

膨胀性地基土译文汇编

— 四 —

轻工业部第二设计院

75.2

毛主席语录

我們不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我們必須打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建設成一个社会主义的现代化强国。

古人、外国人的东西也要研究，拒绝研究是錯誤的，但一定要用批判的眼光去研究，做到古为今用，外为中用。

外国一切好的经验，好的技术，都要吸收过来，为我所用。学习外国必須同独创精神相结合。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

内 容

1、膨胀性土译述 (美国)	1
2、由膨胀土造成的建筑物变形 (苏联)	45
3、关于膨胀性和收缩性土中桩的理论 (澳大利亚)	53
4、膨胀土对桩的影响 (以色列)	71
5、在高膨胀性粘土中隧道的施工 (意大利)	80
6、粘质砂土和黄土的膨胀和承载特性 (以色列)	87
7、蒙脱土的抗剪强度 (英国)	95
8、予测土的膨胀量和膨胀力 (法国)	109
9、重粘土的收缩参数 (以色列)	119
10、粘土的活性度 (日本)	131
11、关于膨胀性土的剪切问题	141
12、温度变化对土的某些物理性质的影响	135
13、粒径对缩限的影响及其与正常概念的偏差	146

关于膨胀性土综述

本文是美国陆军工程兵水文站组织编写的一份综合性报告，发表于1969年6月，作者L. D. Johnson。原文是参考了150余篇有关膨胀土的文献写成的。文中虽然没有对膨胀土的理论与实践提出新的创见，也没有对有关专题进行深入探讨，但内容比较全面，对于了解国外（特别是美国）膨胀土这门学科的现状和发展情况有一定参考价值。

原文文字是提纲式的，分段编号是原来有的。译文中除国名外，地名和人名都按原文，以便查考。参考的文献名从略。

— 译者 —



录

1. 引言

2. 膨胀性粘土的特征

2.1 粘土内矿物的影响

2.2 膨胀的机理

2.3 在现场测土的隆起

3. 膨胀粘土的稳定

3.1 控制密实度

3.2 予湿法

3.3 保持恒含水量

3.4 化学稳定

3.5 电渗透稳定

4. 结构设计

附录：表1—表7

1. 引言

1. 膨胀粘土在全世界许多地方都能找到。图1为具有强烈膨胀和收缩特性的黑粘土分佈图。在这种土上建立的结构所遭受的破坏已有不少报导。包括基础、路面、地坪、地窖、渠道和水庫，以及粘土墙等等。每年因此而造成的损失至少在十亿美元以上。“膨胀”和“收缩”是两个相对的名词。某些低膨胀性的土在一般情况下可不考虑其影响，但在特殊条件下也会引起结构的破坏。

2. 建在膨胀土地基上的结构常常由于附近树木所吸水份的蒸发不畅而隆起。反之，如果水份不能进入土内，而地基土又受热干燥，则可能导致土壤的收缩。土的膨胀量主要取决于气候条件、地下水深度、粘土量及其活性等。其中气候条件包括蒸发率、降雨量和频率等其它因素。某些强烈膨胀型粘土（例如班脱土）即使在没有地下水的干燥地区也具有很大的膨胀潜力。

3. 土壤的膨胀如果是逐步的和均匀的，一般不会引起结构破坏；但是地基土的差量膨胀量会使建筑物产生裂缝或明显的变形。差量膨胀是因为粘土层的厚度不同，地下含水量的变化，或建筑物的用途不同等原因而造成的。建筑物下面土壤的含水量与建筑四周土的含水量也不一样，因为两者的环境条件（蒸发率、降雨频率等）是不一样的。差量膨胀的其他原因是：排水管破损、附近浇灌草地、地面水排泄不畅、树木蒸发引起不同的水份损失、锅炉旁边局部地区受热蒸发等等。差量膨胀约佔土全部膨胀量的 $\frac{1}{4}$ 至 $\frac{1}{2}$ 。

4. 过去在设计一些小型建筑物时，只是根据当地的经验和观察，常常不去考虑土的性质。这种对土质特性的疏忽曾在美国许多地方造成建筑物的破坏。图2是美国地图，因粘土膨胀使建

筑物出过事故的地区用黑点表示。图中“等高线”相当于气候的分区。

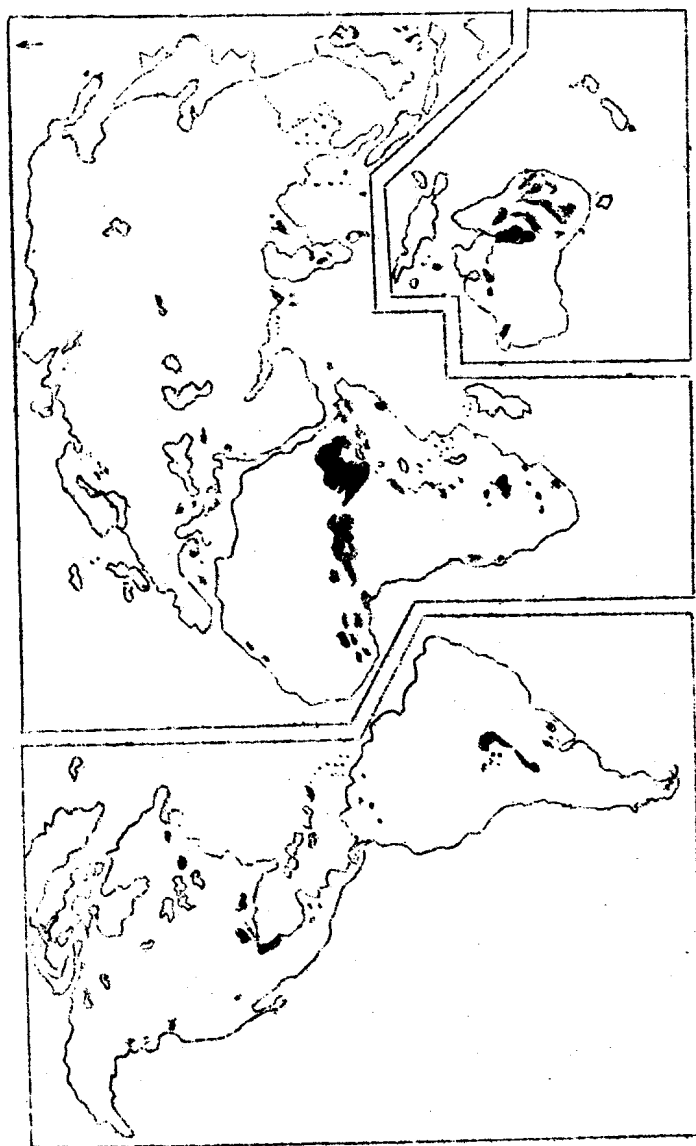
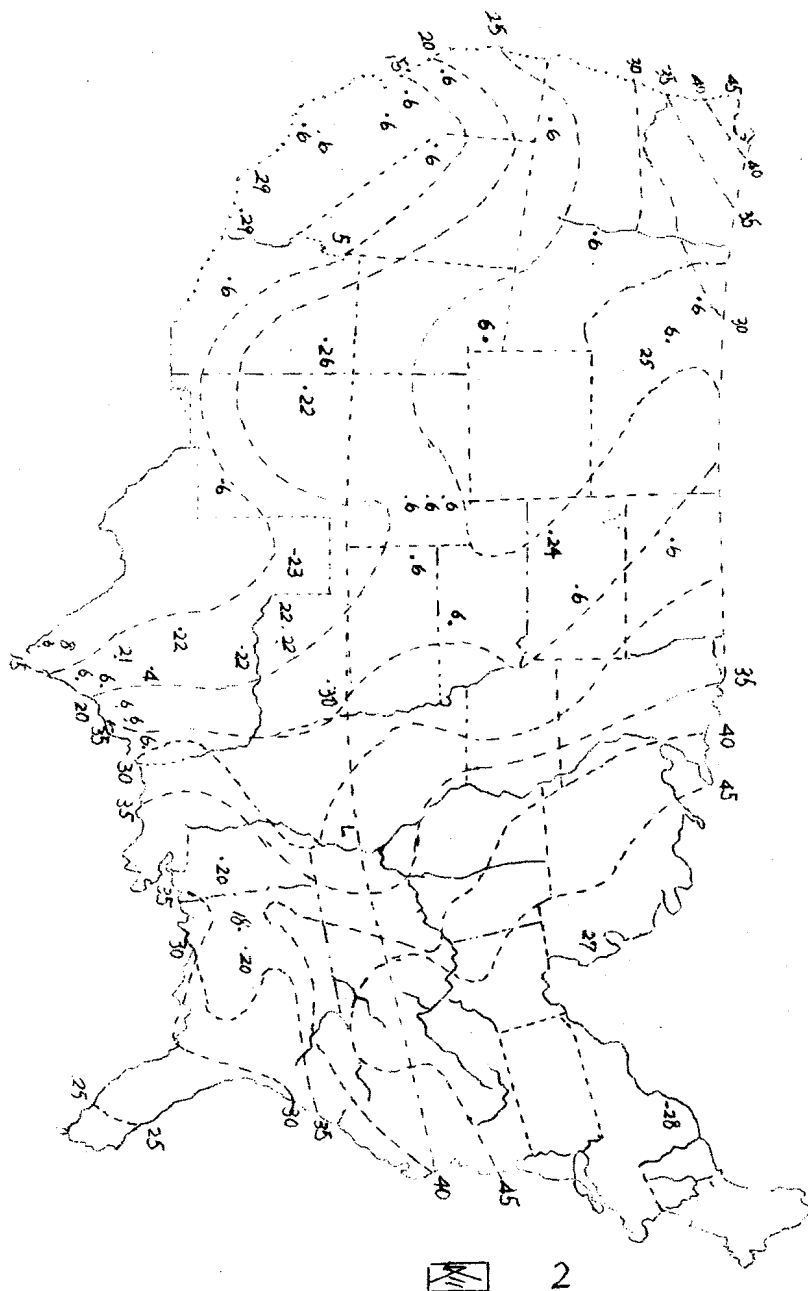


图 1

全支界膨脹土分佈图

(黑色區域表示黑粘土的分佈位置)

5. 本报告的目的是对有关膨胀性土的文献作一综合的评述。首先说明土的膨胀特性，然后讨论各种稳定土壤和建筑措施。



2

美国各地膨胀性土事故位置图。

2. 膨胀性粘土的特性

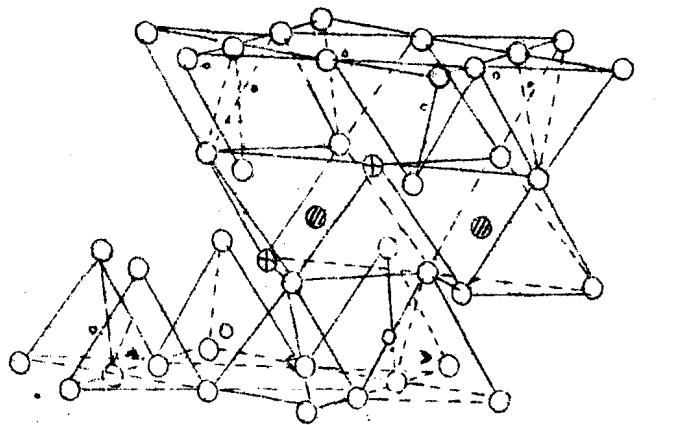
6. 目前已有不少关于膨胀土特性的资料。但是，在实验室予测的数据是可靠需要在现场观测土的实际膨胀情况以进行检查。这是因为试验时所用的土样不可能与实际土完全一致：例如，试验结果往往受到取样大小和形状的影响。要准确地测膨胀力，土样的表面必须是十分平整的，土样的侧摩擦力也将影响试验数据的精确性。除了这些因素之外，在现场测土的膨胀的方法还不完善。因此，对以下问题应作进一步的研究：(a) 对膨胀土性质和构成的鉴定；(b) 地基土膨胀和收缩的野外测定和分析方法。

2.1 粘土内矿物的影响

7. 粘土矿物由片状颗粒组成，其直径约为2微米，矿物按其膨胀能力大小依次为：蒙脱土、伊利石、高岭土，并取决于晶体的格架结构，粘土质量，和阳离子的交换能量。

8. 蒙脱土颗粒的片状结构示于图3（伊利石结构与此相同），是由不同厚度的水层所分隔的许多分子层所组成的。分子层是一个八面体，夹在两个四面体之间，形成对比的是，高岭土矿物的分子层是由一个四面体和一个四面体所组成。蒙脱土分子层之间的粘结力是由弱键形成的，它的颗粒比高岭土要小得多（见附录表1）。

9. 粘土矿物的成因是晶石、云母、和石灰岩的化学风化，受地形、气候、和风化期的影响。例如：玻脱土主要是火山灰风化的结果，而伊利石则是云母加上钾碱的风化产物。图4表示粘土颗粒的排列示意图。

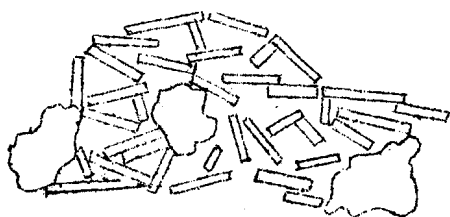


○ 硅 ○ 氧 ⊕ 氢 ⊗ 铝

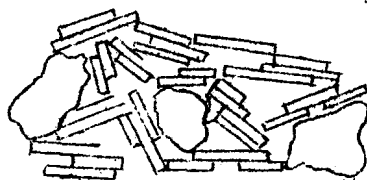
图 3

蒙脱土结构示意图

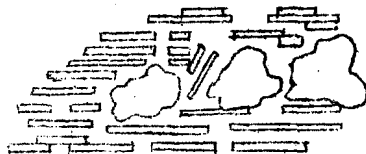
10. 分子灰中低原子価阳离子转换成高原子価阳离子是颗粒产生负电荷的原因。为了达到平衡，颗粒表面必须吸收可交换的正电荷。蒙脱土中互換阳离子一般是钠和钙离子，在伊利石中，



不扰动土 盐水沉淀



不扰动土 清水沉淀



重塑土

图 4

粘土颗粒排列示意图

硅阳离子往往被铝离子所代替，而交换的阳离子则是钾离子。高岭土的阳离子很少，因此，它的离子交换能力远小于蒙脱土和伊利石。

2.2 膨胀的机理

11. 根据热动力学的理论，土中水的流动可以用土中水的能量与自由水的能量之比 Δf 来表示。

$$\Delta f = RT \log_e P/P_0 \quad (1)$$

式中 R = 理想气体常数

T = 绝对温度

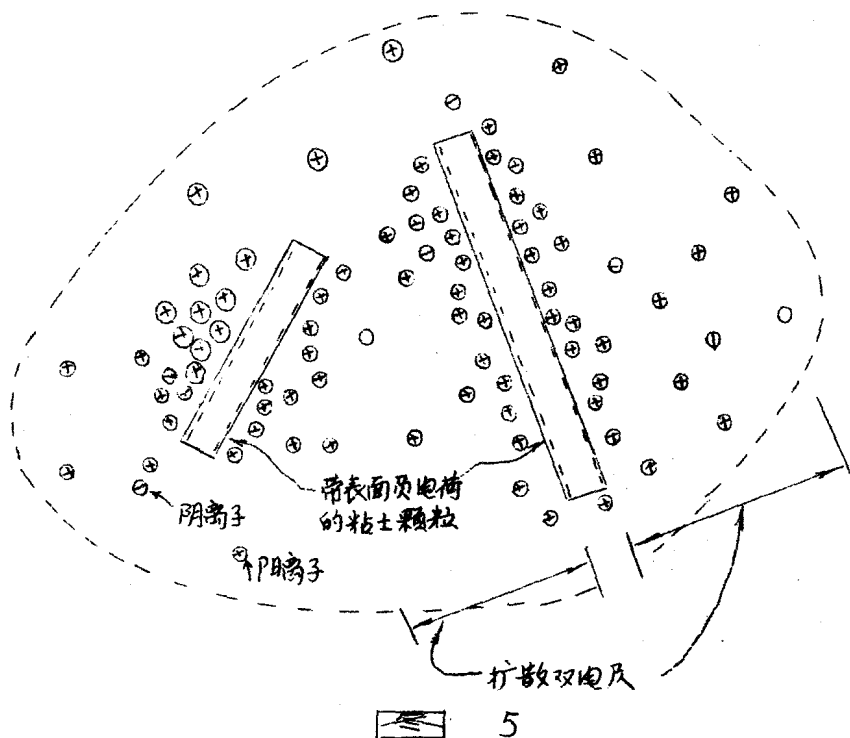
P/P_0 = 相对湿度

能量的变化可以表示为土中水的当量总吸力 ψ ，即毛细压力和渗透压力之和。

$$\psi = \frac{RT}{V} \log_e P/P_0 \quad (2)$$

V = 一个克分子水的体积

12. 粘土内水中盐溶液的浓度以及毛细表面张力都对粘土颗粒间的距离有影响，也就是影响土的膨胀能力。但现在还不了解毛细压力与渗透压力之间存在着什么样的相互关系，粘土体积的变化主要是由于土胶粒的大小起了变化；此外，由于水的移动而改变盐溶液浓度也使吸力变化，从而引起体积的变化。



粘土胶粒

13. 粘土胶粒中的水，即吸附水，受颗粒负电荷的影响。胶粒中的水化离子形成扩散双电层（图5）。为了抵消负电荷的排斥力，粘土内必然存在着一种吸力，其主要来源是电子沿轨道运动时的联锁作用。

14. 如上所述，膨胀可能是由于一种驱动力（以吸压力表示）产生的。在这种机理中，最主要的是：极性吸附的水固着作用，渗透吸收作用，表面张力，热渗作用，颗粒受弯，以及空气压力等。下面分别讨论这些因素。

15. 极性吸附的水固着作用——粘土颗粒（尤其是蒙脱土）在片状表面及上有很多负电荷，吸引了双极水分子，被吸附的水分

子牢固地结合，並排列成一反厚度约3毫微米的膜。这一滞性水膜使颗粒能相互滑动而不产生弹性回弹、破裂，或体积变化，这就是粘土成为塑性的原因。正因为存在着这反粘接力很强的水，在土内引起很高的吸压力。

16. 渗透吸收作用是粘土胶粒内20~40毫微米厚度以外膨胀水的主要原因。渗透的定义是：一种浓度较小的溶液通过半透膜流向一种浓度较大的溶液，使浓度达到平衡。渗透压力就是阻止这种溶液流动所需的压力。当外部压力小于渗透压力时，水将被吸附于粘土颗粒之间，以稀释离子的浓度，颗粒将扩散，导致体积增大和渗透压力降低，直到平衡为止。Scholander曾提出，渗透压力是由于阳离子（溶剂）对孔体边界的压力，该边界能自由膨胀，并使溶液离子间的距离增大。渗透压力 P_o （单位面积重）可按下式计称：

$$P_o = RT(C_c - C_o) \quad (3)$$

式中 R = 气体常数

T = 绝对温度

C_o = 自由孔隙水内离子克分子数 / 公升

C_c = 颗粒间中间面上的离子克分子数 / 公升

$$C_c = \frac{\pi^2}{V^2 B (d + \chi_o)^2} \quad (4)$$

V = 离子体积

B = 与温度有关的系数，取等于 10^{15}

$2d$ = 片状颗粒间距

$\chi_o = 4 / \sqrt{B G}$

G = 电荷表面密度

Ruiv 认为，对实际的土说来，式(3)应修正为：

$$P_{real} = P_o^f \quad (5)$$

f = 活性系数，为含水量的函数，其值小于 1

17. 有关渗透作用的某些特征：渗透作用仅存在于某些能够分散可交换离子的极性流体，例如在水中。由于渗透而引起的膨胀量大小取决于可交换离子的种类。对美国 Wyoming 州班脱石的研究证明，膨胀大小按离子 Na 、 K 、 Ca 、 Mg 、 H 等依次减少。减少土中极性水和新吸附水之间的离子浓度差也可以使膨胀减少，例如粘土在与孔隙水成分相同的盐溶液中的膨胀要比在蒸馏水中的吸收膨胀小。前者甚至可以完全没有膨胀 Foster 发现膨胀量与粘土矿物的游离程度有关，例如，曾观察到随着 Al^{+3} 离子的增加，矿物表面的阳离子游离程度减少了，膨胀亦随之减小了。高岭土矿物的游离性虽然较大，但由于阳离子是吸附于分子片的边缘，其离子交换量甚小，所以它的膨胀并不很大。

18. 表面张力是空气间水吸附的主要原因。由于液体表面分子和内部分子间的相互作用力不等，使气——液界面上的分子力围位在一起，产生了表面张力。当毛细管内的液体浸湿了管壁形成一个吸附薄膜时，管内的液体即升高。粘土颗粒之间的孔隙形成了毛细管，并产生张力 P ：

$$P = \frac{2T_s}{r} \quad (6)$$

式中 T_s = 液体表面张力

r = 弯面的曲率半径

当土中的水蒸发时，弯面曲率半径减小，张力增大，把土颗粒拉在一起，直到达到低于缩限的某一最低收缩度为止。缩限的定义是刚好充满孔隙时的含水量，此时即使再干燥也不会有显著

的体积缩小。如果反过来再加水，就会降低张力而产生膨胀。

19. 所谓热渗作用是指土中的水因温度差要从温暖区向冷区移动，从而使孔隙内表面上的水压力和亲水性起了变化。渗热引起的膨胀是很小的，温度每降低一度约为 $10^{-2}\%$ 。

20. 土内矿物的弹性弯曲是体积变化的一个原因，特别是在部分饱和的土中。外部荷载或水的表面张力都能使颗粒处于受弯状态，而卸荷或加水可以使这种受弯状态消除，从而引起膨胀。

21. 部分饱和土中存留着空气。由于空气排出了双电层中的水而增加了离子浓度，或者由于空气包围颗粒中的张拉应力，引起了膨胀。这种作用在最佳干密状态的非饱和粘土中比在饱和土中要大。

2.3 在现场测土的隆起

22. 地基土的隆起可能以三种形式出现：(a) 在施工开始不久就发生急的来泥是上升的移动，直到施工完毕四年或更长时间才终止；(b) 在建筑物的周围因降雨和蒸发率的变化而产生周期性的胀缩；(c) 因水管破坏引起的局部隆起。第一种情况发生的隆起通常是穹形的，最大的上升位于建筑物的中央部分。在湿土或在气候潮湿的地区（如美国 Alabama 州 Montgomery 市），到干热季节或由于邻近树木的蒸发干燥作用，可使建筑物下面的土发生向下的翘缩现象反之，在干热地区的草坪上浇水会使建筑物的边缘隆起（相对于其中心部分来说）。需要指出的是，对于砂质土或者低于某一饱和度的土，在浸湿后可能因结构的压紧而产生某些沉降，从而减弱了隆起的影响。隆起量的多少取决于：

a. 粘土层厚度

- b. 附加荷重 (覆土)
- c. 地下水深度
- d. 土的吸水量
- e. 进空气的程度
- f. 土的垂直与水平应力
- g. 粘土含量及活性
- h. 季节性湿度变化及其性质
- i. 供排水管道有无渗漏
- j. 土的密度
- k. 时间

膨胀所需时间可按 Terzaghi 的扩散公式计算，将式中的固结系数代之以膨胀系数。高膨胀性粘土的透水性往往很差，因而膨胀过程需要很长的时间。正是因为这个因素，中等膨胀性但透水性强的粘土有时较高膨胀性，但透水性差的粘土产生更大的膨胀。

23. 土的隆起一般假定为垂直于地表，因为倾向膨胀为周围的土所制止。这一假定不适用于以下情况：(a) 由于干燥而严重龟裂的土；(b) 边坡土；(c) 基础中间部分和外部间的湿度可能有微变的基土。用原状土样做的某些自由膨胀试验表明，侧向膨胀可能很大，甚至大于垂直向膨胀。

24. 在开挖深基时因应力的消除而产生的隆起也是应该考虑的。如果建筑物下面全部或局部没有 10~15 呎深的地下室，将因开挖时应力消除和基土湿度变化的共同作用而引起严重问题。

下面分述膨胀潜量、气候变化、固结试验以及有效应力的计算等方面与现场隆起的关係。

25. 膨胀潜量

所谓膨胀潜量是指土在环境条件变化时对其可能产生的膨胀程度或其膨胀能力的一种量度。膨胀潜量曾用以下几种方法测试：

- a. 自由膨胀指数 —— 测定已知体积的土在浸入水中后的体积变化。
- b. 阿特伯界限 —— 用塑性指数和收缩指数（译按：应指塑限和缩限）作为膨胀潜量的指标，因为多数土的膨胀在这二者之间的含水量时发生。
- c. 胶粒含量 —— 确定土中胶粒的成分，通常按直径小于1微米或2微米分类，因为这部分是直接影响膨胀的。
- d. 固结 —— 一般用来说明沉降与外力的关系亦可作为土膨胀潜量的指标。

按以上试验确定的膨胀潜量与下述因素有关：

- a. 矿物类型及其含量 —— 矿物的类型可以用光学和电子显微镜、X-线、热差分析、红外线、和化学分析等方法测定。膨胀取决于结构中的可交换离子，粘土的粒径愈小，单位体积土中吸附的水愈多。
- b. 密度 —— 相同的粘土在同样的初始湿度下加湿，密实的较松散的膨胀要大。
- c. 加荷条件 —— 附加荷载可以减少膨胀，以至在有自由水的条件下膨胀能保持为零。少量的膨胀会使膨胀力大大减小。
- d. 土的结构 —— 应力过程对膨胀是有影响的。原状或胶结土能承受很大变形，并吸收大部分膨胀压力。在完全相同条件下，重塑土比原状土有更大的膨胀。这是因为原状土在被重塑时，其初始硬度在剪力作用下减小了，同