

土 壤 砒 化

鐵道部工務局編

人民鐵道出版社

“土壤砒化”可使土壤提高强度，并获得耐水性及不透水性，而且在不影响原有建筑物的使用条件下能够顺利进行基础加固。沈阳铁路局苏家屯工务段在用土壤砒化法加固墩台基础取得了一定的经验，证实了它的优越性。

这本小册子就是根据上述实践经验，结合有关土壤砒化的技术资料加以整理编成，以供铁路、建筑等基建部门工程技术人员参考之用。



土 壤 砒 化

铁道部工务局编

人民铁道出版社出版

(北京市霞公府17号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第010号

新华书店发行

人民铁道出版社印刷厂印

书号 1415 开本 787×1092 $\frac{3}{32}$ 印张 1 $\frac{3}{16}$ 字数 27千

1959年6月第1版

1959年6月第1版第1次印刷

印数 0,001—1,800册

统一书号: 15043·973 定价 (7) 0.10元

目 录

前 言

第一章 一般理論

- 一、矽化法的应用及其应用范围.....2
- 二、砂土、流砂及黃土的矽化方法.....3
- 三、矽化的基本化学反应.....4
- 四、几种主要因素与矽化土壤强度的关系.....5
- 五、化学溶液在土壤空隙中的扩散和加固
半徑的选定.....10
- 六、土壤加固整体性及溶液消耗量.....12

第二章 勘測設計及施工

- 一、勘測工作及設計組成.....13
 - (一) 勘測工作.....13
 - I、建筑物技术状态的檢定.....13
 - II、工程地質及水文地質的勘測.....13
 - (二) 設計組成.....14
 - I、設計基本技术資料.....14
 - II、設計的編制.....18
- 二、施工.....19
 - (一) 施工前的准备工作.....19
 - I、施工設備的准备.....19
 - II、化学溶液的配制.....22
 - (二) 施工.....26
 - I、灌注管的打入.....26
 - II、溶液的压入.....27
 - III、灌注管的拔出及設備的清洗.....30
 - (三) 質量檢查及施工記錄.....30
 - (四) 技术安全.....31

結 語..... 32

附 录..... 33

前 言

在我国偉大的社会主义建設中，随着鉄路運輸事业飞跃的发展，鉄路桥隧建筑物的质量就必须得以相应的提高和改善。在完成这项巨大的任务中，采用旧的施工方法将不能滿足日益增长的運輸要求。要作到又多、又快、又好、又省，就必须从改进施工方法着想，从采用新技术着手。

在大鬧技术革命的高潮中，沈阳鉄路局苏家屯工务段吳佩鑫、崔文增二位同志，解放思想，学习苏联先进經驗，提出了土壤矽化加固墩台基础的方法。在党的領導与大力支持下，得到全段职工的帮助进行了現場加固試驗，証实了土壤矽化加固墩台基础的优越性。

近年来国内建筑部門用土壤矽化法提高建筑物地基的承载力，和挖掘矿井防止流砂的涌現，都得到了良好的效果，但在桥隧方面的应用尚属鮮見。由于苏家屯工务段全体职工的努力鑽研，使土壤矽化在桥隧建筑物方面的应用得到了良好的开端。土壤矽化不仅使土壤提高强度，获得耐水性及不透水性，而且在不影响原有建筑物使用的条件下能够順利进行基础加固，这些优点在現有桥隧建筑物的加固工程中均有其应用的价值与发展的前途。为使土壤矽化方法在桥隧建筑物方面得到进一步的应用与发展，我局会同苏家屯工务段根据該段实践經驗，結合有关土壤矽化的技术資料加以整理，編成本書。

应当提出的是土壤矽化目前只作了局部加固試驗，看到的有关土壤矽化的技术資料不多，对于土壤矽化的基本精神領会不深，編写中难免有不当之处，因此希望讀者随时提出意見。

第一章 一般理論

土壤矽化是根据土壤天然胶結过程的研究，制定出快速改造天然土壤的一种方法。此法是利用水玻璃（矽酸鈉）和氯化鈣两种化学溶液，通过带孔的管注入土壤顆粒中間。当起化学反应时，則产生矽胶的胶結作用，而使土壤提高机械强度获得耐水性及不透水性。

土壤矽化法就其溶液注入方法来分，有压力矽化及电动矽化，压力矽化是利用水泵或压缩空气将溶液压入土壤孔隙中，此法适用于渗透系数較大的砂性土和黃土类土壤的加固，电动矽化是利用电渗和电泳作用将溶液扩散到細微的土壤孔隙中，并使土壤脫水以达到土壤加固强度的要求，此法适用于渗透系数不大的粘性土壤加固。在此仅将压力矽化的一般理論及加固方法介紹如下：

一、矽化法的应用及其应用范围

1. 矽化法可应用到下述各方面：（1）增加砂土的承载力。（2）預防黃土沉陷。（3）使砂土、黃土及流砂具有不透水性。

2. 应用范围：压力矽化法可有效的应用于各种不同矿物組成的土壤中，但不宜使用在被石油产品、树脂、油类所渗入或地下水 $P \cdot H$ 值大于9.0的土壤中，这是由于油类物质阻碍着矽胶的凝結， $P \cdot H$ 值大于9.0的地下水对矽化土壤起腐蝕作用的緣故。此外土壤的渗透系数也限制了土壤矽化的使用范围。如渗透系数大于80公尺/昼夜的砂及渗透系数小于0.1公尺/昼夜的黃土均不适于矽化加固。

二、砂土、流砂及黃土的矽化方法

根据土壤渗透系数的不同具有两种不同的矽化方法：

(1) 双液矽化：是将水玻璃及氯化鈣溶液先后輪番注入土中加固砂土，由于水玻璃粘滯度較大，溶液不易注入小于2公尺/昼夜土壤中，注入渗透系数大于80公尺/昼夜砂砾中溶液易于流失（可注入水泥浆）不能达到預期的加固强度，故仅适用于2~80公尺/昼夜的干燥和飽和砂土加固。經過双液加固过的土壤，具有不透水性、耐水性及較大的机械强度（15~60公斤/平方公分）。

(2) 单液矽化：是灌注一种溶液的加固方法，由于溶液稀薄适用于渗透系数較小的土壤加固。加固流砂时使用水玻璃加掺料的单液，加固黃土时使用不加掺料的稀薄水玻璃单液。

加掺料的单液矽化法，是由水玻璃加弱酸組成单液注入細微土壤的空隙中。加入掺料的数量影响着胶体在土空隙中形成的時間，一般掺料的数量是根据溶液注入時間来决定，但凝胶時間拖的愈长則加固强度愈低。苏联加固渗透系数0.5~5公尺/昼夜流砂时，单液是由水玻璃和磷酸組成凝胶的，規定为4~10小时。

不加掺料的单液矽化法，是用比較稀薄的水玻璃注入土中，此法仅适用于在地下水位以上渗透系数为0.1~2公尺/昼夜的黃土及黃土类砂质粘土的加固。因为黃土中含有大量的水溶性盐类（主要是水溶性硫酸鈣化合物），此种盐类与注入的水玻璃溶液相遇即能析出矽胶将土壤胶結加固。

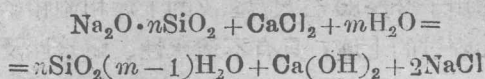
总之单液矽化可补充双液矽化的不足，适用于渗透系数較小的土壤加固。单液矽化土壤具有耐水性，不透水性及較小的机械强度，如矽化过的流砂机械强度为4~5公斤/平方

公分，矽化过的黃土机械强度为 6 ~ 8 公斤/平方公分。

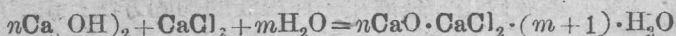
三、矽化的基本化学反应

水玻璃和氯化鈣两种溶液的化学反应比较复杂，它具有—般化学反应和胶质化学反应，其中以胶质反应为主。

苏联学者根据 x 光綫和显微镜的分析研究，认为水玻璃和氯化鈣主要是起胶质的反应，而生成矽胶和氢氧化鈣，产生矽胶的胶結作用。其反应如下：

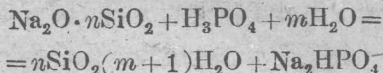


此外并有附属反应：

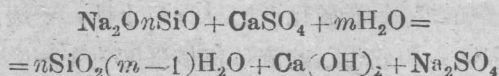


这种生成物，对土壤的加固起了一定作用。根据苏联学者研究认为水玻璃通到土壤的孔隙时，在土壤顆粒的表面形成薄膜，当氯化鈣通过时在其表面外又形成矽胶界膜，在两层相接部份由于水玻璃中 OH^- ， Na^+ 渗入 CaCl_2 溶液中而生成 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。由于 Na^+ ， OH^- 不断扩散，矽胶 SiO_2 不断增加，以致 SiO_2 薄膜不断加厚，生成一部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被吸附在矽胶之中。附属反应所生成的化合物，也起着加强土壤顆粒間粘着力和填充空隙的作用。

硫砂加固，用水玻璃和磷酸溶液制成一种新溶液，压入流砂中形成矽胶的时间一般在配制后 4 ~ 10 小时，其化学反应如下：



黃土加固利用濃度較小的水玻璃压入土中起第二种溶液的作用而生成矽胶，与黃土中硫酸鈣的反应如下：



这两种溶液制成的新溶液，也是以矽胶为主要的胶結材料。

通过凝結及扩散的过程，形成了使土胶結的矽酸薄膜，这种薄膜的厚度取决于水玻璃的模数濃度和土顆粒的大小；同时也决定着加固土壤的强度及耐久性。

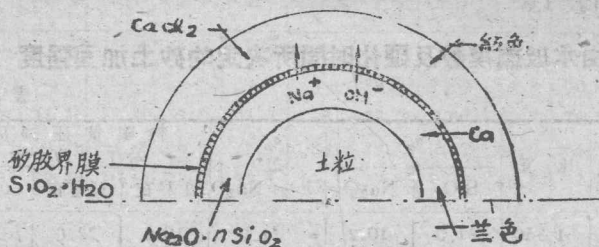


图1 水玻璃和氯化鈣两种溶液的化合

四、几种主要因素与矽化土壤强度的关系

(一) 水玻璃的模数，濃度及数量与矽化土壤强度的关系

1. 模数与强度关系：

水玻璃($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$)的模数，是水玻璃中含 SiO_2 的百分数与 Na_2O 的百分数之比，即模数 $= \frac{\text{SiO}_2\%}{\text{Na}_2\text{O}\%}$ 。水玻璃的模数愈大，意味着水玻璃中含 SiO_2 的成份愈多。因为矽化土壤主要是由于 SiO_2 的胶結作用，使土壤胶結起来，所以水玻璃模数的大小直接影响着土壤加固的强度。根据苏联的研究說明模数为 1 ($\frac{\text{SiO}_2\%}{\text{Na}_2\text{O}\%} = 1$) 的純偏矽酸鈉所得的强度很小，完全不适合土的加固要求。随着模数增加而加固土的强度增加。例如在同样濃度 CaCl_2 溶液的条件下，用模数 2 的水玻璃处理的土的强度为 5~25 公斤/平方公分，用模数 2.7 則土强度为 10~75 公斤/平方公分，最后用模数 3.9 則土强度为

28~30 公斤/平方公分。因此苏联曾用同样濃度而模数在 2.5~4 間的水玻璃进行試驗。研究了水玻璃模数对加固土强度的影响（試样是由柳烈茨基砂，用普通實驗室中土加固办法，将溶液加入而制成。砂的顆粒为 0.5~25 公厘者占 41%，0.25~0.05 公厘者占 59%，水玻璃填塞孔隙 50%），試驗的結果如表 1。

由水玻璃模数及硬化時間所决定的砂土加固强度

表 1

水玻璃 模 数	比 重	%		Σ %	极 限 抗 压 强 度 公斤/平方公分		
		SiO ₂	Na ₂ O		1 晝夜	15 晝夜	30 晝夜
2.06	1.330	21.0	10.2	31.2	10.0	22.0	30.0
2.50	1.330	27.13	10.47	37.6	34.0	48.5	55.0
2.75	1.330	29.19	10.61	39.8	40.0	53.5	65.5
3.06	1.330	27.88	9.10	36.98	40.0	52.0	67.0
3.43	1.330	25.0	7.40	32.4	36.3	43.0	50.0
3.66	1.330	24.61	6.70	31.31	24.6	27.2	29.2
3.90	1.330	25.35	6.50	31.89	15.2	20.0	17.2

根据試驗結果，可以看出，模数在 2.5~3.06 范围內的水玻璃，給砂以最大的加固强度。同时砂的强度由上述范围向兩側特别是向模数較大的一側降低，这也說明过多的 SiO₂ 及 Na₂O 对土强度也有不良影响，故在砂化土壤时規定水玻璃模数为 2.5~3.0。

2. 濃度与强度关系。

水玻璃的濃度影响着砂的加固强度，随着濃度的增加而强度增加，但是濃度很高的水玻璃，由于粘滯度很大（5~10 泊）就不易滲入土中，如表 2 所示。

同时水玻璃用水冲淡到低于一定的濃度时也会引起加固强度的显著降低，如图 2 所示。

由水玻璃模数，濃度及硬化時間 所决定的砂土加固强度

表 2

比 重	模 数 2.75					模 数 3.06				
	%		极限抗压强度 公斤/平方公分			%		极限抗压强度 公斤/平方公分		
	SiO ₂	Na ₂ O	1 昼夜	15 昼夜	30 昼夜	SiO ₂	Na ₂ O	1 昼夜	15 昼夜	30 昼夜
1.490	32.63	11.85	47.6	93.2	100	—	—	—	—	—
1.470	—	—	—	—	—	29.91	9.99	56.8	90.4	107.2
1.425	31.16	11.30	55.0	93.5	98	29.00	9.47	65.5	75.5	81.0
1.385	30.28	11.00	50.5	77.5	83	28.18	9.20	64.0	66.5	70.5
1.335	29.19	10.61	43.0	53.5	65.5	27.88	9.10	45.0	52.0	67.0

用試驗的方法确定出的較好濃度如表 3 所列。

数量与强度关系：

表 3

水玻璃的数量，对加固强度有很大影响，土壤中吸收水玻璃数量愈多則强度愈大。这种土壤的吸收能力，与土壤顆粒有关。顆粒愈細小均匀則吸收溶液的能力愈强。根据試样（此試样用不同量的水玻璃与砂相混合，再浸入氯化鈣中制成的）結果可知当水玻璃填塞砂空隙 40%~50% 时，就能达到最大强度，随着砂中小顆粒数量的增加，水玻璃量也就增加，則强度亦增加，如图 3 所示。

水玻璃模数	根据比重决定的濃度 当 T = 18°C	
	下	上
2.5	1.36	1.44
2.75	1.34	1.42
3.00	1.33	1.41

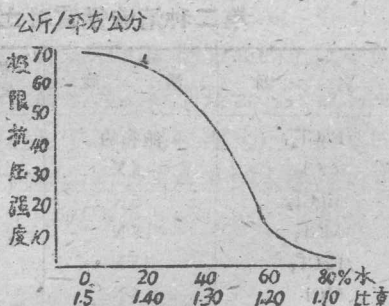


图 2 稀釋水玻璃对加固强度的影响

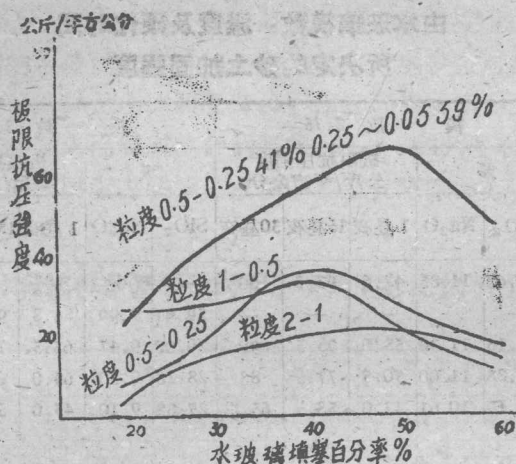


图3 水玻璃填充孔隙的百分率与强度的关系

(二) 第二种溶液化学成份与矽化土壤强度的关系

第二种溶液化学成份，对土加固强度有着极重要的影响。水玻璃几乎能被任何电解质所凝結，但是凝胶的结构，在其胶結性質方面在很大程度上取决于电解质的成份，如表4所示。

第二种溶液性質对土加固强度的关系

表4

名 称	濃 度	极限抗压强度 公斤/平方公分	附 注
BaCl ₂	飽和的	47.0	在全部試驗中水玻璃性質保持不變
CaCl ₂	5 N	35.0	
MgCl ₂	5 N	28.0	
AlCl ₃	5 N	5~8	
FeCl ₃	5 N	5~8	
MCl	5 N	1~2	

由上表可知酸能带来很小强度，由AlCl₃及FeCl₃能得到較大的强度。二价金属Ba, Ca, Mg, 塩的溶液，能給以最

大的强度。因鋇鹽很貴，故采用与其强度相近的 CaCl_2 作矽化土壤的第二种溶液。

試驗檢定，双液矽化使用的 CaCl_2 溶液的最低极限濃度，不低于27~30%相当于比重1.24~1.28。溶液低于上述濃度就会降低土的加固强度。

土壤矽化的第二种溶液量，应等于水玻璃的用量。

(三) 土壤顆粒与矽化土壤强度的关系

矽化土壤的加固强度，随着砂中細顆粒的增加而增加。

这是因为砂土的总表面积随着砂粒的細度而增加，总表面积愈大吸收的溶液愈多，則接收胶結物数量愈多，因而加固强度也就愈大。因此均匀細小顆粒的土壤加固能得較大的强度，如图

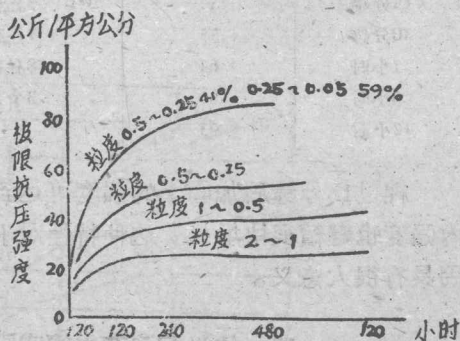


图4 砂顆粒及硬化時間与加固强度的关系

4 所示。

(四) 矿物組成与加固强度的关系

矽化法可以有效的利用于各种不同矿物組成的土壤中如石英砂、石灰石砂、长石砂、黃土等。特别是含有大量石英的砂，能得很結实的加固。但对于不容易吸附 SiO_2 凝結的玄武岩，以及被石油产物，树脂，油类所浸入的土壤应当除外。因为这些油类在土顆粒上所形成的薄膜阻碍着土顆粒与加固溶液的相互作用。

(五) 硬化時間与矽化土壤强度的关系

矽化后土的强度随着時間而增加，但强度增加的主要最大值（70~80%）是在加固过的砂开始硬化的头10昼夜內出

現的。10昼夜以后强度的增加已不大，仅为3个月所达到的总强度的20~30%。值得注意的是强度的迅速增长是在較短的一段时间內，特别是在加固过的砂开始硬化的最初几小时內发生的，根据苏联試驗室作出的資料可以看出(如表5)。

土加固强度与时间的关系

表5

試样时间的增長	极限抗压强度 (公斤/平方公分)	試样时间的增長	极限抗压强度 (公斤/平方公分)
瞬时强度	11	24小时	93
15分鐘	54	3昼夜	95
30分鐘	55	7昼夜	101
1小时	64	28昼夜	107
6小时	66	3个月	148
12小时	91	—	—

經過15分鐘后加固土的强度可达到30%，在以后几小时內强度也繼續很快增长，这种特性对于旧有建筑物的快速加固具有很大意义。

五、化学溶液在土壤空隙中的 扩散和加固半径的选定

双液矽化时，最初通过鑽孔压入的水玻璃将水从土中逐出并填滿土空隙，結果形成被水玻璃所饱和的土体。此时土中水玻璃之濃度稍有降低，因为压入溶液时在水玻璃与顆粒表面間存在着薄膜水略微降低水玻璃的濃度，濃度降低的最低的是水玻璃饱和土体的四周地区。以后通过同一鑽孔压入的氯化鈣溶液，部分的将水玻璃自土空隙中排出，同时每个顆粒四周結成了矽酸薄膜而使砂土胶結。

水玻璃(第一种溶液)的扩散半径，随压力及压入时间的增加而扩大，溶液的扩散半径可达到很大的数值，(如图

5)。但由于压入第二种溶液时，靠近灌注管与远离灌注管处的化学反应不同，限制了加固半径的数值。在两种溶液反应的过程中，矽酸胶及氢氧化钙产生沉淀而氯化钠仍留在溶液中，当加入新的氢氧化钙溶液时，氯化钠就部份地与它混合，而部份则沿着土空隙被冲走。最远地区的氯化钠的稀溶液，对于矽酸盐起稀释作用，减弱着土的加固强度，因而加固半径受到了一定的限制。这种氯化钠的产生，还与土颗粒的总表面积有关，土颗粒总表面积愈大，即第一种溶液与第二种溶液接触面愈大，氯化钠的形成也愈强烈，所以粗砂加

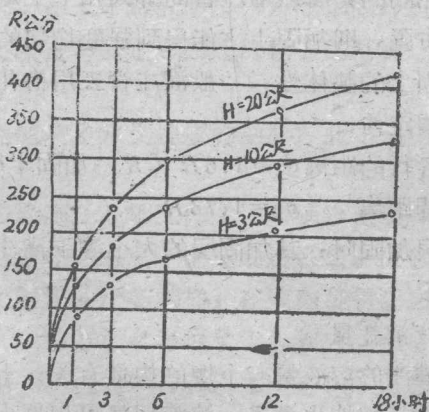


图5 水玻璃的扩散半径与压力及时间的关系

根据渗透系数决定的加固半径

表6

砂 种 类	渗透系数 (公尺/昼夜)	加固半径 (公尺)
极 细 砂	2~5	0.3
细 砂	5~10	0.4
中 砂	10~20	0.6
粗 砂	20~50	0.8
粗 砂	50~80	1.6

固半徑較細砂為大就是這個原因。

單液矽化溶液的擴散，類似雙液矽化第一種溶液的擴散情況。由於生成凝膠溶液凝膠時間的規定限制了加固半徑的數值。根據現場試驗確定加固半徑最小值與透系數的關係如表 6。

六、土壤加固整體性及溶液消耗量

1. 加固整體性：

矽化加固土壤，是通過成排的單獨灌注管，分層壓入土中溶液進行加固的，所以灌注管的排列和上下加固層間的銜接必須適當布置，則加固土才能得到強度均勻的整體結構。為了達到加固土的整體性，一般灌注管採用梅花形的排列，其管間距離規定為：

灌注管各行的距離 $d_1 = 1.5R$ (R —加固半徑)

灌注管間距離 $d_2 = 1.73R$

土壤分層加固時，其加固層的大小等於灌注管有孔部份長度加 $0.5R$

2. 溶液消耗量

加固土灌注的溶液量與土壤的構造有關，土顆粒愈均勻和愈細，則消耗溶液也愈多。溶液用量可根據土壤空隙率來計算，一般使用的經驗公式：

(1) 砂土 水玻璃用量 $Q = 5Vn$ (公升)

V ——加固土體積 (立方公尺)

n ——土壤空隙率 (%)

氯化鈣溶液用量與水玻璃同

(2) 流砂 能生成凝膠的溶液用量

$Q = 15Vn$ (升)

(3) 黃土 水玻璃用量 $Q = 8Vn$ (升)

第二章 勘測設計及施工

一、勘測工作及設計組成

(一) 勘測工作：土壤砂化的成功与否，决定于勘測工作是否完备与正确，所以在設計前必須进行細致的勘測，其主要工作如下：

I、建筑物技术状态的檢定：对須加固建筑物的技术状态，加以彻底檢查与檢定，如建筑物上部結構、基础构造、載重条件等。

II、工程地質及水文地質的勘測：此項勘測工作应按下列方法进行：

甲、初步勘測：此項工作主要是确定土壤砂化的可能性，土壤能否砂化，取决于土壤渗透系数。故砂土及黃土应选取欲加固土层主要土类試样，在室内进行渗透系数的測定及加固試驗（試驗方法参考附录 1）流砂（粉砂）可利用灌注管插入土中，使水通过管进入土中，借以測定流砂之渗透系数。

乙、基本勘測：此項勘測主要是詳細研究地質水文以作設計的依据，作法如下：

(1) 用鑽孔和挖坑方法进行勘測。孔或坑間的距离不得超过 15 公尺。从各层每隔 0.5 公尺深度取土样 3 ~ 5 公斤。从每个透水层取水样 1 ~ 2 升（仅砂土及流砂）。流砂試样在送到試驗室时須有天然含水量而黃土除此以外尚須具有未破坏的結構。

(2) 上述勘測須闡明欲加固土层的地質构造、成层状

态、地下水位、地下水流向及速度。并根据采取試样在試驗室內确定。

- ① 顆粒分析
- ② 孔隙率
- ③ 大孔隙率 (限于黃土)
- ④ 渗透系数 (砂土、黃土)
- ⑤ 水提出物的化学成份
- ⑥ 地下水的化学成分 (砂土及流砂)

(3) 工作量較大的工程編制設計前，須在現場进行土壤加固試驗。土壤加固試驗是将 3~5 根灌注管打入土中，通过該管压入化学溶液到适当深度的土层中，进行局部土壤加固。俟达到一定强度时，将加固周圍挖开檢查，借以确定加固土层的加固半徑，整体性和体积；同时采取試样，在試驗室內檢定强度，耐水性及不透水性。

(二) 設計組成：

I、設計基本技术資料：下述資料摘自苏联土壤矽化規程，进行土壤矽化加固設計时可参照使用。

1. 化学溶液的选定

(1) 砂土双液矽化法，須用水玻璃及氯化鈣溶液。

水玻璃的濃度依渗透系数之大小由比重决定之(表 7)。

表 7

渗透系数 (公尺/昼夜)	濃度为 2.5~3.0 水玻璃比重 (当 $t=18^{\circ}\text{C}$ 时)
2~10	1.35~1.38
10~20	1.38~1.41
20~30	1.41~1.44

氯水鈣溶液之比重，須为 1.26~1.28 (相当于 28~30% 无水氯化鈣)。