

論文

[1116] 減圧練りませ法の適用性に関する基礎研究

正会員 ○長合 友造 (筑波大学大学院)

正会員 山本 泰彦 (筑波大学構造工学系)

1. まえがき

減圧条件下でコンクリートを練りませ、これを大気圧に開放する際に、コンクリート中の気泡がボイルの法則に従って挙動すると仮定すれば、次のような効果が期待できる。すなわち、中程度の減圧条件下でAEコンクリートを練りませた場合には、通常の場合よりも径の小さい気泡を導入でき、例えば、強度、耐凍害性を一定にした場合には、欠陥が少なくかつ単位セメント量の少ないコンクリートを造ることができると考えられる。また、減圧度を更に高めて真空に近い状態で練りませれば、コンクリート中にほとんど気泡が存在しなくなるので、品質の優れた高い強度のコンクリートを造ることが可能になると考えられる。

本文は、上記の新しい練りませ法(以下、減圧練りませ法という)の適用を考える場合に予め検討しておくべき事項に関し、AE剤水溶液、ペーストおよびモルタルを対象として行った基礎的な試験の結果について述べたものである。

2. 使用材料および配合

セメントには、普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は、鬼怒川産川砂(比重=2.59、吸水率=2.47%、F.M=2.55)を用いた。また、AE剤には、樹脂系のものを用いた。

ペーストの配合は、水セメント比を50%とし、これに添加するAE剤量はセメント重量の0.1%とした。また、モルタルの配合は、水セメント比を40、50および62.5%の3種類に変え、大気圧で練りませた場合の目標空気量および目標フロー値がそれぞれ10%および210となるように、試し練りによって定めた(表-1参照)。

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	AE剤量 (Cx%)
40	1.85	0.100
50	2.73	0.045
62.5	3.53	0.040

3. 実験方法

(1) 練りませ

練りませ容器には、内部を観察できるように、透明アクリル製の円筒容器(内径10x15cm)を作成して用いた。練りませは、この容器をペイントシェイカー(paint shaker)で振動させることによって行った。モルタルの練りませにあたっては、まず、セメントと細骨材を容器に入れた後に所定の圧力まで減圧して1分間空練りを行い、次いで、AE剤を加えた練りませ水を加え、注水による圧力の増加を補正した後、6分間練りませた。容器1個当りのモルタルの練りませ量は0.7ℓとし、1回に2個の容器をペイントシェイカーに取り付けて練りませを行った。ペーストの場合も同様に練りませたが、空練りは行わず、練りませ時間は3分間とした。また、この場合の練りませ量は0.5ℓとし、1回に容器1個分ずつ練りませた。

(2) 練りませ直後の空気量の測定

AE剤水溶液とペーストの場合、大気圧開放前後における気泡の高さまたはペーストの高さを練りませ容器の外部から測定し、これらをもとに大気圧開放前後の空気量の値を求めた。また、モルタルの場合は、1回の練りませで得た容器2個分のモルタルを大気圧下でさじで攪拌混合したものを試料とし、小型のワシントン型エアメータにより、大気圧に開放された後の

空気量のみ測定した。

(3) 硬化モルタルの気泡組織およびその他の試験

気泡組織の測定は、リニアトラバース法 (ASTM C457-82a) に準じて行った。また、モルタルのフロー値および強度は、セメントの強さ試験 (JIS R5201) に準じて行った。

4. 実験結果および考察

(1) 練りませ直後の空気量

図-1 および 2 は、AE 剤水溶液あるいは AE ペーストを各種の減圧条件下で練りませた場合に、AE 剤水溶液上に生成される気泡の高さあるいはペーストの空気量を減圧したままの状態測定した結果を示したものである。これらの図より、減圧条件下で生成または連行される気泡の量は圧力が小さくなるに従い幾分減少する傾向にあるが、その減少量は以外に少なく、減圧の程度が相当に大きくても大気圧下と比べて大差のない気泡が生成あるいは連行されていることが認められる。また、図-3 および 4 は、これらを大気圧下に開放した場合における開放前後の気泡の高さあるいは空気量の比を練りませ時の絶対圧に対しプロットしたものであるが、試験結果はボイルの法則による理論線とほぼ一致していることが認められる。これらの結果は、AE 剤水溶液およびペーストの場合には、減圧下でも大気圧下と同程度の空気が連行され、連行された空気が概ねボイルの法則に従って挙動することを示すものと思われる。

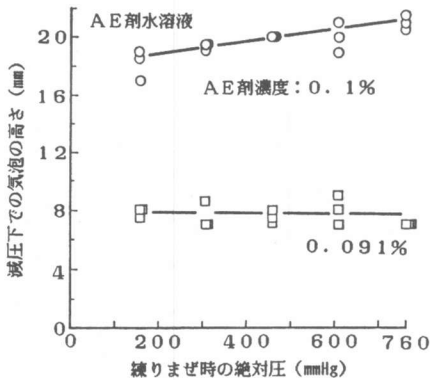


図-1 練りませ時の絶対圧と減圧下での気泡の高さの関係

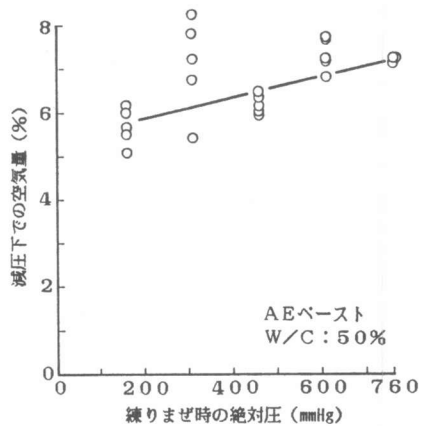


図-2 練りませ時の絶対圧と減圧下での空気量の関係

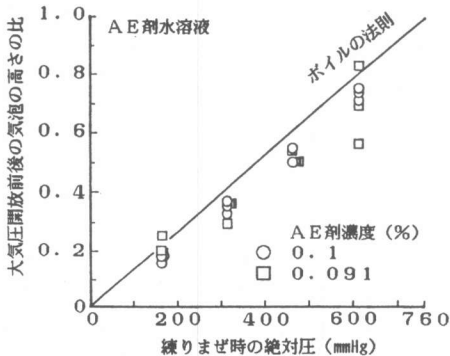


図-3 練りませ時の絶対圧と大気圧開放前後の気泡の高さの比の関係

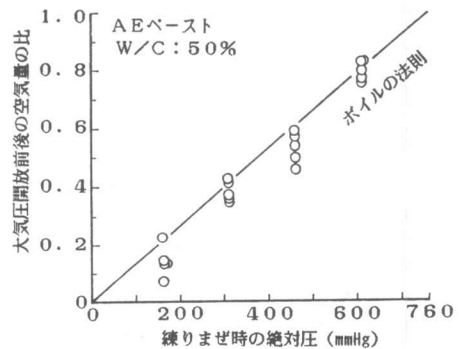


図-4 練りませ時の絶対圧と大気圧開放前後の空気量の比の関係

一方、モルタルの場合には、減圧したままの状態では空気量を測定することが不可能であった。そこで、大気圧開放後の空気量を測定し、これを大気圧下で練りませた場合の空気量に対する比で表して練りませ時の絶対圧との関係を調べた。図-5は、この関係を示したものである。なお、図中の実線は、減圧条件下でも大気圧下と全く同じ量の気泡が連行されたと仮定して、ボイルの法則より求めた理論値を示している。図-5を参照すると、モルタルの場合には、実測値が理論値よりも大きくなる傾向にあることが認められる。このような結果が得られた理由としては、上記の傾向が減圧度の大きい場合および水セメント比が大きい(S/Cが大きい)場合に大きいことを考慮すると、減圧条件下で気泡を覆っていたAE剤分子の一部が圧力開放後にモルタル中に開放され、これが大気圧下での試料の攪拌混合の際に新たな気泡を包み込んだ影響が考えられる。そこで、次に、減圧練りませ直後のモルタルからコア抜きに準じた方法で試料を採取し、その空気量を測定してみた。その結果、このように試料を採取した場合には、ボイルの法則から計算した値とほぼ同じになることが認められ(図-6参照)、予期した影響が確認されたのである。これらの結果から判断すると、モルタルの場合にも減圧下において大気圧下と同程度の空気量が連行され、連行された気泡は概ねボイルの法則にしたがって挙動していると考えられることができると思われる。

### (2) 硬化後の気泡組織

表-2は、練りませ時の絶対圧を変化させたモルタルについて、硬化後の気泡組織を測定した結果を示したものである。この表より、

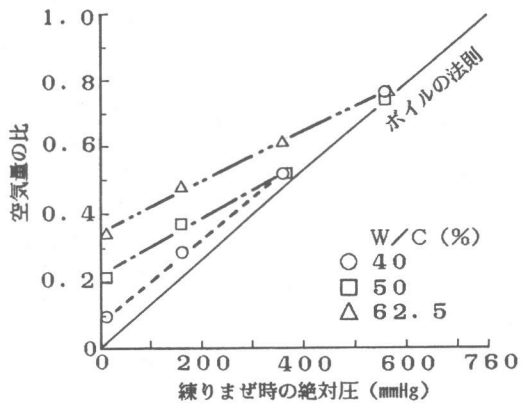


図-5 練りませ時の絶対圧と空気量の比の関係 (攪拌した場合)

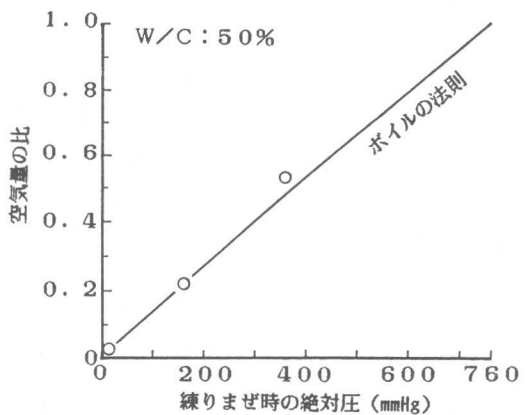


図-6 練りませ時の絶対圧と空気量の比の関係 (コア抜きした場合)

表-2 硬化後の気泡組織測定結果 (大気圧下で攪拌した場合)

W/C (%)	練りませ時の絶対圧 (mmHg)	空気量(%)		平均気泡径(μm)		気泡間隔係数 (μm)
		練りませ直後	硬化後	実測値	理論値 <sup>*1</sup>	
40	760	9.2	10.4	76	--	55
	160	2.5	2.6	74	45	103
50	760	10.8	9.9	91	--	61
	360	5.5	4.3	77	71	81
62.5	160	3.8	2.7	106	54	136
	760	10.8	12.2	130	--	64
62.5	160	5.5	6.7	161	77	132

\*1 760mmHgの平均気泡径をもとにボイルの法則によって計算した値

平均気泡径がほぼ理論値に近い値となったのは、水セメント比50%のモルタルを360mmHgで練り混ぜた場合だけであって、160mmHgで練り混ぜた場合には、いずれも理論値の約1.5~2倍にもなっていることが認められる。しかし、減圧練り混ぜたモルタルの平均気泡径がこのように大きくなった主因は、試料を大気圧下で攪拌混合した際に混入したと思われる大きな気泡の存在によるものであることが判明した。すなわち、図-7は、表-2中の水セメント比50%のモルタルに対する気泡径分布を示したものであるが、減圧練り混ぜを行った場合の方がむしろ小さい気泡の割合が多くなっており、160mmHgで練り混ぜたモルタルの平均気泡径が大きくなったのは500 $\mu$ m以上の大きな

気泡の存在の影響を著しく受けた結果であると考えられる。また、表-3は、練り上がった試料を攪拌せずに作成した供試体について測定した別のシリーズ試験の結果を示したものであるが、この場合には、平均気泡径の実測値は理論値にかなり近い値となったのである。したがって、練り混ぜ直後の平均気泡径に関しては、比較的理論値に近い値になっていると考えられる。

表-3を参照すると、練り混ぜ直後に攪拌を行わなかった場合の気泡間隔係数の値は、大気圧下の場合と比べて大差のないことが示されており、この場合には、モルタル中の気泡数は大気圧下で練り混ぜた場合とほぼ同じであると考えられる。しかしながら、攪拌を行った場合の結果を示した表-2を参照すると、気泡間隔係数の値は大気圧下の場合より相当に大きくなっており、この場合には、実際の気泡数もかなり減じていると考えられる。この理由に関しては、通常のAE剤による気泡の場合には、小気泡と大気泡が接触すると、大気泡が小気泡を吸収して更に大きな独立気泡になり易いことが知られているのであって<sup>1)</sup>、この現象がモルタルの攪拌中に実際に生じたためである可能性が極めて高い。また、この現象が、前述した減圧練り混ぜたモルタルの気泡径が理論値より幾分大きくなった一因とも考えられる。

一般のコンクリートでは、練り混ぜ後の混合・攪拌、等の作業は不可避であり、この間に生

表-3 硬化後の気泡組織測定結果(大気圧下で攪拌しない場合)

W/C (%)	練り混ぜ時の絶対圧 (mmHg)	空気量(%)		平均気泡径( $\mu$ m)		気泡間隔係数 ( $\mu$ m)
		練り混ぜ直後	硬化後	実測値	理論値 <sup>*1</sup>	
40	760	10.9	9.2	63	--	52
	160	2.2	2.7	51	37	72
62.5	760	9.8	10.4	69	--	50
	160	2.1	3.1	50	41	62

\*1760mmHgの平均気泡径をもとにボイルの法則によって計算した値

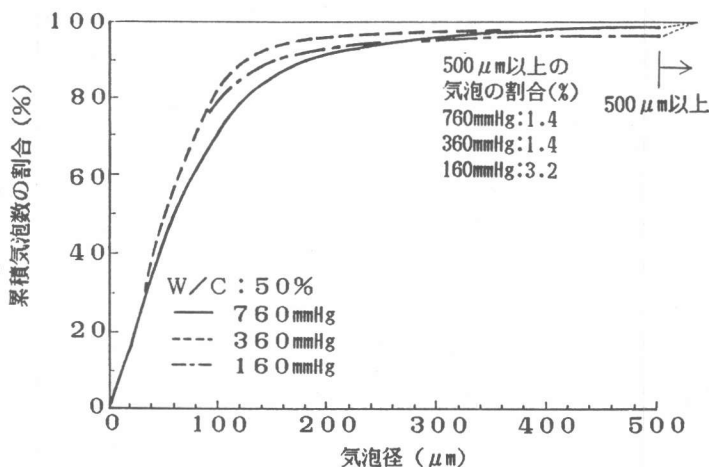


図-7 累積気泡径分布

じる前述してきたような気泡組織への悪影響は、減圧練りませ法の実用化を考えた場合の大きな問題点となる。しかしながら、このような混合攪拌を行っても、大気圧下で練りませた同一空気量の試料と比較すると、減圧練りませを行った場合の気泡間隔係数は著しく改善されるのであって（図-8参照）、この特徴を活かした活用法も考えることもできる。また、最近、気泡同士の一団化が生じにくい新種のAE剤が開発されており<sup>2)</sup>、この種のAE剤の使用によって、上記の悪影響の問題が解決される可能性もある。

（3）減圧練りモルタルの流動性と強度

まず、単位水量の影響を多大に受けるモルタルの流動性と強度を試験するのに先立ち、減圧中におけるモルタルの単位水量の減少量を調べた。その結果、減少量は0.03%以下であり、試験結果に全く影響を及ぼさないことが確認された。

図-9は、大気圧下で約10%の空気量となる配合のモルタルを各種減圧条件下で練りませた場合の空気量とフロー値の関係を示したものである。この図より、いずれの水セメント比の場合でも、空気量の減少とともにフロー値が低下する傾向が認められる。しかし、流動性が低下する程度は水セメント比によって相当に差があり、富配合のモルタルほど低下の程度が小さいことが認められる。一方、前述の空気量の試験では、水セメント比が小さいほどその取扱中における空気の混入が小さくなり、空気量が理論値に近い値となることが示された（図-5参照）。これらの結果は、減圧練りませ法の採用にあたっては、これをなるべく富配合のモルタルまたはコンクリートに用いるのが有利であることを示唆するものと思われる。

図-10は、減圧練りませ法によって作成したモルタルの圧縮強度を、大気圧下で

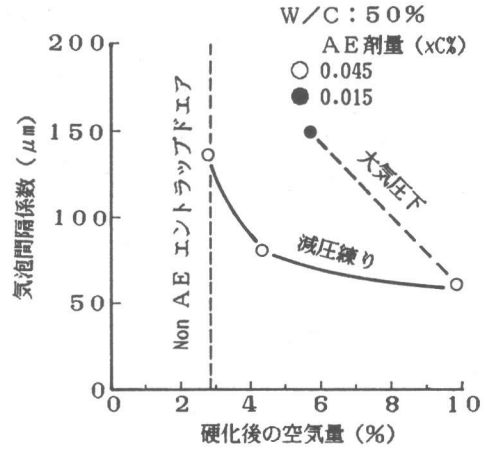


図-8 硬化後の空気量と気泡間隔係数の関係

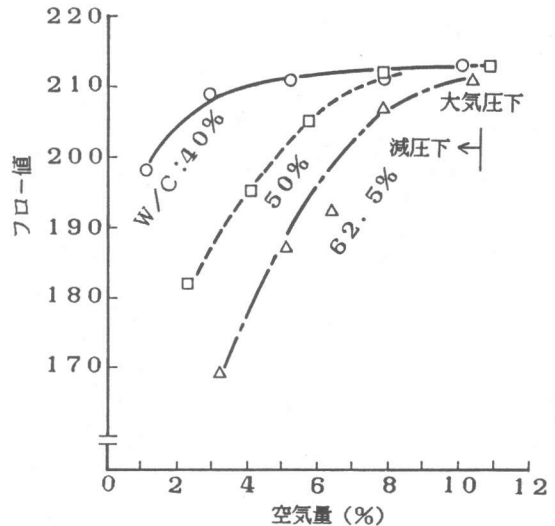


図-9 空気量とフロー値の関係

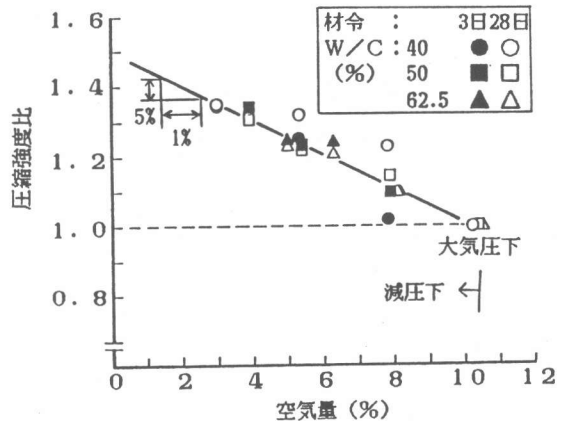


図-10 空気量と圧縮強度比の関係

練り混ぜた同配合のモルタルの圧縮強度に対する比で表し、これを空気量との関係で示したものである。この図より、モルタルの圧縮強度比は空気量を変数とする直線で近似的に表示でき、しかも、この直線関係は、水セメント比が40~62.5%の範囲内では、水セメント比や材令の相違に関わらず全く同じであることが認められる。また、この直線から求まる圧縮強度比の増加率は、空気量1%の減少に対し約5%であり、通常のコンクリートにおける空気量と圧縮強度比との関係とほぼ同じ値になった。一方、曲げ強度に関しては圧縮強度の場合と同様の関係が得られたが、空気量1%の減少に対する曲げ強度比の増加は約2%に過ぎなかった(図-11参照)。

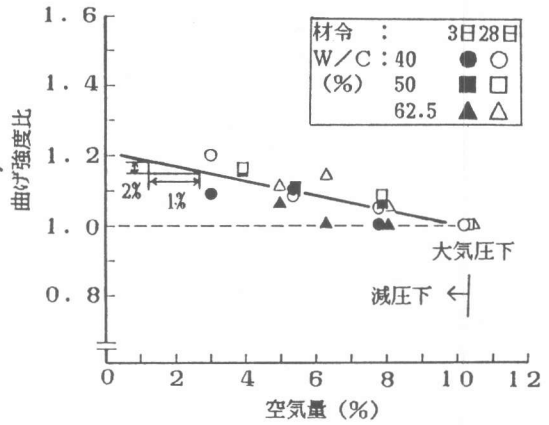


図-11 空気量と曲げ強度比の関係

## 5. 結論

本研究の実験の範囲内で次のことがいえる。

- (1) 減圧した条件下でA E剤水溶液、ペースト、モルタルなどを攪拌あるいは練り混ぜた場合には、大気圧下とほぼ同じ量の気泡が生成あるいは連行される。また、これらの気泡は、概ねボイルの法則に従って挙動する。
- (2) 減圧練り混ぜたモルタルを大気圧下で攪拌・混合すると、空気量や見掛けの平均気泡径の値がボイルの法則から予想される理論値よりも大きくなる。また、気泡間隔係数の値は、大気圧下で練り混ぜたものよりも増加する。前者は、試料の攪拌・混合中に新たな大きな気泡が混入される影響と考えられ、後者は、攪拌・混合中に小気泡が大気泡に吸収される影響と考えられる。これらの影響の程度は、練り混ぜ時の絶対圧が小さい場合ほど大きくなる。
- (3) 減圧練り混ぜたモルタルを大気圧下で攪拌・混合した場合に連行される空気量は水セメント比が小さいほど少ない。また、水セメント比が小さいと、空気量の減少に伴う流動性の低下も少ない。したがって、減圧練り混ぜ法の採用にあたっては、これをなるべく富配合のモルタルまたはコンクリートに用いるのが有利であると考えられる。
- (4) 減圧練り混ぜたモルタルの圧縮強度は、水セメント比や材令に関わらず、空気量1%の減少に対して約5%増加する。

本研究は、文部省科学研究費(No.62460152)で行ったことを付し、謝意を表する。

## 《参考文献》

- 1) Richard C. Mielenz: Use of Surface-active Agents in Concrete, Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968
- 2) Paul F. Gutman: Bubble Characteristics as They Pertain to Compressive Strength and Freeze-Thaw Durability, ACI Materials J., Sep.-Oct., 1988 pp361-366