

[1088] フレッシュコンクリートのレオロジー定数の簡易推定方法

正会員 谷川恭雄(三重大学工学部)

正会員 森 博嗣(三重大学工学部)

正会員 ○筒井一仁(名古屋市役所)

黒川善幸(三重大学大学院)

1. まえがき

スランブ試験は、フレッシュコンクリートのコンシステンシー試験方法の中で最も簡便で多用されている。しかし、近年、流動化コンクリート、繊維補強コンクリート、水中施工用コンクリートなどの実用化に伴い、従来のスランブ試験だけでは、施工時のコンクリートの流動・締固め特性を正確に予測することがきわめて困難な状況になっている。そのため、レオロジーの観点に立ち、フレッシュコンクリートの流動性を統一的に評価する試みが多く、研究者によって報告されている[1,2]。これらのほとんどの報告では、回転粘度計、平行板ブラストメータ、球引き上げ粘度計などを用い、コンクリートをビンガムモデルと仮定した場合のレオロジー定数の測定を行っているが、本来上記の各種測定方法はコンクリートのレオロジー定数を測定する目的で開発されたものではなく、通常用いられる調合の範囲でさえ同一の測定装置ではカバーできない場合が多い。また、上記の各種粘度計による測定方法は、要求される測定条件の確認や、場合によっては複雑な補正が必要になるなど、必ずしも簡便であるとはいえない。

本研究では、現行の代表的なコンシステンシー試験方法であるスランブ試験とフロー試験の結果を用いて、フレッシュコンクリートおよびフレッシュモルタルのレオロジー定数を定量化する手法を提案し、この推定手法の妥当性を確認するため、球引き上げ粘度計による測定値との比較を行った。また、推定方法の適用例として、流動化モルタルの流動特性の経時変化に関するレオロジー的考察ならびに各種コンクリートのレオロジー定数の推定を行った。

2. レオロジー定数の推定方法

本報で提案するレオロジー定数推定方法は、筆者らが既に提案した粘塑性有限要素解析手法[3](以下、FEMと略記する)によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーションが基本となる。すなわち、フレッシュコンクリートをビンガムモデルと仮定し、そのレオロジー定数を変化させたときのシミュレーション結果と実測結果との比較を行って、試料のレオロジー定数を推定するものである。

スランブ試験およびフロー試験の結果を用いて、フレッシュコンクリートやフレッシュモルタルのレオロジー定数(降伏値(τ_y)および塑性粘度(η))を推定する手法として、以下のようなものが考えられる[4]。

- a) スランピング(s.l.)-降下時間(t)曲線の実測を行い、解析曲線と比較する方法(図-1参照)(スランピングとは、スランブ試験時のコンクリート上面の降下量をいう)
- b) フロー値(f.l.m.)-落下回数(n)曲線を測定して、図-2より推定する方法
- c) スランブ値(S.l.)とフロー値(F.l.m.)を併用して、図-3より推定する方法
- d) スランブ値(S.l.)とコンクリートフロー値(F.l.c.)を併用して、図-4より推定する方法

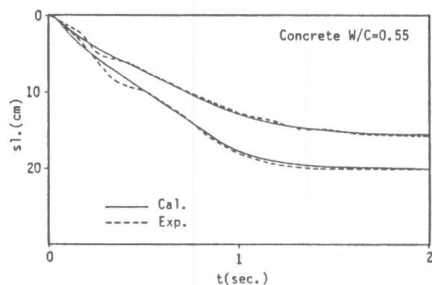


図-1 コンクリートのスランピング (sl.)
-降下時間 (t) 曲線

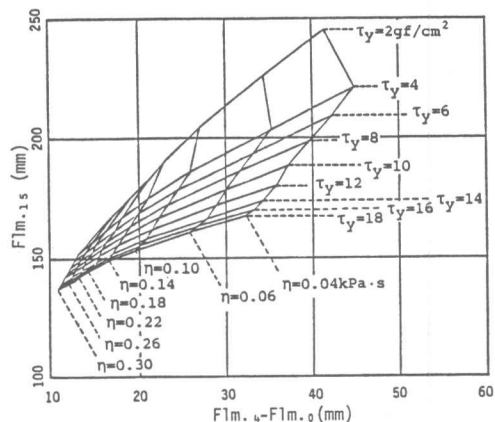


図-2 フロー値 ($Flm_{.15}$, $Flm_{.4}$)
とレオロジー定数の関係

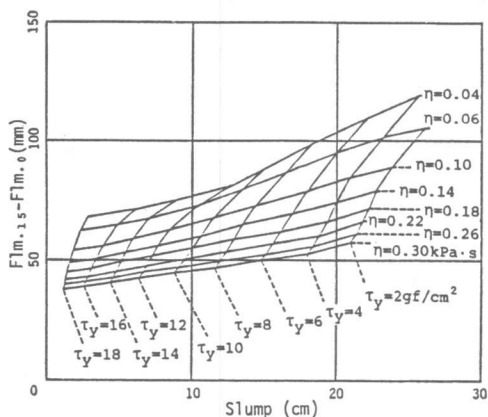


図-3 フロー値およびスランプ値
とレオロジー定数の関係

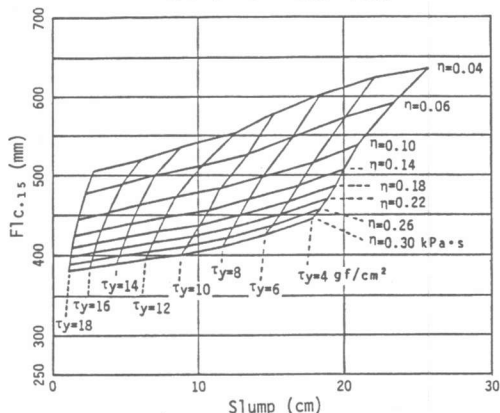


図-4 コンクリートフロー値およびスランプ値
とレオロジー定数の関係

なお、図-2～図-4中の記号、 $Flm_{.0}$ 、 $Flm_{.15}$ 、 $Flm_{.15}$ 、 $Flc_{.15}$ などの記号中の添え字の数字はテーパーの落下回数を示している。

以上の方法のうち、a法は通常建築分野で用いられる各種調合のコンクリートに適用できるという利点があるが、スランピング (sl.)-降下時間 (t) 曲線の測定には、図-5に示すようなスランプコーン自動引き上げ装置ならびにスランピング測定装置が必要となる。b法はモルタル試料については最も簡便な方法であるが、誤差が若干大きい。c法は比較的精度が良く、試験方法も簡便である。d法はc法をコンクリートに拡張したものである。

3. 球引き上げ試験によるレオロジー定数の測定値と推定値との比較

上記の各推定方法の妥当性を確認するためには、レオロジー試験と本提案手法による結果を比較する必要がある。しかし、粗骨材を含んだコンクリートについては、通常用いられるようなレオロジー定数測定装置では正確な測定は困難であり、測定方法はまだ十分には確立されていない。ここでは、モルタルを用いた球引き上げ粘度計による実験結果と、提案したレオロジー定数の推定方法による値との比較検討を行い、モルタルのレオロジー定数推定値の妥当性について検討する。

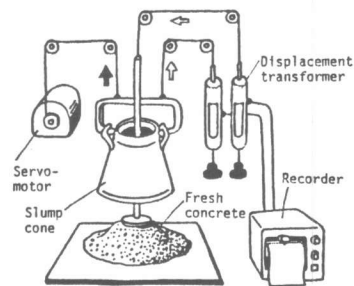


図-5 スランピング試験装置

表-1 実験要因および測定結果

Series	W/C	SP.	F1m.15	F1m.4-F1m.0	τ_y	n
A40-P	40	---	200	35	4.0	0.060
A40-S	40	0.4	210	33	3.0	0.070
A50-P	50	---	222	42	3.0	0.045
A50-S	50	0.4	220	38	3.0	0.055
A60-P	60	---	203	33	3.0	0.070
A60-S	60	0.4	190	30	4.0	0.080

[Notes] W/C:Water-cement ratio (%), SP.:Superplasticizer (/C%), τ_y :Estimated yield value (gf/cm²), n :Estimated plastic viscosity (kPa·s), F1m.0:Flow value before falling, F1m.4,F1m.15:Flow values after 4 and 15 times falling.

3.1 実験の概要

ブレンモルタルおよび流動化モルタルを用いて球引き上げ試験とフロー試験を行った。実験要因としては、表-1に示すように、水セメント比(W/C)および流動化剤添加の有無を取り上げた。

試作の球引き上げ粘度計は、大きさが異なる2つの球(直径25.4mmおよび19.0mm)を同時に一定速度で引き上げる機構をもち、1回の測定で2つのデータを得ることができる。相互干渉が無視できるように、2つの球の間隔は200mmとした。引き上げ速度は、モーターの入力電圧によってコントロールし、速度および抵抗

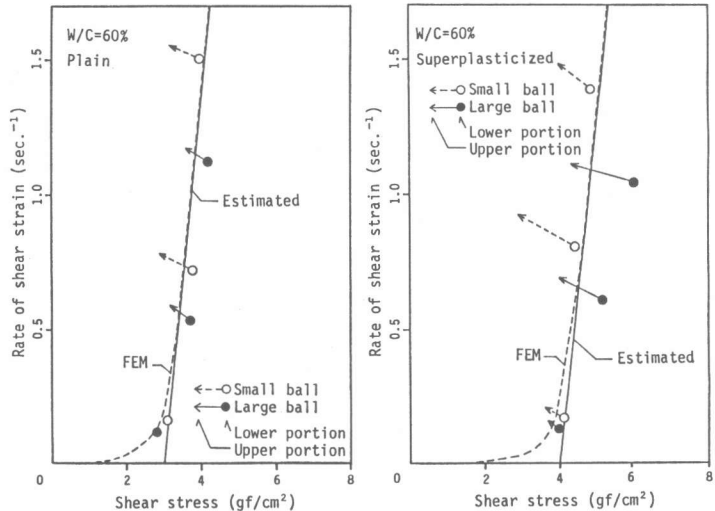


図-6 球引き上げ粘度計の測定結果と本提案による推定結果の一例

力は変位計および荷重計を介して、A/D変換器によってコンピュータのディスクに記録される。データの測定間隔は1/40秒である。測定された平均引き上げ速度および平均抵抗力から、Ansleyの式[5]を用いてひずみ速度およびせん断応力を求めた。なお、試料は理想的なビンガムモデルと仮定した。

また、提案したフロー値のみからレオロジー定数を推定する手法(前述のb法)によりレオロジー定数の推定を行い、実測値との比較を行った。

3.2 実験結果とその考察

図-6は、ブレンモルタルと流動化モルタルに関する実測結果とフロー値より推定したコンシステンシー曲線(実際には直線)を比較したものの一例である。図中の○印および●印は、球の大・小を示しており、容器内の試料の下部で得られたデータの平均値である。また、矢印の先端は上部のデータの平均値を示している。推定したレオロジー定数を入力値として、球引き上げ粘度計のFEM解析を行った結果も図中に併示した。図-6からわかるように、フロー値より推定したコンシステンシー曲線は、Ansley式を用いて求めた実測結果とよく一致している。図には示していないが、他の水セメント比のモルタルについても同様の結果が得られ、本推定手法は、ほぼ妥当であることが確認された。なお、大・小の球による測定値(○および●印)は必ずしも一致せず、大きい球の方がやや大きいせん断応力を算出している。これは大きい球が小さい球に比べてモルタル面とのすべりが少ないことに起因すると考えられる。また、一般に、試料上部は下部に比べ、低いせん断応力を示しているが、これは、試料の上下(今回の実験では約20cmの高低差)のレオロジー的な異方性に起因するものと思われる。また、上下の測定値の差は、水セメント比(W/C)の増加に伴い小さくなることが観察された。

4. 流動化モルタルのレオロジー定数の推定

4. 1 実験の概要

提案した推定方法(2法)の適用例として、流動化モルタルのレオロジー定数の経時変化に関する実験を行った。

実験要因としては、表-2に示すように、水セメント比(W/C=40,50および60%)

の3種)、目標フロー値(180および230の2種)および流動化剤添加の有無を取り上げ、合計12シリーズのモルタルについて、混練後0,10,30,60,90および120分においてフロー値とスランプ値を測定し、それらの経時変化を調べた。流動化剤(ナフタリンスルホン酸塩系)は、ミキサーによる混練後に添加し、さらに1分間手練りを行った時点をもととして、定刻の1分前より繰り返しのを行い、測定に供した。

表-2 実験要因

Series	W/C	S/C	SP.	AE
B40-P1	40	1.5	-	0.04
B40-P2	40	1.7	-	0.04
B40-S1	40	1.9	0.4	0.04
B40-S2	40	2.1	0.4	0.04
B50-P1	50	2.1	-	0.04
B50-P2	50	2.6	-	0.04
B50-S1	50	2.6	0.4	0.04
B50-S2	50	2.9	0.4	0.04
B60-P1	60	2.9	-	0.04
B60-P2	60	3.4	-	0.04
B60-S1	60	3.3	0.4	0.04
B60-S2	60	3.6	0.4	0.04

[Notes] W/C:Water-cement ratio(%), S/C: Sand-cement ratio, SP.:Superplasticizer(/C%), AE:AE agent(/C%).

表-3 測定結果

Series	Time	0	10	30	60	90	120
B40-P1	Fl.	218	213	197	189	184	180
	τ_y	5.0	5.0	7.0	8.0	9.0	9.5
	η	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
B40-P2	Fl.	198	192	190	186	178	175
	τ_y	7.0	8.0	8.0	8.5	9.5	10.0
	η	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07
B40-S1	Fl.	213	212	199	190	177	166
	τ_y	5.0	6.0	8.0	9.0	10.0	12.0
	η	0.04	0.04	0.04	0.05	0.07	0.08
B40-S2	Fl.	201	198	180	168	158	149
	τ_y	6.0	8.0	10.0	11.0	13.0	14.5
	η	0.05	0.05	0.06	0.08	0.11	0.28
B50-P1	Fl.	236	233	219	211	198	190
	τ_y	3.0	3.0	4.5	5.0	6.0	6.5
	η	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06
B50-P2	Fl.	189	189	178	170	161	155
	τ_y	8.0	9.0	11.0	11.5	12.0	12.5
	η	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.09
B50-S1	Fl.	234	214	206	194	180	174
	τ_y	3.0	3.5	5.0	8.0	10.0	11.0
	η	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07
B50-S2	Fl.	202	193	191	167	156	140
	τ_y	4.0	8.0	9.0	12.0	14.0	18.0
	η	0.05	0.05	0.05	0.08	0.12	0.26
B60-P1	Fl.	214	208	203	201	199	194
	τ_y	3.0	4.5	6.0	7.0	8.0	8.5
	η	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
B60-P2	Fl.	181	175	164	155	150	145
	τ_y	6.0	10.0	12.0	14.0	15.0	15.0
	η	0.07	0.07	0.10	0.11	0.14	0.14
B60-S1	Fl.	228	206	199	189	186	185
	τ_y	3.5	7.0	8.0	9.0	9.5	9.5
	η	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06
B60-S2	Fl.	195	192	185	182	171	150
	τ_y	8.0	9.5	10.0	10.5	11.0	16.0
	η	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.10

[Notes] Time: (min.), Fl.: Measured flow value, τ_y : Estimated yield value (gf/cm²), η : Estimated plastic viscosity (kPa·s).

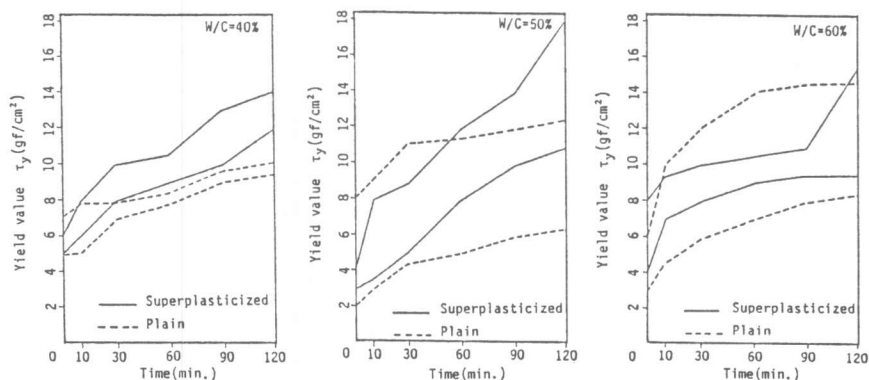


図-7 降伏値 (τ_y) の経時変化

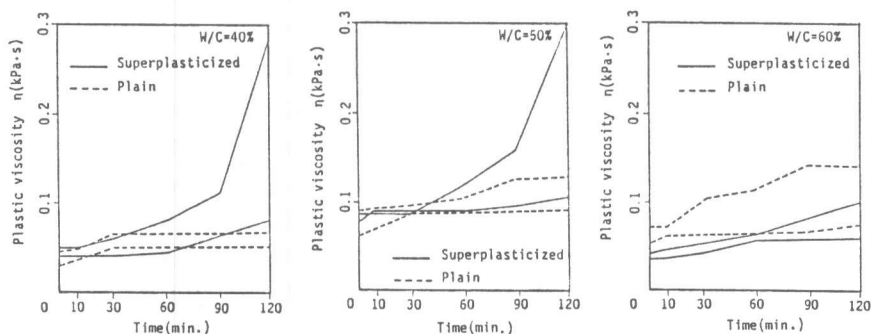


図-8 塑性粘度 (η) の経時変化

4.2 実験結果とその考察

実験によって得られたレオロジー定数の推定値を表-3に示す。図-7および図-8は、推定したフレッシュモルタルの降伏値(τ_y) および塑性粘度(η)の経時変化をそれぞれ示したものである。降伏値および塑性粘度とも時間とともに増大する傾向を示している。結果にバラツキがみられるが、一般に流動化モルタルの降伏値の増大率は、混練後の早期で大きく、塑性粘度は後半で大きい。つまり、流動化モルタルのレオロジー定数の経時変化曲線は、降伏値は上に凸、塑性粘度は下に凸の上昇曲線となる。既往の研究[6]によれば、流動化剤の添加効果は、主として降伏値を低減させる動きがあると指摘されているが、これらの図から明らかのように、降伏値は混練後ただちに大きくなり、流動化剤添加の効果が早期に失われることがわかる。一方、塑性粘度は混練後約1時間以内ではほとんど一定値を保つが、1時間を超えると急激に増加する傾向を示す。図-9は、降伏値(τ_y) および塑性粘度(η)を両軸とする座標に、フレッシュモルタルの経時変化状況をプロットしたものである。この座標上では、2つのレオロジー定数の経時変化は直線的ではなく曲線状となり、この傾向は水セメント比が小さいものほど著しい。水セメント比が小さい場合、すなわち、一般にセメント量が多い場合には、流動化剤の効果が消失した後の塑性粘度の増加が顕著である。

5. 各種コンクリートのレオロジー定数の推定

5.1 実験の概要

ここでは、前述のd法を用いて、流動化コンクリート、鋼繊維補強コンクリート、水中コンクリートなどの各種フレッシュコンクリートのレオロジー定数を推定し、若干のレオロジー的考察を行った。

ブレンコンクリート、流動化コンクリート、鋼繊維補強コンクリートおよび水中コンクリートを用いて、スランブ試験およびコンクリートフロー試験を行った。実験要因としては、表-4に示すように、水セメント比(W/C)、各種混和剤(鋼繊維を含む)混入の有無、および骨材量を取り上げた。コンクリートに用いた粗骨材の最大寸法は20mmである。コンクリートフロー試験は、ASTM規定のコンクリートフロー試験(ASTM C 124)に準じて行ったが、フローコーン引き上げ直後から、フローテーブルを1回落下させるごとにフロー値を測定し、これを15回繰り返した。同一試料に対して、スランブ試験およびコンクリートフロー試験を2回ずつ行い、それらの平均値を用いてレオロジー定数の推定を行った。

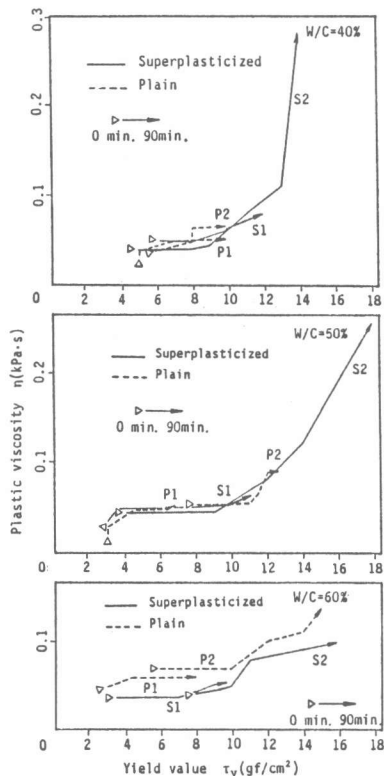


図-9 レオロジー定数の経時変化

表-4 実験要因および測定結果

Series	W/C	SP.	SC.	SF.	S1.	Flc.15
C40-D	40	-	-	-	10.2	418
C40-W	40	-	-	-	20.4	471
C50-D	50	-	-	-	6.0	402
C50-W	50	-	-	-	20.5	535
C60-D	60	-	-	-	4.0	385
C60-W	60	-	-	-	20.0	498
C30-S	30	2.0	-	-	19.2	390
C40-S	40	0.5	-	-	16.2	378
C50-S	50	0.5	-	-	19.5	460
C60-S	60	0.5	-	-	13.3	409
C50-A	50	-	0.5	-	20.7	423
C60-A	60	-	0.5	-	19.7	455
C30-F	30	2.0	-	1.5	17.2	500
C60-F	60	-	-	1.5	7.0	367

[Notes]
W/C: Water-cement ratio (%).
SP.: Super plasticizer (%).
SC.: Segregation controlling admixture (%).
SF.: Volume fraction of steel fiber (%).
S1.: Slump value (cm).
Flc.15: Flow value after 15 times falling.

5. 2 実験結果とその考察

各種コンクリートのレオロジー定数の推定値を図-10にプロットした。図より、鋼繊維補強コンクリートおよび水中コンクリートの塑性粘度は、普通コンクリートの4～10倍になることがわかる。本実験では、スランプ値が同程度となるように調合を決定しているため、流動化剤、分離低減剤および鋼繊維の混入によるレオロジー定数の変化は、降伏値よりもむしろ塑性粘度に顕著に現れる結果となっている。塑性粘度は、締固め性、ポンプ圧送性など、各種の施工条件におけるワーカビリティに大きく影響を与えるが、本実験で取り上げたような特殊コンクリートの流動特性をスランプ値のみから評価することは不可能であり、本推定方法のように複数の試験値から、レオロジー定数を推定し、コンクリートのコンシステンシーをより正確に把握する必要があるものと思われる。

6. まとめ

本研究では、現行の代表的なコンシステンシー試験であるスランプ試験およびフロー試験を拡張・複合して、フレッシュコンクリートおよびモルタルのレオロジー定数を推定する手法を提案し、その妥当性を確認するため、モルタルを用いた若干の実験を行った。また、本推定方法の適用例として、流動化モルタルの経時変化のレオロジー的意味、および各種特殊コンクリートのレオロジー定数について調べた。スランプ値やフロー値は試験法自身がもつ測定値のバラツキを包含しており、また、比較の対象となる解析値にもいくつかの仮定が導入されている。したがって、本推定方法によって得られるレオロジー定数は、あくまでも近似的な値である。しかし、既に提案されている各種粘度計と比較して、本手法は非常に簡便であり、各種調合のフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に充分適用できるものと思われる。

〔謝辞〕 本実験に際し、混和剤を御提供頂きました藤沢薬品工業株式会社に謝意を表します。

〔引用文献〕

- [1] 岩崎：ワーカビリティ判定法，コンクリート工学，Vol.21，No.10，pp.4-12，1983.10.
- [2] Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G.: The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, 356 pp., 1983.
- [3] 谷川・森・筒井・黒川：粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートのレオロジー解析（その1～その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp.669-674，1986.
- [4] Tanigawa, Y., Mori, H., Tsutsui, K., and Kurokawa, Y.: Estimation of Rheological Constants of Fresh Concrete by Slump Test and Flow Test, Trans. of JCI, Vol.8, pp.65-72, 1986.
- [5] Ansley, R.W.: Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic, AIChE J., Vol.13, No.6, pp.1193-1196, 1967.
- [6] 岸谷・友沢・岡・村瀬：流動化コンクリートに関するレオロジー的研究，第3回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.33-37, 1981.

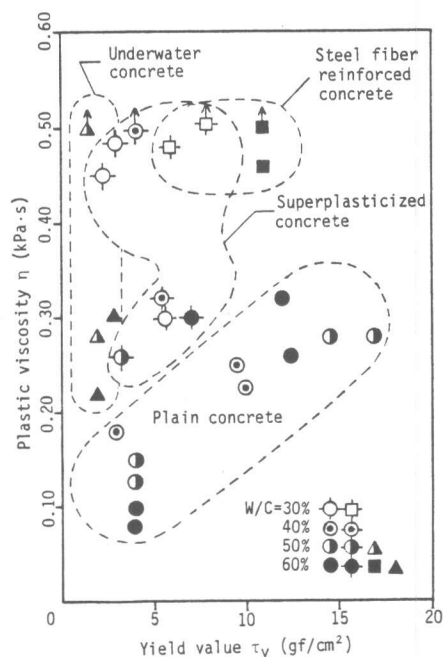


図-10 各種コンクリートのレオロジー定数