

[1041] 流動化した高強度軽量コンクリートの材料分離に関する一実験

正会員 ○河井 徹 (清水建設 技術研究所)

正会員 岡田武二 (清水建設 技術研究所)

1. まえがき

土木学会および建築学会では、流動化コンクリートのスランプを、それぞれ18cmおよび21cm以下と規定している。それ以上に流動化したコンクリートは材料分離が問題になるからである。しかし、粘稠剤を適度に混入すれば、締固めが不要な程度まで流動化しても、十分な材料分離抵抗性が発揮されることが、最近の水中コンクリートの研究で明らかにされている。

これからの土木構造物の施工では、高強度の軽量コンクリートをパイプレータによる締固めなしで、打込むことが要求される場合がある。

そこで、筆者らは、粘稠剤を混入した高強度軽量コンクリートを、締固めが不要な程度の高流動域まで流動化させて、そのコンクリートの流動性の保持時間、落下による鉛直方向の材料分離の程度、およびコンクリートを自重で流動させた時の水平方向の材料分離特性等の諸品質を実験により確認した。そして、粘稠剤の材料分離低減効果を確認するとともに、コンクリートの流動性と材料分離がコンクリートの諸品質に与える影響を明確にした。本論文は、これらの実験結果および実験を通して得られた知見に関して報告するものである。

2. 実験の概要

2.1 使用材料と配合

実験に使用した配合を表-1に示す。セメントはD社製の高炉セメントB種(スラグ分量55%)を、混和材SFはN社製のシリカヒューム(比重2.19、BET法比表面積198400cm²/g)を、細骨材は鹿児島産丘砂(比重2.58、粗粒率2.70)を、粗骨材はNM社製の膨張性頁岩を主成分とする造粒型人工軽量粗骨材(絶乾比重1.28、24時間吸水率5.7%、粗粒率6.44)を絶乾状態で使用した。粘稠剤HはS社製の水溶性高分子エーテル(2%水溶液粘度30000CPS)であり、水に対する混入率を表-2に示すようにAおよびB配合で3水準とした。AE剤はY社製の主成分が天然樹脂酸塩のものをセメントに対して0.075%混入してベースコンクリートの空気量を7.5±1%とした。高強度用減水剤MTはK

表-1 コンクリートの配合

配 合	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プの 範 囲 (cm)	空気量 の 範 囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 SF
A	15	9.5±1	7.5±1	28.9	38.0	145	502	589	478	50
B						145	502	613	498	0

(注) スランプおよび空気量はベースコンクリートの値。

主成分がナフタリンスルホン酸塩系のスランプロス低減型のものを表-2に示す水準で使用した。

表-2 混和剤の組合せ

配 合	粘 稠 剤 の 混 入 率 H/W(%)	流動化剤の 添 加 率 SP/C(%)
A	0	0.6
	0.02	1.1
	0.04	1.6
B	0	0.7
	0.03	1.2
	0.06	1.6

(注) A配合 H/W=0%のときのみ SP/C=1.0%を実施

2.2 実験方法

ベースコンクリートは強制練りミキサで2分間練り混ぜた。スランプ、空気量、単位容積重量を測定後、直ちに可傾式ミキサに移し、流動化剤を添加後、5.3rpmの回転数で15分間練り混ぜて流動化した。この方法は、実施工において、コンクリートを運搬時のエネルギーに

より流動化させる方法を再現したものである。練りませ中に軽量粗骨材が吸水する水量（絶乾重量の3%）は予め練りませ水に混入しておいた。流動化コンクリートの試験は以下のようにした。練りませ直後のコンクリートについて、スランプ、スランブフロー、空気量、単位容積重量の試験を行った。また、練りませ後3時間まで30分ごとに、静置したコンクリートのスランプおよびスランブフロー試験を行って、流動性の変化を調べた。この場合、顕著な材料分離が認められる配合もあったため、コンクリートは練直してから試験した。圧縮強度はφ10cm×h20cmの寸法でJIS A 1132に準じて作製した供試体（以下、標準供試体と呼ぶ）の他、A配合のH/W=0%および0.04%の配合に対しては、締固めを行わずにコンクリートの自重流下で作製した供試体でも試験した。コンクリートの鉛直方向の材料分離を調べる目的で、φ10cm×h100cmの塩ビ管内にコンクリートを上部から落下させて打込み、材令7日で図-1に示す寸法に切断した各供試体（以下、コアと呼ぶ）の単位容積重量を測定した。本数は各配合とも2本とした。材料分離の程度は各コアの長さの重みを考慮した単位容積重量の標準偏差を示す(1)式で表した。

$$\sigma_{cd} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 k (W_i - \bar{W})^2}{18}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

W_i : 図-1の①のコアの単位容積重量 (t/m³)、 $\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^7 k W_i}{18}$
 $i=1、7$ 、の時 $k=1$ $i=2、4、6$ の時 $k=4$
 $i=3、5$ の時 $k=2$

②、④、⑥のコアは、その後20±1℃の水中で養生して、材令28日で圧縮強度試験を行った。

次に、コンクリートを自重で水平方向に流動させた時のコンクリートの流動と材料分離の特性を調査する目的で、図-2に示すような流動実験をA配合で行った。つまり、流動化したコンクリートを45cm×30cmの柱状のA部に高さ1mまで静かに充填した後、仕切り箱Bを徐々に引上げ、A部のコンクリートを自重で流動させた。流動停止後、流動距離、流動勾配を測定した。また、基点と先端位置および流動距離1mごとに20ℓのコンクリートを採取し、各試料のコンクリートとモルタルの単位容積重量および単位粗骨材量を測定した。材料分離の程度は各試料の値を x_i として、コンクリートおよびモルタルの単位容積重量の標準偏差を σ_c 、 σ_m 、単位粗骨材量の変動係数を CV_g とした。

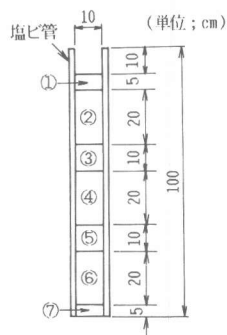


図-1 材料分離実験

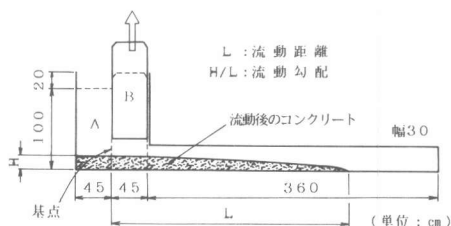


図-2 流動実験の概要

表-3 フレッシュコンクリートの諸物性値

配合	H/W (%)	MT/C (%)	SP/C (%)	ベース		流動化後			
				スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	単重 (t/m ³)
A1 A1'	0	0.95	0.6	10.5	7.5	25.5	51.0	8.0	1.787
A2			1.0	8.5	7.4	26.5	61.0	8.3	1.787
A3			1.1	8.5	7.9	27.5	69.0	8.7	1.752
			1.6	9.5	7.3	28.0	75.0	8.5	1.761
A4 A5 A6	0.02	1.00	0.6	10.5	7.4	25.0	43.0	9.1	1.783
			1.1	10.5	8.0	27.0	68.0	8.7	1.785
			1.6	8.5	7.4	28.0	72.0	8.6	1.769
A7 A8 A9	0.04	1.05	0.6	10.0	8.1	23.5	39.0	9.0	1.782
			1.1	10.5	7.2	26.0	54.0	9.5	1.785
			1.6	10.5	8.4	27.0	57.0	9.7	1.779
B1 B2 B3	0	0.8	0.7	9.0	8.0	27.0	67.0	8.3	1.779
			1.2	9.5	8.1	28.0	75.0	9.3	1.770
			1.6	9.5	6.9	28.0	78.0	8.3	1.789
B4 B5 B6	0.03	0.95	0.7	9.5	6.5	26.0	58.0	7.8	1.787
			1.2	9.0	6.7	27.5	70.0	7.6	1.773
			1.6	9.5	6.6	27.5	71.0	8.0	1.763
B7 B8 B9	0.06	1.18	0.7	8.5	6.7	23.0	42.0	6.8	1.759
			1.2	9.0	7.0	25.0	51.0	8.4	1.756
			1.6	10.0	6.8	26.5	56.0	7.2	1.769

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの諸物性

フレッシュコンクリートの諸物性値を表-3に示す。ベースコンクリートのスランプを 9.5 ± 1 cmにするのに必要なMT/CはH/Wの増加に伴い増加している。これは、粘稠剤の混入により降伏値が上昇したためである。また、粘稠剤の混入により空気量の増加は認められていない。粘稠剤は空気量増加作用があるが、H/Wが0.06%以下であればその作用は無視してよいと判断できる。空気量は流動化により平均1%程度増加しているが、SP/Cが0.6~1.6%の範囲では、空気量の増加量に明確な差は認められていない。

3.2 流動性

スランプとスランプフロー（以下Sfと略す）の関係を図-3に示す。H/Wの値に拘らず、両者は一つの曲線関係を示している。砂利スランプ値¹⁾（スランプコーンと同体積のコンクリート中の粗骨材を絶乾状態でコーンに詰め、引抜いたときのスランプ値）を越えた高流動域では、コンクリートの流動性をSfで表示すれば、その変化を鋭敏に反映できるといえる。

Sfの経時変化を図-4および図-5に示す。流動化直後のSfはSP/Cの増加に伴い増加するが、H/Wの増加に伴い減少している。つまり粘稠剤の混入により流動化効果が低減することがわかる。時間経過に伴うSfロス（SP/Cが大きいほど少なくなっている。SP/C=1.6%およびB配合のSP/C=1.2%では、流動化終了後もSfが多少増加しており、90~120分後に流動化直後の値に戻っている。また、A配合でSP/C=1.1%の場合は、Sfロスが多少認められるが、1時間後のSfは50cm以上を示している。粘稠剤の混入がSfの経時変化に与える影響をみると、A配合ではほとんど影響がないが、B配合の場合は、経過時間が1時間以上の時、Sfロスの低減効果が認められている。

3.3 材料分離と圧縮強度

図-6にSfと塩び管内コアの単位容積重量の標準偏差 σ_{cd} との関係を示す。Sfが70cm程度まではSfの増加に伴い σ_{cd} は徐々に増加するが、Sfが70cm以上では、B配合の σ_{cd} が大幅に増加している。B配合でSfが70cm以上のコンクリートは顕著な材料分離が生じていることがわかる。つまりコア①は

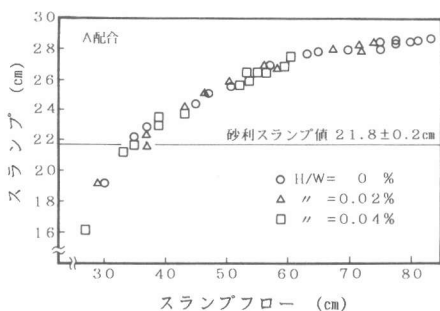


図-3 スランプフローの適用範囲

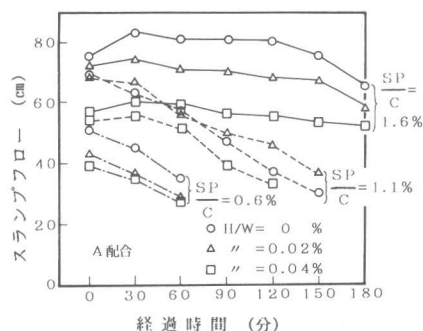


図-4 スランプフローの経時変化

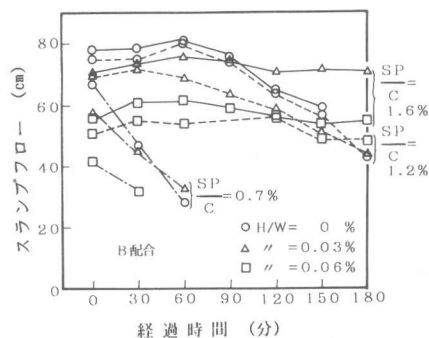


図-5 スランプフローの経時変化

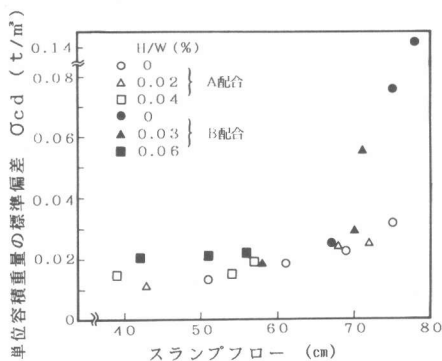


図-6 スランプフローと材料分離との関係

粗骨材が多く、コア⑦はモルタル分が多いコンクリートである。A配合とB配合では、同一のSfではA配合の方が σ_{cd} が小さい。これはA配合の方が、水結合材比 $W/(C+SF)$ が小さいためにコンクリートの粘性が高くなり、材料分離抵抗性が増したためであると考えられる。

図-7に σ_{cd} と塩ビ管内のコア②、④、⑥の平均圧縮強度 f'_c との関係を示す。コアの圧縮強度は、 H/W 、 SP/C の値に拘らず σ_{cd} が 0.03 t/m^2 程度までは σ_{cd} の増加に伴い低下している。つまり、コアの平均圧縮強度は材料分離の程度にはほぼ比例して低下していることになる。

図-8～10に、材令28日における標準供試体の圧縮強度 f'_s と SP/C および Sf との関係を示す。

図-8において、圧縮強度は、A配合で $f'_s=332\sim 539\text{ kgf/cm}^2$ 、B配合で $f'_s=283\sim 543\text{ kgf/cm}^2$ であり、混和剤の混入により大きく変化している。A、B両配合とも H/W の値に拘らず、 SP/C の増加に伴い圧縮強度が大幅に低下している。表-3から SP/C が増加しても空気量がほとんど変化していないこと、および流動化剤中に含まれる水が水セメント比の変化に及ぼす影響は、AおよびB配合でそれぞれ、約0.7%および約0.6%であることを考慮すると、強度低下の要因が何か他に存在することになる。なお粘稠剤の混入によりその強度低下を抑制する傾向が認められる。以下、それらの要因について考察する。

図-9、10において、同一の H/W では Sf の増加に伴い圧縮強度が低下している。特に Sf が70cm前後を越えたとその傾向が顕著となっている。図-9において自重流下で作製した供試体は Sf が50cm以上では標準供試体より圧縮強度が高く、しかも Sf の増加に伴いその差が大きくなっている。つまり、標準供試体は、棒つきと軽打により生じる材料分離に起因する強度低下の影響を含んでいることがわかる。また、 Sf が50cm以上であれば、セルフコンパクティング性を示すことがわかる。

以上より、 SP/C の増加により f'_s が低下する原因は Sf の増加による材料分離のためであると判断される。

図-11に σ_{cd} と f'_s との関係を示す。図-7と図-11では多少傾向が相違している。そこで、コアと標準供試体の圧縮強度比 f'_c/f'_s と σ_{cd} との関係を図-12に示す。圧縮強度比は、ほとんどの値が1.0以下であり、 σ_{cd} が

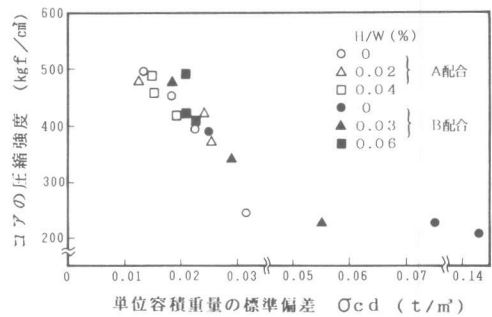


図-7 材料分離とコアの圧縮強度との関係

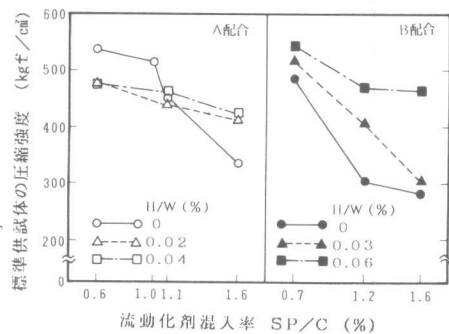


図-8 混和剤が圧縮強度に与える影響

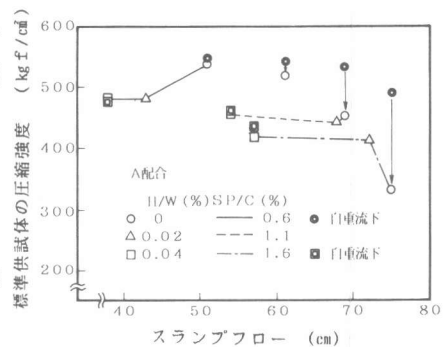


図-9 流動性と圧縮強度との関係

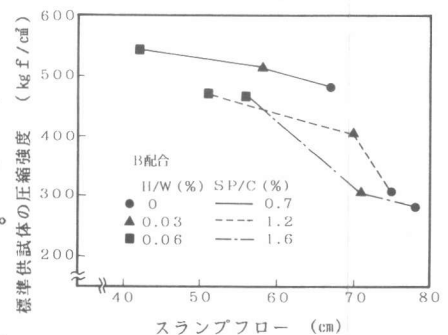


図-10 流動性と圧縮強度との関係

0.03 t/m²程度までは圧縮強度比が低下している。このことは塩び管内に落下させることにより生じる材料分離の程度は、標準供試体作製時の棒突きと軽打により生じる材料分離の程度より大きいことを示している。また、その影響は σ_{cd} が増加するほど、つまり材料分離し易いコンクリートほど受け易いことを示している。

ここで、粘稠剤が圧縮強度に与える影響について考察する。図-9、11において同一のSfおよび σ_{cd} の場合、A配合では粘稠剤を混入したものは粘稠剤無混入のものに比較して、圧縮強度が低下している。しかし、図-7のコアの圧縮強度ではその傾向が認められていない。図-12において、A配合で粘稠剤を混入した場合、 σ_{cd} が0.02 t/m²程度まではその比は1.0に近い。このことはA配合で粘稠剤を混入した場合、 σ_{cd} が0.02 t/m²程度以下の場合、落下高さが最大1 m、平均55 cm程度の落下であれば、標準供試体と同程度の圧縮強度が確保されることを示している。この時のSfは図-6から65 cm程度以下と判断される。また粘稠剤無混入の場合は圧縮強度比が低下しており、落下による材料分離の影響が大きい。なおB配合は、試料数が少ないため粘稠剤混入の有無の影響は不明であるが、A配合と比較的似た傾向にあると判断される。以上の結果、粘稠剤の混入によりコンクリートの圧縮強度は低下するが、落下させた場合の材料分離に対する抵抗性は増加することがわかった。

以上より、粘稠剤を適量混入し、Sfが50~65 cm程度のA配合は、セルフコンパクティング性と落下に対する材料分離抵抗性を有していることがわかった。

3.4 流動実験

図-13、14にSfと流動距離およびSfと流動勾配との関係を示す。両者ともSfの増加に伴う増加傾向は、H/Wの値に関係していない。つまり、流動距離と流動勾配は、粘稠剤の有無に関係なく、Sfで一義的に定まっている。図-14から、Sfが50~65 cmの時の流動勾配は1/20~1/50であることがわかる。流動勾配は流路の側面および底面抵抗により変化するので、打込み高さ、或は部材厚さが実験条件より大きい場合は、流動勾配はさらに小さくなると想定される。

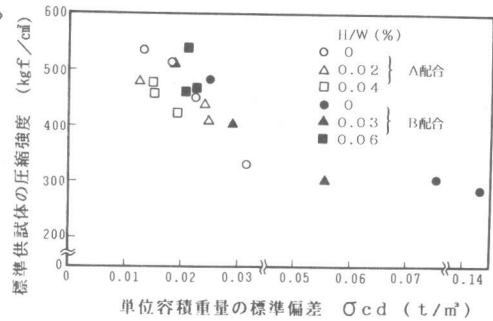


図-11 材料分離と圧縮強度との関係

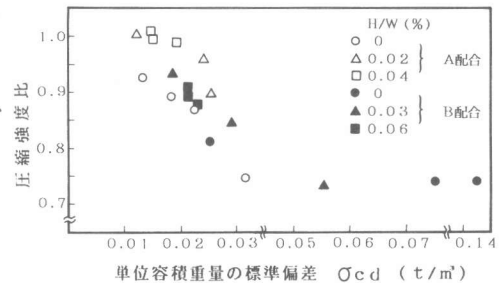


図-12 材料分離と圧縮強度比との関係

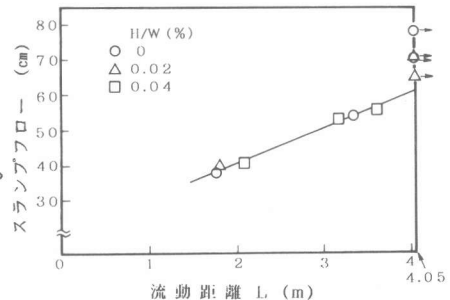


図-13 流動距離の変化

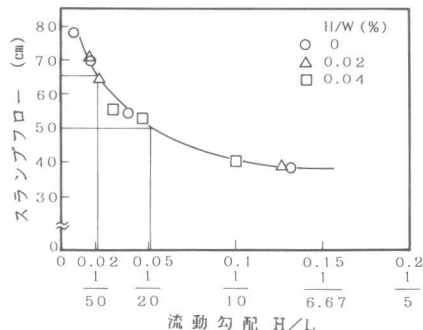


図-14 流動勾配の変化

図-15にSfと流動距離別試料の単位粗骨材量の変動係数CV_gとの関係を示す。CV_gはH/Wの値に拘わらずSfが53cm程度を越えると直線的に上昇している。これは、Sfの増加に伴い、流動するコンクリートの上部層は軽量粗骨材が多く、下部層はモルタル分が多くなり、流路の底面抵抗により下部層よりも、上部層のコンクリートが先行して流れた結果、先端部の単位粗骨材量が増加したためである。

図-16、17に、モルタルとコンクリートの流動距離別試料の単位容積重量の標準偏差 σ_m および σ_c とSfとの関係を示す。図-16で、 σ_m はSfが70cm程度までは直線的に微増している。つまり、Sfが53~70cm程度の範囲では、単位粗骨材量の変動は大きくなるが、モルタルの単位容積重量の変化は少ないことがわかる。また、図-16から同一のSfに対して σ_m はH/Wの値が大きいくほど小さくなる傾向が認められる。このことは粘稠剤がモルタルの材料分離を抑制していることを示している。

図-17から、当然のことながら、 σ_c は σ_m とCV_gの両者の変化と特徴を複合した変化を示していることがわかる。また σ_c はSfが65cm程度までは0.02 t/m³以内に収まっており、Sfが65cm程度を越えると材料分離が大きくなることがわかる。

ここで、図-15、16から粘稠剤を混入した配合でSfが65cmの時は、 $\sigma_m=0.016$ t/m³およびCV_g=4%の値が得られる。これらの値から判断すると、Sfが65cm以下であり、粘稠剤を適当量混入したコンクリートは、水平方向に自重で流動させた時も、有害な材料分離が生じていないと判断される。

4. 結 論

高流動化した高強度軽量コンクリートに関する本実験の範囲で以下のことが明らかになった。

- (1)コンクリートを鉛直方向に打込むと、粗骨材が上部に移動する。スランプフローが70cmを越えるとコンクリートの材料分離が顕著となる。また材料分離の増加に伴い圧縮強度が低下する。
- (2)コンクリートを水平方向に流動させた場合、先端部のコンクリートは単位粗骨材量が多くなる。この場合、単位粗骨材量およびモルタルの単位容積重量の変化を含めたコンクリートの材料分離は、スランプフローが65cmを越えると顕著になる。
- (3)粘稠剤を適当量混入させると、コンクリートを鉛直方向に打込んだ場合の圧縮強度の低下の抑制およびコンクリートを水平方向に流動させた場合の材料分離の低減に有効である。

5. 参考文献

- 1) 長瀬重義、他：高流動域にあるコンクリートの流動特性とその評価、フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集。土木学会、p.p.23-28, 1981。

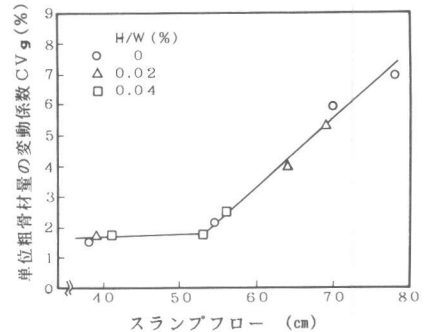


図-15 単位粗骨材量の変化

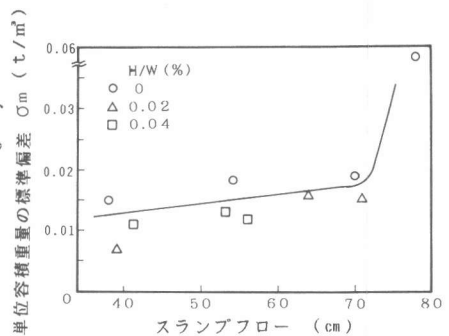


図-16 モルタルの材料分離の変化

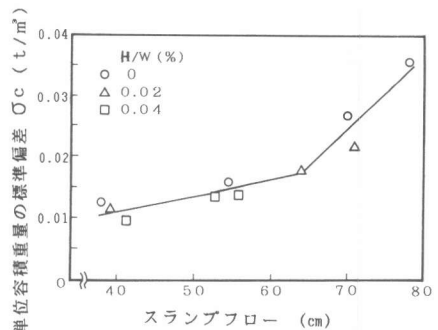


図-17 コンクリートの材料分離の変化