

9. 増粘剤 1 液タイプ高性能 AE 減水剤を用いた中・高流動コンクリート (SFC)

の積算温度による強度発現性に関する考察

Consideration of strength development depending on cumulative temperature of medium and high fluidity concrete (SFC) using superplasticizer containing viscosity modifying agent

河合 智寛*¹ 荒木 朗*¹

要 旨

増粘剤 1 液タイプ高性能 AE 減水剤を用いた収縮低減型中・高流動コンクリートコンクリートは、これまでリニューアルなどの耐震改修工事で合計 367.5m³ を実施工に適用してきた。このコンクリートは、一般財団法人 日本建築総合試験所による技術審査証明 (GBRC 性能証明 第 15-20 号『スームスフィルクリートー収縮低減型中・高流動コンクリートー』、2016 年 2 月 4 日付) を取得しており、本報では実施工で得られた硬化コンクリートの圧縮強度において、日平均気温の積算温度との関係から強度発現性について考察した。コンクリートの打込み後 91 日までの積算温度 M_{91} が 840 °D・D を下回ることではなく、初期の強度発現性における圧縮強度は日平均気温の積算温度と一次対数関数の比例関係にあり、圧縮強度 10N/mm² 以上の確保には積算温度 50 °D・D が必要と考えられる。

キーワード：収縮低減型中・高流動コンクリート／増粘剤 1 液タイプ／膨張材／積算温度／初期の強度発現性

1. はじめに

増粘剤 1 液タイプ高性能 AE 減水剤を使用した収縮低減型 中・高流動コンクリートは、弊社において、一般財団法人 日本建築総合試験所による技術審査証明 (GBRC 性能証明 第 15-20 号『スームスフィルクリートー収縮低減型中・高流動コンクリートー』、2016 年 2 月 4 日付) を取得している。スームスフィルクリート (以下、SFC) は、軽微な締固め作業で狭隘な部分まで充填できるワーカビリティと適度なコンシステンシーを有しており、かつ市販の無収縮モルタルと同等以上の高い収縮低減性能を有しているコンクリートである。一般的な耐震改修工事では、コンクリート上部に無収縮モルタルもしくは無収縮グラウトを圧入充填して増設壁を構築するが、SFC を使用する場合はモルタルやグラウトを充填せずに梁下まで一体的に構築できるため、コンクリートとモルタルの打継ぎ面も無くなり、建物供用後の収縮ひずみによるひび割れ発生の危険性を低減することができる。

2. 概要

GBRC 性能証明における適用範囲では、SFC は増設壁あるいは増打ち壁などに使用するコンクリートとしての品質および耐久性に配慮し、設計基準強度 $F_c=27 \cdot 30 \cdot 33$ (N/mm²) を対象としている。

実施工の適用に際しては、コンクリートの設計基準強

度および構造体強度補正值の考え方として、SFC は無収縮モルタルの圧縮強度に対応していることや、実施工で設計基準強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ の部位であっても、フレッシュコンクリートの品質、圧縮強度、施工性および耐久性 (乾燥収縮率など) に関して安全側の設定となるように適用してきた。具体的には設計基準強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ の場合、設計基準強度 $F_c=27\text{N/mm}^2$ のコンクリートを採用 (膨張材による若干の強度低下を担保) することとし、本技術証明の製造 (施工) マニュアルに基づき、JASS 5 に準じた構造体強度補正值を加味してコンクリートの調査計画を行い、室内試験練りの性状確認により監理者立会いあるいは承認を得て施工してきた (表-1、図-1)。実績として、これまでリニューアルなどの耐震改修工事で合計 367.5m³ になる (2024 年 12 月末時点)。なお、JIS A 5308 でも普通コンクリートでスランプフロー管理によるコンクリートは製造可能であるが、増粘剤含有タイプの混和剤は未使用かつコンクリートの材料分離抵抗性が確保可能なスランプフローと呼び強度の区分に限られる (表-2)。このため、呼び強度 45 を超えて 60 までの高強度コンクリートとなる事例も多い。一方、弊社実物件の耐震改修工事では設計基準強度 36N/mm² を超える実施工は稀であり、既存壁との接合部で過密配筋となり易い増設壁であってもスランプ管理によるコンクリート打込みが多く、品質確保の観点から施工に苦慮する実情がある。

*¹ 技術研究所 建築材料研究グループ

表-1 室内試験練りの使用材料と決定調合（実施工例）（呼び強度 30）

使用材料(工場NN)

材料	種類	産地 または 品名	表乾 密度 g/cm ³	粗粒 率 %	実積 率 %
セメント	C:普通ポルトランドセメント	T社製	3.16	—	—
水	W:地下水	—	—	—	—
細骨材	S1: 砕砂	京都府 亀岡産	2.65	2.85	—
	S2: 石灰石砕砂	大分県 津久見産	2.68	2.85	—
粗骨材	G: 碎石	京都府 亀岡産	2.68	—	58.0
混和剤	SP: 高性能AE減水剤 (増粘剤1液タイプ)	B社製	—	—	—
混和材	E: 膨張材(構造用)	T社製	3.16	—	—

※【細骨材混合割合】砕砂:石灰石砕砂=70%:30%(容積比)

使用材料(工場KR)

材料	種類	産地 または 品名	表乾 密度 g/cm ³	粗粒 率 %	実積 率 %
セメント	C:普通ポルトランドセメント	UM社製	3.16	—	—
水	W:回収水(上澄水)	—	—	—	—
細骨材	S1: 砕砂	大阪府 高槻産	2.66	2.80	—
	S2: 石灰石砕砂	福岡県 北九州産	2.69	2.40	—
粗骨材	G: 碎石	大阪府 箕面産	2.68	—	58.0
混和剤	SP: 高性能AE減水剤 (増粘剤1液タイプ)	B社製	—	—	—
混和材	E: 膨張材(構造用)	T社製	3.16	—	—

※【細骨材混合割合】砕砂:石灰石砕砂=60%:40%(容積比)

決定調合(実施工)(呼び強度30)

工場	配合名	W/B (%)	かさ 容積 m ³ /m ³	細骨 材率 (%)	調合(単位量)(kg/m ³)						備考
					セメント C	混和材 膨張材 EXP	水 W	砕砂 S1	石灰 砕砂 S2	碎石 2005A G1	
A	砕砂70:石灰砕砂30 30-55-20N	50	0.540	52.6	335	25	180	647	279	839	工場NN
B	砕砂60:石灰砕砂40 30-55-20N	50	0.530	53.6	335	25	180	564	382	823	工場KR

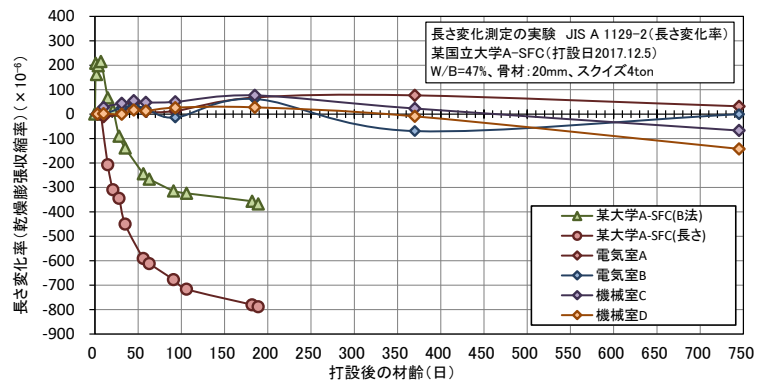
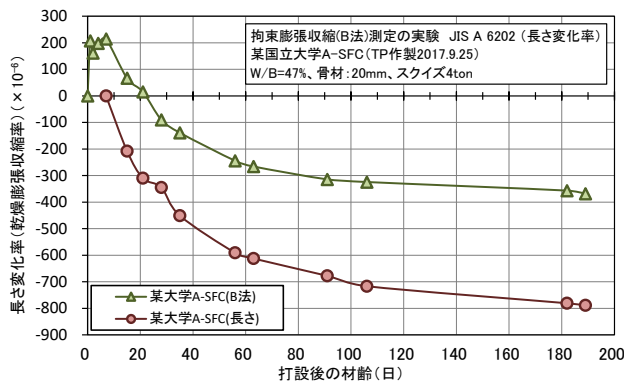


図-1 SFCにおける耐久性評価（長さ変化試験による乾燥収縮率の評価）（実績）

表-2 レディーミクストコンクリートの種類（JIS A 5308）とスームスフィルクリートの関係

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法	スランプまたはスランプフロー	弊社：耐震改修工事用 スムーズフィルクリート												呼び強度 (N/mm ²)		曲げ4.5
	(mm)	(cm)	18	21	24	27	30	33	36	40	42	45	50	55	60		
普通	20,25	8,10,12,15,18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	
		21	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	
		45	—	—	—	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	
		50	—	—	—	—	—	○	○	○	○	○	—	—	—	—	
		55	—	—	—	—	—	—	○	○	○	○	—	—	—	—	
	60	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	○	—	—	—	—	
40	5,8,10,12,15	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
軽量	15	8,12,15,18,21	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	
舗装	20,25,40	2.5,6.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	
高強度	20,25	12,15,18,21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	
		45,50,55,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	—	

※増粘剤含有タイプの混和剤を使用 ➡ スームスフィルクリート(SFC)

3. 実施工の実績

SFC の打込み実績について、これまでの打込み時期を集計した結果を図-2 に示す。なお、実施工の打込み時期については現場ごとに打設回数は異なるが、概ね短期間（1 ヶ月～3 ヶ月程度）で終了することや、必ず室内試験練りによる性状確認の後に現場適用に至るため、集計は室内試験練りを実施した件数と時期に絞って集計した。

図-2 から打込み時期は、概ね 4 月から 10 月の期間が多く、標準期および夏期での施工が主流となっている。冬期においても、SFC は施工されているが、JASS 5 による凍害危険度 1 (ごく軽微) 以上の地域での適用は全く無く、特別な寒中コンクリート工事対策を必要とする地域での適用案件はまだ無い。これまで SFC の打込みは北九州から近畿一円までの西日本で施工してきた。また、冬期の打込みを想定して、GBRC 性能証明の取得の際に、室内試験による凍結融解試験 (A 法) を検証している。その結果から SFC は、凍害危険度 1 (ごく軽微) 以上の地域に対して JASS 5 と同様に、コンクリートの打込み後の養生期間で凍結するおそれのある場合に、予め寒中コンクリート工事対策の実施を必要とするコンクリートである。

なお、昨今の地球温暖化による問題および気象庁データの 30 年間の平年値データ更新 (1910～2020 : 最新) により、寒中コンクリート工事の適用範囲に変化が生じている。深瀬ら⁵⁾によれば、調査結果が 2023 年から提供されており (図-3)、これによると、山間部等の特殊な地域でこれまで通りの留意は必要ではあるが、今後は近畿一円から西日本地域において、コンクリート凍結に対する特殊な寒中コンクリート工事対策は減少しうる可能性にあることが示唆されている。SFC 打込み実績は北九州から近畿一円までの西日本で施工してきたこともあり、気象庁データの日平均気温および日最低気温を参考にして、冬期の SFC 適用地域の実績について凍結および強度割れが無かったことも含めて確認した。

3-1. 硬化コンクリートの強度発現性

室内試験練りの標準養生における強度発現性を図-4 に示す。室内試験練りでは 3 個の供試体による圧縮強度によって、SFC のポテンシャルを確認することを目的に実施しており、供試体は全て標準水中養生による養生方法で材齢 7 日および材齢 28 日における圧縮強度を確認している。

図-4 から、上図は材齢 7 日の圧縮強度の結果を示し、下図は材齢 28 日の圧縮強度の結果をそれぞれ示している。箱ひげ図を見ると、呼び強度 30、33、36 の全てにお

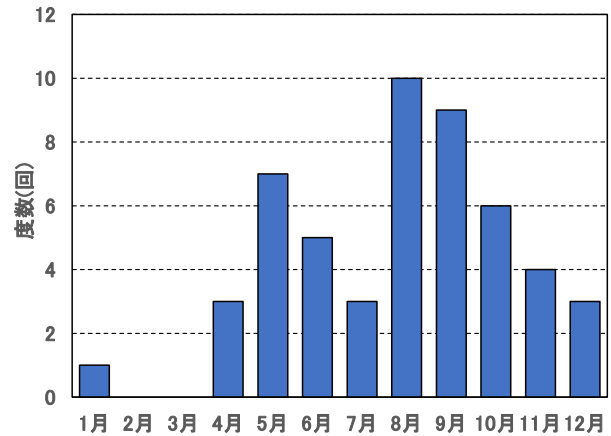


図-2 SFC 打込み時期 (実績)

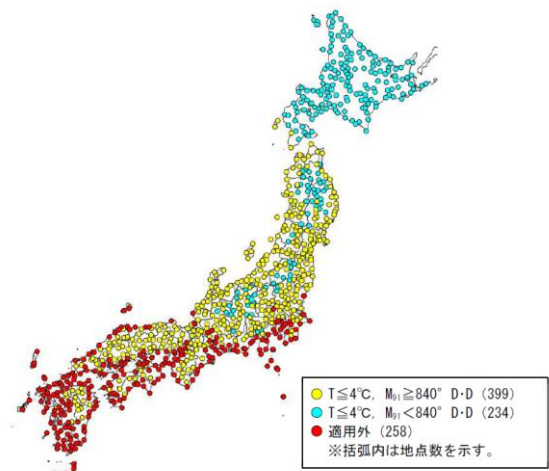


図-3 寒中コンクリート工事の適用地点 (引用⁶⁾)

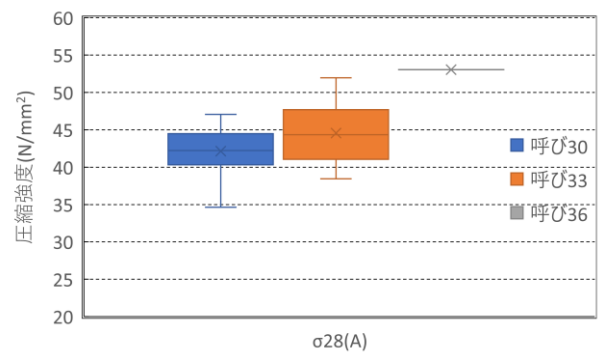
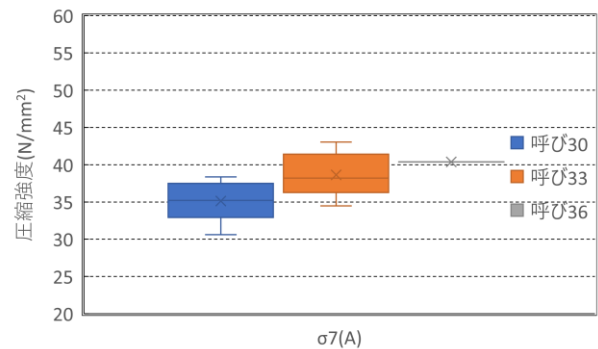


図-4 標準養生における強度発現性

いて、材齢 7 日強度時点で呼び強度を例外なく既に満たし、材齢 28 日強度も十分に満たす結果が得られている。室内試験練りの決定調査にて、実施工の SFC の圧縮強度として十分なポテンシャルを持っていることが分かる。

実施工における SFC の現場水中養生の強度と標準水中養生の強度の関係を図-5 に示す。図-5 は全ての現場ではないが、予め依頼して材齢 28 日における圧縮強度について、現場水中養生の強度と標準水中養生の強度の両方を採取した結果である。図中の赤破線は×1.15 のラインを示している。呼び強度 33 では現場水中 σ_{28} と標準養生 σ_{28} で強度発現性に大きな差は認められなかったが、呼び強度 30 では現場水中養生 28 日強度に対する標準水中養生 28 日強度の比率が同等あるいは+15%程度まで高くなる傾向が見られた。より現場状況に近い養生条件となる現場水中養生の強度の方がやや低くなる傾向にあると考えられるが、プロットされた全ての点で呼び強度を下回ることにはなかったため、良好な結果が得られていると推測される。これらのことから、実施工した SFC も呼び強度を十分に満たし、JASS 5 の規定通り、例外なく SFC においても構造体コンクリート強度は材齢 91 日で設計基準強度以上が確保できていると推察される。

4. 積算温度による SFC 強度発現性

気象庁では、1991～2020 年の過去 30 年間データを用いて 2020 年の平年値が作成されており、令和 3 年 (2021 年) 5 月 19 日から使用が開始されている。それ以前の平年値については、旧：1981～2010 年の平年値であり、現在の気象庁からダウンロードできる 30 年間の平年値データは、1910～2020 年の最新版である。なお、気象庁では観測地点の日平均気温や日最低气温・日最高気温、および平年値などを無償で提供しているが、ここでは SFC 打込み実績から得られた硬化コンクリートの圧縮強度と日平均気温の積算温度との関係について考察を行った。

積算温度の考え方は、JASS 5 の寒中コンクリート工事に準じ、以下の通りとした。

【寒中コンクリート工事の適用期間】

(1) 打込み日を含む旬の日平均気温が 4.0℃以下の期間

初期凍害防止のための対策を講じなければならない期間に該当し、気温の日較差を考慮し、日平均気温が 4℃以下になると日最低气温が 0℃以下となり、初期凍害の危険度が高くなることに由来する。ここで使われる旬の日平均気温は 30 年間の平年値である。

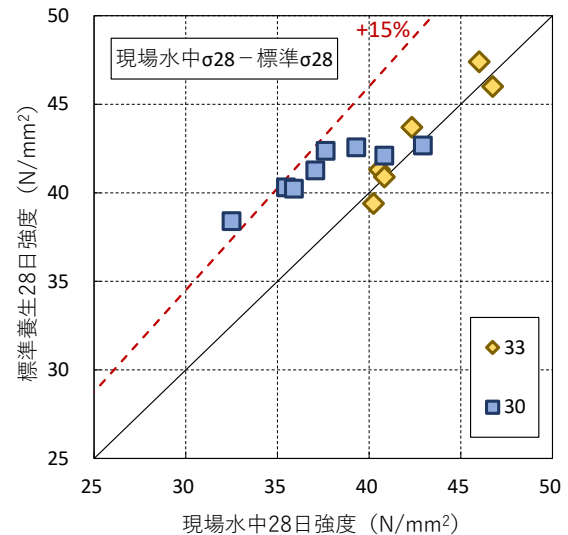


図-5 現場水中 σ_{28} と標準養生 σ_{28}

(2) コンクリート打込み後 91 日までの積算温度 M_{91} が 840 °D・D を下回る期間

材齢 91 日までに構造体コンクリートで品質基準強度を確保するために、低温による強度発現の遅れに対する調査上の対策および養生条件の検討が必要となる期間とされている。なお、積算温度 M_{91} は、コンクリートの打込みから材齢 91 日までの予想日平均気温から下式の関係式により算出される値である。

M_{91} が 840 °D・D 未満の期間

$$M_{91} = \sum_{z=1}^{91} (\theta_z + 10)$$

ここに、 M_{91} ：気温に基づく積算温度 (°D・D)

z ：材齢 (日)

θ_z ：材齢 z 日における予想日平均気温 (°C)

SFC を適用した現場において実際の日平均気温のデータは無いこともあり、気象庁データ (全国気象官署の地点データ) から現場に近いデータが提供されている近傍地域を選定し、現場の日平均気温の代用地点データとして本報では取り扱った。また、積算温度の考え方は寒中コンクリート工事のみならず、通期を通して、材齢 z 日における予想日平均気温の積算温度 M_z は、コンクリートの圧縮強度の推定には有効な手法であると推察される。打込み日を含む旬の日平均気温が 4.0℃以下の適用期間の推定に 30 年間の平年値は用いられるが、1910～2020 年の最新版 2020 年の平年値を用いたコンクリートの強度発現性についても、実施工の SFC に対して強度発現性の推定という観点から本報では考察を試みた。

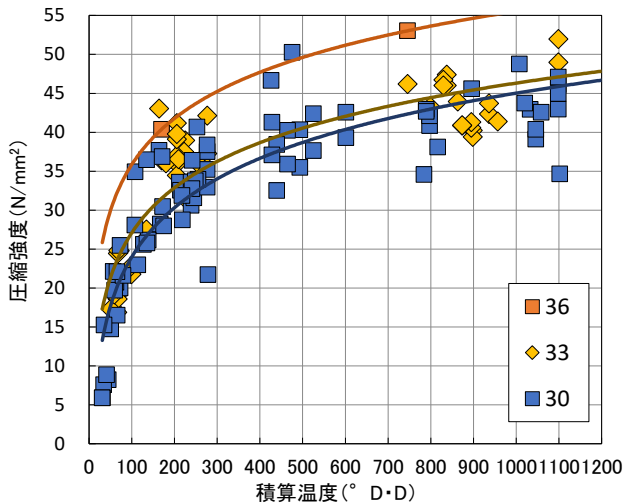


図-6 SFC の積算温度と圧縮強度の関係

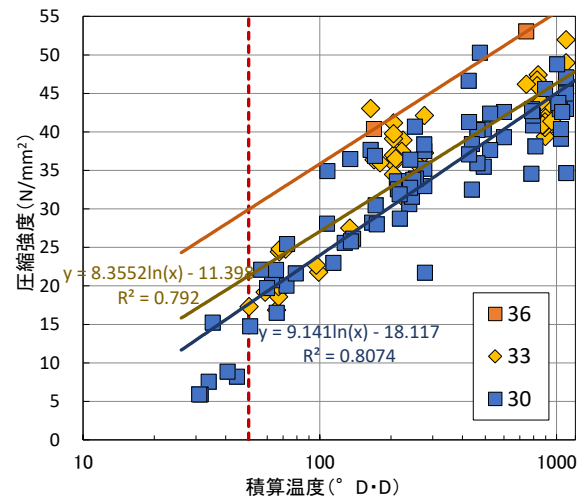


図-7 SFC の積算温度と初期の強度発現性

4-1. 日平均気温の積算温度による SFC 強度発現性

SFC の積算温度に関する強度発現性について、気象庁データの日平均気温の積算温度とコンクリート圧縮強度の関係を図-6 に示す。

図-6 は、呼び強度 30、33、36 について、これまでの SFC 実績を日平均気温の積算温度でプロットしたものである。データとしては適用件数の呼び強度 30 が一番多く、次いで 33、36 のプロット数となる。積算温度は 1200 °D・D まで表示しており、各々の呼び強度について、一次対数関数の近似曲線も示している。SFC の日平均気温の積算温度と圧縮強度には相関関係があることが分かり、全ての呼び強度 30、33、36 でコンクリート打ち込み後 91 日を待たずして、SFC 実績の日平均気温の積算温度 M_{51} が 840 °D・D を下回ることではなく、良好な結果が得られていることも分かった。

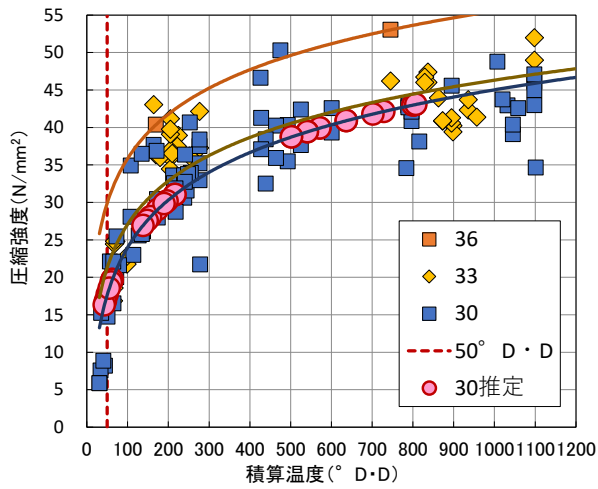
図-7 は、同様に初期の強度発現性を日平均気温の積算温度の一次対数関数で近似回帰した結果を直線で示したものである。SFC の圧縮強度は日平均気温の積算温度の一次対数関数と比例関係にあると考えられ、寄与率は 0.8 以上になる。図中の赤破線は積算温度 50 °D・D のラインを示しており、SFC 実績をプロットすると、一次対数関数の近似回帰した結果の直線よりも下方にあり、かつ積算温度 50 °D・D よりも小さな積算温度の範囲に表れたプロットがいくつかあった。これらの点は、2017/12/11 (材齢 2 日 31.0 °D・D : 5.9N/mm²)、2017/12/5 (材齢 2 日 31.4 °D・D : 5.9N/mm²)、2017/11/20 (材齢 2 日 34.0 °D・D : 7.5N/mm²)、2017/11/14 (材齢 2 日 44.7 °D・D : 8.2N/mm²) であり、冬期の実施工で材齢 2 日の圧縮強度の結果であった。

寒中コンクリート工事では、初期凍害の防止と低温による強度発現の遅れの 2 点が技術的課題であり、初期凍害の防止として、圧縮強度 5.0N/mm² が得られるまでコンクリートを凍結させないように初期養生を行う必要がある (JASS 5)。また、型枠の存置期間として、同 JASS 5 (2022) で基礎・梁側・柱および壁のせき板の存置期間は、コンクリートの圧縮強度が、計画供用期間の級が短期および標準の場合は 5N/mm² 以上、長期および超長期の場合は 10N/mm² 以上に達したことが確認されるまでとなっている。加えて、せき板の取外し後、圧縮強度が得られるまで湿潤養生をしない場合は、それぞれ 10N/mm² 以上、15N/mm² 以上までせき板を存置することが規定となっている。実施工では次工程への配慮からせき板の早期脱型の要望があることも事実である。SFC は通期での適用を考えているため、図-7 から考察される推定にはなるが、日平均気温の積算温度による初期の強度発現性から、SFC 圧縮強度 10N/mm² 以上の確保には積算温度 50 °D・D が必要であると推察される。なお、今後もデータ補充の拡充は必須と考えられる。

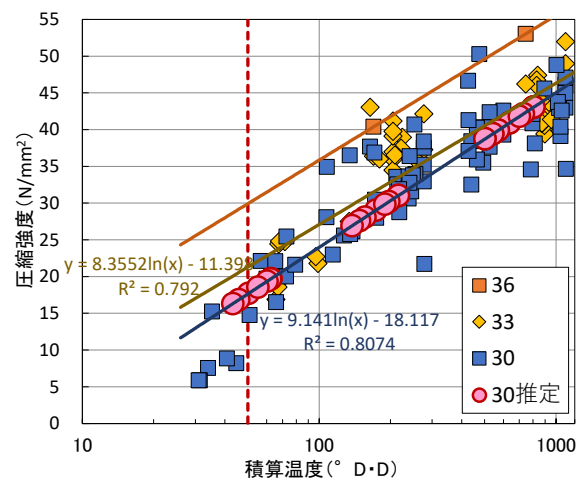
4-2. 平年値の積算温度による SFC 強度発現性

気温に基づく積算温度 (°D・D)、材齢 z 日における予想日平均気温 (°C) の関係式について、予想日平均気温の取り方を気象庁データの 1910～2020 年の最新版 2020 年の平年値とし、SFC 強度発現性を施工実績から得られた呼び強度の一次対数関数の近似回帰線との関係から考察した。SFC の積算温度に関する強度発現性について、予想平均気温を平年値とした積算温度とコンクリート圧縮強度の関係を図-8 に示す。

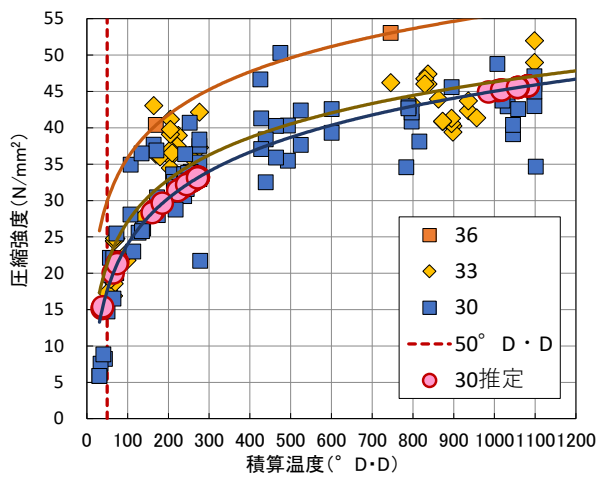
【標準期】



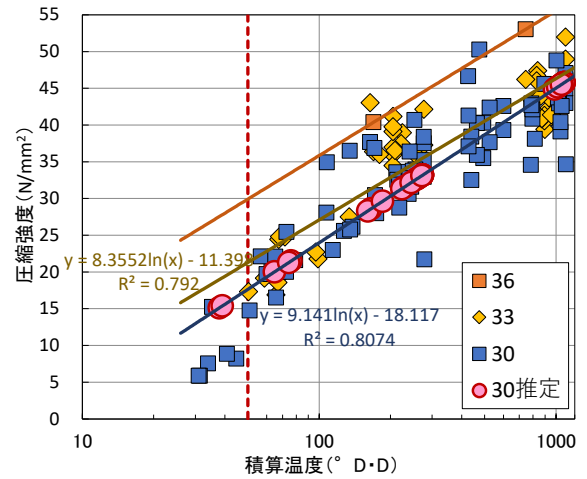
【標準期】



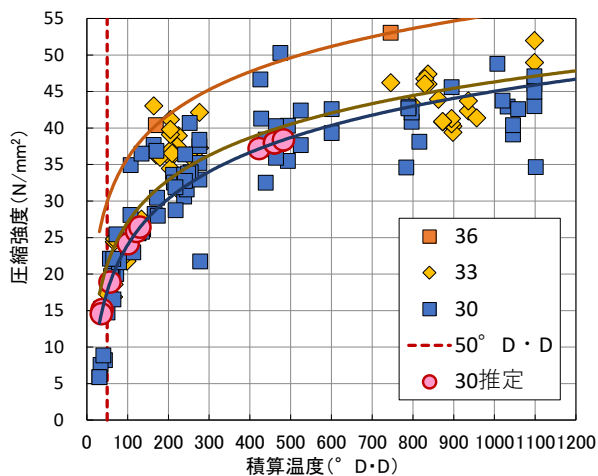
【夏期】



【夏期】



【冬期】



【冬期】

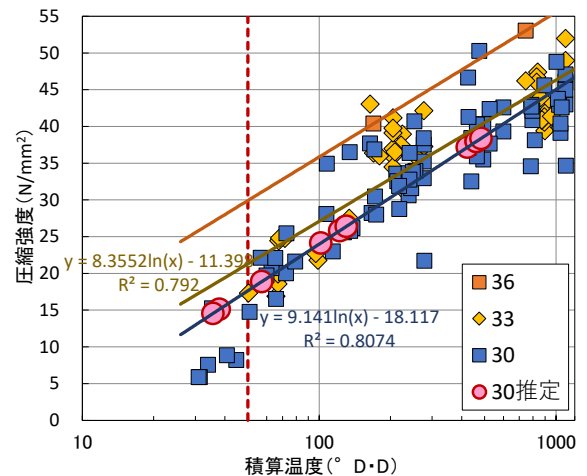


図-8 SFC の積算温度と圧縮強度（左側）および初期の強度発現性（右側）

図-8 は SFC 実施工の適用件数が一番多い呼び強度 30 において、室内試験練りを除く実施工の結果を平年値の積算温度でプロットしたものである。

図中に示す赤破線は積算温度 50 °D・D のラインであり、凡例の赤丸「30 推定」が平年値の積算温度でプロットした点である。

標準期・夏期・冬期のいずれの場合も、日平均気温の積算温度から得られた呼び強度の一次対数関数の近似回帰線と高い相関関係が見られた。なお、これらの SFC 実績のデータは材齢 3 日以上での圧縮強度の結果が反映されている。

SFC 実績の積算温度に関する強度発現性は、通期を通して、予想日平均気温を平年値とした積算温度とコンクリート圧縮強度の関係と日平均気温とした積算温度とコンクリート圧縮強度の関係とで類似する結果が得られ、材齢 3 日以上の強度発現性の推定に、平年値の積算温度の考え方は有用であると推察される。

5. まとめ

SFC 実施工で得られた硬化コンクリートの圧縮強度において、日平均気温の積算温度との関係から強度発現性について考察した。さらに積算温度 M_z (z は材齢日数) において、予想日平均気温を平年値とするコンクリート圧縮強度の強度発現性を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) SFC 実施工の標準養生における材齢 28 日強度は、呼び強度を満足する結果であった。
- (2) SFC も構造体コンクリート強度は材齢 91 日で設計基準強度以上が確保できると推察される。
- (3) 日平均気温の積算温度による SFC 圧縮強度の関係は、積算温度の一次対数関数と比例関係にある。
- (4) SFC 圧縮強度 10N/mm^2 以上の確保には、日平均気温の積算温度 $50^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ が必要と考えられる。
- (5) 材齢 3 日以上の日平均気温および平年値の積算温度と SFC 圧縮強度の関係は相関が見られる。

【参考文献】

- 1) 河合智寛、山崎順二、立松和彦：増粘剤 1 液タイプ高性能 AE 減水剤を用いた中流動コンクリートの物性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.217-218、2014.09
- 2) 河合智寛、新田稔、山崎順二、立松和彦：増粘剤 1 液タイプの高性能 AE 減水剤を用いた無収縮 中・高流動コンクリートの開発 その 2 硬化物性および調合決定の手法、日本建築学会学術講演梗概集、pp.537-538、2016.08
- 3) 河合智寛、新田稔、山崎順二、福島和将：増粘剤 1 液タイプの高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートのポンプ機種が圧送性に及ぼす影響 その 1 実験の概要 1、日本建築学会学術講演梗概集、pp.417-418、2018.07

- 4) 河合智寛、宇井衛、山崎順二、立松和彦：増粘剤 1 液タイプの高性能 AE 減水剤を用いた無収縮 中・高流動コンクリートの開発 その 4 実施工における硬化物性、日本建築学会学術講演梗概集、pp.457-458、2019.07
- 5) 深瀬孝之、谷口円、濱幸雄：寒中コンクリート工事に影響する気候特性に関する考察、日本建築学会技術報告集、Vol.25、No.61、pp.1039-1044、2019.10
- 6) 深瀬孝之：気温の平年値更新に伴う寒中コンクリート工事に及ぼす影響、日本建築学会学術講演梗概集、pp.479-480、2023.07