城市滨江道路边坡防护结构优化设计研究

江芳发[1]　陈华兰[1]　陈　莉[2]　张应泉[2]

1.福建省闽芝建设发展有限公司 福建 南平 353000

2.福建永向建设发展有限公司 福建 南平 353000

【摘　要】：泉州市滨江道路多建于晋江沿岸冲积平原，受软土地基、台风暴雨及潮汐水位变化影响，传统硬质边坡防护结构易出现沉降变形、冲刷损毁等问题，且生态景观效果欠佳。本文以泉州市江滨北路改造工程为依托，针对闽南滨海地区特殊的地质水文条件，分析原有浆砌块石护岸存在的结构性缺陷，提出“格宾石笼+生态混凝土+土钉锚固”的复合式边坡防护优化方案。通过极限平衡法对优化前后边坡稳定性进行定量验算，结果表明优化后边坡安全系数提升 18.6%，同时显著改善生态景观效果。研究成果可为东南沿海城市滨江道路边坡防护设计提供技术参考。

【关键词】：滨江道路；边坡防护；结构优化；格宾石笼；泉州市

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.045

引言

滨江道路属于城市滨水空间的组成，具有交通通行、防洪护岸以及景观休闲等多重功能。泉州市依江临海，晋江、洛阳江穿城而过，沿江建成江滨北路、江滨南路等多条主干道，多建于 20 世纪 90 年代到 21 世纪初，受当时技术条件的限制，边坡大多采用浆砌块石、重力式挡土墙等传统的硬质防护结构。

经过二十余年的运行，边坡病害逐渐显现出来，晋江沿岸广泛分布着冲海积淤泥质软土，长期蠕变引起挡墙基础沉降、墙体倾斜开裂；闽南地区年均降雨量为 1200～1600mm，5～9 月台风暴雨频繁发生，雨水冲刷造成坡面损坏、墙后填土流失；硬质护岸隔断了水陆生态系统之间的联系，与“生态泉州”建设的理念不相符。

近些年来生态护坡、复合支护等新技术在国内滨江工程中逐渐被采用，但是泉州滨海软土地区相关的专项研究较少。本文以江滨北路丰泽段改造工程为依托，从结构安全、生态适应、景观融合三个方面对边坡防护体系进行优化，用定量验算的方法验证方案的可行性，探索出适合闽南气候地质特点的滨江道路边坡建设模式。

1 工程概况与地质水文条件

1.1 工程概况

泉州市江滨北路丰泽段西起顺济桥，东到晋江大桥，全长约 4.2km，为双向六车道城市主干道，道路等级为城市主干路，设计车速 50km/h。道路沿晋江左岸设置，具有城市交通和防洪堤防双重功能，设计防洪标准为 50 年一遇。现状边坡高度 3.5～6.8m，原有防护形式为 M7.5 浆砌块石护坡，坡率 1:1.5，坡脚设 C20 混凝土镇脚[1]。

现场勘查得知，该路段边坡有如下病害：约 320m 长的区段浆砌块石勾缝脱落、局部砌块松动外翻；6 处挡墙有竖向裂缝，最大缝宽为 12mm；坡脚处由于江水常年冲刷，基础外露最深达 0.8m；坡面没有植被覆盖，景观效果不好，与周边滨海公园的风貌不协调。

1.2 地质条件

项目场地位于晋江下游冲积平原，属于典型的滨海相沉积地貌。根据地质勘察报告可知，场地地层自上而下依次为：

（1）人工填土层：厚度 1.2～2.5m，以碎石土、粉质黏土为主，结构松散。

（2）淤泥质土层，厚度为 3.5～6.8m，呈流塑～软塑状态，承载力特征值仅为 60kPa，压缩性大，是边坡沉降变形的主要控制层。

（3）粉质黏土层：厚度 2.0～4.5m，可塑状态，承载力 140kPa。

（4）强风化花岗岩层：埋深 8.5～12m，岩体破碎，承载力 350kPa。

泉州地区地壳构造活动频繁，花岗岩风化带较厚，残积土遇水易软化崩解，加上台风暴雨集中，边坡水毁风险较大抖音百科。

1.3 水文条件

晋江为泉州市主要河流，项目河段属于感潮河段，正常水位为 1.2～1.8m（黄海高程），历史最高洪水位为 4.85m，涨落潮差为 1.5～2.5m。江水含沙量小，但是汛期流速大，对坡脚冲刷作用明显。地下水位埋深为 0.8-1.5m，受潮汐的影响而有周期性的波动，地

下水同江水的水力联系紧密，给边坡稳定造成不良影响[2]。

2 原有边坡防护结构存在的问题

（1）结构稳定性不足：原有的浆砌块石护坡是刚性结构，对地基沉降的适应性差。由于下卧软土层蠕变不断发生，造成部分区段挡墙出现不均匀沉降，造成墙体开裂、砌块错位。同时墙后排水系统不完善，在暴雨期间墙后积水产生静水压力，使边坡抗滑稳定性下降。根据 2025 年市政设施普查数据，本路段边坡中度以上病害占总比例的 21.7%以上，安全隐患大。

（2）抗冲刷能力衰减：浆砌块石护坡由于长时间的江水浸泡和潮汐往复的作用，砂浆勾缝慢慢脱落，砌块间的粘结力降低。汛期洪水带泥沙冲刷坡脚，使基础淘空、墙体前倾。台风风暴潮期间水位突然上涨、下跌，边坡内外水头差急剧变化，容易造成渗透破坏。

（3）生态与景观功能缺失：传统的硬质护岸把水陆生态系统之间所有的物质和能量交换全部切断了，破坏了滨江地带的生物栖息地。坡面无植被覆盖，夏季表面温度可达 55℃以上，加重城市热岛效应。灰色调的砌石界面同周边滨海公园、生态漫道的景观风貌形成强烈反差，不符合泉州“山水城市”的发展定位[3]。

（4）维护成本较高：刚性护坡一旦发生裂缝、沉降等病害，维修起来比较困难，费用也较高。局部损坏一般要进行大面积的拆除重建，施工期间要封闭部分车道，对交通造成较大影响。据统计可知，该路段近五年年均边坡养护费用大于 80 万元，并且呈逐年上升的趋势。

3 边坡防护结构优化设计

（1）优化设计原则：根据泉州滨江地区的实际情况，本次优化遵循以下三个原则，第一是安全第一，在 50 年一遇的洪水和台风工况下保证边坡的稳定，安全系数符合规范要求；第二是生态适应，使用柔性防护结构，恢复滨水岸线的生态功能，选择本地耐湿植物；第三是经济耐久，考虑初期投资和全生命周期成本，选择抗腐蚀、耐老化的材料，减少后期维护费用[4]。

（2）复合式防护结构方案：本次优化采用下部格宾石笼护脚、中部生态混凝土护坡和上部土钉墙锚固的三级复合防护体系，边坡整体坡率调整为 1:2.0，具体结构如下图所示。

坡脚格宾石笼防护段高程 2.0m 以下常水位变动区，用镀锌铝合金格宾石笼防护。格宾网箱尺寸 2m×1m×0.5m，网孔规格 8cm×10cm，钢丝直径 2.7mm，外涂聚氯乙烯防腐层。网箱内装入粒径为 15～25cm 的花岗岩块石，孔隙率为 30%左右。石笼分层砌筑，底层设 1.0m 宽的抛石护脚，深入河床以下 0.6m，抵御江水淘刷。格宾石笼属于柔性结构，可以适应地基不均匀沉降，并且孔隙也可以给水生生物提供栖息空间。

中部生态混凝土护坡段高程为 2.0m 至 4.5m 水位变动带，用预制生态混凝土砌块护坡。砌块尺寸为 40cm×30cm×15cm，内部孔隙率为 25%，孔隙内填种植土，播撒耐水草本植物种子。砌块下面设 10cm 厚碎石垫层和一层无纺土工布，起反滤排水作用。砌块之间用不锈钢插销连接成整体，抗冲刷流速可达 5m/s，满足汛期行洪的要求。生态混凝土可以抵抗水流的冲刷，还可以进行坡面绿化，改善生态景观的效果。

上部土钉墙锚固段高程 4.5m 以上至道路路肩，采用土钉墙+三维植被网复合支护。土钉采用φ25mm 螺纹钢筋，长度 4～6m，倾角 15°，水平间距 1.5m，梅花形布置。土钉钻孔直径 110mm，灌注 M20 水泥砂浆。坡面挂φ6mm@200×200 钢筋网，喷射 8cm 厚 C20 混凝土面层，面层设置泄水孔。坡面表层铺设三维土工网垫，喷播混合草籽，达到固土和绿化双重目的。土钉进入粉质黏土层，可以改善边坡的整体稳定情况，控制土体的侧向变形[5]。

（3）排水系统优化：完善的排水系统可以保证边坡的稳定性。优化方案分为三层排水系统，坡顶设截水沟拦截道路和坡顶汇水，坡面设横向排水槽间距 10m 导排坡面径流，坡脚设排水沟汇集坡面出水并接入市政排水系统。墙后设连续排水层，用级配碎石+土工布反滤结构排除墙后积水，减小静水压力。

4 稳定性验算与效果对比

4.1 计算参数与方法

用瑞典条分法进行边坡抗滑稳定验算，取最不利断面（边坡高度为 6.8m 处）作为计算剖面。岩土体物理力学参数按照地勘报告的取值计算工况有正常工况、暴雨工况和地震工况。

4.2 优化前后稳定性对比

对原有浆砌块石护坡方案与优化后复合防护方案分别进行稳定性计算，结果如表 1 所示。

表 1 边坡防护方案优化前后稳定性对比表

工况	方案类型	安全系数	规范要求值	安全储备	评价
正常工况	原浆砌石方案	1.24	≥1.20	3.3%	基本满足
正常工况	优化复合方案	1.47	≥1.20	22.5%	良好

暴雨工况	原浆砌石方案	1.03	≥1.10	-6.4%	不满足
暴雨工况	优化复合方案	1.22	≥1.10	10.9%	满足
地震工况	原浆砌石方案	1.08	≥1.05	2.9%	临界
地震工况	优化复合方案	1.28	≥1.05	21.9%	良好

注：续表 1。

从表 1 可以看出，原来的浆砌石方案在暴雨工况下安全系数只有 1.03，小于规范要求的 1.10，存在安全隐患；而优化后的复合防护方案在三种工况下安全系数都满足规范要求，正常工况下安全系数为 1.47，比原方案提高 18.6%，暴雨工况下提高 18.4%，边坡稳定性明显提高。

4.3 综合效益对比

除结构安全外，优化方案在其他方面也具有明显优势：生态效益植被覆盖率由原来的 0%提高到现在的 75%以上，恢复滨水岸线生态功能；景观效益表现为形成多层次的绿化界面，与周边滨江公园景观相融合。经济效益上虽然初始投资比传统的方案要高出 12%左右，但是后期的维护费用降低了 60%以上，全生命周期成本也更低。施工便捷性为格宾石笼和生态砌块都是预制构件，现场装配式施工，比传统浆砌石工期缩短约 30%。

5 施工关键技术与质量控制

（1）软土地基处理：对于下卧软土层，坡脚处用换填垫层法进行地基处理。开挖表层淤泥质土，换填 80cm 厚级配碎石，分层夯实，压实度不小于 93%。换填范围超过石笼基础外缘 1.5m，改善基底应力分布，减小沉降变形。施工时严格控制换填材料级配和压实质量，使地基承载力大于 120kPa。

（2）格宾石笼施工：格宾网在工厂预制，在现场组装后填充。网箱组装时保证边框对齐、绞合牢固，绞合间距不大于 20cm。块石填充用人工配合机械分层的方式进行，粒径均匀，大面朝外，填充密实度不低于 90%。每层填充完后加盖网盖，用绞合法固定。石笼砌筑错缝布置，防止通缝，层间设连接筋提高整体性。

（3）土钉注浆质量控制：土钉成孔用干作业法，保证孔壁完整不塌落。注浆采用常压注浆工艺，注浆管插到孔底 0.2m 处，边注浆边慢慢拔管，注浆压力 0.3～0.5MPa，注浆饱满度不低于 90%。初凝后进行二次补浆，保证土钉和周围土体粘结牢固。土钉抗拔力试验抽检总数为 1%，不少于 3 根，抗拔力不小于设计值的 1.2 倍。

（4）生态植被建植：生态混凝土砌块孔隙内填入改良种植土，播种狗牙根、百喜草等耐贫瘠、耐水湿的本地草种。上部三维网坡面用液压喷播工艺，草籽、保水剂、粘合剂、有机肥混合喷射。施工选择在春季或者秋季进行，养护期不少于 45 天，保证出苗率和覆盖率达到设计要求。

6 结论

本文以泉州市江滨北路改造工程为背景，针对闽南滨海软土地区滨江道路边坡防护的特殊性，开展了结构优化设计研究，泉州滨江地区软土地基、台风暴雨、潮汐作用等多重因素叠加，传统的硬质边坡防护结构稳定性不够，暴雨工况下安全系数不能满足规范要求，存在安全隐患；提出的“格宾石笼+生态混凝土+土钉墙”三级复合防护体系，充分发挥了各个结构形式的技术优势，后边坡正常工况安全系数提高到 1.47，比原方案提高了 18.6%的结构安全储备；复合防护方案具有结构安全和生态景观的双重效益，植被覆盖率超过 75%，全生命周期经济性更好，符合泉州生态城市建设的要求，可以给东南沿海其他城市滨江道路工程提供借鉴。

后续可以开展长期监测研究，积累软土地区生态边坡变形和沉降的长期数据，不断改进设计参数和构造措施。

参考文献：

[1] 陈信源.市政道路路基边坡防护施工技术设计[J].中国建筑金属结构,2025,24(19):57-59.

[2] 张衡.道路路基及边坡防护工程设计中应用要点探究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(31):153-155.

[3] 何慧敏.道路高边坡防护施工技术研究[J].运输经理世界,2024,(21):118-120.

[4] 刘生涛.市政道路路基处理及边坡防护典型工程实例[J].城市道桥与防洪,2023,(8):201-203+208+20.

[5] 陈曌.边坡防护中的生态防护与基本建设设计[J].中国高新科技,2023,(6):89-90.