

# 土力学原理十记

沈扬 等 编著



中国建筑工业出版社

# 土力学原理十记

沈扬 等 编著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

土力学原理十记/沈扬等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-112-17926-8

I. ①土… II. ①沈… III. ①土力学 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 051573 号

本书以独特视角诠释和剖析了经典土力学原理的精髓, 并结合实践进行分析。全书共分为十章即十记, 包括土性、有效应力、渗流、附加应力、压缩、固结、强度、土压力、地基承载力、边坡的相关内容。

本书面向土木、水利和交通类从事岩土工程相关工作的科研、设计人员和研究生, 也可作为本科生学习土力学之后的提高辅导用书。

\* \* \*

责任编辑: 杨 允 王 梅 咸大庆

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 关 健

## 土力学原理十记

沈扬 等 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京永峥有限责任公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{4}$  字数: 220 千字

2015 年 4 月第一版 2015 年 4 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-17926-8

(27171)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

谨将此书献给以黄文熙先生、钱家欢先生为代表的  
河海大学岩土工程国家重点学科的第一代开拓者

## 前 言

土力学是这样的一门学科，它沿袭了经典力学的思路，同时又展现着数学的精妙，而学科螺旋式的上升，很大程度是因为对土体奇妙特性的揭示永无止境。但也正是这样的复杂性，造成了很多学习者的疑惑，在他们眼中，如果材料不能变形，那就是理论力学解决的范畴，如果可以变形，那么就应归属于材料力学、弹性力学或塑性力学研究的领域，亦或当材料变形的研究视角从单元体的变形扩展到杆件的变形时，则可由结构力学来应对。那么土力学究竟又是怎样的力学呢，在还没有理解土力学真谛的时候，一些非岩土工程专业的学生甚至已经把—个“伪力学”的帽子重重地加在了它的头上。

初学者之所以对土力学产生畏惧、迷茫或轻视，一方面源于他们对土力学架构下各部分内容割裂看待以及机械式的识别与记忆；另一个方面，则是因其一味把它理解为全新的学科，割裂了与传统理论知识间的实质性联系。孤立地看待问题，其实也很难找到学科真正的亮点特色所在。概括地说，存在问题的本源就是未明其理，所以迷茫。

这个“理”，主要是土力学的原理。土力学和其他力学一样，存在很多原理性知识，有些是土力学专属的：如有效应力原理、固结理论、渗流力理论等；也有些是借鉴或承接于传统经典理论的：如弹性力学理论、达西渗透定律、莫尔-库伦强度理论等；还有一部分则是土力学建模体系中大量唯物与唯象思想碰撞的结果，体现了这门学科中科学性与实践性的结合，也就是本质与实用之间的一种变通之理：如挡土墙土压力计算中的朗肯、库伦和太沙基方法、边坡稳定分析中的条分法、地基承载力中的各类极限承载力计算方法等。而交织在整个体系上的大量数学计算，其本质也都不应脱离物理含义，我们应坚持在大物理视野下看待土力学问题，才能学好这门实用的力学。

因此，本书的目的就是尽力讲通土力学中的理，是原理，是道理，是物理，也包括对土力学专有模糊哲学所体现大智慧进行—种诠释，以此帮助读者对土力学的战略架构能有更加清晰的了解，便于他们更有效地从战术上去攻克相关难题。

在—全书内容架构上，—方面结合主笔人多年来科研和执教的经验，对近百年来土力学经典的原理精髓，以初学者更易理解的视角和笔法诠释出来，例如土中水的复杂性与趣味性，有效应力的多视角剖析，渗流力与孔压间的联系，沉降分

层总和法的演变，固结方程的内涵剖析，土压力理论的多样化展示，地基承载力计算方法间的本质联系等；另一方面，也将主笔人在土力学原理方面的一些研究成果展示出来，与读者们讨论：这其中包括了渗流力的建模理解，有效应力定义的再解析，三轴不排水剪切试验中相关孔压系数的推导，土压力水土分算理论中三轴强度指标应用的尝试，以及有水边坡稳定分析中局部、整体水压法的提出与应用等。

拉格朗日曾说：一个数学家，只有当他能够走出去，对他在街上碰到的第一个人清楚地解释自己的工作时，他才完全理解了自己的工作。对于土力学这样的实用学科而言，更应做到在尽可能深入探究的同时，还能浅出地让更多的相关专业人员理解这些理论，并实现其充分应用。为此，本书从2010年开始酝酿，到如今收笔，可谓每一个篇章都是绞尽脑汁，咬文嚼字，努力强调土力学原理体系的逻辑性和连贯性、兼顾严谨性与生动性。与主笔人一起“搜肠刮肚”的，还有各级研究生们，他们协助参与了各记著写和修改工作，具体分工是第一记（徐海东、尤延锋）、第二记（励彦德）、第三记（杜文汉）、第四记（陶明安）、第五记（邱晨辰、杜文汉）、第六记（李海龙、徐海东）、第七记（葛冬冬）、第八记（王保光）、第九记（朱颖浩）、第十记（王鑫），全记校核（刘璐）。本书得到了国家自然科学基金项目（51479060）和长江学者和创新团队发展计划（IRT1125）的资助，在此也谨表谢忱。

本书面向土木、水利和交通类从事岩土工程相关工作的科研、设计人员和研究生，也可作为本科生学习土力学之后的提高辅助用书。

限于著者水平，书中难免存在一些不妥之处，恳请读者批评指正。

2015年春节

# 目 录

第一记 土性记——因水而奇妙的土力学 .....	1
1.1 妙手回春 .....	1
1.2 千年佛像 .....	3
1.3 盐撒西域 .....	5
1.4 掘金西部 .....	6
1.5 结论结语 .....	8
第二记 有效应力记——土力学的半壁江山 .....	10
2.1 唯物论下的唯象王国：有效应力原理的建模体系 .....	10
2.2 阿基米德定律的启示：自重作用下土的有效应力表征 .....	14
2.3 万能与万万不能：有效应力应用约定 .....	15
2.4 结论结语 .....	17
第三记 渗流记——神龙见首不见尾 .....	19
3.1 精悍概念不简单：渗流力的三重唯象定义 .....	19
3.2 动如参商不可见：孔压与渗流力的使用 .....	21
3.3 结论结语 .....	25
第四记 附加应力记——土力学计算的序曲 .....	27
4.1 附加应力的关注缘起 .....	27
4.2 附加应力计算中的怪点 .....	29
4.3 应力泡的魔术 .....	32
4.4 最大塑性开展区深度的应力解读 .....	34
4.5 结论结语 .....	36
第五记 压缩记——奇异的土体弹簧 .....	38
5.1 压气还是压水：土体压缩的本质 .....	38
5.2 一个变模量的弹簧：沉降计算的核心 .....	41
5.3 易容术的能与不能： $e$ - $\lg p$ 法和 $e$ - $p$ 法的相似与差异 .....	43
5.4 规范法——理论分层总和法的进化 .....	47
5.5 结论结语 .....	51
第六记 固结记——一维固结不简单 .....	54
6.1 解释不了的现象：人造“固结度”的得与失 .....	54

6.2	不再统一的孔压与位移固结度：双层地基中固结度的判定 .....	58
6.3	大而建筑，小而实用：常用固结理论的差别 .....	60
6.4	结论结语 .....	68
<b>第七记</b>	<b>强度记——雾里看花的规律与定律 .....</b>	<b>70</b>
7.1	这个圈圈不好画：冠名权争议下土的强度问题基本表述 .....	70
7.2	简单的是最美的：超固结引出的强度本质 .....	74
7.3	被忽视的价值：理想直剪试验的超静孔压 .....	77
7.4	深藏不露的城府：小议三轴 CU 试验的内涵与应用 .....	80
7.5	结论结语 .....	90
<b>第八记</b>	<b>土压力记——授之以渔的土压力理论 .....</b>	<b>93</b>
8.1	钻牛角尖的土压力问题 .....	93
8.2	挡墙位移视角的土压力分析思想 .....	94
8.3	跳出挡墙看土压力：被动土压力的太沙基解法 .....	97
8.4	挡墙计算的“天下大势”看不穿：杂谈水土压力分、合算 .....	102
8.5	结论结语 .....	109
<b>第九记</b>	<b>地基承载力记——“派系”林立的方法中看联系 .....</b>	<b>112</b>
9.1	地基承载力计算方法基本分类 .....	112
9.2	从多个层面来理解限制塑性区开展法 .....	114
9.3	空气动力学之父不得闲：评典型极限分析法里程碑意义 .....	122
9.4	结论结语 .....	129
<b>第十记</b>	<b>边坡记——寻找圆弧滑动条分法计算的命门 .....</b>	<b>131</b>
10.1	求解边坡稳定问题的基本核心：条分法 .....	131
10.2	求解湿坡稳定问题的物理学思路：局部水压法和整体水压法 .....	134
10.3	超静定解除的代价与弥补：瑞典条分法 .....	138
10.4	退一进二的大师智慧：毕肖普条分法 .....	145
10.5	结论结语 .....	152



# 第一记 土性记——因水而奇妙的土力学

## 1.1 妙手回春

很多报考岩土工程专业研究生的同学，在填报导师和选择研究方向时，会不约而同地以地基处理为己任，因为他们觉得从事这个研究能早日接触实际，以利于自己将来找工作。但当他们进入课题组会发现，师兄们经常围绕实验室里那些常规平淡的三轴、压缩试验打转，而自己“奉命”学习的文献中亦有大量曾经在学习土力学时见到的土的基本特性内容。于是不免发出这样的疑问：难道这也是为成为地基处理的人才做准备吗？纵使导师做了一通思想工作，降低了对上述“打基础”工作作用的怀疑程度，但多数人还是深信这段提高过程是枯燥而痛苦的。我想说，其实土的基本工程特性很有趣，关键看你怎么学，会不会学以致用。土力学界有一句老话，叫做“自从有了水，土力学就变得更复杂”，那么在本书开篇的第一记中，笔者不妨写得轻松一些，以土中水来揭示土体基本特性中神奇、淘气而有趣的一面。

药店里常有各类治疗腹泻的药，而其中不少药的学名标注的是“蒙脱石散”。学过土力学的读者可能会说：“且慢！蒙脱石？这不是黏土最基本的三种组成矿物之一吗？该不会是重名了吧？”不是重名，所谓的“蒙脱石散”就是以蒙脱石为原料配制而成的止泻良药。

那么蒙脱石怎么会有如此医用功效呢？如读者所知，典型的黏土矿物有三种：蒙脱石（montmorillonite）、高岭石（kaolinite）和伊利石（illite），而蒙脱石是其中强度最低，但吸水性最强的矿物，以蒙脱石为基本原料的止泻药正是依靠了其强大的吸水性。为了寻求这种吸水性的机理解释，我们不妨拿出微观电镜，来看看蒙脱石的基本晶胞组成特征。图 1-1 左侧是蒙脱石的基本亲水晶胞结构示意图，右侧是组成晶胞的两种基本结构单元：硅氧四面体和铝（镁）氢氧八面体（为了清晰起见，晶胞中没有把结构单元中的阳离子绘制出来）。从中我们可以看到，蒙脱石的晶胞是由两层硅氧四面体和一层夹于其间的铝（镁）氢氧八面体组成的 2:1 型层状硅酸盐矿物结构。晶胞外围是以负电性的二价氧离子为边界，两个晶胞表面的同性相斥使得晶胞间距增大，加之一些晶胞中还存在内部正

电荷的置换或缺失，如铝离子被镁离子替代或丢失，将导致晶胞间负电性增强、斥力进一步增大，在宏观上就表现为土粒比表面积增大、土粒间孔隙增加，水容易侵入。更因为水分子具有极性，侵入孔隙中，不是到此一“流”，而是到此一“留”，在土粒四周安营扎寨下来，扩大规模的同时，也就进一步增加了晶胞间距和宏观孔隙。

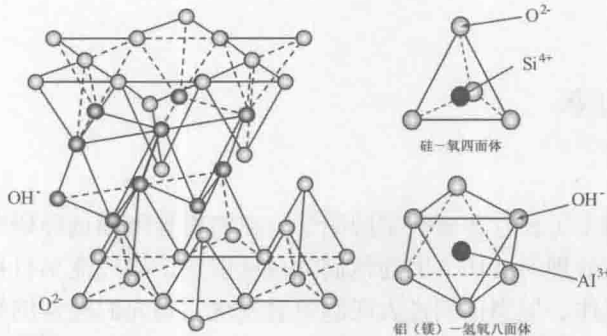


图 1-1 蒙脱石的基本晶胞结构

黏性土的晶胞结构表现为负电特性，不过蒙脱石比之于另外两种矿物高岭石（层状结构，由硅氧四面体和氢氧八面体组成）和伊利石（层状结构，虽然也是由两个硅氧四面体和一个氢氧八面体组成，但受到同像置换的影响后，层与层之间会夹杂钾离子，中和了一定的负电性），其颗粒间的极性排斥力最大，因此决定了由蒙脱石组成的土质的吸水性最强。

当病人感谢蒙脱石妙手回春的同时，岩土工程师们却在工程中无语地看着由蒙脱石所组成的土质。由于蒙脱石强大的吸水能力造成其为组成分的黏土拥有显著膨胀的特性，诞生了名为膨胀土的特殊工程土。膨胀土干涸后开裂、吸水后鼓胀、浸水时承载力衰减、干缩时裂隙发育，性质极不稳定，给建筑工程安全带来很大隐患。偏偏膨胀土在我国分布范围很广，在 4 个直辖市（京、津、沪、渝）及其他 12 个省份（新、陕、冀、晋、鲁、豫、鄂、皖、苏、川、滇、桂）均有不同范围分布（图 1-2 深色部分所示都是有膨胀土分布的主要省份）。

而目前我国正在开展的大型水利工程——南水北调的东线和中线工程，其输水管线正好穿越膨胀土分布地区（见图 1-2），如果让膨胀土恣意胀缩，很可能会顶坏埋藏于土中的输水管线，造成管线开裂，调水也就成了泡影。因此，对工程区域膨胀土地基的处理，刻不容缓。

讲到这里，不妨请读者先思考一下，应如何采取措施治理膨胀土呢？或许大家会说，只要能减少晶胞之间的间距，使得土体的孔隙减少，水不就无机可乘了吗？说得很好，那么又如何减少晶胞间距呢？或许有人会说，要治本，就应该减

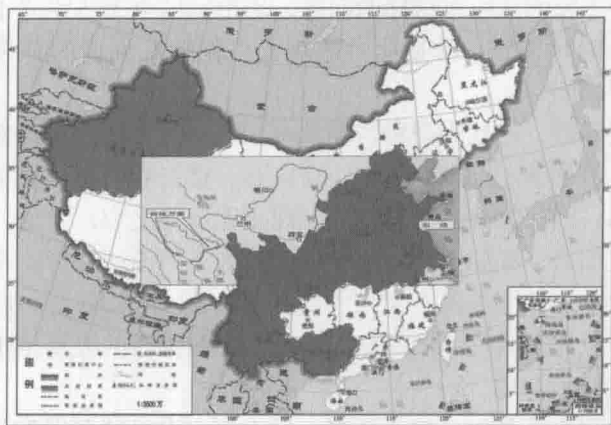


图 1-2 南水北调工程东、中线穿越膨胀土地区分布示意图

少晶胞的负电特性，从根本上杜绝水膜的增厚——完全正确，土力学就应该这样学习，层层剥笋，学以致用！在实际的地基处理问题中，有一种方法是在膨胀土地基中掺入一定量的石灰进行改良。石灰中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  解离出的  $\text{Ca}^{2+}$  与黏土胶体颗粒中的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  进行交换，增加了晶胞的正电价，从而一定程度上中和了土粒带有的负电特性，减少同性相斥，缩小了水分子可以“见缝插针”的空间，里面的水被挤出去，外界的水也进不来，膨胀土的胀缩特性也就得到了缓解。如此看来，蒙脱石在不同场合会不断转换福祸的角色，掌握好土力学，竟也有可能寻得根除生活病灶的一剂良方。

## 1.2 千年佛像

前秦建元二年（公元 366 年），一位名叫乐尊的和尚来到位于今天甘肃西部的鸣沙山，又累又渴时，突然看到佛光万道。他把这看成是佛的启示，于此开凿石窟，兴建佛像，后人因循而建，日渐扩大规模，乃至成为今天举世闻名的世界文化遗产——敦煌莫高窟。

莫高窟的彩塑佛像（如图 1-3 所示）是中华诸多艺术瑰宝中的一朵璀璨之花，近代的工艺美术师在“膜拜”的同时，也开始积极地临摹与仿制。就在他们刚开始仿制时，发现新做的彩塑容易产生裂



图 1-3 位于莫高窟 45 窟的盛唐菩萨彩塑像

缝，如果当年的工匠无法应对这样的问题，恐怕佛像也无法屹立千年。那究竟是什么使彩塑变得婀娜多姿，又是什么造成了“克隆”佛像的开裂，我们又能够通过什么方法去解决呢？

要解释这些问题，不妨先带着疑问学习一些相关的知识。现实中，黏土根据含水率的不同，可处于三种稠度状态，即流态、塑态和固态。如果土体的含水率过高，进入流态，则如泥浆，变形脱疆，却毫无承载之力；反之，如果含水率过低，则土体进入固态，犹如土砖石瓦，强度很高，但无法变形，常发生毫无预兆的脆性破坏；只有当黏土具备一定“不高不低”的含水率时，方处于可塑状态，既有一定强度，也能具有可控制的变形能力。彩塑佛像的成型也正是利用了黏土的可塑性，方显曼妙身姿。

那么可塑状态究竟是怎么形成的呢？一方面，由于结合水膜的存在，吸附这些结合水的相邻黏土颗粒彼此连结（结合水连结）；同时，由于黏土颗粒很小，会表现出类似于胶体的性质，在一定的颗粒间距下（土中水膜不太厚的时候），自身亦有一定聚沉性质；加之很多黏土组成中包含一些盐类与胶体物质，也能提供一定胶结黏聚力，三管齐下，使得塑造佛像的土在保持各种“pose”的同时，不发生整体性破坏，反之若以不具备上述特性的砂土立一个砂墩，在风吹之下都可能迅速垮塌。另一方面，土粒之间胶结、咬合在一起，若没有润滑剂，要搅拌这一堆混合物该有多费力啊！土中的吸着水膜就充当了润滑剂的作用，原本“紧贴”在一起的黏土颗粒因为水分子的“入侵”而容易错动，宏观上就表现为黏土能被任意揉捏。如果水膜过厚，黏土颗粒的负电性也就控制不了这些多余的水分子，在它们的“脱疆”运动下，黏粒间的连结和胶结作用显著降低甚至消失，土体从可塑态变成了流动态，因此彩塑的含水率配比真是恰到好处才可（从土力学上说就是含水率应控制在液限与塑限之间，保证土体处于良好的可塑状态）。

现在我们再回过头来看看之前所说的裂缝问题，答案和 1.1 节所述内容有一定联系。膨胀土吸水性很强，是因为颗粒间同性相斥，水容易侵入，制作敦煌彩塑的主体原料亦是黏土，同样具备吸水性。反之，当水分丧失以后，也会导致土粒之间间距减少，造成宏观体积收缩。甘肃敦煌地处戈壁，四季干燥，昼夜温差大，气候异常带来的是水分蒸发、含水率降低，一胀一缩间，就会导致彩塑的开裂和破坏。因此匠师们对敦煌彩塑进行处理时，不但要防止其膨胀，更要抑制其脱水收缩。

后来人们终于从古籍中找到了解决开裂的方法：先人以木架为骨、黏土为身，同时在彩塑敷面的黏土中掺入一定量的砂，还放入了稻草、棉花。从我们专业的角度如何去解释呢？“掺砂子”，是因为砂土矿物结构不同于黏土，没有负电性所带来的胀缩特性，从而在保证佛像整体可塑性的基础上，抑制了黏土固有的开裂；添加的棉花、稻草之于彩塑就像钢筋之于混凝土，起到一种筋材连结的

作用，保证了佛像虽屹立千年，仍熠熠生辉。

我们的祖先在没有系统理论的时候，就从经验中寻找到了答案，而我们学习了相关原理后，更应努力学以致用，解决身边的实际问题。这不，看似枯燥无比的土力学知识，不是还能解决艺术难题么。

### 1.3 盐撒西域

在我国的西北部，例如新疆部分地区、甘肃河西走廊、青海柴达木盆地，近几十年来土体盐碱化的程度日益严重（图 1-4）。因为土壤含盐量太高（超过 0.3%），而使农作物低产或不能生长，并逐渐演变为土地荒漠化，给生活在这里的居民带来了诸多不便。很长一段时间内问题的根源无法找到，现在人们终于发现，有些问题是修建的水库帮的倒忙。



图 1-4 我国西北地区常能见到的盐碱地

水利建设多是为了找水、蓄水，为生活在西部缺水地区的同胞解决饮用水困难的问题。例如甘肃红崖山水库（亚洲最大的沙漠水库）、新疆小海子水库（西北地区最大的平原水库）、青海拉西瓦水电站（北方地区装机容量最大的水电站）。但是过多地建设水库，尤其是平原水库，违背了自然界的规律。如新疆塔里木河上的胜利水库、多浪水库，呼图壁河上的大海子水库、小海子水库等，这里的坝基多为第四纪松散土层，土壤渗透性太好，水分留不住，水在土中以重力水的形式形成渗流，迁移到别的地方。而这些地区地质条件中富含的盐分，就随着重力水渗流过程不断迁移。但是也许有人奇怪，新疆的地下水位并不高，盐分又是怎么聚集在地表的呢？那是因为，一者，虽然地下水位不高，但由于土中毛细水的作用又进一步把下部的盐分带到地表，加之新疆局部地区特有的地表高温条件下（吐鲁番地区一向被称为“火洲”），上升的毛细水很快被蒸发，而盐分

则逐渐积累下来；二者，由于平原水库的建设改变了水的渗流路径，加剧了盐分搬运和上移的过程，因此加剧了很多地区盐碱化的程度，真是好心办了坏事。既然这些地区不适于修建平原水库，当初为何要大力推进平原水库建设？那是因为解放初期，由于交通困难、经济和技术力量薄弱，建造平原水库是一种因地制宜且多、快、好、省的措施，可迅速地解决发展生产对水利的迫切需要，并在一定时期内发挥了巨大的经济和社会效益。但随着时间的推移，很多平原水库老化，局部坝基渗漏严重，坝后排水不畅，坝后土壤次生盐渍化严重，引发土地沙化，流域下游水量逐渐减少甚至枯竭。

为了应对上述次生灾害，同时更好地利用水资源，发展水电和灌溉，必须有计划地积极修建山区水库。2010年8月11日，位于帕米尔高原塔什库尔干县境内，总投资18.06亿元的国家项目，新疆重点工程项目——下坂地水利枢纽工程，开始并网发电。至此，南疆片区工业、农业用电紧张、生态科学补水的问题得到有效缓解。新疆下坂地水利枢纽工程是塔里木河流域近期综合治理项目中唯一的山区水库工程，也是自治区重点水利工程，它的兴建可以代替塔里木河下游16座平原水库的蓄水，对促进地区经济发展和社会发展意义深远。

作为设计和科研人员，为国家建设而奉献，我们责无旁贷，但是如果不了解科学规律，不循自然法则行事，即使怀揣报国之情和爱民之心，也可能会因为建筑规划、基础设计等出现失误而抱憾终生。

## 1.4 掘金西部

这次，让我们具有国际化视野，把目光聚焦到大洋彼岸。1901年的美国，西进运动已经渐进尾声，哈米尔兄弟（24岁的牛仔阿尔·哈米尔和28岁的推销员柯特·哈米尔）在阿巴拉契亚山地区拓荒掘进的洪流中尚无成就。而当时，淘金热潮已然褪去，人们饥渴地寻找着另外一种看似不会枯竭的新宝库，即被称为“黑色黄金”的石油。哈米尔兄弟也随之改变生计，受雇到休斯敦附近的纺锤山顶上开采石油。他俩和雇主商讨的施工报酬是掘进1m深度得到6.5美元，那么掘进一口360m深的油井，雇主就要支付2300美元（相当于今天11万美金的购买力）。虽然诱惑巨大，但是这些财富一度只能是空中楼阁，因为当地土质以砂土为主，钻孔后很容易发生坍塌。就在两人经过一次又一次失败即将选择放弃的时候，突然想出了一个看似怪诞的招数，居然止住了钻井塌孔。他们是如何实现的呢？答案来自奶牛。没有听错吧？没有，确实是奶牛！牛仔又干起了放牛的老本行，并在油井旁边挖了一个泥塘，然后让奶牛们在那里栖息，疯狂地践踏着泥塘，而塘中产生的泥浆被兄弟俩用来涂抹在钻井壁上，他们发现这些泥

浆很快有了支护的作用，井壁不再有颗粒下落，塌孔的情况大大改善，钻井的深度也随之变深。终于，当掘进2个月后，钻井深度达到330m时（计划如果再掘进30m没油就放弃），黑色油柱一跃而起，冲出地面60m高，一个新的掘金时代拉开序幕！

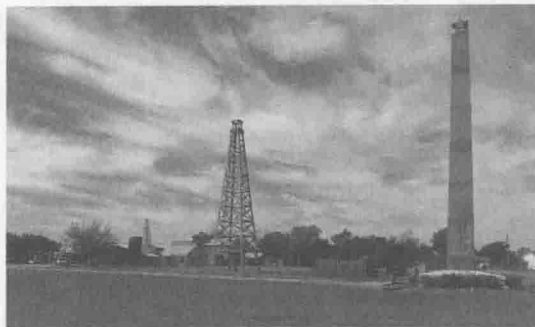


图 1-5 美国休斯敦附近纺锤顶山上的石油开采纪念碑

砂土容易坍塌，而泥浆这种看似没有任何强度的东西却为什么能够帮助钻井呢？要回答这个问题，首先我们要知道黏土具有触变性。黏土颗粒之间通过电键连结形成一种机械结构，黏土本身的黏聚力特性在一定含水率的时候得到了发挥，在无外力作用时，泥浆呈现出稳定固态，而一经触动（如摇晃、搅拌、振动），泥浆即刻变为流体，形体随着贮藏它的容器形状的变化而变化，当扰动停止以后，它的强度又会慢慢恢复，土的这种特性即被称为触变性。哈密尔兄弟用来涂抹钻井壁的泥浆就具备这样的特性。这类泥浆可以附着在土壁上，形成低透水性泥膜，一方面不但可以阻碍外部泥浆渗入地层，还能防止地下水浸出而稀释泥浆，另一方面又可以成为外部泥浆柱压力作用面，以抵抗地压来维护土壁稳定从而起到支撑钻井的作用，虽然强度不大，但防止砂土的塌落已是绰绰有余。这种看似很原始的小把戏，带来了施工界的技术革命，如今被称作“泥浆护壁”的这项施工技术已经广泛应用于岩土工程施工的各个角落，同时随着岩土技术的发展，施工过程中为了提高安全性和可靠性，不断有新的方法被应用于“泥浆护壁”技术的改良，这里就不作赘述了。

当然触变性带来的危害也可能是巨大的，挪威就发生过这样一件事情。那是1978年的4月29日，在里萨（Rissa）发生了20世纪挪威最大的一起滑坡。滑坡的土质是具有极端触变性的高灵敏度海相黏土（marine clay）。当时滑坡区域周围有开挖和打桩等作业，施工人员堆积了近700立方米的土在Botnen湖的岸边。没曾想，周边的土体受到扰动，开始破坏，进而引起整体滑坡。滑坡开始于湖岸沿线，并且向后发展到内侧，短短6分钟，引起了0.33平方公里区域场地的液化（相当于47个足球场），滑坡长度1.5公里，波及7个村庄，造成了600

多万立方米的泥石流。幸运的是，虽然当时有 40 个人被这场泥石流卷走，但只有一个人遇难，为什么呢？因为发生滑坡的是一种触变性的土，当丧失强度滑坡以后，土体液化得像融化了的冰淇淋一样（本来黏土还有黏结能力，但是对超灵敏土而言，其黏聚力也已丧失），对于人体的冲击力不大。图 1-6 就是滑坡过后，一座悬空在半山腰而少了地基的房屋。如果屋主知道这里的地基像“冰淇淋”一样易受扰动，胆子再大恐怕也不会在这儿选址造屋吧。



图 1-6 挪威里萨滑坡事故现场

从上述的正反两个例子了解了土体触变性特征后，我们再来看看土体触变性的细观机理究竟是什么：触变是由于片状的黏土颗粒集聚形成了一种絮状的网架结构，致使其内部的孔隙很大，在静止时水分子定向排列，黏粒之间的连结和胶结吸引作用而表现出来，但是一经扰动，水分子排列混乱而扩大了水的体积，使得黏粒漂浮于水中，呈现流动的状态。譬如弱触变性的土在受到外界影响时就会先发生结构破坏，但随着其内部土颗粒之间结构的调整和重组，不多时就又会恢复相对稳定的状态，因此工程人员根据这一特性，常把弱触变性黏土作为泥浆护壁的材料。而有些强触变性黏土，像流黏土（Quick clay）或勒达黏土（Leda clay），看上去好像是固体，但如果探究其结构可以看到，土中水的质量占据了 80%，也就是含水率达到了 400%！此时，黏土的颗粒之间实际上主要就依靠水的表面张力暂时维持状态，若是这种黏土受到扰动却被要求立刻恢复“生机”，则实在勉为其难了。

## 1.5 结论结语

在阅读了大量有趣亦发人深思的故事后，让我们来总结一下本记中讲述的土体与水密切相关的性质：依次是黏性土的晶体结构、黏性土的稠度、土中自由水



的渗透作用以及黏性土的触变性。这些都是笔者从学生时代所接触的土力学第一章中那些“枯燥”的知识中提炼出来的。土性记中的知识，使得土力学看起来不像力学，更像是物理和化学上的布道，但其中的原理性就变得更强大。而笔者通过很多重大工程问题中土体的宏观力学性质和现象与其所蕴含的微观机理解释综合地呈现给读者，以期能启发大家，希望各位也能够像一个高明的医者那样对工程问题实现标本兼治。

英国著名的建筑大师雷恩爵士 (C. Wren) 首先是一位和牛顿齐名的杰出数学家。1666 年伦敦发生大火，为了恢复伦敦城往日的生气，他积极投身于建筑事业，依靠其坚实的数学基础，完成了圣保罗大教堂和另外五十几个教堂以及其他公共建筑的设计与重建。当他去世以后，就安葬于圣保罗大教堂唱诗班席位之下的地穴内。教堂的门口建有其墓碑，刻有拉丁文的墓志铭：Si monumentum requires, circumspice (如果你想找他的纪念碑，就请看看你的周围吧!)。一个人在离开人世后竟能获得如此崇高的赞扬与肯定，他的事迹是否能更加激发起我们作为一个工程类科研和设计人员的斗志呢？而从本记所讲的那些例子中不难看到，土力学在土木、交通、水利、地质等诸多工程中都有应用，其使用范围之广，开拓意义之大，让我们总会不时发出“不识庐山真面目，只缘身在此山中”的感慨。



图 1-7 雷恩爵士和他设计的圣保罗大教堂

不过，楼阁非空中，基础很重要，为了实现自己的价值，也为后世留下浓墨重彩的一笔，让我们现在就开始去打好土力学的这个基础吧。

### 本记主要参考文献

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版). 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [2] 唐大雄. 工程岩土学 (第二版). 北京: 地质出版社, 1999.
- [3] 殷宗泽. 土工原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 张海彬. 石灰改良膨胀土的理论与实践. 铁道建筑, 2005, (10): 38-40.
- [5] 李生才, 邓文樵. 泥浆护壁机理的研究. 阜新矿业学院学报 (自然科学版), 1990, 9 (2): 11-15.
- [6] 毛海涛, 侍克斌, 马铁成, 王晓菊. 新疆平原水库透水地基渗流防治的重要性和有效措施. 水利与建筑工程学报, 2008, 6 (4): 6-10.
- [7] 梁晓叶, 王鹤亭. 关于新疆平原水库的讨论. 灌溉排水学报, 1984, 8 (3): 30-35.
- [8] 张国庆, 雷晓云, 潘婷. 奎屯河流域水资源开发利用现状分析. 新疆农垦科技, 2011, (2): 70-71.