

第一章 混凝土

1.1 普通混凝土的基本组成材料

Definition 1.1.1. 混凝土的狭义定义是：水泥、粗骨料、细骨料和水按一定比例混合而成的材料。

水泥和水组成水泥浆，填充骨料之间的空隙。在混凝土硬化前，水泥浆起润滑作用，赋予混凝土拌合物流动性，便于施工；在混凝土硬化后起胶结作用，把砂、石骨料胶结成为整体，使混凝土产生强度，成为坚硬的人造石材。砂、石是骨料，对混凝土起骨架作用，

Remark. 氯离子对钢筋有腐蚀作用，不宜用海砂。

Definition 1.1.2. 细度模数 $M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1}$

将500g干砂试样由粗到细依次过筛，然后称得剩留在各个筛上的砂重量（m），并计算出各筛上的分计筛余百分率(各筛上的筛余量占砂样重的百分率)，分别以a表示。再算出各筛的累计筛余百分率(各个筛与比该筛粗的所有筛之分计筛余百分率之和)，分别以A表示。

$$a_i = \frac{m_i}{500} \times 100\%, \text{ 显然 } A_j = \sum_{i=1}^j a_i$$

细度模数是衡量砂粗细程度的指标。细度模数愈大，表示砂愈粗。（粗砂3.7- 3.1，中砂3.0-2.3，细砂2.2-1.6）

Remark. 砂骨料的含水状态：

- (1)干燥状态:含水率等于或接近于零
- (2)气干状态:含水率与大气湿度相平衡
- (3)饱和面干状态:骨料表面干燥而内部孔隙含水达到饱和
- (4)湿润状态:不仅内部孔隙充满水，表面附有一层表面水

粗骨料:

1. 有害物质: 卵石和碎石中不应混有草根、树叶、树枝、塑料、煤块和炉渣等杂物。
2. 碱骨料反应: 水泥中的碱性氧化物与骨料中的活性成分反应, 生成碱—硅酸凝胶体, 它会吸水膨胀产生膨胀。使用含碱量小于0.6%的水泥, 或掺加能抑制碱—骨料反应的掺合料。
3. 混凝土用粗骨料其颗粒形状以接近立方形或球形的为好, 而针状和片状颗粒含量要少。否则会降低强度。
4. 骨料表面特征: 与碎石比较 (碎石多棱角), 卵石表面光滑, 拌制混凝土时需用水泥浆量较少, 拌合物和易性较好。但是强度没有碎石高。

1.2 混凝土的技术性质

Definition 1.2.1. 影响混凝土流动性的因素:

混凝土拌合物内的阻力主要来自两个方面, 一为骨料间的摩阻力, 一为水泥浆的粘聚力。

1. 水泥浆数量: 在水灰比不变的情况下, 如果水泥浆越多, 则拌合物的流动性越大。但若水泥浆过多, 使拌合物的粘聚性变差。老师提到了, 水泥浆早期是起润滑作用, 后期才是起胶结作用。这条我是感觉有点反常识的, 毕竟配比是不变的, 但是绝对数量是影响的
2. 水灰比: 在水泥用量不变的情况下, 水灰比越小, 水泥浆就越稠厚, 水泥浆的流动性就越差, 混凝土的流动性也就越差。
3. 水泥性质: 例如采用矿渣水泥或火山灰水泥拌制的混凝土拌合物, 其流动性比用普通水泥时为小, 这是因为前者水泥的密度较小, 所以在相同水泥用量时, 它们的绝对体积较大, 且在相同稠度下需水量要大一些, 因此混凝土就显得较稠。
4. 砂率: 砂起到填充大石头间隙的作用, 所以砂率应当有一个最合适的值, 过大过小都不好。
5. 骨料性质: 采用卵石和河砂拌制的混凝土拌合物, 其流动性比用碎石和山砂拌制的好, 这是因为前者骨料表面光滑, 摩阻力小; 用级配好的骨料拌制的混凝土拌合物

和易性好，因为骨料级配好时其空隙少。

6. 拌合物存放时间及环境温度的影响:随着时间的延长，流动性下降(温度过高，水分丧失)。
7. 外加剂的影响：混凝土拌合物掺入减水剂或引气剂，流动性明显提高，引气剂还可有效地改善混凝土拌合物的粘聚性和保水性，二者还分别对硬化混凝土的强度与耐久性起着十分有利的作用。

混凝土拌合物的和易性（工作性）

定义：是指混凝土拌合物能保持其组成成分均匀，不发生分层离析、泌水等现象，适于运输、浇筑、捣实成型等施工作业，并能获得质量均匀、密实的混凝土的性能。和易性为一个综合技术性能，它包括流动性、粘聚性和保水性三方面的涵义。

1. 流动性：是指混凝土拌合物在自重或机械振捣力的作用下，能产生**流动并均匀密实地充满模型的性能**。混凝土拌合物的流动性以坍落度或维勃稠度作为指标。坍落度适用于流动性较大的混凝土拌合物，维勃稠度适用于干硬的混凝土拌合物。
2. 粘聚性：是指混凝土拌合物**内部组分间的粘聚力**，在运输和浇筑过程中不致发生离析分层现象，而使混凝土能保持整体均匀的性能。
3. 保水性：是指混凝土拌合物**保持内部水分**、在施工过程中不致产生严重的泌水现象的能力。

Theorem 1.2.1. 无论是水泥浆数量的影响，还是水泥浆稠度的影响，实际上都是水的影响。因此，影响混凝土拌合物和易性的决定性因素是其拌合用水量的多少。

实践证明，在配制混凝土时，当所用粗、细骨料的种类及比例一定时，为获得要求的流动性，所需拌合用水量基本是一定的，即使水泥用量有所变动时，也无甚影响。这一关系称为“恒定用水量法则”，它为混凝土配合比设计时确定拌合用水量带来很大方便。**粗骨料的需要更少的水，这是因为粗骨料的总表面积比细骨料更小，只要更少的水来包裹。**

改善流动性的措施：

- (1)尽可能选用较粗大的粗、细骨料；
- (2)采用泥及泥块等杂质含量少，级配好的粗、细骨料；
- (3)尽量降低砂率；

(4)在上述基础上，保持水灰比不变，适当增加水泥用量和用水量；如流动性太大，则保持砂率不变，适当增加砂、石用量；

(5)掺加减水剂。

改善粘聚性和保水性的措施：

- (1)选用级配良好的粗、细骨料，并选用连续级配；
- (2)适当限制粗骨料的粒径，避免选用过粗的细骨料；
- (3)适当增大砂率或掺加粉煤灰等矿物外加剂；
- (4)掺加减水剂和引气剂。

外加剂类型	主要作用	作用机理
减水剂	减少水分，增加强度，增强耐久性。	吸附分散作用、润滑作用
早强剂	调节凝结硬化速率	促进水泥的水化和硬化
引气剂	提高抗渗性，提高抗冻性	增加小气泡，降低摩擦
防冻剂	提高抗冻性能	添加早强、减水、防冻、引气成分
膨胀剂	抵抗收缩，防止开裂	使水泥浆体膨胀
掺和料	减少水泥用量、降低成本	减少活性成分比例
减缩剂	减少混凝土收缩	物理减缩

表 1.1: 外加剂的作用及机理

减水剂的原理：

水泥加水后，由于水泥颗粒在水中的热运动，使水泥颗粒之间在分子力的作用下，形成了一些絮凝状结构。降低了水泥的流动性，不得不加大量的水以保持和易性。减水剂的本质是表面活性剂，亲水部分指向水溶剂，憎水部分指向水泥，起到了水泥颗粒之间的润滑作用。同时减水剂所带的电荷打开了水泥的絮凝结构，释放了原来被束缚的游离水。

水泥颗粒在此作用下充分分散，提高了水化面积，减少了拌合水量，提高了水泥强度。(常见的有木质素系减水剂等)

1.2.1 影响混凝土强度的因素

1) 水泥强度: 水泥强度的大小直接影响混凝土强度的高低。在配合比相同的条件下，所用的水泥强度等级越高，制成的混凝土强度也越高。

2) 水灰比: 高水灰比导致低强度, 由于工程中加水后水分蒸发会产生孔隙, 导致强度下降。

3) 骨料的种类、质量和数量: 骨料级配良好可以产生更高强度。同时碎石由于比卵石更加粗糙, 粘结力更强, 可以产生更大强度。

4) 外加剂和掺合料: 混凝土中加入外加剂可按要求改变混凝土的强度及强度发展规律, 如掺入减水剂可减少拌合用水量, 提高混凝土强度; 如掺入早强剂可提高混凝土早期强度, 但对其后期强度发展无明显影响。超细的掺合料可配制高性能、超高强度的混凝土。

5) 施工条件: 在施工过程中, 必须将混凝土拌合物搅拌均匀, 浇注后必须捣固密实, 才能使混凝土有达到预期强度的可能。机械搅拌和捣实的力度比人力要强(因为搅拌更加均匀)

6) 养护条件: 养护环境温度高, 水泥水化速度加快, 混凝土早期强度高; 反之亦然。若温度在冰点以下, 不但水泥水化停止, 而且有可能因冰冻导致混凝土结构疏松, 强度严重降低, 尤其是早期混凝土应特别加强防冻措施。为加快水泥的水化速度, 可采用湿热养护的方法, 即蒸汽养护或蒸压养护。湿度通常指的是空气相对湿度。相对湿度低, 混凝土中的水份挥发快, 混凝土因缺水而停止水化, 强度发展受阻。另一方面, 混凝土在强度较低时失水过快, 极易引起干缩, 影响混凝土耐久性。一般在混凝土浇筑完毕后12h内应开始对混凝土加以覆盖或浇水。对硅酸盐水泥、普通水泥和矿渣水泥配制的混凝土浇水养护不得少于7天; 使用粉煤灰水泥和火山灰水泥, 或掺有缓凝剂、膨胀剂、或有防水抗渗要求的混凝土浇水养护不得少于14天。

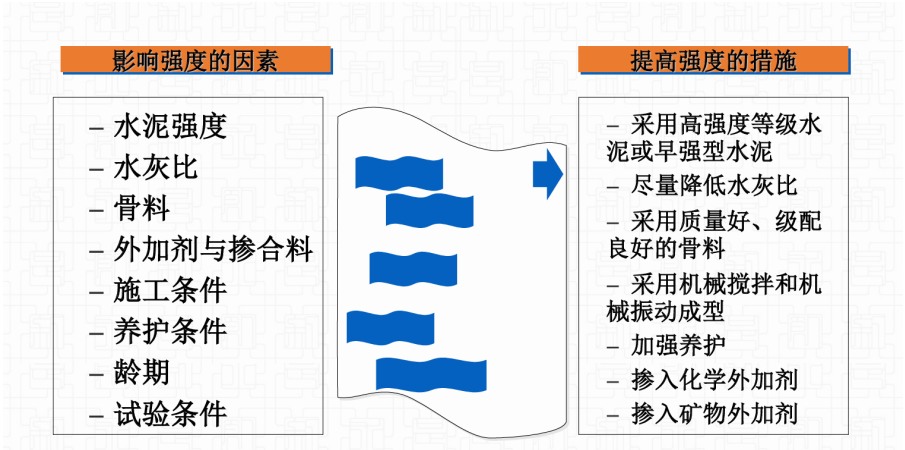


图 1.1: 混凝土强度影响因素

计算强度经验公式:

$$f_{cu,28} = \alpha_a f_{ce} (B/W - \alpha_b)$$

式中 $f_{cu,28}$ —— 标准养护 28d 后的混凝土抗压强度, MPa;

B/W —— 混凝土的胶水比 (胶凝材料与水的质量之比);

α_a 、 α_b —— 与粗骨料有关的回归系数, 可通过历史资料统计得到, 若无统计资料, 可采用《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011) 提供的经验值: 采用碎石时 $\alpha_a = 0.53$, $\alpha_b = 0.20$; 采用卵石时 $\alpha_a = 0.49$, $\alpha_b = 0.13$;

f_{ce} —— 实测的经标准养护 28d 的胶凝材料胶砂抗压强度 (MPa)。无实验条件时, 可取 $f_{ce} = \gamma_f \gamma_s \gamma_c f_{ce,k}$, 其中 $f_{ce,k}$ 为水泥强度等级标准值; γ_c 为与水泥强度等级值有关的强度富余系数。 γ_f 和 γ_s 分别为掺加粉煤灰和矿渣微粉作为混凝土掺合料时, 对胶凝材料胶砂强度的影响系数。

Remark. 根据早期强度推算 28d 龄期强度公式:

$$\frac{f_{cu}}{f_n} = \frac{\lg 28}{\lg n}$$

式中 n 为第 n 天龄期

1.2.2 混凝土耐久性的影响因素

Definition 1.2.2. 混凝土的耐久性

定义：混凝土在长期外界因素作用下，抵抗外部和内部不利影响的能力。

1. 抗渗性：水的渗入可能导致水泥水化产物的溶解，可能导致软水腐蚀，也可能直接腐蚀钢筋，或者渗入水导致冻融作用侵蚀。
2. 抗冻性：硬化混凝土在水饱和状态下，经受多次冻融循环而不破坏、同时也不严重降低强度的性能。
3. 抗侵蚀性：混凝土抵抗各种酸、碱、盐液体或气体侵蚀的能力。
4. 抗碳化性：氢氧化钙转变为碳酸钙的过程（实际上还有水化硅酸钙以及钙矾石也转变为碳酸钙）。好处是强度提高了，坏处是体积收缩导致裂缝，同时碱度下降，导致钢筋表面钝化膜消失，产生锈蚀。
5. 碱骨料反应：混凝土内水泥中的碱性氧化物（ Na_2O 、 K_2O ），与骨料中的活性SiO发生化学反应，生成碱——硅酸凝胶，其吸水后产生很大的体积膨胀，从而导致混凝土产生膨胀开裂而破坏的现象。

提高混凝土耐久性的主要措施：

混凝土材料

结构构造和裂缝宽度限制

施工要求

特殊防腐蚀措施

1.3 混凝土质量控制

用数理统计方法可求出几个特征统计量：强度平均值、强度标准差（ σ ）以及变异系数（ C_v ）。强度标准差越大，说明强度的离散程度越大，混凝土质量愈不均匀。也可用变异系数来评定，该值越小，混凝土质量愈均匀。

Remark. 对于强度标准差，显然越小品控越好。对应的正态分布曲线越窄越高。

$$C_v = \frac{\sigma}{f_{cu}}$$

对于强度保证率，有假定正态分布和假定使用样本近似的两种方法：

所以，强度保证率可按如下方法计算：首先，计算出**概率度** t ，即

$$t = \frac{\overline{f_{cu}} - f_{cu,k}}{\sigma}$$

再根据 t 值，计算或根据下表查得保证率 P 。

t	0.00	0.50	0.84	1.00	1.20	1.28	1.40	1.60
$P/\%$	50.0	69.2	80.0	84.1	88.5	90.0	91.9	94.5
t	1.645	1.70	1.81	1.88	2.00	2.05	2.33	3.00
$P/\%$	95.0	95.5	96.5	97.0	97.7	99.0	99.4	99.87

令混凝土配制强度等于混凝土平均强度，即，再以此式代入概率度 t 计算式，则当 $P=95\%$ 时， $t=-1.645$ ，因此：

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + 1.645\sigma \qquad f_{cu,0} = \frac{f_{cu,k}}{1 - 1.645C_v}$$

图 1.2: 强度保证率计算方法其一

比如说，工厂要求是10 MPa，你应当使用10MPa+ 1.645 σ (这里 σ 是工厂生产的混凝土的标准差)，以便确保有95%的概率达到10MPa的强度。

工程中 $P(\%)$ 值可根据统计周期内，混凝土试件强度不低于要求强度等级标准值的组数 N_0 与试件总数 $N(N \geq 25)$ 之比求得，即：

$$P = \frac{N_0}{N} \times 100\%$$

图 1.3: 强度保证率计算方法其二

1.4 混凝土配比

基本要求 包括:和易性、强度、耐久性、经济性(最后考虑)。

基本参数 包括:水灰比、单位用水量和砂率。

顺序是先依据刚才的强度保证率，计算得到强度，根据强度反算水胶比，然后确定用水量，依据用水量和水胶比反算胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量，确定砂石用量。

1. 确定混凝土配制强度

$$f_{cu,0} = \begin{cases} f_{cu,k} + 1.645\sigma & (f_{cu,k} < C60) \\ 1.15f_{cu,k} & (f_{cu,k} \geq C60) \end{cases}$$

2. 确定水胶比

$$\frac{W}{B} = \frac{\alpha_a f_{ce}}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b f_{ce}}$$

无实测值时, $f_b = \gamma_f \gamma_s f_{ce}$, $f_{ce} = \gamma_c f_{ce,g}$ 同时应符合 $\leq (W/B)_{\max}$ 的要求

3. 确定混凝土拌和用水量 m_{w0} (查表得到; 掺外加剂时计算得到, 具体见后)

4. 计算胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量

$$m_{b0} = \frac{m_{w0}}{W/B}$$

同时应 $\geq (m_{b0})_{\min}$

5. 确定合理砂率 β_s (查表得到或计算得到)

$$m_{f0} = m_{b0} \beta_f$$

$$m_{c0} = m_{b0} - m_{f0}$$

6. 计算砂石用量

Remark. W/B的值不仅由强度确定, 还由耐久性决定, 两者取最小值。

符号	含义
f_b	混凝土抗压强度设计值
γ_f	抗压强度安全系数
γ_s	结构安全系数
f_{ce}	混凝土等效抗压强度
γ_c	材料安全系数
$f_{ce,g}$	标准混凝土抗压强度（实验室28天标准养护测得）
f_{cu}	混凝土极限抗压强度（“cu”=ultimate）
$f_{cu,0}$	混凝土极限抗压强度的初始值(考虑了强度保证率的情况)
$f_{cu,k}$	混凝土极限抗压强度的特征值（生产的混凝土的参数）

计算时候考虑两种方法:

体积法:

$$\frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{f0}}{\rho_f} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + 0.01\alpha = 1 (\rho \text{单位用 } Kg/m^3) \quad (\text{无引气时 } \alpha = 1)$$

$$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}}$$

重量法（假定表观密度法）

$$m_{c0} + m_{f0} + m_{w0} + m_{s0} + m_{g0} = m_{cp}$$

$$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}}$$

符号	含义
m_{c0}	水泥的质量（单位：kg）
m_{f0}	外加剂的质量（单位：kg）
m_{w0}	水的质量（单位：kg）
m_{s0}	细集料的质量（单位：kg）
m_{g0}	粗集料的质量（单位：kg）
ρ_c	水泥的密度（单位：kg/m ³ ）
ρ_f	外加剂的密度（单位：kg/m ³ ）
ρ_w	水的密度（单位：kg/m ³ ）
ρ_s	细集料的密度（单位：kg/m ³ ）
ρ_g	粗集料的密度（单位：kg/m ³ ）
α	引气率（无引气时， $\alpha = 1$ ）
β_s	细集料与总集料的质量比
m_{cp}	混凝土的总质量（单位：kg）

体积法是基于混凝土各组成材料的体积比例来设计混凝土配比。具体来说，通过已知材料的质量和密度，计算出每种材料的体积，然后调整各材料的体积比，确保混凝土最终的体积为1立方米。

$$\frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{f0}}{\rho_f} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + 0.01\alpha = 1 \quad (1.1)$$

这表示混凝土的总体积等于1立方米，考虑了不同组分的体积和相应的密度。每个材料的质量（如水泥、外加剂、水、细集料、粗集料）除以它们的密度得到体积，再加上引气量（由 α 表示）来进行调整。 α 是引气率，当没有使用引气时， $\alpha = 1$ 。

重量法是根据各组分的质量来设计混凝土配比。该方法假定各材料的表观密度已经考虑了材料的干湿状态、孔隙度等影响，因此只需要根据各组成材料的质量来调整其比例，使得总质量满足设计要求。

$$m_{c0} + m_{f0} + m_{w0} + m_{s0} + m_{g0} = m_{cp} \quad (1.2)$$

在重量法中，所有组分（如水泥、外加剂、水、细集料、粗集料）的质量之和等于混凝土的总质量 m_{cp} 。与体积法不同，重量法直接通过质量来控制混凝土的组成，通常用于常规的混凝土设计中。

Example 1.4.1. 导致混凝土腐蚀的原因和反应有什么？

按严重程度：

1. 碱-骨料反应 (Alkali-Aggregate Reaction, AAR)

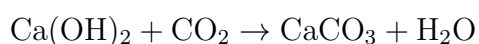
混凝土中的碱性物质（如氢氧化钠、氢氧化钾）与骨料中的活性矿物反应，生成吸水膨胀的凝胶。这种凝胶在吸水后体积膨胀，导致混凝土内部产生膨胀应力，产生裂缝和剥落，严重破坏混凝土的结构完整性，是混凝土最严重的一种内部侵蚀。

2. 硫酸盐侵蚀

硫酸盐离子渗入混凝土，与水泥中的氢氧化钙和三钙铝酸盐反应，生成膨胀性的硫酸钙类矿物（如石膏、钙矾石）。这些矿物体积膨胀，导致混凝土开裂和剥落，严重破坏混凝土结构。硫酸盐侵蚀在含硫酸盐环境中极具危害性，破坏程度与碱骨料反应相近。

3. 碳化 (Carbonation)

大气中的二氧化碳与混凝土中的氢氧化钙反应生成碳酸钙：



该反应使混凝土孔隙被碳酸钙填充，增强了混凝土强度，但同时降低了混凝土的碱性（pH值下降），破坏了保护钢筋的氧化膜，易导致钢筋锈蚀，影响结构耐久性。