

考虑桩-土相互作用的超大跨度悬索桥地震响应研究

Research on Seismic Response of Super Long-span Suspension Bridges Incorporating Pile-soil Interaction

薛 豪¹, 邵长江^{1,2}, 崔皓蒙¹, 王春阳¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031;
2. 西南交通大学 陆地交通地质灾害防治技术国家工程研究中心, 成都 610031)

摘 要: 以国内某超大跨度悬索桥为工程背景, 运用 Abaqus 软件建立桩-土相互作用模型, 并在此基础上基于 SAP2000 软件, 分别建立了考虑非线性桩-土相互作用、仅考虑线弹性桩-土相互作用 (m 法) 和不考虑桩-土相互作用 (塔底固结) 三种边界条件的全桥模型, 系统研究地震荷载作用下不同边界条件模拟方式对超大跨度悬索桥地震响应的影响机理。结果表明: 地震荷载作用下, 表层软土地基不会进入塑性阶段, 深层岩石地基发生刚度退化进入塑性阶段; 塔底固结方案的塔柱位移与内力响应均与其他方案相差较大; 在横竖向地震作用下, 不同边界条件对结构响应影响差异较纵竖向地震更大; m 法模型位移与内力响应均略小于非线性模型, 使用 m 法模拟超大跨度悬索桥边界条件可能会使结构偏于不安全。研究成果可为类似桥梁工程的抗震设计及桩-土相互作用分析提供理论依据和技术参考。

关键词: 超大跨度悬索桥; 桩-土相互作用; m 法; 地震响应

中图分类号: U448.25; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0095-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.017

XUE Hao¹, SHAO Changjiang^{1,2}, CUI Haomeng¹, WANG Chunyang¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. National Engineering Research Center of Geological Disaster Prevention Technology in Land

Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking a super-long-span suspension bridge in China as the engineering background, this study established a pile-soil interaction model using Abaqus software. Based on this model, three full-bridge models were developed using SAP2000 software, considering three boundary conditions: nonlinear pile-soil interaction, linear elastic pile-soil interaction (m-method), and no pile-soil interaction (tower base fixed). The study systematically investigated the influence mechanisms of different boundary condition simulation methods on the seismic response of super-long-span suspension bridges under seismic loads. The results indicate that under seismic loads, the surface soft soil foundation does not enter the plastic stage, while the deep rock foundation undergoes stiffness degradation and enters the plastic stage; The displacement and internal force response of the tower column in the tower bottom consolidation scheme are significantly different from those in other schemes; The difference in the impact of different boundary conditions on structural response under horizontal and vertical earthquakes is greater

基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2024NSFSC00185)。

作者简介: 薛 豪 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 桥梁抗震。

收稿日期: 2025-01-16

道桥技术

than that under vertical earthquakes; The displacement and internal force response of the M-method model are slightly smaller than those of the nonlinear model. Using the M-method to simulate the boundary conditions of a long-span suspension bridge may make the structure more unsafe. The research results can provide theoretical basis and technical reference for seismic design and pile-soil interaction analysis of similar bridge engineering.

Key words: super-long-span suspension bridge; pile-soil interaction; m method; earthquake response

0 引言

桩-土相互作用问题一直以来受到了抗震工作者的重视,在地震工程、防灾减灾及防护工程等领域是一个十分重视的问题^[1]。随着我国基础设施建设向超大跨度、复杂地质方向拓展,准确模拟桩-土相互作用对保障跨海桥梁等战略工程的安全性具有重大工程价值^[2]。

地震作用下桥梁桩-土相互作用机理复杂,目前已有大量学者进行了研究。高非凡等^[3]通过Abaqus模型对比发现,桩-土效应会显著提升桥墩与支座的损伤概率,建议抗震评估需纳入土体柔性约束。郭森等^[4]针对地震滚石灾害,证明滚石动能是桥墩损伤的核心参数。杨慧^[5]通过深基坑数值模拟,证明修正摩尔-库仑模型(MMC)在预测变形时优于传统摩尔-库仑模型(MC)。曾佳明等^[6]在研究中指出,考虑土-结构相互作用(SSI)的大跨度空间结构抗震研究对于实现大跨度空间结构精确化分析,保障结构抗震安全性具有重要意义。陈晓广^[7]针对湿陷性黄土地层桩基中性点难以准确把握,存在导致工程实测负摩阻力高于规范参考值的问题,提出一种“相对位移法”的计算方法。焦驰宇等^[8]通过多角度地震动输入,分析了液化侧向扩展场地上曲线桥的地震响应。邹作家^[9]以跨走滑断层的悬索桥为对象,重点分析了土-结构相互作用下桥梁的动力响应,结果显示,考虑土-结构相互作用的m法模型比更复杂的一体化模型计算结果更为保守。王楚皓^[10]针对某千米级公铁两用悬索桥及其梁轨系统,重点分析了桩-土相互作用模拟方式、桩基直径与地基刚度等因素的影响,结果发现,考虑桩-土相互作用会增大桥梁上部结构的位移和钢轨应力,不同桩-土模型对主桥钢轨应力影响显著。

目前常规的桩-土边界条件处理方式包括墩底固接法和m法。墩底固接完全忽略了桩-土相互作

用,该方式对于结构简单,振型单一的简支梁桥、连续梁桥等较为适用,但对于结构复杂的大跨度悬索桥适用性如何有待考证^[11];m法是目前普遍运用于桥梁抗震计算的方法,适用于桩基础在地面处位移较小的情况。但跨海大桥中表层往往存在软体地基,受地震荷载等强烈水平荷载因素影响,桩顶发生位移可能性较大,使土体进入非线性,故只考虑土体线弹性的m法对于跨海大桥适用性有待考证^[12]。

当前研究多聚焦中小跨桥梁或特定地质条件,对超大跨度跨海桥梁的桩-土相互作用模拟仍存在不足。此类桥梁常面临软弱地基、大荷载及严格变形控制需求^[13-15],传统墩底固接法(忽略桩-土效应)或线弹性m法(仅适用于小位移场景)的适用性亟待验证。为此,以超大跨度悬索桥为研究对象,建立全桥空间有限元模型,分析地震作用下塔柱结构的响应规律与差异。

1 工程概况

国内某超大跨度悬索桥为主跨2 180 m的平行缆单跨吊悬索桥,西侧边跨跨径为670 m,东侧边跨跨径为710 m,为目前世界上跨度最大、车道数量最多的大跨度跨海桥梁结构,其桥型布置如图1所示。主梁分为上下两层,均为双向8车道高速公路,共计16车道,采用板桁结合体系钢桁梁形式,两层梁宽均为42.6 m(不计护栏),两层主梁高差为13.5 m。两侧塔柱均采用门式塔结构,塔高均为348.72 m,总设五层横梁,从下往上排列依次为:一层横梁高9.5 m,宽20.2 m;二层横梁高69.71 m,宽46.4 m;三层横梁高151.84 m,宽42.6 m;四层横梁高238.5 m,宽37.6 m;最高层五层横梁高337.64 m,宽31.6 m。悬索桥采用常规的双主缆,主缆直径为1.4 m(钢丝抗拉强度为2 060 MPa),是目前应用在悬索桥中最大缆径。锚碇采用重力式锚碇,锚碇基础

为地下连续墙基础，为直径 140 m、墙厚 1.5 m 的圆柱形基础。承台采用哑铃形，每个塔柱下采用直径 50 m、厚 9 m 的圆柱形承台；基础为 40 根直径为

3 m 的单桩组成的群桩基础，群桩基础均匀分布在承台底，呈现出圆形群桩基础，如图 2 所示，其中西塔桩基长度为 76 m，东塔桩基长度为 60 m。

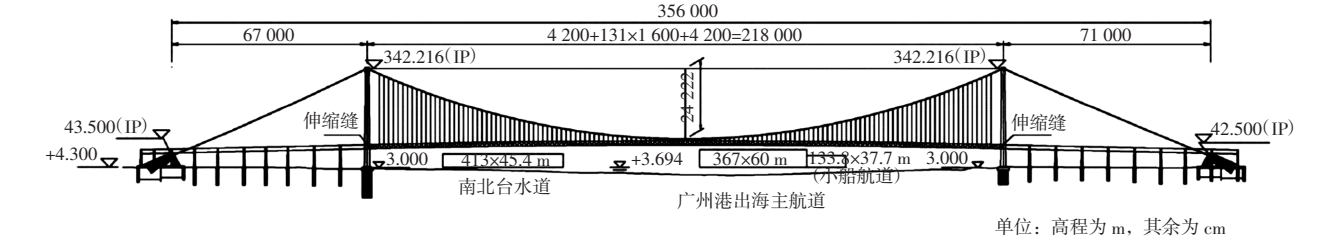


图 1 桥梁立面
Fig. 1 Bridge facade

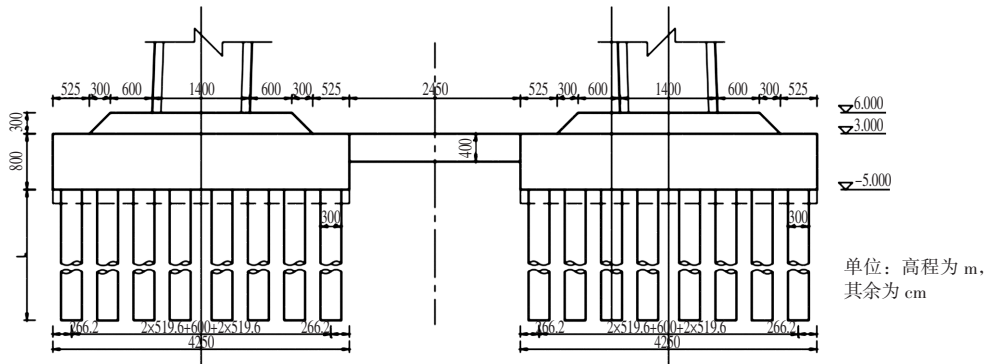


图 2 承台桩基正视图
Fig. 2 Front view of pier foundation

2 桩 - 土相互作用模拟

2.1 建立模型

采用有限元软件 Abaqus 中摩尔 - 库仑模型模拟土体的非线性本构。由于东、西塔桩长以及土体性质不同，分别建立东、西塔单桩模型。为使分析结果准确，水平范围土体取桩径（3 m）的 20 倍，纵向土体取桩长的 2 倍。其中西塔桩长 76 m，桩径 3 m，地基水平土体取 60 m×60 m，地基厚取 152 m，承台横向尺寸为 6 m×6 m，厚 1 m；东塔桩长 60 m，桩径 3 m，地基水平土体取 60 m×60 m，地基厚取 120 m，承台横向尺寸为 6 m×6 m，厚 1 m，如图 3 所示。

桩基混凝土材料为 C30（密度为 2 550 kg/m³，弹性模量为 30 GPa，泊松比为 0.2），东、西塔土层性能指标见表 1。模型输入荷载为静载，分别为作用于桩顶的上部荷载压力、水平荷载和重力。上部荷载压力以压强形式均匀作用于承台顶，由 SAP2000

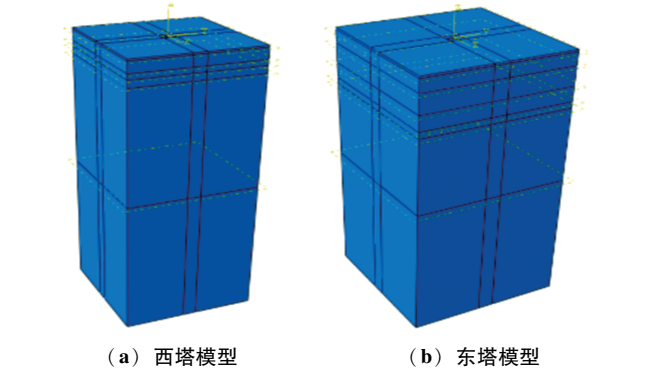


图 3 东、西塔单桩模型
Fig. 3 Single pile model of East Tower and West Tower

全桥模型计算而来，取平均值 2 000 kN；水平荷载以剪应力的形式均匀作用于承台顶，以不同分析步的形式由小到大逐步施加，其中西塔施加的剪力为 36~1 656 kN，东塔施加的剪力为 36~720 kN；重力施加依据实测密度值。水平桩 - 土界面的模拟方式采用主从接触面，定义桩表面为主接触面，土表面为从接触面，摩擦系数取 0.3。

表 1 东塔、西塔土层性能指标

Table 1 Performance indicators of soil layers in East Tower, West Tower

| 名称 | 土层 | 深度/m | 密度/ (kg/m ³) | 压缩模量/MPa | 泊松比 | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/ (°) | 剪胀角/ (°) |
|----|---------|---------|--------------------------|----------|------|---------|-----------|----------|
| 西塔 | 淤泥 | 0~6 | 1 400 | 1 | 0.30 | 30 | 11.0 | 0 |
| | 粉质黏土 | <6~8 | 1 800 | 5 | 0.35 | 22 | 6.6 | 0 |
| | 全风化泥岩 | <8~12 | 1 900 | 1 000 | 0.35 | 75 | 24.0 | 0 |
| | 中风化泥岩 | <12~152 | 2 300 | 2 000 | 0.35 | 150 | 32.0 | 0 |
| 东塔 | 粉细砂 | 0~6 | 1 800 | 3 | 0.25 | 5 | 27.5 | 0 |
| | 中粗砂 | <6~15 | 1 800 | 5 | 0.25 | 2 | 38.0 | 0 |
| | 砂砾 | <15~22 | 1 800 | 16 | 0.25 | 1 | 34.0 | 0 |
| | 强风化泥质砂岩 | <22~25 | 2 100 | 800 | 0.28 | 60 | 30.0 | 0 |
| | 中风化泥质砂岩 | <25~43 | 2 300 | 3 000 | 0.28 | 150 | 40.0 | 0 |
| | 中风化砂岩 | <43~45 | 2 500 | 3 000 | 0.31 | 150 | 44.0 | 0 |
| | 中风化泥质砂岩 | <45~120 | 2 300 | 3 000 | 0.28 | 150 | 40.0 | 0 |
| | | | | | | | | |

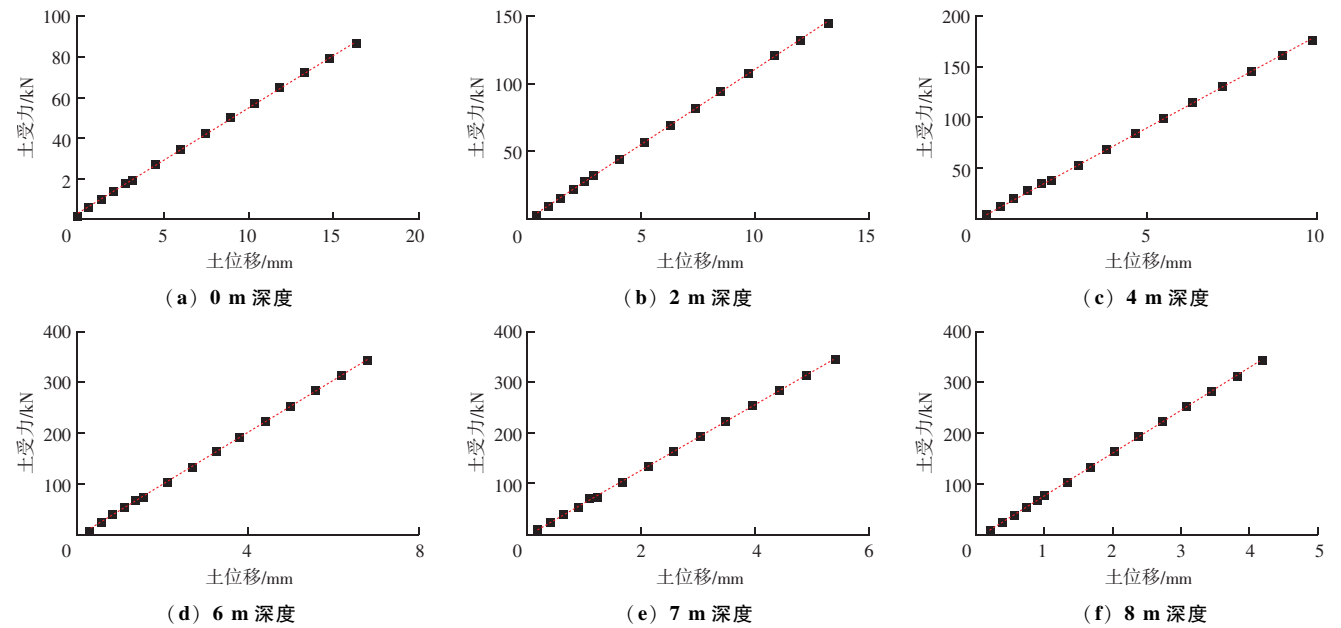
2.2 单桩 F-y 曲线确定

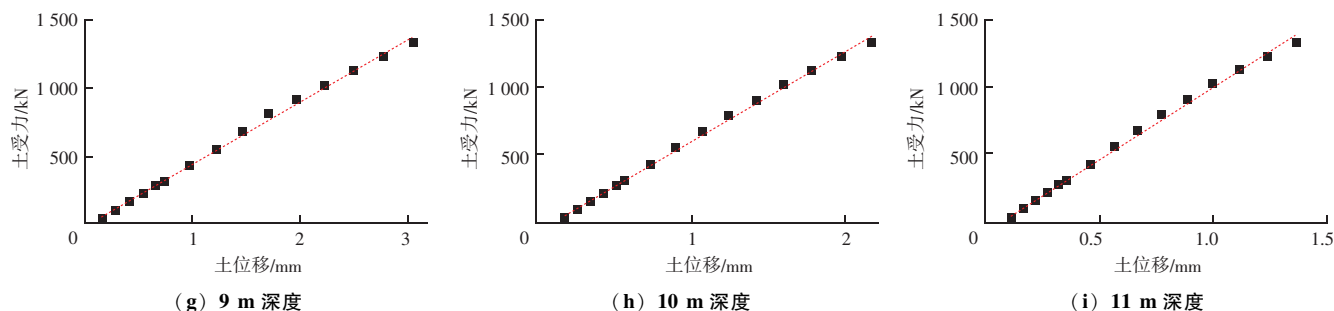
Abaqus 模型计算完成后,提取桩身受弯一侧各深度桩身位移曲线。由于施加荷载是朝单一方向的水平静载作用,桩与土之间不会存在彼此分离的情况,因此在同向水平静载作用下桩受弯侧的水平位移与桩侧土的水平位移相等。

土体受力的确定则相对复杂,为与 m 法不同深度刚度曲线形成对比,采用 Abaqus 软件中的切片功能,以 1 m 为间隔分别对桩基模型进行切片。由于是单向静力作用,提取受压侧土体承受的压力,即得到土体在静力作用下承受的水平向力。对土体在静力作用下的位移与压力进行数据处理,并进行线性拟合,得到各深度桩周土 F-y (力-位移) 曲线

(0~11 m),如图 4 所示,探究海洋软土地基与岩层的 F-y 曲线分布规律。

由图 4 可知,水平静力作用下,在桩顶位置(0 m 深度),桩周土水平位移达到了 16 mm,各点位仍完全位于拟合曲线上,其斜率(土弹簧刚度)没有发生退化,该处桩周土仍然处于弹性阶段;并且在 0~8 m 深度(其中 0~6 m 深度土体为淤泥,<6~8 m 深度土体为粉质黏土)内桩周土的位移均随着土体承受水平压力的增大而呈线性增加,其斜率(土弹簧刚度)随着荷载的增大而保持不变,该范围桩周土均未进入塑性阶段。土体深度在 9 m 时,该处桩基土已经变成了全风化泥岩,土体压缩模量大幅提升(土体变硬)。在土体位移约为 2 mm 时,



图 4 西塔各深度桩基础 $F-y$ 曲线Fig. 4 $F-y$ curves of pile foundations at different depths in West Tower

该处点位于拟合曲线上方; 在土体位移达到 3 mm 时, 该处点位于拟合曲线下方。由此可知, 该处土体产生了一定的刚度退化, 进入塑性阶段。9 m 深度以下土体均产生了一定的刚度退化, 进入塑性阶段; 11 m 以下土体均进入了塑性阶段。

由表 1 可知, 0~8 m 深度范围的土体均为软土地基, 力学性质较弱, 在水平荷载作用下, 即使桩顶位移达到了 16 mm, 软土地基也未进入非线性。对于 9~11 m 深度范围内的岩层地基, 其压缩模量远大于表层软土地基, 力学性质极强, 在该深度土体位移仅仅 2 mm 的情况下, 土体即产生了一定的刚度退化, 进入了非线性。对于跨海大桥地基, 往往面临地质条件复杂并且表层土体与深层土体力学性质差异大的问题, 荷载作用下可能会出现表层的软土地基未进入非线性, 但深层的土体进入了塑性阶段的情况, 这与普通桥梁工程中表层土体位移较大从而进入塑性阶段的情况完全不同, 现有规范对此类跨海大桥大直径桩基础的适用性存在一定的局限性。

3 全桥模型模拟

3.1 建立模型

基于 SAP2000 有限元软件建立全桥动力计算模型, 其中主梁、塔柱以及横梁均采用梁单元模拟; 主缆与吊索均采用索单元, 并考虑 $P-\Delta$ 效应。两侧锚碇均采用固接处理。桩基边界条件模拟方式如下: ①采用 Abaqus 精细化模型模拟非线性桩-土相互作用 (方案一); ②采用 m 法模拟线弹性桩-土相互作用 (方案二); ③塔柱底固接 (方案三)。

方案一即是上述有限元模型得到的各深度 $F-y$ 曲线进行线性拟合, 取其拟合曲线斜率, 即得到桩基础各深度模拟单桩-土弹簧静刚度, 再乘以群桩

折减系数, 得到群桩-土弹簧静刚度, 动刚度保守取静刚度的 2 倍, 得到群桩动力刚度, 将各深度群桩动力土弹簧刚度输入 SAP2000 全桥模型; 方案二即是按照 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》, 并结合地勘报告计算得到各深度单桩-土弹簧静刚度, 乘以群桩折减系数 (与方案一相同), 再按照规范同样取 2 倍静刚度得到群桩动力刚度, 将其输入 SAP2000 全桥模型; 方案三不设桩基础, 将塔柱底与大地固接, 如图 5 所示。

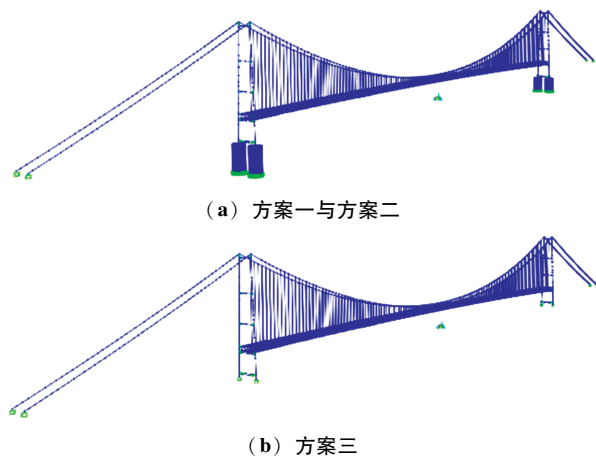


图 5 全桥模型

Fig. 5 Full bridge models for scheme

3.2 地震动输入

该桥址为Ⅲ类场地, 地震烈度为 7 度。该项目属于重大桥梁工程, 地震动输入需根据专门的地震安全性评价确定。根据地震安评报告, 该桥在 E2 基准下 100 年超越概率为 2.5% 的设计地表加速度峰值为 0.22g, 拟合出 3 条典型人工地震动加速度时程曲线, 如图 6 所示, 分别施加纵竖向和横竖向地震动, 比例系数均为 1:0.65, 根据 CJJ 166—2011《城市桥梁抗震设计规范》, 计算后选取地震反应最大的地震响应为研究对象^[15]。

道桥技术

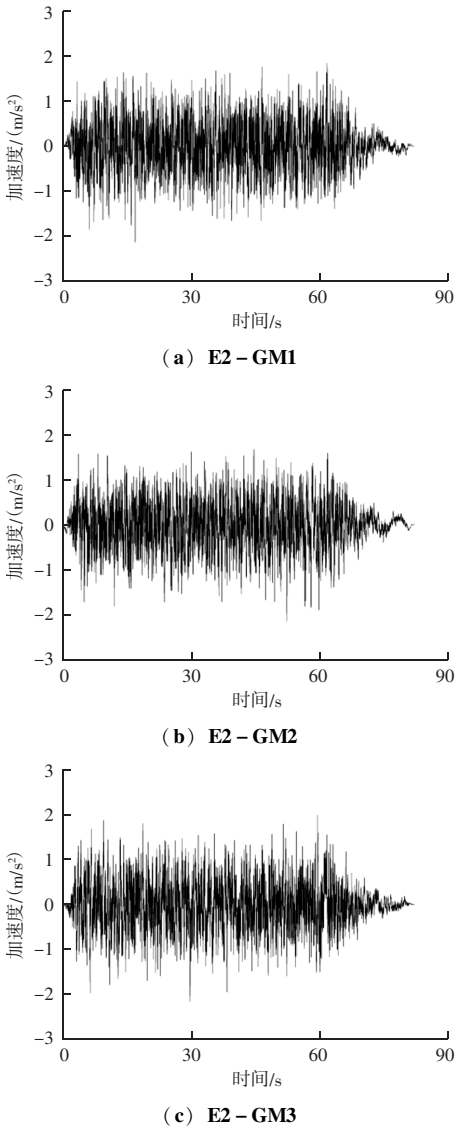


图6 人工地震波 E2-GM 加速度时程曲线
Fig.6 Artificial seismic E2-GM acceleration time history curve

3.3 地震动响应对比

3.3.1 位移响应

以西塔塔柱为研究对象，在上述三种边界条件

下，不同方案在纵竖向与横竖向地震动作用下各层塔柱的位移包络见表2。超大跨度悬索桥的塔柱位移响应与桩基础边界条件之间存在一定的规律，分析可以发现：

(1) 在纵竖向和横竖向地震动作用下，基准方案塔柱各向位移响应均大致呈现：非线性拟合土弹簧（方案一）>m 法线性土弹簧（方案二）>塔柱底固接（方案三）。

(2) 方案三与其他两种方案在纵竖向、横竖向地震动作用下各向位移均有较大差异，由此可知对于大跨度悬索桥，不考虑桩-土相互作用得出的结构位移响应将会与实际结构产生较大的误差。

(3) 方案一与方案二位移响应在靠近桩基础的一层塔柱处差异最大，随着塔柱高度的升高差异逐渐减小，在靠近塔顶的五层塔柱处差异最小。在纵竖向地震动作用下，方案一与方案二的位移响应十分接近，仅顺桥向位移有些许差异，横桥向与竖桥向位移十分接近；横竖向地震动作用下，方案一与方案二在横桥向位移差异较大，其中在一层塔柱处，方案一相对于方案二位移偏差达29.4%。由此得出在双向地震作用下，方案一与方案二在竖桥向位移上最为接近，顺桥向位移上有较小差异，在横桥向位移上差异较大。可以合理推测，对于超大跨度悬索桥，使用m法模拟桩-土相互作用时，可能会使横竖向地震作用下下层塔柱横桥向位移相对偏小，进而影响结构安全性。

(4) 在相同PGA纵竖向地震动和横竖向地震动作用下，结构在横竖向地震动作用下整体位移响应明显大于纵竖向地震作用下整体位移响应，且结构在纵竖向地震下不会产生横桥向位移，即超大跨度悬索桥抗横竖向地震动更不利。

表2 纵、横竖向地震动各向位移包络
Table 2 Longitudinal and transverse、vertical seismic motion displacement envelope in all directions

| 方向 | 方案名称 | 各层塔柱顺桥向位移 | | | | | 各层塔柱横桥向位移 | | | | | 各层塔柱竖桥向位移 | | | | |
|-----|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 横竖向 | 方案一 | 0.015 | 0.182 | 0.748 | 1.632 | 2.807 | 0.022 | 0.136 | 0.384 | 0.646 | 0.884 | 0.038 | 0.077 | 0.122 | 0.158 | 0.183 |
| | 方案二 | 0.013 | 0.184 | 0.747 | 1.631 | 2.806 | 0.017 | 0.128 | 0.374 | 0.634 | 0.869 | 0.038 | 0.077 | 0.122 | 0.157 | 0.183 |
| | 方案三 | 0.000 | 0.128 | 0.674 | 1.570 | 2.786 | 0.000 | 0.087 | 0.340 | 0.653 | 0.969 | 0.001 | 0.045 | 0.094 | 0.130 | 0.156 |
| 纵竖向 | 方案一 | 0.030 | 0.300 | 1.086 | 2.024 | 2.952 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.029 | 0.059 | 0.096 | 0.129 | 0.161 |
| | 方案二 | 0.026 | 0.303 | 1.081 | 2.022 | 2.953 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.029 | 0.059 | 0.096 | 0.130 | 0.161 |
| | 方案三 | 0.000 | 0.232 | 1.060 | 2.079 | 3.056 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.030 | 0.066 | 0.100 | 0.131 |

(5) 纵竖向地震动作用下, 各节点顺桥向位移 > 竖桥向位移 > 横桥向位移; 横竖向地震作用下, 各节点顺桥向位移 > 横桥向位移 > 竖桥向位移。横桥向位移与竖桥向位移的大小与地震波施加的方向有关。

3.3.2 内力响应

以西塔塔柱为研究对象, 在三种边界条件下, 基准方案在纵竖向与横竖向地震动作用下各层塔柱内力包络见表 3。超大跨度悬索桥的塔柱内力响应与桩基础边界条件之间存在一定的规律, 分析可以发现:

- (1) 在纵竖向和横竖向地震动作用下, 基准方案塔柱内力响应均大致呈现出塔柱底固接 (方案三) > 非线性拟合土弹簧 (方案一) > m 法线性土弹簧 (方案二)。基准方案内力响应差异整体较位移响应差异小。
- (2) 与位移响应相同, 方案三与其他两种方案在纵竖向、横竖向地震动作用下内力响应均有较大差异。由此可知, 对于大跨度悬索桥, 不考虑桩-土相互作用得出的结构内力响应将会与实际结构产生较大的误差。
- (3) 方案一与方案二内力响应在靠近桩基础的

一层塔柱处差异最大, 随着塔柱高度的升高差异逐渐减小, 在靠近塔顶的五层塔柱处差异最小。在纵竖向地震作用下, 方案一与方案二各层塔柱轴力响应十分接近, 剪力响应与弯矩响应有较大差异; 在横竖向地震作用下, 方案一与方案二各层塔柱轴力响应、剪力响应与弯矩响应均有较大差异, 其中剪力差异最大, 仅在一层塔柱处, 两种方案剪力响应偏差达 8.1%。在纵竖向和横竖向地震动作用下, 两种方案轴力响应差异均最小, 弯矩响应差异次之, 剪力响应差异最大, 且方案二各项内力响应均较方案一小。可以合理推测对于超大跨度悬索桥, 使用 m 法模拟桩-土相互作用时, 可能会使地震作用下下层塔柱内力响应相对偏小, 进而影响结构的安全性。

- (4) 在相同 PGA 纵竖向和横竖向地震动作用下, 结构在横竖向地震动作用下结构轴力和剪力响应大于纵竖向地震作用下结构轴力和剪力响应, 但其弯矩响应远小于纵竖向地震弯矩响应, 即超大跨度悬索桥塔柱抗横竖向地震更不利, 但在纵竖向地震作用下塔柱受弯更为严重。

表 3 纵、横竖向地震动内力包络
Table 3 Longitudinal and transverse vertical seismic motion displacement envelope in all directions

| 方向 | 方案名称 | 各层塔柱轴力 $P/10^3\text{kN}$ | | | | | 各层塔柱剪力 $V/10^3\text{kN}$ | | | | | 各层塔柱弯矩 $M/(10^3\text{kN}\cdot\text{m})$ | | | | |
|-----|------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|---|--------|-------|--------|-------|
| | | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 横竖向 | 方案一 | 3 665 | 3 190 | 2 669 | 1 944 | 1 094 | 266 | 180 | 159 | 125 | 411 | 9 960 | 8 071 | 6 071 | 4 351 | 4 158 |
| | 方案二 | 3 601 | 3 161 | 2 648 | 1 929 | 1 089 | 246 | 170 | 156 | 123 | 413 | 9 845 | 8 018 | 6 055 | 4 332 | 4 154 |
| | 方案三 | 4 077 | 3 620 | 2 953 | 2 604 | 1 111 | 316 | 188 | 182 | 160 | 395 | 11 149 | 8 828 | 6 634 | 5 804 | 4 776 |
| 纵竖向 | 方案一 | 2 697 | 2 211 | 1 873 | 1 413 | 932 | 170 | 116 | 99 | 48 | 104 | 17 446 | 10 272 | 8 584 | 9 360 | 1 202 |
| | 方案二 | 2 696 | 2 210 | 1 872 | 1 413 | 932 | 163 | 114 | 98 | 46 | 104 | 17 226 | 10 166 | 8 460 | 9 342 | 1 210 |
| | 方案三 | 2 643 | 2 174 | 1 849 | 1 407 | 940 | 161 | 141 | 118 | 45 | 133 | 21 920 | 12 744 | 8 610 | 1 0950 | 1 629 |

4 结论

运用 SAP2000 建立不同边界条件的全桥模型, 探究地震荷载下不同桩基础边界条件对超大跨度悬索桥塔柱动力响应的影响, 得到以下主要结论:

- (1) 在横竖向地震作用下不同边界条件对结构响应影响差异较纵竖向地震作用更大。
- (2) 不考虑桩-土相互作用, 采用塔底固接方案的结构响应与采用 m 法线性模型和非线性模型的结构响应相差巨大, 对于超大跨度悬索桥, 应考虑桩-土相互作用。
- (3) m 法线性土弹簧模拟边界条件与非线性模型两种方案塔柱响应在靠近桩基础的一层塔柱处相

差最大, 随着塔柱高度的升高不断减小, 在最高的五层塔柱处相差最小。

- (4) m 法模型的塔柱位移与内力响应均略小于采用非线性模型, 按照规范使用 m 法模拟桩-土相互作用可能会使结构偏于不安全, 确定合理的桩-土相互作用模拟方式至关重要。

参 考 文 献

[1] 贺志强. 某曲线梁桥桩土相互作用对抗震性能影响的分析 [J]. 四川水泥, 2024 (10): 226-228.
[2] 高高峰, 路军, 董旭, 等. 基于动水及桩-土-结构相互作用的斜拉桥地震响应分析 [J]. 公路工程, 2016, 41 (4): 19-36.
[3] 高非凡, 王竞宇, 陈博宇, 等. 桩-土效应对波形钢腹板连续梁桥地震易损性影响分析 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学

道桥技术

版), 2025, 42 (1): 82-89.

- [4] 郭森, 张柳煜, 郭元凯, 等. 基于桩-土作用效应的滚石撞击桥墩动力响应分析 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2019, 36 (1): 17-21, 112.
- [5] 杨慧. 基于修正摩尔-库伦模型的深基坑开挖数值模拟分析 [J]. 四川水泥, 2022, (12): 63-66.
- [6] 曾佳明, 朱忠义, 吕辉, 等. 考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震研究进展 [J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41 (1): 69-82.
- [7] 陈晓广. 基于桩土相对位移特征的深厚湿陷性黄土地区桩基承载力计算方法 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (1): 137-142.
- [8] 焦驰宇, 霍鹏翔, 曹跃, 等. 地震输入方向及液化扩展场地的夹角对曲线桥抗震的影响 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (8): 3452-3462.
- [9] 邹作家. 土-结构相互作用对跨走滑断层悬索桥地震响应的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [10] 王楚皓. 考虑桩土相互作用的千米级悬索桥梁轨系统地震响应

研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.

- [11] 占锋, 孙正财. 考虑桩-土效应的钢栈桥地震响应分析 [J]. 公路与汽运, 2025, 41 (5): 94-99, 104.
- [12] 郭歆. 桩土相互作用对桥轨系统近场脉冲地震响应的影响分析 [J]. 结构工程师, 2024, 40 (3): 61-67.
- [13] 张高, 张金, 唐孟. 不同桩-土模型对山区大跨度刚构桥地震易损性的影响分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47 (1): 155-164.
- [14] 张俊鑫. 近断层脉冲型地震作用下考虑桩土作用的斜拉桥地震响应分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [15] 吴鸣, 浦童刚. 考虑桩-土-水-结构相互作用的钢箱梁斜拉桥动力特性分析 [C] //中国公路学会, 中国航海学会, 中国铁道学会, 中国航空学会, 中国汽车工程学会. 2024 世界交通运输大会 (WTC2024) 论文集 (桥梁工程、隧道工程与轨道交通). 汕头大学土木与智慧建设工程系; 云南省公路科学技术研究院, 2024: 17-23.

(上接第 75 页)

- [8] 赵庆新, 才鸿伟, 安赛, 等. 水泥-磨细矿渣固化滨海盐渍土强度及机理 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (3): 625-630.
- [9] 徐超, 彭安琪, 于俊杰, 等. 考虑软土蠕变的大型锚碇基础变形与稳定性分析 [J]. 科技通报, 2025, 41 (5): 24-32.
- [10] 徐超, 郭宏峰, 杨晓明, 等. 普硅水泥和矿渣水泥加固滨海软土效果对比分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (9): 2737-2740.
- [11] 柏延平, 夏懿, 马雷, 等. 粉煤灰基地聚物固化黄土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 8-13.
- [12] 吴云根. 粉煤灰-矿渣粉地聚物稳定碎石配合比设计及工程应

用 [J]. 交通世界, 2025 (23): 35-37.

- [13] 骆展鹏, 石超, 熊春林, 等. 土壤固化剂研究进展 [J]. 四川水泥, 2025 (8): 69-71.
- [14] 骆展鹏, 熊春林, 韩泽军, 等. 矿渣-粉煤灰-玻璃粉复合固化盾构土力学性能及固化机制 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1803-1812.
- [15] 董雪妍, 丁坚平, 段先前, 等. 黔中地区岩溶深基坑抗浮水位及涌水量预测 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2017, 34 (1): 119-122.

(上接第 80 页)

- [14] 何春梅, 宁晓骏, 李月富. 人行悬索桥结构参数对舒适度的影响研究 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (4): 427-432.
- [15] 尹栋佳, 聂科琴, 刘政伟. 人行景观斜拉桥舒适度研究 [J]. 交通科技, 2022 (4): 67-70.
- [16] 河北省工程建设标准. 景区人行玻璃悬索桥与玻璃栈道技术指标: DB13 (J) T 264-2018 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.

- [17] 中国工程建设标准化协会标准. 景区人行悬索桥工程技术规程: T/CECS 1140-2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [18] 李欢, 何旭辉, 王汉封, 等. π 型断面超高斜拉桥涡振减振措施风洞试验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (7): 62-68.
- [19] 刘志文, 肖晗, 王雷, 等. II 型钢-混凝土结合梁断面涡激振动及气动控制措施 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (3): 68-78.