

マイクロ波加熱によるコンクリートの強度促進技術に関する研究

平田 隆 祥 十 河 茂 幸

Acceleration Method of Concrete Strength by Microwave Heating

Takayoshi Hirata Shigeyuki Sogo

Abstract

Using microwave heating, it was possible to harden cast concrete in a short time. In this study, the acceleration of heating and strength of concrete by using microwaves was investigated.

The experiments revealed: (1) Microwave heating (Frequency: 2460 ± 30 MHz) penetration depth of fresh concrete was about 100 mm. (2) Applying microwave heating to ordinary concrete W/C=0.55, the compressive strength of the concrete can reach 5.0 N/mm^2 in only 3.5 hr. (3) Concrete hardened by microwave heating resists freezing and thawing. Such performance compares favorably with commercially available rapid hardening concrete as well as concrete containing accelerators, showing that microwave curing is a promising technique for practical applications.

概 要

マイクロ波を照射する加熱方法により、コンクリートの硬化を促進することが可能となる。本研究では、マイクロ波を照射したコンクリートの発熱性状や、強度発現特性について実用化のための実験を行った。実験の結果、以下の知見が得られた。(1)フレッシュコンクリート中へのマイクロ波加熱(周波数: 2460 ± 30 MHz)の浸透深さは約100mm程度である。(2)マイクロ波を水セメント比55%の普通コンクリートに照射すると、適切な照射条件を選択することにより、材齢約3.5時間で初期強度 5.0 N/mm^2 を得ることができる。(3)マイクロ波を照射し硬化したコンクリートは、耐凍害性等の耐久性上の品質には問題がない。このように、マイクロ波加熱によるフレッシュコンクリートの促進養生方法は、従来の方法と比較しても実用可能であることが明らかとなった。

1. はじめに

コンクリート用途の多様化に伴い、低温環境下の施工、急速施工、製品製造の分野などで、効率的なコンクリート強度の促進技術が求められている。一方、効率的な加熱方法に、マイクロ波加熱方法がある。この加熱方法は、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。さらに工業分野でも、食品、ゴム、木材、セラミック等の加熱、乾燥を目的として利用されている¹⁾。

ところが、コンクリート分野へのマイクロ波の応用は、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、レーダー、⑤破砕などの分野で研究が進められているが、実用化されている技術は少ないのが現状である²⁾。

本研究では、現場コンクリートの効率的な強度促進手段の開発を目的とし、上記に示すマイクロ波の利用方法の一つで、照射によりコンクリートに自己発熱を生じさせ、強度促進を図る方法について実用化のための検討を行った。

2. マイクロ波の特性

2.1 マイクロ波の概要

マイクロ波は、Fig.1に示す周波数300MHzから30GHzまでの電磁波で、約1mから1cmの範囲の波長を持つ。電波法では、レーダー、情報伝達以外の工業的用途に用いるマイクロ波周波数帯として、 2450 ± 50 MHz、 5800 ± 50 MHz、 22125 ± 150 MHzの3つの周波数帯域が、IMS (Industrial Scientific and Medical) 周波数帯として定められている。この周波数帯は、工業用途の使用でマイクロ波が漏洩することがあっても、通信などの妨害にならないように、定められている。

2.2 漏洩電波限界値

電波法の無線設備規則の中で、通信設備以外の設備の項に、「電界強度の許容値」が示されている。工業用加熱設備の場合、100メートルの距離において毎メートル100マイクロボルト以下。また、米国HEW(The Department of Health, Education and Welfare)の電子レンジより輻射されるマイクロ波の規準は、1970年10月

の合衆国法Volume35に定められている。「電子レンジより輻射されるマイクロ波の電力密度は、製造メーカーが販売する前段階において電子レンジ外面から5cm又はそれ以上のどの点においても、1mW/cm²を越えてはならない。販売後は、電子レンジ外面が5mW/cm²又はそれ以上となつてはならない」としている。今日、電磁波が人体に与える影響は問題にされているものの、マイクロ波の漏洩電力がどの程度人体に影響を与えるかは、正確には知られていない。一方、装置からの漏洩電力密度は、Fig. 2に例示するリークチェッカーにより、簡単に計測することができる。マイクロ波を用いる実験や施工を行う場合は、必ず漏洩電力密度を計測する必要がある。

2.3 マイクロ波による加熱

電氣的に絶縁された誘電体にマイクロ波を照射すると、マイクロ波の電界の変化で、誘電体を構成している陽イオンと陰電子からなる双極子が回転・振動し、その内部摩擦により発熱する。マイクロ波によって任意の材料を加熱する場合、発熱は加熱対象物の物性値によって異なり、(1)式で与えられる。

$$P = 2\pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \dots\dots\dots(1)$$

- ここで P : 加熱電力密度 (W/m²)
- f : マイクロ波周波数 (Hz)
- E : マイクロ波の電界強度 (V/m)
- ϵ_0 : 真空中の誘電率 (8.85 × 10⁻¹² F/m)
- ϵ_r : 誘電体の比誘電率
- tan δ : 誘電体の誘電正接

(1)式で明らかのように、マイクロ波加熱では、材料固有の物性値である ϵ_r と tan δ の損失係数と呼ばれる積が重要で、この値が大きいとマイクロ波によって加熱されやすい性質を示す。また、マイクロ波による加熱を検討するうえで、加熱対象物内部へのマイクロ波の浸透深さも考慮する必要がある。損失係数 $\epsilon_r \tan \delta$ が大きい材料ほど、マイクロ波が加熱対象物内部で減衰する。この時のマイクロ波電力密度が1/2になる深さを電力半減深度Dといい、(2)式で求められる。この電力半減深度により、誘電体の表面部から中心部までどの程度均一に加熱できるかが検討でき、コンクリートは数cmとされている。Fig. 3に各種物質の誘電率と電力半減深度を示す。

$$D = 3.32 \times 10^7 / (f \sqrt{\epsilon_r \tan \delta}) \text{ (m)} \dots\dots\dots(2)$$

2.4 マイクロ波加熱の長所

他の加熱方法と比較し、マイクロ波加熱は次のような長所を有する。

- 1) 通常の熱伝導による加熱ではないため、物質内部まで短時間に加熱することができる。
- 2) マイクロ波加熱は、物質内部に浸透して熱に変化する

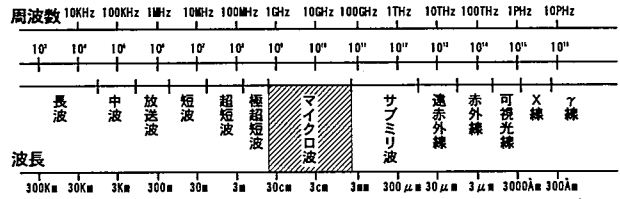


Fig. 1 電磁波の波長と周波数
An Electromagnetic Wavelength and Frequency

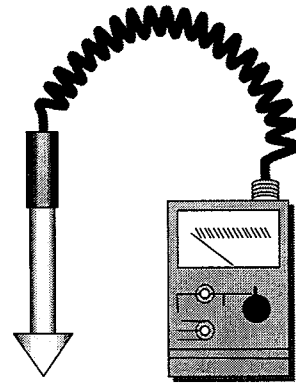


Fig. 2 リークチェッカー(narda Model 8201)
Electromagnetic Leakage Monitor

- るため、エネルギー損失が小さい。
- 3) 加熱電力の制御や、操作が容易である。
- 4) 密閉加熱が可能で、真空中で容易に加熱できる。
- 5) 騒音や排ガスが発生せず、作業環境が良好である。

3. マイクロ波照射によるコンクリートの品質への影響

3.1 実験概要

実験は2段階で実施した。最初の段階は、Photo 1に示すマイクロ波発振装置を用いて、少量の試料で、マイクロ波を照射した場合のコンクリートの基礎物性について実験(実験1)を行った。マイクロ波発振装置内のマグネトロンは、使用時間に伴って劣化し、マイクロ波発振出力が低下する。そこで、実験に用いた装置は、マイクロ波の入射電力と反射電力が計測できるパワーユニットを積載し、マイクロ波の入射電力が正確に制御できるものとした。Table 1にマイクロ波発振装置の仕様を示す。

次の段階では、コンクリート表面をマイクロ波発振器が移動するモデル装置を試作し、打込み完了直後のコンクリートにマイクロ波を直接照射して強度促進を行う方法について、大型供試体を用いて実用化実験(実験2)を行った。可動式マイクロ波発振器をFig. 4に、仕様をTable 2に示す。

3.2 マイクロ波照射電力量と温度上昇量(実験1)

マイクロ波を、Table 3, Table 4に示す4種類の試料

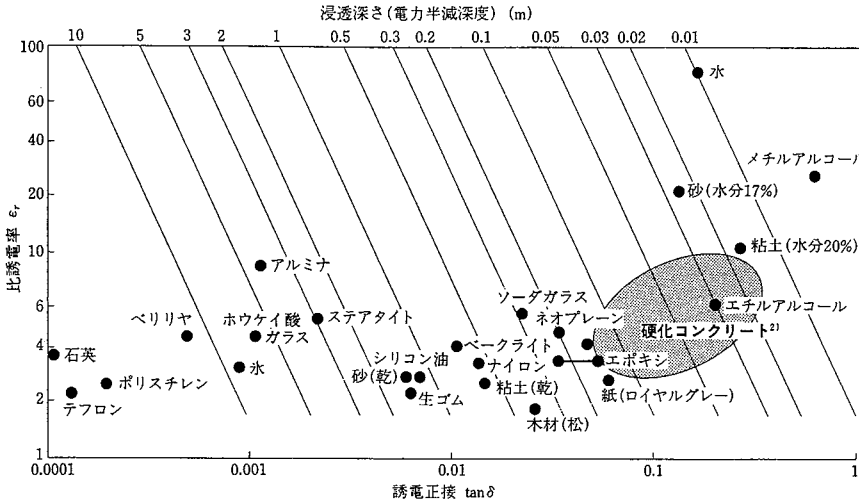


Fig. 3 各種物質の誘電率と電力半減深度 (周波数:2450MHz)
Dielectric Characteristics of Various Materials (Frequency:2450MHz)

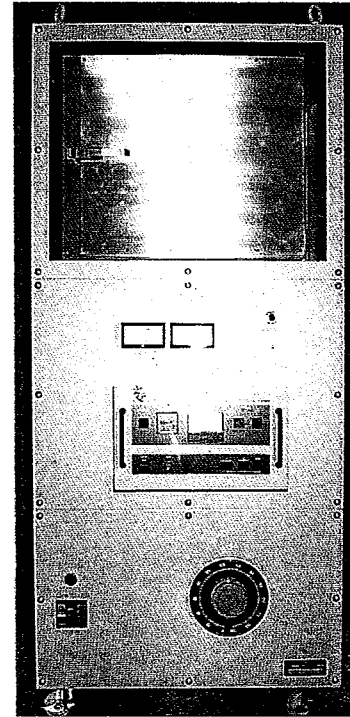


Photo 1 マイクロ波発振装置の外観
General View of Microwave Generator

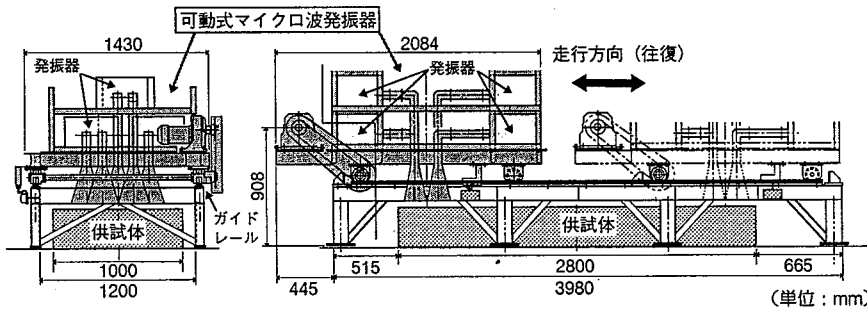


Fig. 4 可動式マイクロ波発振器
Movable Microwave Generator

に照射し、マイクロ波照射時間と温度上昇量の関係およびマイクロ波入射電力量と温度上昇量の関係を調査した結果を、Fig. 5に示す³⁾。実験は、直径80mmのガラス製ビーカーに0.5Lの試料を入れて計測を行った。

マイクロ波の照射電力量と試料の温度上昇速度を比較した結果、各試料の温度上昇速度は、セメントペースト<水<石粉ペースト<コンクリートの順で大きくなり、水よりもコンクリートの方が、若干加熱速度が大きいことが明らかとなった。これは、フレッシュコンクリートの比熱が水よりも小さいことと、セメントの水和に伴う自己発熱があるためと考えられる。

3.3 マイクロ波加熱の浸透深さ (実験1)

マイクロ波をTable 4に示すフレッシュコンクリートに連続照射した場合の、加熱浸透深さを調査した結果をFig. 6に示す。実験は、φ100×200mmの金属製型枠にフレッシュコンクリートを採取し、上端面からのみマイクロ波を照射して、高さ方向の温度分布からマイクロ波加熱の浸透深さを推定した。計測の結果、温度分布には、高さ100mmの位置に変極点が存在した。従って、マイクロ波加熱は、フレッシュコンクリート中に約100mmの深さまで浸透し、それ以深は通常の熱伝導により加熱され

Table 1 マイクロ波発振装置の仕様
Specification of Microwave Generator

マイクロ波出力	電力:0.1 kW~1.2kW 可変
	周波数:2460±30 MHz
入力電源	3相:200±10 V 13 A(MAX),3.0 kVA
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

Table 2 可動式マイクロ波発振装置の仕様
Specification of Movable Microwave Generator

発振出力	1.2 kW(公称)5 台使用
発振周波数	2460±30 MHz
発振管	マグネトロン 2M 317
発振アンテナ	ホーン型アンテナ:開口部寸法 240×180mm 5 個使用 配置:走行方向に対し交互に2列で構成
発振器走行方式	レール上、モータ駆動(インバータ制御)
発振器走行速度	約 4m/min

Table 3 加熱実験に用いた材料
Properties of Materials for Experiments

水	水道水
石灰石粉	W/Ls : 50%
ペースト	Ls: ρ 2.73, Blaine 498m ² /kg
セメント	W/C : 50% 普通ポルトランドセメント
ペースト	C: ρ 3.16, Blaine 332m ² /kg
コンクリート	W/C : 55% 普通ポルトランドセメント ②配合 (Table 4)

ると推察される。また、水セメント比の違いによるマイクロ波加熱の浸透深さへの影響は小さかった。

3.4 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1)

マイクロ波をフレッシュコンクリートに照射した場合の、フレッシュ性状の経時変化の関係を調査した結果を Fig. 7 に示す。実験には、フレッシュコンクリートを14 L 使用した。マイクロ波の照射に伴い、コンクリートは、温度が上昇し、スランプや空気量は低下したものの、低下の程度は無照射で静置した場合と大差のない結果となった。

3.5 マイクロ波照射とコンクリートの強度発現 (実験1)

フレッシュコンクリートにマイクロ波を照射して急速に加熱すると、フレッシュコンクリート中の水分が蒸気となって、ポーラスな硬化コンクリートが形成され、十分な強度発現は得られない。そこで、Table 5 に示す照射条件および養生条件を組み合わせ、コンクリートの強度発現を調査した。

3.5.1 積算温度と初期強度 マイクロ波照射により、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、Fig. 8, Fig. 9 に示すように、水セメント比55%の場合は、無照射が26° D·Dなのに対し、照射条件Aは半分の13° D·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があるものと考えられる。また、照射条件Aで水セメント比65%の場合は、圧縮強度が2.0N/mm²と低い値となった。

3.5.2 材齢14日、28日における圧縮強度 材齢14日、照射条件Aの圧縮強度は、Fig. 10 に示すように、標準養生のコンクリートより5~20%程度小さく、材齢28日の照射条件Aおよび照射条件Bの圧縮強度は、標準養生より若干大きくなる場合や、小さくなる場合が見られた。これらの理由として、マイクロ波の照射による強度発現は、配合によって効率の良い照射条件があり、照射が過大となると内部乾燥や水和組織の変化により圧縮強度が低下する場合があると推察される。従って、マイクロ波加熱をコンクリートの強度促進に利用する場合は、照射条件を適切に選定することが重要と考えられる。

Table 4 コンクリートの配合
Mixture Proportions of Concrete

配合	Gmax (mm)	Air (%)	c. l. (°C)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	Ad.
①	20	4.5	20.0	45.0	44.0	155	344	791	1026	0.86
②				55.0	47.0	164	300	849	975	0.75
③				65.0	45.0	165	254	830	1034	0.64

*C:NP; ρ 3.16, S: ρ 2.60, G: ρ 2.65, Ad.:AE減水剤

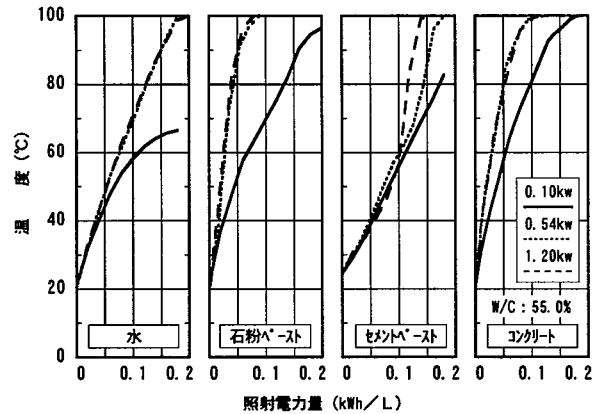


Fig. 5 マイクロ波照射による温度上昇と照射電力
Relationship between Temperature and Microwave Electric Power

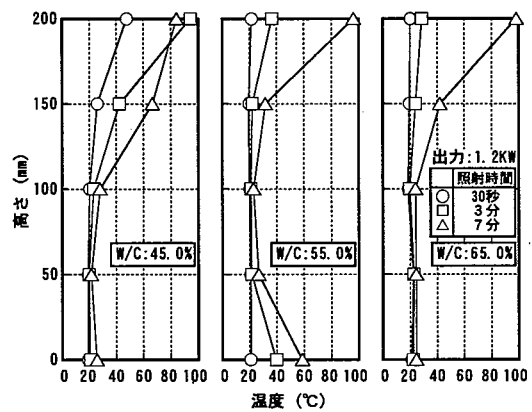


Fig. 6 マイクロ波照射による発熱分布の変化
Temperature Distribution of Concrete by Microwave Heating

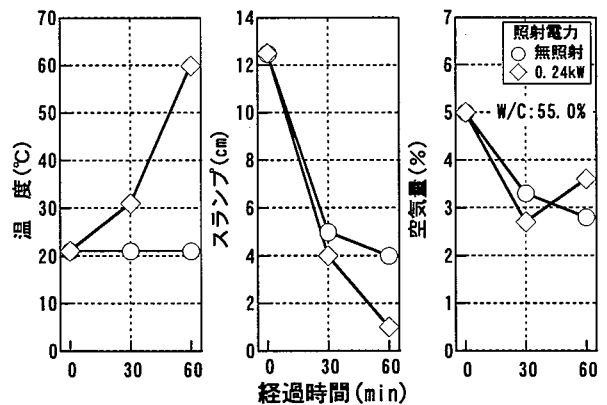
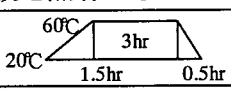
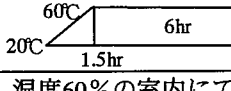


Fig. 7 フレッシュコンクリートの性状の経時変化
Change of Fresh Concrete Characters

Table 5 マイクロ波照射と養生条件
Microwave Heating Control and Curing Method

条件	方法
無照射	マイクロ波を照射しない
照射条件A	給熱方法* 
照射条件B	給熱方法* 
気中養生	温度20℃, 湿度60%の室内にて養生
水中養生	温度20℃の水中にて養生

*コンクリートの内部温度による制御

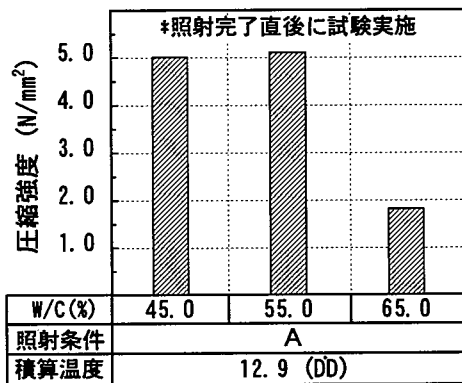


Fig. 9 照射完了直後の初期強度
Early Compressive Strength Immediately after Microwave Heating

3.6 マイクロ波を照射したコンクリートの耐凍害性 (実験1)

マイクロ波を照射したコンクリートの初期凍害抵抗性、凍結融解抵抗性を調査した結果をFig. 11に示す。圧縮強度が5.0N/mm²に到達した時点から、凍結融解試験を行った結果、照射条件Aおよび無照射のいずれも、相対動弾性係数は、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、両者の初期凍害抵抗性に大きな違いは見られなかった。また、凍結融解試験の結果、照射条件Aで水中養生したコンクリートは、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。

3.7 可動式マイクロ波発振器によるコンクリートへの直接照射の効果 (実験2)

可動式マイクロ波発振器は、出力1.2kWのマイクロ波発振器5台を組合せ、ガイドレール上を移動する構造となっている。マイクロ波は、型枠内に打ち込まれた厚さ200mm、水セメント比47%の普通ポルトランドセメントを用いた呼び強度30N/mm²のレディーミクストコンクリートの表面上を、走行速度約4m/minで移動させながら断続的に照射し、コンクリート内部の温度分布や、強度発現を調査した。

照射開始直後のコンクリート内部の温度上昇速度は、Fig. 12に示すように、深さ5mmの位置で0.9℃/min、50mm

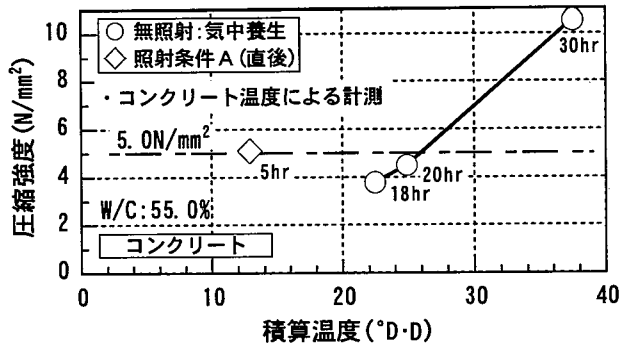


Fig. 8 積算温度とコンクリートの初期強度
Relationship between Early Compressive Strength and Cumulative Temperature

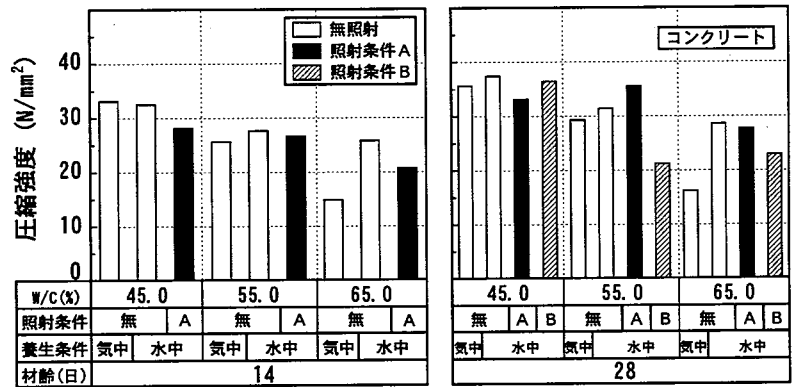


Fig. 10 マイクロ波を照射したコンクリートの圧縮強度
Compressive Strength of Microwave Irradiated Concrete

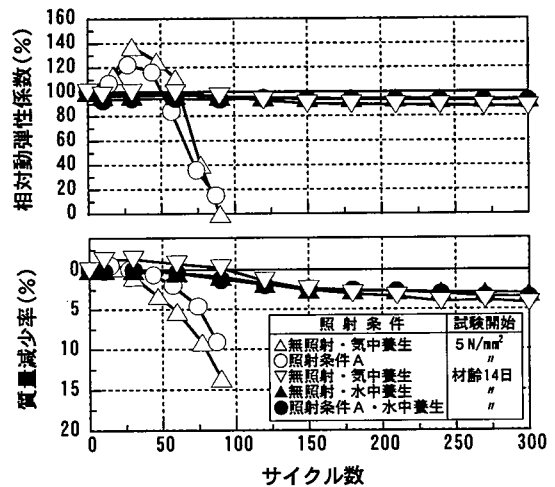


Fig. 11 凍結融解試験結果
Results of Freezing and Thawing Test

の位置で0.3℃/min、100mmの位置で0.06℃/minとなった。そこで、マイクロ波を照射した電力エネルギーから熱エネルギーへの変換効率を算定した結果、エネルギー変換効率は約64%となった。このことから、マイクロ波加熱は、コンクリートに対する効率的な給熱方法と考えられる。次に、マイクロ波照射による初期強度促進効果を、積算温度で整理した結果をFig. 13に示す。マイクロ波照射は、無照射に比べ、約半分の1/2 D²Dで圧縮強度5.0N/mm²に到達しており、基礎物性実験(実験1)と同等の結果となった。最後に、マイクロ波を照射して強度

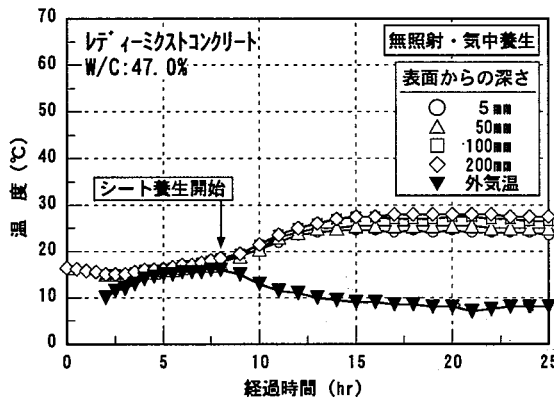
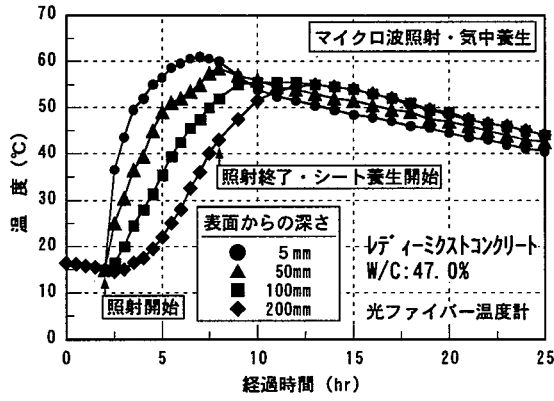


Fig. 12 マイクロ波照射によるコンクリートの深さ方向の温度履歴
Temperature Distribution of Concrete Specimen by Microwave Heating

発現を促進したコンクリートの強度特性は、Fig. 14に示すように、材齢7日では、標準養生のコンクリートに比べ、圧縮強度、静弾性係数とも若干大きいですが、材齢28日では、いずれも5%程度低下した。従って、マイクロ波を照射した場合、長期強度の伸びが期待できない可能性があるが、実用上は問題ない範囲内と考えられる。

4. まとめ

実験の結果得られた知見を下記に示す。

- 1) マイクロ波によるコンクリートの加熱速度は、同一容積の水よりも若干速い。
- 2) マイクロ波加熱の浸透深さは約100mmであり、それ以上は通常の熱伝導により加熱されると考えられる。
- 3) 水セメント比55%の普通コンクリートに照射すると、適切なマイクロ波加熱条件を選定することにより、初期養生を行うことなく、材齢、約3.5時間で初期強度 5.0N/mm²を得ることができる。
- 4) 適切なマイクロ波を照射したコンクリートは、耐凍害性などの耐久性上の品質には問題がない。

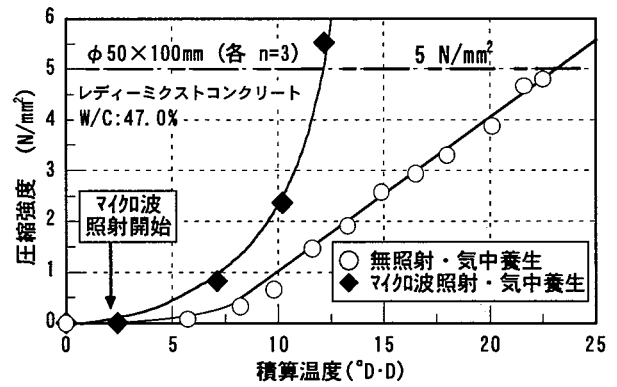


Fig. 13 積算温度とコンクリートの初期強度
Relationship Between Early Strength and Cumulative Temperature

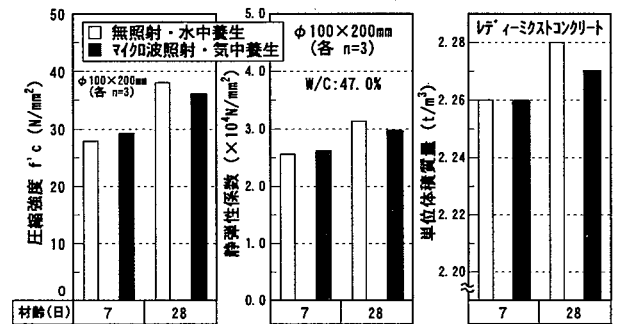


Fig. 14 マイクロ波を照射したコンクリートの強度特性
Strength Properties of Microwave Irradiated Concrete

- 5) マイクロ波を、打込み後のコンクリートに直接照射した場合、電力エネルギーの熱エネルギーへのエネルギー変換効率は約64%である。

以上のように、コンクリートへのマイクロ波照射による加熱は、エネルギー変換効率が高く、強度促進手段として効果的であり、硬化後のコンクリートの品質も良好であることが明らかとなった。今後、コンクリート分野への、本技術の実用化を推進する予定である。

参考文献

- 1) 柴田長吉郎：工業用マイクロ波応用技術，電気書院(1986)
- 2) 平田隆祥：コンクリートへのマイクロ波の応用，コンクリート工学, Vol. 35, No. 6, pp. 33-37, 1997. 6
- 3) 平田隆祥・川島宏幸・十河茂幸・相原 功：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，コンクリート工学, Vol. 19, No. 1, pp. 649-654, 1997. 6
- 4) 平田隆祥・十河茂幸：マイクロ波照射によるコンクリートの発熱・強度発現特性の検討，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集V, pp. 146-147, 1998. 10