

論文 冬期における円柱供試体の強度推定に関する一考察

渡邊 真史*1・三本 巖*2・斉藤 丈士*3

要旨: 冬期において普通ポルトランドセメントあるいは高炉セメント B 種を使用した水セメント比 50% のコンクリートを対象に、円柱供試体の脱型時期を 1, 3, 5 および 7 日として初期強度の発現速度を故意に変化させ、材齢 1, 4, 8 および 13 週において強度試験を実施した。この結果に対して強度成長曲線のモデル式を適用したところ、円柱供試体の強度発現を精度よく表現し得ることを確認した。また、レディーミクストコンクリート工場の工程検査の実績値に対して、本モデルの適用性を検討したところ、採取時の試料温度や水セメント比が異なる円柱供試体の強度発現に関しても、本モデルが適用可能であった。

キーワード: 円柱供試体, 冬期, 脱型時期, 強度成長曲線

1. はじめに

レディーミクストコンクリート工場の工程管理において、保証材齢に達した時点で得られる強度を正確に把握し、配合設計ならびに品質管理を行うことは、経済性や品質安定の面から重要である。このため、実際の工程管理では、初期材齢の強度から保証材齢における強度を正確に推定することが重要視されている。特に、通常期や夏期に比べて初期強度が小さくなる冬期では、型枠の存置期間を決定するために、特定の強度が得られる材齢を施工者から製造者に確認する場合があります。精度の高い推定方法の確立が望まれる。

強度の推定方法には、材齢 7 日強度と材齢 28 日強度の線形関係から逆算する方法や、強度と材齢の関係を表すゴーラル曲線を用いる方法がある。これらの関係式は、簡易的に通年の強度データから定式化されることが多く、初期強度が小さい冬期では長期強度の推定値が過小となり、経済的な配合設計ができない恐れがある。冬期における強度発現は、積算温度をパラメータとした関数によって精度よく表現することができる¹⁾が、JIS A 1132「コンクリート強度試験用供試体の作り方」において養生温度の測定要求はなく、積算温度による強度推定は一般的に行われていない。したがって、積算温度をパラメータとせず、既存の手法では考慮しにくい初期材齢の強度増進を精度よく表現し、かつ、長期材齢における強度増進も正確に表現し得る強度成長曲線の作成が望まれる。

そこで本研究では、コンクリート温度が概ね 5~15℃となる関東地方南部の冬期において、脱型時期により初期強度の発現速度を変化させた水セメント比 50% の円柱供試体を対象に、強度成長曲線のモデル式について検討した。また、実際の工程検査における強度の実績値に対しても、モデル式の適用性について検討した。

表-1 使用材料

材料名(記号)	種類および物性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
	高炉セメント B 種, 密度: 3.04g/cm ³
水 (W)	上水道水, 千葉県浦安市
細骨材 (S)	山砂: 千葉県富津市産 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.40%
粗骨材 (G)	石灰砕石 2005: 高知県吾川郡産 表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.37%
化学混和剤 (Ad)	高性能 AE 減水剤, ポリカルボン酸エーテル系

表-2 コンクリートの配合 (kg/m³)

種類	C	W	S	G	Ad
普通	340	170	824	972	1.700
高炉 B	336	168	822	972	1.344

2. 実験概要

初期強度の発現速度が異なるデータを得るために、脱型時期を要因とした実験を行った。

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種の 2 種類とした。コンクリートの配合は、表-1 に示す記号を用いて表-2 に示すとおりであり、いずれのセメントの場合においても、水セメント比は 50%、粗骨材のかさ容積は 0.600m³/m³ と統一した。化学混和剤の使用量は、目標スランプを 20±2.5cm、目標空気量を 5.0±1.5% と設定した上で、これらの目標値を満足するように設定した。

*1 (株) 内山アドバンス 技術本部 中央技術研究所 修士 (工) (正会員)

*2 (株) 内山アドバンス 技術本部 中央技術研究所

*3 日本大学 生物資源科学部 生物環境工学科 博士 (工) (正会員)

2.2 測定項目

測定項目の一覧は表-3 に示すとおりである。

2.3 養生方法および強度試験

円柱供試体の型枠を脱型するまでの存置期間は、1, 3, 5 および 7 日の 4 水準とした。脱型前の型枠を静置させた場所は、空調による温度および湿度の調整を行っていない屋内とした。供試体の脱型はそれぞれ、供試体採取から 24 時間±30 分、72 時間±30 分、120 時間±30 分、および 168 時間±30 分の時間内で行った。脱型後の供試体は、強度試験の材齢まで 20℃ の水中で養生した。なお、脱型時期が 7 日の場合の材齢 7 日の強度試験は、供試体の水中養生は行わず、脱型した直後、供試体表面が乾燥したままの状態で行った。また、全ての水準において、強度試験は供試体の上面を研磨した後に実施した。

型枠存置期間における環境温度と供試体内部の温度の履歴を測定するため、強度試験用とは別に用意した円柱供試体の材齢 7 日までの中心温度を、熱電対とデータロガーを用いて 1 時間間隔で測定した。あわせて、供試体を存置した場所における環境温度も測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表-4 に練混ぜ直後のフレッシュ性状の試験結果を示す。いずれのセメントの場合においても表-3 に示す目標スランブおよび目標空気量を満足する結果であった。

3.2 圧縮強度

表-5 に圧縮強度の実測値を示す。また、型枠を脱型するまでの環境温度およびコンクリート温度の履歴を図-1 に示す。温度計の精度上、測定毎に 1~2℃ のばらつきが認められるが、全体の傾向として、環境温度とコンクリート温度の差は小さく、ほぼ同様の履歴を示した。

図-2 および図-3 に、材齢と強度比の関係を示す。ここに示す強度比は、各試験材齢における強度値を脱型時期が 1 日の場合の強度値で除した値である。すなわち、脱型時期を変化させたことによる強度発現の遅延の程度を表したものである。図に示すとおり、初期材齢における強度発現の遅延は、高炉セメント B 種のほうが著しかった。しかし、最終強度はいずれのセメントの場合においても同程度であった。養生温度が継続的に低い場合、長期強度が大きくなる傾向は既往の研究²⁾で明らかにされているが、供試体の脱型前の期間に限定して養生温度を低く設定した本実験の条件下においても、同様の傾向が確認された。

本章の検討では、初期強度の発現速度を極端に変化させることに重点を置き、脱型時期を 7 日まで設定した。このため、初期強度を材齢 7~28 日程度に設定し、長期強度を材齢 56~91 日程度に設定して実験を行った。実際

表-3 測定項目

測定項目	測定方法
スランブ (目標値: 20.0±2.5cm)	JIS A 1101
空気量 (目標値: 5.0±1.5%)	JIS A 1128
練混ぜ直後のコンクリート温度	JIS A 1156
圧縮強度 (全て上面研磨後に実施)	JIS A 1108
脱型までの環境温度	熱電対
脱型までのコンクリート温度	熱電対

表-4 フレッシュ性状の試験結果

種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
普通	21.5	5.7	11
高炉 B	20.5	5.6	11

表-5 コンクリートの圧縮強度の実測値

種類	脱型時期	圧縮強度 (N/mm ²)			
		1 週	4 週	8 週	13 週
普通	1 日	29.7	38.0	41.1	41.9
	3 日	26.6	37.4	41.2	42.5
	5 日	23.9	36.5	42.0	44.6
	7 日	18.5	35.2	39.9	41.7
高炉 B	1 日	22.2	38.2	42.6	44.1
	3 日	19.5	37.9	43.1	45.1
	5 日	15.1	35.5	41.3	42.7
	7 日	9.56	35.6	40.9	42.2

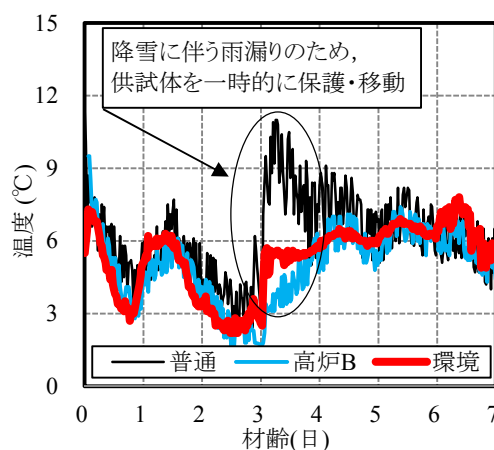


図-1 環境温度およびコンクリート温度の履歴

のレディーミクストコンクリート工場における工程管理では、円柱供試体の脱型時期は 16 時間以上 3 日以内であり、初期強度を材齢 3~7 日程度に設定し、長期強度を材齢 28 日に設定するのが一般的である。

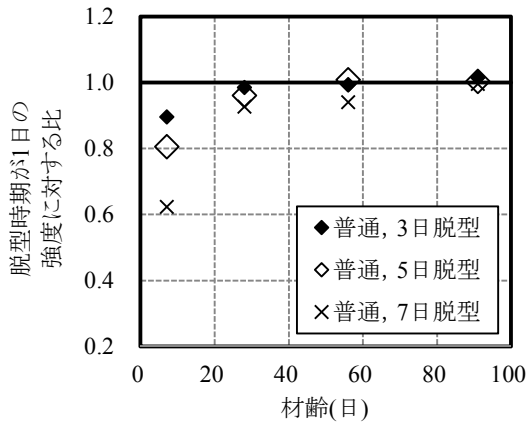


図-2 材齢と強度比の関係 (普通)

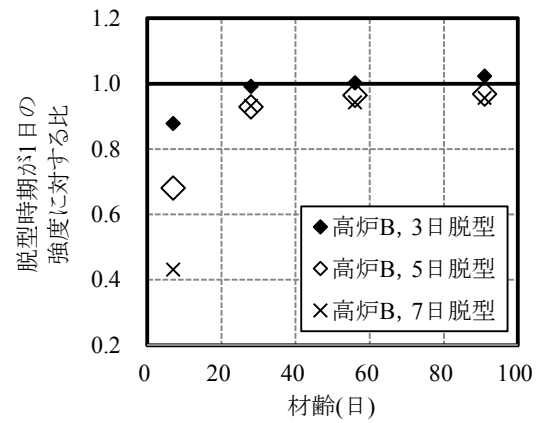


図-3 材齢と強度比の関係 (高炉B)

4. 強度成長曲線

4.1 回帰式

コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を表す代表的な関数として、式(1)に示すゴーラル曲線³⁾がある。

$$\sigma_t = \frac{\alpha \times t}{\beta + t} \quad (1)$$

ここに、 σ_t : 圧縮強度 (N/mm²)、 t : 材齢 (日)、 α および β : 係数である。

式(1)の係数 α は最終強度を表し、係数 β は強度増進の程度を表す係数である。式(1)の未定係数は2つであることから、強度と材齢のデータが2組揃えば、回帰式を求めることができる。しかし、初期材齢から長期材齢における強度増進の程度を係数 β によって一意的に定めており、前章で図-2 および図-3 に示したように、最終強度が同程度である一方で、初期材齢における強度発現が異なる場合、強度の推定において精度が低くなる可能性がある。

本検討では、式(1)と同様に最終強度を表す係数に加え、初期材齢および長期材齢における強度増進の程度を別々の係数として与える強度成長曲線のモデル式として式(2)を提案する。

$$\sigma_t = a \times \left\{ 1 - \exp(-b \times t^c) \right\} \quad (2)$$

ここに、 σ_t : 圧縮強度 (N/mm²)、 t : 材齢 (日)、 a 、 b および c : 係数である。

式(2)は物理法則から導出されるものではないが、前章の各水準の実験結果に対して、強度発現の遅延の程度によらず、材齢と強度の関係を精度よく回帰し得る関数として工学的に導入するものである。式(2)の係数に工学的な意味を当てはめると、図-4 のようになる。係数 a は最終強度を表し、係数 b は初期材齢の強度増進の程度を、係数 c は長期材齢の強度増進の程度を表す。 b の値が大きいほど、強度成長曲線の最初の立ち上がり、すなわち、初期材齢における接線の傾きが大きくなる。また、 c の

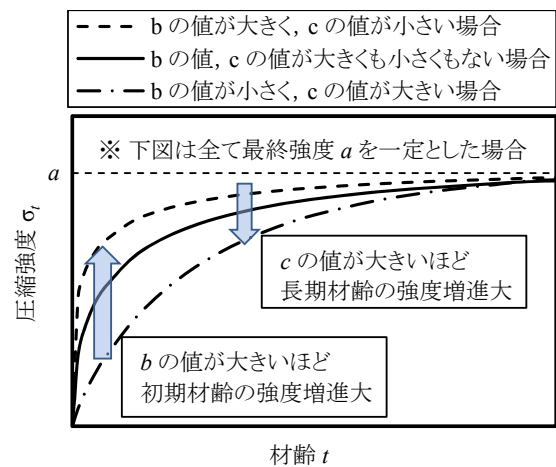


図-4 強度成長曲線の係数

表-6 式(2)の係数

種類	脱型時期	係数		
		a	b	c
普通	1日	43.3	0.481	0.451
	3日	43.7	0.336	0.527
	5日	43.2	0.233	0.635
	7日	41.6	0.124	0.803
高炉B	1日	44.2	0.165	0.741
	3日	45.0	0.116	0.820
	5日	42.4	0.063	1.001
	7日	41.1	0.016	1.446

値が大きいほど、長期材齢における強度成長曲線の接線の傾きが大きくなる。式(2)の未定係数は3つであり、材齢と強度のデータが3組揃えば、回帰式を求めることが可能である。しかし、材齢が無限大となる段階の圧縮強度を表す係数 a は推定上補外値となるため、比較的長期の材齢の強度データを回帰分析に取り入れ、解が収束していることを確認する必要がある。

4.2 実験結果の回帰分析および再評価

表-5 に示した強度データをもとに、最小二乗法によって各水準の材齢と強度の関係を式(2)によって回帰し、強度成長曲線の係数を表-6 に示すように得た。表中に示すように、脱型時期が遅く強度発現が遅延した水準ほど、初期材齢の強度増進の程度を表す係数 b の値は小さく、長期材齢の強度増進の程度を表す係数 c の値は大きいことがわかる。したがって、これらの係数を初期材齢における強度値によって定めることができれば、様々な養生条件に対して、特定の材齢における強度を推定することが可能となる。本節では、材齢 7 日および 28 日における強度値を用いて、強度成長曲線の係数を求めることとする。

係数 a は、前述のとおり推定上の補外値であり、また、表-6 に示すように、同一の試料から供試体採取して実験を行ったにもかかわらず、やや異なる値となった。本検討では、図-5 に示すように材齢 28 日強度と係数 a の間に相関性が確認されたため、係数 a を式(3)によって与えることとした。

$$a = 0.920 \times \sigma_{28} + 9.22 \quad (3)$$

ここに、 σ_{28} ：材齢 28 日強度である。

係数 b は初期材齢の強度増進の程度を表すことから、本検討では、係数 b を材齢 7 日強度と材齢 28 日強度の比で表すこととし、実験的に図-6 に示す結果が得られたことから、式(4)のように定式化した。なお、式(4)は式(2)を変形して得られる関数形ではない。

$$b = 0.949 \times \left(\frac{\sigma_7}{\sigma_{28}} \right)^{3.14} \quad (4)$$

ここに、 σ_7 ：材齢 7 日強度である。

本検討では係数 b と強度比の関係をセメントの種類によらず同一の関数によって定式化しているが、コンクリートの強度増進はセメントの種類によっても異なる⁴⁾ため、本検討とは異なる種類あるいは他メーカーのセメントを使用する場合には、別途検討するべきであると考えられる。

係数 c は、式(2)を c について陽な形に書き改めた式(5)によって求められる。ここでは、式(3)および式(4)によって求めた係数の値と、材齢 28 日強度を式(5)に代入することとした。

$$c = \frac{1}{\ln t} \times \ln \left\{ \frac{1}{b} \times \ln \left(\frac{a}{a - \sigma_t} \right) \right\} \quad (5)$$

以上より求めた係数を式(2)に代入し、全ての水準に対して圧縮強度の推定値を求めたところ、図-7 に示す結果を得た。推定値は概ね実測値 $\pm 5\%$ の範囲に入っており、いずれのセメントの場合においても、脱型時期や

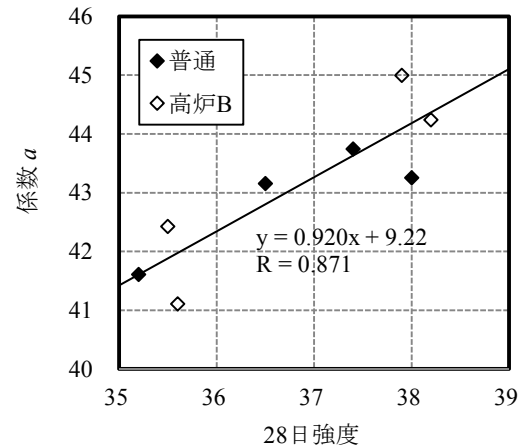


図-5 材齢 28 日強度と係数 a の関係

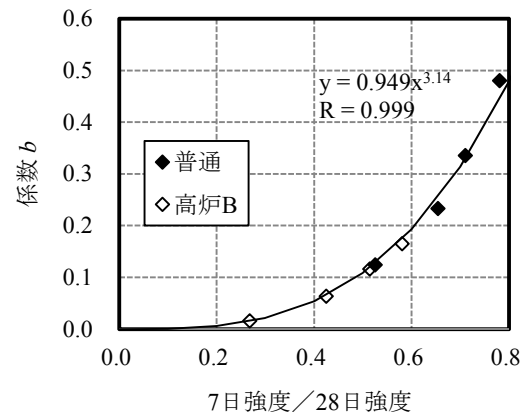


図-6 強度比と係数 b の関係

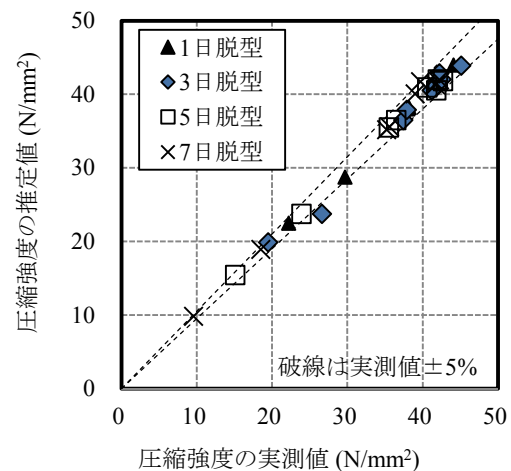


図-7 圧縮強度の実測値と推定値の関係

試験材齢によらず、強度を精度よく再現できていることがわかる。したがって、本検討で示した強度成長曲線が、強度管理用円柱供試体の強度発現を精度よく表現し得る可能性があることが確認された。

4.3 強度実績値の回帰分析および再評価

レディーミクストコンクリート工場の工程検査や製品検査をはじめとする強度管理の業務において、強度管理用円柱供試体の脱型までの温度を実測することは一般的に皆無であり、コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係を定式化するのは困難である。また、供試体採取時のコンクリートの空気量の変動や、脱型時期、品質管理を行う試験室の室温といった養生条件の差異により、同一のセメント水比であっても、圧縮強度が相違することがある。一例として、表-7 に示す条件に対して、レディーミクストコンクリート工場の工程検査における強度の実績を図-8 に示す。セメント水比が同じであっても、強度値が 10N/mm² 程度の範囲で異なることがわかる。したがって、前節と同様に初期強度から長期強度を推定する手法が直接的であり、実用的な方法であると考えられる。具体的に述べると、水セメント比や空気量の違い、脱型時期や採取時の試料温度によって異なるコンクリートの強度増進の程度を、各水準でパラメータを与えて分類するのではなく、それらの影響を総合的に包含した実際の強度値によって簡易に整理する試みである。

本検討では、レディーミクストコンクリート工場の実際の工程管理において得られた、表-7 に示す 48 組の強度データに関して回帰分析を行い、式(2)の係数 a 、 b および c を求めた。回帰分析に用いた全データの掲載は、紙数の制限の都合上割愛する。本節では、材齢 3 日および 7 日における強度値を用いて各係数を表現することとした。

係数 a は、図-9 に示すように材齢 7 日強度と比較的相関が認められた。直線回帰式からやや乖離したデータが数点存在したが、本検討では全てのデータを用いることとし、式(6)のように定式化した。

$$a = 0.980 \times \sigma_7 + 13.6 \quad (6)$$

ここに、 σ_7 : 材齢 7 日強度である。

係数 b は、材齢 3 日強度と材齢 7 日強度の比によって表すこととし、図-10 に示す結果をもとに、式(7)のように定式化した。

$$b = 0.975 \times \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_7} \right)^{2.77} \quad (7)$$

ここに、 σ_3 : 材齢 3 日強度である。

係数 c は式(5)によって求められ、ここでは式(6)および式(7)によって求めた係数の値と、材齢 7 日強度を代入することとした。

以上により求めた係数 a 、 b および c を用いて圧縮強度の推定値を求め、実績値を再評価したところ、図-11 に示す結果を得た。回帰式が特定の材齢における強度を概ね再現していることがうかがえる。

表-7 強度実績の条件（回帰式作成用のデータ）

データ数	48 組
採取期間	2011 年 12 月 14 日～2012 年 3 月 22 日
脱型時期	採取から 16 時間以上 3 日以内
配合	普通ポルトランドセメント， W/C=41.0～53.5%，高性能 AE 減水剤
試料温度	8～15℃（採取時）
試験材齢	3，7，14 および 28 日

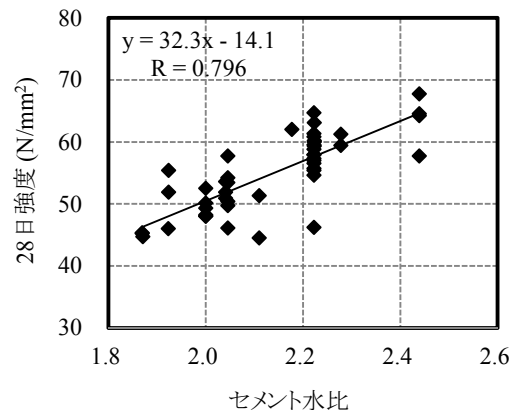


図-8 セメント水比と材齢 28 日強度の関係

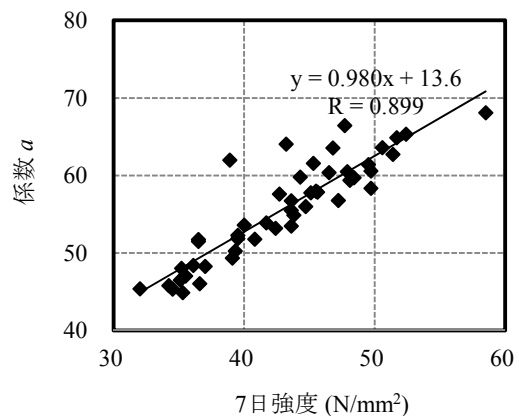


図-9 材齢 7 日強度と係数 a の関係

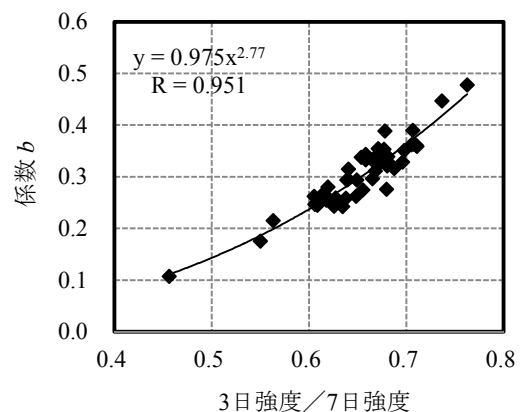


図-10 強度比と係数 b の関係

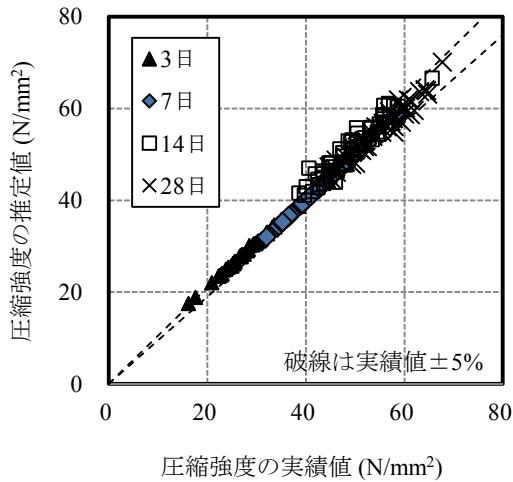


図-11 圧縮強度の実績値と推定値（回帰式の作成）

4.4 強度実績値に基づく強度推定

前節で求めた強度成長曲線を用いて、表-8 に示す同一のレディーミクストコンクリート工場における翌年および翌々年の強度実績値を対象に、材齢3日および7日の強度値から、材齢14日および28日の強度値を推定したところ、図-12 に示す結果を得た。比較的幅広い水セメント比の範囲において、過去の実績より求めた回帰式によって、圧縮強度を概ね推定できていることがわかる。

本検討で作成した強度成長曲線の係数は、セメントの種類やメーカーが異なる場合に対してそのまま適用することはできない。しかし、強度実績値に基づいて回帰分析を行い、初期材齢における2組の強度実績値を用いて式(2)の係数定めれば、これまで配合毎に作成されたゴーラル曲線によって個別に行われていた強度推定を、ひとつの回帰式を用いてさらに正確に行うことが可能となる。

本検討で示した手法は、強度の実績値が得られた上での推定方法である。初期強度を直ちに求めたいときには、強度成長曲線の係数をセメント水比や積算温度等の関数で与えたり、セメントの種類毎に設定したりする方が、より汎用的である。この点については、空気量等の強度の変動要因も考慮する必要があり、今後の課題としたい。

5. まとめ

冬期における強度管理用円柱供試体の強度発現を実験的に検討し、最終強度、初期および長期の強度増進の程度を表すパラメータを強度成長曲線の係数として与え、強度推定モデルを提案して検証したところ、以下の結論を得た。

- (1) 脱型時期を要因として初期強度の発現速度を変化させた場合の本実験結果を再評価したところ、回帰式が円柱供試体の強度発現を精度よく表現し得

表-8 強度実績の条件（回帰式評価用のデータ）

データ数	34組
採取期間	2012年12月3日～2013年4月1日 2013年12月9日～2014年2月22日
脱型時期	採取から16時間以上3日以内
配合	普通ポルトランドセメント， W/C=40.0～57.8%，高性能AE減水剤
試料温度	9～15℃（採取時）
試験材齢	3，7，14および28日

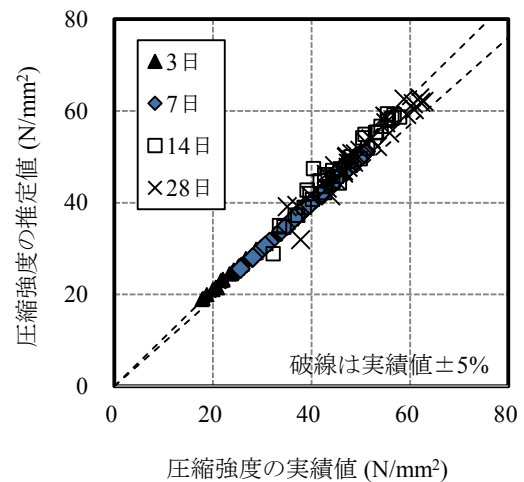


図-12 圧縮強度の実績値と推定値（回帰式の評価）

ることを確認した。

- (2) レディーミクストコンクリート工場の工程検査において得られた、採取時の試料温度や水セメント比が異なる円柱供試体の強度発現に関しても、本モデルは適用可能であった。

参考文献

- 1) 金武漢，洪悦郎，鎌田英治：モルタルおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度発現に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.355，pp.1-6，1985.9
- 2) 吉野利幸，大楽隆男，鎌田英治：高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.370-375，1991.
- 3) 氏家勲，大野浩二：各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.51-61，2005.9
- 4) 鎌田英治，洪悦郎，林直樹：各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.360-365，1990.