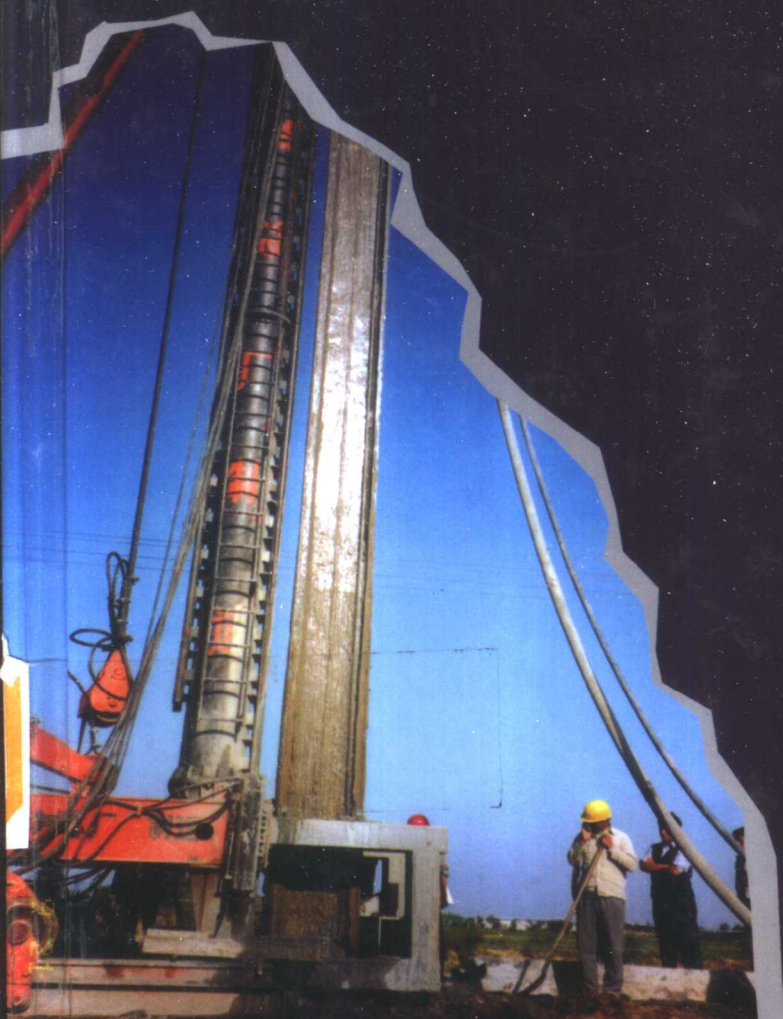


中国堤坝 防渗加固新技术

白永年 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国堤坝防渗加固新技术

白永年 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书总结了我国近几年来治理病险堤坝的新工法、新材料、新经验,对病险堤坝防渗加固技术作了较全面的介绍。详尽地阐述了各种工法的原理、工艺和设备,列举了大量的工程实例,具有很强的实用性。

全书共分十章,主要内容包括:概论;堤坝地基防渗加固理论;综合技术治理病险堤坝;振动沉模防渗板墙技术;劈裂帷幕灌浆技术;高压喷射灌浆防渗技术;土工膜防渗技术;级配料灌浆技术;混凝土防渗墙技术;灌浆材料及防渗墙材料。

本书读者对象主要是水利、水电、土建、交通管理,规划设计,专业施工和其他工程技术人员,亦可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国堤坝防渗加固新技术/白永年等著. —北京:中国水利水电出版社, 2001. 9

ISBN 7-5084-0624-9

I. 中… II. 白… III. 挡水坝-渗流控制-新技术 IV. TV640.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 18827 号

书 名	中国堤坝防渗加固新技术
作 者	白永年 等 著
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	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 25.25 印张 599 千字
版 次	2001 年 11 月第一版 2001 年 11 月北京第一次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	45.00 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

序

中国的主要经济发达地区属于典型的季风气候区，集中易发暴雨洪水的七大江河流域的中下游，占中国人口的 $1/2$ ，面积的 $1/3$ ，工农业产值的 $2/3$ ，人口、经济集中，每次大的洪水都给人民的生命财产造成巨大损失。1949 年新中国建国以来，为除害兴利，全国人民付出了巨大的投入，兴修水利也获得了巨大的成绩。由于受历史条件和生产力水平的限制，大部分堤防大坝都存在着先天不足，后期老化问题，如填土疏松，抗渗透能力低；地基较普遍的未进行认真处理，在河道中下游冲积平原地区的不同深度都存有较强的透水层，易产生管涌、冒沙等渗透破坏；一些老的堤坝，存有生物洞穴、腐朽树根和渗流浸蚀等隐患。1998 年长江流域大水，除个别江堤决口外，沿江发生管涌冒沙等险情 9405 处，其中因渗漏问题出险的 7548 处，出现了险情丛生的紧张局面。

中国已修建江河湖海堤防长度达 26 万 km，不少工程质量很差，需要进行防渗加固处理的占相当大比例：已建成水库 8.5 万多座，其中病险水库约占 $1/3$ ，加固任务十分艰巨紧迫。除了国家加大投入以外，全国水利战线的广大科技工作者要加强责任心，增强创新精神，利用新技术，精心设计、精心施工，选择一些适合中国国情的施工方法，保证工程质量，加快施工进度，在尽可能短的时期内基本完成重要堤坝的加固任务。这是当前防洪安全，水资源充分利用的迫切任务。

新中国成立以来，我国创造了不少堤坝加固适合中国国情的新工法，白永年同志任主编，并组织了十几位专家共同编著的《中国堤坝防渗加固新技术》一书，系统介绍了有关工法，对每一项工法都系统地分析了它一定的适应范围和优缺点，供使用者因地制宜地选用。例如，书中介绍的“综合技术治理病险堤坝”是一项好的方法，尤其是对病险水库的大坝处理，它根据大坝的不同部位，不同隐患特点，有针对性地采取不同技术措施，能做到优质低价，书中介绍了一些典型工程的成功经验，值得参考。将各种技术集中到一个工程上，产生一个综合的最优方案，是一种实事求是的科学方法。又如“劈裂灌浆技术”、“振动沉模防渗板墙技术”是我国首创和发展的堤坝加固新技术，它的优点是质量有保证、施工速度快、造价便宜，是堤防加固的好方法。我国有那么长的堤防，过多地采用混凝土防渗墙是不适宜的，如果采用劈裂灌浆技术，对较深层的沙

卵石地基再配合高喷灌浆，就可以起到优势互补的作用。

我们处在一个经济全球化、科学技术快速发展的信息化时代，依靠新技术、新工艺参与市场竞争，优胜劣汰是市场经济的发展规律。新中国成立以来我国水利事业虽然取得了很大成绩，创造了不少新技术，有一些已处在国际领先地位，但在某些方面还处在落后状态，尤其是在设备性能和自动化控制方面。为适应病险堤坝的防渗加固，必须大力提倡创新精神，加快新技术、新工艺的研究应用。今后在新技术的科研选题、设备研制改造等方面，除一些重点科研项目由国家出资主持以外，大量的应当由水利施工企业和科研单位自己来承担，这是市场竞争的需要。否则一个水利施工企业，一个科研单位不能在一定时间内创造出一些新技术成果或新产品，以适应社会生产力的需要，这个单位就很难长期生存下去。山东华水水电工程有限公司在总经理白永年的领导下，提出“以创新为动力，以高新技术参与市场竞争，以优质低价贡献社会”，他们把工作的重点放在科研上，公司的生存和发展靠先进技术。这种发展方向是值得提倡的。

《中国堤坝防渗加固新技术》一书，是白永年同志和他的同事们汇集了他们多年来理论研究的成果和实践经验的结晶。我深信这本书的出版，将对我国防渗技术的发展起到积极的促进作用。

愿我国的水利施工企业、科研单位多研制出新成果、新技术、新工艺、新设备，以适应我国江河堤防和病险水库大坝加固的需要。

徐乾清

2001年9月

目 录

序

第一章 概论	1
第二章 堤坝地基防渗加固理论	5
第一节 软土地基	5
第二节 刚性基础下软基的承载力	9
第三节 土石坝和堤防地基的承载力	20
第四节 软土地基上堤坝的抗滑稳定	30
第五节 透水地基	34
第六节 渗流计算	47
第七节 用有限元法计算有垂直防渗板墙的堤坝和地基渗流	68
第八节 软土地基、透水地基防渗加固技术综述	72
第三章 综合技术治理病险堤坝	79
第一节 土的抗渗强度	79
第二节 渗流控制	80
第三节 综合防渗技术	82
第四节 石砭峪水库防渗加固工程	88
第四章 振动沉模防渗板墙技术	103
第一节 概述	103
第二节 基本原理	103
第三节 设计	105
第四节 机械设备	107
第五节 施工工艺	110
第六节 施工组织设计	112
第七节 西险大塘防渗加固工程	117
第五章 劈裂帷幕灌浆技术	124
第一节 概述	124
第二节 劈裂帷幕灌浆机理	125
第三节 劈裂灌浆试验	128
第四节 劈裂灌浆设计	132
第五节 施工组织设计	152

第六节	灌浆期的观测·····	159
第七节	灌浆效果检查与验收·····	165
第八节	岭澳水库土坝灌浆工程实例·····	167
第九节	堤坝地基劈裂灌浆·····	179
第十节	劈裂灌浆技术的新发展·····	187
第六章	高压喷射灌浆防渗技术·····	200
第一节	概述·····	200
第二节	基本原理·····	203
第三节	高压喷射灌浆施工·····	217
第四节	工程实例·····	232
第七章	土工膜防渗技术·····	250
第一节	概述·····	250
第二节	垂直铺塑防渗技术·····	261
第三节	堆石坝的复合土工膜防渗工程·····	285
第四节	重要堤防临水坡铺设土工膜防渗工程·····	292
第五节	浆砌石坝的复合土工膜防渗工程·····	306
第六节	土工膜在防渗工程应用中存在的问题及改进措施·····	307
第八章	级配料灌浆技术·····	311
第一节	概述·····	311
第二节	级配料灌浆设计·····	312
第三节	级配料灌浆的施工·····	314
第四节	质量控制和检测·····	316
第五节	岸堤水库除险加固工程实例·····	317
第九章	混凝土防渗墙技术·····	322
第一节	概述·····	322
第二节	造孔技术·····	324
第三节	泥浆固壁·····	331
第四节	混凝土灌注及接缝处理·····	334
第五节	特殊地层技术处理·····	337
第十章	灌浆材料及防渗墙材料·····	341
第一节	概述·····	341
第二节	灌浆材料的性能和试验·····	344
第三节	粘土浆·····	346
第四节	纯水泥浆·····	350
第五节	水泥粘土浆·····	353
第六节	水泥砂浆和水泥粘土砂浆·····	357

第七节	水泥粉煤灰浆及水泥粉煤灰砂浆.....	363
第八节	防渗墙材料.....	369
第九节	粘土混凝土防渗墙材料.....	381
第十节	塑性混凝土防渗墙材料.....	383
第十一节	高强度低弹模混凝土防渗墙材料.....	385
第十二节	灌浆材料和防渗墙材料的外加剂.....	387
参考文献		393
跋		395

第一章

概 论

我国主要的经济发达地区属沿海季风区，旱涝洪水灾害频繁，为除害兴利，中华人民共和国成立以来，兴建了大量的水利枢纽工程。据 1998 年统计，我国已建成各类水库 8.5 万座，总库容为 4924 亿 m^3 。其中大型水库 403 座，中型水库 2653 座，小型水库 8.1 万余座。其中在我国大江大河的上游修建了 245 座大型水库，控制流域面积 150 万 km^2 以上，占江河流域面积的 34%，拦蓄了大量洪水，极大地减少了江河中下游的洪涝灾害；近年来为城乡供水约 5800 亿 m^3 ；到 1999 年底我国水电总装机已达 7297 万 kW，居世界第二位。我国修建加固堤防 26 万 km，这些堤防在保护大江大河中下游的工农业生产和人民的生命财产中发挥了巨大作用。

我国的水库大坝、江河大堤绝大部分为土坝、土堤，这些工程多数是中华人民共和国成立后各个历史时期兴建的，有些工程除了防洪标准低以外，出现的主要问题是土坝的变形稳定和渗透稳定得不到保证，这是影响水利枢纽工程安全运行的主要因素。由于受当时历史条件、经济基础、技术水平的限制，在稳定方面出现的问题，有的是由于规划设计不合理，有的是因施工质量不好引起的。例如我国有些均质土坝，填料颗粒粗却无防渗体系，渗流稳定得不到保证；有的砂壳土石坝，砂壳不碾压或碾压不实，不仅不能抵抗当地一定烈度的地震，而且在正常运行期间有时也出现滑坡；有的粘土心墙坝，由于碾压不实，大坝出现一些严重的裂缝，导致渗透破坏，危及大坝安全；有一些挡水枢纽工程，由于对强透水覆盖层地基清理不彻底，或对可能出现的与基岩接触带的接触冲刷变形未做处理，工程建成以后发生渗透变形破坏；一些平原水库土坝，地基软弱或具有较强的沙基透水层，因缺乏正确的设计，只修一些很低的坝，不仅水的利用率很低，而且浪费了大面积的农田。

据土坝失事资料分析，由于防洪标准低，出现超标准洪水垮坝的占 51.5%；由于设计不合理、施工质量差垮坝的占 38.5%，其表现为坝体裂缝，出现渗透破坏，坝体滑坡，坝基渗透管涌等。超标准洪水垮坝率比较高，原因是大规模兴建水库的初期，一些中小型水库缺少水文资料，设计洪水标准不准确，溢洪道泄洪标准低，甚至有的小型水库没有溢洪道，小洪水一样能垮坝。随着今后水库防洪标准的提高和水库设计施工的规范化，超标准洪水的垮坝率会大大降低，因大坝质量差的垮坝率则会增加。从近年我国 241 座大型水库曾发生的 1000 次工程事故分析：大坝裂缝占 25.3%，渗透管涌占 31.7%，两者共占 57%。根据国外的调查统计资料分析，土坝的老化，尤其是内部老化，一般为 100~200 年。我国有一些土坝，由于兴建时设计施工不规范，已经出现了未老先衰迹象，有些土坝建成十几年，坝体内部就出现了大面积的弱应力土区。因为土坝填筑质量差，大坝的沉降变形问题一直稳定不下来。已经发现，一些土坝虽已运行了几十年，但每年的垂直沉降量仍在 2~5mm，土坝各个不同的部位土柱高度不同，尤其在较陡的岸坡段，经过几十年变形的积累，

所产生的应力应变差，已经大大超过了坝体一些部位土的抗剪和抗拉强度。所以有的土坝内部已经出现了大量裂缝，有的虽未出现裂缝，但也已出现了小主应力不足的弱应力土区，在某些条件下会出现水力劈裂，对大坝的渗透稳定造成严重威胁。1980年，山东省黄前水库为安装测压管在坝顶钻孔时，在某一深度钻孔漏水，原认为坝体内存在空洞或裂缝，经开挖检查，发现是由于钻孔时的循环水柱压力劈开的纵向裂缝，很显然是由于坝体内部存在弱应力土区所引起的。国内还有一些土坝在勘探等钻孔时，也发现在钻孔中漏浆漏水的现象，尤其是近几年上述情况有所增多。有迹象表明，我国土坝较普遍地存在坝体内部老化等隐患，尤其是在较陡的岸坡段，在某一高水位时，可能因为水力劈裂产生横向裂缝，威胁大坝安全。

据水利部1994年的抽查统计，在374座大型水库中，病险库就有111座，约占大型水库数量的30%；2500座中型水库中，病险库670座，约占中型水库的26.8%；小型水库8万多座，其中病险水库约占40%。经多年的努力，病险水库除险加固工作已取得了很大成绩，但我国水库数量大、问题多，除险加固的任务任重而道远，尤其是一些中小型水库的质量问题，决不能轻视。随着我国经济建设的高速发展，社会财富快速积累，处于江河下游的经济发达地区，洪水可能造成的损失会越来越大，1998年洪水已经给我们提出了警告。为了保卫我国的经济建设，减少洪水可能造成的危害，病险水库和一些江河大堤的除险加固已经迫在眉睫。

为解决某些病险堤坝的除险加固问题，20世纪50年代我国从国外引进了乌卡斯工法，后又从德国引进了液压抓斗、液压洗槽机等。近年国内也相继研制了一些类似的工法，这些工法的传统工序是：按照设计的几何尺寸造槽，泥浆固壁，清沉渣，浇水下混凝土，处理槽孔之间的接头等。上述工法各有优势，也各有缺点。有的工法对于一些较深较厚的混凝土连续墙（又称混凝土防渗墙）是比较适宜的，我国已有40多座大坝采用混凝土连续墙，如碧口、毛家村、三峡围堰等都很成功，但也有发生渗透破坏事故的，如西斋堂、玉马等坝。混凝土连续墙的缺点是：要求工艺高，工序多，容易出现质量问题，造价太高，尤其是对一些中低水头的水库大坝、堤防，不太适应。

为适应生产的需要，中华人民共和国成立以来，尤其自1980年初以来，我国研制和引进了十几种堤坝防渗加固新技术，其中有的技术属于我国独创，有的技术已达到国际领先水平。这使我国在土石坝加固技术方面，由70年代末以前单一的引进混凝土连续墙技术发展为适应我国国情的技术配套体系。这些技术包括了对土坝坝体、坝下覆盖层、接触带和喀斯特地质的防渗加固，面板堆石坝的防渗加固，以及近年实施的利用综合技术处理病险堤坝隐患等技术。同样，这些新技术也各有它的适用范围和局限性或在某些方面容易出现問題。本书拟从理论和实践的结合上对病险堤坝防渗加固新技术作一较全面介绍。

本书共分十章。编写的原则是以创新为主线，以介绍实用技术为主体，充分反映我国近20年在堤坝防渗加固方面的创新特色和学科水平。各章的核心内容如下：

堤坝地基防渗加固理论：为了使本书具有坚实的理论基础，较全面地为读者提供堤坝防渗加固方面的理论知识和计算方法，特请河海大学顾淦臣教授撰写了堤坝地基防渗加固理论一章，作为全书的理论基础。

综合技术治理病险堤坝：水库大坝是由不同的各个部分组成的，病险情况也往往不同。

根据土坝产生病害的不同部位、不同原因、工程地质特点等，采用不同技术措施，进行综合治理，做到科学、经济、合理。这是近年我国在治理病险堤坝方面的一个成功经验，综合技术比单一技术质量易掌握，施工速度快，工程成本低。正如利用不同技术，不同工艺组合成一件完美的艺术品一样，只要在规划设计上多下功夫，就一定能成功。通过本书对综合技术的论述和一些工程实例证明，综合技术治理病险堤坝具有巨大潜力，是今后病险水库堤坝治理的发展方向和总趋势。

振动沉模防渗板墙技术：该技术被列为国家“九五”期间科技成果重点推广项目，已获得五项国家专利，适用于堤防、低坝的防渗加固，能建造超薄混凝土连续墙。其优点是由传统建造混凝土防渗墙的六道工序简化为一道工序成墙。该技术从理论阐述和施工实践上，解决了国内外具有同样原理的技术尚未解决的槽孔之间的夹泥和下部开叉使混凝土连续墙不连续的弊端，因而成墙质量可靠，施工速度快，成本低。

劈裂帷幕灌浆技术：该技术为我国独创。土坝坝体劈裂灌浆，1984年获水利电力部优秀科技成果二等奖，1985年获国家科技进步二等奖，并被列为国家“七五”期间科技成果重点推广项目；地基劈裂灌浆，1993年获国家发明三等奖，并被列为国家“八五”期间科技成果重点推广项目。该项技术适用于土坝、土堤、坝体及某些地质条件下的地基防渗加固，能形成垂直连续的防渗帷幕，还能解决坝体主要部位的变形稳定，质量可靠，施工速度快，甚至在十几天的时间内就能初步解决坝体的渗透稳定，使大坝转危为安，其成本只及混凝土连续墙的十几分之一。

高压喷射灌浆防渗技术：该技术获得国家科技进步二等奖，被列为国家“八五”期间科技成果重点推广项目。70年代末从日本引进，主要用于地基加固，经改造用于坝下地基覆盖层、接触带等的防渗，在大块径、堆石体等地质条件也可建造防渗墙。其优点是不需对地基进行开挖，即可在地基的某一深度建造符合设计要求的防渗体。

土工膜防渗技术：该技术是近年国内外迅速发展起来的一种将新材料、新工艺用于水工建筑物的防渗新技术，既可以用于在建水工建筑物的防渗，又可以用于已建水工建筑物的防渗。它的最大优势在于防渗性能好，工程造价低，有很大发展潜力；其缺点是开槽深度有限，接头与已有刚性建筑物的搭接比较困难。

级配料灌浆技术：该技术获得省级科技进步二等奖，适应于喀斯特地质条件下的防渗加固工程。该项技术发明以来，处理了若干原认为老大难的挡水建筑物的漏水工程，为喀斯特地区兴建挡水建筑物创造了有效、快速，又大量节约经费的技术手段。

混凝土防渗墙技术：这是国内外发展较早的防渗工程技术，近年在造槽设备和工艺上有新的发展，所以本书仍将它作为一项新技术，作简单介绍。

灌浆材料及防渗墙材料：由于各种防渗工程对防渗体的弹模、渗透系数、抗渗坡降等要求有所不同，主要是通过各种材料的混合配比来满足设计上的要求。作为单独一章，较详细地介绍了适应不同设计要求的各种灌浆材料的特性和各种材料的配比、试验和检验方法。

本书具有以下特点：

(1) 专业性。本书作为一部专著，主要论述了堤坝坝身及地基的变形稳定和渗透稳定的理论和计算方法，重点介绍了已建工程和在建工程渗流稳定的控制措施，尤其是对已建

病险水库堤坝防渗加固处理技术做了重点介绍。

(2) 针对性。近年国家对病险堤坝的处理加大了投入，如何科学、经济、合理地用好，使其发挥最大的实际效益，是人们所关注的问题，也是编写出版本书的目的。希望能够因地制宜地做出方案比较，选取最优的技术方案，提高我国病险堤坝加固治理的水平，保证工程质量，加快治理速度。

(3) 实用性。为方便规划、设计和施工部门的应用，本书详尽地阐述了各种工法的原理、工艺和设备，列举了大量的工程实例。尤其是综合技术治理的工程实例，充分证明利用综合技术治理病险堤坝的科学性、经济性、合理性，为读者提供有价值的参考。

(4) 系统性。作为对病险堤坝的处理，我国已创造出较全面的、系统的、先进的技术体系，书中所介绍的内容，基本可以满足目前我国处理病险堤坝的要求。一个病险堤坝的处理，可以采用一种技术，更多的是采用多种技术进行综合治理，这是本书所提倡的。

(5) 成熟性。书中介绍的部分新技术是国家“七五”、“八五”、“九五”期间重点进行推广的，有的已获国家奖励，这些技术已经过多项工程的实践检验，技术上已相当成熟。但是在规划设计时，技术方案的选择，要符合病险工程的实际情况；由于一些病险工程的复杂性，要选择好施工队伍，并有专家现场指导，保证防渗加固工程的成功。

本书是以中国华水水电开发总公司山东分公司和山东华水水电工程有限公司的有关专家为主，并特约了河海大学、山东大学有关教授专家集体撰写的，是集体智慧的结晶。书中内容有错误和不足之处，敬请读者批评指正。本书作者将不断努力，继续进行堤坝防渗加固方面的研究和技术创新，以满足广大读者的要求。

第二章

堤坝地基防渗加固理论

第一节 软土地基

江河下游的堤防，海滨的海塘闸岸，低洼地区的平原水库，往往建在软土地基上。但有的工程建成后受到扰动或震动，发生了突然的大面积的沉陷或塌滑，这是由于对高灵敏性软土地基缺乏认识，而设计施工考虑不周。有的工程的软基处理又过分保守。有的平原水库担心承载力不够而不敢建较高的坝，造成水资源和土地资源的浪费，这是由于对软土的涵义和特性缺乏理解而存在盲目性。还有的工程把透水地基当作软土地基。为此，本节先介绍软土的涵义和特性。

1. 软土的涵义

对软土的涵义，各国尚无一致的认识，国内各行业标准也不一致。《工程地质手册》^①称软土是指天然含水量大、压缩性高、承载能力低的一种软塑到流塑状态的粘性土。

《铁路工程设计技术手册》^②建议软土的指标为：天然含水量 ω 接近或大于液限；孔隙比 $e > 1$ ；压缩模量 $E_s < 4000\text{kPa}$ ；标准贯入击数 $N_{63.5} < 2$ ；静力触探贯入阻力 $P_s < 700\text{kPa}$ ；不排水强度 $c_u < 25\text{kPa}$ 。

JTJ051—85《公路土工试验规程》规定符合表 2-1 所列指标的土为软土。

表 2-1 软土划分指标

土类 \ 指标	含水量 ω (%)	孔隙比 e	压缩系数 a (MPa^{-1}) 在 100~200kPa 压力下	饱和度 S_r (%)	快剪内摩擦角 φ (°)
粘土	>40	>1.2	>0.5	>95	<5
中、低液限粘土	>30	>0.95	>0.3	>95	<5

注 原表中的 a 分别为 0.05kPa^{-1} 及 0.03kPa^{-1} ，有误，本书作了改正。

JTJ017—96《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》规定软土的特征为：天然含水量 $\omega \geq 35\%$ ，或 $\omega \geq$ 液限；天然孔隙比 $e \geq 1.0$ ；十字板剪切强度 $S_u < 35\text{kPa}$ ，相应的静力触探贯入阻力 P_s 约为 750kPa 。

SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》对软弱粘土层的评价标准为：液性指数 $I_L \geq 0.75$ ；无侧限抗压强度 $q_u \leq 50\text{kPa}$ ；标准贯入击数 $N_{63.5} \leq 4$ ；灵敏度 $S_r \geq 4$ 。

JGJ83—91《软土地区工程地质勘察规程》规定，符合以下三项特征为软土：外观以灰

① 《工程地质手册》，该书编写组，北京，中国建筑工业出版社，1984 年。

② 《铁路工程设计技术手册》，交通部第一铁路设计院编，北京，人民交通出版社，1992 年。

色为主的细粒土；天然含水量大于或等于液限；天然孔隙比大于或等于1.0。日本道路公团1987年提出的软土地基标准见表2-2。

归纳起来，可按表2-3划分粘土性软土和砂质粘土性软土。

软土的压缩系数高，抗剪强度低。因此，在软土地基上修建刚性基础（混凝土基础或

圬工砌体基础），其沉降大，承载能力低，往往需要扩大基础面积以降低基底压力，或增加建基深度以增大反压力，或采取换土、强夯、堆载排水预压、振冲置换等加固地基措施。在软土地基上修建土坝、路堤时，其沉降大，且容易发生塑流，往往需要放缓堤坝边坡、增建堤坝趾部反压平台、排水预压、振冲置换等加固地基措施。为此，对软土地基应针对上部建筑物的结构性质和形式，进行正确的勘探和试验。

表 2-2 软土地基标准

地 层	泥炭质地草及 粘土质地草		砂质地草
	层厚 (m)	<10	>10
标准贯入击数 N	<4	<6	<10
无侧限抗压强度 q_u (kPa)	<60	<100	
荷兰式贯入指标 q_v (kPa)	<800	<1200	<4000

表 2-3 软土的物理力学性质

土 类	塑性指数	含水量 ω (%)	孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	压缩系数 a (MPa^{-1})	渗透系数 k (cm/s)	总应力抗剪强度		标准贯入 击数 N	无侧限 抗压强度 q_u (kPa)
							φ (°)	c (kPa)		
粘土性软土	≥ 17	> 40	> 1.2	> 95	> 0.5	$< 1 \times 10^{-6}$	0~5	< 20	< 2	< 30
砂质粘土性软土	< 17	> 30	> 1.0	> 95	> 0.3	$< 1 \times 10^{-6}$	8~22	< 12	< 4	< 60

注 总应力抗剪强度、标准贯入击数、无侧限抗压强度三项指标，对有些软土不一定同时满足，只要其中一项满足即可。

2. 淤泥、淤泥质土

淤泥、淤泥质土是软土的一种，淤泥是沉积时夹带有机物并有微生物作用，且有结构性的粘性土。《工程地质手册》解释为：淤泥和淤泥质土是指在静水或缓慢的流水环境中沉积，经生物化学作用形成的粘性土。这种粘性土含有机质，天然含水量大于液限。当天然孔隙比 $e > 1.5$ 时，称为淤泥； $1.0 < e < 1.5$ 时，称为淤泥质土。按沉积环境可分为滨海沉积、湖泊沉积、河滩沉积、沼泽沉积等四类淤泥或淤泥质土。

TJT219—87《港口工程技术规范》对淤泥的定义为：近代水沉积形成的天然含水量大于液限、天然孔隙比大于1.0而小于1.5的亚粘土、粘土分别称为淤泥质亚粘土、淤泥质粘土。近代水沉积形成的天然含水量大于液限、天然孔隙比大于1.5的亚粘土、粘土都称为淤泥。

有的文献定义泥炭和腐殖质土如下：

泥炭：天然含水量大于300%，孔隙比大于5，快剪内摩擦角小于 12° ，位于塑性图A线以下或以上。

腐殖质土：天然含水量大于200%，孔隙比大于4，快剪内摩擦角小于 5° ，位于塑性图A线以下或以上。

但是，有些地区的泥炭和腐殖质土由于腐殖质没有完全分解，抗剪强度却较大。例如贵州六盘水地区的泥炭，其性质差别很大。天然含水量79%~563%，孔隙比1.6~10.9，液限57%~340%，塑限36%~236%，内摩擦角 $9^\circ \sim 23^\circ$ ，凝聚力2~42kPa，压缩系数

($a_{100-200}$) $21 \sim 129 \text{ kPa}^{-1}$ 。

云南滇池的湖沼泥炭天然含水量 $301\% \sim 647\%$ ，孔隙比 $6.8 \sim 12.1$ ，三轴不固结不排水剪 $\varphi_{uu} = 1^\circ 54'$ 、 $c_{uu} = 2 \text{ kPa}$ ，三轴固结不排水剪 $\varphi_u = 16^\circ$ 、 $c_u = 2 \text{ kPa}$ ，压缩系数 $a_{50-100} = 170 \sim 300 \text{ kPa}^{-1}$ ，垂直渗透系数 $k_v = 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，水平渗透系数 $k_h = 3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，有机质含量 $25\% \sim 54\%$ 。

有些滨海沉积和湖泊沉积的淤泥含有贝壳，河滩沉积的淤泥含有砂粒，则抗剪强度较高，其快剪指标 φ_q 可达 15° 。但压缩系数仍很大，可达 500 kPa^{-1} 。

淤泥和淤泥质土包括泥炭和腐殖质土，其天然含水量大，抗剪强度低，压缩系数大，水平渗透系数大于垂直渗透系数，随着上部压力的增加，渗透系数逐渐减小。这些特性可使刚性基础发生较大沉降、偏斜、塑流、周围土体隆起等危害。对土石堤坝、路堤可能发生较大沉降、塑流、趾部隆起，导致堤坝发生裂缝、塌滑等危害。前者需要采取碎石桩、振冲桩、深层搅拌桩、抛石强夯等加固措施；后者可采取填土挤淤、填土强夯挤淤、分期填筑、砂井或垂直塑料板带排水堆载预压、根据位移观测控制填土速度等措施。如果泥炭的分解程度小于 50% ，在继续分解后，压缩系数将增大，抗剪强度将减小，情况将更加恶化，故应尽量把泥炭挤出去。堤坝要承受水头，防止渗漏，防止渗透破坏。含水量很高的泥炭处于流塑状态，破坏渗透比降很小，容易在水压力下击穿流失，故需要采取必要的防渗措施。

3. 灵敏性软土

淤泥和淤泥质土有较多的极细颗粒——胶体颗粒，粒径不大于 0.001 mm ，并且含水量高于液限，呈流塑状态。当它静置一定时间，就成为凝胶体，具有一定的承载能力。如果受到搅动，就会流动液化，失去胶聚力，承载能力很低，甚至就像水一样没有承载能力，这种现象称为触变。在扰动力消失后，经一定时间，又逐渐胶凝，恢复原状。这是因为胶体粒子扩散层中的阳离子和扩散层之间的阴离子和水分子一起有次序地排列，形成有规则的构造，结合水在阳、阴离子作用下，使这结构增加了某些强度。但当在外力作用下，破坏了这些不牢固的联结，土随之液化。外力移去，经过一定时间后，阳、阴离子和结合水的分子缓慢移动又达平衡状态，原生构造又恢复，强度又增加。这种触变现象是可逆的。

土的触变性的强弱程度用灵敏度 S_t 表示。即：

$$S_t = \frac{q_u}{q'_u} \quad (2-1)$$

式中： q_u 为原状土的无侧限抗压强度； q'_u 为重塑土的无侧限抗压强度（保持含水量和孔隙比与原状土相同）。

土按灵敏度分类如下：

非灵敏性土	$S_t = 1$	极灵敏性土	$S_t = 8 \sim 16$
低灵敏性土	$S_t = 1 \sim 2$	微流动土	$S_t = 16 \sim 32$
中灵敏性土	$S_t = 2 \sim 4$	中等流动土	$S_t = 32 \sim 64$
高灵敏性土	$S_t = 4 \sim 8$	流动土	$S_t > 64$

中灵敏性土受到打桩扰动、混凝土防渗墙造槽、冲击钻造孔、振动沉模建造防渗板墙、振冲置换等施工时就会发生触变。高灵敏性土在较强地震、附近爆破震动、重型车辆通过时就会发

生触变。极灵敏性土在中等地震、爆破震动、机械振动、车辆通过时都会发生触变。

灵敏性土作为堤坝工程或建筑物的地基一般采取人工加固，如喷粉（水泥、石灰、矿粉）搅拌，或分层堆填土石强夯把灵敏性土挤出，或掺混土石以降低含水量。

4. 饱和粉细砂

饱和粉细砂的特性与软土不同，没有粘粒胶粒，没有塑性，抗剪强度不是很低，压缩系数不是很大。但受到地震或其他反复振动时，粉细砂被加密，孔隙减小，导致孔隙水压力上升，有效应力降低。当孔隙水压力等于该处粉细砂的上覆土柱压应力时，抗剪强度完全丧失。当孔隙水压力大于上覆压应力时，则发生喷水冒砂。建筑物为刚性基础有足够压力时不会喷水冒砂，但基础下的砂层可能从基础周围喷水冒砂，导致基础下沉偏斜。土堤、土坝、路堤下的粉细砂则从堤坝趾部喷出，导致堤坝塌陷裂缝。水库淹没的上游砂质堤坡，因振动孔隙水压力增大使抗剪强度减小，导致边坡塌滑。上述这些现象称为液化（liquefaction）。由于饱和粉细砂在振动作用下产生这种性态，所以也把它列入软土类中。

级配均匀的粉细砂容易液化。中值粒径 d_{50} 在 0.05~0.1mm，不均匀系数 c_u 为 2~5 的极细砂至细砂最易液化。中值粒径 d_{50} 在 0.02~0.5mm，不均匀系数 c_u 小于 10 的粉砂至粗砂都属于易液化砂。易液化砂的颗粒组成见图 2-1。图中阴影线范围的颗粒曲线的饱和砂容易液化。

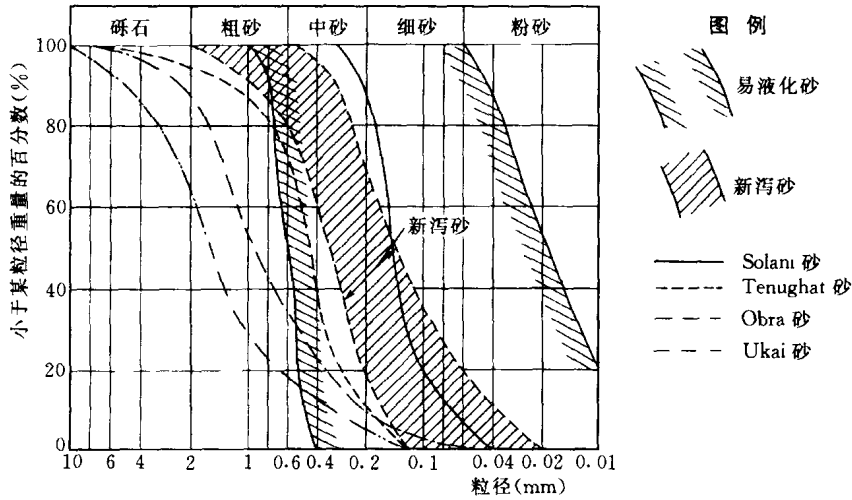


图 2-1 易液化砂的颗粒曲线

除了级配以外，砂土的密实度、沉积时间、震动力的强弱都是影响液化的重要因素。砂土的相对密实度愈大，愈不易液化。1975 年海城地震后，经调查水平地面下中细砂喷水冒砂的情况，得出结论是：相对密度大于 0.55 的砂层，Ⅶ度地震区未液化；相对密度大于 0.7 的砂层，Ⅷ度地震区未液化。在砂层地面上有 1.0m 土层覆盖的区域，Ⅶ度地震区未喷水冒砂，也就是表面有盖重压应力 20kPa，Ⅶ度地震不会液化。

SDJ14—78《水利水电工程地质勘测规范》建议，不同地震烈度下砂土不发生液化的临界相对密度如表 2-4 所示。如果小于表中的相对密度，当发生表中相应的地震烈度时砂层可能发生液化。

SDJ14-78 还建议了另一种判别砂土液化的方法,即按标准贯入试验击数判别,方法如下:
深度 Z 处的饱和砂土不发生液化的临界贯入击数 N_{cr} 用下式计算:

$$N_{cr} = N_c [0.9 + 0.1(Z - Z_w)] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (2-2)$$

式中: Z 为砂土层深度 (m), 如深度不足 5m, 以 5 m 计; Z_w 为地下水位离地表深度 (m), 当地面淹没于水下时, Z_w 取零; ρ_c 为土的粘粒 (粒径小于 0.005mm) 含量重量百分比, 当 $\rho_c < 3$ 时, 取 3; N_c 为当 $Z=3\text{m}$ 、 $Z_w=2\text{m}$, $\rho_c < 3$ 时, 饱和砂土的临界贯入击数, 按表 2-5 采用。

表 2-4 饱和砂土遇地震时可能发生液化破坏的临界相对密度

地震烈度	VI	VII	VIII	IX	X
相对密度 D_r (%)	65	70	75	80~85	90

* SDJ14-78 未列地震烈度 X 度相对应的相对密度。
X 度地震的临界相对密度是一些专家建议的。

表 2-5 N_c 值

地震烈度	VII	VIII	IX	X
近震	6	10	16	24
远震	8	12		

注 坝址、厂址基本烈度比震中烈度小 2 度或 2 度以上称为远震。

若饱和砂土层的深度为 Z , 地下水位深度为 Z_w , 在该地层作标准贯入试验得到标准贯入击数为 $N_{63.5}$, 当 $N_{63.5} < N_{cr}$ 时, 则该地层可能液化。

如果标准贯入试验是在建筑物施工以前做的, 那时试验点深度为 Z' , 地下水位深度为 Z'_w , 标准贯入击数为 $N'_{63.5}$, 则工程建成正常运用后的 $N_{63.5}$ 可按式校正。

$$N_{63.5} = N'_{63.5} \left(\frac{Z + 0.9Z_w + 0.7}{Z' + 0.9Z'_w + 0.7} \right) \quad (2-3)$$

式中: Z 、 Z_w 为原标准贯入试验点在工程建成运用后的地层深度和地下水位深度 (m)。

临界贯入击数式 (2-2) 中的 Z 、 Z_w 也按正常运用时的地层深度和地下水位深度计算。

标准贯入试验判别液化土层, 只适用于 $Z < 15\text{m}$ 的土层。

以上判别液化土层的相对密度法和标准贯入击数法只适用于水平地面下的砂层。对于地形复杂或上部有建筑物的地基砂层要做砂土动力特性和振动孔隙水压力试验, 并作静力动力有限元分析研究, 得出液化度 $\frac{u_d}{\sigma_3}$ 等值线图, 其中 u_d 为动孔隙水压力, σ_3 为静小主应力。

对可能液化的地基进行处理, 可采用强夯、振冲、振冲置换等增加砂层相对密度的工程措施, 或采用压载增大上部压应力、围封防止砂层向建筑物轮廓外挤出或喷出的措施等。

第二节 刚性基础下软基的承载力

混凝土、钢筋混凝土、圬工砌体等刚性基础下面的软基可能被基础压力挤出, 或发生过大沉降、不均匀沉降等危及上部建筑物的安全。这就需要计算地基的承载能力。承载能力的大小取决于地基土的抗剪强度、基础的尺寸、基础的形状、基础的埋置深度等。

不少学者研究过地基承载力理论, 1920 年普朗特耳 (L. Prandtl) 根据塑性理论推导了无重量地基的极限承载力公式。20 世纪 40 年代, 太沙基 (K. Terzaghi) 根据上述基本原理