

論文 マイクロ波の現場コンクリートへの照射方法とその効果

平田隆祥*1・十河茂幸*2

要旨：コンクリートへのマイクロ波応用技術の一つに、マイクロ波加熱による強度促進技術がある。室内実験でこの技術の有効性を確認した結果、マイクロ波照射エネルギーが効率よくコンクリートの発熱に換わり、効果的な強度促進が可能となることが明らかとなった。そこで、本研究では、現場コンクリートへ本技術を応用するため、可動式マイクロ波発振器を試作して、その効果の確認実験を行った。実験の結果、コンクリートへのマイクロ波の直接照射方法は、強度促進手法として有効であり、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。

キーワード：マイクロ波、コンクリート、急速施工、強度促進、凍結融解、細孔分布

1. はじめに

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、効率的な強度促進技術が求められている。一方、近年、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、その利用方法の一つに、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¹⁾。

これまで筆者らは、室内実験において、フレックスコンクリートに周波数 $2460 \pm 30\text{MHz}$ のマイクロ波を照射すると、誘電体である水分子の振動により自己発熱が生じて、一般的な普通コンクリートの場合でも、前養生を行うことなく、3時間で 3N/mm^2 程度、5時間で 5N/mm^2 程度の強度促進効果があり、耐凍害性も確保できることを明らかにした²⁾。また、その照射に要する電力量とコンクリートの発熱量の関係から、電力の熱エネルギーへの変換効率が、約50%であることを報告した³⁾⁴⁾。

そこで、このマイクロ波加熱を、現場コンクリートに適用することが可能となれば、非常に効率的な強度促進手段になると考え、適用方法の検討を行った。実験では、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加熱を行った。

実験の結果、コンクリートへのマイクロ波の直接照射は技術的に可能で、かつ、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。

2. マイクロ波加熱装置の利用形態

マイクロ波加熱装置を、コンクリートの加熱に利用する方式は、大別して下記の2種類に分類される。

- a) コンクリート製造プラントに定置する方式
- b) コンクリート施工現場内の可搬方式

また、コンクリートの施工工程を考慮すると、図-1に示す①～⑥の6種類の適用位置が考えられ、それぞれに特徴を有している。特に、⑥の位置は、打ち込まれたコンクリートを直接加熱するため、エネルギー効率は高い反面、技術的には適用が難しい。また、直接加熱の応用例として、サイトプレキャスト部材の低コスト、急速製造なども考えられる。

*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)大林組技術研究所 土木第三研究室室長 工博 (正会員)

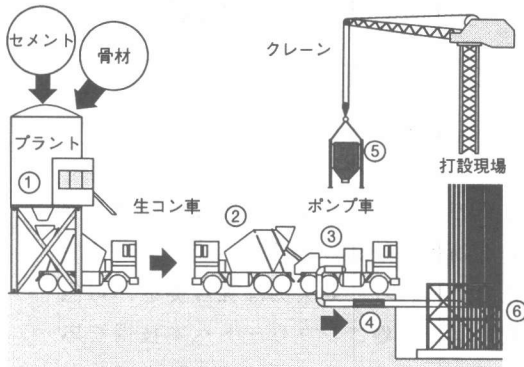


図-1 マイクロ波加熱技術の適用位置

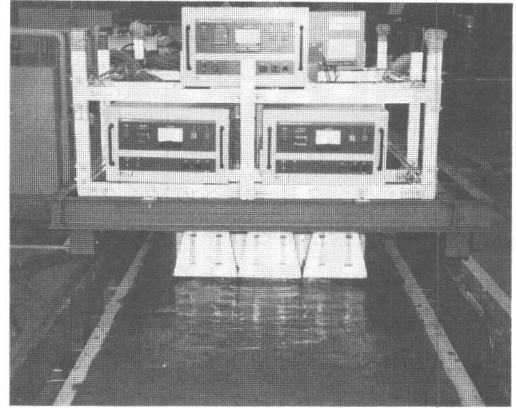


写真-1 マイクロ波発振器可動部および照射状況

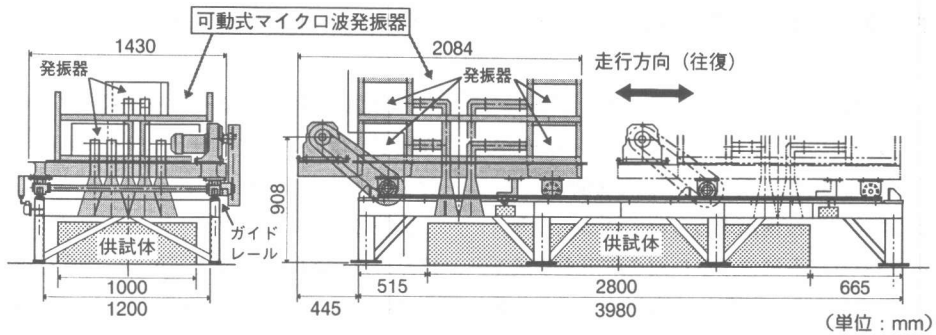


図-2 可動式マイクロ波発振器および供試体の設置状況

表-1 可動式マイクロ波発振器の仕様

発振出力	12 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:走行方向に対し互い違いに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

3. 実験概要

実験は、出力 1.2kW のマイクロ波発振器 5 台で、ガイドレール上を移動する可動部を構成し、型枠内に打ち込まれたコンクリートの表面上を、走行速度約 4m/min で往復移動させながらマイクロ波を断続的に照射して加熱し、コンクリート内部の温度上昇量を計測した。また、コンクリート内部から、テストピースを抜き取り、強度発現を確認するとともに、硬化コンクリートの凍結融解抵抗性や、セメントマトリックス中の細孔状態の変化を計測して、マイクロ波を照射しない場合との比較検討を行った。

3.1 可動式マイクロ波発振器

実験に用いた可動式マイクロ波発振器の概要を

図-2 に、仕様を表-1 に示す。この装置の可動部は、発振器を 2 段に設置してあり、各発振器から伸びた導波管の先端に、ホーン型アンテナを走行方向に対し互い違いに 2 列に取り付けている。この可動部を、コンクリート供試体上の長さ約 2m の範囲で往復移動させる構造となっている。

3.2 マイクロ波の照射条件および養生方法

マイクロ波の照射は、室内実験の結果³⁾を参考にし、供試体内部の温度変化を計測しながら、表面部の温度上昇速度が 40℃/2hr 以上、または、最大許容加熱温度 60℃を越えた場合は、照射を一時停止する断続照射による制御を行った。マイクロ波発振器可動部および照射状況を写真-1 に示す。制御の結果、総照射時間は 160 分 42 秒となった。また、コンクリート供試体の加熱による表面乾燥を防止するため、照射開始から 2 時間後に、表面をマイクロ波が透過するラップフィルムで養生した。さらに、照射開始から 6 時間後に照射を終了し、

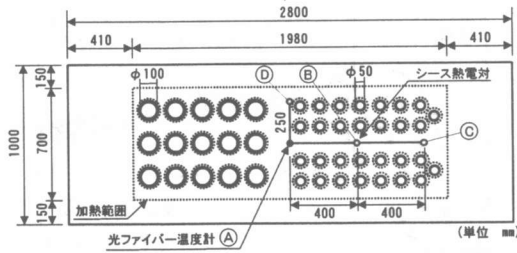


図-3 供試体の形状及びテストピースの採取位置

表-2 使用材料

材料	記号	種類	比重	性質・成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	JIS R 5210 規格品
細骨材	S	香川県室木・岡山県大槌海砂	2.56	吸水率 1.82% 粗粒率 2.75
粗骨材	G	兵庫県赤穂 碎石	2.64	吸水率 0.69%、 粗粒率 6.74 実積率 58.0
混和剤	A	AE 減水剤	1.25	リグニンスルホン酸化合物及びポリオール複合体
水	W	上水道水	1.00	-

保温の目的で、エアーキャップを用いて供試体を養生した。その後は、外気による自然冷却とした。

3.3 供試体の形状およびテストピースの配置

加熱用供試体の形状およびテストピースの配置状況を図-3に示す。供試体の寸法は、W1000×L2800×H250mmの平盤状とし、長さ方向の中央部約2mを加熱範囲とした。比較のため、寸法W1000×L1000×H250mmの加熱しない供試体も作製し、いずれの供試体も木製合板型枠を使用した。また、加熱用供試体の内部には、テストピースを採取する目的で、寸法φ100×H200mm、φ50×H100mmの2種類のポリプロピレン製型枠を、コンクリート表面の高さにそろえて配置してあり、また、加熱用供試体内部の深さ方向の温度分布を計測するため、A～Dの4点において温度計測を行った。

3.4 コンクリートの配合および使用材料

実験に用いたコンクリートの使用材料、および、その配合を表-2、表-3に示す。

表-3 コンクリートの配合及び試験結果

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	塩化物量 (kg/m ³)
			W	C	S	G	A				
20	47.0	43.1	175	372	730	995	0.930	8.5	6.0	16.4	0.045

表-4 試験項目及び試験方法

項目	方法	
コンクリート内部の深さ方向の温度分布	A～D(図-3)の4点、深さ: 5.50,100,200mm A点は光ファイバー温度計、その他はシース熱電対を使用	
マイクロ波発振器の投入電力	発振器出力、反射波出力を電力計にて計測	
マイクロ波漏洩量	リークチェッカーにて計測	
初期強度	寸法: φ50×100、各3本、ブルーピングリング試験装置にて計測	
圧縮強度	JIS A 1108に準拠	
静弾性係数	JSCE-G502に準拠	試験材齢 7日、28日
単位容積質量	強度試験用供試体の質量・寸法より算定	
動弾性係数	JIS A 1127に準拠: 縦振動法	供試体寸法 φ100×200
凍結融解抵抗性	JSCE-G501に準拠: 開始材齢14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深さ方向の分布測定、深さ20cmまで5段階、測定材齢14,28日 D-乾燥4日間、セル容量16cc、試料質量5g、2回平均	

3.5 試験項目および試験方法

試験計測は、主に、マイクロ波の出力電力量とコンクリートの温度上昇量との関係、および、照射後硬化したコンクリートの物性について測定を行った。表-4に試験項目および試験方法を示す。

4. 実験結果および考察

4.1 コンクリート供試体内部の温度上昇変化

A～Dの各点における、深さ方向の温度履歴を図-4に、無照射の場合を図-5に示す。マイクロ波は、打込み完了直後から、供試体に6時間、断続的に照射した。A～Dの深さ方向の温度履歴はほぼ同一であり、供試体は均等に加熱されたと考えられる。また、無照射の場合は、25℃程度までしか温度上昇しなかったのに比べ、照射した場合は、照射完了から2時間後に、深さ5～200mmの全断面が、ほぼ均一の50℃程度となった。

次に、A点における照射開始直後のコンクリート内部の温度上昇速度は、深さ5mmの位置で0.9℃/min、50mmの位置で0.3℃/min、100mmの位置で0.06℃/minとなった。また、図-6に示すコンクリートの深さ方向の温度変化から、深さ100mmの位置に温度上昇の変極点が存在していた。

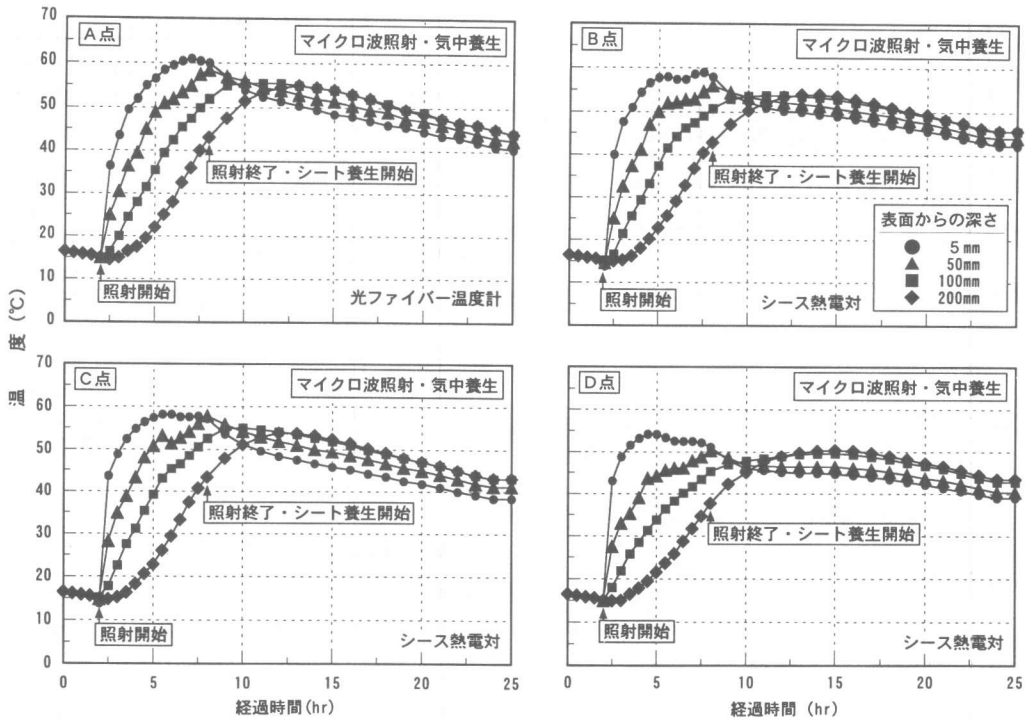


図-4 マイクロ波加熱養生によるコンクリートの深さ方向の温度履歴

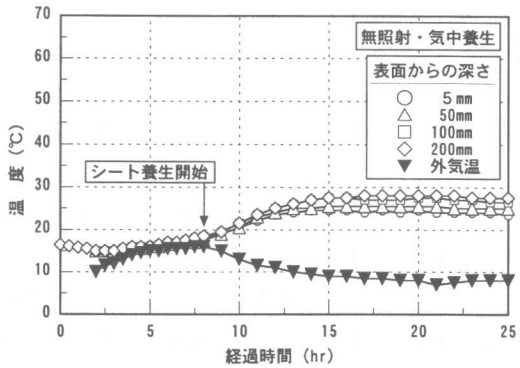


図-5 無照射・気中養生によるコンクリートの深さ方向の温度履歴及び外気温

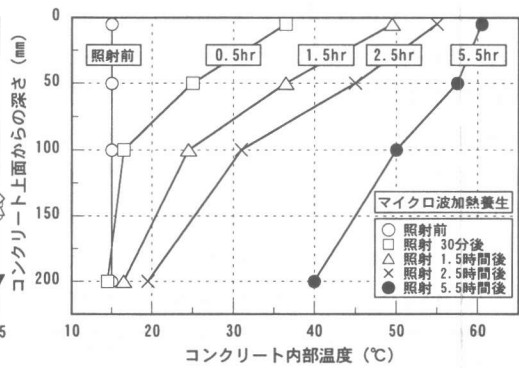


図-6 コンクリートの深さ方向の温度分布

以上の結果より、マイクロ波加熱は、約 100mm の深さまで浸透し、それ以深は、通常の熱伝導により $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 程度の温度上昇速度となると考えられる。次に、連続照射中のマイクロ波発振器の出力電力、コンクリートからの反射電力、および、漏洩量を計測した結果、出力電力は発振器 1 台当たり 1.05kW 、反射電力は 0.05kW (MAX)、全体の漏洩量は $1\text{mW}/\text{cm}^2/\text{at}1\text{m}$ であった。実用化に当たっては、反射や漏洩などの対策が必要と考えられる。

4.2 マイクロ波加熱のエネルギー効率

コンクリートの温度上昇量の計測結果より、マイクロ波を用いた場合の、エネルギー効率を概算した結果を下記に示す。エネルギー効率の換算式は、下記に示す式(1)となる。

・エネルギー効率

$$\begin{aligned} \alpha &= (w \times c \times \Delta t) / (W \times t) \times 100 \quad (1) \\ &= (883 \times 0.92 \times 40) / (5.25 \times 9642) \times 100 \\ &\approx 64 (\%) \end{aligned}$$

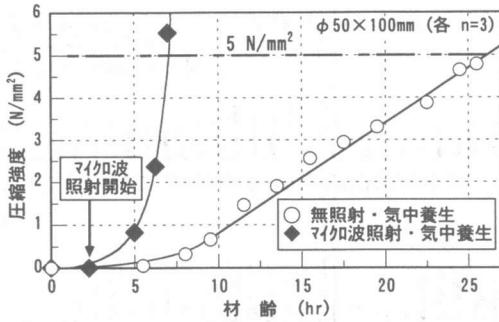


図-7 材齢とコンクリートの初期強度

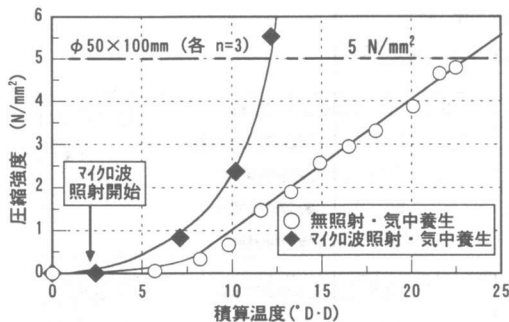


図-8 積算温度とコンクリートの初期強度

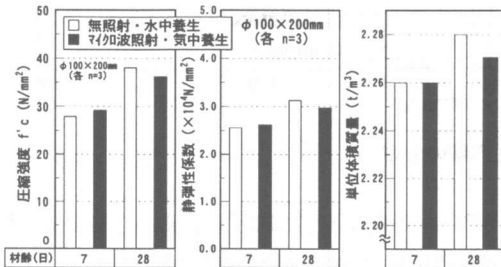


図-9 マイクロ波を照射したコンクリートの強度特性
ここに

α : エネルギー効率(%) V : 加熱コンクリート容積(cm^3)

$$V = W72 \times L270 \times H20 (cm) = 388800 (cm^3)$$

w : 加熱コンクリート質量(kg) $w = V \times \rho \approx 883 (kg)$

ρ : コンクリートの密度(g/cm^3), $\rho = 2.27$ (配合換算)

c : コンクリートの比熱($kJ/kg \cdot ^\circ C$), $c = 0.92$

Δt : コンクリートの温度上昇量($^\circ C$), $\Delta t = 40$

W : マイクロ波照射電力(kW)

$$W = 1.05/1 \text{ 台} \times 5 \text{ 台} = 5.25$$

t : マイクロ波総照射時間(sec)

$$t = 9642 (160 \text{ 分 } 42 \text{ 秒})$$

4.3 マイクロ波照射による初期強度促進効果

コンクリート表面から深さ10cmまでの、初期強度の発現状況を図-7, 図-8に示す。

マイクロ波を照射した場合, 圧縮強度 $5N/mm^2$ に

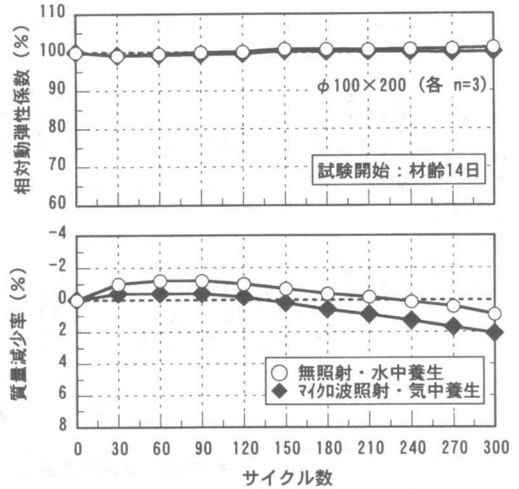


図-10 凍結融解試験結果

到達するのは, 照射開始から5時間であるのに比べ, 無照射の場合は, 外気温が $10^\circ C$ 程度と低く, 24時間を要している。また, 積算温度で整理した結果, マイクロ波照射は無照射に比べ, 約半分の $12^\circ D \cdot D$ で圧縮強度 $5N/mm^2$ に到達している。これは, マイクロ波加熱が単に給熱だけでなく, セメントの水和反応を促進する効果があるためと考えられる。

4.4 マイクロ波照射コンクリートの強度特性

マイクロ波照射により強度発現を促進したコンクリートは, 図-9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, 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。

4.5 マイクロ波照射コンクリートの耐凍害性

凍結融解試験の結果, 図-10に示すようにマイクロ波照射コンクリートの方が, 質量減少率が若干大きいものの, 耐凍害性については, 無照射の場合と同等と考えられる。

4.6 マイクロ波照射コンクリートの細孔分布

マイクロ波を照射したコンクリートの細孔分布は, 図-11に示すように材齢14日において半径 $4.3nm$ 以下の微細空隙の減少が大きいものの, 全体は, 無照射の場合と大差ない結果となっている。一方, 全細孔容積について比較すると, 図-12に示

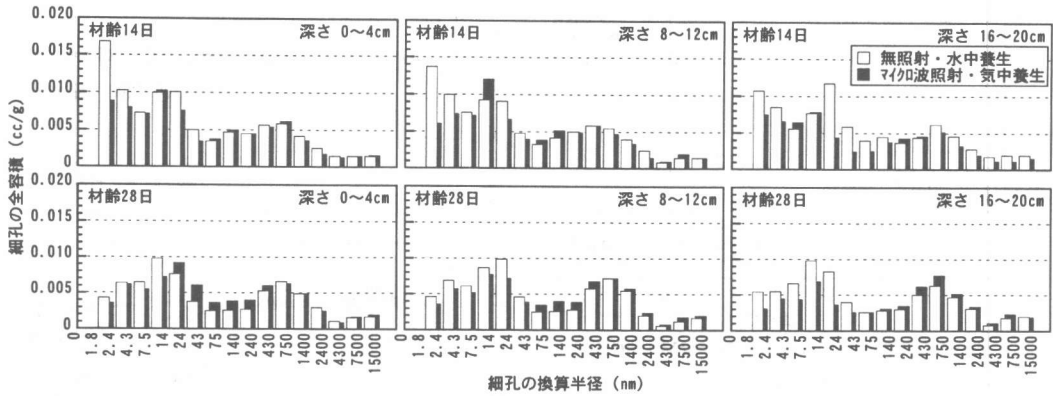


図-11 細孔分布の測定結果

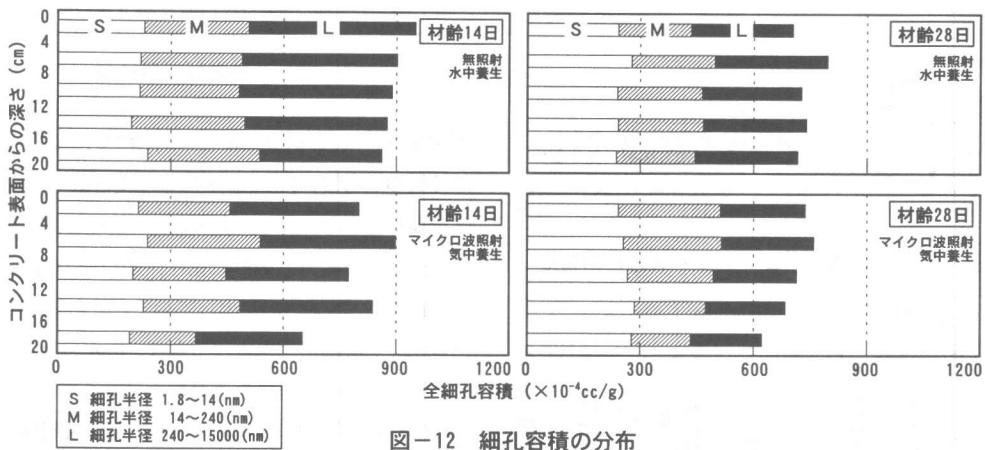


図-12 細孔容積の分布

すようにマイクロ波照射コンクリートの方が、全体的に若干小さくなる傾向が見られた。また、材齢28日における、マイクロ波照射コンクリートの深さ方向の分布を見ると、深い位置ほど全細孔容積は減少していた。これらの結果より、マイクロ波をコンクリートに照射すると、早期に水和反応が進み、セメントペーストマトリックスが緻密化すると考えられる。

5. まとめ

コンクリートへのマイクロ波の直接照射は、加熱エネルギー効率が高く、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から、技術的には低温環境下の施工、急速施工、製品製造の分野などへの適用が可能であると考えられる。今後、コンクリート分野での本技術の実用化が期待される。

謝辞：本研究の遂行にあたり、三菱重工業(株)技術本部高砂研究所・建機研究推進室の兵頭和也氏、有川究氏に多大なご助力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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回年次学術講演会講演概要集V, pp. 528-529, 1996. 9
- 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