 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11440

Seismic Hydrodynamic Effects and Response Characteristics Analysis of Deep-Water Bridge Piers Considering Pile-Soil Interaction

Zhiqing Jin

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract

To investigate the influence of pile-soil interaction on the seismic dynamic response characteristics of deep-water bridge piers, this study established a refined numerical model of deep-water bridge piers considering pile-soil interaction using ADINA software, based on the Mohr-Coulomb constitutive model and the ideal potential fluid theory. The influence laws of factors such as site conditions, water depth, and seismic intensity on the dynamic response characteristics were systematically analyzed. The results show that after considering pile-soil interaction, the pier-top displacement, pier-bottom bending moment, and shear force all increase with increasing water depth and seismic intensity, with shear force exhibiting the largest increase. Site conditions play a key controlling role in the seismic response of deep-water bridge piers, and neglecting pile-soil interaction would underestimate the structural response, with the deviation being more significant in soft soil sites.

Keywords

deep-water bridge; pile-soil interaction; seismic response; site condition

考虑桩土相互作用的深水桥墩地震动力响应特性分析

靳志强

重庆交通大学土木工程学院，中国 · 重庆 400074

摘　要

为研究桩土相互作用对深水桥墩地震动力响应特性的影响，本研究基于Mohr-Coulomb本构模型与理想势流体理论，采用ADINA软件建立了考虑桩土相互作用的深水桥墩精细化数值模型，系统分析了场地条件、水深及地震强度等因素对动力响应特性的影响规律。结果表明：考虑桩土相互作用后，墩顶位移、墩底弯矩及剪力均随水深和地震强度增大而增大，其中剪力增幅最大；场地条件对深水桥墩地震响应起关键控制作用，忽略桩土相互作用会低估结构响应，尤其在软土场地偏差更为显著。

关键词

深水桥梁；桩土相互作用；地震响应；场地条件

1 引言

桥墩作为核心承重构件，深水地震引发的动水效应会加剧结构响应与损伤风险，亟需研究其动力特性。现有研究主要采用解析、实验和数值模拟方法。Westergaard[1] 率先提出将动水压力转化为附加质量的分析方法。在此基础上，林曾等 [2] 利用 Morison 附加质量法揭示了动水压力对墩身弯矩和剪力的影响；梁发云等 [3] 通过离心振动台试验证实了附加质量法模拟地震动水效应的有效性；Wei 等 [4] 基于三维势流体单元验证了该方法在桩 - 水系统中的适用性。然而，上述研究均未考虑桩土相互作用。陈宇等 [5] 引入动力松弛技术建立数值模型并结合离心机试验，发现硬土场地动水效应显著而软弱土场地影响较小。Zhang 等 [6] 在 OpenSEES 平台中同时考虑桩土相互作用与动水压力，指出桩 - 水相互作用对桥墩易损性影响轻微，但硬土场地中的群桩基础更易发生损伤。

然而，既有工作尚未系统揭示场地条件、水深、地震强度及频谱特性等多因素耦合下的动力响应演化规律。因此，开展多因素深水桥梁地震响应分析，对完善深水桥梁抗震设计理论具有必要价值。

【基金项目】国家重点研发计划资助（项目编号：2023YFB2604400）；桥梁工程结构动力学国家重点实验室暨桥梁结构抗震技术交通行业重点实验室开放课题。

【作者简介】靳志强（2001–），男，中国河南安阳人，硕士，从事土木工程研究。

2 基于 ADINA 考虑桩土耦合的桥墩模型

2.1 桩土耦合的处理方法

深水桥梁地震响应分析中，桩 – 土耦合作用复杂。本文基于有限元软件 ADINA 建立深水桥梁精细化计算模型，土体本构采用 Mohr-Coulomb 模型 [7]，桩 – 土接触界面通过界面接触算法 [8] 模拟。该模型可有效反映土体在荷载作用下的非线性变形特性，更贴合土体实际受力状态，有效表征土体受剪过程中的屈服变化规律。在构建数值模型时，选取桩体表面作为主接触面，土体表面为从接触面。桩体结构假定为线弹性 [9]，桩土接触面的力学行为遵循库仑摩擦定律。

2.2 深水桥墩有限元模型

以深水空心矩形桥墩为对象，建立了精细化有限元模型。桥墩高 50 m，截面为 6 m × 3.6 m 空心矩形，壁厚 0.5 m，最大水深 40 m。为反映上部结构惯性效应，在墩顶施加了等效单跨梁附加质量。

桥墩采用 C40 混凝土（密度 2500 kg/m³，弹性模量 32.5 GPa，泊松比 0.2）。水体视为可压缩理想流体（密度 1000 kg/m³，体积模量 2.2 GPa），计算域取桥墩截面特征尺寸的 10 倍 [4]，底部固壁、四周无限远透射边界、顶面自由液面。墩 - 水界面设流固耦合约束，墩底全固结。

承台下设 9 根直径 1.8 m 桩基，承台尺寸 12 m × 12 m × 3 m。土体取单桩直径 20 倍范围，外侧及底部固定约束。桩 - 土界面以桩表面为主接触面、土体为从接触面，摩擦系数 0.2。地基按均质细砂考虑，密度 1950 kg/m³，内摩擦角 34°，黏聚力 3.0 kPa，泊松比 0.31，变形模量 47.3 MPa。桩基采用 C30 混凝土（密度 2500 kg/m³，弹性模量 30 GPa），承台与桥墩为 C40 混凝土。桥墩、承台、桩基及土体均采用三维实体单元离散，水域选用理想势流体单元 [7]，墩 - 水界面始终启用流固耦合约束。

数值模型引入桩土相互作用后，土体自重应力将导致桩基产生初始沉降。直接开展地震动力计算而未消除该沉降引起的应力偏差，会扭曲结构动力响应，影响分析精度。因此，动力求解前先进行静力分析，获取场地天然初始地应力场，并将其导入动力分析模块作为初始应力基底 [10]。以此抵消土体自重沉降效应，校正基础初始变形状态，确保地震响应计算建立在合理的初始应力状态之上。

3 地震动力响应分析

本节参照《水运工程抗震设计规范》[11]，选用加速度峰值作为量化地震烈度的核心指标。数值分析设定固定计算工况，桥墩最大入水深度取 40m，地基简化为单层均质细砂层，以此构建单一可控的基础分析条件。依据现行规范反应谱匹配原则，从 PEER 强震数据库中选取典型天然强震 Loma Prieta 波作为模型地震时程激励荷载。研究采用单向地震激励模式，仅沿模型整体 X 轴向施加地震动作用，动力时程计算总时长设定为 40 秒。在此基础上，将 Loma Prieta 波峰值加速度调至 0.05g、0.1g 和 0.2g，阻尼比为 5%，系统探究激励幅值对深水桥墩动力响应的影响。

3.1 地震强度对桥墩动力响应的影响

从图 1 中看出，在 Loma Prieta 地震波作用下，桥墩与群桩的弯矩整体呈现自桩顶向桩底递减的规律。随 PGA 从 0.05g 增至 0.2g，桩顶弯矩由 17.32 MN · m 升至 69.60 MN · m，桩底弯矩仅从 1.76 MN · m 升至 6.45 MN · m，深层桩身内力增幅远小于浅层。其机理在于，埋深越大，土体约束刚度越高，桩土之间形成稳定的耦合体系，阻尼耗能效应可大幅抵消地震惯性力，从而显著抑制了深层弯矩的增长。这表明，群桩基础的地震损伤控制性截面位于桩顶区域。

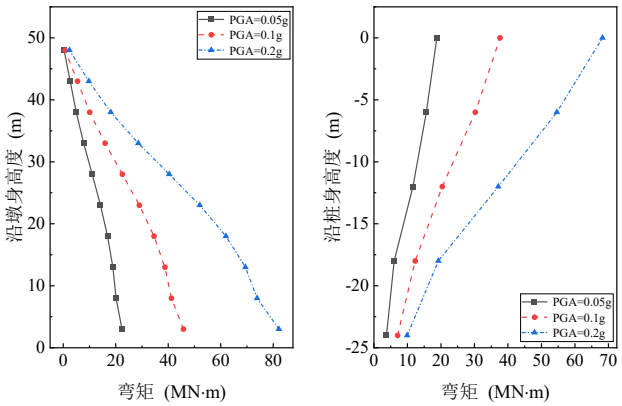


图 1 不同强度地震作用下桥墩和桩弯矩包络图

随地震强度提高，墩顶位移显著增大但增速逐渐放缓，其中 Loma Prieta 波引起的位移响应更为突出。弯矩分布上，墩身弯矩自顶向底递增，极值位于墩底。桩身弯矩则自桩顶向下递减，峰值集中于桩顶。水下区段因动水附加作用，弯矩增幅明显高于水上区段。桩底内力增幅整体偏小，源于深层土体的紧密嵌固与阻尼耗能有效抑制了地震惯性力。

3.2 不同土质对桥墩动力响应的影响

深水桥梁多建于土质差异显著的沿岸场地，地震下的桩土耦合效应会显著改变桥墩的内力与变形。基于《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）[12] 相关条文要求，并参考已有文献 [5] 的取值方法完成参数选定。选定了剪切波速分别为 139 m/s、210 m/s 和 286 m/s 的三种刚度场地，在 PGA 统一取 0.2g 条件下，系统分析了不同水深与土质条件对深水桩基桥墩动力响应的影响。三类土质对应的详细物理力学参数汇总于表 2。

在 0.2g Loma Prieta 地震波激励下，中粗砂、细砂、软黏土三种场地中桥墩墩顶位移依次为 90 mm、120 mm、237 mm。墩底弯矩分别为 51.78 MN · m、63.32 MN · m、83.01 MN · m；桩身中部弯矩分别为 5.78 MN · m、13.42 MN · m、27.63 MN · m。可见土体强度越高，桩 - 土约束刚度越大，嵌固效应可有效限制墩顶变形并平衡地震惯性力，从而显著降低结构动力响应。该规律不受地震波形与水深变化的影响，动水附加作用并未改变土质条件对桩基桥墩动力响应的主控地位。

表 2 土层参数

序号	土层名称	密度/（kg/m³）	内摩擦角 ψ/(°)	黏聚力 c/kpa	泊松比	变形模量/MPa
1	软黏土	1780	15	16.3	0.35	4.07
2	细砂	1950	34	3.0	0.31	47.3
3	中粗砂	2050	36	5.0	0.28	216

表 3 地震作用下结构动力响应最大值

地震波	水深（m）	墩顶位移（mm）			墩底弯矩（MN•m）			桩中弯矩（MN•m）		
		中粗砂	细砂	软黏土	中粗砂	细砂	软黏土	中粗砂	细砂	软黏土
Loma Prieta	0	90	120	237	51.78	63.32	83.01	5.78	13.42	27.63
	10	95	128	247	54.79	64.44	83.84	6.12	13.99	28.57
	20	99	135	251	61.07	67.53	88.29	6.31	14.36	29.07
	30	112	138	257	75.19	74.50	91.68	6.84	15.61	29.61
	40	123	142	260	89.15	83.40	91.89	7.81	17.04	30.92

为了更直观的对比桥墩在有水环境和无水环境下动力响应的区别，引入无量纲参数 R 来表示动水压力对于深水桥墩在地震作用下动力响应增大的程度[13]，具体表示为：

$$R=\frac{S_{有水}-S_{无水}}{S_{有水}}\times 100\%$$

式中，$S_{有水}$表示桥墩有水时某一地震响应值，$S_{无水}$表示桥墩无水时某一地震响应值。因此，桥墩墩顶位移的增长率可以表示为 R_D。同理，R_{DM} 可以表示墩顶弯矩的增长率，R_{ZM} 表示桩中弯矩增长率。

图 2 为桩基深水桥墩在 PGA 为 0.2g 的 Loma Prieta 地震波作用下计算得到的动力响应增长率。对比不同工况可知，水深相同时，场地土越硬，结构地震响应随水深增加的增长率越大；桩身中部弯矩增幅整体小于墩底，源于桩周土阻尼耗能对内力增长的抑制。软黏土场地各项动力响应增长率均低于 12%，动水效应放大不明显，表明软弱土体突出的黏滞阻尼与塑性耗能可有效耗散地震及动水附加能量。为此，深水桩基桥墩抗震设计应重视硬土场地的动水附加内力增长，并可合理利用软土场地的阻尼耗能机制以降低地震响应。

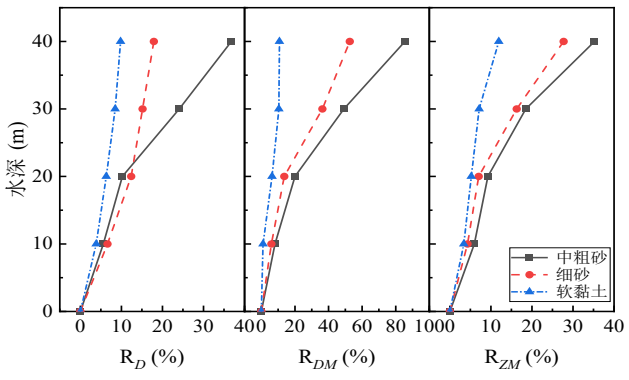


图 2 0.2g 的 Loma Prieta 地震作用结构地震响应增幅

4 结论

本文建立了考虑桩土耦合作用的深水桥墩有限元模型，系统分析了水深、地震强度与场地土质条件对桥墩地震响应特性的影响分析。主要结论如下：

（1）地震强度增大时，桥墩内力同步上升，但墩顶位移增幅逐步放缓，表明桩土体系阻尼耗能随强度提升而增强；水下区段动水压力使内力增幅明显高于水上区段，桩身下部则因桩土阻尼作用而响应增幅较小。

（2）土体强度越高，桥墩地震响应越小。水深增加时，硬土场地响应增幅更显著，动水效应突出，软弱场地桩土耦合体系阻尼效应更强，可有效弱化动水压力对结构响应的干扰。

（3）忽略桩土相互作用会低估墩顶位移、墩底弯矩与剪力，软弱场地中偏差尤为突出，即使硬土场地，其对高阶模态及动水压力分布的影响仍不可忽略。因此，深水桥梁地震响应分析必须根据实际场地条件合理计入桩土相互作用效应。

参考文献

[1] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Transactions of the American society of Civil Engineers, 1933, 98(2): 418-433.

[2] 林曾, 章勇, 袁万城, 等. 深水多塔斜拉桥地震动水效应分析[J]. 结构工程师, 2016, 32(01): 77-84.

[3] 梁发云,袁周驰,梁轩.深水桥墩地震响应离心振动台试验及数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(07): 93-104.

[4] Wei K, Yuan W C. Seismic analysis of deep water pile foundation based on three-dimensional potential based fluid elements[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 3:1-10.

[5] 陈宇, 吴佳梁, 吴堃, 等. 考虑桩土相互作用的深水桥墩地震响应分析[J/OL]. 工程力学: 1-10[2024-04-02].

[6] Zhang C, Wu C, Wang P, et al. Seismic Fragility Analysis of Bridge Group Pile Foundations Considering Fluid-pile-soil Interaction[J]. Shock and Vibration, 2020: 8838813.

[7] Laursen T A, Simo J C. A continuum - based finite element formulation for the implicit solution of multibody, large deformation - frictional contact problems[J]. International Journal for numerical methods in engineering, 1993, 36(20): 3451-3485.

[8] Desai C S, Zaman M M, Lightner J G, et al. Thin - layer element for interfaces and joints[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 19-43.

[9] Timurağaoğlu M, Fahjan Y, Doğangün A. Numerical investigation on p–y method of group piles under static and dynamic loads[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 20(13): 7381-7416.

[10] Boulanger R W, Curras C J, Kutter B L, et al. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1999, 125(9): 750-759.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程抗震设计规范：JTS 146-2012[S]. 北京：人民交通出版社， 2012.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局。建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[13] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1974, 3(1): 33-49.