

## 21 世纪环境岩土工程展望 Environmental geotechnology-perspective in the 21st century

方晓阳

(美国麻省州立大学环境工程和科技中心)

**文 摘** 论述了对环境岩土工程进行评价的重要性,同时讨论了常规岩土工程方法不适用研究土与环境相互作用问题的原因。阐述了笔者于 80 年代末提出的粒子能场理论,并特别强调其在敏感性生态岩土工程方面的应用:①土的干湿、胀缩和冻融循环机理;②土的污染和清污机理及过程;③放射性核废料和氡气的控制。最后,用两个最具挑战性的环境岩土工程为例来说明环境岩土工程问题的关联性和复杂性。

**关键词** 污染,清污,生态,环境,岩土工程,核废料,氡气,太阳能  
**中图法分类号** TU 411, TU 46<sup>+</sup> 2, X 5, X 7

**作者简介** 方晓阳,男,著名研究教授,博士,美籍华人。曾在普灵顿大学和理海大学工作,现在美国麻省州立大学环境工程和科技中心工作。80 年代初,与人合作开发出第一个有害有毒场地识别和表征专家系统;1986 年组织召开了第一届环境岩土工程国际学术研讨会;1989 年提出用于评价土-水-污染物相互作用的粒子能场理论,并研制出利用太阳电磁波激发技术的土清污系统,获得美国和其他国家专利。

*Hsai- Yang Fang*

(Center for Environmental Engineering, Science and Technology, University of Massachusetts- Lowell, Lowell, MA 01854- 2881, USA)

**Abstract** This paper explains why the environmental aspects of geotechnology urgently need to be evaluated. Also discussed is why the current approach in geotechnical engineering is not effective for studying the soil- environment interaction. Refinement of particle- energy- field theory proposed in late 1980' s by the author is made with special emphasizes on the applications to sensitive ecological geotechnology, such as: (1) mechanisms of wet- dry, swell- shrinkage and freeze- thaw cycles of soil; (2) soil contamination and decontamination mechanisms and processes; (3) controlling the radioactive nuclear wastes and radon gas. Finally, two most challenging environmental geotechnical projects as examples are used to illustrate how interdisciplinary and complex nature of environmental geotechnical problems will be.

**Key words** contamination, decontamination, ecology, environment, geotechnology, nuclear wastes, radon gas, solar energy

### 1 引 言

岩土工程本来就很复杂,随着人口增长、生活水平的提高和工业化进展,将变得更加复杂。大量以前认为不合适居住和其他工程的土地也被利用,而使空气、水和土地受到污染。在各种环境条件下,目前用于分析土性的土力学原理和方法已受到挑战。因此,环境岩土工程发展迅速,它是一门交叉科学,覆盖了在大气圈、生命圈、地水圈、岩石圈及地质微生物圈等各种环境下土和岩石及其相互作用问题。地质微生物层是指树根特性和细菌活动及其对水土体系工程性质有影响的土层。

自从第一届环境岩土工程国际学术讨论会于 1986 年召开以来,环境岩土工程得到迅速发展,不仅覆盖了传统岩土工程问题,而且延伸到<sup>[1]</sup>: ①有害有



毒废料控制, ②湿地、海岸边、疏浚和海相沉积物, ③干旱和沙漠地区, ④敏感性生态地质环境及考古技术。在环境岩土工程领域,现在主要有两个分支:地质环境工程和生态环境工程。地质环境工程主要强调有害有毒废料控制系统的管理和修正、填料场的选择、填料的稳定分析和土清污技术。生态岩土工程研究环境岩土工程的敏感性生态和地质方面。

当前岩土工程计算方法主要有: ①阿太堡界限和比重等土质参数对同一种土在任何条件下都假设为常数, ②用荷载作为破坏控制标准, ③通常任意假设土的应力应变关系, ④土的含水量只包含重力水(自由水),而不包含其他孔隙水,如环境水(双电层水、结合水、渗

到稿日期: 1999- 01- 01

透水), ⑤在分析和计算中, 只考虑了土体静水势能, 而未考虑热势能和电势能问题。因此, 我们提出了一个分析各种环境条件下土性的统一方法——粒子能场理论<sup>[2]</sup>。本文的目的是推进粒子能场理论在各种环境条件下水土性质的应用。

2 粒子能场理论

2.1 假设和方法

粒子能场理论创建于 80 年代末, 包括基本粒子、粒子系统和能场三部分, 该理论的假设: ①物质世界由像原子、离子和分子的粒子组成, 粒子依据其电磁力和结构, 可能相互吸引或排斥, ②键能(如离子键、共价键、化学键)和链(如阳离子、水偶极、对称阳离子)控制粒子间的应力-应变-强度特性和耐久性, 能(动能、势能、热能、电能、磁能和放射能)使粒子产生相互运动, ③粒子系统可以是固态(吸力>排斥力时)、液态(吸力≈排斥力时)和气态(吸力<排斥力时)。

粒子系统是指粒子群性状, 能量变化是粒子运动的主要原因。能源可以从面力和体力获得, 由面力和体力(如重力)产生的能源包括势能、动能、热能、电能、磁能和放射能。能场是指一个能量对另一个能量的反应场, 也可以说成是能量的影响领域, 粒子能场是粒子面力和体力作用的集合。

2.2 粒子能场和粒子性质

(1) 能场: 从实用上讲, 能场或粒子能场由机械能场(势能和动能场)、热能场、电能场、磁能场和放射能场五部分组成。除机械能场外, 均归纳为多介质能场, 电能场是所有能场的中心。

(2) 粒子间强度和键: 在组成粒子的原子和分子中存在两种键, 即主键和次键。所有粘土粒子都带有电荷, 当两个粒子面面排列时, 在负电荷面和介于可交换阳离子之间存在吸引力。如果相邻面的原子非常接近, 而使其外电子层重叠, 就会产生排斥力。当各种吸引力和排斥力叠加后, 就得到净相互作用力。

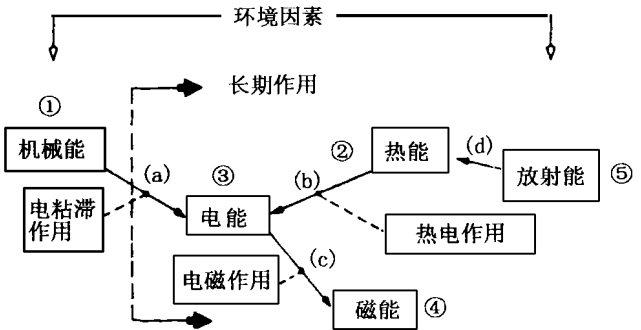


图1 能场的相互关系及其连接

Fig. 1 Interrelationship of energy field and its linkages

(3) 各种能场的连接: 各种能场的连接如图 1 所示, 表 1 给出了分析各种能场粒子性状所需的定律、理论和原理。由于环境条件的变化, 土的性质也会变化, 就应采用不同的分析方法。

表 1 分析各种能场下粒子性质所用定律和理论

Table 1 Law/theory for evaluation of particle behavior in various energy fields

环境区	各种能场的主要组成	分析时所用定律和理论
I	机械能场(势能和动能): 荷载, 变形, 速度, 加速度, 重量, 质量, 波, 声, 流体运动	牛顿定律, 虎克定律, 运动定律, 达西定律
II	热能场: 水合作用, 湿润热, 运动扩散力, 热导和热阻, 热渗透	热动力学定律, 富里叶定律, 一般气体定律
III	电能场: 极化作用, 质子迁移, 电动力, 电导和电阻, 电泳, 电渗透	安培定律, 库仑定律, 焦耳定律, 欧姆定律
IV	磁能场: 电磁作用, 强磁性, 电磁感应, 电磁波	法拉第定律, 雷兹定律, 比奥-萨法特定律, 高斯定律
V	放射能场: 衰变作用, 放射性, 核反应, 基本力	原子物理学, 核物理学

2.3 能场和环境

控制物态变化的三个基本热量变化是: 熔化热(从固态到液态)、升华热(从固态到气态)和蒸发热(从液态到气态)。当物态变化时, 物质就会吸收或释放能量(如图 2 所示)。

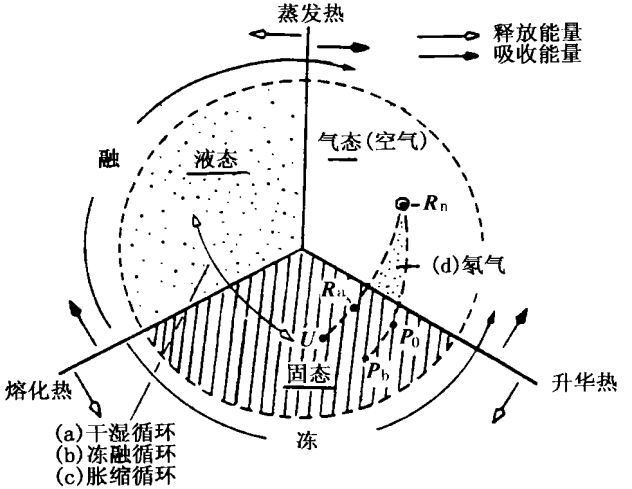


图2 热能场作用下的物态

Fig. 2 State of matter in thermal energy field

(1) 固-液-气相界面: 固-液-气相物态包括干湿循环、冻融循环、胀缩循环和氦气。用图 3 来说明干湿循环和胀缩循环的界面机理。干土变湿(膨胀)是多介质能场作用的结果, 而湿土变干(收缩)仅是热能场作用的结果, 因此, 胀缩循环是不同能场作用的结果, 从而不可逆。同样道理, 冻融循环也有不同机理; 氦气未经过液态阶段而从固态直接到气态的变化也与此类

似。图 3 同时表明, 对同一种土, 含水量相同时, 其工程性质不一定相同, 而取决于水流方向。细粒土, 特别是污染土<sup>[3]</sup>的水流运动一般属于物质迁移运动。

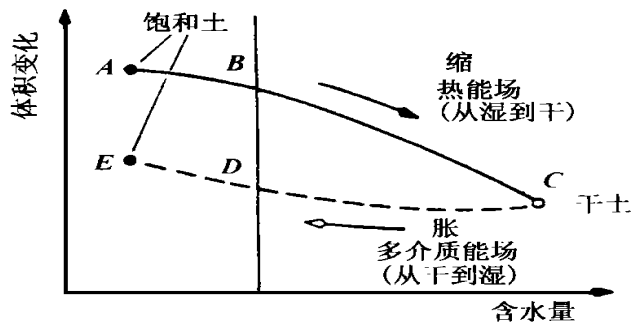


图 3 细粒土的水流动方向和体积变化的关系  
Fig.3 Direction of water flow affects volume changes of fine-grained soil

(2) 破坏前和破坏阶段的关系: 大多数岩土工程问题主要考虑荷载作用下的破坏, 但荷载不是唯一的控制因素<sup>[4]</sup>。两种不同情况下破坏前和破坏的相互关系如图 4 所示。可看出, 破坏前条件下材料的使用期限是可控的, 一旦材料达到破坏点后人们已无能为力。

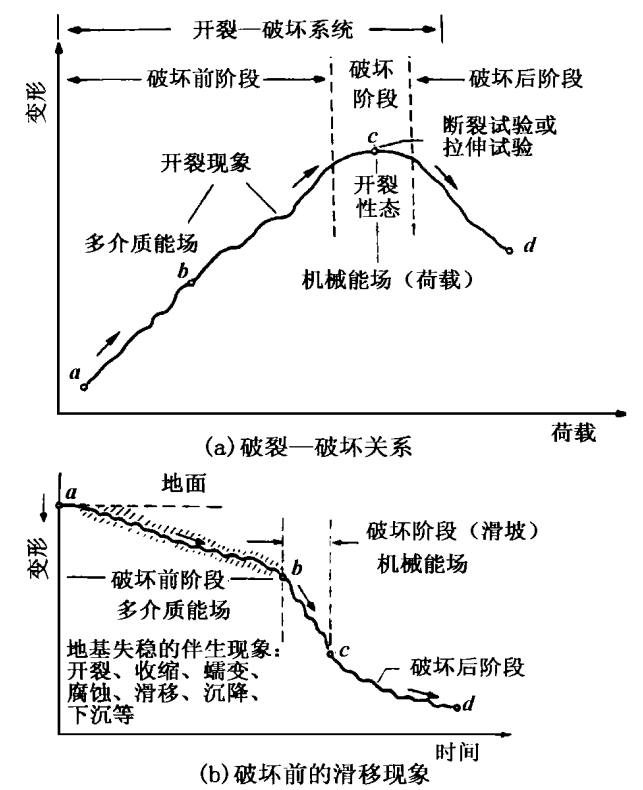


图 4 荷载作用下土的三个基本破坏条件示意图  
Fig.4 Schematic diagram of three basic failure conditions of soil subjected to an applied load

2.4 各种能场下粒子性质

(1) 机械能场

当前岩土工程的理论和方法主要是根据机械能

(势能、动能和动荷载) 确定的, 的确, 机械能对岩土工程性状起着重要作用, 但机械能只能决定问题的短期性状。

(2) 环境(热-电-磁-放射)能场

随着时间的推移, 土的性质不再只是由机械能场控制, 环境因素(如温度变化, 干湿、胀缩、冻融循环, 污染等)将改变土粒子性质, 因为热-电-磁能场与自然环

境关系密切, 所以它们也会影响土的性质, 且这种影响是长期的。  
a) 热能场 在水土体系里热能场有三个基本特征: ①湿润热力和运动扩散力, ②热转换作用, ③物态。当土变湿时, 湿润热是吸水物质的热转化, 这种现象发生在细粒土中, 特别是胶体中。运动扩散力由形成连接力的结构产生, 可用不可逆过程的热动力学估算。在大多数土中, 热转换过程是传导或对流或两者兼而有之。热一般垂直向地面运动, 而不是向下运动。在不扰动条件下, 固体粒子、液相和气相是分散排列的, 而在重塑条件下则是以絮凝结构排列, 现场条件下的土处于两者之间。

b) 电能场和电磁能场 水土体系中电能起着重要作用, 基本特性有: 极化作用、质子迁移、电粘滞作用、电动作用和电磁能。

c) 放射能场 与放射能场有关的岩土工程问题有: 核废料的处理、放射性和有毒氢气的控制、核能的利用和  $\gamma$  射线的利用。

(3) 多介质能场

a) 电粘滞作用(图 5(a)) 在水力梯度(势能)作用下, 水流进带负电荷的粘粒土孔隙中是热电能场作用结果, 可交换阳离子在下游分开而形成势流, 而势流对可变换阳离子产生了电延滞力。Fang<sup>[5]</sup>用这个概念解释土体内部开裂机理。

b) 热电作用(图 5(b)) Seebeck 于 1822 年发现了直接把热能转变为电能的方法, 即热电作用。

c) 电磁作用(图 5(c)) 热电能与自然水土体系密切相关, 由于水土与环境关系复杂, 热电能在这体系中的分布是随机的, 离子运动方式也是随机的。当水土体系通电后, 粒子保持随机运动, 但能场边界会改变。由于这个原因, 当两个或多个运动电荷作用于这体系时, 热电能可能转变为电磁能。事实上, 水土体系也可能本身就有电磁能。

2.5 粒子能场理论的应用和评述

(1) 应用 粒子能场理论可用来识别和表征岩土工程问题的每个阶段, 有下列三个应用领域: ①问题的识别和分类(表 2), ②修正室内和现场试验或理论和试验结果, ③预测长期性状。

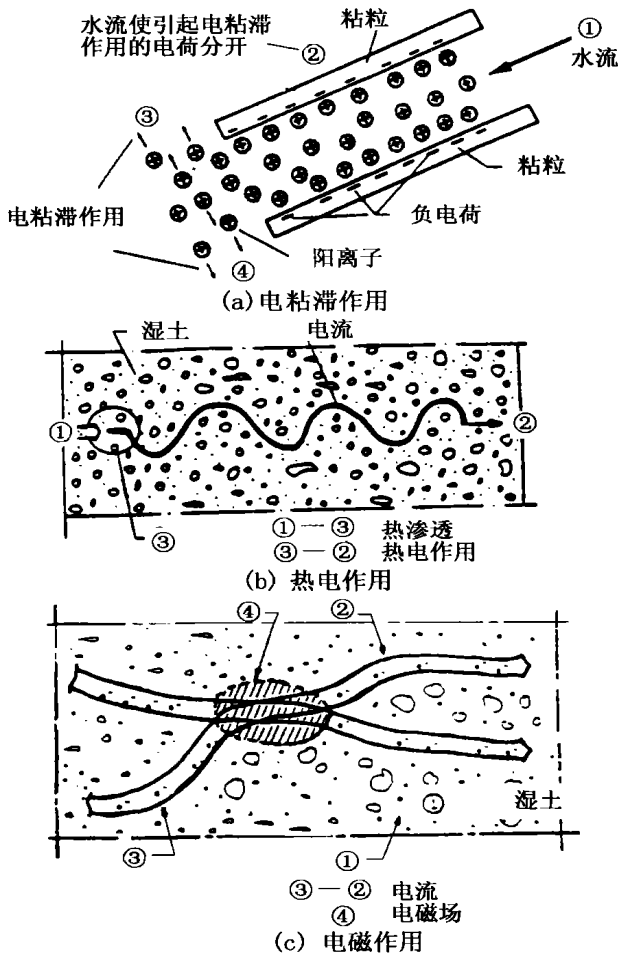


图 5 多介质能场下土的性质

Fig. 5 Soil behavior in multimedia energy field

(2) 评述 粒子能场理论覆盖了岩土工程问题和方法的大部分领域,目前的机械能场方法只是其中的一部分。图 6 为对土性相对影响的比较,图 7 为环境对土的利用期限的影响。机械能控制影响土性的主要因素,但只是短期影响,而环境因素是长期影响。粒子能场理论是将无关的群体、能场和各种环境连接为一个有关的系统的桥梁。

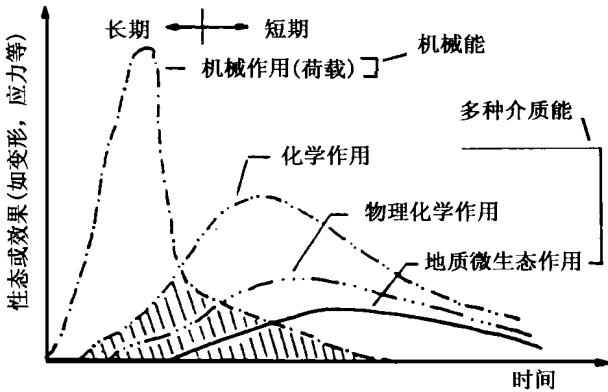


图 6 土性相对影响的比较

Fig. 6 Schematic comparison of relative effects on soil performance

荷载/环境因素	能场	控制破坏条件	性态
土性	荷载因素	机械能	破坏条件
	环境因素	热能 电能 磁能 放射能	破坏前和破坏条件
			短期效果
			长期效果
			利用期限

图 7 荷载/环境因素对土的利用期限的影响

Fig. 7 Effects of load/environmental factors on the useful life of soil

表 2 用粒子能场理论识别环境岩土工程问题

Table 2 Identification of some environmental geotechnical problems based on particle energy field theory

问 题	粒子能场	备 注
①透水性		
宏观粒子	势能	达西定律
微观粒子	多介质能	质量传递现象(能传导)
②体变		
缩	热能	图 3
胀	多介质能	
③吸着作用		
吸收作用	动能	类似浸透作用
吸附作用	多介质能	
④压实		
干边	机械能	含水量与密度的关系
湿边	多介质能	
⑤固结		
主固结	机械能	太沙基理论
次固结	多介质能	
⑥超固结压力		
荷载引起	机械能	卡萨格兰德方法
环境引起	多介质能	图 8
⑦应力-应变-时间关系		
应力软化	多介质能	
应力硬化	多介质能	
蠕变	多介质能	
⑧破坏准则		
破坏前	多介质能	图 4
破坏阶段	机械能	莫尔-库仑准则
⑨摩擦力		
宏观粒子	机械能	粒状土
微观粒子	多介质能	粘土
⑩液化		
宏观粒子	机械能	粒状土
微观粒子	多介质能	粘土
⑪土压力		
主动	机械能	朗肯和库仑理论
被动	多介质能	
静止	机械能	
⑫滑坡		
破坏前	多介质能	图 4(b) 和图 9
破坏	机械能	

### 3 敏感性生态岩土工程

地球环境有四个层次: 大气圈、生命圈、地水圈、岩石圈, 它们相互关联, 形成正常环境, 统称为生物圈。生态岩土工程是环境岩土工程的一部分, 通常有三类问题: ①与地质、气候有关的问题, 如泥流、沙漠、湿地, ②与健康有关的问题, 如酸雨、核废料; ③与文化有关的问题, 如考古。它们对生态环境因素相当敏感, 都直接或间接地与环境岩土工程有关。

#### 3.1 敏感性生态岩土工程问题的自然和人为因素

##### (1) 自然因素

与岩土工程有关的地球变暖和温室效应应包括: 大气温度上升、海水位上升和干旱等。地球变暖也与厄尔尼诺现象有关。据 1998 年记载, 厄尔尼诺现象引起下列不正常现象: ①暴雨引起的山洪和泥石流; ②沿海岸线高潮海浪; ③严重干湿和冷热循环引发干旱和冰雹; ④飓风和雷暴雨的袭击; ⑤干旱加雷暴雨引发的大火。

##### (2) 人为因素

a) 酸雨 酸雨主要由燃煤电厂、汽车尾气和工业设施的各种污染物散发到空气中而产生。这些排放物主要为二氧化硫、氮和其他气体, 由氧和水汽化物组成, 在空气中形成硫酸、碳酸、盐酸和其他酸性物质。

b) 酸矿物质排放 矿井中的硫化铁被氧化成硫酸, 硫酸溶解在水中, 从矿井中排出, 这些酸性水流入溪流、湖泊或地下, 从而引起水土污染。酸矿水是一种化学复合液, 没有定量的成分, 主要传递和沉淀溶液中的无机物。这些酸性矿水处于碱性到强酸性之间。矿井中不可溶的固体小颗粒通过水流流出矿井, 大颗粒则沉淀下来, 使水流变缓, 更小的颗粒则悬浮在水中相当长时间, 然后排到水库或井中。

c) 海洋污染物和疏浚材料 1995 年国际保护组织和世界银行建议全球通过必要的海洋保护, 努力保持海洋生物多样性。疏浚材料是海相沉积物, 是承载力、抗剪强度和渗透性低的超饱和、超软弱细颗粒淤泥质粘土, 含有大量的有机物、原油沉淀物、海洋残余物、气体和气泡、有害有毒污染物。

d) 放射性核废料和氦气 放射性核废料和氦气是生态岩土工程问题的主要部分, 将在下文中讨论。

#### 3.2 敏感性生态岩土工程问题的遗传诊断

本文所用的“遗传诊断”一词定义为材料下列方面的检验和评估系统方法: ①矿物成分, ②可交换离子的类型和浓度, ③材料对环境的敏感性和分解可能性, ④环境历史, ⑤强度历史, ⑥目前的荷载和环境条件。可用粒子能场理论来识别和表征这个问题的每个阶段。因为传统的岩土工程方法不能有效地分析某些敏感性

生态岩土工程问题, 所以, 遗传诊断是一个有效的方法。

##### (1) 抗剪强度分析

土的应力-应变-强度不是固定不变的, 如果环境条件改变, 随弹性到塑性条件变化, 也随软化或硬化条件变化, 因此, 应力-应变-时间关系不能概括为一个数学模式, 也不能随意假设为弹性、塑性或粘弹性。可用遗传诊断方法来理解和解决环境条件下土结构问题的基本稳定性。环境条件下抗剪强度分成原材料固有抗剪强度和当前环境条件下引起的抗剪强度两部分, 前者由矿物结构、粒子大小和形状、粒子间的连接强度决定; 而后者则由下列环境因素引起: ①干湿循环和冻融循环, ②淋溶作用, ③吸附作用, ④可交换离子, ⑤地质微生物因素。

##### (2) 沉降分析和先期固结压力

在传统的沉降与时间曲线中, 太沙基固结理论只考虑了机械能场中的荷载, 而没有考虑多介质能场中的生物和物理-化学因素, 后者对超固结粘土更为关键。

如果最大的粒间压力大于当前上覆压力, 则称为先期固结压力或过去压力, 地质作用、孔隙压力的改变、土的结构和环境条件均会引起预固结效果。估算先期固结压力的方法均从机械能出发, 而不问其产生的原因。超固结粘土形成原因目前还不太清楚, 也没有有效的方法可用。从图 8 可以看出, 荷载引起的超固结压力大于环境引起的超固结压力, 而且后者所需时间更长。另一方面, 开始破坏所需时间表明, 环境引起破坏时间更长。在这两种情况中, 确定开始破坏时间的方法也将不同, 换句话说, 在加荷情况, 应该采用机械能场准则, 如果考虑环境因素影响, 则应该采用多介质能场准则。

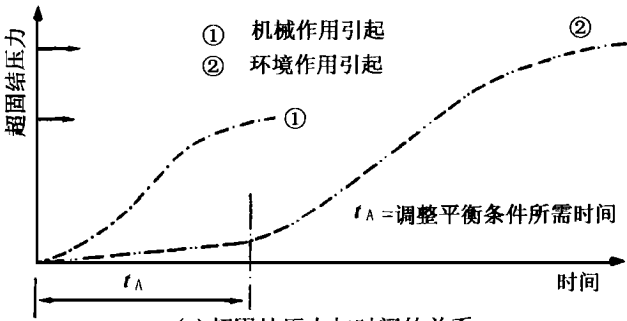
##### (3) 土坡稳定和滑坡

地基稳定是多介质能场作用的结果(见表 2), 下面的例子比传统土坡稳定更为复杂。

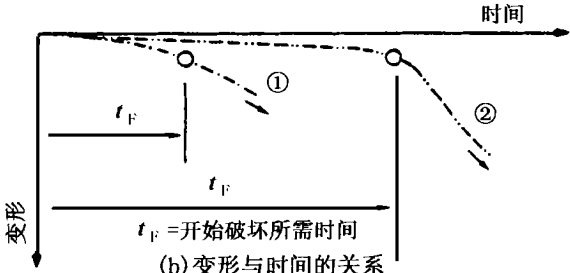
a) 泥流 泥流是一种重要的滑坡类型, 引起泥流的原因和破坏机理复杂, 是一种没解决好的滑坡问题。传统的极限平衡或极限分析方法不适用分析泥流。图 9 从粒子能场理论观点说明泥流的破坏机理。

b) 泥石流 泥石流和泥流相似, 泥流是对细粒土而言, 泥石流则包括碎石、砾石和漂石等大颗粒材料。泥石流的特点特别, 在特殊的地理、环境条件和气候出现。

c) 固化泥流 固化泥流有两种: ①由于暴雨上部土变湿, 下部土仍处于干燥状态, 引起干湿界面滑坡, ②上部土融化, 下部土仍处于永久冰冻状态, 引起融冻界面滑坡, 这两种类型的破坏面均在界面上。湿土区深度可按 Beattie 等建议方法<sup>[6]</sup>计算; 冻土深度可用 Stefan 和 Berggren 方法计算或用电阻法测定。



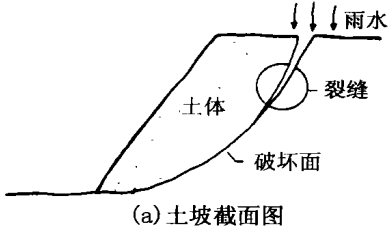
(a) 超固结压力与时间的关系



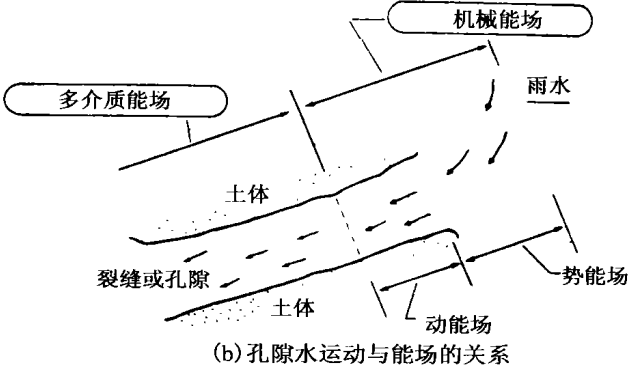
(b) 变形与时间的关系

图 8 超固结粘土形成机理

Fig. 8 Mechanism of overconsolidated clay deposits



(a) 土坡截面图



(b) 孔隙水运动与能场的关系

图 9 用粒子能场理论解释泥流破坏机理

Fig. 9 Mudflow failure mechanism explained by the particle energy-field theory

(4) 人工土

天然土经常并不能适应建筑目的, 否则会引起过早破坏或渐进破坏, 人工土的原理和方法见图 10<sup>[7]</sup>。该方法的关键在于控制土元素的离子替换或增减以满足工程需要, 采用洗选方法把天然土变成等离子土(纯土)。

天然土和等离子土之间特性差异的试验包括<sup>[8]</sup>: 阿太堡界限、渗透性、抗剪强度和固结。这些资料可用来选择适当的土中离子类型以满足各种工程应用目的, 这样的改良土适于有害有毒控制设备、止水工程,

同时也能用于土体加固和注浆。

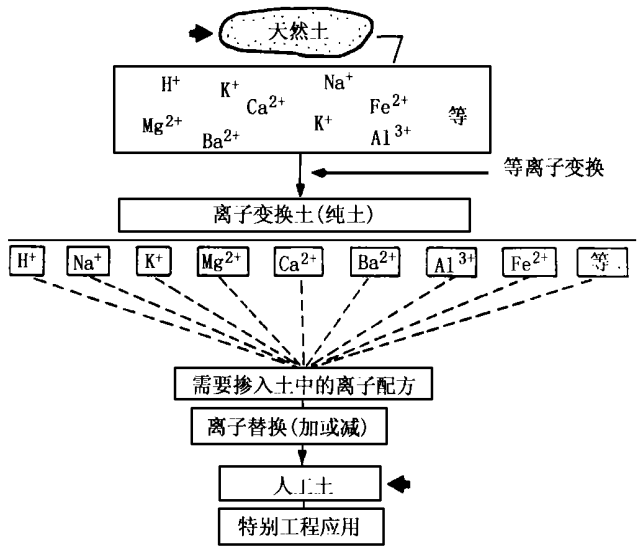


图 10 人工土的原理和方法

Fig. 10 The concept and approaches for man-made soil

4 核废料和氦气及污染和清污机理

4.1 放射性核废料

(1) 核废料来源

在所有自然或人造废料中, 放射性核废料的性质不稳定和不可预见, 因而也最复杂。在分解过程中可改变形态和性质, 它不仅自身是污染物, 且很容易污染周围环境。为了有效控制这类废料, 必须了解放射性与环境相互作用机理, 特别是与土-岩石-水体系的相互作用机理。自然和人为因素是核废料的两个主要来源, 自然因素主要来源于铀, 人为因素是采矿、核电厂反应堆和核武器, 其中核电厂是主要来源。

表 3 放射性核废料和普通废料特性的比较

Table 3 Comparison of general characteristics between radioactive nuclear waste and common waste

特征	放射性核废料	普通填埋式城市固体废物
(1) 矿物结构的稳定性	不稳定	稳定
(2) 有害	是	是
(3) 有毒	是	可能是
(4) 强烈	有时	一般不
(5) 衰变过程	复杂	相当简单
(6) 与环境的相互作用	尚未很好了解	了解比放射性材料好得多
(7) 认识	少	较多
(8) 当前研究	少	先进
(9) 对人类健康的影响	大	小
(10) 控制方法	少	已有

(2) 有效控制核废料方法欠缺的原因

除核废料的不稳定性和不可预见性外, 影响核废料控制的另一个重要因素是公众缺乏了解和觉醒, 也

无法可依,只是政府行为。表 3 列出了放射性核废料和普通填埋式城市固体废物的一般特性的对比。

(3) 放射性废料与环境相互作用机理

原子核由质子和中子组成, 尽管一个元素的所有原子核的质子数相同, 但放射性同位素中子数不同。原子量总是小于中子、质子和电子质量之和, 失去质量的能当量称为核的连接能。连接能越大, 核就越稳定。核不稳定时, 就会衰变成稳定状态。在衰变过程中, 核放射随时间减少, 每种核放射由半衰期决定。有五种放射衰变作用:  $\gamma$  衰变、 $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变、电子俘获和发射。放射性原材料是从铀衍生的, 而铀来源于火成岩, 铀转化为镭需很长时间。已提出从岩石和矿物中释放铀、镭和氡气的机理。

(4) 核废料控制方法评述

a) 贮藏 50 年内放射程度将减少 50~ 100 倍, 通过把核废料贮藏在安全地方以减少放射程度。

b) 固化 发展把核废料转变成固体的技术, 以减少其活动性和扩散性。

c) 隔离 把核废料贮藏在隔离人类的地方, 如深海海底、矿井底、遥远的不毛之地和沙漠地区。

d) 安置 把核废料安全运输和安置在贮藏室内。为了开发有效放射性废料处理系统, 必须考虑下列三个基本准则: ①废料必须安置在隔离的贮藏环境里; ②装运箱和外包装材料必须保障放射性原子核不渗漏; ③岩层应该不可渗漏。

在研究核废料和周围岩石相互作用时, 最感兴趣的是确定什么岩石对核废料的反应小和敏感性差, 能保持不渗漏状态。研究表明, 有效的是硅酸盐类岩石。核废料与地下水和有关的岩土工程性质的相互作用及放射性废料先进处理技术得到很大发展<sup>[9,10]</sup>。

4.2 有害有毒放射性氡气

无色无味的放射性有毒氡气来源于岩层铀和镭的分解, 渗入土水体系中, 最终扩散到大气中。氡气任何时候都会与岩土、矿物质、土水和空气相互作用, 是个典型的多介质能场问题。氡气是惰性气体, 因此缺乏正常化学和生物反应能力, 它的分子只有一个原子, 不与其他元素相混, 但是, 最近研究发现<sup>[11]</sup>, 在土、水和空气中可找到氡气, 并受温度、pH 值、离子交换反应、氧化还原反应等环境影响。

(1) 氡气与环境的相互作用 氡气具有独特的性质, 其原体是固体元素镭, 氡本身是气态, 其裂变物钋和铅也是固体。镭的半衰期是 1620 a, 而氡气只有 3.8 d。氡从岩层中释放而渗入土- 水- 空气体系分三个阶段: ①氡从原体岩转移到变质岩; 原体岩是火成岩, 变质岩有石灰石、大理石等。②氡通过  $\alpha$  反冲作

用从岩石和矿物中释放。③氡通过吸附作用与尘埃和悬浮物相互作用, 含氡尘埃和悬浮物是复合粒子, 要用粒子能场理论来分析其性质。

(2) 氡气的性质和调节方法 在六个惰性气体中, 氡的原子数最大, 但电离能最小, 这就是氡气不稳定和易与土- 水- 空气体系混合的主要原因。惰性气体原子量和原子数与电离能的关系如图 11 所示。控制放射性有毒氡气的方法有被动法和主动法<sup>[12,13]</sup>。被动法试图把氡气保存在贮藏室内, 主动法是阻止氡与地岩接触或控制氡- 水排出系统<sup>[11]</sup>。

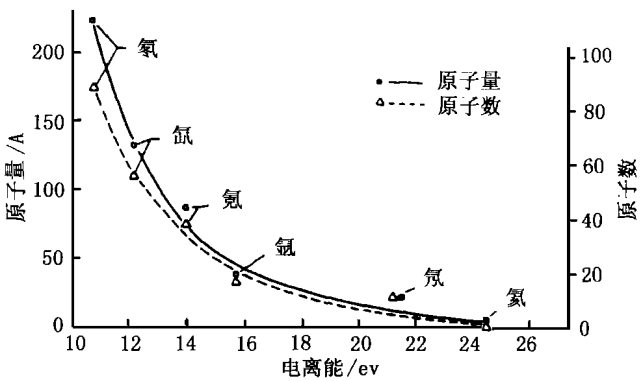


图 11 惰性气体原子量和原子数与电离能的关系

Fig. 11 Atomic weight and atomic number vs. ionization energy of noble gases

4.3 土污染和清污机理

早期的污染土治理方法主要是从场地开挖和清除污染土, 并把它们在填埋场里填埋起来。现在治理有害有毒废料场方法已有改进, 重点是使用电动法、电化学法、电磁法或固化法在原地处理。

(1) 影响空气- 水- 土污染的关键因素

①尘埃: 尘埃是各种材料分解产生的, 其成分复杂易变, 有的是液态悬浮粒和烟雾, 有的是固态烟尘, 还有的是固体和液体凝聚物。②悬浮物: 当尘埃吹落到水里时, 就成了悬浮物。尘埃- 悬浮物通过吸附与环境相互作用。

(2) 污染和清污机理

所有固体或土矿物粒子都会吸附气体和溶解物, 吸附特性取决于水土体系的粒子表面积、温度和压力。表面积越大, 吸附能力就越强, 所以细粒土比粗粒土吸附力强。温度降低和压力增大, 吸附量就大。土污染和清污与吸附压力的关系如图 12 所示。从此可以看出, 环境会影响吸附压力, 其变化范围为 6.25~ 2500 kg/cm<sup>2</sup>。许多情况下, 吸附压力很大, 很难将污染物和土粒子分开。污染和清污过程中的吸附压力也不同。大多数情况下, 清污时需要大得多的压力才能将污染物和土粒子分开。

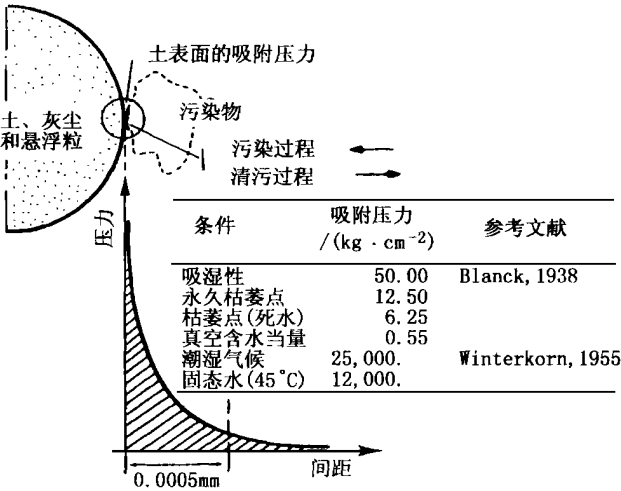


图 12 土污染和清污机理与吸附压力的关系  
Fig. 12 Soil contamination and decontamination mechanisms as reflected on the characteristics of adsorption pressures

(3) 电动作用(线性一维电流)

用亥姆霍兹经典理论分析电动现象时必须注意下列局限性: ①该理论基于胶体的双电层厚度, 适用于孔隙较大和界面双电层扩散小的情况, ②该理论只适用原状或重塑粉质粘土, 不适用于垫层的混合均匀粘土或有机质土。

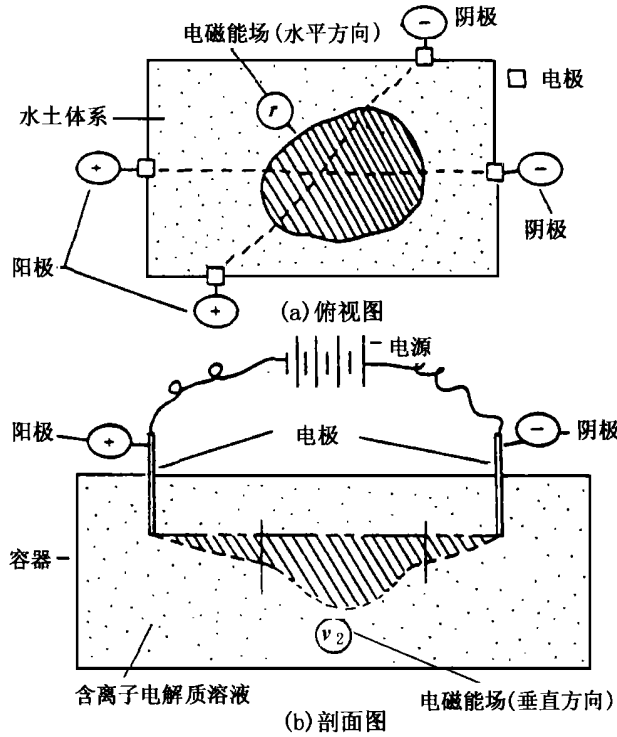


图 13 室内电磁作用示意图  
Fig. 13 Schematic diagram of electromagnetic process in laboratory condition

4.4 电磁作用及其应用

电磁能用于清除土污染的想法和理由是基于如下

物理原理: ①根据库仑定律, 静止的两个电荷之间存在大小相等的作用力, 运动电荷作用力与静电荷作用力之间存在一个差值, 总力可分成电荷力(取决于电荷大小)和电磁力(取决于电荷速度)两部分。②当磁力作用在运动电荷上时, 就存在磁场, 磁场吸引力等于作用于以 1 m/s 的速度垂直磁场运动的 1C 电荷上的力。

根据物理原理和实用观点, 电磁力会增加能场的影响面积, 从而导致水土体系中更多的离子交换。已研制出测定水土体系电磁力的简单试验设备和方法<sup>[1]</sup>。把长约 7.25 mm 和 15 mm 的土样放在塑料管内, 并一起放在两个电解槽之间(如图 13 所示), 施加电流。图中阴影部分是电磁能场, 水土体系的水将从阳极向阴极流动, 并测记时间和出水量。电动和电磁作用的主要区别(如图 14 所示)是: 电动是一维线性电流作用, 电磁是三维随机电流作用, 其他特性见表 4。图 14 还给出了这两种方法的试验结果, 它们存在明显的差别。

表 4 电动和电磁方法的比较

Table 4 Comparison characteristics between electrokinetic and electromagnetic processes

项目	电动方法	电磁方法
基本理论	欧姆定律, 胶体化学理论	法拉第定律, 雷兹定律, 比奥-萨法特定律
土颗粒大小限制	均质、极细粒土	各种土
饱水性	视土的双电层厚度而定, 最好饱和	饱和或非饱和
影响范围	表层	深层
电驱动力	低	高
能源	电	电
污染物的特性和识别	不能	能

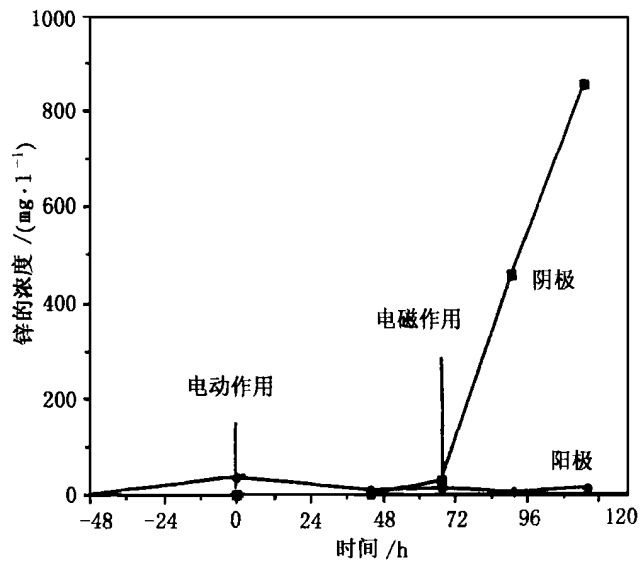


图 14 电动和电磁作用的室内试验结果比较  
Fig. 14 Comparison of laboratory test results obtained from electrokinetic and electromagnetic processes



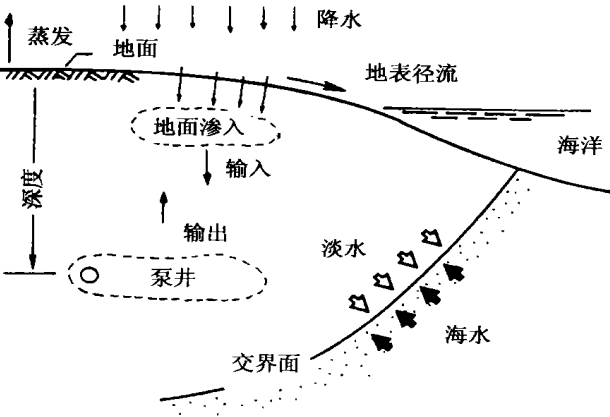


图 15 自清污方法控制海水入侵示意图

Fig. 15 A schematic diagram illustrates controlling saltwater intrusion based on selfdecontamination concept

4.5 土自清污作用机理

自然界生态系统和环境循环一般是处于平衡状态的, 同样, 自然界水土体系具有自清污能力, 包括沉积作用、中和作用、蒸发作用、渗透作用、吸附作用和抑制作用。水、地面和土体的自清污作用因素列于表 5, 如果污染量小于自清污能力, 理论上讲污染对人健康没影响。

自清污系统的基本原理是保持自然生态系统或环境循环的平衡。以海水入侵作为一个自清污例子(图 15)。如果渗入地下的雨水量等于或大于地下水输出量, 那么海水与淡水交界面保持不变, 这表明地下水将不被海水污染。

表 5 土自清污作用影响因素

Table 5 Factors for soil decontamination process

领域	自清污作用
①空气中(大气圈)	一些污染物被风吹走或暴雨冲走
②地面(生命圈)	与树和植物相互作用, 地表径流, 蒸发和蒸散, 渗入地下
③土中(岩石圈)	吸著作用, 吸收作用, 吸附作用, 中和作用, 离子交换, 氧化还原反应, 持着和淋溶作用
④水中(水圈)	和其他离子中和作用, 沉淀, 冲走
⑤地质微生物圈	一些污染物被细菌吞食和被植物吸收

4.6 太阳电磁能系统及其应用

热电、电动和电磁系统需要电源作为输入能, 如果采用太阳能作为能源, 将热能转变为电能(如图 5(b)), 再变成电磁能(如图 5(c))。为了验证太阳电磁作用的可能性, 进行了简单室内试验, 其流程如图 16 所示。本项研究目的是: ①提出热贮藏量原理, ②开发廉价的太阳能接收和贮藏系统, ③开发太阳能变成热电磁能的转换系统, ④应用推广。

(1) 太阳电磁作用

a) 利用天然土作为太阳能接收和贮藏系统 根据热贮藏量原理, Fang<sup>[14]</sup>提出利用天然土作为廉价的

太阳能接收和贮藏系统, 为检测热贮藏量和其他有关参数, 给出了温度和时间关系示意图(图 17)。

b) 热贮藏量 从图 17 可以看出, 从 a 点到 b 点是加热过程, 测出某一深度土体吸收的热能,  $\Delta T_1$  表示加热时间, 从 b 点到 d 点地面不再输入热能, 但仍能测出该深度处吸收的热能,  $\Delta T_2$  表示这段时间, 从 d 点到 e 点是释放阶段,  $\Delta T_3$  表示其时间, 土的热贮藏量定义为 b, c, d 和 e 点下的面积。 $\Delta T_2$  和  $\Delta T_3$  越大, 热贮藏量就越大。

c) 电磁作用的发展(图 13) 增大电驱动力促使水土体系中的水、气泡或污染物排出, 太阳能转化成热能(如图 5(b)) 和电磁能(如图 5(c))。

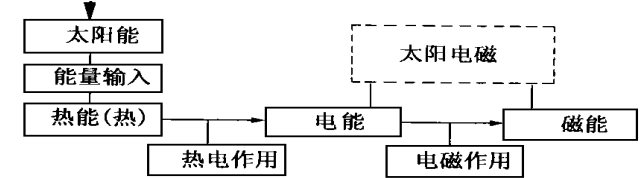


图 16 太阳电磁作用流程图

Fig. 16 Flow diagram of solar- electromagnetic process

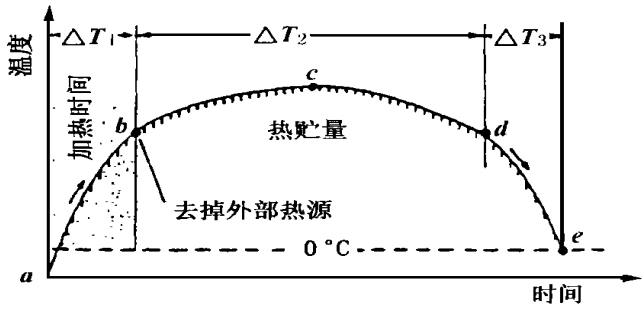


图 17 热贮藏量原理

Fig. 17 The concept of thermal storage capacity

(2) 试验研究和应用

a) 试验研究 试验研究包括两部分, 一是通过不同土类、密度和厚度的组合, 确定用何种土吸收太阳能, 二是电磁作用如何使水土体系中水均匀分布。对于前者, 使用红外线灯作为太阳能, Fang<sup>[15, 16]</sup>完成了把土和地基结构作为太阳能接收和贮藏系统的基础工作, 并进行了少量试验, 典型的试验结果如图 18 所示。需进一步作下列研究: ①各种土类、颗粒大小、土层厚度和含水量的组合, ②各种加热强度, ③其他环境条件(如风)。

b) 转换系统 用水、土或其他廉价方法把太阳能转换成热能, 试验有待完善。

c) 可能应用 不仅在工程领域而且在医学领域有许多应用。与环境岩土工程有关的重要应用有: ①除掉疏松材料中多余水分和气泡以提高其密度、承载力和抗剪强度, ②广大干旱和沙漠地区的灌溉。

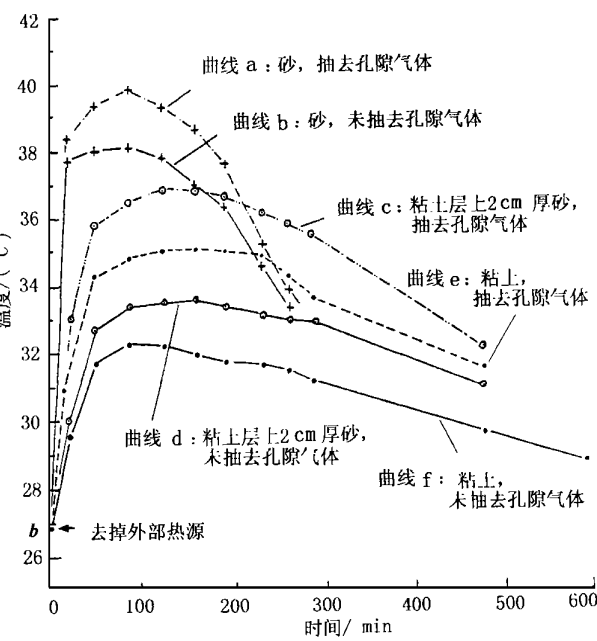


图 18 土的热贮藏量试验结果

Fig. 18 Typical laboratory test results on thermal storage capacity of soil

5 21 世纪最具挑战性的环境岩土工程

这里介绍的两个环境岩土工程不仅是交叉学科,而且全面反映了与环境的相互作用,相当困难,但最具挑战性,现在只是一个梦想,可能在 21 世纪变成现实。

5.1 台湾海峡横跨工程

在半个世纪前就已提出兴建隧道、大桥或轮渡来连接大陆和台湾岛的横跨台湾海峡工程的构想。台湾海峡的宽度变化大,从厦门到高雄大约 310 公里。相当不利的环境条件有地震、火山活动、海啸、台风、暴雨、强海浪及复杂的地质构造和地理特点,如果能克服这些困难,兴建横跨台湾海峡工程,将获得巨大收益。清华大学 21 世纪发展研究会和台湾大学联合福建省海洋局和有关当局于 1998 年 7 月 25~ 27 日在厦门召开了横跨台湾海峡工程第一次正式可行性研讨会,于会代表不仅有技术人员,而且有政治、经济、财政和管理人员。

横跨台湾海峡是一项复杂工程,环境条件相当不利,覆盖了工程、政治、环境、经济和社会诸方面问题。技术方面问题有,施工阶段庞大的施工运作、巨大的材料供应和复杂运输体系,使用中冗长的日常维护和监测。有许多关于该工程的设想、建议和评价。笔者建议的方法<sup>[17]</sup>包括三个要素:①变以前单一运输目的为多目的系统,使该工程的目的多样化,②在施工中把整个领域成分地带阶段观测,形成分地区阶段作业,③扩大海洋水界和土地开发,发展海洋集合体及多目的

和多局面的专家系统。海洋集合体、附属工程和可行路线的关系如图 19、20 所示。

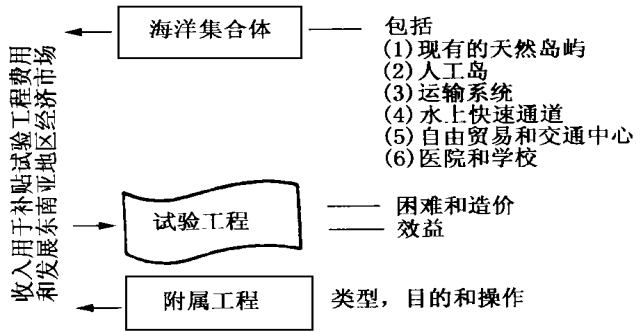


图 19 海洋集合体和附属工程与跨海工程的相互关系

Fig. 19 Interrelationship between ocean community, satellite projects and Taiwan Strait Crossing Route Project

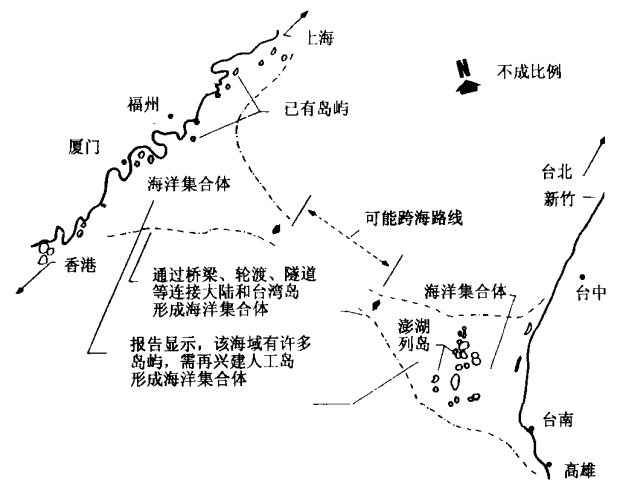


图 20 建议的海洋集合体和跨海工程路线

Fig. 20 Proposed ocean communities and crossing route for the Taiwan Strait Crossing Route Project

5.2 戈壁沙漠绿化工程

戈壁沙漠位于中国西北地区,是世界第二大沙漠,占地 1295000 平方公里。沙漠的主要环境问题有:热、风和水,沙漠绿化目的是使沙漠-水-环境的相互作用处于最佳状态,从而使广大的废地变成人类生存的有用农田。本文主要考虑沙漠水源和水的分布系统。已提出许多干旱和沙漠地区的取水方法,但它们不是太贵就是效果不理想,本文提出利用太阳电磁作用取水新方法。

利用太阳能溶化天山冰雪获取大量水以满足干旱和沙漠地区的灌溉需要,这是利用免费能源和水源及自动灌溉系统的唯一方法,它必须符合三个基本准则:①利用太阳能费用低和节约能源,②利用天山冰雪是无限的水源,③利用热电磁作用配给灌溉整个沙漠地区的水,具体应用步骤见表 6。

根据初步调查,尽管不能得出普遍结论,但表明建

议方法耗时短、费用低、效果好。

表 6 太阳能电磁能在戈壁沙漠的应用步骤  
Table 6 Application step of solar electromagnetic system for the Gobi Desert

项目	内容
太阳能(热能)	(a) 接收系统 (b) 贮藏系统 (c) 从太阳能到热的转换过程
太阳能融化冰雪过程	(a) 源头(天山) (b) 地点、位置和高度 (c) 冰雪的类型和性质 (d) 数量(最大和最小限制)
融化冰雪的控制和贮藏库	(a) 临时贮藏路径和地点 (b) 永久贮藏地 (c) 地面和地下贮藏地 (d) 应急贮藏路径和地点
排水方法和运输系统	(a) 地面排水系统 (b) 地下排水系统
防护、控制和反沙漠化措施	(a) 沙运动的防护 (b) 融雪洪水 (c) 雪崩问题 (d) 泥流、泥石流和固化流 (e) 监测系统和警报信号 (f) 维护和管理
室内模型试验	(a) 太阳能接收和贮藏 (b) 冰雪融化过程 (c) 融雪贮藏 (d) 灌溉系统 (e) 控制浸渍系统
管理	(a) 计算机辅助设计 (b) 专家系统

6 结 语

本文的目的是提出环境岩土工程的概貌及其在 21 世纪的应用。一些工作刚刚起步, 尚未得出明确的结论, 还需作进一步研究。但是, 希望通过本文能使岩土工程师认识到环境岩土工程的重要性, 也指出环境岩土工程是一门交叉学科, 需从其他学科获得知识。利用台湾海峡跨海和戈壁沙漠绿化工程作为例子来说明环境岩土工程知识和方法是掌握土水环境性质的极为有用的工具。

本文原稿为英文, 由南京水利科学研究所土工研究所王年香博士翻译成中文。

参 考 文 献

1 Fang H Y. Introduction to Environmental Geotechnology. CRC Press, Boca Raton, FL, 1997. 688  
2 Fang H Y. Particle theory – a unified approach for analyzing soil behavior. In: Proc 2nd Int Symposium on Environmental Geotechnology, Vol 1. 1989. 164~ 194  
3 Fang H Y. Mass transport phenomena of contaminated unsaturated fine grained soil. In: Proc 8th Int Conf on Computer Methods and Advances in Geomechanics. 1994. 1049~ 1054  
4 Fang H Y. Prefailure deformation characteristics of contaminated fine grained soil. In: Proc Int Symposium of

Pre failure Deformation Characteristics of Geomaterials. Japan, 1994. 299~ 304  
5 Fang H Y. Cracking and fracture behavior of soil. In: Vallejo L E, Liang R Y eds. Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering (Geotechnical Special Publ No. 43). ASCE, NY, 1994. 102~ 117  
6 Beattie A A, Chau E P Y. The assessment of landslides potential with recommendation for future research. Journal of the Hong Kong Institution of Engineering, 1976  
7 Fang H Y. Recent accomplishments and future trends in geotechnics in the 21st century, Topic 6. In: Geoenvironmental Engineering. U S – Canada Workshop, Univ of Oklahoma and U S National Science Foundation( NSF), 1992. 309~ 317  
8 Winterkorn F H, Fang H Y. Soil technology and engineering properties of soils, Chapter 3. In: Foundation Engineering Handbook. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, NY, NY, 1991. 88~ 143  
9 Rahn P H. Ground water contamination by radioactive waste. In: Proc 1st Int Symposium on Environmental Geotechnology, Vol 1. 1986. 233~ 246  
10 Dmitriev S A, Stefanovsky S V. Research and development of advanced technologies of radioactive waste treatment. In: Proc 5th Int Conf on Radioactive Waste Management & Environmental Remediation, Vol 1. American Soc of Mechanical Engineers( ASME), 1995  
11 Fang H Y. Expert systems for assessment of radon gas. In: Malina J F, Jr eds. ASCE Environmental Engineering 1989 Specialty Conf, ASCE, NY, 1989. 97~ 104  
12 Fang H Y, Chaney R C. Desert environmental interaction and anti desertification measures. In: Proc 1st Int Symposium on Environmental Geotechnology, Vol 2. 1987. 258~ 288  
13 Lou G Y, Chu T Q, Wu H, Liu G C. Locating radon/ water leaking source in rock formation based on two preferred planes principle. In: Proc 2nd Int Symposium on Environmental Geotechnology, Vol 2. 1991. 229~ 241  
14 Fang H Y, Chaney R C. Mechanics of soil heat interaction and its thermal storage capacity. In: Proc ASCE Engineering Mechanics Specialty Conf, Purdue Univ, Vol 2. 1983. 786~ 789  
15 Fang H Y, Chaney R C. Using soil and foundation structures as heat collector and thermal storage in solar energy system. In: Proc Int Conf on Energy Resources and Conservation Related to Built Environment, Vol 2. Pergamon Press, NY, 1980. 788~ 799  
16 Fang H Y, Chaney R C, Eways J H, Down J M. Low-cost solar energy collector and storage systems. In: Proc 16th Intersociety Energy Conversion Eng Conf. Atlantic, GA, American Soc of Mechanical Engineers, ( ASME), NY, 1981. 196~ 202  
17 Fang H Y. A feasibility study on Taiwan strait tunnel project (a multi-purpose project) – a regionalization-stage approach. In: Symposium on Feasibility Study of the Taiwan Strait Tunnel Project ( Xiamen, Fujian, 1998). Beijing: Tsinghua Univ Press, 1999. 25~ 27