

高流動コンクリートの収縮および沈下挙動に関する研究

釣谷 叔輝* 内藤 英晴**
 小笠原 哲也*** 岩井 隆彰****
 阿部 哲良** 大村 隆一郎**

要 旨

近年、鋼とコンクリートとの合成構造であるサンドイッチ構造物やコンクリート充填鋼管柱のようなコンクリートの締固めが困難な構造物に、流動性・充填性に優れた高流動コンクリートが使用される機会が増えている。その際、コンクリートの沈下・収縮により、鋼材とコンクリートの間に隙間ができて一体性が損なわれたり、鋼材の拘束によるひびわれを生じることがないようにする必要がある。

本研究では、セメントや混和材の種類およびその混入率の相違が高流動コンクリートの自己収縮・乾燥収縮および沈下に及ぼす影響について検討した。また、コンクリート中にダイアフラムといった障害物が介在する時の沈下挙動およびダイアフラム下面に生じる間隙量に対する影響についても同様に検討を行った。

その結果、収縮および沈下挙動はコンクリートの種類や混和材の種類によってかなり異なることがわかった。

1. まえがき

サンドイッチ構造やコンクリート充填鋼管柱および過密配筋を有する構造物では、密閉空間や過密配筋部の鉄筋間の狭小部のようなコンクリートの締固めが困難で充填不良が懸念される箇所に、流動性・充填性に優れた高流動コンクリートの使用が不可欠である。この際には、フレッシュ時から硬化過程におけるコンクリートの収縮・沈下により鋼材とコンクリート間に大きな隙間が生じたり、鋼材の拘束によるひびわれが生じて構造物の一体化を損ねることがないように十分留意する必要がある。

しかし、各種高流動コンクリートの収縮・沈下挙動を体系的に比較研究した例はあまり多くない。本研究では、このような背景を受けて、各種高流動コンクリートの収縮・沈下挙動とその相互関係をより明確に解明することを目的としたものである。

高流動コンクリートは、一般のコンクリートに比べて水結合材比が小さく単位結合材量が多いため、大きな自己収縮が生じると言われている。また、筆者らは高流動コンクリートの沈下は、凝結始発時間前の水和収縮に伴うセメント粒子の重力による再配列に起因するいわゆる初期沈下と、凝結始発時間後の自己収縮に起因する沈下から成ることを報告済みである¹⁾。これらの点を踏まえて、①セメントや混和材の種類およびその混入率の相違が自己収縮・乾燥収縮および沈下量に及ぼす影響と、②コンクリート中にダイアフラムといった障害物が介在する時の初期沈下とダイアフラム下面に生じる間隙量、およびその両者の関係について検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用材料を表-1に示す。細骨材は山砂と砕砂とを50:50の割合で混合して使用した。

表-1 使用材料およびその物性値

使用材料	種 類	物性および成分
セメント	普通ポルトランドセメント(OPC)	比重3.16 比表面積3280cm ² /g
	高ビーライト系セメント(HBC)	比重3.22 比表面積3400cm ² /g
	高炉スラグ微粉末(BFS)	比重2.90 比表面積5960cm ² /g
混和材	フライアッシュ(FA)	比重2.32 比表面積3350cm ² /g
	石灰石微粉末(Ls)	比重2.72 比表面積5050cm ² /g
細骨材(S)	山砂	表乾比重2.58 吸水率1.37%
	砕砂	表乾比重2.63 吸水率2.02%
粗骨材(G)	砕石(2005)	表乾比重2.65 吸水率1.10%
混和剤	高性能A E減水剤 遅延型(SP)	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
	A E剤(AE1)	変形アルキルカルボン酸
	増粘剤	低界面活性型水溶性メチルセルロース系

2. 2 配合

本実験の対象とした配合は、粉体系・増粘剤系・併用系の3種類の高流動コンクリートである。各コンクリートの配合を表-2に示す。また、配合決定のための品質目標値を表-3に示す。

各配合は粉体の種類と組合せで分類できる。配合名B40, B60, B80は普通ポルトランドセメントに高炉スラ

* 横浜支店 ** 技術研究所 *** 九州支店 **** 大阪支店

グ微粉末(BFS)を内割で40, 60, 80%混入したものである。配合名F20, F40, F60は普通ポルトランドセメントにフライアッシュ(FA)を内割で20, 40, 60%混入したものである。配合名Hと配合名OPCはそれぞれ高ビークライト系セメントと普通ポルトランドセメントを単味で使用したものである。以上が粉体系の配合である。増粘剤系の配合は配合名VAで、メチルセルロース系の増粘剤を単位水量の0.25%混入したものである。併用系の配合は配合名Lsで、普通ポルトランドセメントに石灰石微粉末を内割で30%混入した粉体と増粘剤を組み合わせたものである。高性能AE減水剤には遅延型のものを使用し、空気量を調整するためにAE剤を併用した。

各配合は試験練りにより決定した。すなわち水粉体(あるいは水結合材)比や高性能AE減水剤の添加量を調整することにより、製造したコンクリートが表-3に示す品質目標値を満たすように決定した。

2. 3 練り混ぜ

コンクリートの練混ぜには容量100リットルの水平二軸強制練りミキサを用い、1バッチ80リットルとした。練混ぜ方法は、粗骨材、セメント、増粘剤、細骨材の順にミキサに投入し、30秒間の空練りを行った後、練混ぜ水と混和剤を投入し120秒間の本練りを行った。

2. 4 試験方法

(1) フレッシュコンクリート試験

コンクリート練上がり10分後と35分後にスランブフロー試験、Vロート試験、空気量試験を行い、所定の品質を満足していることを確認してから収縮試験・沈下量試験および間隙量試験のための試料を採取した。また、同一のバッチから採取した試料により、凝結試験とブリージング試験も併せて実施した。練上がり35分後におけるフレッシュコンクリート試験結果と凝結試験およびブリージング試験の結果を表-4に示す。

(2) 収縮試験

本実験に用いた供試体は、日本コンクリート工学協会(以下JCIと呼ぶ)の提案する「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」²⁾に従い製作した(図-1)。収縮ひずみの計測には埋込型ひずみ計(ゲージ長100mm、拡張径フランジφ30mm)を用い、コンクリートの始発時間を計測開始時間とした。また、供試体は4~6体製作し、包装用ラップフィルムとビニール袋で包装して乾燥を防止し、材令1, (7), 14, (28), 63, 180日()内は一部の配合のみで順次乾燥させた。

供試体の打設および計測は、いずれも恒温恒湿室内(温度20℃、湿度60%)で行った。

表-2 コンクリート配合

配合No.	種類	配合名	粉体	混和材(wt%)	W/B (%)	s/m (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						増粘剤 (W×wt%)	SP (P×wt%)	AE剤	
								W	C	BFS	FA	Ls	S				G
1	粉体系	B40	OPC+BFS	40	30.5	45.0	52.0	179	352	235			792	742		1.00	0.0020
2		B60	〃	60	31.1	〃	〃	179	231	346			〃	〃		1.00	0.0020
3		B80	〃	80	31.6	〃	〃	179	113	453			〃	〃		0.90	0.0030
4		F20	OPC+FA	20	30.5	〃	〃	176	461		115		〃	〃		1.05	0.0045
5		F40	〃	40	30.0	〃	〃	167	338		225		〃	〃		0.95	0.0065
6		F60	〃	60	29.0	〃	〃	160	220		330		〃	〃		0.80	0.0060
7		H	HBC	0	27.6	〃	〃	175	633				〃	〃		1.20	0.0020
8		OPC	OPC	0	30.0	〃	〃	181	602				〃	〃		1.35	0.0030
9	増粘剤系	VA	OPC	0	42.0	53.0	56.1	181	431				933	〃	0.25	1.55	0.0030
10	併用系	Ls	OPC+Ls	30	32.0	45.0	52.0	183	417			154	792	〃	0.10	0.95	0.0020

表-3 各試験項目と管理目標値

試験・測定項目	試験・測定方法	管理目標値
スランブフロー	土木学会規準(案)に準拠	65±5cm
空気量	JIS A 1128および土木学会規準(案)に準拠	4.5±1.5%
V75ロート 流下時間	土木学会規準(案)に準拠	10±5sec
V65ロート 流下時間	土木学会規準(案)に準拠	10±5sec
凝結時間試験	JIS A 6204 附属書1に準拠	-
ブリージング試験	JIS A 1123に準拠	-

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

配合No.	スランブフロー (cm)	V75ロート (秒)	V65ロート (秒)	空気量 (%)	始発 (hr)	終結 (hr)	ブリージング量 (cm ³ /cm ²)	ブリージング率 (%)
1	65.5	9.4	11.7	4.6	14.2	16.0	0.04	0.85
2	66.5	7.8	8.9	3.3	15.0	17.2	0.06	1.32
3	64.5	11.2	12.1	3.8	12.7	15.7	0.08	1.55
4	67.0	5.9	7.2	6.2	15.7	17.3	0.08	1.71
5	69.5	5.2	6.9	5.8	19.0	21.1	0.18	3.98
6	63.5	5.8	6.3	6.1	23.3	26.0	0.32	7.71
7	66.0	9.0	11.6	3.0	23.3	25.5	0.19	4.31
9	66.0	9.6	12.1	4.1	15.9	17.6	0.04	0.87
11	65.0	8.4	11.4	5.0	22.4	24.6	0.04	1.00
12	64.5	9.7	13.0	5.2	11.1	13.1	0.04	0.89

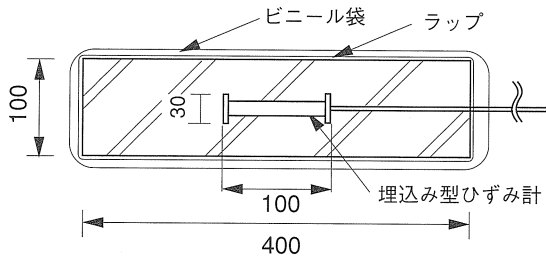


図-1 収縮試験試験体図 (単位; mm)

(3) 沈下量試験

図-2 に沈下量測定装置を示す。試料高さが沈下量に及ぼす影響を確かめるために試料高さは50cm、100cm、150cm、200cmの4水準とした。アクリルパイプ中に打ち込んだコンクリート試料の上面に薄いアクリル板を敷き、その上にコンクリートを押し込まないようにバネを取り外した変位計を設置し沈下量を測定した。なお、乾燥防止のためラップでアクリルパイプ上面を封緘し、アクリルパイプ内面には剥離材を塗布して摩擦の低減を図った。また、試料は傾けたパイプの外側を木槌で叩きながら静かに流し込むことにより大きな気泡を巻き込まないようにした。なお、沈下測定は室温20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内で実施した。

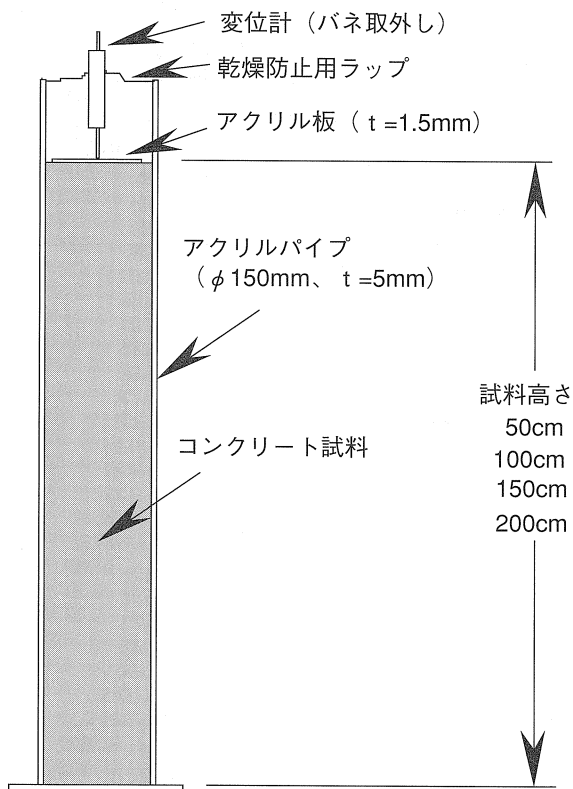


図-2 沈下量試験試験体図

(4) 間隙量試験

図-3 に間隙量測定装置を示す。試料高さは200cmとし、中間部に設けたダイヤフラムの開口率は20%、40%、60%の3水準とした。打設の際にはフレキシブルホースを用いて試料を流し込み、型枠の外側を木槌で叩きながら大きな気泡を巻き込まないようにした。硬化後、側面の型枠を外し、ダイヤフラム下面の間隙をすきまゲージで測定した。なお、試料上端における沈下量も併せて測定した。本試験も室温20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内で実施した。

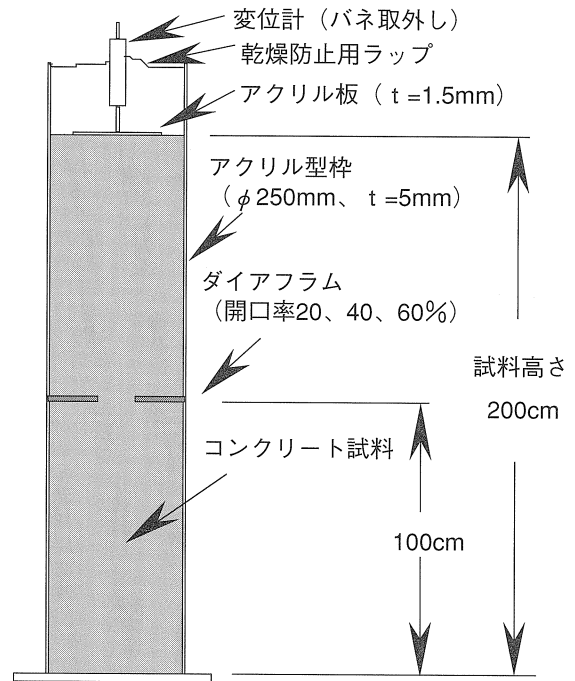


図-3 間隙量試験試験体図

3. 実験結果および考察

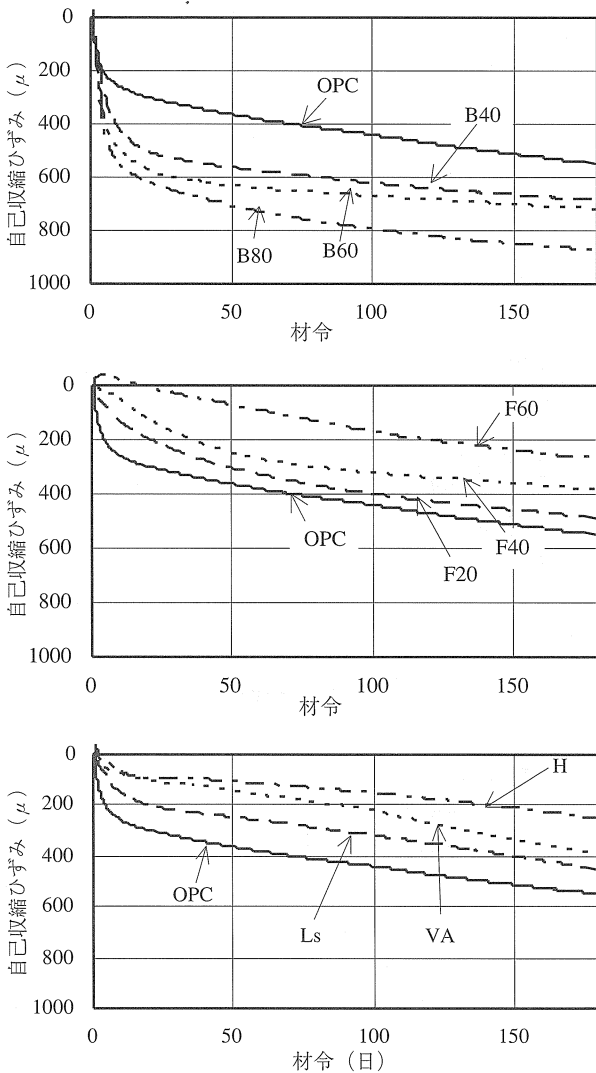
3.1 自己収縮

図-4 に各配合の自己収縮ひずみと材令の関係を示す。なお、比較のために各グラフには普通ポルトランドセメント単味(OPC)の試験結果も一緒に示している。

高炉スラグ微粉末(BFS)を混入した配合(B40, B60, B80)は、いずれも材令30日までの自己収縮ひずみの増加量が、他の配合の増加量に比べ大きくなった。また、BFS混入率が高いほど自己収縮ひずみは大きくなった。一方、フライアッシュ(FA)を混入した配合(F20, F40, F60)は、BFSを混入した配合で見られたような、材令初期における急激な自己収縮ひずみの増加はなく、FA混入率が高くなるにつれ自己収縮ひずみは小さくなった。高ビーライト系セメントを用いた配合(H)については、

普通ポルトランドセメント単体(OPC)より水結合材比(W/B)が小さいにも関わらず自己収縮ひずみは小さくなった。結合材として普通ポルトランドセメントのみを使用した併用系(Ls)、増粘剤系(VA)についてみると、Ls、VAは同程度の自己収縮ひずみになった。

これより、FAおよび高ビークライト系セメントは自己収縮ひずみを低減させ、また本実験で用いたブレン値6000のBFSでは自己収縮ひずみを増加させる効果があると考えられる。また、自己収縮ひずみは、混和材の種類、W/Bの大小に関わらず材令180日においても増加傾向にあり、長期間継続することが判る。



図一四 自己収縮ひずみと材令との関係

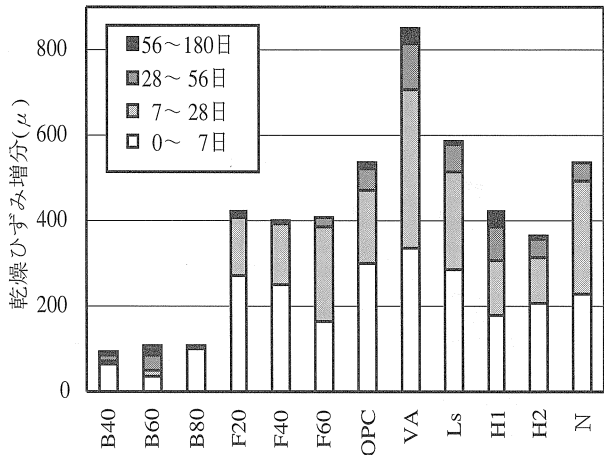
3. 2 乾燥ひずみ量

図一五に、脱型後直ちに乾燥させた供試体の材令180日までの期間における全収縮ひずみから、別途自己収縮ひずみを差し引いた結果(ここでは、その差が乾燥に

よるひずみの増分と考え、乾燥ひずみ増分と呼ぶ)を示す。

BFSを混入した配合(B40, B60, B80)は、OPCと比べ単位水量がほとんど等しいにも関わらず、乾燥ひずみ増分は小さくなった。また、混入率による乾燥ひずみ増分への影響は認められなかった。一方、FAを混入した配合(F20, F40, F60)については、OPCと比べ乾燥ひずみ増分に大きな差はなかったが、混入率が増えるに従って単位水量が減少しているにも関わらず、乾燥ひずみ増分はほぼ一定となった。配合VAでは、単位水量がOPCやLsとほぼ等しいにも関わらず、乾燥ひずみ増分は250~300μ大きくなった。

したがって、BFSは乾燥ひずみ増分を低減させるが、FAは混入率が高くなると乾燥ひずみ増分を増加させる効果があることが判る。すべての配合において乾燥ひずみ増分は材令56日の時点でほぼ収束しており、自己収縮ひずみと比べ早期に終局値に到達すると考えられる。



図一五 各種高流動コンクリートの乾燥ひずみ増分

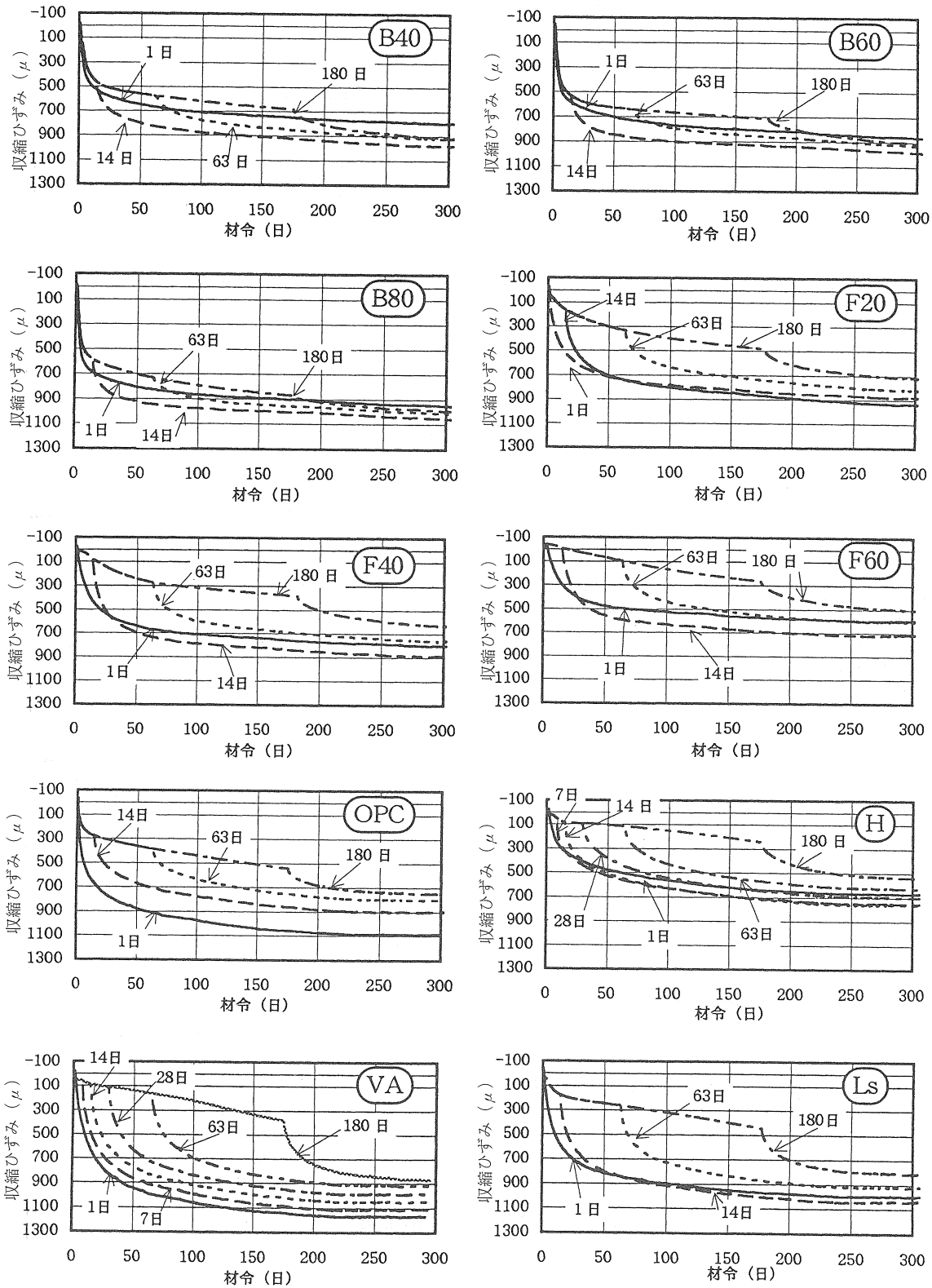
3. 3 乾燥開始材令が収縮ひずみに及ぼす影響

図一六に、異なる材令で乾燥させたときの全収縮ひずみの変化を示す。

一般に、乾燥開始材令が早いほど全収縮ひずみは大きくなると考えられ、これを満足する結果となったのは配合OPCとVAのみである。その他の配合では、材令14日(一部の配合では7日)以降の乾燥に伴う全収縮ひずみは乾燥開始材令が早いほど大きくなっているが、乾燥開始材令によっては材令1日で乾燥させたときの全収縮ひずみを上回っている。まず、BFSを混入した配合(B40, B60, B80)では、材令14, 63, 180日で乾燥させたときの全収縮ひずみは材令1日で乾燥させたときの値

よりすべて大きくなった。また、FAを混入した配合 (F20, F40, F60)では、材令1日で乾燥させたときの全収

縮ひずみは乾燥開始材令14日での値より小さく、混入率の増大に伴い乾燥開始材令63日での値に近づく結果



図一六 乾燥開始材令と収縮ひずみとの関係

となった。

以上のことより、乾燥開始材令が早いほど全収縮ひずみが大きくなったのは配合名 OPC, VA のみであり、配合によっては、必ずしも乾燥開始材令が早いほど全収縮ひずみが大きくなるとはいえず、全収縮ひずみを最大にする乾燥開始材令が存在すると考えられる。また全収縮ひずみは材令300日程度でほぼ一定となっており、この材令付近での全収縮ひずみを終局値にすることができると考えられる。

3. 4 初期沈下量

沈下量の経時変化の一例を図-7に示す。いずれのケースにおいても打設直後から材令1日までの初期材令において沈下は急激に進行し、その後は時間の経過とともにわずかずつ進行した。凝結始発時間までに初期の急激な沈下は終了しているが、ここでは、凝結始発時間を初期沈下終了時間と定義し、その時点での沈下量を初期沈下量と定義する。初期沈下量は主に鋼材とコンクリートとの肌離れに大きく関係すると考えられる。

ブリージングの発生は、粉体系では打設から2～3

時間、増粘剤系は16時間、併用系は4時間経過後であるのに対して、初期沈下は打設直後から大きく生じた。このことからブリージング発生前の沈下には主として水和収縮が起因し、その後ブリージングの影響が加わるものと考えられる。

表-5に各配合についての初期沈下量の一覧を示す。この結果をもとに試料高さHと初期沈下量との関係を求めた結果を図-8に示す。これらの図から、いくらかのばらつきはあるものの、初期沈下量は試料高さにほぼ比例することがわかる。

図-9にダイアフラムの開口率と試料上端における沈下量の関係を示す。同図においては、ダイアフラム無しで試料高さH=1.0mでの初期沈下量を開口率0%の結果とし、H=2.0mでの初期沈下量を開口率100%の結果とした。この開口率100%の場合と比較して、ダイアフラムが有る場合では沈下量は小さくなった。ダイアフラムの開口率が大きくなるほど、沈下量は大きくなっているが、開口率60%程度でも沈下を抑制する効果があると考えられる。

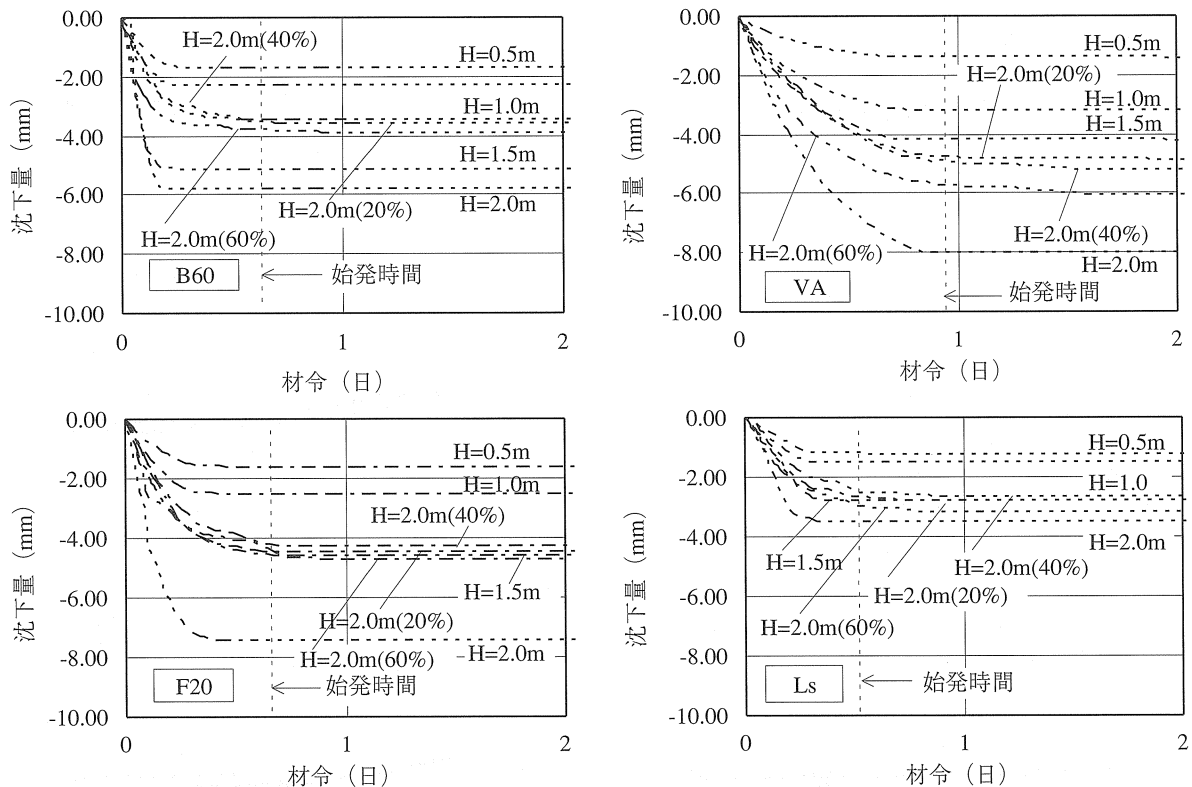
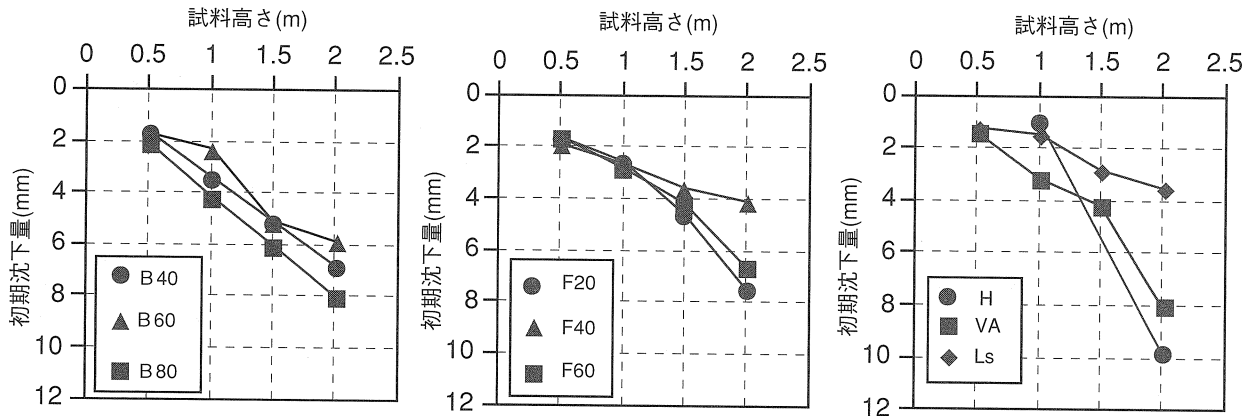


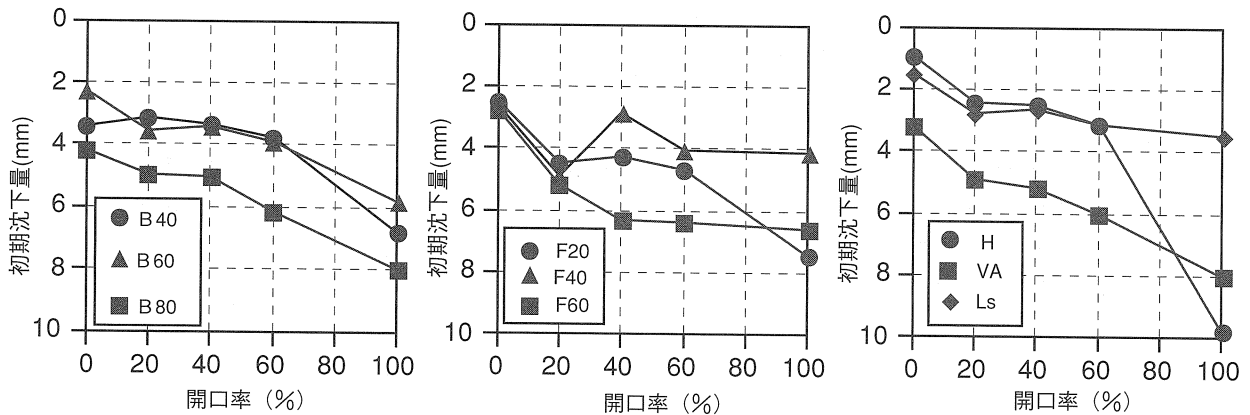
図-7 沈下量と材令との関係

表一五 各配合の初期沈下量

No.	配合名	初期沈下量 (mm)						
		ダイアフラム無				ダイアフラム開口率		
		H=0.5m	H=1.0m	H=1.5m	H=2.0m	20%	40%	60%
1	B40	1.60	3.40	5.10	6.80	3.13	3.36	3.73
2	B60	1.69	2.30	5.10	5.81	3.57	3.43	3.89
3	B80	2.00	4.17	6.00	8.00	4.98	5.01	6.15
4	F20	1.60	2.52	4.60	7.44	4.45	4.29	4.69
5	F40	1.89	2.62	3.60	4.12	4.89	2.87	4.04
6	F60	1.60	2.78	4.20	6.60	5.20	6.28	6.37
7	H	-	0.94	-	9.77	2.44	2.52	3.17
8	OPC	-	-	-	-	-	-	-
9	VA	1.40	3.20	4.20	8.00	4.87	5.21	6.02
10	Ls	1.20	1.50	2.80	3.50	2.77	2.62	3.13



図一八 試料高さとの初期沈下量との関係



図一九 ダイアフラムの開口率と試料上端における沈下量との関係

3.5 間隙量

表一六と図一10には、ダイアフラムの開口率を変えた時のダイアフラム下面での間隙量の測定結果を示す。図一10に示すようにダイアフラムの開口率と、沈下に伴いダイアフラム下面に生じる間隙量との関係は、

開口率が小さくなるほど、間隙量は大きくなる傾向がある。

図一11に開口率20%のダイアフラム下面の間隙量と凝結始発時間の関係を示す。開口率20%のものについては凝結始発時間が遅いほど間隙量は大きくなる傾

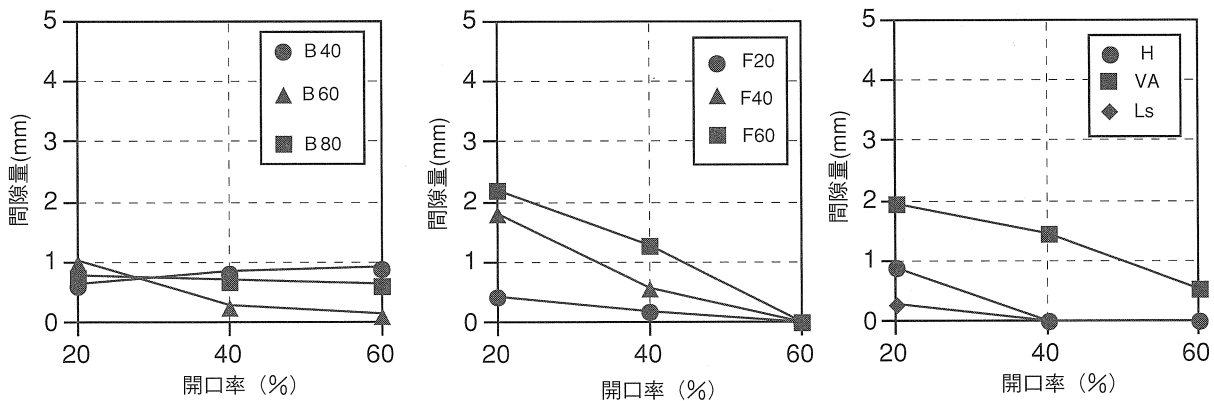
向にあるが、開口率40%、60%では両者に明確な相関関係は認められなかった。開口率が小さいとコンクリートの流動変形が起こりにくくなるため、間隙量が大きくなると考えられる。

4. まとめ

- (1) 混和材として高炉スラグ微粉末を混入すると、自己収縮ひずみは大きくなり、乾燥に伴う収縮ひずみの増分は小さくなる傾向にある。
- (2) 混和材としてフライアッシュを使用するか、セメントに高ビーライト系セメントを用いると自己収縮は小さくなる。
- (3) コンクリートの配合によっては、乾燥を開始する

表一6 ダイアフラムの開口率とその下面での間隙量

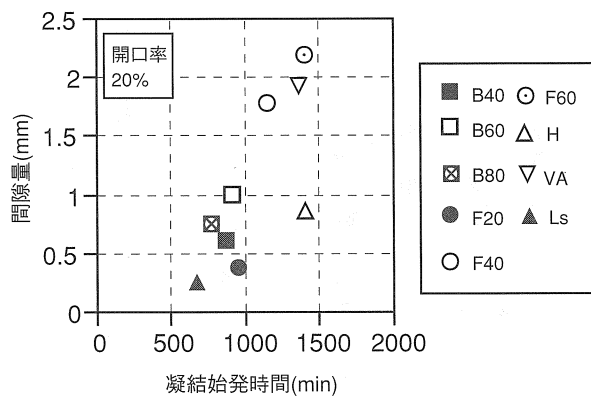
No.	配合名	間隙量 (mm)		
		ダイアフラム開口率		
		20%	40%	60%
		H=2.0m		
1	B40	0.65	0.85	0.92
2	B60	1.03	0.28	0.17
3	B80	0.79	0.72	0.64
4	F20	0.42	0.18	0.00
5	F40	1.81	0.57	0.00
6	F60	2.21	1.28	0.00
7	H	0.89	0.00	0.00
8	OPC	-	-	-
9	VA	1.95	1.46	0.55
10	Ls	0.29	0.00	0.00



図一10 ダイアフラムの開口率を変えた時のダイアフラム下面の間隙量

材令が早いほど収縮ひずみが大きくなるとは限らず、収縮ひずみを最大にする乾燥開始材令が存在すると考えられる。

- (4) 自己収縮ひずみは材令180日においても増加傾向にあり、今後、より長期材令での自己収縮ひずみに基づく予測式の提案が必要であると考えられる。本実験の結果からは材令300日で収縮量はほぼ一定となっており、実用上は材令300日頃の自己収縮ひずみを終局ひずみと考えるとも良いと思われる。
- (5) 初期沈下量の大きさは、高流動コンクリートの種類によって大きく異なる。
- (6) 試料高さや初期沈下量はほぼ比例し、初期沈下量は凝結性状に大きく左右される。
- (7) ダイアフラムの開口率が小さくなるほど、上面の沈下量は小さくなり、ダイアフラムは沈下を抑制する効果があるが、沈下に伴いダイアフラム下面に生じる間隙量は大きくなる傾向にある。
- (8) ダイアフラムの開口率が小さい範囲では、間隙量は初期沈下量が大きいものほど大きくなっている。



図一11 ダイアフラム下面の間隙量と始発時間の関係

参考文献

- 1) 内藤・三浦・濱崎：高流動コンクリートの沈下挙動に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.678-683、1996
- 2) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会 報告書(Ⅱ)、pp.209-210、1994