

北京交通大学

硕士学位论文

控制下覆软夹层地铁车辆段地基的不均匀沉降措施研究

姓名：张晓晓

申请学位级别：硕士

专业：建筑与土木工程领域

指导教师：陈文化

201206

## 中文摘要

**摘要：**地铁车辆段是地铁车辆停放，检查，整备，运用和修理的管理中心所在地。本文以北京地铁回龙观车辆段运营初便产生局部下沉与不均匀沉降为例案，研究地铁车辆段不均匀沉降机理。回龙观车站的地基是由原先的渔场改建为垃圾场，再在此基础上填埋修建的地铁车站，此地基属于下覆软夹层地基。每当车辆进行停靠等操作，此地铁车辆段的地基将会发生过大沉降。沉降变形计算是土力学中的重要研究课题。自从 Terzaghi (1924) 年提出一维固接理论以来，沉降变形理论研究已经取得了长足的进展，沉降变形的估算精度也有了很大的提高。常规的沉降变形计算方法是半经验理论的，是经典土力学理论与经验相结合的方法。由于路基沉降变形的复杂性，使得计算值与实测资料存在较大的误差。鉴于此，本文采用数值分析法考虑车辆荷载对软土条件下路基沉降变形进行计算和分析，从而保证上部结构的正常使用和安全。并针对此状况，采取经济实效的地基处理方法。

本文主要工作有：1) 分析了造成回龙观车辆段不均匀沉降的原因；2) 重点研究钢渣换填结合土工格栅方案的施工工艺、钻孔灌注钢渣的施工工艺以及在地基两次打桩加强地基的处理方案的施工工艺；3) 采用了 ABAQUS 有限元方法对处理前后地铁地基的工后沉降进行了分析对比。

本论文的特点与创新：

1) 本论文采用的三种处理方法中的土工格栅和钢渣换填相结合的方法是一个创新点，此种方法工期短、易操作且经济环保，特别适合如北京、广州等人口流动很大的城市

2) 本论文总选用的三种处理方案均选用钢渣作为主要处理材料，这样可以有效地利用首钢等大型钢厂产生的废渣，钢渣有质量大、强度高优点，既能清理废渣又能减少黏土的使用，是非常环保的手段。

**关键词：**地铁车辆段；不均匀沉降；钢渣换填-土工格栅；钻孔填渣；边界打桩；数值模拟

## ABSTRACT

**ABSTRACT:** Car-depot is the subway metro vehicle parking, checking, servicing, using and repairing management center. This article is based on the Beijing subway huilongguan's car depot with local sink and the uneven settlement at the beginning of operation, researching the uneven settlement. The original foundation of the huilongguan station is a fishing ground, and then it transform into the dump, and on the basis of landfill building the subway stations, so this foundation belong to the soft interlayer foundation. Whenever the vehicles parked and so on, the subway car depot foundation will happen too big settlement. The calculation of Settlement and deformation is the one of important studying subjects in soil mechanics. Since Terzaghi presented the theory of one dimension consolidation, both the theory of settlement and deformation and the estimating precision of them have made great progress. It is the semi-theoretical and semi-experienced method of the conventional calculating method of settlement and deformation. Because of the complexity in the roadbed's settlement, there has also been a big error between the consequence based on the conventional method and the actual value. Therefore, this article will calculate and analysis the settlement and deformation of the foundation with soft interlayer in the way of numerical analysis considering vehicle load, which would promise the normal use of the upper structure and security. In the light of the status I will take some ground treatment which is economic and useful.

The mainly work of this paper are: 1) Making a comparison with different treatment scheme for the weak foundation; 2) the key research on construction technology which are replacement method with steel slag in combination with geogrid, the bored perfusion of steel slag and two piling foundation to strengthen the foundation; 3) using the finite element analysis of the foundation's settlement before and after processing the subway foundation, which was analyzed and compared.

The characteristics and innovation of this paper:

- 1) Replacement method with steel slag in combination with geogrid spend construction period, and is easy to operate and economic environmental protection, especially suitable for such as Beijing, guangzhou and other population flow very big city
- 2) innovation points is that Replacement method with steel slag in combination

with geogrid is still less, belonging to the innovative solutions , and further use of steel slag also belong to a fill innovation points, can effectively use waste residue produced by large steel mill .The steel slag have advantages of gerat quality, strength. With this method we can clean up waste residue and also can reduce the use of clay, and so it is a very environmental protection means.

**KEYWORDS:** subway-car depot; uneven settlement; Replacement method with steel slag in combination with geogrid ; punching and perfusion of steel slag ; piling foundation ; numerical simulation

## 致谢

本论文的工作是在我的导师陈文化教授的悉心指导下完成的，陈文化教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢三年来陈文化老师对我的关心和指导。

陈文化教授在学习上和生活中都给予了我很大的关心和帮助，在此向白冰老师表示衷心的感谢。

陈文化教授对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，刘春刚、周祥等同学对我论文中的数值模拟研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢家人张彦青、韩玉凤，感谢我的朋友，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

# 1 绪论

## 1.1 研究背景和研究意义

随着人民生活水平的提高,人口大量涌入城市,导致城市空间不断减小,为了解决这一问题,并且顺应大城市的快节奏生活,地铁也就应运而生了,地铁的出现很好的疏散交通拥堵现象,其高效准时的特点备受市民所喜爱。与此同时,作为地铁维修、检测、停靠的基本场所—车辆段的修建也将备受瞩目。

地铁工程在我国快速发展和大量修建,由于土质条件各不相同,地基处理就极其重要。地基是指承托建筑物基础的这一部分范围很小的的场地,也就是说承受由基础传来荷载的土层(或岩层)成为地基。位于基础地面下第一层成为持力层,在其以下的土层统称为下卧层。由于建筑物上部结构材料强度很高,而相应地基土的强度很低,压缩性较大,因此必须设置一定结构形式和尺寸的基础,使地基的强度和变形满足设计的要求。

我国土地辽阔,自然地理环境不同,土质各异,地基条件区域性较强,在选择建筑场地时,应尽量选择地质条件良好的场地从事建设。但我国近年来,基本建设大规模发展,有时也不得不在地质条件不好的场地进行修建,为此必须对地基进行处理。因而在工程建设中,地基处理也显得越来越重要。而地基处理的目的,就是对软弱地基上可能发生的问题,如沉降、承载力偏低和渗漏等,采取一定的方法和措施加以改善地基条件,以满足建筑物对地基的要求。

目前,我国国民经济飞速发展,岩土工程和地下工程建设规模日益扩大,对地基的要求也越来越高,难度也越来越大。而地基的不确定因素相对于上部建筑来说更多、问题更复杂、难度也更大。地基处理不好造成的后果将会十分严重。据调查统计,世界各国发生的各种工程事故,地基问题常常是发生事故的主要原因。地基是根本,它处理的好不仅对建筑安全有益处、对人身安全也是一种保障,同时也会产生很大的经济效益。

随着北京人口的急剧增长,很多人都选择了在郊区生活在城市上班的生活模式,因此地铁就应运而生了,北京作为国内屈指可数的地铁城市之一,地铁修建工程如火如荼,图 1.1 为北京地铁线路图,地铁有如下的优点: 1、节省上部空间。由于一般大城市的城市土地价格贵,修建地下快轨,很大程度上可以节省地面空间; 2、减少上部干扰。地铁建于地面以下,可以减少上部空间的噪音污染。3、减轻拥堵现象。地铁行驶时间与行驶路线均是相对独立的,它不会受到上部交通

情况的影响，同时也相对疏散了客流量，可以减轻上部人流的拥堵现象，这样也就加快了人们出行流动时间。4、节约能源。目前全球变暖，地铁的开通减少了开车能耗的能源，因为其车速稳定、时间规律，民众相对来说乐于乘坐，由此节约下来的能源是非常可观的。

地铁车辆段作为地铁车辆停放，检查，整备，运用和修理的管理中心所在地。若运行线路较长，为了有利于运营和分担车辆的检查清洗工作量，可在线路的另一端设停车场，负责部分车辆的停放，运用，检查和整备工作。当技术经济合理也可以两条或两条以上线路共设一个车辆段。城市轨道交通除车辆保养基地以外，尚有综合维修中心，材料总库和职工技术培训中心等基地，有条件时，尽量将它们与车辆段规划在在在一起。车辆段的主要业务如下：1. 列车在段内调车，停放，日常检查，一般故障出来和清扫洗刷。2. 车辆的技术检查，月修，定修，架修和临修试车等作业。3. 列车回段折返乘务司机换班。4. 内设备和机具的维修及调车机车的日常维修工作。5. 紧急救援抢修队和设备。

由此可以看出地铁车辆段的重要性，因此本课题研究下覆软夹层地铁车辆段的地基沉降分析是很有必要的，总结国内外地基处理方面的经验教训，推广和发展各种软基处理技术，提高地基处理水平对加快基本建设速度、节约基本建设投资具有特别重要的意义，本课题同时也为日后处理软夹层地基提供一定的参照。

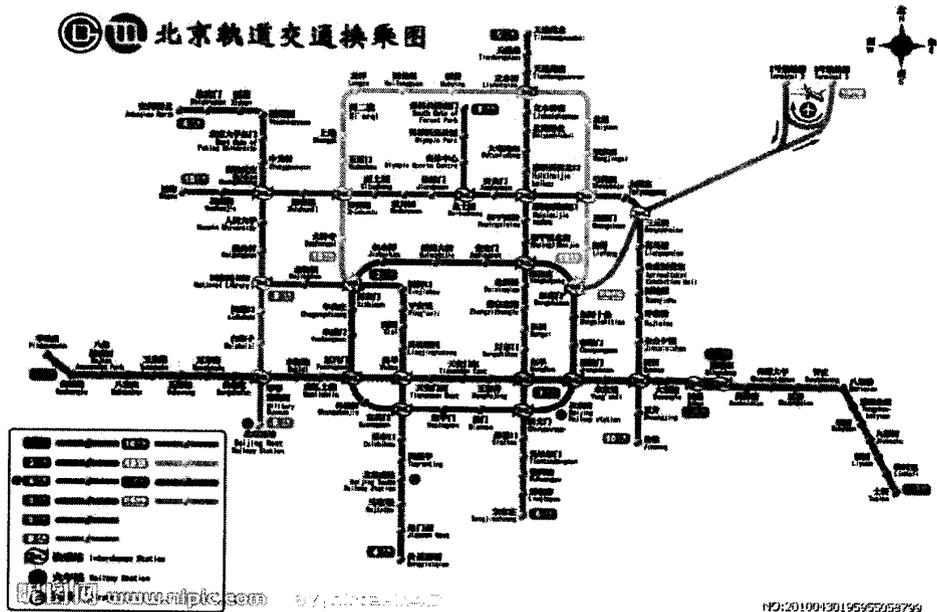


图 1.1 北京地铁情况

## 1.2 国内外文献评述与研究现状分析

### 1.2.1 软土条件下路基沉降研究现状

软土在我国分布广泛,下覆软夹层的路基更是分布广泛,特别是在沿海和河流分布较多的湿润地区。由于软土地基的压缩性高,渗透性低,固结变形持续时间长,所以具有软土层的地基的沉降量时工程中比较重要的一个课题。随着我国土木工程的大力发展,在软弱土层上修建公路、铁路、建筑、机场等日益增多,而且对沉降量的限制要求也日趋严格,并追求理论上能更和实际接近。因此,改进软基处理方法,加固软基增强地基承载力以及完善计算方法都具有重大的学术价值与社会效益。

软土是软弱黏性土的简称。它是第四纪后期形成的海相、泻湖相、三角洲相、湖泊向和湖泊相的黏性土沉积物或河流冲积物,有点属于新近淤积物。软粘土大部分是饱和的,其天然含水量大于液限,孔隙比大于 1.0。软黏土的特点是天然含水量高(一般为 35%~80%),天然孔隙比大(一般为 1.0~2.0),抗剪强度低(不排水抗剪强度约在 5~25KPa),压缩系数高(一般为  $\alpha_{1,2}=0.5\sim 1.5\text{MPa}^{-1}$ ,最大可达到  $4.5\text{MPa}^{-1}$ ),渗透系数小(一般约  $1\times 10^{-6}\sim 1\times 10^{-8}\text{cm/s}$ )。在荷载作用下,软弱土地基的承载力低产生大的地基沉降和不均匀沉降,而且沉降稳定历时比较长,特别是在比较深厚的软黏土层上,结构物基础的沉降往往需要的时间更长。

沉降变形计算是土力学中的重要研究课题。自从 Terzaghi (1924) 年提出一维固结理论以来,沉降变形理论研究已经取得了长足的进展,沉降变形的估算精度也有了很大的提高。地基沉降的计算方法有如下几种: I 分层总和法。分层总和法是在地基沉降计算深度范围内划分为若干层,计算各分层的压缩量,然后求其总和。计算时应先按基础荷载、基底形状和尺寸、以及土的有关指标确定地基沉降计算深度,且在地基沉降计算深度范围内进行分层,然后计算基底附加应力,各分层的顶、底面处自重应力平均值和附加应力平均值。通常假定地基土压缩时不允许侧向变形(膨胀),即采用侧限条件下的压缩性指标。为了弥补这样得到的沉降量偏小的缺点,通常取基底中心点下的附加应力  $S_z$  进行计算。II 有限元法。这种方法适用于连续介质,对于一般土体可以采用非线性弹性本构模型或弹塑性本构模型,考虑复杂的边界条件、土体应力应变关系的非线性特性、土体的应力历史和水与骨架上应力的耦合效应,可以考虑土与结构的共同作用、土层的各向异性,还可以模拟现场逐级加荷,能考虑侧向变形及三维渗流对沉降的影响,并能求得任意时刻的沉降、水平位移、孔隙压力和有效应力的变化。从计算方法上来说,由于其计算参数多,且需通过三轴试验确定,程序复杂难以为一般工程设计

人员接受,在实际工程中没有得到普遍应用,只能用于重要工程、重要地段的地基沉降的计算。III 规范法。《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7-89)所推荐的地基最终沉降量计算方法是另一种形式的分层总和法。它也采用侧限条件的压缩性指标,并运用了平均附加应力系数计算,还规定了地基沉降计算深度的标准以及提出了地基的沉降计算经验系数,使得计算成果接近于实测值。

顾绍付,刘仰韶,刘仕顺(2010)<sup>[11]</sup>基于大量实测软基沉降监测数据,分析了恒载预压期长短对 Asaoka 法推算沉降的影响,提出了 Asaoka 法推算软基最终沉降的修正公式,可减小由预压期较短而引起的沉降推算偏差。

王伟,卢廷浩(2007)<sup>[12]</sup>结合软基沉降机理,提出用 Weibull 模型预测软基沉降全过程。该预测模型参数意义较为明确,可以反映加载速度等因素的影响,克服了其它两种成长模型反弯点处沉降值与最终沉降相对不变的缺点。在利用其它模型预测时,只有初步判断实测样本反弯点的位置才能较科学的选择有效样本和相应模型进行预测。Weibull 模型可以充分利用沉降观测样本,具有广泛的适应性,指数模型是它的一种退化形式。它不但可以预测线性加载的软基沉降,而且可以预测一次加载或近似一次加载的软基沉降。工程实例的实测和计算比较说明该模型是可靠的。

荆志东,郭永春,邱恩喜,郑立宁(2010)<sup>[13]</sup>在 CFG、PHC 等刚性桩桩顶加设 50cm 厚筏型钢筋混凝土形成板桩板结构控制深厚软土路基沉降,是高速铁路建设中提出的新型地基处理形式,以满足高标准铁路路基变形要求。通过对群桩处理的深厚软土路基在有无钢筋混凝土板时路基沉降的离心模拟,重点研究了钢筋混凝土板对路基沉降的控制作用以及桩、板与土体之间的相对变形。试验结果表明,在群桩处理地基上部铺设一定厚度的钢筋混凝土板,可以使路基整体沉降减小 12%,并使路基整体沉降更加均匀;桩端平面上部 1/3 桩长范围内土体由软塑状态转变为硬塑状态,密度和含水率变化显著;加载作用对路基变形影响深度大于 40m。

胡亚元(2011)<sup>[14]</sup>为了控制在循环荷载作用下软基路堤的总沉降和工后沉降,采用能够综合考虑主、次固结沉降的 Yin-Graham 一维等效时间线模型和一维条件下软土“最终”沉降与应力路径无关的性质,获得在正弦循环荷载作用下路堤运行期间长期总沉降和工后沉降近似计算公式,建立路堤总沉降和工后沉降与回弹指数、压缩指数、蠕变系数、初始有效应力、路堤承受的静荷载幅值和动荷载幅值之间的关系,除上述影响因素外,工后沉降还与运行期开始时路堤下软基的总有效应力有关。利用沉降公式计算具体工程软基路堤运行期结束时的长期总沉降量,计算误差小于 0.275%。

唐朝晖,刘晓,李菊凤(2005)<sup>[15]</sup>将经验曲线波形非线性回归分析应用于广肇高速公路的软基沉降量预测中,分别采用双曲线模型、指数曲线模型和星野法模型对同一段软基的沉降进行了预测,结果表明:①3种模型的短期沉降预测能力均较好,

且以星野法模型与实际最贴近;②双曲线模型与星野法模型预测的最终沉降量相近,而指数曲线模型预测的最终沉降量偏小。

余成华,李菊凤(2010)<sup>[6]</sup>利用改进的剑桥模型,采用 FLAC3D 有限差分方法,对用袋装砂井排水固结法处理软土地基沉降过程的流固耦合模拟,并将模拟结果与实际检测的应力、应变情况进行对比。结果表明,表面沉降和分层沉降的模拟值与实测值能很好地吻合,模型能较为真实地反映路基沉降变形的实际情况。

欧阳辉(2009)<sup>[7]</sup>结合深圳一污水处理厂软基监测的实例,根据堆载预压法的沉降规律和曲线拟合模型,利用现场实测数据对软土地基沉降进行预测,研究了双曲线法[1]、三点法、Asaoka 法预测精度及其适用性。

### 1.2.2 地基处理方法的研究进展与现状

近年来,我国经济迅速发展,常常需要在各种复杂的地质条件下建造工程,需要实现选择地质条件良好的场地,但有时不得不在条件不好的地段进行建设,有时还需要对天然的不良地基进行处理和加固等。因而在工程建设中,地基处理也显得越来越重要。为解决好这些问题,工程地质和岩土工程界的学者和技术人员进行了不懈的努力,取得了许多的成果,积累了丰富的经验,促使新技术、新方法不断涌现。

地基处理的目的是对软弱地基上可能发生的问题,如沉降、承载力偏低和渗透等,采取一定的方法和措施加以改善地基条件,以满足建筑物对地基的要求。

地基处理在我国历史比较悠久,长久以来人们在生产实践中积累了丰富的实践经验。据史料记载,早在三千年前,我国已开始采用竹子、木头以及麦秸等来加固地基,向软土中夯入碎石等材料以挤密软土也早在两千多年就有记载。此外,利用夯实的灰土和二合土等作为建筑物垫层,在我国古建筑中就更为广泛。如经历了无数次地震仍屹立了一千多年的西安小雁塔,就是采用了分层夯实的 3m 多厚的黄土垫层;陕西扶风塔的垫层,也是采用了分层夯实的拌和了石灰的黄土。

在新中国成立后,在近十余年内更是取得了迅速的发展。回顾这几十年来我国地基处理技术的发展历程,大体上可划分为 20 世纪 50~60 年代及 70 年代末至现在这两个阶段。第一个阶段开始,由于新中国刚刚诞生,随着工业建设和城市建设的发展需要,地基处理技术引进和开发的应用达到了一个高潮。这个时期,砂石垫层法、砂桩挤密法、石灰桩、化学灌浆法、重锤夯实法、堆载预压法、挤密土法和灰土柱、预压浸水法以及井点降水等地基处理技术先后被引进。

从 20 世纪 70 年代末开始,地基处理技术进入了第二个阶段。由于改革开放,伴随着沿海地区大批工业项目特别是一些大型现代化企业和沿海城市高层建筑的

发展,大批先进的地基处理技术从国外引进来,从而大大促进了我国地基处理技术的应用和研究。近十余年来,石灰桩、碎石桩、动力固结法(强夯)、高压喷射注浆法、深层搅拌法、真空预压法、砂井法和塑料排水板法都得到了广泛的研究和应用发展。

吴爱红、蔡良才等(2010)<sup>[8]</sup>通过不同荷载作用下的盐胀试验,研究了荷载对不同压实度、不同含盐量的硫酸盐渍土盐胀的抑制效果,拟合了盐胀经验公式,探讨了换填覆重法硫酸盐渍土地基处理。

詹金林,水伟厚,梁永辉,宋美娜(2009)<sup>[9]</sup>对内蒙沙漠土进行8 000 kNm、6 000 kNm、4 000 kNm、3 000 kNm能级强夯法地基处理试验,通过标准贯入试验、动力触探试验和平板载荷试验对强夯后的沙漠土进行检测,得出各种能级强夯对沙漠地区填方区、挖方区处理后的有效加固深度和承载力。对强夯法处理沙漠土的一些规律进行总结,给出各种强夯能级能够处理的有效加固深度、夯点间距等设计施工参数,供类似地质条件下强夯地基处理工程借鉴参考。

周健,崔积弘等(2008)<sup>[10]</sup>针对吹填细砂及下卧软黏土地基的工程性质,对强夯-降水联合法和无填料振冲法结合整体塑料排水板加固此类地基的适用性进行了试验研究。在试验的基础上,确定了振冲施工工艺的振冲间距、上拔间距等振冲大面积施工参数,同时分析了强夯过程中下卧黏性土中孔隙水压力的增长消散过程及影响因素,得到了一些有益的结论,对类似工程有一定的借鉴意义。

赖正发,李开文,董柱,杨正东(2004)<sup>[11]</sup>结合云南洱海地区的排水截污工程的基坑工程实例,介绍了在地下水位较高、有深厚淤泥、抗震设防烈度较高、附近有较多建筑的复杂地质条件下的地基处理与基坑支护有机结合的设计与分析。

崔激,张志耕,闫澍旺(2009)<sup>[12]</sup>提到高原湿地软基的突出特点是含有地质条件很差的泥炭层。采用碎石桩联合土工格栅复合地基处理湿地软基是一个新的尝试。在有限元分析的基础上,给出了碎石桩联合土工格栅复合地基处理高原湿地软基的受力、变形特征与作用机制,结果表明,碎石桩可以加快软基的排水固结,提高地基的承载力,土工格栅的主要作用在于限制路堤的侧向位移和减小差异沉降。

李卫民,常青(2009)<sup>[13]</sup>以工程实例对低能级强夯+CFG桩加固新填土地基的技术和施工方法在贵州山区的应用作了介绍,并结合静载试验,动力触探测试,低应变测试,沉降观测等数据对试验结果进行了分析总结,为山区建设中新填土地基处理提供了新的思路和经验。

王志德,张鑫,杜荣军,易海洋(2011)<sup>[14]</sup>为了掌握该公路在施工过程中变形特征,采用有限元软件 NCAP-2D 对尹中高速公路施工过程进行了模拟,分析了不同桩间距、断桩两种情况下的破坏、位移特征。结果表明,旋喷桩桩顶处于塑性状态,旋喷桩桩顶侧向位移大于桩底,增加了基础的稳定性;当桩间距变化时,桩顶土和

桩间土的塑形区范围、位移量呈正相关变化,桩顶附近发生塑性破坏的敏感区域;有断桩时,塑形区在断桩处分布范围明显较大,影响地基加固效果。所得结果对于此类公路的建设施工具有一定的借鉴意义。

吴雪婷,徐光黎(2010)<sup>[15]</sup>为适应世界标准构造物设计规范的发展趋势,基于极限状态设计法的基本思想,构建了完整的铁路工程地基处理设计体系,包括地基处理工程等级、荷载组合、地基处理性能要求等;提出了铁路地基处理设计性能矩阵、地基处理与性能要求之间的相互关系;针对不同铁路等级、轨道类型、速度目标值给出了铁路地基处理设计中稳定性和沉降的控制指标。将极限状态设计理念引入到地基处理设计中,其目的就是为了逐步融入国际发展新潮流,以期制定满足不同工程性能要求的地基处理技术规程。

### 1.2.3 有限元方法研究地基沉降的进展与现状

沉降计算方法是一个比较突出的问题。目前有关沉降计算的理论分析方法可以归纳为两种类型:一类是理论算法;另一类是数值模拟分析法。理论算法是建立在 Terzaghi 等人创立的经典土力学基础上,在经典土力学中会有很多假定。这类方法简便、直观、计算参数少且易取得等优点,因而在工程中得到了广泛应用。数值模拟分析方法则是近代土力学研究的产物。70 年代以来,随着计算机和有限元应用技术的发展,人们可以将复杂的土工计算问题编制成有限差分程序或者有限元计算程序,通过计算机运算,从而得到较为准确的计算结果。利用数值分析法,可以较全面的考虑土体的变形特性及边界条件,理论上就算出来的值更为可靠。

20 实际 40 年代,土的本构关系的含义被提出来,指的就是土体在外荷载的作用下应力、应变和时间的关系。土的本构关系重点研究的是土的强度、变形和稳定问题。土体作为天然地质材料在组成和构造上呈现高度的各向异性、非均质性、非连续性和随机性,在动力性能上又表现出强烈的非线性、滞后性、刚度软化性变和形累积性,其应力、应变关系非常复杂<sup>[16]</sup>。

目前本构模型大致可分为 2 大类:粘弹性模型和弹塑性模型。自 1968 年 Seed 提出用等价线性方法近似考虑土的非线性以来,粘弹性理论已有了较大的发展。在土体的动力反应分析中,常用的粘弹性模型有等效线性模型和曼辛型非线性模型两大类。等效线性模型不追求滞回曲线的具体数学表达式,所谓滞回曲线就是描述卸载与再加载时应力应变规律的曲线,在此种模型中给出等效弹性模量和等效阻尼比随剪应变幅值和有效应力状态变化的表达式;弹塑性模型则是给出动应力应变的表达式,此表达式是根据不同的加载条件、卸载和再加载条件得出来的。

在给出初始加载条件下的动应力应变关系式后,再利用曼辛二倍法得出卸荷和再加荷条件下的动应力应变关系,以构成滞回曲线方程<sup>[17]</sup>。

粘弹性理论是目前工程应用中的主流,尽管其还存在多方面的不足,这些不足主要表现在不能考虑应变软化、应力路径的影响以及土的各向异性和大应变时误差较大等的影响,但它在形式上是比较简单的,经过适当的处理和改进后结合动力有限元程序,同样可以计算出循环荷载作用下土工构造物的永久变形发展过程。土的弹塑性模型建立在弹性理论和塑性增量理论基础之上,它将土的应变分解为可恢复的弹性应变和不可恢复的塑性应变,并分别由弹性理论和塑性增量理论计算。土的塑性增量理论通常由屈服面理论、流动法则和硬化规律组成。它们分别规定了塑性应变增量的产生条件、方向和大小。弹塑性模型在理论上更为严密,适用条件更为广泛,而且能够反映土体较为复杂的各向异性、剪胀性等力学特性,对于描述复杂加载条件下的变形与破坏机理具有极大的潜力。

Nova 和 Roberto(1983)<sup>[18]</sup>介绍了剑桥模型,对循环荷载下沙土或粘性土的变形作出模拟,运用的是弹塑性本构模型。

周健(1999)<sup>[19]</sup>运用不相关联的流动法则,建立了多重屈服面模型,模拟的是饱和软土的应变软化模型,模拟是建立在循环荷载作用下的。模拟饱和和软土孔压变化这项工作还是首次。

Li 和 Meissner(2002)<sup>[20]</sup>在临界状态土力学和新型运动硬化的基础上提出了一个双面模型,用以预测饱和粘性土循环荷载下的不排水特性。

刘振纹、秦崇仁、王建华等(2004)<sup>[21]</sup>采用拟静力的方法建立弹塑性蠕变模型,它将土的循环累积变形过程与静力作用下的蠕变过程等效从而简化了循环累积变形的计算。

Jastrzebska 和 Stenik(2004)<sup>[22]</sup>提出了一个描述循环荷载下粘性土特性的模型(NAHOS)。这个模型基于临界状态理论和边界面理论,其中还包含了应力路径突然弯曲时造成的刚度巨变的概念。

庄迎春、胡安峰、谢康和等(2005)<sup>[23]</sup>通过等分单层地基和固结时间,将土层的一维固结问题处理为恒载线性问题。利用受恒载作用下多层地基的一维线性固结问题的解析解,给出了受循环荷载作用下单层地基考虑压缩性变化的一维固结问题的解答。

李兴照和黄茂松(2007)<sup>[24]</sup>提出了一个能够描述循环加载条件下饱和软黏土流变特性的弹粘塑性本构模型。模型以边界面弹塑性理论为基础,采用滞后变形理论。

沈珠江(1984)<sup>[25]</sup>认为经典塑性理论把应变分成弹性应变及塑性应变两部分不能圆满说明土的塑性变形性质。根据土的变形特点,提出三重屈服面模式,三个

屈服面分别称为压缩屈服面、剪切屈服面和剪胀压硬屈服面。对砂土和粘土分别建议了屈服函数的具体表达式，并引用两组试验资料加以论证。

彭小云等(2007)<sup>[26]</sup>在《黄土沟壑区湿软地基处理的 FLAC 数值模拟》一文中提出黄土沟壑区分布的湿软地基目前还没有系统的理论研究，其工程性质与一般软土有一定区别。为合理选择该类型软土地基处理方案，结合工程实际，运用 FLAC 数值分析软件对湿软黄土地基不同处理情况下的应力应变进行了模拟。依据文中的数值模型可修改相应参数后用于其他相似断面，为地基处理方案的设计和施工提供依据。

包太等(2002)<sup>[27]</sup>应用 FLAC 对地下洞室与其上部地基的相互作用进行了分析，并和常规计算方法进行了对比。FLAC 设有多种本构模型，另外，程序还设有界面单元。可以模拟断层、节理和摩擦边界的滑动、张开和闭合行为。支护结构如砌衬、锚杆、支架等与围岩的相互作用也可以在 FLAC 中进行模拟。发现 FLAC 能够模拟现场地质条件，弥补一般常规方法不能考虑断层的不足，是一种简单易行的分析方法。

尹清锋、白冰等(2005)<sup>[28]</sup>根据使用该程序的具体实践，给出了在地下空间开挖分析中处理特殊问题的经验，提出了针对程序改进的一些想法和建议。

郭丰永、史宇等(2005)<sup>[29]</sup>采用岩土体变形和稳定性计算都很可靠地 FLAC3D 程序对京津唐告诉公路军粮城试验 1 段进行了三维数值分析，比较客观的反映了软土地基变形的实际情况。

### 1.3 研究目的

本课题的研究目的，就是对下覆软夹层的地铁车辆段地基上可能发生过大的沉降，导致上部轨道错位、列车脱轨等现象，进行数值模拟，能更合理的考虑现场地质条件，分析沉降及位移等，采取一定的方法和措施加以改善地基条件，以满足车辆段对地基的要求。

### 1.4 研究内容

根据已有研究成果及现状，通过理论分析与数值模拟，研究下覆软夹层地铁车辆段的路基沉降问题，模拟回龙观地铁车辆段的现场土质，分析沉降变形及危害，并采取运用新型材料钢渣混凝土进行置换软夹层土层，具体如下：

第一章阐述了选题的背景和研究意义，列举了国内外近年来软弱地基的处理方法以及有关地基沉降的发展状况，列出本论文的研究目的及技术路线

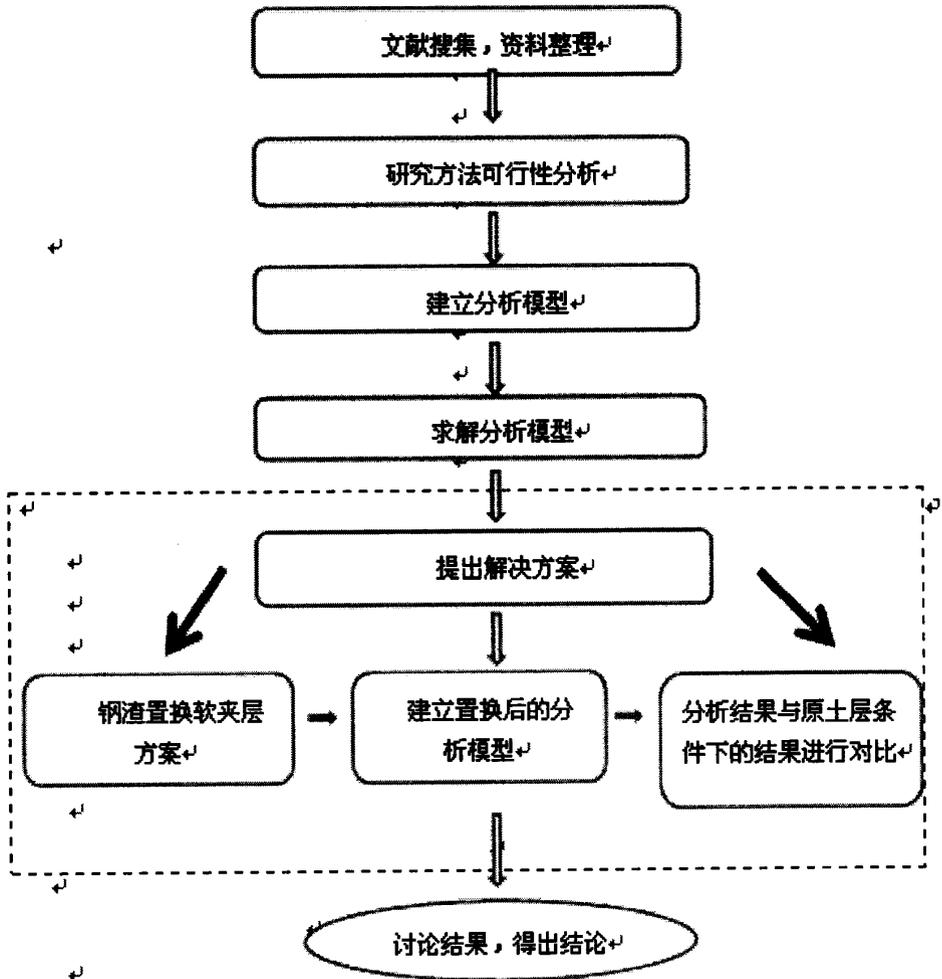
第二章介绍了几种加固软弱地基的方法，着重考虑有不均匀沉降地基的处理方法，并从工期、效果及经济等各方面进行综合的论证对比，总结出各种方法的优点缺点及适用范围。

第三章针对北京地铁回龙观车辆段的实际地质条件及交通状况，采取三种方案进行处理，即土工格栅-钢渣换填方案、钻孔填渣方案以及边界打桩方案，详细论述这三种方案的施工工艺，并分别阐述这三种方案的优越性。

第四章采用数值模拟的方法对第三章中所讲述的三种处理方法分别进行模拟，并与处理前的工后沉降进行对比，展示处理后的效果。

第五章结论，首先对文章中的第二、三、四章进行总结，论述这三章所得到的结果，总结出本论文的特点与创新点。然后研究展望，提出本论文中存在的问题并对以后的研究研究工作提出展望。

### 1.5 技术路线





## 2 几种加固软土地基方案的对比

本章介绍软弱地基的特点，并针对地基的不均匀沉降，详细论述了几种传统加固此种地基的方法以及适用范围。

### 2.1 软弱地基介绍

随着我国建筑工程项目的不断增多，软弱地基的处理变的越来越重要，软弱地基处理的好坏，不仅关系到工程建设的速度，而且关系到工程建设的质量，因此提高软弱地基处理方法具有重要的价值和意义。

根据《建筑地基基础设计规范》(GB5007-2002)规定，软弱地基系指主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土或其它高压缩性土层构成的地基。当地基压缩层主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土或其它高压缩性土层构成时应按软弱地基进行设计。在建筑地基的局部范围内有高压缩性土层时，亦应按局部软弱土层考虑。

以下简述这些软弱土的特性：

#### 1、淤泥及淤泥质土

它是在净水或缓慢流水环境中沉积的、经生物化学作用形成的、天然含水量高的、承载力（抗剪强度）低的、软塑到流塑状态的饱和粘性土。其含水量一般大于液限（40%~90%）；天然孔隙比一般大于 1.0 或等于 1.0；当土由生物化学作用形成，并含有机质，其天然孔隙比  $e$  大于 1.5 时为淤泥；天然孔隙比小于 1.5 而大于 1.0 时称为淤泥质土，淤泥和淤泥质土总称软（粘）土。淤泥及淤泥质土广泛分布在沿海城市，比如天津、上海、杭州、广州等城市以及内部含有湖泊等湿润地区。这种土质的特点就是强的压缩性、透水性低、流变性能大、容易造成不均匀沉降等特点。在荷载作用下，地基承载能力低，地基沉降变形大，不均匀沉降也大，而且沉降稳定时间比较长。

#### 2、冲填土

冲填土是由水力冲填泥沙沉积形成的填土。常见于沿海地带和江河两岸。冲填土的特点是含水量较大、具有较高的压缩性但是其强度低，属于软质土。当冲填土中含砂量较高时，它的工程性质就与粉细砂土相类似，此时就不必看作是软土‘但是当含砂量低黏土颗粒加多时，这时冲填土往往是欠固结的，强度和压缩性能都比较差，就必须进行地基处理，才能保证上部结构的安全性。

### 3、杂填土

杂填土是指含有大量建筑垃圾、工业废料及生活垃圾等杂物的填土。常见于一些较古老城市和工矿区。杂填土成分相对复杂，分布也很不均匀，具有很高的压缩性能从而杂填土的变相量大，浸水后容易产生湿陷现象，相同地基内，地基的承载力和压缩性也会有很大的差异，这样就会产生不均匀沉降或者局部沉降，后果严重，对于这种土质，一般需要经过加固或者地基处理才能够投入使用。对有机质含量较多的生活垃圾和对基础油侵蚀性的工业废料等杂填土地基，未经处理，不宜做持力层。

### 4、其他高压缩性土

饱和的松散粉细沙（含部分粉质粘土），亦属于软弱地基的范畴。当受到机械振动和地震荷载重复作用时，将产生液化现象；基坑开挖时会产生流砂或管涌，再由于建筑物的荷重及地下水的下降，也会促使砂土下沉。其它特殊土如湿陷性黄土、膨胀土、盐渍土、红粘土以及季节性冻土等特殊土的不良地基现象，亦属于需要地基处理的软弱地基范畴。

## 2.2 处理软弱地基的几种方案及适用范围

软弱地基是一种不良地基。由于软土具有强度较低、压缩性较高和透水性很小等特性，因此在软土地基上修建建筑物，必须重视地基的变形和稳定问题。在软弱土地基上的建筑物往往会出现地基强度和变形不能满足设计要求的问题，因而常常需要采取措施，进行地基处理。处理的目的是要提高软弱地基的强度，保证地基的稳定，降低软弱土的压缩性，减少基础的沉降和不均匀沉降。目前针对软弱地基的不同构成有很多不同的处理方法，下面就各种处理软弱地基方案进行分别讨论：

### 1 换土垫层法

换土垫层法，顾名思义就是在地基处理过程中将原先的浅层软弱填土挖除，并用强度高与压缩性低的土质进行换填，再进行分层碾压或者夯实来压实土层，从而能够有效地提高地基的承载能力，降低地基沉降变形。换土垫层法适用范围是浅层软弱地基，若是软弱土分布较浅且厚度小，可以讲软弱土全部挖除并置换。但是如果软弱土层分布较深，则不适合采用局部换填法处理，因为对于这种地基，上部结构刚度较差，荷载较大，这样在基底产生的附加荷载对下卧层的影响较大。因此换土垫层法经常用来处理轻型建筑、地坪、堆料场及道路工程等。垫层的主要作用一是可以提高持力层的强度，将建筑物的基底压力扩散到地基中去，使垫层以下软弱土地基的应力减小到许可承载力范围以内，从而满足稳定性要求；另

一方面低压缩性垫层替代了承受应力最大的软弱土地基以后，可以减少地基的沉降量。在路堤或土坝工程中，砂石垫层还起到排水固结作用，提高地基土的排水固结速度，防止季节性冻土的冻胀，消除膨胀土的膨胀性及失陷性土层的失陷性。

### 垫层作用

#### 1) 提高地基的承载力

浅基础的地基承载力与基础下土层的抗剪强度有关，如果以抗剪强度较高的砂或其它填筑材料代替较软弱的土，可提高地基的承载力，避免地基破坏。

#### 2) 减少沉降量

一般地基浅层部分的沉降量在总沉降量中所占的比例较大，在相邻基础宽度范围内的沉降量约占总沉降量的 50%。如果以较密实的垫层材料代替较软弱的土层，就可以减少这部分的沉降量。

#### 3) 加速软弱土层的排水固结

砂或砂石等垫层材料透水性大，软弱土层受压后，垫层可作为良好的排水面，可以使基础下面的空隙水压力迅速消散，加速垫层下软弱土层的固结从而提高其强度，避免地基土塑性破坏。

#### 4) 防止冻胀

因为粗颗粒的垫层材料空隙：因为粗颗粒的垫层材料空隙大，因此可以防止寒冷地区土中结冰所造成的冻胀。

### 1.1 垫层材料的选用

根据换填材料的不同，将垫层分为砂石(砂砾、碎卵石)垫层、土垫层(素土、灰土、二灰土垫层)粉煤灰垫层、矿渣垫层、加筋砂石垫层等，其适用范围见表 2.2.1。

表 2.2.1 垫层的土料

垫层种类	适用范围
砂(砂砾、碎石)垫层	多用于小型建筑工程的墙、沟等的局部处理。适用于一般饱和、非饱和的较弱土和下水黄土地基处理；不宜用于湿陷性黄土地基及大面积截载，密集基础和动力基础的软土地基处理；也不宜用于有地下水，且流速快，流量大的地基处理，不宜采用粉细砂做垫层。
土垫层	素土垫层 适用于中小型工程及大面积回填地基的处理。
灰土垫层	适用于中小型工程，尤其适用于湿陷性黄土地基的处理，也可用于膨胀土地基处理。
粉煤灰垫层	用于厂房、机场、港区陆域或堆场等大、中、小型工程的大面积填筑，粉煤灰垫层在地下水位以下时，其强度降低幅度在 30%左右
干渣垫层	用于中小型建筑工程，尤其适用于地坪，堆场等工程大面积地基处理和场地平整，铁路，道路地基等。但对于受酸性或碱性废水影响的地基不得用于干渣垫层。

### 1.2 换土垫层法的设计与计算

确定垫层的设计控制指标，一般由现场确定，当无试验资料时可参照表 2.2.2 使用。

表 2.2.2 换土垫层设计控制指标

土类	设计指标			压缩系数		
	容许荷载 (KN/m <sup>2</sup> )	压缩模量 (MPa)	密度 (Kg/m <sup>3</sup> )	含水量 (%)	框架	排架
粘土	150	10-15	1640-1680	20-22	0.96	0.95
	100	5-10	1610-1660	21-23	0.96	0.95
细砂	200	20	1630-1694	16		0.95
	150	15				
中、粗砂	300	25	1660-1800	16		0.94
砾砂	200	20				
级配碎石	300	30	2240-2250	8-10		0.95
混合碎石	250	25	2240-2250			
级配矿渣	300	30	1120-1130	8-12		0.95
混合矿渣	250	25	1120-1130			

注：(1) 级配碎石或矿渣是指破碎、筛分而得到的各种粒径（2~5cm）的碎石或矿渣。混合碎石或矿渣是指未经筛分而得到的自然粒径的碎石或矿渣，(2) 粘土的含水量位最佳含水量，其它如砂、石的含水量为施工所需的含水量。

有文献提出<sup>[30]</sup>垫层的材料最好因地制宜就地取材，可按照同填土的材料可分为砂石垫层（砂砾、碎卵石）、土垫层（素土、灰土、二灰土）、粉煤灰垫层、矿渣垫层等。砂石垫层适用于一般饱和、非饱和的软弱土地基处理，不宜用于湿陷性黄土地基，也不宜用于大面积堆载密集基础和动力基础的软弱土地基处理。土垫层适用于湿陷性黄土地基的处理，也可有条件用于膨胀土地基处理。粉煤灰垫层和矿渣垫层均可用于道路、堆场和小型建构筑物的换填垫层；易受酸、碱影响的基础或地下管网不得采用矿渣垫层，大量填筑粉煤灰及矿渣时，应考虑对地下水和土壤的环境影响。垫层底面的宽度应满足基础底面应力扩散的要求，可按下式计算：

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \quad (2.1)$$

式中： $b'$ 为垫层底面宽度。整片垫层的宽度可根据施工的要求适当加宽。垫层顶面每边超出基础的宽度不宜小于 300mm，从垫层底面两侧向上，按基坑开挖期间保持边坡稳定的当地经验放坡。

垫层厚度=应满足软弱下卧层验算=及地基变形计算：

$$P_z + P_{cz} \leq f_z \quad (2.2)$$

式中:  $P_z$  为垫层底面处附加应力设计值, kPa;

$P_{cz}$  为垫层底面处的自重压力标准值, kPa;

$f_z$  为垫层底面处软弱土层层面处的地基承载力设计值, kPa;

$P_z$  可按式进行简化计算:

$$\text{条形基础: } P_z = b(p - p_0) / (b + 2z \tan \theta) \quad (2.3)$$

$$\text{矩形基础: } P_z = bL(p - p_0) / (b + 2z \tan \theta)(L + 2z \tan \theta) \quad (2.4)$$

式中:  $p_0$  为基底处自重应力, kPa;  $P$  为基底压力, kPa。

### 1.3 沉降量

垫层本身的压缩量可在垫层强度计算以后确定设计干密度时作适当的计算, 垫层以下软弱地层的沉降量, 可按分层总和法确定, 则基础沉降量为:

$$S = S_c + S_p \quad (2.5)$$

式中,  $S_c$  为垫层平时的压缩量 (mm);  $S_p$  为自下卧层顶面开始略土层压缩变形之和, (mm)。当软弱土层较薄且沉降量小时, 则在一般情况下无需采用其他措施; 当垫层以下软弱土层的沉降量较大时, 但不影响建筑物建成后的正常使用时, 需要与之相适应的基础和上部结构, 以保持建筑物的整体稳定当较大的沉降量为建筑物所不容许时, 除非结合其他加固措施, 否则不适宜用本法。

垫层自身变形量可按下式计算:

$$S_c = [(P + aP) / 2] h_p / E_1 \quad (2.6)$$

式中,  $P$  为基底压力 (KPa);  $E_1$  为垫层压缩模量 (KPa);  $a$  为基底压力扩散系数。对于下卧土层的变形量  $S_p$  可按分层总和法确定

### 1.4 施工

垫层施工的关键是要保证使用的填料必须有良好的压实性, 以中、粗砂为好, 可掺入一定数量的碎石, 但要均匀分布, 分层压实。开挖基坑铺设垫层时, 必须避免对软弱土层的扰动和破坏坑底土的结构, 应及时回填基坑, 不应暴露过久或浸水。当采用碎石垫层时, 应在基坑底部先铺一层砂垫层, 然后再铺碎石层。垫层顶面的回填表土也需分层夯实。

#### 粉体搅拌法的施工

粉体搅拌是以石灰、水泥等粉体固化材料, 通过专用的粉体搅拌机械用压缩空气将粉体送到软弱地层中。凭借钻头叶片, 在原位进行强制搅拌, 形成土和掺和料的混和物。使其产生一系列的物理-化学反应, 从而形成柱状加固体, 提高土的稳定性能和力学性能, 一般在掺入 15% 水泥的情况下, 90 天龄期的无侧限抗压强度可达 20MPa<sup>[31]</sup>。

特点是: 可根据不同加固土的性质和需要达到的桩体要求, 选用不同种类、

不同掺量的固化材料，目前常用的有水泥和石灰等。利用固化材料可提高加固土的早期强度，大大缩短工期，由于固结屈服应力很大，故上部承重时，不会产生固结沉降。施工机具简单，设备小型便于操作。无振动和噪音对周围土体无挤压作用，可在建筑物、人口密集区邻近施工。加工费用低廉，技术效果明显，可用于大范围软基处理。

**作业条件：**工作场地表层硬壳很薄时，需先铺填砂、砾石垫层，以便机械在场内顺利移动和施钻，如场内桩位有障碍物，例如木桩、石块等应排除。机械设备配置：钻机、粉体发送器、空气压缩机、搅拌钻头。根据地质资料，通过原位测试及室内试验取得地基土、灰土物理力学及化学指标，选取最佳含灰量，作为设计掺灰量，决定设置搅拌范围，选择桩长、截面及根数。

**操作工艺：**粉体喷射搅拌法是在软土地基中输入粉柱体加固材料，通过和原位地基土强制搅拌混合，使地基土和加固材料发生化学反应，在稳定地基土的同时，提高强度的方法。

**施工原理：**由压缩空气输送的加固材料通过搅拌叶片旋转产生的空隙部位喷出，并随着搅拌叶片的旋转和原位地基土搅拌均匀混合一起，和加固材料分离后的空气，就沿着搅拌轴，由轴与土的缝隙处排出地面。

**固结原理：**粉体喷射搅拌法使用的固化剂，主要有石灰、水泥，还有石膏及通过固结反应而形成稳定的石灰粉体，在软土中加入生石灰，生石灰和土中的水分发生化学反应成熟石灰，水分被吸收，起到了胶结作用，并产生热量，柱体消化而产生体积膨胀 1~2 倍，促进周围土体的固结。拌入石灰后软土物理性能起了变化，加灰后软土液性指数随含水量增加呈线性递减，含水量小于 50% 的土加灰后，液性指数从原来流态进入半固态或固态，在稳定压力下压缩量随石灰粉含量增加而递减，压缩量减小达 1/3，提高石灰柱体的强度。拌入石灰后增加软黏土的渗透性，石灰柱在不同类型软土中起到排水作用。

**施工中注意：**空压机的压力不需要很高，风量不宜过大。钻机及桅杆安装在载体上，在地面上进行操作，要满足耐压力要求。在施工现场要设置石灰池，石灰粉要遮盖，一是防止飞粉污染，二是防止遇雨水产生化学反应，溅伤皮肤及眼睛，施工人员要配戴防护眼镜。钻头提升距地面 30~50CM 应停止喷粉，以防溢出地面。

## 2 深层密实法

深层密实法是通过用夯实、碾压和砂性土的震动等手段提高土的密实性，从而提高地基土承载力。它又分为强夯法、挤密法、粉体喷射搅拌法、孔内强夯法。

下面主要介绍一下强夯法。

强夯法也称动力固结法(Dynamic consolidation or Dynamic compaction)，是将重

锤（一般为 80 kN~400 kN）起吊至一定高度（一般为 10m~40m）后，使其自由落下，产生巨大冲击能量作用于地基，给地基冲击和振动，在一定范围内使地基强度提高、压缩性降低，改善了地基的受力性能。而且还能改善砂土的抗液化条件，消除湿陷性黄土的湿陷性。同时，夯击能还可提高土层的均匀程度，减少将来可能出现的差异沉降。

强夯法就其使用的工程类型和范围说来，已经十分广泛。一般工业与民用建筑、仓库、油罐、贮仓、公路和铁路路基、机场跑道及码头堆场等的地基加固，都使用了它。相对于有的地基处理方法，在施工工艺、施工造价等方面，强夯法有其竞争的优越性。它的局限性是其加固的有效深度以及施工时的噪音和振动。在现有的常规机械动能水平情况下，强夯法的加固有效深度约在 7~8m 左右。

近年，在深圳、上海等发展起来的多级低能强夯法，被认为是有助于在软土地区有效应用强夯加固法的一种改进。它是与轻型井点降水组合构成的新型的强夯加固施工工艺。其工艺流程特点是强夯一抽降水一强夯一抽降水等工序多次循环，所以是多级强夯。显然，这种强夯加固法优点是强夯后能及时排除土中水，消散土中的孔隙水压力，有利于土体加快密实；施工工艺设备等相对简单，工程费用也相对较省些。当然，相对于常规传统的强夯法，它的加固施工工期较长，此外，其加固有效深度仍然无更大的提高。

强夯法主要的加固效果来自于夯锤冲击地砧产生的高能量体波。由于土质改良是土颗粒振动的结果，体波的传播和衰减实际上决定了土体加固的区域，通常情况下夯锤对称轴方向的能量密度最大。随着与对称轴方向夹角的增大，能量密度逐渐减小。另外，当体波以更大半径的球面传播到更深的区域，能量随之衰减。强夯法在实践中已被证实是一种较好的地基处理方法<sup>[32-35]</sup>。

#### 强夯法适用条件

强夯法适用于处理从砾石到黏性土各类地基土，我们通常用来处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土、黏性土、杂填土、湿陷性黄土等。强夯法加固深度最好不超过 15 m，地下水位离地面 2 m~3 m，夯击对象最好为粗颗粒土组成。施工现场离既有建筑物有足够的安全距离（一般为 10 m），否则不宜开工。对于饱和软土，地表面应铺一层较厚的砾石、砂石等粗颗粒填料。

强夯法的有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定。在缺少试验资料或经验时，可按经验公式确定：

$$H=h_0+(1.67D\sim 2.5D) \quad (2.7)$$

式中： $h_0$  为夯实深度，m； $D$  为夯坑直径，m。

夯击遍数应根据地基土的性质确定，一般情况下，可采用 2~3 遍，最后再以低能量夯击一遍。对于渗透性弱的细粒土，必要时夯击遍数可适当增加。两遍夯

击之间应有一定的时间间隔。间隔时间取决于土中超静孔隙水压力的消散时间。当缺少实测资料时,可根据低级土的渗透性确定,对于渗透性较差的黏性土地基的间隔时间,应不少于3-4周;对于渗透性好的地基土可连续夯击。夯击点位置可根据建筑结构类型,采用等边三角形、等腰三角形或正方形布置。第一遍夯击点间距可取夯锤直径的2.5~3.5倍,第二遍夯击点间距可与第一遍相同,以后各遍也可适当减小。对于处理深度较大或单击夯击能较大的工程,第一遍夯击点间距宜适当增大。

## 2) 施工时注意事项

(1)根据要求处理的深度和起重机的起重能力选择强夯锤重,一般情况下夯锤重可取10 t~20 t,其底面形式宜采用圆形。锤底面积宜按土的性质确定,锤底静压力值可取25 KPa~40 KPa,对于细颗粒土锤底静压力宜取小值。锤的底面宜对称设若干个与其顶面贯通的排气孔,孔径可取250 mm~300 mm。

(2)强夯施工宜采用带自动脱钩装置的履带式起重机或其他专用设备。采用履带式起重机时,可在臂杆端部设置辅助门架。或采取其他安全措施,防止落锤时机架倾覆。

(3)当地下水位较高、夯坑底积水影响施工时,宜采用人工降低地下水位或铺填一定厚度的松散性材料,夯坑内或场地积水应及时排除。

(4)强夯施工前,应查明场地内范围的地下构筑物和各种地下管线的位置及标高等,并采取必要的措施,以免因强夯施工而造成破坏。

(5)当强夯施工所产生的振动对邻近建筑物或设备产生有害的影响时,应采取防振或隔振措施。

## 3 软弱地基的松木桩处理

### 1) 松木桩处理软弱地基的适应条件

软土地基的设计之前必须认真进行工程地质勘察和土工试验。只有查清土层和土质的情况,才能正确地进行设计和施工;再者,必须从场地的土层和土质的特点出发,对地基与基础的结构、施工及使用等方面进行综合考虑。通过方案比较、合理地选择地基处理方案。一般软土厚度小于5m时较为适宜用松木桩处理,为了便于打桩,桩长不宜超过4m。作端承桩时,为了保证桩尖能进入持力层,上部可先开挖至基础的埋深后再打桩。桩的材料必须用松木。因松木含有丰富的松脂,这些松脂能很好地防止地下水和细菌对其的腐蚀,价格也较为便宜。松木桩适宜在地下水以下工作,对于地下水位变化幅度较大或地下水具有较强腐蚀性的地区,不宜使用松木桩。

### 2) 松木桩的设计计算

在设计中短木桩用作挤密桩时可按下式设计:

$$S = 0.95d\sqrt{(1 + e_0)(e_0 - e_1)} \quad (2.8)$$

$$n = A / A_p \quad (2.9)$$

S——桩的间距(m)

d——桩径(m)

$e_0$ ——挤密前土的天然孔隙比

$e_1$ ——挤密后作要求达到的孔隙比，可按地基所需的承载力设计值再根据《建筑地基基础设计规范》附录五附表 5-3 或 5-4 确定

n——每  $m^2$  桩的根数

A——每  $m^2$  地基所需挤密桩面积， $A=(e_0-e_1)/(1+e_0)$

$A_p$ ——单桩横截面积( $m^2$ )

在设计中，当桩端有硬壳层存在时，可作为端承桩，按下式计算：

$$P_a = \Psi \alpha [\sigma] A$$

$P_a$ ——单桩承载力

$\Psi$ ——纵向弯曲系数，与桩间土质有关，一般可取 1。

$\alpha$ ——桩材料的应力折减系数，木桩取 0.5。

$[\sigma]$ ——桩材料的容许压力，kPa

实践证明，短木桩处理软弱地基时，有施工方便、经济效益明显的优点，它可避免大量的土方开挖，因而在松木资源较为丰富的地区。用松木桩处理软弱地基在经济和技术上是可行的，它不失为一种处理软弱地基的有效手段。

#### 4 碎(砂)石桩加固法

碎(砂)石桩法是用振动、冲击或水冲等方式在软弱地层中成孔后，在将碎石或砂挤压入已成的孔中，形成大直径的由碎(砂)石所构成的密实桩柱体，借以强化软基和改善软基承载性能。

工程实践的经验表明，碎(砂)石桩的加固方法，对于松散砂土地基或者是人工填土地基有较好的适用性。虽然近年来这种方法也逐渐扩展应用到粘性土地基，甚至是饱和软粘土地基，国内外也有成功的经验和信息报道，但国内也不乏应用失败的教训。主要是与其加固机理和施工方法对软土的不适应性有关。因为软粘土的渗透性一般很小，而灵敏度又高(结构性强的软土其灵敏度更是突出)，成桩过程中强烈地扰动和破坏了土体原始结构及其结构强度，加固施工结束后，地基土体便需要有一个由强度破坏到强度恢复直至强度强化的过程，这个过程是必需伴随着土中孔隙水的消散和孔隙压力向有效应力转换的性能的发生和发展的。软土中碎(砂)石桩对于这一性能的促进和“贡献”是非常缓慢和不“称职”的。所以，其对软土的挤密加固的效果较差，如果不再作一定的预压辅助，施工后的地基仍会留有较为可观的后期沉降。这一点，对于道路工程包括如昆承路这样的高等级

道路建设,显然不能很好的满足要求。

也许也是基于上述的实际情况,故有关规科<sup>[36]</sup>作了一定的提醒,碎(砂)石桩的产生和应用发展,首先是对于砂土地基的有效性和适用性,而对于软土地区的使用,有其局限性的建议:对于处理不排水抗剪强度不小于 20kPa 饱和粘性土地基和饱和黄土地基,应在施工前通过现场试验确定其适用性;对饱和粘性土地基对变形控制要求不严的工程也可采用砂石桩置换处理等。在昆承路工程的软基处理方案选择中,相对于水泥土搅拌桩的加固方法,其选择性的优势并不突出,故对此就不再作试验和投入。

### 5 注浆法与高压旋喷注浆法

注浆法与高压旋喷注浆法基本上也是属同一种类型的软土加固方法。相对于高压旋喷注浆法,前者的注浆法通常泛指压浆压力一般(例如,小于等于 1.0MPa)的压密注浆,它是利用液压、气压或电化学原理,通过注浆管把浆液均匀地注入土层中,浆液以充填、渗透和压挤等方式,赶走土粒间或岩石裂隙间的水分和空气后占据其位置,经人工控制一定时间后,浆液将原来松软的土粒或裂隙胶结成一个整体,形成一个强度较高的、防水性能好和化学稳定性良好的结石体,从而达到加固软土层的目的。一般的注浆法加固软土,其特点是施工工艺相对简单,但加固后的软土性质的改变不一定十分均匀。注浆法的这一弊病极大地限制了注浆法在加固需要承重的地基方面的使用价值,尤其是对于需要大面积地进行加固的工程项目。

高压旋喷注浆法则为压浆压力高达 20~40MPa 的注浆法,它是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻进至土层的预定位置后,以高压设备使浆液或水成为高压射流从喷嘴中喷射出来,冲击破坏土体,同时钻杆以一定速度渐渐向上提升,将浆液与土粒强制搅拌混合,浆液凝固后,在土中形成一个常为圆柱形的固结体。主要用于加固地基,提高地基土的强度和改善土的交通性质,故可作为承载用的半刚性桩地基基础,也可用于挖方工程的支挡结构物或需要进行防渗隔(止)水的帷幕结构物等情况下的工程中。

在全路段如果采用压密注浆加固软基,按设取一公里路段作为估价单位,设定的估算单位取值分别为:路段长 1000m,加固深度 20m,加固宽度 20m(只考虑单幅快车道下的地基土加固),注浆单价 80 元/m<sup>3</sup>,则将需耗费工程造价约为此 3200 万元。显然,除了在全路的某个局部区段或区块或节点上的路基工程的地基处理可以酌情考虑和选用外,就整个道路工程和道路区间而言,这是不可能采用的加固方案。而考虑到上述两种注浆法的工程单价相差可达 5~6 倍,所以,对于高压旋喷注浆法同样也因此不可能被选用。

### 6 预压-排水固结法

这是一种以预压加载和疏导土中水两种措施结合或只取其中之一进行加固软土的方法，它是以排除地基土中的孔隙水因而将土中的超孔隙水压力加速消散、迫使土体发生压缩沉降为机理特征的处理软基的方法。在铁路建设中，可在施工阶段运用此法来处理软基，可使地基提前发生沉降，当然这沉降量也是非常可观的，从而可以极大地减少铁路路基的工后沉降，从而满足车辆段的安全要求。

对软基的预压加载可以使用停放地铁的钢轨以及地基所填筑的材料作为荷载，也可以先堆填填土预压而后再卸除，然后再作地面基层、结构层等表面结构。但是，预压堆载总是需要堆卸交替，需要耗费时间和工程费用。特别是要在整个场地进行实施，那么这将会消耗大量的工时和资金。

疏导软土中的孔隙水以及消散孔隙水压力的常用方法是在软土层中埋置排水砂井或袋装砂井或塑料排水板等提供土中水的竖、径向的排承通道，再辅以在加固土层顶部水平向地铺置一定厚度的砂垫层作为水平向疏水通道。就目前岩土工程技术的发展水平和一般的施工技术，比较有效的处理深度将以 15~20m 为佳。如果在回龙观车辆段项目中采用塑料排水板和砂垫层联合处理软基，从经济以及效益上都不乐观。

除了在时间因素上要求难以满足外，回龙观车辆段在剥离表层耕植土、杂或素填土以及扣除路面结构层厚度等后，所需要换填的填土并不很厚，但若需施加预压所要求的填土荷载，则需要另行堆填，换言之，就是在回龙观车辆段工程中若采用预压和排水固结法加固软基，将没有合理利用路基本身的填土来实施预压加载。因此考虑到另行施工的预压填方荷载的重复堆卸搬运以及北京的交通质量，不仅费用较大，更需费时较长(除了固结排水也需费时外)，故最后未被采用。

### 7 水泥石搅拌桩加固法

这是一种近些年在国内得到大量发展和广泛应用的饱和软土加固方法，又称水泥石搅拌法，有干、湿法之分。它是利用水泥(或石灰)等材料作为固化剂，通过特制的搅拌机械，在地基深处就地软土和固化剂(浆液或粉体)强制搅拌，由固化剂和软土之间所产生的一系列物理、化学反应，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥加固土。从而提高软基的强度和增大抗变形能力。依据施工中进入搅拌的固化剂形态的不同，水泥石搅拌法又分为水泥石搅拌(以水泥浆液参与搅拌)和粉体喷射搅拌(以干粉喷射参与搅拌)两种(即湿法和干法)。由于施工时经过搅拌的水泥土常呈桩柱状加固(置换或挤密)了软土，因此，前者俗称搅拌桩法，后者俗称粉喷桩法。

采用水泥石搅拌法在软土中形成水泥石桩柱体，与桩周软土一起构成由半刚性桩体和软土共同组合的复合地基，起到直接承载上部结构荷载的作用。它将有效地改善地基土体受力状态，将上覆荷载通过这种复合地基扩散到下卧软层，起

到减小下卧软层承载的效果。较之于原来的未经加固过的软土地基，搅拌桩复合地基自是极大地提高了地基承载力，大幅度地减小地基沉降。

分析：

(1)运用此方法势必将要支出巨额施工费用，在工程总体投入中所占的比例太高，故看来是不可取的。

(2)即使采用水泥搅拌桩，仍然会因软土中的有机质对水泥浆的不良胶结而影响成桩质量，进而难以形成具有良好承载性能的复合地基硬壳层。如果这样，也就失去了采用水泥土搅拌桩加固软层的作用。

(3)目前现有的国内施工技术水平，对于水泥土搅拌桩的成桩施工，一般只在桩长不大于 18~20m 时有良好的质量保证，大体量的超长搅拌桩，尽管现在也已经有了多搅拌头的施工机械可以胜任，但势必将大幅度增加施工造价。

(4)大体量的水泥土搅拌桩施工对下卧淤泥质软土层的扰动十分剧烈，必需给予地基土层相当长的“休止期”。这与比较紧迫的建造工期要求不符。

综上所述，以下表 2.2.3 简明阐述几种方法的特点。

表 2.2.3 几种软基处理方法

序号	处理方法	常用处理深度	特点	
1	换填法	2—3	适用于浅层软弱土处理与低洼区域的填筑	
2	预压法	堆载预压	10	适用于油罐地基、堆场、机场、港区陆域、大面积填土和建筑
		真空预压	15	
3	强夯法	10	适用于堆场、港区陆域、大面积填土	
4	碎(砂)石桩法	振冲法	10	适用于不排水抗剪强度大于 20KPa 的淤泥质土；适用于油罐地基、地面堆载、路堤、岸坡和六层及六层以下的建筑地基。
		沉管法	10	
5	注浆法	6	适用于局部加固地基、抗震、防渗	
6	高压喷射注浆法		适用于托换、挡土、坑底加固、防水帷幕	
7	水泥土搅拌法	深层搅拌法	8—12	适用于多层建筑地基加固、挡土结构、机场、道路、防水帷幕
		水泥粉体喷射搅拌法	8—12	同上
8	树根桩		适用于基础托换加固	
9	锚杆静压桩		适用于托换、加固地基、对有缺陷的桩进行补桩加固	
10	沉降控制复合桩基	15—20	适用于八层及八层以下建筑地基	
11	土层锚杆		适用于挡土、抗浮	

### 3 控制下覆软夹层地铁车辆段不均匀沉降

本章以北京地铁回龙观车辆段作为工程背景,选取了土工格栅-钢渣换填方案、钻孔填渣以及边界打桩三种方案,对回龙观车辆段地基进行处理,着重阐述三种方法的施工工艺以及优越性。

#### 3.1 工程概况

北京城市轨道交通回龙观车辆段位于昌平区霍家营村南,兰各庄北侧,城铁霍营站的东北侧,是城市铁路的车辆集散和修理中心,是城市铁路建设的控制工程,包括停车列检库、月修库、定修库、吹扫库、办公楼、设备用房、厂房和宿舍楼等一系列建筑群体。回龙观车辆段(车辆段用地规划如图 3.1)占地 39.54 公顷,建筑面积 14 万  $\text{m}^2$ ,其中含车辆段、综合维修基地及生活设施三部分。东临规划建材城东路,北临规划黄平东路,西侧为北京啤酒厂,南侧为兰各庄及北京农药厂。



图 3.1 车辆段用地规划图

场地原主要为农田及荒地，地形起伏较大。场地红线内分布有若干垃圾坑和鱼塘。垃圾坑东西两侧各一个，深度约 6-13m，主要为生活垃圾；角塘主要分布在场地东南角，深度为 6-13m 不等。该场地在建设上部结构之前必须进行地基处理才能满足上部结构功能使用要求。其中场区内的两大生活垃圾坑及多个鱼塘是地基处理的关键，直接影响到整个场区地基处理的成败。

地质报告表明该地区位于古清河 I 级阶地地带，土层从上到下依次为人工堆积层、新近沉积层、第四纪沉积层。其中人工堆积层主要为粘质粉土素填土，垃圾坑内为生活垃圾和房渣土等，人工堆积层最大厚度为 11.0m。新近沉积层主要为粘质粉土、砂质粉土等。第四纪沉积层包括粘质粉土、粉质粘土、中粗砂等，如表 3.1.1，其有关岩土工程的设计参数则如 3.1.2 所列。在土层性质分析中该地层在场地平面 5m 以下都是承载力较好的土层，在车辆段上部结构的初步方案中，列检库有 3、4 的地基位于鱼塘位置新填土，架修库基本位于天然地基土。

表 3.1.1 回龙观车辆段地质土层分布

层序号	土名	层厚范围 (m)	一般图形描述
1	素填土	0.7~3.6	以粘性土堆填为主，夹少量碎砖等杂质，松散
2	淤泥质素填土	1.6	为鱼塘底淤泥，混杂粘性土，含多量有机质，孔隙较大
3	粉质粘土	0.5~1.6	黄褐色，含铁质氧化物，具针孔桩孔隙
4	淤泥质粉质粘土	0.6~12.3	灰色，含多量有机质，偶见褐色腐殖质层
5	粉质粘土夹粉砂	1.3~5.4	暗绿色，黄褐色，顶部含少量有机质，下部含多量铁质氧化物，结构均匀致密
6	淤泥质粉质粘土 夹粉砂	1.7~2.2	灰色，含多量有机质，夹团块状粉土或粉砂
7	粘质粉土	3~6	灰色，含有机质，结构紧密
8	粉质粘土	3.5~6.8	暗绿色，黄褐色，顶部含有少量有机质，下部含铁质氧化物
9	中粗砂	8.3~10.6	黄褐色，含多量铁质氧化物，成分以长石、石英为主，呈密实状态

3 控制下覆软夹层地铁车辆段不均匀沉降

表 3.1.2 各地基土层岩土设计参数一览表

层 序 号	土名	天然 含水 量%	土粒 比重	重力密 度 KN/m <sup>3</sup>	孔隙比	塑性 指数	液性 指数	压缩系 数 KPa <sup>-1</sup>	压缩 模量 MPa	内聚 力 KPa	内摩 擦角 °	先期	渗透	比贯	建议承	钻孔灌注桩设计参数	
												固结 压力 KPa	系数 *10 <sup>-5</sup> cm/s	入阻 力 MPa	载力标 准 (KPa)	极限侧阻 力标准值 (KPa)	极限端阻 力标准值 (KPa)
1	素填土	27.5	2.72	19.4	0.79	11.9	0.58	0.362	4.96	15.9	14.3				80	18	
2	淤泥质素 填土	44.3	2.6	16.4	1.288	18	1.17	1.05	2.18	6.4	8.1				50	10	
3	粉质粘土	29.0	2.72	19.4	0.814	12.7	0.8	0.36	6.03	14.9	11.6	180	1.03	0.73	70	20	
4	淤泥质粉 质粘土	41.3	2.69	17.95	1.119	14	1.41	0.768	3.29	6.1	11.4	67.5	1.01	0.33	60	18	
5	粉质粘土 夹粉砂	32.6	2.72	18.85	0.916	13.2	0.87	0.287	7.21	14.6	15.1	700		2.42	120	70	800
6	淤泥质粉 质粘土夹 粉砂	37.9	2.71	18.21	1.052	13.2	1.22	0.433	4.96	10.6	14.8	255		0.93	80	25	250
7	粘质粉土	23.5	2.72	20.2	0.661	11.9	0.51	0.185	9.43	27.7	13.6				200	60	900
8	粉质粘土	29.3	2.72	18.99	0.853	11.5	0.9	0.33	5.4	10.8	19.3			2.25	120	40	400
9	中粗砂	27.4	2.65	19.12	0.782			0.14	12.51	8.9	23.7	835			200	60	1000

回龙观车辆段自 2002 年 9 月建段以来，主要担负着城铁 13#线的运营工作。截止到 2003 年 10 月，日均客运量为 9 万人次左右，最高客运量达到 14 万人次。回龙观车辆段还担负着城铁 13#线运营电动客车的各项修理工作。图 3.1 为回龙观车辆段大门，图 3.2 为回龙观车辆段车场，图 3.3 为回龙观车辆段停车列检库。图 3.4 为车辆段停车列检库

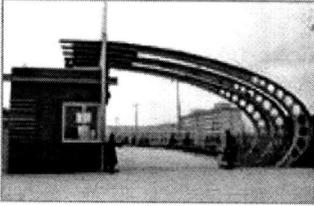


图 3.2 车辆段大门



图 3.3 车辆段车场



图 3.4 车辆段停车列检库

2002 年 9 月，10 组 30 辆城铁客车在内燃机车的牵引下，缓缓在回龙观车辆段进行首次冷滑试车（如图 3.5）。冷滑即为城铁客车不带电运行，热滑则指客车带电运营试验。客车由 3 辆编组电动列车前后各挂一辆内燃机车组成，由内燃机车提供动力。客车在约 500 米的轨道上往返行驶，技术人员坐在车厢内，观测仪器，记录各种数据参数。车身围着木板，参加试验的陈工程师说，这是为了测量车厢间距，防止客车运营中发生刮蹭。客车停在站台后，技术人员下车，用卷尺测量客车与站台距离。



图 3.5 城铁列车在回龙观车辆段进行适应轨道的准备工作

综上所述，北京地铁回龙观车辆段地基的特点就是：回龙观车辆段地基是由原先的渔场改建为垃圾填埋场，之后又将垃圾填埋场挖除修建为地铁车辆段，渔场和垃圾填埋场土质松软，承载力低，而在进行改建的时候，并没有完全的挖除清理干净，导致地基土质分布不均，地基局部软弱，从而导致地基不均匀沉降及

局部大幅度下沉。

## 3.2 土工格栅-钢渣换填处理地铁车辆段地基不均匀沉降

### 3.2.1 北京钢渣处理现状及在地基处理中的应用

#### 3.2.1.1 北京钢渣处理现状及钢渣性能

钢渣是炼钢厂的工业废料，其大量堆积造成的粉尘污染会严重影响周边环境。近年来，随着社会对废料处理的迫切要求和天然石料的供不应求，工程部门开始认识到钢渣中蕴藏着巨大的应用潜力，经过不断研究与试验，钢渣开始在路基工程中得到应用。在北京，北京市路政局率先开展二灰钢渣应用研究。经过多年的试验研究，钢渣在半刚性基层中的应用已经得到推广。2003年，北京市科委立项开展“工业钢渣在公路工程中的综合应用研究”，全面分析了钢渣用于沥青混合料的可行性。在此基础上，为了更加充分有效利用钢渣的特点和优势，2006年北京市交通委员会正式立项“钢渣骨料在沥青混凝土面层的应用研究”，论证了钢渣在抗滑磨损层中应用的可行性<sup>[37]</sup>。

2009年我国的铁钢产量已达5.678亿吨，钢渣的排出量近亿吨。目前，美国、德国、日本等发达国家的钢渣利用率在95%以上，由于种种原因，我国的钢渣并没有得到充分利用，利用率仅为10%左右，与发达国家相比还有较大的差距。距国家提出到2010年冶炼渣的综合利用率达86%的计划指标相差甚远，大宗的钢渣如今已在各钢铁公司周围堆积，严重破坏了周边的生态环境，影响钢铁企业的可持续发展。从目前发展趋势来看，钢渣的资源化利用途径主要集中在建筑行业，且以在水泥和混凝土中的应用作为发展的重点。在工程应用方面，钢渣的利用从二灰钢渣用于半刚性基层开始，之后还曾用于沥青混合料中。近年来，钢渣开始用于抗滑磨损层中，伴随着应用的不断推广和应用层位的拓展，对钢渣的研究也不断深入。

#### 1. 钢渣的基本性质

钢渣是转炉炼钢过程中生成的液态熔渣冷却固化后形成的一种工业废料<sup>[38]</sup>。路用渣是钢渣经过一系列处理工艺后得到的性质稳定的材料。其物理力学指标见表3.2.1

表 3.2.1 钢渣物理力学指标

指标	试验值			技术要求
	10-25mm	10-20mm	5-10mm	
石料压碎值/%	15.6	14.3		≤28
洛杉矶磨耗值/%	18	15.6		≤30
吸水率	0.47	1.25	1.96	≤2
视密度	3.371	3.327	3.326	≤2.5
对沥青的粘附性		4 级		≥4 级
	13.3	10.9	10.7	≤15
		4.7		≤12

与北京地区常用的石灰岩和玄武岩等石料相比，钢渣的一个特点是密度偏大，表观相对密度相对也较大，吸水率也较大。

钢渣的另一个特点是耐磨性好，其抗滑性能见表 3.2.2，钢渣另一个有别于常规石料的特点是体积稳定性，这与其化学成分密切相关。钢渣中的游离氧化钙和氧化镁是导致钢渣遇水膨胀的主要原因。但是当钢渣被存放半年以上后，钢渣的游离氧化钙含量低于 2%，从而通过将钢渣破碎后在室外堆积几个月来控制钢渣体积的膨胀性，从而消除其水化反应。由此可见钢渣可以作为骨料掺杂于土料中。

表 3.2.2 粗集料抗滑指标

指标	钢渣	玄武岩	技术标准
磨光值	56	42	≥40
冲击值	14.4	10.3	
磨耗值	15.6	13.8	≤28
压碎值	14.3	12.8	

综合来说钢渣单独应用于地基的作用主要有以下几个方面：

(1)吸水作用：钢渣中含有游离氧化钙，它将与土中的水生成熟石灰，有相当于游离氧化钙重量 32% 的水分被吸收，从而改善土的力学性质，同时钢渣吸水后产生膨胀，挤密桩周土体或其它溶洞，效果显著。

#### (2)粉化性

将钢渣随意放置在空气中，由膨胀继而引起崩解，由大块崩解为小块和粉末，这种现象称为钢渣的粉化，粉化后粒径小于 15mm 的重量占试样总重量的百分率，称为粉化率。当钢渣中含游离氧化钙 1%—4% 以上时，则可使钢渣发生膨胀崩解，大于 5% 时则会产生不同程度的粉化。但由于钢渣本身的不均匀性，即使同一炉所产生的粉化程度也有所不同。

### (3)水凝性

从转炉钢渣矿物的成分分析,钢渣中的主要水硬性矿物硅酸三钙  $C_3S$ 、硅酸二钙  $C_2S$  都具有水凝性。 $C_3S$  的早期和后期强度都较高,而  $C_2S$  早期强度低,后期强度高。与水泥熟料相比,钢渣中的  $C_3S$ 、 $C_2S$  含量低,且熔进杂质,形成固熔体,因而水凝性发展缓慢。一般是钢渣颗粒越细其水凝性发挥越充分。

### (4)离子团粒化作用:钢渣中含有硅酸三钙、

硅酸二钙等水泥矿物,用钢渣加固软土时,钢渣颗粒表面的矿物将与软土中的水产生作用,发生水解和水化反应,生成氢氧化钙、硅酸钙等;而软土作为多项分散系,土粒中含量最多的二氧化硅遇水后形成胶体颗粒,使小的土粒组成相对较大的团粒,从而提高土体的强度。

综上所述,钢渣作为集料替代天然砂石用于加固软土地基具有一定的先瞻性与效益。由于钢渣颗粒表面粗糙,且多棱角,可改善集料与土颗粒接触部分的粘结性能,另外,钢渣具有胶凝性能,在钢渣表面会发生水化,进一步改善集料与土颗粒及石块的粘结性能。故以钢渣为集料换填软夹层,地基将会更加密实。钢渣中含有耐磨性较好的矿物组分,与天然砂石相比具有良好的耐磨性能。且钢渣还具有高硬度、耐冲击性、抗冻融性等特性。这些特性可提高地基的耐久性能,延长地基结构的服役年限。

#### 3.2.1.2 钢渣在地基处理中的应用

钢渣是炼钢工业中用石灰提取渣杂质而大量生成的废渣,平均每生产 1t 的钢材就会产生 0.2t 左右的钢渣,我国钢渣年总排放量 1000 多万吨,综合利用率达 60% 左右,其中除了部分回收外,大部分应用到建筑工程或建材业。鉴于钢渣与矿渣在化学成分上的相似性,钢渣可以代替部分矿渣制造钢渣水泥。例如某些单位就采用了少量强碱激发剂代替部分熟料,研制成功节能型钢渣矿渣水泥。还有将 0-10mm 钢渣用于生产空心砖及其它混凝土制品,其效果显著。

使用不同的方法将钢渣灌入地基成桩,用以提高地基承载力和减少沉降,称之为钢渣地基加固法。在我国使用钢渣桩有记载的工程是 1982 年 12 月-1983 年 2 月上海市南汇县咸塘港桥台地基加固工程。在日本,从 1975 年起多次使用钢渣挤密桩加固地基,其主要是为了防止砂性地基土的振动液化。<sup>[39]</sup>

在上述应用的同时,如能将钢渣作为粉煤灰的骨料,形成钢渣混凝土,其力学强度将提高几倍,相当于加筋桩,提高抗剪或抗震作用。一般情况下,在混凝土中掺入一定量的粉煤灰后,除了粉煤灰本身的火山灰活性作用,生成硅酸钙凝胶,作为胶凝材料一部分起增强作用外,在混凝土用水量不变的条件下,可以较

好地改善混凝土的和易性，同时还可降低水化热。如果保持混凝土拌合物原有和易性不变，那么就可以减少用水量，起到减少孔隙的效果，从而提高混凝土的密实度和强度，并能增强耐久性。如果将钢渣和粉煤灰混合使用，那么钢渣桩就可以体现出粉煤灰和钢渣的物理特性、力学特点；同时钢渣可以起到加筋作用，提高桩体的强度，并充分利用废弃资源，减少对砂石的需求量，这样既可以减少废弃资源占用和破坏耕地，又减少其所产生的污染，从而减少对自然环境的破坏。钢渣和粉煤灰价格低廉，所以也可以减少工程造价。

### 3.2.2 土工合成材料及其工程应用

回龙观车辆段属于下覆软夹层的地铁路基，在选取的综合性方案中，主要是采用土工合成材料中的土工格栅以强化换填后的地基强度。此前的许多工程实践也已经表明，土工格栅等土工合成材料在岩土工程领域有着明显的效果和应用前景，作为岩土工程领域的一种新型材料，也受到了广泛关注。本文运用的这套加固方案，在加固机理上也许不够完善，但还是需要继续做出进一步的探讨。

#### 3.2.2.1 土工合成材料与土工格栅

土工合成材料是岩土工程领域内的新型材料，它以人工合成的聚合物为原料，制成各种产品置于土层的表面、内部或各个土层之间，发挥加强或保护土体等的作用。土工合成材料已经被制成多种产品类型，名目繁多，经过几次国际土工界的规范，目前基本统一认同分成为土工织物(有纺或无纺)、土工膜、特种土工合成材料及复合土工合成材料等四大类和若干小类(表 3.2.3)。土工格栅则分属于特种土工合成材料一类。

表 3.2.3 土工合成材料分类表

土工织物		土工膜	特种土工合成材料	复合土工合成材料
织造	编织	吹塑膜	土工格栅	复合土工膜
	平织	压延膜	土工网	加筋土工膜
	针织	涂敷膜	土工格室	塑料排水板
非织造	针刺		土工带	
	热粘		土工模袋	
	胶粘		土工垫	
				土工管
			膨胀性聚苯乙烯	

土工合成材料具有多方面功能，一种土工合成材料往往又兼具有数种功能。随着土工复合材料的发展，所兼有的功能将会更多。但总的说来，其主要功能可归纳为六种，即反滤功能、排水功能、隔离功能、防渗功能、防护功能和加筋功能等<sup>[40]</sup>。可见，它的这些作用都是有助于强化岩土介质在工程条件下的强度性状与抗变形能力的。所以，它的诞生被誉为是“岩土工程的一场革命”。

土工合成材料在工程上的应用较早，1946年，美国开展渠道廉价衬砌计划，在数千公里渠道上铺设聚氯乙烯膜防渗，取得很好的经济效益。1958年，在美国佛罗里达海岸，开始用土工织物块石防护。在我国，上世纪60年代用聚氯乙烯膜作渠道防渗。1965年，用沥青聚氯乙烯热压膜锚固子桓仁水电站混凝土支墩坝上游面防治裂缝漏水。80年代，用非织造土工织物防止铁路基床翻浆、公路路基和路堤加筋，河岸护坡等已经很普遍。土石坝用土工膜防渗，用土工织物作反滤和排水的实例也很多<sup>[41]</sup>。近些年来，高速公路建设蓬勃发展，采用土工合成材料进行软道路路基加筋、防渗、隔离、稳定、防护等等的应用的报道亦十分活跃<sup>[42]</sup>。

土工格栅是土工合成材料中的特种材料一类(表 4.2.4)，它是在挤压制成的聚丙烯板材或高密聚乙烯板材上成排冲孔，然后单向拉伸或双向拉伸成材。单向拉伸制成椭圆形孔和单向肋条。是为单向拉伸格栅(图 3.2.1a)。双向拉伸制成正方形孔和双向肋条，是为双向拉伸格栅(图 3.2.1b)。在制造过程中，经过定向拉拔，使聚合物分子定向排列，加强了分子链间的联结力，使抗拉强度比原材料提高 5~10 倍，而拉伸率降低到原材料的确 10%~15%，而且还降低了蠕变量。用作加筋材料，既具有高强度，又减少了变形墨。埋在土中加筋时，土砂嵌入格栅孔眼中间，与土砂间的摩擦系数可比土工织物与土砂间的摩擦系数增大 80%~100%。

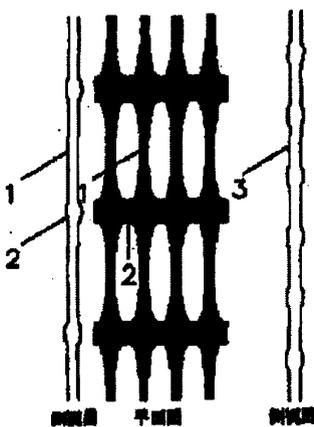


图 3.2.1a 单向拉伸格栅

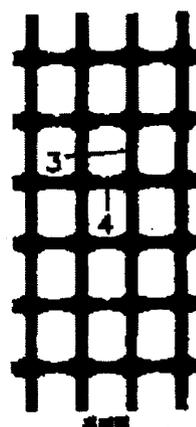


图 3.2.1b 双向拉伸格栅

图中 1-肋条；2-横条；3-纵肋；4-横肋

土工格栅型号很多，肋条间距、肋条厚度、材质与抗拉强度各有差别。表 3.2.4 介绍了某国双向拉伸土工格栅一种产品的规格。表 3.2.5 则是几种土工格栅的物理

力学性质。

表 3.2.4 双向拉伸土工格栅 SS2 产品规格

产品宽度 (mm)	3000	产品宽度 (mm)	3000
纵肋数 (1/m)	37	纵肋距 (mm)	27.23
横肋数 (1/m)	27	横肋距 (mm)	36.17
最大孔长 (mm)	34.42	纵肋最小厚度 (mm)	1.54
最大孔宽 (mm)	24.73	横肋最小厚度 (mm)	1.74
纵肋最小宽度 (mm)	2.68	节点最大厚度 (mm)	4.17
横肋最小宽度 (mm)	2.93	单位面积质量 ( $g/m^2$ )	2026

表 3.2.5 几种土工格栅的物理力学性质

种类	宽度	卷长	网眼尺寸	抗拉强度	材料	拉伸	主要用途
			纵 $\times$ 横 (mm)	纵/横			
SS1	3	50	28 $\times$ 28	12/17	PP	双向	软基表层加筋 缓边坡加筋
SS2	3	50	28 $\times$ 40	15/28	PP	双向	软基表层加筋 缓边坡加筋
SS3	3	50	46 $\times$ 71	12/28	PP	双向	软基表层加筋 缓边坡加筋
SR1	1	30	53 $\times$ 10	60/13	HDPE	单向	陡坡加筋, 沉排 基础挡土墙加筋
SR2	1	30	110 $\times$ 22	80/13	HDPE	单向	陡坡加筋, 沉排 基础挡土墙加筋
GM1	1	50	51 $\times$ 51	15/15	HDPE	双向	透水骨架

回龙观车辆段软基处理采用的是钢渣混合土换填和铺设土工格栅强化的方案, 在施工中决定选用双向土工格栅, 其主要物理力学指标如下: 网眼尺寸:  $\approx 25\text{mm}$ , 纵向 (横向) 抗拉强度:  $\geq 40\text{KN/m}$ , 伸长率:  $\leq 4\%$

### 3.2.2.2 土工合成材料的加筋功能与作用

加筋功能是土工合成材料的主要功能之一。随着土工合成材料的广泛应用, 各种高强度的加筋材料, 如土工格栅等得到了广泛的采用。本文在回龙观车辆段下覆软夹层的地基处理中采用土工合成材料中的土工格栅, 铺设于钢渣垫层的底部, 这样就可以发挥其加筋作用以强化软基, 提高软土地基的强度和抗变形能力。

在中外历史上, 古代劳动人民都有应用天然纤维于土体中起加强作用的记载,

可见“加筋”的概念源远流长。近代则是自法国工程师 H. Vidal 于上个世纪六十年代开创的“加筋土”技术开始,经过三十多年的发展,已成为一项效果显著工程实用技术,得到广泛的应用。将土工合成材料应用于加筋软基上的堤坝建筑则是从 1971 年开始。在我国,1983 年铁道部首次将土工筋材用于加强铁路路堤并获得成功。此后,由于这种加固方法效果理想,施工简便,造价也低廉,因此得到迅速发展。目前已广泛应用于水利、电力、公路、铁路、港口等各种工程实践中,取的显著的社会与经济效益。同时,也必须指出,土工合成材料之应用于软基加筋强化软土的作用,在其设计计算方法和理论原理解释等方面却是远为滞后于工程实际。不少加筋成功的工程实例还未得到满意的或比较有效的理论分析<sup>[43]</sup>。

在地基处理工程中,土工合成材料的加筋作用主要应用于加筋土挡墙、加筋陡坡、加筋垫层等工程中,例如,本文讨论的回龙观车辆段的土工格栅强化软基的措施就属于加筋垫层应用的工程项目。实践表明,加筋垫层的主要作用在于改变地基浅层的应力场和应变场,从而减小土体的侧向位移,均化基底压力,减少不均匀沉降,进而提高堤坝的稳定性。通常,采用土工织物加筋路堤软基,一般可取得如下主要效果:

(1)扩散和均化填土荷载压力。由于加筋垫层的应力扩散作用,使堤身荷载应力分布到更大的面积,从而减小和均化了应力强度。文献<sup>[44]</sup>的计算资料认为,加筋后堤底范围内平均应力约可减少近 30%,轴线处应力可减少 16.20%。由此可见其显著效果之一斑。同时,工程研究显示,当下卧软层厚度比较深厚而又必须使用土工合成材料时,应设置足够的加筋垫层厚度,这样,应力扩散作用和水平约束作用同时发挥才能取得良好的效果。但是,也有研究和观测资料认为,土工合成材料在薄层软基时的强化作用比深层软基的作用效果明显得多<sup>[42]</sup>。

(2)限制了堤基的侧向变形。由于土工织物和土体间存在着摩擦力,这种摩擦作用将改变体系的应力场和位移场,而限制地基的侧向变形是其直接效果之一。列向变形减少的幅度是随着上覆填土荷载高度的增高而增大的。这是因为填高增赶后,土工织物的变形增加,其加筋作用越加明显的缘故。文献的计算资料,人为,在设定填高最大值为 6m 的条件下,堤趾的侧向变形可减少达 40.9%。

(3)减少地基的沉降和不均匀沉降。对于加筋能否减少地基沉降量,目前工程界尚有不同看法。一种观点认为加筋垫层不但能提高地基承载力,而且也能减少地基沉降量,而且,采用加筋垫层,可以均衡路堤断面范围内的差异沉降,减小弯沉盆的深度<sup>[42]</sup>。不但能稠显减小路基沉降的不均匀性,约束路基的水平位移,而且尚能有效降低路基的总沉降量<sup>[44]</sup>;另一种观点则认为加筋垫层能显著提高地基承载力,但对减少地基沉降量是无效的;第三种观点稍有“中庸”,即加筋与否对最终沉降量几乎没有影响,但加筋效果体现在施工期间抑制和降低沉降与侧向

位移的发展,有利于提高路堤的稳定性。而且室内模型试验表明,在软土地基上,每铺一层土工格栅,地基承载力提高一倍以上,总体沉降量减少 21%。由此,可以这样认为,加筋垫层的存在,将极大地提高地基承载力和稳定性,但也能产生减少地基沉降量(进而影响到不均匀沉降)的功效,只是在强度与变形二者之间,对前者的强化较为显著罢了。事实上,大量的有限元分析计算和对比表明,对于不同形状的路堤和地基土层,加筋后都能使堤轴处的沉降减少 10~30%<sup>[44]</sup>,而堤坝中心轴线处与两侧堤趾处的沉降差则减少得更多。对于这一分析结果的机理解释认为,地基的总沉降量是由不排水初始沉降  $S_i$ 、固结沉降  $S_c$  和次固结沉降  $S_s$  三部分构成,加筋后,地基的应力扩散了,竖向应力的减小必然导致固结沉降的减少(加筋前后地基土体的压缩模量当然未必发生了大的变化)。再者,由于地基的初始沉降是因地基土在荷载下的侧向变形导致的体积不变的竖向沉降量,如果加筋作用减少了地基土的侧向变形,其结果必然减少了因此引发的初始沉降量。这样,地基总沉降量组成中的两个沉降分量( $S_c$ 、 $S_i$ )有了减少,而次固结沉降又并不会因加筋而增加,因此,地基总沉降必然会减小。

### 3.2.3 土工格栅-钢渣换填施工工艺

正如许多土建、道路和市政等领域的工程实践所揭示的那样,工程的设计、施工与监控是一项完整的系统工程,一个不可分割的过程整体。文明、优异的施工措施将是保证工程成功的关键。反之,正如俗语所说,野蛮、无序的施工将不仅耗尽正确、优秀设计所赋予的安全系数,而且将断送整个工程的成功前景。基于这样的认识,回龙观车辆段工程的伊始,我们便落实了一系列严格的质保和安保的管理措施。力求严密有序的施工组织设计和工序工艺流程,其中也包括了在软基处理这一个施工环节。运用土工格栅结合钢渣换填方案处理回龙观车辆段地铁路基的处理示意图如图 3.2.2 所示

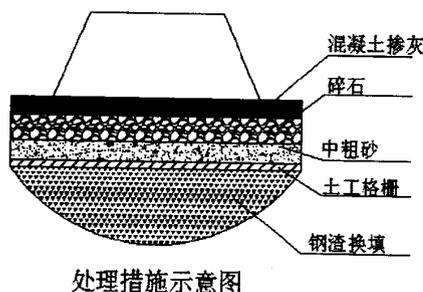


图 3.2.2 土工格栅-钢渣换填示意图

### 3.2.3.1 钢渣换填施工工艺

《建筑地基处理技术规范》(GB50007—2002)中规定:换填法适用于淤泥、淤泥质土、湿陷性黄土、素填土、杂填土地基及暗沟、暗塘等的浅层处理。换填法在国外亦有的将它归属于“压实”的地基处理范畴,“压实”可认为是由土排除空气而使空隙减小,因此它不同于“固结”,“固结”是由于排除孔隙水而使孔隙体积减少。换填后将土层压实,就增加了土的抗剪强度,减少了渗透性和压缩性,减弱了液化势,并增加了抗冲刷能力。目前此方法经常应用的范围包括淤泥、淤泥质土、松散素填土、杂填土、湿陷性黄土、季节性冻土、已完成自重固结的吹填土,及暗塘、暗浜、暗沟、局部松软透镜体、废井、废坑、墓穴、人防工程、拆除旧基础后的坑穴和低洼区的填筑。

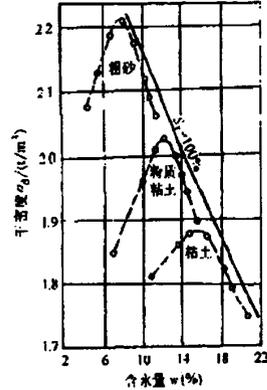


图 3.2.3 击实试验

土的压实机理:当粘性土的土样含水量较小时,其粒间引力较大,在一定的外部压实功能作用下,如还不能有效地克服引力而使土粒相对移动,这时压实效果就比较差。当增大土样含水量时,结合水膜逐渐增厚,减小了引力,土粒在相同压实功能条件下易于移动而挤密,所以压实效果较好。但当土样含水量增大到一定程度后,孔隙中就出现了自由水,结合水膜的扩大作用不大,因而引力的减少就不显著,此时自由水填充在孔隙中,从而产生了阻止土粒移动的作用,使压实效果又趋于下降。因此在设计时要选择一个“最优含水量”,这就是土粒的压实机理。

#### 1 一般规定

1) 换土垫层法适用于处理各类浅层软弱地基及不均匀地基。当在建筑物范围内上层软弱土较薄时,则可采用全部置换处理。对于处理范围内存在的松填土、暗沟、暗塘、废坑、废井、墓穴或拆除旧基础后的坑穴,保持建筑物地基整体变形均匀是换土垫层法处理地基应遵循的基本原则。

2) 采用换土垫层法全部置换厚度不大的软弱土层,可取得良好的效果。对于深厚的软弱土层,不应采用局部换土垫层法处理地基。对于不同特点的工程,还应分别考虑换填材料的强度、稳定性、压力扩散能力、密度、渗透性、耐久性、对环境的影响、价格、来源与消耗等。当换土量大时,尤其应首先考虑当地材料的性能及适用条件,此外还应考虑所能获得施工机械的使用条件等综合因素。

3) 当采用换土垫层法进行地基处理时,应根据建筑物体形、结构特点、荷载性质和量级、场地岩土工程条件及周围环境,并结合施工机械设备与当地材料的来源等进行综合分析,合理进行换填设计,选择适宜的换填材料和相应的施工方法,保证

技术先进,经济合理。

## 2 施工原则

1) 对地基持力层中存在的软硬不均点,要根据对持力层的稳定性及建筑物安全的影响确定处理方法。对不均点范围小,埋藏很深,四周土层稳定,地基压缩没有影响时,对该不



图 3.2.4 碾压现场

均点可不作处理。否则,应予挖除,并根据与周围土质及密实度均匀一致的原则,分层回填,夯压密实,以防地基持力层的不均匀变形对上部建筑物造成破坏。

2) 对垫层底部的下卧层中存在软硬不均点,要根据对垫层稳定及建筑物安全的影响确定处理方法。对不均匀沉降要求不高的一般性建筑,当下卧层中不均点范围小,埋藏很深,处于地基压缩范围以外,且四周土层稳定时,对该不均点可不作处理。否则,应予挖除,并根据与周围土质及密实度均匀一致的原则,分层回填,并夯压密实,以防止下卧层的不均匀变形对垫层及上部建筑物产生危害。

3) 当垫层下卧层为软弱土层时,因其具有一定的结构强度,一旦被扰动强度大量降低,变形大量增加,将影响垫层及建筑物的安全使用。通常的做法,是在开挖基坑时预留厚约 200mm 厚的保护层,待做好铺填垫层的准备后,对保护层挖一段随即用换填材料铺填一段,直到完成全部垫层,以保护下卧层的结构不被破坏。在软弱下卧层顶面设置厚 150~300mm 的砂层防止粗粒换填材料挤入下卧层时破坏其结构。

4) 在同一栋建筑物下,应尽量保持垫层厚度相同;对于厚度不同的垫层,应防止垫层厚度突变;在垫层较深部位施工时,应注意控制该部位的压实系数,以防止或减少由于地基处理厚度不同所引起的差异变形。

关于换填法,需注意如下几点:

1) 大面积填土产生的大范围地面荷载影响深度较深,地基土的压缩变形量大,沉降延续时间长,与换填法浅层处理地基的特点不同,因而大面积填土地基的设计和施工时,地面堆载应力求均衡,避免大量、迅速、集中堆载,并根据使用要求、堆载特点,结构类型和地质条件确定允许堆载的大小和范围。堆载不宜压在基础上,应在基础施工前不少于三个月完成大面积填土。

2) 通常基坑开挖后,利用分层回填压实,虽也可处理较深的软弱土层,但经常由于地下水位高而采取降水措施。

3) 坑壁放坡,占地面积大或需要基坑支护。

4) 施工土方量大,弃土多等因素,从而使处理费用增高、工期拖长,因此换填法的处理深度通常宜控制在 3m 以内,但也不宜小于 0.5m,因为垫层太薄,则

换土填层的作用并不显著。

### 3 钢渣黏土混合物垫层施工要点

1) 开挖基坑铺设钢渣黏土混合物垫层时,必须避免扰动软弱土层的表面,基坑开挖后应及时回填,不应暴露过久或浸水,并防止踏践坑底。钢渣黏土混合物垫层底面应铺设在同一标高上,如深度不同,基坑底面应挖成踏步或斜坡塔接,施工应按先深后浅的顺序进行在基坑内分层铺设钢渣黏土混合物,然后逐层夯压密实。下层的密实度经检验合格后,方可进行上层的施工。

2) 人工级配的钢渣黏土混合物垫层,应将钢渣和黏土拌和均匀后,再行铺填夯压密实。分层虚铺厚度必须按所使用夯压机具来确定,每层钢渣黏土的夯压遍数应根据设计要求的干重度在现场试验确定。为了保证土施工控制的含水率不致变化,拌合均匀后的钢渣黏土应在当天使用。夯压密实后,在短时间内水稳性及硬化性均较差,易受水浸而膨胀疏松,影响灰土的夯压质量。钢渣黏土混合物筑完后,应及时回填基坑或作临时遮盖,防止日晒雨淋。刚筑完或尚未夯压密实的钢渣黏土混合物如遭受雨淋浸泡,则应将积水及松软的钢渣土除去,并补填夯压密实,受水浸泡的钢渣黏土层,应在凉干后再夯压密实。

### 4 钢渣黏土混合物垫层设计方案

为了充分利用天然地基强度,减小基底附加应力和调整基础变形沉降,设计时从三个方面着手。第一,在土体不发生整体剪切破坏的前提下,以基础的变形沉降为控制条件。杂填土作为持力层,其承载力显然不够。因此必须将杂填土挖除,采用钢渣黏土混合物垫层进行处理的方法,其主要目的在于提高浅基础的承载力。以质量轻强度大的钢渣与黏土的混合物代替基底下可能产生剪切破坏的软土。实际工程中,先挖除大约 2m 厚的杂填土,余下 3m 左右的杂填土采用 80KN 的压路机碾压,碾压后的杂填土的变形模量控制在 4000~5000KPa 范围。

### 5 质量检验

1) 垫层的施工质量检验,对于粉质粘土、灰土可用环刀法、贯入仪、轻型动力触探或标准贯入试验;对于砂石可用重型动力触探。砂垫层使用的环刀容积不应  $<200\text{cm}^3$ ,径高比 1:1,以减少其偶然误差。在粗粒土垫层中可设置纯砂检验点,按环刀取样法检验,或用灌水法、灌砂法进行检验。

2) 检验时必须先通过现场试验,在压实系数达到设计要求的垫层试验区内,利用动探、贯入试验测得的贯入深度或击数,作为控制施工压实系数的标准,进行施工质量检验。

3) 用环刀法检验垫层的施工质量时,取样点应位于每层土厚度的  $2/3$  深度处。检验点数量,对大基坑每  $50\sim 100\text{m}^2$  不少于 1 个检验点;对基槽每  $10\sim 20\text{m}$  不少于 1 个点,每个独立基础不少于 1 个点。采用贯入仪或动探检验垫层的施工质量时,每层

检验点的间距应 $<4m$ 。

## 6 施工工艺

施工方法包括，机械碾压法、重锤夯实法和平板振冲法三种。

1) 机械碾压法：采用压路机、推土机、羊足碾或其他压实机械来压实地基土。其施工时应先将拟建建筑物范围一定深度的软弱土挖去，现将基坑底部碾压，再将沙石、素土、或灰土等垫层材料分层铺在基坑内，逐层压实。采用机械碾压施工时应注意保证碾压的速度：平碾不能大于 $2km/h$ ；羊足碾不能大于 $3km/h$ ；振动碾不能大于 $2km/h$ ；振动压实机不能大于 $0.5km/h$ 。由于分层回填碾压应注意防止基坑灌水或雨水下渗，也应控制施工含水量。防止地基因水处理不当而发生破坏。

2) 重锤夯实法：重锤夯实法是用起重机械将夯锤（如图 5.3.3）提升至一定的高度后，然后自由下落，不断重复夯击已加固地基。其主要设备为起重机械、夯锤、钢丝绳和吊钩。其施工顺序，应一夯挨一夯的顺序进行，在独立基坑内，易按先外后里的顺序夯击。当夯实完毕时，应将基坑表面修整之设计标高。采用重锤夯实施工时，应控制土的最优含水量，使土粒间有适当的水分润滑，夯击时易于相互滑动挤压密实；同时防止土的含水量过大，避免夯击成“橡皮土”。

3) 平板振冲法：平板振冲法是利用振动压实机（如图 5.3.4）来压实无粘性土或粘粒含量少、透水性较好的松散杂填土地基的方法。振动压实施工时，先振基槽两边，后振中间。振动压实的效果与填土成分、振动时间等因素有关。应注意其振动时间对地基土的影响。

对于回龙观车辆段下覆软夹层地铁路基，本文采用的处理方法是钢渣与黏土混合物进行换填，其施工方法如下：

### 一、现场情况说明

该工程开挖至设计标高后，未到设计要求的粉质粘土（新近沉积）持力层，根据勘察要求，对未到持力层部分开挖后进行换填。

经过现场踏勘，基础底以上均为回填土，现根据勘察报告描述，约向下挖除 $5m$ 可到持力层。先将集水坑挖设完毕，需将原有施工面破坏掉，重新换填施工。

### 二、施工部署

#### 1、施工便道

为了方便施工，在北侧留设施工便道，方便砂石运至槽底。

#### 2、材料准备

本项工程的浅层换土垫层法拟采用钢渣换填垫层，即钢渣与普通黏土垫层。

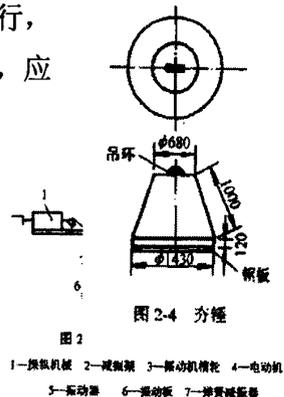


图 2-4 夯锤

图 2

1—起重机械 2—钢丝绳 3—滑轮 4—电动机  
5—吊钩 6—木板 7—增重砝码

图 3.2.5 夯锤

填料采用粒径较好的级配砂石。现场储备足量的填料，保证换填的时候不受材料供应短缺的影响。

### 3、机械人员投入

#### 3.1、人员投入

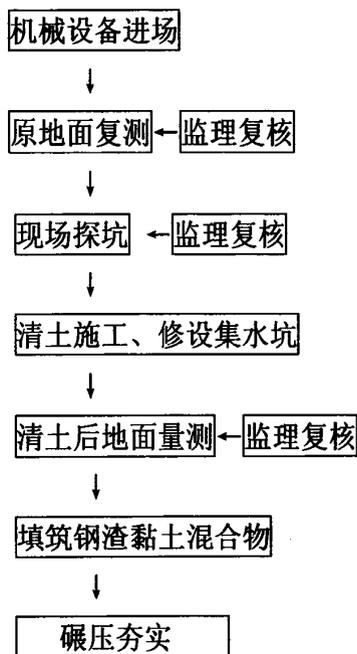
- (1) 项目经理：1 人
- (2) 技术负责人：1 人
- (3) 施工员：2 人
- (4) 质检员：1 人
- (5) 测量员：2 人
- (6) 安全员：1 人
- (7) 实验员：1 人
- (8) 配合工人：20 人

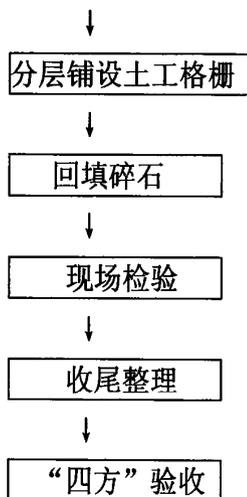
#### 3.2 机械设备

表 3.2.6 机械设备

序号	名称	型号	数量
1	挖掘机	220	1
2	挖掘机	60	1
3	装载机	Z50	1
4	自卸汽车		2
5	夯实机		2

### 三、施工工序





#### 四、土方施工

##### 1、测量放线

根据现场土层破坏面积放出处理边线，确定换填范围，用白灰洒线，避免欠挖或超挖。

##### 2、土层清理

2.1、用挖掘机、装载机配合把不稳定土层运至基槽以外。

##### 2.2、清土顺序

清土施工至上而下，先清理面层并及时回填保证道路畅通，在着重清理破坏严重处，确保提早换填完毕。

##### 2.3、清土原则

- ①、清土必须干净彻底，不留死角。
- ②、清理时必须把不稳定土层全部清除，直至检测合格，并能满足设计要求。
- ③、清土过程中严禁超挖，破坏稳定土层。
- ④、预留 15-20cm 人工清理。
- ⑤、清理完毕后及时拍照存证。

##### 2.4、清土后测量

清土后报请监理和施工单位三方量测和验收，达到要求后进行下一道工序施工。

清土完成后，测量人员及时放出处理边线，经双方认可后，及时回填钢渣黏土，确保施工的连续性。

#### 五、换填施工

由于该工程二次开挖后，大部分未达到设计要求，根据勘察单位要求，将该部分不稳定土层挖除，用钢渣换填至二次开挖标高后，进行基底静载试验，经现场交底，钢渣换填范围从筏板外边线以外不小于 0.3m。

1、工艺流程：检验钢渣黏土混合物质量 → 分层铺筑钢渣黏土混合物 → 夯实或碾压 → 找平验收

2、对钢渣黏土进行技术鉴定。土料采用粘质土，钢渣则选定首钢产出钢渣。对于粘质土要求是，土质均匀，不能是淤质土，塑性指数在 12~18 之间，液限和塑限含水量分别控制在 50% 和 26% 以下。其最小 CBR 强度不大于 8。据此，经过比较，最后选定取用回龙观区域旁边的表层黏质黄土。其有关指标如下：天然含水量 17.6%，十分接近于最佳含水量。液限含水量 37%，塑限含水量 16%，则其塑性指数为 12，最大干密度为  $1.698 / \text{m}^3$ ，最佳含水量 15.8%，CBR 强度值为 8.7。上述指标均符合设计要求。由于天然含水量接近最佳含水量，所以自取土点运至施工现场无需过多翻晒便可以投入填筑使用。此外，取土点距离回龙观较近，取运也相对比较便捷。

### 3、铺筑土工格栅以及钢渣黏土

对原状表层地基土进行清除和疏排水，然后即进行表面碾压，碾压机械采用 6~8 吨的压路机，以静压为主(不作振动碾压)。压实度定为 0.85(重型击实标准)。。碾压结束并经验收合格后，在原土地表上铺设土工格栅。铺设要求平整、拉紧没有褶皱，并用插钉将其牢固在钎灰土面以固定其联结，搭接长度不小于 15cm，搭接处用尼龙绳扎紧。本次土工格栅展铺宽度为 20m，两端向上包裹，折回长度近 2m。土工格栅铺设完毕应及时进行换土堆填施工，必需确保土工格栅在阳光下的暴晒时间不得超过 48 小时。根据设计，此次换土垫层总厚度为 2m，分 5 次分层碾压，每分层 40cm。铺填的钢渣需采用较细且均匀的颗粒，需过筛。第 1、2 分层钢渣采用异地拌和，小吨位车辆运送至现场，一次碾压成型，以避免损坏土工格栅。其上之第 3、4、5 层钢渣则采用现场翻耕、拌和和碾压。碾压施工机械采用宝马机、重型压路机和平地机。由于本工程中选用的黏土十分均质，几乎不含杂质(如草根、结石等)，天然含水量又接近最佳含水量。因而较易于碾压垫层成型，而且也便于控制碾压质量，成型后测得的压实度可达到 0.9 及其以上，养护半个月后其弯沉值均满足规范和设计要求。

对于鱼塘清理不干净的地基路段的垫层施工，工艺要求更为严格。首先将采用围堰封闭，再抽干积水，挖除塘底浮泥，先回填以 80cm 的道碴石(即不采取通常的大块抛石的“粗放型“施工措施)，夯实至以施工机具(如图 5.3.5)在其上运行不出现严重的“弹簧晃动”和塘底无“翻浆”现象作为达到压实标准的要求。接着再实施换填施工，而且填料应以黏土为主，掺入的钢渣比别的路段要少，取每分层 40cm，碾压至压实度满足 0.9 的要求。当钢渣黏土混合物回填至原地面标高后，再进行素填土以及轨道的铺设、固定和施工制作。

夯实或碾压过程中夯实或碾压的遍数，由现场试验确定。打夯时要一夯压半

夯，行行相接，全面夯实，一般不少于3遍。采用平板震压机往复碾压，一般碾压不少于4遍，其轮距搭接不小于50cm。边缘和转角处应用人工或蛙式打夯机补夯密实。

找平和验收：①施工时应分层找平，夯压密实，并应设置钢渣检查点，用 $200\text{cm}^3$ 的环



图 3.2.6 土工格栅施工

刀取样；测定钢渣的质量密度，压实密度不小于0.94。下层密实度合格后，方可进行上层施

工。②最后一层压（夯）完成后，表面应拉线找平，并且要符合设计规定的标高。

## 六、质量标准

### 1、保证项目：

- ① 基底土质承载力必须符合设计要求。
- ② 钢渣的质量密度，必须符合设计要求和施工规范的规定。

### 2、基本项目：

① 配置换填材料的钢渣和黏土的比例正确，拌合均匀，虚铺厚度符合规定，夯压密实。

② 分层留接槎位置正确，方法合理，接槎夯压密实，平整。

### 3、允许偏差项目：

- ① 顶面标高 $\pm 15$ ，用水平仪或拉线和尺量检查。
- ② 表面平整度 $\pm 15$ ，用2m靠尺和楔形塞尺量检查。

### 4、质量记录

- ① 施工现场的工程地质勘察报告。
- ② 地基钎探记录
- ③ 地基隐蔽验收记录。
- ④ 砂石的试验报告

## 七、质量保证措施

1、大面积下沉：主要是未按质量要求施工，分层铺筑过厚、碾压遍数不够等。要严格执行操作工艺的要求。

2、局部下沉：边缘和转角处夯打不实，留接槎未按规定搭接和夯实。对边角处的夯打不得遗漏。

3、密实度不符合要求：坚持分层检查钢渣地基的质量。每层钢渣检查点的钢渣黏土质量密度。必须符合规定，否则不能进行上一层的钢渣铺设施工。

## 八、安全注意事项

1、为了达到安全施工目标，我们结合工程实际，建立安全保障体系和安全责任制，牢固树立“安全第一，预防为主”的思想，坚持实行标准化管理。

2、施工人员进入现场，首先进行安全意识教育，施工过程中坚持经常的安全教育和检查评比活动。

3、根据安全措施要求和现场实际情况，各级管理人员需亲自逐级进行书面交底分部（分项）工程施工前进行书面安全技术交底，交底要有针对性，内容全面，且履行签字手续。坚持“五同时”、“三不放过”制度。

4、安全员每日对边坡进行巡视，防止边坡垮塌伤人。

5、安排专人协调指挥机械施工，防止机械施工中伤人。

6、施工用电由电工每日进行检查，发现隐患及时排除。

7、槽底施工必须要保证边坡安全，建议甲方对现有边坡进行支护（换填时基坑已达三级基坑要求）。

#### 3.2.3.2 土工格栅施工工艺

##### 1、双向土工格栅简介

双向土工格栅是用高分子聚合物通过挤压、成板、冲孔过程后再纵向、横向拉伸而成。该材料在纵向和横向上都具有很大的拉伸强度，这种结构在土壤中同样也能提供一个更为有效的力的承担和扩散的理想的连锁系统，适应于大面积永久性承载的地基

用途：双向土工格栅适用于各种堤坝和路基补强、边坡防护、洞壁补强，大型机场、停车场、码头货场等永久性承载的地基补强。

1) 增大路（地）基的承载力，延长路（地）基的使用寿命。

2) 防止路（地）面塌陷或产生裂纹，保持地面美观整齐。

3) 施工方便，省时，省力，缩短工期，减少维修费用。

4) 防止涵洞产生裂纹。

5) 增强土坡，防止水土流失。

6) 减少垫层厚度，节约造价。

7) 支撑边坡植草网垫的稳定性绿化环境。

8) 可取代金属网，用于煤矿井下假顶网。

双向拉伸土工格栅主要用途

双向拉伸塑料土工格栅适用于各种堤坝和路基补强、边坡防护、洞壁补强，大型机场、停车场、码头货场等。

土工格栅加筋混凝土路面，其路面应符合下列要求：

1) 纵向平整度、横向路拱的坡度与平顺性均匀符合设计标准，若达不到标准，应在加铺之前作处理。

2) 加铺前对路面承载能力进行评定, 若承载能力达不到标准, 或水泥混凝土路面有板底脱空现象, 均应作增强处理, 水泥混凝土路面的接缝与裂缝应事先清理、填充。

3) 原有路面及基层表面有局部放松、坑洞及扩散型裂缝, 应事先修补、填塞, 以保持表面状况完好。

4) 原有路面表面应冲洗干净, 消除尘土、松散颗粒及杂物。

## 2、处理回龙观车辆段地基的土工格栅施工工艺

工艺流程: 检测、清理下承层→人工铺设土工格栅→搭接、绑扎、固定→摊铺上层路基土→碾压→检测。

土工格栅在平整的下承层上按设计要求的宽度铺设, 其上下层填料无刺坏土工格栅的杂物, 铺设土工格栅时, 将强度高的方向垂直于路堤轴线方向布置。土工格栅横向铺设。铺设时绷紧, 拉挺, 避免折皱、扭曲或坑洼。土工格栅沿纵向拼接采用搭接法, 搭接宽度不小于 20cm。

铺好土工格栅后, 人工铺设上层填料, 及时完成碾压, 避免长期暴晒。然后采用机械运料、整平、碾压。机械摊铺、碾压从两边向中间推进, 碾压自两边向中间进行, 其压实度保持达到规范要求。

杜绝一切施工车辆和施工机械行驶或停放在已铺好的土工格栅上, 施工中随时检查土工格栅的质量, 发现有折损、刺破、撕裂等损坏时, 视程度修补或更换。

### 1、材料:

#### (1) 土工格栅

土工格栅是目前国内一种最新的土工建筑材料, 它具有拉伸强度高 (>100KN/m, 延伸率小于百分之十五), 尺寸稳定性好, 耐腐蚀, 抗老化 (设计使用寿命 120 年, 地下), 使用温度宽 (-50--120 度) 等特性, 已广泛用于险坡防护、松软地基处理、加筋土挡墙工程及一些高承载力的结构中, 是建筑行业具有划时代意义的新型材料。土工格栅用于路基加固防护, 格栅和路面材料融合在一起, 可有效地分配荷载, 防止道碴流失和路基变形, 提高路基的稳定性, 承受更大的变荷。

#### (2) 钢渣黏土混合垫层

### 2、机械:

选用 25T 平板式振动压路机和 50T 平板拖式振动压路机各一台, 140 推土机一台, 工人 7-8 人配合施工。

### 3、施工方法

(1) 首先精确放出路基边坡线, 为了保证路基宽度, 每侧各加宽 0.5m, 把晾晒好的基底土进行整平后用 25T 振动压路机静压两遍, 再用 50T 震压四遍, 不平整

的地方人工配合整平。

(2) 铺垫 0.2m 厚的中(粗)砂,人工配合机械整平后,25T 的振动压路机静压两遍。

(3) 铺设土工格栅。土工格栅铺设时底面应平整、密实,一般应平铺,拉直、不得重叠,不得卷曲、扭结,相邻的两幅土工格栅需搭接 0.2m,并沿路基横向对土工格栅搭接部分每隔 1 米用 8 号铁丝进行穿插连接,并在铺设的格栅上,每隔 1.5-2m 用 U 型钉固定于地面。

(4) 第一层土工格栅铺好后,开始填设第二层 0.2m 厚的中(粗)砂(如图 3.2.7),其方法:汽车运砂到工地卸于路基一侧,而后用推土机向前赶推,先把路基两侧 2 米范围内填筑 0.1m 后,把第一层土工格栅折翻上来再填上 0.1 米的中(粗)砂,禁止两侧向中间填筑和推进,禁止各种机械在没有填筑中(粗)砂的土工格栅上通行作业,这样能保证土工格栅平整,不起鼓,不起皱,待第二层中(粗)砂平整后,要进行水平测量,防止填筑厚度不均匀,待抄平无误后用 25T 振动压路机静压两遍。

(5) 第二层土工格栅施工方法同第一层方法一样,最后再填筑 0.3m 的中(粗)砂,填筑方法同第一层一样,用 25T 压路机静压两遍后,这样路基基底加固就处理完毕。

(6) 在第三层中(粗)砂碾压好后,沿线路纵向在边坡两侧各铺设土工格栅两幅,搭接 0.16m,并用同样方法连接好,然后开始土方施工作业。铺设土工格栅进行边坡防护,必须每层测量出铺设的边线,每侧要保证边坡整修后土工格栅埋于边坡内 0.10m。

(7) 铺设土工格栅完成后,在中粗砂的上部填上碎石,运用压路机碾压保证碎石被挤密压实。

(8) 碎石层上部运用混凝土掺灰材料进行浇筑,形成平稳均匀的路基表面,以方便在其上部进行轨道道床的铺设。

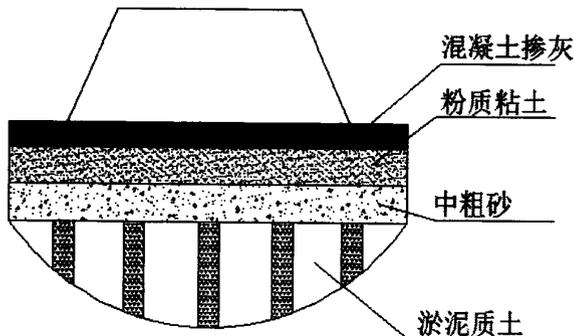
### 3.3 钻孔填渣方案处理地铁车辆段地基不均匀沉降

灌注桩系是指在工程现场通过机械钻孔、钢管挤土或人力挖掘等手段在地基土中形成桩孔,并在其内放置钢筋笼、灌注混凝土而做成的桩,依照成孔方法不同,灌注桩又可分为沉管灌注桩、钻孔灌注桩和挖孔灌注桩等几类。钻孔灌注桩是按成桩方法分类而定义的一种桩型。

因混凝土是在泥水中灌注的,因此混凝土质钻孔灌注桩的特点如下:1)、与沉入桩中的锤击法相比,施工噪声和震动要小的多;2)、能建造比预制

桩的直径大的多的桩； 3）、在各种地基上均可使用； 4）、施工质量的好坏对桩的承载力影响很大；量较难控制。

本工程中运用钻孔灌注桩的方法示意图如图 3.3.1



处理措施示意图

图 3.3.1 钻孔灌注桩示意图

### 钻孔灌注桩的是施工

#### 1、概况

本工程用  $\Phi 600\text{mm}$  钻孔灌注桩基础，排架间距 20m，每个排架 5 根，桩间距 3.5m，共 6 根，设计桩长 35m，浇筑钢渣。

#### 2、施工工艺流程框图

钻孔灌注桩施工工艺流程框见图 3.3.2。

#### 3、施工准备

##### 3.1 施工技术准备

- (1) 熟悉规范、灌注桩施工图纸等各种技术文件；
- (2) 按设计要求，会同监理工程师一起明确相关灌注桩施工参数，正式施工前，开展典型施工，对参数进行验证；
- (3) 准备灌注桩施工用各种表格，并征得监理工程师同意；
- (4) 对灌注桩施工的各班组进行充分详细的技术交底，使之掌握相关技术规程、指标和设计要求。

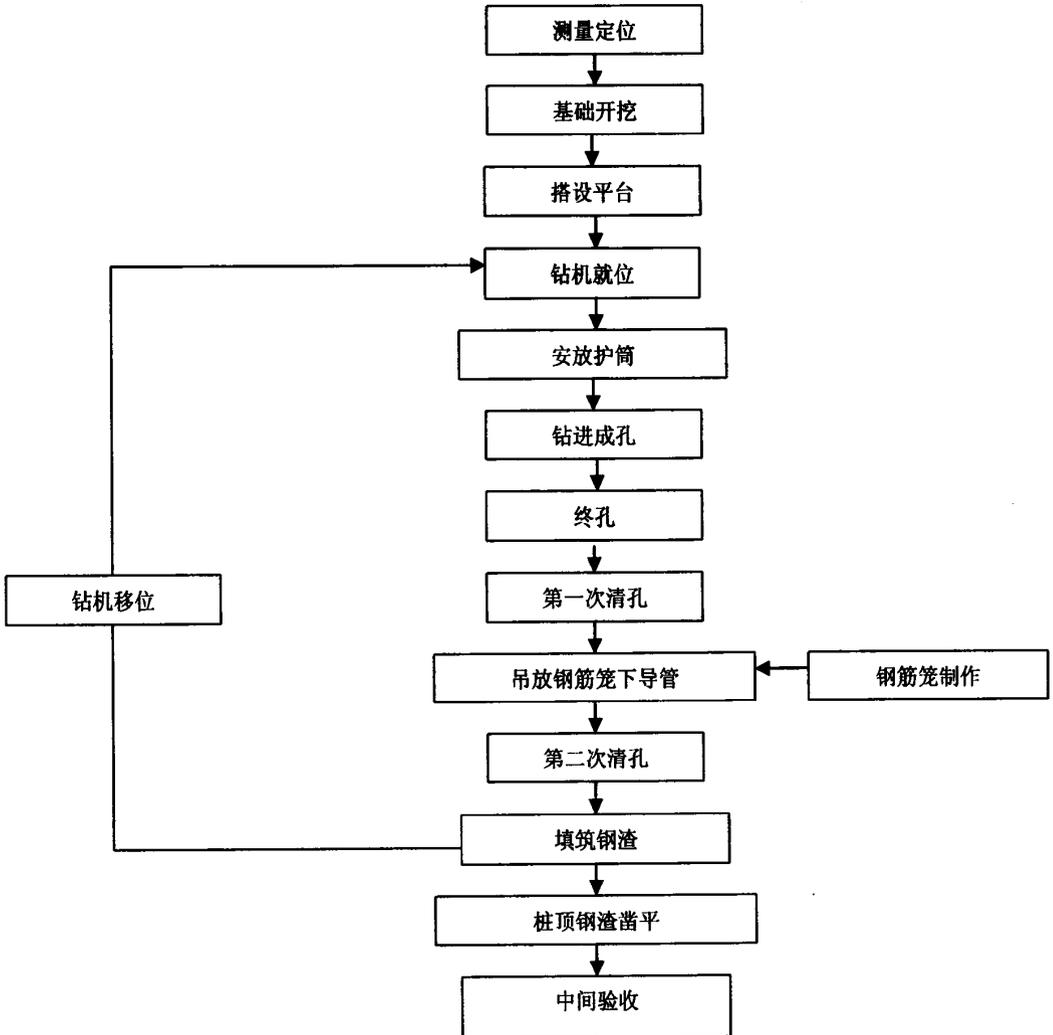


图 3.3.2 灌注桩施工工艺流程图

### 3.2 机械设备、人员配备

机械设备：根据工程量和工期要求，结合现场施工条件，拟投入 1 台 GPS-15 型正循环钻机，抛石区域投入 1 台冲击钻机，钻孔灌注桩人员配备 15 人。具体使用计划见表 3.3.1。

钻孔灌注桩主要设备使用计划表

表 3.3.1 钻孔灌注桩主要设备使用计划表

序号	名称	规格	单位	数量	备注
1	钻机	GPS-15	台	1	正循环
2	钻机	JK5 单程冲击钻机	台	1	冲击
3	电焊机	380V	台	2	钢筋焊接
4	泵	15KW	台	2	注钢渣
5	全站仪	徕卡智能	台	1	测量放样

6	经纬仪	T2	台	2	测量放样
7	水准仪	S3	台	1	测量放样

### 3.3 施工总体安排

根据设计及施工要求,本工程灌注桩计划配备 1 台 GPS-15 型正循环钻机及配套设备、施工材料,三翼刮刀钻头钻进,正、反循环相结合清孔。抛石区域下钢护筒配置 1 台冲击钻机。计划工期 60 天。

### 3.4 施工方法

#### (1) 施工平台搭设

根据工程特点,钻孔桩施工平台搭设为:在左侧桩边设 4m 宽通道,每个排架处设 6m 宽、17m 长平台,平台面标高+3.4m(见图 3.3)。施工通道作为灌注桩施工的主要设备进点及材料运输通道,平台材料考虑一次性投入。

平台立杆采用 $\Phi 114$ 钢管搭设,钢管横向间距(排架方向)根据桩位情况一般控制在 2m 以内,纵向间距 2m;并采用[14 槽钢或 $\Phi 50$ 钢管将沿纵、横两个方向将各根立杆(上、下两层)连成整体;同时按规范要求设置斜撑、剪刀撑以增强稳定性;完成以后用槽钢或机台木将平台顶部连接成整体,上铺 50mm 厚木板;木板铺设要平整。

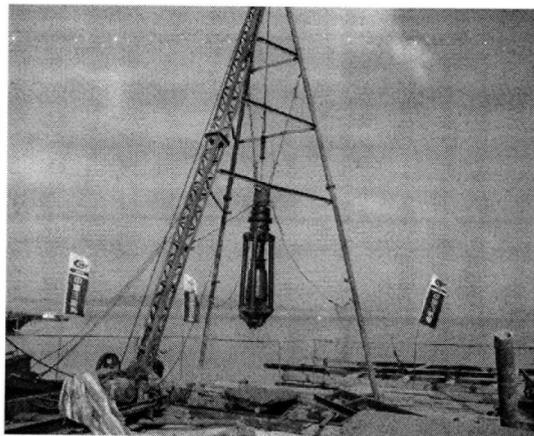


图 3.3.3 类似工程钻孔灌注桩施工照片

#### (2) 开钻前施工准备工作

开钻前选定施工测量定位点,对地质情况进行详细分析,并按设计要求制作钢套筒,根据设计要求及现场地质条件,护筒下到原泥面以下约 7m;采用一台全站仪测出桩的中心线,在操作平台上标明桩号,并在岸上设二个控制点,以便埋设护套筒时,校核和浇桩时的正确位置。

#### (3) 埋设钢护筒

钢护筒设计为直径 1.4m,壁厚 16mm,长度 11m。钢护筒按设计要求制作。

用全站仪定出桩的正确位置,利用钻机把护套筒吊放在开挖槽内,并采用压重、振动或锤击并辅以

筒内除土的方法将护筒沉入泥面,完成定位以后进行校核。抛石区以冲击下放。护筒分节下放,第一节计划 7m,往上各节 1.5m(4 节)焊接接高。

护筒顶标高按桩顶标高加 2.0m 控制,即顶标高为+5.1m,护筒埋入原泥面以下约 5m。护筒埋设位置偏差 $\leq 5$ cm,倾斜度 $\leq 1\%$ 。

#### (4) 钻孔

钻机就位前，应对钻孔前的各项准备工作进行检查，包括机具设备的检查和维修。钻机就位后，应认真调平对中，要求转盘中心同支架上的吊滑轮在同一铅垂线上。在钻进过程中要经常检查，如稍有倾斜或位移，应及时纠正，使成孔后的垂直度不超过 1/100。钻孔深度必须达到设计的要求方能终孔。

钻孔时应注意以下事项：

- (1) 开钻时应慢速钻进，待钻头全部进入地层后，方可加速钻进；
- (2) 经常对钢渣质量进行检测和试验，不合要求时，应随时改正，并注意地层变化，在地层变化处应捞取渣样，与地质剖面图核对；
- (3) 因故停钻时，应保证孔内具有规定的水位和钢渣相对密度、粘度；
- (4) 钻孔作业应分班连续进行，交接班时应交代钻进情况及下一班应注意事项，并认真作好施工原始记录。

#### (5) 清孔

为保证钻孔桩质量和提高支承能力，在灌注桩填入钢渣之前，对已钻成的桩孔必须进行清孔。清孔采用正循环为主，当部分地段圆砾含量较多，颗粒较大，正循环清孔有困难时采用反循环或气矩法清孔。清孔工作要及时，当钻孔终孔后，应立即进行，清孔指标见表 3.3.2。

表 3.3.2 清孔指标

指标	相对密度	含砂率	粘度	备注
数值	1.10-1.20	4%-6%	20-22s	

#### (6) 钢筋笼制作、安放

钢筋笼制作前，应进行钢筋除锈、整直，主筋不得有局部弯曲。钢筋骨架分段制作，每段约 5~8m，分段后的主筋接头应互相错开；所有箍筋与主筋的接触点要点焊，以确保钢筋笼的整体性；钢筋笼尺寸应符合设计要求并按规范要求的规格、间距固定好保护层垫块。清孔完毕后，经测探，孔径和竖直度检查符合要求，利用钻机进行安放钢筋笼。钢筋笼在安装过程中，要保持居中，节与节之间采用单面焊连接。钢筋笼安放完毕后，应采取有效的加固措施（如孔顶反压槽钢等）防止填灌钢渣过程中钢筋笼上浮。

填渣时必须连续进行，中途不得中断，不得留施工缝，导管接头不得漏水或进空气（钢渣填灌前应对导管进行水密性试验，合格后方可使用）。提升导管时，要保持导管底部埋入的钢渣不少于 2m（一般控制在 2~6m 左右），并不得进水。采用插入式振动器将桩顶范围振捣密实，以便截除桩头软弱层钢渣后，保持桩的施工质量。遇有故障及时处理，并及时与有关人员汇报，研究处理措施。

#### (8) 桩头处理

待桩身达到一定的强度后，采用切割机在设计桩顶标高处割缝，人工凿除该范围内的预留部分，并保证桩顶伸入上部构件的长度（为 10cm）。

### 3.5 桩基质量检测要求

根据设计要求，所有钻孔灌注桩进行小应变动力检测和超声波检测，抽取 2 根进行高应变动力检测。

检测单位须具有相应的资格和资质，并需业主或监理工程师批准才能进场。检测按常规方法进行。

### 3.6 异常情况的处理方法

施工过程中出现的各种异常情况处理方法详见表 3.3.3。

表 3.3.3 钻孔桩施工异常情况处理方法

序号	事故类型	事故描述	处理方法
1	塌孔	护筒底口塌孔	回填粘土拌水泥干粉夹碎石，用钻头锤击挤压，重新造壁。
		严重塌孔	立即回填块石、粘土夹水泥，待回填物稳定后，反复冲击挤压，再造稳定牢固的孔壁，并确保泥浆性能参数，加强护壁。
2	漏浆	轻微漏浆	减小孔内外水头差，加稠泥浆、改善泥浆性能
		严重漏浆	立即回填块石、粘土，待回填物稳定后，冲击挤土，使孔壁密实，重新冲击成孔
3	斜孔（非钢护筒倾斜）	轻微	提钻至偏斜处以上，反复轻冲击扫孔
		较大	回填块石夹粘土至偏斜以上，重新冲孔
4	卡钻	轻微	增大提升力，或用千斤顶辅助提升
		严重	用锤击振动法或微型爆破松动法，用大顶力千斤顶提升
5	漏砂	特别严重	加工高强度钻头，将原钻头结构破坏，冲击成几块后，用吸力为 2t 电磁铁吸上来，然后再冲孔。
		轻微	增加泥浆粘度，加大泥浆比重，加强泥浆护壁效果。
6	卷边	严重	立即回填块石、粘土夹水泥，待回填物稳定后，反复冲击挤压，再造稳定牢固的孔壁，并确保泥浆性能参数，加强护壁。
		轻微	回填块石，反复冲击。
7	进尺缓慢	严重	反复回填块石，用反循环冲击钻冲击成孔。
		≤30mm/h	更换耐磨块，加大冲程，加大泥浆循环量，及时清渣。如遇岩石特别坚硬，加大钻头重量。

### 3.7 质量保证措施

- (1) 桩孔直径、深度符合设计要求，孔底必须清渣并符合设计要求。
- (2) 灌注桩用的原材料和配合比设计以及泥浆的质量、稳定性必须符合设计要求。
- (3) 灌注桩的清孔、吊装钢筋骨架、灌注等各项工序应连续、快速完成，桩身不得留有施工缝。
- (4) 成孔设备就位后，必须平整、稳固、确保在施工中不发生倾斜、移动；为准确控制钻孔深度，应在桩架或桩管上作出控制深度的标尺，以便在施工中进行观测、记录。
- (5) 本工程灌注桩必须保证设计桩长，并应清除孔底残留物；钻孔完成后，应立即检查成孔质量，并填写施工记录。成孔的质量必须符合有关规范要求。
- (6) 钢筋笼宜一次成型，若分段制作，分段长度以 5~8m 为宜。搬运时应采取适当措施，防止扭转、弯曲。埋设时，要对准孔位，吊直扶稳，缓缓下沉，避免碰撞孔壁。钢筋笼下放到设计位置后，应立即固定。两段钢筋笼连接采用挤压套筒连接。
- (7) 填灌钢渣到桩顶时，应严格按照规范要求，同时用插入式振动器将桩顶 3-4m 范围振捣密实，以保证在凿除表面浆层后，桩顶质量能符合设计要求。
- (8) 平台搭设时，须预留桩位，避免返工。

## 3.4 边界打桩方案处理地铁车辆段地基不均匀沉降

### 3.4.1 边界打桩简介

本方案利用的是挤密桩加固软土地基的原理，其加固原理与钻孔灌注桩一样都是运用的打桩挤密地基土的作用。但是考虑到回龙观车辆段钢轨铺设已经完成，并且已经投入使用，如果全部挖除，再进行加固处理，将会导致工期长，影响地铁车辆的停放与检修工作，而在边界打桩的方法就是要避免此种情况，尽量保持原来的轨道不受干扰，只在边界打桩进行挤密地基，增强地基承载力，以此可以减小花费，经济有效。

挤密桩法，是软土地基加固处理的方法之一。通常在湿陷性黄土地区使用较广，用冲击或振动方法，把圆柱形钢质桩管打入原地基，拔出后形成桩孔，进而进行素土，灰土、石灰土、水泥土等物料的回填和夯实，达到形成增大直径的桩体，并同原地基一起形成复合地基。特点在于不取土，挤压原地基成孔；回填物料时，夯实物料进一步扩孔。本工程中回填的材料选用的是钢

渣，做到绿色施工，此为本文的一大特点。其处理方案桩的布置如图 3.4.1。

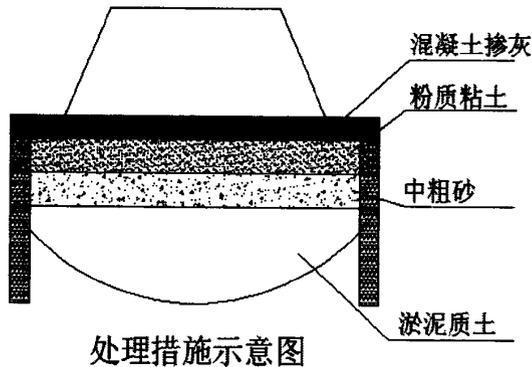


图 3.4.1 边界打桩方案示意图

挤密桩法与其它地基处理方法比较，有如下主要特征：

1) 灰土、素土等挤密桩法是横向挤密，但可同样达到所要求加密处理后的最大干密度的指标；

2) 与土垫层相比，无需开挖回填，因而节约了开挖和回填土方的工作量。比换填法缩短工期约一半；

3) 由于不受开挖和回填的限制，一般处理深度可达 12~20m；

4) 由于填入桩孔的材料均属就地取材，因而比其它处理湿陷性黄土和人工填土的方法造价为低，取得很好的效益。

挤密桩的加固机理：

(1) 土的侧向挤密作用 土(或灰土)桩挤压成孔时，桩孔位置原有土体被强制侧向挤压，使桩周一定范围内的土层密实度提高。其挤密影响半径通常为 1.5~2.0(为桩径直径)。相邻桩孔间挤密效果试验表明，在相邻桩孔挤密区交界处挤密效果相互叠加，桩间土中心部位的密实度增大，且桩间土的密度变得均匀，桩距越近，叠加效果越显著。合理的相邻桩孔中心距约为 2~3 倍桩孔直径。

土的天然含水量和干密度对挤密效果影响较大，当含水量接近最优含水量时，土呈塑性状态，挤密效果最佳。当含水量偏低，土呈坚硬状态时，有效挤密区变小。当含水量过高时，由于挤压引起超孔隙水压力，土体难以挤密，且孔壁附近土的强度因受扰动而降低，拔管时容易出现缩颈等情况。

土的天然干密度越大，则有效挤密范围越大；反之，则有效挤密区较小，挤密效果较差。土质均匀则有效挤密范围大，土质不均匀，则有效挤密范围小。

土体的天然孔隙比对挤密效果有较大影响,当时,挤密效果好,当时,一般情况下土的湿陷性已消除,没有必要采用挤密地基,故应持慎重态度。

#### (2)灰土性质作用

灰土桩是用石灰和土按一定体积比例(2:8或3:7)拌和,并在桩孔内夯实加密后形成的桩,这种材料在化学性能上具有气硬性和水硬性,由于石灰内带正电荷钙离子与带负电荷粘土颗粒相互吸附,形成胶体凝聚,并随灰土龄期增长,土体固化作用提高,使土体逐渐增加强度。在力学性能上,它可达到挤密地基效果,提高地基承载力,消除湿陷性,沉降均匀和沉降量减小。

(3)桩体作用 在灰土桩挤密地基中,由于灰土桩的变形模量远大于桩间土的变形模量(灰土的变形模量为 $29\sim 36\text{MPa}$ ,相当于夯实素土的 $2\sim 10$ 倍),荷载向桩上产生应力集中,从而降低了基础底面以下一定深度内土中的应力,消除了持力层内产生大量压缩变形和湿陷变形的不利因素。此外,由于灰土桩对桩间土能起侧向约束作用,限制土的侧向移动,桩间土只产生竖向压密,使压力与沉降始终呈线性关系。

土桩挤密地基由桩间挤密土和分层填夯的素土桩组成,土桩桩体和桩间土均为被机械挤密的重塑土,两者均属同类土料。因此,两者的物理力学指标无明显差异。因而,土桩挤密地基可视为厚度较大的素土垫层。

施工中可能出现的问题和解决方法:

1) 夯打时桩孔内有渗水、涌水、积水现象可将孔内水排出地表,或将水下部分改为混凝土桩或碎石桩,水上部分仍为钢渣桩。

2) 沉管成孔过程中遇障碍物时可采取以下措施处理:

①用洛阳铲探查并挖除障碍物,也可在其上面或四周适当增加桩数,以弥补局部处理深度的不足,或从结构上采取适当措施进行弥补;

②对未填实的墓穴、坑洞、地道等面积不大,挖除不便时,可将桩打穿通过,并在此范围内增加桩数,或从结构上采取适当措施进行弥补。

3) 夯打时造成缩径、堵塞、挤密成孔困难、孔壁坍塌等情况

可采取以下措施处理:

①当含水量过大缩径比较严重时,可向孔内填干砂、生石灰块、碎砖碴、干水泥、粉煤灰;如含水量过小,可预先浸水,使之达到或接近最优含水量;

②遵守成孔顺序,由外向里间隔进行(硬土由里向外);

③施工中宜打一孔,填一孔,或隔几个桩位跳打夯实;

④合理控制桩的有效挤密范围。

### 3.4.2 边界打桩方案施工工艺

#### 1、施工准备

- 1) 复核地基是否是位于地下水以上。
- 2) 根据地形采用挖掘机或装载机平整场地，场地的低洼地段回填压实；松软地段，用钢板或垫木作为支垫，或采取砂砾填筑措施保持机械稳定。
- 3) 桩体使用的水泥按设计要求为 42.5 级普通硅酸盐水泥，并进行检验，合格后方可使用。
- 4) 桩体使用的土有机质含量不大于 5%。
- 5) 进行配合比试验，选定符合本标段水泥土挤密桩要求的配合比。
- 6) 在挤密桩施工现场附近，布置一水准点，以保证施工过程中，标高得以有效的控制。
- 7) 桩位测放，按照工程外控点在基坑内定出主轴线，主轴线闭合复测合格后，以主轴线为准，测放出各桩中心点，桩中心点用木桩石灰定点。
- 8) 成孔设备：2.5t 柴油打桩机，桩管直径 500mm，长 7m。
- 9) 夯实设备：提升式夯实机。
- 10) 回填设备：铁锹、量斗、铁筛、手推车等。
- 11) 对场地土含水率进行测定，以确定最佳含水率。

#### 2、钢渣挤密桩设计参数及要求

1) 桩径采用 50cm，桩间距 2m，沿边界呈带状布置。技术人员应根据图纸，将各挤密桩坐标计算完成，经测量人员复核无误后方可使用。在放样结束后，应现场用小钢尺逐孔量测间距复核，保证现场的准确性。

钢渣桩的标高应根据涵洞的底面进行布置，准确计算各钢渣桩的桩顶、桩底标高，整理成表。

- 2) 基坑开挖后基坑不得泡水。
- 3) 钢渣桩每边超出涵洞基础外缘的宽度不小于 2.0m。
- 4) 成桩孔允许误差：

表 3.4.1 成桩孔允许误差

序号	项目	允许偏差
1	桩位	不大于 50mm
2	桩孔垂直度	1.5%
3	桩径	不小于设计
4	桩深	不小于设计

5) 夯填桩孔前，抽样检查桩位、桩孔直径、深度和垂直度，经检验合格后，对孔底进行夯实，然后按设计要求向孔内分层填入钢渣。夯填桩孔时选用机械分段夯实，夯锤直径不小于 0.3m，落距和填料厚度根据现场试验确定。

6) 钢渣混合料的压实系数不小于 0.9。

7) 桩孔施工完成后，桩顶部 0.5~0.7m 松土采用冲击碾压压实，高于设计桩顶高程的应挖除碾压平整，桩顶铺设 0.5m 厚水泥改良土（掺 6%水泥）垫层。

8) 钢渣桩施工后，在基坑周围设置防水板，防水板的入土深度不小于 1.0m。

9) 基础筑出地面后，基坑及时用不透水土或原土层夯填至稍高于附近地面，干容重不小于 15.5KN/m。

### 3、工艺流程图

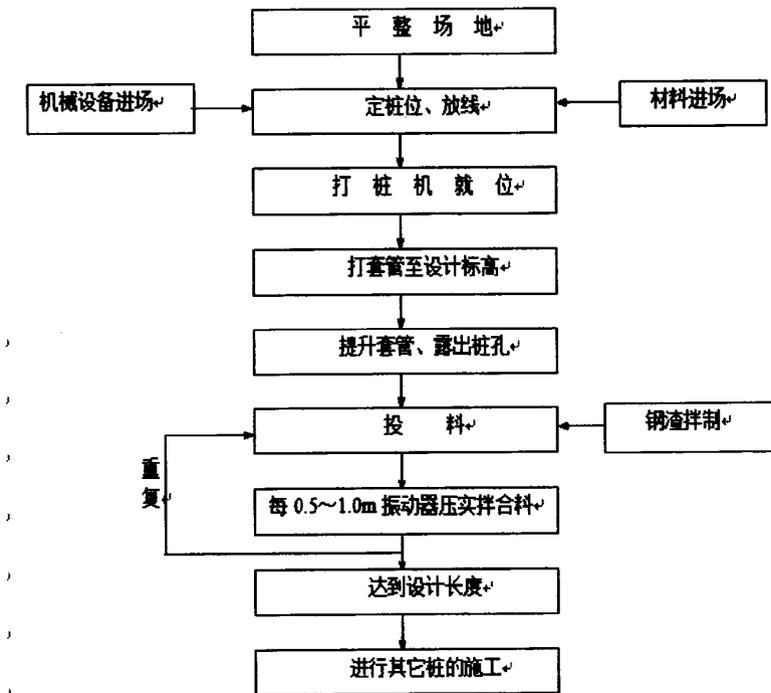


图 3.4.2 边界打桩工艺流程图

### 4、钢渣挤密桩成孔

本工程采用冲击法进行施工。工序包括桩机就位，沉管，拔管，移位四个工序。其施工要求是：

1) 桩机就位后，使其平整稳定，然后吊起桩管，对准桩位。并在桩管与桩锤间垫好，缓缓放下，使桩管，桩尖，桩锤于同一垂线上。借锤重及桩管自重，将桩尖压入土中。

2) 桩尖开始入土时，先低锤轻击，等沉入土中 1-2 米后各方面方可正常施工。根据试桩确定的速度，落距锤击沉管至设计深度。

3) 设计桩间距为 2m, 采用跳点、跳排的方法施工。

4) 夯击沉管后, 当桩的斜度超过 1.5% 时, 应拨起重新打。若出现桩锤回跳过高或沉桩速度过慢, 桩孔倾斜, 桩靴损坏的情况时, 应及时回填挤密。每次成孔拨管后, 应及时检查桩尖。

5) 用卷扬机吊沉桩至设计深度后, 应立即关闭油门, 及时均速拨管, 有困难时可用水浸湿桩管周围土层或旋活桩管后起拨, 拔出后立即测量桩孔直径、深度和倾斜度。

6) 将配制好的钢渣料投入桩孔 (每次投料按试桩参数确定)。开动振动锤, 将投入的钢渣料夯实, 完成一次投料。多次投料夯实, 直至达到设计桩顶标高, 一根挤密桩完成。

7) 施工中注意施工安全, 成孔后桩机应撤离一段距离, 并及时夯填桩孔 (未夯填的桩孔不得超过 10 个), 或孔口加盖。

8) 待整个基底水泥土挤密桩完成后, 用厚度 60cm 水泥参量不小于 6% 水泥土垫层压实封顶。达到设计强度理论值后, 在其上立模施工前涵洞基础。

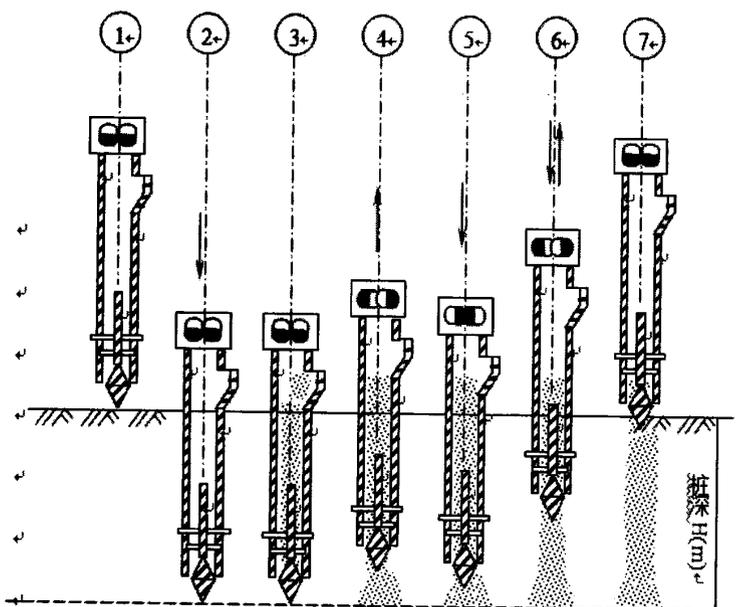


图 3.4.3 施工操作示意图

## 5、质量要求和检验

### 1) 质量要求

- ① 桩位准确: 桩孔中心点的偏差不超过 50mm, 桩孔垂直度偏差不大于 1.5%;
- ② 桩径与深度符合设计: 桩孔直径允许误差沉管法为 -2cm, 冲击法为 +10cm 或 -5cm、爆扩法为  $\pm 5$ cm; 桩孔深度不应小于设计深度;
- ③ 桩身连续、桩体密实: 压实系数不小于 0.9。

- ④施工过程中有专人监测成孔及回填夯实的质量，并有详细记录备查。
- ⑤试验人员现场跟踪控制黄土配合比及最佳含水量，压实密度。

#### 2) 质量控制

- ①施工中应重点控制桩管下沉时间，挤压时间。
- ②控制钢渣土的拌和质量、投料深度和夯实锤数。

#### 3) 质量检查

##### ①检查设备及方法

质量检查设备采用轻型动力触探仪，这种仪器轻便灵活，操作简单，可沿深度连续测定，其测定结果与饱和砂土干密度之间的关系密切，误差小，相关性好，可根据  $N_{10}$  得出地层的干密度。触探仪探头规格：直径 40mm，圆锥角  $60^\circ$ （截面积  $12.5\text{cm}^2$ ）。检查方法：在选定的检查位置连续锤击贯入，记录贯入 10cm 的锤击次数（落锤量 10kg，落距 50cm）。

②检查时间：因打桩后孔隙水压力一天后基本消散，故质量检查的时间在一天后进行。

③检查数量：每台桩机打完桩的地段，按每 30m 划分一个检查地段，并将此段沿线路纵向等分成四区，在第一、三或二、四区各抽查一处，有不合格时，则须在未检查的两区各抽查一处，以便评定施工质量和确定处理方法。

#### 4) 质量评定

施工质量检测及验收标准按《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2002 的有关规定办理。

检查试验记录和施工记录：

①施工时，应以设计深度为依据，以桩管实际下沉深度和下沉时间的长短来判定桩深是否达到要求深度。

②根据质量检查结果，评定施工质量的好坏，质量不合格者应分清情况，部分或成段进行补桩。

### 3.5 小结

经过上述三种施工方法的比对研究，此三种方法各有长短，其中钢渣换填结合土工格栅的方案，加固效果好、工期短、易操作，能够更加有效的处理废钢渣，属于绿色环保的施工方案，另外此种方法还运用了土工格栅新型合成材料，此种材料质地轻、韧性好，能够有效地克服地基土不均匀沉降，两者相结合效果更显著，形式也比较新颖。

钻孔注渣的方案，比较传统，创新上没有更多的突破，只是在填筑材料上选

用了钢渣来填充桩孔，将本论文要把钢渣运用到地基处理方向的理念贯彻到底。

边界钻孔的方案相对钻孔注渣的方案会更切合实际，针对回龙观车辆段属于不均匀土质，即以往的鱼塘和垃圾填埋场未进行清理彻底而造成局部地基软弱，从而造成局部沉降与整体的不均匀沉降现象，结合目前回龙观车辆段投入使用的情况，采用此种方案来控制工后沉降，会更人性化，即不会对地铁运营造成太多的负面影响。此种方案要比钢渣换填方案工期更短，但是操作不如换填法简单。

## 4 数值模拟

### 4.1 概述

岩土材料的真实应力应变关系特性非常复杂,不仅具有非线性、弹塑性、粘塑性,还具有各向异性、剪胀性等特性,同时应力路径、强度发挥以及土的组成、结构、状态和温度等因素均对其有着不同程度的影响。

有限元法的出现,是工程计算方法领域中的一场革命。有限元方法是一种基于性能的计算方法,理论上来说有限元方法能够合理的预测结构受荷后的全过程,并且能够反映出试验难以详细测定的参数。随着计算机技术的发展,有限元方法日趋完善,已成为土木工程界强有力的分析计算工具之一。

本章以有限元基本原理为依据,结合试验结果,通过有限元程序 ABAQUS

建立了回龙观车辆段土层的平面应变模型,研究了软土路基荷载作用下地基的沉降变化以及选用钢渣换填-土工格栅以及钻孔填渣、边界打桩三种方法处理后地基的沉降变化。

#### 1、饱和土固结方程

平面问题的饱和土体非线性有效应力动力分析基本方程主要由下述几部分组成<sup>[45]</sup>。

##### 1) 微分方程式

考虑饱和土体内任意一个微分单元体的平衡,设其棱边分别为  $d_x, d_y$ , 应力的指向采用土力学的习惯,以压为正,拉为负。由达朗贝尔原理,其动力平衡方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\theta r}}{r \partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - F_r &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{r \partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} - F_\theta &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{r \partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} - F_z &= 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

其中,  $F_r$ 、 $F_\theta$ 和  $F_z$ 分别为  $r$ 、 $\theta$ 和  $z$ 正方向的单位体力,  $u_r$ 、 $u_\theta$ 和  $u_z$ 分别为土体骨架在  $r$ 、 $\theta$ 和  $z$ 方向的位移分量,  $\rho$ 是饱和土体密度。

由 Biot 固结理论,饱和土体的固结变形平衡方程式如下:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\theta r}}{r \partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\partial p_g}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - F_r &= 0 \\
 \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{\partial p_g}{r \partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta} + p_g}{r} - F_\theta &= 0 \\
 \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{r \partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial p_g}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} - F_z &= 0
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

式中  $p_g$  为孔隙水压力。

## 2) 几何方程式

如果饱和土体以压应力为正，以拉应力为负，则几何方程可以写作：

$$\begin{aligned}
 \epsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r} & \epsilon_\theta &= \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta} + \frac{u_r}{r} & \epsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} \\
 \gamma_{\theta z} &= \frac{\partial u_z}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \\
 \gamma_{rz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial u_r}{\partial r} \\
 \gamma_{r\theta} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{r \partial \theta} - \frac{u_\theta}{r}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

## 3) 本构关系

饱和土体的应变主要来源于两个方面：(1) 有效应力增量  $\{d\sigma\}$  导致的正常应变增量  $\{d\varepsilon\}$ ；(2) 荷载作用导致的孔隙水压力增量  $dp_g$  引起的应变增量  $\{d\varepsilon^0\}$ 。

即：

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^\sigma\} + \{d\varepsilon^0\} \tag{4.4}$$

其中：

$$\{d\varepsilon^0\} = [D]^{-1} \{d\sigma^0\} \tag{4.5}$$

## 4) 有效应力原理

对于多孔可压缩材料，可模拟为多相体，并满足有效应力原理。

作用于土中一点的应力服从有效应力原理：即总应力是由平均孔隙水压力乘以系数  $X$  和作用于土体骨架上的有效应力  $\sigma'$  组成：

$$\sigma' = \sigma + X \mu_w I \tag{4.6}$$

通常情况下， $X = X(s)$  可以通过试验获得，由于该试验数据较难准确测定，ABAQUS 假定  $X = S$ 。有效应力原理假定土体中孔隙水的本构关系为简单的线弹性，而 ABAQUS 中所有的岩土材料本构关系都可以用来描述土骨架的应力应变关系。

## 5) 应力平衡方程

土体应力平衡方程可采用虚功原理来表示，即某一时刻  $t$  土体的虚功与作用在该土体上作用力(体力和面力)产生的虚功相等，即

$$\int_V \sigma : \delta \varepsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V \hat{f} \cdot \delta v dV \tag{4.7}$$

式中,  $\delta_v$  为虚速度场,  $\delta_\epsilon$  为虚应变,  $\sigma$  为真实应力,  $t$  为单位面积上的表面力,  $f$  为单位体积上的体积力。

在土体中,  $f$  通常包含孔隙水的重量:  $f_w = (s_n + n_t) \rho_w g$ , 式中,  $\rho_w$  为孔隙水的密度,  $g$  为重力加速度, 因此虚功方程可写为:

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V f \cdot \delta v dV + \int_V (s_n + n_t) \rho_w g \cdot \delta v dV \quad (4.8)$$

采用有限元法时, 采用拉格朗日方程对方程进行空间离散, 基本未知量为单元节点的位移。因此, 土体可用有限元来模拟。

## 2、ABAQUS 软件简介

ABAQUS 是一套功能强大的工程模拟的有限元软件, 其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库。并拥有各种类型的材料模型库, 可以模拟典型工程材料的性能, 其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料。作为通用的模拟工具, ABAQUS 除了能解决大量结构(应力/位移)问题, 还可以模拟其他工程领域的许多问题, 例如热传导、质量扩散、热电耦合分析、振动与声学分析、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及压电介质分析<sup>[46]</sup>。

ABAQUS 为用户提供了广泛的功能, 且使用起来又非常简单。大量的复杂问题可以通过选项块的不同组合很容易的模拟出来。例如, 对于复杂多构件问题的模拟是通过把定义每一构件的几何尺寸的选项块与相应的材料性质选项块结合起来。在大部分模拟中, 甚至高度非线性问题, 用户只需提供一些工程数据, 像结构的几何形状、材料性质、边界条件及载荷工况。在一个非线性分析中, ABAQUS 能自动选择相应载荷增量和收敛限度。他不仅能够选择合适参数, 而且能连续调节参数以保证在分析过程中有效地得到精确解。用户通过准确的定义参数就能很好的控制数值计算结果。

ABAQUS 被广泛地认为是功能最强的有限元软件, 可以分析复杂的固体力学结构力学系统, 特别是能够驾驭非常庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析, 同时还可以做系统级的分析和研究。ABAQUS 的系统级分析的特点相对于其他的分析软件来说是独一无二的。由于 ABAQUS 优秀的分析能力和模拟复杂系统的可靠性使得 ABAQUS 被各国的工业和研究中所广泛的采用。ABAQUS 产品在大量的高科技产品研究中都发挥着巨大的作用。

材料模型: 定义了多种材料本构关系及失效准则模型, 包括:

弹性: 线弹性, 可以定义材料的模量、泊松比等弹性特性;

正交各向异性，具有多种典型失效理论，用于复合材料结构分析；

多孔结构弹性，用于模拟土壤和可挤压泡沫的弹性行为；

亚弹性，可以考虑应变对模量的影响；

超弹性，可以模拟橡胶类材料的大应变影响；

粘弹性，时域和频域的粘弹性材料模型；

塑性：

金属塑性，符合 Mises 屈服准则的各向同性和遵循 Hill 准则的各向异性塑性模型；

铸铁塑性，拉伸为 Rankine 屈服准则，压缩为 Mises 屈服准则；

蠕变，考虑时间硬化和应变硬化定律的各向同性和各向异性蠕变模型；

扩展的 Druker-Prager 模型，适合于沙土等粒状材料的不相关流动的模拟；

Capped Drucker-Prager 模型，适合于地质、隧道挖掘等领域；

Cam-Clay 模型，适合于粘土类土壤材料的模拟；

Mohr-Coulomb 模型，这种模型与 Capped Drucker-Prager 模型类似，但可以考虑不光滑小表面情况；

泡沫材料模型，可以模拟高度挤压材料，可应用于消费品包装、及车辆安全装置等领域混凝土材料模型，这种模型包含了混凝土弹塑性破坏理论渗透性材料模型，提供了依赖于孔隙比率、饱和度和流速的各向同性和各向异性材料的渗透性模型。

其它材料特性：

包括密度、热膨胀特性、热传导率和导电率、比热、压电特性、阻尼以及用户自定义材料特性等。

载荷、约束及连接：

载荷：载荷包括均匀体力、不均匀体力、均匀压力、不均匀压力、静水压力、旋转加速度、离心载荷、弹性基础，伴随力效应，集中力和弯矩，温度和其他场变量，速度和加速度等。

约束：除常规的约束外，还提供线性和非线性的多点约束(MPC)，包括刚性链、刚性梁、壳体/固体连接、循环对称约束和运动耦合等。连接强大的接触对定义与分析功能为管接头接触密封分析，铰链连接分析，壳体密封分析等带来极大的便利。

## 4.2 摩尔-库伦模型的本构理论

这种模型的破坏包线对应于摩尔-库伦判据（剪切屈服函数）加上拉伸分离点

(拉应力屈服函数), 与拉应力流动法则相关联而与剪切流动不相关联<sup>[47]</sup>。

### 1、增量弹性法则

在有限元方法中, 这种模型的实现用到了主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  和平面外应力  $\sigma_{zz}$ 。主应力和主方向从应力张量分量计算 (压应力为负)。

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (4.9)$$

相应的主应变增量  $\Delta e_1$ 、 $\Delta e_2$ 、 $\Delta e_3$  分解为:

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p \quad i=1,3 \quad (4.10)$$

这里上标 e 和 p 分别指弹性和塑性部分, 塑性分量只在塑性流动阶段不为零。

胡克定律的主应力和主应变的增量表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= \alpha_1 \Delta e_1^e + \alpha_2 (\Delta e_2^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta \sigma_2 &= \alpha_1 \Delta e_2^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta \sigma_3 &= \alpha_1 \Delta e_3^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_2^e) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

式中:  $\alpha_1 = K + (4/3)G$  和  $\alpha_2 = K - (2/3)G$ 。

### 2、屈服函数和势函数

按照式 4.9 的假定, 在应力空间和  $(\sigma_1, \sigma_2)$  平面的破坏准则可以表示为如图 4.2.1 的形式。由摩尔-库伦屈服函数定义的从 A 点到 B 点的破坏包线为:

$$f_3 = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (4.12)$$

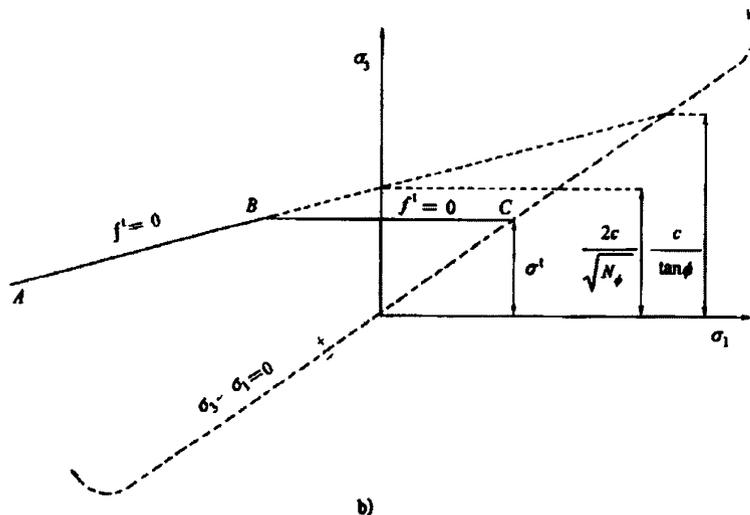


图 4.2.1 岩土材料的摩尔-库伦模型及屈服准则

由 B 点到 C 点拉应力屈服函数定义为:

$$f_i = \sigma^t - \sigma_3 \quad (4.13)$$

式中:  $\phi$ —摩擦角;

C—粘聚力

$\sigma^t$ —抗拉强度

$$N_\phi = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (4.14)$$

材料的强度不能超过定义的  $\sigma_{\max}^t$  的值:

$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan\phi} \quad (4.15)$$

剪切势函数  $g^s$  对应于非关联的流动法则, 其表达式如下:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi \quad (4.16)$$

势函数  $g^t$  对应于拉应力破坏的相关联流动法则, 其表达式如下:

$$g^t = -\sigma_3 \quad (4.17)$$

弹性假设和破坏准则不一致, 分别由  $(\sigma_1, \sigma_3)$  平面中位于 1 区或 2 区 (分别对应于  $h=0$  区域内-或+区域) (图 4.2.2)。如果位于 1 区, 说明是剪切破坏, 应用由势函数  $g^s$  确定的流动法则, 应力点回归到  $f^s=0$  的曲线上。如果位于区域 2, 说明是拉应力破坏, 应用由势函数  $g^t$  确定的流动法则, 应力点回归到  $f^t=0$  的曲线上。

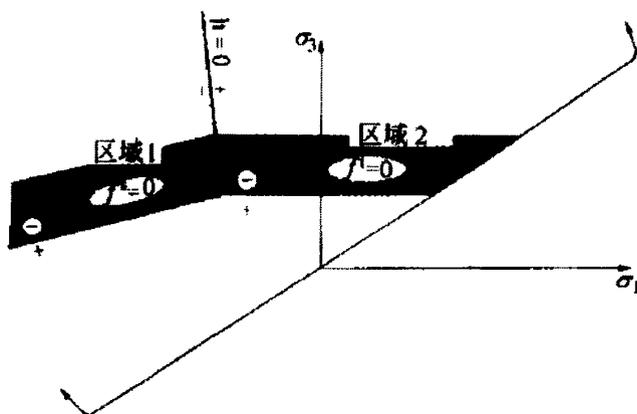


图 4.2.2 摩尔库伦模型中用于定义流动准则的区域

### 4.3 有限元模型

本文的工程背景为北京回龙观车辆段下覆软夹层的地基, 其地基土是由早年的鱼塘, 后又改建为垃圾填埋场后, 在改建为地铁车辆段时并未清理干净这些软弱土而残留在地基下卧层中, 从而在上部车辆荷载的作用下就会造成车辆段地基的不均匀沉降及局部较大沉降, 在第三章中对这种地基的处理提出了三个方案, 本节中将运用 ABAQUS 有限元软件来对第三章所提到的三种方案进行模拟, 并与原状土层进行比较, 从而体现出来处理措施的优越性及处理效果。

## 1) 材料的变形参数

ABAQUS 软件进行模拟的时候, 主要运用到的参数为各层土的弹性模型和泊松比, 与此同时地基土的重度以及层厚都将予以考虑, 表 4.3.1 为部分土壤的弹性模量。

表 4.3.1 土壤弹性模量

名称	干密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	弹性模量 (MPa)	泊松比 $\mu$
松散均匀砂	1470	10~26	0.2~0.4
致密均匀砂	1840	34~69	0.3~0.45
松散含颗粒粉砂	1630		
致密含颗粒粉砂	1940		0.2~0.4
硬粘土	1730	6~14	0.2~0.5
软粘土	1170~1490	2~3	0.15~0.25
黄土	1380		
软有机粘土	610~820		
冰砾泥	2150		

## 2) 材料强度参数

土壤样本的内聚力和摩擦角值见表 4.3.2

表 4.3.2 土壤强度参数

名称	内聚力 (KPa)	内摩擦角 ( $^{\circ}$ )	
		峰值	残留值
砾石		34	32
砂砾石		35	32
含泥粉砂砾石	1.0	35	32
粉砂粒	3.0	28	22
细砂		32	30
粗砂		34	30
级配良好砂		33	32
低塑粉土	2.0	28	25
中-高塑粉土	3.0	25	22
低塑粘土	6.0	24	20
中塑粘土	8.0	20	10
高塑粘土	10.0	17	6
有机粉土或粘土	7.0	20	15

加强环境保护和资源有效利用是当今世界主题，钢渣作为钢铁工业的主要副产品之一，是炼钢过程中产生的废渣，数量约为钢产量的 15%—20%<sup>[48]</sup>，钢渣作为一种废弃资源如何科学有效地综合利用、变废为宝、应用到土木工程建设中是一项重要的课题。

对于废钢渣的矿物成份、理化性能及其基本力学特性，国内外许多学者都已经进行了大量研究，同时取得了大量的研究成果。对于工业废钢渣的再利用上，在诸如日本美国等发达国家，废钢渣已充分应用到工程建设中，其回收率基本达到 100%。而我国对于废钢渣的回收再利用上只有国外的一半左右，研究深度和广度不够，资源流失比例仍然不小。

废钢渣与粘土的混合土作为地基处理的材料，为废钢渣在软土地基处理中的应用提供了依据，废钢渣可以作为一种环保型地基改良材料应用到软土地基处理当中，通过对基础下部的软土层进行整体或局部性的改进，以提高地基的承载力，降低地基的沉降量，从而达到地基处理的作用。

在杨钊的《转炉钢渣资源综合利用的可行性研究》<sup>[49]</sup>一文中，对钢渣的力学指标做了详细的分析论述：处理后钢渣的指标如表 4.3.3

表 4.3.3 处理后钢渣指标

序号	名称	单位	指标
1	钢渣含水率	%	<10
2	粒化后水渣粒度	mm	<5
3	脱水后水渣比重	t · m <sup>-3</sup>	1.7~2.0

高炉渣土的压缩系数、压缩模量以及压缩指数如表 4.3.4

表 4.3.4 轻型击实试样指标

名称	指标
压缩系数 $a_{1.2}/\text{MPa}^{-1}$	0.07
压缩模量 $E_{s1.2}/\text{MPa}$	24.3
压缩指数 $C_c$	0.043
土的压缩性	低压缩性

根据《铁路工程地质手册》<sup>[50]</sup>得到土的各项指标的经验值，如表 4.3.5，4.3.6 以及 4.3.7

表 4.3.5 土的压缩模量一般范围值

卵石土	54~65
碎石土	29~65
砾石土	14~42

	粗砂	36 (中实) ~48 (密实)
	中砂	31 (中实) ~42 (密实)
细砂	稍湿	25 (中实) ~36 (密实)
	潮湿及饱和	19 (中实) ~31 (密实)
粉砂 (淤泥)	稍湿	17 (中实) ~21 (密实)
	潮湿	14 (中实) ~17.5 (密实)
	饱和	9 (中实) ~14 (密实)
砂粘土	半干硬	16 (中实) ~39 (密实)
	可塑	4 (中实) ~16 (密实)
粘土	半干硬	16 (中实) ~59 (密实)
	可塑	4 (中实) ~16 (密实)

表 4.3.6 粘性土抗剪强度参考值

	$\phi$ (°)			C (kpa)		
	粘砂土	砂粘土	粘土	粘砂土	砂粘土	粘土
<0	28	25	22	20	60	100
0~0.25	26	23	20	15	40	60
0.25~0.50	24	21	18	10	25	40
0.50~0.75	20	17	14	5	15	20
0.75~1.00	18	13	8	2	10	10
>1.00	≤14	≤10	≤6	1	≤5	≤5

注: 粘砂土 $3 < I_p \leq 7$ ; 砂粘土 $7 < I_p \leq 17$ ; 粘土 $I_p > 17$ 表 4.3.7 土的侧压力系数  $\xi$  和泊松比  $u$  参考值

土的种类和状态		$\xi$	$u$
	碎石土	0.18~0.33	0.15~0.25
	砂土	0.33~0.43	0.25~0.30
	粉土	0.43	0.30
粉质粘土	坚硬状态	0.33	0.25
	可塑状态	0.43	0.30
	软塑或流动状态	0.53	0.35
粘土	坚硬状态	0.33	0.25
	可塑状态	0.53	0.35
	软塑或流动状态	0.72	0.42

注: 粘土 $I_p > 17$ ; 粉质粘土 $10 < I_p \leq 17$ ;  $I_p \leq 10$ 

本论文中模型所选用的模型参数如下: 模型中各层土的弹性模量以及泊松比

选值如下表 4.3.8:

表 4.3.8 土层模型参数表

序号	土层名称	厚度 (m)	密度 Kg/cm <sup>3</sup>	内聚力 KPa	内摩擦角 (°)	压缩模量 Es (MPa)	泊松比 $\mu$	弹性模量 E (MPa)
1	混凝土	0.6	2500				0.4	30000
2	粉质粘土	3	1940	14.9	11.6	6.03	0.2	10.09
3	中粗砂	2	1912	8.9	23.7	12.51	0.15	37.53
4	淤泥质土	5	1795	6.1	11.4	3.29	0.2	9.87
5	钢渣	5	2000	22	26	23	0.3	48.6
6	碎石	3	1400	1.2	34	19.7	0.3	40

列车荷载如表 4.3.9 所示

表 4.3.9 ZK 活载换算表

列车荷载种类	设计轴重	轨道形式	分布宽度	计算高度 (m)				
				土的重度 (KN/m <sup>3</sup> )				
				18	19	20	21	22
ZK 活载	200	GTRS · I 型板式无砟轨道	3.0	3.1	2.9	2.8	2.6	2.5
		GTRS · I 型双块式无砟轨道	3.4	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3
		GTRS · II 型板式无砟轨道	3.25	2.9	2.7	2.6	2.5	2.3
		有砟轨道	3.4	3.0	2.8	2.7	2.6	2.4

轨道按双线计算, 荷载运用换算土柱方法进行计算, 所谓换算土柱方法即铁路路基设计规范将列车和轨道荷载全部作为静荷载计算, 并将其换算成相当的具有一定高度和分布宽度的土柱称为换算土柱, 计算时将路基面上的轨道静载和列车竖向活载一起换算成与路基土体重度相同的矩形土体。经过模拟, 现提出应力与变形的模拟结果进行对比分析。其土体示意图以及三种方法的模型如下图。

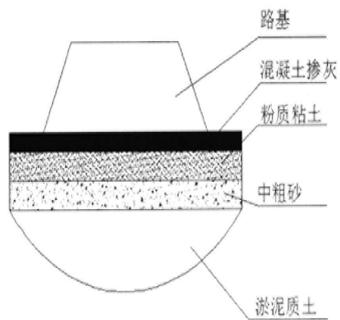


图 4.3.1 地基土层分布示意图

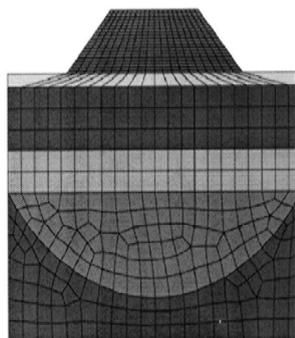


图 4.3.2 钢渣换填方案模型

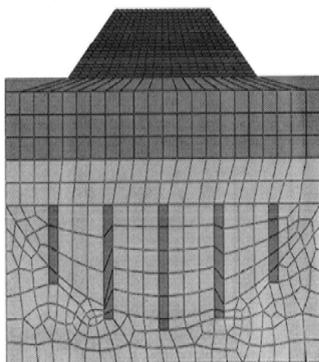


图 4.3.4 钻孔填渣方案模型

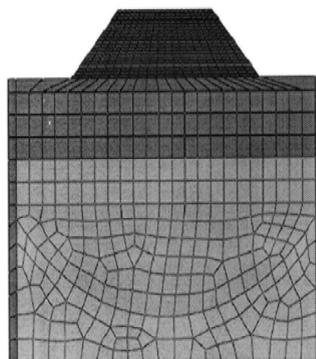


图 4.3.3 边界打桩方案模型

下面就原状土层、钢渣换填-土工格栅方案、钻孔填渣方案以及边界打桩方案在应力和沉降方面进行分别讨论并对比。

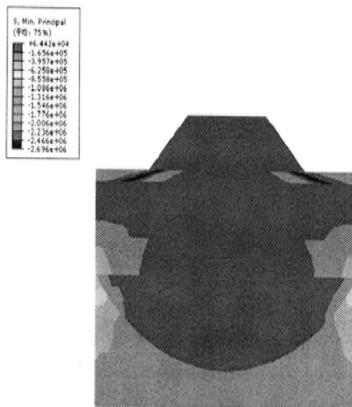


图 4.3.5 原状土状态下应力云图

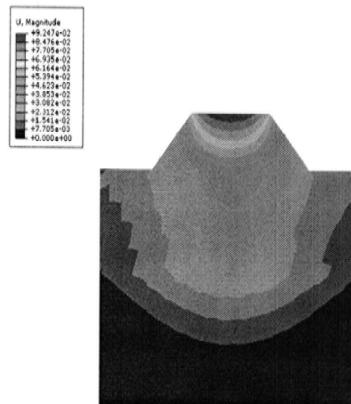


图 4.3.6 原状土状态下沉降云图

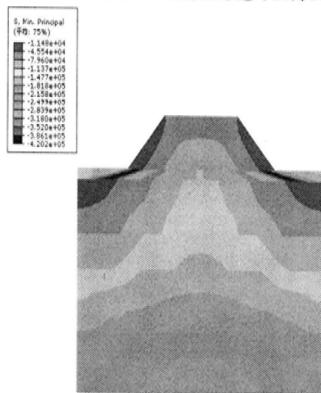


图 4.3.7 钢渣换填方案应力云图

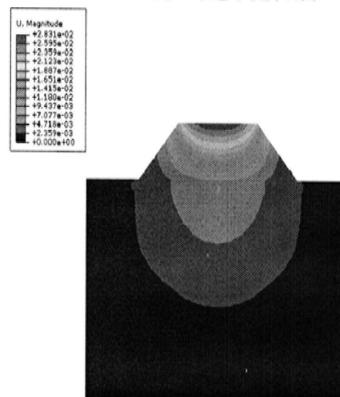


图 4.3.8 钢渣换填方案沉降云图

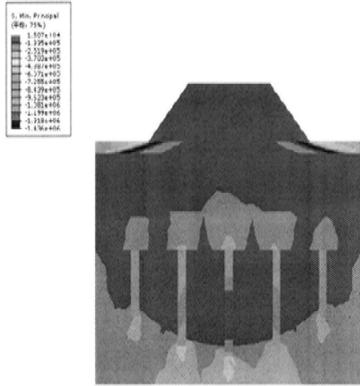


图 4.3.9 钻孔注渣方案应力云图

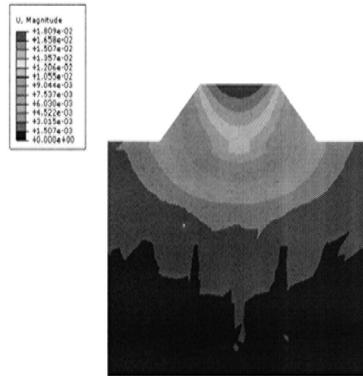


图 4.3.10 钻孔注渣方案沉降云图

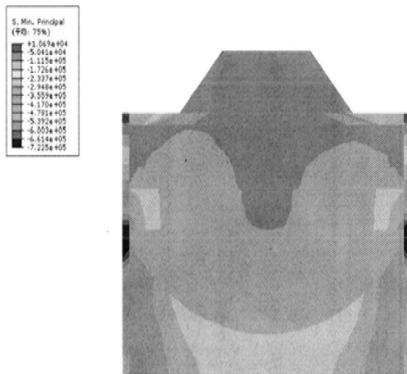


图 4.3.11 边界打桩应力云图

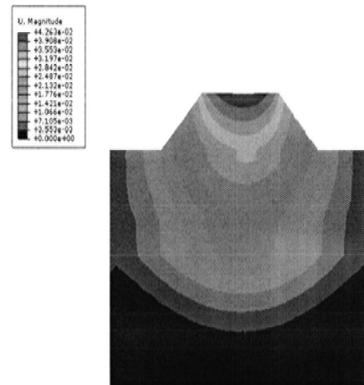


图 4.3.12 边界打桩沉降云图

由原状土状态下沉降云图中可以看出，在地基未处理前，上部路基最大位移可达到 9.247cm，这个沉降值已经远远超过了规范中所要求的沉降量，选取 5 个点在四种状态下的应力-位移图如图 4.3.13、4.3.14、4.3.15、4.3.16 所示，其中横向坐标为应力 (KPa)，纵向坐标为沉降量 (mm)。

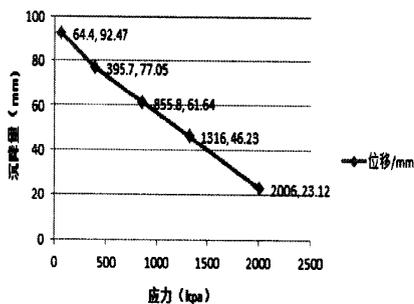


图 4.3.13 原状土状态下应力-位移曲线图

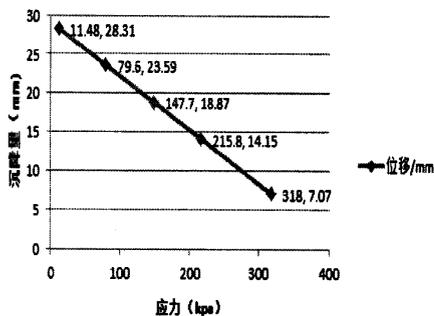


图 4.3.14 钢渣换填方案应力-位移曲线图

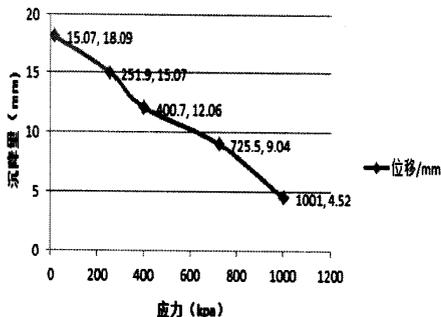


图 4.3.15 钻孔填渣方案应力-位移曲线图

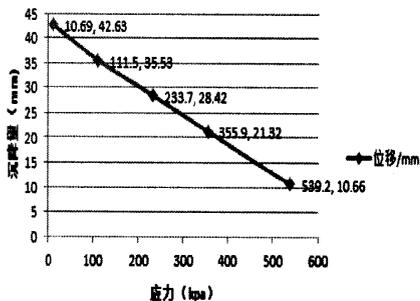


图 4.3.16 边界打桩方案应力-位移曲线图

经过上述的对比，可以总结出如下几点：

- 1) 沿地基土表层往下，随着深度的增加，沉降量逐渐减小，应力逐渐增大，原状土状态下路基表层的沉降量可以达到 9.247cm，沉降量过大，需要进行地基加固处理。
- 2) 钢渣换填方案的最大沉降量达到 2.83cm，在本论文中钢渣换填是结合土工格栅一起进行加固，沉降量会小于 2.83cm，加固效果比较理想，这种加固方法经济有效，属于三种方法中花费最小，效果也相对比较理想的方案。
- 3) 钻孔填渣方案的最大沉降量仅为 1.809cm，加固处理效果非常显著，但是其花费较大，且施工工序比较繁琐，不如钢渣换填法易操作。但是这种方法的工期要比钢渣换填方案短，加固效果也是三种方法中最好的。
- 4) 边界打桩的最大沉降两达到 4.2cm，效果不如前两种方案明显，此方法只是运用边界桩来挤密地基土，它的优点在于不挖除原有地基的土壤，不破坏路基上面已有的设施建筑，工期要比第二种方案更短，操作也较方便。这种方案用来处理不均匀沉降地基是最方便也最快的方法。

## 5 结论

### 一、全文总结

本文以回龙观车辆段下覆软夹层地铁路基工程为研究背景,通过 Flac 3D 数值模拟实际工况,模拟出沉降量并结合现在已有的地基处理措施,选择土工格栅与浅土换层相结合的新方法来处理此种地基,力求高效经济的解决问题。此文得出的结论有如下几点:

1.回龙观车辆段自2002年9月建段以来,主要担负着城铁13#线的运营工作。截止到2003年10月,日均客运量为9万人次左右,最高客运量达到14万人次。回龙观车辆段还担负着城铁13#线运营电动客车的各项修理工作。此项工程与北京市民的生活关系重大,如何选择技术经济俱佳的软基加固方案,是工程实施中的首当其冲的一道巨大难题。

本文根据各方面综合考虑,以工程背景为主要依据进行撰写论文,分别就方案论证和具体确定、采用土工合成材料中的土工格栅强化软基结合运用钢渣黏土进行换填来处理地基的决策、进行理论初步分析计算以及整理分析工程信息化跟踪资料等方面进行撰写和总结。

2.本文在回顾我国岩土工程中关于地基处理技术发展现状的基础上,根据回龙观车辆段软夹层的分布状况,选择其中成熟可行的几种处理方法进行分析比较,在技术(含施工)可行性、环境保护、工期现实性、经济负担预估以及管理措施条件等诸方面逐个进行剖析论证比较,最后作出采用浅层换土方案的决策。计算分析结果显示,处理后的回龙观车辆段下覆软夹层地铁路基的沉降得到了大幅度的控制,并在允许范围内,这表明了这一处理方案的选定和实施在技术经济两方面均是正确和有效的,其社会效益也是显著的。

3.本文在总结和分析现有的土工合成材料在地基工程中应用的基础上,根据工程当时的市场实际,确定选用其中的双向土工格栅作为发挥加筋作用强化软基的首选材料。回龙观车辆段下覆软夹层地铁路基的工程实践证明,土工合成材料在道路工程中的应用(加筋功能和作用)可以有效地改善软基土体的强度和变形,从而减小道床的沉降和不均匀沉降。处理后的数值模拟数据也表明,道床地基沉降量也都被控制在允许值之内。

4.本论文选用三种方案进行不均匀沉降地基的处理,三种方案均利用钢渣回填,宗旨就是运用钢渣来处理地基。钢渣具有不易压缩、强度高等优点,用来加固局部沉降的地基是有效又环保的新措施新理念。

5.本工程运用土工格栅结合钢渣换填的方法进行地基处理,不仅起到良好的加

固地基的作用，与此同时，鉴于北京首钢每天产生的废钢渣量大的特点，此方法能够起到合理利用钢渣保护环境的功效，这个手段也是本文中的一个亮点，可以作为产钢量比较大的城市加固地基时的参考方案，也是工程质量保证的一个创新和有效的举措。

5.本论文中在用数值模拟计算出三种处理方案以及未处理时的沉降量与应力分布状况，并将其进行对比，作出总结分析。在数值模拟过程中，结合实际工况就会有相应的差异，模拟过程中土质分布均匀化、边界条件理想化，这都会造成与实际状况有差，因此这也是未来需要面对的问题，即如何考虑会使模拟更理想。

## 二、研究展望

本文主要研究软夹层地基即回龙观下覆软夹层地铁路基在垂直方向的变形，从而得出一些粗浅的结论。但是地基处理问题特别是软弱地基的处理作为岩土工程中一项重要的课题，特别其问题的复杂性及时间、能力有限，通过文献阅读和本文研究的体会，认为以下几个方面可继续深入研究：

① 本文结合回龙观车辆段实际工程，考虑的只是车辆静止后对轨道产生的静载，对具有软弱下卧层的轨道路基产生的变形，在未来的研究工作中可以继续深入，考虑动荷载即地铁车辆驶入驶出车辆段对此种下卧软弱层地基的动力响应问题。

② 本论文研究的浅显，只是分析地基在垂直方向的沉降变形，而未考虑与此同时地基在横向上的挤压变形，因此在未来的工作中可以深入研究地基三维变形，作出更直观可靠的分析并采取更加有效经济的处理措施。

③ 本文中提到的荷载只是将列车轴重进行换算作出分析，而实际工作中还会有管道、线路等设施，在未来的工作中可以多多进行调研，作出更准确地荷载估计。

④ 文章中重点分析的三种处理方案，并未在实际工程中得到检验，而只是用计算机进行模拟，因此其处理效果及施工方案的编排只是停留在理论层面上，未来的工作里，希望能够在实践中拿到数据，加深学习。

## 参考文献

- [1]顾绍付,刘仰韶,刘仕顺. Asaoka法推算软基沉降偏差的修正方法探讨. 岩土力学. 2010, 31 (7)
- [2]王伟, 卢廷浩. 基于Weibull曲线的软基沉降预测模型分析. 岩土力学. 2007,28 (4)
- [3]荆志东, 郭永春, 邱恩喜, 郑立宁. 新型桩板结构对告诉铁路软基沉降控制作用离心试验. 岩土力学. 2010,31 (8)
- [4]胡亚元. 考虑次固结时循环荷载引起的软基沉降. 浙江大学学报. 2011,45 (1)
- [5]唐朝晖, 刘晓, 李菊凤. 软基沉降的经验曲线非线性回归分析预测方法研究. 地质科技情报. 2005,24 (z1)
- [6]余成华, 李菊凤. 基于袋装砂井排水固结法处理软基的沉降过程流固耦合模拟. 岩土力学. 2010,31 (3)
- [7]欧阳辉. 基于曲线拟合法的软基沉降预测研究. 路基工程. 2009, (2)
- [8]吴爱红, 蔡良才, 顾强康. 硫酸盐渍土机场地基处理换填覆重法研究. 岩土力学, 2010,31 (12)
- [9]詹金林, 水伟厚, 梁永辉, 宋美娜. 强夯法加固沙漠土地基处理试验研究. 岩土力学, 2009,30 (z2)
- [10]周健, 崔积弘, 贾敏才, 史旦达. 吹填细砂软弱地基处理试验研究. 岩土力学. 2008,29 (4)
- [11]赖正发, 李开文, 董柱, 杨正东. 地基处理和基坑支护在淤泥中的复合应用. 岩石力学与工程学报. 2004,23 (z1)
- [12]崔澈, 张志耕, 闫澍旺. 碎石桩联合土工格栅复合地基处理湿地软基的机制研究. 岩土力学. 2009.30 (6)
- [13]李卫民, 常青. 低能级强夯+CFG桩地基处理新填土地基. 岩土力学. 2009,30 (z2)
- [14]武志德, 张鑫, 杜荣军, 易海洋. 数值模拟在高速公路软弱地基处理中的应用. 科技导报. 2011,29 (32)
- [15]吴雪婷, 徐光黎. 基于极限状态设计法的铁路工程地基处理设计体系构建. 地质科技情报. 2010,29 (3)
- [16]SL237-1 999, 土工试验规程[S]
- [17]刘汉龙, 余湘娟. 土动力学与岩土地震工程研究进展[J]. 河海大学学报, 1999,27(1): 6-15.
- [18]NOVA 1L Mathematical Modelling of Cyclic Behaviour of Soils[M]. Notherlands: A. A. Bulkema,1983,47-59.
- [19]周健饱和和软土循环变形的弹塑性研究[J]. 岩土工程学报,2000(04): 499. 502.
- [20]Rouainia M, Wood D M. A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss Of strucmre[J]. GEOTECHNIQUE. 2000, 50(2): 153 · 164.
- [21]刘振纹, 秦崇仁, 王建华等. 循环荷载作用下软土地基的累积变形[J]. 中国港湾建设. 2004. 12(6): 35-38.
- [22]Jastrzebska M, Sternik K.Application of elasto-plastic model with anisotropic hardening to analysis of cyclic loading of cohesive soil[J]. CYCLIC BEHAVIOUR OF SOILS

ANDLIQUEFACTION PHENOMENA. 2004: 41-46.

- [23]庄迎春, 胡安峰, 谢康和. 循环荷载作用下软土的一维固结分析四. 土木工程学报, 2005, 38(9), 109-114.
- [24]李兴照, 黄茂松. 循环荷载作用下流变性软黏土的边界模型阴. 岩土工程学报. 2007,29(2): 249-254.
- [25]沈珠江. 土的重屈服面应力应变模式[J]. 周体力学学报. 1984,6(2): 163. 173.
- [26]彭小云, 曹晶, 赵娟, 折学森, 张婷. 黄土沟壑区湿软地基处理的FLAC数值模拟. 西部探矿工程, 2007,5
- [27]包太. 地下洞室与其上部地基相互作用的FLAC分析. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2002,31(6)
- [28]尹清锋, 白冰. FLAC3D及其在地下空间开挖分析中的一些问题. 西部探矿工程, 2005,11
- [29]郭丰永, 史宇, 毛霖, 王雪松. 高速公路软土地基沉降的FLAC3D数值模拟. 天津城市建设学院学报, 2005,11
- [30]王哲, 李侠. 换填法处理软弱地基在施工中应注意的问题. 山西建筑. 2009,35 (17)
- [31]牛志荣. 地基处理技术及工程应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社. 2003
- [32]李秀敏. 浅述换土垫层法处理软弱地基. 科技情报开发与经济. 2004,14(3)
- [33]崔微, 张志耕, 闫澍旺. 碎石桩联合土工格栅复合地基处理. 岩土力学. 2009,30(6)
- [34]李伟华, 赵成刚. 含软夹层的层状沉积河谷场地的地震动力响应分析. 岩土力学. 2009,30(1)
- [35]牛洪涛. 湿陷性黄土隧道基底加固处理技术研究. 工程技术. 2011
- [36]白武钢. 深层搅拌桩加固铁路软基技术及效果分析. 路基工程. 2006,1 (124)
- [37] 葛磊. 钢渣回填技术在奥林匹克公园中心区地下车库工程中的应用. 建筑技术. 2007,4
- [38] 张爱萍, 李永鑫. 钢渣复合掺合料配置混凝土的工作性能与力学性能研究. 混凝土. 2006,6
- [39] 王保民, 胡斌, 蔺怀义. 钢渣混凝土强度特性的试验研究. 特种结构. 2004,12
- [40]国家标准《土工合成材料应用技术规范》(GB 50290. 98). 北京: 中国计划出版社. 1998
- [41]国家行业标准《公路土工合成材料应用技术规范》(JTJ/T019-98). 北京:人民交通出版社. 1999. .
- [42]翁升, 马时冬. 土工布加筋垫层对路基变形和稳定的影响. 岩土力学. 2001,1 (22)
- [43]施有志, 马时冬. 土工格栅的界面特性试验. 岩土力学. 2003, 2 (24)
- [44] 朱洪, 阮道红. 土工格网应力传递性能在软土地基处理中的应用. 第五届全国地基处理学术讨论会论文集, 1997
- [45]崔鹏. 基于ABAQUS的高层建筑的短桩受力的计算机模型. 广西大学学位论文集. 2009
- [46]武志德, 张鑫, 杜荣军, 易海洋. 数值模拟在高速公路软弱地基处理中的应用. 科技导报. 2011,29 (32)
- [47]谢强, 张永兴, 张建华. 生活垃圾卫生填埋场沉降特性研究的意义及现状. 重庆大学学报. 2003,26 (8)
- [48]王志红. 无砟轨道铁路路基工后沉降控制浅析. 长沙铁道学院学报. 2008,9 (1)
- [49] 杨钊. 转炉钢渣资源综合利用的可行性研究. 有色金属设计. 2007,4
- [50] 《铁路工程地质手册》铁道部第一勘测设计院.北京.中国铁道出版社.1999.207-220

## 作者简历

张晓晓，女，河南省新乡市人，本科就读于北方工业大学建筑工程学院土木工程专业，于2009年7月毕业，获得北方工业大学学士学位。2010年9月，考入北京交通大学土建学院建筑与土木工程专业的硕士研究生，研究方向为岩土工程、地基处理。

研究生在校期间，由导师陈文化教授组织测试地铁16号线运营对动物园古建筑的微震扰动，出具检查报告。

在校期间，在交通部公路科学研究院进行实习，主要做绘图员的工作，2010年在中国建筑设计研究院总监六部实习，担任项目助理，负责招投标与合同管理，独立完成商务标书的制作，参与跟标唱标，做简单的工程报价。参与的项目有“中国国学中心建设工程设计”“山东美术馆”“中国水电青云阶”“北京工商大学良乡校区实验楼，学生公寓及其附属设施项目”等项目。

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：张曦晓 签字日期：2012年6月18日

## 学位论文数据集

表 1.1: 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
地铁车辆段; 不均匀沉降; 钢渣换填-土工格栅; 钻孔填渣; 边界打桩; 数值模拟	公开	TU411	624	
学位授予单位名称*		学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*
北京交通大学		10004	工学	硕士
论文题名*		并列题名		论文语种*
控制下覆软夹层地铁车辆段基的不均匀沉降措施研究				中文
作者姓名*	张晓晓		学号*	10125554
培养单位名称*		培养单位代码*	培养单位地址	邮编
北京交通大学		10004	北京市海淀区西直门外上园村 3 号	100044
学科专业*		研究方向*	学制*	学位授予年*
建筑与土木工程		地基处理	2 年	2012 年
论文提交日期*	2012 年 6 月			
导师姓名*	陈文化		职称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*		答辩委员会成员	
	白冰		白冰, 李涛, 曾巧玲, 李伟华	
电子版论文提交格式 文本 ( ) 图像 ( ) 视频 ( ) 音频 ( ) 多媒体 ( ) 其他 ( ) 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版 (发布) 者		电子版论文出版 (发布) 地		权限声明
论文总页数*	83			
共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。				