

論文 プレキャストコンクリートの脱型時の強度予測に関する研究

瀧川 瑞季*1・勝岡 夏那*2・橋本 紳一郎*3・伊達 重之*4

要旨：プレキャストコンクリート製品は、生産性向上のために蒸気養生プロセスを導入することが一般的である。本研究では実際の製品製造で適用されている蒸気養生条件を想定し、コンクリートの若材齢における力学特性の確認、ならびに有効材齢式による強度予測の精度について検証を行った。その結果、積算温度法において同一の有効材齢であっても蒸気養生を施すコンクリートの若材齢強度の予測には不向きであることが確認された。また、アレニウス則を基に水和反応速度と積算温度発熱量を定義することで精度よく圧縮強度を予測できることが確認された。

キーワード：プレキャストコンクリート, 蒸気養生, アレニウス則, 水和反応速度, 積算温度発熱量

1. はじめに

近年、建設業界では建設業就業者の高齢化が進行し、離職率が年々増加していく中、少子高齢化による若年入職者の確保が厳しいことが取りざたされている¹⁾。こうした中、国土交通省はi-Constructionを打ち立て、コンクリート工の規格の標準化等の中で生産性向上への取り組みを開始した^{2,3)}。その中でもプレキャストコンクリート製品(以下、プレキャスト製品とする)は現場打ちコンクリートに比べ品質が安定しており、工期短縮も実現可能となる。その他にも現場作業の省力化や建設現場における安全性の向上等も期待できる⁴⁾。

プレキャスト製品は一般的に蒸気養生を施すことでセメントの水和反応を促進させて早期脱型を行うことを可能にしている。一方、蒸気養生工程の導入により水和反応を促進させた結果、脱型時にプレキャスト製品表面と内部との間で著しい温度差が生じ、温度ひび割れ発生の危険性が高くなることが報告されている^{5,6)}。また、強度発現状況も部材内で差が生じている可能性もある。水和反応は一般的に温度の影響、特に若材齢において高温環境下では反応速度が高まることも知られている。今後更なる需要増加に伴った生産性向上と同時に安定した品質確保を担保するためにも製品の初期強度発現特性を推定することは有益である。

既往の研究では、コンクリートの強度予測推定において積算温度という温度が異なっている場合でも積算温度の値が同じであれば、得られる圧縮強度は等しいという考え方が多く用いられる^{7,8,9)}。積算温度法に基づいて考えると同一材料・配合・養生方法だった場合において、図-1のようにM₁とM₂が同じ面積(積算温度)であればコンクリート強度も同等という考え方である。しかし、こ

の異なる二つのパターンでそれぞれ養生したコンクリートの若材齢(1日)の強度は、実際は大きく異なることが容易に想像できる。筆者らは、あくまでも積算温度法に基づいた予測式は、桜の開花予想に活用される場合のように、長期強度でかつ温度の違いも10℃未満の環境であれば強度予測が適用可能と考えられるが、プレキャスト製品のように蒸気養生を施すことで製品内部と外気温では2倍以上の温度差があり、かつ数時間～数日程度の若材齢(とりわけ脱型時)における強度予測には無理があると考えている。

これまでの研究において養生温度が20℃の場合の水和反応時の発熱温度や速度などを考慮した材齢(以下、有効材齢とする)を使用した有効材齢式にて初期強度を算出、実測値との検討を行った^{10,11)}。その結果、既存の有効材齢式の中でも水和反応熱による活性化エネルギーを考慮したアレニウス則に基づく式が適切に初期強度を推定できる可能性を示した^{10,11)}。実際の測定値と各有効材

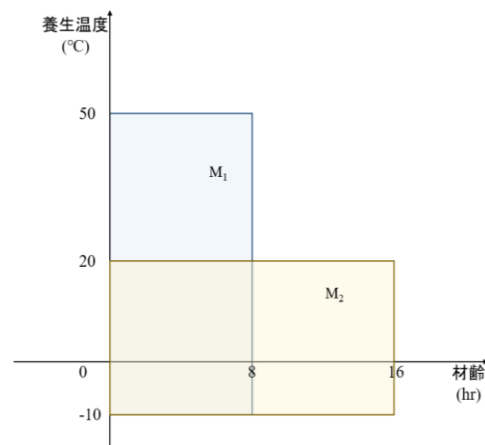


図-1 積算温度法に基づく有効材齢の考え方

*1 東海大学 大学院総合理工学研究科総合理工学専攻 (学生会員)

*2 東海大学 大学院工学研究科建築土木工学専攻 (学生会員)

*3 千葉工業大学 創造工学部都市環境工学科 博士(工学) (正会員)

*4 東海大学 工学部土木工学科 博士(工学) (正会員)

表-1 予測値と実測値の偏差

	養生温度 (°C)	養生時間 (hr)	偏差 (N/mm ²)
基準	50	4	-
積算温度法	20	8	14.6
アレニウス則		32	5.60

表-2 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm ³)
セメント	H	早強ポルトランドセメント	3.13
細骨材	S	陸砂(茨城県鹿島産) (吸水率: 1.54%)	2.62※
粗骨材	G	碎石(茨城県岩瀬産) (吸水率: 0.54%)	2.65※
混和剤	Ad	ポリカルボン酸系 高性能減水剤	1.05

※: 細骨材, 粗骨材の密度は表乾密度の数値

表-3 配合表

W/C (%)	s/a (%)	混和剤 添加量 (%)		Air (%)
31.9	42.0	0.7		2.0
単位量 (kg/m³)				
W	C	S	G	Ad
134	420	783	1094	2.94

表-4 実験の組み合わせ

記号	練上り温度 (°C)	養生温度 (°C)	保持時間 (hr)
10-35-2	10	35	2.0
10-45-3.5		45	3.5
10-55-5		55	5.0
20-35-5	20	35	5.0
20-45-2		45	2.0
20-55-3.5		55	3.5
30-35-3.5	30	35	3.5
30-45-5		45	5.0
30-55-2		55	2.0
10-40-1.5	10	40	1.5
10-50-3		50	3.0
10-60-4.5		60	4.5
20-40-4.5	20	40	4.5
20-50-1.5		50	1.5
20-60-3		60	3.0
30-40-3	30	40	3.0
30-50-4.5		50	4.5
30-60-1.5		60	1.5

齢式との偏差だが, 普通ポルトランドセメントを使用し W/C=30%, S/C=2.0 でモルタルを作製し, 蒸気養生を 50°C で 4 時間施したものを基準に積算温度法とアレニウス則共に同一の強度を示すとされる養生条件を比較した。結果, 表-1 のようになり, アレニウス則の方が実測値と推定値の乖離が小さいことが確認された。よって, 蒸気養生を施したコンクリートの若材齢時の強度予測にはアレニウス則に基づいた化学的なアプローチが必須である。しかし, 既往の研究を含めても研究事例は少ないうえ, 様々な養生パターンでの実験における適合性やその後,

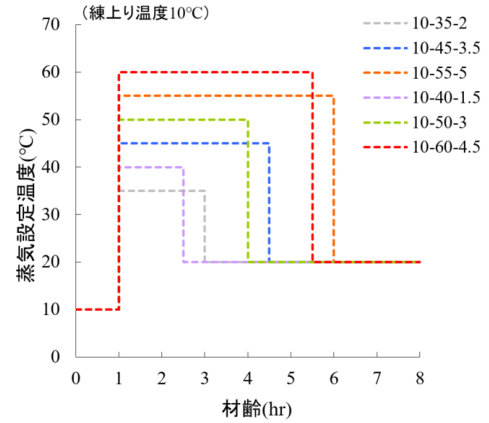


図-2 養生条件(練上り温度: 10°C)

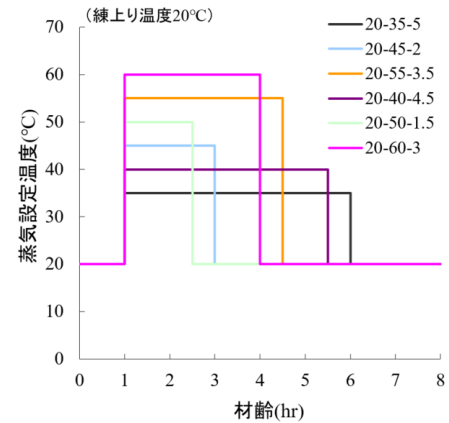


図-3 養生条件(練上り温度: 20°C)

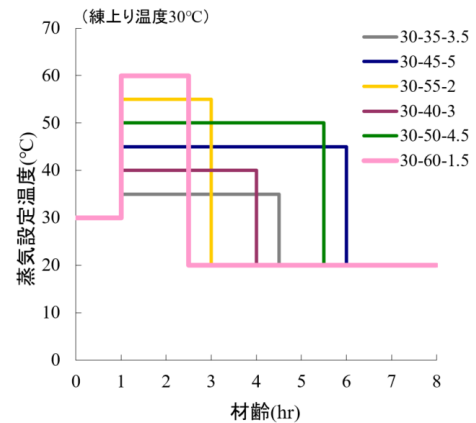


図-4 養生条件(練上り温度: 30°C)

実用化を目的とした式の提案は行われていない。本研究では蒸気養生を施したコンクリートの力学特性における影響を確認するため異なる温度と時間で養生したコンクリートの圧縮強度を測定し, 力学特性の確認を行った。また積算温度法とアレニウス則の有効材齢式での精度について検討し, 既存の有効材齢式よりも精度よくできる式の提案を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料と配合を表-2, 表-3 に示す。これまでの研究

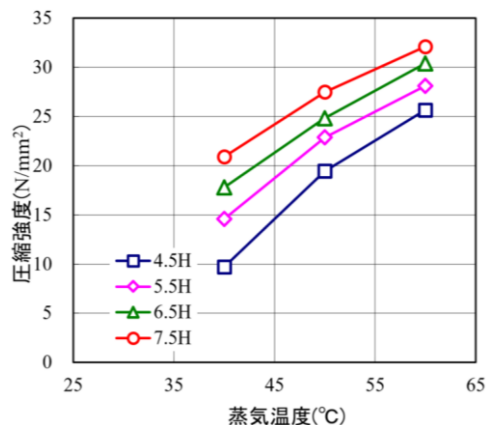


図-5 圧縮強度と蒸気養生温度(40℃, 50℃, 60℃)

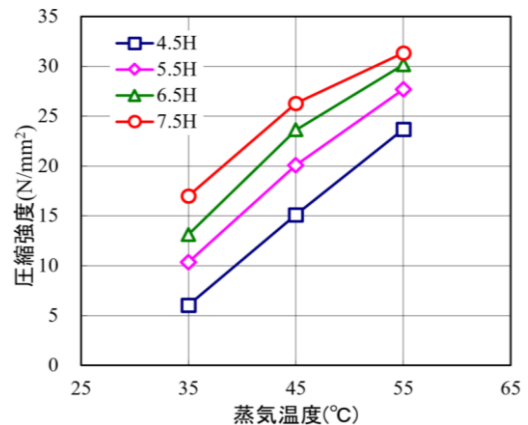


図-6 圧縮強度と蒸気養生温度(35℃, 45℃, 55℃)

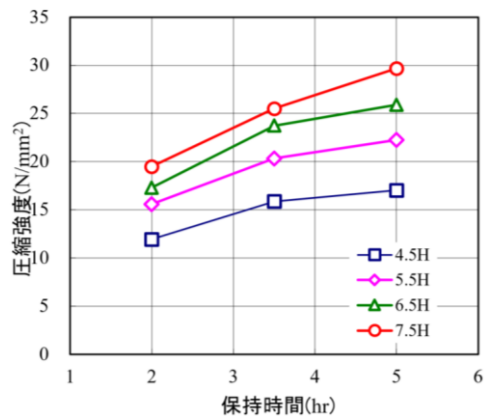


図-7 圧縮強度と保持時間(2hr, 3.5hr, 5hr)

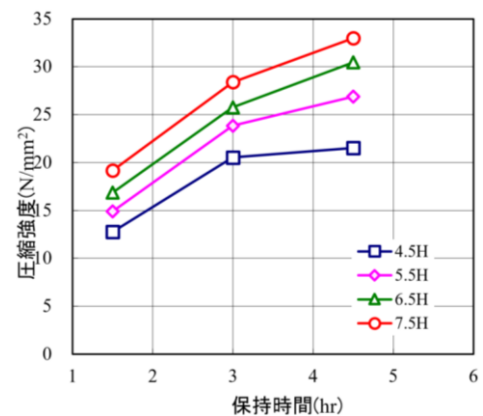


図-8 圧縮強度と保持時間(1.5hr, 3hr, 4.5hr)

¹⁰⁾と同様に W/C を 32%に設定し、本研究では s/a を 41%とした。本研究では実際のプレキャスト製品として実用化された配合であり、セメントの水和反応の程度が最も確認しやすいものを配合として採用した。

2.2 実験条件

実験の組み合わせを表-4に、養生条件を図-2から図-4に示す。配合ならびに各養生条件は一般的なプレキャスト製品を製造する際のものを参考にし、実験を行った。各養生条件は、1日2回転以上で製造することを想定したもので、プレキャスト製品として生産実績がある条件から練上がり温度、各養生条件の設定を行った。

蒸気養生の実施条件は前置き時間を1時間→各養生条件に合わせて養生しその後、脱型とした。コンクリートの練混ぜから脱型までを7時間以内とし、その後圧縮強度の測定を行った。昇温・降温は設けなかった。

2.3 試験項目

圧縮強度を JIS A 1108 に準拠して行った。供試体寸法はφ10×20cmの円柱供試体とし、材齢4.5時間、5.5時間、6.5時間、7.5時間でそれぞれ測定を行った。また、既存の有効材齢への精度を確認するため、供試体の温度履歴の測定を行った。供試体温度の測定は、円柱供試体の中心部に熱電対を埋設し接水後3分から5分毎に行った。一般的にプレキャスト製品の脱型強度が配合を決定

するための支配要因となることが多いため、本研究では圧縮強度に着目した。

2.4 コンクリートの強度予測式

(1) 積算温度に基づく予測式

積算温度法¹²⁾はコンクリートの強度発現は温度と時間の積、とりわけ基準温度を-10℃した温度(T+10)と時間との積によってあらわされるとして品質管理の考え方に広く使用されている。式(1)に算出式を示す。

$$t_e = \sum \frac{(T+10)}{30} \Delta t \quad (1)$$

t_e : 有効材齢(hr)

Δt : コンクリート温度が T である時間(hr)

T: コンクリート温度(°C)

(2) アレニウス則に基づく予測式

積算温度の概念では若材齢での圧縮強度の実測値と予測値に大きな乖離があるが、長期的にみると予測値と実測値との差が減少していくことが知られている¹³⁾。これは強度発現に対して温度が線形的に効果を及ぼすとするところに問題の原因があるとして Hansen ら¹⁴⁾がアレニウス則を基に式(2)のような有効材齢式を提案した。併せて Hansen ら¹⁴⁾は見かけの活性化エネルギーを提案している。

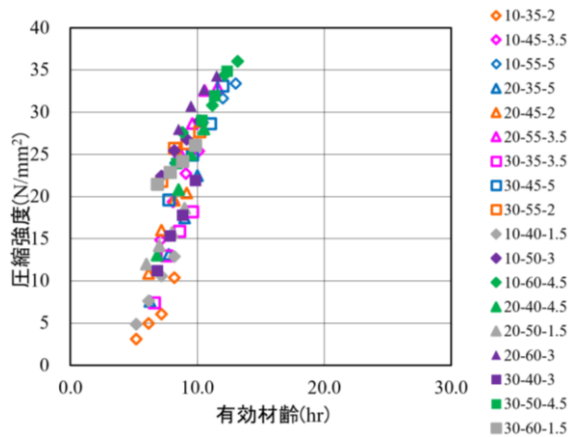


図-9 コンクリートの圧縮強度と式(1)の関係

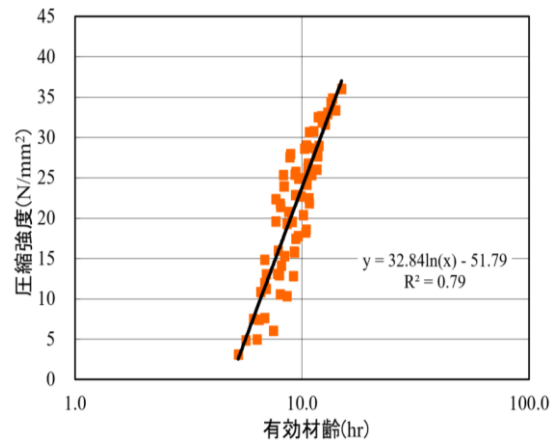


図-10 強度予測における式(1)の適用性

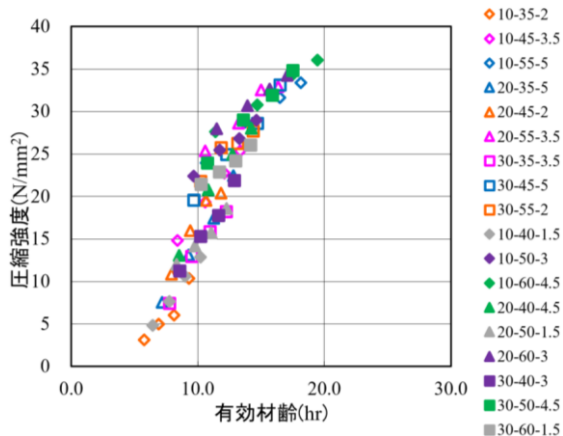


図-11 コンクリートの圧縮強度と式(3)の関係

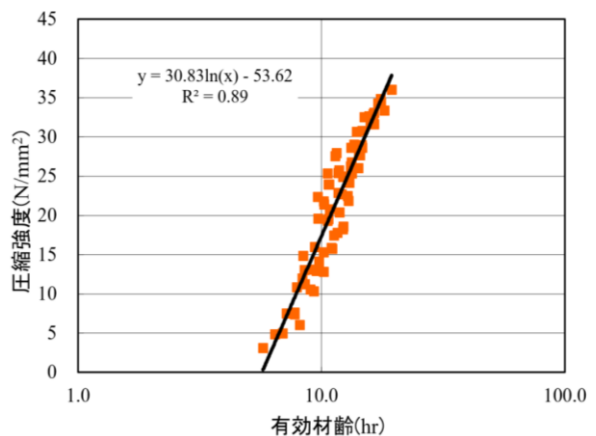


図-12 強度予測における式(3)の適用性

$$t_e = \sum \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T} \right) \right] \Delta t \quad (2)$$

$E=33.5\text{kJ/mol}$ ($T \geq 293\text{K}$)

$E=33.5+1.47(293-T)\text{kJ/mol}$ ($T < 293\text{K}$)

t_e : 有効材齢(hr) T : コンクリート温度 (K)

Δt : コンクリート温度が T である時間(hr)

E : 見かけの活性化エネルギー (kJ/mol)

R : 気体定数 (8.3144J/(K・mol))

これに対し、Jonasson ら¹⁵⁾はアレニウス則に基づく考え方は強度発現に対する温度依存性は適切に表しているが、ある一定の強度レベルに達すると実測値と予測値に乖離が生じることについて報告している。特に 50℃に近いような高温での養生の場合にはその傾向が強くなることを指摘し式(3)のような有効材齢式を提案している。

なお、これまでの研究成果^{10,11)}を踏まえ、活性化エネルギーを考慮した式(3)の方がより精度よく予測が行えたことから本研究の範囲においてアレニウス則に基づく強度予測の精度を確認するのは式(3)とした。

$$t_e = \sum \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T} \right) \right] \Delta t \quad (3)$$

$$\text{ただし, } \frac{E_a}{R} = Q_{ref} \left(\frac{30}{T-263} \right)^{K_3}$$

t_e : 有効材齢(hr) T : コンクリート温度(K)

Δt : コンクリート温度が T である時間(hr)

E_a : 見かけの活性化エネルギー(kJ/mol)

R : 気体定数 (8.3144J/(K・mol))

Q_{ref} : 4600(kJ/mol) K_3 : 0.59

3. 結果および考察

3.1 コンクリートの力学特性に関する確認

図-5 から図-8 に蒸気養生条件がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響を示す。本研究では様々な練上がり時間や養生条件を組み合わせる実験をしているが、特に養生温度が圧縮強度に影響を及ぼすため、養生温度に着目し比較を行った。これらの結果より、蒸気養生温度が高く、保持時間が長いほど圧縮強度が高くなることが確認された。これらは既往の研究でも報告¹⁶⁾されており、本研究でも同様の傾向を示していることを確認した。

3.2 各有効材齢式の精度について

図-9 と図-11 にコンクリートの圧縮強度と各有効材齢式との関係性を、図-10 と図-12 に各有効材齢式の精度を示す。図の中で実験データを使用し重回帰分析を行っている。本研究では既往の研究^{10,11,17)}でも使用し、初期強度と有効材齢の関係において高い精度が確認されている対数曲線を使用した。式(4)として下記に示す。

$$\sigma_c = a \cdot \log_e(t_e) + b \quad (4)$$

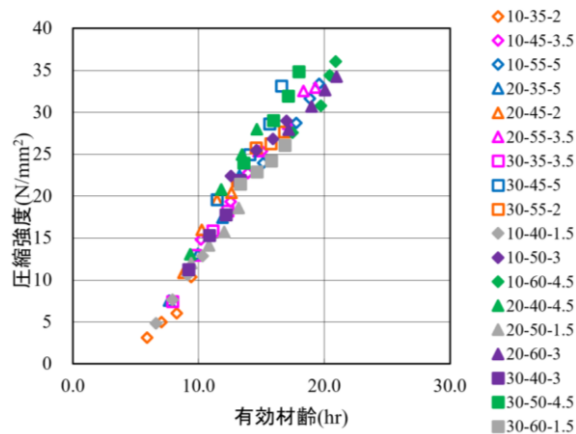


図-13 コンクリートの圧縮強度と式(5)の関係

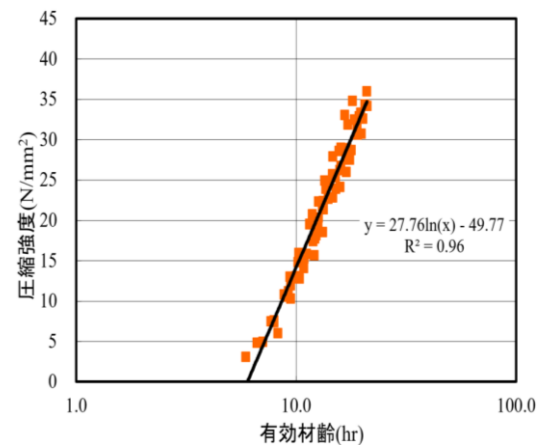


図-14 強度予測における式(5)の適用性

σ_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

t_e : 有効材齢(hr)

α, b : 定数

図-8 から図-11 より、積算温度法よりもアレニウス則に基づいた有効材齢式の方が精度よく圧縮強度を予測できることが確認された。これは水和反応の程度が考慮されているからであると考えられる。強度発現は温度依存性が高いが、アレニウス則はコンクリートの養生温度・時間と一緒に活性化エネルギーが式内で定義されている。よってアレニウス則に基づいた式(3)の方が精度よく予測ができたと推察される。

既存のアレニウス式はあくまでもコンクリート温度とセメントの活性化エネルギーのみを式に定義している。しかし、実際のプレキャスト製品はコンクリート外部から蒸気養生により熱を与えられるだけでなく、セメントの水和反応による水和発熱によりコンクリート内部からも熱が生まれる。脱型時の強度予測へ適応させるにあたり、この両者を考慮しなければ適切な強度予測が行えないと筆者らは考えた。そこで本研究の結果ならびにこれまでの研究成果^{10,11)}をもとに、既存のアレニウス式(3)をベースとして単位セメント量や密度などから水和反応速度ならびに積算温度発熱量を加味した修正式を検証の対象とした。検証対象の式を式(5)として下記に示す。

$$t_e = \sum \left[H(T, Q) \exp \left\{ -\frac{E(Q)}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \right\} \right] \Delta t \quad (5)$$

[]内を対数に直すと

$$\log H = \log H(T, Q) - \frac{E(Q)}{R} \left[\frac{1}{T} \right] \quad \text{となる。}$$

この時の H は水和発熱速度、 Q は積算発熱量をさす。これらは断熱温度上昇量から求めることができ、それぞれ、

$$Q = \frac{c\rho\Delta T_{ad}}{c}, \quad H = \frac{dQ}{dt} = \frac{c\rho}{c} \times \frac{d\Delta T_{ad}}{dt}$$

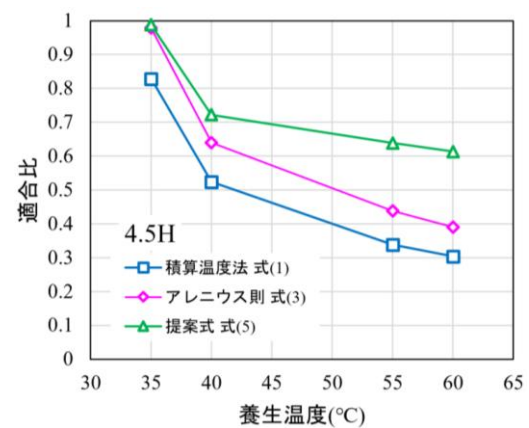


図-15 各有効材齢式の強度予測における適合性

で算出する。

ここで、

c : 比熱, ρ : 密度,

$E(Q)$: 積算発熱量に対する活性化エネルギー

R : 気体定数 (8.3144J/(K・mol))

ΔT_{ad} : 断熱温度上昇量, C : 単位セメント量

図-13 と図-14 に式(5)を使用した時の圧縮強度の有効材齢式との関係とその精度を示す。本研究の範囲において最も精度よく圧縮強度を予測することができた。新たに組み込んだ2つの要素により水和反応の程度がより正確に定義されたためであると考えられる。また図-15 に提案式も含めた各有効材齢式の適合比を示す。適合比は式(6)にて算出する。

$$1 - \left| 1 - \frac{\sigma_e}{\sigma} \right| \quad (6)$$

σ_e : 圧縮強度の予測値 σ : 圧縮強度の実測値

練上がり温度が 20℃、最高温度での保持時間が 3 から 5 時間の範囲とし、最も材齢の短い 4.5H を本論文に抜粋する。抜粋の理由はプレキャスト製品の製造にあたり最も用いられる養生条件であり、本研究の範囲において最

も材齢が短いものだからである。その結果、提案した式(5)を用いることで既存の有効材齢式よりも高い精度で予測できることが確認された。特に材齢 4.5H において、これまで広く使用されている積算温度法と較べると概ね 2 倍の高精度であることを確認した。その他の材齢でも同様の傾向が確認され、約 1.8 倍の高精度であることが確認された。それだけでなく、提案式は高温になるにつれても約 6 割の精度を担保できることから温度が高くなっても精度低下が少ないことが確認された。これはプレキャスト製品の脱型時の強度予測には有利になり、既存の有効材齢式を高精度に改善できたことを示すと考えられる。しかし、これまで広く使われていた 2 つの式よりも高精度で予測はできるが高温になるにつれて精度が低下していることは否めない。また、今回の実験では考慮していない配合や養生条件についての適応性については今後の研究課題として検証していき、更なる改良をしていきたいと考えている。

4. まとめ

蒸気養生を施したコンクリートの力学特性における各養生条件の影響を確認した。また、各有効材齢式の脱型時の強度予測ならびにその精度を確認したうえでプレキャスト製品向けの脱型時の圧縮強度予測式の提案を行った。本研究の範囲において以下の知見を得た。

- (1) 養生条件の違いに関わらず、積算温度法において同一の有効材齢であっても蒸気養生を施すコンクリートの若材齢強度(とりわけ、脱型時の強度)の予測は困難である。
- (2) アレニウス則を基にした有効材齢式を使用することで脱型時の強度が予測できるだけでなく、実際の水和反応の程度を考慮し水和反応速度、積算温度発熱量を式に使用することで精度が向上し、より正確に強度を予測できることが確認された。

参考文献

- 1) 国土交通省：資料 3 建設業及び建設工事従事者の現状，pp.1-11, 2017.3
- 2) 公益社団法人 土木学会：付属資料 2 プレキャストコンクリートを活用した生産性向上の実例集，pp.345-406, 2016
- 3) 伊達重之：建設工事へのプレキャスト製品活用の現状，建設機械施工，Vol.71, No.9, p.25-36, 2019
- 4) 万木正弘，北辻政文，久田真，中田善久：委員会報告 プレキャストコンクリート製品の設計と利用委員会，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.1-8, 2009
- 5) 遠藤友紀雄，田代藤雄，森本博昭，小柳治：蒸気養生下におけるコンクリートの諸特性について，コンクリート工学年次報告集，Vol.18, No.1, pp.1305-1310, 1996
- 6) 齋藤寛泰，小澤満津雄，阪口裕紀，森本博昭：蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート部材の初期応力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.443-448, 2011
- 7) 劉翠平，坂本繁一，小川輝幸，牛島栄：積算温度法によるマスコンクリートの圧縮強度推定に関する実験的考察，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-271, pp.541-542, 2016
- 8) G.Chengju : Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI Material Journal, Vol.86, Issue 4, pp.341-353, 1989
- 9) N.J.Caruno, R.C.Tank : Maturity Function for Concretes Made With Various Cements and Admixtures, ACI Material Journal, Vol.89, pp.188-196, 1992
- 10) 丸山貴吉，中嶋望，橋本紳一郎，伊達重之：プレキャストコンクリートの初期強度発現に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.2, pp.577-582, 2016
- 11) N. Nakajima, T. Maruyama, H. Koyama, S. Date : Effect of Steam Curing on Initial Strength Development of Mortar, International Journal of Engineering and Technology, Vol.9, No.6, pp.468-473, 2017
- 12) 伊藤憲雄，三橋博三，服部達也，梅原秀哲：若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究，土木学会論文集，No.620, V-43, pp.201-213, 1999
- 13) 伊藤憲雄，三橋博三，桐越一紀：養生過程で温度履歴を受けたコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢，コンクリート工学年次論文集，Vol.15, No.1, pp.103-112, 2004
- 14) P. Hansen, E. J. Pedersen : Maturity computer for controlled curing and hatching of concrete, Nord Betong, pp.127-140, 1977
- 15) Jonasson J. E. : Early strength growth in concrete-preliminary test results concerning hardening at elevated temperatures, The 3rd RILEM Symposium on Winter Concreting, Espoo Finland, pp.249-254, 1985
- 16) 河野清：コンクリート製品の促進養生，コンクリートジャーナル，Vol.4, No.3-4, pp.22-28, 1966
- 17) 菊池俊文，片山行雄，瀧論，黒田泰弘：現場内プレキャスト部材に用いるコンクリートのマチュリティ則に基づく初期強度発現の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.415-420, 2013