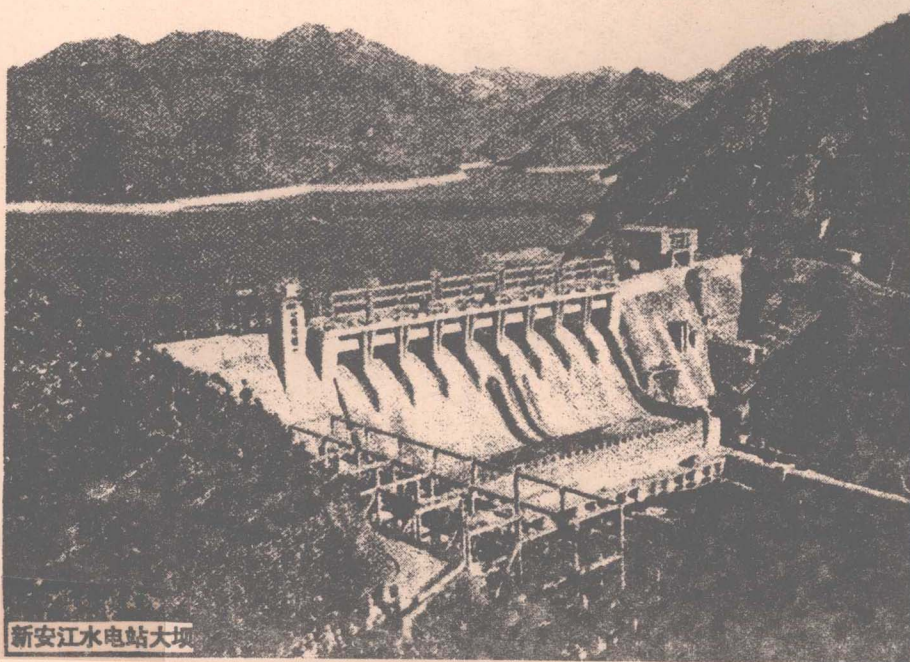


混 凝 土

技术研究论文集

戴镇潮 著

(赠阅·请指正)



一九九九 年十月

混 凝 土
技 术 研 究 论 文 集

戴镇潮 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

一九九九年十月

重庆

本论文集论述混凝土组成材料（骨料、水泥、粉煤灰等）的性质和选择、使用方法；混凝土成份配合的确定方法及有关性能；混凝土的取样方法，生产质量控制，强度标准，质量控制水平的评定指标；大坝混凝土的抗裂能力及防裂措施；碾压混凝土筑坝的问题等。

本论文集主要供混凝土技术工作者参考；也可供水利、电站、房建、道路、桥隧、港口、冶金……等工程的设计、施工、科研、教学人员参考。

本论文集共 204 千个字符，插图 100 幅，表 135 张。作者自费印刷 100 册，分赠同行，请予指正和勘误（勘误表附后）。指正意见和勘误表请寄作者。

作者住址：重庆市和平路蔡家石堡 24 号 11-3
邮政编码：400010

前 言

混凝土作为工程建设的主要建筑材料，用量十分巨大。混凝土技术工作者的任务是在保证质量的前提下，尽量降低成本，改进施工方法，加快工程进度。为此，需要研究混凝土组成材料的性能，选择优良的组成材料，采取合理的加工、使用方法；需要探索确定混凝土成分配合的科学方法和研究混凝土的性能，采用先进的施工方法；需要按照混凝土的特点，正确运用数理统计方法进行取样、质量控制和检验。作者在水利工程和水电站工程的工地上，从事混凝土试验研究，质量控制和检查及施工近四十年，根据积累的资料和遇到的问题，在前辈及同行研究成果的基础上，经思考研究，陆续写成一些论文，现整理编成本论文集，希望对促进混凝土技术的进步起一些作用。

本论文集共二十六篇，主要论点如下：

一、衡量砂子粗细的指标应采用细度模数，不应采用平均粒径。（第一篇）

二、砂子粗细和级配对混凝土强度没有影响，对坍落度有影响；当细度模数不变，除特殊的级配（间断级配、中间一级或二级含量过多）外，级配变化对坍落度影响很小。（第二篇）

三、砂子粗细不稳定时，最好是将偏粗的砂和偏细的砂混合成细度适中的砂子使用。（第三篇）

四、粗骨料最优级配尚无科学的方法求得，也无合理的指标来评定。目前多凭经验确定的较优级配为：最大粒径 $\sim 1/2$ 最大粒径的颗粒含量为50%左右。这时空隙率和表面积较小。（第五篇）

五、间断级配骨料优于连续级配骨料，可降低混凝土用水量和水泥用量，但易分离，然而却又容易振捣密实，所以又不怕分离，应创造条件加以推广应用。（第五篇）

六、粉煤灰活性高、需水性小、来源比较丰富，一般不需再磨细，优于其他混合材料。混凝土的混合材料应优先选用粉煤灰。（第八篇）

七、粉煤灰的水化热7天约为水泥的 $1/3$ ，28天约为水泥的 $1/2$ 。（第十篇）

八、掺粉煤灰混凝土的后期强度增长率高；90天后的抗渗性显著提高，且比不掺的高很多，故掺粉煤灰混凝土应尽量采用长的龄期。（第十一、十二篇）

九、由于已普遍掺用粉煤灰，大坝混凝土不一定非用大坝水泥（现称中热水泥）不可；远离水泥厂的大坝，建议购进熟料，在工地磨成水泥使用比较经济合理；低热微膨胀水泥适用于受约束部位，用于大坝基础约束区对防裂有一定作用，不能用于脱离基础约束的大坝上部。（第十七篇）

十、确定混凝土成分配合应以水灰比定则和最小用水量定则为指导；以强度与水灰比关系的试验结果，和不同粗细骨料比例的坍落度（或工作度）试验结果为依据，确定水灰比、用水量和最佳粗细骨料用量，就基本可消除经验因素，所得成分配合比较准确。（第十八篇）

十一、控制混凝土生产质量应事先控制好组成材料质量和保证配料称量准确。快速测定混凝土强度不能用来控制混凝土生产质量。（第二十一篇）

十二、混凝土的施工配制强度和验收强度应在设计强度的基础上按一次计量抽样检验方案确定。其中强度标准差应按以知计；并考虑抽样组数和抽样检验的两类错误。（第二十三篇）

十三、混凝土强度的标准差和变异系数都随强度变化，用来衡量质量控制水平时应考虑这一情况。为不受强度影响，可用水泥强度、灰水比和试验误差三者的变异系数分项来衡量质量控制水平；也可用三者变异系数平方和的方根来综合评定质量控制水平。（第二十四篇）

十四、大坝混凝土的抗裂能力不仅是抗拉能力，还应包括线胀系数、徐变（松弛系数）和水化温升。建议以“防裂温降”作为综合抗裂能力指标。防裂温降（℃）=7天水化绝热温升-极限拉伸/（线胀系数×松弛系数）。（第二十五篇）

十五、防止大坝混凝土裂缝的措施应采用：（1）尽量降低强度，延长龄期；（2）加冰拌和，适度预冷（不宜预冷骨料，深度预冷，因制冷规模大，冷量损失大）；（3）以水管冷却为主（冷量损失小，冷却效率高）；（4）加厚浇筑块（目前采用的薄块浇筑，因掺加粉煤灰和缓凝减水剂，早期水化热减小，自然冷却效果降低，且不利水管冷却）；（5）做好表面保护。（第二十五篇）

十六、碾压混凝土筑坝的主要问题是层间结合不良，不能防渗；以及骨料粒径小，成本高，不经济。解决的办法是做好迎水面防渗面板和简化碾压混凝土；或用低流态（常态）混凝土大面积薄层浇筑。（第二十六篇）

限于作者的实践和水平，只研究了混凝土技术的很小部分，研究的也不深，而且难免有错误之处，敬请读者指正。

最后，向与作者共同工作获得本论文集有关试验结果的同事们致以衷心的感谢。

目 录

第一篇 砂子粗细指标——细度模数与平均粒径的评价	1
一、平均粒径计算式的推导	1
二、平均粒径计算式的分析	3
三、细度模数计算式的推导	5
四、平均粒径与细度模数的比较分析	8
五、进一步的分析讨论	12
六、结论	14
第二篇 砂子粗细和级配对混凝土的影响	16
一、砂子粗细对混凝土的影响	17
二、砂子级配对混凝土的影响	20
三、结论	22
第三篇 粗细不稳定砂子的使用方法	23
一、按砂子细度模数不同, 分别选用不同的混凝土成分配合	23
二、按砂子细度模数调整混凝土成分配合	23
三、将粗砂和细砂混合成细度稳定的砂子	25
四、将砂子水力分级, 再配成细度模数稳定的砂子	26
五、结论	28
第四篇 链斗式采砂船水下采挖砂卵石的细砂流失量估算方法	30
第五篇 混凝土的粗骨料级配	34
一、最大粒径	34
二、分级尺寸	35
三、级配	36
四、间断级配	39
五、结论	43
第六篇 粗骨料的破碎、逊径问题及对策	44
一、粗骨料自由下落的破碎情况	44
二、粗骨料破碎、逊径颗粒对混凝土的影响	45
三、筛分产生逊径颗粒的原因及对策	46
四、超、逊径颗粒含量测定方法及标准的讨论	46
五、防止粗骨料破碎的措施	47

六、大骨料破碎后的对策.....	49
七、结论	50
第七篇 混合材活性指标的讨论和建议.....	51
第八篇 粉煤灰与其他混合材的比较.....	56
一、前言	56
二、需水性	57
三、干缩性	59
四、活性——对砂浆、混凝土强度的影响	60
五、其它性能.....	61
六、结论	62
第九篇 磨细粉煤灰的性能.....	64
一、磨细粉煤灰的特征及对水泥的影响	64
二、对混凝土的影响.....	67
三、结论	70
第十篇 粉煤灰的水化热.....	71
第十一篇 掺粉煤灰混凝土的后期强度.....	74
一、试验结果.....	74
二、主要规律.....	76
三、实际应用.....	77
第十二篇 掺粉煤灰混凝土的抗渗性.....	79
第十三篇 振动磨和球磨机磨细粉煤灰的试验对比.....	82
一、SM-30 型振动磨的构造、性能和工作原理.....	82
二、粉煤灰磨细试验结果.....	83
三、振动磨和球磨机磨细粉煤灰的比较	86
第十四篇 粉煤灰的一种输送方式——脉冲气力输送.....	87
一、脉冲气力输送的设施、工作原理和操作规程.....	87
二、主要参数选择.....	89
三、使用经验.....	92
第十五篇 粉煤灰的掺加方法.....	94
一、干法	94
二、湿法	96
三、浆法	97
四、综合评价.....	99

第十六篇 混凝土掺粘土的试验和应用	100
一、试验结果	100
二、实际应用	104
三、结论	106
第十七篇 大坝混凝土水泥选用的几个问题	107
一、水泥品种	107
二、水泥的供应方式	109
三、低热微膨胀水泥	110
四、结论	112
第十八篇 大坝混凝土成分配合的确定方法	113
一、技术要求	113
二、基本定则	118
三、主要规律	119
四、试验	123
五、计算和确定	126
六、掺加粉煤灰混凝土成分配合的确定方法	128
七、结论	129
第十九篇 混凝土强度经验式中的 a 和 b	130
一、 a 和 b 的物理意义	131
二、不同条件的 a 和 b	132
三、怎样准确求测 a 和 b	135
四、结论	136
第二十篇 湿筛和骨料最大粒径对混凝土试件抗压强度的影响	137
一、试验研究的目的	137
二、湿筛成不同最大粒径混凝土的试件抗压强度测定结果	138
三、不同最大粒径混凝土的试件抗压强度测定结果	140
四、测定结果比较和讨论	141
第二十一篇 混凝土生产质量控制与快速测强	143
一、混凝土生产质量控制	143
二、混凝土生产质量检验	147
三、快速测定混凝土强度	149
四、结论	151
第二十二篇 混凝土的取样问题	152
一、取样数量	152
二、取样方法	156

三、结论	159
第二十三篇 混凝土强度标准的讨论	160
一、设计标准	160
二、施工控制标准	164
三、验收标准	167
四、结论	177
第二十四篇 混凝土强度的标准差与变异系数及质量控制水平指标的探讨	179
一、几种不同观点	179
二、以混凝土强度经验式推算强度标准差和变异系数	181
三、施工现场和试验室的实测结果	189
四、讨论和建议	191
五、结论	194
第二十五篇 大坝混凝土的抗裂能力及防裂措施	196
一、大坝混凝土的抗裂能力	196
(一) 抗拉能力	196
(二) 徐变	202
(三) 线胀系数	203
(四) 水化温升	204
(五) 混凝土的综合抗裂能力及指标	204
(六) 综合抗裂能力指标——“防裂温降”的算例	206
(七) 混凝土抗裂能力的测定问题	207
二、大坝混凝土的防裂措施	207
(一) 提高混凝土的抗裂能力	207
(二) 降低坝块温度	209
(三) 表面保护	213
三、结论	215
第二十六篇 碾压混凝土筑坝存在的问题及解决办法	217
一、前言	217
二、碾压混凝土筑坝存在的问题	218
三、几种改进措施的评价	221
四、解决办法	223
五、结论	224

第一篇 砂子粗细指标——细度模数与平均粒径的评价

[内容提要] 本文推导了细度模数和平均粒径计算式的来源,比较和分析了两者反映砂子粗细变化的敏感性和准确性,证明细度模数是几何平均粒径的对数函数,有明确的物理意义,而且计算简便,和以筛孔尺寸的对数值为横坐标的筛分曲线图是配套使用的;平均粒径则由于基本假定前后矛盾,计算式中粗颗粒含量不起作用,不能正确反映砂子粗细的变化,而且计算繁琐。因此,衡量砂子粗细的指标应采用细度模数,不应采用平均粒径。

衡量砂子粗细的指标,对研究砂子的性能关系极大。1918年美国阿布仑(Duff.A.Abrams)提出用细度模数来衡量混凝土骨料(包括细骨料——砂子和粗骨料——石子)的粗细程度。由于细度模数的来源缺乏明确的介绍,一般往往认为细度模数虽然计算简便,但其物理意义不明确(主要是无名数,无计量单位的缘故),也不能反映砂子级配,在使用中常产生疑虑。1943年前苏联斯克拉姆塔耶夫(В.Г.Скрамтаев)提出用平均粒径来衡量砂子的粗细。平均粒径以毫米来度量,比无名数的细度模数似乎物理意义要明确些,但也不能将砂子级配表示出来。在实际应用中,平均粒径并没有能取代细度模数,相反,一般都仍坚持使用细度模数,而应用平均粒径的却越来越少。本文从推导平均粒径和细度模数的来源着手,比较和分析两者反映砂子粗细变化的敏感性和准确性,以评价优劣。

一、平均粒径计算式的推导

平均粒径亦称斯氏平均粒径,其计算有两个基本假定:一是各分级砂的平均粒径为上下两筛孔尺寸的算术平均值;二是以砂粒均呈理想的球体,计算混合砂平均粒径。另外,在计算式中不计0.15 mm以下的颗粒含量。

当砂子筛分用的筛孔尺寸由小至大为: $d_1=0.15\text{mm}$ 、 $d_2=0.3\text{mm}$ 、 $d_3=0.6\text{mm}$ 、 $d_4=1.2\text{mm}$ 、 $d_5=2.5\text{mm}$ 、 $d_6=5.0\text{mm}$,则各分级砂的平均粒径为:

$$0.15\text{mm}\sim 0.3\text{mm}\text{砂子的平均粒径 } d_{L1} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{(0.15 + 0.3)}{2} = 0.225 \text{ mm}$$

同理0.3~0.6mm砂子的平均粒径 $d_{L2}=0.45\text{mm}$

0.6~1.2mm砂子平均粒径 $d_{L3}=0.9\text{mm}$

1.2~2.5mm砂子平均粒径 $d_{L4}=1.85\text{mm}$

2.5~5.0mm砂子平均粒径 $d_{L5}=3.75\text{mm}$

令 γ 为砂子比重, 则各分级平均粒径的球形砂粒每颗重量(由小至大)相应为:

$$g_1 = \frac{1}{6} \gamma \pi d_{L1}^3$$

.....

$$g_5 = \frac{1}{6} \gamma \pi d_{L5}^3$$

又令 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 分别为筛孔尺寸0.15、0.3、0.6、1.2、2.5、5.0mm的筛余量, 则各分级砂的颗粒数(粒径为各分级平均粒径的球形体)计算如下:

$$0.15 \sim 0.3 \text{mm 砂子颗粒数 } n_1 = \frac{G_1}{\frac{1}{6} \gamma \pi d_{L1}^3}$$

$$0.3 \sim 0.6 \text{mm 砂子颗粒数 } n_2 = \frac{G_2}{\frac{1}{6} \gamma \pi d_{L2}^3}$$

$$0.6 \sim 1.2 \text{mm 砂子颗粒数 } n_3 = \frac{G_3}{\frac{1}{6} \gamma \pi d_{L3}^3}$$

$$1.2 \sim 2.5 \text{mm 砂子颗粒数 } n_4 = \frac{G_4}{\frac{1}{6} \gamma \pi d_{L4}^3}$$

$$2.5 \sim 5.0 \text{mm 砂子颗粒数 } n_5 = \frac{G_5}{\frac{1}{6} \gamma \pi d_{L5}^3}$$

各分级砂混合后, 平均粒径为 D_S 的球形砂粒每颗重量为:

$$\frac{1}{6} \gamma \pi D_S^3 = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5}{\frac{1}{6} \gamma \pi \left(\frac{G_1}{d_{L1}^3} + \frac{G_2}{d_{L2}^3} + \frac{G_3}{d_{L3}^3} + \frac{G_4}{d_{L4}^3} + \frac{G_5}{d_{L5}^3} \right)}$$

$$\text{即得 } D_S^3 = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5}{\frac{G_1}{d_{L1}^3} + \frac{G_2}{d_{L2}^3} + \frac{G_3}{d_{L3}^3} + \frac{G_4}{d_{L4}^3} + \frac{G_5}{d_{L5}^3}}$$

将上面已计算得的 d_{L1} 、 d_{L2} 、 d_{L3} 、 d_{L4} 、 d_{L5} 的数值代入, 则得斯氏平均粒径 D_S 的计算式如下:

$$D_S = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5}{11G_1 + 1.37G_2 + 0.171G_3 + 0.02G_4 + 0.0024G_5}} \text{ mm} \dots\dots\dots (1)$$

若以各级筛余百分率来计算, 则式(1)改为:

$$D_s = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{11P_1 + 1.37P_2 + 0.171P_3 + 0.02P_4 + 0.0024P_5}} \text{ mm} \dots\dots\dots (2)$$

式(2)中, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 分别为筛孔尺寸0.15、0.3、0.6、1.2、2.5、5.0mm的筛余百分率。

二、平均粒径计算式的分析

平均粒径计算存在三个问题:

1、分级砂平均粒径采用算术平均值, 和混合砂平均粒径采用球体平均粒径不一致

计算砂子平均粒径有多种方法。已见到的有三种, 即简易平均粒径、几何平均粒径、球体平均粒径。

简易平均粒径的计算为: 各分级砂的简易平均粒径为各分级上下两筛孔尺寸的算术平均值, 和斯氏平均粒径的第一个假定相同; 混合砂的简易平均粒径 D_L 为各分级砂的简易平均粒径的加权平均值, 即:

$$D_L = \frac{G_0 d_{L0} + G_1 d_{L1} + G_2 d_{L2} + G_3 d_{L3} + G_4 d_{L4} + G_5 d_{L5}}{G_0 + G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5} \text{ mm} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)中的 G_0 为0.15mm以下的颗粒含量。为简便起见, 假定这些颗粒的粒径均大于 $d_0=0.075\text{mm}$, 也即假定所有砂子的颗粒大于0.075mm。 d_{L0} 为该级颗粒的简易平均粒径, 即:

$$d_{L0} = \frac{(d_0 + d_1)}{2} = \frac{(0.075 + 0.15)}{2} = 0.1125 \text{ mm}$$

式(3)中的其他符号同前。

式(3)和式(1)迥然不同, 根本原因是计算假设和方法不同。

几何平均粒径的计算详见下节。

计算砂子球体平均粒径也应先计算各分级砂的球体平均粒径, 计算推导如下:

设砂粒均呈球体, 则每一颗砂粒重 g 为:

$$g = \frac{1}{6} \gamma \pi x^3$$

式中 γ ——砂粒比重;

x ——球体砂粒直径。

于是单位重量球体砂粒数 n 为:

$$n = \frac{1}{g} = \frac{6}{\gamma \pi x^3}$$

现取某一分级砂, 其上一筛孔尺寸为 x_u , 下一筛孔尺寸为 x_L ; 再设该分级砂大小颗粒均匀分布, 则这一分级砂中的不同粒径砂的单位

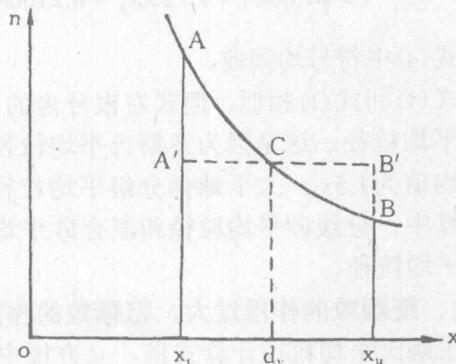


图1-1 单位重量的球体砂粒数 n 与粒径 x 的关系示意图

重量颗粒数呈连续曲线分布，如图1-1中的 $n \sim x$ 关系线ACB。

设图1-1中面积 $ABx_u x_L$ 与矩形面积 $A'B'x_u x_L$ 相等，则矩形 $A'B'x_u x_L$ 的高 $A'x_L$ 或 $B'x_u$ 即为这一分级砂粒径为平均值时的单位重量颗粒数； $A'B'$ 线与 $n \sim x$ 关系线的交点C的横坐标值 d_v 即为该分级砂的球体平均粒径，推算如下：

用积分法求得 $ABx_u x_L$ 的面积 M 为：

$$M = \int_{x_l}^{x_u} \frac{6}{\gamma \pi x^3} dx = \frac{6}{\gamma \pi} \int_{x_l}^{x_u} x^{-3} dx = \frac{3}{\gamma \pi} \left(\frac{1}{x_l^2} - \frac{1}{x_u^2} \right)$$

由于矩形 $A'B'x_u x_L$ 的面积亦等于 M ，所以线段 $\overline{Cd_v}$ 的长度为：

$$\overline{Cd_v} = \frac{M}{x_u - x_l} = \frac{3}{\gamma \pi (x_u - x_l)} \left(\frac{1}{x_l^2} - \frac{1}{x_u^2} \right)$$

$$\text{又 } \overline{Cd_v} = \frac{6}{\gamma \pi d_v^3}$$

于是得分级砂球体平均粒径 d_v 为：

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{2x_u^2 x_l^2}{x_u + x_l}}$$

一般，砂子筛分析用的上下筛孔尺寸之比常为2，即 $x_u = 2x_l$ ，则各分级砂球体平均粒径为：

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{8}{3}} x_l = 1.39 x_l$$

再按斯氏推导混合砂平均粒径的方法一样，求得混合砂的球体平均粒径 D_v 为：

$$D_v = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5}{13.8G_1 + 1.725G_2 + 0.216G_3 + 0.027G_4 + 0.0034G_5}} \text{ mm} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)中符号均同前。

式(4)和式(1)相似，但式右根号内的分母值式(4)比式(1)大，故球体平均粒径 D_v 小于斯氏平均粒径。这是因为在斯氏平均粒径计算中，各分级平均粒径取上下筛孔尺寸的算术平均值为 $1.5x_l$ ，大于球体分级平均粒径 $d_v = 1.39x_l$ 的缘故，由此可以看出，斯氏平均粒径计算中，分级砂平均粒径和混合砂平均粒径的计算方法不一致，使斯氏平均粒径大于球体平均粒径。

2、细颗粒的作用过大，粗颗粒的作用过小

在斯氏平均粒径计算式里，立方根中的分母，各分级颗粒含量(G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5)前面的系数，由细至粗约以 $1/8$ （即 2^{-3} ）递减。颗粒越细，在计算式中作用越大。粒

径0.6mm以上的颗粒含量，在计算式中几乎不起作用，可以忽略不计。在式(4)球体平均粒径计算式中也有同样情况，这是按球体来计算砂子平均粒径的必然结果。

3、未考虑0.15mm以下的颗粒

上面已分析，在斯氏平均粒径计算式中，颗粒越细其作用越大，因此没有考虑最细一级0.15mm以下的颗粒也是很大的缺陷。虽然在立方根中的分子中有所表现，但远没有完全表现出来，因此有些砂子的平均粒径值会出现反常现象，即出现错误的反映。为简便地考虑0.15mm以下的颗粒，假定所有砂子颗粒粒径均大于0.075mm，即 $d_0=0.075$ ，并设0.075~0.15mm的颗粒含量为 G_0 ，则斯氏平均粒径修正为：

$$D'_s = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{G_0 + G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5}{87.8G_0 + 11G_1 + 1.37G_2 + 0.171G_3 + 0.02G_4 + 0.0024G_5}} \text{ mm} \cdots \cdots (5)$$

式中 D'_s ——修正后的斯氏平均粒径；其他符号同前。

三、细度模数计算式的推导

细度模数，英文名Fineness Modulus，以 $F.M.$ 代表，是几何平均粒径（以 D_m 代表）的对数函数，即：

$$F.M. = 3.32 \lg D_m + 3.25 \cdots \cdots (6)$$

或称砂子几何平均粒径是细度模数的指数式函数，即：

$$D_m = 0.105 \times 2^{F.M.} \text{ (mm)} \cdots \cdots (7)$$

式(7)中0.105和2是不变的，所以细度模数 $F.M.$ 就代表几何平均粒径 D_m 。

按阿布仑提出细度模数采用的骨料筛分析用的筛孔尺寸（美国标准），由小至大为 $d_0=0.074\text{mm}$ 、 $d_1=0.149\text{mm}$ 、 $d_2=0.297\text{mm}$ 、 $d_3=0.59\text{mm}$ 、 $d_4=1.19\text{mm}$ 、 $d_5=2.38\text{mm}$ 、 $d_6=4.76\text{mm}$ 、 $d_7=9.52\text{mm}$ ……，以上下筛孔尺寸之比为2向上递增，则各分级几何平均粒径为：

$$d_{m0} = \sqrt{d_0 \times d_1} = \sqrt{0.074 \times 0.149} = 0.105 = 0.105 \times 2^0 \text{ mm}$$

$$d_{m1} = \sqrt{d_1 \times d_2} = 0.105 \times 2^1 \text{ mm}$$

$$d_{m2} = \sqrt{d_2 \times d_3} = 0.105 \times 2^2 \text{ mm}$$

$$d_{m3} = \sqrt{d_3 \times d_4} = 0.105 \times 2^3 \text{ mm}$$

$$d_{m4} = \sqrt{d_4 \times d_5} = 0.105 \times 2^4 \text{ mm}$$

$$d_{m5} = \sqrt{d_5 \times d_6} = 0.105 \times 2^5 \text{ mm}$$

$$d_{m6} = \sqrt{d_6 \times d_7} = 0.105 \times 2^6 \text{ mm}$$

.....

.....

$$d_{mn} = \sqrt{d_n \times d_{n+1}} = 0.105 \times 2^n \text{ mm}$$

以上各式与(7)比较, 可知各分级的细度模数由小至大为: 0、1、2、3、4、5、6、..... n 。

在计算等权数值的几何平均值时采用:

$$x_m = \sqrt{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_n}$$

式中 x_m ——几何平均值;

$x_1, x_2, x_3 \cdots x_n$ ——各单个数值;

n ——数值个数。

在计算不等权数值的几何平均值时采用:

$$x_m = \sqrt[{\sum_{i=1}^n z_i}]{x_1^{z_1} \cdot x_2^{z_2} \cdot x_3^{z_3} \cdots x_n^{z_n}}$$

式中 x_m ——几何平均值;

$x_1, x_2, x_3 \cdots x_n$ ——各单个数值;

$z_1, z_2, z_3 \cdots z_n$ ——各单个数值的方次(即“权”)

计算混合骨料的几何平均粒径时, 各分级的几何平均粒径相当于各单个数值, 各分级含量百分率 $P_0, P_1, P_2, P_3, \cdots P_n$ 相当于“权”, 则混合骨料的几何平均粒径 D_m 为:

$$D_m = \sqrt[{\sum_{i=0}^n P_i}]{d_{m0}^{P_0} \cdot d_{m1}^{P_1} \cdot d_{m2}^{P_2} \cdot d_{m3}^{P_3} \cdots d_{mn}^{P_n}}$$

设骨料全部大于0.074mm(实际上0.074mm以下的颗粒很少), 则上式中的 $(P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n) = 100\% = 1$; 再据前面计算得各分级的几何平均粒径 $d_{m0}, d_{m1}, d_{m2}, d_{m3}, \cdots d_{mn}$ 代入上式, 得混合骨料得几何平均粒径 D_m 为:

$$D_m = 0.105 \times 2^{(P_1 + 2P_2 + 3P_3 + \cdots + nP_n)} \text{ mm}$$

式中的指数 $(P_1 + 2P_2 + 3P_3 + \cdots + nP_n)$ 就是细度模数 $F.M.$, 于是得 $D_m = 0.105 \times 2^{F.M.}$ mm, 就是式(7)。

以上推导了细度模数和几何平均粒径的关系和计算式, 证明细度模数就代表平均粒径。这就充分说明, 细度模数是有明确的物理意义的。

一般规定, 粒径为4.76mm(近似为5mm)以下为砂子, 但实际上砂子中含有4.76mm以上颗粒。有关规范规定, 砂子中允许含有10%以下的4.76mm~9.52mm(近似为5~10mm)的颗粒, 所以砂子细度模数按下式计算:

$$F.M. = P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4P_4 + 5P_5 + 6P_6 \cdots \cdots (8)$$

式(8)可解释为,砂子细度模数是筛孔尺寸0.149mm至9.52mm间,各分级筛余百分率与相应各分级细度模数乘积之和。由表1-1则证明,砂子细度模数是筛孔尺寸为0.149mm至4.76mm各级筛子的累计筛余百分率之和。

表 1-1 砂子细度模数=累计筛余百分率之和的分析表

筛孔尺寸 (mm)	分计筛余百分率	累计筛余百分率
4.76	P_6	P_6
2.38	P_5	$P_6 + P_5$
1.19	P_4	$P_6 + P_5 + P_4$
0.59	P_3	$P_6 + P_5 + P_4 + P_3$
0.297	P_2	$P_6 + P_5 + P_4 + P_3 + P_2$
0.149	P_1	$P_6 + P_5 + P_4 + P_3 + P_2 + P_1$
累计筛余百分率之和 (即细度模数)		$6P_6 + 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + 1P_1$

按细度模数的定义,粒径0.074mm以上的砂子和粗骨料(石子)都可以用它作为衡量粗细的指标;同样,粒径小于0.074mm的材料,如粘土、水泥、粉煤灰,也可用它来衡量粗细,只不过这时细度模数为负值。

我国国家建筑工程总局标准JGJ52-79《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》及被引用的其他标准中的砂子细度模数的计算式为:

$$F.M. = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} \dots\dots\dots (9)$$

式(9)中的 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 A_6 分别为5.0、2.5、1.25、0.63、0.315、0.16mm(近似相当于本文前面的4.76、2.38、1.19、0.59、0.297、0.149mm)各筛的累计筛余百分率,与本文的分计筛余百分率 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 的关系为:

$$\begin{aligned} A_1 &= P_6 \\ A_2 &= P_6 + P_5 \\ A_3 &= P_6 + P_5 + P_4 \\ A_4 &= P_6 + P_5 + P_4 + P_3 \\ A_5 &= P_6 + P_5 + P_4 + P_3 + P_2 \\ A_6 &= P_6 + P_5 + P_4 + P_3 + P_2 + P_1 \end{aligned}$$

代入式(9)得:

$$F.M. = \frac{5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + 1P_1}{1 - P_6} \dots\dots\dots (10)$$

式(9)、式(10)与式(8)的差异,主要是式(9)、式(10)没有考虑5mm(4.76mm)以上的颗粒的作用,因此计算结果将偏小。实际上5mm以上的颗粒在砂子中将增加其粗细程度,计算细度模数时应加以考虑。前面已经证明,细度模数不仅适用于5mm以下的颗粒,也适用于5mm以上的颗粒,只要上下分级尺寸(筛孔尺寸)之比为2。而且5~10mm(4.76mm~9.52mm)颗粒的细度模数为6,比砂子中其他分级的细度模数都大,计算中不考虑它,细度模数计算结果必然偏小,特别是其含量较多时。只有当砂子中不含5mm以上的颗粒,即 $A_1=P_6=0$ 时,式(9)、(10)和式(8)的计算结果才相同。现举例计算结果列

于表1-2。

表 1-2

不同级配砂子，按式(8)和式(9)、 Φ 计算的细度模数值比较

砂子编号	级配特点	分计筛余 (%)						细度模数	
		P_6	P_5	P_4	P_3	P_2	P_1	按式(8)计算	按式(9) Φ 计算
1	5~10mm 含量较多, $P_6=10\%$	10	15	20	20	15	15	3.20	2.89
2	5~10mm 含量较少, $P_6=5\%$	5	10	20	30	20	10	3.00	2.84
3	5~10mm 含量很少, $P_6=1\%$	1	9	20	30	20	15	2.76	2.73
4	5~10mm 含量没有, $P_6=0\%$	0	9	20	30	20	15	2.75	2.75

以上说明，国家建工总局标准JGJ52-79《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》及被引用的其他标准中的砂子细度模数计算方法，不符合细度模数的定义，计算结果偏小，而且使计算变繁，应加以更正。

四、平均粒径与细度模数的比较分析

在推导平均粒径和细度模数计算式的过程中清楚地表明，平均粒径在表面上看似乎有明显的物理意义（主要特征是以毫米度量），但实际上其基本假定前后不一致，细颗粒作用大，粗颗粒作用小，且计算繁琐；细度模数则具有明确的物理意义，计算方便，粗细颗粒在其中都起适当的作用。

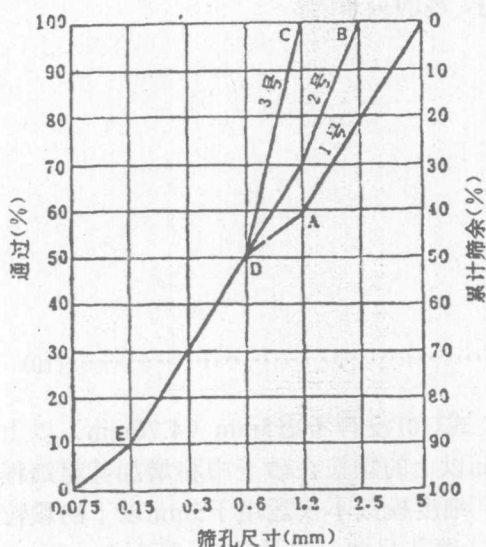


图 1-2 1号、2号、3号砂筛分曲线

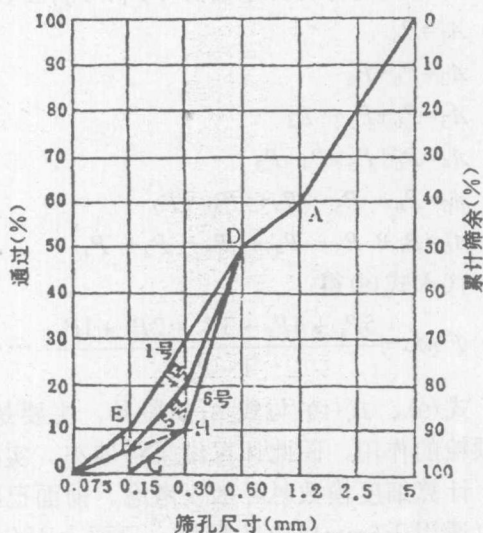


图 1-3 1号、4号、5号、6号砂筛分曲线

将两者应用于一定级配（颗粒组成）的砂子中（见图1-2、表1-3、表1-4；图1-3、表