

既有深厚回填土高边坡强夯加注浆施工工法

1 前言

强夯法是用起重机械将大吨位夯锤起吊到一定高度后，自由落下，给地基土以强大的冲击能量的夯击，使土中出现冲击波和很大的冲击应力，迫使土体孔隙压缩，排除孔隙中的水，使土粒重新排列，迅速固结，从而提高地基承载力，降低其压缩性的一种地基加固方法。强夯法适用土质范围广（碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土），加固效果显著，可取得较高的承载力，一般地基强度可提高 2~5 倍；压缩性可降低 2~10 倍。经过多年的实践及强夯设备的更新，强夯法施工已广泛运用到高速公路铁路，机场、核电站、大工业区、港口填海等基础加固工程。

注浆法是指用气压、液压或电化学原理把某些能固化的浆体通过压浆泵、灌浆管均匀的注入各种介质的裂缝或孔隙中，以填充、渗进和挤密等方式，驱走裂缝、孔隙中的水分和气体，并填充其位置，硬化后将岩土胶结成一个整体，形成一个强度大、压缩性低、抗渗性高和稳定性良好的新的岩土体，从而改善地基的物理化学性质的施工工艺，该工艺在工程建设的地基处理中应用领域十分广泛，主要用于截水、堵漏和加固地基。

基于既有深厚回填土高边坡变电站地质特点，结合强夯、注浆施工工艺，创新提出既有深厚回填土高边坡强夯加注浆施工工法，采用三段式地基处理方式（即强夯、强夯加注浆、注浆），既避免了全部强夯处理带来的大量回填土置换，造成的环境与工期影响；又避免了

全部采用注浆带来的造价大幅上升。

本工法于 2022 年 7 月 12 日在国家一级查新单位浙江省科技信息研究院进行了查新，经查新分析发现，本工法主要技术特点在文献中未见具体述及，在所检浙江省级工法文献中未见报道。

2 特点

在工法实施前期对变电站进行了现场实地地质勘探与填方区填方量的测算，并利用有限元分析软件（例如：迈达斯 GTS20）对填方区进行了有限元建模，得到了既有深厚回填土高边坡有限元模型。利用已得到的有限元模型对不同工况展开了数值模拟研究。最终得出了更加经济有效的注浆+强夯三段式地基处理施工工法。

在工法实施过程中，利用了一套有利保障注浆浆体配合比合格率的方法，将浆体配合比提高了 97%，确保了该工法实施过程中浆体配合比。针对工法中的注浆施工效率低下提出了一套提高注浆效率的方法，将原先 1.3 孔/天/组提高到了 4.3 孔/天/组，使得注浆效率提高了近 3 倍。既有深厚回填土高边坡强夯加注浆工法，确保了电网运行安全，更大大缩短了建设工期，与此同时确保了地基处理质量，也做到了环境友好。对以后类似深厚回填土边坡工程地基处理具有十分重要的借鉴意义。

3 适用范围

本施工方法适用于既有深厚回填土高边坡地基处理施工。

4 工艺原理

结合深厚回填土边坡地质特点，综合测算地质模型参数，并利用

有限元分析软件（例如：（例如：迈达斯 GTS20））对填方区进行了有限元建模，得到了既有深厚回填土高边坡有限元模型。利用已得到的既有深厚回填土高边坡有限元模型对回填区自然条件下沉降、回填区全部注浆地基处理、回填区注浆+强夯地基处理三种工况展开了数值模拟研究，得出最优地基处理方式，即强夯加注浆地基处理。

在工法实施中将高边坡分段处理（即强夯、强夯加注浆、注浆），见图 4.1.1。填土深度小于 8m 区域的，仅强夯；边坡线以内 6m 范围，仅注浆；其余区域强夯结合注浆。通过结合两种地基处理方式，最终得出了更加经济有效的注浆+强夯三段式地基处理施工工法，既避免了全部强夯处理带来的大量回填土置换，造成的环境与工期影响；又避免了全部采用注浆带来的造价大幅上升。

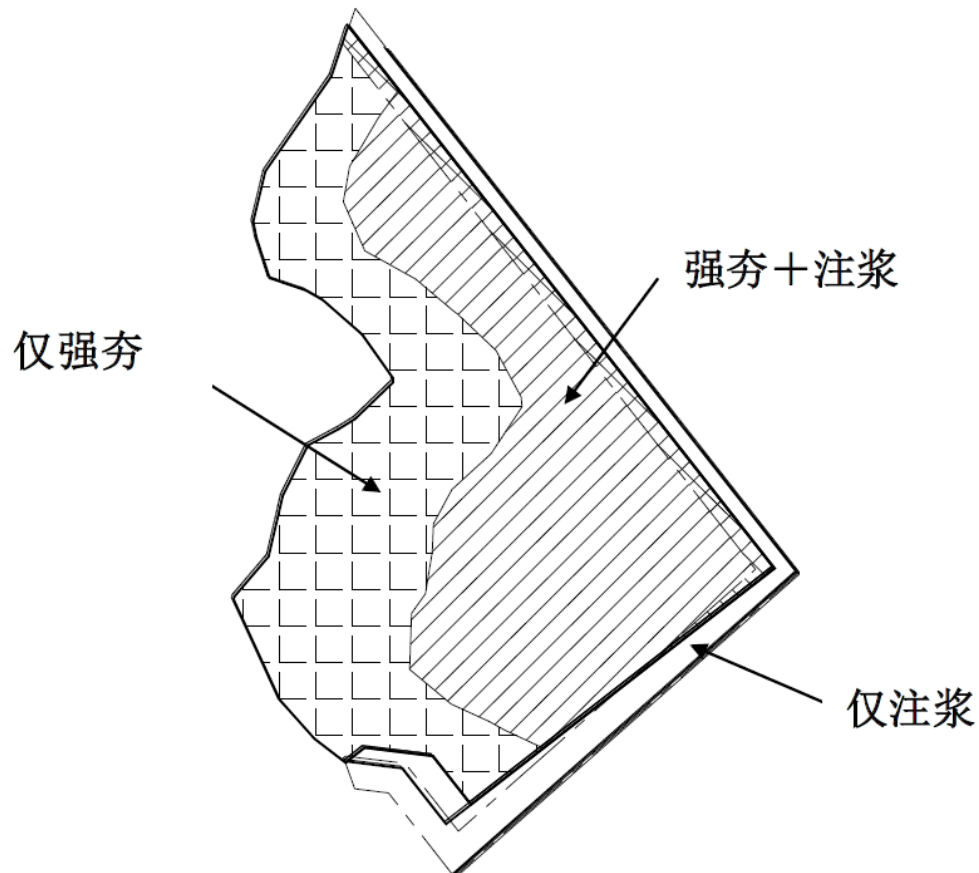


图 4.1.1 三段式地基处理区域划分

5 工艺流程及操作要点

5.1 工艺流程

既有深厚回填土高边坡强夯加注浆施工工艺流程如图 5.1.0-1 所示。

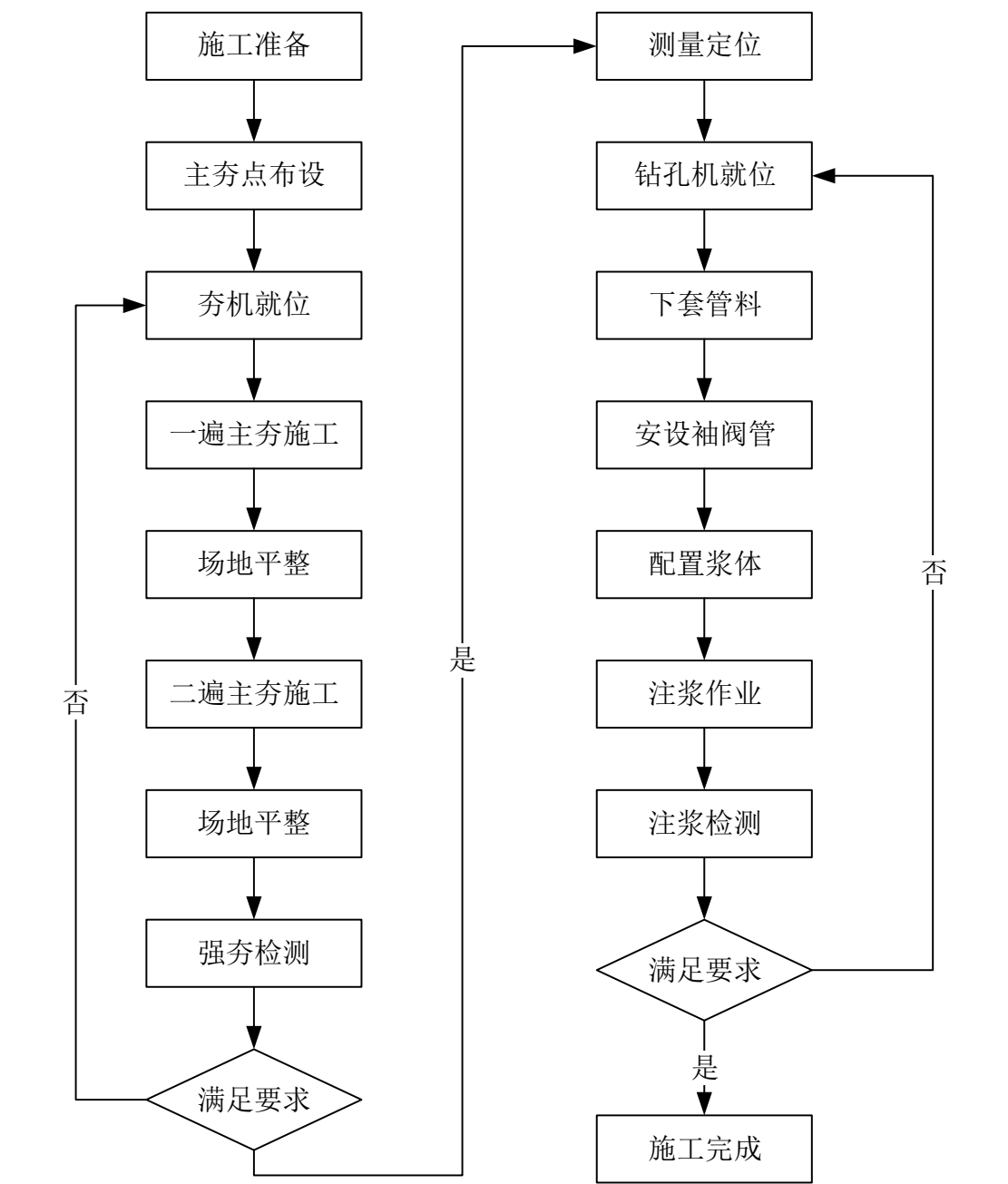


图 5.1.0-1 既有深厚回填土高边坡强夯加注浆施工工艺流程

5.2 操作要点

5.2.1 施工总体布置

在现场根据地质条件将高边坡分段划分三个区域（即强夯区域、强夯加注浆区域、注浆区域），其中强夯机作业涵盖强夯区域、强夯加注浆区域。注浆作业涵盖强夯加注浆、注浆区域。

在高边坡坡面位置，因机械无法进行施工，可根据机械设备情况，分梯次在边坡开挖机械设备操作平台（如图 5.2.1-1）。由于台阶开挖为临时性开挖，并且边坡为人工填土边坡，应根据现场地形地貌及地质条件调整开挖台阶的宽度，根据现场施工情况先开挖一段注浆完成一段回填后再开挖下一段，不宜大面积一次性开挖完成后再施工。同时边坡注浆平台需结合永久护坡设置，注浆平台尺寸高度注意考虑机械工作面的要求。另外，平台外侧应用钢管打入地下搭设钢管护栏，以保证施工人员在边坡上施工的安全，现场安排专职安全员全天候观察施工边坡的稳定性情况，雨天采用彩条布对已开挖地段进行覆盖，挖设排水渠以防雨水对开挖区的冲刷。

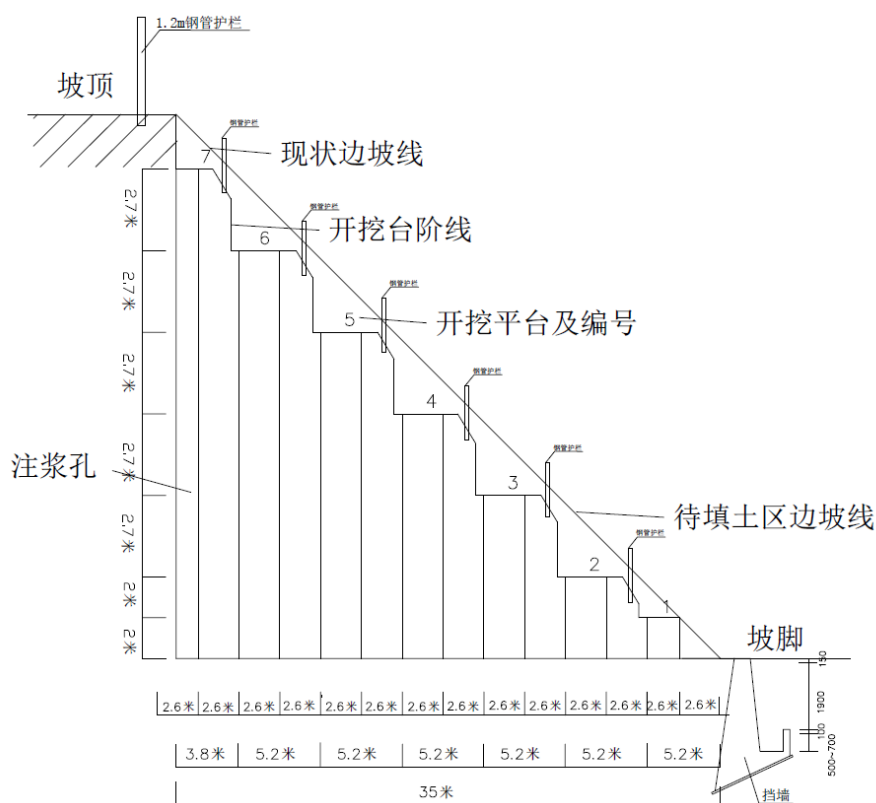


图 5.2.1-1 典型高边坡注浆放坡示意图

5.2.2 施工准备

1 应用有限元数值模拟软件对方案比选

工法实施前需利用有限元分析软件进一步论证强夯加注浆处理效果，根据论证结果分析地基处理方式的适用性和经济性。

采用大型有限元分析软件迈达斯 GTS420 对回填区进行工后沉降分析。该款软件功能强大、运算稳定、界面友好，被广泛的应用于解决岩土工程的变形、稳定及地下水渗流等问题。首先分析在不做地基处理条件下，深厚回填土的场地沉降。沉降云图见图 5.2.2-1。分析结果可以看出，在不做地基处理条件下，场地表层回填土最大沉降已超过规范允许值。

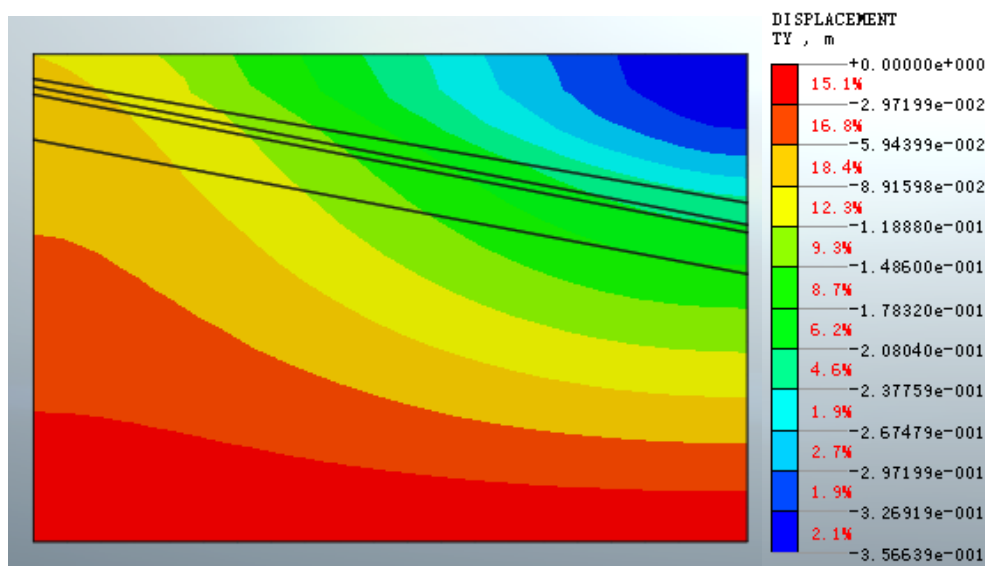


图 5.2.2-1 不做处理条件下深厚回填土区沉降云图

综合回填区沉降以及固体体积率两方面均不满足设计以及规范要求可知，深厚回填土区场地需要进行地基处理。同时为确保变电站运行阶段的填方区设备的稳定性，以及场地沉降必须在可控范围内，必须对回填土进行地基处理，以减少后期设备运行阶段的沉降。

既有深厚回填土高边坡工程特点如下：填方较厚，且填方高度较深的范围较广，回填土性质复杂。针对此类工程地基处理适用的主要有全部注浆、强夯法+注浆法。以下通过施工和经济等方面比较两种工艺的适用性，进一步论证既有深厚回填土地基处理方案。

以丽西变电站高边坡地基处理为例，全部采用注浆则注浆面积约为 10000m²。注浆布置方式如下：孔径为 80mm，注浆深度为 9~23m，间距 3.0m，采用梅花形布置。注浆材料选择黄泥浆液（黄泥：水泥：水）。

若采用强夯加注浆地基处理方式，则强夯处理面积约为 8000 m²，强夯参数如下：

表 5.2.2-1 强夯技术参数

区域	强夯面积 (m ²)	夯点间距 (m)	夯击能 (kN.m)	收锤标准
填方区	8000	5m (正三角形 布置)	12000	最后两击平均夯 沉量小于 5cm

注浆面积为 5600 m²。注浆布置方式如下：孔径为 80mm，注浆深度为 9~23m，间距 3.0m，采用梅花形布置。注浆材料选择黄泥浆液（黄泥：水泥：水）。

通过对比全注浆、强夯加注浆各种施工参数，机械、人工、工程量大小，综合测算得出两种地基处理方式中强夯加注浆更加经济。

下面验证强夯加注浆地基处理后，既有深厚回填土场地沉降能否满足设计以及规范要求。经强夯加注浆处理后，回填土的压缩模量 $E_s=15\text{MPa}$ ；将加固后的压缩模量参数代入 GTS 有限元模型重新进行场地沉降计算，沉降计算结果云图见图 5.2.2-2。

从图 5.2.2-2 可以发现，强夯加注浆处理后回填土场地最大沉降量比强夯加注浆处理前减少了 41%，地基处理效果良好，既有深厚回填土场地沉降能够满足设计以及规范要求。

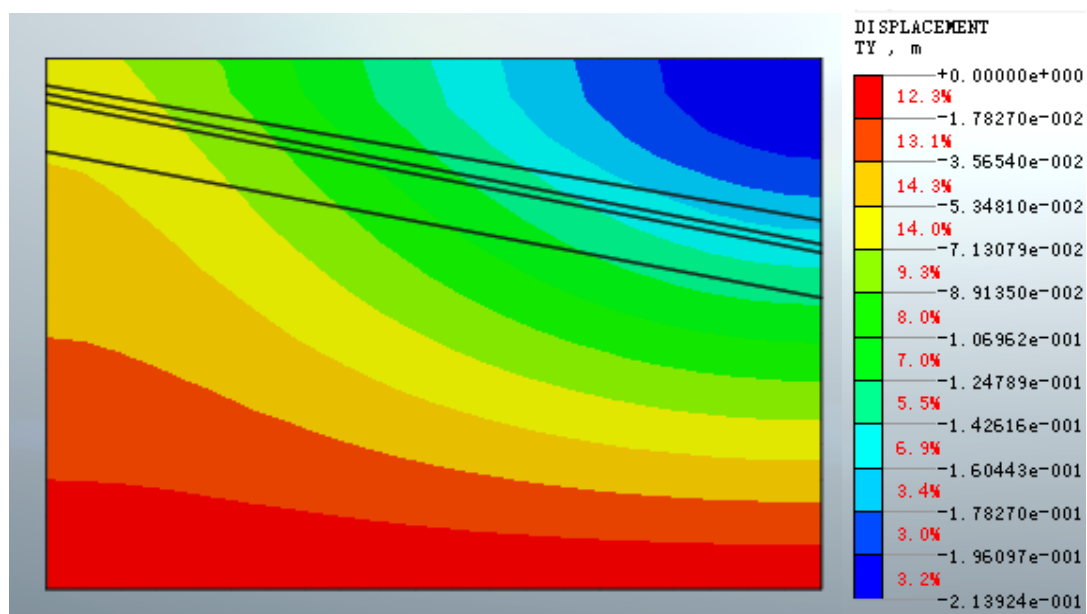


图 5.2.2-2 强夯加注浆地基处理后深厚回填土区沉降云图

因此在工法实施前，充分论证了强夯加注浆地基处理不仅能够满足设计以及规范要求，且具有更加优越的经济性。

2 强夯机选型

根据地质资料，场地填方区回填土深度，边坡安全距离，设计参数等因素考虑，强夯处理面积以及强夯处理回填土的深度，确定夯能，锤径。

3 试夯面积、夯点布置、夯击方式选择

试夯区的面积不宜过小，一般夯点其纵横排数不宜少于 5 排，有必要确保四排。因过少则反映不出夯点之间能量叠加之后实践的加权处理深度。检测点个数受限，检测点越少，检测方法越单一，所取得检测数据就越具有偶然性，缺少各种方法的互为参照性，其代表性和真实性都难以确保。试夯面积不低于规范要求的 400m²。

夯点布置宜根据加固土层厚度、土质条件、设计给出的技术参数（处理后地基承载力、固体提及率、压实系数）以及试夯结果确定。

4 注浆方式的选择

常用的注浆方式有袖阀管注浆法、孔口封闭注浆法、沉管注浆法等。

袖阀管注浆法适用于处理全充填或半充填的土（溶）洞、淤泥、淤泥质土、流塑、软塑或可塑粘性土、粉土、砂土、碎石土等地基。土（溶）洞及高压缩性土体是地基中的软弱地带。该方法耗费管材较多，且对套壳料的制作要求较高。



图 5.2.2-3 袖阀管注浆管件

孔口封闭注浆法适用于以下几种类型：

- 1) 块裂结构岩体、陡倾角裂隙岩体、碎裂和散体结构岩体或缓倾角层状岩体以及缓倾角裂隙发育的岩体，应注意防止岩体抬动；
- 2) 钻孔较深的帷幕注浆、深层固结注浆、浅孔低压注浆；
- 3) 盖重较大或对抬动变形不敏感的工程部位；

该法注浆浆体的损耗量较大，因此较为昂贵的材料注浆不宜采用该工法。



图 5.2.2-4 孔口封闭注浆法

沉管注浆法适用于水下地基处理、地下水埋深较浅、水文与地质条件差等地质类型，大多应用于水利工程等。

在注浆方式的选择中要结合工程地质条件、岩层分布特点、设计技术参数、施工效率、经济性进行确定。

5 注浆浆体选择

注浆浆体的选择依据地质分层状况、场地填方区回填土深度、设计参数确定。

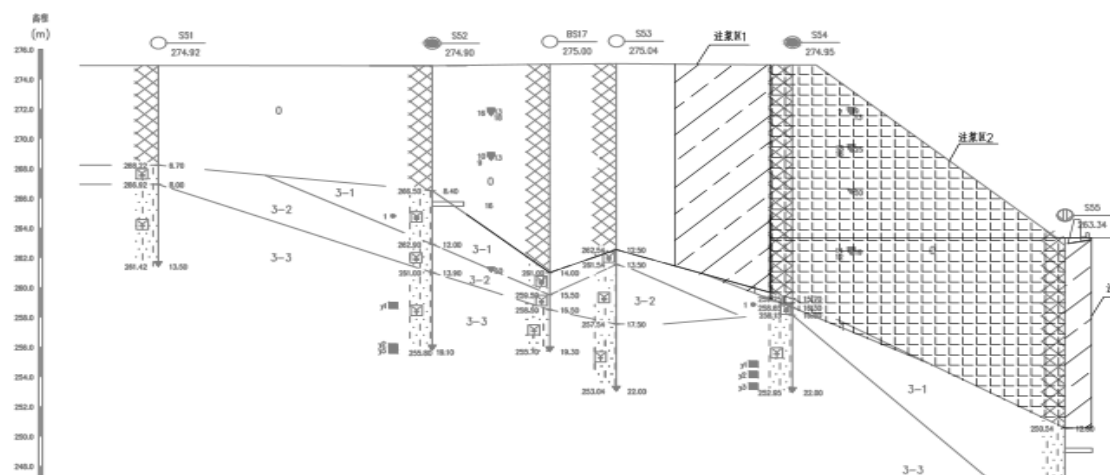


图 5.2.2-5 典型高边坡地质分层剖面图

其中注浆量遵循以下公式：

$$Q=\pi R^2 H * A * n * \beta$$

R：有效扩散半径

H：注浆深度

A：损耗系数（1.15~1.3）

n:孔隙率

β ：浆液填充系数

式中各个参数根据工程具体情况而定。

6 注浆泵送机的选择

流量是选泵的重要性能数据之一，它直接关系到整个装置的的生产能力和输送能力。选择泵时，以最大流量为依据，兼顾正常流量，在没有最大流量时，通常可取正常流量的 1.1 倍作为最大流量。注浆压力同样是注浆泵的选型重要因素，主要参考设计参数中的终止注浆压力大小。

浆体性质，包括液体介质名称，浆体温度、密度、粘度，介质中固体颗粒直径等，这涉及到系统的扬程，是选用泵的重要依据。其中泵机要求浆液中的固体颗粒直径不得含有太多杂质，否则容易出现堵塞泵机的现象，严重时甚至会导致泵机报废，既影响工程注浆效率，又存在安全风险。若浆体含有不同介质时，通常选用颗粒直径最大的介质作为注浆泵送机的选型依据。如：浆体中含有水泥、黄泥时，可选择泵机有水泥泵送机（如图 5.2.2-6）、黄泥泵送机（如图 5.2.2-7），但由于黄泥颗粒直径大于水泥，则以黄泥颗粒直径作为泵送剂选型依

据。



图 5.2.2-6 水泥泵送机



图 5.2.2-7 黄泥泵送机

注浆系统的管路布置指的是送液高度送液距离送液走向，吸入侧最低液面，排出侧最高液面等一些数据和管道规格及其长度、材料、管件规格、数量等，以便进行扬程计算的校核。

7 注浆钻孔机的选型

钻孔机的选型影响了钻孔进度以及能否深入岩层，钻孔机的选型不理想将严重影响注浆效率及工期。在钻孔的选型中要考虑其施工效率以及转场的灵便性。边坡注浆施工中的钻孔机大多选择大功率的气动凿岩钻孔机（如图 5.2.2-4），该钻孔机的体型较小，重量适中，移动灵活，可在边坡台阶上稳定注浆，适用于高边坡注浆。



图 5.2.2-8 气动凿岩钻孔机

5.2.3 浆体介质的干燥与筛分

浆体介质的颗粒度、含水量直接影响着注浆浆体配比的准确性，从而影响着注浆施工质量。在进行泥浆配比前，需认真查验介质进场时的颗粒度、含水量，并利用有效措施保证原材料的质量。首先对介质进行晾晒、烘干等干燥处理；再利用筛分机对介质进行碾碎筛分处理；最后对已干燥筛分的介质进行覆盖保护，以防再次沾水结块。

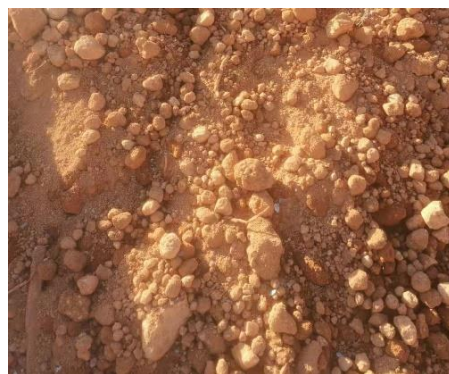


图 5.2.3-1 浆体介质干燥处理前 图 5.2.3-2 浆体介质干燥处理后



图 5.2.3-3 浆体介质筛分处理前 图 5.2.3-4 浆体介质筛分处理后

5.2.4 浆体制备

1 浆体搅拌器选型

浆体制备中要定期查看搅拌器搅拌效果，搅拌器搅拌效果不理想要及时更换搅拌器。

以下为市面上的两种常用搅拌器，两种搅拌器技术参数如下：

型号	叶片层数 (层)	叶片数 (个)	功率 (KW)	转速 (转/分 钟)	可配容积 (L)
ZLD5 桨式螺旋搅拌器	1	3	25	200	500
ZLD9 桨式轮旋搅拌器	2	4	50	400	1000

对比以上两种搅拌器，其中单层搅拌器只能搅拌到最下层浆液，三叶搅拌器搅动效果差，低功率搅动频率低，起不到对浆液完全搅拌的效果，施工条件允许情况下，尽量选用大功率、多层、多叶搅拌器。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/226132144132010040>