

特别提醒：

1. 本书用 A4 纸打印，沿装订线装订。
2. 本书用于实验指导，可用于听课笔记，可记录实验数据。
3. 本书非上交实验室。

《道路工程材料》

实验指导书



第 _____ 组

姓名： _____

天津城建大学

目 录

实验室安全制度及注意事项·····	1
实验 1 石油沥青实验（石油沥青基本性能实验）·····	1
实验 2 车辙实验（沥青混合料马歇尔稳定度与车辙实验）·····	2
实验 3 普通混凝土实验（混凝土和易性与普通混凝土强度实验）·····	5
实验 4 配合比设计实验（混凝土配合比设计实验）·····	8

实验室安全制度及注意事项

特别提醒：

1. 对试验采用的仪器和设备，其工作原理和调试方法都应有一定了解后才能使用，实验时不准动用与实验无关的仪器设备，
2. 试验实践是培养学生动手能力的一个重要环节，因此每个学生都必须亲自动手，分工协作，共同努力完成试验。
3. 试验过程中，要以科学态度仔细观察和分析试验现象，如有异常现象应及时报告指导教师设法排除。
4. 严格遵守实验室有关设备使用的操作规程。

实验 1 石油沥青实验

（石油沥青基本性能试验）

1. 沥青针入度实验

1.1 原理：沥青的针入度以标准针在一定的载荷、时间及温度条件下垂直穿入沥青试样的深度表示，单位为 $1/10\text{mm}$ 。除非另行规定，标准针、针连杆与附加砝码的总质量为 $(100 \pm 0.05)\text{g}$ ，温度为 $(25 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ ，时间为 5s。

1.2 仪器：针入度仪、标准针、试样皿、恒温水浴、平底玻璃皿等。

1.3 实验步骤：

1.3.1 将已恒温到试验温度的试样皿放在平底玻璃皿中的三角支架上，用与水浴相同温度的水完全覆盖样品，将平底玻璃皿放置在针入度仪的平台上。慢慢放下针连杆，使针尖刚刚接触到试样的表面，调节针入度仪上的表盘读数归零。

1.3.2 启动计时装置，使标准针自由下落穿入沥青试样中，到规定时间标准针自动停止移动，此时表盘指针的读数即为试样的针入度，用 $1/10\text{mm}$ 表示。

1.3.3 同一试样至少重复测定三次，每一试验点的距离和试验点与试样皿边缘的距离都不得小于 10mm 。

1.4 试验结果：

表 1

试验项目	针入度试验结果			针入度平均值 ($1/10\text{mm}$)
	第 1 次 ($1/10\text{mm}$)	第 2 次 ($1/10\text{mm}$)	第 3 次 ($1/10\text{mm}$)	
针入度				

2 沥青延度试验

2.1 原理：沥青试件在 $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、拉伸速度 $5\text{cm/min} \pm 0.25\text{cm/min}$ 时，拉伸至断裂时的长度，以 cm 表示。

2.2 仪器：延度仪、模具、水浴、隔离剂、支撑板等。

2.3 实验步骤：

2.3.1 将试件按规定方法成型，放入水浴。

2.3.2 将模具两端的孔分别套在实验仪器的柱上，然后以一定的速度拉伸，直到试件拉伸断裂，测量试件从拉伸到断裂所经过的距离。

2.3.3 正常的试验应将试样拉成锥形或线形或柱形，直至在断裂时实际横断面面积接近于零或一均匀断面，取平行测定三个结果的平均值作为测定结果。

1.4 试验结果：

表 2

试验项目	延度试验结果			延度平均值 (cm)
	第 1 个试件 (cm)	第 2 个试件 (cm)	第 3 个试件 (cm)	
延度				

3. 沥青软化点试验（环球法）

3.1 原理：沥青的软化点是试样在测定条件下因受热而下坠达 25mm 时的温度，以℃表示。

3.2 仪器：铜肩环、钢球、钢球定位器、浴槽、环支撑架和支架、温度计等。

3.3 实验步骤：

3.3.1 试件按规定方法成型，将钢球夹住并置于定位器中，并将各仪器及温度计放于规定位置。

3.3.2 从浴槽底部加热使温度以 5℃ / min 恒定的速率上升，当两个试环的球刚触及下支撑板时分别记录温度计所显示的温度，取两个温度的平均值作为沥青的软化点。

3.4 试验结果：

表 3

试验项目	软化点试验结果		软化点平均值 (℃)
	第 1 环 (℃)	第 2 环 (℃)	
软化点			

4. 沥青牌号评定

《建筑石油沥青》(GB / T 494-2010) 规定：建筑石油沥青按针入度不同分为 10 号、30 号和 40 号三个牌号，技术要求见表 4。

表 4 建筑石油沥青技术要求

项目	质量指标			试验方法
	10 号	30 号	40 号	
针入度 (25℃, 100g, 5s) / (1 / 10mm)	10~25	26~35	36~50	GB / T 4509
延度 (25℃, 5cm / min) / cm 不小于	1.5	2.5	3.5	GB / T 4508
软化点 (环球法) / °C 不低于	95	75	60	GB / T 4507

5. 报告与结论：

内容：沥青针入度；延度；软化点；牌号。

实验 2 车辙实验

(沥青混合料马歇尔稳定度与车辙实验)

1. 沥青混合料物理指标测定

1.1 主要仪器设备：浸水天平。

1.2 实验步骤：

表观密度：用水中重法测定其表观密度，按下式计算，取 3 位小数。

$$\rho_s = \frac{m_a}{m_a - m_w} \rho_w$$

式中： ρ_s ——试件的表观密度（ g/cm^3 ）； m_a ——干燥试件的空气中质量（ g ）； m_w ——试件的水中质量（ g ）； ρ_w ——常温水的密度（ $\approx 1\text{g}/\text{cm}^3$ ）

表观密度试验记录：

试件编号	干燥试件的空气中质量 m_a (g)	试件的水中质量 m_w (g)	试件的表观密度 ρ_s (g/cm^3)	ρ_s 平均值 (g/cm^3)
1				
2				
3				

2. 沥青混合料马歇尔稳定度试验

2.1 主要仪器设备：天平、恒温水槽、马歇尔试验仪

2.2 实验步骤：

用卡尺测量试件直径和高度，将恒温水槽调节至要求的试验温度（ $60\pm 1^\circ\text{C}$ ），把试件置于已达规定温度的恒温水槽中保温 30~40min，再将试件取出置于马歇尔试验仪的下压头上，盖上下压头，然后装在加载设备上，将流值测定装置安装在导棒上，使导向套管轻轻地压住上压头。

自动控制型马歇尔稳定度测定仪

沥青混合料类型：I 型沥青混凝土；道路等级：行人道路

实验项目	试件编号			各项目 平均值	合格判断 (是或否)
	1	2	3		
单个试件的稳定度 MS (kN)					
单个试件的流值 FL (mm)					
单个试件的马歇尔模数 $T = \frac{MS}{FL}$ (kN/mm)					—

3. 沥青混合料车辙试验

3.1 目的与适用范围：

本方法适用于测定沥青混合料的高温抗车辙能力，供沥青混合料配合比设计时的高温稳定性检验使用，也可用于现场沥青混合料的高温稳定性检验。

试验温度为 60°C ，轮压为 0.7MPa ，计算动稳定度的时间原则上为试验开始后 45~60min 之间。

本方法适用于接 T0703 用轮碾成型机碾压成型的长 300mm、宽 300mm、厚 50~100mm 的板块状试件。

3.2 仪具与材料技术要求：

台秤、沥青混合料拌合机、轮碾成型机、车辙试验机（主要由试件台、试验轮、加载装置、试模、试件变形测量装置、温度检测装置、恒温室组成）。

3.3 方法与步骤：

试验轮接地压强测定：测定在 60°C 时进行，在试验台上放置一块 50mm 厚的钢板，其上铺一张毫米方格纸，上铺一张新的复写纸，以规定的 700N 荷载后试验轮静压复写纸，即可在方格纸上印出轮压面积，并由此求接地压强。若压强不符合 $0.7\pm 0.05\text{MPa}$ 时，荷载应予适当调整。

用轮碾成型机碾压成型长 300mm、宽 300mm、厚 50~100mm 的板块状试件。将混合料在烘箱里加热到拌和温度以上 10°C 左右备用，石油沥青拌和温度控制在 $130\sim 160^\circ\text{C}$ 。

将预热的试模从烘箱中取出，装上试模框架，将拌和好的全部沥青混合料用小铲稍加拌和后均匀地沿试模由边至中按顺序转圈装入试模，中部要略高于四周。

取下试模框架，用预热的小型击实锤由边至中转圈夯实一遍，整平成凸圆弧形，在表面铺一张裁好尺寸的普通纸。

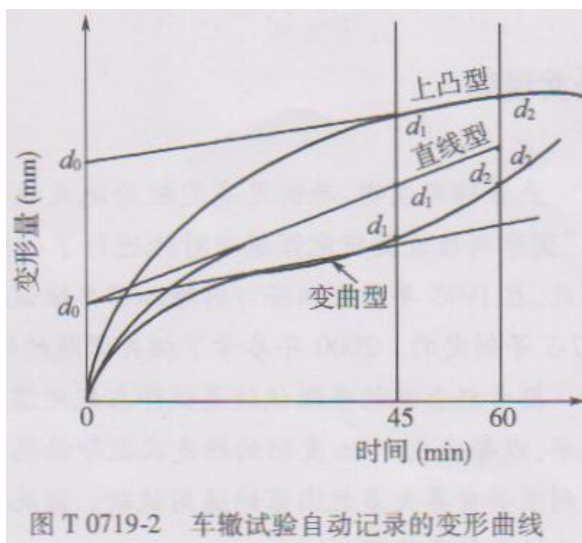
成型前将碾压轮预热至 100℃ 左右；然后，将盛有沥青混合料的试模置于轮碾机的平台上，轻轻放下碾压轮，调整总荷载为 9kN (线荷载 300N / cm)。

启动轮碾机，先在一个方向碾压 2 个往返 (4 次)；卸荷；再抬起碾压轮，将试件调转方向；再加相同荷载碾压至马歇尔标准密实度 100% ± 1% 为止。试件正式压实前，应经试压，测定密度后，确定试件的碾压次数。对普通沥青混合料，一般 12 个往返 (24 次) 左右可达要求 (试件厚为 50mm)。

压实成型后，揭去表面的纸，用粉笔在试件表面标明碾压方向，连同试模一起存常温条件下放置的时间不少于 12h。

将试件连同试模一起，置于已达到试验温度 60℃ ± 1℃ 的恒温室中，保温不少于 5h，也不得超过 12h。在试件的试验轮不行走的部位上，粘贴一个热电偶温度计 (也可在试件制作时预先将热电偶导线埋入试件一角)，控制试件温度稳定在 60℃ ± 0.5℃。

将试件连同试模移置于轮辙试验机的试验台上，试验轮在试件的中央部位，其行走方向须与试件碾压或行车方向一致。开动车辙变形自动记录仪，然后启动试验机，使试验轮往返行走，时间约 1h，或最大变形达到 25mm 时为止。试验时，记录仪自动记录变形曲线 (图 T0719-2) 及试件温度。



从图 T0719-2 上读取 45min (t_1) 及 60min (t_2) 时的车辙变形 d_1 及 d_2 ，准确至 0.01mm。

当变形过大，在未到 60min 变形已达 25mm 时，则以达到 25mm (d_2) 的时间为 t_2 ，将其前 15min 为 t_1 ，此时的变形量为 d_1 。

3.4 试验结果：

沥青混合料试件的动稳定度按下式计算。

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{(d_2 - d_1)} \times C_1 \times C_2$$

式中：DS —— 沥青混合料的动稳定度，次/mm；

d_1 —— 对应于时间 t_1 (一般为 45min) 的变形量，mm；

d_2 —— 对应于时间 t_2 (一般为 60min) 的变形量，mm；

C_1 —— 试验机类型系数，曲柄连杆驱动加载轮往返运行方式为 1.0；

C_2 —— 试件系数，试验室制备宽 300mm 的试件为 1.0；

N —— 试验轮往返碾压速度，通常为 42 次 / min。

公路类型 城市主干路； 试验轮接地压强 _____ (MPa)，试验温度 _____ (°C)

试验项目	试验结果
t_1 (min)	
t_2 (min)	
d_1 (mm)	
d_2 (mm)	
C_1	
C_2	
N (次 / min)	
$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{(d_2 - d_1)} \times C_1 \times C_2$ (次/mm)	
合格判断 (是或否)	

4. 标准与规范：

《沥青路面施工及验收规范》(GB50092-1996) 第 7.3.3 条规定：经配合比设计确定的各类沥青混凝土混合料的技术指标应符合表 7.3.3 的规定。

热拌沥青混合料马歇尔试验技术指标 (节选) 表 7.3.3

试验项目	沥青混合料类型	主干路	其他道路	行人道路
击实次数 (次)	I 型沥青混凝土	两面	两面	两面各 35
稳定度 (kN)	I 型沥青混凝土	>	>	>3.0
流值 (0.1mm)	I 型沥青混凝土	~	~	20~50

(机械式：启动加载设备，当试件荷载达到最大值的瞬间 (压力环百分表进程 > 0.22mm)，取下流值计，同时读取压力环中百分表读数和流值计的流值读数)

第 7.3.4 条规定：对用于高速公路、一级公路和城市快速路、主干路沥青路面的上面层和中面层的沥青混凝土混合料进行配合比设计时，应通过车辙试验机对抗车辙能力进行检验。在温度 60°C、轮压 0.7MPa 条件下进行车辙试验的动稳定度，对高速公路和城市快速路不应小于 800 次/mm，对一级公路及城市主干路不应小于 600 次/mm。

4. 报告与结论

内容：表观密度；车辙试验沥青混合料的动稳定度及合格判断；马歇尔稳定度测定仪测试的各项平均值；马歇尔稳定度测定仪测试的各项平均值及合格判断。

实验 3 普通混凝土实验

(混凝土和易性与普通混凝土强度试验)

1. 实验目的

- 1.1 掌握普通混凝土计算配合比的试拌方法。
- 1.2 掌握和易性的测定、调整技能并测出混凝土的实际表观密度，据此计算出基准配合比。

1.3 掌握混凝土抗压强度的测定方法。

2. 主要仪器设备

搅拌机。磅秤。拌铲、拌板、钺刀、直尺、量筒、捣棒、坍落度筒。试模：内壁边长为 $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$ 或 $100 \times 100 \times 100 \text{mm}$ 的立方体金属试模或塑料试模。

3. 实验内容

3.1 设计要求：

混凝土设计强度等级：_____；设计坍落度（mm）：_____；

计算水胶比：_____；砂率（%）：_____。

3.2 试验方法及结果

计算配合比 (每 1m^3 混凝土材料用量)	水泥 (kg)	砂子 (kg)	石子 (kg)	水 (kg)

7 升 (0.007m^3) 拌合物材料用量	$C_{\text{拌}}$ (kg)	$S_{\text{拌}}$ (kg)	$G_{\text{拌}}$ (kg)	$W_{\text{拌}}$ (kg)

坍落度量测：用脚踩住筒两边的脚踏板，使坍落度筒在装料时保持位置固定。将混凝土拌和物用铁锹分三次装入筒内，使捣实后每层高度约为筒高的 $1/3$ 。每层用捣棒振捣 25 次。顶层振捣后，刮去多余的混凝土，并用抹刀抹平。提起坍落度筒后，量测筒高与坍落后混凝土试体最高点之间的高度差，即为该混凝土拌合物的坍落度值，坍落度值以 mm 为单位。从开始装料到提起坍落度筒的整个过程应不间断地进行，并应在 150s 内完成。

坍落度量测结果	第 1 次量测 (mm)	第 2 次量测 (mm)	平均值 (mm)

粘聚性检查：用捣棒在已坍落的混凝土锥体侧面轻轻敲打，此时若锥体逐渐下沉，则表明粘聚性良好；若锥体倒塌、部分崩裂或出现离析现象，则表明粘聚性不好。

保水性检查：将坍落度筒提起后，如拌合物底部无稀水泥浆或仅有少量稀浆析出，则表明保水性良好；如底部有较多的稀水泥浆析出，锥体部分也因失浆而骨料外露，则表明保水性能不好。

检查项目	现象描述与结果
粘聚性检查	
保水性检查	

配合比调整原则：按计算的配合比首先应按上述步骤进行试拌以检查拌合物的性能，当试拌得出的拌合物坍落度不能满足要求或粘聚性和保水性能不好时，应进行调整。计算水胶比宜保持不变，通过调整配合比其他参数，使混凝土拌合物性能符合设计和施工要求，然后修正计算配合比，提出试拌配合比。

混凝土拌合物不良状态	调整方法
坍落度小于设计要求，粘聚性和保水性良好	保持水胶比不变，增加水泥浆用量，相应减少砂石用量（砂率不变）
坍落度大于设计要求，粘聚性和保水性良好	保持水胶比不变，减少水泥浆用量，相应增加砂石用量（砂率不变）
坍落度符合设计要求，粘聚性和保水性不好	保持砂石的总量不变，增加砂率； 或保持水胶比不变，调整胶凝材料用量，相应调整砂石用量
砂浆含量过多	减少砂率（保持砂石总量不变，提高石子用量，减少砂用量）

3.3 试件成型(三块)：试件尺寸为 $150 \times 150 \times 150 \text{mm}^3$ 或 $100 \times 100 \times 100 \text{mm}^3$ 。

用试模法测出混凝土实际表观密度 $\rho_{\text{oh实}}$

试模质量 G_1 (kg)	试模+砼质量 G_2 (kg)	试模体积 V (m^3)	$\rho_{oh实} = \frac{G_2 - G_1}{V}$ (kg / m^3)

3.4 基准配合比计算:

$$C_{基} = \frac{C_{拌}}{C_{拌} + S_{拌} + G_{拌} + W_{拌}} \times \rho_{oh实}$$

$$S_{基} = \frac{S_{拌}}{C_{拌} + S_{拌} + G_{拌} + W_{拌}} \times \rho_{oh实}$$

$$G_{基} = \frac{G_{拌}}{C_{拌} + S_{拌} + G_{拌} + W_{拌}} \times \rho_{oh实}$$

$$W_{基} = \frac{W_{拌}}{C_{拌} + S_{拌} + G_{拌} + W_{拌}} \times \rho_{oh实}$$

∴基准配合比为:

3.5 抗压强度测定:

试件标准养护温度 20℃±2℃; 相对湿度 95%以上; 实际龄期 n 天; 标准龄期 28 天; 加荷速度 连续均匀加荷。

(计算说明: 混凝土强度等级 < C60 时, 用非标准试件测得的强度值均应乘以尺寸换算系数, 其值为对 200mm×200mm×200mm 试件为 1.05; 对 100mm×100mm×100mm 试件为 0.95。标准试件 150mm×150mm×150mm 的尺寸换算系数为 1。

三个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值 (精确至 0.1MPa); 三个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时, 则把最大及最小值一并舍除, 取中间值作为该组试件的抗压强度值; 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的 15%, 则该组试件的试验结果无效。

参照 JGJ / T 15-2008 《早期推定混凝土强度试验方法标准》: $\frac{f_{28}}{f_n} = \frac{\lg_{28}}{\lg_n}$, 则

$f_{28} = f_n \times \frac{\lg_{28}}{\lg_n}$, 式中 f_{28} 为 28 天龄期时混凝土抗压强度, f_n 为 n 天龄期时混凝土抗压强度, n≥3)。

编号	受压面积 A (mm^2)	最大破坏荷载 (n 天龄期) P (N)	尺寸换算 系数	单块抗压强度 $f = \frac{P}{A} \times \text{系数}$ (MPa)
1				
2				
3				
该组混凝土实际 n 天龄期抗压强度				

4. 报告与结论:

内容: 实际 n 天龄期混凝土抗压强度: _____ (MPa)。

推定 28 天龄期混凝土抗压强度: _____ (MPa)。

推定 28 天龄期强度达到设计强度等级标准值: _____ (%)。

实验 4 配合比设计实验

(混凝土配合比设计实验)

混凝土的配合比设计是一个计算、试配、调整的复杂过程，大致可分为初步计算配合比、基准配合比、实验室配合比、施工配合比四个设计阶段。

初步配合比主要是依据设计的基本条件，参照理论和大量试验提供的参数进行计算，得到基本满足强度和耐久性要求的配合比；

基准配合比是在初步计算配合比的基础上，通过实配、检测，进行工作性的调整，对配合比进行修正；

实验室配合比是通过调整水灰比的微量调整，在满足设计强度的前提下，确定一水泥用量最少的方案，从而进一步调整配合比；

施工配合比是考虑实际砂、石的含水对配合比的影响，对配合比最后的修正，是实际应用的配合比。

总之，配合比设计的过程是一逐步满足混凝土的强度、工作性、耐久性、节约水泥等设计目标的过程

1. 实验目的

掌握混凝土配合比设计方法及调整方法，并能确定基准配合比。

2. 设计任务

给定混凝土设计强度等级、结构部位（钢筋混凝土构件等）、环境（干燥环境等）。

3. 施工条件

给定水泥强度等级，粗骨料品种、最大粒径、级配、表观密度，混凝土工作性（干硬性或塑性、坍落度），细骨料种类、级配、表观密度。

4. 设计步骤

第 1 步：确定混凝土配置强度： $f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma$ (公式 1)

(表 1)

混凝土强度等级 $f_{cu,k}$	低于 C20	C20~C35	高于 C35
(当施工单位不具有近期的同一品种混凝土强度资料时) 混凝土强度标准差 σ (MPa)	4.0	5.0	6.0

第 2 步：水灰比（当混凝土强度等级小于 C60 时）： $W/C = \frac{\alpha_a f_{ce}}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b f_{ce}}$ (公式 2)

(表 2)

石子品种	碎石	卵石
(当不具备试验统计资料时)		
回归系数 α_a	0.46	0.48
回归系数 α_b	0.07	0.33

(当水泥 28 天抗压强度实测值 f_{ce} 、水泥强度等级的富余系数 γ_c 缺乏实际统计资料时)

$f_{ce} = \gamma_c f_{ce,g}$ (公式 3)

(表 3)

水泥强度等级值 $f_{ce,g}$ (MPa)	32.5	42.5	52.5
水泥强度等级的富裕系数 γ_c	1.12	1.16	1.10

(表 4)

环境条件		结构物类别	最大水灰比			最小水泥用量(kg)		
			素混凝土	钢筋混凝土	预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土	预应力混凝土
1. 干燥环境		• 正常的居住或办公用房屋内部件	不作规定	0.65	0.60	200	260	300
2. 潮湿环境	无冻害	• 高湿度的室内部件 • 室外部件 • 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 • 高湿度且经受冻害的室内部件	0.55	0.55	0.55	250	280	300
3. 有冻害和除冰剂的潮湿环境		• 经受冻害和冰剂作用的室内和室外部件	0.50	0.50	0.50	300	300	300

第 3 步：每立方米混凝土的用水量 m_{w0} ：水灰比在 0.40~0.80 范围时，根据粗骨料的粒径及施工要求的混凝土拌合物稠度，其用水量可下表选取。

(表 5) 塑性混凝土的用水量 (kg/m^3)

拌合物稠度		卵石最大粒径 (mm)				碎石最大粒径 (mm)			
项目	指标	10	21	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	185	175
	55~70	210	190	180	170	220	205	195	185
	75~90	215	195	185	175	230	215	205	195

注：本表用水量系采用中砂时的平均取值。

第 4 步：每立方米混凝土的水泥用量 m_{c0} ：
$$m_{c0} = \frac{m_{w0}}{W/C} \quad (\text{公式 4})$$

第 5 步：混凝土的砂率 β_s ：

(表 6) 混凝土的砂率 (%)

水灰比 (W/C)	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

注：本表数值系中砂的选用砂率，本表中的砂率系指砂与骨料总量的重量比。

第 6 步：粗骨料和细骨料的确定：

重量法：
$$m_{c0} + m_{g0} + m_{s0} + m_{w0} = m_{cp} \quad (\text{公式 6})$$

$$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} \times 100\% \quad (\text{公式 7})$$

式中： m_{c0} ——每立方米混凝土的水泥用量（kg）；
 m_{g0} ——每立方米混凝土的粗骨料用量（kg）；
 m_{s0} ——每立方米混凝土的细骨料用量（kg）；
 m_{w0} ——每立方米混凝土的用水量（kg）；
 β_s ——砂率（%）；
 m_{cp} ——每立方米混凝土拌合物的假定重量（kg），其值可取 2350-2450kg。

$$\text{体积法: } \frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + 0.01\alpha = 1 \quad (\text{公式 8})$$

$$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} \times 100\% \quad (\text{公式 7})$$

式中： ρ_c ——水泥密度（kg/m³），可取 2900-3100kg/m³；
 ρ_g ——粗骨料的表观密度（kg/m³）；
 ρ_s ——细骨料的表观密度（kg/m³）；
 ρ_w ——水的密度（kg/m³），可取 1000kg/m³；
 α ——混凝土的含气量百分数，在不使用引气型外加剂时， α 可取为 1。

5. 混凝土配合比设计实例

5.1. 设计任务：混凝土设计强度等级：C20，钢筋混凝土构件、干燥环境。

5.2. 施工条件：水泥强度等级：32.5，粗骨料：碎石、级配合格、最大粒径 20mm、表观密度 2700kg/m³，塑性混凝土、坍落度 35~50，细骨料：中砂、级配合格、表观密度 2600kg/m³。

5.3. 设计步骤：

第 1 步：混凝土配制强度计算

公式及取值依据	计算及取值过程	计算结果
混凝土配制强度 $f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma$ (MPa) (公式 1)	20+1.645*4.0	28.23
混凝土强度标准差 σ 取值 (MPa) (表 1)	5.0	-----

第 2 步：水灰比计算

公式及取值依据	计算及取值过程	计算结果
水灰比 $W/C = \frac{\alpha_a f_{ce}}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b f_{ce}}$ (公式 2)	(0.46*36.4) / (28.23+0.46*0.07*36.4)	0.57
并核实是否满足最大水灰比要求 (表 4)	并符合最大水灰比要求	
其中： α_a (表 2)	0.46	-----
其中： α_b (表 2)	0.07	-----
其中： $f_{ce} = \gamma_c f_{ce,g}$ (公式 3)(表 3)	36.4	-----

第 3 步：每立方米混凝土的用水量确定

取值依据	取值过程
每立方米混凝土的用水量 m_{w0} (kg) (表 5)	195

第4步：每立方米混凝土的水泥用量计算

公式及取值依据	计算及取值过程	计算结果
每立方米混凝土的水泥用量 $m_{c0} = \frac{m_{w0}}{W/C}$ (公式4) 并核实是否满足最小水泥用量要求 (表4)	195/0.57 并符合最小水泥用量要求	<u>342</u>

第5步：混凝土的砂率确定

取值依据	取值过程
混凝土的砂率 β_s (%) (表6) (砂率对混凝土拌合物性能影响较大, 可调整范围略宽)	38

第6步：粗骨料和细骨料的计算 重量法 (通常采用):

公式及取值依据	计算及取值过程	计算结果
$m_{c0} + m_{g0} + m_{s0} + m_{w0} = m_{cp}$ (公式6)	$m_{s0} = (2400 - 195 - 342) \times 0.38$	$m_{s0} = \underline{708}$
$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} \times 100\%$ (公式7)	$m_{g0} = 2400 - 195 - 325 - 708$	$m_{g0} = \underline{1155}$
其中: m_{cp} (kg)	2400	-----

计算配合比 (初步配合比) $m_{c0} : m_{g0} : m_{s0} : m_{w0} = \underline{342 : 1155 : 708 : 195}$

体积法 (允许采用):

$\frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + 0.01\alpha = 1$ (公式8)	$342/3000 + m_{g0}/2700 + m_{s0}/2600 + 195/1000 + 0.01 \times 1 = 1$ $0.114 + 0.00037 m_{g0} + 0.00038 m_{s0} + 0.195 + 0.01 = 1$ $0.00038 m_{s0} = 0.681 - 0.00037 m_{g0}$ $m_{s0} = 1792 - 0.974 m_{g0}$	$m_{g0} = \underline{1129}$
$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} \times 100\%$ (公式7)	$m_{s0} = 0.38 m_{s0} + 0.38 m_{g0}$ $0.62 m_{s0} = 0.38 m_{g0}$ $m_{s0} = 0.38/0.62 \times m_{g0} = 0.6129 m_{g0}$	
	$1792 - 0.9737 m_{g0} = 0.6129 m_{g0}$ $m_{g0} = 1792 / (0.6129 + 0.9737)$	
	$m_{s0} = 1792 - 0.974 m_{g0}$ $m_{s0} = 1792 - 0.974 \times 1129$	$m_{s0} = \underline{692}$
其中: α	1	-----
其中: ρ_c (kg/m ³)	3000	-----

计算配合比 (初步配合比) $m_{c0} : m_{g0} : m_{s0} : m_{w0} = \underline{342 : 1129 : 692 : 195}$

6. 报告与结论 内容: 混凝土设计强度等级; 重量法计算配合比; 体积法计算配合比。