

深层搅拌法加固码头软基离心模型试验研究

Centrifuge model test of pier ground improved by CDM

王年香, 章为民

(南京水利科学研究院 土工研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 运用离心模型试验技术对采用深层搅拌法加固码头接岸软基和沉箱码头基础的工作机理和破坏机理开展研究, 弄清了影响整体稳定性的主要因素, 得出了不同地基条件、不同着底方式、不同宽度加固体的外部破坏型式和地基整体破坏型式, 证实了可用朗肯理论计算加固体两侧主、被动土压力。

关键词: 变形特性; 破坏型式; 土压力; CDM 加固体; 离心模型试验

作者简介: 王年香, 男, 1963年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地基基础工程的模型试验、计算分析和现场监测等方面的研究工作。

中图分类号: TU 472.3⁺ 6; U 655.54

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)05-0634-05

WANG Nianxiang, ZHANG Weimin

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The working and failure mechanism of soft ground improved by the cement deep mixing method (CDM) is studied with centrifuge model test for the foundation under retain wall of pile-supported pier and the foundation under caisson. The main factors influencing the complete stability of improved ground are clarified. The failure type of ground improved by CDM in different geological conditions and with different width of improved ground are obtained. It is verified that the active and passive earth pressures on two sides of improved ground can be calculated with Rankine theory.

Key words: deformation behaviour; failure type; earth pressure; ground improved by CDM; centrifuge model test

1 引言^y

随着我国港口建设规模的扩大和新港址的开发, 将愈来愈多地遇到软土加固难题。深层水泥搅拌法(简称 CDM 工法)是解决这一难题的主要方法之一。一航局等单位在吸收、引进、消化国外成功经验的基础上, 研究开发出适合我国国情的海上深层水泥搅拌法加固软土地基技术, 并先后在天津港东突堤工程、烟台港西港池二期工程、天津港南疆煤码头新建工程等应用, 达到了提高地基强度以防止过大沉降变形和提高稳定性的目的, 取得了满意效果。

CDM 工法的设计计算方法总体是“理论落后于实际”。在应用广泛的日本现行设计方法中^[1], 没有考虑加固体的破坏型式, 而都假定加固体处于极限平衡状态, 采用朗肯土压力计算理论进行计算。但是, 正如有关作用在挡土墙上土压力的研究成果所表明的那样, 作用在加固体上的土压力受其变位的影响很大。因此, 采用朗肯理论计算作用于加固体上的土压力是否可行, 加固体的变位和破坏型式不同时, 作用于其上的土压力是否一样, 这些都是 CDM 工法在实际应用中亟待研究解决的问题。

离心模型试验技术研究始于 20 世纪五六十年代, 80 年代后进入了高速发展时期^[2]。目前该技术的研究内容几乎涉及了土木工程的所有领域, 已成为岩土工程技术研究中最主要、最有效的手段。本文针对

CDM 加固体的外部稳定问题, 通过离心模型试验, 分析研究一般深层搅拌加固体在荷载作用下的受力状态、应力与应变、与周围土体的相互作用、破坏型式等, 找出符合实际的加固地基破坏型式和土压力计算理论, 弄清影响整体稳定性的主要因素。

2 离心模型试验方法

2.1 离心模型相似理论

模型与原型的相似理论是模型试验的依据和准则。用模型来模拟原型, 就是使模型与原型有相同的力学表现, 如果有相同的力学表现, 就应该有相同的力学控制方程。用模型来模拟原型一般应该满足运动平衡条件、土的本构条件和运动边界条件。

大量的试验资料表明: 土的力学性质呈非线性, 且取决于应力水平, 即不同的应力水平条件下土体的力学特性不同。因此, 在进行模型试验时, 满足模型应力水平与原型应力水平相等是至关重要的, 而只有离心模型试验才能满足这一要求。在离心模型试验中, 如果选用原状土制模并使其密度与原型相同, 可以使模型几何尺寸缩小 n 倍, 场加速度增大 n 倍(n 为模型比尺), 确保模型每一点应力与原型相同, 从而实现用模型表现原型的目的。

^y 基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(96-415-01-01)

收稿日期: 2001-03-21

表 1 高桩码头工程各土层物理力学性质指标
Table 1 Indices of soil of pile-supported pier

土 名	w /%	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	e	I_P	I_L	压缩系数 / MPa^{-1}	三轴快剪强度 /kPa	十字板强度 /kPa
淤泥质粘土	41.4	17.8	1.114	17.4	1.260	0.679	19.8	22.1
淤泥质粘土	50.7	17.1	1.336	23.4	1.222	0.815	21.0	25.6
粘质粉土	26.5	19.5	0.730	9.1	1.055	0.276	54.2	51.4

2.2 工程原型简介

试验以华北某港两码头工程为原型, 其中一个为高桩码头, 挡土墙下接岸软基采用块式 CDM 工法加固。码头面标高 $\nabla+6.0$, 加固体顶标高 $\nabla+2.0$, 底标高 $\nabla-16.5$, 宽度 4.4 m, 水泥掺量 $a_v=310\text{ kg/m}^3$, 水灰比 0.8, 无侧限压缩模量 160 MPa, 泊松比 0.25, 抗压强度 2.5 MPa, 容重 17.8 kN/m^3 , 主要土层的物理力学性质指标见表 1, 设计荷载 20 kPa。另一个工程为沉箱码头, 沉箱下软基采用块式 CDM 工法加固。码头面标高 $\nabla+5.85$, 加固体顶标高 $\nabla-12.5$, 底标高 $\nabla-20.0$, 宽度为 24 m, 堆场采用排水板预压法处理, 设计高水位 $\nabla4.3$, 低水位 $\nabla0.5$, 各土层容重及十字板强度见表 2, 设计荷载 60 kPa。

表 2 沉箱码头工程各土层物理力学性质指标
Table 2 Indices of soil of caisson pier

土 名	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	十字板强度/kPa	
		加固前	加固后
淤泥	16.2	11.6	28
淤泥质粘土	17.3	17.2	34
淤泥	16.5	15.8	36
淤泥质粘土	17.4	25.6	48
亚粘土	19.6		
亚砂土	19.8		

2.3 模拟技术

(1) 模型比尺选择

综合各种影响因素, 模型比尺选为 $n=100$ 。

(2) 地基土层模拟

试验土料取自现场, 以地基强度指标作为主要模拟量, 而其他诸如含水率、容重等参量都作为次要参量近似满足相似律。为模拟成层地基, 采用了以下固结方式, 根据容重及厚度求得各层土所需的湿土重, 然后经过浸泡拌成泥浆, 从底层至上层分层固结, 并测定各土层的厚度、强度, 使其符合要求。

(3) CDM 加固体模拟

这是试验关键, 北诒昌树等采用酚醛树脂来模拟^[3], 本试验选用两种方法: 酚醛树脂(俗称电木)和水泥土。酚醛树脂的抗拉强度为 50~68 MPa, 断裂伸长率为 1.0%~1.5%, 抗拉弹性模量为 5200~7000 MPa, 水泥土性质与现场基本一致。

2.4 试验方案

各试验方案布置见图 1。码头接岸地基 CDM 加固体分别采用电木和水泥土模拟, 地基土为原土层。沉箱码头地基 CDM 加固体采用水泥土模拟, 分别采用原土层、淤泥质粘土和粘质粉土模拟地基土。

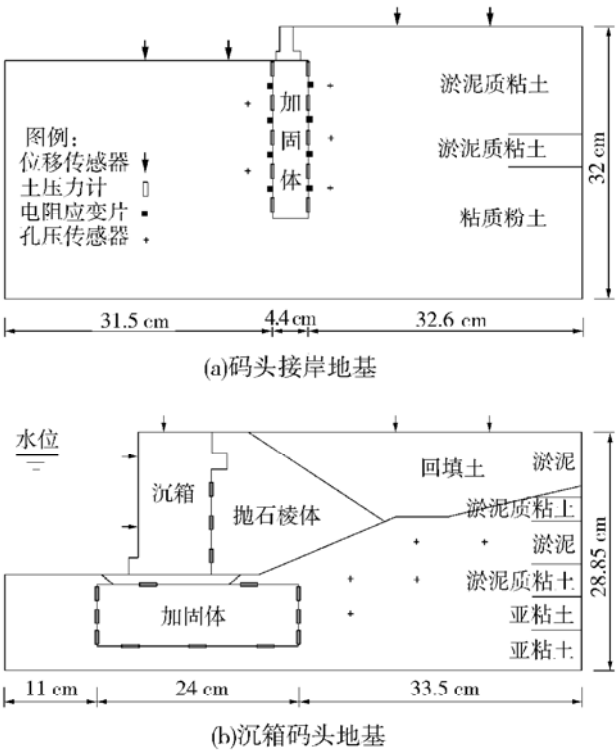


图 1 离心模型试验布置图
Fig. 1 Layout of the model

3 地基和加固体的变形特性

3.1 码头接岸地基

图 2 为从试验开始到结束的实测码头接岸地基变位矢量图。可以看出, 码头接岸地基变位主要发生在淤泥质粘土层, 且上大下小, 下面的粘质粉土层则基本上不发生变位。在加固体的两侧形成主、被动区, 主动侧的淤泥质粘土层呈向加固体方和下方变位的趋势, 被动侧则呈从加固体向地表面变位的趋势。观察加固体附近的变位可知, 发生在加固体上部的水平位移比下部大, 而加固体的沉降则很小, 因此, 加固体以底端前点为支点, 发生向被动侧旋转的变位形态。比较水泥土和电木模拟加固体发现(见图 3), 由于电木的抗

表 3 堆场荷载产生的沉箱码头变形增量

Table 3 Increments of settlements and displacements induced by loading

地基土	荷载增量 /kPa	堆场		沉箱			
		沉降 S_1 /cm	沉降 S_2 /cm	沉降 S_3 /cm	水平位移 H_1 /cm	水平位移 H_2 /cm	倾斜度/%
原土层	60	29.18	28.12	0.87	5.07	3.50	0.1847
	80	24.81	22.56	0.14	10.00	7.66	0.2729
淤泥质粘土	60	31.61	29.01	2.14	17.09	17.85	- 0.0894
	80	26.66	24.15	1.55	14.52	16.06	- 0.1812
粘质粉土	60	22.07	23.86	0	1.35	0.86	0.0576
	60	11.60	13.80	1.58	2.65	2.37	0.0329
	50	8.26	8.07	0.68	0.91	0.04	0.1024
	20	2.43	2.73	0.29	0.30	0	0.0353

弯刚度远大于水泥土, 电木从下到上产生倾斜, 而水泥土则在粘质粉土层基本上没有水平位移, 只在淤泥质粘土层范围内产生水平位移, 从而在淤泥质粘土与粘质粉土层交界面有明显的转折点。

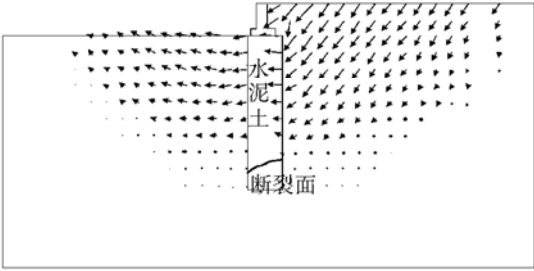


图 2 码头接岸地基变位矢量图

Fig. 2 Vectors of deformation of foundation under retain wall

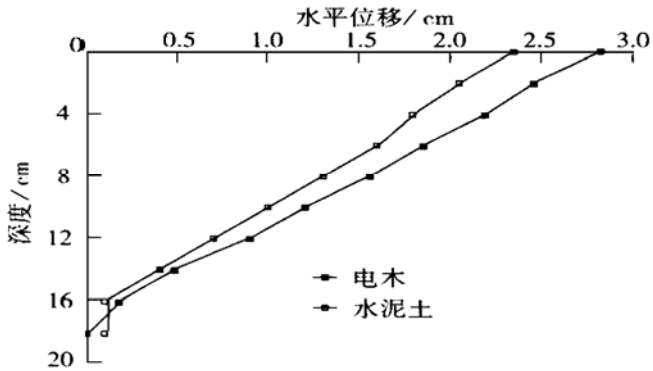


图 3 码头接岸地基加固体水平位移分布图(模型值)

Fig. 3 Displacements distribution of improved ground in the model

3.2 沉箱码头地基

图 4 为从试验开始到结束的实测沉箱码头地基变位矢量图。可以看出, 沉箱码头地基变位主要发生在淤泥质粘土岸坡上, 且上大下小, 下面土层变位则视土质情况而定。从堆场荷载引起的沉箱码头地基堆场沉降、沉箱沉降和水平位移增量(见表 3)可以看出, 土质条件越好, 堆场沉降、沉箱沉降和水平位移就越小, 且当加固体嵌入粘质粉土层时, 沉箱朝码头前沿倾斜, 当加固体悬浮在淤泥质粘土层时, 沉箱朝后倾斜。从加固体的变位情况(表 4)来看, 加固体嵌入粘质粉土层

时, 变位主要以水平位移为主, 且顶面大、底面小; 加固体悬浮在淤泥质粘土层时, 变位既有水平位移, 又有沉降, 水平位移顶面大、底面小, 沉降后方大、前沿小, 且水平位移和沉降量级相当。

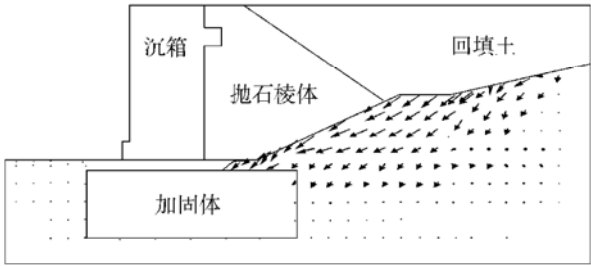


图 4 沉箱码头地基变位矢量图

Fig. 4 Vectors of deformation of foundation under caisson

表 4 试验结束时沉箱码头加固体的变位(模型值)

Table 4 Deformation of improved ground in the model

土 层	沉降/mm		水平位移/mm	
	前沿	后方	底面	顶面
原土层	0	0	1.0	3.0
淤泥质粘土	1.0	1.5	2.0	4.5
粘质粉土	0	0	1.5	3.0

4 破坏型式

4.1 加固体的外部破坏型式

图 5 给出了码头接岸地基加固体用电木模拟时, 加固体由堆场荷载引起的弯矩及其最大和最小应力分布, 弯矩和最大应力随着荷载的增大而增大, 而最小应力则随着荷载的增大而减小。淤泥质粘土层中的加固体弯矩较小, 接近粘质粉土层时则显著增大, 此处加固体中出现了较大的拉应力。另外, 试验结束后发现, 码头接岸地基加固体用水泥土模拟时, 加固体在淤泥质粘土层和粘质粉土层交界面处已经被折断。这充分说明加固体在淤泥质粘土层和粘质粉土层交界面处承受了较大的弯曲应力, 因此, 对于嵌入粘质粉土层的加固体, 加固体的破坏型式主要为倾覆破坏。

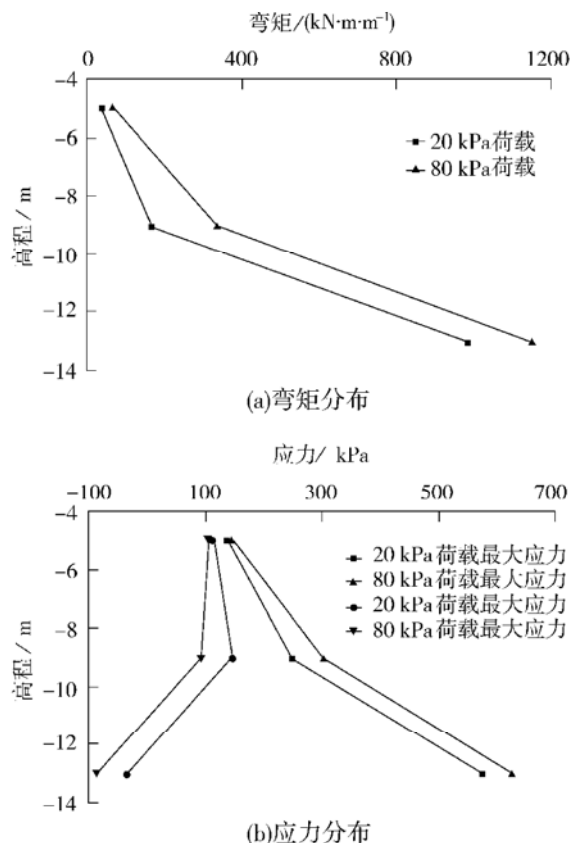


图5 加固体的弯矩和最大、小应力分布图

Fig. 5 Bending moments and stresses distribution of improved ground

从不同地基条件下沉箱码头地基的变位图可以看出,破坏时,嵌入粘质粉土层的CDM加固体主要以水平位移为主;悬浮在淤泥质粘土层的CDM加固体既有水平位移,又有沉降,且量级相当。因此,嵌入粘质粉土层的沉箱码头CDM加固体的外部破坏型式主要为滑移破坏;悬浮在淤泥质粘土层的沉箱码头CDM加固体的外部破坏型式主要为承载力破坏和滑移破坏。

4.2 加固体的内部稳定验算

内部稳定是指加固体的应力验算。从试验结果来看,对于码头接岸地基加固体,主要以抗弯条件作为应力验算的控制指标;对于嵌入粘质粉土层的沉箱码头CDM加固体,主要以抗剪条件作为应力验算的控制指标;对于悬浮在淤泥质粘土层的沉箱码头CDM加固体,主要以抗压条件作为应力验算的控制指标。

4.3 地基整体破坏型式

图6为根据实测的地基变位矢量图画出的地基整体破坏线,可以认为,地基整体破坏型式为对数螺旋曲线破坏,可以简单地用圆弧滑动法进行稳定计算。码头接岸地基加固体刚度越大,滑弧就越深;对于嵌入粘质粉土层的沉箱码头CDM加固体,滑弧较浅,可能会穿过加固体滑动;对于悬浮在淤泥质粘土层的CDM加固体,滑弧较深,绕过加固体滑动。

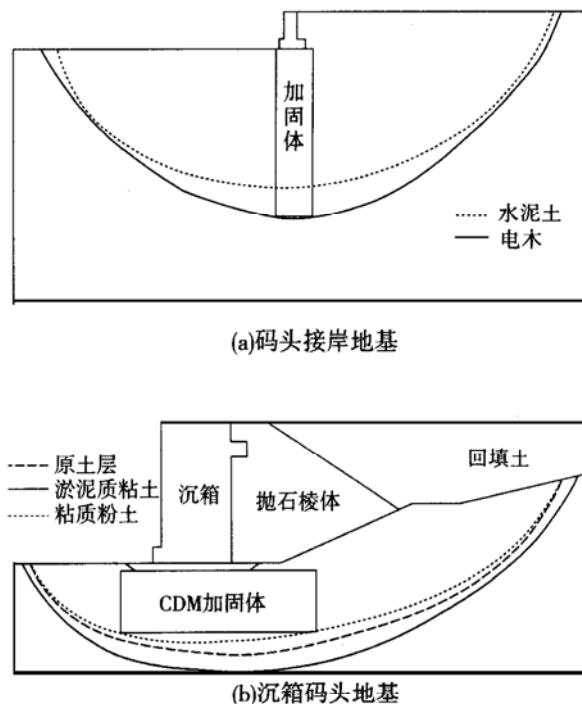


图6 地基整体破坏线

Fig. 6 Complete failure line of foundation

5 作用于加固体两侧的土压力

作用于加固体上的土压力是进行加固体外部稳定和内部稳定计算的重要参数。土压力是加固体和周围土体相互作用的结果。一方面,它们的取值直接影响到加固体的大小、形状和变形性状;另一方面,加固体的大小、形状和变形性状反过来又影响作用于其上土压力的变化。大量的研究表明,当墙体发生平移、倾斜、沉陷时墙后的土压力分布是不同的。

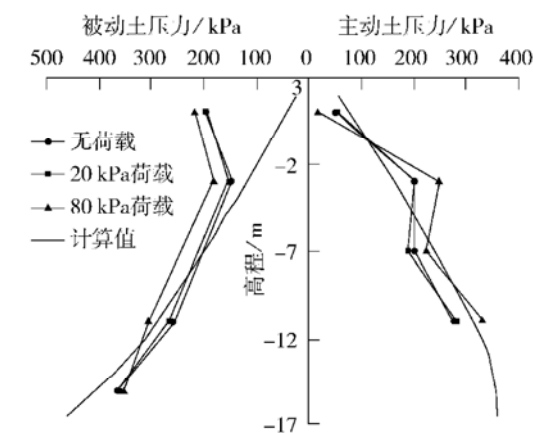
图7为码头接岸地基实测的作用于加固体上主、被动土压力沿深度的分布图,图中的计算值为朗肯主、被动土压力,按下式计算^[4]:

$$\begin{aligned} p_a &= \sigma_v - c_u \\ p_p &= \sigma_v + c_u \end{aligned} \quad (1)$$

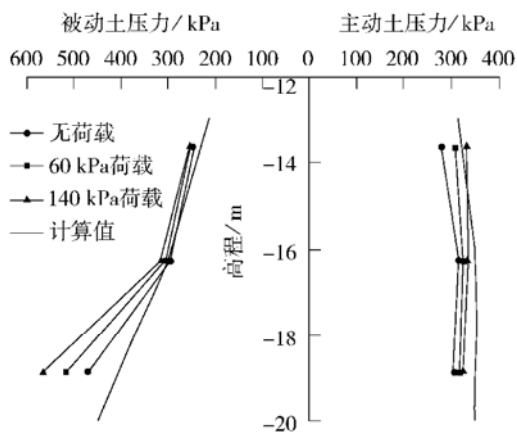
式中 c_u 为模型土层原位不排水强度的实测值; σ_v 为上覆土重,未考虑堆场荷载影响。

由此可以看到,与朗肯土压力相比,码头接岸地基加固体上土压力实测值除上部被动侧外基本一致,上部被动土压力偏大主要是实测土压力包含孔隙水压力所致。沉箱码头地基加固体上实测土压力在上半段与计算值基本一致,而下半段实测主动土压力偏小,实测被动土压力偏大,这可能与下部地基为粘质粉土,其强度随加速度和荷载增长较快有关。另外,实测主、被动土压力还随堆场荷载有所增大,这主要是由于孔隙水

压力增长所致。因此,作用于加固体的主、被动土压力可以采用朗肯理论计算。



(a) 码头接岸地基



(b) 沉箱码头地基

图7 加固体上的主、被动土压力分布图

Fig. 7 Active and passive soil pressures distribution of improved ground

6 结 论

(1) CDM 加固体着底方式和宽度不同,其变形也不同。嵌入粘质粉土层的码头接岸加固体,以底端前点为支点,发生向被动侧旋转的变位形态。嵌入粘质粉土层的沉箱码头加固体沉降和水平位移均很小,悬浮在淤泥质粘土层的沉箱码头加固体沉降和水平位移较大。

(2) 加固体的宽度、深度和着底方式不同,其外部破坏型式也不同。嵌入粘质粉土层的码头接岸地基加固体为倾覆破坏,嵌入粘质粉土层的沉箱码头加固体为滑移破坏,悬浮在淤泥质粘土层的沉箱码头加固体为承载力破坏和滑移破坏。

(3) 用 CDM 工法加固码头地基,其整体破坏型式为对数螺旋曲线破坏,可简单地用圆弧滑动法进行稳定计算。加固体的刚度和着底方式不同,滑弧深度也不同。

(4) 试验实测土压力与朗肯理论计算值相差不大,证实了可用朗肯理论计算加固体两侧主、被动土压力。

(5) 试验结果表明,采用水泥土模拟码头地基 CDM 加固体,比日本等国采用电木来模拟更符合实际情况,从而更真实地反映了加固体的内部破坏型式。

参考文献:

- [1] CDM 研究会. セメント系深层混合处理工法——设计与施工マニュアル(设计・施工编)[M]. 1992.
- [2] Schofield A N. Cambridge geotechnical centrifuge operation[J]. Geotechnique, 1981, 30(3): 227~ 268.
- [3] 北诘昌树. 深层混合处理工法による改良地盤の安定性に関する研究[J]. 港湾技研資料, 1994(774): 1~ 73.
- [4] 魏汝龙. 总应力法计算土压力的几个问题[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 120~ 125.

《水运工程》月刊 2002 年征订通知

《水运工程》月刊是经国家新闻出版署批准,由交通部主管、中交水运规划设计院主办、面向全国水运工程行业,在国内外公开发行的科技刊物。本刊及时报道国家在水运工程行业方面的方针政策;重点报道港口、航道与航电枢纽、桥涵、修造船厂、市政建设等勘察、规划、设计、科研、施工、水运经济及管理方面的新技术、新材料、新方法及技术改造方面的成果和主要经验教训。1992 年本刊被首选为全国中文核心期刊,1994 年成为美国工程信息公司中国信息部 Ei Page One 数据库的收录期刊,1997 年获交通部优秀期刊,首批入编中国学术期刊(光盘版),2000 年加入中国期刊网(CHINANET, CERNET),并正式成为国家科技部中国科技论文统计源期刊。

本刊设有综合、港口、航道、桥涵、施工、规范、讨论、电算应用、工程监理、信息等栏目。

本刊国际标准刊号: ISSN1002- 4972; 国内统一刊号: CN11- 1871/U; 广告经营许可证号: 京东工商广字第 0082 号。本刊每本 6 元,全年 72 元。另本部存有 1993 年以来的合订本,每本(年) 100 元。

邮汇地址: 北京市安定门内国子监 28 号《水运工程》编辑部; 邮政编码: 100007; 联系电话: (010) 64016622- 367(364)。

开户行: 北京市商业银行建国支行; 户名: 中交水运规划设计院; 帐号: 0329400120109002564。

(《水运工程》编辑部 供稿)