

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.03.017

海砂-淤泥混合料在福州某防潮工程堤身填筑中的运用

李文斌

(福建省水利规划院, 福建 福州 350001)

摘要: 在福州某防潮工程建设过程中,由于岛内禁止开山取土,缺乏优质填筑黏性土材,堤身主填料成为工程制约因素。工程区附近河道、滞洪区开挖存在大量废弃淤泥,需进行淤泥资源化处理,海砂也易得,一定配比的海砂-海泥混合料可作为海堤堤身主填料。通过室内试验对不同掺合比的海砂-海泥混合料的土体强度参数、压缩性能、渗透性能、固结特性的对比分析,找到海砂-淤泥按质量比1.5:1掺合时,淤泥混合料的物理力学性质指标满足工程要求,适合作为防潮堤的主填料,稳定分析结果显示满足规范要求,海砂-淤泥混合料在海堤堤身填筑成功运用有保证,具备良好的经济及社会生态效益。

关键词: 防潮工程;海砂-淤泥混合料;掺合比;淤泥资源化处理

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)03-0093-06

Application of Sea Sand-silt Mixture in Embankment Filling of a Tide-proof Project in Fuzhou

LI Wenbin

(Fujian Provincial Planning Institute of Water Resources, Fuzhou, Fujian 350001, China)

Abstract: During the construction of a tide-proof project in Fuzhou, the main filling material of levee body is a restriction factor because of the prohibition of soil extraction from mountain and the lack of high-quality clay materials. There are a lot of abandoned silt in the river course and flood detention area near the project area, which need to be reused, and the sea sand is easy to access. Based on the comparative analysis of the strength parameters, compressive properties, permeability properties and consolidation properties of sea sand-sea mud mixture with different mixing ratios in laboratory tests, it is found that when sea sand-sea mud mixture is mixed at the mass ratio of 1.5:1, the physical and mechanical properties of the silt mixture could meet the engineering requirements and are suitable to use as the main filling material of the tidal embankment. The results of the stability analysis show that the requirements of the code are met. The successful application of the sea sand-silt mixture in the construction of the seawall body is guaranteed, which has good economic and social ecological benefits.

Keywords: tidal protection project; sea sand-silt mixture; mixing ratio; sludge resource treatment

福建省位于我国东南,背山面海,山地多平地少,有长达3 752 km的海岸线,每年7到10月份台风季节和八月大潮期间,风暴潮直接影响着沿海地区的经济发展,修建海堤等基础设施将增强沿海地区的抗潮能力,对保障沿海地区社会经济发展具有

重大意义^[1]。而沿海堤防多采用山土、砂性土填筑,近年沿海地区山土、砂性土又比较缺乏,若从内陆运输则会导致工程造价高、工期长。

海砂,由于含盐率较高,使得人们对于其在建筑行业中的应用持有质疑态度,随着建筑用砂需求量

的持续增加,淡水砂由于再生速度慢,导致可用砂的价格不断抬高^[2-3]。欧洲国家及日本^[4]等海砂的成功运用为海砂利用的可能性提供案例。在国内,海砂已在高速公路以及高等级混凝土中得到成功的应用,但作为填筑材料应用于海堤建设仍待进一步研究^[5]。

淤泥,在我国每年产生的废弃开挖疏浚淤泥达上亿立方米,这些废弃淤泥一般含水率高、孔隙比大、高压缩性、强度低^[6]。淤泥固化技术的不断成熟为综合利用废弃淤泥提供了思路。陈萍等^[7]进行了疏浚淤泥与焚烧底灰混合固化试验研究。王东星等^[8]进行了大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性试验研究。朱婧等^[9]进行了淤泥和黏性土的压缩特性对比试验研究。Liu 等^[10]对水泥、粉煤灰和矿渣作为固化剂含量对河道疏浚污泥固化的影响进行了研究。黄朝焯^[11]探讨了基于粉煤灰、石膏、石灰、减水剂及三乙醇胺等配方的淤泥固化技术在深厚淤泥地基中的运用。福建建工建材科技开发有限公司提出了根据生石灰改性淤泥土的含碱率确定添加铝硅酸盐与脱硫石膏的配比固化的方法^[12]。胡孝彭等^[13]对重庆市永川区河道疏浚淤泥掺入水泥固化建议量进行了研究,室内试验以及现场应用均证实,淤泥经过快速固化以后,其物理力学性质可得到了很大的改善,可以满足工程建设质量需求^[14],但固化成本较高依旧是制约淤泥固化土实践的主要障碍。

由于沿海地区海砂储量较为丰富,价格低廉,而砂无黏聚力堤防在沿海长期风浪荷载作用下易失稳,补救又较困难。适当掺合比的海砂掺淤泥混合土不仅价格较为低廉而且从原理上可用于海堤填筑^[15],海砂-淤泥混合料作为新型填筑材料进入了工程师的视野。

1 项目简介

本次海砂-淤泥混合料工程运用结合的防潮堤工程项目为福州市某防潮工程,海堤总线长 5.89 km。工程位于福州市东部、闽江入海口,为低山丘陵滨海海岛,全岛禁止开山挖土,土料资源匮乏。堤线所需堤身主填料约 53 万 m^3 ,土料用量大,建设海堤存在土料场的选择、堤型选择、施工等诸多问题,而主体填筑料的选择成为本工程关键性的问题,基于此,很有必要对此开展研究。通过对附近备选料源的调查,工程区内侧为千余亩的滞洪区以及六条内河,滞洪区以及内河开挖将产生百万立方的淤泥,

这将为海砂-淤泥混合料提供充足的淤泥原料,科学试验以及工程计算比选可综合评价海砂-淤泥混合料在海堤堤身填筑中的安全性、适用性及经济性,提出适用于设计海堤以海砂-淤泥混合料作为主填筑料的掺合比,优化设计,提高经济效益(见图 1)。

该防潮工程防潮标准为 50 年一遇,工程等别为 II 等,海堤建筑物级别为 2 级。

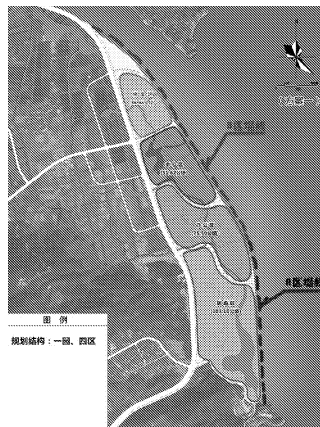


图 1 福州某防潮堤堤线平面图

2 堤防地层及典型设计断面情况

2.1 地基土层

依据钻探试验资料,堤防地基土层自上而下为:

(1) 淤泥:呈灰黑、灰色,揭示厚度 7.2 m ~ 15.3 m,饱和,流-软塑状,含水率 66%,含石英粉细砂约 10% ~ 15%,该层土体具有高含水率、高压缩性等特点。

(2) 淤泥质土:深灰色,饱和,可-软塑,含腐殖质,具腥臭味,稍粘手,手搓可成条状,干强度较高,韧性较高,层厚约 7.4 m ~ 8.8 m,含水率 51.5%,软塑,质纯。该层土体具有高含水率、高压缩性等特点。

(3) 淤泥夹砂:深灰色,饱和,流塑,含腐殖质,具腥臭味,局部夹砂及贝壳碎屑,砂质含量约 10% ~ 15%,干强度中等,韧性中等,标贯 3 击 ~ 4 击,厚约 12.0 m ~ 13.4 m,未揭穿。

(4) 粉砂:呈灰黄色,揭示厚度 2.60 m ~ 8.70 m,饱和,松散-稍密,标贯 8 击 ~ 10 击,砂粒成分主要为石英,含泥约 10% ~ 15%。

(5) 粉质黏土:灰、深灰色,厚约 5.8 m ~ 8.5 m,可塑,成分主要由粉、黏粒组成。无摇振反应,切面稍光滑,干强度及韧性中等。

(6) 强风化花岗岩:灰黄、褐黄色,揭示厚度 2.6 m ~ 2.8 m。矿物成分主要为长石、石英,少量为云母。岩芯呈碎石或碎块状,手折可断,为碎裂状结

构,风化裂隙发育,岩体极破碎,属极软岩,岩体基本质量等级为 V 级。

2.2 典型设计断面

海堤设计断面为斜坡式复合堤,堤身填筑主要材料为海砂-淤泥混合土。具体典型断面为:堤身回填海砂-淤泥混合土,堤顶高程为 10.1 m,宽 5 m,迎水面高程 6.80 m 处设一平台,平台宽 4 m,平台以上坡度为 1:2.5,平台下外边坡 1:2,高程 6.80

m 平台外侧分两级设抛石压载,一级平台高程 4.3 m,宽 15 m,二级平台高程 5.3 m,宽 10 m;海堤背水坡至高程 4.8 m 坡度为 1:2.5,在高程 7.00 m 处设一宽 8 m 平台,在坡脚分两级设抛石压载,一级平台顶高程 3.8 m,宽 10 m,二级平台顶高程 4.8 m,宽 4 m。由于堤防所在位置地基均为淤泥或淤泥质土,设计打设排水板以加快堤基排水固结,排水板深度为 12 m~18 m(平均 15 m)(见图 2)。

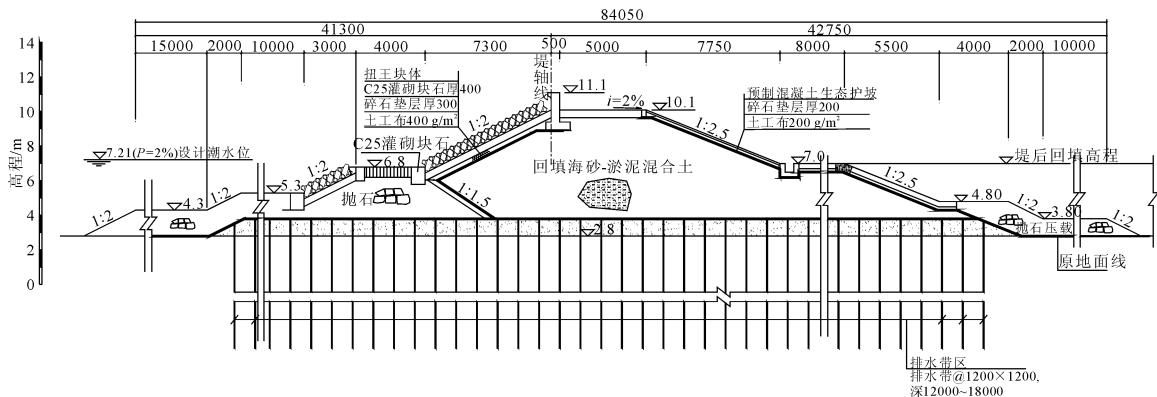


图 2 海堤设计标准断面图(平面尺寸单位:mm)

3 海砂-淤泥混合料试验

3.1 试验材料及基本物理力学性质

海砂-海泥混合料是一种复合材料,试验所用淤泥取自项目区西侧闽江入海口规划滞洪湖处,其基本的物理力学性质指标见表 1,海砂取自项目区附近售砂场,其基本的物理力学性质指标见表 2。

表 1 试验淤泥物理性质指标

含水率 w/%	比重 G _s	重度 γ /(kN·m ⁻³)	孔隙 比 e	塑限 ω _L /%	液限 ω _p /%	有机质 含量/%
65	2.67	16.1	1.73	24.4	41.4	3.6

表 2 试验海砂物理性质指标

含水率 w/%	比重 G _s	孔隙 比 e	最大 孔隙比	最小 孔隙比	颗粒直 径 D/mm
8	2.73	0.67	0.76	0.52	0.075~5

3.2 试验方案及成果

通过试验研究不同掺合比(质量比分别为:2.5:1.0、2.0:1.0、1.5:1.0、1.0:1.0、1.0:1.5、1.0:2.0、1.0:2.5)海砂-海泥混合料的强度指标、压缩性和渗透性以确定最佳掺合比。并对推荐的最佳掺合比平行对比黏性(山)土以及搅拌水泥土固结试验,以说明推荐混合料掺合比在固结方面的性能。

3.2.1 海砂-海泥掺合比确定

通过对不同掺合比的海砂-海泥混合料进行强度试验(包括:固结快剪、三轴 CU)、压缩试验以及渗透试验研究,得出合适的海砂海泥掺合比。

3.2.2 不同掺合比的强度特性

通过固结快剪、三轴 CU 试验得出不同掺合比的混合料试验的强度指标,结果如表 3 所示。

表 3 不同配比试样的强度指标

海砂海泥 配比	黏聚力 c/kPa		内摩擦角 φ/(°)	
	固结快剪	三轴 CU	固结快剪	三轴 CU
2.5:1.0	10.4	12.1	25.0	25.1
2.0:1.0	11.6	13.6	21.2	21.0
1.5:1.0	14.9	15.0	19.6	15.2
1.0:1.0	20.3	8.1	16.1	10.6
1.0:1.5	29.3	7.4	13.2	8.9
1.0:2.0	27.9	5.6	10.1	6.8
1.0:2.5	26.6	4.9	8.6	5.3

从表 3 结果可以看出:两种试验得出的摩擦角均随着海砂配比的增加而增加,而黏聚力指标呈现先增大后减小的趋势,但不同试验黏聚力达到峰值的海砂海泥配比及峰值大小各不相同。其中三轴 CU 试验中,海砂海泥掺合比为 1.5:1.0 时,黏聚力达到峰值,大小为 15.05 kPa;固结快剪试验中,配比为 1.0:1.5 时,峰值大小为 29.3 kPa。

3.2.3 不同掺合比的压缩、渗透特性

海堤建设过程中,沉降变形包括了地基以及堤身自身沉降变形,堤身填筑材料抵抗压缩变形的能力作为堤身变形主要原因应进行着重考虑。图 3 为混合料压缩系数随掺合比的变化曲线图,从中可以看出:随着海泥的比重增加,压缩系数逐渐增大。其中以掺合比为 1:1 混合料的压缩系数为分界点,当海砂掺量小于等于 50% 时,压缩系数均小于 0.5 MPa^{-1} ,为中压缩性土,且压缩系数大小随海泥含量增加基本呈成线性增长。当海泥比重超过 50% 时,压缩系数明显提高,但是随着海泥继续增加,压缩系数几乎不变。

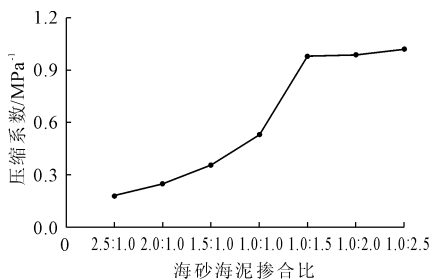


图 3 压缩系数与海砂海泥掺合比的关系

图 4 为混合料渗透系数随掺合比的变化曲线图,从图中可以看出:海砂海泥质量比大于 1.5:1.0 时,渗透系数在 10^{-4} cm/s 量级范围,小于或等于 1.5:1.0 时,渗透系数在 10^{-5} cm/s 量级范围,或小于 10^{-5} cm/s 。

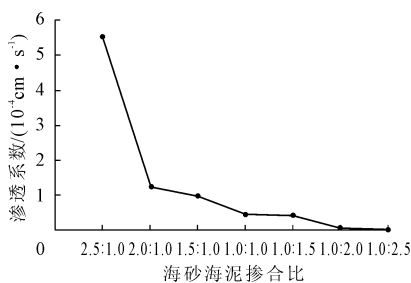


图 4 渗透系数与海砂海泥掺合比的关系

鉴于以上分析,综合考虑不同实验的强度指标、压缩性和渗透性,认为海砂淤泥的掺合比为 1.5:1.0 较适宜。

3.2.4 对比黏性(山)土、淤泥搅拌水泥土固结试验

通过标准固结试验等方法系统地研究淤泥、黏性(山)土、海砂淤泥混合料(推荐配比 1.5:1.0)、搅拌水泥土压缩固结特性,通过对比分析得出材料固结变形的相关规律,进而从固结角度进一步探讨淤泥、黏性(山)土、海砂淤泥混合料、搅拌水泥土作为

海堤堤身填料的可行性,通过试验结果分析见表 4。

表 4 不同材料的压缩系数及固结系数

材料	压缩系数 / MPa ⁻¹	固结系数
淤泥	1.40	0.017
黏性(山)土	0.16	0.042
海砂-淤泥混合料(海砂:淤泥=1.5:1.0)	0.36	0.013
20%水泥掺量搅拌水泥土	0.21	0.015
饱和淤泥	1.40	0.029
饱和黏性(山)土	0.52	0.036
饱和状态下海砂-淤泥混合料(海砂:淤泥=1.5:1.0)	0.50	0.016
饱和状态下 20%水泥掺量搅拌水泥土	0.50	0.017

注:固结系数为 100 kPa 下采用时间对数法的分析成果。

从表 4 可以看出,压缩系数方面:淤泥的压缩系数属于高压缩性土,必须进行处理才能上堤填筑,天然状态下黏性(山)土与掺量 20% 的水泥搅拌(桩)土压缩系数接近低压缩性土、海砂:淤泥 = 1.5:1.0 的海砂-淤泥混合料为中等压缩性土,饱和状态下黏性(山)土、海砂-淤泥混合料与掺量 20% 的水泥搅拌(桩)土基本为中压缩性土。固结系数方面:海砂:淤泥 = 1.5:1.0 的海砂-淤泥混合料在 100 kPa 固结压力下达到 50% 的固结度的固结系数为 0.013,饱和状态下其固结系数为 0.016,固结方面已基本与掺量为 20% 水泥掺量搅拌水泥土相似,比黏性(山)土的固结性态优。这是由于在固结过程中,海砂:淤泥 = 1.5:1.0 这种材料中海砂的比例较大,具有较好的透水性能,开始时,土中应力全部由孔隙水承担,随着孔隙水的挤出,孔隙水压力较快转变为由土骨架承受的有效应力。

3.2.5 室内试验推荐海砂-淤泥混合料掺合比

综上所述可以看出,当淤泥混合料的海砂掺量加大时,强度参数及压缩性能、固结性能得到很大的提升,而淤泥混合料的渗透系数逐渐向海砂靠近,其中较小的淤泥颗粒极易流失,不予考虑;相反,淤泥含量较高时,虽然此时的渗透系数低,但考虑到强度参数及压缩特性,也不予考虑。参考淤泥混合料强度参数随掺合比变化规律以及对比固结试验结果,可以看出混合料中海砂-淤泥掺合比为 1.5:1.0 时较为合适,以此作为海砂-淤泥混合料推荐掺合比。

4 主填料选定

本工程堤身填土主填料方量约为 53 万 m^3 ,可选择的主填料为黏性(山)土、充砂管袋、海砂-淤

泥混合料及搅拌水泥土料等,各方案断面结构类似前图2标准断面,不同的仅是堤身回填材料不同。

根据以上四种填土料来源及施工工艺等,技术经济比选如下:

(1) 费用方面:施工直接费方面上,价格最低的是黏性(山)土回填料,为92.19元/m³,其次为海砂-淤泥混合料,为93.60元/m³,再次为充砂管袋,为132.37元/m³,最高为搅拌水泥土料,为192.63元/m³。但海砂-淤泥混合料可以消化堤后滞洪区河道开挖的大量外运填埋淤泥,即考虑淤泥的工程资源化利用,则每方海砂-淤泥混合料可以节约淤泥外运填埋费用20元,由此采用海砂-淤泥混合料综合费用可以降低至73.6元/m³,综合费用最低,从福州某防潮工程海堤项目约53万m³主填料来看,采用海砂-淤泥混合料可以比黏性(山)土回填料等其他填料节约工程费用985万元以上。

(2) 工程安全性方面:堤防工程对土料的抗渗性、固结性、整体性以及强度要求较高。从室内实验看来,在压缩特性与固结特性方面,水泥掺量为20%的搅拌水泥土与海砂淤泥掺合比为1.5:1.0的海砂-淤泥混合料相近,压缩系数分别为0.21 MPa⁻¹(饱和0.50 MPa⁻¹)与0.36 MPa⁻¹(饱和0.50 MPa⁻¹)、100 kPa固结系数分别为0.013与0.015,均为中压缩性土。黏性(山)土的压缩系数为0.16 MPa⁻¹(饱和0.52 MPa⁻¹)、100 kPa固结系数为0.42,也为中压缩性土,但饱和条件下压缩性能略逊于搅拌水泥土与海砂-淤泥混合料且固结系数较大。所以,搅拌水泥土料在强度、抗渗透性、整体性以及固结性态均最优,其次为海砂-淤泥混合料,再次为黏性(山)土回填料。充砂管袋由于其充砂管袋袋体为化纤材料,存在生产厂家良莠不齐、在海边日照高盐风浪等条件可能存在长期运行袋体破裂导

致抗渗透性以及整体性缺陷,存在破损不易修补等弱点,在工程安全性上存在较大隐患。

(3) 施工便利性方面:充砂管袋水下水上均可以施工,管袋内砂土主要采用排水自密实方式,施工最为便利,其余三种材料在水下高饱和条件下碾压压实度实现较为困难,或需赶潮水施工,施工便利性较充砂管袋弱。

(4) 工期方面:影响工期的主要因素是施工时环境对料体的影响、料体的生产能力、料体施工的压实条件、材料的固结时间等,在相同的风浪条件下充砂管袋施工工期最短、搅拌水泥土料及海砂-淤泥混合料次之、黏性(山)土回填料工期最长。

(5) 环境友好性:由于海砂-淤泥混合料与搅拌水泥土料均消化了原需要使用特种设施设备外运填埋的堤后滞洪区河道开挖的巨量淤泥,实现了淤泥的资源化利用,而海砂-淤泥混合料采用的均是天然材料,与搅拌水泥土需添加水泥进行碱化反应相比,环境友好性比搅拌水泥土更胜一筹。充砂管袋带充填料虽是海砂,但充砂管袋袋体为化纤材料环境友好性也相对较差。在建设生态文明的条件下,黏性(山)土现在作为填筑用料的开采也日益困难,环境友好性也不足。所以,从环境友好性方面看,海砂-淤泥混合料最优。

综合以上四种材料方案比选,海砂-淤泥混合料由于施工直接费较省、考虑淤泥资源化利用后综合费用最省、工程安全性较高、环境友好性最优、施工工期较短推荐为该防潮海堤工程主填料的推荐填料。

5 稳定分析计算

5.1 断面分区渗流及力学特性

根据前典型设计断面及试验结果,各分区的渗流及力学特性见表5。

表5 海堤工程地质主要设计参数

土层名称	天然重度 γ /(kN·m ⁻³)	垂直渗透 系数 K_v /(cm·s ⁻¹)	孔隙比 e	天然快剪 C_u /kPa	天然快剪 φ_u /(°)	固结快剪 C /kPa	固结快剪 φ /(°)	慢剪 C' /kPa	慢剪 φ' /(°)
海砂-淤泥混合料	18.1	9.9×10^{-5}	0.97	4.6	12.0	14.9	19.6	18.8	22.5
抛石	24.0	1.0×10^1	0.40	0.0	45.0	0.0	45.0	0.0	45.0
抛填海砂	18.5	1.0×10^{-3}	0.80	0.0	26.0	0.0	26.0	0.0	26.0
淤泥	16.0	4.0×10^{-7}	1.97	6.0	1.3	11.5	13.3	14.1	16.0
淤泥夹砂	16.3	6.0×10^{-5}	1.60	11.9	6.0	10.6	15.6	15.0	19.0
淤泥质土	17.4	6.0×10^{-6}	1.39	14.1	2.7	14.6	14.7	15.0	18.0

5.2 抗滑稳定计算与结果

根据《海堤工程设计规范》^[16](SL 435—2008),

海堤边坡抗滑稳定计算分为正常和非常两种运行情况。

(1) 正常运用水位情况。外海侧边坡稳定:临海侧设计高潮潮水位骤降(5 h)至滩涂面高程,内港为涝水位

内港侧边坡稳定:临海侧设计高潮潮水位,内港为低水位(或无水)。

(2) 非常运用施工期情况。计算按偏安全以设计高潮水位下计算背水侧、外海无水计算临水侧边坡稳定。

防潮堤为 2 级海堤,抗滑安全系数正常运用

(稳渗期以及水位降落期)条件下为 1.25,非常运用(施工期)下为 1.15^[16]。正常运用情况海堤整体抗滑稳定计算采用有效固结应力法;非常运用情况的海堤整体抗滑稳定计算采用总应力法,采用《水工结构有限元分析系统 AutoBANK 7.0》程序计算进行抗滑稳定计算。

控制计算工况、水位组合以及计算结果情况见表 6。

表 6 抗滑稳定计算结果表

序号	工况	有效应力/总应力	渗流情况	解法	安全系数	
					计算值	规范值
1	正常运行期	有效应力法	高潮水位线	瑞典法	2.27(外海侧)	1.25
					1.71(内港侧)	
2	水位降落期	有效应力法	高潮水位线→降落 5 小时线	瑞典法	1.79(外海侧)	1.25
					1.76(内港侧)	
3	施工期	总应力法	高潮水位线	瑞典法	1.20(外海侧)	1.15
					1.17(内港侧)	

根据以上计算结果,采用海砂-淤泥混合料作为筑堤主填料的设计断面,其抗滑稳定满足规范要求。

6 结 论

本文结合福州某防潮海堤工程实践,基于海砂-海泥混合料配比试验,分析了海砂-海泥混合料作为海堤填筑工程主填料的可行性及优越性,并采用 AutoBANK 有限元软件对海堤的整体稳定性进行了分析研究,小结如下:

(1) 通过快剪、固结快剪及三轴 CU 等试验分析不同掺合比下海砂-淤泥混合料强度参数可知:随着海砂掺量的增加,快剪试验中,黏聚力逐渐变大,固结快剪及三轴 CU 试验中,混合料黏聚力有一个先增加后减小的趋势,三轴 CU 中在掺合比 1.5:1.0 时,黏聚力达到最大,随后减小;内摩擦角则呈一直增加的趋势。分析强度、渗透、压缩及固结性能后,可以看出混合料中海砂淤泥掺合比为 1.5:1.0 时较为合适,该配比下海砂-淤泥混合料为中压缩性土、抗渗性能较好,也具备较好的抗剪强度参数 c 、 φ 值,可作为海砂-淤泥混合填料推荐掺合比。

(2) 计算结果表明正常运用以及非常运用条件下,海堤整体抗滑稳定均能满足规范要求,海砂-淤泥混合料在海堤填筑工程成功运用有保证。

(3) 海砂-淤泥混合料因其施工直接费较省、考虑淤泥资源化利用后综合费用最省、工程安全性

较高、环境友好性最优、施工工期较短推荐为该海堤工程主填料的推荐填料,优化了工程设计实践。

参考文献:

- [1] 张从联,朱峰,李维涛等. 上海、浙江、福建三省市海堤现状调查[J]. 水利水电科技进展,2008,28(2):51-55.
- [2] 刘伟,谢友均,董必钦,等. 海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报,2014,33(1):15-22.
- [3] 喻国轩,李淑娥,金明东,等. 无机结合料加固吹填海砂土的三轴试验研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(2):68-72.
- [4] Rachid Z, Vincent D. Mechanical behaviour and environment Impacts of a test road built with marine dredged sediments [J]. Resource Conservation and Recycling, 2008,52(6):947-954.
- [5] 陈於军. 海砂吹填土在临海高等级公路中的应用[J]. 科技传播,2012(12):156-157.
- [6] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):39-41,50.
- [7] 陈萍,高炎旭,马美玲. 疏浚淤泥与焚烧底灰混合固化方法的试验研究[J]. 水利学报,2015,45(6):749-756.
- [8] 王东星,徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性试验研究[J]. 岩石力学,2013,33(12):3659-3664.