

論文 高強度コンクリートの練混ぜ性能の推定

木村芳幹*1・岩井信彰*2

要旨: 高強度コンクリートを試験室で練り混ぜ、ミキサが負荷する電力を測定した。その結果、負荷電力はセメントの種類や水セメント比により異なり、負荷電力がフレッシュコンクリートの塑性粘度と密接な関係があることを把握した。また、Lフロー値 L_f をLフロー初速度 L_v で除した値(相対 L フロー時間 L_f / L_v)とコンクリートの塑性粘度の推定値 η との関係に強い相関が認められたことから、相対 L フロー時間を用いてコンクリートの練混ぜ時間、ミキサの最大負荷電力および消費電力量を推定できることが明らかとなった。

キーワード: 高強度コンクリート, ミキサ負荷電力, 塑性粘度, L型フロー試験

1. まえがき

高強度コンクリートは粘性が高いことから製造時にミキサが負荷する電力(以下、負荷電力)が大きくなるといわれている。しかし、これまでに、コンクリートの粘性と負荷電力(電流)との関連を明らかにした例¹⁾は少ない。これは、既往の報告の多くが実機練混ぜ時の測定によるものであって、練混ぜ時間の確認や品質管理を目的としている²⁾³⁾ことによるものと思われる。

本報では、セメントの種類、調合およびフレッシュコンクリートの性状が負荷電力に及ぼす影響を明らかにし、高強度コンクリートの練混ぜ性能を推定する手法について検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料と調合

使用材料を表-1 に示す。セメントには、普通セメント(N)、シリカフェーム混入セメント(SF)、低熱セメント(LH)の3種類、およびNとSF、NとLHをそれぞれ質量比1:1で混合したセメント2種類(SNおよびLN)の合計5種類を用いた。混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤であり、使用するセメントに応じてSFおよびSNにはSF用を、N、LH、LNにはLH用を用いた。なお、SF用はLH用と比較して分散

表-1 使用材料

セメント	普通セメント(N) 密度3.16g/cm ³ 、比表面積 3260cm ² /g
	シリカフェーム混入セメント(SF) 密度3.08g/cm ³ 、比表面積 5560cm ² /g
低熱セメント(LH)	密度3.22g/cm ³ 、比表面積 3710cm ² /g
	海砂:砕砂=7:3、混合密度 2.57g/cm ³ 、粗粒率 2.82
粗骨材	砕石 2015:1505=6:4、密度 2.62g/cm ³ 、実積率 59.1%
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤 (LH用およびSF用の2銘柄)

表-2 コンクリートの調合

調合No.	記号(C:W/C)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤(C×%)	
			水	セメント	粗骨材		
1	N50	50.0	185	370	754	935	1.00
2	N40	40.0		438	852		1.30
3	N33	33.3	175	525	781	870	1.50
4	N28	28.6		613	711		2.10
5	SF40	40.0		438	842		1.10
6	SF33	33.3	175	525	770	870	1.10
7	SF28	28.6		613	698		1.30
8	SN40	40.0		438	847		1.00
9	SN33	33.3	175	525	776	870	1.10
10	SN28	28.6		613	704		1.20
11	LH40	40.0		438	858		1.30
12	LH33	33.3	175	525	789	870	1.40
13	LH28	28.6		613	720		1.65
14	LN40	40.0		438	855		1.75
15	LN33	33.3	175	525	785	870	1.80
16	LN28	28.6		613	715		2.10

性能が高い混和剤である。

コンクリートの調合は、表-2 に示すように、セメント水比(C/W)を2.5, 3.0, 3.5(以下 W/C=40%, 33%, 28%), 粗骨材かさ容積を0.56m³/m³とした。

*1 (株)新井組 技術研究所 主任部員 (正会員)

*2 (株)新井組 技術研究所 主任研究員 (正会員)

ただし、N50は、比較用として練り混ぜたW/C=50%のコンクリートである。

2.2 フレッシュコンクリートの目標性能

フレッシュコンクリートの目標性能を表-3に示す。なお、目標スランプフロー値はW/Cに応じた暫定値であって、材料分離がみられず、一般建築構造物に対する施工性が適していると判断された場合には、目標値を満足していない場合でも決定調合とした。フレッシュコンクリートの試験項目は、スランプフロー試験、L型フロー試験、空気量およびコンクリート温度の測定である。試験方法は、対応する基準および文献⁴⁾によった。

2.3 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには、表-4に示す性能を保有する容量0.1m³のパン型強制練りミキサを用い、1調合あたりの練混ぜ量を0.03m³×2バッチとした。ただし、W/C=33%では0.03m³および0.045m³をそれぞれ1バッチずつとした。練混ぜ手順は、図-1に示すように、モルタルを60秒練り混ぜた後に、コンクリートを90秒練り混ぜる方法とした。ただし、N50の練混ぜ時間はモルタルが30秒、コンクリートが60秒である。

2.4 負荷電力の測定概要

負荷電力の測定には、チャートとしてリアルタイムで電力を出力する機能を保有する電力計を用いた。電力計を写真-1に示す。

プリントアウトされたチャートの一例を図-2に示す。同図より、モルタル、コンクリートの練混ぜ時ともに、電力に極大、極小値がみられることが分かる。これは、ミキサ回転翼と容器との間にモルタル塊あるいは粗骨材が嵌合したことにより、一時的に電力が大きくなったことによると考

表-3 フレッシュコンクリートの目標性能

W/C	スランプフロー値	空気量
40	50±5cm	2.0±1.5%
33	55±5cm	
28	60±5cm	

表-4 ミキサの性能

練混ぜ容量	0.1m ³
電動機	3.7kW
羽回転数	60rpm

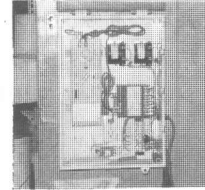


写真-1 電力計

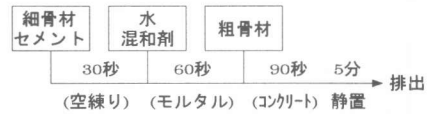


図-1 コンクリートの練混ぜ手順

えられる。そこで、負荷電力は、極小となった時点の電力から空転時の電力(0.38kW)を差し引いた値で評価することとした。また、消費電力量は負荷電力を経過時間で積分した値、負荷電力が平衡となる時間(以下、平衡時間)は練混ぜ終了時の負荷電力との差がモルタルで0.01kW以下、コンクリートで0.02kW以下となった経過時間とした。

3. フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5に示す。同表における数値はNが2バッチ混合の値、それ以外は2バッチの平均値である。なお、練混ぜは3~5月の常温環境で行い、コンクリート温度は17.0~26.0℃、空気量は0.7~3.4%の範囲である。

表5において、降伏値の推定値 τ_y (以下、降伏値)

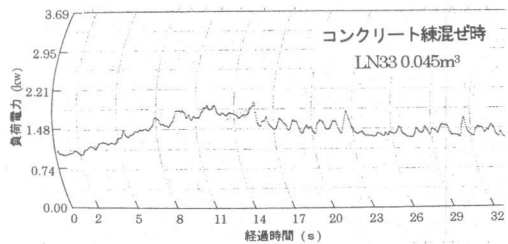
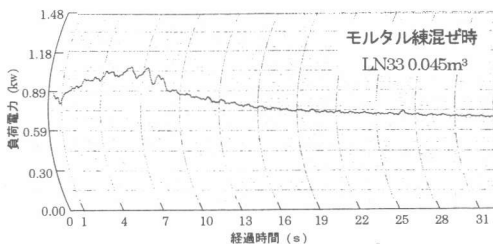


図-2 プリントアウトされたチャートの一例

はスランプフロー値 S_f を(1)式⁵⁾に、塑性粘度の推定値 η (以下、塑性粘度)は τ_y および 5-10cm 間 L フロー時間 Lt_{5-10} を(2)式⁶⁾に代入して求めた値である。ただし、 Lt_{5-10} は 3-8cm 間および 8-13cm 間 L フロー速度 Lv_{3-8} および Lv_{8-13} から求めたフロー時間の平均値とした。

$$\tau_y = \frac{4\rho G Vol.}{\sqrt{3\pi S_f^2}} \times 10^6 \quad (1)$$

$$Lt_{5-10} = \left\{ (8.33 \times 10^{-5} \rho - 2.35 \times 10^{-8}) \tau_y^2 + 3.78 / \rho - 4.98 \times 10^{-5} \right\} \eta \quad (2)$$

ここに、 τ_y :降伏値(Pa)、 η :塑性粘度(Pa·s)、 S_f :スランプフロー値(mm)、 Lt_{5-10} :5-10cm 間 L フロー時間(s)、 ρ :密度(kg/m³)、 G :重力加速度(9.8067m/s²)、 Vol :スランプコーンの容積(m³)

一般に、コンクリートの降伏値はフロー値で、塑性粘度はフロー速度やフロー時間で評価することができる。しかし、図-3 に示した L フロー初速度 Lv と塑性粘度 η との関係における回帰式を用いると、N50 の塑性粘度が SF28 より大きく評価されることとなる。これは、L フロー初速度が粘度に加え、降伏値も合わせた評価値であることによるものと考えられる。そこで、L フロー値 Lf を L フロー初速度 Lv で除した値を相対 L フロー時間 Lf / Lv と定義し、塑性粘度との関係について検討する。

図-4 に、相対 L フロー時間 Lf / Lv と塑性粘度 η との関係を示す。同図より、本実験の範囲ではセメントの種類や調合にかかわらず、両者の関係に強い相関が認められることが分かる。また、N50 においても同図に併記した回帰直線とほぼ一致することから、相対 L フロー時間を用いて塑性粘度が推定できると考えられる。

4. 負荷電力・消費電力量の測定結果

4.1 経過時間と負荷電力との関係

経過時間と負荷電力との関係を、モルタル練混ぜ時について図-5 に、コンクリート練混ぜ時について図-6 に示す。なお、同図にプロットした点は、練混ぜ開始から 20 秒までは 5 秒間ごと、20

表-5 フレッシュコンクリート試験結果

記号	S_f (mm)	St_{50} (s)	Lf (mm)	Lv_{3-8} (mm/s)	Lv_{8-13} (mm/s)	Lf/Lv (s)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)
N50	343	-	245	216	229	1.10	770	24
N40	494	-	415	149	145	2.82	383	95
N33	546	9.1	505	132	126	3.91	315	135
N28	591	6.4	525	100	96	5.36	272	210
SF40	438	-	373	282	305	1.28	482	39
SF33	519	-	480	343	353	1.38	344	44
SF28	518	-	488	273	282	1.77	354	61
SN40	435	-	338	199	189	1.74	493	58
SN33	544	4.8	500	201	231	2.32	319	85
SN28	551	5.3	500	169	157	3.08	313	117
LH40	503	-	448	157	168	2.76	384	97
LH33	623	4.2	628	180	173	3.56	244	128
LH28	704	4.3	708	125	125	5.67	194	208
LN40	515	-	415	137	136	3.04	355	121
LN33	549	6.7	503	152	144	3.40	314	127
LN28	616	6.1	590	127	126	4.73	251	180

S_f :スランプフロー値、 St_{50} :50cm フロー時間、 Lf :L フロー値、 Lv_{3-8} :3-8(8-13)cm 間 L フロー初速度、 Lv_{8-13} :8-13(8-13)cm 間 L フロー初速度、 Lv :L フロー初速度($Lv_{3-8} + Lv_{8-13})/2$ 、 τ_y :降伏値の推定値、 η :塑性粘度の推定値

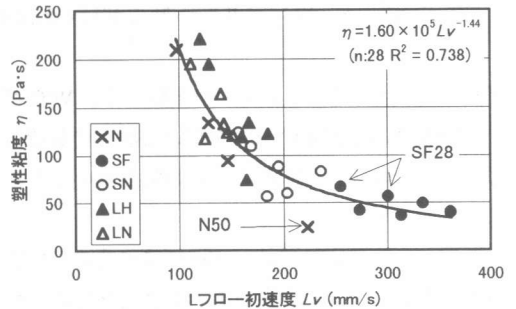


図-3 L フロー初速度 Lv と塑性粘度 η との関係

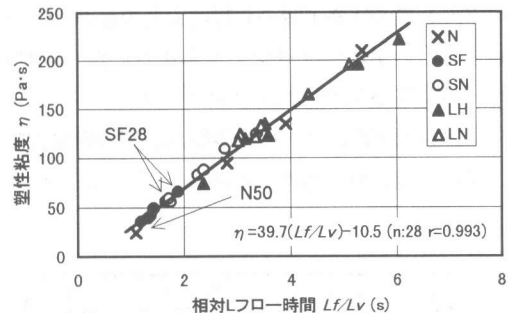


図-4 相対 L フロー時間 Lf / Lv と塑性粘度 η との関係

秒から練混ぜ終了までは 10 秒間ごとの平均値である。

これらの図より、セメントの種類、および W/C によって、負荷電力が異なることが分かる。負荷電力は、セメントの種類で比較すると $N > LH = LN$

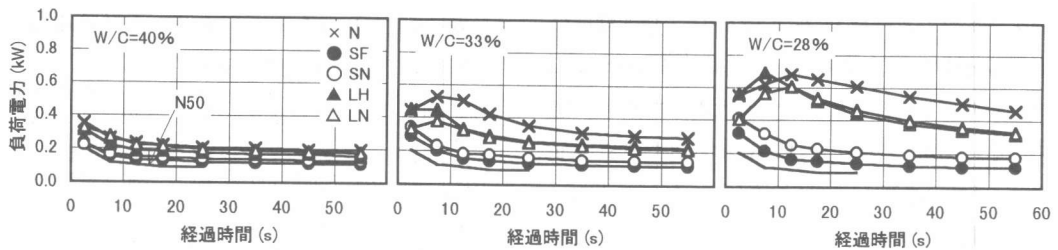


図-5 モルタル練混ぜ時の経過時間と負荷電力との関係(練混ぜ量:0.03m³)

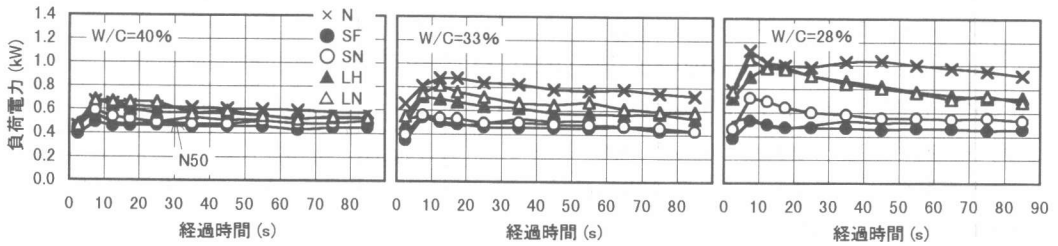


図-6 コンクリート練混ぜ時の経過時間と負荷電力との関係(練混ぜ量:0.03m³)

>SN>SFの順、同一セメントで比較するとW/Cが小さい調合ほど大きい。SFを用いた調合で負荷電力が小さいのは、混和剤の分散性能が高いことによるものと思われる。

モルタル練混ぜ時では、練混ぜ終了時の負荷電力が大きい調合ほど、負荷電力が最大となるまでの時間、および平衡時間が長くなる傾向が認められる。また、コンクリート練混ぜ時では、最大負荷電力と練混ぜ終了時の負荷電力との差が、W/C=40%ではいずれのセメントでも小さいが、W/C=33%および28%ではLH、LNで大きい。

4.2 最大負荷電力、平衡時間および消費電力量

W/Cと最大負荷電力との関係を図-7に示す。

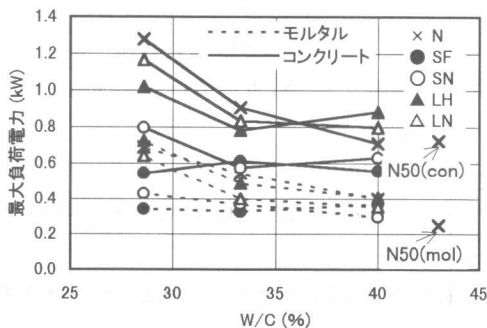


図-7 W/Cと最大負荷電力との関係(0.03m³)

最大負荷電力は、モルタル練混ぜ時、コンクリート練混ぜ時ともにW/Cが小さいときほど大きい。また、コンクリート練混ぜ時のSF、SNの最大負荷電力は、N50と同等以下である。

つぎに、各調合の平衡時間および平衡時間における消費電力量を図-8に示す。同図より、モルタルの平衡時間は、W/C=40%ではセメントの種類の違いによる差はほとんどないが、W/Cが小さくなるにつれて差が明確となることが分かる。消費電力量は、W/Cが小さくなるにつれて大きくなるが、セメントの種類による違いは、W/Cが小さいほど顕著である。

4.3 練混ぜ量が負荷電力に及ぼす影響

W/C=33%における最大負荷電力と消費電力量

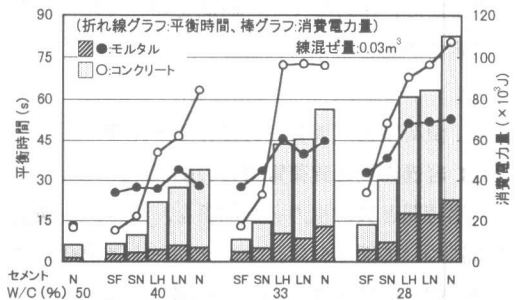


図-8 各調合の平衡時間および消費電力量

について、練混ぜ量が 0.03m^3 のときの値に対する 0.045m^3 のときの値の比を、図-9 に示す。最大負荷電力の比はモルタルで 1.21~1.56, コンクリートで 1.30~1.87 であって、セメントの種類によりばらつきがみられる。ただし、これらを平均すると、練混ぜ量の比率=1.5 と同程度である。消費電力量の比率はモルタルで 1.17~1.35, コンクリートで 1.23~1.46 と、練混ぜ量の比率よりやや小さい。なお、本実験の範囲では練混ぜ量が平衡時間に及ばず影響は明確でなかった。

4.4 フレッシュ性状と負荷電力との関係

負荷電力 EP と、降伏値 τ_y との関係を図-10 に、塑性粘度 η との関係を図-11 に示す。なお、同図にプロットした負荷電力は、経過時間がモルタルで 5~10 秒および 50~60 秒の平均値, コンクリートで 15~20 秒および 80~90 秒の平均値である。これらの図より、負荷電力とコンクリートの降伏値および塑性粘度との関係には、ともに相関が認められることが分かる。負荷電力は降伏値が小さく、あるいは塑性粘度が大きくなるほど、つまりスランプフロー値および相対 L フロー時間が大きくなるほど、大きくなるといえる。

一方、文献²⁾³⁾によると、負荷電流(負荷電力)はスランプフロー値が大きな調合ほど小さくなることが指摘されている。ここで、文献²⁾³⁾による測定は、実機練混ぜ時の負荷電流によってスランプフロー値を管理することを目的としたものであって、ほぼ同一材料、同一調合のコンクリートについて比較検討がなされている。しかし、本実験は使用材料や調合が異なるコンクリートを対象としており、結果として、塑性粘度が大きい調合ほどスランプフロー値を大きく設定している。このことが、文献²⁾³⁾と結果が異なったものと考えられる。つまり、使用材料や調合が異なるコンクリートの負荷電力を比較する場合には、塑性粘度を要因とした検討が必要であるとされる。

そこで、相対 L フロー時間と最大負荷電力、平衡時間、および消費電力量との関係について検討を加える。なお、以下の検討には、N50 の値に対するそれぞれの値の比率を用いる。

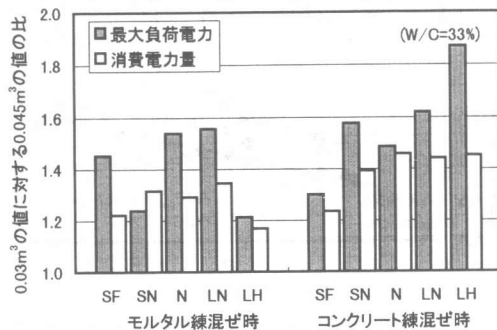


図-9 最大負荷電力および消費電力量の比率

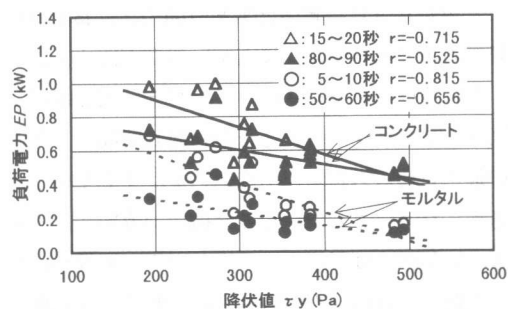


図-10 降伏値 τ_y と負荷電力 EP との関係

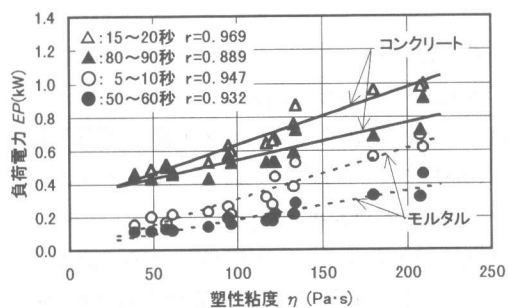


図-11 塑性粘度 η と負荷電力 EP との関係

相対 L フロー時間 L_f / L_v と最大負荷電力の比 sEP_m , 平衡時間の比 sET , および消費電力量の比 $sQEP$ との関係を図-12~14 に、一次回帰直線および相関係数を併記して示す。

図-12 より、相対 L フロー時間が大きい場合ほど、最大負荷電力の比が大きくなることが分かる。また、一次回帰による相関係数がモルタル練混ぜ時で 0.940, コンクリート練混ぜ時で 0.915 と大きく、強い相関が認められる。同様に、図-13, 14

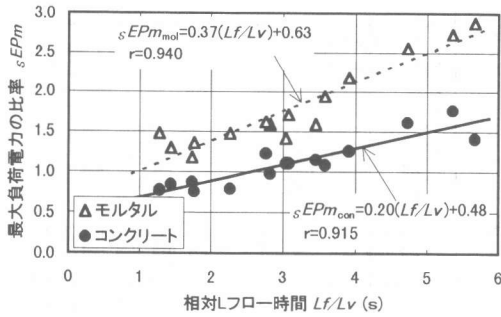


図-12 相対 L フロー時間 L_f / L_v と最大負荷電力の比 sEP_m との関係

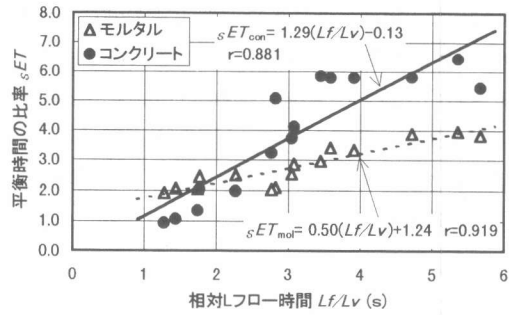


図-13 相対 L フロー時間 L_f / L_v と平衡時間の比 sET との関係

より相対 L フロー時間と平衡時間の比、および消費電力量の比との関係にも強い相関が認められる。

これらのことより、相対 L フロー時間を用いて高強度コンクリートの適正な練混ぜ時間、ミキサの最大負荷電力および消費電力量が予測できると考えられる。さらに、ミキサ機種の違いによる影響、および N50 程度のコンクリートの練混ぜ性能が把握できれば、実機練混ぜ時における高強度コンクリートの練混ぜ性能が事前に推定できると考えられる。

5. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) L フロー値 L_f を L フロー初速度 L_v で除した値 (相対 L フロー時間 L_f / L_v) を用いてコンクリートの塑性粘度が推定できる。
- 2) ミキサの負荷電力、平衡時間、消費電力量は、セメントの種類、および W/C によって異なる。
- 3) 本実験の範囲では、ミキサの負荷電力とコンクリートの降伏値および塑性粘度との関係に相関が認められた。使用材料や調合が異なるコンクリートについて負荷電力を比較する場合には、塑性粘度を要因とした検討が必要である。
- 4) 相対 L フロー時間と N50 に対する最大負荷電力の比、平衡時間の比および消費電力量の比との関係には強い相関が認められる。相対 L フロー時間を用いて、高強度コンクリートの適正な練混ぜ時間、ミキサの最大負荷電力および消費電力量が予測できると考えられる。

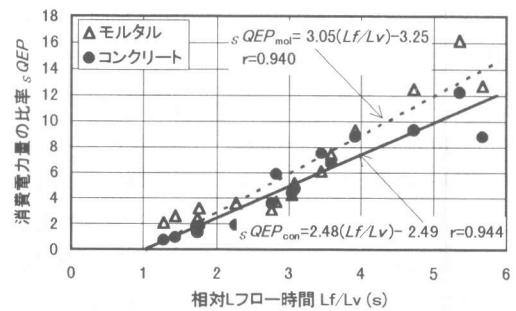


図-14 相対 L フロー時間 L_f / L_v と消費電力量の比 $sQEP$ との関係

参考文献

- 1) 若松岳, 松島博之, 原田暁: ミキサ負荷電流を利用した高流動コンクリートの製造管理の一考察, 第 2 回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp.25~32, 1994.5
- 2) 安田正雪, 樹田佳寛, 阿部道彦: 実機プラントにおける高強度コンクリート製造時の負荷電流 (NewRC 実大施工実験 その 4), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.305~306, 1992.8
- 3) 立山創一, 福岡信: ミキサ負荷電流による高流動コンクリートの製造管理, コンクリート工学年次論文報告集, 第 17 巻, 第 1 号, pp.41~44, 1995.6
- 4) 松田敦夫, 梅本宗宏, 村田浩三: 高流動コンクリートの各種コンシステンシー評価試験方法に関する研究 (その 3: L フロー試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.483~484, 1994.9
- 5) 小村理恵, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 葵英: フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関する研究 (その 1: レオロジー一定数の推定手法), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.519~520, 1994.9
- 6) 西之園一樹, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸: L フロー試験時の粘性体の流動シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.465~466, 1995.8