

論文

[1063] 高性能 AE 減水剤コンクリートの品質におよぼすマイクロ波加熱養生効果に関する研究

杉原和忠^{*1}・太田福男^{*2}・斎藤辰彦^{*2}

1. はじめに

近年、コンクリート用混和剤の著しい高性能化に伴って、コンクリートはより高強度、より高流動の品質に変わりつつある。これらの新しい特徴をもったコンクリートの実用範囲を拡張するためには、幅広い角度から検討した詳細な材料特性を把握することが必要である。特に高性能 AE 減水剤使用コンクリートの中には、骨材のごくわずかな含水状態の変動によって凝結時間が大幅に遅延するものがある。

筆者らは、これまで高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートをプレキャスト製品の製造に利用することによって生産効率の向上を計るための研究を二、三行ってきた。その結果、高性能 AE 減水剤使用コンクリートの凝結時間の遅延が型枠脱型時間に大きく影響するため、コンクリートに使用する骨材の含水状態によって生じる凝結時間の遅延を是正する方法を講じることによって、高品質のプレキャスト製品を効率よく生産できることを明らかにした。特に、遅延是正方法としては混練直後のフレッシュコンクリートにマイクロ波を照射することによって、コンクリート中の余剰水を除去することが可能であることを実験で確かめた[1]。

本研究では、混練直後のフレッシュコンクリートにマイクロ波を断続的に照射することによって（以下、マイクロ波加熱養生と呼称する）、蒸気加熱養生と同等もしくはそれ以上の高性能 AE 減水剤使用コンクリートの凝結促進効果および早期強度発現特性を得ることを目的とし、蒸気養生による効果を基準にして最適マイクロ波加熱養生方法について種々検討した。

なお、マイクロ波加熱養生方法の特徴は、加熱時間がきわめて短いにもかかわらず、コンクリートの内外の上昇温度差がほとんどなく、加熱による品質の不均質性が熱伝導方式に比べてかなり小さいことにある。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

実験の概要は表-1に示すとおりである。すなわち、フレッシュコンクリートのマイクロ波加熱方法はセメントの水和反応過程に基づいて設定した。図-1に示すように、水和反応過程は水和発熱速度曲線より I~V までの 5 段階に分類され、セメントに注水後 2 時間までの I、II 期を早期、48 時間までの III、IV 期を中

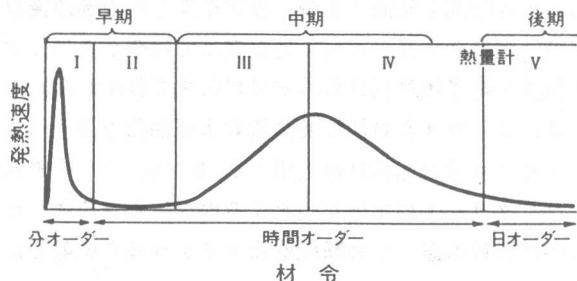


図-1 セメントの水和反応過程[2]

* 1 大同工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 * 2 大同工業大学 工学部建設工学科、教授・工博 (正会員)

期、それ以降のVを後期と分類されている。なかでもⅢ期は養生温度の影響を受けるC-S-H相が生成される時期であり、Ⅲ期の終わりでは水和反応が最も活発に行われる時期である[2]。

このため、本実験ではマイクロ波加熱時期を次のように定めた。図-1の早期Ⅰの終了点もしくはⅡの始まり近辺に相当する時期に加熱を開始する表-1中に示す①および②タイプと、図-1中の中期Ⅲの始まりに相当する③および④タイプとC-S-Hの水和反応がかなり活発になっているⅢ期中程に加熱を開始する⑤タイプの5種類と蒸気養生および標準養生の計7種類である。

本実験で使用したコンクリートの調合は表-2に示すように、高性能AE減水剤としてナフタレン系混和剤とポリカルボン酸系混和剤2種類の計3種類を使用した。比較のために従来のAE(ビソル)剤も使用している。なお、使用骨材は細骨材として山砂(表乾比重2.55)を、粗骨材として木曾川産の碎石混合川砂利(表乾比重2.60)を使用した。また、粗骨材の最大粒径は20mmとした。

表-1 実験の概要

要因	水準
セメント	普通ポルトランドセメント
混和剤	AE(ビソル)、 ナフタレン系高性能AE減水剤、 ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(2種類)
養生方法	標準養生、蒸気養生 マイクロ波加熱養生
加熱温度	蒸気養生=60℃一定 マイクロ波加熱養生=60℃一定
マイクロ波加熱養生期間	1. 5時間 1. 5時間
加熱開始時期	①始発前1/3、②始発時 ③始発~終結時前半、④同後半、 ⑤終結時以降

表-2 コンクリートの調合

NO.	水セメント比 W/C(%)	セメント C(kgf)	水 W(kgf)	砂 S(kgf)	砂利 G(kgf)	混和剤量 (%)	空気量(%)	
							目標値	実測値
1	5.2	31.7	16.5	85.7	97.5	C×0.03	4.0	4.5
2	4.0	41.5	16.6	74.0	99.0	C×1.5	4.0	3.5
3	3.0	53.3	16.0	62.6	103.9	C×1.15	2.0	1.3
4	3.8.2	45.0	17.2	70.7	107.6	C×3.0	1.4	0.8

1. AE(ビソル) 2. ナフタレン系高性能AE減水剤 3. ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 4. ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
単位: kg/m³

圧縮試験の供試体はφ10×20cmの円柱体として、型枠は紙モールドを使用した。凝結試験の供試体はJISA6204付属書1に従った。ただし、金属容器はマイクロ波を照射する場合に支障を来すためプラスチック容器を代用した。

コンクリートの養生は、マイクロ波加熱養生と比較のために行った蒸気養生は練り置30分、加熱上昇時間1時間30分、設定温度60℃到達後保温養生3時間行い、脱型後は室温20℃±1℃、湿度95%±5%の恒温室にて材令28日まで養生した。マイクロ波加熱養生の場合も、加熱養生終了後は同様の方法で材令まで養生した。

2.2 マイクロ波加熱装置および加熱方法

マイクロ波の加熱は最大出力2.5kWのバッチ式装置にて行った。加熱方法は、加熱期間中にコンクリートの水分が脱水するのを防ぐために、ビニールシートで型枠上面を覆い、設定温度に到達後は保温のため断続的にマイクロ波を照射した。

2.3 測定項目

供試体中央部にクロメルアルメルφ0.3mm耐熱800℃の熱電対を埋込んでコンクリートの内部温度-時間曲線を求めた。また、コンクリートの圧縮強度を材令1日、3日、7日および28日で求めた。

3. 実験結果とその考察

3. 1 マイクロ波加熱による最適コンクリート内部温度上昇速度と内部温度上昇分布

(1) 断続加熱による内部温度最適上昇速度

フレッシュコンクリートを急速加熱すると、加熱上限温度が60℃までは体積膨張はほとんどみられないが、それ以上の温度になると、コンクリート中の水が沸騰し始め、内部の水隙ならびに空隙の膨張などによって一時的な体積膨張が起きる。最も顕著な例として90℃まで急速加熱した結果を図-2に示す[1]。この図から、急速な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膨張は、加熱エネルギー $E = 7 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ までは、 E の増加に比例するかのよう著しく膨張するが、 E がそれ以上になると体積膨張は続くものの、膨張率は鈍ることがわかる。これは $E = 7 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以上になると、膨張し続けているコンクリート中の空隙ならびに水隙の内部圧が強くなり、外部に抜けることによるものと思われる。この抜け道がコンクリートの始発時以降にできた場合は加熱が終了しても完全には閉鎖することなく残る場合があり、加熱による弊害が生じる。また、急速加熱はコンクリート中の水分蒸発を活発にさせ、 $E = 7 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以上になるとコンクリート中の脱水率が図-3[1]に示すように急激に大きくなる。したがって、コンクリートの品質に悪影響をおよぼさない加熱エネルギー E は $7 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以下であることが望ましいことがわかる。

(2) コンクリート内部上昇温度分布

マイクロ波加熱と熱伝導方式による加熱の大きな相違点はコンクリート内部温度の均等性にある。このことを確かめるために、連続加熱した場合のコンクリート内部上昇温度分布状況の一例を図-4に示す。なお、図は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形供試体の直径方向温度分布を示す。図-4から、マイクロ波加熱による場合、上昇温度にかかわらず、コンクリートの内部温度はほぼ均等に上昇していくのに対して、蒸気養生では供試体の外側1cm中に入った部分の温度が、設定温度60℃近くになっても供試体中心部では打設時温度と同程度であり、かなり不均等になっていることがわかる。すなわち、マイクロ波加熱の場合は急速に連続加熱をしても、コンクリート内

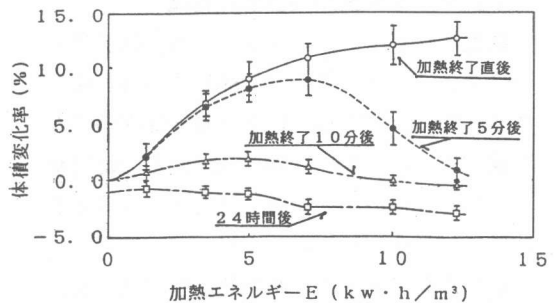


図-2 加熱エネルギーとフレッシュコンクリートの体積変化率

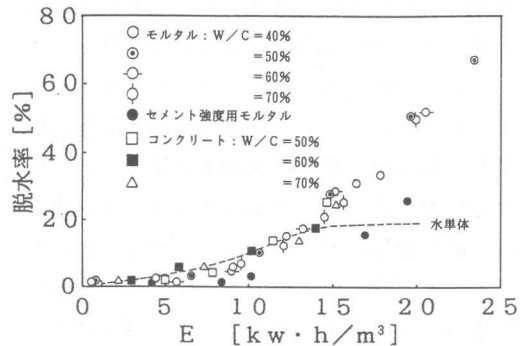


図-3 加熱エネルギーとフレッシュコンクリートの脱水率との関係

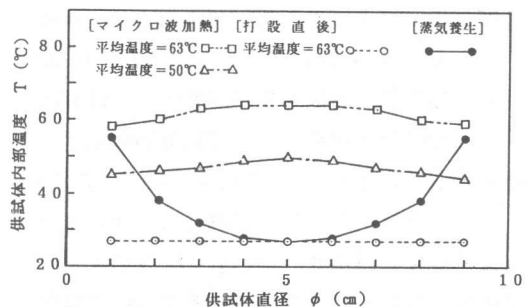


図-4 供試体直径方向のコンクリートの内部上昇温度分布

部温度分布はほぼ一定であることがわかる。

以上(1)、(2)から、マイクロ波加熱をする場合加熱範囲約60℃以下で、加熱時のコンクリート中の脱水を防ぐ方法さえ講じれば、急速加熱をしてもコンクリート内部に不均等性を生じないことがわかる。

3.2 マイクロ波加熱養生による高強度フレッシュコンクリートの凝結促進効果

(1) マイクロ波加熱養生の特徴

高強度フレッシュコンクリート凝結促進効果におよぼすマイクロ波加熱養生の特徴を調べるために、蒸気養生による凝結促進効果と比較した。図-5に蒸気養生による促進効果を、図-6にマイクロ波加熱養生による促進効果の一例をそれぞれ示す。

その結果、マイクロ波加熱養生では、調合No.1の普通強度コンクリートの凝結促進効果は蒸気養生と同等であるが、高性能AE減水剤を用いた高強度コンクリートの凝結促進効果は、減水剤の種類によって著しく異なる。すなわち、調合No.2のナフタレン系減水剤を使用したコンクリートではマイクロ波加熱養生による促進効果は蒸気養生に比べてかなり大きい。調合No.3~4のポリカルボン酸系減水剤を使用したコンクリートでは、逆に蒸気養生による促進効果の方がマイクロ波加熱によるそれを上廻っている。この原因については今のところよくわからない。

(2) マイクロ波加熱養生時間と促進効果

マイクロ波加熱養生時間の長短が混和剤の種類によってどのような影響をおよぼすか調べるために、加熱開始時間を0.5時間の一定とし、加熱養生時間を0.5時間、1.5時間、3.0時間の3種類について始発時間および終結時間を比較した。その結果を図-7に示す。図から、ナフタレン系混和剤では、マイクロ波加熱養生時間が0.5時間、1.5時間では促進効果に差がなく良好であるが、3.0時間になると促進効果は低下する。これに対してポリカルボン酸系混和剤では逆の傾向がみられ、加熱養生時間が3.0時間で蒸気養生と同程度の促進効果をもたらすことなどがわかる。

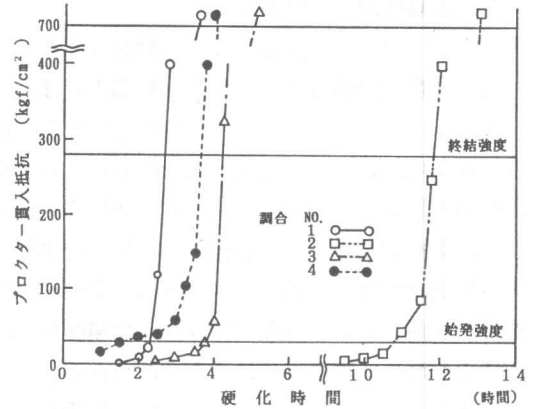


図-5 蒸気養生による凝結促進効果

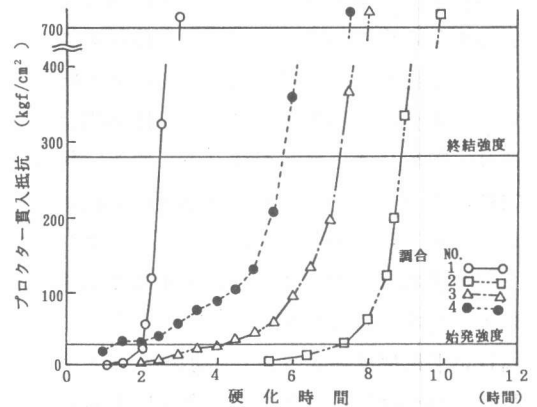


図-6 マイクロ波加熱養生による凝結促進効果(①タイプ)

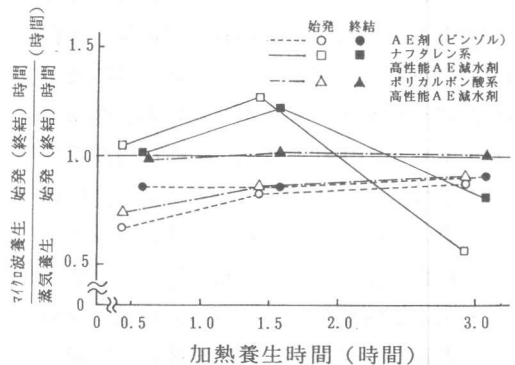


図-7 マイクロ波加熱時間と凝結促進効果

3.3 マイクロ波加熱養生による高性能AE減水剤コンクリートの早期強度発現特性

(1) 強度発現におよぼす加熱開始時期の影響について

高性能AE減水剤コンクリートの強度発現特性におよぼす加熱開始時期の影響を調べるために、加熱開始時期を混練開始より30分、2時間、3時間の3種類について比較した。その結果の一例を図-8に示す。なお、設定温度は60℃とし、その保持時間(図中の保温養生時間)は1.5時間の一定とした。図から、材令1日の圧縮強度は練り置30分および3時間後に加熱しても標準養生による強度とほとんど同じであるが、練り置2時間後に加熱した場合は30%程標準養生のそれを上廻る。これは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ やC-S-H生成開始時期に加熱をするため、水和反応促進に最も効果的であることから、1日強度が高くなるものと思われる。材令3日では、練り置30分後に加熱したコンクリートの圧縮強度は標準養生のそれを15~20%下廻る。また練り置3時間後に加熱した場合の強度発現性が最も良い。これは、練り置30分後の加熱では加熱による脱水により、水和反応が進行するに従って反応水が不足することによるのではないかとと思われる。なお、練り置3時間後の加熱では反応の遅い未水和部分の反応促進に寄与するためではないかとと思われる。

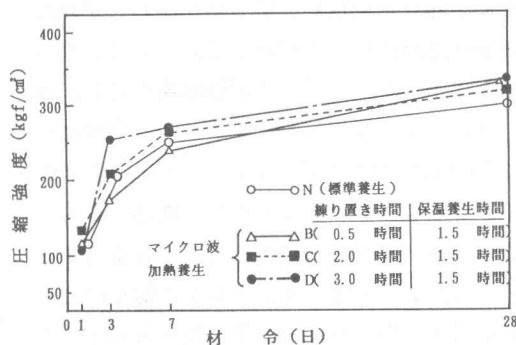


図-8 強度発現におよぼす加熱開始時期の影響

(2) 強度発現におよぼす設定温度保持時間の影響

マイクロ波加熱によるコンクリートの設定温度が60℃に到達後の温度保持時間(保温養生時間)が強度発現特性にどのように影響するかを調べるために、保温養生時間を1.5時間と3.0時間の場合について比較した。この場合、加熱開始時間は2時間の一定とした。その結果の一例としてナフタレン系混和剤を用いたコンクリートの強度発現特性を図-9に示す。図から、材令1日では保温養生時間が1.5時間の圧縮強度が3.0時間の保温養生の強度に比べて20%程大きくなっている。また、3日、7日、28日のいずれの材令の強度も明確な差異はみられない。これらのことから、マイクロ波加熱養生による保温時間は1.5時間あればそれ以上時間をかけても強度発現特性にはあまり影響しないことがわかる。

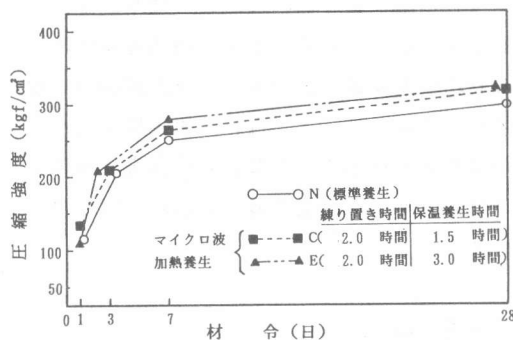


図-9 強度発現におよぼす加熱保持時期の影響

(3) マイクロ波加熱養生におよぼす混和剤種類の影響

同一条件でマイクロ波加熱養生を行っても、高性能AE減水剤を使用するコンクリートでは水セメント比が小さいだけに、混和剤の種類によってコンクリートの強度発現特性に相違が生じることが予測される。これを確かめるための実験を行い、保温養生時間1.5時間の場合について、ナフタレン系混和剤とポリカルボン酸系混和剤の強度発現特性を対比して図-10にその結果の

一例を示す。図から、ポリカルボン酸系混和剤を用いたコンクリートでは、練り置30分後に加熱した場合が、材令にかかわらず強度発現特性が良いことがわかる。これは、図-11に示すブリージング試験結果からわかるように、この混和剤がコンクリート混練直後に自由水を遊離させ、コンクリート表面に浮遊させることから、マイクロ波加熱によってこの浮遊水を主に蒸発させることによるものと思われる。一方、ナフタレン系混和剤では全く様相が異なり、練り置3時間後に加熱する方がコンクリートの強度発現特性に効果的であることがわかる。この原因は前節(1)と同様ではないかと思われる。

以上のことから、高性能A E減水剤を用いたコンクリートの強度発現特性に、マイクロ波加熱養生方法はかなり有効であり、特にナフタレン系混和剤コンクリートには最適であることがわかる。

4. 結論

以上の結果より、高性能A E減水剤を使用したコンクリートのマイクロ波加熱養生による凝結促進効果は、ナフタレン系混和剤を使用したコンクリートでは、蒸気養生に比べてかなり効果がある。また、強度発現効果についてもマイクロ波加熱養生方法はかなり有効である。

[参考文献]

- 1) 太田福男、小川進吾；コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No. 1、1992
- 2) 羽原俊祐；セメントコンクリート、No. 549 11、pp. 31-43(1992)

[謝辞]

本研究は平成3、4年度の財団法人三重県工業技術振興機構技術研究開発費補助金によって行ったものである。また、三重県窯業試験場伊藤氏、ナルックス(株)小川氏、竹本油脂(株)山本氏、花王(株)山中氏には多大な御協力を頂いた。

記して謝意を表します。

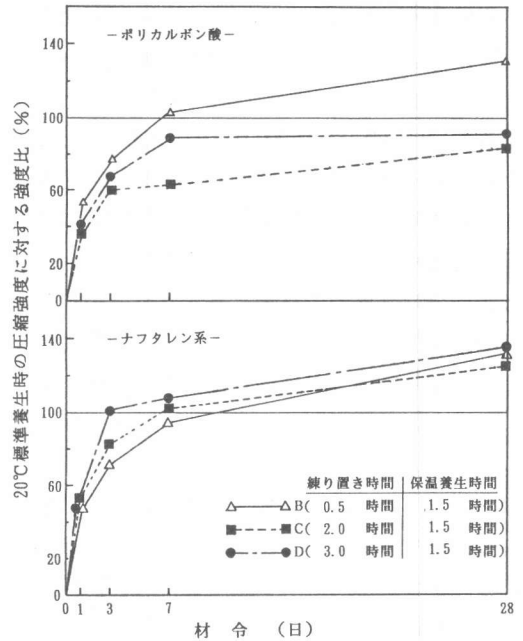


図-10 マイクロ波加熱によるコンクリートの強度発現特性におよぼす混和剤種類の影響

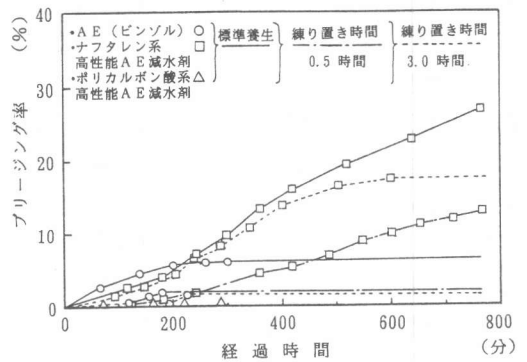


図-11 マイクロ波加熱によるコンクリートのブリージング量