

DOI: 10.11779/CJGE201608021

# 论土骨架与渗透力

李广信

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 指出了土骨架的定义、成分即所占据的空间; 认为土力学就是研究土骨架的力学性质及其影响因素的学科。用大量的例子, 形象地说明土骨架的溃散所造成的严重后果。从土的颗粒出发解释了土中水的渗透力的机理, 推导了渗透力的计算公式。特别指出, 通常所谓的“渗透力就是渗透水流对于土骨架的拖曳力”的说法是不全面的。

**关键词:** 土骨架; 溃散; 渗透力; 推力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)08-1522-07

**作者简介:** 李广信(1941-), 男, 黑龙江宾县人, 教授, 博士生导师, 长期从事土力学教学和土的本构关系、土工合成材料工程、高土石坝以及地基基础工程的科研工作。E-mail: ligx@tsinghua.edu.cn。

## On soil skeleton and seepage force

LI Guang-xing

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Some concepts are pointed out, including the definition of the soil skeleton, its composition and the space occupied by the soil skeleton. It is indicated that soil mechanics is a subject to study the mechanical properties of the soil skeleton and its influencing factors. A large number of examples with some serious consequences induced by collapse of the soil skeleton are illustrated. Based on the analysis of forces on particles, the mechanism of seepage force in the soil skeleton is explained, and the formula for calculating the seepage force is derived. In particular, that generally the so-called “seepage force is the drag force of the soil skeleton by flow of water” is not comprehensive.

**Key words:** soil skeleton; collapse; seepage force; thrust

## 0 引言

在土力学中, 土骨架与渗透力是很重要的概念, 有效应力原理、渗流固结理论、渗透变形、土坡稳定与砂土液化等一系列课题, 都建立在这两个概念的基础之上<sup>[1]</sup>。

## 1 土骨架

### 1.1 定义与组成

对于土力学中土骨架这个术语, 多数教材与教师都没有特别的给予定义和解释, 直接就使用了。它与土的颗粒有什么关系? 他有什么特性? 它包含有哪些成分?

其实土骨架与土颗粒的关系就像钢丝网与钢丝的关系一样, 是完全不同的概念。正确的理解应当是: 土骨架是由土颗粒相互接触与联接形成的可以承担与传递有效应力的构架体, 其孔隙中充满了孔隙流体(液态或气态), 但孔隙流体并不属于土骨架。土骨架据有

整个土体的全部体(面)积。

在图1所示的应力状态中, 颗粒F(freedom)游离于传力系统之外, 似不应属于土骨架范畴<sup>[2]</sup>。但在其他应力状态体系下, 它可能就会参与力的传递。所以我倾向于将所有固体土颗粒都计入土骨架之中, 这样, 土骨架中的实体体积就等于 $nV$ ,  $n$ 是孔隙率;  $V$ 为土体的体积(=土骨架的体积)。结合水、毛细水与自由水, 一般不列入土骨架, 而是与土骨架相互作用的流体, 会影响土骨架的力学性质。

### 1.2 土骨架的体(面)积与密度

图2表示的是不同边界条件下的土的体积, 其中刚性边界所包围的体积通常大于土骨架的体积; 柔性边界包围的体积小于土骨架的体积, 所以才有粗粒土

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279085); 国家重点基础研究发展计划(“973”项目)(2013CB036402); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(2013-KY-4)

收稿日期: 2016-05-19

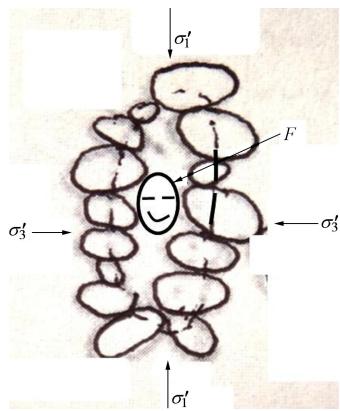


图 1 承担有效应力的土骨架与游离的颗粒

Fig. 1 Soil skeleton with effective stress and free particles

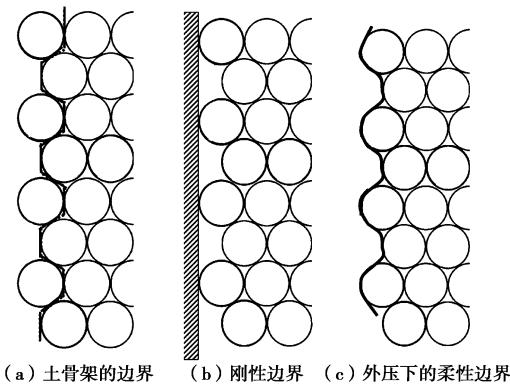


图 2 土体的几种边界及相应的体积

Fig. 2 Several boundaries and corresponding volumes of soil  
三轴试验中的“膜嵌入”问题；图 2 (a) 所示边界才是土骨架的边界。

土骨架像一个丝瓜瓢一样是一个宏观的整体。或者恐怖一点说，就像一个人的骨架，比如白骨精披一张皮，就是一个人：一个美女，一个老太婆，或者一个老大爷——除了孙悟空别人都看不透。所以对于干土，土骨架的密度就是土的干密度 $\rho_d$ ；而土颗粒的密度则等于颗粒矿物的比重 $G_s$ 乘以4℃的纯水的密度。例如土骨架的密度等于 $\rho_d=(1-n)G_s\rho_w=1.6\text{ g/m}^3$ ，而土颗粒的密则约等于 $G_s\rho_w=2.7\text{ g/m}^3$ ，则孔隙率 $n$ 等于0.407，如图3所示。

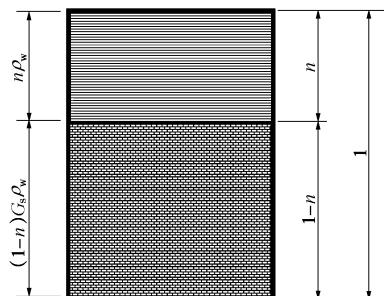


图 3 饱和土的三相换算草图

Fig. 3 Three-phase conversion sketch of saturated soil

将一个单位体积的土骨架放入水中，亦即在饱和

土中，土骨架的重量扣除土骨架中的颗粒的浮力后 $=\gamma_d-(1-n)\gamma_w=(1-n)\gamma_w(G_s-1)=(1-n)\gamma_wG_s+n\gamma_w-\gamma_w=\gamma'$ ，可见土骨架的浮重度就是土体的浮重度 $\gamma'$ 。

### 1.3 土骨架的应力

图 4 (a) 表示的是干土中的土骨架的应力，

$$\sigma = \frac{\sum p_i}{A}, \quad (1)$$

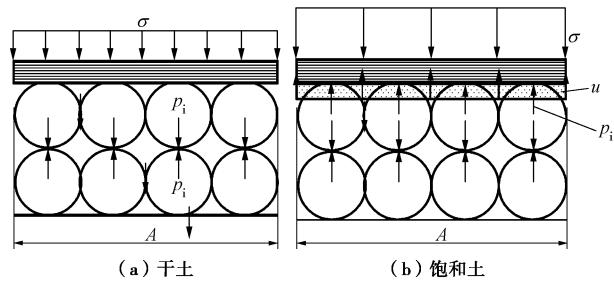
式中， $p_i$  为在考虑的作用面上的第  $i$  个颗粒接触点接触力的竖向分力， $A$  为应力作用的面积。

图 4 土骨架的应力示意图

Fig. 4 Sketch of stress of soil skeleton

图 4 (b) 表示的是饱和土体中的应力，则

$$\sigma = u + \frac{\sum p_i}{A} = u + \sigma', \quad (2)$$

式中， $u$  为孔隙水压力，式 (2) 就是有效应力原理的表达式。式 (1) 的应力其实也是有效应力，它等于总应力。从上述可见，土骨架的应力与连续介质材料的应力不同。它并不是介质中通常所定义的应力为 $\sigma = dp/dA$ ，而是在一定的面积  $A$  上若干个接触点集中力与此面垂直的分力之和被面积  $A$  除，因此更像是一个虚拟的应力。

应当注意的是，在以土骨架为力的隔离体时，不能计入其中包含其中的孔隙水、气，但要计入它们对土骨架的作用力。我们知道渗透力  $j$  是渗透水流作用于单位体积土骨架上的作用力。在竖直向上的渗流时，取单位体积的土骨架为隔离体，其竖向的极限平衡条件是

$$\gamma' = j = i\gamma_w. \quad (3)$$

从此可以推导出流土的临界水力坡降  $i_{cr}$  为

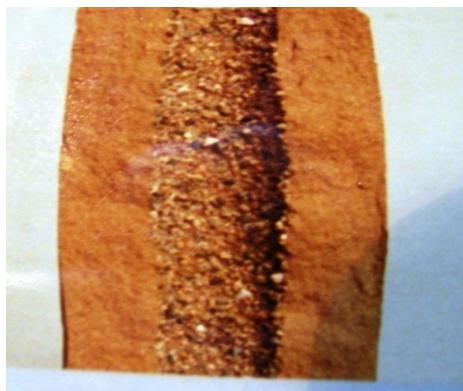
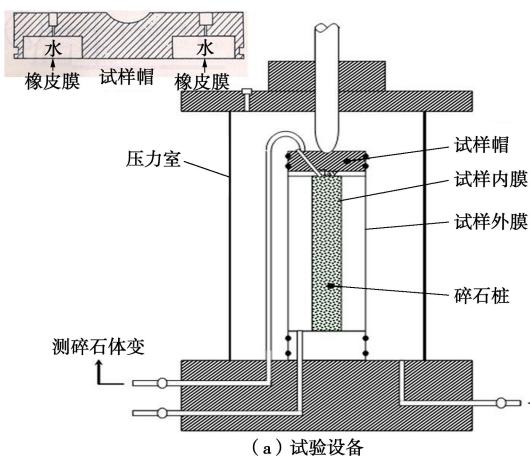
$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}. \quad (4)$$

在土力学中，土的变形与强度特性决定于有效应力，亦即决定于土骨架的变形、强度和结构特性。而土颗粒本身的变形几乎可以忽略；土颗粒的强度为组成颗粒的矿物强度，远高于土骨架的强度；颗粒本身也是不透水的。因而有效应力原理认为：影响土体变形与强度的是有效应力，而有效应力正是作用于单位土骨架面积上的力。

### 1.4 土骨架的作用

土骨架与土颗粒在很多情况下所起的作用是不同的。我指导研究生作过模拟碎石桩复合地基的试验，见图5<sup>[3]</sup>。这是把直径为20 mm的碎石柱放在外径为100 mm的黏性土试样中心，组成大三轴复合试样，研究碎石桩复合地基承载力提高的原理。

这个试验的顶帽下部中心有一20 mm宽的环形橡皮膜，膜后是一个充水的压力室，控制碎石柱与整个试样有相同的应变，同时量测桩间土上的竖向应力。



(b) 复合试样

图5 碎石桩复合地基模拟试验

Fig.5 Simulation tests on gravel pile composite foundation

图6表示的是试验测得的5种不同情况的应力应变关系曲线：①是复合试样中碎石的应力应变曲线；②是与复合试样同围压，其中的碎石同密度的纯碎石三轴试样的试验曲线；③是与复合试样同围压，与其中黏土同密度的纯黏性土三轴试样的试验曲线；④是复合试样中黏土的应力应变曲线；⑤是与复合试样平均重度相同的碎石颗粒+黏土混合试样的试验曲线。

这里有一个奇怪的现象，那就是掺了碎石的混合试样的曲线⑤既低于复合试样中黏土的曲线④，也低于纯黏土试样的曲线③。对于这一现象我们开始很是不解，探讨了很久，后来发现这是有道理的。

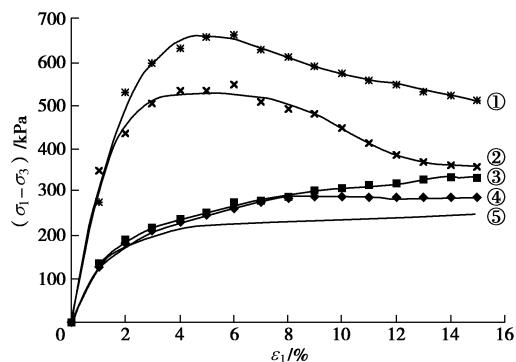


图6 几种情况的应力应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of several cases

在图7(b)中，复合试样中的碎石干密度为 $\rho_d=1.67 \text{ g/m}^3$ ，黏土的干密度为 $\rho_d=1.52 \text{ g/m}^3$ ，复合试样的平均干密度为 $\bar{\rho}_d=1.544 \text{ g/m}^3$ ；在图7(c)中，纯黏土的干密度为 $\rho_d=1.52 \text{ g/m}^3$ ；而在图7(a)中，混合试样的平均干密度也是 $\rho_d=1.544 \text{ g/m}^3$ ，但由于碎石呈颗粒状“悬浮”在黏土中，碎石颗粒的密度数值上等于单个颗粒的比重，即 $\rho_d=2.67 \text{ g/m}^3$ ，这样算下来黏土的干密度只有 $\rho_d=1.42 \text{ g/m}^3$ ，由于碎石颗粒悬浮在黏土的基质中，没有形成骨架，试样的强度完全由黏土决定，并且黏土的干密度远小于 $\rho_d=1.52 \text{ g/m}^3$ ，所以图7(a)的强度最低就不可避免了。其各部分密度的计算见图8。

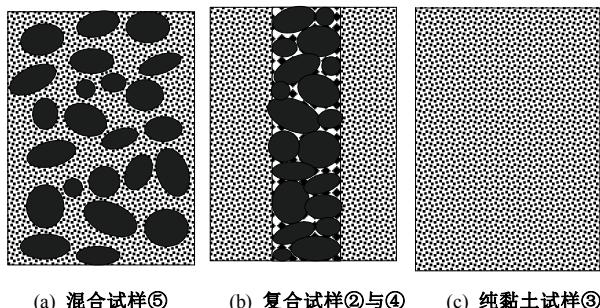


图7 3种试样的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of three samples

这就发现一个有意义的现象，即复合试样中碎石形成了骨架，类似于地基处理中的碎石桩，使复合试样抗剪强度远高于同密度的纯黏土；而在混合试样中，碎石颗粒呈单粒被黏土所包围，没有形成以碎石构成的一级骨架，它悬浮在细粒土中，成为以细粒土形成的二级骨架中的填充物。对整体强度没有贡献，并且拖累得黏土干密度减小，致使强度最低。用这样的填土处理地基，会事与愿违：打乱了骨架用颗粒；拆开了机器用零件；解散了队伍用单兵，都是蠢人干的蠢事。

这种现象与战争中的军队相似，一支队伍与若干作为单兵的战士是不同的。一个以连排班为建制的队伍，具有战斗力，所谓“建制”就是骨架。而散兵游

勇就形不成战斗力。当年西楚霸王项羽，尽管“力拔山兮气盖世”，最后在垓下被汉军十面埋伏，层层包围，带领的28骑壮士被分割孤立，最后只好自刎乌江。在三国演义中，长坂坡赵云在百万军中如入无人之地，表现出猛将的气势。如果没有曹操下令“要活赵云，不要死子龙”，万箭齐发，他也难逃活命。所以刘备即使有赵云、张飞那些猛将，在当阳也被打得七零八落，狼狈不堪。

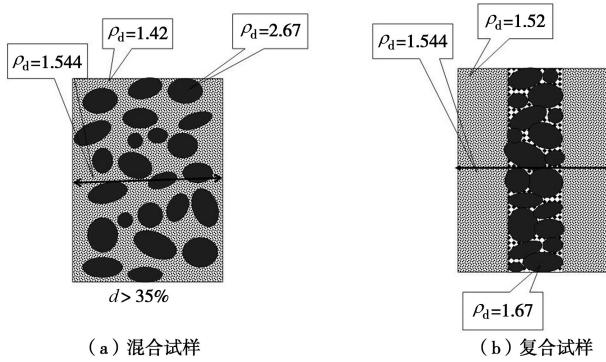


图8 混合试样与复合试样中的干密度

Fig. 8 Dry densities in mixed samples and composite samples

南北朝时的秦晋淝水之战，前秦皇帝苻坚统帅大军号称百万，到达长江北岸，踌躇满志，自信满满地扬言：“滚滚江水，投鞭可断”。而东晋的统帅谢安、谢玄与谢石等只以8万兵马在南岸迎敌。他们要求苻坚兵马稍稍后退，以便东晋人马过江与其决战，结果，骄傲轻敌的秦军大兵后退，以便东晋兵马过江后两军列阵决战。可是晋军过江立即发起攻击，处于后退中的秦军猝不及防，又赶上大将苻融由于在混乱中战马失蹄而被杀，朱序大喊“秦兵败矣！”人心大乱，队伍大乱，成为一群散兵。由土骨架溃散为一堆土颗粒，毫无战斗力，“八公山下，草木皆兵”，讲的就是这场战役，其实秦军的百万兵马中不少是自己互相踩踏而伤亡。可见土骨架与土颗粒的巨大差别。

孙悟空棒打白骨精三次，可是都没有把其骨架打散，结果是自己在被念了一通紧箍咒之后，被赶回了花果山。美国世贸大厦在20世纪70年代初雄踞世界第一高楼，911被撞，钢结构散架后变成一堆建筑垃圾，惨不忍睹。可见骨架之重要。

可以这么认为：“土力学就是研究土骨架的力学特性及其影响因素的学科”。在土中，颗粒以骨架形态存在，其孔隙中充满液、气相流体，这才叫作土。土是由固、液、气三相介质组成的，但由三相介质组成的东西却不一定土。如果在外部因素作用下土骨架溃散为单个颗粒，例如流土、管涌、液化、流沙、流滑，就成了泥沙、泥石流或沙尘暴，那就是流体力学中的多相流和泥沙动力学研究的领域，与土力学无关

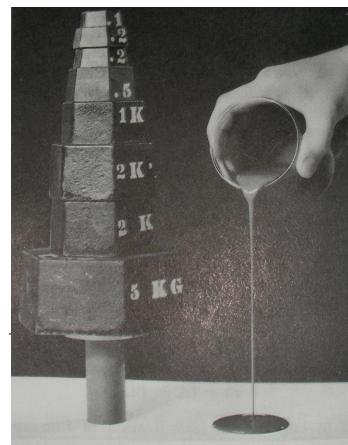
了。

沈括在《梦溪笔谈》中讲到“流沙”：“人多不晓並河之义”，“予尝过无定河，度活沙，人马履之，百步之外皆动，瀰漫然如人行幕上。其下足处虽甚紧，若遇其一陷，则人马砾车，应时皆没。至有数百人平陷无孑遗者。或谓：此即流沙也。”“並字亦书作渥，按古文，渥，深泥也。”<sup>[4]</sup>

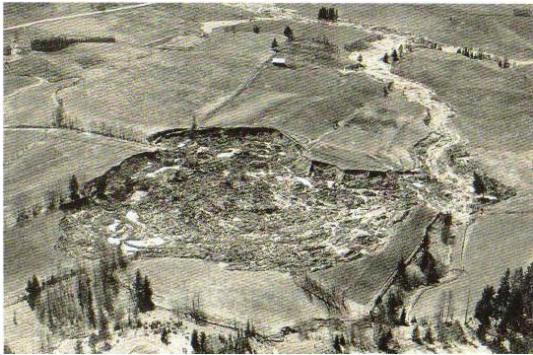
沈括是古代知识分子中比较关心自然科学知识的，更可贵的是他在这里涉及到一个重要的土力学问题，那就是土骨架与土颗粒的区别。这种土骨架溃散可能有几种形式。

流滑是饱和松散的细砂在扰动下“静态液化”的现象。在三峡工程的科研阶段，由于葛洲坝建成后在三峡库区淤积，在三峡坝址附加淤积了一层极细极松的粉细砂，其干密度只有 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 左右。我们在室内对其进行三轴试验，小心翼翼地施加一定的真空制成试样，可是用手指轻轻一碰试样的橡皮膜，试样马上化为一滩泥水，真所谓是“一触即溃”。这种现象称为流滑，英文中成为 quick，倒是很形象的。从电视上见过在沙漠中干砂的流滑：砂流如水，瞬息万变。所以即使是一盘散沙，那也是土骨架，它至少可以承担起自重。

高灵敏度土的扰动破坏图9(a)表示的是一种高灵敏度土，其原状土 $38 \text{ mm}$ 直径的三轴试样可承受无侧限压缩试验中的 $11 \text{ kg}$ 的砝码；可是在烧杯中搅拌扰动后就变成了泥浆<sup>[5]</sup>。在北欧就有大面积的高灵敏性土。这些海相淤积的软黏土，在大约20000年前冰河期被压在 $3000 \text{ m}$ 冰层以下，以后冰层退去，淤积土露出地面，上部形成硬壳层。随后它们被雨水淋洗，盐分减少，阳离子浓度降低，絮凝结构破坏，一旦受到扰动，例如河流冲刷，在很短时间内大面积流动破坏。曾看过整个录像，由于内施工扰动，在十几分钟内，大片场地迅速泥化，树木房屋随之流走，真是触目惊心。如图9(b)所示。



(a) 扰动与未扰动的高灵敏度黏土



(b) 高灵敏度土场地的流滑

图 9 高灵敏度土

Fig. 9 High-sensitivity soil

20 个世纪 60 年代, 我在黑龙江省的松花江支流漂河滩负责修闸挖基坑, 当地老百姓讲, 这里会“鼓稀泥”, 不能挖坑, 我回忆上学土力学时, 老师就没讲过什么“鼓稀泥”, 结果很容易就挖了 3 m 深的基坑。可第二天到现场一看, 粗细不等的泥流沿着坑壁缓缓流下, 里面已经是半坑泥浆了, 这就是可怕的高灵敏度土。

上面沈括所说的“流沙”“活沙”似乎并不是砂土的流滑或液化。倒像是一种欠固结土——沼泽土。那就是表面一层草皮或者塔头, 人行其上忽忽悠悠的“颤颤然如人行幕上”, 一旦失足或者踏破表面硬壳层, 下面是无底的淤泥。这是一些彼此还没有完全接触的极细的悬浮与半悬浮的颗粒, 远没有形成骨架。在前述的漂河踏查时, 我们就走过这些“漂浮”的“塔头”, 也常常失足, 所幸当时下面淤泥中的冰层还没有化透, 没有坠入深渊。所谓的“并河”与“涅, 深泥也。”恐怕就是如此。凡是骨架的溃散, 都伴以高超静孔隙水压力, 实际上是有效应力的丧失, 其后果都是很严重的。

一个国家掌管经营一方土地, 自有其制度、规则与骨架, 人民和社会也还是平和与安定的。美帝国主义总是要把自己的制度与意志强加于人。先是伊拉克, 后是利比亚、阿富汗、叙利亚, 结果造成那里民不聊生, 哀鸿遍野, 满目疮痍。现在那些流亡的难民冲击着欧盟。看到难民潮, 就让人想到了泥石流(图 10); 那种无序的、盲目的、具有巨大破坏力的可怕的浊流涌动着, 冲击着人类的秩序。本来是一方土地, 一方山河, 一旦失去了骨架就变为家国的残破与苦难。普京在联合国的讲话就很有道理:“我们所有人都不应该忘记历史的经验。比如说我们都记得苏联的历史。输出社会变革实验, 试图从自己的意识形态原则出发来改造这个或是那个国家, 经常导致灾难性的后果, 没有推动进步, 而是造成了退步。但是好像没有人去学习他人的错误经验, 而是不断的重复错误, 现在继续

输出所谓的“民主革命”。可见无论是当年共产党的输出革命, 还是现在美国的输出民主, 都是破坏人家土骨架的行为。



图 10 泥石流

Fig. 10 Debris flow

“文化大革命”风浪汹涌, 百万红卫兵如潮水般涌向各地, 摧毁一切秩序与骨架。这一浪潮冲向全国, 哈尔滨亚洲最大的教堂、孔府的碑石、清华的二校门都被摧毁。一个国家的骨架的溃散真是灾难。

据说每个穆斯林都以朝拜麦加为最高理想和荣光, 我想既是朝拜总是应祈福的, 不知何故, 那里却年年踩踏, 年年亡命。成千上万的信徒围着一个什么东西在有序的转, 不知何故突然失控变成了无序的人流, 骨架溃散, 于是也就如泥石流一样翻滚着、挤压着, 一些倒霉蛋就没命了。所以我倾向于去投靠佛教或者道教, 到深山老林独自修炼, 至少可免被踩踏之苦。

### 1.5 土骨架的强度

土所以能成为骨架, 一是颗粒间的相互接触, 二是颗粒间的相互联接, 前者形成摩擦力, 后者产生黏聚力。土的强度就是土骨架的强度, 摩擦力是靠颗粒间的接触与围压的约束, 紧紧地把颗粒团结在一起。一个军队的纪律就是围压, 有纪律才可形成战斗力。吴王阖闾听说孙武治兵有方, 让他到宫里操练 100 名宫女给自己看看。孙武将其分为两队, 指令吴王的两个美姬为两队队长, 由他带来的军吏监军。号令一声, 宫女们嬉笑玩闹, 不成队形。孙武令监军将两个美姬斩首, 阖闾求情也没用。两个人头端上后, 这支没有任何训练的宫女队伍, 立刻变得令行禁止, 进退有序。纪律即是围压, 围压产生强度。黏聚力是形成骨架及其强度的另一个重要因素。土的黏聚力可能是由于: 咬合、基质吸力、静电引力、范德华力、颗粒间的胶结、接触点的化合键(包括离子键、共价键和金属键)等。土中的毛细水、双电层的结合水与土骨架的黏聚力有关, 尤其是, 黏土颗粒外表面的 3 层水分子(厚约 10 Å)与黏土颗粒间的结合非常紧密, 其性质不同

于一般重力水，属于强结合水，也近似于非饱和土的残余含水率。它对土骨架的黏聚力影响更大。

国民党的军队在抗日期间，在民族仇恨和爱国主义感情驱使下，具有很强的凝聚力，台儿庄会战、长沙会战、松山战役，在装备不如对方的情况下，取得可歌可泣的战果。但在抗日胜利以后的国共战斗中，由于国民党的极度的贪污腐败，“想中央，盼中央，中央来了更遭殃”，使民心尽失，官兵不愿内战。而共产党及时地开展了土地改革和阶级教育，使贫苦农民分得了土地，使他们相信，只有打败国民党和地主阶级，才能保住分的土地和财产，过好日子。“支部建立在连上”，强有力的思想工作体系，使以农民为主的解放军具有很强的凝聚力和战斗力。有些被俘的国军，一旦变成解放军，其战斗力令人刮目相看，就是这个道理。

## 2 渗透力

### 2.1 渗透力的机理

渗透力是土力学中的一个重要而独特的物理量，在一些《土力学》教材中，通常解释道“我们将渗透水流施加于土颗粒上的拖曳力称为渗透力”<sup>[7]</sup>，如图 11 所示。我们知道水是有黏滞性的，它的流动对于固体边界有黏滞性，即摩擦力，其大小服从牛顿定律。因而渗透水流对颗粒肯定作用有拖曳力。

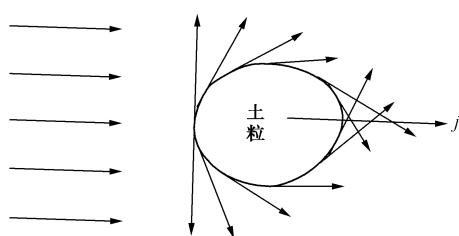


图 11 《土力学》教材中的渗透力示意图

Fig. 11 Sketch of seepage force in a textbook of soil mechanics

我们停在一个拥挤的人流中，会体验这种“拖曳力”，尤其是你穿的是条绒、粗呢、麻布等粗糙衣料时，就更明显。可是我们同时也会感到后背的压力，有时这种压力比摩擦力更难以抵御。比如上海外滩的踩踏事故，在汹涌的人流中，通往观景平台人行通道阶梯的底部有人失衡跌倒，他其后的一些人，不忍从他们身上踏过，于是形成了一个力图停止的小骨架，他们背受不明真相的人流的巨大压力，承受两侧人流的拖曳力，又失去了前面跌倒者的支撑，这些人也只能跌倒，于是形成多米诺骨牌效应，造成踩踏，使 36 人死亡，49 人受伤。这时如果你身在其中，并且侥幸未死，你一定会牢记：渗透力除了拖曳力外，还有沿流向的巨大压力差。

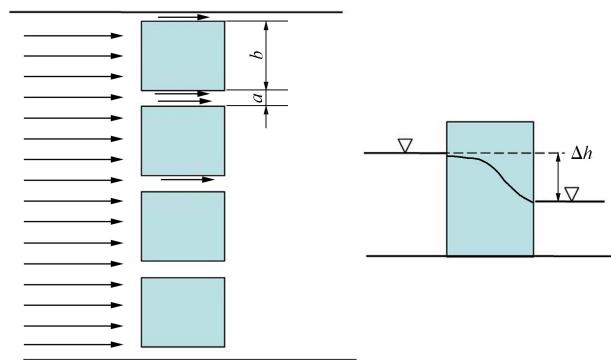


图 12 土颗粒上的推动力与拖曳力

Fig. 12 Thrust and drag force on soil particles

如图 12 所示，假设一排方形的颗粒位于水流中，在颗粒宽度  $b$  上，颗粒受到两侧水位  $\Delta h$  的作用，沿流向压力差为  $J_1 = b\Delta h\gamma_w$ ；而在间隙宽度  $a$  上，沿流向压力差为  $J_2 = a\Delta h\gamma_w$ ，这个力转化为摩擦力也作用于颗粒上。则每个颗粒受的总渗透力  $J = (a + b)\Delta h\gamma_w$ 。所以正确的定义应当是：“土骨架受到的渗透水流施加的推动力与拖曳力称为渗透力”。

我们要搬一个大纸盒，当然可以两手夹在其两侧，靠摩擦力把它搬起，但更省力的是两手兜底，加上手掌部分摩擦力；要推一个抛锚的汽车，人们在两侧用手掌与车的侧面的摩擦力来推，大半是推不动，只有再加上一些人在后面用压力推，才能奏效。

但是这种“拖曳力”却是渗透力定义中的不可缺少的部分。设想在图 12 中，方形颗粒紧密相接，没有渗流也就没有拖曳力与渗透力，两侧作用的就是静水压力。如果颗粒悬浮在水流中与水流以相同速度流动（如水中的泥沙），那么两侧也有水压力差，但无拖曳力，也无渗透力。所以没有拖曳力就没有渗透力。渗透力应是作用于土骨架中的颗粒上的，而不是作用于游离的颗粒上。

图 13 表示的是在水平渗流情况下，土体中颗粒  $i$  与流动的孔隙水间力的相互作用：在颗粒表面上各点作用有水的法向压力，由于黏滞性，渗流在颗粒表面上作用有切向拖曳力。如果沿着颗粒表面将法向压力的竖向分量积分，则得到水对于颗粒的浮力  $F_i = \gamma_w V_{si}$ ， $V_{si}$  为颗粒的体积。亦即等于此颗粒排出水的重量，可见它是一个体积力。

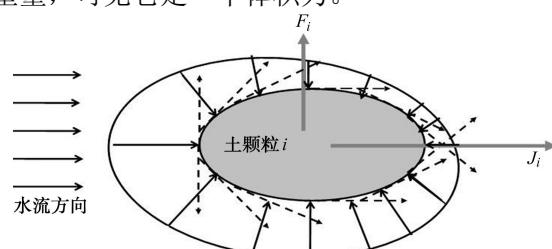


图 13 有水平渗流情况下的颗粒受力示意图

Fig. 13 Schematic diagram of particles under horizontal seepage

如果沿着颗粒表面将法向压力的水平分量和切向力的水平分量积分，则得到水对于颗粒的水平推动力与拖曳力之和  $J_i$ ，可见它与浮力一样也是一个体积力。

这里有个需要说明的问题，那就是图 13 中扣除了浮力后的合力是否一定是水平方向的？这里的颗粒画成相对于水平轴对称的形状，所以力的竖直分量就都抵消了。如果颗粒像飞机机翼一样的片状，并且被有序地排放，那么它在水平水流中，就会产生升力，但如果土体中的这种颗粒是随机形成与随机排列的，那么其土体总的竖直分量就都抵消了。可想而知，如果土体不是各向同性的，那么其渗透力的方向也就不一定与渗流的方向一致。你不是听说过“大风起兮云飞扬”，“好风凭借力，送我上青云”吗，不是也见过水平的风也会把风筝吹上天吗。

目前我们都假设土体是各向同性的。

## 2.2 渗透力的计算

图 14 表示的是图 13 中土骨架中的颗粒  $i$  在土体中位置，颗粒本身的体积为  $V_{si}$ ，水平向长度为  $\Delta l_i$ ；与其他颗粒相接触。它在土体（或者土骨架）中所占据的体积为  $V_{si}/(1-n)$ ， $n$  为土的孔隙率，所以该颗粒两侧在土体中所占的平均截面面积为  $a = \frac{V_{si}}{\Delta l_i(1-n)}$ 。以体

积为  $V_{si}/(1-n)$ （包含有  $V_{si}$  附近的空腔）的土体中的孔隙水为隔离体，考虑它在渗流方向（水平方向）上的力的平衡，两侧压力差等于颗粒对水的渗透力的反作用力  $J_i$

$$\gamma_w \Delta h_i \frac{V_{si}}{\Delta l_i(1-n)} = \gamma_w \frac{V_{si}}{1-n} i = J_i \quad (5)$$

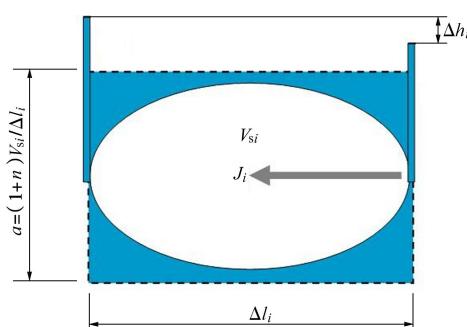


图 14 渗透力的推导

Fig. 14 Derivation of seepage force

设在单位体积土体中，含有  $m$  个颗粒，将  $m$  个颗粒受到的水的水平向的作用力叠加，则

$$j = \sum_{i=1}^m J_i = \sum_{i=1}^m \gamma_w \frac{V_{si}}{1-n} i = \left[ \frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^m V_{si} \right] \gamma_w i \quad (6)$$

由于  $\sum V_{si} = V_s$ ，亦即单位体积土体中的全部颗粒固体的体积。在单位体积土体中， $\sum V_{si}/(1-n) = 1.0$ ，则

$$j = \gamma_w i \quad (7)$$

这就是渗透水流作用于单位体积土骨架上的渗透力。 $j$  叫渗透力，它是一种体积力，它作用于单位体积土骨架上，其大小和水力坡降成正比，对于各向同性渗流，其作用方向与渗流场的水力坡降方向相一致。

## 3 结 论

(1) 土骨架是由土颗粒相互接触形成的可以承担与传递有效应力的构架体，土骨架占据整个土体的体(面)积。

(2) 土的变形与强度就是土骨架的变形与强度，土力学是研究土骨架的力学特性及其影响因素的学科。土骨架溃散后，就成为多相流体的研究对象。

(3) 土骨架的溃散，往往伴随着严重的地质灾害与工程事故。

(4) 渗透力是渗透水流对于土骨架中的颗粒的推动力与拖曳力，渗透力是一个体积力。

(5) 在渗流各向同性的土体中，渗透力与土中水的水力梯度和渗流流速方向一致。

## 参 考 文 献：

- [1] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [2] REINT De Boer. Trends in continuum mechanics of porous[M]. Springer, 2005 .
- [3] 田 海. 复合地基中桩材与土的相互作用试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1997. (TIAN Hai. Experimental study on soil-pile interaction in composite foundation[D]. Beijing: Tsinghua University, 1997. (in Chinese))
- [4] 沈 括. 梦溪随笔[M]. 北京: 北京燕山出版社, 2001. (SHEN Kuo. Dream stream essays[M]. Beijing: Beijing Yanshan Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [5] HOTZ R D, KOVACS W D. An introduction to geotechnical engineering[M]. London: Prentice-Hall, Inc. 1981.
- [6] 陈仲颐. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhong-yi. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [7] 卢廷浩. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. (LU Ting-hao. Soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese))