

耐寒促進剤を調合した無機系接着剤の付着強度に関する研究

Study on Bond Strength of Cement-Based Adhesive Mixed with Frost-Resistant Accelerator

折田 現太^{*1}
Genta Orita

阿部 隆英^{*2}
Takahide Abe

高瀬 裕也^{*3}
Yuya Takase

川上 明大^{*4}
Akihiro Kawakami

【要旨】

あと施工アンカーに適用する接着剤として、長期持続荷重に対する耐性の高さから、無機系接着剤の普及が期待されているが、無機系接着剤はセメント系材料であるため、寒中施工では初期凍害等の不具合が懸念される。そこで筆者らは、氷点下を含む寒中施工（目標：-10℃～4℃）に無機系接着剤を適用させるため、適切な耐寒促進剤の濃度を圧縮強度および付着強度の実験結果から選定した。実験結果より、目標とする環境下で施工が可能かつ、良好な圧縮強度・付着強度となった練り混ぜ水に含まれる防凍効果のある成分濃度は11.1%～17.3%であった。この結果を基に、11.1%～17.3%の中間値である濃度14.3%の練り混ぜ水で作製した無機系接着剤を用いて、北海道室蘭市内の寒冷期に実施工を想定した付着実験を実施した。その結果、氷点下の寒中施工でも良好な付着強度を発揮することを確認した。

【キーワード】 あと施工アンカー 耐寒促進剤 寒中施工 無機系接着剤 付着強度

1. はじめに

2010年の各種合成構造設計指針¹⁾の改定では、一部適用について制限があるものの、各種アンカーボルトの設計に、無機系接着剤に関する記述が追加された。また、有機系接着剤と比べてクリープ等の長期持続荷重に対する耐性が高く²⁾、長期荷重が作用する部位への普及が期待されている。一方、無機系接着剤はセメント系の材料であるため、寒中施工では強度発現の遅れによる工期の長期化や、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、寒中コンクリートの分野では、様々な耐寒促進剤に関する研究³⁾が行われているが、この耐寒促進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少ない。

無機系接着剤に耐寒促進剤を用いた場合、耐寒促進剤の濃度を高くすると、凝固点は低くなるため、寒中施工における適用範囲が広まると考えられる。しかしながら、過度な添加は無機系接着剤の強度低下が懸念されることから、無機系接着剤に含まれる耐寒促進剤の濃度によ

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。これらより、無機系接着剤の練り混ぜ水に含まれる防凍効果を有する成分の濃度（以下、防凍成分濃度と呼称する）と無機系接着剤の強度発現のバランスに配慮し、適切な防凍成分濃度を設定する必要がある。

そこで、著者らは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。本報では、防凍成分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、圧縮強度および付着強度への影響を確認することで、氷点下を含む寒中施工（目標：-10℃～4℃）に適用できる防凍成分濃度を選定した。また、選定した防凍成分濃度を用いて行った、北海道室蘭市内の寒中施工時期における実施工を想定した付着実験についても併せて報告する。

2. 無機系接着剤の防凍性状特性の確認

2.1 無機系接着材の構成および製作方法

本試験で使用する無機系接着剤の区分は、注入方式に



(a) 手順1 練り混ぜ水の注入



(b) 手順2 混合攪拌



(c) 手順3 接着剤の打込み

写真-1 無機系接着剤の製作手順

1.技術研究所 研究開発 G 第三研究室 2.建築事業本部 コンシェルジュゼネラルオフィス 耐震技術 G
3.室蘭工業大学 4.住友大阪セメント株式会社

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 のプレミックス粉体である。また、練り混ぜ水に混合する耐寒促進剤は、防凍効果のある亜硝酸リチウム (LiNO₂) を主成分とした成分濃度 45.5% の水溶液を使用した。

写真-1 に無機系接着剤の作製手順を示す。無機系接着剤は、主剤と耐寒促進剤が配合された練り混ぜ水を、攪拌用の治具が取り付けられた電動ドリル用いて混合攪拌して製作する。攪拌時間は、練り混ぜ水を注入後 30 秒とした。最後に、作製した無機系接着剤を専用ガンで試験体に打込んだ。

2.2 無機系接着剤の凝固点確認

(1) 凝固点確認実験の概要

無機系接着剤の凝固点を検証するため、防凍成分濃度 c は 0%, 3.2%, 5.5%, 7.7%, 11.1%, 14.3%, 17.3%, 29.4%, 38.5% の計 9 水準とし、凝固点確認実験を行った。供試体は直径 50mm、高さ 100mm の供試体用円柱状型枠に写真-1 の手順で作製した無機系接着剤を打込み、中心部に温度計を設置した。その後、-20°C の恒温槽内に供試体を静置し、供試体の中心温度を測定した。

純溶媒の冷却曲線は、凝固が始まって温度が一定になるはずだが、凝固点を過ぎてても一定温度にならず、温度が低下していく。この現象は過冷却と呼ばれ、過冷却後は凝固点まで温度が上昇して温度が一定になる。この温度が上昇する現象は、凝固熱が発生するためである⁴⁾。本実験の使用材料である無機系接着剤は、複合材料であるが、純溶媒と同様に凝固熱によって温度が上昇した後、温度の降下が見られた。したがって、本実験では凝固熱による温度上昇が終了する値を凝固点とする。

(2) 凝固点確認実験の結果

供試体の温度は、図-1 に示すように、材料温度が低下し、その後、凝固熱による温度上昇がみれる。これらより得られた、無機系接着剤の凝固点と防凍成分濃度の関係を図-2 に示す。防凍成分濃度が 17.3% 以下の範囲において、濃度が 1.0% 増加すると凝固点が約 1.0°C 低くなる負の比例関係にあり、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、29.4%、38.5% の供試体は凝固熱による温度上昇が確認できなかったため、凝固点は -20°C 以下であると推察される。

3. 無機系接着剤の強度への影響

3.1 無機系接着剤の圧縮強度と防凍成分濃度の関係

(1) 圧縮強度試験の概要

圧縮強度試験の実験条件を表-1 に示す。圧縮強度 σ_B と防凍成分濃度 c の関係を検討するため、防凍成分濃度

c は 0%, 7.7%, 11.1%, 14.3%, 17.3%, 29.4%, 38.5% の 7 水準とした。また、圧縮強度用の供試体は、直径 50mm、高さ 100mm の供試体用円柱状型枠に各防凍成分濃度の無機系接着剤を打込み作製し、その後、表-1 に示す所定の試験材齢になるまで -5°C の恒温槽内で養生を行った。

(2) 圧縮強度試験の結果

各防凍成分濃度で作製した無機系接着剤の圧縮強度 σ_B と材齢の関係を図-3 に示す。防凍成分濃度の違いによって強度発現は異なるが、氷点下の養生条件下において

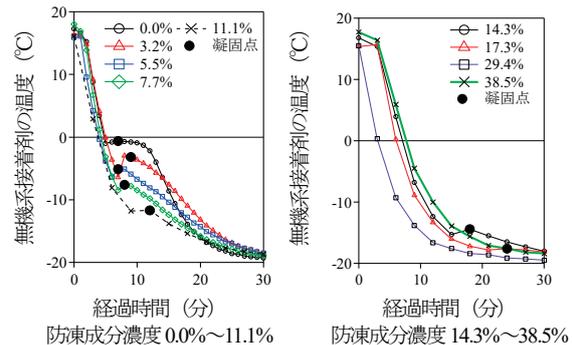


図-1 凝固点確認実験結果

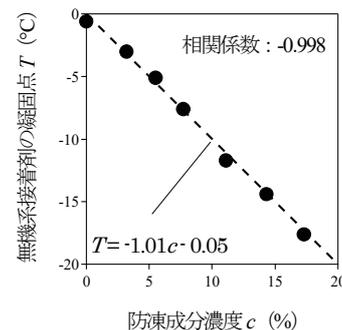


図-2 防凍成分濃度と凝固点の関係

表-1 圧縮強度試験の実験条件

防凍成分濃度 (%)	0	7.7	11.1	14.3	17.3	29.4	38.5
試験材齢 (日)	6, 28	6, 27	6, 27	7, 20	6, 19	1,2,3, 6,27	6, 26
養生温度 (°C)	-5						

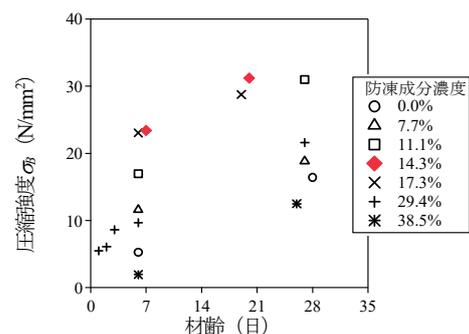


図-3 無機系接着剤の圧縮強度と材齢の関係

も、全ての実験条件で強度増進が見られた。

そこで、材齢 6 日における各防凍成分濃度の圧縮強度を比較したものを図-4 に示す。なお、防凍成分濃度 14.3%については材齢 7 日の値を参考として示した。本実験の条件では、ある一定の防凍成分濃度まで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。

3.2 無機系接着剤の付着強度と防凍成分濃度の関係

(1) 付着実験概要

付着実験の実験条件を表-2 に示す。実験水準は 3.1(1) の圧縮強度試験と同様に防凍成分濃度を 7 水準とし、材齢 6 日で付着実験を実施した。

付着実験に用いた試験体を図-5 に示す。あと施工アンカーの穿孔は湿式コアドリルで行い、穿孔径は 16mm とした。次に、5°C の恒温槽で保管してある無機系接着剤の材料を用いて、20°C 環境下で作製した防凍成分濃度の異なる無機系接着剤を穿孔内に打込み、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。なお、使用した全ねじボルト（以下、アンカー筋と呼称する）は、径 $da=12\text{mm}$ 、長さ $L=170\text{mm}$ 、鋼種 SNB7 であり、定着長さは $5da$ とした。

アンカー筋定着後、-5°C の恒温槽内に 6 日間養生を行った。また、実験方法は写真-2 に示す万能試験機でアンカー筋を引張った。

(2) 付着実験結果

材齢 6 日における付着強度 τ_{max} と防凍成分濃度 c の関係について観察する。図-6 に図-4 で示した圧縮強度を併せた、付着強度および圧縮強度と防凍成分濃度の関係を示す。

τ_{max} は防凍成分濃度が 11.1% の時が最も高く、それより高い濃度では減少する傾向を呈した。また、本実験で得られた結果を、付着強度を算定するための基本平均付着強度 τ_a を用いて検証する。なお、文献 1) では無機系接着剤の注入方式に関する基本平均付着強度の設計式が定められていないため、ここでは安全側の判断となるように、次式に示す最も高い接着剤区分である有機系接着剤のカプセル方式の算定式を採用した。

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

ここに、 τ_a はアンカー筋の基本平均付着強度、 $e\sigma_B$ は母材コンクリートの圧縮強度であり、ここでは付着実験の開始時、試験期間中、終了時の圧縮強度の平均値 21.9N/mm^2 とする。

式(1)より τ_a は 10.2N/mm^2 と算定される。図-6 を改めて見ると、防凍成分濃度 c が 7.7%~17.3% である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。

3.3 目標性能を満足する防凍成分濃度の範囲

τ_a を満足することの出来る防凍成分濃度は、7.7%~17.3% であった。しかしながら、-10°C 環境下での施工を可能とさせるためには、凝固点確認実験の結果から防凍成分濃度は 11.1% 以上となっており、両者の結果から判断をすると、防凍成分濃度 c は 11.1%~17.3% が妥当であると考えられる。

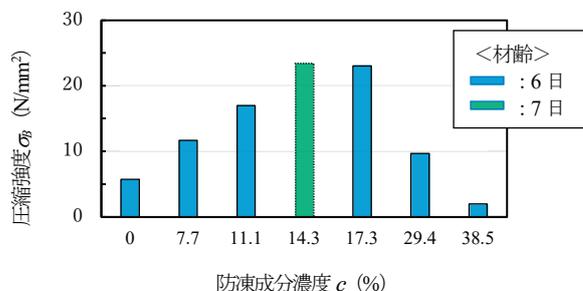


図-4 各防凍成分濃度の圧縮試験結果

表-2 付着実験の実験条件

項目	実験条件
防凍成分濃度 c	0%, 7.7%, 11.1%, 14.3%, 17.3%, 29.4%, 38.5% の 7 水準
無機系接着剤の養生温度	-5°C
付着実験の実施日	無機系接着剤打込みから 6 日後

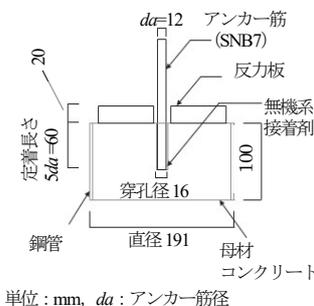


図-5 試験体概要



写真-2 付着実験状況

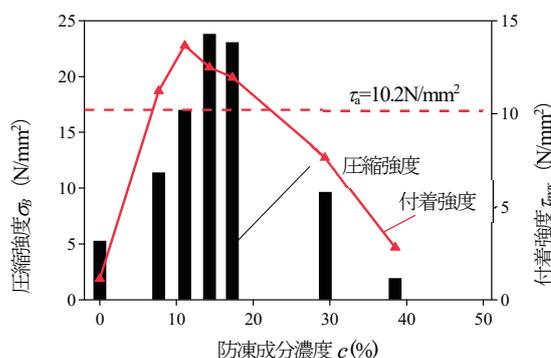


図-6 付着強度および圧縮強度と防凍成分濃度の関係

4. 実施工を想定した付着強度実験

4.1 実験概要

(1) 試験体パラメータおよび環境温度の推移

試験体パラメータの一覧を表-3に示す。本研究の目標とする寒中施工では、前章より11.1%~17.3%が妥当な防凍成分濃度の範囲であると判断したが、本実験では防凍成分によるバラつきを考慮して、11.3%~17.3%の中間値である防凍成分濃度14.3%の練り混ぜ水で作製した無機系接着剤（以下、CFWと呼称する）を使用した。

本実験は、2019年の冬に北海道室蘭市で実施し、温度推移の違いによる付着性能を把握するため、2日に分けて（以下、定着日-A、定着日-Bと呼称する）定着した。定着後、材齢1日、7日、28日で付着実験および接着剤の圧縮試験を行った。試験体名は、接着剤名、定着日、材齢の組み合わせで構成されている。

次に、環境温度の推移を図-7に示す。定着日-Bは定着日-Aの2日後である。本実験では、アンカー筋の定着作業および養生期間が、氷点下を含む試験環境となるように定着日を決定した。

定着日-Aは、1日の中で気温が低い傾向にある朝方に定着作業を開始した。定着作業時の温度は、約4°Cであり、定着後24時間の温度推移は、-5°C~2°Cであった。

定着日-Bの定着時の温度は、およそ-12°Cであった。その後の24時間の温度推移は-13°C~-10°Cであった。なお、最低気温は-15°Cを記録している。

以上のように、両定着日とも、定着後の環境温度は氷点下となり、特に定着日-Bについては、定着作業後24時間は-10°C以下であった。その後も材齢7日後まで-10°C~0°Cの温度推移となり、通常のセメント系材料であれば、凍害を受ける可能性が極めて高い条件と考えられる。

(2) 試験体の諸元

付着実験に用いる試験体の諸元を図-8に示す。本実験に使用する試験体は、はじめに280mm×280mm×150mmのコンクリートブロックを作製し、これを鋼製型枠に6個または9個配置して、隙間をグラウトで充填した。アンカー筋は材質をSNB-7、径をM16とし、280mm角のコンクリートブロック1個に対し、1本ずつ定着した。なお、埋め込み深さ4.5da（daはアンカー筋の軸径）で、湿式コアドリルにより直径18mmのビットを用いて穿孔した。

また、付着実験に用いる試験体は各実験条件で2体ずつ作製し、同時に実施する圧縮強度用の供試体は直径50mm、高さ100mmの供試体を3体ずつ作製した。

4.2 加力方法および計測方法

付着実験の加力方法および計測方法を図-9に示す。本実験は付着強度を確認することが目的のため、コンク

リートがコーン状破壊しないよう、反力板を用い、破壊形式が付着破壊となるように有効埋め込み深さを設定している。溝形鋼を用いて架台を組み、専用の鋼製治具を介して、M30の加力用ボルトと連結し、360kNのセンターホールジャッキを用いてアンカー筋を引張った。

表-3 実験パラメーター一覧

試験体名		接着剤	定着日	養生方法	試験材齢
CFW-A	CFW-A-1	CFW	定着日 A (4°C)	外気 暴露	1日
	CFW-A-7				7日
	CFW-A-28				28日
CFW-B	CFW-B-1	CFW	定着日 B (-12°C)	外気 暴露	1日
	CFW-B-7				7日
	CFW-B-28				28日

※1 CFW：耐寒促進剤を調合した無機系接着剤

※2 試験体名の一例： $\frac{\text{CFW}}{\text{接着剤名}} - \frac{\text{A}}{\text{定着日}} - \frac{\text{1}}{\text{試験材齢}}$

※3 定着日の（ ）内の温度は、定着時の環境温度を示す。

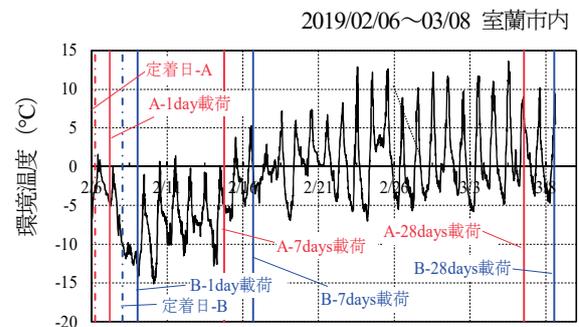


図-7 付着実験時の環境温度推移

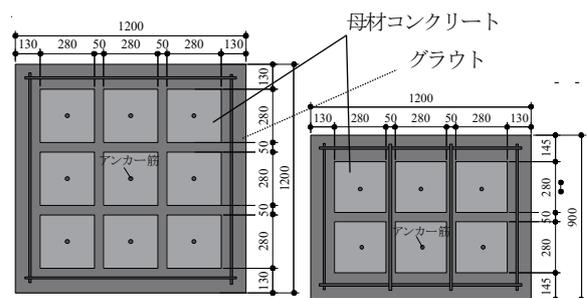


図-8 試験体諸元

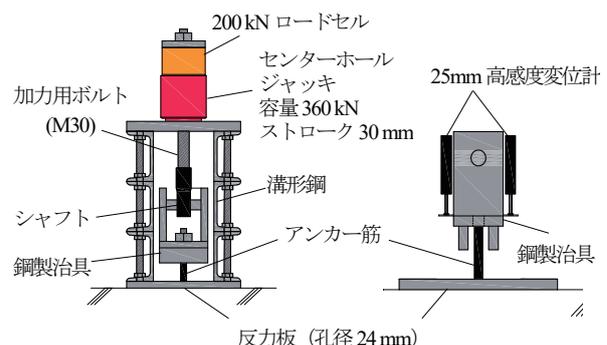


図-9 付着実験の荷重方法および計測方法

4.3 実施工を想定した付着実験結果

(1) 無機系接着剤の圧縮強度試験結果

図-10に無機系接着剤の圧縮強度 σ_B の推移を示す。なお、圧縮強度 σ_B は、供試体3本の平均値である。

定着日-AのCFW（以下、CFW-Aと記載する）は、材齢1日で $\sigma_B=16.8\text{ N/mm}^2$ の強度発現を確認した。その後、材齢とともに強度も上昇し、材齢28日で $\sigma_B=32.5\text{ N/mm}^2$ となった。

定着日-BのCFW（以下、CFW-Bと記載する）は、図-7から読み取れるように、供試体作製後から24時間の温度推移が $-13^\circ\text{C}\sim-10^\circ\text{C}$ と、極めて厳しい環境下であったため、材齢1日では、十分に硬化しておらず、圧縮試験を実施することができなかった。しかし、材齢7日では、 $\sigma_B=15.0\text{ N/mm}^2$ まで上昇し、材齢28日ではCFW-Aと同等の $\sigma_B=34.1\text{ N/mm}^2$ となった。以上、強度増進が見られたことから -10°C 程度の環境下では初期凍害を受けず、緩やかではあるが水和反応が進んでいると考えられる。

(2) 付着実験の結果

各材齢の付着強度 τ_{max} を図-11に、付着強度 τ_{max} および付着強度の安全率 α 一覧を表-4に示す。なお、 τ_{max} および α は次式とする。

$$\tau_{max} = T_{max} / S \quad (2)$$

ここに、 T_{max} ：実験時の最大引張力

S ：鉄筋の付着表面積

$$\alpha = \tau_{max} / \tau_a \quad (3)$$

また、本検討では、3.2節(2)で用いた式(1)の設計式で実験結果を評価する。付着実験時の圧縮強度の平均値は 22.4 N/mm^2 である。

CFW-Aの τ_{max} に着目すると、養生温度 $-5^\circ\text{C}\sim-2^\circ\text{C}$ の条件下では、材齢1日で τ_a を超える付着強度が発現した。材齢7日、28日では、 σ_B 同様、付着強度に関しても強度増進が確認でき、 α が1.8~2.0程度となる付着強度となった。

続いて、CFW-Bの結果に着目すると、養生温度 $-13^\circ\text{C}\sim-10^\circ\text{C}$ の条件下では材齢1日の付着強度は 2.58 N/mm^2 となり、十分な付着強度を確認できなかった。その後は最低気温 -15°C となったが、養生温度が 0°C 付近になる時間帯もあり、付着強度の上昇が確認された。また、材齢7日、材齢28日の α は1.7~2.0程度の付着強度となった。

4.4 付着強度と接着剤の圧縮強度の関係

τ_{max} と σ_B の関係を図-12に示す。なお、図-10に示すようにCFW-B-1のデータは、圧縮試験を実施することができなかったため、図中に表記していない。

本実験の条件では、異なる養生条件に関わらず、 σ_B が増大するにつれ、 τ_{max} も上昇する傾向を確認した。以上

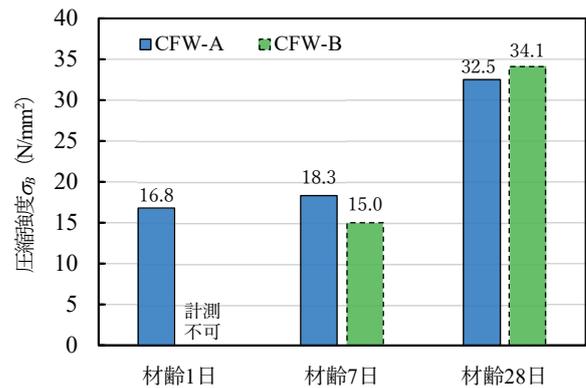


図-10 無機系接着剤の圧縮強度の推移

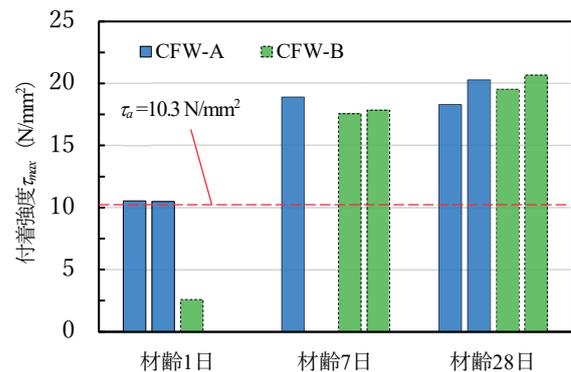


図-11 各材齢の付着強度

表-4 最大付着強度および付着強度の安全率一覧

試験体名	1 体目		2 体目		
	τ_{max}	α	τ_{max}	α	
CFW-A	CFW-A-1	10.53	1.02	10.49	1.02
	CFW-A-7	18.87	1.83	—	—
	CFW-A-28	20.27	1.96	18.29	1.77
CFW-B	CFW-B-1	2.58	0.25	—	—
	CFW-B-7	17.55	1.70	17.85	1.73
	CFW-B-28	20.72	2.01	18.84	1.83

τ_{max} ：付着強度 (N/mm²)

α ：安全率 τ_{max} / τ_a

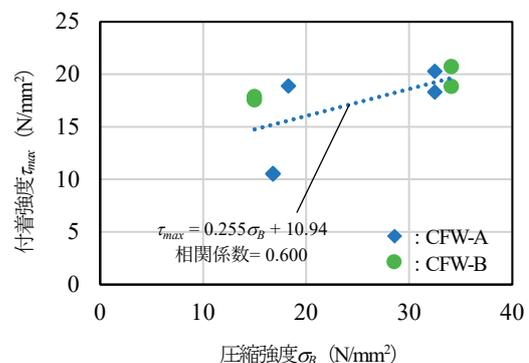


図-12 τ_{max} と σ_B の関係

の結果より、耐寒促進剤を調合した無機系接着剤を使用した場合、 -10°C 以上であれば確実に σ_B および σ_{max} は増大する。

5. おわりに

本報告では、 $-10^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ の環境下で施工が可能な無機系接着剤の防凍成分濃度を、接着剤の凝固点および圧縮強度、付着強度の強度発現への影響から決定した。本研究の範囲では、防凍成分濃度が11.1%~17.3%の範囲で目標とする寒中施工が可能かつ、良好な圧縮強度および付着強度を実現することができた。

また、防凍成分濃度14.3%の無機系接着剤を用いて寒中期の実施工を想定した試験施工の結果、最低気温 -15°C を含む環境温度が -10°C 以下の条件下であっても、無機系接着剤の圧縮強度および付着強度の強度増進を確認した。なお、 $-13^{\circ}\text{C}\sim -10^{\circ}\text{C}$ の養生環境下では、初期凍害の現象は見られなかったものの、水和反応は非常に緩やかであると考えられる。

以上の結果から、本研究で使用した耐寒促進剤を調合した無機系接着剤は、 -10°C 程度の環境条件であっても初

期凍害を受けずに施工が可能だと判断できる。

今後は、耐寒促進剤を調合した無機系接着剤を使用したアンカー筋の付着力に関して、破壊形式を考慮して評価を行っていききたい。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針，2010
- 2) 安藤 重裕，中野 克彦，：接着系あと施工アンカーのクリープ変形評価方法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，82巻736号，pp949-958，2017
- 3) 浜 幸雄，鎌田 英治：耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結環境下における強度増進性状と水分凍結，コンクリート工学論文集，第8巻第2号，pp73-80，1997.7
- 4) 野村 裕次郎，辰巳 敬，本間 義夫，他1名：チャート式®シリーズ 新化学 化学基礎+化学，数研出版株式会社，pp.175
- 5) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2010
- 6) 安藤 重裕ら他7名：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性，日本建築学会学術講演梗概集，構造IV，pp.201-202，2012.9

Summary Although the dissemination of a cement-based adhesive is expected as an adhesive for post-installed anchors because of high durability to long-term sustained loading, the problem of frost damage at early ages during cold weather construction is a concern because the inorganic adhesive is a cement-based material. Thus, we selected the concentration of a proper frost-resistant accelerator from the experimental results of compressive strength and bond strength in order to apply cement-based adhesive during cold weather construction when the temperatures are near or below freezing (target: -10°C to 4°C). The experimental results showed that the concentration of a component in kneaded water that can be used under the targeted environment and that can provide good compressive strength and bond strength effective in the prevention of freezing is 11.1% to 17.3%. Based on this result, we conducted an pull-out experiments by assuming the implementation of construction during the cold season in Muroran City, Hokkaido, using an cement-based adhesive prepared with kneaded water at a concentration of 14.3% with a median value of 11.1% to 17.3%. As a result, good adhesive strength was demonstrated even for cold weather construction at temperatures below freezing.

Key Words : Post-Installed Anchor, Frost-resistant Accelerator, Cold Whether Construction, Cement-based Adhesive, Bond Strength