



高等学校土木工程专业系列教材

DIJI GONGCHENG CHULI YU JIANCI

地基工程处理与 检测技术

李渝生 苏道刚 编著



西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>

高等学校土木工程专业系列教材

地基工程处理与检测技术

李渝生 苏道刚 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍了软弱地基工程加固处理的基本原理、技术方法及其检测技术。教材内容贴近工程实际,是目前国内第一部集工程处理与检测技术于一体的综合性教材。

第1篇“地基工程处理技术”包括1~8章,全面系统地介绍了软弱地基加固处理的各种工程技术,着重阐述各项工程技术的基本原理、适用范围、设计方法及施工技术要点。强调地基岩土条件和各项工程技术的作用原理在地基处理方案选择中的重要性。

第2篇“地基检测技术”包括9~14章,重点介绍了地基处理效果检验的主要现场原位测试及室内试验技术。其中某些测试技术及设备是成都理工大学工程地质实验室自主开发及研制的。试验课程强调技术方法的有效、实用和可操作性。

本书可作为高等院校勘察技术与工程、岩土工程等专业的教材,亦可作为相关设计及施工部门的工程技术人员参考用书,对于全国注册岩土工程师考试也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

地基工程处理与检测技术 / 李渝生, 苏道刚编著.
—成都: 西南交通大学出版社, 2010.10
高等学校土木工程专业系列教材
ISBN 978-7-5643-0907-7

I. ①地… II. ①李…②苏… III. ①地基处理—高等学校—教材 IV. ①TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 190052 号

高等学校土木工程专业系列教材

地基工程处理与检测技术

李渝生 苏道刚 编著

责任编辑 黄淑文

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 19.375

字数: 484 千字

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0907-7

定价: 36.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

经过长期的教学及工程研究实践，我们认为软弱地基的工程处理，是一个涉及地基岩土及地质环境、物理及化学原理、土木工程施工技术、材料学、能源与环境保护等多个科技领域的复杂技术。尤其是在地基工程地质条件极为复杂的中国西部地区，土木工程科技工作者还将面对不断出现的新问题。要有效地解决这些问题，一方面必须深刻地理解和掌握各项工程技术的科学原理；另一方面还需充分认识到，地基岩土性质对于选择合理的工程处理方法也是十分重要的。此外，不可忽视检测技术在控制施工质量中的重要性。

为了与土木工程科学技术发展的最新水平相适应，本教材包括“地基工程处理技术”和“地基检测技术”两部分。教材内容贴近工程实际，是目前国内第一部集工程处理与检测技术于一体的综合性教材。

为了与高等院校地质工程专业教学相适应，本书删繁就简，尽可能以基本概念的清晰阐述、基本理论与技术方法的传授为主。为此，编者做出了应有的努力。

全书共分两篇 14 章。其中，序、绪论及第 1 篇“地基工程处理技术”（1~8 章）由李渝生编著，第 2 篇“地基检测技术”（9~14 章）由苏道刚编著。最后由李渝生统编、校订定稿。

特别需要指出的是，在本教材引用的工程案例中，若干表达符号与现行技术规范不一致，为尊重原文作者，一般未作修改。此外，本教材还引用了许多参考书籍与文献，在此谨向这些作者示衷心的感谢。

本书能够及时完稿，得益于成都理工大学环境与土木工程学院巨能攀副院长、工程地质实验室付晓敏主任以及教务处有关领导的大力支持。此外，刘杰、罗选红、李玉倩、刘根亮、谢莉、王洁、曹广鹏及鲍杰等研究生在电子版录入、绘图及校对等方面做了大量工作。编者在此向他们致以诚挚的谢意。

编者希望本书除作为教材外，还可作为工程技术人员的参考文献。

目前，土木工程技术正处于快速发展过程中。国内外的地基处理方法很多，其中相当多的技术方法尚处于不断发展之中，也不乏成功应用的范例，教材中难以及时予以体现。对于书中存在的不足之处，敬请读者提出批评和指正。来函请寄成都理工大学环境与土木工程学院。

编 者
2010.9

目 录

绪 论	1
-----------	---

第 1 篇 地基工程处理技术

第 1 章 换填垫层法	7
1.1 换填垫层法的概念	7
1.2 换填垫层的作用原理	7
1.3 垫层设计的主要指标	8
1.4 施工技术要点	13
1.5 工程案例：某厂油罐碎石垫层地基处理	15
第 2 章 排水固结法	17
2.1 概 述	17
2.2 基本原理	18
2.3 排水系统	19
2.4 加压系统	23
2.5 加载速率的控制	30
2.6 质量检测	32
2.7 工程案例	32
第 3 章 复合地基	48
3.1 基本理论与有关的计算问题	48
3.2 碎石桩复合地基	55
3.3 土桩、灰土桩复合地基	60
3.4 砂桩复合地基	66
3.5 水泥土搅拌桩复合地基	71
3.6 石灰桩复合地基	80
3.7 水泥粉煤灰碎石桩（CFG 桩）	84
3.8 工程案例	90
第 4 章 振冲挤密法	99
4.1 基本原理	99
4.2 设计与计算	101

4.3 施工技术要点102

第 5 章 强夯法105

5.1 强夯加固机理105

5.2 强夯参数的确定111

5.3 现场测试117

5.4 工程案例：强夯法加固某煤码头细砂地基119

第 6 章 灌浆法123

6.1 概 述123

6.2 灌浆材料124

6.3 有关灌浆技术的几个基本问题125

6.4 灌浆工艺129

6.5 灌浆设计136

6.6 施工技术要点146

6.7 工程案例：广州市某建筑物地基静压注浆加固处理147

第 7 章 地基托换技术152

7.1 概 述152

7.2 坑式托换153

7.3 桩式托换156

7.4 工程案例160

第 8 章 特殊土地基的工程处理对策163

8.1 软黏土地基163

8.2 杂填土地基166

8.3 冲填土地基173

8.4 松散砂土地基175

8.5 山区复杂地基176

8.6 岩溶与土洞181

8.7 湿陷性黄土地基183

8.8 膨胀土地基190

8.9 冻土地基196

8.10 工程案例：非洲膨胀土挖土填砂地基的失效及工程处理203

第 2 篇 地基检测技术

第 9 章 荷载试验206

9.1 土体浅层平板荷载仪试验206

9.2 单桩竖向荷载试验211

9.3 旁压试验212

第10章 触探试验216

10.1 动力触探试验216

10.2 静力触探试验230

第11章 剪切试验239

11.1 十字板剪切仪试验239

11.2 地基土原位大剪试验246

第12章 波速测试252

12.1 土体声波探测252

12.2 桩的波速测试261

第13章 地基检测中的土工试验265

13.1 第一类地基土的土工试验265

13.2 第二类地基土的土工试验271

13.3 第三类地基土的土工试验272

13.4 第四类地基土的土工试验273

第14章 压力、位移观测274

14.1 地基土应力和空隙水压力测试274

14.2 地基的沉降和水平位移观测277

附录1 原位测试指标、土工试验指标统计280

附录2 主要技术名词汉英对照表282

参考文献302

绪 论

一、导致地基变形破坏的主要原因

在各种土木及水利工程事故中，因地基问题处理不当所引起的工程事故占有相当大的比例。因地基问题造成的事故一旦发生，轻者影响建筑物正常使用，重者危及生命财产安全，并且补救困难。近年来，随着工程建设规模越来越大，所涉及的地基岩土条件也越来越复杂，地基对建筑物的重要性已得到广泛的重视。

地基与上部结构荷载之间的相互作用十分复杂，导致地基变形破坏的原因也是多种多样的。具体的破坏原因和形式概括起来有以下四个方面：

(1) 强度及稳定性问题。当地基的抗剪强度不足以支撑上部结构荷载时，地基岩土体即会产生局部或整体剪切失稳破坏，如图 1 所示。

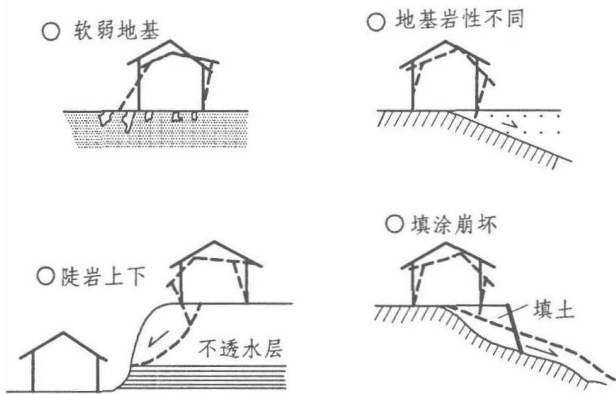


图 1 地基强度及稳定性问题导致地基破坏

(2) 压缩变形及不均匀沉降问题。当地基岩土体在上部结构荷载作用下产生过大的压缩变形时，将影响建筑物的正常使用，尤其是过大的压缩变形差导致的不均匀沉降超过建筑物的允许范围时，结构破裂将是非常严重的，如图 2 所示。

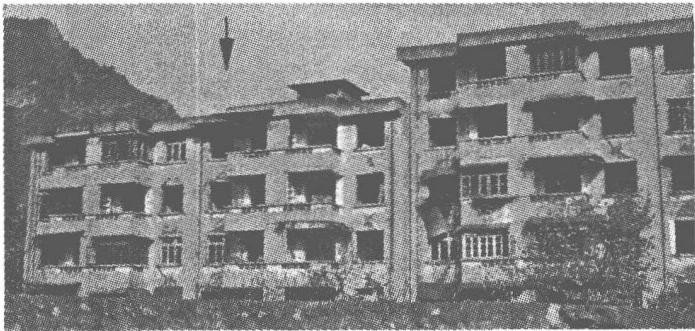


图 2 地基不均匀沉降导致建筑物解体（四川省绵竹市汉旺镇 2008.5.12 $M=8.0$ 地震）

(3) 当地基土石颗粒成分、结构及抗侵蚀强度与地下渗流的动力条件处于某种特殊的环境中时，将产生潜蚀、管涌等渗透变形而导致地基强度失效，如图 3 所示。

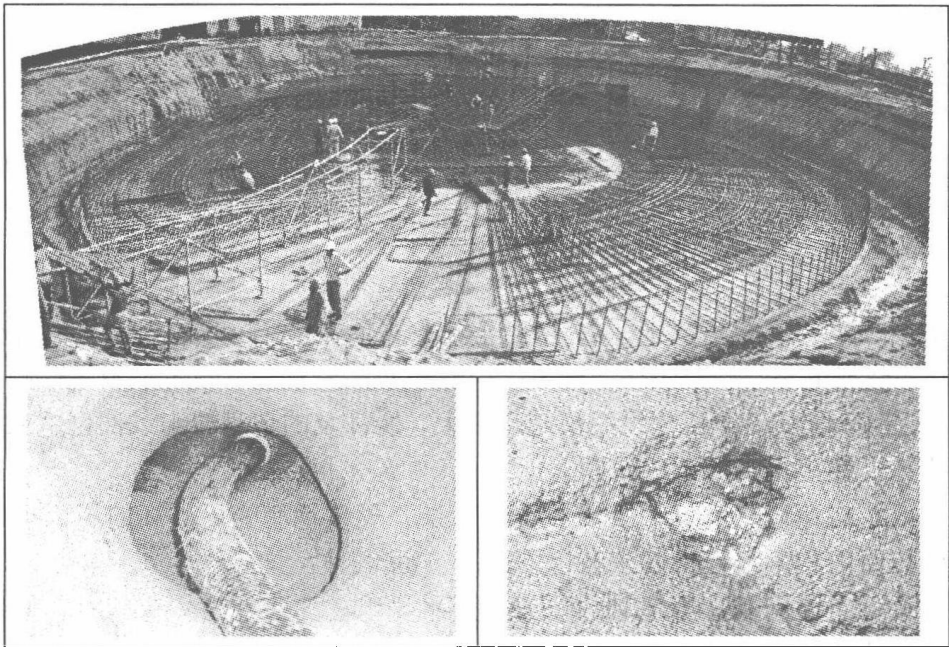


图 3 印度加尔各答市 Durgapur 电厂地基渗透变形

(4) 地震、机械振动、浪击作用及爆破等动力荷载引起地基土，特别是无黏性土的液化、失稳及震陷等危害，如图 4 所示。这类问题地可能分别概括于上述变形问题中，所不同的是由动荷载引起的。

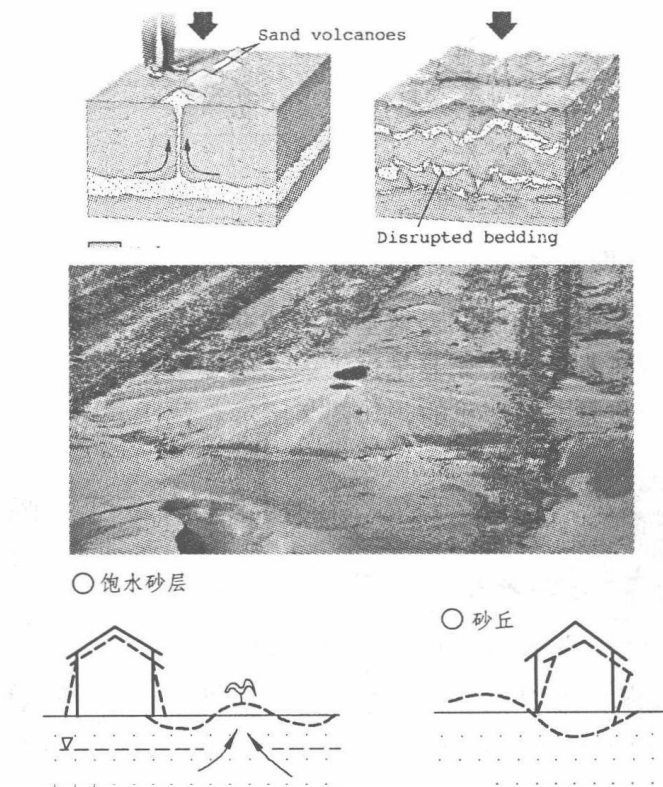


图 4 砂土振动液化

二、软弱地基

我国地域辽阔，从沿海到内陆、山区到平原，分布着多种多样的复杂地基，其抗剪强度、压缩性及透水性等因土类不同而有很大的区别。尤其是软黏土、杂填土、充填土、饱和粉细砂（包括粉质黏土）、湿陷性黄土、淤泥质土、膨胀土、多年冻土、岩溶土洞及山区复杂地基土等类软弱土和不良土，其低劣的工程性质给越来越多的建筑地基带来诸多棘手问题。因此，地基土工程处理的要求也就随之更为迫切和广泛。此外，除了在上述各类软弱和不良地基上建筑结构物时需要考虑地基处理外，建筑物改造、加高及厂房设备更新等造成荷载增大，对原有地基强度提出更高的要求而又难以满足时，也需要进行工程加固处理。因此，地基软弱与否，应根据在该地基上建造构造物可能产生的问题的大小来判断。

通常，地基因承受基础荷载不同而出现不同的变形情况。在局部加载条件下，随荷载的增大，地基变形发展一般经历三个阶段（见图 5）：

第一阶段为某一荷载 P_1 作用时，地基变形速率随时间增大而减小并最后收敛为零，即 $ds/dt=0$ ，地基停止变形；第二阶段是当荷载进一步增大至 P_2 时，地基变形速率收敛为某一定值，即 $ds/dt=c$ ，地基内产生局部滑动，处于塑性流动状态，此时地基不断产生变形，直至形成贯通的滑动面。可以认为地基此时已达到极限状态而处于很危险阶段，随后很快达到第三阶段破坏状态（ $ds/dt=\infty$ ）。

这三个阶段所对应的荷载-沉降曲线，由荷载与沉降量呈直线关系逐渐变为非线性关系，直至达到破坏荷载，如图 5（b）所示。

根据荷载与地基强度的相对关系，若地基变形出现上述第二阶段情况或出现这种情况的可能性很大时，这种地基可称为软弱地基。此外，建筑物规模、重要性及施工速度等也是判断基础软弱程度的重要因素。

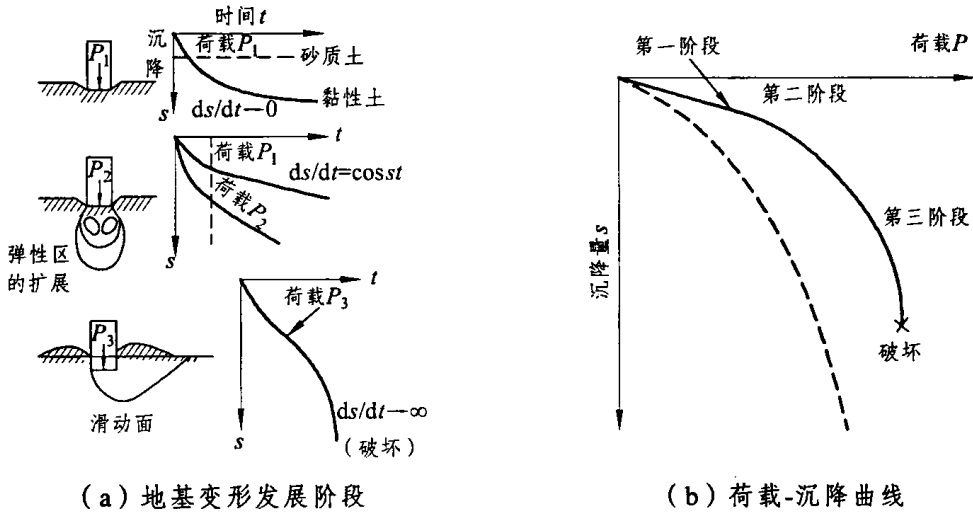


图 5 不同荷载作用下的地基变形状况

三、地基处理方法的分类

很久以前，人类已懂得对天然地基进行人工处理，如灰土垫层在我国古代就已广泛使用。随着现代工程技术的发展与进步，许多新的地基处理技术得到开发和应用。地基处理及测试

技术的研究和推广使用，业已成为岩土工程中的一项重要课题。总结国内地基处理方面的经验教训，推广和发展各种处理和测试技术，提高地基工程处理的技术水平，对加快工程建设进度、降低工程造价具有不可忽视的重大意义。

地基处理方法的严格分类较为困难，某一种地基处理方法同时具有几种不同的作用机理。迄今为止，地基处理技术可从处理的目的、原理、动机、处理时效及地基土性质等不同角度进行分类。其中根据地基处理的目的和原理进行分类是最本质的分类方法。

“地基处理”一词的狭义解释是改良地基土原有性质的意思，大致可分为土质改良、土体置换及土体补强。

1) 土质改良

属于土质改良一类的地基处理方法，是指利用机械（力学的）、电力、化学及热力等手段增加地基土的密度，或使地基土固结以达到处理目的，即尽可能有效地利用原地基。因此，这类方法可以说是真正意义上的最为正统的处理方法。

但是，由于土质改良的方法很多，原理也各种各样，许多方法还同时具有多种效果。因此，重要的是应明确地基处理目的，再据此选择处理方法。常见的土质改良方法有：

① 利用排水增加密度（排水固结法）。包括堆载预压、真空法（大气压法）、降低地下水位法及电渗法等。

② 利用挤实增加密度（振密、挤密法）。包括重锤夯实、强夯、振冲挤密、挤实砂桩法等。

③ 固结法。包括注入、喷射混合、电力固结、冻结及烧结法等。

2) 土体置换

土体置换是将软土层换填为良质土的一种积极方法。当地表附近存在非常软的黏性土层时采用这种方法是最有效的，但当软土层很厚时则工程费用较高而不经济。

该方法的原理是：以砂及碎石等材料置换软弱地基中的软弱土体，形成复合地基；或在软弱地基中部分土体内渗入水泥砂浆及石灰等物，形成加固体，与未加固部分形成复合地基，以达到提高地基承载力、减少压缩量的目的。置换及拌入的主要方法有垫层法、振冲置换法、高压喷射注浆法、石灰桩法、深层搅拌法、褥垫法及灌浆法等。

3) 土体补强

土体补强是采用薄膜、绳网及板桩等约束住地基土，或是在土体中放入抗拉强度高的补强材料形成复合地基以加固和改善地基土的剪切特性的方法。这类方法主要有铺设薄膜法、绳网法、板桩围截法及复合补强法等。从作用原理上说，这些方法并不能防止地基的压缩（固结）变形，而黏性土的压缩变形可能持续很长时间，因此采用土体补强法时应注意这一点。

除上述各类低级处理方法外，在实际工程中，尤其是在某些特殊的托换技术的应用中，还有其他一些地基处理方法。较常用的主要有基础加压纠偏法、浸水与加压矫正法、排土纠倾法、预浸法及膨胀土地基帷幕等。

地基处理的方法种类繁多，而且仍在不断地发展，并明显有采用综合措施进行工程处理的趋势。

四、地基工程处理方案的设计程序

地基工程处理方案的设计应该按图 6 所示程序进行。

首先根据建筑物对地基的技术要求和地基土石层条件，确定需要进行人工处理的天然土石层的范围及处理要求。

然后根据天然地基条件、处理方法的原理、已有工程处理经验和机具设备及材料条件，进行地基工程处理方案的可行性研究，提出多种可供选择的方案。

最后，对提出的各种方案进行技术、经济、施工进度等要素的比较分析，确定采用一种或几种处理方法。此外，应视工程需要进行小型原位试验或补充调查，然后进行施工设计。工程实践表明这是技术可靠而合理的地基处理方案设计程序。

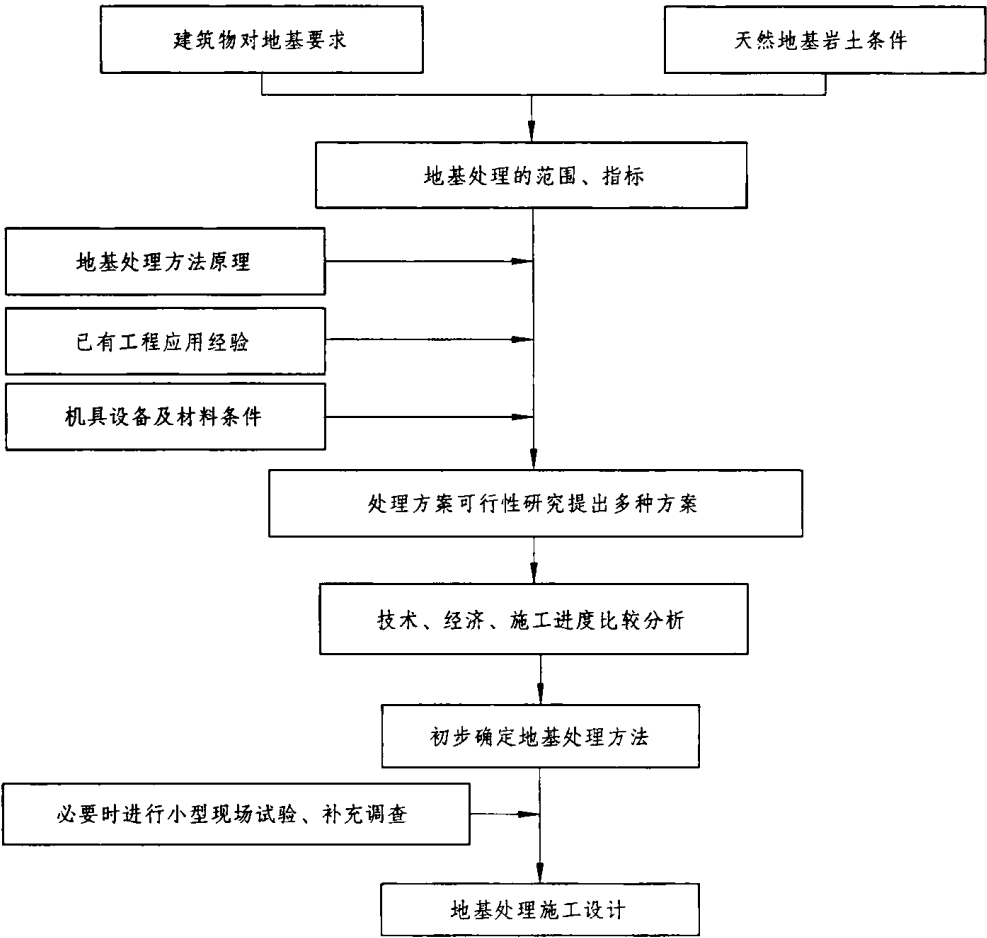


图 6 地基处理方案设计程序

五、地基工程处理方法选择的基本原则

各类建筑物对地基的要求不同，各类地区地基土石情况差别很大，即使同一地区也有很大差别，这就决定了地基处理问题的复杂性。因此，在实际工作中，判断是否需要天然地基进行人工处理以及采用什么处理方法已成为建筑工程首先需要解决的问题。而处理措施是否恰当，不仅影响建筑物的安全和正常使用，而且也涉及工程造价、建设速度等重要问题。

地基处理方法的正确选择与实施，是地基处理的核心问题。在众多的地基处理方法中，每种处理方法都有其适用范围、局限性及优、缺点，没有哪种方法是万能的。另一方面，具体工程情况的复杂性对于变化的地基工程地质条件的要求各不相同。因此，应从地基岩土条件、处理要求（包括处理后地基应达到的技术指标、处理范围、工程进度等）、工程费用以及材料、机具设备等方面综合考虑，以确定合适的地基处理方法。

合理的地基处理方法原则上一定是技术上可靠、经济上合理并且满足施工进度的要求。通过比较分析可采用一种地基处理方法，也可采用两种或两种以上方法组成综合处理方案。

在确定地基处理方法时，必须考虑节约能源及环境保护等问题，避免对地下水产生污染，避免振动及噪声对周围环境产生不良影响。

六、地基工程处理设计与施工管理中应重视的基本问题

地基处理工程极其特殊，一方面多数处理方法的加固效果并不是施工结束后就能全部发挥作用，需待施工完成后经过一段时间才能逐渐体现出来；另一方面，每项处理工程都有其特殊性，同一种处理方法在不同地区应用的施工工艺也不尽相同。而且地基处理大多是隐蔽工程，很难直接检验其加固效果。这就要求在地基工程处理的设计与施工中必须注意以下几个基本问题：

① 详细的检查与分析工作，应包括对岩土工程勘察、土工试验以及拟采用的技术方案过去应用经验的调查研究，必要时应做一定的现场原位试验。

② 在地基处理施工过程中，现场施工人员仅了解施工程序是不够的，更重要的是必须掌握处理方法的原理、技术标准和质量要求。

③ 现场监测是施工程序中不可或缺的重要工作。这不仅是施工质量的基本保证，而且观测资料的收集也可为下阶段工作提供可靠的技术依据。

④ 处理施工结束后，应尽量采用可能的技术手段来检验处理效果。尤其是对于重要工程项目和新的技术方法，必须加强质量检验测试工程。

⑤ 通过反分析工作可获得必要的技术参数。一方面可用以验证设计方案的合理性，监测工程安全等问题。根据实测数据的反分析所获得的参数，比设计计算值更为接近实际，必要时也可据此修改设计。另一方面，反分析资料可使工程技术人员获得许多宝贵的工程经验，有利于技术水平的不断提高。

第 1 篇 地基工程处理技术

第 1 章

换填垫层法

【学习重点】

- (1) 换填垫层处理方法的适用条件；
- (2) 垫层的作用原理；
- (3) 确定垫层厚度及宽度的技术方法；
- (4) 垫层材料的承载力拟定不合理而产生的问题；
- (5) 垫层的应力扩散作用；
- (6) 各类垫层材料的基本性质及适用性。

1.1 换填垫层法的概念

当软弱土地基的承载力和变形不能满足建筑物荷载要求、而软弱土层的厚度又不大时，可将此土层部分或全部挖除，分层换填强度较高、性能稳定且无侵蚀性的土或其他材料，经压实后形成垫层。这种地基处理方法称为换填垫层法（简称垫层法）。

填垫层法多用于基础荷载相对较低的建构（筑）物的地基处理，按不同置换材料分为砂垫层、碎石垫层、素土垫层、灰土垫层、粉煤灰垫层及矿渣垫层等。虽然不同材料的垫层其应力分布有所差异，但试验及沉降观测资料显示，其极限承载力和力学效应基本相似，故可以近似地按砂垫层的计算方法进行置换设计。

国外某些工程采用轻质材料作为置换体，如聚苯乙烯块（密度仅为 20 kg/m^3 ）等。为避免垫层材料陷入下卧软土中，并减少软弱下卧层中的应力集中，可在垫层底部铺设土工布等形成加筋垫层。

1.2 换填垫层的作用原理

1) 提高地基承载力、减少沉降量

地基承载力与土层的抗剪强度有关。如果以抗剪强度较高的砂或其他填筑材料代替较软

弱土层，则可提高地基的承载力。

一般而言，地基浅层部分的沉降量在总沉降量中所占的比例较大。如以密实砂或其他填充材料代替上部软弱土层，就可以减少这部分沉降量。

2) 应力扩散作用

垫层对应力的扩散作用，使得作用在下卧土层上的附加应力大幅度减小，这有利于改善地基承载力与基础荷载之间的矛盾，从而相应地减少下卧土层的沉降量。

3) 加速软弱土层的排水固结作用

若建筑物基础直接与软弱土层相接触，在荷载的作用下，软弱土地基中的水将被迫绕基础两侧排出，使基底软弱土不易固结，形成较大的孔隙水压力，导致地基强度降低而产生塑性破坏。而透水性较好的砂、石等垫层作为良好的排水层，可使地基土孔隙水压力迅速消散，加速垫层下伏软弱土层的固结。

4) 防止冻胀及消除膨胀土的胀缩作用

孔隙较大的粗颗粒垫层材料不易产生毛细管现象，可以防止寒冷地区土中结冰所造成的冻胀。对于膨胀土地基，采用砂石垫层可有效地消除地基胀缩作用对基础受力的影响。

1.3 垫层设计的主要指标

垫层的设计不但要求满足建筑物对地基变形及稳定的要求，而且也应符合经济合理的原则。设计的主要内容是确定垫层断面的合理厚度和宽度。既要求有足够的厚度来置换可能被剪切破坏的软弱土层，又要有足够的宽度以防止垫层向两侧挤出。

对于排水垫层来说，除要求有一定的厚度和密度满足上述要求外，还要求形成一个排水面，促进软弱土层的固结。

1.3.1 垫层的厚度

垫层压力分布如图 1.1 所示。其中垫层厚度 z 应根据被置换软弱土的深度或下卧土层的承载力确定（不宜小于 0.5 m、也不宜大于 3 m），并符合垫层底面处土的自重应力与附加应力之和小于同高程处地基承载力特征值的基本要求，其表达式为：

$$P_z + P_{cz} \leq f_{az} \quad (1.1)$$

式中 f_{az} ——垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值（kPa）；

P_{cz} ——垫层底面处土的自重应力（kPa）；

P_z ——相对于荷载效应标准组合时，垫层底面处的附加应力（kPa）。

垫层底面的附加应力 P_z ，可根据应力扩散角 θ 分别按以下公式简化计算：

条形基础：

$$P_z = \frac{(P_k - P_c)B}{B + 2z \times \tan \theta} \quad (1.2)$$

矩形基础：

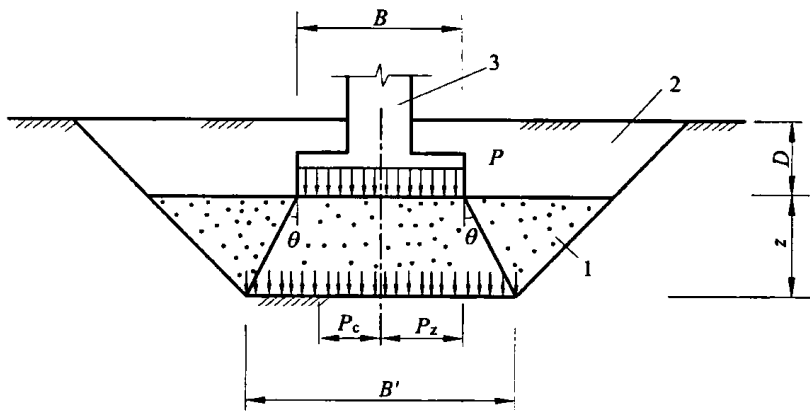


图 1.1 垫层压力分布图

1—砂垫层；2—回填土；3—建筑基础

$$P_z = \frac{(P_k - P_c)Bl}{(B + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta)} \tag{1.3}$$

式中 P_k ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力 (kPa)；
 P_c ——基础底面处土的自重应力 (kPa)；
 l ——矩形基础底面的长度 (m)；
 B ——矩形或条形基础底面的宽度 (m)；
 z ——基础底面下的垫层厚度 (m)；
 θ ——垫层的应力扩散角，宜通过试验确定，或参考表 1.1 采用。

表 1.1 垫层应力扩散角

z/B	不同置换材料的垫层应力扩散角		
	中砂、粗砂、砾砂、圆砾、角砾、卵石、碎石、矿渣	粉质黏土、粉煤灰	灰土
0.25	20°	6°	28°
≥0.5	30°	23°	28°

注：① 当 $z/B < 0.25$ 时，除灰土取 $\theta = 28^\circ$ 外，其余材料均取 $\theta = 0^\circ$ ，必要时宜由试验确定；
② 当 $0.25 < z/B < 0.5$ 时， θ 值可由内插法求得。

必须注意的是：确定垫层厚度时，垫层材料的承载力要合理拟定。若承载力拟定值过高，则可能导致垫层厚度较大，使得施工困难，且不经济。

1.3.2 垫层的宽度

垫层底面的宽度除应满足应力扩散的要求外，还要防止因垫层侧向变形而使基础沉降增大。宽度计算的经验方法是扩散角法。以条形基础为例，砂垫层底宽度应为：

$$B' \geq B + 2z \times \tan \theta \tag{1.4}$$

扩散角 θ 仍按表 1.1 确定。垫层顶面宽度应至少超过基础底宽 300 mm，或从垫层底边两侧向上按放坡角确定垫层顶面宽度，即得砂垫层的设计断面。

1.3.3 垫层的承载力

垫层的承载力应通过现场荷载试验确定。当无试验资料时，可按表 1.2 选用，并应验算下卧层的承载力。

表 1.2 各种垫层材料的承载力指标

施工方法	换填材料类型	压实系数 λ_c	承载力特征值 f_{ak} (kPa)
碾压、振密、 重锤夯实	碎石、卵石	0.94~0.97	300~450
	砂夹石（其中碎石、卵石占全重的 30%~50%）		220~280
	土夹石（其中碎石、卵石占全重的 30%~50%）		180~220
	角砾、圆砾		180~250
	中砂、粗砂、砾砂		160~200
	黏性土和粉土（ $8 < I_p < 14$ ）		150~180
	灰土	0.93~0.95	200~300
	粉煤灰	0.90~0.95	120~160
	矿渣		200~350

1.3.4 沉降计算

置换地基的变形包括垫层自身变形和下卧层变形两部分。

对于粗颗粒置换材料，垫层自身的压缩变形在施工期间已基本完成，置换地基的变形一般仅考虑其下卧层的沉降变形。

对于细粒置换材料，尤其是厚度较大的垫层或沉降要求严格的建（构）筑物，除需考虑下卧层变形外，还必须计算置换垫层自身的变形。置换垫层的变形参数应根据试验或当地经验确定，也可参照表 1.3 选用。下卧层沉降变形应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定计算。

表 1.3 垫层的模量指标

换填材料类型	压缩模量 E_s (MPa)	变形模量 E_0 (MPa)
粉煤灰	8~20	—
砂	—	20~30
碎石、卵石	—	30~50
矿渣		35~70

1.3.5 垫层材料

1. 砂 石

砂石垫层材料宜采用级配良好、质地坚硬的碎石、卵石、角砾、砾砂、粗砂及中砂等，颗粒的不均匀系数应不小于 10。