

# 铁路动荷载作用下刚柔劲性复合桩设计研究

文 / 王晓杰 中铁十四局集团有限公司市政工程分公司

**摘要:**当前,人们对于竖向荷载作用下劲性复合桩的承载特性和变形规律的研究比较重视,而对其在铁路工程循环往复荷载作用下的动力特性关注不足。与现有桩型不同,由于劲性复合桩的构造形式、施工技术等方面的特殊性,使其在荷载作用下产生了特殊的受力与破坏机理。为确保列车高速行驶过程中的安全运营以及结构使用安全,研究铁路桥梁劲性复合桩基础在深厚软弱地基上的动力特性,拓展劲性复合桩在铁路工程中的应用范围,对在各类工程建设中推动劲性复合桩技术的应用,具有非常重要的理论意义。

**关键词:**刚柔组合; 水泥土-土动力; 变形计算

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.057

## 引言

我国沿海地区普遍发育有较深的软黏土地层,许多铁路都必须修建在此类软基上。桥梁深基础的形式有沉井和桩基,在我国,在深厚软土地区修建的桥梁,一般都是以桩基为基础的。随着我国高铁建设的迅猛发展,桥梁在高速作用下的动力响应问题日益受到关注。为控制软弱地层中桩基的侧向变形和保证桩身结构安全,在实际施工中,为了提高桩的整体刚度,一般采取增加桩长和加大直径等措施。静动荷载下桩基础的受力和变形性状是桩-土相互作用的产物,除受桩身自身特征外,还与桩周土属性等因素密切相关,故可从桩周土体加固思想出发,提高桩基础的动力性能。

### 一、整体设计方法

铁路动荷载作用下刚柔劲性复合桩设计主要包括以下几个内容:

①结合接触界面理论和界面动力剪切规律,构建芯桩-水泥土-土接触界面动力模型,并采用动力剪切试验结果对其进行验证与修正,建立劲性复合桩动力特性的理论分析过程中界面接触状态的计算方法。

②通过建立芯桩-水泥土-土动力共同作用有限元分析模型,研究土性参数、动荷载参数对劲性复合桩的动力行为的影响,揭示芯桩、水泥土与土三者之间的关系。

③利用建立的芯桩-水泥土-土动力共同作用的理论分析模型,引入局部应力应变法和能量法与临界面结合法,提出铁路动荷载作用下劲性复合桩疲劳寿命计算方法。

④基于Winkler地基梁理论和应变楔理论,采用修正应变楔模型,建立软黏土地基中的劲性复合桩承载力的简化计算方法,加入黏土、水泥土的刚度衰减模型;建立劲性复合桩水平循环效应简化分析方法。

⑤结合动力共同作用的有限元与理论分析模型,研究土体、桩体等不同因素对劲性复合桩的动力特性,在此基础上分析不同桩径、不同桩距以及不同桩长组合条件下劲性复合群桩在动荷载作用下承载力与沉降的最优配置,进而提出适用于铁路动荷载作用下劲性复合桩设计方法。

## 二、方法研究

### (一) 水泥土-土接触界面动力模型

不同恒定法向应力下的剪应力 $\tau$ -位移 $s$ 曲线的初始

刚度计算方法众多,目前理论体系相对比较成熟。然而,循环法向应力下的剪应力 $\tau$ -位移 $s$ 曲线的初始刚度尚未见任何确定的计算方法。通过接触界面动力剪切模型试验可获取芯桩-水泥土和水泥土-土体接触界面的 $\tau$ - $s$ 关系曲线,同时根据芯桩-土体接触界面动力剪切模型试验可得到相应的 $\tau$ - $s$ 曲线,通过对比分析可揭示水泥土对接触界面动力剪切力学特性的影响。

在库仑摩擦力基础上考虑固化效应对桩侧摩阻力的影响,则劲性复合桩极限摩阻力可表示为

$$\tau_u = c_{inter} + (\sigma_n + \Delta\sigma_n) \tan \delta_{inter}$$

式中:  $\tau_u$ 为极限侧摩阻力;

$\sigma_n$ 为初始法向应力或围压;

$\Delta\sigma_n$ 为法向应力或围压的增量,由固化增强桩侧向有效应力所产生;

$c_{inter}$ 为接触界面黏聚力;

$\delta_{inter}$ 为接触界面摩擦角;

$\tan \delta_{inter}$ 为接触界面摩擦系数。

此外,通过固化接触界面动力剪切模型试验获取的动剪切刚度 $k$ 可与未固化接触界面剪切模型试验得到的剪切刚度 $k_s'$ 建立关系,为考虑固化效应影响的接触界面剪 $\tau$ - $s$ 曲线构建提供基础。由此可建立考虑固化效应影响的 $\tau$ - $s$ 曲线模型,以双曲线函数模型为例(不限于双曲线函数),则可表示为:

$$\tau = s / \left( \frac{1}{k_s} + \frac{s}{\tau_u} \right)$$

通过上式可求得固化后任意法向应力或围压下的摩阻力值,从而揭示固化效应对劲性复合桩增强作用机理,为建立符合劲性复合桩-水泥土-土接触界面动力模型提供理论基础。

### (二) 水泥土-土动力共同作用的有限元分析模型

有限元软件在模拟复杂环境条件下的桩-土体系共同作用具有独特的优势。

利用ABAQUS中的FRIC子程序进行了二次开发,将建立的接触界面动力模型嵌入至ABAQUS软件中实现劲性复合桩的有限元模拟。在ABAQUS的计算中,每个加载步骤都使用一个子程序,将数据传递给子程序(上一次荷载作用下的侧阻力,抗剪刚度和状态变量),通过子

程序的运算，对输入的数据进行校正，并将其反馈给ABAQUS主程序，完成该加载步骤的迭代。

在不考虑两个方向上剪应力的相互影响，FRIC子程序二次开发平台的接触界面的本构关系为：

$$\begin{Bmatrix} \Delta\tau_1 \\ \Delta\tau_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_{s1} & 0 \\ 0 & k_{s2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \end{Bmatrix}$$

式中： $\Delta\tau_1$ ， $\Delta\tau_2$ ， $k_{s1}$ ， $k_{s2}$ ， $\Delta s_1$ ， $\Delta s_2$  分别为两个方向上的剪应力增量、剪切刚度、滑移变形增量。

在劲性复合桩-水泥土-土接触界面动力模型的二次开发子程序中，只需给出 $k_{s1}$ 和 $k_{s2}$ ，并根据滑移变形增量更新接触界面剪应力即可实现，其中 $k_{s1}$ 和 $k_{s2}$ 由固化接触界面动力学模型试验确定。因此，再对桩体、水泥土、土体材料选择合适的ABAQUS软件内置单元体，即可建立考虑弹性阻尼边界条件及结构自身振动特性的劲性复合桩-水泥土-土动力共同作用的有限元分析模型，并通过试验结果对其进行验证。

**(三) 水泥土-土动力共同作用的理论模型分析**

劲性复合桩在施工过程中由于成桩扰动和水泥土的影响，使得桩周土体强度沿径向发生变化，进而形成土体径向不均匀性。将桩周扰动土体沿径向分为两个大区域，一是靠近桩身的近场区，这一地区既受到施工扰动作用，又受到养护加固作用的影响，土特性随着距桩中心的距离不同而不同；二是远场区，在距离桩基较远的地方，既无施工扰动作用，也无加固作用，土性均一。其中，近场区范围由水泥土在土体的渗透扩散、加固范围等因素来判定。将近场区沿径向由内向外划分为m个等厚度圈层，即为靠近桩身径向厚度d的环形区域；远场区为近场区外的均质半无限区域，两个区域分界面处圆的半径为rm，r0是桩的半径，如图1所示。

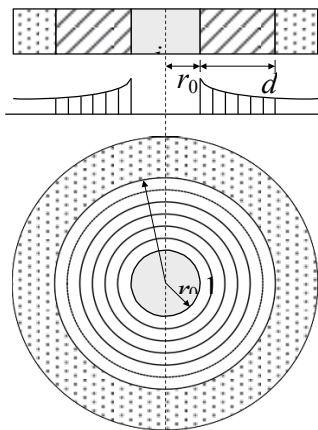


图1 多圈层模型

由于成桩效应和固化效应的影响，近场区土体的抗剪强度随距桩身中心位置的不同而发生变化；可以某种函数形式（如指数函数、二次函数）来表示土体剪切模量随径向的变化，从而用于描述扰动区土体的软化或硬化性质。

由于地基土的控制方程为偏微分方程，直接求解很

困难，因而通过利用积分变换法将地基土的控制偏微分方程转化为常微分方程，采用传递矩阵法并结合单层土体径向扰动区特征对常微分方程进行求解，则可推导出径向非均质单层土体的刚度矩阵。然后，考虑土体纵向成层性将其推广至各土层，结合各土层之间的连续条件将各土层的应力和位移联系起来，从而建立考虑径向非均质性的层状地基理论模型。根据外荷载以及边界等条件对径向非均质层状地基理论模型进行求解，可得到径向非均质地基内不同位置处的位移和应力。由此在径向多圈层递推理论基础上，利用圈层间的连续条件从外至内逐层求解，即可获得扰动区对桩身的剪切刚度。将桩-土体系由桩顶至桩端划分为n个微元层，以第i段微单元为例，可认为扰动区对桩身的作用可简化刚度为 $k_{i1}$ 的弹簧，而水泥土对桩身的作用可简化为 $k_{i2}$ 的弹簧，从而第i段桩体微单元所受的桩侧作用力相当于两个刚度分为 $k_{i1}$ 、 $k_{i2}$ 的弹簧串联，如图2所示。

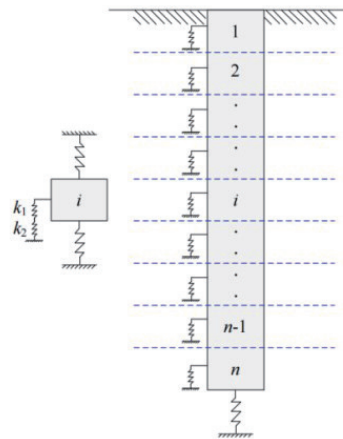


图2 桩体单元计算模型

其中， $k_{i1}$ 可通过刚度传递多圈层理论模型求解得到， $k_{i2}$ 可由接触界面动力剪切模型试验确定。

在上述的研究基础上，进一步采用荷载传递矩阵分析法，并结合径向多圈层模型和相邻微单元桩段交界面上的位移连续和应力平衡条件，即可建立考虑径向非均质层状地基中劲性复合桩-水泥土-土动力共同作用的理论分析模型。

**(四) 水平变形计算方法**

铁路动力荷载作用导致劲性复合桩基周土体强度和刚度弱化，不仅会使劲性复合桩基产生竖向位移，还会使得劲性复合桩基产生水平位移，引起劲性复合桩基产生水平累积变形，降低劲性复合桩基水平承载能力。

应变楔方法以桩前土体的楔形变形为基础，考虑土体之间的连续，以土体的应力-应变关系为基础，研究桩的横向承载特性，从而得到桩身的内力及变形。

针对劲性复合桩基水平变形，基于Winkler地基梁理论和应变楔理论，基于改进的应变楔本构模型，建立能反映土体非线性特性的软土地基中劲性复合桩的水平承载能力的简化计算方法。

在以上研究基础上，基于软黏土刚度衰减概念（见下图3）。

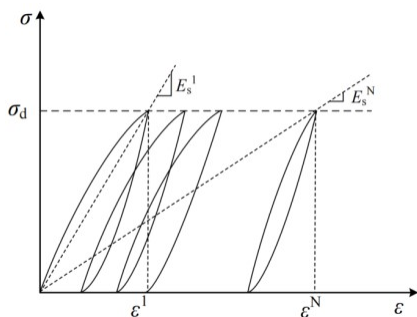


图3 土体弹性模量衰减曲线示意图

引入软黏土刚度衰减模型，在软黏土土体应力-应变关系中实现软黏土土体循环加载刚度弱化效应，构建软黏土土体循环响应机制，根据软黏土力学试验，在边界面本构模型的框架内，引入临界状态面，建立软黏土在循环加载条件下的本构模型，结合修正应变楔模型，建立软黏土地基中劲性复合桩基础水平循环效应简化计算方法。最后，根据单调和循环荷载下劲性复合桩基础承载性状，提出劲性复合桩基础设计建议，为软黏土地基中铁路动力作用下劲性复合桩基础水平变形计算提供设计思路。

### (五) 劲性复合桩设计方法

结合构建的考虑动力分析的弹性阻尼边界条件与结构振动特性的劲性复合桩-水泥土-土动力共同作用的有限元分析模型，采用叠加正弦函数的激励力函数对列车动荷载进行仿真，试验研究了高速铁路车辆荷载作用下，高强混凝土组合桩的动力反应过程，并通过研究土性参数、车速、列车运行线数等因素对劲性复合桩动力特性的影响，从而揭示桩、水泥土与土三者之间的关系，同时为铁路桥梁评估、病害治理提供依据。

在考虑成桩弱化效应和固化增强效应双重作用的劲性复合桩-水泥土-土动力共同作用的理论分析模型基础上，引入局部应力应变法和能量法与临界面结合法，通过对比预测铁路动荷载作用下劲性复合桩疲劳寿命，分析两种计算方法优劣，从而提出一种适用于铁路动荷载作用下劲性复合桩疲劳寿命计算方法。

结合劲性复合桩-水泥土-土动力共同作用的有限元分析模型和理论分析模型，桩的桩径、桩长和间距等参数对桩的动力性能有很大的影响，归纳桩长、桩径、桩间距与变形之间的规律；然后，研究动态荷载下群桩的动态力学行为，分析不同部位桩身动位移、速度、加速度及动应力幅值的变化规律。结合实际工程中常用的劲性组合群桩基础，将承台和群桩视为一空间整体，对其进行了三维有限元分析，开发出一套用于群桩基础的三维模型计算软件，应用该软件对洋吕线实验场中桩基系统进行了动力性能分析。最后，基于Matlab编制相应的计算程序，将设计方法中各参数进行计算并编制相应的设计表格，用以指导铁路工程中动力荷载下劲性复合桩基础的设计与施工。

## 三、工程应用

### (一) 工程概况

洋口港至吕四铁路（简称洋吕铁路）位于江苏省南

通市东北部，途径南通市所辖如东县、通州湾示范区、海门市、启东市，铁路等级为II级，目标行车速度为120 km/h。

洋口运河特大桥 0-2号墩台位于如东县长沙镇北渔村属滨海盐土，存在较厚软土层、液化土层和化学侵蚀成分。

表1 复合桩竖向承载力参数表

土层分布	侧阻力特征值	复合段侧阻力	端阻力特征值
	(kPa)	调整系数	(kPa)
(2) 1 粉质黏土(复合段)	27	1.8	
(2) 3-2 粉砂(复合段, 层底深度<10)	12	2.1	
(2) 3-2 粉砂(复合段, 15>层底深度>10)	12	2.1	
(4) 2-1 粉土(复合段, 15>层底深度>10)	28	1.9	
(4) 2-2 粉砂(复合段, 层底深度<15)	25	2.1	
(4) 2-2 粉砂(复合段, 层底深度>15)	25	2.1	
(4) 2-2 粉砂(管桩段)	24	1	
(5) 2-2 粉砂(管桩段, 层底深度>10)	30	1	
(6) 2 黏土(管桩段)	37	1	
(7) 1 粉砂(管桩段)	38	1	3000

上述墩台桩基采用刚柔劲性复合桩：φ1m水泥搅拌桩（柔桩）+φ0.6mUHC管桩（刚桩）；水泥搅拌桩桩长16m，桩数量20根；UHC管桩桩长30m，桩数量6根。

### (二) 计算结果

通过计算此墩台刚柔劲性复合桩模型，桩基水平、竖向承载力、竖向沉降及水平刚度均满足要求。

### 结论

劲性复合桩是将预制管桩嵌入水泥土桩中，经最佳配合而形成的一种新的桩型。该组合桩采用大直径、低成本的水泥土桩，对预制管桩周土体进行了加固处理，形成了荷载由混凝土芯桩传递到桩周水泥土再传递到桩周土体的双层传递模式，使预制管桩的受力性能得到很大改善。劲性复合桩充分发挥了预制混凝土管桩和水泥土桩的技术优势，经工程实践证明，该桩是一种既经济又高效，施工简便的新型桩基形式。

劲性复合桩在铁路中应用尚属先例，需要进一步试验验证施工可行性。

### 参考文献

- [1] 廖宏兵. 劲性复合桩研究进展分析[J]. 工程技术研究, 2022, 7(20): 101-103.
- [2] 钱于军, 许智伟, 邓亚光, 等. 劲性复合桩的工程应用与试验分析[J]. 岩土工程学报, 2013(S2): 4.
- [3] 吴静. 劲性复合桩在高层基础设计中的应用分析[J]. 江苏建筑, 2021(3): 3.
- [4] 王辉. 劲性复合桩在深厚软土地区工程中的运用[J]. 山西建筑, 2017, 43(14): 2.
- [5] 姚月亮. 浅析SM劲性复合桩在冲填土地基处理中的应用[J]. 中国勘察设计, 2016(10): 4.
- [6] 李怡秋. 劲性复合桩竖向承载力有限元模拟与分析[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(3): 3.
- [7] 顾建. 双排劲性复合桩连体支护结构及受力分析方法: 202310969211[P][2024-02-19].
- [8] 洪波. 劲性搅拌桩在复合地基中应用效果的评价和研究[D]. 中国地质大学(北京)[2024-02-19]
- [9] 杨天龙. MC劲性复合桩与钻孔灌注桩在某工程项目中应用对比分析[J]. 交通科技与管理, 2022(009): 000.