

# コンクリート用混和材料

友 沢 史 紀\*

## 1. はじめに

混和材料はセメント・水・骨材以外の材料で、練り混ぜの際に必要なに応じてモルタルまたはコンクリートにその成分として加える材料であり、添加量の多少によって混和剤と混和材に区分されている。この区分には必ずしも明確な境界はなく、薬品的に少量用いられるものを混和剤、使用量が比較的多く、それ自体の容積がコンクリートの調合に算入されるものを混和材と呼んでいる。

1930年代、コンクリート中に均一に分散した微細な空気泡がコンクリートの凍結融解抵抗性の向上およびワーカビリティの改善に極めて効果のあることが認められ、次いで、起泡作用よりもセメント粒子の分散作用が卓越し、それによってセメントペーストの流動性が著しく増大するものが見出された。

これを端緒として、その後各種の混和材料が開発され、ワーカビリティ、強度特性、水密性、耐久性など、コンクリートの品質を経済的に改善する効果が優れていることから、現在ではほとんどのコンクリートに用いられており、コンクリート用材料として不可欠の地位を占めている。

## 2. コンクリート用化学混和剤

混和剤については研究も実績も国内においてすら既に30年近くの蓄積があるにもかかわらず、従来、JIS規

格が制定されていなかった。そこで、コンクリート用化学混和剤協会では、混和剤の性能判定基準および試験方法を明確にすることを目的として、工業標準新規原案「コンクリート用化学混和剤」を作成し、昨年2月通産省工業技術院に提出した。これは本年中には公布・制定の予定である。

規格原案では、「主として、その界面活性作用によって、コンクリートの諸性質を改善するために用いる混和剤」を「コンクリート用化学混和剤」と定義し、一般の構造用コンクリートをはじめ、その他のコンクリート、モルタル、グラウト、および各種コンクリート製品の製造に用いるAE剤、減水剤およびAE減水剤について規定している。

減水剤、AE減水剤にはコンクリートの凝結・硬化速度の調節機能を付与させたものがあり、原案では表-1<sup>1)</sup>に示されているように混和剤の種別を全部で7種としている。

原案では混和剤の品質を、それを用いたコンクリートの品質によって評価することとし、混和剤を用いない「基準コンクリート」と、試験の対象とする混和剤を用いた「試験コンクリート」とを対比することによって判定する方法が採用されている。また、原案ではできるだけ普遍性のある判定をするために、表-2に示す条件によりスランプ8cmの硬練りコンクリートとスランプ18cmの軟練りコンクリートの2種類のコンクリートに

表-1 コンクリート用化学混和剤の品質(案)<sup>1)</sup>

品質項目	種類および型	AE 剤	減 水 剤			AE 減 水 剤		
			標 準 型	遅 延 型	促 進 型	標 準 型	遅 延 型	促 進 型
減 水 率 (%)		6 以上	4 以上	4 以上	4 以上	10 以上	10 以上	8 以上
ブリージング量の比 (%)		75 以下	100 以下	100 以下	100 以下	70 以下	70 以下	70 以下
凝結時間の差 (min)	始 発	-60~+60	-60~+90	+60~+210	+30 以下	-60~+90	+60~+210	+30 以下
	終 結	-60~+60	-60~+90	+210 以下	0 以下	-60~+90	+210 以下	0 以下
圧縮強度比 (%)	材令3日	95 以上	115 以上	105 以上	125 以上	115 以上	105 以上	125 以上
	材令7日	95 以上	110 以上	110 以上	115 以上	110 以上	110 以上	115 以上
	材令28日	90 以上	110 以上	110 以上	110 以上	110 以上	110 以上	110 以上
長さ変化比 (%) <sup>2)</sup>		120 以下	120 以下	120 以下	120 以下	120 以下	120 以下	120 以下
凍結融解に対する抵抗性 <sup>2)</sup> (相対動弾性係数, %)		80 以上	—	—	—	80 以上	80 以上	80 以上

注: 1) 乾燥期間6か月。

2) スランプ18cmは除く。凍結融解の繰返し200サイクル。

\* 建設省建築研究所無機材料研究室長, 工博

表—2 コンクリート用化学混和剤の試験条件

粗骨材：最大寸法 20 mm の砂利または碎石			
セメント量：280±5 kg/m <sup>3</sup> { (普通ポルト 3 銘柄混合)			
300±5 kg/m <sup>3</sup> { (碎石を用いる場合は +20 kg/m <sup>3</sup> )			
スランプ：8±1 cm			
18±1 cm			
	空気量 (%)	s/a (%)	
基 準	2.0 以下	40~50	
試 験	減 水 剤	基準に対し 1.0 以下	基準より 0~1% 減
	AE 剤・AE 減水剤	基準に対し 3±0.5% を加えたもの	基準より 1~3% 減

ついて試験を行うこととしている。

表—1 に示した混和剤の品質水準は、我が国における従来の規準類、外国規格ならびに既往の試験結果および共通一斉試験結果などを参考として定めたものであり、混和剤を用いることによりコンクリートの諸性質が改善されることを前提とし、これに若干の試験誤差を考慮して定めたものである。

2.1 A E 剤

(1) 概 説

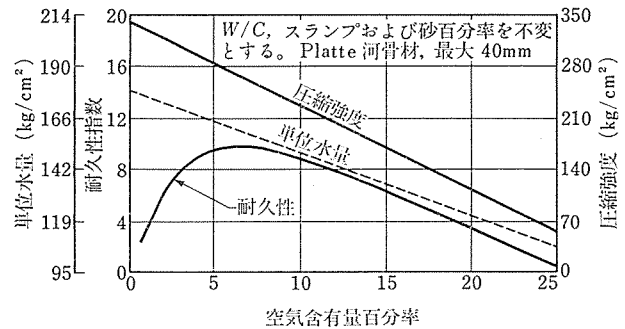
AE 剤 (Air Entraining Admixture : 空気連行剤) は、起泡性の優れた混和剤で、これを用いるとセメント粒子や細骨材の微粉分中の間隙にある空気と水の界面に吸着し、界面活性作用によってコンクリート中に多くの気泡が生成する。

セメントや細骨材の間に付着している空気を完全に除去することは極めて困難であるので、混和剤を用いないコンクリートでも 1~2% の空気が含まれている。これは潜在空気と呼ばれるもので、比較的粗大なものが多く、形状も不整である。これに対して、混和剤を用いて計画的に導入した空気を連行空気という。連行空気は、球状をした微細なそれぞれが独立した空気泡であって、コンクリート中に均一に分散しており、コンクリートのワーカビリチーの改善および凍結融解作用に対する抵抗性の向上に顕著な効果を示す。

コンクリート中の空気量が単位水量、強度あるいは耐久性に及ぼす影響は 図—1<sup>2)</sup> に示すような一般的な傾向が認められるが、空気量が 2% 以下では耐久性の向上にはほとんど効果がなく、また 6% を超えると強度低下や乾燥収縮が大きくなるので、粗骨材の最大寸法に応じて適当な空気量を選定しなければならない。

(2) AE 剤を用いたコンクリートの特性

連行空気泡は、コンクリート中であたかもボールベアリングのような働きをし、またセメントペースト容積を増すのでワーカビリチーが改善され、所要のコンシステンシーを得るための単位水量を 6~8% 程度減少させることができる。

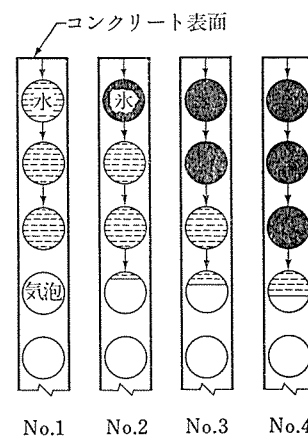


図—1 連行空気量が単位水量、耐久性指数および圧縮強度に及ぼす影響<sup>2)</sup>

コンクリートはそれぞれ比重の異なる物質の混合体であるため、まだ固まらない状態では比重の軽い水は上に、重い骨材は下方に沈降して分離しようとする傾向がある。コンクリートに空気を連行すると、空気泡が水、骨材およびセメントの移動を拘束して材料分離を妨げ、単位水量の減少と相まってプリージングが減少する。

コンクリートに空気を連行すると、ほぼ空気量に比例して強度は低下する。一般に空気量 1% の増加に対し、プレーンコンクリートと同一セメント量のととき 2~3%、同一水セメント比の場合には 4~6%、それぞれ材令 28 日の圧縮強度が減少する。空気量が一定であれば強度低下の割合は、最大寸法が大きいほど、またセメント量の少ないコンクリートほど小さい。

コンクリートの表面が凍結点以下になると、図—2<sup>3)</sup>



図—2 凍結融解作用の機構<sup>3)</sup>

に示すように表面に近い空隙中の自由水、浸透水が凍結し、この際、約 9% の体積膨張を呈し内向きの圧力が生じる。凍結しない自由水はこの圧力によって移動を余儀なくされるが、移動を拘束されると高い圧力となってコンクリートの内部組織に微細なひびわれが発生し、さらにこの作用が継続すると表層からコンクリートが崩壊してゆき、最終的には全体が破壊される。コンクリート中に連行空気泡が適当量存在すると、自由水の凍結による

表-3 各種 AE 剤を用いたコンクリートの気泡組織<sup>4)</sup>

A E 剤		空 気 量 (%)	気泡の比表面積 (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	気泡の間隔係数 (μ)	コンクリート 1 cm <sup>3</sup> 中 に含まれる気泡の数 (個/cm <sup>3</sup> )	練り上がりコンクリー トの空気量 (%)
種 類	名 称					
用	い	1.1	143	659	2 840	1.8
レ	ジ	4.2	207	239	28 040	4.3
ア	ル	4.0	254	200	15 220	3.7
非	イ	4.6	122	413	6 430	4.1

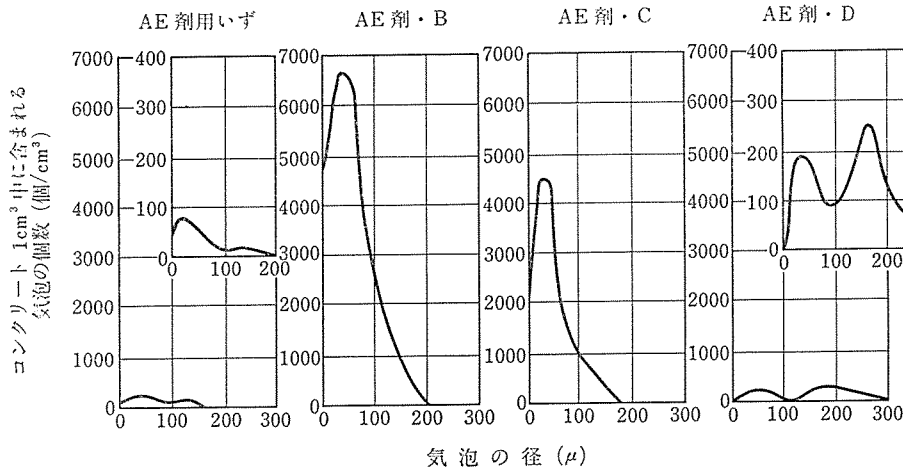


図-3 各種 AE 剤を用いたコンクリートの気泡の粒径分布<sup>4)</sup>

大きな膨張圧を緩和するとともに、自由水の移動をも可能にする。また、フリージングの少ないワーカブルなコンクリートが得られるため、凍結融解に対する抵抗性が著しく向上し、コンクリートを破壊から守ることができる。

混和剤によって連行される気泡の分布状態は AE 剤の銘柄によってかなり異なり、表-3<sup>4)</sup> および図-3<sup>4)</sup> によると、レジ系およびアルキルベンゾール系の気泡間隔係数は 200 μ 程度であるのに対し、非イオン系のものである 400 μ 程度で AE 剤を用いない場合と大差ないことが示されている。

また、これらの AE 剤を用いてコンクリートの凍結融解試験を行った 図-4<sup>5)</sup> によると、連行空気量を同一としても、AE 剤の種類によって凍結融解に対する抵抗性の改善効果にかなりの差があることがわかる。このように、コンクリート中に同一量の空気を連行しても、AE 剤の種類によってコンクリート中に存在する気泡の粒径とその分布状態は著しく相違し、凍結融解に対する抵抗性の改善効果が大きく異なるということに注意を払わなければならない。

## 2.2 減水剤・AE 減水剤

### (1) 概 説

減水剤・AE 減水剤は、界面活性作用のうちセメント粒子に対する分散作用が特に顕著であり、これによりセ

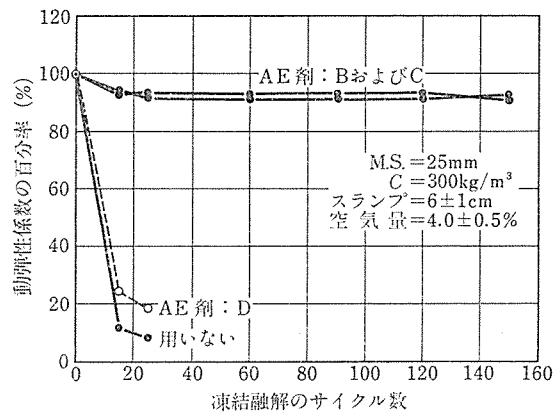


図-4 AE 剤の種類と凍結融解に対する抵抗性との関係<sup>5)</sup>

メントペーストやコンクリートの種々の性状が著しく改良される。

一般にセメント粒子が水と接すると、セメント粒子表面を濡らす力よりも粒子間の凝集力が大きいので、多くのセメント粒子は互いに集合し、集塊となってセメントペースト中に存在する。これに、たとえばリグニンスルホン酸カルシウムを添加すると、水中でリグニンスルホン酸陰イオンとカルシウム陽イオンとに電離して強い陰イオン活性を呈し、集塊状態のセメント粒子の界面に吸着される。その結果、集塊となっていたセメント粒子は静電気的な反発作用により個々に分散される。これがセ

メントの分散作用であり、セメントと水との接触面積が増大してセメントの効率が增大するとともに、集塊中に含まれていた水や空気が放出されるので、セメントペーストの流動性が增大する。

減水剤は空気を連行しないので、凍結融解に対する抵抗性の改善にはあまり効果がないが、連行空気によって生じるいくつかの問題点（たとえば、強度低下、ポンパビリチーの低下、打上がり面の気泡跡など）を解決することができる。

AE 減水剤は、セメント分散作用および空気連行作用を併有する混和剤で、空気連行、単位水量の減少およびセメントの効率増大の総合効果が期待できる。

(2) 減水剤・AE 減水剤を用いたコンクリートの特性

減水剤ではセメントの分散作用により、また AE 減水剤では連行空気泡の作用がこれに加わり、コンクリートのワーカビリチーが著しく向上し、材料の分離傾向も減少する。所要のコンシステンシーを得るための単位水量は、プレーンコンクリートに比し、減水剤の場合 4~6%、AE 減水剤では 12~16% 程度減少させることができる。

減水剤・AE 減水剤では 図-5<sup>9)</sup> に示すように、その型および使用量を適切に選定することによって、コンクリートの凝結を計画的に調節することができる。

遅延型の特長は、コンクリートの凝結を遅延させるだけでなく、セメントの初期水和反応を抑制して水和発熱速度を低下させ、コンクリートの最高温度を低くし、か

つ最高温度に到達する日数を遅らせることができる。

なお、ポストテンション方式におけるグラウトの流動性を改善し、浸透を容易にするために、グラウト用混和材料として減水剤あるいは AE 減水剤の遅延型とアルミニウム粉末が多く用いられており、両方の効果を備えた混和剤も市販されている。

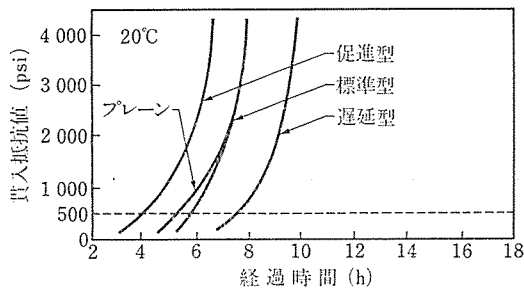
促進型はコンクリートの凝結促進効果よりも、初期強度発現の促進に特長がある。このため、低温時における初期強度の発現や型わく存置期間の短縮などの目的に用いることができる。

減水剤は単位水量を 4~6% 少なくすることができるので、プレーンコンクリートと単位セメント量を同一とすれば、水セメント比はおよそ 3% 程度小さくなる。連行空気による強度低下がなく、しかもセメントの分散作用による効率増大の効果も加わるので、コンクリートの強度は 10~15% 程度大きくなる。

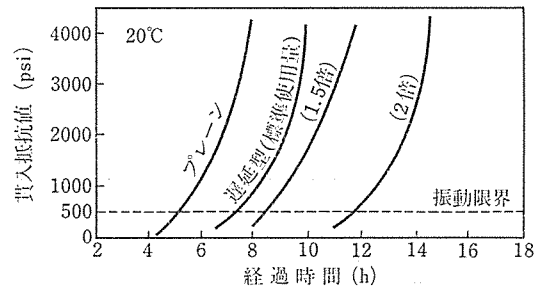
AE 減水剤は連行空気による強度減少があるが、減水率が大きい場合には、それ以上に水セメント比減少による強度増加が大きいので、減水剤の場合と同様に強度は 10~15% 程度大きくなる。

したがって、プレーンコンクリートと同一強度とするためには、単位セメント量を 6~10% 程度減少させることができる。このようにセメント量を減少できるということは、マスコンクリートやセメント量が過大になる場合に、非常に有益である。

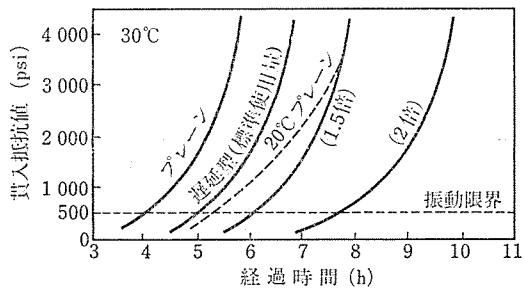
AE 減水剤は、AE 剤と同様な起泡作用を有しており、凍結融解に対する抵抗性を著しく改善することがで



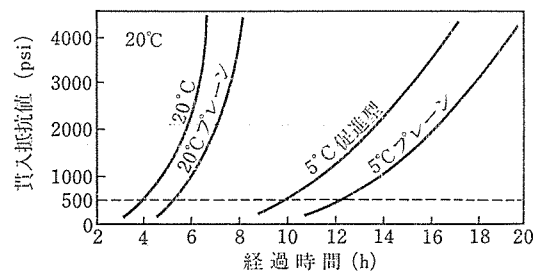
(a) AE 減水剤の型とコンクリートの凝結



(b) 遅延型の使用量とコンクリートの凝結(20°Cの場合)



(c) 遅延型の使用量とコンクリートの凝結(30°Cの場合)



(d) 促進型とコンクリートの凝結

図-5 各タイプの AE 減水剤を用いたコンクリートの凝結特性<sup>9)</sup>

報 告

きる。さらに、AE 減水剤は減水率が大きく、単位水量を少なくすることができるので、特に初期の凍害に対する抵抗性を増大するうえでも有利である。

AE 減水剤の気泡組織は、AE 剤と同様に銘柄によって相当異なり、凍結融解に対する抵抗性も相違するので、過去の実績や試験結果を十分に検討して選定すべきである。

以上に示した混和剤のまだ固まらないコンクリートおよび硬化コンクリートに対する主な効果を、日本建築学会「コンクリート用表面活性剤使用指針案」では、表-4<sup>7)</sup>のようにまとめて示している。

混和剤を利用する場合、目的とする性能が得られるように剤の種類あるいは型を選定することは当然であるが、この場合、コンクリートの他の性能に及ぼす影響についても十分な検討を行い、施工あるいはコンクリートの品質に支障のないことを確認することが大切である。

プレストレストコンクリートに用いる鋼材は高張力鋼であり、しかもプレストレスによって常時高い引張応力を受けているので、腐食性雰囲気に対してより敏感に反応しやすい。したがって、緊張材に接触するコンクリートまたはグラウトには、鋼材の腐食を促進する塩化カルシウムまたは塩化物をある程度以上含む混和剤を用いてはならない。

減水剤および AE 減水剤の主成分には、その分子中にセメントの水和反応を遅延させる作用をもつといわれる水酸基、カルボキシル基などの原子団をもつものが多い。そこで、これらの促進型では凝結硬化反応を促進する副次成分として塩化カルシウムなどを添加して、初期強度の発現を促進している。

塩化物の許容限度として、土木学会“プレストレストコンクリート標準示方書”では、㊸ プレテンション部材で主構造に用いるものおよび海浜地帯など環境条件の悪い箇所に用いるもの、またはポストテンション部材の PC グラウトには、砂の絶乾重量に対し 0.03% 以下 (NaCl 換算)、㊹ 簡易なプレテンション部材、PC ぐいのように地中に埋設され外気の影響を受けにくいもの、およびポストテンション部材の場合には、セメント重量の 0.1% に相当する量以下で、構造物の重要度、環境条件等によって適切に定める、としている。

また、日本建築学会 JASS 5 では、ポストテンション方式の場合、グラウト用のモルタルについては鋼材の腐食の危険をなくするため、細骨材の塩分許容値を 0.02% としている。

緊張材に直接接触するコンクリートおよびグラウトでは、塩分の許容値は一般の場合より厳しく考えるべきであり、特にオートクレーブ養生を行う場合には、鋼材の腐食は極めて進行し易いので、塩分含有量の管理はさらに厳重に行わなければならない。

コンクリート中の鋼材腐食を促進する因子は塩素イオンであるので、従来のように細骨材中の NaCl 量の規制だけではなく、今後は骨材はもちろん混和材料や練りませ水中の塩分も含めたコンクリート中の全塩化物量、すなわち塩化物の総量で管理していくべきであろう。

3. 高性能減水剤

高性能減水剤についての明確な定義はないが、一般に、セメント粒子を効果的に分散させ、凝結の遅延、過剰な空気連行および強度低下などの悪影響なしに高い混

表-4 表面活性剤の主要効果一覧表<sup>7)</sup>

主要な効果		表面活性剤の種類	AE 剤	減水剤			AE 減水剤		
				標準型	遅延型	促進型	標準型	遅延型	促進型
まだ固まらないコンクリート	単位水量の減少	○	△	△	△	◎	◎	◎	
	単位セメント量の減少	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	空気連行性	◎	—	—	—	◎	◎	◎	
	ワーカビリティの改良	◎	○	○	○	◎	◎	◎	
	ブリージングの減少	◎	△	△	△	◎	◎	◎	
	コンクリートの凝結の遅延	—	—	◎	×	—	◎	×	
	コンクリートの凝結の促進	—	—	×	○	—	×	○	
	ポンパビリティの改良	○	◎	◎	◎	○	○	○	
	フィニッシュャビリティの改良	○	○	○	○	○	○	○	
	スランプ低下の防止	—	○	◎	—	○	◎	—	
硬化したコンクリート	初期強度の増大	—	○	—	◎	○	—	◎	
	水和熱の低減	—	○	◎	×	○	◎	×	
	水密性の増大	○	○	○	○	◎	◎	◎	
	中性化に対する抵抗性の増大	○	○	○	○	◎	◎	◎	
	凍結融解作用に対する抵抗性の増大	◎	—	—	—	◎	◎	◎	
	化学的浸食作用に対する抵抗性の増大	○	○	○	○	◎	◎	◎	
	すりへり・摩耗作用に対する抵抗性の増大	—	○	○	○	○	○	○	

◎：効果大，○：効果あり，△：効果ややあり，×：使用不可，—：関係なし

入率で使用でき、単位水量を大幅に減少することのできる混和剤を高性能減水剤と呼んでいる。

高性能減水剤の高い減水作用を利用して、通常のコンクリートと同程度のワーカビリティを保持したまま水セメント比を極力低減し、高強度コンクリートを得る場合には高強度用減水剤などと呼ばれ、あらかじめ練りまぜられたコンクリートに高性能減水剤をあとから添加することにより、通常の水セメント比でワーカビリティの優れたコンクリートを製造する場合には流動化剤などと呼んでいる。

高性能減水剤は 図-6<sup>9)</sup> に示すように、その使用量に応じて減水率が增大し、20~30% に及ぶ大幅な減水が可能であるが、これはセメントの分散効果が優れているばかりでなく、使用量の増大にもよっている。

高性能減水剤はセメントの水和反応を阻害せず、起泡作用もないので、使用量を増加してもコンクリートの凝結は遅延せず、空気量もほとんど増加しない。高性能減水剤の非空気連行性は、連行空気による強度低下の割合の大きい高強度コンクリートの製造には重要な性質である。また、高性能減水剤の有するセメントの分散・減水効果は、あらかじめ練りまぜられたセメントペーストにあとから添加(遅延添加)した場合の方が大きく、流動化コンクリートはこの原理を巧みに利用したものである。

(1) 高強度コンクリートへの応用

高性能減水剤の高い減水性を利用して、通常のワーカビリティで水セメント比を大きく低減し、特殊な養生を

行わずに 800 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の高強度コンクリートが製造され、コンクリート長大鉄道橋などで実用化されている。また、プレストレストコンクリート、プレキャストコンクリート部材、パイプ、セグメント等の高温養生時間および製造工程の短縮などにも応用されている。

高性能減水剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、減水効果による水セメント比の低減に対応して増大する。表-5<sup>9)</sup> に高性能減水剤の使用量、単位セメント量と圧縮強度の関係の一例を示す。

表-5 高性能減水剤を用いたコンクリートの圧縮強度<sup>9)</sup>

添加量 (%) 液状品として	W/C (%)	水 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	
				7日	28日
0	42.5	170	400	352	508
0.6	40.0	160		462	627
1.2	37.3	149		519	700
1.8	34.3	137		632	735
2.4	31.5	126		659	781
0	37.0	185	500	474	642
0.6	35.0	175		562	747
1.2	32.0	160		715	829
1.8	29.6	148		724	842
2.4	27.4	137		732	879
0	33.3	200	600	602	681
0.6	31.7	190		668	757
1.2	29.2	175		743	853
1.8	27.2	163		770	872
2.4	25.3	152		786	920

(2) 流動化コンクリートへの応用

流動化コンクリートとは、あらかじめ練りまぜられた単位水量の少ない硬練りまたは中練りコンクリートに、セメント分散性能の高い混和剤をあとから加えることにより、硬練りコンクリートの品質を保持したまま、流動性を一時的に増大させたもの、つまりスランプの大きいコンクリートにしたものである。

流動化コンクリートは、西ドイツやイギリスでは硬練りコンクリートの施工性改善を目的として開発・使用されているが、我が国の建築分野では従来の施工性を保持しつつ、硬練りコンクリートに近い品質を得るための手法、すなわち、コンクリートの品質改善という目的の方が強く意識されている。

流動化コンクリートの特長は、同一スランプの通常のコンクリートに比較して、セメントペースト量が少ないこと、水セメント比が同じであってもペースト自体の流動性が著しく大きくなっていることである。したがって、流動化する前のコンクリートとして、通常の硬練りコンクリートの調合をそのまま採用した場合には細

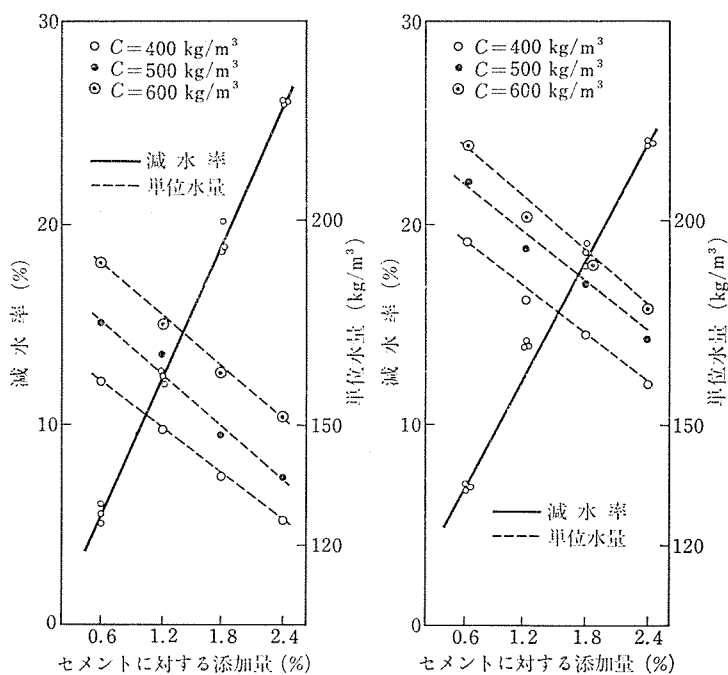


図-6 高性能減水剤の添加量と減水率との関係<sup>9)</sup>

骨材量が不足し、分離しがちなコンクリートとなる。このようなことから、適正なワーカビリティを有する流動化コンクリートを得るためには、ベースとなるコンクリートに通常より多くの細骨材量が必要となり、一般には細骨材率を3~5%程度増加するような措置が講じられている。ベースコンクリートの単位水量は、細骨材率の増加に見合う補正が必要で、通常の硬練りコンクリートのそれより若干多くなっている。しかし、流動化コンクリートの単位水量は 図-7<sup>9)</sup> に示すように、AE 減水剤

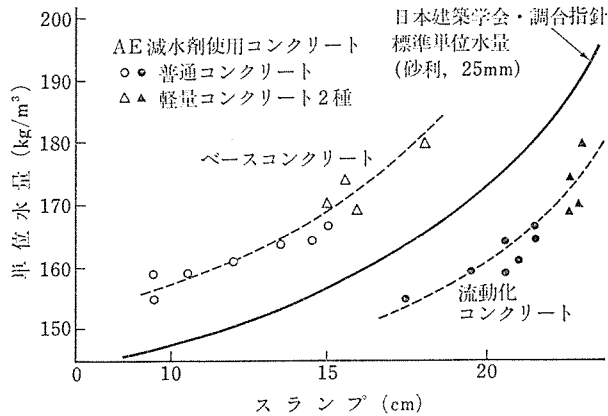


図-7 流動化コンクリートの単位水量<sup>9)</sup>

を使用した通常の軟練りコンクリートの単位水量に対してさらに8~12%程度少なくなっている。

流動化コンクリートの力学的性質は、基本的にはベースコンクリートと同じであり、その一例として流動化剤添加前後のコンクリートの圧縮強度の関係を 図-8<sup>10)</sup> に

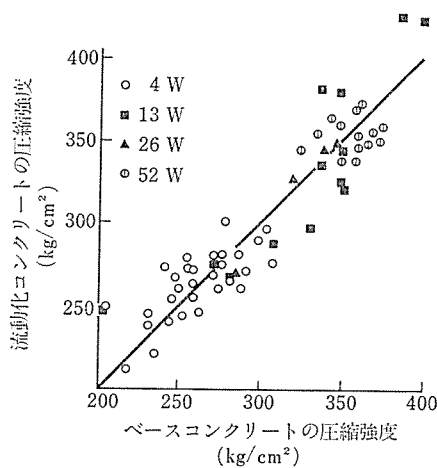


図-8 流動化剤添加前後の圧縮強度<sup>10)</sup>

表-6 フライアッシュの化学成分と物理的性質<sup>11)</sup>

二酸化けい素	45%以上	比 重	1.95 以上
湿 分	1%以下	粉末度 比表面積 (ブレン方法) (cm <sup>2</sup> /g)	2400 以上
強 熱 減 量	5%以下	単位水量比 (%)	102 以下
		圧縮強度比 (%)	28日 60 以上
			91日 70 以上

示すが、空気量が同じであれば、有意な差は認められない。

高強度コンクリートを得るには、できるだけ水セメント比の小さいコンクリートを密実に締固めることが必要であるが、流動化コンクリートは所要のワーカビリティを損なうことなく水セメント比を小さくすることができるので、現場打ちのプレストレストコンクリートにはきわめて有効であると考えられ、今後の普及が期待できよう。

#### 4. フライアッシュ

フライアッシュは、火力発電所における微粉炭燃焼ボイラの煙道に浮遊しているアッシュを、電気集塵器等により捕集した産業副産物であるが、セメントに混和した場合の効果が優れていることから、混和材としてだけではなく、これを混合したフライアッシュセメントとして土木・建築の各分野で広く利用されている。

フライアッシュは、それ自体に水硬性はないが、これに含まれている可溶性のけい酸等がセメントの水和の際に生成される水酸化カルシウムと常温で徐々に化合して、不溶性の安定なけい酸カルシウム等を生成する。このような性質をポゾラン活性と呼んでおり、フライアッシュは人工ポゾランの代表的なものである。

フライアッシュの粒子の大部分は、表面が滑らかなガラス質で球状を呈しており、これは他のポゾランに見られない優れた特長である。

混和材としてのフライアッシュは、表-6<sup>11)</sup> に示すように JIS にその品質が定められている。

フライアッシュの品質は、微粉炭の品質、ボイラの構造・運転状態、集塵器の形式等によって異なり、炭素含有量の比較的大きいものもある。未燃焼炭素の含有分の多いフライアッシュは、AE 剤が吸着しやすく、所定の空気量を得るためには、一般に AE 剤の使用量を増加する必要がある。

##### (1) フライアッシュを用いたコンクリートの特性

フライアッシュをセメントの一部に置き換えて用いた場合、その形状が球形であるためワーカビリティが改善され、所要のコンシステンシーを得るために必要な単位水量を少なくすることができる。単位水量が減少する程

度は、フライアッシュの粒形・粉末度、フライアッシュによるセメントの置換率、コンクリートの調合等によって相違するが、置換率を 25% とした場合には、6~7% 程度となる。

フライアッシュでセメントの一部を置き換えたコンクリートの強度は、比較的初期の材令においてはいくぶん小さいが、長期の材令では相当に増進する。長期強度の増進程度は、フライアッシュの品質ならびに置換率、セメントの品質、コンクリートの水セメント比、養生条件等によって相違する。

フライアッシュを用いたコンクリートは、セメントの水和反応に際して遊離石灰の発生が少ないため、化学的な作用または海水に対する抵抗性が大きくなる。そのため、水密コンクリート、海水の作用を受けるコンクリート、プレパックドコンクリートなどに使用されることが多い。また、セメントの水和反応に際しての水和熱の発生が緩和されるので、マスコンクリートにも多く使用されている。しかし、フライアッシュの置換率を大きくすると、同一調合の場合、一般に中性化の進行が速く、初期強度の発現も小さくなる傾向にあるので、所定の材令における設計基準強度の確保、鉄筋に対するコンクリートのかぶり厚さなどに、特別の配慮が必要である。

### 5. コンクリート用膨張材

コンクリート用膨張材（以下、膨張材という）は、セメントおよび水とともに練り混ぜた場合、水和反応によってエトリンガイトあるいは水酸化カルシウムの結晶を生成して、モルタルまたはコンクリートを膨張させる作用を有する混和材で、JIS にその品質が定められている（表—7<sup>12)</sup>）。

現在市販されている膨張材の比重、粉末度および化学成分を表—8<sup>13)</sup> に、また、これら膨張材の水和反応式を表—9<sup>13)</sup> に示す。

表—8 我が国における市販膨張材の化学成分および粉末度・比重<sup>13)</sup>

銘柄	比重	粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	化 学 成 分 (%)							
			強熱減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	計
A	3.00	2500	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9	99.5
B	3.00	3200	1.2	3.1	6.3	0.4	58.0	0.3	29.6	98.9
C	3.14	3500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0	99.5
D	3.06	3900	0.4	11.4	5.5	2.1	58.2	2.6	19.3	99.5

注：粉末度・比重は、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）による。

表—9 膨張材の水和反応式<sup>13)</sup>

$3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} + 8\text{CaSO}_4 + 96\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$	
(膨張材Aの主成分：カルシウムサルホアルミネート) (エトリンガイト)	
$6\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{SO}_3 + 32\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	
(膨張材Bの主成分) (エトリンガイト)	
$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$	(膨張材C, Dの主成分) (水酸化カルシウム)

表—7 膨張材の化学成分と物理的性質<sup>12)</sup>

項 目		規 定 値		
化 学 成 分	酸化マグネシウム	%	5.0 以下	
	強熱減量	%	3.0 以下	
物 理 的 性 質	比表面積	cm <sup>2</sup> /g	2000 以上	
	1.2mm ふるい残分	%	0.5 以下	
	凝 結	始 発	min	60 以後
		終 結	h	10 以内
	膨張性(長さ変化率)	7日		0.00030 以上
		28日		-0.00020 以上
圧 縮 強 さ kgf/cm <sup>2</sup> (MPa)	3日		70 以上	
	7日		150 以上	
	28日		300 以上	

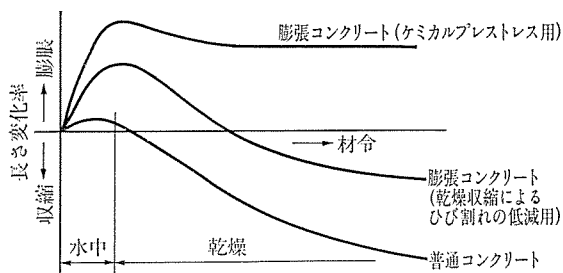
膨張材の水和速度は、セメントと混合した際有効な膨張となるように、モルタルやコンクリートの凝結終了後から水和が開始し、常温においては 3~7 日で終了するように化学的・物理的に調整されている。

膨張の過程におけるエトリンガイトや水酸化カルシウムの生成時には、十分な水分の供給が必要であり、特に材令初期における湿潤養生が重要である。

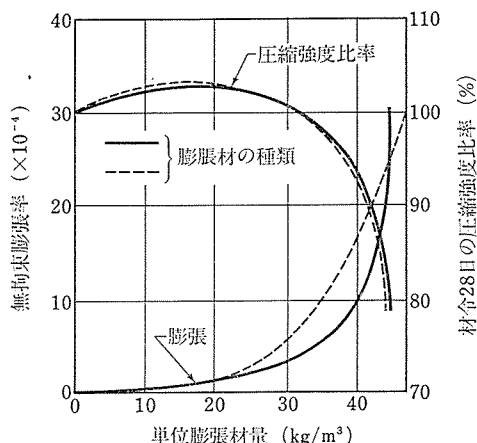
膨張材はモルタルまたはコンクリートの乾燥収縮を補償し、ひびわれの低減を目的として土木・建築の両分野で使用されている。また、膨張材の膨張性能をより積極的に利用する方法として、膨張材を多量に混和してコンクリートに生じる膨張力を鉄筋などで拘束し、ケミカルプレストレスを導入する方法があり、現在、遠心力鉄筋コンクリート管、コンクリートボックスカルバート、鉄筋コンクリート矢板などのコンクリート製品をはじめ、充填用モルタル・コンクリートなどにも用いられている（図—9<sup>14)</sup> 参照）。

膨張コンクリートの圧縮強度は、図—10<sup>15)</sup> に示すように無拘束で養生された場合、膨張率がある程度大きく





図—9 膨張コンクリートおよび普通コンクリートの膨張・収縮特性曲線<sup>14)</sup>



図—10 単位膨張材量と圧縮強度比率および無拘束膨張率<sup>15)</sup>

なると低下するが、単位膨張材量が  $30 \text{ kg/m}^3$  程度であれば、圧縮強度の低下はほとんどない。また、鋼製型わくによる拘束下での強度試験結果では、無拘束膨張率が大きくても、通常のコンクリートとほぼ同じ程度の強度を示している。

これらのことから一般的には、自由膨張させた場合でも強度低下を生じない範囲とされている単位膨張材量を  $25 \sim 30 \text{ kg/m}^3$  程度としたコンクリートが収縮補償コンクリートとして、また、単位膨張材量を  $40 \sim 60 \text{ kg/m}^3$  としたコンクリートがケミカルプレストレス導入や充填を目的として用いられている。

## 6. む す び

建設工事において主要な役割を担うコンクリート技術

の進展はまことに目覚ましく、新材料・新工法の導入などによるコンクリートの性能向上と、産業副産物の利用範囲拡大が講ぜられており、混和材料への要請は年々高くなる現状にある。

混和材料として品質の良好なものを適切に用いれば優れた効果が得られるので、それぞれの利点を積極的に利用することが望まれるが、使用方法を誤れば害になる性質を有するものもある。したがって、混和材料の選定・使用に当たっては、それぞれの性質および効果を十分に確認して適切に用いることが極めて大切である。

最後に、引用させて頂いた文献の著者の方々に謝意を表す。

### 参 考 文 献

- 1) コンクリート用化学混和剤協会 JIS 原案作成委員会「コンクリート用化学混和剤(案)」
- 2) 米国内務省開拓局編(近藤泰夫・訳): コンクリートマニュアル, 国民科学社, 昭和 53 年
- 3) H.L. Kennedy: ASTM Proc., 1944
- 4) 小林正几: 各種の AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質に及ぼす影響について, セメント技術年報, 1967
- 5) 小林正几: 各種の AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質に及ぼす影響について, セメント・コンクリート, No. 249, 1967
- 6) 岸谷孝一, 秀島節雄, 山本幸雄: 混和剤の知識について, その 3, 建築生産, 1974. 3
- 7) 日本建築学会: コンクリート用表面活性剤使用指針案・同解説, 昭和 53 年
- 8) 山川肇爾: コンクリート用減水剤の新しい使い方, コンクリート製品, No. 55, 1973
- 9) 日本建築学会: 流動化コンクリートの技術の現状, 昭和 55 年
- 10) 嵩英雄ほか: 高性能減水剤の遅延添加による高流動コンクリートの研究(1~4 報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和 51 年
- 11) JIS A 6201 フライアッシュ
- 12) JIS A 6202 コンクリート用膨張材
- 13) 日本建築学会: 膨張材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針案・同解説, 昭和 53 年
- 14) 一家惟俊: 膨張材使用によるひび割れ防止, 施工, No. 109, 1975
- 15) 河野俊夫ほか: 中央大学多摩校地施設新築工事のコンクリート工事における一連の研究(その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1977