

新型围垦堤防设计标准与设计方法研究

张发明¹ 龚政² 陈国平² 张继勋³ 郭兴文⁴

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学力学与材料科学学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以江苏苏北沿海东台条子泥特大型围垦工程为依托,围绕江苏沿海开发围垦中的关键技术问题,融汇理论分析、数值模拟、模型试验、现场监测等先进的手段和技术,提出堤防设计标准、堤防迎水坡防冲关键技术,以及基于潮位频繁变动下的堤防渗透变形多元判据,针对海堤工程位置水深较大,水下地形复杂,潮汐、波浪等水动力条件更加恶劣等条件,提出基于合理利用土地资源、岸线资源、保护环境、美化环境海堤的防护结构新形式,以及强震作用下的围堤液化成因及破坏机理,针对新时期围垦工程由高、中滩围涂向低滩围涂方向发展,对海堤建设提出的新要型的海堤结构,构建一整套沿海围垦工程中的围垦堤防稳定评估理论与方法体系以及安全保障技术。

关键词:围垦工程;设计标准;结构优化;渗透稳定;液化控制

中图分类号:TV213.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-9511(2012)03-0026-05

1 国内外研究现状

我国海涂资源丰富,海涂围垦或围海造地不仅为沿海地区发展农业、盐业、养殖业提供了大量用地,而且也为沿海港口建设和城市工业及生活设施提供大量用地。围海造地已成为解决我国沿海地区人多地少,经济、社会发展与土地不足之间矛盾的主要途径之一。滩涂围垦就是利用围堤包围具有特定条件的海边滩地(主要是落潮滩地,当然,随着围垦事业的发展,还可以在稍深水中),于筑堤工程完成后通过排水设施疏干堤内使成农田的工程。滩涂围垦工程新建海堤具有堤坝较矮长、主要建筑物基础条件差、施工难度大、运行环境恶劣等特点,设计、施工技术均具有其特殊性。新时期围垦工程正由高、中滩围涂向低滩围涂的方向发展,由于低滩区域水动力条件复杂,堤前水深浪大,堤身高度大,选择合适的围堤标准等级、堤身结构形式、海堤的抗浪、防冲措施是低滩围垦工程建设的难点^[1],对海堤建设提出了新的要求,结构断面型式、建筑材料等都需要进行改进和创新。随着经济高速发展,围垦的开发目标要求海堤满足多功能要求,如路堤结合、堤港结

合,给海堤的安全赋予了更深层次的含义。科学、生态围涂等要求的提出,这些都对海堤设计赋予了新的含义与要求,极大地推动了新型结构海堤的研究与实践。

海堤工程的防洪(潮)标准与海堤保护区的社会经济发展水平紧密相关。区域经济发展水平越高的地区,风暴潮灾害的经济损失和社会影响越大,对海堤防御风暴潮的要求相对更高;与此同时,地区经济发展水平又决定了该区域承受灾害的能力和恢复生产自救的能力,以及在海堤工程建设方面的资金投入力度。在目前国家对沿海地区海堤工程建设的投资政策情况下,海堤工程的防洪(潮)标准与区域社会经济发展相辅相成,互为依托。由于气候变暖,江苏沿海海平面持续上升、风暴潮频发、区间暴雨增强等因素,也使得现状海堤标准难以满足要求。根据 1965—1995 年潮位观测资料,分析得出江苏沿海海平面绝对上升速率为 2.2 mm/a(不包含陆地沉降率),以此推算,未来 20 年江苏沿海海平面将绝对上升约 44 mm。频发的风暴潮伴随着巨浪,会对海堤等造成严重的破坏。必须将滩涂开发与海堤设计标准等一并进行系统深入研究,提出新形势下的海堤

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAB03B02)

作者简介:张发明(1963—),男,浙江浦江人,教授,博士,主要从事地质工程研究。

设防标准。

堤基液化是地震时围堤破坏的重要原因。过去的几次大地震震害调查结果显示,地震液化引起的土体变形,特别是土体大变形和侧向流动是导致桥梁、坡坝、建筑物、生命线工程及道路等构筑物和基础破坏的主要原因。近年来,针对地震作用下的围堤液化特性,国内外已经开展了一些研究,包括振动台试验、离心机试验、数值模拟等。这些研究结果均验证了地基液化是围堤地震破坏的一个重要因素。然而,由于液化场地地震性态相当复杂,强震作用下的围堤液化成因及破坏机理仍不是很清楚,有待补充与完善。张建民等^[2-3]根据新泻地震和阪神地震液化场地的调查分析,提出液化后大变形的实用预测图表。经验公式方法的优点是应用方便,通过场地的某些参数即可计算出地面永久变形。但是由于经验预测模型都只针对特定的地区和土层条件,而且忽视了边界条件对变形的影响,所以适用性还不强。国内简化分析方法——等效结点力法研究以张克缙^[4]、刘汉龙^[5]等为代表,简化分析方法的计算结果与现场调查比较符合,但是其实质是静力分析,把复杂的地震响应简化为静力荷载,而忽视了地震荷载作用下土体的动力响应,且不能对变形的发生过程进行定量描述。

土体的室内动力试验是目前国内外研究土体液化特性的重要手段之一。张建民等^[6]通过对饱和砂土液化后变形机理的分析,对 Romberg-Osgood 模型进行改进,提出了一个有物理基础的、适用与描述液化后不排水单调荷载条件下砂土应力-应变关系的本构模型,并给出了适用于描述液化后不排水往返加载条件下的、从液化前中小应变到液化后大应变的本构模型。另外,王刚等^[7]基于边界面弹塑理论的框架,对剪切引起的可逆性和不可逆性体变进行了数学描述,建立了可描述饱和砂土液化后大变形的弹性循环本构模型。

目前分析液化引起的地震变形常用的方法是非线性本构模型与数值分析方法的联合使用。这些方法一般来说包括有效应力非线性本构模型、Biot 动力固结理论、有限元或有限差分逐步迭代求解。数值分析方法的可靠性,极大地依赖于所采用的本构模型、模型参数的确定以及对计算对象的材料、结构及边界条件进行简化处理的程度^[8]。另外,将有限元等数值方法同试验研究相结合,也是一种思路。Kuwano 等首先根据有限元法得到初始应力状态和地震剪应力时程,然后利用三轴扭剪试验模拟应力状态及加载情况,根据试验得到的土的残余应变来

计算土坝的永久位移。利用数值分析方法计算液化后土体变形,关键在于液化后土体本构模型的选取及对大变形发生机理的解释。已经建立了较多的本构模型,并利用有限元或有限差分方法进行了液化后变形的数值分析^[9]。

纵观国内外对渗透变形的研究现状,已有研究成果主要是对渗透变形的形成与恶化进行宏观定性和半定量的研究,对于堤坝的抗渗透性也主要集中在地下水渗流的复杂模型问题。对于沿海滩涂围垦工程中的堤防堤基渗透破坏的研究极少^[10],尚不能从机理上分析渗透破坏的成因,急需采用试验与理论相结合的方法研究围垦堤身、堤基的渗透变形机制。渗透变形影响因素众多,过程十分复杂。关于堤基渗透变形机理的理论体系至今仍然很不完善。最为关键的因素有堤基地质结构复杂性、围堤附近环境变化的多元性及堤前环境的复杂性等,由于岸坡和堤防迎水坡经常受到水流的浸泡和冲刷,特别是在潮位日变幅大、潮差变化过程复杂条件下其结构和受力往往难以定量甚至定性分析,因而也难以控制,另外,还有风暴潮与波浪的作用,也使得堤基渗透变形的发生过程难以准确判别;目前已有的数值计算方法虽然能够定性反映堤基渗透变形过程,但是却很难精确模拟现实情况。堤基渗透变形的数值模拟要从机理分析方面入手,建立更合理、全面的渗透变形判据,进而引进更适合渗透变形特点的计算方法,以期获得更精确的模拟效果。

江苏沿海具有举世闻名的辐射沙洲海域,槽滩相间、地形复杂、潮差大、动力作用强,使得现状海堤标准难以满足要求。因此,系统开展沿海围垦工程技术研究,可为沿海开发工业布局、防御自然海洋地质灾害、节约工程投资提供重要的科学依据,具有极为重要的理论意义与现实意义。

2 研究目标

针对江苏沿海开发中的关键问题和现实需要,本文紧紧围绕围垦中的关键技术问题,融汇理论分析、数值模拟、模型试验、现场监测等先进的手段和技术,开展围垦堤防设计标准、堤防迎水坡防冲关键技术、昼变动潮位下堤防渗透稳定判别理论、堤防结构抗震与振动液化控制技术以及堤防结构优化设计关键技术研究,旨在构建一整套沿海围垦工程中的围垦堤防稳定评估理论与方法体系以及安全保障技术,着力提高成果的工程实用性,方便地进行多方案的比较,为解决围垦堤防优化设计与安全控制等提供先进的理论方法和现代手段。

针对围垦堤防的特点,研究影响围垦堤防安全的控制性影响因素,提出合理的结构计算分析方法与安全设计标准,在此基础上采用现代最优化设计理论与方法,建立围垦堤防结构的优化数学模型,获得最佳的堤防结构,从而提高滩涂围垦堤防的设计水平与设计质量。

围绕基于生态环境保护的江苏沿海大规模围垦设计、施工、材料、工艺关键技术问题,针对江苏沿海水动力条件复杂,研究围垦堤防设防标准与设计方法,通过对关键技术的延伸、耦合与配套,形成相应的产业链,极大提升我国在大规模围垦工程领域内的技术能力。

3 研究内容

3.1 新型围垦堤防设防标准研究

针对围垦方案与施工工艺,研究围垦工程实施前后围垦堤防工程主要设计参数变化,研究新形势下水文条件变化,不同设计标准围垦堤防方案的技术经济分析,以现有的围垦堤防设计标准为基础,根据江苏沿海的实际情况,研究并提出设防标准的建议。

a. 对国内海堤设计相关规程规范、兄弟省市大型围垦工程设计标准研究相关资料,沿海开发产业布局及相关部门对海堤设防标准的意见,以及海堤设计主要基础资料等进行收集和整理;分析现状海堤采用的设计标准对于未来沿海滩涂围垦开发的适应性。

b. 以潮流、波浪水动力数值模拟为主要技术手段,研究新形势下水文条件变化,主要包括匡围工程实施前后海堤工程主要设计参数中潮位、波浪条件等的变化;推求江苏沿海不同重现期的潮位、波浪等设计参数分布,考虑天文大潮、假想台风、海平面上升最不利情景遭遇,研究匡围工程实施后潮位、波浪等不利条件,作为具有特别重要保护对象的新建海堤工程的设防标准。

c. 初步开展不同设计标准海堤方案的技术经济分析,按照保证防潮安全、工程投资最小化的原则,并结合地方实际情况,提出新围垦工程分类、分段、分期的设计标准。对于部分特别重要保护对象,主要从允许越浪量等角度,初步研究该海堤的设防标准。

3.2 新型围垦堤防迎水坡防冲关键技术研究

围绕围堤快速施工方法,研究筑堤新材料与新工艺下的堤防迎水坡防冲关键技术,提出新型防浪护面结构型式。

a. 采用新材料新工艺,提出新型护面结构型式。研究波浪爬高、越浪量和海堤结构稳定性,提出经济合理的新型护面结构和多功能海堤结构及其相关设计计算方法;对不同类型的海堤分别从抗滑稳定性、堤脚冲刷稳定性、渗透稳定性、动力作用下海堤的稳定性、强台风作用下海堤稳定性以及不同结构形式的防浪效果等几个方面开展相应的研究。

b. 综合考虑围垦、港口及环境的需求,提出多功能新型海堤结构。重点依据海堤的功能,提出海堤设计中主要影响因素,建立合适的数学优化分析模型,进而对结构进行优化设计分析;建立基于多重影响因素的海堤优化分析模型,选取典型地基(粉(砂)土类和淤泥质土)为研究对象,在研究地基加固的基础上,提出合理的上部结构型式,以及提出应对超强台风对海堤的作用的工程措施。

3.3 昼变潮差新型围垦堤身与堤基渗透破坏特征与控制技术研究

海堤的渗漏一般可以分为堤身渗漏和地基渗漏2种。本文结合不同地基情况的海堤,对围垦海堤进行渗透稳定性研究,提出科学有效的计算模型、分析方法和稳定性判别标准,为设计提供参考。依据围垦新材料,解决快速施工期及工后昼变潮差堤身及堤基渗透变形问题,分析高潮位、昼变潮差堤基渗透破坏形式与破坏动力条件,研究潮涨潮落过程及波浪作用下管袋、“土代石”等新型围垦堤防及潮沟区堤基的围垦堤防渗流特性,提出渗透破坏控制措施。

a. 高潮位下堤基渗透破坏形式与破坏动力条件分析。渗透变形的形式及其发生发展过程与地质条件、土粒级配、水力条件、防渗排渗措施等因素有关。土体渗透变形类型的判别是分析、预测和控制渗透变形的前提。因此,准确判别堤基渗透变形类别、提供临界水力比降参数是堤基选择安全可靠、经济合理的防渗措施的基础依据。

b. 潮涨落过程中的海堤渗流特性的物理模型试验。拟开展物理模型试验,通过对不同级配的滩涂沉积砂土进行不同变水头作用下的试验,获得颗粒移动规律、水力梯度与流量、平均流速的关系。给出干重度-固结度-临界水力坡降之间的关系式。

c. 渗透变形与颗粒级配相关关系研究。通过对粗粒土不同级配的渗透破坏坡降控制性试验研究,探讨粗粒土的渗透破坏坡降与其级配在不同范围内存在的相关关系。本研究拟选取条子泥围垦工程当地材料,通过筛分配料进行不同级配土料渗透破坏坡降的规律性研究,对试验数据进行多角度的

相关性回归分析,研究渗透破坏坡降与不均匀系数、渗透破坏坡降与曲率系数的关系,并提出渗透破坏控制措施。

3.4 新型围垦堤防结构抗震与振动液化控制技术研究

目前对于地震作用下海堤稳定性研究成果相对较少。基于此,本文重点研究在地震作用下海堤粉细砂地上海堤的液化稳定性计算方法和动力稳定性判别标准。研究快速施工震动荷载作用下堤防结构抗震与振动液化控制技术,基于我国现有规范提出一种适合围垦区围堤地震液化稳定分析简化法。

a. 围堤抗震设防标准的原则和方法研究。主要开展大量的调研工作,分析国内外现场实测数据和设计分析资料,结合现有工程抗震设计规范,提出快速施工震动荷载作用下围堤的抗震设防标准采用的原则和方法。

b. 围堤及围堤地基地震液化的分析方法研究。为了更好地描述复杂应力路径下土体动力特性,拟基于超固结界面概念、Armstrong - Frederick 型非线性运动硬化准则和非关联流动准则,建立反映动荷载作用下砂土的循环活动性以及液化强度特征,可以用于饱和液化砂土的本构分析模型。实验方法主要采用室内试验方法进行分析研究。

c. 围堤地震液化的简化分析方法研究。基于我国现有规范,提出一种适合围垦区围堤地震液化稳定分析简化法,并进行实例应用。

d. 围堤地震液化控制技术研究。研究围堤在地震作用下的地震反应、超孔隙水压力的发展过程和围堤的变形特征,计算分析降低浸润线、碎石桩消散超孔隙水压力和加筋等措施的抗震效果,并提出围堤综合抗震措施。

3.5 新型围垦堤防结构优化设计关键技术研究

依据围垦区的水文地质条件、围垦材料特点,综合考虑围垦、港口及环境的需求,研究围垦堤防在安全稳定基础上的最优结构断面型式。具体包括以下研究内容。

a. 围垦海堤设计安全控制指标及其计算理论方法研究。①海堤抗滑稳定性研究。海堤施工期与运行期的稳定性是海堤建设成败的关键指标之一。针对围垦海堤的特点,在借鉴软土地基上的堤坝稳定性计算理论与方法,通过考虑地基破坏形式、堤身与基础的强度、堤脚冲刷稳定性以及堤身滑动稳定性等方面,对围垦海堤进行稳定性研究,提出合理有效的数值分析模型、分析方法和稳定性判别标准,为设计提供参考。②新型防浪结构研究。风浪

是造成海堤堤坝越浪、海水漫溢、海堤损坏的主要动力因素,如何防止风浪对海堤的破坏是海堤设计中重要问题之一。这一问题涉及风浪特性的计算以及风浪与海堤建筑物构造特点间的相互作用计算分析。本课题结合风浪计算理论,通过数值模拟计算,提出比较有效地防浪结构设计,并进行室内、现场试验验证,并将其应用于实际工程中。

b. 海堤结构优化设计研究。在前述工作基础上,本课题采用现代最优化设计理论与方法,建立包含影响海堤安全性指标在内的堤防结构的优化数学模型,通过最优化方法获得最佳的堤防结构,从而提高滩涂围垦堤防的设计水平与设计质量。

4 技术路线

针对海堤工程位置水深较大,水下地形复杂,潮汐、波浪等水动力条件更加恶劣,海堤的防护要求更高等特征,通过对海堤现状评价及国内外相关资料的收集,采用水动力数值模拟的手段,研究围垦工程实施前后海堤工程主要设计参数的变化,主要包括潮位、波浪条件等;建立复杂地形条件下考虑底摩阻及局部风影响的浅水波浪折射、绕射变形数学模型;计算不同设防标准围垦工程前后不同堤段的波浪要素;对不同设计标准海堤方案,提出海堤的分段设计标准建议;采用波浪物理模型试验,研究波浪爬高、越浪量和海堤结构稳定性,提出经济合理的新型护面结构和多功能海堤结构,及其相关设计计算方法;对不同类型的海堤分别从抗滑稳定性、堤脚冲刷稳定性、渗透稳定性、动力作用下海堤的稳定性、强台风作用下海堤稳定性以及不同结构形式的防浪效果等几个方面开展相应的研究,提出适用的理论模型和数值分析模型;采用数值计算、物理实验的手段,运用海岸动力学、流体力学、结构力学、高等土力学、工程优化设计以及有限元等基本理论开展相关的研究。拟采用的技术路线见图1。

a. 开展广泛的调研、资料收集和系统的分析整理工作,总结现有研究成果,结合研究目标剖析所要解决的问题,拟定更为细致的研究计划。

b. 通过现场调研,了解我国海堤建设现状,分析海堤建设中存在的主要问题,研究海堤损坏机理。按照临港新城、农垦、工矿企业等3大类用地方式分别进行研究。

c. 地质信息的取得与分析。开展必要的地质勘探和科研试验,详细分析勘探和试验资料,建立符合实际的地质模型,通过分析论证确定渗透变形的边界条件、破坏模型和与分析方法相配套的地质参数等。

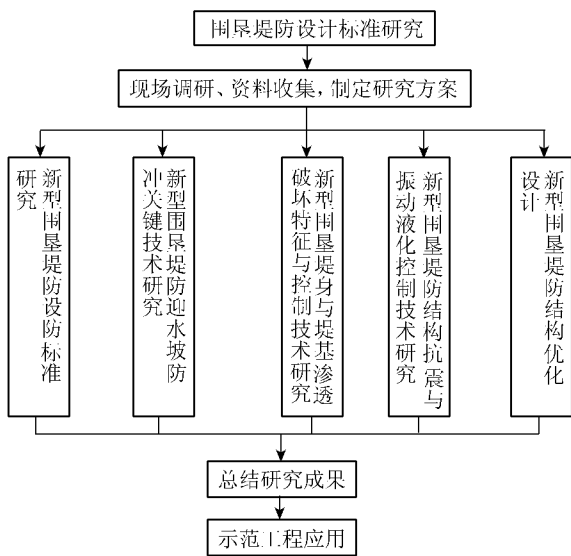


图 1 技术路线

d. 研究海相沉积淤泥质土在风暴潮作用下的堤基滑动破坏机理,为合理确定堤防工程的安全设计提供重要的技术依据。

e. 采用波浪物理模型试验,研究波浪爬高、越浪量和海堤结构稳定性,提出经济合理的新型护面结构和多功能海堤结构,及其相关设计计算方法。

f. 对目前我国围堤工程动力破坏和动力特性进行分类,根据分类情况开展相应的实验研究,提出适用的理论模型和数值分析模型;根据理论分析和数值分析的结果提出抗液化处理技术。

g. 对目前我国海堤工程从地质条件、工程材料、断面型式、功能、规模等几个方面进行分类,根据分类情况对不同类型的海堤分别从抗滑稳定性、堤脚冲刷稳定性、昼夜变动潮位条件下的渗透稳定性、动力作用下海堤的稳定性、强台风作用下海堤稳定性以及不同结构形式的防浪效果等几个方面开展相应的研究,提出适用的理论模型和数值分析模型。

5 预期成果

江苏海岸远离岸线的沙洲围垦区堤外水深较大,水下地形更加复杂,潮汐、波浪等水动力条件更加恶劣,海堤的防护难度增大。由于气候变暖,江苏沿海海平面持续上升、风暴潮频发、区间暴雨增强等因素,也使得现状海堤标准难以满足要求。必须将滩涂开发与海堤设防标准等一并进行系统深入研究,提出新形势下的海堤设防标准,研究成果可为江苏沿海开发工业布局、防御自然海洋地质灾害、节约工程投资提供重要的科学依据,具有极为重要的理论意义与现实意义。本课题成果的推广应用前景广阔,具有十分重要的推广应用价值。本项目研究将

达到的预期成果如下:

a. 系统深入研究滩涂开发与海堤设防标准,提出新形势下的海堤设防标准,并为地区经济长远发展留有适当的余地,并应用于 2 个工程。

b. 海堤工程位置水深较大,水下地形复杂,潮汐、波浪等水动力条件更加恶劣,海堤的防护要求更高。对堤防的结构型式提出了新的要求,开发新型的堤防的结构型式。

c. 开展昼变潮位下堤基渗透破坏形式与破坏动力条件分析,提出昼变潮位、波浪及风暴潮条件下不同堤基地质结构的堤基渗透破坏判别标准。

d. 提出强震作用下的围堤液化成因及破坏机理、堤防结构抗震与振动液化控制技术,解决围垦大堤抗液化加固工程措施与相应的施工技术。

e. 开展堤防结构优化设计关键技术研究,结合海堤满足如路堤结合、堤港结合等多功能要求,提出新型海堤结构形式。

参考文献:

- [1]高志伟.小洋山北海堤围垦工程技术研究[D].上海:上海交通大学,2008.
- [2]张建民.地震液化后地基大变形的实用预测方法[C]//第八届土力学及岩土工程学术会议论文集.北京:万国学术出版社,1999:573-577.
- [3]SHAMOTO Y,ZHANG J M,GOTO S.Mechanism of large post liquefaction deformation in saturated sand[J].Soils and Foundations,1996,37(2):71-80.
- [4]张克绪,李明幸,常向前.地震引起的土坝永久变形分析[J].地震工程与工程震动,1989,9(1):91-100.
- [5]刘汉龙,陆兆溱,钱家欢.土石坝地震永久变形分析[J].河海大学学报:自然科学版,1996,24(1):91-96.
- [6]ZHANG J M,WANG G.A constitutive model for evaluating small to large cyclic strain of saturated sand during liquefaction process[J].岩土工程学报,2004,26(4):546-552.
- [7]王刚,张建民.砂土液化大变形的弹塑性循环本构模型[J].岩土工程学报,2007,29(1):51-59.
- [8]张建民,王建华.土动力学与土工抗震[C]//第八届土力学及岩土工程学术会议论文集.北京:万国学术出版社,1999:44-55.
- [9]LI X S,MING H Y.Unified modeling of flow liquefaction and cyclic mobility[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2000,19:363-369.
- [10]徐柏龙.浅析沿海堤基无粘性土渗透变形的判别及其影响因素[J].岩土工程界,2008,11(8):43-45.

(收稿日期:2012-04-05 编辑:陈玉国)