

# 软弱地基加固方法的合理选择

北方交通大学土木建筑系 唐业清

软弱土一般是指抗剪强度低, 压缩性高, 渗透性较小的土。尚未固结的吹(冲)土、杂填土、素填土、淤泥、淤泥质土等。地基主要受力层是由软弱土所组成时, 称为软弱地基。软弱地基不经加固处理, 一般不宜直接作为建筑物的地基。

由于软弱地基的性状复杂, 长期以来, 许多工程技术人员惯用挖除、换填和桩基础等方法避开软弱地基, 没有充分利用软弱地基的承载能力, 这也是一种浪费。

我国人口众多, 随着城乡建设事业日益发展, 建设用地更趋紧张。因此, 充分利用软弱地基, 做好软弱地基的加固处理, 受到了广泛的重视。

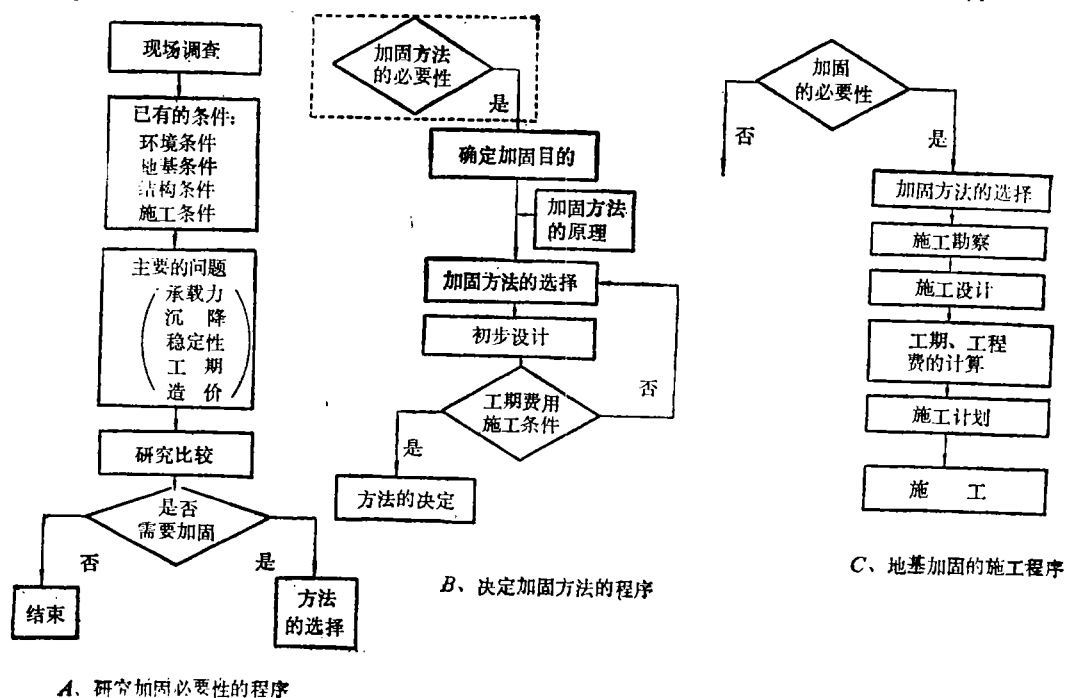
软弱地基的加固处理方法, 国内外已达四、五十种之多, 应针对不同的软弱地基特性, 选择合理的、经济的加固处理方法, 如果方法选择不当, 不但达不到加固处理的目的, 在经济上, 时间上都会造成浪费。因此, 合理的选择加固方法, 是利用软弱地基的首要问题。

本文将介绍软弱地基加固的工作程序; 加固方法的工程分类; 合理的选择加固方法以及加固的施工管理等问题。

## 一、软弱地基加固的工作程序

软弱地基加固的工作程序包括必要性的研究, 加固方法的选择和加固施工等内容, 其程序见表1。

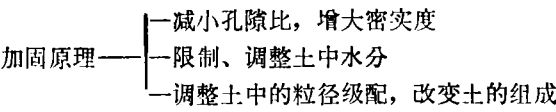
表1



二、软弱地基加固方法的分类

地基加固处理方法分类有数种之多，本文建议根据加固原理、加固目的和施工特点进行分类：

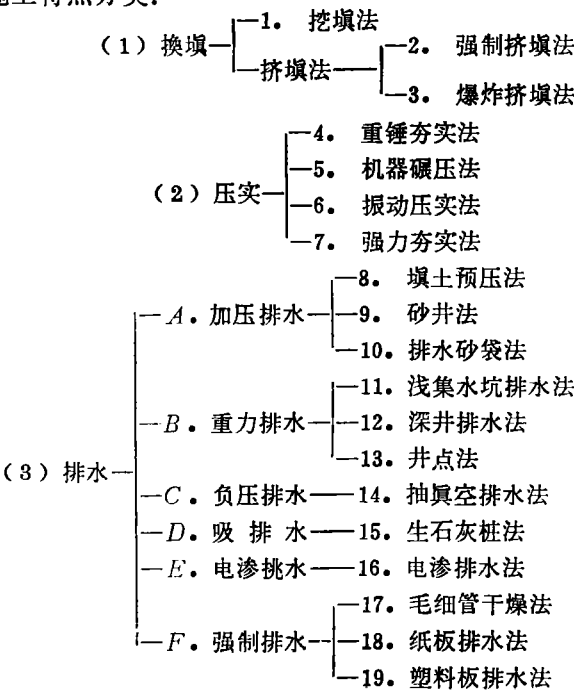
1. 按加固原理分类

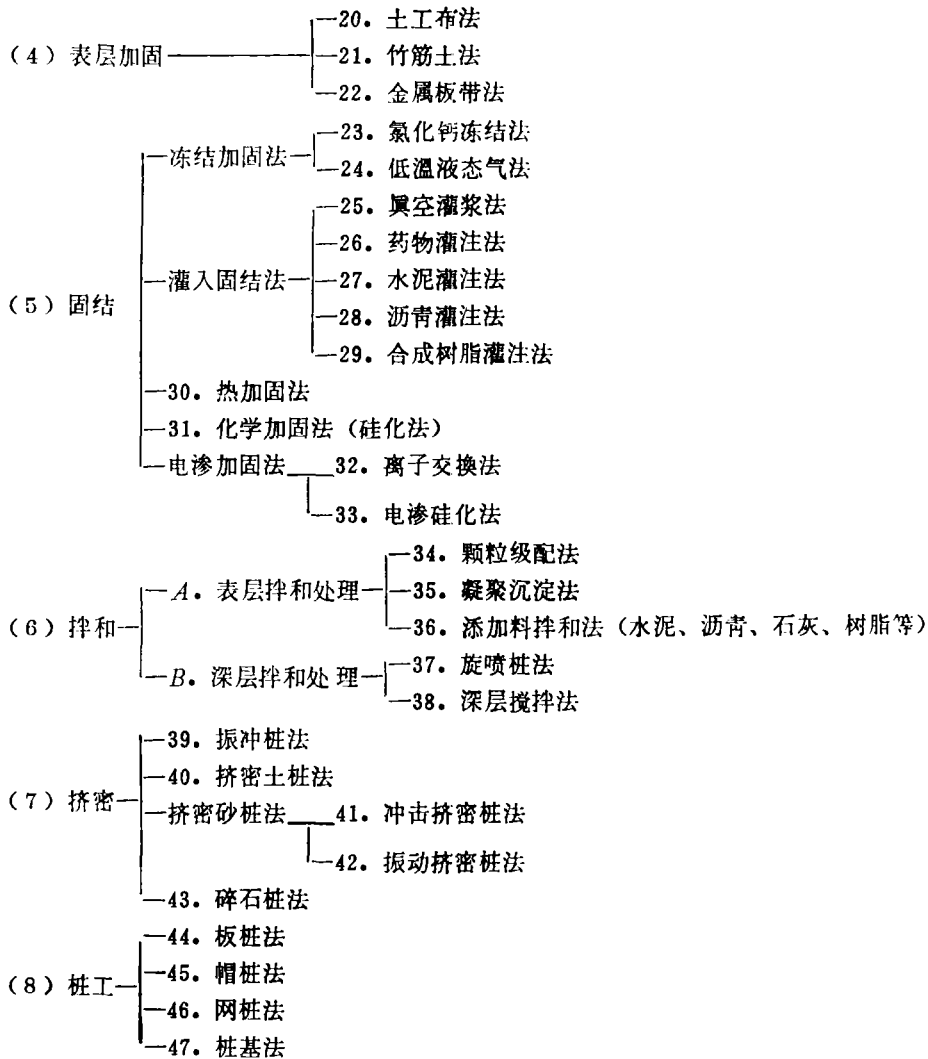


2. 按加固目的及深度分类

| 位 置 | 目 的    | 合 适 的 加 固 方 法  |
|-----|--------|--|
| 表 层 | 软弱土的加固 | 调整粒径，换填，洒水压实，爆破，强制干燥，凝聚沉淀，水平向排水，水泥添加处理，高炉渣添加处理，石灰添加处理，沥青加固处理，土工布加固。                    |
|     | 防止侵蚀   | 水泥添加处理，高炉渣添加处理，石灰添加处理，水泥灌浆，沥青灌注，药液注入，土工布（或网），植被。                                       |
|     | 防止冻胀   | 换填，隔温。   |
|     | 防 尘    | 添加无机材料，高分子药液加固，植被，柏油。  |
| 深 层 | 粘性土的加固 | 砂井，袋装砂井，纸板或塑料板排水，挤密砂桩，电渗排水，电化学加固，高炉渣深层加固，旋喷桩，高分子药液灌入，冻结，烧结，石灰桩，水泥灌浆，负压排水加固，生石灰搅拌，水泥搅拌。 |
|     | 砂质土加固  | 挤密砂桩，桩冲桩，水玻璃加固，沥青及高分子药液灌入，旋喷桩，水泥深层搅拌，电力冲击，冻结，负压排水，井点降水，水泥灌浆。                           |

3. 按施工特点分类：





### 三、软弱地基加固方法的合理选择

软弱地基的各种加固方法，都有一定的适用条件，其作用效果也不相同，通常要根据建筑物场地的地质条件；结构物条件；设计施工条件；环境条件以及加固效果等因素来综合考虑，选用合理的经济的加固法。

#### (一) 根据地质条件选择加固方法

软弱地基的状态是比较复杂的，在不同的地质条件下，选择的加固方法也应各异。

##### 1. 软弱土层的厚度

土层薄时，沉降量会小些，所需的固结时间短，一般厚度在4~5m 以内时，可采用简单的表层加固法。

土层厚时，方法选择较困难，可用竖向排水井（砂井、袋装砂井、纸板或塑料板排水）或挤密桩法等。

## 2. 土中有无排水砂层

有排水砂层时,土层厚度在3~4m时,地基易于固结,不需要采用砂井、砂桩等深层加固方法,可选用表层加固方法,逐渐加载法和堆载预压法等。

没有良好排水砂层时,排水时距离长,固结时间长,强度增长慢,可采用竖向排水井来加快沉降,也可与堆载预压法并用,加强处理效果。

## 3. 粘土层与砂土层交互排列时

这时地基的稳定和沉降问题较少,但要注意砂层的液化问题,采用填土堆载压实法加固效果好。

## 4. 软弱地基倾斜时

这时在竖向和水平向地基会持续下沉,而且建筑物的沉降也不均匀,软土层较薄处可用换填法,较厚处应采用综合加固法(如堆载砂井预压法等)。

## 5. 不同土质的影响

淤泥质土时,地基的透水性差,可采用砂井排水法或电渗法等能加快固结,强度提高的快。

厚的黑泥层时,可用缓慢加载预压固结法效果好。

粘土及粉土地基时,透水性差,孔隙压力大,易引起长期沉降及滑坡破坏,可采用电渗法、负压排水法、重力排水法及药液灌入法等。

砂质土地基时,一般问题较少,但沿海或新填的砂土,应考虑液化问题。防止液化的条件是:增大砂土地基相对密度 $D_r$ ,增加地基的有效应力,改变地基的渗透性,增大透水性,缩短排水距离,使孔隙压力消散的快。这时可采用挤密砂桩法、振冲桩法或压实加固法等,采用碎石或砾石作桩料,透水性好,加固效果好。还可采用降低水位法、砂砾石垫层法,土工布以及竹筋、带钢等法,都有一定效果。

6. 根据软弱地基的不同土质条件,选用合适的加固方法时,还可参见表2。

### (二) 根据设计、施工条件选择加固方法

#### 1. 设计时应考虑用地、工期及用料情况

(1) 用地条件,施工时占地多些,对工程有利,例如采用较缓的边坡堆载时,稳定性好,但经济支出大。

(2) 工期,工期不宜安排的太紧,以便选用缓速的加载施工方法,时间充分,施工时地基稳定性好,以后问题也少。

(3) 工程用料,要求就地取材,选择容易得到的材料,这是考虑选择那种地基加固方法的重要因素。例如:

采用砂垫法时,应选用透水性好的河砂,有困难时也可选用山砂,但细粒土含量不能多。在地下水位以下,应用岩屑,砂砾、粗砂等透水性好的材料,还要安排好挖掘出来的软弱土的堆放场地。

采用填土压实法时,不需特殊的材料,但应有一定的场地和选好填料的取土场。

采用堆载预压法时,要安排好做为堆载的填土用后的转移问题,在填土下应设置排水沟。

表2

根据地基土质条件选择合适的加固方法

| 位置    | 序号 | 加固方法的名称              | 各类软弱地基土适用情况 |     |     |     |      |   |          |          |      |     | 加固效果 |   |   |      |   |   | 加固深度 | 加固方法的要点及条件 |
|-------|----|----------------------|-------------|-----|-----|-----|------|---|----------|----------|------|-----|------|---|---|------|---|---|------|------------|
|       |    |                      | 淤泥质土<br>吹填土 | 素填土 | 杂填土 | 粘性土 | 非饱和土 |   | 粉砂       | 细砂       | 湿陷黄土 | 碎石土 | 压缩强度 |   |   |      |   |   |      |            |
|       |    |                      |             |     |     |     | 饱    | 和 |          |          |      |     | A    | B | C | D    | E                                       | F   |      |            |
| 表层    | 1  | 换土垫层法                | ○           | ○   | ○   | ○   | ○    | ○ | ○        |          |      |     | △    | △ | △ | △    | 2m左右                                    | 挖去表层土,用中、粗砂、灰土或矿渣等材料为垫层。  |      |            |
|       | 2  | 挤填法                  | ○           |     |     | ○   |      |   |          |          |      |     | △    | △ | △ |      | 1~3m                                    | 在软弱土层表面,堆土或堆块石,靠其自重将软土挤出(有压人挤出或爆炸挤出)。   |      |            |
|       | 3  | 振动压实法                |             | ○   | ○   |     |      |   | ○        | ○        | ○    | ○   | △    | △ | △ |      | 1.2~1.5m左右                              | 用振动压实机振动压实,其自重可达20t,振动力5~10t,压实后承载力近10~12t/m <sup>2</sup> 。   |      |            |
|       | 4  | 重锤夯实法                |             |     | ○   |     | ○    | ○ | ○        | ○        |      |     | △    | △ | △ |      | 1.5m左右                                  | 将1.5t重锤吊起,落距2.5~4.0m,自由落下,在一定深度内消除液化及湿陷性。   |      |            |
| 加固法   | 5  | 分层回填碾压法              |             | ○   | ○   |     | ○    |   |          |          |      |     | △    | △ |   |      | 浅层加固                                    | 用羊足碾、压路机、推土机等碾压,将填土压实,也可添加水泥、石灰、树脂等料拌和碾压加固,承载力可达8~12t/m <sup>2</sup> 。  |      |            |
|       | 6  | 表层挤密法                |             |     | ○   | ○   | ○    |   |          |          |      |     | △    |   |   |      | 加固持力层                                   | 用20~30cm长的片石,尖向下用重锤密排夯入。  |      |            |
|       | 7  | 土工布或土筋加固法            |             |     |     | ○   |      |   |          |          |      |     |      | △ |   | 浅层加固 | 在软基上铺土工布(网),其上再铺砂、压平,也可在土工布上再置钢筋、竹筋、板带。 |   |      |            |
|       | 8  | 沥青灌注法                |             |     |     |     |      |   | ○冷法沥青软化液 | ○热法(热沥青) |      |     | △    | △ |   |      | >1.2m                                   | 在钻孔内灌注沥青(热法及冷法)增加粘聚性,降低透水性。   |      |            |
|       | 9  | 石灰粘土浆灌注法             |             |     |     |     |      |   | ○        | ○        |      |     |      | △ | △ |      | >1.2m                                   | 在钻孔内灌注石灰、粘土浆,增加粘聚性,降低透水性。   |      |            |
| 深层加固法 | 10 | 砂井预压排水法(包括袋装砂井、负压排水) | ○           |     |     | ○   |      |   | ○        |          |      |     | △    |   | △ |      | 10~20m(取决于土层)                           | 在土中打砂井(或袋装砂井)地表做排水沟和铺砂,然后在土上堆载预压(或负压排水),对泥炭土效果差。  |      |            |
|       | 11 | 纸板或塑料板排水             | ○           |     |     | ○   |      |   |          |          |      |     | △    |   |   |      | 10~25m                                  | 将排水纸板、塑料板置于土中,作用与砂井相似,作为软土地基的竖向排水通道。  |      |            |
|       | 12 | 电渗排水法                | ○           |     |     | ○   |      |   |          |          |      |     | △    |   |   |      | 20m左右                                   | 在土中通直流电,将负极集水排出,正负极管间由于Fe(OH) <sub>3</sub> 的膨胀,使土体加密。   |      |            |
|       | 13 | 降低水位法                | ○井点法处理吹填土   |     |     |     |      |   | ○        |          |      |     |      |   | △ |      | 30m以内                                   | 根据土的K值确定排水方法:当K=10 <sup>-3</sup> ~5×10 <sup>-2</sup> m/min井点法;当K在5×10 <sup>-2</sup> m/min以上,深井法,浅井堆法;当K在10 <sup>-4</sup> m/min以下真空法电渗法。 |      |            |

续上表

| 位 置              | 加 固 方 法 的 名 称    | 各 类 软 弱 地 基 适 用 情 况 |           |                |                       |      |     | 加 固 效 果 |   |       |             | 加 固 方 法 的 要 点 及 条 件 |   |
|------------------|------------------|---------------------|-----------|----------------|-----------------------|------|-----|---------|---|-------|-------------|---------------------|---|
|                  |                  | 淤泥质土<br>吹填土         | 杂 素 填 土   | 粘 性 土          | 粉 细 砂                 | 湿陷黄土 | 石 土 | 压 缩 强 度 |   | 透 水 率 | 动 态 加 固 深 度 |                     |   |
|                  |                  |                     |           |                |                       |      |     | A       | B |       | C           |                     | D   |
| 深 层              | 14 硅 化 法         | ○                   |           | ○              | ○                     |      | ○   | △       | △ | △     | △           | 20m左右               | 当 $K=0.1\sim 80\text{m/昼夜}$ ,采用压力双液硅化法;当 $K<0.1\text{m/昼夜}$ ,用双液电动硅化法;当 $K=0.1\sim 2.0\text{m/昼夜}$ ,湿陷黄土用无压或压力单液硅化法。<br>振冲器射水成孔,填充碎石挤压成桩,承载力提高1.5~2倍变形减少1/3~2/3。<br>用重8~200t的锤,提高8~40m,自由落下,加固软弱地基。<br>常用桩径0.2~0.4m,加固深度可达10m以上,由于生石灰桩吸水膨胀,吸水发热,承载力可达15t/m <sup>2</sup> 。 |
|                  | 15 振 冲 桩 法       |                     | ○         | ○              | ○                     |      |     | △       | △ |       |             | 30m左右               |   |
|                  | 16 强 夯 法         |                     | ○         |                | ○                     |      | ○   | △       | △ |       |             | 8—40m               |   |
|                  | 17 生 石 灰 桩 法     | ○ $W<45\%$          |           | ○ $W<130\%$    | ○ $N<10\sim 15W>20\%$ |      |     | △       | △ |       |             | △10~20m             |   |
| 加 固 法            | 18 旋 喷 桩 法       | ○                   | ○无障<br>碍物 | ○ $(N_{63.5})$ | ○ $(N_{63.5}<10)$     |      |     | △       | △ |       |             | △10~40m             | 旋喷器高压喷射水泥浆,搅拌均匀成桩,承载力提高,可分单管(桩径0.3~0.8m)二重管(桩径1m左右)三重管(桩径1~2m)三种。<br>搅拌机边搅动边喷射水泥浆,化学浆液或生石灰粉,水泥等干粉,混合硬结后形成均匀加固土体。<br>用振冲器入冲击等法,在土中成孔,将砂、灰土振动压实成桩。<br>根据加固土层厚度,将不同长度钢管打入土中,间距0.3~0.5m边接管边压力灌浆。<br>在钻孔内通过液态氮或氯化钙循环,使土冻结增加地基的临时强度。  |
|                  | 19 深 层 搅 拌 法     | ○                   | ○         | ○              | ○                     |      |     | △       | △ |       |             | △20m左右              |   |
|                  | 20 挤 密 桩 法       |                     | ○(砂石桩)    | ○(砂桩)          | ○碎石中粗砂                | ○灰土桩 |     | △       | △ |       | △           | 5~20m               |   |
|                  | 21 水 泥 压 力 灌 浆 法 |                     |           |                | ○                     |      | ○   | △       | △ |       |             | >4m                 |   |
| 法                | 22 冻 结 法         | ○                   | ○         | ○              | ○                     |      | ○   | △       | △ |       |             | 根据需要的选定             | 在钻孔内通过液态氮或氯化钙循环,使土冻结增加地基的临时强度。<br>在钻孔内输入热空气或注入燃料燃烧,改良土性。<br>上部结构采用轻质材料,加大基础尺寸和减轻基础自重。<br>采用防水钢板桩,做地下连续墙,群桩(钢管桩或水泥桩)防水或传递荷载。<br>用缓慢增加地基荷载或分段加载法,控制加载速率。  |
|                  | 23 热 加 固 法       |                     |           |                |                       | ○    | ○   | △       | △ |       | △           | 10~15m              |   |
|                  | 24 减 轻 荷 载 法     | ○                   | ○         | ○              | ○                     | ○    | ○   | △       | △ |       |             |                     |   |
|                  | 25 构 筑 物 法       | ○                   | ○         | ○              | ○                     | ○    | ○   | △       | △ |       |             |                     |   |
| 26 控 制 加 荷 速 度 法 |                  | ○                   | ○         | ○              | ○                     | ○    | ○   |         | △ |       |             |                     |   |

- A. 促进压密:增加早期强度,减少残留变形;

B. 减少沉降量:使改良后地基的沉降量降低;

C. 增加强度:增加地基强度和抗滑能力;

D. 控制变形:控制地基发生明显变形;
- E. 减少水压力:降低对地基稳定的水压力;

F. 防水:阻断地下水,使地基一部分不透水;

G. 防止液化:增加地震时的安全性;

H. 改善地基动力性能:减少地基受振动时的不良影响。

采用竖向排水时,首先要考虑透水性好砂料,有困难时再选用纸板或塑料板排水方法。

## 2. 施工时应采用科学的管理方法

(1) 施工管理的影响。虽然选用了较好的地基加固方法,但由于施工管理不善,造成地基的扰动;或者由于机械走行路线的不合理,使地基加固不均匀,或者使灵敏性大的软弱地基受到冲击振动,施工后场地沉降不均匀,这也就失去了好的加固方法的优越性。

(2) 要严格按照设计条件施工,如采用堆载预压法,但堆载填土的宽度、高度都不够,就达不到加固效果。又如,挖填法仅适合3m以内,自重强制挤换法或爆破法可适于7~10m,砂桩、砂井法适于20~30m,超过上述的界限,这些加固方法也就不适用了。

此外,还要考虑施工的难易程度、管理的经验及水平,测试的手段,施工中土性有无变化和是否引起相邻结构物的变位等因素,选择合适的加固方法。

## (三) 根据场地环境条件选择加固方法

要考虑加固 施工时对周围环境的影响,例如:新填土会对原有道路、房屋产生挤压,侧向位移或附加沉降,采用砂桩、砂井施工时,有噪音,靠近居民点较近就会扰民,采用填土堆载时,要有大量的土料运进运出工地,会影响交通和环境卫生,采用降低水位法时,要考虑引起周围地基的附加下沉,甚至影响周围居民的用水,这时应预先调查或做隔水墙并考虑施工后注水复原问题,打石灰桩灌注药物或采用电渗排水法时,会污染周围地下水,应慎重对待。

## (四) 根据结构物条件选择加固方法

要考虑结构物的等级、结构体系、断面形状、位置、基础埋深,使用要求和建筑材料等因素对选择加固方法的影响,特别是有地下水结构物(地下室、涵洞、地下铁道……)或者结构物高低不同,沉降不均时,都应给予特殊注意。在上部结构、基础类型的选择上也应采取相应措施。要使上、下部协调共同工作。

总之,在选用加固方法时,要考虑设计方法的可靠性,加用后维修养护的简易性,工程用料取得的难易程度以及工程造价,场地工期等因素,综合研究,选用合理的加固方法。

(五) 软弱地基加固施工中容易发生的质量问题,见表3所示。

# 四、软弱地基加固工程的施工管理

为了保证软弱地基的加固质量,应搞好施工管理。其内容包括计划管理、质量管理、工程管理、测试检验管理和维护管理等方面。

1. 施工计划管理:包括进度计划、需用的机具,劳力、材料场地环境和安全生产等。

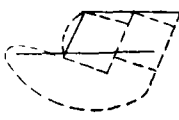
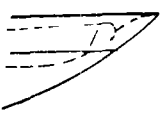



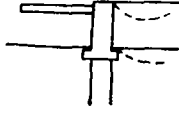
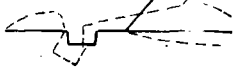

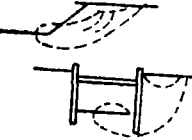

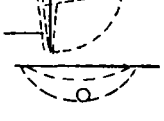
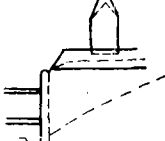
2. 施工质量管理:在施工中应对各个环节(如压实、排水、填土)的质量标准有明确要求,严格检查。

3. 施工工程管理:根据设计和施工条件,力求工程的开支少劳动生产率高,能有效的利用人力和机械,尽量不发生工程事故等因为地基强度的增长需要一定的时间,所以地基加固施工要尽量提早安排,不要影响后期工程,还可通过调整施工速度,确保地基的稳定性和安全。

4. 测试检验管理: 软弱地基最容易发生的问题是填土引起周围地基的沉降, 基础及结构物的失稳和地基承载力的不足等问题。因此, 在加固施工前、施工过程中和施工以后, 要对被加固的软弱地基进行检测, 以便了解地基的状态, 加固效果, 及时修正加固设计, 调整施工进度。

软弱地基施工的主要问题

表 3

| 稳                           | 定   | 变                            | 形   |
|-----------------------------|---|------------------------------|---|
| ① 由于地基剪切引起填土的破坏             |    | 过量的沉降或者由不均匀沉降引起填土的变形         |    |
| ② 由于地基承载力不足, 引起结构物变形或破坏     |    | 过量的沉降或者由不均匀沉降引起结构物的变形        |    |
| ③ 由于偏心荷载或者土压力使结构物变形或破坏      |    | 结构物与填土间产生不均匀下沉或变形            |     |
| ④ 由填土和结构物荷载引起地基侧向流动、隆起      |   | 由填土或者结构物荷重引起侧向地基的沉降和变位       |   |
| ⑤ 由于开挖引起斜坡的崩塌以及基坑底部隆起       |  | 由于膨胀或者土压力的变化, 引起坑壁或者板桩的变位    |  |
| ⑥ 随着开挖时的应力降低或松弛, 使基坑侧向或地面变形 |  | 由于开挖时的排水, 随着地下水位降低而引起周围地基的下沉 |  |

5. 维护管理: 在使用期间, 对重要建筑物的外观要定期巡回检查, 并注意降雨、地震、地下水位升降、冻融及土质变化等情况了解对被加固地基的影响, 以便及时做好抢修、维护和复原工作。

## 五、结 论

要合理的选择软弱地基加固方法, 应考虑以下各项条件:

1. 要详尽地掌握场地的地质条件和软弱土的性状。



2. 了解建筑物的等级, 结构体系、荷载, 以及对施工和使用中的要求。
3. 施工单位的条件, 处理软弱地基的能力和經驗。
4. 各种加固方法的基本原理、作用效果、适用效果、适用范围、维护难易、施工繁简和选择条件。
5. 地基加固时所需材料的来源, 运输距离和材料的价格。
6. 针对上述条件, 选择一种或几种合适的加固方法, 通过初步设计仔细比较, 最后选定; 施工简便、方法可靠、工程造价低廉适合当地条件的合理加固方法。