



寒中コンクリート工事における地域特性を考慮した合理的な施工計画方法に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-06-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 深瀬, 孝之 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00010186

博士學位論文

寒中コンクリート工事における地域特性を考慮した
合理的な施工計画手法に関する研究

2020年2月

深瀬 孝之

目次

第1章 序論

1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本研究に関連する既往の研究	2
1.2.1	寒中コンクリート工事に関連する規準類の変遷	2
1.2.2	温度-時間関数	5
1.2.3	温度と強度の関係	7
1.3	本論文の構成と概要	9

第2章 寒中コンクリート工事の実態と課題

2.1	はじめに	13
2.2	アンケート調査の概要	14
2.2.1	調査内容	14
2.2.2	調査対象数と回答数	14
2.3	アンケート調査の結果	16
2.3.1	回答者の属性	16
2.3.2	調合計画	17
2.3.3	強度推定	18
2.3.4	養生計画	21
2.3.5	品質管理	21
2.3.6	寒中指針の利用度および評価	22
2.3.7	寒中コンクリート工事における新しい技術の採用など	23
2.4	寒中コンクリート工事における課題	24
2.5	第2章の結論	27

第3章 構造体コンクリートの強度推定方法

3.1	はじめに	29
3.2	圧縮強度の推定方法	30
3.2.1	有効材齢方式	30
3.2.2	積算温度方式	30
3.2.3	有効材齢方式と積算温度方式における強度推定値の比較	31

3.3	実績データによる実測値と推定値の比較	34
3.4	強度管理手法としての適用性の検討	36
3.5	第3章の結論	38

第4章 養生上屋の熱損出量

4.1	はじめに	41
4.2	寒中指針における熱損失量の算出方法	42
4.2.1	基本式	42
4.2.2	外気温の設定方法	42
4.2.3	上屋材料の熱貫流率	43
4.2.4	換気回数	43
4.3	熱損失量の検証	45
4.3.1	外気温	45
4.3.2	上屋材料の熱貫流率	45
4.3.3	換気回数	47
4.4	第4章の結論	54

第5章 寒中コンクリート工事に影響する気候特性

5.1	はじめに	57
5.2	寒中コンクリート工事に影響を及ぼす気候特性	58
5.2.1	寒中コンクリート工事の適用地域と適用期間の日数	58
5.2.2	調合計画方法	59
5.2.3	初期養生方法	61
5.2.4	各地点における積算温度と気温・適用日数の関係	62
5.3	気候特性の分類	64
5.4	調合計画方法に関する検討	65
5.4.1	JASS5方式の適用範囲の拡張	65
5.4.2	積算温度方式に基づく材齢延長	68
5.5	第5章の結論	70

第6章 施工計画支援システムの開発

6.1	はじめに	73
6.2	システムの目的と要件	74
6.3	システムの全体構成	75
6.4	システムの概要	78
6.4.1	気候特性	78
6.4.2	調合計画	80
6.4.3	養生計画	80
6.4.4	強度推定	81
6.5	第6章の結論	91

第7章 総括

発表論文

謝辞

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

寒中コンクリート工事では、コンクリートが凍結する可能性がある施工条件下においても、通常期に施工されるコンクリートと同様に要求品質や工事計画を確保しなければならない。寒中コンクリート工事は、北海道や東北地方に代表されるような積雪寒冷地に特化するものとして取り扱われるが、関東以南の沿岸部を除く広い地域に適用される。そのため、地域によって著しく異なる気象条件を十分に踏まえたうえで、寒中コンクリート工事を合理的かつ経済的に実施することの意義は極めて大きい。

我が国の寒中コンクリートに関する研究は1940年代から行われており^{1) 2)}、その後、洪らによって積算温度を用いた調合計画方法や初期凍害対策に関する礎が築かれた³⁾。1978年には、寒中コンクリート工事に関連する技術的な指針が取り纏められ、日本建築学会から「寒中コンクリート施工指針案・同解説」⁴⁾が発刊された。それ以降、技術の進歩や時代背景に応じて、現行指針（第5版、2010年）⁵⁾に至るまで改定が繰り返されてきた。

現行指針では、寒中コンクリート工事の適用期間に関する技術的意味の明確化、調合計画方法の根拠となる強度増進曲線および氷点下域の積算温度評価法などに検討が加えられ、寒中コンクリート工事における技術的な課題は大幅に解消された。

一方、その内容は北海道などの厳寒な積雪地域における対応に重点が置かれており、比較的温暖な地域における気候特性に十分に配慮されたものではない。また、加熱養生時における計画温度と実績温度には差異が生じることが実務者から指摘されている。近年、大規模な養生上屋を設置する事例も多く、計画温度確保や環境負荷低減の観点からもこの温度差の解消が望まれる。

そのため、北海道や東北地方に加えて近畿地方などの比較的温暖な地域を調査対象に含めて、寒中コンクリート工事の実態を把握して課題を明らかにするとともに、その課題を解決することが重要である。また、寒中コンクリート工事の施工計画では調合と養生などの条件を変えながら煩雑な計算を繰り返す必要があり、実務者からは各種の計算を簡便かつ適正に実行するための支援システムが期待されている。

以上のような背景を踏まえ、本研究では、各地域の気候特性を踏まえたうえで、寒中コンクリート工事における課題解決を図り、合理的な施工計画が実施できることを目的とする。

- (1) アンケート調査から寒中コンクリート工事の実態を明らかにし、課題を抽出する。
- (2) せき板の取り外しに関する強度管理方法として、コンクリート部材の温度履歴に基づく強度推定方法の適用性について検討する。
- (3) 加熱養生時の熱量計算法を検証し、温度差異を解消する。
- (4) 寒中コンクリート工事に影響する気候特性を整理する。
- (5) 上記の検討結果を反映させた施工計画支援システムを構築する。

1. 2 本研究に関連する既往の研究

1. 2. 1 寒中コンクリート工事に関連する規準類の変遷

日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5 という)は、1953年の制定以来、技術の進歩、研究の蓄積、建築物に対する要求品質の向上などに対応して改定が行われてきた。現行のJASS5(第15版、2018年7月改定)が刊行されるまで、概ね10年ごとに大改定が行われ、さらにその大改定の間で小改定がなされてきた。

同様に、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」(以下、寒中指針という)は、1978年の初版刊行後、JASS5の規定内容に整合させるとともに、新材料や新技術などへの対応を図るため、JASS5の大改定にあわせて改定が行われてきた。

表1.2.1にJASS5および寒中指針の変遷を示す。JASS5においては、1953年(初版)から寒冷期(打込み後4週までに月平均気温約2~10℃の月を含む期間をいう)と極寒期(打込み後4週までに月平均気温約2℃以下の月を含む期間をいう)とに区分して、使用材料や初期養生などに関する規定を設けてきた⁶⁾。

1965年におけるJASS5大改定では、極寒期を「11節寒中コンクリート」に規定することとし、「寒中コンクリートとは、コンクリート打込み後4週までの期間の平均予想気温が約3℃以下の場合に施工するコンクリート」と定められた。強度上の水セメント比65%のコンクリートが標準養生28日に対して25%の強度低下を生じるような積算温度が370°D・D(平均温度3.2℃)であることから、これを規準値として定めたと解説されている⁷⁾。

一方、当時における寒中コンクリートは、日本の土木学会では4℃、ACI(American Concrete Institute)では4.5℃(50°F)、RILEM(International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures)の寒中コンクリート施工指針では5℃以下として扱われており、洪悦郎(11節解説執筆委員)は世界的に共通な規定を踏まえ、積算温度420°D・D(平均温度5℃)を主張したが認められなかった⁸⁾。

計画調合の定め方においては、気温によるコンクリート強度の補正值を用いる場合と積算温度方式による方法が規定されており、調合に関する基本的な方針は現行の規準類に引き継がれている。なお、積算温度方式では、積算温度による水セメント比の補正係数 α を用いて水セメント比を算出する方法が適用されていた。

1975年に大改定されたJASS5(第5版)⁹⁾では、仕様書としての性格を明確にする趣旨から、記述は簡素明瞭に、内容は必要最小限なものに修正された。そのため、改定前には含まれていた技術指導的な内容は省略され、別に作る各種の指針がその役割を担うことになった。

この方針に基づいて、日本建築学会北海道支部の寒中コンクリートワーキンググループ(主査:洪悦郎)によって原案が作成され、1978年に「寒中コンクリート施工指針案・同解説」⁴⁾が発刊された。この指針案では、コンクリートの品質の級が高級および常用のコンクリートの寒中施工に関して、初期凍害を防止するための初期養生と施工管理に対する標準的な施工指針が示された。

改定前のJASS5(第4版)と比較すると、寒中コンクリートの期間や計画調合などに関する内容については踏襲されたが、鬼頭^{10) 11) 12)}、長島¹³⁾らによって加熱保温養生および断熱保温養生などに関連する内容が整備された。

その後、1986年のJASS5大改定に対応して、1989年に寒中指針が改定された。これまでは工事現場練りコンクリートに対しても考慮された規定となっていたが、北海道では1960年からレディーミクストコンクリートが普及し、工事現場練りがほとんど行われなくなった。この環境変化を踏まえ、寒中指針（第3版）¹⁴⁾ではレディーミクストコンクリートを用いることを標準として、規定内容が検討された。

調合計画では、構造体コンクリートの強度管理材齢を91日以内とし、それに対応する気温による強度補正值が示された。また、積算温度方式では、積算温度による水セメントの補正係数 α と設計基準強度からコンクリートの強度補正值を求める方法が定められた。

1998年に改定された寒中指針（第4版）¹⁵⁾は、1997年のJASS5大改定に対応させたものである。この改定でJASS5（第11版）¹⁶⁾には耐久設計基準強度、品質基準強度および ΔF の概念が導入され、従来の調合計画手法をそのまま適用すると過剰な強度補正を招くことが想定された。そのため、調合計画を全面的に改定し、品質基準強度と設計基準強度との強度差、および打込みから材齢28日までの期間の平均温度をもとに、設計基準強度を材齢28日で得るための強度補正值が規定された。また、その強度補正值に対応して、打込みから材齢91日までに品質基準強度を確保するための積算温度が示された。

2009年のJASS5の大改定では、旧版の平均予想気温による強度補正值（ T 値）、 ΔF が削除され、新たに構造体強度補正值（ S 値）が導入された。これは、標準養生供試体の強度と構造体コンクリート強度との差として定義された¹⁷⁾。

2010年には、JASS5（第13版）に整合させるとともに、前回の寒中指針改定後に日本建築学会北海道支部に設置された「コンクリートの調合設計研究委員会」や「寒中コンクリート施工調査研究委員会」などの活動成果を踏まえ、現行の寒中指針（第5版）⁵⁾に改定された。

この改定では、1) 寒中コンクリート工事の適用期間の技術的意味の明確化、2) 調合計画手法のJASS5との整合化、3) 調合計画手法の根拠となる強度増進標準曲線の見直し、4) 氷点下域での積算温度の導入などが行われた。

寒中コンクリート工事の適用期間に関しては、1965年から「コンクリート打込み後4週までの期間の積算温度が $370^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ （平均温度約 3.2°C ）以下の期間」と定義され、2009年のJASS5改正までの約44年間、踏襲されてきた。しかし、この規準値の根拠となった水セメント比65%は近年使用される一般的なコンクリートの水セメント比とは乖離しており、さらに強度低下率25%に関しても技術的な意味が不明確であった。

そのため、寒中コンクリート工事の適用期間は、初期凍害防止と低温による強度増進の遅れへの対応が必要となる期間として変更された。初期凍害対策を講じる必要がある期間を日平均気温が 4°C 以下の期間とし、また強度増進対策が必要な期間をコンクリートの打込み後91日までの積算温度が $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ を下回る期間として規定した。

この適用期間の変更によって、施工地域の気象条件に応じて必要となる工事対策の目的が明確になった。さらに、初期凍害対策のみを対象とする土木分野における規定（日平均気温が 4°C 以下の期間）¹⁸⁾とも整合性が確保された。

表 1.2.1 JASS5 および寒中指針の変遷

年	JASS5	寒中指針	主な内容
1953	初 版		<ul style="list-style-type: none"> ・「8 節 寒冷期および極寒期のコンクリート施工」(洪悦郎ら) ・寒冷期：打込み後 4 週までに月平均気温約 2~10℃の月を含む期間 ・極寒期：打込み後 4 週までに月平均気温約 2℃以下の月を含む期間
1957	第 2 版 【大改定】		<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの調合部分の改定
1965	第 3 版 【大改定】		<ul style="list-style-type: none"> ・極寒期を「11 節 寒中コンクリート」に規定する(洪悦郎) ・適用期間：打込み後 4 週までの予想平均気温が約 3℃以下 (370°DD) ・調合計画方法 <ol style="list-style-type: none"> 1) 気温によるコンクリート強度の補正值 2) 積算温度方式
1969	第 4 版		<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5308 (1968) 改定への対応
1975	第 5 版 【大改定】		<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの品質・材料・施工方法の級の設定 ・契約書の一部とする趣旨から簡素明瞭な記述
1978		初 版	<ul style="list-style-type: none"> ・初期凍害を防止するための初期養生と施工管理に対する標準的な施工指針(洪悦郎, 長島弘, 鬼頭弘一ら)
1979	第 6 版		<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5308 (1978) 改定への対応 ・呼び強度の用語定義
1981		第 2 版	<ul style="list-style-type: none"> ・規定内容の変更なし
1984	第 7 版		<ul style="list-style-type: none"> ・化学混和剤の JIS 規格の採用
1986	第 8 版 【大改定】		<ul style="list-style-type: none"> ・品質と耐久性の向上を主目的とする改定(スランプや単位水量の制限など) ・強度管理材齢 28~91 日とする調合計画
1989		第 3 版	<ul style="list-style-type: none"> ・レディーミクストコンクリートの使用を標準とする対応(洪悦郎, 長島弘, 鎌田英治, 林直樹ら)
1991	第 9 版		<ul style="list-style-type: none"> ・建築指導課長通達「アルカリ骨材反応抑制対策に関する指針について」 ・国際単位系 (SI) への移行
1993	第 10 版		<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5308 (1993) 改定への対応 ・高性能 AE 減水剤に関する規定の追加
1997	第 11 版 【大改定】		<ul style="list-style-type: none"> ・耐久設計基準強度, 品質基準強度, ΔF の導入 ・高強度コンクリートの強度範囲の拡大 ・凍結融解作用を受けるコンクリートの耐凍害性能の 3 区分
1998		第 4 版	<ul style="list-style-type: none"> ・調合計画のプロセスの全面的な変更 ・耐寒促進剤, 断熱型枠などの新技術への対応(鎌田英治, 濱幸雄ら)
2003	第 12 版		<ul style="list-style-type: none"> ・高強度コンクリートに関する規定の見直し
2009	第 13 版 【大改定】		<ul style="list-style-type: none"> ・構造体強度補正值 (S 値) の導入 ・計画供用期間の級に超長期の追加
2010		第 5 版	<ul style="list-style-type: none"> ・寒中コンクリート工事の適用期間の変更 ・強度増進曲線と調合計画手法の見直し ・氷点下温度域の積算温度の導入(濱幸雄, 桂修, 長谷川拓哉, 深瀬孝之ら)
2015	第 14 版		<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート関連の JIS および関連指針類の改定対応
2018	第 15 版		<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5308 (2014) 改定対応 ・温度履歴によるせき板の取外し(建設省告示第 110 号) 改正対応 ・標準養生供試体を用いた圧縮強度試験(建設省告示第 1102 号) 改正対応

1. 2. 2 温度-時間関数

コンクリートの強度は材齢とともに増加していくが、温度履歴に大きく影響される。特に低温環境下で強度の増進が遅れる寒中コンクリート工事では、保温養生の打ち切りや型枠支保工の取り外しなど、施工上必要となる強度を推定することは極めて重要なものである。そのため、温度と時間による強度の増進過程に関しては、1940年代から多くの研究が行われてきた。

北海道では、1941～1943年に高橋敏五郎と高橋芳夫によって、施工時からの気温変化とコンクリート強度の伸びとの関係に関する研究が行われていた。材齢の代わりに温度と材齢の積（ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{Day}$ ）を用いて整理する方が、強度増進曲線が平滑化されることを示している^{1) 2)}。

イギリスでは1949年にMagazine of Concrete Researchが発行され、蒸気養生における積算温度の検討を行ったR.W.Nurseによって式(1.1)が提案された¹⁹⁾。

これに関して、A.G.A.Saulが蒸気養生に対する積算温度をMaturityと名付けて、その適用性を1951年に発表した²⁰⁾。

その後、Saulの考えに基づいて、Sven G.Bergstromが積算温度関数として $(\theta+10)$ を用いて強度値を整理することの有用性を1953年に示した(式(1.2))²¹⁾。

一方、日本においては、洪悦郎が1950年からコンクリートの初期養生の効果などについて時間温度相乗積(時間-温度面積効果)を用いて整理する方針で研究を進めていた。1957年に上記のSaulやBergstromの論文を入手し、その手法に基づいて現行JASS5に適用されている積算温度方式として発展させた³⁾。

1956年にはA.Nykanenらによって式(1.3)が提案され²²⁾、この方法は1962年に発刊されたRILEMの寒中コンクリート施工指針に採用された。

R.W.Nurse

$$M = \sum \theta \Delta t \quad (1.1)$$

Sven G.Bergstrom , A.G.A.Saul,

$$M = \sum (\theta + 10) \Delta t \quad (1.2)$$

A.Nykanen

$$M = \sum (\theta + 10) \Delta t \quad (\theta \geq 0^{\circ}\text{C}) \quad (1.3)$$

$$M = \sum 0.2(\theta + 15) \Delta t \quad (\theta < 0^{\circ}\text{C}) \quad (1.4)$$

ここに、 M ：積算温度の考え方による温度-時間関数

θ ： Δt 時間の温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）

t ：硬化時間（日または時）

氷点下の温度域では強度増進が著しく遅くなり、その傾向は温度が低くなるほど顕著となる。氷点下の強度増進を表すための温度-時間関数は、上記のA.Nykanenらの方法を含めていくつかの提案がなされている。

A.Nykanenらは、式(1.4)に示すように積算温度の基準温度を -15°C とし、それに補正係数0.2を乗じて氷点下の積算温度として評価することとした。

三森らは、積算温度の基準温度を -10°C として補正係数を検討した結果、補正係数を水セメント比によらず0.2に固定しても実用上十分な精度で強度が推定できることを示した^{23) 24)}。

須藤らの研究成果²⁵⁾を受け、谷口²⁶⁾らは凍結による水の化学ポテンシャルの低下を考慮した積算温度式を提案した(式(1.5))。現行の寒中指針(第5版, 2010年)資料3では、この氷点下温度域の積算温度式に基づく強度管理段階での利用方法が示されており、1日の温度変動を直線近似によって考慮する方法も提案されている。

$$M = \sum 10 \times \exp(-0.60 \times (-\theta)^{0.74}) \Delta t \quad (\theta < 0^\circ\text{C}) \quad (1.5)$$

ここに、 M : 積算温度 ($^\circ\text{D}\cdot\text{D}$)

θ : Δt 時間の温度 ($^\circ\text{C}$)

t : 時間 (日または時)

1977年には、Hansenら²⁷⁾によって温度と化学反応速度の関係を示す Arrhenius 式を応用する方法が提案された(式(1.6))。この方法では、対象とするコンクリートの養生温度が 20°C と異なる場合に、その温度がセメント水和反応に対してどの程度の促進あるいは遅延を与えるのかについて、 20°C で養生した場合の材齢に換算して表すことになる。この換算した材齢は等価材齢 (Equivalent age) と呼ばれ、CEP-FIP Model Code 1990²⁸⁾に適用されている。

養生温度が水和反応速度に影響を及ぼす度合いを Arrhenius 式によって重み付けしているため、等価材齢では温度による影響を積算温度に比べて大きく評価する。温度 20°C を基準とした場合の積算温度と等価材齢の関係を図1.2.1に示す。

$$t_e = \sum \exp\left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \Delta t \quad (1.6)$$

ここに、 t_e : 等価材齢 (日)

T : Δt 時間の温度 ($^\circ\text{C}$)

T_s : 基準温度 (293°C)

E : 見かけの活性化エネルギー (kJ/mol)

【普通ポルトランドセメントの場合】

$T \leq 20^\circ\text{C}$ の時

$$E = 33.5 + 1.47(20 - T)$$

$T \geq 20^\circ\text{C}$ の時

$$E = 33.5$$

R : 気体定数 ($8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$)

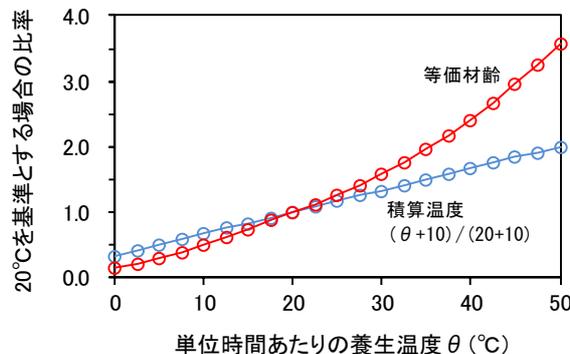


図 1.2.1 20°Cを基準とする場合における積算温度と等価材齢の関係

1. 2. 3 温度と強度の関係

現在までに、温度-時間関数を用いてコンクリートの強度増進過程を表現するための研究が、数多く行われてきた。その成果は、寒中コンクリート工事の調合計画や施工上必要となる強度の推定など、実務において広く活用されているところである。

コンクリートの強度増進過程に適用する回帰曲線には、種々の関数が考えられる。まず、1956年に、Plowman²⁹⁾ は対数関数を用いて次のような関係式を示した。

$$F = A \log M + B \quad (1.7)$$

ここに、 F ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 A 、 B ：定数である。

Carino ら³⁰⁾ は、次式の双曲線関数によってコンクリートの強度発現を表した。

$$F = F_u \frac{k(t-t_0)}{1+k(t-t_0)} \quad (1.8)$$

ここに、 F ：材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 F_u ：コンクリートの終局強度 (N/mm^2)、 t_0 ：強度増進が始まるときの材齢 (日)、 k ：定数である。

初期の研究では 2 種類の対数曲線によって強度増進曲線を近似していたが、洪ら³¹⁾ は強度増進の全過程を次式のようなロジスティック曲線によって近似できることを明らかにした。

$$F = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-a \times \log M + b)} \quad (1.9)$$

ここに、 F ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 F_∞ ：最終到達強度 (N/mm^2)、 M ：積算温度 ($^\circ\text{D} \cdot \text{D}$)、 a 、 b ：水セメント比により変化する係数である。

吉田ら³²⁾ はロジスティック曲線に加えて、次式に示すようなゴンペルツ曲線の適用性を確認した。なお、ロジスティック曲線は変曲点を中心に左右対称であることに対して、ゴンペルツ曲線は左右対称とはならないといった特性の違いがある。

$$F = F_\infty \exp\left(-a\left(1/M\right)^b\right) \quad (1.10)$$

ここに、 F ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 F_∞ ：最終到達強度 (N/mm^2)、 M ：積算温度 ($^\circ\text{D} \cdot \text{D}$)、 a 、 b ：定数である。

旧版の寒中指針 (第 4 版, 1998 年)¹⁵⁾ で提案された強度増進曲線は、ロジスティック曲線に基づいたものであった。各種のセメントに対応しており、任意の積算温度に対する強度推定が可能となった。一方、実積データと強度増進曲線との関係は初期材齢での乖離が大きく、さらに低水セメント比になるほどその差が大きくなることが指摘されてきた³³⁾。

そこで、谷口ら³⁴⁾ は高強度域を含む広範囲な強度に対して、高い精度で強度推定が行えるように曲線の見直しを行い、ゴンペルツ曲線を用いた強度推定式を新たに提案した。この成果は、現行の寒中指針 (第 5 版, 2010 年)⁵⁾ における調合計画の技術的な根拠とされている。

一方、式 (1.11)、式 (1.12) に示すように、CEP-FIP Model Code 1990²⁸⁾ に採用されている強度推定式には有効材齢 (Temperature adjusted concrete age) が指標として用いられている。有効

材齢は、前述の Arrhenius 式を用いた等価材齢に基づくものであるが、活性化エネルギーと気体定数にあらかじめ数値を代入することによって簡略化を図ったものである。標準養生 28 日の圧縮強度を基準として強度増進過程を表す形式となっており、汎用性が高いといわれている³⁵⁾。

$$f(t_T) = f_{28} \exp \left[s \left\{ 1 - \left(\frac{28}{t_T/t_1} \right)^{1/2} \right\} \right] \quad (1.11)$$

$$t_T = \sum \Delta t_i \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (1.12)$$

ここに、 $f(t_T)$ ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 f_{28} ：標準養生材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm²)、 t_T ：有効材齢 (日)、 $t_1=1$ 、 s ：セメント種類に応じた係数、 Δt_i ：温度が T (°C) である期間の日数、 $T_0=1^\circ\text{C}$ である。

この方法は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説」³⁶⁾において適用されている。ただし、CEP-FIP Model Code に示されている「セメント種類に応じた係数」が日本のセメントに適合しないことから、国内の強度データに基づいて係数の修正が行われている。

また、2016 年に改正された建設省告示第 110 号では、せき板の取り外しに関する基準として従来からの圧縮強度試験による方法などに加えて、有効材齢を用いた強度推定方法が追加された。表 1.2.2 には、告示・規準類におけるセメント種類に応じた係数を示す。

表 1.2.2 セメント種類に応じた係数 s

CEP-FIP Model Code 1990			鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針	建設省告示 第 110 号
普通・早強系	0.38	普通ポルトランドセメント	0.31	0.31
早強高強度系	0.2	早強ポルトランドセメント	0.21	0.21
低発熱系	0.25	中庸熱ポルトランドセメント	0.60	0.60
		低熱ポルトランドセメント	1.06	1.06
		高炉セメント	0.54 (B 種)	0.54 (B, C 種)
		フライアッシュセメント	-	0.58 (B, C 種)

1.3 本論文の構成と概要

本論文では、寒中コンクリート工事に関するアンケート調査から抽出した課題に対応して、強度推定方法や養生上屋の熱損出量の計算法を検討するとともに、気候特性を考慮した施工区分と比較的温暖な地域における調合計画手法の提案を行った。さらに、抽出された課題の解決策を反映させ、かつ寒中コンクリート工事の施工計画を簡便で合理的に実施するための支援システムの開発を行った。図 1.3.1 に本論文の構成を示し、以下に各章の概要について述べる。

第1章は本研究の序論であり、研究の背景と目的、関連する既往研究および本論文の構成を示す。

第2章では、北海道、東北、北関東、中部、北陸、近畿に所在するレディーミクストコンクリート工場および施工者を対象としたアンケート調査から、寒中コンクリート工事の実態と課題を整理した。その結果、調合計画や強度推定に関する実施頻度や方法などには、地域によって大きな差異が認められた。また、構造体コンクリートの強度管理方法、加熱養生時の温度差異、調合計画方法の適用範囲に関して、課題が存在していることを明らかにした。

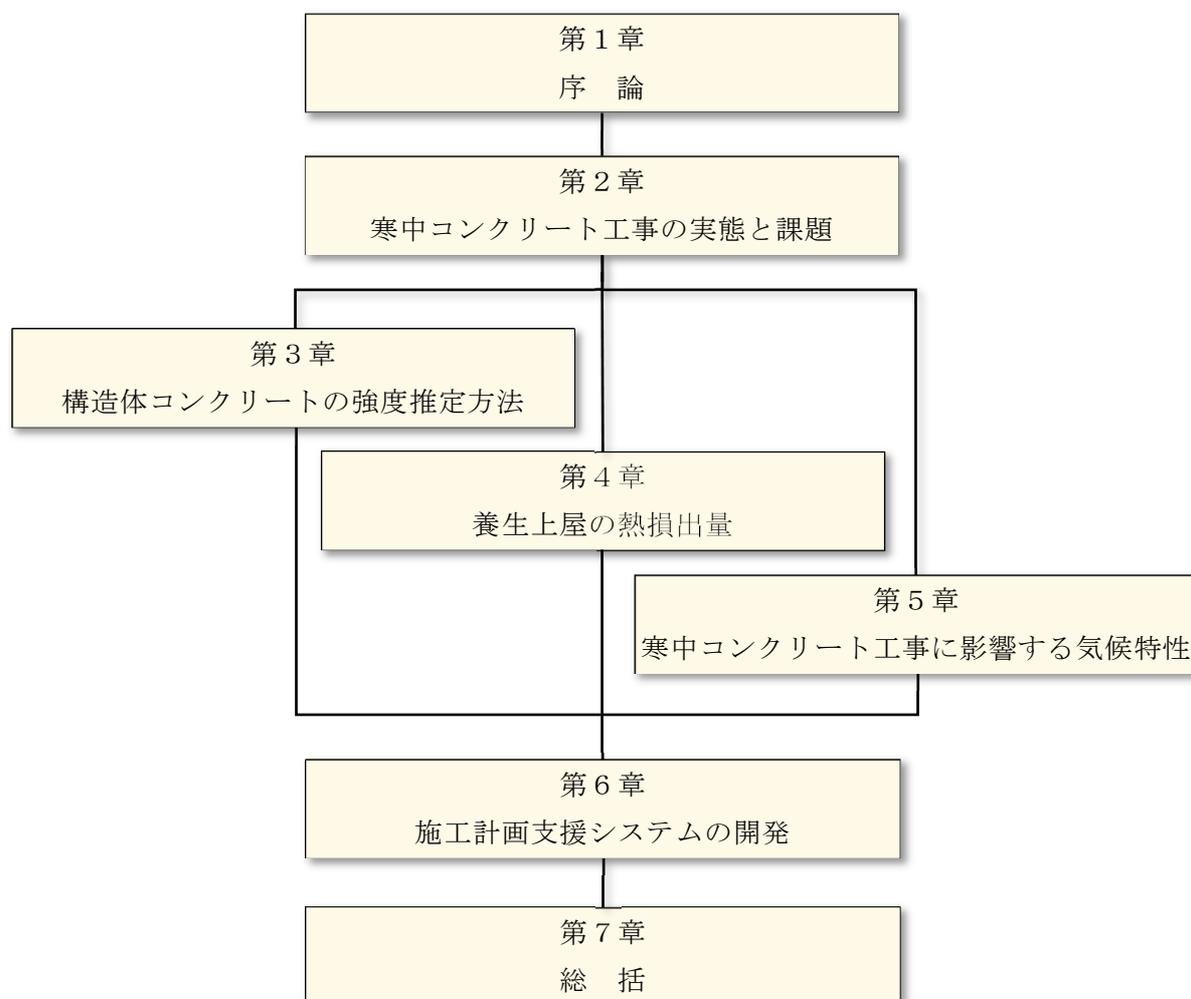


図 1.3.1 本論文の構成

第3章では、せき板の取り外しに関する強度管理方法として、コンクリート部材の温度履歴に基づいて強度を推定する方法を検討した。

従来から、せき板の取り外しの時期は現場養生した供試体の圧縮強度試験によって決定されることが多い。しかし、コンクリート部材と供試体との温度履歴は部材寸法や供試体の保管場所の温度環境などによって相違し、圧縮強度試験では適切な判定ができない場合が生じる。特に寒中コンクリート工事では、初期凍害防止や低温環境下での工程管理の観点から厳密に強度管理を実施する必要がある。このような強度管理上の課題に対して、部材の温度履歴に基づいて強度を推定する方法は、コンクリート部材の強度発現性を合理的かつ適正に評価できる手法として期待される。

そこで、建設省告示第110号（2016年3月改正）に規定される有効材齢方式、寒中指針に示される積算温度方式の2つの強度推定方法に関する適用性を検討した。その結果、普通ポルトランドセメントに関しては両者ともに適用性が高いことが確認された。一方、フライアッシュセメントB種では積算温度方式の適用性は認められるものの、推定方法による差異は大きく、混和材料の種類や置換率などによる影響を考慮する必要があることを示した。

第4章では、第2章で示された加熱養生における計画と実績との温度差異に関して、その要因を明らかにするため、現行の寒中指針における加熱養生時の熱量計算法を検証した。特に換気回数を決定するための基準換気回数と補正係数は、寒中指針第1版（1978年）から現行の第5版（2010年）に踏襲されており、その間見直しがなされていない状況にあった。

検証の結果、基準換気回数は養生床面積が100m²以下の場合に検証結果と乖離する傾向を示すが、その他の範囲においては概ね整合することが確認できた。また、各種の補正係数については、囲み材の一重・二重による補正係数に修正を要することが明らかになった。

その他、外気温の設定時の留意点、上屋材料の熱貫流率および基準換気回数の安全率による影響度などを示した。

第5章では、第2章で示された寒中コンクリート工事の実施状況に関する地域差を把握するため、気象庁の地域気象観測システムにおいて気温を観測する891地点の日別平年値（統計期間1981～2010年）を用いて、寒中コンクリート工事に影響する気候特性を整理した。

その結果、材齢91日までの積算温度の年間最小値と日平均気温や材齢28日までの平均温度の年間最小値との関係には相関性が認められ、これらの指標などを用いて寒中コンクリート工事に関する気候特性を3タイプに分類することを提案した。併せて、比較的軽微な施工対応で寒中コンクリート工事が行える地域の調合計画手法について検討した。

第6章では、第3章から第5章における成果を反映させるとともに、調合計画、養生計画および強度推定に関連する計算を適正に実施するためのツールとして提供するため、施工計画支援システムを検討した。

第7章は総括であり、本研究で得られた成果を要約するとともに、今後の課題について述べる。

— 第1章の参考文献 —

- 1) 高橋敏五郎, 高橋芳夫: 気象とコンクリート強度 (1), 土木学会誌, Vol.32, No.1, pp.14~17, 1947.8
- 2) 高橋敏五郎, 高橋芳夫: 気象とコンクリート強度 (2), 土木学会誌, Vol.33, No.1, pp.22~26, 1948.3
- 3) 洪悦郎: コンクリート強度推定実用法の提案とその応用, 日本建築学会論文報告集, 第 63 号, pp.129-132, 1959.10
- 4) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針案・同解説 (第1版), 1978.2
- 5) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説 (第5版), 2010.1
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (第1版), 1953.11
- 7) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (第3版), 1965.10
- 8) 洪悦郎, 鎌田英治, 長島弘: 寒中コンクリート, 技術書院, pp.4~5, 2000.6
- 9) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (第5版), 1975.1
- 10) 鬼頭弘一, 黒沢紀彦, 横須賀誠一, 洪悦郎, 荒谷登: 寒中の仮設工事対策に関する研究 その 1. シート上屋の換気量測定実験, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.89~92, 1972.3
- 11) 黒沢紀彦, 鬼頭弘一, 横須賀誠一, 洪悦郎, 荒谷登: 寒中の仮設工事対策に関する研究 その 2. シート仮設上屋の換気量算定法の提案, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.93~96, 1972.3
- 12) 鬼頭弘一: 養生上屋の換気回数 (その1), 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.71~74, 1976.9
- 13) 長島弘, 塚山隆一: 超早強セメントを用いた寒中コンクリートの断熱養生における温度経歴計算方法, 日本セメント技術協会セメント技術年報, pp.397~402, 1972
- 14) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説 (第3版), 1989.1
- 15) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説 (第4版), 1998.2
- 16) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (第11版), 1997.1
- 17) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (第13版), 2009.2
- 18) 土木学会: 2017 制定コンクリート標準示方書 [施工編], 2018.3
- 19) R.W.Nurse: Steam Curing of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.1, No.2, pp.79~88, 1949.6
- 20) A.G.A.Saul: Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure, Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No.6, pp.127~140, 1951.3
- 21) Sven G.Bergstrom: Curing temperature, age and strength of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 5, No.14, pp.61~66, 1953.12

-
- 22) Nykanen, A.: Hardening of concrete at different temperature, especially below the freezing point, RILEM Symposium on Winter Concreting, Session B, 1956.2
 - 23) 三森敏司, 大楽隆男, 濱幸雄, 桂修: 氷点下でのコンクリートの強度増進性状と積算温度関数式に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.553~558, 2000
 - 24) 三森敏司, 大楽隆男, 濱幸雄, 桂修: 凍結条件下におけるコンクリートの強度増進性状におよぼす水セメント比および凍結開始材齢の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.421~426, 2001
 - 25) 須藤由美子, 桂修, 吉野利幸, 三森敏司, 濱幸雄: 凍結および乾燥を受けたセメント硬化体の水和反応速度と強度増進, 日本建築学会構造系論文集, 第 542 号, pp. 17-22, 2001.4
 - 26) 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, 第 640 号, pp. 995-1003, 2009.6
 - 27) P.Freisleben Hansen, Erik J.Pedersen : Maturity Computer for controlled curing and hardening of concrete, Nordisk Betong, V.1, pp.19-34, 1977
 - 28) CEP-FIP Model Code 1990, Comite Euro-international du Beton,1990
 - 29) Plowman, J. M.: Maturity and the Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 8, No.22, pp. 13-22,1956.3
 - 30) Nicholas J. Carino: The maturity method: Theory and application, cement, concrete, and aggregates, pp.61-73, Vol.6, No.2, 1984
 - 31) 洪悦郎, 鎌田英治, 田畑雅幸, 濱幸雄: ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案 - 普通ポルトランドセメントの場合 -, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 367 号, pp.1-7,1986.9
 - 32) 吉田隆行・岡永健・御厨祐・大坪正典: 成長曲線によるコンクリート強度推定法の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp .555-560, 1992
 - 33) 小林和寛, 深瀬孝之, 濱幸雄: 寒中コンクリートにおける強度増進標準曲線の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.407~408, 2006.7
 - 34) 谷口円, 桂修, 濱幸雄, 吉野利幸: 水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案, 日本建築学会大会構造系論文集, 第 74 卷, 第 641 号, pp.1205~1210, 2009.7
 - 35) 日本建築学会: 構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点, 2008.2
 - 36) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2

第 2 章

寒中コンクリート工事の実態と課題

第2章 寒中コンクリート工事の実態と課題

2.1 はじめに

寒中コンクリート工事の技術的な対応を網羅した、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」¹⁾（以下、寒中指針という）は、同学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」²⁾（以下、JASS5 という）との整合性を図りながら、ほぼ10年ごとに改定が行われてきた。

直近の2010年の改定では、寒中コンクリート工事の適用期間、調合計画手法および氷点下域の積算温度などが変更された。これらの改定点に伴う実務への影響に加えて、近年における高強度コンクリートやマスコンクリートの増加、仮設資材の進歩に伴う養生形式の合理化などの寒中コンクリート工事を取巻く環境の変化から、その実態を把握する重要性が高まってきた。

そこで、日本建築学会北海道支部では、寒中コンクリート新技術調査委員会（活動期間：2017～2018年度）を設置して、寒中コンクリート工事に係わる技術の適用状況や課題などを明らかにし、寒中指針の充実化に向けた活動を行うこととした。その活動の一環として、2017年度には著者らが中心となって、寒中コンクリート工事の実態を把握することを目的としたアンケート調査を実施した。この調査では、北海道と東北地方に加えて、中部地方や北陸地方などに調査範囲を拡大し、これらの地域に所在するレディーミクストコンクリート工場（以下、製造者という）と施工者にアンケート調査を実施した。

本章では、アンケート調査から得られた主要な結果を示すとともに、寒中コンクリート工事の実態と課題について整理する。

2. 2 アンケート調査の概要

2. 2. 1 調査内容

寒中コンクリート工事が適用される主な地域に所在する、製造者 806 工場（全国生コンクリート工業組合連合会会員）および施工者 293 事業所（日本建設業連合会会員企業 200 事業所、地場施工業者 93 事業所）を対象に、2018 年 1 月下旬から 2 月上旬にアンケート調査を実施した。施工者に関しては、本支店などの管理部門に加えて、2017 年度に寒中コンクリート工事が行われた作業所に所属する技術者を対象とした。

表 2.2.1 に回答者別の調査項目および回答形式を示す。主な調査項目としては、寒中コンクリート工事における調合計画と強度推定の実施頻度と方法、温度管理方法、寒中指針の利用度と評価、新しい技術の適用状況などとした。なお、調査項目数は製造者 24、施工者（管理部門）29、施工者（作業所）36 であった。

調査方法は、回答者が調査票の電子データをウェブサイトから入手し、回答後の調査票を回収用のメールアドレスに送信する方法とした。

2. 2. 2 調査対象数と回答数

表 2.2.2 に回答者が所属する組織の所在地別の回答数などを示す。製造者、施工者（管理部門）および施工者（作業所）に対する回答数は、それぞれ 349 件（回答率 43%）、42 件（回答率 14%）、67 件（回答率不明）であり、総計 458 件の回答が得られた。

寒中コンクリート工事の適用状況は各地域の気象特性³⁾に影響されることが考えられるため、北海道、東北、北関東、中部、北陸および近畿の 6 地域に区分して調査結果を整理することとした。ただし、中部地方における作業所の回答数は 3 件と少数であることから、参考値として取り扱うこととする。

表 2.2.1 回答者別の調査項目および回答形式

分類	調査項目	製造者	施工者 管理部門	施工者 作業所
回答者の属性 など	本社所在地	-	△	△
	企業規模（従業員数）	-	○	○
	所属組織（工場）の所在地	△	△	△
	工事の発注者区分（民間、民間以外）	-	-	○
	2017年度の寒中コンクリート工事の適用物件数（計 300m ³ 以上）	○	○	-
	寒中コンクリート工事の予定数量	-	-	○
	回答者の寒中コンクリートの施工経験	-	○	○
回答者の寒中コンクリートの理解度	○	○	○	
調合計画	回答者の所属組織で調合計画を算定する頻度	○	○	-
	調合計画算定の実施者	-	-	○
	回答「頻度なし」以外：調合計画時に主に適用する図書	○	○	○
	回答「頻度なし」以外：調合計画方法の利用頻度（採用した方法）	○	○	○
	回答「頻度なし」以外：最も多く採用する調合計画方法	○	○	○
回答「頻度なし」以外：最も多く採用する調合計画方法の選定理由	◎	◎	◎	
養生計画	回答者の所属組織で加熱養生を算定する頻度	-	○	-
	加熱養生算定の実施者	-	-	○
	回答「頻度なし」以外：加熱養生時に、寒中指針を利用する頻度	-	○	○
養生・ 品質管理	温度測定の実施有無	-	-	○
	回答「温度測定あり」：温度測定機器の種類	-	-	◎
	回答「温度測定あり」：温度測定位置	-	-	◎
	回答「温度測定あり」：加熱養生時の計画温度と実績温度の差異	-	○	○
	現場養生供試体の目的	-	-	◎
	寒中適用時期における供試体の工場保管の頻度	○	-	-
	現場養生供試体の養生種別	-	-	◎
現場養生供試体の保管場所	-	-	◎	
強度推定	強度確保確認の実施有無	-	-	○
	強度推定を行う頻度	○	○	-
	回答「強度推定あり」：推定方法の利用頻度（採用した方法）	○	○	○
	氷点下温度域の積算温度の評価方法	◎	◎	◎
寒中指針	寒中指針の利用度	○	○	○
	回答「利用なし」以外：指針に対する評価	○	○	○
	回答「利用なし」以外：指針に関する問題点・要望	△	△	△
新技術 など	耐寒促進剤の利用度	○	○	○
	施工時の初期凍害の発生有無，判定・処置などに関する支援有無	○	○	○
	回答「あり」：判定方法や処置の概要	△	△	△
	高強度コンクリート，中庸熱セメント使用の施工（製造）実績	◎	◎	◎
	回答「実績あり」：調合計画や強度管理などの問題点など	△	△	△
	温度履歴によるせき板の除去方法（告示第 110 号）	○	○	○
	回答「告示既知」：告示第 110 号の適用有無	○	○	○
	寒中コンクリート工事に関連する新しい技術の採用有無	○	○	○
	回答「採用あり」：採用した技術の概要	△	△	△
寒中コンクリート用計算ソフトの利用経験の有無	○	○	○	
回答「利用あり」：ソフトの種類	◎	◎	◎	

○：単一回答，◎：複数回答，△：記入回答

表 2.2.2 アンケート調査の対象数と回答数

所属組織 所在地 回答者	北海道	東北地方					北関東地方				中部地方				北陸地方				近畿地方			所在地 不明	回答 数	対象 数	回答 率
	北海道	青森 県	秋田 県	岩手 県	山形 県	宮城 県	福島 県	茨城 県	栃木 県	群馬 県	長野 県	山梨 県	岐阜 県	愛知 県	新潟 県	富山 県	石川 県	福井 県	滋賀 県	奈良 県	京都 府				
製造者	84	17	11	21	16	37	13	5	8	13	25	2	0	0	28	6	16	19	16	5	5	2	349	806	43%
施工者 (管理部門)	18	0	0	1	0	7	0	-	-	-	1	1	0	4	6	1	2	1	-	-	-	0	42	293	14%
施工者 (作業所)	35	2	0	3	1	5	2	-	-	-	0	1	1	1	9	2	4	1	-	-	-	0	67	不明	不明

2. 3 アンケート調査の結果

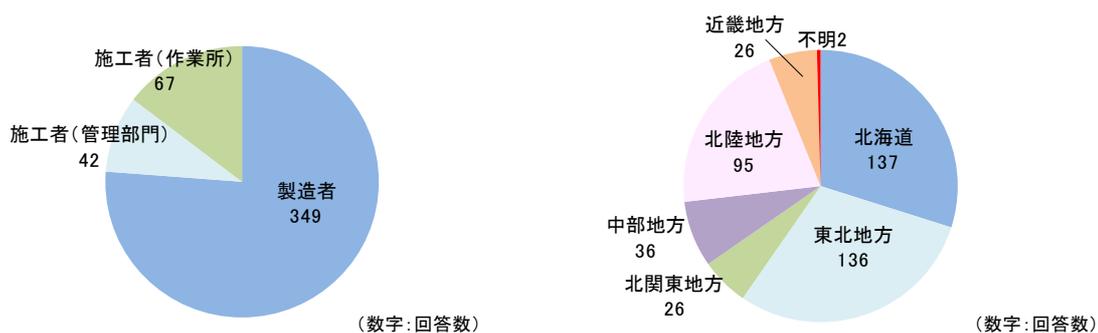
2. 3. 1 回答者の属性

図 2.3.1 に所属組織別および所属組織の所在地別の回答比率を示す。また、施工者に関しては、所属企業の従業員数別の回答比率を図 2.3.2 に示す。

製造者からの回答は全体の約 75%を占めており、施工者に比べて各地方からの回答が得られた状況にある。所属組織の所在地に関しては、北海道、東北地方および北陸地方が約 80%を占める。また、施工者の従業員数は、「1,000 人超え」(45%) が最も多く、次いで「301~1,000 人以下」(28%)、「101~300 人以下」(18%) であり、これらを合わせると約 90%を占める。

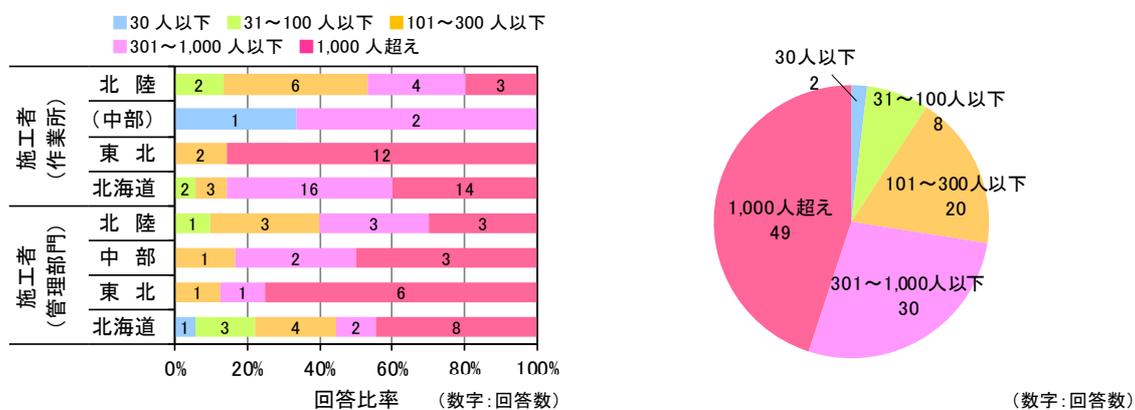
図 2.3.3 に、製造者と施工者（管理部門）回答による、所属組織における寒中コンクリート工事の適用物件数（2017 年度内に実施するコンクリート数量 300m³ 以上の建築工事を対象とする）を示す。また、図 2.3.4 に回答者の自己評価による寒中コンクリート工事に関する理解度を示す。

製造者回答において、北海道、東北および中部地方では 1 件以上の物件を保有するとの回答が 60%以上であるが、北関東、北陸および近畿地方では「物件なし」との回答が過半数を占める。



(a) 所属組織別 (b) 所属組織の所在地別

図 2.3.1 所属組織別および所属組織の所在地別の回答比率



(a) 所属・地域別 (b) 施工者全体

図 2.3.2 施工者における従業員数別の回答比率

回答者の理解度に関しては、「理解していない」がわずかに含まれているが、全体的に見ると「おおむね理解している」「普通」が大半を占める。地域別では、製造者、施工者ともに他の地域に比べて北海道と東北地方では「よく理解している」「おおむね理解している」に対する回答比率が高い傾向を示す。

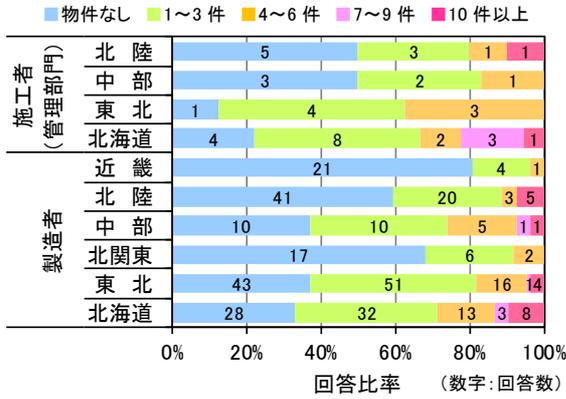


図 2.3.3 寒中コンクリート工事の適用物件数

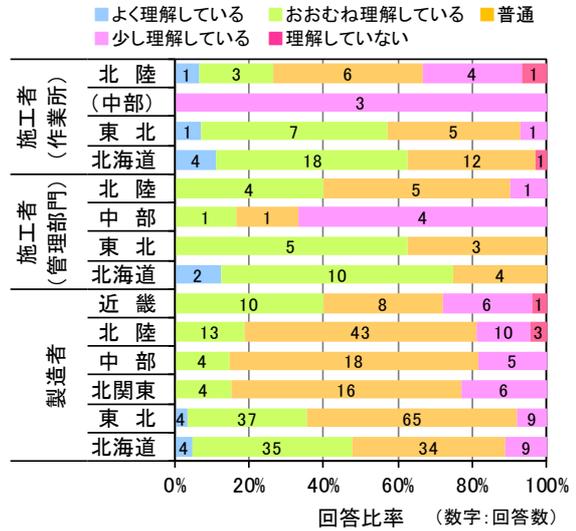


図 2.3.4 寒中コンクリート工事の理解度

2. 3. 2 調査計画

(1) 所属組織における調査計画に関連する計算の実施頻度

製造者と施工者（管理部門）回答による、所属組織で調査計画に関連する計算が実施される頻度を図 2.3.5 に示す。「少ない」「非常に少ない」「実施なし」に該当する回答が半数以上を占め、全地域ともにその実施頻度は低い。そのなかで、実施頻度が比較的高い傾向を示したものは、製造者回答での北海道と中部地方、施工者（管理部門）回答での東北地方である。

なお、図 2.3.6 に示すように、施工者（作業所）回答では関連計算は作業所技術者または製造者が実施することが多く、施工者（管理部門）が関与する頻度は低い傾向がみられた。

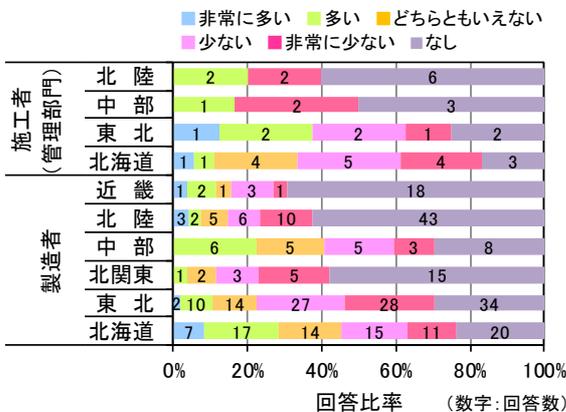


図 2.3.5 調査計画計算の頻度（製造者・管理部門回答）

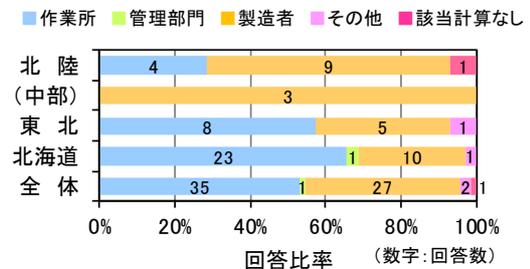


図 2.3.6 調査計画計算の実施者（作業所回答）

(2) 調合計画方法

図 2.3.7 は、製造者回答における 6 種類の調合計画方法の利用度を地域別に示したものである。ここで、「JASS5 による方法」は材齢 28 日までの予想平均気温に応じて構造体強度補正値を定める方法である。また、「積算温度による方法」は寒中コンクリート工事における標準的な方法であり、積算温度から構造体強度補正値を定める方法をいう。

北海道では「積算温度による方法」の利用度が最も高く、「非常に多い」(19%)、「多い」(35%)を合すると過半数を占める。次いで、「JASS5 による方法」と「標準曲線 (平均的)」が比較的よく利用されることがわかる。東北地方では「JASS5 による方法」の利用度が高く、「非常に多い」「多い」が約 60%を占める。「JASS5 による方法」に関しては、関東、中部、北陸および近畿地方でその利用度はさらに高くなり、「非常に多い」「多い」の回答がほとんどである。なお、これらの地域において「積算温度による方法」は利用されるものの、その利用度は極めて低い。

図 2.3.8 に最も多く採用する調合計画方法を示す。製造者回答では、調合計画方法の利用度(図 2.3.7)と同様の傾向が認められる。施工者(管理部門および作業所)の回答では、北海道では「積算温度による方法」、東北地方では「JASS5 による方法」と「積算温度による方法」、北海道と東北地方以外では「JASS5 による方法」と「工場の実績などによる強度増進曲線」が利用される。

各地域で主に利用される調合計画方法には大きな差異が認められる。その要因として、「JASS5 による方法」は材齢 28 日までの予想平均気温が 0℃以上の場合に制限されており、この条件が満足できない場合には「積算温度による方法」を採用することが想定される。各地域の気象条件から定められる材齢 28 日までの平均温度が、調合計画方法を選択する際の分岐条件であると考えられる。

(3) 調合計画の適用図書

図 2.3.9 に調合計画に関連する計算を実施する際に適用する図書を示す。北海道では「寒中指針」、東北地域では「JASS5」と「寒中指針」、これらの地域以外では「JASS5」と「公共建築工事標準仕様書」が適用される傾向がみられ、採用する調合計画方法に応じて指針類を参照することが伺える。

2. 3. 3 強度推定

(1) 所属組織における強度推定の実施頻度

図 2.3.10 に回答者の所属組織において強度推定が実施される頻度を示す。製造者と施工者(管理部門)ともに、北海道と東北地方を除く地域では「実施なし」が大多数を占める。一方、調合計画と同様に北海道の製造者と東北地方の施工者(管理部門)での実施頻度が高く、特に北海道の製造者では「非常に多い」「多い」との回答が約 35%に達する。

(2) 強度推定方法

製造者回答による、各地域における 5 種類の強度推定方法の利用度を図 2.3.11 に示す。北海道では「標準曲線 (平均的)」と「標準曲線 (安全側)」、北海道以外の地域では「工場実績などによる強度増進曲線」の利用度が高い。特に北海道における「標準曲線 (平均的)」の利用

調合計画方法 (図 2.3.7, 図 2.3.8 共通)

- 方法 1): JASS5 による方法 (材齢 28 日までの予想平均気温によって構造体強度補正値を定める)【JASS5 表 5.1】
- 方法 2): 積算温度による方法 (積算温度をもとに構造体強度補正値を定める)【寒中指針 表 4.2, 4.3, JASS5 解説表 12.2, 12.3】
- 方法 3): 標準曲線 (安全側) を利用する方法【寒中指針 資料 3】
- 方法 4): 標準曲線 (平均的) を利用する方法【寒中指針 資料 3】
- 方法 5): 工場の実績や強度試験結果から定めた強度増進曲線を利用する方法
- 方法 6): その他の方法

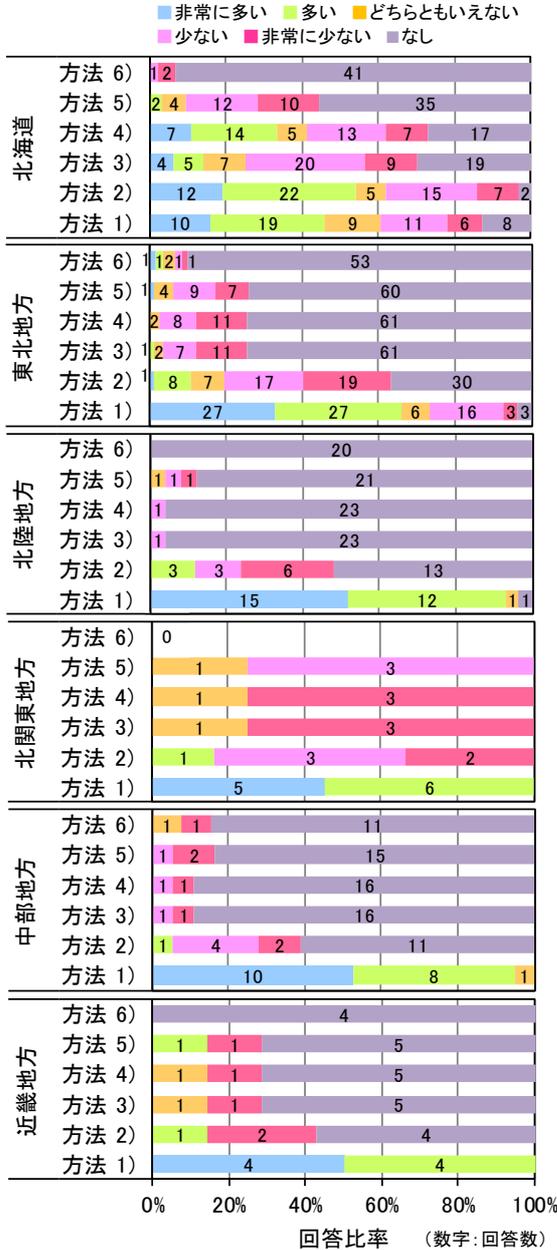


図 2.3.7 調合計画方法の利用度 (製造者回答)

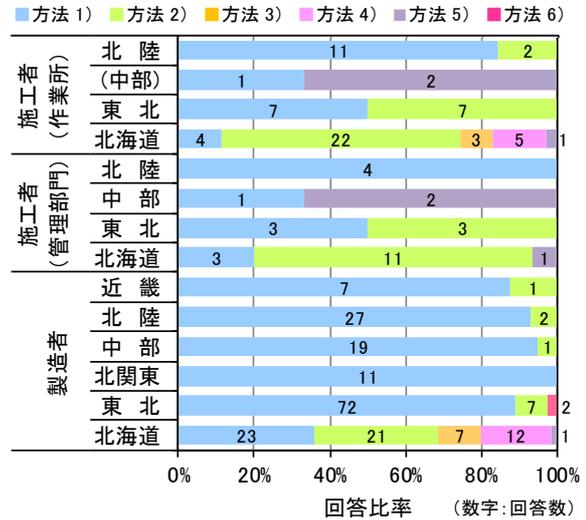


図 2.3.8 最も多く採用する調合計画方法 (全回答)

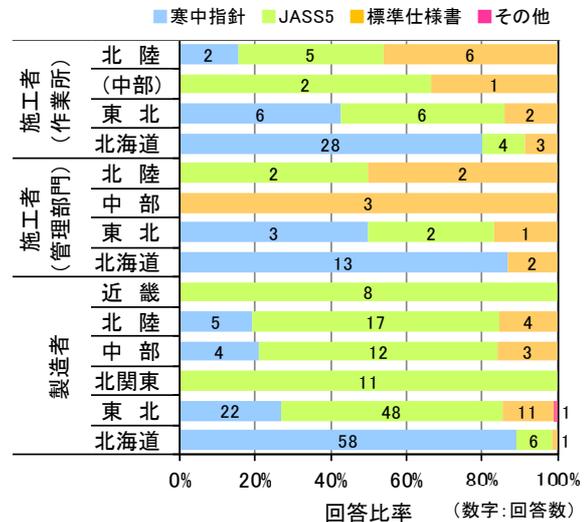


図 2.3.9 調合計画の適用図書 (全回答)

度が高く、「非常に多い」(10%)と「多い」(39%)がほぼ半数を占める。

調合計画方法として「JASS5 による方法」を適用する場合、一般的には設計基準強度が得られる材齢を 28 日とすることから、強度推定によってこの材齢を確認する必要性は低い。一方、「積算温度による方法」では、初期強度や設計基準強度が得られる材齢は工程を考慮した任意の材齢として計画するため、実施段階での検証が必要となる。したがって、強度推定においても調合計画と同様に地域によって差異が生じているものと考えられる。

(3) 氷点下域に対する積算温度の評価方法

図 2.3.12 に氷点下域に対する積算温度の算定方法を示す。北海道を除く地域では「通常の算定方法」が大多数であるが、北海道では「通常の算定方法」のほかに「低減する算定方法」が採用されることが確認できる。「低減する算定方法」は現行の寒中指針に新たに導入されたものであり、寒中指針の利用頻度が高い北海道において普及したものと考えられる。

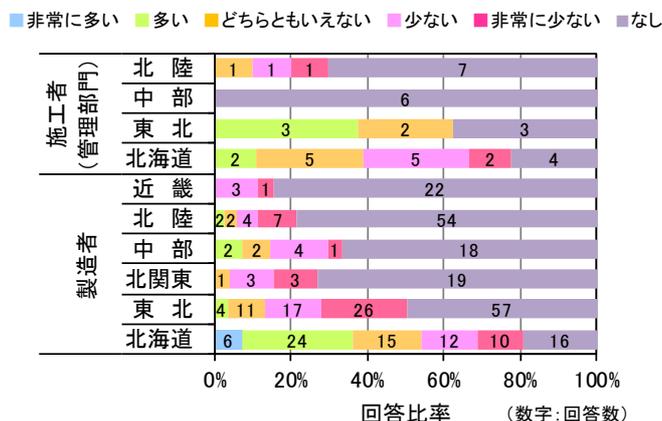


図 2.3.10 強度推定の実施頻度 (製造者・管理部門回答)

強度推定方法

- 方法 1)：積算温度の実績値と計画値を比較する方法
- 方法 2)：標準曲線（安全側）を利用する方法【寒中指針 資料 3】
- 方法 3)：標準曲線（平均的）を利用する方法【寒中指針 資料 3】
- 方法 4)：工場の実績や強度試験結果から定めた強度増進曲線を利用する方法
- 方法 5)：その他の方法

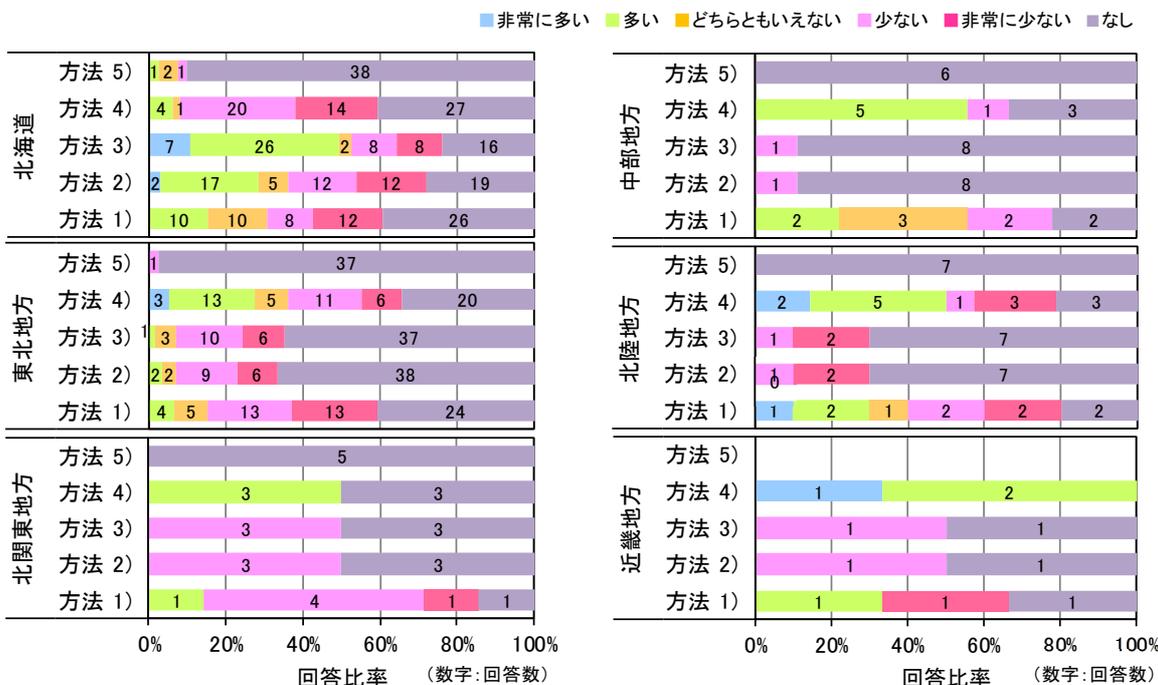


図 2.3.11 強度推定方法の利用度 (製造者回答)

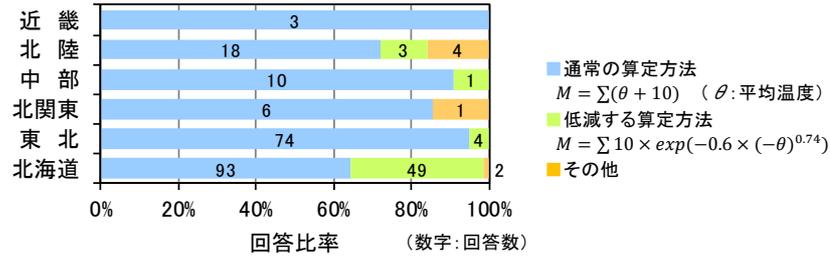


図 2.3.12 氷点下域に対する積算温度の評価方法 (複数選択, 全回答)

2.3.4 養生計画

施工者 (作業所) 回答による, 加熱養生計画における熱量計算の実施者を図 2.3.13 に示す。また, 施工者 (管理部門および作業所) 回答による, 寒中指針に示される熱量計算方法の利用度を図 2.3.14 に示す。

すべての地域において, 熱量計算は「作業所技術者」による実施がほとんどであり, 管理部門などが関与することは少ない。熱量計算方法の利用度に関しては, 北海道が最も高く, 「非常に多い」が47%であり, 「多い」と合せると約90%を占める。一方, 中部・北陸地方では, 加熱養生の実施自体が少なく, その計算方法の利用度は低い。

2.3.5 品質管理

(1) 温度管理

作業所回答による, コンクリートの温度管理に用いる計測器を図 2.3.15 に, 計測部位を図 2.3.16 に示す。温度計測機器としては, 「電子式温度計」の採用が多く, 「アナログ式温度計」と「アナログ式自記温度計」が採用されることは少ない。また, 各地域ともに「上屋内部」「外部」「床」の3箇所を温度計測対象とすることが多い。

図 2.3.17 に, 施工者 (管理部門および作業所) 回答による, 加熱養生における計画温度と実績温度との差異を示す。加熱養生時の温度差に関して, 北海道では「計画値に比べ実績値の方が5~10℃位高い」, 東北地域では「ほぼ同じ」が, 両者ともに60%程度を占めており, 地域によって温度差に対する認識が異なることがわかる。

(2) 強度管理

作業所回答による, 寒中コンクリート工事の適用期間中に作成する現場養生供試体の目的, 養生種別および保管場所を図 2.3.18~2.3.20 に示す。

現場養生供試体は各地域ともに, 「初期養生の打ち切り」「せき板の取外し」「支保工の取外し」および「構造体コンクリート強度の確認」を目的とすることが多い。その養生種別は「封かん養生」が大多数であるが, 北海道以外の地域では「水中養生」も採用される。また, 極めて少数ではあるが, 「簡易断熱養生」が利用されることも確認できる。

現場養生供試体の保管場所は, 北海道では「施工階」、北海道以外では「工事敷地内の建物外部」が過半数を占める。また, 「工事敷地外の建物外部」での保管も少数ながら存在する。供試体の養生方法は構造体コンクリートの温度条件に近い現場封かん養生が原則であるにもかかわらず, これに適合しない方法によって強度管理が実施されている可能性が示される。

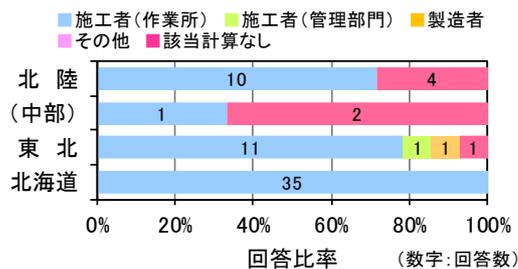


図 2.3.13 熱量計算の実施者（作業所回答）

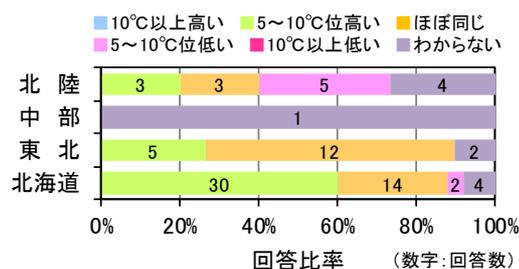


図 2.3.17 加熱養生時の温度差（施工者回答）

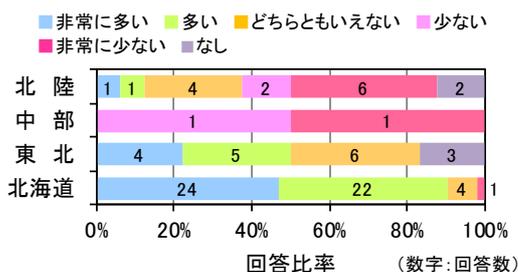


図 2.3.14 寒中指針の熱量計算の利用度（施工者回答）

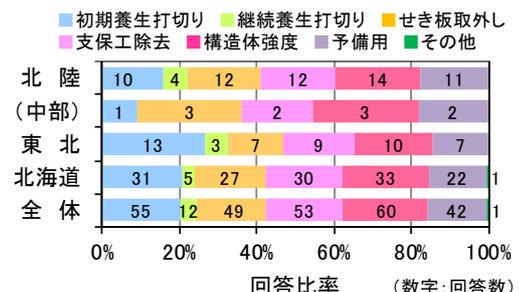


図 2.3.18 現場供試体の目的（複数選択，作業所回答）

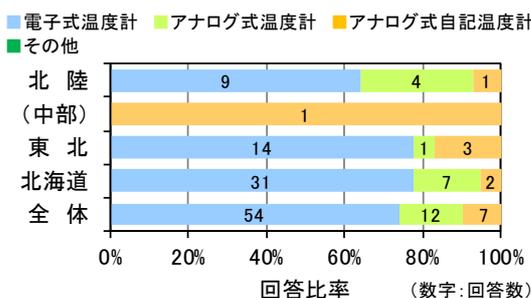


図 2.3.15 温度計測機器（複数選択，作業所回答）

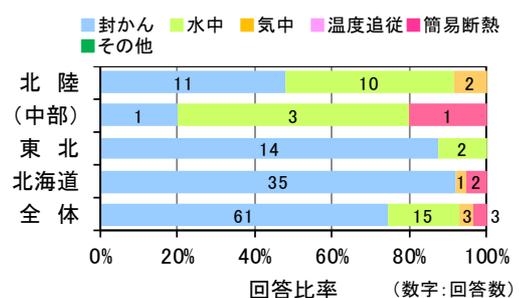


図 2.3.19 供試体の養生種別（複数選択，作業所回答）

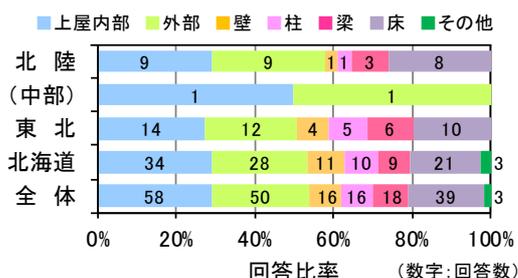


図 2.3.16 温度計測部位（複数選択，作業所回答）

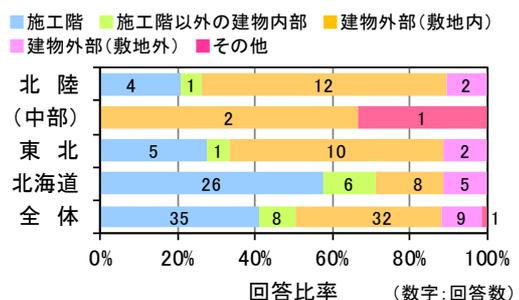


図 2.3.20 現場供試体の保管場所（複数選択，作業所回答）

2. 3. 6 寒中指針の利用度および評価

図 2.3.21 に寒中コンクリート工事に対応する際の寒中指針の利用度を示す。北海道と東北地方における利用度が高い傾向を示し、特に施工者（管理部門）回答では「非常に多い」「多い」が 80%前後を占める。一方、これらの地域以外では利用度は低く、「利用しない」「非常に少ない」が 60%を超える。

図2.3.22に寒中指針に対する評価を示す。すべての評価項目に共通して、「普通」が50～60%、「良い」が30%程度に対して、「非常に悪い」「悪い」との回答が5%程度であることから、比較的良好な評価であるといえる。

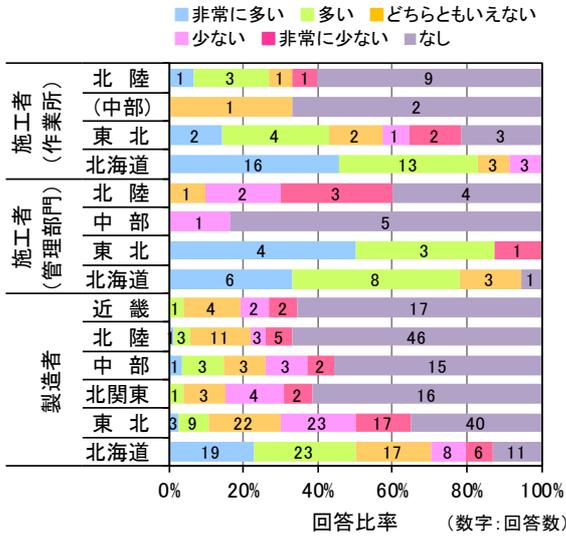


図 2.3.21 寒中指針の利用度 (全回答)

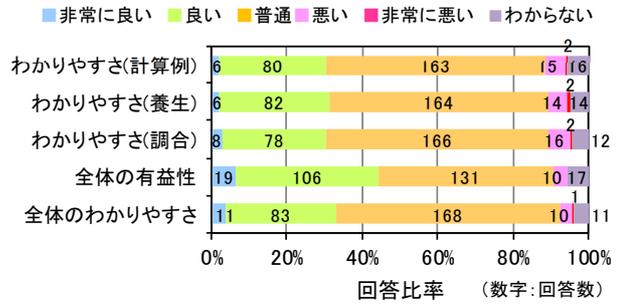


図 2.3.22 寒中指針の評価 (全回答)

2. 3. 7 寒中コンクリート工事における新しい技術の採用など

図2.3.23に、中庸熱セメントを使用したコンクリートと高強度コンクリートに関する製造または施工実績の有無を示す。北海道と北陸地方での実績が多いが、これら以外の地域においても少数ながら実績が存在する。特に、北海道では高強度コンクリートに関して「実績あり」との回答が約20%を占める。

図2.3.24に耐寒促進剤の利用度を示す。耐寒促進剤の利用度は北陸と近畿地方で低く、関東と中部地方で高い傾向がある。

図2.3.25に新しい技術の採用有無、計算ソフトの利用経験などを示す。新しい技術の採用実績は12件であり、極めて少ない。その主な内容としては、耐寒促進剤、ユニット式養生上屋、サーモ付加熱設備、インターネット利用による採暖温度確認である。

コンクリートの温度履歴をもとにせき板の取外しが可能となった、旧建設省告示第110号の改正(2016年3月)に関して、「知っている」との回答は16%であり、その認知度は低い。

また、寒中コンクリート工事に関連する計算ソフトの利用経験は、全回答者平均では28%であるが、図2.3.26に示すように北海道と東北地方での利用度については他の地域に比べて高い傾向がみられる。

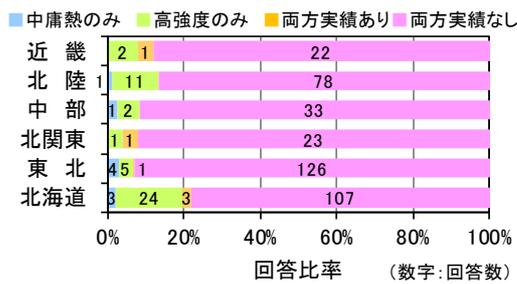


図 2.3.23 製造または施工実績の有無 (全回答)

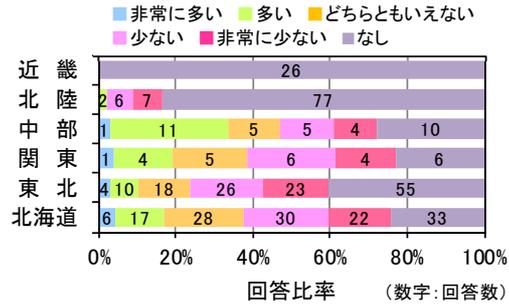


図 2.3.24 耐寒促進剤の利用度 (全回答)

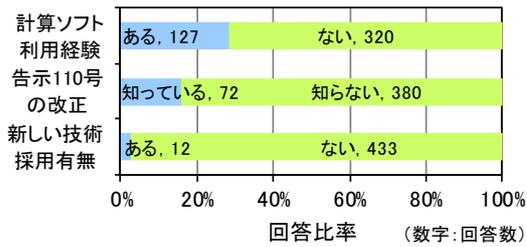


図 2.3.25 新しい技術の採用実績など (全回答)

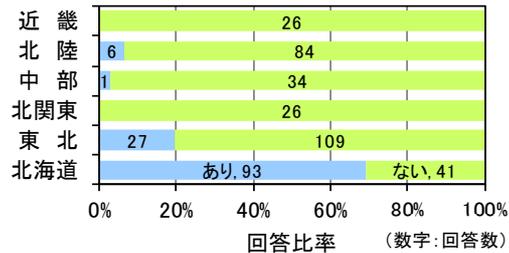


図 2.3.26 計算ソフトの利用度 (全回答)

2. 4 寒中コンクリート工事における課題

本調査の結果を踏まえ、寒中コンクリート工事における課題について考察する。

(1) 適用条件のうち日平均気温 4℃以下のみ該当する場合の調合計画

本調査では、寒中コンクリート工事の計画・管理方法、指針の利用度などは地域によって異なる傾向を示すことが確認された。表 2.4.1 に示すように、代表的な全国気象官署の地点における 1981 年から 2010 年までの気象統計値に基づく適用日数、日最低気温、適用条件別の期間および材齢 28 日までの予想平均気温が 0℃未満となる期間は大きく異なる。工事での対応は施工時期の気象条件に応じて決定されることから、その実施内容には地域差が生じることになる。

調合計画方法に関しては、「JASS5 の方法」が北海道以外の地域において広範囲に利用されることが確認された。この方法では、寒中コンクリート工事の適用条件のうち日平均気温 4℃以下のみ該当する場合には、材齢 28 日までの予想平均気温から構造体強度補正值 (3 または 6N/mm²) を簡便に決定することができる。しかし、材齢 28 日までの予想平均気温が 0℃以上に制限されているため、一部の地域においては適用できない期間が存在する。

本調査における寒中指針に対する要望には、「材齢 28 日までの予想平均気温に応じて構造体強度補正值 9N/mm² を採用したい」との回答が含まれており、その妥当性を検討することが必要である。

(2) 加熱養生時の温度差異

加熱養生における計画と実績の温度差異に関しては、本調査 (図 2.3.17) と同様に過去の調査⁴⁾からも、計画温度に対して実績温度が高くなると施工者に認識されていることが示されている。また、図 2.4.1 に示すように、北海道内の実施工現場において計測した躯体温度と計画養生温度の関係からも、実績温度が高くなる傾向が確認できる^{5), 6)}。

これらの結果を踏まえ、以下に加熱養生に関連する課題を記載する。

- 1) 計画段階では寒波を考慮して日平均気温の平年値から 4℃低い平均気温を想定する。本来、施工直前の気象予報に基づいて想定気温との相違を確認することが基本となるが、実務では実行されていない可能性が高く、実績温度を上昇させる要因となる。寒中指針の運用上の課題として捉え、適用条件などの明確化を図ることが必要である。
- 2) 現行の寒中指針における熱損失量の算定手法、被覆材料の熱貫流率や安全率などは 1978 年の指針発刊時の内容が踏襲されており、40 年間以上も大きな見直しがなされていない。そのため、これらの妥当性について再検証する必要がある。

表 2.4.1 代表的な全国気象官署の地点における適用期間と温度条件

気象庁平年値 (1981 年～2010 年)

地名	適用日数 (日)	最低温度 (℃)	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
北海道	旭川	182	-13.5						
	札幌	161	-7.5						
	函館	141	-6.8						
東北	青森	131	-4.5						
	盛岡	131	-6.2						
	仙台	90	-2.2						
関東	水戸	62	-2.5						
	前橋	51	-1.2						
中部	長野	110	-4.8						
	甲府	52	-2.6						
北陸	新潟	80	-0.4						
	福井	59	-0.3						
近畿	彦根	51	0.2						
	奈良	31	-0.7						

- (Blue line) : 寒中コンクリート工事の適用条件①：日平均気温が 4℃以下の期間
- (Green line) : 寒中コンクリート工事の適用条件②：材齢 91 日までの積算温度が 840°D・D 未満の期間
- (Red line) : 材齢 28 日までの平均気温が 0℃未満の期間

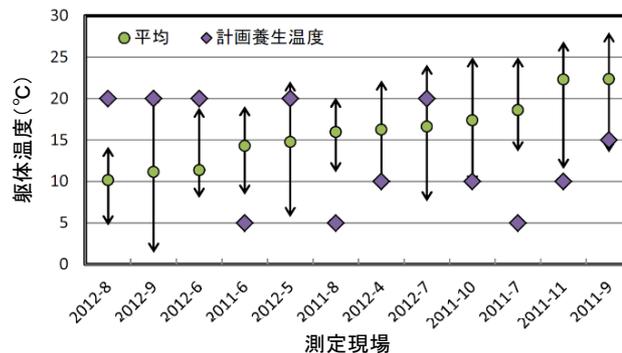


図 2.4.1 加熱養生期間中の躯体温度と計画養生温度^{5),6)}

(3) 構造体コンクリートの強度管理

本調査(図 2.3.20)では現場養生供試体の施工階以外での保管が確認されたが、構造体コンクリートの強度を推定するための供試体は構造体と同等の温度条件で保管することが原則である。

特に、寒中コンクリート工事では保温養生を行うことが多く、構造体は外気温とは異なる温度環境となる。そのため、供試体保管場所の温度環境、供試体のキャッピング作業に伴う施工場所からの持ち出しによって、供試体と構造体コンクリートとの温度履歴が異なるといった問題が生じる。

2016年に改正された旧建設省告示第110号では、せき板の取外しに必要な強度に関して、供試体を用いた圧縮強度試験を実施しなくとも、構造体の温度履歴を用いた推定強度によって判定することが可能となった。供試体保管に係わる問題を解消する方法として、この告示の適用など、寒中コンクリート工事における適正かつ合理的な強度管理方法を検討する必要がある。

(4) 高強度コンクリート

寒中コンクリート工事における高強度コンクリートの実績が多数確認された(図 2.3.23)。しかし、現行の寒中指針において高強度コンクリートは適用除外とすることができるとされ、高強度コンクリートに関する技術的な対応は網羅されていない。高強度コンクリートの普及度を考慮すると、初期強度や設計基準強度に対する推定方法および強度試験の判定方法に関する内容を補完する必要がある。

2.5 第2章の結論

製造者と施工者を対象とした寒中コンクリート工事に関するアンケート調査の結果から、以下に示すような実態と課題が明らかになった。

- (1) 調合計画の関連計算や強度推定に関する実施頻度、各種算定方法の利用度と適用指針、寒中指針の利用度などは、地域によって大きな差異が認められる。
- (2) 調合計画方法として、北海道では「積算温度による方法」、東北地方では「JASS5による方法」と「積算温度による方法」、これらの地域以外では「JASS5による方法」が主に採用される。
- (3) 強度推定方法に関しては、北海道では「標準曲線（平均的）」と「標準曲線（安全側）」、北海道以外の地域では「工場実績などによる強度増進曲線」の利用度が高い。
- (4) 加熱養生時における計画温度と実績温度の差は、北海道では「実績値の方が5～10℃位高い」、東北地方では「ほぼ同じ」と認識される傾向が強い。
- (5) 寒中指針の利用度は北海道と東北地方で高く、その評価に関しては「普通」と「良い」が大多数を占めるが、有益性に比べてわかりやすさに対する評価が低い。
- (6) 本調査の結果を踏まえ、寒中コンクリート工事の課題として、調合計画方法の適用範囲、加熱養生時の温度差異、構造体の強度管理方法、高強度コンクリートへの対応が考えられる。

- 1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2011.11
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015.7
- 3) 長谷川拓哉，濱幸雄，長谷川壽夫，桂修，谷口円，深瀬孝之：気温の平年値の変化が寒中コンクリート工事の適用期間・積算温度に及ぼす影響，日本建築学会技術報告集，第18巻，第38号，pp.25-29，2012.2
- 4) 深瀬孝之，濱幸雄，長谷川拓哉，谷口円，他15名：寒中コンクリートに関するアンケート調査結果 寒中コンクリート施工調査研究委員会報告，日本建築学会北海道支部研究報告集，第80巻，pp.359-362，2007.7
- 5) 谷口円，深瀬孝之，桂修，濱幸雄：実施工現場におけるコンクリート,外気,環境温度 その1 測定概要と夏期の結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.385-386，2013.8
- 6) 深瀬孝之，谷口円，濱幸雄，長谷川拓哉：実施工現場におけるコンクリート,外気,環境温度 その2 冬期の結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.387-388，2013.8

第 3 章

構造体コンクリートの強度推定方法

第3章 構造体コンクリートの強度推定方法

3.1 はじめに

寒中コンクリート工事では、初期凍害防止や低温環境下での工程管理の観点から、通常期に比べて厳密な強度管理が要求される。そのため、従来から積算温度を用いた強度推定方法（以下、積算温度方式という）を用いて、初期養生の打ち切りや支保工の除去を判断するための強度試験の実施時期が検討されてきた。この積算温度方式は1960年代から洪ら¹⁾によって体系化されたものであるが、近年の研究成果^{2), 3)}をもとに見直しが行われ、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」⁴⁾（以下、寒中指針という）における技術的な根拠として取り纏められている。

実際のコンクリート工事では、現場養生した供試体の圧縮強度試験によってせき板の存置期間が決定されることが多い。したがって、この供試体は構造体コンクリートと同等の温度条件で保管される必要がある。

一方、第2章「寒中コンクリート工事の実態と課題」で述べたように、アンケート調査では現場養生供試体を施工階以外で保管される事例が確認された。また、供試体はキャッピング作業に伴い施工場所から数日間持ち出されることが一般的に行われていること、供試体に比べて構造体の硬化初期における温度上昇量が大きいことを考えると、供試体と構造体コンクリートとの温度履歴は異なることが想定される。そのため、圧縮強度試験では構造体コンクリート強度を適切に判定できない可能性が高い。

2016年3月に、建築基準法施行令第76条「型わく及び支柱の除去」の技術的基準となる「建設省告示第110号」（以下、告示第110号という）が改正された。この改正では、せき板の取り外しに関する基準として、平均気温に応じた存置日数および圧縮強度試験による方法に加えて、有効材齢を用いた強度推定方法（以下、有効材齢方式という）が追加された。また、有効材齢方式の具体的な運用に関する管理要領⁵⁾が示された。

この改正によって、圧縮強度試験によらず、構造体の温度履歴から推定した強度を用いてせき板の取り外しに関する判定が可能となった。前述したような強度管理上の課題に対して、構造体コンクリートの温度履歴に基づいて強度を推定する方法は、コンクリート部材の強度発現性を合理的かつ適正に評価できる手法として実施工での活用が期待される。

本章では、有効材齢方式と積算温度方式との強度推定結果を比較するとともに、せき板の取り外しに関する強度管理手法としての適用性について検討する。なお、告示110号では、有効材齢方式以外にも、せき板の取り外しに関する基準として適切な研究的裏付けのあるものは、適用できるとされている。

3. 2 圧縮強度の推定方法

3. 2. 1 有効材齢方式

有効材齢方式は、コンクリートの温度履歴から式 (3.2) によって有効材齢を求め、式 (3.1) によって圧縮強度を算出する方法である。告示第 110 号ではせき板を取り外すために必要な圧縮強度の推定に用いることとし、その対象は「基礎、梁側、柱および壁」、「版下および梁下」に対して、それぞれ 5N/mm^2 および設計基準強度の 50% である。

$$f_{c_{te}} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{(t_e - 0.5)/t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} \times f_{c_{28}} \quad (3.1)$$

ここに、 $f_{c_{te}}$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

s : セメントの種類に応じて、表 3.2.1 に掲げる数値

t_e : コンクリートの有効材齢 (日)

$$t_e = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i/T_0'} \right] \quad (3.2)$$

Δt_i : (i-1) 回目の測定から i 回目の測定までの期間 (時間)

T_i : i 回目の測定により得られたコンクリートの温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_0' : 1 (無次元化のための係数) ($^{\circ}\text{C}$)

t_0 : 1 (日)

$f_{c_{28}}$: 次の①, ②のいずれかによる。 (N/mm^2)

① JIS A 5308 に適合するコンクリートにあっては、発注した呼び強度の強度値

② 建築基準法第 37 条第 2 号の国土交通大臣の認定を受けたコンクリートにあっては、設計基準強度に当該認定において指定された構造体強度補正值を加えた値

表 3.2.1 セメントの種類による係数 s

セメントの種類	s	セメントの種類	s
普通ポルトランドセメント	0.31	低熱ポルトランドセメント	1.06
早強ポルトランドセメント	0.21	高炉セメント B 種, C 種	0.54
中庸熱ポルトランドセメント	0.60	フライアッシュセメント B 種, C 種	0.58

3. 2. 2 積算温度方式

寒中指針における調合計画および強度管理では、式 (3.3) ~ (3.8) に示される積算温度と圧縮強度との関係 (積算温度方式) に基づいて、初期強度、設計基準強度および品質基準強度を確保するために必要な積算温度が決定されている。

ここで、標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度 ${}_{20}F_{28}$ を調合強度とする場合には積算温度と圧縮強度の平均的な関係（不良率 50%）が得られ、呼び強度とする場合には安全側の関係（不良率 4%）が得られる。したがって、調合計画では、初期強度や設計基準強度などの施工上必要となる強度に対しては平均的な関係、構造体コンクリートの要求品質である品質基準強度に対しては安全側の関係が適用される。

$$F = F_{\infty} \times \exp(a \times M_c^b) \quad (3.3)$$

ここに、 F ：コンクリートの圧縮強度（N/mm²）

M_c ：コンクリートの温度補正を行った積算温度（°D・D）

$$M_c = M + C_M(T_{24} - 20) \quad (3.4)$$

$$M = \sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \quad (3.5)$$

M ：積算温度（°D・D）

T_c ：期間 Δt のコンクリートの平均温度（°C）

Δt ：時間間隔（日）

T_{24} ：打ち込みから 24 時間のコンクリートの平均温度（°C）

F_{∞} ：コンクリートの最終到達強度（N/mm²）

$$F_{\infty} = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp(a \times {}_{20}M_{28}^b)} \times (1 + C_f(T_{24} - 20)) \quad (3.6)$$

${}_{20}F_{28}$ ：標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度（N/mm²）

${}_{20}M_{28}$ ：標準水中養生を行った材齢 28 日における積算温度（°D・D）

a, b ：セメントの種類による係数

$$a = a_1 \times {}_{20}F_{28} + a_2 \quad (3.7)$$

$$b = b_1 \times {}_{20}F_{28} + b_2 \quad (3.8)$$

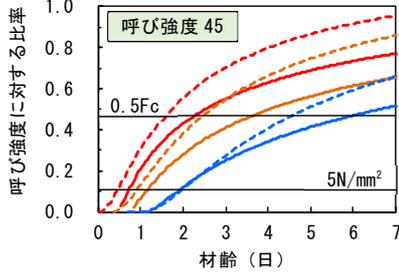
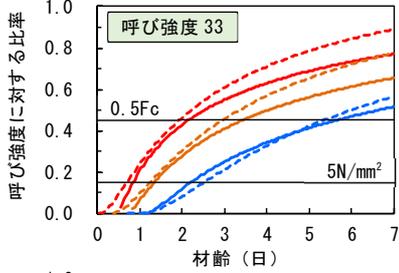
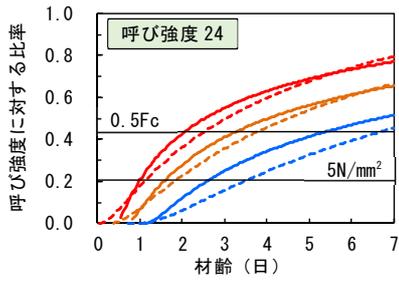
$a_1, a_2, b_1, b_2, C_f, C_M$ ：セメントの種類による係数（表 3.2.2 による）

表 3.2.2 セメントの種類による係数 s

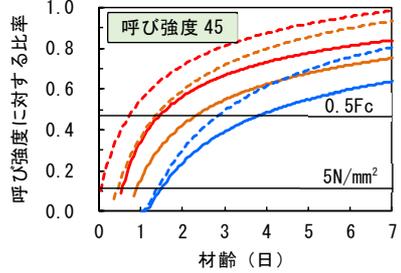
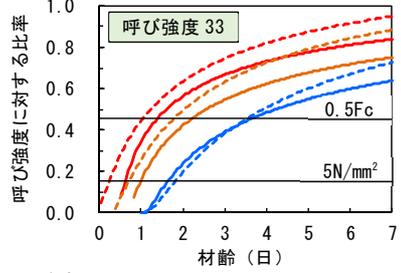
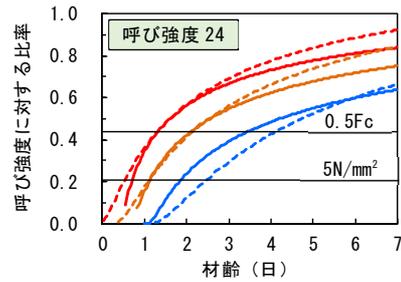
セメントの種類	a_1	a_2	b_1	b_2	C_M	C_f
普通ポルトランドセメント	526.9	-37.8	13.34	-1.06	0.680	-0.0005
早強ポルトランドセメント	-439.0	1.1	-5.14	-0.46	0.975	-0.0027
高炉セメント B 種	-405.6	-3.6	-1.67	-0.44	1.355	0.0075
フライアッシュセメント B 種	97.4	-16.0	6.68	-0.72	1.376	0.00028

3. 2. 3 有効材齢方式と積算温度方式における強度推定値の比較

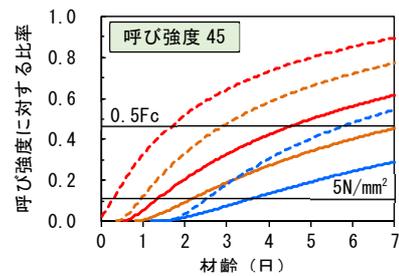
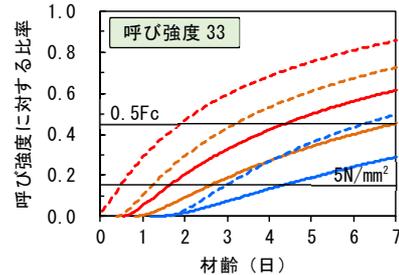
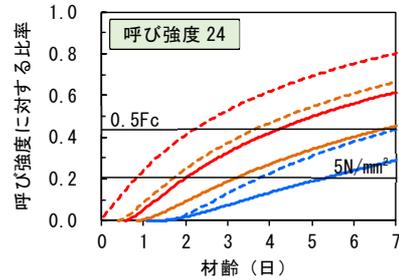
図 3.2.1 に、有効材齢方式と積算温度方式を用いて算出した強度比率（推定値／呼び強度）と材齢の関係を示す。積算温度方式では、セメント種類、呼び強度および打ち込みから 24 時間の平均温度によって強度発現性が異なることから、セメントの種類（4 水準）、呼び強度（3 水準）および養生温度（3 水準）を変化させて比較することとした。



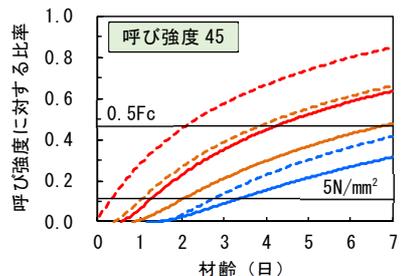
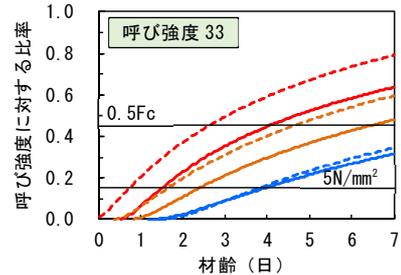
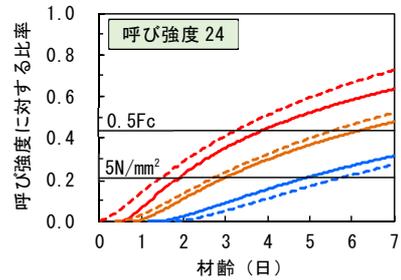
(a) 普通ポルトランドセメント



(b) 早強ポルトランドセメント



(c) フライッシュセメント B 種



(d) 高炉セメント B 種

1) 有効材齢方式
 — : 養生温度 25°C
 - - : 養生温度 15°C
 ... : 養生温度 5°C
 2) 積算温度方式
 ... : 養生温度 25°C
 - - : 養生温度 15°C
 — : 養生温度 5°C
 注) 図中の 0.5Fc は、構造体強度補正値を 3N/mm² とする場合の設計基準強度の 50%を示す。

図 3.2.1 各種セメントに関する有効材齢方式と積算温度方式による強度推定値の比較

普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントに関して、有効材齢方式と積算温度方式との差異は比較的小さく、せき板の取り外しに必要となる圧縮強度 5N/mm^2 が得られる日数の差は 0.5 日以下がほとんどである (図 3.2.2)。

一方、フライアッシュセメントおよび高炉セメントの場合、初期材齢の段階から両方式における差異は大きい。特にフライアッシュセメントでは、圧縮強度 5N/mm^2 が得られる日数として 1.0~1.5 日程度の差異が生じている。この要因としては、強度推定式を決定した際に用いた混和材の種類、置換率などの相違が考えられる。

具体的には、有効材齢方式では高炉セメント B 種および C 種相当 (普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末 4000 を混合率 45%、70%として混合する)、およびフライアッシュセメント B 種および C 種相当 (普通ポルトランドセメントにフライアッシュ II 種を混合率 20%、30%として混合する) を対象としているのに対して、積算温度方式では市中数社の高炉セメント B 種およびフライアッシュセメント B 種を対象として強度推定式の諸係数が設定されていることが挙げられる。

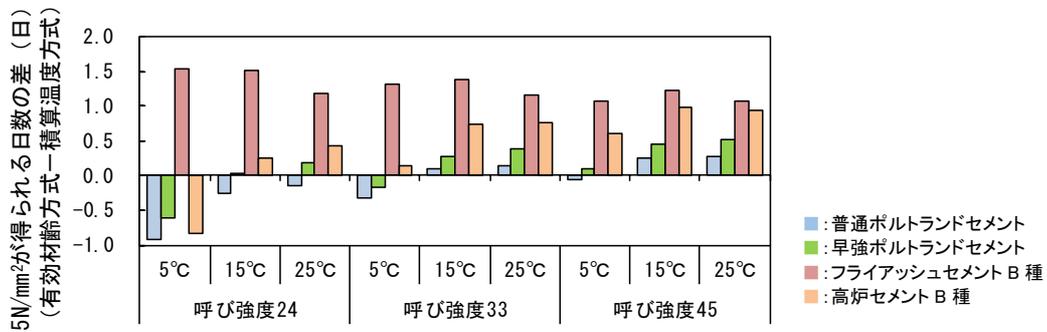


図 3.2.2 有効材齢方式と積算温度方式での 5N/mm^2 が得られる日数差

3. 3 実績データによる実測値と推定値の比較

フライアッシュセメント B 種において、有効材齢方式と積算温度方式による強度推定値に大きな相違が確認された。そこで、レディーミクストコンクリート工場 1 社（札幌市東区）が保有する圧縮強度試験の実績データを用いて、実測値と推定値を比較することとした。

表 3.3.1 に実績データの概要を示す。2015 年度から 2016 年度までの 2 年間に於いて寒中コンクリートの適用期間以外に出荷されたもので、高強度を除く呼び強度の範囲を対象とした。試験体は各出荷先で作製した強度試験用供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ，封かん養生）とし、試験材齢は 4 日以内とした。供試体の養生温度は、工場試験室での保管時間を考慮して、試験室の温度と札幌气象台（札幌市中央区）で観測された日平均気温を用いて温度履歴を決定した。

セメントの種類はフライアッシュセメント B 種相当（普通ポルトランドセメントにフライアッシュ II 種を混合率 20%として混合する），および一般の工事で最も使用されている普通ポルトランドセメントの 2 種類とした。表 3.3.2 にメーカーの試験成績表によるフライアッシュの品質を示す。参考文献⁵⁾で使用したフライアッシュに比べ、二酸化けい素の構成比率は高く、比表面積は低いことが確認できる。

図 3.3.1 (a) に、普通ポルトランドセメントに関する、圧縮強度の実測値と有効材齢方式および積算温度方式による推定値との関係を示す。両方式ともに全体的にばらつきが大きいですが、圧縮強度の実測値は推定値を上回る傾向を示す。また、圧縮強度の実測値が 10N/mm^2 前後においては両方式の直線回帰式は概ね一致する。

同様に、図 3.3.1 (b) にフライアッシュセメント B 種に関する両方式の実測値と推定値の関係を示す。フライアッシュセメント B 種では、普通ポルトランドセメントと比較して実測値と推定値との相関性は高いが、両方式の差異が顕著に示される。両方式の直線回帰式で比較すると、有効材齢方式による推定値は積算温度方式に比べ 8N/mm^2 程度下回ることが確認できる。

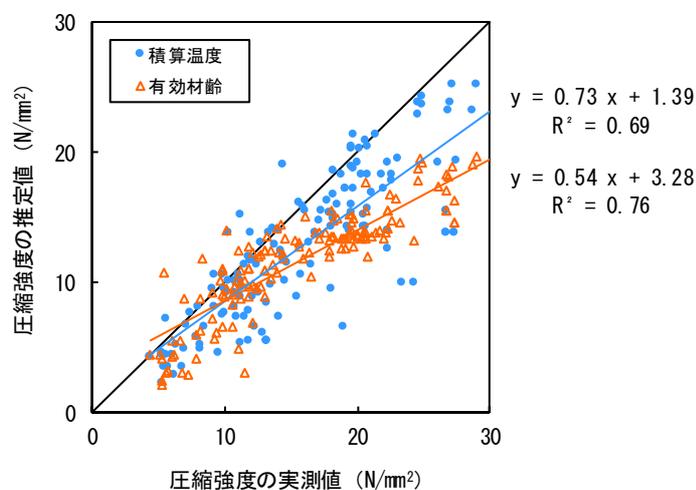
その要因として、有効材齢方式ではフライアッシュセメント B 種よりも混合比率が高い C 種を含めて同一の強度推定式を与えているため、B 種のみを対象とする場合に比べて強度推定値を小さく評価する可能性がある。また、フライアッシュセメント B 種に関しては、既往研究⁶⁾では式 (3.1) 中の $(t_c - 0.5)$ に含まれる補正項 0.5 を 0 と定めており、この相違が若材齢の推定値に影響を及ぼしているものと考えられる。

表 3.3.1 実績データの概要

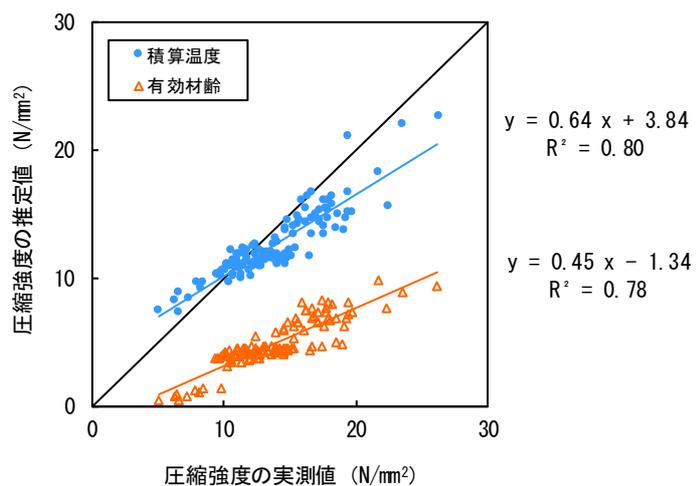
セメントの種類	データ数	呼び強度	スランブ (cm)	試験材齢 (日)
普通ポルトランドセメント	157	24~42	15,18	1~4
フライアッシュ B 種相当	119	27~40	15,18	1~4

表 3.3.2 フライアッシュの品質 (2016年4月～10月, メーカー成績表)

項目	平均	最小	最大	参考文献 ⁵⁾	
二酸化けい素 (%)	64.5	63.3	66.8	54.0～59.6	
強熱減量 (%)	1.9	1.6	2.3	1.5～2.1	
密度 (g/cm ³)	2.30	2.28	2.31	2.31～2.33	
比表面積 (cm ² /g)	4037	3940	4100	4220～4440	
フロー値比 (%)	107	105	109	110～111	
活性度指数 (%)	材齢 28 日	90	86	96	84～87
	材齢 91 日	103	97	109	100～106



(a) 普通ポルトランドセメント



(b) フライアッシュセメント B 種

図 3.3.1 圧縮強度の実測値と推定値との関係

3. 4 強度管理手法としての適用性の検討

普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメント B 種に関する強度推定の既往研究から、有効材齢方式および積算温度方式について、せき板の取り外しに係わる強度推定手法としての適用性を検証する。

表 3.4.1 に告示第 110 号または日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」⁷⁾ (以下, JASS5 という) に規定される, せき板の取り外しに係わる圧縮強度を示す。告示第 110 号では版下などのせき板の存置期間を含めた広範囲な強度域を対象としている。一方, 実施工においては支保工の除去以前にせき板を取り外す工法を採用することは極めて少ない。したがって, 強度推定手法の強度域については, 5 N/mm² から 15N/mm² の範囲が重要であると考えられる。

既往研究⁸⁾における実験概要を表 3.4.2 に示す。また, 図 3.4.1 には材齢と実測強度の関係を示すとともに, 有効材齢方式および積算温度方式による推定値を併記する。ここで, 普通ポルトランドセメントとフライアッシュセメント B 種相当 (フライアッシュ II 種, 混合率 15%, 密度 2.33cm³/g, 二酸化けい素 60.8%, 比表面積 3740 cm²/g, 28 日活性度 92%, 91 日活性度 108%) を用いた調合の水セメント比は, それぞれの呼び強度を同一にするため, 変動係数を 10%として調合強度を定め, 材齢 28 日に調合強度が発現するように設定されている。

図 3.4.1 に示されるように, 普通ポルトランドセメントの圧縮強度 5N/mm² から 15N/mm² の範囲において, 推定値が実測値をわずかに超過するものが一部存在するものの, 有効材齢方式および積算温度方式ともに実測値と推定値は概ね一致する。

フライアッシュセメント B 種の場合, 積算温度方式による推定値は圧縮強度 5N/mm² から 15N/mm² の範囲において実測値と概ね一致するが, 圧縮強度 15N/mm² 以降では強度の増進に伴って実測値に比べ推定値が上回る方向に推移する。有効材齢方式に関しては推定値と実測値との差異は大きく, フライアッシュの置換率などの相違が強度発現性に影響を及ぼしていることが考えられる。

表 3.4.1 基準などにおけるせき板の取り外しに係わる圧縮強度

建築物の部分	告示第 110 号	JASS 5		
		計画供用期間	せき板取外後の湿潤養生	
基礎, 梁側, 柱 および壁	5 N/mm ²	短期, 標準	あり	5 N/mm ²
			なし	10 N/mm ²
		長期, 超長期	あり	10 N/mm ²
			なし	15 N/mm ²
版下および梁下	設計基準強度の 50%	原則として支保工の取外し後とする		

表 3.4.2 既往研究における実験概要⁸⁾

セメント	呼び強度	W/C (%)		スランブ (cm)	養生温度 (°C)	試験材齢 (日)
		N	FB			
普通ポルトランド セメント, フライアッシュ セメント B 種	24	65.0	61.0	18	5, 20	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 14, 28, 56, 91
	30	57.5	53.0			
	39	48.5	44.0			

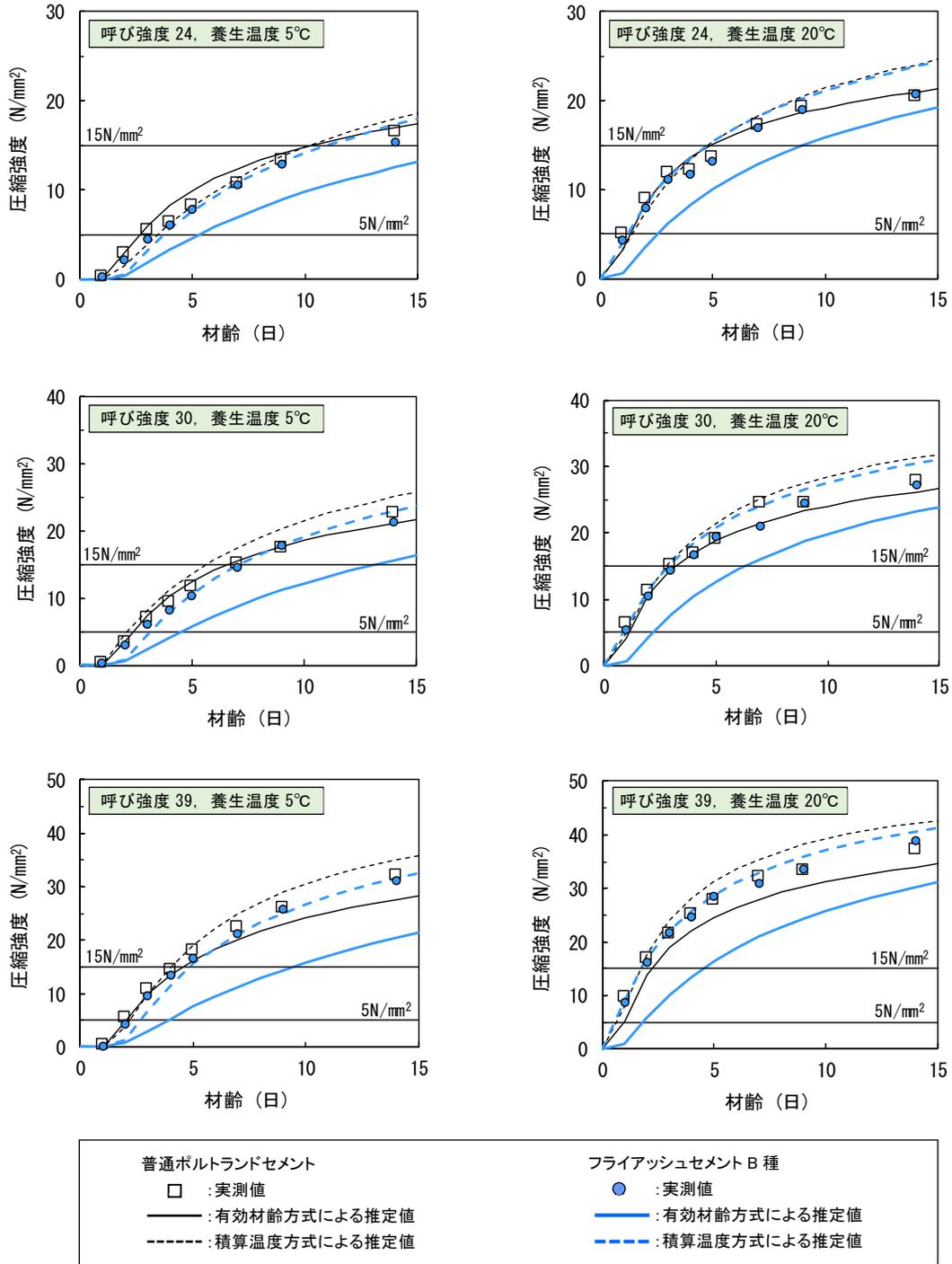


図 3.4.1 既往研究における実測値⁸⁾と推定値の関係

3. 5 第3章の結論

告示第110号に規定される有効材齢方式, および寒中指針に示される積算温度方式に関して, 両方式による強度推定結果を比較するとともに, せき板の取り外しに係わる強度管理手法として検討を行った結果, 以下の知見が得られた。

- (1) 有効材齢方式と積算温度方式から求められる強度推定値は, 普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントでは比較的一致するが, フライアッシュセメント B 種および高炉セメント B 種では両方式による差異が大きい。
- (2) 両方式による強度推定値とレディーミクストコンクリート工場の実績値との関係では, 普通ポルトランドセメントの場合には全体的にばらつきが大きいものの低強度域における直線回帰式は概ね一致するが, フライアッシュセメント B 種では両方式に大きな差異が認められる。
- (3) 既往研究との関係において, フライアッシュセメント B 種における有効材齢方式は乖離するものの, その他のケースに関しては概ね一致する。
- (4) 普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメント B 種に関して, 積算温度方式はせき板の取り外しに係わる強度管理手法としての適用性が確認できる。但し, 混和材料の品質や置換率の相違による影響を考慮する必要がある。

— 第3章の参考文献 —

- 1) 洪 悦郎：コンクリート強度推定実用法の提案とその応用，日本建築学会論文報告集，第 63 号，pp.129～132，1959.10
- 2) 小林和寛，深瀬孝之，濱幸雄：寒中コンクリートにおける強度増進標準曲線の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.407～408，2006.7
- 3) 谷口円，桂修，濱幸雄，吉野利幸：水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案，日本建築学会大会構造系論文集，第 74 巻，第 641 号，pp.1205～1210，2009.7
- 4) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2011.11
- 5) 国立研究開発法人建築研究所：建築研究資料 No.168 型わくの取り外しに関する管理基準の検討，2016.3
- 6) 崔亨吉，中田善久，榊田佳寛，佐藤幸恵，野口貴文，大塚秀三，安田正雪，高橋祐一，蓮尾孝一，吉岡昌洋，唐沢智之，河野政典，鹿毛忠継，棚野博之，土屋直子，宮田敦典，荒巻卓見：各種結合材を用いた構造体コンクリートの圧縮強度管理の基準に関する検討：その 14 模擬部材表面の温度履歴に基づく圧縮強度の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.167～168，2015.9
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015.7
- 8) 開洋介，齋藤敏樹：フライアッシュコンクリートの強度発現性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.215～216，2015.9



第 4 章

養生上屋の熱損出量

第4章 養生上屋の熱損出量

4.1 はじめに

北海道や東北地方に代表される積雪寒冷地では、寒中コンクリート工事を実施するにあたり養生上屋が設置される。初期凍害防止などのコンクリートの品質確保に加えて、冬期における作業環境向上の観点からも、養生上屋が担う役割は大きい。また、一般的には養生上屋内に加熱設備を配置し、その内部空間を加熱することが行われている（写真4.1.1～4.1.4）。

洪らは1960年代から冬期の建設工事実施上の諸問題に関する研究に着手し、北海道の雇用問題、労働環境の実態をとらえ、また、冬期の気象条件の解析、養生上屋の換気と採暖方法などの実務的な研究を進展させた^{1) 2)}。その後、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針案・同解説（第1版，1978年）」³⁾に、鬼頭ら^{4) 5) 6)}の研究成果をもとに養生上屋の熱損出量の算定方法が取り纏められた。

この算定方法は、現行の「寒中コンクリート施工指針・同解説（第5版，2010年）」（以下、寒中指針という）⁷⁾にそのまま踏襲されており、その間見直しがなされてこなかった。第2章「寒中コンクリート工事の実態と課題」で述べたように、アンケート調査では加熱養生時において計画温度と実施温度に差異があることが確認された。

本章では、熱損出量に関連する算定方法についての根拠を確認するとともに、その妥当性について検証することとする。



写真 4.1.1 養生上屋の内部（加熱養生部シート遮断）



写真 4.1.2 養生上屋の外観



写真 4.1.3 養生上屋の内部（躯体工事）



写真 4.1.4 養生上屋の内部（温風用ダクト）

4. 2 寒中指針における熱損失量の算出方法

4. 2. 1 基本式

養生上屋内部の空気を加熱する場合、養生上屋の熱損出量は上屋材料の伝熱による熱損出量と上屋空間の換気による熱損出量の合算値として、式 (4.1) ~ (4.3) を用いて算出することが標準である。

$$Q_1 = \Sigma(K_n S_n) \quad (4.1)$$

$$Q_2 = 0.35NV \quad (4.2)$$

$$Q = (Q_1 + Q_2)(T_i - T_{me}) \quad (4.3)$$

ここに、 Q_1 ：養生上屋の伝熱による 1 時間・温度差 1°C あたり熱損失量 (W/K)

K_n ：各上屋材料の熱貫流率 (W/m²K)

S_n ：各上屋材料の面積 (m²)

Q_2 ：養生上屋の換気による 1 時間・温度差 1°C あたり熱損失量 (W/K)

0.35：空気の容積比熱 (W/m³K) (0.3kcal/m³・°C)

N ：養生上屋の形状・構造・風速などから仮定した養生上屋内部空気の 1 時間あたり換気回数 (回/h)

Q ：養生上屋の伝熱および換気により失われる時間当たり熱損失量 (W)

V ：養生上屋内部の (建築物内部も含む) 空気容積 (m³)

T_i ：計画養生温度 (°C)

T_{me} ：(4.4) 式または (4.5) 式により仮定した初期養生期間の予想平均気温 (°C)

4. 2. 2 外気温の設定方法

初期養生期間中の外気温は、式 (4.4) および式 (4.5) に基づいて仮定する。寒中コンクリート工事の計画段階では、日平均気温の平年値に寒波による気温低下 (4°C) を想定した外気温を設定する。また、工事の実施段階では、直近の気象予報などから寒波のおそれや予想気温を考慮して外気温を定めることになる。

(1) 工事の計画段階

$$T_{me} = T_{sme} - 4 \quad (4.4)$$

ここに、 T_{me} ：気温の低下を考慮し補正した初期養生期間の平均気温の仮定値 (°C)

T_{sme} ：初期養生期間の平均気温の平年値 (°C)

(2) 工事の実施段階

① 寒波のおそれがある場合や気温が予想困難な場合

$$T_{me} = T_{sme} - 4$$

② 寒波のおそれがなく、平均気温以上となることが予想できる場合

$$T_{me} = T_{sme} \quad (4.5)$$

4. 2. 3 上屋材料の熱貫流率

上屋材料の伝熱による熱損出量を算出する際に用いる、各材料の熱貫流率を表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 上屋材料の時間当たりの熱貫流率

上屋材料 (部材の表面の状況)	熱貫流率	
	W/m ² hK	(kcal/m ² h°C)
合板 12mm+シート	7.0	(6.0)
薄鉄板 (トタン板)	14.0	(12.5)
シート	10.0	(8.6)
ポリカーボネート	8.5	(7.5)
厚手ポリフィルム ^{*1}	9.3	(8.0)
地盤, コンクリート ^{*2}	2.9	(2.5)

*1: 継ぎ手をファスナー加工又は接着加工したもの

*2: 捨てコンクリート、基礎などのコンクリート

4. 2. 4 換気回数

(1) 基準換気回数

換気回数は式 (4.6) に基づき、養生上屋の形状、構造、風速などの条件を考慮して定める。なお、 N_s および A, B, C, D をそれぞれ図 4.2.1 および表 4.2.2~4.2.6 に示す。

$$N = N_s \times A \times B \times C \times D \tag{4.6}$$

ここに、 N : 換気回数 (回/h)

N_s : 基準換気回数 (回/h)

A : 囲い材のサイズによる補正係数

B : 囲い材の継ぎ目状態による補正係数

C : 上屋の平面形状による補正係数

D : 囲み材の一重・二重と継ぎ目の良否状態による補正係数

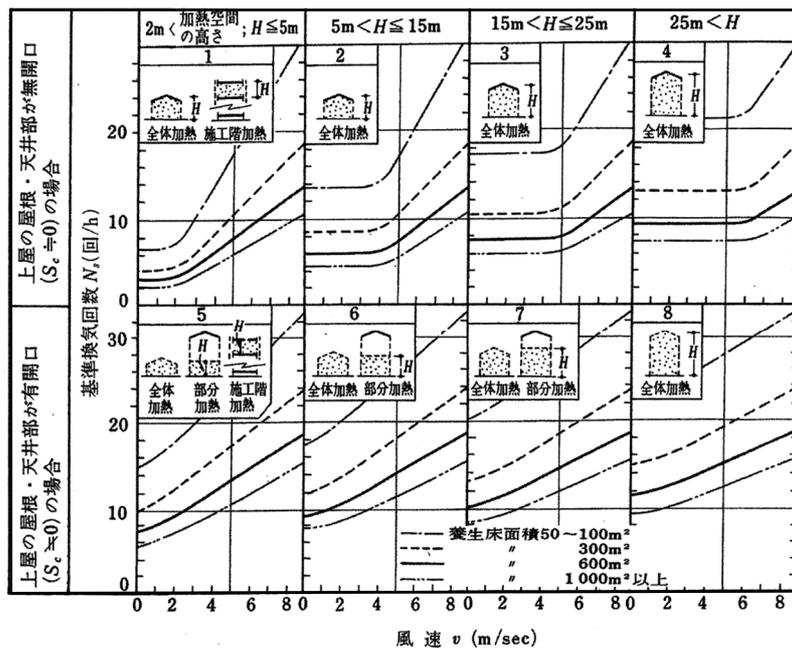


図 4.2.1 基準換気回数 N_s

表 4.2.2 換気回数計算用風速（1990 年までの資料による）

地 域		風速 (m/s)	地 域		風速 (m/s)	地 域		風速 (m/s)
北海道	旭川	1.8	東北	宮古	2.2	中部	富山	2.9
	帯広	2.2		秋田	5.6		金沢	2.4
	釧路	4.0		酒田	6.0		福井	2.5
	札幌	2.4		山形	1.7		長野	2.6
	小樽	3.0		仙台	3.9		松本	2.1
	苫小牧	4.6		若松	2.1		甲府	1.9
	室蘭	6.0	関東	宇都宮	1.9		飯田	1.6
東北	函館	3.0	秩父	1.3	高山	1.4		
	青森	3.4	中部	新潟	4.6	近畿	上野	2.9
	八戸	4.0	上越	2.0	中国	津山	2.0	
	盛岡	3.1						

表 4.2.3 囲い材サイズによる補正係数 A

囲い材	囲い材サイズ (m)		備 考 (1/ℓ ₁ +1/ℓ ₂)	補正係数 A
	ℓ ₁	ℓ ₂		
建築工事用 シート	3.6	5.4	0.46	1.0
	3.6	4.8	0.49	1.1
	2.7	3.6	0.65	1.4
	1.8	5.4	0.74	1.6
	1.8	5.1	0.75	1.6
	1.8	4.8	0.76	1.7
	1.8	3.6	0.83	1.8
合 板	0.9	1.8	1.67	3.6
	0.6	1.8	2.22	4.8

[注] ℓ₁およびℓ₂は矩形の短辺及び長辺の長さ (m)

表 4.2.4 囲い材の継ぎ目状態による補正係数 B

継目の状態	補正係数 B	隙間間隔 (cm)	備 考
良 好	0.3	0~0.5	目張りなどによりほとんど隙間・開口が無い場合
	0.5	0.5~1.0	囲い材同士の突き合わせ・緊結が良く隙間開口が無い場合
普 通	1.0	1.0~2.0	所々に隙間がある場合
やや不良	1.5	2.0~3.0	緊結がルーズで隙間・開口が多い場合
不 良	3.0	3.0 以上	大きい隙間・開口が多い場合

表 4.2.5 上屋の平面形（辺長比）による補正係数 C

囲い材	事務所・商業ビルなどに 多い			学校・アパートなどに 多い	
	辺長比 X/Y	1.0	2.0	3.0	5.0
補正係数 C	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1

[注] Xおよび Yは矩形の短辺及び長辺の長さ (m)

表 4.2.6 囲み材の一重・二重と継目の良否状態による補正係数 D

	外囲いの種類	内囲いシートの 継目状態	補正係数 D
一重囲い	シートまたは合板	—	1.0
二重囲い	シ ー ト	良 好	0.7
		普 通	0.8
		やや良好	0.9
		不 良	1.0
	合 板	良 好	0.6
		普 通	0.7
	やや良好	0.8	
	不 良	1.0	

4.3 熱損失量の検証

4.3.1 外気温

前述したように、外気温は日平均気温の平年値や気象予報に基づいて仮定する。外気温の仮定値には寒波による気温の低下分（4℃）が含まれていることから、本来、加熱養生時に外気温の仮定値と実温度との差異を確認し、熱損出量計算に反映させる必要がある。実施時の外気温が平年値であっても外気温の再設定が行われないう限り、過剰な熱量が供給されて養生空間の温度は計画養生温度よりも4℃上昇することになる。

実務では実施直前または実施時の外気温に基づく再検討がなされていない可能性も考えられ、指針運用上の留意点として明示することが望ましい。

4.3.2 上屋材料の熱貫流率

現行の寒中指針には、6種類の上屋材料の熱貫流率が示されている（表4.2.1）。この熱貫流率の根拠に関しては、文献⁸⁾に寒中指針第1版（1978年）³⁾における考え方が記載されている。ここでは、自然対流時の熱貫流率の実験値に対して上屋内側に風が入り込むことを想定し、式（4.7）によって定めた内外の熱伝達率（表4.3.1）を用いて、風の程度（無風、有風、強風）に対応させた熱貫流率を決定している。その後、寒中指針第4版（1998年）⁹⁾において、例示する上屋材料の種類が見直されるとともに、風の程度の区別がなくなり、現行指針（2010年）⁷⁾に踏襲されている状況にある。

また、一般的に上屋材料の熱貫流率は式（4.8）から求めることができる。ここで、補正係数 k は合板やシートなどのように表面が平滑な材料では 1.0 とし、波板鉄板などの凹凸のある材料に関しては投影面積に対する実表面積の比率とする。

$$\alpha = (8.7 \text{ or } 11.6) + 4.6v \quad (4.7)$$

ここに、 α ：熱伝達率（W/m²K）

v ：風速（m/s）

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{l_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_o}} \times k \quad (4.8)$$

ここに、 K ：熱貫流率（W/m²K）

α_i ：上屋内側の熱伝達率（W/m²K）

α_o ：上屋外側の熱伝達率（W/m²K）

λ_n ：各上屋材料の熱伝導率（W/mK）

l_n ：各上屋材料の厚さ（m）

k ：上屋材料の表面形状による補正係数（実表面積／投影面積）

表 4.3.1 寒中指針第1版における熱伝達率

記号	風の程度	熱伝達率（W/m ² K）	
		外側	内側
無風	自然対流の程度 0～0.5 m/s	8～12	8～9
有風	月平均風速の程度 4～6 m/s	29～35	9～17
強風	寒冷・温暖前線通過時などの強風 15～20m/s	81～104	12～23

ここで、熱伝達率の検証に際して、有風時（風速 4～6m/s）の平均値を適用することとして、外側の熱伝達率 $\alpha_o=32\text{W/m}^2\text{K}$ 、内側の熱伝達率 $\alpha_i=13\text{W/m}^2\text{K}$ を用いることとする。なお、外側風速 5m/s、内側風速 1m/s の条件下における対流熱伝達率 α_c をユルゲスの式（式（4.9））^{10）} から算出し、放射熱伝達率 α_r を $5.0\text{W/m}^2\text{K}$ と仮定すると、外側と内側の熱伝達率 α_o 、 α_i としてそれぞれ 30、 $15\text{W/m}^2\text{K}$ が得られる（式（4.11））。この値は本検証に適用する熱伝達率と概ね一致する。

表 4.3.2 に再計算結果を示す。上屋材料が合板 12mm+シートの場合について、現行指針と計算結果に差異が生じているが、その他の材料では両者の値はほぼ一致する。

図 4.3.1 に各種の上屋材料における厚さと熱貫流率の関係を示す。厚さが 0.5mm 以下の材料では、材料の熱伝導率が熱貫流率に及ぼす影響は小さいことがわかる。

検証結果から、現行指針における上屋材料の熱貫流率の妥当性が確認できるとともに、例示されていない上屋材料に対しても同様の方法によって熱貫流率を算出することができると考えられる。また、厚さが 0.5mm 以下で表面が平滑な材料（ $k=1.0$ ）であれば、熱伝導率によらずに熱貫流率として $9\text{W/m}^2\text{K}$ 程度の値を採用することができる。

$$\alpha_c = 5.8 + 3.9v \quad (v \leq 5\text{m/s}) \quad (4.9)$$

$$\alpha_c = 7.1v^{0.78} \quad (v > 5\text{m/s}) \quad (4.10)$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (4.11)$$

ここに、 α_c ：対流熱伝達率（ $\text{W/m}^2\text{K}$ ）

v ：風速（m/s）

α ：熱伝達率（ $\text{W/m}^2\text{K}$ ）

α_r ：放射熱伝達率（ $\text{W/m}^2\text{K}$ ）

表 4.3.2 上屋材料の熱貫流率

上屋材料	熱伝導率 λ (W/mK)	厚さ ℓ (m)	補正係数 k	熱貫流率 K ($\text{W/m}^2\text{K}$)	
				検証結果	現行指針
合板 12mm+シート	0.16	0.012	1.0	5.4	7.0
	0.2	0.0001			
薄鉄板（トタン板）	53	0.0003	1.4	12.9	14.0
シート	0.2	0.0001	1.0	9.2	10.0
ポリカーボネート	0.2	0.003	1.0	8.1	8.5
厚手ポリフィルム	0.2	0.001	1.0	9.2	9.3

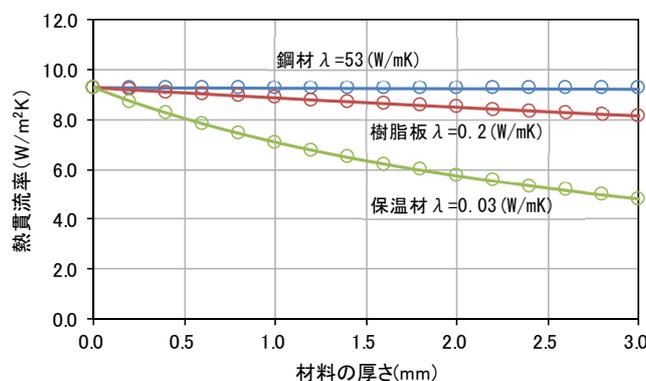


図 4.3.1 各種材料における厚さと熱貫流率の関係

4. 3. 3 換気回数

前節の「4.2.4 換気回数」に示した基準換気回数 N_s および補正係数 $A \sim D$ は、寒中指針第1版（1978年）の内容がそのまま現行指針（2010年）に踏襲されており、その間見直しがなされていない状況にある。そこで、寒中指針第1版に基づき、これらの算出方法を検証することにする。

(1) 基準換気回数

既往研究⁴⁾によって、養生上屋に換気の一般式を採用することの適合性が確認されていることから、寒中指針と同様に式(4.12)～(4.14)を用いて換気量および換気回数を算出する。

$$Q_{sm} = \alpha_m A_m \{2gP_i/\gamma_0 + 2gh_m(T_i - T_0)/T_i - Cv^2\}^{1/2} \quad (4.12)$$

$$\sum Q_{sm} = 0 \quad (4.13)$$

$$n = \sum |Q_{sm}| / 2V \quad (4.14)$$

ここに、 Q_{sm} ：換気量 (m³/h)

n ：換気回数 (回/h)

V ：養生空間の気積 (m³)

α_m ：囲い材隙間の流速係数 (0.7)

A_m ：開口面積 (m²)

h_m ：開口部の高さ (m)

T_i ：室内絶対温度 (°K)

T_0 ：室外絶対温度 (°K)

c ：風圧係数

v ：外気風速 (m/s)

P_i ：室内全圧 (kg/m²)

γ_0 ：外気密度 (kg/m³)

g ：重力加速度 (m/s²)

ここで、計算上の仮定条件を以下に示す。

- 1) 側面の囲い面には2個の集中開口を仮定し、その高さは養生上屋高さの1/4と3/4の位置とする。開口面積は各側面におけるシート隙間面積の1/2とする。
- 2) 囲い材は3.6m×5.4mの工事用シートを基準とする。
- 3) 側面のシート間の隙間は2cmとし、屋根・天井部が有開口の場合にはその隙間は4cmとする。
- 4) 養生上屋の平面形状は正方形とする。
- 5) 養生上屋内温度を5°Cとし、外気を-10°Cとする。
- 6) 風速係数は風上側0.8、風下側-0.4とする。
- 7) 床面積は100, 300, 600, 1000m²、加熱空間の高さは5, 10, 20, 30mとする。
- 7) 気象条件の悪化や加熱器の故障を考慮して、安全率を1.5とする。

これらの仮定条件に基づいて再計算すると、一部の結果において寒中指針と乖離することが確認された。そのため、各囲い面の開口数を20個として収束計算を行うこととした。

図 4.3.2 に寒中指針に示される基準換気回数と検証結果の関係を示す。上屋の屋根・天井部が有開口で養生床面積が 300m² 以上の場合には、検証結果は寒中指針と概ね一致する。上屋の屋根・天井が無開口の場合には、風速 4m/s 以下の範囲において検証結果は現行指針に比べて減少する傾向が認められるが、その差は 10%程度に留まっている。

上屋の屋根・天井部が有開口および無開口ともに、養生床面積が 100m² 以下の場合には検証結果との差が大きくなる傾向を示す。特に、無開口で風速が 3~4m/s 以上となる条件においては寒中指針に比べて最大で 20%程度増加することが確認できる。

ここで、計算上の仮定条件 7) において設定した安全率 1.5 が養生上屋の全熱損出量に及ぼす影響を試算する。養生材はシートとし、養生床面積 (100, 1000m²)、高さ (5, 20m)、風速 (3, 6m/s)、天井開口 (有, 無) を組み合わせた条件に対して、伝熱による熱損失量 Q_1 と換気による熱損失量 Q_2 を求め、全熱損失量 Q (Q_1+Q_2) に占める換気による熱損失量 Q_2 の比率を算出する。

安全率 1.0 とする場合の比率 Q_2/Q は、図 4.3.3 に示すように 0.2~0.6 の範囲に分布する。したがって、基準換気回数算定に対する安全率 1.5 は、全熱損出量に対して 10~30%程度の割り増しとなることがわかる (補正係数 A~D が 1.0 の場合)。

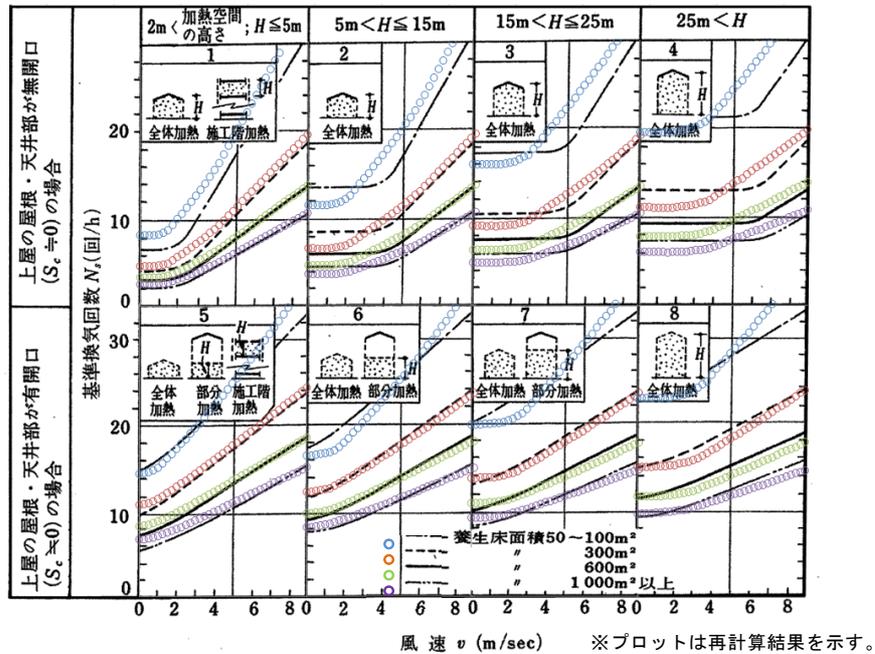
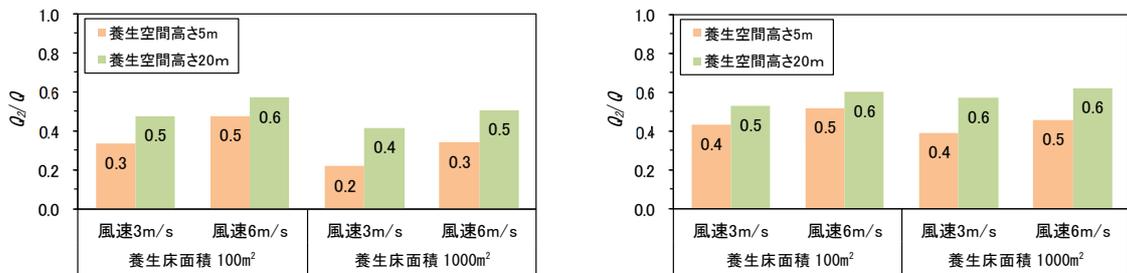


図 4.3.2 基準換気回数における寒中指針と再計算結果の関係



(a) 天井部：無開口 (b) 天井部：有開口
 図 4.3.3 全熱損失量 Q に占める換気による熱損失量 Q_2 の比率 (安全率 1.0)

(2) 換気回数計算用風速

基準換気回数計算用の風速は気象統計値をもとに、各地域における寒中コンクリート工事の適用期間内の月平均風速の最大値として定められている。現行指針では1990年までの気象統計値が用いられているため、最新の平年値（統計期間1981～2010年）に更新し、併せて現行指針との差を表4.3.3に示す。

各地域における計算用風速は、現行指針に比べて増加する傾向を示す。したがって、次回の寒中指針の改定時には、最新の気象データを用いて計算用風速を更新することが必要となる。さらに、実務者が寒中指針に掲載されていない地点の風速を適切に設定できるように、計算用風速が適用期間内の月平均風速の最大値であることを明記することが望ましい。

表 4.3.3 換気回数計算用風速に関する現行指針との差異

地域	月平均風速 (m/s) (統計期間 1981年～2010年)									現行指針 (m/s)	現行との差 (m/s)
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	最大			
北海道	旭川	2.9	3.5	3.0	2.6	3.0	3.4	3.4	3.5	1.8	1.7
	帯広	2.3	2.7	2.7	2.3	2.4	2.8	2.7	2.8	2.2	0.6
	釧路	5.1	6.1	6.0	5.4	5.4	5.9	5.1	6.1	4.0	2.1
	札幌	3.4	3.6	3.3	3.5	3.4	3.8	4.5	4.5	2.4	2.1
	小樽	2.9	3.2	3.6	3.1	3.3	3.1	2.8	3.6	3.0	0.6
	苫小牧	3.3	3.6	3.2	3.1	3.7	3.4	3.6	3.7	4.6	-0.9
	室蘭	4.7	5.7	6.0	5.8	5.2	4.9	4.5	6.0	6.0	0
	函館	3.5	4.0	3.9	3.9	3.9	4.2	4.0	4.2	3.0	1.2
東北	青森	3.4	3.9	4.1	4.0	4.1	4.3	4.2	4.3	3.4	0.9
	八戸	3.8	4.5	4.8	5.1	5.0	5.1	4.7	5.1	4.0	1.1
	盛岡	2.5	2.7	2.8	2.7	2.9	3.3	3.5	3.3	3.1	0.2
	宮古	2.5	2.5	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.6	2.2	0.4
	秋田	3.8	4.6	5.2	5.1	5.1	4.9	4.7	5.2	5.6	-0.4
	酒田	4.0	4.7	5.5	5.8	5.4	4.9	4.3	5.8	6.0	-0.2
	山形	1.5	1.5	1.6	1.5	1.6	1.8	2.0	1.8	1.7	0.1
	仙台	3.2	3.4	3.5	3.7	3.8	3.9	3.7	3.9	3.9	0
関東	若松	1.5	1.6	1.9	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3	2.1	0.2
	宇都宮	2.9	2.6	2.6	2.9	3.0	3.2	3.2	3.0	1.9	1.1
	秩父	1.1	1.1	1.4	1.6	1.7	1.9	1.9	1.9	1.3	0.6
	新潟	2.8	3.3	4.0	4.0	3.9	3.5	3.4	4.0	4.6	-0.6
中部	上越	2	2.3	2.6	2.6	2.5	2.4	2.5	2.6	2.0	0.6
	富山	2.7	3.0	3.1	3.0	3.0	3.2	3.4	3.1	2.9	0.2
	金沢	3.6	4.3	4.9	4.8	4.6	4.4	4.2	4.8	2.4	2.4
	福井	2.5	2.6	2.7	2.6	2.8	3.0	3.1	2.8	2.5	0.3
	長野	2.4	2.1	1.9	2.0	2.2	2.8	3.0	2.8	2.6	0.2
	松本	1.9	2.2	2.2	2.2	2.2	2.5	2.7	2.5	2.1	0.4
	甲府	1.7	1.8	2.1	2.4	2.8	2.8	2.7	2.8	1.9	0.9
	飯田	1.7	1.8	2.0	2.0	2.4	2.6	2.7	2.6	1.6	1.0
近畿	高山	1.3	1.3	1.2	1.2	1.4	1.6	1.9	1.6	1.4	0
	上野	2.1	2.2	2.6	2.9	2.9	2.8	2.7	2.9	2.9	0
中国	津山	1.4	1.4	1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	-0.2

□ : 寒中コンクリート工事の適用期間 □ : 寒中コンクリート工事の適用期間内の月平均風速最大値

(3) 囲い材のサイズによる補正係数 A

式 (4.12) より換気回数は開口面積に比例することがわかる。囲い面の開口面積は、囲い材のサイズ (短辺 l_1 , 長辺 l_2) から求められる $1/l_1+1/l_2$ に比例する。したがって、補正係数 A は、囲い材のサイズの基準 (3.6×5.4m) に対する $1/l_1+1/l_2$ の比率として定めることができる。

再計算結果は、表 4.2.3 に示す補正係数 A と整合する。

(4) 囲い材の継ぎ目状態による補正係数 B

補正係数 A と同様に換気回数は開口面積に比例することから、囲い材の隙間間隔に比例して補正係数 B が決定される。したがって、表 4.2.4 に示される補正係数 B は適正であることが理解できる。

(5) 上屋の平面形状による補正係数 C

現行指針において、上屋の平面形状 (辺長比 X/Y : 矩形の短辺 Y に対する長辺 X の比) による補正係数 C は、表 4.2.5 のように示されている。しかし、辺長比の範囲は 1.0~7.0 に限定されており、擁壁などの細長い構築物には適用することができない。そこで、前述した換気の一般式に基づいて、現行の補正係数を検証するとともに、辺長比の範囲を拡張して補正係数を求めることとする。

表 4.3.4 に示すように、屋根・天井部が無開口と有開口の場合について、養生上屋の高さ H (5, 10, 20, 30m) と床面積 A (100, 300, 600, 1000m²) の条件を組み合わせた 16 種類を検証対象とし、風速 0~9m/s の範囲で 0.5m/s 毎に補正係数を算出した。

図 4.3.4 に各条件に対する補正係数 C の計算結果を示す。なお、図中の計算種別の記号のうち、 H と A はそれぞれ上屋の高さ (m) と床面積 (m²) を表す。また、表 4.3.5 には、現行指針における補正係数と検証結果との関係を示す。

各辺長比に対する補正係数 C は、養生上屋の高さや床面積による影響は小さいが、辺長比が大きくなると風速による変化量が増大する傾向を示す。現行指針に採用されている補正係数 C は、有開口における最大値と同等であり、その妥当性を確認することができる。

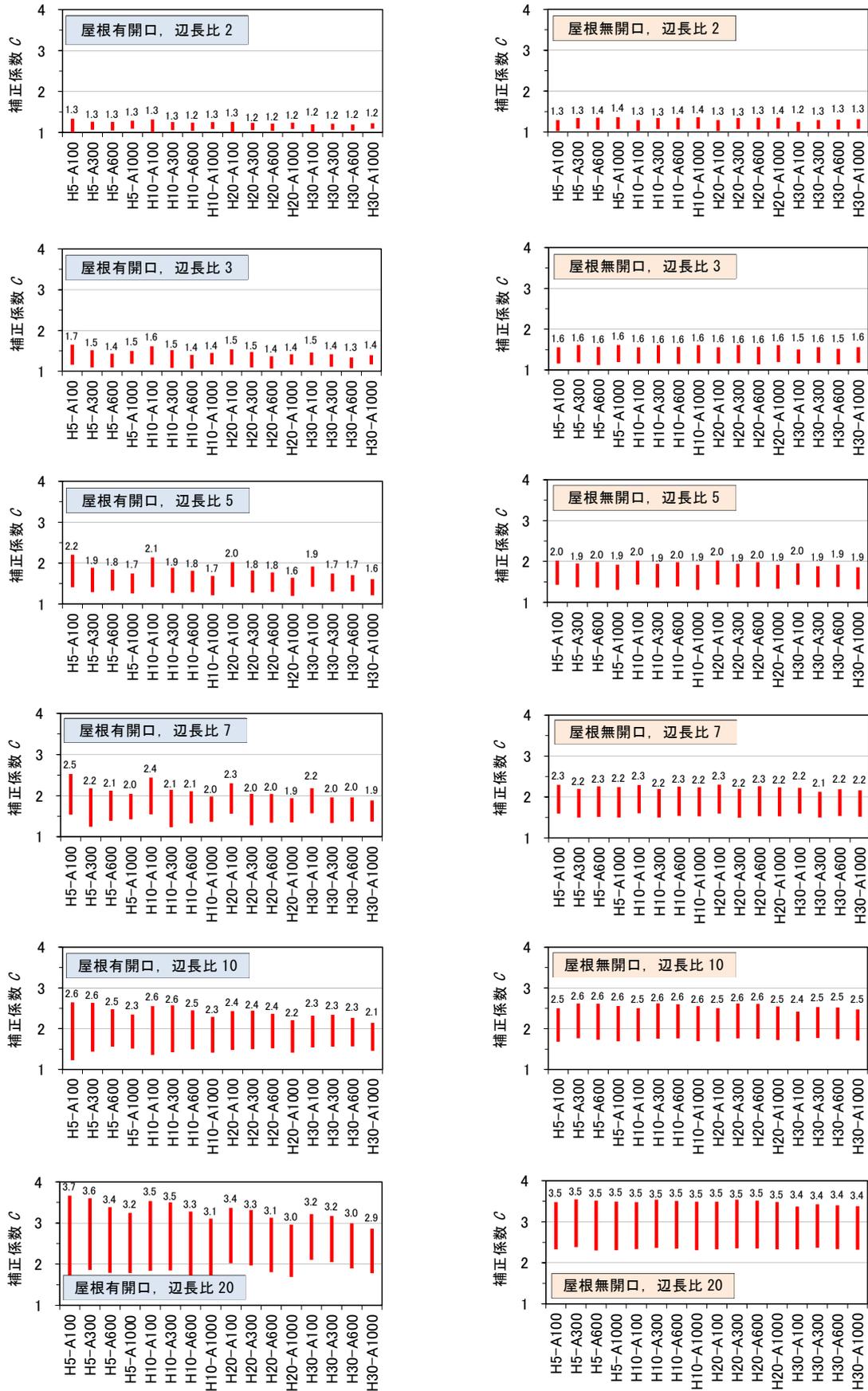
また、同様の決定方法に基づいて、辺長比 10, 20 に対する補正係数 C をそれぞれ 2.4, 3.3 程度に定めることができる。

表 4.3.4 再計算の対象

屋根部の開口有無	辺長比 X/Y	加熱空間の高さ H (m)	上屋の床面積 A (m ²)
有開口, 無開口	1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0 10, 20	5, 10, 20, 30	100, 300, 600, 1000

表 4.3.5 補正係数 C に関する現行指針と検証結果の関係

辺長比 X/Y	現行指針 C	検証結果 C			
		平均値		最大値の平均値	
		有開口	無開口	有開口	無開口
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2.0	1.2	1.1	1.2	1.3	1.3
3.0	1.5	1.3	1.4	1.5	1.6
5.0	1.8	1.5	1.7	1.8	2.0
7.0	2.1	1.7	1.9	2.1	2.2
10.0	-	1.9	2.2	2.4	2.6
20.0	-	2.4	2.9	3.3	3.5



※ H, A は、上屋の高さ (m) と床面積 (m²) を表す。

図 4.3.4 上屋の平面形状による補正係数 C の検証結果

(6) 囲み材の一重・二重と継ぎ目の良否状態による補正係数 D

養生上屋の天井部が無開口の場合、図 4.3.5 (a) に示すように二重囲いの開口状態を 4 個の直列開口として実効面積 αA を求め、一重囲いの実効面積に対する比として一重または二重囲いによる補正係数 D を定めることができる^{5) 6)}。天井部が有開口の場合には、図 4.3.5 (b) に示すように並列開口を含む 4 個の直列開口として、同様に補正係数 D を求めることができる。

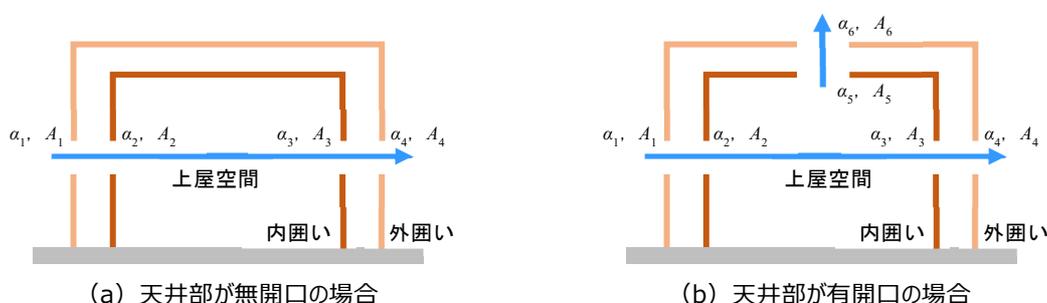


図 4.3.5 養生上屋の換気経路

実効面積は天井部の開口の有無に応じて、式 (4.15) および式 (4.16) による。

- ・天井部が無開口の場合

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1 A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_2 A_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_3 A_3}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_4 A_4}\right)^2}} \quad (4.15)$$

- ・天井部が有開口の場合

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1 A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_2 A_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_3 A_3 + \alpha_5 A_5}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_4 A_4 + \alpha_6 A_6}\right)^2}} \quad (4.16)$$

ここに、 αA : 実効面積 (m²)

$\alpha, \alpha_1 \sim \alpha_6$: 流速係数 (0.7)

$A, A_1 \sim A_6$: 開口面積 (m²)

養生上屋の高さ H (5, 10, 20, 30m), 床面積 A (100, 300, 600, 1000m²), 天井開口の有無, 外囲い材の種類 (シート, 合板), 内囲い材の隙間を変化させて補正係数 D を算出し, それぞれの最大値を表 4.3.6 および図 4.3.6 に整理する。なお, 側面の隙間に関して, 内囲いは継目状態に応じて 1, 2, 3, 6cm, 外囲いは 2cm とする。また, 天井部が有開口の場合にはその隙間は内外ともに側面の 2 倍として算定する。

外囲いがシートの場合, 内囲いシートの継目状態が良好 (隙間 1cm) 以外について, 現行指針と検証結果は概ね一致する。一方, 外囲いが合板の場合には, すべての継目状態に関して検証結果は大きく異なる。なお, 最近の実施工においては, 囲い材として工専用シートや樹脂系パネルが一般的に採用されており, 一重および二重囲いともに合板パネルが利用されることは少ない。

表 4.3.6 補正係数 D に関する現行指針と検証結果

	外囲いの種類	内囲いシートの 継目状態	補正係数 D		
			現行指針	検証結果	
				無開口	有開口
一重囲い	シートまたは合板	—	1.0	-	
二重囲い	シート	良 好	0.7	0.45	0.45
		普 通	0.8	0.71	0.71
		やや良好	0.9	0.83	0.83
		不 良	1.0	0.95	0.95
	合 板	良 好	0.6	0.14	0.14
		普 通	0.7	0.27	0.27
		やや良好	0.8	0.39	0.39
		不 良	1.0	0.64	0.65

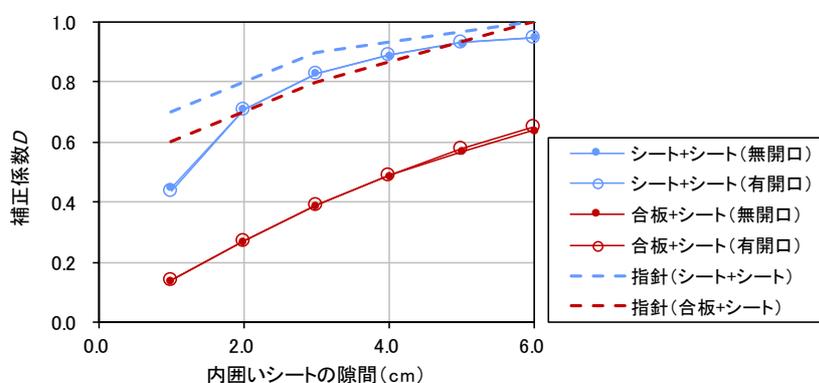


図 4.3.6 補正係数 D に関する現行指針と検証結果

4. 4 第4章の結論

第2章で示したように、アンケート調査から加熱養生時の計画温度と実績温度には差異が生じると認識されていることが確認された。そのため、現行の寒中指針に示される加熱養生時の熱量計算方法を検証した結果、温度差異の要因は以下の事項であることを明らかにした。なお、本検証結果に基づいて現行指針を修正することが望ましいと考える。

- (1) 計画段階で仮定する外気温には寒波による温度低下分が見込まれているため、実施直前や実施時に外気温を確認することが必須であり、寒中指針には運用上の留意点として明記することが必要である。
- (2) 基準換気回数は、養生床面積が 100m^2 以下の場合に検証結果との差が大きくなる傾向を示す。
- (3) 基準換気回数に適用されている安全率 1.5 は、養生上屋の全熱損出量を 10～30%程度割り増すことになる。
- (4) 換気回数計算用風速は、最新の気象統計値に基づいて修正する必要がある。
- (5) 囲み材の一重・二重による補正係数において、外囲いが合板の場合のすべてのケース、および外囲いがシートの場合の一部のケースに対する検証結果は現行指針と乖離する。

— 第4章の参考文献 —

- 1) 洪悦郎, 中島亨: 寒中コンクリートの技術的問題 コンクリート温度分布, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第29号, pp.17~20, 1967.8
- 2) 洪悦郎: 通年施工のための採暖計画に関する研究, 日本建築学会建築雑誌研究年報, Vol.70, 1247-1248, 1971.3
- 3) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針案・同解説 (第1版), 1978.2
- 4) 鬼頭弘一: 養生上屋の換気回数 (その1), 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.71~74, 1976.9
- 5) 鬼頭弘一: 養生上屋の換気回数 (その2 換気回数の算定法), 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.173~176, 1977.3
- 6) 鬼頭弘一: 寒中施工用養生上屋の換気回数算定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.391~392, 1977.10
- 7) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説 (第5版), 2010.1
- 8) 洪悦郎, 長島弘: 寒中コンクリート, 技術書院, pp.163~168, 1968.2
- 9) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説 (第4版), 1998.2
- 10) 田中俊六ほか: 最新建築環境工学, 井上書院, pp.188~189, 2019.2



第 5 章

寒中コンクリート工事に影響する気候特性

第5章 寒中コンクリート工事に影響する気候特性

5.1 はじめに

寒中コンクリート工事において、調合計画・養生計画などの施工計画や工事工程の立案に際して、気象統計データをもとに施工地域の気候特性を把握することが重要である。日本の気候には著しい地域的な差異があるため、気候特性に応じた配慮が十分になされなければ、初期凍害や強度増進の遅れに伴う工程遅延を招くことになる。

日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」¹⁾（以下、寒中指針という）は、近年の研究成果^{2) 3)}や実務者を対象としたアンケート調査の結果⁴⁾を踏まえながら、その充実化が図られてきた。一方、その内容は北海道や東北地方などの寒冷度の厳しい地域を意識した対応に重点が置かれたものであり、比較的温暖な地域における気候特性を十分に考慮されたものとはいえない。

第2章「寒中コンクリート工事の実態と課題」に示したアンケート調査結果からも、調合計画において適用する方法や規準類、加熱養生の実施頻度および寒中指針の利用度などには大きな地域差が存在することが示された。寒中指針の次回改定に向け、寒中コンクリート工事に影響を及ぼす気候特性を踏まえた上で、その特性に応じた合理的な計画手法を整備することが不可欠である。

本章では、気象庁の地域気象観測システム（以下、アメダスという）約1,300地点のうち、気温を観測する891地点における日別平年値（統計期間1981～2010年）⁵⁾を用いて、寒中コンクリート工事に影響を及ぼす気候特性を整理する。併せて、比較的軽微な施工対応で寒中コンクリート工事が行える地域の調合計画手法について検討する。

5. 2 寒中コンクリート工事に影響を及ぼす気候特性

5. 2. 1 寒中コンクリート工事の適用地域と適用期間の日数

寒中指針では、初期凍害の防止と強度発現の遅れへの対応を図るため、寒中コンクリート工事の適用期間を下記のいずれかの条件が該当する期間として規定している。なお、下記条件における日平均気温 T には日平均気温の平年値を採用し、適用期間は旬単位に定めることとする。

- (1) 打込み日を含む旬の日平均気温 T が 4°C 以下の期間
- (2) コンクリートの打込み後 91 日までの積算温度 M_{91} が $840^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$ 未満の期間

図 5.2.1 にアメダス 891 地点における寒中コンクリート工事の該当条件を示す。「日平均気温 T が 4°C 以下」のみに該当する地点は 401 箇所と最も多く、北海道南部から九州内陸部にかけて広く分布する。

「積算温度 M_{91} が $840^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$ 未満」のみに該当する地点はなく、「日平均気温 T が 4°C 以下」と「積算温度 M_{91} が $840^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$ 未満」の両者に該当する地点は 243 地点で、主に北海道、東北地方の内陸部、中央高地に位置する。一方、これらの条件に該当しない 247 地点では、寒中コンクリート工事の適用を受けない。その主な地域は、茨城県以南の太平洋沿岸、島根県や山口県の日本海沿岸、山間部を除く四国・九州地方に限定される。

図 5.2.2 に上記の条件から算出した適用期間の日数を分布図として示す。この日数の全体的な傾向は北海道 150~200 日、東北地方 90~150 日、中部地方以南で 90 日未満となり、北海道から南西部に向かって減少する。また、寒中コンクリート工事の適用内外の境界地域では 30 日未満となり、名古屋や益城のように約 10 日と極めて短い期間となる地域も含まれる。

寒中コンクリート工事の適用地域は北海道や東北地方などに代表される積雪寒冷地だけではなく、日本各地に広く分布する。また、南北に長い日本では地域によって寒冷の度合いが異なり、適用期間の日数には大きな違いがみられる。

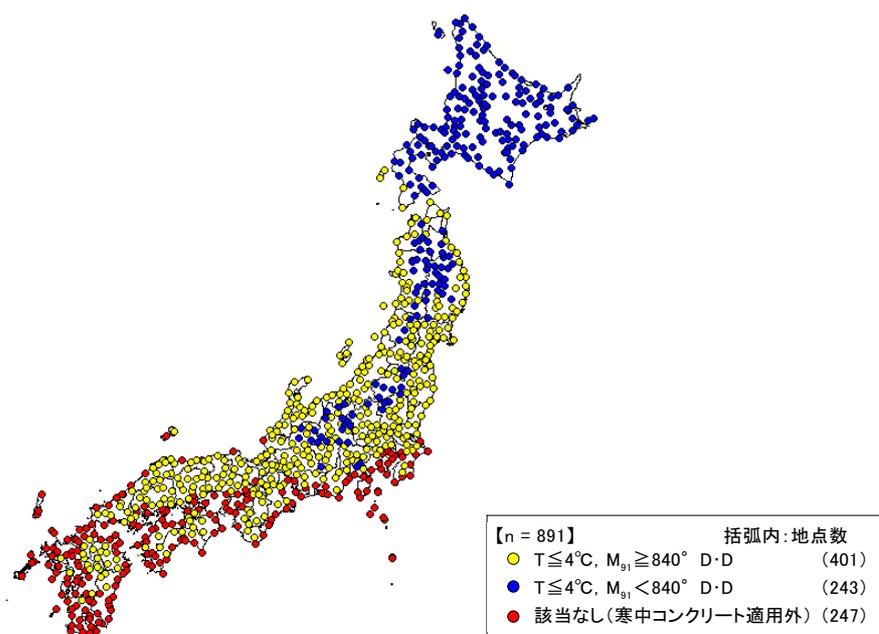


図 5.2.1 各観測地点における寒中コンクリート工事の該当条件

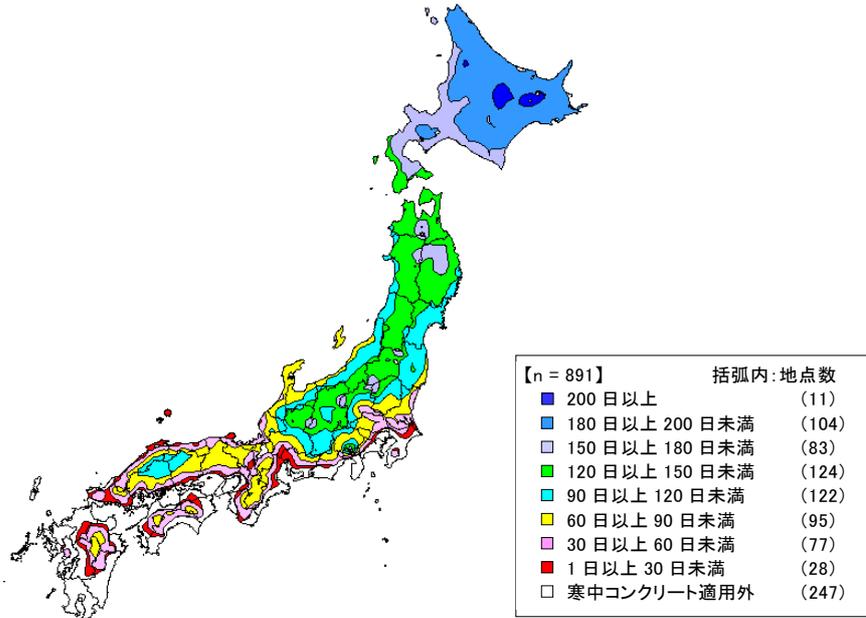


図 5.2.2 寒中コンクリート工事の適用期間の日数

5. 2. 2 調合計画方法

寒中コンクリート工事の調合計画では、以下の2つの方法によって構造体強度補正値を定めることが一般的である。

(1) コンクリートの打込みから 28 日までの期間の予想平均気温によって定める方法⁶⁾(以下、JASS5 方式という)

(2) 積算温度をもとに定める方法¹⁾(以下、寒中指針方式という)

JASS5 方式は通常期における標準的な方法で、材齢 28 日までの予想平均気温とセメントの種類に応じて、構造体強度補正値を簡便に決定することができる。しかしながら、寒中コンクリート工事での適用にあたっては、材齢 91 日までの積算温度が $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 以上、かつ材齢 28 日までの平均温度が 0°C 以上である場合に制限される。一方、寒中指針方式は、材齢 91 日までの積算温度が $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 未満の場合にも適用することができ、寒冷の厳しい地域での調合計画に対応することができる。

図 5.2.3 は、代表的な観測地点における寒中コンクリート工事の適用期間について、JASS5 方式の適用可否を示したものである。また、適用期間の日数 (P) に占める、JASS5 方式が適用可能な日数 (D) の比率 D/P を分布図として図 5.2.4 に示す。

北海道において、JASS5 方式が適用できる期間は短く、その日数が適用期間に占める比率 D/P は 0.25 程度である。東北地方の比率 D/P に関しては、盛岡などの北部内陸で 0.5 以下となる一方で、秋田や仙台などの沿岸部では概ね 1.0 となる地域が混在する。関東地方以南では、奥日光や阿蘇山などの標高が高い地点、中央高地などで JASS5 方式が適用できない期間が存在するものの、全期間について JASS5 方式が適用可能となる地域 ($D/P=1.0$) が大部分を占める。

北海道、東北地方の北部内陸および中央高地などのように JASS5 方式が適用できる期間が短い地域では、必然的に寒中指針方式の利用頻度が高くなることが考えられる。また、それ以外

の地域では寒中コンクリート工事の適用期間においても、通常期と同様に JASS5 方式が採用されることが想定できる。

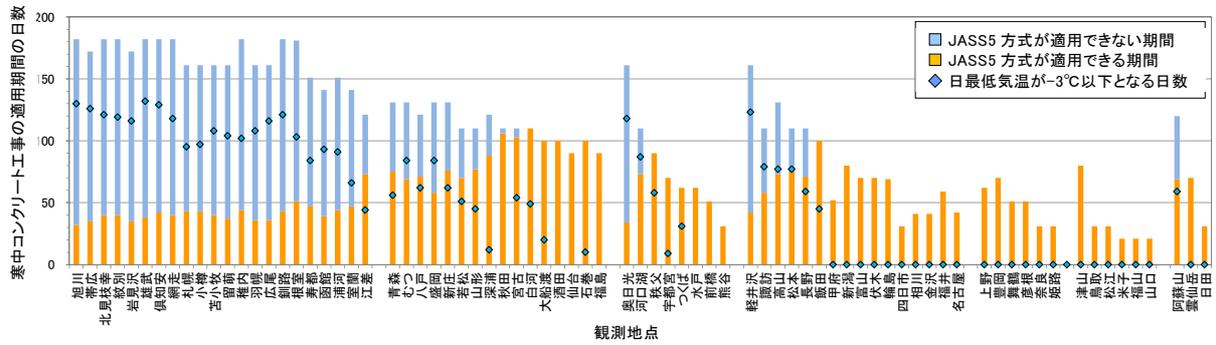


図 5.2.3 代表的な観測地点における、寒中コンクリート適用期間内の JASS5 方式の適用可否

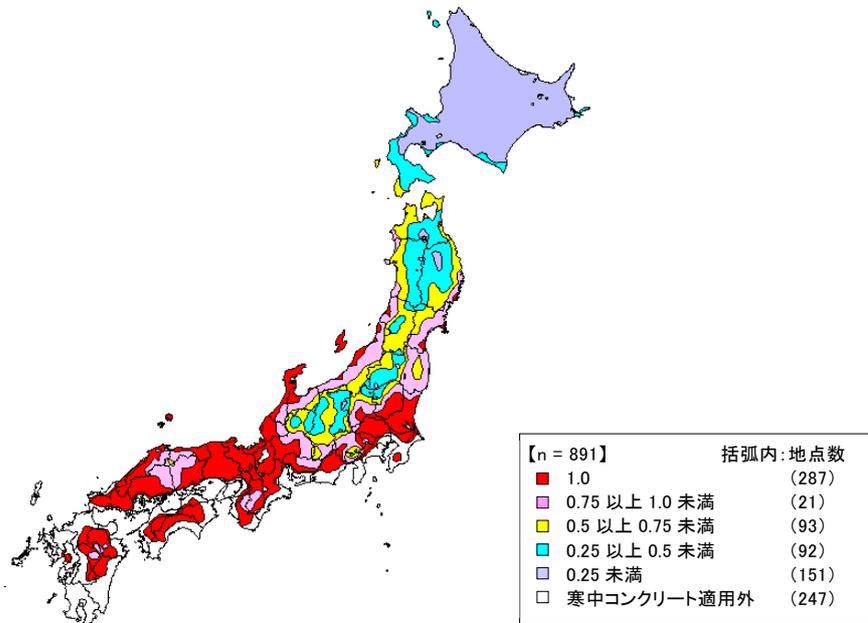


図 5.2.4 適用期間 P に占める JASS5 方式の適用可能な日数 D の比 (D/P)

5.2.3 初期養生方法

初期凍害防止のための養生方法として、養生期間中の予想最低気温が -3°C 以下の場合には加熱養生または断熱養生、 -3°C より高い場合には被覆養生が採用される。

そこで、日最低気温の平年値を用いて、日最低気温の年間最小値を図5.2.5に、寒中コンクリート適用期間内で日最低気温が -3°C 以下となる日数を図5.2.6に示す。なお、主要地点において日最低気温が -3°C 以下となる日数を図5.2.3に併記する。

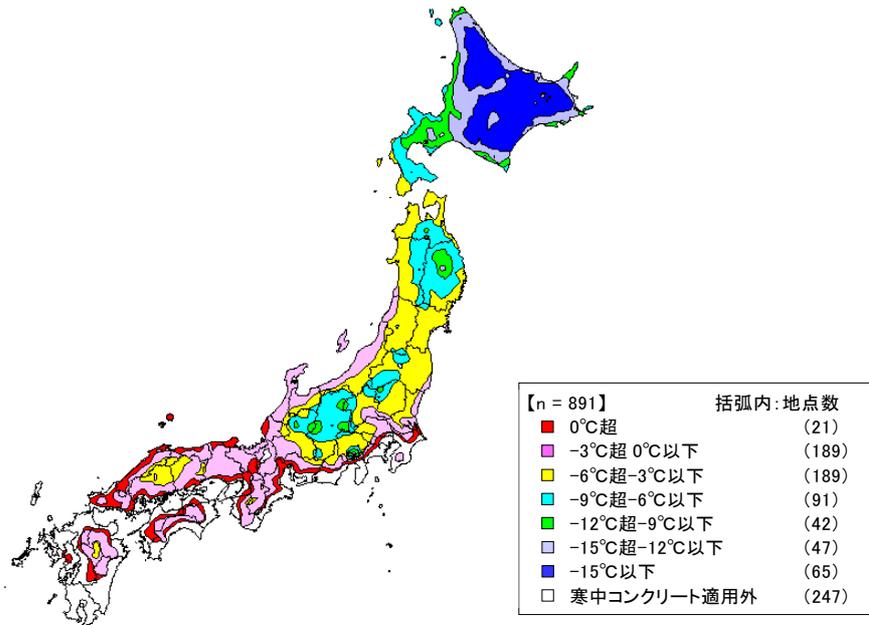


図 5.2.5 日最低気温の年間最小値

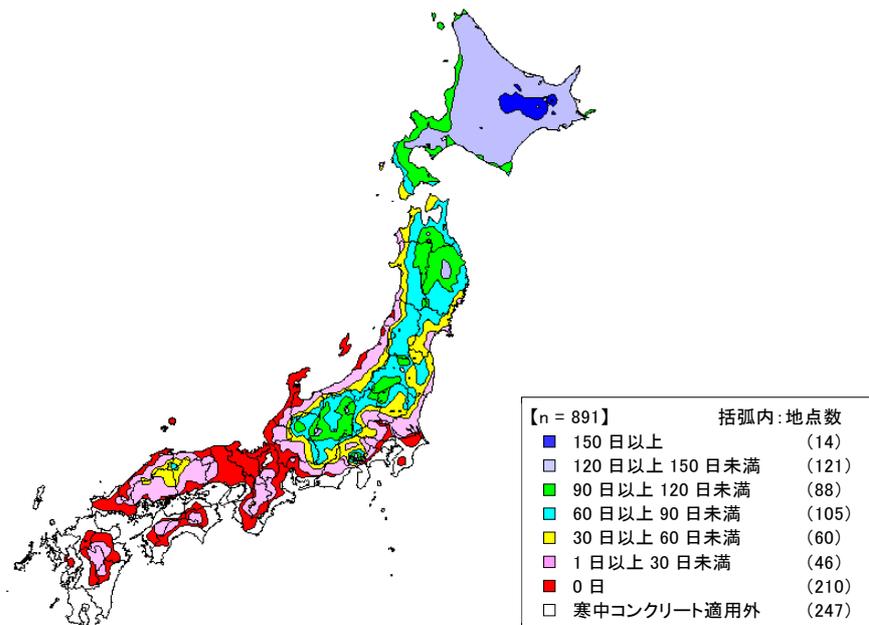


図 5.2.6 日最低気温が -3°C 以下となる日数

北海道、東北地方から中央高地までの地域には、日最低気温が -3°C 以下となる期間が存在する。特に北海道では、「日最低気温の年間最小値が -12°C 以下」かつ「日最低気温 -3°C 以下となる日数が120日以上」となる地域が大部分を占める。これらの地域では、加熱養生や断熱養生を実施する頻度が高くなることが考えられる。

主に南関東、近畿から九州地方においては、日最低気温が -3°C に達しない地域が広範囲に分布することから、被覆養生が標準的な養生形式であると考えられる。なお、適用地域の境界周辺部では、日最低気温が 0°C を下回らない地域(21地点)も存在する。

5.2.4 各地点における積算温度と気温・適用日数の関係

各地点における材齢91日までの積算温度 M_{91} の年間最小値に対して、日平均気温、日最低気温および材齢28日までの平均気温 θ の年間最小値、JASS5方式が適用できる日数の比率 D/P などの関係を図5.2.7~5.2.10に整理する。なお、標高が高く他の地点に比べて気温が極端に異なる富士山を除外し、890地点または寒中コンクリート工事が適用される643地点を対象とする。

図5.2.7に積算温度 M_{91} の年間最小値と日最低気温・日平均気温の年間最小値との関係を示す。日最低気温の年間最小値との関係には 5°C 程度のばらつきがみられるが、日平均気温の年間最小値との関係に関しては高い相関性が認められる。なお、図中で 4°C 以下の範囲に位置する日平均気温のプロットが、寒中コンクリート工事の適用を受ける地域(643地点)のデータであることを意味する。

同様に、図5.2.8において積算温度 M_{91} の年間最小値と材齢28日までの平均気温 θ の年間最小値との関係にも相関性がみられる。

積算温度 M_{91} の年間最小値との関係において、日平均気温の年間最小値の回帰式(図5.2.7)と材齢28日までの平均気温 θ の年間最小値の回帰式(図5.2.8)はほぼ一致する。したがって、各地点における日平均気温の年間最小値と材齢28日までの平均気温の年間最小値はほぼ同値であり、積算温度 M_{91} の年間最小値が $840^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$ 以上となる場合には、日平均気温および材齢28日までの平均気温が概ね -2°C 以上であることがわかる。

図5.2.9からは、積算温度 M_{91} の年間最小値と適用期間の日数は2次関数によって近似できることが示される。ただし、適用期間は旬単位で定められるため、その日数には10日程度のばらつきが生じる。

図5.2.10において、積算温度 M_{91} の年間最小値の増加に伴い、JASS5方式が適用できる日数の比率 D/P は増加し、積算温度 M_{91} の年間最小値が $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$ 程度でその比率は1.0に達する。ここで、積算温度 M_{91} の年間最小値 $840^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$ に対する比率は0.5程度を示すことから、この値が調合計画方法を選択するうえでの閾値として位置付けられる。

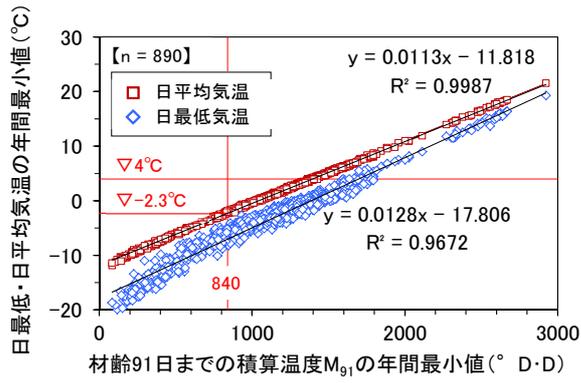


図 5.2.7 年間最小値における M_{91} と気温の関係

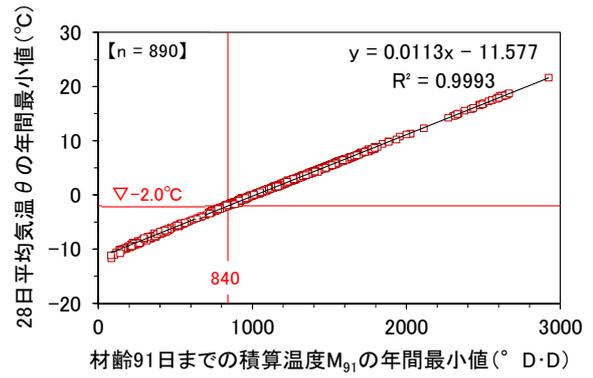


図 5.2.8 年間最小値における M_{91} と θ の関係

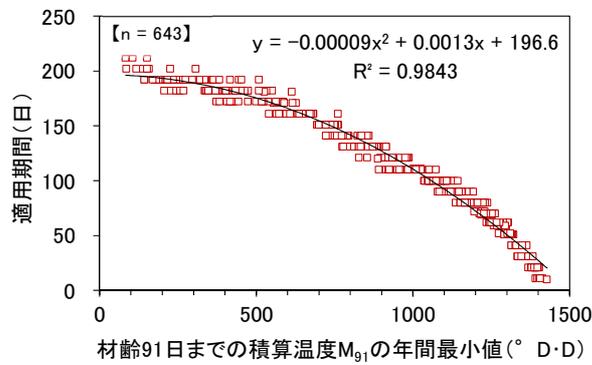


図 5.2.9 M_{91} の年間最小値と適用期間の日数

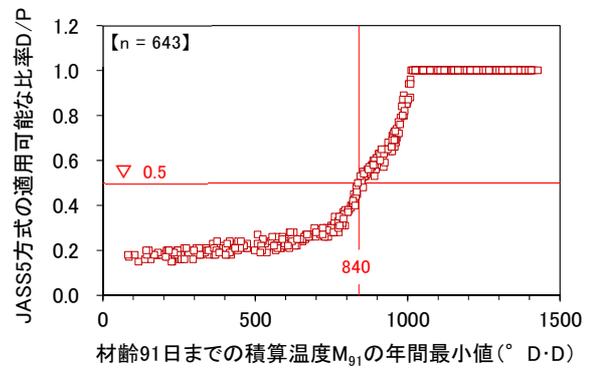


図 5.2.10 M_{91} の年間最小値と比率 D/P

5.3 気候特性の分類

表 5.3.1 に示すように、JASS5 方式および寒中指針方式の適用条件を踏まえて 3 タイプに分類すると、寒中コンクリート工事に影響する気候特性や施工計画に関連する指標を整理することができる。また、図 5.3.1 には、この分類に基づく気候特性の分布図を示す。

各タイプの施工計画上的特徴は、次のように考えられる。なお、JASS5 方式が適用できる日数の比率 D/P から推測される各タイプの調合計画方法には、第 2 章のアンケート調査結果（図 5.3.2、施工者回答）と同様の傾向がみられる。

- ◎タイプⅠ：寒中コンクリート工事の全期間において、JASS5 方式が利用できる。最低気温が-3℃以下となる日数が少なく、初期養生として被覆養生の実施頻度が高い。
- ◎タイプⅡ：JASS5 方式が利用できない期間が含まれる。加熱養生の実施頻度が高い地点が過半数を占める。
- ◎タイプⅢ：最も寒冷の厳しい気候で、寒中指針方式と加熱養生の実施頻度が高い。

表 5.3.1 寒中コンクリート工事に影響する気候特性の分類

(富士山を除く 890 地点)

タイプ	アメダスの該当地点数(箇所)	積算温度 M_{91} 年間最小値 (°D・D)	28 日平均気温 θ 年間最小値 (°C)	適用期間日数 (日)	適用期間内で JASS5 方式の適用可能となる日数の比率 D/P	適用期間内で日最低気温が-3℃超 0℃未満となる日数の比率	適用期間内で日最低気温が-3℃以下となる日数の比率
I	287	【840 以上】 1012~1428	【0℃以上】 0~4.4	10~111	287	21, 39, 4, 56, 167	18, 25, 208, 35
II	114	【840 以上】 843~1010	【0℃未満】 -2.0~0	111~141	2, 21, 91	4, 2, 21, 87	4, 2, 4, 33, 71
III	242 (富士山除く)	【840 未満】 83~837	【0℃未満】 -11.7~-1.8	121~212	82, 160	50, 192	2, 56, 184
(適用外)	247	【840 以上】 1384~	4.2~	0	-	-	-

(注) 表内グラフの凡例：■ 0, ■ 0~0.25 以下, ■ 0.25~0.5 以下, ■ 0.5~0.75 以下, ■ 0.75~1.0 以下

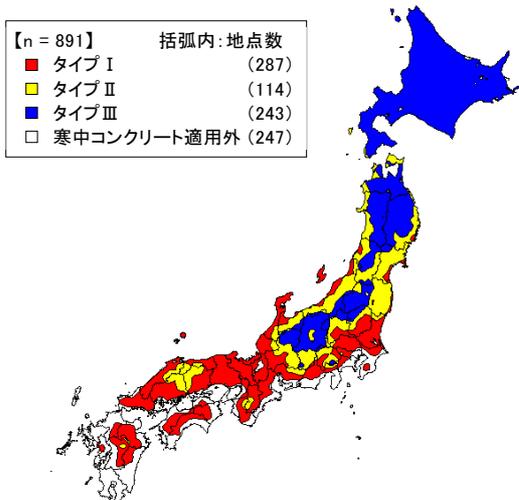


図 5.3.1 気候特性の分類

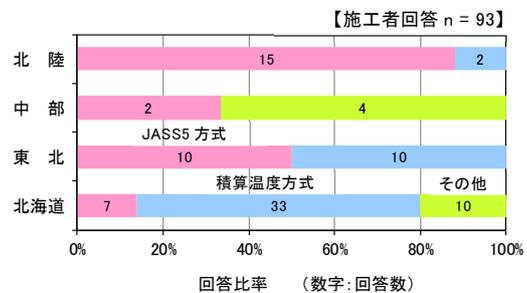


図 5.3.2 アンケート調査結果 (最も採用する調合計画)

5.4 調合計画方法に関する検討

寒中コンクリート工事の気候特性タイプⅡでは、材齢91日までの積算温度が840°D・D以上となるものの、材齢28日間の平均気温が0~-2°Cとなり、JASS5方式が適用できない期間が存在する。そのため、一部の期間に寒中指針方式を採用するなど、一貫した方法で調合計画が実行できないことが予想される。

この課題を解消するため、タイプⅡの調合計画方法について検討することとする。なお、標準的な寒中コンクリート工事（設計基準強度21~36N/mm²、普通ポルトランドセメント）を対象とする。

5.4.1 JASS5方式の適用範囲の拡張

タイプⅡ（114地点）の温度域への対応を図るため、JASS5方式の適用範囲を-2°Cまでに拡張する場合について、以下の2つの方法によって検証する。

(1) 寒中指針に基づく標準的な方法

現行の寒中指針では、構造体強度補正值₂₈S₉₁を9N/mm²とする場合、設計基準強度を得るための積算温度の下限値は210°D・Dとされている（表5.4.1）。この積算温度は、設計基準強度に3N/mm²を加算した強度を得るための必要積算温度として、式（5.1）～（5.5）に基づいて算出されたものである。

各地点における、材齢91日までの積算温度M₉₁の年間最小値と材齢28日までの積算温度M₂₈の年間最小値との関係を図5.4.1に示す。同図からは、タイプⅡにおける積算温度M₂₈の最小値が約220°D・Dであり、設計基準強度を得るための積算温度210°D・Dを満足することが確認できる。

表 5.4.1 設計基準強度 F_c を確保できる積算温度の下限値の標準値（抜粋）

セメント種類	設計基準強度 F _c (N/mm ²)	調合管理強度 F _m (N/mm ²)								
		21	24	27	30	33	36	39*	42	45
普通ポルトランドセメント	18	450	315	210	165	120	105	75	75	60
	21	—	450	300	210	150	120	90	90	75
	24	—	—	420	285	210	150	120	105	90
	27	—	—	—	390	270	195	150	120	105
	30	—	—	—	—	375	255	180	150	120
	33	—	—	—	—	—	345	225	195	150
	36	—	—	—	—	—	—	300	240	180

* : F_m=39 は 40 を対象とする

$$M = \sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \tag{5.1}$$

$$F = F_\infty \times \exp(a \times M_c^b) \tag{5.2}$$

$$F_{\infty} = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp\left(a \times {}_{20}M_{28}^b\right)} \times (1 - 0.0005(T_{24} - 20)) \quad (5.3)$$

$$M_c = M + 0.68(T_{24} - 20) \quad (5.4)$$

$$a = 526.9/{}_{20}F_{28} - 37.8, \quad b = 13.34/{}_{20}F_{28} - 1.06 \quad (5.5)$$

ここに、 M ：積算温度（°D・D）

T_c ：期間 Δt のコンクリートの平均温度（°C）

Δt ：時間間隔（日）

F ：コンクリートの圧縮強度（N/mm²）

F_{∞} ：コンクリートの最終到達強度（N/mm²）

${}_{20}F_{28}$ ：標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度（N/mm²）

${}_{20}M_{28}$ ：標準水中養生を行った材齢 28 日における積算温度（°D・D）

M_c ：コンクリートの温度補正を行った積算温度（°D・D）

T_{24} ：打ち込みから 24 時間のコンクリートの平均温度（°C）

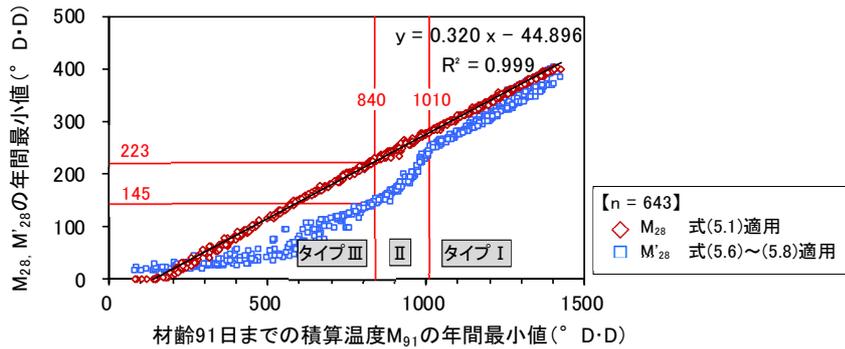


図 5.4.1 積算温度 M_{91} と M_{28} , M'_{28} の年間最小値の関係

(2) 氷点下域の積算温度を考慮する方法

氷点下域の積算温度を考慮する場合には、寒中指針資料 3 に基づいて、圧縮強度推定に式 (5.2) ~ (5.5)，積算温度に式 (5.6) ~ (5.8) を適用する。その結果、設計基準強度（3N/mm² の加算なし）を得るための積算温度として 160°D・D が得られる。

$$T_c \geq 0 \quad M = \sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \quad (5.6)$$

$$T_c < 0 \quad M = \sum_0^t 10 \times \exp(-0.60 \times (-T_c)^{0.74}) \Delta t \quad (5.7)$$

$$M' = ((T_{ave} - T_{min}) / (T_{max} - T_{min})) / 2 \times (T_{max} \text{ に対する } M) + 0.5 \times (T_{ave} \text{ に対する } M) + ((T_{max} - T_{ave}) / (T_{max} - T_{min})) / 2 \times (T_{min} \text{ に対する } M) \quad (5.8)$$

ここに、 M' ：日内温度変動を考慮する積算温度（°D・D）

T_c ：期間 Δt のコンクリートの平均温度（°C），

T_{max} , T_{ave} , T_{min} ：日最高気温，日平均気温，日最低気温（°C）

図 5.4.1 において、材齢 28 日までの積算温度（氷点下域の積算温度考慮） M'_{28} の最小値は $145^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ となり、必要積算温度 $160^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ を下回る。タイプ II に属する 114 地点のうち、青森や十日町などの 33 地点が積算温度 $160^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ を満足できない状況にある。

一方、表 5.4.2 に示すように積算温度 M'_{28} が $160^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 未満となる期間は日最低温度が -3°C 以下となるため、少なくとも数日間の保温養生（加熱または断熱養生）が必要となる。この養生に伴う積算温度の増加分を加味すると、必要積算温度は満足されるものと考えられる。

以上、寒中指針における標準的な方法および氷点下域の積算温度を考慮する方法を用いて、設計基準強度を得るための必要積算温度と平年値から決定される積算温度との関係を確認した。その結果、材齢 28 日までの予想平均気温 -2°C 以上 0°C 未満の温度域に構造体強度補正值 $9\text{N}/\text{mm}^2$ を適用する場合について、材齢 28 日で設計基準強度が確保されることが確認できた。表 5.4.3 に示すように、JASS5 方式の適用範囲を拡張することによって、タイプ II の全適用期間に対し JASS5 方式を用いた調合計画が行えることになる。

表 5.4.2 タイプ II の代表地点における、材齢 28 日までの積算温度 M_{28} 、 M'_{28} の最小値と最低気温

(単位： $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 、 $^{\circ}\text{C}$ 、積算温度：5 単位切下げ)

地名	28日平均気温 年間最小値(°C)	項目	11月			12月			1月			2月			3月			最小値
			上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
東北	青森 青森県	最低温度	4.0	2.1	0.6	-0.8	-2.0	-2.7	-3.6	-4.3	-4.5	-4.4	-3.8	-3.4	-2.9	-2.1	-0.5	-4.5
		M_{28}	420	370	325	295	270	250	240	240	240	255	280	310	340	385	440	240
		M'_{28}	420	360	305	255	215	175	155	155	160	190	230	275	315	375	440	155
	横手 秋田県	最低温度	3.6	1.5	0.2	-1.2	-2.6	-3.5	-4.5	-5.1	-5.2	-5.2	-4.5	-4.0	-3.4	-2.7	-1.2	-5.2
		M_{28}	415	360	320	285	260	235	225	225	230	250	270	300	330	380	445	225
		M'_{28}	410	350	295	240	195	155	145	145	150	175	215	265	300	365	440	145
	花巻 岩手県	最低温度	3.7	0.6	-0.2	-1.9	-3.3	-5.0	-6.3	-6.7	-6.4	-6.6	-5.4	-4.7	-4.2	-2.8	-1.4	-6.7
		M_{28}	420	365	320	280	250	235	230	230	240	255	285	315	345	395	450	230
		M'_{28}	410	345	295	235	190	160	150	150	165	200	245	285	320	375	440	150
	新川 宮城県	最低温度	2.3	0.3	-0.2	-1.9	-3.3	-5.0	-6.3	-6.7	-6.4	-6.6	-5.4	-4.9	-4.3	-3.1	-1.8	-5.4
		M_{28}	415	370	335	300	275	255	245	240	245	260	280	305	335	380	435	240
		M'_{28}	405	350	305	265	225	185	165	165	170	195	230	270	305	355	420	165
山形 山形県	最低温度	4.3	2.2	1.0	-0.1	-1.3	-2.2	-3.1	-3.7	-3.9	-3.9	-3.4	-3.0	-2.3	-1.4	-0.2	-3.9	
	M_{28}	440	395	355	325	295	270	260	260	265	280	305	340	370	420	480	260	
	M'_{28}	440	390	340	295	255	215	195	195	205	240	270	310	350	410	480	195	
若松 福島県	最低温度	4.2	2.1	0.9	-0.2	-1.4	-2.6	-3.4	-4.0	-4.1	-4.1	-3.7	-3.2	-2.5	-1.7	-0.4	-4.1	
	M_{28}	435	385	350	315	285	265	255	255	260	275	300	330	365	415	475	255	
	M'_{28}	435	380	330	285	240	205	185	185	195	230	265	300	340	405	475	185	
中部	十日町 新潟県	最低温度	5.1	2.9	1.5	0.3	-0.9	-2.0	-2.7	-3.4	-3.6	-3.6	-3.5	-3.1	-2.6	-1.7	-0.7	-3.6
		M_{28}	455	405	360	325	295	275	265	265	265	280	295	325	350	390	445	265
		M'_{28}	455	400	345	300	260	225	205	200	205	235	265	290	320	375	440	200
	上市 富山県	最低温度	5.2	3.2	1.9	0.6	-0.8	-1.9	-2.8	-3.5	-3.9	-3.9	-3.6	-3.2	-2.4	-1.5	-0.4	-3.9
		M_{28}	470	420	380	340	310	290	275	275	275	290	310	335	365	410	470	275
		M'_{28}	470	420	365	320	280	250	230	230	230	255	275	305	340	400	470	230
	佐久 長野県	最低温度	1.9	-0.5	-2.2	-3.8	-5.3	-6.6	-7.1	-7.7	-8.2	-8.2	-7.1	-6.0	-4.9	-3.7	-2.2	-8.2
		M_{28}	410	355	315	275	250	230	220	220	230	250	280	320	350	400	460	220
		M'_{28}	390	325	280	230	185	160	150	150	160	190	235	285	320	380	450	150
	河口湖 山梨県	最低温度	2.7	0.7	-0.9	-2.6	-4.1	-5.2	-5.8	-6.3	-6.8	-6.7	-5.5	-4.7	-3.8	-2.5	-0.9	-6.8
		M_{28}	435	385	345	310	285	265	255	255	260	280	310	340	375	420	470	255
		M'_{28}	420	365	315	280	250	215	190	190	210	245	280	310	345	405	465	190
高山 岐阜県	最低温度	3.4	1.4	0.1	-1.3	-2.7	-4.0	-4.7	-5.4	-6.0	-6.0	-5.4	-4.7	-3.8	-2.7	-1.3	-6.0	
	M_{28}	420	370	325	290	260	240	230	230	235	255	285	320	355	405	465	230	
	M'_{28}	415	355	295	240	195	160	150	150	155	190	235	285	320	385	460	150	
中国 高野 広島県	最低温度	2.6	0.3	-0.9	-2.0	-2.8	-3.9	-4.4	-5.0	-5.6	-5.6	-5.3	-4.7	-4.2	-3.2	-1.7	-5.6	
	M_{28}	420	370	330	300	280	260	250	245	250	265	290	325	355	405	460	245	
	M'_{28}	405	345	300	270	235	195	175	175	180	215	255	295	330	385	450	175	
九州 阿蘇山 熊本県	最低温度	4.8	2.3	0.4	-1.4	-2.6	-3.5	-4.3	-4.8	-5.3	-5.1	-3.8	-3.0	-2.5	-1.2	0.6	-5.3	
	M_{28}	420	365	320	285	260	240	230	230	240	270	300	335	370	415	465	230	
	M'_{28}	415	350	295	245	200	160	145	145	170	220	270	310	355	410	465	145	

□ : 寒中コンクリート適用期間, □ : 28日平均気温が 0°C 未満となる期間, □ : $M'_{28} < 160^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$

表 5.4.3 タイプ II の構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ (普通ポルトランド)

材齢 28 日までの予想平均気温 θ ($^{\circ}\text{C}$)	$-2 \leq \theta < 0$	$0 \leq \theta < 8$
構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ (N/mm^2)	9	6

5. 4. 2 積算温度方式に基づく材齢延長

タイプⅡに寒中指針方式を適用し、構造体強度補正值 6N/mm^2 、設計基準強度が得られる材齢を 35 日および 42 日とする場合の適用可否について確認する。

前節と同様に 2 つの方法を用いて設計基準強度を得るための必要積算温度と各地点における材齢 35、42 日の積算温度を求め、それらの関係を表 5.4.4 および図 5.4.2 に示す。また、表 5.4.5 および表 5.4.6 には、代表的な地点における材齢 35 日および材齢 42 日の積算温度の最小値を示す。

(1) 設計基準強度が得られる材齢を 35 日とする場合

タイプⅡに属する 114 地点中の 68 地点では、材齢 35 日までの積算温度の年間最小値は設計基準強度を得るための必要積算温度を満足することができる。したがって、この 68 地点に関しては、寒中コンクリート工事が適用される全期間について、設計基準強度が得られる材齢を 35 日に延長する手法を採用することができる。

(2) 設計基準強度が得られる材齢を 42 日とする場合

タイプⅡに属する全地点において、設計基準強度が得られる材齢を 42 日まで延長することで、設計基準強度を得るための必要積算温度を満足することができる。したがって、上記の 68 地点を除く 46 地点では、施工時期に応じて設計基準強度を確保する材齢を 35 または 42 日に延長する手法で対応可能であることが確認できる。

表 5.4.4 材齢延長する場合の積算温度の関係 ($_{28}S_{91}=6\text{N/mm}^2$ 、普通ポルトランド)

			寒中指針に基づく標準的な方法	氷点下域の積算温度を考慮する方法
設計基準強度を得るための必要積算温度 ($^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$)			300	215
設計基準強度が得られる材齢	35 日	材齢 35 日までの積算温度 M_{35}, M'_{35} の年間最小値 ($^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$)	280	185
		114 地点のなかで、 M_{35}, M'_{35} が必要積算温度以上となる地点数 (適用可能な地点数)	86	68
	42 日	材齢 42 日までの積算温度 M_{42}, M'_{42} の年間最小値 ($^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$)	340	225
		114 地点のなかで、 M_{42}, M'_{42} が必要積算温度以上となる地点数 (適用可能な地点数)	114	114

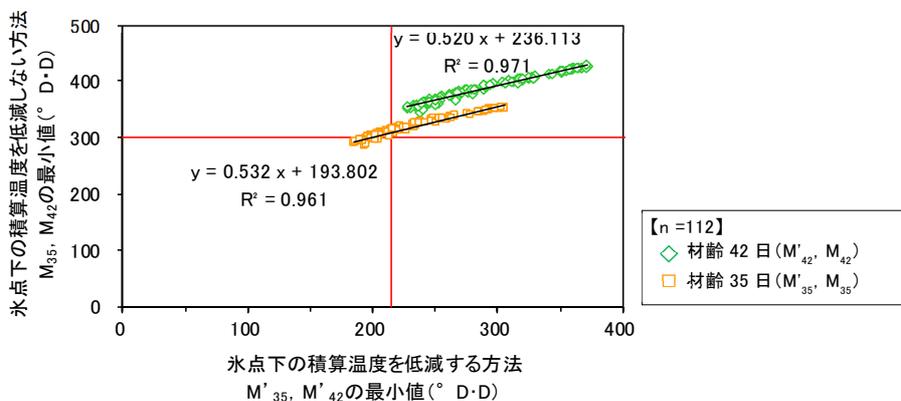


図 5.4.2 材齢 35 日・42 日における積算温度の年間最小値の関係

表 5.4.5 タイプIIの代表地点における、材齢 35 日までの積算温度 M_{35} , M'_{35} の最小値と最低気温

(単位: °D・D, °C, 積算温度: 5 単位切下げ)

地名	28日平均気温 年間最小値(°C)	項目	11月			12月			1月			2月			3月			最小値
			上旬	中旬	下旬													
東北	青森 青森県	最低温度	4.0	2.1	0.6	-0.8	-2.0	-2.7	-3.6	-4.3	-4.5	-4.4	-3.8	-3.4	-2.9	-2.1	-0.5	-4.5
		M_{35}	505	445	395	355	330	310	300	300	310	330	365	405	445	510	575	300
	M'_{35}	495	425	365	300	255	210	195	195	215	255	305	370	420	495	575	195	
	横手 秋田県	最低温度	3.6	1.5	0.2	-1.2	-2.6	-3.5	-4.5	-5.1	-5.2	-5.2	-4.5	-4.0	-3.4	-2.7	-1.2	-5.2
		M_{35}	495	435	385	345	315	295	285	285	295	320	355	395	435	510	585	285
	M'_{35}	485	415	345	280	230	190	185	185	195	240	290	350	405	490	580	185	
花巻 岩手県	最低温度	3.7	0.6	-0.2	-1.9	-3.3	-5.0	-6.3	-6.7	-6.4	-6.6	-5.4	-4.7	-4.2	-2.8	-1.4	-6.7	
	M_{35}	500	440	385	340	310	290	290	290	310	330	370	415	455	520	585	290	
M'_{35}	485	415	340	275	230	195	190	200	225	270	320	375	425	500	575	190		
新川 宮城県	最低温度	2.3	0.3	-0.6	-1.6	-2.6	-3.6	-4.6	-5.3	-5.4	-5.4	-4.9	-4.3	-3.8	-3.1	-1.8	-5.4	
	M_{35}	500	450	405	365	335	315	305	305	315	335	360	400	440	500	565	305	
M'_{35}	480	420	365	315	265	225	210	210	225	265	310	360	405	475	555	210		
山形 山形県	最低温度	4.3	2.2	1.0	-0.1	-1.4	-2.2	-3.1	-3.7	-3.9	-3.9	-3.4	-3.0	-2.3	-1.4	-0.2	-3.9	
	M_{35}	535	480	435	390	360	335	330	330	340	365	395	440	485	555	630	330	
M'_{35}	530	465	410	350	305	265	250	255	275	310	360	410	465	545	630	250		
若松 福島県	最低温度	4.2	2.1	0.9	-0.2	-1.4	-2.6	-3.4	-4.0	-4.1	-4.1	-3.7	-3.2	-2.5	-1.7	-0.4	-4.1	
	M_{35}	525	465	420	380	350	330	325	325	335	355	390	435	480	550	625	325	
M'_{35}	520	455	395	335	290	250	235	235	260	300	345	400	455	535	625	235		
中部	十日町 新潟県	最低温度	5.1	2.9	1.5	0.3	-0.9	-2.0	-2.7	-3.4	-3.6	-3.6	-3.5	-3.1	-2.6	-1.7	-0.7	-3.6
		M_{35}	550	485	435	395	365	340	335	335	340	355	385	420	455	515	590	335
	M'_{35}	550	480	415	360	315	275	260	260	270	305	345	385	425	500	585	260	
	上市 富山県	最低温度	5.2	3.2	1.9	0.6	-0.8	-1.9	-2.8	-3.5	-3.9	-3.9	-3.6	-3.2	-2.4	-1.5	-0.4	-3.9
		M_{35}	565	510	455	415	380	355	350	350	350	370	400	440	475	540	615	350
	M'_{35}	565	500	440	385	340	305	295	295	300	325	360	405	455	530	615	295	
佐久 長野県	最低温度	1.9	-0.5	-2.2	-3.8	-5.3	-6.6	-7.1	-7.7	-8.2	-8.2	-7.1	-6.0	-4.9	-3.7	-2.2	-8.2	
	M_{35}	490	430	375	335	305	285	280	285	295	325	370	415	465	530	605	280	
M'_{35}	460	390	325	270	225	195	190	195	215	260	315	375	430	505	595	190		
河口湖 山梨県	最低温度	2.7	0.7	-0.9	-2.6	-4.1	-5.2	-5.8	-6.3	-6.8	-6.7	-5.5	-4.7	-3.8	-2.5	-0.9	-6.8	
	M_{35}	525	465	415	375	350	325	325	325	335	365	400	445	485	550	610	325	
M'_{35}	505	435	380	335	295	260	250	255	275	320	365	410	460	530	605	250		
高山 岐阜県	最低温度	3.4	1.4	0.1	-1.3	-2.7	-4.0	-4.7	-5.4	-6.0	-6.0	-5.4	-4.7	-3.8	-2.7	-1.3	-6.0	
	M_{35}	505	445	395	350	320	300	290	295	305	330	370	420	465	535	610	290	
M'_{35}	490	420	345	285	235	195	190	190	210	260	315	375	435	515	605	190		
中国	高野 広島県	-1.1	最低温度	2.6	0.3	-0.9	-2.0	-2.8	-3.9	-4.4	-5.0	-5.6	-5.6	-5.3	-4.7	-3.2	-1.7	-5.6
M_{35}	505	450	405	370	345	320	315	315	320	345	380	425	470	535	605	315		
M'_{35}	480	415	365	320	280	240	225	225	245	290	335	390	435	510	595	225		
九州	阿蘇山 熊本県	-1.7	最低温度	4.8	2.3	0.4	-1.4	-2.6	-3.5	-4.3	-4.8	-5.3	-5.1	-3.8	-3.0	-2.5	0.6	-5.3
M_{35}	500	440	385	350	320	295	290	295	315	350	395	440	480	540	600	290		
M'_{35}	490	415	345	285	235	195	185	195	235	295	355	415	465	535	600	185		

□ : 寒中コンクリート適用期間, □ : 28日平均気温が0°C未満となる期間, □ : $M_{35} < 300^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$, □ : $M'_{35} < 215^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$

表 5.4.6 タイプIIの代表地点における、材齢 42 日までの積算温度 M_{42} , M'_{42} の最小値と最低気温

(単位: °D・D, °C, 積算温度: 5 単位切下げ)

地名	28日平均気温 年間最小値(°C)	項目	11月			12月			1月			2月			3月			最小値
			上旬	中旬	下旬													
東北	青森 青森県	最低温度	4.0	2.1	0.6	-0.8	-2.0	-2.7	-3.6	-4.3	-4.5	-4.4	-3.8	-3.4	-2.9	-2.1	-0.5	-4.5
		M_{42}	580	515	460	420	390	370	365	365	380	415	455	510	565	640	720	365
	M'_{42}	565	490	410	340	290	250	240	245	275	330	395	475	540	630	720	240	
	横手 秋田県	最低温度	3.6	1.5	0.2	-1.2	-2.6	-3.5	-4.5	-5.1	-5.2	-5.2	-4.5	-4.0	-3.4	-2.7	-1.2	-5.2
		M_{42}	570	505	445	400	370	350	350	350	365	400	445	500	560	645	740	350
	M'_{42}	555	470	385	315	265	230	225	230	260	310	375	455	530	625	735	225	
花巻 岩手県	最低温度	3.7	0.6	-0.2	-1.9	-3.3	-5.0	-6.3	-6.7	-6.4	-6.6	-5.4	-4.7	-4.2	-2.8	-1.4	-6.7	
	M_{42}	575	505	445	395	370	350	350	360	380	415	465	520	575	655	735	350	
M'_{42}	555	465	380	315	270	235	235	250	290	345	410	480	545	635	725	235		
新川 宮城県	最低温度	2.3	0.3	-0.6	-1.6	-2.6	-3.6	-4.6	-5.3	-5.4	-5.4	-4.9	-4.3	-3.8	-3.1	-1.8	-5.4	
	M_{42}	580	520	470	430	395	375	370	375	385	415	450	500	555	630	710	370	
M'_{42}	555	485	415	355	310	270	260	265	290	335	390	455	520	605	700	260		
山形 山形県	最低温度	4.3	2.2	1.0	-0.1	-1.3	-2.2	-3.1	-3.7	-3.9	-3.9	-3.4	-3.0	-2.3	-1.4	-0.2	-3.9	
	M_{42}	620	555	505	460	425	405	400	405	420	450	495	555	615	695	790	400	
M'_{42}	610	535	470	400	350	315	315	315	345	395	455	525	595	690	790	315		
若松 福島県	最低温度	4.2	2.1	0.9	-0.2	-1.4	-2.6	-3.4	-4.0	-4.1	-4.1	-3.7	-3.2	-2.5	-1.7	-0.4	-4.1	
	M_{42}	605	540	490	445	415	395	395	395	410	445	490	545	605	690	785	395	
M'_{42}	595	520	455	385	335	300	295	300	330	380	440	515	585	680	785	295		
中部	十日町 新潟県	最低温度	5.1	2.9	1.5	0.3	-0.9	-2.0	-2.7	-3.4	-3.6	-3.6	-3.5	-3.1	-2.6	-1.7	-0.7	-3.6
		M_{42}	635	565	510	460	430	410	405	405	415	440	475	525	575	650	745	405
	M'_{42}	630	545	480	415	360	330	320	325	340	380	430	485	545	635	740	320	
	上市 富山県	最低温度	5.2	3.2	1.9	0.6	-0.8	-1.9	-2.8	-3.5	-3.9	-3.9	-3.6	-3.2	-2.4	-1.5	-0.4	-3.9
		M_{42}	655	590	535	485	450	425	420	420	430	460	500	550	605	685	775	420
	M'_{42}	650	575	505	445	395	365	360	360	370	410	455	515	580	675	775	360	
佐久 長野県	最低温度	1.9	-0.5	-2.2	-3.8	-5.3	-6.6	-7.1	-7.7	-8.2	-8.2	-7.1	-6.0	-4.9	-3.7	-2.2	-8.2	
	M_{42}	565	495	435	390	360	340	340	350	370	410	465	525	585	670	760	340	
M'_{42}	530	440	370	310	260	235	235	245	280	340	405	480	550	645	745	235		
河口湖 山梨県	最低温度	2.7	0.7	-0.9	-2.6	-4.1	-5.2	-5.8	-6.3	-6.8	-6.7	-5.5	-4.7	-3.8	-2.5	-0.9	-6.8	
	M_{42}	605	540	485	440	410	395	395	395	415	455	505	555	610	685	765	395	
M'_{42}	575	500	440	385	340	315	315	320	350	400	460	520	585	670	760	315		
高山 岐阜県	最低温度	3.4	1.4	0.1	-1.3	-2.7	-4.0	-4.7	-5.4	-6.0	-6.0	-5.4	-4.7	-3.8	-2.7	-1.3	-6.0	
	M_{42}	580	515	455	410	375	355	355	360	375	415	470	530	590	675	770	355	
M'_{42}	560	475	390	320	270	235	235	240	275	335	405	485	560	655	760	235		
中国	高野 広島県	-1.1	最低温度	2.6	0.3	-0.9	-2.0	-2.8	-3.9	-4.4	-5.0	-5.6	-5.6	-5.3	-4.7	-3.2	-1.7	-5.6
M_{42}	585	520	470	435	405	385	380	385	395	430	480	535	590	675	755	380		

5.5 第5章の結論

寒中コンクリート工事に影響する気候特性を整理するとともに、軽微な対応で施工可能となる地域（タイプⅡ：28日平均気温の年間最小値 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 、かつ材齢91日までの積算温度の年間最小値 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 以上）の調合計画手法を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 寒中コンクリート工事の適用地域は日本各地に分布し、その適用を受けない地域は限定的である。
- (2) 寒中コンクリート工事の適用期間の日数、材齢28日までの予想平均気温によって構造体強度補正値を定める方法（JASS5方式）が適用できる日数は、地域によって大きく異なる。
- (3) 材齢91日までの積算温度の年間最小値と日平均気温や材齢28日までの平均温度の年間最小値との関係に相関性が認められる。
- (4) 寒中コンクリート工事に関する気候特性を3タイプに分類することで、地域特性や施工計画上の特徴を表すことができる。
- (5) タイプⅡでは、構造体強度補正値 $9\text{N}/\text{mm}^2$ の適用範囲を設けることで、全期間に対してJASS5方式を適用することが可能になる。
- (6) タイプⅡでは、施工時期に応じて設計基準強度を確保する材齢を35日または45日に延長することで、構造体強度補正値 $6\text{N}/\text{mm}^2$ を採用することができる。

— 第5章の参考文献 —

- 1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2011.11
- 2) 谷口円，桂修，濱幸雄，吉野利幸：水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案，日本建築学会大会構造系論文集，第74巻，第641号，pp.1205～1210，2009.7
- 3) 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に，日本建築学会技術報告集，第74巻，第640号，pp.995-1003，2009.6
- 4) 深瀬孝之，濱幸雄，長谷川拓哉，谷口円，他15名：寒中コンクリートに関するアンケート調査結果 寒中コンクリート施工調査研究委員会報告，日本建築学会北海道支部研究報告集，第80巻，pp.359-362，2007.7
- 5) 気象庁：平年値（統計期間1981～2010年），（CD-ROM），2011.3
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2018.7



第 6 章

施工計画支援システムの開発

第6章 施工計画支援システムの開発

6.1 はじめに

寒中コンクリート工事では、建物条件、施工条件および気象条件などの諸条件を考慮したうえで、養生計画、調合計画、品質管理計画などを立案することが重要である。特に調合計画では、養生計画と対比させながら、初期凍害を防止するための強度や施工上必要となる強度が所定の材齢で確保できるかについて検討する必要がある。

この施工計画の立案において、実務者は寒中コンクリート工事に関連する規準類を理解するとともに、気象統計データをもとに各種の算定を繰り返すことによって、計画内容を詳細化することになる。寒中コンクリート工事を熟知した技術者であっても、この作業には多大な時間を要しており、これらのシステム化が期待されていた。

日本建築学会北海道支部では、2000年にコンクリートの調合設計研究委員会(活動期間:2000～2001年度)を設置し、著者らが中心となって日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説(第4版,1998年)」¹⁾に対応した「寒中コンクリート施工支援システム」の開発を行った²⁾³⁾。しかしながら、2010年には同指針は第5版(以下、寒中指針という)⁴⁾に改定され、調合計画の内容は全面的に変更された。

そこで、現行の寒中指針に対応させるとともに、第3章から第5章の成果を組み込んだシステムを開発することとする。

6.2 システムの目的と要件

寒中コンクリート工事の計画全体を合理的かつ経済的なものにするためには、図 6.2.1 に示すようにフィードバックを繰り返しながら、工事全般の内容を具体化させていくことになる。施工計画段階では、気象統計データに基づく積算温度、任意の材齢に対する強度推定、加熱養生時の熱量などの煩雑な計算を繰り返し、関連する規準類の規定に適合させることが必要となる。

そのため、寒中コンクリート工事の立案に際して、実務者が各種計算を適切かつ簡便に実行できることを目的として施工支援システムを開発する。

このシステムを開発するにあたり、以下に要件を示す。

- ① 現行の寒中指針⁴⁾ および公共建築工事標準仕様書（以下、標準仕様書という）⁵⁾ に適合することを基本とする。
- ② 現行指針における課題の解決を図る。
- ③ システム操作やデータ管理が簡便である。
- ④ システムの配布が容易である。
- ⑤ 汎用性がある。
- ⑥ 導入コストが安価である。

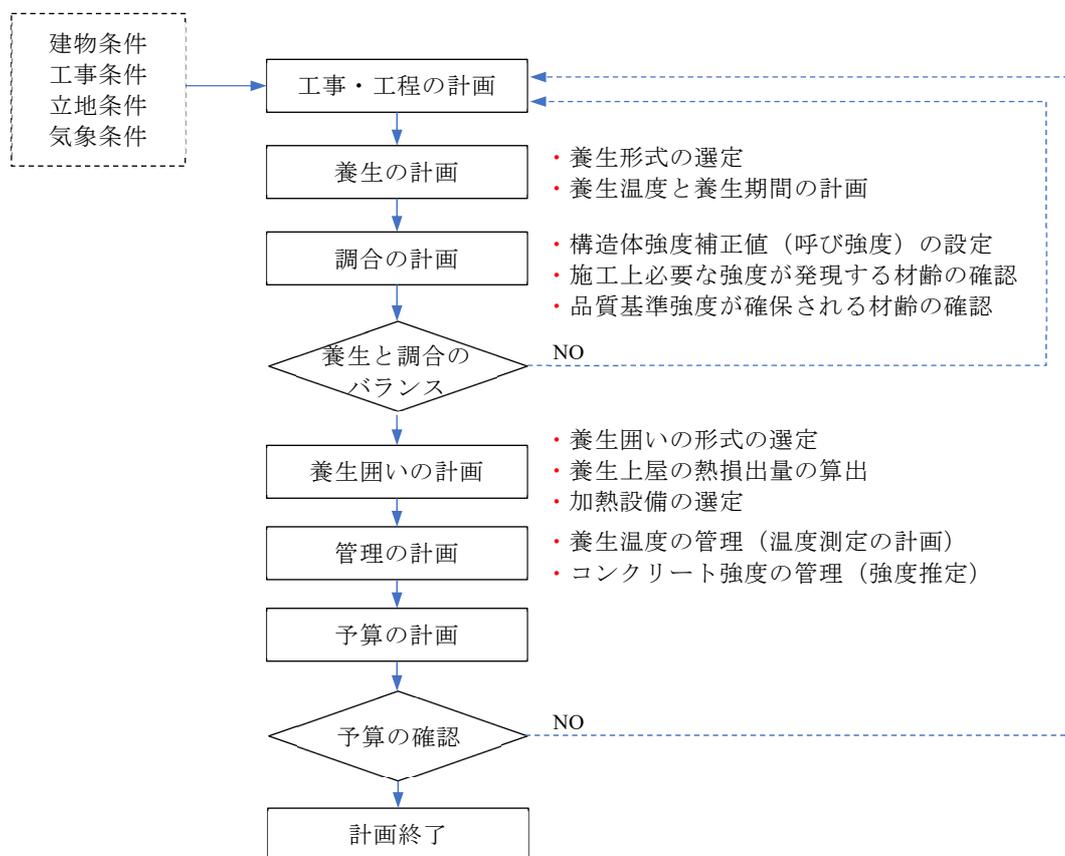


図 6.2.1 寒中コンクリート工事の計画フロー

6.3 システムの全体構成

システムは、図 6.3.1 に示すようにメイン画面を中心として、調合計画、養生計画、強度推定、気候特性、ヘルプの5分野から構成される。また、前述のシステム要件を踏まえ、最も一般的に普及している表計算ソフト (Microsoft Excel) を採用し、VBA (Visual Basic for Applications) を用いてプログラムを作成することとする。また、表 6.3.1 には、日本建築学会北海道支部「コンクリートの調合設計研究委員会 (2000~2001 年度)」におけるシステムとの相違について示す。

計算に用いる気象統計値としては、現時点で最新の平年値 (統計期間 1981~2010 年)⁶⁾ を採用し、寒中コンクリート工事が適用される地域 (643 地点) の旬最高気温、旬平均気温、旬最低気温を格納する。

複数の算定条件の入力データを容易に管理するため、算定毎に個別のシステムデータを作成する形式ではなく、複数の入力データを一括して一つのシステムデータに格納する形式を採用する。図 6.3.2 に示すように、各入力データはリストによって管理することができる。

図 6.3.3 にヘルプ記載内容の一例を表示する。ヘルプ部分にはシステムの操作方法に加えて、規準類の規定内容や計算方法などを解説することによって、計算方法のブラックボックス化を防ぐことにする。また、ヘルプは内容の更新に対する容易性を考慮して、インターネット上に配置する。

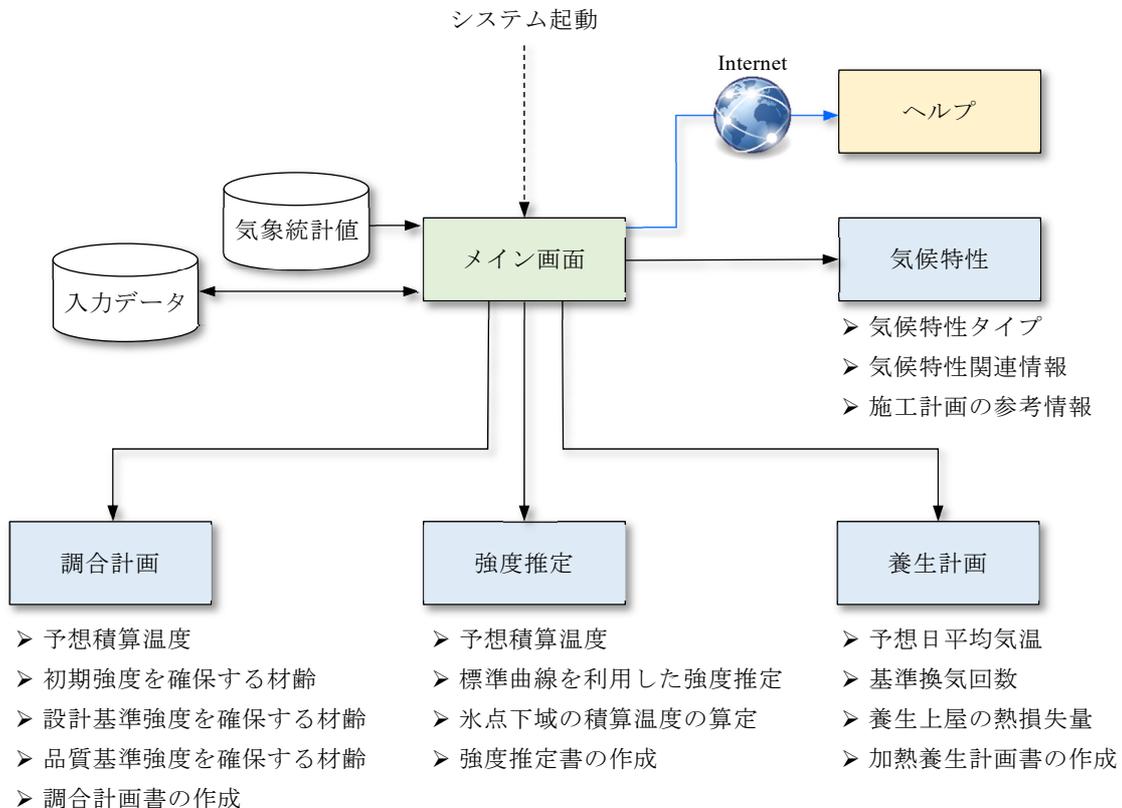


図 6.3.1 システムの全体構成と主な機能

表 6.3.1 新旧の施工計画支援システムの相違

	旧：日本建築学会北海道支部 コンクリートの調査設計委員会	新：施工計画支援システム
基本アプリケーション	Microsoft Access (データベースソフト)	Microsoft Excel (表計算ソフト)
プログラミング言語指針	Access VBA	Excel VBA
システムのデータ容量	3.8MB (実行用システム：80MB)	2.5MB
システム配布の容易性・汎用性	△：Access を所有していない場合、実行用システムをインストールする必要がある	○：Excel は一般化されているため、上記のシステムのみを配布する
データの管理方法	○：データベース管理	○：データベース管理
コスト	△：Access 実行用システムのデータが大きいため、配布コストが増加する	○：配布が容易で、安価に構築できる
気象統計データ	<ul style="list-style-type: none"> 旬平均気温 平年値の統計期間：1971～2000年 194地点 	<ul style="list-style-type: none"> 旬最低気温，旬平均気温，旬最高気温 平年値の統計期間：1981～2010年 643地点
適用指針類	<ul style="list-style-type: none"> 寒中指針（第4版，1998年）¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 寒中指針（第5版，2010年）⁴⁾ 標準仕様書（2019年）⁵⁾
調査計画	<ul style="list-style-type: none"> 上記指針に基づく調査計画方法 計画と実績の強度が乖離するため、参考値として強度増進曲線を表示する 	<ul style="list-style-type: none"> 上記指針に基づく調査計画方法 初期養生検討のための参考情報提供 設計基準強度の確保材齢を指定する場合の調査計画 設計基準強度に対する、材齢28日推定強度との比率
加熱養生の熱量計算	<ul style="list-style-type: none"> 上記指針に基づく算定方法 	<ul style="list-style-type: none"> 上記指針に基づく算定方法 外気温設定種別の選択 基準換気回数図表のシステム化 換気回数計算用風速の更新 補正係数D（二重，合板）の修正
強度推定	<ul style="list-style-type: none"> 積算温度を用いるロジスティック曲線 	<ul style="list-style-type: none"> 積算温度を用いるゴンペルツ曲線 氷点下域の積算温度（日内変動考慮）
気候特性	-	<ul style="list-style-type: none"> 気候特性タイプの表示 気候特性に関連する情報提供 施工計画検討のための情報提供

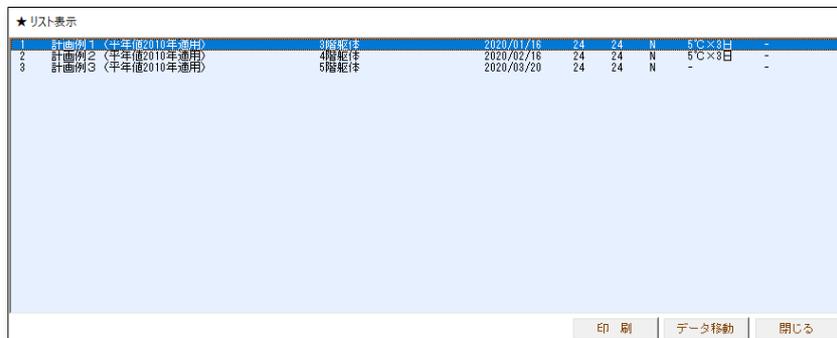


図 6.3.2 各入力データの管理

- はじめに
- セットアップと起動
- 調査計画の条件設定
- 調査計画の算定結果
- 調査計画の算定方法
- 強度推定の条件設定
- 強度推定の算定結果
- 強度推定の算定方法
- 養生計画の条件設定
- 養生計画の算定結果
- 養生計画の算定方法
- データの操作方法
- 解説
- ライセンスの登録

調査計画における算定方法

指針では、構造体補正強度 $_{28}S_n$ を定める方法として、以下の2つの方法が示されています。これらの方法のうち、本システムでは下記(2)の方法を適用して算定を行っています。

(1) コンクリートの打込みから材齢28日までの予想平均気温によって定める方法(指針4.4)

通常期に用いるJASS5.5.2.cによる方法を寒中コンクリートの適用期間にも適用して、構造体補正強度 $_{28}S_{91}$ を定めることができます。但し、この方法は材齢91日までの積算温度が $840^{\circ}D \cdot D$ 以上の場合に制限されています。

(2) 積算温度をもとに定める方法(指針4.5)

寒中コンクリートの標準的な計画方法で、計画した材齢以内に品質基準強度や設計基準強度を得るための積算温度を確保するように、構造体補正強度 $_{28}S_n$ を定める方法です。本システムでは、3水準の構造体補正強度 $_{28}S_n=3, 6, 9 N/mm^2$ について、初期強度 $5 N/mm^2$ 、設計基準強度、および品質基準強度を得るための必要積算温度(指針解説表9.1、表4.3、表4.2)と、養生温度(旬平均気温・加熱養生温度)から算出した積算温度に基づいて、各強度が確保される材齢を求めています。

日平均温度 θ

- ・ 施工地域の旬平均気温
- ・ 加熱養生温度

品質基準強度: $F_q = \text{Max}(F_c, F_d)$

← 設計基準強度 F_c
← 耐久設計基準強度 F_d

材齢 n 日の積算温度 M_n

$M_n = \sum (\theta + 10)$

調査管理強度: $F_m = F_q + {}_{28}S_n$

← 構造体補正強度 $_{28}S_n=3, 6, 9 N/mm^2$

容強度に対する必要積算温度 M'

- ・ $5 N/mm^2$ (指針解説表 9.1)
- ・ F_c (指針表 4.3)
- ・ F_q (指針表 4.2)

各強度が得られる材齢

※ 氷点下温度域に対する積算温度の低減は考慮しない

◇ $M_n \geq M'$

F_q 確保材齢: 91 日以内
初期養生中の温度確認
(旬最低気温による判定)

- ・ $0^{\circ}C$ を上回る :OK
- ・ $0^{\circ}C$ 以下 $-3^{\circ}C$ 上回る :OK(被覆)
- ・ $-3^{\circ}C$ 以下 :加熱

- はじめに
- セットアップと起動
- 調査計画の条件設定
- 調査計画の算定結果
- 調査計画の算定方法
- 強度推定の条件設定
- 強度推定の算定結果
- 強度推定の算定方法
- 養生計画の条件設定
- 養生計画の算定結果
- 養生計画の算定方法
- データの操作方法
- 解説
- ライセンスの登録

強度推定における算定方法

指針資料3.2に示される強度増進標準曲線を適用して、材齢(積算温度)と圧縮強度の関係を求めています。

<< 基本式 >>

指針資料3.2の強度増進の標準曲線式

$$F = F_{\infty} \times \exp(a \times M_c^b)$$

$$F_{\infty} = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp(a \times {}_{20}M_{28}^b)} \times (1 + C_f(T_{24} - 20))$$

$$a = a_1 / {}_{20}F_{28} + a_2 \quad b = b_1 / {}_{20}F_{28} + b_2$$

$$M_c = \left(\sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \right) + C_M (T_{24} - 20)$$

ここに、

- F: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
- F_{∞} : コンクリートの温度補正を行った最終到達強度 (N/mm²)
- ${}_{20}F_{28}$: 標準水中養生を行った材齢28日 (840[°]D・D)における圧縮強度(N/mm²)
- ① 平均的な算定の場合には調査強度とする。
- ② 安全側の算定の場合には呼び強度とする。
- ${}_{20}M_{28}$: 標準水中養生を行った材齢28日における積算温度(° D・D)
- T_{24} : 打ち込みから24時間のコンクリートの平均温度(°C)
- a, b: ゴンペルツ曲線の係数
- M_c : コンクリートの温度補正を行った積算温度 (° D・D)
- T_c : コンクリートの平均温度 (°C)
- Δt : 平均温度算出のインターバル時間 (日)

図 6.3.3 ヘルプの記載内容の一例

6.4 システムの概要

6.4.1 気候特性

寒中コンクリート工事では、施工地域の気象特性を十分に把握し、施工計画を合理的に立案することが重要である。そこで、第5章「寒中コンクリート工事に影響する気候特性」における検討成果である気候特性区分、標準的な調合計画や養生計画などの情報を提供することとする。

図 6.4.1 および図 6.4.2 にそれぞれ算定フローとシステムの概要を示す。各地域の日別平年値を用いて算出した気象特性データをシステムに格納する。実務者は施工地域、施工時期、セメント種類の3つの施工条件を指定することで気候特性データを入手することができ、調合計画や養生計画の基本的な方針を定めることができる。

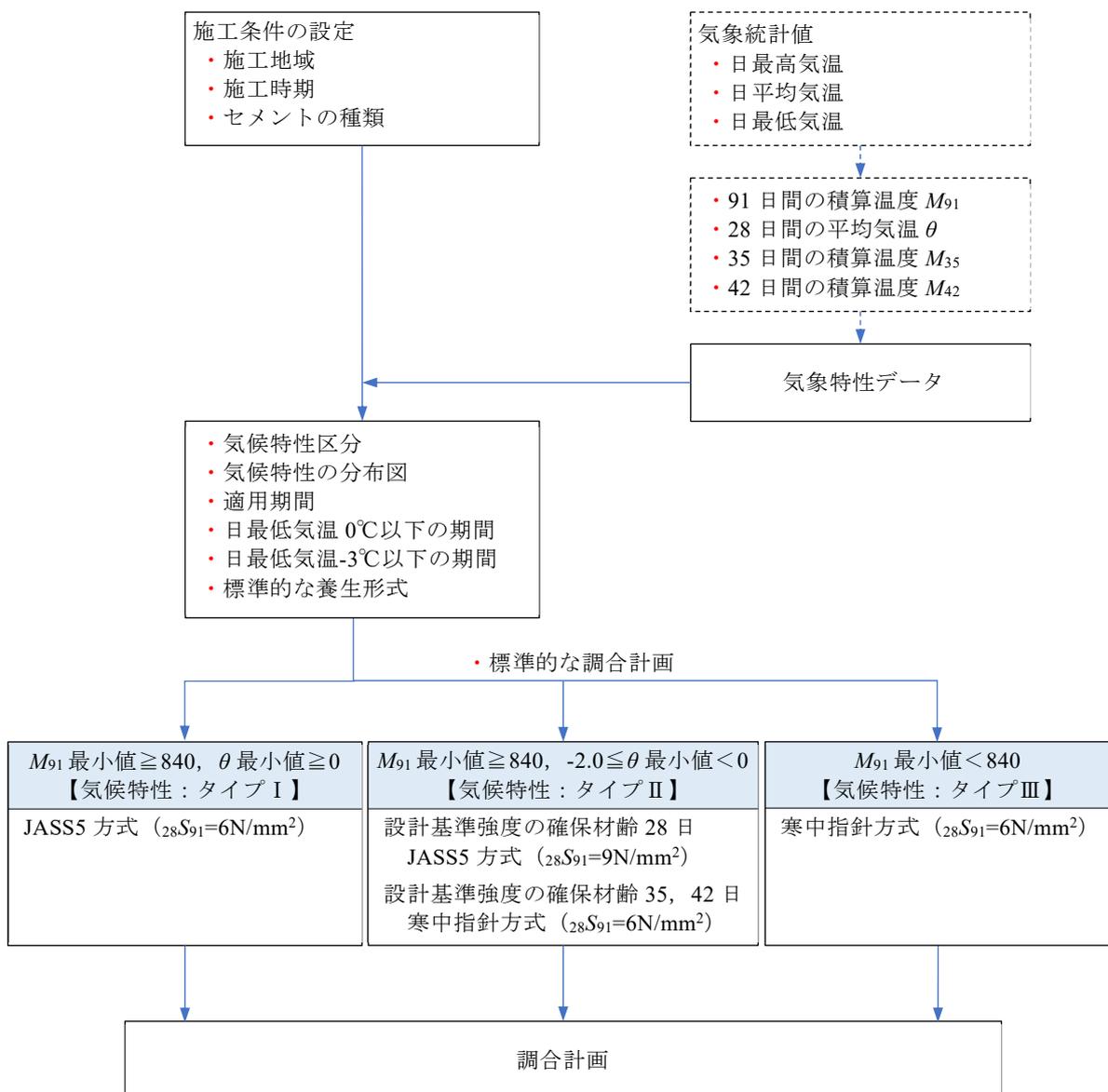
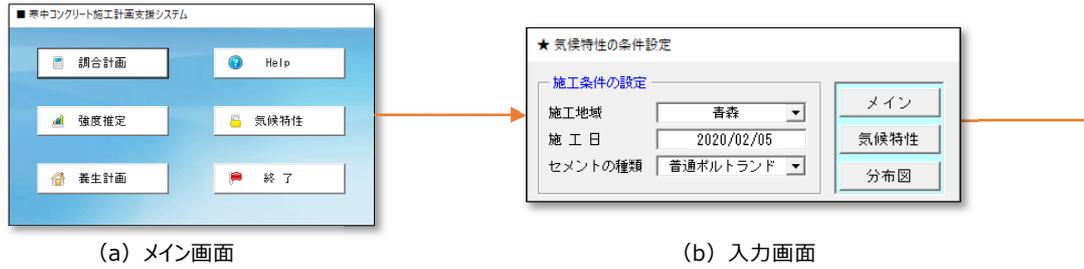


図 6.4.1 気候特性の算定フロー



(a) メイン画面

(b) 入力画面

★ 気候特性と施工計画に関する参考情報

施工地域：青森 施工時期：2020/2/5

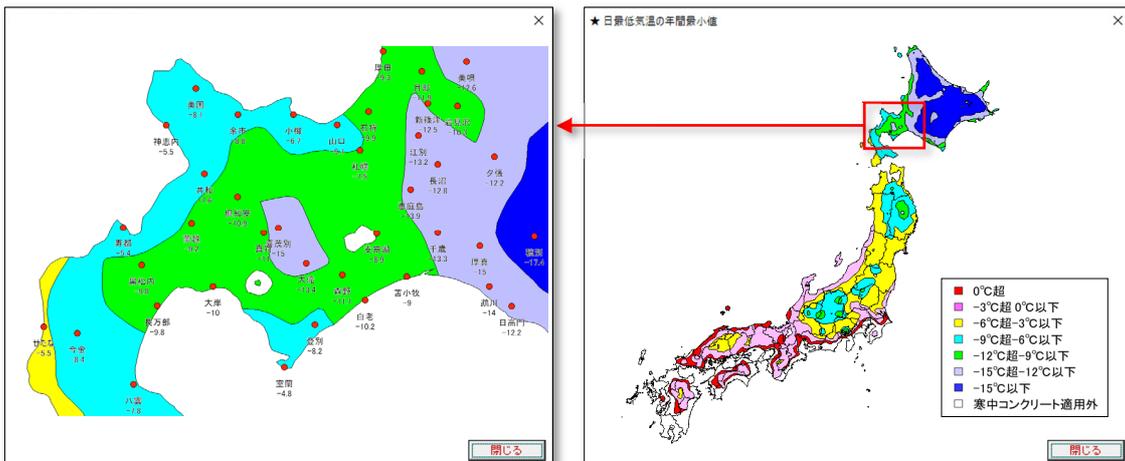
- 地域特性区分：タイプ II
 - ・ 28 日間平均気温の年間最小値が 0℃～-2.0℃となる地域です。
 - ・ 設計基準強度を材齢 28 日で確保する場合には JASS5 方式、材齢 35 日または 42 日で確保する場合には寒中指針方式が適用できます。
 - ・ 日最低気温が-3℃以下となることが多く、加熱養生が必要になる頻度が高い地域です。
- 施工計画に関連する情報

		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
適用期間	日平均気温 4℃以下							
	材齢91日までの積算温度 840 °D・D未滿							
調合計画	JASS5適用 (S値: 6.9N/mm ²) (設計基準強度の確保材齢: 28日)				S値: 9N/mm ²		S値: 6N/mm ²	
	寒中指針適用 (S値: 6N/mm ²) (設計基準強度の確保材齢の延長)			35日	42日	35日		
最低気温	日最低気温 0℃以下							
	日最低気温 -3℃以下							
養生計画	養生形式			被覆	断熱+加熱		被覆	

- ・ 日最低気温：-4.0℃
- ・ 日平均気温：-1.3℃
- ・ 日最高気温：1.5℃
- ・ 材齢 28 日までの平均温度：-0.4℃
- ・ 材齢 91 日までの積算温度：1291° DD (平均温度 4.2℃)

閉じる

(c) 施工計画に関連する情報



(d) 気候特性に関連する分布図

図 6.4.2 気候特性のシステム概要

6. 4. 2 調合計画

図 6.4.3 および図 6.4.4 に、それぞれ調合計画における算定フローとシステムの概要を示す。施工地域と施工時期に連動する気象データに養生条件を考慮して、計画時の積算温度を算出する。標準曲線（積算温度と強度増進性状の関係を表す。）から定められた各強度に対する必要積算温度と計画積算温度を用いて、設計基準強度や品質基準強度が得られる材齢を求めることができる。

ここでは、構造体補正強度 $_{28}S_n=3, 6, 9\text{N/mm}^2$ の調合について一括して算定し、これら 3 種類の調合における相違を容易に把握することができる。この算出結果を工程計画などと対比させることで、調合計画や養生日数などを効率的に検討することが可能となる。

(1) 条件設定

条件設定画面において、施工地域や施工日、設計条件および養生条件を設定する。また、計画内容を検討するための参考情報として、施工地域における気温の平年値や初期養生条件の設定に必要となる情報を提供する。

工程計画から設計基準強度を確保すべき日数が制限される場合がある。このようなケースに対応するため、設計基準強度が得られる目標日数を指定することで、標準的な施工計画を提示できるような計算フローも準備する。

(2) 算定結果・計算書類

3 種類の調合管理強度に関して、初期強度、設計基準強度および品質基準強度の各強度が確保される日数を算出する。また、標準仕様書の規定に対応するため、標準曲線によって材齢 28 日の圧縮強度を推定し、その強度が $0.7 \times$ 設計基準強度以上であることを確認することができる。また、材齢 91 日までの各材齢における圧縮強度と積算温度を表示する。

調合計画書、強度推定結果、積算温度表の 3 種類の計算書類を作成する。図 6.4.5 に調合計画書と積算温度表を例示する。

6. 4. 3 養生計画

図 6.4.6 に養生計画の算定フローを示す。また、図 6.4.7 にシステムの概要を示す。計画養生温度、施工地域と施工時期から決定される日平均温度、上屋材料の種別・面積、囲い材のサイズや隙間状態などによる補正係数、基準換気回数などの施工条件から、養生上屋の熱損出量を算出することができる。この熱損出量を満足させるように加熱方法を選定することになる。

(1) 条件設定

条件設定画面において、養生上屋の伝熱および換気による熱損出量の算出に関連する条件を設定する。ここで、基準換気回数に関しては、開口の有無、養生上屋の床面積と高さ、風速に対応させて、グラフ（図 4.2.1）から読み取ることが現行指針における基本的な方法である。しかしながら、図 4.3.2 に示すように一部の検証結果が現行指針と乖離するため、収束計算から基準換気回数を算出する機能を付加する。この基準換気回数のシステム化に加えて、第 4 章の成果を次のように反映させることとする。

- 1) 外気温の設定方法は、①計画段階（平年値-4℃）、②実施段階（平年値）、③実施段階（平年値-4℃）の 3 種類から選択することとし、設定に対する考え方を明確にする。

- 2) 換気回数計算用風速は、最新の平年値（統計期間 1981~2010 年）⁶⁾ を適用して更新する。
- 3) 囲み材の一重・二重による補正係数 D を修正する（表 4.3.6）。

(2) 算定結果・計算書類

養生上屋の伝熱および換気による熱損出量をそれぞれ算出し、両者を合算して全体の熱損出量を求める。また、図 6.4.8 に示すように、加熱養生計画書および基準換気回数に関する算定書を作成することができる。

6.4.4 強度推定

図 6.4.9 および図 6.4.10 にそれぞれ強度推定の算定フローとシステム概要を示す。コンクリート施工後の強度管理段階におけるシステムの利用を想定し、施工地域と施工時期から決定される日平均温度に養生条件を加味した積算温度から、標準曲線を用いて材齢 91 日までの圧縮強度を推定する。この推定強度を参考にして、支保工除去時などに必要となる強度が発現するまでの日数を確認することになる。

第3章で示された強度推定式の適用性を踏まえて、ここで適用する強度推定方法には寒中指針に示される積算温度方式を採用する（積算温度を用いるゴンペルツ曲線、式 (3.3) ~ (3.8)）。また、氷点下温度域の積算温度を適用する場合には日内変動を考慮することとして、日最低気温、日平均気温および日最高温度から算出する（式 (5.7), 式 (5.8)）。

(1) 条件設定

条件設定画面において、施工地域や施工日、設計基準強度、養生条件および氷点下温度域の積算温度の適用有無について設定する。なお、使用したコンクリートの調合強度と整合させるため、調合強度の算定式における係数などを変更できることとする。

(2) 算定結果・計算書類

材齢 91 日までの各材齢に対する圧縮強度を推定するとともに、初期強度、設計基準強度および品質基準強度が確保される材齢を表示する。また、初期養生が確保されるまでの期間において養生温度が 0°C 以上を満足するか、材齢 91 日までに品質基準強度が確保されるかについて合否判定を行う。

計算書類として、強度推定計算書、強度推定データ表、積算温度データ表を作成することができる。図 4.4.11 に強度推定計算書と強度推定データ表を例示する。

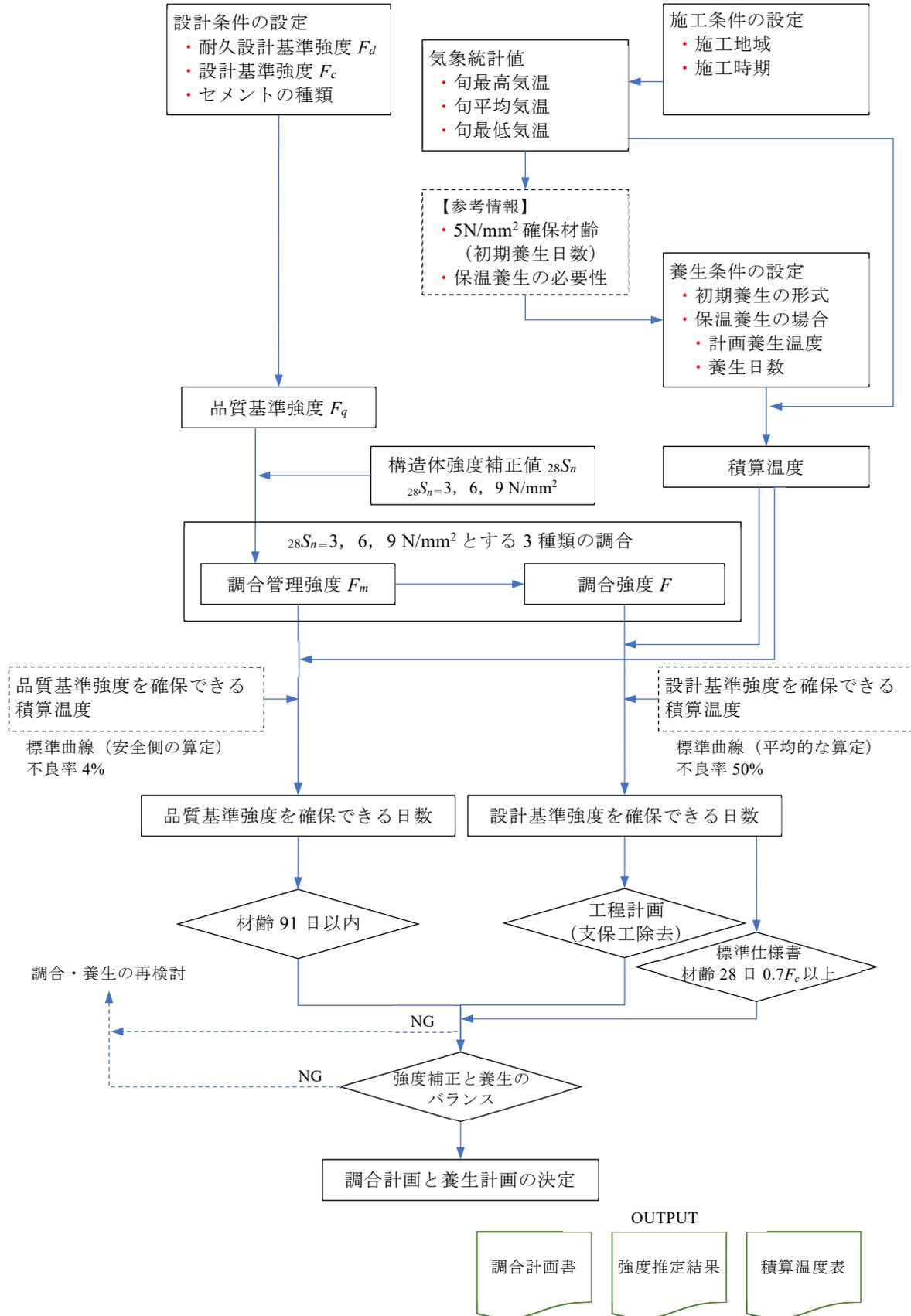


図 6.4.3 調合計画の算定フロー

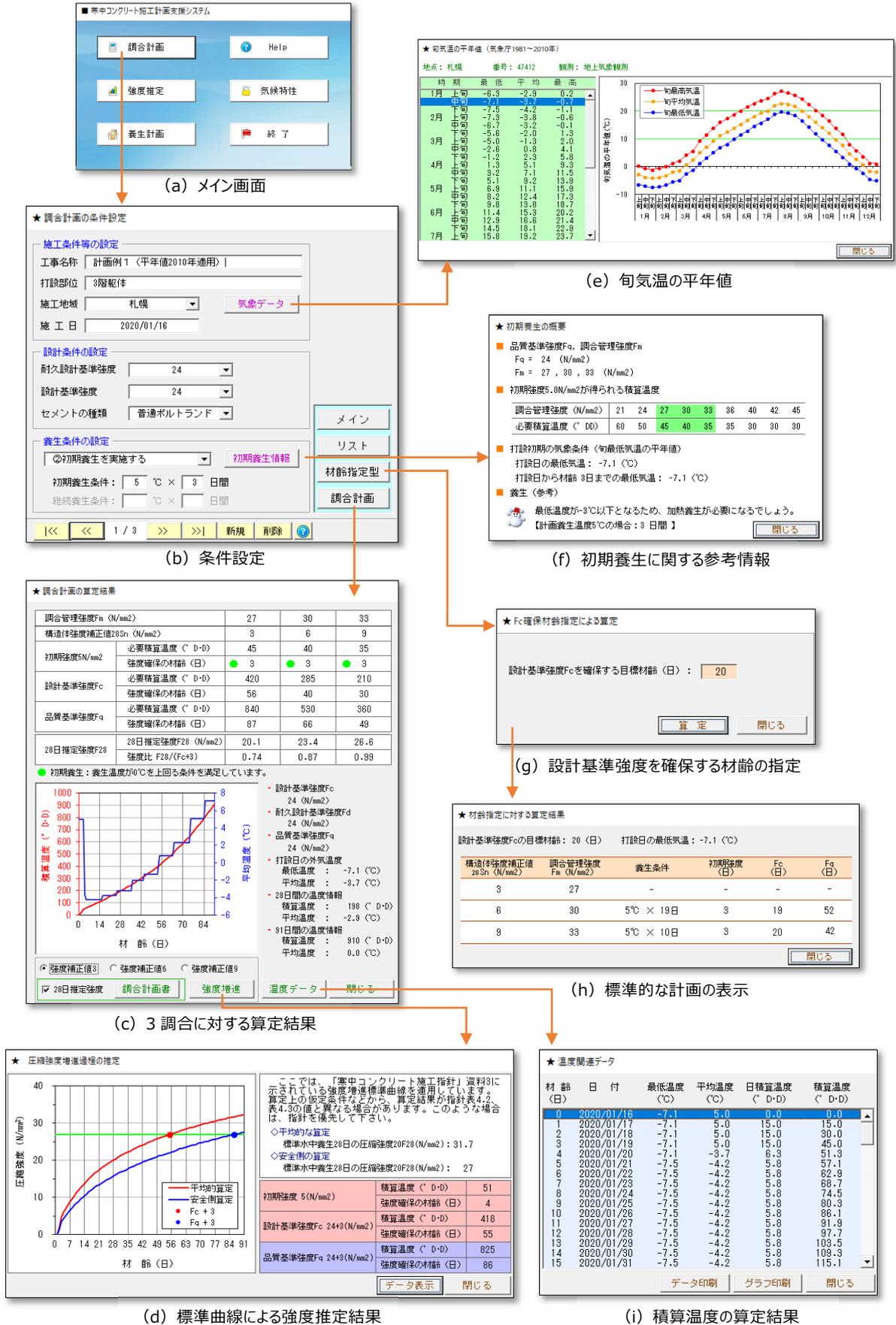


図 6.4.4 調査計画のシステム概要

調 合 計 画 書	
工事名称	計画例 1 (平年値2010年適用)
施工地域	札幌 (旬平均気温: 1981~2010年の気象庁平年値[地上気象観測])
施工予定日	2020/1/16
施工箇所	船橋体
初期養生	初期養生: 5 (°C) × 3 (日)
セメント種類	普通ポルトランドセメント
設計基準強度 (F_c)	24 (N/mm ²)
耐久設計基準強度 (F_d)	24 (N/mm ²)
品質基準強度 (F_q)	24 (N/mm ²)
構造体強度補正值 ($_{\text{設計}}S_n$)	3 (N/mm ²)
調合管理強度 ($F_{\text{管理}}$)	27 (N/mm ²)

日本建築学会「寒中コンクリート施工指針 2010年版」に示される、4.5 積算温度をもとに構造体強度補正值を定める方法を適用して、調合計画を行う。

(1) 各強度に対する必要積算温度

- 1) 初期強度5N/mm²が得られる積算温度 45 (° D-D) [指針解説表9.1参照]
- 2) 設計基準強度 F_c が得られる積算温度 420 (° D-D) [指針表4.3参照]
- 3) 品質基準強度 F_q を保证するための積算温度 340 (° D-D) [指針表4.2参照]

(2) 各強度に対する確保材齢

旬平均気温 (気象庁平年値1981~2010年) から積算温度を算出し、上記の必要積算温度を満足する材齢を求める。

- 1) 初期強度5N/mm²が得られる材齢 3 (日) [表1参照]
- 2) 設計基準強度 F_c が得られる材齢 56 (日) [表2参照]
- 3) 品質基準強度 F_q を保证する材齢 88 (日) [表3参照]

設計基準強度を56日に確保し、構造体コンクリート強度を88日(91日以内)に保証することができる。

表1 初期強度が得られる材齢までの積算温度

区間開始日	区間終了日	日数	累積日数	平均温度	区間積算温度	積算温度
2020/01/16	2020/01/19	3	3	5.0	45.0	45.0

表2 設計基準強度が得られる材齢までの積算温度

区間開始日	区間終了日	日数	累積日数	平均温度	区間積算温度	積算温度
2020/01/16	2020/01/19	3	3	5.0	45.0	45.0
2020/01/20	2020/01/20	1	4	-3.7	-3.7	41.3
2020/01/21	2020/01/31	11	15	-4.6	-46.2	0.1
2020/02/01	2020/02/10	10	25	-3.8	-38.0	-37.9
2020/02/11	2020/02/20	10	35	-3.8	-38.0	-75.9
2020/02/21	2020/02/29	9	44	-3.8	-34.2	-110.1
2020/03/01	2020/03/10	10	54	-3.8	-38.0	-148.1
2020/03/11	2020/03/12	2	56	-3.8	-7.6	-155.7

(a) 調合計画書

積算温度データ										札幌	
材齢 (日)	日付	最低温度 (°C)	平均温度 (°C)	日積算温度 (° DD)	積算温度 (° DD)	材齢 (日)	日付	最低温度 (°C)	平均温度 (°C)	日積算温度 (° DD)	積算温度 (° DD)
0	2020/01/16	-7.1	5.0	0.0	0.0	46	2020/03/02	-5.0	-1.3	8.7	394.5
1	2020/01/17	-7.1	5.0	15.0	15.0	47	2020/03/03	-5.0	-1.3	8.7	343.2
2	2020/01/18	-7.1	5.0	15.0	30.0	48	2020/03/04	-5.0	-1.3	8.7	351.9
3	2020/01/19	-7.1	5.0	15.0	45.0	49	2020/03/05	-5.0	-1.3	8.7	380.6
4	2020/01/20	-7.1	-3.7	8.3	53.3	50	2020/03/06	-5.0	-1.3	8.7	369.3
5	2020/01/21	-7.5	-4.2	5.8	59.1	51	2020/03/07	-5.0	-1.3	8.7	378.0
6	2020/01/22	-7.5	-4.2	5.8	64.9	52	2020/03/08	-5.0	-1.3	8.7	386.7
7	2020/01/23	-7.5	-4.2	5.8	70.7	53	2020/03/09	-5.0	-1.3	8.7	395.4
8	2020/01/24	-7.5	-4.2	5.8	76.5	54	2020/03/10	-5.0	-1.3	8.7	404.1
9	2020/01/25	-7.5	-4.2	5.8	82.3	55	2020/03/11	-2.6	0.8	10.8	414.9
10	2020/01/26	-7.5	-4.2	5.8	88.1	56	2020/03/12	-2.6	0.8	10.8	425.7
11	2020/01/27	-7.5	-4.2	5.8	93.9	57	2020/03/13	-2.6	0.8	10.8	436.5
12	2020/01/28	-7.5	-4.2	5.8	99.7	58	2020/03/14	-2.6	0.8	10.8	447.3
13	2020/01/29	-7.5	-4.2	5.8	105.5	59	2020/03/15	-2.6	0.8	10.8	458.1
14	2020/01/30	-7.5	-4.2	5.8	111.3	60	2020/03/16	-2.6	0.8	10.8	468.9
15	2020/01/31	-7.5	-4.2	5.8	117.1	61	2020/03/17	-2.6	0.8	10.8	479.7
16	2020/02/01	-7.8	-3.8	6.2	123.3	62	2020/03/18	-2.6	0.8	10.8	490.5
17	2020/02/02	-7.8	-3.8	6.2	129.5	63	2020/03/19	-2.6	0.8	10.8	501.3
18	2020/02/03	-7.8	-3.8	6.2	135.7	64	2020/03/20	-2.6	0.8	10.8	512.1
19	2020/02/04	-7.8	-3.8	6.2	141.9	65	2020/03/21	-1.2	2.3	12.3	524.4
20	2020/02/05	-7.8	-3.8	6.2	148.1	66	2020/03/22	-1.2	2.3	12.3	536.7
21	2020/02/06	-7.8	-3.8	6.2	154.3	67	2020/03/23	-1.2	2.3	12.3	549.0
22	2020/02/07	-7.8	-3.8	6.2	160.5	68	2020/03/24	-1.2	2.3	12.3	561.3
23	2020/02/08	-7.8	-3.8	6.2	166.7	69	2020/03/25	-1.2	2.3	12.3	573.6
24	2020/02/09	-7.8	-3.8	6.2	172.9	70	2020/03/26	-1.2	2.3	12.3	585.9
25	2020/02/10	-7.8	-3.8	6.2	179.1	71	2020/03/27	-1.2	2.3	12.3	598.2
26	2020/02/11	-6.7	-3.2	6.8	185.9	72	2020/03/28	-1.2	2.3	12.3	610.5
27	2020/02/12	-6.7	-3.2	6.8	192.7	73	2020/03/29	-1.2	2.3	12.3	622.8
28	2020/02/13	-6.7	-3.2	6.8	199.5	74	2020/03/30	-1.2	2.3	12.3	635.1
29	2020/02/14	-6.7	-3.2	6.8	206.3	75	2020/03/31	-1.2	2.3	12.3	647.4
30	2020/02/15	-6.7	-3.2	6.8	213.1	76	2020/04/01	1.3	5.6	15.6	663.0
31	2020/02/16	-6.7	-3.2	6.8	219.9	77	2020/04/02	1.3	5.6	15.6	678.6
32	2020/02/17	-6.7	-3.2	6.8	226.7	78	2020/04/03	1.3	5.6	15.6	694.2
33	2020/02/18	-6.7	-3.2	6.8	233.5	79	2020/04/04	1.3	5.6	15.6	709.8
34	2020/02/19	-6.7	-3.2	6.8	240.3	80	2020/04/05	1.3	5.6	15.6	725.4
35	2020/02/20	-6.7	-3.2	6.8	247.1	81	2020/04/06	1.3	5.6	15.6	741.0
36	2020/02/21	-5.6	-2.0	6.8	253.9	82	2020/04/07	1.3	5.6	15.6	756.6

(b) 積算温度表

図 6.4.5 調合計画における計算書類

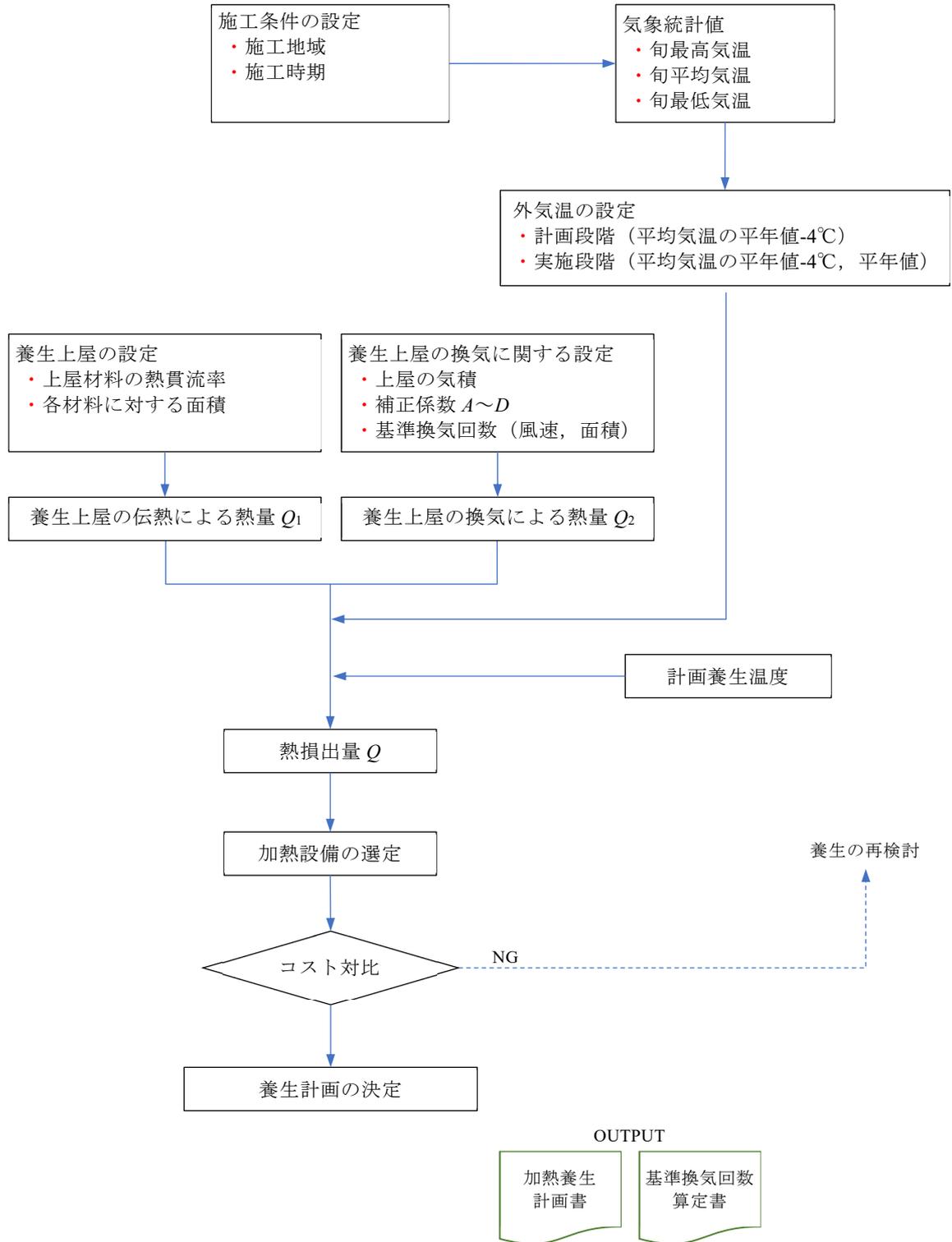


図 6.4.6 養生計画の算定フロー

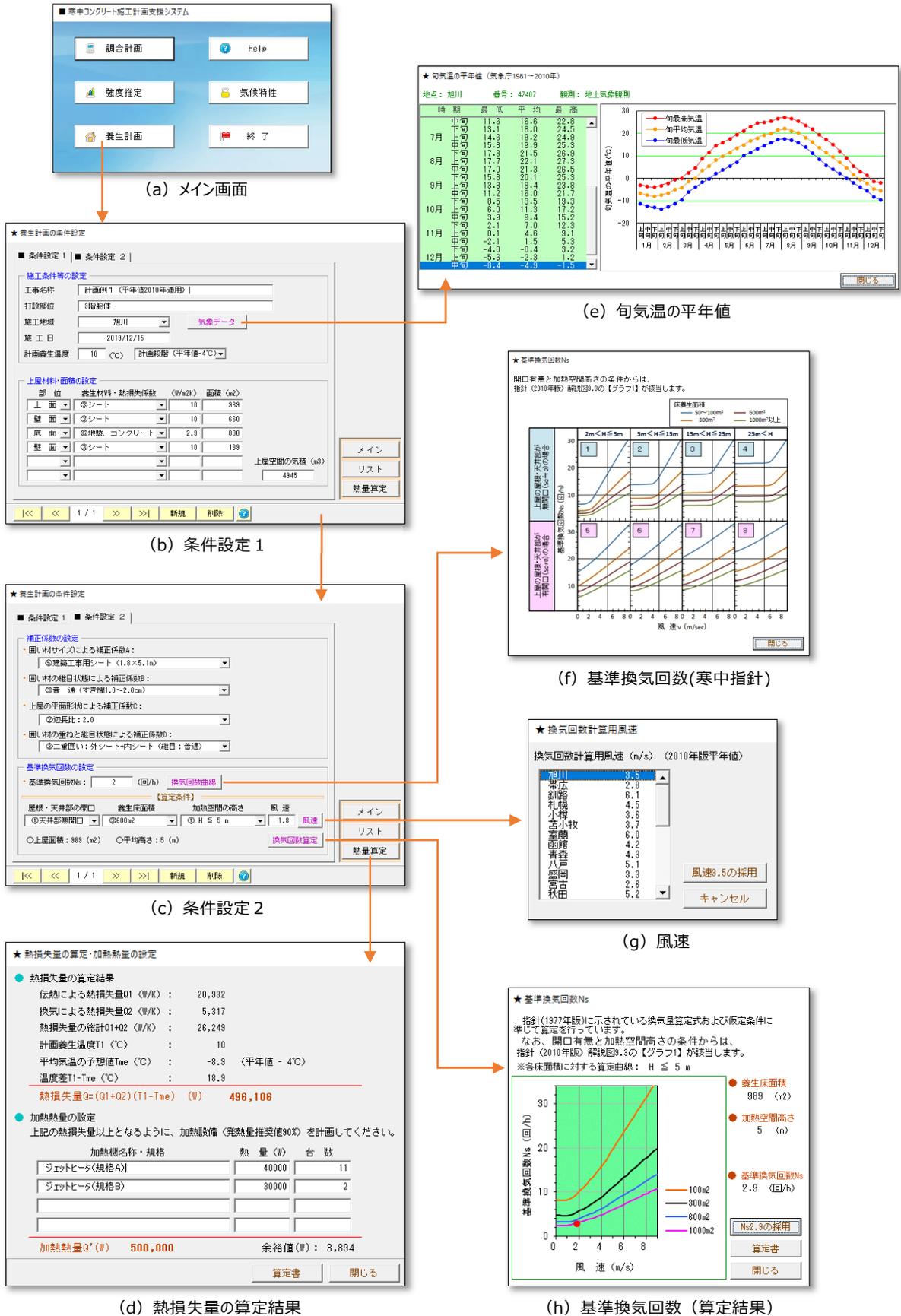


図 6.4.7 養生計画のシステム概要

加熱養生計画書

工事名称	計画例1 (平年値2010年適用)	
施工地蔵	旭川	旬平均気温: 1981~2010年の気象庁平年値 (地上気象観測)
施工予定日	2019/12/15	平年値: 旬最低気温 -8.4℃, 旬平均気温 -4.9℃
施工箇所	3階躯体	
計画養生温度	10.0℃	

1. 養生上屋の伝熱による熱損失量の算定

日本建築学会「寒中コンクリート施工指針 2010年版」9章を適用して、熱損失量を算定する。

$$Q1 = \sum (Kn \cdot Sn)$$

Q1: 伝熱による1時間・温度差1℃あたりの熱損失量 (W/℃)
 Kn: 各上層材料の熱損失係数 (W/m²℃)
 Sn: 各上層材料の面積 (m²)

部位	養生材料	Kn (W/m ² ℃)	Sn (m ²)	Kn・Sn (W/℃)
上 面	シート	10.0	988.0	9,880
壁 面	シート	10.0	880.0	8,800
底 面	地盤、コンクリート	2.9	880.0	2,552
壁 面	シート	10.0	189.0	1,890
Q1 = ∑ (Kn・Sn)				20,932

2. 養生上屋の伝熱による熱損失量の算定

$$Q2 = 0.35 \cdot N \cdot V$$

Q2: 換気による1時間・温度差1℃あたりの熱損失量 (W/℃)
 N: 養生上屋内部空気の1時間あたりの換気回数 (回/h)
 V: 養生上屋内部の空気容積 (m³)
 M = Ns · A · B · C · D

A: 囲い材サイズによる補正係数
 B: 囲い材の継目状態による補正係数
 C: 上層平面形 (辺長比) による補正係数
 D: 囲い材の一重・二重と継目の良否状態による補正係数

1) 基準換気回数Nsの算定
 指針解説図9.3および解説表9.3から、基準換気回数Nsを求める。
 Ns = 2.0 ※天井部無開口, 風速: 1.8m/s, 高さ: H ≤ 5

2) 囲い材サイズによる補正係数Aの設定
 指針解説表9.5から、補正係数Aを定める。
 A = 1.8 ※建築工用シート (1.8×5)

3) 囲い材の継目状態による補正係数Bの設定
 指針解説表9.6から、補正係数Bを定める。

(a) 加熱養生計画書

養生上屋の基準換気回数に関する算定書

1. 算定方法

日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説2010年版」(資5.1)式に基づいて換気回数を算出する。ここで、養生上屋の囲い面にm個の開口が分布する場合、それぞれの開口における風圧力と温度差による換気量は(1)式のように表すことができる。また、すべての開口における換気量(流入量と流出量)の総和は0となる。

なお、(1)式による連立方程式(2)式を組み合わせることでQ_mおよびP_zを解くことになるが、これらは非線形方程式であるため近似解を求めることになる。

(1) 基本式

$$Q_m = \alpha_n A_n \left\{ 2sh_n(T_i - T_o)/T_i - cv^2 + 2gP_z/\gamma_o \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$$\sum Q_m = 0 \quad (2)$$

$$n = \sum |Q_m| / 2V \quad (3)$$

ここに、
 Q_m: 換気量 (m³/h)
 n: 換気回数 (回/h)
 V: 養生空間の容積 (m³)
 α_n: 囲い材すき間の流速係数
 A_n: 開口面積 (m²)
 h_n: 開口部の高さ (m)
 T_i: 室内絶対温度 (K)
 T_o: 室外絶対温度 (K)
 c: 風圧係数
 v: 外気風速 (m/s)
 P_z: 室内全圧 (kg/m²)
 γ_o: 外気密度 (kg/m³) γ_o = 353/T_o

図1 開口分布と風圧係数

(2) 算定上の設定条件
 上式における設定条件を以下に示す。(下記4)以外は、「寒中コンクリート施工指針・同解説1978年版」による。)

- 上屋の平面形状: 正方形
- 囲い材すき間の流速係数α_n: 0.7
- 開口面積A_n:
 囲い材のサイズを3.6m×5.4mとし、すき間間隔を壁面2cm、屋根(開口あり)4cm、隅部1cmとする。
- 開口分布
 上記の壁面すき間は10箇の集中開口に換算し、養生空間高さとする。
- 上屋内外の温度差(T_i-T_o): 15℃ (内部温度5℃、外気温-8.4℃)
- 風圧係数c: 風上側0.8, 風下側-0.4 (図1参照) (側面: 0.4, 屋根: -0.4)

(b) 基準換気回数の算定書

図 6.4.8 加熱養生における計算書類

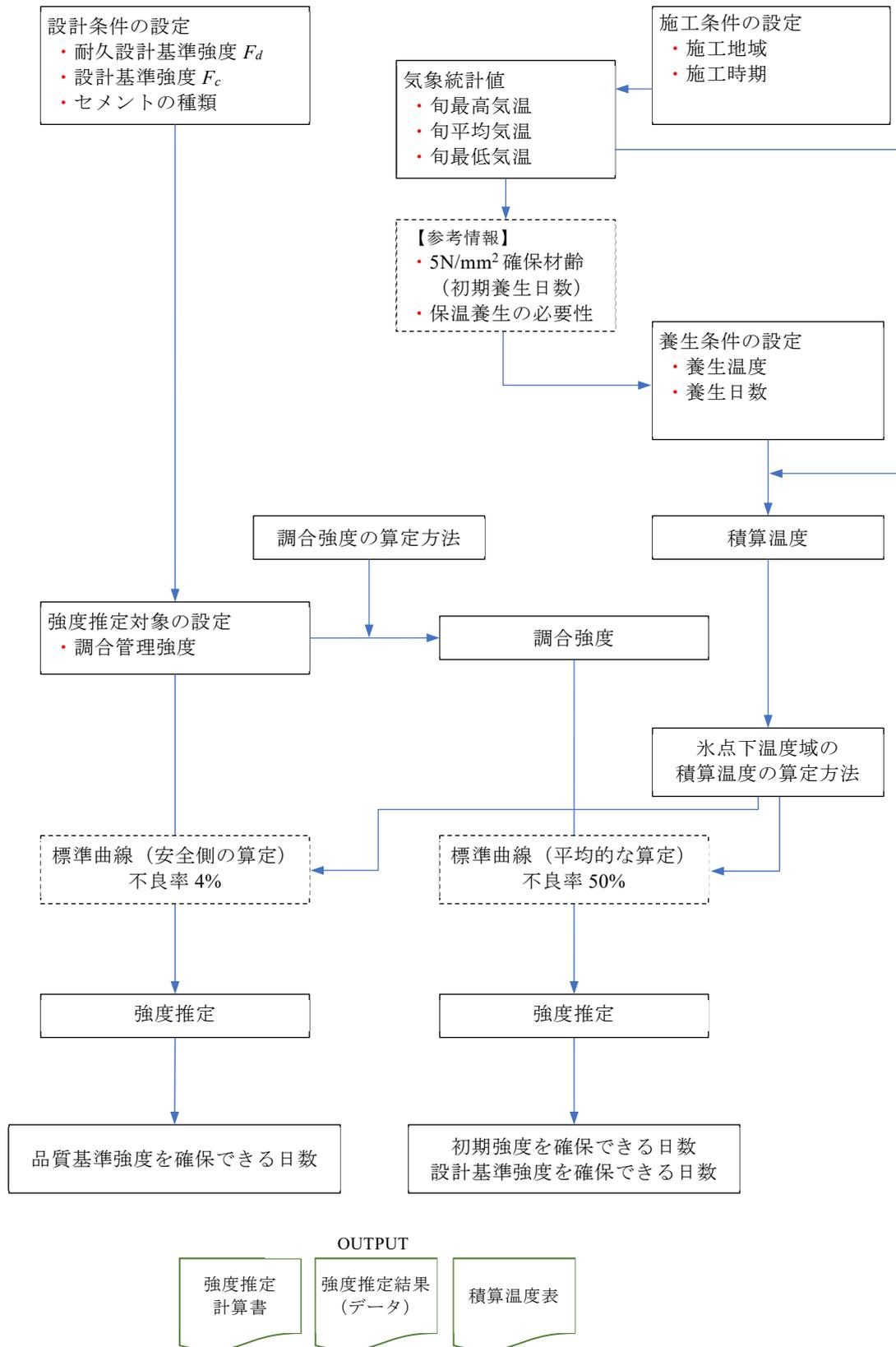


図 6.4.9 強度推定の算定フロー

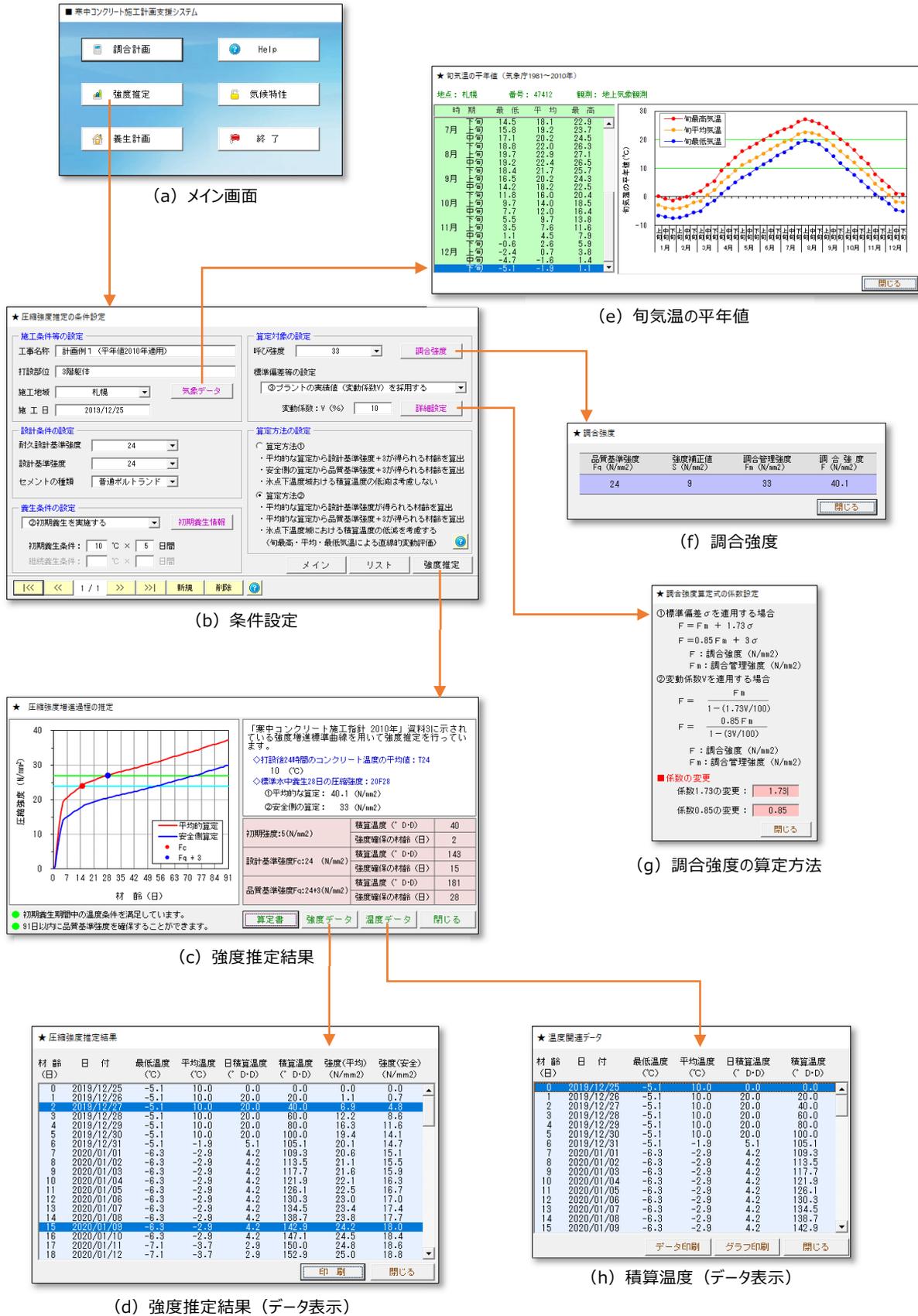


図 6.4.10 強度推定のシステム概要

強度増進の標準曲線を利用する方法

工事名称 計画例1 (平年値2010年適用)
 施工地 札幌 (旬平均気温: 1931~2010年の気象庁平年値[地上気象観測])
 施工予定日 2019/12/25
 施工箇所 3階躯体
 初期養生 初期養生: 10 (°C) × 5 (日)
 セメント種類 普通ポルトランドセメント
 調合管理強度 (Fm) 33 (N/mm²)
 耐久設計基準強度 (Ftd) 24 (N/mm²)
 設計基準強度 (Fc) 24 (N/mm²)
 品質基準強度 (Fq) 24 (N/mm²)
 構造体強度補正係数 (S_{cc}) 9 (N/mm²)
 変動係数 (V) 10.0 (%) (工場実績)
 調合強度 (F) 40.1 (N/mm²) 算定式: F = Fm/(1-1.73V/100), F = 0.85Fm/(1-(3V/100))

1. 圧縮強度の推定式
 日本建築学会「寒中コンクリート施工指針 2010年版」資料3に示される強度増進の標準曲線を採用する。

$$F = F_m \times \exp(\alpha \times M_c^b)$$

$$F_m = \frac{20 F_{28}}{\exp(\alpha \times 20 M_{28}^b)} \times (1 + C_c (T_{28} - 20)) \quad M_c = M + C_c (T_c - 20)$$
 ここに、F: 圧縮強度の推定値 (N/mm²), F_m: 最終到達強度 (N/mm²)
 M_c: 温度補正後の積算温度 (°C・D), M: 積算温度 (°C・D)

項目	安全側算定	平均側算定
20°C 28日の圧縮強度 $_{20}F_{28}$ (N/mm ²)	33.0	40.1
20°C 28日の積算温度 $_{20}M_{28}$ (°C・DD)		340
打設後24時間のコンクリート平均温度 T_{24} (°C)		10.0
温度補正後の最終到達強度 F_m (N/mm ²)	43.1	48.5
セメント種類による係数 C_f		-0.00050
セメント種類による係数 a_f		526.9
セメント種類による係数 a_g		-37.8
セメント種類による係数 b_f		13.34
セメント種類による係数 b_g		-1.06
セメント種類による係数 C_K		0.680
強度推定式の係数 $a = (a_f / _{20}F_{28}) + a_g$	-21.8	-24.7
強度推定式の係数 $b = (b_f / _{20}F_{28}) + b_g$	-0.656	-0.727

2. 初期強度 (F=5) が得られる材齢の推定
 圧縮強度推定式 (平均的な算定) から必要積算温度Mを求める。

$$M_c = \left(\frac{F - F_m}{\alpha} \right)^{1/b} \quad M = M_c - C_c (T_c - 20)$$

$$M_c = 26.6 \quad M = 33.4$$
 強度の算出結果 (表1) から、

(a) 強度推定計算書

強度推定結果 (水点下温度域の積算温度低減) Fm = 33, F = 40.1, Fc = 24, Fq = 24

材 齢 (日)	日 付	外気最低温度 (°C)	平均養生温度 (°C)	日積算温度 (°C・DD)	積算温度 (°C・DD)	圧縮強度【平均的】 (N/mm ²)	圧縮強度【安全側】 (N/mm ²)
0	2019/12/25	-5.1	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2019/12/26	-5.1	10.0	20.0	20.0	1.1	0.7
2	2019/12/27	-5.1	10.0	20.0	40.0	6.9	4.8
3	2019/12/28	-5.1	10.0	20.0	60.0	12.2	8.6
4	2019/12/29	-5.1	10.0	20.0	80.0	16.3	11.6
5	2019/12/30	-5.1	10.0	20.0	100.0	19.4	14.1
6	2019/12/31	-5.1	-1.9	5.1	105.1	20.1	14.7
7	2020/01/01	-6.3	-2.9	4.2	109.3	20.6	15.1
8	2020/01/02	-6.3	-2.9	4.2	113.5	21.1	15.5
9	2020/01/03	-6.3	-2.9	4.2	117.7	21.6	15.9
10	2020/01/04	-6.3	-2.9	4.2	121.9	22.1	16.3
11	2020/01/05	-6.3	-2.9	4.2	126.1	22.5	16.7
12	2020/01/06	-6.3	-2.9	4.2	130.3	23.0	17.0
13	2020/01/07	-6.3	-2.9	4.2	134.5	23.4	17.4
14	2020/01/08	-6.3	-2.9	4.2	138.7	23.8	17.7
15	2020/01/09	-6.3	-2.9	4.2	142.9	24.2	18.0
16	2020/01/10	-6.3	-2.9	4.2	147.1	24.5	18.4
17	2020/01/11	-7.1	-3.7	2.9	150.0	24.8	18.6
18	2020/01/12	-7.1	-3.7	2.9	152.9	25.0	18.8
19	2020/01/13	-7.1	-3.7	2.9	155.8	25.3	19.0
20	2020/01/14	-7.1	-3.7	2.9	158.7	25.5	19.2
21	2020/01/15	-7.1	-3.7	2.9	161.6	25.7	19.4
22	2020/01/16	-7.1	-3.7	2.9	164.5	25.9	19.5
23	2020/01/17	-7.1	-3.7	2.9	167.4	26.2	19.7
24	2020/01/18	-7.1	-3.7	2.9	170.3	26.4	19.9
25	2020/01/19	-7.1	-3.7	2.9	173.2	26.6	20.1
26	2020/01/20	-7.1	-3.7	2.9	176.1	26.8	20.3
27	2020/01/21	-7.5	-4.2	2.4	178.5	26.9	20.4
28	2020/01/22	-7.5	-4.2	2.4	180.9	27.1	20.5
29	2020/01/23	-7.5	-4.2	2.4	183.3	27.3	
30	2020/01/24	-7.5	-4.2	2.4	185.7		
31	2020/01/25	-7.5	-4.2	2.4	188.1		
32	2020/01/26	-7.5	-4.2	2.4	190		
33	2020/01/27	-7.5	-4.2	2.4			
34	2020/01/28	-7.5	-4.2	2.4			
35	2020/01/29	-7.5	-4.2	2.4			
36	2020/01/30	-7.5	-4.2	2.4			

(b) 強度推定計算書 (データ表示)

図 6.4.11 強度推定における計算書類

6.5 第6章の結論

第3章から第5章における成果を反映させるとともに、寒中コンクリート工事における調査計画、養生計画および強度推定に関連する計算を合理的かつ適正に実施することを目的として、現行の規準類に対応した施工計画支援システムを開発した。

以下に、期待できる効果および今後の課題について述べる。

- (1) 寒中コンクリート工事に関連する計算が簡便に実行できるため、計算結果をフィードバックしながら各種の検討を進めることができる。
- (2) 現行の寒中指針および標準仕様書の規定内容に従い、適正に計算することができる。
- (3) 一般的に普及している表計算ソフトを利用し、かつ広範囲の気象データを格納していることから、システムの汎用性が高い。
- (4) 第3章から第5章の成果を組み込んでいることから、現行指針の課題解決を図り、より合理的な計画を実施することができる。
- (5) 寒中コンクリート工事の計画では、気温に加えて風、雪などの気象情報も重要であり、システムで提供すべき気象統計データを精査し、その充実化を図る必要がある。

- 1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，1998.2
- 2) 深瀬孝之，千歩修，濱幸雄，桂修，田中宏和：コンクリートの調合設計研究委員会報告 寒中コンクリート施工支援システムの開発日本建築学会北海道支部研究報告集，第75号，pp.335-338，2002.6
- 3) 深瀬孝之，濱幸雄，桂修，田中宏和，千歩修：寒中コンクリート施工支援システムの開発と展開，日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.797-798，2002.08
- 4) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2011.11
- 5) 公共建築協会：公共建築工事標準仕様書（建築工事編）平成31年版，2019.5
- 6) 気象庁：平年値（統計期間1981～2010年），（CD-ROM），2011.3

第 7 章

総 括

第7章 総括

本研究の目的は、寒中コンクリート工事における課題を整理し、課題として抽出された強度管理方法、加熱養生の算定方法、寒中コンクリートに影響を及ぼす気候特性に関して検討を行い、より合理的な施工計画を実現することである。さらに、実務者が簡便かつ合理的に施工計画を立案するためのツールとして、本研究の成果を含めた施工計画支援システムを提供することである。

以下に本研究の結果を取り纏める。

第1章では、本研究の背景と目的、関連する既往研究および本論文の構成を記した。

第2章では、製造者と施工者を対象とした寒中コンクリート工事に関するアンケート調査に基づいて、以下に示すような実態と課題を明らかにした。

- (1) 調合計画の関連計算や強度推定に関する実施頻度、各種算定方法の利用度と適用指針、寒中指針の利用度などは、地域によって大きな差異が認められる。
- (2) 調合計画方法として、北海道では「積算温度による方法」、東北地方では「JASS5による方法」と「積算温度による方法」、これらの地域以外では「JASS5による方法」が主に採用される。
- (3) 強度推定方法に関しては、北海道では「標準曲線（平均的）」と「標準曲線（安全側）」、北海道以外の地域では「工場実績などによる強度増進曲線」の利用度が高い。
- (4) 加熱養生時における計画温度と実績温度の差は、北海道では「実績値の方が5～10℃位高い」、東北地方では「ほぼ同じ」と認識される傾向が強い。
- (5) 寒中指針の利用度は北海道と東北地方で高く、その評価に関しては「普通」と「良い」が大多数を占めるが、有益性に比べてわかりやすさに対する評価が低い。
- (6) 本調査の結果を踏まえ、寒中コンクリート工事の課題として、調合計画方法の適用範囲、加熱養生時の温度差異、構造体の強度管理方法、高強度コンクリートへの対応が考えられる。

第3章では、告示第110号に規定される有効材齢方式、寒中指針に示される積算温度方式に関して、せき板の取り外しに係わる強度管理手法としての適用性を検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 有効材齢方式と積算温度方式から求められる強度推定値は、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントでは比較的一致するが、フライアッシュセメント B 種および高炉セメント B 種では両方式による差異が大きい。
- (2) 両方式による強度推定値とレディーミクストコンクリート工場の実績値との関係では、普通ポルトランドセメントの場合には全体的にばらつきが大きいものの低強度域におけ

る直線回帰式は概ね一致するが、フライアッシュセメント B 種では両方式に大きな差異が認められる。

- (3) 既往研究との関係において、フライアッシュセメント B 種における有効材齢方式は乖離するものの、その他のケースに関しては概ね一致する。
- (4) 普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメント B 種に関して、積算温度方式はせき板の取り外しに係わる強度管理手法としての適用性が確認できる。但し、混和材料の品質や置換率の相違による影響を考慮する必要がある。

第 4 章では、施工者には加熱養生における計画温度と実績温度との差異が認識されていることから、その要因を明らかにするため、現行の寒中指針に示される加熱養生に対する熱量算定方法を検証した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 計画段階で仮定する外気温には寒波による温度低下分が見込まれているため、実施直前や実施時に外気温を確認することが必須であり、寒中指針には運用上の留意点として明記することが必要である。
- (2) 基準換気回数は、養生床面積が 100m^2 以下の場合に検証結果との差が大きくなる傾向を示す。
- (3) 基準換気回数に適用されている安全率 1.5 は、養生上屋の全熱損出量を 10~30% 程度割り増すことになる。
- (4) 換気回数計算用風速は、最新の気象統計値に基づいて修正する必要がある。
- (5) 囲み材の一重・二重による補正係数において、外囲いが合板の場合のすべてのケース、および外囲いがシートの場合の一部のケースに対する検証結果は現行指針と乖離する。

第 5 章では、寒中コンクリート工事に影響する気候特性を整理するとともに、軽微な対応で施工可能となる地域（タイプ II：28 日平均気温の年間最小値 $-2\sim 0^\circ\text{C}$ 、かつ材齢 91 日までの積算温度の年間最小値 $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 以上）の調査計画方法を検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 寒中コンクリート工事の適用地域は日本各地に分布し、その適用を受けない地域は限定的である。
- (2) 寒中コンクリート工事の適用期間の日数、材齢 28 日までの予想平均気温によって構造体強度補正値を定める方法（JASS5 方式）が適用できる日数は、地域によって大きく異なる。
- (3) 材齢 91 日までの積算温度の年間最小値と日平均気温や材齢 28 日までの平均温度の年間最小値との関係に相関性が認められる。
- (4) 寒中コンクリート工事に関する気候特性を 3 タイプに分類することで、地域特性や施工計画上の特徴を表すことができる。
- (5) タイプ II では、構造体強度補正値 $9\text{N}/\text{mm}^2$ の適用範囲を設けることで、全期間に対して JASS5 方式を適用することが可能になる。
- (6) タイプ II では、施工時期に応じて設計基準強度を確保する材齢を 35 日または 45 日に延長することで、構造体強度補正値 $6\text{N}/\text{mm}^2$ を採用することができる。

第6章では、第3章から第5章における成果を反映させるとともに、寒中コンクリート工事における調合計画、養生計画および強度推定に関連する計算を適正に実施することを目的として、現行基準類に対応した施工計画支援システムを構築した。

以下に、期待できる効果および今後の課題について述べる。

- (1) 寒中コンクリート工事に関連する計算が簡便に実行できるため、計算結果をフィードバックしながら各種の検討を進めることができる。
- (2) 現行の寒中指針および標準仕様書の規定内容に従い、適正に計算することができる。
- (3) 一般的に普及している表計算ソフトを利用し、かつ広範囲の気象データを格納していることから、システムの汎用性が高い。
- (4) 第3章から第5章の成果を組み込んでいることから、現行指針の課題解決を図り、より合理的な計画を実施することができる。
- (5) 寒中コンクリート工事の計画では、気温に加えて風、雪などの気象情報も重要であり、システムで提供すべき気象統計データを精査し、その充実化を図る必要がある。

本研究の成果である、温度履歴に基づく強度管理方法の適用性の検証、加熱養生における温度差異の改善、地域特性区分と比較的温暖的な地域における調合計画手法の提案によって、寒中コンクリート工事における現状の課題が解決され、気候特性を踏まえた合理的な施工計画が実現可能となる。

2022年に予定されている日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5」の大改定に対応して、「寒中コンクリート施工指針・同解説」の改定に向けた準備が2020年度から開始される。この改定に際しては、本研究の成果を反映させるとともに、温暖的な地域における施工状況の実態把握をさらに進展させる必要がある。そのほか、施工計画支援システムの改定対応や気象統計データの更新と提供方法などに関しては、継続して検討を行っていく予定である。

発表論文

1. 学位関係

(1) 査読付き論文

- 1) 深瀬孝之, 谷口円, 開洋介, 濱幸雄: せき板の取り外しに係わる強度推定方法の検討, 日本建築学会技術報告集, 第 57 号, pp.497-500, 2018.6
- 2) 深瀬孝之, 谷口円, 濱幸雄: 生コンクリート製造者と施工者を対象とした寒中コンクリート工事に関するアンケート調査, 日本建築学会技術報告集, 第 60 号, pp.591-596, 2019.6
- 3) 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, 第 61 号, pp.1039-1044, 2019.10

(2) 学術講演 (査読なし)

- 1) 濱幸雄, 深瀬孝之, 谷口円, 杉山雅, 足立裕介, 大和田英生, 齊藤智洋, 嶋田樹, 神本邦男, 神坂和博, 池田耕平, 山本美明, 立松宏一, 崔亨吉, 竹田雅仁, 外崎諭: 寒中コンクリートに関するアンケート調査結果 (その 1 生コン工場技術者を対象とした調査) 寒中コンクリート新技術調査委員会 中間報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 91 号, pp.5-8, 2018.6
- 2) 深瀬孝之, 濱幸雄, 谷口円, 杉山雅, 足立裕介, 大和田英生, 齊藤智洋, 嶋田樹, 神本邦男, 神坂和博, 池田耕平, 山本美明, 立松宏一, 崔亨吉, 竹田雅仁, 外崎諭: 寒中コンクリートに関するアンケート調査結果 (その 2 建設会社管理部門技術者を対象とした調査) 寒中コンクリート新技術調査委員会 中間報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 91 号, pp.9-12, 2018.6
- 3) 谷口円, 濱幸雄, 深瀬孝之, 杉山雅, 足立裕介, 大和田英生, 齊藤智洋, 嶋田樹, 神本邦男, 神坂和博, 池田耕平, 山本美明, 立松宏一, 崔亨吉, 竹田雅仁, 外崎諭: 寒中コンクリートに関するアンケート調査結果 (その 3 建設会社作業所技術者を対象とした調査) 寒中コンクリート新技術調査委員会 中間報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 91 号, pp.13-16, 2018.6
- 4) 濱幸雄, 深瀬孝之, 谷口円, 立松宏一, 杉山雅, 足立裕介, 大和田英生, 齊藤智洋, 嶋田樹, 神本邦男, 神坂和博, 池田耕平, 山本美明, 竹田雅仁, 外崎諭: 寒中コンクリート新技術調査委員会報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 92 号, pp.1-6, 2019.6
- 5) Takayuki Fukase : Cold Weather Concreting in Japan, The 13th International Symposium between KOREA,CHINA & JAPAN Performance Improvement of Concrete for Long life span Structure, 2019.8

2. 学位関係以外

(1) 査読付き論文

- 1) 三森敏司, 濱幸雄, 長谷川拓哉, 深瀬孝之: 北海道・東北圏の実務者を対象とした寒中コンクリートに関する実態調査と現行指針の課題, 日本建築学会技術報告集, 第 29 号, pp.15-20, 2009.2
- 2) 長谷川拓哉, 濱幸雄, 長谷川壽夫, 桂修, 谷口円, 深瀬孝之: 気温の平年値の変化が寒中コンクリート工事の適用期間・積算温度に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 第 38 号, pp.25-29, 2012.2

(2) 学術講演 (査読なし)

- 1) 深瀬孝之, 千歩修, 濱幸雄, 桂修, 田中宏和: コンクリートの調合設計研究委員会報告: 寒中コンクリート施工支援システムの開発, 日本建築学会北海道支部研究報告, 第 75 号, pp.335-338, 2002.6
- 2) 深瀬孝之, 濱幸雄, 桂修, 田中宏和, 千歩修: 寒中コンクリート施工支援システムの開発と展開, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.797-798, 2002.8
- 3) 深瀬孝之, 会田勝博: 高強度コンクリートの強度発現性と調合設計に関する検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 76 号, pp. 453-454, 2003.6
- 4) Takayuki Fukase, Hisashi Noda, Osamu Ito: The Pumpability and Changing Quality of High Strength Concrete, The 7th Korea/Japan Joint symposium on Building Materials & Construction, pp. 247-252, 2004.8
- 5) 深瀬孝之, 濱幸雄, 長谷川拓哉, 谷口円, 東利博, 庄司一二三, 那須豊治, 大矢実, 田中芳治, 会田勝博, 酒井亨, 小林和寛, 有江暢亮, 馬場優: 北海道内の実務者を対象とした寒中コンクリートに関するアンケート調査結果: 寒中コンクリート施工調査研究委員会中間報告, 第 79 号, pp. 39-42, 2006.7
- 6) 小林和寛, 深瀬孝之, 濱幸雄, 相澤由美子: コンクリートの強度増進標準曲線の適用性に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 79 号, pp. 25-28, 2006.7
- 7) 小林和寛, 深瀬孝之, 濱幸雄: 寒中コンクリートにおける強度増進標準曲線の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 407-408, 2006.7
- 8) 深瀬孝之, 濱幸雄, 谷口円, 小林和寛: 北海道内の実務者を対象とした寒中コンクリートに関するアンケート調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 323-324, 2006.7
- 9) 深瀬孝之, 濱幸雄, 長谷川拓哉, 谷口円, 東利博, 庄司一二三, 那須豊治, 大矢実, 田中芳治, 会田勝博, 酒井亨, 小林和寛, 有江暢亮, 滴草久人, 馬場優: 寒中コンクリートに関するアンケート調査結果: 寒中コンクリート施工調査研究委員会報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 80 号, pp. 359-362, 2007.7

- 10) 深瀬孝之, 濱幸雄, 長谷川拓哉, 谷口円: 北海道と東北圏の実務者を対象とした寒中コンクリートに関するアンケート調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 637-638, 2007.7
- 11) 濱幸雄, 深瀬孝之, 三森敏司: 寒中コンクリートを対象とした強度増進標準曲線の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 635-636, 2007.7
- 12) Takayuki Fukase: Experimental Study of High Strength Concrete with High Strength Admixture, The 1st International Symposium between KOREA, CHINA & JAPAN Performance Improvement of Concrete for Long life span Structure, pp. 107-110, 2007.10
- 13) 谷口円, 深瀬孝之, 濱幸雄, 長谷川拓哉, 桂修, 大矢実, 小川安良, 金森重行, 進藤毅幸, 那須豊治, 濱岡正行, 松尾健司, 宮川耕介, 峰吉孝宏: 実施工現場におけるコンクリート, 外気, 環境温度: 寒中コンクリート工事合理化研究委員会報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 86 号, pp. 35-40, 2013.6
- 14) 谷口円, 深瀬孝之, 桂修, 濱幸雄: 実施工現場におけるコンクリート, 外気, 環境温度: その 1 測定概要と夏期の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 385-386, 2013.8
- 15) 深瀬孝之, 谷口円, 濱幸雄, 長谷川拓哉: 実施工現場におけるコンクリート, 外気, 環境温度: その 2 冬期の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 387-388, 2013.8
- 16) 深瀬孝之, 長谷川拓哉, 小谷卓司, 進藤毅幸, 谷口円, 齋藤敏樹, 小川安良, 金森重行, 安藤睦, 桂修, 会田勝博, 松尾健司, 濱幸雄, 牛田健一, 酒井亨, 名和豊春: 北海道におけるフライアッシュコンクリートに関するアンケート調査結果: 寒冷地におけるフライアッシュの有効利用研究委員会中間報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 87 号, pp. 21-24, 2014.6
- 17) 深瀬孝之, 齋藤敏樹, 会田勝博, 今井和宏, 谷口円, 桂修, 酒井亨, 齋藤智洋, 濱幸雄, 牛田健一, 進藤毅幸, 松尾健司, 名和豊春, 小谷卓司, 加藤政治, 長谷川拓哉, 小川安良, 開洋介: 北海道におけるフライアッシュコンクリートの調合に関する調査結果: 寒冷地におけるフライアッシュの有効利用研究委員会報告, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 88 号, pp. 33-36, 2015.6
- 18) 深瀬孝之, 酒井亨, 神坂和博, 片口英和, 佐藤元, 長倉靖典, 池田耕平: 普通強度域における増粘剤系高流動コンクリートの実用化に関する検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 第 89 号, pp. 13-16, 2016.6

謝 辞

本論文は、伊藤組土建株式会社での実務経験や日本建築学会などの委員会活動の成果をもとに、2017年からの3年間、室蘭工業大学大学院工学研究科博士後期課程工学専攻において、同大学院教授 濱幸雄先生のご指導のもとで得られた知見を加えて、寒中コンクリート工事に関する研究を取りまとめたものです。

本論文をまとめるにあたり、濱先生にはいつも暖かく見守っていただきながら、適切なお助言と励ましのお言葉をいただきました。約20年前になりますが、日本建築学会北海道支部の委員会で濱先生と一緒に活動させていただいたことが、著者にとっての大きな転機になりました。それ以降、学位取得への動機付け、その実現に向けたチャンスを幾度も与えていただきました。著者の長年の目標であった社会人博士課程への入学、そして本論文の取りまとめなど、濱先生がいなければ成し得ないものでした。深く感謝申し上げます。

本論文の審査に際して、副査をお引き受けいただいた室蘭工業大学理事 溝口光男先生、同大学大学院准教授 菅田紀之先生には、ご多忙のなか丁寧なご指導、貴重なお助言をいただきました。心からお礼申し上げます。

研究職ではない著者にとって、学協会における委員会活動は非常に有益なものでした。濱先生とともに多くの場面で活動をともした、北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所研究主幹 谷口円氏も大きな存在でした。学協会における取り纏めや論文の執筆、会議後の懇親会などを通して、いつも前向きなパワーとお助言をいただきました。心から感謝いたします。

日本建築学会北海道支部寒中コンクリート新技術調査委員会(2018~2019年度)の皆様には、寒中コンクリート工事に関する実態調査や課題抽出において、多くの議論をさせていただき、本研究に関して有益なお助言をいただきました。特に、北海道立総合研究機構建築研究本部主査 立松宏一氏には、養生上屋の熱損出量に関連する環境工学についてご教示いただきました。アンケート調査に実施にあたり、清水建設株式会社北海道支店部長 大和田英生氏、鹿島建設株式会社北海道支店課長 齊藤智洋氏、株式会社大林組北海道支店課長 嶋田樹氏にもご支援をいただきました。委員の皆様には感謝いたします。

本研究における構造体コンクリートの強度推定方法の検討に際して、北海道電力株式会社総合研究所副主幹 関谷美智氏、北海道電力株式会社 開洋介氏、北電総合設計株式会社 技術研究所室長 齋藤敏樹氏、北海道太平洋生コン株式会社工場長 神本邦男氏から強度試験データの提供や励ましのお言葉をいただきました。深くお礼申し上げます。

北方建築総合研究所研究主幹 桂修氏(当時)には、著者が学会活動に参加した初期の段階から数多くのお助言をいただきました。また、学位取得のきっかけとなるお言葉をいただき、深く感謝しております。寒中コンクリートに関する書籍を出版するというお約束を果たせるよう努力して参ります。

北海道ティーシー生コン株式会社工場長 会田勝博氏（当時）には、コンクリートの製造や品質管理のあり方など、多くのことをご教示いただきました。超強度コンクリートの大臣認定、耐火性能実験、委員会活動、アイダ会などで公私ともに後押ししていただき、大きな支えになりました。心から感謝申し上げます。

鹿島建設株式会社担当部長 有江暢亮氏には、日本建築学会北海道支部寒中コンクリート施工調査研究委員会（2005～2006年度）から、寒中コンクリート工事のあり方を施工者の立場からご助言をいただくとともに、夜遅くまでお付き合いいただきながら多くの激励をいただきました。深くお礼申し上げます。

會澤高圧コンクリート株式会社執行役員 酒井亨氏、同社総括工場長 神坂和博氏には、長年に渡り各種の委員会活動を支えていただき、また高流動コンクリートの大臣認定などでご協力をいただき、心からお礼申し上げます。

本論文は、伊藤組土建株式会社における貴重な実務経験と社会人博士課程入学に対する理解がなければ、完成させることはできませんでした。特に同社常務取締役 大谷正則氏のご支援に、謹んでお礼申し上げます。今後は、北海道科学大学から人材育成や学術的な支援を行うことでご恩に報いることができるよう尽力して参ります。

最後に、いつも心配してくれていた父昭吾と母芳江、博士課程に進むことを後押ししてくれた義父加藤幸次郎と義母美智子に深く感謝します。そして、博士課程入学や転職について理解を示し、長い間支えてくれた妻みゆきに心から感謝します。

2020年 3月
深瀬 孝之