混凝土工艺学汇编

建筑工程出版社

混凝土工艺学汇编

建筑工程出版社出版

·1958·

內 容 提 要

本書是有关混凝土工艺学的一些研究报告和譯文的汇編。其中有一篇研究混凝土集料的連續和間断級配，探討了級配的統一规律，并提出采用和推广法国間断級配。另一篇是用促凝剂配制低流动性早强高强混凝土的理論研究和試驗报告。第三篇是在攪拌机內湿拌强化混凝土的研究，对此法的工艺过程和效果作出估計。第四篇討論混凝土工作度和流变性質，提出解决干硬性混合物工作度測定的方向。第五篇是根据法文翻譯德国胡米著的高强度混凝土的制造工艺，其中着重討論用普通水泥及压蒸法获得700号以上的混凝土。最后一篇是有关压蒸养护的一些問題，作者提出压蒸法混凝土配合比的决定原理等建議。

本書可供土建及混凝土科学研究机关，高等学校师生及工程技术人員参考。

混凝土工艺学汇編

*

建筑工程出版社出版（北京市阜成門外大街）

（北京市書刊出版業營業許可証出字第052号）

建筑工程出版社印刷厂印刷・新華書店發行

書号771　153千字　850×1160 1/32　印張 5 3/4

1958年7月第1版　1958年7月第1次印刷

印數：1—2,846 册　定價（10）1.10 元

目　录

混凝土集料連續級配規律性的探討和間断級配的若干問題

胡 多 聞

前 言

本文首先根据混凝土强度理論的发展，說明混凝土的基本性能和原理，然后导出級配問題。

在連續級配的討論中，举出最大密度、表面积和干涉論等学派对級配規律的分析，并举簡例說明。然后，总結这些規律的特性，发掘其中存在的問題，特别是各派学說对中間粒度的意见分歧，初步以水泥用量改正数 n 和級配改正系数k，把各派規律統一起来。

其次論述了間断級配的发展过程，以及按飞莱定理导出的以瓦萊特为首的法国間断級配学派，介紹了他的理論系統和方法。然后，作者認为干涉論也可以作为間断級配的理論基础。同时，作者提出按工作度（易浇搗性和离析性）解說間断和連續級配的优劣，并着重批判認为間断級配要离析的錯誤看法。

最后，提出法国間断級配在技术和經济上的优点，并談到实践上所遭遇的問題和困难，提出一些初步的建議和解决方案。推荐了砂石规格、潤湿水量的測定方法与水泥的选择，并提出今后推广采用間断級配的条件和范围。

一、飛萊定理同混凝土強度和級配理論的發展

談到混凝土的級配問題，首先必須明确混凝土的組成和基本技术性质，而这些基本性质中以强度、工作度、經济和耐久性最为重要。其中的主要环节問題是探求技术性能与物理化学結构（水

泥晶网和空隙)的关系。

近60年来，混凝土工艺学获得了发展。这应归功于苏联学者馬留迦[2]在1895年創造性地利用空隙原理，解說混凝土强度的基本問題[1]。其后两年，法国飞莱綜合以前影响混凝土强度的因素，重点举出空隙作为控制混凝土强度的唯一重要因素[8]。他把这样多的錯綜复杂的因素，例如集料顆粒及品质、粒度、形状、粗糙度、外廓、水泥品质、集料的潤湿水量、混凝土中集料的級配和密实度、用水量、稠度和工作度等等統一地归納起来，发现一般砂与石子的品质和大小(无化学反应)，不論胶結料、砂、石子和水的配合比如何，不論混合物的稠度和密实度如何，所有用同样胶結料制出的可能使用的砂浆和混凝土的强度，可按下式决定：

$$R=K\left(\frac{c}{c+e+v}\right)^2=K\left(\frac{1}{1+\frac{e+v}{c}}\right)^2$$

式中　c——水泥的絕对体积；

e和v——相应是水和空气空隙的体积；

R——混凝土抗压强度；

K——常数。

飞莱的理論，起了带头的扭轉作用：其一，揭露了混凝土結构和性质的微妙关系，从而明确了研究方向，导致以后級配的研究，这一問題，下文将詳細闡論；其二，为創造簡易实用的强度公式創造了条件。现将20世紀以来各国学者及工程师們創造的公式按时間先后分类于下：

1. 美国爱伯倫氏(1918年)指数曲綫型公式[3]

$$R_{28}=\frac{A}{B^x}$$

式中　R_{28}——混凝土28天抗压强度；

x——水灰比，按松体积計算；

A, B——常数。

这一公式經大量实驗及实践，$A=815\sim985$，$B=9\sim3.5$；$x=1.5\times$按重量計的水灰比B/Ц。强度按公制。

其后德国胡米(Hummel)提出简化式，即：$R_{28}=\frac{1000}{10^{w}}$

2. 苏联别拉耶夫双曲綫型公式(1927年)[1]：

$$R_{28}=\frac{R_{\text{Ц}}}{K\left(\frac{B}{\text{Ц}}\right)^{1.5}}$$

式中 $R_{\text{Ц}}$——水泥标号或活性；

$B/\text{Ц}$——按重量計算的水灰比；

K——常数。

后来德国格瑞夫(Graf)建議的公式形式为：

$$R_{28}=\frac{R_{\text{Ц}}}{a\left(\frac{B}{\text{Ц}}\right)^{1.5}}$$

式中 $R_{\text{Ц}}$——水泥标号；

a——常数：2.5—6（当用德国 DIN 1164 标准）軟練砂浆。

3. 瑞士鲍洛米(Bolomey)直綫型公式(1930年)[4]：

$$R_{28}=0.5\text{或}0.55R_{\text{Ц}}\left(\frac{\text{Ц}}{B}-0.5\right)$$

美国雷氏(Lyse)的公式(1932年)：

$$R_{28}=a\frac{c}{V}+100$$

式中 c,v为水泥和水的絕对体积比。如水灰比换算为重量比，且考慮水泥标号，则此两公式无异。

从上面的强度公式的发展情况看来，可作出結論如下：

各国各学派研究家，一致公認水灰比是决定强度的主导因素，其他因素是次要的。这与飞莱的理論是分不开的，即以空隙来控制强度。对于各种其他因素，各派考慮的处理方法不同，例如别拉耶夫、格瑞夫及鲍洛米公式明确地考慮到水泥活性$R_{\text{Ц}}$；而爱伯倫、胡米、雷氏公式則概括到常数中。另外，石子是碎石还是卵石，则由于影响不大，各派公式多不考慮，而在鲍洛米，别拉耶夫两公式中

則予以考慮(相差約10%)。由于实用的方便和要求，因此各公式前后的发展形势是由繁而簡；双曲綫型的比指数曲綫型的計算要方便一些，而直綫型比双曲綫型的还要簡单，因此直綫式迄今仍为我国、苏联、法国、瑞士及日本等国所采用。

由此可见空隙对混凝土强度有决定性的作用，而且对耐久性(抗冻性和腐蝕性)也有关系。因此，以空隙为出发点，产生了不同的級配理論，以获得高質量的混凝土。

二、連續級配的理論

1. 最大密度学派的連續級配

早在1901～1907年，美国富勒氏(Fullers)和湯姆遜(Thompson)发表了理想的最大密度級配理論曲綫[9]。他們的思想路綫，就是受到飞萊空隙理論的影响。要获得最强的混凝土，必須减少空隙，也就是說提高密度；他們的想法是最大数量的固体粒子能够挤滿在混凝土混合物中，則其結果将会做成最强的和最优的混凝土。

富勒氏假想的最高密度曲綫是①連續級配；②砂石混合物的密度最紧。这样，他规定出下列公式：

$$P=100\sqrt{\frac{d}{D}}$$

式中　P——通过篩孔为d的集料重量%；

d——篩孔，公厘；

D——最大粒度，公厘。

此后在1916年，魏格(Wig)等曾經指出[16]，此式不适合于所有的集料，其細粒部似乎較少而且不匀。

(1) 其后，鮑洛米在1935～1938年[5]，将富勒氏最高密度曲綫改正，并增加了細粒的組成，导出下式：

$$P=A+(100-A)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

式中　P、d和D意义同前，A为常数，取决于稠度和石子种类。一般 A值介于 4～14之間。

以这种观点出發的还有

（2）　瑞士联邦标准（$EMPA$）：

$$P=50\left(\frac{d}{D}+\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$$

（3）　比尔宾（Birebent），（1950年）：$P=\left(\frac{d}{D}\right)^n$

式中　$n=\frac{1}{2}$（富勒氏定理），或 $n=\frac{1}{4}$等等。

（4）　由于以上計算較煩，而且要增加細粒部分，富尔納斯（Furnas）和安德瑞格（Andererg）于 1931 年提出各邻篩分計篩余%应該具有一定的比例，即粗粒可按71%递减，細粒按 83% 递减，而对于水泥可按100%递减[10]。

为了評比以上各連續級配的差别，可参閱表 1 和表 2。

按最大密度理論計算的包括水泥粒子在內的各篩总通过量%

（D=40公厘）　　表 1

篩孔　(公厘)		40	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.085*
富勒 $P=\left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$		100	70.7	50.0	35.4	25.0	17.3	12.3	8.67	6.1	4.6
飽洛米 $P=A+(100-A)\sqrt{\frac{d}{D}}$	$A=4$	100	72.0	52.0	38.0	28.0	20.6	15.8	12.4	9.8	8.4
	$A=10$	100	73.6	55.0	41.9	32.5	25.6	21.0	17.8	15.5	14.1
	$A=14$	100	74.8	57.0	44.4	35.5	28.9	24.6	21.5	19.2	17.9
瑞士聯邦 $P=50\left(\frac{d}{D}+\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$		100	60.4	37.5	23.9	15.6	10.1	6.9	4.4	3.1	2.4
比尔宾 $P=\left(\frac{d}{D}\right)^n$ $n=\frac{1}{4}$		100	84.1	7[illegible].8	59.5	50.0	41.6	35.0	29.5	24.6	21.4
富尔納斯—安德瑞格		100	75.1	57.4	44.9	34.9	26.3	19.1	13.2	8.2	4.1

* 0.085公厘是水泥細度標准篩孔。

綜上所述，可以看出最高密度連續級配有下列特征：

（1）　基本假設：認为当水泥砂石混合物达到最大密度时，混

凝土也达到最大密度或最小空隙。也就是說，水泥水化硬化后，粒子骨架和晶网約与分布在干混合物中的而未加水的水泥粒子骨架和密布状态相应。同时，优良的不离析的塑性稠度，将依賴于由粗到細連續搭配的砂石混合物来保証。

不計0.085公厘以下粒子时*，按最大密度理論計算的各篩总通过量（$D=40$公厘）　　**表 2**

篩孔（公厘）		40	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.085
富勒氏 $P=\left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$		100	69.2	47.6	32.3	21.4	13.3	7.9	4.3	1.5	0
鮑洛米 $P=A+(100-A)\sqrt{\frac{d}{D}}$	$A=4$	100	69.4	47.7	32.4	21.4	13.4	8.1	4.4	1.5	0
	$A=10$	100	69.4	47.7	32.4	21.4	13.4	8.1	4.3	1.5	0
	$A=14$	100	69.4	47.7	32.4	21.4	13.4	8.1	4.4	1.6	0
瑞士聯邦 $P=50\left(\frac{d}{D}+\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$		100	59.5	36.0	22.1	13.5	7.9	4.6	2.1	0.7	0
比尔宾 $P=\left(\frac{d}{D}\right)^{n}$ $n=\frac{1}{4}$		100	79.9	63.0	48.6	36.5	25.7	17.3	8.4	4.1	0
富尔納斯-安德瑞格		100	74.0	55.6	42.6	32.1	23.1	15.6	9.5	4.3	0

* 不計算0.085公厘以下粒子，可認為是砂石混合物。

（2） 良好的級配，应該对工作度、强度、耐久性和經济意义，显示有影响的作用，而且应該非常明显；否則，費了很大力气，按一定的数学几何规律来探求或达到某种理想級配，效果并不完全理想。例如，人工配制連續級配集料，分級甚細，对40公厘的集料有9个分級，对水工建筑物用的大粒集料，分級就更多了。但是根据实践，不一定非要恰好符合理想級配，才能得到所需要的混凝土；实际上缺少某一分級，或某一分級量有所增减，反而能获得良好的混凝土。因此，我們应該把这些所謂理想級配，看作是在一定条件下人为地拟訂的理想公式，而不是不能变更的条例。

（3） 按表1和表2所列数据，可以清楚地看到各派公式的理想值差异相当大。各粒度（0～40公厘）规定的总通过量最大差值达35%（10、5、2.5公厘）；相应0.085～40公厘的粒子总通过量

最大差值为23～27%。必須指出，其中对大粒(20、40公厘)规定值差异較小，对再小一些的粒子(1.2公厘以下)差异也較小。它們的主要差异，在于对中間粒子的配量处理上有分歧，象間断級配，則根本上删除了一些中間粒子。本文对連續級配探討的规律基础，就是建立在这种論据上。

（4） 由表1和表2也可以看出来各派最高密度的粒子級配情况。富勒氏理論中，对較細顆粒规定的量較少，但是随着水泥品质和細度的提高，似乎其微粒规定的量显得更少了。富勒氏对强度和工作度的控制是靠調节水量来达成的，如果調整水泥量，則似乎自相矛盾。旣靠水量来調节工作度，則强度和耐久性將随水的增多而降低，只有在增加水量达到要求工作度，且强度和耐久性都滿足要求时，这种理想級配才能說是完成了任务。鮑洛米理論，改正了富勒氏細粒較少的缺点，并且把水泥用量考虑在內，以便控制强度。其实，鮑洛米理論，不論A值如何，扣除了0.085公厘的粒子后，即砂石混合物的粒子級配，是与富勒氏相同的，这在表1和表2中对比一下，就可以看出来了。他們的缺点，是相同的。瑞士联邦公式的要求是較粗的，可能对細粒混凝土較为适用。比尔宾的理論，灵活性較大；当$n=\frac{1}{4}$时，似乎太細了。富尔納斯，安德瑞格百分率法，計算較为簡单，其結果与鮑洛米$A=14$时情况相似，即适用于塑性較大的混合物。

（5） 最高密度理論的連續級配，在砂石骨架对强度的影响，以及粒子間摩擦力对工作度的影响方面，沒有考虑或估計在內。例如，坚固的大粒子較多时，将使混凝土的强度有所改善，能使28天强度提高約10%，特别是对早期强度，提高得較为显著。水泥混凝土早期强度受到固相粒子含量的影响。用最高密度的观点，要配成最高密度的混合物，显然是細粒砂較多。但是細粒多，相对来說，用水量就会增加，空隙也必随之而增。如保持水灰比不变，則用灰量增大，空隙体积的絕对值也必随之增大。恐怕为了要配出最大密度的混凝土，采取所謂最高密度連續級配，是不合适的。按数学填

充理論，最密的混合物也不是理想級配所能达到的。苏联奥浩欽(Охотин)教授証明，获得最密的混合物的条件是：粒径减小比例为16，而重量为大粒的43%，容許在25～50%以內波动。

2. 表面积学派的連續級配理論

在1918年，爱德华(Edwards)首創利用表面积配制混凝土的原理[7]；混凝土强度取决于水泥与集料表面积之比（在其他情况相同时），因之混凝土的配合比与砂石集料的表面积有关。进而言之，水泥与集料表面积之比相同的混凝土，其强度相近；又两种集料总体积相等时，較細的集料，因表面积大，为达到同样的稠度需水較多。

随后，杨氏(R.B.Young)把爱德华理論与水灰比連系起来[18]。

他們的理論都不能求出粗細集料的最优級配，然而計算表面积这一理論观点的提出是頗为重要的。

到1947年歌德特(Goded)提出一套理論[11]，这一理論把表面积同級配連系起来。他的理論有以下几项：

（1） 混凝土的抗压强度乃是表面积，最大粒度和空隙度%的函数，即：

$$R_{28}=f(S\cdot\alpha\cdot D)$$

式中 R_{28}——同前；

S——集料表面积；

α——空隙度%；

D——最大粒度。

由于D是常数，d变化很小，所以

$$R_{28}=\frac{b}{S^m},$$

式中 b——与粒度D有关的系数；

m——取决于水泥活性和品質的指数。

（2） 集料表面积S（平方公尺）按下式計算：

$$S=\frac{P}{25D}\cdot\frac{a}{\gamma}\Sigma\frac{p_i}{d_{i-1}+d_i},$$

式中　S——表面积(平方公尺);

P——全部集料的重量(公斤);

D——最大粒度(公厘);

a——常数(河砂砾$=3$,碎石$=3\sqrt{3}$);

γ——集料比重(公斤/升);

d_1, d_2, d_i………——篩孔或粒度;

p_1, p_2, p_i………——在各篩上的遺留量,其总和为P。

(3) 理想級配曲綫为:

$$P=100-K\left[1-\left(\frac{d}{D}\right)^{\rho}\right]$$

式中　P——篩孔d的总通过量%;

D——同前;

$$K=\frac{100-f}{1-\varepsilon_f^{\frac{1}{2}}\cdot\frac{1}{2}}$$

式中　f——小于0.15公厘的粒子量(%);

ε_f——此值$=\dfrac{0.15\text{公厘}}{D\text{公厘}}$;

$\rho=\dfrac{m}{m+1}$, 式中 m——指数,取决于水泥的活性或品質(如强度固定,即相应于集料面积);一般$m\doteq1$,当$m=1$时,$\rho=\dfrac{1}{2}$。

$$P=100-K\left(1-\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$$

設当f(小于0.15公厘的粒子量)甚少时,而$D\gg0.15$公厘,即$\varepsilon_f\doteq0$,则$K=100$,于是

$$P=100-K\left(1-\sqrt{\frac{d}{D}}\right)=100\sqrt{\frac{d}{D}}$$

这一公式即富勒氏学派的公式。由此可以看出，富勒氏理論可以說是歌德特理論的特殊情况，或者說，是 D 較大，0.15公厘以下顆粒較少时的情况。

$$\text{如令}\ K=\frac{100-f}{1-\frac{\varepsilon^{\frac{1}{2}}}{f}\cdot\frac{1}{2}}(100-A)\left(1+\frac{\beta}{100}\right)$$

式中：　β——水泥重量与集料重量的比值(%)，即：

$$\beta=\frac{A}{1-\frac{A}{100}},\ A\text{为鮑洛米公式中的常数。}$$

则　$$P=A+(100-A)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

这就是鮑洛米公式。

須知在一定工作度下，用水量是細粒（0.15公厘以下）和水泥用量以及水泥活性或品质(表面积)的函数。因此，如令

f——小于0.15公厘的顆粒含量%；

β——水泥重量与集料重量之比值%；

n——取决于水泥活性或品质(表面积)的常数（0.86～1.0)；

ψ——取决于稠度的常数；

则　$$\psi=f+n\beta=\text{常数。}$$

歌德特試驗求出，对震动、塑性和稀混合物，其 ψ 值分别为15,16.5,18。于是理想級配为：

$$P=100-K\left(1-\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$$

$$=100-\frac{100+n\beta-\psi}{1-\sqrt{\frac{0.15}{D}}}\left(1-\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$$

歌德特的理想級配，概括了前段最高密度的級配，而且結論是相符合的。这一級配考慮到粒度的大小、及水泥表面积和0.15公

厘以下的顆粒和水泥用量，也就是說混凝土的稠度。这也可以說为連續級配提供了一些理論根据。

今举一例說明，設 $D=40$公厘，$n=1.0, \beta=13.6, \psi=16.5$，

于是 $$P=100-\frac{100+1\times 13.6-16.5}{1-\sqrt{\frac{0.15}{40}}}\left(1-\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$$

$$=100-\left(1-\sqrt{\frac{d}{D}}\right)\doteq 100-103.2\left(1-\sqrt{\frac{d}{D}}\right)$$

$$=103\sqrt{\frac{d}{D}}-3.2$$

計算結果列于表3。

按歌德特理論計算的理想級配　　　　**表 3**

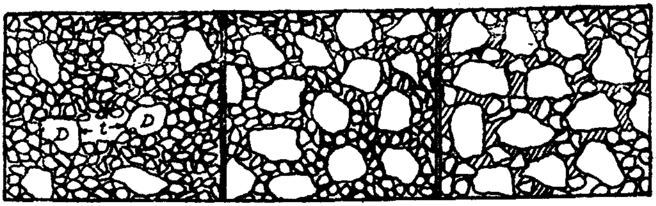
篩孔　　　　(公厘)	40	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.085
P，0～40公厘總通過% $103\sqrt{\frac{d}{D}}-3.2$	100	69.6	48.4	33.3	22.6	14.6	9.5	5.8	3.1	1.5
不計0.085公厘以下粒子的總通過量	100	69.2	47.7	32.3	21.4	13.3	8.1	4.4	1.6	0

由上表看出，歌德特理論的計算結果，細粒組成比富勒氏要少一些，但是如按0.085公厘以上粒子計算，其結果是相同的(參閱表1和表2)。也就是說，歌德特理論也是以接受富勒氏級配中的砂石混合物为基础建立起来的。

3. 干涉学說的連續級配理論

1933年美国魏茅斯发表了集料粒子干涉学說[14] [15]。設两相邻篩孔的直径分别为d_1和d_2，則$d_1 \sim d_2$間的集料分級的平均粒度，可認为是d_1和d_2的算术平均。設較大分級的粒度为D，各大粒間的間隙距离为t，較小粒的分級粒度为D_1(图1)。

显然，当$t<D_1$时，发生干涉，使集料空隙增多，密度降低；当$t=D_1$时为临介干涉，此时集料空隙最小，密度最大；$t=D_1$时，也不发生干涉作用。明确的說，t 的間隔包括小粒的平均粒径和包住集料的水泥膜厚度。为簡化起见，可按下式求t：



(a) $t>D_1$　　(b) $t=D_1$　　(c) $t<D_1$

图 1　粒子干涉情况

$$t=\left[\left(\frac{d_o}{d_a}\right)^{\frac{1}{3}}-1\right]D$$

式中　t, D ——见前段說明；

d_o ——某一分級集料的干燥搗实密度（单位松散体积中的固体或絕对体积比率），亦即該分級集料容重与比重之比；

d_a——前述分級在混合集料中的干燥搗实密度（即該分級在大粒空隙中的分布密度，或其单位松散体积中的固体或絕对体积比率）。

試設 $D_1\sim\frac{1}{2}D$，即 $t=\frac{1}{2}D$，则 $\left(\frac{d_o}{d_a}\right)^{\frac{1}{3}}\doteq 1.5$，于是

$$d_a=\frac{d_o}{3.375}$$

于是各分級总通过量%可按下式計算：

$$P=\left(\frac{d}{D}\right)^n$$

式中　n——指数，取决于集料的几何特性。

既令$\frac{d}{D}=\frac{1}{2}$，d_a＝大于d的集料量，于是$P=1-d_a$，从而得出$1-d_a=\left(\frac{1}{2}\right)^n$，也就是

$$n=\frac{\log(1-d_a)}{\log\left(\frac{1}{2}\right)}$$