

コンクリート ミキサ内における固体粒子の運動について

正員 楠 場 重 正*

ON THE MOTION OF PARTICULATE SOLIDS IN A CONCRETE MIXER

By Shigemasa Hasaba, C.E. Member

Synopsis. These studies were intended to give the basic information on the mechanism of mixing in a concrete mixer. This paper is a note on the experimental investigations on the motion, distribution and mixing of the particulate solids of three ingredients, in two model mixers of the tilting type without mixing blades which rotate horizontally.

1. 緒 言

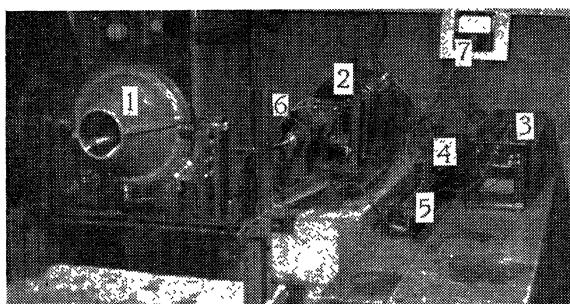
混合の操作は広く工業に使用され、土木工学および化学工学方面などで古くから取扱われ、材料、配合、強度などいろいろの方面より検討されている。しかしミキサ自体については一応その試験方法¹⁾を規定しているが基礎的研究についてはほとんどなされておらないのが現況である。

本研究はコンクリート ミキサに対する基礎的研究として可傾式パッチ ミキサを対象として模型実験を行い、まず固体-固体の混合機構を明らかにしようとしたものであるが、ここに報告するものはミキサ内に混合羽根をもたず、水平に回転したときのミキサ内における固体粒子の運動、混合に関して実験的に考察したものである。

2. 実験装置および実験方法

写真-1 は実験装置全体を示す。1 はミキサおよび支架、ミキサは 0.57 m³ (21切) 可傾式ミキサの約1/10および1/15の模型（以下おののおのⅠ型、Ⅱ型と呼ぶ）で、Ⅰ型は写真-2 (a) に示すようにアルミニューム鋳物で最大寸法は直径 210 mm、長さ 258 mm である。

写真-1



Ⅱ型は写真-2 (b) に示すようにミキサ内の粒子の運動を観察するために、透明な合成樹脂を本体に採用した。

この最大寸法は直径 135 mm、長さ 176 mm でいずれも試料採取のため中央リングを境に4つに分割した。

2 は直流電動機、3, 4, 5 は回転速度可変用の摺動抵抗器、6, 7 は電動機軸回転数測定用の交流発電機および回転指示計である。

ミキサ本体は支架部分で 0° より 5° 間隔に 40° まで傾斜させることができる。

使用した固体粒子を相馬および九味浦のセメント試験用標準砂を粉碎して、タイラー フルイを使用

No.1 (細粒子) -80/+100 mesh

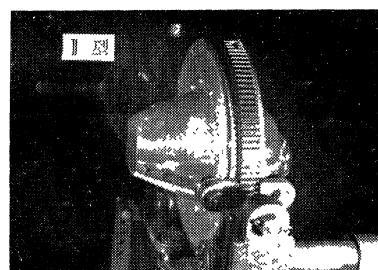
No.2 (中間粒子) -42/+ 48 mesh

No.3 (粗粒子) -20/+ 24 mesh

写真-2 (a)

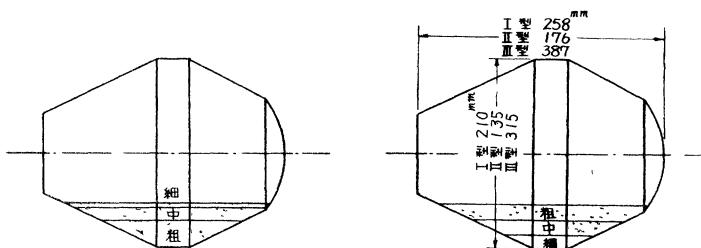


写真-2 (b)



* 金沢大学助教授、工学部土木工学教室

図-1



とフルイ分けして使用した。砂は使用に際して常に乾燥器にて十分乾燥して使用した。

実験はまずⅠ型について水平状態で回転し、これに静止時の可能最大投入量の約80%、60%、40% (1400 g, 1050 g, 700 g) と投入量を定め、おのおの場合において重量比で1(細) : 2(中) : 4(粗) の比で図-1のように3層に分けて投入した。

回転数は従来のミキサの周速1 m/sec を規準として、回転計の測定に都合のよいように電動機軸において400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 950 rpm の4種とした。回転時間は回転しはじめてから30'', 1', 2', 3', 4' とし回転終了後おのおの投入量に対して図-2に示すように水平に2~4層に分け、さらに軸に直角方向に3~4断面で切って、おのおの部分から角型スプーンで試料を採取した。

採取した試料はフルイ分けして自動天秤で計量した。

Ⅱ型についてはⅠ型に相当した状態、すなわち投入量については静止時の可能最大投入量の80%、60% (302 g, 224 g) をⅠ型と等しく、重量比で1(細) : 2(中) : 4(粗) の割合で3層に分けて投入した。

回転数については投入された粒子が、ミキサの最大直径部分Ⅰ型と等しい遠心力をうける回転数を選んだ。いまⅠ型とⅡ型の関係を示すと表-1のようになる。

表-1

型式	最大直径 cm	電動機回転数 rpm	トラム回転数 rpm	周速 cm/sec	遠心加速度 cm/sec ²
I	21.0	A	400	44.5	48.9
II	13.5		500	55.5	39.2
I	21.0	B	600	66.6	73.2
II	13.5		750	83.3	58.9
I	21.0	C	800	88.8	97.6
II	13.5		1000	111.1	78.5
I	21.0	D	950	105.4	115.8
II	13.5		1200	133.3	94.2

図-2

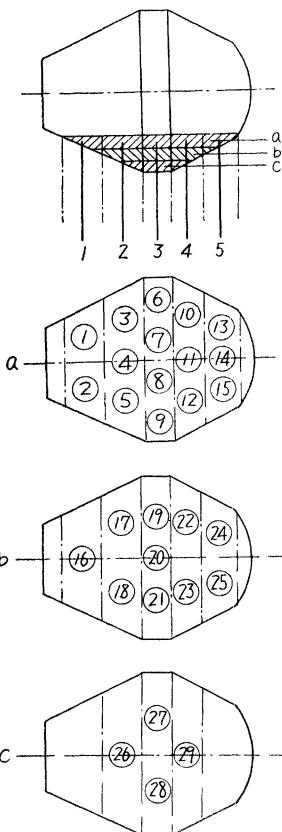
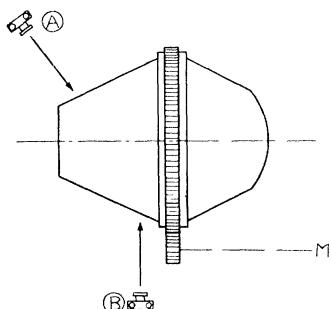


図-3



なおミキサ内の粒子の運動を観察するため、Ⅱ型について粗粒子を黒く染めて回転中に図-3に示すAおよびB位置から写真撮影した。写真-3~6はその一例を示したものである。

3. 水平に回転するミキサ（羽根のない場合）内の固体粒子の運動

水平回転円筒内における固体粒子の運動についてはすでに化学工学²⁾、採鉱工学³⁾においてボールミル型混合機、ボールミルなどにおける固体粒子の運動につき研究され著者⁴⁾もすでに水平回転円筒内における細粒固体粒子の分離について発表したが水平回転円筒内で固体粒子は回転数により3つの形態を示すことが明らかにされている。すなわち回転数の小さい間は粒子は粒子相互の摩擦および粒子と円筒周壁の摩擦により、円筒周壁に付着して円運動を行い、ある高さまで持ち上げられると自由表面を流下し斜面の下端において再び円運動に入る。この際回転数がごく遅い間は自由表面はほぼ平面をなすが、回転数がやや大きくなると図-4(a)に示すように曲面をなし、断面はあたかも「曲玉」のような形状をなす。しかし粒子と円筒周壁の摩擦力が小さくて、自由表面

が粒子の安息角より大きくなれないときは、粒子は一体となつてある高さから円筒周壁を滑り円筒の回転につれていわゆる单弦運動を行う。

回転数を次第に上げると、粒子はついにある高さから 図-4(b) に示すように円筒周壁よりはなれて円筒空間に飛出して、放物線を画いて自由表面上に落下する。落下した粒子は一部はそのまま粒子体中にもぐるが大部分は自由表面を流下して円運動に入る。かくして回転数をさらに上げてゆくと、図-4(c) に示すように粒子の落下する点が次第に移動し、ついには粒子は完全に円筒内面に固着して円筒と同一回転する。

本実験に採用したミキサは 写真-2において示したように、両側の截頭円錐部と中央円筒部(以下円錐部、円筒部と呼ぶ)より

なり、粒子の運動は円筒部と円錐部に分けて考えることとする。

まず円筒部では粒子は水平回転円筒内におけると同じく回転数の上昇につれて上述と同様に3つの形態を示す(写真-3(a)～写真-6 参照)。

つぎに円錐部では一断面をとれば水平回転円筒と変わらないが、全体として半径の相違により回転の遅い間は 写真-3(b) に見られるように粒子の上昇線はミキサの投入口あるいは底部から円筒部に向つてほとんど直線的となり、それから粒子は自由表面を流下する。

ただこの際円錐部では周壁の傾斜により 図-5 に示すようにおのの粒子はその位置において遠心力と重力により

$$S = mr\omega^2 + mg \cos \alpha$$

なる半径方向の力をうけている。これを周壁に直角な力 N と軸方向の力 H に分けて見ると、

$$N = S \sec \beta = m(r\omega^2 + g \cos \alpha) \sec \beta$$

$$H = S \tan \beta = m(r\omega^2 + g \cos \alpha) \tan \beta$$

となり粒子はその位置において

$$F = H - \mu N \quad \text{ただし } \mu : \text{粒子相互の動的摩擦係数}$$

なる力にて円筒部に向つておされている。

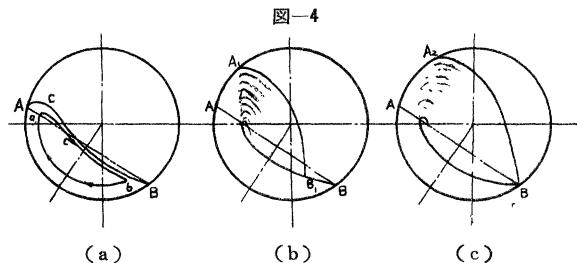


写真-3 (a)

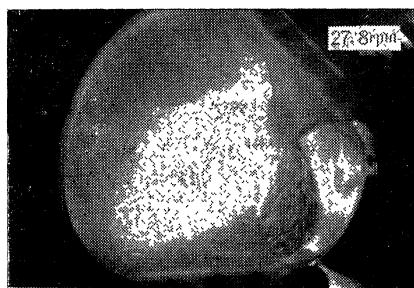


写真-3 (b)



写真-4 (a)

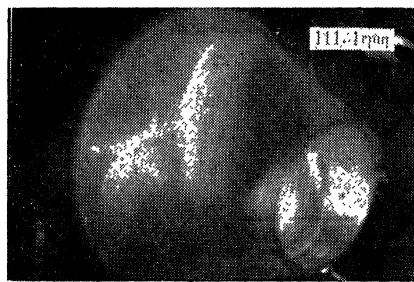


写真-4 (b)

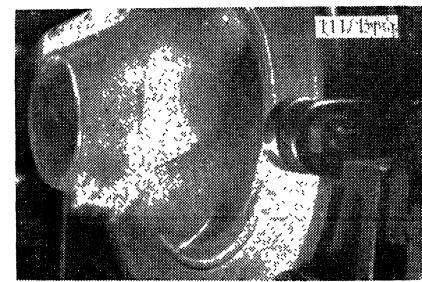


写真-5

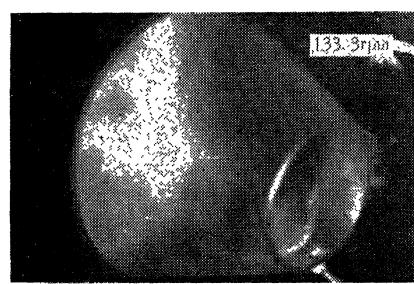
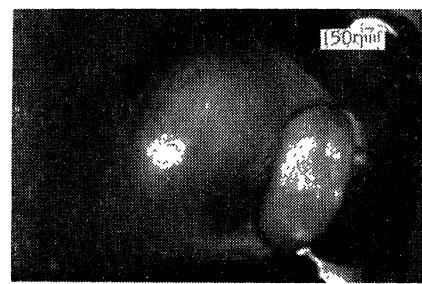


写真-6



従つて回転の上昇につれて粒子は中央に集まり、写真-4 (b) のような状態では円錐部と円筒部の縫目からミキサ投入口あるいは底部に向つて粒子は放物線状に上昇し、円筒部から円錐部への流れを生じているのが観察される。回転がさらに上昇すれば投入量にもよるがそのほとんどが円筒部に集まり写真-6 に示すように粒子は円筒周壁に固着してミキサと同一回転する。

4. 実験結果および考察

さきに述べた方法で採取した試料からフルイ分けした結果を 1, 2, 3, 4, 5 の各層について平均して、その平均全重量に対する No.1 (細), No.2 (中), No.3 (粗), の混合割合を計算して f_{ni} とする。すなわち試料の平均全重量を W_g , W_g 中にふくまれる No.1, No.2, No.3 の粒子の重量を w_1g , w_2g , w_3g とすれば

$$f_{1t} = \frac{w_1}{W} \quad f_{2t} = \frac{w_2}{W} \quad f_{3t} = \frac{w_3}{W} \quad \text{ただし } W = w_1 + w_2 + w_3 \text{ である。}$$

つぎに投入時におけるおのの粒子の全重量に対する割合を計算して P_{ni} とすれば、 P_{ni} はミキサ内で粒子が完全に混合された場合、採取した試料から得らるべき値、すなわち期待値である。従つて f_{ni}/P_{ni} を計算することにより試料中のおのの粒子の片寄りを知ることができる。各投入量の一定回転数についておのの粒子につ

図-6 (a)

ドラム型式 I 型 傾斜角 0° 投入量 1400g 80%

ドラム回転数 44.5 rpm

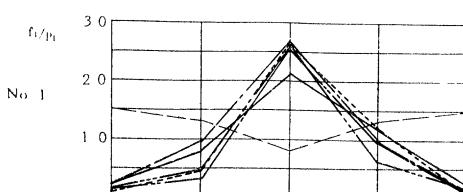
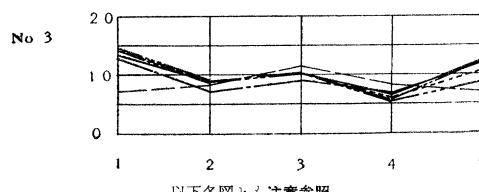
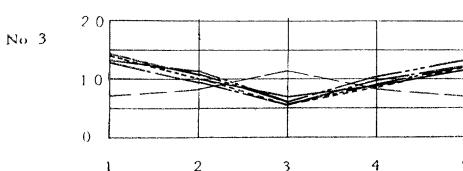
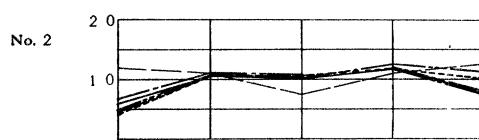
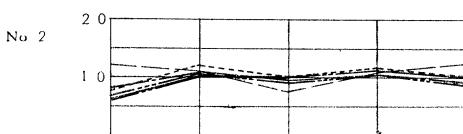
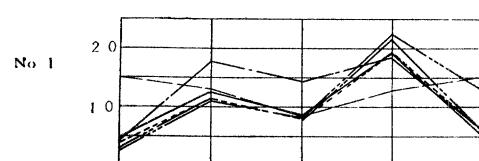


図-6 (b)

I 型 80% 66.6 rpm



注意

回転前: —————— 30°
回転後: {————— 1°
————— 2°
————— 3°
————— 4°

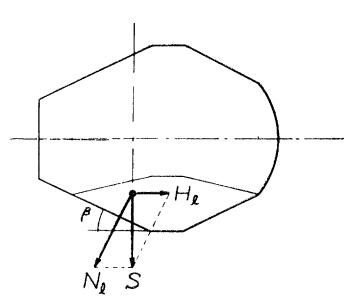
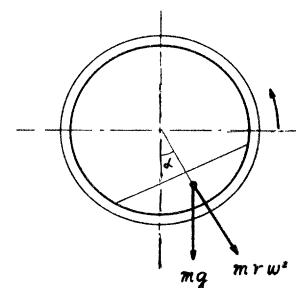


図-5



以下各図とも注意参照

いて f_{ni}/P_{ni} を縦軸にとり、横軸に試料採取の中心位置をとると、I型については図-6、図-8、II型については図-7、図-9に示すようになる。

これらの結果よりI型、II型を通じて投入量と回転数が等しいときは混合時間に関係なく、粒子の分布状態は一様で、回転後30''~1'でおのおの粒子は移動を終り、その後ほとんど大きな移動が認められない。

図-6 (c)

I型 80% 88.8 rpm

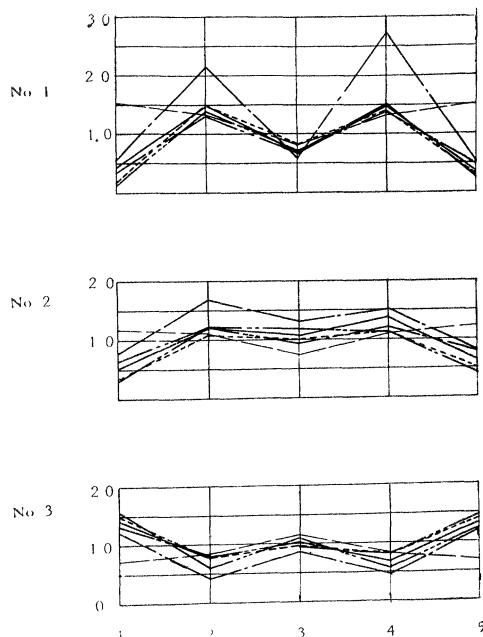


図-6 (d)

I型 80% 105.4 rpm

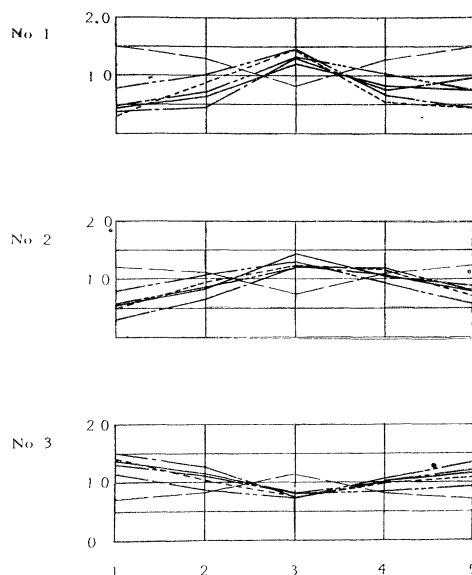


図-7 (a)

ドラム型式 I型 傾斜角 0° 投入量 30kg 80%
ドラム回転数 55.5 rpm

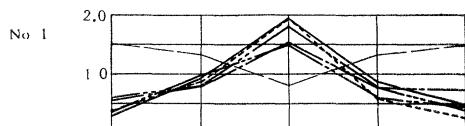
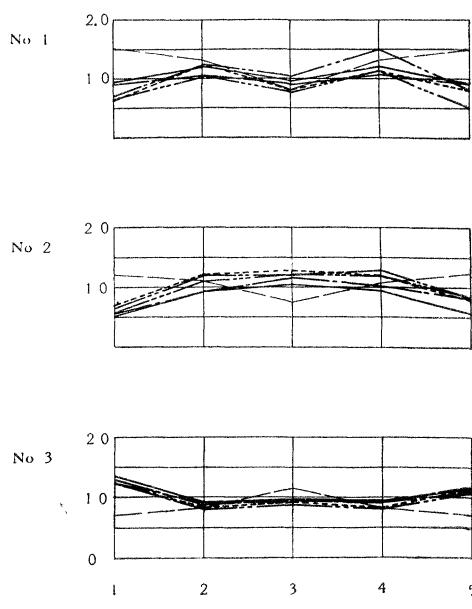


図-7 (b)

I型 80% 83.3 rpm



位置

粒子の分布状態には投入量と回転数により2通りある（以後A型、M型と呼ぶ）。A型は細粒が円筒部に多く集まり、粗粒子が円錐部の1、5の層に集まる状態で、I型、II型のいずれも投入量が80%のときは、回転数の遅いA回転と最も早いD回転、投入量60%のときはA、B、D回転のとき示され、回転前の粒子の分布状態とは全く逆の状態を示している。

M型は細粒が円錐部の2、4の層に多く、粗粒が円筒部および円錐部の1、5の層に集まる状態でI型、II型のいずれも投入量80%のときは中間回転数のB、C回転投入量60%のときはC回転のとき示す状態で、回転前

図-7 (c)

I型 80% 111.1rpm

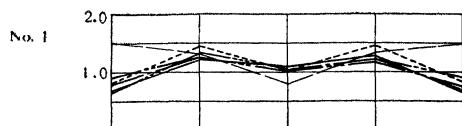


図-7 (d)

I型 80% 133.3rpm

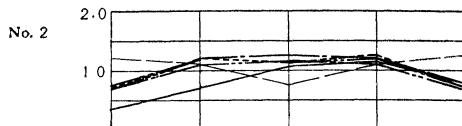
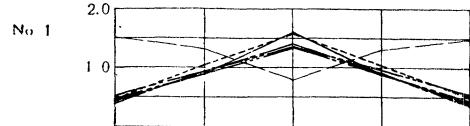


図-8 (a)

I型 60% 88.8rpm

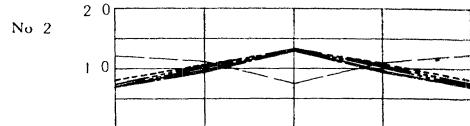
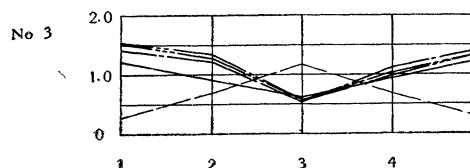
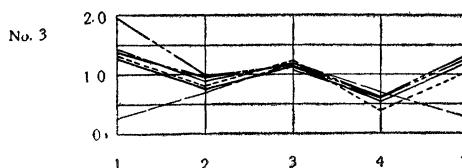
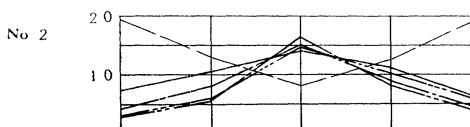
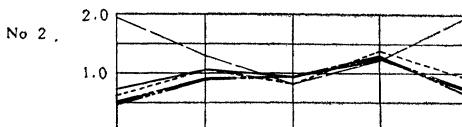
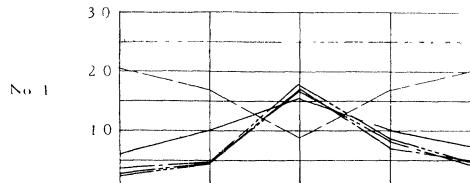
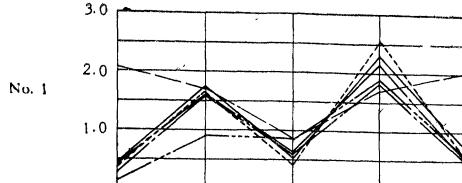
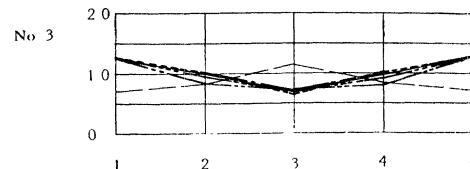
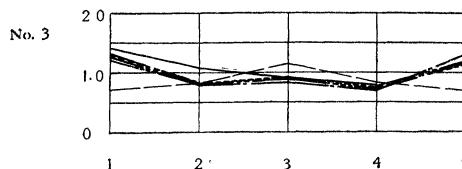


図-8 (b)

I型 60% 105.4 rpm



の粒子の分布状態に比較すると、両端の1, 5の層では全く逆になるのは△型と等しいが、円錐部の2, 4の層および円筒部ではあまり変化が認められない。

図-8 (c)

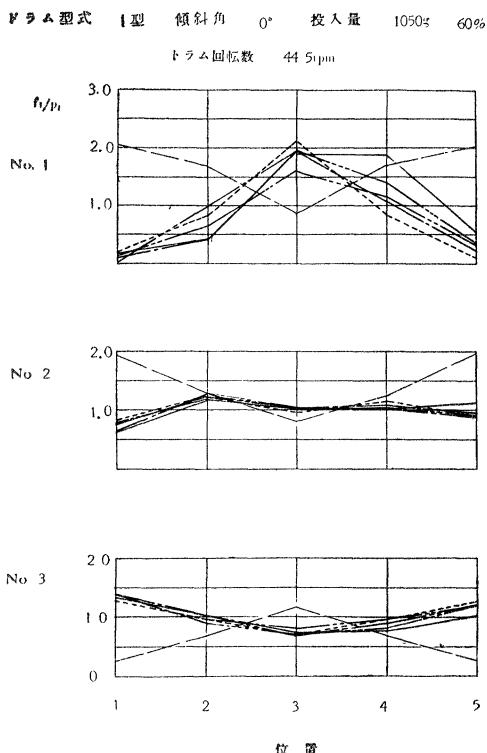


図-8 (d)

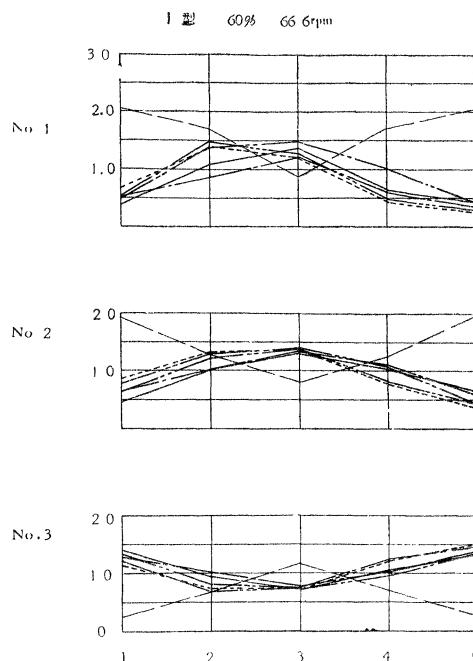


図-9 (a)

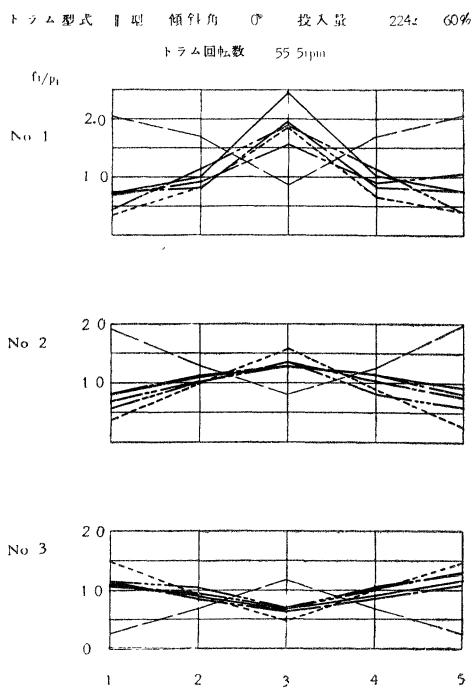


図-9 (b)

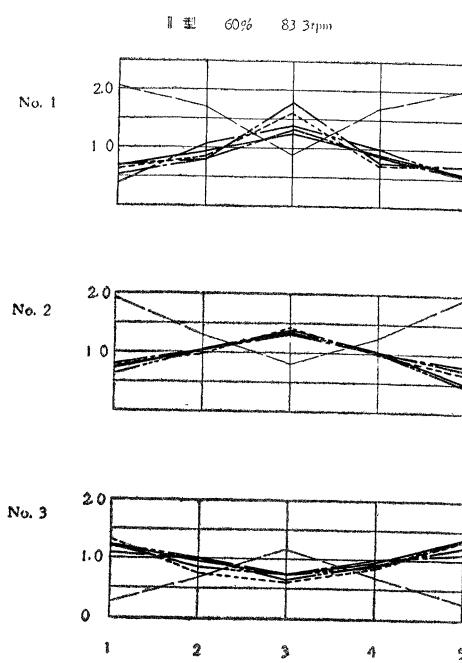


図-9 (c)

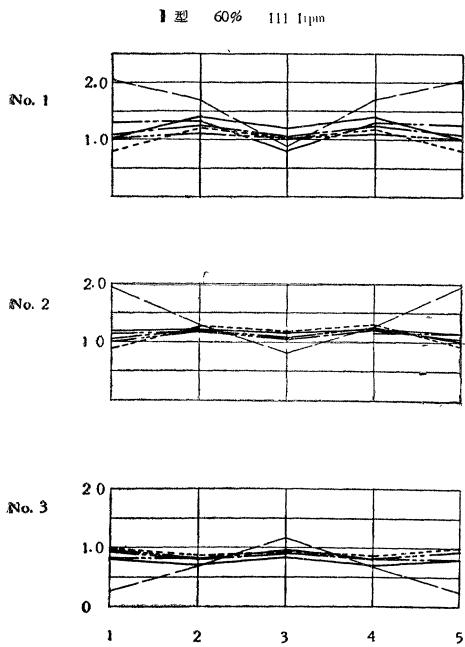
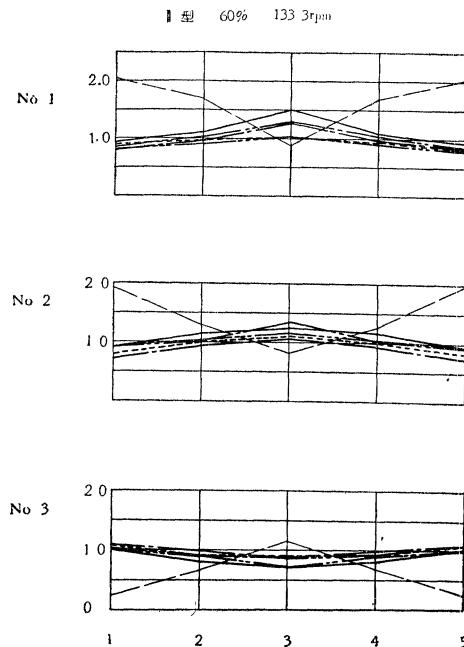


図-9 (d)



中間粒子については \wedge , M 型を通じて細粒に近い分布状態を示す。

以上 2 つの型は投入量、回転数により多少異なるが、一般に \wedge 型は回転の遅いときと回転の早いときにおいて示され、回転の遅い方が片寄りがはげしい。M 型は中間の回転のとき示されるがなかでも回転の早い方が片寄りがやや大きい。

回転の遅いときは粒子は層状に周壁にそつて持ち上げられ、ある高さから流下する、いわゆる流動運動のみであるため、粒子の移動にともない細粒が粗粒の間げきをぬつて力の働く方向すなわち円筒部に集まり粗粒は円錐部の 1, 5 の層にのこると考えられる。

回転の早いときは投入量のほとんどが円筒部に集まり、ある高さまで粒子は周壁に固着した状態で持ち上げられ、落下運動に入るから、固着状態の部分では粒子相互の移動はなく、落下運動の際、細粒が同時に周壁からミキサ空間に飛出し、落下中および落下点で細粒が混ざると考えられる。従つて回転中は比較的混合はよいと思われる。しかし回転をとめた瞬間粒子は円筒部より両側円錐部にひろがる。その際ころがり抵抗の小さい粗粒がさきに円錐部にひろがり結局回転の遅いときと同じような分布状態を示すものと考えられる。ただこの際粒子がひろがるときのみ分離が生ずる関係上回転の遅いときにくらべて片寄りは少ない。中間の回転ではさきほど述べたように円錐部と円筒部の境でとくに高く持ち上げられ、円筒部より円錐部への粒子の流动が生ずるため円筒の細粒が円錐部の 2, 4 の層に移動し、さらに円錐部の端部よりは回転の遅いときと同じように円筒部へ向つて細粒が移動するから M 型の分布状態を示すと考えられる。

粒子の分布状態から混合状態を検討すると、フルイ分けしたおのの粒子について f_{ni}/P_{ni} が 1 であれば、その試料は完全混合状態にある。従つて粒子の分布線が $f_{ni}/P_{ni}=1$ なる線に近いほどミキサの混合状態がよいこととなる。ただミキサ全体としての混合状態の良否はミキサ内の各層における粒子の量が異なるから、部分的によくても量の多いところで混合状態が悪ければ全体としての混合状態は悪くなる。

まずミキサ各部について \wedge 型の分布状態では一般に円錐部の 1, 5 の層および円筒部において片寄りがはげしくとくに 1, 5 の層ではほとんど細粒が存在しない分離の状態で、円錐部の 2, 4 の層では大体完全混合に近い状態である。M 型の分布状態では円錐部の 1, 5 の層では \wedge 型と同じように細粒が非常に少なく混合状態はよくない。円筒部および円錐部の 2, 4 の層では片寄りはあまりはげしくなくかなり良い混合状態にある。従つてミキサ全体の混合状態は回転の遅い A 回転では円筒部の片寄りが大きく混合状態は良くない。回転の早い D 回転では A 回転と同じように \wedge 型の分布状態を示すが円筒部での片寄りは A 回転にくらべて小さく全体として良

い混合状態と考えられる。中間の回転では早い回転の方が片寄りが少なくA回転の場合よりも混合状態は良いようである。

以上から固体粒子の混合は粒子相互の層状運動と落下運動により進むと考えられる。層状運動による混合を流動混合、落下運動による混合を落下混合と呼べば、流動混合は粒子相互の層移動により行われるもので、落下混合は空間を落下する粒子の速度差により行われるものである。回転の遅いときは流動混合のみで、中間の回転では落下混合が加わり、回転の早いときは落下混合のみとなる。従つてミキサにおける固体粒子の混合には落下混合が非常によく、流動混合は分離への一過程に過ぎないと考えられる。

5. 結 言

以上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、水平で混合羽根のない場合におけるミキサ内の固体粒子の運動、分布状態並びに混合状態について実験的に検討したがつぎのように結論できる。

(1) I型, II型を通じて細, 中, 粗の粒子中, 細粒が最も移動しやすく, 粗粒は細粒の動きに大きく影響される。

(2) 粒子はミキサの回転後30°～1'で移動を一応終り、それ以上の時間ではなほだしい分布型の変化は認められない。

(3) 回転による粒子の分布状態には細粒についてミキサ軸方向に1つの頂点をもつ△型と、2つの頂点をもつM型の2通りがある。

(4) I型、II型において投入比率が等しく、最大直徑部における遠心力が等しい回転では同じ型の分布状態を示す。

(5) ミキサ内の粒子の混合は流動混合と落下混合の2つにより行われるが、落下混合のみが行われる回転数の早いときが混合状態が最もよく、ついで流動混合と落下混合の存在する中間回転となり、流動混合のみが行われる回転数の遅いときの混合状態は最も悪い。

以上、粒径比、混合比が一定の場合について述べたが、これらの相違についてはミキサの傾斜度、羽根の影響などと今後の研究により明らかにしたいと願つている。

終りに本研究にたいし終始御指導を賜つた京都大学 村山溯郎博士および実験にあたり御協力を得た池田 淳、清水 遼、白村 晋、高原清介君に深謝の意を表すものである。

参考文献および資料

- 1) JIS 1119: 「ミキサで練り混せたコンクリート中のモルタルの単位容積重量差の試験法」, JIS. A. 1112 「また固まらないコンクリートの洗い分析試験方法」など
 - 2) 大山義年: 水平回転円筒内の粒体の運動, 理化学研究所彙報 第 12 帯 12 号 昭.8, 第 14 帯 7, 9 号 昭.10, 第 15 帯 6 号 昭.11, 第 18 帯 8 号 昭.14, 第 19 帯 8 号 昭.15
P.M.C. Lacy 'Development in the Theory of Particle Mixing' J. appl. Chem. 4 May, 1954
 - 3) Taggart. Handbook of Mineral Dressing 5-03-5-10
 - 4) 村山潮郎・柳場重正: 混合機械の研究, 土木学会誌, 36-10 昭.26-10

(昭.34.9.28)

土木学会論文集編集委員会

委員長	雄男	胤富人	幸良	恵晃	次	郎和郎	恒麟樹	隆	夫
委員	武和広	茂文	和忠	敏俊	博	太	隆三		
	上田	上東	藤蔭	保村	村島	原安野	易	柏	
	最芦井	伊伊伊	大奥	木君		健	栄		
	"	"	"	"	"	原	野		
	"	"	"	"	"	安	易		
	"	"	"	"	"	口	辺		
	"	"	"	"	"	松	丸		
	"	"	"	"	"	三光	森山		
	"	"	"	"	"	渡			
	"	"	"	"	"				