

コンクリート ミキサ内の骨材粒子の基本運動を もととする混合度の考察

—混合羽根を考えない場合—

ONE CONSIDERATION OF MIXING INDEX OF CONCRETE ON THE BASES OF MOTION OF PARTICLES IN THE MIXER

—In Case of no Mixing Blade—

柳 場 重 正*

By Shigemasu Hasaba

1. 緒 言

固体粒子の混合、分離は粒子相互の運動差によって各粒子の位置的移動を生ずるときの粒子群の分布変化の状態をいう。著者は混合機構の究明にあたって仕込割合の分布状態を理想混合として、実際混合過程において各所における粒子の混合割合を測定し、その結果からミキサ全体の瞬間的混合度 X を算定することがもっとも妥当であることを提唱した。混合度 X の時間的変化を決定することによってミキサ内の混合状態の変化を見ることができ、そのミキサによって得られる混合度の限度とそれ以後の分離機構による混合の悪化の状態を観察することができる。

混合、分離は粒子の対流、拡散、せん断の3種の運動によるものとされている。もちろんこれらの運動が混合ないし分離におよぼす影響の程度はそのミキサの種類、操作条件、混合すべき原料によって異なる。化学工学における混合の混合度 σ に関する時間的変化は多くの人々の報告によると結果的に図-1に示すような傾向をもっている。すなわち混合度の時間的変化は I, II, III の領域で変化する。I の領域は非常に短時間であって測定が困難である。II の領域は測定結果によると時間の経過につれて、そのときの操作条件における最良の混合度に達する。III の領域では分離機構により混合が悪化し、時間の経過につれて再び混合され結局分離と混合のくり返しにより混合度の変化は波状となる。しかし化学工学における混合操作は粒子の平均粒径差のきわめて少ない2成分系の混合がおもで、しかも回転軸が水平の場合が多く図より考察すれば、回転軸に直角的な断面の混合がおもなもので、軸に沿うての混合は非常に小さく、

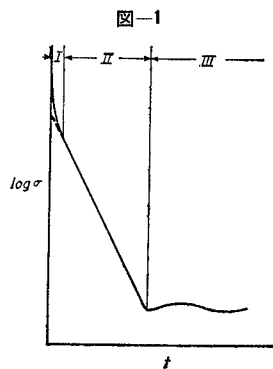


図-1

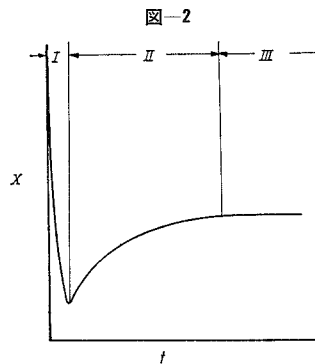


図-2

混合度を支配する粒子相互の運動差は粒径の差よりも比重の差が支配的となり、混合度の変化に相当時間を必要とする。コンクリートミキサの場合はこれと非常に異なって、取り扱う材料が多成分系のものであり、とくに

その粒径範囲が広く、回転軸も水平に対して傾けた状態で操作する機会が多いから、混合度の時間的変化は前者にくらべて非常に異なった状態を示し、一般的には図-2に示すようになる。この場合は図-1と同様にI, II, IIIの混合過程の領域を示すが、前者のI, IIの領域を含んだようなIの領域は非常に短く、測定による決定は困難であるが、投入時の混合度とIの領域に続くIIの領域の測定により推定することができる。Iの領域においては回転軸に直角的な断面において、粒子の流動運動、飛ばし運動²⁾による自由運動を主体として急速に混合が進むものと考えられる。

もちろんこれと同時に軸方向に粒子はミキサ周壁の傾斜、回転軸の傾斜にもとづいた拡散的運動を行なうが、粒子群が混合しなければ、拡散の影響は少ないのでI領域では短時間に混合度がよくなり最良の混合度となる。最良の混合度に達したあとは、軸方向の拡散的運動の影響が大きくなり分離を生じ、混合度は時間とともに悪化し、IIの領域を示すことになる。そして時間の経過とともに混合と分離が互いに消去して混合度は安定し領域IIIとなる。

コンクリートミキサ内では骨材粒子の混合と同時にセメントと水あるいは混和剤の混合によるペーストの混和作用も行なわれなくてはならない。したがって固体粒子がいかに早く混合してもコンクリートの最も重要な要素であるペーストの混和が完全でなくてはミキサとしての役目を達することができない。しかしペーストが完全

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学教室

に混和されて一定の粘性を示すには実験結果³⁾より最小1分であり、固体粒子が単独で混合された場合ではすでにIIの領域に入っている。しかし固体粒子の混合の際ペーストが混入すると、ペーストの粘性により混合の進む速度は時間的に遅れることが推察できるので、混合時間1分における混合度を対象として、粒子の運動を基本として考察を進めるものである。

固体粒子の混合の現象は非常に複雑で、固体粒子のミキサ内の運動および混合の過程に対する基本的微分方程式は一応もとめることはできるが、これを数学的に積分して混合の過程をもとめることは困難である。しかしかかる過程に対して、その過程を示す微分方程式や、その現象に関与する物理的諸元が知られているとき、次元解析により解決する方法⁴⁾がとられ、すでに液混合や粉砕における必要馬力などについて Rushton⁵⁾ および Rose⁶⁾ などによって次元解析により解析が試みられている。著者はこの点より固体混合の過程に対する微分方程式、ミキサ内の固体粒子の運動方程式および混合度に関与すると考えられる物理的諸元より、おのおの混合度に関与すると考えられる無次元項をもとめ、比較検討を試みた。

2. 粒子の運動に関する基本因子と混合度の関係

コンクリート ミキサ内の固体粒子の運動に関する理論的考察²⁾および実験的結果³⁾により、ミキサにおける混合は混合羽根、ペーストの有無にかかわらず、つぎの3つの運動により支配されると考えてよい。

- (1) 流動運動
- (2) 飛しょう運動
- (3) 拡散運動

もちろんこれらの運動はミキサの形状、寸法、混合材料の物性（比重、息角など）、材料の粒径、混合の操作条件（傾斜角、回転速度）などによって定まるもので、混合、分離は粒子の運動による粒子相互の位置的移動によるものと定義されるから、混合度はもちろん粒子の運動を左右する因子の関数として取り扱われるべきである。粒子の運動はミキサ内の各点の各種の粒子の分布濃度 f_i に時間的変化を生ずるから、 f_i の変化は主軸に直角的な断面における流動運動、飛しょう運動による強制対流と主軸方向に生ずる拡散による粒子相互の移動によって生ずると考えて差し支えない。したがっていま軸に直角的な断面に x, y 軸をとり、軸方向に z 軸をとり、 u, v をおのおの x, y 軸方向の速度、 k を拡散定数とすれば強制対流、拡散による f_i の時間的変化はつぎの微分方程式で与えられる。

$$\left(u \frac{\partial f_i}{\partial x} + v \frac{\partial f_i}{\partial y}\right) + k \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} = -\frac{\partial f_i}{\partial t} \dots\dots(1)$$

実験室で行なった実験結果をそれと幾何学的に相似の

実際のミキサに応用するためには混合、分離を左右する因子を粒子の運動を基本として合理的に組合わせた無次元項の関係を求めその傾向を考察する必要がある。

式(1)において L を代表長さ、 v を代表速度、 T を時間とすれば式(1)の元方程式は、

$$\left[\frac{vf_i}{L}\right] + \left[\frac{kf_i}{L^2}\right] = -\left[\frac{f_i}{T}\right] \dots\dots\dots(2)$$

となり、これより(1)の微分方程式が成立するためには、

$$\phi\left(\frac{\rho_0 v L}{\mu_g}, \frac{v^2}{Lg}, \frac{L^2}{kT}\right) = \text{定数} \dots\dots\dots(3)$$

なる関係をうる。式中 ρ_0 は密度、 μ_g は粘度、 g は重力加速度を表わす。しかしミキサにおける固体粒子相互の拡散運動は、粒子体の上昇円運動部においてそのときの回転速度により細粒が粗粒の間げきをぬって軸方向に移動するもので、拡散係数 k はそのときの回転速度 N 、ミキサの代表寸法である最大直径 D 、使用材料の平均径 d の関数と考えられるから式(3)の第3項 L^2/kT は $L^2/NDdT$ となり、 Dd は代表長さ L で L^2 とあわせれば、第3項は $[1/NT]$ となる。一方粒子の運動速度 v はミキサの最大直径部の周速 πND の関数であるから式(3)はつぎのように書きあらわすことができる。

$$\phi\left[\frac{\rho_0 NDd}{\mu_g}, \frac{N^2 D^2}{dg}, NT\right] = \text{定数} \dots\dots\dots(4)$$

すなわち第1項は Reynolds number NRe 、第2項は Froude number NFr に相当する無次元項となる。

つぎにミキサ内における固体粒子の各運動に影響する基本因子について検討を加えてみると、これら運動に関する微分方程式については著者はすでに解析²⁾を行ない、流動運動に対しては、

- (a) すべりのない場合

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{15}{28} \frac{\rho_0}{\rho_m} \frac{C_R}{d} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \frac{5}{7} g \sin \varphi_1 = 0 \dots\dots\dots(5)$$

- (b) すべりのある場合

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{3}{4} \frac{\rho_0}{\rho_m} \frac{C_R}{d} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - g(\sin \varphi_1 - \mu' \cos \varphi_1) = 0 \dots\dots\dots(6)$$

飛しょう運動に対しては

$$\frac{d(v \cos \varphi)}{v^3 \cos \varphi} = -\frac{3}{4} \frac{C_R \rho_0}{d \rho_m g} \frac{d\varphi}{\cos^3 \varphi} \dots\dots\dots(7)$$

拡散運動に対しては

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \dots\dots\dots(8)$$

なる運動方程式が得られている。

これら運動方程式の各項を元にかえて元方程式をつくり、おのおのの粒子の運動に影響する無次元項を求めてみれば、まず式(6)において元方程式は

$$\left[\frac{L}{T^2}\right] - [g] + [g \mu'] + \left[\frac{C_R}{L} \frac{\rho_0}{\rho_m} v^2\right] = 0 \dots\dots\dots(9)$$

となり、これより無次元項を求めれば

$$\phi_1 \left[\frac{v^2}{Lg}, C_R, \mu', \frac{\rho_0}{\rho_m} \right] = \text{定数} \dots\dots\dots(10)$$

となる。

式(10)中第3項と第4項は材料の物性によりきまるもので操作条件には無関係となる。第1項は Froude number N_{Fr} に相当するもので、第2項 C_R は粒子の運動に対する空気の抵抗係数であり、流体力学によれば一般的に Reynolds number N_{Re} の関数であるから、操作条件に対して式(10)は

$$\phi_1 \left[\frac{N^2 D^2}{Lg}, \frac{\rho_0 NDL}{\mu_g} \right] = \text{定数} \dots\dots\dots(11)$$

となる。

つぎに飛ばし運動に対して式(7)より元方程式は

$$[v] = - \left[\frac{C_R}{d} \frac{\rho_0}{\rho_m} \frac{v^3}{g} \right] \dots\dots\dots(12)$$

となり、これより無次元項は

$$\phi_2 \left[C_R, \frac{v^2}{gd}, \frac{\rho_0}{\rho_m} \right] = \text{定数} \dots\dots\dots(13)$$

となり、式(11)におけると同じく操作条件に対しては

$$\phi_2 \left[\frac{\rho_0 NDL}{\mu_g}, \frac{N^2 D^2}{gd} \right] = \text{定数} \dots\dots\dots(14)$$

となる。

さらに拡散運動に対しては式(8)より元方程式は

$$\left[\frac{\bar{w}}{T} \right] = \left[\frac{k\bar{w}}{L^2} \right] \dots\dots\dots(15)$$

これより、

$$\phi_3 \left[\frac{kT}{L^2} \right] = \text{定数} \dots\dots\dots(16)$$

となる。式(16)における k について式(3)より式(4)への関係を入れれば式(16)は

$$\phi_3 [NT] = \text{定数} \dots\dots\dots(17)$$

なる関係をうる。したがってミキサ内の固体粒子の運動に影響する操作条件に対する基本因子は Reynolds number N_{Re} に相当する $[\rho_0 NDL/\mu_g]$ 、Froude number N_{Fr} に相当する $[N^2 D^2/gd]$ と $[NT]$ なる3項の無次元項となる。

また混合度 X に関与すると考えられる物理的諸元を理論的、実験的考察より表-1に示すようにして、 X を

表-1

D : ミキサの最大直径 cm	μ_g : 空気の粘度 gr/cm·sec
L : ミキサの最大長さ cm	μ_1 : 粗粒の摩擦係数
d_1 : 粗粒の平均直径 cm	μ_2 : 中粒の "
d_2 : 中粒の " cm	μ_3 : 細粒の "
d_3 : 細粒の " cm	T : 時間 sec
g : 重力加速度 cm/sec ²	N : 回転速度 rps
ρ_0 : 空気の密度 gr/cm ³	k : 拡散定数 cm ² /sec
ρ_m : 粒子の密度 gr/cm ³	

これら物理的諸元の関数として次元解析を行なうとまず

$$X = \phi [D^a L^b N^c d_1^d d_2^e d_3^f g^g \rho_0^h \rho_m^i \mu_g^k \mu_1^l \mu_2^m \mu_3^n T^p k^q] \dots\dots\dots(18)$$

とし、これより L, M, T により次元式を書くと

$$[M^a L^b T^c] = [L]^a [L]^b [T^{-1}]^c [L]^d [L]^e [L]^f [L T^{-2}]^g \\ \times [ML^{-3}]^h [ML^{-3}]^i [ML^{-1} T^{-1}]^k \\ \times [M^k L^l T^m]^{l+m+n} [T]^p [L^2 T^{-1}]^q$$

これより、

L について

$$a+b+d+e+f+g-3h-3i-k+2q=0 \dots\dots(19)$$

T について

$$-c-2g-k+p+q=0 \dots\dots\dots(20)$$

M について

$$h+i+k=0 \dots\dots\dots(21)$$

となり、式(19)、(20)、(21)より

$$d=3h+3i+k-2q-a-b-e-f-g$$

$$c=p-2g-k-q$$

$$k=-h-i$$

さらにこの3式より

$$d=2h+2i-2q-a-b-e-f-g$$

$$c=p-2g+h+i-q$$

となり、式(18)は

$$X = \phi [D^a L^b N^{p-2g+h+i-q} d_1^{2h+2i-2q-a-b-e-f-g} \\ \cdot d_2^e d_3^f g^g \rho_0^h \rho_m^i \mu_g^{-h-i} \mu_1^l \mu_2^m \mu_3^n T^p k^q]$$

これを整理すれば、

$$X = K_1 \left[\frac{NDd_1 \rho_0}{\mu_g} \right]^{h+i} \left[\frac{N^2 D^2}{gd_1} \right]^{-g} \left[\frac{L^2}{kT} \right]^{-q} \\ \times [NT]^{p-q} \left[\frac{d_1}{D} \right]^{h+i} \left[\frac{d_1}{L} \right]^{-2q-b} \left[\frac{\rho_0}{\rho_m} \right]^i \\ \times \left[\frac{d_2}{d_1} \right]^e \left[\frac{d_3}{d_1} \right]^f [\mu_1]^l [\mu_2]^m [\mu_3]^n \dots\dots(22)$$

となり、 $[\]$ 内はいずれも無次元項で第5項より第12項までは与えられたミキサで与えられた材料に対して定数であるから、実験によって得られる混合度 X は結局

$$X = K_2 \left[\frac{NDd \rho_0}{\mu_g} \right]^a \left[\frac{N^2 D^2}{gd} \right]^b [NT]^c \left[\frac{L^2}{kT} \right]^d \\ \dots\dots\dots(23)$$

となる。ただし、

$$d = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}$$

式(23)の第4項において拡散係数 k を回転速度 N 、最大直径 D 、使用材料の代表粒径 d の関数とすれば、

$$\left[\frac{L^2}{kT} \right] = \left[\frac{L^2}{NTDd} \right] = \left[\frac{1}{NT} \right] \left[\frac{L}{D} \right] \left[\frac{L}{d} \right]$$

となり、式(23)は

$$X = K_1 \left[\frac{NDd \rho_0}{\mu_g} \right]^a \left[\frac{N^2 D^2}{gd} \right]^b [NT]^c \dots\dots(24)$$

となる。

以上混合過程に対する微分方程式、ミキサ内の固体粒子の運動方程式および混合度に関与すると考えられる物理的諸元より次元解析によりもとめた無次元項はいずれも Reynolds number N_{Re} 、および Froude number N_{Fr} に相当する無次元項および $[NT]$ なる3項となり、これらが混合、分離を左右する主要因子となり、混

合度 X は結局式(24)にて表わされると考えられる。

3. 実験装置および方法

写真-1 および 2 は実験装置の全体を示したもので、写真-1 は I 型, II 型に対するもので写真-2 は III 型に対するものである。写真のうち ① はミキサで、1.51 m³ (56 切) コーン型可傾式ミキサの約 1/10, 1/15, 1.5/10 の模型 (以下おのおの I 型, II 型, III 型とよぶ) で、I 型はアルミニウム鑄物で最大寸法は直径部で 210 mm, 長さ 258 mm, II 型は透明な塩化ビニール樹脂を使ってその最大直径は 135 mm, 長さ 176 mm, III 型はアルミニウム鑄物を使いその最大直径は 315 mm, 長さ 387 mm でいずれも両側円錐部の円錐頂角は 50° とした。なおミキサ本体は実験において試料採取の都合上各型とも中央リングを境に前, 後部円錐をおのおの 2 つに分割した。ミキサの駆動は中央リングに歯車を取付け歯車駆動とし, ②の支架によりささえ, 回転軸は水平より 5° 間隔に 25° まで傾斜させることができる。③は電動機で I, II 型に対しては直流電動機, III 型に対しては特殊分捲三相電動機を使用した。したがって直流電動機には写真-1 に示すような⑥⑦⑧なる回転速度可変用の摺動抵抗器を使用した。④⑤はおのおの電動機軸の回転速度を測定するための回転計および指示計である。

実験は一応ミキサ内の固体粒子の運動および混合機構の基本的研究を主体としたため混合羽根を取付けずに実験を行なった。

使用した固体粒子は石川県手取川産の砂, 砂利をタイラーフルイを使用して表-2 に示すようにフルイ分けて使用した。おのおの粒子の平均粒径 (フルイ目の平均値), 比重, その他の物理的性質を示すと表-3 に示すとおりである。

おのおのミキサへの材料の投入量は図-3 に示すようにミキサの材料投入口下端より水平線を引き, 水平線以下の部分に投入できる材料をおのおのそのときの最大可能投入量とする。その 80% を投入量として各傾斜角について, さきにフルイ分けした材料を 3 種ずつ組み合わせ, 細, 中, 粗としおのおの場合における投入比を重量化で 1 (細) : 2 (中) : 4 (粗) とした。表-3 は配合表で, 表-4 はおのおの組み合わせの

図-3

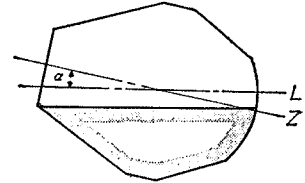


表-2

	平均粒径 (mm)	比重	単位容積重量 (軽装) (kg/m ³)	空け率 (%)	安息角	せん断係数	せん断抗係数	摩擦係数 (金属板との μ_1)	摩擦係数 (粗面との μ_2)
No. 1	0.163	2.68	1 250	53	35°00'	0.66	1.43	1.00	
No. 2	0.324	2.63	1 309	50	32°30'	0.66	1.19	0.90	
No. 3	0.775	2.59	1 332	49	30°00'	0.66	1.00	0.75	
No. 4	1.539	2.58	1 417	45	32°00'	0.97	0.75	0.54	
No. 5	3.579	2.58	1 452	44	29°30'	1.00	0.70	0.50	
No. 6	5.750	2.58	1 502	42	30°00'	1.57	0.62	0.48	
No. 7	12.5	2.59	1 503	42	32°00'	1.87	0.55	0.49	

表-3

	I 型		II 型		III 型	
0°	1 400	(細) 200	301	43	5 250	750
		(中) 400		86		1 500
		(粗) 800		172		3 000
5°	1 750	250	525	75	6 580	940
		500		150		1 880
		1 000		300		3 760
10°	2 100	300	651	93	7 840	1 120
		600		186		2 240
		1 200		372		4 480
15°	2 800	400	840	120	10 500	1 500
		800		240		3 000
		1 600		480		6 000
20°	3 500	500	1 155	165	13 090	1 870
		1 000		330		3 740
		2 000		660		7 480

単位: (g)

表-4

粒子の組み合わせ	比重	単位容積重量 (軽装) (kg/m ³)	空け率 (%)
No. 1, 2, 3	2.62	1 470	44
No. 2, 3, 4	2.59	1 506	42
No. 3, 4, 5	2.58	1 527	41
No. 4, 5, 6	2.58	1 610	38
No. 5, 6, 7	2.59	1 625	37

ただし配合は重量比で 1 (細) : 2 (中) : 4 (粗) とする

写真-1

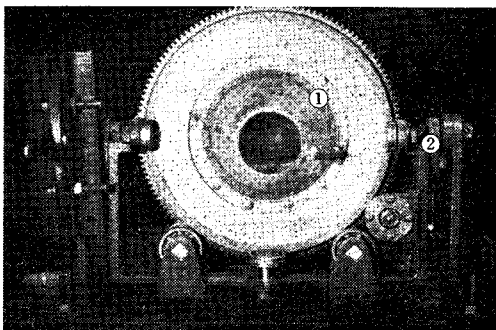
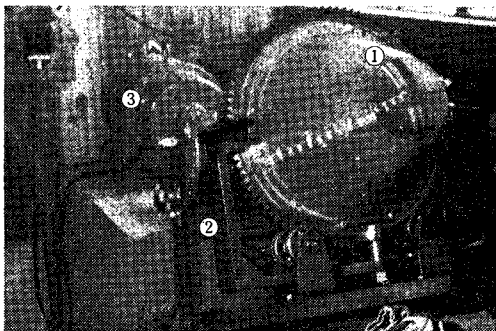


写真-2



固体粒子の比重，単位容積重量および空げき率を示したものである。

回転速度は従来ミキサの周速 1 m/sec を規準としてることより，測定の都合上おのおの電動機軸において I 型では 400, 600, 800, 950 rpm, II 型では 500, 750, 1000, 1200 rpm, III 型では 150, 240, 330, 400 rpm のおのおの 4 種とした。表-5 はこれらドラム回転速度，周速の関係を示したものである。

回転時間は従来の実験結果より固体粒子の混合度が最

表-5

	最大直径 (cm)	電動機軸回転速度 (rpm)	ドラム回転速度 (rpm)	周速 (cm/s)
I	21.0	400	44.5	48.9
	13.5	500	55.5	39.2
	31.5	150	30.0	49.9
II	21.0	600	66.6	73.2
	13.5	750	83.3	58.9
	31.5	240	48.0	80.0
III	21.0	800	88.8	97.6
	13.5	1000	111.1	78.5
	31.5	330	66.0	113.0
I	21.0	950	105.4	115.8
	13.5	1200	133.3	94.2
	31.5	400	80.0	132.9

図-4

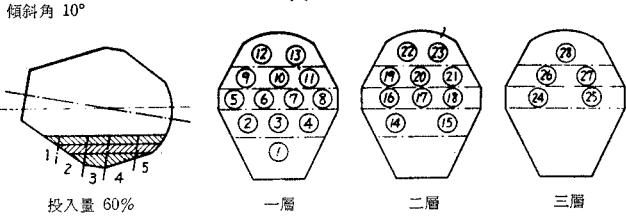


図-5

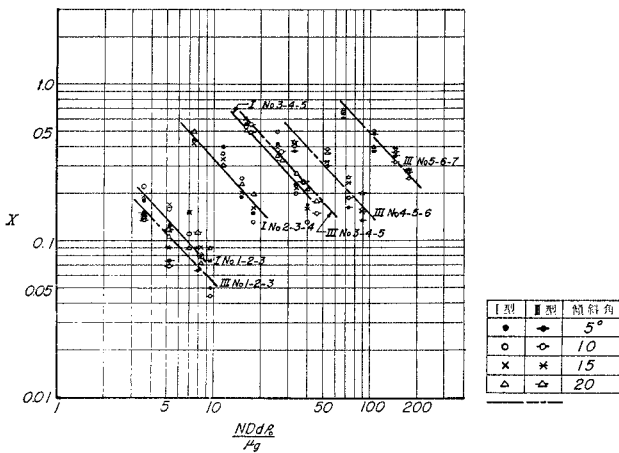
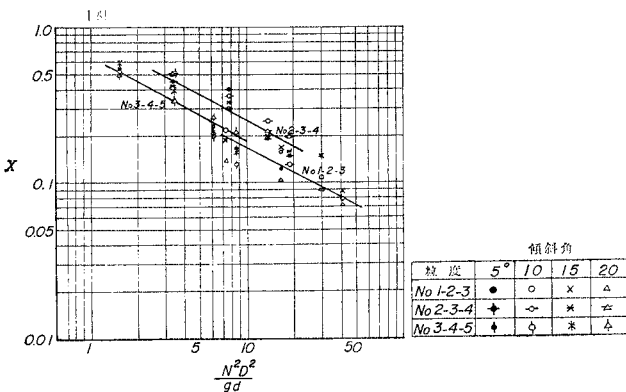


図-6



も良くなると思われる 1 分の場合につき検討した。またドラムの回転傾斜角は 5°, 10°, 15°, 20° の 4 種とした。

以上各種の条件のものに回転を終ったところで前部円錐部の上蓋を取りはずし各傾斜角に応じて水平に 2~4 層に分け，さらに回転軸方向に 3~4 断面で切っておのおの部分より角型スプーンにより試料を採取し，そのときの粒子の組み合わせによりフルイ分けして計量した。計量した結果はおのおの軸に直角に切った層について平均し，その層における粒子の量とした。図-4 は試料採取の一例を示したものである。しかしておのおの粒子の平均重量の試料の平均全重量に対する比 f_{ni} を計算し，投入時におけるおのおの粒子の全重量に対する比 P_{ni} とより各層の混合度 $X_i^{(1)}$ を求めさらにそのときのミキサの混合度 $X^{(1)}$ を求めた。

4. 理論式に関する実験的考察

式 (24) において求めた混合度の理論式について実験結果より検討を加えてみると，混合度 X は式 (24) に示すとおり第 1 項の Reynolds number $[N_{Re}]$ ，第 2 項の Froude number $[N_{Fr}]$ に相当する無次元項および $[NT]$ なる 3 つの無次元項によって影響される。したがってまず各項の混合度 X への影響を知るため，混合度 X と各項の関係を両対数目盛を用いて図示すると図-5 より図-8 に示すとおりで，各項と混合度 X の関係は与えられたミキサ，与えられた材料に対して同一傾斜をもち，回転速度が上昇するほど混合度は良くなり，各項と混合度 X は，

$$X = k_1 [N_{Re}]^{-1.09} \dots\dots\dots (25)$$

$$X = k_2 [N_{Fr}]^{-0.55} \dots\dots\dots (26)$$

$$X = k_3 [NT]^{-1.05} \dots\dots\dots (27)$$

なる関係となる。

図-7

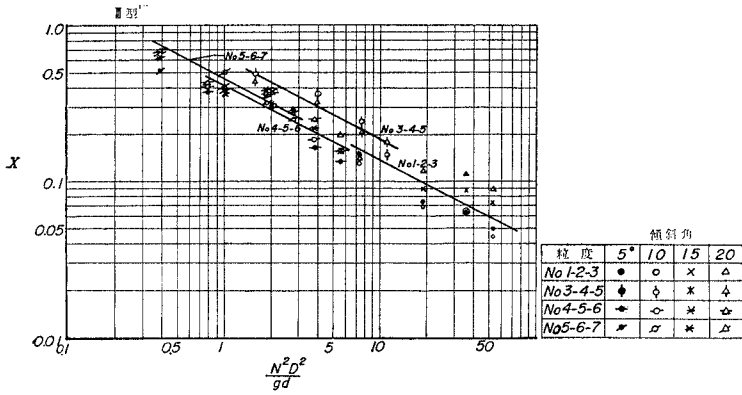


表-6

型	骨材組み合わせ	α	β	θ	K
I	No. 1-2-3	-0.32	-0.16	-0.30	1.2
	No. 2-3-4				3.1
	No. 3-4-5				4.1
III	No. 1-2-3	-0.32	-0.16	-0.30	0.92
	No. 3-4-5				3.4
	No. 4-5-6				3.8
	No. 5-6-7				6.5

表-7

型	材料組み合わせ	ミキサ回転速度 (rpm)	混 合 度 X					
			5°	10°	15°	20°	平均値	計算値
I	No. 1-2-3	44.5	0.180	0.220	0.190	0.140	0.183	0.186
		66.6	0.125	0.160	0.170	0.105	0.140	0.127
		88.8	0.150	0.110	0.150	0.090	0.125	0.100
		105.4	0.080	0.080	0.090	0.075	0.081	0.088
	No. 2-3-4	44.5	0.450	0.406	0.427	0.500	0.446	0.419
		66.6	0.400	0.365	0.330	0.300	0.349	0.288
		88.8	0.192	0.250	0.200	0.230	0.218	0.220
		105.4	0.150	0.130	0.160	0.200	0.160	0.189
	No. 3-4-5	44.5	0.550	0.538	0.600	0.500	0.547	0.496
		66.6	0.420	0.500	0.400	0.350	0.402	0.336
		88.8	0.230	0.200	0.217	0.271	0.229	0.258
		105.4	0.165	0.130	0.159	0.217	0.168	0.217
III	No. 1-2-3	30.0	0.150	0.135	0.145	0.135	0.141	0.149
		48.0	0.075	0.070	0.090	0.120	0.089	0.104
		66.0	0.065	0.065	0.090	0.115	0.084	0.075
		80.0	0.050	0.045	0.075	0.090	0.065	0.063
	No. 3-4-5	30.0		0.400		0.450	0.425	0.435
		48.0		0.370		0.323	0.347	0.299
		66.0		0.238		0.231	0.234	0.218
		80.0		0.150		0.183	0.167	0.184
	No. 4-5-6	30.0	0.372	0.400	0.404	0.423	0.400	0.437
		48.0	0.300	0.390	0.320	0.384	0.349	0.300
		66.0	0.162	0.188	0.235	0.250	0.209	0.220
		80.0	0.135	0.158	0.155	0.201	0.162	0.182
No. 5-6-7	30.0	0.606	0.661	0.635	0.680	0.646	0.670	
	48.0	0.490	0.500	0.369	0.400	0.440	0.462	
	66.0	0.350	0.320	0.395	0.376	0.363	0.338	
	80.0	0.291	0.250	0.284	0.280	0.276	0.234	

しかしして混合度 X には式(24)に示すように3つの項が同時に影響するから、混合度 X と $[NRe]^{-1.09} \cdot [NFr]^{-0.55} \cdot [NT]^{-1.05}$ の関係を両対数目盛に図示すれば図-9に示すとおりで、この場合も与えられたミキサで与えられた材料に対して両者の関係はいずれも同一傾斜をもつ。これより各項の指数 α, β, θ および係数 K を決定すれば表-6 のようになる。さらにこれら指数および係数を用いた表-8

粒子の組み合わせ	No. 3-4-5	No. 4-5-6	
α		-0.72	
β		-0.33	
θ		-0.62	
K W/C	50%	6.8	3.4
	60%	2.04	3.3

計算結果と実験結果を示すと表-7 のようになり式(24)により一応混合時間1分におけるミキサのいろいろの回転速度に対する混合度をもとめる。以上はから練りにおける混合度について検討を加えたが、ペーストが混入したときは固体粒子の運動はペーストの粘性により制約をうけその動作は遅くなり、最適混合度をうる時間は遅くなるが混合過程より粒子自体の運動はから練りの場合とほぼ等しいと考えられる。したがってペーストが入った場合についてもその最適混合度 X_b と3つの無次項の間には式(24)が成り立ち、前と同じように整理すれば、図-10に示すようになり式(24)における各項の指数 α, β, θ および係数 K_b は表-8に示すようになる。以上限られた3種の模型ミキサおよび粒子の組み合わせについて検討したが一応から練りについては係数 K が粒

図-8

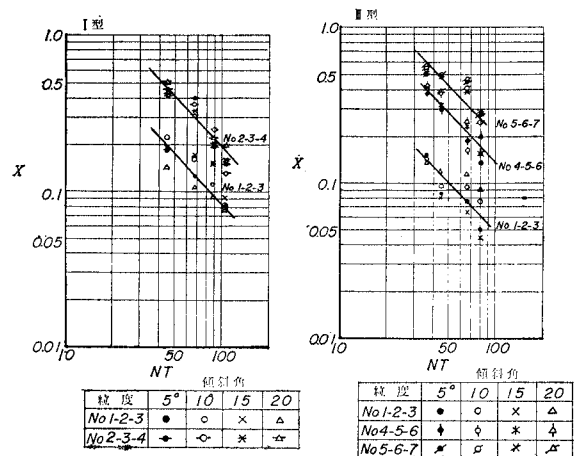


図-9

1型	2型	傾斜角
●	○	5°
○	○	10°
x	*	15°
△	▽	20°

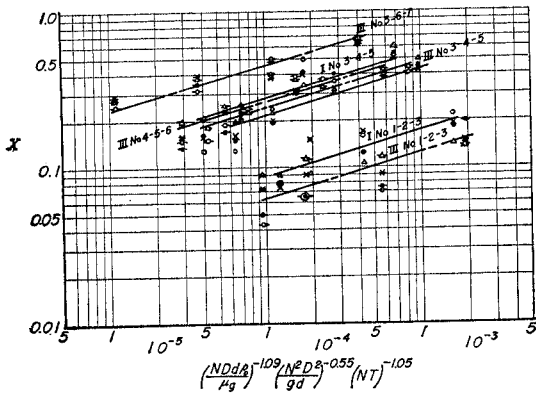
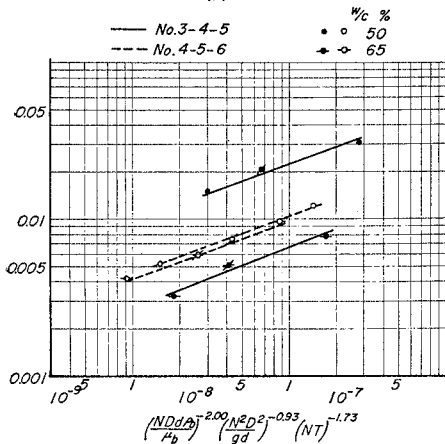


図-10



子の組み合わせと使用ミキサの大きさなどにより変化し、ペーストが混入すると指数、係数ともにペースト濃度にも影響を与えられる。したがってこれら指数、係数の決定にはさらに広範囲の実験にまたなければならぬ。

5. 結 言

コンクリート ミキサにおける混合機構の基礎的研究として、混合羽根を持たないミキサ内の骨材粒子の運動および混合に関する理論的、実験的考察の結果、多成分系固体粒子の混合につき、その混合度 X に関する理論式として著者は

$$X = K \left(\frac{NDd\rho_0}{\mu g} \right)^\alpha \left(\frac{N^2 D^2}{gd} \right)^\beta (NT)^\theta$$

なる式を導き、実験的にも一応成り立つことを述べた。しかし現在使用されているミキサについても、おのおの操作条件について NRe , NFr , NT の値はいずれも著者が行った実験値の範囲にあり、混合羽根の影響などと今後の研究において検討を加える予定である。

参 考 文 献

- 1) 柳場重正：コンクリートミキサにおける混合度について、土木学会論文集，73号，昭36.3.
- 2) 柳場重正：コンクリートミキサ内の固体粒子の運動について、金沢大学工学部紀要，Vol. 3, No. 4, 1964.12 および土木学会論文集，68号，昭35.5.
- 3) 柳場重正・高桑重三：鋼球を骨材とみなした場合のセメントペーストの挙動。セメントコンクリート，No. 169, 1961.3.
- 4) Robert Edworth Johnston & Meredith Wooldridge Thring: Pilot Plant, Models and Scale-up Methods in Chemical Engineering 1957.
- 5) Rushton, Costich & Everett: Chemical Engineering Progress Vol. 46, No. 8, p. 395.
- 6) H.E. Rose & R.M.E. Sullivan: A Treatise on the Internal Mechanics of Ball, Tube, & Rod Mills (7) 8): 2)

(1967.7.6・受付)