

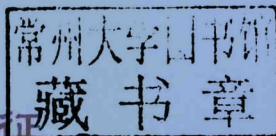
第27届
全国结构工程学术会议
论文集

第II册

PROCEEDINGS OF THE 27TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. II

主编：陆新征



《工程力学》杂志社

2018.9

CSTAM2018-P62

郑重声明

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版论文集，属内部学术交流资料。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及有关部門随时查阅、检索和引用，论文组织委员会每届均作如下的承诺和声明：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 为了扩大学术交流，会议论文集被中国有关信息部门及学术期刊光盘版收录。
3. 会议严格执行文责自负的原则。关于涉及保密问题及有关抄袭等学术不端行为，均由作者本人负责。

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在长沙度过了它 26 岁生日后，今年在陕西西安召开第 27 届全国结构工程学术会议。

陕西是华夏文明的重要发源地，关中平原孕育了周、秦、汉、唐等多个重要朝代，深远的影响了中国乃至世界的政治和文化。进入近代后，以延安为代表，陕西又成为中国抗日战争时期和新民主主义革命时期的重要政治中心。

西安是世界知名的文化古都，是中国最重要的历史古城之一。西安见证了中国古代史中最辉煌的年代，被无数脍炙人口的乐府、唐诗歌咏。近代以来，西安作为整个西部地区重要政治、经济、文化、科教中心，是中国重点高等院校和科研院所最为集中的城市之一。

今年会议的东道主西安建筑科技大学办学历史最早可追溯到始建于 1895 年的北洋大学，1956 年全国第三次高等学校院系调整时，学校由原东北工学院、西北工学院、青岛工学院和苏南工业专科学校的建筑、土木、市政类系（科）合并而成，时名西安建筑工程学院。1959 年和 1963 年，先后易名为西安冶金学院、西安冶金建筑学院。1994 年更名为西安建筑科技大学。西安建筑科技大学是我国著名的土木、建筑“老八校”之一，原冶金工业部直属重点大学。在土木建筑、环境市政、材料冶金等领域取得了众多研究成果，培养了一大批优秀人才，为我国工程建设和科技发展做出了重要贡献，2016 年 11 月工程学进入 ESI 全球排名前 1%。

在中国力学学会结构工程专业委员会、西安建筑科技大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 180 篇，分装为 2 卷，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰硕的收获。

论文集主编 陆新征



2018 年 9 月

第 27 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 180 篇，共计 1192 页，分装成 2 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册只载本册目录。

第 I 册论文 82 篇（共 592），包括特邀报告和三个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 钢筋混凝土结构、材料与构件；3. 钢结构、材料与构件；4. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

第 II 册论文 98 篇（共 600 页），包括三个学科类别：5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工；7. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；8. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他。

第 27 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 II 册目录

5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

| | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| P 波垂直入射下海域岛礁场地动力反应分析 | 宝 鑫 刘晶波 王东洋 王建平 郭 东 宋 可 (001) |
| 黄土场地桩基横向力学行为数值模拟 | 程麦理 (008) |
| 吹填岛礁地基稳定性问题研究综述 | 黄 云 胡其高 张硕云 (012) |
| 基于数值分析的仓扶式挡墙内力分布规律研究 | 梁 波 张青松 赵宁雨 厉彦君 凌学鹏 (017) |
| 隧道纵向地震反应最不利时刻的确定及其应用 | 刘晶波 王东洋 谭 辉 宝 鑫 (024) |
| 高放废物地质处置切缝药包定向爆破技术研究 | 满 轲 刘晓丽 王 驹 岳中文 王锡勇 许 鹏 (032) |
| 关于三轴六自由度液压振动台指标的讨论 | 牛宝良 (042) |
| 土-地下结构相互作用体系地震反应分析中阻尼模型探讨 | 潘凯星 陈清军 (052) |
| 盾构下穿铁路碎石道床沉降规律及施工参数控制..... | 彭 华 杨志蔚 曹 全 马文辉 (057) |
| 考虑瓦斯影响的煤层平动突出计算 | 祁 航 张常光 蔡明明 (065) |
| 新建地铁对接既有线微扰动控制研究进展 | 钱浩勇 汪庆桃 钱秋冬 (071) |
| 复理石顺层边坡最危险岩层倾角及简化的单层面模型..... | 邱天琦 杨 军 吴志轩 沈兆普 梁宇钊 (077) |
| 复杂地下综合体结构地震反应分析 | 沈夏鸣 陈清军 (084) |
| 基于能量原理和材料结构状态集合函数的统一流变本构方程研究..... | 卫振海 刘恩龙 (089) |
| 深部岩体爆破开挖破坏的数值流形法研究 | 杨石扣 任旭华 张继勋 (101) |
| 预应力混凝土管桩与承台连接节点抗震性能研究..... | 杨志坚 韩嘉明 雷岳强 赵海龙 胡嘉飞 (109) |
| 双参数地基上自由板动力特性解析计算与讨论 | 张望喜 王 雄 曹亚栋 (116) |
| 塑料排水板对吹填地基加固效果影响机制的分析..... | 赵相超 邱永明 戚惠峰 (129) |

6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

| | |
|--------------------------|-----------------------|
| 风攻角对钝体箱梁气动特性的影响 | 陈 帅 路起凡 刘小兵 (133) |
| 可动荷载下斜交框架地道桥空间受力分析 | 范香艳 李青宁 王 剑 王小丹 (137) |

| | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 高拱坝在谷幅收缩作用下的应力应变响应分析 | 高克静 赵文光 王仁坤 张建海 (142) |
| 锈蚀钢筋混凝土桥墩加固性能研究 | 郭 悬 陈 伟 张 琛 (148) |
| 复式防波堤断面尺度对波浪爬高的影响研究 | 韩新宇 罗 鑫 董 胜 (153) |
| FPS 支座双向加载拟静力试验与数值模拟研究 | 焦驰宇 马银强 刘陆宇 龙佩恒 侯苏伟 (161) |
| 索道桥的主索布置方案研究 | 景天虎 王 鑫 刘均利 莫时旭 (171) |
| 凹痕对斜拉桥斜拉索气动性能影响研究 | 刘庆宽 孙一飞 张磊杰 胡波 马文勇 刘小兵 (176) |
| 风攻角对扁平箱梁气动特性的影响 | 路起凡 陈 帅 刘小兵 (181) |
| 大跨度高低塔斜拉桥纵向减震研究 | 吕 龙 薛小强 (185) |
| 卸载程度对钢桁梁桥主桁构件加固效果的影响 | |
| | 苏庆田 薛智波 王思哲 张春雷 王 倩 陈 亮 (189) |
| 结构损伤识别频率权值叠加曲率模态改变率方法..... | 唐盛华 苏彬建 楚加庆 简 余 (197) |
| 钢桥面板工地接头的疲劳性能研究 | 王 辉 燕 飞 曾志斌 (206) |
| 波浪对悬空板冲击作用的数值模拟研究 | 王 钰 纪巧玲 刘庆凯 (213) |
| 基于统一理论的钢管混凝土系杆拱桥施工控制 | 王成波 宋郁民 (217) |
| 基于 p-y 曲线法的高桩码头全结构段和单排架模型对比研究 | 王浩天 董 胜 (223) |
| 考虑局部土壤特性的城市曲线立交桥梁地震响应..... | 王天利 李青宁 韩雷雷 (232) |
| 下穿陇海线地道桥顶进施工架空体系刚度分析 | 王小丹 李青宁 王 剑 范香艳 (238) |
| 规则波作用下导桩锚泊的浮防波堤水动力特性的数值模拟..... | 王 钰 纪巧玲 刘庆凯 (242) |
| 基于机器视觉的隧道结构物壁面缺陷检测装置试验研究..... | |
| | 武 鑫 秦 丰 魏少华 史明辉 康妮萍 尹冠生 (246) |
| 带防撞梁的钢桥上部结构防超高车辆撞击实验研究..... | 徐 丹 王 涛 FERNANDO Mereu (254) |
| 并列双钝体箱梁间距对涡激共振特性的影响 | 杨 群 张胜斌 刘小兵 刘庆宽 (260) |
| 正交异性钢桥面板肋-面板焊缝疲劳验算的应力分析模型评估 | 杨雅斌 石广玉 (264) |
| 临界雷诺数区光滑圆柱振动与气动力研究 | 周佳豪 马文勇 黄伯城 (274) |

7. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 基于有限元模型的螺栓法兰连接结构冲击失效实验方案研究..... | 田彤辉 袁杰红 王青文 (278) |
| 船舶艏部整体隔振系统中轴承载荷增量研究 | 赵兴乾 徐 伟 帅长庚 李正民 (285) |
| 导弹头罩分离防护结构材料力学性能分析 | 周玉宁 陈 浩 李 磊 高志勇 孟献策 (290) |

8. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

| | |
|-------------------------|-------------------|
| 输电塔米字型腹杆气动力特性试验研究 | 柴晓兵 马文勇 张庆华 (294) |
|-------------------------|-------------------|

| | |
|---|-------------------------------------|
| 方形高层建筑风压分布特性 | 郭小飞 马文勇 刘庆宽 侯莉倩 (298) |
| 穿廊式坑道出入口冲击波传播规律数值模拟研究..... | 韩国振 杨 赞 (303) |
| 超高烟囱结构的流场二维数值模拟 | 韩江明 贾娅娅 刘庆宽 (308) |
| CFRP-火灾后混凝土界面快速剥离试验 | 何栋尔 肖云逸 章子华 罗 威 诸葛萍 (312) |
| 超大型冷却塔风荷载时程响应及动力抗风性能分析..... | 贾明明 李志平 吕大刚 侯宪安 郎路光 (318) |
| 基于 OpenSEES 的 PVA-FRCC 框架结构非线性动力时程分析..... | 柯 骄 苏 骏 陈 明 (326) |
| 地震作用下大跨度斜拉桥桥塔的动力响应分析 | 李 顺 楼梦麟 (333) |
| 基于和声搜索优化算法的地震动选择 | 李雁军 吕大刚 王震宇 (339) |
| 精确测量地冲击下土颗粒的运动 | 李永胜 周宏元 王小娟 张雪健 (343) |
| 三心圆柱面煤棚风荷载分布规律试验研究 | 梁朋飞 胡 波 刘庆宽 郑云飞 (347) |
| 串联双圆柱气动力的干扰效应研究 | 刘夕强 陈 帅 赵会涛 刘小兵 (352) |
| 钢管混凝土构件抗爆性能研究进展 | 卢云柯 谭清华 蒋志刚 (356) |
| 爆炸容器动态响应研究进展综述 | 钱秋冬 汪庆桃 胡玉峰 (362) |
| 医疗系统抗震韧性评估指标体系 | 尚庆学 李吉超 王 涛 (368) |
| 基于 SPH 算法的泡沫混凝土动态压缩数值研究 | 申文静 周宏元 王小娟 (374) |
| 湍流对高层建筑极值风压影响的风洞试验研究 | 苏万林 李正农 (378) |
| A 类风场与台风风场下航站楼屋盖气动性能对比..... | 孙 捷 柯世堂 (382) |
| 不同地震下的校园建筑震害与经济损失对比 | 孙楚津 程庆乐 曾 翔 许 镇 陆新征 (387) |
| 串联双方柱气动力的干扰效应研究 | 孙亚松 陈 帅 赵会涛 刘小兵 (396) |
| 基于人工边界子结构的地震波动输入方法的简化..... | 谭 辉 宝 鑫 王东洋 刘晶波 (400) |
| 碳纤维布加固砌体填充墙抗近距离小当量炸药爆炸实验研究..... | 万 军 (405) |
| 基于检测数据的钢筋材料超强对 RC 框架抗震性能评估 | 王啸威 蒋 庆 冯玉龙 李葛葛 种 迅 王瀚钦 (409) |
| 运营状态下中承式拱桥短吊杆应力幅频谱统计及疲劳分析..... | 王子豪 雷家艳 何文朋 施 伟 (416) |
| 接触爆炸作用下钢筋混凝土单向板动态响应的数值分析..... | 吴志昇 宋殿义 严 波 谭清华 (425) |
| CFRP-火灾后混凝土界面快速剥离模拟 | 肖云逸 何栋尔 章子华 罗 威 诸葛萍 (435) |
| 拔榫状态下直榫节点滞回性能有限元分析 | 谢启芳 张利朋 王 龙 崔雅珍 杨柳杰 (440) |
| 天然气泄漏爆炸冲击同沟并行邻管的模拟方法 | 徐涛龙 梁 博文 霞 姚安林 李又绿 蒋宏业 (447) |
| 接触爆炸作用下钢筋砼箱梁动态响应过程数值模拟..... | 杨 赞 韩国振 (458) |
| 阶跃荷载下钢管混凝土拱的非线性动力屈曲 | 杨智诚 刘爱荣 傅继阳 (466) |
| 环境激励下基于 ARMA 时间序列模型的损伤识别..... | 张 焯 李东升 李庆洲 (470) |
| 基于恢复力的大跨度屋盖结构等效静力风荷载 | 张建国 庄佳坤 (476) |

| | |
|----------------------------------|---------------------------|
| 土坡地震响应数值模拟中最优边界范围选取 | 张江伟 李小军 曹静杰 迟明杰 王玉石 (480) |
| 基于损伤的单层球面网壳结构地震剩余承载力评估与优化研究..... | 张天龙 丁 阳 李忠献 (490) |
| 表板厚度对爆炸荷载作用下轻质挂板能量吸收的影响..... | 张雪健 周宏元 王小娟 李永胜 (500) |
| 新型含能弹入水冲击特性的数值模拟研究 | 赵 阳 袁端才 崔伟峰 董良龙 (504) |
| 基于减震比设计方法的惯容减震结构分析 | 赵志鹏 张瑞甫 陈清军 潘 超 王 超 (510) |
| 斜向风下方柱气动力特性的试验研究 | 郑 熙 马文勇 邓然然 (515) |
| 全装配式混凝土结构抗连续倒塌动载试验数值模拟..... | 周 云 胡 翔 裴熠麟 陈太平 易伟建 (520) |
| 考虑中尺度台风影响下大型航站楼屋面风压特性研究..... | 朱容宽 柯世堂 (526) |
| 铝合金刻槽靶板冲塞机理的数值模拟 | 邹 浩 蒋志刚 刘 飞 (531) |
| 大长宽比建筑风荷载特性及结构优化研究 | 左太辉 李庆祥 黄啟明 (536) |

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

| | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Al/Ta、Al/W 复合材料拉伸性能研究 | 董良龙 阳世清 袁端才 林庆章 李俊杰 (543) |
| 风-沙环境下考虑叶片停机位置大型风力机塔架气动力与受力性能分析 | 董依帆 柯世堂 (549) |
| 掺陶瓷粉混凝土碳化性能试验研究 | 方 菁 陈梦成 杨 超 许开成 (554) |
| 我国风电发展现状及前景 | 高 超 贾娅娅 刘庆宽 (558) |
| 昆山市某片区排水管网水流数值计算及分析 | 韩 凯 茅泽育 丁法龙 (563) |
| PVA 纤维增强混凝土的发展现状及工程应用 | 胡 强 苏 骏 (568) |
| 工业回收钢纤维混凝土抗剪和劈拉性能试验研究..... | 姜麒任 李 妍 方 权 (576) |
| 圆形断面管道非满流水力特性研究 | 茅泽育 丁法龙 韩 凯 罗 佳 (582) |
| 工业回收钢纤维混凝土抗折性能试验研究 | 陈 庚 李 妍 林朝东 (587) |
| 台风下考虑中-小尺度耦合的大型风力机气动力与结构响应研究 | 余文林 柯世堂 (592) |
| 寒区水库垂向水温分布及冰盖生消机理研究 | 茅泽育 丁法龙 韩 凯 郑乾坤 (597) |

P 波垂直入射下海域岛礁场地动力反应分析

*宝 鑫, 刘晶波¹, 王东洋¹, 王建平², 郭 东², 宋 可¹

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 海军工程设计局, 北京 100070)

摘 要: 本文重点研究 P 波垂直入射时海域岛礁场地的地震反应。利用流体介质动力人工边界和一致粘弹性人工边界单元模拟无限海水介质与半无限地基的波动辐射效应, 建立了岛礁-海水系统近场有限元模型。推导了 P 波垂直入射时含上覆水层的半空间自由场位移理论解, 利用基于人工边界子结构的地震波动输入方法, 将该自由场位移转化为等效地震输入荷载, 实现了海域场地 P 波垂直输入。通过算例分析, 验证了模型与方法的准确性, 并分析海水的耦合作用与水体中的波动输入对海域场地地震反应的影响。本研究可为海域场地地震反应分析提供一定的理论指导和方法借鉴。

关键词: 海域工程场地; 地震波动输入; 压缩波; 人工边界; 有限元

近年来, 我国在海洋油气资源开发、远海岛礁建设等海洋工程建设领域不断取得重大进展, 但受环太平洋地震带影响, 海域工程面临高烈度地震等灾害风险, 一旦出现地震损坏, 将严重威胁海洋区域的经济发展和地区安全, 因而其地震安全性应予以高度重视^[1]。海域场地地震反应分析是进行海洋工程抗震设计的基础, 对于此类分析所需考虑的流-固耦合数值模拟方法^[2]、固、液相介质人工边界条件^[3-5]以及地震波动输入方法^[6-7]等方面, 国内外科研人员已开展了大量研究工作, 取得了较为丰硕的成果, 但对以上方法进行必要的发展与改进, 分析海域岛礁场地地震反应机理与规律的相关研究, 目前还较为少见。

作者在前一篇文章^[8]中, 建立了考虑流-固耦合效应的海域岛礁场地-海水系统近场有限元模型, 并分别利用流体介质动力人工边界条件和一致粘弹性人工边界单元模拟无限海水介质与半无限地基的波动辐射效应, 利用基于人工边界子结构的地震波动输入方法实现了 sv 波垂直输入。与 sv 波垂直入射时海域场地自由场模型中固、液介质不发生能量交换的情况不同, P 波垂直入射时在流-固耦合界面发生透射与反射, 波动经固体介质传入流体介质后, 将在流体介质内往复传播, 此时流体中的波动对于岛礁地震反应的影响未知并可能是显著的, 因而 P 波垂直入射时岛礁场地地震反应分析需同时考虑地震波在固体与流体介质中的输入。鉴于此, 本文推导了 P 波垂直入射时含上覆水层的半空间自由场位移时域理论解, 利用该自由场分布实现了海域场地 P 波垂直输入, 并进行相应的动力反应分析, 评价海水的耦合作用与水体中的波动输入对岛礁场地地震反应的影响。

1 模型与方法

1.1 海域岛礁场地-海水耦合系统有限元建模

建立如图 1 所示的岛礁-海水系统近场有限元模型, 其中, 固体与流体介质分别采用通用有限元软件 Ansys 的 Solid45 和 Fluid80 单元建模。分别在流体域和固体域的近场截断处添加流体介质动力人工边界条件^[5]和一致粘弹性人工边界单元^[9], 其中流体人工边界采用文献^[5]推荐的 Combin40 单元建模。流、固介

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC1402800), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(90715035), 国家自然科学基金项目(51478247)

作者简介: *宝 鑫(1992—), 男, 辽宁人, 博士研究生, 主要从事结构抗震与场地地震反应研究(E-mail: bx15@mails.tsinghua.edu.cn);

刘晶波(1956—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 主要从事结构抗震和防灾减灾研究(E-mail: liujb@mail.tsinghua.edu.cn);

王东洋(1988—), 女, 辽宁人, 博士研究生, 主要从事地下结构抗震研究(E-mail: dongyangw@126.com);

王建平(1964—), 男, 北京人, 高级工程师, 硕士, 副局长, 主要结构工程研究(E-mail: 13301159156@sina.com);

郭 东(1977—), 男, 甘肃人, 高级工程师, 博士, 主要从事结构抗爆抗震研究(E-mail: guodong_lz@163.com);

宋 可(1997—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要从事结构抗震研究(E-mail: 15311755092@163.com)。

质人工边界参数的确定原则与文献[5]、[9]一致。

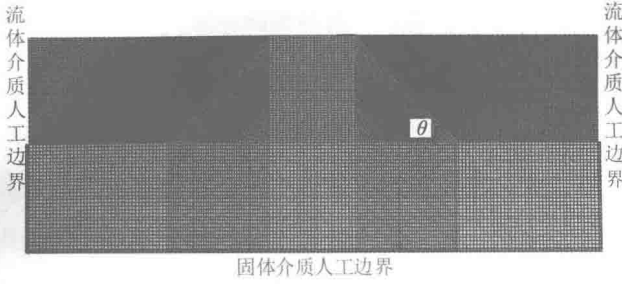


图1 岛礁-海水系统有限元模型

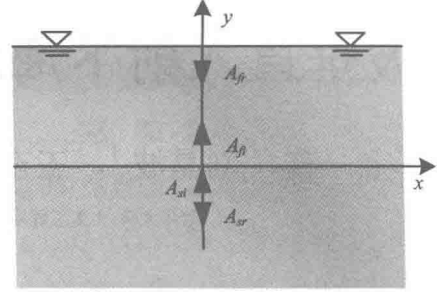


图2 含上覆水层的半空间示意图

1.2 P波垂直入射时含上覆水层的半空间自由波场

进行场地地震波动输入时,人工边界上的等效输入荷载由自由波场转化而来,因而应首先分析如图2所示的含上覆水层的半空间模型的自由场分布。固体与流体介质的波动方程如式(1)、(2)所示,其中流体介质采用无黏可压缩假设。

$$\rho_s \ddot{\mathbf{u}} = (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\rho_f \ddot{\mathbf{u}} = K_{bulk} \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (2)$$

其中 ρ_s 、 ρ_f 分别为固体与流体介质的密度, λ 、 μ 为固体介质的拉梅常数, K_{bulk} 为流体介质的体积模量。固体介质中应力应变关系满足广义虎克定律;流体动水压 p_f 与位移向量的空间散度成线性关系,即:

$$p_f = -K_{bulk} \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3)$$

P波垂直入射时,模型中固体介质的波系 $u_s(y,t)$ 由入射P波 $u_{si}(y,t)$ 和反射P波 $u_{sr}(y,t)$ 构成,流体介质的波系 $u_f(y,t)$ 由透射P波 $u_{ft}(y,t)$ 和自由液面反射P波 $u_{fr}(y,t)$ 构成。根据 Helmholtz 定理,引入位移势函数 $\phi(y,t)$,则波系中各成分的位移可表示为:

$$u_s = u_{si} + u_{sr} = \frac{\partial \phi_{si}}{\partial y} + \frac{\partial \phi_{sr}}{\partial y} \quad u_f = u_{ft} + u_{fr} = \frac{\partial \phi_{ft}}{\partial y} + \frac{\partial \phi_{fr}}{\partial y} \quad (4)$$

对于频率为 ω 的简谐入射波,稳态解的势函数可表示为^[10]:

$$\phi_{si} = A_{si} \exp \left[i\omega \left(-\frac{y}{c_p} + t \right) \right] \quad \phi_{sr} = A_{sr} \exp \left[i\omega \left(\frac{y}{c_p} + t \right) \right] \quad \phi_{ft} = A_{ft} \exp \left[i\omega \left(-\frac{y}{c_f} + t \right) \right] \quad \phi_{fr} = A_{fr} \exp \left[i\omega \left(\frac{y}{c_f} + t \right) \right] \quad (5)$$

其中 c_p 、 c_f 分别为固体介质和流体介质中的P波波速, $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho_s}$, $c_f = \sqrt{K_{bulk} / \rho_f}$, A_{si} 和 A_{sr} 为固体介质中入射波和反射波的势函数幅值, A_{ft} 和 A_{fr} 为流体介质中透射波和自由液面反射波的势函数幅值。

在流固耦合界面处 ($y=0$), 满足法向位移连续和法向应力平衡条件, 即:

$$u_s(y,t) \Big|_{y=0} = u_f(y,t) \Big|_{y=0} \quad (6)$$

$$\sigma_y(y,t) \Big|_{y=0} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_s(y,t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = p_f(y,t) \Big|_{y=0} \quad (7)$$

在自由液面处 ($y=H$) 压强为0:

$$p_f(y,t) \Big|_{y=H} = 0 \quad (8)$$

将式(3)(4)(5)分别代入式(6)(7)(8), 并联立方程组, 得到:

$$\begin{cases} A_{sr} = A_{si} \cdot (Z_f - Z_s) / (Z_f + Z_s) \\ A_{ft} = A_{si} \cdot 2c_f \rho_s / (Z_f + Z_s) \\ A_{fr} = A_{si} \cdot [-2c_f \rho_s \exp(-2i\omega H/c_f)] / (Z_f + Z_s) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $Z_f = c_f \rho_f [1 - \exp(-2i\omega H/c_f)]$; $Z_s = c_p \rho_s [1 + \exp(-2i\omega H/c_f)]$ 。

将式(5)、(9)代入式(4), 并做 Fourier 变换, 得到波场频域解:

$$U_s(y, \omega) = \frac{i\omega}{c_p} \left[-A_{si} \exp\left(-\frac{i\omega y}{c_p}\right) + A_{sr} \exp\left(\frac{i\omega y}{c_p}\right) \right] \quad U_f(y, \omega) = \frac{i\omega}{c_f} \left[-A_{ft} \exp\left(-\frac{i\omega y}{c_f}\right) + A_{fr} \exp\left(\frac{i\omega y}{c_f}\right) \right] \quad (10)$$

其中入射波 u_{si} 对应的频域解为:

$$U_{si}(y, \omega) = -\frac{i\omega A_{si}}{c_p} \exp\left(-\frac{i\omega y}{c_p}\right) \quad (11)$$

对于任一给定的输入地震动 $u_g(t)$, 对其做 Fourier 变换得到 $U_g(\omega)$, 由 $U_{si}(y, \omega)|_{y=0} = U_g(\omega)$, 得到:

$$A_{si} = -c_p U_g(\omega) / (i\omega) \quad (12)$$

将式(9)(12)代入式(10), 得到固体域与流体域中波场的频域解 $U_s(y, \omega)$ 、 $U_f(y, \omega)$, 对其做 Fourier 逆变换, 即可得到波场时域解 $u_s(y, t)$ 、 $u_f(y, t)$ 。

1.3 基于人工边界子结构的地震波动输入方法

有效的波动输入方法是确保场地地震反应问题数值模拟精度的关键环节, 波动法将输入地震动转化为人工边界上的等效荷载, 是目前常用的地震动输入方法之一。最近刘晶波等由波动法基本理论出发, 提出一种基于人工边界子结构的地震波动输入方法^[7]。该方法通过人工边界子结构模型的动力分析直接获得等效输入地震荷载, 模拟精度高, 实施与求解过程简单便捷, 已有效应用于海域场地 sv 波垂直入射的地震反应分析^[8]。本文在此基础上进一步发展该地震波动输入方法, 实现海域场地 P 波垂直入射, 具体步骤如下。

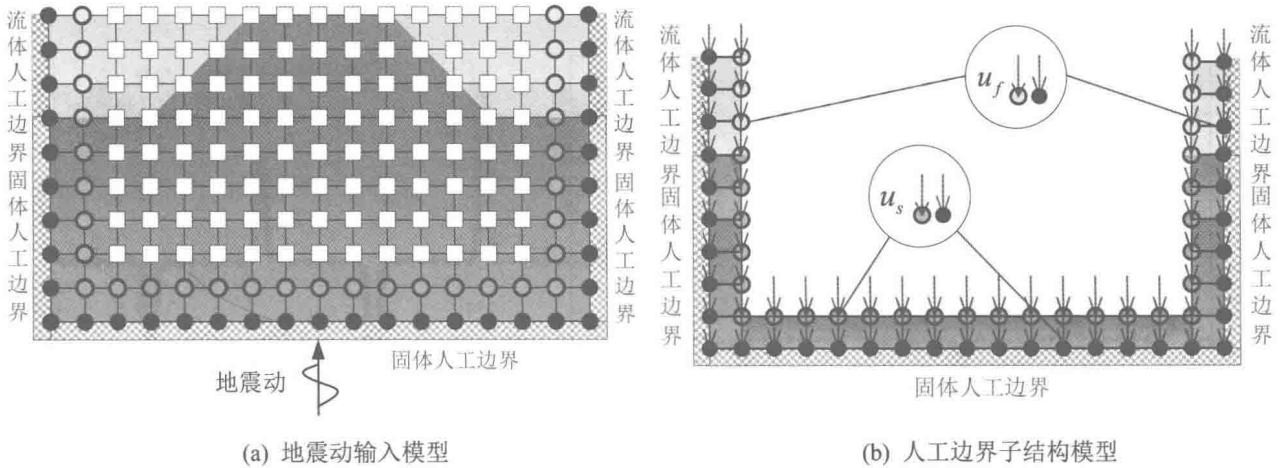


图3 基于人工边界子结构的地震波动输入方法计算步骤

(1) 建立岛礁-海水系统近场有限元模型, 如图 3(a)所示, 删去内部单元, 即仅保留由流、固介质人工边界节点和与之相邻的内部节点所包围的单元, 得到如图 3(b)所示人工边界子结构模型。

(2) 对人工边界子结构模型所有流、固介质单元的节点分别施加第 1.2 节得到的与节点空间位置相对应的自由波场位移时程 $u_f(y, t)$ 、 $u_s(y, t)$, 如图 2(b)所示, 对该子结构模型进行动力分析, 求得人工边界节点的反力, 即为实现地震波动输入的等效输入地震荷载。

(3) 对如图 2(a)所示的岛礁-海水系统近场有限元模型的所有人工边界节点施加由步骤(2)获得的等效输入地震荷载, 进行动力时程计算, 即完成了海域场地的地震波动输入。

2 算例与分析

2.1 含上覆水层的半空间 P 波垂直入射

为验证将以上方法应用于 P 波垂直入射时海域场地地震反应分析的适用性与计算精度, 首先研究含上覆水层的半空间 P 波垂直入射问题, 有限元模型如图 4 所示, 计算域长度为 1600m, 水深、固体域高度均为 600m。介质材料参数如表 2 所示。采用如图 5 所示的 Dirac- δ 脉冲 P 波作为输入位移荷载进行动力分析, 脉冲持时为 0.2s。此问题的理论解由第 1.2 节给出。比较自由液面中点 A 和耦合界面中点 B 处的竖向位移反应, 结果如图 6 所示。

由对比结果可见, 采用本文方法计算得到的位移反应与理论解极为接近, 说明本文方法可有效实现覆水场地的地震波动输入。由于流、固介质的波速差异, P 波垂直入射时在耦合界面发生透射与反射, 波动经固体介质传入流体介质后, 在流体介质内往复传播, 逐渐衰减。

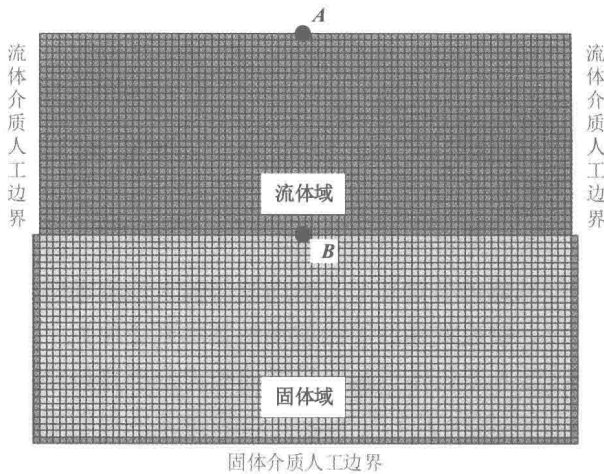


图 4 含上覆水层的半空间模型

表 1 介质材料参数

| | | |
|------|---|------|
| 固体介质 | 密度 ρ_s ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 2700 |
| | P 波波速 c_p ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 4500 |
| | S 波波速 c_s ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 1800 |
| 流体介质 | 密度 ρ_f ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 1000 |
| | 波速 c_f ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 1435 |

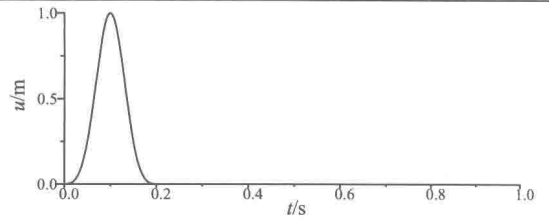
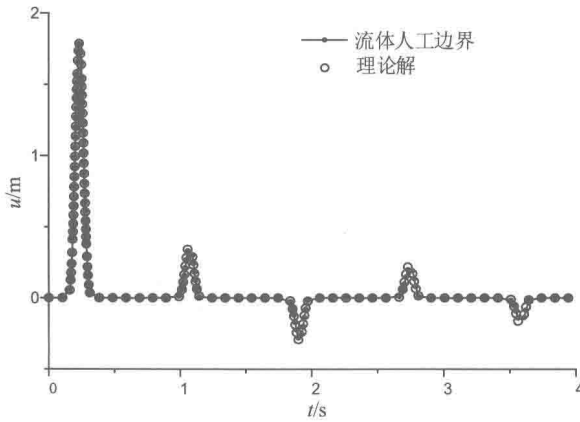
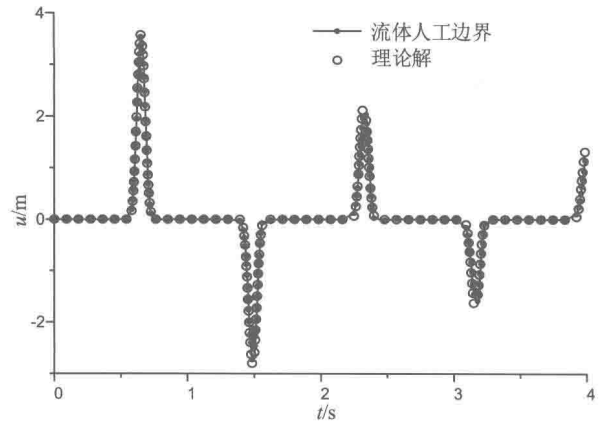


图 5 位移荷载时程



(a) A 点竖向位移反应时程



(b) B 点竖向位移反应时程

图 6 位移反应时程曲线

2.2 海域岛礁场地脉冲 P 波垂直入射

分析脉冲 P 波垂直入射下, 海域岛礁场地的动力反应, 并评价水体介质中的波动输入对场地地震反应的影响。建立如图 1 所示的岛礁-海水系统二维有限元模型, 礁顶宽度为 500m, 水深 600m, 倾角 θ 为 30° , 介质材料参数如表 2 所示, 垂直入射如图 5 所示的脉冲 P 波, 分别采用本文考虑流、固介质中波动输入的方法和仅在固体介质中输入脉冲波, 而忽略水体中的波动输入进行计算。给出由以上两种方法得到的 0.43s 和 0.57s 时的波场快照, 如图 7 所示, 此时岛礁地形对流体介质中波场的影响尚未扩散到截断边界处。

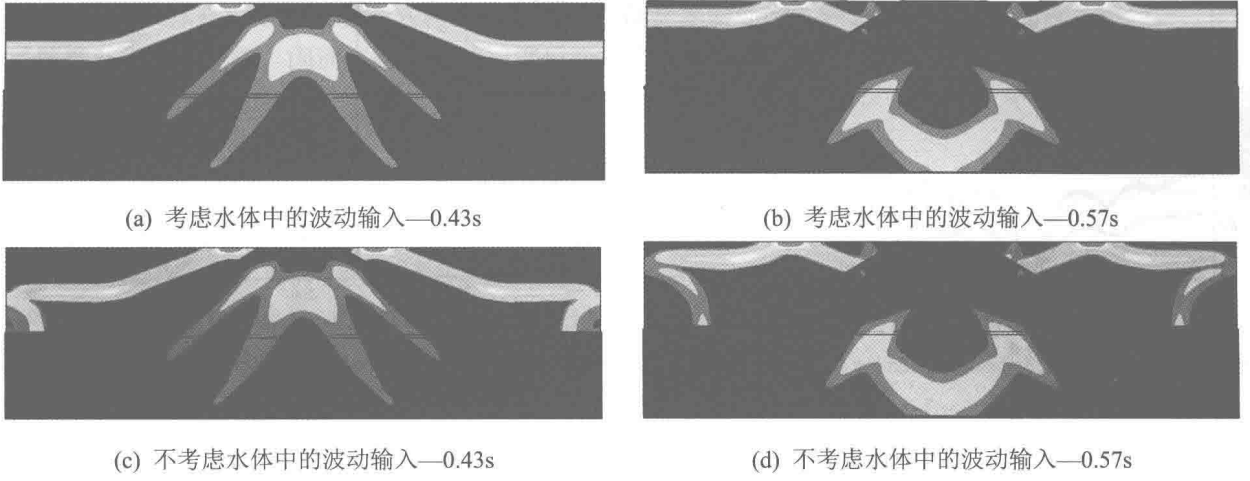


图7 岛礁-海水系统波场快照

由对比结果可见,采用本文方法同时考虑水体与固体介质中的波动输入时,波阵面在截断边界处光滑连续,在岛礁地形引起的散射波尚未到达的区域,波场分布与自由场一致,验证了采用本文方法进行海域场地P波垂直输入的准确性;仅在固体介质中入射脉冲波,而忽略水体中的波动输入时,在截断边界流-固耦合界面处出现额外的震源,产生的平面波向场地扩散,将对计算结果产生不利影响。

2.3 海域岛礁场地地震P波垂直入射

建立如图1所示的岛礁-海水系统二维有限元模型,礁顶宽度、水深和材料参数与算例2相同,分别令倾角 θ 为 30° 和 45° ,垂直入射如图8所示的三条地震P波。比较采用本文方法、忽略水体中的波动输入以及无水情况计算得到的岛礁顶部加速度峰值比 R_a 的空间分布,结果如图9~10所示。其中 R_a 定义为相同波动输入下岛礁场地相比于平坦场地地表的加速度放大系数,如式(13)所示,其中 a 为岛礁顶部竖直或水平方向的加速度, a_0 为相同波动输入下平坦场地地表的竖向加速度。

$$R_a = \max(|a|) / \max(|a_0|) \quad (13)$$

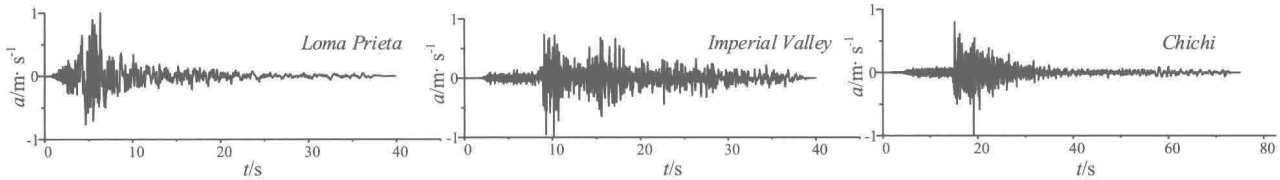
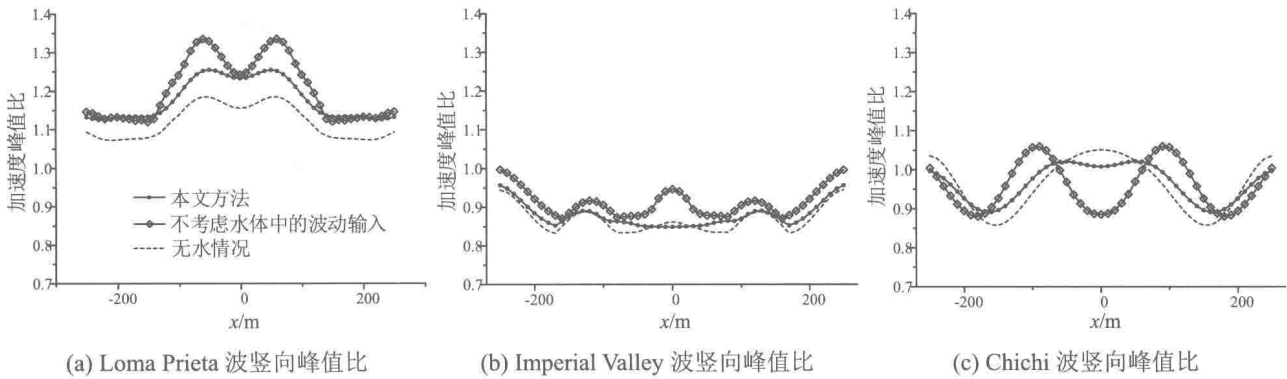


图8 地震动加速度时程



(a) Loma Prieta 波竖向峰值比

(b) Imperial Valley 波竖向峰值比

(c) Chichi 波竖向峰值比

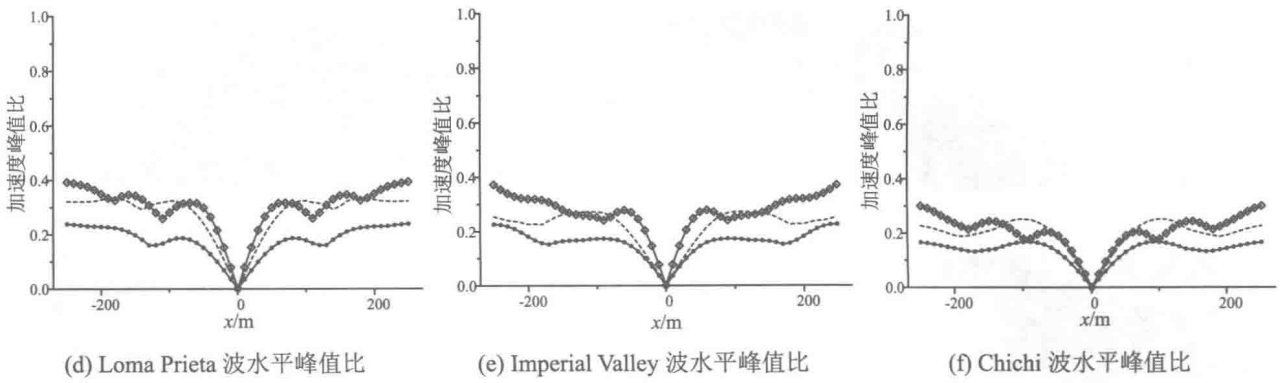


图9 30°坡度模型加速度峰值比的空间分布

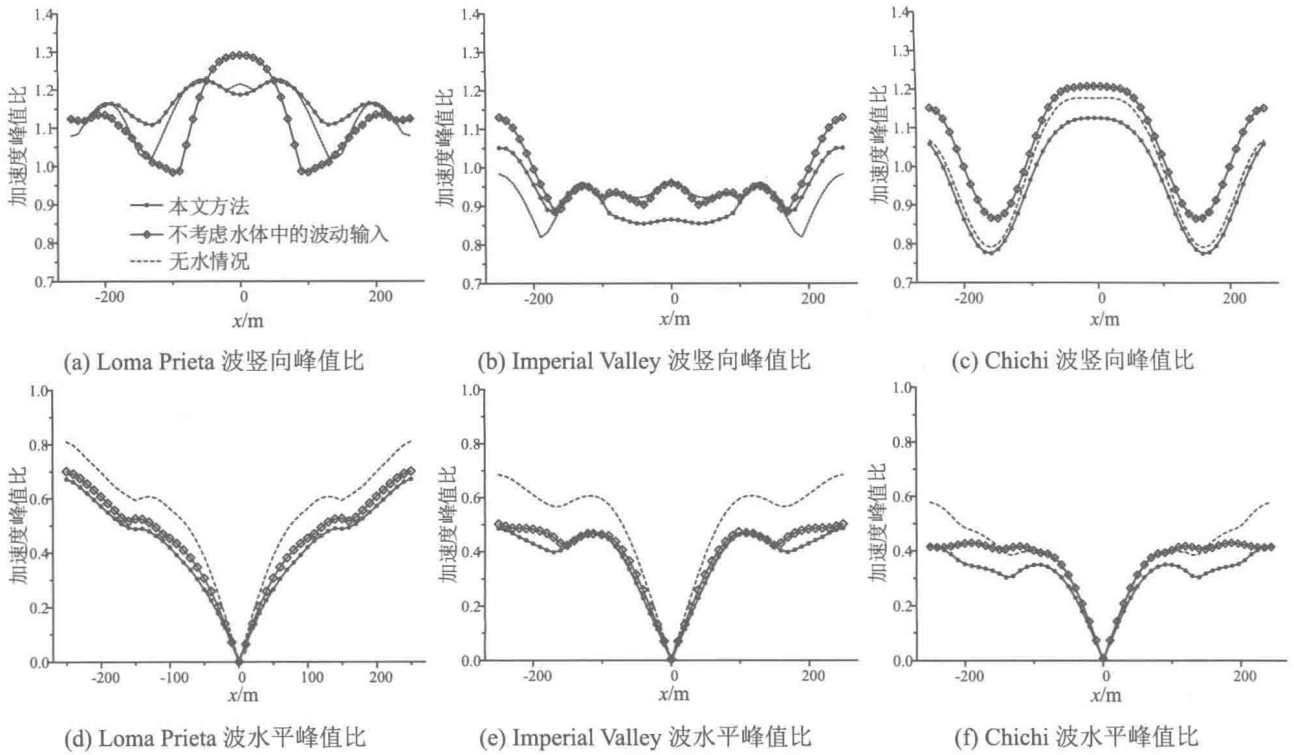


图10 45°坡度模型加速度峰值比的空间分布

由计算结果可以得到以下结论：不同地震 P 波垂直入射时，不同坡度岛礁模型顶部加速度峰值比的空间分布规律存在明显差别；竖向加速度峰值比分布相对平缓，礁顶中点和角点处容易出现加速度峰值比极值，水平向加速度峰值比由中点至角点逐渐增大，最大值接近 0.7，说明 P 波垂直入射时，岛礁顶部平台段，尤其是靠近角点处水平向地震反应不容忽视；海水的耦合作用和水体介质中的波动输入对岛礁地震反应影响显著，尤其在水平方向上，不考虑二者影响将明显高估岛礁场地的地震反应，说明在海域场地地震反应分析中考虑海水的影响及水体介质中的波动输入是必要的。

3 结论

海域岛礁场地地震反应分析对于科学规划建设海洋工程具有重要意义，本文重点研究 P 波垂直入射时岛礁场地的地震反应，建立了岛礁-海水系统近场有限元模型，推导了含上覆水层的半空间自由场位移理论解，并利用该自由场分布实现了海域场地 P 波垂直输入，通过算例分析，得到以下结论：

- (1) 采用本文改进的基于人工边界子结构的地震波动输入方法可有效实现海域场地 P 波垂直输入。
- (2) 采用不同地震 P 波垂直入射时，不同坡度岛礁模型的场地地震反应存在明显差异，其中竖向地震反应极值一般出现于礁顶中点或角点，水平向地震反应由中点至角点逐渐增大。

(3) 忽略水体介质中的波动输入将导致截断边界耦合界面处产生额外的震源, 对岛礁场地地震反应的计算精度产生不利影响, 因而在海域场地地震反应分析中考虑水体介质中的波动输入是必要的。

参考文献:

- [1] 李小军. 海域工程场地地震安全性评价的特殊问题[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(2):97-104.
- [2] 宝鑫, 刘晶波. 考虑流-固耦合效应的含液容器动力响应有限元分析方法[J]. 核动力工程, 2017, 38(2):111-114.
- [3] 刘晶波, 王振宇, 杜修力,等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6):46-51.
- [4] Zhao M, Wu L, Du X, et al. Stable high-order absorbing boundary condition based on new continued fraction for scalar wave propagation in unbounded multilayer media[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2018, 334.
- [5] 刘晶波, 宝鑫, 谭辉, 等. 波动问题中流体介质的动力人工边界[J]. 力学学报, 2017, 49(6): 1418-1427.
- [6] 刘晶波, 吕彦东. 结构—地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998,31(3):55-64.
- [7] 刘晶波, 谭辉, 宝鑫,等. 土-结构动力相互作用分析中基于人工边界子结构的地震波动输入方法[J]. 力学学报, 2018, 50(1):32-43.
- [8] 宝鑫, 刘晶波, 韩鹏飞,等. 流体人工边界在海域场地地震分析中的应用[C]. 全国地震工程学术会议, 上海市, 2018.
- [9] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9):1070-1075.
- [10] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009:18-19.

黄土场地桩基横向力学行为数值模拟

*程麦理

(延安大学建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 为探讨黄土地区桩基的水平承载特性, 研究桩基在桩顶水平荷载作用下的内力和变形分布规律。借助有限元软件 ANSYS 建立桩基半结构模型, 结合水平加载制度, 深入探究桩基的横向承载能力, 对桩长、桩径进行了参数分析。结果表明: 桩顶水平荷载作用下, 桩-土界面有明显的相互作用力学行为, 桩-土界面分离深度可达 4.5d, 桩径比桩长参数对桩基的抗侧移刚度和水平承载力影响更显著, 桩基减震耗能能力有限。

关键词: 水平承载力; 黄土场地; 桩基础; 桩-土界面; 有限元; 数值模拟;

随着我国基础设施建设范围的不断扩大, 在我西北黄土高原建设了一大批工程结构。由于桩基础沉降小, 承载力高, 能较好处理特殊场地基础承载问题, 在工程建设中得到了广泛应用。桩基横向承载力是反映桩基抗震性能的重要指标, 同时桩-土相互作用对桩基抗震耗能有显著影响, 因而对黄土地区桩基的横向力学变形行为研究意义重大。

李洪江等^[8]通过推导考虑侧壁摩擦力的桩基水平承载挠曲微分方程, 提出了小变形下的桩基水平承载力计算方法(f_m 法)。Chau 等^[1]假设嵌岩桩的周围内层土为非线性土体, 外层土为线性粘弹性土体, 建立了圆柱形的水平振动桩-土非线性相互作用力学模型。祝兵等^[4]通过建立墩底固结、 m 值法和 P - y 曲线法三类模型, 探讨了桩-土作用对梁-拱组合桥梁的影响。胡伟等^[2]通过数值分析研究了黄土区不同桩径比对摩擦桩-土-结构体系和端承桩-土-结构体系的影响规律。冯君等^[7]结合室内物理模型试验和有限元分析, 研究了高承台桩的水平承载特性。李晋^[3]对桩-土作用进行试验研究及仿真分析, 探讨了竖向静载下桩顶沉降、桩端反力、桩侧摩阻力及浸水黄土桩承载力的变化规律。赵明华等^[6]和冯士伦等^[9-10]分别从理论和振动台实验角度对液化土层桩基的水平承载特性进行研究, 结果表明液化土体侧移对桩基的内力和变形影响较大。

本文为探讨黄土场地桩基的横向力学性能, 对某黄土场地的桩基进行了仿真模拟, 以期真实反映桩顶在横向荷载作用下桩基和土体的应力及变形行为, 为黄土场地桩基水平承载力学性能研究提供依据。

1 有限元模型建立

某黄土场地布置混凝土基桩一根, 桩径 1m, 桩长 11m, 埋深 10m, 成桩形式为钻孔灌注端承桩。在桩顶端施加横向水平位移荷载, 桩基轴向恒载 30kN。对桩径和桩长进行桩基横向承载力及抗震能力的参数分析。

为使模拟计算简化, 突出主要研究内容, 假定: 场地土体为单层, 黄土沿竖向力学性能无变化。近场与远场土体通过应变区分, 近场土体发生弹塑性变形, 远场仅发生弹性变形。为提高计算效率, 结合桩基在单向位移荷载作用下结构整体的变形性能, 对桩基进行对称性处理, 即仅研究桩基半结构的力学行为。

1.1 材料特性

桩基场地土体为黄土, 采用 Drucker-Prager 材料模型, 泊松比 $\nu=0.4$, 弹性模量 $E=0.25 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, 粘聚力 $c=21 \text{ kPa}$, 摩擦角 35° , 膨胀角 30° 。桩基采用强度等级为 C30 的混凝土, 材料采用多线性等向强化模

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408453); 陕西省教育厅专项科研项目(17JK0859)

作者简介: *程麦理(1987-), 男, 陕西人, 讲师, 博士, 主要从事结构工程及桥梁工程研究(E-mail: cml3635@163.com);

型(MISO), 定义了不同应变下混凝土材料对应应力。为考虑桩基内部钢筋对混凝土桩的增强效应, 对混凝土设置三向配筋率方式引入钢筋效应, 钢筋材料弹性模量 $E=2.1 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$, 泊松比 $\nu=0.3$, 采用双线性随动强化模型(BKIN), 屈服强度 335 N/mm^2 , 屈服后切线弹性模量 $2 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。

1.2 单元选取

由于有限元分析模型为三维实体模型, 为精确考虑混凝土基桩及近场土体的力学变形能力, 采用 SOLID65 单元模拟场地及基桩, 该单元能够准确模拟三维实体结构的受拉开裂和受压破碎性能。

荷载作用下桩基发生水平弯曲变形, 桩-土界面有明显的张开、闭合效应, 同时桩-土界面还有拖曳摩擦效应, 为合理模拟反映其力学性能, 采用表面摩擦单元进行模拟。由于基桩混凝土弹性模量相较土体更具刚性, 因而在桩基表面附着 Target170 单元, 默认其为刚体目标面, 在土体界面附着 Contal173 单元。

1.3 加载程序

根据桩基荷载加载制度, 结合桩基横向力学性能, 对桩基采用位移加载模式, 位移等级增量 5mm, 每荷载等级内桩顶施加拟静力位移两次, 图 1 给出了位移荷载的加载制度。

1.4 模型建立

根据桩基在横向位移荷载作用下桩基受力性态的对称特征, 为提高计算效率, 建立 ANSYS 有限元模型时采用半结构处理方法。为考虑远场土体对桩基变形的影响, 深入探究近场、远场土体在桩基弯曲对土体应力、变形的分布规律, 远场土体模型半径为 $6d$, 场地土体实体模型采用半圆扇形模型。在基桩顶面节点采用位移耦合(u_x)模式施加位移荷载。

在模型底面添加三向位移约束, 对称面处为 Y 向位移约束, 远场土体边界为极坐标系的 X 向位移约束。单元实体模型如图 2 所示, 图中边界 1(极坐标系: u_x); 边界 2: u_y ; 边界 3: u_x, u_y, u_z 。

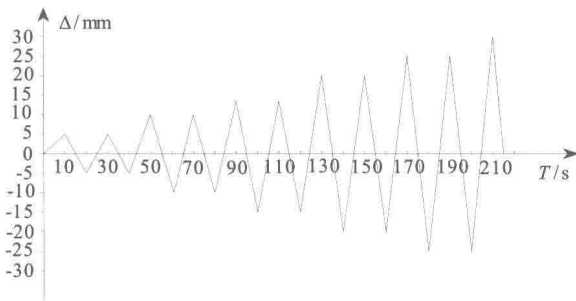


图 1 位移荷载制度

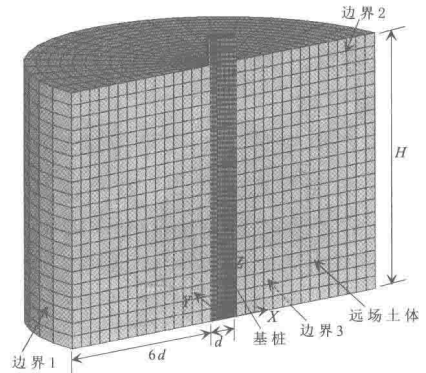


图 2 桩基实体有限元模型

2 应力分析

2.1 横向应力分析

图 3 给出了桩顶横向位移作用下桩基的 X 向应力云图。通过对桩基模型在桩顶横向位移作用下的应力分析可知, 在基桩埋深小于 $3.5d$ 范围内应力变化剧烈, 对于基桩埋深大于 $3.5d$ 部分其横向应力较小。图 4 为桩基顶部横向局部应力云图, 当桩基顶部有横向位移时, 基桩与土体有明显的界面分离, 表明模拟分析满足基桩发生弯曲变形时近场土体与桩基仅有压力而无拉力的相互作用。在沿 X 向位移作用下, 近场土体有局部剪切应力集中区, 表明该集中应力区易发生土体的剪切破坏。

2.2 界面应力分布

图 5 为基桩与近场土体接触界面在桩顶横向位移作用下的应力分布。分析可知, 近场土体界面与基桩界面分离明显, 在靠近地表处最大, 随埋深的增大界面分离量值逐渐减小。图中标示出界面拉应力集中区和压应力的集中区, 表明基桩在顶部发生弯曲变形时有明显的拉、压应力分区。