

土木学会論文集

第 71 号・別冊 (4-2)

遠心力鉄筋コンクリート クイに用いるコンクリートの
遠心締固めに関する研究

正員 綾 亀 一

TRANSACTIONS
OF
THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS
No. 71, EXTRA PAPERS (4-2)

ON COMPACTING CONCRETE OF REINFORCED
CONCRETE PILES BY CENTRIFUGAL METHOD

By Kiichi Aya, C.E. Member

Nov. 1960
TOKYO JAPAN

昭和 35 年 11 月

土木学会

遠心力鉄筋コンクリート クイに用いるコンクリートの 遠心締固めに関する研究

正員 綾 龜 一*

ON COMPACTING CONCRETE OF REINFORCED CONCRETE PILES BY CENTRIFUGAL METHOD

By Kiichi Aya, C.E. Member

Synopsis: In this paper, the author describes a compacting method of concrete of centrifugally spun precast reinforced concrete piles. Testing through the hollow-spun specimens made by the special apparatus, the minimum number and time of revolutions necessary to make the hollow form, and next in this speed range, the minimum number and time of revolutions required to obtain the maximum strength of concrete at low, middle, and high speed revolutions are investigated. Consequently at the low speed revolution, a most suitable speed and time for concrete slump are obtained. At high speed revolution, concrete strength is highest when the spun effect ($E = kn^2 t^{1/2}$) is constant. R.p.m. of middle speed revolution is given by $n' = n / \sqrt{2}$.

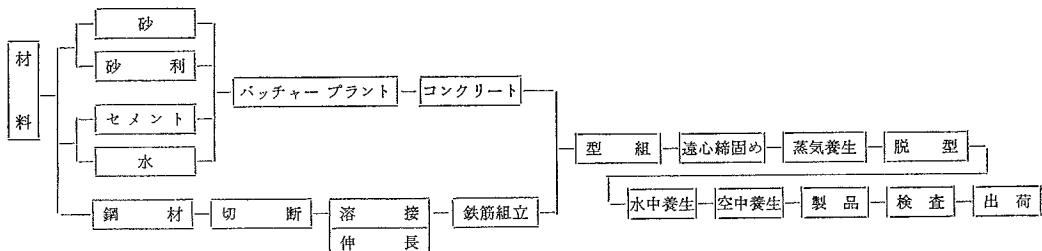
要旨 本文は遠心力を利用してクイを製作するときそのコンクリートを締固める方法について論じたものである。筆者は特殊な方法によって製作した遠心力中空供試体を用いて、まず中空円筒形に締固め成形しうる最小回転数と回転時間を調べ、つぎにこの回転数の範囲内にて低速、中速、および高速度回転の最も強度を与える回転数、回転時間を求めた。

その結果低速度回転ではコンクリートのスランプによって最適の回転数、回転時間があり、高速度回転では遠心効果が一定のとき最も強度が大になる。また中速回転数は $n' = n / \sqrt{2}$ にて与えられるこことを発見した。

1. 序 文

遠心力鉄筋コンクリート クイとは、型わくに鉄筋カゴと、まだ固まらないコンクリートとを投入し、これを適当な回転数と回転時間により回転せしめ、これによる物理的エネルギー、すなわち遠心力をを利用して中空円筒形に締固めたコンクリートの既製クイのことである。

クイの製作から出荷までを簡単に説明すると次のようになる。



この工程の中ではほかの鉄筋コンクリート既製品といちじるしく異なっているところは、コンクリートを締固める場合に回転を利用した遠心力工法によることがある。このコンクリートは化学的凝結現象が始まる以前の状態であるにもかかわらず、締固めが終れば回転をとめても中空の状態を保つのである。コンクリートを打ち込むさいの締固め方法はいく種類があり、現在普通に使用されているのは振動工法である。これらは大部分すでに研究が進み、信頼性をもって使用されている。しかし遠心力工法はヒューム管として数 10 年の歴史をもつてゐながら、その性質に関する学問的な研究は十分に進んでいとはいいがたく、またこれらに関する文献も非常に乏しい状態である。しかし製作者は遠心力工法を使用すればコンクリート中に存在する余分の空気および水分を締め出し、コンクリートを型わくのすみずみまで十分ゆきわたらせ、緻密で均等なコンクリートを得ることができ

* 大同コンクリート工業 KK, 取締役技術部長

るということはわかっている。この研究のおくれている原因はその締固め方法が一般的でなく、設備も大変であり、製法が工場のみに限られていること、近年になってヒューム管の応用として、クイ・ポールなどの利用が盛んになって注目し始めたこと、供試体をつくる方法が普通のコンクリートにくらべて繁雑で、かつ正確なものを大量につくることが困難なためであろうと思われる。筆者の知る範囲では現在の締固め方法は過去数10年の経験と、いわゆる“カン”によっているといつても過言ではないと考えられる。

そこで筆者はコンクリートの遠心締固めの回転数および回転時間が遠心力コンクリートの強度におよぼす影響についての実験を始め、これにより、コンクリートに対して締固めによる最適な回転方法を定めることに成功をみたので、これらの研究結果を一文にまとめて報告しようと考える。以下この研究結果を順を追って述べることにする。

2. 実験装置および手順

(1) 供 試 体

実験にあたってまず必要なものはその対称となる標準供試体である。昭和30年JIS A 5310で「遠心力鉄筋コンクリート基礎クイ」のJISが制定されたが、コンクリートの強度の判定は普通の手づめ標準供試体で代行するよう示されている。しかしながら遠心力で締固めたコンクリートの強度を普通の手づめで判定するのは不合理なことである。そこでどうしても遠心力コンクリートの標準供試体が必要となってくる。普通のコンクリートの標準供試体は直径15cm、高さ30cmの円柱形のものとなっているが、骨材の大小に応じて変化させ、また多くの実験結果から直径と高さの比を一定にして、直径の大小による差を標準供試体に換算するため、一定の率を乗じている。遠心力コンクリートの場合にはこの形状の差に加えて厚さの項が入ってくる。後に述べるように遠心力は直径と重さと回転数の2乗に比例するから、各寸法に対する率というものが相当複雑になる。そこでこの実験の基本となるべき標準供試体を便宜上普通コンクリート供試体と同じ寸法の外径15cm、高さ30cm、また厚さが4cmになる中空円筒形と定め、これを標準として試験した(写真-1)。この供試体の特徴は以下述べるように、普通のコンクリートの標準供試体型わくをそのまま使用して容易にかつ大量につくりうることにある。

(2) 供試体の製作装置および方法

今まで行なっていた供試体の製作方法は、型わくを一定の間隔をおいた2個あるいは3個の滑車の上におき、この滑車の回転による摩擦を利用して型わくを回転させ遠心力を加える方法である(図-1)。しかしながらこの方法では設備が面倒であり、実験としての精度に非常に欠ける可能性がある。

筆者の考案せる供試体製作方法はつぎのように精度の高いもので実験には非常に適している。

すなわち回転には旋盤を、回転の変化にはコンプーリー(Cone-Pulley)、時間はストップウォッチを使用した。これを図-2によりくわしく説明する(写真-2)。

図中1および2は載頭円錐状ローラーいわゆるコンプーリーで、これを一定間隔を設けて互いに反対の方向に並列し、これにベルトをかけ左右に移動する。一方供試体型わく4にコンクリートを既定量だけ投じ蓋板5をし、この両中心に孔を開けて、ここを旋盤6の両センター7にて押える。モーター8のスイッチを入れるとVベルト9を通りコンプーリーへ、コンプーリーから旋盤へと伝わり、供試体はいずれの偏心もなく回転することになる。しかし3のベルトを左右に移動することにより供試体自身の回転数を自由に変化させることができる非常に簡単な装置である。なお回転数は回転計によりあらかじめしらべておき、ベルトの各位置にそれぞれ回転数の目盛を付しておく。この場合変速には必ずしもコンプーリーのみでなく、変速モーターその他種々のものがあるが、ただ速度が確実なものを用いたにすぎない。回転締固め終了後は型わくを旋盤からはずし、蓋板を取り、中空部に締め出された水分を取り出し、上部をキャッピングし、翌日脱型して水中養生をした(標準温度)。この

写真-1



図-1

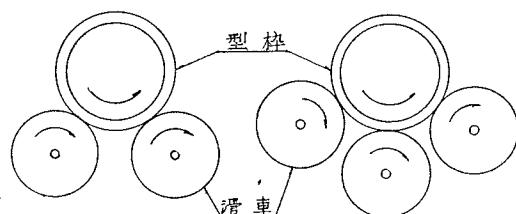
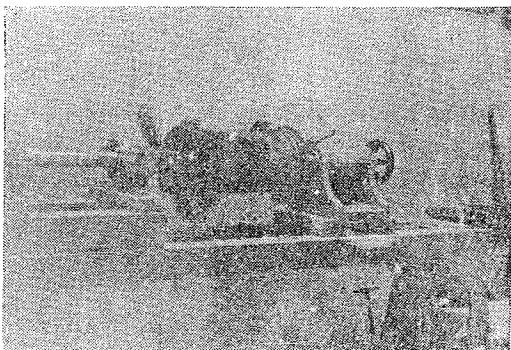


写真-2



試験での回転範囲は 90~800 rpm である。

(3) 実験の手順

実験を開始するにはある程度回転にたいする目安がなければならない。遠心力を加えるというだけで、ただでたらめに回転したのではコンクリートは中空に成形しないのである。そこで従来のいわゆる“カン”によっていた方法を参考としてこの回転手順を割り出し、実施してみることにした。もちろんおもなる目的は適当な回転数と回転時間からその締固めの最適な条件をだすことにある。

現在工場で製作している回転方法には 2 段階（低速と高速）、3 段階（低速と中速と高速）あるいはその他の方法がある。この段階をわけている理由は、まず低速度の回転で最初型わくに投じられた生コンクリートをその中に均等な厚さに拡げ、つぎに中速度と高速度回転で締固めるわけである。もちろん遠心力によって締固めるわけであるから高速度回転の大切なことはいうまでもないが、その準備期間とみられる低速度あるいは中速度回転がいかに重要な意味をもち、また強度におよぼす影響が大きいかはあとにのべる実験結果より明らかである。

また遠心力コンクリートの場合には回転数のみでなく回転時間の要素が入ってくるので一層複雑な問題となってくる。回転にあたってとくに大切なことは円滑に回転が行なわれることである。偏心したり回転に振動が加わった場合には遠心力の締固め効果がいちじるしく阻害される。

以下実験結果につき順次述べてゆくが、まず低速度回転数および回転時間のコンクリートの強度におよぼす影響を、ついで高速度および中速度のそれについて行ない、各場合に対する解析から任意のコンクリートに対する遠心締固め効果の最適なものを探してみた。以下述べる結果はすべて直径 15 cm、厚さ 4 cm、高さ 30 cm の遠心力コンクリートの供試体について行なったものである。

3. 遠心締固めに関する理論

(1) 等速円運動をする物体の遠心力

運動している物体が求心力の作用を受ける場合に物体はその慣性作用によって求心力に抵抗しようとする。この抵抗が起るゆえに物体は、ちょうど求心力と等しくかつ方向反対の力を受けつつあるものと考えられる。この仮想的な力を物理学上「遠心力」と称しているのである。たとえば重さ m なる物体が点 O を中心として半径 r の円周上を v なる速度で等速円運動をしている場合、その物体は mv^2/r なる求心力を受けている。しかしこれだけでは力は均り合わないから慣性抗力 $-mv^2/r$ を付加して考えると均り合うことになる（図-3）。このときの慣性抗力を遠心力といっているのであって実際に物体に働いているのではなく、あたかも働いているかのごとき作用を起こしているのである。この仮想の力、遠心力を F とすれば、次式にあらわすことができる。

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

図-2

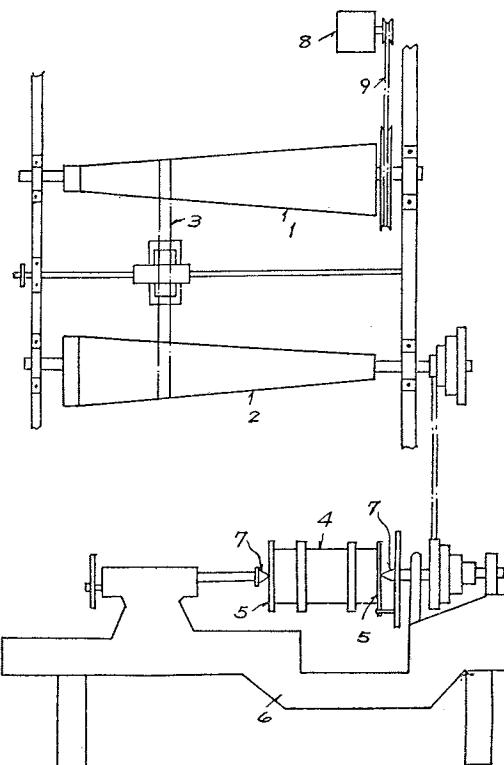
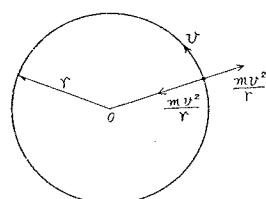


図-3



回転数を n とすれば

$$v = 2\pi rn$$

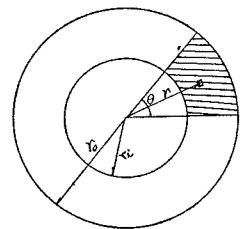
$$\therefore F = \frac{m(2\pi rn)^2}{r} = 4\pi^2 m r n^2$$

この式から遠心力 F は物体の質量 m と半径 r と回転数 n の 2 乗の積に比例することができる。

(2) 遠心圧力分布

前項は質点の遠心力の場合であるが、この項では流体の遠心による圧力を考えてみる。円筒中に流体を入れて軸のまわりに一定の角速度 ω で回転させると、流体は粘性のため円筒と同じ角速度 ω で回転するようになる。重力の影響を無視すると、流体は一定厚さの円筒形となる。この場合の円筒の内
径を $2r_i$ 、外径を $2r_o$ とし、任意の点の半径を r とすれば、前項により微小部分の遠心力は $\rho r \cdot dr \cdot d\theta \cdot r \omega^2$ である(図-4)。

図-4



斜線部分の遠心力は

$$P = \int_0^\theta \int_{r_i}^{r_o} \rho r^2 \omega^2 d\theta \cdot dr = \frac{1}{3} \rho \omega^2 \theta (r_o^3 - r_i^3)$$

全体の遠心力は

$$\theta = 2\pi \quad \omega = 2n\pi$$

$$\therefore P = \rho \frac{8\pi^3 n^2}{3} (r_o^3 - r_i^3)$$

ただし、 ρ : 密度、 n : 回転数

(3) コンクリートの遠心締固めの場合

コンクリートを遠心力で締固める場合の力学的要素を理論的に取り扱うことは仲々困難なことである。そこで仮定としてまだ固まらないコンクリートを粘性のある流体と考える。普通流体ならば回転中は円筒形を保つが、回転を止めると回転中成形していた円筒形の形をくずしてしまう。しかしコンクリートの場合は、ある一定時間回転すると、回転をとめてもそのままの形を保っている。これは遠心圧力により外方に押しつけられるため、その粘性、この場合は付着力にあるいは凝集力がまとめてくるものと考えられる。そこでこの力を締固め効果と考え、これが遠心力の大きさと回転時間とに関係するものと仮定する。そこで遠心力の効果 E は次式で表わすことができる。

$$E = f(F^x \cdot T^y)$$

F : 遠心力の大きさ、 T : 回転時間

x, y はある常数であり、実験よりきめることにする。またこの実験の場合は重量および半径が一定であるから、遠心力の大きさ F は

$$F = kn^2 \text{ で表わすことができる。}$$

そこで締固め効果 E は、つぎのように考える。

$$E = kn^2 \cdot t^a$$

ただし E : 遠心締固め効果、 n : 回転数、 t : 回転時間、 k, a : 任意の常数
つぎの実験から a の値を求めてみた。

4. 実験内容の概略

以下行なう実験はつぎのような計画にもとづいて行なった。

(1) コンクリートの配合

予備試験により、遠心締固め条件である成形状態は、コンクリートの流動性に大いに関係のあることがわかったので、この実験のコンクリート配合はスランプの変化を主体にして行なった。そこでセメントと骨材の比を一定にして水分のみを変化させ、この場合の水・セメント比とスランプの関係を求めておき、各スランプについて実験を行なってみた。

(2) 締固めに必要な回転範囲の研究

遠心力コンクリートはただいいかげんに回転させても成形しない。そこに回転のさせ方、あるいはそれぞれの回転にたいする範囲というものがある。ここではその成形するための回転の方法と各回転の限界をもとめる実験を行なった。

(3) 低速度回転とコンクリートの強度との関係

つぎに締固め回転のうち、最初の段階である低速度回転数および回転時間のコンクリート強度におよぼす影響

を調べ、適当な回転を求めた。

(4) 高速度回転とコンクリートの強度との関係

締固め段階である高速度回転がコンクリートの強度におよぼす影響についてしらべ、最適な回転数を求めた。また遠心力効果と回転数、回転時間の関係から常数 a の値を実験的に定めた。

(5) 中速度回転のコンクリートの強度におよぼす影響

ついで3段階回転の中間の段階である中速度回転がコンクリートの強度におよぼす影響をしらべてみた。

(6) 総括的な回転

以上の結果から総括してあるコンクリートに最適な回転条件をもとめた。

5. 回転方法に関する実験結果

(1) コンクリート材料の性質

(a) セメント セメントは秩父セメントの普通ポルトランドセメントを使用した。その物理的性質は表-1のようである。

表-1

比 重	粉 末 度		凝 結		安 定 性 (煮 沸)	強 热 減 量 (%)	マグネシア (%)	無 水 硫 酸 (%)
	比 表 面 積 ブ レ ーン	88ミクロン 残分(%)	始 発	終 結				
3.15	3210	2.0	1-59	2-59	良	0.71	1.62	1.70

1:2 教練モルタル強度 ($w/c=0.65$)								
圧 縮 強 さ (kg/cm^2)			曲 げ 強 さ (kg/cm^2)			養 生 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)		
3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日	室 温	水 温	
129	230	396	33.1	50.2	69.4	20.0	20.0	

(b) 骨材 骨材は粗細骨材とも静岡県安倍川産のもので、これらの諸性質および試験に使用した粒度の範囲は表-2および図-5に示す。

表-2

試 料	細 骨 材	粗 骨 材
採 集 場	安 倍 川	安 倍 川
比 重	2.64	2.65
単位容積重量	1.744	1.727
粗 粒 率	2.40~2.90	6.93~7.75

(c) 試験機 供試体の製造装置は前に述べたが、供試体は型わくをはずしたのち、水中養生(21±3°C)を行ない、材令28日をへて圧縮試験を行なった。圧縮試験機は東京衡機製作所の100tアムスラー型を使用した。

(2) コンクリートの配合

試験に使用したコンクリートの配合は、セメント・砂・砂利の比を1:1.5:2.7とし、水分は $w/c = 35\sim50\%$ になるようにした。この場合の w/c とスランプの関係は表-3および図-6のようである。前に述べたように予備試験から、回転締固めはコンクリートの流動性に関することがわかったので、回転に関する実験のコンクリート配合は、スランプを基準として行なった。

図-5

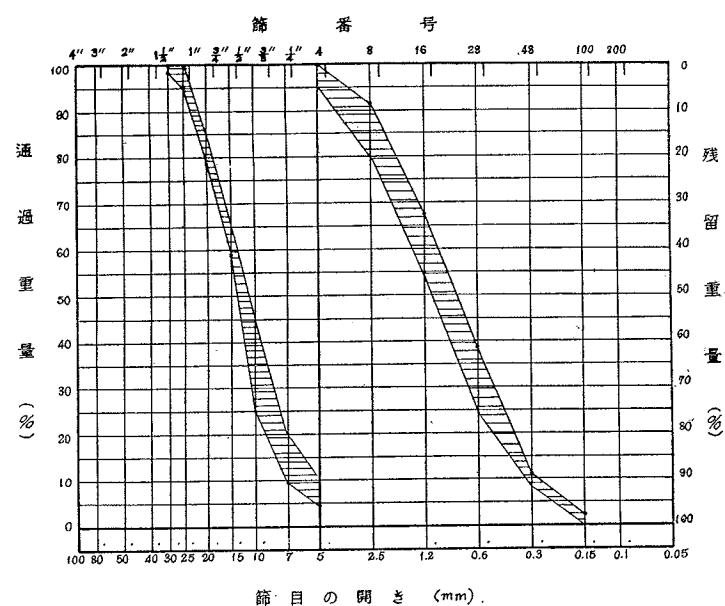


表-3

w/c (%)	36	38	40	42	44	46	50
ス ラ ン プ cm	0.5	1.8	3.2	5.8	8.5	11.0	17.0
ス ラ ン プ cm	0.4	2.0	3.5	5.5	8.0	10.8	16.5
ス ラ ン プ cm	0.5	1.7	3.5	5.7	8.3	10.8	16.0
平均	0.5	1.8	3.4	5.7	8.3	10.9	16.5

(3) 遠心締固め回転の範囲に関する実験

(a) 概説 実験をはじめるにあたって、まずいかなる回転にすれば中空円筒形にできあがるか、すなわち遠心力コンクリートができる回転の範囲、回転の方法を知る必要がある。回転の条件として最初は必ずおそい速度で行なう低速度回転が必要である。低速度回転は型わくのコンクリートをその中に均等な厚さにしてつぎの段階への締固め効果を十分ならしめるための準備期間である。しかしこの速度がある限度よりはやい場合にはコンクリートは遠心力による半径方向の力のため、そのまま側面におしつけられてしまつて一様な厚さにはならず、部分的に異なった厚さのものや、豆板のものができてくるのである(写真-3)。すなわち低速度回転は締固めの準備期間ではあるが、遠心力コンクリートの成形には、きわめて重要な意味をもっているものである。つぎに低速度回転により一様な厚さにされたコンクリートは高速度回転により十分締固められ、遠心力コンクリートに成形するのである。

高速度回転はコンクリートの締固め、すなわち遠心力コンクリートの総仕上げをする最も重要な段階であつて、この場合の回転数および回転時間の影響がコンクリートの品質、強度などにおよぼす影響の大きいことはいうまでもない。この回転の場合にもコンクリートが遠心力によって締固まる最低の回転数がどのくらいであるかということが問題になってくる。そこでまず最初に低速度による回転の限界を、つぎに高速度による回転の最低限界を実験的に求めることにする。

(b) 低速度回転の限界に関する実験 遠心力コンクリートをつくるための回転の最初は低速度回転である。しかしこの回転がある限度以上になつたり、またある時間以下になつたりしては、いかに中速度あるいは高速度回転を調節しても、中空円筒形には成形しない。そこでこの回転数および回転時間の限度をまずしらべてみることにする。

(i) 低速度回転数の限界：実験の始めとしてまず高速回転数および回転時間を一定(500 rpm 7分間)、低速度回転時間も一定(3分間)とし、低速度回転数を100～300 rpm の範囲で変化させた。すなわち、最初100～300 rpm の範囲のある回転でそれぞれ3分間行ない、つぎに500 rpm で7分間締固めた。そして各回転に対してコンクリートのスランプを変化させ、その締固め成形状態をしらべた結果は表-4のようである。なお高速回転数はある範囲以上では、どのように変化させても成形に関する限り、変わりなかった。

表-4

低速回転数 rpm	100	125	150	175	200	225	250	275	300
スランプ cm	成形不能	不	不	不	不	不	不	不	不
0	成形可能	可	可	不	不	不	不	不	不
2	可	可	可	可	不	不	不	不	不
4	可	可	可	可	可	不	不	不	不
6	可	可	可	可	可	不	不	不	不
8	可	可	可	可	可	可	不	不	不
10	可	可	可	可	可	可	可	不	不
12	可	可	可	可	可	可	可	可	不
14	可	可	可	可	可	可	可	可	可
16	可	可	可	可	可	可	可	可	可

いま縦軸に低速回転数、横軸にスランプをとり、成形し得る範囲を図表であらわすとつぎのように直線となる

図-6

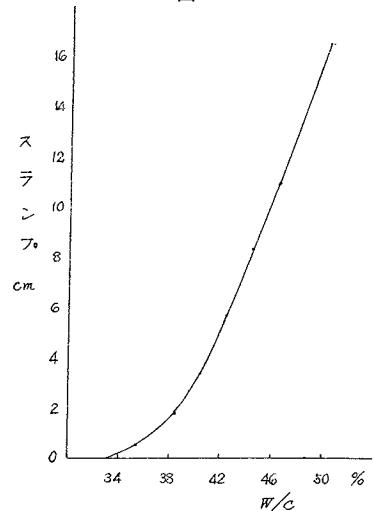
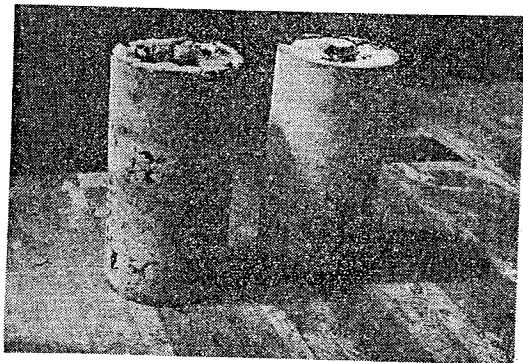


写真-3



(図-7)。この図表からわかるように、スランプの小さい硬練りコンクリートほど、低速回転数をおそくないと成形せず、軟かくなるに従って回転数を大きくしても十分成形できるということである。すなわち図示するように、この直線部分以下の範囲ではコンクリートは十分中空円筒形に成形できるといえる。このことは例えば流動性の液体のようなものでは低速回転数が非常にやくても、すなわち最初から回転数を大きくして回転しても十分中空均等な厚さで回転していることからも明らかな現象ということができる。

(ii) 低速回転時間の限界：前項では低速回転時間を3分間として行なったのであるが、回転数の限界では、ある程度以上の時間ではいくら長く低速回転を行なっても同様な成形状態であることがわかった。そこで各回転にたいする時間の限界をもとめるため、各スランプにたいして限界の回転数で成形可能な最低の低速回転時間をもとめてみると表-5のようになる。

表-5

スランプ(cm)	低速回転時間(秒)											
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
0	不	不	不	不	不	不	不	不	不	不	不	不
2	不	不	不	不	不	不	不	不	可	可	可	可
4	不	不	不	不	不	不	不	可	可	可	可	可
6	不	不	不	不	不	不	可	可	可	可	可	可
8	不	不	不	不	不	可	可	可	可	可	可	可
10	不	不	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可
12	不	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可
14	不	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可
16	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可

この限界を図示すると図-8のような直線関係となる。この図からわかるようにスランプの小さい硬練りコンクリートほど、低速回転時間を長くしないと成形せず、軟かいコンクリートは時間は短くても成形する。従って図中の直線部分より上の範囲の時間ならば十分成形可能である。ただし回転数は前項の範囲内でなければならない。

(c) 高速度回転の限界に関する実験 前項に定めた低速回転数と回転時間で一様な厚さとなったコンクリートは、この高速度回転により十分締固められて遠心力コンクリートができあがる。しかしこの高速度回転の場合にもある回転数、あるいは回転時間以下では成形しない状態のある場合があることは明らかである。そこで各回転に応じて時間変化させ、回転をとめても中空円筒形に成形している最低の限界をもとめてみた。

実験は低速度回転を一定(125 rpm 3分間)として、コンクリートのスランプを変えて、各スランプについて、各回転数に応じて成形し得る最低の時間を実験的にしらべてみた。その結果を表-6に示す。

本実験の高速度回転数の範囲は300~700 rpmである。

高速度回転数とこれにより締固めるべき最低の回転時間をスランプ別に図示すると図-9のようになる。そこでこれを書き改め、縦軸に高速度回転数の4乗を、横軸に回転時間をとると図-10のように双曲線となる。この関係は式であらわすと、 $n^4 t = \text{一定}$ 、すなわちこれを書き改めると $n^2 t^{1/2} = \text{一定}$ となる。

そこで遠心締固め範囲は図中の曲線以上の範囲であり、これ以下の回転では、回転をとめると中空円筒形に保つことができず、成形しない。また成形の条件は、回転数に非常に関係し、回転時間による影響は割合小さいこ

図-7

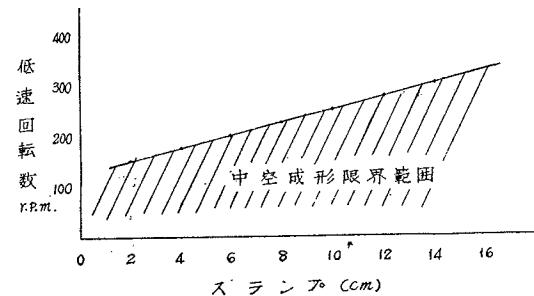


図-8

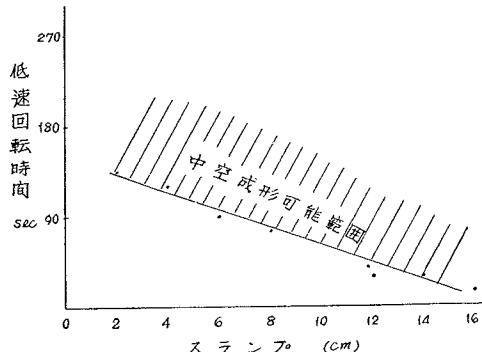


表-6

スランプ (cm) 高速 回転数(rpm)	最 低 回 転 時 間 (分一秒)											
	3 cm			5 cm			8 cm			10 cm		
700	30	35	35	40	40	40	45	50	45	50	55	60
650	45	50	45	50	55	55	1-00	1-15	1-00	1-00	1-15	1-00
600	1-00	1-00	1-00	1-15	1-00	1-15	1-30	1-30	1-45	1-30	1-45	1-00
550	1-30	1-15	1-30	1-30	1-45	1-30	2-00	2-15	2-00	2-15	1-45	1-45
500	2-00	2-15	2-15	2-15	2-30	2-30	3-00	3-15	3-00	2-15	2-45	2-30
450	3-30	3-15	3-30	3-30	3-15	3-30	4-30	4-15	4-30	4-45	3-30	3-15
400	5-30	5-15	5-30	6-00	6-15	6-00	7-00	7-00	7-15	7-45	5-00	5-00
350	9-00	9-30	9-15	12-00	12-00	11-00	15-00	15-00	16-00	17-00	8-00	7-45
300	18-00	17-00	17-00	20-00	21-00	23-00	26-00	26-00	27-00	28-00	30-00	17-00

図-9

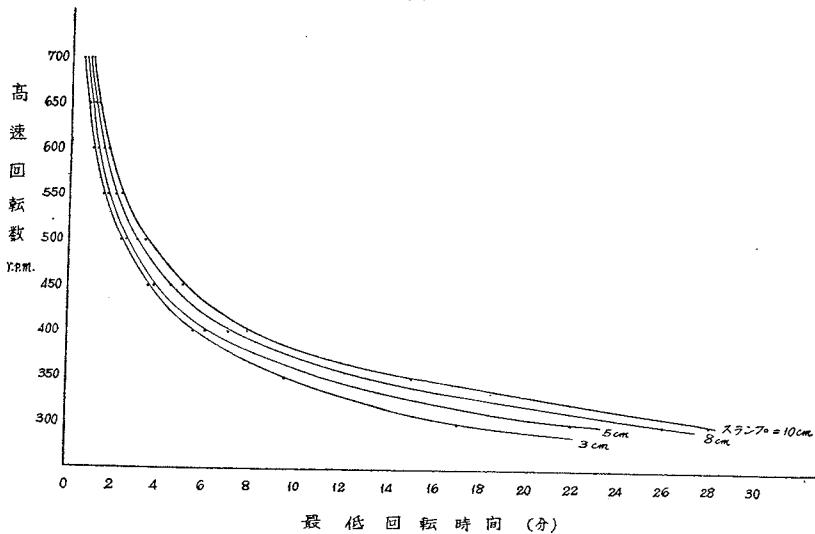
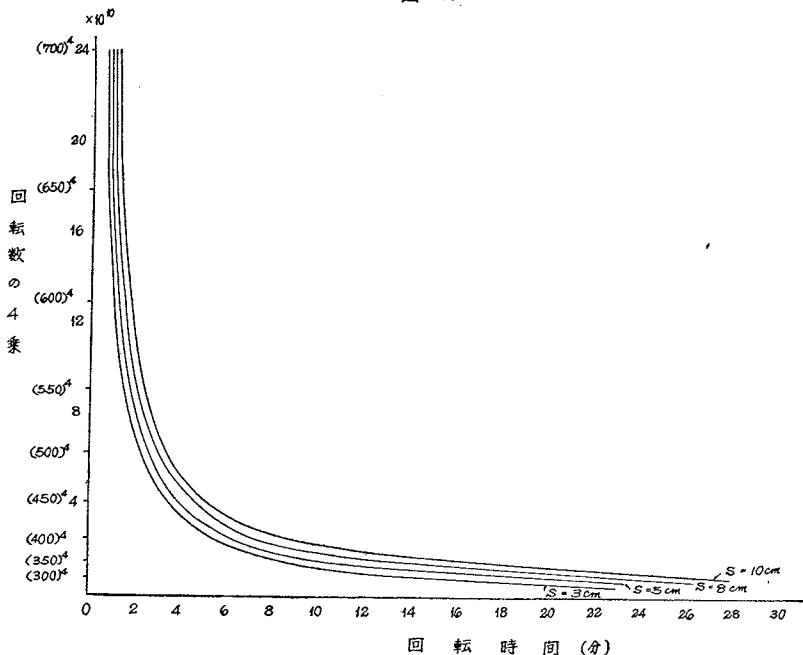


図-10



とがわかる。

この締固め範囲の実験から、先に仮定した $E=kn^2t^\alpha$ より $\alpha=1/2$ となる。これは後の実験でさらに確認することにするが、同じ回転数でも、スランプにより、締固め時間が異なり、軟かいものほど回転時間は長くかかる。しかし回転数を大きくするとその差はほとんどなくなる。スランプが異なっても $E=kn^2t^{1/2}$ の関係は変化なく、 k の値がそれぞれ異なるだけである。

(d) 総括 以上の結果より遠心力コンクリートに成形できる回転の範囲をまとめると、つぎのようになる。

(i) コンクリートを中空円筒形に締固める遠心力回転は、最低限度つぎの段階で行なわなければならない。すなわちコンクリートを型わくに投入後、まず低速回転数である時間回転させる。その後引きつづき高速回転数である時間回転させなければならない。

(ii) 低速回転数および時間は 図-11 の直線が限界で斜線部分、すなわち回転数はこの直線以下、回転時間はこの直線部分以上でなければならない。

(iii) 低速度回転が終ると回転を早くしてつぎの高速度回転にする。高速度回転は 図-10 に示す範囲で、回転数、時間ともこれ以上にすればよい。この時間が経過すれば遠心締固め作業は終了したとしてよい。

(4) 遠心締固め回転とコンクリートの強度との関係

以上の実験は締固めの回転の限界、すなわち中空円筒形に成形できる範囲についてのべたのであるが、この項では、締固まる回転の範囲内で最も適当な回転数および回転時間を、換言すれば、この回転数、回転時間で締固めれば、最も強度の大きいコンクリートができるという回転をしらべるための実験を行なった。強度の最も大きいというのは、遠心力締固め効果が最も大きいものと解釈した。

(a) 低速度回転とコンクリートの強度との関係 最初に低速度回転がコンクリートの強度におよぼす影響についての実験から始めた。低速度回転の場合は、高速度回転にくらべて時間が短かく、その影響もある範囲ならばあまり差がないので、時間は一定（3分間）とし、各低速度回転にたいして、それぞれスランプを変化させ、つぎに高速度回転を一定（500 rpm 7分間）として締固め、これを脱型後4週間水中標準養生して、圧縮破壊した場合の、必要回転数、スランプ、コンクリートの強度との関係をしらべてみた。その結果はつぎに示すとおりである（表-7、図-12）。

この結果をみると、ある一定の低速回転数の場合は一般にスランプが大きくなるに従って最初のうちは強度が上昇するが、

図-11

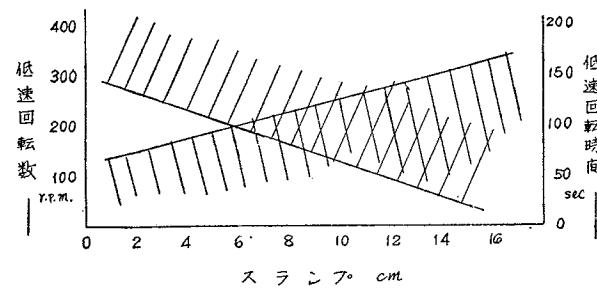
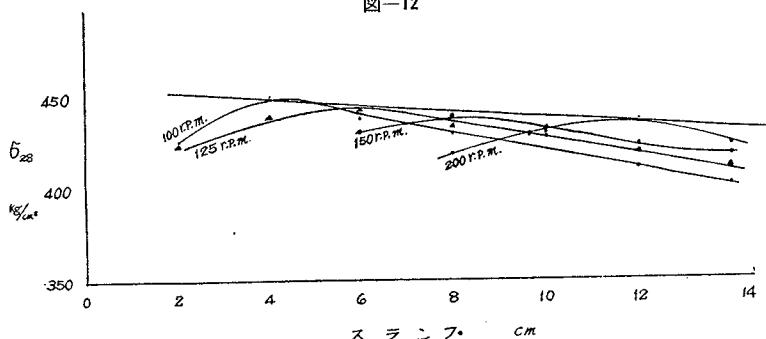


表-7

図-12



ある一定の極大値に達して今度は逆に減少する。この現象は各回転数の場合とも同じであって、それぞれ極大値をもっている。この極大値を結ぶと直線となり、この直線が各回転数ごとの強度との曲線の包絡線のような形となる。この直線はスランプが小さい硬練りコンクリートほど強度は大きくなる。すなわち強度を大きくしようと思えばウォーカブルな範囲においてスランプを小さくして、このスランプに適当な低速回転数を用いればよい。

表-8

スランプ cm	2	4	6	8	10	12	14
最適低速回転数 (rpm)	/	100	125	150	/	200	/

もちろん各スランプに応じた極大値のえられる最適な低速回転数が存在する。いまこの最適な最小回転数とスランプを図表にすると表-8、図-13のごとくなる。この直線はさきの最低回転数の限界直線と平行している。

これらの原因を考えてみると、第一に遠心締固めを終って成形した遠心力コンクリート自体の水・セメント比の相違である。すなわち生コンクリートが同じ水・セメント比であっても、回転数の相違により、できあがった遠心力コンクリートの水・セメント比が皆違ってくる。これは遠心締固めにより締め出されたトロ（水あるいは薄いモルタル状のもの）を分析し、これを生コンクリートから差し引いた計算をし、できあがった遠心力コンクリートの水・セメント比と低速回転数との関係をもとめると表-9、図-14のようになる。

この図-14からさきの強度との関係を比較してみるとわかるように、成形した遠心力コンクリートの強度は、その水・セメント比が小さいほど大きい。

表-9

生コンクリート w/c %		40	42	44	46
低速回転数	100 rpm	32.3	34.0	37.0	
	125	33.6	33.8	35.2	39.0
	150		35.0	35.0	38.0
	175			36.2	37.2
	200				37.3
	250				39.0

のことから低速回転数の役割は、まだ固まらないコンクリートを型わくの中で均等な厚さにするのみでなく、回転を適当に加減することにより、成形した遠心力コンクリートの水・セメント比を最小にし、強度を大きくするための準備回転にもなるということができる。

第二に問題になるのはコンクリート材料の分離である。従来コンクリートの強度は Abrams によりとなえられた水・セメント比説が主体となっているが、この説には多くの仮定、および条件の上になりたっているものであって、すべてのコンクリートがこの説にあてはまるというものではない。仮定の中の重要な要素として材料の分離という問題がある。すなわちコンクリートは十分に練り混ぜられた各材料が均一なものであるということである。遠心力コンクリートの場合は最初均一であっても回転締固めの途中では、遠心力が重量に比例するから、各材料に加わる遠心力は異なるてくるわけである。もちろん材料の分離の大きいほど不均一で強度の弱いことは確実である。遠心力工法であるから多少の材料分離はまぬかれないが、できるだけ分離の少ないよう回転することが必要である。分離現象のおこりやすいのは、最初練った静止したコンクリートを回転はじめるときである。あまり回転がおそいと遠心力より重力の方が大きくなつてコンクリートは型わくの内壁にくっつかない。そこで型わくにくつついで回転する最小の回転数を計算してみると

$$\text{遠心力} \geq \text{重力}$$

$$\frac{m(2\pi r \cdot n)^2}{r} \geq mg \quad \therefore n \geq \sqrt{\frac{g}{4\pi^2 r}} = \frac{5}{\sqrt{r}}$$

$$\text{直径を } D \text{ とすれば} \quad n \geq \frac{7}{\sqrt{D}}$$

n は 1 秒間の回転数であるから、これを 1 分間の回転数 N に改めると、 $N = 60n$

図-13

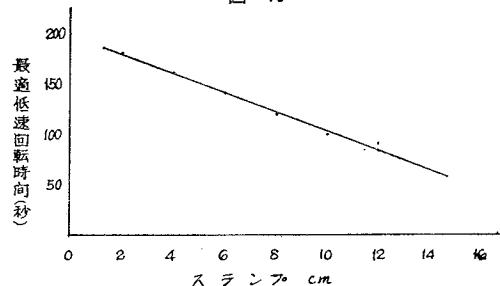
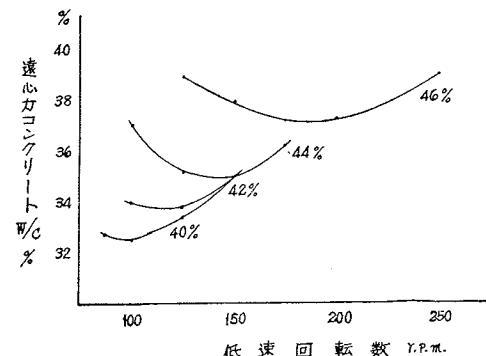


図-14



$$\therefore N \geq \frac{420}{\sqrt{D}}$$

この実験の場合 $D=15 \text{ cm}$ であるから

$$N \geq 108 \text{ rpm}$$

ゆえにコンクリートが型わく内面にくっついて回転する最小回転数は 110 rpm であることができる。そこでこれ以下の回転にすれば回転中コンクリートは型わくにくっつかず、練り混ぜされているようになる。このような場合にはどうしても分離する傾向は強い。また逆にあまり早すぎても遠心力の差がすぎて分離する。そこに適当な回転数というものが存在し、このときに強度が最も大きくなるものと考えられる。

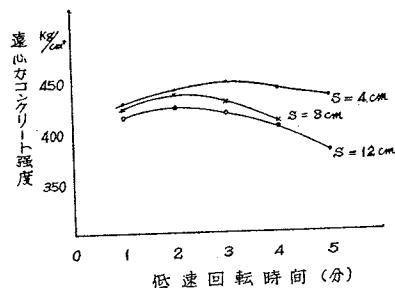
つぎに低速度の回転時間と遠心力コンクリートの強度との関係をしらべてみる。

いま低速度の回転数を一定 (150 rpm) にして時間を変えこの場合のできあがった遠心力コンクリートの強度との関係をしらべた結果の一例を示すとつぎのようである (表-10, 図-15)。なお高速度回転は一定とした (500 rpm 5 分間)。

表-10

低速回転時間 (分)	遠心力コンクリート強度 $\sigma_{28} \text{ kg/cm}^2$		
	スランプ 4 cm	8 cm	12 cm
1	430	425	415
2	443	440	425
3	450	430	420
4	443	410	410
5	435		380

図-15

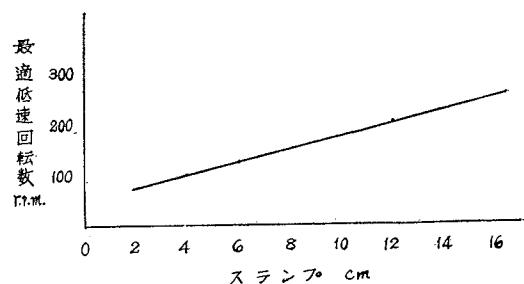


この場合にも回転数と同様、時間の増加とともに漸次強度は増大するが、ある時間で極大値を得、さらに時間が長くなると逆に段々減少してゆく傾向にある。最適な時間は、コンクリートのスランプが小さいほど長く、スランプの大きい軟練りほど短かくてよい。ほかに各スランプに対しての最適回転数についても行なった結果、最適な回転時間はつぎのようになった。縦軸に最適な低速回転時間を、横軸にスランプをとると、この関係は直線関係となり、さきの限界直線とは平行している (表-11, 図-16)。

表-11

スランプ cm	2	4	6	8	10	12
最適低速回転時間(分-秒)	3-00	2-40	2-20	2-00	1-40	1-30

図-16

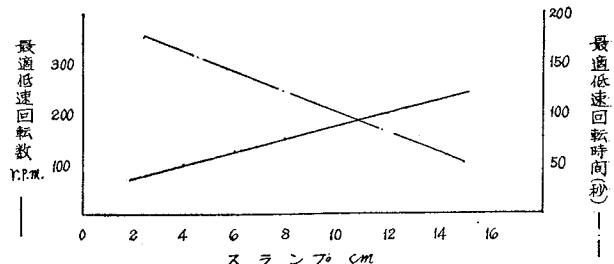


以上の結果から、コンクリートのスランプに応じた適当な回転数および回転時間を求めることができる。この結果をわかりやすく図表にあらわすとつぎのようになる。すなわち横軸にコンクリートのスランプを縦軸に回転時間と回転数をとると最適な強度が得られる直線が図-17 のようにあらわすことができる。これにより、練り上ったコンクリートのスランプに応じた低速回転数および回転時間をもとめることができる。

(b) 高速度回転とコンクリートの強度との関係 つぎに締固めの最終段階である高速度の回転と、これによるコンクリートの強度との関係についてしらべてみる。

低速度回転を一定 (125 rpm 3 分) として高速度回転数と回転時間および圧縮強度との関係をしらべた結果はつぎのようである (表-12)。

いま横軸に高速度回転時間を、縦軸に圧縮強度 (材令 28 日水中標準養生) をとり、各回転数ごとにその時間と



強度との関係を示すと 図-18 のようになる。この結果から遠心力は回転数の2乗に比例するが、遠心力コンクリートの強度は必ずしも回転数の2乗に比例して大きくはならない。また回転時間にも比例しないということがわかる。しかしある範囲では回転数および時間の増加にともない強度も増大してゆき、ある極大値を経て逆に減少の傾向になる。この原因はさきに述べた分離現象がもっとも大きいと考えられる。遠心力コンクリートは回転数および時間の増大にともない大きくなるのであるが、逆に分離現象もこれに比例して大きくなるからその効果が相殺され、このような結果になるものと考えられる。つぎにこの実験から各回転数に応じた強度の極大値をとりこの場合の回転数と回転時間との関係をしらべてみよう。この関係は 表-13 に示すものであるが、これを、縦軸に回転数の4乗を横軸に回転時間をとると 図-19 のような曲線になる。この曲線はある高速回転数で回転させたときの最適な回転時間を示している。また逆に時間に制限されたとき、この時間に対する最適な回転数をも示している。しかしこの曲線上の点ではもちろん同じ強度が得られるわ

表-12 高速回転数、回転時間と遠心力コンクリートの強度との関係(平均値) (kg/cm^2)

時間(分)	高速回転数 (rpm)					
	400	450	500	600	700	800
1					372	385
2				370	391	395
3			372	404	392	
4			378	385	402	390
5		366	392	418	400	388
6	354	380	404	416	396	386
7				413	394	385
8	380	400	428	412	390	
9				410		
10	400	425	442	400		
11	410					
12	408	446	438	398		
13						
14	432	450	434			
15		454				
16	440		430			
17						
18	448	452	430			
19						
20	456	448	428			
21						
22	460	444				
23						
24		440				
25	466					

図-18

表-13

高速回転数 (rpm)	強度の最大が得られる回転時間 (分)
400	25
450	15
500	10
600	5
700	3
800	2

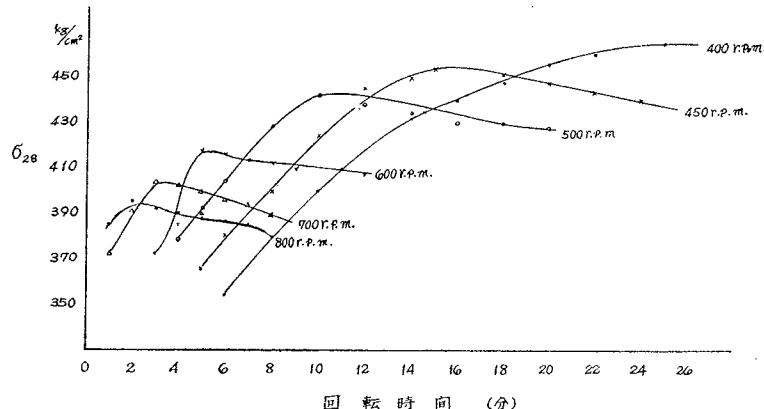
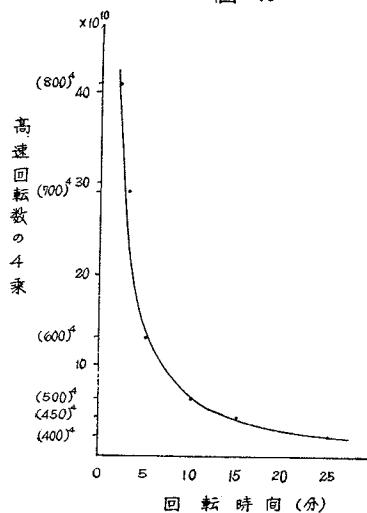


図-19



けでなく、回転数か、回転時間のうちいずれかが一定の場合に最も大きい強度が得られるということである。

またこの曲線は双曲線をなしており、この横軸と縦軸との積は一定である。

$$\therefore n^4 t = \text{一定} \quad \text{または} \quad n^2 t^{1/2} = \text{一定} \quad \text{である。}$$

遠心力効果 $E = kn^2 t^\alpha$ において $\alpha = 1/2$ となり、すなわち $E = kn^2 t^{1/2}$ である。

そこで最適な高速度回転は遠心力効果が一定の場合に存在するといふことができる。またこの一定の範囲内では、回転数が小さくて、時間の長い方が強度は大である。しかしながら実際問題としてクイアリーハーはポールなどを製作する場合には長時間回転させておくことはきわめて不経済で、能率も悪いから、生産面から限られた時間内で最長の

時間をえらび、これに相当する回転数で締固めるのが最良の方法だと考えられる。また一方変速機、そのほかの関係から最高の回転数が抑えられるわけで、設備上の回転数の最高が低い場合は、これに相当した時間回転させ、多少時間が長くなつてもやむを得ないと考えられる。

(c) 中速度回転についての実験 中速度回転とは最初の低速度回転と最後の高速度回転の中間で、連続して行なわれる中速の回転のことである。このようにする理由は、回転速度を低速度から高速度になる間にできるだけ急激な変化を与えることなくし、その遠心締固め効果を十分に発揮させようとするためである。材令の分離をより少なくすることからいえば2段階より3段階、さらに4段階など、あるいは段階を設げずに徐々に変化させてゆく方が望ましいのであるが、3段階以上では、その差はあまりない。そこでこの実験では3段階までとした。

中速度の回転の有無がコンクリートの強度にいかに影響するかをしらべてみることにする。ただ中速度回転はさきの低速、高速のように成形条件には関係なく、遠心力コンクリートの品質のみに関係するのである。

試験はまず低速度回転を一定(125 rpm 3分間)とし、高速度回転を、500 rpm (10分), 600 rpm (5分), 700 rpm (3分)の場合について、中速度の回転がコンクリートの強度におよぼす影響をしらべた。この結果は表-14、図-20 のとおりである。

表-14

高速回転数 500 rpm (10分間) のときのコンクリート強度						600 rpm のとき					700 rpm のとき					
中速度回転時間(分)	中速回転 (rpm)					中速度回転時間(分)	中速回転数 (rpm)					中速度回転時間(分)	中速回転数 (rpm)			
	250	300	350	400	450		350	400	450	500	550		400	450	500	550
1	440	441	443	444	444	1	420	421	422	422	422	1	400	401	402	403
2	441	442	445	447	440	2	422	424	425	427	420	2	401	403	404	406
3	441	444	447	450	437	3	422	425	429	426	415	3	401	404	408	408
4	443	446	451	448	435	4	424	428	434	422		4	402	405	411	407
5	445	452	455	442	433	5	426	431	435	417		5	403	407	413	404
6	445	451	453	437		6	428	434	420			6	405	410	411	400
7	448	447	450			7	430	434	425			7	406	411	408	
8	450	442	445			8	431	431	422			8	408	409	404	
9	445	441	440			9	430	425				9	406	403		
10	442	435				10	427	421				10	401			

この場合の傾向として一般に中速度回転は時間を多くするに従って強度はだんだん大きくなるが、ある程度大きくなると、逆に減少する。いま各中速度回転数で強度の極大となる位置をとり、中速度回転数と回転時間の関係を図示すると図-21のように直線関係が得られる。この関係は回転数が大きいほど時間は短かく、小さいほど時間は長くなければならないことを示している。しかし強度の間でそれほど大きい効果はない。

つぎに各高速回転数にたいする最適な中速度回転数をもとめると図-22 のようになり直線関係を示す。これを式で示すと

$$n'^2 = \frac{n^2}{2} \quad \therefore n' = \frac{n}{\sqrt{2}} \quad \text{となる。}$$

ただし n : 高速回転数, n' : 高速回転数 n の場合の最適な中速度回転数

すなわち最適な中速度回転数の2乗はこの場合の高速回転数の2乗の半分であるということができる。このときの時間は大体5分が適当であることが実験から明らかである。また最適中速度回転数および時間を用いた場合には、そのときの2段階回転の3~4%程度強度は大きくなる。しかし不用

図-20

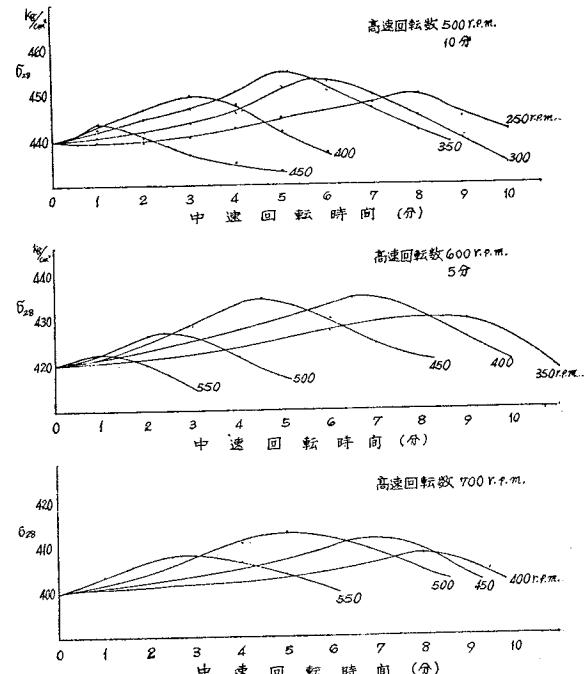
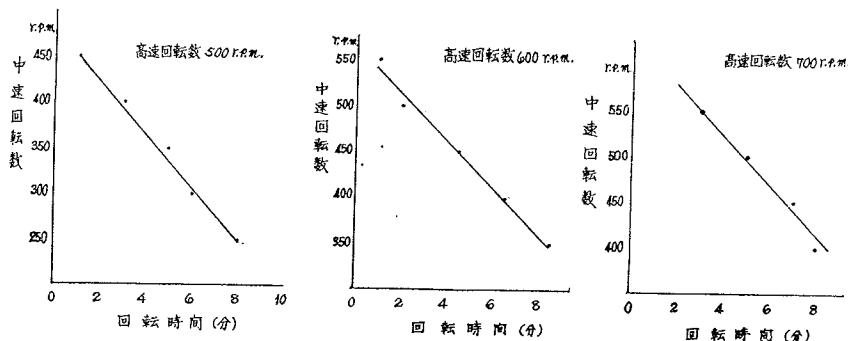


図-21



意な回転数および時間で中速回転を行なう場合にはかえってそのときの2段階回転より強度は小さくなり、逆の結果をまねくおそれがあるから注意すべきである。

(5) 実験に対する結論

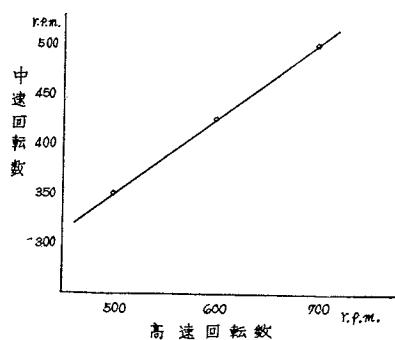
以上の回転に関する種々の実験結果を総合するとつぎのようになる。

- (a) 遠心力コンクリートをつくるにあたっての締固め回転に影響をおぼすコンクリートの性質は、その軟かさの度合による。この実験では軟かさの度合をスランプであらわした。
- (b) 遠心締固める場合、回転にあたってとくに大切なことは偏心したり、回転に振動が加わったりなどすると締固め効果がいちじるしく阻害されるから、必ず円滑に回転が行なわれることが大切である。
- (c) 遠心力コンクリートが中空円筒形に成形し、回転を終了してもそのままの形を保持するためには少なくとも低速度と高速度の2段階の回転をすることが必要である。この場合低速度回転数はある速度以下、回転時間はある時間以上、また高速度回転数および時間はある限度以上でなければならない。
- (d) 低速度回転は練ったコンクリートのスランプによってある限界を有し、おのののに対しては最適なもののが存在する。この最適回転数および時間はスランプが小なる硬練りほどおそらく、かつ時間は長くしなければならない。
- (e) 高速度回転では、各回転時間にたいしてそれぞれ最高の強度を有する回転数が存在する。このおのののの場合の回転数の2乗と回転時間の平方根の積は一定となる。
- (f) この結果から判定して遠心力効果が一定のような回転のとき遠心力コンクリートの強度が大きくなる。しかし遠心力効果が一定であっても各回転にたいする強度は同じでなく、成形する範囲内で回転数が低く時間の長い方が強度は大である。
- (g) 配合から考えれば、遠心力コンクリートの強度も、一般に練ったさいのコンクリートがウォーカブルな範囲において、水・セメント比が小さいほど強度は大である。しかしこのことは、それぞれの水・セメント比を有する配合において、そのときのスランプに対して最適な回転を行なった場合のみいえることである。
- (h) 回転を3段階にして中速度回転を低速度と高速度の中間で行なった場合、適當な中速度回転では2段階の場合の3~4%強度は大きくなる。
- (i) 適當な中速度回転数はその場合の高速度回転数を $\sqrt{2}$ でわったものである。また回転時間は5分程度が適當である。
- (j) 遠心力によって締固められたトロを分析して、練ったコンクリートから差し引き計算をした結果、遠心力コンクリートの水・セメント比は一般に強度の大きいものほど小さくなっている。同じ水・セメント比のコンクリートでも回転方法により、できあがった水・セメント比は異なり、この中で水・セメント比が小さくなるものほど、締固め効果のよい、強度の大きいものといふことができる。

(6) 回転締固め手順

以上の実験結果より合理的な回転の手順を考えてみる。最初に最適な回転を求めるための回転締固めに必要な注意について述べてみる。

図-22



- (a) 回転は偏心なく円滑に行なうこと。
- (b) 十分練り混ぜられたコンクリートは、ただちに型わくの中に投じ、練ってからできるだけ早い時間に回転をしなければならない。
- (c) 練り混ぜたコンクリートはウォーカブルなものでなければならない。
- (d) 各回転の段階で、低速より中速に、中速より高速に変化させる場合に、急激にしない方がよい。
- (e) コンクリートのスランプはウォーカブルな範囲で小さい方が望ましく、一般に5cm以内で2cm以上の範囲がよい。

つぎに回転手順として、現在までの実験結果の中でもっとも合理的な方法をえらんでみた。

- (a) まずコンクリートのスランプを測定する。
- (b) このスランプにたいする最適な低速回転数および回転時間を実験の表から求める。
- (c) つぎに生産面から限られた回転時間がある。いたずらに長時間回転させるのは能率上全く非合理であるが、あまり短かい時間では、回転数を相当大きくしなければならず、製作上きわめて危険であり（現在の設備では）、また締固め効果も悪い。そこで許される範囲内で最大の時間を定める。この時間は少なくとも10分間以上でなければならない。
- (d) 前述の条件によりきまった制限時間から、さきにきまった低速回転時間と中速回転時間（5分間）を差し引いた値を高速回転時間と定める。しかしこの結果、高速回転時間が小さすぎる場合には、実際に製作するのが不可能なので、回転時間は、実際の設備上だし得る回転数とにらみ合わせたものでなければならない。ゆえにこの場合には(c)で決めた時間を長くする必要がある。
- (e) もとめた高速回転時間より、回転数nを $n^2t^{1/2} = \text{一定}$ の実験式を利用して求めることができる。
- (f) 中速回転数は $n' = \frac{n}{\sqrt{2}}$ より求められる。
- (g) 以上より低速、中速、高速の3段階の回転数、および回転時間が求められたから、これらを順に連続して行なえば、能率に合した、合理的な遠心力コンクリートが得られることになる。

6. 結 語

以上述べた実験結果は遠心力鉄筋コンクリート・クイを製作する場合に最も重要な工程である遠心締固めのきいの基本となるべきものである。しかしこの実験が実際の製造にそのまま使用できるか否か、はなはだ疑問である。実験と実際とで最も条件の異なっているところは回転のさいの支持状況である。実際の場合には前にも述べたように、滑車の上に型わくをのせて回転させるのである。しかし実験では両端の中心を支えて回転させるのであるからその回転の状態が非常に異なってくる。それゆえ前者の回転ではいくら完全だとはいっても多少の偏心回転はまぬがれない。一方実験では完全なもので行なわなければ意味がない。そこで実際には実験のとおり行なっても必ずしも最良の締固めが行なわれるとはいい得ない。しかしながらおのの回転ごとにその偏心状態が全く一定はしていないので、一定の法則にあてはめて回転数、回転時間を決めることは非常にむずかしく、また不可能もある。例えは目でみて完全に偏心なく、スムースに回転が行なわれていると思っても、クイを途中で切断してみると完全な中空円筒形ではなく、中空部にやや凹凸などの部分がみられる。これは完全に回転していない証拠である。

そこで実際製造の場合の標準は実験により行なったもので定めてあるが、このとおりではうまくない場合が往々にしてあり、そのときの回転の状態に応じてある程度の調節をしているのが現状である。この回転の不良をきたす原因としては、遠心機のレベルの差、タイヤ直径の不整、型わくのねじれなどがあげられる。製造技術者はつねにこのことに注意して、円滑に回転が行なわれることに留意すべきである。かくすることにより、実験と同じ条件のクイを得ることが可能となる。

回転不良によって生ずる不良品の種類をあげてみるとつぎのようなものである。

- (1) クイの厚さが均一にならず、偏肉になる。このため打込み中、座屈した例が多い。
- (2) 締固めが十分でないため、回転をとめると、中空円筒形を保たず形がくずれる。
- (3) コンクリート材料の分離がはなはだしく、強度も弱くなる。
- (4) 製品にアバタを生じやすい。
- (5) 軸方向鉄筋がねじれることが多い。

このような状態があるので、回転には十分注意が必要である。一方実験の方は試験機の都合から、標準供試体と同じ型わくのもので行なったのであって、あくまで基本である。他に直径の差による変化、高さと厚さと直径

の関係、ただ今後行わなければならない問題が山積している。

最後にこの遠心力工法によるコンクリート製品が最近非常に多量に生産されるようになった関係上、需要者側でもその工法について相当関心をもたれるようになったと考えられるが、われわれ製造者としても、今後さらに進んだ研究によってますますよい製品を、安く生産する方向に進んでゆきたいと考えである。

昭和35年11月25日印刷　　土木学会論文集第71号・別冊(4-2)定価80円(税10円)
昭和35年11月30日発行

著　　者 東京都千代田区丸の内1の6 大同コンクリート工業KK 綾　　亀　一

発行者 東京都新宿区四谷一丁目 社団法人 土木学会 末森猛雄

印刷者 東京都港区赤坂溜池5番地 株式会社技報堂大沼正吉

発行者 社團法人 土木学会 振替東京16828番

東京都新宿区郵便局区内 新宿区四谷一丁目 電話(351)5138