

地基处理 工程实例

殷宗泽 主编
龚晓南



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

地基处理 工程实例

殷宗泽 主编
龚晓南



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书汇集了 66 个地基处理工程实例。按处理类型分, 共 10 类: 换填与加筋土法, 预压法, 深层搅拌法, 强夯与强夯置换法, 振冲挤密与碎石桩法, 高压喷射注浆法与灌浆法, 土桩与灰土桩, 低强度桩与刚性桩复合地基, 已有建筑地基加固与纠倾, 综合处理与其它。

本书介绍的都是近年来成功的地基处理工程实例, 实例中介绍的地基处理方案的选择、施工工艺、监测方法及新的探索, 对类似的地基处理工程有很强的借鉴意义。

图书在版编目 (CIP) 数据

地基处理工程实例/殷宗泽, 龚晓南主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2000

ISBN 7-5084-0293-6

I. 地… II. ①殷… ②龚… III. 地基处理 IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 04563 号

书 名	地基处理工程实例
作 者	殷宗泽 龚晓南 主编
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 32.25 印张 758 千字
版 次	2000 年 7 月第一版 2000 年 7 月北京第一次印刷
印 数	0001—5100 册
定 价	59.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

在软弱地基上兴建工程，首先要解决的问题就是将地基承载力提高到设计要求，使地基能够安全地承受建筑物的荷载。这就须要作地基处理。地基处理的方法很多，足以让人眼花缭乱，而且新方法、新材料、新工艺还在不断涌现出来。对于一个具体工程来说，如何选用合适的地基处理方法就成了工程师们颇费思索的问题。

应该说，各种方法有各自的特点，也有各自的适用范围，而且还与地区及环境等因素有关。一种方法可能在甲地使用起来经济合理，到了乙地却未必优越。以地基排水设施为例，许多工程都用塑料板排水，但有些地方有充足的廉价的砂土材料，则用袋装砂井可能更经济。如何因地制宜地选择地基处理方法，须要作许多深入细致的工作。

其中最重要的当然是对各种方法要有一个清楚的了解。一个工程师，哪怕是很有经验的工程师，也很难说对所有的地基处理方法都使用过，都有使用的经验。他仍然需要学习，需要了解他未曾使用过的方法；即使有些方法他曾用过，也还需要了解别人在使用这些方法中的经验，也许别人在使用中还有独特之处，值得借鉴。因此，很有必要将各方面的经验汇集起来。编写本书，就是希望能达到汇集经验、交流经验的目的。

本书列出了 60 多个地基处理工程实例，有成功的，也有失败的，分别从工程概况、地质条件，处理方法、设计与施工，乃至经济比较等方面作了介绍。这些实例包含了方法使用中的许多经验，是方法与具体条件相结合的经验，具有鲜明的个性。不敢说所列成功实例所采用的处理方法都是那种情况下最恰当的处理方法，但可以说，这些实例给出了针对该具体情况适宜采用的并经过实践检验了的地基处理方法。书中也收集了少数失败的实例，并从技术上分析了事故原因，提出了纠正的方法。其实，失败的实例往往给人们以更多的启迪。失

败的教训是以沉痛的代价换来的,让人知道什么是不该做的,为什么不该做,在什么条件下可以做,做到什么程度等,使人们的认识更加深刻。

如果这 60 多个实例能够使读者更多地了解地基处理方法,更恰当地使用它,并在此基础上创造出更好更新的地基处理方法,那么本书作者们所付出的辛勤劳动便没有白费了。

编 者

1999. 11. 26

目 录

前 言

第一章 地基处理概论	(1)
第二章 换填法与加筋土法	(20)
土工合成材料加筋土体工程应用实例	王铁儒 (22)
土工织物与砂垫层复合加固软基	俞仲泉 顾家龙 (31)
第三章 预压法	(37)
真空预压法加固济南遥墙机场软基	叶柏荣 (39)
深圳至汕头高速公路软基加固	王盛源 关锦荷 周春儿 (56)
广东三水县佳能电池厂地基滑动事故用袋装砂井作竖向加筋 抗滑处理实例	王盛源 关锦荷 (70)
温州电厂煤场袋装砂井堆载预压	章胜南 (75)
砂井预压法处理大型油罐软基工程实例	贾庆山 (86)
充水预压法加固软土上大型油罐地基	贾庆山 (110)
塑料排水板工程施工探索	江和明 (123)
第四章 深层搅拌法	(133)
大型油罐搅拌桩复合地基工程实例	朱向荣 (135)
深层搅拌法加固地基试验及工程应用	陈家冬 (151)
陕西旅游房地产开发公司综合办公楼饱和黄土地基深层搅拌 加固工程	许新桩 (157)
深层水泥粉体搅拌桩加固饱和黄土地基工程实例 ——西安铁路中心医院老干部病房楼地基加固	杨晓华 (160)
深层搅拌水泥粉喷桩在机场软基处理中的应用	赵志锐 雷开先 (166)
深层搅拌桩在桩孔护壁中的应用	陈 强 戴亚林 (170)
深层搅拌法在市政道路工程地基处理中的应用	张龙海 (173)
第五章 强夯与强夯置换法	(178)
福州长乐机场浅层地基强夯施工	周 松 (180)
强夯法处理深圳蛇口港散货中转仓库地基	姜 舟 (191)
强夯块石墩复合地基	张学武 阮文保 (194)

强夯加固江西湖口棉纺厂填土地基	周洵锐	黄富华	贾再良	(200)
强夯在地下水位以下圆砾层加固中的应用	黄经秋	张晓玲	梁才昌	(206)
强夯块石墩地基处理技术在市政道路工程中的应用	雷和全	张龙海		(211)
第六章 振冲挤密和碎石桩法				(218)
干振碎石桩加固液化地基试验研究	刘松玉	方 磊		(219)
地震区高层建筑振冲地基工程实例——烟台工贸大厦工程			曾昭礼	(225)
广东新会天马港地基加固工程	王盛源	关锦荷		(231)
振动挤密砂石桩加固大型油罐砂性地基工程				
实例	谢新宇	应宏伟	卞守中	潘秋元 (239)
振冲法与充水预压法综合处理油罐软基工程实例			贾庆山	(248)
集装箱堆场大面积碎石桩地基加固处理			王大笔	(260)
25 m 深层振冲挤密砂基加固跑道地基的施工与试验			楼永高	(265)
第七章 高压喷射注浆法和灌浆法				(278)
肇庆商业大厦地基加固			邝建政	(282)
旋喷灌浆加固技术在岩溶区的应用	郭贱苟	韩金田	邓 浩	(285)
砂卵石地基机械打管灌浆工程实例		聂明家	于劲勇	(289)
水泥压密注浆补强工程实录			邵锦周	(295)
用劈裂灌浆技术处理湿陷性黄土地基			张高宁	(298)
第八章 土桩与灰土桩法				(302)
宁通一级公路路基二灰土桩加固	殷宗泽	卢廷浩	田孝发	(303)
灰土桩处理既有建筑物湿陷事故实例分析			凌均安	(318)
二灰桩在高速公路桥头软弱地基处理工程中的应用	匡玉生	郭金峰		(325)
灰土桩复合地基治理湿陷性黄土施工			施加成	(329)
第九章 低强度桩和刚性桩复合地基				(333)
高层建筑下桩—筏复合桩基的设计分析			倪士坎	(334)
低强度混凝土桩复合地基在北京慧忠北里 C 区高层住宅中的				
应用	耿 林	李 辉		(341)
高层建筑采用刚性桩复合地基实例			刘岳东	(347)
石灰桩+CFG 桩与桩间土形成三元复合地基				
——太原市公安局兰盾大厦工程实例			秦晋邦	(351)
第十章 已有建筑物地基加固、纠倾及迁移				(358)
锚杆静压桩加固与沉井冲水纠倾工程实例	龚晓南	卞守中	潘秋元	温晓贵 (360)

某商住楼的纠倾与基础加固实践	林 奇	(368)
南京站水塔倾斜原因的分析与纠偏	陆庆张	(374)
建筑群远距离整体平移工程实例	侯伟生 张天宇	(380)
锚杆静压桩在地基加固中的应用	邓永山 汪日新	(385)
建筑物顶升纠偏技术的研究和应用	甘正常 周华俊 蒋小鸣	(389)
一种新的顶升纠倾方法——某工程水塔的纠倾	龚晓南 章胜南 卞守中	(396)
大港油田钻井泥浆站办公楼纠偏工程实例	杨书遂 盛立方	(399)
一起群楼地基倾斜事故的分析	杨书遂	(405)
某油站油罐基础倾斜原因分析	杨书遂	(409)
某丝织厂车间相邻建筑土体(整体)滑移的防治	朱应达	(415)

第十一章 综合处理及其他 (419)

澳门国际机场人工岛地基处理	刘翼熊 唐羿生 阙卫明	(420)
南京南湖地区软土地基处理方案比较分析	龚晓南 卢锡璋 乐子炎	(439)
泉厦高速公路桥头软基综合处理	马时冬 涂 帆 林开球	(452)
蛇口集装箱码头软基加固	林本义 汪肇京	(461)
静压沉桩方法处理预制桩基础事故	郭贱苟 韩金田 邓 浩 周新华	(470)
人工挖孔桩事故处理的实践	韩金田 邓 浩 刘洪波	(475)
方形横截面振压扩底灌注桩加固高层建筑地基工程实例	曹沂凤	(479)
昆钢铁前三厂(场)三烧及六高炉 1、2 号锚索挡墙 工程实录	黄经秋 赵志锐	(487)
驳岸滑坡的分析与治理	陆 飞	(491)
用夯扩桩替代未能终孔的挖孔桩——某六层轻厂房基础 事故处理	陈书申 陈为群	(496)
混凝土沉管人工挖孔桩在地下水位下施工新方法	聂明家 李殿香 于劲勇	(499)
淤土上加高土坝反压法处理实例	殷宗泽	(503)

第一章 地基处理概论

一、地基处理目的

土木工程建设中，当天然地基不能满足建（构）筑物对地基的要求时，需要对天然地基进行地基处理，形成人工地基，以满足建（构）筑物对地基的要求，保证其安全与正常使用。

（一）建（构）筑物对地基的要求

建（构）筑物对地基的要求主要包括下述三个方面。

1. 地基承载力或稳定性问题

地基承载力或稳定性问题是指地基在建（构）筑物荷载（包括静、动荷载的各种组合）作用下能否保持稳定。若地基承载力不能满足要求，在建（构）筑物荷载作用下，地基将会产生局部或整体剪切破坏，影响建（构）筑物的安全与正常使用，甚至造成建（构）筑物的破坏。天然地基承载力的高低主要与土的抗剪强度有关，也与基础型式、大小和埋深有关。边坡稳定也属于这类问题。

2. 沉降、水平位移及不均匀沉降问题

在建（构）筑物的荷载（包括静、动荷载的各种组合）作用下，地基将产生沉降、水平位移以及不均匀沉降。若地基变形（沉降、水平位移、不均匀沉降）超过允许值，将会影响建（构）筑物的安全与正常使用，严重的将造成建（构）筑物破坏。其中不均匀沉降超过允许值造成的工程事故比例最高，特别在深厚软粘土地区。天然地基变形大小主要与荷载大小和土的变形特性有关，也与基础型式有关。

3. 渗透问题

渗透问题主要分两类：一类是堤坝蓄水构筑物地基渗流量超过其允许值时，其后果是造成较大水量损失，甚至蓄水失败；另一类是地基中水力比降超过其允许值时，地基土会因潜蚀和管涌产生破坏，严重的将导致建（构）筑物破坏。天然地基渗透问题主要与地基中水力比降和土的渗透性有关。

（二）软弱地基

很难给软弱地基或不良地基下一个确切的定义，工程师们常将不能满足建（构）筑物对地基要求的天然地基称为软弱地基或不良地基。天然地基是否属于软弱地基是相对的。天然地基是否需要地基处理取决于地基土的性质和建（构）筑物对地基的要求两个方面。在土木工程建设中经常遇到的软弱土和不良土主要包括：软粘土、人工填土（包括素填土、杂填土和冲填土）、部分砂土和粉土、湿陷性土、有机质土和泥炭土、膨胀土、多年冻土、岩溶、土洞和山区地基等。下面分别加以简略介绍。

1. 软粘土

软粘土是软弱粘性土的简称，包括海相、泻湖相、三角洲相、溺谷相和湖泊相的粘性

土沉积物或河流冲积物。大部分是饱和的,其天然含水量大于液限,孔隙比大于1.0。当天然孔隙比大于1.5时,称为淤泥;当天然孔隙比大于1.0而小于1.5时,称为淤泥质土。软粘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5~25 kPa;压缩系数高,一般 $a_{1-2}=0.5\sim 1.5\text{MPa}^{-1}$,最大可达到 4.5MPa^{-1} ;渗透系数小,一般约为 $1\times 10^{-6}\sim 1\times 10^{-8}\text{cm/s}$ 。在荷载作用下,软粘土地基承载力低,地基沉降变形大,不均匀沉降也大,而且沉降稳定历时比较长,一般需要几年,甚至几十年。软粘土地基广泛地分布在我国沿海以及内地河流两岸和湖泊地区。例如:天津、连云港、上海、杭州、宁波、温州、福州、厦门、湛江、广州、深圳、珠海等沿海地区,以及昆明、武汉、南京、马鞍山等内陆地区。

2. 人工填土

按照物质组成和堆填方式分为素填土、杂填土和冲填土三类。按堆填时间又可分为老填土和新填土两类。粘性土堆填时间超过10年、粉土堆填时间超过5年,称为老填土。

素填土是由碎石、砂或粉土、粘性土等中的一种或几种材料组成的填土,其中不含杂质或含杂质较少。若分层压实则称为压实填土。素填土的性质主要取决于填土性质、压实程度以及堆填时间。

杂填土是人类活动形成的无规则堆积物,主要由建筑垃圾、工业废料或生活垃圾组成,其成分复杂,性质也不相同,且无规律性。在大多数情况下,杂填土是比较疏松和不均匀的。在同一场地的不同位置,地基承载力和压缩性也可能有较大的差异。

冲填土是由水力冲填泥沙形成的。冲填土的性质与所冲填泥沙的组成、性质及冲填时的水力条件有密切关系。含粘土颗粒较多的冲填土往往是欠固结的,其强度和压缩性指标都比同类天然沉积土差。以粉细砂为主的冲填土,其性质基本上和粉细砂相同。

3. 部分砂土和粉土

主要指饱和粉砂土、饱和细砂土和砂质粉土。粒径大于0.25 mm的颗粒不超过全重的50%、粒径大于0.075 mm的颗粒超过全重的85%的称为细砂土。粒径大于0.075 mm的颗粒不超过全重的85%、但超过50%的称为粉砂土。粒径大于0.075 mm的颗粒不超过全重的50%、而粒径小于0.005 mm的颗粒含量不超过全重的10%、塑性指数 I_p 小于或等于10的称为砂质粉土。处于饱和状态的细砂土、粉砂土和砂质粉土在静载作用下虽然具有较高的强度,但在动荷载作用下有可能产生液化或大量震陷变形。地基会因液化而丧失承载能力。如需要承担动力荷载,这类地基也需要进行处理。

4. 湿陷性土

湿陷性土包括湿陷性黄土、粉砂土和干旱半干旱地区具有崩解性的碎石土等。是否属于湿陷性土可根据野外浸水载荷试验确定。当在200 kPa压力作用下附加变形量与载荷板宽之比大于0.015时称为湿陷性土。在工程建设中遇到较多的是湿陷性黄土。

湿陷性黄土是指在覆盖土层的自重应力及自重应力和建筑物附加应力综合作用下,受水浸湿后,土的结构迅速破坏,并发生显著的附加下沉,其强度也迅速降低的黄土。由于黄土湿陷而引起建筑物不均匀沉降是造成黄土地区事故的主要原因。由于大面积地下水位上升等原因,部分湿陷性黄土饱和度达到80%以上,黄土湿陷性消退,转变为低承载力(100 kPa)和高压缩性土。饱和黄土既不同于软粘土,也不属湿陷性黄土。它兼具两者特性,

这类地基的处理问题逐渐增多。黄土在我国特别发育,地层多、厚度大,广泛分布在甘肃、陕西、山西大部分地区,以及河南、河北、山东、宁夏、辽宁、新疆等部分地区。当黄土作为建筑物地基时,首先要判断它是否具有湿陷性,然后才考虑是否需要地基处理以及如何处理。

5. 有机质土和泥炭土

土中有机质含量大于5%时称为有机质土,大于60%时称为泥炭土。

土中有机质含量高,强度往往降低,压缩性增大,特别是泥炭土,其含水量极高,压缩性很大,且不均匀,一般不宜作为天然地基,需要进行地基处理。

6. 膨胀土

膨胀土是指粘粒成分主要由亲水性粘土矿物组成的粘性土,在环境的温度和湿度变化时会产生强烈的胀缩变形。利用膨胀土作为建(构)筑物地基时,如果没有采取必要措施进行地基处理,常会给建(构)筑物造成危害。膨胀土在我国分布范围很广,根据现有的资料,广西、云南、湖北、河南、安徽、四川、河北、山东、陕西、江苏、内蒙古、贵州和广东等均有不同范围的分布。

7. 多年冻土

多年冻土是指温度连续3年或3年以上保持在 0°C 或 0°C 以下,并含有冰的土层。多年冻土的强度和变形有许多特殊性。例如,冻土中因有冰和未冰水的存在,故在长期荷载作用下有强烈的流变性。多年冻土作为建筑物地基需慎重考虑,需要采取处理措施。

8. 岩溶、土洞和山区地基

岩溶或称“喀斯特”,它是石灰岩、白云岩、泥灰岩、大理石、岩盐、石膏等可溶性岩层受水的化学和机械作用而形成的溶洞、溶沟、裂隙,以及由于溶洞的顶板塌落使地表产生陷穴、洼地等现象和作用的总称。土洞是岩溶地区上覆土层被地下水冲蚀或被地下水潜蚀所形成的洞穴。岩溶和土洞对建(构)筑物的影响很大,可能造成地面变形,地基陷落,发生水的渗漏和涌水现象。在岩溶地区修建筑物时要特别重视岩溶和土洞的影响。

山区地基地质条件比较复杂,主要表现在地基的不均匀性和场地的稳定性两方面。山区基岩表面起伏大,且可能有大块孤石,这些因素常会导致建筑物基础产生不均匀沉降。另外,在山区常有可能遇到滑坡、崩塌和泥石流等不良地质现象,给建(构)筑物造成直接的或潜在的威胁。

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

二、地基处理原理

为了提高地基承载力、减小荷载作用下地基沉降量和沉降差,需要对天然地基进行地基处理。地基处理的方法很多,各种地基处理方法的加固原理可以从下述两方面来分析:一是从经过地基处理形成的人工地基形式来分析;另一是从地基处理方法的加固地基原理来分析。

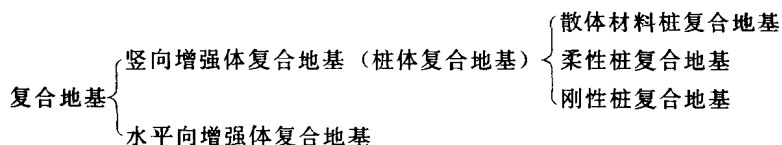
1. 从人工地基形式分析

广义讲经过地基处理形成的人工地基形式主要有 3 种：①浅基础（或称均质地基）；②复合地基；③桩基础。

考虑到桩基础的特殊性，通常在讨论地基处理方法中不包括桩基础。下面主要讨论前两种人工地基形式。事实上，上述三种人工地基形式是连续变化的，相互之间并不存在明确的界限。如复合桩基，其实质是考虑桩土共同承担荷载的摩擦桩基础，有人将其划归桩基础，也有人将其视为刚性桩复合地基的一种。两种意见都有道理，笔者更倾向于后一种意见，主要考虑的是其荷载传递机理、设计计算方法更接近复合地基。

浅基础是指天然地基在地基处理过程中，主要持力层或压缩层部分软弱土层的物理力学性质得到全面改善。例如通过换填法将软弱土层置换成抗剪强度高、压缩性能好的土层；又如通过排水固结法使软粘土通过排水固结，抗剪强度增大，孔隙比减小。形成浅基础的加固原理是通过全面改善主要持力层土体的抗剪强度达到提高地基承载力的目的，或通过全面改善主要压缩层土体的压缩性能达到减小沉降和沉降差的目的。经过地基处理形成的浅基础的承载力和沉降计算理论与天然地基的相同。

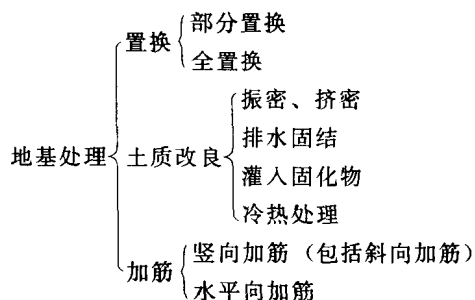
复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强、或被置换，或在天然地基中设置加筋材料，加固区是由基体（天然地基土体）和增强体两部分组成的人工地基。根据地基中增强体方向可分为竖向增强体复合地基和水平向增强体复合地基。竖向增强体复合地基习惯上称为桩体复合地基。根据增强体性质又可分为散体材料桩复合地基、柔性桩复合地基和刚性桩复合地基。即：



形成桩体复合地基加固地基的原理，一方面是通过桩和桩间土共同承担荷载可有效提高地基承载力，另一方面桩与桩间土形成的加固区存在，可有效减小沉降量和沉降差。对于水平向增强体复合地基，水平加筋体可有效扩散应力，达到提高地基承载力和减小沉降量和沉降差的目的。

2. 从地基处理方法的加固地基原理分析

地基处理方法很多，从加固原理上可以分为三大类：置换、土质改良和加筋，即：



置换可分为部分置换和全置换。部分置换和全置换是指荷载作用面上而不是指置换深度。部分置换一般形成复合地基，全置换一般形成浅基础。

土质改良是通过物理的方法,或化学的方法,或物理化学方法对天然地基中部分或全部土体进行土质改良。前者为了形成复合地基,后者为了形成人工浅基础。

通过振密、挤密进行土质改良适用于可压缩性土地基,如砂土、低饱和度粉土和粘性土、湿陷性黄土、杂填土、素填土地基等。其加固原理是土体密实后,抗剪强度提高和压缩性减小。通过振密、挤密,无论形成复合地基还是形成人工浅基础均可达到提高地基承载力和减小沉降的目的。

排水固结适用加固软粘土地基。其加固原理是利用土体在一定荷载作用下排水固结,孔隙比减小,抗剪强度增长,达到提高地基承载力,减少工后沉降的目的。排水固结后形成的人工地基是均质地基,或称浅基础。

采用灌入固化物加固地基适用范围广,可以说各类地基都可采用灌入固化物加固,但灌入的固化物的种类、灌入工艺应视地基情况和加固目的确定。其加固原理是通过固化物与地基土体之间的物理化学作用,形成抗剪强度高、压缩性小的增强体。灌入固化物一般形成复合地基,但也可形成人工浅基础。

冷热处理是通过冻结地基土体,或焙烧、加热地基土体,改变土体物理力学性质达到地基处理的目的。

加筋包括竖向加筋和水平向加筋,也包括斜向加筋。

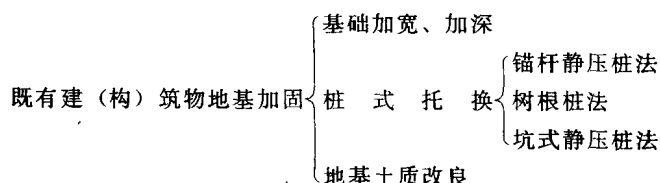
水平向加筋主要指加筋土。通过在地基土层中铺设土工合成材料——土工织物或土工格栅等以达到提高地基承载力和减小沉降的目的。

竖向加筋主要指在地基中设置钢筋混凝土桩或低强度桩形成复合地基,设置土钉、树根桩形成加筋土体等,以达到提高地基承载力和减小沉降的目的。

需要说明的是一种地基处理方法加固地基的原理往往不是一种,而是多种。例如土桩和灰土桩法既有挤密作用,又有置换作用;又如石灰桩法,既有置换作用,又有化学作用,还有热效应,石灰吸水加快桩间土排水固结作用;又如振冲密实法,既有振密挤密作用,又有置换作用;砂石桩法既有置换作用,又有排水固结作用等。

除对天然地基进行地基处理外,还有对既有建筑物地基进行加固以及与地基处理关系密切的对倾斜建(构)筑物纠倾。下面加以说明。

既有建筑物地基加固,又称为托换,其加固原理基本上与天然地基的相同,但有其特殊性。既有建筑物地基加固可分为下述三类:基础加宽、加深,桩式托换和地基土质改良,即:



既有建筑物地基土质改良加固原理基本上与天然地基土质改良加固原理相同。但应重视下述情况:在应用许多地基处理方法进行土质改良过程中,由于施工扰动、复合土体尚未固化等原因,地基土强度暂时可能降低,这将引起施工期附加沉降。在加固过程中,施工期附加沉降处理不妥可能会加剧建(构)筑物的不均匀沉降,严重的可能危及建筑物

安全。

基础加宽是为了减小基底压力，基础加深是为了将荷载传送给较好土层，其加固原理是明确的。但应注意，对深厚软粘土地基，减小基底压力对解决地基承载力不足是很有效的，但对减小沉降量是否有效应作详细分析。

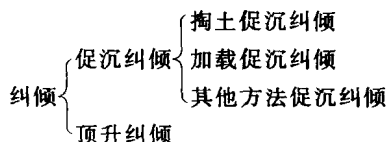
桩式托换是通过在基础下设置部分桩，形成复合地基或形成桩基，达到地基加固的目的。桩式托换常采用锚杆静压桩法、树根桩法和坑式静压桩法等。

锚杆静压桩技术是将压桩架通过锚杆与建筑物基础联接，利用建筑物自重荷载作为压桩反力，用千斤顶将桩分段压入地基中，通过静压桩承担部分荷载。

树根桩是一种小直径钻孔灌注桩，其直径一般为 100~250 mm，有时也采用 300 mm。先利用钻机钻孔，成孔后放入钢筋或钢筋笼，同时放入注浆管，用压力注入水泥浆或水泥砂浆而成桩，亦可放入钢筋笼后再灌入碎石，然后注入水泥浆或水泥砂浆而成桩。小直径钻孔灌注桩也有人称为微型桩。小直径钻孔灌注桩可以竖向，斜向放置，因形状如树根而得名。

坑式静压桩技术是在基础侧挖导坑，需要对基础或建筑物先作临时支撑，再在基础下挖坑，在坑中以建筑物自重荷载作压桩反力，用千斤顶将桩分段压入地基中，通过静压桩承担部分荷载。

倾斜建（构）筑物纠倾通常分为两类：促沉纠倾和顶升纠倾，即：



促沉纠倾的原理是让沉降较小的一侧产生新的沉降，以达到纠倾的目的。掏土促沉是在基础下地基中或基础侧地基中掏土使建筑物产生新的沉降。加载促沉是在沉降小的一侧加载使建筑物产生新的沉降。其他方法促沉纠倾如降低地下水位，又如湿陷性黄土地基浸水促沉等。

顶升纠倾的原理是将建筑物沉降大的部位顶升，以达到纠倾的目的。

三、复合地基承载力和沉降计算

前面已经谈到通过地基处理形成的人工地基有三种形式：浅基础、复合地基和桩基础。浅基础和桩基础承载力和沉降计算已有较成熟和较系统的理论，而复合地基承载力和沉降计算理论尚不成熟，正在发展之中，下面作简略介绍。

1. 竖向增强体复合地基承载力计算

竖向增强体复合地基承载力计算通常有两种思路。一种是先分别确定桩体承载力和桩间土承载力，根据一定的原则叠加这两部分承载力得到复合地基的承载力；另一种是把桩体和桩间土组成的复合地基作为整体来考虑，如通过地基滑弧稳定分析法确定复合地基极限承载力。在稳定分析中采用复合土体的综合指标。

采用第一种思路，复合地基的极限承载力 p_{cf} 可用下式表示：

$$p_{cf} = k_1 \lambda_1 m p_{pf} + k_2 \lambda_2 (1 - m) p_{sf} \quad (1)$$

式中 p_{pf} ——桩体极限承载力, kPa;

p_{sf} ——天然地基极限承载力, kPa;

k_1 ——反映复合地基中桩体实际极限承载力的修正系数, 与地基土质情况、成桩方法等因素有关, 一般大于 1.0;

k_2 ——反映复合地基中桩间土实际极限承载力的修正系数, 其值与地基土质情况、成桩方法等因素有关, 可能大于 1.0, 也可能小于 1.0;

λ_1 ——复合地基破坏时, 桩体发挥其极限强度的比例, 也称为桩体极限强度发挥度;

λ_2 ——复合地基破坏时, 桩间土发挥其极限强度的比例, 也称为桩体极限强度发挥度;

m ——复合地基置换率, $m = A_p/A$, 其中 A_p 为桩体面积, A 为对应的加固面积。

对刚性桩复合地基和柔性桩复合地基, 桩体极限承载力可采用类似摩擦桩极限承载力计算式计算, 其表达式为

$$p_{pf} = \frac{1}{A_p} [\sum f S_a L_i + R] \quad (2)$$

式中 f ——桩周摩阻力极限值;

S_a ——桩身周边长度;

A_p ——桩身横断面积;

R ——桩端土极限承载力;

L_i ——按土层划分的各段桩长; 对柔性桩, 桩长大于有效桩长时, 计算桩长应取有效桩长值。

除按式(2)计算桩体极限承载力外, 尚需计算桩身材料强度允许的单桩极限承载力, 即

$$p_{pf} = q \quad (3)$$

式中 q ——桩体极限抗压强度。

由式(2)和式(3)计算所得的二者中取较小值为桩的极限承载力。

对散体材料桩复合地基, 桩体极限承载力主要取决于桩侧土体所能提供的最大侧限力。

散体材料桩在荷载作用下, 桩体发生鼓胀, 桩周土进入塑性状态, 可通过计算桩间土侧向极限应力计算单桩极限承载力。其一般表达式可用下式表示:

$$p_{pf} = \sigma_{ru} K_p \quad (4)$$

式中 K_p ——桩体材料的被动土压力系数;

σ_{ru} ——桩间土能提供的侧向极限应力。

计算桩侧土体所能提供的最大侧限力常用方法有 Brauns (1978) 计算式, 圆筒形孔扩张理论计算式, 被动土压力计算式, Wong H. Y. (1975) 计算式和 Hughes 和 Withers (1974) 计算式等, 现将 Brauns (1978) 计算式介绍如下, 其他可参阅有关文献。

Brauns (1978) 计算式是为计算碎石桩承载力提出的, 其原理及计算式也适用于一般散体材料桩情况。Brauns 认为, 在荷载作用下, 桩体产生鼓胀变形。桩体的鼓胀变形使桩周土进入被动极限平衡状态, 桩周土极限平衡区如图 1(a) 所示。在计算中, Brauns 作了下述几条假设:

(1) 桩周土极限平衡区位于桩顶附近, 滑动体成漏斗形, 桩体鼓胀破坏段长度等于

$2r_0 \tan \delta_p$, 其中 r_0 为桩体半径, $\delta_p = 45^\circ + \varphi_p/2$, φ_p 为松散材料桩体材料的内摩擦角。

(2) 桩周土与桩体间摩擦力 $\tau_M = 0$, 极限平衡土体中, 环向应力 $\sigma_\theta = 0$ 。

(3) 不计地基土和桩体的自重。

在上述假设的基础上, 作用在图 1 (c) 中阴影部分土体上力的多边形如图 1 (b) 所示。图中 f_M 、 f_K 和 f_R 分别表示阴影部分所示的平衡土体的桩周界面、滑动面和地表面的面积。根据力的平衡, 可得到在极限荷载作用下, 桩周土上的极限应力 σ_{ru}

$$\sigma_{ru} = \left(\sigma_s + \frac{2C_u}{\sin 2\delta} \right) \left(\frac{\tan \delta_p}{\tan \delta} + 1 \right) \quad (5)$$

式中 C_u ——桩间土不排水抗剪强度;

δ ——滑动面与水平面夹角;

σ_s ——桩周土表面荷载, 如图 1 (a) 所示;

δ_p —— $\delta_p = 45^\circ + \varphi_p/2$, 其中 φ_p 为桩体材料内摩擦角。

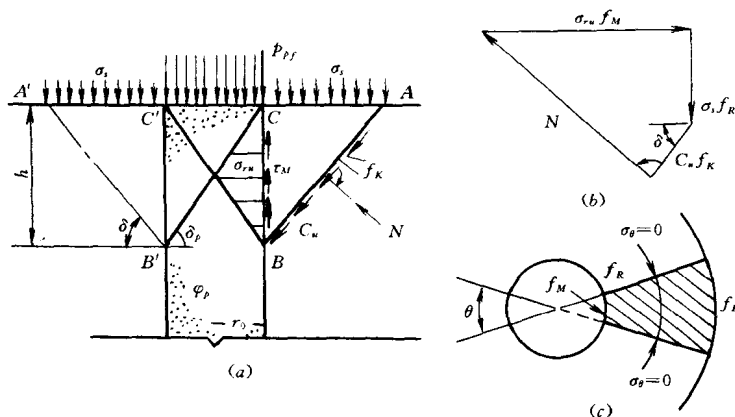


图 1 Brauns (1978) 计算图式

根据式 (4) 可得到桩体极限承载力为

$$p_{pf} = \sigma_{ru} K_p = \left(\sigma_s + \frac{2C_u}{\sin 2\delta} \right) \left(\frac{\tan \delta_p}{\tan \delta} + 1 \right) \tan^2 \delta_p \quad (6)$$

滑动面与水平面的夹角 δ 可按式 (7) 用试算法求出

$$\frac{\sigma_s}{2C_u} \tan \delta_p = - \frac{\tan \delta}{\tan 2\delta} - \frac{\tan \delta_p}{\tan 2\delta} - \frac{\tan \delta_p}{\sin 2\delta} \quad (7)$$

当 $\sigma_s = 0$ 时, 式 (6) 可改写为

$$p_{pf} = \frac{2C_u}{\sin 2\delta} \left(\frac{\tan \delta_p}{\tan \delta} + 1 \right) \tan^2 \delta_p \quad (8)$$

夹角 δ 可按式 (9) 用试算法求得

$$\tan \delta_p = \frac{1}{2} \tan \delta (\tan^2 \delta - 1) \quad (9)$$

设桩体材料内摩擦角 $\varphi_p = 38^\circ$ (碎石内摩擦角常取为 38°), 则 $\delta_p = 64^\circ$, 由式 (9) 试算得 $\delta = 61^\circ$, 代入式 (8), 可得 $p_{pf} = 20.8C_u$ 。这就是计算碎石桩承载力的 Brauns 理论简化计算式。

复合地基极限承载力计算式(1)中,天然地基极限承载力除了直接通过载荷试验,以及根据土工试验资料,查阅有关规范确定外,常采用 Skempton 极限承载力公式进行计算。Skempton 极限承载力公式为

$$p_{sf} = C_u N_c \left(1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) \left(1 + 0.2 \frac{D}{L} \right) + \gamma D \quad (10)$$

式中 D ——基础埋深;

C_u ——不排水抗剪强度;

N_c ——承载力系数,当 $\varphi=0$ 时, $N_c=5.14$;

B ——基础宽度;

L ——基础长度。

已知桩体极限承载力 p_{pf} 和桩间土极限承载力 p_{sf} , 则可根据式(1)得到复合地基极限承载力 p_{cf} 值。

复合地基的容许承载力 p_{cc} 计算式为

$$p_{cc} = \frac{p_{cf}}{K} \quad (11)$$

式中 K ——安全系数。

当复合地基加固区下卧层为软弱土层时,按复合地基加固区容许承载力计算基础的底面尺寸后,尚需对下卧层承载力进行验算。要求作用在下卧层顶面处附加应力 p_0 和自重应力 σ_r 之和 p 不超过下卧层土的容许承载力 $[R]$, 即

$$p = p_0 + \sigma_r \leq [R] \quad (12)$$

确定附加应力 p_0 , 可以用数值分析方法计算。为了简化起见,实用上也可以采用压力扩散法计算。

采用第二种思路计算复合地基极限承载力是将桩体和桩间土组成的复合土体作为整体来考虑,常采用稳定分析法计算。稳定分析方法很多,现以圆弧分析法为例。圆弧分析法计算原理如图2所示。在圆弧分析法中,假设地基土的滑动面呈圆弧形。在圆弧滑动面上总剪切力记为 T ,总抗剪力记为 S ,则沿该圆弧滑发生滑动破坏的安全系数 K 为

$$K = \frac{S}{T} \quad (13)$$

取不同的圆弧滑动面,可得到不同的安全系数值,通过试算可以找到最危险的圆弧滑动面并可确定最小的安全系数值。通过圆弧分析法既可根据要求的安全系数计算地基承载力,也可按确定的荷载计算地基在该荷载作用下的安全系数。

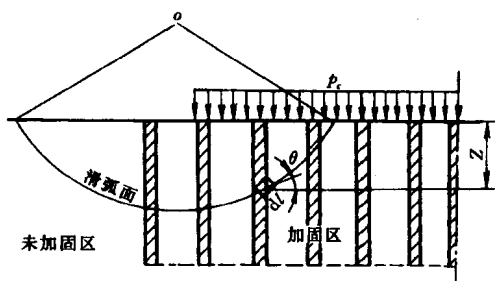


图2 圆弧分析法

在圆弧分析法计算中,假设的圆弧滑动面往往经过加固区和未加固区。地基土的强度应分区计算。对加固土和未加固土采用不同的强度指标。未加固区采用天然地基土体强度指标。加固区土体强度指标可采用复合地基土体综合强度指标,也可分别采用桩体和桩间土的强度指标计算。