論文　膨張性高流動コンクリートによる沈下補償に関する研究

神代泰道[*1]・小柳光生[*2]・中島啓喜[*3]

要旨：打込み直後からのコンクリート表面の沈下を補償するため，アルミニウム粉末を用いた膨張性高流動コンクリートについて実験的に検討した。実験では，AL粉末の種類，添加量，環境温度を変えて膨張挙動を比較した。その結果，以下のことが分かった。環境温度が低いほど，膨張率は小さくなるため，反応の早いタイプのAL粉末を用いる必要がある。反応の早いAL粉末の方が，添加量が膨張率に与える影響は大きい。また，開口のある密閉箇所を充填する場合には，膨張圧の影響により開口付近にブリーディング水が発生する場合がある。このときの発生量は膨張率が大きいほど多くなるが，0～0.5%の膨張率とすれば0.1cm³/cm²以下となる。

キーワード：高流動コンクリート，膨張，アルミニウム粉末，沈下，ブリーディング量

1．はじめに

コンクリートの沈下は，打込み直後からコンクリート面が鉛直方向に下がる現象であり，比較的大きな体積変化を伴い，鉄筋や鉄骨との付着性能の低下，コンクリート表面のひび割れの発生を招く[1)]。コンクリートの沈下は，ブリーディング現象の結果として起こるものとしてとらえられてきたが，近年になって，高流動コンクリートのようなブリーディングがほとんど発生しないコンクリートでも，同様に沈下が起こることが指摘されている[2)]。特に，これらのコンクリートは密実な充填が要求される部位への適用が多い。

そこで高流動コンクリートの沈下による体積変化を補償するため，アルミニウム粉末（以下AL粉末）などの発泡剤や膨張材の利用が報告されている[3)4)]。AL粉末は発泡ガスを利用したものであるが，その効果はコンクリートの調合や打設高さに影響を受け，打込み直後から反応を開始するように制御する必要がある[1)]。さらに膨張材を実構造物に適用する場合には，温度の変動等の影響で，コンクリート天端の沈下量をゼロにするのは難しいことが指摘されている[3)]。

ここではAL粉末を用いた膨張性高流動コンクリートによる沈下補償について，AL粉末の種類および添加量，環境温度，打設高さをパラメーターに実験を行った結果について述べる。

2．沈下が充填性に及ぼす影響

最近の文献調査[5)]によると，高流動コンクリートのようなブリーディングのないコンクリートの沈下は，骨格が形成される前の水和収縮による体積変化が主な要因とされ，さらにコンクリート表面からの水分蒸発による体積変化が加わった結果であるとされる。沈下は，以下の条件の場合に大きくなる[5)]。

(1)コンクリートの打込み高さが高い
(2)雰囲気温度及び湿度が低い
(3)凝結が遅延する
(4)空気量が多い
(5)セメントペーストの容積が大きい

また，高流動コンクリートの沈下が密閉空間の充填性に及ぼす影響を調査した研究[6)]によると，充填箇所に対して高さ1m以上のコンクリートのヘッド圧が作用する場合には，沈下による充填性の低下はほとんど起こらないとされる。したがって，AL粉末による沈下補償が必要な部位としては，例えば免震装置基礎の下部コンクリートなどのようにコンクリートのヘッド圧の作用が期待できない箇所の充填である。

3．実験概要

3.1　実験の目的

AL粉末を用いた膨張性高流動コンクリートを実構造物に適用するためには，添加量の他に，前述した環境温度，打設高さが膨張挙動に及ぼす影響の把握が必要となる。特に，打込み直後から膨張を開始するため，環境温度の影響は大きいと考えられる。そこで環境温度を10，20，30℃の３水準として実験を行うこととした。

密閉箇所に打ち込まれた膨張性高流動コンクリートは，まだ十分に硬化していない状態で膨張圧が作用し，加圧状態となる。一方，上部に打設開口や空気孔が設けられている場合には，その箇所は無加圧状態であるため，コンクリート内部に圧力勾配が発生し，開口部付近に向かってコンクリート中の水が移動し，ブリーディング水となって充填性を阻害する可能性がある。そこでこの圧力勾配により発生するブリーディング量の程度を，後述する拘束ブリーディング試験によって評価することとした。

*1　（株）大林組　技術研究所　建築材料研究室　構造材料グループ　副主査　工博　（正会員）
*2　同　専門副主事　工博　（正会員）
*3　（株）フローリック 東日本技術センター　（会員外）

3.2　コンクリートの調合

コンクリートの使用材料を**表－１**に示す。セメントは高強度コンクリート用として実績の多い中庸熱ポルトランドセメントとした。AL粉末は，表面の処理の程度を変えた反応時間の異なる２種類とした。P1は反応の早いタイプ，P2はP1より反応が遅いタイプである。

コンクリートの調合を**表－２**に示す。単位水量は170kg/m³，水セメント比は33.5%とし，いわゆる粉体系高流動コンクリートとした。実験のパラメーターは**表－３**に示すようにし，AL粉末の添加量は20,30g/m³とした。

コンクリートの練混ぜは，強制２軸ミキサ(55リットル）を用い，セメントと細骨材で，10秒間空練りし，水を加えて90秒練り混ぜ，粗骨材を投入してから60秒間練り混ぜ，５分静置後，30秒間練り混ぜてから排出した。

AL粉末の添加は，練り混ぜたコンクリートを重力式ミキサに移し変えた後に添加し，120秒間高速で攪拌した。これはAL粉末は直接アジテータートラックに添加される事例が多いことを模擬したものである。

3.3　試験項目

試験項目を**表－４**に示す。膨張率の測定は**図－１**に示すように，φ150×300mmの鋼製型枠に打ち込んだ後，高感度変位計で測定した。あわせてφ100×1,000mmのPVC製パイプにも打ち込み，ノギスを用いて測定した。

拘束ブリーディング試験は，**図－２**に示す試験装置を用いて，軽量型枠（φ150×300mm）に打込み後，上面に開口（φ50）を有する鋼製の蓋をして，膨張を拘束した。この開口に滞留してくるブリーディング水をスポイトにて採取し，１時間ごとに記録した。この試験にあわせて同様の軽量型枠に採取したコンクリートのブリーディング量を測定した(無拘束ブリーディング試験)。圧縮強度用の供試体は，φ100×200mmの鋼製型枠に採取後，上面にガラス板を置き，その上から0.02N/mm²の重石[4)7)]を載せて，膨張を拘束させた。いずれの環境温度においても採取後，前養生（20℃，RH90%)を行ってから翌日脱型し，所定の材齢まで標準水中養生を行った。

4. 実験結果

4.1　フレッシュコンクリートの試験結果

表－５にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。調合記号はAL粉末のタイプと添加量で表した。AL粉末を添加した場合は30g/m³の場合のみ示した。スランプフローおよび空気量はいずれも所要の範囲であり，AL粉末

表－１　使用材料

分類	概　要
セメント	C：中庸熱ポルトランドセメント　密度3.24g/cm³
細骨材	S1：S2＝5：5(容積比)
	S1：陸砂（千葉県君津産）　表乾密度2.63g/cm³ 吸水率1.85%　FM2.66
	S2：砕砂（埼玉県上里産）　表乾密度2.61g/cm³ 吸水率1.83%　FM2.88
粗骨材	G1：砕石2005　東京都青梅産　表乾密度2.69g/cm³ 吸水率0.79%　実積率58.0%　FM6.54
混和剤	SP：高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）
膨張剤	AL：アルミニウム粉末
	P1：反応早いタイプ
	P2：反応遅いタイプ

表－２　コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量　(kg/m³)				
		W	C	S1	S2	G
33.5	53.2	170	508	456	453	820

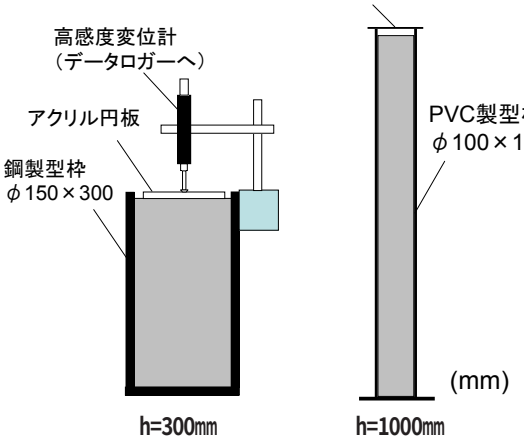
スランプフロー：60～70cm　空気量：2.0±1.0%

表－３　実験のパラメーター

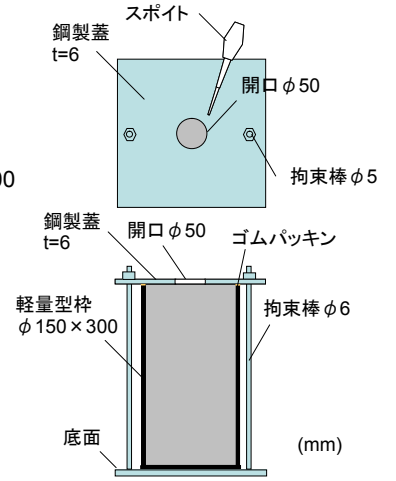
項目	パラメータ
AL粉末の種類	P1，P2
AL粉末の添加量(g/m³)	0，20，30
環境温度(℃)	10，20，30

表－４　試験項目

項目	備　考
スランプフロー	JIS A 1150（コンクリートのスランプフロー試験方法）
空気量	JIS A 1128（フレッシュコンクリートの空気量の圧入による試験方法）
コンクリート温度	JIS A 1156（フレッシュコンクリートの温度測定方法）
圧縮強度	鋼製型枠φ100×200mmに採取し，上面に0.015N/mm²の荷重をかけて膨張を拘束し，脱型後は標準水中養生
膨張率	鋼製型枠φ150×300mmに打込み後、高感度変位計にて計測 PVC製パイプφ100×1000に打込み後，ダイアルゲージにて計測
拘束ブリーディング試験	軽量型枠φ150×300mmに打込み後，上面を，開口（φ50）を有する蓋で膨張を拘束し，1時間ごとに開口に滞留するブリーディング水をスポイトにて採取
（無拘束）ブリーディング試験	軽量型枠φ150×300mmに打込み後，上面を乾燥防止のための蓋をし，拘束ブリーディング試験と同一時刻にブリーディング量を測定



図－１　膨張量の測定方法



図－２　拘束ブリーディング試験の概要

の添加による大きな性状の変化は認められなかった。高性能AE減水剤の添加率は，環境温度が10℃で1.20%，20℃で1.30%，30℃で1.35%と，環境温度が高いほど増加した。

4.2　膨張挙動

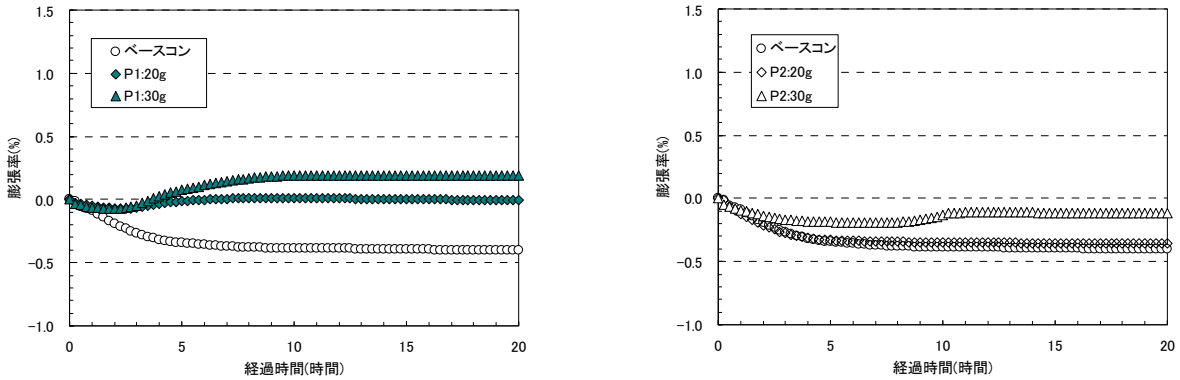
(1)環境温度の影響

各環境温度における膨張率の測定結果を**図－3～5**に示す。AL粉末を混入していないベースコンクリートについては沈下挙動を示しているが，文献[5)]で指摘されているように環境温度が低いほど長く続くようであり，コンクリートの凝結性状が大きく影響している。沈下率としては，環境温度が10℃と20℃では大きな差はなく，30℃の場合は小さくなった。

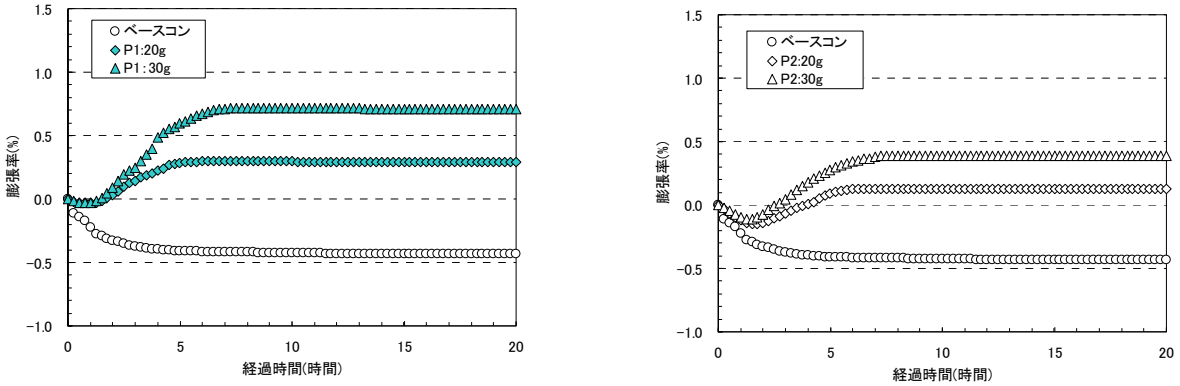
AL粉末を添加したコンクリートについては，添加量が多いほど膨張率も大きくなり，収束する時間も若干長くなった。AL粉末のタイプで比較すると，反応の早いP1を用いた方が早期に膨張が始まり，同じ添加量であれば，最終的な膨張率も大きくなった。特に環境温度が10℃と低い場合には，反応の遅いP2タイプを用いると膨張側にならなかった。

表－5　フレッシュコンクリートの試験結果

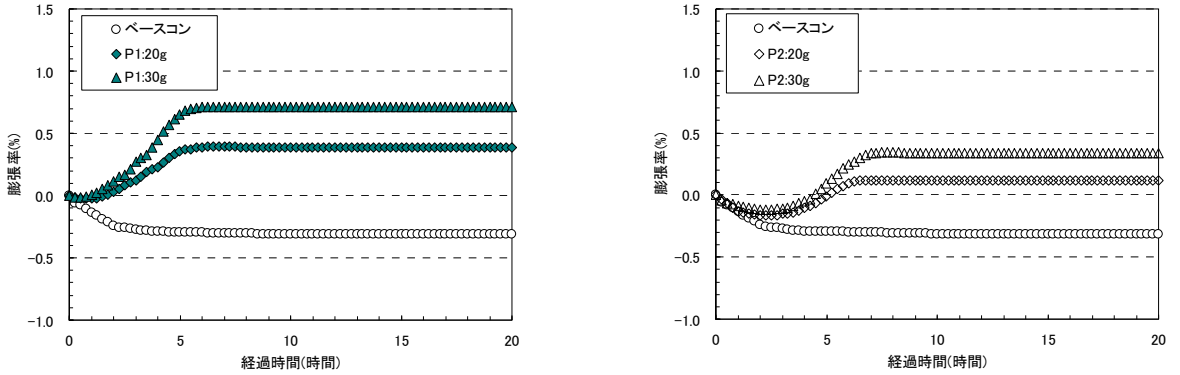
環境温度	調合	SP添加率	スランプフロー(cm)	50cm到達時間(秒)	停止時間(秒)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
10℃	ベース	1.20%	63.5×62.5	4.9	40.8	1.5	12.5
	P1:30g	1.20%	66.0×66.0	5.4	38.9	1.4	12.0
	P2:30g	1.20%	66.0×63.0	5.8	36.0	1.5	12.0
20℃	ベース	1.30%	64.0×62.0	5.7	24.7	1.6	20.5
	P1:30g	1.30%	66.5×63.0	5.3	38.6	1.3	21.5
	P2:30g	1.30%	65.0×65.0	4.7	30.1	1.2	21.5
30℃	ベース	1.35%	68.0×66.5	4.2	34.4	1.1	31.0
	P1:30g	1.35%	66.0×64.0	4.6	31.3	1.0	30.5
	P2:30g	1.35%	67.0×65.0	4.7	37.7	1.3	31.0



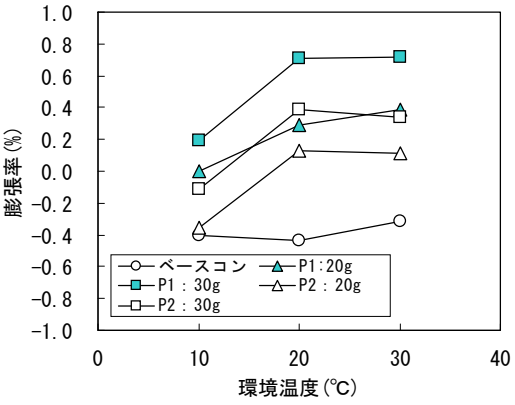
図－3　膨張率の測定結果（環境温度10℃）



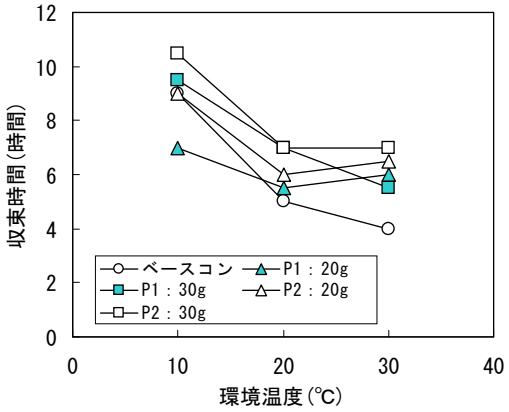
図－4　膨張率の測定結果（環境温度20℃）



図－5　膨張率の測定結果（環境温度30℃）



図－６　環境温度と膨張率の関係



図－７　環境温度と収束時間の関係

図－６に環境温度と膨張率の関係を示す。これよりAL粉末の添加量が同じであれば,環境温度が低くなると膨張率が小さくなることが分かる。**図－７**に環境温度と収束時間(測定開始からの沈下あるいは膨張挙動が収束した時間)の関係を示す。環境温度が低いほど収束時間が長くなっている。AL粉末による膨張挙動についても,水和反応に伴い溶出した水酸化カルシウムとの反応により発泡するため,環境温度の影響を受けやすいものと推察される。

(2)重回帰分析結果

上記のように膨張挙動は,AL粉末の添加量と環境温度の影響を受けやすい。そこでAL粉末の種類ごとに添加量と環境温度を説明変数とした重回帰分析を行った。その結果を**表－６**に示す。以下の回帰式が得られた。

$$P1：Y=0.0166X_1+0.0307X_2-0.715 \quad (1)$$

$$P2：Y=0.0152X_1+0.0194X_2-0.721 \quad (2)$$

ここで，Y：膨張率(%)，X_1：環境温度(℃)

X_2：添加量(g/m³)

これよりP1タイプでは,添加量が10g増加すると膨張率は約0.3%増加し,同様にP2タイプでは約0.2%増加する。反応の速いP1タイプの方がP2よりも添加量が膨張率に影響を与えやすいといえる。

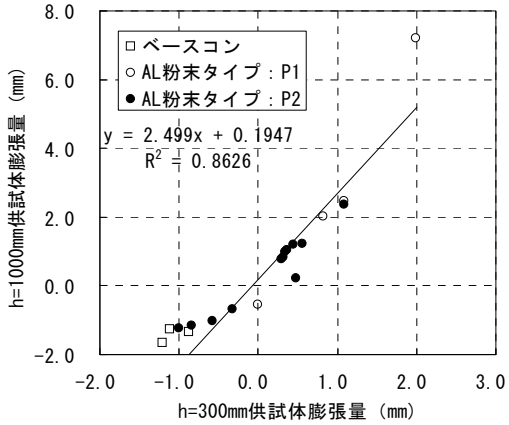
なお,これら結果は今回の実験条件におけるものであり,セメントの種類,調合条件などの違いにより係数の大きさは異なるものと考えられる。

(3)打込み高さの影響

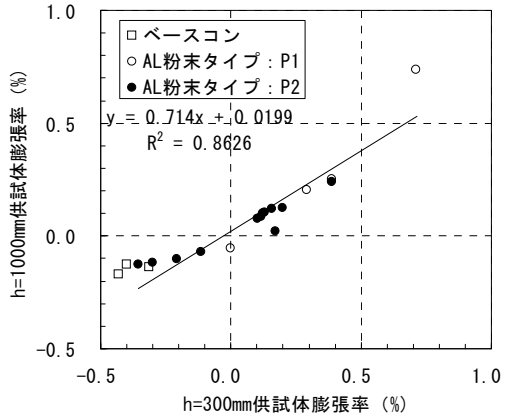
図－８に試験体の高さを300mmと1,000mmとした場合の膨張量を比較して示す。膨張量は，h=1,000mmの方が大きくなり，h=300mmの約2.5倍となっている。一方，**図－９**に示すように膨張率で比較すると，h=1,000mmとh=300mmの膨張率は同一ではなく，h=1,000mmではh=300mmの0.7倍と小さくなっている。このように試験体高さが高くなると膨張量は大きくなるが,膨張率としてはむしろ小さくなる。これは打込み高さが高くなる

表－６　重回帰分析の結果

AL粉末	P1	P2
重相関係数	0.967	0.900
切片	-0.715	-0.721
X_1（環境温度）係数	0.0166	0.0152
X_2（添加量）係数	0.0307	0.0194



図－８　試験体高さの影響（膨張量）



図－９　試験体高さの影響（膨張率）

と，h=300mmを基準とした膨張率をそのまま適用できないことを示唆するものである。この原因については膨張圧の影響と考えられる。すなわち高瀬ら[7]の研究で明らかなように，AL粉末が発泡する際の膨張圧は，最大で0.015N/mm²とされており，これをコンクリート高さに換算すると，約630mm分である。したがって，上面から630mmより下部の部分においては発泡による膨張が十分にできないため，打込み高さが高い場合には，h=300mmを基準とした膨張率より小さくなるものと推察される。

4.3　拘束ブリーディング試験結果

(1)拘束ブリーディング量

拘束ブリーディング試験における上蓋の開口部で採取されたブリーディングの発生量（以下，拘束ブリーディング量）を**図－10～12**に示す。拘束ブリーディング量は，環境温度が高く，AL粉末の添加量が多いほど，また，反応の早いP1タイプの場合ほど多くなる傾向であり，その挙動は膨張の挙動とよく一致している。なお，ベースコンクリートおよび無拘束条件におけるブリーディング量は0cm³/cm²であった。

(2)膨張率と拘束ブリーディング量の関係

図－13に膨張率と拘束ブリーディング量の関係を示す。両者の相関はかなり高く，膨張率が大きくなるほど拘束ブリーディング量は多くなった。膨張率がおよそ0.5%を超えると拘束ブリーディング量が0.1cm³/cm²を上回るようである。この拘束ブリーディング量の大小が，実構造物における充填性にどの程度影響するかは今のところ不明であるが，文献[8]では充填性を確保するためのブリーディング量として0.1cm³/cm²以下とする規定が設けられている。沈下を補償する程度の膨張率（0～0.5%）を目標とすれば，拘束ブリーディング量は0.1cm³/cm²以下となるため，充填性に悪影響はないと考える。

4.4　圧縮強度の試験結果

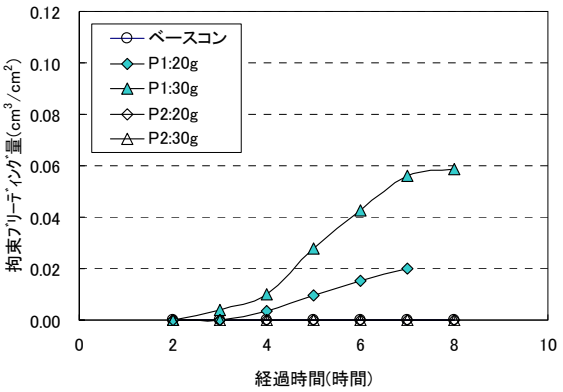
材齢28日における圧縮強度の試験結果をAL粉末の添加量で整理して**図－14**に示す。ベースコンクリートについては環境温度が高いほど圧縮強度は高くなる傾向がみられた。AL粉末の添加により，圧縮強度はベースコンクリートより5～10%程度低下するケースがみられた。

5．環境温度15℃における実験

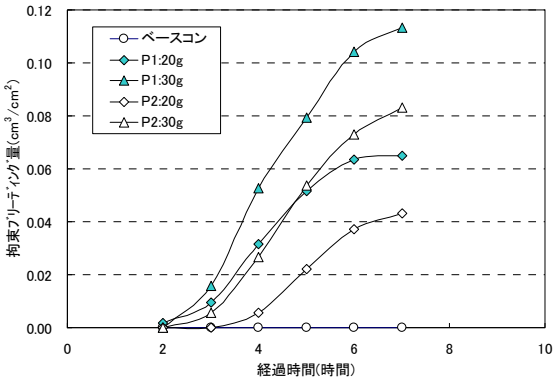
5.1　実験概要

ここではこれまでの実験結果を用いて環境温度15℃ににおいて沈下を補償する膨張性高流動コンクリートを検討した。AL粉末の添加量は，環境温度15℃，膨張率0%として式(1)および(2)から算出し，その結果，P1タイプで15g/m³，P2タイプで25g/m³とした。コンクリートの使用材料および調合はこれまでと同じとし，膨張率および拘束ブリーディング量を測定した。

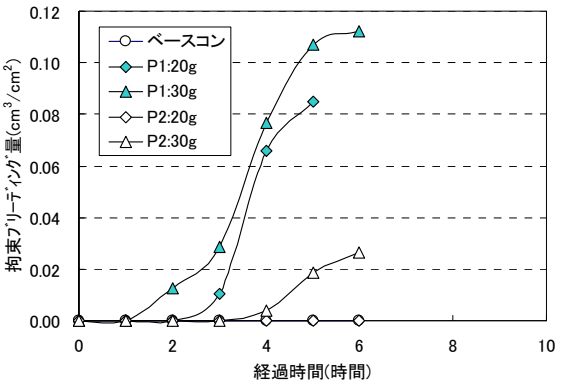
5.2　実験結果



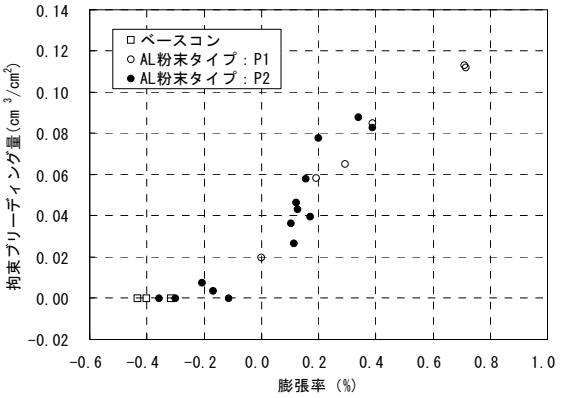
図－10　拘束ブリーディング試験結果（環境温度10℃）



図－11　拘束ブリーディング試験結果（環境温度20℃）



図－12　拘束ブリーディング試験結果（環境温度30℃）



図－13　膨張率と拘束ブリーディング量の関係

(1)フレッシュコンクリートの試験結果

表－7に試験結果を示す。高性能AE減水剤の添加率は10℃と20℃の中間とし，1.25%とした。この結果，所要の流動性が得られた。AL粉末を添加しても大きな流動性の変化はなかった。

(2)膨張挙動

図－15に膨張率（h=300mm)の測定結果を示す。当然ながら反応の早いP1の方が早期に膨張が開始した。最終的な膨張率はP1およびP2ともにほぼ同じ0.05%となった。拘束ブリーディング試験結果を**図－16**に示す。膨張挙動と同様に，P1の方が早期にブリーディングが発生するものの，最終的な発生量はほぼ同じであり，0.1cm³/cm²に対して十分小さかった。以上のように今回の実験結果を用いて，環境温度15℃において沈下補償できる膨張性高流動コンクリートを製造することができた。

6. まとめ

打込み直後からのコンクリート表面の沈下を補償するためアルミニウム粉末を用いた膨張性高流動コンクリートについて実験的に検討した。

(1)AL粉末の添加は，フレッシュ性状への影響はないが，圧縮強度は若干低下する。

(2)環境温度が低い場合，膨張率が小さくなるため，反応性の早いAL粉末を用いる必要がある。

(3)反応の早いタイプのAL粉末の方が，添加量が膨張率に与える影響は大きい。

(4)打込み高さが高くなると，AL粉末の膨張圧の影響によりh=300mm供試体を基準とした膨張率より小さくなる。

(5)開口のある密閉箇所を充填する場合，膨張圧による圧力勾配により開口に向かって水が移動し，ブリーディング水が発生する場合がある。このときの発生量は膨張率が大きいほど多くなるが，0～0.5%の沈下を補償する程度の膨張率とすれば0.1cm³/cm²以下となる。

参考文献

1)田澤栄一：コンクリート欠陥とその対策，コンクリート工学，Vol.37，No.10，pp.3-10，1999

2)内藤 英晴，三浦 尚，濱崎 勝利：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

3)桜本文敏，鈴木清孝，依田和久，小高茂央：高強度鋼管充填コンクリートの開発，鹿島技術研究所年報，第44号，pp.33-38，1996

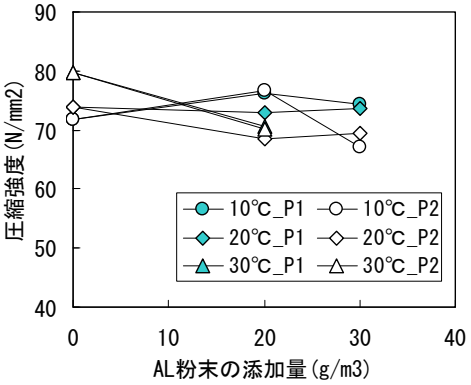
4)石原誠一郎，三橋博三，立松和彦，山崎順二：無収縮高流動コンクリートで一体化した逆打ちコンクリートの打継ぎ部せん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.439-444，1999

5)神代泰道：高流動コンクリートの沈下特性に関する最近の研究，コンクリート工学，Vol.42，No.10，2004

6)内藤 英晴，大村 隆一郎，三浦 尚：合成構造による高流動コンクリートの充てん性に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.11，No.3，pp.77-87，2000

7)高瀬三郎，田辺清，松岡康訓：アルミニウム粉末を使用した逆打コンクリート，土木学会論文集，No.355，VI-1，pp.63-71，1986

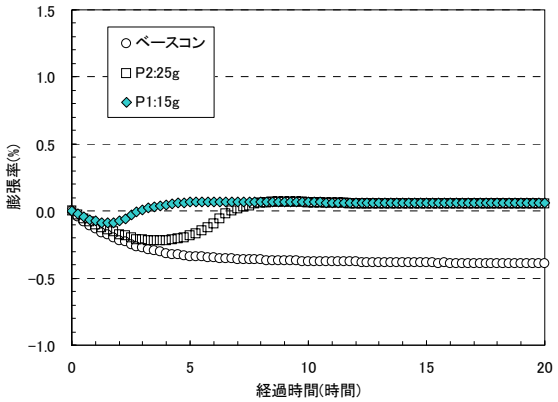
8)新都市ハウジング協会：CFT造技術基準・同解説，2002



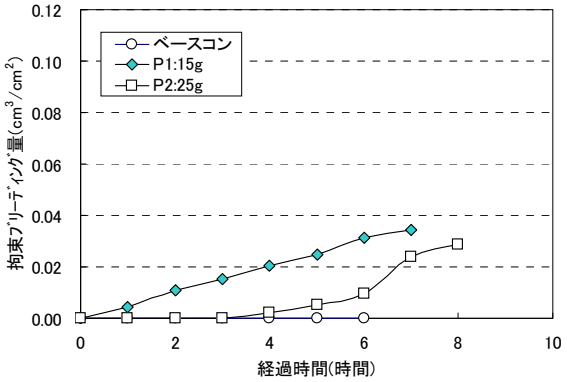
図－14　AL粉末の添加量と圧縮強度（材齢28日）

表－7　フレッシュコンクリート試験結果

環境温度	調合	SP添加率	スランプフロー(cm)	50cm到達時間(秒)	停止時間(秒)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
15℃	ベース	1.25%	63.0×62.5	4.9	26.7	1.4	16.0
	P1:15g	1.25%	62.0×62.0	6.8	22.4	1.2	16.0
	P2:25g	1.25%	63.0×61.0	5.5	28.3	1.2	16.0



図－15　膨張率測定結果（環境温度15℃）



図－16　拘束ブリーディング試験結果（環境温度15℃）