

# 缺陷 CFG 桩复合地基稳定性分析与加固设计

张锦华<sup>1</sup>, 王衍辉<sup>1</sup>, 刘鑫<sup>2,3</sup>, 杜强<sup>2,4</sup>

(1. 广东交通实业投资有限公司, 广东 广州 510100; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学隧道与轨道工程研究所, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:**基于具体工程的缺陷 CFG 桩分布统计结果, 运用 Plaxis 数值计算软件对缺陷 CFG 桩复合地基稳定性进行计算, 并对其进行加固方案的设计。研究表明: 缺陷 CFG 桩破碎带沿桩身主要分布在浅部和中部, 破碎带长度绝大部分位于 0~1 m 之间, 平均长度约 0.5 m, 断桩不是缺陷 CFG 桩的主要形式, 断桩主要发生在桩端以下 2.8 m 左右; 基于 Plaxis 分析软件, 将 CFG 桩体等效转化为连续墙体, 并划分横断面区域, 按比例将缺陷 CFG 桩统计结果融入计算模型, 能较准确地获得缺陷 CFG 桩复合地基的稳定安全系数; 缺陷 CFG 桩复合地基宜在路堤边坡坡脚处打设抗滑桩进行加固, 抗滑桩采用预应力混凝土管桩; 设计了抗滑桩的选型、布置以及地梁。通过加固前后复合地基稳定安全系数的对比, 验证了该设计方案的有效性。

**关键词:**缺陷 CFG 桩; 复合地基; 稳定性; 加固设计

**中图分类号:** TU473.1

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1006-7647(2013)S1-0043-04

水泥粉煤灰碎石桩(cement fly-ash gravel pile, CFG)复合地基,是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌合形成的高黏结强度桩,和桩间土、褥垫层一起形成复合地基<sup>[1-2]</sup>。近年来,CFG 桩复合地基处理技术凭借自身的特点,已大量应用于高速公路路基加固中,特别是在软弱地基以及路堤与桥台过渡段等路基的加固中取得了良好的效果。然而,在较多高速公路、铁路的建设过程中,经检测发现所打设的 CFG 桩存在缩颈、局部破碎,甚至断桩等质量问题,导致质量达不到相关规范要求,给工程带来安全隐患。目前,已有学者对缺陷 CFG 桩进行了研究:安建国<sup>[3]</sup>建立四桩群桩模型,对缺陷 CFG 桩竖直荷载性状进行了数值分析,得出缺陷桩对群桩基础整体工作特性的影响规律;宋祖民<sup>[4]</sup>采用有限元方法研究了存在缺陷的单桩和群桩在水平荷载作用下的工作性状,获得缺陷 CFG 桩基础相对于正常桩基础各自的工作机理。卓华雄<sup>[5]</sup>对某铁路工点采用 CFG 桩工程的检测结果进行了分析,总结了在一些特殊环境中 CFG 桩复合地基的缺陷,指出高含水量的软土地区易导致 CFG 桩复合地基桩土应力失衡,同时得出动载荷对桩身的破坏有直接影响的结论。

刘学峰等<sup>[6]</sup>通过现场检测缺陷桩和完整桩的承载力试验,指出如果 CFG 桩浅部断裂部分无垂直方向偏移,浅部断裂桩对复合地基承载力和沉降量影响甚微。贾志刚等<sup>[7]</sup>在对某工程 CFG 桩施工前试桩的施工后检测时,结合具体地质条件,分析了缺陷 CFG 桩的形成原因,并对施工工艺进行了调整和改进。通过上述分析可以发现,目前对缺陷 CFG 桩的研究大多体现在 CFG 桩施工技术的改进、桩身缺陷检测以及质量事故的处理分析上,缺乏对缺陷 CFG 桩,特别是对存在一定比例缺陷 CFG 群桩复合地基稳定性的分析,以及对缺陷 CFG 桩复合地基加固设计的研究。

本文依托广东某高速公路 CFG 桩复合地基工程,在统计分析缺陷 CFG 桩分布规律的基础上,对缺陷 CFG 桩复合地基稳定性进行数值计算,并对其进行加固方案设计研究,为同类工程缺陷 CFG 桩复合地基的加固设计提供参考。

## 1 工程概况

广东某高速公路 K129+080~K130+050 段采用 CFG 桩处理,梅花形布置方式,面积置换率为  $m =$

基金项目:国家自然科学基金(51079052);广东省科技厅科技项目(200903005);江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX10B\_208Z, CXLX11\_0437);河海大学中央高校基本科研业务费专项(2012B03014)

作者简介:张锦华(1976—),男,广东番禺人,工程师,主要从事地基处理研究。E-mail:hua3282@126.com

0.157。CFG 桩与褥垫层之间铺设双向土工格栅,第1层土工格栅铺设在桩顶,第2层铺设在碎石垫层顶。铺设时,沿路基横向土工格栅不宜搭接;沿路基纵向土工格栅搭接长度宜不小于0.1 m,并用高强塑料扎扣扎牢,之后沿搭接方向每隔4 m 设置一个门钉,门钉压入土中30 cm。土工格栅主受力方向沿路堤横向铺设。碎石垫层采用级配碎石,直径不大于2 cm,具体设计参数为:软土厚度7.1 m;桩长10.0 m;桩径0.5 m;桩间距1.2 m;桩体强度15 MPa;单桩承载力设计值120 kN;褥垫层厚度0.3 m。

CFG 桩施工完毕后,依据 JGJ106—2003《建筑桩基检测技术规范》的相关要求,对2278根 CFG 桩采用钻芯法进行取样抽检,共抽检 CFG 桩114根,约占总桩数的5%。将抽检部位按路基在路基底面垂直投影分为①~⑦共7个区域,如图1所示。各区域缺陷统计见表1。

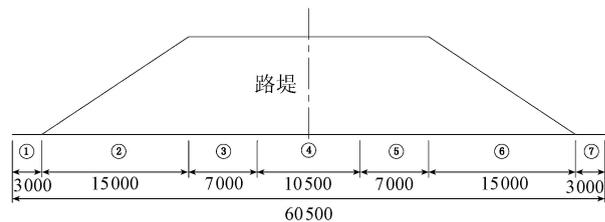


图1 抽检 CFG 桩分布区域(单位:mm)

由表1可以看出,路基右侧 CFG 桩复合地基加固区域、坡脚以外区域以及路基中心区域的缺陷 CFG 桩比例相对较高。多破碎带缺陷 CFG 桩在路基中间、右侧分布较多;破碎带沿桩身主要分布在浅部和中部,少量分布底部;长度为0~1 m的破碎带占绝大部分,约81%,平均长度约0.5 m。长度为1~2 m和大于2 m的破碎带分布相对较少。断桩总体发生较少,但在路基中间、右侧相对较多,且主要分布在桩端以下2.8 m左右。

## 2 稳定性计算

### 2.1 计算模型建立

采用岩土分析软件 Plaxis 对缺陷 CFG 桩复合地基稳定性进行计算。依据表1对 CFG 桩破碎分

布、数量、位置、长度等情况的统计,路基右幅缺陷 CFG 桩比例较高,分布较为复杂,故计算模型路基采用右幅路基。

在对二维复合地基稳定性进行分析时,需要先将 CFG 桩体等效转化为连续墙体<sup>[8]</sup>。由于 CFG 桩布置为梅花形(图2),因此在对 CFG 桩进行墙体转化时,应先根据式(1)计算出面积置换率  $m$ :

$$m = \frac{\pi D^2}{2\sqrt{3}S^2} \quad B = mS \quad (1)$$

式中: $D$ 为桩体直径; $S$ 为桩间距; $B$ 为墙体厚度。将桩体转化为墙体后,墙体间距仍然为  $S$ 。

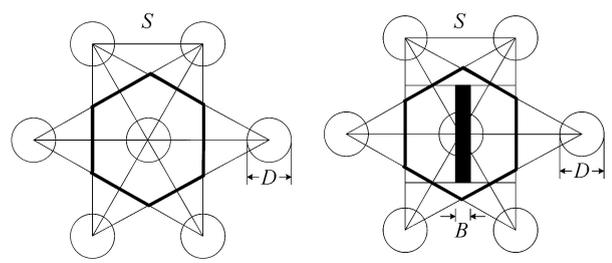


图2 CFG 桩转化为连续墙体示意图

经计算, $m = 15.7\%$ , $S = 1.2$  m,故  $B = 0.189$  m。计算模型宽度取50 m,地基深度取20 m,填土高度取10 m,路基边坡比值1:1.5,路基顶宽度取12.25 m。底部不透水,约束横向和纵向位移;两侧不透水,横向约束,纵向自由。地下水位为地下0.5 m。在地基土体和路基填土之间设30 cm厚的砂性褥垫层,褥垫层顶部和底部均铺设土工格栅,所建立模型见图3。

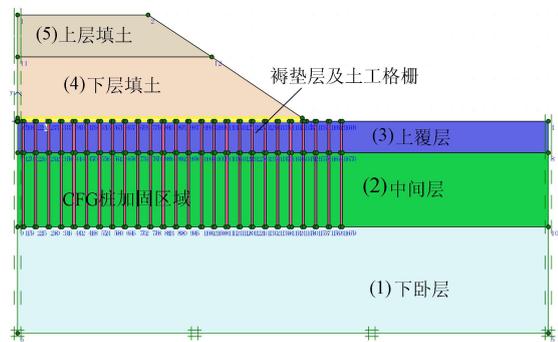


图3 CFG 桩复合地基稳定性计算模型

表1 各区域缺陷桩统计结果

区域	抽检桩/根	缺陷桩/根	多破碎带桩/根	不同破碎部位桩/根			不同破碎带长度桩/根			断桩数/根	断桩深度/m
				浅部(0~2 m)	中部(2~7 m)	底部(7~10 m)	0~1 m	1~2 m	>2 m		
①	8	4	1	4	0	0	5	0	0	1	1.3
②	23	10	5	8	8	2	15	1	2	1	5.0
③	10	5	1	3	2	1	5	1	0	0	
④	23	14	11	14	20	6	33	6	1	7	2.7
⑤	11	6	2	4	3	1	3	5	0	1	0.5
⑥	32	18	9	14	14	3	29	3	0	3	2.9
⑦	7	5	3	4	3	3	6	2	2	0	
合计	114	63	32	51	50	16	96	18	5	13	

## 2.2 计算参数选取

地基土体、路堤填土和褥垫层的物理、力学参数值见表2,桩体及破碎带物理力学参数见表3。

表2 路基填土物理力学参数

土层	厚度/m	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	泊松比	压缩模量/ MPa	$c/kPa$	$\varphi/(\circ)$
(1)	10.0	1.77	0.30	3.440	13.7	14.5
(2)	7.0	1.67	0.33	2.140	7.0	4.8
(3)	3.0	1.56	0.33	1.890	5.0	4.2
(4)	6.0	1.90	0.30	6.475	38.2	17.6
(5)	4.0	1.92	0.30	9.625	40.3	18.7
褥垫层	0.3	2.10	0.25	50.000	10.0	35.0

表3 桩体及破碎带物理力学参数

参数	泊松比	密度 $\rho/$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	压缩模量/ MPa	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	$c/$ kPa	$\varphi/$ ( $\circ$ )
桩体	0.25	230	8000	5333	3200	1250	37
破碎带	0.3	210	40	33	15	10	35

## 2.3 缺陷 CFG 桩设置

在考虑缺陷 CFG 桩体对复合地基稳定性影响时,为尽量反映缺陷 CFG 桩的真实情况,建立数值分析模型时融入了表1的统计结果。在对缺陷 CFG 桩整体布置时,按照在路基底面垂直投影划分的区域,计算各个区域缺陷 CFG 桩体占总桩体的比例,确定缺陷桩体数量,按照完整桩和缺陷桩交叉排列的方式进行布置;将缺陷 CFG 桩体分多破碎带桩体和单破碎带桩体,按各个区域内缺陷 CFG 桩中多破碎带桩体占缺陷桩体比例计算多破碎带桩体数,进而计算单破碎带桩体个数;在考虑破碎带在单桩中的位置和长度时,按统计中浅部破碎、中部破碎和底部破碎比例及统计的破碎带平均长度进行缺陷桩体设置。

## 2.4 计算结果分析

经过有限元计算,该缺陷 CFG 桩复合地基路堤边坡稳定安全系数  $F_s = 1.252$ 。计算得到的位移云图见图4。由图4可以看出,该缺陷 CFG 桩复合地基失稳是深层滑坡,滑裂面穿过了路基土体和⑥区(即路基边坡投影区域中的桩体上端)和⑦区(坡脚以外区域的桩体上端及未加固区)。

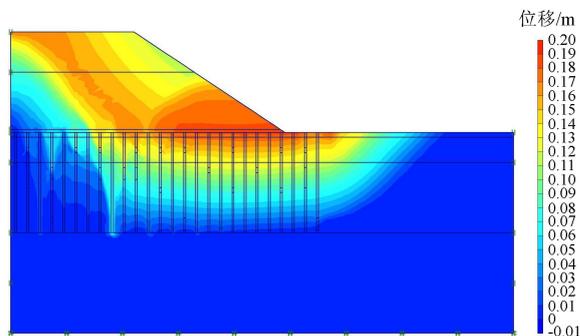


图4 路堤边坡总位移增量云图

JTG D30—2004《公路路基设计规范》要求,路堤和地基整体稳定性计算分析  $F_s > 1.20$ 。GB 50330—2002《建筑边坡工程技术规范》要求,按照边坡安全等级划分,二级边坡(依托工程中的路堤边坡属于二级)的  $F_s > 1.25$ ,并且要求对地质条件复杂、破坏后果严重的安全系数应当适当提高。根据上述规范的要求,本文工程虽然  $F_s = 1.252 > 1.250$ ,但这仅是所有缺陷 CFG 桩分布形式的一种平均情况,且  $F_s$  过于接近容许值。路堤边坡如果仅为  $F_s > 1.2$ ,显然是偏于不安全的,且该段地质条件较差,复合地基中存在相对较高比例的缺陷 CFG 桩,一旦出现大范围的路堤失稳,将造成不良影响。因此,综合考虑存在缺陷 CFG 桩路段的地质条件、计算所得路基边坡安全系数以及破坏后的不良影响,需对全线缺陷 CFG 桩比例高于 50%、边坡  $F_s < 1.25$  的路堤边坡进行加固。

## 3 缺陷桩复合地基加固设计

### 3.1 加固设计原则与思路

根据现场的施工条件、地质以及项目自身的特点,以“安全可靠,经济合理,施工快捷”为设计原则。首先,加固后的安全系数要达到相关规范要求<sup>[9]</sup>;其次,在确保安全的前提下,尽可能降低成本;最后由于施工工期相对紧张,为不影响正常施工工序与工期,在施工工艺、流程的选择上,尽量选择快捷、质量易控制的施工方法。

对于提高路堤边坡稳定性的加固措施,打设抗滑桩是最直接也是有效的加固方法,其原理是通过抗滑桩体穿过潜在滑坡面,增强滑坡面处的抗剪强度,阻碍滑坡体的整体下滑趋势。另外,通过打设抗滑桩产生挤土效应,一定程度上增加土体强度,阻止由于上部土体加载而产生的地基土体侧向位移,从而起到增加路基边坡稳定性的抗滑加固效果。

### 3.2 加固设计

缺陷 CFG 桩复合地基路段的加固设计主要分为抗滑桩选型、抗滑桩布置以及地梁设计三大部分。

**a. 抗滑桩选型。**考虑到依托工程遵循的“重质量、工期短”的要求,综合分析打桩机械以及工地现场条件等客观因素,抗滑桩选用预应力管桩。这是因为一方面预应力管桩的成桩质量高,工程质量有保证;另一方面施工速度快,较采用其他桩型更节省工期。抗滑选用桩管桩规格尺寸(等级 AB)为:管桩直径 400 mm,壁厚 95 mm,桩长 11 m;预应力钢筋直径 9 mm,数量 8 个,分布直径 318 mm,直径 4 mm;螺旋筋 L1 间距 50 mm,长度 1.2 m, L2 间距 100 mm。预应力混凝土管桩外径 400 mm,壁厚 95 mm,容许承

载力 1650 kN, 等级 AB, 有效预应力 4.5 MPa, 抗裂弯矩 104 kN·m, 极限弯矩 63 kN·m。

**b. 抗滑桩布置。** 抗滑桩在确定桩位时应遵循如下原则: 一方面根据原有设计图和实际打桩位置图, 即考虑原 CFG 桩的位置; 另一方面考虑抗滑桩打设在原 CFG 桩梅花形分布的三角型形心的位置。根据上述原则, 抗滑桩最终设计如下: 抗滑桩打设位置在边沟与坡脚线之间、宽为 2 m 的碎落台, 按沿公路里程方向 2 排布置, 排距为 0.5 m。靠近坡脚一排桩简称为内侧桩, 靠近边沟一排桩简称为外侧桩。沿公路断面方向桩距 1.8 m, 内侧桩轴心距坡脚 0.65 m, 外侧桩轴心距坡脚 1.15 m, 距边沟 0.85 m, 平面布置见图 5。

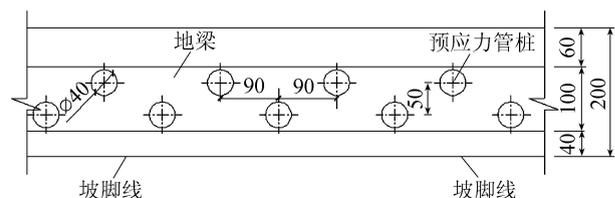


图 5 抗滑桩平面布置(单位:mm)

预应力混凝土管桩设计深度为 12 m, 打入持力层 2~2.5 m, 贯入度每 10 击 20~100 mm 为收锤标准, 实际打设长度可根据收锤时长度确定; 管桩上端与地梁连接, 桩身进入地梁 10 cm, 填芯混凝土与地梁混凝土标号一致, 为 C25, 填芯高度为 1 m; 在桩端板上焊接 12 根直径为 16 mm 的钢筋伸入地梁, 以确保地梁和管桩较好地形成整体, 预应力管桩与地梁连接示意图见图 6。

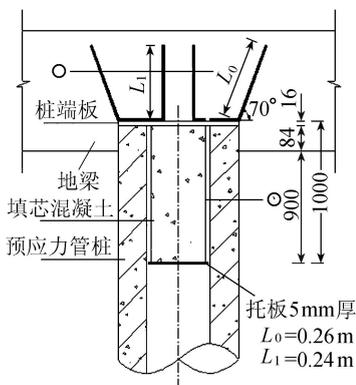


图 6 预应力管桩与地梁连接示意图(尺寸单位:mm)

**c. 地梁设计。** 打设抗滑桩之后, 抗滑桩之间是相互独立的, 整体性较差, 在沉桩位置打设地梁, 可将各个桩形成整体, 起到连续墙体的作用, 使抗滑桩的抗滑效果整体性提高, 从而使边坡的稳定性有所加强。

地梁设计如下: 距坡脚线 0.4 m, 距边沟 0.6 m, 截面尺寸宽度为 1.0 m, 高度为 0.4 m, 长约 95 m; 地梁顶面与地面相平, 底面距离地面 0.4 m。地梁截

面配筋为: 主筋 8 根, 直径 20 mm, 顶面 4 根, 底面 4 根, 顶面 4 根等间距布置, 底面 4 根两侧各布置一根, 中间布置 2 根, 底面部分为 2 个矩形区域, 以便预应力混凝土管桩桩端伸入地梁。地梁采用 C25 混凝土, 保护层厚度为 30 mm。施工中按照地梁施工技术规范要求架立地梁模板, 确保地梁的浇注质量。

## 4 加固后边坡稳定性分析

加固后路堤边坡稳定性的计算模型, 采用图 3 的模型为基本模型, 在其基础上添加抗滑桩。抗滑桩在原有 CFG 桩群中打设, 桩长 12.5 m, 底部进持力层 2.5 m。由于模型是平面的, 同时考虑新增抗滑桩位置, 因此将 2 排抗滑桩简化成 2 根桩, 转换原则与 CFG 桩转换方法一致。经计算取桩间 0.5 m, 桩宽 0.15 m。

加固后的边坡稳定安全系数增加到  $F_s = 1.368$ 。加固后总位移增量云图见图 7。将前后总位移增量云图对比可见, 加固后的总位移显著降低。

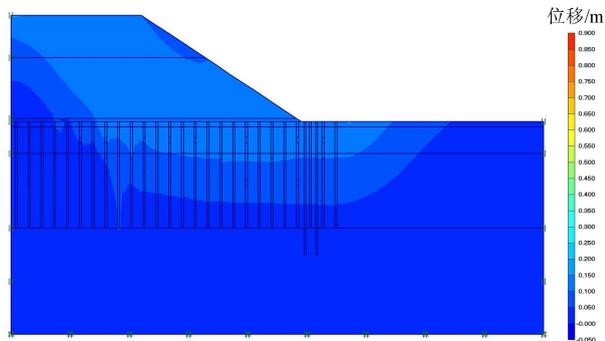


图 7 加固后总位移增量云图

## 5 结论

**a. 缺陷 CFG 桩破碎带沿桩身主要分布在浅部和中部, 破碎带长度绝大部分位于 0~1 m, 平均长度约 0.5 m, 断桩不是缺陷 CFG 桩的主要形式, 其主要发生在桩端以下 2.8 m 左右。**

**b. 基于 Plaxis 分析软件, 将 CFG 桩体等效转化为连续墙体, 并划分横断面区域, 按比例将缺陷 CFG 桩统计结果融入计算模型, 能较准确地获得缺陷 CFG 桩复合地基的稳定安全系数。**

**c. 缺陷 CFG 桩复合地基宜采用在路堤边坡坡脚处打设抗滑桩进行加固的方式, 抗滑桩宜采用预应力混凝土管桩。**

**d. 设计了抗滑桩的选型、抗滑桩的布置以及地梁, 通过加固前后复合地基稳定安全系数的对比, 验证了设计方案的有效性。**

(下转第 55 页)

样性指数、景观均匀度指数、优势度指数等来掌握水域空间异质性的动态变化。景观多样性指数、景观均匀度指数和景观优势度指数的计算公式<sup>[8]</sup>分别为

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = \frac{H}{H_{\max}} = \frac{- \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i}{\ln m} \quad (3)$$

$$D = H_{\max} + \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (4)$$

式中： $P$  为景观类型； $i$  为所占面积的比例； $m$  为景观类型数量； $H_{\max}$  为景观多样性指数的最大可能取值。

## 5 结 语

水域保护和水生态环境建设在人口、资源、环境平衡和经济社会协调发展具有重要意义。做好水域保护和水生态环境建设，涉及余姚市经济、技术等多个方面，以及种群、群落、生态系统、景观生态系统等多个层次。近几年来，余姚市积极开展生态护岸、环保疏浚等工作，应用景观生态学理论开展了水域保护与水生态环境建设的实践与探索，取得了良好的效果。建议今后将水土保持、农村水环境整治等有关工程进行整合，加强生态学过程的观测和分析，

(上接第 46 页)

### 参考文献：

- [1] 何结兵,洪宝宁. CFG 桩复合地基桩土应力比数值分析[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2004,7(1):61-64.
- [2] 陈昌仁,侯新宇,郭洪涛. CFG 桩复合地基承载力经验公式的修正及应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):321-324.
- [3] 安建国. 含有缺陷桩的桩基础竖向承载性状的三维有限元分析[D]. 天津:天津大学,2006.
- [4] 宋祖民. 缺陷桩水平承载性状的数值模拟[D]. 天津:天

(上接第 50 页)

- [8] 徐青,郑汲,程永存,等. 应用纹理分析识别 SAR 海上溢油图像[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(5):569-574.
- [9] 邹亚荣,王华,朱海天,等. 海上溢油 SAR 图像分割算法研究[J]. 海洋环境科学,2009,28(3):313-315.
- [10] SOLBERG A H S, BREKKE C P, HUSOY O. Oil spill detection in radarsat and envisat sar images [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(3):746-755.
- [11] CHAN T, VESE L. Active contours without edge[J]. IEEE Trans Image Proc, 2001, 10:66-277.
- [12] CHENG Yong-cun, LI Xiao-feng, XU Qing, et al. SAR

以进一步利用景观生态学理论指导余姚市的水域保护和水环境建设。

### 参考文献：

- [1] 水行政执法责任制工作手册[M]. 杭州:浙江省水利厅, 2010.
- [2] 董哲仁,孙东亚,王俊娜,等. 河流生态学相关交叉学科进展[J]. 水利水电技术,2009,40(8):36-43.
- [3] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2007.
- [4] 余姚市水域保护规划[R]. 杭州:浙江省水利河口研究院,2009.
- [5] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [6] 陈吉江,严永红,陈起红. 陆埠水库人工湿地生态系统设计及探讨[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(增刊2):249-251.
- [7] 张世瑕,王紫雯,张继明. 流域湿地的景观生态特性分析与景观特征指数的运用:以杭州沿山河流域和西溪湿地为对象[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(6):1054-1060.
- [8] 董哲仁,孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

(收稿日期:2012-09-21 编辑:骆超)

津大学,2006.

- [5] 卓华雄. 浅谈特殊环境中 CFG 桩复合地基的缺陷[J]. 山西建筑,2009,35(30):93-94.
- [6] 刘学峰,李麦玲,李发成. CFG 桩桩体浅部断裂问题的探讨[J]. 陕西建筑,2009(3):38-40.
- [7] 贾志刚,吴雄志,焦利国. 长螺旋 CFG 桩施工质量缺陷及改进措施实例[J]. 山西建筑,2007,33(8):117-118.
- [8] 詹云刚. CFG 桩复合地基加固深厚软基沉降计算研究[D]. 南京:南京工业大学,2005:42-43.
- [9] GB50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S].

(收稿日期:2012-12-05 编辑:胡新宇)

observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(2):350-363.

- [13] 石立坚,赵朝方,刘朋. 基于纹理分析和人工神经网络的 SAR 图像中海面溢油识别方法[J]. 中国海洋大学学报,2010,39(6):1269-1274.
- [14] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005:100-110.
- [15] ESPEDAL H A, WAHL T. Satellite SAR oil spill detection using wind history information[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(1):49-65.

(收稿日期:2013-01-28 编辑:胡新宇)