

土木建筑工程继续教育丛书

地基处理新技术

卢肇钧 曾国熙 叶政青 蒋国澄 编

中国建筑工业出版社

本书是在已出版的《地基处理手册》基础上缩编而成，简要介绍各种地基处理技术的特点、适用范围、设计原理、施工方法及测试手段。反映了我国当前地基处理的水平，同时兼蓄国外先进经验。以适应职业教育和在职继续教育工作的需要。

全书共分八章，内容包括：总论，浅层处理，排水固结法，振冲法和强夯法，压力灌浆和深层搅拌，锚固技术和土工聚合物的应用，托换技术，现场测试方法。

本书可供从事地基设计和施工人员使用，亦可供工程勘察、建筑设计以及大专院校有关专业师生参考。

* * *

责任编辑 高峰

土木建筑工程继续教育丛书

地基处理新技术

卢肇钧 曾国熙 叶政青 蒋国澄 编

*
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*
开本：850×1168毫米 1/32 印张：5³/₈ 字数：142千字

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

印数：1—17,000册 定价：2.30元

ISBN7-112-00778-X/TU·550

(5856)

出 版 说 明

社会的进步、经济的振兴和科技的发展，都依赖于劳动者素质的提高和大量合格人才的培养。为此，必须努力通过各种途径，加强对劳动者和科技工作者的职业教育和在职继续教育。

为满足土木建筑界科技工作者补充新知识的需要，在中国建筑学会及中国土木工程学会的倡导和参与下，我社拟编辑一套《土木建筑工程继续教育丛书》，由两个学会各专业委员会协助，按专题约请有关专家执笔，陆续出版。

本丛书以在职的具有大专文化程度的中青年科技工作者为主要对象，可作为进修自学材料，也可供短期培训之用。

中国建筑工业出版社

一九八八年十一月

目 录

第一章 总论	1
1.1 地基处理的目的和意义	1
1.2 地基处理方法的分类及各种方法的适用范围	3
1.3 地基处理方法的选用原则及处理前后应注意事项	12
1.4 特殊土处理	17
第二章 浅层处理	26
2.1 概述	26
2.2 换土垫层法	27
2.3 机械碾压法	30
2.4 振动压实法	31
2.5 重锤夯实法	32
2.6 砂桩	33
2.7 土桩与灰土桩	36
2.8 短桩处理	39
2.9 楔形桩	41
2.10 褥垫法	43
第三章 排水固结法	45
3.1 概述	45
3.2 排水固结法的原理	45
3.3 排水固结法的设计与计算	48
3.4 排水固结法的实施	64
第四章 振冲法和强夯法	66
4.1 振冲挤密法	66
4.2 振冲置换法	72
4.3 强夯法	81
第五章 压力灌浆和深层搅拌	87

5.1 灌浆法	88
5.2 高压喷射注浆法	98
5.3 深层搅拌法	108
第六章 锚固技术和土工聚合物的应用	117
6.1 锚固技术	117
6.2 土工聚合物在工程中的应用	125
第七章 托换技术	134
7.1 概述	134
7.2 坑式托换	135
7.3 桩式托换	136
7.4 特殊托换	141
7.5 综合托换	148
第八章 现场测试方法	149
8.1 概述	149
8.2 平板载荷试验	153
8.3 静力触探	154
8.4 动力触探	155
8.5 标准贯入试验	157
8.6 旁(横)压试验	158
8.7 十字板剪切试验	158
8.8 现场大型剪切试验	159
8.9 土中应力的测试	159
8.10 地基沉降及位移观测	161
8.11 地基土的波速测试	162

第一章 总 论^①

1.1 地基处理的目的和意义

结构物的地基问题，概括地说，可包括以下四个方面：

1. 强度及稳定性问题，当地基的抗剪强度不足以支承上部结构的自重及外荷载；即会产生局部或整体剪切破坏。

2. 压缩及不均匀沉降问题，当地基在上部结构的重量及外荷载作用下产生过大的变形会影响结构物的正常使用，特别是超过结构物所能容许的不均匀沉降时，结构可能开裂破坏。湿陷性黄土遇水而发生剧烈的变形也可包括在这一类地基问题中。

3. 地基的渗漏量或水力比降超过结构物及地基的容许值时，会发生水量的流损以及潜蚀和管涌，有可能导致失败。

4. 地震、机器以及车辆的振动和爆破等动力荷载可能引起地基土，特别是饱和无粘性土的液化、失稳和震陷等危害，这类地基问题也可能分别概括于上述稳定性问题和变形问题中，只是由于动力荷载引起的。

当结构物的天然地基发生上述四类问题之一或其中几个时，即须采用适当的地基处理以保证结构物的安全与正常使用。有的可在上部结构上采取一些措施。地基与结构物的关系极为密切。据调查统计，世界各国各种土木、水利、交通等类工程的故事中，地基问题常是主要原因。

地基问题的处理恰当与否，关系到整个工程的质量、投资和进度。因此其重要性已越来越多被人们所认识。

① 本章原编写人：曾国熙等。缩编者：卢肇钧。

我国地域辽阔，从沿海到内地，由山区到平原，分布着多种多样的土，其抗剪强度、压缩性、以及透水性等因土的种类不同而可能有很大差别，各种地基土中，不少为软弱土和不良土，主要包括：软粘土、杂填土，冲填土，饱和粉细沙（包括部分轻亚粘土），湿陷性黄土、泥炭土、膨胀土，红粘土、多年冻土、岩溶土洞等，山区的土在某种条件下也可能是不良的土。而我国的新建设工程越来越多地遇到不良地基。因此地基处理的要求也就越来越迫切和广泛。

另外，除了在上述各种软弱和不良地基上建造建筑物时需要考虑地基处理外，当旧房改造、加高、工厂设备更新等造成荷载增大，对原来地基提出更高的要求，原地基不能满足新的要求时，或者在开挖深基础、建造地下铁道等工程中有土体稳定、变形或渗流问题时，也需要进行地基处理。

随着我国四个现代化建设事业的发展，基本建设的规模越来越大，经常遇到要在软弱地层或不良地基土建造工业与民用建筑、铁道公路工程、堆场码头等，而且结构物的荷载越来越大，对地基的要求越来越高。于是，越来越多的工程需要对天然地层进行人工处理；采用人工地基以满足结构物对地基的要求。因此，在实际工程中，判断是否需要对天然地层进行人工处理，如需采用人工地基又将采用什么处理方法已成为日益突出的问题。

各种各样的结构物对地基的要求是不同的，各地区天然地层的情况也是千差万别的 即使在同一地区，地质情况也可能有很大的差别，这就决定了地基处理问题的复杂性，是采用天然地基，还是采用人工地基？采用人工地基时应采用什么地基处理方案？这是建造建筑物时首先需要解决的问题。处理是否恰当不仅影响建筑物的安全，而且对建设速度，工程造价都有不小的影响。有时甚至成为工程建设中的关键。

可以追溯到很久以前，人类就已懂得对天然地层进行人工处理，采用人工地基建造建筑物。例如，灰土垫层在我国老早就已广泛使用。许多现代的地基处理技术都可在古代找到它的雏型。

工业的发展、技术的进步促进了各种地基处理技术的发展。现代建筑事业对地基处理提出了愈来愈高的要求。许多新的地基处理技术得到开发和应用。地基处理技术是一门既古老又年轻的科学。地基处理技术的研究和推广使用已成为土木工程中一项重要的课题,总结国内外地基处理方面的经验教训,推广和发展各种地基处理技术,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重大的意义。

在论述地基处理时,必然会牵涉到土的名称和分类。目前国内对地基土的分类尚不统一。为一致起见,本书主要采用《工业与民用建筑地基基础设计规范》中关于土的工程分类标准。

1.2 地基处理方法的分类及各种方法的适用范围

在讨论地基处理方法以前,首先说明一点,桩基础是应用得最多的人工地基之一,考虑到桩基础已有较完整的理论,其设计方法,施工工艺、现场监测都较成熟,已成为一门独立的学科,专著很多,在地基处理方法的分类中,一般不包括各种桩基础,也不把它作为一种地基处理方法介绍。

地基处理方法可以按地基处理原理、地基处理的目的,地基处理的性质,地基处理的时效、动机等不同角度进行分类。其中最本质的是根据地基处理原理进行分类,下面据此作简要介绍,具体的各种处理方法详见以后各章。

应该指出,地基处理方法的严格分类是十分困难的。不少方法具有几种不同的作用。例如:振冲法具有置换作用,有的还有挤密作用。又如各种挤密法中,同时也有置换作用,此外,还有一些地基处理方法的加固机理以及计算方法目前尚不十分明确,有待进一步探讨。地基处理方法不断地发展,功能不断地扩大,也使分类变得更加困难,因此下述分类仅供读者参考,在介绍地基处理方法分类的同时、将扼要介绍各种地基处理方法的适用范围。

1.2.1 排水固结法

排水固结法的原理是软粘土地基在荷载作用下，土中孔隙水慢慢排出，孔隙比减小，地基发生固结变形，同时，随着超静水压力逐渐消散，土的有效应力增大，地基土的强度逐步增长。

排水固结法常用于解决软粘土地基的沉降和稳定问题。

排水固结法是由排水系统和加压系统两部分共同组合而成的。

根据排水系统和加压系统的不同，排水固结法可分为下述几种方法：

1. 堆载预压法

在建造建筑物以前，通过临时堆填土石等方法对地基加载预压，达到预先完成部分或大部地基沉降，并通过地基土固结提高地基承载力，然后撤除荷载，再建造建筑物。

临时的预压荷载一般等于结构物的荷载，但为了减少由于次固结而产生的沉降，预压荷载也可大于结构物荷载，称为超载预压。

为了加速堆载预压地基固结速度，常可与沙井法式塑料排水板法等同时应用，如粘土层较薄，适水性较好，也可单独采用堆载预压法。

适用范围：软粘土地基。

2. 砂井法（包括袋装砂井、塑料排水板、塑料管等法）

根据太沙基固结理论，土层达到一定固结度所需的时间与排水距离的平方成正比，因此，减小排水距离是缩短固结时间的最有效方法，在软粘土地基中，设置一系列砂井，并在地面铺设砂垫或砂沟，人为地增加土层固结排水通道，缩短排水距离，从而加速固结，并加速强度的增长，这种方法称为砂井法。

砂井法常辅以堆载预压，称为砂井堆载预压法。

适用范围：透水性低的软弱粘性土，但对于泥炭土等有机质沉积物不适用。

3. 真空预压法

在粘土层上铺设砂垫层，然后用薄膜密封砂垫层，用真空泵对砂垫及砂井抽气，使地下水位降低，同时在大气压力作用下加速地基固结。与荷载预压法相比，真空预压法就是以真空造成的大气压力代替临时堆土荷载，或其一部分。由于真空预压的压力只能达到某一程度，如达不到结构物的荷载时，还可另加堆载。

适用范围：软粘土地基。

4.降低地下水位法

降低地下水位虽然不能改变地基中的总应力，但能减少孔隙水压力，使有效应力增大，促进地基固结。达到在建造建筑物前完成部分固结沉降和提高地基强度的目的。

适用范围：在地下水位接近地面的土层中进行开挖深度较大的工程时，特别是饱和粉、细砂地基多采用降低地下水位措施。

5.电渗法

在土中插入金属电极并通以直流电，由于直流电场作用，土中的水从阳极流向阴极，这种现象称为电渗。如将水从阴极排除（通常采用井点作为阴极，并由井点进行真空抽水），而不让水在阳极附近补充，则借助电渗作用可逐渐排除土中水。在工程上常利用它降低粘性土中的含水量或地下水位来提高土坡或基坑边坡的稳定性，也可利用它来加速堆载预压饱和粘性土、地基的固结，提高地基土强度等。

适用范围：饱和软粘土地基。

1.2.2 振密、挤密法

振密、挤密法的原理是采用一定的手段，通过振动、挤压使地基土体孔隙比减小，强度提高，达到地基处理的目的。根据采用的手段可分为下述几种方法：

1.表层压实法

采用人工或机械夯实、机械碾压或振动对填土、湿陷性黄土、松散粉、细砂等软弱或较疏松表层上进行压实，也可采用分层回填压实加固，分层压实的填料也可适量添加石灰、水泥等。

适用范围：浅层疏松粘性土（其含水量接近于最佳含水量）、松散砂性土、湿陷性黄土及杂填土。

2. 重锤夯实法

利用重锤自由下落时的冲击力来夯实浅层杂填土地基，使其表面形成一层较为均匀的硬壳层。

适用范围：天然含水量接近于最佳含水量的浅层土。

3. 强夯法

将很重的锤从高处自由落下，反复多次夯击地面给地基以冲击力和振动，从而提高地基土的强度并降低其压缩性。

适用范围：无粘性土、杂填土、非饱和粘性土以及湿陷性黄土等。

4. 振冲挤密法

振冲挤密法通常用以加固砂层，其原理是：一方面依靠振冲器的强力振动使饱和砂层发生液化，颗粒重新排列，孔隙比减小；另一方面依靠振冲器的水平振动力，形成垂直孔洞，在其中加入填料，使砂层挤压加密。

适用范围：砂性土，小于0.005mm的粘粒含量小于10%。若粘粒含量大于30%，则效果明显降低。

5. 土桩和灰土桩

土桩和灰土桩挤密地基是由桩间挤密土和填夯的桩体组成的人工“复合地基”，土桩主要适用于消除湿陷性黄土地基的湿陷性，灰土桩主要适用于提高人工填土地基的承载力。

适用范围：湿陷性黄土、人工填土、非饱和粘性土。

6. 砂桩

在松散砂土或人工填土中设置砂桩，能对周围土体或产生挤密作用，或同时产生振密作用，就可以显著提高地基强度，改善地基的整体稳定性，并减小地基沉降量。

适用范围：松砂地基或杂填土

1.2.3 置换及拌入法

以砂、碎石等材料置换软弱地基，或在部分土体内掺入水

泥、水泥砂浆，以及石灰等物，形成加固体，与未加固部分形成复合地基，从而达到提高地基承载力，减小压缩量的目的。置换及拌入法包括下述几种方法：

1. 垫层法

在天然地层上铺设垫层，作为人工填筑的持力层，同时将建筑物基底压力扩散到下卧天然地层中，使其应力减小到下卧层的许可承载力范围以内，从而满足地基稳定性的要求，同时由于垫层材料的压缩性低于天然的软粘土层，采用垫层法也可减少地基的沉降量。

垫层材料可分柔性材料和刚性材料。柔性材料包括砂土、碎石、石渣、煤灰、矿渣、粘性土等，刚性材料包括木材垫层，金属垫层、合成树脂垫层等，砂、砾、碎石或石渣等无粘性土是最常采用的垫层材料，因为这类土的强度大，压缩性小，透水性好，比较容易使之密实，且在不少地区料源丰富，价格便宜。

适用范围：浅层地基处理。

2. 开挖置换法

开挖置换法就是将基底下一定深度的软弱土层挖除（如软弱土层较薄，可将其全部挖除），然后回填较好的土石料，例如砂土、碎石、石渣等，分层夯实作为持力层，达到地基处理的目的。

适用范围：浅层地基处理。

3. 振冲置换法（碎石桩法）

利用一种能产生水平向振动的管状机械设备在高压水流帮助下边振边冲，在软弱粘性土地基中成孔，再在孔内分批填入碎石或卵石等材料制成一根根桩体，桩体和原来的粘性土构成所谓复合地基，以提高承载力并减小压缩性，碎石桩的承载力和沉降量在很大程度上取决于周围软土对其的约束作用。

适用范围：软弱粘性土地基，但对于抗剪强度较低的软粘土，采用碎石桩务必慎重从事。

4. 高压喷射注浆法

过去此法称为旋喷桩。以高压喷射流直接冲击破坏土体，使喷射的水泥或其它浆液与土拌和凝固后成为拌和柱体。在软弱地基中设置这种柱体群，形成了复合地基或挡土结构。

适用范围：粘性土、冲填土、粉细砂、砂砾石等地基。

5. 深层搅拌法

深层搅拌法是用于加固饱和软粘土地基的一种新技术。它是利用水泥或石灰等其它材料作为固化剂的主剂，通过特别的深层搅拌机械，在地基深处就将软土和固化剂强制搅拌，利用固化剂和软土之间所产生的一系列物理-化学反应，形成坚硬拌和柱体，与原土层共同起复合地基的作用。

高压喷射注浆法和深层搅拌法的差别在采用不同的加料拌和手段。

适用范围：与高压喷射注浆法类似。

6. 石灰桩法

在软弱地基中用机械成孔，填入作为固化剂的生石灰并加以搅拌或压实形成桩体，利用生石灰的吸水、膨胀、放热作用和土与石灰的离子交换反应、凝硬反应等作用，改善桩体周围土体的物理力学性质，石灰桩和周围被改良的土体一起组成复合地基，达到地基加固的目的，关于石灰桩法，本书暂不介绍，读者如需进一步了解，请参阅其它文献或专著。

适用范围：软弱粘性土。

7. 褥垫法

在压缩性较低的地基上（如岩基、砾石）上加褥垫，使它与压缩性较高的地基相适应，调整岩土交界处的相对变形，避免由于该处应力集中而使结构物破坏。

适用范围：地基软土层深浅不一，易于发生不均匀沉降的地层。

1.2.4 灌浆法

灌浆法的实质是用气压、液压或电化学原理，把某些能固化的浆液注入各种介质的裂缝或孔隙，以改善地基的物理力学

性质。

灌浆法可用于防渗、堵漏、加固和纠正建筑物倾斜。它主要适用于砂及砂砾石地基，以及湿陷性黄土地基等。灌浆法在水利建筑、道桥以及地下建筑等工程的各个领域中都得到广泛应用。

灌浆材料常分为粒状浆材和化学浆材两个系统、粒状浆材主要包括纯水泥浆、粘土水泥浆、水泥砂浆、以及石灰浆等，化学浆材的品种很多，包括环氧树脂类、甲基丙烯酸酯类、聚氨酯类、丙烯酰胺类、木质素类和硅酸盐类等。

在地基处理中，常用的灌浆方法按其依据的理论可分为四种，即渗入性灌浆法，劈裂灌浆法、压密灌浆法、电动化学灌浆法。

适用范围：根据采取不同的灌浆方法及相应的灌浆材料，灌浆法可应用于砂及砂砾地基，湿陷性黄土地基，粘性土地基。

1.2.5 加筋法

通过在土层中埋设强度较大的土工聚合物、拉筋、受力杆件等达到提高地基承载力、减小沉降，或维持建筑物稳定的地基处理方法称为加筋法，加筋法一般有下列几种：

1. 土工聚合物

利用土工聚合物(或称为土工合成物或土工织物)的高强度、韧性等力学性能，扩散土中应力，增大土体的刚度模量或抗拉强度，改善土体或构成加筋土以及各种复合土工结构。土工聚合物除了上述加固强化作用外，还可用作反滤、排水和隔离材料。

适用范围：加强软弱地基，或用作反滤、排水和隔离材料。

2. 锚固技术

锚固技术是将一种新型受拉杆件的一端固定在边坡或地基的岩层或土层中，另一端与结构物(如挡土结构物)联结，利用锚固力以承受由于土压力、水压力或风力所施加于结构物的推力，从而可维持结构物的稳定。

适用范围：在天然地层中可用灌浆锚杆，在人工填土中可用锚定板。

3. 加筋土

把抗拉能力很强的拉筋埋置在土层中，通过土颗粒和拉筋之间的摩擦力形成一个整体，称为加筋土。拉筋一般使用具有耐拉力，摩擦系数大及耐腐蚀性的板状、网状、丝状、带状的材料，主要是镀锌片、铝合金以及合成树脂等材料。关于加筋土本书不作进一步介绍。

适用范围：在人工填筑的砂性土中可以采用，但不宜用于粘性土。

4. 树根桩法

在地基中沿不同方向，打设直径为75~250mm的细桩，桩身可垂直或倾斜，形成如树根状的群桩，以支撑结构物，或用以挡土，乃至用于稳定土坡。

适用范围：软弱粘性土、杂填土。

1.2.6 冷热处理法

1. 冻结法

通过人工冷却，使地基温度降低到孔隙水的冰点以下，使地基土冻结。从而具有理想的截水性能和较高的承载能力（或横向支承能力）。

适用范围：用于饱和的砂土或软粘土地层中的临时性措施。

2. 烧结法

在软弱粘土地基的钻孔中加热，通过焙烧使周围地基土减小含水量提高强度，减少压缩性。

关于冷热处理法，本书不作进一步介绍。

适用范围：软粘土、湿陷性黄土等。

1.2.7 托换技术

托换技术（或称基础托换）是指对原有建筑物地基和基础需要进行处理。加固或改建，在原有建筑物基础下需要修建地下工程以及邻近建造新工程而影响到原有建筑物的安全等问题的技术总称。

托换技术一般可分为两个阶段进行：（1）采取适当而稳妥

的方法，支托住原有建筑物的全部或部分荷载；（2）根据工程需要对原有建筑物的地基和基础进行加固、改建或让原有建筑物下进行其它地下工程的施工。

托换技术需要应用各种地基处理技术，有时还要结合上层建筑的处理，它并不是一种具体的地基处理方法。

适用范围：针对建筑物基础和地基的情况，具体分析其可行性。

1.2.8 其它

除了上述各种地基处理方法外，在实际工程中，特别是在特殊托换技术中应用的，还有其它一些地基处理方法。

1. 锚杆静压桩

锚杆静压桩法是把锚杆技术和静压桩技术两者巧妙结合起来的方法，它利用结构物的自重，先在基础上埋设锚杆，借锚杆反力，通过反力架用千斤顶将桩逐段压入地基和基础中开凿出来的或预留的桩孔，当压桩力达到1.5~2.0倍桩的设计荷载时，便可将桩和基础紧固在一起，卸除反力架千斤顶，该桩便能承受荷载，从而减少基础下地基所受的部分压力，阻止建筑物的不均匀沉降。

2. 基础加压纠偏法

采用人为地改变荷载条件，迫使地基土产生不均匀变形，从而调整基础不均匀沉降。例如在烟囱等类高耸结构物沉降较小的一侧堆钢锭或石块等。

3. 基础减压和加强上部结构刚度法

在设计软弱地基上结构物时，上部结构往往需要采取某些加强其刚度和强度的措施，如经常采用的钢筋混凝土腰箍，以加强砖结构物的整体刚度；或减轻结构自重的措施，如选用轻质材料，轻型结构和补偿性基础（如采用地下室层）等。

4. 套筒法

套筒法是指在原桥梁的桥墩水下部分的若干钢筋混凝土桩基础外包以套筒（实际上是一沉井结构），再在套筒内灌注混凝土

土,从而将分散的若干钢筋混凝土柱基础形成一个重力式桥墩。

5. 浸水与加压矫正法

在高耸结构物的倾斜矫正中,可利用湿陷性黄土遇水湿陷的特性,采用浸水、加压或浸水加压的方法进行矫正。

6. 排(掏)土纠偏法

排(掏)土纠偏法包括在结构物沉降较小一侧的地基中抽(掏)砂(土)、钻孔取土、穿孔取土纠偏等方法。

7. 预浸水法

利用黄土浸水后产生自重湿陷的特性,在施工前进行大面积浸水,使土体预先产生自重湿陷,以消除全部黄土层的自重湿陷性和深层土层的外荷湿陷性。

8. 灰土柱

先开挖直径大于1米的圆柱形井孔,达到较好的持力层后,用2:8或3:7灰土分层回填夯实成柱体,以支承荷载。

9. 膨胀土地基帷幕

帷幕作为地基防水保湿屏障,用以截断外界因素对地基水分的影响,从而保证地基中水分的稳定、消除引起膨胀土地基胀缩变形的根源。帷幕型式有砂帷幕、填砂的塑料薄膜帷幕、填土的塑料薄膜帷幕、沥青油毡帷幕以及塑料薄膜灰土帷幕等。

防渗帷幕在水利工程中是常用的一种措施。

地基处理方法种类繁多,而且还在不断发展,这里不可能对所有的处理方法加以介绍。不少地基处理方法是综合措施,例如对膨胀土地基采用帷幕配合宽散水,并搞好排水系统,在山区则要治坡。又如对地基中存在暗浜的情况,需要根据具体情况采用不同的方法处理。

1.3 地基处理方法的选用原则及处理前后应注意事项

1.3.1 地基处理方法设计顺序

在讨论地基处理方法选用原则及地基处理前后注意事项以