

[1022] 練りませ進行過程におけるコンクリートの物性および均一性

岸 清 (東京電力)

正会員 ○渡部 正 (前田建設工業 技術研究所)

牧野英久 (前田建設工業 技術研究所)

正会員 山田一字 (前田建設工業 技術研究所)

1. まえがき

コンクリートを練り混ぜるためのミキサは、現在種々のものが製造販売されているが、練り混ぜ中におけるコンクリートの動的物性や練り混ぜ機構について十分に明らかにされているとはいえない。これは、練り混ぜという操作技術に影響を及ぼす要因が非常に多いためである。しかし、近年、高品質なコンクリートを練り混ぜるための技術が開発され、練り混ぜ機構についてもある程度明らかになってきた。⁽¹⁾⁽²⁾

著者らは、コンクリートミキサにおける練り混ぜ機構および最適操作条件を明らかにし、製造されるコンクリートの品質をどのような指標で評価すべきかについて検討するための研究を実施している。

ここで報告する実験では、練り混ぜ時間という影響因子に着目し、練り混ぜ進行過程でコンクリートの物性および均一性がどのように変化していくかを種々のミキサを使用して検討したものである。

表-1 使用したミキサの諸元

形 式	公称容量	回 転 数 (rpm)	最外縁の 周速 (m/s)	羽 根 の 枚数	そう入率*
可傾式ミキサ	2切	30	1.03	2枚	0.32
	4切	0 ~ 42	0 ~ 2.0	3枚	0.31
	8切	16	0.98	3枚	0.21
水平二軸型 強制練りミキサ	90ℓ	34	1.07	5枚/軸	0.27
パン型 強制練りミキサ	100ℓ	0 ~ 60	0 ~ 3.0	3枚	0.32

$$* \text{そう入率} = \frac{\text{公称容量}}{\text{ミキサ内容積}}$$

2. 実験概要

使用したミキサは、表-1に示す5種類であり、そのうち可傾式ミキサ(4切)、パン型強制練りミキサのそれぞれは可変速式である。

コンクリートの配合は、表-2に示したとおりである。練り混ぜ方法は、図-1に示したように、ミキサ停止状態のもとで全材料を層状に2回に分けて投入し、それから所定時間ミキサを回転させる方法とした。練り混ぜ時間は10~1000秒に変化させ、練り混ぜ量は公称容量相当とした。

標準的な試験項目は、スランプ、空気量、ブリージング、圧縮強度およびJISA 1119に準拠したバッチ内コンクリートのモルタル量の差、粗骨材量の差とした。各試験に供するコンクリートは、所定時間練り混ぜた後に、可傾式ミキサでは停止状態で排出した試料を、水平二軸型ミキサでは運転状態で排出した試料を、パン型ミキサでは停止させたミキサ内の試料をいずれも練り直しを行なわないで採取した。そして、試験は1バッチにつき3回づつ行ない、コンクリートの特性値としてそれらの平均値を、品質のバラツキとしては標準偏差で表わすものとした。

コンクリートの練り混ぜ中には、ミキサの回転に消費される有効電力および積算有効電

表-2 コンクリートの標準配合

粗 骨 材 の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)					
			水		セメント		細骨材	
			W	C	S	粗骨材G 10~20mm	粗骨材G 5~10mm	混和剤 Ad
20	55	49	180	327	868	558	372	0.033

セメント：普通ポルトランドセメント

細骨材：大井川産川砂，比重2.62，吸水率1.07%，粗粒率2.70

粗骨材：秩父産硬質砂岩系砕石，比重2.70，吸水率0.64%

混和剤：天然樹脂系AE剤

力量を測定した。またパン型強制練りミキサの場合には、同時に回転トルクも測定した。

3. 実験結果

3.1 練り混ぜ特性曲線⁽³⁾に基づく練り混ぜ性能評価

練り混ぜ時間に対する混合度および特性値の変化を表わした練り混ぜ特性曲線は、ミキサ内の混合状態、練り混ぜ機構を知る上で重要なものである。

図-2は、水平二軸型強制練りミキサの練り混ぜ特性曲線であり、横軸に練り混ぜ時間の対数を、縦軸に特性値の平均値と標準偏差をプロットしたものである。この練り混ぜ特性曲線の変化傾向は、ミキサの形式、操作条件および配合等によつて大きく異なることが明らかになっている⁽³⁾。しかしながら、いずれの場合においても、次のような共通したパターンが認められた。

- (1) 練り混ぜ初期の段階では、バッチ内コンクリートの品質のバラツキ（特性値の標準偏差）が非常に大きく、練り混ぜの進行に伴い、ある時間で定常状態に達する。
- (2) スランプは、ある特定の練り混ぜ時間で最大値を示す。
- (3) プレーンコンクリートの場合、エントラップドエアは練り混ぜの進行に伴い減少する。
- (4) AEコンクリートの場合には、空気量の変化はほとんど生じない。
- (5) ブリージングは、練り混ぜの進行に伴い減少する。
- (6) 圧縮強度は、練り混ぜの進行に伴い増大する。
- (7) 粗骨材量の差およびモルタル量の差がJISの規格値（粗骨材量の差：5%以下、モルタル量の差：0.8%以下）を満足していても、品質特性値のバラツキは必ずしも定常状態に達していない場合がある。

このように、ミキサの練り混ぜ性能を評価する場合には、供給された材料のマクロ的混合度合（JIS A 1119の試験）の評価のみでは不十分であり、少なくともスランプ、圧縮強度のバラツキをも考慮する必要があるといえる。

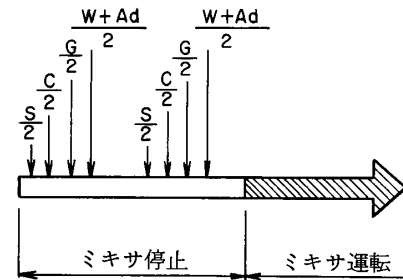


図-1 練り混ぜ方法

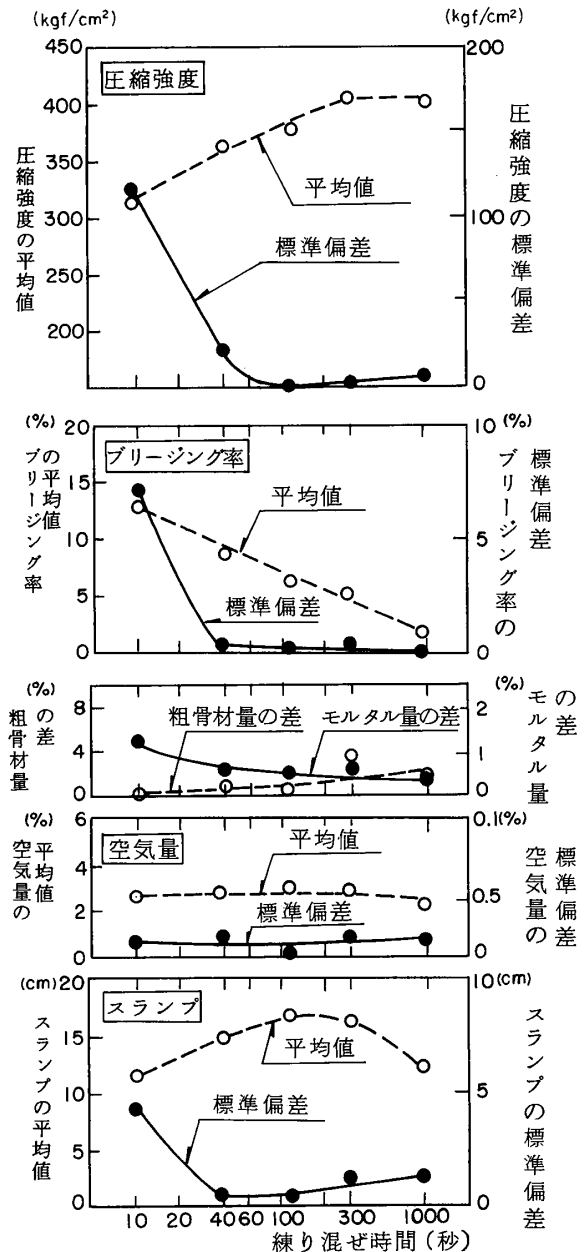


図-2 水平二軸型強制練りミキサの練り混ぜ特性曲線

3.2 練り混ぜ進行過程におけるスランプ

(1) 練り混ぜエネルギー⁽⁴⁾に基づく検討

前述したように、スランプは練り混ぜ時間とともに変化する傾向が見られた。図-3は、可傾式ミキサ(4切)で周速を0.7, 1.0, 1.3 m/sに変化させた場合の練り混ぜ進行に伴うスランプ変化(スランプ変化曲線)を示したものである。このように、周速によつてスランプ変化曲線の傾向が大きく異なっていた。すなわち、スランプは、周速が大きいほど短時間で最大値を示し、その後の減少割合も大きくなる傾向が認められた。

これらの現象を、練り混ぜエネルギーすなわち、実質的な練り混ぜに関与するコンクリート単位体積当りの積算消費電力量によつて評価すると、図-4のようになる。このように、スランプ変化曲線は、ミキサの周速による違いを練り混ぜエネルギーを一つの指標として評価可能であることが認められた。

図-5は、同様な評価方法で、練り混ぜ容量が異なる可傾式ミキサ(2切, 4切, 8切)におけるスランプ変化曲線を示したものである。これらのミキサは、周速がほぼ同一とみなせるものであり、それぞれ1.03, 1.00, 0.98 m/sである。しかしながら、それらの変化曲線の傾向が異なっており、他の条件すなわち、ミキサの容量、羽根の形状・枚数等の違いによる影響を練り混ぜエネルギーによつて一義的に評価し得ないことを示している。

(2) スランプの変化要因に関する検討

スランプは、いずれのミキサでも練り混ぜ進行初期の段階で増加傾向を示し、ある特定の時間で最大値となりその後減少傾向を示している。

この現象は、図-6に示したように、コンクリート特有の性質ではなく、不活性な高炉スラグ微粉末をセメントの代りに使用した場合にも同様な傾向が認められる。⁽⁵⁾

これは、粉粒体(セメントおよび高炉スラグ微粉末)と液体(水)との充填形態が、練り混ぜ進行初期の段階ではペンジュラー状態からファニキュラー状態へと移行している過程であり、それ以降においてスランプが最大値に達して減少傾向を示すのは、キャピラリー状態に以降し粉粒体の分散が一層進んでいるためであろうと推測される。

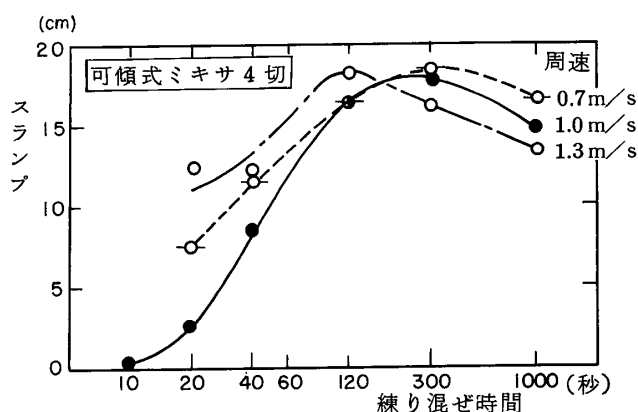


図-3 可傾式ミキサ4切で周速を変化させた場合のスランプ変化曲線

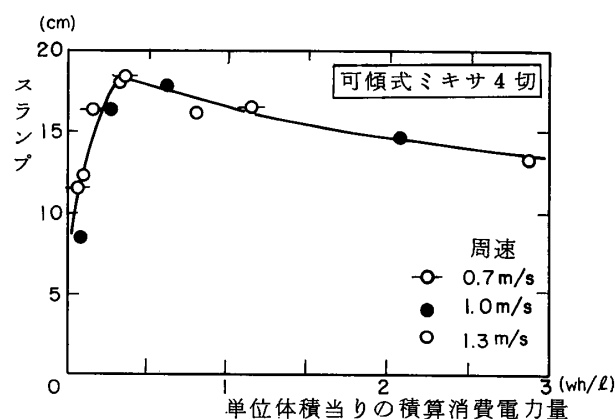


図-4 可傾式ミキサ4切で周速を変化させた場合の練り混ぜエネルギーとスランプの関係

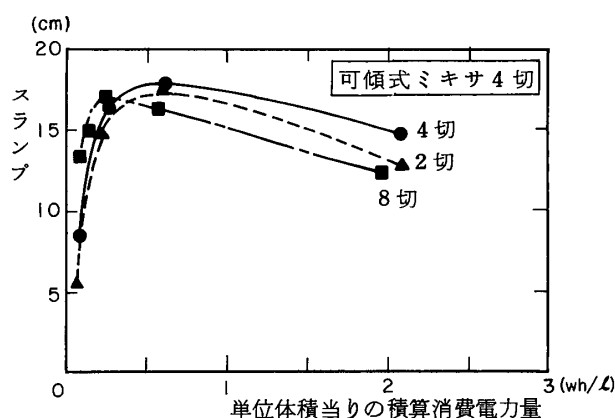


図-5 容量が異なる可傾式ミキサにおける練り混ぜエネルギーとスランプの関係

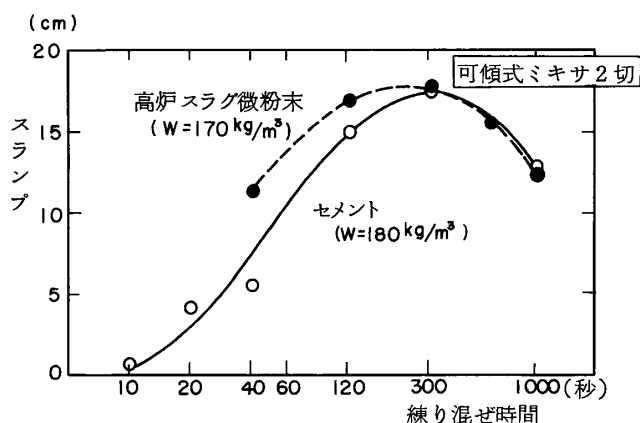


図-6 セメントを高炉スラグ微粉末で置き換えたコンクリートのスランプ曲線

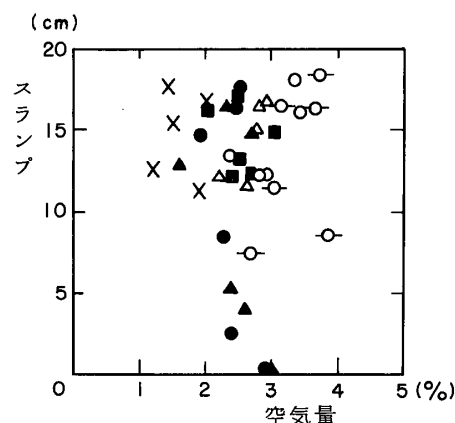


図-7 空気量とスランプの関係 (表-1の全ミキサ)

なお、空気量とスランプの関係は、図-7に示すとおりであり、それらの間に相関性は認められず、スランプの変化は空気量に依存していないものといえる。

(3) ミキサの回転トルク

パン型強制練りミキサを使用して、練り混ぜ時の回転トルクを測定した。その結果を、消費電力およびスランプの変化とともに、図-8に示した。このように、練り混ぜ時間が300秒から1000秒にかけてスランプが減少しているにもかかわらず、消費電力はほとんど

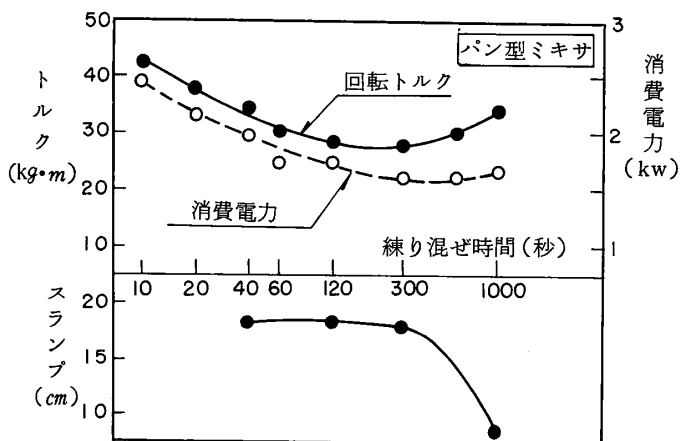


図-8 パン型強制練りミキサ(周速2.0m/s)における回転トルク、消費電力およびスランプの関係

変化していない。一方、回転トルクは、スランプの減少とともに増大している。したがって、練り混ぜ進行過程におけるコンクリートの物性変化の評価は、消費電力よりも回転トルクの方が指標として有効であることを示している。消費電力、回転トルクおよび回転数との間には、

$$T = f\left(P, \frac{1}{N}\right)$$

ここに、T：回転トルク

P：電力

N：回転数

の関係があり、電力が一定でトルクが増加傾向を示すということは、スランプの減少に伴って回転数も減少しているためではないかと考えられた。しかし、練り混ぜ時の回転数実測結果ではそのような現象は認められなかった。この理由としては、次のような事が考えられる。

- 回転トルクは、ミキサ羽根に作用する負荷を直接測定しているのに対し、消費電力は、減速機、伝達軸等を介したモーターの負荷を測定しているため、コンクリートに対する直接的な仕事量とはいえない可能性がある。
- 無負荷時の回転トルクは、負荷時の $30 \text{ kg} \cdot \text{m}$ に比較して $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}$ と非常に小さいが、消費電力は、負荷時の 1.5 kw に比較して無負荷時はその60%に相当する 0.9 kw である。したがって、負荷変動に対する応答感度が異なるためではないかと思われる。

3.3 練り混ぜ進行過程における圧縮強度

(1) 練り混ぜエネルギーに基づく検討

可傾式ミキサにおける練り混ぜ時間と圧縮強度の関係は、図-9に示すとおりであつた。実験は、練り混ぜ容量が2切、4切、8切の可傾式ミキサおよび練り混ぜ容量が4切で周速を0.7, 1.0, 1.3 m/sとした可傾式ミキサにて行なつた。いずれの場合も、練り混ぜの進行に伴つて圧縮強度は増大しているが、その変化曲線の傾向は異なっている。練り混ぜ時間が120秒の場合には、いずれのミキサも $350 \sim 374 \text{ kgf/cm}^2$ とほぼ同一の圧縮強度を示しているが、練り混ぜの進行に伴つて、ミキサの容量、周速による差が明確に表われ、1000秒の場合には圧縮強度の範囲が $375 \sim 438 \text{ kgf/cm}^2$ に広がっている。

前述したスランプと同様、練り混ぜエネルギーで圧縮強度を評価すると図-10、図-11のようになる。図-10は、可傾式ミキサ(4切)で周速を変化させた場合である。このように、圧縮強度は、スランプの場合(図-4)とは異なり、周速による違いを練り混ぜエネルギーでは一義的に評価し得ないことを示している。図-11は、それらに可傾式2切、8切および水平二軸型ミキサの実験結果を加えたものであり、同様ながいえる。

(2) ブリージングに基づく検討

最終ブリージング率と圧縮強度の関係は図-12に示すとおりであり、可傾式4切、8切および水平二軸型ミキサの結果についてプロットしてある。圧縮強度は、ブリージングの減少とともに増大する傾向が認められるが、図-2からも明らかなように、練り混ぜの進行に伴つてブリージングが減少していることから考えると、練り混ぜ時間をも含めて圧縮強度を評価しているともいえる。

同一配合のコンクリートにおいて、ブリー

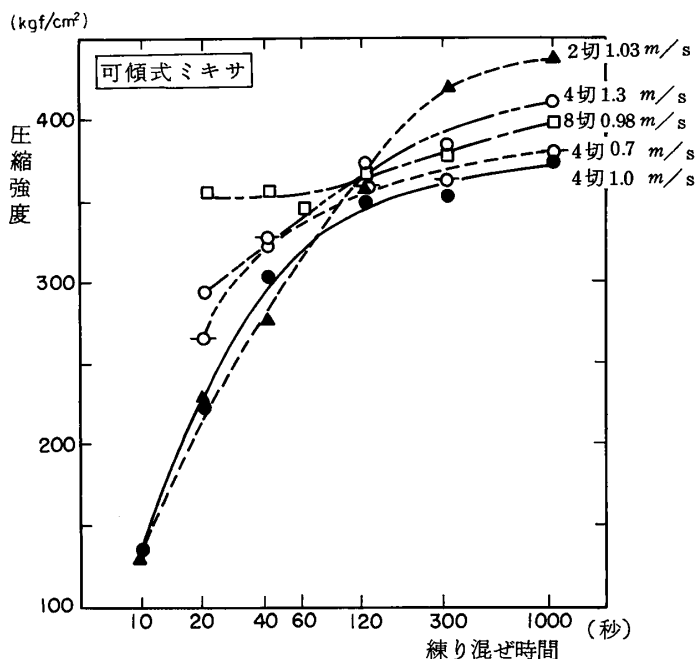


図-9 可傾式ミキサにおける圧縮強度

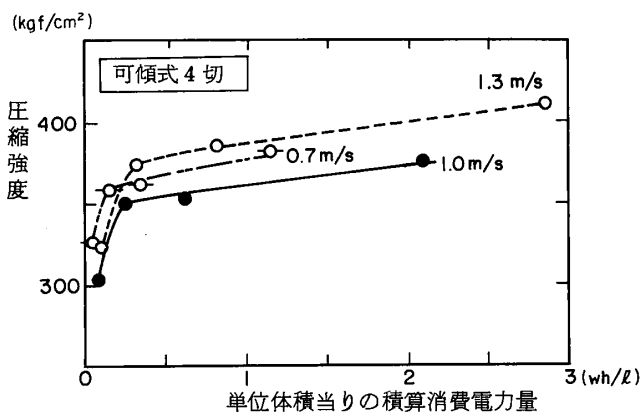


図-10 可傾式ミキサで周速を変化させた場合の練り混ぜエネルギーと圧縮強度の関係

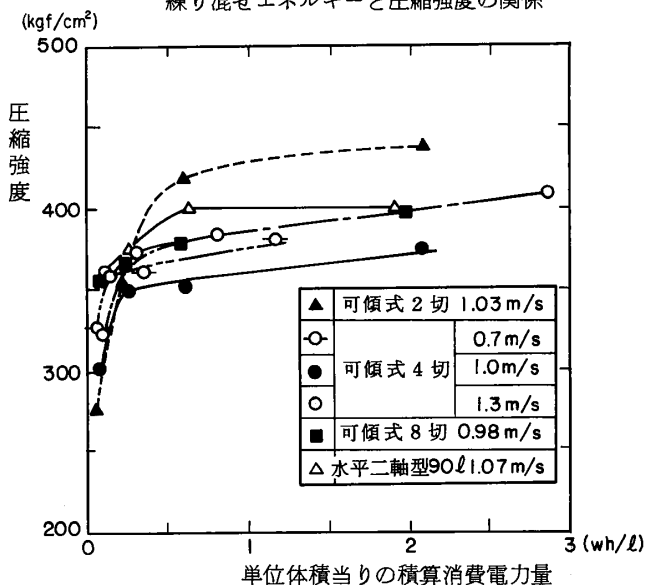


図-11 種々のミキサにおける練り混ぜエネルギーと圧縮強度の関係

ージングが減少するに伴って圧縮強度が増大するという現象は、ブリージングによる内部欠陥、すなわち、粗骨材下面に生ずる空隙が少なくなるためであるとされており⁽²⁾ここでも同様な結果が得られた。また、分割方式による練り混ぜ、すなわち、S.E.C.工法やダブルミキシング工法についてもブリージング率と圧縮強度との間に相関性が認められ、練り混ぜ方法の違いを同一に評価できることが明らかとなっている。そして、その場合、通常の一括練り混ぜ方式でも、それらの関係上に位置することが明らかになっており、S.E.C.工法やダブルミキシング工法による圧縮強度の増大は、ブリージングの減少によってもたらされるためであると説明されている。⁽²⁾

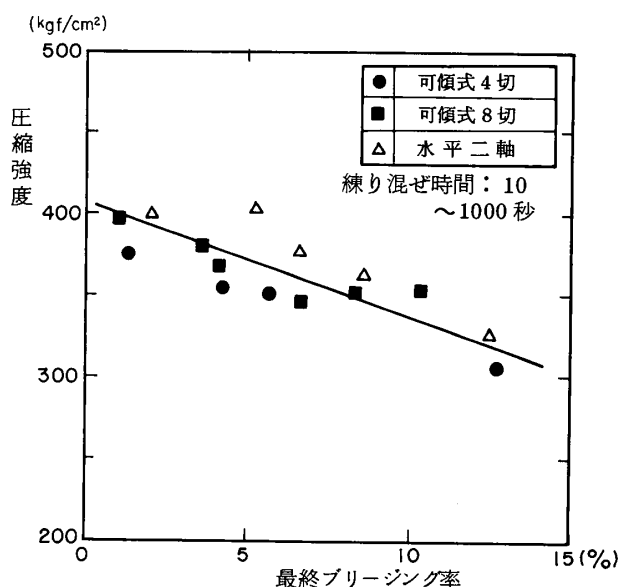


図-12 最終ブリージング率と圧縮強度の関係

本実験の結果からは、①練り混ぜ進行に伴う圧縮強度の増大は、セメント粒子の分散性向上によってもたらされ、その分散性の間接的評価はブリージングによっても表わすことができる。②一括練り混ぜ方式でも、練り混ぜ時間を長くすればS.E.C.工法やダブルミキシング工法と同様、コンクリート諸性質を改善することができる。ということが推測できる。

4. 結論

今回の実験により、練り混ぜ進行過程におけるコンクリートの物性および均一性について得られた結論を要約すると以下のようになる。

- (1) 練り混ぜの進行に伴って、コンクリートの物性は大きく変化する。そして、その変化傾向は、ミキサの形式および操作条件の違いの影響を大きく受ける。
- (2) ミキサの練り混ぜ性能を評価するには、JIS A 1119の試験のみでは不十分であり、品質特性値をも考慮した練り混ぜ特性曲線が有用な評価手法となりえる。
- (3) 練り混ぜ進行中におけるスランプおよびその変化は、ミキサの回転トルクにより評価できそうである。
- (4) 配合が同一であれば、ミキサの形式、操作条件（練り混ぜ時間、練り混ぜ方法）の違いが圧縮強度に及ぼす影響は、セメント粒子の分散性を間接的に表わしているブリージングによっても評価できうるものと思われる。

参考文献

- [1] 魚本：分割方式によるコンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究，コンクリート工学，Vol.20，No.9，Sept.1982
- [2] 田澤，宮沢：新しい練り混ぜ方法がコンクリートの性質に及ぼす影響，セメントコンクリート，No.466，Dec.1985
- [3] 岸，稲垣，山田，渡部：ミキサの形式・容量がコンクリートの品質に及ぼす影響，土木学会，フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム，昭和61年3月
- [4] 曾我，高木，木村：練り混ぜエネルギーがフレッシュコンクリートの性状におよぼす影響，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，1986年
- [5] 日本粉体工業協会編：混合混練技術，日刊工業新聞社