

論文 高強度および高流動コンクリートのレオロジー性質が 硬化コンクリートの品質に及ぼす影響

寺田謙一¹・谷川恭雄²・森 博嗣³・黒川善幸⁴

要旨：本報告は、中型壁試験体を用いて、高強度および高流動コンクリートのフレッシュ時のレオロジー性質が、圧縮強度およびヤング係数などの品質特性の均質性、ならびに表面の仕上がりにも及ぼす影響について検討したものである。その結果、流動開始位置から5cmまでのLフロー時間 $L_{t,5}$ により評価されるフレッシュコンクリートの性質が、分離抵抗性、鉄筋間通過性および表面気泡の発生などに関係していること、高粉体系高流動コンクリートの均質性の良否の判定は、粗骨材面積率の標準偏差として6%を目安としてよいこと、などが明らかとなった。

キーワード：高流動コンクリート、レオロジー、せん断ボックス試験、分離抵抗性

1. はじめに

高流動コンクリートにおいては、充填性および分離抵抗性をレオロジー的立場から評価することが課題となっている。筆者らは、高粉体系および分離低減剤系の高流動コンクリートについて、中型壁試験体を用いて、各種コンシステンシー評価試験法によるコンクリートの充填性および均質性の評価を試みた¹⁾。本研究では、高流動化した高強度コンクリート、および特殊な混和剤を用いた比較的粘性が低い通常強度の高流動コンクリートに関して、既報¹⁾と同様の試験体を用いて、レオロジー性質とコンクリートの充填性および均質性、あわせてコンクリート表面の気泡の発生量の関係を検討した。

本報告では、コンクリートの均質性および表面の仕上がりに関する検討結果について述べる。なお、充填性に関する検討結果については、すでに報告した²⁾。

2. 実験概要

2.1 コンクリート

表-1に、コンクリートの使用材料を示し、表-2に、コンクリートの調合を示す。調合HSF1およ

びHSF2は、水結合材比 $W/B=28$ および29%の高強度コンクリートを高流動化したもの（以下、高強度と呼ぶ）であり、スランプフロー値を $65\text{cm}\pm 5\text{cm}$ 、空気量を2%として計画した。調合NSFは、水セメント比 $W/C=50\%$ の通常強度の高流動コンクリート（以下、高流動と呼ぶ）であり、スランプフロー値を $60\text{cm}\pm 5\text{cm}$ 、空気量を4.5%として計画した。

練混ぜは、容量 3m^3 の強制2軸ミキサーにより行った。練混ぜ時間は、モルタルで15秒、粗骨材を投入後120秒とした。プラントより実験現場までのコンクリートの輸送時間は、10分程度であった。

2.2 中型壁試験体および実験条件

図-1に、中型壁試験体を示す。試験体は、無筋、標準配筋および過密配筋の3種類とし、壁部分のせき板には、アクリル板およびコンクリート型枠用樹脂コーティング合板を使用した。

表-3に、中型壁試験体の実験条件を示す。因子として、スランプフロー値 S_f 、配筋状態、締固め方法、および型枠用合板への油性剥離剤塗布の有無を取り上げた。スランプフロー値 S_f の水準は、目標スランプフロー値の中心値に近い

*1 (株) 銭高組技術研究所 主席研究員 工修 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)
 *3 名古屋大学大学院助教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)
 *4 名古屋大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

材料区分	記号	種類・銘柄	品質・特徴
セメント	BC	低熱ポルトランドセメント	密度3.24g/cm ³ , 比表面積3100cm ² /g, C _s S61%, C _s S20%
	NC	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ , 比表面積3250cm ² /g
細骨材	S1	青梅産砕砂	比重2.65, f.m.3.25, 吸水率1.99%, 実積率64.3%
	S2	香取郡産山砂	比重2.59, f.m.1.75, 吸水率2.89%, 実積率61.2%
粗骨材	G1	青梅産硬質砂岩砕石	比重2.66, f.m.6.74, 吸水率1.08%, 実積率61.2%
	G2	奥多摩産石灰岩砕石	比重2.68, f.m.6.83, 吸水率0.68%, 実積率62.7%
混和剤	AD1	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物
	AD2	分離低減作用を有する高流動コンクリート用混和剤(一液性)	ポリカルボン酸系化合物
混和材	SF	シリカフューム	濃度50%スラリータイプ

表-2 コンクリートの調合

調合記号	水結合材比 W/B (注1) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 B×% (注1)	
			水	セメント	シリカフューム	細骨材 (注2)		粗骨材
HSF1	28	50.0	165	BC:572	SF:18	827	841(注3)	AD1:2.45
HSF2	29	49.6	165	BC:569	0	816	876(注3)	AD1:2.00
NSF	50	50.7	180	NC:360	0	878	874(注4)	AD2:2.70

(注1)B:セメント+シリカフューム, (注2)容積比S1:S2=0.6:0.4, (注3)容積比G1:G2=0.7:0.3, (注4)G2のみ

もの、および上下限值に近いものとした。スランプフロー値Sfの調整は、混和剤AD1およびAD2の添加量の調整、練置き時間および生コン車への加水(20kg/m³)により行った。

打込み方法については、高強度調合HSF1のAシリーズの場合は、生コン車より直接打ち込んだが、その他のシリーズについては、最大吐出圧力4.4MPa、輸送管径125Aのブーム付ピストン型ポンプ車を用いた。いずれの場合も、打設速度は20m³/h程度とした。図-2に、パイプレータおよび突棒の挿入位置を示す。たつきは、コンクリート型枠用合板の面に対してのみ、木槌を用いて行った。

2.3 測定項目

(1) フレッシュコンクリート

スランプフロー試験、Lフロー試験およびせん断ボックス試験³⁾を行った。図-3に、Lフロー試験器を示す。流動開始位置からの距離が5cmまでの流動時間Lt_{0.5}、同じく5cmから10cmまでの流動時間Lt_{5.10}を測定した。図-4に、せん断ボックス試験の概略を示す。試験装置に強制変位を与えることにより、せん断ひずみ速度を最大1/s程度の範囲まで変化させ、その時のせん断応力を測定する機構になっている。得られたせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を直線回帰し、直線の傾きより塑性粘度 η を、回帰直線の応力軸の

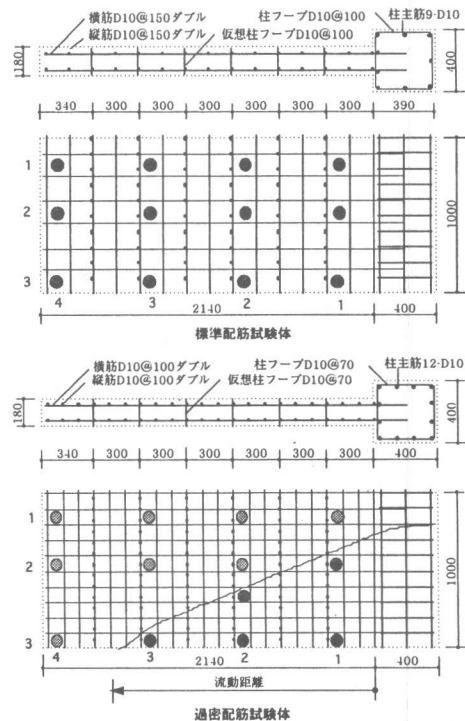


図-1 中型壁試験体

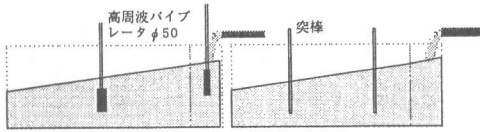


図-2 バイブレータおよび突棒の挿入位置

切片を降伏値 τ_y として求めた。

(2) 硬化コンクリート

コンクリートの硬化後、壁部分より $\phi 75\text{mm}$ のコアを採取し、圧縮強度とヤング係数の力学的特性、および粗骨材分離の評価指標としての粗骨材面積率を測定した。図-1中に、コアの採取位置を示す。高さ方向については、原則として、コンクリート上面に近い部分、下部および中間部の3箇所より採取した。表面の仕上がりについては、壁面に生じた気泡の個数で評価した。気泡個数は、墨汁および石膏により、壁面全体を黒色に、気泡を白色に2値化した後、写真撮影し、それを画像処理して求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 粗骨材面積率の分布

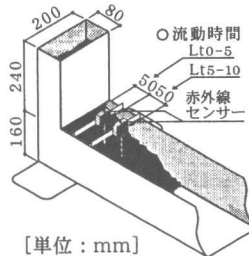
図-5に、粗骨材面積率の平均値の分布を、流動方向および高さ方向について示す。高強度Aシリーズの場合は、流動方向に関する粗骨材面積率の変化は小さく、高強度Bシリーズの場合は、流動方向先端部の粗骨材面積率が小さくなる傾向がある。高流動Cシリーズの場合は、流動距離が大きくなるほど粗骨材面積率は小さくなる傾向が認められる。高流動Dシリーズ場合は、打ち込んだコンクリートが分離傾向にあったが、各試験体ごとの流動方向先端部の粗骨材面積率のばらつきが大きい。

高さ方向についての粗骨材面積率の平均値の分布をみると、高強度Aシリーズの場合は、過密配筋のAH3試験体を除けば、高さ方向の変化は小さい。高強度Bシリーズの場合は、BS1、BS2試験体を除き、上部ほど粗骨材面積率は小さくなっているが、BS1、BS2以外の試験体は、バイブレータによる加振を行っており、その影響と考えられる。高流動Cシリーズの場合は、粗骨

表-3 中型壁試験体の実験条件

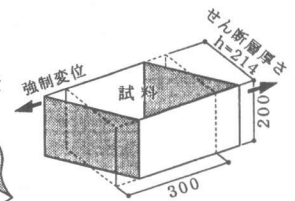
コンクリートの調合	フレッシュ時の性質					試験体				締固め			
	Sf (cm)	L _{t0-5} (s)	L _{t5-10} (s)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)	記号	配筋	剥離剤	加振	つつき	たたき		
高強度HSF1	66.8	0.25	0.29	63.6	63.6	AS1	無筋	○					
						AS2	標準配筋	○					
						AS3	過密配筋	○					
高強度HSF1(加水)	74.8	0.10	0.13	54.3	30.6	AH1	無筋	○					
						AH2	標準配筋	○					
						AH3	過密配筋	○					
高強度HSF2	63.5	0.39	0.42	96.5	32.1	BS1	無筋				○		
						BS2	標準配筋					○	
						BS3	過密配筋		○				
高強度HSF2(経時)	45.5	0.31	0.38	94.2	34.5	BL1	無筋		○		○		
						BL2	標準配筋		○				
						BL3	過密配筋		○			○	
高流動NSF	61.3	0.19	0.08	57.9	17.2	CS1	無筋	○					
						CS2	標準配筋	○					
						CS3	過密配筋	○					
高流動NSF(経時)	53.8	0.23	0.11	69.7	19.6	CL1	無筋	○					
						CL2	標準配筋	○					
						CL3	過密配筋	○					
高流動NSF	62.3	0.05	0.10	64.4	14.2	DS1	無筋	○			○		
						DS2	標準配筋	○				○	
						DS3	標準配筋						○
						DS4	標準配筋						○
高流動NSF	67.0	0.08	0.12	60.6	25.9	DH1	無筋				○		
						DH2	標準配筋						○
						DH3	標準配筋					○	
						DH4	標準配筋						

凡例)Sf:スランプフロー値, L_{t0-5}:0~5cmまでのLフロー時間, L_{t5-10}:5~10cmまでのLフロー時間, τ_y :降伏値, η :塑性粘度, 試験体記号:A,B,C,D:シリーズ名, S:スランプフロー値標準, L:スランプフロー値下限, H:スランプフロー値上限, 数字:No.



[単位: mm]

図-3 Lフロー試験器



[単位: mm]

図-4 せん断ボックス試験の概略

材面積率の高さ方向の変化は小さいが、コンクリートが分離傾向にあった高流動Dシリーズ場合は高さ方向の変化が大きい。つつきおよびたたきの影響は明確ではない。

3.2 粗骨材の分離とレオロジー性質の関係

(1) 降伏値 τ_y

図-6に、粗骨材面積率の標準偏差とせん断ボックス試験により測定した降伏値 τ_y の関係を示

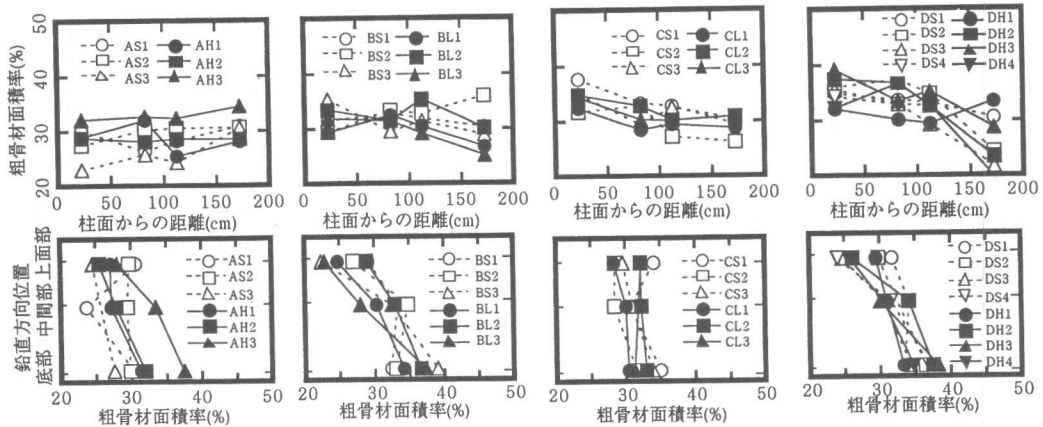


図-5 粗骨材面積率の平均値の分布

す。降伏値 τ_y は、約50~100Paの範囲に分布している。打ち込んだコンクリートが分離傾向にあった高流動Dシリーズの標準配筋試験体、および高強度Bシリーズのバイブレータによる加振を行った試験体の粗骨材面積率の標準偏差が大きい傾向にある。締固めを行わなかった高強度Aシリーズ、高流動Cシリーズおよび高流動Dシリーズの無筋試験体の場合は、粗骨材面積率の標準偏差は、降伏値 τ_y にかかわらずほぼ一定である。図-7に、粗骨材面積率の標準偏差とスランプフロー値Sfの関係を示す。スランプフロー値は降伏値 τ_y に関連のある指標であり、スランプフロー値が小さいほど降伏値 τ_y は大きくなるが、粗骨材面積率の標準偏差とスランプフロー値の関係は、図-7に示した降伏値 τ_y の場合と同様の傾向を示している。

これらのことから、本来は粗骨材の分離には降伏値 τ_y が大きく影響すると考えられるが、この実験の範囲では、降伏値 τ_y が粗骨材の分離に及ぼす影響は小さい。すなわち、降伏値 τ_y が小さい高流動コンクリートにおいては、分離抵抗性には降伏値 τ_y だけでは評価できないレオロジー性質が大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

(2) 塑性粘度 η

図-8に、粗骨材面積率の標準偏差とせん断ボックス試験により測定した塑性粘度 η の関係を示す。塑性粘度 η は、約10

~70Pa・sの範囲に分布しているが、高強度調合と高流動調合の塑性粘度 η の範囲は、明らかに異なっている。高強度調合の場合、バイブレータによる加振を行った試験体を除くと、粗骨材面積率の標準偏差は、塑性粘度 η にかかわらずほぼ一定である。高流動調合の場合は、ばらつきが大きく、粗骨材面積率の標準偏差と塑性粘度 η の間に相関は認められない。

図-9に、粗骨材面積率の標準偏差とLフロー時間 $L_{t_{5,10}}$ の関係を示す。また、図-10に、粗骨材面積率の標準偏差とLフロー時間 $L_{t_{0,5}}$ の関係を示す。Lフロー時間は、塑性粘度 η に関連のある指標であり、Lフロー時間が大きいほど塑性粘度 η は大きくなる。Lフロー試験では、流動時間を測定する範囲として、流動速度が一定となる流動開始位置からの距離が5cmから10cmまでの流動時間を測定し、粘度の指標とするのが一般的である⁴⁾。図-9の粗骨材面積率の標準偏差と $L_{t_{5,10}}$ の関係は、高強度調合のバイブレータによる加振を行った試験体を除くと、図-8に示した粗骨材

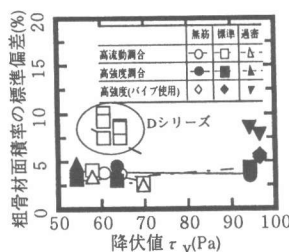


図-6 粗骨材面積率の標準偏差と降伏値 τ_y の関係

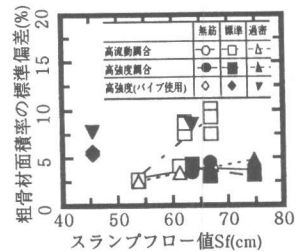


図-7 粗骨材面積率の標準偏差とスランプフロー値Sfの関係

面積率の標準偏差と塑性粘度 η の関係と比較的類似している。

図-10に示した $L_{t_{0.5}}$ の場合は、高流動CおよびDシリーズの標準配筋試験体においては、 $L_{t_{5.10}}$ の場合と異なり、 $L_{t_{0.5}}$ が大きいほど粗骨材面積率は小さくなっている。また、無筋試験体の場合は、 $L_{t_{0.5}}$ にかかわらず粗骨材面積率の標準偏差はほぼ一定である。高強度調合の場合は、 $L_{t_{5.10}}$ とほぼ同様の傾向にある。

以上のことから、降伏値 τ_y の場合と同様に本実験の範囲内では、塑性粘度 η についても粗骨材の分離に及ぼす影響は小さいことがわかる。 $L_{t_{5.10}}$ よりも流動初期のLフロー時間 $L_{t_{0.5}}$ の方が、配筋試験体における粗骨材面積率の標準偏差の違いをよく評価できていることから、Lフロー時間 $L_{t_{0.5}}$ に表れるコンクリートの特性、例えば附着抵抗性などが、分離抵抗性あるいは鉄筋間通過性に大きく影響していると考えられる。

3.3 粗骨材の分離と力学的特性の関係

図-11に、圧縮強度の変動係数と粗骨材面積率の標準偏差の関係を示す。高流動調合の場合、粗骨材面積率の標準偏差が大きいほど、すなわち分離の程度が大きいほど圧縮強度の変動係数は小さい傾向にある。

図-12に、ヤング係数の変動係数と粗骨材面積率の標準偏差の関係を示す。粗骨材面積率の標準偏差が大きいほどヤング係数の変動係数は大きい傾向にある。全体的にみると、高強度調合よりも高流動調合のヤング係数の変動係数の方が大きい。本実験と同様の中型壁試験体を用いた、高流動コンクリートに関する実験結果について述べた既報¹⁾では、粗骨材量が $0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ の場

合、ヤング係数の変動係数6%に対応する粗骨材面積率の標準偏差を6%とし、粗骨材面積率の標準偏差がそれ以上になった場合に均質性が損なわれていると評価した。本実験では、高強度調合に関しては既報¹⁾ とほぼ同様の結果となっているが、高流動調合の場合は、粗骨材面積率の標準偏差が6%以下でもヤング係数の変動係数は6%よりも大きく、既報¹⁾ の評価指標が適用できないことを示している。主として混和剤AD2によって流動性および分離抵抗性が付与された本実験で用いた高流動コンクリートにおいては、硬化後まで含めた性質が、既報¹⁾ における高粉体系および分離低減剤系高流動コンクリートの性質と異なっているものと推察される。

いずれにしても、粗骨材面積率の標準偏差、すなわち粗骨材分離の程度と圧縮強度の変動係数との相関は弱く、コンクリートの均質性を評価する場合には、品質特性として粗骨材分離と相関のあるヤング係数を取り上げるのが適切である。高強度調合の結果から判断すると、高粉体系高流動コンクリートの均質性の良否の目安としては、既報¹⁾ で述べたヤング係数の変動係数が6%になる粗骨材面積率の標準偏差6%が、ほぼ妥当な値であると考えられる。

3.4 表面の気泡

高流動調合の場合、つつき、たたきおよび剝離剤塗布の有無による気泡発生数の明確な違いは認められなかった。高強度調合の場合、パイプレータによる加振の効果が認められ、加振した試験体の気泡発生数は比較的少なかった。

図-13に、壁単位面積当たりの気泡個数とLフロー時間 $L_{t_{5.10}}$ の関係を示す。高強度調合の場

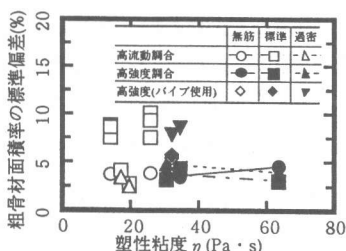


図-8 粗骨材面積率の標準偏差と塑性粘度 η の関係

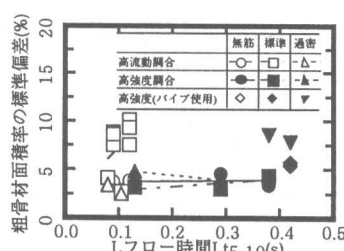


図-9 粗骨材面積率の標準偏差とLフロー時間 $L_{t_{5-10}}$ の関係

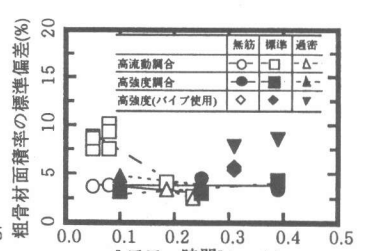


図-10 粗骨材面積率の標準偏差とLフロー時間 $L_{t_{0.5}}$ の関係

合、Lフロー時間 $L_{t_{5-10}}$ が小さいほど、すなわち塑性粘度が η が小さいほど気泡個数は少ない傾向にある。高流動調合の場合、Lフロー時間 $L_{t_{5-10}}$ と気泡個数の間には相関は認められない。図-14に、気泡個数とLフロー時間 $L_{t_{0-5}}$ の関係を示す。高流動調合の場合、Lフロー時間 $L_{t_{0-5}}$ が大きいかほど気泡数も多くなるが、その傾向は配筋量により異なり、無筋、標準配筋、過密配筋の順に気泡数の増大量が大きい。配筋量により気泡発生数が異なる原因としては、配筋量の違いによりコンクリートの流動速度が異なり、配筋量が少ないほど流動速度が速くなり、気泡が上昇できずに型枠面に取り残されることによとも考えられる。高強度調合の場合も、気泡個数は、計画空気量が大きい高流動調合の場合より増大の割合は小さいが、Lフロー時間 $L_{t_{0-5}}$ 大きいほど多くなる傾向にある。これらのことから、Lフロー時間 $L_{t_{0-5}}$ は、 $L_{t_{5-10}}$ に表れないフレッシュコンクリートの性質、例えば付着特性などの違いを表しているとも考えられる。

4. まとめ

高強度および高流動コンクリートを用いた中型壁流動実験の結果をまとめると、以下のようである。

- 1)スランプフロー値の範囲が45~75cmの本実験で用いた高流動コンクリートの降伏値は、約50~100Paの範囲にあった。また、塑性粘度は約10~70Pa・sの範囲にあった。
- 2)降伏値および塑性粘度が粗骨材の分離に及ぼす影響は、本実験の範囲内では小さかった。
- 3)流動開始位置から5cmまでのLフロー時間 $L_{t_{0-5}}$ により評価される付着抵抗性などのフレッシュコンクリートの性質が、分離抵抗性、鉄筋間通過性および表面気泡の発生などに関係して

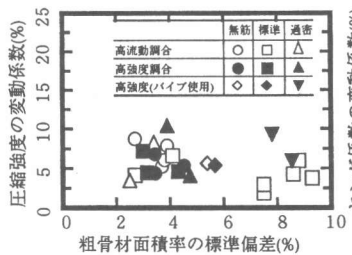


図-11 圧縮強度の変動係数と粗骨材面積率の標準偏差

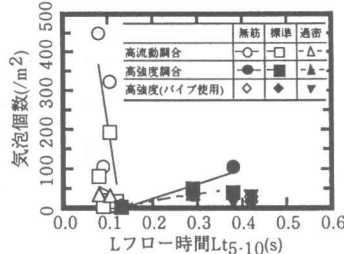


図-13 気泡個数とLフロー時間 $L_{t_{5-10}}$ の関係

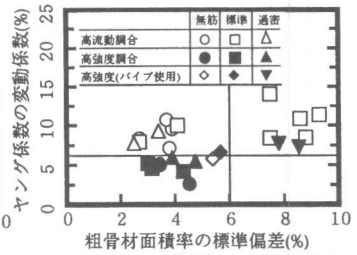


図-12 ヤング係数の変動係数と粗骨材面積率の標準偏差

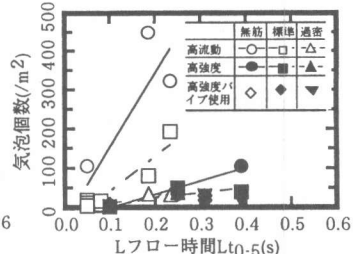


図-14 気泡個数とLフロー時間 $L_{t_{0-5}}$ の関係

いる。

- 4)高粉体系高流動コンクリートの均質性の良否の判定は、粗骨材面積率の標準偏差として6%を目安としてよい。

【参考文献】

- 1) 谷川恭雄ほか：高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法（その1-12），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.183-206，1995.8.
- 2) 寺田謙一・森 博嗣・黒川善幸・北大路洋：高流動コンクリートの中型壁型枠内打設に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.145-150，1997.6.
- 3) 寺田謙一，谷川恭雄，森 博嗣，黒川善幸，三島直生，若林信太郎，田倉政典：モデル材料を用いたフレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する実験的研究（その1~その3），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp.705-710，1997.9.
- 4) 谷川恭雄・森 博嗣・黒川善幸：粘塑性流動解析手法によるL型フロー試験時のコンクリートの流動シミュレーション，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.270-275，1995.12.