

城市建設部地方建筑施工技術會議

技術資料彙編

(18)

土壤电动砂化
加固法的理論与施工

城市建設出版社

城市建設部地方建筑施工技術會議
技術資料

(18)

土壤電動砂化加固法
的理論與施工

城市建設部建筑工程局編

北京市書刊出版業營業許可証出字第 088 号

城市建設出版社出版(北京阜外大街)

國家統計局印刷廠印刷 新华書店發行

書号 076 80 千字 787 × 1092 $\frac{1}{32}$ 3 $\frac{1}{2}$ 印張

1957 年 7 月第 1 版

1957 年 7 月第 1 次印刷

印數 1——1760 冊

定價 (10) 0.55 元

前 言

城市建設部于今年8月召开了全国地方建筑施工技术會議。会后，根据各省市地方建筑部門的要求，將这次會議中交流的一部分技术資料整理出来，分为18个專輯出版，以供各省市地方建筑部門的技术人員参考。

但是，由于地方建筑部門的条件差，有些新技术的試驗和实践經驗尚不夠完整，同时限于出版倉促和整理校訂者的水平，錯誤及不妥之处在所难免，希望讀者批評指正。

城市建設部建筑工程局

1956年11月

目 录

引 言	1
一、理論	2
(一) 电动砂化的基本理論	2
1、加固的目的	2
2、土壤中的电动現象	4
3、电动砂化法	9
(二) 电动砂化加固工程的設計	20
1、勘测、鑽探工作	21
2、建筑物的基础加固計算	22
3、防水幕厚度的計算	23
4、深基础加固的計算	24
5、化学溶液的濃度和用量	24
6、电极的布置与电极間的距离	28
(三) 土壤电动化学加固工程的应用	29
1、电动砂化加固法在各种土壤中的应用范围	29
2、电动砂化加固应用的实例	30
(四) 施工时各种溶液的配制計算	34
1、稀釋水玻璃溶液时和水量的計算	34
2、使用濃度的氯化鈣溶液的配制	34
3、工程化学溶液用量的計算方法	36
二、某厂基础电动砂化加固施工	39
(一) 某厂基础加固前的勘测及試驗	39
1、一般情况	39

2、地質資料的彙集	41
3、某厂地基电动砂化方案的決定	42
(二)某厂基础加固前的設計	47
(三)施工前的准备工作及設備	49
1、电極管的定位工作	50
2、保溫及防雨設備	50
3、蒸气、水、电源的設備	50
4、主要材料工具的准备	50
5、其他設備	56
6、劳动力的組織	57
(四)注药管、極棒的打入及拔出	58
1、蒸气刺針刺穿冻土操作方法	58
2、电極管的打入方法	58
3、拔管的方法	60
4、断管的处理	60
5、打、拔管时应注意的事項	61
6、管子打不进去时的处理办法	63
7、斜管及鋼筋棒的打入	63
(五)溶液的灌注	64
1、刷洗管子	64
2、溶液的配制	66
3、溶液的灌注及药液的調整	63
(六)統計、記錄及輔助工作	70
(七)通电	72
1、电动砂化加固措施	72
2、通电时应注意事項	76
3、电动砂化加固工程技术与保安方面的措施	78
(八)質量檢查	78

1、沉陷观测	79
2、贯入试验	79
3、鑽探	80
4、野外加固试验	81
(九)电动砂化法加固地基操作方法综述	81
(十)电动砂化加固法技术操作规程	86

引 言

本資料的編制分兩部分：一、电动矽化加固的基本理論，二、某厂厂房基础电动矽化加固施工。第一部分是根據波蘭蔡白尔多維奇院士的講義和建筑工程部建筑技术研究所的“土壤电动矽化加固方法的理論与技术資料”，并結合某厂加固施工的經驗編写的（双电層和电动現象，是根据中央的資料采摘下来的）。第二部分是根據波蘭院士蔡白尔多維奇教授确定的加固原則、加固設計并結合施工中的几点体会整理出来的。前半部多半是理論，后半部是施工过程，問題的解決方法和質量的檢查驗收等。

电动矽化和电动鋁化是研究改造土壤的一門科学。其中电动矽化法是專門研究加固土壤的科学，即根据土壤的形成性質、土壤中的电动現象和地下水的运动規律性进行改造地基的一种方法。

本資料編写的基本目的，乃是想帮助那些初参加电动矽化加固工作的人員掌握基本知識；并使他們通过这本书，能夠在學習人民民主国家的先进經驗上、解决軟弱地基及防水問題上，得到一些参考。

应当提出來的是，我們閱讀到的有关这方面的先进經驗的書籍并不多，業務知識水平也有限，因而在某些地方还没有能夠領會到先进資料的基本精神；这样在本資料中的理論和用詞上，就难免有不恰当之处。因此，我們誠懇地希望讀者随时提出意見。

黑龍江省城市建設局

一、理 論

(一) 电动矽化的基本理論

电动矽化(化学加固)法是利用土壤中的电动(电滲、电泳)現象,使土壤中的水(靜止或流动的),不只是由水压而产生运动,同时也受电的影响出現电滲、电泳現象。

电动矽化在靜止或流动的通常的水(地下水)压下,由于电力的誘导,使水玻璃和氯化鈣的溶液深入微細的土壤顆粒的孔隙中結成矽膠,起比較均匀的作用。并使膠結后的土壤的脱水达到一定的要求。同时,因电动矽化的結果,也改良了建筑物地基的土壤。

本电动矽化法系苏联的先进經驗(化学药液苏联在很早以前就已經采用,但注药时是利用压力的办法)与波蘭院士蔡白尔多維奇多年研究成功的电动理論(电泳、电滲)結合的产物。

1、加固的目的

建筑地基土壤的軟弱和地下水的流动、侵蝕,对建筑物的基础有着程度上不同的害处。特别是含有化学成分的地下水,对地基基础的侵蝕(冲刷和溶解)更为強烈,極易使土壤松动,降低地基土壤的允許耐压应力。这种作用,又通常發生在具有湿润生产的厂房基础地基中,这就会影响到工程的质量。

由于地下水的流动,往往会帶动土壤中的細小顆粒(如淤泥或流砂),这也是降低建筑物承载力的原因之一。另一原因是由于地下水的冻结。地下水一冻结,势必引起建筑物的升降和移

动，甚至造成整个建筑物的破裂或倾斜。

为了加固地基基础，近百年来我们采取的办法不外乎以下几种：

- (1) 采用灌水泥浆、粘土浆、热沥青等特殊处理的办法；
- (2) 加深基础的埋置深度（深基础）；
- (3) 采用大量混凝土和钢材来加固建筑物的基础；
- (4) 加大基础的断面和改造加固基础的地基。

为了今后在新建、恢复、扩建、改建工程中，充分利用比较成熟的科学方法——“电动砂化法”，首先必须了解其加固的目的：

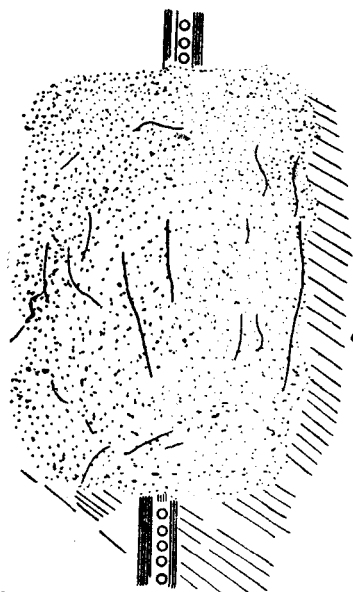
1) 增加土壤的强度：可以提高地基土壤的承载力，使土壤的强度达到一定要求。

2) 增加土壤的不透水性：由于溶液的作用，可以提高土壤的不透水性（耐水性）。

3) 增加土壤的密度：由于电渗和砂胶的作用，可增加颗粒间的粘结力。

4) 增加朽木的强度：为了保存古代的已朽木质遗物，防止其继续腐朽。

有时，几种加固目的可以合并一起使用。电动化学加固法（电动砂化法）虽尚年青，但从几年来使用的效果来看，却是先进的地基加固方法。它的使用范围也比较广泛，在砂



图一、砂化后的土壤管被拔后附着于管壁上的土壤

土、粘土或淤泥等不同土壤中都可应用，因此土木、建筑、水利等工程都有一定的利用价值。但不等于在任何土壤中都可以应用，苏联就曾經專門討論过这一問題。

2、土壤中的电动现象

(1) 土壤中水的运动規律:

地下水的运动是由于地下水的水头高、低而引起的。根据达西 (Darcy) 的定律，水在土壤中的速度为:

$$V_h = K_h \frac{h}{e} \dots\dots\dots (1)$$

式中: V_h = 水流速度

K_h = 滲透系数 (公分/秒)

h = 水头差 (系数)

e = 水头的距离

这公式适用于土壤内水平流时的情况。水在大塊粗粒土内呈现紊流时，則根据苏联克斯諾波理斯基的定律处理，

$$V_h = K_h \sqrt{\frac{h}{e}} \dots\dots\dots (2)$$

假設土壤中通以直流电、水在土壤中依电流而流动时，則应利用下列公式:

$$V_E = K_E \frac{V}{e} \dots\dots\dots (3)$$

式中: V_E = 通电后水流的速度

K_E = 电气滲透系数 (簡称电滲系数，平方公分/秒伏)

V = 电压 (伏特)

L = 电极間距离 (公分)

$$\frac{V}{e} = \text{电压梯度} \left(\frac{V}{e} = 0.4 \sim 0.6 \text{ 伏特/公分} \right)$$

根据土壤的不同性質， K_h 值的变化很大， K_E 值变化很小。根据波蘭蔡白尔多維奇院士的研究，在一般的土壤中， $K_E = 10 \sim 5$ 平方公分/秒伏左右。瑞士学者Schaad和Haicbr二人对电渗作用进行了研究，在論文中提出：通电后水的流速必須为兩者之和，即等于 $V_h + V_E$ 。因此得出下式：

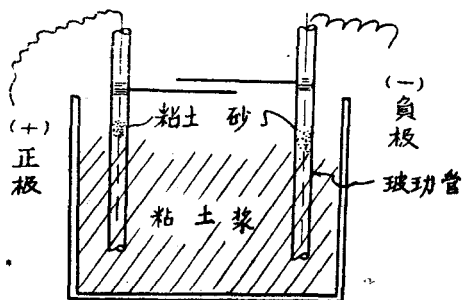
$$V_F = V_h + V_E$$

式中： V_F = 地下水通电前与通电后的自然速度和电渗速度的总和。

(2) 电动現象：

在19世紀初叶（公元1809年），俄国莫斯科大学教授Rasa进行了試驗，發現了粘土中的电动現象（見圖2）。他首先把粘土漿放置于玻璃箱內，用兩支玻璃管分別插入箱內的粘土漿中。在管內仔細地裝入洗淨了的砂土，并注入适量的淨水；然后在玻璃管內的水中放入两个金屬的电柱棒，作为正負電極，并通以直流电。在通直流电后，則發現正極的玻璃管內的水逐漸混濁，同时有少量粘土粒子趋向陽極；而負極的玻璃管中水面逐漸上升。由于通直流电的作用，粘土的細粒穿过砂土向陽極移动，而水分則趋向陰極。这两种不同的現象，就是所謂电动現象。

如將金屬電極棒直接插入粘土漿（塑性粘土）中通电后，則見正極周圍的粘土漿（塑性



图二 Rasa 試驗

粘土)逐漸干燥,長時間后,周圍因干燥而出現裂縫;而負極周圍的塑性粘土逐漸稀軟。這充分証明了,在电位差的作用下,粘土漿中水的运动,是由陽極趨向陰極的。

(3) 双电層的構造(根据建筑工程部建筑技术研究所的資料):

根据很多理論資料和实验的証明,在現代膠体化学中运用双电層,已經解决了不少問題。

由于固体構造中的表面离子層有自由的不飽和的价,因此在固体顆粒表面具有一層电荷層(圖3中的1)。土壤的矿物細粒或膠質細粒,其基本核心系由 SiO_2 及 Al_2O_3 構造單位所組成。由于構造关系,可因吸引离子或因电离而損失陽离子,以致在顆粒的表面帶有負电荷,有吸附陽离子的能力。如我們把双电層看做是与电容器相似,則这一个电荷層好象电容器的內壳。在与固体顆粒直接接触的液体中,反离子層很牢固地吸附在固体顆粒表面;这是由于靜电子引力很大的緣故(圖3中的2)。但其电荷数不足,以致固体顆粒的电荷中和。因此,在液体內部,离接触面較近处还有与第2層同符号的电荷層3。距离接触面越远,吸力就越小,因此随着距离的延長而增加其可动性,形成一个可动的离子層,其密度也越远越小。这部分叫“扩散層”。

在双电層中有一定的电位降落。在固体中的电位是一定的,在双电層以外的液体中的电位也是一定的,其电位差除去在第2層固定層內的电位差,即在扩散層內的电位降落,就叫“电动电位”。各种土壤中的电动电位都不一样,因而影响土壤的电滲系数。电动电位与双电層的扩散層的厚度有关。

圖3的中心部分(核心)为“膠核”,与膠核表面坚固的吸附着的不可移动的离子(反离子層)形成膠团中不可动摇的部分,叫做“膠粒”,而与扩散層一起則叫做“膠团”。土壤的

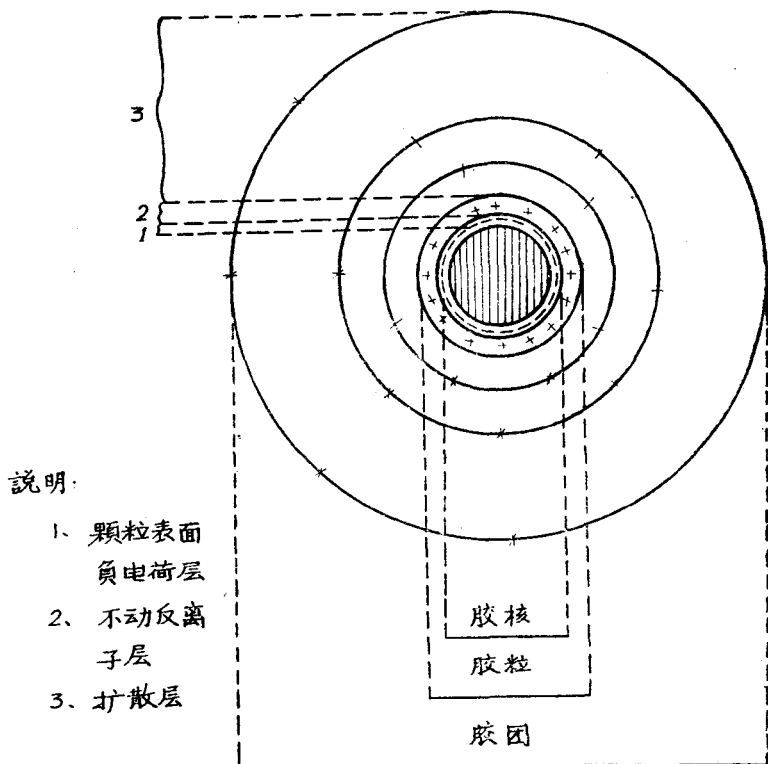


图 三
胶团构造示意图

胶核部分大半是铝硅酸盐类的颗粒，而周围的阳离子则为钠、钾、钙、镁等金属离子。

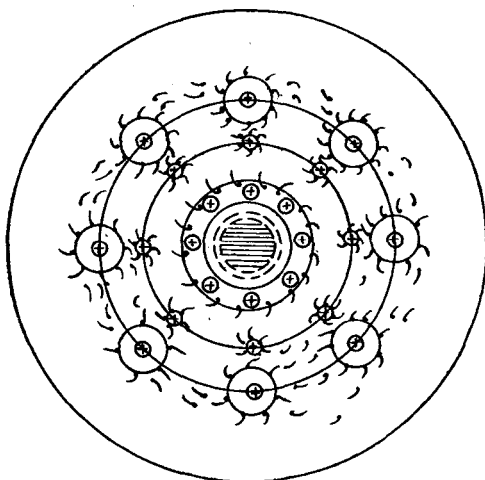
(4) 电泳和电渗：

在1947年，波兰蔡白尔多维奇教授就已经开始对电渗、电泳进行过研究和试验；在1935年，也有人利用这理论进行土壤的排

水工作。可見，电滲、电泳的理論，在很早以前已被人們所采用，但还不普遍。

水或水溶液中的膠团構造，如周圍介質的分子有極性，可以極化，則它可以在電場中处于定向的狀態。有很多水的分子直接吸附在膠粒的表面（見圖4），其大部分水的分子都吸附在扩散离子的周圍，而成为“水化殼”。扩散層的厚度，是由液体的極化情况决定的：液体的極化性越大，扩散層的厚度也越大。

双电層構造的土壤顆粒，在水和溶液中通常呈現中和的狀態。当通直流电受其影响时，則帶有正电荷的扩散層的陽离子轉向陰極移动，帶有負电荷的粘土顆粒趨向陽極。当扩散層的陽离子向陰極移动的同时，扩散層中定向的水随着正离子向陰極移动。这种現象称之为“电动現象”。



圖四.水溶液中的膠体負电顆粒構造示意图

⊕ 阳离子 — 水分子

在膠体化学上，水从陽極趨向陰極的現象叫“电滲作用”，固体顆粒向陽極移动的現象叫“电泳作用”。兩者作用的总称就叫“电动現象”。根据土壤的顆粒，可以确定电滲作用的大小：土壤的顆粒越大，起的电滲作用就越大；土壤內含有粘土顆粒（細顆粒）越多，电滲的作用就越小。可見，电滲作用

的大小，与土壤中的粘土颗粒和含量有着一定的比例。

3、电动矽化法

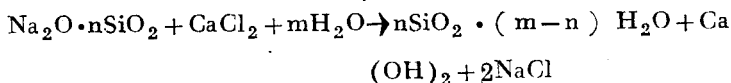
电动矽化法是波蘭蔡白尔多維奇院士根据苏联斯大林獎金获得者 Б.А.Ржанинын、В.Н.Карунн 等人在1930年發明的“压力矽化”和1809年苏联科学家 Рейс 發明的电滲現象，加以發展起来的。在地基土壤的化学加固工作中，最常采用的是电动矽化法和电动鋁化法两种。矽化法是利用水玻璃和氯化鈣两种化学溶液，通过帶有孔洞的鋼管注进土壤颗粒中間；当起化学反应时，則产生矽膠的膠結作用，而使土壤增加地耐力和不透水性。电动矽化法就是在溶液矽化和压入的过程中通以直流电，利用土壤中电滲、电泳的作用（电动現象），而使溶液趋向一定的方向，讓溶液进入微細土粒空隙中起比較均匀的作用；并使矽化了的土壤脫水，以达到地基的要求強度。

(1) 矽化的基本化学反应：

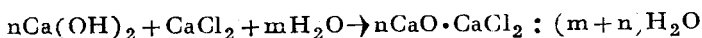
土壤矽化是通过帶有孔洞鋼管輪番的把水玻璃（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ）和氯化鈣（ CaCl_2 ）两种溶液注入土壤之内，由于两种溶液的化学变化而使土壤加固和增加不透水性。

水玻璃和氯化鈣两种溶液的化学反应比較复杂，它具有一般化学反应和膠質化学反应，其中以膠質反应为主。

苏联学者 В.А.Каргин 根据X光綫和显微鏡的分析研究，認為水玻璃和氯化鈣主要是起膠質的反应，而生成矽膠和氫氧化鈣，产生矽膠的膠結作用。其反应如下：



此外，并有附屬反应：



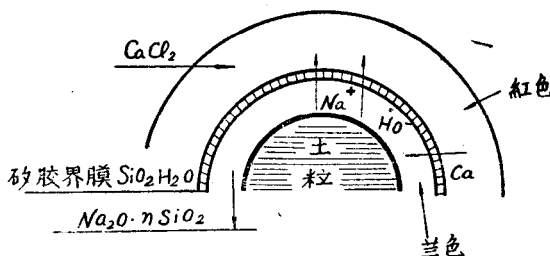


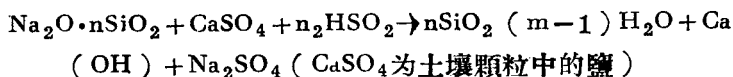
图 五

这种生成物，对土壤的加固起了一定的作用。根据苏联学者 В.А.Коргин 院士的研究，认为水玻璃通过土壤的孔隙时，在土壤粒子的表面形成薄膜；当 CaCl_2 通过时在其外表面又形成砂胶界膜。在两层相接的部分，由于水玻璃中的 OH^- 、 Na^+ 渗入 CaCl_2 溶液中，而生成 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。由于 Na^+ 、 HO^- 不断渗出，砂胶 SiO_2 不断增加，以致 SiO_2 的膜不断地加厚，生成的一部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被吸附在砂胶之中。附属反应所产生的化合物，也起着加强土壤颗粒间粘着力和填满空隙的作用。

目前，一般学者都倾向第二种意见，即认为反应的主要产物是砂胶。氢氧化钙及氯化钠同时在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和剩余的 CaCl_2 的作用下，可能起附属反应，产生 $m\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot (m+n)\text{H}_2\text{O}$ ；但砂胶仍起主要作用。

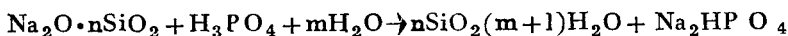
对渗透系数小的黄土或粉砂之类的土壤，有很多学者研究后利用单液加固法。

黄土加固：利用浓度小的水玻璃，压入土中，起第二种溶液的作用，而生成砂胶。氢氧化钙和硫酸钠的反应如下：



粉砂加固：用水玻璃和磷酸溶液配制成一种新溶液，压入粉

砂中，形成砂膠的時間一般在配制后 4 ~ 10 小时之內。其化学反式如下：



由这两种溶液配制成的新溶液（單液砂化），也是以砂膠为主要的膠結材料。

电动砂化加固土砂时，溶液由于压力（溶液自重）和电动現象誘导的作用，通过帶孔的鋼管灌入土砂中。当溶液开始注入土砂中，进入的初步阶段主要是受压力的支配，在进入时，电滲作用总不如压力的作用显著。但溶液进入砂土的空隙后，溶液在土中的运动方向，主要是受电力誘导的影响；如溶液由陽極管注入，进入土砂中后由陽極趋向陰極，溶液注入到达一定程度，砂膠將土砂空隙填充后，随着土砂不透水性的增強，电力的作用就更为显著。电动砂化中电流的效能大致可归納以下几种：

1) 土砂粒的表面充分結成砂膠后，經电动作用排水，使土砂的顆粒表面結成砂膠部分脫水，从而大大增加基地土壤的不透水性、強度以及顆粒間的粘着力。

2) 由于土壤中的电滲作用，使由陽極注入的溶液趋向陰極；同时由于电流作用誘导溶液流动的方向，因而能使溶液均匀地进入土砂的微細空隙和顆粒周圍，加強加固作用。

3) 由于电滲、排水作用，能縮短地基加固的过程。

波蘭蔡白尔多維奇院士在作电动砂化时，是采取压力和电力同时并用的办法，以加速达到加固的目的。一般利用压力时，其压力为 1 ~ 3 个大气压。

根据某糖厂主厂房加固工程采用电动砂化加固法的經驗，在加固速度上，采用电动砂化和压力并用的加固法要比压力砂化法快些（但具体数字尚未得出）。

（2）电动砂化法施工前的各种試驗：