

V-12 耐寒剤使用コンクリートの強度性状に関する一考察

北見工業大学 学生会員 久 保 裕 一
 北見工業大学 フェロー 鮎 田 耕 一
 北見工業大学 正 会 員 桜 井 宏
 北見工業大学 正 会 員 猪 狩 平 三 郎
 水元建設(株) 正 会 員 水 元 尚 也

1. はじめに

寒中コンクリートでは型枠の取り外し時期や養生期間を決定するために、積算温度を用いて強度推定することがある。圧縮強度と積算温度の関係は強度増進曲線で表されるが、本論文では寒中コンクリートの初期凍害防止策として耐寒剤を使用した場合の同曲線の適用性と、積算温度の基準温度について検討した。また、耐寒剤を使用した実構造物の強度性状などを調査した。

すなわち、耐寒剤を使用し作製したコンクリート供試体の圧縮強度と積算温度の関係を基に求めた強度増進曲線の妥当性をスラブから切り取ったコア供試体の圧縮強度と積算温度の関係から検討するとともに、施工から約5年経過した耐寒剤使用護岸壁体の調査結果からその強度性状と耐凍害性を検討した。

2. 基準温度の検討

2.1 実験概要

耐寒剤使用コンクリートの圧縮強度と積算温度の関係を調べるため、 $\phi 12.5 \times 25$ cmの円柱供試体を用いて環境条件別に圧縮強度を求めた。耐寒剤の使用量はセメント100kg当たり5、4、3ℓ（以下NF5、NF4、NF3とする）を使用した。環境条件と試験材齢を表1に示す。また、強度増進曲線の適用性を検討するために用いたコア採取用スラブは、耐寒剤をセメント100kg当たり5ℓ使用した。スラブは冬季に屋外で打ち込み所定材齢（材齢3、5、7日）でコア供試体を切り取り圧縮強度を求めた。

表1 環境条件と試験材齢

環境条件	試験材齢 (日)
10℃気中	3
0℃気中	5, 7, 14, 28
-9℃気中	5, 7, 14, 28
20℃水中	91

表2 練り上がり性状

耐 寒 剤 種 類	空気量 (%)	スランプ (cm)
NF5	5.5	7.0
NF4	5.6	6.0
NF3	6.2	8.5
スラブ(NF5)	5.7	9.0

2.2 使用材料

- (1) セメント：普通ポルトランドセメント（比重3.16）
- (2) 骨材：粗骨材は川砂利（最大寸法40mm、比重2.58、粗粒率7.20）、細骨材は川砂（比重2.56、粗粒率2.70）と陸砂（比重2.61、粗粒率2.70）を容積比率1：1で混合。
- (3) 混和剤：耐寒剤（主成分：ポリグリコールエステル誘導体及び含窒素化合物）

2.3 練り上がり性状

スランプの目標値は 8 ± 2.5 cm、空気量の目標値は $5.5 \pm 1\%$ とした。練り上がり性状を表2に示す。

Consideration on Strength of Concrete Containing Nonfreezing Agents

by Yuichi KUBO, Koichi AYUTA, Hiroshi SAKURAI, Heizaburo IGARI and Takaya MIZUMOTO

2.4 供試体及び養生方法

(1) 封かん供試体

供試体（φ12.5×25cm）は、打込み後、型枠をつけたまま10℃の室内に3日間静置し脱型した。脱型後、ラップフィルムとビニール袋により封かん状態にし、表1に示す所定の環境条件下に静置した。コンクリート温度は供試体中心部に埋設した熱電対により測定し積算温度を算出した。

(2) コア供試体

供試体採取用スラブ（90×180×55cm）を、サロマ湖へ流入する小河川付近（図11参照）で作成した。打込み後、合成繊維製の不織布養生シート（厚さ3mm）で覆い、保温養生を材齢12日まで行った。コア供試体（φ10×20cm）は所定材齢でスラブから切取った。コンクリート温度はスラブ内の上面、下面から1cmと中心の3ヶ所に埋設した熱電対により測定し、積算温度を算出した。

2.5 圧縮強度と積算温度の関係

圧縮強度試験は封かん供試体ではJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従い、コア供試体ではJIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」に従い実施した。積算温度は(1)式により計算した。

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに M : 積算温度 (°C・日)
 T : コンクリート温度 (°C)
 T_0 : 基準温度 (°C)
 Δt : 時間 (日)

本研究では(1)式の基準温度を、通常のコンクリートで用いられる-10℃の他、これ以下についても検討した。これは基準温度を水和が起り得る最低のコンクリート温度とすると、耐寒剤を使用したコンクリートは-10℃以下でも強度増進する¹⁾ためである。

強度増進曲線は、ロジスティック曲線及びゴンペルツ曲線を適用した。両曲線では水和速度が最大になる変曲点の位置が異なっている。ロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線を図1、図2に、曲線式を(2)、(3)にそれぞれ示す。ここで最終到達強度 F は積算温度が無限での値だが、解析では標準養生材齢91日の値を用いた。曲線式中の係数 α 、 β は、 $\log M = X$ 、ロジスティック曲線では $\ln\{F/(f'_c - 1)\} = Y$ 、ゴンペルツ曲線では $\ln\{-\ln(f'_c/F)\} = Y$ と変数変換して、 $Y = \alpha X + \beta$ として最小二乗法から求めた。

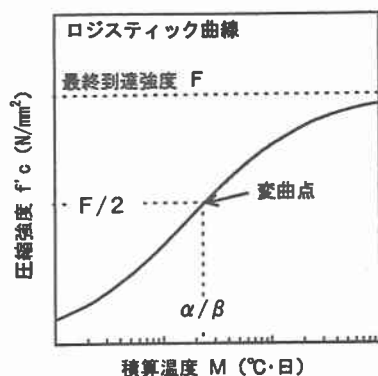


図1 ロジスティック曲線

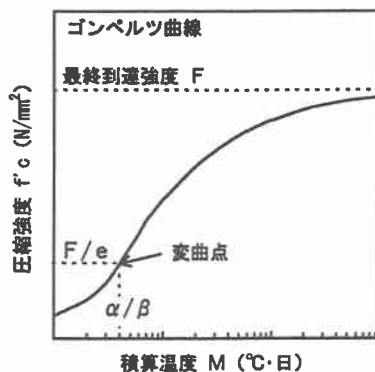


図2 ゴンペルツ曲線

$$f'_c = \frac{F}{1 + \exp(\alpha - \beta \log M)} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$f'_c = F \exp\{-\alpha \exp(-\beta \log M)\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに F : 最終到達強度 (N/mm²)
 M : 積算温度 (°C・日)
 α 、 β : 係数

コア供試体の圧縮強度（以下、実測値とする）と強度増進曲線から求めた圧縮強度（以下、計算値とする）の両者から、誤差の平均値（平均誤差）と誤差の標準偏差（標準誤差）を基準温度別に求めた。

2.6 実験結果及び考察

基準温度を -10°C として、強度増進曲線にロジスティック曲線を適用した場合の耐寒剤使用量別の封かん供試体の圧縮強度と積算温度の関係を図3に、ゴンペルツ曲線を適用した場合を図4にそれぞれ示す。相関係数はロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線ともに $0.86\sim 0.88$ の範囲内であった。

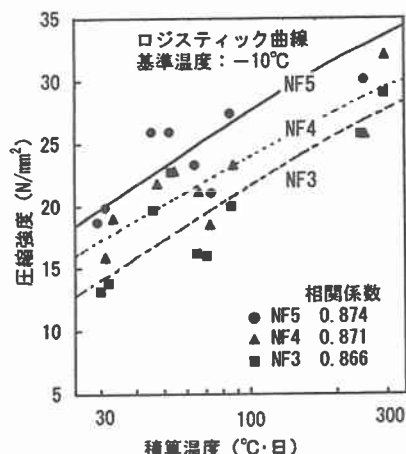


図3 圧縮強度と積算温度の関係
(ロジスティック曲線, 基準温度: -10°C)

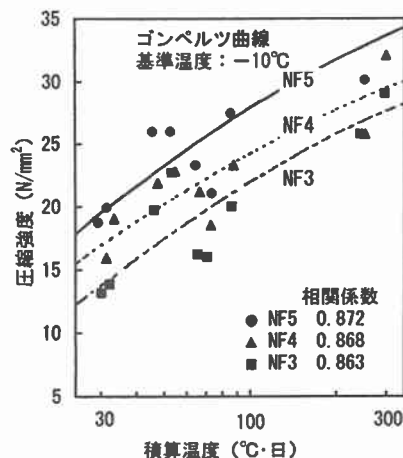


図4 圧縮強度と積算温度の関係
(ゴンペルツ曲線, 基準温度: -10°C)

基準温度が $-10\sim -20^{\circ}\text{C}$ の範囲での、封かん供試体の圧縮強度とロジスティック曲線及びゴンペルツ曲線との相関係数を図5に示す。ロジスティック曲線とゴンペルツ曲線では相関係数にほとんど差はない。NF5、NF4、NF3のいずれにおいても相関係数が 0.9 以上になるのは $-11\sim -15^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。

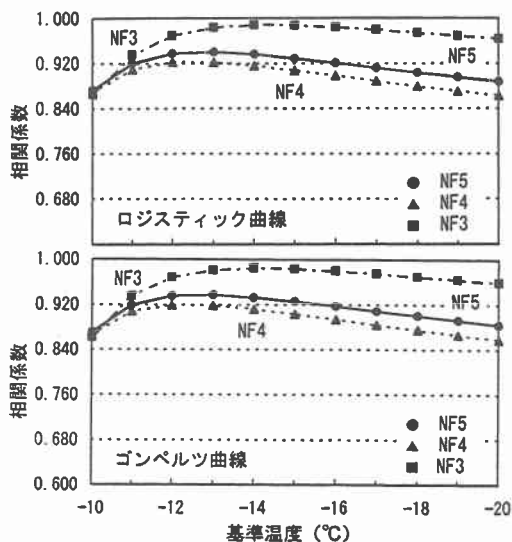


図5 基準温度と相関係数の関係

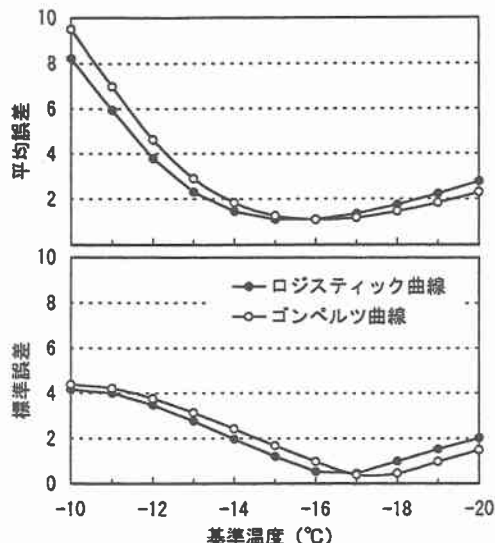


図6 基準温度と平均誤差及び標準誤差の関係

実測値と計算値の平均誤差と標準誤差を図6に示す。平均誤差が最小になる基準温度はロジスティック曲線では -15°C であり、ゴンペルツ曲線では -16°C であった。一方、標準誤差が最小になる基準温度は両曲線とも -17°C であり、同温度で実測値と計算値の差が最も小さい。

以上の結果から、耐寒剤を使用したコンクリートの圧縮強度を積算温度から推定するためには、実測値と計算値の平均誤差や標準誤差が基準温度 -15°C ～ -17°C の範囲で最も小さくなること、相関係数が0.9以上になるのは -11°C ～ -15°C の範囲であることを併せて考慮し、基準温度を -15°C と設定するとよいといえよう。基準温度が -10°C 及び -15°C で強度増進曲線にロジスティック曲線を適用した場合のコア供試体の圧縮強度との関係を図7に、ゴンペルツ曲線を適用した場合を図8にそれぞれ示す。基準温度を -15°C にした場合 -10°C の場合に比べて曲線によくのっている。

既往の研究²⁾のデータも含めて基準温度を -15°C として整理した耐寒剤使用量別の強度増進曲線をロジスティック曲線の場合を図9に、ゴンペルツ曲線の場合を図10に示す。

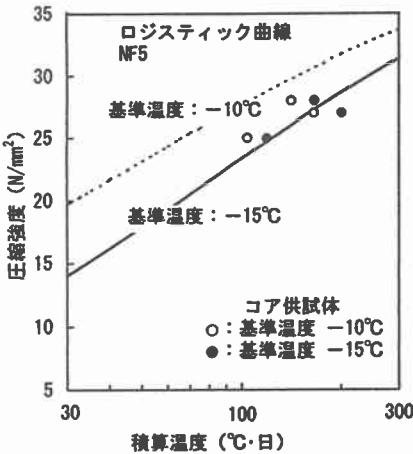


図7 ロジスティック曲線とコア供試体の圧縮強度との関係

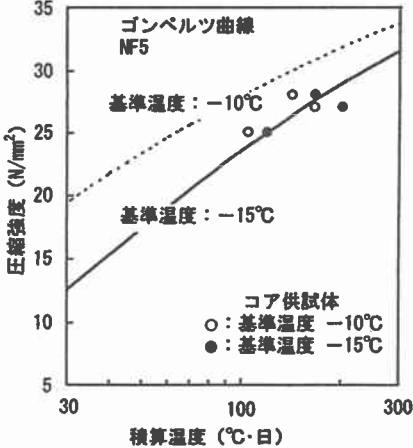


図8 ゴンペルツ曲線とコア供試体の圧縮強度との関係

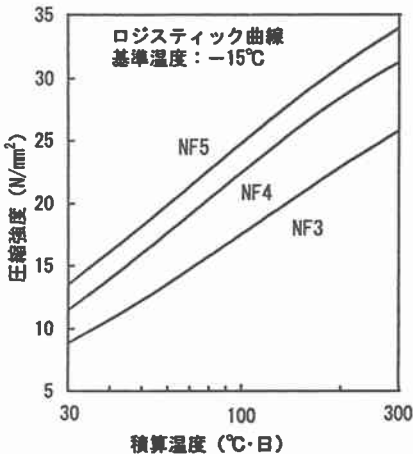


図9 耐寒剤使用量別の強度増進曲線 (ロジスティック曲線)

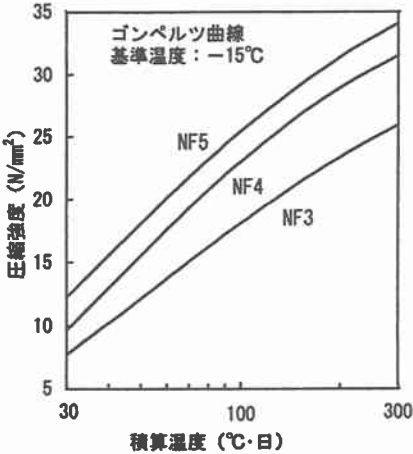


図10 耐寒剤使用量別の強度増進曲線 (ゴンペルツ曲線)

3. 施工から約5年経過した耐寒剤使用コンクリート護岸壁体の調査

3.1 調査概要

平成4年にサロマ湖畔で試験施工された耐寒剤使用コンクリート壁体⁹⁾を調査した。調査現場は図11に示すサロマ湖に流入する小河川の河口部である。壁体は左岸と右岸に施工され写真1のように壁体の上流側が耐寒剤を使用したコンクリート、下流側が耐寒剤を使用していないコンクリート(プレーンコンクリート)である。

調査内容は、①養生終了時からのコンクリートに作用した凍結融解回数の推定 ②耐寒剤使用コンクリートの外観の目視評価 ③シュミットハンマーによる強度推定である。



図11 調査現場

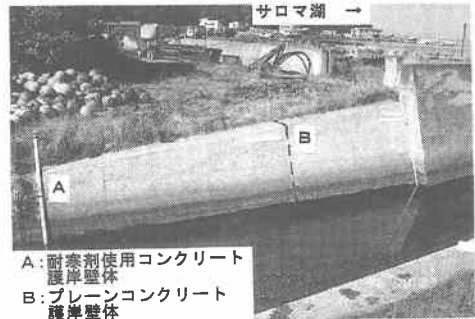


写真1 護岸壁体

3.2 調査方法

(1) 凍結融解回数

養生終了時(平成4年2月10日)から今回の調査時(平成8年10月23日)までの佐呂間における気温⁴⁾から、凍結融解回数を推定した。コンクリートの凍結温度は、海水の作用を受ける場合に一般的に用いられる -2°C を用いた。

(2) 目視評価

耐寒剤使用壁体、プレーンコンクリート壁体それぞれについて劣化の度合いを目視により評価した。

(3) シュミットハンマーによる強度推定

各壁体の一定の高さの3ヶ所にそれぞれ50cm×50cmの枠を取り付け、その枠内をシュミットハンマーで25点ずつ測定し、平均反発硬度Rを求めた。さらに関係式から推定強度を求めた。材齢は4年8ヵ月である。強度の推定は、日本材料学会の「シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定法指針」の推定式を用いた。推定式を下記に示す。

$$\sigma_c = -184 + 13.0 R_0$$
$$R_0 = R + \Delta R$$

ここに σ_c : 推定圧縮強度 (kgf/cm^2)
 R_0 : 基準硬度
 R : 測定硬度
 ΔR : 打撃方向の傾斜による補正值で -10° とした。

3.3 調査結果及び考察

養生終了時から調査時までの推定凍結融解回数は420回であった。なお、期間中の最高気温は 36.8°C であり最低気温は -27.0°C である。

目視による評価では、耐寒剤使用壁体、プレーンコンクリート壁体ともに表面剥離やポップアウト等の劣化現象はほとんど見られず、5冬弱の経過での劣化は認められなかった。

推定した圧縮強度は表3に示すように、耐寒剤使用コンクリート壁体の方がプレーンコンクリート壁体より約 10N/mm^2 大きかった。なお、参考のためコア供試体の材齢3ヵ月強度も併せて示した。コア供試体を切取ったスラブは耐寒剤使用コンクリートスラブは材齢12日までシート養生、プレーンコンクリートスラブは材齢13日まで給熱養生されている。

施工時に行ったNF5の急速凍結融解試験結果（材齢14日まで20℃水中養生後試験開始、水中凍結水中融解）を図12²⁾に示す。耐寒剤使用コンクリート、プレーンコンクリートとも300サイクル終了時の耐久性指数は80程度であり耐凍害性は良好であった。調査結果から、両壁体は養生終了直後から400回以上もの凍結融解作用を受けたにもかかわらず強度が増進し、また表面もほとんど劣化がないことから、耐寒剤使用コンクリートは、プレーンコンクリートと同等の耐凍害性を有しているといえる。

表3 推定圧縮強度及び材齢3ヵ月のコア供試体圧縮強度

耐寒剤使用コンクリート		プレーンコンクリート	
	推定圧縮強度 σ_c		推定圧縮強度 σ_c
右岸	40 N/mm ²	右岸	31 N/mm ²
左岸	40 N/mm ²	左岸	31 N/mm ²

コア供試体	材齢3ヵ月強度	コア供試体	材齢3ヵ月強度
	36 N/mm ²		23 N/mm ²

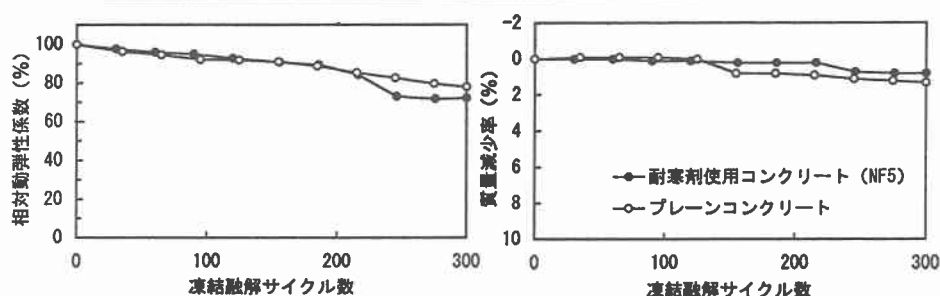


図12 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数及び質量減少率の関係

4. まとめ

耐寒剤（主成分：ポリグリコールエステル誘導体及び含窒素化合物）をセメント100kg当たり5, 4, 3ℓ使用したコンクリートを用いて行った強度増進曲線の適用性と基準温度に関する研究結果、及び施工から4年8ヵ月経過した耐寒剤使用コンクリート護岸壁体（セメント100kg当たり5ℓ使用）の調査結果から以下のことが明らかになった。

- (1) ロジスティック曲線、ゴンペルツ曲線を強度増進曲線として用いた場合、基準温度が-10℃での相関係数は0.86～0.88であり、-11～-15℃で0.9以上となり適用性は良好であった。
- (2) 屋外で打ち込まれたスラブから切り取ったコア供試体の圧縮強度と強度増進曲線との平均誤差や標準誤差、及び相関係数の結果から耐寒剤使用コンクリートの基準温度は-15℃と設定するのがよい。
- (3) 材齢4年8ヵ月経過時の耐寒剤使用コンクリート護岸壁体の表面は、養生終了直後から400回以上の凍結融解作用を受けたにもかかわらず健全であり、強度増進していたことからプレーンコンクリートと同等の耐凍害性を有しているといえる。

参考文献

- 1) 鮎田耕一, 桜井 宏, 水元尚也, 猪狩平三郎, 小笠原育穂: 耐寒剤使用コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係, 第9回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 574～579, 1993. 12
- 2) 鮎田耕一, 桜井 宏, 日下陽一郎: 耐寒剤使用コンクリートの低温域での強度発現特性, セメント・コンクリート論文集, No. 49, pp. 210～215, 1995
- 3) 鮎田耕一, 桜井 宏, 猪狩平三郎, 小笠原育穂, 長田幸樹: 耐寒剤を使用した寒中コンクリートの試験施工, 第8回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 521～526, 1992. 12
- 4) 日本気象協会北海道本部: 北海道の気象