

胡进军,徐长琦,谢礼立,等.南海岛礁场地地震稳定性研究中的关键问题探讨[J].地震工程学报,2018,40(2):279-287.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.279

HU Jinjun, XU Changqi, XIE Lili, et al. Key Issues in Seismic Stability Analysis of Reef Sites in South China Sea[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 279-287. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.279

南海岛礁场地地震稳定性研究中的关键问题探讨^①

胡进军, 徐长琦, 谢礼立, 李琼林

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:目前我国针对陆域地区的建筑物和构筑物已建立了比较完备的抗震设计理论和技术体系,但对于海洋工程的抗震研究工作开展得不充分,尤其是海洋岛礁场地的地震反应分析尚属空白。伴随着近年来我国南海地区的迅速开发建设,有必要对南海岛礁的地震危险性分析和抗震设计展开研究。介绍南海岛礁场地的特殊工程地质条件和地震活动性特征,通过比较目前国内外常用的场地地震反应分析方法,针对岛礁这一特殊工程地质体,提出岛礁场地地震反应分析中需要考虑的四个显著因素,包括(1)南海岛礁体的特殊地形;(2)南海岛礁特殊的岩土工程材料;(3)海水-岛礁体动力相互作用;(4)南海地区海底输入地震动的确定,并探讨解决这些问题的思路。为分析地震作用下岛礁场地的稳定性、场地反应分析提供研究思路,同时为南海岛礁建设中的地震危险性分析提供参考。

关键词: 南海; 岛礁; 地震危险性分析; 场地地震反应分析

中图分类号: TU315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)02-0279-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.279

Key Issues in Seismic Stability Analysis of Reef Sites in South China Sea

HU Jinjun, XU Changqi, XIE Lili, LI Qionglin

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: Although China has established a relatively complete seismic design system for buildings and structures on land areas, minimal research has been conducted on seismic problems associated with marine engineering, particularly with respect to seismic response analyzes of reef sites. With the rapid development of the South China Sea in recent years, it is necessary to conduct a seismic hazard analysis during the design of reef sites. This study introduces typical engineering geological conditions and seismic activity characteristics of reef sites in the South China Sea. Through a comparison with common methods employed in site seismic response analysis at home and abroad, four critical factors and relevant solutions are proposed: (1) the terrain on islands and reefs in the South China Sea is distinct and it requires (2) specialized geo-technical engineering material; (3) the dynamic interaction between the seawater and reef should be consid-

^① 收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500400); 国家自然科学基金项目(51578516); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2017B06)

作者简介: 胡进军(1978—), 男, 研究员, 博士, 主要从事地震动参数特征分析研究。E-mail: hujinjun@iem.ac.cn。

ered; and the (4) input ground motion in the seabed of the South China Sea needs to be determined. This study provides research ideas for conducting stability analyzes of reef sites with respect to earthquakes, and also acts as a reference for seismic hazard analyzes during construction on islands and reefs in the South China Sea.

Key words: South China Sea; island and reef; seismic hazard analysis; seismic response analysis of soil site

0 引言

近年来由于可观的经济地位、主要的海上运输生命线以及重要的战略地位,使得我国海域建设不断加速,可以预料在今后相当长的一段时间内,海洋经济必定会成为我国经济发展的一个强有力的着力点。

与此同时,由于我国南海地区所处的地震地质环境复杂,对海区地震稳定性研究的需求也逐渐迫切。1987 年郭增建等^[1]根据地质背景、历史地震、地震周期性问题编制了《中国海域及其相邻海域地震烈度区划图》,基于我国南海北纬 20°线附近和以北地区以往有 6 级以上地震发生的事实,将该区域海域地震烈度划为Ⅶ~Ⅷ度,然而,由于当时海域地震资料和地质构造资料有限,精度较差,且区划图编制过程中并没有考虑海域内的地质构造盆地^[2],同时根据陆地地震的规律来划定海域地震本身就有一定局限性,导致该区划图在反映海域地震影响的过程中存在一些问题。2015 年颁布的第五代中国地震区划图(《中国地震动参数区划图》)中并没有包含海洋地区的地震区划,但从南海及其周缘地震历史分布图发现,南海北部和华南沿海是板内地震相对活跃的海域,历史上曾多次发生过 7 级以上的地震^[3]。因此,伴随着近年来我国在南海地区的迅速开发,有必要对南海岛礁的地震危险性分析和抗震设计展开研究。

在针对南海岛礁上的建、构筑物进行抗震设计时,需要考虑南海岛礁场地特殊的工程地质条件,其中以岛礁场地特殊的地形地貌和珊瑚岛礁岩土体特殊的物理力学性质最为代表。珊瑚岛礁是南海地区工程建设的主要载体,然而珊瑚礁作为一种特殊的岩土工程材料,其特殊的工程性能可能会引起特殊的地质灾害类型。詹美珍等^[4]在研究雷州半岛西南部珊瑚礁区场地稳定性后认为,珊瑚礁不受外力作用时稳定性良好,一旦受到外力作用则会产生局部应力集中甚至丧失部分稳定性。

为此研究者有必要分析在动力作用(诸如地震、海啸)下的珊瑚岛礁稳定性问题以及岛礁场地的破

坏特征。特别是了解目前国内外场地地震反应分析技术,适合岛礁场地的计算方法;以及结合岛礁场地工程地质资料建立的分析模型,钙质砂、礁灰岩等新型岩土工程材料的本构模型;最后是动力地质(地震、海水、潮汐等)共同作用下,的场地反应规律。为分析地震作用下岛礁的稳定性和破坏特征提供研究思路,同时为南海岛礁建设中的设计地震动参数确定提供参考。

1 岛礁场地工程地质条件

1.1 岛礁地形地貌

南海群岛珊瑚礁地貌类型是由它所处的海洋地理、地质环境决定的,由海洋造礁石珊瑚群落生长、充填、堆积形成的生物堆积地貌,其类型的划分应根据礁体的形态特征、礁体形成和发育的固有性质来确定。崔永圣^[5]按照珊瑚岛礁与海平面的关系和自身特点,将珊瑚岛礁地貌分为岛屿、沙洲、礁(干出礁)、暗沙、暗滩五种类型(图 1)。单华刚等^[6]将珊瑚礁分为向海坡、外礁坪、内礁坪和潟湖四大地貌单元:陡峭的阶地是向海坡的特征;外礁坪由礁缘凸起带和礁坡带组成;内礁坪一般珊瑚丛生,凹凸不平,并堆积了珊瑚断枝、礁砾块、沙屑等;潟湖水深在 5~80 m 间,常见的 5~25 m,湖底沉积多为较细粒砂砾或粉细砂等。王新志^[7]根据地貌形态将珊瑚礁主要分为环礁、台礁和水下礁丘,其中环礁地貌结构又分为向海坡、礁坪、潟湖三个地貌相带。孙宗勋等^[8]在地貌相带划分基础上结合海洋水动力环境分带、沉积环境、地层岩性、礁岩体结构特征及工程地质特性将珊瑚礁划分成为 5 个工程地质相带:外礁坪剧烈冲刷区、中礁坪砾块堆积带、内礁坪珊瑚生长带、潟湖砂质堆积带和灰沙岛堆积带(图 2)。

珊瑚礁地貌最大特色是海洋钙质生物的堆积,在波基面以上的地貌部分均受到暴风浪或常浪流的冲蚀,潮上带受风力的堆积和吹蚀作用。结合前人的研究资料,将南沙群岛珊瑚礁地貌类型分为环礁、台礁、陆坡潮下生物礁滩、陆坡与海槽谷中的塔礁、陆架潮下礁丘 5 个基本类型^[9]。

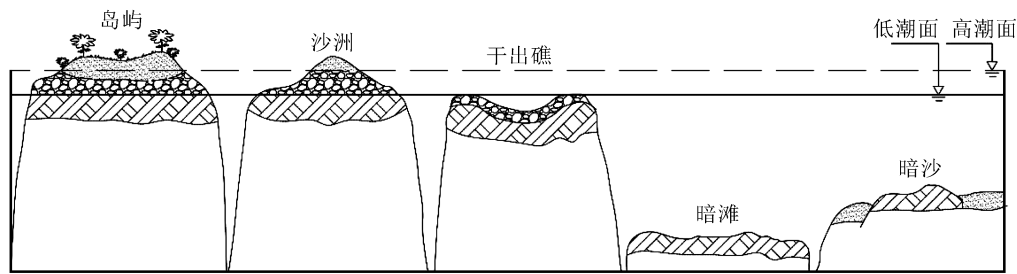


图 1 珊瑚岛礁地貌分类示意图 (根据文献[5]重新绘制)

Fig.1 Sketch map of landform classification of coral reefs (After reference [5])

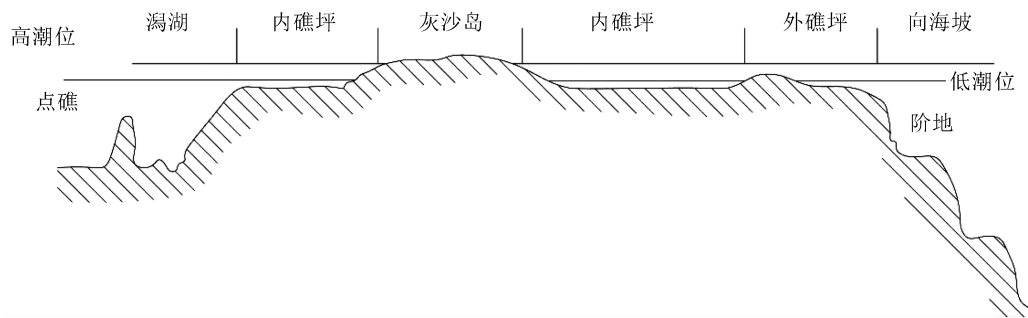


图 2 珊瑚礁工程地质分带示意图 (根据文献[8]重新绘制)

Fig.2 Sketch map of engineering geological zones of coral reefs (After reference [8])

1.2 岛礁体工程地质分层 (礁体浅地层结构)

南沙群岛珊瑚礁自渐新世开始发育以来,沉积厚度已超过 2 100 m。1990 年和 1994 年,南沙综合科学考察队先后在永暑礁钻探了 152 m 的“南永 1 井”和 413 m 的“南永 2 井”,并于 1993 年出版了《南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁地质》^[10] 专著。“南永 1 井”是南沙群岛科考队在南沙永暑礁礁坪上打入的一口全采芯的礁相地质研究钻井,总进尺 152.07 m,采芯率为 71%,并对岩芯进行研究如下:0~17.3 m 为未胶结的生物砂砾堆积,17.3 m 以下为礁灰岩,礁灰岩内存在两个沉积间断面,将岩芯分成三段:17.3~89.8 m 为生物砾砂屑灰岩;89.8~142 m 为溶蚀孔隙发育的生物砾砂屑灰岩、珊瑚灰岩;142~152.07 m 为珊瑚白云岩^[11]。“南永 2 井”共采得 413.69 m 岩芯,根据其岩性特征、生物组成变化,可分为五层:0~17.71 m 为未胶结的松散生物沉积,固结石化矿物成分仍保持生物骨骼原始成分——文石和高镁方解石;17.71~18.71 m 已成岩——珊瑚灰岩,矿物成分方解石化;18.71~22.69 m 又是一层与 0~17.71 m 岩性相同的未胶结成岩的松散生物屑层;22.69~141.71 m 为生物灰岩,生物骨骼的矿物组成由文石和高镁方解石转为方解石;141.71~413.69 m 以下为生物白云岩,生物骨骼的矿物成分先方解石化后又白云

化^[12]。图 3 为珊瑚礁浅层岩土体结构特征及岩盆结构示意图,上层为珊瑚砂砾层,含少量的珊瑚断枝、贝壳等,松散无胶结;下层为礁灰岩,埋深 16~22 m,基岩面起伏不定,部分含有弱胶结的礁灰岩,呈倾斜状,为珊瑚碎屑胶结物,强度比原生礁灰岩强度低^[12]。

从珊瑚礁浅地层结构可以看出,珊瑚岛礁地层主要分为两个部分:上部为未胶结的性质较软的钙质砂,可以作为一般浅基础的持力层;下部为胶结的性质较硬的礁灰岩,力学性质良好,可作为深基础的持力层,可承载较高荷载。

1.3 珊瑚岛礁岩石的物理力学性质

岛礁场地的工程特性不仅与岛礁体浅地层结构有关,与珊瑚礁岩土材料更密不可分。由于珊瑚礁岩的组成矿物相对单一,因此它的物理力学性质与一般常见的岩石相比具有特殊性。白晓宇等^[13]通过沙特某电厂工程的土工资料分析,对珊瑚礁进行了如下总结:(1)珊瑚礁所属的钙质土有较高内摩擦角,常在 31°~40°间,且随围压增大而降低;其具有高孔隙比,常在 0.7~2.5 间;试验中表现出高压缩性,其压缩性与黏性土类似;(2)珊瑚礁岩土孔隙发育,透水性很强,作为一般的建筑物地基其沉降变形小,但存在严重的不均匀性,珊瑚礁岩属非均质地基,高承载力伴随着不均匀性。

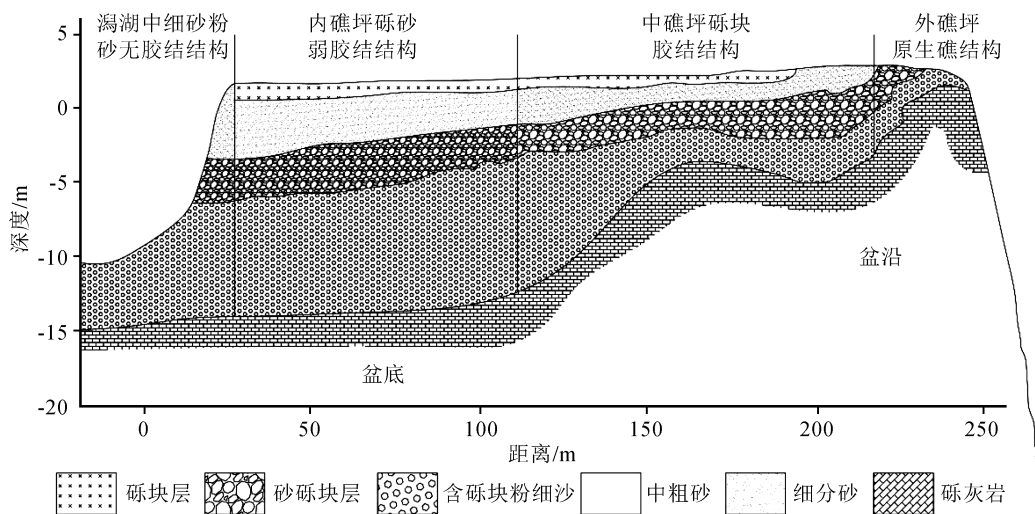


图 3 珊瑚礁岩石及浅层结构示意图(根据文献[7]重新绘制)

Fig.3 Sketch map of iopolith of coral reef and its shallow structure (After reference [7])

珊瑚礁岩石的孔隙发育,透水性很强,存在严重的不均匀性,薄弱部位易造成基础塌陷和不均匀沉降。王新志^[7]根据试验发现礁灰岩孔隙率可达到50%以上(这一点在各类岩石当中很少见);并测得饱和礁灰岩的单轴抗压强度为5.04~7.21 MPa,弹性模量7.9~12.9 GPa,泊松比0.24~0.26;礁灰岩破坏后仍有较高的残余强度,破坏前应力应变曲线接近为直线,破坏后转化为较高的延性。干燥礁灰岩的抗拉强度在0.94~1.76 MPa间,饱和礁灰岩抗拉强度在0.88~1.56 MPa间,平均抗拉强度为1.14 MPa,饱和抗拉强度略低。可见,礁灰岩的抗拉强度偏低,岩石软化性较弱。

钙质砂是普遍分布于南沙群岛珊瑚礁礁坪和潟湖表层的一类岩土介质。珊瑚礁地基土为粉砂,局部含珊瑚碎块,表面有砂土或碎屑覆盖层。粉砂为新近沉积的松散堆积物,混有大量的生物碎屑。钙质砂形状不规则,磨圆度差,易破碎,与石英砂相比具有较高的孔隙比,其承载力随着相对密度的增大而增大,而变形量则显著减小。蒋礼^[14]通过对南海岛礁钙质砂的强度特性进行三轴剪切试验发现,其有效内摩擦角随着有效主应力的增加而减小,在试验所加应力允许范围内其最终的残余强度值差别不大,在33°左右随着围压的增大而降低。

关于上述岛礁岩土工程材料的研究,国际上在上世纪八十年代曾因North Rink石油平台的工程问题而掀起研究热潮^[11],比较著名的有澳大利亚悉尼大学、Monash大学、西澳大利亚大学,国内开展相关研究的是海军工程设计部门和中国科学院(包括武汉岩土研究所和力学研究所)。但上述研究大

多关注于静力学层面,对钙质砂这种特殊岩土介质的动模量和阻尼比的研究却比较有限^[15]。

2 南海岛礁地震活动性分析

2.1 南海岛礁地质灾害危险性讨论

伴随着南海地区海洋丰富水产、矿产、油气资源的开发以及海上运输生命线的开辟,南海珊瑚岛礁的地位逐渐提升,与此同时,社会上关心南海海域有无发生大地震并伴生海啸的可能,对海区稳定性评价的需求也渐迫切。况且珊瑚礁作为一种特殊的岩土工程材料,是否会产生独特的地质灾害类型也需要进一步研究。詹文欢等^[16]通过珊瑚礁的地质记录,研究了南沙群岛海区珊瑚礁内动力灾害地质类型(包括活动断裂、地震和火山运动等)、外动力灾害地质类型(包括海底槽谷与地形突变带、崩塌、滑坡、峰礁与埋藏礁、泥丘、埋藏负地貌等),同时还分析了人类活动对珊瑚礁发育的影响。赵焕庭^[17]将南海诸岛珊瑚礁区的新构造运动特征概括为断裂、火山运动、地震、地壳下降四个方面。杨马陵等^[18]和魏柏林等^[19]分析中国南海海域地震海啸潜在危险后认为南海东部边缘的马尼拉海沟是南海亚板块向菲律宾板块的俯冲带,强震活动频繁,是南海最有可能引发地震海啸的潜在区域。单华刚等^[6]在分析珊瑚礁浅地层结构后认为应该用岩体力学数值计算方法来验证礁体顶部整体的动力稳定性。詹美珍等^[4]在研究雷州半岛西南部珊瑚礁区场地稳定性后认为珊瑚礁在不受外力作用下稳定性良好,一旦受到外力作用则会产生局部应力集中甚至丧失部分稳定性。

分析上述研究发现,南海岛礁的危险性地质主

要体现在地震、海啸方面,在动力作用下岛礁体的稳定性将是研究重点。然而,上述分析讨论均以历史资料为基础,得到的多为定性的结论,在基于精细化模型进行数值计算方面缺乏深入的研究。

2.2 南海地震活动概况

1987 年我国首次进行了海域地震烈度区划的研究,并编制了《中国海域及其相邻海域地震烈度区划图》,图中将 $N20^{\circ}$ 线附近和以北地区海域地震烈度划为 VII ~ VIII 度^[1]。刘武英^[20]在考虑地质构造因素的同时,结合日月同纬的作用,指出在中国华南及其以东海域,在 $N20^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 存在一条东西向的地震带。张虎男等^[21]在编制 1900—1988 年南海及周缘地震震中分布图时指出:震级 ≥ 6 的地震主要分布在台湾—菲律宾一线和大巽他群岛附近,集中在台湾东部海域;并指出南海北部和华南沿海是板内地震相对活跃的海域,历史上曾多次发生 7 级以上的地震。胡进军等^[3]根据南海及相邻近区域截至 2008 年的历史地震记录绘制了南海及周缘地震历史分布图,并指出东部区域特别是从台湾南部到吕宋岛西侧俯冲带地震多发、频发,多为 4.5~6 级的中强地震,6 级以上和大于 7 级的地震也有发生。

通过对南海地区地质构造、历史地震资料的分析研究表明,南海由于其独特且复杂的地震地质环境,使得该地区发生地震的几率提高,因此在当地进行工程建设的过程中必须考虑地震作用的影响。

3 场地地震反应分析现状

大量的震害调查表明,场地条件对地震作用下的地面运动有明显影响。场地地震反应分析是估计场地条件对地震动响应的有效办法,土层地震反应结果的可靠性直接关系到结构抗震设计有关地震动参数的正确选取^[22]。

由于地震动和土体非线性的复杂性,目前国内工程界广泛应用的场地地震反应分析软件采用的是 Seed 和廖振鹏等提出的单向等效线性化波动方法^[23-25],该方法的核心是将复杂的土体非线性问题简化成等效线性化问题,即用一个等效剪切模量及等效阻尼比替代所有不同应变幅值下的剪切模量和阻尼比。等效线性化方法的优点主要体现在概念简单明确,计算量小,计算参数容易获取,便于工程应用,对于地震动较小、坚硬和中硬的水平成层场地计算结果比较可靠;缺点在于该等效线性化处理只能粗略地估计土体非线性的影响,在工程实践中处理软弱土层和强地震动输入时计算结果不可靠^[26-31],

甚至可能出现过大的窄频放大效应(即共振效应)^[32]。

针对等效线性化方法的不足,国内外开发了时域非线性计算方法,该方法能够进行非线性化分析,且可以考虑孔隙水压的影响。肖遥等^[33]认为该非线性计算方法的最大缺陷在于确定非线性本构参数时比较复杂,无法通过动三轴等动力试验直接获得。

国内外学者用一维等效线性波传法来进行场地地震反应分析时发现,在地震动输入大、场地较软时该方法计算结果的不合理现象十分明显;此外,对于复杂场地而言,一维等效线性化波动法不能反应几何形态不规则、土层分布不均匀对地震波传播过程的影响^[28],因此国内外学者建立二维或三维数值模型来研究实际特殊地形对场地地震反应的影响^[34-38]。金丹丹等^[33]采用二维非线性精细化有限元模型对场地条件较为复杂的泉州盆地和福州盆地研究后认为,数值方法对加深了解盆地特殊场地条件下的地震反应特征十分必要。

与一维等效线性化方法相比,二维或三维非线性有限元方法在处理复杂场地的地震反应分析中优势明显。目前的方法已经成为考虑特殊地形及工程地质条件对场地地震效应影响的主流方法。

4 南海岛礁场地地震反应分析的特点

由于南海岛礁场地特殊的工程地质条件,造成在分析其地震反应的过程中会面临诸多困难,主要有以下四个因素需要考虑:(1)南海岛礁体特殊的地形;(2)南海岛礁特殊的岩土工程材料;(3)海水-岛礁体动力相互作用;(4)南海海底地震动的确定。

4.1 特殊地形条件

在场地地震反应分析中,不同场地类型对地震波传播有很大影响,局部地形引起的地质条件改变对地震波传播的影响备受关注,尤其是像阶地、暗河、河漫滩、软弱层、盆地、河谷等特殊地形对场地地震效应的影响显著。潘旦光等^[39]针对河谷地形进行土层地震反应分析时发现,由于河谷的存在,土层表面加速度放大系数分布不均匀,离河谷越近加速度放大越厉害。高孟潭等^[40]在总结分析汶川地震中汉源地区烈度异常原因时发现,由于该地处于流沙河河畔二、三级阶地和山前洪积扇交汇地带,地形条件极为复杂,造成该地区在汶川地震中破坏严重,导致了高烈度异常区的出现。David Carver 等^[41]通过调查加州地区 Loma Prieta 地区震后灾害时发现,地处河漫滩上的居民区在地震中破坏更为严重。

Athanasopoulos 等^[42]通过分析希腊帕特雷市 Eigion 镇的地震动记录后发现,沿河岸地区的地震动记录要比远离河岸的平原区更为剧烈。可见在场地震反应分析的过程中对于局部地形引起的地质条件改变应给予足够的重视,若采用简化规则模型进行场地地震反应分析则会使计算结果产生较大偏差。

为研究南海岛礁在地震作用下的实际反应,考虑局部地形引起的地质条件改变对地震波传播的影响,建立的模型应尽可能真实地还原实际工程地质条件,其中以图 3 中硬质礁灰岩胶结形成的“岩盆”结构最为典型,岩盆是否会对地震波的传播产生能量聚焦效应,值得重点研究。

4.2 特殊的岩土工程材料动力学性质

南海珊瑚礁主要由钙质砂和礁灰岩两种材料组成,与传统石英砂和岩石材料相比,两者均表现出特殊的物理力学性质。其中作为海工建筑物基础的钙质砂受力也较为复杂,主要表现为波浪、风、地震、暴风雨及其他振动荷载与静力荷载的共同作用^[43]。总之,海洋环境中的钙质砂处于复杂的初始固结应力状态并承受着复杂的动应力作用。复杂的静动力状态和钙质砂内空隙高、易破碎等性质都对钙质砂的动应变、孔隙水压力增长规律以及动强度特性(包括液化特性)产生显著的影响^[14]。

为了使岛礁场地地震反应分析的计算结果更为准确可靠,研究者应充分考虑钙质砂受力特性,提出科学的试验方案,对岛礁场地的钙质砂进行科学且深入的动力学特性研究,并建立能表征钙质砂基本动力学特性的本构模型,最终应用到实际计算过程中。

4.3 海水-岛礁体动力相互作用

由于岛礁体位于深海水中,存在海水与岛礁工程地质体动力相互作用,随着海洋工程的建设,尤其是岛礁码头、港口及岛礁机场的建设,开展地震作用下海水-岛礁体动力相互作用机理研究具有重要的意义和工程价值。

海水-岛礁体动力相互作用问题可以分为地震作用和波浪作用两种情况,其中以地震作用下的海水-岛礁体动力相互作用危害性最大,破坏也最为典型,在此重点考虑。同时,地震作用下海水-岛礁动力相互作用问题可以参考目前研究较为成熟的水-桥墩动力相互作用问题。黄信等^[44]在总结国内外研究现状后指出,地震作用下水-桥墩动力相互作用会使桥墩受到地震动水压力的作用,这一过程中流固耦合问题作用机理复杂,分析该耦合问题的方法

主要有解析法、数值法、混合法。解析法是先求得桥墩所受的地震动水压力的解析解,然后将动水压力带入桥墩结构的振动方程,从而对桥墩结构进行动水压力作用下的地震响应分析,但该方法仅能对简单的桥墩结构进行动水压力作用下的地震响应分析,对于复杂的岛礁体结构显然不能适用;数值法利用有限元法或边界元进行求解,由于需要建立大型水体的数值模型使得其计算效率急剧降低,较难进行动水压力作用下的岛礁体地震响应分析。而混合法综合了前两种方法的优点,先求得地震动水压力的解析解,再采用有限元建立桥墩结构分析模型,进而对桥墩进行动水压力作用下的地震响应分析。显然混合法最适用于分析动水压力作用下的岛礁体地震响应。然而混合法中对于地震动水压力分析的关键在于是否考虑水的可压缩性。如若将水体视为不可压缩的理想流体,即不考虑水体中黏滞力和密度变化的影响,则可以导出与水体运动无关的质量矩阵,从而将结构与水的相互作用转化成动力学问题求解。但实际过程中,由于水体压缩性的存在,当地震卓越周期与岛礁水体的共振周期比较接近时,岛礁体的地震反应会十分剧烈,此时动水压力将迅速增大。建议通过水下振动台试验来进一步分析水体的压缩性在地震反应过程中的表现形式,从而判断将水体视为可压缩的理想流体这一方法的可行性。

在岛礁场地的地震反应分析中,对于海水与岛礁体动力相互作用下的耦合问题,建议采用混合分析的方法,将海水视为不可压缩的理想流体,然后求得地震动水压力的解析解,最后将水压力的解析解集成到岛礁体的有限元模型中进行分析。

4.4 海底输入地震动的确定

美国和日本是世界上较早布置海底强震仪的国家。美国在地震活动性较高的南加州地区近海域安放了海底地震观测系统(Seafloor Earthquake Measurement System,简称 SEMS)。根据得到的海底强震记录,Boore 等^[45]、Diao 等^[46]及 Yang 等^[47]研究了海底强震动的特性。日本在 1923 年曾发生 7.9 级关东大地震的相模湾海底俯冲带布置了实时海底地震海啸监测系统(Earthquake and Tsunami Monitoring Cable,简称 ETMC),取得了很多海底强震记录^[48]。目前,我国台湾地区于 2011 年建成首座海底地震台站,建立于台湾东北海岸(此处经常发生地震)45 km 处,位于水下约 2 000~3 000 m^[49]。大陆地区近海海域目前为止还没有安装海底强震仪,因此我国海底强震动特性的研究还处于刚起步

阶段。

场地土的地震反应不仅与场地条件有关,还与输入地震动的特征密切相关^[50],但目前我国南海地区由于缺乏海底强震动观测系统,无法收集到南海岛礁地区海底强震观测数据。因缺乏海底强震动记录,限制了我国在近海地震动研究以及在海洋工程抗震设防领域的研究,建议在开展南海地区岛礁场地地震反应分析研究的过程中采用美国 SEMS 和日本 ETMC 采集到的强震记录。随着我国南海地区海洋工程建设的蓬勃发展,有必要在南海地区建立自己的海底强震动观测系统,从而推进我国海洋地震动领域的研究。

4.5 小结

由于计算条件和试验条件的限制,工程界对实际场地的地震反应分析多采用一维等效线性化方法,且在计算模型的选取上采用简化后的规则模型,这样计算得到的结果与实际情况可能存在差异。为研究南海岛礁在地震作用下的实际反应,建立的模型应尽可能真实地还原实际工程地质条件,包括岛礁的特殊地形、岛礁体与海水的动力相互作用以及钙质砂与礁灰岩等特殊的岩土工程材料。在海底地震动输入方面可考虑选用美国近海或者日本深海海底的实际强震记录,针对岛礁场地具有覆盖层薄、刚度低、非线性强的特性,采用二维或三维非线性有限元模型对岛礁场地进行地震反应分析,可为解决岛礁场地的设计地震动问题提供思路。

5 结论与讨论

通过对南海岛礁的工程地质条件、地震活动性分析、地震反应分析方法三个方面的探讨,为分析地震作用下其稳定性提供了思路,可为将来南海建设中岛礁场地的设计地震动参数提供依据。

(1) 南海地区地质条件复杂,其中南海东部边缘的马尼拉海沟是南海亚板块向菲律宾板块的俯冲带,强震活动频繁,是南海最有可能引发地震海啸的潜在区域,应当引起重视。

(2) 开展岛礁场地地震反应分析时可采用二维或三维非线性有限元模型分析计算,以避免一维等效线性化方法存在的局限性:包括①等效线性化方法只能粗略估计土体非线性的影响,且对于软弱土层该方法计算结果不合理;②不能考虑岛礁场地特殊地形的局限性,例如珊瑚岛礁特殊的岩盆构造传统处理手段无法表征。

(3) 目前虽然我国在海洋石油工程设计指南中

给出了地震分析部分的要求,但是该环节仅仅只是对上部结构提出了强度设计要求,并未针对岛礁特殊的场地类型提供设计地震动参数。由于受海水和岛礁特殊地形的影响,在岛礁场地的地震设防水准、地震动衰减关系、岛礁特殊“岩盆”地形、岛礁体特殊岩土工程材料的动力学特性、海水与礁体的动力相互作用、海底地震动特征等方面还有许多问题需要解决,目前这方面的研究尚属起步阶段。

参考文献(References)

- [1] 郭增建,杨国军,秦保燕,等.中国海域及其相邻海域地震烈度区划图及简要说明[J].西北地震学报,1987,9(4):79-81.
GUO Zengjian, YANG Guojun, QIN Baoyan, et al. Seismic Intensity Zoning Map and Brief Description of China Sea Area and Adjacent Sea Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 1987, 9(4): 79-81.
- [2] 郭增建,秦保燕,郭安宁,等.关于1987年中国海域地震烈度区划图的修定[J].西北地震学报,1999,21(1):99-102.
GUO Zengjian, QIN Baoyan, GUO Anning, et al. A Correction of the Seismic Zoning Map of Sea Areas in China and Its Vicinity[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(1): 99-102.
- [3] 胡进军,郝彦春,谢礼立.潜在地震对我国南海开发和建设影响的初步考虑[J].地震工程学报,2014,36(3):616-621.
HU Jinjun, HAO Yanchun, XIE Lili. Effects of Potential Earthquakes on Construction and Development in South China Sea Region[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 616-621.
- [4] 詹文欢,詹美珍,孙宗勋,等.雷州半岛西南部珊瑚礁礁体结构与场地稳定性分析[J].热带海洋学报,2010,29(3):151-154.
ZHAN Wenhuan, ZHAN Meizhen, SUN Zongxun, et al. Rock Mass Structure and Ground Stability of Coral Reefs in the Southwestern Leizhou Peninsula[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(3): 151-154.
- [5] 崔永圣.珊瑚岛礁岩土工程特性研究[J].工程勘察,2014,42(9):40-44.
CUI Yongsheng. Study on Geotechnical Characteristics of Coral Reef[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(9): 40-44.
- [6] 单华刚,汪稔.珊瑚礁工程地质中的几个重要问题研究[C]//全国工程地质大会,2000.
SHAN Huagang, WANG Ren. Study on Several Important Problems in Engineering Geology of Coral Reefs[C]//National Engineering Geological Congress, 2000.
- [7] 王新志.南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2008.
WANG Xinzhì. Study on Engineering Geological Properties of Coral Reefs and Feasibility of Large Project Construction on Nansha Islands[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.

- [8] 孙宗勋,詹文欢,朱俊江.南沙群岛珊瑚礁岩体结构特征及工程地质分带[J].热带海洋学报,2004,23(3):11-20.
SUN Zongxun, ZHAN Wenhuan, ZHU Junjiang. Rockmass Structure and Engineering Geological Zones of Coral Reefs, Nansha Islands of South China Sea[J].Journal of Tropical Oceanography,2004,23(3):11-20.
- [9] 钟晋梁.南沙群岛珊瑚礁地貌研究[M].北京:科学出版社,1996.
ZHONG Jingliang. Geomorphology Research of Coral Reef of Nansha Islands[M].Beijing:Science Press,1996.
- [10] 中国科学院南沙综合科学考察队.南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁地质[M].北京:海洋出版社,1992.
Chinese Academy of Sciences, Nansha Integrated Scientific Expedition. Quaternary Coral Reef Geology of Fierly Cross Reef on Nansha Islands[M].Beijing:Ocean Press,1992.
- [11] Detailed Engineering Geological Investigation of North Rankin 'A' Platform Site Nyland G.1988.
- [12] 汪稔,宋朝景,赵焕庭,等.南沙群岛珊瑚礁工程地质[M].北京:科学出版社,1997.
WANG Ren, SONG Chaojing, ZHAO Huanting, et al. Engineering Geology of Coral Reef in Nansha Islands[J].Beijing: Science Press,1997.
- [13] 白晓宇,张明义,李明怀,等.珊瑚礁地基的工程性状研究[J].工程勘察,2010,38(11):21-25.
BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, LI Minghuai, et al. Study on Engineering Characteristics of Coral Reef Foundations[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2010,38(11):21-25.
- [14] 蒋礼.南海钙质砂破碎力学特性研究[D].成都:成都理工大学,2014.
JIANG Li. The Study On Particle Breakage Mechanics Characteristics of South China Sea Calcareous Sand[D].Chengdu: Chengdu University of Technology,2014.
- [15] 虞海珍.复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
YU Haizhen. Experimental Research on Dynamic Behavior of Saturated Calcareous Sand Under Complex Stress Conditions [D].Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2006.
- [16] 詹文欢,孙宗勋,张乔民,等.南沙群岛海区珊瑚礁灾害性地质分析[J].热带海洋学报,2002,21(2):58-65.
ZHAN Wenhuan, SUN Zongxun, ZHANG Qiaomin, et al. Hazardous Geology of Coral Reefs in Southern South China Sea[J].Journal of Tropical Oceanography,2002,21(2):58-65.
- [17] 赵焕庭.南海诸岛珊瑚礁新构造运动的特征[J].海洋地质与第四纪地质,1998(1):37-45.
ZHAO Huanting. Characteristics of the Neotectonic Movement of Coral Reefs in the South China Sea Islands[J].Marine Geology & Quaternary Geology,1998(1):37-45.
- [18] 魏柏林,康英,陈玉桃,等.南海地震与海啸[J].华南地震,2006,26(1):47-60.
WEI Bolin, KANG Ying, CHEN Yutao, et al. Earthquake and Tsunami of the South China Sea[J].South China Journal of Seismology,2006,26(1):47-60.
- [19] 杨马陵,魏柏林.南海海域地震海啸潜在危险的探析[J].灾害学,2005,20(3):41-47.
YANG Maling, WEI Bailin. The Potential Seismic Tsunami Risk in South China Sea and Its Surrounding Region[J].Journal of Catastrophology,2005,20(3):41-47.
- [20] 刘武英.中国海域地震研究综述[J].国际地震动态,1999(8):1-5.
LIU Wuying. Comprehensive Description of the Studies on Earthquakes of the Sea Areas of China[J].Recent Developments in World Seismology,1999(8):1-5.
- [21] 张虎男.南海及其周缘的地震活动与区域稳定性评价[J].海洋学报,1995,17(6):81-89.
ZHANG Hunan. Seismicity and Regional Stability Evaluation of the South China Sea and Its Periphery[J].Journal of Oceanography,1995,17(6):81-89.
- [22] 陈青生,高广运,何俊锋.上海软土地场三维非线性地震反应分析[J].岩土力学,2011,32(11):3461-3467.
CHEN Qingsheng, GAO Guangyun, HE Junfeng. Three-dimensional Nonlinear Analysis of Seismic Ground Response of Soft Soils in Shanghai[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(11):3461-3467.
- [23] 齐文浩,薄景山.土层地震反应等效线性化方法综述[J].世界地震工程,2007,23(4):221-226.
QI Wenhao, BO Jingshan. Summarization on Equivalent Linear Method of Seismic Responses for Soil Layers[J].World Earthquake Engineering,2007,23(4):221-226.
- [24] KAKLAMANOS J, BAISE L G, THOMPSON E M, et al. Comparison of 1D Linear, Equivalent-Linear, and Nonlinear Site Response Models at Six Kik-net Validation Sites[J].Soil Dynamics & Earthquake Engineering,2015,69:207-219.
- [25] YANG J, YAN X R. Site Response to Multi-directional Earthquake Loading: A Practical Procedure[J].Soil Dynamics & Earthquake Engineering,2009,29(4):710-721.
- [26] 张克绪,谢君斐.土动力学[M].北京:地震出版社,1989.
ZHANG Kexu, XIE Junfei. Soil Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press,1989.
- [27] 杨伟林,陈国兴,严新育,等.软土地基深开挖对场地设计地震动的影响[J].地震工程与工程振动,2000,20(3):93-99.
YANG Weilin, CHEN Guoxing, YANG Xinyu, et al. Study of Influence of Deep Level Excavation on Design Ground Motion Parameters in a Weak Foundation Site[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2000,20(3):93-99.
- [28] 齐文浩,薄景山,张忠利.土层地震反应分析的研究现状[J].世界地震工程,2010,26(增刊1):368-372.
QI Wenhao, BO Jingshan, ZHANG Zhongli. Research Status on Studies of Soil Layer Seismic Response Analysis[J].World Earthquake Engineering,2010,26(Supp1):368-372.
- [29] 齐文浩.土层非线性地震反应分析方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2008.
QI Wenhao. Study on Method of Seismic Response Analysis of Nonlinear Soil Layers[D]. Hargin: Institute of Engineering

- Mechanics, China Earthquake Administration, 2008.
- [30] 齐文浩, 薄景山. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程, 2007, 23(4): 221-226.
- QI Wenhao, BO Jingshan. Review of Equivalent Linearization Methods for Seismic Responses of Soil Layers[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 221-226.
- [31] 薄景山, 李秀领, 李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 11-15.
- BO Jingshan, LI Xiuling, LI Shanyou. Some Progress of Study on the Effect of Site Conditions on Ground Motion[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 11-15.
- [32] 李小军. 非线性场地地震反应分析方法的研究[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1993.
- LI Xiaojun. Study on Seismic Response Analysis Method of Nonlinear Site[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, State Seismological Bureau, 1993.
- [33] 肖遥. 场地地震反应分析方法的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- XIAO Yao. Studies of Sites Seismic Ground Response Analysis Methods[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011.
- [34] 董非蕃, 陈国兴, 金丹丹. 泉州盆地地震效应的二维非线性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 95-102.
- DONG Feifan, CHEN Guoxing, JIN Dandan. Two-dimensional Nonlinear Seismic Effect Analysis of Quanzhou Basin[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 95-102.
- [35] 邹德高, 徐斌, 孔宪京. 边界条件对土石坝地震反应的影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 105-110.
- ZOU Degao, XU Bin, KONG Xianjing. Study of Influence of Boundary Condition on Rockfill Dam Seismic Response[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Suppl): 105-110.
- [36] 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.
- LIU Jingbo, LÜ Yandong. A Direct Method for the Analysis of Soil Structure Dynamic Interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-64.
- [37] 王一功, 杨佑发. 针对场地地震反应分析的 ANSYS 二次开发[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 42-45.
- WANG Yigong, YANG Youfa. A Secondary Development of ANSYS for Site Earthquake Response[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(2): 42-45.
- [38] 金丹丹, 陈国兴. 福州盆地地震效应特征的一、二维模型对比研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊 1): 48-53.
- JIN Dandan, CHEN Guoxin. Large-scale Two-dimensional Nonlinear FE Analysis vs. One-dimensional Equivalent Linearization Analysis on Seismic Effect of Fuzhou Basin[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Suppl): 48-53.
- [39] 潘旦光. 复杂场地的土层地震反应分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- PAN Danguang. Seismic Response Analysis of Soil Layers in Complex Sites[D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [40] 高孟潭, 陈学良, 俞言祥, 等. “5·12”汶川 8.0 级地震震源烈度异常机理的初步探讨[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(3): 216-223.
- GAO Mengtan, CHEN Xueliang, YU Yanxiang, et al. Preliminary Discussion on Intensity Anomalous Mechanism of Hanyuan Town in 5·12 Wenchuan Earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(3): 216-223.
- [41] CARVER D, HARTZELL S H. Earthquake Site Response in Santa Cruz, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(1A): 55-65.
- [42] ATHANASOPOULOS G A, PELEKIS P C, LEONIDOU E A. Effects of Surface Topography on Seismic Ground Response in the Egion (Greece) 15 June 1995 Earthquake[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 1999, 18(2): 135-149.
- [43] 李建国. 波浪荷载作用下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
- LI Jianguo. Experimental Research on Dynamic Behavior of Saturated Calcareous Sand under Wave Loading[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [44] 黄信. 水—桥墩动力相互作用机理及深水桥梁非线性地震响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- HUANG Xin. Mechanism of Water—Bridge Pier Dynamic Interaction and Nonlinear Seismic Responses of Bridges in Deep Water[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [45] BOORE D M, SMITH C E. Analysis of Earthquake Recordings Obtained from the Seafloor Earthquake Measurement System (Sems) Instruments Deployed off the Coast of Southern California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(1): 260-274.
- [46] DIAO H, HU J, XIE L. Effect of Seawater on Incident Plane P and SV Waves at Ocean Bottom and Engineering Characteristics of Offshore Ground Motion Records off the Coast of Southern California, USA[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(2): 181-194.
- [47] YANG Y Q, HU Jinjun, XIE L L, et al. Characteristics of Ground Vibration Caused by Blasting Demolition Collapse of Zhuanyang Viaduct[J]. Journal of Vibration & Shock, 2015, 34(5): 110-114.
- [48] 胡进军, 刁红旗, 谢礼立. 海底强地震动观测及其特征的研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 1-8.
- HU Jinjun, DIAO Hongqi, XIE Lili. Review of Observation and Characteristics of Seafloor Strong Motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6): 1-8.
- [49] 赵纪东. 中国台湾将建设首座海底地震台站[J]. 地球科学进展, 2010, 25(2): 146-146.
- ZHAO Jidong. Taiwan to Boost Quake Warning System[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(2): 146-146.
- [50] 高峰, 严松宏, 陈兴冲. 场地地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2789-2793.
- GAO Feng, YAN Songhong, CHEN Xingchong. Analyses on Seismic Responses of Ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Suppl2): 2789-2793.