

地震-列车荷载耦合作用下桩网复合路基动力响应^{*}邓友生^{1,2} 张克钦¹ 李 辉³ 李文杰¹ 肇慧玲¹ 马二立¹

(1. 西安科技大学桩承结构研究中心, 710054, 西安;

2. 西安交通工程学院轨道交通工程安全与智能控制重点实验室, 710030, 西安;

3. 青海大学土木水利学院, 810016, 西宁)

摘 要 [目的] 随着高速铁路的快速发展, 列车行驶过程中遇到地震的可能性大幅提高, 因此有必要研究不同列车运行速度与峰值加速度下的桩网复合路基动力响应问题。[方法] 以京沪高速铁路上铺设的 CRTS II 型板式无砟轨道为例, 基于有限元软件建立三维轨道-桩网复合路基模型, 通过子程序施加列车移动荷载与地震波, 分析其轨道振动、动应力传递、桩体受力及行车安全性。[结果及结论] 当列车运行速度较高时, 列车与地震的共振效应明显, 峰值加速度对于轨道的竖向振动影响较小。地基的动应力幅值主要由地震作用控制, 地基表面的动土应力会出现突变增大的情况。随着水平距离的增加, 桩土动应力比呈先增大后减小的变化趋势, 土工格栅的拉应力逐渐增加, 并在到达土工格栅边缘时变为负值。桩体轴力与弯矩幅值随着峰值加速度与列车运行速度的增加而增加, 越靠近土工格栅边缘的桩体受列车运行速度的影响越小。列车在行驶中的脱轨系数受地震峰值加速度的影响较小, 但受列车运行速度的影响较大, 在地震中可通过降低列车运行速度来提升行车安全性。

关键词 高速铁路; 桩网复合路基; 列车荷载; 地震作用**中图分类号** U213.244

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.023

Dynamic Response of Pile-Net Composite Subgrade under Coupled Seismic-Train Load EffectDENG Yousheng^{1,2}, ZHANG Keqin¹, LI Hui³, LI Wenjie¹, ZHAO Huiling¹, MA Erli¹

(1. Pile-Supported Structures Research & Test Center, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China;

2. Key Laboratory of Rail Traffic Engineering Safety & Intelligent Control, Xi'an Traffic Engineering Institute, 710030, Xi'an, China; 3. School of Civil Engineering and Water Resource, Qinghai University, 810016, Xining, China)

Abstract [Objective] With the rapid development of high-speed railways, the possibility of encountering earthquakes during train operation has significantly increased. Therefore, it is

necessary to study the dynamic response of pile-net composite subgrades at different train running speeds and peak accelerations. [Method] Taking the CRTS II plate-type ballastless track laid on the Beijing-Shanghai High Speed Railway as an example, a three-dimensional track-pile-net composite subgrade model is established using finite element software. Track vibration, dynamic stress transfer, pile forces, and driving safety are analyzed by applying train moving loads and seismic waves with subroutines. [Result & Conclusion] When the train runs at a higher speed, the resonance effect between the train and seismic is obvious, and the peak acceleration shows less effect on vertical track vibrations. The dynamic stress amplitude of foundation is dominated by seismic action, and the dynamic soil stress on the foundation surface shows a sudden increase. With the increase of horizontal distance, the pile-soil dynamic stress ratio exhibits a trend of first increasing and then decreasing, and the geogrid tensile stress gradually increases and turns negative when reaching the geogrid edge. The axial force and the bending moment amplitude of the pile body increase with the uplift of peak accelerations and train speeds. The closer the pile body is to the geogrid edge, the less it is affected by train operation speed. The train derailment coefficient in operation is less affected by the seismic peak acceleration, but is more affected by train operation speed. In case of earthquake, the operation safety can be enhanced by reducing train operation speed.

Key words high-speed railway; pile-net composite subgrade; train load; seismic action

随着高速铁路(以下简称“高铁”)在中国的快速发展,穿越地震带的高铁线路越来越多,甚至有些线路会穿越多个不同震级的地震带,使行车过程中遭遇地震的可能性大幅提升。当列车行驶速度较快时,较小的地震即可使列车出现脱轨或倾覆等重大安全事故,因此列车-地震耦合荷载下的路基动

^{*} 国家自然科学基金项目(51878554); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2018JZ5012)

力响应研究具有重要意义。

目前,对列车荷载引起铁路振动的研究主要集中在 3 个方面:现场测试、模型试验及数值模拟。文献[1]对我国京沪高速铁路列车运行速度超过 300 km/h 时的地面垂直加速度进行了现场测量。由于现场实测对环境与仪器的要求较高,因此部分学者选择室内模型试验进行研究。文献[2]采用在路基顶部施加正弦循环荷载的方法,通过室内模型试验,分析了螺旋桩-土复合路基的动态受力关系。文献[3]通过模型试验,研究了动荷载下的桩网复合路基动态响应。文献[4]建立了大比例 X 形桩网复合地基模型,研究了循环荷载下的地基振动响应及应力分布特征。数值模拟具有计算便利性及可控性等优点,在列车振动研究中获得了广泛应用。文献[5]建立了桩承式路堤有限元模型,分析了不同列车运行速度及桩弹性模量对地面振动的影响。文献[6]研究了不同列车运行速度、桩帽尺寸及桩间距对土体动应力幅值的影响,研究结果表明,桩体置换率越高,桩土应力比反而会降低。在地震作用于铁路路基的研究中,文献[7]通过大型振动台试验,研究了地震作用下的有砟轨道脱轨表现,研究结果表明,列车临界脱轨条件为 $0.15g$ (g 为重力加速度)。

已有文献研究主要集中于路基受单一列车荷载或地震的影响,对于耦合荷载与桩网复合路基鲜有研究。鉴于此,本文基于有限元软件 ABAQUS 建立轨道-桩网复合路基模型,对其输入列车-地震耦合荷载,研究不同列车运行速度及 PGA(峰值地面加速度)对路基动力响应的影响。本文研究可为地震-列车耦合荷载作用下高速铁路桩网复合路基的设计提供依据。

1 有限元模型

1.1 建立模型

轨道结构采用京沪高速铁路上铺设的 CRTS II 型板式无砟轨道,钢轨采用 60 kg/m 标准钢轨,钢轨支点间距为 0.65 m,轨距为 1.435 m。轨道板采用 C55 混凝土材料,厚度为 0.25 m,CA(水泥沥青)砂浆层位于轨道板下方,厚度为 0.05 m,混凝土支承层厚度为 0.3 m,忽略各轨道板间的接缝构造,沿线路方向采用实体单元模拟为一个整体结构。采用弹簧-阻尼单元模拟钢轨与轨道板之间的连接扣件,弹簧刚度为 46 kN/mm,阻尼系数为 48 kN·s/

m,轨道板下设桩网复合路基,褥垫层厚 0.3 m,桩基采用 C30 混凝土,桩径为 0.5 m,桩长为 10.0 m,桩间距为 2.0 m,桩土之间的接触采用硬接触与罚函数来定义摩擦,摩擦因数取土体内摩擦角的正切值。土工格栅可以承受拉力,但不受压,在有限元计算中采用 Shell 单元模拟,并嵌入垫层中。土体分为黄土、砂土、粉质黏土三层,高为 20 m,以抵消边界效应的影响。模型横截面示意图如图 1 所示。路基、垫层及土体采用摩尔-库伦塑性材料模型,以精准模拟土壤的非线性^[8],其余部分使用弹塑性模型,通过模态分析选取模型具有显著贡献的自振频率,计算并施加瑞利阻尼,阻尼系数为 0.05。综合参考相关文献^[9-10],模型相关计算参数如表 1 所示。

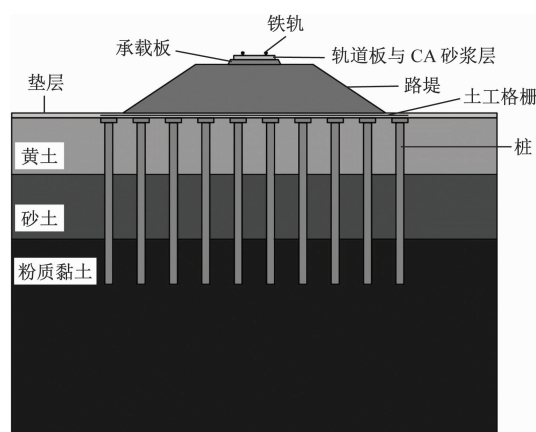


图 1 模型横截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model cross-section

表 1 模型相关计算参数

Tab. 1 Calculation parameters related to the model

名称	密度/ (t/m^3)	弹性模量/ kPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
钢轨	7.8	2.1×10^8	0.30		
轨道板	2.4	3.5×10^7	0.20		
CA 砂浆层	1.8	7.0×10^6	0.20		
承载板	2.4	3.0×10^7	0.20		
路堤	2.0	4.0×10^4	0.25	55.0	38.0
垫层	2.3	1.2×10^5	0.15	55.0	38.0
土工格栅	1.7	2.8×10^6	0.33		
桩	2.4	3.0×10^7	0.20		
黄土	1.9	7.4×10^3	0.27	20.0	8.8
砂土	1.9	2.2×10^4	0.30	4.0	35.0
粉质黏土	2.1	1.0×10^4	0.31	43.6	15.2

模型主要采用 C3D8R 单元划分网格,土工格栅选用 S4R 单元,路基共划分 196 278 个网格,钢轨

共划分 90 450 个网格。采用无限元边界法模拟三维模型两个断面及侧面的无限性,对直接受力最大的底面采用静态边界,约束其竖向位移。模型网格划分示意图如图 2 所示。

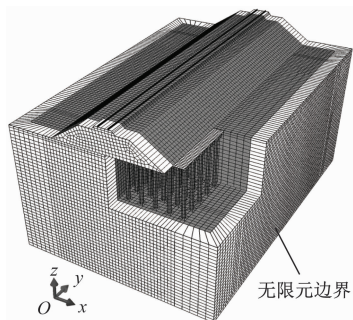


图 2 模型网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model mesh division

1.2 荷载施加与验证

通过 ABAQUS 软件中的 Load 模块,使用编写好的 Dload 子程序,将列车荷载定义为时间和坐标的函数,从而将变化的移动荷载施加到轨道路基模

型上,轮轨接触点的作用范围设为 $0.05 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}$ 。

轮轨力 $F(t)$ 可以表示为^[11]:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega_1 t) + P_2 \sin(\omega_2 t) + P_3 \sin(\omega_3 t) \quad (1)$$

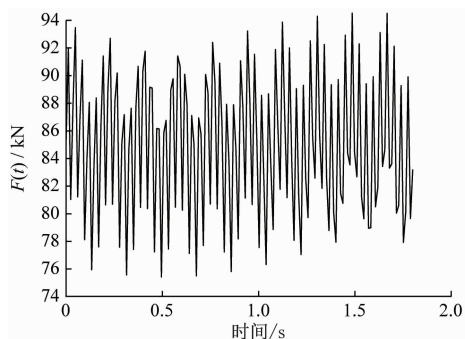
式中:

P_0 ——车轮静载;

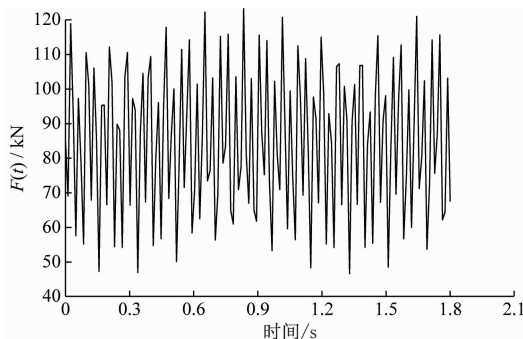
P_1, P_2, P_3 ——某一不平顺时刻 t 的振动荷载幅值;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ——振动圆频率。

列车选取 CRH3 型动车组,共 8 节车箱,列车轴重为 17 t,CRH3 型动车的单边静轮载为 85 kN,列车簧下质量为 750 kg。按照相对不利情况,取轨道几何不平顺波长 $L_1 = 10 \text{ m}$,某一不平顺时刻的几何不平顺矢高 $a_1 = 3 \text{ mm}$, $L_2 = 2 \text{ m}$, $a_2 = 0.3 \text{ mm}$ 。在此基础上,选取多轴模型为最不利激励形式,分析路基的动力响应。当列车运行速度为 200 km/h 及 400 km/h 时,轮轨力时程曲线如图 3 所示。



a) 列车运行速度为 200 km/h



b) 列车运行速度为 400 km/h

图 3 不同列车运行速度下的轮轨力时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of wheel-rail forces at different train operation speeds

选取 EI-Centro 地震波模拟施加地震,考虑不同地震设防烈度,输入 6 级、7 级、8 级、9 级设防烈度下的地震波,其 PGA 分别为 0.05g、0.10g、0.20g、0.40g。本文主要考虑水平地震,在模型底部沿顺坡向输入水平地震波。由于列车运行总时间为 1.8 s,而地震持续时间较长,仅选取地震波较强的 2.0 ~ 3.8 s 时间范围输入模型。EI-Centro 地震波时程曲线如图 4 所示。

为验证列车荷载施加的正确性,选取文献[12]中经过验证的列车与路基参数,将其应用于本文所提模型。提取基床表面竖向动应力并与文献中的数据对比。不同计算方法的基床表面竖向动

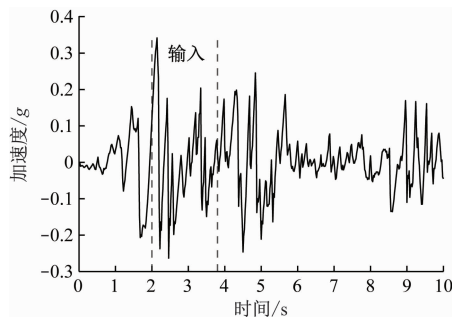


图 4 EI-Centro 地震波时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of the EI-Centro seismic wave

态应力时程曲线对比如图 5 所示。由图 5 可知:本文所提模型的计算结果与文献中的数据基本一致,

验证了本文所提模型的有效性与合理性。需要注意的是,文献数据是车载作用于轨道后,提取轨道上的扣件反力再作用于轨道板得到的基床表面动力响应,与本文采用的直接荷载传递方式有一定的差异。

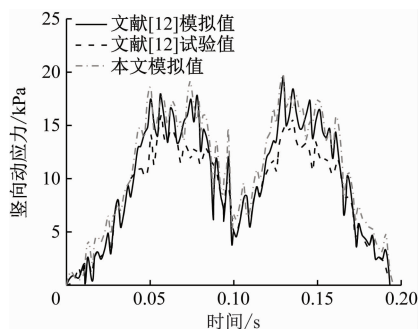
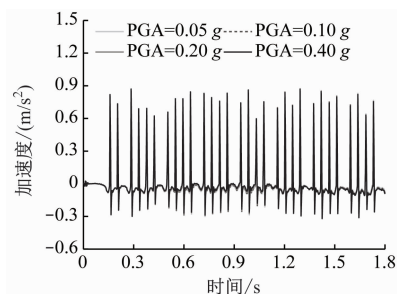
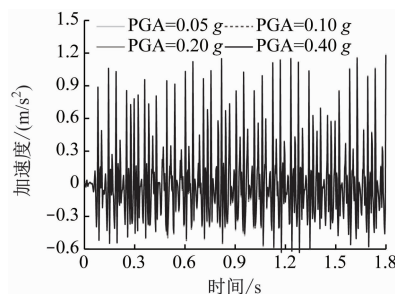


图5 不同计算方法的基床表面竖向动态应力时程曲线对比

Fig. 5 Time-history curves comparison of subgrade surface vertical dynamical stress using different calculation methods



a) 列车运行速度为 200 km/h



b) 列车运行速度为 400 km/h

图6 不同列车荷载与地震 PGA 耦合作用时的轨道竖向加速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of track vertical acceleration under the coupling of different train loads and seismic PGA (peak ground acceleration)

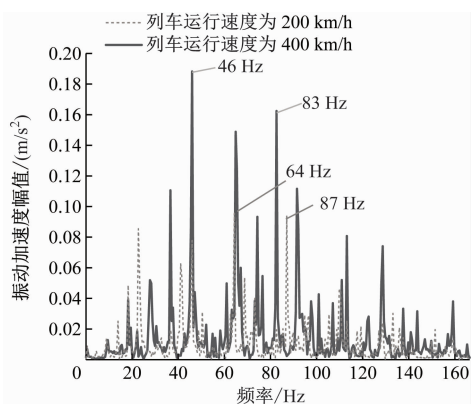


图7 PGA 为 0.10g 时轨道的振幅频谱

Fig. 7 Track amplitude spectrum at a PGA of 0.10g

度为 200 km/h 时的主要振动频率均较高,但其低频幅值也较大,表明此时为列车与地震的共同作用。列车运行速度达到 400 km/h 时的主要振动频率主

2 计算结果与分析

2.1 轨道加速度

当列车运行速度为 200 km/h 及 400 km/h 时,列车荷载与 4 种地震 PGA 耦合作用时的轨道竖向加速度时程曲线,如图 6 所示。轨道的振动随着列车运行速度的增加而有明显的提升,但不同 PGA 对于轨道竖向振动基本没有影响。由此可知,在轨道竖向振动过程中,列车荷载占据主导因素,且影响较大。将得到的加速度时程曲线进行 Fourier 展开得到频谱曲线,由于不同 PGA 对轨道振动的影响较小,仅选取 PGA = 0.10g 时轨道的振幅频谱进行分析,如图 7 所示。

通过已有文献研究结果可知,列车荷载单独作用时的主要振动频率为高频,地震单独作用时的频率主要为低频^[13]。在耦合荷载作用下,列车运行速

要为低频,列车运行速度越高,列车荷载与地震作用的共振效果越明显,因此可通过降低地震过程中的列车运行速度来有效降低列车的脱轨风险。

2.2 动应力分布

对于桩网复合路基的动力响应问题,研究不同方向上,桩与土体的动应力传递规律。设置 4 条检测路径,其分布示意图如图 8 所示。

竖向及水平向地基、桩-土、土工格栅动应力幅值曲线如图 9 所示。其中:图 9 c) 的横坐标由文献 [3] 中动荷载作用下的桩土应力比计算方法得出(桩土应力比定义为桩顶与其相邻桩间土的动应力平均值之比)。

由图 9 a) 可知:各测点动应力幅值在竖直方向上呈现逐渐减小的趋势,表明列车荷载作用的动力响应被逐渐吸收。当单一列车荷载作用时,动应力

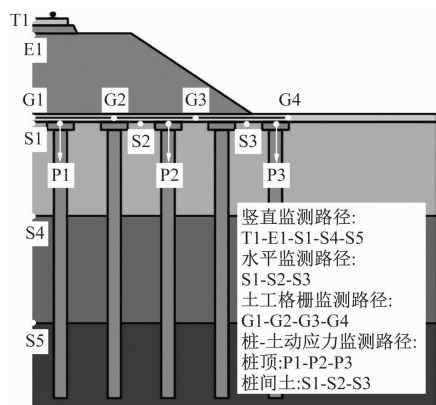


图8 监测路径分布示意图

Fig. 8 Monitoring paths distribution layout

幅值随竖向深度的增加而逐渐减小^[7],而 S1 处产生了突变增大的情况,这可能是由于耦合荷载时,地震直接作用于地基底部并向上传递,使地基受地震影响远高于受列车荷载影响,处于地基顶部与路堤交界处的 S1 点需承受路堤自重振动下产生的荷载与地基底部向上传递的地震波,在这两种耦合荷载相互作用下, S1 点处的应力幅值较大。

不同竖向测点处的动应力随着 PGA 的增加而增大,其中:PGA 从 0.05g 增加至 0.20g 时,动应力增加的幅值较大;PGA 从 0.20g 增加至 0.40g 时,动应力增加的幅值较小,大部分监测点处的地基应力已较为接近。但此时轨道板与路堤表层监测点

的动应力仍继续增加,证明了地基中地震占据主导作用,也表明高烈度地震作用($PGA = 0.40g$)时,地基已丧失承载能力。

对于不同列车运行速度,当 PGA 较小时,列车运行速度对动应力影响较大,动应力有较大的提升;随着 PGA 的增加,动应力增大的幅值逐渐减小,随着地基深度的增加,动应力的增大趋势也逐渐减小。导致这种现象的原因为:地基对于动力响应的吸收作用;列车荷载对于地基的影响较小。

由图 9 b) 可知:随着水平距离的增加,地基动应力幅值逐渐减小,表现为荷载逐渐扩散、消退;随着 PGA 的增加,动应力幅值逐渐增大;当 PGA 为 0.20g 与 0.40g 时,两者的地基动应力幅值基本相同,且随列车运行速度的增加而产生的变化较小。

由图 9 c) 可知:随着水平距离的增加,桩土应力比先增大后减小。当仅受列车荷载作用时,桩土应力比随着水平距离的增加而逐渐增大^[7]。地震作用时,最边缘的桩主要承担由地震作用产生的地震力,使桩所承担的应力有所下降。不同于动应力幅值较为规律的分布,桩土应力比并不随着 PGA 的增加而线性增加,表明地震对桩体受力有较大的影响。当 PGA 为 0.40g 时,桩土应力比最高。在高烈度地震作用下,地基承载能力受到较大的破坏,更多荷载转移到桩上,桩土应力比获得了较大的提

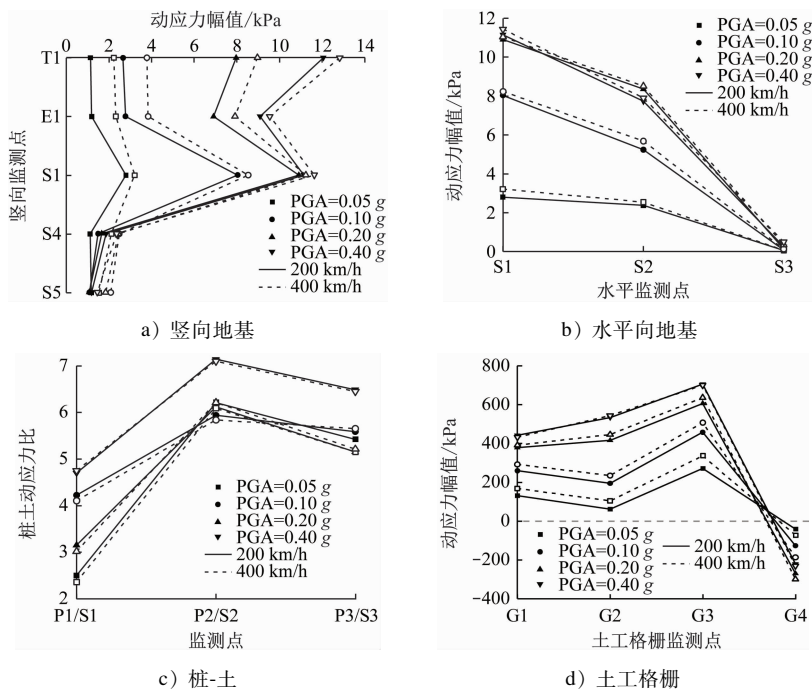


图9 竖向及水平向地基、桩-土、土工格栅动应力幅值曲线

Fig. 9 Dynamic stress amplitude curves of vertical and horizontal foundations, pile-soil, and geogrids

升。当列车运行速度较高时,桩土应力比有一定程度的下降,此时土体承担了更多荷载,但 PGA 较高时的桩土应力比下降幅度较小,此时的土体难以承担更多荷载,则本该由土体承担的荷载继续由桩体承担,表明桩承式加筋路堤的作用是有利的。

由图 9 d) 可知:随着水平距离的增加,土工格栅的拉应力逐渐增大。单一车载作用下的土工格栅拉应力随着水平距离的增加而逐渐减小,地震的加入使越靠近边缘的格栅产生的拉应力越大,接近坡脚处的土工格栅拉应力则会出现负值,此时的土工格栅产生了挤压作用。随着 PGA 的增加,格栅拉应力逐渐增大,且增加的幅度逐渐减小;而随着列车运行速度的增加,格栅拉应力也随之增大,且 PGA 越大,格栅拉应力增加的幅度越小。这表明高烈度地震下,格栅拉应力由地震作用主导,但地震烈度较低时,土工格栅受列车荷载的影响也较大。

2.3 桩身应力

对于桩承式复合路基,由于桩身同时受到竖向

与水平荷载作用,选取 P1、P2、P3 点位置的桩体进行桩身应力分析。桩体轴力和弯矩随桩长的变化曲线如图 10 所示。

由图 10 a) — 10 c) 可知:随着水平距离的增加,桩轴力的中性点(轴力最大值)不断下移;在耦合荷载作用下,桩体越靠近外侧,受地震作用越大,同时受列车荷载越小,其桩土差异沉降不断变大,桩体更加依靠端承力发挥作用,同时外侧桩轴力值远高于内部桩轴力值。当不同 PGA 作用时,随着 PGA 的增加,桩轴力不断增大;位于内部的桩轴力幅值在 PGA 由 0.10g 增长至 0.40g 时均有较大的增长趋势,而边桩 P3 在 PGA 从 0.20g 增长至 0.40g 时,其轴力增长值小于 0.10g 增长至 0.20g 的情况,表明此时的边桩承载能力已不足以支持其承受烈度较高的地震作用。对于不同列车运行速度而言,随着水平距离的增加,列车运行速度对轴力的影响逐渐减小。

综上所述,复合路基外侧的桩体主要承担地震

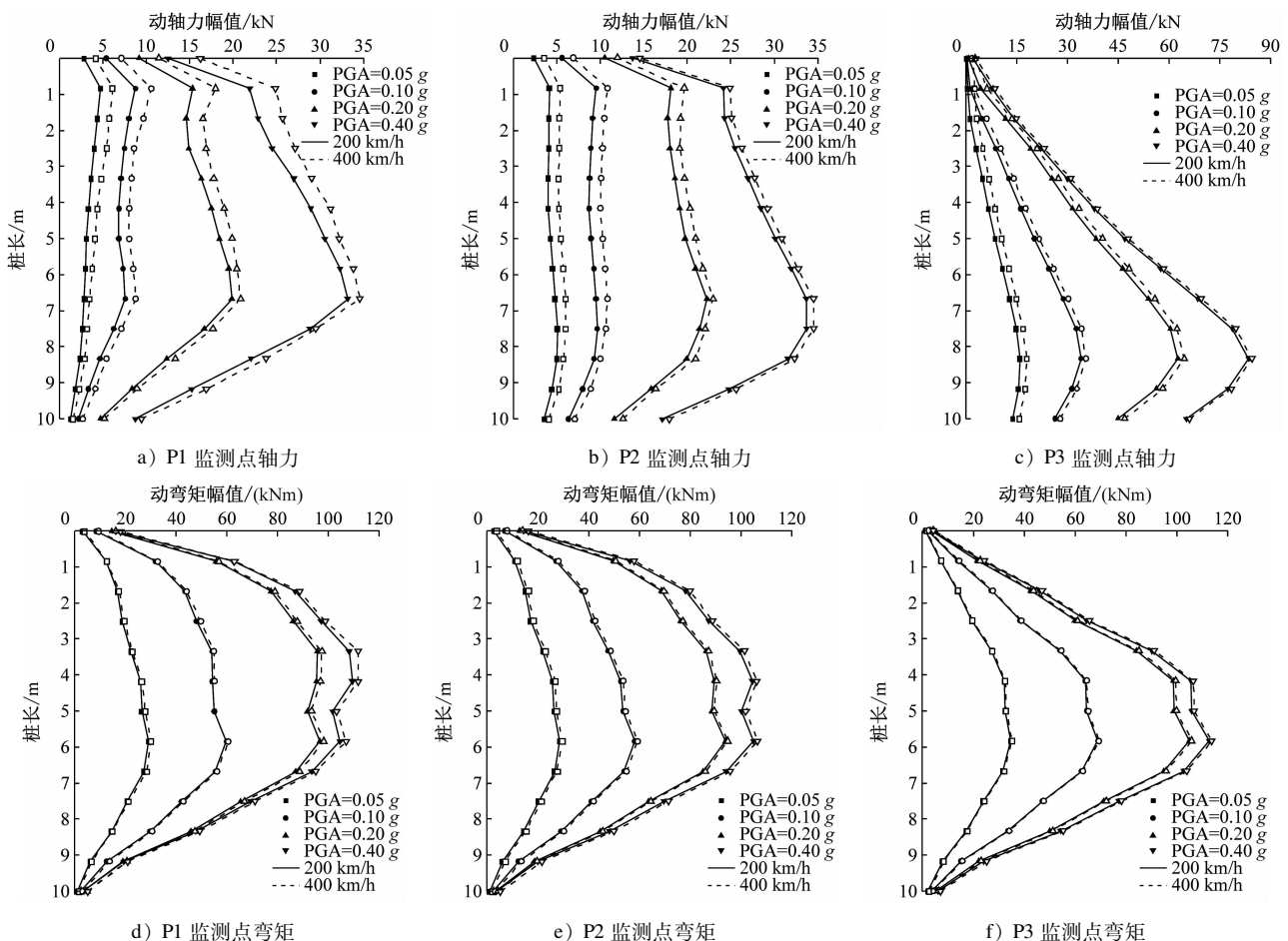


图 10 桩体轴力和弯矩随桩长的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of pile axial force and bending moment with pile length

力作用,并为内部桩体提供一个屏障,使内部桩体受地震作用较小而更多地承担列车荷载。因此,对于桩承式路基的抗震设计应较多考虑边桩的抗震性能,增强其抗弯刚度;而对于内部桩体,则应考虑增强其竖向抗压强度。

由图 10 d) — 10 f) 可知:不同监测点位置处,桩体弯矩幅值并不呈光滑的圆弧型,不同土层交界处由于地震作用产生错动,使桩体弯矩产生突变。但其突变值均较小,由于受到列车荷载的竖向作用,可以在一定程度上增强土体密实度,提升桩网复合路基的承载能力。桩体弯矩幅值均随着 PGA 的增加而不断增大,PGA 从 0.20g 增长至 0.40g 时的弯

矩增加幅值较小,表明此时已接近桩体承载能力的极限值。不同列车运行速度对桩体弯矩的影响不大。因此,在桩体的抗弯设计中,应重点考虑水平荷载,列车荷载的影响较小。

2.4 脱轨系数

为进一步了解耦合荷载下的列车行驶安全性,定义轮轨横向力与垂向作用力之比为脱轨系数,并根据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》中规定的脱轨系数安全标准,取脱轨系数 ≤ 1.0 。不同列车运行速度下的脱轨系数如图 11 所示。

不同 PGA 对于列车行驶安全性有一定的影响,

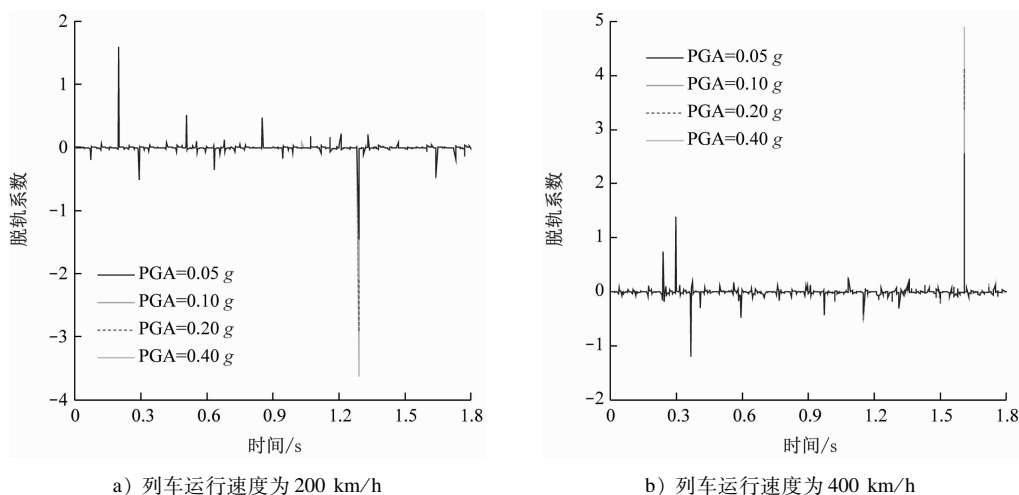


图 11 不同列车运行速度下的脱轨系数

Fig. 11 Derailment coefficients at different rain operation speeds

但主要影响脱轨系数的最大值。当 PGA 为 0.4g 时,脱轨系数的增幅较大,其余时刻则几乎一致,但即使烈度最低的地震耦合荷载也会使其超过标准限值。不同列车运行速度对于耦合荷载作用下的脱轨系数影响较大,当列车运行速度为 400 km/h 时,脱轨及临近脱轨次数明显多于列车运行速度为 200 km/h 的情况,且不同 PGA 下的脱轨系数最大值也远高于列车运行速度为 200 km/h 的情况。由此可知,在地震过程中,高速行驶的列车应尽快降低行驶速度,以增加行车安全性。

3 结语

本文通过有限元模型研究了列车与地震耦合荷载下的桩网复合路基动力响应,对不同地震烈度及列车运行速度进行了研究,分析其对轨道振动、桩土应力、桩体受力及行车安全性的影响。主要获

得以下结论:

1) 列车荷载对轨道的竖向振动占据主导地位,PGA 对其影响较小;列车运行速度越高,列车与地震的共振作用越明显。

2) 耦合荷载作用下,竖向动应力在地基表面产生的突变增大,地震对地基的影响远大于列车荷载的影响。动应力随着 PGA 与列车运行速度的增大而增加,但在高烈度地震情况下,动应力的增幅较小。桩土应力比呈先增加后减小的趋势,复合地基外侧桩体主要承担地震力。土工格栅拉应力随着水平距离的增加而增大,边缘处出现挤压作用。

3) 桩体轴力与弯矩幅值随着 PGA 的增加而有所增大,弯矩幅值受列车运行速度的影响较小,越靠近边缘的桩体轴力受列车运行速度的影响越小。设计时,应重点考虑边桩的抗震性能。

4) 列车脱轨系数受 PGA 的影响较小,列车运

行速度对脱轨系数的影响较大。在地震中行驶的列车应尽量降低列车运行速度,以保证其行驶安全性。

参考文献

- [1] ZHAI W, WEI K, SONG X, et al. Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 72: 24.
- [2] 关伟, 吴红刚, 余仕江, 等. 列车荷载下螺杆桩复合地基动力特性及承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 508.
- GUAN Wei, WU Honggang, YU Shijiang, et al. Experimental study on dynamic and bearing characteristics of part-screw pile composite foundations under train loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 508.
- [3] 邓友生, 李令涛, 彭程谱, 等. 静动荷载下桩网结构路基模型试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2149.
- DENG Yousheng, LI Lingtao, PENG Chengpu, et al. Model tests on geogrid reinforced pile supported embankment under static and dynamic loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2149.
- [4] 陈育民, 谢云飞, 薛珊珊, 等. 列车荷载作用下 X 形桩-网复合地基动力响应研究[J]. 振动工程学报, 2022, 35(4): 857.
- CHEN Yumin, XIE Yunfei, XUE Shanshan, et al. Dynamic response of XCC pile-net composite foundation under train loading [J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(4): 857.
- [5] TANG Y, XIAO S, YANG Q. Numerical study of dynamic stress developed in the high speed rail foundation under train loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 36.
- [6] CAO L, YANG C, ZHANG J, et al. Earthquake response of the train-slab ballastless track-subgrade system: a shaking table test study[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(17/18): 1979.
- [7] WANG J, LI Q, YANG C, et al. Dynamic response and damage character of road embankment under strong earthquake[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(9): 69771451.
- [8] 邓友生, 孟丽青, 蔡梦真, 等. 水泥土搅拌桩加固黄土路基稳定性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(3): 59.
- DENG Yousheng, MENG Liqing, CAI Mengzhen, et al. Research on stability of loess roadbed reinforced with cement-soil mixing piles[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(3): 59.
- [9] 邓友生, 杨彪, 彭程谱, 等. 群桩基础后压浆地震动力响应研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 80.
- DENG Yousheng, YANG Biao, PENG Chengpu, et al. Study on seismic dynamic response of post-grouting pile group foundation [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 44(2): 80.
- [10] 孙璐, 段雨芬, 赵磊, 等. 高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道结构动力特性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 406.
- SUN Lu, DUAN Yufen, ZHAO Lei, et al. Dynamic response analysis of CRTS II ballastless track structure of high-speed railway[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(2): 406.
- [11] 王启云, 张家生, 孟飞, 等. 高速铁路路基模型列车振动荷载模拟[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 43.
- WANG Qiyun, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Simulation of train vibration load on the subgrade testing model of high-speed railway[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6): 43.
- [12] XIE W, GAO G, SONG J, et al. Ground vibration analysis under combined seismic and high-speed train loads[J]. Underground Space, 2022, 7(3): 363.
- [13] 魏平, 魏静, 杨松林, 等. 高速铁路低路基桩网结构土工格栅动力特性[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 19.
- WEI Ping, WEI Jing, YANG Songlin, et al. Geogrid dynamic characteristics of pile-net structure in low subgrade of high-speed railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(6): 19.

· 收稿日期:2023-01-03 修回日期:2023-02-22 出版日期:2025-05-10
Received:2023-01-03 Revised:2023-02-22 Published:2025-05-10
· 第一作者:邓友生,教授, dengys2009@126.com
通信作者:张克钦,硕士研究生, zhangkq321@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license