

砂土场地桩柱式框架墩桩身地震需求 参数敏感性分析

杨光怡¹, 叶爱君^{1,2}, 王晓伟^{1,2}, 李 闯³

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092;
3. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310006)

摘要: 桩柱式框架墩是桥梁工程中广泛采用的下部结构形式, 而现行桥梁抗震设计规范按能力保护原则要求桩身在地震下保持弹性。因此, 揭示各设计参数对桩身地震需求的敏感性是进行桩身能力保护设计的重要前提。为此, 基于土-桩-结构一体化建模方法, 对工程中常见的砂土地带土面系梁桩柱式框架墩桥梁的桩身地震需求参数敏感性开展理论研究。首先研究了不同地震强度下砂土地带桩柱弯矩分布发展规律以及土面系梁对桩身弯矩的分担作用和变化规律; 在此基础上, 提出了表征桩身地震弯矩最大值、埋深以及加强配筋范围的标准化地震需求指标, 全面分析了系梁、桩柱及土体参数对桩身地震需求的敏感性, 基于推导提出的敏感参数界定标准, 确定了桩身地震需求的高、低敏感参数。研究成果可为砂土地带土面系梁桩柱式框架墩基于桩身能力保护的抗震设计提供参考。

关键词: 桥梁工程; 桩柱式墩桥梁; 土面系梁; 桩身地震需求; 敏感性分析

中图分类号: TU442.5⁺5

文献标志码: A

Sensitivity analysis of seismic demand parameters of pile-columns of frame piers in sandy soil sites

YANG Guangyi¹, YE Aijun^{1,2}, WANG Xiaowei^{1,2}, LI Chuang³

(1. Bridge Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Zhejiang Shuzhi Institute Technology Co., Ltd., Hangzhou 310006, China)

Abstract: The pile-columns of frame piers is a widely used substructure in bridge engineering. The current seismic design specifications for bridges require the pile to remain elastic following the capacity protection principle. Therefore, identifying the sensitivity of various design parameters to seismic demands of the piles is an important prerequisite for the capacity protection design of the piles. For this purpose, based on a coupled soil-pile-structure finite element modeling method, the sensitive parameters of pile-columns of frame piers to pile seismic demand are studied. Firstly, distribution mechanisms of bending moment under different earthquake intensity are investigated, together with understanding the contribution of ground surface tie beam to withstand the pile-shaft bending moment. On this basis, standardized seismic demand indicators representing the maximum bending moment of the pile, the corresponding depth, and the recommended reinforcement range are proposed. The sensitivity of tie beam, pile, column and soil parameters to the seismic demands of piles is analyzed. Based on the sensitivity parameter definition standards derived in this paper, the high and low sensitivity parameters of the pile seismic demand are identified. The research results can provide a reference for the seismic design of bridges supported by extended pile-shaft frames with ground surface tie beams in cohesionless soils based on pile capacity protection principle.

收稿日期: 2024-03-16; 修回日期: 2024-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378183, 52178155, 52008155)

作者简介: 杨光怡(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: yangguangyi@tongji.edu.cn

通信作者: 王晓伟(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: xiaoweiwang@tongji.edu.cn

Key words: bridge engineering; pile-columns of frame piers; ground surface tie beam; capacity protection design of pile; sensitivity analysis

0 引言

桩柱式桥墩由于其结构简明、施工便捷等优势,被广泛应用于我国高速公路桥梁和城市高架桥。我国现行桥梁抗震设计规范^[1-2]要求桩身按能力保护构件设计,即在地震中保持弹性工作状态。准确预测桩身的地震需求是桩柱式墩抗震设计的关键,而探明结构和土体主要设计参数对桩身地震需求的敏感性是关键前提,也是本文的研究目标。

目前已有部分关于桥墩和桩基地震需求敏感参数的研究。张洁等^[3]采用拟静力试验与数值模拟结合的方法,比较配筋率不同的双层高架桥梁框架墩的抗震性能,结果表明,立柱配筋率较高时,横梁和节点会发生严重的损伤,减小立柱配筋率后,破坏主要集中于立柱,横梁和节点的损伤得到了有效控制;同时桥墩的延性能力提高。陈敬一等^[4]采用拉格朗日方程和动量矩定理建立了可计算摇摆双层框架墩桥梁结构动力反应的刚体分析模型,对结构地震反应进行计算,探讨了桥墩宽高比和桥墩尺寸等模型参数对其地震反应的影响,结果表明,摇摆双层桥梁结构地震反应随着桥墩宽高比的增大而减小,结构倒塌工况数量随着宽高比和桥墩尺寸增加而减少。吴宜峰等^[5]建立了钢筋混凝土双柱墩精细有限元数值模型,采用低周反复加载,对轴压比、配筋率、配箍率和混凝土强度对钢筋混凝土双柱墩滞回性能的影响进行分析,结果表明,配筋率和轴压比是影响最大抗力和位移延性的主要指标,配箍率在超过一定限值后影响较小。龙佩恒等^[6]建立典型混凝土连续梁桥双柱墩有限元模型,研究剪跨比、轴压比、箍筋率和纵筋率参数对桥墩弯矩、剪力和位移能力需求比的影响,结果表明,随着轴压比和配筋率的增大,桥墩弯矩能力需求比增大,配箍率对桥墩能力需求比的影响并不显著。PADGETT等^[7]在考虑结构参数不确定的基础上,对典型板式钢梁桥易损性进行分析,结果表明,墩高、桥梁跨度及宽度等结构参数会显著影响桥梁地震易损性,结构阻尼比和支座刚度等结构参数对桥梁地震易损性的影响并不显著。WANG等^[8]提出基于易损性的龙卷风图法,以支座位移、墩身曲率和桩身曲率为地震损伤指标,研究了相关结构和土体参数对不同冲刷深度下的可液化场地中群桩基础桥梁地震易损性影响,结果表明,墩高、墩径以及墩配筋率是墩身地震易损性的敏感参数,桩径是桩身地震易损性的敏感参数,而钢筋弹性模量对墩身和桩身的地震易损性并不敏感。ZHOU等^[9]结合试验及数值模拟结果,以地震下结构抗力、残余位移和延性为研究指标,采用龙卷风图法研究了结构和土体参数对受冲刷群桩基础抗震性能的影响,结果表明,桩径和桩身轴力比是影响群桩抗震性能最重要的参数,桩配箍率对群桩的抗震性能几乎没有影响,对于中密砂土中的深基础,桩长、桩间距和砂土相对密度对受冲刷群桩基础的抗震性能影响较小。梁永朵等^[10]整理了37根高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰长度试验数据,并通过灰色关联方法分析了影响高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度的主要因素,结果表明,纵筋直径影响最大,其次是试件高度和截面宽度,试件轴压比和含箍率影响最小。刘腾飞等^[11]对桩柱式桥墩进行循环往复的Pushover数值分析,研究砂土相对密度对桩身塑性铰长度的影响,结果表明,砂土相对密度会显著改变桩身的等效塑性铰长度以及桥墩屈服及破坏位移。王晓伟等^[12]通过对典型倾斜液化场地桩柱式桥梁进行非线性地震反应分析,以黏土层顶的水平位移、加速度以及上部结构的水平位移最大值作为比较值,通过龙卷风图法和一次二阶矩法对相关参数进行敏感性分析,结果表明,松砂层的内摩擦角、土层倾角和地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)是地震反应的控制性参数,钢筋和混凝土材料强度并非结构地震反应的敏感参数。宋帅等^[13]综合考虑地震动和结构的不确定性,对常见的简支梁桥及连续梁桥进行地震需求分析,分别采用Monte-Carlo数值模拟方法及核密度估计方法计算得到各随机参数基于方差的重要性测度指标及矩独立重要性测度指标,结果表明,支座剪切模量、上部结构质量以及阻尼比等参数对桥梁结构各构件的地震需求影响均较为显著。总体而言,结构和土体参数是影响桥墩和桩基础抗震行为的重要参数,而材料参数的影响相对不显著。

现有研究的对象主要集中于无系梁桩柱式框架墩、桩柱式单墩或群桩基础,而针对带土面系梁的桩柱式墩,目前尚缺乏桩身地震需求参数敏感性研究。土面系梁会分担桩柱式墩的地震弯矩需求,从而改变桥墩和桩身的地震弯矩分布,而当前的研究尚未揭示不同强度地震作用下土面系梁对桩柱式墩地震需求的影响规

律,也尚未探明相应的高、低敏感性结构和土体设计参数。

本文旨在对带土面系梁桩柱式桥墩的桩身地震需求开展参数敏感性研究。基于土-桩-结构有限元建模方法,研究桩柱式墩地震弯矩分布特性,重点揭示系梁和桩柱配筋及尺寸、轴压比、土体相对密实度等主要设计参数对桩身地震需求的敏感性,基于本文推导提出的敏感参数界定标准,确定影响桩身地震需求的高、低敏感参数,为带土面系梁桩柱式桥墩基于桩身能力保护设计提供参考。

1 计算模型及参数

本文以苏台高速主线双柱墩连续梁桥为背景,以采用能力保护设计的带土面系梁桩柱式框架墩梁桥为研究对象,聚焦横桥向抗震行为和地震需求研究,场地土层以砂土或粉砂为主,故简化为均一砂土地,考虑不同的相对密实度。需要说明的是,这类桥梁的纵桥向抗震行为与桩柱式单墩类似,已在以往研究中报道^[14]。为此,基于 OpenSees 平台^[15]建立了可有效模拟该类梁桥横桥向抗震行为的土-桩-结构一体化单墩模型见图1,上述建模方法采用 UC Davis 完成的离心机试验 CSP3 进行验证,具体验证见文献[8,14]。

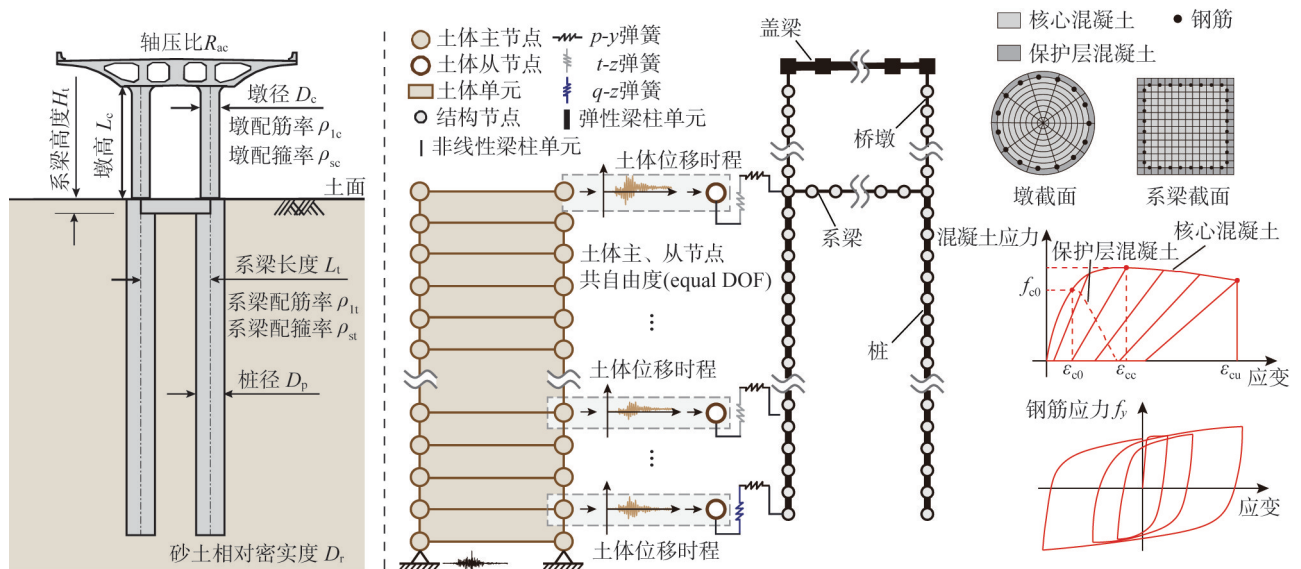


图1 桩柱式框架墩有限元模型

Fig. 1 Finite element model of pile-columns of frame piers

考虑桩身采用能力保护设计,不允许出现塑性铰,采用弹性梁柱单元进行模拟,桥墩和系梁则采用基于位移的非线性梁柱单元,单元长度取1倍墩径或截面宽度,每个单元取5个积分点。纵向钢筋采用 Steel02 材料^[16],屈服强度取400 MPa,屈后刚度比取0.01,极限拉应变取0.18。混凝土采用 Concrete04 材料,保护层混凝土抗压强度取30 MPa,对应的应变取0.002,极限压应变取0.004,核心混凝土本构参数采用 Mander 模型确定^[17]。该体系桥梁横桥向各墩至少布置一个固定支座,且支座在地震下按能力保护构件设计,可以可靠地传递上部结构惯性力,本文中墩上部与盖梁固结,故可以将上部结构共同简化为集中质量 M_a ,通过混凝土材料抗压强度 f_c 、墩身截面面积 A_c 和轴压比 R_{ac} 确定,即 $M_a = f_c \cdot A_c \cdot R_{ac} / g$,其中 g 为重力加速度 (9.81 m/s^2),出于表述简洁,图中未画出盖梁和支座。场地中的砂土非线性本构采用 PDMY 材料进行模拟,参数选取可由文献[8]确定。土体采用基于平面应变假定的四节点 Quad 单元模拟,单元厚度设为0.5 m,该厚度可保证实际地震波的有效传播^[18],桩身单元相应地按0.5 m进行划分^[19]。相同深度的土体两侧节点共自由度,土体底面节点约束水平及竖向自由度。

土-桩相互作用采用美国 API 规范^[20]推荐的 $p-y$ 曲线, MOSHER^[21]提出的 $t-z$ 曲线以及 MEYERHOF 等^[22]提出的 $q-z$ 曲线模拟。具体而言,采用 PySimple1 材料模拟土桩水平相互作用的 $p-y$ 弹簧,土-桩水平相对位移为 y 时的桩侧土压力如式(1)所示^[20]:

$$p(y) = A p_u \tanh\left(\frac{kh}{A p_u} y\right) \quad (1)$$

式中: A 为荷载系数(循环荷载取0.9); k 为初始地基弹性模量,可根据砂土相对密实度确定^[18]; p_u 为极限土

体抗力,按式(2)确定^[18]:

$$p_u = \min [(C_1 h + C_2 D_p) \gamma h, C_3 D_p \gamma h] \quad (2)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 为根据砂土密实度确定的参数; γ 为土体有效重度。

采用 TzSimple1 材料模拟桩侧竖向土桩相互作用的 t - z 弹簧,土-桩竖向相对位移为 z 时的桩侧摩阻力如式(3)所示^[21]:

$$t(z) = z / \left(\frac{1}{E_f} + \frac{1}{t_u} z \right) \quad (3)$$

式中: E_f 为桩侧摩阻力初始模量,可由内摩擦角 φ 确定; t_u 为桩侧极限摩阻力,按式(4)确定:

$$t_u = 0.4 \gamma h \pi D_p \tan(0.8 \varphi) \quad (4)$$

采用 QzSimple1 材料模拟桩尖竖向土桩相互作用的 q - z 弹簧,土-桩竖向相对位移为 z 时的桩尖抗力如式(5)所示^[22]:

$$q(z) = q_u \left(\frac{z}{z_{eq}} \right)^{1/3} \quad (5)$$

式中: z_{eq} 为土抗力达到峰值 q_u 时的位移,按照 MEYERHOF 等^[22] 的推荐,可确定为 $0.05 D_p$;土抗力峰值 q_u 按式(6)确定:

$$q_u = N_q \gamma h \quad (6)$$

式中, N_q 为桩尖竖向承载力系数,受内摩擦角 φ 和桩身持力层深度影响,可由文献[22]确定。

2 地震动输入及工况选择

本文采用 BAKER 等^[23] 选取的 40 条岩石场地实际地震记录作为地震动,从模型土层底部输入。这 40 条地震动峰值加速度介于 $0.1 \sim 1.0 g$ 之间,对应阻尼比为 5% 的加速度反应谱见图 2,均值反应谱与我国规范 7 度区 IV 类场地的设计反应谱很接近。值得说明的是,7 度区 IV 类场地也是本文研究对象常见的工程场地。

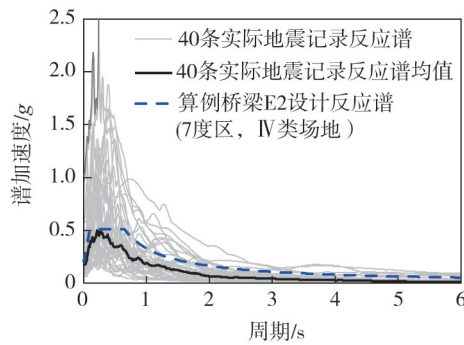


图 2 40 条地震记录加速度反应谱及设计反应谱

Fig. 2 Acceleration response spectra of 40 ground motions and design response spectra

3 地震弯矩分布及地震需求指标

3.1 带土面系梁桩柱式框架墩弯矩分布

本节以 Chi-Chi 地震动(PEER 数据库编号 3507,测站 TCU129)为代表性地震记录,研究某典型带土面系梁桩柱式框架墩在不同强度地震作用下的弯矩分布特性,所选用 Chi-Chi 地震动加速度、速度及位移时程见图 3。

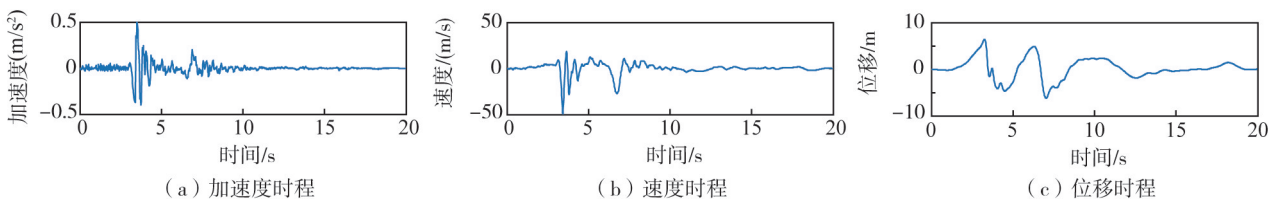


图 3 Chi-Chi 地震动加速度、速度和位移时程

Fig. 3 Acceleration, velocity and displacement time histories of Chi-Chi ground motions

基于 OpenSees 平台对墩身和系梁截面进行弯矩-曲率分析,对恒载轴压力 7 952 kN 墩顶及 8 342 kN 墩底、0 轴力系梁截面进行弯矩曲率分析,可得恒载状态下墩顶、墩底和系梁截面的屈服弯矩分别为 8 090、8 240、2 883 kN·m,其弯矩-曲率曲线见图 4。

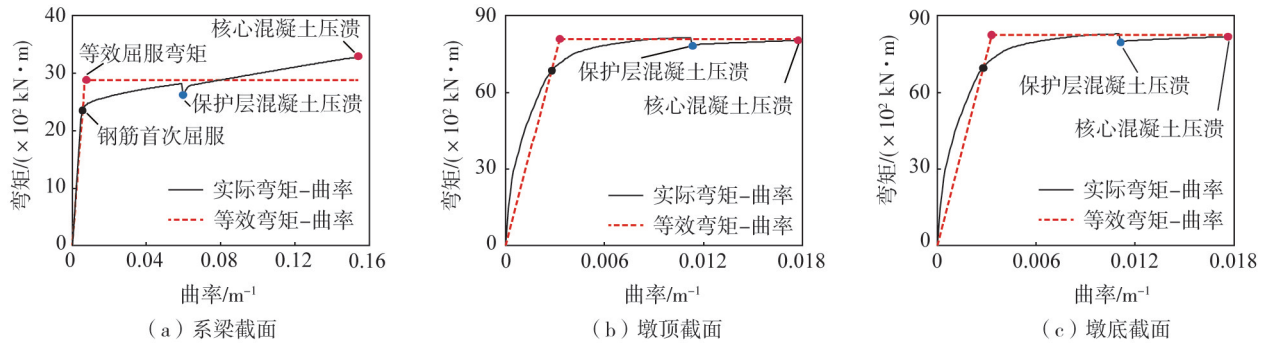


图 4 系梁及桥墩截面弯矩-曲率曲线

Fig. 4 Moment-curvature curves of tie beam and pier cross-section

对该桩柱式框架墩输入峰值加速度 0.1~1.0 g 的 Chi-Chi 地震动,其弯矩分布见图 5,系梁和墩顶截面在 PGA 介于 0.1~0.2 g 之间屈服,而墩底截面在 PGA 介于 0.2~0.3 g 之间屈服,各截面屈服前弯矩随 PGA 增长变化比较明显,屈服后弯矩变化不大。尽管作为能力保护构件的桩身始终处于弹性状态,系梁及桥墩屈服后,桩身弯矩增长也并不明显。因此,桥墩屈服后桩身最大弯矩不会进一步显著增大,当 PGA 达到 0.5 g 后,各墩墩顶、墩底、系梁两端截面均屈服,桩身弯矩需求稳定在 11 500 kN·m 左右。鉴于此,对高度和弯矩进行标准化处理,分别除以墩径(D_c)和墩底弯矩,前述结果相对应,PGA 达到 0.5 g 后,桩身标准化弯矩需求稳定在 1.25 左右。

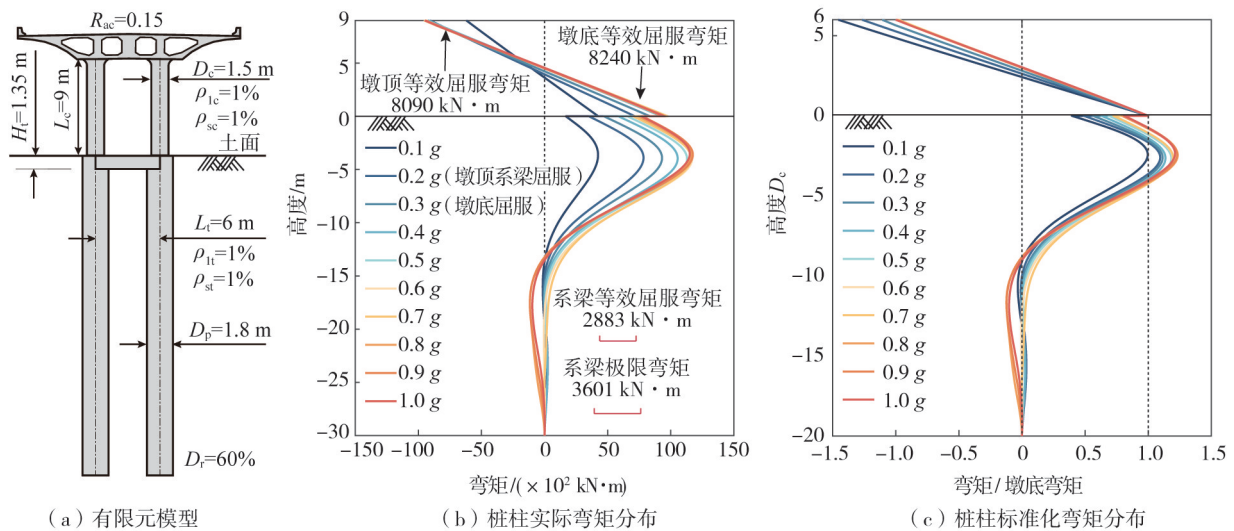


图 5 不同 PGA 的 Chi-Chi 地震动下桩柱弯矩分布图

Fig. 5 Distribution of pile-shaft bending moment under Chi-Chi ground motion of different PGA levels

3.2 地震需求指标定义

从桩柱式墩能力保护设计原则出发,应重点研究桩身最大弯矩 $M_{p,max}$,除此以外,桩身最大弯矩埋深 H_p 和桩身弯矩到达 50%最大弯矩深度 L_p 可以用于保守估计桩身加强配筋范围。为尽可能得到普适性结论,基于图 5 结果,提出了桩柱式墩的标准化地震需求指标,即

$$\begin{aligned}\bar{M}_{p,max} &= M_{p,max} / M_{c,max} \\ \bar{H}_p &= H_p / D_c \\ \bar{L}_p &= L_p / D_c\end{aligned}\quad (7)$$

式中: $\bar{M}_{p,max}$ 、 \bar{H}_p 和 \bar{L}_p 分别为桩身标准化最大弯矩、标准化最大弯矩埋深和标准化 50%最大弯矩埋深; $M_{c,max}$ 为墩底弯矩; D_c 为墩身直径,见图 6。

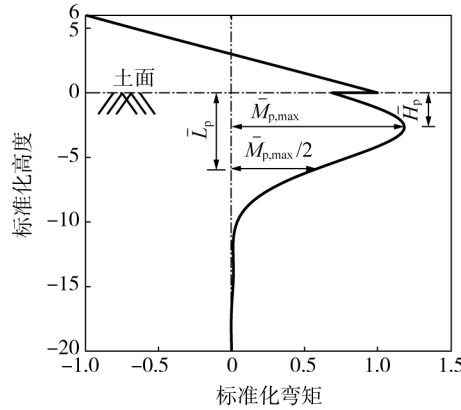


图 6 标准化桩柱弯矩分布图

Fig. 6 Standardized bending moment distribution of pile-columns of frame piers

4 参数敏感性分析

4.1 分析参数及取值

针对带土面系梁桩柱式框架墩,本文考察的主要设计参数包括:砂土相对密实度、墩高、桩径、桩柱配筋率、轴压比、系梁截面尺寸及配筋率。

本文建模参数参考苏台高速主线双柱式连续梁桥。苏台高速主线桥跨径布置为 25、30 m,25 m 桥梁墩柱为直径 1.2 m 的圆形截面,高度范围 1~11 m,超过 7 m 的墩柱带底系梁,桩为直径 1.3 m 的圆形桩,桥墩和桩基配筋率介于 0.7%~0.8%;30 m 桥梁墩柱为直径 1.3 m 的圆形截面,高度范围 1.0~12.5 m,超过 7 m 的墩柱带底系梁;桩为直径 1.5 m 的圆形桩,桥墩和桩基配筋率介于 0.7%~0.9%。系梁尺寸参考实际工程相关设计参数取值,截面高度取 0.8~1.0 倍墩径为宜,宽度取 0.6~1.0 倍墩径为宜。

为便于计算分析,标准工况下桩柱式框架墩模型墩径取 1.5 m,桩径取 1.8 m(1.2 倍墩径),系梁截面宽度取 1.35 m(0.9 倍墩径),宽度取 1.2 m(0.8 倍墩径),其他参数的取值参考实际工程确定,各标准化参数的均值和上、下限见表 1。

表 1 敏感性分析参数取值

Table 1 Values of parameters for sensitivity analysis

参数	符号	标准工况取值	下限值	上限值
砂土相对密实度	$D_r/\%$	60.0	40.0	80.0
标准化墩高	$\bar{L}_c = L_c/D_c$	6	4	8
标准化桩径	$\bar{D}_p = D_p/D_c$	1.2	1.1	1.3
墩配筋率	$\rho_{vc}/\%$	1.00	0.75	1.25
墩配箍率	$\rho_{sc}/\%$	1.00	0.75	1.25
标准化系梁截面高度	$\bar{H}_t = H_t/D_c$	0.9	0.8	1.0
标准化系梁长度	$\bar{L}_t = L_t/D_c$	4	3	5
系梁配筋率	$\rho_{lt}/\%$	1.00	0.75	1.25
系梁配箍率	$\rho_{st}/\%$	1.00	0.75	1.25
轴压比	R_{ac}	0.15	0.10	0.20

4.2 计算原理

4.2.1 敏感性指标定义

为排除参数上下限取值对敏感性分析的影响,本文采用 AHMED 等^[24]提出的基于龙卷风图法的参数敏感性分析方法,敏感性指标 S_1 计算公式为

$$S_1 = \frac{(O_1 - O_2) / \text{Mean}(O_1, O_2)}{(I_1 - I_2) / \text{Mean}(I_1, I_2)} \quad (8)$$

式中: I_1, I_2 为某敏感性分析参数的不同输入值; O_1, O_2 分别为对应需求参数输出值; $\text{Mean}(,)$ 为取均值。若

$S_1 > 0$, 表示研究参数与需求参数呈正相关, 反之呈负相关; $|S_1|$ 越大, 表示该参数敏感性越大。

由于本文中研究参数均有 3 个不同取值(上限值 I_{max} 、标准值 I_m 、下限值 I_{min} , 具体取值见表 1), 分别取上限值与标准值、下限值与标准值作为 I_1 与 I_2 得到相应的敏感性指标 S_{11} 、 S_{12} , 并取两者平均值得到最终敏感性指标 S_1 , 计算过程列于式(9):

$$S_{11} = \frac{(O_{i-max} - O_{i-m}) / \text{Mean}(O_{i-max}, O_{i-m})}{(I_{max} - I_m) / \text{Mean}(I_{max}, I_m)}$$

$$S_{12} = \frac{(O_{i-min} - O_{i-m}) / \text{Mean}(O_{i-min}, O_{i-m})}{(I_{min} - I_m) / \text{Mean}(I_{min}, I_m)} \tag{9}$$

$$S_1 = \text{Mean}(S_{11}, S_{12})$$

式中: I_{max} 、 I_m 、 I_{min} 分别为分析参数输入上限值、标准值、下限值; O_{i-max} 、 O_{i-m} 、 O_{i-min} 为对应需求参数输出值, 其他符号含义同式(8)。

4.2.2 敏感参数界定标准

$|S_1|$ 的大小可以反映结构参数的相对敏感性, 但 AHMED 等^[24] 未定义高、低敏感参数的界定标准。鉴于此, 本文推导提出了面向工程应用的高、低敏感参数界定标准。

为此, 首先定义输入的结构参数和输出的需求参数变化幅度分别为 $\Delta_I = (I_2 - I_1) / I_1$ 和 $\Delta_O = (O_2 - O_1) / O_1$, 代入式(8), 敏感性指标 S_1 计算公式可改写为式(10):

$$S_1 = \frac{O_1 - O_2}{O_1 + O_2} \cdot \frac{I_1 + I_2}{I_1 - I_2} \tag{10}$$

将 $I_2 = (1 + \Delta_I) \cdot I_1$ 和 $O_2 = (1 + \Delta_O) \cdot O_1$ 代入式(10)可将 S_1 化简如式(11)所示:

$$S_1 = \frac{\Delta_O \cdot (2 + \Delta_I)}{\Delta_I \cdot (2 + \Delta_O)} \tag{11}$$

对式(11)进行进一步化简, 可得输出参数的变化程度 Δ_O 的定量计算式如式(12)所示:

$$\Delta_O = \frac{2S_1}{(2/\Delta_I) + 1 - S_1} \tag{12}$$

式(12)表明, 输出参数变化程度 Δ_O 由敏感性指标 S_1 和输入结构参数变化程度 Δ_I 共同决定, 一方面, 随着 S_1 的增大, Δ_O 会相应增大, 即地震需求对该结构参数的变化更为敏感; 另一方面, 随着输入结构参数变化范围变大, 即 Δ_I 增大, 也会导致 Δ_O 增大。

对于实际工程而言, 若某设计参数的变化导致地震需求变化范围在 $\pm 10\%$ 之内, 即 $|\Delta_O| \leq 10\%$, 通常可认为该设计参数为低敏感性参数; 相反地, $|\Delta_O| > 10\%$ 对应的设计参数为高敏感性参数。鉴于此, 图 7 给出了当 $|\Delta_O| = 10\%$ 时, Δ_I - S_1 关系曲线。考虑到实际工程设计过程中各参数的变化范围通常不超过 50%~200% (从减半到双倍), 即 $\Delta_I \in [-0.5, 1.0]$, 对应的 $|S_1| \leq 0.143$ 。换言之, 当 $|S_1| \leq 0.143$ 时, 即使设计参数的变化范围达到 50%~200%, 地震需求的变化范围不超过 10%。因此, 以 $|S_1| = 0.143$ 为敏感参数界定标准, 即 $|S_1| > 0.143$ 时为高敏感性参数, 而 $|S_1| \leq 0.143$ 时为低敏感性参数。

4.3 敏感性分析结果

对于各分析工况, 取 40 条地震动地震反应分析结果的均值, 开展参数敏感性分析, 结果见图 8。以 $|S_1| > 0.143$ 为敏感参数界定标准, 可以发现标准化墩高 \bar{L}_c 、标准化桩径 \bar{D}_p 和砂土密实度 D_r 为 3 个地震需求指标的共同高敏感参数, 此外, 系梁配筋率 ρ_{li} 也是弯矩需求指标 $\bar{M}_{p,max}$ 的高敏感参数, 而轴压比 R_{ac} 、墩配筋率 ρ_{lc} 、墩配筋率 ρ_{sc} 、系梁配筋率 ρ_{st} 、标准化系梁长度 \bar{L}_l 和标准化系梁高度 \bar{H}_l 是低敏感性参数。

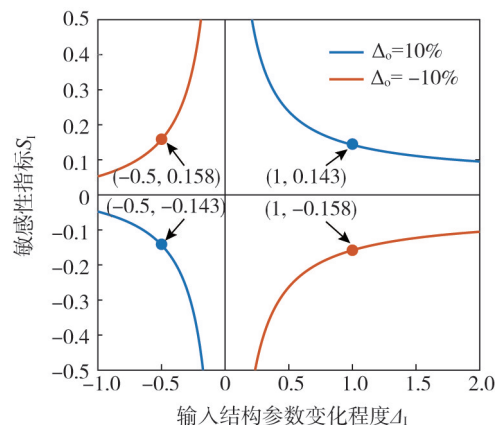


图 7 $|\Delta_O| = 10\%$ 时的 Δ_I - S_1 关系曲线
Fig. 7 Δ_I - S_1 relation curves for $|\Delta_O| = 10\%$

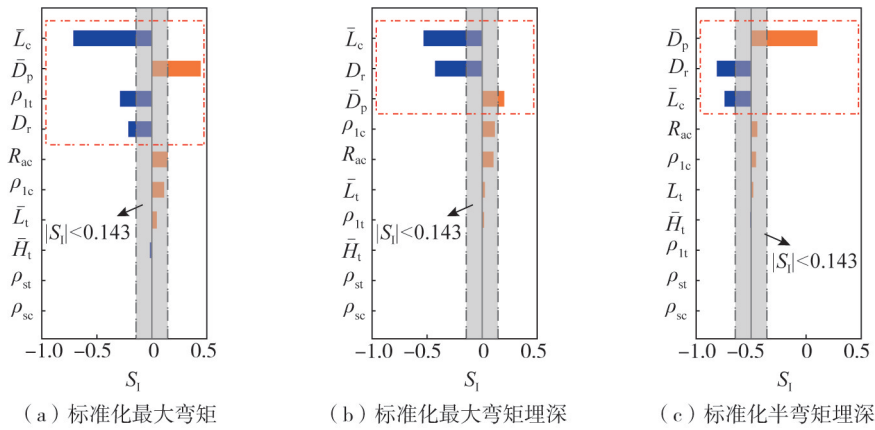


图 8 桩身弯矩需求参数敏感性分析结果

Fig. 8 Sensitivity analysis results of parameters for pile bending moment demand

进一步通过分析敏感性指标 S_i 的正负,研究敏感参数对桩身地震需求的影响。随着标准化墩高 \bar{L}_c 的增大以及标准化桩径 \bar{D}_p 的减小,导致结构整体刚度变小,从而导致桩身弯矩需求 $\bar{M}_{p,max}$ 有所降低,所需土抗力减小,故而最大弯矩埋深减小,即 \bar{H}_p 和 \bar{L}_p 均有所减小。砂土相对密实度 D_r 越大,相同位移下土抗力越大,最大弯矩埋深变浅,最大弯矩更接近墩底弯矩,即 $\bar{M}_{p,max}$ 降低。

此外,系梁刚度并不是影响桩身弯矩分布的敏感参数,这一点从 \bar{L}_t 和 \bar{H}_t 的 $|S_i|$ 均显著小于 0.143 可以看出。系梁强度 ρ_{1t} 对 $\bar{M}_{p,max}$ 有减小作用,但是对于 \bar{H}_p 和 \bar{L}_p 的影响则并不显著,系梁作为分担桩身弯矩的安全储备构件,主要是使桩身弯矩水平整体减小,并不会影响最大弯矩埋深。不同系梁配筋率桩柱式框架墩在 Chi-Chi 地震动下的桩身标准化弯矩分布曲线见图 9,可见增加系梁配筋率会减小桩身弯矩,但不会改变最大弯矩埋深。

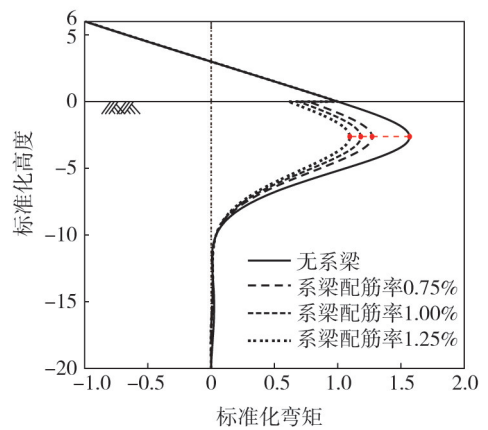


图 9 Chi-Chi 地震动下不同系梁配筋率桩柱标准化弯矩分布图

Fig. 9 Standardized bending moment distribution of pile-shaft with different tie beam reinforcement ratio under Chi-Chi ground motion

5 结论

本文基于土-桩-结构一体化模型,研究了不同地震动强度下砂土地带土面系梁桩柱式框架墩弯矩分布发展规律。提出了敏感参数界定标准,基于龙卷风图法,探明了砂土地按能力保护设计的桩柱式墩桥梁桩身地震需求的高、低敏感性参数,得出如下结论:

1) 通过增量动力分析,揭示了地震下典型带土面系梁桩柱式框架墩的震损模式,系梁首先屈服,随后桥墩墩顶、墩底先后屈服,在系梁和桥墩均屈服后,地震动强度的增长对桩身弯矩需求影响较小。

2) 土面系梁对于墩身的弯矩分布几乎没有影响,主要是对桩身弯矩起分担作用,从而有效减小桩身弯矩需求,但对最大弯矩埋深无影响。

3) 系梁配筋率是影响桩身弯矩需求的敏感参数之一,配筋率越大,系梁分担弯矩能力越强,桩身标准化弯矩需求越小;而系梁长度和截面高度是低敏感性参数。换言之,系梁强度对桩身弯矩有显著影响,但系梁刚度的影响很小。

4) 除系梁配筋率外,标准化墩高、标准化桩径和砂土密实度是影响桩身地震需求的另外 3 个高敏感参数。随着标准化墩高的增大以及标准化桩径的减小,结构整体刚度变小,桩身弯矩响应有所降低,最大弯矩埋深点抬升;砂土相对密实度越大,最大弯矩埋深变浅,最大弯矩更接近墩底弯矩,桩身弯矩需求也有所降低,以上参数是实际工程中对地震作用下桩柱式框架墩桩身能力保护设计的关键研究参数。

以上结论限于均一砂土地桩柱式框架墩在远场地震下的桩身弯矩需求分析,对于黏性土地、分层砂土地以及近场脉冲地震下的情况,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
CJJ 166—2011 Code for seismic design of urban bridges[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [2] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
JTG/T 2231-01—2020 Specifications for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [3] 张洁, 管仲国, 李建中. 双层高架桥梁框架墩抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 120-128.
ZHANG Jie, GUAN Zhongguo, LI Jianzhong. Experimental research on seismic performance of frame piers of double-deck viaducts[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 120-128. (in Chinese)
- [4] 陈敬一, 杜修力, 韩强, 等. 摇摆双层桥梁地震反应及抗倒塌能力分析[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 56-69.
CHEN Jingyi, DU Xiuli, HAN Qiang, et al. Analysis of seismic response and overturning resistance of rocking double-deck bridge system[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 56-69. (in Chinese)
- [5] 吴宜峰, 李爱群, 王浩, 等. 钢筋混凝土双柱墩滞回性能数值模拟与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(4): 776-781.
WU Yifeng, LI Aiqun, WANG Hao, et al. Numerical simulation and analysis of hysteretic behavior of RC two-columned piers[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(4): 776-781. (in Chinese)
- [6] 龙佩恒, 张广达, 焦驰宇, 等. 连续梁桥双柱墩抗震性能影响参数分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(5): 130-136.
LONG Peiheng, ZHANG Guangda, JIAO Chiyu, et al. Influencing parameter analysis of the seismic behavior of two-columned piers of continuous girder bridges[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(5): 130-136. (in Chinese)
- [7] PADGETT J E, DESROCHES R. Sensitivity of seismic response and fragility to parameter uncertainty[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(12): 1710-1718.
- [8] WANG X W, YE A J, JI B H. Fragility-based sensitivity analysis on the seismic performance of pile-group-supported bridges in liquefiable ground undergoing scour potentials[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109427.
- [9] ZHOU L X, BARBATO M, YE A J. Pile group effect modeling and parametric sensitivity analysis of scoured pile group bridge foundations in sandy soils under lateral loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28(8): 04023046.
- [10] 梁永朵, 孙治国, 王东升, 等. 高强钢筋高强混凝土土墩等效塑性铰长度分析[J]. 混凝土, 2011(9): 49-52.
LIANG Yongduo, SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, et al. Analysis of equivalent plastic hinge length of high-strength reinforced high-strength concrete pier[J]. Concrete, 2011(9): 49-52. (in Chinese)
- [11] 刘腾飞, 叶爱君, 王晓伟. 土体约束对桩柱式桥墩塑性铰长度的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1490-1496.
LIU Tengfei, YE Aijun, WANG Xiaowei. Confinement effect of soil on plastic hinge length in extended pile-shafts[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1490-1496. (in Chinese)
- [12] 王晓伟, 叶爱君, 罗富元. 液化场地桩柱式基础桥梁结构地震反应的敏感性分析[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 132-140.
WANG Xiaowei, YE Aijun, LUO Fuyuan. Seismic response sensitivity analysis of pile supported bridge structures in liquefiable ground[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 132-140. (in Chinese)
- [13] 宋帅, 钱永久, 钱聪. 桥梁地震需求中随机参数的重要性分析方法研究[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 106-114.
SONG Shuai, QIAN Yongjiu, QIAN Cong. Research on methods for importance analysis of random parameter in bridge seismic demand[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 106-114. (in Chinese)
- [14] 王晓伟, 钱晋, 叶爱君, 等. 砂土地桩柱式墩桥梁桩身地震需求简化计算方法[J]. 工程力学, 2024, 41(12): 150-157.
WANG Xiaowei, QIAN Jin, YE Aijun, et al. Simplified seismic demand prediction method for extended pile-shafts in cohesionless soils[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(12): 150-157. (in Chinese)
- [15] MCKENNA F. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation[J]. Computing in Science & Engineering, 2011, 13(4): 58-66.
- [16] FILIPPOU F C, POPOV E P, BERTERO V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints[M]. Berkeley, Calif.: Earthquake Engineering Research Center, University of California; Springfield, Va.: National Technical Information Service, U.S. Dept. of Commerce, 1983.
- [17] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [18] ZHANG Y Y, CONTE J P, YANG Z H, et al. Two-dimensional nonlinear earthquake response analysis of a bridge-foundation-ground system[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(2): 343-386.
- [19] 赫中营, 叶爱君. 力法非线性梁柱单元的合理单元长度划分[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 178-184, 198.
HE Zhongying, YE Aijun. Reasonable discrete element length of force-based nonlinear beam-column elements[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 178-184, 198. (in Chinese)
- [20] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API. Geotechnical and foundation design considerations[S]. Washington D.C.: American Petroleum Institute, 2011.
- [21] MOSHER R L. Load-transfer criteria for numerical analysis of axially loaded piles in sand. Part 2. Load pile capacity curves for steel and concrete piles[R]. Vicksburg, MS: Army Engineer Waterways Experiment Station, 1984.
- [22] MEYERHOF GEORGE GEOFFREY. Bearing capacity and settlement of pile foundations[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(3): 197-228.
- [23] BAKER J W, LIN T, SHAHI S K, et al. New ground motion selection procedures and selected motions for the peer transportation research program[R]. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2011.
- [24] AHMED B F, DASGUPTA K. Seismic limit states for reinforced concrete bridge pile in sand[J]. Structures, 2021, 33: 128-140.