

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221219

软体排鼓包变形应变响应特征及识别方法研究

徐雪鸿¹, 魏祥龙^{2,3}, 杨涵苑³, 夏志康³, 黄廷杰³, 朱昊⁴, 左利钦³

(1. 长江南京航道工程局, 江苏 南京 210011; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要: 软体排作为柔性的护滩、护底措施广泛应用于长江中下游的航道整治工程中, 其服役状态对洲滩的守护效果影响较大。针对软体排排体鼓包变形识别及量化的难点, 通过开展模型试验, 研究了鼓包变形的排体应变响应特征, 发现鼓包变形的排体应变在断面方向呈抛物线型的分布特征, 应变最大值位于鼓包包体的顶部。进而基于排体鼓包的应变响应特征, 给出了鼓包变形的形态预测方程, 并进一步提出了鼓包变形的识别及形态反演方法。研究结果可为软体排变形监测及评估分析等提供参考。

关键词: 软体排; 鼓包; 变形测量; 航道整治; 光纤传感

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)04-0147-04

1 引言

软体排是由土工织物和压载块系结而成, 具有一定的柔性, 并具有透水、反滤、隔离的功能, 能很好地适应河床底部变形, 广泛应用于航道整治工程中的洲滩守护^[1-2]。由于水流条件、河床组成、自身的结构疲劳、平面布置及软体排施工工艺等影响因素, 排体在服役一段时间后会出鼓包、塌陷、悬挂等变形破坏^[3-6]。其中, 鼓包变形的范围及高度对护滩软体排的稳定性具有重要影响, 因而需及时获取排体的变形形态并开展整治建筑物的服役状态评估与修复。在以往研究中, 软体排边缘冲刷变形是研究重点, 从边缘冲深、排体变形破坏等方面开展了较多研究。针对软体排的鼓包变形, 马爱兴等^[4]归纳了现场及模型试验中鼓包变形导致的排体破坏形式; 刘怀汉等^[7]分析了排体鼓包的形成原理。但针对排体鼓包形态识别与量化的研究较少。鉴此, 本文通过开展模型试验研究鼓包变形下的应变响应特征, 并基于排体鼓包变形的应变响应特征提出变形的识别方法, 结果可为软体排服役状态的评估分析提供技术支持。

2 模型试验

2.1 试验设计

试验在矩形水槽中进行(4 m×2 m×1 m), 水槽内用模型沙埋置直径 30 cm 的圆柱形气囊后平铺密实处理, 外接打气和抽气装置用以模拟地形变化。结合试验条件及目的, 排布及压载块体的模拟比尺设定为 1:30。根据《内河航道整治建筑物模拟技术规程》^[8], 软体排基布选用 250 g/m² 的棉布, 压载块体选用密度为 2.7×10³ kg/m³、底部直径为 1.1 cm、高度为 0.3 cm 铝合金圆柱体片进行模拟, 压载块体重量模拟偏差为-2.8%。符合规范要求(<±5%), 压载块体以电熔胶粘贴在棉布上, 粘贴间距按原型间距同比尺缩小。原型中排体上方还会设置抛石进行压载, 用于增强排体稳定性。由于是否设置块石压载均不会影响排体的应变响应特征及形态识别方法, 同时为方便利用地形仪测量排体变形, 因而在模型试验中排体上方未设置块石进行压载。

排体应变测量采用分布式光纤传感方法, 技术原理见文献^[9,10]。试验选用的应变测量光纤

收稿日期: 2022-06-10, **修回日期:** 2022-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2040219); 长江航道科技项目(Hs219003); 江苏省水利科学研究院自主科研经费专项资金项目(2022Z017)

作者简介: 徐雪鸿(1991-), 男, 工程师, 研究方向为航道整治及施工管理, E-mail: 120131688@qq.com

通讯作者: 魏祥龙(1990-), 男, 博士、助理研究员, 研究方向为航道工程, E-mail: 90wxl@sina.cn

为直径 0.9 mm 的紧套光纤, 定点固定间距为 2 cm。排体光纤变形监测采用高精度光纤解调仪 (OFDR)。应变解调仪测量精度 $\pm 1 \mu\epsilon$, 空间采样分辨率 1 mm。在排布上粘贴光纤时, 首先将光纤拉直后按预定定点间距点涂胶水使其固定在排布表面上。排布上布设有 15 个断面, 断面间距在 0.05~0.10 m 之间, 断面测量长度 1.2 m。排布下方埋置气囊通过充放气模拟地形变化, 试验布置见图 1。现场踏勘照片^[4]显示, 鼓包的区域长度可达十几米, 隆起高度可达数米。本试验通过充气单次模拟地形抬升 1 m 左右的高度模拟鼓包变形, 排体变形范围长度在 10~20 m 之间。试验组次设计见表 1。

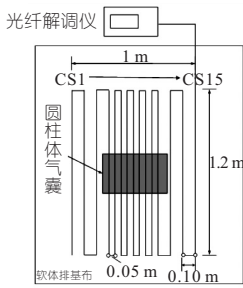


图 1 传感光纤及气囊布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of optical fibers and airbag

表 1 试验组次

Tab. 1 Test group

试验组次	单次模拟高度变化	最大变形影响范围
GB1	+1 m 左右	15 m 左右
GB2	+1 m 左右	18 m 左右
GB3	+1 m 左右	21 m 左右

试验步骤如下。

步骤 1 预定位置放置气囊平整试验沙并铺排。

步骤 2 缓慢放水至淹没地形仪超声探头。

步骤 3 测量初始地形及初始应变。

步骤 4 缓慢充气进行一个组次的地形变化模拟。

步骤 5 地形隆起静置 15 min 后测量各断面地形及光纤应变。

步骤 6 测量完成后重复步骤 4、5 进行下一个组次的试验。试验鼓包效果见图 2。

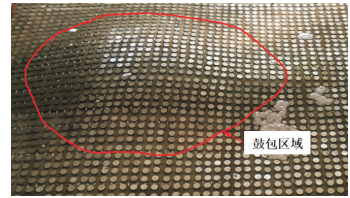


图 2 排体鼓包试验照片

Fig. 2 Test picture of bulge deformation of flexible mattress

2.2 鼓包变形应变响应特征分析

图 3 为在不同变形组次下的地形及应变响应分布, 其中断面地形高程及应变沿 X 轴方向进行测量。由图 3 可看出, 三个组次下断面地形高程逐渐提高, 最高可达 10 cm 左右。随着地形范围及高度的不断升高, 排体应变响应范围及响应值也不断增大。从应变分布形态看, 地形抬升最大的区域其应变响应值也最大。每个鼓包断面的包体顶部区域的应变值最大, 可达 2 000 $\mu\epsilon$ 左右, 应变在测量断面方向呈抛物线型分布形态, 鼓包变形区域应变在空间上呈半椭圆体的分布特征。

为进一步研究地形变化高度与应变响应的关系, 在三次地形变化中选取了 15 个应变变化显著的测量断面, 提取其中的地形及应变进行量化对比分析。由于光纤定点间距 Δt 及地形仪的测量间距 Δt 均为 2 cm, 因而应变与地形高程数据沿断面方向, 以 2 cm 为间隔提取并进行平均处理形

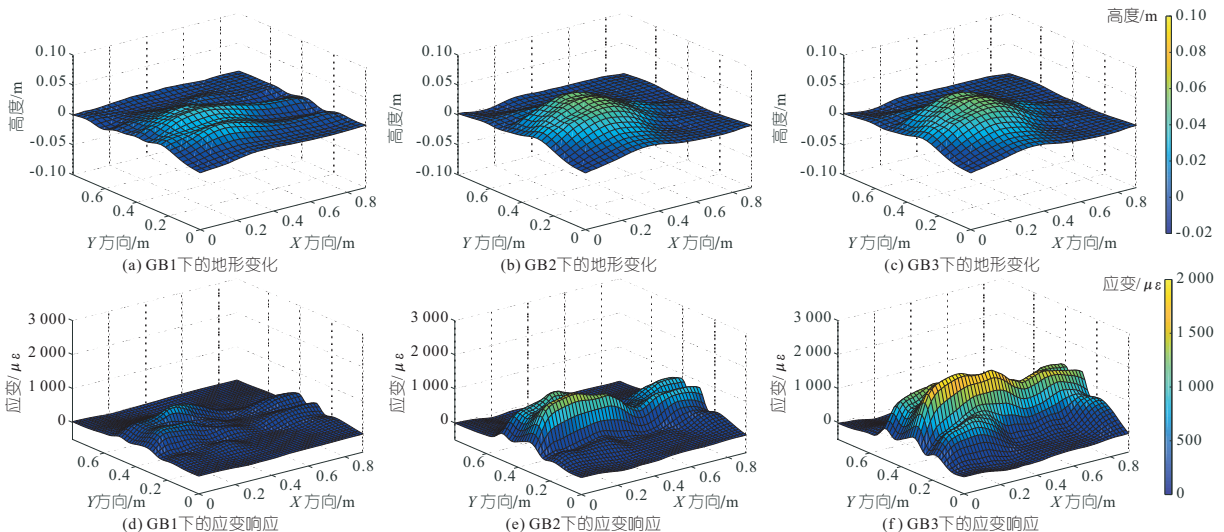


图 3 不同组次下的地形变化、应变响应

Fig. 3 Topographic changes and strain response in different tests

成一对分析数据。提取的平均应变 y_{ei} 表征了该采样间隔的平均应变,即:

$$y_{ei} = \Delta l / \Delta t \quad (1)$$

式中, Δl 为采样范围内的总伸长量。

同样地,定义地形变化高度 Δh 与测量间距 Δt 比值为相对高度 x_i ,表征了单位长度下的地形变化情况,即:

$$x_i = \Delta h / \Delta t \quad (2)$$

建立应变 y_{ei} 与相对高度 x_i 的关系见图 4。由图 4 可看出,应变 y_{ei} 与相对高度 x_i 具有相同的变化趋势。更进一步地将两者进行线性拟合,相关系数 $R^2 = 0.83$,可见地形的抬升高度是影响排体变形应变响应的关键因素。

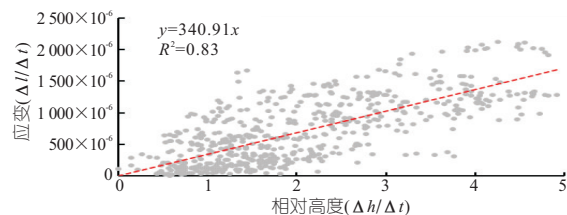


图 4 应变与相对高度的关系

Fig. 4 Relationship between strain and relative height

3 排体鼓包变形识别方法

应变在鼓包变形断面呈近似抛物线型分布特征,为鼓包变形识别提供了可能性。应变极值位于鼓包顶部区域,鼓包变形区域的边缘应变值为正常值,因而可通过识别鼓包区域两端正常值 a_i 、 a_j ,确定其对应的位置(标记为 l_i 、 l_j),则鼓包排体范围为 $[l_i, l_j]$,鼓包变形长度为 $L = l_i - l_j$ 。鼓包顶部高程为 c ,假定鼓包顶点位于鼓包断面的中部,则对应的排体鼓包形态方程为:

$$y = a \left[x - (l_i - l_j) / 2 \right]^2 + c \quad (3)$$

式中, a 为待定系数。

实际应用中还需给出地形抬升变形的基准高程 d ,因而实际的排体鼓包形态方程为:

$$y = a \left(x - \frac{l_i - l_j}{2} \right)^2 + c + d \quad (4)$$

为确定鼓包形态方程,首先需确定鼓包顶部高程 c 。与常规工程刚性结构的一维拉伸变形不同,地形抬升引起柔性排体变形是空间上的弯曲变形,难以通过光纤应变的积分推导出地形抬升高度。由于地形变化与应变具有相同的变化趋势,因此可通过实测应变极值对地形高程变化的关系进行反推,即:

$$c = y_{\epsilon_{\max}} \Delta t / 340.91 \quad (5)$$

式中, $y_{\epsilon_{\max}}$ 为断面最大应变; Δt 为定点间距。

排体鼓包形态方程为:

$$y = a \left(x - \frac{l_i - l_j}{2} \right)^2 + \frac{y_{\epsilon_{\max}} \Delta t}{340.91} + d \quad (6)$$

式(6)中系数 a 可通过代入 $x = l_i$ 或 $x = l_j$ 求得。

需说明的是,本文研究结果是基于室内边坡试验获得的,因而在往原型推广时还需做进一步的优化完善。应用分布式光纤传感技术对排体鼓包变形的识别及变形反演的方法可总结为:①分析判别处于抛物线型分布的应变区域,确定鼓包范围 $[l_i, l_j]$;②寻找鼓包范围内应变极值,代入式(5)求得参数 c ;③代入 $x = l_i$ 或 $x = l_j$ 求得系数 a 确定鼓包形态状态方程,实现对排体变形的反演。

以本文试验数据为例,选取鼓包区域中间的 CS7、CS8 断面,对第三次鼓包变形的 GB3 工况进行鼓包变形的形态反演。预测的变形形态与实际的变形形态对比见图 5。由图 5 可看出,本文提出的方法得到的鼓包隆起高度与实测高度误差在 13% 以内,排体变形形态与实测形态较接近。

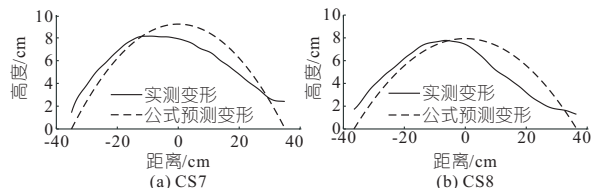


图 5 实测变形与预测变形对比

Fig. 5 Comparison between measured deformation and formula predicted deformation

4 结论

a. 排体鼓包变形的应变响应与地形的隆起程度呈正比,且排体断面应变呈抛物线型分布,应变在空间上呈半椭圆体形分布。

b. 根据软体排排体鼓包的应变响应特征,提出了基于分布式光纤传感的排体鼓包形态预测方程,并总结归纳了排体鼓包变形识别及形态反演方法。后期根据工程实际,进一步优化分布式光缆选型及布设,结合本文提出的鼓包变形识别及形态反演方法,可实现原型排体变形的分布式监测与识别反演。

参考文献:

- [1] HUANG W, CREED M, CHEN F, et al. Scour around submerged spur dikes with flexible mattress protection[J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 2018, 144(5): 04018013.

[2] MA A X, CAO M X, DENG Y, et al. Laboratory and field investigation of an ecological cavity mattress in river bed protection [J]. *Ecological engineering*, 2021, 172(2):106393.

[3] COX A, THORNTON C I, ABT S R. Articulated concrete block stability assessment for channelized flow[J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2019, 145(4):06019002.

[4] 马爱兴, 曹民雄, 王秀红, 等. 长江中下游航道整治护滩带损毁机理分析及应对措施[J]. *水利水运工程学报*, 2011(2):32-38.

[5] 韩林峰, 王平义, 苏伟. X 型系混凝土块软体排水毁量化分析及整治效果评估[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2017, 50(4):487-493, 499.

[6] 陈立, 朱一松, 张为, 等. 护滩带边缘局部冲刷深度计算公式初步研究[J]. *泥沙研究*, 2017, 42(2):61-66.

[7] 刘怀汉, 付中敏, 陈婧, 等. 长江中游航道整治建筑物护滩带稳定性研究[C]//中国水利学会青年科技工作委员会. 中国水利学会第三届青年科技论坛论文集. 郑州:黄河水利出版社, 2007:290-294.

[8] 中华人民共和国交通运输部. 内河航道整治建筑物模拟技术规程:JTS/T 231-8-2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[9] SONG Z, SHI B, JUANG H, et al. Soil strain-field and stability analysis of cut slope based on optical fiber measurement[J]. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2017, 76(3):937-946.

[10] 迟延光, 白清, 王宇, 等. 管道应力危害 BOTDR 分布式光纤检测系统[J]. *传感技术学报*, 2018, 31(11):1775-1780.

Research on Strain Response Characteristics and Identification Method for Bulge Deformation of Flexible Mattress

XU Xue-hong¹, WEI Xiang-long^{2,3}, YANG Han-yuan³, XIA Zhi-kang³,
HUANG Ting-jie³, ZHU Hao⁴, ZUO Li-qin³

(1. Changjiang Nanjing Waterway Engineering Bureau, Nanjing 210011, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: Flexible mattress is a beach protection measure which is widely used in the waterway regulation projects in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The in-situ service condition of the flexible mattress has a great impact on the protection efficiency for the beach and shoal. Aiming at the difficulty of identifying and quantifying the deformation of the bulge of the flexible mattress, a model test was carried out to study the strain response characteristics of the bulge deformation. The result shows that the strain under bulging deformation presenting a parabolic strain distribution characteristic on the cross-section, and the area with the largest strain is located on the top of the bulging body. Based on the strain distribution characteristics of bulge deformation, the shape prediction formula was proposed. Furthermore, the bulge deformation identification method and shape inversion method were put forward. The results can provide the reference for the deformation monitoring and assessment of the flexible mattress.

Key words: flexible mattress; bulge deformation; deformation measurement; waterway regulation; optical fiber sensing

(上接第 142 页)

Pressure Distribution Characteristics of Diversion Tunnel of Yebatan Hydropower Station

ZHOU Shun-wen¹, PU Yun-juan¹, LI Deng-song², YANG Ke-chen³

(1. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China;

2. School of Automation, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: As a diversion tunnel, the pressure distribution of the tunnel body, the top and the bottom of the tunnel is very important to avoid cavitation, vibration and other undesirable phenomena. Taking the diversion tunnel of Yebatan Hydropower Station as the research object, this paper simulated the pressure distribution of the diversion tunnel based on the physical model test, as well as the three-dimensional numerical model established by the RNG k-ε turbulence model and the VOF method. The reliability of the three-dimensional numerical simulation was verified by the experimental data. The results show that the main flow of the diversion tunnel, the pressure distribution of the tunnel body at the sudden change of hydraulic boundary such as the inlet chamber section, the turning section and the plug section, as well as the variation trend of the bottom and top pressure along the way were analyzed. The research results show that the pressure distribution along the bottom and top of the diversion tunnel shows a downward trend, but at the sudden change of hydraulic boundary such as the sluice chamber section, the plug section and the turning section, the pressure value will show a large fluctuation of rapid increase or decrease.

Key words: Yebatan Hydropower Station; diversion tunnel; pressure distribution; hydraulic boundary mutation