

# 論文 マイクロ波を照射したコンクリートの耐凍害性に関する基礎研究

平田隆祥<sup>\*1</sup>・川島宏幸<sup>\*2</sup>・十河茂幸<sup>\*3</sup>・相原 功<sup>\*4</sup>

**要旨:**コンクリートの使用方法の多様化に伴い、低温環境下の施工、急速施工、製品製造の分野などで、凝結や初期強度の促進が求められている。一方、コンクリートにマイクロ波を応用する試みがなされており、その利用法の一つに、マイクロ波加熱によるコンクリートの強度促進方法がある。本研究は、マイクロ波加熱の照射エネルギーとコンクリートの発熱や強度発現の関係、およびマイクロ波を照射したコンクリートの耐凍害性について基礎的な検討を行った。その結果、マイクロ波による強度促進方法は、促進効率が良く、適切な使用により十分な耐凍害性が確保できることを明らかにした。

**キーワード:**マイクロ波、コンクリート、強度促進、耐凍害性、凍結融解、細孔分布

## 1. はじめに

マイクロ波は図-1に示す電磁波の一種で、真空中や大気などの物質中を、電場と磁場の振動が光速度で伝わる電磁波の性質と、金属に当たると完全に反射する光に近い性質を併せ持っている。この性質からマイクロ波は、戦時に軍用レーダーとして用いられた。また今日では、マイクロ波が誘電体を内部から自己発熱させる特徴を生かし、家庭用の電子レンジとして利用されている。近年、マイクロ波のこの様な特長から、コンクリートの分野においても表-1に示す①含水量、

水セメント比の推定、②強度促進および促進養生、③強度、骨材量の推定、④非破壊検査、⑤破碎などに応用する試みがなされている[1]。

本報告では、マイクロ波照射によるコンクリートの発熱や強度発現とそのエネルギー効率の関係、およびマイクロ波を照射したコンクリートの耐凍害性について検討を行った。

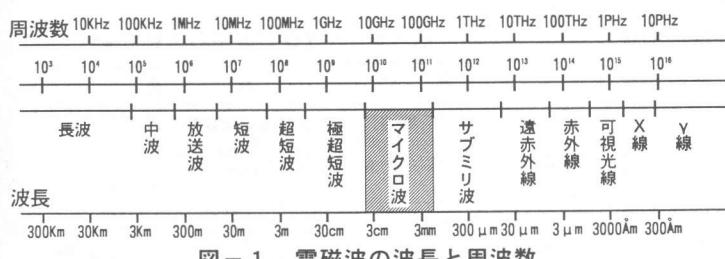


図-1 電磁波の波長と周波数

表-1 マイクロ波のコンクリートへの主な応用分野

分類	応用項目	応用内容	
		海外	国内
①フレツ	含水量・水セメント比の早期判定	・マイクロ波加熱炉による乾燥分離法 ・マイクロ波吸収法	・マイクロ波加熱炉による乾燥分離法
②シコニンク	強度促進および促進養生	・プレキャストコンクリートの促進養生の実用化	・基礎研究段階
③リート	強度・骨材量の早期判定	・報告例は少ない	・コンクリートの品質保証、品質管理
④硬コイン化クリー	非破壊検査	・圧縮強度の推定 ・構造物の非破壊検査レーダー	・火害劣化の診断 ・構造物の非破壊検査レーダー
⑤	破碎	・報告例は少ない	・コンクリート表層部の破碎除去

\*1 (株)大林組 技術研究所 土木第三研究室研究員 (正会員)

\*2 (株)大林組 本店 土木工事部 (正会員)

\*3 (株)大林組 技術研究所 土木第三研究室室長、工博 (正会員)

\*4 (株)大林組 技術研究所 コンサルタント第二部担当部長 (正会員)

## 2. 従来の強度促進方法

従来の強度促進方法を大別すると、a)早強性のセメントや急結材を使用する方法、b)促進剤や耐寒剤などの混和剤を使用する方法、c)加熱によりホットコンクリートとする方法、d)蒸気養生やオートクレーブ養生などの促進養生とする方法などがある。ここでは、上記のc)d)に相当するマイクロ波加熱による強度促進方法に着目し、この方法がコンクリートの品質に及ぼす影響について検討を行った。

### 3. 実験概要

実験は2ケース行った。実験Ⅰは、マイクロ波を、表-2に示す水、石灰石微粉末ペースト（以下、石粉ペーストと呼称）、セメントペースト、コンクリートに照射し、マイクロ波照射電力エネルギーと温度上昇速度の関係について検討を行った。

石粉ペーストは、反応性の無い無機材料として、セメントペーストとの比較のために用いた。また、セメントは、普通ポルト

ランドセメントを用いた。

次に実験Ⅱでは、表-3に配合を示す練上り直後のコンクリートにマイクロ波を照射し、フレッシュコンクリートの性状の変化や、硬化したコンクリートの物性について検討を行った。実験に用いたマイクロ波発振装置の外観を写真-1に、装置の仕様を表-4に示す。

#### 3.1 試験項目および試験方法

実験Ⅰは、表-2に示す4種類の試料を、直径80mmのガラスピーカーに500cc入れ、試料の水分逸散を抑制するために蓋をしてマイクロ波を照射した。マイクロ波の照射電力は、0.10, 0.54, 1.20kWとし、温度上昇を棒状水銀温度計にて3分間隔で計測した。実験Ⅱでは、最初に、練上り直後のコンクリートを容量14ℓのポリプロピレン製蓋付容器に採取し、マイクロ波を照射電力0.24kWで照射した場合と、無照射で静置した場合とで、フレッシュコンクリートの性質の経時変化を比較した。次に、直径100mm、高さ200mmのポリプロピレン製型枠にコンクリートを採取し、蓋をして、型枠1本毎にマイクロ波を照射した。マイクロ波照射電力は、0.04, 0.07, 0.10kW

表-2 加熱実験に用いた材料

水	水道水
石灰石粉	W/Ls:50 %
ベースト	Ls; $\rho$ 2.73, Blaine 498m <sup>2</sup> /kg
セメント	W/C:50 % 普通ポルトランドセメント
ベースト	C; $\rho$ 3.16, Blaine 332m <sup>2</sup> /kg
コンクリート	W/C:55 % 普通ポルトランドセメント 配合（表-3参照）

表-3 コンクリートの配合

Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad
20	4.5	55.0	47.0	164	300	849	975	0.75

Ad:リグニンスルフォン酸系AE減水剤

表-4 マイクロ波発振装置の仕様

マイクロ波出力	電力: 0.1kW~1.2kW可変 周波数: 2460±30MHz
入力電源	3相: 200±10V 13A(MAX), 3.0kVA
加熱炉内寸法	W400×D400×H350 mm
装置本体寸法	W700×D750×H1585 mm
使用環境	設置場所: 屋内 相対湿度: 90%RH以下

表-5 マイクロ波照射と養生条件

条件	方 法
マ	無 照 射 マイクロ波を照射しない
イ	照 射 条 件 A 納熱方法* 60°C 20°C 1.5hr 3hr 0.5hr
ク	照 射 条 件 B 納熱方法* 60°C 20°C 1.5hr 6 hr 0.5hr
ロ	養 生 気中養生 温度20°C, 湿度60%の室内にて養生
波	水中養生 温度20°Cの水中にて養生

\*コンクリートの内部温度による制御

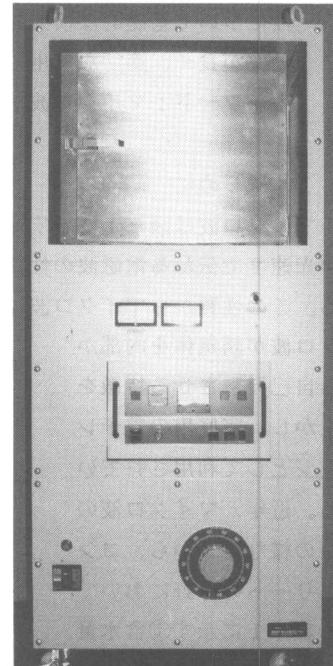


写真-1 マイクロ波発振装置の外観

とし、同一条件の3本の供試体の平均値から、照射電力量とコンクリートの初期強度の関係を測定した。最後に、3本の供試体毎に、表-5に示す3種類のマイクロ波照射条件と、2種類の養生条件を組み合わせて実験を行い、硬化したコンクリートの強度特性、初期凍害抵抗性、凍結融解抵抗性、気泡分布、細孔分布の測定を行った。なお、若材齢コンクリートの初期凍害抵抗性を評価する試験規定はないため、凍結融解試験にならない、但し圧縮強度が $5.0\text{N/mm}^2$ になった時点から試験を開始した。実験IIの試験項目および試験方法を表-6に示す。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 マイクロ波照射電力量と温度上昇量

マイクロ波の照射による各試料の温度上昇速度は、図-2に示すようにセメントペースト $\leq$ 水 $<$ 石粉ペースト $<$ コンクリートの順で大きくなつた。フレッシュコンクリートの比重を2.3、比熱を $0.23\text{kcal/kg}\cdot\text{°C}$ と仮定すると、図-3に示す照射電力量から求めた発热量のエネルギー効率は、約50%となり、水の約45%より大きくなつた。これは、セメントの水和反応の促進に伴う、発熱の影響があると考えられる。

##### 4.2 マイクロ波照射とフレッシュコンクリートの性質の変化

実験IIによるマイクロ波照射とフレッシュコンクリートの性質の経時変化の関係は、図-4に示すようにマイクロ波の照射に伴い温度が上昇し、スランプや空気量は低下したものの、本実験では、無照射で静置した場合と大差ない結果となつた。

##### 4.3 マイクロ波照射とコンクリートの強度発現

###### (1) 照射電力量と初期強度

マイクロ波の照射による、コンクリートの初期強度の発現は、図-5に示すように

表-6 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101に準拠
空気量	JIS A 1128に準拠
コンクリート温度	棒状水銀温度計にて測定
圧縮強度	JIS A 1108に準拠
静弾性係数	JSCE-G502に準拠
動弾性係数	JIS A 1127に準拠：縦振動法
初期凍害抵抗性	JSCE-G501に準拠 開始：強度 $5\text{N/mm}^2$
凍結融解抵抗性	JSCE-G501に準拠 開始：材齢14日
気泡間隔係数	面積法；画像処理装置による測定 面積： $60 \times 60 \text{ mm}$ 、測定材齢28日
細孔容積分布	水銀圧入法；ポロシティーメーターによる測定、測定材齢14, 28日

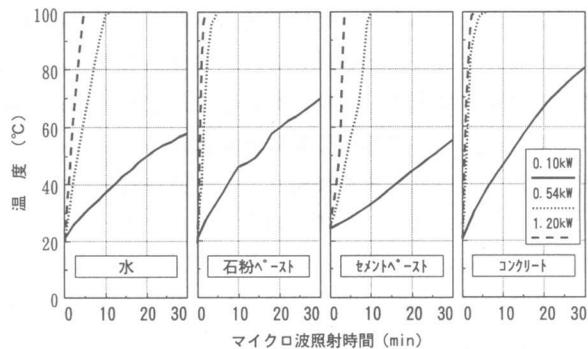


図-2 マイクロ波照射による温度上昇の経時変化

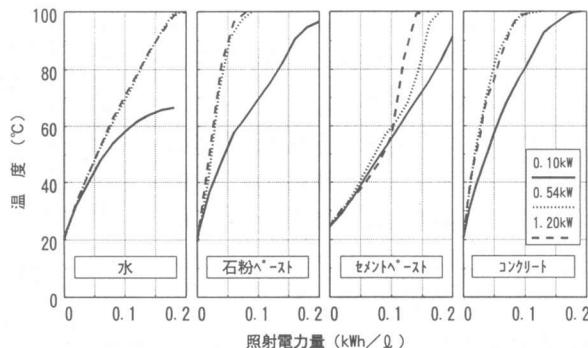


図-3 マイクロ波照射による温度上昇と照射電力量

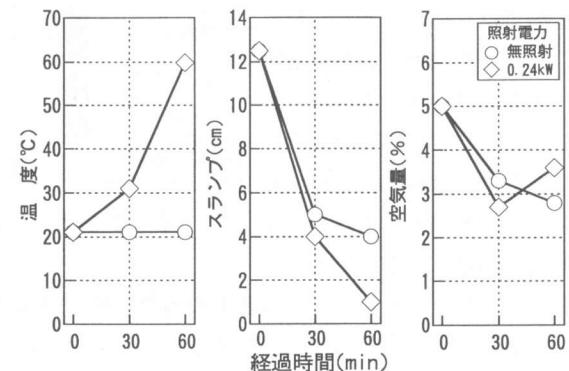


図-4 フレッシュコンクリートの性質の経時変化

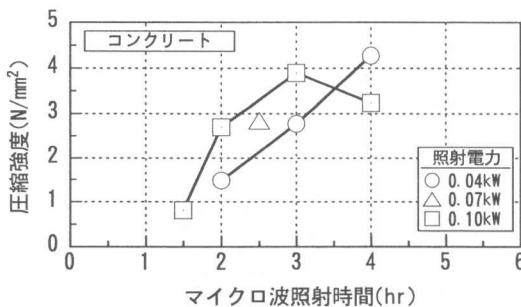


図-5 マイクロ波照射による初期強度の経時変化

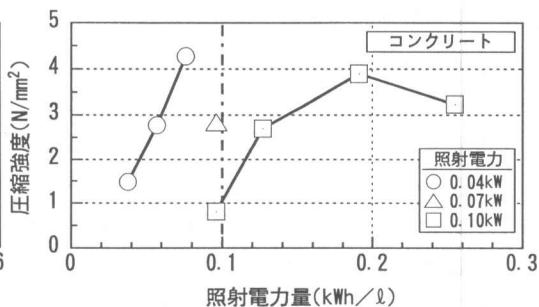


図-6 マイクロ波照射による初期強度と照射電力量

照射電力が大きい方が、短時間で大きな強度が得られた。しかし、照射電力0.10kWで4時間マイクロ波を照射した場合は、3時間照射した場合より圧縮強度が小さくなかった。さらに、図-6に示す単位容積当たりの照射電力量を比較すると、0.1kWh/l付近では、照射電力が大きい0.10kWより0.04kWの方が圧縮強度が大きくなった。この理由は、マイクロ波加熱により、コンクリートが100°C近くまで加熱され、水分が蒸気となって逸散し、セメントマトリックスがポーラスになったことなどの影響と考えられる。従って、マイクロ波加熱にも、最適な温度上昇速度や最高温度があると考えられる。そこで、以下の実験では、表-5に示すように従来の促進養生方法を参考にして最高温度を60°Cとし、但し、温度上昇速度は27°C/hで前養生を行わずに加熱した。

## (2) 積算温度と初期強度

圧縮強度5.0N/mm<sup>2</sup>が得られるコンクリート内部の積算温度を、表-5に示す無照射で気中養生した場合と、照射条件Aの2条件について調べた。

圧縮強度5.0N/mm<sup>2</sup>が得られた積算温度は、図-7に示すように無照射が26D°Dなのにに対し、照射条件Aは半分の13D°Dとなった。これは、マイクロ波の照射が、単に給熱だけでなく、マイクロ波自体にコンクリートの凝結や硬化を促進する効果もあるのではないかと考えられる。

## (3) 圧縮強度、静弾性係数

材齢28日の圧縮強度は、図-8に示すように照射条件Aは、気中、水中のいずれの養生条件も無照射の場合より1割程度増加したが、照射条件Bは、水中養生の場合でも無照射の場合より3割程度低下した。また、静弾性係数はどの照射条件においても、無照射に比べて1割弱小さくなった。従って、マイクロ波の照射条件によっては、圧縮強度が低下する場合があり、弾性係数は若干低下すると考えられる。

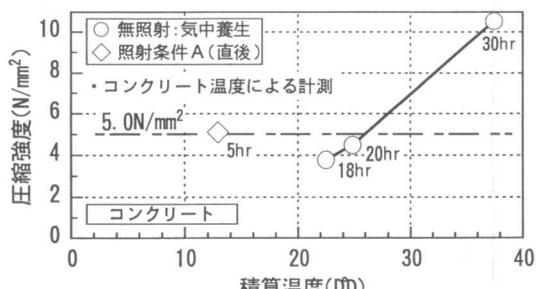


図-7 積算温度とコンクリートの初期強度

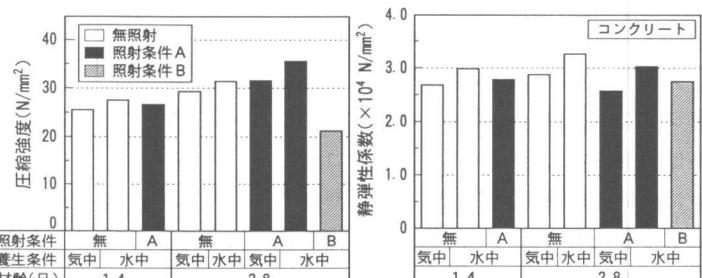


図-8 マイクロ波を照射したコンクリートの強度特性

#### 4.4 マイクロ波を照射したコンクリートの耐凍害性

##### (1) 初期凍害抵抗性

照射条件Aおよび無照射のいずれも、相対動弾性係数は、図-9に示すようにコンクリートの硬化に伴って30サイクルまで増加した後、100サイクルまでには低下し、両者に大きな違いは見られなかった。

##### (2) 凍結融解抵抗性

照射条件Aで水中養生したコンクリートは、図-10に示すように無照射で水中養生した場合と大差なく、十分な凍結融解抵抗性があると考えられる。

##### (3) 硬化コンクリートの気泡分布

図-11に示す気泡分布、空気量および気泡間隔係数は、無照射で水中養生の場合と、照射条件Aで水中養生の場合は、ほぼ同様の気泡分布となった。一方、照射条件Bで水中養生の場合、気泡径が $60\mu\text{m}$ 以下の空気量の増加を示す結果となったが、この理由については今後の検討が必要と考えられる。実験の結果、マイクロ波を照射しても、気泡間隔係数は $250\mu\text{m}$ 以下であり、凍結融解作用に十分抵抗できると考えられる。

##### (4) 硬化コンクリートの細孔分布

無照射で気中養生とした場合、図-12に示すように材齢14日と材齢28日では、細孔分布にはほとんど変化は無かった。一方、照射条件Aで水中養生した材齢14日の細孔分布は、無照射で水中養生を行った材齢28日の細孔分布とほぼ同様の傾向を示し、材齢28日では無照射の場合より水和反応が進んでいる。このことから、マイクロ波をコンクリートに照射すると、水和組織の発達を促進する効果があると考えられる。

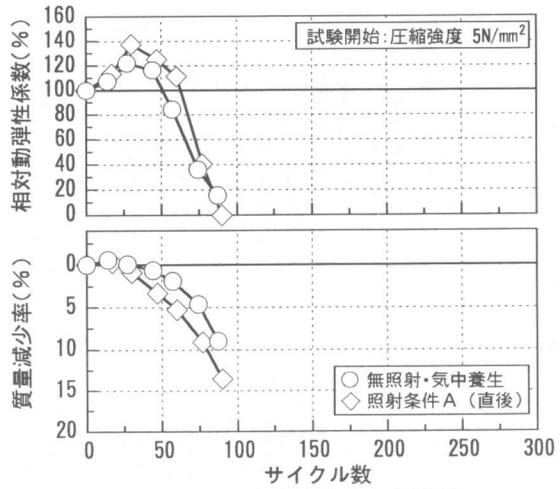


図-9 初期凍結融解試験結果

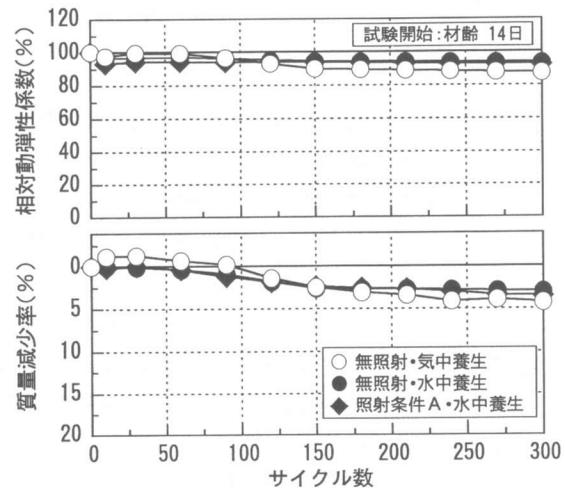


図-10 凍結融解試験結果

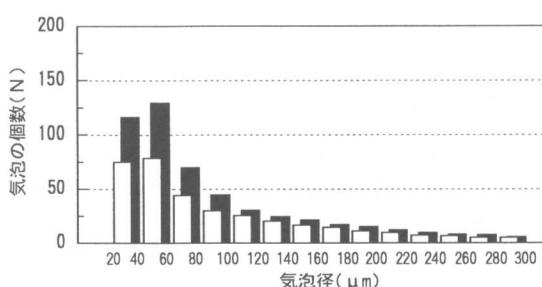


図-11 空気量・気泡分布の測定結果

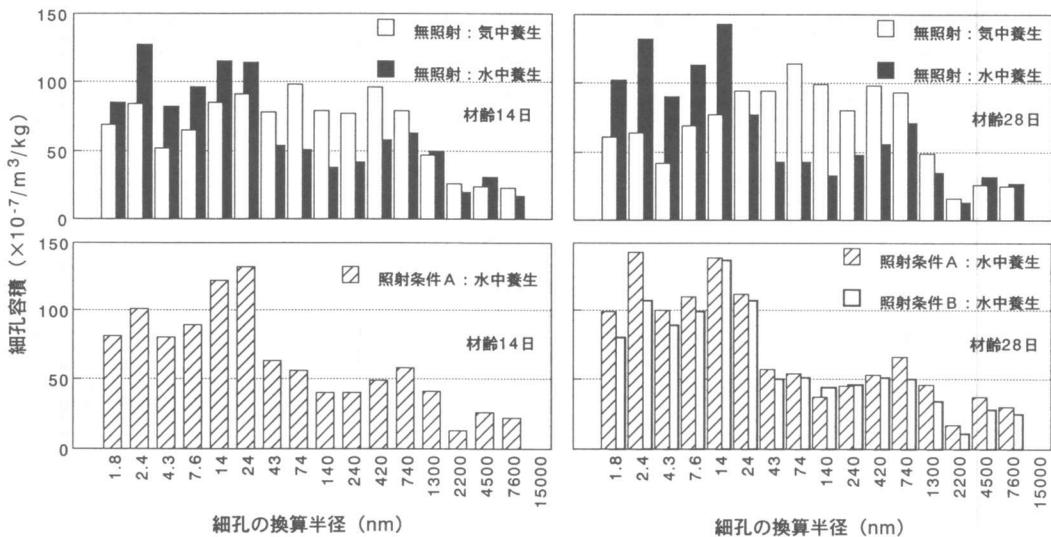


図-12 細孔分布の測定結果

## 5.まとめ

コンクリートの凝結や初期強度を促進する目的で、マイクロ波加熱による強度促進方法に着目し、マイクロ波照射エネルギーとコンクリートの発熱、強度発現、およびマイクロ波を照射したコンクリートの耐凍害性について検討した結果、下記の知見が得られた。

- ①フレッシュコンクリートの比重を2.3、比熱を0.23kcal/kg°Cと仮定すると、今回の実験では、マイクロ波照射電力量から求めた発熱量のエネルギー効率は約50%となり、水の約45%より大きくなった。これは、セメントの水和反応の促進に伴う、発熱の影響があると考えられる。
- ②マイクロ波を照射した場合、圧縮強度5.0N/mm²が得られるコンクリート内部の積算温度は、無照射の約半分となった。このことから、マイクロ波自体にコンクリートの凝結や硬化を促進する効果があるのではないかと考えられる。
- ③マイクロ波を照射して初期強度を促進した後、養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、照射条件Aの場合、材齢28日で1割程度増加したが、マイクロ波の照射条件によっては強度が低下する場合があった。また、静弾性係数は若干低下する傾向が見られた。
- ④マイクロ波をコンクリートに照射すると、セメントの水和組織の発達を促進する効果があると考えられ、標準養生のコンクリートと同様の細孔分布や気泡間隔係数が得られる。従って、マイクロ波の適切な照射により、十分な初期凍害抵抗性や凍結融解抵抗性を確保することができると考えられる。

## 参考文献

- [1]平田隆祥、十河茂幸、相原功：マイクロ波照射エネルギーとコンクリートの加熱・強度発現に関する基礎的研究、土木学会第51回年次学術講演会概要集V, pp. 528-529, 1996.9