

水泥土讲义

一、概念

1、概述

在深厚的软土层上建造大型工业建筑、高层房屋以及道路工程、港口码头日益增多，因此软土地基加固技术越来越受到工程技术人员的重视。而水泥深层搅拌法加固软土技术（粉喷法）这种方法就适于加固软土，加固效果显著，加固后可很快投入使用，适应快速施工要求。在加固施工中无振动、无噪音，对环境不会造成污染。目前，此方法在施工中已得到广泛使用。而实验室对水泥土深层搅拌法质量控制主要是通过水泥土配合比设计和强度检测验证。

2、水泥土

水泥和土以及其他组分按适当比例混合、拌制并经硬化而成的材料。

3、水泥掺入比

掺入的水泥质量与被加固土的湿质量之比，以百分数表示。

4、水泥浆水灰比

用于加固土体的水泥浆中，水与水泥的质量比。

5、水泥土深层搅拌法（粉喷法）

是利用水泥作为固化剂的主剂，通过特制的深层搅拌机械，在地基深处就将软土和固化剂强制拌和，利用固化剂和软土之间所产生的一系列物理-化学反应，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的优质地基或地下挡土构筑物。

6、基本原理

基于水泥土的物理化学反应。水泥拌入软粘土中，遇到土中水份即发生水化和水解反应。当水泥的各种水化物生成后，有的继续硬化，形成水泥石骨架，有的则与周围具有一定活性的粘土颗粒发生离子交换、团粒化作用、凝结硬化反应和碳酸化反应，生成新的化合物，从而提高水泥土的强度。

7、适用范围

深层搅拌法（粉喷法）适用于天然含水量 30%-70%的淤泥质土、粘性土、粉性土地基；但不适用于 pH 值小于 4 的土层；加固深度不宜大于 15 米。

8、水泥土室内试验目的

(1) 为制定满足设计要求的施工工艺提供可靠的强度数据；

(2) 为现场施工进行材料检验。

二、检测依据:

- 1、《软土地基深层搅拌加固法技术规程》YBJ225-1991
- 2、《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2012
- 3、《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》TB10113-1996
- 4、《土工试验方法标准》GB/T50123-1999 (2007 版)
- 5、《水泥土配合比设计规程》JGJ/T233-2011

三、基本规定

1、在进行水泥土配合比试验前，应完成下列工作：

- (1) 搜集详细的岩土工程勘察资料。
- (2) 根据工程设计的要求，确定配合比试验所需的各种材料并检验其性能指标。
- (3) 结合工程情况，了解当地相关经验、配合比试验资料和影响水泥土强度的因素。

对于有特殊要求的工程，尚应了解其它地区相似场地上同类项目经验和使用情况等。

2、水泥土配合比设计应确定以下内容：

- (1) 用水泥加固土体的可行性。
- (2) 加固土体的水泥品种和强度等级。
- (3) 水泥土的水泥掺入比、水泥浆水灰比和外加剂品种及掺量。

3、水泥土的每种配合比宜进行 7d、28d、90d 三种龄期的试验。

4、无特殊要求的工程，水泥土的性能指标宜以 90d 龄期为准，有特殊要求的工程，水泥土的性能指标可按设计要求执行。

四、仪器设备及环境:

- 1、压力试验机，测量精度 $\pm 1\%$ ，试件破坏荷载在压力机全量程的 $20\% \sim 80\%$ 之间；
- 2、搅拌机宜采用转速可调、可封闭搅拌的行星式搅拌机，转速宜为 $(100 \sim 400)$ r/min；
- 3、 $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ 或 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 试模；
- 4、振动台（频率为 $50\text{Hz} \pm 2\text{Hz}$ ，负载振幅 $0.5\text{mm} \pm 0.02\text{mm}$ ）；
- 5、标准养护箱。
- 6、试验环境温度_为室温。

五、原材料

1、水泥石配合比试验用土应符合下列规定：

(1) 试验用土应为工程拟加固土。

(2) 土样应风干、碾碎，并应通过 5mm 筛。

(3) 在需要加固处理的软弱土地基中，选择有代表性的土层，在取样钻孔中（或试坑）采集必要数量的试料土（考虑到富余量）。如果地层复杂，处理范围内多层土时，应取最软弱的一层土进行室内配比试验。试坑采集的试料土，应采用塑料袋或其它密封方法包装，保持天然含水量；当试料土采集地点离实验室较远，运输过程中不能保持天然含水量的情况下，试料土可采用风干土料。但两者均必须采集部分原状土，以满足常规土工试验要求。

(4) 试料土制备时，应除去其中所夹有的贝壳、树枝、草根等杂物。以现场施工为目的的室内配合比试验应采集保持天然含水量的扰动土，当采用风干土料时，土料应粉碎，过 5mm 筛，加水在室内重新配制成相当于天然含水量的试料土，放置 24 小时，并防止水分蒸发。

(5) 试料土含水量必须在同一地层的不同部位，至少 3 处取样测定。

2、水泥石配合比试验用水泥应符合下列规定：

(1) 试验用水泥应与工程现场使用的水泥一致。

(2) 试验用水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB175 的规定。

3、水泥石配合比试验用水应与工程现场用水一致。

4、水泥石配合比试验用外加剂应符合下列规定：

(1) 可根据工程需要和土质条件选用不同类型的外加剂，其品种和掺量应通过试验或工程经验确定。

(2) 外加剂性能应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 的要求。

六、配合比设计

1、水泥石配合比的确定应按下列步骤进行：

(1) 测定土样天然含水率、密度，当有特殊要求时，可增加土样其他相关性能的试验；

(2) 测定风干土含水率；

(3) 确定水泥掺入比基准值；

(4) 选取水泥浆水灰比；

(5) 计算各材料用量比例;

(6) 进行水泥石试配;

(7) 调整和确定水泥石配合比。

2、水泥掺入比基准值可根据使用目的及当地经验,按工程要求的水泥石性能指标确定,并宜取 3%~25%,也可按工程要求的水泥掺入比确定。

3、水泥浆的水灰比可根据施工方法和处理目的,按设计要求或当地经验确定,也可取 0.45~2.0。

4、水泥石的材料用量确定:

(1) 确定试验所需湿土的质量:

$$m_s = 1000\rho_s V_s$$

式中: m_s ——湿土质量 (kg)

ρ_s ——土的天然密度 (g/cm^3)

V_s ——土的体积 (m^3)

(2) 确定试验所需风干土的质量:

$$m_0 = \frac{1+0.01\omega_0}{1+0.01\omega} m_s$$

式中: m_0 ——风干土质量 (kg)

ω ——土的天然含水率 (%)

ω_0 ——风干土的含水率 (%)

(3) 根据选定的水泥掺入比基准值,确定掺入的水泥质量:

$$m_c = \frac{1+0.01\omega}{1+0.01\omega_0} 0.01\alpha_w m_0$$

式中: m_c ——水泥的质量 (kg)

α_w ——水泥掺入比 (%)

(4) 根据选定的水泥浆水灰比,确定加水量:

$$m_w = \left(\frac{0.01\omega - 0.01\omega_0}{1+0.01\omega} + 0.01\mu\alpha_w \right) \frac{1+0.01\omega}{1+0.01\omega_0} m_0$$

式中: m_w ——加水量 (kg)

μ ——水泥浆水灰比

(5) 确定外加剂用量:

$$m_a = 0.01\alpha_a \cdot m_c$$

式中: m_a ——外加剂的质量 (kg)

α_a ——外加剂的掺量(%), 可根据外加剂性能按经验取值。

5、水泥土试配时, 宜采用三个配合比, 其中一个配合比的水泥掺入比应为基准值, 另外两个配合比的水泥掺入比, 宜比基准值分别增加和减少 3%。

6、根据试配结果, 宜选定符合设计要求、较小水泥掺入比所对应的配合比。试配结果不满足设计要求, 则应调整配合比重新进行试验。

七、试样的搅拌、成型与养护

1、每批试样宜一次搅拌成型, 搅拌方式应采用机械搅拌, 并应符合下列规定:

(1) 风干土和水泥应先均匀混合, 再洒水搅拌至直至均匀。

(2) 拌合水可一次加入, 也可逐次加入。但采用逐次加入时, 应逐次拌合 1min。

从加水起至搅拌均匀, 搅拌时间不应少于 10min, 并不应超过 20min。

2、试件的成型应符合下列规定:

(1) 成型试验室环境条件: 温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 相对湿度不低于 50%。

(2) 试件成型前, 试模内表面涂一薄层矿物油或其它不与水泥土发生反应的脱模剂。

(3) 水泥土搅拌后尽快成型, 成型时间不应超过 25min。

(4) 试样成型步骤:

①拌合物宜分两层插捣, 每层装料高度宜相等。

②每层按螺旋方向从边缘向中心均匀插捣 15 次。在插捣底层拌合物时捣棒应达到试模底部, 插捣上层时, 捣棒应贯穿该层后插入下一层 $(5 \sim 15)$ mm, 插捣时捣棒应保持竖直。插捣后用油灰刀或刮刀沿试模内壁插拔数次。

③试模附着或固定在振动台上振实, 振实时间不低于 2min, 振实后拌合物应高出试模上沿口。

④试模顶部多余的水泥土应刮除, 抹平后应盖上塑料薄膜。

3、试件拆模与养护应符合下列规定:

(1) 试件在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的环境条件下静置 48h 后拆模。

(2) 拆模后应检查试件外观, 不得有肉眼可见的裂纹、缺棱掉角、倾斜及变形。

(3) 应称取试件养护前的质量，精确至 1g，并应根据试件的公称尺寸计算拆模后水泥土的重度。当同组试件重度中最大值或最小值与平均值之差超 3%时，或当该组试件重度平均值小于天然土重度时，改组试件应作废，并应重新制备。

(4) 称量后的时间应放入 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 水中养护，试件建的间隔不小于 10mm，水面高出试件表面不小于 20mm。

八、无侧限抗压强度试验

1、无侧限抗压强度试验的试件应为 6 个。

2、无侧限抗压强度试验应按下列步骤进行：

(1) 将试件安放在试验机下垫板中心，试件的承压面与成型面垂直。启动试验机，当上压板与试件接近时，应调整球座，使接触面均衡受压。

(2) 以 $(0.03 \sim 0.15)$ kN/s 的速率连续均匀地对试件加荷，直至试件破坏后记录破坏荷载 P ，精确至 0.01kN。

(3) 试验结果计算及确定应按下列方法进行：

$$f_{cu} = \frac{P}{A}$$

式中： f_{cu} ——水泥土无侧限抗压强度 (MPa)，精确至 0.01 MPa；

P ——破坏荷载 (N)；

A ——试件的横截面积 (mm^2)。

3、试验结果的确定

(1) 计算 6 个试件的无侧限抗压强度的平均值，精确至 0.01MPa；

(2) 当 6 个试件无侧限抗压强度的最大值或最小值与平均值之差超过平均值的 20%时，应以 6 个试件的平均值作为该组试件的无侧限抗压强度结果；

(3) 当 6 个试件无侧限抗压强度的最大值或最小值与平均值之差超过平均值的 20%时，应以中间 4 个试件的平均值作为该组试件的无侧限抗压强度结果；

(4) 当中间 4 个试件无侧限抗压强度的最大值或最小值与平均值之差超过平均值的 20%时，该组试件的试验结果应作废，并应重新制作试件。

2、水泥土深层搅拌法（粉喷法）定义：是利用水泥作为固化剂的主剂，通过特制的深层搅拌机械，在地基深处就地将软土和固化剂强制拌和，利用固化剂和软土之间所产生的一系列物理-化学反应，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的优质地基

或地下挡土构筑物。

九、设计影响因素：

影响水泥土抗压强度的因素较多，也较为复杂，大致有以下几点：

1、土质、土性特征：

对含高岭石、多水高岭石、蒙脱石等粘土矿物的软土加固效果较好；而对含有伊利石、氯化物和水铝石英等矿物的粘性土以及有机质含量高，pH 值较低的粘性土加固效果较差。

塑性指数大于 25 时，会在搅拌时在搅拌叶上形成泥团，水泥土无法拌和。

地下水含有大量硫酸盐时（海水渗入地区），硫酸盐对水泥产生结晶侵蚀，出现开裂、崩解而丧失强度。此种情况下应选用抗硫酸盐水泥。

2、水泥强度等级、水泥掺入量：

水泥强度提高 1 个等级，水泥土标准强度增大 20-30%；

当其他条件相同，在同一土层中水泥掺入比不同时，水泥土强度也不同，当水泥掺入比大于 10% 时，标准强度可达 0.3~2Mpa 以上。但因场地土质与施工条件的差异，掺入比的提高与水泥土强度增加的百分比是不完全一致的，如掺入比由 10% 增加到 12% 时，水泥土强度可增加 10~26%；但当掺入比小于 5% 时，水泥与土的反应过弱、固化程度偏低，试件强度离散性较大，故实际工程中选用掺入比大于 5% 为宜，一般可使用 7~15%。如要求达到相同强度，水泥强度提高 1 个等级，水泥掺入量可降低 2-3%。

3、外掺剂：

外掺剂对水泥强度有着不同的影响，掺入合适的外掺剂，有可能节省水泥用量或提高水泥土的强度，如在水泥土中掺入一定量的粉煤灰，既可提高加固效果，又可消除工业废料对环境的影响。当掺入与水泥等量的粉煤灰后，水泥土强度可以提高 10%。

4、含水量：

当水泥土配方相同时，其强度随土样的天然含水量的降低而增大。当土样含水量在 50~85% 范围内变化时，含水量每降低 10%，强度可提高 30~50%。

5、有机质含量：

有机质含量高会阻碍水泥化学反应，影响水泥土强度的增长。有机质含量高的土加固效果差。一般认为，有机质含量大于 10%，就不太适合掺水泥了。

6、龄期：

水泥土的强度随龄期的增长而增大，一般情况下水泥土的强度 7d 时 可达标准强度的 30-50%；30d 可达到标准强度的 60-75%；90d 为 180d 的 80%，而 180 天以后，水泥土强度增加仍未终止。另外根据电子显微镜的观察，水泥土的硬凝反应也需要三个月才能完成。因此，龄期 90d 的强度作为水泥土的标准强度。

7、养护条件：

不同的养护湿度、温度影响水泥土的强度。如：冰冻会减缓水泥化学反应，使水泥土强度的增长缓慢。

8、制样水平：

制样的规范程度，包括拌和均匀程度，试料装模时捣实程度，有没有气泡等都会影响到水泥土试件的强度。