

地震作用引发的高速列车脱轨评价

王 滢^{1,2}, 李建端^{1,2}, 高 盟^{1,2}, 徐 晓^{1,2}, 陈青生³

(1. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 青岛 266590;

2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 青岛 266590;

3. 新加坡国立大学土木与环境工程系, 新加坡 119077)

摘 要: 动力作用下轨道和路基的振动响应问题是解决高速列车在轨运行安全的关键之一。为保证地震时高铁的在轨安全,基于 ABAQUS 和 FORTRAN 子程序方法,创建了高铁无砟轨道-路基-地基三维精细化模型,详细分析地震-列车移动荷载特征对轨道结构的影响以及瞬态脱轨标准,探讨高速列车在地震作用下的临界速度和脱轨机理,考虑的脱轨标准包括轨道横向力与垂直力的比率(脱轨系数)和轨道的横向变形量,以此寻求合理的改进将地震的风险降到最低。结果表明:地震与列车移动荷载共同作用时,前者对钢轨的竖向正位移影响显著,而其加速度和频谱则受后者的作用更为突出;与此同时,列车脱轨概率显著增大,钢轨的临界速度为 50 m/s(180 km/h),此时钢轨横向位移较大,脱轨系数曲线变化剧烈,严重超出国家安全标准,列车可能失稳,甚至脱轨。

关键词: 地震作用; 移动荷载; 振动响应; 临界速度; 脱轨系数; 高速列车

中图分类号: TU 311.3; TU 352.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2022)02-0137-09

doi: 10.11936/bjtxb2020050004

Evaluation of High-speed Train Derailment Caused by Seismic Action

WANG Ying^{1,2}, LI Jianduan^{1,2}, GAO Meng^{1,2}, XU Xiao^{1,2}, CHEN Qingsheng³

(1. Shandong Province Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore)

Abstract: The vibration response of track and roadbed under dynamic action is one of the keys to solve the problem of safe operation of high-speed trains on track. To ensure the security of high-speed rail during an earthquake, based on ABAQUS and FORTRAN subprogram methods, a three-dimensional refined model was established that included ballast-less track, subgrade and foundation of high-speed railway, which were analyzed in detail including the influence of seismic-train moving load characteristics on track structure and instantaneous derailment standard. The critical speed and derailment mechanism of high-speed train under the action of a large earthquake were discussed. The derailment criteria considered included the ratio of the transverse force to the vertical force (derailment coefficient) and the transverse deformation of the track, so as to seek reasonable improvement and minimize the risk of major earthquake. Results show that when the seismic action and train moving load act together, the former has a significant effect on the vertical positive displacement of the rail, and its acceleration and frequency spectrum are more prominently affected the latter. Meanwhile, the train derailment probability

收稿日期: 2020-05-08; 修回日期: 2020-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978510); 山东省自然科学基金资助项目(ZR201702160391)

作者简介: 王 滢(1979—), 女, 讲师, 主要从事岩土动力学与岩土地震工程方面的研究, E-mail: hopeywg@ hotmail. com

significantly increases. The critical speed of the rail is 50 m/s (180 km/h). At this time, the rail lateral displacement is large, and the derailment coefficient curve changes sharply, which seriously exceeds the national safety standards. The train may lose stability or even derail.

Key words: seismic action; moving load; vibration response; critical speed; derailment coefficient; high speed train

21世纪20年代初是我国铁路“四纵四横”快速客运通道的竣工时间点。与此同时,地震在我国时有发生且人为不可控,高速铁路所穿越地区多处在地震液化带上。鉴于高铁线网较为密集,发车间隔稍显短暂,列车运营时刚好发生地震的可能性较高,存在着一定的脱轨风险。本文研究地震作用下高速运行列车的临界速度及其脱轨机制,以期为我国高铁的地震重大地质灾害防治提供行之有效的抗震减振设计和对策。

现有文献研究的侧重点大多倾向于轮轨动力学方面,主要探索地震作用下列车和轨道的相互作用机制,而忽视路基结构和地基条件所带来的影响。如翟婉明等^[1-3]建立车辆-轨道相互作用的理论模型和仿真模型,同时进行现场试验验证、参数确定及应用实践等方面内容,就列车脱轨标准提供宝贵建议。Nishimura等^[4]从理论和实验两方面研究地震运动激励下高速铁路车辆的脱轨机理,省略轨道本身的质量,基于正弦波激励下的结果,探讨车速对脱轨的影响。以脱轨系数及冲角为重要指标,李竹文等^[5]创建列车脱轨尖点突变模型,探究尖点突变发生的2种情形和3种列车时速的模型差异。通过考虑横向加速度、列车轮对的轮缘角、车轮卸载和轨距等多种力学因素,Koo等^[6]从理论上推导出一种单轮对脱轨系数,并可以预测各种脱轨模式。Jin等^[7]采用完全非线性轮轨接触模型来数值模拟动态激励过程中车轮相对于轨道的跳跃。张景峰等^[8]基于非线性显式有限元动力技术建立列车U型梁碰撞模型,就撞击U型梁的过程剖析其机理。然而,这些研究忽略了岩土介质条件对地震反应及脱轨的影响,建立的是列车-轨道相互作用系统模型,仅从力学角度分析地震期间对列车脱轨的影响。事实上,不同的路基结构和地基条件会使振动传播和衰减规律有所不同,考虑不同路基结构的影响是确保列车在轨运行安全性和平稳性的重要研究内容。

因此,本文创建了考虑地震的列车移动荷载作用下无砟轨道-路基-地基的三维数值分析模型,把高铁列车时速作为一个重要指标,研究轨道结构在不同列车时速下的振动传播和衰减规律,同时结合脱轨系数和钢轨的横向变形来评价列车的脱轨机

制,以期为高速铁路的安全性评估提供重要参考。

1 计算模型及参数

1.1 模型及参数的确定

依据《高速铁路设计规范》^[9]创建轨道系统-路基-地基的三维有限元模型,见图1,由上至下包括钢轨-扣件-轨道板-CA砂浆层-底板-基床表层-基床底层-路堤本体-地基。其中, x 、 y 、 z 轴的方向与轨道的位置关系分别对应的是:轨面上垂直钢轨方向、轨面上平行钢轨方向、垂直轨面方向。在本模型中,钢轨类型为60 kg/m,轨道板、CA砂浆层、路基和地基均采用8节点实体单元,线路纵向长度、地基表面宽度、总高度分别为150、52、27.706 m,轨距和扣件支点间距分别为1.435和0.65 m。本模型具体计算参数详见表1。

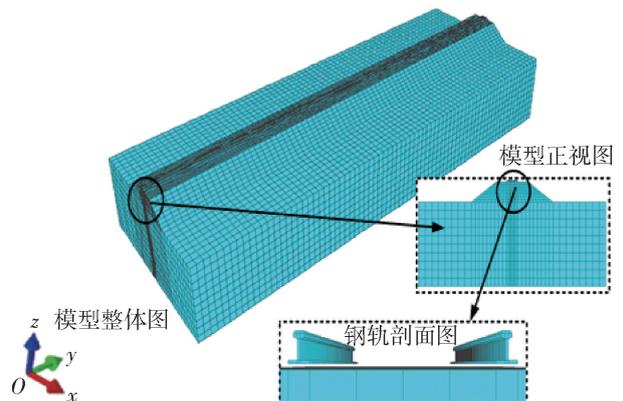


图1 有限元计算模型

Fig. 1 Finite element computing model

如图2所示,人工边界选择的是三维黏弹性。底板与基床表层、路堤本体与地基之间通过绑定的方式接触以满足各部位之间的变形协调条件。在本模型中,各部位均设置为弹性本构。

如图3所示,轨道系统的连接由弹簧阻尼得以实现, K 、 C 分别为弹簧的等效刚度和阻尼系数^[10]; K_x 、 K_y 分别为弹簧的等效横向刚度、等效纵向刚度,其值均取37.5 kN/m; C_x 、 C_y 分别为弹簧的横向阻尼系数、纵向阻尼系数,均取30 kN·s/m; K_z 为弹簧的等效竖向刚度,取25 kN/m; C_z 为弹簧的阻尼系数,取值37.5 kN·s/m。

表 1 有限元模型计算参数

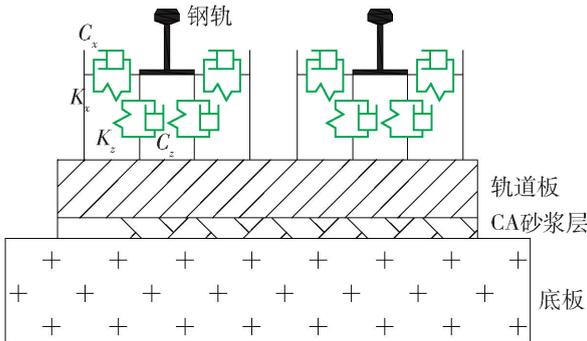
Table 1 Parameters of the finite element computing model

名称	高度/m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比 ν	阻尼比 ζ	瑞利阻尼 系数 α	瑞利阻尼 系数 β
钢轨	0.176	7 800	210.00	0.30	0.01	0.144 88	0.000 69
轨道板	0.200	2 500	35.50	0.20	0.03	0.434 53	0.002 07
CA 砂浆	0.030	1 800	7.00	0.20	0.05	0.724 39	0.003 45
底板	0.300	2 500	30.00	0.20	0.03	0.434 53	0.002 07
基床表层	0.400	1 950	0.25	0.30	0.08	1.159 02	0.005 52
基床底层	2.300	1 900	0.20	0.25	0.07	1.014 14	0.004 83
路基本体	4.300	1 850	0.15	0.25	0.10	1.448 78	0.006 90
地基	20.000	1 800	0.10	0.25	0.08	1.159 02	0.005 50

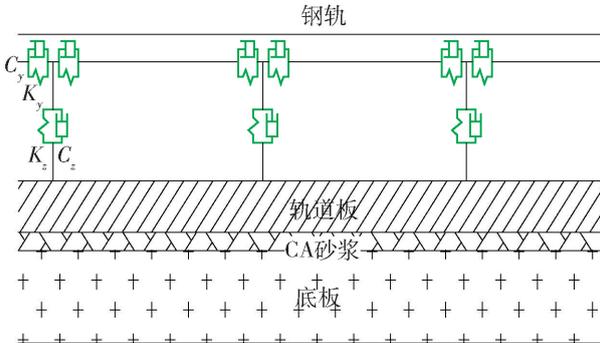


图 2 黏弹性边界条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of viscoelastic boundary condition



(a) 主视图



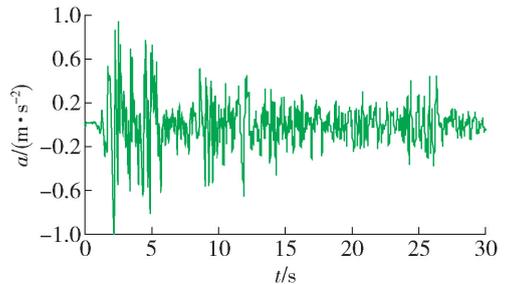
(b) 侧视图

图 3 板式无砟轨道动力学模型示意图

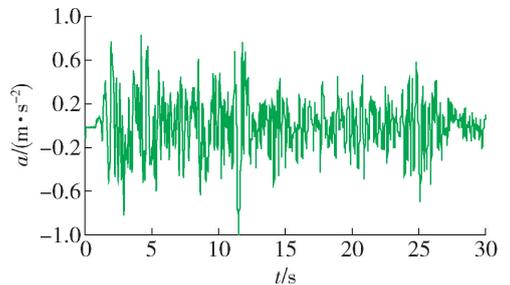
Fig. 3 Schematic diagram of dynamic model of slab ballast-less track

1.2 地震作用

以边界结点上的等效荷载近似代替地震波, 是分析结构地震反应常用的一种合理手段. 夏栋舟等^[11]研究结构的抗震性能时, 将地震波加速度从模型底部输入. 本文亦借鉴该方案, 从模型的底部输入 Imperial Valley 地震波, 以 7 度作为抗震设防烈度控制标准, 于是调整地震波峰值为 0.1 g. 图 4 为水平方向加速度时程曲线, 其中最危险时段 2.0 ~ 3.6 s 影响性最强, 最具有代表性, 取之为地震加速度激励.



(a) 水平x方向



(b) 水平y方向

图 4 Imperial Valley 波加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration time-history curve of Imperial Valley wave

1.3 列车移动荷载

本文重点分析路基响应而非轨道力学, 故为减小计算量假设轨道平顺且轨轮接触光滑, 列车荷载

仅考虑竖向分量,且列车脱轨仅由地震力引起. 通过编制 DLOAD 子程序,实现软件 ABAQUS 的二次开发,因轮轨接触并非点接触,故在模型中于钢轨表面设置列车移动面荷载. 单辆列车轴重力荷载示意图见图 5.

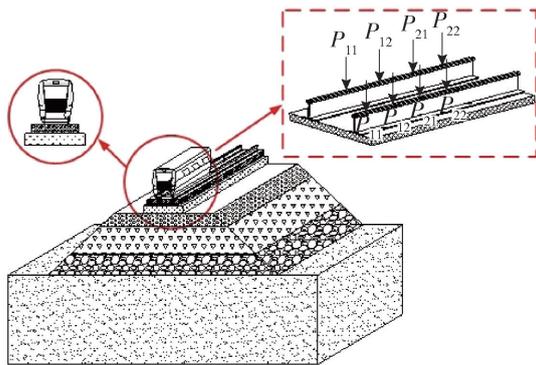


图 5 单辆列车轴重荷载示意图

Fig. 5 Schematic diagram of single train axle load

列车选用 CRH3 型动车组,轴质量为 17 t,总长度约 200 m,中间车车长、车辆定距、相邻 2 个车厢间轴距、转向架固定轴距分别为 25、17.375、4.5、2.5 m. 本文采用边学成等^[12]的关系式

$$P_M = \sum_{n=1}^M f_n(x-ct) \quad (1)$$

$$f_n(x-ct) = P_{n1} \delta \left(x-ct + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right) +$$

$$P_{n1} \delta \left(x-ct + a_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right) +$$

$$P_{n2} \delta \left(x-ct + a_n + b_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right) +$$

$$P_{n2} \delta \left(x-ct + a_n + b_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right) \quad (2)$$

式中: P_M 为列车产生的连续轴重荷载; c 为车速; M 为车厢节数; P_{n1} 和 P_{n2} 分别为车厢前、后轮的轴重力; L_s 为车厢长度; L_0 是为第 1 节车厢前某测量参考点的始距; a_n 、 b_n 为车轴间距; $\delta(\cdot)$ 为冲击荷载的 Dirac 函数.

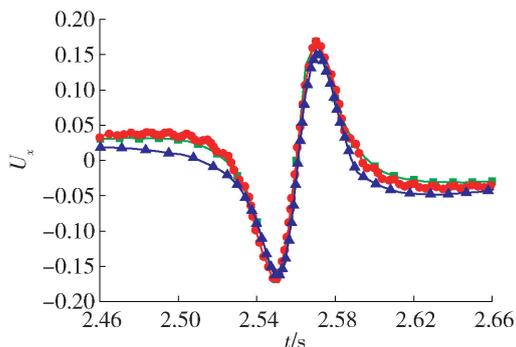
2 模型有效性验证

2.1 振动位移验证

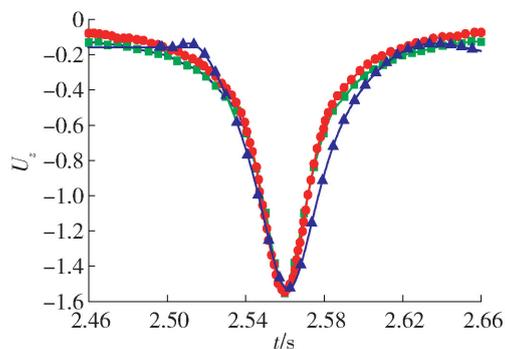
为了验证本文三维数值模型的合理性和可靠性,参考 Eason^[13]和高广运等^[14]的研究成果,将 3D 数值模型中钢轨-扣件-轨道板-CA 砂浆层-底板系统简化为 Euler 梁,于其表面施加 70 m/s 的竖向列车移动荷载. 地基土层密度取 2 000 kg/m³,泊松比和材料阻尼系数分别取 0.25 和 0.05.

图 6 提供高广运 2.5 维有限元计算结果和

Eason 的均匀弹性半空间地基的解析解,其中移动点荷载正下方 1 m 处观察点的水平位移值 U_x 和竖向位移值 U_z ,均为乘以 $2\pi\rho v_s^2/p$ 之后的归一化值^[14],其中 ρ 为土体密度, v_s 为土体纵波波速, p 为列车轴重荷载. 比较后可知,本文 3D 数值仿真模拟的基床表层位移时程曲线与 Eason、高广运的结果吻合度较高,本文模型的有效性得以验证.



(a) 沿x坐标方向位移值



(b) 沿z坐标方向位移值

—EASON —2.5 FEM —本文结果

图 6 基床表层竖向位移时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of vertical displacement in the subgrade surface

2.2 脱轨系数验证

脱轨系数为轮轨的横向作用力 Q 与垂向作用力 P 之比,在铁道与城市轨道交通领域常以之来评估列车运营的安全状态. 若脱轨系数处在安全目标值范围之内,则可作为列车平稳运行的重要参考指标之一. 根据《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范(GB 5599—85)》^[15]中的规定,有一定安全裕量的标准为: $Q/P \leq 1.0$ (第二限度). 如图 7 所示,提取出车速为 70 m/s 时的脱轨系数情况. 可以看出,脱轨系数始终未超出该安全标准范围,这也从侧面验证了当前模型的有效性.

3 轨道结构的振动特性分析

随着铁道运输对列车速度要求的不断提高,各

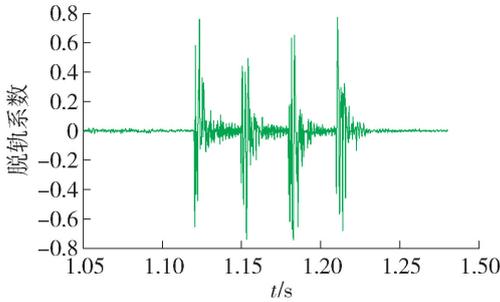


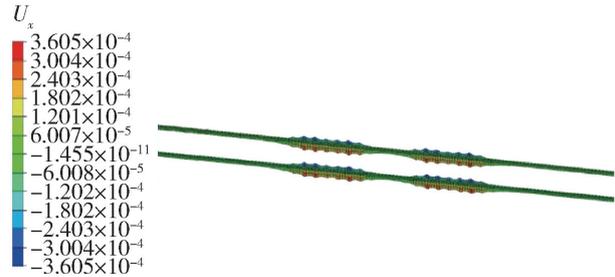
图7 列车脱轨系数

Fig.7 Derailment coefficient of the train

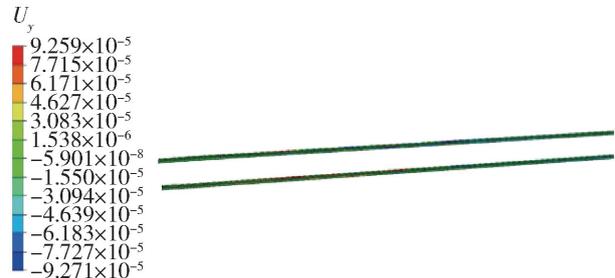
铁路沿线处轨道和地面的振动响应变得越来越大. 因此,研究轨道结构在不同列车速度情况下的振动响应规律,对于保证高铁运营的安全性和稳定性具有十分重要的意义.

3.1 钢轨振动位移

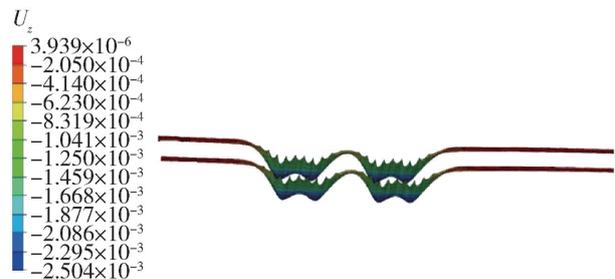
图8、9描述的是列车移动荷载在70 m/s的速度下,施加地震作用对钢轨位移的影响. 其中: U_x 表示钢轨的横向位移; U_y 表示钢轨的纵向位移; U_z



(a) 钢轨的x向位移云图



(b) 钢轨的y向位移云图



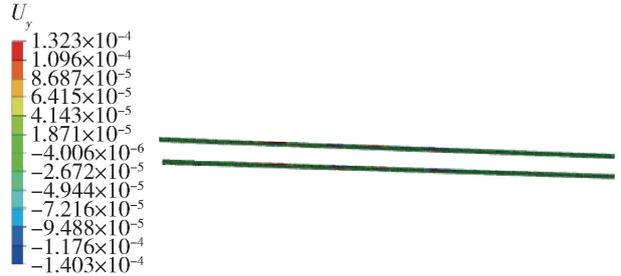
(c) 钢轨的z向位移云图

图8 仅列车移动荷载作用下钢轨的位移云图

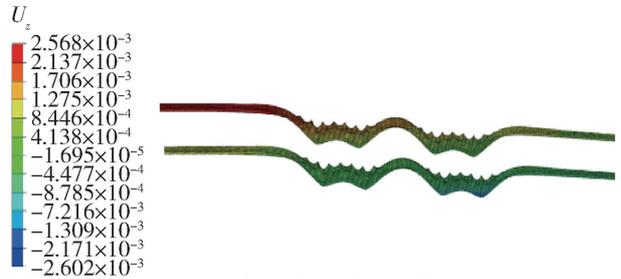
Fig.8 Displacement cloud image of the rail under the train moving load



(a) 钢轨的x方向位移云图



(b) 钢轨的y方向位移云图



(c) 钢轨的z方向位移云图

图9 地震+列车移动荷载作用下钢轨的位移云图

Fig.9 Displacement cloud image of the rail under the seismic-train moving load

表示钢轨的竖向位移. 从位移云图可直观看出不同荷载作用下钢轨在3个方向的位移分布规律:钢轨位移变化以 x 、 z 方向位移为主, y 方向位移变化情况对较小.

具体而言,地震作用对 x 方向位移影响显著,钢轨 x 方向峰值位移增至9.01 mm,约是仅移动荷载时钢轨位移的25倍;地震+列车移动荷载作用对 y 方向位移影响不大,但与仅移动荷载作用(见图8(b))相比,位移峰值涨幅高达51.3%;对 z 方向位移来说,移动荷载在 z 方向产生负位移,地震作用使其产生正位移,两者共同作用下负向峰值位移略有增加,而正向峰值位移约是原来的652倍,这极可能导致列车运行形态失常,甚至发生倾覆的情况,从而对乘客的生命财产安全造成威胁.

为了评价地震对钢轨竖向位移的影响,如图10所示,研究地震作用下列车运行速度分别取50、70、100、130 m/s时,钢轨竖向位移的变化曲线. 其中,0~1.0 s为仅地震单独作用时的情况, $t=1.0$ s后随

着列车的驶入,移动荷载与地震进行耦合,对钢轨竖向位移起到双重复合作用。

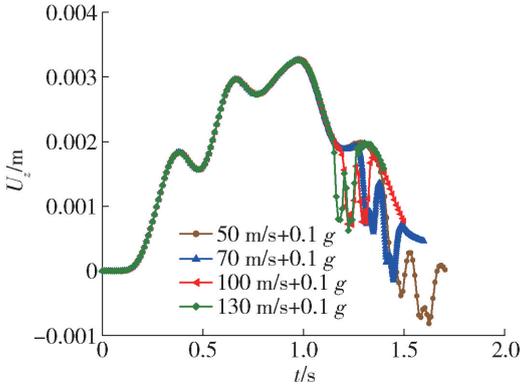


图10 地震+列车移动荷载作用下钢轨竖向位移曲线
Fig. 10 Vertical displacement curve of the rail under the seismic-train moving load

由图10可知: $t = 1.0$ s前,在仅有地震的条件下,钢轨竖向位移呈波动上升趋势; $t = 1.0$ s后,叠加列车移动荷载后两者共同作用时,以列车移动荷载为主,钢轨的位移整体上呈减小趋势,且列车轮轨分布较为清晰,这与钢轨的位移云图(见图9(c))一致。而值得注意的是,钢轨的竖向位移和列车运行速度并不成正比关系,列车运行速度为50、70 m/s时,钢轨位移出现反常现象,且50 m/s时钢轨位移最大。也就是说,在地震和列车移动荷载复合作用下,存在着一个临界速度50 m/s引发轨道的强烈振动,列车可能失稳,甚至脱轨。

3.2 脱轨系数

参照2.2节中的脱轨系数第二限度安全标准,为了进一步评价地震作用与不同列车速度下脱轨机制之间的关系,对施加地震前后不同车速情况下的脱轨系数和钢轨横向(x 方向)位移进行分析。图11为轮轨作用力示意图。

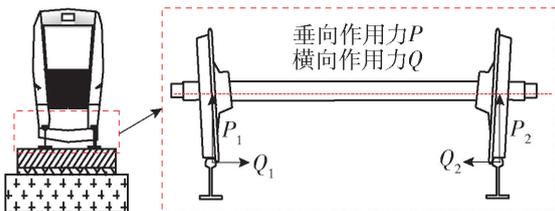
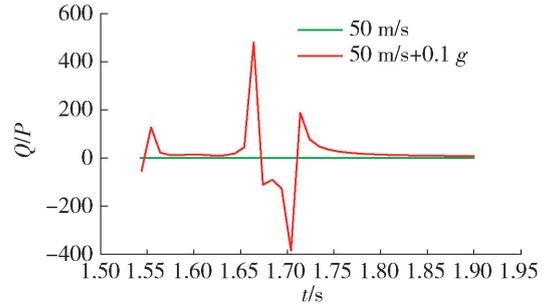


图11 轮轨作用力示意图

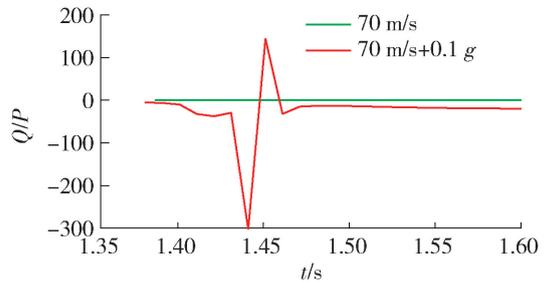
Fig. 11 Schematic diagram of wheel-rail force

图12为不同车速下的脱轨系数,图13为不同车速时钢轨横向位移图。从图12、13可知,未施加地震作用时,4种不同列车速度下的脱轨系数和横

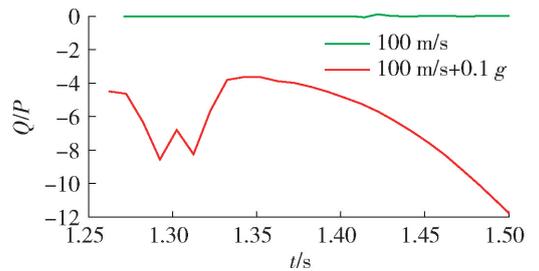
向位移均在0附近。也就是说,在列车移动荷载单独作用的情况下,列车横向位移很小,处于未脱轨的安全状态,脱轨系数也满足安全标准,这也从侧面验证了本文所建立模型的合理性和可靠性。施加地震作用后,列车横向位移显著增加,脱轨系数超出安全标准,且远超脱轨系数超限时间(0.035 s)^[2]。



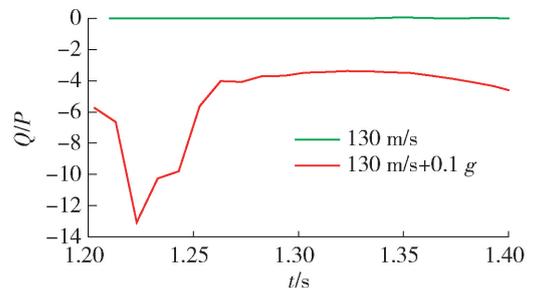
(a) 车速50 m/s



(b) 车速70 m/s



(c) 车速100 m/s



(d) 车速130 m/s

图12 不同列车速度时列车脱轨系数

Fig. 12 Derailment coefficient at different train speeds

相较于其他车速而言,50 m/s时列车脱轨风险最高;在此车速下,脱轨系数曲线变化最为剧烈,且在突变时间点1.66 s时的横向变形达到8 mm,脱轨

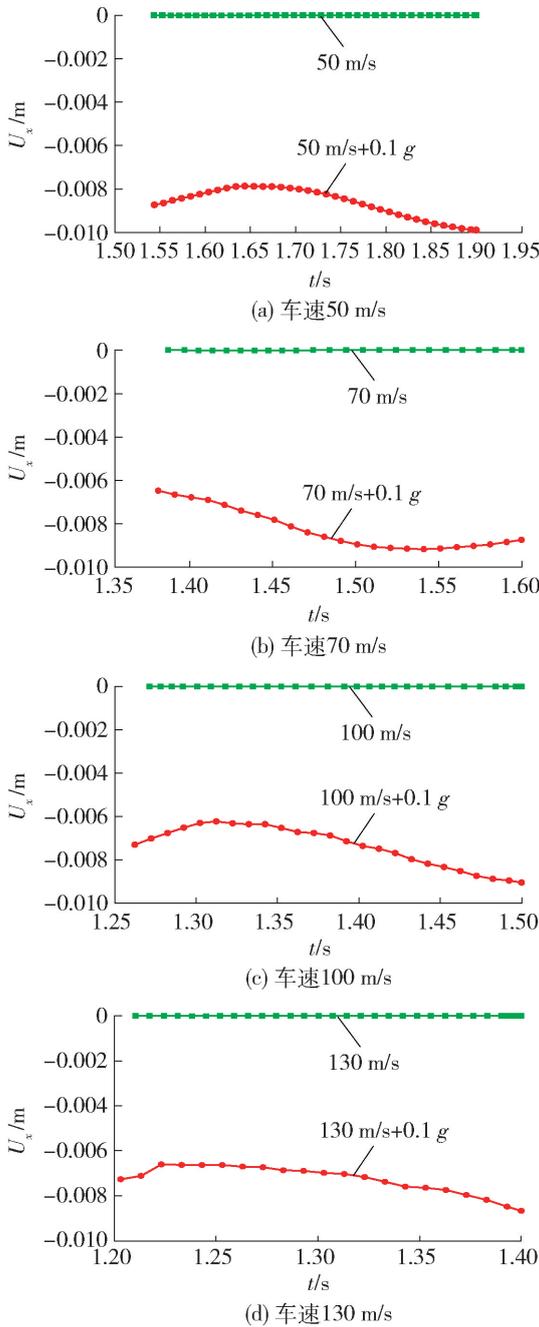


图13 不同列车速度下钢轨的横向位移

Fig. 13 Lateral displacement of the rail at different train speeds

系数高达500左右,是其他运行速度下脱轨系数的2~70倍,严重超出国家安全标准. 另外,经过仔细观察不难发现,轨道横向位移的突变点与脱轨系数的突变点,基本上保持一致.

因此,从安全性的角度考虑,把脱轨系数和钢轨的横向位移共同作为主要评价指标,来探讨列车脱轨的可能性大小是切实可取的. 换言之,随着列车的运行,在某个危险时刻,钢轨的横向位移显著增大,同时

脱轨系数也急剧变化,这意味着此时列车的稳定性不好,运行形态已经失常,正处于脱轨的临界状态.

3.3 轨道的加速度和频谱

图14是考虑地震发生时不同车速的情况下钢轨的加速度时程曲线. 从图中可以看出,在0~1.0s时,加速度时程基本无波动,这说明钢轨加速

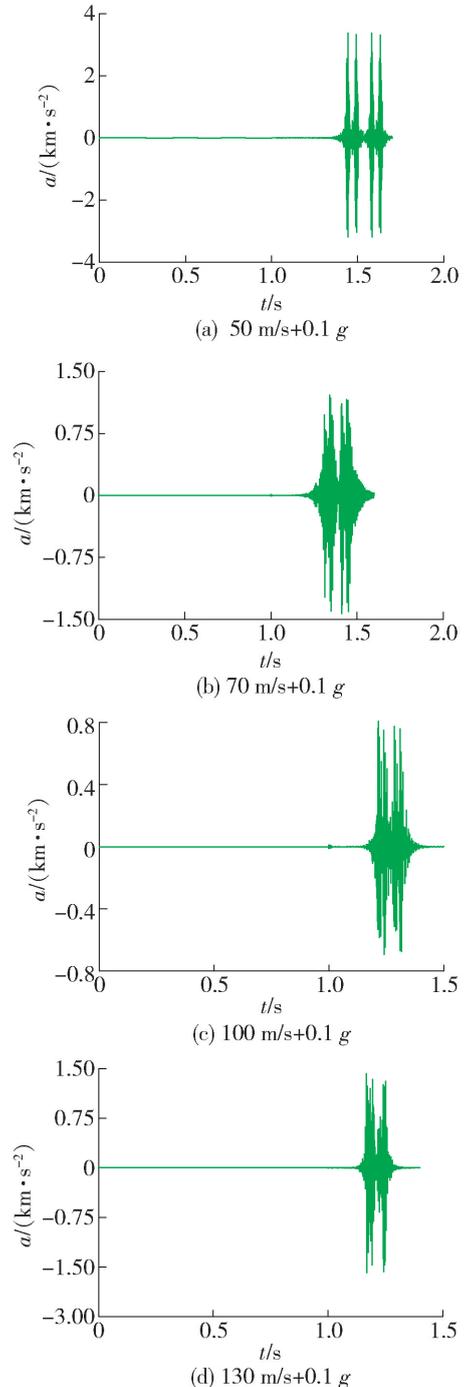


图14 复合作用时不同车速情况下的钢轨加速度时程曲线

Fig. 14 Acceleration time-history curve of the rail by the composite action at different train speeds

度的地震反应并不显著; $t = 1.0$ s 后,再施加不同列车运行速度情况下的移动荷载,钢轨的加速度变化比较明显,这说明钢轨加速度对列车移动荷载较为敏感. 经比较钢轨的峰值加速度可发现:车速为 50 m/s 时,钢轨的振动频率最快,其加速度约在 1.44 s 时达到最大幅值 $3\,384.05\text{ m/s}^2$;而在地震作用下车速为 50 m/s 时钢轨的状态最为危险,其加速度被放大,轨道振动较为剧烈,列车运行存在隐患,极有可能会失稳,甚至发生脱轨事故.

图 15 是在 $0.1g$ 地震加速度作用下,移动荷载

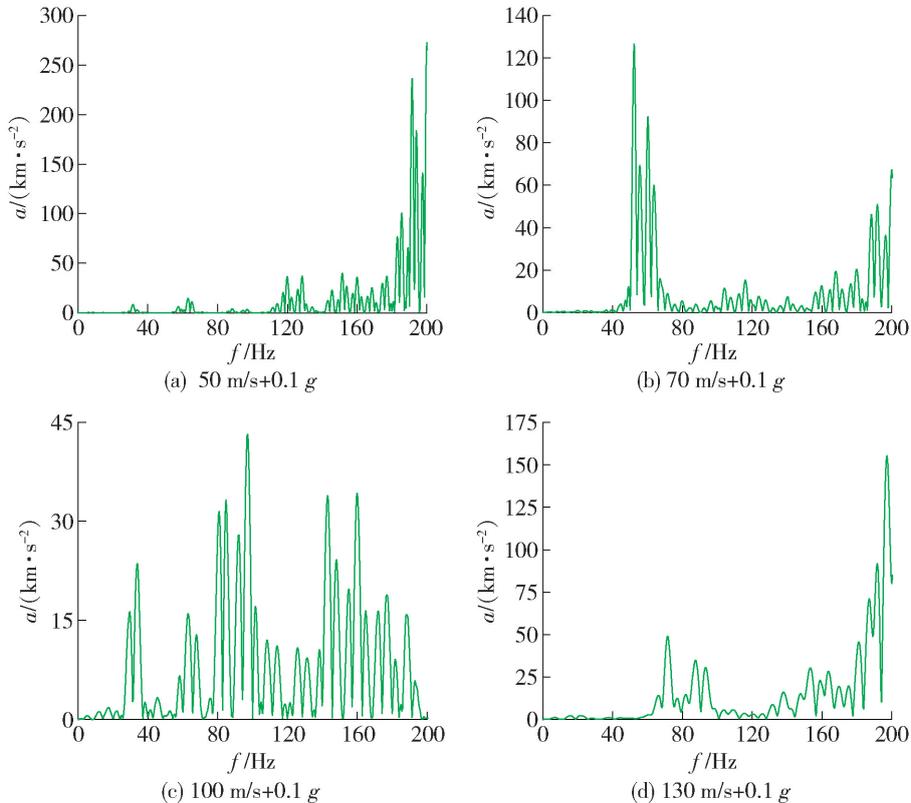


图 15 复合作用时不同车速情况下的钢轨加速度频谱曲线

Fig. 15 Acceleration spectrum curve of the rail by the composite action at different train speeds

综上所述,钢轨在地震与列车移动荷载的复合作用下的临界速度为 50 m/s (180 km/h),比目前已知的临界车速 350 km/h^[14]明显小得多. 轨道的临界速度一般不止一个,而其中的最小值是重中之重. 显然,在复合作用下,该最小临界速度不是很大,一般低于高铁列车的运营时速,轨道结构易因地面波而剧烈振动,导致列车运行形态失常,甚至脱轨.

4 结论

本文通过建立地震和列车移动荷载复合作用下轨道结构-路基-地基的三维精细化计算模型,对高速铁路轨道结构在不同速度下的位移、加速度、频谱

分别取 50、70、100、130 m/s 运行速度情况下钢轨加速度的频谱曲线. 由图可知,在不同车速情况下,各频段(低、中、高频)均有出现,且存在着多个主导频率,但总体上以高频成分为主. 对比 5 种列车速度下的频谱曲线,不难发现:相较于其他情况而言,当车速为 50 m/s 时,钢轨的高频成分集中且较为密集,这说明 50 m/s 是列车在地震作用下运行的一个临界速度,此时钢轨的振动能量不能及时有效地传播与衰减,极有可能会发生共振现象,大大降低乘客的舒适度和列车运行的安全性.

曲线进行分析. 主要结论如下:

1) 复合作用下,地震对钢轨的动位移起主导作用,尤其是对竖向正位移影响显著,极可能导致列车的倾覆.

2) 复合作用下,钢轨在不同列车速度下各个频率均有出现,且以高频成分为主.

3) 复合作用下,钢轨的加速度时程对列车速度的变化较为敏感,尤其在临界速度时,钢轨的加速度幅值数量级高达 10^3 m/s^2 .

4) 从安全性考虑,以脱轨系数和钢轨的横向位移为主要指标共同作为列车脱轨的评价标准:当车速取 50 m/s 时,脱轨系数曲线变化最为剧烈,严重

超出国家安全标准,此时列车极可能失稳,甚至脱轨。

5) 相较于已知的临界车速 $350 \text{ km/h}^{[14]}$,复合作用下情况的为 50 m/s (180 km/h),该值一般低于高铁列车运营时速,轨道结构易因地面波而剧烈振动,导致列车运行形态失常,甚至脱轨。

参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学研究的新进展[J]. 中国铁道科学, 2002(2): 1-14.
ZHAI W M. New progress in the study of vehicle-track coupling dynamics [J]. China Railway Science, 2002(2): 1-14. (in Chinese)
- [2] 翟婉明, 陈果. 根据车轮抬升量评判车辆脱轨的方法与准则[J]. 铁道学报, 2001(2): 17-26.
ZHAI W M, CHEN G. Methods and criteria for judging vehicle derailment based on wheel lift [J]. Journal of the Railway Society, 2001(2): 17-26. (in Chinese)
- [3] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 2002: 10-22.
- [4] NISHIMURA K, TERUMICHI Y, MORIMURA T, et al. Analytical study on the safety of high speed railway vehicle on excited tracks [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2010, 4(1): 211-225.
- [5] 李竹文, 戴焕云. 基于突变理论的列车脱轨机理研究[J]. 铁道建筑, 2013, 53(1): 91-95.
LI Z W, DAI H Y. Research on the mechanism of train derailment based on catastrophe theory [J]. Railway Construction, 2013, 53(1): 91-95. (in Chinese)
- [6] KOO J S, OH H S. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheelset [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3483-3498.
- [7] JIN Z, PEI S, LI X, et al. Effect of vertical ground motion on earthquake-induced derailment of railway vehicles over simply-supported bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 383: 277-294.
- [8] 张景峰, 韩万水, 景媛, 等. 列车脱轨撞击U型梁动力仿真模拟及损伤分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(1): 48-53.
ZHANG J F, HAN W S, JING Y, et al. Dynamic simulation and damage analysis of train derailment impacting U-beam [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(1): 48-53. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [10] 杜衍庆, 白明洲, 倪守睿. 列车相向运行对双线无砟轨道高速铁路路基动应力响应分析[J]. 北京工业大学报, 2014, 40(4): 580-585.
DU Y Q, BAI M Z, NI S R. Analysis of dynamic stress response of double-track ballastless track subgrade with trains running oppositely [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(4): 580-585. (in Chinese)
- [11] 夏栋舟, 何益斌, 刘建华. 刚性桩复合地基-上部结构动力相互作用体系抗震性能及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3505-3511.
XIA D Z, HE Y B, LIU J H. Seismic performance and influencing factors of rigid pile composite foundation-superstructure dynamic interaction system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3505-3511. (in Chinese)
- [12] 边学成, 陈云敏. 列车荷载作用下轨道和地基的动响应分析[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 477-484.
BIAN X C, CHEN Y M. Dynamic response analysis of track and foundation under train load [J]. Journal of Mechanics, 2005, 37(4): 477-484. (in Chinese)
- [13] EASON G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force [J]. International Journal of Engineering Sciences, 1965, 2: 581-609.
- [14] 高广运, 何俊锋, 杨成斌, 等. 2.5维有限元分析饱和地基列车运行引起的地面振动[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 234-241.
GAO G Y, HE J F, YANG C B, et al. 2.5D finite element analysis of ground vibration caused by train operation on saturated ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 234-241. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国铁道部. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB 5599—85[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.

(责任编辑 郑筱梅)