

論文

[1019] シリカフェームを混入した高強度コンクリートの品質管理手法に関する研究

正会員○岩清水隆（竹中工務店技術研究所）

正会員 吉岡保彦（竹中工務店技術研究所）

正会員 三井健郎（竹中工務店技術研究所）

1. はじめに

近年、RC高層集合住宅等の需要の増加から、コンクリートの設計基準強度は高強度化し、 $F_c = 420 \sim 480 \text{ kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートが施工されている。コンクリートの強度はさらに高強度化する傾向を示しており、近い将来、設計基準強度 600 kgf/cm^2 以上の高強度コンクリートが施工されることが予想される。しかし、このような高強度化を実現するためにはシリカフェーム等の高強度用混和材の利用が不可欠である。さらに、このような高強度コンクリートを実際に施工するためにはその強度に対応して厳密な品質管理が必要となる。

本研究はシリカフェーム(SF)を用いた高強度コンクリートの品質管理のうち、コンクリート受け入れ時のSF混入率、水結合材比($W/(C+SF)$)及び顆粒状シリカフェームを用いた場合の顆粒分解率の早期判定方法に関して基礎的検討を行ったものである。

2. 測定方法

2.1 結合材量

セメント(C)とSFの総量(結合材量)の判定は、コンクリートからふるい分けたモルタルの懸濁液の比重から求めることとした。

2.2 SF混入率

SFはセメントの $1/100$ 程度の径を持ち SiO_2 を主成分とする超微粒子であり、通常、セメントに対して重量比で $10 \sim 20\%$ 程度混入されるのが一般的である。一方、SFはフライアッシュと同様のポゾラン材であるため、混入率が適切でないとコンクリートに悪影響を及ぼすことになる。そのため混入率を管理する必要があるが、コンクリートからSFを化学的手法により検出することは、主成分である SiO_2 がコンクリートの使用材料である骨材中にも含まれるため非常に困難である。そこでNavier-Stokesの式より、粒径の差による水中での沈降速度の違いを利用して混入率を判定する方法¹⁾の検討を行った。

SFはコンクリートに利用する場合、取扱いを容易にするためスラリー状にするか顆粒状にして用いられている。顆粒状のSFはコンクリートとして練り混ぜられた場合、顆粒が分解すると言われているが、事前に顆粒を分解することは非常に困難である。SFの混入率を判定するための検量線を作成するためには事前に十分に分解しておく必要があるため、超音波洗浄器(出力 1200W)を顆粒状SFの分解に利用することとした。

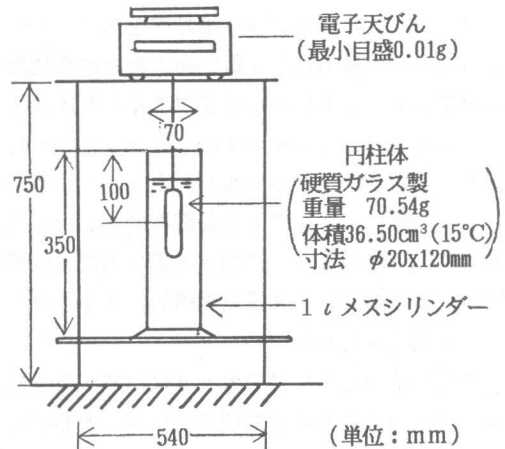


図-1 測定装置の概要

S Fとセメントの沈降速度の違いはコンクリートから採取したモルタルの懸濁液の比重の変化から検出することとした。その際、従来現場でのセメント量の検出のために用いられている浮標比重計を用いると、懸濁液の比重の時間的変化が大きく、一つの比重計では試験精度面で対応し難いこと、比重計の目盛りが読み難いことなど不都合な点が多い。そこで懸濁液中の浮標にかかる浮力を直接計測する方法を考案し適用することとした。

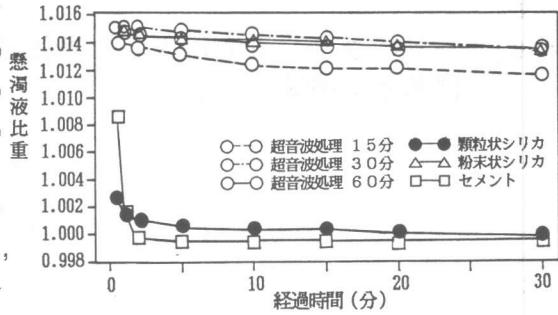


図-2 SF, Cの懸濁液比重の変化

測定装置の概要を図-1に示す。本測定装置は、電子天秤から懸濁液中に吊した円柱体の水中重量と気中重量の差を経時的に測定することにより、円柱体にかかる浮力の変化を検出するものである。測定値の表現は、浮力を円柱体体積で除すことにより15°Cの懸濁液の比重に換算して行うこととした。

図-2はSF及びセメントをそれぞれ30gずつ1リットルメスシリンダーに入れ、水を加え計1リットルとし、30秒間上下転倒攪はん後、懸濁液の比重の変化を測定したものである。セメント及び顆粒状SFは5分程度でほとんど比重変化が終了しているのに対して、超音波洗浄器により処理をしたSFは比重の変化が僅かしかみられない。このことから、セメントとSFの沈降速度には明らかに違いがあり、その違いを利用してのSFの検出が可能であることがわかる。

2. 3 水量

コンクリートの水量は、ふるい分けにより採取したモルタルを高周波加熱装置（電子レンジ、出力500W）により水分を蒸発させることにより検出を行うこととした。その際、細骨材中の水分、セメントの結合水、混和剤の固形分等の重量の補正を行いモルタル中の水量を算出した。

3. 実験1・・・予備実験

本測定法が可能であるかどうかの確認を行うために予備実験を行った。実験方法は、C+SF量を60gから140gまで20gずつ変化させ、各々SFを内割で0, 10, 20%混入したものを表-1に示すコンクリートの調査と砂結合材比が同一となるように細骨材を加え、ピーカーの中で少量の水と分散性向上のため高性能減水剤3mlと共に葉さじで攪はんしモルタル状にしたものを1リットルのメスシリンダーに入れ、水を加え1リットルとした後、ゴム栓をし30秒間に12回の上下転倒攪はんを行った。その後、直ちに図-1に示す装置の所定の位置に円柱体を挿入した状態で静置し、水中重量の変化の測定を行った。

実験に使用した材料を表-2に示す。SFは顆粒状のものを30分間超音波処理したものを用了。

実験結果の一例を図-3に示す。セメントと

表-1 コンクリートの調査

W (C+SF) (%)	S A (%)	単位量(kg/m ³)			
		水	C+SF	細骨材	粗骨材
30	35	175	583	549	1040

* SFはセメントの内割で0, 10, 15, 20%

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (比重3.16)
細骨材	男木島沖 海砂 70% (比重2.55) 赤穂産 砕砂 30% (比重2.59)
粗骨材	赤穂産 砕石 (比重2.63)
シリカフューム	アイスランド産顆粒状シリカフューム (比重2.20)
混和剤	高性能AE減水剤 (アエノ型特殊活性剤)

SFの総重量が同じでも、SFの混入率の違いにより懸濁液の比重の変化に明確な違いが現れている。

図-4はC+SF量と攪はん終了後から30秒後の懸濁液の比重の関係を示したものである。攪はん終了からの時間経過が少ない場合は、C+SF量と懸濁液比重はよい相関を示している。

また、SFはほとんど沈降しないものと考え、懸濁液の比重の変化はセメント及び細骨材中の微粒分等によるものと考えられる。そこで、セメントのみの重量と懸濁液比重の減少量を示したものが図-5である。懸濁液の比重の減少量は30秒後の値を基準にし5分後との差で表した。懸濁液比重の差とセメント量の間にもよい相関が現れているといえる。

予備実験の結果から、攪はん終了後初期の段階でC+SFの量を判定し、5分程度経過した段階でセメント量を判定しその差を求めることによりSF量の判定が可能となることがわかった。

4. 実験2・・・モルタルによる実験

本手法の適用性の検討を行うために、表-1に示す調合のコンクリートから粗骨材を除いたモルタルにより確認実験を行った。

4.1 検量線の作成

コンクリート及びモルタル中のSF量及び結合材量を判定するためには、予めC+SF量及びC量を求めるための検量線を作成しておく必要がある。そこでC+SF量を90gおよび130g、SF混入率を内割で0、10、20%とし、予備実験と同様の方法で懸濁液の比重の測定を行った。

測定から得られた検量線を図-6及び図-7に示す。C+SF量を求めるための検量線を、静置後30秒、1分及び2分で求めたが、測定値のばらつき等を考慮して1分後の値を採用することとした。またC量を求めるための検量線は、1分後の値を基

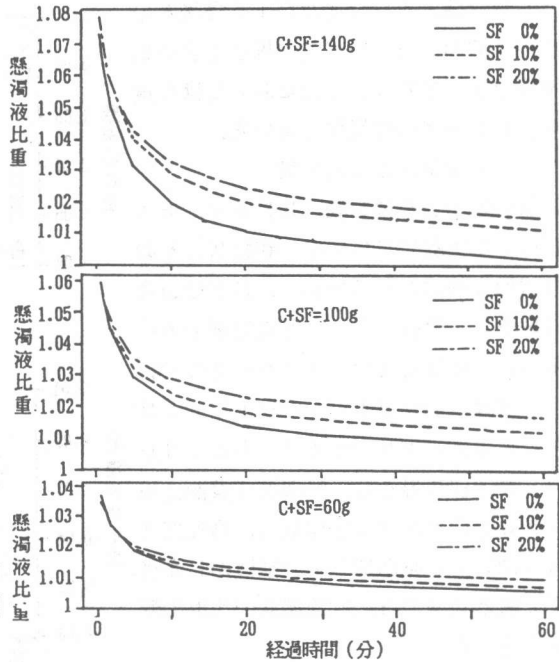


図-3 予備実験結果

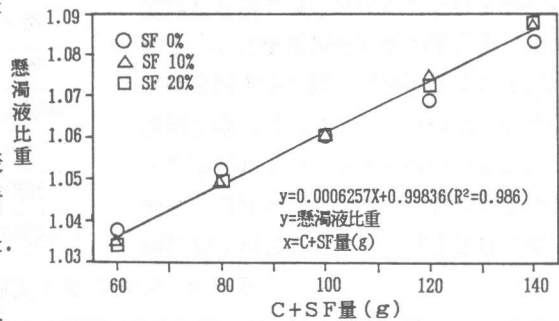


図-4 C+SF量と懸濁液比重の関係

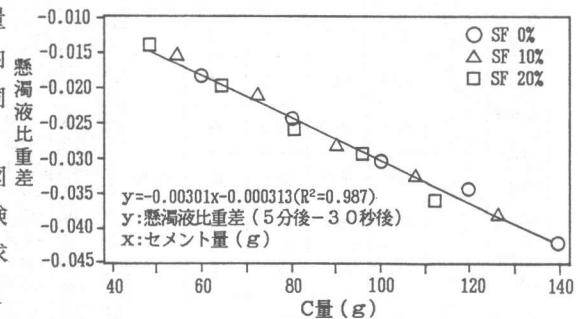


図-5 C量と懸濁液比重差の関係

準とし5分後、10分後及び15分後との比重の差を示した。いずれの場合もよい相関関係を示しており、以後においてはC量の判定に5分後の検量線を用いた。

4. 2 モルタルによる実験

実験の因子と水準を表-3に示す。モルタルによる実験においては、顆粒状SFの分解状態の検討を行うために、SFは超音波処理を30分行ったものと無処理のものを用いた。練り混ぜは、モルタルミキサにおいては練り混ぜ量1.5リットルで120秒、オムニミキサでは4リットルで60秒行った。練り混ぜ後、懸濁液比重測定用に250gのモルタルを採取し、高性能AE減水剤3mlを添加し十分攪はんした後、予備実験と同様の方法で懸濁液の比重の変化を測定した。

表-4に実験結果の一覧を示す。SF混入率については、図-8に示すように、超音波処理を行ったものについてはほぼ設定値に近い混入率の測定が可能であり、本測定法によって正確なSF混入率の測定が可能であることがわかる。しかし、超音波処理を行わなかったものについては設定値より低めの値が得られておりモルタルミキサ等で練り混ぜを行った限りにおいては顆粒

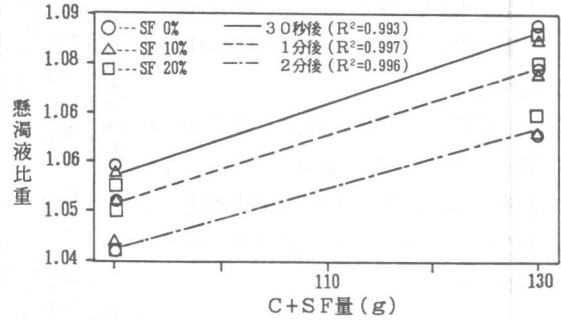


図-6 C+SF量の検量線

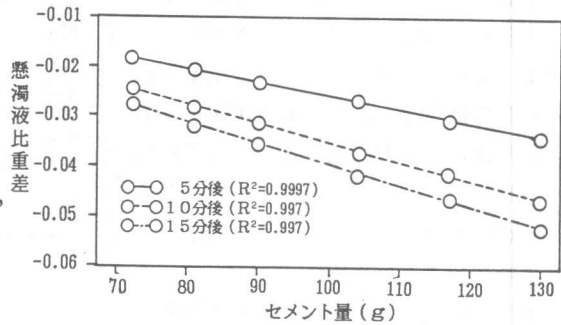


図-7 C量の検量線

表-3 実験の因子と水準 (実験2)

因子	水準
SF混入率(%)	0, 10, 15, 20
ミキサー	・1ℓモルタルミキサ・10ℓオムニミキサ
採取時期	・練り上り直後・60分後
試料の種類	モルタル, コンクリート

表-4 実験結果 (実験2)

No.	SF処理	ミキサの種類	試料の種類	セメント量 (g)	SF量 (g)	SF混入率 (%)	水量 (g)	採取時期	測定結果						圧縮強度 (kgf/cm²)	
									C+SF (g)	C (g)	SF (g)	SF/(C+SF)(%)	W (g)	W/(C+SF)(%)	1週	4週
1	超音波処理	モルタル	モルタル	111.8	0	0	33.55	練り直後	113.8	110.1	3.6	3.2	34.6	30.4	—	—
								60分後	116.2	110.0	6.2	5.3	34.4	29.6	—	—
2	超音波処理	モルタル	モルタル	100.7	11.2	10	33.55	練り直後	112.1	99.9	12.2	10.9	34.3	30.6	—	—
								60分後	110.9	100.1	10.8	9.8	34.1	30.7	—	—
3	超音波処理	モルタル	モルタル	95.1	16.8	15	33.55	練り直後	111.3	93.2	18.1	16.2	33.6	30.2	—	—
								60分後	112.5	95.6	16.9	15.0	33.8	30.0	—	—
4	超音波処理	モルタル	モルタル	89.5	22.4	20	33.55	練り直後	112.1	86.4	25.7	22.9	32.6	29.0	—	—
								60分後	107.8	84.7	23.0	21.4	31.8	29.5	—	—
5	無処理	モルタル	モルタル	95.1	16.8	15	33.55	練り直後	106.3	94.8	11.5	10.8	35.4	33.3	724	892
								60分後	106.0	97.8	8.2	7.7	35.1	33.2	—	—
6	超音波処理	モルタル	モルタル	95.1	16.8	15	33.55	練り直後	110.4	94.6	15.8	14.3	33.3	30.2	867	1039
								60分後	109.8	90.0	19.8	18.0	31.7	28.9	—	—
7	無処理	モルタル	モルタル	95.1	16.8	15	33.55	練り直後	104.4	93.6	10.7	10.3	34.4	33.0	691	918
								60分後	105.3	94.3	11.0	10.4	33.5	31.9	—	—
8	無処理	コンクリート	コンクリート	95.1	16.8	15	33.55	練り直後	108.9	95.7	13.2	12.1	34.6	31.7	—	—
								60分後	109.3	96.1	13.2	12.1	33.1	30.3	—	—

状SFが十分に分解されていないことが推測できる。これは、圧縮強度にも明確に現れており、超音波処理を行ったものは無処理のものと比較し強度が高く現れている。

試料として採取したモルタル中の細骨材量のばらつきを考慮すると、C+SF量は水量との比率で検討することが望ましいと考えられる。さらにコンクリートの水結合材比を判定する目的でセメント及びSF量の測定と同時に高周波加熱法による水量の測定も行った。水量の測定においては、モルタル200gを採取し、電子レンジで5分後から5分ピッチで重量減少量が0.1g以下になるまで測定を行った。

$W/(C+SF)$ の測定値は図-9に示すように超音波処理をしたものについては28.9~30.7%の範囲にあり、精度よく測定が行われているものと考えられる。

電子レンジによる乾燥時間は図-10に示すように、重量変化がなくなるまで15~20分程度であった。しかし、5分で全水量の90~95%が乾燥しており実際に用いる場合には早期に判定することを目的として、5分以下での測定結果を一時判定として利用することも考えられる。また、練り混ぜ直後と60分後でのC、SF、W量の測定値に顕著な違いがみられなかったことから、60分程度以内であれば上記の方法が適用可能であると考えられる。

5. 実験3・・・コンクリートによる実験

顆粒状のSFはコンクリートとして練り混ぜた場合に、粗骨材の機械的な摩擦せん断作用により十分に分解されると言われている。実験3においては、本測定法のコンクリートへの適用性を確認すると共に、コンクリートにおいて顆粒状SFがどの程度分解されているかを知ることが目的として実験を行った。実験の因子と水準を表-5に示す。コンクリートの調査は表-1に示す通りとした。練り混ぜは60リットルパン型強制練りミキサにより30リットルで練り混ぜ時間150秒及び300秒とした。試料はコンクリートを5mmふるいでふるい分け採取した150gのモルタルとした。なお、C+SF量の検量線は1分後、またC量の検

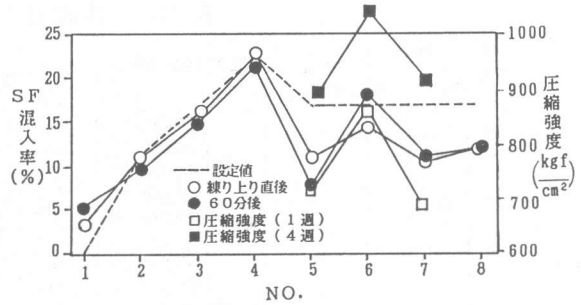


図-8 SF混入率測定結果

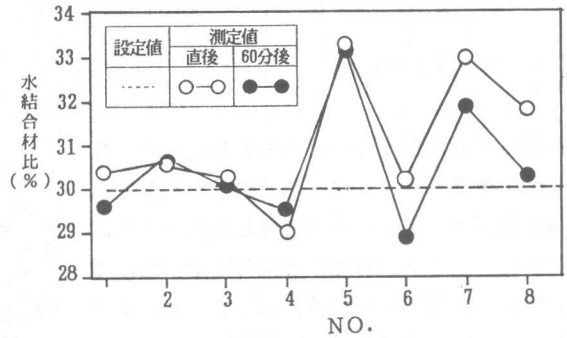


図-9 水結合材比測定結果

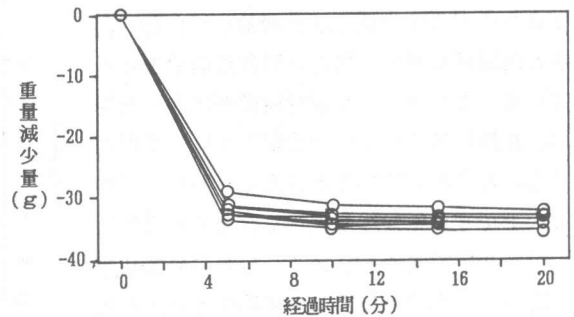


図-10 重量減少量測定結果

表-5 実験の因子と水準(実験3)

因子	水準
SF混入率	0, 10, 15, 20%
測定時期	練り混ぜ直後, 60分後
SF処理	超音波処理, 無処理
練り混ぜ時間	150秒, 300秒

表-6 実験結果 (実験3)

NO.	SF C+SF (%)	計算値 (g)			練り混 ぜ時間 (秒)	SF処理	採取時期	測 定 結 果								圧縮強度 (kgf/cm ²)		
		セメント量	SF量	水量				C+SF (g)	C (g)		SF (g)		SF/C+SF(%)		W (g)	W/C+SF (%)	1週	4週
									5分	10分	5分	10分	5分	10分				
1	0	111.8	0			-	練り直後	117.1	110.2	110.9	6.9	6.2	5.9	5.3	36.3	31.0	678	817
							60分後	117.7	113.0	112.8	4.7	4.9	4.0	4.1	36.2	30.8		
2	10	100.7	11.2				練り直後	116.6	108.9	107.7	7.7	8.9	6.6	7.6	35.8	30.7	-	-
							60分後	111.8	101.8	102.5	10.0	9.2	8.9	8.2	35.6	31.6		
3	10	100.7	11.2			無処理	練り直後	105.5	97.7	96.7	7.8	8.8	7.4	8.3	36.5	34.6	-	-
							60分後	108.6	102.2	99.1	6.4	9.5	7.7	8.7	35.9	33.1		
4	15	95.1	16.8	33.6		超音波 処 理	練り直後	108.6	98.9	98.1	9.7	10.4	8.9	9.6	35.5	32.7	640	813
							60分後	108.1	99.6	98.8	8.5	9.3	7.8	8.6	35.1	32.4		
5	15	95.1	16.8	33.6		超音波 処 理	練り直後	108.7	95.0	93.9	13.7	14.8	12.6	13.6	35.2	32.4	703	900
							60分後	109.1	96.0	94.7	13.1	14.5	12.0	13.3	34.2	31.3		
6	20	89.5	22.4			無処理	練り直後	109.4	98.2	95.5	11.2	14.0	10.3	12.8	34.9	31.9	667	900
							60分後	108.7	94.6	93.8	14.1	14.9	13.0	13.7	34.4	32.7		
7	20	89.5	22.4			無処理	練り直後	108.9	97.2	94.8	11.7	14.1	10.7	12.9	35.2	32.3	-	-
							60分後	109.4	96.6	94.5	12.8	14.9	11.7	13.6	35.7	32.6		
8	20	89.5	22.4			無処理	練り直後	112.6	97.8	95.4	15.0	17.4	13.3	15.5	35.1	31.1	-	-
							60分後	111.3	97.1	94.7	14.2	16.6	12.7	14.9	35.7	32.1		

量線は5分及び10分後のものを用いた。試験結果を表-6に示す。SF混入率及び圧縮強度を図-11に、水結合材比を図-12に示す。コンクリートとした場合は全体的に設定値よりも若干低めの値を示している。また、SF混入率15%の場合に顕著に現れているように、練り混ぜ時間を長くすることによってSFの混入率の測定値が増加しており、超音波処理を行った場合と同程度の値を示している。これは、練り混ぜ時間が短かった場合、顆粒状SFが十分に分解しない可能性があることを示していると言える。特にSFの混入率が20%程度と大きくなった場合には注意が必要であると言える。SFの分解状態の違いから水結合材率も全体的に大きめの値となったものと考えられる。以上のことから、本手法により顆粒状SFを用いたコンクリートに対して、その適切な練り混ぜ時間及び練り混ぜ方法の検討も併せて行えるものと考えられる。

5. まとめ

以上SFを混入した高強度コンクリートの品質管理の一つとして、C+SF量、SF混入率、水結合材率の測定方法について、その適用性に関する検討を行った。SFの混入率に関しては顆粒状SFを用いた場合には顆粒が分解していれば十分満足できる精度で判定が可能であることがわかった。また逆にコンクリート中の顆粒状SFの分解状態の判定にも用いることが可能であることがわかった。さらに、水結合材比の測定も高周波加熱装置により水分量を測定することにより精度よく判定が可能であることがわかった。

〈参考文献〉1) 土の粒度試験法, JIS A 1204

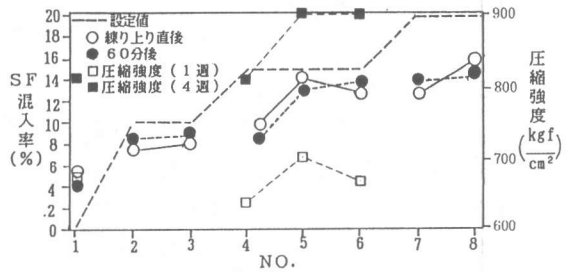


図-11 SF混入率測定結果

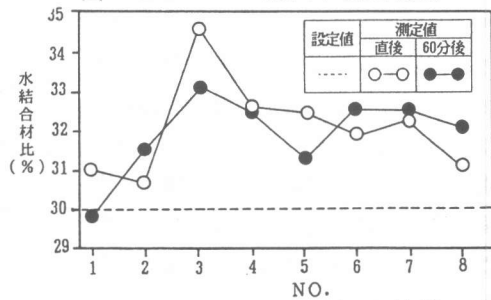


図-12 水結合材比測定結果