

参考文献:

- 冯玉林,高鸽,蒋丽忠,等. 2022. 高铁轨道-桥梁系统地震损伤轨道不平顺谱述评[J]. 铁道标准设计, 66(10): 1-8.
- Feng Y L, Gao G, Jiang L Z, et al. 2022. Review on track irregularity spectrum of high-speed railway track-bridges system damage by earthquake[J]. Railway Standard Design, 66(10): 1-8. (in Chinese)
- 勾红叶,冉智文,蒲黔辉,等. 2019. 高速铁路桥梁竖向变形与轨面几何形态的通用映射解析模型研究[J]. 工程力学, 36(6): 227-238.
- Gou H Y, Ran Z W, Pu Q H, et al. 2019. Study on mapping relationship between bridge vertical deformation and track geometry of high-speed railway[J]. Engineering Mechanics, 36(6): 227-238. (in Chinese)
- 蒋丽忠,余建,周旺保,等. 2022. 横向地震作用下震致轨道几何不平顺研究[J]. 工程力学, 39(2): 1-13. (in Chinese)
- Jiang L Z, Yu J, Zhou W B, et al. 2022. Study on geometrical irregularity of rail induced by transverse earthquake[J]. Engineering Mechanics, 39(2): 1-13. (in Chinese)
- 蒋丽忠,周旺保,魏标,等. 2020. 地震作用下高速铁路车-轨-桥系统安全研究进展[J]. 土木工程学报, 53(9): 1-13.
- Jiang L Z, Zhou W B, Wei B, et al. 2020. Research progress of train-track-bridge system safety of high-speed railway under earthquake action[J]. China Civil Engineering Journal, 53(9): 1-13. (in Chinese)
- 吕佳伟. 2021. 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.
- Lyu J W. 2021. Research on dynamic performance of bridge-track system with simple supported beam on high-speed railway under pulsed near fault ground motion[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University. (in Chinese)
- 沈绍建,刘伟庆,杜东升,等. 2013. 地震动频谱特性对隔震结构非线性地震响应的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 35(3): 1-5.
- Shen S J, Liu W Q, Du D S, *et al.* 2013. Effects of nonlinear seismic response of isolated structures on spectrum characteristics of ground motions[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 35(3): 1-5. (in Chinese)
- 孙逊. 2020. 桥上无砟轨道地震响应分析及轨道变形对行车安全性影响研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- Sun X. 2020. Earthquake response analysis of ballastless track on bridge and influence of track deformation on running safety of high-speed train[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 喻梅,吕佳伟,贾宏宇,等. 2021. 近断层脉冲型地震作用下高速铁路桥梁-轨道系统响应分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 48(9): 138-146.
- Yu M, Lyu J W, Jia H Y, *et al.* 2021. Response analysis of high-speed railway bridge-rail system subjected to near-fault pulse-type earthquake[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 48(9): 138-146. (in Chinese)
- 张凡,李帅,颜晓伟,等. 2017. 近断层脉冲型地震动作用下大跨斜拉桥地震响应分析[J]. 振动与冲击, 36(21): 163-172.
- Zhang F, Li S, Yan X W, *et al.* 2017. Effects of near-fault pulse-type ground motions on the seismic responses of a long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 36(21): 163-172. (in Chinese)
- 张强. 2019. 地震作用下简支梁桥横向变形对高速铁路行车安全影响研究[D]. 成都:西南交通大学.
- Zhang Q. 2019. Study on the influence of lateral deformation of simple supported girder bridge on high-speed railway driving safety under earthquake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 张树强. 2018. 震后轨道变形对列车行车安全性影响研究[D]. 北京:中国地震局工程力学研究所.
- Zhang S Q. 2018. Study on the influence of track deformation on train driving safety after earthquake. [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范(2015年版)[S].
- GB 50010—2010, Code for design of concrete structures (2015 Edition) [S]. (in Chinese).
- 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]. (in Chinese)
- Calabrese A, Almeida J P, Pinho R. 2010. Numerical issues in distributed inelasticity modeling of RC frame elements for seismic analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering, 14(S1): 38-68.
- Jiang L, Yu J, Zhou W, *et al.* 2020. Applicability analysis of high-speed railway system under the action of near-fault ground motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 139: 1-19.
- Kashani M M, Lowes L N, Crewe A J, *et al.* 2016. Nonlinear fibre element modelling of RC bridge piers considering inelastic buckling of reinforcement[J]. Engineering Structures, 116: 163-177.
- Mander J, Priestley M. 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 114(8): 1804-1826.
- Miura S. 1996. Deformation of track and the safety of train in earthquake[J]. Quarterly Report of RTRI, 37(3): 139-146.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 65(3): 581-626.
- Yu J, Jiang L, Zhou W, *et al.* 2020. Study on the dynamic response correction factor of a coupled high-speed train-track-bridge system under near-fault earthquakes[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 50(9): 1-20.
- Yu J, Jiang L, Zhou W, *et al.* 2021. Study on the influence of trains on the seismic response of high-speed railway structure under lateral uncertain earthquakes[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(7): 2971-2992.

Geometrical Irregularity of High-speed Railway Bridge Tracks Considering Seismic Spectrum Characteristics

GAN Lin^{1,2}, GUO Endong^{1,2}, WU Houli^{1,2}, LI Changhong^{1,2}, LIU Cong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

Taking a typical five-span simply supported beam bridge of the high-speed railway as an example, a refined finite element model of high-speed railway bridge-track is established. According to the spectral characteristics of different types of ground motions, near-field-pulse type, near-field non-pulse type, far-field long-period type and ordinary type are selected. The ground motions with different spectral characteristics are input, and the nonlinear time-history analysis of the structure is carried out to explore the influence of different types of ground motions on the residual deformation of the track. The results show that the ground motions with different spectral characteristics have different effects on the residual deformation of the track, and the structure is most sensitive to the near-feld pulsetype ground motion. Under the action of various types of ground motion, the transverse residual deformation law of the rail is similar, and the residual deformation is the largest in the middle part of the whole bridge. The vertical residual deformation in the mid-span of each span bridge is much larger than that of the pier (abutment) position. The position of the beam joint is the weak part of the track, and the residual deformation of the gauge has an obvious sharp mutation at the connection of the beam body of each span. When $PGA > 0.2\text{ g}$, the track deformation under the action of various types of ground motion increases with the increase of PGA . When $PGA = 0.38\text{ g}$, the bridge has entered the plastic state, and the influence of ground motion type on track residual deformation is reduced.

Keywords: high-speed railway bridge tracks; residual deformation; spectral characteristics; nonlinear time history analysis