

DOI: 10.11779/CJGE2024S10014

DCM 和碎石基床联合承载特性的离心模型试验研究

王雪奎^{1, 2, 3, 4, 5}, 岳长喜^{1, 2, 3, 4, 5}, 黄思杰⁶

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300461; 2. 港口岩土工程技术交通运输行业重点实验室, 天津 300461; 3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300461; 4. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222; 5. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;
6. 华设检测科技有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: DCM 联合碎石基床是处理跨海沉管隧道复杂地质条件的新型地基形式, 在软土地区极具优势。依托深中通道沉管隧道工程, 通过离心模型试验, 研究了 DCM 联合碎石基床的承载特性和激振荷载对 DCM 桩身完整性的影响, 研究结果表明: 复合地基荷载-沉降曲线存在拐点, 拐点前荷载和沉降呈线性关系, 拐点后呈陡降型; 碎石基床能够有效分散应力, 提高地基的整体承载力; 复合地基的极限承载力约是沉管底部最大荷载的 1.5 倍; 当上部荷载超过地基极限承载力后, 碎石会刺入 DCM 桩体内, 引起桩头破碎, 影响范围约为桩头以下 3 m 内; 地基表面沉降较小, 工后沉降占总沉降的 15.5%, 该新型地基形式能够有效控制沉降。

关键词: DCM; 复合地基; 碎石基床; 承载特性

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0143-04

作者简介: 王雪奎 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事土工离心模型试验方面的研究。E-mail: 454917485@qq.com。

Centrifugal model tests on combined bearing characteristics of DCM and gravel foundation

WANG Xuekui^{1, 2, 3, 4, 5}, YUE Changxi^{1, 2, 3, 4, 5}, HUANG Sijie⁶

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd, Tianjin 300461, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Transport, PRC, Tianjin 300461, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300461, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, CCCC, Tianjin 300222, China; 5. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 6. China Design Testing Technology CO., LTD, Nanjing 210000, China)

Abstract: The combination of DCM and gravel foundation is a new type of foundation form for dealing with complex geological conditions of cross sea immersed tube tunnels, which has extremely advantageous in soft soil areas. Based on the immersed tunnel project of Shenzhong-Zhongshan Bridge, centrifugal model tests are conducted to study the bearing characteristics of the DCM combined gravel foundation and the influences of excitation loads on the integrity of the DCM piles. The research results show that there is a turning point in the load-settlement curve of the composite foundation and a linear relationship between the load and the settlement before the turning point, and a steep drop after the turning point. The gravel foundation can effectively disperse stress and improve the overall bearing capacity of the foundation. The ultimate bearing capacity of the composite foundation is about 1.5 times the maximum load at the bottom of the immersed tube. When the upper load exceeds the ultimate bearing capacity of the foundation, the gravel will penetrate into the DCM piles, causing the pile head to break, with an impact range of about 3 m below the pile head. The surface settlement of the foundation is relatively small, and the post-construction settlement accounts for 15.5% of the total settlement. This new type of foundation form can effectively control settlement.

Key word: DCM; composite foundation; gravel foundation; bearing characteristic

0 引言

DCM(深层水泥搅拌法)是利用专用的搅拌机械, 将水泥或石灰等固化材料强制搅拌到软土地基中, 通过固化材料和软土的一系列物理化学反应, 从而提高软土地基强度和稳定性的一种地基加固方法^[1-3]。该方

法具有施工速度快、成本低、加固效果快、安全高效等优点, 特别在沿海软黏土的加固上受到岩土工程学者们的重视。自 60 年代, 该方法被提出后, 学者们

表 1 地基土层的主要物理力学性质

Table 1 Main physical and mechanical properties of soil layers

土层	厚度 /m	含水率 w/%	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	弹性模量 E/MPa	泊松比 v
碎石基床	0.8		2.00	1.000	17.55		40.0	0	14.63	0.25
淤泥	10.0	83.2	1.53	2.326	1.57	2.176	1.5	3.8	1.06	0.33
中砂	5.0	13.5	1.99	0.548	15.81	0.100	25.9	8.0	13.18	0.25
全风化花岗岩	6.5	16.3	1.96	0.652	18.00	0.097	27.4	18.5	15.00	0.25

主要从加固机理^[4-6]、加固工艺^[7]、承载力^[8]、变形计算^[9]等方面进行了大量的研究，但对 DCM 和碎石基床联合承载特性，以及激振荷载对 DCM 桩身完整性影响的研究尚不多。依托深中通道沉管隧道地基加固工程，通过土工离心模型试验，研究 DCM 和碎石基床联合承载特性，以及激振荷载对 DCM 桩身完整性的影响，为工程的设计和施工提供参考。

1 工程概况

深中通道是中国继港珠澳大桥之后又一世界级“隧、岛、桥”集群工程，其水下隧道部分采用沉管方案。根据前期地质勘察资料可知，沉管下地基主要为淤泥和砂性土，其物理力学指标如表 1 所示。地基土的强度较低、厚度大，不满足承载力和沉降要求，需要对其进行处理。工程中，首次大规模应用海上深层水泥搅拌桩（DCM）作为沉管隧道地基处理工法。DCM 复合地基施工完成后，在其上抛填碎石并振密，共同组成 DCM 联合碎石基床这一新型地基型式。在抛填和振密过程中，碎石的挤入可能对 DCM 桩身完整性造成影响，并且 DCM 和碎石基床的联合承载特性尚不明确。因此需要开展 DCM 联合碎石基床承载特性和激振荷载对 DCM 桩身完整性影响的研究。

2 试验方法

2.1 试验设备

本试验是在中交天津港湾工程研究院有限公司 TPEI-200 土工离心机上进行的，如图 1 所示。



图 1 TPEI-200 土工离心机

Fig. 1 TPEI-200 geotechnical centrifuge

该离心机的容量为 $200g \cdot t$ ，最大离心加速度为 $200g$ ，旋转半径为 $4 m$ ；数采系统采用高精度动静一体采集模块，共有 128 通道，其中应变通道 80 路、电

压通道 16 路、电流通道 16 路，振动通道 16 路。

2.2 模型设计

综合考虑模型的几何尺寸、材料、传感器布置等因素，本次试验的相似比尺选定为 $N=40$ 。本次试验的关键荷载为碎石振密时的激振荷载，但考虑到离心场下很难直接模拟激振荷载，故在试验中采用拟静力法模拟激振荷载，即采用机械手按照 $1 mm/min$ 的速率逐渐施加静荷载，直至 DCM 桩发生破坏。荷载板采用铝合金板制作，经相似比尺计算后，其平面尺寸为 $125 mm \times 100 mm$ 。机械手模型箱的内部净尺寸为 $963 mm$ （长） $\times 663 mm$ （宽） $\times 650 mm$ （高）。

试验时在模型的关键部位不同深度处分别设置了土压力传感器、孔压传感器和激光位移传感器，模型的水平和剖面图如图 2，3 所示。

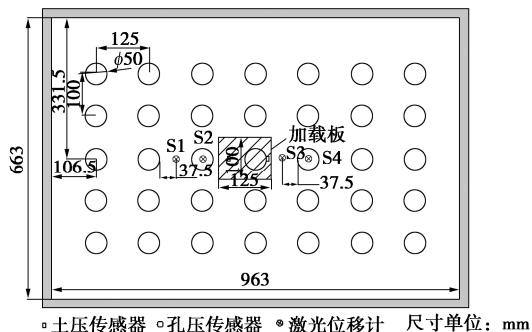


图 2 模型水平布置图

Fig. 2 Level drawings of centrifugal model

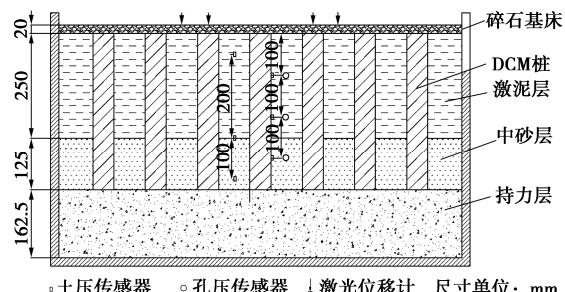


图 3 模型剖面布置图

Fig. 3 Sectional drawings of centrifugal model

2.3 模型制备

模型地基土料取自深中现场，对淤泥层，以地基强度指标作为制模标准，即模型地基土的强度与现场一致。试验前将土料过筛去除杂质后，经真空搅拌制成饱和泥浆，最后放入固结仪固结，制备软土地层。

经微型十字板检测, 模型淤泥层的平均不排水强度为 4 kPa; 对砂土层, 以密度为制模标准, 采用分层击实法进行填筑, 其干密度为 1.75 g/cm^3 ; 对持力层, 采用黏土混 30% 的碎石制成, 其压缩模量与现场一致。碎石基床采用 2~5 mm 级配碎石来模拟, 其填筑密度为 1.75 g/cm^3 。

DCM 桩采用水泥土桩模拟, 其无侧限抗压强度与现场一致。固化材料为海螺 P.O 52.5 水泥, 水泥掺量为 280 kg/m^3 , 水灰比 0.9, 28 d 抗压强度 1.2 MPa。

3 试验结果分析

3.1 承载特性分析

图 4 给出了原型荷载与沉降曲线。从图 4 中可以看出, DCM 和碎石基床复合地基在上部荷载作用下, 荷载和沉降曲线开始呈近似线性关系, 当荷载超过拐点 Q_1 后, 沉降随荷载快速增大, 表现为陡降型, 这说明地基逐渐发生失稳破坏。工程中, 一般取荷载沉降曲线的拐点作为极限承载力, 本试验中的极限承载力为 4460 kN, 对应的沉管底部荷载为 224 kPa, 而单独的 DCM 桩计算承载力为 92.3 kPa, 这说明碎石基床能有效分散应力, 提高地基的整体承载力。实际上, 沉管底部最大荷载为 147 kPa, 地基极限承载力约是沉管底部最大荷载的 1.5 倍, 这说明 DCM 联合碎石基床这种地基型式能够满足承载力要求。

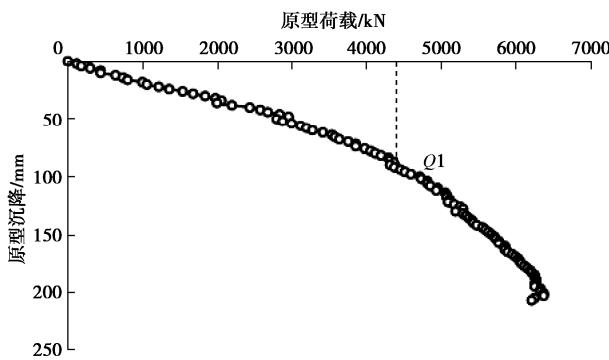


图 4 荷载沉降曲线

Fig. 4 Relation curves between load and settlement

试验结束后, 逐层挖开上部土层, 如图 5 所示。



图 5 桩头破坏情况

Fig. 5 Damage situations at pile head

发现碎石刺入 DCM 桩体, DCM 桩头约 3 m 范围

内发生破碎, 其他桩体保持完整, 这说明荷载主要对桩头一定范围内的完整性造成较大影响, 施工中应严格控制激振荷载。

3.2 土压力规律

图 6, 7 分别给出了桩侧和土中土压力的过程曲线。从图中可以看出, 各点土压力均随着离心加速的增加而增大; 离心加速度稳定后, 也逐渐趋于稳定; 待施加荷载后, 各点的土压力均快速增大, 其中浅部的土压力增大速率更大一些, 说明地基浅部受到的附加应力更大, 影响更明显。

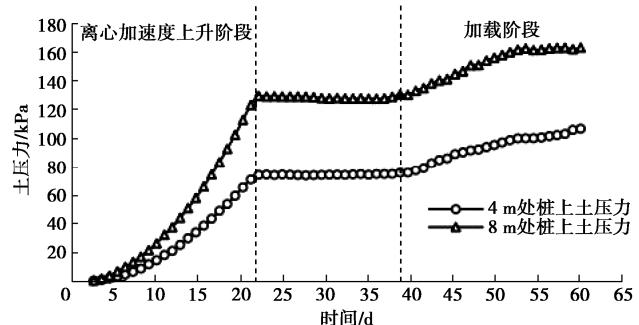


图 6 桩上土压力过程曲线

Fig. 6 Pressure-process curves of piles

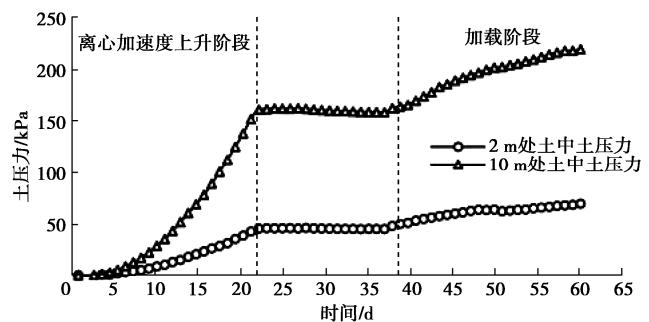


图 7 土中土压力过程曲线

Fig. 7 Pressure-process curves of soils

3.3 孔隙水压力规律

图 8 给出各点孔隙水压力的过程曲线。从图 8 可看出, 各点孔隙水压力均随着离心加速的增加而增大; 离心加速度稳定后, 孔隙水压力逐渐降低, 说明超静孔压有所消散; 加载后, 各点孔隙水压力均快速增加, 且地基浅部的孔压增大速率更大, 孔压反应更剧烈。

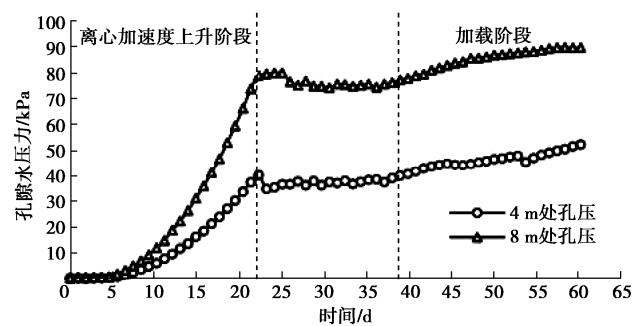


图 8 孔隙水压力过程曲线

Fig. 8 Pore-water pressure process curves

3.4 沉降规律

图9给出了各点沉降过程曲线。从图中可以看出，在离心加速度上升阶段，各点沉降均随着加速度的上升而增大；加速度稳定后，各沉降点也逐渐趋于稳定。离心加速度上升阶段可认为是施工阶段，此时地基平均沉降为87 mm；加速度稳定后，可认为是工后阶段，施工两个月后，平均沉降为103 mm，平均工后沉降为16 mm，占总沉降的15.5%，这说明沉降主要发生在施工期，工后沉降很小，DCM联合碎石基床这一新型地基形式，能够有效控制复合地基沉降。

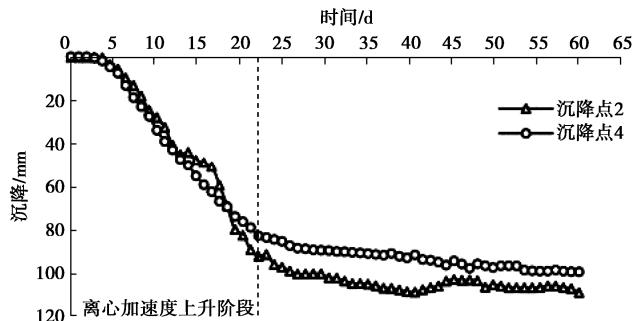


图9 沉降曲线

Fig. 9 Settlement curves

4 结 论

(1) DCM桩联合碎石基床的荷载-沉降曲线存在拐点，拐点前荷载和沉降呈线性关系，拐点后沉降随荷载增加而快速增大，呈陡降型；碎石基床能够有效分散应力，提高地基的整体承载力；复合地基的极限承载力约是沉管底部最大荷载的1.5倍，该地基处型式，能够满足工程需要。

(2) 当上部荷载超过地基极限承载力后，碎石会刺入DCM桩体内，引起桩头破碎，影响桩身完整性，影响范围约为桩头以下3 m内。

(3) 在上部荷载作用下，桩侧土压力，土中土压力，孔隙水压力均迅速增大，且地基上部增加速率大于底部，荷载对地基上部的影响剧烈。

(4) 复合地基表面沉降较小，工后沉降占总沉降的15.5%，这说明DCM联合碎石基床这一新型地基形式，能够有效控制复合地基沉降。

参考文献：

- [1] 何开胜. 水泥土搅拌桩设计计算方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 31-35. (HE Kaisheng. Study of design methods of deep cement-soil mixing piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 31-35. (in Chinese))

- [2] KLEIN A, POLIVKA M. Cement and clay grouting of foundations: the use of admixtures in cement grouts[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1958, 84(1): 1-2.
- [3] BRUCE D A. Practitioner's guide to the deep mixing method[J]. Ground Improvement, 2001, 5(3): 95-100.
- [4] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4):1-8. (DUAN Jiwei, GONG Xiaonan, ZENG Guoxi. Load transfer law of cement mixing pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4): 1-8. (in Chinese))
- [5] 郭印, 徐日庆, 邵允铖. 淤泥质土的固化机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1071-1075. (GUO Yin, XU Riqing, SHAO Yuncheng. Study on mechanism of muddy soil stabilization[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1071-1075. (in Chinese))
- [6] 黄新, 宁建国, 郭晔, 等. 水泥含量对固化土结构形成的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 436-441. (HUANG Xin, NING Jianguo, GUO Ye, et al. Effect of cement content on the structural formation of stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 436-441. (in Chinese))
- [7] 徐超, 董天林, 叶观宝. 水泥土搅拌桩法在连云港海相软土地基中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 495-498. (XU Chao, DONG Tianlin, YE Guanbao. Application of cement deep mixing method in Lianyungang marine soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 495-498. (in Chinese))
- [8] 郑刚, 姜忻良. 水泥土搅拌桩复合地基承载力研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 46-50. (ZHENG Gang, JIANG Xinliang. Research on the bearing capacity of cement treated composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 46-50. (in Chinese))
- [9] 郝玉龙, 王立忠, 陈云敏, 等. 深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 345-349. (HAO Yulong, WANG Lizhong, CHEN Yunmin, et al. Analysis and control of the settlement in thick soft clay ground reinforced by deep mixing cement piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 345-349. (in Chinese))

(编校：胡海霞)