

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.12.013

装配式悬挑路基结构的地震响应研究

陈亮, 黄润钺, 严靖, 苏锐涵, 钟剑

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章以某装配式悬挑路基结构为工程背景,基于 OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation,地震工程模拟的开放体系)软件建立 3 跨装配式悬挑路基结构有限元模型,研究不同连接方式对结构动力特性和非线性时程地震作用下的影响规律。结果表明:不同连接方式对结构主要构件的纵桥向地震响应及风险曲线影响较小,但对结构主要构件横桥向地震响应及风险曲线影响较大;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增加,立柱地震需求减小,但锚杆地震需求增加;当结构下部采用装配式连接时,随着结构上部刚度增加,年超越概率增加;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增加,年超越概率减小。研究结果可为山区公路建设中的装配式悬挑路基结构设计提供参考。

关键词:装配式悬挑路基结构;OpenSees 软件;动力特性;风险曲线

中图分类号:U416.02

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)12-1671-08

Research on seismic response of prefabricated cantilever subgrade structures

CHEN Liang, HUANG Runyue, YAN Jing, SU Ruihan, ZHONG Jian

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:Based on the engineering background of a prefabricated cantilever subgrade structure, this paper establishes a finite element model of a three-span prefabricated cantilever subgrade structure based on Open System for Earthquake Engineering Simulation(OpenSees) software, and studies the influence of different connection modes on structural dynamic characteristics and nonlinear time-history earthquake action. The results show that different connection modes have little influence on the longitudinal seismic response and risk curve of the main components of the structure, but have great influence on the transverse seismic response and risk curve of the main components of the structure. When the upper part of the structure is consolidated, with the increase of the stiffness of the lower part of the structure, the seismic demand of the column decreases, but the seismic demand of the anchor increases. When the lower part of the structure is assembled, the annual exceedance probability increases with the increase of the stiffness of the upper part of the structure. When the upper part of the structure is consolidated, the annual exceedance probability decreases with the increase of the stiffness of the lower part of the structure. The research results can provide reference for the structural design of prefabricated cantilever subgrade in mountainous highway construction.

Key words:prefabricated cantilever subgrade structure; OpenSees software; dynamic characteristics; risk curve

山区公路建设常面临地形复杂、费用高、工期长等问题,悬挑路基结构较常规结构能达到更

好的效果,但仍存在以下不足:构件尺寸与地面断面对应,导致构件种类繁多、标准化程度不高;混

收稿日期:2022-05-31;修回日期:2022-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178135)

作者简介:陈亮(1980—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

接钢筋和锚杆采用 HRB400 材料。混凝土采用 Concrete01 本构模型,钢筋采用 Steel01 本构模型。内纵梁与内侧挑梁置于土体上,其受力特征类似于弹性地基梁,挑梁与道路、山体之间设置间隙,用 zeroLength 单元和 ENT 单元模拟弹性地基梁,用 zeroLength 单元和 Gap 单元模拟间隙部位,立柱与土体之间的接触采用土弹簧连接。装配式悬挑路基结构整体及细部模型如图 4、图 5 所示。

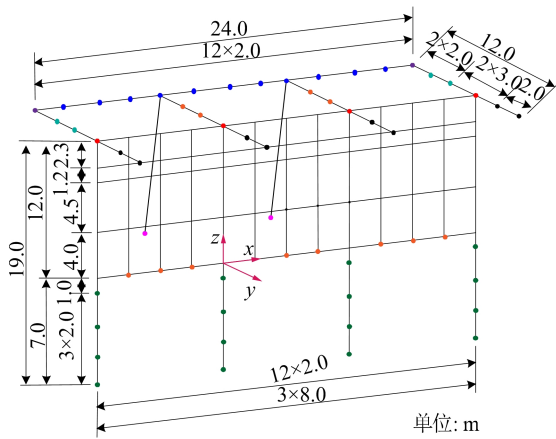
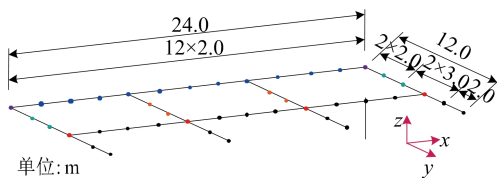
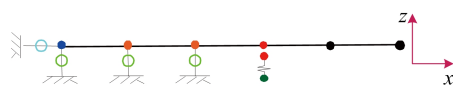


图 4 装配式悬挑路基结构整体模型

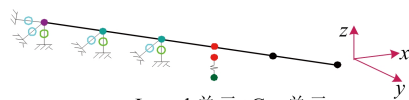


(a) 结构上部建模方法



- zeroLength 单元+Gap 单元
- zeroLength 单元+ENT 单元

(b) 中间挑梁建模方法



- zeroLength 单元+Gap 单元
- zeroLength 单元+ENT 单元

(c) 两侧挑梁建模方法

图 5 装配式悬挑路基结构细部模型

2.2 接触部分建模

根据接合部位是否有后浇段,将装配式节点分为湿连接与干连接 2 种形式^[11]。本结构中立柱与挑梁通过螺纹钢筋连接,属于干式连接装配式节点,如图 6 所示,采用 ENT 单元、zeroLength 单元、zeroLengthSection 单元共同模拟连接接触部

位^[12]。ENT 单元与 zeroLength 单元模拟立柱与挑梁之间的受力特征,zeroLengthSection 单元保证连接钢筋的连续性。

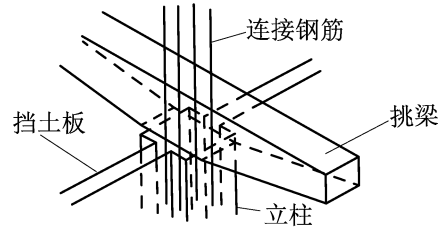


图 6 装配式节点干式连接部位

ENT 单元的本构模型如图 7 所示。

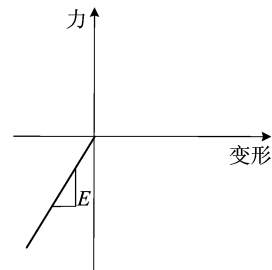


图 7 ENT 单元本构模型

目前,ENT 单元中的刚度 E 值主要依靠经验值,其可靠度与适用范围存在局限性。为了更好地模拟结构的实际状况,本文基于罚函数接触原理提出 E 值的计算原理和计算公式。罚函数法用弹簧在接触部位之间建立联系^[13],接触的实质是部件接触部位之间的相互作用,因此可将接触部位中的一部分看成弹性弹簧,接触部位受力如图 8 所示。

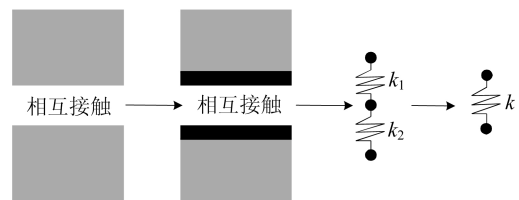


图 8 接触部位 ENT 单元受力弹簧分析

接触刚度 k 计算公式为:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (1)$$

其中, k_1 、 k_2 为接触部位材料自身的弹性模量。

通过式(1)计算的 k 值为 ENT 单元中的刚度 E 值,也是 zeroLength 单元中主要位移自由度刚度。装配式构件之间只能传递力而不能传递力矩,因此将 zeroLength 单元中 3 个转动自由度刚

度赋予一个较小数值即可。为了保证计算的收敛性,还需对 zeroLength 单元中其他 2 个位移自由度刚度进行赋值,其计算公式为:

$$0.01k_x \approx k_y \approx k_z \quad (2)$$

其中: k_x 为主要位移自由度刚度; k_y 、 k_z 为另外 2 个次要位移自由度刚度。

3 动力特性与地震响应分析

根据工程中常见的 5 种连接方式建立对应的有限元模型,探究不同连接方式对悬挑结构动力特性和地震响应的影响。5 种模型对应的连接方式见表 1 所列。

表 1 5 种模型对应的连接方式

模型	连接方式
模型 1	结构上部、下部均为装配式连接
模型 2	结构上部铰接、下部装配式连接
模型 3	结构上部固接、下部装配式连接
模型 4	结构上部固结、下部铰接
模型 5	结构上部、下部均为固结

3.1 动力特性分析

5 种模型的模态计算结果如图 9 所示。

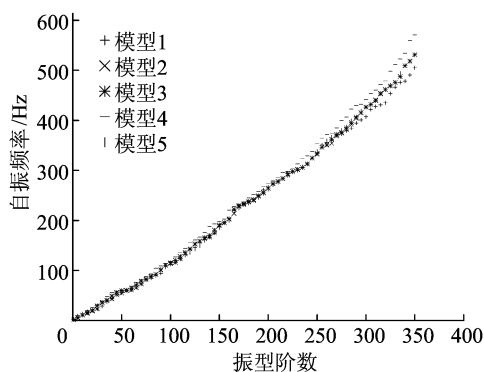


图 9 5 种模型的自振频率

由图 9 可知,模型 4 的自振频率显然大于其他模型的自振频率,其他模型的低阶振型频率比较接近,在高阶振型时,模型 2、模型 3、模型 5 的自振频率比较接近,且均大于模型 1 的自振频率,说明结构上部的连接方式对结构自振频率影响较小,下部的连接方式对自振频率影响较大,且主要体现在结构的高阶振型频率上。

3.2 概率地震需求分析

依据悬挑路基结构自身的力学特性,选取立柱最大位移、立柱最大截面弯矩、立柱最大曲率和

锚杆最大轴力作为工程需求参数进行分析^[14-15]。

通过地面运动强度参数超越不同水准地震作用概率,可以得到场地地震风险模型为:

$$\lambda(I_M) = \alpha(I_M)^{-\beta} \quad (3)$$

其中: I_M 为地面运动强度参数; $\lambda(I_M)$ 为超越概率; α 、 β 为回归系数。

在概率地震需求分析中,需将工程需求参数 e_{dp} 表示为 I_M 的函数,即

$$\ln e_{dp} = \ln a + b \ln I_M \quad (4)$$

其中, a 、 b 为回归系数。

对数标准差 $\beta_{e_{dp}|I_M}$ 计算公式为:

$$\beta_{e_{dp}|I_M} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln e_{dpi} - \ln e_{dp|I_M})^2}{N-2}} \quad (5)$$

其中, N 为回归分析的数据点数。

e_{dp} 风险曲线计算公式为:

$$\lambda(e_{dp}) = \alpha \left(\frac{e_{dp}}{a} \right)^{-\beta/b} \exp \left(\frac{\beta^2 \beta_{e_{dp}|I_M}}{2b^2} \right) \quad (6)$$

3.3 地震波的选取

为真实反映悬挑路基结构在地震作用下的响应,选取与实例工程场地类型一致的地震波。从美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)地震波库选取实际地震波的重要设计参数符合以下条件:工程场地 30 m 表层土的剪切波速为 400 ~ 600 m/s,震级为 M5 ~ M7,远场地震工程场地距离破裂带的最近距离为 60 ~ 80 km。

3.4 地震响应分析

以地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA) a_p 为 I_M ,在双对数坐标系下,通过 I_M 与地震作用下立柱最大位移、立柱最大截面弯矩、立柱最大曲率、锚杆最大轴力分别作直线拟合,推导出 I_M 和立柱最大位移、立柱最大截面弯矩、立柱最大曲率、锚杆最大轴力的数学关系。为简化表达式,用 M_1 、 M_2 分别表示立柱纵桥向、横桥向最大截面弯矩,用 D_1 、 D_2 分别表示立柱纵桥向、横桥向最大位移,用 C_1 、 C_2 分别表示立柱纵桥向、横桥向最大曲率,用 F_1 、 F_2 分别表示锚杆纵桥向、横桥向最大轴力。各工程需求参数与 PGA 的拟合曲线及风险曲线计算结果如图 10 ~ 图 17 所示。

从图 10a 可以看出,模型 4 的拟合直线斜率小于其他模型,说明模型 4 的连接方式使立柱纵桥向截面弯矩对地震动强度的敏感性略有下降,其余拟合直线之间相差较小。从图 10b 可以看出,

模型 1 与模型 4 的风险曲线较为接近,略高于其他模型,说明在不同连接方式下立柱所达到的弯矩需求接近,各风险曲线之间相差较小。因此,可以认为不同连接方式对立柱纵桥向内力需求影响较小。

由图 11a 可知:不同连接方式对立柱横桥向内力需求影响较大。5 个模型拟合直线的斜率相差较小,说明不同连接方式不会使立柱横桥向截面弯矩对地震动强度的敏感性产生影响。模型 4、模型 5 的拟合直线低于模型 3 的拟合直线,说明当结构上部固结时,随着结构下部刚度增

加,立柱横桥向内力需求减小。

由图 11b 可知,当结构下部采用装配式连接时,随着结构上部刚度增大,年超越概率增大;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增大,年超越概率减小。

从图 12a、图 12b 可以看出,不同连接方式不会使立柱纵桥向位移对地震动强度的敏感性产生较大的影响,虽然采用不同的连接方式,但立柱所达到的位移需求几乎一致,各模型的风险曲线之间相差较小。因此,可以认为不同连接方式对立柱纵桥向位移需求影响较小。

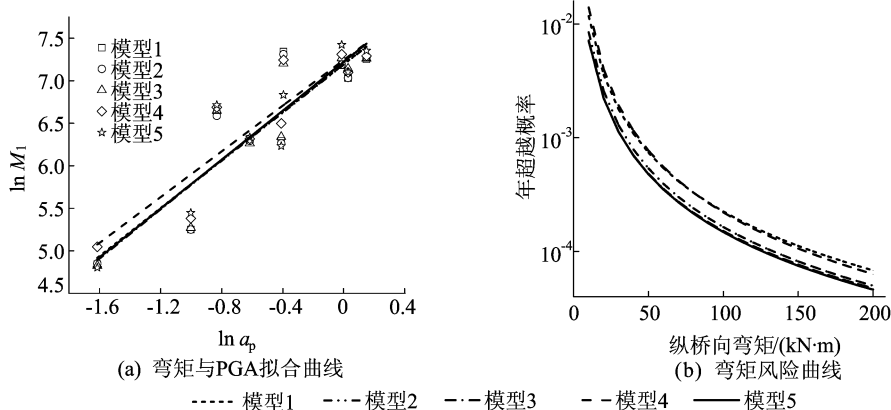


图 10 立柱纵桥向最大弯矩与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

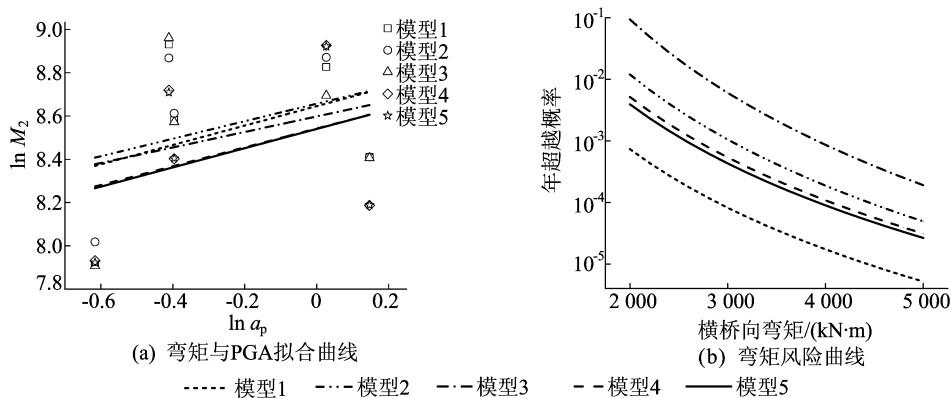


图 11 立柱横桥向最大弯矩与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

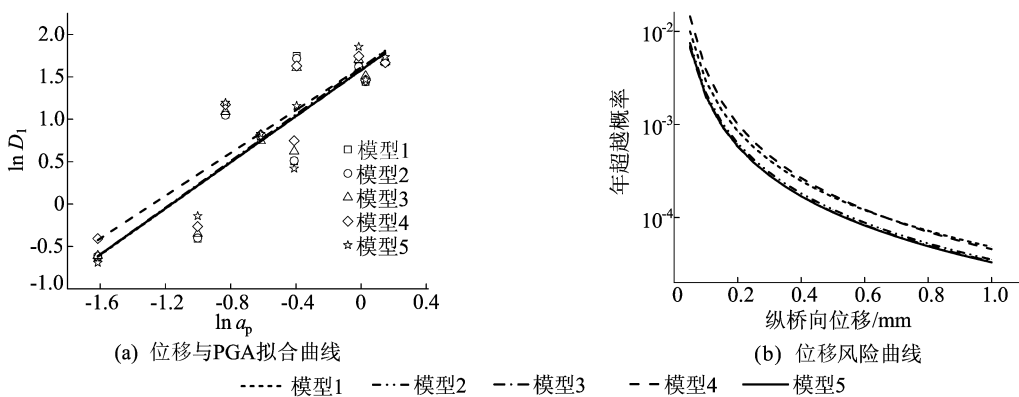


图 12 立柱纵桥向最大位移与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

从图 13a、图 13b 可以看出,不同的连接方式不会使立柱横桥向位移对地震动强度的敏感性产生较大的影响。当结构上部固结时,随着结构下部刚度增加,立柱横桥向位移需求减小;当结构下

部采用装配式连接时,随着结构上部刚度增大,年超越概率增大;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增大,年超越概率减小。因此,不同连接方式对立柱横桥向位移需求影响较大。

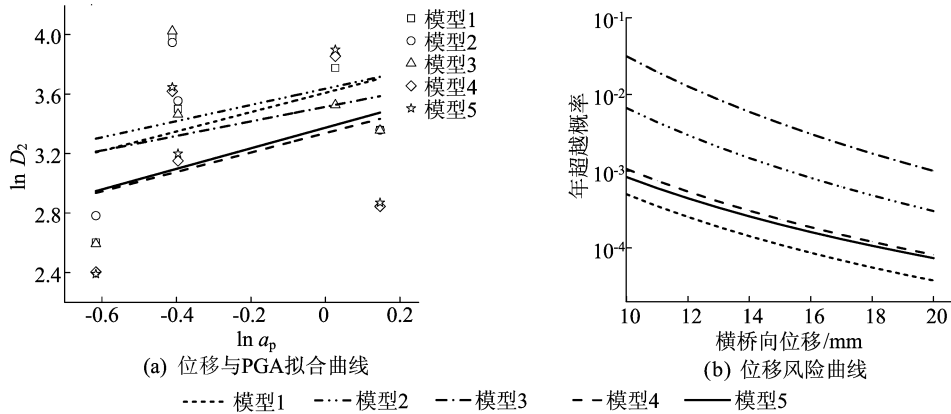


图 13 立柱横桥向最大位移与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

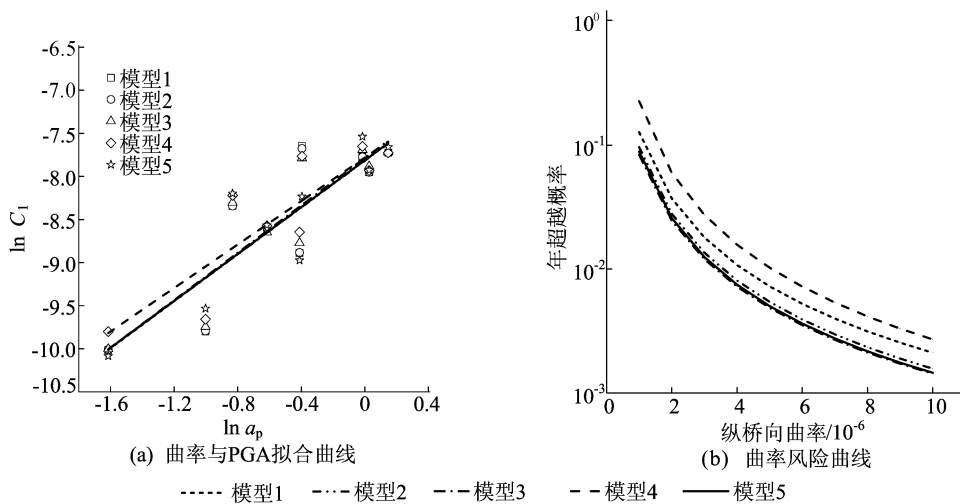


图 14 立柱纵桥向最大曲率与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

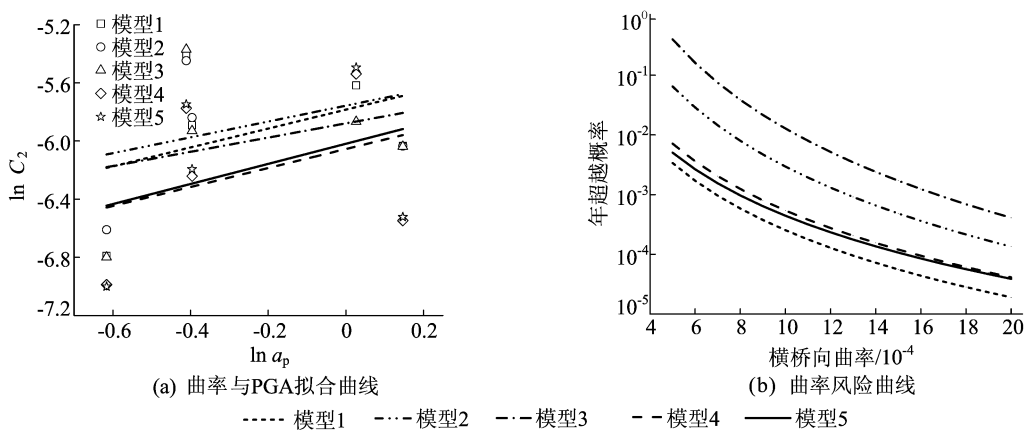


图 15 立柱横桥向最大曲率与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

从图 14a、图 14b 可以看出,不同连接方式不会使立柱纵桥向曲率对地震动强度的敏感性产生较大的影响,虽然采用不同的连接方式,但立柱所

达到的曲率需求接近,各模型的风险曲线之间相差较小。因此,可以认为不同连接方式对立柱纵桥向曲率影响较小。

从图 15a、图 15b 可以看出,不同连接方式不会使立柱横桥向曲率对地震动强度的敏感性产生较大的影响。当结构上部固结时,随着结构下部刚度增加,立柱横桥向曲率减小;当结构下部采用

装配式连接时,随着结构上部刚度增大,年超越概率增大;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增大,年超越概率减小。因此,不同连接方式对立柱横桥向曲率影响较大。

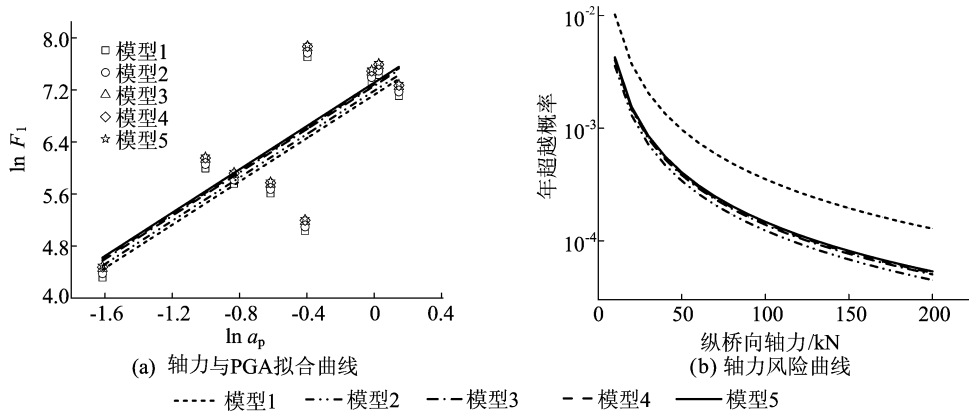


图 16 锚杆纵桥向最大轴力与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

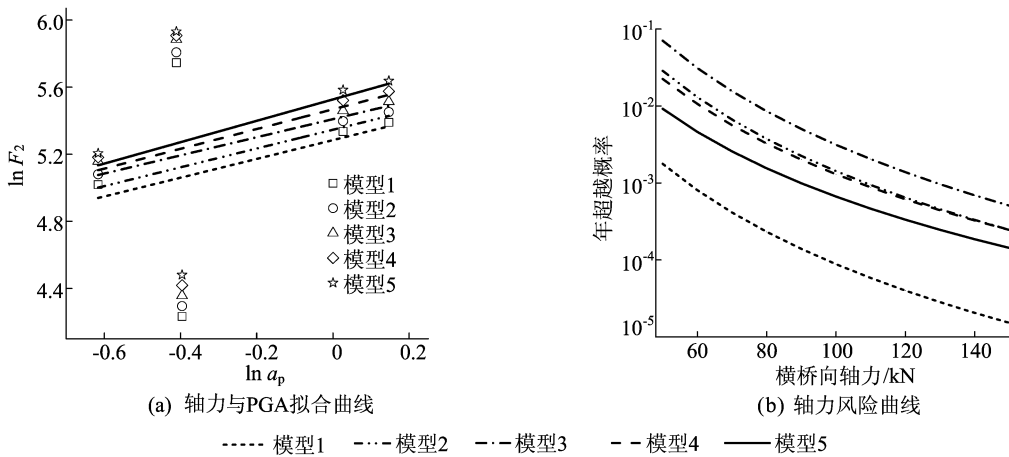


图 17 锚杆横桥向最大轴力与 PGA 的拟合曲线和风险曲线

由图 16a 可知,5 个模型拟合直线的斜率几乎一致,说明不同连接方式不会使锚杆纵桥向轴力对地震动强度的敏感性产生较大影响。当结构下部采用装配式连接时,随着结构上部刚度增加,内力需求略有增加;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增加,内力需求略有增加。

由图 16b 可知,模型 1 的风险曲线略高于其他模型,说明在不同连接方式下锚杆所达到的内力需求接近,5 个模型风险曲线之间相差较小,因此,不同连接方式对锚杆纵桥向内力需求影响较小。

由图 17a 可知:5 个模型拟合直线的斜率几乎一致,说明不同连接方式不会使锚杆横桥向轴力对地震动强度的敏感性产生较大影响;随着结构刚度增加,锚杆在横桥向的内力需求有所增加。由图 17b 可知:当结构下部采用装配式连接时,随

着结构上部刚度增大,年超越概率增大;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增大,年超越概率减小。因此,可以认为不同连接方式对锚杆横桥向内力需求影响较大。

综合分析上述结果可知,不同连接方式对纵桥向立柱弯矩、立柱位移、立柱曲率和锚杆轴力的地震响应及风险曲线影响较小,但对横桥向立柱弯矩、立柱位移、立柱曲率和锚杆轴力的地震响应及风险曲线影响较大;用上部固结、下部铰接或上下部均固结的连接方式来近似模拟装配式悬挑路基结构之间的连接方式是合理的。在实际工程中,采用全装配式结构,上部固结、下部铰接或上下部均固结这 3 种连接方式时,结构主要构件的地震响应和风险曲线相对于其他连接方式更加安全。

4 结 论

本文以装配式悬挑路基结构为研究对象,分析 5 种常见的连接方式对结构动力特性的影响,采用概率地震需求分析法,对结构地震响应规律进行分析,得出以下结论:

1) 结构上部连接方式对结构自振频率影响较小,下部连接方式对自振频率影响较大,且主要体现在高阶振型频率上。

2) 不同连接方式对结构主要构件的纵桥向地震响应及风险曲线影响较小,但对结构主要构件横桥向地震响应及风险曲线影响较大。当结构上部固结时,随着结构下部刚度增加,立柱地震需求减小,但锚杆地震需求增加;当结构下部采用装配式连接时,随着结构上部刚度增加,年超越概率增加;当结构上部固结时,随着结构下部刚度增加,年超越概率减小。

3) 用上部固结、下部铰接或上下部均固结的连接方式来近似模拟装配式悬挑路基结构之间的连接方式是合理的。在实际工程中,采用全装配式结构,上部固结、下部铰接或上下部均固结这 3 种连接方式时,结构主要构件的地震响应和风险曲线相对于其他连接方式更加安全。

[参 考 文 献]

- [1] 陈滔. 基于土-结构相互作用的山区公路路基拓宽改建力学行为数值模拟[D]. 成都:西南交通大学,2015.
[2] 黎安金. 悬挑结构复合道路在凯雷公路中的应用探索[D].

- 重庆:重庆交通大学,2012.
[3] 王晓东. 整体式悬挑结构道路建设技术在西藏类昌公路的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2007.
[4] 崔学常,张江涛,郑文. 半桥-边坡复合道路结构空间力学行为分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(6): 1115-1118,1227.
[5] 郑文. 半桥-边坡复合路基结构性能与设计方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
[6] 刘晨光,周志祥,毛久群. 整体式悬挑结构与岩土共同作用研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(6): 1303-1305,1362.
[7] 刘长喜. 山区道路悬挑结构与岩土的共同作用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.
[8] 姚宇坤,孙国富,陈喆,等. 新型“悬挑支撑”路基结构的参数优化设计研究[J]. 公路工程 2020,45(5):228-233.
[9] 魏业清,李欢,聂午龙. 悬挑板路基的计算分析[J]. 路基工程,2020(4):184-188.
[10] 田海涛. 山区装配式悬挑路基结构力学行为分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
[11] 曹徐阳,冯德成,王淳,等. 基于 OpenSEES 的装配式混凝土框架节点数值模拟方法研究[J]. 土木工程学报,2019, 52(4):13-27.
[12] 赵建锋,孟庆一. 基于干接缝单元的预制拼装桥墩抗震性能数值模拟[J]. 地震工程与工程振动,2020,40(2):111-122.
[13] 王熙昭. 有限元自动接触算法研究与实现[D]. 大连:大连理工大学,2019.
[14] 梁辉,赵文光,郭胜山,等. 高拱坝地基体系整体稳定概率地震风险分析[J]. 水利学报,2021,52(3):310-322.
[15] 钟剑,万华平,任伟新,等. 全概率理论斜拉桥地震风险分析[J]. 振动工程学报,2018,31(4):654-661.

(责任编辑 张淑艳)

· 信息与动态 ·

《合肥工业大学学报(自然科学版)》专栏征稿启事

为了贯彻落实党的二十大精神,紧密围绕科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略,《合肥工业大学学报(自然科学版)》设置“机器人与人工智能”“环境污染与防治”两个专栏,即日起面向国内外专家学者征集“机器人与人工智能”“环境污染与防治”领域的原创性学术论文、专题综述;稿件一经录用将优先刊发。

来稿要求政治导向正确、论证充分、具有较强的引领性和创新性。格式要求参见《合肥工业大学学报(自然科学版)》网页投稿指南的征稿简则和投稿模板。

在线投稿网址:<http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。