

論文 温度履歴養生を行うコンクリートの積算温度に基づく圧縮強度推定方法に関する研究

田所 雄治*1・上野 敦*2・鎌田 知久*3・大野 健太郎*2

要旨：プレキャスト製品のコンクリート強度を積算温度から推定できるように、セメントの種類、配合および養生条件を変化させたときの材齢 1 日以内の強度発現および材齢 1 日から 14 日までの強度増加を考察し、温度履歴養生を行うコンクリートの圧縮強度の推定方法について検討した。その結果、成長曲線の一種であるゴンペルツ曲線を応用して積算温度と圧縮強度の関係を表し、20℃水中養生の管理材齢 14 日強度を基準指標として、温度履歴養生を行った場合の材齢 1 日以内の強度発現と材齢 1 日から 14 日までの強度増加の割合を定量的に表現することで、材齢 1 日以内および 14 日の圧縮強度を推定できる可能性が示唆された。

キーワード：プレキャストコンクリート製品、温度履歴養生、積算温度、強度推定、ゴンペルツ曲線

1. はじめに

一般にプレキャストコンクリート製品（以下、製品）の製造では、型枠の効率的利用、早期出荷、保管場所の最小化など、生産性を高めるための促進養生として常圧蒸気養生（以下、蒸気養生）が行われている。

蒸気養生による初期強度の促進においては、養生槽内の雰囲気温度を管理し、製品のコンクリートの熱応答を定量的に把握して、コンクリート強度を評価する必要がある。既往の検討では、蒸気養生の槽内の雰囲気温度から、製品のコンクリート断面の温度分布とその経時変化を推定し、その温度履歴から得られる積算温度を用いて脱型時強度を評価している¹⁾。一方で、脱型後の管理材齢における圧縮強度と耐久性に関する特性値に着目すると、材齢 14 日の圧縮強度で水分浸透速度係数を管理できる可能性があることが報告されている²⁾。それらを踏まえると、蒸気養生を行ったコンクリートの積算温度から材齢 1 日以内および材齢 14 日の圧縮強度を適切に推定することができれば、製造前のシミュレーションによる実製品のコンクリートの評価が可能となり、要求されるコンクリートの圧縮強度に応じて、蒸気養生槽内の温度設定の最適化が図れるようになるものと考えられる。

以上の背景から本研究では、蒸気養生を想定した温度履歴を受けるコンクリートを対象に、コンクリートの積算温度から圧縮強度を推定する手法を示すことを目的とし、セメントの種類、配合および養生条件を変化させたときの材齢 1 日以内の強度発現と材齢 1 日から 14 日までの強度増加の割合を考察し、温度履歴養生を行うコンクリートの積算温度に基づく圧縮強度の推定方法について、20℃水中養生の圧縮強度を基準として検討した。

2. 試験方法

2.1 使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表-1 に、配合を表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント（OPC）と関東地方の製品工場で使用されることが多い普通エコセメント（ECO）の 2 種類とした。W/C は 35、45 および 55%の 3 水準とした。また、単位水量を 160kg/m³の一定とし、単位粗骨材絶対容積を 396L/m³の一定とした。スランプおよび空気量は、工場での打込みのし易さ、および製品の表面の仕上がり状態（表面気泡の低減）を考慮し、高性能減水剤の添加量でそれぞれ 18±2.5cm および 2.0±1.5%の範囲内に調整した。

2.2 養生条件

養生条件を表-3 に、温度履歴養生の槽内温度設定を図-1 に示す。養生条件は、一般的な蒸気養生³⁾を想定した養生 H、同一型枠を 1 日 2 回使用することを想定した養生 D、および養生 D の降温速度を低く設定した養生 D2 の 3 水準とした。養生 H と D2 は、同一の積算温度における強度発現への影響を確認するため、材齢 10 時間で積算温度が同等となるように設定した。また、ECO の W/C35%については、養生 D の材齢 10 時間までの積算温

表-1 使用材料

種類	記号	密度(g/cm ³)
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16
普通エコセメント	ECO	3.15
細骨材（陸砂） 大井川水系、吸水率 1.94%	S	表乾 2.59
粗骨材（碎石 2005） 青梅産、吸水率 0.53%	G	表乾 2.65
高性能減水剤 ポリカルボン酸エーテル系	SP	1.08

*1 興建産業株式会社 技術部（正会員）

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授 博士（工学）（正会員）

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域助教 博士（工学）（正会員）

表-2 コンクリートの配合

セメント 種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP(C×%)
OPC	18±2.5	2.0±1.5	35	41.4	160	457	724	1050	0.95
			45	44.0		356	806		1.15
			55	45.6		291	860		1.30
ECO			35	41.4	160	457	722	1050	0.92
			45	44.0		356	805		1.15
			55	45.6		291	859		1.30

表-3 養生条件

養生 記号	温度履歴養生の槽内温度設定および積算温度						材齢 1 日 まで	材齢 1 日～ 14 日まで (二次養生)	
	前置時間 (h)	昇温速度 (℃/h)	最高温度 (℃)	保持時間 (h)	降温速度 (℃/h)	材齢 10(h)までの 積算温度(℃・h)			
H	2.0	20.0	60.0	2.0	10.0	500	封緘養生 (20℃)	気中保管 (20℃, 60% R.H.)	
D	2.0	25.0	70.0	1.5	30.0	467			
D2	2.0	25.0	70.0	1.5	16.6	500			
D3	2.0	25.0	70.0	2.2	30.0	500			
W	封緘養生(20℃)							水中養生(20℃)	

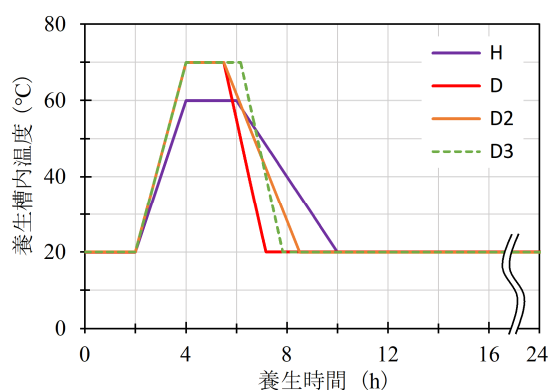


図-1 温度履歴養生の槽内温度設定

度が養生 H および D2 と同等になるよう、降温速度は同じで、最高温度の保持時間を 0.67 時間増やした養生 D3 を加えた。給熱までの前養生時間は、製品工場で一般に設定される 2 時間³⁾とした。

打込み後の円柱供試体（以下、供試体）は、水分の逸散を抑制するため、供試体上面を塩化ビニリデンフィルムで封緘した。降温後、材齢 1 日（脱型）までは 20°C の封緘養生とし、脱型後は製品のヤード保管を想定して、材齢 14 日まで 20°C（60%R.H.）の恒温恒湿室で保管した。各コンクリートの 20°C 水中養生（養生 W）の供試体も用意し、温度履歴養生による強度発現への影響を検討した。供試体は封緘状態で 24 時間静置後に脱型し、20°C の水中で材齢 14 日まで養生を行った。

2.3 試験方法

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験は φ100×200mm の供試体を用いて JIS A 1108 に準じて試験した。温度履歴養生を行うコンクリー

トの試験材齢は 8, 16, 24 時間および 14 日とした。養生 W の試験材齢は 1 日（=24 時間）および 14 日とした。

(2) 温度測定と積算温度の算定

温度履歴養生のコンクリート温度は、供試体の中心部で熱電対により材齢 3 日まで測定し、その後、材齢 14 日までは保管環境の雰囲気 20°C に追従するものと見なした。なお、養生 W は、材齢 1 日（脱型）まで同様の位置で温度を測定した。

コンクリート供試体および養生槽内（表-3）の積算温度は、土木学会示方書の式(1)⁴⁾で算定した。

$$M = \sum \{(\theta + A) \cdot \Delta t\} \quad (1)$$

ここに、 M : 積算温度(°C・時間)、 θ : Δt 時間中のコンクリートまたは養生槽内の温度(°C)、 A : 定数で 10(°C)、 Δt : 温度 θ である時間(h)

3. 結果および考察

3.1 実測温度

材齢 1 日までの養生槽内および供試体の温度履歴について ECO35% を例として図-2 に示す。供試体の温度履歴は、養生槽内の温度変化よりも多少遅延傾向にあり、最高温度が高く、保持時間が短くなる傾向が認められた。これは、熱伝導および水和熱に起因するものであり、他の養生条件でも同様の挙動が認められた。

3.2 材齢 1 日までの強度発現とその後の強度増加

温度履歴養生を行った供試体の材齢 8, 16 および 24 時間における積算温度と圧縮強度の関係を図-3 に示す。材齢 1 日以内で温度と時間条件を変化させた同等の積算温度における OPC の強度は、W/C にかかわらず、養生 D および D2 が養生 H よりも大きくなる傾向が認められた。

その養生による強度の差は、W/C35%で2.2～5.5N/mm²、W/C45および55%で0.7～1.6N/mm²であり、W/Cが小さいほど温度履歴の違いによる材齢1日以内の強度発現への影響は大きくなった。一方、ECOの場合は、OPCのような養生Hよりも養生DやD2で強度が高くなる傾向は認められなかった。ECOの強度の差は、W/C35%で2.5～3.1N/mm²、W/C45%で0.2～0.5N/mm²であり、W/C55%では、養生DでW/C45%に近い強度発現が認められ、養生HおよびD2と養生Dとの強度の差は大きくなったが、この原因は不明である。しかし、OPCおよびECOの温度履歴養生における材齢1日以内の圧縮強度の発現性状は、温度履歴養生の条件にかかわらず、積算温度に支配されることが認められた。

材齢1日の圧縮強度 f'_{c1} と材齢1日から14日までの圧縮強度の増加量 $\Delta f'_c$ の関係を図-4に示す。圧縮強度の増加量 $\Delta f'_c$ は、養生Wにおいては顕著に大きくなるが、温度履歴養生においては著しく小さいことがわかる。ECO55%の養生Dは、材齢1日の強度発現は大きいですが、材齢14日までの強度増加量が小さく、他の養生条件と異なる傾向が示されているが、この要因は明確ではない。

セメントの凝結と硬化は、エーライトからのイオンの溶出と鉱物内外でのケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の析出反応によるコンクリートの内部組織(セメント粒子間)の緻密化によると言われている^{5)・6)}。温度履歴養生を行ったコンクリートの長期強度の増進が劣るのは、水和早期の給熱によってクリンカー鉱物表層に緻密なC-S-H層が形成されるために、クリンカー鉱物内部の未水和部分へのその後の水分供給が抑制され、コンクリートの内部組織が緻密化しない⁵⁾ばかりでなく、温度履歴養生後の脱型による空隙水の蒸発も生じやすいため⁷⁾と考えられる。

3.3 20℃水中養生との強度比較

各養生条件および材齢における圧縮強度 f'_c を養生Wの材齢14日の圧縮強度 $f'_{c_{w14}}$ との比(以下、強度比 $f'_c/f'_{c_{w14}}$)で表し、強度発現に関する温度履歴養生の促進効果を検討した。また、温度履歴養生の材齢1日から14日までの圧縮強度の増加量 $\Delta f'_c$ を養生Wの増加量 $\Delta f'_{c_{w14}}$ との比(以下、強度増加量比 $\Delta f'_c/\Delta f'_{c_{w14}}$)で表した。セメント水比(C/W)と強度比の関係および強度増加量比の関係を図-5および図-6に示す。材齢1日における蒸気養生の強度比は、ECO55%養生Dを除き、C/Wが大きいほど高くなり、その増加割合は養生Wと同等であった。また、温度履歴およびセメントによる違いは僅かで、0.01～0.06の差であった。温度履歴養生による材齢1日における強度発現は、養生Wよりも強度比で0.09～0.15の促進効果があった。

材齢14日の強度比は0.67～0.77で、セメントの種類、

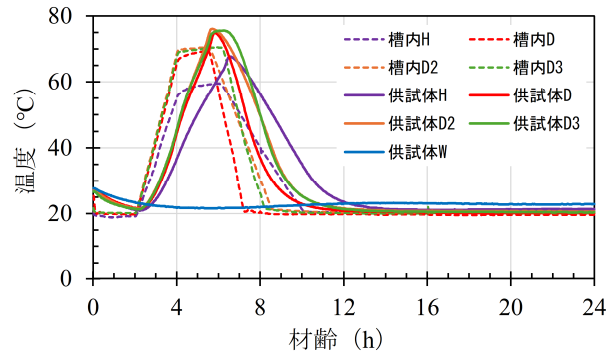


図-2 実測の温度履歴(例 ECO35%)

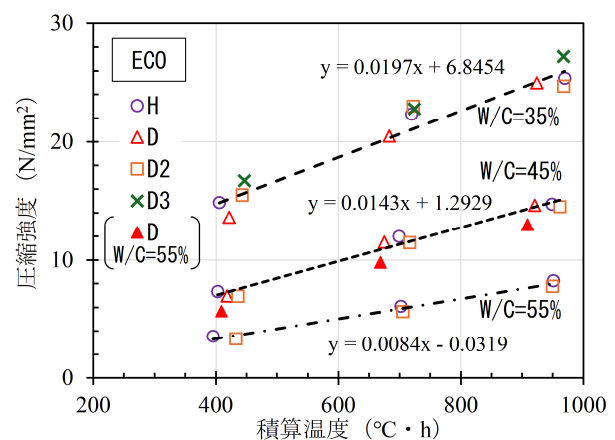
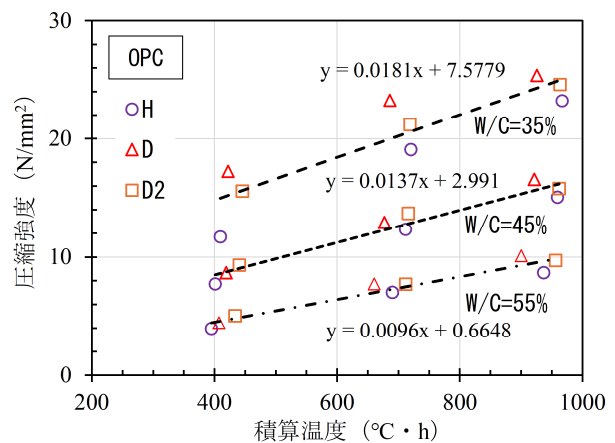


図-3 積算温度と圧縮強度の関係(材齢1日まで)

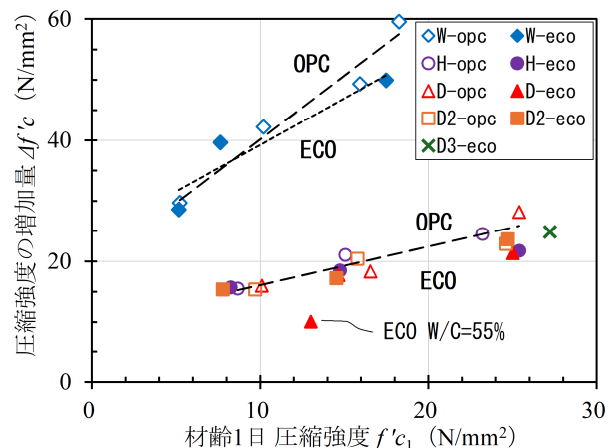


図-4 材齢1日の圧縮強度と材齢14日での増加量

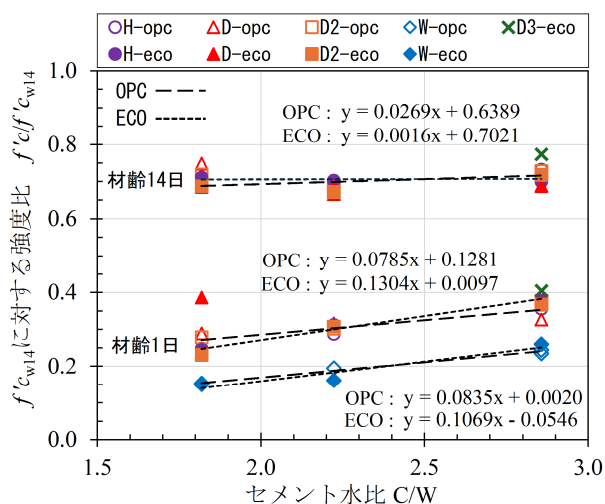


図-5 C/W と強度比の関係

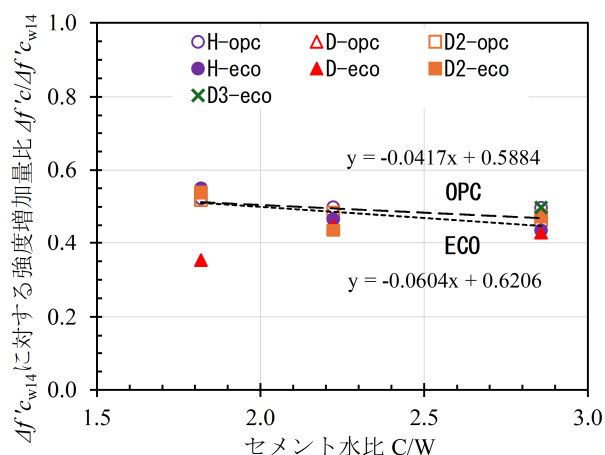


図-6 C/W と強度増加量比の関係

W/C および温度履歴にかかわらず同程度であるが、強度増加量比は、C/W が大きいほど低くなる傾向となった。

3.4 圧縮強度の推定方法

温度履歴養生を行うコンクリートの積算温度に基づく圧縮強度の推定を、使用するコンクリートのポテンシャルと考えられる 20℃水中養生による基準の強度発現特性との関連で検討することは、コンクリート配合および温度履歴養生条件の影響などを考察するうえで有用と考えられる。これにより、温度履歴養生条件の影響を明確に表現できるようになり、その影響をコンクリートの配合などの条件に応じて系統的に説明できる可能性があると考えられる。

材齢または積算温度と圧縮強度の関係を表す数式は、様々なものが提案されている^{8) 9)}。中でも、普通および早強セメントを使用した場所打ちコンクリートの早期材齢における強度推定は、成長曲線の一種であるゴンペルツ曲線が実測値を精度よく近似し、相関係数が高いことが報告されている¹⁰⁾。そこで、本研究の促進養生での強度推定と類似することから、ゴンペルツ曲線を用い

て積算温度と圧縮強度の関係を検討することとした。管理材齢 14 日における 20℃水中養生の圧縮強度を基準値として用い、独立変数として積算温度を用いると式(2)が得られる。

$$f'_c(M_i) = f'_{c_{w14}} \cdot \exp \left\{ -b \cdot \left(\frac{m_{st}}{M_i} \right)^c \right\} \quad (2)$$

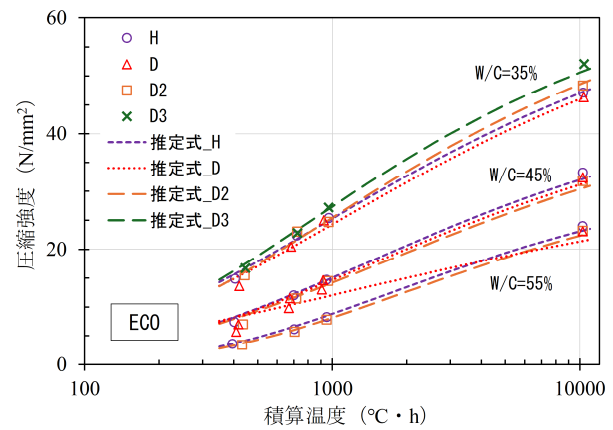
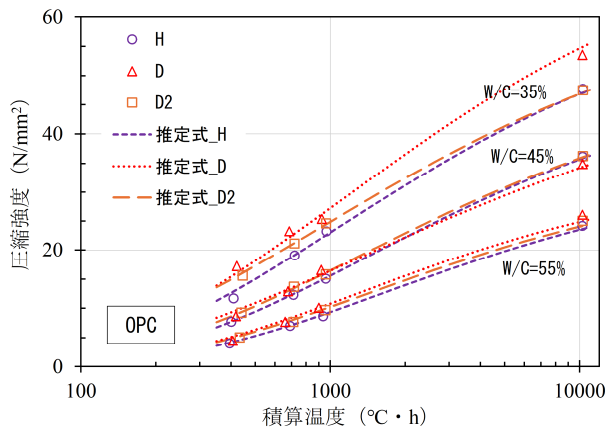
ここに、 $f'_c(M_i)$: 温度履歴養生を行ったコンクリートの材齢 14 日までの任意の積算温度における圧縮強度の推定値(N/mm²)、 $f'_{c_{w14}}$: 管理材齢 14 日における 20℃水中養生の圧縮強度(N/mm²)、 b : 材齢 1 日以内の強度発現に関する係数、 m_{st} : 温度履歴養生を行ったコンクリートの材齢 1 日における積算温度(℃・h)、 M_i : 温度履歴養生を行ったコンクリートの任意の積算温度(℃・h)、 c : 材齢 1 日から 14 日までの強度増加に関する係数 (図-6, $\Delta f'_c / \Delta f'_{c_{w14}}$)

この強度推定式は、20℃水中養生の材齢 14 日強度を基準値とし、曲線式の独立変数に温度履歴養生の影響を考慮するもので、二次養生として 20℃ (60%R.H.) 気中保管を想定したものである。この推定式を用いれば、温度履歴養生条件の強度発現への影響を定量的に表現でき、適切に強度推定できる可能性があるものと考えた。

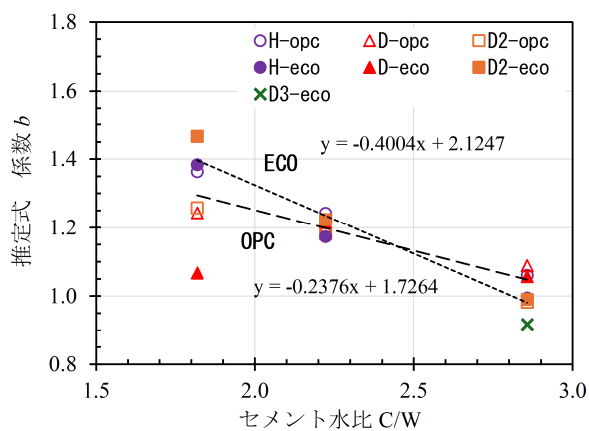
3.5 推定値と実測値の比較

実測の積算温度と圧縮強度の関係および温度履歴養生条件ごとの強度推定を図-7、推定式の諸元値と相関係数を表-4 に示す。推定式の係数 b は実測強度との整合で求めた。なお、OPC35%については、コンクリートの練混ぜパッチによる $f'_{c_{w14}}$ の違いが生じたため、養生 H および D2、養生 D、それぞれの $f'_{c_{w14}}$ を基準に推定式の検討を行った。その結果、推定値と実測値の差は、OPC で-1.18～+1.34N/mm²、ECO で-1.66～+2.51N/mm²、全ての推定式の相関係数は 0.9847 以上であった。材齢 3, 7 日などの中間材齢に相当する積算温度における強度推定の検証は行っていないが、この 20℃水中養生の強度を基準とした推定方法を用いれば、推定式における積算温度と圧縮強度の関係で、温度履歴養生による脱型時強度の促進、および材齢 14 日での強度増進の低下を表すことが可能となる。このように、係数 b 、 m_{st} および c をコンクリートの配合および温度履歴養生条件ごとに定めることで、圧縮強度を適切に推定できる可能性があることが示された。

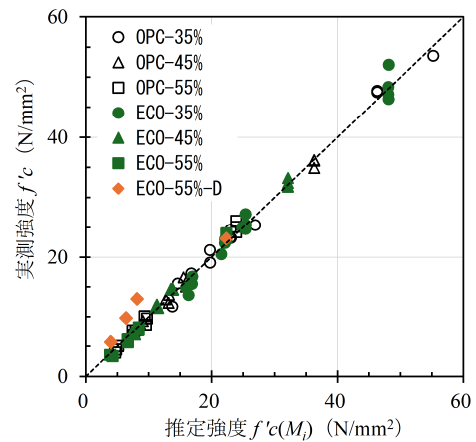
この温度履歴養生の影響を表現した係数 b および c を C/W との関数式 (図-8, 図-6) で表し、コンクリートの配合ごとに係数 b および c を求め、温度履歴養生条件ごとの m_{st} を配合ごとに平均化し、それらの値 (表-4) を推定式に用いて推定精度を検討した。実測の積算温度と圧縮強度の関係および温度履歴養生の影響を C/W で関数化した強度推定を図-9、推定強度と実測強度の関



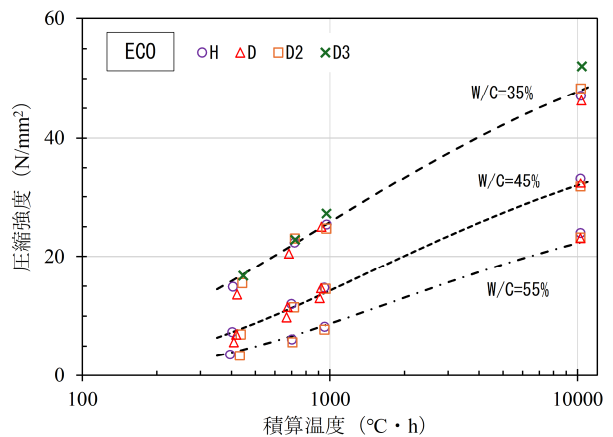
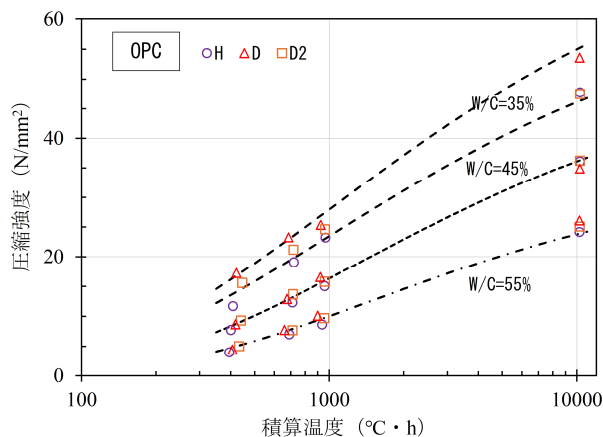
図－7 実測の積算温度と圧縮強度の関係および温度履歴養生条件ごとの強度推定



図－8 C/W と推定式係数 b の関係



図－10 推定強度と実測強度の関係



図－9 実測の積算温度と圧縮強度の関係および温度履歴養生の影響を C/W で関数化した強度推定

係を図－10 に示す。推定値と実測値の差 (ECO55%養生 D の検証も含む) は, OPC で $-2.19 \sim +2.06 \text{ N/mm}^2$, ECO で $-4.85 \sim +2.73 \text{ N/mm}^2$, 全ての推定式の相関係数は 0.9787 以上 (表－4) であった。温度履歴養生条件ごとの強度推定と比べて, 推定精度として OPC で $-1.01 \sim +0.72 \text{ N/mm}^2$, ECO で $-3.19 \sim +0.22 \text{ N/mm}^2$ の差が生じた。温度履歴養生条件による影響を C/W で関数化して強度推定する場合は, その推定精度の差を考慮して, 要求する強度を定める必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 材齢 1 日以内の積算温度と圧縮強度の関係は, 実験を行った範囲の温度履歴養生の条件ごとに直線的な関係となる。
- (2) 材齢 1 日から 14 日までの圧縮強度の増加量は, 20℃水中養生においては顕著に大きい, 温度履歴養生においては著しく小さい。
- (3) 20℃水中養生の材齢 14 日の圧縮強度に対する温度履

表-4 強度推定式の諸元値と相関係数

種類	W/C	養生	f'_{cw14} (実測)	温度履歴養生条件ごとの推定				温度履歴養生の影響を C/W で関数化した推定			
								OPC $b=-0.2376C/W+1.7264$ $c=-0.0417C/W+0.5884$		ECO $b=-0.4004C/W+2.1247$ $c=-0.0604C/W+0.6206$	
				b	m_{st}	c	相関係数	b	m_{st}	c	相関係数
OPC	35	H	65.26	1.060	967	0.497	0.9993	1.048	952	0.469	0.9993
		D	77.81	1.089	925	0.473	0.9990				0.9989
		D2	65.26	0.982	963	0.464	0.9999				0.9998
	45	H	52.43	1.242	959	0.499	0.9999	1.198	948	0.496	0.9999
		D		1.204	921	0.434	0.9984				0.9985
		D2		1.180	964	0.484	0.9998				0.9998
	55	H	34.90	1.363	937	0.523	0.9999	1.294	931	0.513	0.9997
		D		1.243	900	0.539	0.9999				0.9997
		D2		1.258	956	0.518	0.9998				0.9999
ECO	35	H	67.41	0.994	969	0.436	0.9988	0.981	957	0.448	0.9990
		D		1.057	924	0.428	0.9957				0.9964
		D2		0.990	967	0.474	0.9980				0.9980
		D3		0.917	967	0.498	0.9998				0.9996
	45	H	47.29	1.173	948	0.466	0.9998	1.235	943	0.486	0.9997
		D		1.215	920	0.448	0.9983				0.9981
		D2		1.224	948	0.435	0.9982				0.9983
	55	H	33.72	1.384	951	0.550	0.9996	1.397	936	0.511	0.9996
		D		1.067	908	0.353	0.9847				0.9787
		D2		1.466	949	0.539	0.9999				0.9998

履歴養生の強度比は、0.67～0.77 で、セメントの種類、W/C および温度履歴にかかわらず同程度であった。また、材齢 1 日における温度履歴養生の強度比は、20℃水中養生よりも大きく、また W/C が小さいほど大きな傾向があり、変化の割合は温度履歴養生と 20℃水中養生ともに同等の値を示した。

- (4) 材齢 1 日から 14 日までの 20℃水中養生の圧縮強度増加量に対する温度履歴養生の強度増加量比は、C/W が大きいほど低くなる傾向となった。
- (5) 20℃水中養生の圧縮強度を基準としたゴンペルツ曲線を用い、温度履歴養生における積算温度と圧縮強度の関係を表した。この結果、温度履歴養生の材齢 1 日以内の強度促進および材齢 1 日から 14 日までの強度増加の割合を係数で表現することで、圧縮強度を推定できる可能性がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京都立大学春木彩乃氏、同大学院堀住永樹氏、他コンクリート研究室の学生の皆様に多大なご協力を頂きました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 田所雄治, 曾根正夫, 永吉哲郎, 國府勝郎: プレキャスト製品の蒸気養生におけるコンクリート断面の温度分布推定と給熱効果の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.973-978, 2024.6
- 2) 酒井創地, 上野敦, 鎌田知久, 大野健太郎: 硬化過程

で温度履歴を受けたコンクリートの水分浸透挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.850-855, 2023.6

- 3) 小田部裕一, 柏木武春, 伊達重之: プレキャスト製品の配合, 養生方法に関するアンケート調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1015-1020, 2024.6
- 4) 土木学会: 2023 年制定コンクリート標準示方書【施工編】, pp.143-144, 2023
- 5) 近藤連一, 後藤誠史, 大門正機: セメントの水和と硬化, コンクリート工学, Vol.14, No.1, pp.24-34, 1976.1
- 6) 下坂建一: 安全・安心を支えるセメントの化学, 化学と教育, Vol.69, No.2, pp.62-65, 2021.2
- 7) 中谷俊晴, 渡邊賢三, 坂井吾郎, 石田哲也: 製造時期および二次養生方法の違いがプレキャストコンクリート製品の諸物性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.541-546, 2019.6
- 8) 吉田隆行, 岡永健, 御厨祐, 大坪正典: 成長曲線によるコンクリート強度推定法の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.555-560, 1992.6
- 9) 谷口円, 桂修, 松村宇, 吉野利幸: 各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度増進性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.357-362, 2008.6
- 10) 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