

マイクロ波加熱養生によるコンクリート強度の 即時判定法に関する研究

伊藤幸広¹・辻 正哲²

¹正会員 工博 東京理科大学助手 理工学部土木工学科 (〒 278 千葉県野田市山崎 2641)

²正会員 工博 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科

マイクロ波を透過し高温での力学特性の優れた樹脂で作られた拘束型枠にコンクリートを打込み、外部から高出力のマイクロ波を照射することにより、極短時間でコンクリートを硬化させ、その促進強度より材齢 28 日強度を推定する試験方法を開発した。本研究では、提案する試験方法の早期判定法としての適用性を調べるため、促進強度に影響を及ぼす要因、試験の再現性および推定精度等について検討を行った。

Key Words : *accelerated strength test, microwave heating, closed form*

1. はじめに

現在、硬化コンクリートの品質管理においては、材齢 28 日の圧縮強度を管理特性として用いることが一般的であり、この管理特性を他の品質の代用特性として用いることも多い。しかし、所定の品質の保証およびコンクリートの経済的な生産といった品質管理本来の目的を考えた場合、打設から 28 日経過後の特性値を用いて効果を上げることは困難である。特にコンクリート工事においては、28 日経過後に強度不足が判明した場合、その構造物は補強もしくは取り壊しの対象となり、工期の遅延や工費の増加など、多大な損失をもたらす危険性を含んでいる。

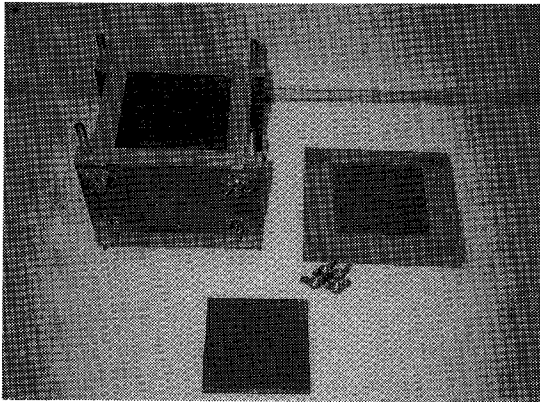
このような背景から、コンクリートを短時間で強度発現させ、その促進強度から材齢 28 日強度を早期に推定しようとする試験方法の研究が古くから行われており、現在までに数多くの方法が提案されている¹⁾。コンクリートの硬化促進方法としては、温水、沸騰水、蒸気、赤外線などによる高温養生および型枠によってコンクリートを密閉・拘束した状態で高温養生する方法²⁾³⁾などがある。しかし、いずれの方法も物質の熱伝導によって試料内部まで昇温させる加熱方法を採用しているため試験時間が長くなるという問題がある。

一方、熱伝導によらず物質の内部から均等にかつ急速に発熱させる加熱方法にマイクロ波加熱がある。マイクロ波加熱をコンクリートの養生手段として用いた場合、凝結促進効果⁴⁾があることが知られているが、連続的に長時間マイクロ波加熱を行うと、コンクリート中の空気および水分の体積膨張や水分の蒸発を引き起こし、硬化

後の強度が低下するという問題点がある。また、マイクロ波は金属を透過しないため、一般的に用いられている鋼製の型枠を使用できないこともマイクロ波加熱をコンクリートの養生手段として適用する上での障害となっている。

著者らは、マイクロ波加熱の上記のような問題を解決するため、マイクロ波を透過する型枠を用い、コンクリートを加圧拘束した状態でマイクロ波を照射することにより、型枠内を高温高圧状態にするとともにコンクリート中の空気や水分の体積膨張を抑制し、コンクリートを極短時間で硬化させる方法を開発した。また、この方法によって得られた促進強度から材齢 28 日強度を推定する方法を提案してきた⁵⁾⁶⁾。しかし、これまでに提案した方法では、試験方法は簡易であるが試験時間が 60 分程度とやや長く問題が残されていた。

本研究では、高出力のマイクロ波加熱装置を用いることにより試験時間の短縮を計り、使用材料の品質の変化や有害物の混入にともなうコンクリートへの影響を提案する試験方法で評価する場合の適用条件について検討を加えるとともに、試験の再現性および推定精度を調べ、提案する試験方法のコンクリート強度の早期判定法としての適用性について検討を行ったものである。なお、本論文ではこれらの検討に先立ち、最適な試験方法を確立するための実験を行っている。



写真一 拘束型枠 (手前：発泡シリコンゴム)

2. マイクロ波加熱養生によるコンクリート強度の即時判定法の概要

(1) 試験装置

a) 型枠

試験に用いた拘束型枠は、一辺が約 10 cm の立方体供試体が作製できるものであり、コンクリートを打ち込む型枠本体と加圧拘束するための上蓋および加圧力を伝達するための中蓋より構成されている(写真一)。型枠本体および上蓋の材質は、ガラス繊維で強化したポリフェニレンサルファイド樹脂 (PPS 樹脂) である。この樹脂は、マイクロ波の透過率が高いことに加え、高温域での力学特性に極めて優れたものであり、促進養生時のコンクリートの温度上昇に伴う膨張圧に対しても変形を起こさないものである。表一には、ガラス繊維で強化したポリフェニレンサルファイド樹脂の特性を示す。中蓋の材質は、発泡シリコンゴムである。中蓋の役割は、上蓋からの加圧力を伝達する機能の他に、促進養生時の温度上昇にともない膨張し、型枠本体の内壁面に密着することにより、コンクリートからの水分の蒸発を抑制する機能を持つ。なお、拘束型枠は全て蝶ねじを用いて組み立てられるようになっており、加圧拘束や脱型に関わる作業を容易にしている。

b) マイクロ波加熱装置

マイクロ波加熱装置はマイクロ波出力 1000 W、発振周波数 2450 MHz の S 社製の市販の電子レンジであり、その仕様を表二に示す。

(2) 試験手順

コンクリートの打ち込みから促進強度を求めるまでの一連の試験手順は以下に示すとおりである。

- ①型枠本体にコンクリートを一層で詰め、14 回突き棒で締め固めた後に木槌でたたき気泡を追い出す。

表一 ガラス繊維で強化したポリフェニレンサルファイド樹脂の特性

項目	試験方法 (ASTM)	特性値
引張強度	D-630	1700 kgf/cm ²
曲げ強度	D-790	2600 kgf/cm ²
荷重たわみ温度 (18.6 kgf/cm ²) (熱変形温度)	D-648	260°C以上
比誘電率 (1 MHz)	D-150	3.9
誘電正接 (1 MHz)	D-150	0.0014

表二 マイクロ波加熱装置の仕様

項目	仕様
マイクロ波出力	1000 W
発振周波数	2450 MHz
定格電圧	AC200 V
庫内寸法 (幅×奥行×高さ)	330×330×208 mm

- ②コンクリート表面を平に均し、その上に中蓋を置く。
- ③中蓋の上に上蓋を載せ、蝶ねじを手で締め付けることにより加圧拘束を行う。
- ④加圧拘束の際にコンクリートから脱水が生じるが、その脱水量が所定の量になるまで加圧を続ける。(脱水量は拘束型枠ごと台秤に載せ、重量を計量することによって求める。)
- ⑤マイクロ波加熱装置内に拘束型枠を入れ、マイクロ波出力 1000 W の状態で所定の時間まで促進養生を行う。
- ⑥促進養生が終了したら直ちにマイクロ波加熱装置より拘束型枠を取り出し、脱型を行う。(この時、供試体温度は 100°C 以上であるが、厚手のゴム手袋を使用すれば火傷の危険性はほとんどない。)
- ⑦載荷面の断面寸法を測定し、耐圧試験機で圧縮強度試験を行う。

3. 試験方法の確立

本章では、試験時間および推定精度に影響を及ぼすと考えられる以下の 3 つの試験条件について検討を行い、最適な試験方法の確立を試みたものである。本実験で検討した試験条件としては、促進養生時間、加圧拘束時の脱水量および脱型終了から圧縮試験開始までの時間である。

(1) 使用材料および配合

促進養生時間および脱型終了から圧縮試験開始までの時間を検討する実験ではモルタルを用いた。加圧拘束時

表一三 普通ポルトランドセメントの物理的性質

種 類	比 重	比表面積 (cm^2/g)	安定性	圧縮強さ (kgf/cm^2)			
				1日	3日	7日	28日
普通ポルトランド セメント	(T社) 3.16	3350	良	-	151	254	426
	(N社) 3.16	3270	良	-	154	253	420

表一四 細骨材の物理的性質

	粗粒率	比重	吸水率 (%)	実績率 (%)
細骨材 (鬼怒川産川砂)	2.60	2.60	1.32	65.2

表一五 粗骨材の物理的性質

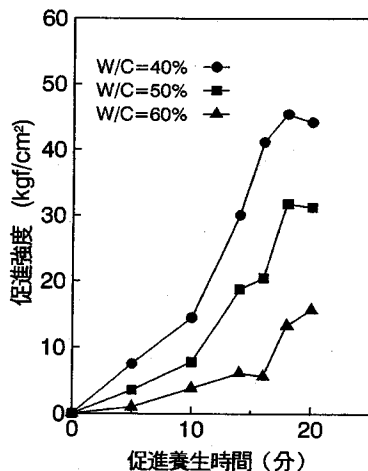
	粗粒率	比重	吸水率 (%)	実績率 (%)
粗骨材 (山梨産碎石)	7.36	2.65	0.92	59.6

表一六 コンクリートの配合

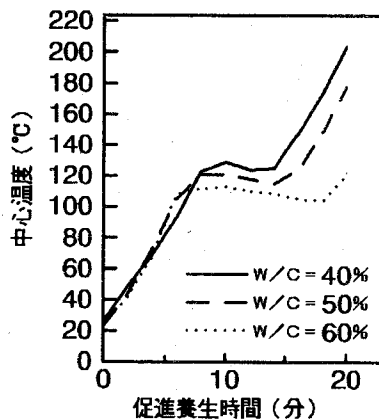
種類	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					混和剤 Ad
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
AE剤 コンクリート	50	47	187	374	800	918	0.066	
AE減水剤 コンクリート	50	43	165	330	772	1043	2.97	

の脱水量を検査する実験については、モルタルとコンクリートでは脱水可能な量が大幅に異なるため、モルタルおよびコンクリートの両者について検討を行った。

促進養生時間および脱水量の検討で用いたセメントは、T社製の普通ポルトランドセメントであり、圧縮試験開始までの時間の検討で用いたセメントは、N社製の普通ポルトランドセメントである。その物理的性質は表一三に示すとおりである。細骨材は全ての実験において共通であり、その物理的性質は表一四に示すとおりである。脱水量の検討で用いた粗骨材の物理的性質は表一五に示すとおりである。促進養生時間の検討では、水セメント比が40, 50および60%, 砂セメント比2の3種類のモルタルについて、脱水量および圧縮試験開始までの時間の検討で用いたモルタルは、水セメント比50%, 砂セメント比2のものである。なお、脱水量の検討で用いたコンクリートは、AE剤使用のコンクリートおよびAE減水剤使用のコンクリートの2種類であり、それぞれの配合は表一六に示すとおりである。目標スランブはいずれも $8 \pm 1.5 \text{ cm}$ であり、空気量は $4 \pm 1\%$ である。実験で使用したAE剤はY社製のレジジン酸ナトリウム塩系のものであり、AE減水剤はS社製のリグニンスルホン酸塩系のものである。



図一 促進養生時間と促進強度の関係



図二 促進養生時間と供試体中心温度の関係

(2) 実験方法

促進養生時間の検討では、水セメント比の異なる3種類モルタルのそれぞれについて、促進養生時間を5, 10, 14, 16, 18および20分と変化させ促進強度を求めた。この実験での脱水量は60gとした。脱水量の検討では、モルタルの場合には脱水量を30~80gの間で変化させ、コンクリートの場合には5~40gの間で変化させ促進強度を求めた。この実験での促進養生時間は18分とした。圧縮試験開始までの時間の検討では、圧縮試験開始までの時間を1~30分の間で7段階に変化させ促進強度を求めた。この実験での促進養生時間は18分とし、脱水量は60gとした。

(3) 実験結果

図一は、促進養生時間と促進強度の関係を示したものである。なお、各点は2個の供試体の強度の平均値で

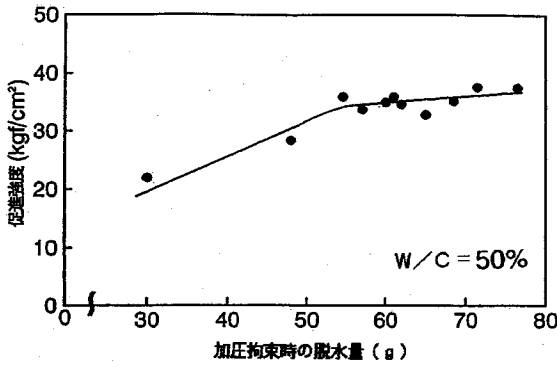


図-3 モルタルの加圧拘束時の脱水量と促進強度の関係

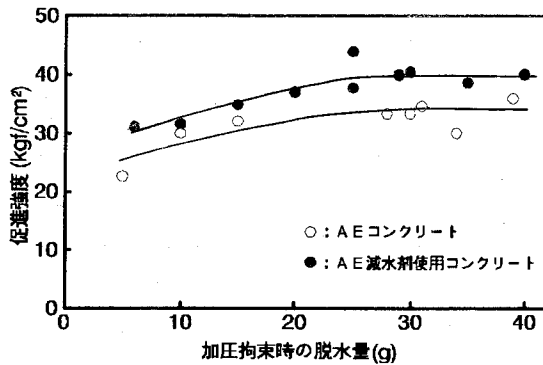


図-4 コンクリートの加圧拘束時の脱水量と促進強度の関係

ある。水セメント比が40および50%の配合では、促進養生時間が18分の時に促進強度がそれぞれ最大となり、促進養生時間が20分となると若干ではあるが強度が低下している。図-2は、図-1と同一の試験条件において供試体中心部の温度変化をアルコール温度計によって測定した結果である。水セメント比40および50%の配合では、促進養生時間が20分となると中心温度が160°C以上とかなり高温となるため、結合水の一部が脱水されるものと推測される。これにより強度低下が生じたものと考えられる。

早期判定試験における促進養生時間としては、可能な限り短い方が良いが、推定精度を良くすることを考えれば、材齢28日強度に近い促進強度が得られる時間であることおよび配合の違いによる促進強度の差が大きくなる時間であることなどが重要と考えられる。したがって、以上の結果より、本試験法における最適な促進養生時間は18分と考えられる。

図-3は、モルタルの加圧拘束時の脱水量と促進強度の関係を示したものである。脱水量が30gでは促進強度が約22 kgf/cm²であるのに対し、脱水量が55gでは約31 kgf/cm²となる。しかし脱水量が55g以上になると、

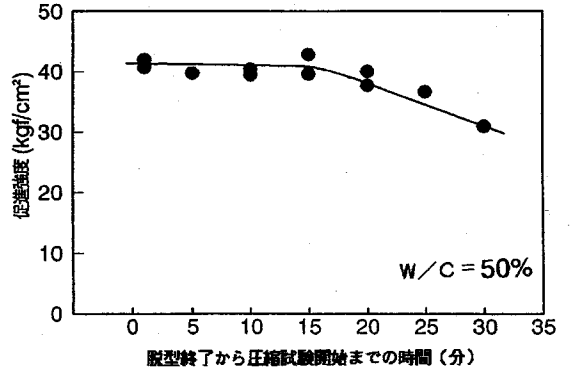


図-5 脱型終了から圧縮試験開始までの時間と促進強度の関係

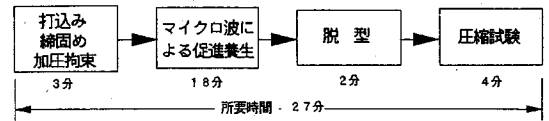


図-6 試験手順と所要時間

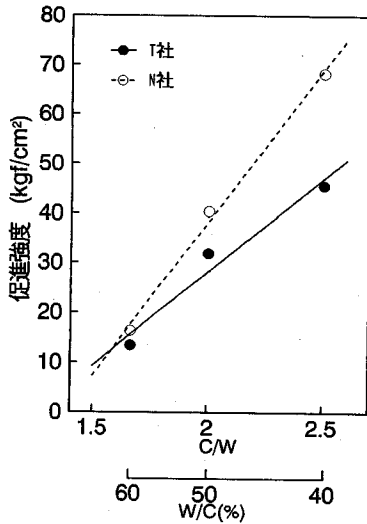
脱水量の増加にともなう強度の増加率は小さく、脱水量が最大の78gでも促進強度は35 kgf/cm²程度である。脱水量が小さい場合に促進強度が小さくなる理由としては、脱水量が50g以下の場合ではモルタルを完全に拘束したという状態ではないため、加圧拘束による効果が十分に得られなかったことによると考えられる。図-4は、コンクリートの加圧拘束時の脱水量と促進強度の関係を示したものである。コンクリートもモルタルの場合と同様の傾向を示しているが、コンクリートの場合には脱水量がおおよそ30g以上で促進強度の増加率が小さくなっている。

この結果より、脱水量によって加圧力を管理することも可能であると考えられ、さらに脱水量の大きい範囲では、脱水量の変化にともなう促進強度の変化率が小さいため、ある値以上において脱水量の管理値を設定すれば、脱水量の計量誤差にともなう推定精度への影響を小さくできるものと考えられる。本試験法における加圧拘束時の最適な脱水量はモルタルの場合60g、コンクリートの場合は30gと考えられる。

図-5は、脱型終了から圧縮試験開始までの時間と促進強度の関係を示したものである。圧縮試験開始までの時間が15分以内では、促進強度はほぼ一定であるが、それ以上となると促進強度は徐々に低下する傾向が見られる。強度が低下する理由としては、高温の供試体を気中に放置するため、時間の経過とともに供試体内部と表面部に温度差が生じ微細ひびわれが発生したためと考えられる。特に本実験では15分以降にその影響が顕著になっ

表一七 モルタルの配合

要因	W/C (%)	S/C	混和剤/有害物
セメントの銘柄	40, 50, 60	2	—
風化セメント	50	2	—
高性能減水剤の添加	40, 50, 60	2	高性能減水剤: C×0.5%
空気量	50	2	AE剤: C×0.012% 0.016%
有害物の混入	50	2	フミン酸: C×1.0%



図一七 セメントの銘柄の違いが促進強度に及ぼす影響

たものと考えられる。以上のことより、圧縮試験は脱型終了から15分以内に行えばよいことがわかる。

図一六には、コンクリートの打ち込みから圧縮試験までの各作業工程に要する作業時間と試験の全所要時間を示す。ここに示した作業時間は、1人の試験者が1個の供試体の作業に関わる時間であり、この場合、試験の全所要時間は27分となる。なお、3台のマイクロ波加熱装置を用い2人の試験者で3個の供試体の促進強度を求める場合には、作業を平行して行うことができるため試験の全所要時間は35分程度となる。

4. 本試験法の適用条件に関する検討

本試験法では型枠内を高温高圧状態とし促進養生を行うため、標準養生とは水和反応の形態が異なると考えられる。したがって、標準養生の強度に影響を及ぼす因子でも本試験法では評価できない可能性がある。本章では、使用材料の品質の変化や有害物の混入など、種々の要因の変化が促進強度に及ぼす影響を調べ、本試験法で評価可能な要因の種類や本試験法を適用する場合の条件等について若干の考察を加えたものである。本実験でとりあげた要因としては、セメントの銘柄、セメントの風化に

表一八 風化したセメントを用いたモルタルの促進強度

	<kgf/cm²>	
	開封直後のセメント	風化セメント
促進強度	31.0 (100)	20.4 (65.8)
標準養生材齢7日強度 (φ5×10cm)	356 (100)	309 (86.8)

よる影響、高性能減水剤の添加、空気量(AE剤の添加量)および有害物の混入である。

(1) 使用材料および配合

実験で使用したセメントは、表一三に示すT社製の普通ポルトランドセメントである。なお、セメントの銘柄の影響を調べる実験では、表一三に示す2社の普通ポルトランドセメントについて比較検討した。セメントの風化による影響を調べる実験では、開封後3週間経過したT社製の普通ポルトランドセメントを風化したセメントとして用いた。細骨材は全ての実験において共通であり、その物理的性質は表一四に示すとおりである。実験で使用した混和剤のうち、高性能減水剤はS社製のナフタレンスルホン酸塩系のものであり、AE剤はY社製のレジン酸ナトリウム塩系のものである。また、有害物の混入の影響を調べる実験では、細骨材中に含まれコンクリートの強度増進をそこなう代表的な有機不純物であるフミン酸を有害物として取り上げた。フミン酸は1級試薬のものを用いた。各実験で用いたモルタルの配合は表一七に示すとおりである。

(2) 試験方法

促進養生供試体の作製は、第2章の試験手順に従って行った。なお、促進養生時間および脱水量は、それぞれ18分および60gとした。標準養生供試体はφ5×10cmのものを用い、JIS A 1132に準じて作製した。促進養生供試体および標準養生供試体は、各条件に対しそれぞれ3個作製し平均を求めた。

(3) 実験結果

図一七は、銘柄の異なる2種類の普通ポルトランドセメントについて、セメント水比と促進強度の関係を示したものである。同一配合でも銘柄が異なれば促進強度も異なり、特にセメント水比が大きくなる程、その差は大きくなっている。ただし、いずれの銘柄のセメントにおいてもセメント水比と促進強度との間には比較的良好な相関がみられる。これより本試験法ではセメントの銘柄が異なる毎に検定値を設ける必要があるといえる。

表一八は、風化したセメントおよび開封直後のセメントを用いたモルタルの促進強度と標準養生材齢7日強度を示したものである。標準養生では、風化したセメント

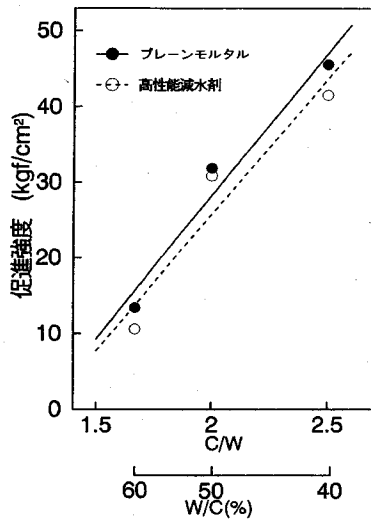


図-8 高性能減水剤の添加が促進強度に及ぼす影響

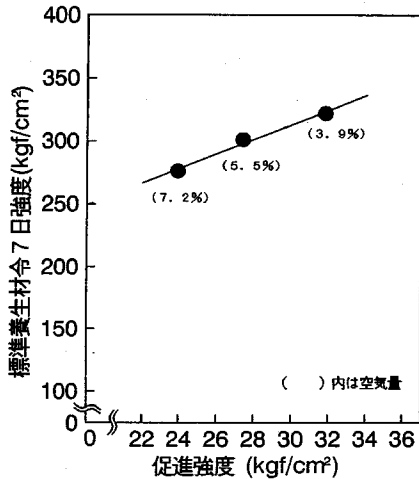


図-9 空気量と標準養生材齢7日強度の関係

を用いたモルタルの強度は開封直後のセメントを用いたモルタルの強度の86.8%であるのに対し、促進養生では強度の低下率が65.8%となり、標準養生を行った場合よりも小さくなっている。このような傾向は、促進強度から材齢28日強度を推定する他の早期判定方法³⁾にも見られる傾向である。本試験法で風化したセメントを用いたコンクリートの強度を推定する場合には、安全側ではあるが多少過小評価する可能性がある。

図-8は、高性能減水剤の添加の有無別にセメント水比と促進強度の関係を示したものである。いずれのセメント水比においても高性能減水剤を添加したモルタルは、プレーンモルタルに対し強度が若干小さくなっている。両者の差がこの程度であれば、一つの検定線で強度推定が可能であるが、推定精度は若干悪くなるものと考え

表-9 フミン酸を添加したモルタルの促進強度

(有機物)	< kgf/cm² >	
	プレーンモルタル	フミン酸添加モルタル (C×1%添加)
促進強度	31.0 (100)	19.4 (61.4)
標準養生材齢7日強度 (φ5×10cm)	356 (100)	209 (58.7)

表-10 早強ポルトランドセメントの物理的性質

種 類	比 重	比表面積 (cm²/g)	安定性	圧縮強さ (kgf/cm²)				
				1日	3日	7日	28日	
早強ポルトランドセメント	(N社)	3.14	4480	良	152	281	385	483

えられる。

図-9は、空気量の異なるモルタルについて、促進強度と標準養生材齢7日強度の関係を示したものである。これらの間には直線的な関係があり、高い相関が見られる。すなわち本試験法では、空気量の増加による強度低下の影響を評価することができるものと考えられる。

表-9は、プレーンモルタルとフミン酸を添加したモルタルの促進強度と標準養生材齢7日強度を示したものである。標準養生では、フミン酸を添加したモルタルの強度はプレーンモルタルの強度の58.7%であり、促進養生の場合のそれは61.4%である。標準養生と促進養生の強度低下率はほぼ同等であることから、本試験法ではフミン酸等の有害物の混入による強度低下の影響を評価できる可能性がある。

5. 再現性および推定精度の検討

本章では、本試験法の再現性および種々のコンクリート強度を推定した場合の推定精度について検討を行ったものである。再現性の検討では、同一配合のモルタル10バッチについて、それぞれ促進強度を求め、バッチ内変動およびバッチ間変動より評価を行ったものである。推定精度の検討で対象としたコンクリートの種類は、普通ポルトランドセメントを用いたAEコンクリート、同コンクリートを高性能減水剤により流動化したコンクリート、普通ポルトランドセメントを用いたAE減水剤により単位水量を減少させたコンクリート、早強ポルトランドセメントを用いたAEコンクリートおよび普通ポルトランドセメントの40%を高炉スラグにより代替したAEコンクリートの5種類である。

(1) 使用材料および配合

実験で使用したセメントは、表-3に示すT社製の普通ポルトランドセメントおよび表-10に示すN社製の

表-11 コンクリートの配合表

配合番号	セメントの種類	水セメント比		細骨材率 s/a	単位量 (kg/m ³)					
		W/C	s/a		水	結合材		粗骨材	混和剤 AE剤 (高性能減水剤) (減水剤)	
						W	C			B
OP-1	普通 ポルトランドセメント	40	45	187	468	—	731	910	0.084	
-2		50	47		374	—	800	918	0.066	
-3		60	49		312	—	859	910	0.069	
-4		70	51		267	—	913	893	0.072	
SP-1		40	45		468	—	731	910	0.159 (2.94)	
-2		50	47		374	—	800	918	0.101 (2.37)	
-3		60	49		312	—	859	910	0.103 (1.98)	
-4		70	51		267	—	913	893	0.089 (1.68)	
AE-1		40	41		413	—	708	1038	<3.72>	
-2		50	43		330	—	772	1043	<2.97>	
-3		60	45		275	—	828	1032	<2.49>	
-4		70	47		236	—	880	1011	<2.13>	
HP-1	40	45	468	—	731	910	0.126			
-2	50	47	374	—	800	918	0.101			
-3	60	49	312	—	859	910	0.084			
-4	70	51	267	—	913	893	0.072			
BB-1	40	46	281	187	741	887	0.105			
-2	50	48	224	150	812	896	0.084			
-3	60	50	187	125	872	889	0.070			
-4	70	52	160	107	927	872	0.060			

早強ポルトランドセメントである。高炉スラグはN社製(比重2.90)のものである。細骨材および粗骨材は、第3章で用いたものと同一であり、それぞれの物理的性質は表-4および表-5に示すとおりである。AE剤およびAE減水剤は第3章で用いたものと同じであり、高性能減水剤は第4章で用いたものと同じである。

再現性の検討で用いたモルタルは、水セメント比50%、砂セメント比2のプレーンモルタルである。推定精度の検討で対象としたコンクリートの配合は、表-11に示すとおりであり、5種類のコンクリートのそれぞれについて水セメント比を40, 50, 60および70%の4段階に変化させた合計20配合である。なお、空気量は全て4±1%とし、スランブは流動化したコンクリートのみ18±1.5cmとし、他の配合では8±1.5cmとした。

(2) 実験方法

モルタルおよびコンクリートの促進養生供試体の作製方法は、第2章の試験手順に従って行った。促進養生時間はいずれの場合も18分であるが、脱水量はモルタルの場合60g、コンクリートの場合30gとした。

標準養生供試体はφ10×20cmであり、JIS A 1132に準じて作製した。促進養生供試体および標準養生供試体は、各配合に対しそれぞれ3個作製し平均を求めた。

表-12 再現性の検討結果

バッチ番号	促進強度 (kgf/cm ²)			平均	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
	1	2	3			
1	29.3	29.1	—	29.2	0.10	0.3
2	31.7	21.9	30.6	28.1	4.38	15.6
3	28.9	30.0	32.8	30.6	1.64	5.4
4	32.5	35.8	28.0	32.1	3.16	9.8
5	31.1	31.5	32.0	31.5	0.37	1.2
6	31.2	31.3	31.7	31.4	0.22	0.7
7	35.5	33.4	34.8	34.6	0.87	2.5
8	30.0	28.1	28.5	28.9	0.82	2.8
9	30.2	33.8	30.4	31.5	1.65	5.2
10	30.3	28.7	31.0	30.0	0.96	3.2
平均				30.8	1.40	4.7
				変動係数 (%)	5.8	

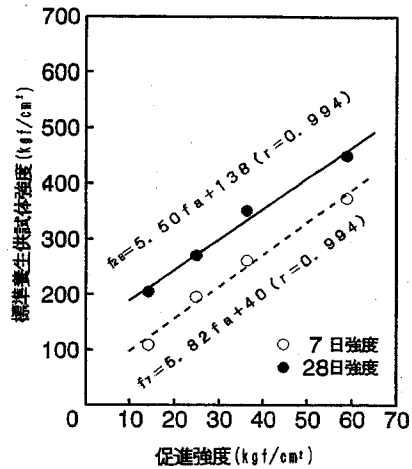


図-10 普通ポルトランドセメントを用いたAEコンクリートの促進強度と標準養生供試体強度の関係

(3) 実験結果

表-12は、同一配合のモルタル10バッチの促進強度試験結果である。バッチ内のばらつきは同時に採取した3個の供試体の促進強度の変動係数で表した。バッチ内の変動係数の最大値は15.6%と大きい。これを除く他のバッチでは全て10%未満である。10バッチの変動係数の平均値は4.7%となり、良好な値であるといえる。なお、変動係数の最大値を示したバッチ番号2では、促進強度21.9 kgf/cm²の供試体のみ非常に小さい値であるが、これは圧縮試験時の操作ミスによるものと考えられる。バッチ間のばらつきは、各バッチの促進強度の平均値の変動係数で表した。本実験のバッチ間の変動係数は5.8%となっている。これらの変動係数は標準養生供試体の変動係数と同程度であることより、本試験法の再現性は高いものと考えられる。

図-10~14は、各種コンクリートにおける、促進強度と標準養生供試体強度の関係を示したものである。また、表-13には、全ての促進強度と標準養生供試体強度との

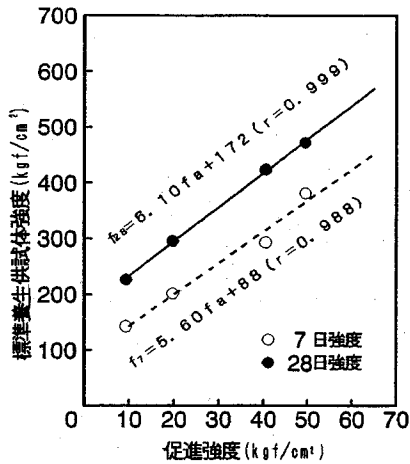


図-11 普通ポルトランドセメントを用いた流動化コンクリートの促進強度と標準養生供試体強度の関係

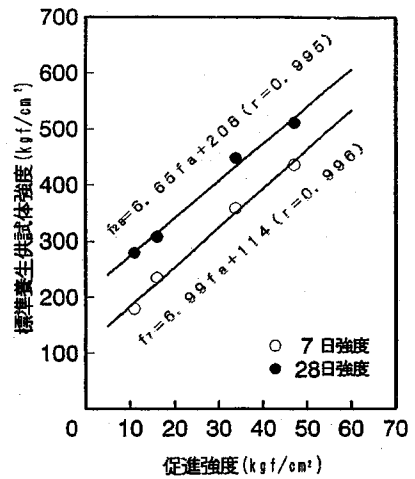


図-13 早強ポルトランドセメントを用いたAEコンクリートの促進強度と標準養生供試体強度の関係

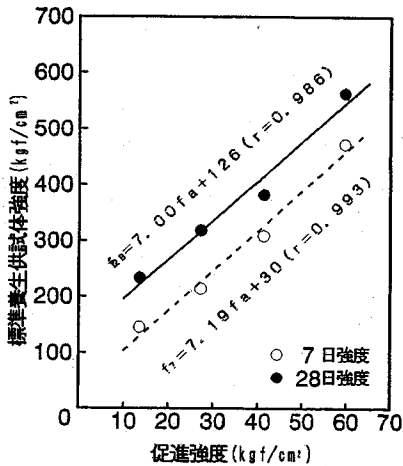


図-12 普通ポルトランドセメントおよびAE減水剤を用いたコンクリートの促進強度と標準養生供試体強度の関係

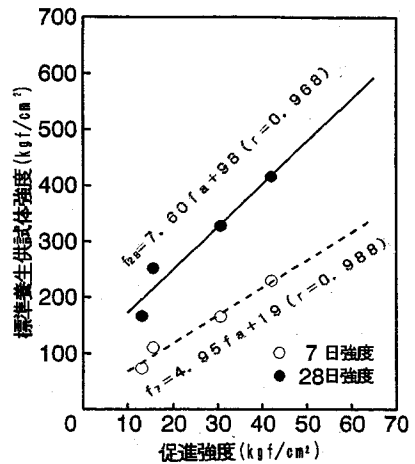


図-14 普通ポルトランドセメントの40%を高炉スラグで代替したAEコンクリートの促進強度と標準養生供試体強度の関係

関係の回帰計算結果を示す。普通ポルトランドセメントの40%を高炉スラグで代替したAEコンクリートの材齢28日強度の結果を除いて、相関係数はいずれも0.985以上であり、標準養生供試体強度と促進強度との間には高い相関関係が見られる。すなわち、セメントの種類や添加する混和剤の種類が変化しても本試験法は適用可能であるといえる。ただし、回帰直線の傾きおよび切片はそれぞれ若干異なるため、推定精度を上げるためにはコンクリートの種類が異なる毎に検定線を設けることが必要となる。

セメントの種類が異なれば強度発現性状が異なるため同一の検定線で強度を推定することは困難であるが、同一銘柄の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートで混和剤の種類が異なる場合には、同一検定線で推定

表-13 各種コンクリートの回帰計算結果

コンクリートの種類		材 齢	回 帰 直 線	相 関 係 数
普通ポルトランドセメント	A E コンクリート	7 日	$f_7 = 5.82fa + 40$	0.994
		28 日	$f_{28} = 5.50fa + 138$	0.994
	流 動 化 コンクリート	7 日	$f_7 = 5.60fa + 88$	0.988
		28 日	$f_{28} = 6.10fa + 172$	0.999
AE減水剤使用 のコンクリート		7 日	$f_7 = 7.19fa + 30$	0.993
		28 日	$f_{28} = 7.00fa + 126$	0.986
早強ポルトランドセメント を用いたコンクリート		7 日	$f_7 = 6.99fa + 114$	0.996
		28 日	$f_{28} = 6.65fa + 208$	0.995
普通ポルトランドセメント の40%を高炉スラグ で代替したコンクリート		7 日	$f_7 = 4.95fa + 19$	0.988
		28 日	$f_{28} = 7.60fa + 98$	0.968

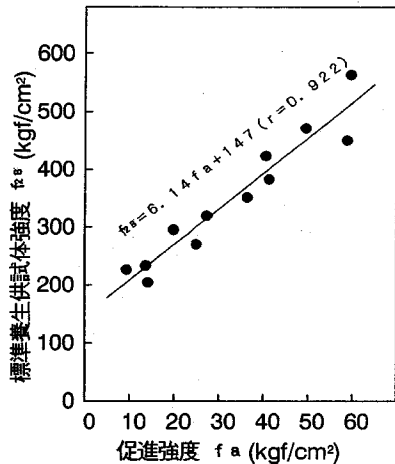


図-15 普通ポルトランドセメントを用いた3種類のコンクリートの促進強度と標準養生供試体強度の関係

できる可能性がある。図-15は、普通ポルトランドセメントを用いたAEコンクリート、同コンクリートを流動化したコンクリートおよびAE減水剤を使用したコンクリートの全てのデータにつき、促進強度と標準養生材齢28日強度との関係を示したものである。回帰式より求めた推定値と実測値の差の絶対値を実測値で除したものの平均値、すなわち推定誤差は7.3%であった。

以上の結果を総合すると、本試験法の再現性および推定精度は高く、また、試験方法が簡易であり試験時間も短いことから早期判定法としての適用性は高いものと思われる。ただし本試験法の現場における適用性を評価する場合には練上り温度、骨材種の違い、混和剤(材)の過剰添加などの影響を検討する必要がある。今回検討した項目についても現場においてより多くのデータの蓄積を行い適用範囲および推定精度の検討を行う必要がある。また、その他の検討課題として、マイクロ波加熱装置の発振周波数を小さくした場合もしくはマイクロ波出力および発振周波数が同一でも庫内形状を変化させた場合の加熱特性の検討を行うことにより、さらなる試験時間の短縮の可能性がある。

6. 結論

本研究では、マイクロ波加熱を用いたコンクリート強度の早期判定法の試験方法の確立、適用条件の検討および再現性、推定精度などについて検討を行った。今回の実験で得られた結果を要約すると以下のとおりとなる。

(1) 出力1000Wのマイクロ波加熱装置を用いた場合、本試験法による最適な促進養生時間は18分となる。

(2) 加圧拘束時に生じる脱水量は、ある値以上において脱水量の管理値を設定すれば、脱水量の計量誤差が

推定精度に及ぼす影響を小さくできる。

(3) 脱型終了から圧縮試験を行うまでに15分以上の時間を要すると、促進強度は脱型直後に圧縮試験を行ったものより小さくなる。したがって、圧縮試験は脱型終了から15分以内に行う必要がある。

(4) 本試験法では、試験者2人で3個の供試体の促進強度を求めるまでに要する時間は約35分である。

(5) 同種のセメントでも銘柄が異なれば促進強度は大きく異なる。そのため、コンクリートの強度推定をする場合には、セメントの銘柄毎に検定線を設ける必要がある。

(6) 開封直後のセメントに対し、風化したセメントを用いることによるモルタルの促進強度の低下率は、同様のセメントを用い標準養生を行ったモルタルの強度の低下率より大きい。すなわち、本試験法で風化したセメントを用いたコンクリートの強度を推定する場合、多少過小評価する可能性がある。

(7) 高性能減水剤を添加したモルタルの促進強度はプレーンモルタルの促進強度より若干小さくなる。AE剤の添加による空気量の増加に伴う強度低下の影響は、本試験法により評価が可能である。

(8) フミン酸の添加によるモルタルの促進強度の低下率は、フミン酸を同量添加し標準養生を行ったモルタルの強度低下率とほぼ同等であり、本試験法ではフミン酸等の有害物の混入による強度低下の影響を評価できる可能性がある。

(9) 同一配合のモルタル10パッチについて促進強度を求めた結果、パッチ内の3個の促進強度の変動係数は平均で4.7%、また、パッチ間の変動係数は5.8%となり、本試験法の再現性は高いものと考えられる。

(10) 各種コンクリートの促進強度と標準養生供試体強度の間には高い相関があり、セメントや添加する混和剤の種類が変化しても本試験法は適用可能であるといえる。ただし、推定式の傾き及び切片はそれぞれ異なるためコンクリートの種類が異なる毎に検定線を設けることが必要となる。

(11) 普通ポルトランドセメントを用い、添加する混和剤の種類が異なる3種類のコンクリートについて本試験法を適用し推定精度を求めた結果、推定誤差は7.3%であり、高い推定精度が得られた。

謝辞：本論文の作成にあたり、東京理科大学土木工学科当時卒業生の長塩靖祐氏、山本忠氏、和泉博之氏ならびに河合恒氏から多大なるご協力を得た。心から感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 笠井芳夫：早期迅速判定試験方法の総合的な動向，生コ

- ンクリート, Vol.7, No.11, pp.54-65, 1988.11.
- 2) 小沢満三他：クローズド・フォームによるコンクリートの早期強度判定法, コンクリート品質の早期判定に関するシンポジウム発表論文集, pp.85-88, 1979.2.
 - 3) 吉兼享：密閉拘束型枠を用いた高温養生によるコンクリート強度の早期判定方法について, コンクリート品質の早期判定に関するシンポジウム発表論文集, pp.89-92, 1979.2.
 - 4) 杉原和忠他：高性能 AE 減水剤コンクリートの品質に及ぼすマイクロ波加熱養生効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第15巻, 第1号, pp.381-386, 1993.
 - 5) 辻正哲他：マイクロ波を利用したコンクリートの早期強度判定法, セメント・コンクリート No.538, pp.7-12, 1991.
 - 6) 伊藤幸広他：マイクロ波によるコンクリートの早期強度判定法, 第19回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.5-10, 1992.

(1994.3.29 受付)

STUDY ON ACCELERATED STRENGTH TEST USING MICROWAVE HEATING

Yukihiro ITOU and Masanori TSUJI

Using microwave heating, it was possible to harden concrete cast in the closed form in a short time. New accelerated strength test method which predicts the 28-day strength from the accelerated strength obtained by microwave heating was developed. In this study, the effects of cement, admixture, air content and impurities on the accelerated strength were investigated. And the accuracy and the reproducibility of this test method were also investigated.