

膨胀土的微结构和膨胀势

高国瑞

(化工部勘察公司, 河北沧州)

提 要

本文对具有各种不同膨胀势的样品进行了微结构特征的研究, 分析了产生膨胀的结构原因, 提出了评价不同膨胀势的微结构分类意见。根据这个分类, 有可能在工程实践中, 作为评价膨胀势的一种手段。

一、概 述

迄今为止, 还很难确认影响粘土膨胀的各种因素中那一种是起主导作用的。尽管如此, 人们认为通过对土的微结构特征分析, 有可能搞清产生膨胀的原因^[1]。我们从部分膨胀土、海洋土和黄土的微结构特征研究中证明了土的工程性质和微结构是有一定联系的^[2,3,4]。

大家知道, 膨胀土和膨胀性地基土的概念是不同的, 前者主要是指具有膨胀潜势的土, 这种膨胀潜势是产生膨胀的内在因素, 它不受外部条件(如温度、湿度、压力等)变化的影响。而后者是指在内外因素(湿度、温度和覆盖压力发生变化)作用下, 上部建筑物或土体本身将承受外加胀缩力的地基土。这种地基土的胀缩力足以使某些建筑物或构筑物开裂、破坏或无法使用。

本文的目的, 首先要搞清土的膨胀势和微结构特征的关系, 然后进一步探索利用微结构分类来评价土的膨胀势。

利用扫描电镜研究土的微结构是在真空条件下进行的, 样品一般不允许带水。有人怀疑样品脱水之后会影响土的微组织结构, 认为风干样品的微结构状态不能如实反映土的膨胀性能。通过双目实体镜多次对带水到脱水样品作连续的低倍观察发现, 在同一个断面上土体收缩时土颗粒发生平行的向心移动, 但不影响它在土结构中的相对位置。在高倍扫描电镜下也未发现由于脱水而产生贯通微裂隙。因此, 可以认为样品的缓慢风干脱水过程, 一般不会破坏土的微组织结构。另外大部分膨胀土都具有一定的胀缩可逆性, 胀缩是在缩限和胀限范围内活动, 超出这个范围, 土体就不再发生收缩和膨胀。而在固结仪中所测定的最大线收缩率(从胀限到缩限的脱水收缩)和最大线膨胀率(从缩限到胀限的浸水膨胀)不相等, 主要是因为膨胀过程受到侧壁影响之故。观察所制备的样品, 胀缩不受限制并不存在这个问题。既然含水量低于缩限时, 土体不再发生收缩, 那末应该认为风干样品的微结构状态和缩限样品的状态相同。所以对风干样品的微结构进行分析, 不仅能够反映土的膨胀性能, 而且反映的是土的最大膨胀势。所以在国外有人认为利用扫描电镜分析土的微结构, 是评价土膨胀势的最适当的方法^[1]。

我们在有关单位的支持下,对国内大部分膨胀土地区的土样和部分国外膨胀土样进行了观察和分析。这些样品的物理力学性质列在表1中。

表1 部分膨胀土样品的物理力学性质

样品名称	埋 深 H (m)	含水量 w (%)	孔隙比 e	液 限 w_L (%)	塑性指数 I_P (%)	粘粒含量 $<5\mu$ (%)	膨 胀 力 P_p (kg/cm ²)	自由膨胀 F_s (%)	胀缩总率 e_{ps} (%)
宁明 105	2.0	23	0.67	56	31	73	5.63	85	15.9
宁明 92	4.5	29	0.74	52	26	80	4.76	103	17.3
邯 27—4	1.5	23	0.65	47	25	48	0.35	87	7.2
邯 9—5	3.8	22	0.62	62	42	19	(0.30)	48	3.7
来 宾		49	1.36	62	31	48	0.01	76	8.4
洪山	6.0	28	0.79	58	32		0.28	65	7.5
束 33	5.5	38	1.06	77	40	56	1.15	101	7.0
荆门	5.6	29	0.82	55	27	57	(0.70)	71	5.8
鸡街		30	0.84	61	29	58	0.50	91	7.7
上思		29	0.77	44	25	77		72	19.0
文山	1.2	28	0.68	47	27			58	
苏丹	2.5	12	0.67	55	27	60	1.26		
乍得	2.5	22	0.80	45	20	76	1.10~2.50	75	13.6
贵县 174	7.5	39	1.09	82	47	80	1.05	65	6.3
束 20	7.5	37	1.16	56	30		0.28	59	1.7
贵县 152	5.5	31	0.87	61	34	77	1.08	49	3.4
卫家园	3.8	24	0.76	49	24	30	1.65	60	8.4

[注]为便于比较, e_{ps} 值均取 $e_{p0.5} + e_{SL}$,此指标为湖北综合勘察院所建议。

二、膨胀土微结构特征分析

1.通过对土体微结构的观察得知,在具有膨胀性能的土中,普遍地存在着面-面叠聚体,这种叠聚体大多是长扁形(图1(a)),但少数也有呈方柱形,串珠形(图1(b)),从层间吸水膨胀理论或晶格扩张理论来看,这种叠聚体是产生胀缩性的最主要的基本组织单元。图3表示面-面叠聚体示意图,土的吸水膨胀程度高。 h , H 分别表示吸水前后土体厚度,下同。图4表示边-面凝聚体,吸水后膨胀的程度低。

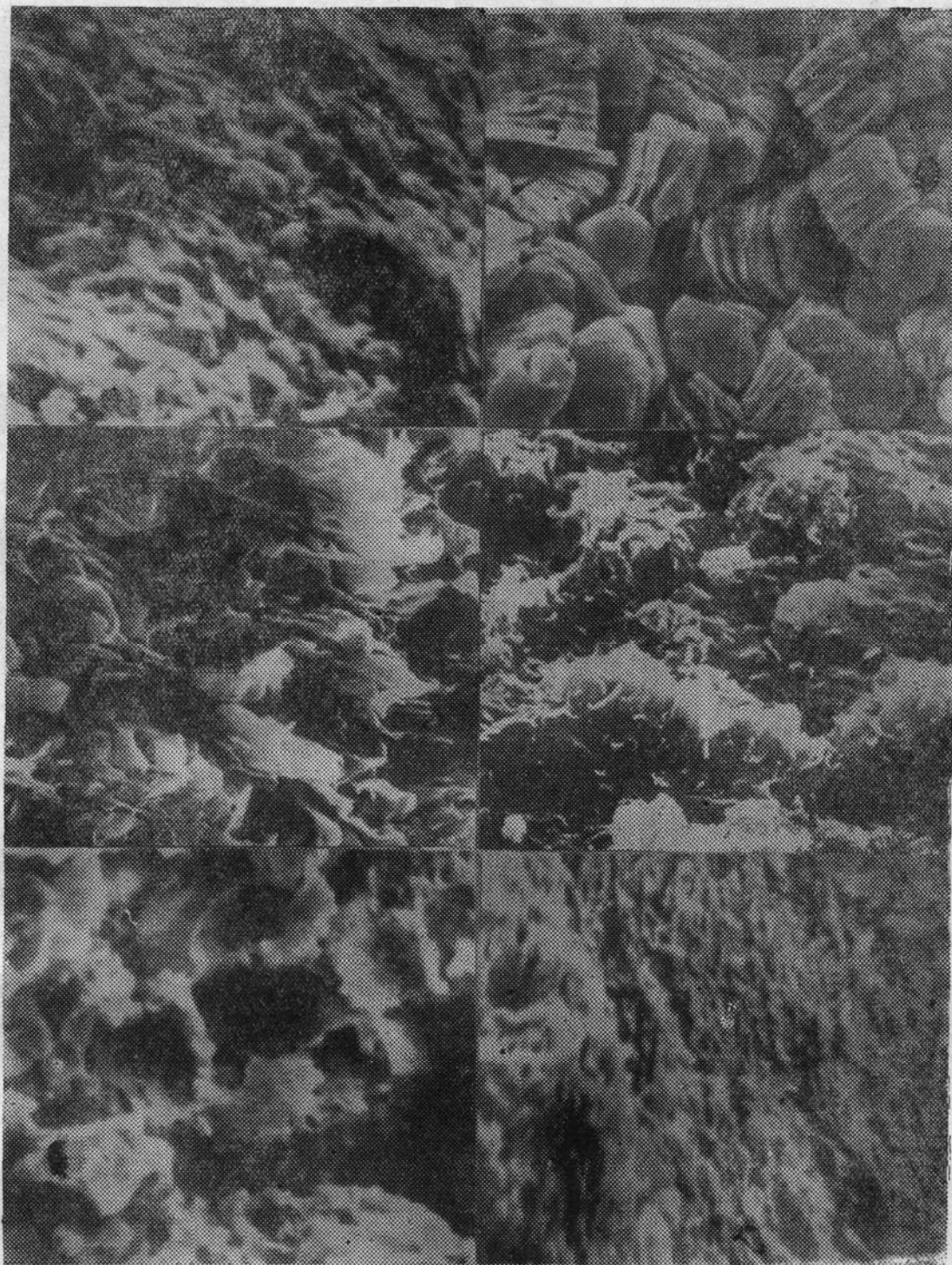
2.从面-面叠聚体的赋存状态看,除少数存在于粒间或粒间孔隙之内,大量的都是以自相集聚的方式赋存,构成粘土基质。在胀缩性强的土中,这种粘土基质所占的比例就大,在整



$\frac{a}{b}$	(a)长扁形面-面叠聚体 $\times 2000$ (荆门)	(b)方柱形面-面叠聚体 $\times 5000$ (柬埔寨)
$\frac{c}{d}$	(c)叠聚体形成的粘胶基质 $\times 580$ (宁明)	(d)粘、粉粒形成的粘粉基质 $\times 2200$ (卫家园)
$\frac{e}{f}$	(e)叠聚体水平排列 $\times 2300$ (宁明)	(f)叠聚体垂直排列 $\times 1200$ (洪山)

图1 显微图像照片之一①

①图1(a)~(f)中的数字为扫描电镜的放大倍数,原照片制版时缩小了20%。



$\frac{a|b}{c|d}$ (a) 叠聚体斜向排列 $\times 2300$ (宁明)
 $\frac{e|f}{}$ (c) 典型伊里石微结构 $\times 5300$ (山东)

(b) 典型高岭石微结构 $\times 2200$ (苏州)
 (d) 典型蒙脱石微结构 $\times 5200$ (浙江)
 (f) 叠聚体垂直排列 $\times 2400$ (贵县)

图2 显微图像照片之二①

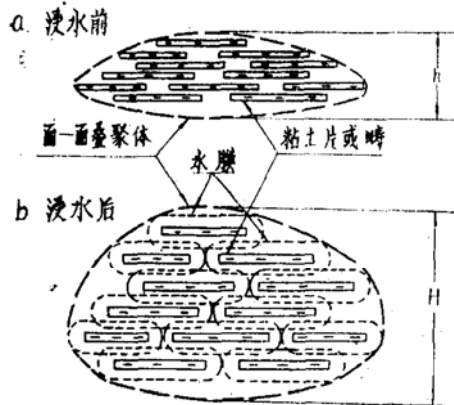


图3 面-面叠聚体浸水前后示意图

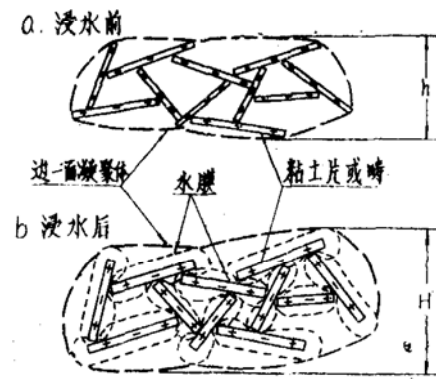


图4 边-面凝聚体浸水前后示意图

个土体结构中占绝对优势,宁明的膨胀土就是极好的例子(图1(c)及表1)。在粉粒和粘土基质各占一定比例的膨胀土中,其膨胀性就较小,卫家园(图1(d))和邯郸的膨胀土,就是因为粉粒较多,相对的粘土含量($5\mu < 40\%$)较低,因此仅具有轻微的膨胀势。这一点与在宏观试验中以粘粒含量的多寡(或液限的大小)判别土的膨胀性是一致的,同时也证明粉粒本身不起胀缩作用,而粘土基质才是发生膨胀的根源。

3.显微图像表明,具有膨胀性的土,面-面叠聚体一般是互相搭接,呈平行排列,且大多是水平向平行排列(图1(e)),但也有垂直竖向排列(图1(f)),或斜向排列(图2(a))。这种排列就决定了胀缩的方向性,这一点已为实践所证明。

4.上述现象说明,面-面叠聚体排列的方向和叠聚体内粘土片或畴的排列方向一致,因此叠聚体前后搭接形成平行带状体,尤其是在排列比较密集的膨胀土中很难辨别单个叠聚体的首尾,一般呈水平层理状。叠聚体排列的疏密直接影响胀缩的程度。当叠聚体排得紧密,所有粒间缝隙挤得很紧,遇水膨胀时,只有向外扩张;而叠聚体排列疏松的土体,则浸水膨胀时首先填充原有的孔隙,然后再向外扩张。因此在相同条件下,叠聚体排列密集,浸水后,膨胀压力就大,膨胀程度就高;反之,则膨胀压力就小,膨胀程度就低。这一点和宏观试验中所发现的膨胀性和密度之间的关系是一致的。

5.在分析粘土的形态时,我们发现构成面-面叠聚体的粘土片、畴,它的形态和胀缩性有一定联系。具有曲面起皱的粘土片、畴的土体,它的胀缩程度远比扁平而直的粘土片、畴要来得高。这可能和粘土的矿物成份有关。 X 衍射分析证明前者为蒙脱石和伊里石,后者为高岭石。从典型的粘土矿物的形态来看,高岭石(图2(b)),外形呈扁平而直且较厚;蒙脱石(图2(d)),外貌弯曲而起皱且较薄;伊里石外形平缓地带曲(图2(c))。众所周知蒙脱石的胀缩性远比高岭石高。所以从微形态上也可以大致分辨粘土矿物的成分,从而区别土的胀缩性。

三、微结构分类和膨胀势

根据以上分析,笔者就影响土的膨胀势的微结构特征,提出以下看法。

1.土体产生膨胀的条件是,土中不仅要有面-面叠聚体,而且这种叠聚体必须大量地以自相集聚的方式构成粘土基质,粉粒含量增多就会明显地降低膨胀势,所以我们根据粘土基质

在土体中所占的比例, 将微结构分为两类, 一类为粘胶基质结构(图5), 另一类为粘粉基质结构(图6)。前者的胀缩程度高, 后者则较低。



图5 粘胶基质示意图

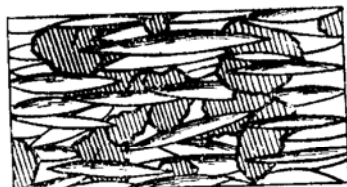


图6 粘粉基质示意图

2. 构成面-面叠聚体的粘土片或粘土畴的形态, 在一定程度上影响土的胀缩程度。由于我国膨胀土的主要粘土矿物为伊里石, 然而伊里石的形态基本上呈曲片状, 所以我们根据粘土片、畴的形态, 划分成曲片状面-面叠聚体(图7)和平片状面-面叠聚体(图8)两类, 曲片状的胀缩程度较高, 平片状的胀缩程度较低。



图7 曲片状面-面叠聚体示意图



图8 平片状面-面叠聚体示意图

3. 面-面叠聚体排列的疏密, 也是决定膨胀势高低的重要因素, 因此在考虑结构分类因素中也把面-面叠聚体的排列划分成开放(图9)和密集(图10)两类。



图9 面-面叠聚体开放排列示意图

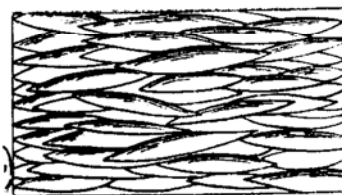


图10 面-面叠聚体密集排列示意图

除以上因素之外, 面-面叠聚体的取向, 对于决定膨胀方向是极为重要的, 但对于土体的总的膨胀势则无甚影响, 所以在判别膨胀势的分类中可以不考虑, 但是在评价膨胀土的工程地质条件时, 不能忽略这一点。

综合以上三方面因素, 结合常见的膨胀土中存在的结构类型和它们的相应的物理力学性质, 可以把土的微结构划分为八类并列入表2, 表中“类别”栏内罗马数字的排列顺序, 由I至Ⅷ表示膨胀势由强逐渐减弱。

按表2的分类方法, 对表1中各个样品的显微图像进行逐个鉴定, 其结果列在表3中

表 2

膨 胀 土 微 结 构 类 型

面-面叠聚体赋存状态			膨 胀 势	类别	结 构 类 型
形 态	排 列	基 质			
曲片状	密集	粘胶质	强 烈	I	曲片状、密集、粘胶基质结构
曲片状	开放	粘胶质	强	II	曲片状、开放、粘胶基质结构
曲片状	密集	粘粉质	中偏强	III	曲片状、密集、粘粉基质结构
曲片状	开放	粘粉质	中	IV	曲片状、开放、粘粉基质结构
平片状	密集	粘胶质	中偏弱	V	平片状、密集、粘胶基质结构
平片状	开放	粘胶质	弱	VI	平片状、开放、粘胶基质结构
平片状	密集	粘粉质	微 弱	VII	平片状、密集、粘粉基质结构
平片状	开放	粘粉质	无	VIII	平片状、开放、粘粉基质结构

表 3

部 分 膨 胀 土 样 品 微 结 构 分 类 表

样 品	面-面叠聚体赋存状态			类别	膨 胀 势	微 结 构 类 型
	形态	排 列	基质			
宁明105	曲片状	密集	粘胶质	I	强 烈	曲片状、密集、粘胶基质结构
宁明92	曲片状	密集	粘胶质	I	强 烈	曲片状、密集、粘胶基质结构
邯27—4	曲片状	密集	粘粉质	III	中偏强	曲片状、密集、粘粉基质结构
邯F9—5	曲片状	密集	粘粉质	III	中偏强	曲片状、密集、粘粉基质结构
来宾	曲片状	开放	粘粉质	IV	中	曲片状、开放、粘粉基质结构
洪山	曲片状	开放	粘粉质	IV	中	曲片状、开放、粘粉基质结构
東 33	曲片状	开放	粘胶质	II	强	曲片状、开放、粘胶基质结构
荆门	曲片状	开放	粘胶质	II	强	曲片状、开放、粘胶基质结构
鸡街	曲片状	开放	粘胶质	II	强	曲片状、开放、粘胶基质结构
上思	曲片状	开放	粘胶质	I	强 烈	曲片状、密集、粘胶基质结构
文山	曲片状	开放	粘粉质	IV	中	曲片状、开放、粘粉基质结构
苏丹	曲片状	开放	粘粉质	III	中偏强	曲片状、密集、粘粉基质结构
乍得	曲片状	开放	粘胶质	I	强 烈	曲片状、密集、粘胶基质结构
贵县174	曲片状	开放	粘胶质	II	强	曲片状、开放、粘胶基质结构
東 20	平片状	开放	粘胶质	VI	弱	平片状、开放、粘胶基质结构
贵县152	曲片状	开放	粘粉质	IV	中	曲片状、开放、粘粉基质结构
卫家园	曲片状	密集	粘粉质	III	强	曲片状、密集、粘粉基质结构

把表 3 样品的结构类型和表 1 相应样品的膨胀性指标作比较并绘在图上。图11是膨胀压力和微结构分类关系图,大部分点子都集中在图的左部,没有明显的规律性,这说明膨胀压力受到天然含水量的影响,不能如实地反映土的膨胀势。图12为自由膨胀和微结构类型关系图。由于自由膨胀不受天然含水量的影响,能在一定程度上反映土的膨胀势,因此图12也多少能表现出随着微结构类型由 I ~ VIII 顺序递增其自由膨胀量则呈递减的趋向。然而自由膨胀量指标是用扰动土样测定的,反映不出土内部结构的状况,所以图12上的点也比较分散。图

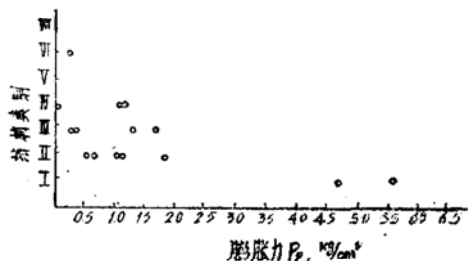


图11 膨胀力和结构类别关系图

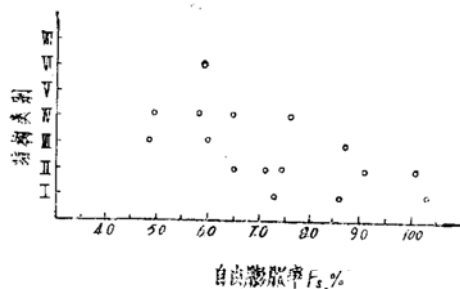


图12 自由膨胀和结构类别关系图

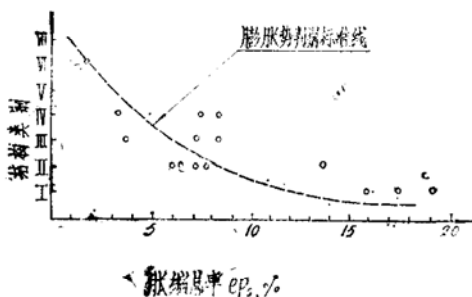


图13 胀缩总率和结构类别关系图

13为胀缩总率和微结构类型的关系图, 由于胀缩总率能在一定程度上反映出土体结构的状况, 所以其规律性要比图12好, 图上的点子比较接近于膨胀势判别线^①。当然图13也还不够理想, 一方面由于胀缩总率多少还受天然含水量的影响, 另一方面所取的样品数量还不够多。然而有一点可以肯定, 按微结构类型来鉴别土的膨胀势的可能性是存在的, 假如能够进一步积累资料, 再适当补充和调整一些微结构

类型, 就有可能作为评价土的膨胀势的一种手段。

四、两个有关判别膨胀势的例子

1. 关于红粘土是否具有膨胀势, 这个问题在云南、贵州一直有争论。在我们这次电镜观察中, 对广西贵县的红粘土和湖南、江西等地的红粘土进行了对比观察。广西贵县的红粘土膨胀性指标见表1, 而湖南、江西两地的红粘土不具膨胀性, 自由膨胀率均小于30%。扫描电镜观察发现, 贵县红粘土的微结构中具有明显的面-面叠聚体, 并且这些叠聚体呈垂直向平行排列(图2(f)), 按照上述微结构分类将被划分为II类膨胀土, 它们的膨胀势可达“较强”的程度。而湖南、江西的红粘土不仅没有明显的面-面叠聚体, 而且连粘土颗粒和凝聚体的轮廓边界也是模糊不清的。这也许是该地区红粘土不具膨胀势的原因。

2. 关于枣阳蒙脱型粘土不具膨胀性的问题。枣阳车站附近的白色粘性土, 它的粘土颗粒的矿物成份经X衍射, 红外吸收光谱, 差热分析以及化学分析都证明是蒙脱石, 然而测定的自由膨胀率只有20%, 通过扫描电镜观察, 得出结论如下:

- ① 存在着相当多的粉质碎屑而粘土含量不高, 不足以形成产生膨胀物质基础的粘土基质。
- ② 最重要的一点, 也就是根本没有发现粘土片之间形成面-面叠聚的形式, 而是形成边-边和边-面相联结的结构(图2(e))。所以即使普遍认为具有膨胀性的蒙脱石, 在这种结构条件下, 不具备足够的膨胀势。

以上两例也多少说明土的微结构和膨胀势的关系。

^①此线系根据湖北综合勘察院提出的判别等级绘制成的。

五、结 论

1. 面-面叠聚体的存在是产生膨胀的主要结构原因。

2. 分析面-面叠聚体的赋存状态(包括粘土基质的含量、形态、排列和取向等)是从微结构形态上鉴别土是否具有膨胀势的一种途径。

3. 根据膨胀土的微结构特征和膨胀性的关系,可以划分不同的微结构类型。通过微结构分类有可能判别土的膨胀势。

4. 按微结构类型确定的膨胀势与胀缩总率、自由膨胀量有一定关系,而和膨胀压力无关。

参 考 文 献

- [1] Ravina, I., Swelling of Clays, Mineralogical Composition and Microstructure, Proc. 3rd. Int. Conf, Expansive Soils, Haifa, Israel, 1973, pp. 27~33.
- [2] 高国瑞, 膨胀土微结构特征研究, 工程勘察, 1981年第5期, 第39~42页。
- [3] Gao Guorui(高国瑞), Microstructural Features of The Marine Soils in China, Proc. IV. Congress IAEG, New Delhi, Vol. VII, 1982, pp. 263~273.
- [4] 高国瑞, 黄土显微结构分类与湿陷性, 中国科学, 1980年, 第12期, 第1203~1208页。

Microstructures of Expansive Soil and Swelling Potential

Gao Guo-rui

(Geotechnical Investigation Corporation, Ministry of Chemical Industry, Cangzhou, Hebei)

Abstract

In the present paper, expansive soil samples with different swelling potentials are studied for their microstructure features, and the causes for the expansion are studied from the analysis of soil structure. Based on these studies, a microstructure classification method has been proposed for evaluation of different swelling potentials which may serve as a means to evaluate the swelling potentials of the soil in engineering practice.