

J “九五”国家重点科技攻关项目成果论文集
JIUWU GUOJIA ZHONGDIAN KEJI
GONGGUAN XIANGMU CHENGGUO LUNWENJI

深水枢纽港建设 关键技术及示范工程

交通部科技教育司 编



人民交通出版社

S

HENSHUI SHUNJUGANG JIANSHE GUANJIAN JISHU JI SHIFAN GONGCHENG

“九五”国家重点科技攻关项目成果论文集

深水枢纽港建设关键技术及示范工程

交通部科技教育司 编

人民交通出版社

内 容 提 要

本论文集是交通部科技教育司为总结“九五”国家科技攻关项目《深水枢纽港建设关键技术及示范工程》研究成果专门组织出版的文集。全书共收集论文 30 余篇,分为海上深层水泥搅拌加固软基技术(海上 CDM 工法)、深水防波堤建设技术、深水大圆筒码头结构型式关键技术、港口水工建筑物耐久性技术四部分。文中包括了深水枢纽港建设方面的科研、设计、施工技术,这些技术整体上达到了国际先进水平,部分达到了国际领先水平。其中多项技术得到了工程应用并经受了实践的检验,取得了明显的经济效益和社会效益,提高了深水枢纽港工程建设技术水平。

此论文集可供从事交通工作的行政管理、技术管理、标准规范、试验研究、设计施工技术人员和大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

深水枢纽港建设关键技术及示范工程/交通部科技教育司编.-北京:人民交通出版社, 2001
ISBN 7-114-03993-X

I. 深… II. 交… III. 深水港-港口工程-工程施工-技术-文集 IV. U658-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 046248 号

“九五”国家重点科技攻关项目成果论文集

深水枢纽港建设关键技术及示范工程

Shenshui Shuniugang Jianshe Guanjian Jishu Ji Shifan Gongcheng

交通部科技教育司 编

正文设计: 孙立宁 责任印制: 张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 26.75 字数: 428 千

2001 年 9 月 第 1 版

2001 年 9 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—1500 册 定价: 68.00 元

ISBN 7-114-03993-X

U · 02911

编委会名单

主任：张春贤

副主任：任茂东

编委：张春贤 任茂东 刘家镇 陈国靖 王笑京
郑家庆 李子青 赵冲久 张敬 曲长志
左其华 袁雪戡 杜颖

主编：任茂东 刘家镇

副主编：赵之忠 郑代珍

编辑：杨志峰 李华国 张杰 杜力 杨江芄
孙玉平 王文奎 方景 毛凯 赵智邦
邓冰 胡卫群 赵瑞琴

序

随着新世纪的到来和“十五”计划的全面启动,我国交通事业也进入了更加快速发展的时期。为更好总结“九五”国家重点科技攻关的科研成果,促进科研成果进一步转化和推广,提高交通建设科技含量,加速交通现代化进程,由交通部科教司组织编写了《国道主干线设计集成系统开发研究》和《深水枢纽港建设关键技术及示范工程》两本科技成果论文集。

“九五”是我国交通发展取得显著成绩的五年,也是交通科技取得重大进展的五年。为贯彻实施“科教兴交”战略,“九五”期间我部组织实施了“国道主干线设计集成系统开发研究”、“深水枢纽港建设关键技术及示范工程”等国家重点科技攻关项目。这些项目紧密结合“九五”交通基础设施建设和运输发展形势,对涉及交通事业发展的关键技术进行集中攻关。经过科技人员的艰苦努力,取得了突破性的进展,多项成果达到国际领先水平。这些研究成果已经直接服务于国民经济主战场,为交通行业产业升级和结构调整作出了积极贡献。

这两本论文集是交通科技工作者五年来集中攻关的丰硕成果的总结,更是广大交通人不懈努力、勇于创新智慧结晶。在此对参与这项工作的科技人员表示衷心的感谢,并祝愿他们今后为我国交通事业发展作出更大贡献。

张春贤

二〇〇一年八月

前言

沿海港口在国民经济发展中起着举足轻重的作用,担负着我国外贸进出口货运量的近90%。随着国民经济持续、快速、健康的发展和即将加入WTO,我国的对外贸易将大幅度增长,原油、成品油、铁矿石、煤炭等大宗货物进出口量将增大,外贸集装箱运输也将保持高速增长,港口工程建设将面临更加繁重的任务。然而由于受到可利用码头岸线的限制,深水枢纽港的建设将向水深、浪大、流急、地基条件差、工程建设难度大的外海深水区、大江大河入海口等自然条件恶劣、复杂的区域发展。因此,迫切需要研究深水枢纽港建设技术,为我国深水枢纽港建设提供有力的技术支持。

深水枢纽港建设离不开基础地基处理、深水防波堤、码头结构型式及其建筑物使用维护等关键技术。“九五”国家科技攻关项目《深水枢纽港建设关键技术及示范工程》共设海上深层水泥搅拌加固软基技术(海上CDM工法)、深水防波堤建设技术、深水大圆筒码头结构型式关键技术、港口水工建筑物耐久性研究4个课题。

海上深层水泥搅拌加固软基技术(海上CDM工法)研究(96—415—01):

CDM工法是一种在地基中注入水泥硬化材料,用特别搅拌机就地快速加固软弱地基的新方法。由于CDM工法的开发应用历史不长,在基本理论、设计方法与施工工艺等方面还存在着许多需要解决的问题。因此本课题设置了基本理论研究、设计方法、施工工艺、现场取样与工程土试验特性研究5个专题进行研究,以完善CDM工法的计算理论、设计及施工工艺。通过近5年的攻关,取得了如下成果:

——针对海上CDM加固地基,提出了土体极限分析理论,提出了基于曲面破裂面的土压力计算公式,提出了边坡稳定性分析的精确方法,提出了非均质土地基承载力的计算方法;编制了土压力计算、承载力计算、结构强度计算、稳定计算及整体稳定计算的应用软件及计算图表;

——全面研究了水泥搅拌土的工程特性及其影响因素,提出了合理的配合比设计方法;

——改进了CDM工法的施工工艺流程,编制了海上CDM工法操作规程;

——研究确定了先进实用的钻孔取样设备和工艺,编制了“CDM搅拌体现场取样与强度试验规程”。

深水防波堤建设技术研究(96—415—02):

随着国民经济的发展和船舶大型化,在水深、浪大地区修建港口和防波堤将越来越多,因此,本课题设置深水航道对波浪传播影响规律、船舶进出口门通航条件、深水防波堤新型结构型式及斜向浪与建筑物的相互作用4个专题对深水防波堤建设技术进行攻关研究。通过近5年的攻关,取得了如下成果:

——研究了深水航道对波浪传播影响规律。针对示范工程研究解决了消减防波堤设计波高的工程措施;

——研究确定了船舶进出典型港口口门的限制条件,研究了不同防波堤堤头布置的水力特性和其对通航条件的影响,提出了典型港口口门通航的一般规律;

——针对梳式防波堤结构和无顶板开孔沉箱防波堤结构进行了深入的研究,提出了设计、施工成套技术;

——对斜向波与直立式防波堤相互作用问题进行了深入研究,提出了斜向波浪力,堤头波浪力和斜向波作用时,直立堤前后波况的经验计算和分析方法。

深水大圆筒码头结构型式关键技术研究(96—415—03):

大圆筒用于建造码头始创与法国,由于造价低、施工进度快、受力条件好、适用范围广等优点,逐渐被国内外港工界所重视,但是由于其计算理论、设计方法、施工工艺等方面尚缺乏深入认识,使该结构型式的广泛应用受到局限。因此本课题通过设置模型试验研究(基本计算理论)、设计计算方法及 CAD 技术、施工工艺、原型观测等 4 个专题对深水大圆筒码头结构型式关键技术进行深入研究。通过近五年的攻关,取得了如下成果:

- 提出了大圆筒筒内外土体的土压力计算模式;
- 研究了沉入式大圆筒的工作机理及破坏模式,建立了沉入式大圆筒的稳定计算模式;
- 研究提出了大圆筒的抗震性能;
- 提出了大圆筒码头结构的设计计算方法,开发了 CAD 软件;
- 研究开发了大圆筒综合助沉措施施工方案。

港口水工建筑物耐久性研究(96—415—04):

几十年来,我国有大量的沿海港口码头工程投入使用,并暴露出较为严重的耐久性问题。随着港口的规模越来越大,自然条件也更加恶劣,因此研究适合于这些建筑物的设计标准、新材料、新技术、新工艺以提高其耐久性势在必行。本课题通过设置典型地区环境和已建工程破坏状况调查与分析、氯离子在混凝土中渗透规律及钢筋锈蚀评定技术、海工高性能混凝土、混凝土表面涂层封闭保护技术以及电化学脱盐防腐保护技术进行攻关研究。通过近五年的攻关,取得了如下成果:

- 通过对东南沿海和北方港口建筑物破损情况的调查,分析了港口混凝土建筑物破坏的主要影响因素,并提出了保证混凝土建筑物正常运行 50 年以上的混凝土耐久性的设计建议指标及相关要求;
- 提出了氯离子在混凝土中的渗透规律,开发了钢筋锈蚀评定技术;
- 研究开发了大掺量磨细矿渣高性能混凝土和掺硅粉-粉煤灰高性能混凝土的配制与应用技术;
- 研究开发了 GSY 渗透剂、FSY 封闭剂、FH 咪喃改性环氧底漆系列涂层封闭保护体系,其中 GSY 有机硅渗透剂、GSY(I)、GSY(II)的性能达到国际先进水平,并初步建成中间体合成中试基地;

——开发了钢筋混凝土中化学脱盐防腐保护的阳极材料,及工具型阳极层的设计方法,提出了海工钢筋混凝土防腐新技术。

《深水枢纽港建设关键技术及示范工程》集中了科研、高等院校、设计、施工等共计 14 个单位,数百位科技人员,历时近五年联合攻关,研究提出了海上深层搅拌加固软基(CDM)、深水防波堤建设、深水大圆筒码头结构型式、港口水工建筑物耐久性成套技术,并在计算理论、设计方法、施工工艺及管理等等诸方面均有较大的创新和突破。取得了研究成果 118 项,经国内知名专家鉴定,其中达到国际领先水平 34 项,国际先进水平 38 项,国内领先水平 22 项。

攻关成果应用于天津、大连、宁波北仑、黄骅、深圳赤湾等国家重点工程项目,解决了工程建设中关键技术问题,降低了工程造价、缩短了建设工期,有力地支持了国家重点工程建设。攻关成果的应用和推广,将提高我国深水筑港建设水平,加快港口建设速度,促进交通运输业的发展。

目 录

海上深层水泥搅拌加固软基技术(海上 CDM 工法)

前言	(3)
海上 CDM 工法基本计算理论的研究	(4)
土体极限分析的基本理论	(28)
基于曲面破裂面的土压力计算方法	(39)
边坡稳定性分析的精确方法	(56)
非均质土地基承载力的计算方法	(66)
海上 CDM 工法加固软基技术设计方法的研究	(79)
水泥搅拌土工程特性研究	(105)

深水防波堤建设技术

前言	(135)
深水航道对波浪传播影响规律的研究	(137)
波浪模型试验中底部摩擦的研究	(163)
航道引起波能集中现象的试验研究	(167)
船舶进出口门通航条件的研究	(172)
梳式防波堤的试验研究与实施	(179)
遥控自航船模航行试验研究	(187)
无顶板开孔沉箱结构型式试验研究	(194)
斜向波与直立式防波堤相互作用	(202)

深水大圆筒码头结构型式关键技术

前言	(223)
沉入粘土中的大圆筒筒内外土压力分布规律及计算方法	(224)
沉入式大圆筒结构码头工作机理离心试验研究	(234)
沉入式大直径圆筒结构施工期稳定性的试验研究	(246)
大圆筒码头结构抗震性能试验研究	(254)
沉入式大圆筒码头结构设计计算方法的研究	(264)
大圆筒码头结构的数值模拟分析	(271)
圆筒接岸结构桩基码头的有限元分析	(282)
波浪荷载作用下大圆筒结构的动力特性分析	(291)

目录

港口水工建筑物耐久性技术

前言	(307)
混凝土中钢筋腐蚀预估技术的试验研究	(308)
混凝土中钢筋腐蚀电化学检测与处理系统研究设计	(318)
混凝土中钢筋腐蚀电化学检测评定技术、技术研究	(329)
海工高性能混凝土的研究与应用	(342)
FH 系列混凝土表面涂层封闭保护技术研究	(377)
GSY 新型混凝土有机硅渗透剂的研究与应用	(386)
钢筋混凝土电化学脱盐防腐技术研究(1) ——技术参数与影响因素试验研究	(394)
钢筋混凝土电化学脱盐防腐技术研究(2) ——阳极系统研究设计、施工工艺质控措施与示范工程	(406)

海上深层水泥
搅拌加固软基技术
(海上 CDM 工法)

前言

随着我国对外开放和国民经济的迅猛发展,港口建设进入了一个持续发展的时期。自“三年大建港”以来我国的港口建设发展很快,目前老港区的岸线已经基本饱和,为适应经济发展和船舶大型化,今后港口将向水深、浪大、流急、地基条件差,建港自然环境复杂、恶劣的外海深水区、大江大河入海口发展。

深水枢纽港的建设与发展,越来越多地遇到软土加固的难题,对建筑物软弱地基的处理提出了更迫切的要求。

海上深层水泥搅拌法(海上 CDM 工法)是一种处理深水软土比较好的新方法。它具有强度提高快、对软土适应强、施工干扰少,特别是对环境污染小等特点。但由于开发应用历史不长,基本计算理论还不成熟,设计方法尚不完善且比较保守,使工程造价偏高,影响了大面积的推广。

本研究拟在吸收国外先进技术结合我国实践经验的基础上,通过理论研究,室内试验与现场观测相结合的科学途径,在海上 CDM 基本计算理论方面实现了新的突破,提高海上 CDM 工法的技术水平,并在我国今后的深水港建设中大规模的推广应用。

本课题研究包括五个专题:基本计算理论的研究;设计方法的研究;施工工艺和施工管理的研究;取样技术的研究;水泥搅拌土工程特性的研究。

本研究在海上 CDM 基本计算理论、设计方法、施工工艺等诸方面均取得了较大的创新和突破,取得研究成果 20 项,其中 10 项成果达到了国际领先水平、3 项成果达到了国际先进水平、7 项成果达到了国内先进水平。“海上深层水泥搅拌加固软基技术基本计算理论及设计方法的研究”被国家科技部等四部委评为“九五”国家重点科技攻关计划优秀科技成果。“基本计算理论及设计方法研究”包括 2 个专题,10 项成果。

本科题的研究成果已在天津港、黄骅港等国家重点工程项目中得到应用,解决了工程建设中的关键技术,降低了工程造价约 20%,缩短了建设工期约 20%,取得了明显的经济效益和社会效益。海上深层水泥搅拌加固软基技术进一步的开发研究,必将进一步提高我国深水筑港技术水平,加速我国港口建设的发展。

本论文集收集的 10 项成果,前 6 项为基本计算理论专题的主要研究成果,后 4 项为各研究专题的总报告。

海上 CDM 工法基本计算理论的研究

刘翼熊 张 敬 黄传志*

(天津港湾工程研究所)

摘 要 通过理论分析推导、离心模型试验、有限元计算,并结合天津港南疆煤码头示范工程监测,完善了海上深层搅拌法(海上 CDM 工法)基本计算理论研究,为设计方法的改进提供了坚实的理论依据。

关键词 CDM 工法 计算理论 试验研究

1 研究目的及要求

海上深层水泥搅拌法具有强度提高快,对软基适应性强等许多优点。但由于开发应用历史不长,基本计算理论不成熟,设计方法不完善等问题,影响了大面积应用。1988~1990 年间,在天津港东突堤工程中我国第一次在港口海上工程中采用 CDM 工法^[1]。1993 年在烟台港西港池二期工程的重力式码头地基加固中再次使用了 CDM 加固法。我国港工界都认为 CDM 法好,近年来本来有多项工程如大连港北良码头工程可以采用 CDM 法,只是因为它的设计方法太保守导致造价高而改用其他处理方法。本专题的研究目的就是:为了在我国深水枢纽港建设中推广这一新的软基加固方法,在吸收国外先进技术和我国实践经验的基础上,通过基本计算理论研究、室内模型试验并结合天津港南疆煤码头示范工程,进一步对海上深层水泥搅拌法进行系统的理论研究,以期在设计方法、保证施工质量、降低工程造价诸方面有所突破,从而推进这一设计方法的发展,使它在深水枢纽港建设等领域中产生更大的经济效益。

2 国内外技术现状

对于水泥搅拌加固地基的基本计算理论近 20 年来以日本港湾技术研究所^{[2][3][4]}为主进行了多年大量的研究。他们的计算理论研究一直是结合室内模型(主要是离心模型)实验和现场原位监测进行的。

直到目前为止,他们对于壁式、块式、格式搅拌体的基本观点仍然是将加固体视为地下重力式结构物来考虑设计方法的。把加固地基的稳定性分为外部稳定性(地下结构物的抗滑、抗倾稳定性)和内部稳定性(加固地基本身破坏与否)两种,分别采用不同的方法去验算。验算两种稳定性时,作用在加固地基上的外力均采用海侧的被动土压力和填土侧的主动土压力。他们通过大量的离心模型试验和少量的现场大型载荷试验以及对实际工程的观测,都认为现行设计方法是可行的,并证实了破坏模式的有效性。但他们也承认现行设计方法中还存在一些问题,需要作进一步的研究。这些问题主要是:对于内部稳定分析,由于满足外部稳定条件时

* 主要参加人:天津港研所叶国良、孙万禾、高志义、李伟;南京水科院王年香、章为民;中港一航院郭莲清、姜建维。

断面很大,几乎不发生变形,仍然采用主动和被动土压力是有问题的。日本学者通过一系列离心模式试验观察到,加固体的土压力,取决于上部结构的型式、施工速率和加固型式,并建议用静止土压力代替极限土压力来进行内部稳定分析;也有人认为现行设计方法没有考虑交界面的粘聚力,因而低估了加固体的外部稳定性。

其它国家如瑞典对搅拌法研究较早,但未见在海上应用 CDM 工法加固地基的报道。我国从 80 年代末开始在海港码头工程中实际应用 CDM 工法加固软土地基,但设计时均采用日本的《CDM 设计、施工手册》^[4]。

综上所述,目前我国 CDM 工法多用于陆上工程;海上 CDM 工法的施工设备刚刚引进,施工能力不足、经验不多,还没有自己的施工规范,施工不得不参照日本 CDM 协会编写的施工手册进行,不能满足日益增长的实际工程的迫切要求。《CDM 设计、施工手册》,没有对它的计算理论开展深入的研究。

3 主要研究内容

基本计算理论的研究主要对水泥搅拌体在建筑物荷载作用下的受力状态、应力变形特性、与周围土体的相互作用、稳定情况与破坏方式进行研究,找出合理的分析计算方法,为设计方法的建立提供可靠依据。该研究采用理论分析与模型试验及原位监测相结合的方法进行。为使本研究成果更具代表性,克服本项研究依托工程——天津港南疆煤码头护岸工程的局限性,同时对 1990 年完成施工的东突堤北侧沉箱码头 CDM 加固工程进行分析研究。该工程在施工期间有比较完整的现场监测资料,便于理论分析与实测资料进行对比。

3.1 计算理论研究

计算理论研究内容有(1)用极限平衡法和有限元极限分析法研究搅拌土地基及其结构物的整体稳定性;(2)用弹塑性有限元分析法研究 CDM 地基的应力应变关系;(3)根据模型试验得出的破坏模式研究合理的计算方法;(4)根据搅拌体和上部结构的位移特性研究相应的土压力计算方法。

3.2 模型试验

主要采用离心模型进行试验研究(1)搅拌体、上部结构及周边地基土在加荷过程中和使用状态下的应力应变状态、内部应力和界面土压力的分布情况;(2)不同形式搅拌体的极限承载力和破坏型式;(3)搅拌体地基的整体稳定性。

3.3 现场原位监测

在依托工程中选择两个典型断面进行同样的监测。监测中以搅拌体及其上方挡土结构物上所承受的土压力为重点。用现场监测结果来检验、调整理论计算和模型试验结果。监测项目应包括土压力、基底压力、壁间土和后方未加固土的孔隙水压力、搅拌体内部应力、各部位的垂直与水平位移。

4 示范和验证工程简介

本课题的示范工程是天津港南疆煤码头接岸 CDM 加固工程。鉴于该工程岸坡坡度缓及加固体的外形不同于常用形式,而 10 年前建成的天津港东突堤北侧沉箱码头 CDM 加固地基工程更具代表性,且施工时有较系统的沉降位移观测资料,故将其也列入这次攻关分析研究的对象之一,权且称之为验证工程,以示有别于示范工程。

4.1 煤码头东引桥接岸 CDM 加固工程

东引桥 CDM 加固体为块式结构,加固区长为 40.5m,宽 4.4m。搅拌桩长为 18.5m(+2m~-16.5m)。其他桩径、水泥用量等与中引桥相同。CDM 加固体布置如图 1 所示。该区的土层及其物理力学指标如表 1 所示。

天津港南疆煤码头东引桥地基土指标 表 1

高 程 (m)	土 名	含水量 (%)	重 度 (kN/m³)	相对密度	饱和度 (%)	孔隙比	塑性指数 (%)	十字板强度 (kPa)
+3~±0	淤泥质粘土	48.4	17.3	2.73	98.1	1.28	20.7	18.8
±0~-6	粉质粘土	36.0	18.4	2.71	96.4	1.01	16.1	26.6
-6~-10	淤泥质粘土	56.1	17.2	2.74	99.5	1.47	26.6	21.2
-10~-13.5	淤泥质粘土	46.5	17.4	2.73	99.1	1.23	21.7	27.9
-13.5~-16	粉质粘土	35.3	18.1	2.71	98.5	0.92	14.9	36.8
-16 以下	粉质粘土	24.4	19.9	2.70	95.9	0.69	8.3	54.3

4.2 煤码头中引桥接岸 CDM 加固工程

中引桥 CDM 加固体为壁式结构,加固区长为 30.15m,宽为 8.25m。加固体由长短壁相间组成,每 2 排短壁接 1 排长壁,排间相互搭接 15cm。长壁长 18.5m,短壁长 3m。搅拌桩桩径 70cm,水泥掺量是 310kg/m³,采用 525 # 普通硅酸盐水泥,要求 90 天龄期的无侧限抗压强度达 2.5MPa。CDM 加固体布置如图 2 所示。该区的土层及其物理力学指标如表 2 所示。

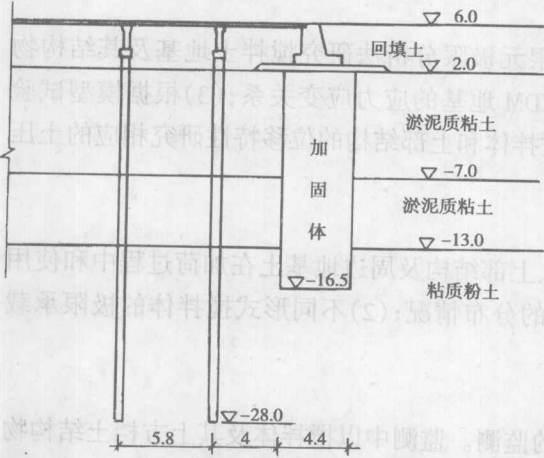


图 1 天津港南疆煤码头新建工程东引桥 CDM 加固体接岸结构示意图

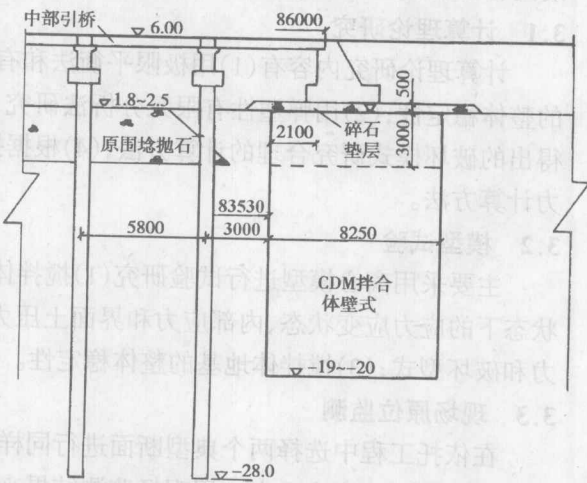


图 2 天津港南疆煤码头新建工程中引桥 CDM 加固体接岸结构示意图

天津港南疆煤码头中引桥地基土指标 表 2

土层编号	高 程	土 名	w %	γ	G _s	S _r	e	I _p	C _u
2-1	+3.3~2.3	粘土	40.7	18.0	2.73	95.8	1.14	20.5	—
2	2.3~-2.0	淤泥质粘土	41.6	17.8	2.73	97.3	1.21	20.8	19.8
3	-2.0~-6.7	粉质粘土	36.1	19.0	2.71	97.5	0.87	13.7	43.4

续上表

土层编号	高 程	土 名	$w\%$	γ	G_s	S_r	e	I_p	C_u
4	-6.7 ~ -9.0	淤泥质粘土	49.1	17.1	2.74	97.4	1.39	23.5	40.9
5	-9.0 ~ -12.7	粘土	40.3	18.4	2.73	98.3	1.07	20.5	50.8
6	-12.7 ~ -17	粉质粘土	29.6	19.6	2.70	97.7	0.75	12.2	65.3
7	-17 以下	粉土	24.9	19.9	2.68	94.4	0.66	7.7	—

4.3 东突堤北侧沉箱码头 CDM 加固地基工程

CDM 加固体位于沉箱下方,直接承受沉箱及其后方回填体的压力。加固体为块式结构,块厚 7.5m(- 12.5 ~ - 20m),块宽 24m。采用 425 # 普通水泥,水泥掺量为 150 ~ 170kg/m³,水灰比为 1.1 ~ 1.3,90 天龄期的无侧限抗压强度 2.78MPa。加固体布置如图 3 所示。该区的地基土层及其物理力学指标如表 3 所示。

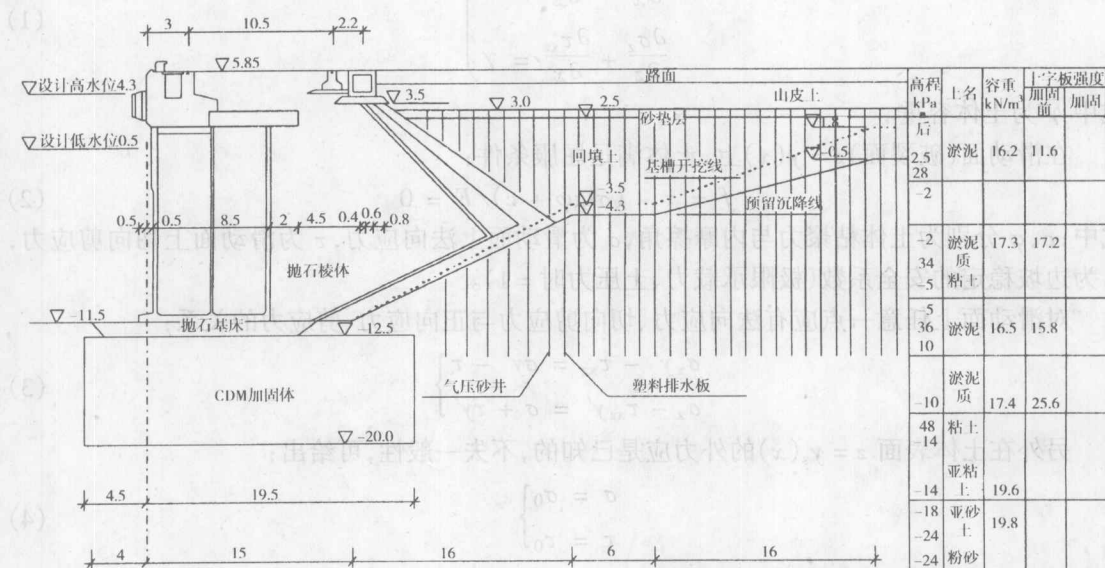


图3 东突堤北侧沉箱码头结构断面示意图

东突堤北侧沉箱码头地基土指标

表 3

土层编号	高 程	土 名	$w\%$	γ	e	I_p	C_u
I ₂	-2.5 ~ -5.0	淤泥质粘土	47	17.3	1.33	20.6	16
III ₁	-5.0 ~ -11.7	淤泥	59	16.5	1.65	27.1	18
III ₂	-11.7 ~ -14.7	淤泥质粘土	47	17.4	1.31	22.6	30
IV	-14.7 ~ -20	亚粘土	27	19.6	0.77	10.3	—
V	-20 ~ -23	亚砂土	23	19.8	0.76	5.7	—

5 子题研究

5.1 计算理论

5.1.1 本研究的基本任务

以水泥拌和体作为加固地基来设计建造各种港口工程时,一般需要对包括水泥拌和体在内的构筑物及地基进行稳定性分析计算。其中最主要的分析计算任务当属土压力、地基承载力、整体稳定性。

为了保证工程具有足够安全度的条件下,将工程设计的更为经济合理,相应分析计算方法的更准确、更合理是主要前提之一。寻求土压力、地基承载力、整体稳定理论上更合理、计算结果更准确可靠、实用上更方便的分析计算方法是本项研究的任务。研究的详细内容有:(1)极限平衡问题及其基本解法;(2)基于曲面破裂面的土压力计算公式;(3)边坡稳定性分析的精确方法;(4)非均质土地基承载力的计算方法。

5.1.2 极限平衡问题及其基本解法

5.1.2.1 极限平衡问题

土体极限分析问题通常按平面应变问题考虑,应力分量 $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ 应当满足如下的静力平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} &= \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 γ 为土体容重。

在滑动面(破裂面) $z = y(x)$ 上,土体满足屈服条件:

$$f = \tau - (\sigma \tan \varphi + c)/F = 0 \quad (2)$$

式中: c, φ 分别为土体粘聚力与内摩擦角, σ 为滑动面上法向应力, τ 为滑动面上切向剪应力, F 为边坡稳定的安全系数(极限承载力、土压力时 $= 1$)。

对滑动面上任意一点应有法向应力、切向剪应力与正向应力、剪应力的关系:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x y' - \tau_{xz} &= \sigma y' - \tau \\ \sigma_z - \tau_{xz} y' &= \sigma + \tau y' \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

另外在土体表面 $z = y_s(x)$ 的外力应是已知的,不失一般性,可给出:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \\ \tau &= \tau_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: σ_0, τ_0 分别为土体表面的法、切向力。

上述平衡方程(1)、破裂面上的屈服条件(2)、应力关系式(3)、表面外力条件(4),以及当讨论土压力问题时的直墙边界条件,我们称之为极限平衡问题。是我们讨论土压力问题、承载力问题、边坡稳定问题所依据的基本方程和定解条件。

5.1.2.2 基本解法

建立的以滑动面函数式(y')表示的滑动面上法向、切向应力与正向、剪应力的关系(3)。这样,极限平衡问题就有 5 个方程(1)、(2)、(3), 5 个未知函数: $\sigma, \tau, \sigma_z, \sigma_x, \tau_{xz}$ 。使得沿滑动面求解极限平衡问题成为可能。

对土压力问题,可获得墙后(前)应力分量的一般表达式,进而得出墙面上的土压力公式。对承载力、边坡稳定问题,可获得内力所产生力矩的一般表达式,并据此解出极限荷载或安全系数的计算公式。更重要的是,应用本文方法可以获得相对于所取滑动面的精确解。

5.1.3 建议的土压力计算公式

5.1.3.1 主动土压力公式