



# 耦合三维地层模型的复杂高桩结构桩基设计

刘杰, 芦志强, 杨凯

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 针对复杂高桩结构桩基设计的空间问题和传统地质资料的表达不足, 为信息化、可视化管理桩基, 提出了建立桩基信息数据库; 基于工程区域的多源地形、地质数据, 引入三维地层建模技术, 建立了复杂高桩结构的三维地层耦合模型, 并实现桩基和地层的三维重建、碰桩检测、桩位优化、持力层的选取、桩长及轴向承载力计算、桩位自动绘制等可视化辅助设计功能, 极大提高了复杂高桩结构桩基设计的效率与水平。

**关键词:** 复杂高桩结构; 桩基设计; 信息化管理; 三维地层模型; 桩长计算; 碰桩检测

**中图分类号:** TU 473.1; TP 391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2013)06-0055-005

## Pile foundation design of complex pile-supported structure integrated with 3D strata model

LIU Jie, LU Zhi-qiang, YANG Kai

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** To counter the spatial issues of pile foundation design for complex pile-supported structure and lack expression of traditional geological data, we establish the pile information database for digitally and visually managing piles to facilitate design work. By coupling 3D piles model and strata-graphic model, we achieve several visual-aided design functions, such as reconstruction of piles and strata, collision detection and optimization of piles layout, selection of pile bearing stratum, calculation of pile length and axial bearing capacity, and automatic output of piles layout in 2D. The successful application of the technical solutions has improved the efficiency and level of pile foundation design for complex pile-supported structure.

**Key words:** complex pile-supported structure; pile foundation design; information management; 3D strata model; calculation of pile length; pile collision detection

由于受平面布置、外力条件和地质因素等影响, 高桩结构下部桩基时常布置复杂、桩数众多, 在设计中经常存在碰桩及桩位优化困难问题。同时, 因现有工程地质资料局限于二维、静态的表达方式, 数据离散、有限, 无法直观、完整揭露基础地质的空间展布规律, 不能满足复杂高桩结构桩基的快速、高效设计的需求。众多科研、设计单位对其进行了研究: 如基于VRML-Java的虚拟现实技术<sup>[1]</sup>建立高桩码头结构布置虚拟场景; 采用公式法和三维图形法<sup>[2]</sup>对可能相碰的桩基进行验算和优化; 同时, 将三维可视化技术应用于

港口规划、水工建筑物设计和疏浚开挖等方面<sup>[3-5]</sup>。

研究表明, 三维技术解决复杂桩基空间设计是一种趋势, 但研究成果并未涉及桩信息的有效管理以利于复杂桩基设计和优化, 以及如何准确、直观地表达高桩结构下部地形、地质条件, 为桩基设计(如桩长、轴向承载力、桩位二维输出等)提供模型平台。本文提出建立桩基信息数据库, 实现桩基信息化和可视化管理, 引入三维地层建模技术, 重建高桩结构下部地形和地层构造, 建立复杂高桩结构的三维地层耦合模型, 在三维设计平台上实现一系列的可视化辅助设计功能(图1)。

收稿日期: 2013-02-04

作者简介: 刘杰(1980—), 男, 博士, 工程师, 从事港口、航道规划设计工作。

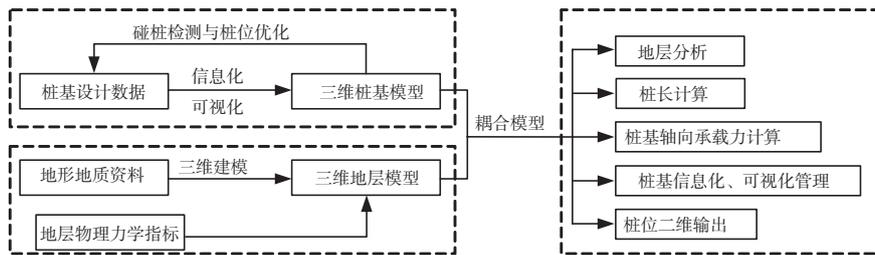


图1 复杂高桩结构桩基设计的技术流程

### 1 桩基信息化及碰桩检测

#### 1.1 桩基信息化

高桩结构设计中，桩基信息主要有几何属性、桩位属性和力学属性。

1) 几何属性：方形截面 ( $Sq$ )，边长  $B$ ，如预制混凝土方桩；圆形截面 ( $Ci$ )，半径  $R$ ，如混凝土灌注桩、钢管桩等。2) 桩位属性：对应于工程设计的习惯，桩位属性含行号、列号、水平扭角 ( $\alpha$ )、斜度 ( $\beta$ )、桩顶坐标 ( $Z_1, X, Y$ ) 和桩底坐标  $Z_2$  等。桩基的几何属性和桩位属性见图 2。3) 力学属性：本文指单桩轴向承载能力，含轴向抗压承载力和抗拔承载力，由桩身入土深度及桩端处理类型确定。

基于桩体的几何、桩位和力学属性，建立了桩基信息数据库，对桩体进行信息化管理，数据库表头如表 1 所示。表中单桩轴向承载力初始值为

空，桩长  $L$  初始值为工程设计中的足够长值，实际桩长和桩底高程需根据桩轴力设计值或桩底进入持力层的深度修正。采用三维可视化技术，通过访问桩基信息数据库，在三维平台中批量重建桩体的空间实体，建立高桩结构的三维桩基模型。

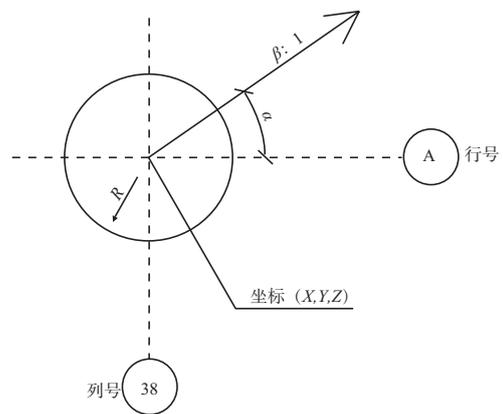


图2 桩体几何属性和桩位属性

表1 桩基信息数据库表头项

行号	列号	截面类型	R或B/m	桩长L/m	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	$Z_1 / m$	X/m	Y/m	$Z_2 / m$	单桩轴向承载力/kN	
											抗压承载力	抗拔承载力
J3	38a	$Sq$	0.6	40	168	4	6.50	333.55	10.25	-31.5		

#### 1.2 复杂高桩结构桩基碰桩检测

《港口工程桩基规范》<sup>[6]</sup>中明确规定了在桩基工程施工前，应结合沉桩允许偏差和富裕距离，校核各桩是否相碰。目前碰桩检测主要采用三维技术模拟桩基的布置，运用不同的空间视角观察基桩的相互位置关系来进行，并运用三维作图法测量基桩之间的距离。这种方法不适用于复杂桩基存在的众多桩互相交叉的情况。

从桩基几何属性分析，两桩之间的最小净距  $e$  可以转化为两桩轴线的最小距离  $L_{min}$ ，见式 (1)，

其中  $R(P)$  为桩基  $P$  截面中心至外轮廓线的最大距离， $e$  依据施工条件、施工机械和施工能力等确定。

$$L_{min} = R(P_i) + R(P_j) + e \quad (1)$$

三维平台中，两桩体之间中心最小距离函数为  $L_{ij} = CurveDeviation(P_i, P_j)$ ，即计算桩体中心线的最小距离。如果  $L_{ij} \geq L_{min}$ ，说明桩基  $P_i$  和  $P_j$  沉桩时在允许偏差内不会发生碰桩，如果  $L_{ij} < L_{min}$ ，说明桩基  $P_i$  和  $P_j$  沉桩时在允许偏差内可能发生碰桩。

基于桩基信息数据库和可视化的三维桩基模型,复杂群桩基的碰桩检测流程如图3所示。该检测覆盖了群桩基中的任意两根桩基,计算程序化和自动化;碰桩结果报表输出,结合三维可视化模型,直观掌握碰桩问题,为优化桩位提供了精确的数据。

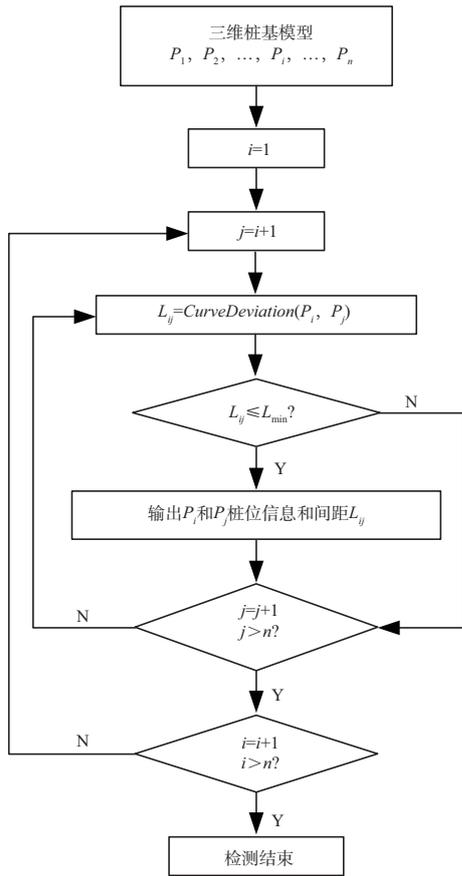


图3 复杂高桩结构桩基碰桩检测流程

某复杂高桩结构通过力学计算后的工程区域布置有69根钢管桩,其中包括11根直桩和58根斜桩,水平扭角各异。在平台相邻部位,桩基空间展布复杂、相互交叉、碰桩严重。通过建立桩位信息数据库及桩体可视化操作,自动检测碰桩,快速优化桩位并实时修正桩基数据库,为桩基调整后的受力复核提供数据,生成的三维桩基模型见图4。

### 2 三维地层建模

高桩结构是利用桩基将作用于上部结构的各种荷载传递到深层地基中,因此基础地层对于桩基设计至关重要。传统的工程地质资料的分析

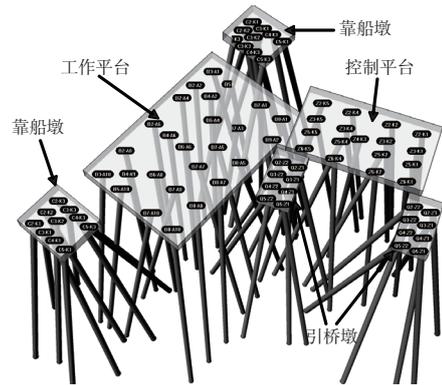


图4 某复杂高桩结构优化后的三维桩基模型

解释一般局限于二维、静态的表达方式,不能充分揭示其空间变化规律。本文引入三维地层建模技术,将离散的、二维的地质数据向空间三维扩展,为桩基设计提供交互式空间分析平台和地质数据。三维地层建模体系结构可分为原始数据处理、地层建模和模型分析应用3个阶段,其总体流程可用图5表示。

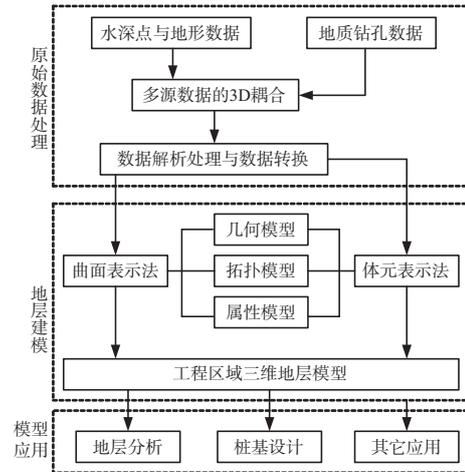


图5 三维地层建模结构体系

#### 1) 原始数据处理。

水深点与地形数据,包含了测图等深线和水深测点等数据,为地层建模提供地形数据。地质钻孔数据,包含了工程地质勘察得到的地质钻孔柱状图和地质专家推断得到的地质剖面图等数据。通过多源数据的3D耦合,保证地质构造空间几何形态表达的准确性和对各种复杂空间对象间关系描述的一致性。如图6所示。

#### 2) 地层建模。

地层建模的核心技术是地层空间对象的三维表示方法。曲面表示法和体元表示法是三维地层

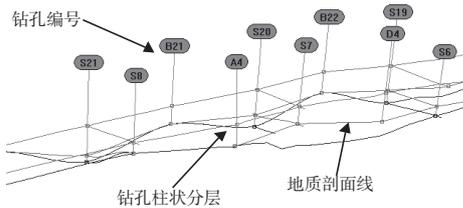


图6 耦合多源数据的地层资料

建模的两个主要方法。通过三维建模，实现了：  
 ①地层对象空间几何形态的表达，即根据地质数据的空间分布及变化特征建立空间地层几何模型。桩基与地质的关系表现为柱体与地层面的关系，因此本文采用曲面来表达地层对象（图7）。  
 ②地层对象空间几何关系的描述，即三维拓扑模型的建立，反映地层对象之间的各种拓扑关系。  
 ③地层对象属性信息的关联，将建立的地层物理学指标属性附加到几何模型中相应的地层对象上，以便进行关于属性参数方面的计算。

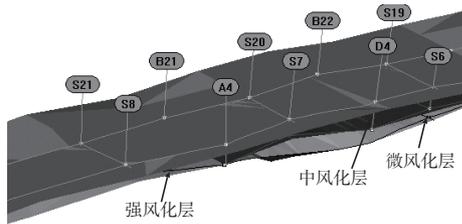


图7 三维地层模型

### 3) 模型应用。

模型应用主要包括地层分析、桩基设计、基槽开挖统计等其他方面的应用。地层分析主要是对地层对象三维可视化，并对建立的三维地层模型作任意剖切分析，并提供地层的展布预测、指导地层勘探布置和地层剖面图二维CAD输出等；桩基设计应用主要是基于建立的桩基与地层空间拓扑关系，为桩基设计提供辅助功能；三维地层模型的扩展应用，将在后续研究中详细论述。

### 3 耦合三维地层模型的桩基设计

在桩轴向承载力计算中，桩身穿过不同土层的长度常作为一个重要的计算参数。一般情况下，工程地质勘察时难以在每根桩下都布置钻孔，因此在没有钻孔布置的地方，桩身穿过某土层的长度通常依据桩身附近钻孔的地层分布数据参考计算求得。但是当钻孔之间的距离较远，地层分布较为复

杂，同一地层在不同钻孔中的高程相差较大时，采用该方法计算所得结果的误差较大。

三维地层模型是基于原始地勘资料和地质工程师合理推断来描述地层构造的空间展布形态和变化规律，在无钻孔区域提供相对可靠的推断数据，并且地层对象还关联了物理力学属性。因此，耦合三维地层模型的复杂高桩结构将提高桩基设计的精度和广度，丰富设计成果。

### 3.1 复杂高桩结构的三维地层耦合模型

耦合三维地层模型和三维桩基模型，充分表达了工程设计中的桩基与基础地层之间的拓扑关系。图8所示为复杂高桩结构的三维地层耦合模型的某个断面， $S_1 \sim S_3$ 分别为覆盖土层、强风化层和中风化层， $P_1 \sim P_3$ 为某排架部分桩基， $D_1 \sim D_3$ 为 $P_1$ 分别在 $S_1 \sim S_3$ 中的长度。

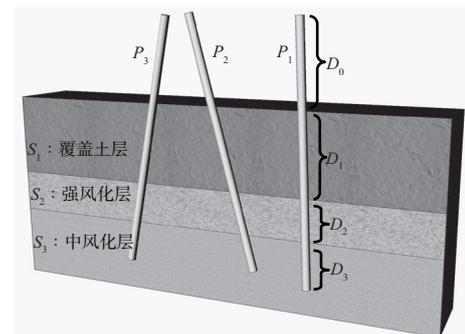


图8 高桩结构的三维层耦合模型

在耦合模型中，桩体 $P_i$ 在土层 $S_j$ 中的长度 $D_{ij}$ 由桩中心线与土层 $S_j$ 的上下顶面的交点计算得到，计算函数见式（2），当桩尖进入持力层后 $D_{ib}$ 由桩基轴力与承载力匹配计算确定（或者由工程经验确定）。

$$D_{ij} = Len\_Soil(P_i, S_j) \quad (2)$$

### 3.2 基于三维地层耦合模型的桩基设计

根据工程设计中桩端处理的不同，可分为端承桩和摩擦桩两种，端承桩如嵌岩桩，摩擦桩如打入砂层中的钢管桩。基于三维地层耦合模型，不同类型的桩基采用不同的设计流程（图9）。

#### 1) 端承桩。

根据工程经验，选择桩尖的持力层 $S_{ib}$ ；桩 $P_i$ 对三维地层模型逐层计算直至持力层 $S_{ib}$ ，桩底进入持力层深度为 $D_{ib}$ ；根据桩 $P_i$ 与持力层顶面的交

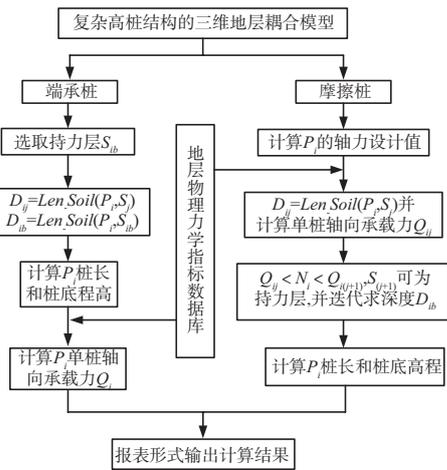


图9 基于三维地层耦合模型的桩基设计

点和深度  $D_{ij}$ , 计算桩底高程和桩长  $L_i$ ; 基于土层关联的物理力学指标和桩端类型, 计算桩基轴向承载能力; 同时, 修正桩基信息数据库中的桩长和桩底高程, 并将设计结果报表输出, 提供给设计人员。

2) 摩擦桩。

在力学模型中计算得到复杂高桩结构各桩基的轴力设计值  $N_i$ ; 桩  $P_i$  对三维地层模型利用式 (3) 逐层计算  $D_{ij}$ , 同时基于土层关联的物理力学指标和桩端类型, 计算桩基轴向承载能力  $Q_{ij}$ ; 当  $Q_{ij} < N_i < Q_{i(j+1)}$  时, 桩尖选在地层  $S_{(j+1)}$ , 进入持力层深度  $D_{ib}$  由迭代求的; 根据桩  $P_i$  与持力层顶面的交点和深度  $D_{ib}$ , 计算桩底高程和桩长  $L_i$ ; 同时, 修正桩基信息数据库中的桩长和桩底高程, 并将设计结果报表输出, 提供给设计人员。

基于修正后的桩基信息数据库和三维桩基模型, 采用平面投影的方法, 自动输出二维桩位

图, 提供给工程设计人员设计成果。

4 结语

针对复杂高桩结构和传统地质表达方式中存在的问题, 通过建立桩基信息数据库, 耦合三维地层模型, 实现了一系列可视化辅助设计功能, 为设计人员实时提供更加可靠、丰富的分析成果。该技术解决方案已经在实际工程中得到实践和应用, 下一步的研究工作主要有: 完善技术思路, 在三维设计平台上, 开发相应的功能模块, 更好地服务于设计工作; 将信息化的设计成果数据库, 与高桩结构中相应的桩基进行关联, 在三维平台上进行实时、交互的查询与修改, 准确、直观地掌握设计成果。

参考文献:

- [1] 胡新根. 基于VRML-Java的高桩码头结构布置虚拟场景的实现[J]. 科技广场, 2006(1): 62-63.
- [2] 徐超. 仪征舜天舫装码头桩基设计及碰桩验算简介[J]. 交通工程建设, 2008(2): 32-36.
- [3] 王庆春. 三维可视化技术在港口规划设计中的应用[J]. 中国港湾建设, 2004(3): 11-13.
- [4] 凌小军. 三维地形建模程序在港航工程挖泥计算中的应用[J]. 水运工程, 2004(10): 19-21.
- [5] 叶建科. AutoCAD三维技术在在港口水工建筑物设计中的应用[J]. 华南港工, 2009(3): 48-53.
- [6] JTS 167-4-2012 港口工程桩基规范[S].

( 本文编辑 武亚庆 )

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。