



# 大型港口结构安全智能监测预警及性能提升 关键技术与示范应用 (2022-2024)

浙江省交通运输科学研究院

汇报人：港航研究所—陈世俊

2022年11月23日

# 目 录

## 一、项目意义

## 二、技术路径

## 三、预期成果

## 四、前景展望

# 一、项目意义—行业发展的趋势



## 国家科技发展趋势



习近平总书记在穿山港区考察

2020年3月29日，习近平总书记<sup>总书记</sup>在浙江宁波舟山港穿山港区考察时强调，要坚持**一流标准**，把港口建设好、管理好，努力**打造世界一流强港**，为国家发展作出更大贡献。

### 《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012—2030年）》

✓ 水运交通基础设施长期性能科学观察网工程建设方案

### 《交通强国专项（数字孪生专项任务）》

✓ 数字交通基础设施、虚拟孪生基础及示范应用，入围中国科协2020重大科学问题

001186

### 中共中央文件

中发〔2019〕39号

#### 中共中央 国务院 关于印发《交通强国建设纲要》的通知

各省、自治区、直辖市党委和人民政府，中央和国家机关各部委，解放军各总单位，中央军委机关各部门，各人民团体：

现将《交通强国建设纲要》印发给你们，请结合实际认真贯彻落实。

中共中央  
国务院  
2019年9月14日

（此件公开发布）

— 1 —



### 中央文件

#### 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》

2021-02-24 18:37:18 来源：新华社

新华社北京2月24日电 近日，中共中央、国务院印发了《国家综合立体交通网规划纲要》，并发出通知，要求各地区各部门结合实际认真贯彻落实。

《国家综合立体交通网规划纲要》全文如下。

为加快建设交通强国，构建现代化高质量国家综合立体交通网，支撑现代化经济体系和社会主义现代化强国建设，编制本规划纲要。规划期为2021至2035年，远景展望到本世纪中叶。

### 中共浙江省委全面深化改革委员会文件

浙委改发〔2021〕2号

#### 中共浙江省委全面深化改革委员会 关于印发《浙江省数字化改革总体方案》的 通知

按照省委十四届八次全会决策部署，现就加快推进数字化改革制订如下方案。

##### 一、总体要求

###### （一）指导思想

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的十九大和十九届二中、三中、四中、五中全会精神，坚持以人民为中心的发展思想，完整、准确、全面贯彻新发展理念，

# 一、项目意义—安全生产的需求

针对浙江沿海码头高温、高湿、高盐、高含沙的海洋服役环境，导致的结构损伤、船舶撞击、岸坡淤积等问题。



岸坡淤积



码头坍塌



港口码头震后破坏



上部构件劈裂



钢筋锈胀开裂

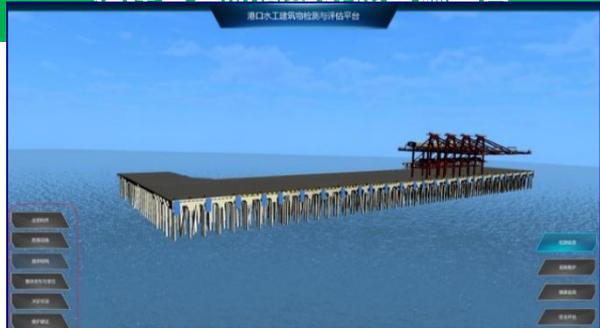


基桩锈胀受损

# 一、项目意义—研究目标

**项目来源：2022年度“尖兵”“领雁”研发攻关计划；研发经费：2500万元；**  
**研发周期：2022年1月-2024年6月；依托工程：宁波舟山港股份有限公司老码头。**

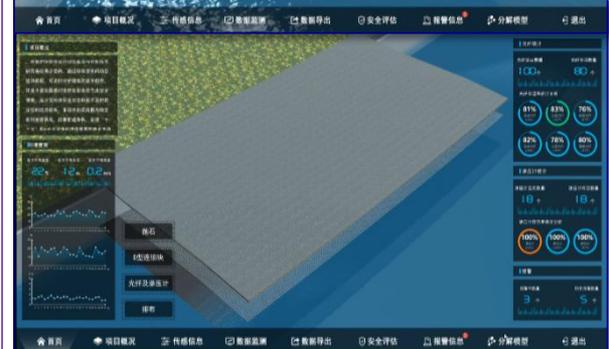
## 开展高桩新码头健康监测研究 搭建全寿命周期健康监测平台



### 港口水工建筑物检测与评估平台

名称	位置	类型	状态	更新时间	备注
1	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
2	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
3	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
4	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
5	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
6	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
7	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
8	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
9	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
10	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
11	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
12	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
13	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
14	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
15	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
16	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
17	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
18	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
19	老码头	重力式	正常	2022-01-15	
20	老码头	重力式	正常	2022-01-15	

## 开展航道整治建筑物安全监测



## 开展重力式码头及地基安全监测



# 一、项目意义—单位组成

联合行业优势单位，强强联合，组成“产-学-研-用”技术公关团队

浙江省交通运输科学研究所

✓ 第一承担单位



宁波舟山港股份有限公司

✓ 依托工程单位



交通运输部天津水运工程  
科学研究所

✓ 技术支持单位

# 目 录

## 一、项目意义

## 二、技术路线

## 三、预期成果

## 四、前景展望

## 二、技术路线

### 围绕港口安全、绿色和智慧发展的总目标

### 创新五项技术、研制三套装备、研发两种材料、开发一个平台、示范两项工程



## 二、技术路线



### 2022年度成果（第一阶段）

课题成果	年度计划进度安排	完成情况
<b>创新5项技术</b>	码头结构监测预警体系和评估方法研究	<b>1.完成码头结构监测预警指标选取</b> <b>2.完成结构安全评估办法</b>
<b>研制3套装备</b>	2套装备样机开发	<b>1.开裂损伤非接触式高精度监测装置</b> <b>2.码头岸坡淤积智能监测长寿命传感器</b>
<b>研发2种材料</b>	2种材料室内实验	<b>1.混凝土裂缝“自愈合”修复材料</b> <b>2.新型聚合物高性能混凝土修补材料</b>
<b>开发1个平台</b>	1个孪生平台原型框架开发	<b>1. 码头结构精细化模型方法研究</b>
<b>示范2项工程</b>	示范工程的现场布设方案	<b>1.完成2项示范工程的现场布设方案</b>

# 目 录

## 一、项目意义

## 二、技术路径

## 三、预期成果

## 四、前景展望

### 三、预期成果—5项技术



创新内容	预期成果	技术指标	国内外同类技术
码头整体安全评估	码头整体安全性评估技术	建立 <b>整体体系层次</b> 的安全性评估方法，反映码头真实安全状态。 <b>模型验证准确率达85%以上。</b>	目前规范方法为 <b>构件层次</b> ，由构件代表整体。
	码头结构承载力时变状态预测方法	建立 <b>考虑结构和地基时变</b> 的码头承载力演变规律及计算方法，能够 <b>预测未来</b> 码头安全状态， <b>模型验证准确率达85%以上。</b>	目前规范方法 <b>不考虑</b> 承载力 <b>时变</b> ， <b>不能预测</b> 未来码头安全状态。
多层次码头安全预警体系	在役码头结构安全智能监测指标体系	提出 <b>在役</b> 码头结构安全智能监测指标体系，体系涵盖结构、地基、环境、船舶等关键要素， <b>重点特征要素覆盖率达到100%。</b>	现有码头结构安全智能监测 <b>未形成监测体系</b> ，已有成果仅针对新建结构， <b>尚无</b> 针对在役码头的相关指标体系。
	多层级码头安全预警决策及阈值确定方法	实现考虑 <b>多因素</b> 影响的 <b>多层级</b> 预警阈值。	目前码头安全预警多为 <b>单层级</b> 预警阈值。
码头岸坡绿色生态防护技术	一次性“治本”固淤方法	实现由常规“治标”清淤向“治本”固淤的转变，码头 <b>损坏率降低20%以上。</b>	目前采用 <b>常规</b> 清淤方法，易产生水体和环境 <b>污染</b> ，且需要经常 <b>反复清淤。</b>

### 三、预期成果—课题1：码头结构损伤演化及安全监测体系构建



- ✓ 通过混凝土加速腐蚀(模拟30年以上)、大比尺动力模型(> 1:3)、离心机(500g·t)试验等手段;
- ✓ 厘清微观层次上钢筋混凝土材料性能和构件损伤演化机理;
- ✓ 明确宏观层次上岸坡淤积、船舶撞击对码头结构损伤及承载特性影响;
- ✓ 构建码头结构安全智能监测指标体系。

解决机理性难题



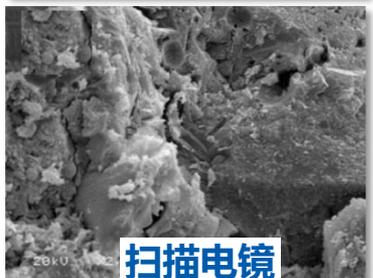
岸坡淤积



船舶撞击



室内试验



扫描电镜



离心机试验

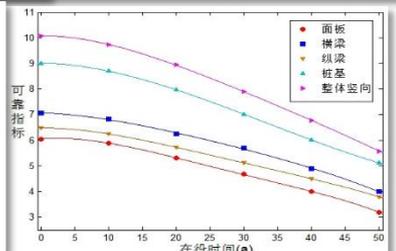
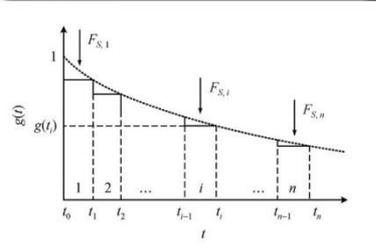
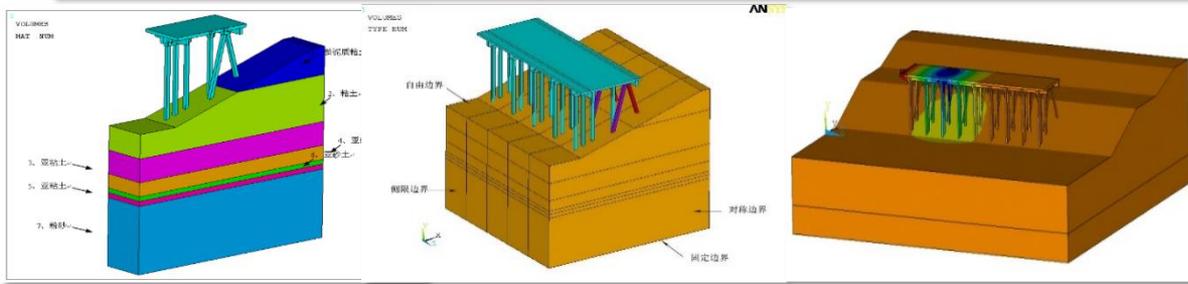


# 三、预期成果—课题3：结构整体安全性评估、预警及决策技术

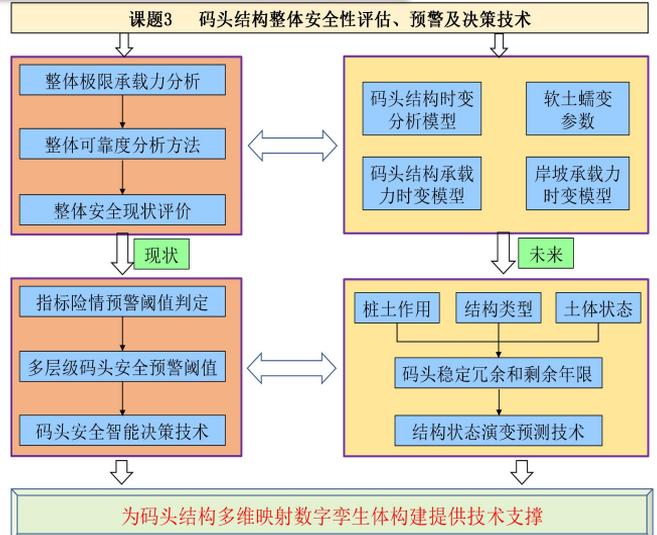


解决决策预警难题

- ✓ 突破多因素耦合作用下损伤码头整体安全性评估技术；
- ✓ 创新码头整体时变结构状态演变预测技术；
- ✓ 构建多层次码头整体安全性评估体系，实现“从构件到整体”、“从现状到未来”评估的提升；
- ✓ 建立码头安全预警阈值判定方法，实现模拟预测推演和智能决策控制。



$$\left. \begin{aligned} R(t) &= R_0 \varphi(t) \\ \mu_R(t) &= \mu_{R_0} \varphi(t) \\ \delta_R(t) &= \delta_{R_0} \eta(t) \end{aligned} \right\}$$



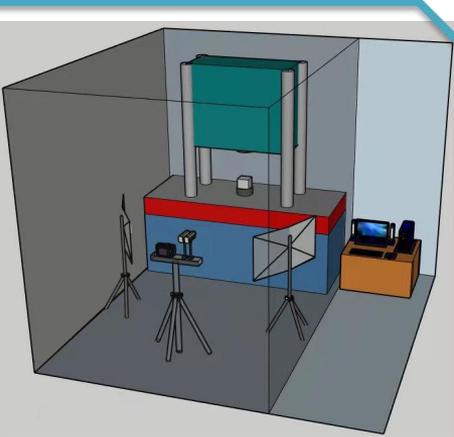
### 三、预期成果—3套装备



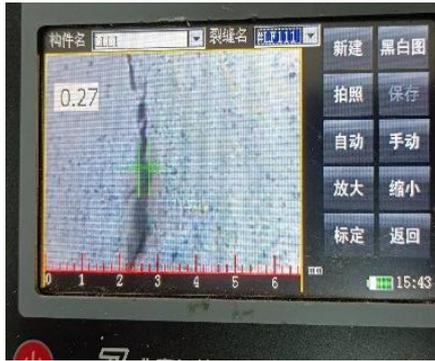
研制具有自主知识产权的高精度、长寿命快速识别装备。

创新成果	成果特色	技术指标	国内外同类技术
码头结构开裂损伤非接触式高精度监测装置	自主研发、战略创新产品、进口替代	实现水上结构物， <b>实时监测</b> ，精度优于 <b>0.1mm</b> ，使用 <b>年限</b> 达到 <b>3年</b> 以上。	无裂缝实时监测设备。常采用 <b>人工检测</b> 代替，多为 <b>进口设备</b> 。
码头岸坡淤积智能监测长寿命传感器	自主研发、战略创新产品、进口替代	实现水下岸坡淤积 <b>实时监测</b> ，分辨率优于 <b>1cm</b> ，使用 <b>年限</b> 达到 <b>5年</b> 以上。	无淤积实时监测设备。常采用多波速等 <b>定期扫测</b> ，多为 <b>进口设备</b> 。
阵列压电式船舶系缆力快速识别装备	自主研发、战略创新产品、进口替代	<b>不改变系统方式</b> ，实现码头系缆力矢量融合快速识别，分辨率优于 <b>1kN</b> ，使用 <b>年限</b> 达到 <b>1年</b> 以上。	<b>改变现有系统方式</b> ，多为 <b>进口设备</b> 。

# 装备1：码头结构开裂损伤非接触式高精度监测装置



室内试验

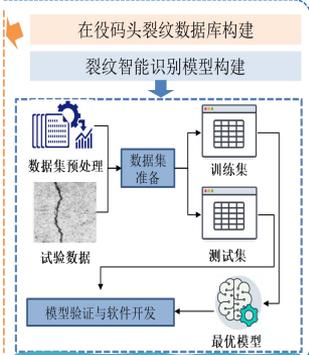


装备样机

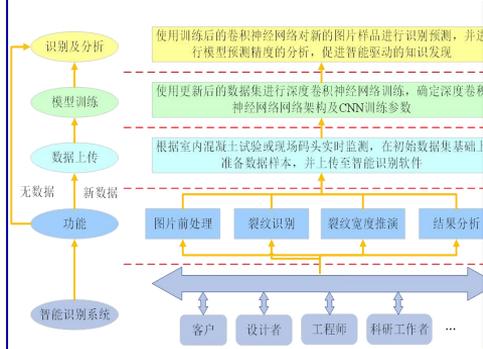


相机模块

本地存储模块  
稳定光源模块  
无线传输模块  
供电模块  
设备防护模块  
辅助模块



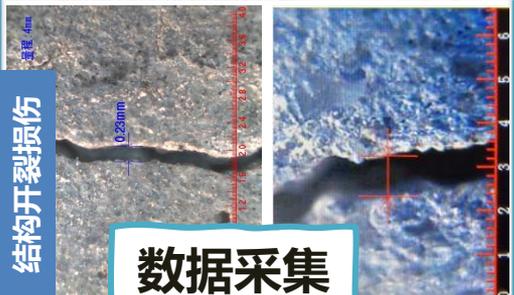
数据样本库



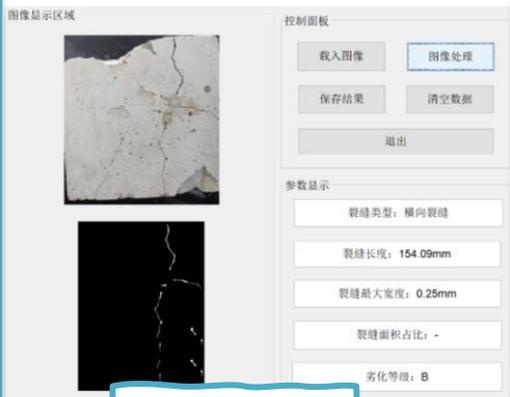
识别系统

# 装备1：码头结构开裂损伤非接触式高精度监测装置

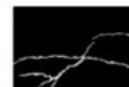
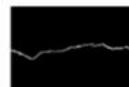
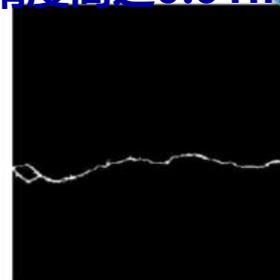
与裂缝宽度测量仪相比，精度高达0.01mm



数据采集



软件识别

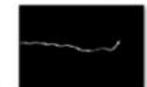
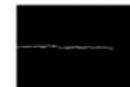
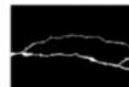


001.png

002.png

003.png

004.png

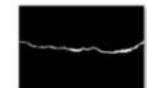
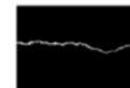
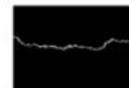


013.png

014.png

015.png

016.png

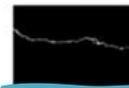


025.png

026.png

027.png

028.png



037.png

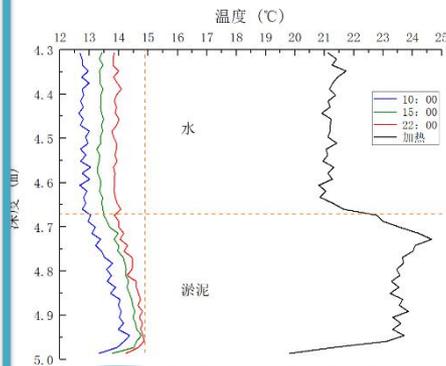
040.png

数据样张

# 装备2：码头岸坡淤积智能监测长寿命传感器



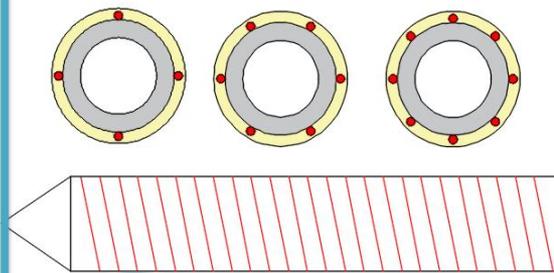
装备样机



设计原理



管壁材料



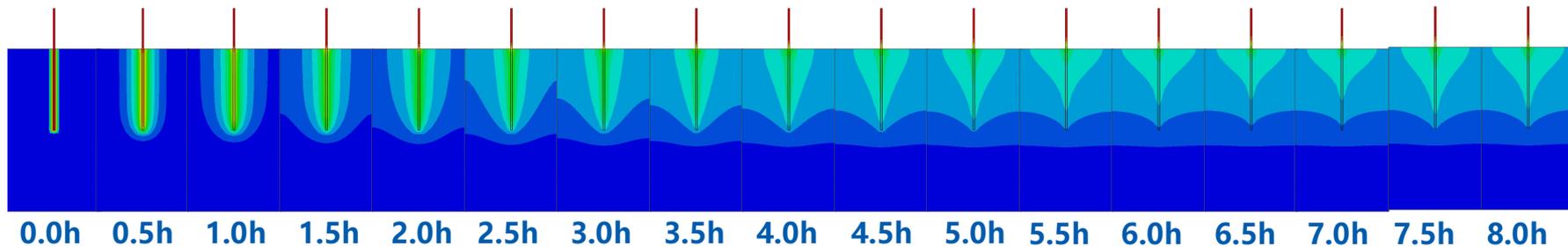
缠绕方式



室内试验

# 装备2：码头岸坡淤积智能监测长寿命传感器

		降温时间																				
加热温度		0.5h	1.0h	1.5h	2.0h	2.5h	3.0h	3.5h	4.0h	4.5h	5.0h	5.5h	6.0h	6.5h	7.0h	7.5h	8.0h	8.5h	9.0h	9.5h	10.0h	
	40°C	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	50°C	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	60°C	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	70°C	√	√	√	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	80°C	√	√	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90°C	√	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	100°C	√	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X



### 三、预期成果—2种材料



**创新研发高强耐久、水下速凝的新型聚合物绿色修补材料，长时效、主动修复的混凝土微生物材料。**

创新成果	成果特色	技术指标	国内外同类技术
新型聚合物高性能混凝土修补材料	自主研发、战略创新产品： 高强度、水下速凝、高耐久、 绿色修补	达到工程 <b>示范阶段</b> ，修复材料 强度不低于 <b>100MPa</b> 、水下 速凝时间不高于 <b>30min</b> 。	同类技术处于 <b>实验室阶段</b> ，在用修补材料 多为化学类材料，环 保性差。
基于微生物矿化的 混凝土裂缝“自愈 合”修复材料	自主研发、战略创新产品： 长时效、主动修复、绿色生 态	达到工程 <b>示范阶段</b> ，实现面板、 水上部位小于 <b>0.3mm</b> 的微裂 缝的 <b>主动修复</b> 。	同类技术处于 <b>实验室阶段</b> 。

# 材料1：新型聚合物高性能混凝土绿色修补材料

配合比1：丁苯乳胶：硅丙乳液：乙烯共聚物

硫铝酸盐水泥



硅丙乳液



丁苯胶乳



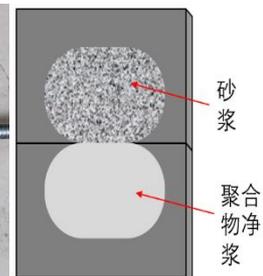
乙烯共聚乳液



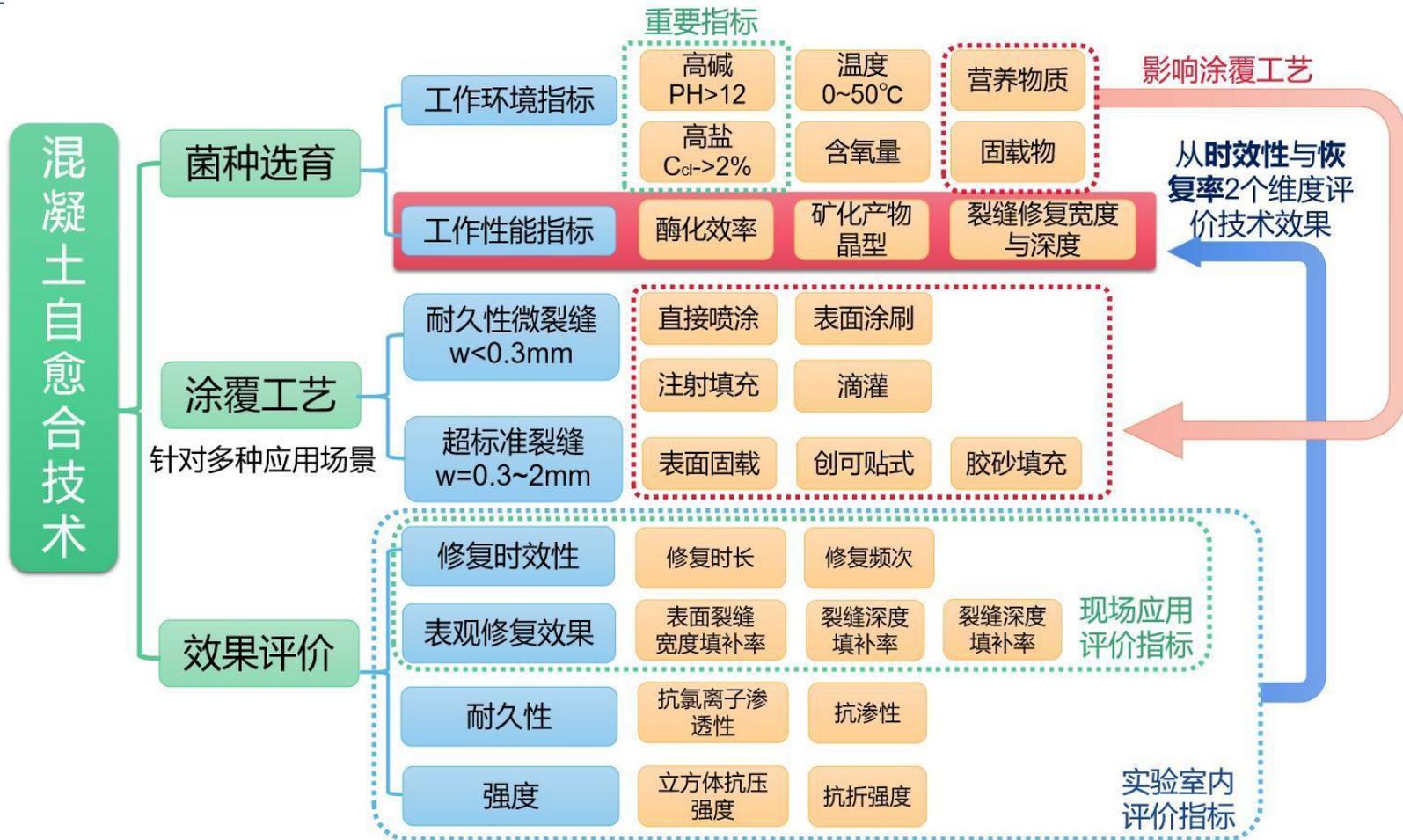
抗压强度与抗折强度试验



粘接试验



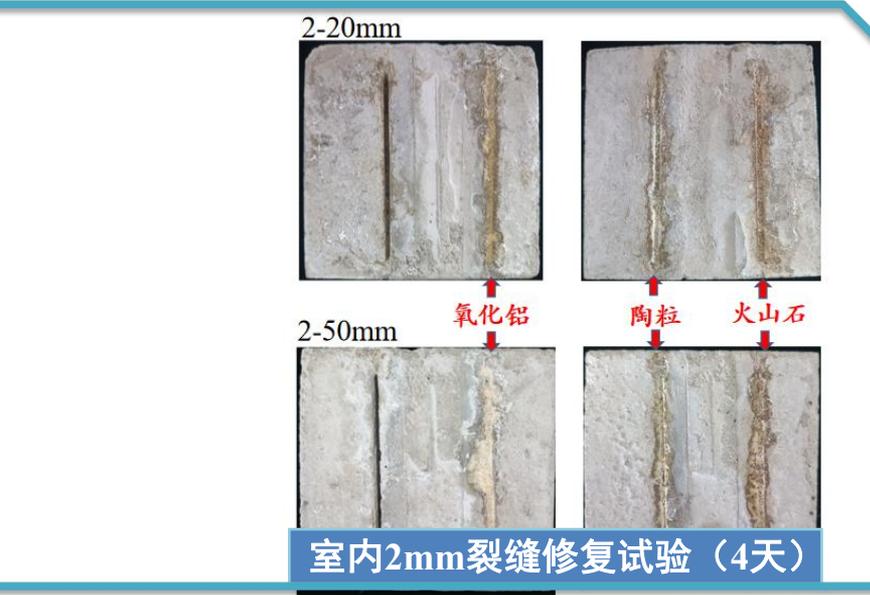
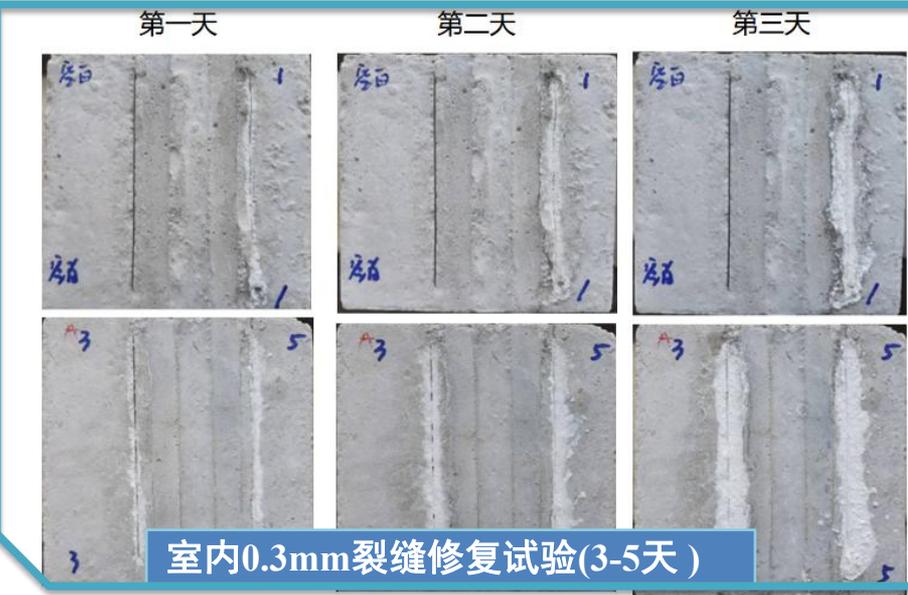
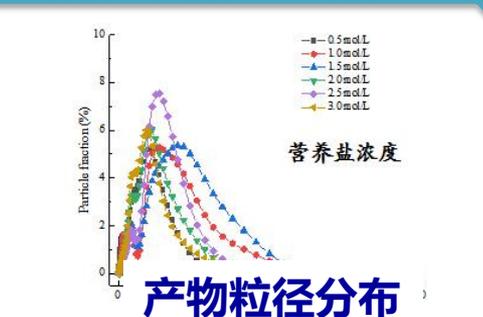
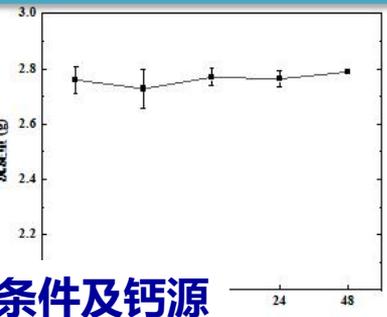
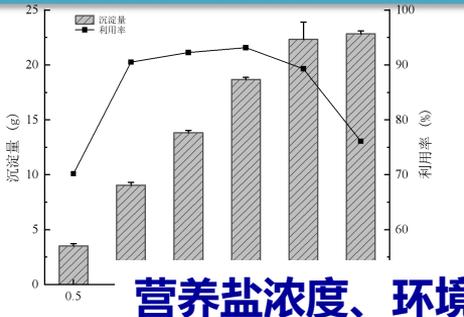
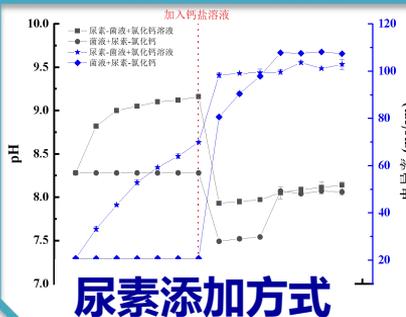
# 材料2：基于微生物矿化的混凝土裂缝“自愈合”修复技术



## 微生物诱导矿化技术——菌种比选

巴氏芽孢杆菌	火山石	1.5和2.0mm的试件裂缝完全封堵，强度恢复率为19.68%和15.51%
	陶粒	可愈合的裂缝最大宽度0.3 mm 86% 抗压特性：提高了约24% 吸水性：降低了约27%
粘性芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginous</i> L3	low-alkali sulfo-aluminate cement (SC) 低碱硫铝酸盐水泥	面积修复率 0.3–0.5 mm 90%； 吸水性：小于5%
巨大芽孢杆菌 <i>Bacillus megaterium</i>	low-alkali sulfo-aluminate cement (SC) 低碱硫铝酸盐水泥	0.4 and 0.5 mm； 面积修复率：95%； 防渗修复率：95%
球形芽孢杆菌 <i>Bacillus sphaericus</i> LMG 22557	海藻酸钠	最大修复宽度：0.25mm左右
好氧嗜碱微生物 <i>Bacteria.H1</i>	膨胀珍珠岩	最大修复宽度达到 0.72 mm， 渗水系数降低幅度达 97.8%（14 d）
嗜碱性芽孢杆菌 <i>Bacillus alcalophilus</i>	改造陶粒（压碎）	修复宽度；0.4-0.5mm 60% 抗压强度：与对照组一致，45MPa
	low-alkali sulfo-aluminate cement (SC) 低碱硫铝酸盐水泥	修复宽度：0.25-0.35mm； 面积修复率：99.2%； 抗渗性：97%

# 材料2：基于微生物矿化的混凝土裂缝“自愈合”修复技术



### 三、预期成果—1个平台

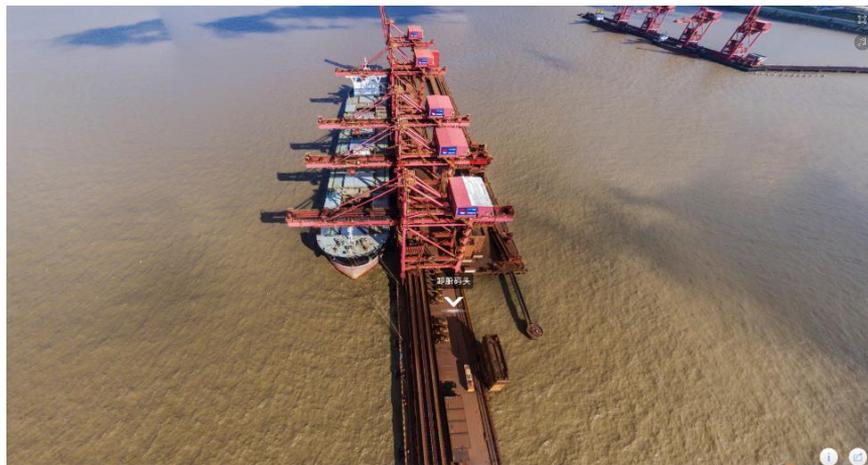
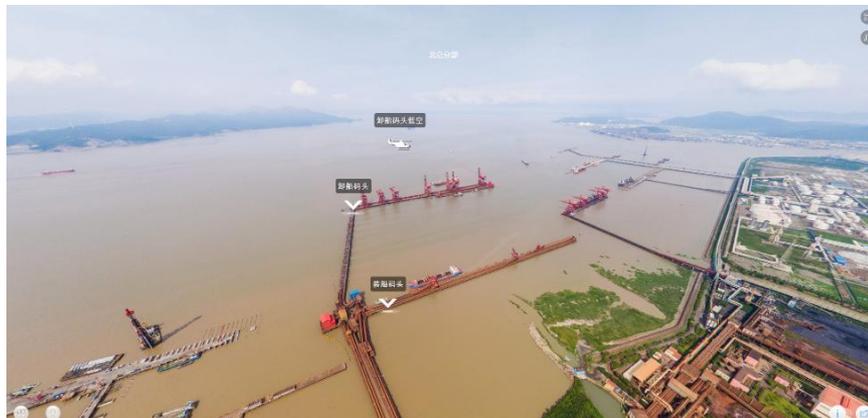
创新成果	成果特色	技术指标	国内外同类技术
码头数字孪生灾变预警与应急决策平台	自主研发、完全知识产权	基于数字孪生的“场景构建-力学感知-预测推演-决策控制” <b>四维一体的平台</b> ，实现码头关键特征要素 <b>100%覆盖</b> 。	现有平台多为常规软件或者基于BIM系统， <b>未见</b> 基于数字孪生技术的平台。

- ✓ 研发海量实时、高并发多源异构监测**数据存储与高效索引技术**，建成高同步时序数据库；
- ✓ 利用深度学习算法进行**数据挖掘**，赋予数字孪生体**智能分析能力**；
- ✓ 创新多源数据**三维可视化增强技术**，创建“场景构建-力学感知-预测推演-决策控制”**四维一体**的码头数字孪生体。

解决**数字化难题**



# 三、预期成果—港口码头智能监测预警及性能提升示范应用



## 宁波港北仑港区20万吨矿石中转码头2号泊位示范应用

- ✓ 码头前沿采用SUC2000H行橡胶护舷
- ✓ 码头系船柱为2000kN
- ✓ 码头面设计标高+7.70m
- ✓ 泥面设计标高-20.5m



#### 码头现状及问题：

- ✓ **上部结构**局部腐蚀破损严重，出现混凝土空鼓、脱落、开裂、吐锈以及露筋等现象；
- ✓ **混凝土涂层**局部存在轻微流挂，有开裂剥落、鼓泡等问题；
- ✓ **部分基桩**出现玻璃钢包覆层脱落等现象；
- ✓ **码头淤积情况**严重，年均疏浚2~3次，平均清淤2万方/次，清淤后一周内，码头前沿0~5米处平均回淤1米，前沿5米外至50米处平均回淤0.5米。



# 三、预期成果—课题6：港口码头智能监测预警及性能提升示范应用

- ✓ 建成码头数字孪生动态安全监管平台；
- ✓ 开展监测、性能提升成套技术及装备的集成示范应用；
- ✓ 纳入国家长期性能观测网先行示范工程，
- ✓ 编制港口码头安全状态的分级标准指南。

确保成果转化应用



# 目 录

## 一、项目意义

## 二、技术路径

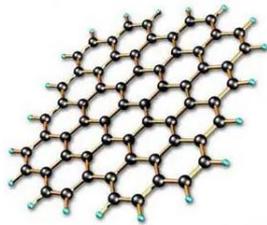
## 三、预期成果

## 四、前景展望



## 2个新方法

- 多层次码头安全预警决策及阈值确定方法
- 基于整体时变模型的码头结构状态演变预测方法



## 2种新材料

- 基于微生物矿化的混凝土裂缝“自愈合”修复材料
- 新型聚合物高性能混凝土修补材料

## 5项新技术



- 在役码头结构安全智能监测指标体系构建技术
- 多因素耦合作用下损伤码头整体安全性评估技术
- 码头岸坡绿色生态防护技术
- 码头结构损伤修复增强技术
- 码头结构多维映射数字孪生体构建与可视化技术



## 1个新平台

- 基于多维孪生技术的码头数字化动态安全管控平台



## 2个示范应用

- 宁波舟山港北仑港区码头
- 宁波镇海港区码头

## 3套新装备

- 码头结构开裂损伤非接触式高精度监测装置
- 码头岸坡淤积智能监测长寿命传感器
- 阵列压电式船舶系缆力快速识别装备



## 1部标准指南

- 港口码头整体安全状态分级标准指南

## 四、前景和展望



- 研发出一套港口安全状态智能监测成套技术和装备、以及基于多维孪生技术的码头数字化动态安全管控平台，涵盖结构、地基、环境、船舶等关键要素，重点特征要素覆盖率达到100%；
- 立承载状态下多因素融合的码头结构服役演变规律及计算方法，模型验证准确率达85%以上；
- 提出码头结构损伤修复增强技术和岸坡绿色生态防护技术2项，码头损坏率降低20%以上，使用年限提高20%以上；
- 核心技术指标达到国际先进水平，在服役年限超过10年的大型沿海港口推广应用。

谢谢!

