

本日の構成

- はじめに
- 初期凍害
- 低温下の強度増進の遅れ
- 氷点下の強度増進
- 寒中コンクリート工事の現状把握
北海道における土木・建築の実情

寒冷地のコンクリートの難しさ

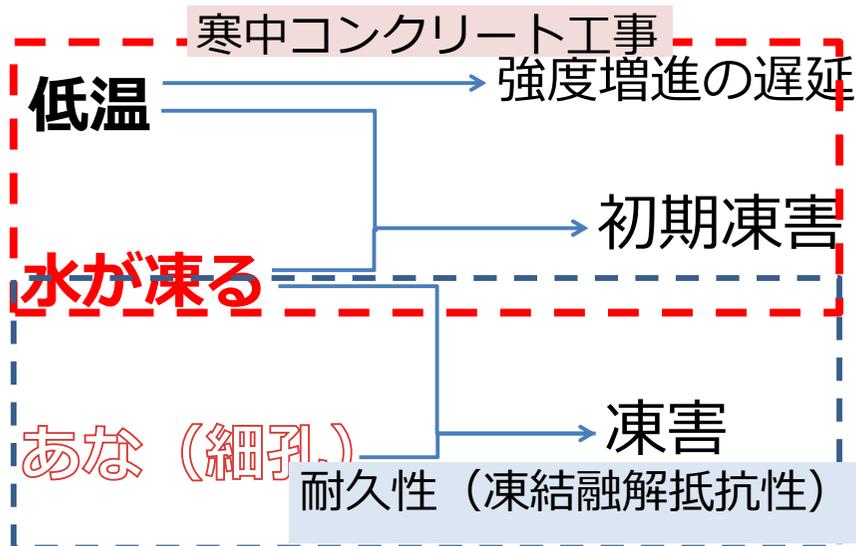


低温

水が凍る！



寒冷地のコンクリートの難しさ



寒中コンクリート工事のポイント

初期凍害

- 初期凍害を防止
 - ・ 採暖養生の手法
 - ・ 耐寒促進剤の利用？



低温下の強度増進の遅れ

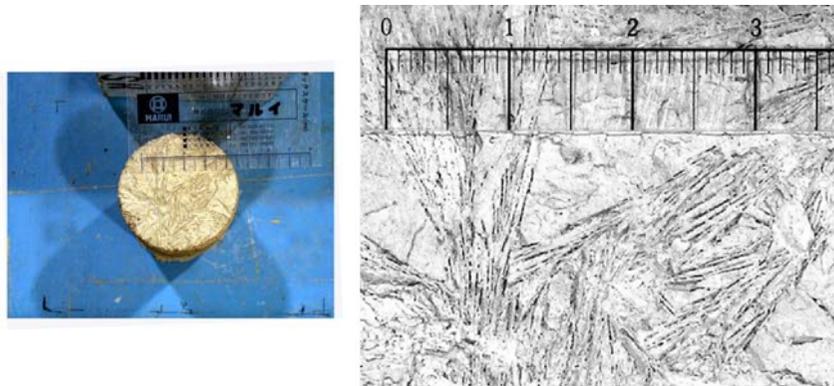
- 強度増進を予測
 - ・ 温度履歴で予測
 - ・ 氷点下温度ではどうなる？

初期凍害

初期凍害？



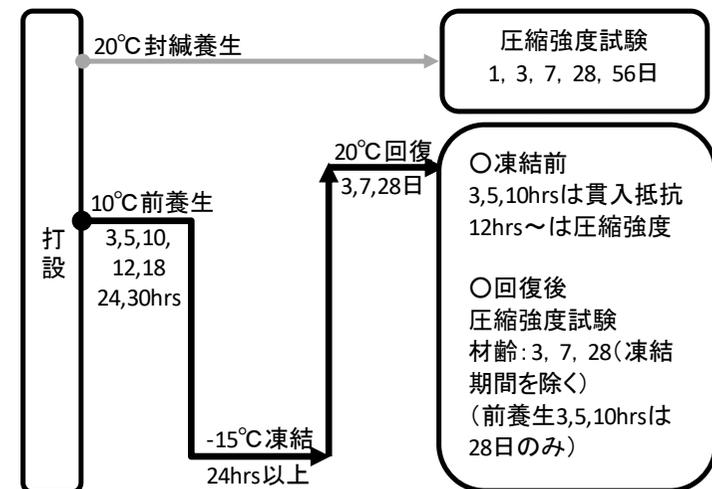
初期凍害？



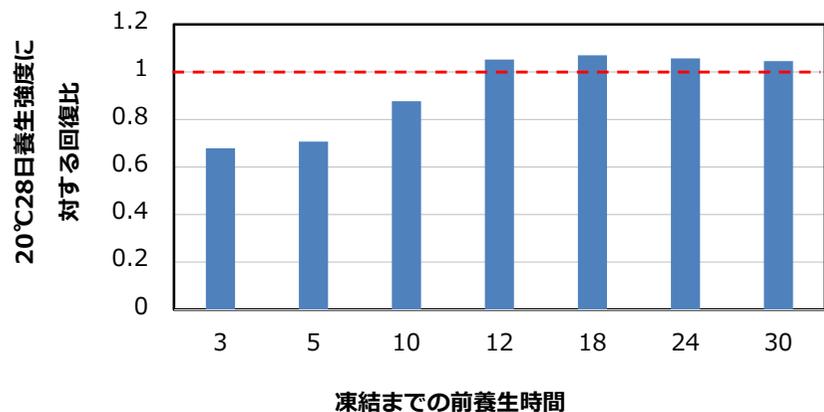
築●●年の公営住宅：解体時のスラブに鳥の足跡???

凍結なしと凍結させたコンクリートの回復養生後の強度の関係

●実験のフロー



凍結なしと凍結させたコンクリートの回復養生後の強度の関係



初期凍害って？

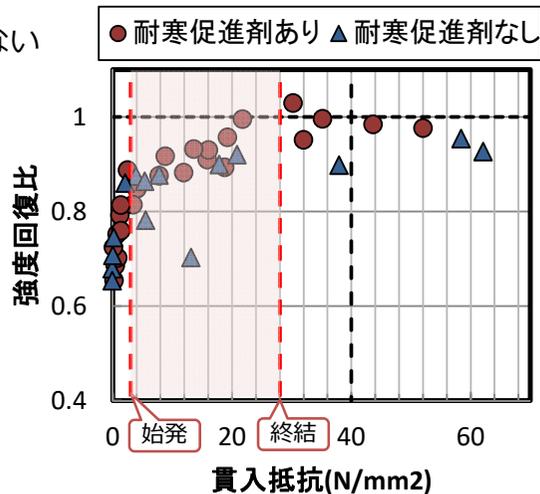
- 一番怖いこと
一度の凍結でその後回復できないダメージをうけること

→5.0N/mm²が出るまでの凍結を防ぐ
→初期養生（保温，採暖）の必要性

初期凍害の発生条件？

貫入抵抗と強度回復比

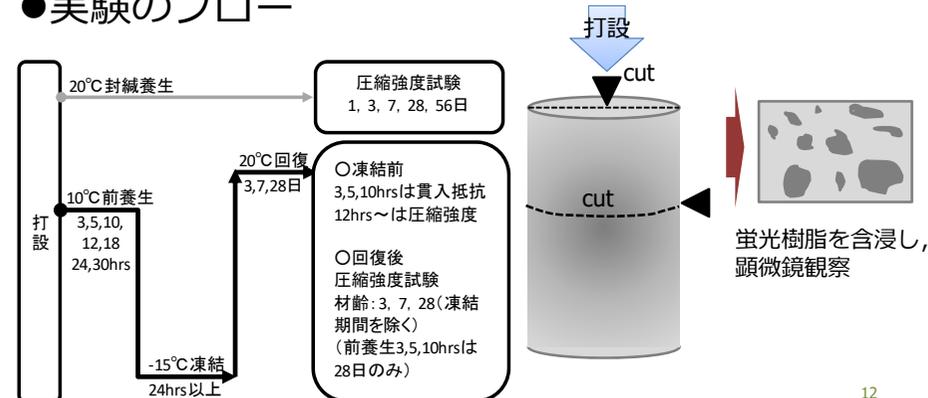
時間だけでは管理できない
→実環境は温度が変動



初期凍害って？

強度回復しないコンクリート（モルタル）
には何が起きているのか？

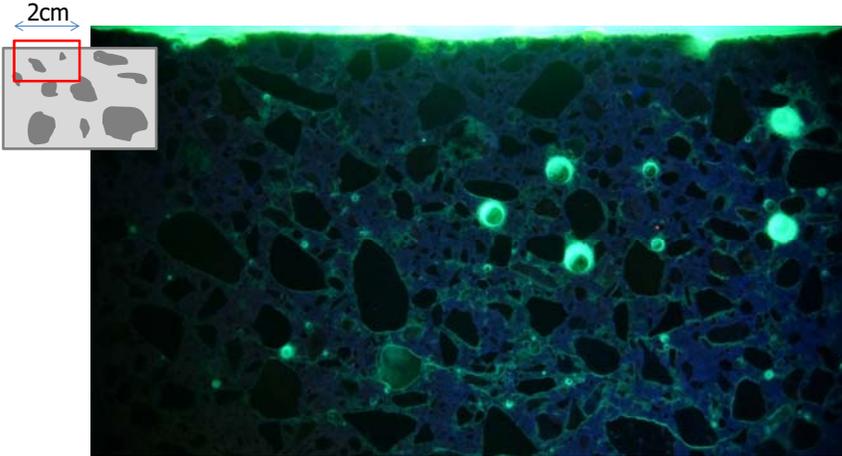
●実験のフロー



初期凍害って？

初期凍害コンクリート（モルタル）には何が起きているのか？

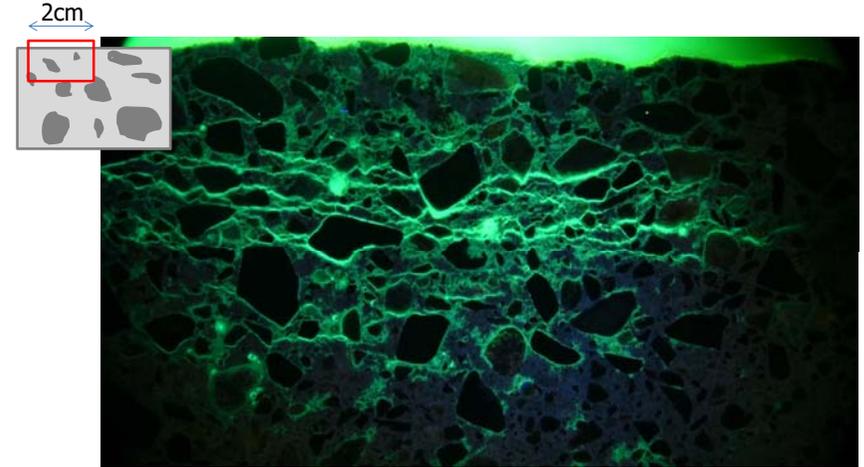
→強度回復したもの



初期凍害って？

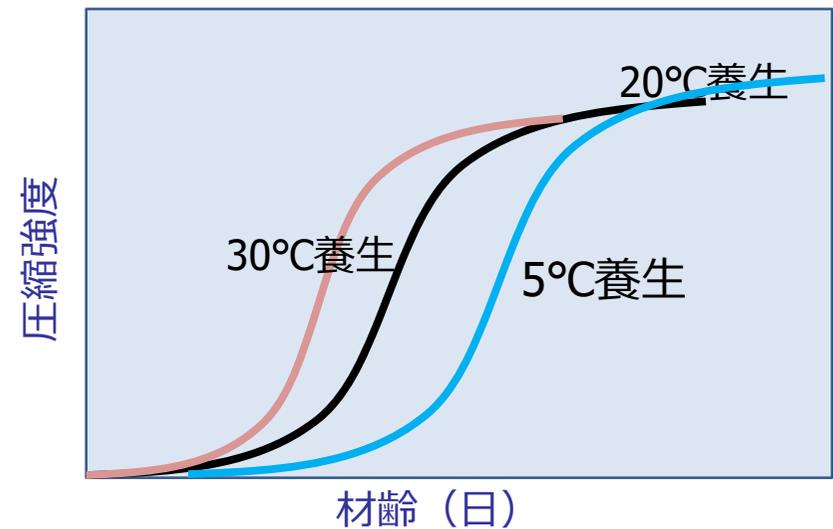
初期凍害コンクリート（モルタル）には何が起きているのか？

→強度回復しなかったもの



低温下の強度増進の遅れ

低温下のコンクリートの強度増進



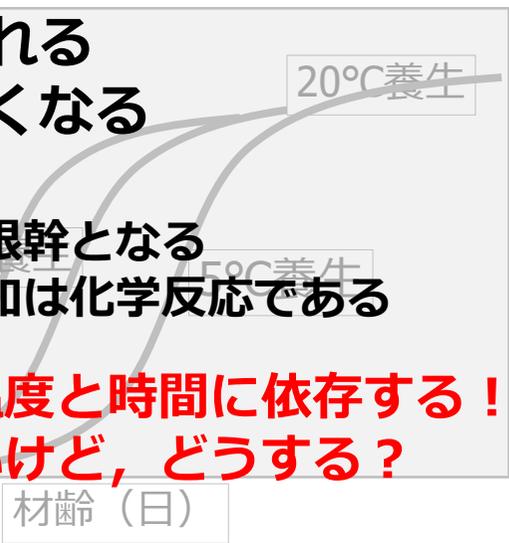
低温下のコンクリートの強度増進

- ・ 低温で遅れる
- ・ 高温で早くなる

縦軸は強度

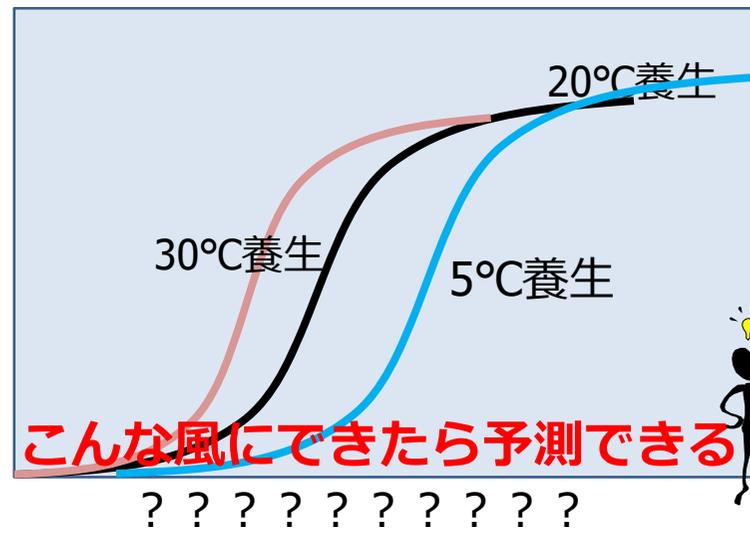
強度発現の根幹となる
セメントの水和は化学反応である

強度増進は温度と時間に依存する！！
→予測したいけど、どうする？



低温下のコンクリートの強度増進

縦軸は圧縮強度

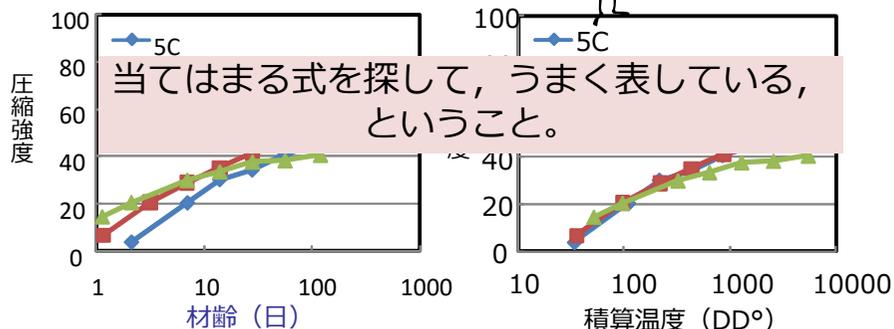


低温下のコンクリートの強度増進

ある約束ごとに基づいて温度時間影響を算定すると、
温度履歴の異なるコンクリートの強度増進を一義的に表せる

積算温度

$$M = \sum (T_c + 10) \Delta t$$



既往の温度時間関数 (Maturity)

- ・ 温度と時間の影響を表す約束ごと

● 積算温度

$$M(t) = \sum_0^t (T - t_0) \times \Delta t$$

M(t): 材齢tでの積算温度, T: 養生温度またはコンクリートの平均温度, t₀: 基準温度

● 等価(有効)材齢(20°C養生の材齢に換算)

(アレニウス式)

$$t_e = \sum_0^t \exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{293}\right)\right) \times \Delta t$$

t_e: 材齢tでの等価材齢,

E: 見かけの活性化エネルギー,

R: 気体定数,

T_c: Δt間の平均コンクリート温度(K)

強度増進を表す温度時間関数 (Maturity) ²¹

□積算温度

✓ Nurse(1949), Saul(1951), Belgstorm(1953)

$$M = \sum (T_c + 10) \Delta t$$

✓ 洪ら(1959)・・・積算温度方式として体系化

→強度増進の予測手法と一緒に提供
→寒中工事の根幹をなす手法として確立された

➤普通, 早強ポルトランドセメントを対象

低熱セメントを表せない

10の部分を変える?

→鉱物組成が大きく異なるものには使えない

コンクリートの強度増進予測

標準的な積算温度etc.と圧縮強度の関係を数式化

●ロジスティック関数

$$F_c = F_{inf} / (1 + \exp(-K \log M + m))$$

●ゴンペルツ関数

$$F_c = F_{inf} \exp(-a(1/M)^b)$$

ここに, F_c : 圧縮強度

F_{inf} : 時間が無限大の時の圧縮強度

M : 積算温度

K, m, a, b : 定数

○グローバル曲線 (土木学会), 双曲線 (ASTM) など

強度増進を表す温度時間関数 (Maturity) ²²

□等価 (有効) 材齢

✓ Hansen(1977)・・・Arrhenius式: 温度依存性をよく表す

$$t_e = \sum \left(\frac{k_{T_c}}{k_{T_{ref}}} \right) \times \Delta t = \sum \left(\exp \left(\frac{-E}{R} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \right) \Delta t$$

✓ Carino(1992), Kjellsen(1993), Wirquin(2002)

→セメント種類により, E が異なる値をとる

→セメントの特性との関係が明らかではない

実験式, 使えるセメントなどが限定される

強度増進予測曲線とセットで用いるとよい

温度履歴による強度予測手法

□ 2010建築学会寒中コンクリート施工指針

(1)普通ポルトランドセメントを使用した場合

4社の普通ポルトランドセメント, 水セメント比25%から65%, 942データから誘導

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

ここに, F_{inf} : コンクリートの温度補正を行った最終到達強度 (N/mm²)

$$F_{inf} = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp(a \times {}_{20}M_{28}^b)} \times (1 - 0.0005(T_{24} - 20))$$

${}_{20}F_{28}$: 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)

${}_{20}M_{28}$: 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 $a = 526.9 / {}_{20}F_{28} - 37.8$ $b = 13.34 / {}_{20}F_{28} - 1.06$

M_c : コンクリートの温度補正を行った積算温度 (°D・D)

$$M_c = \left(\sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \right) + 0.68(T_{24} - 20)$$

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)

推定値と実測値の相関係数 $R = 0.988$

推定値と実測値の差の標準偏差

$F < 10$ N/mm² $\sigma = 2.2$ N/mm²

$F \geq 10$ N/mm² $\sigma = 4.0$ N/mm²

氷点下の強度増進予測

初期強度が得られたコンクリート

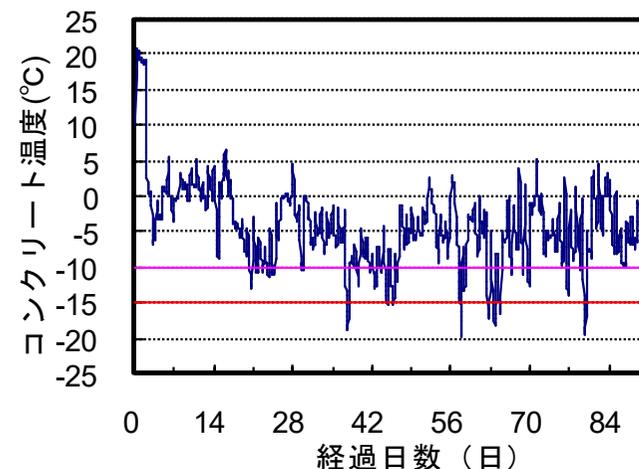
を

水をかぶらないようにして、1月の旭川の屋外に氷点下に置いておくと・・・

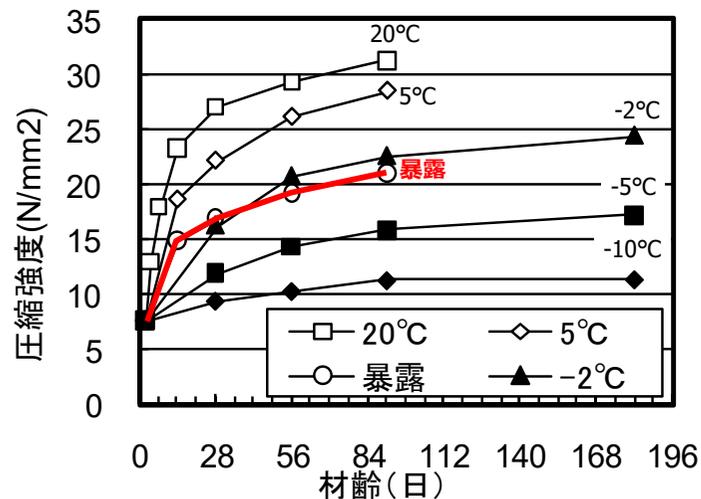
強度はどうなる？



暴露した試験体の温度測定結果



強度のデータ

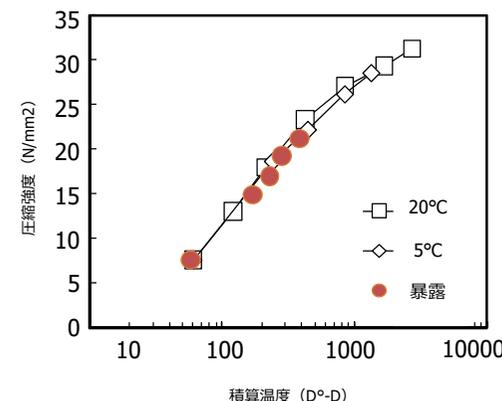
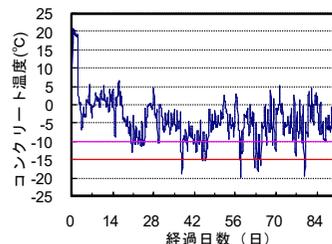
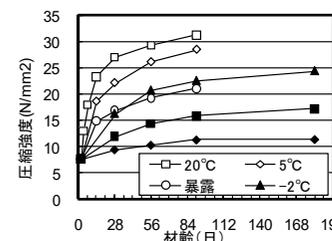


○氷点下のコンクリートの強度増進 氷点下の強度増進予測

- 寒冷期の屋外でのコンクリート強度増進

$$T_c \geq 0 \quad M = \sum (T_c + 10) \Delta t$$

$$T_c < 0 \quad M_{yf} = \sum 10 \times \exp(-0.64 \times (-T_c)^{0.7}) \Delta t$$



寒中コンクリート工事の現状把握 北海道における土木・建築の実情

JCI北海道支部特別委員会(2019-2020) 「北海道における品質確保のあるべき姿委員会」

JCI東北支部
「寒中コンクリートの品質確保に関する研究委員会報告」(H30.4)
(寒中コンクリート用チェックシート、凍害対策、高耐久化)



寒中工事なのか？寒中のコンクリート(耐久性確保)なのか？
両者を分けて議論

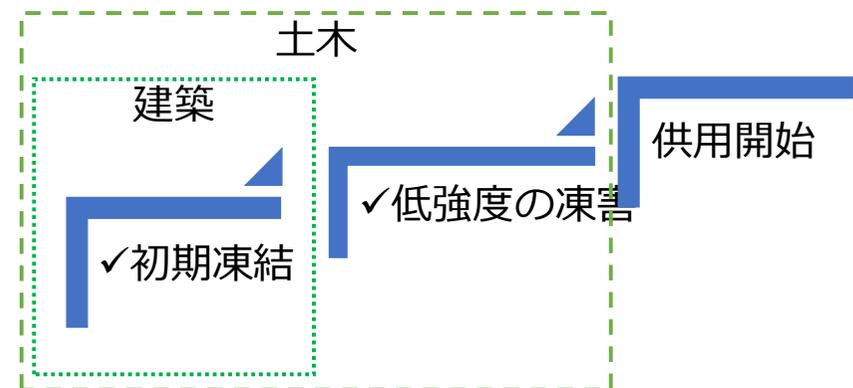
寒中コンクリート工事
・建築と土木の比較
(用語, 取り扱い)
・施工実態の把握

寒中のコンクリート(耐久性)
・劣化の現状把握
・使用材料(骨材, 配合等)
・北海道独自対策の整理

建築土木の考え方？の相違 (示方書2017, JASS52015他)

項目	示方書施工編 12章 寒中コンクリート	JASS5 12節 寒中コンクリート工事
期間	日平均気温が4°C以下となることが予想される時	(1) 打込み日を含む旬の日平均気温が4°C以下の期間。 (2) コンクリート打込み後91日までの積算温度が 840°D・Dを下回る期間。積算温度式は、以下 $M_{01} = \sum_{z=1}^z (\theta_2 + 10)$ ここに、 M_{01} : 積算温度 (°D・D) z: 材齢 (日) θ_2 : 材齢 z 日における日平均気温 (°C)
目的	・凝結硬化の初期に凍結させない ・養生終了後、想定される凍結融解作用に対して 十分な抵抗性を持たせる ・工事中の各段階で予想される荷重に対して十分な強度を持たせる	・初期凍害の防止 ・低温による強度増進の遅れに対する対応
養生	初期凍害を防ぐだけでなく、 次の春までに受ける凍結融解に対しても抵抗性を考慮して 養生期間を設定	初期養生の必要性を明解に示す
養生期間の目安	養生温度を5°C以上に保つことを終了するときに必要な圧縮強度の標準が、凍結融解を受ける頻度により断面の大きさ毎に2水準示され (5~15N/mm ²)、さらにその圧縮強度を得る温度制御養生期間の目安として、凍結融解を受ける頻度と制御養生温度により、セメント毎に4水準示される	初期養生は5.0N/mm ² が得られるまで
配調合での対応	単位水量を少なく	強度補正・管理材延長 (積算温度での計画)

土木建築の寒中コンクリート工事の違い



土木（示方書）の目安

【土木】における寒中コンクリートの養生期間→強度発現が目安（合理的）

養生温度を5℃以上に保つのを終了する時に必要な圧縮強度の標準（単位：N/mm²）

5℃以上の温度制御養生を行った後の次の春までに想定される凍結融解の頻度	断面の大きさ		
	薄い	普通	厚い
(1) しばしば凍結融解を受ける場合	15	12	10
(2) まれに凍結融解を受ける場合	5	5	5

（2017土木学会コンクリート標準示方書施工編）

所要の圧縮強度を得る温度制御養生期間の目安（断面：普通）（W/C=55%標準）

春までに想定される凍結融解の頻度	養生温度	普通	早強	混合B種
(1) しばしば凍結融解を受ける場合	5℃	9日	5日	12日
	10℃	7日	4日	9日
(2) まれに凍結融解を受ける場合	5℃	4日	3日	5日
	10℃	3日	2日	4日

終了後も2日間0℃以上を確保（急冷防止）

初期凍害を防ぐための強度（建築と同じ）
初期の凍害を防ぐための強度（研究報告を考慮）

- ・風雨雪寒暑を受けた供試体の1年強度が夏期製造（7日散水養生）の1年強度と同じになるための初期養生終了時の強度は、初期養生終了後外気に晒されてから材齢28日までの外気温の平均が-3℃で60kg/cm²、-4℃で90kg/cm²必要
- ・水と接する構造物ではさらに大きな強度が必要（150kg/cm²）
- ・右図の試験開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係を参考

（コンクリート標準示方書S49改定資料）

33

建築（JASS5）の目安

P91

コンクリート温度またはその周囲の温度の中でもっとも低い部分において求めた積算温度による強度の推定値およびJASS5T-603（構造体コンクリートの強度推定のための圧縮強度試験方法）による強度が、5.0N/mm²以上となった段階で初期養生を打ち切ってよい。

型枠の存置期間は、JASS 5 9.10の規定に従う

解説表10.1 基礎、梁側、柱および壁のせき板取外しに必要な圧縮強度

せき板取外し後の湿潤養生	計画供用期間の級	
	短期・標準	長期・超長期
実施する	5 N/mm ²	10 N/mm ²
実施しない	10 N/mm ²	15 N/mm ²

積算温度があることで、強度確保に必要な温度時間を柔軟に管理可能

資料表 3.4 圧縮強度 10.0 N/mm² が得られる積算温度算出例

セメント種類	調合管理強度 (N/mm ²)								
	21	24	27	30	33	36	40	42	45
早強ポルトランドセメント	70	60	50	40	35	30	30	25	25
普通ポルトランドセメント	120	95	75	65	55	50	45	40	40
フライアッシュセメントB種	120	95	80	70	60	55	50	50	45
高炉セメントB種	160	135	110	90	80	70	60	55	50

資料表 3.5 圧縮強度 15.0 N/mm² が得られる積算温度算出例

セメント種類	調合管理強度 (N/mm ²)								
	21	24	27	30	33	36	40	42	45
早強ポルトランドセメント	125	100	80	65	55	45	35	35	30
普通ポルトランドセメント	220	160	120	95	80	70	60	55	50
フライアッシュセメントB種	220	170	130	105	90	80	65	65	60
高炉セメントB種	275	220	180	140	120	100	85	80	70

34

寒中工事施工事例（土木）

番号	種別	時期	初期養生			継続				
			日数	温度	仮設	日数	温度	仮設		
1	土木	港湾	舗装	2019	1	5	単管組立シート囲い養生	なし	初期養生と同等	
					2	0				
2	土木	河川	カルバート	2016	3	10	外壁：ラップ付防災養生シート、屋根：ADMパネル	なし	初期養生と同等	
					2	0				
3	土木	河川	河川床止	2013	4	10	足場＋シート、ADM屋根	7	外気	
					5	0℃以上				
4	土木	橋梁	橋台・橋脚	2012	3	10	外部足場＋二重シート、屋根：ADMパネル	なし	初期養生と同等	
					2	0				
5	土木	橋梁	橋脚	2020	H:4, N:7	10	外部足場＋防災シート、屋根：トラック荷台シート	なし	初期養生と同等	
					2	0				
6	土木	トンネル	覆工	2013	1	10	セントル用バレーン	7	10	覆工養生バレーン(脱型後コンクリート)シートシャッター(終点坑口部)、防音扉(貫通後坑内から起点坑口部に移動)
7	土木	地下駐輪場	カルバート	2019	4	5	屋根：覆工板、中仕切り：ブルーシート	14	2~3	地下そのまま

35

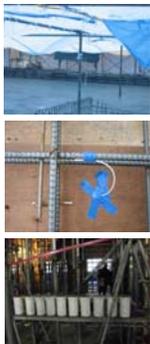
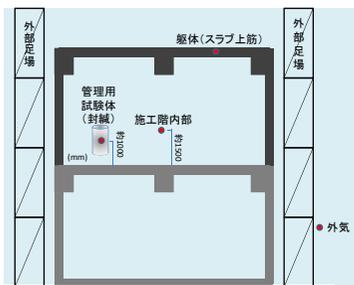
寒中工事施工事例（建築）

番号	種別	時期	初期養生			継続		
			日数	温度	仮設	日数	温度	仮設
8	建築	病院	2019	3	16	足場＋シート、ADM屋根	なし	初期養生と同等
9	建築	大学	2019	2	7	足場＋防音パネル、ADM屋根	なし	初期養生と同等
10	建築	病院	2019	3	5	側面：枠組足場下地防災シート張り 上面：単管下地ブルーシート張り	なし	初期養生と同等

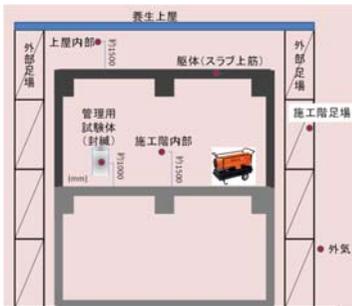
36

測定概要

● 夏期



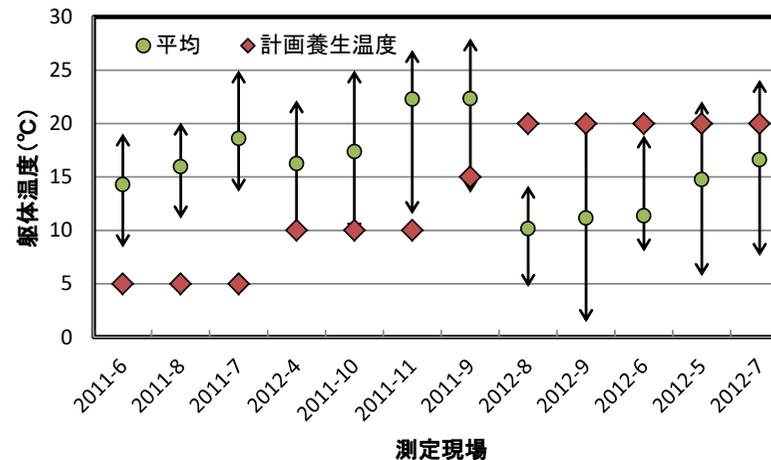
● 冬期



- 温度測定・・・コンクリート打設直後から、1時間以下の間隔で温度測定・記録
- 強度測定・・・管理用試験体（封緘）について、所定の材齢で圧縮強度試験を行う（JISA1108）
→強度予測曲線の精度を検証

37

初期養生（加熱）期間の計画養生温度と実際の躯体温度



38

寒中工事の現状

●寒中施工指針の有無

建築は、学会指針で計画から施工・管理まで実施できる体系（北海道内ではほぼ100%利用）

土木は、該当箇所をたどることで計画立案、施工できる体系

●初期凍害防止策は土木・建築で同等の手法が確立

●「低強度（若材齢）の凍害」の観点の有無

建築は温度補正，オーバースペックのコンクリートを施工、常時上屋がある。仕上等の次工程がすぐ続く

→低強度（若材齢）の凍害等が発生しない条件に自然となっている

●Maturityの利用

建築のみ。

39

ご清聴ありがとうございました

Thank you for your kind attention!

40