

論文 遠心力締固めコンクリートの特性に及ぼす各種要因の影響

福澤公夫*1・沼尾達弥*2・川名信政*3・清田章二*4

要旨：回転と振動を独立に与えることのできる実験用遠心成形機を用いて、加速度、成形時間、振動の有無などの成形条件およびコンクリートの混和剤添加率を変化させてコンクリートの遠心力締固めを行うときのスラッジの比重・体積、肉厚のばらつき、内面の仕上がりが、分離層の厚さおよび圧縮強度に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、各速度における成形条件の影響を明らかにするとともに、速度間にまたがって影響する成形条件のあることを示した。

キーワード：遠心力締固め、振動、加速度、スラッジ、混和剤添加率

1. 序論

我が国では、コンクリートポール、パイル、それにパイプは、ほとんど遠心力締固め成形方法により製造されている。この方法が中空円筒形の製品を効率よく成形できること、締固め中にコンクリートから脱水および脱気が行われ、高強度のコンクリートが比較的容易に得られることなどの特長を有するためと考えられる。

遠心力締固めは、一般に型枠にコンクリートを投入し、型枠を車輪上で段階的に回転数を増加させながら回転させる。このとき、車輪と型枠の接触により振動が生じ、それが締固めに寄与することが報告されている¹⁾。従来、コンクリートの遠心力締固めに関する研究は、振動が全く生じない小型のジャイロ式遠心成型機あるいは振動が常に生じる小型の車輪式遠心成型機によって研究が行われている^{2)~4)}。車輪と型枠による振動は、型枠の大きさに影響を受けるものと思われ、車輪式遠心成型機を用いる場合でも実験結果をそのまま製造に適用することができないのが現実である。

本研究は、遠心力締固め機構の解明を目的と

して、各種要因が遠心力締固めコンクリートに及ぼす影響を実験的に検討したものであり、本研究における特徴をあげると次のとおりである。

- (1) 回転と振動を各々任意に与えることのできる成形装置を用いて、振動の影響を検討した。
- (2) 中速における成形条件が高速における成形条件に影響するか、すなわち、速度間の交互作用があるかを、加速度、時間および振動の有無について検討した。

2. 実験方法

2.1 要因と水準

表-1に実験の要因と水準を、図-1に L_{23} 直交表への割付を示す。中速と高速における加速度、時間および振動の有無およびコンクリートにおける混和剤の添加率を主効果とし、同一の速度における成形条件の交互作用に加えて、それぞれの成形条件の速度間の交互作用および混和剤添加率と成形条件との交互作用を要因とした。なお、加速度は自由落下の標準加速度(g)に対する比で表している。基本的な加速度を初

*1 茨城大学 教授 工学部都市システム工学科 工博 (正会員)

*2 茨城大学 助教授 工学部都市システム工学科 工博 (正会員)

*3 日本コンクリート工業 (株) 生産技術部 次長

*4 日本コンクリート工業 (株) 開発営業部 建築グループ 課長代行 (正会員)

表-1 要因と水準

	初速	中速		高速
		中速 I	中速 II	
加速度 ($\times g$)	3	A: 8 - 15	B:35	58
時間 (秒)		C: 60- 60	D:30	
振動の有無	無	E:有 (2640rpm)	F:有 (2640rpm)	無
混和剤 添加率 (%)	G : 0.75, 1.30			

- 注) 1) 交互作用 $A \times B, A \times C, A \times E, B \times D, B \times F, B \times G, C \times D, C \times E, C \times G, D \times F, E \times F, E \times G, F \times G$
 2) 初速は要因としない。実験条件として示す。
 3) g は、自由落下の標準加速度 ($9.81m/s^2$)

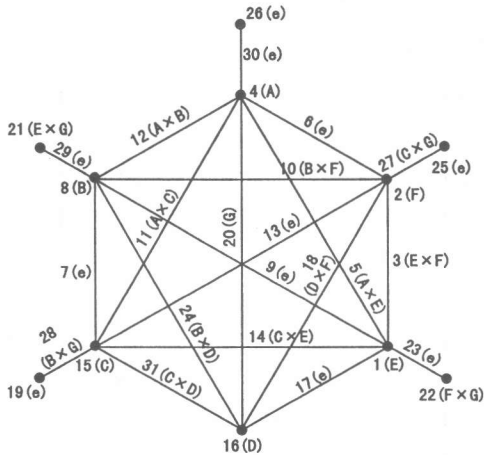


図-1 L_{27} 直交表への割付

速:3g, 中速 I :8g, 中速 II :15g, 高速:35g とし、これとこれより大きな加速度を与える場合と比較した。

2.2 供試体の作製

供試体は、JIS A 1136 による直径 20cm, 高さ 30cm および肉厚 5cm のものを用いた。表-2 に供試体作製に用いたコンクリートの配合を示す。混和剤には、ナフタレン系の高強度用減水剤を用いた。供試体の成形には、写真-1 に示す遠心力成形機を用いた。左下のモーターに

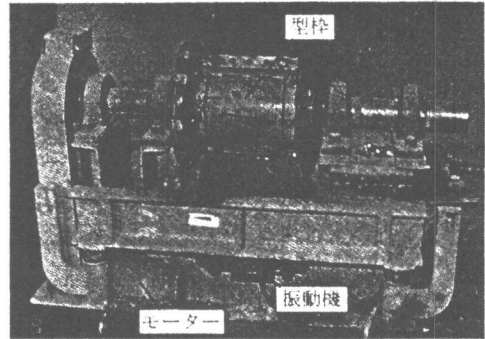


写真-1 遠心成形装置

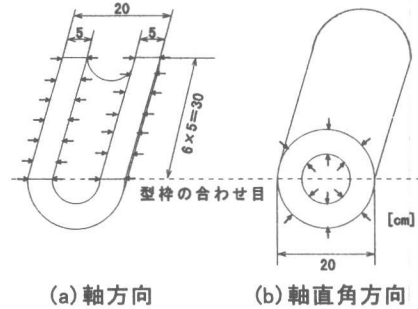


図-2 肉厚測定位置

よりベルトを介して供試体を回転させるとともに中央部の振動機により回転部分全体を振動できる構造となっている。振動機の振動数は、5400rpm であり、回転中に型枠に生じた振動波形を解析したところ、5400rpm およびその 2 倍、8 倍の振動が卓越している。所定の条件により成形した後、型枠を傾けて端部に設けた孔から、微粒分および水からなるスラッジを採取し、その体積および質量から比重を測定した。なお、スラッジから水分およびセメント分を分離することは行わなかった。供試体は、最高温度 65℃ の蒸気養生を行い、脱型後供試体中央において軸方向に切断し、軸方向の肉厚および端部において軸直角方向の肉厚を測定し、それらの変動係数を求めた。さらに、内面状態の評価および分離層厚さの測定を行った。図-2 (a) に供試体軸方向の肉厚の測定位置を、図-2 (b) に軸直角方向の肉厚の測定位置を示す。供試体の断面は、図-3 のようにコンクリート層、モルタル層、ペースト層およびスラッジ層にほぼ分ける

表-2 コンクリートの配合

No.	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	A
1	25	10 ± 2	2 ± 1	39.8	45	167	420	805	998	3.15 (C × 0.75%)
2	25	10 ± 2	2 ± 1	36.6	45	154	421	820	1017	5.47 (C × 1.30%)

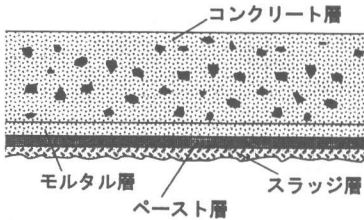


図-3 断面構成

ことができる。供試体の肉厚は、これら全体の厚さとし、分離層の厚さは、コンクリート層以外の厚さとした。内面の仕上がり状態については、分離層が約 2mm 未満を 1 点、2mm 以上であるが波打っていない場合を 2 点、2mm 以上で波打っている場合を 3 点として評価した。すなわち点数の小さい方が、内面がよい状態といえる。圧縮強度は蒸気養生後、気中養生を行った遠心供試体の材齢 14 日における値とした。なお、この場合の供試体厚さは JIS A 1136 に従い供試体両端面で測定し、圧縮強度に寄与しない内面のスラッジ層を除いて求めた。供試体は、肉厚等の測定および圧縮強度の測定にそれぞれ 1 本ずつ使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 各種要因の影響

各測定項目についての分散分析により有意となった要因の影響を図-4 に示す。これらの影響図から各評価項目について、得られた結果とその理由等を以下に記す。

a) スラッジ体積

混和剤添加率に関わらず、中速時間の長い方がスラッジ体積が多く、その影響は混和剤添加率の小さい方が大きい (CxG)。時間の長いほどスラッジ体積が多いのは、中速時に粗骨材が外側に、内側にスラッジが分離する現象が進行す

るためと思われる。また、混和剤添加率の低い方が、時間の影響を受けるのは、混和剤の添加量の少ない方が、コンクリート中のモルタル分の粘性が大きいためと考えられる。

高速加速度が 35g の場合は、時間の影響は小さく加速度が 58g のときは、時間の長いときにスラッジの体積が小さくなる (BxD)。35g の場合は、中速時に分離された部分がペーストと水分に分離されるのに対し、58g では加速度が大きいため張り付けられた部分からも脱水が行われるためと思われる。

b) スラッジの比重

混和剤の添加率が、0.75% の場合は、中速時の時間が長いほど、スラッジの比重は大きくなるのに対し、1.3% の場合は、時間の影響を受けない (CxG)。添加率 1.3% の場合の方が流動性がよいため、水の分離が早く進むためと思われる。高速時には、混和剤添加率に関係なく、時間の長いほどスラッジの比重は小さくなる (D)。高速においては、内側に分離した部分から、砂が、次いでセメントが張り付けられるのでスラッジの比重が小さくなるのであろう。

c) 軸方向の肉厚のばらつき

中速においても、高速においても振動のある方が、変動係数が大きい。中速時、高速時ともに振動のあるときの変動係数がとくに大きくなる (ExF)。中速時に振動を受けると、内側に分離される量が増加するとともに密度も大きくなり、このときに高速時に振動を受けると、絞り出された部分の締め固めが行われにくくなるためと推定される。

d) 軸直角方向の肉厚のばらつき

軸方向と同じように、中速における時間と高速における時間の交互作用が有意であった (Cx

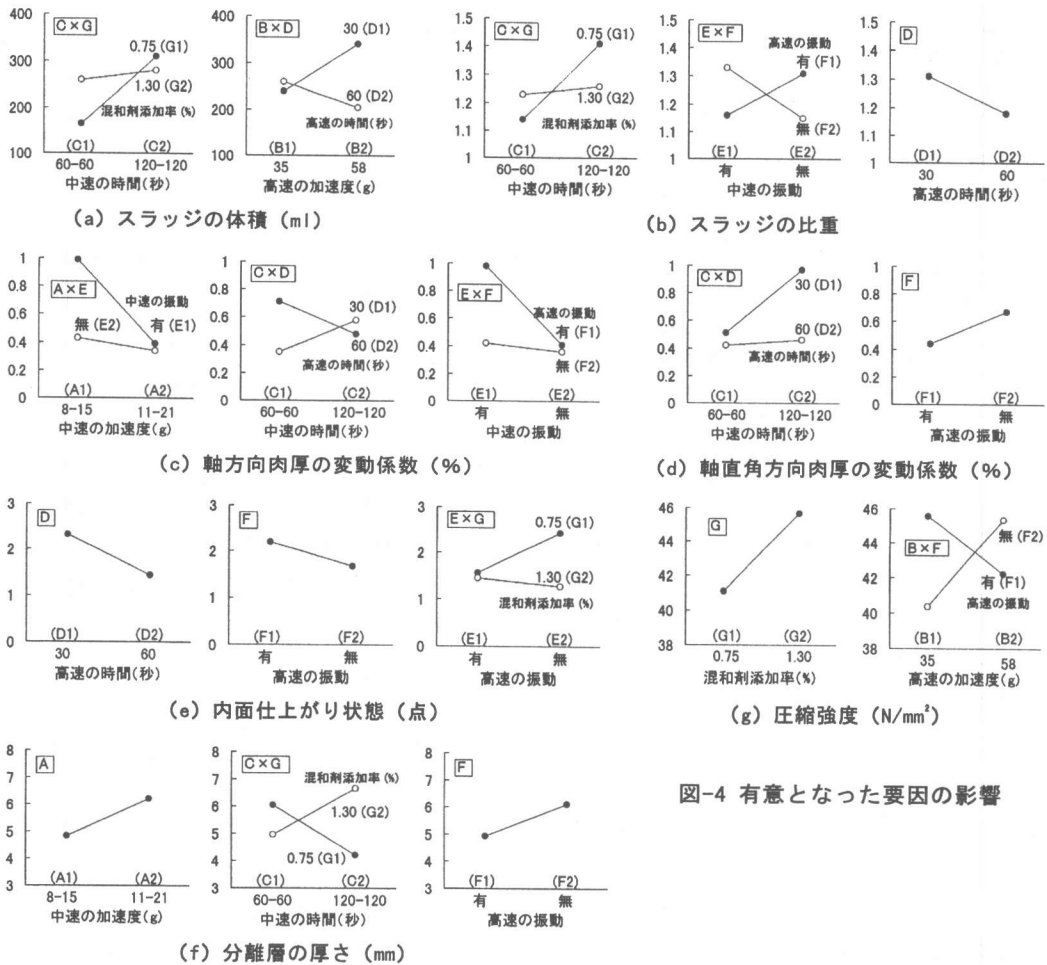


図-4 有意となった要因の影響

D)が、その影響は、軸方向とは異なっていた。高速における振動のない方が、軸直角方向の肉厚のばらつきが大きい(F)。端面部においては、コンクリートと型枠との間に摩擦があるので、振動のある方が一定の肉厚になるものと思われる。

e) 内面仕上がり

高速における時間の短い方(D)が、また振動のない方(F)が内面がよくなる。内面の仕上がりを向上させるには、静かにかつ長い時間をかければよいことになる。有意となった要因が高速の場合に限られるのが注目される。内面の成形が高速時であることを示すものといえよう。

f) 分離層の厚さ

中速時加速度の大きい方が分離厚さが大きい

(A)。コンクリートの脱水および脱気が行われる範囲でなるべく小さな加速度を選定することが必要になるものと思われる。混和剤添加率が高い場合は、中速時間の長いほど分離層が厚くなり、添加率が低い場合は、逆となる(CxG)。混和剤の多いほど、流動性がよいため、粗骨材とモルタルの分離が進行するものと思われる。

高速においては、振動のある方が、分離層の厚さは小さくなる(F)。内面の仕上がりとは傾向が異なるところが面白い。

g) 圧縮強度

混和剤の添加率の多い方が、高強度が得られる(G)。これは、元々水セメント比が小さくなるので当然の結果である。高速時加速度と振動の有無が有意となっており(BxF)、振動のない

ときは加速度の大きい方が、振動のあるときは、加速度の小さい方が高強度となっている。実際の製造時には、振動が生じていることを考慮すると、高速加速度を大きくすることは、好ましくないといえよう。加速度が大きく、振動が存在すると、中速でいったん形成された部分を壊す作用をするものと想像される。

3.2 中速・高速における主効果の影響

表-3に主効果の影響を示す。この表では、要因については、右の方が、時間が長いとか、振動があるとか何らかの作業を伴う方向となっている。評価項目については、上の方が好ましく下の方が好ましくない状態を示す。したがって、表中の矢印が右上がりであれば、何らかの作業によって結果がよくなることを示す。表-3から次のことが観察される。

a) 時間の影響

スラッジの比重、スラッジの体積、軸直角方向の肉厚のばらつきについては、中速においては時間の短い方が良く、高速においてはまったく逆の傾向となっている。高速においては、内面の仕上がり状態の観点からも時間の長い方が良い結果となっている。このように、時間の影響は、同一速度域では傾向が一致し、速度域間では全く反対である。

b) 振動の影響

中速における振動の影響は、軸方向の肉厚のばらつきにおいて振動の無い方が良い結果となっている。高速においては、評価項目ごとに傾向が異なっており、軸方向の肉厚のばらつき、内面の仕上がりについては、振動のない方が良く、軸直角方向の肉厚のばらつき、分離層厚さについては振動のある方が良くなっている。

c) 加速度の影響

中速においては、軸方向の肉厚のばらつきについては、加速度の大きい方が、分離層厚さについては、逆に加速度の小さい方が良い結果となっている。高速については、加速度の影響は、見られない。

表-3 各種速度域における要因の主効果

速度域	中速				高速			
	加速度		時間		加速度		時間	
要因	小	大	短	長	無	有	無	有
評価項目								
スラッジの体積	少		↘				↗	
スラッジの比重	小		↘				↗	
軸方向の肉厚のばらつき	小	↗			↘			↘
軸直角方向の肉厚のばらつき	小		↘				↗	↗
分離層厚さ	小	↘						↗
内面の仕上がり状態	良						↗	↘
圧縮強度	大							
	小							

3.3 中速と高速における交互作用

表-4に、中速・高速間における交互作用の有無についての一覧表を示す。表-4より、両速度の交互作用が有意となったのは、21箇所のうち4箇所である。このことは、大部分の要因については、中速における各要因の作用と、高速における各要因の作用とは独立していることを示す。したがって、そのような要因については、中速あるいは高速において実験を行って判断できることを示す。逆に、交互作用が有意となった項目、すなわち、スラッジの比重に及ぼす振動の影響、軸方向の肉厚のばらつきに及ぼす時間および振動の影響あるいは、軸直角方向の肉厚のばらつきに及ぼす時間の影響を検討する場合には、中速・高速の条件を同時に検討する必要がある。

3.4 中・高速における締固め

3.2から3.4の観察結果を総合して中・高速における遠心力締固めがどのように行われるのかを整理する。

表-2の配合につき、比重を計算して大きい方から並べると、粗骨材：2.63、細骨材：2.59、

表-4 中速と高速の交互作用

	中速-高速		
	加速度	時間	振動
スラッジの体積	●	●	●
スラッジの比重	●	●	○
軸方向の肉厚のばらつき	●	○	○
軸直角方向の肉厚のばらつき	●	○	●
内面成形性	●	●	●
分離層厚さ	●	●	●
圧縮強度	●	●	●

○：有意となった場合，●：有意とならない場合

モルタル：2.28，セメントペースト：1.96 となる。中速においては，コンクリートに流動性がある間は，比重差により，粗骨材が外側に，逆に空気・分離したモルタル・セメントペースト・水・微粒分は内側に移動する。このとき，細骨材も比重が大きい，セメントの微粒分による粘着力があるため，分離しにくいのであろう。モルタルから水，ペーストなどの分離も比重差によるものと考えられる。したがって，中速域の時間が長いほど，あるいは振動のあるときほど内側に分離するモルタル分が多く，スラッジ比重，スラッジ体積などが大きくなる。

高速においては，内側に分離したモルタル分に主として作用して，それらから，水とセメントのような微粒分を分離する。したがって，高速の時間の長いときの方がスラッジ比重が小さくなり，スラッジ体積が少なくなる。高速になると，中速で外側に移動した粗骨材は動かない。加速度が高まるとともに，中速では分離しにくい材料，つまり，内側に集まったモルタル中からセメントペーストあるいは水が分離するのであろう。

圧縮強度は，遠心力締固めにより，水セメント比が小さくなり，強度が増進するといわれていたが，本実験の場合には影響が見られなかった。圧縮強度については，混和剤添加率が有意となったように混和剤による水セメント比の減少の方が影響の大きいことを示すものといえよう。

ただ，本研究の場合，コンクリート，モルタルおよびペーストの各部分の合成強度であり，今後それぞれの部分に対する各種要因の影響が分かる実験を行うべきであろう。

4. 結論

中速および高速の加速度，時間および振動の有無などの成形条件およびコンクリートの混和剤添加率が，遠心力締固めを行うときのスラッジの量・比重，肉厚のばらつき，内面成形性および分離層厚さなどの評価項目に及ぼす影響を検討した。その結果から次のことがいえよう。

- (1) 中速・高速における成形条件が，遠心力締固めコンクリートの各種評価項目に及ぼす影響を示した。
- (2) 振動の有無が影響を受ける評価項目数は，中速よりも高速の方が多い。
- (3) 中速で断面の構成が決定され，高速では主として内面の状態が決定される。
- (4) 中速における各要因の作用と，高速における各要因の作用とは独立しているものと交互作用のあるものと両方ある。要因と評価項目の組み合わせにおいて大部分は，前者である。
- (5) 圧縮強度は，成形条件よりも混和剤の添加による水セメント比の低下の影響が大きい。

参考文献

- 1) 杉木六郎：最近の遠心力コンクリート製品に関する技術，セメント・コンクリート，No.316，pp.2-10，1973.6.
- 2) 岡田・小林・岡村：遠心力締固めコンクリートに関する要因実験，セメント技術年報，Vol.21，pp.281-287，1968.12.
- 3) 下山・富田・茂庭：遠心成形における分離性状に関する研究，セメント技術年報，Vol.43，pp.188-191，1988.12.
- 4) 下山善秀：静的外力による硬練りコンクリートの変形に関する研究：土木学会論文集 No.390/V-8，pp.141-149，1988.2.