流動コンクリートの管内流動に関する研究

日本大学　学生会員　○根本　竜太郎
日本大学　正会員　伊藤　義也
日本大学　正会員　山口　晋

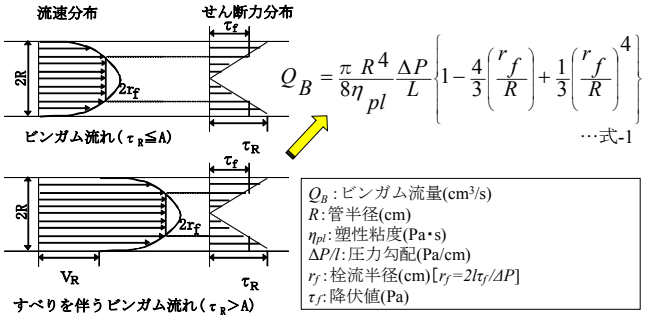
１．はじめに

コンクリート工事では，鉄筋の過密化や複雑な配管条件などに対応するため，中流動コンクリートや高流動コンクリート（以下，流動コンクリート）が用いられるようになっている．これらは，配合やコンシステンシー試験結果を基にした経験の活用が困難であり，現在においても圧送試験を行い，配管径やポンプ能力を選定しているのが現状である．そのため，流動コンクリートの配管計画に用いるレオロジー定数を容易に把握できる簡易的な試験方法を確立する必要がある．

本研究はコンクリートの圧送作業の合理化のために必要となるレオロジー定数の測定を従来の研究成果[1),2)]を基に，管型粘度計を用いて種々の流動コンクリートについて実験に供し，配管計画方法の手順を示すとともに，簡易な圧送性評価方法の提案を行った．

２．コンクリートの管内流動

コンクリートの管内流動は，図-1 を参照して，管壁に滑りを伴うビンガム流れとなり，その流量は次式で与えられる．



$$Q_B = \frac{\pi}{8\eta_{pl}} R^4 \frac{\Delta P}{L}\left\{1-\frac{4}{3}\left(\frac{r_f}{R}\right)+\frac{1}{3}\left(\frac{r_f}{R}\right)^4\right\} \quad \cdots式\text{-}1$$

Q_B：ビンガム流量(cm³/s)
R：管半径(cm)
η_{pl}：塑性粘度(Pa･s)
$\Delta P/l$：圧力勾配(Pa/cm)
r_f：栓流半径(cm)[$r_f=2l\tau_f/\Delta P$]
τ_f：降伏値(Pa)

図-1　すべりを伴う流速分布図

式-1 を用いて，塑性粘度，降伏値，粘性摩擦係数，及び付着力を求めるためには，4 組の実測流量と圧力勾配から求めるべきであるが，式が発散し解が得られないので，従来の研究成果[1)]を利用して付着力とコンクリートのフローとの関係式（$A=-1.76\times10^{-2}SLF+1.31$ ($\gamma=0.99$)）を利用して，未知数を 3 個として式-1 を解くことにした．これらのことを確認するため管型粘度計を用いて流動コンクリートの流量測定を行った．

３．実験の概要

３．１使用材料

実験には，表-1 に示す材料を用い，フロー値の目標を 60，65 及び 70cm とし試験練りを行い，中流動コンクリート，併用系及び粉体系の高流動コンクリートの配合を表-2 の通り定めた．

表-1　使用材料

材料	種類	
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm³，粉末度3370cm²/g
細骨材	茨城県鹿島産陸砂	密度2.62g/cm³，吸水率1.00%，F.M.2.10
	北海道産白老陸砂	密度2.65g/cm³，吸水率1.25%，F.M.4.26
粗骨材	東京都青梅産砕石2005	密度2.67g/cm³，吸水率0.92%，F.M.6.77
混和剤	高性能AE減水剤	
	高流動コンクリート用増粘剤	
混和材	高炉スラグ	

表-2　コンクリートの配合

配合	No	単位水量 (kg/m³)	細骨材率 s/a(%)	水W (kg)	セメントC (kg)	高炉スラグ BFS(kg)	細骨材S (kg)	粗骨材 G大(kg)	粗骨材 G小(kg)	助剤 303 (g)	混和剤＊ (g)	増粘剤 SFCA (g)
中流動	1	160	52.9	160.6	471	－	887	488.4	325.6	2670	4420	－
	2	165	50.9	165.4	486	－	828	496.8	331.2	2760	4560	－
	3	170	48.6	170.3	500	－	797	512.4	341.6	2840	4690	－
併用系	1	165	49.6	161.2	330	141	840	517.2	344.8	－	3768	140
	2	170	51.7	166.1	340	146	861	488.4	325.6	－	3888	150
	3	175	53.9	171.0	350	150	884	459.6	306.4	－	4000	150
粉体系	1	165	52.9	160.6	471	－	887	488.4	325.6	－	4420	－
	2	170	50.9	165.4	486	－	828	496.8	331.2	－	4560	－
	3	175	48.6	170.3	500	－	797	512.4	341.6	－	4690	－

＊混和剤の種類：中流動　B 社製マスターグレニウム
併用系・粉体系　B 社製 SP8SV

３．２コンクリートの練り混ぜ

表-2 に示すコンクリートは，容量 100L の二軸強制練りミキサを用いて，1 バッチの量を 100L として 2 分間練り混ぜ，ミキサ内で 3 分間静置した後，1 分間再撹拌してから練り舟に排出し，各種試験に供した．

３．３管型粘度計による流量測定

実験に用いた管型粘度計は，試料容器，排出管，圧送管，圧力センサ，流出量測定用はかり，水平架台及びコンプレッサから構成されている．流量の測定は，コンクリートを試料容器に投入後，圧送圧力の目標値を 5，15 及び 25kPa として，それぞれの単位時間当たりの流出量を単位容積質量で除して求めた．流量測定は同じ条件で 3 回繰り返して行った．

なお，コンクリートの塑性粘度及び降伏値の測定には，内円筒半径 15cm，高さ 20cm，外円筒半径 20cm の内円筒回転型の共軸二重円筒型回転粘度計を用い多点法[3)]によって測定した．

キーワード　流動コンクリート，ビンガム流れ，レオロジー定数，塑性粘度，降伏値，管型粘度計
連絡先　〒275-8575　千葉県習志野市泉町 1-2-1　TEL.047-474-2470

4．流量測定結果

流動コンクリートの試験結果の一例としてフロー値60cmにおける流量測定結果を圧力勾配との関係で整理し図-2に示す．これによれば，中流動コンクリート，併用系や粉体系の高流動コンクリートの流量は，従来の試験結果と同様に圧力勾配にほぼ比例する結果となった．また，管型粘度計による塑性粘度及び降伏値の計算結果を回転粘度計による試験結果とともに表-3に示す．この結果によると管型粘度計による塑性粘度及び降伏値は，回転粘度計による試験値とほぼ一致し，両者の比は，塑性粘度の場合0.87から1.30，平均1.09で，降伏値は0.78から1.40，平均1.01となっている．また，条件毎に3回繰返し測定した試験値のバラツキ（標準偏差）は，一部の例外的な値を除いて，管型粘度計による標準偏差の方が小さくなっており，安定したレオロジー定数が得られた．これら管型粘度計による試験値が得られるまでの時間は30分で，回転粘度計の約1/2となっていることから，コンクリートの試験練り時に管型粘度計による試験を実施することで，流動コンクリートのポンプ圧送計画で必要となるポンプ能力の選定が容易となる．なお，その手順案を図-3に示した．

5．コンクリートの圧送性の評価

一般にコンクリートのコンシステンシー（流動性の評価）はフロー値で行っているが，図-2に示すように同じフロー値でも流量が相違することからフロー値だけではコンクリートの流動性評価は不十分と判断される．このため，コンクリートの管内流動における圧送性の評価の指標として一定の圧力勾配（例えば，0.015MPa/m）における流量を流動性評価指数（K値と呼ぶ）として用いれば，簡単に圧送性の相対比較が可能になる．スランプフロー60cmのコンクリートにおけるK値は表-3に併記したようであって，中流動コンクリートが最も流動性が高いことが簡単に把握できる．

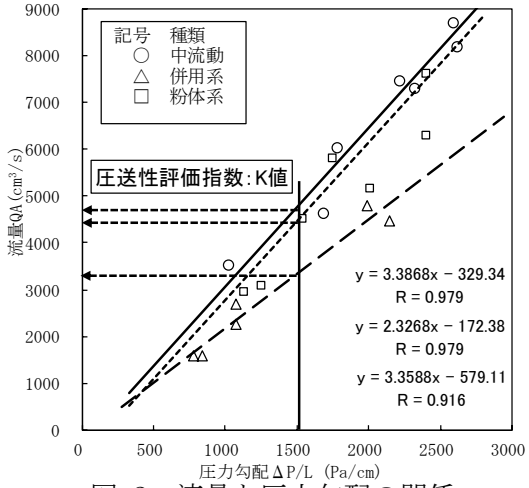


図-2 流量と圧力勾配の関係

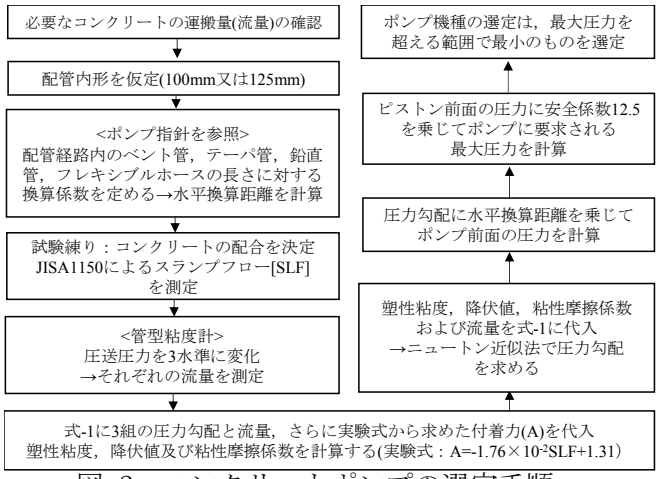


図-3 コンクリートポンプの選定手順

参考文献

1) 山之内他：管型粘度計によるフレッシュコンクリートの流動性評価方法の提案，第17回生コン技術大会論文集，2013年4月.

2) 山之内他：フレッシュコンクリートの圧送性評価方法に関する基礎研究，土木学会第71回年次学術講演会，2016年9月.

3) 菊川他：まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一提案，土木学会論文集，第28号，1979年4月.

表-3 レオロジー定数試験結果及び圧送性評価指数

コンクリートの種類	No.	スランプフロー SF(cm)	回転粘度計 塑性粘度 η_{pl} (Pa・s)	平均値	標準偏差	回転粘度計 降伏値 τ_f (Pa)	平均値	標準偏差	管型粘度計 塑性粘度 η_{pl} (Pa・s)	平均値	標準偏差	管型粘度計 降伏値 τ_f (Pa)	平均値	標準偏差	比（管型/回転） 塑性粘度 η_{pl} (Pa・s)	比（管型/回転） 降伏値 τ_f (Pa)	圧送性評価指数 K値 (cm^3/s)
中流動	1-1	51.0	141	143	21.0	97	93	4.5	146	157	21.0	94	91	3.6	1.03	0.97	5080
	1-2	49.5	164			93			181			91			1.10	0.98	
	1-3	50.5	122			88			143			87			1.17	0.99	
	2-1	58.5	90	91	1.0	71	69	1.5	102	101	0.6	67	65	1.9	1.13	0.95	
	2-2	59.5	92			69			101			64			1.10	0.93	
	2-3	61.5	92			68			101			63			1.10	0.93	
	3-1	63.5	86	88	1.7	64	61	3.6	106	105	1.2	61	59	3.4	1.23	0.95	
	3-2	66.0	90			57			104			55			1.16	0.96	
	3-3	66.5	88			62			106			60			1.21	0.97	
併用系	1-1	54.0	458	464	46.8	209	218	13.9	432	463	28.3	207	203	4.7	0.94	0.99	3490
	1-2	51.0	421			234			487			205			1.16	0.88	
	1-3	52.5	514			211			470			198			0.91	0.94	
	2-1	63.5	223	250	36.3	104	99	9.2	224	231	20.3	81	84	9.4	1.01	0.78	
	2-2	63.5	235			88			214			76			0.91	0.87	
	2-3	61.0	291			104			253			94			0.87	0.91	
	3-1	74.0	80	67	11.5	60	53	7.5	97	77	18.4	66	64	2.0	1.21	1.10	
	3-2	75.0	58			54			75			63			1.30	1.16	
	3-3	72.0	63			45			60			63			0.96	1.40	
粉体系	1-1	52.0	151	130	22.1	149	147	8.6	156	144	19.4	161	162	2.6	1.03	1.08	5038
	1-2	49.0	107			138			122			161			1.14	1.17	
	1-3	48.5	132			155			154			165			1.17	1.07	
	2-1	62.0	107	98	8.5	111	110	7.0	101	103	3.9	102	106	3.7	0.94	0.92	
	2-2	62.5	90			117			101			109			1.12	0.93	
	2-3	61.5	98			103			107			106			1.10	1.03	
	3-1	70.0	76	83	10.4	90	88	2.1	95	96	9.4	104	105	1.1	1.24	1.15	
	3-2	70.0	78			86			87			104			1.12	1.21	
	3-3	69.5	95			89			106			106			1.11	1.19	