

DOI: 10.11779/CJGE201809007

碎石垫层沉箱基础水平循环加载模型试验与分析

陈渊文^{1, 2}, 黄茂松^{*1, 2}, 楼初旻^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 碎石垫层沉箱基础是一种适于强震区深厚软弱土地基的深水基础形式, 具有抗震性能良好、承载力高、便于施工、造价合理等优点。采用自主设计的大周数水平循环加载装置对碎石垫层沉箱基础开展了室内 1g 模型试验研究, 探讨了基础在水平静力加载、循环加载以及循环后静力加载下的承载变形特性。试验研究表明, 基础在长期水平循环荷载作用下具有安全可靠的工作性能。静载下基础的荷载-水平位移关系可视为刚塑性、滑动破坏前为双曲线关系。循环荷载下基础的累积位移发展呈现收敛的趋势, 并随着荷载幅值的增大而增大; 基础在单向循环荷载下的累积位移大于同等大小荷载静载下的位移。循环加载后基础沿各方向的水平承载力和刚度均有所提高。然后, 对基于边界面理论的修正 G-M 弹塑性接触面本构模型进行改进, 利用 ABAQUS 接触面子程序 UINTER 将其嵌入 ABAQUS 中, 对碎石垫层沉箱基础的模型试验进行了有限元数值分析, 模拟得到的规律与试验结果相近。

关键词: 沉箱基础; 碎石垫层; 模型试验; 循环加载; 累积变形; 循环强化; 循环硬化; 接触面本构

中图分类号: TU434

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)09-1619-08

作者简介: 陈渊文(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事基础工程方面的科研工作。E-mail: cyw0822@qq.com。

Model tests and analyses of caisson foundation based on gravel cushion under cyclic lateral loads

CHEN Yuan-wen^{1, 2}, HUANG Mao-song^{*1, 2}, LOU Chu-yang^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The caisson foundation based on the gravel cushion is a scheme of deep foundations suitable for the ground with thick weak soil in seismic areas and has many advantages such as excellent seismic resistance, high bearing capacity, convenience for construction and reasonable cost. In this study, a series of 1g model tests on the caisson foundation based on the gravel cushion are conducted using a loading device designed for cyclic loadings of large cycle numbers, and the characteristics of bearing capacity and displacement of the foundation subjected to lateral static loads, cyclic loads and static loads after cyclic loadings are discussed. The experimental results reveal that the foundation has reliable working performance under long-term lateral cyclic loads. Under the static loading, the load-horizontal displacement curve of the foundation can be viewed as a rigid-plastic relation and described in a hyperbola relationship. Under the cyclic loads, the accumulative displacement of the foundation develops in a stable manner and increases with the amplitude of the cyclic loads. The accumulative displacement under one-way cyclic loads is larger than the displacement under the static loads with the same amplitude. Both the bearing capacity and loading stiffness are enhanced in all directions after cyclic loadings. Then the modified G-M elastoplastic interface constitutive model based on the boundary surface theory is improved and programmed into ABAQUS utilizing the interface user subroutine UINTER in ABAQUS, and the FEM analyses of model tests are conducted, and the results match well with the test ones.

Key words: caisson foundation; gravel cushion; model test; cyclic loading; accumulative displacement; cyclic strengthening; cyclic hardening; interface constitutive model

0 引言

跨海及跨江桥梁基础长期承受风、波浪等周期性循环荷载的作用, 这些循环荷载除了会对基础承载力产生影响外, 还会使基础产生水平循环累积变形, 尤

其当循环累积变形发展到一定程度时可能导致基础及

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目
(2013CB036304)

收稿日期: 2017-05-02

*通讯作者 (E-mail: mshuang@tongji.edu.cn)

上部结构倾斜, 从而影响桥梁的服役性能。在实际工程设计中往往能充分考虑基础承载力的要求, 但对变形考虑较少, 因此桥梁基础的水平循环累积变形特性是工程设计关注的重要问题之一。

碎石垫层沉箱基础是近十几年内出现的一种较新颖的深水基础形式, 它尤其适用于强震地区的深厚软弱土地基, 具有如下优点: 抗震性能良好, 承载力高, 便于施工, 造价合理等。于 2004 年建成通车的希腊 Rion-Antirion 大桥首次采用了这种基础形式, 其将直径 90 m 的混凝土沉箱基础放置在加固的天然地基上以减小不利环境条件和强烈地震作用对大桥结构的潜在损坏。经打桩加固的地基可防止发生对高耸桥塔(主塔高度达 230 m)极为不利的倾斜破坏模式, 而砾石层主要起到耗能隔震的作用^[1-3]。不少学者围绕希腊 Rion-Antirion 大桥在基础抗震设计^[4-7]、可靠度分析^[8]、数值分析和足尺试验研究^[9-10]、设计与施工方法^[11]、震后实测数据分析^[12]等方面开展了系列研究并取得了诸多成果。然而目前对于碎石垫层沉箱基础在长期水平循环荷载作用下累积变形的探讨还很少, 因此有必要对这类基础的水平循环加载变形特性进行研究。

碎石-结构物接触面的加载特性对于碎石垫层沉箱基础的承载变形行为起着控制作用, 因此选取一个合适的接触面本构模型对于这种基础的有限元数值分析至关重要。Mortara 等^[13]在 Ghionna 等^[14]提出的砂-钢接触面静力弹塑性本构模型的基础上, 基于界面概念提出了适用于循环加载的砂-钢接触面弹塑性本构模型(G-M 界面模型)。任宇^[15]利用 ABAQUS 接触面子程序 UINTER 将 G-M 界面模型嵌入 ABAQUS 中, 对循环剪切下的接触面性状进行了模拟, 对接触面循环弱化性状及相关影响因素进行了分析。楼初旸等^[16]对 G-M 静力模型进行了改进, 使之可以反映碎石-结构物接触面切向硬化和法向剪胀/剪缩的现象, 并将其应用于碎石-结构物接触面的静载计算中。然而目前对于碎石-结构物接触面本构模型的研究以及将复杂接触面本构模型嵌入商业有限元软件进行计算的实践还较少, 因此有必要对碎石垫层沉箱基础的接触面本构模型及其有限元数值分析进行进一步研究。

本文采用自行设计的大周数循环加载装置针对碎石垫层沉箱基础开展了水平静力加载、2000 次水平循环加载以及水平循环后静力加载的系列模型试验, 讨论了基础的承载变形规律以及荷载幅值(循环荷载比)和基础质量(基底上覆应力)等因素对其长期累积变形的影响。然后, 本文对 G-M 界面模型进行改进, 使之能够反映碎石-结构物接触面在循环加载下的力学特性, 利用 ABAQUS 接触面子程序 UINTER 将该

模型嵌入 ABAQUS 中。在 ABAQUS 中建立碎石垫层沉箱基础模型试验的三维有限元分析模型, 模拟了静载及循环加载的模型试验。

1 模型试验简介

为了研究碎石垫层沉箱基础在长期水平循环荷载作用下的承载与累积变形特性, 本文使用自行设计的大周数循环加载装置对相似比为 1:300 的模型基础进行了 1g 室内模型试验, 并对试验结果进行总结分析。



图 1 模型基础

Fig. 1 Model foundation

1.1 模型基础

模型基础的底面为圆形(如图 1 所示), 基底直径为 500 mm, 底面采用轻细骨料混凝土浇筑养护, 为适度提高粗糙度在底面均匀粘贴一层黄砂。模型质量为 17.61 kg, 对应基底平均应力为 0.880 kPa。若用黄砂紧密填满模型基础上部空腔, 则模型基础质量将增加至 26.70 kg, 对应基底平均应力为 1.350 kPa, 改变基础质量可用于研究基底上覆应力对承载变形特性的影响。

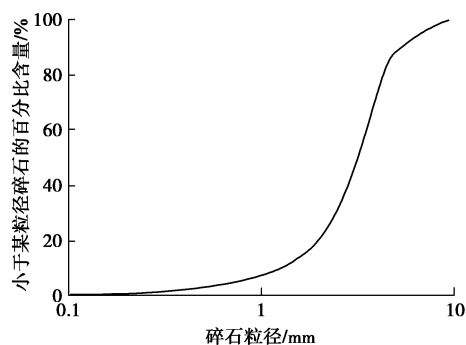


图 2 垫层中碎石的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curve of gravel in cushion

1.2 碎石垫层

垫层中的碎石由常用建筑材料瓜子片用孔径 5 mm 的筛滤得, 平均粒径为 2.87 mm, 不均匀系数 $c_u=2.81$ mm, 颗粒级配曲线见图 2。每次加载前垫层换用新的碎石重新铺设, 避免碎石的磨损效应对后续

试验结果产生影响。铺好碎石后用 20 kg 砝码盖压且用轻锤夯实。垫层厚度为 60 mm。

垫层下卧层采用分层压实至中等密实度的黄砂, 厚度为 64 cm。试验中可认为模型基础的位移完全由基础与垫层的接触面变形引起。

1.3 试验装置

模型箱内部尺寸长为 130 cm, 宽为 100 cm, 高为 70 cm。

为施加长期大周数循环荷载, 设计了一套由力控制的循环加载机械装置(如图 3 所示)。模型基础的一侧通过钢绞线与加载装置连接, 另一侧通过钢绞线与固定质量的配重砝码相连(如图 1 所示)。该加载装置可对基础施加稳定的循环荷载。改变转臂端部的砝码质量可以调节循环荷载的幅值, 改变转臂转动前的初始位置可以调节循环荷载的类型^[17]。



图 3 大周数循环加载装置图

Fig. 3 Loading device designed for cyclic loading with large cycling numbers

加载中沿水平和竖直方向各有 2 根高精度 LVDT 位移传感器分别测量基础的水平和竖向位移(如图 4 所示), 采用 dataTaker DT80G 数据采集仪记录试验中的传感器数据。静载试验的采样频率为 2.0 Hz。考虑海洋环境中风、波浪等循环荷载的作用频率 0.05~0.2 Hz, 试验中控制水平循环荷载的频率为 0.1 Hz, 采样频率为 1.0 Hz。



图 4 位移测量设备——高精度 LVDT

Fig. 4 Instrument for displacement measurement-LVDT in high precision

1.4 试验方案

在风、波浪等循环荷载作用下, 基础下的碎石垫层和砂土地基可认为处于排水状态, 不必考虑孔隙水压力的影响, 故本试验使用干的砂和碎石。实际风、波浪等荷载的作用方式非常复杂, 试验表明模型基础在单向循环荷载下的累积位移最大, 故在试验中可通过施加单向循环荷载的加载方式研究基础在水平循环荷载作用下的累积变形。

试验加载方式有水平静力加载、水平循环加载和水平循环后静力加载 3 种方式。

静力加载为基准试验, 用于得到基础的水平极限承载力。试验采取逐级加载方式, 每级施加的荷载增量根据试做静载试验得到的承载力确定, 每级加载间隔从 4~7 min 不等, 视每级加载后基础位移发展何时稳定而确定, 当模型基础在加载后不再能保持静止、出现持续滑动时则达到破坏(即达到水平荷载-位移曲线的塑性平台), 取发生滑动的前一级荷载为水平承载力(如图 5 所示)。

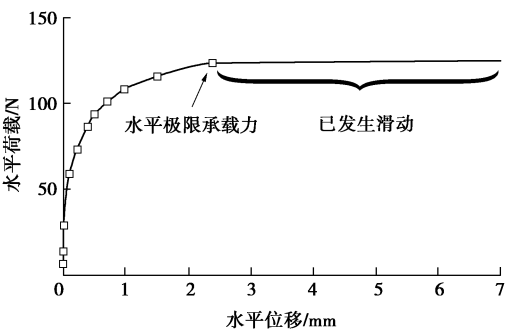


图 5 水平承载力的确定方法

Fig. 5 Determination of lateral bearing capacity

循环加载试验中的荷载为单向荷载(如图 6 所示), 循环荷载的大小根据模型基础水平承载力和加载设备确定。本文中采用 3 种循环荷载幅值和 2 种基础质量进行试验, 如表 1 所示。定义循环荷载比为水平循环荷载幅值与基础水平承载力的比值。循环加载次数为 2000 次。

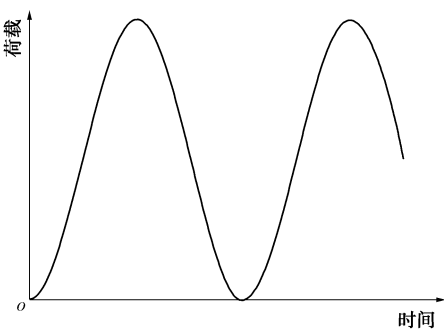


图 6 单向循环荷载示意图

Fig. 6 Schematic of one-way cyclic loads

表 1 模型试验循环加载方案

Table 1 Programs of cyclic loading in model tests			
基础质量	基底上覆应力	循环荷载幅值	循环荷载比
/kg	/Pa	/N	
17.61	880	112.7	0.92
17.61	880	72.5	0.59
17.61	880	37.2	0.30
26.70	1350	112.7	0.55
26.70	1350	72.5	0.36

循环后静载试验用于研究循环荷载引起的基础与碎石垫层接触面变化对基础承载力和变形的影响。根据循环后静力加载方向与循环荷载方向的关系分为同向和反向加载两种。

2 试验结果与分析

2.1 直接静力加载试验

图 7 为两种质量模型基础在直接静力加载下的荷载 - 水平位移曲线。根据直接静载试验可得 880, 1350 kPa 两种基底上覆应力下模型基础的水平承载力分别为 123.0, 204.5 N。静载作用下基础的荷载 - 水平位移关系可视为刚塑性, 即随着水平荷载增加基础位移缓慢发展, 在该阶段荷载 - 水平位移曲线呈现双曲线关系但位移很小, 当荷载超过基底摩擦力时基础沿着基底-碎石接触面突然发生滑动达到破坏。

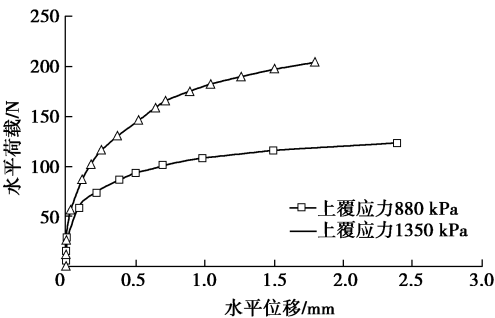


图 7 直接静力加载下基础的荷载 - 水平位移曲线

Fig. 7 Load-horizontal displacement curves of model foundation under static loads

2.2 单向循环加载试验

图 8 为两种质量模型基础在单向荷载 2000 次循环加载下的水平循环累积位移随循环次数的发展规律。由图可见, 基础的水平循环累积位移呈收敛式发展, 且大于同等大小荷载静载下的位移, 累积位移在前 500 次循环内已基本发展完成。基础最终的水平循环累积位移稳定值随着循环荷载比的增大而增大。从循环荷载比为 0.92、上覆应力为 880 kPa 的试验加载曲线可以看出, 即使水平循环荷载幅值接近极限承载力 (荷载幅值达 91.6% 的极限承载力), 基础累积变形的发展也是稳定和收敛的, 这表明碎石垫层沉箱基础在长期水平单向循环荷载作用下具有稳定安全的承载变形特性。

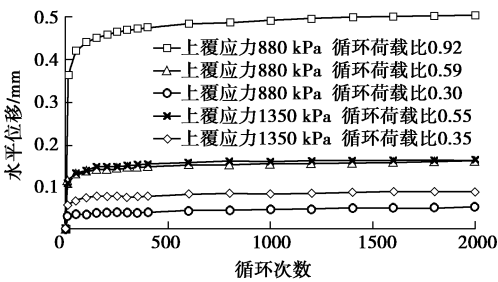


图 8 单向循环荷载下基础的水平位移 - 循环次数曲线

Fig. 8 Evolution of horizontal displacement with cycling number of model foundation under one-way cyclic loading

2.3 循环后静力加载试验

为研究循环加载对基础水平承载力的影响, 在每组单向循环加载后对基础进行静力加载, 加载方向分为与单向循环荷载同向与反向两种。图 9 为质量 17.61 kg 的模型基础在不同幅值单向循环荷载加载 2000 次后的同向静载试验与直接静载试验得到的荷载 - 水平位移曲线。由图可见, 循环加载后基础的水平承载力相比循环加载前有显著提高, 同时初始水平刚度也明显硬化, 并且循环荷载的幅值越大, 承载力强化、刚度硬化的程度越高。图 10 为模型基础在循环荷载比 0.59 的单向荷载循环加载后沿两个方向的静力加载得到的荷载 - 水平位移曲线, 可以看出循环加载后同向静载比反向静载的承载力强化与初始刚度硬化现象更显著。这是由于, 在循环荷载的作用下, 基底与碎石垫层接触面中的碎石被不断压密, 导致其强度和刚度增大, 同时接触面中碎石由于磨损和破碎产生的细小颗粒填充到较大颗粒的孔隙中, 进一步增大了接触面的密实度, 使得其强度、刚度也进一步增大; 循环荷载的幅值越大, 对接触面的压密作用越显著, 同时循环后反向静载的加载路径与循环加载时不一致, 使得接触面在循环荷载下的压密效果有所削弱。表 2 列出了不同循环荷载幅值的循环加载后静载得到的承载力强化程度。基础在循环荷载下表现出的强化和硬化现象对于保障基础的长期服役性能具有积极意义。

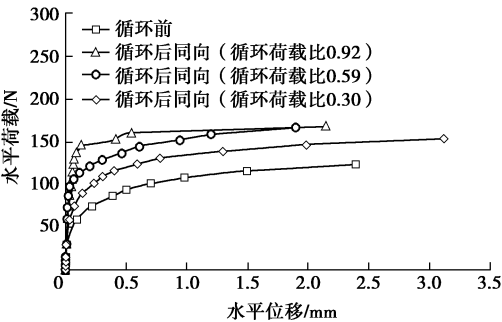


图 9 直接静载与循环后静载下模型基础的荷载 - 水平位移曲线

Fig. 9 Load-horizontal displacement curves of model foundation under static loads before and after cyclic loadings

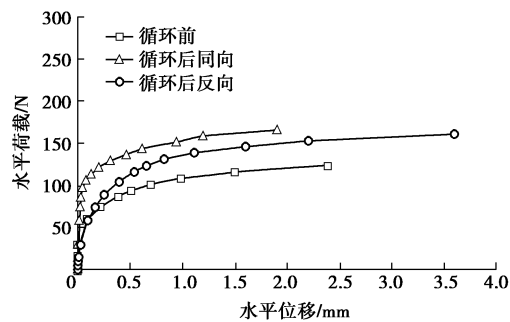


图 10 循环加载后不同方向静载下模型基础的荷载 - 水平位移曲线 (循环荷载比 0.59)

Fig. 10 Load-horizontal displacement curves of model foundation under static loads along different directions after cyclic loadings (cyclic loading ratio 0.59)

表 2 不同荷载幅值循环加载后的水平承载力强化程度
Table 2 Extents of strengthening of bearing capacity obtained from static loads after cyclic loadings of different load amplitudes

循环荷载幅值 /N	承载力提高比例/%	
	循环后同向	循环后反向
112.7	35.8	17.7
72.5	34.5	30.4
37.2	24.1	18.2

3 基于修正 G-M 边界面模型的数值模拟

3.1 修正 G-M 边界面模型简介

本文为了描述碎石-结构物接触面的循环加载特征,对 G-M 边界面模型进行了改进。改进的模型仍采用边界面概念 (见图 11),但边界面和移动内屈服面的方程有所修改,并对剪胀性方程进行了修改。

模型中边界面 f 和移动内屈服面 f_0 的表达式如下:

$$f = \sqrt{\tau^2} - k_h \sigma_n^\beta \quad , \quad (1)$$

$$f_0 = \sqrt{\tau^2} - k_0 \bar{\sigma}_n^\beta \quad , \quad (2)$$

式中, k_h 和 k_0 分别为边界面和移动内屈服面的硬化参数, β 为控制边界面和移动内屈服面曲率的参数。

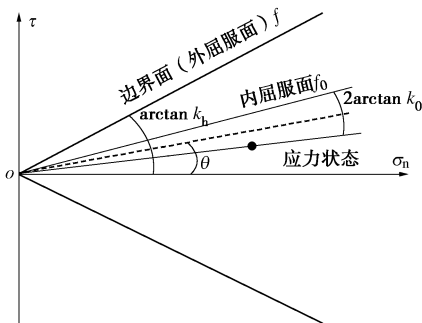


图 11 G-M 边界面模型的边界面及移动内屈服面 ($\beta=1$)
Fig. 11 Isotropic and kinematic surfaces of model used in this study ($\beta=1$)

模型中的映射法则与 G-M 边界面模型相同^[13]。

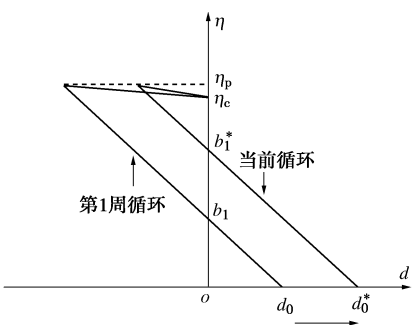


图 12 本文中模型的循环剪胀性

Fig. 12 Cyclic dilatancy of model used in this study

在 G-M 边界面模型中,应力比 η 与剪胀率 d 呈双直线关系,并且随着循环周数增大, η - d 双直线整体向左 (剪胀) 方向移动^[13]。在本文修正模型中, η - d 双直线整体向右 (剪缩) 方向移动,如图 12 所示,该循环 η - d 双直线关系的表达式为

$$\eta = \begin{cases} -\frac{\rho \eta_c}{d_0^*} d + b_1^* & (w_n \leq 1) \\ -\frac{\eta_p - \eta_c}{\eta_p - b_1^*} \cdot \frac{b_1^*}{d_0^*} d + \eta_c & (w_n > 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, η_p 为剪应力峰值对应的应力比, η_c 为剪应力临界值对应的应力比; b_1 和 b_1^* 分别为第 1 周循环和当前循环的 η - d 直线 ($w_n \leq 1$ 段) 在 η 轴上的截距; d_0^* 为循环初始剪胀率,其表达式为

$$d_0^* = \frac{\eta_p - b_1}{\eta_p - b_1^*} d_0 \quad ; \quad (4)$$

d_0 为静力 G-M 模型中的初始剪胀率^[14]; ρ 为反映剪胀性的参数,表达式为

$$\rho = \iota e^{\kappa \sigma_n} + 1 \quad , \quad (5)$$

式中, ι 和 κ 为控制剪胀程度的参数,通过试验确定。

基于 Sloan^[18]提出的带误差控制的修正欧拉显式次阶积分算法,利用 ABAQUS 的接触面子程序接口 UINTER,将本文的模型编程并嵌入 ABAQUS 中^[19]。本文只给出了修正 G-M 模型相比原模型的改进之处,完整的模型参数定义请参考相关研究成果^[13-14, 19]。

3.2 模型建立

本文假定基础位移完全由基底接触面变形引起,因而本节在建立 ABAQUS 模型的过程中,直接将碎石设置为土体,与沉箱基础直接连接,中间不设置垫层。建模的基本假定如下:①碎石材料和沉箱基础材料均为各向同性材料;②碎石垫层适用莫尔库仑模型,且不考虑水的影响。

建模图 13 所示,基础为直径 50 cm、高 10 cm 的圆柱体,采用线弹性材料模型,模量 $E=200$ GPa,泊松比 $\nu=0$ 。碎石体为长 1.5 m、宽 1.5 m、高 0.9 m 的

长方体，采用莫尔-库仑模型，材料参数如表 3 所示。

表 3 碎石材料参数

Table 3 Material parameter values of gravel				
密度/(kg·m ⁻³)	模量/MPa	泊松比	黏聚力/Pa	摩擦角/(°)
1750	60	0.22	0.1	34°

沉箱基础和碎石均采用 C3D8R 单元。碎石的底面设置三向约束，4 个侧面设置 X 、 Y 向约束。在模型基础底部的前端施加 X 向的水平力，模拟水平荷载。模拟循环荷载时，荷载采用频率为 0.1 Hz、波形为正弦函数的单向循环，由于模拟循环时会产生巨大的数据量，且计算速度较慢，因而本文取 100 次循环。

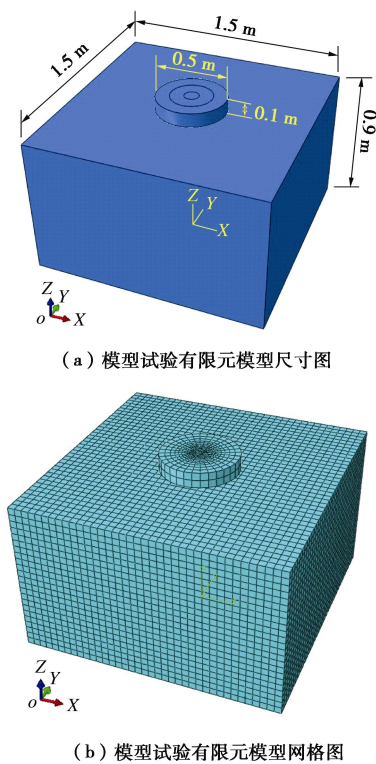


图 13 碎石垫层沉箱基础模型试验有限元模型

Fig. 13 FEM model for model tests

表 4 模型试验的接触面模型参数

Table 4 Interface parameter values of model tests for G-M models		
参数名称	参数意义	参数取值
k_c	硬化参数峰值	$2.70 \text{ Pa}^{1-\beta}$
k_p	硬化参数临界值	$2.75 \text{ Pa}^{1-\beta}$
ζ	控制 w_p^0 的大小	$1 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$
ζ	控制 w_p^0 的大小	$2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$
C_k	移动内屈服面参数	0.1
γ	循环强化参数	3.04
δ	循环收敛参数	-1.39
n	循环强化参数	9.0
χ_b	势函数参数	0.2
χ_h	循环强化参数	12.6

沉箱基础和碎石之间的接触面采用改进的修正 G-M 界面模型，其中静载模型 4 个重点参数和循环模型参数取值如表 4 所示，其余参数取值参考楼初旸^[19]的研究成果。

3.3 对比与验证

在平均上覆应力分别为 880 Pa 和 1350 Pa 的条件下，静载模型试验水平荷载 Q -水平位移 w 关系的模拟结果如图 14 所示， Q 和 w 的取值均来自加载点。由图 14 可见，有限元计算得到的基础 Q - w 关系与模型试验比较接近，均出现前期逐渐累加、后期滑动破坏的现象，且数值上的规律也类似。

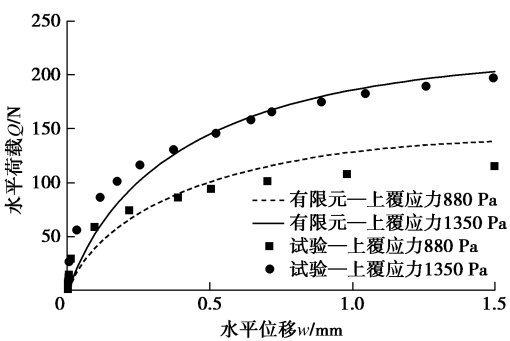


图 14 静载模型试验 Q - w 关系有限元模拟结果

Fig. 14 FEM results of Q - w relationship for monotonic model tests

循环加载方面，本文重点研究模型基础水平荷载和水平位移的加载历史。在平均上覆应力为 880 Pa 和 1350 Pa 时，模型基础水平累积位移残余值 w_c 随循环次数变化的模拟结果分别如图 15、16 所示。

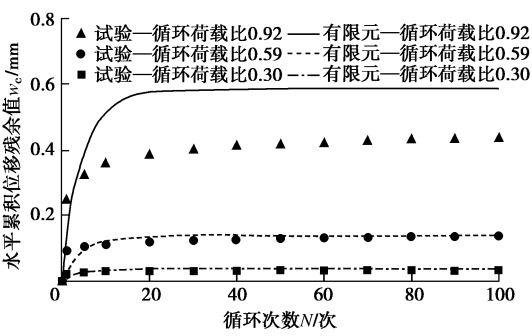


图 15 上覆应力 880 Pa 时模型基础水平累积位移残余值发展

Fig. 15 Development trend of horizontal accumulative displacement of model foundation under normal pressure of 880 Pa

从图 15、16 可见，有限元计算结果能够模拟单向循环荷载作用下模型基础水平位移的发展规律。但当循环荷载比较大时 ($\eta_d=0.9$)，模拟结果偏大，与试验结果有一定的偏差。这种偏差可能由两方面的原因造成：第一，当循环荷载比越大时，剪切位移的发展程度 (w^p/w_p^0) 越大，循环加载中的硬化模量随剪切位移的发展程度呈现幂函数规律的衰减^[13, 16]，因而出现

了水平累积位移稳定值高于模型试验值的情况。第二, 有限元模型中的接触面采用了改进的 G-M 界面模型, 但材料模型仍采用莫尔库仑模型, 接触面模型和材料模型未能实现硬化与剪胀性上的统一, 当循环荷载较大时, 下方的材料变形更大, 导致水平累积位移稳定值在数量上出现偏差。

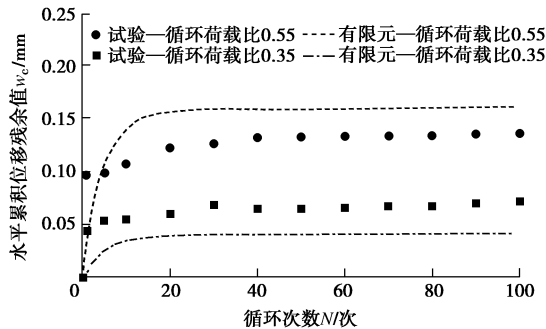


图 16 上覆应力 1350 Pa 时模型基础水平累积位移残余值发展
Fig. 16 Development trend of horizontal accumulative displacement of model foundation under normal pressure of 1350 Pa

4 结 论

本文对碎石垫层沉箱基础开展了水平静力加载、水平循环加载以及循环后静力加载的模型试验研究, 讨论了基础质量(基底上覆应力)和荷载幅值(循环荷载比)对碎石垫层沉箱基础承载变形特性的影响, 并对基于界面理论的 G-M 弹塑性接触面本构模型进行改进, 利用 ABAQUS 接触面子程序 UINTER 将其嵌入 ABAQUS 中, 对碎石垫层沉箱基础的模型试验进行了有限元数值分析。主要结论如下:

(1) 静载作用下基础的水平荷载-水平位移关系可视为刚塑性, 即随着水平荷载增加基础位移缓慢发展, 在该阶段荷载-水平位移曲线呈现双曲线关系但位移很小, 当荷载超过基底摩擦力时基础沿着基底-碎石接触面突然发生滑动达到破坏。

(2) 在水平单向循环荷载作用下基础的水平循环累积位移呈收敛式发展, 且大于同等大小荷载静载下的位移, 累积位移在前数百次循环内已基本发展完成。在基础不发生破坏的前提下, 即使大周数循环荷载的幅值接近基础水平承载力, 基础累积变形也是稳定发展而收敛的。这表明碎石垫层沉箱基础在长期水平循环荷载作用下具有安全稳定的工作性能。基础的水平循环累积位移稳定值随着循环荷载比的增大而增大。

(3) 由于水平循环荷载对垫层接触面的压密作用, 循环加载后基础沿正、反两个方向的水平承载力和刚度均有显著提高, 且循环荷载幅值越大, 承载力强化、刚度硬化的程度越明显, 当循环后静载方向与单向循环荷载方向一致时基础承载力强化、刚度硬化

程度最明显。这表明在基础不发生破坏时, 水平循环荷载对于保障基础的长期服役性能有积极意义。

(4) 在 ABAQUS 中建立三维模型, 使用改进的 G-M 界面本构模型模拟碎石垫层沉箱基础的静载及循环加载模型试验, 两类试验的有限元模拟结果能够正确反映模型试验中基础在水平静载和循环荷载作用下的承载变形特性, 总体规律与模型试验相同, 说明修正 G-M 界面模型的参数取值合理并且能应用到碎石垫层沉箱基础的分析中。

本文试验中的模型基础底面的上覆应力远小于实际情况, 当上覆应力增大到真实状况的应力水平时, 其对基底接触面特性参数的影响还有待进一步研究。此外本文的数值模型对于循环荷载比较大时的累积位移模拟结果明显偏大, 还有待进一步优化。

参考文献:

- [1] COMBAULT J. The Rion-Antirion Bridge—when a dream becomes reality[J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, 5(4): 415 - 426.
- [2] LOGAR J. Ground improvement: state-of-the-art in South-Eastern Europe[C]// *Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik (2nd Symposium on Ground Improvement in Geotechnics)*. Vienna, 2012: 19 - 46.
- [3] 朱建民, 张瑞霞, 穆保岗, 等. 碎石垫层在跨海大桥超大型设置基础中的应用[J]. *公路*, 2014, 59(3): 84 - 87. (ZHU Jian-min, ZHANG Rui-xia, MU Bao-gang, et al. Application of gravel cushion in super-large laying-down foundations[J]. *Highway*, 2014, 59(3): 84 - 87. (in Chinese))
- [4] PECKER A, TEYSSANDIER J P. Seismic design for the foundations of the Rion-Antirion Bridge[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 1998, 131(1): 4 - 11.
- [5] COMBAULT J, MORAND P, PECKER A. Structural response of the Rion-Antirion Bridge[C]// *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, 2000: 1609.
- [6] PECKER A. A seismic foundation design process, lessons learned from two major projects: the Vasco de Gama and the Rion-Antirion Bridges[C]// *ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit*. La Jolla, 2003.
- [7] PECKER A. Design and construction of the Rion Antirion Bridge[C]// *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, *Proceedings of Geo-Trans*. Los Angeles, 2004: 216 - 240.
- [8] PECKER A. Enhanced seismic design of shallow foundations:

- example of the Rion-Antirion Bridge[C]// Proceedings of 4th Athenian Lecture on Geotechnical Engineering. Athens, 2006.
- [9] INFANTI S, PAPANIKOLAS P, CASTELLANO M G. Seismic protection of the Rion-Antirion Bridge[C]// Proceedings of 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. Yerevan, 2003.
- [10] INFANTI S, PAPANIKOLAS P, BENZONI G, et al. Rion-Antirion Bridge: design and full-scale testing of the seismic protection devices[C]// Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, 2004:2174.
- [11] TEYSSANDIER J P, COMBAULT J, MORAND P. The Rion-Antirion Bridge design and construction[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, 2000: 1115 - 1127.
- [12] PAPANIKOLAS P, STATHOPOULOS-VLAMIS A, PANAGIS A, et al. The behavior of Rion-Antirion Bridge during the earthquake of "Achaia-Ilia" on June 8, 2008[C]// Proceedings of 3rd International fib Congress incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference. Washington D C, 2010.
- [13] MORTARA G, BOULON M, GHIONNA V N. A 2-D constitutive model for cyclic interface behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, **26**(26): 1071 - 1096.
- [14] GHIONNA V N, MORTARA G. An elastoplastic model for sand-structure interface behaviour[J]. Géotechnique, 2002, **52**(1): 41 - 50.
- [15] 任 宇. 长期竖向循环荷载作用下桩的变形特性试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (REN YU. Model test and theoretical study on deformation behavior of single piles to long-term cyclic axial loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [16] 楼初昉, 黄茂松. 修正 Ghionna-Mortara 界面模型在碎石垫层沉箱基础中的应用[J]. 建筑科学, 2016, **32**(增刊): 210 - 215. (LOU Chu-yang, HUANG Mao-song. Application of modified Ghionna-Mortara interface constitutive model to the caisson foundation with gravel cushion[J]. Building Science, 2016, **32**(S0): 210 - 215. (in Chinese))
- [17] 张 勋, 黄茂松. 水平循环荷载下砂土中沉井加桩基础累积变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(6): 1265 - 1272. (ZHANG Xun, HUANG Mao-song. Cumulative deformation of a caisson-piles composite foundation in sand subjected to cyclic lateral loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(6): 1265 - 1272. (in Chinese))
- [18] SLOAN S W. Substepping schemes for numerical integration of elasto-plastic stress-strain relations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1987, **24**(5): 893 - 911.
- [19] 楼初昉. 碎石垫层沉箱基础水平静力及循环加载特性[D]. 上海: 同济大学, 2017. (LOU Chu-yang. Response of caisson foundations based on gravel cushions subjected to lateral monotonic and cyclic loadings[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese))