
第4章 水泥混凝土

Chapter4 Cementing Concrete

第4章 水泥混凝土

本章知识点

【知识点】 混凝土性能特点，骨料的细度模数、颗粒级配，混凝土拌合物流动性、粘聚性、保水性，混凝土强度标准值、强度等级，水灰比、砂率、单位用水量，混凝土养护、变形、碳化、碱骨料反应，普通混凝土配合比设计，减水剂、早强剂、引气剂、缓凝剂，轻质混凝土、高性能混凝土。

【重点】 混凝土组成材料的质量要求，影响混凝土和易性、强度及耐久性的主要因素，提高混凝土性能的主要措施，普通混凝土配合比设计原理与方法，常用外加剂的种类与效能，混凝土的质量波动规律及检验评定。

【难点】 普通混凝土配合比设计原理与方法，外加剂的效能与作用机理。

第4章 水泥混凝土

Chapter4 Cementing Concrete

4.0 混凝土材料发展简述

4.0 History of concrete development

4.0 混凝土材料发展简述

混凝土的生产与使用有近二百年的历史，但在数千年前已有“混凝土”的雏形。

◆ 1824年波特兰水泥的发明与使用，才有真正意义上的混凝土材料，水泥混凝土研制萌芽（花匠的启示）。

◆ 1850年法国造船师郎波发明了钢筋混凝土，首次建造了混凝土船，后来运用于土木工程。

混凝土  钢筋混凝土

◆ 1913年美国人利用回转窑首次烧制页岩陶粒轻骨料，解决了混凝土自重大的缺陷。

普通混凝土  轻集料混凝土

◆ 1928年法国人弗列西涅发明了预应力钢筋混凝土，提高了混凝土的抗拉强度和抗裂性，为混凝土在大跨、高层建筑工程中的应用开辟了新途径。

钢筋混凝土 \Rightarrow 预应力混凝土

◆ 20世纪60年代以来，外加剂、各种纤维、聚合物等材料在混凝土生产中的广泛使用，使混凝土材料的性能更加优良和全面。

预应力混凝土 \Rightarrow 多功能和高性能混凝土

第4章 水泥混凝土

Chapter4 Cementing Concrete

4.1 混凝土的分类与性能特点

4.1 Classification and properties of concrete

4.1 混凝土的分类与性能特点

混凝土是指以胶凝材料（主要是水泥、沥青等）、骨料和水为主要原料（也可加入外加剂和矿物掺合料），经拌合、成型、养护等工艺制成的硬化后具有强度的工程材料。它是用途最广、用量最大的土木工程材料。

通常把以水泥为胶凝材料、表观密度为 $1950\sim 2500\text{kg/m}^3$ 、主要用于工程结构的混凝土称为**普通混凝土**，它是土木工程建设中使用最为广泛和用量最大的混凝土品种。



混凝土的生产



4.1.1 混凝土的分类与质量要求

混凝土的种类

表 4-1

分类依据		混凝土种类	分类依据		混凝土种类
混凝土 表观密度 (kg/m ³)	>2800	重混凝土	混凝土 抗压强度 (MPa)	>60	高强混凝土
	2000~2800	普通混凝土		30~60	中强混凝土
	<2000	轻混凝土		<30	低强混凝土
混凝土所用胶凝材料种类		水泥混凝土	混凝土掺合料种类		粉煤灰混凝土
		沥青混凝土			硅灰混凝土
		石膏混凝土			矿渣混凝土
		聚合物混凝土			纤维混凝土
混凝土的功能和用途		结构混凝土	混凝土施工工艺		泵送混凝土
		防水混凝土			喷射混凝土
		防辐射混凝土			碾压混凝土
		耐腐蚀混凝土			灌浆混凝土
		装饰混凝土			真空脱水混凝土

4.1.1 混凝土的分类与质量要求

混凝土的种类很多，对混凝土质量的基本要求是：

- (1) 混凝土拌合物应具有与施工条件相适应的施工和易性；
- (2) 混凝土在规定龄期内应具有符合设计要求的强度；
- (3) 具有与工程环境条件适应的耐久性。



混凝土拌合物



混凝土强度测试

4.1.2 混凝土的性能特点

表 4-2

性能特点		特点描述
优点	(1) 性能可调	混凝土的性质可根据工程的具体要求进行针对性的设计与调整，从而满足各类工程建设需要
	(2) 抗压强度较高	混凝土抗压强度一般为10~60MPa，超高强混凝土的抗压强度可达100MPa以上
	(3) 施工方便	混凝土拌合物具有良好的流动性和塑性，可制成各种形状和大小的构件，既可现浇，又可预制
	(4) 原材来源广泛	混凝土组成材料中砂石占80%左右，易于就地取材，成本较低
缺点	(1) 自重大	普通混凝土的表观密度为1950~2500kg/m ³ ，比强度较小
	(2) 抗拉强度较低	混凝土抗拉强度只有抗压强度的1/20~1/10，受拉变形能力小，易开裂
	(3) 收缩变形较大	在水化及凝结硬化过程中产生化学收缩和干燥收缩，易产生收缩裂缝

混凝土的优点有（ ）。

- ☐ A 在凝结前有良好的塑性，可浇注成各种形状、大小的构件和结构物
- ☐ B 与钢筋有牢固的粘结力
- ☐ C 抗压强度高，耐久性良好
- ☐ D 抗拉强度高，受拉时抗变形能力强
- ☐ E 不容易开裂，自重轻

A

B

C

(建筑2000年考题) 下列关于混凝土的叙述中，
() 是错误的。

- ☐ A 气温越高，硬化速度越快
- ☐ B 抗剪强度比抗压强度小
- ☐ C 与钢筋的膨胀系数大致相同
- ☒ D 水胶比越大，强度越大

第4章 水泥混凝土

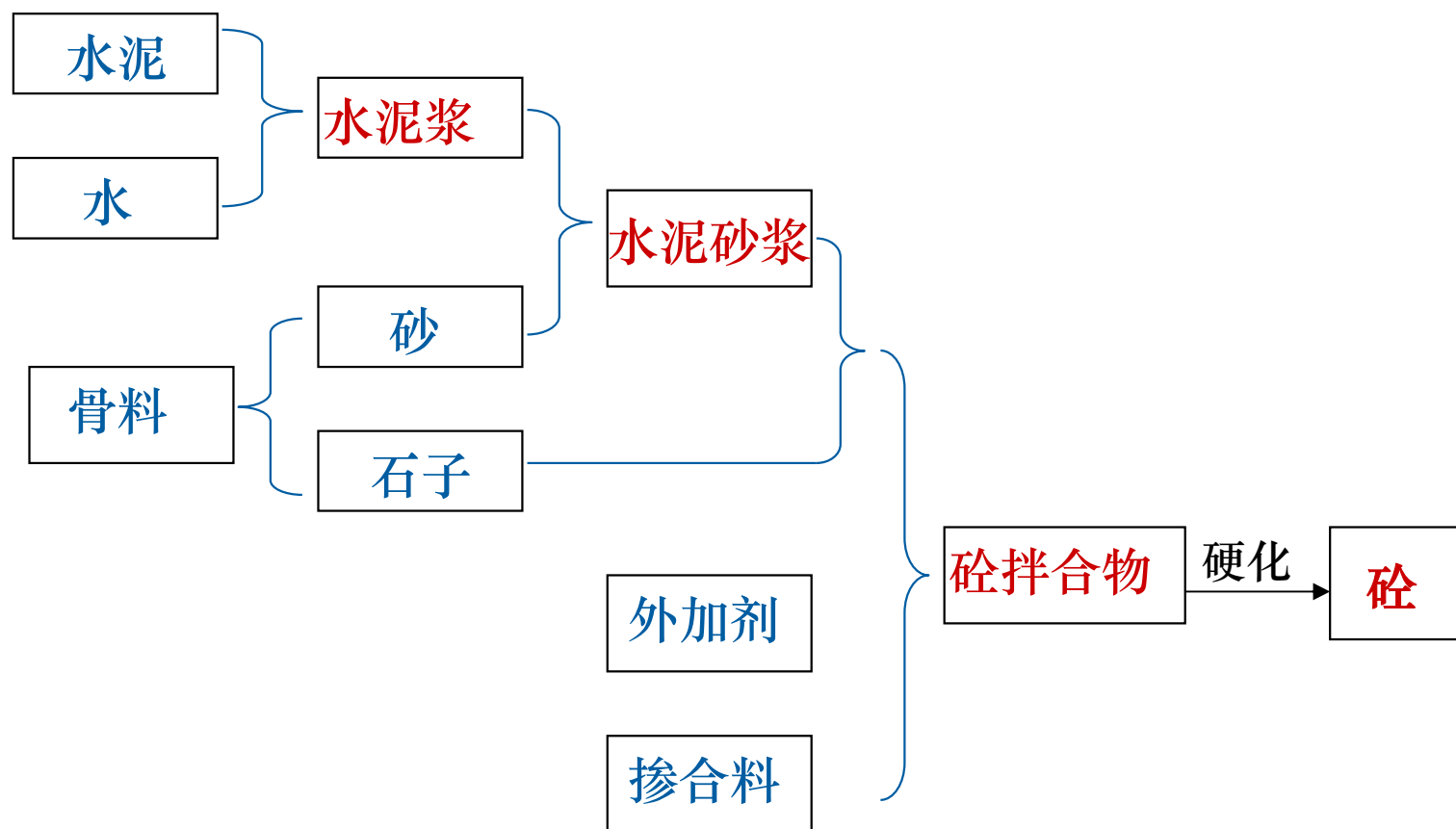
Chapter4 Cementing Concrete

4.2 普通混凝土的组成材料及质量要求

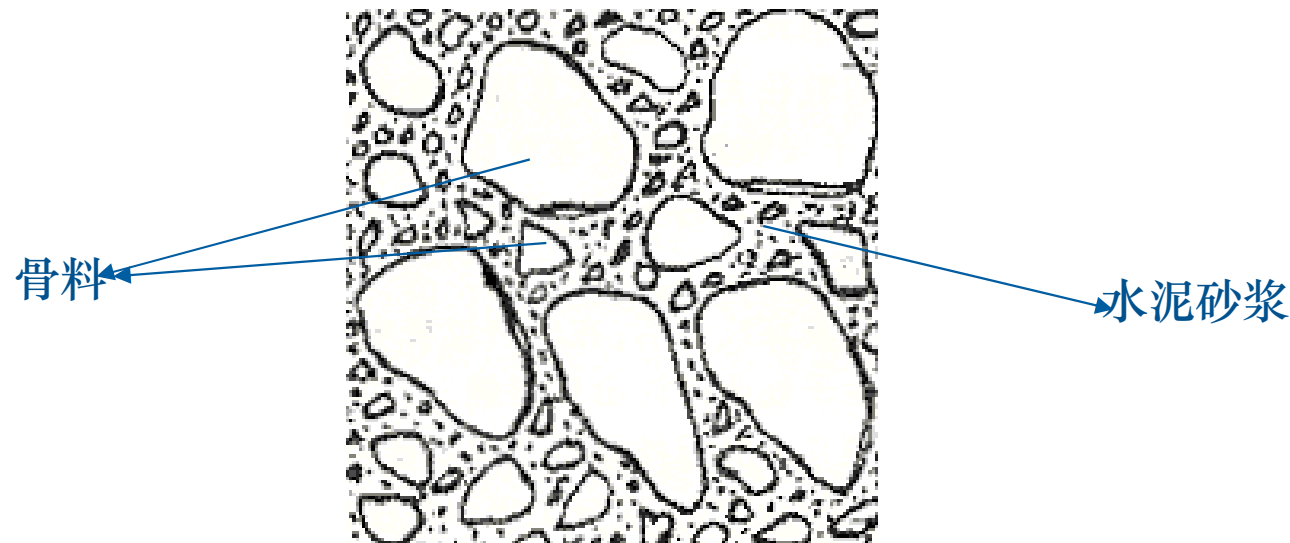
4.2 Component materials and quality requirements of concrete

4.2 普通混凝土的组成材料及质量要求

混凝土属于人工材料，配制普通混凝土的原材料有水泥、砂、石、水、外加剂、掺合料等。混凝土原材料的性能与质量在很大程度上决定了混凝土的性能与质量。



砂、石在混凝土中主要起骨架作用，将砂石材料称为**骨料**。水泥与水形成的**水泥浆**在硬化前起润滑作用，使混凝土拌合物具有可塑性。在混凝土拌合物中，水泥浆包裹砂粒形成**水泥砂浆**，水泥砂浆填充石子空隙形成混凝土浆体。混凝土硬化后，水泥浆起胶结和填充作用。外加剂可改善、调节混凝土的性能；矿物掺合料可提高混凝土的新拌性能和耐久性，并降低成本。



4.2.1 水泥

1. 水泥品种的选择



2. 水泥强度等级的选择

配制混凝土时，水泥的强度等级的选择应与所配制混凝土的强度等级相适应。

根据经验，配制中低强度混凝土时，水泥强度等级 $\approx 1.5 \sim 2.0$ 混凝土强度等级为宜；配制高强度混凝土时，水泥强度等级 $\approx 0.9 \sim 1.5$ 混凝土强度等级为宜。

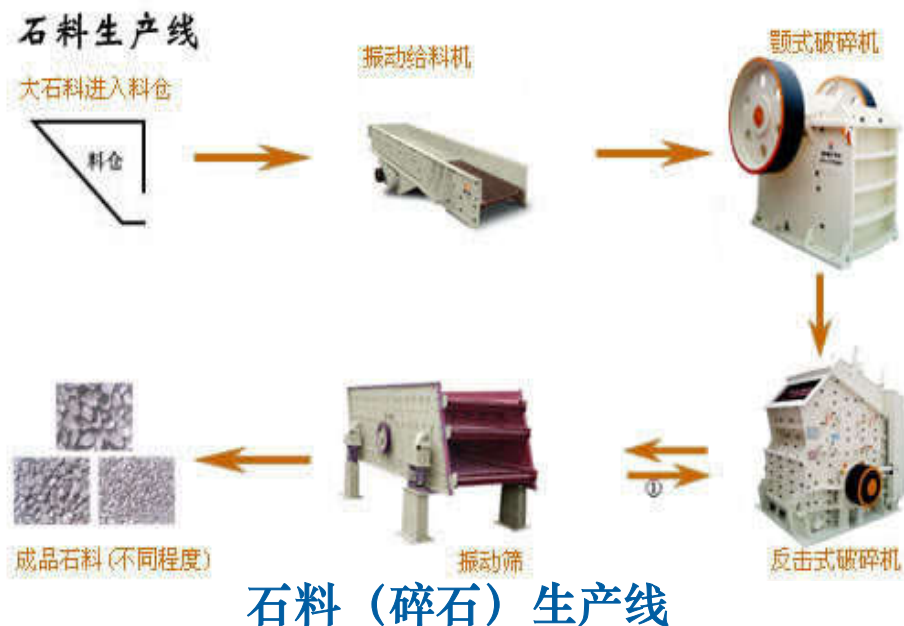
4.2.2 骨料 (aggregate)

骨料种类

骨料	粒径（mm）	种类		执行标准
细骨料	0.15～4.75	天然砂	河砂	《建筑用砂》 (GB/T14684—2001)
			海砂	
			山砂	
		人工砂		
		混合砂		
粗骨料	4.75～90	碎石		《建筑用卵石、碎石》 (GB/T14685—2001)
		卵石		

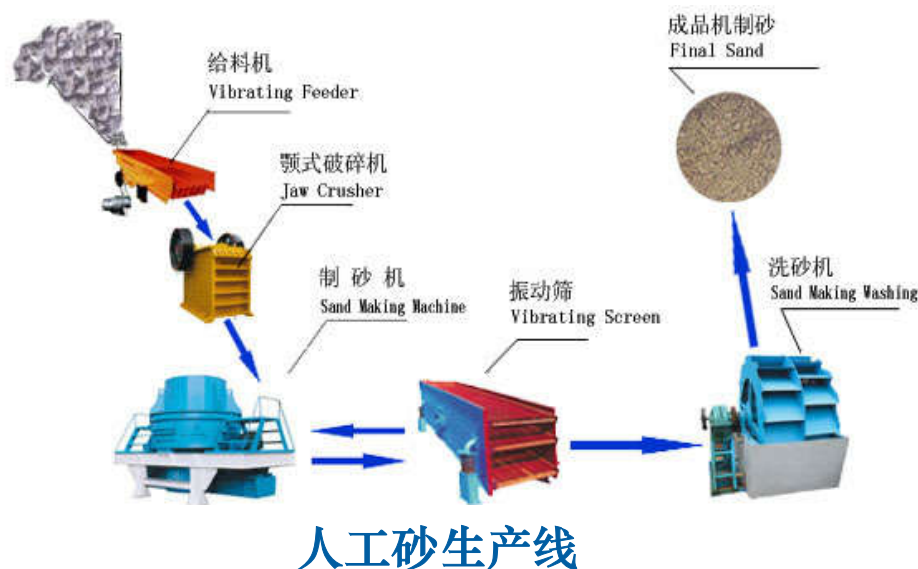


4.2.2 骨料



骨料的用量和体积在混凝土中占有较大比例 (70%~80%)，其来源与质量将直接关系到所配制混凝土的技术性能和质量。

国家及行业有关标准对砼用骨料的质量指标有明确要求。



4.2.2 骨料

1. 有害杂质含量

混凝土用骨料尤其是天然骨料中常含有：

(1) 云母、黏土、淤泥、贝壳、粉砂等杂质

这些杂质常粘附在骨料表面，影响水泥浆（或砂浆）与骨料的粘结度，降低所配制混凝土的强度。同时，含有杂质的骨料还会增加混凝土的用水量，增大混凝土的收缩，降低混凝土的抗冻性和抗渗性。

(2) 有机杂质、硫化物和硫酸盐等杂质

这些杂质对水泥石将产生腐蚀作用。

《普通混凝土用砂石质量与检验方法标准》（JGJ52-2006），对混凝土用骨料的有害杂质含量进行了限量规定，见表4-3。

4.2.2 骨料

骨料中有害杂质含量限值 (JGJ 52-2006) 表 4-3

有害杂质项目	骨料种类	配制不同强度等级混凝土时有害杂质限量指标		
		$\geq C60$	C55~C30	$\leq C25$
含泥量 (按质量计, %)	砂	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 5.0
	石子	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 2.0
泥块含量 (按质量计, %)	砂	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 2.0
	石子	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.7
硫化物和硫酸盐含量 (折算为 SO^3 , 按质量计, %)	砂	≤ 1.0		
	石子	≤ 1.0		
有机物含量 (用比色法试验)	砂	颜色应不深于标准色, 如深于标准色, 应按水泥胶砂强度试验方法进行强度对比试验, 抗压强度比应不低于0.95		
	卵石	颜色应不深于标准色, 如深于标准色, 应配制成混凝土进行强度对比试验, 抗压强度比应不低于0.95		
云母含量 (按质量计, %)	砂	≤ 2.0		
轻物质含量 (按质量计, %)	砂	≤ 1.0		
针、片状颗粒 (按质量计, %)	石子	≤ 8	≤ 15	≤ 25

4.2.2 骨料

2. 坚固性

为了保证混凝土的强度和坚固性，混凝土用骨料须有一定的坚固性要求。

骨料坚固性指标 (JGJ 52-2006)

表 4-4

混凝土所处环境条件及其性能要求	循环后的质量损失 (%)	
	砂	石子
在严寒及寒冷地区使用并经常处于潮湿或干湿交替状态下的混凝土；有腐蚀性介质作用或经常处于水位变化区的地下结构或有抗疲劳、耐磨、抗冲击等要求的混凝土	≤ 8	≤ 8
其他条件下使用的混凝土	≤ 10	≤ 12

3. 碱活性

混凝土用骨料中含有活性氧化硅或含有黏土的白云石质石灰石时，在一定条件下会与水泥中的碱发生碱—骨料反应，造成体积膨胀导致混凝土开裂。

4.2.2 骨料

4. 形状与表面特征

混凝土用骨料的颗粒形状及表面特征，将在一定程度上影响混凝土拌合物的流动性和混凝土的强度。



碎石和人工砂一般多棱角，表面粗糙，与水泥浆能较好地粘结。卵石、河砂和海砂为近似球形，表面光滑，与水泥砂浆的粘结较差。在水泥用量和用水量相同的情况下，由碎石、人工砂拌制的混凝土拌合物流动性较差，但混凝土强度较高；由卵石、河砂拌制的混凝土拌合物流动性较好，但强度较低。

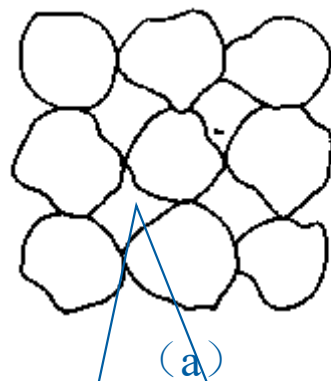


砂的颗粒较小，一般不考虑其形貌特征。

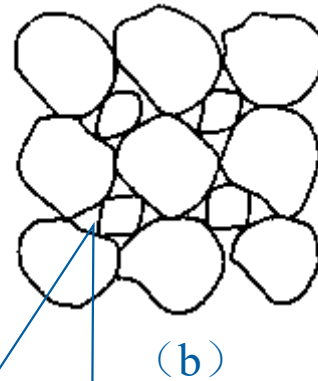
4.2.2 骨料

5. 级配和粗细程度

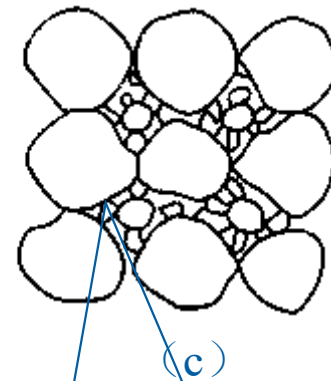
级配是指骨料中不同粒径颗粒的分布情况。级配良好的骨料可使其空隙率和总表面积较小，从而达到节约水泥、提高混凝土密实性及强度的目的。



若砂、石的粒径分布
在同一尺寸范围内，
空隙率很大。



若砂、石的粒径分布
在两种尺寸范围内，
空隙率较小。



若砂、石的粒径分布
在更多的尺寸范围内，
空隙率更小。

骨料只有适宜的粒径分布，才能达到良好的级配要求。

4.2.2 骨料

粗细程度是指不同粒径的骨料颗粒混在一起后的总体粗细程度。相同重量的骨料，粒径越小，总表面积越大。在混凝土中，砂、石骨料表面分别由水泥浆和水泥砂浆包裹，骨料的总表面积越大，需要的水泥浆就越多。



不同粒径的骨料

当骨料中含有较多的大粒径骨料，并以适当的中粒径骨料及少量细粒径骨料填充其空隙时，则可达到空隙率和总表面积均较小，这样不仅水泥浆用量较少，而且还可提高混凝土的密实度和强度。

4.2.2 骨料

在拌制混凝土时，控制骨料的颗粒级配和粗细程度具有重要的经济与技术意义，应同时考虑骨料的颗粒级配和粗细程度。

(1) 砂的粗细程度与颗粒级配

砂的粗细程度和颗粒级配用筛分析方法测定。



4.2.2 骨料

砂骨料筛分析试验累计筛余与分计筛余的关系 表 4-5

筛孔尺寸 (mm)	筛余量 (g)	分计筛余 (%)	累计筛余 (%)
4.75	m_1	a_1	$A_1 = a_1$
2.36	m_2	a_2	$A_2 = a_1 + a_2$
1.18	m_3	a_3	$A_3 = a_1 + a_2 + a_3$
0.60	m_4	a_4	$A_4 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$
0.30	m_5	a_5	$A_5 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5$
0.15	m_6	a_6	$A_6 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6$

砂的粗细程度用细度模数 (M_x) 表示, 按下式计算:

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} \quad (4-1)$$

4.2.2 骨料

式中 M_x ——砂的细度模数；

$A_1 \sim A_6$ ——累计筛余百分率（%）。

根据砂的细度模数大小，可将其分为特粗砂、粗砂、中砂、细砂和特细砂，见表4-6。

砂的细度模数及分类

表 4-6

细度模数 M_x	>3.7	$3.7 \sim 3.1$	$3.0 \sim 2.3$	$2.2 \sim 1.6$	$1.5 \sim 0.7$
砂的分类	特粗砂	粗砂	中砂	细砂	特细砂

普通混凝土用砂的细度模数一般为 $3.7 \sim 1.6$ ，配制混凝土时宜优先选用中砂。

4.2.2 骨料

砂的颗粒级配用级配区表示。根据0.60mm筛孔对应的累计筛余百分率A₄，将砂分成三个级配区，见表4-7。级配良好的粗砂、中砂和细砂应分别落在1、2、3区。当一筛档累计筛余率超界5%以上时，说明砂的级配很差，视为不合格。

砂的颗粒级配区范围

表 4-7

砂样筛筛孔尺寸 (mm)	累计筛余 (%)		
	1区	2区	3区
4.75	10~0	10~0	10~0
2.36	35~5	25~0	15~0
1.18	65~35	50~10	25~10
0.60	85~71	70~41	40~16
0.30	95~80	92~70	85~55
0.15	100~90	100~90	100~90

4.2.2 骨料

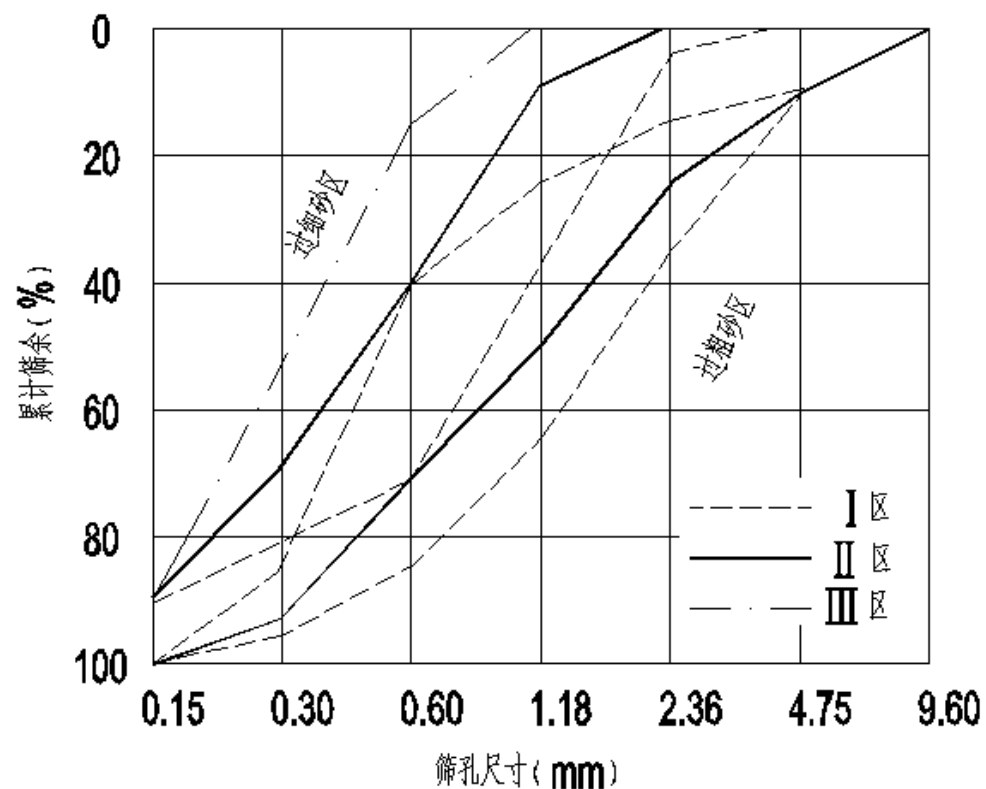


图4-2 砂的级配区曲线

以累计筛余百分率为纵坐标，以筛孔尺寸为横坐标，根据表4-7规定数值可画出砂的1、2、3三个级配区上下限的筛分曲线，如图4-2所示。配制混凝土时宜优先选用2区砂。

【例】砂筛分析实例

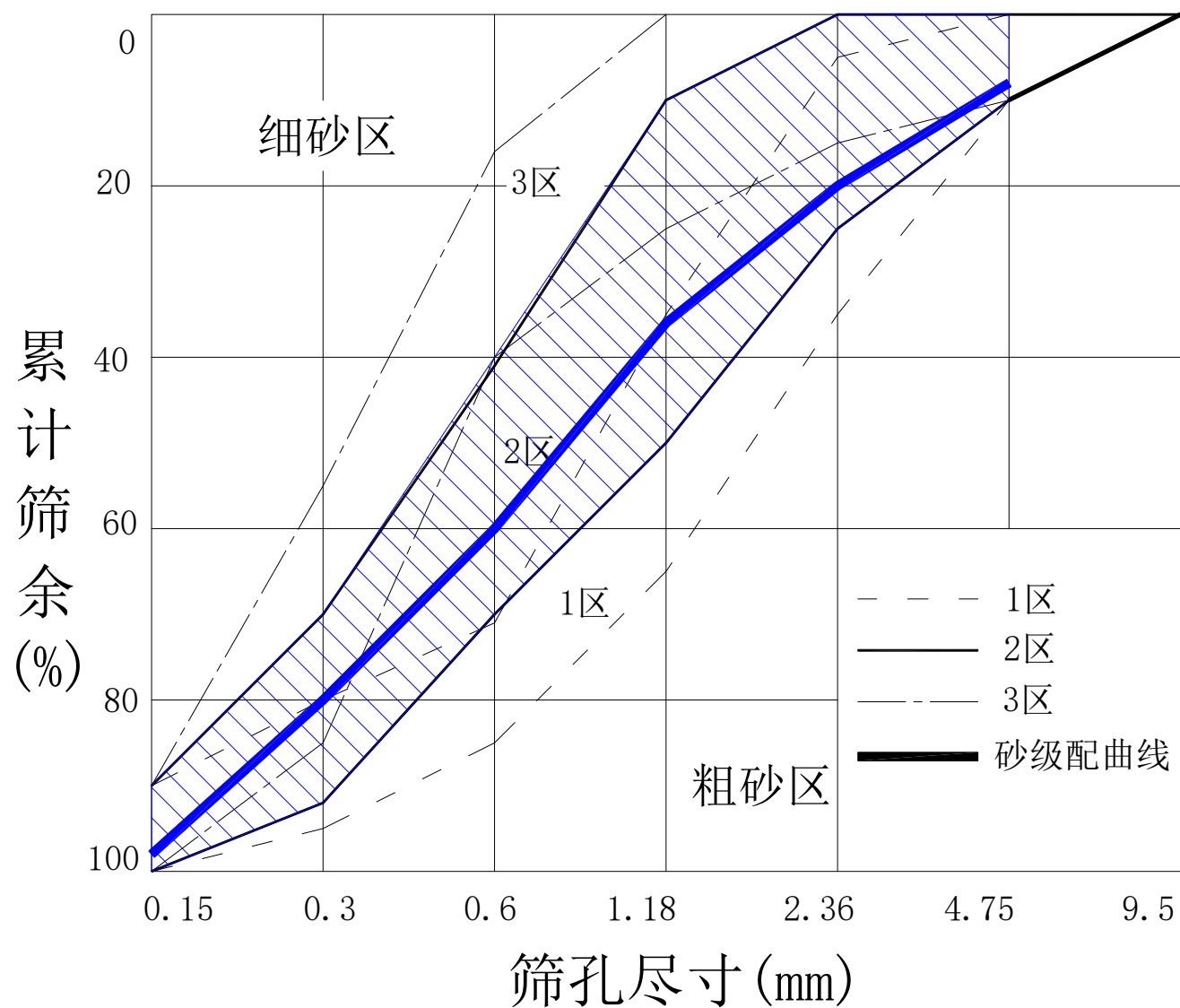
砂筛分试验结果 **表 3-8** ..

筛孔尺寸 (mm) ↴	分计筛余量 (g) ↴	分计筛余率 (%) ↴	累计筛余率 (%) ↴
4.75mm ↴	15 ↴	3.0 ↴	3.0 ↴
2.36mm ↴	38 ↴	7.6 ↴	10.6 ↴
1.18mm ↴	55 ↴	11.0 ↴	21.6 ↴
600μm ↴	144 ↴	28.8 ↴	50.4 ↴
300μm ↴	156 ↴	31.2 ↴	81.6 ↴
150μm ↴	80 ↴	16.0 ↴	97.6 ↴
150μm 以下 ↴	12 ↴	2.4 ↴	100 ↴

【解】分计筛余率和累计筛余率的计算结果见表 3-8。细度模数 M_x 的计算如下： ↴

$$\begin{aligned}
 \dots\dots M_x &= \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} \quad \text{↴} \\
 &= \frac{10.6 + 21.6 + 50.4 + 81.6 + 97.6 - 5 \times 3.0}{100 - 3.0} = 2.54 \quad \text{↴}
 \end{aligned}$$

【例】砂筛分析实例



4.2.2 骨料

(2) 石子的最大粒径和颗粒级配

粗骨料**最大粒径** (D_{\max}) 是指粗骨料中公称粒级的上限。

当粗骨料的粒径增大时，其比表面积随之减小，包裹其表面所需的水泥浆或砂浆的数量相应减少，有利于节约水泥和降低成本。在条件许可的情况下，应尽量选用较大粒径的粗骨料。但在水泥用量少（单位 m^3 混凝土水泥用量 $\geq 170\text{kg}$ ）的混凝土中，当粗骨料粒径大于40mm时，有可能使混凝土的强度下降。

◆ 粗骨料最大粒径还受**结构型式**和**配筋疏密**的限制。一般情况下，混凝土粗骨料最大粒径不得超过结构截面最小尺寸的 $1/4$ ，同时不得大于钢筋间最小净距的 $3/4$ 。对于混凝土实心板，粗骨料最大粒径不得超过板厚的 $1/3$ ，且不得大于40mm。

4.2.2 骨料



钢筋间距

粗骨料的颗粒级配是否良好，对节约水泥和保证新拌混凝土的和易性有很大关系，特别是拌制高强度混凝土，粗骨料的级配更为重要。

粗骨料的级配分为连续粒级和单粒级两种。**连续粒级**是指5 mm以上至最大粒径的粗骨料，在一定范围内各粒级各占一定比例；**单粒级**是从1/2最大粒径开始至最大粒径。单粒级骨料一般不宜单独用来配制混凝土，如果单独使用，应作技术经济分析，并通过试验证明混凝土不发生离析现象或影响混凝土质量。

4.2.2 骨料

石子的级配分析也是采用筛分析的办法，只是所用的一套标准筛孔径（2.36mm~90.0mm）和数量（12个）不同，分计筛余和累计筛余百分率计算方法均与砂相同。



石子的筛分析试验过程

4.2.2 骨料

6. 粗骨料的强度

为保证所配制的混凝土强度，混凝土用粗骨料本身必须致密并具有足够的强度。碎石的强度用抗压强度和压碎值指标表示，卵石的强度用压碎值指标表示。

(1) 碎石的抗压强度

碎石的抗压强度是将原岩石制成边长为50mm的立方体（或直径与高均为50mm的圆柱体）试件，在水饱和状态下测定其极限抗压强度值。

配制混凝土的强度等级大于C60时才检验碎石的抗压强度。如有必要，其他情况时也可进行碎石抗压强度检验。一般要求岩石抗压强度大于配制混凝土强度的1.5倍，火成岩强度不宜低于80MPa，变质岩不宜低于60MPa，水成岩不宜低于45MPa。

4.2.2 骨料

(2) 碎石和卵石的压碎值指标

碎石和卵石的**压碎值指标**是将一定量气干状态的粒径为10~20mm石子装入标准筒内，按规定加荷速度加荷至200kN，卸荷后称取试样质量，再用2.5mm孔径的筛筛除被压碎的细粒，称取试样的筛余量。压碎指标值按下式计算：

$$\delta_a = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (4-2)$$

式中 δ_a ——压碎指标值 (%) ；

m_0 ——试样质量 (g) ；

m_1 ——试样的筛余量 (g) 。



石子压碎指标测定仪

压碎指标表示石子抵抗压碎的能力，其值越小，说明石子抵抗受压破碎能力越强。

骨料在混凝土中的作用，（ ）不正确。

- ☒ A 发生化学反应
- ☐ B 构成混凝土骨架
- ☐ C 减少水泥用量
- ☐ D 减少混凝土体积收缩

【岩土2016】描述混凝土用砂粗细程度的指标是（ ）。

- ☒ A 细度模数
- ☐ B 级配曲线
- ☐ C 最大粒径
- ☐ D 最小粒径

砂的细度模数越高，表明（ ）。

- ☒ A 砂越粗
- ☐ B 砂越细
- ☐ C 砂的级配越好
- ☐ D 砂的含泥量越高

（结构2001年考题）评定细骨料细度和级配优劣的指标是（ ）。

- ☐ A 筛分曲线
- ☐ B 细度模数
- ☒ C 细度模数及筛分曲线
- ☐ D 最大粒径

石子形状对混凝土性能的影响

请观察下图中A、B、C三种石子的形状有何差别，分析其对拌制混凝土性能会有哪些影响。



A、碎石1



B、碎石2



C、卵石

4.2.3 混凝土用水

混凝土用水及其质量要求

混凝土用水（按水源分）	用水质量要求
饮用水	不得影响混凝土的和易性及凝结； 不能有损于混凝土强度发展； 不得降低混凝土耐久性； 不得加快钢筋锈蚀及导致预应力钢筋脆断； 不得污染混凝土表面。
地表水	
地下水	
处理或处置后的工业废水	

当使用混凝土生产厂及商品混凝土厂设备的洗刷水时，水中有关物质限量应符合《混凝土用水中的物质含量限值》（JGJ 63—2006）要求（P61，表4-11）。

海水不得用于拌制钢筋混凝土、预应力混凝土及饰面要求较高的混凝土。

4.2.4 混凝土外加剂 (concrete admixture)

混凝土外加剂是指在混凝土拌制过程中掺入的用以调整和改善混凝土性能的物质，其掺量一般不大于水泥质量的5%。在混凝土中掺入外加剂，投资少、见效快、技术与经济效果显著，是混凝土尤其是高性能混凝土和特种混凝土必不可少的重要组分。

1. 外加剂的功能分类

功能分类 (GB/T8075-2005)	外加剂名称
改善砼拌合物流变性能的外加剂	减水剂、引气剂、泵送剂等
调节砼凝结时间和硬化性能的外加剂	缓凝剂、促凝剂、速凝剂、早强剂等
改善砼耐久性的外加剂	引气剂、防水剂、阻锈剂、矿物外加剂等
改善砼其他性能的外加剂	膨胀剂、防冻剂、着色剂等

除上述四类使用功能的外加剂外，通过它们合理搭配还可形成各种多功能外加剂，如引气减水剂、缓凝减水剂、早强减水剂等。

4.2.4 混凝土外加剂



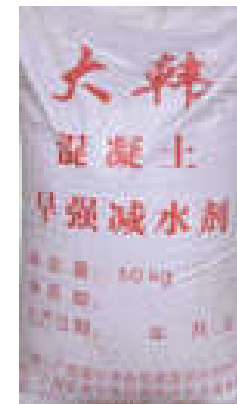
混凝土用各种外加剂

4.2.4 混凝土外加剂

2. 常用外加剂

(1) 减水剂 (water reducer)

减水剂是指在混凝土拌合物坍落度相同条件下，能减少拌和用水量的外加剂。混凝土掺入减水剂后，在配合比不变情况下，能明显提高混凝土拌合物的流动性；在流动性和水泥用量不变时，可减少用水量，提高混凝土强度；若减水时，在保持流动性和强度不变时，可减少水泥用量，降低成本。



混凝土用减水剂

4.2.4 混凝土外加剂

减水剂分为普通减水剂（减水率在5%~10%，宜用于日最低气温5℃以上施工的混凝土，不宜单独用于蒸养混凝土）和高效减水剂（减水率大于12%，宜用于日最低气温0℃以上施工的混凝土）

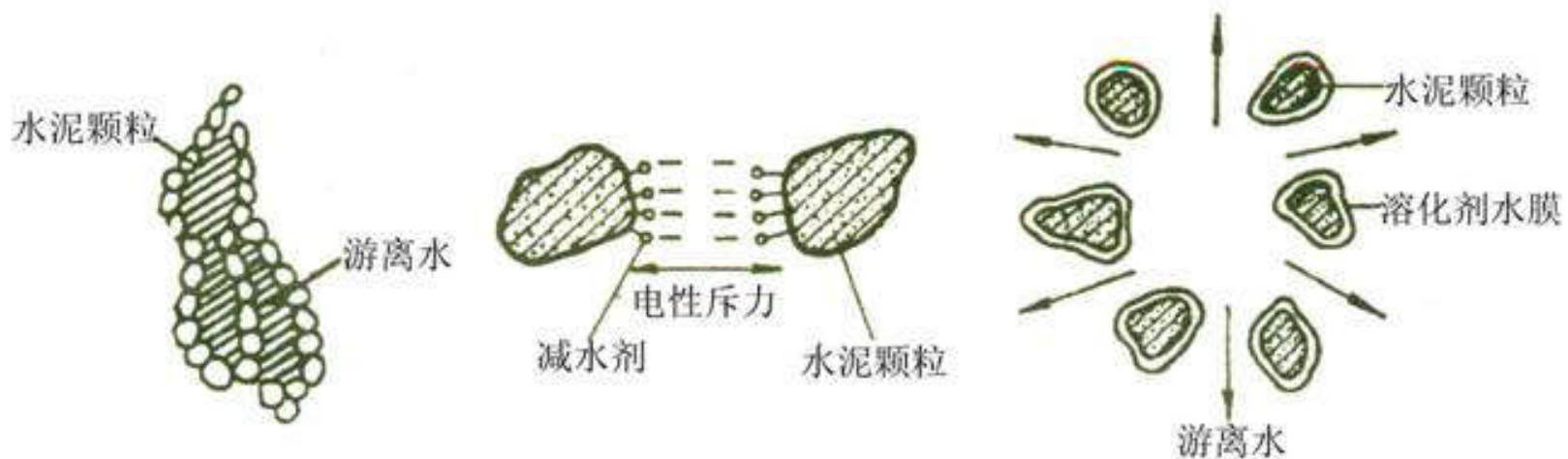
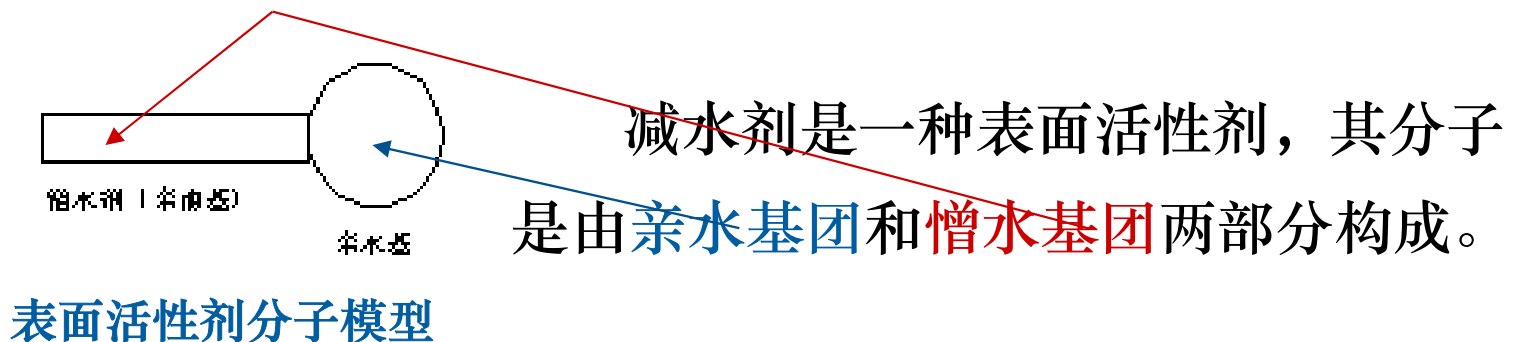


图4-3 减水剂作用机理示意图

4.2.4 混凝土外加剂

(2) 引气剂 (air-entraining agent)

引气剂是一种在搅拌混凝土过程中能引入大量均匀分布、稳定而封闭的微小气泡的外加剂。

引气剂的功效	功效作用描述
改善混凝土拌合物和易性	掺入引气剂后，混凝土拌合物内形成大量微小气泡，相对增加了水泥浆体积，这些微气泡又如同滚珠一样，减少骨料颗粒间的摩擦阻力，从而改善混凝土拌合物的流动性
	由于水分均匀分布在大量气泡的表面，使混凝土拌合物中能够自由移动的水量减少，拌合物的泌水量因此减少，混凝土拌合物的保水性和粘聚性得以提高
提高混凝土抗渗性	混凝土拌合物中大量微气泡的存在，堵塞或隔断了混凝土中毛细管渗水通道，改变了混凝土的孔结构，使混凝土抗渗性显著提高。
提高混凝土抗冻性	气泡有较大的弹性变形能力，对由水结冰所产生的膨胀应力有一定的缓冲作用，因而提高混凝土的抗冻性

4.2.4 混凝土外加剂

引气剂均属表面活性剂，但其作用机理与减水剂有所不同。减水剂的作用主要发生在水—固界面，而引气剂的作用则发生在气—液界面。引气剂能显著降低混凝土拌合物中水的表面张力，使水在搅拌作用下，容易引入空气并形成大量微小的气泡。同时由于引气剂分子定向排列在气泡表面，使气泡坚固而不易破裂。气泡形成的数量和尺寸与加入的引气剂种类和数量有关。



引气剂分为松香类引气剂、合成阴离子表面活性类引气剂、木质素磺酸盐类引气剂、石油磺酸盐类引气剂、蛋白质盐类引气剂、脂肪酸和树脂及其盐类引气剂、合成非离子表面活性引气剂等。

4.2.4 混凝土外加剂

(3) 早强剂 (early strength accelerator)

早强剂是指能加速混凝土早期强度发展的外加剂。混凝土工程中常采用由早强剂与减水剂复合而成的早强减水剂。

早强剂包括：

- 无机盐类（硫酸盐类、硝酸盐类、氯盐类等）；
- 有机物类（有机胺类，羧酸盐类等）；
- 矿物类（明矾石、氟铝酸钙、无水酸铝酸钙）等。

早强剂可加速混凝土的硬化过程，明显提高混凝土的早期强度，多用于冬季施工和抢修工程，或用于加快模板的周转率。炎热环境条件下不宜使用早强剂、早强减水剂。

4.2.4 混凝土外加剂

(4) 缓凝剂 (retarder)

缓凝剂是指能延缓混凝土凝结时间，而不显著影响混凝土后期强度的外加剂。混凝土工程中也常采用由缓凝剂与高效减水剂复合而成的缓凝高效减水剂。

无机缓凝剂：锌盐、磷酸盐、硫酸铁、硫酸铜、氟硅酸盐等；
有机缓凝剂：羟基羧酸及其盐类、多元醇及其衍生物、糖类及其碳水化合物等。

缓凝剂的主要**作用**是延缓混凝土凝结时间和水泥水化热释放速度。有机类缓凝剂大多是表面活性剂，吸附于水泥颗粒以及水化产物新相颗粒表面，延缓了水泥的水化和浆体结构的形成。无机类缓凝剂往往是在水泥颗粒表面形成一层难溶的薄膜，对水泥颗粒的水化起屏障作用，阻碍了水泥的正常水化。

【一级建筑2016】下列混凝土掺台料中，属于非括性矿物掺和料的是（ ）

- ☒ A 石灰石粉
- ☐ B 硅灰
- ☐ C 沸石粉
- ☐ D 粒化高炉矿渣粉

【一级建筑2015】下列混凝土外加剂中，不能显著改善混凝土拌合物流变性能的是()。

- ☐ A 减水剂
- ☐ B 引气剂
- ☒ C 膨胀剂
- ☐ D 泵送剂

【一级建筑2013】用于居住房屋建筑中的混凝土外加剂，不得含有（ ）成分

- ☐ A 木质素磺酸钙
- ☐ B 硫酸盐
- ☒ C 尿素
- ☐ D 亚硝酸盐

第4章 水泥混凝土

Chapter4 Cementing Concrete

4.3 混凝土的主要技术性质

4.3 Main performance attributes of concrete

4.3 混凝土的主要技术性质

4.3.1 混凝土拌合物的和易性 (workability of fresh concrete)

1. 和易性的概念与含义

和易性是指混凝土拌合物易于施工操作（拌合、运输、浇注和振捣）并获得质量均匀、成型密实混凝土的性能，亦称工作性。

混凝土拌合物和易性内容及定义			影响因素
和易性	流动性	混凝土拌合物在自重或机械（振捣）力作用下，能产生流动并均匀密实地填满模板的性能	混凝土拌合物中用水量或水泥浆含量的多少
	粘聚性	混凝土拌合物各组成材料之间有一定的粘聚力，不致在施工过程中产生分层和离析的现象	细骨料的用量以及水泥浆的稠度
	保水性	混凝土拌合物具有一定的保水能力，不致在施工过程中出现严重的泌水现象	同上

4.3.1 混凝土拌合物的和易性

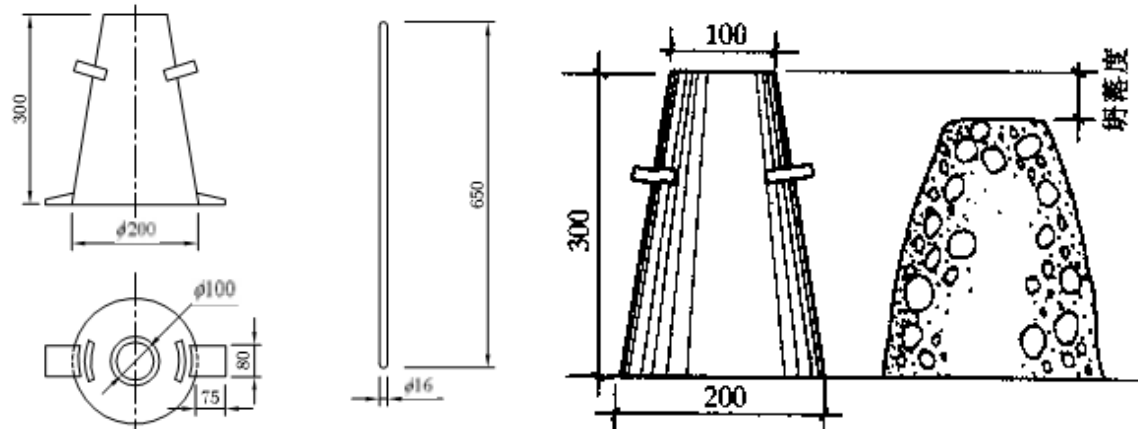
2. 和易性的评定

混凝土拌合物的流动性，用坍落度或维勃稠度来定量评定；

混凝土拌合物的粘聚性和保水性，直观经验定性评价。

(1) 坍落度法 (slump test)

坍落度法是将搅拌好的混凝土拌合物按一定方法装入标准圆锥形坍落度筒（无底）内，并按一定方式插捣，待装满刮平后，垂直平稳地向上提起坍落度筒，量测筒高与坍落后混凝土试体顶点之间的高度差（mm），即为该混凝土拌合物的坍落度值，如下图。



4.3.1 混凝土拌合物的和易性

坍落度值越大，表示混凝土拌合物的流动性愈大。根据坍落度的大小，混凝土的分类见表4-13。

混凝土的分类

表 4-13

坍落度 (mm)	混凝土类别	坍落度 (mm)	混凝土类别
≥ 160	大流动性混凝土	10~90	塑性混凝土
100~150	流动性混凝土	< 10	干硬性混凝土

在实际施工时，对于不同混凝土结构种类的选择见表4-14。

混凝土浇筑时的坍落度选择

表 4-14

混凝土结构种类	坍落度 (mm)
基础或地面等的垫层、无配筋的大体积结构（挡土墙、基础等）或配筋稀疏的结构	10~30
板、梁和大型及中型截面的柱子等	30~50
配筋密列的结构（薄壁、斗仓、筒仓、细柱等）	50~70
配筋特密的结构	70~90

4.3.1 混凝土拌合物的和易性

混凝土拌合物粘聚性的检查方法：用捣棒在已坍落的混凝土锥体侧面轻轻敲打，此时如果锥体逐渐下沉，则表示粘聚性良好；如果锥体倒塌、部分崩裂或出现离析现象，则表示粘聚性不好。

混凝土拌合物保水性检查方法：坍落度筒提起后，如有较多的稀浆从底部析出，锥体部分的混凝土拌合物因失浆而骨料外露，则表明此混凝土拌合物的保水性不好；若无稀浆或仅有少量稀浆自底部析出，则表示此混凝土拌合物保水性良好。

坍落度法测定流动性只适用骨料最大粒径 $\leq 40\text{mm}$ 、坍落度值 $\geq 10\text{mm}$ 的混凝土拌合物。

对于干硬性混凝土，坍落度法已不能准确反映其流动性大小。

4.3.1 混凝土拌合物的和易性

(2) 维勃稠度法 (VB test)

维勃稠度法是将混凝土拌合物装入坍落度筒内，按一定方式捣实刮平后，将坍落度筒垂直向上提起，把透明圆盘转到混凝土圆台体顶面，开启振动台，并同时用秒表计时。当振动到圆盘底面布满水泥浆的瞬间停表计时，所读秒数即为该混凝土拌合物的维勃稠度值。

维勃稠度仪



此方法适用于骨料最大粒径不超过40mm、维勃稠度在5~30s之间混凝土拌合物的稠度测定。

根据维勃稠度的大小，混凝土分类见表4-15。

4.3.1 混凝土拌合物的和易性

3. 影响和易性的主要因素

(1) 水泥浆的用量

(2) 砂率

砂率是指在混凝土中细骨料占骨料总量的质量百分率，用 S_p 表示。

$$S_p = \frac{S}{S + G} \times 100\% \quad (4-3)$$

式中 S_p ——砂率 (%)；

S ——砂子的质量 (kg) ；

G ——石子的质量 (kg) 。

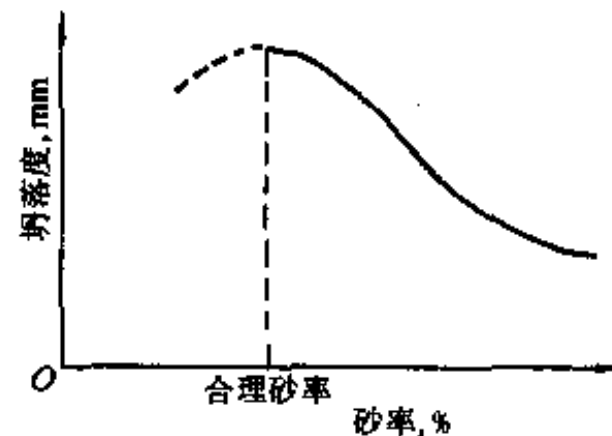


图4-5 坍落度与砂率的关系（水和水泥用量一定）

4.3.1 混凝土拌合物的和易性

(3) 骨料的品种

(4) 水泥与外加剂

(5) 温度和时间

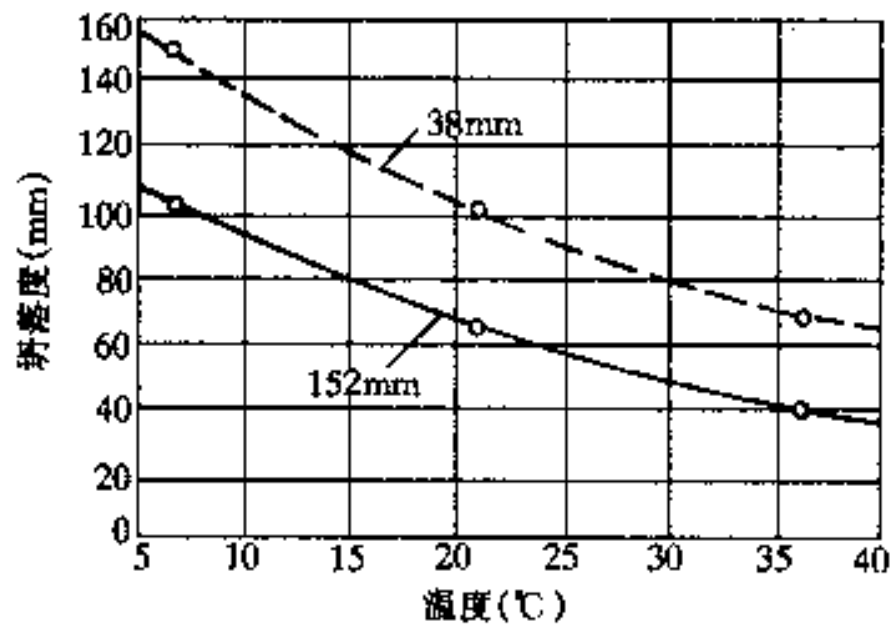


图4-6 温度对拌合物坍落度的影响

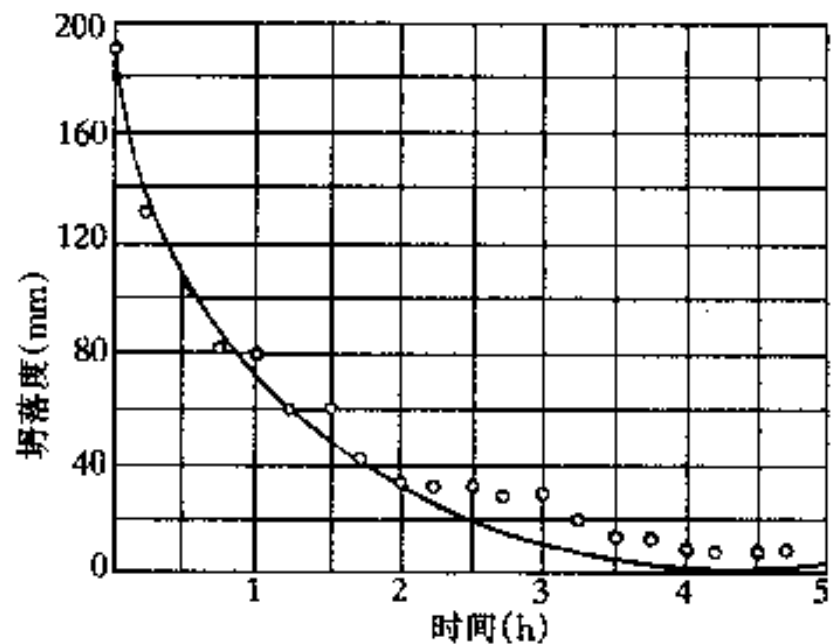


图4-7 坍落度与时间的关系

砼的和易性包括（ ）。

- ☐ A 泌水性
- ☒ B 流动性
- ☒ C 粘聚性
- ☒ D 保水性
- ☐ E 耐水性

混凝土的（ ）会导致混凝土产生分层和离析现象。

- ☐ A 强度偏低
- ☐ B 流动性偏小
- ☒ C 粘聚性不良
- ☐ D 保水性差

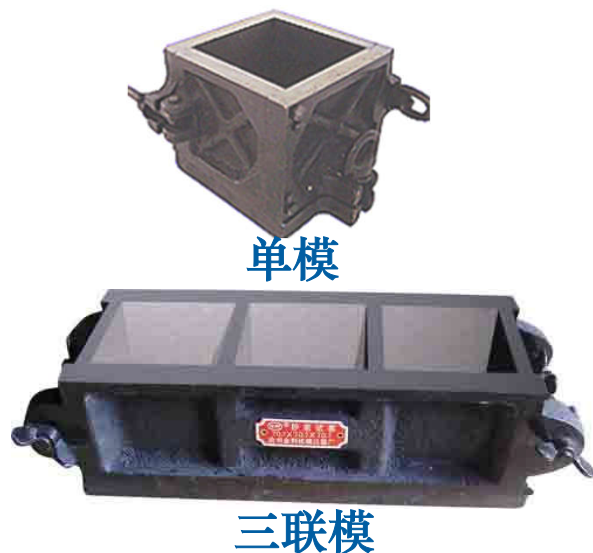
下列关于混凝土坍落度试验的描述，不合理的是（ ）。

- ☐ A 混凝土坍落度试验可以衡量塑性混凝土流动性
- ☐ B 混凝土坍落度试验可以评价塑性混凝土粘聚性
- ☐ C 混凝土坍落度试验可以评价塑性混凝土保水性
- ☒ D 混凝土坍落度试验不可以评价塑性混凝土粘聚性和保水性

4.3.2 混凝土的强度 (strength of concrete)

1. 混凝土立方体抗压强度和强度等级

《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002) 规定, 以边长为150mm的立方体为标准试件, 在标准养护条件 (温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度95%以上) 下养护28d, 按照标准试验方法测得的抗压强度值 (MPa) 称为**混凝土立方体抗压强度**, 用 f_{cu} 表示。



加荷试验

4.3.2 混凝土的强度

混凝土立方体抗压强度按下式计算，精确至0.01MPa：

$$f_{\text{cu}} = \frac{F}{A}$$

式中 f_{cu} ——混凝土立方体试件抗压强度（MPa）；

F ——破坏荷载（N）；

A ——试件受压面积（m²）。

本结果是基于试验时采用立方体标准尺寸试件的计算值。如果试验采用了其它尺寸的非标准试件，测得的强度值均应乘以相应的尺寸换算系数。

以三个试件测值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值。在三个测值中的最大或最小值中，如有一个与中间值的差超过中间值的15%，则把最大及最小值一并舍除，取中间值作为该组试件

4.3.2 混凝土的强度

的抗压强度值；如有两个测值与中间值的差超过中间值的15%，则该组试件的试验无效。

《混凝土结构设计规范》（GB50010-2002）规定，混凝土的强度等级应按混凝土立方体抗压强度标准值来确定。所谓**混凝土立方体抗压强度标准值**，即用上述标准试验方法测得的具有95%保证率的混凝土立方体抗压强度，用 $f_{cu,k}$ 表示。

普通混凝土划分为C7.5~C60共**12个强度等级**；钢筋混凝土划分为C15~C80共**14个强度等级**。如C30表示混凝土立方体抗压强度标准值为30 MPa，即混凝土立方体抗压强度 ≥ 30 MPa的概率在95%以上。

4.3.2 混凝土的强度

混凝土的强度等级是混凝土结构设计时强度计算取值、混凝土施工质量控制和工程验收的重要依据。强度等级的选择主要根据工程的类型与重要性、结构部位以及荷载状况而确定，见表4-16。

工程类型与混凝土强度等级选择

表 4-16

混凝土结构类型	混凝土强度等级
高层建筑、大跨度结构、预应力混凝土、特种结构	>C30
普通建筑的梁、板、柱、楼梯、屋架等钢筋混凝土结构	C20~C30
普通建筑物的垫层、基础、地坪及受力不大的结构	C10~C15



4.3.2 混凝土的强度

2. 混凝土轴心抗压强度

混凝土抗压强度的测定值，不仅与试验环境条件、加荷速度、试件表面状况等因素有关，还与试件的形状有关。由于实际的混凝土构件（如梁、柱）多为棱柱体，因此，采用棱柱体试件比立方体试件更能准确反映混凝土构件与结构的实际抗压情况。

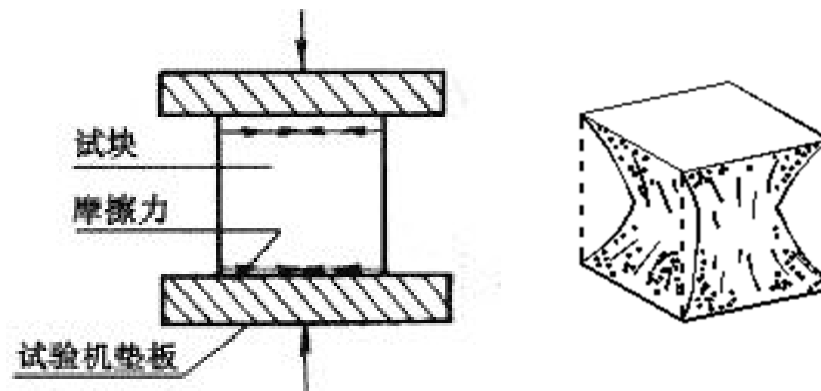
《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081-2002）规定，以150mm×150mm×300mm的棱柱体作为混凝土轴心抗压强度试验的标准试件，按标准试验方法测得的抗压强度称为**混凝土轴心抗压强度**，用 f_{cp} 表示。

对同一混凝土材料，轴心抗压强度 小于立方体抗压强度。

$$f_{cp} \approx (0.7 \sim 0.8) f_{cu}$$

4.3.2 混凝土的强度

混凝土立方体和棱柱体两种试件，在试验时受到试验机上下压板的侧向约束程度不同。试件在试验机上下两块压板摩擦力约束下，侧向变形受到限制的效应称为“**环箍效应**”（如下图）。



环箍效应的影响高度大约为试件边长的0.87倍。立方体试件的整体将受到环箍效应影响，试验测得的抗压强度值相对较大。而棱柱体试件的中间区域未受到环箍效应的影响，试验测得的抗压强度值相对较小。当试验机压板与试件之间涂上润滑剂后，摩擦阻力减小，环箍效应的影响减弱。

4.3.2 混凝土的强度

3. 混凝土抗拉强度

混凝土属脆性材料，其抗拉强度只有抗压强度的 $1/20 \sim 1/10$ 。在工程中，虽然混凝土不能作受拉构件，但根据抗拉强度可以间接地了解混凝土的其他性能。

准确测定混凝土抗拉强度是很困难的。我国采用立方体（国际上多用圆柱体）试件劈裂抗拉试验方法来测定混凝土的抗拉强度。该方法是在试件两个相对表面的轴线上，施加均匀分布的压力，在外力作用的竖向平面内将产生均布拉伸应力，图4-8。

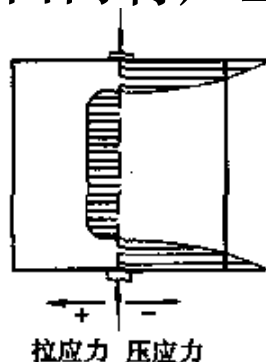


图4-8 劈裂试验时垂直受力面的应力分布

4.3.2 混凝土的强度

拉伸应力可以根据弹性理论计算得出，所得到的抗拉强度称为混凝土劈裂抗拉强度，用 f_{ts} 表示，按式（4-4）计算：

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} \quad (4-4)$$

式中 f_{ts} ——混凝土劈裂抗拉强度（MPa）；

F ——破坏荷载（N）；

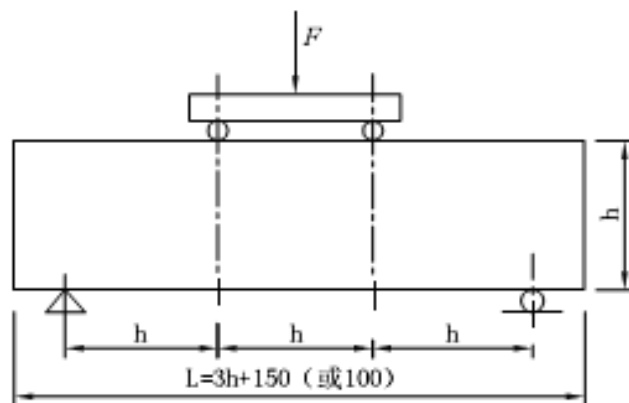
A ——试件劈裂面面积（mm²）。

4.3.2 混凝土的强度

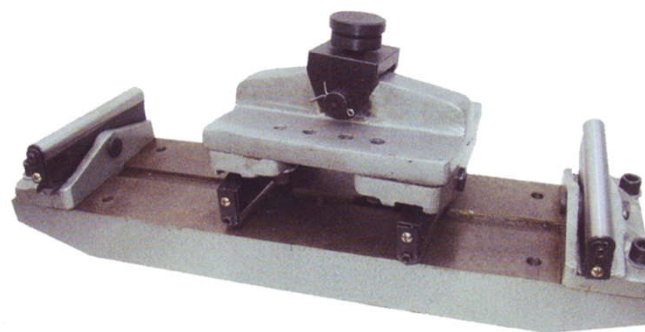
4. 混凝土抗折强度

在混凝土道路工程和桥梁工程的设计、质量控制和验收时，混凝土抗折强度是其重要的技术指标。

《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081-2002）规定，混凝土抗折强度测定采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 600\text{mm}$ （或 550mm ）的长方体小梁作为标准试件，在标准条件下养护28d，按三分点加荷，试件的一端为铰支，另一端为滚动支座。



混凝土抗折试验装置



混凝土抗折夹具

4.3.2 混凝土的强度

混凝土抗折强度按下式计算：

$$f_{cf} = \frac{Fl}{bh^2} \quad (4-5)$$

式中 f_{cf} ——混凝土抗折强度 (MPa) ；

F ——破坏荷载 (N) ；

L ——支座间距即跨度 (mm) ；

b ——试件截面宽度 (mm) ；

h ——试件截面高度 (mm) 。

当采用100mm×100mm×400mm非标准试件时, 取得的抗折强度值应乘以尺寸换算系数0.85；使用其他非标准试件时, 尺寸换算系数由试验确定。

4.3.2 混凝土的强度

5. 影响混凝土强度的因素

- ◆ **主要因素**：水泥强度和水灰比（**水灰比**是指拌制混凝土时，水的用量与水泥用量之比，用 w/c 表示）。
- ◆ **其他因素**：骨料的种类与级配、混凝土成型方法、硬化时的环境条件及混凝土养护龄期等。

（1）水泥强度和水灰比

混凝土的强度主要来自于水泥石的强度及其与骨料间的粘结力，而水泥石的强度及其与骨料间的粘结力又取决于水泥的强度和水灰比的大小。水泥水化所需的结合水一般只占水泥重量的23%左右，但在拌制混凝土拌合物时，为了获得必要的流动性，需要加入较多的水，水灰比大约在0.4~0.65。

4.3.2 混凝土的强度

混凝土强度与水灰比的关系见图4-9。

在水泥强度不变情况下，混凝土强度随水灰比的增大而降低。

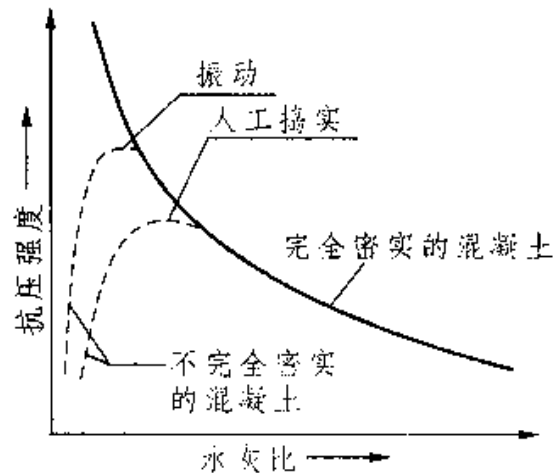


图4-9 混凝土强度与水灰比的关系

在相同水灰比条件下，水泥强度等级越高，水泥石的强度就越高，所配制的混凝土强度也越高。

根据大量试验统计和工程实践经验，混凝土的强度与水灰比、水泥强度有如下关系：

4.3.2 混凝土的强度

$$f_{cu} = Af_{ce} \left(\frac{C}{W} - B \right) \quad (4-6)$$

称为**鲍罗米公式**

式中 f_{cu} ——混凝土28天时的抗压强度 (MPa) ；

$\frac{C}{W}$ ——配制混凝土时采用的灰水比 (水灰比的倒数) ；

A 、 B ——回归系数，与骨料的品种、水泥品种等因素有关。

原则上 A 、 B 应由试验统计得出。无统计资料时，按经验取值：

{ 当采用碎石时： $A=0.46$ 、 $B=0.07$ ；
当采用卵石时： $A=0.48$ 、 $B=0.33$ 。

f_{ce} ——水泥的实测抗压强度 (MPa) ；当无水泥实测强度数据时，水泥的实测抗压强度 f_{ce} 值可按下式确定。

4.3.2 混凝土的强度

$$f_{ce} = \gamma_c \times f_{ce,k} \quad (4-7)$$

式中 γ_c ——水泥强度富余系数，按实际统计资料确定。在正常情况下，水泥强度富余系数一般取1.05~1.15；

$f_{ce,k}$ ——水泥抗压强度标准值（即水泥的强度等级），如32.5级水泥， $f_{ce,k}=32.5$ MPa；42.5级水泥， $f_{ce,k}=42.5$ MPa。

鲍罗米公式的应用：

(1) 当配制混凝土选定了水泥强度等级、骨料种类和水灰比时，利用该公式可直接对算混凝土28天时的抗压强度值。

(2) 当明确了混凝土的设计强度要求和原材料时，利用该公式可以估算配制混凝土应采用的灰水比（或水灰比）。

4.3.2 混凝土的强度

【例题4-1】某混凝土工程要求混凝土强度值不小于40MPa，如果选用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥（强度富余系数为1.10）和碎石粗骨料进行配制，试估算应采用的水灰比。

【解】根据鲍罗米公式（4-6），混凝土应采用的灰水比为：

$$\frac{C}{W} = \frac{f_{cu} + ABf_{ce}}{Af_{ce}}$$

将公式4-7代入上式得：

$$\frac{C}{W} = \frac{f_{cu} + AB\gamma_c f_{ce.k}}{A\gamma_c f_{ce.k}}$$

所以，该工程所用混凝土应采用的水灰比为：

$$\frac{W}{C} = \frac{1}{\frac{C}{W}} = \frac{A\gamma_c f_{ce.k}}{f_{cu} + AB\gamma_c f_{ce.k}} = \frac{0.46 \times 1.10 \times 42.5}{40 + 0.46 \times 0.07 \times 1.10 \times 42.5} = 0.52$$

4.3.2 混凝土的强度

(2) 养护温度与湿度

养护温度与湿度是影响混凝土强度发展的重要外部因素，实质上是对水泥水化过程的影响。

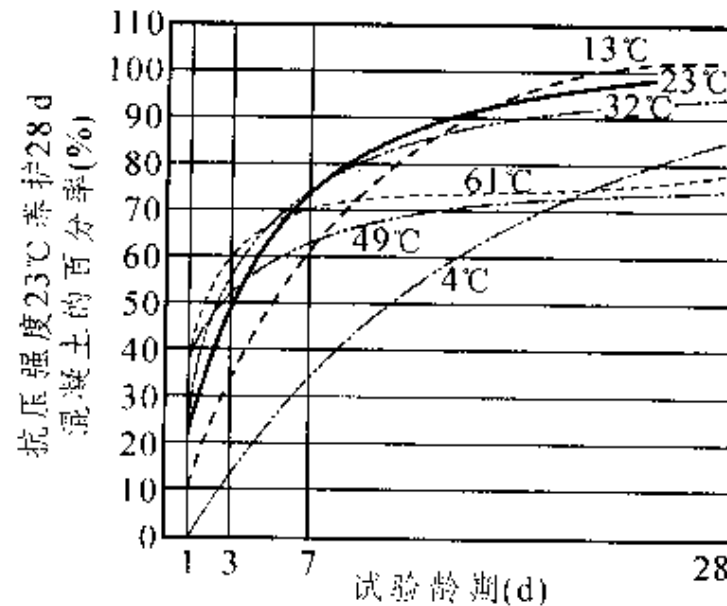


图4-10 养护温度对混凝土强度的影响

湿度是保证水泥水化反应的必要条件。在混凝土浇注后的一定时间内应维持潮湿的养护环境，并特别加强混凝土的早期养护。

4.3.2 混凝土的强度

混凝土养护方法及适用条件

表 4-17

养护方法		养护环境	适用条件
标准养护		在温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度95%以上的养护室或在温度为 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的不流动的氢氧化钙饱和溶液中	实验室测定混凝土的强度
自然养护	洒水养护	在自然温湿度条件下，用草帘覆盖混凝土并经常洒水保持其潮湿，养护时间取决于水泥品种和混凝土的特性	适用于地面混凝土工程和混凝土构件制作
	喷涂薄膜养护	在自然温湿度条件下，将过氯乙烯树脂溶液喷涂在混凝土表面，溶液挥发后在混凝土表面形成一层能阻止水分蒸发的保护膜。有时也用现成的塑料薄膜包裹混凝土	适用于不易洒水养护的高耸和大面积混凝土工程
蒸汽养护		在近 100°C 的常压蒸汽中养护	适用于生产预制混凝土构件及预应力混凝土梁、板
蒸压养护		在 175°C 、8个大气压的压釜中养护	适用于生产加气混凝土、蒸养粉煤灰砖等硅酸盐制品

4.3.2 混凝土的强度

(3) 龄期

龄期是指混凝土在正常养护条件下所经历的时间。由于混凝土的强度源于水泥的水化反应，因此随着混凝土龄期的增长，其强度逐渐增大。最初几天内，混凝土强度增长较快；28天以后混凝土强度增长缓慢。从理论上讲，如果条件适宜，混凝土的强度可持续增长至数十年。混凝土抗压强度与龄期的关系如图4-11所示。

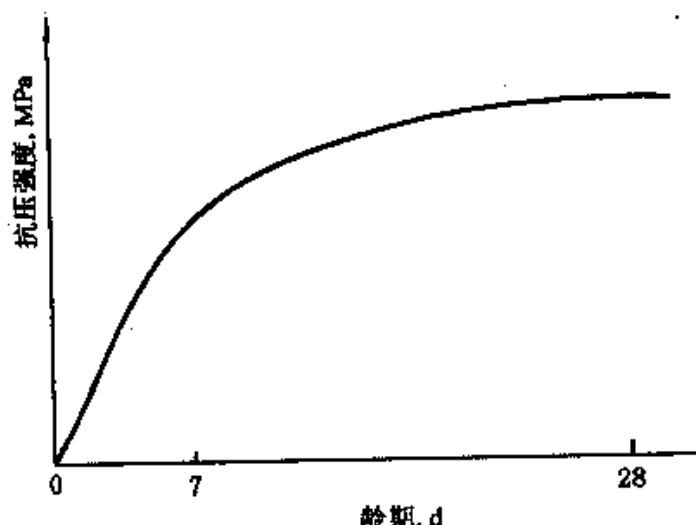


图4-11 混凝土强度与龄期的关系曲线

4.3.2 混凝土的强度

在实际工程中，需要尽快知道已成型混凝土的强度，即能够快速评定混凝土的强度以便决策。

大量试验研究表明，普通混凝土在标准条件养护下，其强度发展大致与龄期的对数成正比关系（龄期不小于3天）。因此，可根据混凝土的早期强度大致估算28天的强度。

$$f_n = f_{28} \cdot \frac{\lg n}{\lg 28} \quad (4-8)$$

式中 f_n —— n 天龄期混凝土的抗压强度（MPa）；

f_{28} ——28天龄期混凝土的抗压强度（MPa）；

n ——养护龄期（ $n \geq 3$ 天）。

4.3.2 混凝土的强度

提高混凝土强度的主要措施

表 4-18

措施分类	主要做法
选材措施	(1) 选用高强度等级水泥和优质砂石骨料
	(2) 掺入减水剂或早强剂
	(3) 掺加硅灰、超细矿渣粉等混合料
配制与成型措施	(1) 尽可能降低水灰比
	(2) 选择合理砂率
	(3) 采用机械搅拌与振捣
养护措施	(1) 保证适宜的温度和湿度
	(2) 必要时可采用湿热养护处理
	(3) 低温时注意防冻保护

我国确定混凝土强度等级的依据是混凝土的
()。

- ☐ A 棱柱体抗压强度标准值
- ☐ B 棱柱体抗压强度设计值
- ☐ C 圆柱抗压强度标准值
- ☒ D 立方体抗压强度标准值

下列关于混凝土强度等级的描述中，合理的是（ ）。

- ☐ A 划分混凝土强度等级不仅考虑强度，而且考虑坍落度
- ☐ B 混凝土强度等级指混凝土在标准试验方法下测得的强度
- ☐ C 混凝土强度等级指混凝土在自然养护条件下测得的强度
- ☒ D 混凝土强度等级根据其立方体抗压强度标准值来确定的

下列关于测定混凝土抗压强度的叙述，不合理的是（ ）。

- ☐ A 测定混凝土强度用的标准试件边长为150mm
- ☒ B 试件分别标准养护3天和28天再测抗强度
- ☐ C 棱柱体试件测得的强度比立方体低
- ☐ D 混凝土试件尺寸越大，测得的抗压强度值越小

用同一强度等级水泥拌制的混凝土，影响其强度的最主要因素是（ ）。

- ☐ A 砂率
- ☐ B 用水量
- ☒ C 水胶比
- ☐ D 水泥用量

【例】预测混凝土强度

【例】某混凝土在标准条件下养护7d，测得其抗压强度为21.0MPa，试估算该混凝土28d抗压强度可达多少？

【解】

$$f_{28} = \frac{\lg 28}{\lg 7} \times f_7 = \frac{1.45}{0.85} \times 21.0 = 35.8 \text{ MPa}$$

4.3.3 混凝土的耐久性 (durability of concrete)

混凝土耐久性是指混凝土抵抗环境介质作用保持其形状、质量和使用性能的能力。它是一个综合性能，涉及的因素很多。

1. 混凝土的抗渗性

混凝土的抗渗性是指混凝土抵抗压力液体（水、油等）渗透的能力。



因混凝土抗渗性差而引起的渗漏



4.3.3 混凝土的耐久性

抗渗性是决定混凝土耐久性的重要方面，对于受压力液体作用的混凝土工程（如地下工程、海港工程、水池、水塔、水坝等）所使用的混凝土必须具有一定的抗渗能力。



4.3.3 混凝土的耐久性

混凝土的抗渗性主要与混凝土的密实度、孔隙特征有关。混凝土的密实度越小、连通孔隙越多，混凝土的抗渗性就越差。

混凝土的抗渗性以**抗渗等级**来表示，分为P4、P6、P8、P10、P12共5个抗渗等级。抗渗等级 \geq P6的混凝土称为**抗渗混凝土**。



混凝土抗渗仪

提高混凝土抗渗性的主要措施：

- (1) 降低水灰比
- (2) 掺加减水剂和引气剂
- (3) 选用洁净且级配良好的骨料
- (4) 加强振捣
- (5) 充分养护等

4.3.3 混凝土的耐久性

2. 混凝土的抗冻性

混凝土的抗冻性是指混凝土在吸水饱和状态下，能经受多次冻融循环不破坏，其强度也不明显降低的能力。

对于严寒和寒冷地区经常与水接触的建筑物及构筑物，所用混凝土必须具有足够的抗冻性。

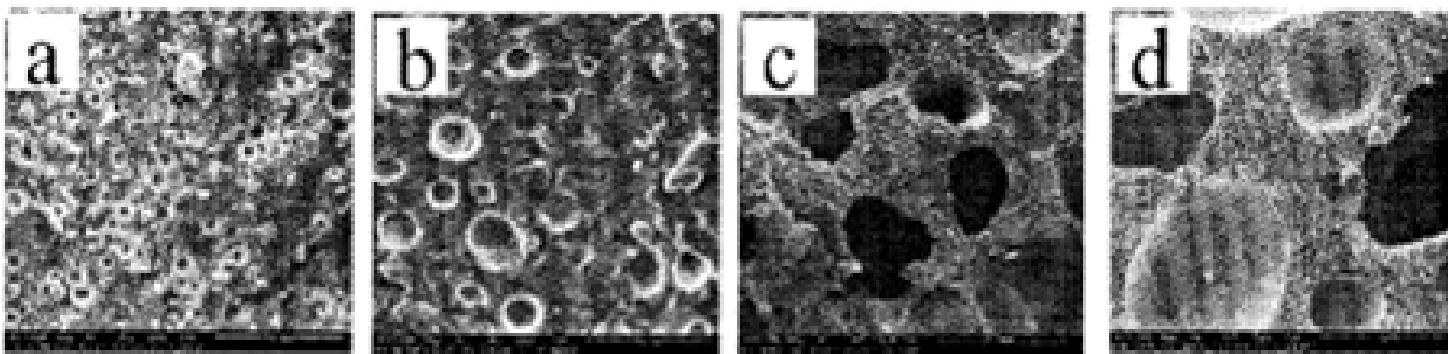


混凝土冻融破坏工程实例

4.3.3 混凝土的耐久性

混凝土的冻融破坏机理：

混凝土在负温下，内部毛细孔中的水结冰后体积膨胀约9%，当产生的膨胀应力超过局部抗拉强度时，将产生微细裂缝，经过反复冻融使裂缝扩展，最终导致混凝土由表及里酥松剥落。混凝土冻融破坏微观构造见下图。



a) A_{1.3}冻融 25 次 (500×); b) A_{1.3}冻融 200 次 (500×);
c) D_{1.3}冻融 25 次 (50×); d) D_{1.3}冻融 200 次 (50×)

混凝土冻融破坏微观构造

4.3.3 混凝土的耐久性

对于混凝土道路工程，除了冰水冻融破坏外，还存在盐冻破坏现象。

由于盐能降低水的冰点，为了融化道路上的冰雪，常在路面上撒放**除冰盐**，除冰盐会使混凝土的饱和程度、膨胀和渗透压力提高，从而加大冰冻的破坏力。



除冰盐将加大混凝土路面的冻融破坏

4.3.3 混凝土的耐久性

混凝土抗冻性取决于混凝土的密实度、孔隙充水程度、孔隙特征以及外部环境温度等因素。

提高混凝土的抗冻性措施：

- (1) 选用级配良好的骨料；
- (2) 选择较小的水灰比；
- (3) 延长养护时间；
- (4) 掺加引气剂（在混凝土中形成均匀分布的不连通微孔，以缓冲因水冻结而产生的挤压力，其效果显著）；
- (5) 提高混凝土的致密度；
- (6) 减少施工缺陷等。

4.3.3 混凝土的耐久性

混凝土的抗冻性用**抗冻等级**来表示。抗冻等级的测定有慢冻法和速冻法两种方法。

常用的慢冻法是以龄期28天的混凝土试件，将其吸水饱和后在 $-15\sim -20^{\circ}\text{C}$ 温度下冻结，然后在 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 温度下融化，如此反复冻融循环，以同时满足抗压强度下降不超过25%和重量损失不超过5%时所能承受的最多冻融循环次数来确定。



混凝土冻融试验装置

混凝土抗冻性分为：

F10、F15、F25、F50
、F100、F150、F200
、F250、F300共9个
等级。

4.3.3 混凝土的耐久性

3. 混凝土的碳化

混凝土的**碳化**是指混凝土内水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 在一定湿度条件下发生化学反应生成 CaCO_3 的过程。

碳化可使混凝土的碱度降低，因此混凝土碳化也称混凝土的**中性化**。



(a) 标准养护 3# 加速碳化 7d



(b) 干燥养护 3# 加速碳化 7d

不同养护条件下的混凝土碳化比较

4.3.3 混凝土的耐久性

碳化从混凝土的表面开始，随着时间的增长，由表及里逐渐向混凝土内部进展。混凝土碳化深度与时间的关系如式4-9。

$$h = K\sqrt{t} \quad (4-9)$$

式中 h ——混凝土碳化深度 (mm) ；

t ——碳化时间 (d) ；

K ——碳化速度系数。



混凝土碳化深度测定

4.3.3 混凝土的耐久性

碳化会使混凝土出现碳化收缩裂缝，强度和耐久性降低，还会使混凝土中的钢筋因失去碱性保护而锈蚀，严重时会使混凝土保护层沿钢筋纵向开裂。

混凝土表层碳化生成的碳酸钙，可减少水泥石的孔隙，对防止有害介质的侵入具有一定的缓冲作用。

综合来看，混凝土碳化弊多利少。



混凝土碳化现象



碳化实验箱

4.3.3 混凝土的耐久性

混凝土碳化是内部诱因 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在外部条件作用下形成的，影响混凝土碳化的主要因素见表4-19。

影响混凝土碳化的主要因素

表 4-19

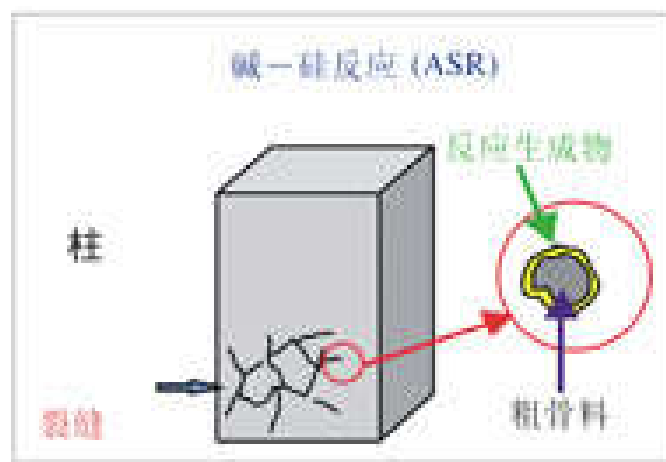
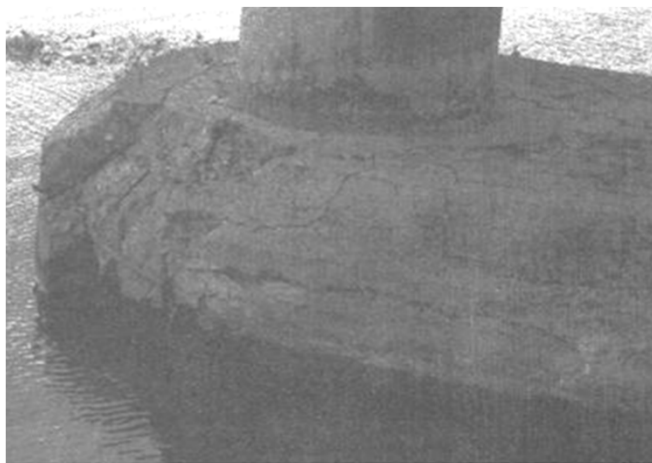
影响因素	对混凝土碳化的影响状况
(1) 水泥品种	水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 多的水泥品种所配制的混凝土碳化速度也较慢，使用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥配制的混凝土，比其它掺混合材料硅酸盐水泥配制的混凝土碳化速度慢
(2) 水灰比	水灰比越大，混凝土的密实度越小，碳化速度越快。当水灰比一定时，碳化深度随水泥用量提高而减小
(3) 施工与养护	搅拌均匀、振捣密实、养护良好的混凝土碳化速度较慢，蒸汽养护的混凝土碳化速度相对较快
(4) 环境条件	空气中 CO_2 浓度大时，碳化速度加快；空气相对湿度在50%~75%时，碳化速度最快；相对湿度 $<20\%$ 时，因缺水碳化基本停止；相对湿度达100%或在水中时，碳化也会停止

4.3.3 混凝土的耐久性

4. 混凝土的碱—骨料反应

混凝土碱—骨料反应是指混凝土内水泥中所含的碱 (Na_2O 和 K_2O) 与骨料中的活性物质 SiO_2 发生化学反应，在骨料表面形成碱—硅酸凝胶的现象。

碱—硅酸凝胶吸水后体积将发生3倍以上的膨胀，从而导致混凝土膨胀开裂而遭到破坏。



碱—骨料反应引起的混凝土膨胀破坏

4.3.3 混凝土的耐久性

碱—骨料反应缓慢，引起的混凝土膨胀破坏在早期不明显，一般需要多年以后才能发现，而且很难修复。

预防混凝土发生碱—骨料反应的主要措施 表 4-20

预防措施	预防原理
(1) 尽量选用非活性骨料	骨料中没有活性物质 SiO_2 ，也就没有发生碱—骨料反应的条件
(2) 控制混凝土的碱含量	当确认使用的是活性骨料时，应选用碱含量小 ($<0.6\%$) 的水泥
(3) 掺加火山灰质混合料	火山灰质混合料能吸收溶液中的钠离子和钾离子，使反应产物在早期就均匀分布在混凝土中，避免集中在骨料表面，以减小或消除所产生的膨胀破坏
(4) 掺入减水剂或引气减水剂	当发生碱—骨料反应时，反应生成的碱—硅酸凝胶可渗入减水剂产生的分散气泡，以降低碱—骨料反应造成的膨胀破坏应力

4.3.3 混凝土的耐久性

5. 提高混凝土耐久性的措施

表 4-21

主要措施		机理描述
选材措施	(1) 合理选择水泥品种	由于不同的水泥品种，其环境适应性不同，因此应根据具体工程要求及环境条件，合理选用水泥品种
	(2) 选用质量优、级配好的砂石骨料	技术条件合格的砂石骨料是保证混凝土耐久性的重要条件，在允许最大粒径范围内尽量选用较大粒径的粗骨料，可减小骨料的空隙率和比表面积，有利于提高混凝土的耐久性
生产措施	(3) 控制混凝土的水灰比和水泥用量	水灰比的大小是决定混凝土密实性的主要因素，它不仅影响混凝土的强度，而且也严重影响其耐久性
	(4) 掺入引气剂或减水剂	掺入引气剂或减水剂对提高混凝土抗渗性能和抗冻性能具有良好作用
	(5) 掺用矿物掺合料	掺矿物掺合料在提高混凝土工作性和强度的同时，也可提高其耐久性
	(6) 加强混凝土施工质量控制	在混凝土施工中，应使混凝土拌合物搅拌均匀，浇灌和振捣密实并加强养护，以获得均匀密实的混凝土，从而提高其耐久性

【造价2017】对混凝土抗渗性起决定作用的是()

- ☐ A 混凝土内部孔隙特性
- ☐ B 水泥强度和品质
- ☒ C 混凝土水胶比
- ☐ D 养护的温度和湿度

【造价2014】受反复冰冻的混凝土结构应选用（ ）。

- ☒ A 普通硅酸盐水泥
- ☐ B 矿渣硅酸盐水泥
- ☐ C 火山灰质硅酸盐水泥
- ☐ D 粉煤灰硅酸盐水泥

钢筋混凝土中发生碳化作用带来的最大危害是（ ）。

- ☐ A 引起混凝土体积收缩
- ☒ B 使混凝土失去对钢筋防锈保护作用
- ☐ C 使混凝土强度降低
- ☐ D 使混凝土变脆，抗冲击性能变差

下列四项中错误的是（ ）。

- ☐ A 轻混凝土的干表观密度不大于 1950kg/m^3
- ☒ B 碱骨料反应是指混凝土中水泥的水化物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与骨料中 SiO_2 之间的反应
- ☐ C 影响普通混凝土抗压强度的主要因素是水泥强度与水胶比
- ☐ D 普通混凝土中的骨料要求空隙率小、总表面积小

【造价2015】有抗化学侵蚀要求的混凝土多使用（ ）。

- ☐ A 硅酸盐水泥
- ☐ B 普通硅酸盐水泥
- ☒ C 矿渣硅酸盐水泥
- ☒ D 火山灰质硅酸盐水泥
- ☒ E 粉煤灰硅酸盐水泥

【一级建筑2015】关于防水混凝土施工的说法，正确的有()。

A

连续性浇筑，少留施工缝

B

宜采用高频机械分层振捣密实

C

施工缝宜留置在受剪力较大部位

D

养护时间不少于7天

E

冬期施工入模温度不低于 5°C

4.3.4 混凝土的变形性能 (deformability of concrete)

1. 混凝土在非荷载作用下的变形

(1) 化学收缩

水泥水化产物的体积小于水化反应前物质（水和水泥）的总体积，由水泥水化反应所产生的固有收缩称为混凝土的**化学收缩**。

化学收缩量随混凝土的龄期延长而增加，大约与时间的对数成正比，在混凝土成型后40天内有较快的增长，之后逐渐趋于稳定。

混凝土的化学收缩率很小（ $<1\%$ ），不会对混凝土结构产生严重破坏作用，但在混凝土内部产生的微细裂缝，会影响混凝土的受载和耐久性能。

混凝土的化学收缩属于不能恢复的变形。

4.3.4 混凝土的变形性能

(2) 温度变形

混凝土与其它材料一样，也会出现热胀冷缩变形现象。混凝土的温度膨胀系数约为 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，当温度升降 1°C 时，1m的混凝土将产生0.01mm的膨胀或收缩变形。

对于大体积混凝土工程来讲，由于混凝土的导热能力较低，水泥水化产生的大量水化热将在内部蓄积，使混凝土内部温度升高。与大气接触的混凝土表面则散热快，温度较低。这样就会造成混凝土内部和表面出现较大的温度差（可达 $50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ ），在内部约束应力和外部约束应力作用下就可能产生热变形温度裂缝。

当温度升降引起的骨料体积变化与水泥石体积变化相差较大时，也将产生具有破坏性的内应力，造成混凝土裂缝和剥落。

4.3.4 混凝土的变形性能

对于大体积混凝土工程，须采取措施减小混凝土的内外温差，以防止混凝土温度裂缝，如：

选用低热水泥；

预先冷却原材料；

掺入缓凝剂降低水泥水化速度；

在混凝土中埋设冷却水管导出内部水化热；

设置温度变形缝等。



4.3.4 混凝土的变形性能

(3) 干缩湿胀

混凝土在干燥环境下，因内部水分蒸发而引起的体积收缩称为**干缩**。混凝土在空气中硬化时，首先失去自由水，但自由水的蒸发并不会引起混凝土体积的收缩。

如果混凝土不断被干燥，混凝土结构中的毛细管水和凝胶体中的吸附水相继蒸发，使孔壁和凝胶体失水紧缩，从而造成混凝土的体积收缩。混凝土的干缩不能完全恢复，即使将干缩后的混凝土长期放在水中也仍然有残余变形（残余收缩约为收缩量的30%~60%）。在一般条件下，混凝土的极限收缩值可达 $5 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4} \text{mm/mm}$ ，即1m混凝土收缩0.5~0.9mm，混凝土的干缩裂缝很容易发生。

4.3.4 混凝土的变形性能

减小混凝土干缩裂缝变形的工程措施

表 4-22

主要措施	其他措施
(1) 保证混凝土用骨料洁净并级配良好	(1) 选用干缩性小的水泥
(2) 加强振捣，提高混凝土密实度	(2) 设置伸缩变形缝，分段浇筑
(3) 减少水泥用量，选择较小的水灰比	(3) 合理配筋
(4) 加强早期养护，延长养护时间	(4) 改善养护环境，如在水中或采用蒸汽、压蒸养护

混凝土吸湿或吸水后而引起的体积膨胀称为**湿胀**。混凝土的湿胀值远小于干缩值，湿胀对混凝土一般不产生危害。

4.3.4 混凝土的变形性能

2. 混凝土在荷载作用下的变形

(1) 短期荷载作用下的变形

混凝土是由多相材料组成的具有不均匀性的弹塑性体，在静力受压时，它既产生可以恢复的弹性变形，又产生不可恢复的塑性变形，其应力与应变关系是非线性的，如图4-12所示。

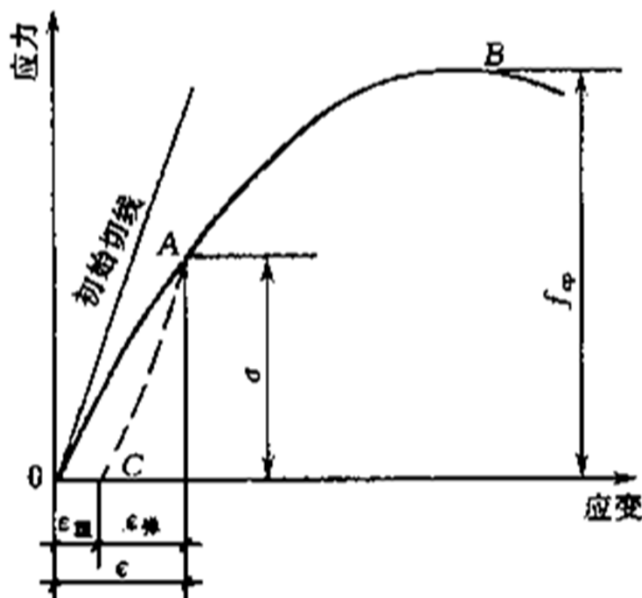


图4-12 混凝土在压力作用下的应力-应变曲线

4.3.4 混凝土的变形性能

混凝土的应力—应变是一条曲线，所以混凝土的变形模量是一个变量。试验表明，混凝土在静力受压时的重复荷载（加荷与卸载）作用下，其应力—应变曲线的变化存在一定规律。如图4-13所示。通常可用A'C'曲线的斜率表示混凝土的弹性模量称为混凝土割线弹性模量。

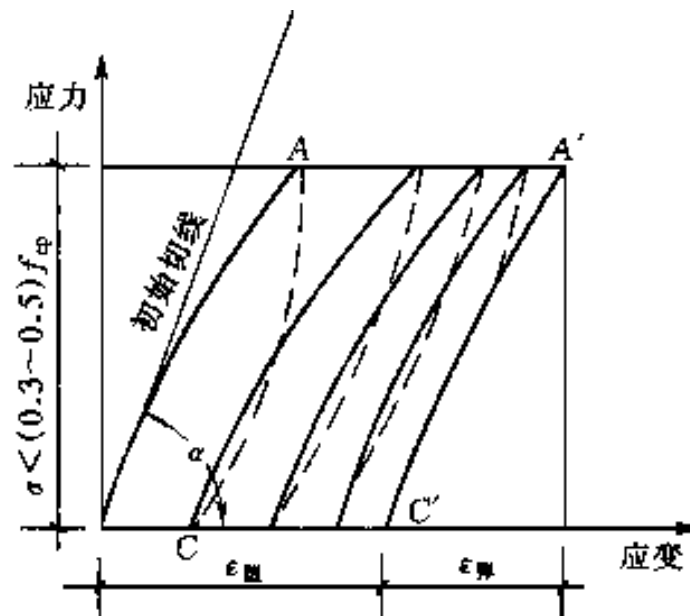


图4-13 低应力下重复荷载的应力-应变曲线

4.3.4 混凝土的变形性能

(2) 长期荷载作用下的变形

混凝土在长期荷载作用下，承受的荷载或应力不变，而变形随时间增长而发展的现象称为**徐变**。混凝土的徐变大约两三年后才趋于稳定。当混凝土卸载后，一部分变形瞬时恢复，一部分变形则要过一段时间后才能恢复（称为**徐变恢复**），剩余的变形是不可恢复的变形（称为**残余变形**）。

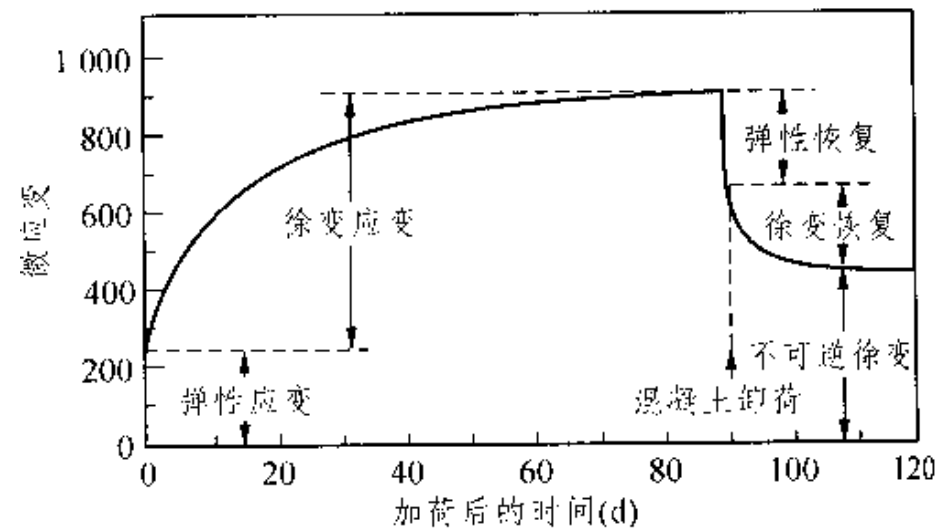


图4-14 混凝土的徐变曲线

4.3.4 混凝土的变形性能

混凝土发生徐变的危害：

混凝土的徐变对混凝土及钢筋混凝土结构物的应力和应变状态有很大影响。徐变可能超过弹性变形，甚至达到弹性变形的2~4倍。徐变会使混凝土构件变形增加，在钢筋混凝土截面中引起应力重分布，在预应力混凝土结构中会造成预应力损失。

混凝土产生徐变的原因及改善措施：

主要是由于水泥石凝胶体在长期荷载作用下的粘性流动或滑移，且吸附在凝胶粒子上的吸附水因荷载应力而向毛细管渗出。当环境湿度减小时，混凝土失水会使徐变增加；当选用的水灰比较大，混凝土强度较低时，混凝土的徐变会增大；当水泥用量较多时，混凝土的徐变增大。采用强度发展快的水泥、增大骨料用量、延迟加荷时间等措施，可使混凝土的徐变减小。

【岩土2016】混凝土的干燥收缩和徐变规律相似，而且最终变形量也相互接近，原因是两者有相同微观机理，均为（ ）。

- ☐ A 毛细孔排水
- ☐ B 过渡区的变形
- ☐ C 骨料的吸水
- ☒ D 凝胶孔水分的移动

关于混凝土湿胀干缩的叙述，不合理的是（ ）。

- ☐ A 混凝土内毛细管内水分蒸发是引起干缩的原因之一
- ☐ B 混凝土内部吸附水分的蒸发引起凝胶体收缩是引起干缩的原因之一
- ☒ C 混凝土的干缩是可以完全恢复的
- ☐ D 混凝土中的粗骨料可以抑制混凝土的收缩

混凝土的水胶比越大，水泥用量越多，则徐变及收缩值（ ）。

- ☒ A 增大
- ☐ B 减小
- ☐ C 基本不变
- ☐ D 难以确定

第4章 水泥混凝土

Chapter4 Cementing Concrete

4.4混凝土的质量检验与评定

4.4 Quality inspection and assessment of concrete

4.4 混凝土的质量检验与评定

4.4.1 混凝土的质量波动

由于混凝土的抗压强度与其他性能之间具有较好的相关性，能够较好地反映混凝土整体的质量情况，通常以抗压强度作为检验和评定混凝土质量的主要指标。

混凝土的质量（强度）虽然会有随机性波动，但在正常情况下对同一种混凝土进行抽样测试统计，其质量波动情况则呈现一定规律——正态分布规律，如图4-15所示。

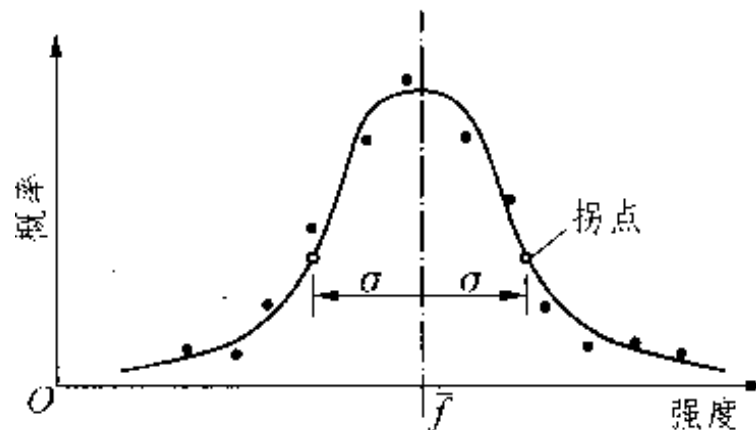


图4-15 混凝土强度正态分布曲线

4.4.2 混凝土质量评定参数

在正常连续生产的情况下，可用数理统计的方法，以强度算术平均值、标准差、变异系数、和保证率等参数综合评定混凝土的质量。

1. 算术平均值 \bar{f}_{cu}

$$\bar{f}_{cu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} \quad (4-10)$$

式中 $f_{cu,i}$ ——第 i 组试件的强度测定值；

n ——该批混凝土试验组数。

强度算术平均值仅反映了混凝土强度的总体平均水平，不能反映混凝土强度的波动情况。

4.4.2 混凝土质量评定参数

2. 标准差（又称均方差） σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i} - \bar{f}_{cu})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - n\bar{f}_{cu}^2}{n-1}} \quad (4-11)$$

强度标准差在数值上等于正态分布曲线上两侧拐点离强度平均值的距离，它反映了强度的离散程度即波动情况。图4-16所示， σ 值越小，分布曲线越窄，强度的离散程度越小，混凝土质量越稳定。对于平均强度相同的混凝土而言，标准差可确切反映混凝土强度的均匀性。

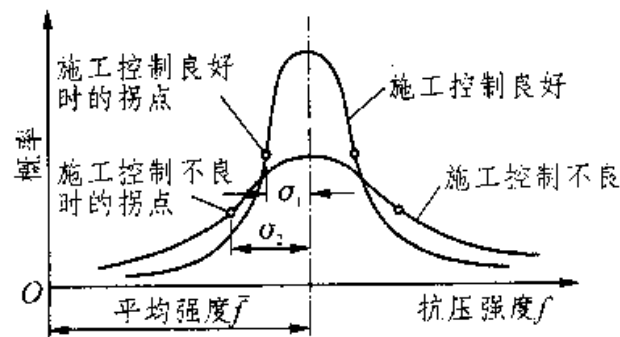


图4-16 离散程度不同的强度分布曲线

4.4.2 混凝土质量评定参数

3. 变异系数

在相同生产管理水平下，混凝土的强度标准差随着平均强度值的增大而增大。对于不同强度等级的混凝土，单用标准差指标难以评判其质量的均匀性。平均强度值不同的混凝土之间的质量稳定性比较，可用变异系数表征。

$$C_V = \frac{\sigma}{f_{cu}} \quad (4-12)$$

变异系数的数学意义是指单位平均强度所产生的标准差，其值越小，混凝土的质量越稳定，生产管理水平越高。

4.4.2 混凝土质量评定参数

4. 强度保证率 P

在混凝土质量控制时，除了考虑所生产混凝土质量的稳定性之外，还须考虑符合设计要求强度等级的合格率，即混凝土**强度保证率**，它是指在混凝土强度总体中，不小于设计要求强度等级的概率（%），如图4-17所示。

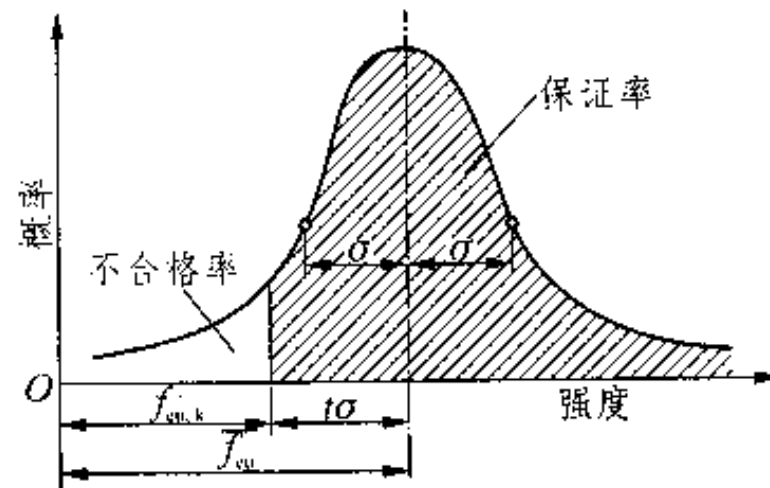


图4-17 混凝土强度保证率

4.4.2 混凝土质量评定参数

强度保证率可由正态分布曲线方程求得。首先计算出概率度 t （或称为保证率系数），根据 t 值可计算出强度保证率 P 。由于计算比较复杂，一般可依据概率度查表4-23得到保证率（%）。

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4-13)$$

$$t = \frac{f_{cu,k} - \bar{f}_{cu}}{\sigma} = \frac{f_{cu,k} - \bar{f}_{cu}}{C_V \bar{f}_{cu}} \quad (4-14)$$

工程中可根据统计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 $N(N \geq 25)$ 之比求得强度保证率。

$$p = \frac{N_0}{N} \times 100\% \quad (4-15)$$

4.4.2 混凝土质量评定参数

根据统计周期内混凝土强度的标准差值和保证率，可将混凝土生产单位的生产管理水平划分为优良、一般、差三个等级，如表4-24所示。

混凝土生产管理水平 (GB50107—2009) 表 4-24

生产管理水平 强度等级 生产单位		优良		一般		差	
		<C20	≥C20	<C20	≥C20	<C20	≥C20
混凝土强度 标准差 (MPa)	预拌混凝土和预制混凝土构件厂	≤3.0	≤3.5	≤4.0	≤5.0	>5.0	>5.0
	集中搅拌混凝土的施工现场	≤3.5	≤4.0	≤4.5	≤5.5	>4.5	>5.5
强度等于和高于要求强度等级的百分率	预拌混凝土厂和预制混凝土构件厂及集中搅拌混凝土的施工现场	≥95		>85		≤85	

4.4.3 混凝土质量评定方法及标准

1. 统计法

当混凝土的生产条件在较长时间内能保持一致，且同一品种混凝土的强度变异性保持稳定时，应由连续的三组试件组成一个验收批，其强度应同时满足下列要求：

$$\bar{f}_{cu} \geq f_{cu,k} + 0.7\sigma \quad (4-16)$$

$$f_{cu,\min} \geq f_{cu,k} - 0.7\sigma \quad (4-17)$$

当混凝土强度等级 \leq C20 时，其强度最小值还应满足下式要求：

$$f_{cu,\min} \geq 0.85 f_{cu,k} \quad (4-18)$$

当混凝土强度等级 $>$ C20 时，其强度最小值还应满足下式要求：

$$f_{cu,\min} \geq 0.90 f_{cu,k} \quad (4-19)$$

4.4.3 混凝土质量评定方法及标准

2. 非统计法

对于试件数量有限，不具备按照统计法评定混凝土强度条件的工程时，可采用非统计法对强度等级 $< C60$ 的混凝土质量进行评定，其强度应同时满足下列要求：

$$\overline{f}_{cu} \geq 1.15 f_{cu,k} \quad (4-20)$$

$$f_{cu,\min} \geq 0.95 f_{cu,k} \quad (4-21)$$

无论是统计法或非统计法评定，当检验结果不能满足上述规定时，该批混凝土强度判为不合格。

对不合格批混凝土制成的结构或构件应进行鉴定，可采用从结构或构件中钻取试件或采用非破损检验方法，对混凝土的强度进行检测，作为混凝土强度处理的依据。

4.4.3 混凝土质量评定方法及标准

混凝土质量问题事件

11·24丰城电厂施工平台倒塌事故



2016年11月24日，江西丰城发电厂三期扩建工程发生冷却塔施工平台坍塌**特别重大事故**，造成**73**人死亡、**2**人受伤，直接经济损失10197.2万元。

4.4.3 混凝土质量评定方法及标准

混凝土质量问题事件

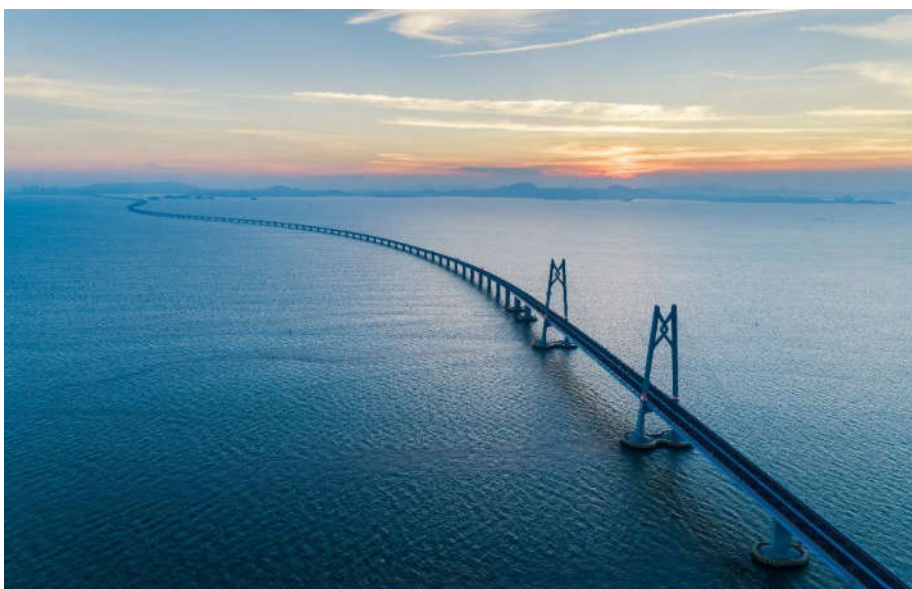
国务院调查组指出该事故与压缩工期、突击生产有关，经查明冷却塔施工单位河北亿能烟塔工程有限公司施工现场管理混乱，未按要求制定拆模作业管理控制措施，对拆模工序管理失控。事发当日，**在7号冷却塔第50节筒壁混凝土强度不足的情况下，违规拆除模板，致使筒壁混凝土失去模板支护，不足以承受上部荷载，造成第50节及以上筒壁混凝土和模架体系连续倾塌坠落。**

经国务院调查组调查认定，该起事故为生产安全责任事故，**31人**被采取刑事强制措施。

4.4.3 混凝土质量评定方法及标准

混凝土质量问题事件

港珠澳大桥质量报告造假事件



港珠澳大桥连接香港、珠海、澳门，全长55公里。从2009年启动开工建设，2018年建成。整体投资约1000亿人民币，由中央及粤港澳三地政府共同出资兴建，使用寿命长达120年。

4.4.3 混凝土质量评定方法及标准

混凝土质量问题事件

2017年5月23日，香港廉政公署公开证实廉政公署已经拘捕21人，
疑涉虚假石屎（即混凝土）压力测试贪污案。

廉署调查显示，当部份测试未能按合约要求于特定时段内完成，涉案技术员及服务人员**涉嫌调整测试器材所显示的时间，以掩饰其违规情况。**同时，廉署在行动中另发现，部分实验室人员涉嫌**以金属校准柱及/或强力石屎砖代替石屎样本**，以伪造测试结果，使测试看似正常进行。

其中一名被告（黄国尧）两度犯案以掩饰个人缺失，制造假的测试结果，试图瞒天过海，罔顾公众安全，法院判其入狱8个月，其余被告正在审理中。

第4章 水泥混凝土

Chapter4 Cementing Concrete

4.5 普通混凝土配合比设计

4.5 Mix design of concrete

4.5 普通混凝土配合比设计

4.5.1 基本要求和资料准备

混凝土配合比设计基本要求与资料准备 表 4-25

基本要求	设计前的相关资料准备
(1) 具有结构设计要求的混凝土强度等级	(1) 工程要求的混凝土和易性、强度和耐久性指标
(2) 具有满足施工要求的混凝土拌合物和易性	(2) 混凝土工程所处的环境条件
(3) 具有与环境条件和使用要求相适应的耐久性	(3) 拟用原材料的品种及物理力学性能
(4) 在保证性能的前提下, 节约水泥, 经济合理	(4) 混凝土配制生产的历史统计资料

4.5.2 三个基本参数及确定原则

混凝土配合比设计的关键是确定水泥、水、砂和石子这四项基本组成材料用量之间的三个比例关系即三个基本参数。

混凝土配合比设计时三个基本参数及确定原则

表 4-26

基本参数		确定原则
名称	表示符号	
水灰比	$\frac{W}{C}$	满足混凝土设计要求的强度和環境条件相适应的耐久性基础上，选用较大的水灰比，以节约水泥，降低成本
砂率	S_p	砂率对混凝土强度、和易性和耐久性均有较大影响，也直接影响水泥用量，砂子的用量以填满石子的空隙并略有富余为原则，尽量选用最优砂率
单位用水量	W_0	根据施工要求的坍落度要求和粗骨料的种类、最大粒径情况，在满足施工要求的和易性基础上，尽量选用较小的单位用水量

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

1. 计算初步配合比

(1) 确定配制强度 ($f_{cu,h}$)

混凝土配制强度须高于设计要求的强度，根据《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ 55—2000）规定，混凝土强度保证率必须达到95%以上，此时的强度保证率系数 $t=1.645$ 。所以，混凝土配制强度应为：

$$f_{cu,h} = f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (4-22)$$

式中 $f_{cu,h}$ ——混凝土配制强度（MPa）；

$f_{cu,k}$ ——具有95%保证率的混凝土设计强度（MPa）；

σ ——混凝土强度标准差（MPa）

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

当无混凝土配制强度历史资料统计资料时，强度标准差可参考表4-27取值。

标准差 (σ) 取值表			表 4-27
混凝土强度等级	<C20	C20~C35	>C35
标准差 σ	4.0	5.0	6.0

(2) 初步确定水灰比 ($\frac{W}{C}$)

根据鲍罗米公式，混凝土达到预期强度（配制强度）应选用的初步水灰比按下式计算：

$$\frac{W}{C} = \frac{Af_{ce}}{f_{cu.h} + ABf_{ce}} \quad (4-23)$$

为保证混凝土的耐久性，最大水灰比还须符合表4-28中的规定。

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

混凝土最大水灰比和最小水泥用量限值

表 4-28

环境条件		混凝土结构类型	最大水灰比			最小水泥用量 (kg/m ³)		
			素砼	钢筋 砼	预应力 砼	素砼	钢筋 砼	预应力 砼
干燥环境		正常的居住或办公用房 屋室内部件	不作 规定	0.65	0.60	200	260	300
潮湿 环境	无 冻 害	高湿度的室内外部件、 在非侵蚀性土和（或） 水中的部件	0.70	0.60	0.60	225	280	300
	有 冻 害	经受冻害的室外部件、 在非侵蚀性土和（或） 水中且冻害的部件	0.55	0.55	0.55	250	280	300
有冻害及 除冰剂的 潮湿环境		经受冻害和冰剂作用的 室内外部件	0.50	0.50	0.50	300	300	300

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

(3) 选择单位立方米混凝土用水量 (W_0)

为满足混凝土施工要求的和易性，混凝土单位用水量应根据施工要求的坍落度、粗骨料种类和最大粒径情况，按表4-29选用。

混凝土单位用水量选用表

表 4-29

和易性指标要求		卵石最大粒径 (mm)				碎石最大粒径 (mm)			
		10	20	31.5	40	16	20	31.5	40
坍落度 (mm)	10~30	190	170	160	150	200	185	175	165
	35~50	200	180	170	160	210	195	175	175
	55~70	210	190	180	170	220	205	195	185
	75~90	215	195	185	175	230	215	205	195
维勃稠度 (s)	16~20	175	160	—	145	180	170	—	155
	11~15	180	165	—	150	185	175	—	160
	5~10	185	170	—	155	190	180	—	165

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

(4) 计算单位立方米混凝土水泥用量 (C_0)

根据已选定的单位立方米混凝土用水量和初步确定的水灰比，可计算求出单位立方米混凝土的水泥用量。

$$C_0 = \frac{W_0}{W/C} \quad (4-24)$$

为保证混凝土的耐久性，由上式计算得出的单位水泥用量还须满足表4-27中规定的最小水泥用量要求。当计算得出的单位水泥用量小于规定的最小水泥用量时，应按表4-27规定的最小水泥用量取值。

(5) 选用合理砂率 (S_p)

根据初步确定的水灰比、采用的骨料种类和粒径，参照表4-30选用砂率。有条件时，可通过试验找出最优砂率。

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

混凝土砂率选用表

表 4-30

水灰比	卵石最大粒径 (mm)			碎石最大粒径 (mm)		
	10	20	40	16	20	40
0.4	26~32	25~31	24~30	30~35	29~34	27~32
0.5	30~35	29~34	28~33	33~38	32~37	30~35
0.6	33~38	32~37	31~36	36~41	35~40	33~38
0.7	36~41	35~40	34~39	39~44	38~43	36~41

(6) 计算单位立方米混凝土中砂、石的用量 (G_0 和 S_0)

单位 m^3 混凝土中砂、石用量的计算方法有重量法和体积法:

① 当采用重量法时, 按下列一组公式计算:

$$\left. \begin{aligned} C_0 + W_0 + S_0 + G_0 &= \rho_{0h} \\ S_P &= \frac{S_0}{S_0 + G_0} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (4-25)$$

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

式中 C_0 、 W_0 、 S_0 、 G_0 ——分别为单位 m^3 混凝土的水泥、水、砂和石子用量（kg）；

ρ_{0h} ——混凝土拌合物的表观密度（ kg/m^3 ）；

S_p ——砂率（%）。

由于单位水泥用量（ C_0 ）、单位用水量（ W_0 ）、砂率（ S_p ）均已确定，混凝土拌合物的表观密度可根据骨料的表观密度、粒径和混凝土强度等级，在 $2400 \sim 2450 \text{ kg}/\text{m}^3$ 范围内选定，因此，联立以上方程组可计算求得砂、石的用量（ S_0 、 G_0 ）。

② 采用体积法时，按下列一组公式计算：

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_0}{\rho_c} + \frac{W_0}{\rho_w} + \frac{S_0}{\rho_{s0}} + \frac{G_0}{\rho_{g0}} + 10\alpha &= 1000 \\ S_P &= \frac{S_0}{S_0 + G_0} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (4-26)$$

式中 ρ_c 、 ρ_w ——分别为水泥、水的密度 (g/cm^3) ;

ρ_{s0} 、 ρ_{g0} ——分别为砂、石子的表观密度 (g/cm^3) ;

α ——混凝土的含气量百分数,不使用引气型外加剂时, $\alpha=1$ 。

由于单位水泥用量、单位用水量、砂率均已确定,各组成材料选定后其密度为已知条件,因此联立以上方程组可计算求得砂、石的用量 (S_0 、 G_0) 。

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

2. 调整基准配合比和试验室配合比

通过以上计算得到的混凝土初步配合比是利用经验公式或经验资料获得的，由此配制的混凝土有可能会不符合实际要求，须进行试配、调整。

先按初步配合比进行试拌，检查所配制混凝土拌合物的和易性是否达到要求。若流动性太大，可在砂率不变的条件下，适当增加砂、石用量；若流动性太小，可保持水灰比不变，增加适量的水和水泥用量；若混凝土拌合物的粘聚性和保水性不良，可适当增加砂率，直到和易性满足要求为止。

经过调整拌合物和易性后得到的配合比，即为可供混凝土强度试验用的混凝土**基准配合比**。

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

由基准配合比配制的混凝土虽满足了和易性要求，但是否满足强度要求尚未可知。

检验强度时一般采用三个不同的配合比，其中一个为基准配合比，另外两个配合比的水灰比可较基准配合比分别增加和减少0.05，其用水量与基准配合比相同，砂率可分别增加或减小1%。

制作混凝土强度试件时，应检验相应配合比的拌合物性能（和易性和表观密度）以作备用，每个配合比至少按标准方法制作一组（三块）试件，标准养护28天测抗压强度，以三组试件的强度和相应的水灰比作图，确定与配制强度相对应的灰水比称为**试验室配合比**，此时的水泥、水、砂、石子用量分别用 C 、 W 、 S 、 G 表示。

4.5.3 混凝土配合比设计步骤

3. 确定施工配合比

通过调整得到的试验室配合比是以材料在干燥状态下计量的，而施工现场存放和使用的砂、石材料都含有一定的水分。因此，现场材料的实际用量应按工地砂、石的含水情况进行修正，修正后的配合比称为施工配合比。当工地用砂的含水率为 $a\%$ 、石子的含水率为 $b\%$ 时，试验室配合比应换算为施工配合比。

$$\left\{ \begin{array}{l} C' = C \\ W' = W - Sa\% - Gb\% \\ S' = S(1 + a\%) \\ G' = G(1 + b\%) \end{array} \right. \quad (4-27 \sim 30)$$

4.5.4 混凝土配合比设计实例

【例题4-2】某露天受雨雪影响的现浇钢筋混凝土柱，截面最小尺寸300mm，钢筋间净距最小尺寸60mm，混凝土设计强度等级为C30，采用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥，实测水泥强度为48.0MPa，密度为3.1g/cm³；砂为中砂，表观密度为2.65 g/cm³，现场用砂的含水率为3%；粗骨料选用碎石，表观密度为2.7g/cm³，现场用石子的含水率为1%；施工采用机械振捣，施工单位无混凝土强度标准差历史统计资料。求满足该工程要求的混凝土施工配合比。

【解】 1. 计算初步配合比

(1) 确定配制强度

4.5.4 混凝土配合比设计实例

施工单位无混凝土强度标准差历史统计资料，查表4-27，混凝土强度标准差取5MPa，所以，混凝土的配制强度为：

$$\begin{aligned}f_{cu.h} &= f_{cu,k} + 1.645\sigma \\&= 30 + 1.645 \times 5.0 \\&= 38.2 \text{ (MPa)}\end{aligned}$$

(2) 初步确定水灰比

① 满足强度要求的水灰比

$$\begin{aligned}\frac{W}{C} &= \frac{Af_{ce}}{f_{cu.h} + ABf_{ce}} \\&= \frac{0.46 \times 48.0}{38.2 + 0.46 \times 0.07 \times 48.0} \\&= 0.56\end{aligned}$$

4.5.4 混凝土配合比设计实例

② 满足耐久性要求的水灰比

该柱在露天受雨雪影响条件下使用，处于有冻害的环境，查表4-27，满足耐久性要求的最大水灰比限值为0.55。

综合①、②两个方面，同时满足强度和耐久性要求的水灰比应为0.55。

(3) 选择单位用水量

单位用水量应根据施工要求的坍落度、粗骨料种类及最大粒径进行选择。规范规定粗骨料最大粒径不得超过结构截面最小尺寸的1/4，同时不得大于钢筋间最小净距的3/4。粗骨料最大粒径：

$$D_{\max} \leq \frac{1}{4} \times 300 = 75(\text{mm}) \quad D_{\max} \leq \frac{3}{4} \times 60 = 45(\text{mm})$$

4.5.4 混凝土配合比设计实例

因此，粗骨料最大粒径按公称粒级应选用 $D_{\max}=40\text{mm}$ ，即采用5~40mm的碎石。由于该柱属中型柱子，采用机械振捣，查表4-14，施工坍落度应为30~50mm。

按照施工坍落度30~50mm、粗骨料碎石最大粒径40mm，查表4-28，单位用水量 $W_0=175\text{kg/m}^3$ 。

(3) 计算单位水泥用量

$$C_0 = \frac{W_0}{W/C} = \frac{175}{0.55} = 318 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

查表4-27，满足耐久性要求的最小水泥用量为280 kg/m³。

所以，当单位水泥用量 $C_0=318 \text{ kg/m}^3$ 时，可同时满足强度和耐久性要求。

4.5.4 混凝土配合比设计实例

(4) 确定砂率

查表4-29，当碎石最大粒径为40mm、水灰比为0.5时，砂率宜为30%~35%，取中值32.5%；水灰比为0.60时，砂率宜为33%~38%，取中值35.5%。按线性内插法，当水灰比为0.55时，砂率 $S_p=34\%$ 。

(5) 计算单位立方米混凝土的砂、石用量

按体积法列以下方程：

$$\left. \begin{aligned} \frac{318}{3.1} + \frac{175}{1} + \frac{S_0}{2.65} + \frac{G_0}{2.7} + 10 \times 1 &= 1000 \\ \frac{S_0}{S_0 + G_0} &= 34\% \end{aligned} \right\}$$

4.5.4 混凝土配合比设计实例

解以上方程组得： $S_0=650\text{kg}$ ；

$$G_0=1262\text{kg}。$$

所以，配制单位立方米混凝土的水泥、水、砂、碎石分别为：

318 kg、175 kg、650 kg、1262 kg，初步配合比为：

$$C_0:W_0:S_0:G_0=1:0.55:2.04:3.97$$

2. 确定基准配合比和试验室配合比

(1) 和易性调整

按初步配合比称取15L混凝土的材料用量，其中水泥4.77 kg，水2.63 kg，砂9.75 kg，石子18.92 kg。按规定方法拌和后测得坍落度为10mm，达不到30~50mm的坍落度要求。保持水灰比不便，增加

4.5.4 混凝土配合比设计实例

水泥浆用量5%，经再次拌和后测得坍落度为35 mm，此时拌合物的粘聚性、保水性均良好。调整后水泥5.01 kg，水2.76 kg，砂9.75 kg，石子18.92 kg，材料总量36.44kg。

调整后的单位立方米混凝土用量（基准配合比）为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水泥 } (5.01/36.44) \times 2\,400 \text{ kg} = 330.0 \text{ kg} ; \\ \text{水 } (2.76/36.44) \times 2\,400 \text{ kg} = 181.8 \text{ kg} ; \\ \text{砂 } (9.75/36.44) \times 2\,400 \text{ kg} = 642.2 \text{ kg} ; \\ \text{石子 } (18.92/36.44) \times 2\,400 \text{ kg} = 1246 \text{ kg} 。 \end{array} \right.$$

(2) 强度检验

采用水灰比为0.50、0.55和0.60三种不同的配合比拌制混凝土，测定其表观密度，制作混凝土试块，标准养护28天后测抗压强度。

4.5.4 混凝土配合比设计实例

由强度检验结果，计算出抗压强度为38.2MPa，对应的水灰比为 0.56。考虑到混凝土组成材料的质量波动，若实际强度能满足配制强度且超强不多，就没有必要重新进行调整。

本例由于受耐久性要求的最大水灰比限制，混凝土的水灰比应选定为0.55。混凝土拌合物的计算表观密度为2400kg/m³，而实测表观密度为2402 kg/m³，两者基本一致，不再调整。所以，单位立方米混凝土的试验室用量为：

水泥为330 kg/m³；水为181.1 kg/m³，
砂642.2 kg/m³；石子1246.0 kg/m³。

试验室配合比为：

$$C:W:S:G=1:0.55:1.95:3.78$$

4.5.4 混凝土配合比设计实例

3. 确定施工配合比

拌制单位立方米混凝土的实际材料用量为：

水泥：330.0 kg；

水： $181.8 - 642.2 \times 3\% - 1246.0 \times 1\% = 150 \text{ kg/m}^3$ ；

砂： $642.2 \times (1+3\%) = 661 \text{ kg/m}^3$ ；

石子： $1246.0 \times (1+1\%) = 1258 \text{ kg/m}^3$ 。

施工配合比为：

$$C' : W' : S' : G' = 1 : 0.45 : 2.0 : 3.8$$

【补充】



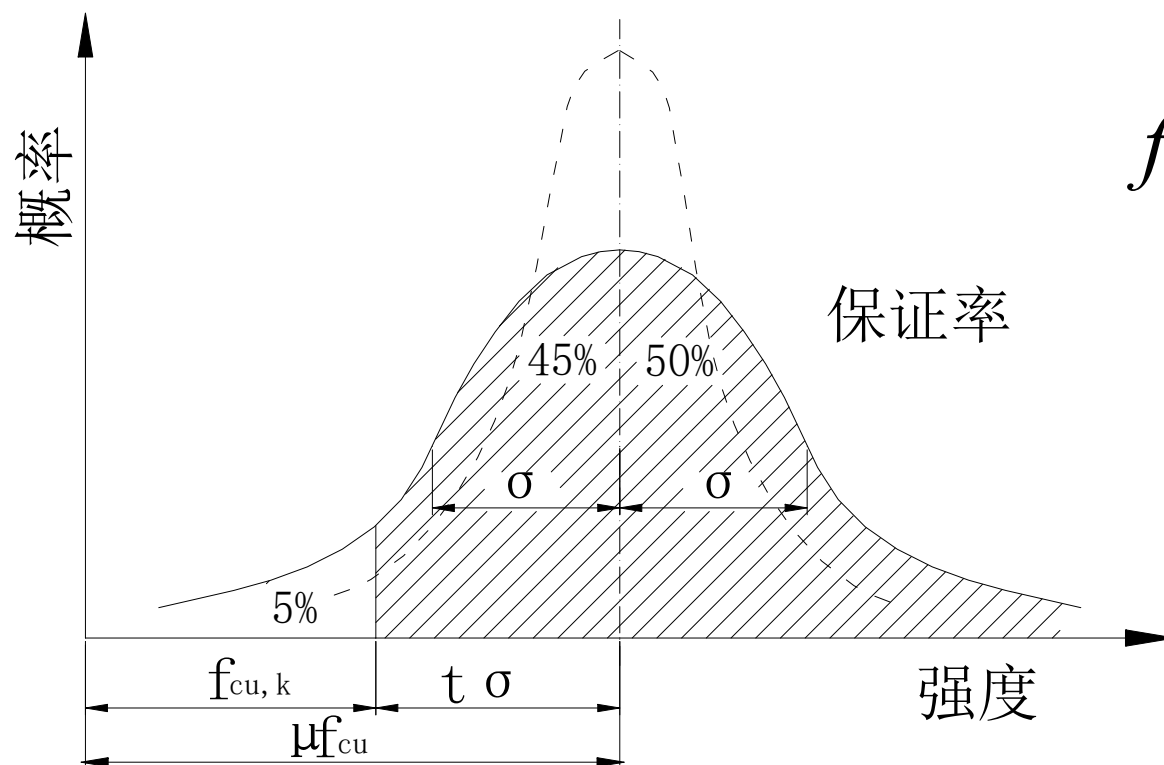
混凝土配合比设计JGJ55-2011

C20混凝土配比单

材料名称	水泥(32.5普)	砂 (中砂)	水	石子
每m ³ 用量 (kg)	391	430	215	1357
质量比	1	1.1	0.55	3.42
实际用量1 (Kg)	100	110	55	342
实际用量2 (Kg)	150	165	82.5	513
施工说明	1.正确计量、计量准确。			
	2.做到工完场清。			
	3.混凝土坍落度30~50，搅拌应充分、均匀。			

混凝土配制强度的确定

混凝土强度的波动规律—正态分布



$$f_{cu,0} = f_{cu,k} - t\sigma$$

混凝土配制强度的确定

4.0.1 混凝土配制强度应按下列规定确定：

1. 当混凝土的设计强度等级小于C60时，配制强度应按下式计算：

$$f_{\text{cu},0} \geq f_{\text{cu},k} + 1.645\sigma$$

2. 当设计强度等级不小于C60时，配制强度应按下式计算

$$f_{\text{cu},0} \geq 1.15f_{\text{cu},k}$$

$f_{\text{cu},0}$ ——混凝土配制强度（MPa）

$f_{\text{cu},k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值，这里取混凝土的设计强度等级值（MPa）；

σ ——混凝土强度标准差（MPa）。

混凝土配制强度的确定

4.0.2 混凝土强度标准差应按照下列规定确定：

1. 当具有近1个月~3个月的同一品种、同一强度等级混凝土的强度资料时，其混凝土强度标准差 σ 应按下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{cu},i}^2 - n m_{\text{fcu}}^2}{n - 1}}$$

式中： σ ——混凝土强度标准差；

$f_{\text{cu},i}$ ——第 i 组的试件强度(MPa)；

m_{fcu} —— n 组试件的强度平均值(MPa)；

n ——试件组数。

n ——试件组数， n 值应大于或者等于30。

混凝土配制强度的确定

对于强度等级不大于C30的混凝土：

- 当 σ 计算值不小于3.0MPa时，应按照计算结果取值；
- 当 σ 计算值小于3.0MPa时， σ 应取3.0MPa。

对于强度等级大于C30且不大于C60的混凝土：

- 当 σ 计算值不小于4.0MPa时，应按照计算结果取值；
- 当 σ 计算值小于4.0MPa时， σ 应取4.0MPa。

2. 当没有近期的同一品种、同一强度等级混凝土强度资料时，其强度标准差 σ 可按表4.0.2取值。

混凝土强度标准值	$\leq C20$	C25~C45	C50~C55
Σ	4.0	5.0	6.0

混凝土配合比的计算

1. 计算配制强度 ($f_{cu, o}$) 【上一步完成】
2. 计算水胶比 (W/B)
3. 选取用水量 (m_{w0}) 和外加剂用量 (m_{a0})
4. 计算胶凝材料用量 (m_{b0})、矿物掺合料 (m_{f0}) 和水泥用量 (m_{c0})
5. 选取砂率 (β_s)
6. 计算粗、细骨料的用量 (m_{g0} 和 m_{s0})

计算水胶比

混凝土强度等级不大于C60等级时，混凝土水胶比宜按下式计算：

$$\frac{W}{B} = \frac{a_a f_b}{f_{cu,o} + a_a a_b f_b} \quad \leftarrow f_{cu,o} = \alpha_a \cdot f_b \left(\frac{B}{W} - \alpha_b \right)$$

式中： W/B ——混凝土水胶比；

α_a 、 α_b ——回归系数，按本规程第 5.1.2 条的规定取值；

f_b ——胶凝材料 28d 胶砂抗压强度（MPa），可实测，且试验方法应按现行国家标准《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》GB/T 17671 执行；也可按本规程第 5.1.3 条确定。

计算水胶比

5.1.2 回归系数 (α_a 、 α_b) 宜按下列规定确定：

1 根据工程所使用的原材料，通过试验建立的水胶比与混凝土强度关系式来确定；

2 当不具备上述试验统计资料时，可按表 5.1.2 选用。

系数 \ 粗骨料品种	碎石	卵石
α_a	0.53	0.49
α_b	0.20	0.13

计算水胶比

5.1.3 当胶凝材料28d胶砂抗压强度值（ f_b ）无实测值时，可按下列式计算：

$$f_b = \gamma_f \gamma_s f_{ce}$$

式中：

γ_f 、 γ_s ——粉煤灰影响系数和粒化高炉矿渣粉影响系数，可按表5.1.3选用。

f_{ce} ——水泥28d胶砂抗压强度（MPa），可实测，也可按本规程5.1.4条确定

表5.1.3粉煤灰影响系数(γ_f)和粒化高炉矿渣粉影响系数(γ_s)

种类 掺量 (%)	粉煤灰影响系数 γ_f	粒化高炉矿渣粉影 响系数 γ_s
0	1.00	1.00
10	0.85~0.95	1.00
20	0.75~0.85	0.95~1.00
30	0.65~0.75	0.90~1.00
40	0.55~0.65	0.80~0.90
50	——	0.70~0.85

说明：1、采用 I II级粉煤灰宜取上限值；

2、采用s75级粒化高炉矿渣粉宜取下限值，采用s95级粒化高炉矿渣粉宜取上限值；采用s105级粒化高炉矿渣粉可取上限值加0.05；

3、当超出表中的掺量时，粉煤灰和粒化高炉矿渣粉影响系数应经
试验 确定

计算水胶比

5.1.4 当水泥28d胶砂抗压强度（ f_{ce} ）

无实测值时，可按下列式计算：

式中：

$$f_{ce} = \gamma_c f_{ce,g}$$

γ_c ——水泥强度等级富余系数，可按实际统计资料确定；当缺乏实际统计资料时，也可按表5.1.4选用。

$f_{ce,g}$ ——水泥强度等级值（MPa）

5.1.4 不同水泥强度等级值的富余系数（ γ_c ）

水泥强度等级	32.5	42.5	52.5
富余系数	1.12	1.16	1.10

5.2 用水量和外加剂用量

【用水量】

5.2.1 每立方米干硬性或塑性混凝土的用水量 (m_{w0}) 应符合下列规定：

1. 混凝土水胶比在0.40~0.80范围时，可按表5.2.1-1和表5.2.1-2选取；
2. 混凝土水胶比小于0.40时，可通过试验确定。

干硬性或塑性混凝土掺外加剂后的用水量在以上数据的基础上通过试验进行调整。

表5.2.1-1 干硬性混凝土的用水量（kg/m³）

拌合物稠度		卵石最大公称粒径（mm）			碎石最大公称粒径（mm）		
项目	指标	10.0	20.0	40.0	16.0	20.0	40.0
维勃稠度（s）	16~20	175	160	145	180	170	155
	11~15	180	165	150	185	175	160
	5~10	185	170	155	190	180	165

表5.2.1-2 塑性混凝土的用水量 (kg/m³)

拌合物稠度		卵石最大公称粒径 (mm)				碎石最大公称粒径 (mm)			
项目	指标	10.0	20.0	31.5	40.0	16.0	20.0	31.5	40.0
坍落度 mm	10~30	190	170	160	150	200	185	175	165
	35~50	200	180	170	160	210	195	185	175
	55~70	210	190	180	170	220	205	195	185
	75~90	215	195	185	175	230	215	205	195

说明： 1、上表用水量系采用中砂时的取值。采用细砂时，每立方米混凝土用水量可增加5kg~10kg；采用粗砂时，可减少5kg~10kg；
2、掺用矿物掺合料和外加剂时，用水量应相应调整。

5.2 用水量和外加剂用量

【外加剂用量】

5.2.2 每立方米流动性或大流动性混凝土（掺外加剂）的用水量（ m_{w0} ）可按下列式计算：

$$m_{w0} = m_{w0'}(1 - \beta)$$

m_{w0} —计算配合比每立方米混凝土的用水量（kg/m³）；

$m_{w0'}$ —未掺外加剂时推定的满足实际坍落度要求的每立方米混凝土用水量（kg），以表5.2.1-2中90mm坍落度的用水量为基础，按每增大20mm坍落度相应增加5kg用水量来计算，当坍落度增大到180mm以上时，随坍落度相应增加的用水量可减少。

β —外加剂的减水率（%），应经混凝土试验确定。

5.2 用水量和外加剂用量

【外加剂用量】

5.2.3 每立方米混凝土中外加剂用量 (m_{a0}) 应按下列式计算:

$$m_{a0} = m_{b0} \beta_a$$

m_{a0} — 计算配合比每立方米混凝土中外加剂用量 (kg/m^3) ;

m_{b0} — 计算配合比每立方米混凝土中胶凝材料用量 (kg/m^3)
, 计算应符合本规程5.3.1条的规定;

β_a — 外加剂掺量 (%), 应经混凝土试验确定。

也可结合经验并经试验确定流动性或大流动性混凝土的外加剂用量和用水量。

5.3 胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量

【胶凝材料用量】

5.3.1 每立方米混凝土的胶凝材料用量 (m_{b0}) 应按下式计算，并应进行试拌调整，在拌合物性能满足的情况下，取经济合理的胶凝材料用量。

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

式中：

m_{b0} —计算配合比每立方米混凝土中胶凝材料用量 (kg/m^3)

m_{w0} —计算配合比每立方米混凝土中水的用量 (kg/m^3)

W/B —混凝土水胶比。

5 混凝土配合比计算

【矿物掺合料用量】

5.3.2 每立方米混凝土的矿物掺合料用量 (m_{f0}) 应按下列式计算:

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

式中:

m_{f0} ——计算配合比每立方米混凝土中矿物掺合料用量 (kg/m^3) ;

β_f ——矿物掺合料掺量 (%), 可结合本规程3.0.5条和5.1.1条的规定确定。

5 混凝土配合比计算

【水泥用量计算】

5.3.3 每立方米混凝土的水泥用量 (m_{c0}) 应按下式计算:

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

计算得出的计算配合比中的用量，还要在试配过程中调整验证。

5.4 砂率

5.4.1 砂率应根据骨料的技术指标、混凝土拌合物性能和施工要求，参考既有历史资料确定。

5.4.2 当缺乏砂率的历史资料可参考时，混凝土砂率的确定应符合下列规定：

- 1. 坍落度小于10mm的混凝土，其砂率应经试验确定。（干硬性混凝土）
- 2. 坍落度为10mm～60mm的混凝土，其砂率可根据粗骨料品种、最大公称粒径及水胶比按表5.4.1选取。
- 3. 坍落度大于60mm的混凝土，其砂率可经试验确定，也可在表5.4.1的基础上，按坍落度每增大20mm、砂率增大1%的幅度予以调整。

5.4 砂率

表5.4.1 混凝土砂率选取参照表

水胶比	卵石最大公称粒径（mm）			碎石最大公称粒径（mm）		
	10.0	20.0	40.0	10.0	20.0	40.0
0.40	26~32	25~31	24~30	30~35	29~34	27~32
0.50	30~35	29~34	28~33	33~38	32~37	30~35
0.60	33~38	32~37	31~36	36~41	35~40	33~38
0.70	36~41	35~40	34~39	39~44	38~43	36~41

说明：1、上表数值系中砂的选用砂率，对细砂或粗砂，可相应地减少或增大砂率。

2、当采用人工砂配制混凝土时，砂率可适当增大；

3、当只用一个单粒级粗骨料配制混凝土时，砂率应适当增大。

5.5 粗、细骨料用量

5.5.1 采用**质量法**计算粗、细骨料用量时，应按下列公式计算：

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

$$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{g0} + m_{s0}} \times 100\%$$

m_{g0} —计算配合比每立方米混凝土的粗骨料用量 (kg)

m_{s0} —计算配合比每立方米混凝土的细骨料用量 (kg)

β_s —砂率 (%) ；

m_{cp} —每立方米混凝土拌合物的假定质量 (kg)，可取2350kg～2450kg。

5 混凝土配合比计算

5.5.2 采用**体积法**计算粗、细骨料用量时，砂率应按公式(5.5.1-2)计算，粗细骨料用量应按下列公式计算

$$\frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{fo}}{\rho_f} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + 0.01\alpha = 1$$

$$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{g0} + m_{s0}} \times 100\%$$

上式中： ρ_c ——水泥密度 (kg/m^3)，可实测，也可取 $2900 \text{ kg}/\text{m}^3 \sim 3100 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；

ρ_f ——矿物掺合料密度 (kg/m^3)，可按GB/T 208实测；

ρ_g ——粗骨料的表观密度 (kg/m^3) ；

ρ_s ——细骨料的表观密度 (kg/m^3) ；

ρ_w ——水的密度 (kg/m^3)，可取 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；

β_s ——砂率 (%) ；

α ——混凝土的含气量百分数。在不使用引气剂或引气型外加剂时， α 可取 1。

在混凝土配合比设计过程中，施工要求的坍落度主要用于控制（ ）。

- ☒ A 混凝土的流动性
- ☐ B 混凝土凝结时间
- ☐ C 用水量
- ☐ D 混凝土早期强度

进行混凝土配合比设计时，确定水胶比的根据是（ ）。

- ①强度 ②和易性 ③耐久性 ④坍落度
⑤骨料品种

- ☐ A ①④
- ☐ B ①⑤
- ☒ C ①③
- ☐ D ④⑤

【造价2014】关于混凝土配合比设计，说法正确的有（ ）。

- ☒ A 水胶比需根据粗骨料特性采用回归系数计算确定
- ☒ B 单位用水量可根据坍落度和骨料特性参照规程选用
- ☒ C 水泥用量不宜大于 $550\text{kg}/\text{m}^3$
- ☐ D 砂率可直接用重量法或体积法确定
- ☐ E 粗细骨料的用量可直接按规程规定选用

某材料试验室有一张混凝土用量配方，数字清晰为**1 : 0.61 : 2.50 : 4.45**，而文字模糊，下列哪种经验描述是正确的（ ）。

- ☐ A 水：水泥：砂：石
- ☒ B 水泥：水：砂：石
- ☐ C 砂：水泥：水：石
- ☐ D 水泥：砂：水：石

【例】普通混凝土配合比设计

【工程要求】

某工程的预制钢筋混凝土梁（不受风雪影响）。

混凝土设计强度等级为**C35**。

施工要求坍落度为**75~90mm**（混凝土由机械搅拌，机械振捣。）

该施工单位无历史统计资料。

【采用的材料】

- 普通水泥：42.5(无实测强度)，密度 $\rho_c=3.1\text{kg/m}^3$ ；
- II级粉煤灰：密度 2.20g/cm^3 ，掺量20%；
- 中砂：河砂，表观密度 $=2.63\text{g/cm}^3$ ；堆积密度 $=1460\text{kg/m}^3$ ；
- 碎石，表观密度 $=2.66\text{g/cm}^3$ ，堆积密度 $=1510\text{kg/m}^3$ ；
- 最大粒径为40mm；
- 减水剂：萘系，减水率20%，掺量1%（胶凝材料重）；
- 自来水。

-
- ①设计该混凝土的配合比（按干燥材料计算）。
 - ②施工现场砂含水率**3%**，石含水率**1%**，求施工配合比

①计算配制强度 ($f_{cu,o}$)

□查表，当混凝土强度等级为C35时，

□ $\sigma=5.0\text{MPa}$ ，则试配强度 $f_{cu,o}$ 为：

□ $f_{cu,o}=35 + 1.645 \times 5.0=43.2$ (MPa)

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma$$

混凝土强度标准值	$\leq\text{C20}$	C25~C45	C50~C55
Σ	4.0	5.0	6.0

②计算水胶比（W/B）

□ 【无水泥实测强度】

□ 查表得42.5水泥富余系数为1.16，则水泥强度为

$$\begin{aligned}f_{ce} &= \gamma_c f_{ce,g} \\ &= 1.16 \times 42.5 = 49.3 \text{MPa}\end{aligned}$$

水泥强度等级	32.5	42.5	52.5
富余系数	1.12	1.16	1.10

②计算水胶比（W/B）

□ 【粉煤灰掺量为20%】

□ 查表确定粉煤灰影响系数为0.8，则胶凝材料强度为

$$f_b = \gamma_f \gamma_s f_{ce} = 0.8 \times 49.3 = 39.4 MPa$$

种类 掺量（%）	粉煤灰影响系数 γ_f	粒化高炉矿渣粉影响系数 γ_s
0	1.00	1.00
10	0.85~0.95	1.00
20	0.75~0.85	0.95~1.00
30	0.65~0.75	0.90~1.00
40	0.55~0.65	0.80~0.90
50	——	0.70~0.85

②计算水胶比（W/B）

- 已知胶凝材料强度 $f_{ce}=39.4\text{MPa}$;
- 所用粗骨料为碎石，查表，
- 回归系数 $\alpha_a=0.53$ ， $\alpha_b=0.20$ 。
- 按下式计算水胶比W/B:

$$\frac{W}{B} = \frac{\alpha_a f_B}{f_{cu,o} + \alpha_a \cdot \alpha_b \cdot f_B}$$

水胶比还要满足耐久性要求

$$= \frac{0.53 \times 39.4}{43.2 + 0.53 \times 0.20 \times 39.4} = \frac{20.882}{47.3764} = 0.44$$

粗骨料品种 系数	碎石	卵石
α_a	0.53	0.49
α_b	0.20	0.13

③确定单位用水量 (W_0)

□该混凝土所用碎石最大粒径为40mm，坍落度要求为75~90。

□查表，取 $W_c=195\text{kg}$ 。

□考虑到减水剂的作用，
$$m_{w0} = m_{w01}(1 - \beta)$$

□实际用水量 m_{w0} 为：
$$= 195 \times (1 - 20\%) = 156\text{kg}$$

拌合物稠度		卵石最大公称粒径 (mm)				碎石最大公称粒径 (mm)			
项目	指标	10.0	20.0	31.5	40.0	16.0	20.0	31.5	40.0
坍落度	10~30	190	170	160	150	200	185	175	165
	35~50	200	180	170	160	210	195	185	175
	55-70	210	190	180	170	220	205	195	185
mm	75~90	215	195	185	175	230	215	205	195

④计算胶凝材料用量 (m_b 、 m_c 、 m_f)

$$m_{B0} = \frac{m_{W0}}{W/B} = \frac{156}{0.44} = 354kg$$

□其中，粉煤灰用量（粉煤灰掺量为20%）

$$m_{f0} = m_{b0}\beta_f = 354 \times 20\% = 71kg$$

□水泥用量

$$m_{c0} = m_{b0} - m_{f0} = 354 - 71 = 283kg$$

□水泥用量还应满足耐久性要求

计算减水剂量

$$m_{a0} = m_B \beta_a = 354 \times 1\% = 3.54kg$$

⑤确定砂率 (β_s)

- 该混凝土所用碎石最大粒径为40mm,
- 计算出水胶比为0.44。
- 查表, 取 $\beta_s=32\%$ 。

水胶比	卵石最大公称粒径 (mm)			碎石最大公称粒径 (mm)		
	10.0	20.0	40.0	10.0	20.0	40.0
0.40	26~32	25~31	24~30	30~35	29~34	27~32
0.50	30~35	29~34	28~33	33~38	32~37	30~35
0.60	33~38	32~37	31~36	36~41	35~40	33~38
0.70	36~41	35~40	34~39	39~44	38~43	36~41

$$\begin{cases} m_{f0} + m_{c0} + m_{g0} + m_{s0} + m_{w0} = m_{cp} \\ \beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{g0} + m_{s0}} \times 100\% \end{cases}$$

假定每立方米混凝土质量 $m_{cp}=2400\text{kg}$ （忽略了减水剂）

$$\begin{cases} 71 + 283 + m_{g0} + m_{s0} + 156 = 2400 \\ 32\% = \frac{m_{s0}}{m_{g0} + m_{s0}} \times 100\% \end{cases}$$

⑥计算粗,细骨料用量_重量法

- 解得砂、石用量分别为
- $m_s=605\text{kg}$, $m_g=1286\text{kg}$ 。
- 按重量法算得该混凝土基准配合比:
- 胶凝材料: 砂: 石: 水: 减水剂

$$\begin{aligned} & m_B : m_s : m_g : m_w : m_a \\ & = 354 : 605 : 1286 : 156 : 3.54 \\ & = 1 : 1.17 : 3.63 : 0.44 : 0.10 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \frac{m_{f0}}{\rho_f} + \frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + 0.01\alpha = 1 \\ \beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{g0} + m_{s0}} \times 100\% \end{cases}$$

代入砂、石、水泥、水的表观密度，取 $\alpha=1$

$$\begin{cases} \frac{71}{2.2 \times 10^3} + \frac{283}{3.1 \times 10^3} + \frac{m_{g0}}{2.66 \times 10^3} + \frac{m_{s0}}{2.63 \times 10^3} + \frac{156}{1 \times 10^3} + 0.01 \times 1 = 1 \\ 32\% = \frac{m_{s0}}{m_{g0} + m_{s0}} \times 100\% \end{cases}$$

计算略，其他同质量法

第4章 水泥混凝土

Chapter4 Cementing Concrete

4.6 其它混凝土简介

4.6 Introduction of different concretes

4.6 其它混凝土简介

4.6.1 轻质混凝土 (light-weight concrete)

凡干表观密度小于 1950kg/m^3 的混凝土统称为**轻质混凝土**。

轻质混凝土的性能特点：

轻质混凝土与普通混凝土相比，具有表观密度小、保温性能好、抗震与抗裂能力强、易于加工等性能优点，但轻质混凝土的变形较大、成本较高。

根据所用原材料及制造方法不同，轻质混凝土分为**三类**：

轻骨料混凝土

多孔混凝土

大孔混凝土

4.6.1 轻质混凝土

1. 轻骨料混凝土

用堆积密度分别小于 1000 kg/m^3 、 1200 kg/m^3 的轻粗、细骨料和水泥配制而成的混凝土称为**轻骨料混凝土**。

(1) 轻骨料的来源

①天然多孔岩石加工而成的天然轻骨料（浮石、火山渣等）



天然浮石



火山渣

4.6.1 轻质混凝土

②地方材料加工成的人造轻骨料（如页岩陶粒、膨胀珍珠岩等）

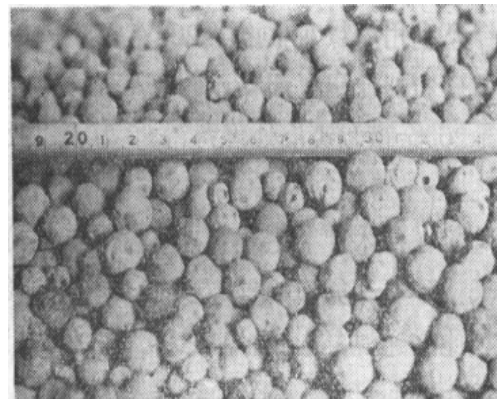


页岩陶粒



膨胀珍珠岩

③工业废渣为原料加工成的工业废渣轻骨料（粉煤灰陶粒、膨胀矿渣等）



粉煤灰陶粒



膨胀矿渣

4.6.1 轻质混凝土

轻骨料混凝土**强度等级**（13个）：CL5.0、CL7.5、CL10、CL15、CL20、CL25、CL30、CL35、CL40、CL45、CL50、CL55和CL60。

轻骨料混凝土**密度等级**（14个）：600～1900 kg/m³。

（2）轻骨料混凝土性能特点及用途

与普通混凝土相比，轻骨料混凝土的表观密度较小、保温隔热能力强、热膨胀系数较小、抗震和耐火性能好、弹性模量小、强度较低、收缩和徐变形大等。

基于上述性能特点，轻骨料混凝土在工程中主要有保温、结构保温和结构三方面用途，见表4-32。

4.6.1 轻质混凝土

轻骨料混凝土的用途

表 4-32

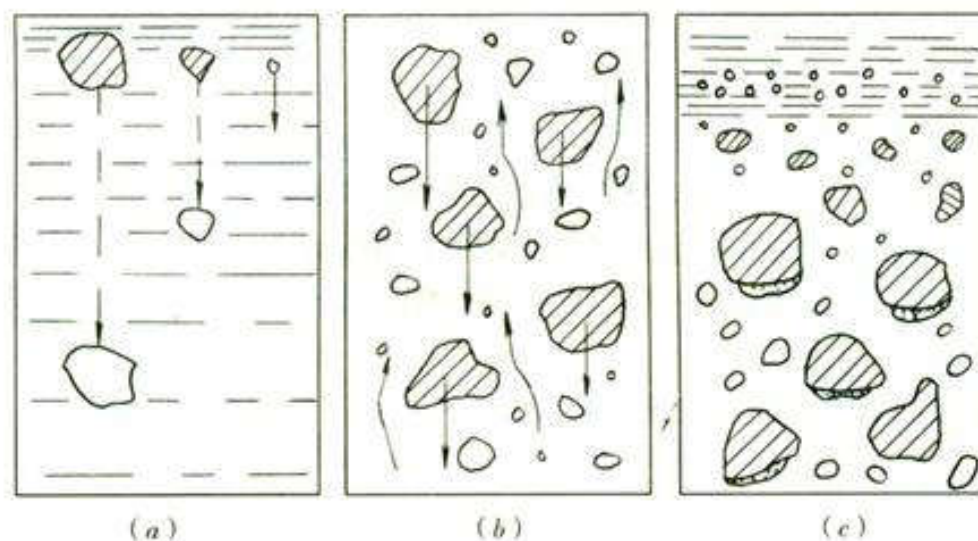
轻骨料混凝土名称	主要用途	强度等级 合理范围 (MPa)	密度等级 合理范围 (kg/m ³)
保温轻骨料混凝土	保温围护结构或热工构筑物	CL5.0	800
结构保温轻骨料混凝土	既承重又保温围护结构	CL5.0~CL15	800~1400
结构轻骨料混凝土	承重构件或构筑物	CL15~CL50	1400~1900

(3) 生产轻骨料混凝土时注意事项

①在进行轻骨料混凝土配合比设计时，应将轻骨料预湿并考虑其附加用水量，以防止拌合物在运输和浇筑过程中产生的坍落度损失。

4.6.1 轻质混凝土

②在生产轻骨料混凝土时，由于拌合物中粗骨料容易上浮，不易搅拌均匀，因此应采用强制式搅拌机作较长时间的搅拌，但成型时振捣时间不宜过长，以免造成分层。



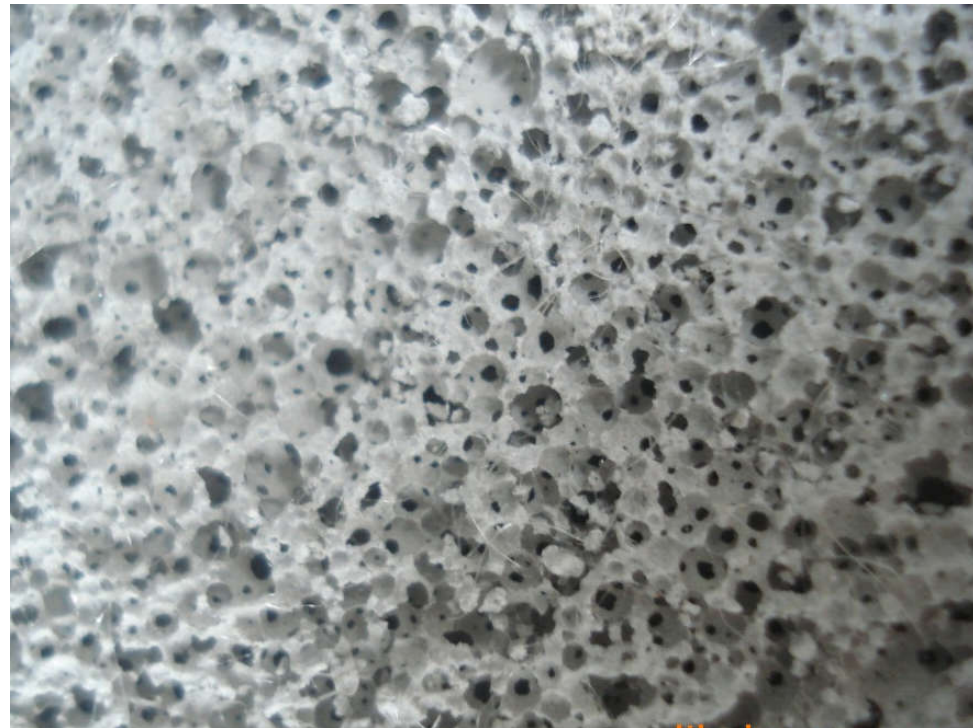
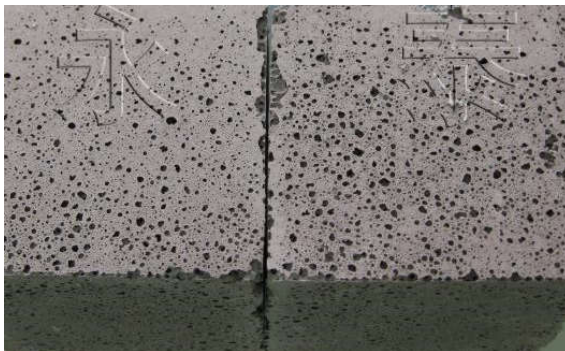
轻骨料混凝土的分层现象

③在养护轻骨料混凝土时，由于轻骨料吸水性强，因此应加强浇水养护，以防止混凝土早期干缩开裂。

4.6.1 轻质混凝土

2. 多孔混凝土 (porous concrete)

多孔混凝土是一种不含骨料且内部分布着大量细小封闭孔隙（孔隙率达60%以上）的轻质混凝土。按照孔隙的生成方式，多孔混凝土分为加气混凝土和泡沫混凝土。



4.6.1 轻质混凝土

加气混凝土是以硅质材料（如石英砂、矿渣、粉煤灰等）和钙质材料（如水泥、石灰）为主要材料，掺加发气剂（如铝粉、双氧水、碳化钙等），经加水搅拌、预养切割、蒸汽养护等工艺制成的多孔材料。

泡沫混凝土是通过机械办法在水中充分发泡后拌入胶凝材料中形成泡沫浆体，经养护硬化形成的多孔材料。

多孔混凝土的技术性能及用途

多孔混凝土 种类	表观密度 (kg/m ³)	抗压强度 (MPa)	导热系数 [W/ (m·K)]	性能特点及用途
加气混凝土	300~1000	0.5~7.5	0.09~0.17	多孔混凝土孔隙率大、自重小、保温性能好、吸水率高、强度较低、便于加工，常用作屋面板、保温和墙体砌筑材料
泡沫混凝土	300~500	0.5~0.7	0.05~0.14	

4.6.1 轻质混凝土

3. 大孔混凝土

大孔混凝土是由水泥、粗骨料和水拌制而成的轻质混凝土。

由于混凝土中不含细骨料（砂），因此称为**无砂大孔混凝土**。

根据所用骨料的品种，分为普通骨料制成的普通大孔混凝土和轻骨料制成的轻骨料大孔混凝土。

大孔混凝土的技术性能及用途

大孔混凝土 种类	表观密度 (kg/m^3)	抗压强度 (MPa)	性能特点及用途
普通大孔混凝土	1500~1900	3.5~10	大孔混凝土的导热系数小，保温与抗冻性能好，收缩变形小，常用作墙体小型空心砌块、砖和各种板材，也用于市政工程的滤水管和滤水板
轻骨料大孔混凝土	500~1500	1.5~7.5	

4.6.2 高性能混凝土 (high-performance concrete)

高性能混凝土是由高强混凝土发展而来的，二者非同一概念。

高强混凝土是一个随混凝土技术进步而不断变化的相对概念，现阶段是将强度等级 $\geq C60$ 的混凝土称为**高强混凝土**。随着混凝土强度的提高，其拉压强度之比将会降低，脆性相对增大，自收缩和干缩变形明显，并易产生裂缝。因此，在混凝土高强化的同时，还应使混凝土具有高耐久性、高体积稳定性和优良的和易性，即所谓的**高性能混凝土**。

目前，配制高性能混凝土的主要措施见表4-33。高性能混凝土不但强度高，而且其抗渗、抗冻、抗碳化、抗腐蚀等耐久性能好，在建筑、道路、桥梁、港口、海洋等工程中的应用越来越广泛。

4.6.2 高性能混凝土

配制高性能混凝土的主要措施

表 4-33

主要措施	名称与指标	
选用优质原材料	水泥	选用强度等级为42.5以上的硅酸盐水泥和普通水泥，单位立方米混凝土的水泥用量控制在500kg以内
	骨料	粗骨料宜用最大粒径小于25mm、强度大于1.2倍混凝土强度、针片状含量小于5%的洁净碎石；细骨料宜用细度模数大于2.6、级配良好的洁净河砂和人工砂
	矿物掺合料	掺加火山灰活性高的硅粉（5%~10%）或磨细矿渣（20%~50%）、I级粉煤灰（20%~30%）、天然沸石粉（5%~15%）等
	外加剂	减水率大于20%的高效减水剂是配制高强高性能混凝土最常用的外加剂，也可同时掺入引气剂、缓凝剂、防水剂、防冻剂等
确定合理的配合比	单位立方米混凝土用水量120~160kg，胶凝材料总量500~600kg，水胶比小于0.4，砂率34%~44%	
采用合理的施工工艺	采用强制式搅拌机搅拌，泵送施工（坍落度18~22mm），高频振动	

4.6.3 纤维混凝土 (fiber concrete)

纤维混凝土是指以普通混凝土为基体，掺入各种有机、无机或金属的不连续短切纤维组成的纤维增强水泥基复合材料，也称为**纤维增强混凝土**。

在普通混凝土中加入适量的纤维之后，纤维对混凝土内部微裂缝的扩展起到阻止和抑制作用，从而使混凝土的抗拉、韧性、抗裂和抗疲劳性能得以提高。

常用的纤维有：钢纤维、碳纤维、玻璃纤维、石棉纤维、合成纤维等。按照掺加到混凝土中纤维的弹性模量大小，纤维混凝土分为高弹模纤维混凝土和低弹模纤维混凝土。

4.6.3 纤维混凝土



水溶性聚乙烯纤维



碳纤维



石棉纤维



玄武岩纤维



玻璃纤维



钢纤维

4.6.3 纤维混凝土

1. 高弹模增强纤维混凝土

钢纤维是最常用的高弹模纤维。钢纤维长度为直径的40~60倍时，纤维较容易均匀地分布于混凝土中，以直径或边长0.3~0.6mm、长度不超过40mm为宜，长度过短的钢纤维会使其丧失增强效果。异型或端部具有锚锭形状的纤维，有利于提高钢纤维与混凝土的粘结强度。



钢纤维

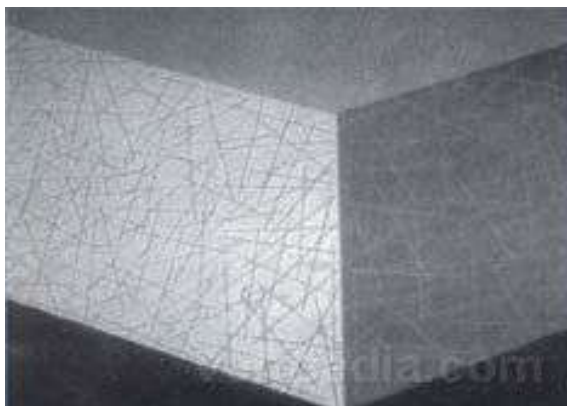
钢纤维既要有一定的硬度又要有一定的弹性，以使钢纤维在拌和过程中较少发生弯曲也不致因过硬而折断，从而更有效地提高钢纤维混凝土的相关性能。

4.6.3 纤维混凝土

钢纤维增强混凝土与普通混凝土的性能比较

表 4-34

项目	与普通混凝土比较	项目	与普通混凝土比较
抗压强度	1.0~1.3倍	抗剪强度	1.5~2.0倍
抗拉、抗弯强度	1.5~1.8倍	耐疲劳强度	有所改善
早期抗裂强度	1.5~2.0倍	抗冲击强度	5~10倍
耐破损性能	有所改善	耐热性	显著改善
延伸率	约2.0倍	抗冻融性能	显著改善
韧性	约40~200倍	耐久性	有所改善



钢纤维混凝土

钢纤维混凝土较普通混凝土的抗拉、抗弯、抗冲击等力学强度均有大幅度的提高，并具有良好的韧性、抗冲磨性和耐久性。

4.6.3 纤维混凝土

2. 低弹模纤维增强混凝土

低弹模纤维混凝土在国外已广泛应用于大面积薄构件，如地面、楼板、车道的防裂，公路路面和桥面的修补以及屋面、地下室、游泳池的刚性防水等。

常用的低弹模纤维有聚丙烯、尼龙、聚乙烯等。低弹模纤维一般都具有很高的变形性，且抗拉强度比混凝土高。在混凝土中掺加低弹模纤维可有效地控制由混凝土内应力产生的裂缝，减少混凝土早期收缩裂缝50%~90%，提高混凝土的抗渗性、耐久性以及混凝土的韧性、抗冻性、抗高温爆裂性。

低弹模纤维混凝土所具有的良好抗裂性不但取决于纤维的种类，还与纤维的长度与掺量有关。

4.6.4 聚合物混凝土 (polymer concrete)

聚合物混凝土是在混凝土中引入有机聚合物作为部分或全部胶结材料的一种新型混凝土。

1. 聚合物浸渍混凝土 (PIC)

聚合物浸渍混凝土是干燥的硬化混凝土浸入有机单体中，再用加热或辐射的方法使渗入混凝土孔隙中的单体聚合，形成混凝土与聚合物为一体的聚合物浸渍混凝土。由于聚合物填充了混凝土内部的孔隙和微裂缝，提高了混凝土的密实度，所以聚合物浸渍混凝土的抗渗性、抗冻性、耐蚀性、耐磨性及强度均有明显提高。

聚合物浸渍混凝土造价高、工艺复杂，目前只是利用其强度高和耐久性好的特性，应用于一些特殊场合，如隧道衬砌、海洋构筑物（如海上采油平台）、桥面板制作等。

4.6.4 聚合物混凝土

2. 聚合物水泥混凝土 (PCC)

聚合物水泥混凝土（含砂浆）是利用聚合物乳液或水溶性聚合物为胶结材料而制成的一种混凝土，如用聚醋酸乙烯、橡胶乳液、甲基纤维素等水溶性代替普通混凝土中的部分水泥而引入混凝土，以提高混凝土和砂浆的密实度。

聚合物水泥混凝土的性能主要取决于聚合物的种类和掺量。聚合物水泥混凝土具有较高的抗弯和抗拉强度，抗拉弹模较低，收缩率较小，极限伸长率较大，抗裂性明显优于普通水泥混凝土和砂浆，且具有防水和抗氯离子渗透、抗冻融等良好的耐久性，它是一种性能优异的新型补强加固材料。

本章结束