

# 高速铁路软土地基处理技术

马伟斌<sup>1</sup>, 史存林<sup>1</sup>, 张千里<sup>1</sup>, 杜晓燕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>铁道科学研究院铁道建筑研究所(100081)

<sup>2</sup>北京圣天工程咨询(100073)

email:iswearsh mily@163.com

**摘要:**铁路路基工程中经常会遇到软土问题,处理的质量与选择的方法将直接影响到轨道结构的稳定性与安全使用,因此软土地基的处理技术对高速铁路建设十分重要。本文首先阐述了软土地基尤其是铁路软土地基的特点,对目前常用的软土地基处理方法以及新技术进行总结,然后提出适合高速铁路软土地基处理的方法,并发展和提出了高速铁路软土地基处理的新技术,对高速铁路软土地基常用的处理方法及其施工工艺进行详细介绍。

**关键词:**软土 高速铁路 轨道结构 地基处理

## 1. 前言

软土是在静水或缓慢流水环境中以细颗粒为主的近代沉积物,其天然含水量大、孔隙比大、压缩性高、承载力低、渗透性小,是一种呈软塑到流塑状态的饱和粘性土。由于高速铁路轨道结构的基础修建在软土中,则此结构的地基就称为高速铁路软土地基。

软土作为特殊土的一种,有其独特的土力学性能:软土的天然含水量高,一般大于30%;孔隙比大,天然孔隙比 $e > 1$ ;压缩系数 $\alpha_{1-2} = 0.5 \sim 2 \text{MPa}^{-1}$ ;透水性低,竖向与水平渗透性不同,一般垂直方向的渗透性系数要小些;抗剪强度低,因为软土的内摩擦角接近于零,抗剪强度主要决定于内聚力;软土具有触变性与流变性。

铁路在通过沿海一带及湖泊沼泽地区时,常常会遇到软土地基问题,主要有路基沉降不稳定及变形过大;路基边坡失稳外挤;路基基床病害等。由于软基变形对铁路路基运营期间造成了较大的危害,它影响了行车安全,增大了线路的养护维修量。从50年代开始,铁路工程技术人员就针对路基工程遇到的软土地基处理问题进行了大量的现场软基试验和研究。经过几十年的努力,通过提高现场勘察技术和手段、采用各种新的原位测试技术和方法、应用各种软基处理新技术和新方法,使铁路路基工程遇到的软土地基处理问题得到了较好的解决。

## 2. 软基的破坏形式

软土由于其不良的工程力学特性,对工程有极大的危害性,综合分析主要有以下几种形式:剪切破坏,由于地基抗剪强度不足以承受其上列车所施加的动、静荷载,造成破坏,表现为使邻近地基产生隆起;由于软土地基的高压缩性,发生不均匀沉降,使轨道结构的基础由于应力集中出现裂缝,最终使轨道结构遭到破坏,失去其使用功能;由于软土地基的高空隙比与高含水率,在使用中发生排水固结,发生不均匀沉降,使轨道结构下沉量过高,影响使用功能。在工程应用实际中,由于铁路路基是承受静、动双向荷载,其受力的复杂性,决定其软土地基发生均匀沉降的可能性极小。

### 3. 软土地基处理方法分类及应用范围

经过长期工程实践已形成了多种形式的软土地基处理方法，如下：

#### 3.1 换填垫层法

此法处理的经济实用高度为  $2 \sim 3\text{m}$ ，如果软弱土层厚度过大，则采用换填法会增加弃方与取土方量而增大工程成本。通过换填具有较高抗剪强度的地基土，从而达到增强地基承载力的目的，满足轨道结构对地基的要求。主要加固方法有换填、抛石挤淤、垫层、强夯挤淤几种。垫层法根据材料的不同可分为砂(砾石)垫层、碎石垫层、粉煤灰垫层、干渣垫层、土(灰土、二灰)垫层。代表方法有砂垫层法及换填法。

#### 3.2 深层密实法

适用于软土厚度  $>3\text{m}$  的中厚软土的加固，分布面积广的软基加固处理，其加固深度可达到  $30\text{m}$ 。通过振动、挤压使地基中土体密实、固结，并利用加入的具有高抗剪强度的桩体材料置换部分软弱土体中的三相(气相、液相与固相)部分，形成复合地基，达到提高抗剪强度的目的。主要加固方法：强夯法、土(或灰土、粉煤灰加石灰)桩法、砂桩法、爆破法、碎石桩法(振冲置换法)、石灰桩法、水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩法)、粉喷桩法、旋喷桩法。代表方法有碎石桩法、强夯法、水泥粉煤灰碎石桩法、粉喷桩法。

#### 3.3 置换法

由于深层密实法中的几种方法都有加入高抗剪强度的材料，置换软土中部分成分的加固机理，与原有的土体共同组成复合地基，达到加固地基的目的，因此深层密实法有时也称为置换法。

#### 3.4 排水固结法

适用于处理各类淤泥、淤泥质粘土及冲填等饱和粘性土地基。软土地基在附加荷载的作用下，逐渐排出孔隙水，使孔隙比减小，产生固结变形。在这个过程中，随着土体超静孔隙水压力的逐渐扩散，土的有效应力增加，并使沉降提前完成或提高沉降速度。主要加固方法：堆载预压法、砂井法、袋装砂井、真空预压法、电渗排水法、降低地下水位法、塑料排水板法等。

#### 3.5 化学加固法

即在软土地基中加入水泥或其它化学材料进行软土地基处理，适用于处理砂土、粉土、淤泥质粘土、粉质粘土、粘土和一般人工填土，也可以在处理裂隙岩体及已有构筑物地基加强中。水泥或其它化学材料注入土体后，与土体发生化学反应，吸收和挤出土中部分水与空气，形成具有较高承载力的复合地基。主要加固方法：粉喷桩、旋喷桩、注浆、水泥土搅拌法。

#### 3.6 加筋土法

通过在路基中埋入高强度、大韧性的土工聚合物、拉筋、受力杆件或柴(木)梢排等方法

加强路基的自身强度,增加抵抗地基变形沉降的能力。适用于软弱岩体、土体中的路堤与路堑。主要加固方法:加筋土路基、土工聚合物、土钉墙、土层锚杆、土钉、树根桩法、柴(木)梢排法。

### 3.7 其它加固方法

除了上述软土路基处理方法外,比较常用的还有桩基、沉井、侧向约束法、反压护道法。桩基与沉井常用于在软土地基中建设重要构筑物(桥梁、大型涵洞等)的基础中,根据软弱土层的厚度其下承层土质情况,桩基设计可分为柱桩与摩擦桩两种。常用的桩基有钻孔桩、挖孔桩、管桩、木桩。侧向约束与反压护道的加固机理均是限制软弱土体向旁挤出,以增加路堤的抗剪能力。侧向约束法适合软土层厚度较小,软土体面积较大的软土地基的加固。反压护道法适合软土体分布面狭窄而软土体厚度较大的软土地基的处理。

## 4. 针对高速铁路的软基处理技术

### 4.1 砂石桩法

碎石桩和砂桩总称为砂石桩,又称颗粒土桩,是指用振动、冲击或水冲等方式在软弱地基中成孔后,再将碎石或砂挤压入已成的孔中,形成大直径的砂石所构成的桩体。

砂石桩的加固机理:在松散砂土与粘性土中有所不同的,在松散砂土中主要是发挥砂石对软土的挤密作用、排水减压作用、和砂基预振效应,而在粘性土中主要是对软土(特别是饱和软粘土)的置换作用。

方法的特点是:加固期短,可以采用快速连续加载方法施工路堤,设备简单,工作面可以加大,对缩短工期十分有利。

施工步骤主要分两大部分:成孔 加填料密实成桩。砂石桩法在 19 世纪 30 年代起源于欧洲,20 世纪 50 年代引入我国后,在工业、交通、水利水电设施中得到广泛的应用,目前已形成了多种施工方法,主要有以下几种:振冲挤密法、沉管法、干振法、钻孔锤击法、振动气冲法、强夯置换法、水泥碎石桩法、裙围碎石桩法、袋装碎石桩法等。在实际施工中,可以根据地质条件及机具设备情况选用合适的施工方法。

成桩材料要求:选用未风化的干净碎石、砾石、矿渣、碎砖及渗水性好的中粗砂等,含泥量应 5%~10%,碎石粒径最大应 50mm,以免桩孔或振冲器磨损过大。

施工机具:根据选用施工方法的不同,合理选用以下几种:振动打桩机,柴油打桩机、电动落锤、振动沉桩机、冲击成孔机、振冲器、起重设施、空气压缩机以及桩管、打桩架等。

施工中常发生的质量问题及注意事项:A.桩的施工次序一般是由里向外或一边推向另一边,有利于挤出部分软土。对抗剪强度低的粘性土地基,为减少制桩时对原土的扰动,宜用间隔跳打的方式施工。B.在成孔过程中应首先严格控制水压、电流和振冲器在固定深度位置的振留时间,以防缩孔、塌孔。C.填料要分批加入,次数频繁,每次少进料,保证试桩标定的装料量。每一深度的桩体在未达到规定的密实电流时要继续加料振实,以防断桩、缩

径。

质量控制:单可采用挖开的方法检查,并在施工中做好记录控制。施工质量的检验可以对碎(砂)石桩进行单桩荷载试验,也可采用动力触探试验,也可用标准贯入法、静力触探法检查处理前后的对比结果及桩间土的挤密效果。整体加固效果的检验可以进行单桩复合地基和群桩复合地基的大型试验。

## 4.2 塑料排水板

加固原理:塑料排水板是一种复合土工材料,由芯板和滤膜组成,其加固软土地基的机理是在软土地层中按一定的间距和布置形式打设塑料排水板,在软土中形成竖向排水通道,加速排水,特点是单孔水断面大,排水畅通、质量轻、强度高,耐久性好。

适用范围:当软土层较厚,路堤较高时,常用塑料排水板法加速固结沉降。

施工方法:插设塑料排水板 塑料排水板桩头处理 (铺设砂垫层) 路基填筑。

施工用主要机械设备:插板机主要由工作装置、驱动装置和行走装置组成。工作装置由导向架和导管组成,导向架由角钢分段焊接,每段长6m,段与段之间用螺栓连接。导管采用热轧无缝钢管制成。为适应在软土中行走多采用履带式,也有轮胎式。

施工注意事项:为方便机械设备移动及排水板桩头直立,可先将地表清流水面后铺设砂垫层;为保证排水通道畅通,每根桩均采用一整条的排水板,不允许有接头,并保持排水板不扭曲,透水膜不被撕破和污染;牵动排水板下沉的锚销与排水板连接可靠,并且锚销与导管下端口密封要严,以免泥砂进入排水板内阻塞排水通道;拔导管时应轻轻进行,以免带出排水板;打设完成后,人工扶正排水板外露的头部,并用砂土紧打管口洞口,轻拍砂土至紧密,保证桩头是直立的。

插设塑料排水板质量控制:在打设过程中,严格控制打桩机就位时导向架的垂直度,以保证桩身的垂直度,一般要求其斜度不超过深度的1.5%;因为在软土中,排水速度与距离的平方成正比,因此打设塑料排水板应严格控制平面位置,偏差位5cm;塑料排水板在插设过程中,若被导管带出,应在距废弃排水板附近补打。

## 4.3 袋装砂井法

原理:袋装砂井是把砂装入长条形、透水性好的纺织袋内,然后用专门的机具设备打入软土地基内代替普通大直径砂井。袋装砂井既有大直径砂井的作用,又可以保证砂井的连续性,避免缩径现象。由于袋装砂井的直径小,材料消耗小,造价低,施工速度快,设备轻型,更适应在软弱的地基上施工。袋装砂井适用于软土层厚度>5m,且路堤高度的自重静压超过天然地基承载力很多时,常采用袋装砂井法。

材料要求:采用聚丙烯或其他抗拉强度能保证承受砂袋自重的纺织料,装砂后砂袋的渗透系数不小于砂的渗透系数。砂采用渗水率较高的中、粗砂,粒径>0.5mm的砂的含量宜占总量的50%以上,含泥量3%,渗透系数 $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。采用风干砂,以免袋内砂干燥后体积减小,造成袋装砂桩缩短与排水垫层不搭接等质量事故。

砂井的布置:袋装砂井可呈矩形,梅花形布置,井径采用 7~12 cm 的直径,井距 1~2 m,砂垫层厚 40~50 cm。

工艺流程:整平原地面 摊铺下层砂垫层 机具定位 打入套管 沉入砂袋 拔出套管 机具移位 埋砂袋头 摊铺上层砂垫层。

施工注意事项:砂井定位要准确,垂直度要正确,沉桩时用两台经纬仪“十”字交叉控制砂井位置,用锤球控制垂直度;砂袋灌入砂后,露天堆放要有遮盖,不能长时间暴晒,施工中避免砂袋挂破漏砂;砂袋入井时,用桩架吊起垂直下井,防止砂袋发生扭结、缩径、断裂和砂袋磨损;拔钢套管时,更要垂直起吊,在出现砂袋带出或损坏砂袋现象时,要在原孔边缘重新打孔施工。连续两次将砂袋带出时,要停止施工,查明原因后再施工;砂袋露出井长度要保证伸入砂垫层至少 30 cm 以上,要保证直立。

#### 4.4 真空预压法

原理:在软土地基上先施作竖向排水系统(砂井或塑料排水板),然后在加固的区域内覆盖不透气膜,利用真空源不停地对加固的土体进行抽气,使其内部形成一个近似真空的环境,土体中的孔隙水在负压作用下,沿着排水通道加速被吸出,从而达到加固的作用。

真空预压法也属于排水固结类的加固范围,其排水固结作用与加载预压作用是可以相叠加的,可以加速排水,在工期紧时可以使用该法加快软土固结的速度。适用于软土厚度大、工期紧的软土地基。其设备与材料损耗小,可以重复使用。

使用的设备材料:真空源一般采用射流箱与离心泵组成,在加固施工中,一套真空装置应能担负 1000~1200 m<sup>2</sup> 加固面积,覆膜采用聚乙烯或聚氯乙烯薄膜。

施工注意事项:施工时应对加固区进行分块,目前国内单块加固面积可达 30000 m<sup>2</sup>,一般分块面积可根据工程地基的实际情况进行考虑,以不超过真空设备的能力为准;排水系统设置要密封,以防空气进入真空区内降低加固效果;真空覆膜处理时接缝采用热合焊接,可平搭接,也可以立缝搭接,热合时根据塑料膜的材质、厚度确定热合温度、刀的压力和时间,使热合缝牢而不熔;由于覆膜的密封性是真空预压加固措施成败的关键,在铺设时一定要小心谨慎,避免划伤、刺破,膜下真空度值一般要求 80 KPa;经常检查加固的压力,当气压值超过要求值时,应及时检查原因,采取补救措施。

质量控制:本加固法成败的关键为真空度保持,因此要严格控制覆膜的密封质量及边缘的密封土施工,保证不透气。经常检查真空度,当气压超过规定值时及时进行处理。

## 4 总结与建议

地基处理技术发展十分迅速,老方法得到改进,新方法不断涌现,在软土地基处理方面,公路与铁路建设中都有很多成功的实例,也不乏失败的教训。针对这些工程中应用的经验与教训,在软土地基处理中应当遵循以下几条原则组织设计与施工,才能更好地达到预期的效果:

认真进行地质调查,根据地质情况进行合适的设计与变更设计,达到预期的加固效



果，避免返工处理的现象。

在工程施工时，要充分了解各种形式的软土地基加固机理，以便针对加固机理进行有重点的质量控制，该放宽的技术指标可适当调整，以降低成本。例如砂桩与砂井的加固机理就不同，砂桩对软土的加固作用主要是挤密作用(特别是在粘性土中)，因此砂桩的数量与直径应有充分的保证，对其平面分布的均匀性可以适当放宽标准，砂井的加固机理偏重于排水固结，因此在早期砂井加固基础上，又改进形成了袋装砂井的技术，以保证砂井的均匀程度与连续性。同属深层密实法加固的粉喷桩与旋喷桩，粉喷桩更倾向于喷粉与软弱土形成复合地基，而旋喷桩则偏重于喷体的桩作用，因此在旋喷桩设计时就充分验证其作为桩基础的力学效果。

加强基础学科的研究，给软土地基处理技术更有力的支持。目前国际上软土加固技术已得到较大的发展，但其理论基础还存在着不准确性与不确定性。例如，强夯法在多处工程施工中的应用并且实测效果证明其加固效果可用，但其加固机理在土力学中还没有完全从理论方面得到证明，或部分还存在着模糊的概念；在挡护设计中经验公式的利用较多，其参数取值的不确定性还大量存在；作为土力学最基本理论的朗金定理与库伦定理中不确定的因素也较多。所有的这些都说明要想加快软土基础技术的开发与应用，必须加强其基础科学的研究。

在实际处理软土地基时，往往不是采用一种形式的处理，多采用多种处理方式相结合，取其加固效果综合作用，能够起到事半功倍的效果。例如在株六复线六盘水段非渗水土中的路堤多数采用在路基面上铺设 60~80 cm 厚的中粗砂垫层，而垫层内则铺设幅宽 4 m 的土工膜，高填地段铺土工格栅加强路基强度；而在路堑地段则采用土工膜加固路基面，土钉墙加固边坡，目前该线已通车近两年，没有发生因软土地基加固不良而出现的问题。在渝怀铁路鱼嘴车站高填路基，最大填土高度 27 m，填方总量  $51 \times 10^5 m^3$ ，软基处理面积近  $60000 m^2$ ，在软基处理中，采用碎石桩、塑料排水板、中粗砂垫层与侧向约束桩联合进行软土地基的处理，目前路基填筑已近完成，没有发生沉降量超限及侧向挤出等不良现象。

另外，软基处理改良是现在岩土行业的热点之一，地基要满足建筑物的稳定性、强度要求，强夯、机密、预压改变土的密度、性能，我们应该找到一个经济合理、安全度高、风险性小的方法，需要进行深入研究，以探索新的软土地基处理的方法。当然在考虑安全经济同时还要考虑环境和可持续发展的问題，过去以排水为主的，比如软土地基常采用的袋装砂井法和塑料排水办法都以排水为主，现在为了环保我们尽量以堵水为主，不如采用砂桩、碎石桩等，应该尽量实现环境和生态平衡不受破坏。

#### 参考文献

- [1] 《地基处理手册》，地基处理手册编写委员会，中国建筑工业出版社，1988
- [2] 《软土地基试验研究文集》，铁道第四勘察设计院，中国地质大学出版社，2001
- [3] 《铁路特殊路基设计规范》，铁道第四勘察设计院，中国铁道出版社，2003

## Soft Soil Subgrade Treatment Techniques of High-speed Railway

WeiBin MA<sup>1</sup> CunLin SHI<sup>1</sup> QianLi ZHANG<sup>1</sup> XiaoYan DU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Railway Engineering Research Institute,China Academy of Railway Sciences,  
Beijing,PRC,100081

<sup>2</sup>ShenTian Engineering Consultation of BeiJing,BeiJing,PRC,100073

### Abstract

The characteristics of soft soil especially of the high-speed railway's was recommended and the ordinary methods of foundation treatment and new techniques was carefully summarized, so the suitable methods of high-speed railway soft soil' foundation treatment was chose, and the new technique of high-speed soft soil's foundation treatment was developed and advanced. Furthermore we introduce in detail them and their construction method.

**Keywords:** *Soft Soil High-speed Railway Track Structure Foundation Treatment*

马伟斌：男，1977年生，博士研究生，主要研究方向是地基处理。