

非悬浮状态下土*的比表面电导的测定

程昌炳 徐昌伟

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

提 要

本文提出了求非悬浮状态下土的比表面电导 K_s 的方法。

表面电导是指被吸附在双电层内部的离子的电导,它是研究双电层特性的一个重要参数。因为它受到吸附物及被吸附离子性质和环境因素所制约,它直接影响到胶体颗粒(吸附物)的动电行为。众所周知,双电层结构常常被用来解释土的工程特性,因此对土的表面电导的研究,将加深我们对其工程特性的了解。

悬浮状态下土的电导和表面电导的研究,前人做过不少工作,于天仁等已作了系统的阐述^[1]。但是,实际中的土并非都呈悬浮状态,另外在研究土与地下水的相互作用时,在这种水-土体系中,土也并不是悬浮在地下水。在工程实践中,非悬浮状态的土既不同于悬浮态,更不同于稀的悬浮态,那末它的表面电导如何确定呢?

根据表面电导 k_s 的定义有 $k_s = K_s \frac{L}{\delta}$, 其中 K_s 为比表面电导, L 为线状电极的长度, δ 为两线状电极的距离。显然表面电导 k_s 为容量因素,不便干比较。而比表面电导 K_s 是单位长度的电极在导电的表面上相距单位距离时的表面电导,它是强度因素,便于比较。因此土的表面电导的测定就归结为比表面电导的测定,正如人们研究电阻就要研究比电阻一样。

一、确定非悬浮状态下土的比表面电导的原理

当液体受压而通过毛细管或多孔隔膜时,在它们的两端或两侧就产生电位差,这就是流动电位。固相物质的比表面电导对流动电位是有影响的,可从下式中看出(当然公式的适用条件还有:流动是层流;孔的曲率半径比其双电层厚度大许多):

$$E_s = \frac{PD\zeta}{4\pi\eta\left(K + \frac{l}{a}K_s\right)} \quad (1)$$

式中 E_s 为流动电位, P 为液体所受的压力, D 为液体的介电常数, η 为液体的粘度, K 为液体的比电

导, a 为毛细管的横截面积, l 为毛细管横截面的周长, K_s 为固相的比表面电导。

在文献[2]中,我们曾令

$$K_b = \alpha\left(K + \frac{l}{a}K_s\right) \quad (2)$$

式(2)中, K_b 为土块的比电导。依比电导的定义有:

$$K_b = \frac{h}{SR} \quad (3)$$

式(3)中, h 为土块的高, S 为土块的横截面积, R 为土块的电阻。

另外在式(2)中, α 是传导系数,我们认为,对于一个给定的土,当孔隙比及结构一定时,它为常数。我们可以通过实验的方法求出 α 的大小,详见^[2]。

$$\text{由式(2)得 } K_s = \left(\frac{K_b}{\alpha} - K\right)\frac{a}{l} \quad (4)$$

式(3)代入式(4)得,

$$K_s = \left(\frac{h}{SR} \cdot \frac{1}{\alpha} - K\right)\frac{a}{l} \quad (5)$$

式(5)中, h 、 S 、 R 、 α 均可在实验中直接测得或求得。现在我们还需知道 a/l 的数值, K_s 方可算出。

当液体在受压下,通过一定几何形状 of 土块时,该液体实际上是通过了许多的毛细管,我们所测得的流动电位 E_s 实际上是这许多毛细管的综合贡献。为此,不妨用一根毛细管来等效这许多毛细管,而且假定这根等效圆毛细管的半径为 r , 因此

$$\frac{a}{l} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} \quad (6)$$

半径 r 的数值为何,鉴于非悬浮态土体系本身的复杂性,目前尚无简便易行的方法来精确地知道它,只得粗略地利用土工实验所得的孔隙比 e 来确定。不过从我们的研究结果表明,这样处理还是可行的。正如上述,我们可以认为土的孔隙的体积即是那根等效的圆毛细管的体积,它的半径为 r , 而且假定它的长与土

* 非悬浮状态下土是指含水量约在两倍流限至塑限左右,可用环刀取而呈块状者。

块的高相等, 均为 h , 因此:

$$e = \frac{V_n}{V - V_n} = \frac{\pi r^2 h}{hS - \pi r^2 h} = \frac{\pi r^2}{S - \pi r^2}$$

即有:
$$r = \sqrt{\frac{Se}{\pi(1+e)}} \quad (7)$$

式(7)代入式(6)得 a/l 之值, 再代入式(5)有:

$$K_s = \left(\frac{h}{SR} \cdot \frac{1}{\alpha} - K \right) \cdot \frac{\sqrt{Se/[\pi(1+e)]}}{2} \quad (8)$$

这就是我们可以直接应用的公式了。式中 h 、 S 、 R 、 e 分别是土样的高、横截面积、电阻、孔隙比, α 为与 e 相应的传导系数, K 为孔隙液的比电导。

二、实验方法

本实验方法基本上同于文献[2]。简述如下: 将市售高岭土(规格、型号详见[2])首先制成钠质高岭土, 再将其孔隙液 NaCl 调至某浓度(如 1M, 0.1M 等), 再固结成型, 用环刀切取, 装入流动电位槽中(该槽的结构见[2]), 记下土样的高度 h , 面积 S 。另外通过含水量和容重的数据算出孔隙比 e 。在流动电位槽中还测得相应的总电阻 R , 孔隙液的比电导 K 用比电导仪另行测定。

为了求得传导系数 α 值, 必须先作出 $e \propto K_b/K$ 的一组图, 以找到孔隙液浓度足够高的那条曲线上的 $e \propto \alpha$ 曲线, 因为 $\alpha = (K_b/K)$ 足够浓^[2], 在这条曲线上就可以找到不同孔隙比所对应的 α 值了。这样, 对于一个土样来说, 其 h 、 S 、 R 、 K 、 α 、 e 均已知, 则比表面电导 K_s 便可直接用式(8)求得。

三、结果及其分析、讨论

现将有关的实验数据列于表1。从计算所得的 K_s 来看, 当钠高岭土的孔隙液浓度变化时, 它们也变化, 而且呈正相关, 即孔隙液愈浓, 则它们也愈大。这种现象显然与它们的双电层结构有关, 土的孔隙液愈浓, 它的双电层也愈被压缩, 那么显示在滑动面上的净负电荷也愈少, 因此对扩散层(Gouy层)中的反号离子的引力也变小, 其淌度当然就增加, 使得 K_s 增大。双电层的压缩也存在使 K_s 减小的因素, 那就是离子之间的距离减少之故。从我们的研究结果看来似乎前者强于后者。

但在本实验中, 孔隙液浓度最大的是样品 K-0-7, 其值为 1M, 按式(8)计算, 它的 K_s 却最小, 而且为零, 这似乎有些异常, 见表1。

为讨论的方便, 我们定义土的比表面电导此时处于“假零状态”。这个状态就是土具有足够高的孔隙

表 1

样号	样高 h (cm)	横截面积 S (cm ²)	孔隙液 NaCl 浓度 c (M)	孔隙比 e	传导系数 α	电阻 R (Ω)	孔隙液比电导 K ($\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	比表面电导 K_s (s)
K-0-7	2.00	20.0	1.0	2.140	0.365	4.0	6.85×10^{-2}	[0]
K-1-7	2.00	20.0	0.10	3.539	0.390	18.4	7.85×10^{-3}	6.75×10^{-3}
K-2-7	2.00	20.0	0.010	3.819	0.400	122	9.38×10^{-4}	1.25×10^{-3}
K-3-7	2.00	20.0	0.0010	4.686	0.400	659	1.03×10^{-4}	3.28×10^{-4}
K-4-7	2.00	20.0	0.00010	4.688	0.400	2710	1.80×10^{-5}	8.54×10^{-5}

液浓度, 以致使它的比表面电导较其孔隙液的比电导小到可以忽略的状态。由^[2]可知, 传导系数 α 就是“假零状态”下的土块的比电导与相应的孔隙液的比电导 K 之比, 即

$$(K_b/K)_{\text{孔隙液足够浓}} = \alpha$$

把它代入式(4)中, 当然得 $K_s = 0$, 也就是说从求算 K_s 的假设出发, 必然导致在“假零状态”下 $K_s = 0$ 的结果。根据实验条件, 孔隙液 NaCl 的浓度为 1M 的状态就是所谓的“假零状态”。但实际上, “假零状态”下的表面电导是否真正为零呢? 这个问题涉及到

双电层的密致层(stern层)内的被吸附离子是否对电导有贡献的问题, 这是一个有争论的问题。如果密致层的离子完全对电导无贡献, 那么当双电层被液电解质压缩到只有密致层, 而无扩散层时, 自然其比表面电导 K_s 为零。否则, 即使双电层被压缩到仅有密致层, K_s 也不会为零, 在这种情况下, 它的值可能又是多少呢? 我们作如下的探讨。

在表1中, 若用 K_s 除以其相应的 K , 且把该值叫做相对比电导, 用 K_R 表示, 即有

$$K_R = K_s/K$$

土的孔隙液浓度不同, 其比电导 K 不同, 比表面电导 K_s 也不同, 所以 K_R 也不同。

表 2 中列入了相对电导 K_R 的数据及以此推算“假零状态”下非零的比表面电导值的有关数据。

表 2

样 号	比表面电导 K_s (s)	相对比电导 K_R
K-0-7	1.23×10^{-2}	0.180
K-1-7	(同表 1)	0.860
K-2-7	(同表 1)	1.33
K-3-7	(同表 1)	3.18
K-4-7	(同表 1)	4.74

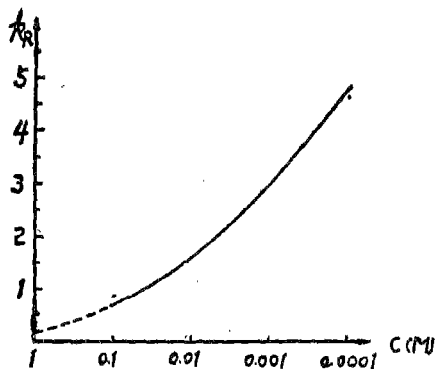


图 1 土的相对比电导 K_R 与其孔隙液浓度 C 的关系

(上接第 61 页)

$$V = \int_{t_0}^{t_1} Q dt$$

式中: t_0 ——为投放时间; t_1 ——示踪剂弥散中心浓度(峰值浓度)到达接收点的时间; Q ——接收

根据上表所列数据, 用 K_R 对 C 作图如下, 再将它外推至孔隙液浓度为 $1m$ 处, 得相应的 K_R 值为 0.18 , 于是反推之得,

$$K_s = K_R \cdot K = 0.18 \times 6.85 \times 10^{-2} \\ = 1.23 \times 10^{-2} s$$

对“假零状态”作上述处理后, 得到相应的比表面电导值。但在工程实践中, 一般是难于遇到这种“假零状态”的, 所以在该状态下的比表面电导值往往未被追究。

四、结 语

笔者在文中假定液体在受压下通过土块是通过一根等效的圆毛细管, 并从该土的孔隙比来推算其毛细管的半径, 由于该体系的复杂性, 当然与实际情况有差异, 但从实验数据及其比表面电导的计算结果来看, 与双电层理论是相符的, 并未见异常, 因此有理由认为本文的假设还是大致接近于实际情况的, 进而采用本文的方法确定非悬浮态土的比表面电导是可行的。另外本文的目的在于介绍求非悬浮态土的比表面电导的方法, 也涉及到了比表面电导与上的孔隙液浓度的关系, 其他特性将另文介绍。

感谢长江水利水电科学研究院王幼麟高级工程师为我们阅读文稿并提出宝贵意见。

参考文献

[1] 于天仁等, 土壤的电化学性质及其研究法(修订本), 科学出版社, 1976。

[2] 陈守义、程昌炳、徐昌伟, 用流动电位法测粘土的 ξ 电位, 岩土工程学报, 第 4 卷, 第 2 期, 1982。

由上式不难看出, 体积与流量大小和示踪剂经历时间的长短有关。一般情况下, 洪水期的最大流量则反映过水管道系统的最大体积(表 2)。

表 2 贵州一些地下河段过水管道体积一览表

地 点	流 量 (l/s)	距 离 (m)	示踪剂名称	重 量 (kg)	投放至峰值浓度所经历 时间 (h)	管道体积 (m ³)
河杠—麻公地下河段	1400	5000	碱性玫瑰精	10	57	287280
河杠—白岩地下河段	1500	7000	碱性玫瑰精	10	71	383400
河杠—尧花地下河段	1800	10100	碱性玫瑰精	10	81	524880
360 蹬—菜花洞地下河段	700	1800	荧光素	10	72	181440
360 蹬—半窝浓地下河段	750	2550	荧光素	10	96	259200
标水岩地下河	600	3910	食 盐	2000	6.5	14040
河底地下河	70	2700	食用苋菜红	20	21	5292
架桥地下河	800	1760	食用胭脂红	9	6.5	18720
养寨地下河	300	1000	食用胭脂红	5	3.75	4050