

論文 あと施工アンカーに用いる耐寒剤を配合した無機系接着剤の付着強度と積算温度による強度増進に関する研究

折田 現太*1・阿部 隆英*2・高瀬 裕也*3・兼吉 孝征*4

要旨：近年、あと施工アンカーに用いる無機系接着剤は、長期荷重が作用する部位への適用性から普及への期待も高まっているが、寒冷期における施工では、初期凍害や強度発現の遅れが懸念される。そこで、低温環境下でのあと施工アンカーの施工性や構造性能を確保するため、本論文では無機系接着剤の練り混ぜ水内に含有させる適切な防凍成分の濃度を、凝固点の温度確認試験やあと施工アンカーの付着強度試験の結果から決定した。更に、実際の施工環境温度により構造性能を担保できるように、積算温度により概ね圧縮強度を推定する算定式を提案した。

キーワード：耐震補強、あと施工アンカー、無機系接着剤、耐寒剤、積算温度、圧縮強度、付着強度

1. はじめに

建築分野においてあと施工アンカーは、看板や設備機器などの工作物の取り付けや、短期荷重のみが作用する耐震補強部材の取り付けにおいて使用されている。ここで、あと施工アンカーは建築基準法第37条の示す「指定建築材料」に含まれていないため、原則として建築物の基礎や主要構造部等に使用することはできない。しかしながら、あと施工アンカーは施工が容易であるため、構造部材への適用が期待され、近年では長期荷重を受ける部位への適用に向けて研究¹⁾が行われている。

2010年の各種合成構造設計指針²⁾の改定では、一部適用について制限があるものの、あと施工アンカーに適用する接着剤として、無機系接着剤について記載された。そのため、前述の長期荷重が作用する部位への適用性から、普及への期待が高まっている。更に、長期荷重の部位への適応性以外にも、無機系接着剤は有機系接着剤と異なり、揮発性有機化合物(VOC)が含まれていないため、施工時の臭気が少ないことや、耐火性を有すること等の長所が挙げられる。

これらの多くの利点を有する無機系接着剤は、セメント系の材料であるため、寒冷期の施工では強度発現の遅れによる工期の遅延や、初期凍害による不具合が懸念される。初期凍害を防ぐ手法として、亜硝酸塩系等の耐寒剤に関する研究が行われ、低温環境下において高い強度発現が保たれていることが確認されている³⁾。しかしながら、この耐寒剤をあと施工アンカーに用いる無機系接着剤に適用した研究事例は著者らが調べた限り無い。そこで、著者らは無機系接着剤においても耐寒剤を用いることで、低温環境下での初期凍害を防ぎ、強度増進させ

ることが可能であると考えられる。

無機系接着剤に耐寒剤を用いた場合、耐寒剤の濃度を高くすると、凝固点は低くなるため、寒冷期における適用範囲が広まるが、過度な添加は圧縮強度へ影響を与えることから、濃度によってはあと施工アンカーの付着強度を確保できない可能性がある。そのため、両者のバランスに配慮し、適切な練り混ぜ水内の耐寒剤の濃度を設定する必要がある。また、実際の施工時には、あと施工アンカーを挿入した後の工程に進むには、養生温度と経過時間、つまり積算温度から圧縮強度を推定し、更にその圧縮強度から、あと施工アンカーの付着強度を予測することが重要である。

そこで、著者らは最終的に氷点下を含む低温環境下で、あと施工アンカーに無機系接着剤を適用することを目的とした研究を開始した。本研究では、まず無機系接着剤の練り混ぜ水に亜硝酸塩系の耐寒剤を配合した基礎的なデータを採取することから始めるため、本論文では耐寒剤の濃度の違いによる無機系接着剤の凝固点を確認すると共に、あと施工アンカーの付着強度試験から耐寒剤の適切な濃度を決定し、次いで決定した耐寒剤の濃度を用いた無機系接着剤の積算温度から圧縮強度を推定できる算定式を提案する。

2. 無機系接着剤の概要

本試験で使用する無機系接着剤の区分は、注入方式によるカートリッジ型である。主剤はセメント成分が超速硬セメントであり、乾燥珪砂と混和剤を混合した S/C = 1.0 が混合されたプレミックスの粉体である。また、耐寒剤は凍結防止に効果的な亜硝酸リチウム(LiNO₂)を主成

*1 飛島建設(株) 技術研究所 研究開発 G (正会員)

*2 飛島建設(株) 建築事業本部 耐震ソリューション部 (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 准教授 博士(工学)(正会員)

*4 住友大阪セメント(株) 建材事業部 (非会員)

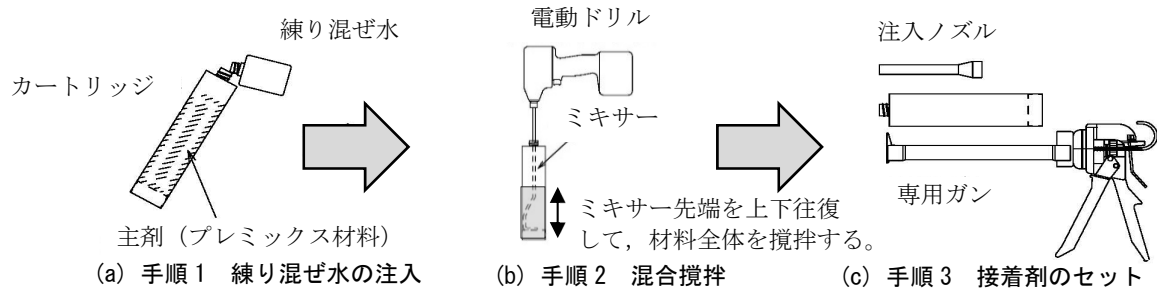


図-1 無機系接着剤の製作手順

分とした成分濃度 45.5%の水溶液を使用した。図-1 に無機系接着剤の製作手順を示す。無機系接着剤の製作は、まず同図(a)に示すカートリッジ内に前述の粉体が収納されており、そこに耐寒剤が配合された練り混ぜ水を注入する。続いて同図(b)に示すように、混合攪拌は先端に攪拌用のミキサーが接続された電動ドリルを用いて行う。攪拌時間は、練り混ぜ水を注入後 30 秒とした。最後に、同図(c)のように専用ガンにカートリッジをセットして無機系接着剤を打設した。

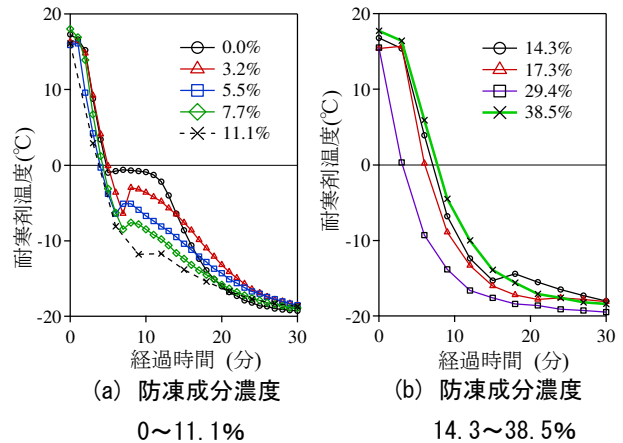


図-2 凝固点確認試験結果

3. 凝固点確認試験及び付着強度試験

本章では無機系接着剤の凝固点を検証するため、耐寒剤の水溶液に含有する有効成分の質量比による濃度（以下、防凍成分濃度と呼称する。）をパラメータとした凝固点確認試験を実施し、その後、耐寒剤を配合した無機系接着剤を用いたあと施工アンカーの付着強度試験を行った。これらの結果から防凍成分濃度の濃度を決定する。

3.1 耐寒剤凝固点確認試験

(1) 試験概要

パラメータは、防凍成分濃度を、0%、3.2%、5.5%、7.7%、11.1%、14.3%、17.3%、29.4%、38.5%の計 9 条件とした。供試体は直径 50mm、高さ 100mm の供試体用円柱状型枠に無機系接着剤を打設し、中心部に温度計を配置した。その後、-20°Cの恒温恒湿機内に供試体を静置し、無機系接着剤の温度を測定した。

(2) 試験結果

図-2 に凝固点確認試験結果を示す。供試体の温度は、恒温恒湿機内の温度の影響を受けて低下し、その後、凝固熱により温度が上昇して一定の値を保持すると、それ以降は、恒温恒湿機内の温度である-20°Cに向けて推移する。本試験では、この凝固熱により温度が上昇した値を凝固点とした。これらより得られた、防凍成分濃度と凝固点の関係を図-3 に示す。防凍成分濃度が 17.3%以下の範囲において、濃度が 1%増加すると凝固点が約 1.0°C 低くなる比例関係にあり、凝固点と防凍成分濃度は高い相関関係を得る結果となった。また、防凍成分濃度 29.4%、38.5%の供試体は凝固点を確認することができなかった。

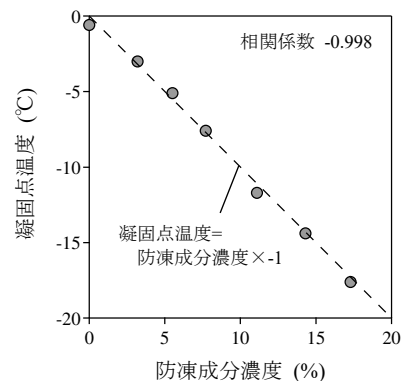


図-3 防凍成分濃度と凝固点の関係

3.2 付着強度試験

(1) 試験概要

付着強度試験のパラメータを表-1 に示す。パラメータは、無機系接着剤に使用する練り混ぜ水の防凍成分濃度とした。また、本試験では、無機系接着剤の圧縮強度（以下 σ_B と表記する）も併せて確認した。

付着強度試験の試験体は、呼び強度 15N/mm²、スランブ 18cm、粗骨材の最大寸法 20mm の普通ポルトランドセメントを使用した母材コンクリートに穿孔径 16mm を湿式コアドリルで穿孔した。次に、表-1 に示す無機系接着剤を穿孔内に注入し、先端形状が平先寸切りの全ねじボルトを穿孔内に垂直に挿入した。使用した全ねじボルト（以下、アンカー筋と呼称する。）は、径 $d=12$ mm、

長さL=170mm、鋼種SNB7であり、定着長さは5dとした。アンカー筋を定着した後、-5℃の恒温恒湿機内に6日間養生を行った後、恒温槽付き万能試験機により引張試験を行った。付着強度試験の試験体および引張試験方法を図-4に示す。測定は荷重および万能試験機の稼働距離とし、恒温槽内の温度、つまり試験温度は-5℃、引張速度は1.0N/mm²/sの条件で载荷した。また、圧縮試験の供試体は、直径50mm、高さ100mmの供試体用円柱状型枠で作成されたものである。

(2) 試験結果

防凍成分濃度における σ_B と材齢の関係を図-5に示す。既往の研究⁴⁾では、亜硝酸塩系の防凍成分濃度を高くするほど初期の強度発現が早い、長期強度は低下する報告がされている。しかし、本試験の条件では、防凍成分濃度が14.3%までは濃度が高くなるに連れ圧縮強度が上昇する傾向にあり、それ以降は防凍成分濃度が高いと圧縮強度が低下する傾向であった。

続いて、-5℃の環境で材齢6日とした σ_B 及び付着強度と防凍成分濃度の関係を図-6に示す。圧縮強度は、防凍成分濃度が14.3%まで増加する傾向であったが、付着強度は防凍成分濃度が11.1%の時に最も高く、それより高い濃度では減少する傾向を呈した。また、あと施工アンカーの付着強度²⁾は、接着剤区分によって異なるが、ここでは安全側の評価となる様に、次式に示す最も高い接着剤区分の設計式を用いて検証する。

$$\tau_a = 10 \sqrt{e\sigma_B/21} \quad (1)$$

ここに $e\sigma_B$ は母材コンクリート圧縮強度、 τ_a はアンカー筋の平均付着強度である。

$e\sigma_B$ は21.9N/mm²であることが確認されているため、式(1)より τ_a は10.2N/mm²と算定される。図-6を改めて見ると、防凍成分濃度が7.7%~17.3%の試験体の付着強度は、 τ_a を上回る結果を得ていることが分かる。

付着強度試験の結果及び破壊形式を表-2に示す。破壊形式は、防凍成分濃度が0%および38.5%の時、アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊と無機系接着剤の破壊が混在したものとなった。その他の濃度では、アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊となった。

上記2つの付着試験の破壊形式を写真-1に示す。防凍成分濃度が0%で接着剤部分が破壊した原因は、凝固点-5℃に達していないため初期凍害を起し、接着剤の強度が出なかったためと考えられる。一方、防凍成分濃度38.5%試験体の接着剤破壊の原因は、既往の研究⁴⁾で示されている様に、耐寒剤の添加量が多いため、多量の亜硝酸根化合物が生成されたことで、従来の硫酸根のエトリンガイトと類似の針状組織が形成されたことが接着剤の強度発現に悪影響を及ぼしたと考えられる。

表-1 付着強度試験のパラメータ

防凍成分濃度 (%)	セメント種別	細骨材	養生温度 (°C)	試験材齢	
				圧縮試験 (日)	付着試験 (日)
0	超速硬セメント	珪砂	-5	6, 28	6
7.7				6, 27	
11.1				6, 27	
14.3				1, 2, 3, 7, 28	
17.3				6, 19	
29.4				1, 2, 3, 6, 27	
38.5				6, 26	

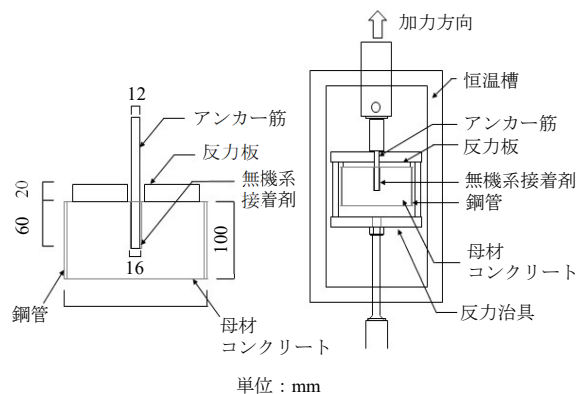


図-4 付着強度試験の試験体および引張試験方法

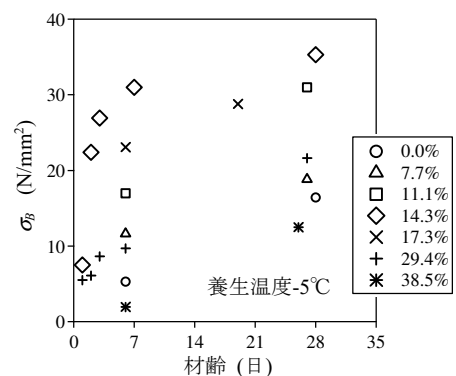


図-5 防凍成分濃度における σ_B と材齢の関係

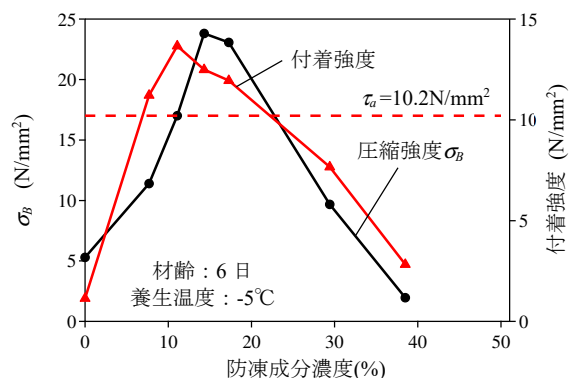


図-6 σ_B 及び付着強度と防凍成分濃度の関係

表-2 付着強度試験の結果及び破壊形式

LiNO ₂ 濃度 (%)	養生温度 (°C)	鉄筋有効径 (cm)	定着長 (cm)	接着剤圧縮試験 (材齢: 6day)		付着試験 (材齢: 6day)	
				圧縮強度 (N/mm ²)	付着強度 (N/mm ²)	最大変位 (mm)	破壊形式
0	-5	12.0	60.0 (5d)	5.27	1.15	0.39	アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊と無機系接着剤の破壊の混合破壊
7.7				11.22	1.37	アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊	
11.1				13.67	1.71	アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊	
14.3				12.50	1.74	アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊	
17.3				11.95	1.59	アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊	
29.4				7.67	1.00	アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊	
38.5				2.83	0.57	アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊と無機系接着剤の破壊の混合破壊	
				9.68			



(a) アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊と無機系接着剤の破壊が混在 (b) アンカー筋と無機系接着剤間の付着破壊

写真-1 付着試験の破壊形式

3.3 防凍成分濃度の決定

前節で示した結果を踏まえ、本節では実際の施工に適用することを考慮して防凍成分濃度を決定することとした。

日本の最も北に位置する政令指定都市の札幌市における2010年～2019年の最低気温は-14.3°Cである⁹⁾ことを考えると、凝固点はそれ以下が望ましいため、凝固点確認試験の結果から防凍成分濃度は14.3%以上となる。また、3.2節(2)で述べた通り、設計で用いる付着強度を満足することの出来る防凍成分濃度は、7.7%～17.3%である。これらの結果から、防凍成分濃度は14.3%および17.3%が妥当であると考えられる。そこで、この2つのパラメータの σ_B 並びに付着強度の結果を比較すると、防凍成分14.3%の強度発現が17.3%より良好なため、本研究では防凍成分を14.3%に決定する。

4. 圧縮強度試験

本章では、前章で防凍成分濃度を14.3%とした練り混ぜ水を用い、 σ_B を積算温度から推定する式を提案する。

4.1 試験概要

表-3 圧縮強度試験のパラメータ

耐寒剤濃度 (%)	セメント種別	細骨材	養生温度 (°C)	圧縮試験材齢 (日)
14.3	超速硬セメント	珪砂	20	28, 91
			5	1, 2, 3, 7, 28, 56, 91
			0	1, 2, 3, 7, 28, 56, 91
			-5	1, 2, 3, 7, 28, 56

圧縮強度試験のパラメータは、養生温度と材齢とした。表-3に圧縮強度試験のパラメータを示す。養生温度は、-5°C, 0°C, 5°C, 20°Cとし、それぞれの供試体は所定の材齢まで恒温恒湿機内で静置した。また、供試体数は各パラメータ3本としたが、養生温度5°C、材齢3日の供試体については、2本とした。

圧縮強度試験の供試体は、付着強度試験時の圧縮試験と同じ供試体用円柱状型枠に無機系接着剤を打設し、作成した。その後、各養生温度で所定の期間まで静置した。また、本試験で使用した無機系接着剤の強度発現の温度依存性を検証するために、温度計測用の供試体の重心に熱電対を設置し、各養生条件の無機系接着剤の温度履歴を採取した。

4.2 試験結果

σ_B と材齢関係を図-7に示す。本試験結果から、 σ_B と材齢の関係を対数関数で近似すると、相関係数が0.86となる。耐寒剤を使用しないセメント系材料における σ_B と材齢の関係は対数関数で与えられる⁹⁾ため、本試験においても、同じ傾向を呈したと言える。ここで、養生温度毎に観察すると、養生温度-5°Cの σ_B は、材齢1日で7～8N/mm²程度であるが、材齢2日の σ_B は21～24N/mm²程度となり、材齢1日以降、急激に σ_B が大きくなる傾向がある。これに対し、養生温度5°Cの σ_B は、材齢1日で25～28N/mm²程度発現しており、材齢が進むに連れて微増していくことが窺える。

注水してから2日後の σ_B は、すべての養生温度において初期凍害に耐える σ_B とされる5 N/mm²を超える結果となった。このことから、凍害防止に対し耐寒剤は有効であると判断される。材齢28日強度に関しては、各養生温度条件で、20℃の現場気中養生とほぼ同等の圧縮強度となり、寒冷期でも標準期と同等の強度発現が見込める結果となった。

5. 積算温度による σ_B の推定式の提案

5.1 推定式の提案

コンクリートの強度発現の温度依存性を表すための積算温度の式は、次式に示すように、氷点下を含む式として谷口ら⁷⁾が提案している。

$$M_C = \Sigma(T_C + 10)\Delta t + C \quad (T_C \geq 0) \quad (2)$$

$$M_C = \Sigma 10 \times \exp(-0.60 \times (-T_C)^{0.74})\Delta t \quad (T_C < 0) \quad (3)$$

ここに、 M_C は積算温度(°D・D)、 T_C は Δt のコンクリートの平均温度(°C)、 Δt は時間間隔(日)、 C は初期温度補正項である。

積算温度式における基準温度は、一般的に-10℃と規定されている。しかしながら、耐寒剤を使用したコンクリートは-10℃より基準温度が低くなることを指摘する研究が多く見受けられる⁸⁾。このことから本論文では、基準温度-10℃に防凍成分濃度14.3%の凝固点-14.4℃を考慮して-25.0℃を基準温度と設定し、式(2)を本試験の範囲である-5℃ $\leq T_C \leq 20$ ℃の範囲で適用することを試みる。

初期温度補正項 C については、文献6)に初期の水和反応による材料温度の上昇を考慮して、打込み後およそ24時間の平均材料温度を、セメント種別によって異なる関数として記載されている。しかしながら、あと施工アンカーの穿孔内に打ち込む無機系接着剤の容量は少なく、あと施工アンカー打設時の無機系接着剤の温度は、短時間で母材コンクリート温度と同程度になることが考えられるため、初期の水和反応に伴う材料温度の上昇による強度発現への影響は小さいと思われる。上記の理由より、 C は0とした。

以上を整理すると、積算温度 M_C は次式により算定される。

$$M_C = \Sigma(T_C + 25)\Delta t \quad (-5 \leq T_C \leq 20) \quad (4)$$

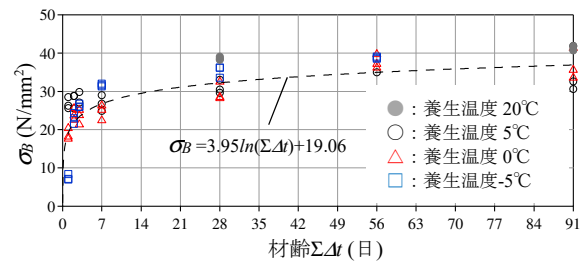
寒中コンクリート施工指針・同解説(2010年)⁹⁾では、コンクリートの強度増進の過程を、積算温度による対数関数で表現しており、例えばロジスティック曲線や、ゴンペルツ曲線が用いられている。ゴンペルツ曲線は初期の傾きが大きい特徴があり、超速硬系セメントを用いた本論文の試験結果を反映し易いと考えられる。そのため、本論文ではゴンペルツ曲線を用いて強度増進過程を推定

する。以上より、 M_C から推定する圧縮強度 F は、ゴンペルツ曲線をベースにした次式で算定される。

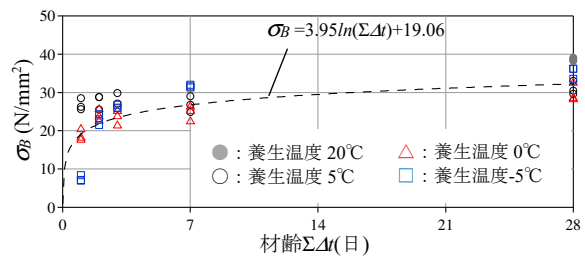
$$F = F_{inf} \cdot e^{a \cdot M_C^b} \quad (5)$$

ここに、 F_{inf} は20℃91日強度(41.1N/mm²)、 a 及び b は実験定数である。

引き続き a 及び b を試験結果から求める。 M_C^b は式(5)より次式となる。



(a) 材齢0~91日



(b) 材齢0~28日

図-7 σ_B と材齢の関係

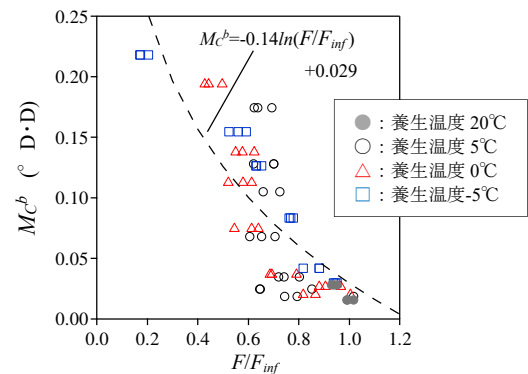


図-8 $M_C^b - F/F_{inf}$ 関係

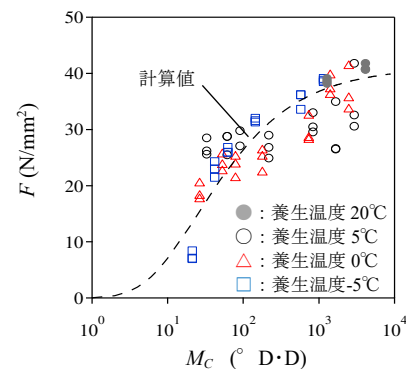


図-9 $F - M_C$ 関係の試験値と計算値の比較

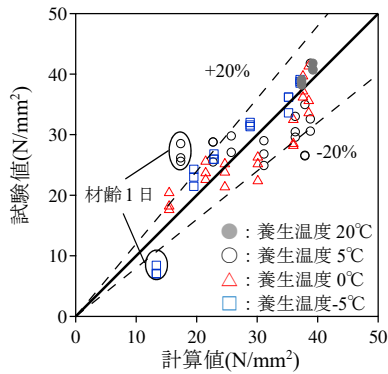


図-10 圧縮強度の試験値と計算値の比較

$$M_C^b = 1/a \cdot \ln(F/F_{inf}) \quad (6)$$

図-8に $M_C^b - F/F_{inf}$ 関係を示し、対数による近似曲線を併記する。なお、圧縮強度の試験値 σ_B と計算値 F を比較するため、以後の図には σ_B と F を併記する。同図の近似曲線から、式(6)の $1/a$ に該当する $\ln(F/F_{inf})$ の係数は -0.14 であるため、ここでは $a = -7$ と置く。また、 b は σ_B と材齢関係がフィッティングするように -0.6 とした。

5.2 計算値と試験値の比較

前節で提案した推定式から、 $F - M_C$ 関係の試験値と計算値を比較する。図-9に $F - M_C$ 関係の試験値と計算値の比較を示す。同図に示すように、本試験で行った養生温度 $-5^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ の範囲において、試験値と計算値の相関係数は 0.67 であり、ばらつきが若干大きいものの、 M_C により概ね F が推定できると思われる。

続いて、 F の試験値と計算値の比較を図-10に示す。同図より、養生温度 -5°C 及び 5°C とした材齢 1 日の試験値は、他の試験体の計算値と比較すると大き目に乖離している。これは、4.2 節で述べた通り、養生温度 -5°C と 5°C では、材齢 1 日の圧縮強度の差が非常に大きいことにあると言える。そのため、今後、若材令の圧縮強度を評価するための推定式を構築することが課題として残っている。しかしながら、材齢 2 日以降の計算値は、いずれの養生温度においても概ね試験値を $\pm 20\%$ の範囲で評価できている。

6. まとめ

著者らは最終的に氷点下を含む低温環境下で、あと施工アンカーに無機系接着剤を適用することを目的とし、無機系接着剤の練り混ぜ水に、亜硝酸リチウムを主成分とした有効成分 45.5% の水溶液を混合した耐寒剤を用いた無機系接着剤の基礎データを採取し、検証した。本論文では無機系接着剤の凝固点やあと施工アンカーの付着強度試験から防凍成分濃度を決定し、次いで決定した防凍成分濃度を用いた無機系接着剤の積算温度から圧縮強度 σ_B を推定できる算定式を提案した。以下に本論文で得

られた知見を示す。

- 1) 防凍成分濃度が 17.3% 以下の練り混ぜ水を用いた無機系接着剤において、防凍成分濃度が 1% 増加すると無機系接着剤凝固点が約 1.0°C 低くなる比例関係にあり、凝固点と防凍成分の濃度は高い相関関係を得た。また、防凍成分濃度 29.4% 及び 38.5% の供試体は凝固点を確認することができなかった。
- 2) 養生温度 -5°C 、材齢 6 日としたアンカー筋の付着強度試験において、防凍成分濃度を $7.7 \sim 17.3\%$ とした試験体の付着強度は、設計に用いる平均付着応力度 τ_a を上回る結果を得た。また、耐寒剤の濃度を 0% とした試験体は、初期凍害の影響を受けた。
- 3) 上記 1) 及び 2) の結果と、札幌市における 2010 年～2019 年の最低気温から、耐寒剤の濃度は 14.3% が妥当であると言える。
- 4) 防凍成分濃度を 14.3% とした場合、積算温度 M_C により圧縮強度 F が概ね推定できる算定式を提案した。しかしながら、若材令の圧縮強度を評価することが困難であるため、これに関しては、今後の課題とする。

参考文献

- 1) 濱崎仁ほか：接着系あと施工アンカーの長期特性の評価に関する実験 その 1 引張りクリープ特性の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.691-692，2014.9
- 2) 日本建築学会：2010 年改定版 各種合成構造設計指針・同解説
- 3) 浜幸雄，三森敏司，鎌田英治：防凍性混和剤を用いたコンクリートの強度増進性状，コンクリート工学論文集，Vol.8，No.1，pp.161-170，1997.1
- 4) 岩澤実和，井上真澄，崔希燮，須藤裕司：亜硝酸塩系硬化促進剤と各種減水剤を用いたモルタルのフレッシュ性状および強度発現に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.243-248，2018
- 5) 気象庁過去の気象データ検索画面：<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture00>（閲覧日：2020 年 1 月 8 日）
- 6) 日本建築学会：2010 年改定版 寒中コンクリート指針・同解説
- 7) 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. 640，995-1003，2009.6
- 8) 鮎田耕一，桜井宏，小川原育穂：耐寒剤を使用したコンクリートの強度発現性状，セメント・コンクリート論文集，Vol.49，pp.476-482，1994