

# 软土地基处理技术在高速公路施工中的应用研究

文 / 郑伟杰 中铁十一局集团第二工程有限公司

**摘要:** 在高速公路的施工过程中,软土地基的处理是确保工程质量和安全的关键环节。软土地基因其承载力低、压缩性高、透水性差等特点,往往给施工带来诸多挑战。若处理不当,不仅会影响高速公路的稳定性、耐久性和安全性,还会增加后期的维护成本。因此,深入研究并应用有效的软土地基处理技术,对于提升高速公路工程的整体质量、延长使用寿命、降低施工成本具有重要意义。本文旨在探讨软土地基处理技术在高速公路施工中的应用,以期对相关工程实践提供参考。

**关键词:** 软土地基处理技术; 高速公路施工; 应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.068

## 引言

软土地基处理技术在高速公路施工中占据重要地位。软土地基具有含水量高、强度低、易变形等特点,若处理不当将直接影响高速公路的路基稳定性和行车安全。因此,研究软土地基处理技术,确保其合理应用,对于提高高速公路建设质量具有重要意义。

### 一、软土地基主要处理技术分类及其原理

#### (一) 浅层处理技术

浅层处理技术主要针对软土层较浅、厚度不大的地基进行处理,通过改善地基表层的物理力学性质,提高地基的承载力和稳定性。

(1) 表层压实技术: 该技术通过机械碾压或振动压实等方法,对地基表层进行密实处理,减小土体的孔隙比,提高土体的密实度和强度。表层压实技术施工简单,成本较低,适用于软土层较薄且分布均匀的地基。

(2) 换土垫层技术: 该技术是将地基表层一定厚度的软土挖除,然后回填强度较高、压缩性较低的砂、碎石、灰土等材料,形成垫层。换土垫层技术能够显著改善地基的承载力和稳定性,减少沉降量。

#### (二) 深层处理技术

深层处理技术主要针对软土层较厚、分布范围较广的地基进行处理,通过改善地基深层的物理力学性质,提高地基的整体承载力和稳定性。

(1) 袋装砂井技术: 该技术是在地基中设置一系列由砂袋组成的竖向排水通道,通过砂袋的透水性,加速地基中水分的排出,促进地基的固结和沉降。袋装砂井技术施工方便,成本适中,适用于透水性较差、固结时间较长的软土地基。然而,该技术对地基的排水条件有一定要求,需确保砂袋能够顺利排水。

(2) 挤密砂桩技术: 该技术是通过振动、冲击或锤击等方法,在地基中成孔并填入砂料,形成密实的砂桩。砂桩与周围土体形成复合地基,提高地基的承载力和稳定性。挤密砂桩技术适用于软土层较厚、含水量较高的地基。然而,该技术施工难度较大,成本较高,且对地基的扰动较大。

(3) 水泥搅拌桩技术: 该技术是通过特制的搅拌机械,在地基中边喷水泥浆边搅拌土体,使水泥浆与土

体充分混合并发生化学反应,形成具有一定强度和刚度的水泥土桩。水泥搅拌桩技术能够显著改善地基的物理力学性质,提高地基的承载力和稳定性。同时,该技术施工速度快,对地基的扰动较小,适用于各种类型的软土地基。

#### (三) 复合地基技术

复合地基技术是将两种或多种地基处理技术相结合,形成具有更高承载力和稳定性的地基处理方法。

(1) 刚性桩复合地基: 该技术是在地基中设置刚性桩(如混凝土桩、钢管桩等),通过刚性桩与周围土体的共同作用,提高地基的承载力和稳定性。刚性桩复合地基具有承载力高、沉降量小等优点,适用于对地基承载力要求较高的工程。

(2) 柔性桩复合地基: 该技术是在地基中设置柔性桩(如水泥土桩、碎石桩等),通过柔性桩与周围土体的共同作用,提高地基的承载力和稳定性。柔性桩复合地基施工方便,成本较低,适用于一般工程。

## 二、软土地基处理技术在高速公路施工中的具体应用

### (一) 浅层软土地基处理技术

#### 1. 表层压实技术的实施步骤与注意事项

##### (1) 实施步骤:

①现场勘察与评估: 首先,需要对施工区域进行详细的现场勘察,了解软土层的分布范围、厚度、含水量、压缩性等基本性质,评估其对高速公路施工的影响程度。②设备选择与准备: 根据现场勘察结果,选择合适的压实设备,如压路机、振动碾等,并检查设备的工作状态,确保其处于良好状态,能够满足施工要求。③清理与整平: 在施工前,需要清理施工区域内的杂物、植被等,并对地基表面进行整平处理,确保压实作业能够顺利进行。④分层压实: 根据设计要求和地基实际情况,将地基表层划分为若干层,逐层进行压实。在压实过程中,应控制压实的速度和遍数,确保每层土体的密实度达到设计要求。⑤质量检测: 压实完成后,需要进行质量检测,包括压实度检测、沉降观测等,以评估压实效果是否满足设计要求。

##### (2) 注意事项: ①控制含水量: 软土的含水量对

压实效果有很大影响。在压实前，应采取措施降低土体的含水量，如排水、晾晒等，以提高压实效果。②选择合适的压实设备：不同的压实设备对土体的压实效果不同。在选择压实设备时，应根据地基的实际情况和工程要求，选择适合的压实设备。③控制压实速度：压实速度过快或过慢都会影响压实效果。在压实过程中，应控制压实的速度，确保每层土体的压实均匀、密实。④注意环境保护：在压实过程中，应注意环境保护，避免对周围环境造成污染或破坏。

## 2. 换土垫层技术的材料选择与施工方法

(1) 材料选择：换土垫层技术的关键在于选择合适的垫层材料。垫层材料应满足以下要求：①强度高：垫层材料应具有足够的强度，以承受上部荷载，防止地基发生沉降。②透水性好：垫层材料应具有良好的透水性，以便及时排出地基中的水分，促进地基的固结。③压缩性低：垫层材料应具有较低的压缩性，以减少地基的沉降量。



图1 换土垫层技术

(2) 施工方法：①清理与整平：在施工前，需要清理施工区域内的杂物、植被等，并对地基表面进行整平处理，确保垫层施工能够顺利进行。②铺设垫层：根据设计要求和地基实际情况，选择合适的垫层材料，并按照一定的厚度和宽度铺设垫层。在铺设过程中，应控制垫层的厚度和均匀性，确保垫层的质量。③压实垫层：垫层铺设完成后，需要进行压实处理。压实方法可采用机械碾压、振动压实等方法，确保垫层的密实度和稳定性。

## (二) 深层软土地基处理技术

### 1. 袋装砂井法的施工工艺与质量控制

(1) 施工工艺：袋装砂井法是一种通过在软土地基中设置由透水型土工织物制成的长条形砂袋，以加速软土排水固结的地基处理方法。其施工工艺主要包括以下几个步骤：①测量放线：根据设计图纸，准确测量并放出每个砂井的位置，确保砂井的平面位置准确无误。②机具就位：将施工机械（如振动打设机械）移至预定位置，并调整至稳定状态，确保施工过程中的垂直度和精度。③沉入导管：利用振动或静压法将导管沉入至设计深度，过程中需控制锤击频率和沉管速度，防止超深或倾斜。④下砂袋：将灌满砂子的袋装砂井缓慢下放至导管内，直至达到设计深度。在下放过程中，需保持砂袋的完整性和连续性。⑤灌水、拔导管：为了顺利拔管而不带出砂袋，需在拔管前向管内灌水。拔管时，应启

动微振器并缓慢提升导管，直至完全拔出。⑥处理井口和砂袋头：清除井口泥土，将高出井口的砂袋割除并重新扎牢袋口。同时，将露出地面的砂袋埋入砂垫层中，以保护砂袋不受破坏。

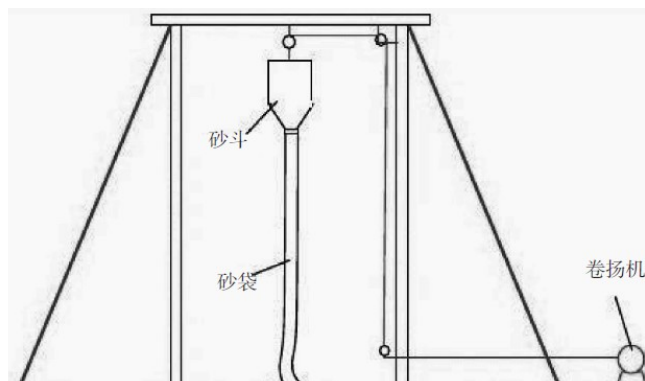


图2 袋装砂井堆载预压平面布置图

(2) 质量控制：①原材料控制：严格控制砂垫层及砂袋用砂的质量，确保其满足设计要求和施工规范。砂袋应选用渗水率高、抗拉强度好的材料制成。②施工精度控制：确保砂井的平面位置和垂直度符合设计要求。在施工过程中，需定期检查和校正施工机械的垂直度和精度。③灌砂率控制：采用灌砂架灌砂，确保砂袋在施工各阶段都处于饱满状态。④排水效果监测：在施工过程中和施工完成后，需对排水效果进行监测和评估。通过观测地基沉降量、孔隙水压力等参数的变化情况，判断排水固结的效果是否满足设计要求。

### 2. 挤密砂桩法的加固机理与适用范围

(1) 加固机理：挤密砂桩法是通过在软土地基中打入砂桩，利用沉桩过程中对周围土层的挤密作用来提高地基承载力的方法。其加固机理主要包括以下几个方面：①挤密作用：沉桩过程中，砂桩对周围土层产生挤密作用，使土颗粒重新排列并变得更加紧密，从而提高地基的密实度和承载力。②排水固结：砂桩作为竖向排水通道，能够加速地基中孔隙水的排出和固结过程，进一步提高地基的强度和稳定性。③置换作用：砂桩本身具有较高的强度和刚度，能够部分置换软土并承担上部荷载，从而减轻软土的负担并提高地基的整体承载力。

(2) 适用范围：挤密砂桩法适用于处理各种软弱地基，包括砂性土、黏性土、有机质土等。其适用范围广泛且加固效果显著，尤其适用于厚度较大的软弱地基处理。

### 3. 水泥搅拌桩法的施工要点与优势分析

(1) 施工要点：①桩位确定与孔口清理：在施工前需准确确定桩位并清理孔口周围的杂物和淤泥等。②制备水泥浆：根据设计要求和现场实际情况配制合适的水泥浆料，确保其满足施工要求。③搅拌下沉与提升：将搅拌头下沉至设计深度并开始搅拌。在搅拌过程中需控制搅拌速度和下沉深度等参数以确保搅拌质量。搅拌完成后将搅拌头提升至地面并进行下一根桩的施工。④

注浆与成桩：在搅拌过程中或搅拌完成后向孔内注入适量的水泥浆料以形成水泥搅拌桩。注浆时需控制注浆压力和注浆量等参数以确保成桩质量。

(2) 优势分析：①承载力强：水泥搅拌桩具有较高的承载力和抗侧力性能能够有效提高地基的整体承载力并满足高速公路等重载交通的需求。②适用范围广：水泥搅拌桩不受地质条件限制适用于各种地质环境中的建筑工程施工。③施工效率高：水泥搅拌桩的施工过程相对简单且施工速度较快能够在较短时间内完成大量地基处理工作。

### (三) 复合地基技术在高速公路施工中的应用

#### 1. 刚性桩复合地基的设计理论与施工工艺

(1) 设计理论。刚性桩复合地基的设计理论主要基于桩-土协同作用原理。在荷载作用下，刚性桩与桩间土共同承担荷载，形成复合承载体系。刚性桩由于自身强度高，能有效提高地基的承载能力，同时减小地基的沉降和差异沉降。其设计关键在于确定合理的桩型、桩径、桩长、布桩形式以及桩间土的加固措施。在设计中，需要充分考虑地质条件、工程要求、施工环境等因素，进行详尽的地质勘察和数值模拟分析。通过计算确定单桩承载力特征值、复合地基承载力特征值等关键参数，以确保设计的合理性和经济性。

(2) 施工工艺。刚性桩复合地基的施工工艺主要包括以下几个步骤：①施工准备：清理施工场地，进行桩位放样，准备施工机械设备和材料。②成孔：根据设计要求，采用钻孔、沉管等方法成孔。成孔过程中需控制孔径、孔深和垂直度，确保成孔质量。③制桩与安装：制作或选择符合设计要求的刚性桩（如预制混凝土桩、混凝土灌注桩等），并将其安装到预定位置。安装过程中需控制桩的垂直度和深度，确保桩与土的紧密接触。④桩顶处理：在桩顶设置褥垫层，以调整桩与土的应力分布，提高复合地基的整体性能。褥垫层材料通常选用碎石、砂土等透水性好的材料。

#### 2. 柔性桩复合地基的创新与发展

近年来，随着材料科学、土木工程技术的不断进步，柔性桩复合地基在材料、设计理论和施工工艺等方面均取得了显著的创新与发展。

(1) 材料创新。传统的柔性桩主要采用碎石、砂土等材料，其强度和稳定性有限。近年来，研究人员在柔性桩材料中加入了土工合成材料（如土工织物、土工格栅等）作为筋材，以提高桩体的侧向约束力和整体稳定性。这种加筋柔性桩不仅提高了地基的承载力，还减少了地基的沉降和变形。

(2) 设计理论创新。随着计算机技术的发展，数值模拟技术在柔性桩复合地基设计中的应用越来越广泛。通过数值模拟分析，可以更加准确地预测地基的受力状态和变形情况，为设计提供可靠依据。同时，研究人员还提出了多种新型柔性桩复合地基的设计方法，如变截面双向搅拌桩、加筋碎石桩等，这些设计方法在提

高地基承载力和稳定性方面表现出了良好的效果。

#### 3. 劲性复合桩（SC桩）的加固效果与经济性分析

劲性复合桩是一种通过高压旋喷、深层搅拌或钻孔注浆等工艺形成水泥石搅拌桩，并在初凝前插入高强度混凝土桩的新型多元桩型。其加固效果显著，经济效益高，在高速公路施工中得到了广泛应用。

(1) 加固效果。劲性复合桩结合了刚性桩承载力高和柔性桩侧摩阻力大的优点，通过水泥石搅拌桩与预应力管桩的结合，形成了高强度、高稳定性的复合桩体。这种桩体不仅提高了地基的承载力，还减少了地基的沉降和变形。在高速公路施工中，劲性复合桩的应用能够显著提高路基的稳定性和耐久性，确保高速公路的安全和长期运营。

(2) 经济性分析。劲性复合桩虽然初期投资较高，但其长期经济效益显著。首先，其加固效果显著，能够显著降低地基的沉降和变形，减少后期维修和加固的费用。其次，劲性复合桩的施工速度快、效率高，能够缩短工期并降低施工成本。

#### 4. 复合地基技术在复杂地质条件下的应用策略

在复杂地质条件下（如软弱土、岩溶、岩石破碎带等），复合地基技术的应用需要更加精细和灵活。以下是一些应用策略：

(1) 详细地质勘察：在施工前进行详尽的地质勘察，了解地质条件的变化情况和潜在风险，为设计提供可靠依据。

(2) 合理选择复合地基类型：根据地质条件和工程要求选择合适的复合地基类型（如刚性桩复合地基、柔性桩复合地基、劲性复合桩等）。

(3) 优化设计参数：通过数值模拟分析等手段优化复合地基的设计参数（如桩型、桩径、桩长、布桩形式等），以确保设计的合理性和经济性。

(4) 加强施工质量控制：在施工过程中加强质量控制和安全管理，确保施工质量和安全。同时，注意控制施工对周边环境的影响，减少对生态环境的破坏。

### 结语

综上所述，软土地基处理技术在高速公路施工中的应用是一个复杂而重要的课题。通过科学合理的选择和应用软土地基处理技术，可以有效地提高地基的承载力和稳定性，减少地基沉降和变形，确保高速公路的安全和长期运营。随着技术的不断进步和工程实践的积累，软土地基处理技术将不断得到完善和创新，为高速公路建设提供更加可靠的技术支持。

### 参考文献

- [1] 楚宇. CFG桩技术在高速公路软土地基处理中的应用[J]. 交通世界, 2023, (14): 55-57.
- [2] 刁宠基. 软土地基处理技术在公路施工中的应用[J]. 中国设备工程, 2019, (02): 182-183.
- [3] 邓明镜, 余婕. 软土地基处理技术在高速公路工程中的应用[J]. 交通世界, 2018, (29): 103-104.