

プレパクトコンクリートのフレッシュモルタルの粘性について

長谷部 正 彦

Study on viscosity in Fresh mortar of Prepacked Concrete

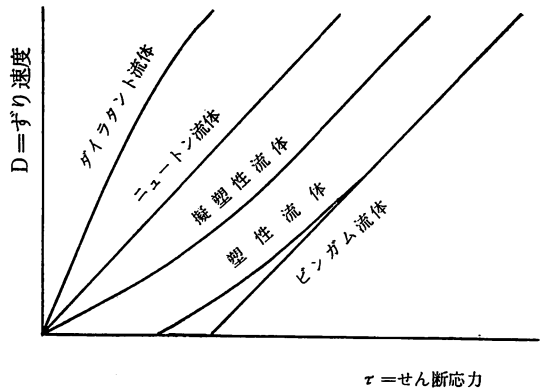
Masahiko Hasebe
(昭和46年10月30日受理)

1 ま え が き

プレパクトコンクリートの用途としては、導入当初の数年間には主として低応力部材、例えばマッシュな無筋コンクリートの単塊構造、セルラブロック等の中詰めコンクリート、他の構造物の基礎や根固め用のコンクリート等に用いたものが大部分であった。その後重要度の高い鉄筋コンクリート構造物の水中施工や高応カプレキャスト部材の水中結合、等の施工例も次第に増加している。又最近ではケーソン等のように特に重要な港湾構造物の水中施工に適用した例も少なくなく、プレパクトコンクリートの設計及び施工の合理化を必要とする段階にまで発展してきている。このようにプレパクトコンクリート工法を応用した場所打ち工法が、急速な発達をみせている今日、プレパクトコンクリート工事を確実に施工するためには、プレパクトモルタルの性質を理解することが大切であると考ええる。

現在フレッシュプレパクトコンクリートのワーカビリティを測定し表現するには、主にフロー試験（プレパクトコンクリート用）等があるが、物理的な意味をもったコンクリートの性質を測定して、それによってワーカビリティを表現しているものは、あまりみうけられない。コンシステンシーを表すには、これらの性質を物理的に測定する必要があると考えられます。プレパクトモルタルは一般に純粘性流体（非ニュートン流体）としてあつかわれている。この流体の流動特性は定常な単純ずり流動における、ずり速度（速度勾配）とせん断応力（ τ ）の関係によって一義的に定まるもので図1に示すように流動曲線の形によって細分される。

本論文では、プレパクトモルタルをビンガム流体と仮定して、モルタルのレオロジー定数のうちのワーカビリ



流動曲線
図 1

チーに密接な関係があると考えられるビンガム粘度を求めた。

2 細管法によるビンガム粘度と剪断応力の降伏値を求める方法

粘性測定法は細管法、回転法(1)、振動法(2)、に大別され、その各々はさらに細別され各種の粘度計が使用されているが、それらの詳細は後記の参考文献を参照された。本論文では細管法による方法である。

Krieger, 及び Maron は細管法によって任意の流体の流動特性を求めるすぐれた方法を提案した。変形速度が次のようにせん断応力の関数で表わされる。

$$- \frac{du}{dr} = g(\tau) \dots\dots\dots(1)$$

u : 発達した流れの管軸方向の速度

τ : 半径 r の点でのせん断応力で g は τ の任意の関数とする。

この流体が円管内を定常的に流れているときは、管長 ℓ 間の 2 断面の釣合いから

$$\frac{r}{R} = \frac{\tau}{\tau_w}, \quad \tau_w = \frac{R}{2} \frac{\Delta P}{\ell} \dots\dots\dots(2)$$

が成立する。ここで R は管の内半径、 τ_w は壁面せん断応力、 ΔP は管長 ℓ 間の圧力降下を示す。さて流量（モルタル流量） Q は、 $r = R$ で $u = 0$ の条件を考えれば

$$Q = \int_0^R 2\pi r u dr = \pi \int_0^R u d(r^2)$$

$$= \pi \left\{ \left[ur^2 \right]_0^R - \int_0^R r^2 du \right\}$$

$u(R) = 0$ より

$$Q = -\pi \int_0^R r^2 du \dots\dots\dots(3)$$

(3)式に(1)、(2)を代入すれば

$$Q = \pi \left(\frac{R}{\tau_w} \right)^3 \int_0^{\tau_w} \tau^2 g(\tau) d\tau \dots\dots\dots(4)$$

よって平均流速 u_a は、

$$u_a = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{R}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 g(\tau) d\tau \dots\dots\dots(5)$$

となる。見掛け流動度 Φ_a は、見掛け粘度 μ_a の逆数で定められるから

$$\Phi_a = \frac{8 u_a \ell}{R^2 \Delta P} = \left(\frac{4 u_a}{R} \right) \left(\frac{1}{\tau_w} \right) \dots\dots\dots(6)$$

(いうまでもなく見掛け流動度 $\Phi_a = 1/\mu_a$ は、ニュートン流体では同一流体、同一温度で定数、即ち流動度となり上式は Hagen - Poiseulli の式となる。しかし非ニュートン流体では平均流速 u_a などの関数となる。)

(5)、(6)式から

$$\Phi_a = \frac{4}{\tau_w^4} \int_0^{\tau_w} \tau^2 g(\tau) d\tau \dots\dots\dots(7)$$

得られる。

次に(7)式を τ_w について微分すれば

$$\frac{d\Phi_a}{d\tau_w} = -\frac{4}{\tau_w} \Phi_a + \frac{4}{\tau_w^2} g(\tau_w) \dots\dots(8)$$

となり、変形すれば、次のような関係式が得られる。

$$g(\tau_w) = \tau_w \left(\Phi_a + \frac{1}{4} \frac{d\Phi_a}{d \log \tau_w} \right) \dots\dots(9)$$

上式右辺第 2 項は非ニュートン流体であるために付加された項で、ニュートン流体では Φ_a は定数であるからこの項は 0 となる。かくして円管中に流体を流した場合に圧力降下 ΔP と平均流速 u_a を知ることができると、(6)式で Φ_a を算出し、 $\Phi_a \sim \log \tau_w$ の線図を作れば(9)式より $g(\tau_w)$ が求められる。

せん断応力の降伏値 τ_y はビンガム流体の流動特性上から

$$0 \leq \tau \leq \tau_y \quad : g(\tau) = 0 \dots\dots(10)$$

$$\tau_y \leq \tau \leq \tau_w \quad : g(\tau) = (\tau - \tau_y) / \mu_B$$

μ_B : ビンガム粘度 τ_y : 剪断応力の降伏値

(10)式を(4)式に代入して積分をすると

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{\tau_w}{\mu_B} \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{3} \frac{\tau_y}{\tau_w} + \frac{1}{12} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^4 \right] \dots\dots(11)$$

(11)式に(2)式を代入すると

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \ell \mu_B} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 \ell \tau_y}{R \Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \ell \tau_y}{R \Delta P} \right)^4 \right] \dots\dots(12)$$

いま、 $\tau_y \ll \tau_w$ として(11)式の括弧内の第 3 項を省略して整理すると

$$\Delta P = \frac{8 \ell \mu_B}{\pi R^4} Q + \frac{8}{3} \frac{\ell}{R} \tau_y \dots\dots\dots(13)$$

となる。然るに実験から得られる ΔP 対 Q の直線の勾配からビンガム粘度 μ_B 、縦軸の切片から降伏値 τ_y が求められる。

2 実験装置とプレパクトモルタルの使用材料

3.1 圧力水頭測定及び流量測定

図 2 に示すように P_1 点と P_2 点での圧力降下を測定するため、傾きをつけて水頭差を測定した。使用材料は管径 20mm のエスロンパイプと、管径 2mm のガラス管を用いた。

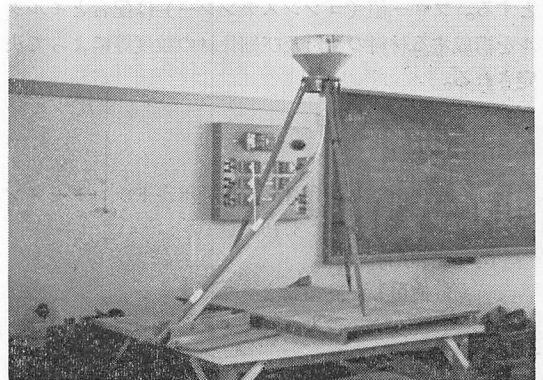


図 2

2mm のガラス管を適用した理由は、予備実験の結果 2.5mm では水頭があらわれにくく、2mm 以下では細骨材がガラス管つまり正確な値を期することが困難であるためである。尚細骨材は土木学会示方書に定義されるように 5mm ふりを重量で 85% 以上通過することであるが本実験では、細骨材は 1.2mm 以下を（ガラス管の管径 2mm）用いる。

図2と同様な傾きの異なったエスロンパイプ(No1,44° No2,40° No3,35° No4,23° No5,13°)を用い圧力水頭、及び流量の変化をきたすようにした。No1～No5のエスロンパイプは同質、同内径でガラス管も同様である。

流量測定は表面のモルタル面を一定にし管内を満ばいにしてパイプの出口より流出されるモルタルを一定時間、容器に受け取り、モルタルの単位容積重量と所要時間とから求める。実験室の実験中の温度は $17 \pm 4^\circ\text{C}$ である。

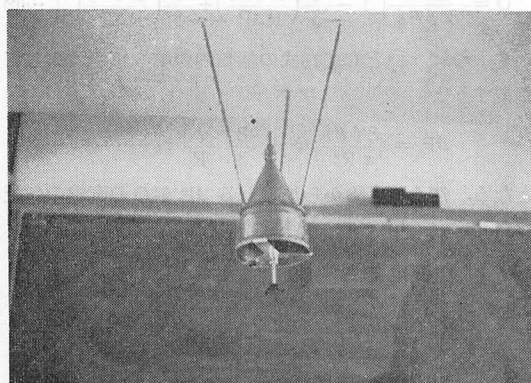


図-3

モルタルのワーカビリティを知るうえには、現在フロー試験(プレパクト用)が使用されている。これは図3に示されている容器にモルタルを入れ下部の流出口よりモルタルの出つくすまでの時間を秒で表わし、フロー値とする。フロー値(コンシステンシー)は配合とモルタルを構成する材料の性質及び細骨材の粒度等によって決定される。

3.2 使用材料と配合

(1) 結合材

使用した結合材は、普通ポルトランドセメント。比重:3.15

(2) 混和剤

使用した混和剤はフライアッシュ。比重:2.32

(3) 細骨材

使用した細骨材は、玉川産のもので物理試験の結果は下記に示す。

配合

W/C+F (%)	39.3
S/C+F	0.7
F/C+F (%)	10
C:セメントの量	
F:フライアッシュの量	
S:細骨材(砂)の量	
W:水の量	

表 1

比重	単位重量 (gr/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率	ふるい通過率 (%)			
				mm 0.15	0.3	0.6	1.2
2.43	1.55	12.5	2.62	98.4	89.4	37.4	0

プレパクトモルタル練り混ぜはランサム型コンクリートミキサー(MIC, 109型)を使用し、練り混ぜ時間を10分とした。

4 実験結果と考察

4.1 実験結果

実験で得られた結果を表2に示す。ここで F_a とは実験前のフロー値である。

フロー値に関して:同じ傾きの管においてもフロー値が異なる。このことは実験中の温度、時間(実験時間)の変化、砂の粒度の違いによる粘性の変化と考えられる。プレパクトモルタルの性状を調べるためには、粘性が同一のものでなくてはならない。しかし表の F_a を見てわかるように同一のフロー値のものはほとんど無い。そこで本実験ではフロー値 27.5 ± 1.1 、 30.0 ± 1.2 、 33.0 ± 1.32 の三つの範囲に区分し、その範囲では近似的に同一粘性と仮定してビンガム粘度を推察した。

速度勾配 $g(\tau_w)$ と τ_w の関数に関して:実測値より ϕ_a 、 τ_w を計算し表に示した。これより $\phi_a \sim \log \tau_w$ の線図を作り[図4,5,6]、(9)式を用いて $g(\tau_w)$ が算出される。 $g(\tau_w) \sim \tau_w$ の関係を図7に示す。図7より理解されるようにプレパクトモルタルはビンガム流体に属していることが理解される。ただしフロー値31.68~34.32のものについては塑性流体に近いと言える。このことから本実験では、フロー値が高くなるとビンガム流体より塑性流体に近づいていくことが推察される。そこでフロー値31.68~34.32の流体はビンガム流体ではないとして除く。

流量と圧力降下に関して:流量 Q と圧力降下 ΔP を表に示した。この関係を図8,9に示す。

$Q \sim \Delta P$ の直線の勾配から、ビンガム粘度 μ_B を(10)式によって算出し、縦軸の切片から降伏値 τ_y を求め表3になった。

表 3

F_a	μ_B	τ_y
sec	$\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$	kg/m^2
26.4~28.6	4.048×10^{-2}	1.875
28.8~31.2	4.538×10^{-2}	1.980

表 2 実 測 値 (1)

記 号	F_a	P_1/w	P_2/w	$(P_1 - P_2)/w$	ΔP	Q	U_a	τ_w	Φ_a	f_B	ReB
単 位	sec	cm	cm	cm	gr/cm ²	cm ³ /sec	cm/sec	gr/cm ²	cm ² /gr·sec		
No.1	38.6	11.2	5.0	6.2	94.65	101.07	32.17	0.9465	135.96		
	37.6	9.9	3.2	6.7	96.84	93.48	29.75	0.9684	122.90		
△	30.45	12.0	4.0	8.0	98.66	120.32	38.30	0.9866	155.27	2.858	12.3
○	27.55	12.3	4.9	7.4	99.32	135.51	43.13	0.9932	173.72	2.167	13.8
×	31.9	13.2	5.1	8.1	100.75	116.59	37.11	1.0075	143.34		
No.2 △	29.0	10.1	5.0	5.1	82.90	119.71	38.11	0.8290	183.86	2.645	12.5
○	28.45	12.2	4.1	8.1	88.22	128.44	40.88	0.8822	185.36	2.389	13.8
○	27.55	12.8	4.7	8.1	90.74	121.82	38.78	0.9074	170.94	2.655	12.5
×	32.95	13.5	4.8	8.7	97.09	92.83	29.55	0.9709	121.73		
×	33.55	15.2	4.4	10.8	98.54	99.97	31.82	0.9855	129.16		
No.3	37.65	10.5	4.7	5.8	75.68	78.40	24.96	0.7568	131.90		
×	32.25	9.3	2.3	7.0	83.40	94.46	30.07	0.8340	144.21		
○	28.4	11.3	2.5	8.8	84.89	108.57	34.56	0.8489	162.84	3.154	10.2
△	29.8	12.1	2.9	9.2	87.12	97.38	31.00	0.8712	142.32	4.014	8.1
△	29.3	12.9	3.6	9.3	88.68	94.63	30.12	0.8868	135.87	4.207	7.4

実 測 値 (2)

	F_a	P_1/w	P_2/w	$(P_1 - P_2)/w$	ΔP	Q	U_a	τ_w	Φ_a	f_B	ReB
No.4 ○	27.15	5.7	1.6	4.1	53.89	72.39	23.06	0.5389	171.11	5.365	6.1
○	28.3	9.6	4.3	5.3	56.99	71.21	22.67	0.5699	159.07	5.656	5.7
○	27.6	8.0	2.3	5.7	58.93	80.43	25.60	0.5893	173.78	4.439	7.0
	40.85	11.9	4.3	7.6	63.16	47.92	15.25	0.6316	96.60		
△	31.0	12.8	4.8	8.0	64.09	65.43	20.83	0.6409	129.98	7.213	4.4
△	29.9	15.2	4.2	11.0	70.23	68.34	21.75	0.7023	123.88	7.027	4.5
No.5 △	30.1	5.5	3.2	2.3	31.29	51.43	16.37	0.3129	209.27	10.708	2.8
	24.2	11.5	7.9	3.6	33.14	60.70	19.32	0.3314	233.18		
○	27.2	13.5	8.2	5.3	38.10	54.18	17.25	0.3810	181.05	8.553	3.6
×	32.3	12.8	7.0	5.8	39.59	39.21	12.48	0.3959	126.09		
△	29.3	11.8	5.1	6.7	40.47	40.21	12.80	0.4047	126.49	16.844	—
○	26.9	10.0	2.5	7.5	42.56	57.46	18.29	0.4256	171.90	7.846	3.9
×	32.6	16.1	8.4	7.7	43.82	45.65	14.53	0.4382	132.66		
×	33.7	18.0	7.8	10.2	49.76	40.91	13.02	0.4976	104.69		
	35.45	19.9	7.7	12.2	54.69	38.72	12.32	0.5469	90.14		
○	$F_a =$		26.4	~	28.6						
△	$F_a =$		28.8	~	31.2						
×	$F_a =$		31.68	~	34.32						

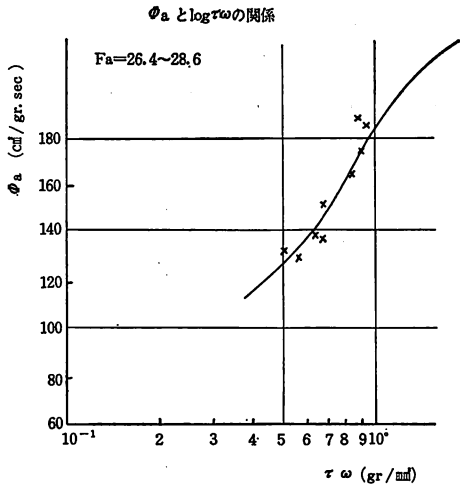


図 4

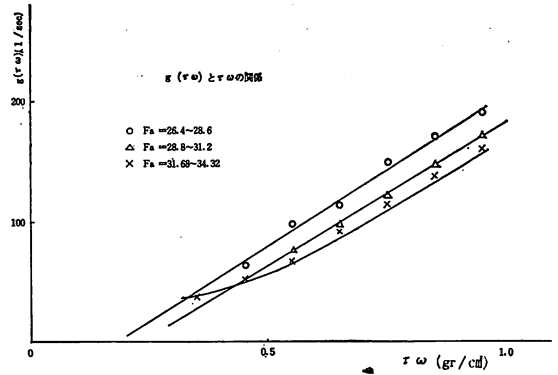


図 7

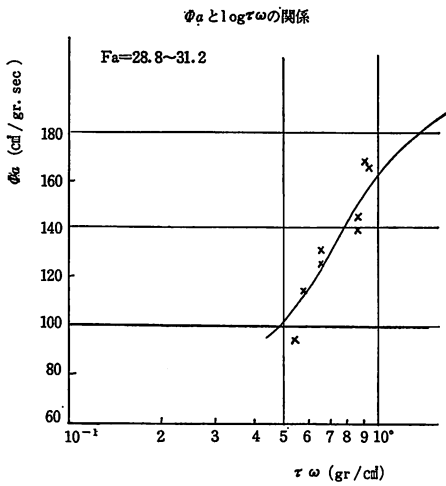


図 5

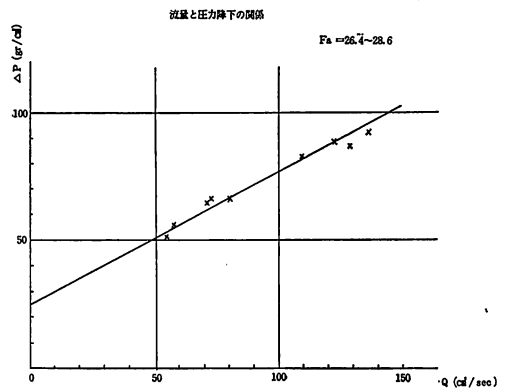


図 8

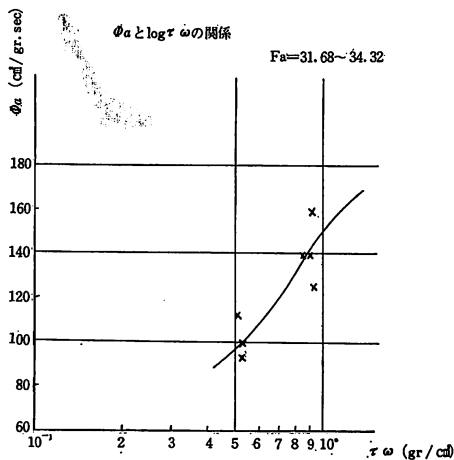


図 6

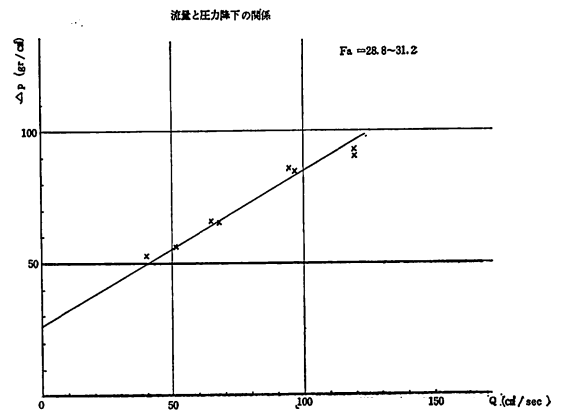


図 9

次に実験で得た結果を流体力学的に応用すると、先づビンガム流体を輸送する際の管内流動の圧力損失は、ニュートン流体における圧力損失を表わす、Darcy-Weisbach の式を類似した式

$$h_r = \frac{\Delta P}{w} = f_B F(a) \frac{\ell}{2R} \frac{u a^2}{2g} \dots\dots\dots(4)$$

$$F(a) = \frac{a(5+6a-11a^2)}{5(3+2a+a^2)^2} = 1-a \dots\dots(5)$$

a : 比せん半径 (τ_y / τ_w)

である。

実験で計算された τ_y を使用して f_B (管摩擦係数) を求めた。それを表 2 に示した。

ビンガム流体が滑らかな管内を流れるとすれば、 f_B は無次元数の関数となるはずである。この f_B に関しては工学的に十分な精度でただ一つの無次元数 Re_B

$$Re_B = \frac{\rho u a d (4\alpha)}{\mu_B} F(a) \dots\dots\dots(6)$$

$$\alpha = \frac{a^4 - 4a + 3}{12a}$$

だけの関数によって表わすことができる。

同一あらしの管ではニュートン流体における管摩擦係数 f とレイノルズ数 Re の関係と、ビンガム流体における f_B と Re_B の関係は実用的な精度の範囲内で同一である (a は層流, 乱流を通じてすべて層流と考えて計算される)

Re_B の計算値は表 2 に示す。

以上の結果から f_B に関しては、同範囲内で同勾配の f_B はほとんど一致している。 $f_B \sim Re_B$ の関係に関しても No 1 \rightarrow No 5 に行くにつれて f_B が大、 Re_B が小になっていることがわかる。このことは $f_B \sim Re_B$ の関係が流体力学的には正しい結果であることが理解される。

4.2 考 察

4.1 の結果を考察してみると、一般にプレパクトモルタルはビンガム流体としてあつかわれているが本実験ではフロー値により塑性流体にも近づいていることが推察される。しかし本実験の装置では、温度、湿度が一定時間内に一定条件で保持することは非常に困難なので測定値にかなりの誤差が考えられる。圧力水頭についてもばらつきが多いのはモルタルの時間とともに変化することや、砂の粒子によるガラス管の影響等が考えられる。例えば No 5 に関して圧力水頭にばらつきが多いのは、与えた勾配が少し小さかったので管内を流動している間にモルタルが硬化して多くなったと考えられる。フロー値についても同一フロー値でも、砂の粒子の違いによる粘

性の変化が考えられる。このように測定値にかなりの誤差が含まれていると考えられるので、 τ_y, μ_B, f_B, Re_B についても誤差が考えられこれらの計算値を検討中である

本実験と比較するために後記の参考文献(3)を参照されたい。それによると τ_y, μ_B について述べてあり本実験の τ_y, μ_B と大体一致している。また今後の課題としては、時間経過と共に特性値がどのように変化していくか、流動特性値が骨材中を流れるモルタルにどのような影響を与えるかである。

最後にこの論文作製にあたってお手伝い戴いた秋田大学土木工学科、田口敬、山森三直城、両君に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 村田二郎, 菊川浩治: 試作コンクリート用回転粘度計について
土木学会26回年次学術講演会集(1971)
西村新蔵, 木山英郎, 阪田憲次
: フレッシュ・ペースト並びにモルタルの粘性的性質に関する基礎的研究
土木学会26回年次学術講演会集(1971)
- (2) 岡田清, 水口裕之: フレッシュモルタルのレオロジー定数に関する一実験
土木学会26回年次学術講演会集(1971)
- (3) 桜井紀朗, 宗沢修郎, 太田考, 古賀和敏
大寸法の碎石を用いたプレパクトコンクリートについての実験的研究
土木学会25回年次学術講演会集(1970)
赤塚雄三: 港湾工事におけるプレパクトコンクリートの施工管理に関する基礎研究
土木学会論文集第140号(1968)
新見芳男, 武川恵之助: プレパクトコンクリート
工法
土木ライブラリー(6) 山海堂
国井大蔵, 鈴木基之: 充てん層内の流体と熱
日本機械学会誌第72巻第602号(1969)
岐阜格: スラリの流動と熱伝達
日本機械学会誌第72巻第602号(1969)
伊藤四郎: 非ニュートン流体の流動
化学工学第24巻第9号(1960)
富田幸雄: 非ニュートン流体の流動
日本機械学会誌第66巻第537号(1963)
: 非ニュートン流体の工学的取扱い
日本機械学会誌第63巻第503号(1960)