



水平排水板真空预压法处理吹填流泥试验研究

张文彬¹, 王贤奔², 谢锦波¹, 潘兵兵², 陈俊杰², 赵欢欢², 陈孟林², 黄建琴²

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200030;

2. 乐清湾港区投资发展有限公司, 浙江温州 325600)

摘要: 常规的竖向排水板真空预压处理新近吹填流泥的压缩量可达 30%~40%, 呈明显的大变形特征, 排水板弯曲变形严重, 导致排水板中的真空度沿深度衰减较大, 影响最终加固效果。针对吹填流泥的这种工程特性, 通过对比试验, 研究了水平排水板真空预压法在该类场地的应用。试验结果表明, 水平板真空预压取得的沉降变形、孔隙水压力、出水量、含水率、十字板抗剪强度等物理力学指标均好于常规的竖向板真空预压, 并分析了水平板真空预压处理吹填流泥的优势。结果表明, 水平板真空预压是一种可行的吹填流泥处理方法。

关键词: 真空预压; 吹填流泥; 水平排水板; 物理力学指标

中图分类号: TU 447; U 616⁺. 26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0122-06

Experimental study on dredger fill flow mud

improved by vacuum preloading method employing horizontal drains

ZHANG Wen-bin¹, WANG Xian-ben², XIE Jin-bo¹, PAN Bing-bing², CHEN Jun-jie², ZHAO Huan-huan², CHEN Meng-lin², HUANG Jian-qin²

(1. Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute, Shanghai 200030, China;

2. Yueqing Bay Harbor Area Investment and Development Co., Ltd., Wenzhou 325600, China)

Abstract: The vertical drainage plate is normally applied in vacuum preloading method for the treatment of blown filled mud and the volume compaction ratio can be as high as 30%~40%. However, the drainage plate has serious deformations in this approach. This leads to the fact that vacuum degree in the drainage plate significantly decreases with the increase of depth. In this study, contrast tests were conducted to investigate the application of horizontal drainage plate in vacuum preloading method. The results show that physical and mechanical properties (e. g., settlement deformation, pore water pressure variation, water drainage amount, water content, vane shear strength, etc.) obtained by horizontal drainage plate are better performed than those by applying the vertical drainage plate. In addition, the advantages of employing horizontal drainage plate to blown filled mud treatment are analyzed. It is feasible to apply vacuum preloading method to blown filled mud with the horizontal drainage plate.

Keywords: vacuum preloading; blown filled mud; horizontal drainage plate; physical & mechanical property

近年来, 沿海地区利用航道疏浚淤泥作为吹填材料的吹填造陆工程日益增多; 经水力吹填形成的陆域场地, 含水率高达 80% 以上, 新近吹填的场地甚至可以达到 200% 左右。许多工程实践表明, 运用真空预压法处理后, 吹填场地沉降量非常显著, 但加固后的强度相对较小^[1]。基于上述原因, 许多学者期望通过优化处理方案和施工工艺

等措施^[2-7]改善该类场地的加固效果。但是, 这些方法均是在常规竖向板真空预压基础上的优化改进。在实际工程当中, 竖向板真空预压处理新近吹填流泥的压缩量可达 30%~40%, 呈明显的大变形特征, 排水板弯曲变形严重, 导致排水板中的真空度沿深度衰减较大, 影响最终加固效果^[8]。

考虑真空预压法处理该类场地侧向收缩不大,

收稿日期: 2016-02-03

作者简介: 张文彬 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程设计与研究。

若将排水板水平布置形成水平板真空预压, 能有效减少排水板的弯曲变形, 改善真空度的传递效果。国外学者^[9-11]针对水平板真空预压进行了相关试验研究, 成功研制了插板设备, 并在实际工程中取得较好的加固效果; 而目前在国内尚未见过相关文献的报道。本文依托温州某吹填造陆工程, 通过竖向板真空预压和水平板真空预压现场模型试验, 研究 2 种工艺加固吹填流泥的沉降变形、孔隙水压力、出水量、含水率、十字板抗剪强度变化规律, 探讨水平板真空预压对流泥固结和变形的影响。

1 现场模型试验

1.1 试样的制备

试验中所采用的土样取自温州某吹填造陆工程, 利用泥浆泵从吹填区抽出泥浆后直接灌入试验池中, 泥面高度为 1.8 m。从表 1 可知, 吹填土黏粒的含量达 50%, 粉粒的含量达 47%, 表现出高黏粒含量特征。

表 1 试样主要物理性质指标

试验池	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	颗粒质量百分数/%		
					黏粒	粉粒	极细砂
A	97.6	46	25	21	50	47	3
B	98.5	46	25	21	50	47	3

1.2 模型试验装置

模型试验主要装置包括试验池、排水系统、调压系统和量测系统(图 1、2)。试验池由 A、B 池组成, A 池为竖向板真空预压试验池, 断面尺寸为 2.4 m×2.4 m, 深 1.9 m; 采用 A 型排水板, 排水板间距 60 cm, 正方形布置, 打设深度 1.8 m。B 池为水平板真空预压试验池, 断面尺寸为 5.0 m×2.4 m, 深 1.9 m; 水平排水板采用 A 型排水板, 长度为 4.5 m(试验池长度为 5 m); 排水板间距 60 cm, 正方形布置(即深度方向上, 在 30、90、150 cm 深度处分别埋设水平排水板; 水平方向上, 也相隔 60 cm 埋设水平排水板; 总计埋设 12 根长为 4.5 m 的水平板排水板)。水平排水体系采用“一管一板”的方式(即插设前在竖向滤管底部绑

扎一根水平排水板; 竖向滤管底部应用无纺布包裹, 以免流泥进去排水体系中), 并采用专门设计的水平板插板器(图 3)将排水板插设至预定位置; 最后将伸出泥面的竖向滤管与水平滤管相连, 并安装出膜口。

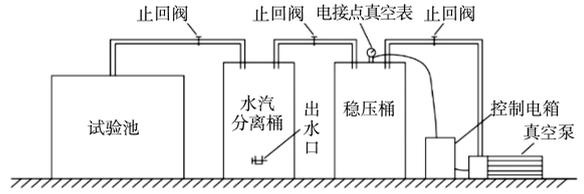


图 1 模型试验装置

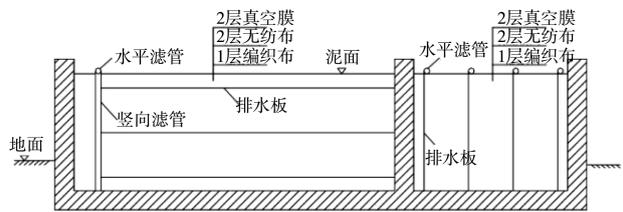


图 2 模型试验加固剖面

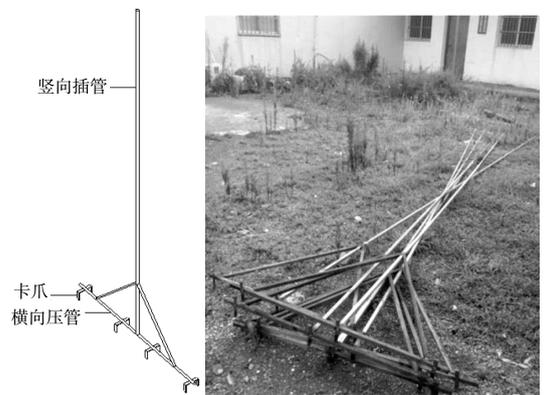


图 3 插板器

调压系统由电接点真空表和控制电箱组成, 通过设置电接点真空表的上下阈值, 自动控制射流泵(即当实际真空度达到下限阈值时, 泵自动开启; 达到上限阈值时, 泵自动关闭), 以达到稳定真空度, 形成真空梯度的目的。量测系统包括

刻度尺、真空表、孔隙水压力计和电子称，刻度尺用来测量泥面沉降，真空表用来测量膜下真空度，孔隙水压力计用来测量土体内孔隙水压力，电子称用来测量抽真空过程中的出水量。

2 试验成果及分析

2.1 真空度

试验过程中，A、B池均采用40~80 kPa的真空梯度，膜下真空度时程曲线如图4所示。由试验结果可知：抽真空期间真空度基本维持在70~80 kPa；至试验结束为止，实际满载天数为61 d。

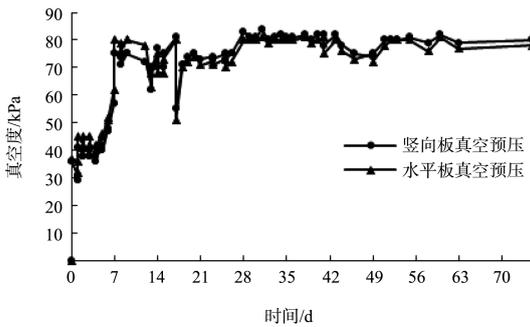


图4 膜下真空度时程曲线

2.2 泥面沉降量

泥面沉降发展过程如图5所示。由试验结果可知：竖向板真空预压和水平板真空预压泥面沉降变化规律基本相同。抽真空初期，A、B池的泥面沉降几乎呈线性变化，第10 d累计沉降量已占总沉降的61%，说明土体自由水排出明显。之后沉降继续发展，第50 d的累计沉降量约占总沉降的98%，最后20 d的沉降量仅占总沉降的2%，说明真空预压后期对于土体的加固效果已不明显。

同时，水平板真空预压泥面沉降量比竖向板真空预压多出25 mm(1.4%)，这是因为随着抽真空的进行，竖向板弯曲变形严重，导致排水板中的真空度沿深度衰减较大；而水平板真空预压通过竖向滤管向深部土体传递真空度，真空度沿深度衰减相对较小；且土体水平向固结收缩并不大，水平板基本不发生弯曲，真空度损失不大；另外，水平板真空预压随着固结的进行，相邻排水板间距大幅缩短，排水距离大幅减少，依据固结理论，能够有效地减少固结时间，提高土体加固效果。

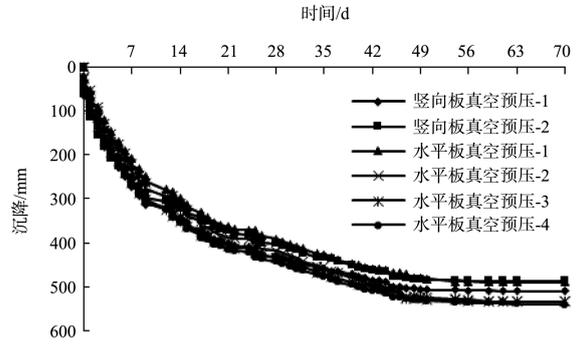


图5 泥面沉降时程曲线

2.3 出水量

由于A、B池土体体积不同，将试验池出水量换算成单位土体体积的出水量，A、B池单位土体体积累计出水量和出水速率时程曲线如图6、7所示。由试验结果可知：竖向板真空预压和水平板真空预压累计出水量和日均出水量变化规律基本相同；抽真空前期，尤其是前3 d，单位体积日均出水量高达25 kg/(m³·d)以上；随着抽真空的进行，出水量迅速衰减，第20 d后单位体积日均出水量均在5 kg/(m³·d)以下。

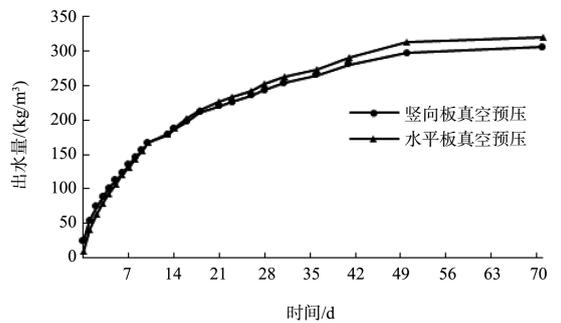


图6 单位土体体积累计出水量随时间变化曲线

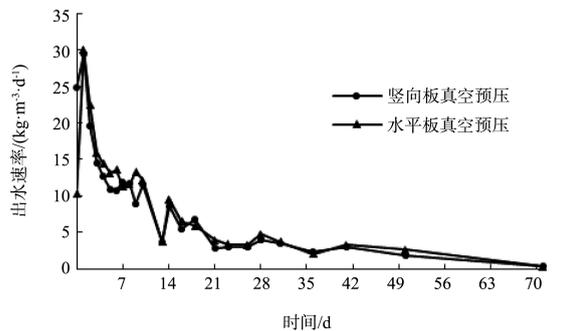


图7 单位土体体积出水速率随时间变化曲线

同时，在抽真空前期，竖向板真空预压的出水量略多于水平板真空预压，这是由于A池在真空膜下设置了水平滤管排水系统，而B池并未设

置; 使得初期 B 池膜下真空度传递不如 A 池, 导致 B 池膜下土体排水固结速率慢于 A 池。到了抽真空中期, 水平板真空预压的出水量开始大于竖向板真空预压, 这一现象与泥面沉降变化规律相一致, 并可以相互印证。

2.4 孔隙水压力

采用压入法在吹填流泥 1 m 深度处埋设振弦式孔压计, 抽真空期间超静孔压时程曲线见图 8。由试验结果可知: 竖向板真空预压和水平板真空预压孔隙水压力变化规律基本相同; 超静孔隙水压力的变化特征可分为两个阶段, 即前期排水期、中期结构形成期。在抽真空初期, 如前所述, 出水量及泥面沉降均较大; 但此时吹填流泥的含水量仍然很高, 土体含有大量的自由水, 土颗粒悬浮在水中, 成为“两相流”; 此阶段土体总应力几乎全部由孔隙水压力承担, 孔压的减小仅仅是排出的自由水使得孔压计上部土重减小, 总应力减少所致。到了真空预压中后期, 大部分自由水被排出, 土颗粒相互接触, 土骨架开始承担压力; 此阶段土体有效应力迅速增大, 在总应力变化不大的情况下, 孔压也迅速降低; 由于土颗粒与结合水的相互吸附作用, 土体排水已相当困难; 导致出水量及泥面沉降的变化均很缓慢。

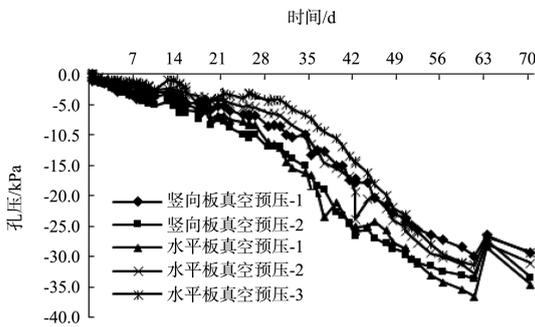


图 8 超静孔隙水压力时程曲线

2.5 含水率

试验结束后加固土体厚度约为 1.1 m, 取排水板间(即离排水板最远处)进行含水率试验, 含水率沿深度变化关系散点及曲线图, 如图 9~11 所示。由试验结果可知: 1) 两种工艺下, 同一深度处的含水率均有一定的离散性, 这是由于施工因素、试验过程中排水板的弯曲变形及取土时的偏

差等因素造成的离散性。2) 不同工艺下, 含水率均呈随深度增加而增大的趋势。3) 20 cm 深度处, 水平板真空预压的含水率比竖向排水板真空预压高出 1.0%, 这是因为水平板真空预压未设置水平滤管, 使得其膜下真空度传递、浅表层的加固效果不如竖向板真空预压。60、100 cm 深度处, 水平板真空预压的含水率比竖向板真空预压分别低 0.7%、3.4%, 表明水平板真空预压对于深层土体的加固效果要优于竖向板真空预压, 且深度越深, 水平板真空预压的优势越明显。其原因已在 2.2 节详细解释。

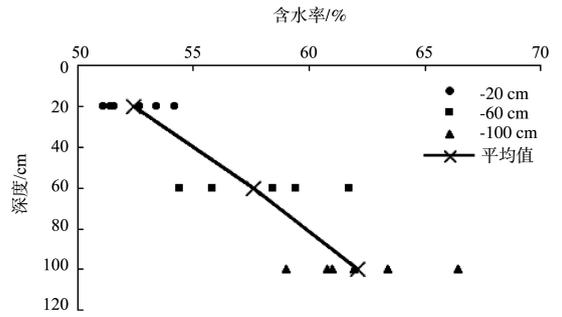


图 9 竖向板真空预压土体含水率散点

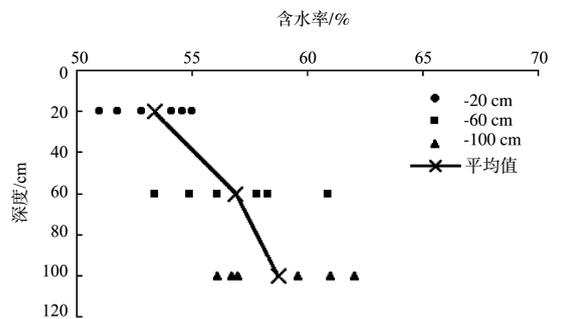


图 10 水平板真空预压土体含水率散点

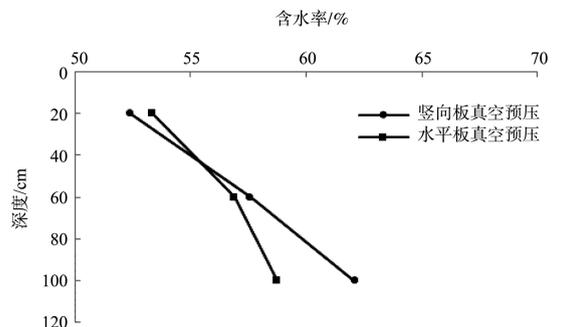


图 11 不同深度的土体含水率

2.6 十字板抗剪强度

十字板抗剪强度试验检测点均在排水板间(即离排水板最远处), 十字板抗剪强度沿深度的变化

关系散点及曲线图见图 12~14。由试验结果可知：
 1) 两种工艺下，同一深度处的十字板抗剪强度均有一定的离散性，这一现象与含水率数据变化规律相一致。2) 不同工艺下，十字板抗剪强度呈随深度增加而减小的趋势。3) 20、40 cm 深度处，不同工艺下的十字板抗剪强度相差不大；100 cm 深度处，水平板真空预压的十字板抗剪强度比竖向板真空预压高出 20%，这一现象与含水率变化规律相一致，并可以相互印证。

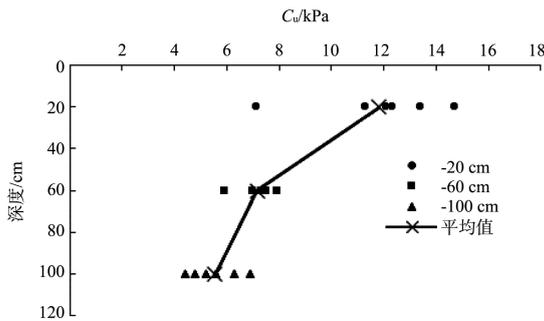


图 12 竖向板真空预压土体十字板抗剪强度散点

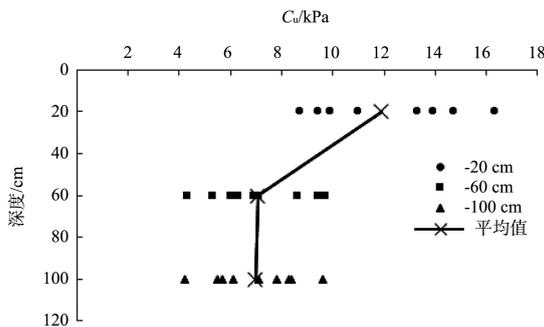


图 13 水平板真空预压土体十字板抗剪强度散点

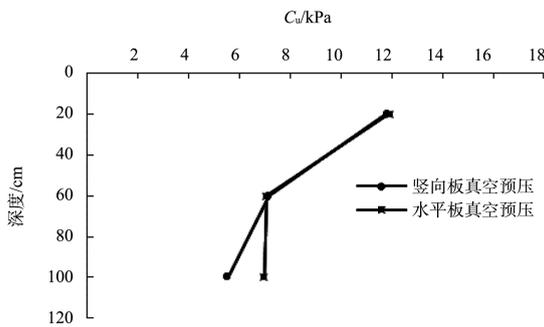


图 14 不同深度的土体十字板抗剪强度 C_u

3 水平板真空预压优势

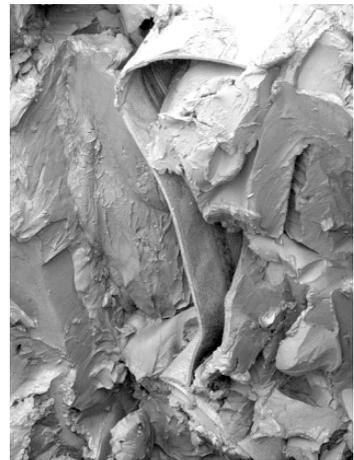
水平板真空预压的优势如下：

1) 运用常规竖向板真空预压加固高黏粒吹填土，其地基沉降量非常显著，导致竖向排水板严

重弯折(图 15 a))，影响其真空度的传递及排水效果。而水平板真空预压，由于土体侧向收缩不大(图 15b))，水平布置的排水板弯曲很小，对真空度的传递效果影响较小。

2) 水平板真空预压在竖直方向采用滤管传递真空度，滤管具有一定柔性和环刚度，且管径较大；在土体沉降过程中，滤管能够随着土体的压缩而弯曲，且其内径基本保持不变，能有效地保证其通水量和真空度的传递效果。

3) 土体的固结过程主要以竖向固结为主，尤其是对于吹填土，其加固后土层压缩量可占整个吹填土层厚度的 30%~40%。水平板真空预压加固吹填土时，随着固结的进行，相邻排水板间距大幅缩小，排水距离大幅减少。依据固结理论，能够有效地减少固结时间，提高土体加固效果。



a) 竖向板



b) 水平板

图 15 排水板弯折情况

4 结论

1) 竖向板真空预压和水平板真空预压加固吹填流泥固结及变形规律基本相同,可分为2个阶段,即排水期和结构形成期。在排水期,吹填流泥的固结过程主要为排出土体中的自由水,出水量及泥面沉降均较大,孔压增长缓慢,土体几乎无结构强度;在结构形成期,土体有效应力迅速增大,孔压也迅速降低,出水量及泥面沉降变化速率开始变缓。

2) 吹填流泥的固结过程呈大变形特征,常规的竖向板真空预压,排水板弯曲变形严重,导致排水板中的真空度沿深度衰减较大,对于深层土体的加固效果影响较大。而水平板真空预压通过竖向滤管及水平向排水板组成排水体,能有效保证其通水量和真空度的传递效果;且随着土体固结,相邻排水板间也会大幅减少;其加固效果,尤其是对深层土体的加固效果,要优于竖向板真空预压。

参考文献:

- [1] 叶国良,郭述军,朱耀庭.超软土的工程性质分析[J].中国港湾建设,2010(5):1-9.
- [2] 武亚军,杨建波,张孟喜.真空加载方式对吹填流泥加固效果及土颗粒移动的影响研究[J].岩土力学,2013(8):2129-2135.

- [3] 沈宇鹏,冯瑞玲,余江,等.增压式真空预压处理软基的加固机理[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(3):792-797.
- [4] 唐彤芝,董江平,黄家青,等.薄砂层长短板结合真空预压法处理吹填淤泥土试验研究[J].岩土工程学报,2012(5):899-905.
- [5] 董志良,张功新,周琦,等.天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):1073-1080.
- [6] 曹永华,李卫,刘天韵.浅层超软土地基真空预压加固技术[J].岩土工程学报,2011(S1):241-245.
- [7] 孙立强,闫澍旺,李伟,等.超软土真空预压室内模型试验研究[J].岩土力学,2011,30(4):984-990.
- [8] 应舒,陈平山.真空预压法中塑料排水板弯曲对固结的影响[J].岩石力学与工程学报,2011(S2):3633-3640.
- [9] Shinsha H, Hino Y, Watari Y. Research in vacuum consolidation method employing horizontal drains (Part 1) [C]//Japanese Geotechnical Society. 22th Symposium of Geological Engineering Research, 1987: 1783-1784.
- [10] Shinsha H, Hino Y, Watari Y. Research in vacuum consolidation method employing horizontal drains (Part 2) [C]//Japanese Geotechnical Society. 22th Symposium of Geological Engineering Research, 1987: 1785-1788.
- [11] Shinsha H, Hino Y, Watari Y. Research in vacuum consolidation method employing horizontal drains (Part 3) [C]//Japanese Geotechnical Society. 23th Symposium of Geological Engineering Research, 1988: 2129-2132.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

天航局中标黄骅港综合港区 PPP 项目

日前,天航局与天津三建建筑公司联合体中标黄骅港综合港区防波堤延伸及码头建设 PPP 项目,项目总投资约 25 亿元。

项目包含 20 万吨级航道防波堤(南堤)延伸工程、渤海水产品交易中心、综合港区 9[#]、10[#]通用码头等工程。其中,20 万吨级航道防波堤(南堤)延伸工程将建设长 8.8 km 防沙潜堤,主要为抛石堤心结构;渤海水产品交易中心工程总用地面积 87 374.7 m²,总建筑面积 112 854.68 m²;综合港区 9[#]、10[#]通用码头工程将建设 2 个 5 万吨级通用泊位工程,码头设计为高桩结构。

http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201607/t20160701_49131.html (2016-07-04)