

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

STUDY ON THE DEFORMATION OF STIFF CONSISTENCY CONCRETE SUBJECTED TO STATIC EXTERNAL FORCE

下山 善秀*

By Yoshihide SHIMOYAMA

It is important to establish a technology for predicting the deformation of fresh concrete subjected to various external forces for saving manpower in concreting work through automation and systematization. This paper describes the analysis and the experimental results on the deformation of comparatively stiff consistency concrete in slump test taken as an example of the deformation subjected to static load. The results obtained from this study proved that it was fundamentally adequate to analyze and predict the deformation by assuming the physical properties of this concrete as a viscoplastic body estimated by cohesion and angle of internal friction. The condition for forming pipe body in centrifugal casting as an application of this method was also discussed.

Keywords: stiff consistency concrete, deformation, static external force, centrifugal casting, condition for forming pipe body

1. まえがき

コンクリート施工は、従来より経験的手法により行われている場合が多いが、コンクリート施工の自動化もしくはシステム化の必要性は、これに携わる者の誰もが認めることである。これを達成するためには、種々の外力下におけるフレッシュコンクリートの変形もしくは流動を予測する技術の確立が必要である。

施工作业時のフレッシュコンクリートの挙動は、自重や圧力等の静的外力およびタンピングや振動締固め時の動的外力等の種々の外力による変形と流動の組合せと考えることができるので、その挙動は、レオロジー手法を導入して解析することができるものと考えられる¹⁾。

フレッシュコンクリートのレオロジーに関するこれまでの研究成果によって、スランプ15 cm程度以上のコンクリートは、ビンガム体として扱うことができ、静的外力による変形挙動も降伏値を用いて解析が可能であることが明らかにされている^{2),3)}。

一方、一般に土木工事やプレキャスト製品などで使用されているスランプが15 cm程度以下のコンクリートについてもビンガム体と仮定し、その降伏値を想定して

粘塑性有限要素法により変形挙動をシミュレーションした結果が報告されている⁴⁾。しかしながら、このような硬練りコンクリートは、粒状体効果が現われるためビンガム体と仮定するには若干無理があることが指摘されており⁵⁾、この点を十分に考慮した変形解析もほとんど報告されていない。

本研究は、コンクリートの物性を塑性流体としての視点から離れ、硬練りコンクリートを湿った砂のような粘塑性体と仮定し、物性値として粘着力や内部摩擦角を用い、モールドクーロンの降伏条件によってその変形を解析するとともに実験による検証を試みたものである。なお本研究においては、静的外力による変形例として、幾何学的に規則性を有する単純形状としてスランプ試験時のコンクリートの変形を取り上げた。また、これらの解析の応用として、ヒューム管やパイル等の製造において経験的に行われている遠心成形における管体形成条件を、同手法を用いて解析するとともに実験的検討も試みた。

2. 硬練りコンクリートの変形解析

硬練りコンクリートの静的外力による変形として、スランプ試験におけるコンクリートコーンの変形を例にとって、その解析方法の検討および実験による検証を

* 正会員 工修 日本セメント(株)中央研究所
(〒135 江東区清澄 1-2-23)

行った。

(1) 変形解析

スランプ試験時のコンクリートは、自重のほかに底面の摩擦の影響を受ける。しかし、不変形領域や低スランプの場合等底面摩擦の影響が少ない場合もあるので、底面摩擦を考慮しない場合と考慮する場合についてそれぞれ解析を行う。

a) 底面摩擦を考慮しない場合

図-1に示すように、スランプコーンを、その頂面の中心に原点0を、鉛直下方にx軸をとった円柱座標系で表示する。任意のxにおいて厚さdxの薄層円板を考え、さらに円板内の任意の半径rにおいて中心角dθの扇形要素を考える。この要素には自重による垂直応力σ_x(式(1))が作用する。

$$\sigma_x = \rho \{ (H+x)^3 - H^3 \} / 3(H+x)^2 \dots\dots\dots (1)$$

σ_x：扇形要素に作用する垂直応力 (gf/cm²)

ρ：コンクリートの単位容積重量 (gf/cm³)

したがって、扇形要素の各断面における応力状態は、図-2に示すモールの応力円(式(2))で表わすことができる。

$$(\sigma - \sigma_x/2)^2 + \tau^2 = (\sigma_x/2)^2 \dots\dots\dots (2)$$

また、硬練りコンクリートの粘塑性体物性値である粘着力Cおよび内部摩擦角φより決まるクーロンの降伏

条件式(3)は、同図内の直線で示される。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (3)$$

コンクリートの変形は、このモールの応力円がクーロン式より上方の変形領域にあるとき、すなわちⅡの状態のとき可能と考えられるので、式(2)と(3)のσについての連立式(4)でσが2実根をもつ条件、すなわち式(4)の判別式D(式(5))がD>0のときに変形することになる。

$$(1 + \tan^2 \phi) \sigma^2 + (2C \tan \phi - \sigma_x) \sigma + C^2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$D = \sigma_x^2 - 4C \sigma_x \tan \phi - 4C^2 \dots\dots\dots (5)$$

したがって、不変形領域高さh₀は、D=0となる条件から求めることができる。

D>0の変形領域にある扇形要素の変形は、モールの応力円がクーロン式に接するⅢの状態になるまで要素がつぶれることによって起こると考えられるので、図-3に示すように、変形後の自重による垂直応力σ_{x1}は、式(6)で与えられる。

$$\sigma_{x1} = 2r_a = 2C(1 + \sin \phi) / \cos \phi \dots\dots\dots (6)$$

変形前後で薄層円板上のコンクリート重量は不変なので、変形後の薄層円板の半径r_{x1}は式(7)で計算することができる。

$$\int_0^{r_x} \int_0^{2\pi} r d\theta dr \sigma_x = \int_0^{r_{x1}} \int_0^{2\pi} r d\theta dr \sigma_{x1}$$

$$\pi r_x^2 \sigma_x = \pi r_{x1}^2 \sigma_{x1}$$

$$r_{x1} = \sqrt{\sigma_x / \sigma_{x1}} \cdot r_x \dots\dots\dots (7)$$

また、変形前後で薄層円板の体積は変わらないと仮定すれば、変形後の薄層円板の厚さdx₁は、式(8)で計算することができる。

$$\pi r_x^2 dx = \pi r_{x1}^2 dx_1$$

$$dx_1 = (r_x^2 / r_{x1}^2) dx = (\sigma_x / \sigma_{x1}) dx \dots\dots\dots (8)$$

以上より、底面摩擦の影響を考えない場合のスランプ値SLは、式(9)で計算することができる。

$$SL = H - h' \dots\dots\dots (9)$$

$$h' = h_0 + \int_{h_0}^H dx_1 = h_0 + \int_{h_0}^H (\sigma_x / \sigma_{x1}) dx$$

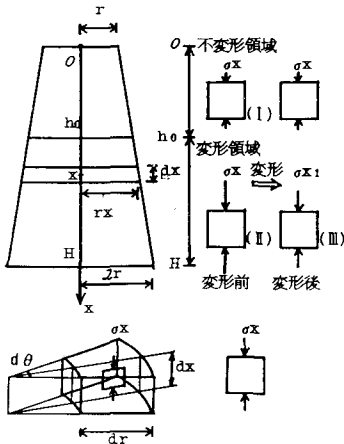


図-1 スランプコーンの変形

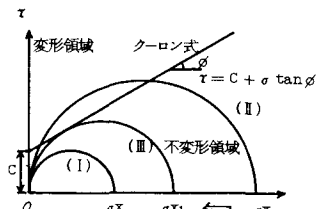


図-2 底面摩擦を考慮しない場合における要素の各断面の応力状態

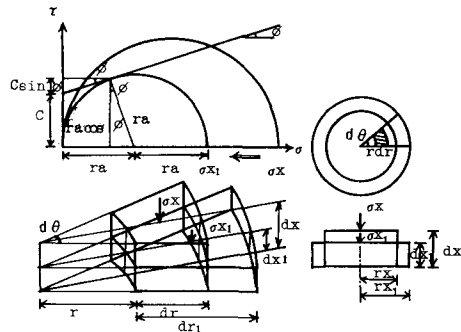


図-3 変形前後の扇形要素および薄層円板

$$= h_0 + \frac{2C(1+\sin\phi)}{\rho \cos\phi} \ln \frac{7H^3}{(H+h_0)^2 - H^2} \dots\dots\dots(10)$$

b) 底面摩擦を考慮した場合

図-4に示すように、底面部においては、摩擦力 τ_{xrh} による合力 ($\tau_{xrh} \times$ 底面積) と等価となるような水平直応力 σ_{r1} が変形領域 $h_0 \leq x \leq H$ に x に関する指数乗式 (11) で分布し、変形を拘束すると仮定すれば式 (12) が得られる。

$$\sigma_{r1} = \sigma_{r1H} \{(x-h_0)/(H-h_0)\}^a \dots\dots\dots(11)$$

$$\int_{h_0}^H \sigma_{r1} \cdot 2\pi r_x dx = \pi (2r)^2 \tau_{xrh}$$

$$2\pi r \sigma_{r1H} (H-h_0) A/B = \pi (2r)^2 \tau_{xrh} \dots\dots\dots(12)$$

$$A = (a+1)H + H(a+2) + h_0$$

$$B = H(a+1)(a+2)$$

また、 σ_{r1} の分布によってコーン内にはせん断応力分布 τ_{xr} が生じ式 (13) で与えられる。

$$\tau_{xr} = \left(\int_0^x 2\pi r_x \sigma_{r1} dx \right) / \pi r_x^2$$

$$= \frac{2\sigma_{r1H} H^2 (x-h_0)^{a+1} \cdot A}{r(H+x)^2 (H-h_0)^a \cdot B} \dots\dots\dots(13)$$

式 (12) の τ_{xrh} は、後記の斜面試験より測定された摩擦力の平均値 (図-12 参照) を用い、また式 (11) の σ_{r1H} は、スランプフロー値が変化しない (図-13 参照) 条件から本解析に準じて推定することにより求め、さらにこれらの結果より a を算定する。ただし、 τ_{xrh} および σ_{r1H} は、本解析方法の正当性を確認するために、個々の斜面試験の結果およびスランプフロー値の実測値から求める場合についても行っている。

任意の x における扇形要素には、図-5に示すように σ_x 、 τ_{xr} および σ_{r1} が作用し、その各断面の応力状態は、図-6のモールの応力円で示される。変形領域の要素の変形後の σ_{x1} は、前記の底面摩擦を考慮しない変形解析同様、モールの応力円がクーロンの式に接する条件で求

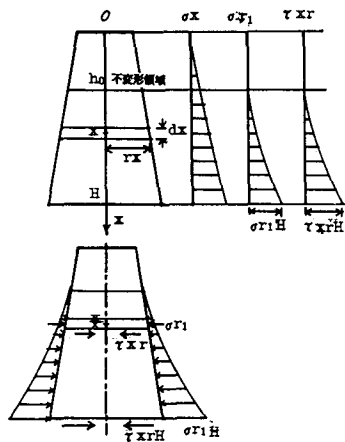


図-4 底面摩擦抵抗の考慮

めることができる。ただし、変形後各要素は底面に近くるので、実際には変形前後で σ_{r1} と τ_{xr} は変化する。しかし、ここでは硬練りコンクリートの変形を扱っており、その変化は小さいものと考えられるので変化しないものと仮定する。したがって図-6に示すように (σ_{r1} 、 $-\tau_{xr}$) を通り、クーロンの式に接するモールの応力円を求め、その円の中心座標を $(b, 0)$ とすれば σ_{x1} は、式 (14) で与えられる。

$$\sigma_{x1} = 2b - \sigma_{r1} \dots\dots\dots(14)$$

$$b = \frac{\sigma_{r1}(1 + \tan^2\phi) + C \tan\phi}{\sqrt{(1 + \tan^2\phi)(\sigma_{r1} \tan\phi + C)^2 - \tau_{xr}^2}}$$

したがって薄層円板の変形後の形状、すなわち層厚 dx_1 および半径 r_{x1} は、底面摩擦を考慮しない変形解析同様に式 (7) および (8) で求めることができる。なおスランプ値は、積分の解析解が得られないので、コーンを適当な厚さ (たとえば 1 cm 程度) の薄層円板に分割して、それぞれの変形後の形状を求める方法で計算する。

(2) 実験による検証

a) 試験概要

① 使用材料および配合

本試験で使用したセメントは、普通ポルトランドセメントである。骨材は、モルタルの場合、利根川産細目砂 (比重 2.53, F.M 1.83) を、またコンクリートの場合、北上川産川砂 (比重 2.53, F.M 2.58) と美山産碎石 2005 (比重 2.65, F.M 6.65) をそれぞれ使用した。

本試験における配合は、表-1に示すように、モルタルの場合 W/C が 50 および 60% のプレールモルタルでスランプが 2.5~14.0 cm の 7 配合、またコンクリー

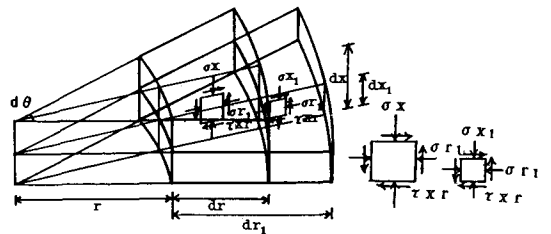


図-5 扇形要素に作用する応力 (底面摩擦考慮)

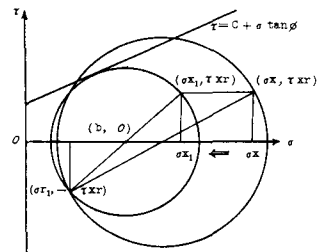


図-6 扇形要素各断面における応力 (底面摩擦考慮)

トの場合 W/C が 38.2 および 50.0 % のプレーンコンクリートでスランプは 1.0~11.0 cm の 5 配合とした。

② 粘塑性体物性値の測定方法

硬練りモルタルの粘塑性体物性値 C および φ の測定は、試料容器の寸法が内径 10 cm, 内高 6 cm のモルタル用一面せん断試験機を使用して実施した。試験は、せん断速度を 1 mm/min, またせん断面上における垂直応力を自重を含めて約 10~35 gf/cm² の 3 段階で行った。図-7 に一面せん断試験における水平変位とせん断応力の実測結果の一例を示す。程度に若干の差はあるが、どの配合でも水平変位が 2~5 mm で最初にすべる部分が存在する。さらに水平変位させるとせん断面付近より分離脱水が顕著になり、したがってせん断抵抗も大きくなり最大せん断応力のピークが現われる。本試験では、分離脱水の影響の少ない初期せん断すべり部の応力を、そのモルタルの降伏せん断応力と考えた。横軸に垂直応力、縦軸にせん断応力をとり、各垂直応力に対応する初期せん断すべり部の応力を打点し、最小 2 乗法により回帰式を求め、その勾配および縦軸との交点の縦距よりそれぞれ φ と C を求めた。この方法により求めた C および φ のばらつき、すなわち変動係数は、表-2 に示すように粘着力で 9.5~13.1 %, 内部摩擦角で 2.1~7.0 % であった。若干粘着力のばらつきが大きい、この測定方法である程度安定した測定値が得られることが確認された。なお他の配合についても測定回数は 3 回であるが、変動係数を表-3 に併記した。これらの結果からもほぼ同程度のばらつきで測定されることが認められた。

硬練りコンクリートの C および φ の測定は、ゴムスリーブを介して成形される直径 10 cm, 高さ 20 cm の供試体が水圧方式三軸室内にセットできるコンクリート用三軸圧縮試験機を用いて行った。スランプコーン変形時

表-1 配合 (スランプ試験におけるコンクリートの変形試験)

配合	配合条件			単位量 (kg/m ³)				
	W/C (%)	s/a (g/g)	スランプ (cm)	C	W	S	G	
M	1	2.36	2.5	570	285	1346	-	
				6.5	606	303	1273	-
				8.0	620	310	1242	-
	2	2.36	4.0	500	300	1363	-	
				6.0	517	310	1326	-
				7.5	533	320	1288	-
				1.0	360	180	843	927
Co	2	48	3.0	380	190	822	904	
			8.0	400	200	802	883	
	3	37	3.0	500	191	597	1032	
				2.10	783	861	-	
				2.10	783	861	-	

M : モルタル Co : コンクリート

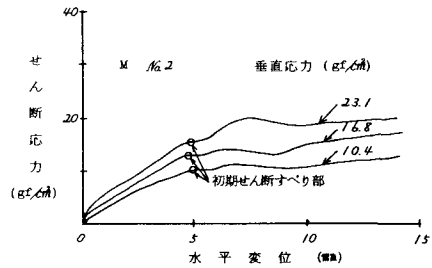


図-7 一面せん断試験における水平変位-せん断応力曲線の一例

に作用する圧力が小さいことを考慮して、側圧は極力小さい水準とし、25~160 gf/cm² の 3 水準とした。軸荷重は、ひずみ速度 1 %/min で載荷した。試験データは、横軸にひずみ、縦軸に軸荷重と間隙水圧をとった X-Y レコーダにそれぞれ記録した。図-8 にその一例を示す。軸荷重のピークは、どの配合においても明確には認められなかった。越川の方法³⁾に従って試料内部でのせん断変形が原因と考えられる間隙水圧の初期低下点から、これに対応する載荷重を求め、これを降伏応力として各側圧におけるモールの応力円を描き、最小 2 乗法によりその共通接線を求め、その勾配およびせん断軸との交点の縦距より φ と C を求めた。この方法により求め

表-2 粘着力 C および内部摩擦角 φ の測定値のばらつき

配合	φ (°)	測定結果					平均	変動係数 (%)	試験法		
		1	2	3	4	5					
M	1	C	5.32	6.80	6.13	6.72	5.27	6.05	1.09	一面せん断試験	
		φ	3.25	2.66	2.82	2.82	3.03	2.92	7.0		
M	2	C	4.55	4.76	4.73	3.88	5.24	4.63	9.5		
		φ	2.64	2.66	2.52	2.67	2.60	2.62	2.1		
M	3	C	3.45	4.85	4.53	3.57	4.28	4.14	13.1		
		φ	2.02	1.68	1.93	1.86	1.80	1.86	6.2		
Co	2	C	5.64	5.99	6.25	4.87	6.11	5.77	8.6		三軸圧縮試験
		φ	2.53	2.49	2.47	2.67	2.40	2.51	3.6		
Co	3	C	5.65	5.13	4.68	6.31	4.82	5.32	11.2		
		φ	1.86	1.92	1.92	1.85	1.71	1.85	4.2		

表-3 スランプ試験におけるコンクリートの変形に関する試験結果および解析による計算スランプ値

配合	粉粒体物性値				底面摩擦係数		スランプ (実測値)		スランプ (計算値)			
	粘着力 (gf/cm ²)	内部摩擦角 φ (°)	φ 変動係数 (%)	μ	μ 変動係数 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	底面摩擦係数	底面摩擦係数			
								μ	μ 変動係数 (%)			
M	1	6.05	1.09	2.92	7.0	0.120	0.879	2.5	20.0	4.0	1.8	1.7
	2	4.63	9.5	2.62	2.1	0.108	0.744	6.5	20.6	8.0	6.3	6.1
	3	4.14	1.31	1.86	6.2	0.091	0.587	8.5	21.1	11.3	10.3	9.9
	4	2.31	12.5	1.50	7.5	0.119	0.174	14.0	24.3	18.1	17.0	16.9
	5	6.24	10.3	3.12	6.2	0.137	0.709	3.5	20.6	3.3	0.8	1.2
	6	5.02	1.17	2.44	3.8	0.241	-0.570	6.0	20.6	7.6	5.0	5.8
	7	4.31	8.7	2.48	4.3	0.131	0.299	7.5	20.6	9.4	7.7	7.6
Co	1	8.35	1.25	2.89	8.0	0.672	-3.29	1.0	20.0	2.2	0.0	0.0
	2	5.77	8.6	2.51	3.6	0.227	-1.25	3.0	20.2	7.3	4.9	4.9
	3	5.32	11.2	1.85	4.2	0.227	-1.25	8.0	22.0	9.7	7.9	7.8
	4	4.50	13.3	9.14	3.9	0.235	-1.60	11.0	23.5	14.0	12.3	12.6
	5	6.41	14.2	2.62	7.7	0.139	0.06	3.0	20.0	3.8	4.0	3.2

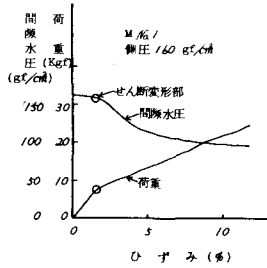


図-8 三軸圧縮試験における荷重および間隙水圧測定結果の一例

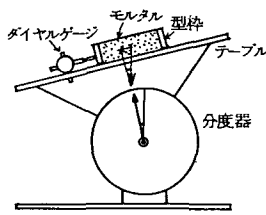


図-9 斜面試験装置

た C および ϕ のばらつき、すなわち変動係数は、表-2 に示すように粘着力で 8.6~11.2%，内部摩擦角で 3.6~4.2% であった。一面せん断試験同様に、若干粘着力のばらつきが大きい、この測定方法である程度安定した測定値が得られることが確認された。また、他の配合についても測定値の変動係数を表-3 に併記したが、これらの結果からもほぼ同程度のばらつきで測定できることが認められた。

③ 斜面試験方法

底面部のコンクリート試料に作用する摩擦力を求める定数、すなわち摩擦係数 μ と付着力 a は、図-9 に示す斜面試験装置を使用して測定した。すなわち、可傾テーブルを水平にし、直径 20 cm、高さが 3 種類 (4.4, 6.6 および 14.8 cm) の底なし型枠に試料を詰めて、徐々にテーブルを傾けて型枠が滑動を始める角度 (ダイヤルゲージが 1 mm 以上動いたときのテーブル角度) を測定し、斜面に沿う分力 (摩擦力) を計算した。上記 3 種の型枠で行った結果を横軸に垂直応力、縦軸に摩擦力をとった座標中に打点し、最小 2 乗法でその勾配および縦軸との交点の縦距よりそれぞれ摩擦係数 μ と付着力 a を求めた。

④ スランプ試験における変形測定方法

スランプ試験は、JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験方法) に準じて行い、スランプ値、底面の広がり直径 (スランプフロー値) を測定すると同時に、全体の变形形状を測定するために写真撮影を行った。写真はスライドで再生し全体の变形形状を測定した。

なお以上②~④の各試験は、モルタルまたはコンクリート練りませ後 30 分以内に終了させた。

b) 試験結果および考察

硬練りモルタルおよびコンクリートの粘塑性体物性値、底面摩擦力を求めるための定数、スランプの実測値および前記の解析方法に従って算出した計算値を表-3 に示す。また図-10 および 11 に、底面摩擦を考慮しない場合および考慮した場合の解析により算出したスランプ値の計算値と実測値の関係および全変形形状の一例を示す。これらの図より、底面摩擦を考慮しない場合の計

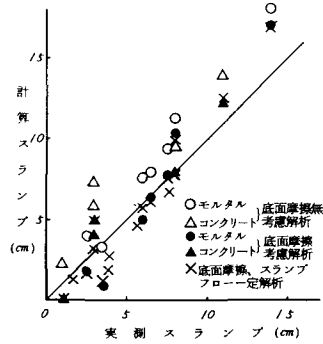


図-10 実測スランプと計算スランプの関係

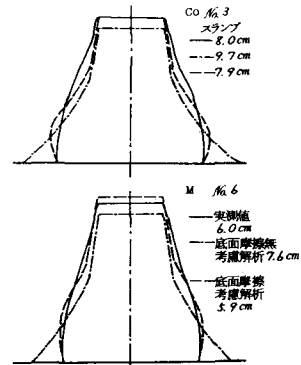


図-11 スランプ試験における全変形形状の一例

算値は、実測値に比べてスランプ値で 2~4 cm 大きくなり、また底面部の形状がより広がることが認められる。若干精度は落ちるが、この解析方法でも概略の变形は予測できることがわかる。底面摩擦を考慮した場合の計算値は、全変形形状も実測値に近くなり、スランプ値も 0~3 cm の誤差で予測できることが認められる。

以上の結果より、硬練りのモルタルおよびコンクリートを粘塑性体と仮定し、粘着力 C および内部摩擦角 ϕ を用いてその物性を評価することが妥当であること、また外力によりそれらの要素内に発生する応力の状態を示すモールの応力円とクーロンの降伏条件式との関係から最終変形量を求める解析方法で硬練りコンクリートの变形をかなり精度よく予測できること等が確認できた。

なお、本試験で実施したスランプの範囲においては、図-12 に示すように、底面摩擦力はコンシステンシーによってほとんど変わらず、モルタルの場合平均 5.2 gf/cm²、コンクリートの場合 8.2 gf/cm² でほぼ一定であることが認められる。また、図-13 に示すように、スランプフロー値もスランプ 8 cm 以上で若干フローするが、その値は小さく実用上は変形なしの 20 cm としても差し支えないものと考えられる。したがって底面の水平直応力 σ_{FH} は、スランプフロー値が 20 cm として

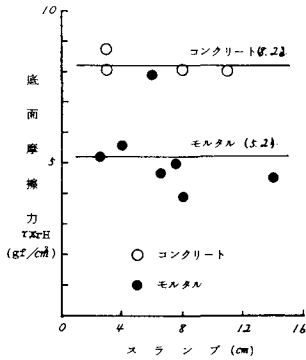


図-12 スランプと底面摩擦力との関係

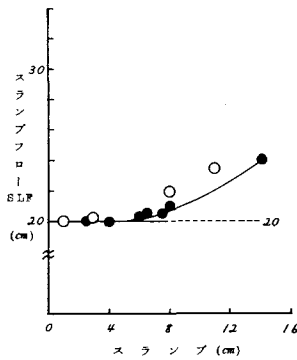


図-13 スランプとスランプフローとの関係

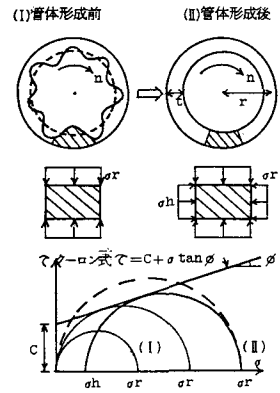


図-14 管体形成前後のモデル図

本解析方法に準じて推定することができ、また底面の摩擦係数 μ_{RH} も前記の一定値で与えることができるので、変形予測に必要なデータとしては、 C および ϕ の物性値のみである。表-3中の底面摩擦、スランプフロー一定解析の結果および図-10中の×印は、この条件で求めたものであり計算値と実測値がよく一致していることが認められる。

3. 遠心成形における管体形成条件

一般に、ヒューム管やパイル等の製造においては、管体を形成し、締めるために遠心成形が実施されている。この成形技術には、大きく分けて次のような2つの工程がある⁷⁾。すなわち、まずフレッシュコンクリートを管型枠内に投入し $5g$ (g は重力加速度) 以下の低遠心加速度で管体を形成する工程と続いて実施される $10\sim 15g$ および $20\sim 30g$ の中および高遠心加速度で順次締めを行う工程である。管体が十分に形成されないうちに、中高遠心加速度で締めを行うと、ペースト分が分離し締固まってしまうので不完全な形状となってしまう。このように管体形成工程は、きわめて重要な工程であるが実際には作業員の経験等に基づいて実施されているのが現状である。本研究は、この管体形成工程における管体形成条件をレオロジー手法を用いて理論的に検討することを試みたものである。一般に遠心成形製品の製造に使用されているコンクリートは、スランプが 8 cm 程度の硬練りであり、また、管体も遠心加速度による静的外力で変形することにより形成されると考えられるので、前記硬練りコンクリートの変形解析が応用できるものと考えられる。

(1) 管体形成条件の解析

一般に遠心成形におけるフレッシュコンクリートの管型枠内への投入は、最低の回転速度 ($1.5g$ 程度) である程度ゆきわたるように行われるが、実際には図-14に示すようにまだかなり凹凸がある状態となる。この状

態で遠心力を徐々に増加させた場合、コンクリート部に作用する外力としては、遠心力、型枠による変形拘束力および若干の振動等が考えられるが、ここで検討する管体形成条件としては、この状態でコンクリートが変形するための概略の目安となる条件すなわち、変形するために必要な最低の条件を得ることを目的とするので、外力としては図-14に示すように遠心力のみが作用するものとして解析を行う。

遠心加速度によりコンクリート部が受ける平均遠心力 σ_r は、式 (15) で計算される。

$$\sigma_r = (\rho/g) \omega^2 r = \rho \alpha_x \dots (15)$$

- α : 遠心加速度 ($4\pi^2 r n^2$) (cm/s^2)
- α_x : 遠心加速度比 (α/g)
- r : 管平均半径 (cm)
- n : 回転数 (回/s)
- g : 重力加速度 (980 cm/s^2)
- ρ : コンクリートの単位容積重量 (gf/cm^3)
- t : 管平均肉厚 (cm)

したがってコンクリート部の各断面における応力状態は、図-14に示すモールの応力円 (式 (16)) で示される。この応力円が、このコンクリートの粘塑性体物性値 C および ϕ で決まるクーロンの降伏条件式 (3) より上の変形領域にある場合凸部の肉厚は、平均肉厚よりは大きいので、この部分が受ける遠心力は、平均遠心力 σ_r より大きいことになり、変形を起こし、より平滑な管体形状を形成しようとするものと考えられるので概略の目安としての管体形成条件は、式 (16) および (3) の連立式の判別式 (17) で $D > 0$ の数学的な表現に置き換えて評価することができる。

$$(\sigma - \sigma_r/2)^2 + \tau^2 = (\sigma_r/2)^2 \dots (16)$$

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \dots (3)$$

$$D = \sigma_r^2 - 4C\sigma_r \tan \phi - 4C^2 \dots (17)$$

(2) 管体形成条件の実験的検討

a) 試験概要

① 使用材料および配合

使用材料は、モルタルおよびコンクリートのいずれの場合においても前記硬練りコンクリートの变形に関する試験で使用したものと様様のものである。

配合は、表—4に示すようにモルタルの場合 W/C が 40, 50 および 60 % で、またコンクリートの場合 W/C が 38.2, 50 および 60 % でいずれの場合もスランプが 0 ~ 8 cm の硬練りとした。

② 粘塑性体物性値測定方法

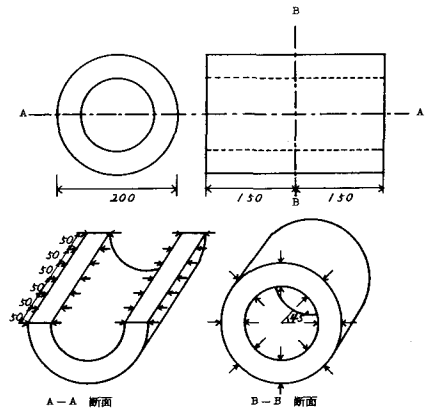
粘塑性体物性値 C および ϕ は、前記硬練りコンクリートの变形に関する試験同様に、モルタルの場合は一面せん断試験で、コンクリートの場合は三軸圧縮試験でそれぞれ求めた。

③ 管肉厚変動の測定方法

管体の形成程度を評価する特性値として、製管後の管肉厚の変動を取り上げ次の方法で測定した。すなわち、前記配合条件でモルタルまたはコンクリートを練りませ、直ちに、外径 20 cm、長さ 30 cm 用の管型枠に 15 kg 投入 ($r \approx 8$ cm, $t \approx 4$ cm となる量) し、最大遠心加速度 α_{max} を 1.5 g, 2.5 g および 5.0 g の 3 条件で所定の遠心条件 ($0.5g \times 2$ 分 $\rightarrow \alpha_{max}/2 \times 1$ 分 $\rightarrow \alpha_{max} \times 5$ 分) を与えて製管した。硬化後、脱型し、図—15に示すように円周および長手方向に真半分に管を切断し、図に示す所定の場所における肉厚をノギスで測長し、円周および長手方向の肉厚のばらつきを示す変動係数 V_r および V_e を求めた。

④ 遠心力による分離の程度を推定する試験方法

前記の管肉厚変動の測定試験において、 α_{max} 5 g まででどの程度モルタルまたはコンクリートが分離するのかを推定するために、一部の配合で試験を行った。モルタルの場合、管肉厚変動測定試験と同様に外径 20 cm、長さ 30 cm 用の管型枠を使用して、 α_{max} 1.5, 2.5 および 5.0 g で遠心成形後、それぞれ管内面の厚さ 1 cm の部



図—15 肉厚測定位置

分からモルタル試料を採取し、手練りでよく混合してフロー試験 (JIS R 5201) を行いフロー値を測定した。また、管体が硬化後、管内面の同部分からモルタル試料を採取し、セメント協会法に準じて配合推定試験を行った。コンクリートの場合は、スランプ試験に必要なサンプル量を採取するために、外径 35 cm、長さ 100 cm (肉厚 5 cm) の型枠を使って、 α_{max} 1.5, 2.5 および 5.0 g で遠心成形後直ちにそれぞれ管内面の厚さ 2 cm 以内の部分からコンクリート試料を採取し、手練りでよく混合した後スランプ試験を行った。各 α_{max} におけるこれらの測定結果の変化より分離の程度を推定した。

b) 試験結果および考察

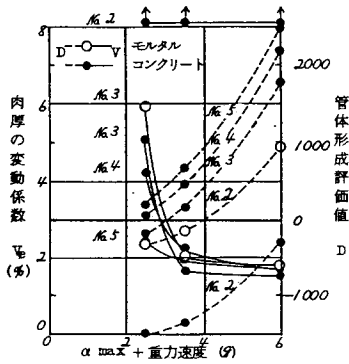
表—5に粘塑性体物性値 C および ϕ 、肉厚の変動係数 V_r および V_e および前記解析方法に従って α_{max} 、 C 、 ϕ より求めた D 値等の結果を示す。また図—16に α_{max} と V_e 値および D 値の関係の一例を示す。これらの結果より、 α_{max} が大きくなるに従って V_r および V_e 値は確実に小さくなり管体が形成されていくことが認められる。

表—4 配合 (管体形成条件に関する試験)

配合種類	配合率 (%)	配合条件			単位量 (kg/m ³)			
		W/C (%)	S/a (S/C)	スランプ (cm)	C	W	S	G
M	40	—	(2.00)	1.0	663	265	1326	—
			(1.75)	4.0	710	284	1243	—
			(2.50)	1.5	560	280	1400	—
	50	—	(2.36)	2.5	570	285	1346	—
			(2.90)	1.0	537	322	1557	—
			(2.73)	4.0	500	300	1363	—
Co	38.2	48	3.0	3.0	500	191	597	1032
			0	3.0	340	170	863	949
			1.0	3.0	360	180	843	927
			3.0	3.0	380	190	822	904
			8.0	4.00	200	802	883	—
			6.0	5.0	3.0	317	190	882

表—5 管体形成条件試験結果

配合種類	配合率 (%)	物性値		α_{max} + (重力加速度)											
		C (g/cm ³)	ϕ (°)	1.5 (2.5) g			2.5 (3.5) g			5.0 (6.0) g					
		(%)	(%)	Vr値 (%)	Vo値 (%)	D値 (%)	Vr値 (%)	Vo値 (%)	D値 (%)	Vr値 (%)	Vo値 (%)	D値 (%)	Vr値 (%)	Vo値 (%)	D値 (%)
M	1	78.3	28.5	21.6	41.3	43.8	—/45	20.9	18.8	153	18.7	16.4	153.7	16.4	153.7
	2	62.0	26.0	22.2	28.1	25.9	71	21.0	18.7	437	18.8	14.1	304.2	18.8	14.1
	3	80.8	36.2	20.5	6.21	5.6	—/32.5	2.52	2.04	—/11.5	1.93	1.81	99.8	1.93	1.81
	4	60.5	29.2	20.5	2.95	2.78	8	1.91	1.75	28.2	1.67	1.57	159.7	1.67	1.57
	5	79.0	29.4	20.2	5.06	5.49	—/201	2.92	2.96	48	1.32	1.59	139.9	1.32	1.59
	6	77.3	28.1	20.2	4.95	4.72	—/164	2.55	2.11	95	1.69	1.48	157.3	1.69	1.48
Co	1	64.1	26.2	23.2	4.52	4.71	81	2.32	2.50	482	1.85	1.79	223.5	1.85	1.79
	2	16.4	32.1	23.2	>10.0	>10.0	>149.2	>10.0	>10.0	1357	10.0	>10.0	>265	10.0	>10.0
	3	83.5	28.9	23.1	5.32	5.09	—/169	2.11	1.64	178	2.10	1.55	179.6	2.10	1.55
	4	57.7	25.1	23.0	3.46	4.22	58	2.58	2.25	465	1.90	1.86	222.5	1.90	1.86
	5	53.2	18.5	22.9	21.0	24.1	239	1.90	2.03	677	1.85	1.70	250.3	1.85	1.70
	6	66.1	26.6	22.9	3.72	4.01	40	2.14	2.30	430	1.98	2.33	212.2	1.98	2.33



図一六 α_{max} と V_e 値および D 値の関係

表一六 管体形成条件試験における分離確認実験結果

配合	項目	基準	1.5 (2.5)g	2.5 (3.5)g	5.0 (6.0)g	スラップ発生 α_max	
M-3	フロー値FL (mm)	1.25	1.24	1.27	1.28	20g	
	絶対比重 ρ (kg/m^3)	-	1932	1927	1920		
	分析値	CaO (%)	-	19.0	19.2		19.3
		insol (%)	-	68.4	68.2		68.1
	配合(推定) (kg/m^3)	C	560	562	567		568
		W	280	278	280		282
S		1400	1401	1393	1386		
M-4	フロー値FL (mm)	1.35	1.33	1.36	1.39	15g	
	絶対比重 ρ (kg/m^3)	-	1930	1921	1922		
	分析値	CaO (%)	-	19.3	19.2		19.3
		insol (%)	-	65.7	65.3		65.4
	配合(推定) (kg/m^3)	C	570	571	565		575
		W	285	287	295		290
S		1346	1344	1329	1332		
G0-5	スラップ (cm)	8.0	7.5	8.0	9.0	10g	

スラップ0 cmのNo.2コンクリートの結果を除けば、他のほとんどのコンクリートまたはモルタルは、ほぼ2.5g (+重力加速度で3.5g)以上で V_r 、 V_e 値ともほぼ2%程度となり、管体が形成されることが認められる。またこのときの D 値は、前記のように管体形成に必要な概略の目安となる条件より算出したものであるため若干のばらつきはあるがほぼ $D>0$ の条件を満足することが認められる。スラップ0 cmのNo.2コンクリートは、 α_{max} が1.5~5.0gの範囲で $D>0$ にはならず V_r および V_e も10%以上で管体が形成されていないことが認められる。以上より、管体形成に必要な概略の目安を与える $D>0$ の条件である程度遠心成形における管体形成を評価することができることがわかった。

なお、表一六に管肉厚変動の測定試験におけるモルタルおよびコンクリートの分離の程度を推定した試験結果を示す。モルタルでの所定遠心加速度による成形後の配合推定試験結果より5.0gで若干管面にペースト分が多くなる傾向が認められること、またフロー値も若干大きくなること、コンクリートでのスラップ値も同様であること等から、5.0gで分離がわずかに起こり始めるこ

とがうかがえる。しかし、この程度の分離ではモルタルまたはコンクリートの性状変化には、ほとんど影響を与えないものと考えられる。

4. 結論

スラップが15 cm以下の比較的硬練りのコンクリートおよびモルタルの静的外力による変形例として、スラップコーンの変形を取り上げ、その解析方法の検討および実験による検証を行った。また、その応用として、遠心成形における管体形成条件についても同様の方法で解析し、実験的検討を行った。これらの試験によって得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 硬練りモルタルおよびコンクリートを粘塑性体と仮定し、粘着力および内部摩擦角を用いて、静的外力による変形例であるスラップコーンの変形をモルラーコーンの降伏条件より解析した結果、底面摩擦力を考慮した場合のスラップ値の計算値は、約2 cmの誤差で実測値とほぼ合うことが確認できた。このことは、硬練りコンクリートを粘塑性体と仮定し、粘着力および内部摩擦角を用いてその物性を評価することが妥当であること、またモルラーコーンの降伏条件より硬練りコンクリートの変形を予測することが可能であることを示すものである。

(2) (1)の応用として、遠心成形において管型枠内に投入されたコンクリートが遠心力により変形するのに必要な概略の目安となる条件から(1)同様の解析によって求めた $D>0$ の条件で管体形成の程度を評価した結果、 $D>0$ で管体がほぼ形成されることが検証された。これは、遠心成形技術に関する理論的な新知見を与えることを示すだけでなく、(1)の解析がさらに多くの変形予測に応用できることを示唆するものであると考えられる。

謝 辞：本研究の実施に際し、東京都立大学教授村田二郎先生に終始ご懇切丁寧なご指導を賜った。また、実験にあたっては、東京都立大学助手 鈴木一雄、川崎道夫、大作 淳の各氏ならびに清水建設(株)高田英二氏に多大なご協力をいただいた。ここに、謹んで感謝の意を評します。

参考文献

- 1) 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究，土木学会論文集，No.378，pp.21~33，1987. 2.
- 2) Murata, J. : Flow and Deformation of Fresh Concrete, RILEM, Materials and Construction, Vol.17, No. 98, pp.117~129, 1984.
- 3) 村田二郎・下山善秀：静的荷重によるフレッシュコンクリートの変形，セメント技術年報，Vol.30，pp.270~273，

- 1976.
- 4) 谷川恭雄・森 博嗣：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法，コンクリート工学，Vol.25，No.5，pp.4～16，1987.
 - 5) 越川茂雄：まだ固まらないコンクリートの粉粒体特性に関する研究，土木学会第32回年次講演会概要集，pp.394～395，1977.
 - 6) 竹内十三男・越川茂雄・伊藤義也：フレッシュコンクリートの三軸圧縮試験方法に関する研究，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論文集，pp.1～6，1986.
 - 7) コンクリート便覧，日本コンクリート工学協会編，技報堂出版.

(1987.6.11・受付)
