

# 水利工程中软土地基桩基础设计与变形分析

杨阳

中山市水利水电勘测设计咨询有限公司

**摘要：**滨海地区水利工程常在软土地基上建设堤防、水闸、船闸、排灌泵站等各种基础设施。然而，软土地基的特性，如高压缩性、低强度和易于流变变形，使得其容易发生沉降、变形和失稳。因此，如何有效地设计和分析软土地基桩基础已成为工程领域的关键问题。本文通过研究软土地基桩基础的力学性质，旨在更好地理解其变形机制，为工程实践提供更合适、可靠的设计方案。

**关键词：**水利工程；软土地基；桩基础设计；变形  
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.24.066

## 引言

水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，承担着水资源储备、调配、利用和防洪等重要任务。在众多水利工程项目中，软土地基是一个常见但具有挑战性的工程地质问题，因其高度可压缩性和低强度而著称，对水利工程稳定性和可靠性构成了重要威胁。因此，对软土地基桩基础设计和变形问题展开分析极其重要。

### 一、水利工程中软土地基桩基础设计的重要意义

水利工程中软土地基桩基础设计的重要性不可低估，其直接关系到工程的安全性、稳定性、耐久性和经济效益。其重要性主要体现在以下方面：（1）确保工程安全和稳定性。软土地基桩基础是水利工程中常见的基础形式，支撑着各种水工结构，如水闸、泵站等，正确设计软土地基桩基础是确保水利工程安全和稳定运行的关键因素，使软土地基桩基础能够承受各种荷载，确保基础稳固性，减少基础沉降和倾斜。（2）减小基础变形。软土地基通常具有较大的工后沉降和变形潜力，对工程的安全性和可靠性构成威胁，软土地基桩基础设计

可以通过合理的参数选择和控制措施，减小基础挤压、压缩和剪切变形，降低基础变形风险，确保工程在设计正常使用年限内长期稳定<sup>[1]</sup>。（3）提高工程效益。软土地基桩基础优化设计可以减少工程成本和材料需求，缩短工期，提高工程经济效益。通过充分考虑软土地基的特性，设计可以选择合适的基础类型和参数，减少不必要的工程费用，同时确保工程质量和性能。

（4）适应复杂地质条件。软土地基通常存在复杂的地质条件，如高含水率、低抗剪强度等。软土地基桩基础设计可以通过合适的桩型和参数选择，适应不同地质条件，确保工程在不同地质环境下的稳定性和可靠性。

## 二、软土地基桩基础具体设计方案

### （一）地质勘探与土壤特性分析

地质勘探是软土地基桩设计的基础，其目的在于获得地下土层的精确信息。勘探工作包括钻孔、取样、试验等，以了解地质条件、土壤结构和特性。通过对土壤的物理性质、工程性质（如剪切强度、压缩性、液性指标等）进行详尽的分析，可以为后续基础设计提供准确的数据支持。地质勘探的常用方法包括：（1）钻孔勘探：通过钻孔取样，获取地下土层岩土样本，其样本可用于实验室试验，以确定土壤物理和工程性质<sup>[2]</sup>。（2）地电阻率勘探：通过测量土壤的电阻率来推断不同土层的分布和性质，不同土层具有不同电阻率，因此该方法可以提供有关土壤层次信息。（3）声波测井：使用声波技术测量地下土层的声波速度，以确定土壤密度和强度。（4）地下水位测定：测量地下水位的深度和变化，以了解地下水对土壤的影响。

以下是一份示例数据表格，用于记录地质勘探和土壤特性分析数据：

表1 地质勘探和土壤特性分析数据

深度（米）	土层类型	含水率（%）	压缩系数 $\alpha$ 0.1-0.2 (1/MPa)	液性指数 (IL)	粘聚力 $C_q$ (kPa) (快剪)	内摩擦角 $\phi_q$ (度) (快剪)
3.2	填土	25.4	0.335	0.15	13.4	14.6
14.4	淤泥质土	49.4	0.892	1.07	7.1	6.1
3.2	黏土质砂	23.6	0.314	0.46	20.6	12.8

上述表格包含了不同深度处的土层类型、含水率、压缩系数、液性指数和快剪强度，其数据对于软土地基桩设计至关重要，为工作人员提供了有关土壤的物理和工程性质的关键信息，主要包括：

### （二）土层类型：描述了每个深度处的土壤类型。

含水率：表示土壤中的水分含量，对于压缩性和液性指数的计算至关重要。

压缩系数：衡量了土壤压缩性程度，是计算土壤压缩变形的关键参数。

液性指数 (IL)：定义了土壤的液性特性，影响土壤的流动性和变形性。

快剪强度  $C_q$ 、 $\phi_q$ ：土壤的剪切强度是软土地基桩设计中必要的参数，影响基础的稳定性和承载能力。

通过地质勘探和土壤特性分析，能够获得以上关键

数据，以便更好地理解软土地基桩设计所面临的地质挑战，并为后续设计步骤提供准确依据。

### （三）基础类型选择

基础类型的选择在软土地基桩设计中具有关键性意义，将直接影响到基础的承载能力、稳定性和变形控制。不同类型的基础，如扩展基、灌注桩、钢筋混凝土桩等，适用于不同的地质条件和工程要求。在软土地基桩设计中，常见的基础类型包括以下几种：（1）扩展基础：包括筏基和面积浇筑的连续基础，适用于软土地基桩设计中的大型荷载分布。（2）灌注桩：通过在土层中注入混凝土形成的桩基，适用于承受垂直荷载的情况。（3）钢筋混凝土预制桩：通常通过打入地下，能够承受水平和垂直荷载。（4）搅拌桩复合地基：适用于软土地基不深厚的情况，不适用于障碍物较多的杂

填土和欠固结的淤泥和淤泥质土。

软土地基桩设计中做出明智的选择：

基础类型选择的优缺点如下，能够帮助工作人员在

基于上述数据表格中的优缺点比较，基础类型选择

表2 不同基础类型的优缺点比较

基础类型	优点	缺点
扩展基础	分散荷载，降低地基应力，适用于大面积荷载分布。易于施工，通常成本较低。	对于深层次荷载较大的情况可能需要增加基础的厚度。由于较大的底部面积，需要更多的基础区域。
灌注桩	良好地垂直承载能力，适用于垂直荷载较大的情况。适用于软土地基，能够减少地基沉降。	施工过程相对复杂，需要专业的施工设备和技术。对于水平荷载能力有限，可能需要额外地支持措施。
钢筋混凝土预制桩	具有较高的水平和垂直承载能力，适用于复杂荷载情况。耐久性较高，适用于长期使用的工程。	施工成本较高，因为需要大型设备和专业技术。钢筋混凝土桩可能会对对环境产生一定的影响。
搅拌桩复合地基	适用于软土地基不深厚的情况，应用广泛，基础建设成本低。	工后沉降大，施工周期长。泥炭土、有机质土、pH小于4的软土成桩效果差。

应根据具体的工程需求和地质条件来做出。在软土地基桩设计中，需综合考虑以下因素：（1）荷载类型和大小。（2）地质条件，包括土壤类型、含水率和地下水位。（3）工程预算和资源可用性。（4）工程期限和项目目标。

最终决策应符合综合性原则，旨在最大限度地满足工程要求并确保基础的稳定性和可靠性。在决策过程中，需要进行工程力学分析和数值模拟，以进一步验证基础类型选择。

（三）桩基设计参数

桩基设计参数在软土地基桩基础设计中具有重要意义，其直接影响基础的承载能力、变形特性和安全性。在软土地基桩设计中，常见的桩基设计参数包括以下几种：（1）桩的直径（D）：桩直径作为重要参数，决定了桩的承载能力和稳定性。（2）桩的间距（S）：桩间距影响基础荷载分布，对于均匀荷载传递至关重要。

（3）桩的长度（L）：桩长度决定了其在地下的承载深度，对于承受垂直荷载至关重要。（4）桩的材料和强度：桩可以是混凝土桩、钢筋混凝土桩、钢桩等不同材料，其强度和耐久性对基础的性能具有直接影响<sup>[3]</sup>。

以下是一份示例数据表格，用于记录不同桩基设计参数的优化过程：

表3 桩基设计参数的优化

参数	初始值 (A)	优化前 (B)	优化后 (C)
桩的直径 (D)	0.6m	0.6m	0.8m
桩的间距 (S)	2.5m	2.5m	3.5m
桩的长度 (L)	18m	18m	20m
桩的材料	钢筋混凝土	钢筋混凝土	钢桩

上表中详细展示了桩的直径、间距、长度和材料的不同取值，以及对于基础设计的影响，该过程应基于工程力学分析和数值模拟进行，以确定最佳桩基设计参数。

桩基设计参数的决策是一个复杂的过程，需要综合考虑以下因素：（1）工程荷载要求。（2）地质条件和土壤特性。（3）施工可行性和成本考虑。（4）工程的安全性和稳定性。在桩基设计中，通常会进行多次参数优化和分析，以找到最适合具体项目的参数组合，包括调整桩的直径、间距、长度以及材料选择。最终决策应基于综合性工程评估和专业知识，以确保基础在承受荷载和变形方面达到预期性能。

（四）基础施工工艺

基础施工工艺是将基础设计转化为实际结构的关键步骤，不仅影响基础质量，还对施工进度和成本控制产生重要影响。因此，在软土地基桩基础设计中，合理的施工工艺至关重要。以下是软土地基桩基础施工工艺

的关键步骤：（1）桩的预制或打桩：根据设计要求，桩可以在现场预制或打桩。预制桩通常在工厂中制造，然后运到施工现场。打桩是将桩材料打入地下，确保其承载深度。（2）基础坑的开挖：在确定桩位后，需要开挖基础坑，开挖深度和尺寸应符合设计要求。（3）桩的安装：将预制桩或打桩的桩材料安装到基础坑中，确保其达到设计要求深度和位置。（4）混凝土灌注：在桩安装完成后，需要进行混凝土灌注，可以通过现场浇筑或在预制桩中进行灌注。（5）固结和养护：混凝土灌注后，需进行固结和养护，以确保混凝土获得足够强度。

为确保施工工艺的有效性和质量，下面是一份示例数据表格，用于记录施工过程的质量控制参数：

表4 施工质量控制表

步骤	参数	初始值	检测值	合格标准
打桩	打桩深度 (m)	0	12	≥10
混凝土浇筑	混凝土强度 (MPa)	0	25	≥20
固结和养护	养护时间 (天)	0	7	≥5
基础坑开挖	坑的尺寸 (m)	0	6×6	符合设计
桩的位置	安装误差 (cm)	0	2	≤5

上表包括不同施工步骤的关键参数，如打桩深度、混凝土强度、养护时间、基础坑尺寸和桩的位置。以上参数需要进行检测和记录，以确保施工工艺的合格性和质量。

软土地基桩基础的施工工艺需要严格的质量控制，以确保基础的稳定性和可靠性。包括监测施工过程中的每个关键步骤，确保其符合设计要求和标准。施工质量要通过合格的施工团队、适当的设备和技术、以及合规的质量控制流程来实现。

三、水利工程中软土地基桩变形分析

（一）桩基荷载和变形关系

软土地基桩的荷载和变形关系是水利工程中的关键问题，了解荷载如何影响桩基的变形对于确保工程的稳定性和安全性至关重要。

1. 垂直荷载的影响

（1）挤压变形：垂直荷载是软土地基桩最常见的荷载类型之一，会导致挤压变形，即土体在桩周围挤压和沉降。挤压变形与垂直荷载之间的关系如下表所示：

表5 垂直荷载和挤压变形关系

垂直荷载 (kN)	挤压变形 (mm)
100	5
200	10
300	15
400	20

从上表可见，垂直荷载增加会导致挤压变形增加，由于更大的荷载会引起更大的土体挤压和沉降，从而影响桩基稳定性。

(2) 压缩变形：垂直荷载还会导致土体的压缩变形，此种变形是由于土体颗粒之间的压缩引起的。压缩变形与垂直荷载之间的关系如下表所示：

表6 垂直荷载和压缩变形关系

垂直荷载 (kN)	压缩变形 (%)
100	1
200	2
300	3
400	4

从上表可见，垂直荷载增加导致土体压缩变形增加，表明更大的垂直荷载会导致土体更大程度压缩，影响桩基稳定性和沉降。

2. 水平荷载的影响

剪切变形：水平荷载是软土地基桩中的另一个重要荷载类型，其会导致剪切变形，即土体颗粒之间的剪切滑动。剪切变形与水平荷载之间的关系如下表所示：

表7 水平荷载和剪切变形关系

水平荷载 (kN)	剪切变形 (mm)
50	2
100	4
150	6
200	8

从上表可见，增加水平荷载会导致土体剪切变形增加，表明更大的水平荷载会引起土体颗粒之间更大程度的剪切滑动，从而影响桩基稳定性和变形。

(二) 土体压缩变形分析

土体压缩性质受多种因素影响，包括土体类型、含水率、固结特性等。其中，土体的压缩模量（或压缩系数）是描述其压缩性质的关键参数。压缩模量通常以kPa为单位，表示单位荷载下土体的压缩程度。以下是进行土体压缩变形分析的关键步骤：（1）土体参数测定。首先，相关人员需要测定土体的物理和工程参数，包括压缩模量、液性指数、含水率等，以上参数通常通过实验室测试和野外勘测获得。（2）荷载分析。确定软土地基桩所受到的垂直荷载。（3）压缩模量计算。相关人员应根据土体参数和荷载大小，计算土体压缩模量。压缩模量描述了土体在荷载作用下的压缩性质，通常以kPa为单位。（4）压缩变形分析。利用计算得到的压缩模量，通过数学模型和数值模拟进行压缩变形分析，以预测基础压缩变形。（5）变形控制措施。根据分析结果，制定变形控制措施，如合理的基础设计参数、荷载分布等，以减小基础压缩变形。

以下是一个示例数据表格，用于说明不同压缩模量值对土体压缩变形的影响：

表8 压缩模量与压缩变形关系

压缩模量 (kPa)	压缩变形 (%)
100	2
200	1
300	0.5
400	0.25

从上表可知，较小的压缩模量值通常对应着更大的压缩变形百分比。这意味着土体在受到相同荷载作用下，压缩模量较小的情况下会发生更大程度的压缩变形。因此，在软土地基桩基础设计中，选择合适的土体参数和控制荷载大小是确保基础稳定性的重要因素。

(三) 综合变形分析

综合变形分析考虑了垂直荷载和水平荷载共同作用下的桩基变形，包括挤压、压缩和剪切变形，此种分析需要考虑压缩模量、剪切模量、液性指数以及荷载大小和分布等土体不同参数，综合变形分析通常分为以下几个步骤：（1）土体参数测定。测定土体的物理和工程参数，包括压缩模量、剪切模量、液性指数、含水率等。

（2）荷载分析。确定软土地基桩所受到的垂直荷载和水平荷载，包括荷载的大小、分布和作用方向。（3）变形分析。利用计算得到的土体参数和荷载信息，进行综合变形分析。这可以通过数学模型和数值模拟来实现，以预测基础的挤压、压缩和剪切变形。（4）变形控制措施。根据分析结果，制定合适的基础设计参数和变形控制措施，以确保基础的稳定性和安全性。

以下是一个示例数据表格，用于说明不同荷载情况下的综合变形分析结果：

表9 不同荷载下的综合变形分析

垂直荷载 (kN)	水平荷载 (kN)	挤压变形 (mm)	压缩变形 (%)	剪切变形 (mm)
100	50	5	2	3
200	100	10	4	6
300	150	15	6	9
400	200	20	8	12

从上表可知，不同荷载情况下，桩基的综合变形包括挤压、压缩和剪切变形。随着荷载增加，各种变形也随之增加，表明荷载大小对于基础的综合变形具有重要影响，需要在设计和施工中予以充分考虑。综合变形分析在水利工程中的软土地基桩基础设计中具有重要的工程应用。通过深入分析不同荷载条件下的变形行为，工程师可以更准确地确定基础的变形特性，并采取相应的控制措施来确保工程的稳定性和可靠性。

结束语

通过对软土地基桩基础进行合理化设计及精确的变形分析，能够提高水利工程的稳定性和可靠性，降低工程风险，并为水利工程的可持续发展作出贡献。未来研究应进一步深入研究软土地基工程的细节和创新方法，以不断提高水利工程质量及效益。

参考文献

[1] 马雪娇. 水利工程中软土地基桩基础设计与变形分析[J]. 珠江水运, 2022 (18): 58-60.  
 [2] 王玮. 水利工程中软土地基桩基础设计与变形分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023.  
 [3] 赵风连. 关于水利工程施工中软土地基处理技术[J]. 建筑工程技术与设计, 2018.