

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230328

# 光纤传感监测护底软体排的可行性探讨

魏祥龙<sup>1a,1b,2</sup>, 杨海亮<sup>2</sup>, 左利钦<sup>2</sup>, 陆永军<sup>2</sup>, 杨涵苑<sup>2</sup>, 袁赛瑜<sup>1a,1b</sup>

(1. 河海大学 a. 水灾害防御全国重点实验室; b. 水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 软体排是长江中下游主要的洲滩守护结构,而水流冲刷作用易引起排体的变形,影响其守护效果。针对水下护底软体排变形监测的难点,通过开展室内试验,探讨光纤传感监测软体排的可行性。研究表明,排体拉伸变形的初始阶段(小于 20 mm),应变实测值与理论值偏差较小;拉伸长度大于 20 mm 时,各测点的误差率呈指数型增长,定点处光缆与排体的固定效果决定了拉伸变形的监测精度;光纤传感对弯曲变形的定位精度为 3 倍的定点距离,集中受力区域(如冲刷坑边缘)会引起光纤的正应变;光纤传感具备监测柔性护滩结构拉伸变形的可行性,但应用该技术时,需考虑传感光纤与软体排变形的耦合性、沉排施工的破坏性及施工工序的复杂性等。该研究结果可为软体排服役状态监测及健康诊断技术的研发提供参考。

**关键词:** 软体排; 航道整治; 变形监测; 光纤传感

**中图分类号:** TV147

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0147-05

## 1 引言

长江干线的整治工程有效控制了滩槽格局、提升了通航能力,但随着航道整治建筑物服役时间的增加,整治建筑物的水毁几率增大,影响其整治效果。以长江中下游广泛应用的护滩护底软体排为例,建成后面临着水的冲刷<sup>[1-2]</sup>,会导致不同程度的变形破坏。软体排变形可分为边缘冲刷悬挂及内部鼓包塌陷等<sup>[3]</sup>,具体表现形式为排体的顺直拉伸变形和弯曲变形,影响其护滩效率。因此,开展护滩护底软体排的变形监测,对保障河势稳定和航运通畅具有重要意义。目前,对于长江中下游的洲滩守护软体排变形测量主要以声学方法为主,包括多波束扫描、侧扫声纳扫描、浅层地质剖面测量、合成孔径声纳扫描等方法<sup>[4]</sup>。声学方法可以获取大面积的排体变形情况,但受限于技术特点无法做到高频和实时监测,不能捕捉排体突发性的失稳变形,因而无法对水下护底软体排的服役状态进行实时监测与动态预警。分布式光纤传感技术能够获取被测参量在时空上的连续分布信息,具有长距离、分布式、耐久性好及测量精

度高等特点。针对排体服役时间长、变形测量范围大,且水下环境复杂的状况,根据分布式光纤传感的技术特点,其具有水下实时监测排体变形的可能,但目前对此研究较少。因此,本文基于分布式光纤传感的技术特性进行试验设计,分别对光纤传感测量排体拉伸与弯曲变形的适用性开展研究,旨在为光纤传感技术在水下柔性结构变形监测与评估方面的应用提供参考。

## 2 拉伸变形监测试验与分析

排体守护边缘易产生冲刷,导致边缘排体在重力作用下处于悬挂状态。悬挂在冲刷坑边缘的排体会产生拉伸变形,而拉伸变形也是软体排主要的受力变形形式。因此,本文通过模拟排体的拉伸变形,并利用光纤传感及拉伸仪进行变形测量,结合拉伸仪的实测数据计算光纤传感技术的测量精度,用以分析光纤传感在排体拉伸变形监测方面的可行性。

### 2.1 试验设计

软体排排布采用 250 g/m<sup>2</sup> 的聚丙烯编织布,

**收稿日期:** 2023-03-06, **修回日期:** 2023-03-27

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52309085);江苏省自然科学基金项目(BK20230960);江苏省卓越博士后计划(2023ZB845);国家重点研发计划(2022YFC3202602);长江航道科技项目(Qs221001);江苏省水利科技项目(Qs222004)

**作者简介:** 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

**通讯作者:** 左利钦(1980-),男,博士、正高级工程师,研究方向为航道工程, E-mail: lqzuo@nhri. cn

其纵向、横向抗拉强度分别为 52、42 kN/m。排布上间隔 0.5 m 在横断面方向设置加筋条。加筋条宽 5 cm, 单位重 50 g/m, 抗拉强度为 11 kN/根, 其承载了软体排大部分外力作用。聚丙烯编织布用于防止水流冲刷排体下方泥沙, 因此试验选用加筋条进行排体的拉伸模拟。

图 1(a) 给出了光缆在加筋条上的固定方式。其中, 测量光缆选用直径 5 mm 的内定点光缆进行应变测量(图 1(c)), 原型中系结一片混凝土连锁块所需的软体排长度为 5 m, 单片混凝土连锁块是最小的压载、防护单元, 因此将测量光缆的定点距离  $D$  设置为 5 m。结合光缆及排布特性, 设计了如图 1(b) 所示的定点固定夹具。该定制夹具由上方倒 U 型夹片、下方垫片及固定螺栓组成, 其中倒 U 型垫片的口径比定点光缆直径小 1 mm, 以便光缆的夹紧固定<sup>[5]</sup>。

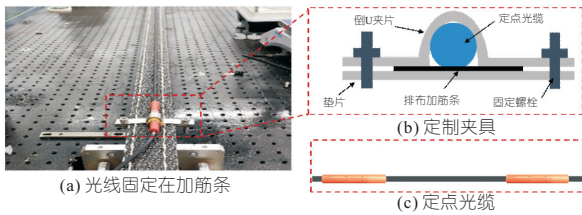


图 1 监测光缆及定制夹具

Fig. 1 The monitoring optical fiber cable and the fixtures

试验选用长 5.4 m 的加筋条, 两端分别固定在标定台两侧。加筋条外接拉伸仪, 拉伸仪可以控制的步进精度为 0.01 mm。除去固定所需的长度外, 加筋条试验测量长度为 5.3 m。启动拉伸仪对加筋条进行拉伸, 模拟排体的顺直拉伸变形。拉伸仪单次步进幅度为 2 mm, 总拉伸量为 40 mm。每一级拉伸静置 1 min 后, 利用高精度光纤解调仪(OFR)测量光纤沿程的应变分布情况。高精度光纤解调仪(OFR)的测量精度为  $1 \mu\epsilon$ , 测量空间分辨率设置为 1 mm。

### 2.2 结果分析

在传感光纤的两个定点之间, 等间距选取 4 个点( $D=100、200、300、400$  cm), 分别提取各点在不同拉伸长度下的应变值, 形成图 2(a) 所示的应变响应曲线。由图 2(a) 可知, 光纤沿程各点的应变变化基本一致, 表明传感光缆两定点间各处

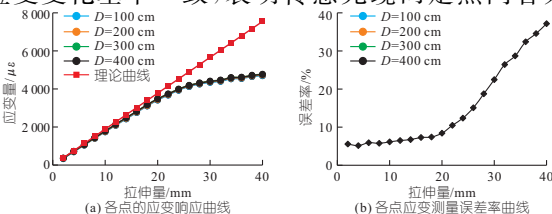


图 2 各点应变响应情况

Fig. 2 The strain response at each point

应变变化规律相同。排体在 2~20 mm 的伸长范围内, 实测应变与理论应变差别较小。图 2(b) 给出了 4 个测点实测值与理论值的平均误差曲线。由图 2(b) 可知, 4 个测点的测量结果基本相同, 即在 2~20 mm 的伸长范围内, 应变测量的误差率随拉伸量的增加缓慢增加至 8.43%。在排体拉伸长度在 22~40 mm 范围时, 各点实测应变值与理论值差别越来越大, 各测点误差率随拉伸量的增加呈指数型增长。40 mm 的拉伸长度时, 实测排体应变与理论应变的差值为  $2804 \mu\epsilon$ , 平均误差率达 37.15%。实测值与理论值的差异, 是由于拉伸量的增加, 夹具对光缆在加筋条上的固定效率降低, 导致光缆与加筋条变形的同步程度降低。且在伸长量大于 20 mm 后, 光缆与加筋条变形的同步性显著降低。因此, 加强光缆与加筋条的固定作用, 以及选用小模量传感光缆, 可进一步提升光缆与加筋条变形的耦合性能, 提高该监测技术对排体变形测量的适用性。

### 3 弯曲变形监测试验与分析

排体顺直拉伸变形模拟所需的空间较小, 因而可以在原型尺度下开展模拟研究。处于塌陷、鼓包等形态的排体会产生弯曲变形, 而复演排体的弯曲变形需要模拟大范围的排体, 原型尺度下难以开展。因此, 本研究在边坡试验箱内, 以 1:30 的比尺开展软体排弯曲变形试验模拟, 探讨光纤传感监测排体弯曲变形的可行性。

#### 3.1 试验设计

试验在边坡试验箱内进行, 该箱体长 2.0 m、宽 1.5 m, 内有原型沙。坡度对试验结果影响不大, 因而以 1:3 的坡度为代表性进行试验。边坡上覆盖有软体排模型, 软体排排布采用棉布, 压载块体按 1:30 制作, 按比尺间距粘贴在棉布的预定位置。单个排体宽度为 40 m, 换算成模型宽度为 1.33 m, 长度为 0.7 m, 光纤以  $d=0.166$  m 定点间距呈 U 型布设在排布上, 该定点间距换算成原型尺度为 5 m。模型试验选用 2 mm 的紧套光缆, 利用环氧树脂按定点间距粘贴在排布上, 光纤布置形式见图 3, 起点与终点间光纤长 2 m。排布铺设在斜坡上, 并覆盖一层碎石子模拟原型的块石压载。研究光纤传感监测技术的可行性时, 可以不对测量对象做严格的变形模拟。如研究对地面塌陷变形监测的可行性时, 可将气囊布设在监测的土体内部, 通过充放气或充放水的方法模拟地形塌陷变化<sup>[6-7]</sup>。光纤应变响应特征只与排体

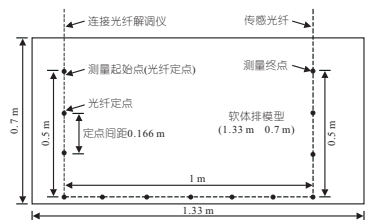


图 3 传感光纤在排体上的布置图

Fig. 3 Arrangement of sensing cables on the flexible mattress

最终的变形形态有关, 因此为更高效地模拟排体的弯曲变形, 在对比已有研究冲刷形态<sup>[8-9]</sup>的基础上, 以人工掏挖模拟地形变化, 模拟排体的弯曲变形。

光纤应变采用高精度光纤解调仪 (OFDR) 进行测量, 共进行 2 个重复组次的试验, 每个组次分别模拟守护边缘弯曲变形 (6 次) 以及内部弯曲变形 (2 次)。为消除人为因素对试验结果的影响, 每次变形模拟后静置 5 min 再进行应变测量。排体弯曲变形模拟过程中先模拟排体守护边缘不同冲刷范围的地形变化, 引起排体的变形范围也随之不断增大; 随后模拟向排体内部方向的弯曲变形, 两次模拟的地形与排体变形范围依次增大。试验中模拟的变形量见表 1。

表 1 变形模拟组次

Tab. 1 Deformation simulation group

模拟组次	边缘弯曲变形模拟/cm						内部弯曲变形模拟/cm	
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	20	30	40	50	60	80	12	30
2	20	35	43	51	68	75	20	20

### 3.2 结果分析

图 4 给出了两组试验的应变响应结果, 图 4 (a)、(c) 为边缘弯曲变形的结果, 其应变变化是相对于初始状态的应变值。图 4 (b)、(d) 是内部弯曲变形的模拟结果。边缘弯曲变形模拟中, 每次变化排体下方冲刷坑纵向延长 0.10~0.20 m 时, 排体产生 0.5 m 左右应变响应。由于两个定点间距  $d$  设置为 0.166 m, 边缘区域的光纤受到两个定点的约束, 并传递到相邻光纤, 因此应变响应范围一般为 0.498 m 左右 ( $3d$ )。这表明对于弯曲变形, 受限于定点布设光纤的测量方法, 变形监测定位精度为  $3d$ 。

从光纤响应特征分析, 光纤在不同的冲刷变形模拟过程中可能受拉也可能受压, 因此应变有正有负。在边缘弯曲变形部分主要以受压负应变为主, 且应变极值随着冲刷范围不断增大而增加 (图 5)。造成光纤受压产生负应变的主要原因为弯曲变形的排布在重力作用下向内产生卷曲, 光纤在定点的作用下受到向内的压力而产生负应

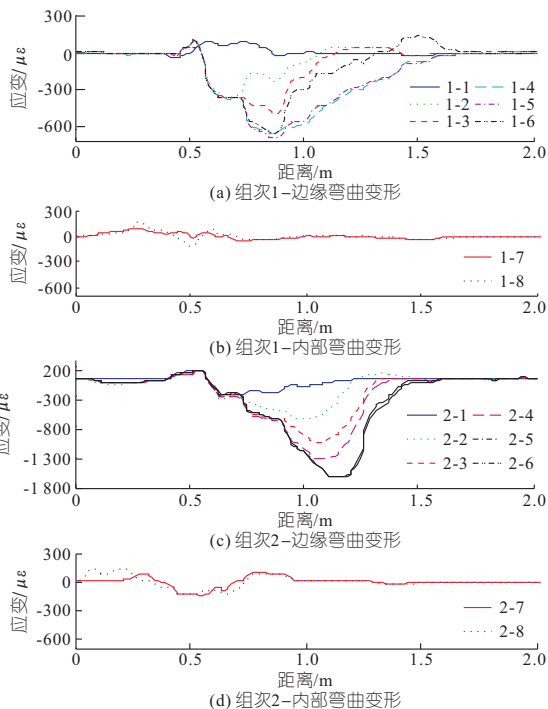


图 4 应变响应曲线

Fig. 4 Strain response curves

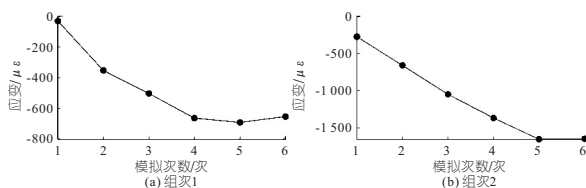


图 5 不同组次下的应变极值变化

Fig. 5 Variation of strain extremes at different group

变。由图 4 (b)、(d) 内部弯曲变形的模拟结果可知, 由于排体产生纵向的悬挂弯曲变形, 光纤会在应力集中区域 (冲刷坑边缘处,  $x = 0.2 \sim 0.3$  m) 产生正应变, 应变峰值在  $200 \mu\epsilon$  左右, 该区域排体主要受拉伸变形产生正应变。其他悬挂区域由于排体向内呈卷缩状态, 并在定点的固定作用下光纤随之向内卷缩受到压力产生负应变, 应变峰值在  $-150 \sim 200 \mu\epsilon$  左右 ( $x = 0.5$  m)。应变是长度增量与原始长度的比值, 没有比尺概念, 因此对于模型中的结果延伸到原型中时, 其应变测值不需要乘以模型比尺进行换算。另外, 定点的间距会影响光纤测量的精度, 对于同一弯曲变形, 不同的定点间距其测量结果不完全相同<sup>[10]</sup>。因此, 应用该技术测量弯曲变形时, 可以对产生弯曲变形的区域进行定位, 但较难直接复演出实际的弯曲变形量。

## 4 光纤传感变形监测的应用

模型试验结果表明了分布式光纤传感在柔性

护岸结构变形监测中的应用前景,但开展具体应用时,传感光纤与柔性结构变形的耦合性、沉排施工的破坏性及施工工序的复杂性等问题也是应用该技术所需要面临的技术难点。

(1) 光纤—排体变形的耦合性。减小定点间距、增大定点布设密度,对提高弯曲变形的定位精度及变形测量精度具有重要意义。受限于柔性排体特殊的施工及服役方式,无法采用全面粘贴的方法在排布上固定光纤。当排体产生弯曲变形时,定点布设的光纤与排体的变形不协同,应变传递效率较低。具体表现为当排体产生弯曲变形时,光纤在排体的带动下会呈一定夹角,导致应变无法有效传递。定点固定光纤的局部微段同样会在排体弯曲的带动下形成光纤的微弯。如图 6 所示,局部光纤由于排体的变形带动已不呈直线分布,并在定点区域形成光纤微弯段。由于夹角  $\alpha$ 、 $\beta$  存在,导致排体变形无法有效传递定点间的应变变化,使得测量的变化量较小。光纤—排体协同变形的耦合性决定了应用该技术时的测量精度。

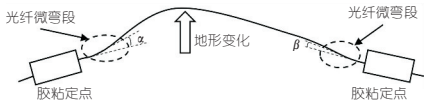


图 6 定点间光纤微弯示意图

Fig. 6 Fiber micro-bending diagram between the fixed-points

(2) 沉排施工的高破坏性。不同施工作业环境对光缆的强度要求不同,不同工程结构对光缆强度要求的为岩土结构 > 混凝土结构 > 钢结构 > 试验模型<sup>[11]</sup>。长江航道整治软体排守护工程施工环境复杂,各种施工机械及施工工艺对变形监测光缆具有较大的破坏性。在软体排沉排施工完成后会在软体排上方进行抛石压载作业,包括浮吊船抛石作业及长臂挖机抛石作业等,块石下落冲击力会对光缆存活造成一定影响。因此,在柔性排体的变形监测中,需要综合考虑强度、测量精度等方面进行光缆的选型与布设。

(3) 施工工序的复杂性。水流冲刷下的软排体变形形式以横向的侵蚀后退为主,因而监测光纤重点沿横断面方向布设,测量排体在横断面方向的变化。护底软体排从岸边往河心侧进行沉排作业,软体排沉放与移船同步进行(图 7)。当光

纤在施工前预先布设在排布上时,沉排施工过程中的排布运输、吊装及卷排等工序极易造成纤芯弯折破坏,因而传感光缆只能在软体排沉排施工过程中,随压载块体在排体上系结时同步固定、安装到软体排的预定位置。因此,光缆在排布上的布置形式需要结合软体排变形规律、沉排施工工艺及排体结构特性进行确定。

综合考虑软体排施工特性,可沿横断面方向,在上下游软体排边间隔一定距离进行定点行布设,通过对排体边缘变形的测量掌握整体的变形情况。在排体上下游边缘处同步布设光缆,光缆长度预先设置为排长的 2 倍与排尾横向连接段长度之和,沉排完工后光缆呈 U 型分布。可在外 U 内侧再布置一个 U 型监测回路,增大测量范围。以双 U 型为例(图 8),每个 U 型回路的光纤从排头一端往排尾布设,在排尾处与排边平行布设,后沿另一边返回到排头另一端形成回路。

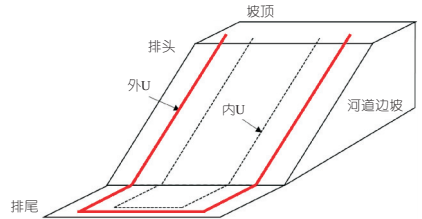


图 8 双 U 型光纤布设方案

Fig. 8 Double-U type optical fiber layout scheme

## 5 结论

a. 应用光纤测量排体的拉伸变形,在拉伸量为 0~20 mm 时,应变的实测值与理论值偏差较小。排体拉伸长度在 22~40 mm 范围内,各测点误差率呈指数型增长。定点处光缆与排体的固定效果决定了拉伸变形的监测精度。

b. 光纤传感对弯曲变形的定位精度为  $3d$ ,处于悬挂弯曲变形状态下的排体光纤主要以受压、负应变为主要响应特征。排布为柔性材料,悬挂时受到压载块体自重作用产生向内的弯曲变形,通过定点夹具带动光纤产生负应变,但对于集中受力区域(如冲刷坑边缘)则主要产生正应变。

c. 光纤传感对柔性护滩结构的拉伸变形监测具有可行性。通过提升光纤定点与排体固定效果,增强排体与光纤变形的耦合性能,能进一步提高分布式光纤在软体排拉伸变形监测中的适用性。通过缩小光纤的定点间距,可提高弯曲变形的监测精度。随沉排施工同步布设光缆,加大对监测光缆的保护措施,有助于提升监测光缆布设的存活率。

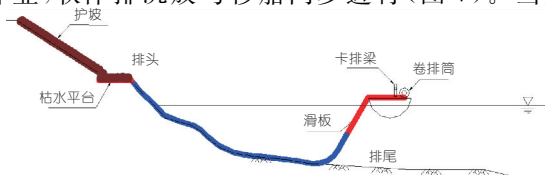


图 7 软体排沉排示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sinking the flexible mattress

## 参考文献:

- [1] ZUO L Q, LU Y J, LIU H X, et al. Responses of river bed evolution to flow-sediment process changes after Three Gorges Project in middle Yangtze River: A case study of Yaojian reach[J]. *Water science and engineering*, 2020, 13(2): 124-135.
- [2] 李思璇, 李圣伟, 董炳江. 三峡水库调蓄影响下武汉河段中下段河床演变特性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(10): 71-77.
- [3] 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]. *水利水电工程学报*, 2011(2): 32-38.
- [4] 唐晓峰, 付桂, 李为华. 高浊度河口复杂条件下护底软体排检测技术探讨[J]. *水运工程*, 2013(3): 81-85.
- [5] 宋云涛, 陈康, 魏祥龙, 等. 一种航道整治软体排变形监测用光缆固定夹具: CN212965527U[P]. 2021-04-13.
- [6] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(6): 1125-31.
- [7] 韦超, 朱鸿鹄, 高宇新, 等. 地面塌陷分布式光纤传感模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(9): 2443-2456.
- [8] 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.
- [9] 李彪, 徐晗, 黄成涛, 等. 冲刷条件下 D 型软体排护底破坏机理研究[J]. *水利学报*, 2015(增刊 1): 158-162.
- [10] 魏祥龙. 航道工程边滩守护软体排变形机理与监测预警方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2022.
- [11] 索文斌. 深基坑工程光纤监测技术与稳定性评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.

## Feasibility Analysis of Riverbed Protection Flexible Mattress Deformation Using Optical Fiber Sensing

WEI Xiang-long<sup>1a, 1b, 2</sup>, YANG Hai-liang<sup>2</sup>, ZUO Li-qin<sup>2</sup>, LU Yong-jun<sup>2</sup>, YANG Han-yuan<sup>2</sup>, YUAN Sai-yu<sup>1a, 1b</sup>

(1a. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention; 1b. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Flexible Mattress is the main beach guarding structure in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The water flow scouring is likely to cause the deformation of the flexible mattress, affecting the guarding effect. Aiming at its deformation monitoring difficulties, this paper explores the feasibility of using optical fiber sensing to monitor the deformation of the flexible mattress through the indoor experiment. The results of the study show that at the initial stage of tensile deformation (less than 20 mm), the measured strain value deviates less from the actual value. When the tensile length is greater than 20 mm, the error rate of each measurement point is exponentially increasing, and the fixing effect of the optical fiber cable and the flexible mattress at the fixed point determines the monitoring accuracy of tensile deformation. The positioning accuracy of optical fiber sensing to measure bending deformation is 3 times fixed-points interval. For the concentrated stress areas (such as the edge of scour pits), positive strain is mainly generated. Optical fiber sensing has the feasibility of monitoring the tensile deformation of flexible beach protection structures. When applying this technology, it is necessary to consider the coupling of the sensing fiber and the deformation of the flexible structure, the destruction of sinking the mattress and the complexity of the construction process. The results can be reference for the research and development of monitoring and assessment technology of the in-service condition of the flexible mattress.

**Key words:** flexible mattress; waterway regulation; deformation monitoring; optical fiber sensing

\*\*\*\*\*  
(上接第 163 页)

## Compressive strength and Permeability of Pervious Concrete Prepared by Reservoir Sediment

LI Yan-cang, ZHANG Zi-he, ZHANG Chun-yuan, SHI Hua-wang, FENG Sheng-lei

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** To improve the added value utilization rate of reservoir sediment in the field of construction materials, the reservoir sediment was used as auxiliary cementitious material to prepare pervious concrete. The results show that with the increase of reservoir sediment content, the compressive strength of the specimens will decrease, and the permeability will increase. With the extension of mechanical activation time, the compressive strength of the specimen increases and the permeability decreases. When the water cement ratio is 0.3, the mechanical activation time is 45 min, the 28 d compressive strength of the prepared pervious concrete can reach 21.44 MPa, and the permeation coefficient is 0.56 mm/s. The results of this study can provide reference for the resource utilization of reservoir sediment in the field of building materials.

**Key words:** reservoir sediment; pervious concrete; compressive strength; permeability; mechanical activation