

論文

[1073] 障害物挿入型回転粘度計によるフレッシュコンクリートの
コンシステンシー評価寺西 浩司^{*1}・谷川 恭雄^{*2}・森 博嗣^{*3}・渡辺 健治^{*4}

1. まえがき

高流動コンクリートの施工は、自己流動による無振動打設が基本であり、また、通常のコンクリートでは対応が困難な厳しい条件下で使用されるケースも多い[1]。したがって、任意の施工条件下におけるコンクリートの流動・充填状況を事前に予測するための理論解析・数値解析の必要性が高まっている。しかし、これらの解析の基本的な入力データとなるレオロジー定数の測定方法が確立されておらず、解析的研究の進展の最も大きな障壁となっている。

球引上げ試験は、最も一般的なレオロジー試験のひとつであり、最近では、モルタルに対しても適用されている[2~5]。しかし、試料内で球を引き上げる間に得られるデータには限りがあり、その再現性にも疑問が残る。また、この試験では、比較的低速で球を引き上げて測定を行うため、必ずしも、実施工条件に対応した結果が得られているわけではない。筆者らは、これらの点を改善し、より簡便なレオロジー試験方法を開発するために、モルタル中で球を水平に周回運動させ、球に加わる抵抗力からレオロジー定数を測定する試験装置を試作した。

また、コンクリートが鉄筋間などの間隙を通過する特性を表す間隙通過性は、材料性質とともに配筋状況や圧力などの施工条件を包括する概念であり、無振動打設される高流動コンクリートでは特に重要な特性のひとつであるが、定量的な性状として評価されるには至っていない[6~7]。そこで、上記の装置において、球の代わりに鉄筋を挿入した装置を用いて測定を行い、間隙通過性の評価を試みた。本研究では、これらの障害物を挿入した新しいタイプの回転粘度計の試用結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 障害物挿入型回転粘度計

障害物として、球を挿入したタイプを球挿入型回転粘度計、鉄筋を挿入したタイプを鉄筋挿入型回転粘度計と呼ぶ。これらは同じ機構の装置を用いているが、球挿入型は、モルタルのレオロジー定数の測定を、鉄筋挿入型は、コンクリートの鉄筋間通過性の測定を目的としており、挿入する障害物によって、その主目的は異なる。

本試験装置の概要を図-1に示す。円筒容器に満たされた試料中において、障害物を一定の相対速度で周回運動させ、そのときに加わる水平抵抗力を測定した。抵抗力は、支持部の鉄板に貼付したワイヤーストレインゲージによって測定したひずみより換算して求めた。また、円筒容器の中心から障害物までの距離を変化させ、数回の測定を行うことにより、異なる流動速度に対する抵抗力を測定した。試験装置としては、外円筒回転式と球周回式の2通りのタイプが考えられ

*1 前田建設工業(株)技術研究所建築材料施工研究室(名古屋大学大学院)、工修(正会員)

*2 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*3 名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修(正会員)

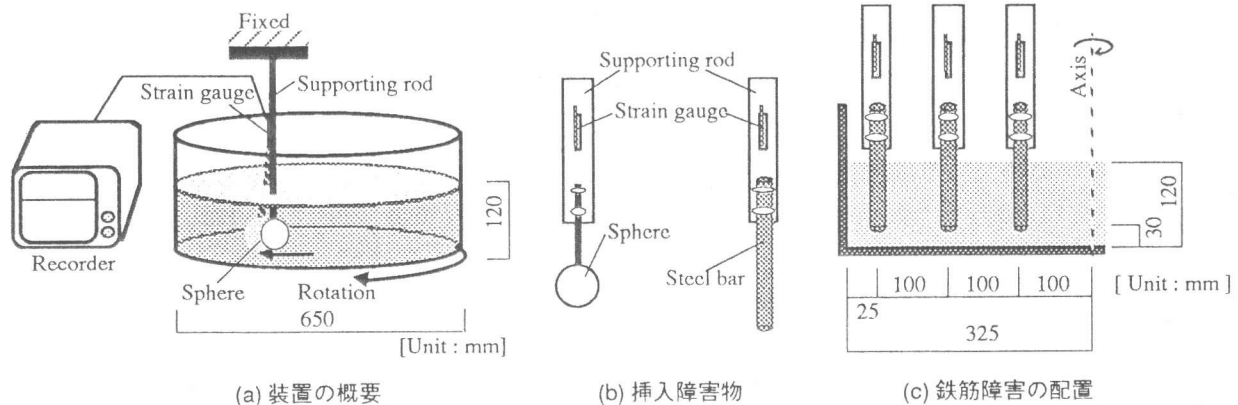


図-1 障害物挿入型周回粘度計の概要

るが、本研究では、パン型ミキサを流用した外円筒回転式を採用した。本実験で用いた装置は、円筒容器が $\omega = 2.45 \text{ rad/s}$ (23.4rpm) の角速度で回転し、最外径における試料の流動速度は796mm/sとなる。なお、試料は容器内に120mmの深さまで充填した。

(1) 球挿入型回転粘度計 (レオロジー試験)

球挿入型では、測定した水平抵抗力と球の相対速度を、Ansleyの提案による粘塑性流体中球体の釣合方程式に適用して、せん断応力およびひずみ速度を算定し、これらをコンシステンシー座標上にプロットして試料のレオロジー定数を推定した。

実験要因としては、球の直径と挿入深さを変化させた。球の直径は、30.3および38.8mm (それぞれSphere-SおよびMと呼ぶ) の2種類とし、挿入深さは、球を支持する直径5mmの支持鋼棒の長さによって調節し、試料表面から30, 60 (基準深さ) および90mmの3水準とした。なお、支持鋼棒が受ける抵抗力を除去するために、鋼棒のみを挿入した場合の抵抗力を同時に測定し、この値を差し引いている。

(2) 鉄筋挿入型回転粘度計 (鉄筋間通過性試験)

鉄筋挿入型の実験は、1本の鉄筋を挿入した場合 (図-1(b)参照) と、一定の間隔で3本の鉄筋を挿入した場合 (図-1(c)参照) について実施した。鉄筋が1本の場合には、直径13mmの丸鋼と異形鉄筋を用い、鉄筋が3本の場合には、鉄筋径が8mmと13mmの2種類の丸鋼を使用した。本実験で用いた粗骨材の最大寸法が20mmであることから、回転容器の底部より30mmの空きを設けて鉄筋を配置した。なお、鉄筋の配置方法がフレッシュコンクリートの流動挙動に及ぼす影響は大きいと予想されるが、今回の試験では、装置の試用とコンクリートの基礎的な鉄筋間通過性の測定を主目的として、配筋の方向や鉄筋間隔については検討していない。

2.2 試料

実験に使用するモルタルの調合を決定するため、本実験に先立ち、高流動コンクリートの試験練りを実施した。結合材は、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 (比表面積 $600 \text{ m}^2/\text{kg}$) の2成分

表-1 実験に用いた調合

Series	W/B	S/B	W	C	Sg	S	SCA	HAE
F060								1.68
F100	33	1.53	254	381	381	1167	0.45	2.80
F120								3.36
F140								3.92

[Notes] W/B: Water-binder ratio(%), B=C+Sg, S/B: Sand-binder ratio, W: Water (kg/m^3), C: Cement (kg/m^3), Sg : Ground granulated blast furnace slag (kg/m^3), S: Sand (kg/m^3), SCA: Segregation control agent (kg/m^3), HAE: High-range water reducing AE agent (%/B).

とし、セルロースエーテル系の分離低減剤を使用した。試料は、スランプフロー値が700mmになるように、高性能AE減水剤の添加量によって調節した。

表-1に、球挿入型回転粘度計の試験で用いたモルタルの調合を示す。試験練りした高流動コンクリートから粗骨材を除いたマトリックスモルタルを基準調合(F100)とした。セメントペーストの流動性の変動がコンクリート全体系の流動挙動に与える影響を調べるため、高性能AE減水剤の添加量を基準調合に対して60~140%まで変化させた。また、鉄筋挿入型回転粘度計の試験では、粗骨材の体積濃度が鉄筋間通過性状に与える影響を調べるため、試験練りした高流動コンクリートの単位粗骨材量 ($G_0=860\text{kg/m}^3$) に対して、粗骨材を0~30%の範囲で基準調合(F100)に混入した試料について測定を行った。

3 実験結果および考察

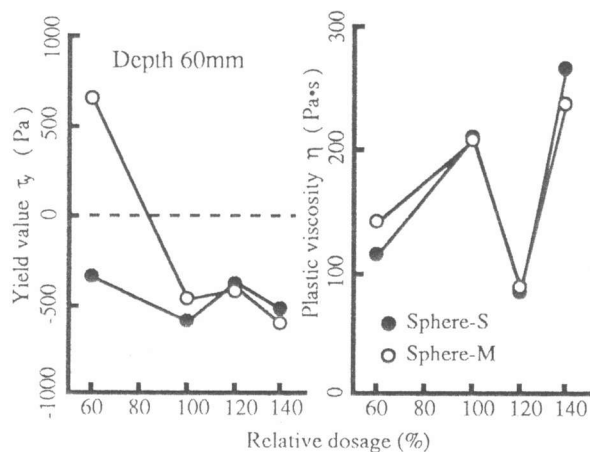
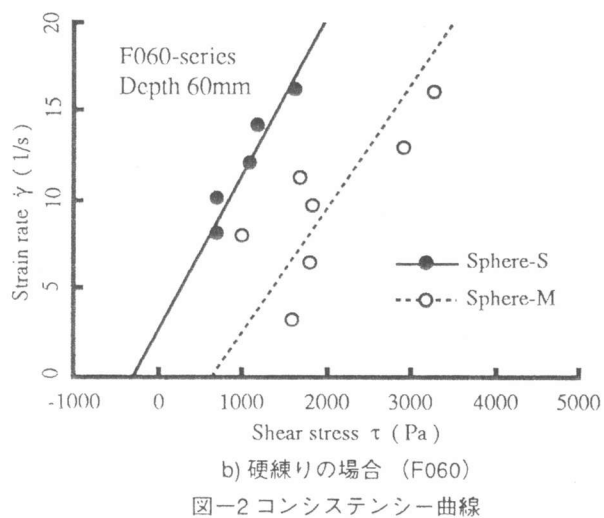
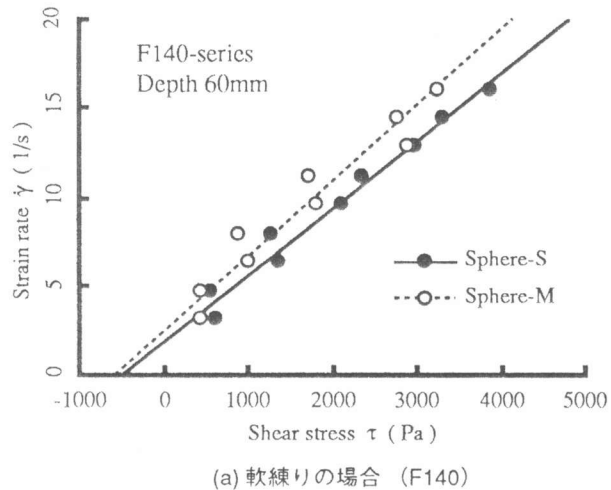
3.1 球挿入型回転粘度計

(1) 試料の調合の影響

図-2に、球挿入型によって得られたコンシステンシー曲線（ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ -せん断応力 τ 関係）の一例を示す。また、図-3に、コンシステンシー曲線より算定したビンガムモデルのレオロジー定数（降伏値： τ_y および塑性粘度： η ）と高性能AE減水剤の添加量の関係を示す。 $\dot{\gamma}$ - τ 関係を直線で表示したため、降伏値が負の値となっているものもある。また、添加量120%のものを除けば、高性能AE減水剤の添加量の増加とともに、降伏値は小さく、塑性粘度は大きくなる。

(2) 球の直径の影響

図-2および図-3によれば、F060を除く試料の測定値は、球の直径にかかわらずほぼ同一直線上に分布し、レオロジー定数も一致している。Ansley式によって換算されるせん断応力とひずみ速度は、本来、球の大きさには影響されないはずであるが、図-2(b)に示すような硬練り試料



(F060)では、球の大きさによる差異が見られ、大きい球を用いた場合のせん断応力が全体的に大きく測定されており、この結果、降伏値が大きな値となった。また、ひずみ速度が大きい領域では、球の周囲ですべりが発生し、抵抗力が低く測定される可能性があり、本試験の適用範囲の限界に近くなるものと思われる。したがって、回転粘度計や球引上げ試験[3~5]と同様に、本試験は、高流動モルタルのような軟練りの試料のレオロジー定数を測定するための試験方法と位置づけることができる。

(3) 球の挿入深さの影響

球の深さが測定値に与える影響を調べるために、基準値(60mm)に対して深さを30mm増減させた場合のコンシステンシー曲線を図-4に示す。また、図-5に、レオロジー定数と球挿入深さの関係を示す。塑性粘度に大きな変化はないが、球の挿入深さの増加にともなって、降伏値が大きくなっている。本実験で使用した試料は、高流動コンクリートのマトリックスモルタルであり、分離抵抗性が十分大きいいため、試料の分離による上下の異方性よりも、静水圧による内部摩擦の影響の方が大きいものと考えられる[8]。

3.2 鉄筋挿入型回転粘度計

(1) 鉄筋が1本の場合

棒状体が流体中を通過する際の抵抗力は、コンシステンシー座標値に変換することができない。図-6は、鉄筋を1本挿入した場合の測定結果を、流動速度-抵抗力座標にプロットしたものである。測定値にばらつきが見られるものの、鉄筋表面の形状の違いが抵抗力に及ぼす影響は小さい。表面積の大きい異形鉄筋の方が付着性に優れ、すべりが発生しにくいいため、抵抗力が大きくなると予想されたが、付着による影響はこの測定領域では小さい。

(2) 鉄筋が3本の場合

図-7は、粗骨材の体積濃度(G/Go)の変化が試料の鉄筋間通過性に与える影響を、鉄筋を3本

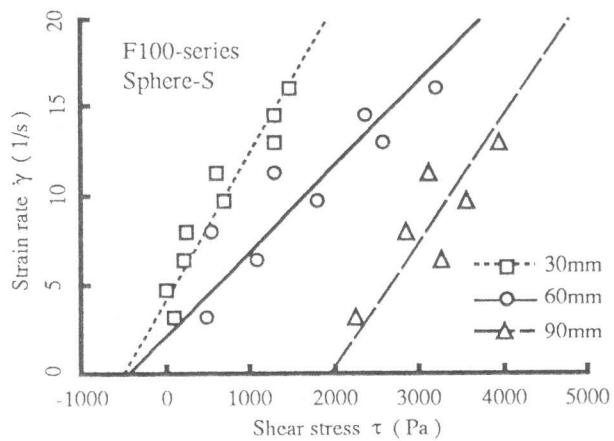


図-4 コンシステンシー曲線に及ぼす球挿入深さの影響

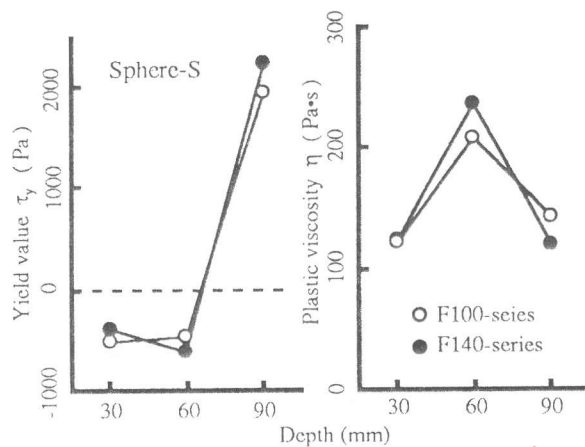


図-5 レオロジー定数と球挿入深さの関係

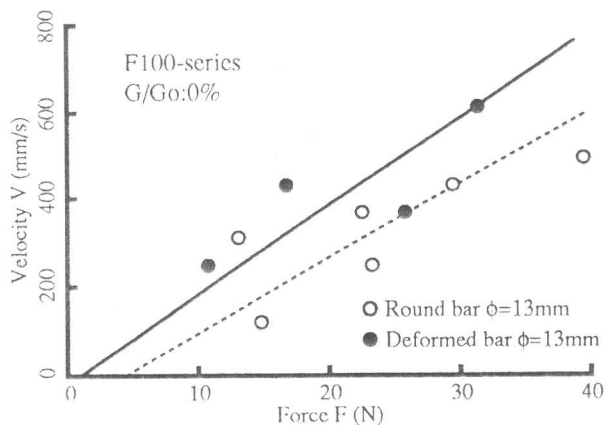


図-6 鉄筋形状が流速と抵抗力の関係に及ぼす影響

挿入した測定結果で示したものである。測定結果はほぼ直線上に分布しており、抵抗力は試料の流動速度に比例している。図中の回帰直線に示されるように、 $\phi=8\text{mm}$ の場合には、速度が0のときの抵抗力（以下、鉄筋間通過降伏力と呼ぶ）が極めて小さいが、 $\phi=13\text{mm}$ の場合には、この鉄筋間通過降伏力が、鉄筋間を通過するための最小限の圧力に関連すると考えられる。また、回帰直線の傾き（ F/V ）は、単位流動速度当りの抵抗力（以下、鉄筋間通過粘性と呼ぶ）を表す。

図-8に、鉄筋間通過降伏力および鉄筋間通過粘性と粗骨材量の関係を示す。前掲の図-7を参考にすると、粗骨材量は、鉄筋間通過降伏力にあまり影響を及ぼさない。しかし、鉄筋間通過粘性は、粗骨材量が大きくなるにつれて大きくなり、速度が速くなるほど鉄筋間を通過するために必要な圧力が増大する。また、鉄筋径が大きくなると、鉄筋間通過降伏力は顕著に増大し、鉄筋間通過粘性もやや大きくなる。なお、この結果には、鉄筋間隔の影響が含まれるものと思われる。

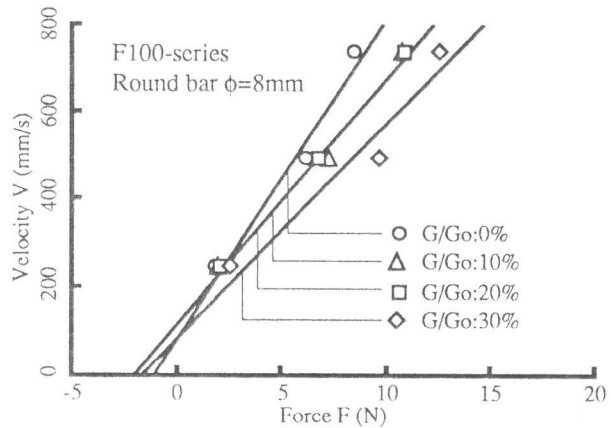
粗骨材量が基準値の30%より大きくなると、本装置の測定条件では、試料が鉄筋間を円滑に通過することができず、鉄筋前面部で盛り上がりしてしまうため、今回の実験では、粗骨材量がさらに多い試料については測定を行っていない。

4. まとめ

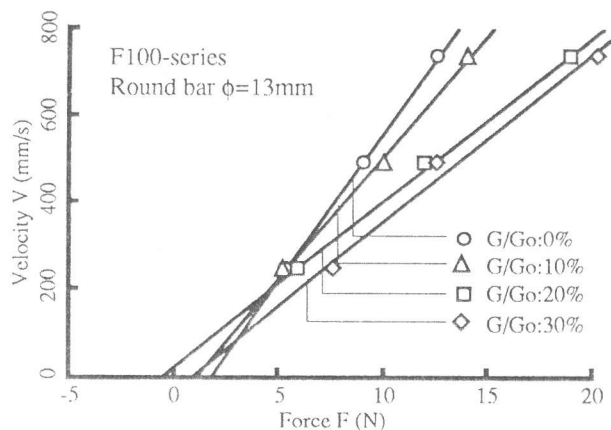
本研究では、コンクリートのレオロジー定数およびコンシステンシーを測定する試験として障害物挿入型回転粘度計を試作した。

球挿入型回転粘度計では、高流動コンクリートのマトリックスモルタルに試用した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 適正な直径の球を使用すれば、モルタルのレオロジー定数を精度よく測定できる。
- 2) 球を挿入する深度によって、得られるレオロジー性質は異なる。すなわち、静水圧がモルタル



(a) $\phi=8\text{mm}$ の場合



(a) $\phi=13\text{mm}$ の場合

図-7 粗骨材量が流動速度と抵抗力の関係に及ぼす影響

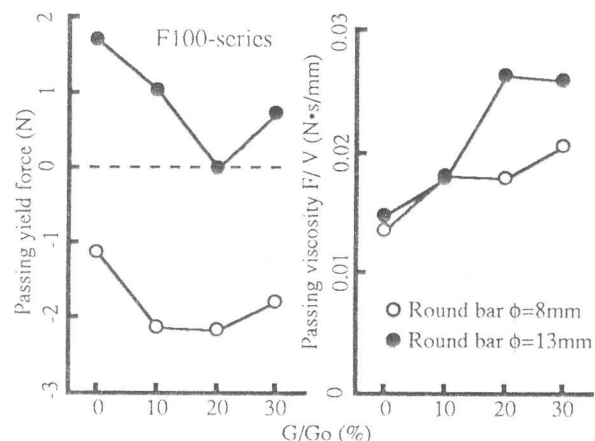


図-8 鉄筋間通過降伏力および鉄筋間通過粘性
と粗骨材量の関係

のみかけのレオロジー性質に影響を与え、その影響は特に降伏値に対して顕著である。

また、鉄筋挿入型回転粘度計に関しては、以下の知見が得られた。

- 3) 本実験の範囲では、丸鋼と異形鉄筋の差異は認められない。また、粗骨材量が大きくなると、鉄筋間を通過するために必要な圧力は増加し、速度に対する比例成分（粘性）の増加が顕著である。
- 4) 本試験装置により、鉄筋間通過性を定量的に把握することができる。

本研究では、外円筒回転式を使用したのが、試料容器が回転するため、遠心力によって試料の表面が若干外周側で高くなる結果となり、回転による振動の問題とともに、検討を要する課題である。また、鉄筋挿入型回転粘度計では、今後、鉄筋間隔を変化させた試験を実施する予定である。

謝辞

本実験の実施に当たり、若林信太郎君、西之園一樹君（名古屋大学学生）、国枝恒裕君ならびに永田貴久君（大同工業大学学生）の助力を得た。本研究費の一部は、平成5年度文部省科学研究費補助金特別研究員奨励研究、同一般研究(C)ならびに日本板硝子材料工学助成会研究助成金によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：“超流動コンクリート研究委員会報告書(I),” 212pp., 1993.5
- 2) 藤原浩己・下山善秀・富田六郎・久保田裕康：高流動コンクリートの充填性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.27-32, 1992.6
- 3) 村田二郎・菊川浩治：回転粘度計によるフレッシュベースト、モルタルおよびコンクリートのレオロジー定数測定法，フレッシュコンクリートの物性の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.9-16, 1979.
- 4) 水口裕之・藤崎茂・大崎豊治：フレッシュコンクリートの塑性粘度および降伏値の測定，セメント技術年報，pp.154-158, 1974.
- 5) 西林新蔵・矢村潔・吉野公：流動化コンクリートのフレッシュ状態での特性評価に関する一考察，フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.25-32, 1974.
- 6) Tattersall,G.H.: The Rationale of Two-point Workability Test, Mag. of Conc. Research, Vol.25, No.84, pp.169-172, 1973.
- 7) 佐原晴也・横田季彦・庄司芳之・竹下治之：高流動コンクリートのワーカビリティ評価試験方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13, No.1, pp.137-142, 1991.6
- 8) 森博嗣・谷川恭雄：フレッシュコンクリートの構成則に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.396, pp.9-16, 1989.2