

報告 マイクロ波促進養生による即時強度判定法を利用したコンクリート構造物の品質管理

神頭 峰磯*1・土井 一慶*2・伊藤 幸広*3

要旨: コンクリート構造物の品質確保を目的として、コンクリートの輸送から荷卸し検査完了までの短時間で圧縮強度の推定を行うために、マイクロ波促進養生によるコンクリート強度の即時判定法の工事への適用性について検討を行った。従来法より作業の効率化を図るため、供試体の小型化や加熱養生条件について実験的に検討を行った。本報告では、鋼コンクリート合成床版のコンクリート工事に改良した即時強度判定法を適用した事例について報告する。結果として、膨張材を混和したコンクリートにおいても各種材齢の圧縮強度を打込み前に精度良く推定でき、品質管理を行うことができた。

キーワード: 圧縮強度, 即時判定, 品質管理, マイクロ波, 促進養生, 膨張材

1. はじめに

コンクリート構造物の品質確保のために、レディミクストコンクリートの荷卸し時に従来の品質管理項目に加えて、単位水量を測定する取り組みが行われている。単位水量の測定は、加水や乾燥収縮を管理する上で有効であるが、圧縮強度の管理に用いる場合には、単位セメント量の印字記録より水セメント比を求め、間接的に圧縮強度を推定する方法となるため、さほど精度が高くない。さらに最近では、混和材の一部（例えば膨張材）が、プラントにおいて自動計量によらず袋管理で計量され、手投入で行われていることから、ヒューマンエラーが生じやすく、単位水量や印字記録のみで品質を確保することが困難となっている。

従来より強度管理は、荷卸し時に採取した供試体の所定材齢の圧縮強度により行われているが、強度不足や強度発現の遅延が判明した場合には、補強や取り壊しの可能性があり、工程遅延やコスト増大といった大きなリスクが含まれている。所定材齢の圧縮強度が、打込み前に判定できれば、工程上重要なリスク管理ができ、構造物の品質確保に繋がる。また、供試体による圧縮強度は、脱型時期やPCケーブルの緊張時期などの様々な工程管理にも利用されている。工程に必要な圧縮強度が得られる材齢があらかじめ判れば、大量に供試体を作製することなく、工程見直しも行え、工程短縮に繋がることにより、経済性も向上するなどメリットも大きい。

コンクリートを短時間で強度発現させ、その促進強度から所定材齢の圧縮強度を即時に判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¹⁾、一部実用化されている²⁾。促進強度より即時に強度判定する方

法では、直接圧縮強度から評価することにより、混和材の過剰投入や結合材の風化や劣化の評価も包括的に可能となる。著者らは、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、短時間で促進強度を求め即時強度判定を行う方法を開発してきた³⁾⁴⁾。本報告では、従来法に対して供試体の小型化および試験時間の短縮について検討を行い、橋梁のコンクリート床版工事の強度管理において本方法を適用した結果について述べるものである。

2. マイクロ波促進養生による即時強度判定法の概要

マイクロ波促進養生とは、マイクロ波が透過する型枠にフレッシュコンクリートを打込み、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、コンクリートを短時間で硬化させる方法（以下、促進養生）である。この促進養生供試体の圧縮強度と、同一コンクリートから作製した標準養生供試体強度との間には高い相関関係がある。促進強度を得るまでの手順は、概ね次の a) ~ f) となる。この手順で促進強度を 3 個得るまでの時間は、文献 4) による方法（以下、従来法）では 35 分程度となっている。

- a) 供試体寸法が 10cm の立方体となる大きさの型枠にコンクリートを打込む。
- b) コンクリート表面を均し、上蓋を載せて蝶ねじを締め付けることにより、加圧拘束を行う。
- c) 加圧拘束の際に発生する脱水量が所定の量になるまで、上部のネジの締め込みにより加圧を行う。
- d) 型枠を出力 1000W の電子レンジに入れ、所定の時間まで促進養生を行う。

*1 日本車輛製造（株） 輸機・インフラ本部 技術計画室（正会員）

*2 日本車輛製造（株） 開発本部 技術開発部 博士（工学）

*3 佐賀大学 大学院 工学系研究科教授 博士（工学）（正会員）

- e) 促進養生完了後に、型枠を直ちに取り出し、脱型を行う。
- f) 載荷面の寸法を測定し、圧縮試験機で圧縮強度試験を行い、促進強度を得る。

3. 供試体の小型化および試験時間の短縮の検討

実構造物の強度管理に本方法を適用するにあたり、作業性の観点から供試体を小型化することについて検討を行った。また、本方法の強度管理方法としては、プラントの出荷時にコンクリートを採取し、打込みまでに品質の判定を行うこととしたため、試験時間の短縮についても検討した。

3.1 供試体の小型化

促進養生供試体は、キャッピングや端面研磨を必要とせず、作業性、試験時間を短縮するために立方体を採用した。従来法では、供試体の寸法は 10×10×10cm であったのに対し、新方法ではさらに作業性の向上を図るため、7.5×7.5×7.5cm の供試体に小型化した。供試体の作製に用いた型枠の外観を写真-1 に示す。上蓋は蝶ねじで締め付ける方法であり、加圧拘束力を安定させるために上蓋とコンクリートの間には、JIS K 6253 による硬さ 35 のシリコン発泡ゴムシートを用いている。型枠の材質は、ガラス繊維で補強されたポリフェニレンサルファイド樹脂（PPS 樹脂）である。PPS 樹脂は、マイクロ波の透過性が良く、高温での力学的特性が優れた樹脂である。その仕様を表-1 に示す。

3.2 試験時間の短縮

供試体の小型化に伴い、マイクロ波による促進養生時間が短縮されることは予測されるが、大幅な短縮とはならない。そこで従来法が 1000W の電子レンジであったのに対し、新方法では最大出力 1800W の電子レンジを使用し、試験時間の短縮を図った。従来法および新方法の電子レンジの仕様の比較を表-2 に示す。

3.3 実験方法

供試体小型化に伴い、加圧拘束の際の脱水量の検討を行った。また、供試体小型化と電子レンジ高出力化による最適なマイクロ波促進養生時間を検討するための実験を行った。実験で使用したコンクリートは、表-3 に示す配合であり、配合強度は 30.5N/mm² である。使用材料は、表-4 に示す特性の普通ポルトランドセメント、砕砂、山砂および砕石である。型枠内には、熱電対を 2 箇所設置して、コンクリート温度および型枠の温度を監視した。なお、加熱時のコンクリート温度と型枠温度の差が小さいため、型枠材料の荷重たわみ温度の 80%程度（208℃）を管理温度として加熱を行い、加熱後に圧縮試験機によって促進強度を計測した。



写真-1 促進養生型枠の外観

表-1 PPS 樹脂の仕様

項目	特性値
引張強度	196MPa
曲げ強度	255MPa
荷重たわみ温度	260℃
比誘電率(1MHz)	4.3
誘電正接(1MHz)	0.0014

表-2 電子レンジの仕様比較

項目	従来法	新方法
マイクロ波最大出力	1000W	1800W
発信周波数	2450MHz	
定格電圧	AC200V	
庫内寸法 (幅×奥行×高さ)	330×310×208mm	330×310×175mm

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S1	S2	G
55	43.2	165	300	550	246	1036

表-4 使用材料

材料名	記号	特性
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.14g/cm ³
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度: 2.67g/cm ³ , 吸水率: 1.38%
	S2	山砂, 表乾密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 1.45%
粗骨材	G	砕石 20mm~5mm, 表乾密度: 2.67g/cm ³ , 吸水率: 0.89%

表-5 実験要因および水準

マイクロ波出力	加熱時間	加熱供試体個数
750W	10分	1
	25分	2
1000W	8分	1
1800W	9分	2
	10分	2

脱水量の実験における加熱条件は、マイクロ波出力を 750W で 10 分間とし、作製する促進養生供試体は 1 個とした。脱水量の目標は 5, 7, 8 および 10g とした。

促進養生時間の検討に関する実験では、マイクロ波出力を 750, 1000 および 1800W の 3 段階に変化させ、それぞれの加熱時間は表-5 に示すとおりとした。な

お、供試体の小型化により、電子レンジ庫内で2個同時に加熱できるため、その可能性についても合わせて検討した。

3.4 実験結果

促進強度と脱水量の関係を図-1に示す。脱水量と促進強度との間には直線的な関係が見られる。脱水量によって促進強度は大きく変化するため、加圧拘束時の脱水量を正確に管理することは重要である。ここでは、より高い促進強度が得られる10gを脱水量とした。

促進養生時間に関する実験結果を表-6に示す。いずれの条件においても約2.5N/mm²以上の促進強度が得られている。これは同一配合で材齢28日の標準養生供試体強度（以下、材齢28日強度）の1/10程度であった。マイクロ波出力750Wにおいて、促進強度3.0N/mm²を得るために加熱時間は供試体が1個の場合は10分であり、2個になると25分要した。これに対し、マイクロ波出力が1800Wでは、2個の供試体でも9分で同等の促進強度が得られた。なお、加熱時間を10分とすると促進強度が低下するが、これは供試体温度が200℃を超え結合水の一部が蒸発したためと考えられる。促進養生方法は1800Wで9分が妥当と考えられるが、型枠の耐久性を考慮し、9分から30秒減じて8.5分を加熱時間とした。

従来法では、10cm角の1個の立方体供試体につきマイクロ波出力1000Wで加熱時間は18分であったが、新手法では、出力1800Wで2個同時に促進養生を行うことが可能となり、加熱時間も8.5分と半分に短縮され試験の合理化が図られた。

3.5 促進強度と標準養生供試体強度の関係

上記で確立した試験方法に基づき作製した促進強度と標準養生供試体強度との関係を調べる実験を行った。コンクリートの配合は、表-7に示す水セメント比を40、50および60%に変化させた3配合である。目標スランプおよび空気量は、それぞれW/C=50%で8.0cmおよび4.5%である。使用材料は、表-4に示すものと同じである。促進強度供試体は2個、材齢28日の標準養生供試体は3個作製した。

フレッシュコンクリートの性状および促進強度と材齢28日強度の実験結果を表-8に示す。これよりセメント水比と促進強度の関係を図-2に示す。促進強度は、セメント水比が1増加するごとに約2.5N/mm²増加しており、試験体サイズを小型化しても両者の間には高い相関関係があることが分かる。また、促進強度と材齢28日強度の関係を図-3に示す。促進強度は材齢28日強度の1/8程度であり、両者の間には高い相関があることから、新しい促進養生方法により即時強度判定が可能であることが示された。

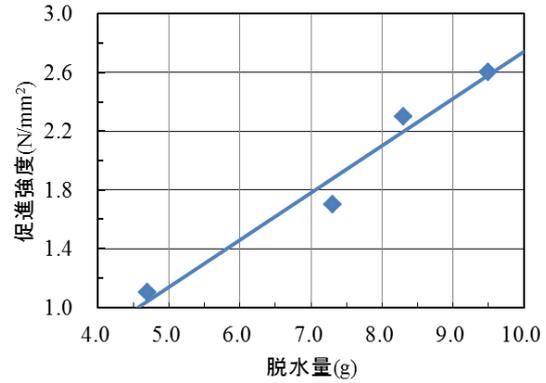


図-1 促進強度と脱水量の関係

表-6 促進養生時間に関する実験結果

マイクロ波出力	加熱時間	加熱供試体個数	最高温度 (°C)	促進強度 (N/mm ²)
750W	10分	1	153	3.1
	25分	2	183	3.0
1000W	8分	1	172	3.5
1800W	9分	2	181	2.9
	10分	2	215	2.4

材齢28日標準養生供試体の圧縮強度：28.8N/mm²

表-7 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S1	S2	G
40	39.7	170	425	463	207	1048
50	42.0	170	340	510	228	1048
60	43.5	170	283	542	242	1048

表-8 促進強度および材齢28日強度の実験結果

W/C(%)	40		50		60	
スランプ(cm)	5.0		6.5		6.0	
空気量(%)	5.1		6.0		6.8	
供試体番号	1	2	3	4	5	6
促進強度 (N/mm ²)	4.5	4.4	3.3	3.0	2.0	2.7
	4.4		3.2		2.3	
材齢28日強度 [平均] (N/mm ²)	42.3		31.8		25.0	

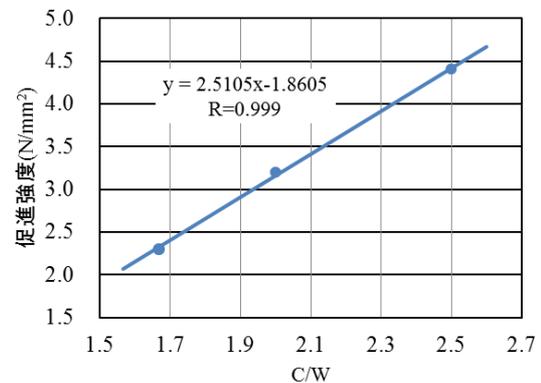


図-2 セメント水比と促進強度の関係

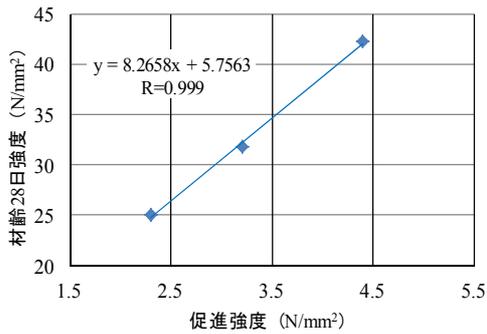


図-3 促進強度と材齢28日強度の関係

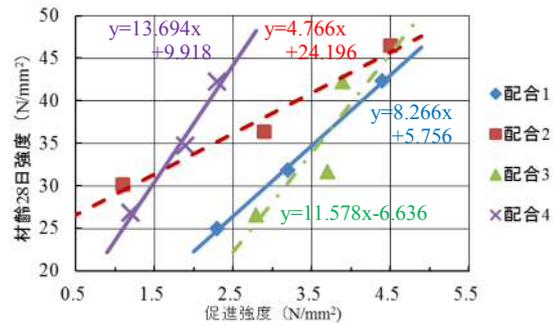


図-4 各種配合の促進強度と材齢28日強度の関係

表-9 使用材料

材料名	記号	特性
セメント	C1	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.14g/cm ³
	C2	高炉セメントB種, 密度: 3.04g/cm ³
混和材	Ex	石灰系低添加型膨張材, 密度: 3.16g/cm ³
細骨材	S1	山砂, 表乾密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 1.45%
	S2	砕砂, 表乾密度: 2.67g/cm ³ , 吸水率: 1.38%
	S3	山砂, 表乾密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 1.72%
	S4	高炉スラグ細骨材, 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.40%
粗骨材	G1	砕石 20mm~5mm, 表乾密度: 2.67g/cm ³ , 吸水率: 0.89%
	G2	砕石 20mm~5mm, 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.43%
混和剤	Ad	AE減水剤標準型, B×1.1%

表-10 配合別使用材料の組合せ

	セメント	混和材	細骨材	粗骨材
配合1	C1	-	S1, S2	G1
配合2	C1	-	S3, S4	G2
配合3	C1	Ex	S1, S2	G1
配合4	C2	-	S1, S2	G1

表-11 コンクリートの配合

	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	Ex	S1,S3	S2,S4	G
配合1	50	42.0	170	340	-	510	228	1048
配合2		43.7	166	332	-	536	240	1036
配合3		42.0	170	320	20	510	228	1048
配合4		42.0	168	336	-	508	227	1048

表-12 各種配合の圧縮強度の実験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	W/B(%)			相関係数 R
		40	50	60	
配合1	促進強度	4.4	3.2	2.3	0.999
	材齢28日強度	42.3	31.8	25.0	
配合2	促進強度	4.5	2.9	1.1	0.985
	材齢28日強度	46.5	36.4	30.2	
配合3	促進強度	3.9	3.7	2.8	0.853
	材齢28日強度	42.2	31.7	26.6	
配合4	促進強度	2.3	1.9	1.2	0.991
	材齢28日強度	42.0	34.7	26.8	

4. 各種配合による検証

4.1 実験方法

コンクリートに使用する骨材は地域によって異なり、また、現場で取り扱うコンクリートは、セメントの種

類が異なる場合や混和材を加えることもあるため、実際の工事で想定される様々な条件に対して、マイクロ波促進養生による即時強度判定法の適用性について検討を行った。実験で検討した使用材料は表-9に示すように、セメントの種類を2種類、細骨材4種類および粗骨材2種類であり、混和材として膨張材混和の有無についても検討を行った。配合は4通りとし、それぞれの使用材料の組み合わせを表-10に示す。呼び名が30-8-20Nとした配合1をベースとして、骨材の種類を変更した配合2、混和材として膨張材を20kg/m³使用した配合3およびセメントに高炉セメントB種を使用した配合4とした。

水結合材比はいずれも50%であり、その配合を表-11に示す。実験では、表の基本配合から水結合材比を±10% (40%, 60%) 変化させた配合を加えた12配合について実施した。

促進養生は、マイクロ波出力を1800Wで8.5分とし、2個の小型供試体を作製した。標準養生供試体については3個の供試体を作製し、材齢28日強度を求めた。

4.2 実験結果

各種配合の実験結果を表-12および図-4に示す。セメント種類が相違すると、回帰直線は大きく相違する結果となった。また、同じセメントを使用しても骨材を変えると、回帰直線の傾きが変化し、骨材の種類が、促進強度の出方に影響することが考えられる。一方、膨張材を添加した場合は、類似の回帰直線を示しているため、膨張材の添加が促進強度に与える影響は小さいと考えられる。今回の実験結果では、いずれの条件の配合に対しても、促進強度と材齢28日強度の間には高い相関が見られる。配合3の相関係数は、他のものより若干低いものの0.85以上を示しており、促進強度より材齢28日強度の推定が可能であり、各種コンクリートにマイクロ波促進養生による即時強度判定法が適用できるものと考えられる。なお、セメントや骨材種別の変化によって、回帰直線の傾きは大きく異なるため、現場で適用する際には、あらかじめ使用するコンクリートの検量線を設けておく必要がある。

5. 工事現場における品質管理の実施例

5.1 工事概要

マイクロ波促進養生による即時強度判定法を実際の工事に適用し、設計基準強度（30N/mm²）以下のコンクリートを排除する目的でコンクリート打込み前に強度管理を行い施工した。対象とした工事は、鳥取県の国道に建設される橋梁で、橋長 171.3m の鋼 3 径間連続細幅箱桁橋である。床版形式は、鋼コンクリート合成床版であり、床版厚さは 240mm である。コンクリート打込みの時期は、5 月中旬であったため、検量線を作成するための試験練りは 3 月に行った。

5.2 試験練りによる検量線の作成

工事では、材齢 28 日強度の他に、材齢 7 日、材齢 14 日にも本方法を適用し、各材齢の圧縮強度推定について検証を行う計画とした。試験練りに使用した配合を表 1-3 に示す。構造物に使用するコンクリートは配合 2（呼び名 30-10-20N）であり、検量線の作成のため水結合材比を 45 および 55% の 2 種類の配合を採用した。セメントは普通ポルトランドセメントであり、混和材としてエトリンガイト石灰複合系の低添加型の膨張材を 20kg/m³ を混和した。細骨材は加工砂、粗骨材は砕石である。なお、スランブおよび空気量調整のために AE 減水剤および AE 助剤を使用した。

加熱養生条件は、マイクロ波出力を 1800W とし、8.5 分の加熱で供試体 2 個同時に促進養生を行った。促進供試体は 6 個作製し、検量線の精度向上を目的に、最小と最大値を除いた 4 つの促進強度を検量線に用いることとした。

試験練りにおける促進強度と各材齢の圧縮強度との関係を図 5 に示す。促進強度に若干ばらつきが見られるものの材齢に係らず両者の間には 0.85 以上の高い相関性が得られたため、現場コンクリートの強度管理には試験練りの結果から得られた単回帰線を検量線とすることとした。

5.3 コンクリート打込み当日の品質管理

コンクリート打込み当日は、出荷コンクリートの初回（1 台目）、中間（15 台目）、最終（25 台目）の 3 回につき、促進強度を運搬中に求め、打込み前に品質の判定を行った。なお、推定強度の検証を行うため、標準養生供試体を荷卸し時に各材齢につき 3 個作製した。また、プラントの保有するコンクリートの配合強度算出式から求められる圧縮強度との精度比較を行うために、荷卸し時にエアメータ法によって単位水量の推定を行った。荷卸し時のコンクリートのフレッシュ性状の検査結果を表 1-4 に示す。コンクリートは、出荷時にアジテータ車から採取し、プラントにおいてマイクロ波促進養生を行った。促進養生の条件は、試験練

表 1-3 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	Ex	S	G	Ad
配合 1	45.0	47.0	164	344	20	813	963	2.46
配合 2	50.0	47.9	164	308	20	843	963	2.46
配合 3	55.0	48.6	164	278	20	867	963	2.46

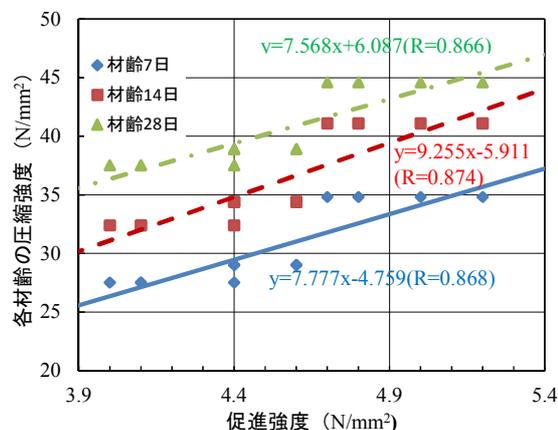


図 5 試験練りにおける検量線

表 1-4 コンクリートのフレッシュ性状

	スランブ (cm)	空気量 (%)	C.T. (°C)	単位水量 (kg/m ³)
1 台目	10.5	4.2	20	166.8
15 台目	10.5	4.4	25	171.7
25 台目	11.0	4.9	24	166.1

り時と同様とし、促進強度供試体は、6 個作製し、最小最大を除いた 4 個の供試体の値を平均して採用した。

打込み時期は 5 月であり、早朝から行ったため、1 台目のコンクリート温度が低くなったが、スランブや空気量などは、経時の変化が見られず安定した品質のコンクリートであった。ただし、15 台目の単位水量は、エアメータ法の結果では他の 2 回と比較して、5kg/m³ 程度多くなっている。

運搬中に行った促進強度試験の結果を表 1-5 に示す。採用した最小最大を除く 4 個の供試体のデータであるが、脱水量および促進強度ともにばらつきが小さく、安定した結果となっている。促進強度から推定した圧縮強度と荷卸し時に採取した標準養生供試体の圧縮強度の結果を表 1-6 に示す。1 台目と 25 台目の推定誤差は材齢に係らず概ね 5% の誤差となり高い精度を示した。15 台目は 10% 前後の誤差を生じたが、この原因は明らかとなっていない。

5.4 推定精度の比較

材齢 28 日強度について、荷卸し時に推定した単位水量とセメントの印字記録から、式 (1) に示すプラントの配合強度算出式を用いて材齢 28 日の圧縮強度を推定した。

表-15 運搬中に行った促進養生の結果（採用値のみ掲載）

供試体番号	1台目				15台目				25台目			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
脱水量(g)	11.6	10.5	9.9	10.7	9.8	10.1	12.8	11.2	10.9	10.5	10.9	10.7
平均/標準偏差(g)	10.7/0.7				11.0/1.4				10.8/0.2			
促進強度(N/mm ²)	4.2	4.4	4.4	4.2	3.8	3.6	3.9	3.8	4.1	4.1	4.0	4.1
平均/標準偏差(N/mm ²)	4.3/0.2				3.8/0.2				4.1/0.0			

表-16 圧縮強度の推定精度

材 齢 (日)	1台目			15台目			25台目		
	圧縮強度(N/mm ²)		誤差 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		誤差 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		誤差 (%)
	推定	供試体		推定	供試体		推定	供試体	
7	28.7	29.9	-4.0	24.8	28.8	-13.9	27.1	28.7	-5.6
14	33.9	35.9	-5.6	29.3	34.6	-15.3	32.0	34.2	-6.3
28	38.6	40.1	-3.7	34.8	38.6	-9.8	37.1	38.3	-3.1

$$\sigma_{28} = -19.660 + 27.300 \times (C/W) \quad (1)$$

表-17には、単位水量から推定した圧縮強度の推定誤差を示す。単位水量から圧縮強度を求める場合は、10～15%の誤差が発生しており、マイクロ波促進養生による即時強度判定法の方が、精度が良いことが確認された。

6. まとめ

本報告では、マイクロ波促進養生による即時強度判定法による供試体の小型化および試験時間の短縮について検討を行い、打込み前にコンクリートの圧縮強度を推定するために実際の工事で適用した結果、以下の知見を得た。

- (1) 供試体の小型化により促進養生時間を 8.5 分と従来の方法の約半分に短縮することができた。また、一つの電子レンジで2個の供試体を同時に養生でき、作業性が向上した。
- (2) 結合材や骨材種類ごとに検量線を設定すれば、促進強度は標準養生供試体強度と高い相関性を示すことが明らかとなった。
- (3) プラント出荷時のコンクリートを用いて即時強度判定を行い、コンクリート打込み前に品質の確認を行うことができた。
- (4) 本方法による圧縮強度の推定精度は、実強度の 5～10%程度であり、現場での早期に強度管理を行う観点からいえば十分な精度を有していると言える。

マイクロ波促進養生による即時強度判定法を工事に適用するために、各種検討を行い、実際の工事現場の品質管理として、荷卸し時に圧縮強度の推定を行った。今回は、材齢 7 日、14 日、28 日の強度推定に留まった

表-17 推定強度の精度比較（配合強度式）

	単位水量 (kg/m ³)	推定した 圧縮強度 (N/mm ²)	標準養生供 試体強度 (N/mm ²)	誤差 (%)
1台目	166.8	34.0	40.1	15.2
15台目	171.7	32.5	38.6	15.8
25台目	166.1	34.2	38.3	10.7

が、本方法を適用すれば、高精度に任意材齢の圧縮強度が推定できることから、今後は、若材齢時に本手法を適用し、脱型強度管理や橋面上への重量物載荷時期などの検討に使用することで、工程短縮や供試体作製の大幅削減などのコスト削減に繋げていきたい。

最後に、マイクロ波促進養生による即時強度判定法を工事へ適用するため、様々なご協力を頂いた方に、心より感謝を致します。

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) 池田尚治，和田克哉，万木正弘，平野敏則：横浜港ベイブリッジフーチング工事における早期品質判定の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 11, No. 1, pp. 751-754, 1989.6
- 3) 辻正哲，伊藤幸広：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, 1991.12
- 4) 伊藤幸広，辻正哲：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，土木学会論文集，No.514, V-27, pp.19-28, 1995.5