

論文 耐寒促進剤を使用したコンクリートの積算温度に関する検討

野々村佳哲*1・島多昭典*2・嶋田久俊*3・吉田行*4

要旨: 耐寒促進剤を使用したコンクリートの強度推定の方法の1つとして積算温度による方法が用いられている。しかし、従来の積算温度式は氷点下域の推定精度に問題があり、耐寒促進剤を用いるような寒中コンクリート工事には適用が難しい。一方、日本建築学会では氷点下でも適用できる積算温度式を2010年に採用している。そこで、本論文では、耐寒促進剤を使用したコンクリートの室内試験および現場施工実験を対象に、氷点下を含む積算温度式の適用性を検証した。その結果、耐寒促進剤を使用したコンクリートについても、十分な前養生を行えば、積算温度から強度推定ができることを確認した。

キーワード: 耐寒促進剤, 高炉セメント, 積算温度, 氷点下

1. はじめに

冬期にコンクリートを施工する場合、コンクリートの強度発現の遅延や凍結による初期凍害の発生を避ける目的で、雪寒仮囲いおよびヒーター等による給熱養生を行うことが一般的であり、通常のコンクリートの養生に比べ、温度管理などに特別な配慮が必要となる。一方、コンクリート用混和剤の一種である耐寒促進剤を用いることで仮囲いや給熱養生を省略し、簡易なシート養生にて施工することが可能になる。このような養生の簡略化により、2割~6割のコスト縮減効果が得られた報告^{1,2)}もある。

耐寒促進剤を使用したコンクリートを打設する際、「耐寒剤を用いる寒中コンクリート施工指針」³⁾(以下、耐寒剤施工指針と呼ぶ)では、コンクリートの圧縮強度が10~20 N/mm²に達するまでシート養生を続けることとしている。同指針では、このときの強度管理の方法として、現場養生した供試体による管理と積算温度による推定の2種類の方法を挙げている。しかし、指針策定当時の実験結果において、標準養生と現場養生とで積算温度と圧縮強度の関係が一致しなかったため、積算温度によって強度管理を行う場合には、必要に応じて予想される温度条件での事前検討をすることを求めており、積算温度を用いて強度推定する場合の負担が非常に大きくなっている。

当時の実験で標準養生と現場養生との積算温度-圧縮強度関係が一致しなかった要因として、積算温度式の適用範囲が挙げられる。現場養生した供試体は養生期間中に0℃以下になったものの、一般的に使用されている積算温度式は養生温度0℃以上の実験で得られた式であり、養生温度が0℃以下の場合には適用できない⁴⁾。一方、指針策定時にはなかったものの、現在では養生期

間中にコンクリート温度が氷点下となる場合でも積算温度を適切に取り扱うための方法がいくつか提案されている。その中でも、谷口ら⁵⁾は、氷点下でも扱える積算温度式として、凍結による反応水の化学的ポテンシャル低下の影響を考慮した式を提案しており、日本建築学会の寒中コンクリート施工指針において採用されている⁶⁾。谷口らの提案式は、普通セメントおよびフライアッシュセメントによる実験で検証されたものであるが、その成り立ちから他のセメント種類にも適用できる可能性が示唆されており⁵⁾、耐寒促進剤を使用したコンクリートにも適用できれば効率的な強度管理が可能となる。

そこで本研究では、耐寒促進剤を使用したコンクリートを対象として室内試験を行い、氷点下の積算温度式の適用性について確認した。その後、氷点下の積算温度式を用いて指針策定当時の現場施工実験結果を再評価し、積算温度によって耐寒促進剤を使用したコンクリート強度を推定できることを確認した。

2. 室内実験

2.1 使用材料および配合

コンクリートの使用材料および配合を、表-1 および表-2 に示す。セメント種類は、普通セメントと高炉セメントの2種類とした。耐寒促進剤は日平均気温-10℃まで施工できるという、現在市販されている中で最も低い外気温に対応している無塩無アルカリ型の2製品を使用した。水セメント比および耐寒促進剤添加量は、使用する耐寒促進剤のカタログ条件に基づいて45%およびセメント100 kg 当たり4リットルの一定とした。耐寒促進剤はA, Bともに単位水量の一部を置換する形で添加した。目標スランプは土木構造物で一般的な8±2.5cmとし、空気量は別途検討を行っている耐凍害

*1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 (正会員)
 *2 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)
 *3 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 主任研究員 (正会員)
 *4 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 博士 (工学) 主任研究員 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類および物理的性質
水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,330cm ² /g)
	高炉セメント B 種 (密度 3.05g/cm ³ , 比表面積 3,720cm ² /g)
細骨材	苫小牧樽前産除塩海砂 (密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 1.18%, 粗粒率 2.85)
粗骨材	小樽見晴産砕石 (密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 1.80%, G _{max} 25mm)
AE 剤	樹脂酸塩系
AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩系
耐寒促進剤 A	亜硝酸化合物
耐寒促進剤 B	亜硝酸化合物・硝酸化合物

表-2 コンクリートの配合

記号	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C × %)		耐寒剤 (C × リットル)		スランプ (cm)	Air (%)
				W	C	S	G	AE 減水剤	AE	耐寒剤 A	耐寒剤 B		
N45-P	普通	45	42	150	333	785	1077	0.12	0.039	0	0	8.9	5.8
N45-A								0.25	0.040	0.04	0	8.6	6.2
N45-B								0.25	0.040	0	0.04	7.2	5.7
B45-P	高炉	45	42	150	333	781	1072	0.1	0.044	0	0	8.2	5.0
B45-A								0.13	0.057	0.04	0	7.1	5.0
B45-B								0.13	0.055	0	0.04	8.0	4.9

性評価⁷⁾において空気量不足となることを避けるため、5~6% 程度となるよう AE 剤を添加した。スランプ・空気量の実測値は表-2 に示す通りである。

2.2 供試体作製および養生方法

コンクリートの練混ぜは 20℃ の恒温室にて行い、各型枠へコンクリートを打込みした後、打設面をラップフィルムによって封緘した。圧縮強度試験用供試体は φ10×20 cm とし、プラスチック製型枠を用いた。打設完了後、各供試体は +20℃、+5℃、-5℃、-10℃ の一定温度下で試験材齢に達するまで封緘養生した。なお、本実験では打設開始から別温度の恒温室への移動完了までに、おおよそ 20~30 分程度の時間を要した。

各養生温度のうち、氷点下で養生を行う供試体は、耐寒剤施工指針³⁾に定める前養生期間に準じて、打設後 24 時間経過するまで +5℃ の恒温室で前養生を行った。24 時間経過後、型枠のまま恒温槽へ移動し、-5℃ または -10℃ 一定の温度条件下で静置した。各供試体は所定の試験材齢に達した後に恒温槽から取り出して脱型し、次節に示す各試験を行った。なお、氷点下で養生を行う供試体の一部は、所定材齢到達後に 20℃ の恒温室に移動してさらに一定期間封緘養生を行った (以降、再養生と呼ぶ)。

2.3 試験方法および試験材齢

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して実施した。試験材齢は +20℃ 養生の供試体については、1, 3, 7, 14,

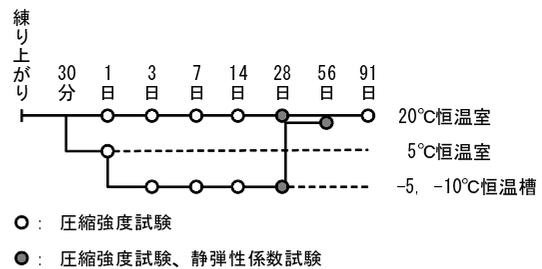
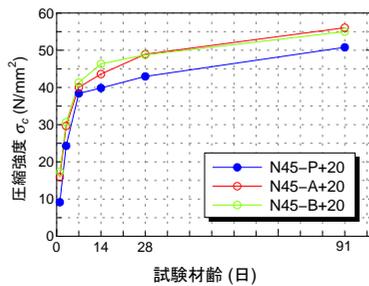


図-1 養生温度と圧縮強度試験の試験材齢

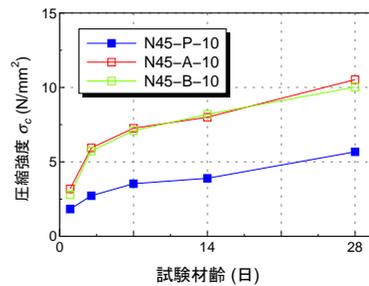
28, 91 日とし、-5℃、-10℃ 養生の供試体については、1, 3, 7, 14, 28 日とした。また、-5℃、-10℃ 養生の供試体では、28 日経過後に +20℃ の恒温室に移動して再養生した後、材齢 56 日でも試験を行った。養生温度と圧縮強度試験の試験材齢を図-1 に示す。なお、氷点下で養生した供試体では、+20℃ 水中に 1 時間浸漬して、解凍した後に圧縮強度試験を行った。解凍時間については、事前の確認試験において、例えば -5℃ 養生した φ10 × 20 cm の供試体の場合、おおよそ 15 分ほどで供試体中心温度が -5℃ から ±0℃ に達することを確認している。

(2) 静弾性係数測定

各養生方法の材齢 28 日、および氷点下で養生した供試体を再養生した材齢 56 日の各供試体を対象に、コンプレッションメータを用いて JIS A 1149 に準拠して静弾性係数を測定した。

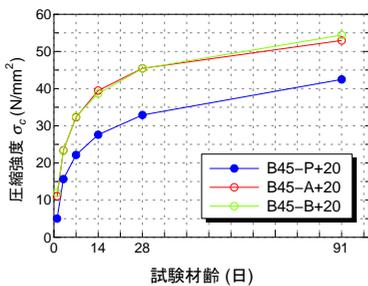


(1) +20℃養生

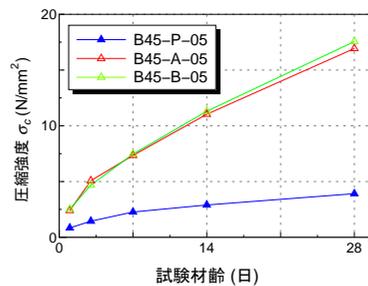


(2) -10℃養生

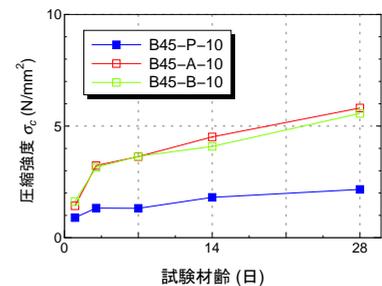
図-2 圧縮強度試験結果 (普通セメント)



(1) +20℃養生



(2) -5℃養生



(3) -10℃養生

図-3 圧縮強度試験結果 (高炉セメント)

2.4 試験結果

(1) 強度増進特性

養生温度別の圧縮強度試験結果を図-2, 図-3 に示す。各試験ケースは, 表-2 に示す記号と養生温度の組合せで示している。図-3 の高炉セメントに着目すると, どの養生温度においても, 耐寒促進剤を使用していない B45-P に比べて, 耐寒促進剤を使用した B45-A, B45-B の方が強度が高くなっており, 高炉セメントの場合でも耐寒促進剤による硬化促進効果が発揮されることが確認できる。また, 図-2(2) や図-3(3) を見ると, 耐寒促進剤の有無に関わらず, -10℃であっても強度増進することがわかる。

(2) 積算温度による比較

寒中コンクリートの圧縮強度の推定方法の1つに積算温度による方法がある。積算温度は一般に, 次式によって計算される⁸⁾。

$$M = \sum (\theta + 10) t \quad (1)$$

ここで, M : 積算温度 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$ ($=^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$)), θ : t 時間中のコンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$), t : 時間 (日) である。

このとき, 式(1)は養生温度 0°C 以上の実験で得られた式であり, 養生温度が 0°C 以下の場合には適用できない⁴⁾。そのため, 日本建築学会では, 養生時に氷点下となる場合にも適用できる積算温度式として, 次式を提案

表-3 氷点下での養生開始時の圧縮強度 σ_1 (N/mm^2)

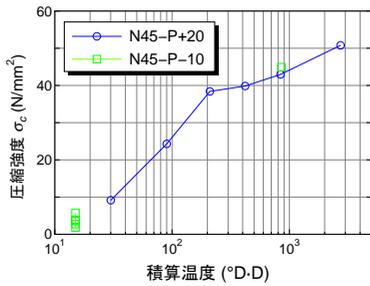
	-5℃養生	-10℃養生
N45-P	-	1.83
N45-A	-	3.18
N45-B	-	2.79
B45-P	0.84	0.90
B45-A	2.40	1.43
B45-B	2.51	1.62

している⁶⁾。

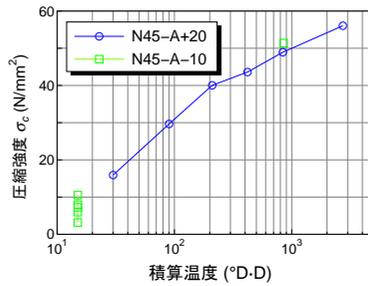
$$\begin{aligned}
 T &\geq 0 \\
 M &= \sum (T + 10) \Delta t \\
 T &< 0 \\
 M &= \sum 10 \times \exp(-0.60 \times (-T)^{0.74}) \Delta t \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで, M : 積算温度 ($^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$), T : Δt のコンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$), Δt : 温度測定間隔 (日) である。このとき, Δt は 6 時間を上限として可能な範囲で短くすることが望ましいとされている。

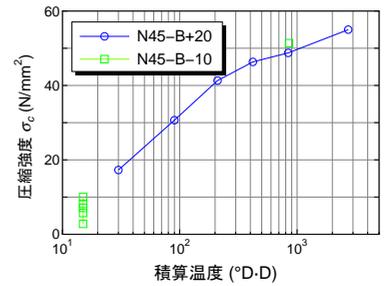
図-4, 5 に, 式(1)の一般的な積算温度式による積算温度-圧縮強度関係を配合別に示す。従来用いられている式(1)では -10°C を基準温度としているため, -10°C 養生時の積算温度がゼロとなり, 強度との関係は評価できない。また, 図-5 に示す -5°C 養生の結果に着目すると, $+20^{\circ}\text{C}$ 養生と -5°C 養生の積算温度曲線が乖離し, 一致していない。



(1) 耐寒促進剤なし

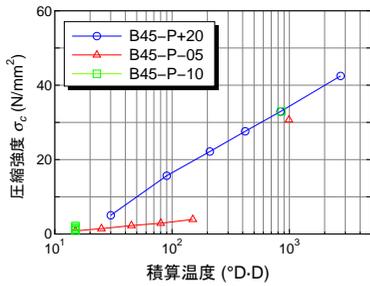


(2) 耐寒促進剤 A

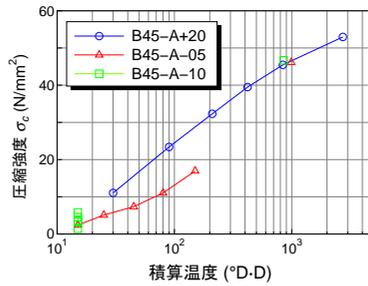


(3) 耐寒促進剤 B

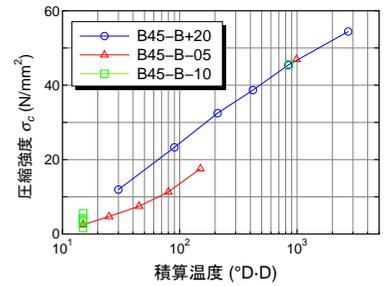
図-4 積算温度-圧縮強度関係 (普通セメント, 式(1)-従来式)



(1) 耐寒促進剤なし

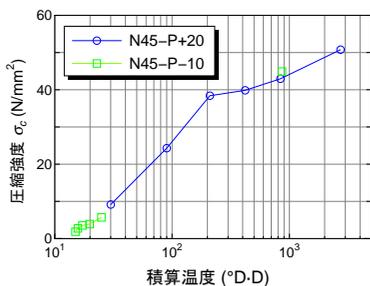


(2) 耐寒促進剤 A

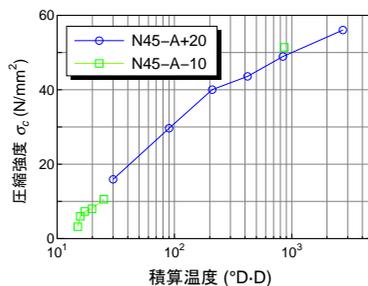


(3) 耐寒促進剤 B

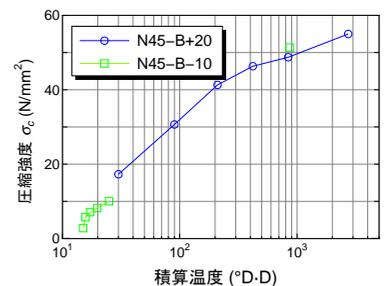
図-5 積算温度-圧縮強度関係 (高炉セメント, 式(1)-従来式)



(1) 耐寒促進剤なし

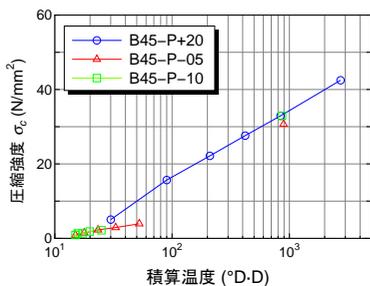


(2) 耐寒促進剤 A

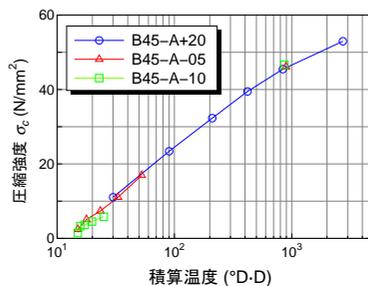


(3) 耐寒促進剤 B

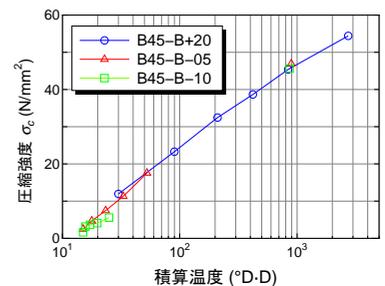
図-6 積算温度-圧縮強度関係 (普通セメント, 式(2)-日本建築学会式)



(1) 耐寒促進剤なし



(2) 耐寒促進剤 A



(3) 耐寒促進剤 B

図-7 積算温度-圧縮強度関係 (高炉セメント, 式(2)-日本建築学会式)

次に、式(2)の日本建築学会式を用いて算定した積算温度と圧縮強度の関係を図-6, 7に示す。図を見ると、耐寒促進剤を使用していないB45-Pを除き、各養生温度の積算温度曲線はよく一致している。建築学会式の根拠となった実験では、凍結開始前にコンクリートの圧縮強度が5~10 N/mm²以上になるよう前養生を行って

る⁵⁾。一方、今回の実験では表-3に示すように、氷点下での養生開始時の圧縮強度が低く、特にB45-Pでは1 N/mm²を下回っていたことから、前養生の不足が配合B45-Pにおいて一致しなかった要因の1つとして挙げられる。

B45-P 以外の配合では、氷点下での養生開始時の圧縮強度が 1.5 N/mm^2 を超えていることから、前養生によって $1 \sim 1.5 \text{ N/mm}^2$ 以上の初期強度が発現した後であれば、普通セメントや高炉セメントに耐寒促進剤を使用したコンクリートについても式 (2) によって氷点下の積算温度を適切に評価し、圧縮強度の推定ができる可能性がある。今後、室内実験や現場施工試験によってデータを蓄積し、さらに検証を重ねる必要がある。

(3) 再養生による強度回復

材齢初期に凍結したコンクリートでは初期凍害を受けている可能性がある。一般に、初期凍害を受けたコンクリートでは、圧縮強度、耐久性、水密性等が著しく低下し、その後養生を行っても回復が望めないとされている。そこで、初期凍害の可能性の評価として、氷点下で 28 日間の養生を行った供試体を対象に $+20^\circ\text{C}$ 28 日の再養生を行い、強度回復の程度を確認した。

図-8 に、再養生をした供試体の圧縮強度を示す。なお、図中の数字は同じ配合で 20°C 28 日養生した供試体の圧縮強度との比である。 -5°C または -10°C で養生した供試体の氷点下での養生開始時の圧縮強度は表-3 で示した通り $0.8 \sim 3.2 \text{ N/mm}^2$ の範囲であり、いずれの供試体でも初期凍害の防止に必要とされる圧縮強度⁹⁾ である 5 N/mm^2 を下回っていた。しかし、再養生後には、耐寒促進剤の有無に関わらず、いずれの供試体でも 90% 以上の強度まで回復しており、材齢初期の凍結による圧縮強度の著しい低下は確認できなかった。

初期凍害による圧縮強度の低下については、1 回だけの凍結作用を受ける場合、コンクリートが凝結硬化を終えて $5 \text{ kgf/cm}^2 (=0.5 \text{ N/mm}^2)$ に達すると強度損失はほとんど起きないことが報告されている¹⁰⁾。今回の室内試験では、表-3 にも示すように凍結開始時の圧縮強度は 0.5 N/mm^2 を超えていたことから、圧縮強度については著しい強度損失が生じなかったと考えられる。

また、 20°C 、 -5°C 、 -10°C の一定温度下で養生した供試体の静弾性係数と、氷点下での養生をした後 $+20^\circ\text{C}$ 28 日の再養生をした供試体の静弾性係数を図-9 に示す。図には、土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] に示される一般的な静弾性係数の値も併せて示している。いずれのケースも概ね 1 つの曲線状に並んでおり、凍結の有無による影響は確認されなかった。再養生によって圧縮強度が回復した場合、静弾性係数も回復することが確認できた。

3. 耐寒剤施工指針における積算温度

土木の分野で利用されている耐寒剤施工指針³⁾では、耐寒促進剤を使用した場合の積算温度について、図-10 が示されており、同一積算温度において、氷点下の養生

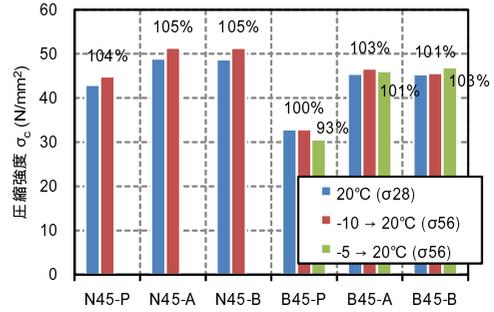


図-8 再養生による強度回復程度

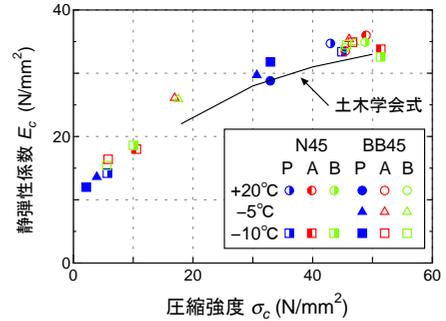


図-9 圧縮強度-静弾性係数関係

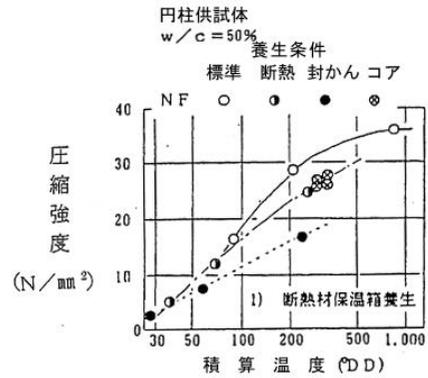


図-10 積算温度と圧縮強度の関係³⁾

となった断熱・封かん・コア供試体において標準養生よりも圧縮強度が小さくなったことから、必要に応じて、予想される環境条件を考慮した実験により、積算温度と強度の関係について検討しておくのがよいと解説している。このため、積算温度式を用いて強度推定する場合には、標準養生での強度増進特性を把握する他に、氷点下での養生を行って標準養生との関係を配合毎に整理することが必要となり、使用者の負担が大きい。

指針の根拠となる図-10 は、平成 2 年に当研究所で実施した現場施工実験がベースとなっており、養生期間中の日平均気温が -6.2°C となる気象条件下で実施された。当時は式 (2) に示す氷点下の積算温度式が提案される前であったため、積算温度は式 (1) によって算定されている。そこで当時の施工報告書のデータを用いて、氷点下

での積算温度算定式(式(2))による図-10の再評価を試みる。

現場施工実験の対象となった構造物は幅4.4m、長さ14.5m、深さ1.0mのウォータープール(写真-1)であり、底版、側壁ともに厚さ0.3mである。コンクリートの水セメント比は50%、耐寒促進剤の添加量はセメント100kg当たり4Lであった。圧縮強度用の供試体は $\phi 10 \times 20$ cmで作製され、封緘養生と断熱材保温箱養生($t=15$ mm)の2種類の現場養生と標準養生を行い、材齢3, 7, 28日で圧縮強度試験を行っている。また、材齢28日目に底版および側壁から $\phi 15 \times 30$ cmのコアを採取し、圧縮強度試験を行っている。温度記録は、供試体、構造物ともに熱電対を用いて計測されている。しかし、シート養生を行っていた材齢7日目までの記録は残っていたものの、それ以降については温度記録が残っていなかった。そのため、7日目以降の積算温度の算定にあたっては、同じ平野部にある最寄りの気象観測点のアメダスデータを利用した。

図-11に氷点下での積算温度算定式(式(2))による再評価結果を示す。アメダスデータから推定している材齢28日の結果のうち封緘養生の積算温度がやや大きくなっているものの、各種養生の試験結果は、ほぼ同一線上となっている。したがって、氷点下を含む積算温度算定式(式(2))を用いることで低温養生の影響を考慮できるため、耐寒剤施工指針で指摘されている「予想される環境条件を考慮した実験」を省略できると考えられる。

4. まとめ

寒中コンクリートにおける強度管理方法の1つである積算温度について、耐寒促進剤を使用したコンクリートを対象に、室内試験および現場施工実験の結果を用いて検証した結果、以下の知見が得られた。

1. 耐寒促進剤の有無に依らず、従来の積算温度式の基準温度である -10 ℃の養生温度でもコンクリートは強度増進する。
2. 従来の積算温度式では、氷点下の一定温度で養生したコンクリートの強度を推定することはできない。
3. 日本建築学会で提案されている積算温度式を用いることにより、耐寒促進剤を使用したコンクリートについても、十分な前養生を行えば、養生温度が氷点下となる場合のコンクリート強度を推定することができる。
4. 日本建築学会の積算温度式を用いることにより、耐寒剤施工指針で指摘されている事前確認試験の一部を省略できる可能性がある。



写真-1 ウォータープールの施工状況

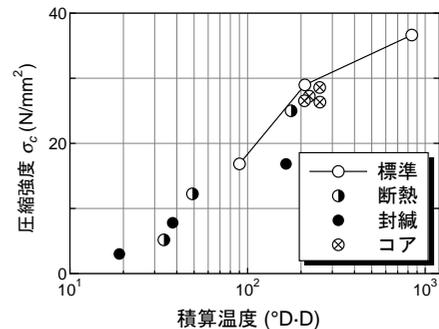


図-11 積算温度と圧縮強度の関係(式(2))

参考文献

- 1) 瀧澤秀則: 耐寒剤による冬期コンクリート施工について、北陸地方整備局管内技術研究会, pp. 173-176, 2002.
- 2) 前川幸治: 合成床版工における、極寒冷地による耐寒剤を使用した寒中コンクリートの施工, 土木施工管理技術論文集, Vol. 13, pp. 67-72, 2009.
- 3) 通年施工推進協議会: 耐寒剤を用いる寒中コンクリート施工指針, 1999.
- 4) (社) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針, p. 169, 2010.
- 5) 谷口円, 桂修, 濱幸雄: 氷点下のコンクリート強度増進と温度時間関数, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 640, pp. 995-1003, 2009.
- 6) (社) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針, p. 171, 2010.
- 7) 野々村佳哲, 島多昭典, 嶋田久俊, 吉田行: 耐寒促進剤の高炉セメントへの利用拡大に向けた基礎的検討, 寒地土木研究所月報, Vol. 749, pp. 45-50, 2015.
- 8) (公社) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], p. 158, 2013.
- 9) (社) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針, p. 162, 2010.
- 10) 神田衛: 早期凍害とその防止, コンクリートジャーナル, No. 10, pp. 15-20, 1966.