

論 文

[1017] フレッシュコンクリートとマトリックスモルタルのレオロジー性質の関係

正会員 谷川恭雄（名古屋大学建築学科）

同 森 博嗣（名古屋大学建築学科）

同 ○ 刈田安浩（名古屋大学大学院）

1. まえがき

コンクリート工事の合理化を推進するには、フレッシュコンクリートの性状を正確に評価する物理的な指標が不可欠であり、各種施工条件に対する適切な材料の選択・管理が必要である。

コンクリートのコンシスティンシー評価試験方法として一般的に用いられているスランプ試験は、フレッシュコンクリートのレオロジー性質の1つである降伏値の検出には適しているが、高強度コンクリートなどで問題となる粘性を検出することができない[1]。モルタルではなくコンクリートのレオロジー試験方法として、適用範囲、簡便性および測定精度の観点から実用に耐え得るものはまだ提案されておらず、この点が、フレッシュコンクリートのレオロジー性質を適切に評価する上での最大の問題点といえる。フレッシュコンクリートの流動性状は、そのマトリックスモルタルのレオロジー性質に支配されていることは自明であるが、両者の関連をレオロジーの観点から解明した研究は少ない[2]。また、一方では、コンクリートの材料分離性状の定量的な把握もこの分野の急務であるが、この場合にも、

コンクリートではなく、マトリックスモルタルのレオロジー性質との関係に注目する必要がある。

本研究では、マトリックスモルタルのレオロジー性状と、コンクリートのレオロジー性状の関連を、理論的・実験的に明らかにし、フレッシュコンクリートのレオロジーモデルをメカニズムとしてとらえることを目的としている。本稿では、両者のレオロジー定数を測定する手法の開発、粗骨材混入の効果に関する理論的考察および基礎的実験の結果について報告する。

2. レオロジー定数の推定手法

筆者らは、既に、粘塑性有限要素法(VFEM)によるシミュレーションを基本として、スランプ値とフロー値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推定する手法を提案し、その妥当性を確認している[1]。今回は、現場での使用を考慮して、フロー試験より簡便な光センサー式L型フロー試験[3, 4]を取

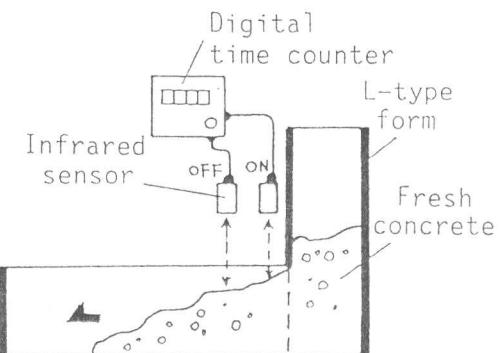


図-1 光センサー式L型フロー試験装置

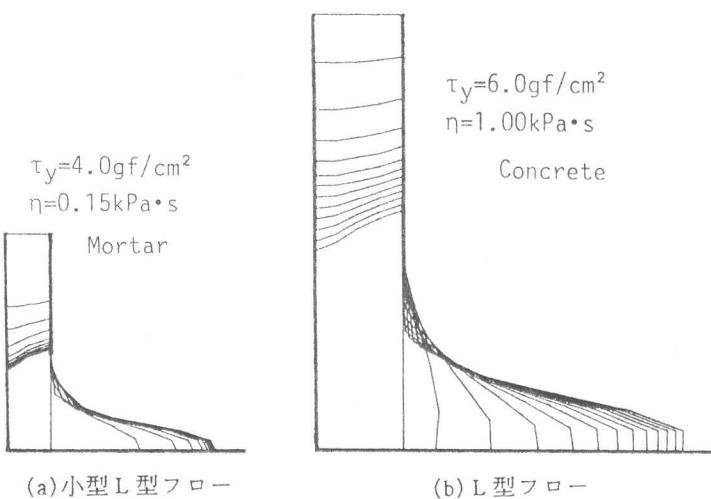


図-2 粘塑性有限要素法によるL型フロー試験の解析例

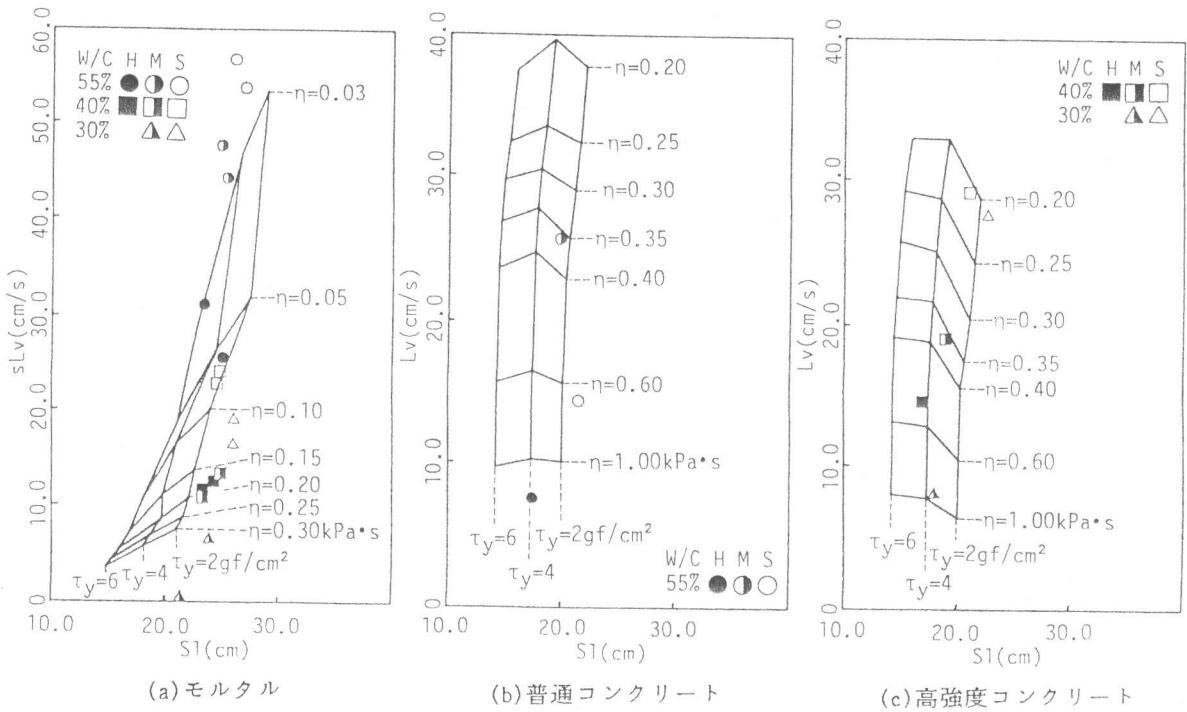


図-3 L型フロー初速度(L_v , sL_v)とスランプ値(S_1)の併用によるレオロジー定数の推定図

り上げ、スランプ値とL型フロー初速度によるレオロジー定数推定方法を新たに開発した。

図-1に、光センサー式L型フロー試験装置を示す。小型L型フロー試験装置（普通型の1/2ササイズ）はモルタル用に試作したものである。

粘塑性有限要素法(VFEM)によるL型フロー試験のシミュレーション結果の一例を図-2に示す。この解析には、別の実験[5]で定量化したすべり粘性抵抗モデルを入力として用いている。得られた計算結果より、実験と同条件の区間（開口部より3～8cm）における平均フロー速度（L型フロー初速度）を算出した。図-3は、スランプ値(S_1)およびL型フロー初速度(L_v , sL_v :それぞれ普通型および小型装置による値)とレオロジー定数(降伏値: τ_y , 塑性粘度: η)の関係に関する解析結果である。なお、図中には、後述の実験結果も併示してある。

3. 理論的考察

コンクリートを粗骨材とモルタルの2相モデルとして取り扱った場合、フレッシュコンクリートとしてのみかけのレオロジー性質は、①モルタルのレオロジー性状、②粗骨材の混入量・形状・寸法、および③モルタルと粗骨材の付着性状の3つに支配される（③は、①および②の関数である）[6]。

図-4は、モルタルの変形性質とコンクリートとしてのみかけの変形性質の概念を示したものである。図中(a)のモルタルに粗骨材を混入することによって、(b), (c)および(d)のコンクリートとなる。(b)は、比較的モルタル部の変形が自由で

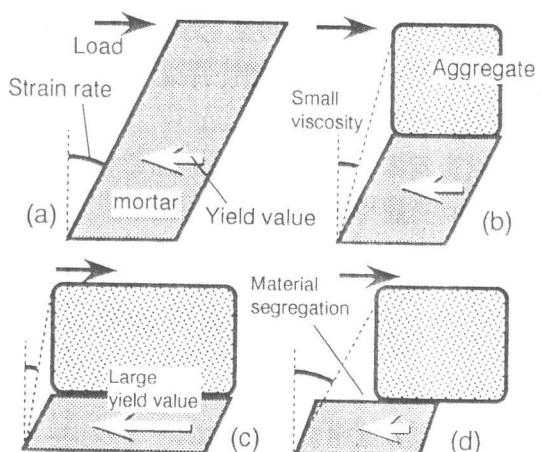


図-4 コンクリートの変形モデル

あり、粗骨材量の増加にともなってコンクリートのみかけの粘性が増加する場合、また、(c)は、モルタルの変形領域が小さく、細骨材との寸法効果によって降伏値が増加し、コンクリートのみかけの降伏値も増加するモデルである。また、(d)は、粗骨材表面積やモルタルの付着抵抗の不足から、粗骨材分離を生じる場合を示しており、この場合は、みかけの粘性は小さくなる。

フレッシュコンクリートを2相モデルとして取り扱うサスペンション要素法(SEM) [7]を用いて、L型フロー試験のシミュレーションを行い、入力値としてのモルタルのレオロジー性状と、解析結果としてのコンクリートの流動性状の関係を比較した。シミュレーション結果の一例を図-5に示す。得られた解析結果より、L型フロー初速度を算定し、これらの値に図-3の関係を適用して、コンクリートとしてのみかけのレオロジー定数(降伏値: τ_y 、塑性粘度: η)を推定した。以上の解析結果を図-6に示す。2次元解析であるため、粗骨材の影響が現実とは異なるものと考えられるが、モルタル部のレオロジー定数がコンクリートのレオロジー定数に与える影響は、モルタルのレオロジー性質や粗骨材量の影響を受け、粗骨材混入による降伏値と塑性粘度の増加傾向を把握することができる。

また、フレッシュコンクリートのせん断変形に与える粗骨材の影響を調べるために、せん断ボックス試験時の変形性状をVFEMを用いて解析した。モデル粗骨材として剛体3角形要素を混入した場合の計算を行った結果の一例を図-7に示す。図-8は、変形速度と出力の抵抗応力からコンクリートとしての降伏値(τ_y)および塑性粘度(η)を算定し、モデル粗骨材のない場合と比較した結果である。図中の V_a/V は、モデル粗骨材の単位体積を表す。

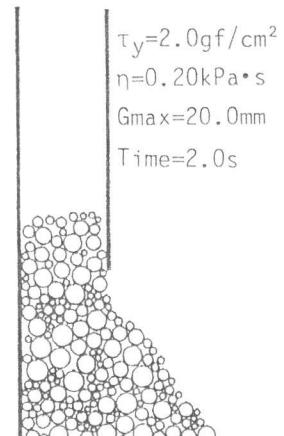


図-5 サスペンション要素法によるL型フロー試験の解析例

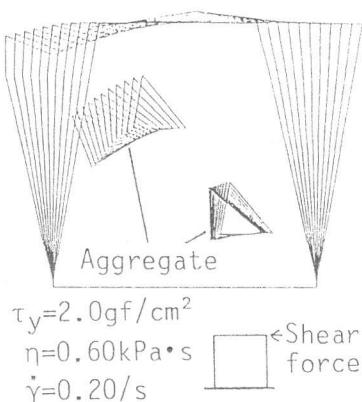


図-7 粘塑性有限要素法によるせん断ボックス試験の解析例

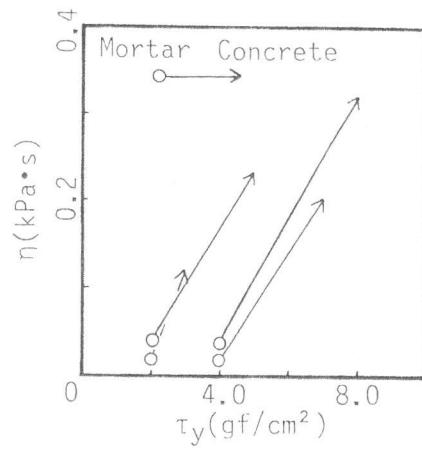


図-6 サスペンション要素法に基づくモルタルとコンクリートのレオロジー定数の比較

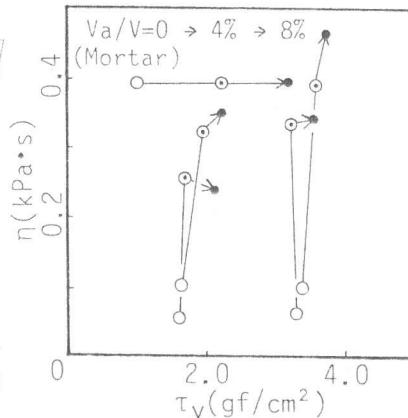


図-8 粘塑性有限要素法に基づくモルタルとコンクリートのレオロジー定数の比較

表-1 コンクリートの調合表

Series	W/C	W	C	S	G	HAE	S1'
NCA55-H		175	318	817		-	15
NCA55-M	55	180	327	797	971	-	18
NCA55-S		190	345	759			21
NCA40-H		180	450	687		-	15
NCA40-M	40	185	463	666	982	-	18
NCA40-S		190	475	655			21
NCA30-M	30	165	550	684	987	0.8	18
NCA30-S						1.0	21

[Notes] W/C: Water-cement ratio(%), W: Water(kg/m³), C: Cement(kg/m³), S: Sand(kg/m³), G: Gravel(kg/m³), HAE : High-performance AE water reducing agent (%/C), S1': Designed slump value(cm).

4. 実験的考察

4.1 実験の概要

実験では、粗骨材の形状および寸法を一定とし、フレッシュコンクリートのレオロジー一定数を測定し、モルタル部のレオロジー性質との関係を調べることとした。実験に使用したコンクリートの調合表を表-1に示す。水セメント比(W/C)を55%、40%および30%の3水準とし、スランプ値(SI)を15、18および21cm(それぞれ、H,MおよびSシリーズ)に設定した(W/C=30%の場合は、SI=18および21cmのみ)。同一の水セメント比では、単位粗骨材量を一定としている。なお、W/C=30%のコンクリートについては高性能AE減水剤の添加量によってスランプ値をコントロールした。

モルタルは、コンクリート混練直後にウェットスクリーニングによって抽出したシリーズ(WM)と、同調合で粗骨材を除いて別に混練したシリーズ(NM)の双方について試験を行った。コンクリートは、ス

ランプ試験、コンクリートフロー試験(ASTM C 124)およびL型フロー試験、また、モルタルは、スランプ試験、コンクリートフロー試験、モルタルフロー試験および小型L型フロー試験に供した。L型フロー初速度は、コンクリート用の普通型(Lv)およびモルタル用の小型(sLv)とも、開口部より3~8cmの区間を試料が通過する時間を光センサーで測定して求めた平均速度を表している(図-3中に実験値を併示)。

また、粗骨材量の変化が試料全体のみかけのレオロジー性質に及ぼす影響を調べる目的で、NCA40-Mシリーズの粗骨材量を1とした場合に、その1/3、2/3および4/3の割合で粗骨材量のみを変化させたコンクリートに関する実験を行った。試験項目は、上記の実験と同様である。

4.2 実験結果とその考察

図-9、図-10および図-11は、コンクリート(NC)とウェットスクリーニングしたモルタル(WM)

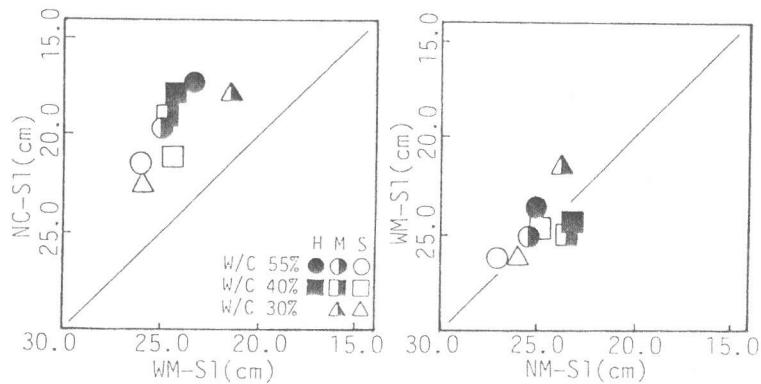


図-9 スランプ値の比較

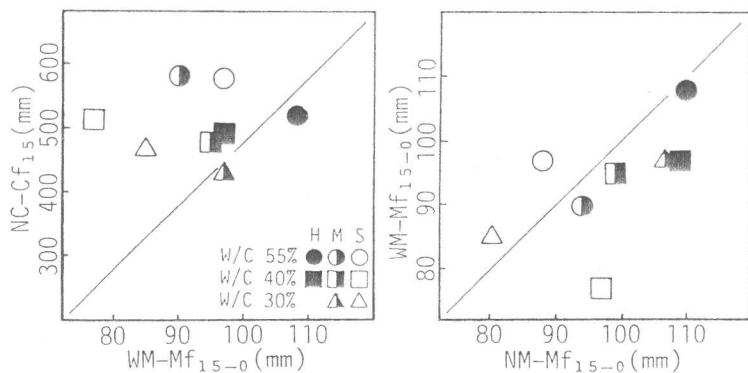


図-10 フロー値の比較

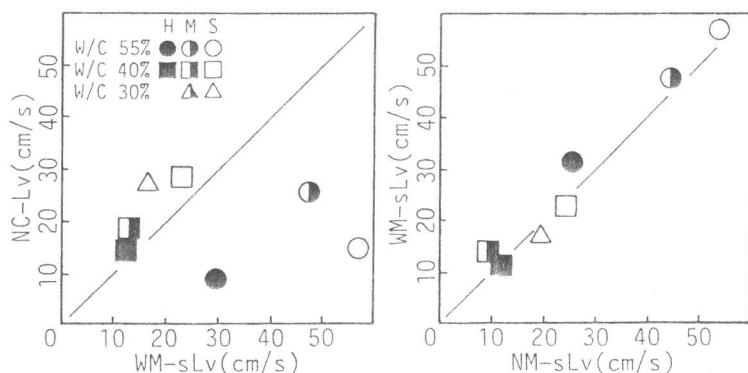


図-11 L型フロー初速度の比較

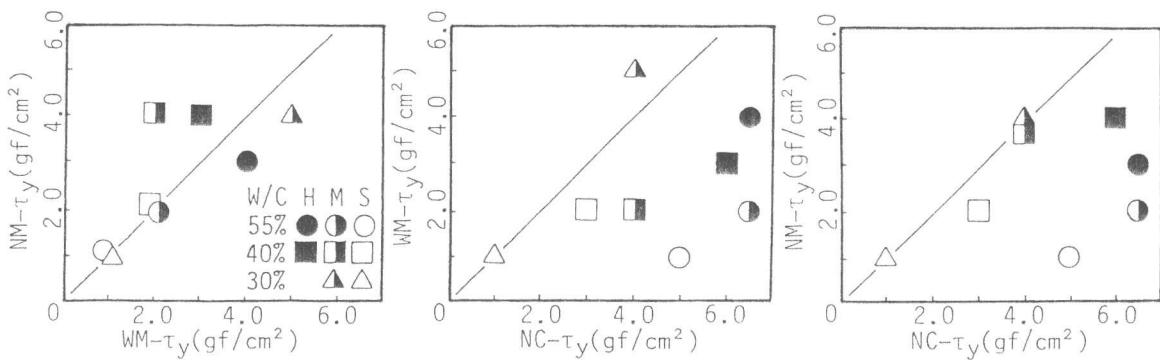


図-12 実験結果から推定した降伏値(τ_y)の比較

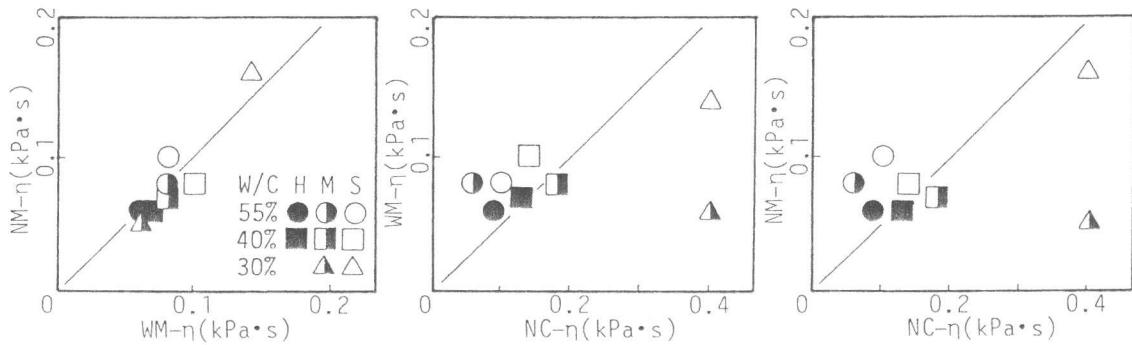


図-13 実験結果から推定した塑性粘度(η)の比較

および別混練のモルタル
(NM)についてスランプ値
(S1)、フロー値(コンクリ
ートフロー値:Cf₁₅、モ
ルタルフロー値:Mf_{15-θ})
およびL型フロー初速度
(Lv, sLv)を比較したもの
である。この実験の範囲
では、ウェットスクリー
ニングで抽出したモルタ
ルと粗骨材を除く調合で
別混練したモルタルの間
に顕著な差異はみられな
かった。

図-12 および図-13は、実験結果を用いて推定したコンクリートとモルタルのレオロジー定数(降伏値: τ_y , 塑性粘度: η)を比較したものである。これらのレオロジー定数は、コンクリートについては、スランプ値とコンクリートフロー値(S1&Cf₁₅)によって、また、モルタルについては、スランプ値とモルタルフロー値(S1&Mf_{15-θ})によって推定している。WMおよびNMシリーズのモルタルは、ほぼ同程度のレオロジー性質を示しており、これらが比較的狭い範囲に分布してい
るのに対して、コンクリートのレオロジー定数はかなり広い範囲に分布している。

図-14は、モルタルおよびコンクリートの塑性粘度(η)と降伏値(τ_y)の関係を示したものである。この図によれば、モルタルからコンクリートへのベクトルは、水セメント比が大きいほど水

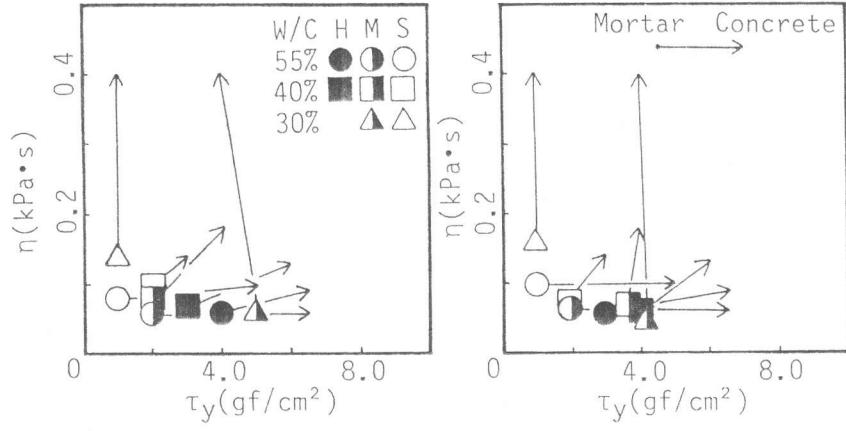


図-14 実験結果に基づくモルタルとコンクリートの
レオロジー定数の比較

平（降伏値の増加）に、また、水セメント比が小さくなるほど垂直（塑性粘度の増加）に近づく傾向を示している。水セメント比の小さい場合、粗骨材とモルタルは完全付着に近い状態にあるためシミュレーションと同様に主として粘性が増大するが、水セメント比の大きい場合には、前掲の図-4の(d)のモデルのようなすべりが生じ、粘性が増加しないものと考えられる。

図-15は、粗骨材混入によるレオロジー定数の変化状況を示したものである。この図より明らかなように、粗骨材量が少ないと、塑性粘度が増加し、粗骨材量がある程度よりも多くなると、降伏値が増加する傾向を示す。この傾向は、図-8に示したせん断変形のシミュレーション結果と類似している。

5.まとめ

本研究では、コンクリートのレオロジー性質に及ぼすマトリックスモルタルのレオロジー性質の影響を調べるために、フレッシュコンクリートおよびフレッシュモルタルに共通して使用可能なレオロジー定数推定手法を開発し、これを用いた理論的な考察および基礎的な実験を行った。本研究の成果は、以下の2点に要約できる。

- 1)光センサー式L型フロー試験をフレッシュコンクリートおよびフレッシュモルタルの双方に適用してレオロジー定数を推定する手法を開発した。
- 2)モルタル中に粗骨材を混入すると、そのレオロジー定数が増加するが、一般に、水セメント比が大きい調合では降伏値が、また、水セメント比が小さい調合では塑性粘度が増加する。

今後、さらに粗骨材の形状・寸法などの実験的要因を加えデータを蓄積するとともに、解析による詳細な検討を行う予定である。

[謝辞]

本研究費の一部は、平成2年度文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)、同一般研究(B)、ならびに1990年度セメント協会研究奨励金によつた。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- 1)森博嗣・谷川恭雄：フレッシュコンクリートの各種コンステンシー試験方法に関するレオロジー的考察、日本建築学会構造系論文報告集、No.377, pp.16-26, 1987.
- 2)水口裕之・河野清：二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション手法、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)谷川恭雄ほか：L型フロー試験による高強度コンクリートの流動性評価（その1：粘塑性有限要素法によるシミュレーション）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A, pp.253-254, 1989.
- 4)谷川恭雄・森博嗣・渡辺健治・三輪正保：高強度・超高強度コンクリートのコンステンシー評価方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12, No.1, pp.275-280, 1990.
- 5)谷川恭雄・森博嗣・三輪正保・田中政史：低水セメント比のフレッシュコンクリートのすべり挙動に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A, pp.853-854, 1990.
- 6)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.
- 7)谷川恭雄・森博嗣・梅本宗宏・渡辺健治：サスペンション要素法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、材料、Vol.38, No.431, pp.26-31, 1989.

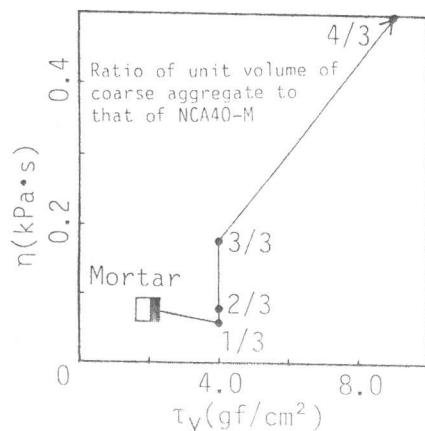


図-15 塑性粘度(η_s)と降伏値(τ_y)の関係に及ぼす単位粗骨材量の影響