

論文

[1073] フレッシュコンクリートの性質におよぼすマイクロ波加熱脱水効果に関する研究

正会員○太田福男 (大同工業大学建設工学科)

小川進吾 (生川建材工業)

1. はじめに

理想的なコンクリートは調合時の単位水量がセメントの水和反応に必要な水量に限りなく近い量であって、しかも施工性が良いことである。この主旨に沿って、コンクリート中の単位水量を減じるための研究開発が古くから種々行われている。この種の研究の一手法として、打設直後のフレッシュコンクリート中の水を何らかの物理的な方法で脱水する研究がある。代表的な研究としては、W.Pogany[1]やY.M.Grigoriya[2]等による電気脱水法や岡田・坂村等による赤外線加熱法[3]などがある。これらの手法にはそれぞれ優れた特徴を持っているものの未解決の問題点が今なお残っている。なかでも、上記いずれの手法にも共通している問題点としては、脱水するためにかなりの時間を必要とするところにある。コンクリートの初期硬化過程を(1)硬化開始時(セメントペーストの粘性と流動性が全くなくなったセメントの凝結終結時に相当し、内部強度が現れ始める時期)の前1/3まで(2)それ以降硬化開始時まで、(3)硬化進行過程の3段階に分けるならば、第1期での脱水は、コンクリートにも濡れた骨材にも影響することなく、脱水理論が適用できる[1]。このような観点から、本研究の目的は、フレッシュコンクリートの第1期での脱水をマイクロ波加熱によって行うことにより、プレキャストコンクリートの生産効率の向上ならびに品質改善に寄与するための基礎的研究として、フレッシュコンクリートのブリージング水量と強度発現特性に及ぼす脱水効果について検討することにある。マイクロ波加熱の特徴は熱伝導方式と異なり分子の振動摩擦による発熱によることから、被加熱物の外側と内部との間に温度差が無く、脱水分布も一様となることの他に、加熱時間が極めて短い点にある。本研究では、このマイクロ波加熱の特徴を利用して、打設直後のフレッシュコンクリートの脱水効果を調べる実験を行った。

2. 実験方法

2. 1 実験の概要

フレッシュコンクリートの性質におよぼすマイクロ波加熱脱水効果について調べるために6種類の実験を行った。以下にその概要を示す。

実験Ⅰ：フレッシュコンクリートのマイクロ波加熱特性

コンクリートの脱水量とマイクロ波加熱エネルギーとの関係を明らかにすることを目的として、マイクロ波照射時間とコンクリートの発熱量ならびに脱水量との関係について調べた。

実験Ⅱ：加熱脱水によるコンクリートのブリージング率

打設直後に加熱脱水したフレッシュコンクリートの脱水量とブリージング水量との関係を明らかにすることを目的として、J I S A 1123に基づいてブリージング試験を行った。

実験Ⅲ：加熱によるフレッシュコンクリートの体積変化

マイクロ波加熱の場合、コンクリートの温度上昇は内外部同時に発熱が進行するため、コンクリート内部の抜け道のない空隙ならびに水隙が急激に膨張することによる体積変化が予想される。本実験ではフレッシュコンクリートの脱水量および加熱温度と体積の経時変化について調べた。

実験Ⅳ：加熱脱水したコンクリートの透水試験

コンクリートの透水率が空隙量を間接的に表すものと考え、同一締め固め条件の下で、JIS A1404の規定に従ってコンクリートの透水試験を行った。

実験Ⅴ：加熱脱水によるセメントの凝結促進効果

練り上がり直後の水和反応が活発でない時期に加熱する場合でも、水和反応が促進されるかどうかを調べる目的で、セメントの凝結試験をJIS R5201の規定に従って行った。

実験Ⅵ：加熱脱水によるコンクリート強度発現特性に関する実験

φ10×20cmの円柱形紙モールドにコンクリートを打設し、5秒間バイブレータをかけた後、マイクロ波加熱を行った。加熱終了後直ちに再度5～10秒間バイブレータをかけて仕上げを行った。

2.2 コンクリートおよびモルタルの調合

本実験で使用したコンクリートの調合およびモルタルの調合を表-1および表-2にそれぞれ示す。なお、細骨材は山砂を、粗骨材は本曾川産の碎石混合川砂利を使用した。また、粗骨材の最大寸法は20mmとした。

2.3 マイクロ波加熱装置の概要

マイクロ波加熱は最大出力1.25kwの加熱装置2台連結したバッチ式装置にて行った。本装置の概要を写真-1および以下に示す。

- ・マイクロ波出力；0～1.25kw連続可変（×2）
- ・発振周波数；2.5GHz
- ・所用電力；AC200V、30A（×2）
- ・加熱処理方法；バッチ式誘電加熱方式
- ・アプリケーション内寸法；940×900×800（mm）
- ・アプリケーション仕様；ターンテーブル方式
- ・許容積載重量；約20kg

なお、アプリケーション内からパワーユニット部への逆反射波の進入および過熱防止のため、流量毎分5ℓ、流量圧2～3 kg/cm²の水を循環させる。

3. 結果とその考察

3.1 フレッシュコンクリートの脱水率と加熱エネルギーとの関係

コンクリートを打設した直後に加熱した場合の脱水率と加熱エネルギーとの関係を把握するために、加熱時間毎にコンクリートの脱水量を調べた。その結果を図-1に示す。なお図には、コンクリートと比較するためにモルタルおよび

表-1 モルタルの調合表*

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C (%)	水 W (kg)	砂 S (kg)	セメント C (kg)
40	1.1	360	802	900
50	1.7	354	973	707
60	2.2	356	1058	594
70	2.7	358	1149	512
80	3.6	353	1204	412

*AE剤使用

表-2 コンクリートの調合表*

水セメント比 W/C (%)	セメント C (kg)	水 W (kg)	砂 S (kg)	砂利 G (kg)
45	422	190	622	1018
50	362	182	702	1018
60	295	177	767	1018
70	253	177	837	985
80	245	170	875	985

*AE剤使用

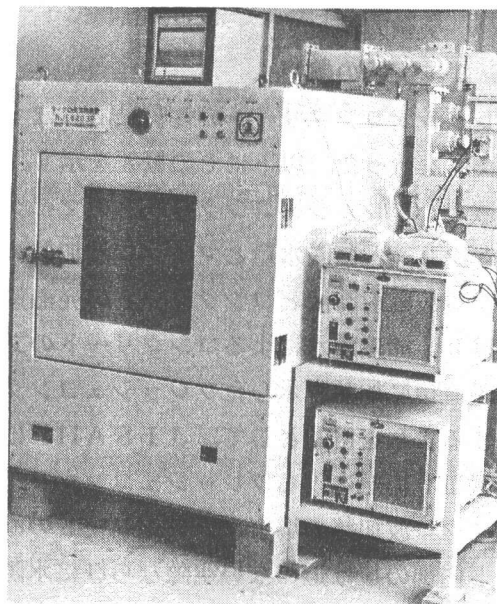


写真-1 マイクロ波加熱装置

コンクリート中の水量と同量の水単体の脱水率と加熱エネルギーとの関係も併示してある。

図から、コンクリートの脱水率と加熱エネルギーとの関係は水セメント比による差異はほとんどないことがわかる。このことから、コンクリート中の脱水に必要なエネルギーは単位水量に支配され、セメント量の影響をあまり受けない（単位水量は各水セメント比ともほぼ同一である）ことがわかる。

また、加熱エネルギーが $15 \text{ kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 以上になると水単体の脱水率とコンクリートの脱水率に大きな差異が生じる。なお、この時点でのモルタル、水ともに内部温度は約 80°C 程になっている（図-2参照）。したがって、水単体とコンクリートの脱水率との差は、セメントおよび細粗骨材自身の温度上昇による水に対する熱伝導加熱作用に、起因するものと思われる。

3.2 加熱エネルギーとフレッシュコンクリートの体積変化との関係

(1) 体積膨張

フレッシュコンクリートにマイクロ波を照射すると加熱脱水に伴って体積変化が起こる。また、加熱脱水させる場合、フレッシュコンクリートの内部温度を 50°C 以下の低温持続状態で脱水する方法と高温で短期間加熱脱水させる方法とが考えられる。そこでまず初めに、加熱温度による試験体の状況変化を調べるために、 30°C ～ 90°C まで 10°C 毎に $W/C=60\%$ のモルタルの加熱脱水を行った。その状況の一例を写真-2に示す。その結果、試験体内部温度が 50°C までのモルタルでは試験体中に加熱脱水による気泡ならびに表面の凹凸はみられないが、 60°C 以上になると気泡ならびに表面の凹凸が出現し、 90°C ではさらにこの傾向が顕著となる。次に、図-3にマイクロ波加熱エネルギー(E)と水セメント比60%のフレッシュコンクリートの体積変化率との関係を示す。

図から、マイクロ波加熱を受けるフレッシュコンクリートの体積はおよそ $E=7 \text{ kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ まではEの増加に比例するかのよう著しく膨張する。Eが $7 \text{ kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 以上になると、その体積膨張が続くものの膨張率は鈍ることがわかる。これは、E

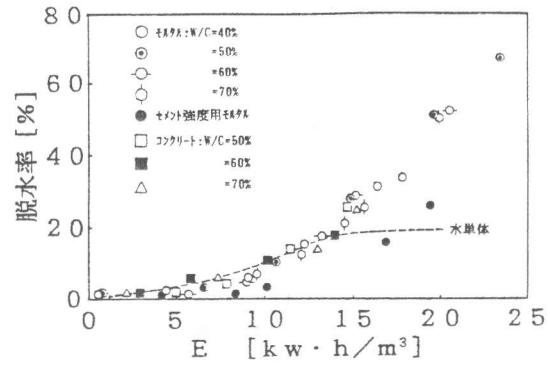


図-1 脱水率と加熱エネルギーとの関係

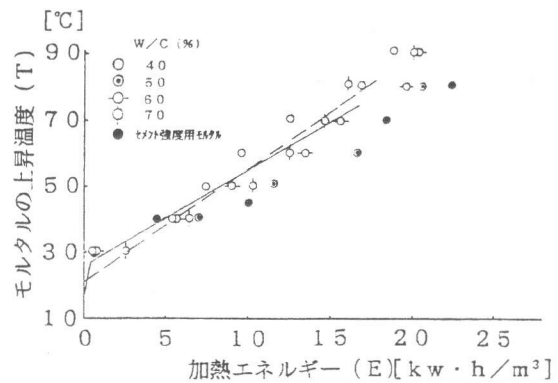


図-2 モルタルの上昇温度と加熱エネルギーとの関係

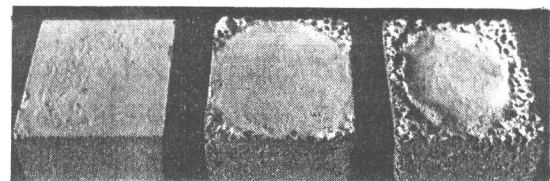


写真-2 加熱脱水温度と試験体の状況

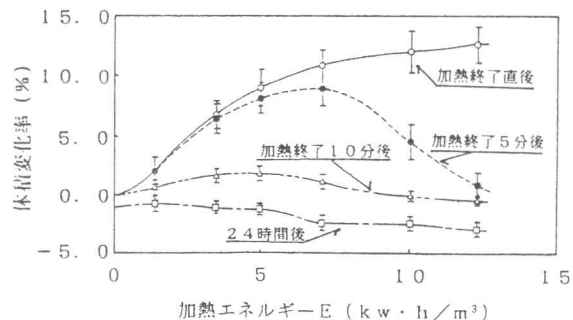


図-3 加熱エネルギーとフレッシュコンクリートの体積変化率との関係

= $7\text{kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ までは、コンクリート中の空隙ならびに水隙が加熱によって膨張し続けるが、 $E=7\text{kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 以上になると、水隙中の水蒸気圧が強くなり、外部に抜け道のできることによるものと思われる。また、加熱が終了すると直ちに収縮・沈下が始まりコンクリートの体積は減少する。特に脱水量の多いコンクリート程体積減少速度は顕著であり、加熱終了後約10分程で加熱前体積とほぼ同程度になる。さらに、24時間後では、脱水コンクリートの体積減少率は、加熱をしないコンクリートの体積減少率より大きく、脱水量の大きいコンクリート程体積減少率が大きくなっている。このことから、コンクリートの体積は加熱時に一時的に膨張するが、セメントの凝結始発時期前の早い時期に収縮・沈下するため24時間後のコンクリートの体積に、加熱による体積膨張の影響は残らないことがわかる。

(2) 加熱脱水コンクリートの空隙量

加熱膨張によるコンクリートの体積変化は加熱終了後10分程で解消されるが、脱水することによって水隙も空隙に変わることから空隙が増大するものと思われるので、コンクリートの脱水量と空隙量との関係を間接的に求めた。図-4は加熱脱水コンクリート（材令7日）の密度と脱水率との関係を示したものである。なお、図の縦軸は脱水しないバイブレータをかけたコンクリートの密度で無次元化してある。図から、脱水率が20%以内ではバイブレータをかけない無振コンクリートの場合、脱水量が多い程コンクリートは高密度となることがわかる。バイブレータを一定量かけた加振コンクリートの場合も脱水量が多い程コンクリートの密度は高くなる。図-5は加熱脱水コンクリートの透水率と脱水率との関係を示したものである。この図から、コンクリートの透水率は脱水率が小さい方が大きく、脱水率が大きくなるにしたがって減少することがわかる。以上のことから、脱水率の小さいコンクリートでは、内部に自由水による水隙が多数存在しているのに対して、脱水率の大きいコンクリートでは、自由水による水隙が脱水時に空隙となり、その後、コンクリートの沈下によって消滅するものと思われる。

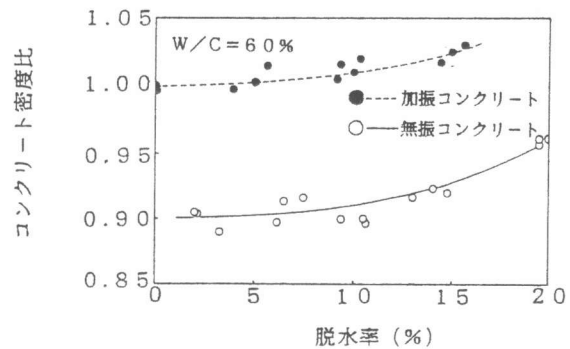


図-4 加熱脱水コンクリートの密度と脱水率との関係

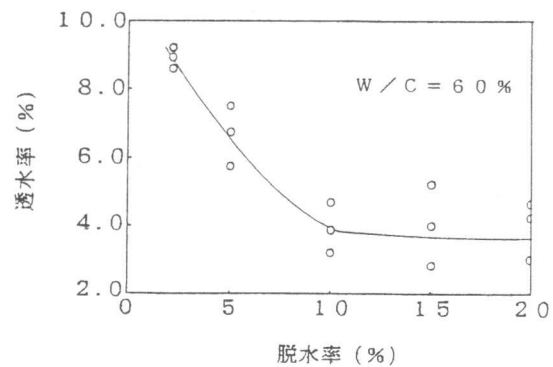


図-5 加熱脱水コンクリートの透水率と脱水率との関係

3. 3 加熱脱水率とブリージング率との関係

ブリージング水は打設後のコンクリートの沈下によって押し出される自由水であるため、打設直後にコンクリートの自由水を脱水すれば、ブリージング水は減少するはずである。このことを確かめるために、脱水量とブリージング水量との関係を調べた。その結果を図-6に示す。この図から、脱水率 $W=2.0\%$ でブリージング水の測定可能な時間は加熱してないコンクリート ($W=0\%$) のおよそ1/2程度と短く、ブリージング量は1/3程少なくなっている。これはほぼ脱水量に相当する。 $W=5.0\%$ のコンクリートでは、 $W=0\%$ のコンクリートに比べて測定時間で1/3、ブ

リージング量で1/6~1/7と少なくなっている。
 $W=5.0\%$ 以上のコンクリートでは全くブリージング水は測定できなかった。以上のことから、打設直後に加熱脱水を行うとブリージング時間も短くなり、ブリージング水量は脱水量とほぼ見合う相当量で少なくなることがわかる。

3. 4 コンクリートの強度発現におよぼす脱水効果

(1) 加熱脱水によるセメントの凝結促進効果

コンクリートの打設直後に短時間加熱した場合でも、セメントの水和反応促進効果があるかどうか調べるために、セメントの凝結試験を行った。その結果を図-7に示す。図から、加熱エネルギーEが $17\sim 18\text{kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ で、始発時間は50%程度短縮される。Eが $20.6\text{kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ では始発時間は加熱をしない場合の1/3程となる。

加熱セメントの終結時間は始発時間程には加熱による差は現れない。例えば、 $E=20.6\text{kw}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ の場合でも、終結時間は約1時間程短縮される程度である。この結果から、コンクリートの打設直後の加熱脱水が、セメントペーストの水和反応を促進しているのか、脱水によってモルタルのコンシステンシーが失われることによるものか断定することは難しいが、始発と終結時間の短縮に寄与していることがわかる。

(2) モルタル強度に及ぼす脱水量と加振効果

図-8は加熱脱水モルタルの圧縮強度と脱水量との関係を材令別に示したものである。この図から、加熱モルタルの圧縮強度は材令3日では加熱をしない常温のモルタル強度とほとんど変わらないが、7日および28日強度では、加熱モルタルは脱水量が多くなっても強度増進がほとんどなく、脱水量13%以上になるとむしろ強度が低下することがわかる。これは写真-2に示すように、加熱脱水によってモルタル中に多量の空隙が出現することによるものと思われる。

図-9はモルタル中の加熱脱水による空隙を減じるために、5秒間加振したモルタルの強度増加率を示したものである。図から、加振すれば、加熱モルタル強度は加熱をしないモルタル強度よりも大きくなり脱水効果が期待できることがわかる。

(3) 加熱脱水コンクリートの強度発現特性

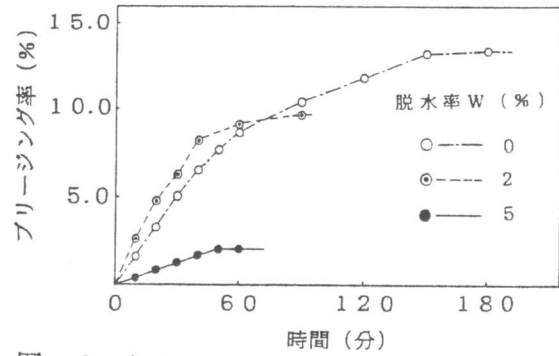


図-6 加熱脱水とブリージング率との関係

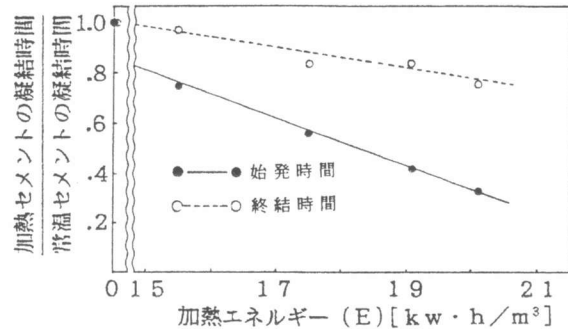


図-7 加熱セメントの凝結時間と加熱エネルギーとの関係

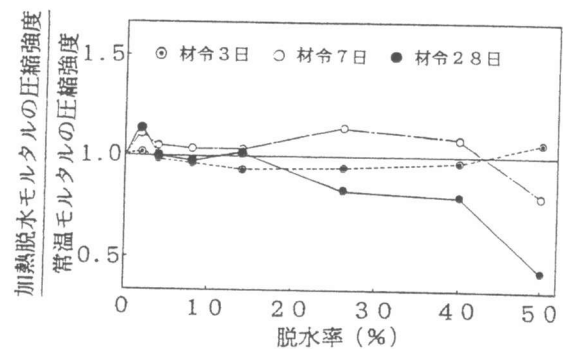


図-8 加熱モルタルの圧縮強度

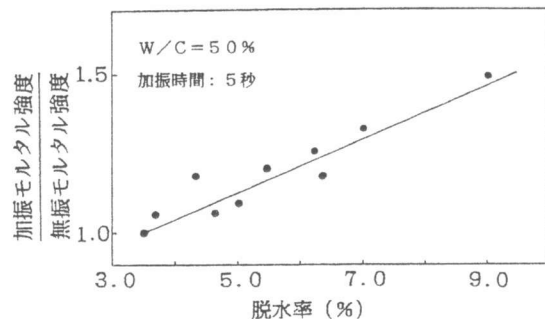


図-9 加熱脱水モルタル強度におよぼす加振効果

本実験ではコンクリート中の自由水のみ脱水して、実質水セメント比 (= (調合時水量 - 脱水量) / セメント量) を低下させることによる強度発現をねらいとしている。図-10は加熱脱水コンクリートの圧縮強度と材令との関係を示したものである。図から、材令にかかわらず脱水量が大きくなるにつれて、コンクリートの圧縮強度は大きくなっているが、早期強度のみ特に大きくなるような傾向はみられない。この結果から、コンクリート強度発現特性に及ぼすマイクロ波加熱による脱水効果は、脱水による実質的な水セメント比の減少に起因するコンクリートの強度増進が認められるものの、加熱による水和反応促進に起因するコンクリートの強度増進効果は認められないことがわかる。

3. 5 加熱脱水によるコンクリートの圧縮強度と実質水セメント比との関係

加熱をしないコンクリートの水セメント比と加熱脱水後のコンクリートの実質水セメント比が同一の場合、コンクリートの圧縮強度は同一になるはずである。図-11はコンクリートの圧縮強度と水セメント比との関係を示したものである。なお、図中の括弧内の数字は実質水セメント比を表す。図から、加熱脱水後の実質水セメント比の圧縮強度は、加熱をしないコンクリートの同一水セメント比の圧縮強度より若干大きい値を示すことがわかる。この結果から、コンクリートの圧縮強度におよぼす加熱脱水効果は十分あるものと思われる。ただし、脱水率の限界はW=15%までで、W=20%以上になると強度増進は望めない。これは、コンクリートのコンシステンシーが失われ加振効果がみられなくなることによるとと思われる。なお、実質水セメント比の強度が加熱をしないコンクリートの強度を上回るのは、加熱終了直後に5~10秒間程再度バイブレータをかけたことに起因するものと思われる。

4. 結論

フレッシュコンクリートの性質におよぼすマイクロ波加熱脱水効果について調べた結果、本報ではブリージング水の除去時間の短縮ならびに、若材令時でも実質水セメント比の低減による強度増進をはかることができることなどが明らかとなった。

[参考文献]

- 1) W. Pogany; The Osmotic Method of Increasing Concrete Strength, Civil Eng. & Public Works Review, Vol. 51, NO. 606, pp. 1349-1351, Dec. 1956
- 2) Y. M. Grigoriya and L. A. Osipov; Investigation of Electro-osmosis for reducing the water in Concrete (in Russian), 妙 J. ACI, Vol. 29, NO. 2, pp. 180, Aug. 1957
- 3) 岡田清・坂村晃; Infra-red Curing of Mortar, Proc. of the Second Japan Congress on Testing Materials, pp. 141-143, Nov. 1959

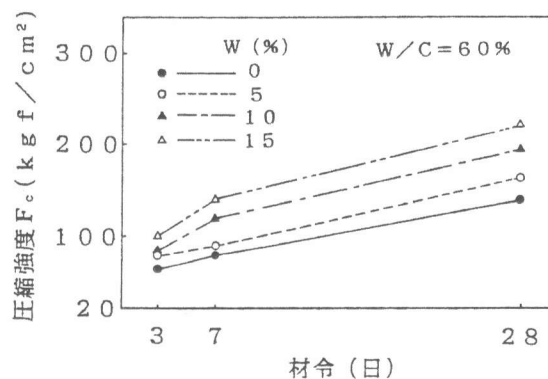


図-10 加熱脱水コンクリートの圧縮強度と材令との関係

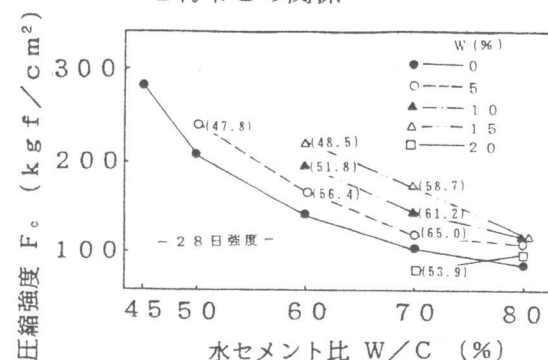


図-11 加熱脱水コンクリートの圧縮強度と水セメント比との関係