

第 1 章

气泡混合轻质土基本概念

1.1 气泡混合轻质土主要成分及制作

按照一定的比例在原料土中 添加固化剂、水和气泡 经过充分混合、搅拌后所形成的轻型填土材料，称为气泡混合轻质土。图 1-1 简要地说明了气泡混合轻质土的制作流程。

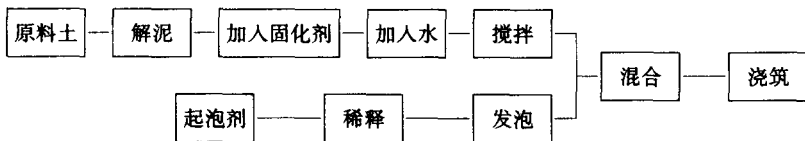


图 1-1 气泡混合轻质土的制作流程

(1) 原料土

原料土可以是工程废弃土，也可以是砂质土或黏性土，但是，为了达到与固化剂及气泡的均匀混合，并确保气泡混合轻质土的流动性，原料土颗粒直径宜小于 5mm 对于不满足要求的原料土，应事先进行解泥及必要的筛分处理。

(2) 固化剂

固化剂分为主剂和辅剂，主剂主要起固结、加强土体骨架的作用，而辅剂是以催化、早凝为目的的固化材料。主剂以水泥类为主，常用的有火山灰水泥、普通硅酸盐水泥、高炉矿渣水泥等，这些材料加入土中后与水发生水化作用产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与黏土颗粒发生离子交换形成固化物，达到加固土体骨架的作用。实践证明，使用高炉矿渣水泥的效果更佳。辅剂是指石膏粉、硅粉等辅助材料，加入这些材料的目的在于减少主剂的用量，达到降低造价的目的。

(3) 起泡剂

起泡剂主要有界面活性类、蛋白类、树脂类等材料，按适当的倍率稀释后的起泡剂，定量泵送到发泡装置，与压缩空气充分混合而产生大量的微小气泡群。图 1-2 简要地说明了气泡的制作流程。在这里，压缩空气是通过空压机加压，用减压阀控制输气压力，以稳定的压力和气量向发泡装置供气。气泡是由致密、直径约为 $30 \sim 300\mu\text{m}$ (10^{-6}m) 左右的气泡群构成。气泡应具有一定的稳定性，与土混合后可在土中形成大量而微小的不连通孔隙。

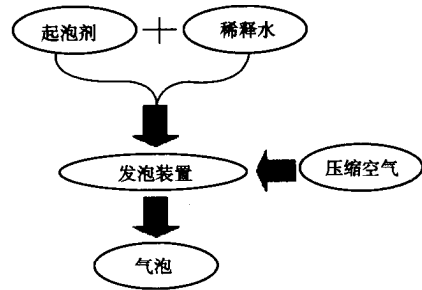


图 1-2 气泡制作流程

1.2 气泡混合轻质土优点

气泡混合轻质土的容重比一般土体小得多，而强度可达到甚至超过良好的土体，且强度和容重还可以按需要自由调整；轻质土还具有良好的力学特性和隔热、隔音性能，便于施工等特性。气泡混合轻质土用于工程建设上，具有以下优点：

(1) 轻质性

在气泡混合轻质土内均匀分布着大量的独立闭合胶质气

泡，气泡膜是一种具有较强韧性的物质，气泡之间互不通水，从而使材料的容重比常规土小得多（表 1-1 及图 1-3）。根据工程上不同的需要，通过适当调整产品中的气泡、固化剂及土的含有率，气泡混合轻质土的容重可在 $5 \sim 12\text{kN/m}^3$ 的范围内自由调整。

几种主要土建材料的容重比较（单位 kN/m^3 ） 表 1-1

水泥混凝土	路面底基层	填土路基	粉煤灰	气泡混合轻质土
25	21 ~ 22	19 ~ 20	12 ~ 16	5 ~ 12

(2) 强度的可调节性

与容重的可调节性原理一样，通过改变轻质土中各种成分的比例 其强度可在 $0.3\text{MPa} \sim 5\text{MPa}$ 的范围内调整。

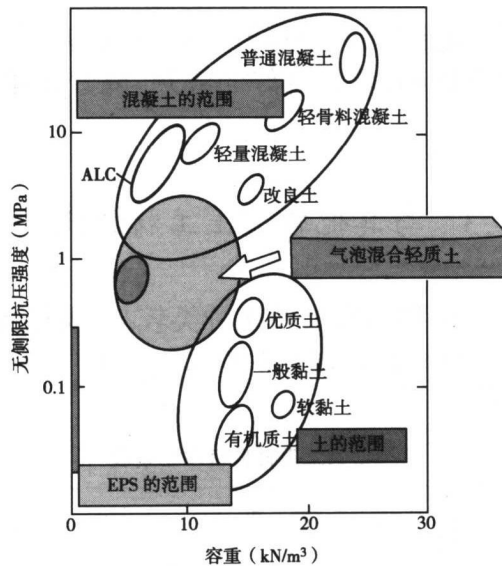


图 1-3 常用几种土工材料的容重与无侧限抗压强度之间的关系

(3) 高流动性

气泡混合轻质土具有良好的流动性，可通过管道泵送，其最大输送距离可达 500m 如果通过中继泵 还可输送更远的距离，最大泵送高度可达 30m。

(4) 固化后的自立性

气泡混合轻质土由于使用水泥作为固化剂，通常在浇筑 4h 后就会开始固化自立，固化后对挡土结构物几乎没有推挤力，因而可进行垂直填筑。

(5) 良好的施工性

气泡混合轻质土由于其具有良好的流动性和固化后的自立性，且浇筑时不需振捣和碾压作业，可进行远距离或在窄小空间内施工。此外，气泡混合轻质土中混有大量的气泡群，成品的体积可达到原材料体积的 3 倍以上，提高了施工材料的运送效率。

(6) 耐久性

气泡混合轻质土属水泥类材料，与高分子材料相比，其耐久性、耐热及抗油污能力强，具有水泥混凝土材料同等的耐久性。

(7) 良好的隔热、隔音效果及抗冻融性能

气泡混合轻质土含有大量的气泡，其气泡体积含有率可达 40~70%，导热系数小，具有良好的隔热、隔音效果及抗冻融性能。

1.3 与其他轻质土工材料比较

目前国内外采用的轻质填土种类较多，现将常用的几种类型材料列于表 1-2 中，以供同仁们研究、比较。

几种轻质土工材料特性比较表

表 1-2

轻质填土材料	构成	容重 (kN/m^3)	主要特性
粉煤灰等材料构成的轻质土	火山灰质矿渣颗粒	12~16	需进行碾压施工； 具有自硬性(火山灰质成分的水化反应)； 废弃材料的再利用； 不能期待太大的减重效果

续上表

轻质填土材料	构成	容重 (kN/m ³)	主要特性
泡沫塑料块 体轻质土(EPS)	泡沫塑料 块	0.16~0.3	超轻量的合成树脂发泡体； 价格昂贵； 不能利用建筑废弃土； 对水的浮力抵抗差
泡沫塑料颗 粒混合轻质土	土砂、泡沫 塑料颗粒及 稳定材料(水 泥)	7以上	容重可自由调整； 与土的变形特性相近； 可利用废弃土制作
气泡混合轻 质土	土砂、水 泥、水及气泡	5以上	容重和强度可自由调整； 具有流动性、自硬性； 可利用废弃土制作； 不需机械压实作业； 力学性能好，隔热、隔音等效果 佳

第 2 章

气泡混合轻质土性能

气泡混合轻质土属于水泥制品系列，但因含有大量的气泡，其性能却与普通水泥砂浆、混凝土迥然不同。

2.1 基本性能

2.1.1 容重

按照工程要求，在气泡混合轻质土中添加气泡，以保证其轻质性。但是，气泡混合轻质土中的气泡含量，随着浇筑时的输送距离、厚度等浇筑条件而变化，同时在固化及压缩过程中也会有少量地消泡现象发生，从而导致气泡混合轻质土气泡减少、容重增加。此外，在地下水位以下或浸入水中气泡混合轻质土容重也会增加。下面着重阐述浇筑厚度及吸水对容重的影响问题。

浇筑厚度对容重的影响

在直径 40cm 高 4m 的管中，分三种情况浇筑气泡混合轻质土 第一种是一次完成 4m 厚的浇筑量，第二种是第一次先浇筑 2m，一天后再浇筑余下的 2m 第三种是第一次浇筑 2m 两天后

再浇筑其余 2m。然后经过试验观察浇筑厚度与容重和强度的关系(图 2-1)。从图 2-1 中不难看出:一次浇筑厚度越大,下部的容重越大,强度也越高。因此,在要求轻质填土的情况下,要特别控制每层的浇筑厚度。

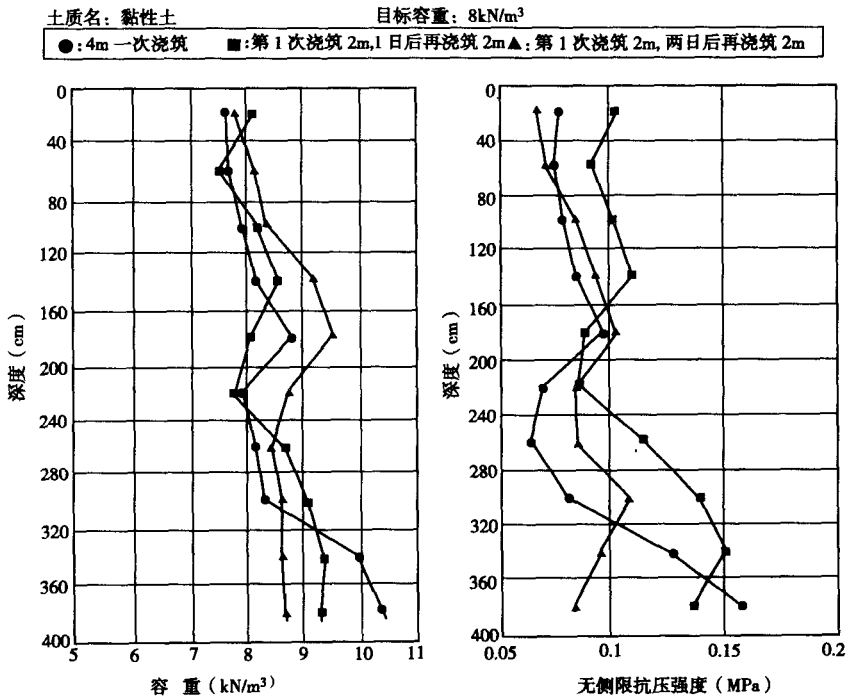


图 2-1 浇筑厚度与容重及无侧限抗压强度的关系

(2) 吸水对容重的影响

因为气泡混合轻质土中含有空隙,所以应特别关注浸水对容重的影响。通过将直径 5cm 高 10cm 的试件全部浸入水中进行试验,其结果示于图 2-2。从试验可以看出:气泡混合轻质土浸水后,由于吸水而使容重增加,气泡含量越多,即密度小的,气泡混合轻质土浸水后容重增加的越多。

现将长期浸水试验结果示于图 2-3。浸水深度分为 0m 和 2m (从试件顶面算起)两种情况,显然浸水 2m 试件,其容重增加的比例大于浸水 0m 的。

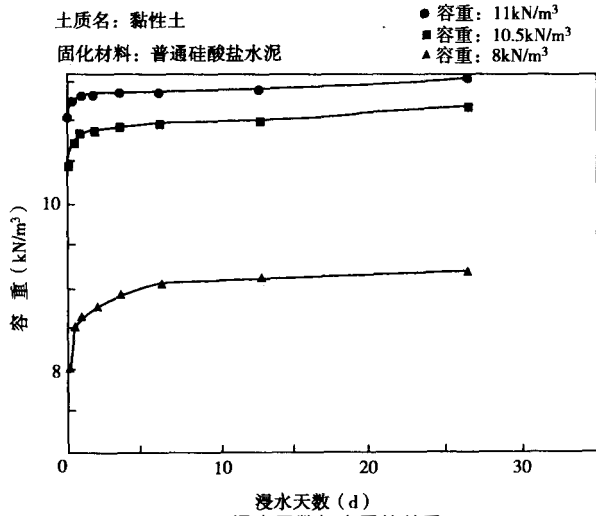
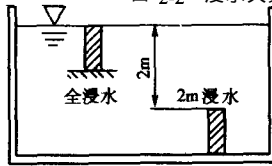


图 2-2 浸水天数与容重的关系



浸水状况

容重：10kN/m³

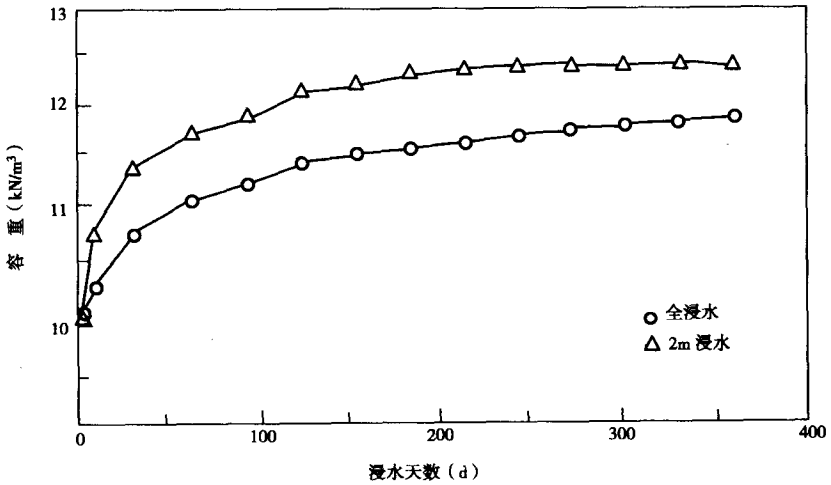


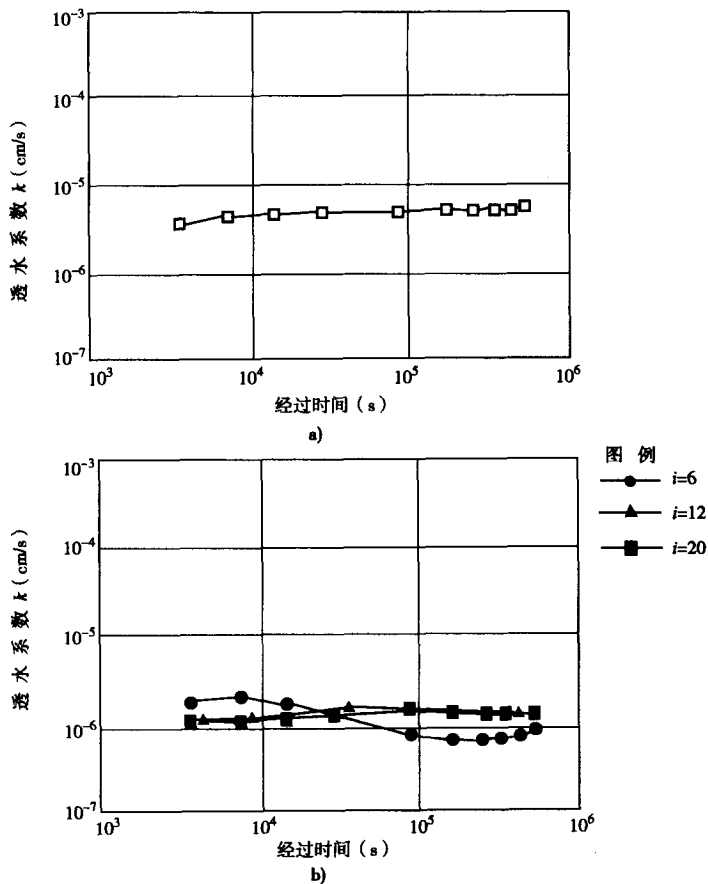
图 2-3 长期浸水天数与容重的关系

因此，在有浸水情况下，使用气泡混合轻质土の場合，一定要考虑浸水后对容重的影响，或采取防水措施避免容重的增加。

但也需强调一点，气泡混合轻质土中虽然含有大量的气泡，但气泡是分散独立的，气泡膜是胶质物质，并具有强韧性不通水性能。因此，气泡混合轻质土吸水量是有限的。

2.1.2 透水性

气泡混合轻质土的透水性是比较低的。通过对不饱和状态和饱和状态的试件 原料土为黏性土 固化材料为普通硅酸盐水泥 进行透水性能试验 从试验结果可以看出 无论是不饱和状态还是饱和状态 透水系数仅为 10^{-5} cm/s 量级 图 2-4a、b)。



注： i 为试验时的水力坡降

图 2-4 由试验开始经过时间和透水系数的关系
a)容重 10kN/m^3 、不饱和状态；b)容重 10kN/m^3 、饱和状态

2.1.3 隔热性能

气泡混合轻质土具有良好的隔热性，广泛用于各种隔热保温的场合，与其他建筑材料热传导率相比较结果，见表 2-1。

几种主要建筑材料的导热性能比较表表 2-1

容重 (kN/m^3)	种 类	热传 导率 $k(\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$	与 5cm 厚软木相当	
			必要的厚度 (cm)	每 m^2 质量 (kg)
0.30	塑料泡沫	0.030	3.41	1.02
2.40	软木	0.044	5.00	12.00
6.00	气泡混合轻质土	0.100	11.36	68.18
9.00	气泡混合轻质土	0.175	19.89	178.93
10.00	沥青	0.630	71.59	715.90
15.00	轻骨料混凝土	0.400	45.46	681.90
17.00	炉渣	0.700	79.55	1352.40
19.50	填土路基	1.047	118.97	2320.10
21.10	砂浆	1.300	147.73	3117.10
21.60	水泥稳定层	1.256	142.73	3083.00
23.00	水泥混凝土	1.400	159.10	3659.30
23.50	沥青混凝土	4.868	259.99	6109.90

2.2 力学特性

2.2.1 无侧限抗压强度

气泡混合轻质土中的土和砂性状，固化材料含量、种类，气泡含量等对无侧限抗压，强度均有明显的影响。

(1) 原材料的种类及用量对无侧限抗压强度的影响

气泡的含有率对无侧限抗压强度的影响

图 2-5 表示气泡的含有率与无侧限抗压强度的关系。图中列出了六组曲线，每组曲线中砂和水泥的比例固定，随着气泡含有率的增加，气泡混合轻质土的强度逐渐降低；在气泡含有率相

同的情况下，砂的含有率越大，气泡混合轻质土上的强度将越低。

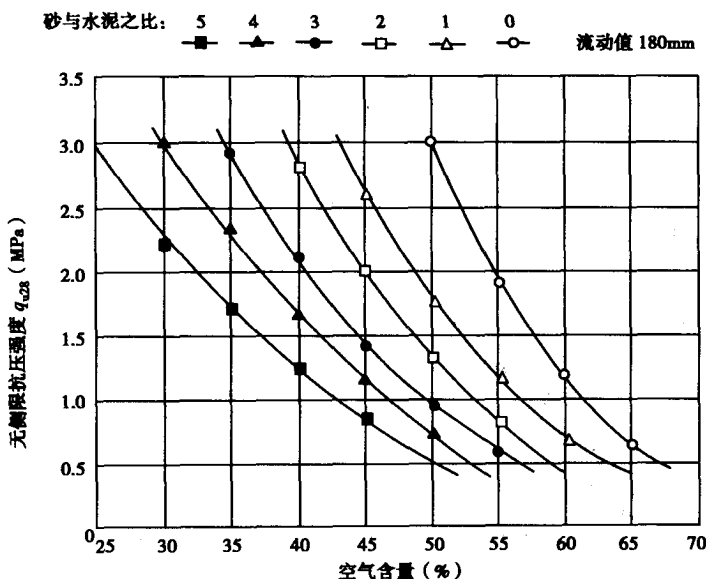


图 2-5 气泡的含有率与无侧限抗压强度的关系

原料土及固化材料的种类、用量对无侧限抗压强度的影响

图 2-6 展示出了固化材料的种类与无侧限抗压强度的关系。图中的纵坐标代表高炉矿渣水泥，横坐标代表普通硅酸盐水泥。试验所用的原料土为黏性土。结果表明，在其他条件相同的情况下，固化材料采用高炉矿渣水泥时，气泡混合轻质土的无侧限抗压强度比采用普通硅酸盐水泥的高。

图 2-7 表示原料土及固化材料的种类、用量与无侧限抗压强度的关系。在其他条件相同的情况下，气泡混合轻质土的无侧限抗压强度随着固化材料用量的增加而增加；在配合比相同的情况下，原料土使用黏性土的比使用山砂的强度高。原料黏性土及山砂物理性能见表 2-2。也有例外情况，如图中虚线所示，即原料土使用山砂且容重低于 8kN/m^3 原料土使用黏性土且容重低于 6kN/m^3 时，随着固化材料用量的增加，强度的增加非常缓慢，因此设计时应避免使用这样的配合比，以免影响工程质量。

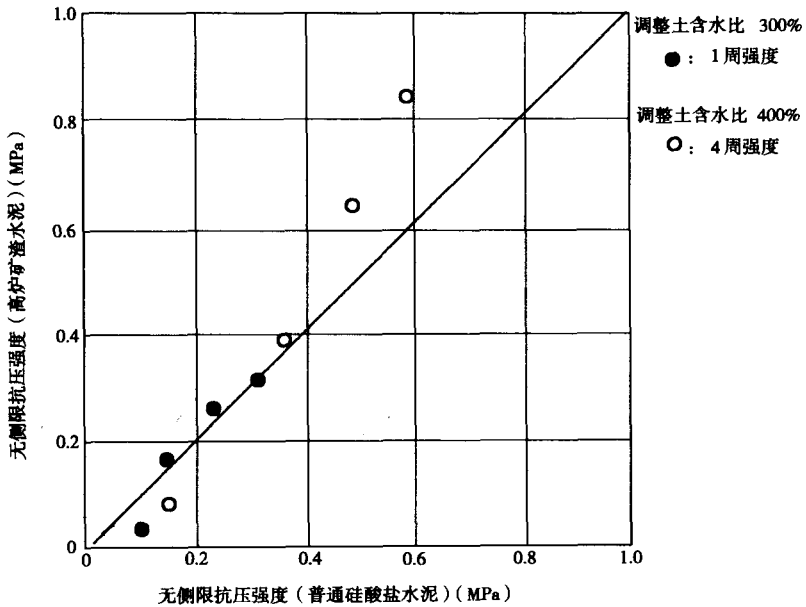


图 2-6 固化材料的种类对无侧限抗压强度的影响

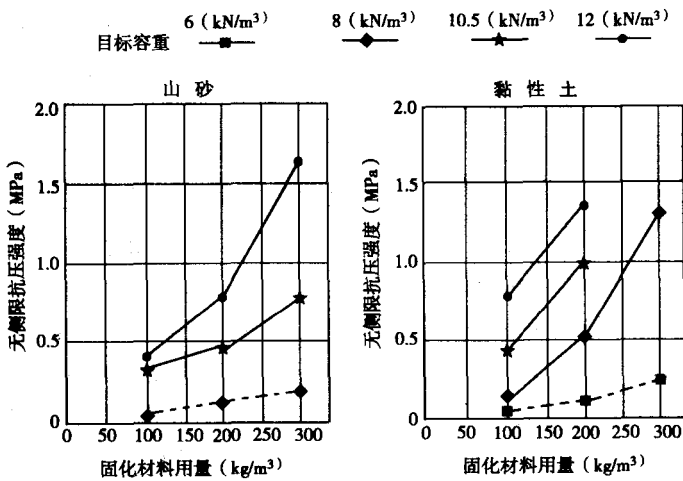


图 2-7 原料土及固化材料的用量对无侧限抗压强度的影响

原料土的试验数据

表 2-2

试验项目 土质名	密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	粒 度			液限 (%)	塑限 (%)
			砂(%)	细粒(%)	黏土(%)		
山砂	2.8	26.3	78.9	11.2	9.8		
黏性土	2.7	42.2	6.1	62.0	31.9	60.0	35.5

表 2-3 列出了几种配合比实例，结果表明：气泡混合轻质土的无侧限抗压强度随原料土的种类、用量及固化材料用量的不同而不同。即气泡混合轻质土的无侧限抗压强度由土砂的性状及用量、固化材料的性状及用量、气泡的含有率综合决定。

几种配合实例

表 2-3

原料土类别	设计容重 (kN/m ³)	原料土用量 (kN/m ³)	固化材料用量 (kN/m ³)	无侧限抗压强度 (MPa)
细砂	10.9	550	275	2.85
无	6.5	0	400	1.4
亚黏土	10.5	210	200	1.4
黏土	10.5	364	200	1.0

(2) 强度与龄期的关系

① 1周强度与4周强度的比较

从图 2-8 展出的气泡混合轻质土的 1 周强度与 4 周强度的关系图中可知，虽然随固化材料、原料土的种类不同而不同，但总体上两者成线性关系。固化材料采用普通硅酸盐水泥时的 4 周强度与 1 周强度的比较，其中采用黏性土的为 2 采用砂土的为 1.4。

强度随着龄期而增加的特性

图 2-9 表示原料土采用黏性土时不同容重的气泡混合轻质土强度随龄期增长的特性。一般情况下，无侧限抗压强度随着龄期增长，28d 后强度还要继续增长相当一部分，甚至可延续到 1~2 年。

此外，气泡混合轻质土浸水后以上关系仍然存在。图 2-10

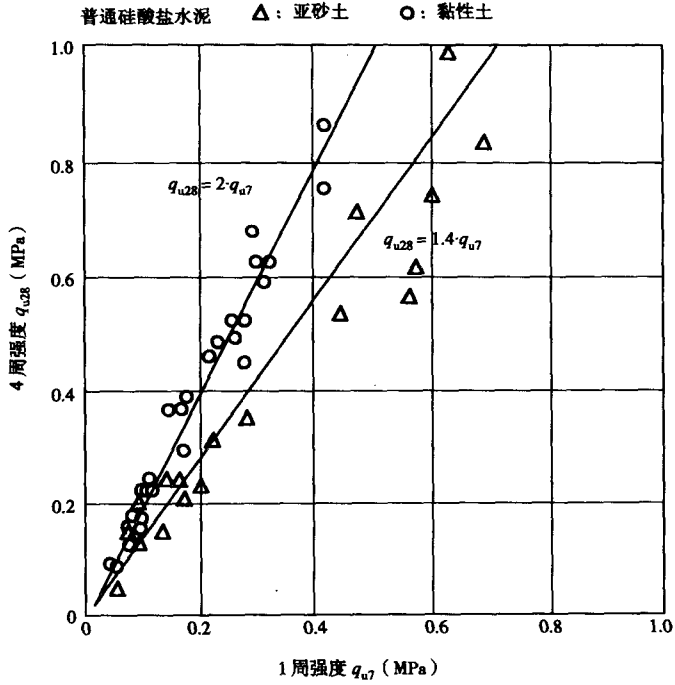


图 2-8 1周强度与4周强度的比较(黏性土、亚砂土)
土质名 黏性土 固氏材料 普通硅酸盐水泥

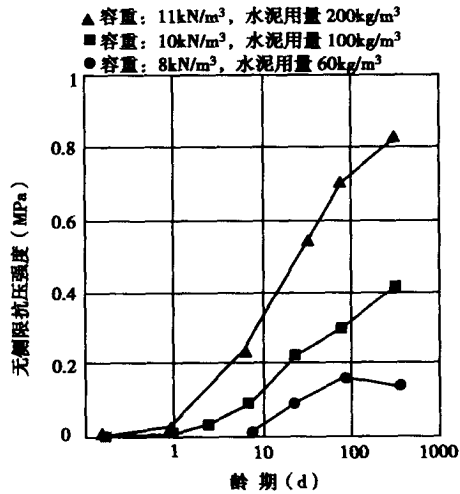


图 2-9 龄期与强度的关系
表明试体浸水期间, 强度仍随龄期的增长而增长, 没有显著下降

的趋势。

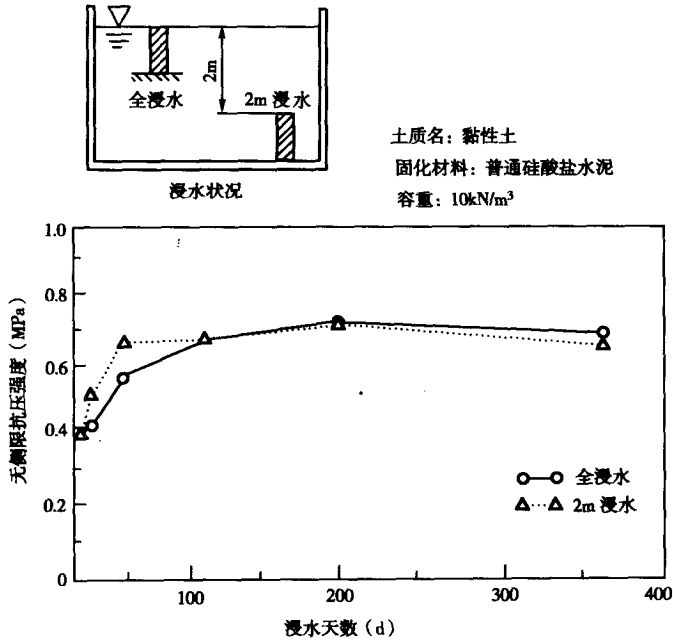


图 2-10 浸水天数与无侧限抗压强度的关系

(3) CBR 特性

为了了解气泡混合轻质土的 CBR 特性 进行了浸水和非浸水 CBR 试验。

图 2-11 表示浸水 CBR 与无侧限抗压强度的关系，利用此关系由无侧限抗压强度推算 CBR 值是可行的。

另外 据有关资料介绍 如果与水泥稳定土的 CBR 进行比较，具有同一无侧限抗压强度时气泡混合轻质土的 CBR 值偏小。

图 2-12 表示浸水和非浸水的 CBR 的关系 从试验可看出浸水和非浸水的 CBR 几乎没有区别 即浸水对 CBR 值基本无影响。

(4) 弹性模量

图 2-13 为容重 10.5kN/m^3 ，原料土为黏性土的气泡混合轻质土无侧限抗压强度与弹性模量的关系。所用试件尺寸为

φ10cm 高 20cm 测试时轴应变由试件中间 10cm 区间测得。

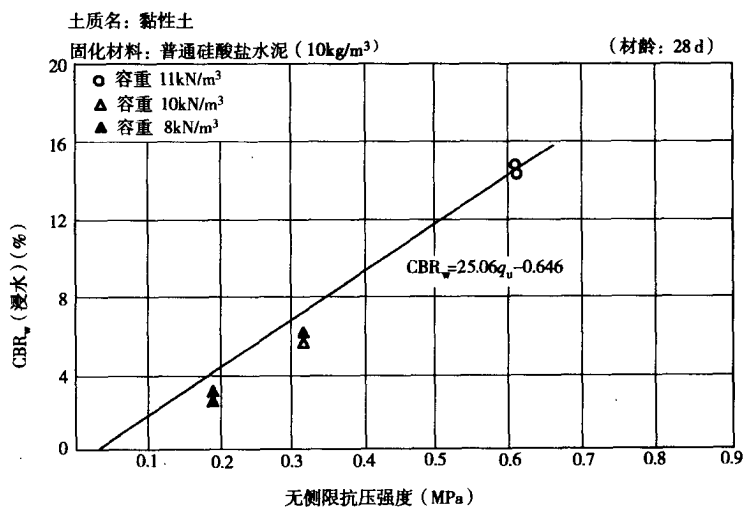


图 2-11 CBR(浸水)与无侧限抗压强度的关系

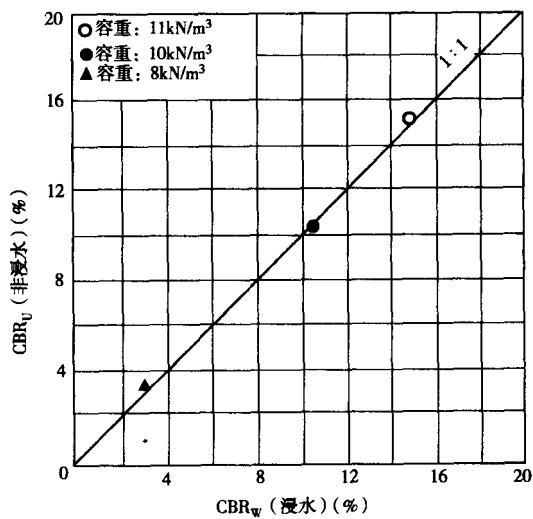


图 2-12 浸水和非浸水 CBR 的关系

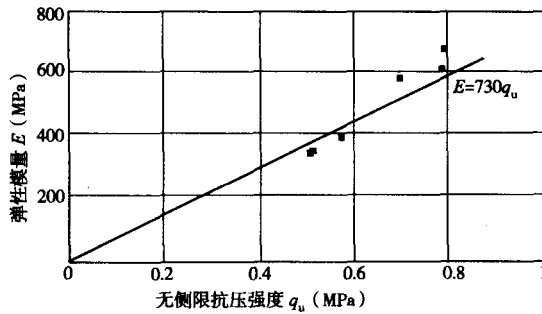


图 2-13 无侧限抗压强度与弹性模量的关系

(5) 无侧限压缩破坏特性

图 2-14 中为三种不同配合比 设计强度相同 均为 1MPa 砂与水泥的比不同 分别为 5、2、0) 的无侧限压缩破坏时的应力与轴应变关系曲线。

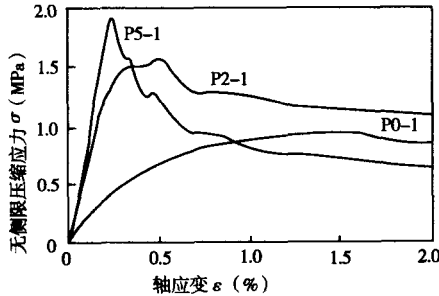


图 2-14 轴应变与无侧限压缩应力关系图

P5-1 含砂量多 空气量较少 脆性破坏；P0-1 空气量多 延性破坏；P2-1 配合比在前两者之间，其破坏形式也处于两者之间。

2.2.2 抗拉强度

表 2-4 为抗拉试验结果一览表。

2.2.3 抗弯强度

气泡混合轻质土抗弯强度与无侧限抗压强度的关系，示于表 2-5 和图 2-15。