

論文

[1059] フレッシュコンクリートの構成則に関する実験的研究

正会員 谷川恭雄 (三重大学工学部)
 同 〇森 博嗣 (三重大学工学部)
 田中政史 (三重大学大学院)
 梅本宗宏 (三重大学大学院)

1. まえがき

フレッシュコンクリートのレオロジーに関する既往の研究報告の多くは、フレッシュモルタルおよびコンクリートの流動特性をビンガムモデルで表現できると仮定し、各種粘度計を用いたレオロジー試験によって、これらのコンシステンシーを降伏値および塑性粘度で定量的に評価しようとしている[1-3]。しかし、ビンガムモデルが適用できるのは、比較的軟練りのフレッシュモルタルおよびコンクリートであり、硬練りの場合は、粉体または粒状体としての性質があらわれ、内部応力状態に依存しない一定の降伏値をもつビンガムモデルの適用に無理が生じることが知られている[4]。

筆者らは、粉体の崩れを表現できるMohr-Coulombの降伏条件をビンガムモデルの構成則に導入して、フレッシュモルタルおよびコンクリートの広範囲な調合に適用できるレオロジーモデル(ここでは、複合モデルと呼ぶ)を提案した[5]。しかし、応力状態に依存する降伏値および塑性粘度に関する資料は極めて少なく、複合モデルを流動シミュレーションに適用するための入力データとなるレオロジー定数の具体的な数値が不明であった。そこで、本研究では、フレッシュコンクリートの降伏値および塑性粘度の応力依存性を確認するため、フレッシュモルタルおよびコンクリートの1面せん断試験を行い、複合モデルへの入力データについて検討を行った。

2. 複合モデルの概要

複合モデルは、粘塑性体と粉体の双方の性状を連続的に扱うことができる[5]。本モデルでは、骨材のインターロックに起因する抵抗力を考慮して、平均垂直応力が大きくなると、見かけ上降伏値を大きくする。一方、降伏後の流動速度を支配する塑性粘度については、その応力依存性が現在不明であるため、提案した複合モデルでは、便宜的に応力状態にかかわらず塑性粘度は一定と仮定した。

3. 実験方法

応力状態を変化させたフレッシュコンクリートのレオロジー試験として、1面せん断試験を行

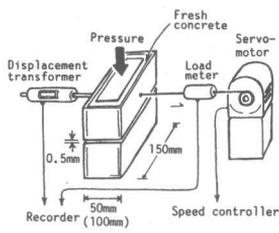


図-1 1面せん断試験装置

表-1 実験要因(実験-I)

Type	Series	W/C (%)	S ₁ (cm)
Mortar	M40S	40	20
	M40H	40	10
	M50S	50	20
	M50H	50	10
	M60S	60	20
	M60H	60	10
Concrete	C40S	40	15
	C40H	40	5
	C50S	50	15
	C50H	50	5
	C60S	60	15
	C60H	60	5
Paste	P30	30	--

[Notes] W/C: Water-cement ratio, S₁: Slump.

表-2 実験要因(実験-II)

Type	Series	W/C (%)	S/C	Coarse Aggregate				
				Kind	Size(mm)	Volume		
Concrete	G1(C50H)	50	1.79	Gravel	5~10	1		
	G2+3					2/3		
	G1+2					1/2		
	BS1			BS2+3	BS1+2	Beads	12	1
								2/3
								1/2
BL1	BL2+3	BL1+2	Beads	20	1			
					2/3			
					1/2			
Mortar	MO			-	-	-		

[Notes] W/C: Water-cement ratio, S/C: Sand-cement ratio, Volume: Relative ratio of coarse aggregate to G1.

った。図-1に、試作の1面せん断試験装置を示す。せん断面は、実験-Iでは50×150 mm、実験-IIでは100×150mmとし、下部容器および上部容器の深さは、いずれも50mmとした。下部容器は固定されており、上部容器は、サーボモータによって一定速度でスライドし、容器内の試料をせん断する。測定は、せん断速度および垂直応力を、それぞれ3段階に変化させ、同一の試料について、合計9回の試験を行った。また、実験-Iでは、1面せん断試験と同時に、モルタルについてはスランプ試験およびフロー試験を、コンクリートについてはスランプ試験およびコンク

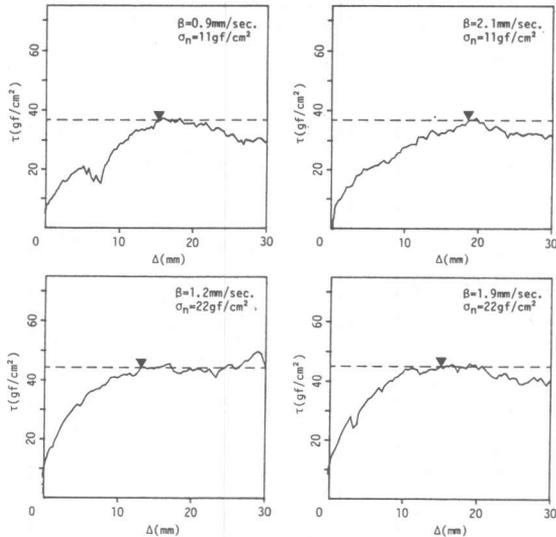


図-2 せん断応力(τ)-変位(Δ)曲線の測定結果

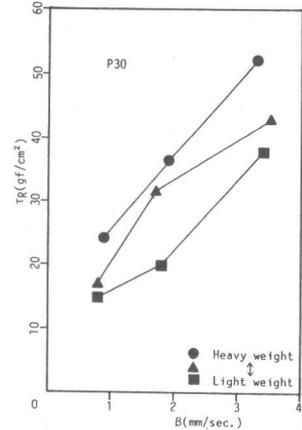


図-3 ベーストのせん断抵抗応力(τ_R)と変位速度(β)の関係(実験-I)

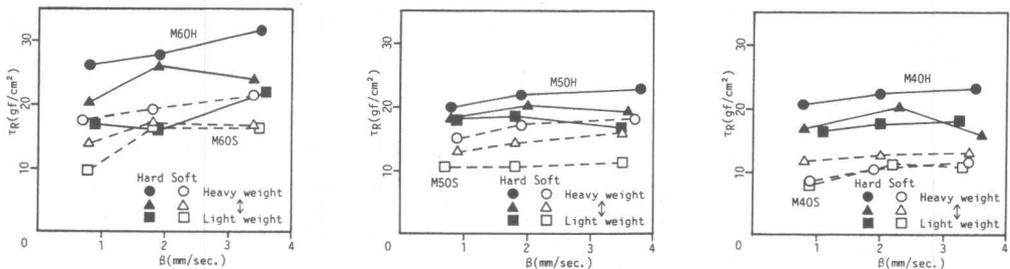


図-4 モルタルのせん断抵抗応力(τ_R)と変位速度(β)の関係(実験-I)

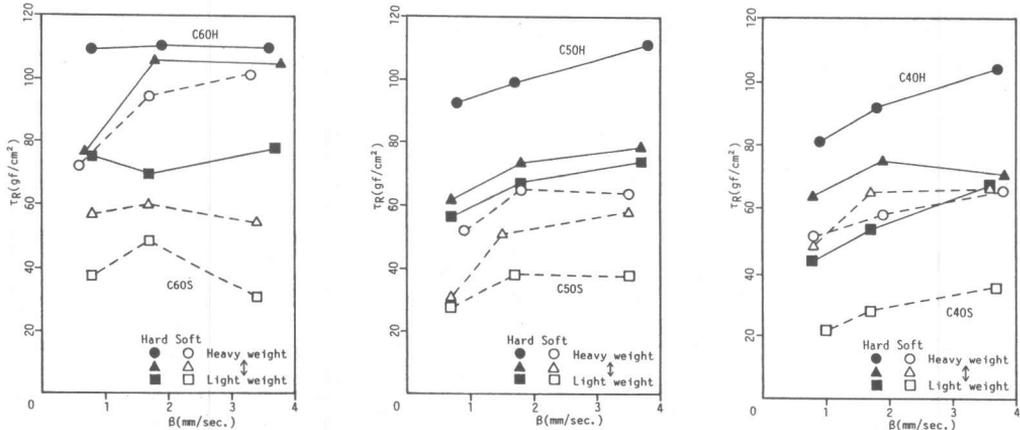


図-5 コンクリートのせん断抵抗応力(τ_R)と変位速度(β)の関係(実験-I)

リートフロー試験(ASTM C 124)を行い、ビンガムモデルの降伏値および塑性粘度を推定した[6]。

実験-Iでは、表-1に示すように、水セメント比およびスランプ値を変化させたフレッシュモルタルおよびコンクリートを用い、小さなせん断面積で測定を行った。コンクリートの粗骨材の最大粒径は、10mmである。この他、比較用に、W/C=30%のセメントペーストについても測定を行った。

実験-IIでは、表-2に示すように、主として粗骨材の影響を調べるため、砂利およびガラス玉を用いたコンクリートについて、大きなせん断面積で測定を行った。

4. 実験結果とその考察

1面せん断試験結果の一例として、フレッシュコンクリートから得られたせん断応力(τ) - 変位(Δ)曲線を図-2に示す。今回の実験では、いずれの曲線も変位が10mm前後になるまでは、せん断応力が増加し、最大値に至っている。さらに変位が進み、応力のピーク点を越えると、せん断応力はやや減少し、ほぼ一定値に落ち着く。図には示していないが、他のシリーズでもほぼ同様の τ - Δ 曲線が得られ、図-2中に ∇ で示したせん断応力の最大値をせん断抵抗応力(τ_R)として、この値を以下の考察に用いた。なお、装置の容器サイズを考慮し、ここでは、変位が30mm以下で得られたデータのみを用いた。

実験-Iより得られた結果を図-3~8に示す。図-3、4

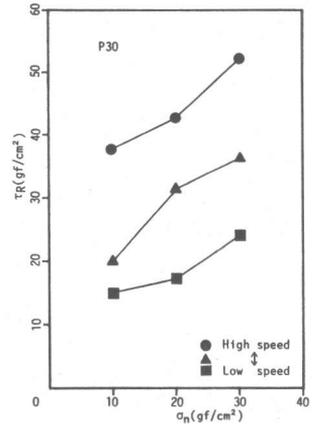


図-6 ベーストのせん断抵抗応力(τ_R)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-I)

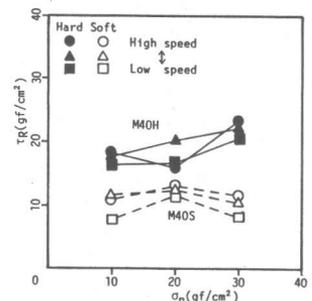
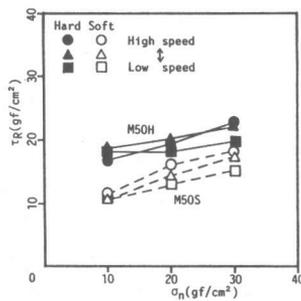
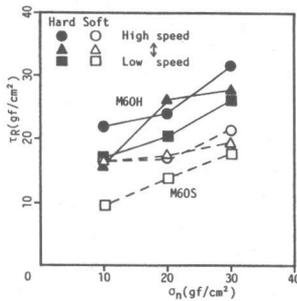


図-7 モルタルのせん断抵抗応力(τ_R)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-I)

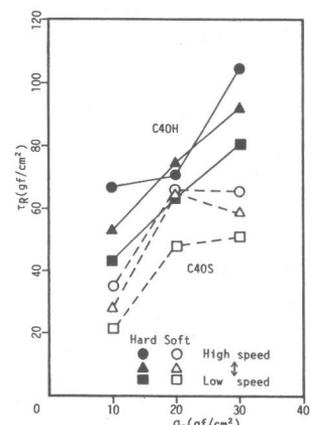
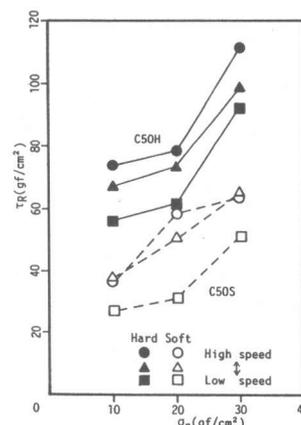
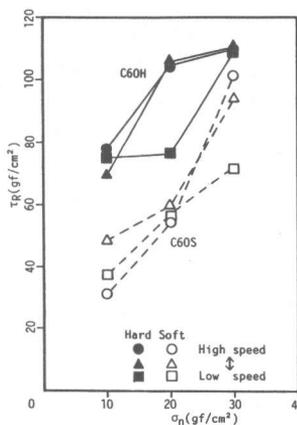


図-8 コンクリートのせん断抵抗応力(τ_R)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-I)

および5は、それぞれ、ペースト、モルタルおよびコンクリートの τ - Δ 曲線から得られたせん断抵抗応力(τ_R)と変位速度(β)の関係を示したものである。これらの図から明らかなように、データにばらつきはあるものの、せん断抵抗応力(τ_R)は、変位速度(β)にほぼ比例して増加している。また、図-6、7および8は、それぞれ、ペースト、モルタルおよびコンクリートのせん断抵抗応力(τ_R)と垂直応力(σ_n)の関係を示したものである。これらの図によれば、いずれのシリーズでも、垂直応力(σ_n)の増加にともなって、せん断抵抗応力(τ_R)は増大しており、内部摩擦が生じていることがわかる。つまり、同一速度で変形する試料でも、応力状態によって異なる抵抗応力が生じることを示しており、応力状態に依存したレオロジーモデルの必要性を示唆するものである。なお、図によれば、応力状態による影響は、コンクリートの場合が最も顕著である。モルタルでは、 $W/C=40\%$ および 50% のものが、応力状態にあまり影響を受けず、比較的ビンガムモデルに近い性状を示しているのに対して、細骨材の多い $W/C=60\%$ では、応力状態にかなり依存した性状を示し、ビンガムモデルから逸脱する結果となっている。

試験装置の上下部容器のクリアランス 0.5mm で、せん断変形が生じると考えると、変位速度(β)からせん断ひずみ速度($\dot{\gamma}$)が計算でき、前掲の図-3、4および5に示した τ_R - β 関係から、せん断応力(τ)-せん断ひずみ速度($\dot{\gamma}$)関係、すなわち、コンシステンシー曲線が得られる。この座標にデータを換算し、同一応力状態の測定結果3点を最小2乗法によって直線近似して、その τ 軸切片および傾きから降伏値(τ_y)および塑性粘度(η)を求めることができる。図-9、10および11は、それぞれ、ペースト、モルタルおよびコンクリートの降伏値(τ_y)

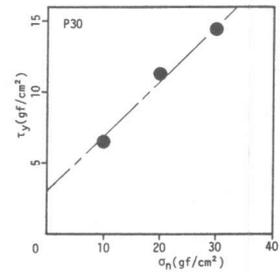


図-9 ペーストの降伏値(τ_y)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-I)

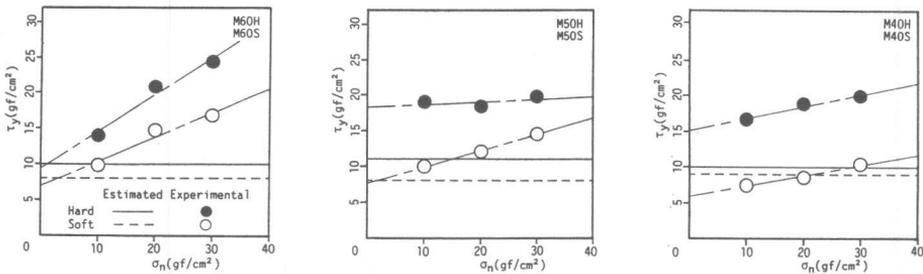


図-10 モルタルの降伏値(τ_y)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-I)

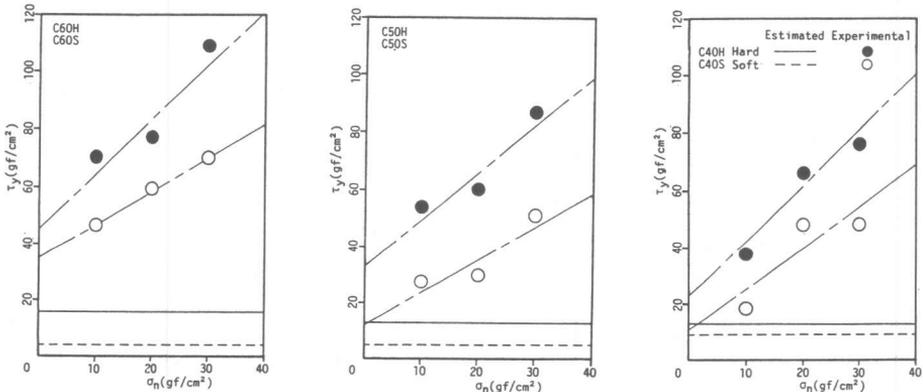


図-11 コンクリートの降伏値(τ_y)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-I)

と垂直応力(σ_n) の関係を示したものである。これらの図には、試料をビンガムモデルと仮定して、スランプ値およびフロー値から推定した降伏値を実線および破線で併示した。図から明らかなように、降伏値は垂直応力に比例して増加する傾向を示す。特に、コンクリートの場合は、降伏値の増加傾向は顕著であり、ビンガムモデルと仮定した場合の降伏値の推定値と比較してかなり大きな値となっている。

実験 - II より得られたせん断抵抗応力(τ_R)と垂直応力(σ_n)の関係を図 - 12 に示す。実験 - I の結果と同様に、垂直応力(σ_n) の増加により直線的にせん断抵抗応力(τ_R) が増加しているが、この傾向は、粗骨材量の増加にともなって顕著となる。また、粗骨材量が多い場合には、粗骨材の形状の違いによる影響がみられ、球形のガラス玉を用いたものに比べて川砂利を用いたコンクリートのせん断抵抗応力の方が大きい。粗骨材が少なくなると、粗骨材の違いによる性状の相違はほとんどみられなくなり、粗骨材間のモルタル部の性状に支配されるものと思われる。図 - 13 は、実験 - II について、コンクリートの降伏値(τ_y) と垂直応力(σ_n) の関係を求めたものである。降伏値(τ_y) の増

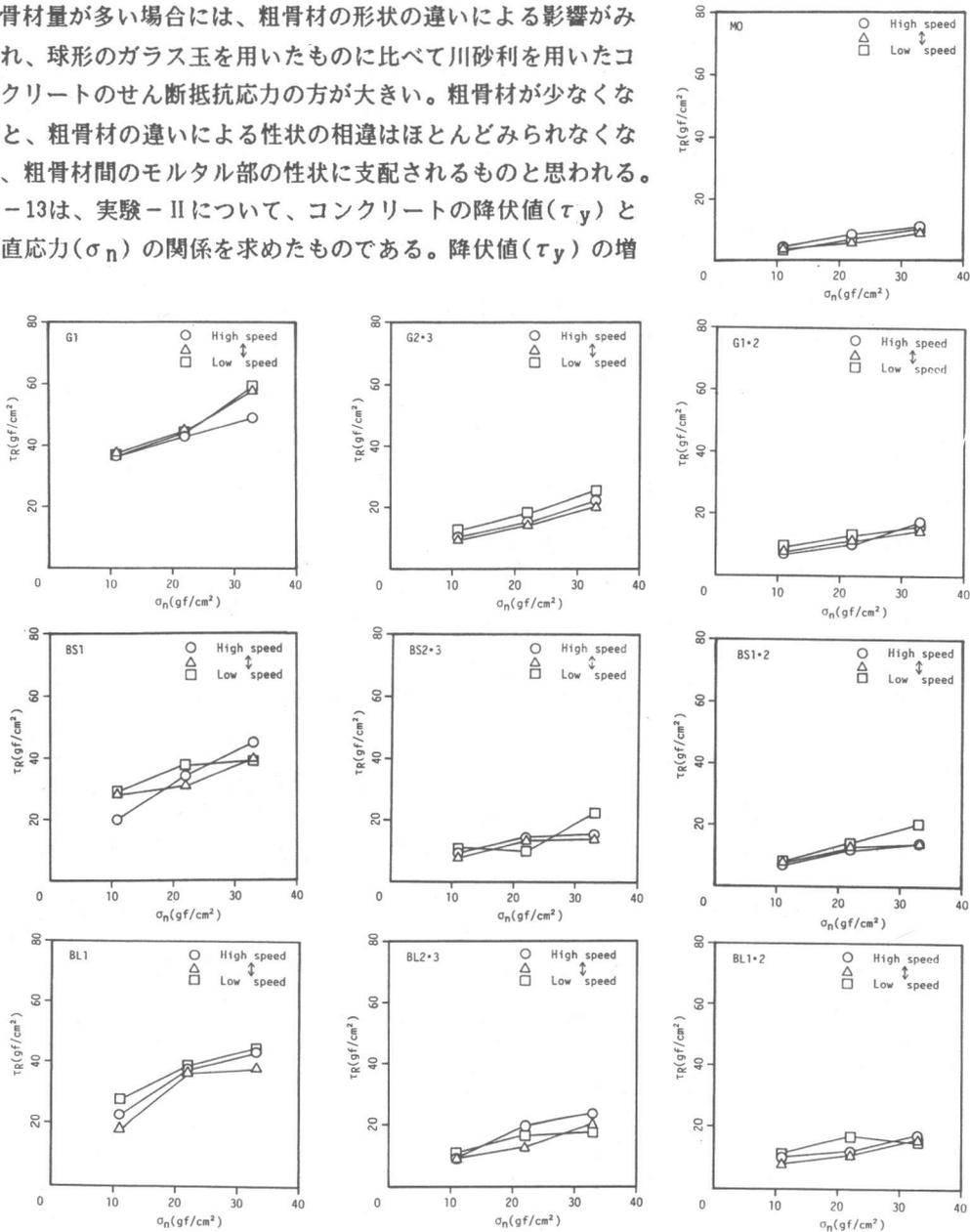


図-12 せん断抵抗応力(τ_R)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-II)

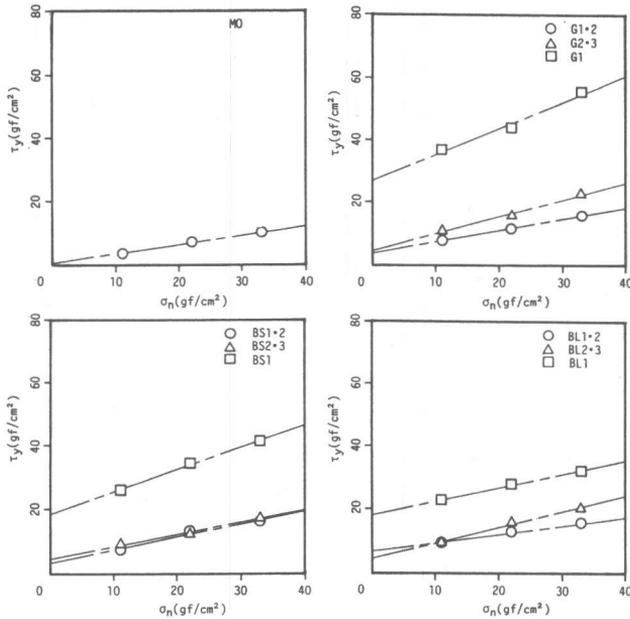


図-13 降伏値(τ_y)と垂直応力(σ_n)の関係(実験-II)

加傾向は実験-Iの場合と同様であるが、粗骨材量の増加にともなって直線の傾きが大きくなり、内部まさが増加しているものと思われる。

本実験の範囲では、モルタルの場合には、せん断面積の違いが測定値に与える影響はほとんど見られないが、コンクリートでは、せん断面積の小さい実験-Iで得られたせん断抵抗応力(τ_R)が、実験-IIの結果に比べてかなり大きくなっており、粗骨材量の多い場合に、せん断面積の小さい実験-Iの容器サイズでは、流動がある程度制限されたものと思われる。また、図には示していないが、塑性粘度(η)と垂直応力(σ_n)の関係に関しては、データにばらつき

が大きく、モルタルおよびコンクリートの塑性粘度の応力依存の顕著な傾向は観察できなかった。

5. 結論

本研究では、筆者らが提案したフレッシュコンクリートの構成則(複合モデル)に関するレオロジー定数の実測データを収集するため、フレッシュセメントペースト、モルタルおよびコンクリートについて1面せん断試験を行い、応力状態に影響を受ける降伏値および塑性粘度の測定を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 降伏値は垂直応力とともに増加し、この傾向は骨材量が多いものほど著しい。
- 2) 塑性粘度の応力依存は顕著ではない。

今後、実験データをさらに蓄積し、定量化を行い、複合モデルを用いた流動解析を行う予定である。

[謝辞] 本実験に際して増田一幸君(三重大学大学院生)の助力を得た。また、本研究費の一部は竹中育英会建築研究助成金によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- [1] 村田・菊川, 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.9-16, 1983.
- [2] 水口・河野, 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.17-24, 1983.
- [3] 松藤・河上・吉岡, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.73-74, 1984.
- [4] 岩崎, コンクリート工学, Vol.21, No.10, pp.4-12, 1983.10.
- [5] 谷川・森・筒井・黒川, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.115-120, 1987.
- [6] 谷川・森・筒井・黒川, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.493-498, 1987.