



全国岩土工程师论坛文集

NATIONAL GEOTECHNICAL ENGINEERS FORUM

2018

陈湘生 张建民 黄强 主编

中国建筑工业出版社

全国岩土工程师论坛文集 (2018)

陈湘生 张建民 黄 强 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

全国岩土工程师论坛文集 (2018)/陈湘生, 张建民, 黄强主
编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018.10
ISBN 978-7-112-22629-0

I. ①全… II. ①陈…②张…③黄… III. ①岩土工程-文集
IV. ①TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 200849 号

本书是中国工程院土木、水利与建筑工程学部主办的“2018 全国岩土工程师论坛”论文选集, 主要涉及以下内容: 地下结构安全性研究与实践、城市地下空间与城轨岩土技术研究与实践、大面积场地与地基处理技术研究与实践、深基础工程施工新技术研究与实践、岩土工程测试新技术研究与实践、环境岩土工程研究与实践、岛礁建设的岩土工程研究与实践、地质灾害风险与防控及综合篇。

本文集适合从事岩土工程有关的科研、工程技术人员及高校相关专业师生阅读、参考。

责任编辑: 咸大庆 王 梅 杨 允

责任校对: 王 瑞

全国岩土工程师论坛文集 (2018)

陈湘生 张建民 黄 强 主编

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 47 字数: 1489 千字

2018 年 12 月第一版 2018 年 12 月第一次印刷

定价: 139.00 元

ISBN 978-7-112-22629-0

(32750)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

20年前，由中国工程院主办的“岩土青年专家学术论坛”在武汉召开。



中国工程院院士与岩土工程青年专家学术论坛全体代表合影

时任中国工程院副院长潘家铮教授专门为论坛论文集作序，勉励青年岩土工程师：岩土工程存在大量复杂问题和重要关键有待研究和攻克，而要解决这些问题，仅靠理论与实验室研究是不够的，岩土的性质如此复杂多彩变幻无常，要取得突破，既要做深入的理论探索和基础性研究，需要各种高新科技的引进和渗透，更需要丰富的实践经验的反馈，从中吸取养料、检验、丰富和改进理论。一定要将两者紧密结合起来才能有成。“岩土工程”这个名词正是意味着岩土力学理论和工程实践的综合，文集中不少论文都是两者结合的范例。我想论坛采用这个名词也有深意吧。既然中国将进行规模空前的工程建设，只要我们努力，在肥沃的土地上也一定能盛开灿烂的鲜花、结出丰硕的成果。谨以此意贡献给青年岩土工程专家们。

二十年来，伴随着建设事业突飞猛进发展，我国岩土工程技术取得了世界瞩目的成就。参会代表是我国岩土工程战线的一支中坚力量，为我国岩土工程理论、实践的发展做出了巨大贡献。

岩土工程系与地质体物理力学性质、环境、工法（施工力学）和过程（时空观）等关联的复杂系统性工程，一向被人们视为影响大、风险也大的一个技术领域。在我国岩土工程技术发展历程中，既有不少成功经验，也有一些沉痛教训。这些都需要我们在前进中继续深入研究总结。在这个科学试验、理论计算、工程经验与施工变形检测监控并存并重的领域里，岩土工程技术人员正确认知岩土工程性质和应用设计理论、正确理解规程规范和把握技术条件、采用合适的施工手段非常重要。期望通过这次论坛交流和论文集的出版，为促进我国岩土工程技术全面健康发展和提高贡献力量。希望岩土工程创新模式和改进规范规程，从静态走向动态、从人工走向智能，使我国岩土工程技术水平走在世界最前列。同时，以纪念我们那个时代青年岩土工程师走过的这二十年。

本论文集的出版，得到了深圳市住建局、中国建筑工业出版社的大力支持，在此表示衷心感谢。

陈湘生 张建民 黄强

2018年9月28日

目 录

一、地下结构安全性研究与实践

可液化地层中地下结构地震响应的动力分析·····	陈韧韧, 王睿, 张建民	3
混凝土沉管隧道介质传输与耐久性研究·····	谢梅杰, 李克非	10
黄土地区地下结构抗震有关问题研究·····	王兰民, 夏坤	16
SV 波斜入射时隧道地震反应分析的纵向整体式反应位移法 ·····	刘晶波, 王东洋, 宝鑫, 谭辉, 李述涛	24
关于地铁地下车站结构抗震研究的几点认识和思考·····	陈国兴, 庄海洋	31
海底盾构隧道三维非线性地震反应分析·····	赵凯, 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴	37
上海 500kV 虹杨地下变电站抗震分析与设计·····	苏银君, 翁其平	44
地下空间建造对地下水渗流影响初步研究·····	康景文, 朱文汇, 刘丹, 郑立宁, 杜超	53
盐渍土环境中钢筋混凝土耐久性设计与提升技术研究·····	刘加平, 穆松, 王育江, 石亮	61
拱形断面车站与矩形断面车站地震响应规律对比分析·····	杜修力, 刘思奇, 蒋家卫, 刘洪涛	67

二、城市地下空间与城轨岩土技术研究与实践

城市深层地下工程中地下水管控方法探讨·····	程丽娟, 侯攀, 马玉岩, 邓树密	75
下卧运营地铁长大基坑竖井施工方案优化研究·····	安国勇, 宋林, 王新宇, 王俊波	82
狭长型地铁车站基坑分步开挖的空间效应研究·····	穆保岗, 龚湘源, 陶津, 王敏	91
软土地区地铁车站纵向暗挖拓建施工技术探索·····	程子聪, 吴小建, 孙廉威, 王新新	99
青岛地铁工程渗漏水处置关键技术·····	刘泉维, 马晨阳	106
长短桩组合围护结构工作特性的模型试验和数值研究·····	丁海滨, 许海明, 徐长节, 杨仲轩	113
盾构施工引起地层位移的时空发展规律及控制技术研究与应用 ·····	张晋勋, 江华, 程晋国, 周刘刚, 武福美, 曲行通	122
基于分布式光纤监测技术的盾构隧道纵向变形研究·····	代兴云, 陶津, 穆保岗, 王敏	133
深圳前海地铁安保区基坑施工隧道变位控制实践 ·····	庞小朝, 苏栋, 陈湘生, 刘树亚, 申明文, 顾问天	141
深圳滨海地层地铁保护区内地下道路施工隧道变形控制技术 ·····	陈仁朋, 吴怀娜, 刘源	150
改良膨胀土 SHPB 试验动力特性与能量耗散分析·····	马芹永, 操子明	160
地铁车站与市政桥梁合建关键技术研究·····	杨德春, 杨璐菡	167
地铁换乘基坑环框支撑结构关键技术分析·····	杨璐菡, 杨德春	175
北京新机场综合交通枢纽桩基础变形控制设计实践 ·····	方云飞, 孙宏伟, 王媛, 卢萍珍, 李伟强	185
应用新型管幕工法修建地铁车站研究·····	赵文, 贾鹏蛟, 柏谦, 王志国	194

三、大面积场地与地基处理技术研究与实践

大面积回填场地的强夯地基处理技术·····	水伟厚, 董炳寅	203
真空预压处理大面积场地与地基技术·····	郑刚, 雷华阳	215
强夯法与分层碾压法在黄土高填方地基处理中的应用		

.....	张继文, 于永堂, 郑建国, 张昌军, 曹杰	223
机场高填方的压实质量实时监控系统研究		
.....	姚仰平, 阮杨志, 张星, 陈军, 耿轶, 刘冰阳, 余贵珍	231
山区高填方机场场地与地基	李强, 韩文喜	241
高真空击密法的发展与展望	楼晓明, 徐士龙	247
场地形成工程基本理论体系及标准体系研究		
.....	康景文, 唐海峰, 叶观宝, 胡志刚, 王晓, 宋宝强	254
大面积场地形成与地基处理	叶观宝, 许言, 张振	261
沙漠风沙土路基加固及边坡风蚀防治的研究进展	李驰, 苏跃宏, 刘俊芳, 高瑜	268

四、深基础工程施工新技术研究与实践

超深等厚度水泥土搅拌墙技术与实践	王卫东, 常林越	277
劲性复合管桩技术工程应用研究	张雁, 李志高, 毛由田	289
全套管全回转钻机施工技术与应用	高文生, 陈建海, 郭传新	301
超深地下连续墙施工关键技术	李耀良, 张哲彬, 张顺	310
静钻根植桩技术及应用	张日红, 陈洪雨, 龚晓南, 周佳锦	319
海上软基 DCM 处理系统研发与应用	龚秀刚	326
免共振微扰动钢管桩沉桩技术与工程应用	周铮	334
预应力矩形桩复合支护及斜桩支护技术在基坑中的应用	刘永超, 刘畅, 赵修明, 李刚	340
大跨桥梁基础新技术	龚维明, 曹耿, 王正振, 戴国亮	348
BFRP 筋土钉支护基坑原型试验研究	康景文, 荆伟, 胡熠, 郑立宁, 纪智超, 陈继彬	357
基坑狭窄区域回填密实技术	周保生, 江建	366
U 型盾构技术及施工过程受力分析与应用	王全胜, 罗长明, 杨聚辉, 杨祖兵	375

五、岩土工程测试新技术研究与实践

岩土工程测试新技术新方法	刘小敏, 侯伟生	387
复杂应力路径下花岗岩残积土强度与变形特性试验研究	赵燕茹, 刘小敏	395
基于 CPTU 的实用土分类图及其工程应用	蔡国军, 邹海峰, 刘松玉, 祝刘文, 杜宇	404
DMT 土体应力状态与压缩模量试验研究	申昊, 刘小敏	411
长沙北辰 A1 项目软岩地基压缩性指标测试与分析	孙宏伟, 方云飞, 卢萍珍	419
TRT 测试成果解译新方法研究	原先凡	427
重载铁路路基动力湿化试验研究	杨志浩, 岳祖润, 冯怀平	434
基础工程检测新技术的分析与应用	施峰, 黄阳, 陈旻	440
基于云平台的建筑基坑自动化监测系统研究与应用	郑伟锋, 刘琦, 侯刘锁	449
全深度阵列式深部位移测量仪研发与应用	李慧生, 蒋书龙, 郑之凯, 赵其华	458

六、环境岩土工程研究与实践

杭州天子岭第二填埋场稳定安全控制及增容	詹良通, 兰吉武, 李伟, 陈云敏	467
微纳米气泡增效地下水原位修复技术	胡黎明, 夏志然	474
高风险工业重金属污染土原地固化稳定化技术及应用	杜延军, 冯亚松, 夏威夷, 周实际	480
国内污染地块勘察技术标准化进展	周宏磊, 王慧玲, 刘晓娜	490
温度升高对垃圾土变形和强度特性影响的温控三轴试验研究	李玉萍, 施建勇, 姜兆起	498
防渗工程屏障中的改性膨润土应用研究与发展	范日东, 杜延军, 刘松玉, 杨玉玲	504
考虑优势渗透效应下氧气在垃圾填埋场内运移模型及模拟		
.....	刘磊, 惠心敏喃, 薛强, 张楚豪, 姚远, 谢文刚	512

干湿循环-根系-土相互作用下填埋场黏土盖层稳定特性研究 … 万勇, 惠心敏喃, 薛强, 刘磊	518
--	-----

七、岛礁建设的岩土工程研究与实践

钙质岩土的工程特性研究进展 …… 汪稔, 吴文娟, 王新志	529
深圳围海造地的海堤建造主要问题与对策 …… 丘建金, 文建鹏, 李拔通	539
珊瑚砂微观结构特征的认识 …… 王清, 王加奇, 程树凯, 陈亚婷, 申结结, 韩岩	549
未胶结钙质砂的静动力强度 …… 裴会敏, 王晓丽, 王栋	558
珊瑚砂大尺度压缩试验与吹填地基沉降估算研究 …… 王笃礼, 李建光, 邹桂高, 陈文博, 彭湘桂, 陆亚兵	565
珊瑚礁灰岩场地钻孔灌注桩工程特性试验研究 …… 唐国艺, 张继文, 郑建国, 王云南, 钱春宇, 刘智	572
钙质砂与钢界面的大位移剪切特性 …… 芮圣洁, 国振, 周文杰, 王立忠, 李雨杰	578
吹填珊瑚砂地建设机场道面技术研究 …… 周虎鑫, 刘航宇	585
DJP 复合管桩在填海抛石地层中的工程应用 …… 陈伟, 刘宏运, 樊继良, 郝盼, 左祥闯, 王浩浩, 王飞, 戴斌	592
钙质砂非线性渗流拖曳力的确定 …… 王胤, 周令新, 杨庆	600

八、地质灾害风险与防控

强震区高位滑坡综合治理工程设计研究——以茂县梯子槽滑坡为例 …… 王文沛, 殷跃平, 闫金凯, 杨龙伟	609
滑坡防治小口径组合桩群大型物理模拟试验研究 …… 闫金凯, 殷跃平	617
堆积体滑坡降雨复活与启动水头条件研究 …… 王环玲, 张海龙, 石崇	625
降雨作用下红层软弱夹层边坡的失稳的尖点突变模型 …… 杜子纯, 刘镇, 周翠英, 明伟华, 杨旭, 周逸红	632
孔隙水压力对黄土坡滑坡滑带土应力松弛影响试验 …… 崔德山, 陈琼, 项伟, 严绍军, 王璐, 杨林筱, 陶现雨	639
地质灾害光纤传感远程组网实时监测技术应用研究 …… 张青, 李滨, 张晓飞, 史彦新, 孟宪玮	646
大型堆积体滑坡局部化破坏离散元模拟研究 …… 徐卫亚, 张强, 王环玲, 王如宾, 孟庆祥, 王盛年	654
金沙江乌东德水电站坝区高陡斜坡地质灾害监测预警研究 …… 李滨, 殷跃平, 张青, 王文沛, 赵其苏	661
考虑空间参数变异性的争岗滑坡可靠度分析 …… 王盛年, 张强	669
易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝三维数值模拟研究 …… 戴兴建, 邢爱国	675
基于强度折减系数法的膨胀土边坡稳定性分析 …… 周同和, 赵迷军, 郜新军, 马一凡, 段鹏辉	682
基于混沌时间序列和能量耗散的高边坡安全预警标准研究 …… 苏定立, 刘镇, 周翠英, 杨旭	689

九、综合篇

城市地下轨道交通土建技术若干新进展 …… 朱合华, 陈湘生	697
岩土工程标准与信息化 …… 黄强, 程骥	711
大面积场地与地基的处理技术 …… 郑刚, 周海祚	724
我国岩土工程技术若干进步与思考 …… 杨光华	740

一、地下结构安全性研究与实践

可液化地层中地下结构地震响应的动力分析

陈韧韧, 王睿, 张建民

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 可液化地层中地下结构的震动响应规律和计算方法是岩土工程抗震研究领域长期以来的热点和难点。现有研究普遍将场地视为假想的均质可液化土层, 且缺乏能高效计算并合理反映地下结构构件配筋与动力非线性性能的建模方法, 对成层可液化地层中结构震动响应规律和破坏机制尚无系统认知。本文通过建立可液化地层中地下结构有限元建模及静动力时程计算分析方法, 揭示成层可液化地层中地下结构震动响应的基本规律。

关键词: 地震; 液化; 地下结构; 数值分析方法

1 引言

城镇人口密度的迅速增加, 促使居民对城镇生存和发展空间需求同步增加。当前, 我国主城区含百万人口的大城市已超过 100 座, 其地上空间利用已逐步趋于饱和, 科学开发利用地下空间成为中国未来城市发展的重要方向。当前, 地铁地下结构的兴建极大地促进了城市地下空间的开发利用, 而且地铁地下结构已经逐步和地下商业街、停车场、地下综合管廊以及人防工程相结合, 形成复杂的多功能大规模地下建筑群。《城市地下空间开发利用“十三五”规划》指出“力争到 2020 年, 初步建立较为完善的城市地下空间规划建设管理体系”, 一方面为促进城市地下空间科学合理开发利用提供制度保障, 另一方面也对改变科学理论研究落后于工程建设实践的现状提出了新要求。

相比于地上建筑, 大规模建设地下结构的历史相对短, 震害案例相对少, 同时, 传统上普遍认为地下结构震动变形小、抗震性能好。然而, 全球地下结构震害屡见不鲜, 尤其在 1995 年 Hyogoken-Nambu (日本阪神) 地震引起地层液化且出现地下结构严重震害后, 引起众多抗震研究者开展对地下结构震动响应规律和机理的研究。此外在 1999 年集集、2010 年 Maule、2011 年 Tohoku、Christchurch 和 2013 年 Emilia 等强震中, 均出现地层液化以及地下结构或设施的震害实例^[1-3]。我国以地铁工程建设为代表的地下空间开发实践中, 常遇见穿越非均匀分布可液化地层的情况, 例如南京地铁 1 号线、上海地铁 2 号线、广州地铁 2 号线、太原地铁 2 号线、天津地铁 5 号线、福州地铁 1~7 号线等, 可液化地层的出现增加了城市地下空间开发利用的难度与安全隐患。

然而, 目前已有研究普遍针对地下结构处于均质可液化地层的简化工况展开, 尚无对实际工程实践中常遇的地下结构穿越非均匀分布可液化地层时震动响应的系统认识。在物理试验方面, 国内外学者通过振动台和离心机振动台设备开展了许多模拟可液化场中地下结构震动响应的缩尺试验研究, 在一定程度上再现和揭示了简单条件下可液化土-地下结构动力相互作用, 但仍未形成统一的规律性认知。随着计算机科学技术水平的高速发展, 通过数值计算开展可液化地层中地下结构静动力时程分析的优点越来越突出, 诸多学者运用该方法进行数值模拟研究, 但尚缺少能同时精细、合理和高效地评价可液化土-结构非线性特征的研究。在地下结构模拟方面, 需要准确高效地反映钢筋混凝土构件配筋及其动力非线性性能; 在可液化土描述方面, 需要采用基于砂土液化物理机制的弹塑性本构模型^[4,5]。

本文运用 OpenSees 有限元计算程序, 采用混合单元对地下结构进行建模, 合理地模拟了可液化土体与钢筋混凝土地下结构的动力相互作用行为。在此基础上, 分析了成层可液化地基中地下结构的动力

响应规律, 重点关注地下结构的变形、内力及土-结构相互作用。

2 可液化地层中地下结构建模与计算方法

2.1 地下结构混合单元建模方法

在地面结构工程领域, 组合式建模方法已经得到广泛应用。纤维梁单元、分层壳单元是组合式方法中经典的建模手段, 具有精度高、计算代价小的特点。二维计算可采用纤维梁单元模拟结构的梁、墙、柱等构件, 它将截面离散为纤维束, 分别描述钢筋、混凝土的位置、面积以及材料分区; 三维计算仍可采用纤维梁单元模拟结构的柱体 (图 1a), 而可采用分层壳单元模拟结构的板、墙等构件 (图 1b), 它将沿壳厚度方向离散为不同材料层, 分别描述纵、横钢筋层和混凝土层^[6,7]。

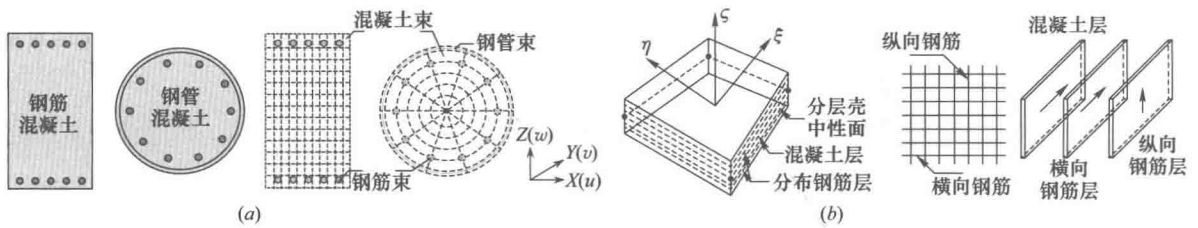


图 1 纤维梁、分层壳单元对钢筋混凝土构件空间离散示意图

不同于地上结构, 可液化场中地下结构周边与土、水接触, 如果直接使用纤维梁单元或分层壳单元模拟地下结构, 一方面不能很好地模拟结构细部几何信息及其质量分布; 另一方面, 在结构周边液化土层发生强非线性变形的工况分析中, 纤维梁、分层壳结构单元直接与土体单元连接容易使计算不收敛。而使用实体单元模拟地下结构, 能很好地反映结构几何信息和质量分布, 但精细化模拟构件弹塑性动力非线性性能的计算代价过大。因此, 通过结合纤维梁、分层壳单元与实体单元的优点, 采用地下结构混合单元实用建模方法, 以适用于可液化地层中的地下结构建模。该方法运用实体单元提供结构几何及质量信息, 纤维梁/分层壳单元则提供刚度和强度信息, 从而实现钢筋混凝土结构配筋和构件性能的模拟。



图 2 分层壳-实体混合单元法结构建模示意图

在有限元数值实现中, 利用实体单元、纤维梁/分层壳单元同时对结构进行空间离散, 如图 2 所示, 以分层壳-实体混合单元为例。通过合理地对实体单元刚度阵置小数以及增加两类单元间的自由度约束方程, 从而在求解方程组中实现混合目的, 见式 (1)~式 (6)。

实体单元与分层壳单元运动方程分别为:

$$[M_B]\{\ddot{u}_B\} + [C_B]\{\dot{u}_B\} + [K_B]\{u_B\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

$$[M_S]\{\ddot{u}_S\} + [C_S]\{\dot{u}_S\} + [K_S]\{u_S\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

其中 $[M]$ 为质量阵, $[C]$ 为阻尼阵, $[K]$ 为刚度阵; $\{u\}$ 为节点平动自由度向量; $\{F(t)\}$ 为节点动力荷载向量; 下标 “B” 和 “S” 分别代表实体单元和分层壳单元。

对实体单元刚度阵置小数, 并对分层壳单元质量阵置零, 当采用瑞利阻尼时:

$$[M_B]\{\ddot{u}_B\} + [C'_B]\{\dot{u}_B\} + [K'_B]\{u_B\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

$$[C'_S]\{\dot{u}_S\} + [K_S]\{u_S\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

其中 $[K'_B]$ 为置小数后的刚度阵, $[C']$ 为受刚度阵和质量阵调整影响后的阻尼阵。

对实体单元与分层壳单元在空间中相同位置节点增加自由度捆绑约束:

$$\{u_B\} = \{u_S\} \quad (5)$$

从而使该离散构件在有限元求解方程组中的求解表达式等效为:

$$[M_B]\{\ddot{u}\} + [C'_B + C'_S]\{\dot{u}\} + [K'_B + K'_S]\{u\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

由于其中 $[K'_B]$ 相对于 $[K'_S]$ 为小量, 即分层壳单元所采用的材料本构关系控制了该构件的变形和强度。

混合单元建模方法继承了原有单元的优点, 能高效地离散复杂的钢筋混凝土构件, 且能够合理模拟钢筋混凝土构件的动力加载反应(图3)^[8], 能够适用于地下结构地震反应数值研究。

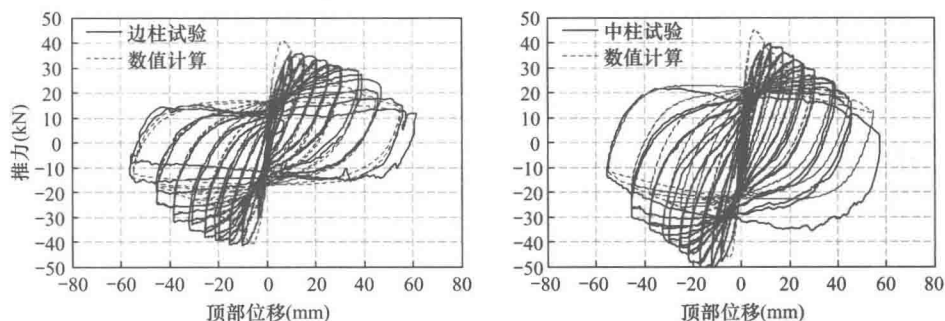


图3 框架柱循环加载试验与数值模拟滞回曲线

2.2 可液化地层中地下结构地震反应计算方法

本节在混合单元建模方法的基础上, 着重考虑材料本构、初始状态以及地震波选用, 采用 OpenSees 有限元开源程序, 合理地同时考虑可液化地层与地下结构动力非线性特性, 建立可液化地层中地下结构抗震计算方法。

(1) 材料本构

地下结构采用混合单元模拟, 其中钢筋采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 本构模型, 可模拟金属材料的往返加载时的包辛格效应; 混凝土采用 Kent-Scott-Park model 本构模型, 可考虑加卸载中混凝土损伤导致的模量衰减。

可液化土体采用砂土液化大变形本构模型 CycLiqCPSP, 该模型框架基于边界塑性理论。该模型考虑了临界状态土力学的状态参数对剪胀的影响, 进而统一描述饱和砂土从液化前到液化后的不同状态。该模型的参数包括弹性模量 (G_0, κ) , 塑性模量 (h) , 临界状态参数 (M, λ_c, e_0, ξ) , 状态参数 (n_p, n_d) , 可逆性剪胀参数 $(d_{re,1}, d_{re,2})$, 不可逆性剪胀参数 $(d_{ir}, \alpha, \gamma_d, r)$ ^[9]。

(2) 初始状态

由于不同的地下结构施工方法与施工过程, 地下结构周边土体的初始应力状态是不同的, 进而会影响土体的动力响应以及与结构的运动相互作用。所以需要通过对边界条件的控制, 在计算程序中实现对单元、节点的分离与重建, 模拟施工过程, 再现准确的初始应力状态。根据施工方法的区别, 地下结构主要分为明挖和暗挖法施工。可通过数值方法细化模拟该过程: ①场地自重应力场计算; ②逐层分级开挖至拟建结构区域; ③逐级结构施工与覆土回填。当埋深超过一定限度后, 明挖法不再适用, 而要改用暗挖法, 施工时对地面的道路通行影响小, 适用于市中心和一些埋深很深的结构; 数值模拟过程为: ①场地自重应力场计算; ②逐级开挖与结构施工, 直至结构完工。

(3) 地震波选用

针对实际工程, 由于不同地震波输入往往得到不同的动力时程分析结果, 因此根据美国国家地震减灾计划 (NEHRP, 2011) 中关于地震波选取及缩放的推荐方法及《建筑抗震设计规范》的相关规定, 应选用多条符合该工程所在地区抗震设防要求的实测地震波作为输入, 并取计算结果的平均值进行分析和评价, 从而提高计算结果的可靠性。

3 成层可液化地层中地下结构震动响应规律

3.1 计算概况

本文以一高 8m、宽 22.1m、埋深 6m 的单层双跨矩形地铁站结构作为研究对象，将对 3 种典型的地层剖面工况开展研究 (图 4)，包括：①结构处于厚度为 20m 的均质可液化层中部 (简称为 Liq)；②结构横穿 6m 厚的可液化夹层 (简称为 M-liq)，其顶底板均处于不可液化土层；③结构处于不可液化层 (简称为 Non-liq)，作为前两个工况的对照。

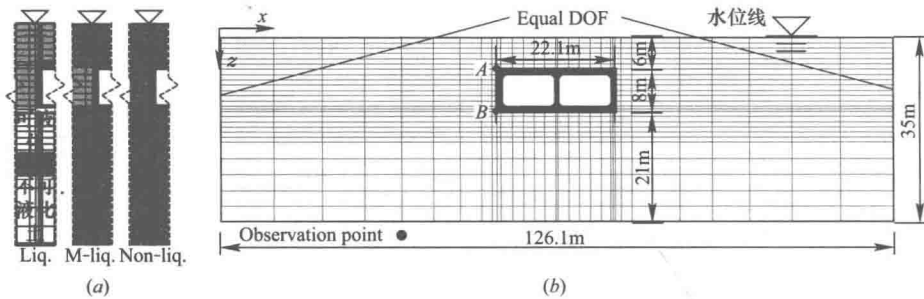


图 4 地层条件示意图

计算采用 OpenSees 有限元二维分析，计算域均为饱和地层，地表排水，左右边界为捆绑边界，结构采用前文提出的非线性纤维梁单元与实体单元组成的混合单元，共同模拟钢筋混凝土地下结构。场地土体采用基于比奥固结理论的 u-p 格式四节点流固耦合单元建模。

根据 NEHRP (2011) 中关于地震波选取及缩放的推荐方法及《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 的相关规定，运用太平洋地震工程研究中心 (PEER, 2016) 地震动数据库选用了 7 条符合要求的地震波，并设置地震峰值加速度为 2.20m/s^2 。

3.2 结果分析

(1) 结构变形与内力响应

根据《建筑抗震设计规范》和《混凝土结构设计规范》关于钢筋混凝土结构设计的相关内容，弯矩、剪力和层间位移角常用于结构构件的截面验算和变形验算，要求地下结构在设防地震作用下其弯矩和剪力不超过相应的设计值，且弹塑性层间位移角小于 $1/250$ 。计算结果显示在可液化土层穿过结构的 M-liq 工况中，地下结构的变形和内力明显大于 Liq 和 Non-liq 工况 (图 5)，表明结构在穿越可液化夹层中的震动破坏危险性明显高于其处在均质可液化地层和不可液化地层的情况。因此，应更加重视工程中常见的非均匀可液化土层对地下结构抗震安全性的影响。

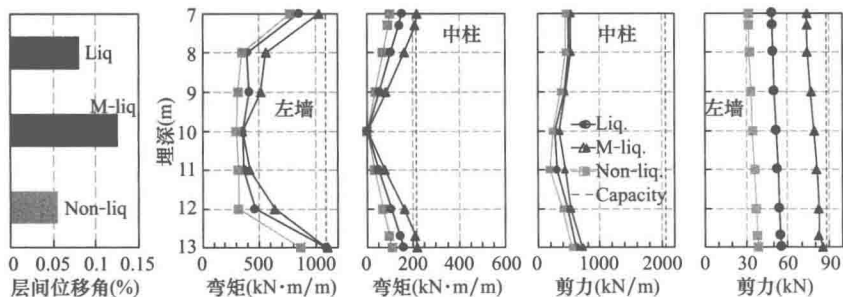


图 5 各地震作用下各工况结构变形与内力平均峰值

(2) 土-结构相互作用分析

场地土体发生的地震变形通过外力作用在地下结构上,导致结构产生地震内力响应与变形,即土与结构动力相互作用。在水平方向上,地下结构主要受到土体对其左右墙面的法向土水压力、顶底板摩擦力和惯性力,本节通过对这三种作用力展开分析土与结构相互作用。

图6(a)给出了地震作用下各工况的平均左右墙面法向作用力初始值及动力增量峰值。对比表明,Liq和M-liq工况的墙面法向力增量大于Non-liq工况的结果,且M-liq工况中墙面顶部法向力增量明显大于另外两种工况,并形成两端大、中间小的非均匀墙面法向力增量分布,增强了地下结构横断面内的剪切作用。

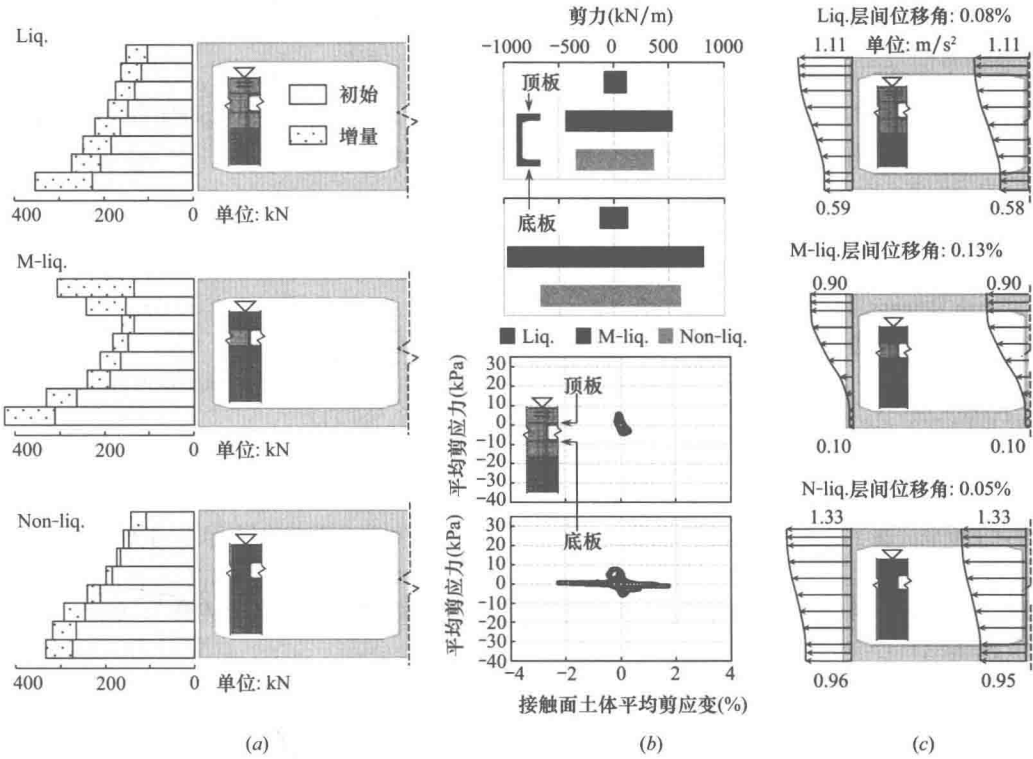


图6 土-地下结构水平方向相互作用力

图6(b)上给出了地震作用下各工况结构顶底板平均剪力值范围。由图可见,M-liq工况的顶底板剪力峰值最大,分别是Non-liq和Liq工况的1.4倍和5倍,表明Liq工况中,可液化土对地下结构顶底板的剪切作用非常有限。为了分析其原因,图6(b)下给出了Liq工况中结构顶底板的平均剪应力和剪应变关系图,可见Liq的底板下土体发生液化。

然而,在三种地层中,虽然Liq工况的顶底板剪力均明显小于Non-liq工况,但其地下结构的震动内力和变形响应仍大于Non-liq工况,下面将从地下结构惯性力分布角度分析其原因。图6(c)展示了地震作用下各工况在最大层间位移角时刻的结构加速度分布。在Liq和M-liq工况中,地下结构的顶底板加速度差异值较大,分别为 0.52m/s^2 和 0.8m/s^2 ,然而,在Non-liq工况中,虽然其加速度绝对值明显大于另外两种工况,但其顶底板加速度差值却较小,为 0.37m/s^2 ,表明土体震动液化导致土体对地下结构的约束作用减弱,并使得结构内部产生更大的差异加速度,即更大的内部不均匀惯性力。与以往研究常对地下结构惯性力忽略不计的观点不同,本研究表明,惯性力是影响可液化地层中的地下结构地震响应的重要因素。

4 结论

本文将纤维梁/分层壳单元与实体单元相结合,提出了地下结构混合单元建模方法,并在此基础上,建立了可液化地层中地下结构抗震计算方法,讨论了成层可液化地层中地下结构震动响应规律。得到以

下认识和结论: (1) 提出的混合单元法继承了原单元的优点, 能够同时合理地考虑地下结构几何信息、质量信息以及材料力学性能, 可在二维和三维有限元分析中高效地离散钢筋混凝土地下结构, 实现了对地下结构的合理建模。(2) 通过对均质液化地层、不可液化地层以及可液化夹层穿越地下结构的对比分析, 表明当液化夹层穿越地下结构时, 结构弹塑性层间位移角、弯矩和剪力比其处于均质可液化地层和不可液化地层更大, 更易达到剪切破坏, 其主要原因是侧墙不均匀法向力和顶底板剪切力均显著大于另外两种工况。(3) 地下结构的惯性力分布是影响地下结构震动响应的重要因素。地层震动液化可使得结构内部出现更大的差异惯性力, 引起的结构变形与内力是不容忽视的。相比于不可液化地层中的浅埋地下结构, 当地下结构局部或整体处于可液化土层时, 结构更容易发生震动破坏。

参考文献

- [1] Tokimatsu K, Asaka Y. Effects of liquefaction-induced ground displacements on pile performance in the 1995 Hyogo-ken-Nambu earthquake [J]. Soils and Foundations, 1998, 38 (Special): 163-177.
- [2] Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station [J]. Soils and foundations, 1996, 36 (Special): 283-300.
- [3] Hashash Y M A, Karina K, Koutsoftas D, et al. Seismic design considerations for underground box structures [C] //Earth Retention Conference 3. 2010: 620-637.
- [4] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (1), 1-50.
- [5] Zhang J M, Wang G. Large post-liquefaction deformation of sand, part I: physical mechanism, constitutive description and numerical algorithm [J]. Acta Geotechnica, 2012, 7 (2): 69-113.
- [6] Lu X, Xie L, Guan H, et al. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 98: 14-25.
- [7] 聂建国, 王宇航. 基于 ABAQUS 的钢-混凝土组合结构纤维梁模型的开发及应用 [J]. 工程力学, 2012, 29 (1): 70-80.
- [8] 陆新征, 叶列平, 潘鹏, 等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 I: 框架试验 [J]. 建筑结构, 2012, 42 (11): 19-22.
- [9] Wang R, Zhang J M, Wang G. A unified plasticity model for large post-liquefaction shear deformation of sand [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 59: 54-66.

作者简介

陈韧韧, 男, 1990 年生, 福建上杭人, 研究生, 工学博士。E-mail: haoyangwuji@126.com, 地址: 北京市海淀区清华大学土工离心机实验室, 100084。



DYNAMIC SEISMIC ANALYSIS OF UNDERGROUND STRUCTURES IN LIQUEFIABLE GROUND

CHEN Ren-ren, WANG Rui, ZHANG Jian-Min

(Tsinghua University, Department of Hydraulic Engineering, Beijing 100084)

Abstract: The seismic response of underground structures in liquefiable ground is an important and challenging topic in the field of geotechnical earthquake engineering. However, existing research on underground structures in liquefiable ground have mostly been conducted in idealized homogeneous soil pro-

files, without sufficient modelling of non-linear dynamic properties of the soil and reinforced concrete components. The seismic response and failure mechanism of underground structures in layered liquefiable ground is still unclear. In this research, a new combined structure element modelling technique is presented, based on which a dynamic finite element analysis method for underground structures in liquefiable ground is developed. The seismic response and failure mechanism of underground structures in layered liquefiable ground are revealed.

Key words: earthquake; liquefaction; underground structure; dynamic analysis

混凝土沉管隧道介质传输与耐久性研究

谢梅杰, 李克非

(清华大学土木系, 北京 100084)

摘要: 考虑我国东南沿海在建的沉管隧道环境, 针对沉管隧道壁所处的特殊环境条件建立了热-水-离子耦合传输模型, 研究多离子多场作用下侵蚀性离子在沉管壁混凝土中的迁移过程。利用该传输模型计算了120年使用期内在不同温度和压力工况下的水分与离子分布, 结果表明: (1) 隧道壁的水分迁移为内侧干燥过程与外侧海水渗入过程的叠加; (2) 温度变化对离子和水分传输的影响比外部水压变化更加显著; (3) 120年隧道外侧溶蚀深度有限, 钢筋锈蚀诱发区域深度约为0.65m, 但锈蚀电流低于 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

关键词: 介质传输; 孔隙材料; 沉管隧道; 混凝土; 溶蚀; 钢筋锈蚀

1 沉管隧道

海底沉管隧道是一类极富挑战性的工程结构。与填埋式隧道相比, 沉管隧道具有较快的施工速度、较好的质量控制和较高的海洋环境适应性^[1]。据统计, 从1910年美国首个沉管隧道建成后, 超过150个工程使用了沉管隧道。未来30年中国拟(在)建的海底隧道有江西南昌红谷隧道、港珠澳大桥海底隧道等。混凝土沉管隧道或者外表面覆盖防水层, 或直接暴露于海水中, 使用结构混凝土来防渗和防水。不论何种方案, 均需要隧道混凝土在使用周期内保持较高的耐久性。

沉管隧道混凝土的耐久性与海水有害介质直接相关, 包括 H^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} 以及侵蚀性 CO_2 ^[2]。这些介质侵入混凝土材料、通过不同机理造成材料劣化: Cl^- 侵入混凝土孔隙溶液后, 会导致内部钢筋锈蚀的电化学反应^[3]; SO_4^{2-} 侵入混凝土材料后可能导致硫酸盐化学反应、生成膨胀性产物, 造成材料开裂^[4]; Mg^{2+} 侵入水泥基材料后会与水化产物发生化学反应, 引起材料基体的破坏^[5]。由于海水pH值较低, 混凝土中的 Ca^{2+} 和 OH^- 会向海水中迁移, 使混凝土材料发生溶蚀^[6]: 首先降低混凝土孔隙的pH值、减弱混凝土对钢筋的保护作用, 其次会增大材料孔隙率, 加速海水中其他有害介质的侵入、并降低结构材料的力学性能。本文针对沉管隧道的环境条件建立了考虑了温度、海水压力、多离子多场传输模型, 研究在不同压力和温度作用下水分和离子的迁移过程, 为沉管隧道耐久性量化设计提供支撑^[7]。

2 热-水-离子传输理论

2.1 孔隙材料假设

混凝土是一种多孔多相的非均质工程材料, 其传输性质与过程的研究需要界定材料的代表性单元体(REV)。研究假定材料孔隙相互连通, 处于非饱和状态。定义材料连通孔隙率为 ϕ , 气相占据的孔隙率为 ϕ_g , 液相占据的孔隙率为 ϕ_l 以及饱和度为 s_l 。孔隙中气相分为干燥空气和水蒸气两种组分, 因此总气体压力 P_g 为干燥空气分压 P_a 和水蒸气分压 P_v 之和, 即 $P_g = P_a + P_v$ 。假定气体满足理想气体方程,

基金项目: 国家自然科学基金(51778332)