

平成29年5月18日

コンクリートの初期収縮ひび割れと
その予測手法

山口大学大学院創成科学研究科

中村秀明

自己紹介

2
of
60



**山口大学大学院創成科学研究科
電気電子情報系専攻**

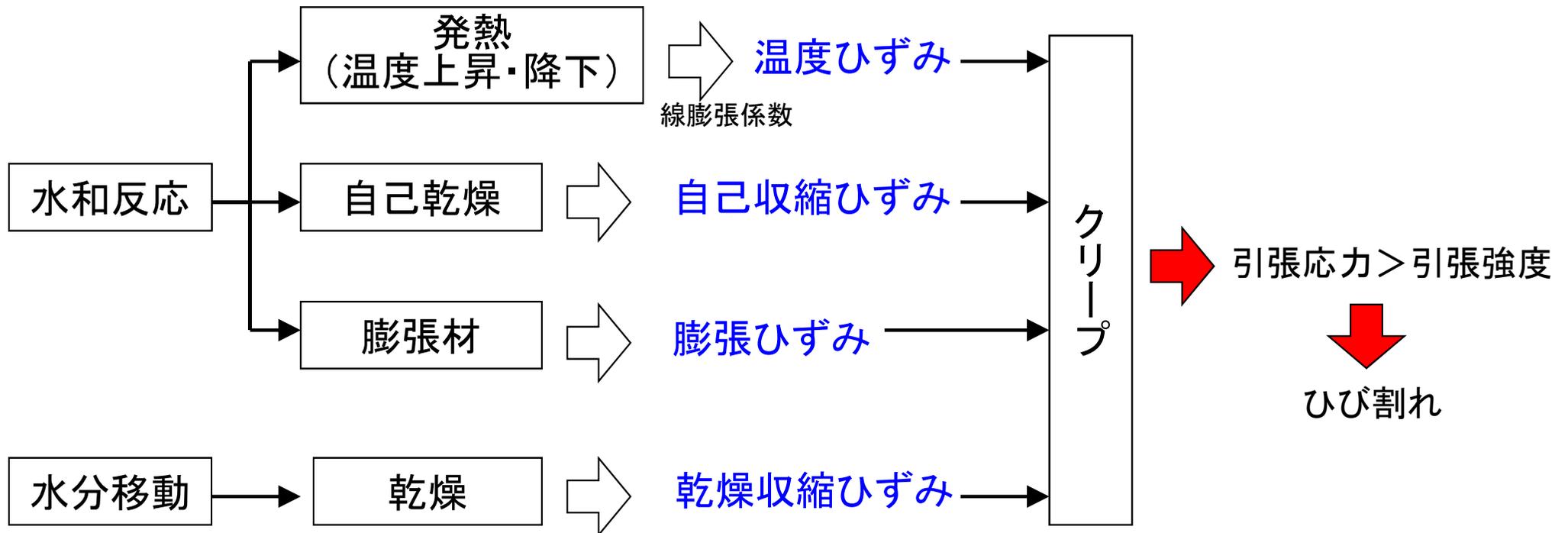
工学部知能情報工学科

教授 中村 秀明

- ・維持管理工学
- ・コンクリート工学
- ・システム工学

コンクリートの体積変化に伴う収縮ひび割れ

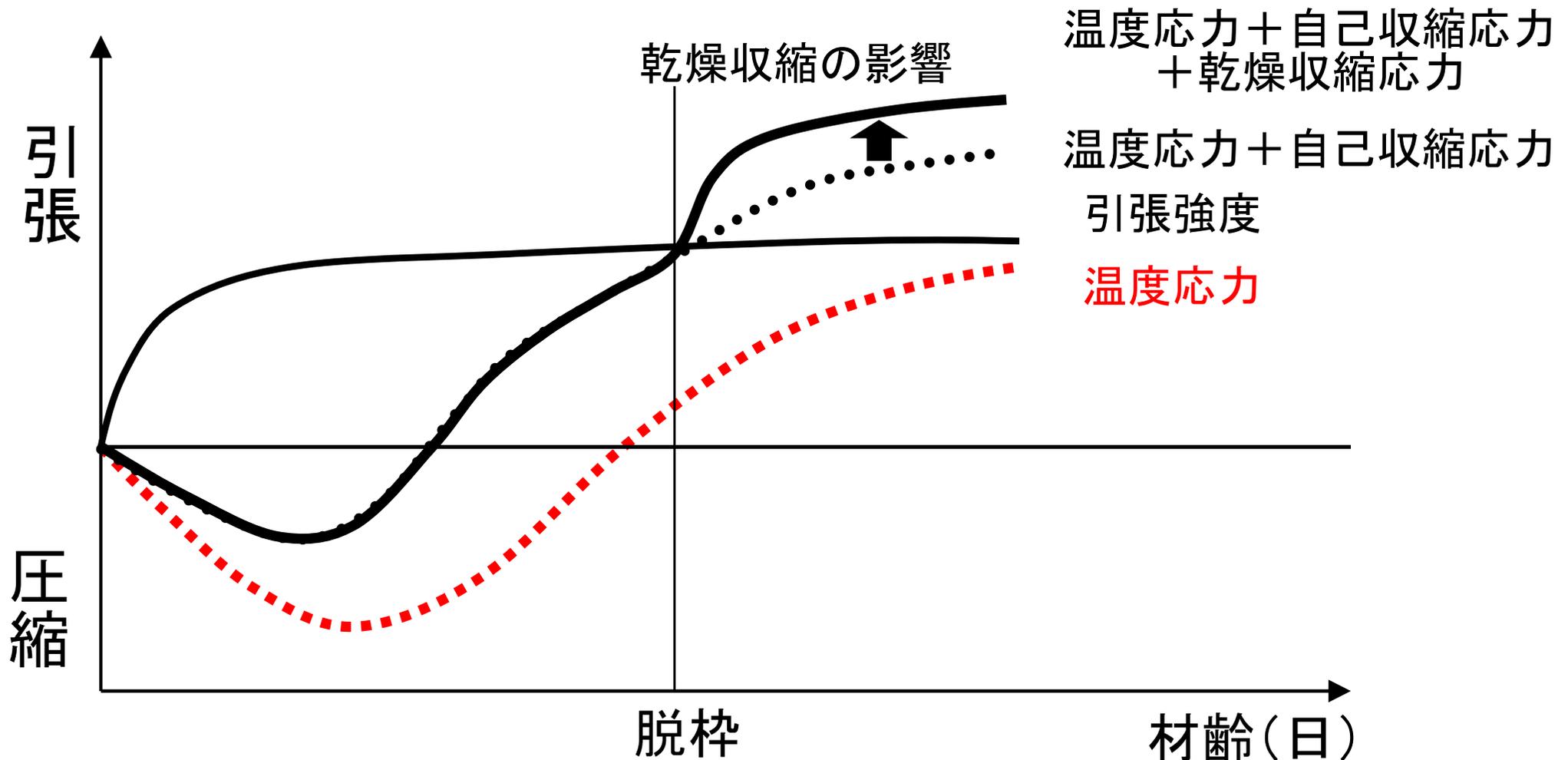
考慮すべきコンクリートの体積変化



ひび割れの複雑性

自己収縮, 乾燥収縮, 温度応力の複合 + 拘束・クリープ

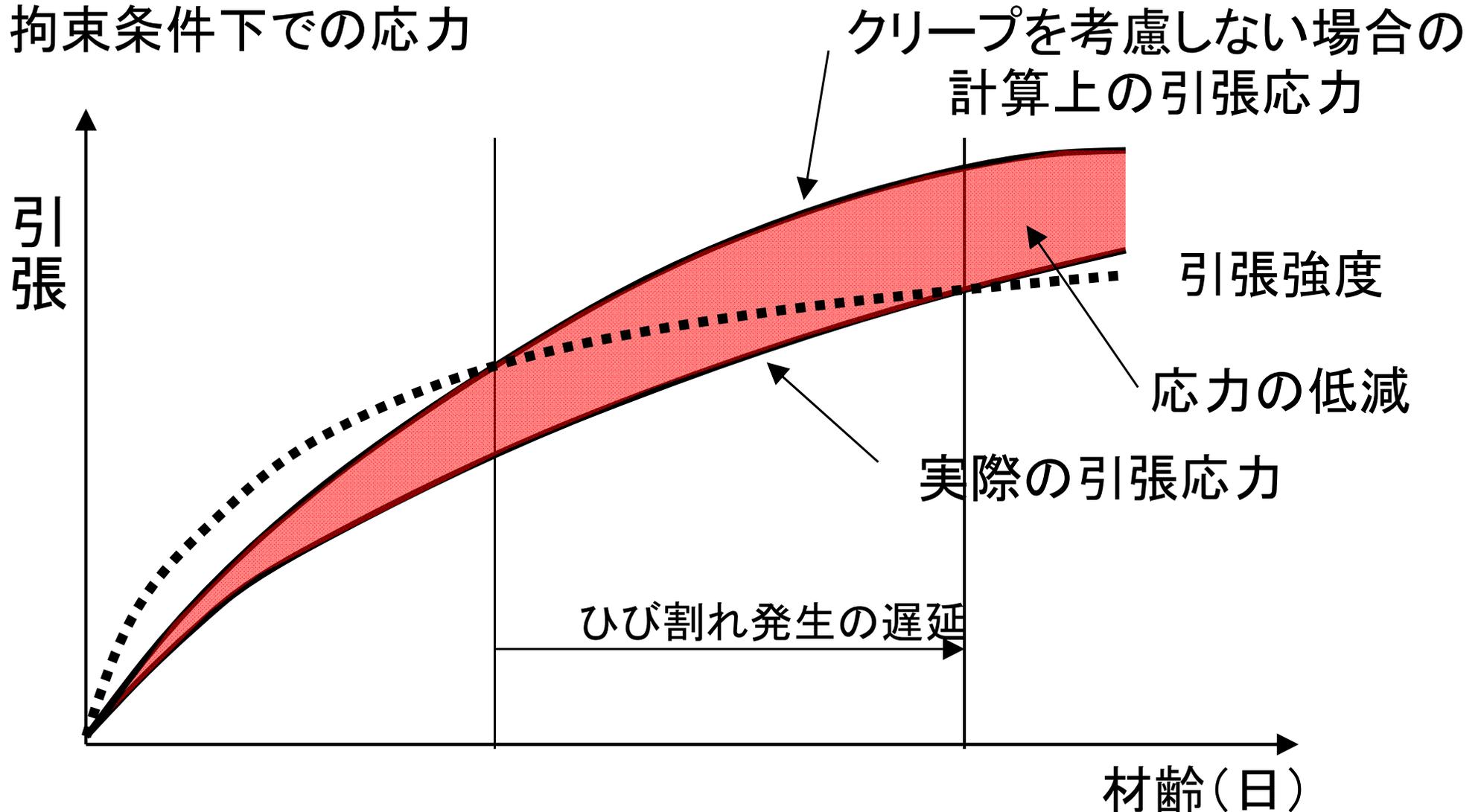
拘束条件下での応力



ひび割れの複雑性

自己収縮, 乾燥収縮, 温度応力の複合 + 拘束・クリープ

拘束条件下での応力



収縮ひび割れ発生メカニズム

6
of
60

コンクリートの**自己収縮**および**乾燥収縮**に伴う変形が、
内的あるいは外的に拘束されると、
コンクリートに引張応力が作用し、ひび割れが発生

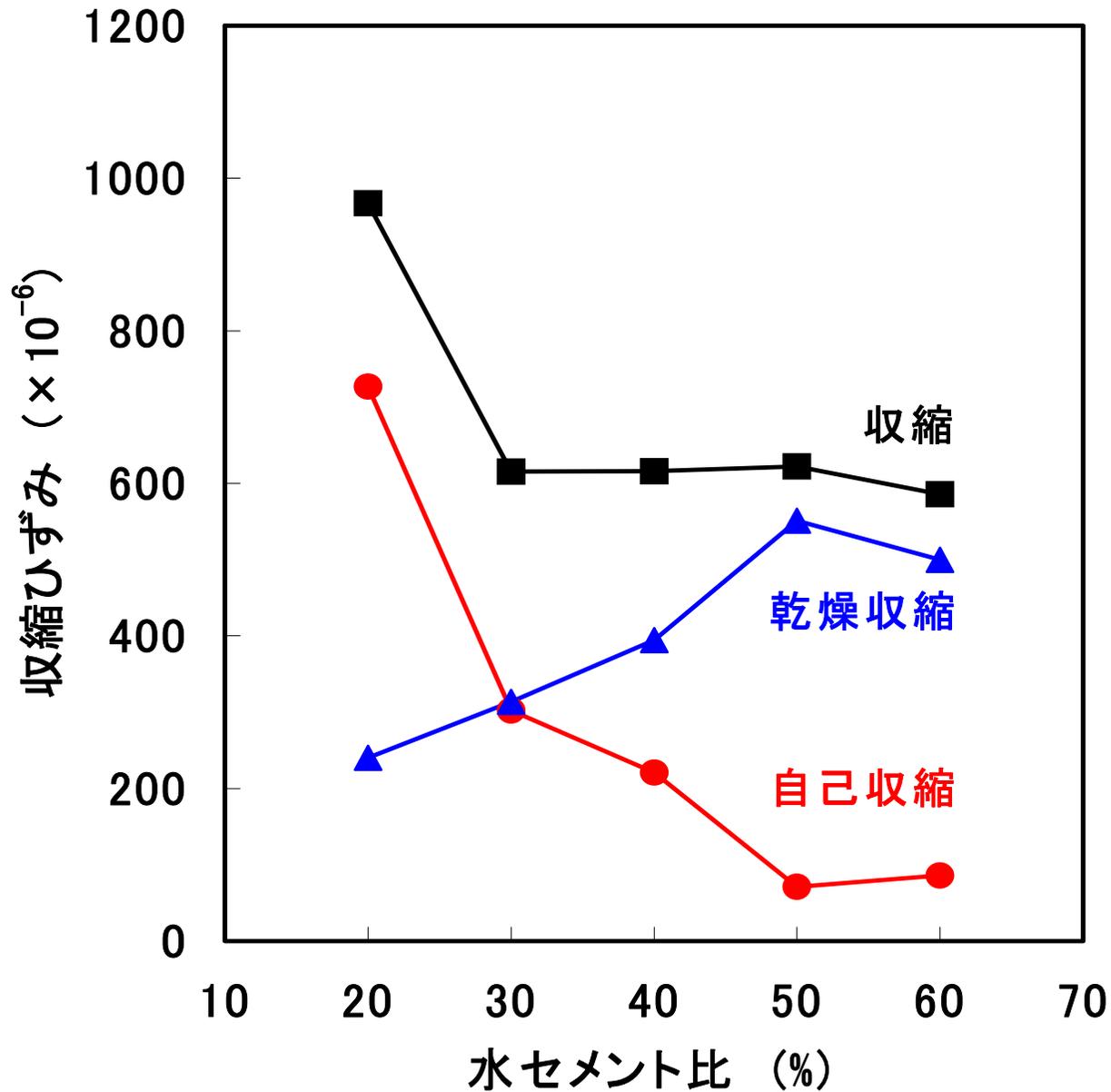
自己収縮

セメントの水和反応の進行によりコンクリートの
体積が減少し、収縮する現象
(W/C小→自己収縮大)

乾燥収縮

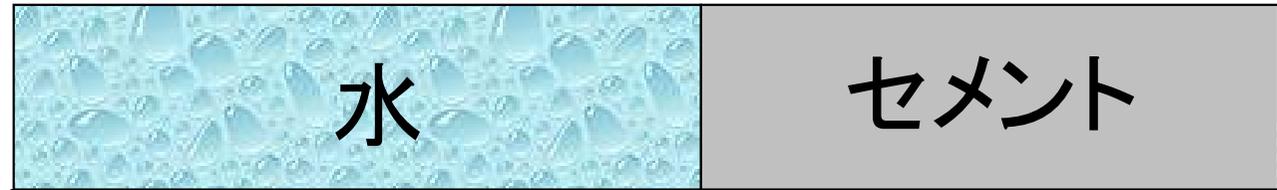
乾燥によるコンクリート中の水分の蒸発により、
コンクリートの体積が減少し、収縮する現象
(W, W/C大→乾燥収縮大)

自己収縮と乾燥収縮



自己収縮のメカニズム

練混ぜ直後



硬化後



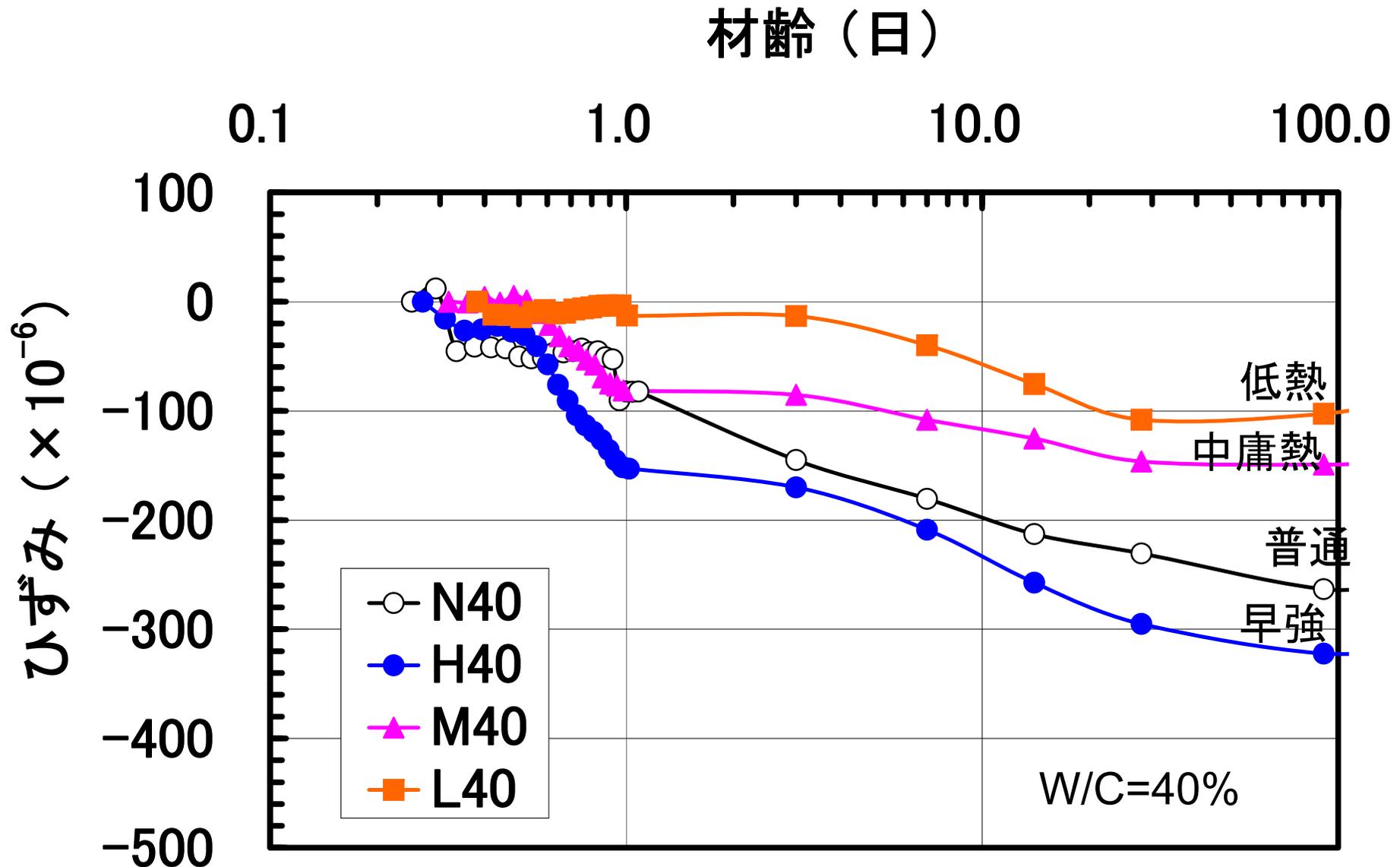
自己収縮

自己収縮ひずみの特徴

10
of
60

- ✓ 自己収縮の進行速度は水セメント比の影響を受ける。
- ✓ 水セメント比が小さい場合、若材齢時に著しく増加し、長期材齢ではその増加が遅くなる。
- ✓ 水セメント比が大きい場合は、長期間にわたり、徐々に自己収縮が増加する。

自己収縮に及ぼすセメント種類の影響



自己収縮ひずみ予測式

12
of
60

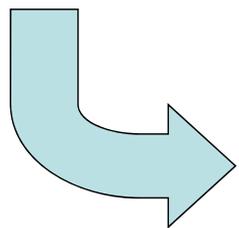
普通ポルトランドセメント

①終局値 $\varepsilon_{ao}(W/C) = 3070 \exp\{-7.2(W/C)\}$

②進行特性 $\beta_a(t) = 1 - \exp\{-a(t - t_o)^b\}$

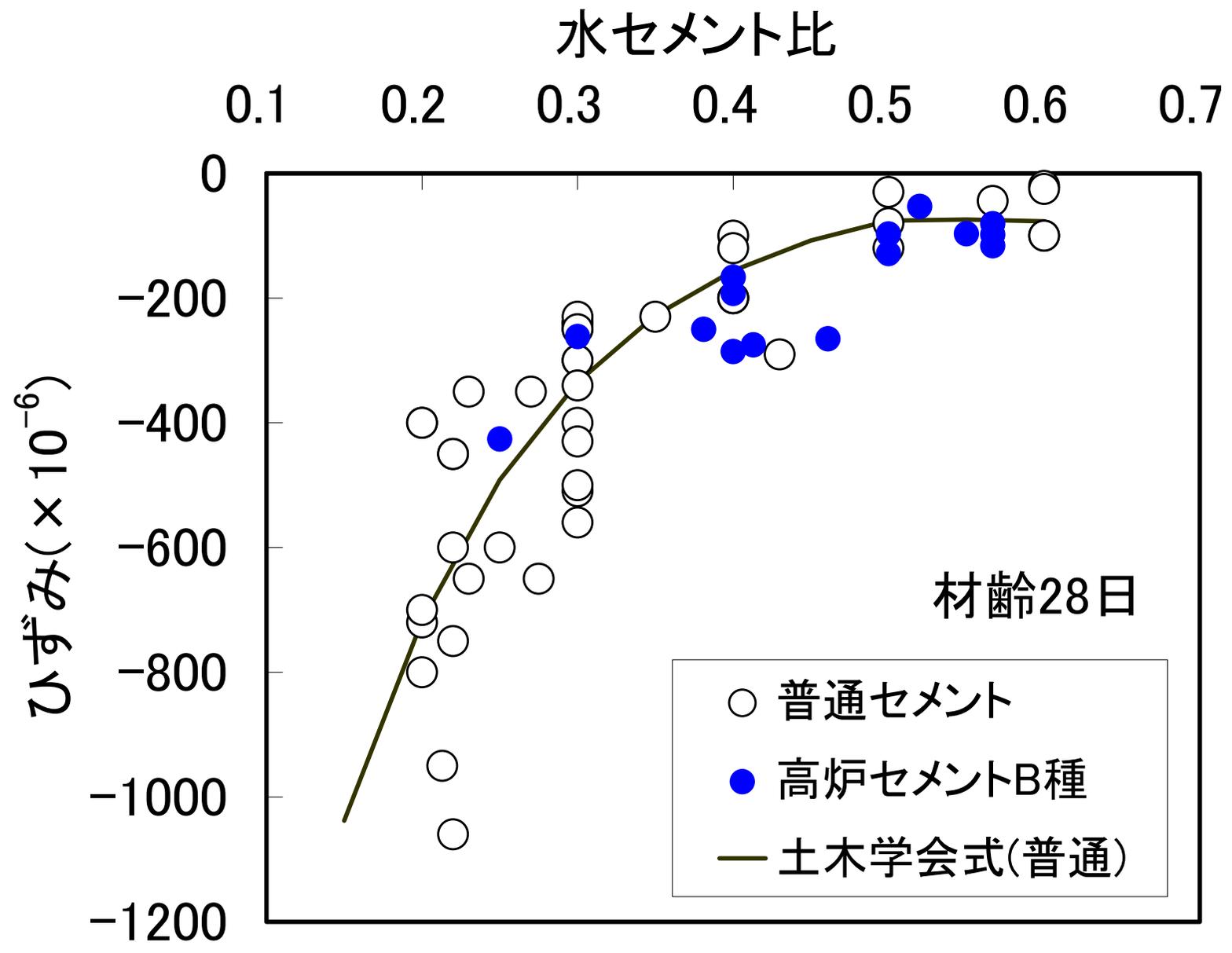
$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right]$$

③セメントの種類 (普通、中庸熱、早強、低熱)

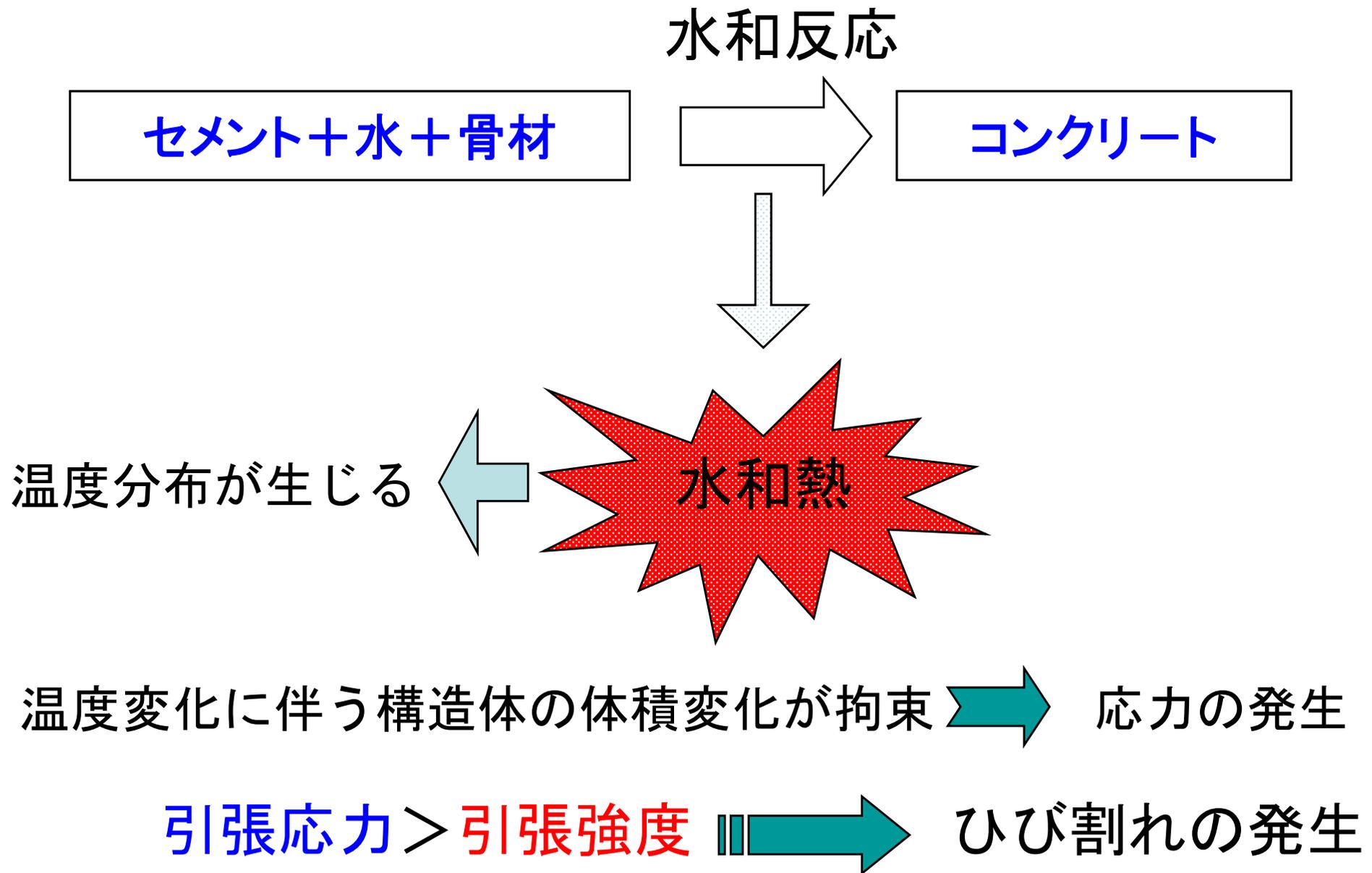


$$\varepsilon_a(t) = \gamma \cdot \varepsilon_{ao}(W/C) \cdot \beta_a(t)$$

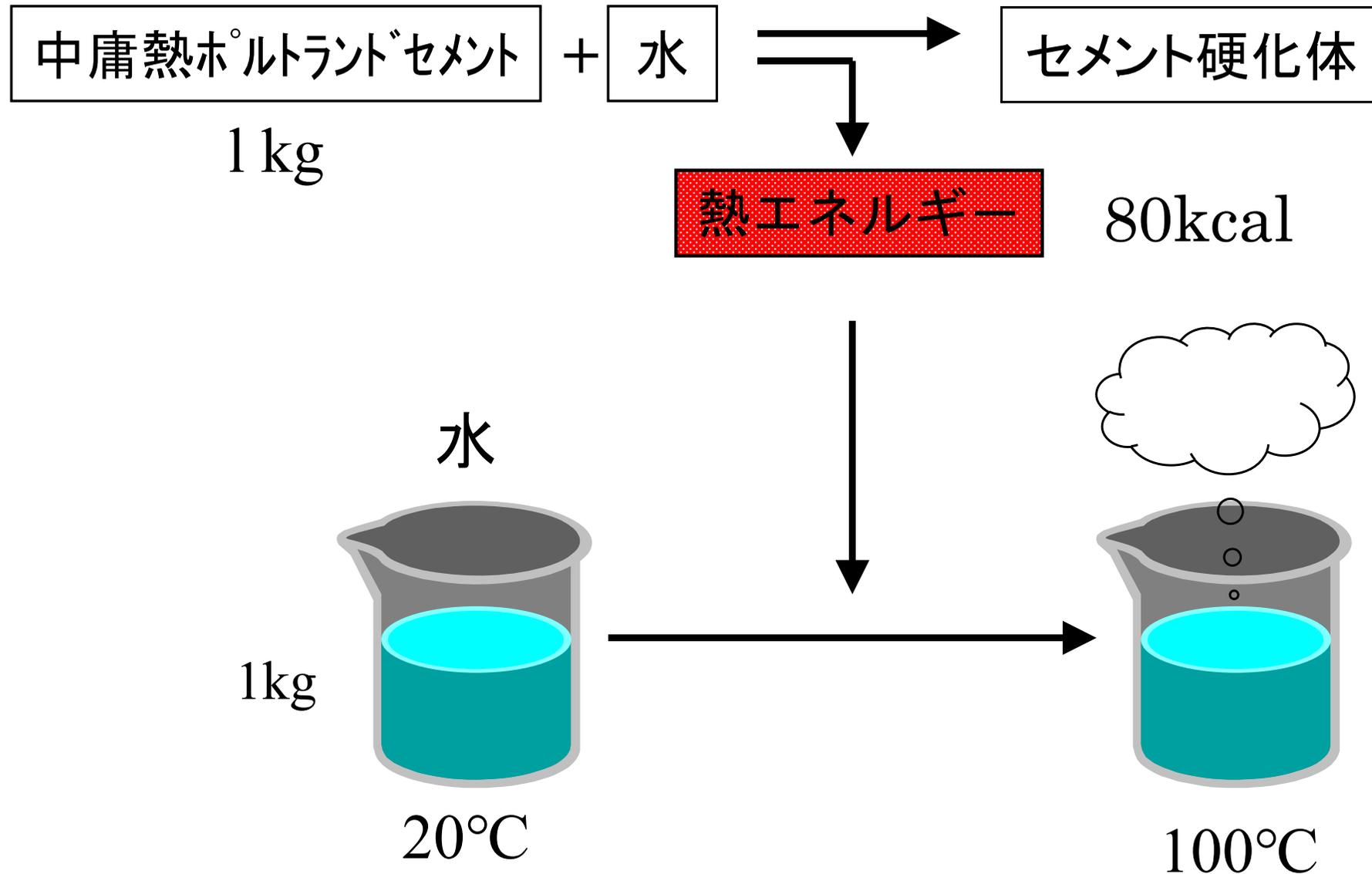
普通セメントおよび高炉セメントB種の自己収縮



温度ひび割れ発生メカニズム



セメントの水和熱



セメントの水和熱

16
of
60

$$\text{熱量(cal)} = \text{比熱(cal/g}^\circ\text{C)} \times \text{質量(g)} \times \text{温度変化}(\text{}^\circ\text{C)}$$

100万m³のダムがセメントの水和熱で20°C温度上昇したと仮定

ダムの発熱量＝

$$0.27(\text{cal/g}^\circ\text{C}) \times 2.3 \times 10^6(\text{g/ m}^3) \times 10^6(\text{m}^3) \times 20(\text{}^\circ\text{C}) = 1.24 \times 10^{10} \text{kcal}$$

風呂の浴槽は200ℓ程度、水の比熱は1.0(cal/g°C)、20°Cの水を40°Cまで温度変化させる

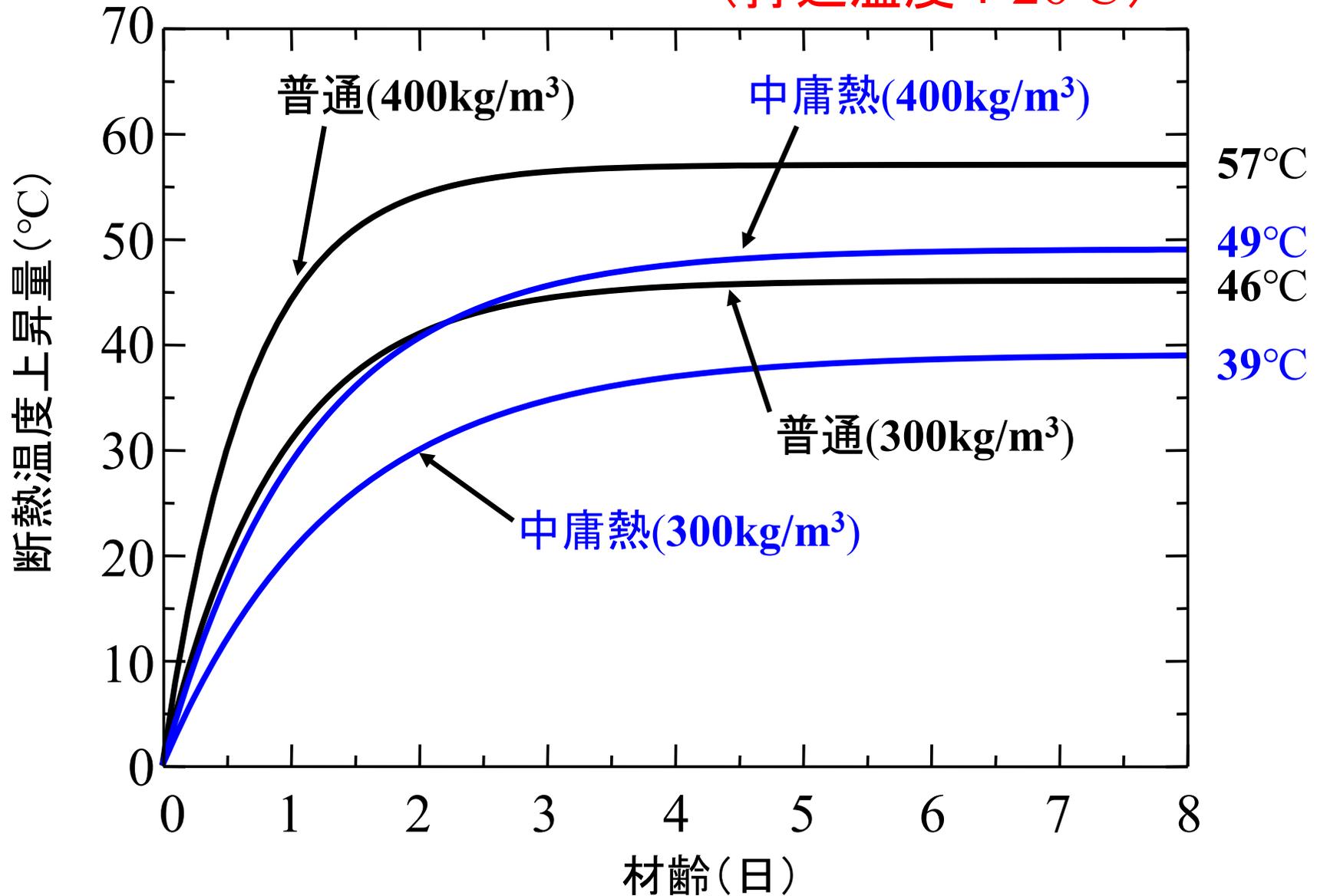
風呂を沸かす熱量＝

$$1.0(\text{cal/g}^\circ\text{C}) \times 2.0 \times 10^5(\text{g}) \times (40-20)(\text{}^\circ\text{C}) = 4,000 \text{kcal}$$

風呂を310万回沸かせる量になり、1万世帯の約1年分に相当

断熱温度上昇量

(打込温度 : 20°C)



セメント種別の終局断熱温度上昇量

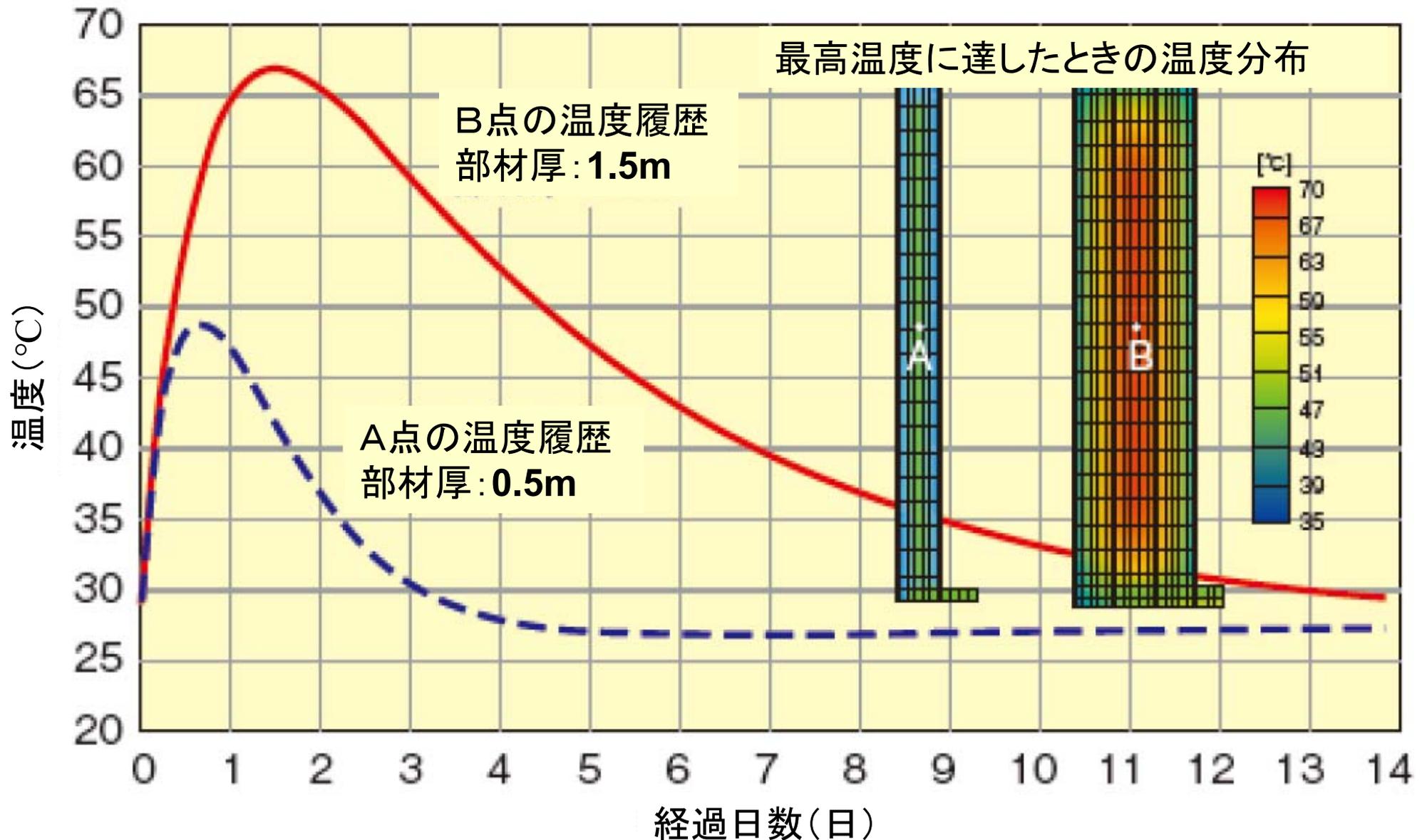
18
of
60

C=300kg/m³

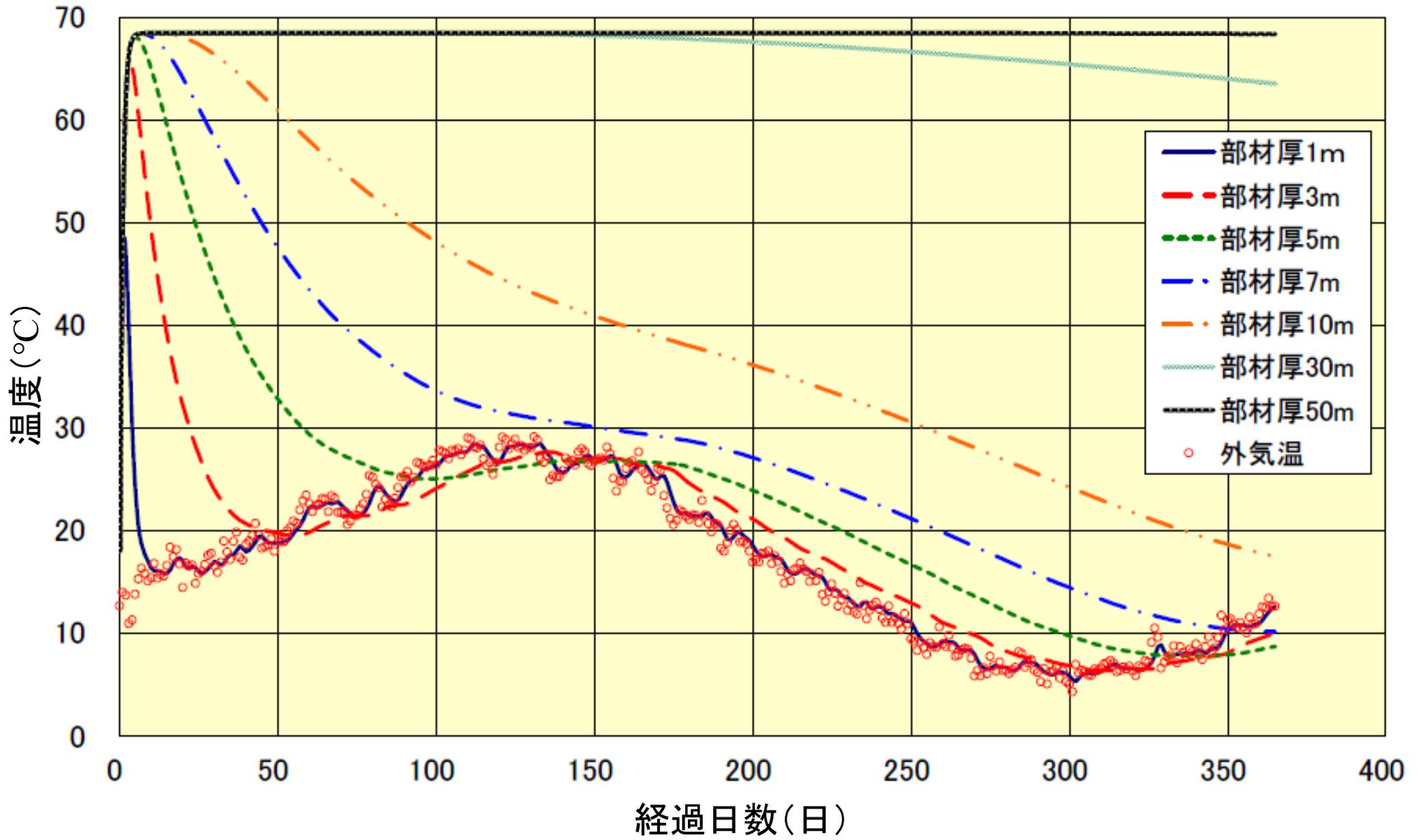
打込温度：20℃

セメント種類	終局断熱 温度上昇量 (℃)	備考	セメント種類 (低熱セメント)	終局断熱 温度上昇量 (℃)	備考
普通ポルトランド	46		A社（2成分）	26.7	
中庸熱ポルトランド	39		A社（3成分）	25.7	
高炉C	45		B社（超低熱）	23.5	
フライアッシュC	44		B社（ビーライト）	26.6	
早強ポルトランド	51.7	実験値	C社	33.8	
			D社	39.7	280kg/m ³
			E社	28.9	240kg/m ³
			E社	29.2	314kg/m ³

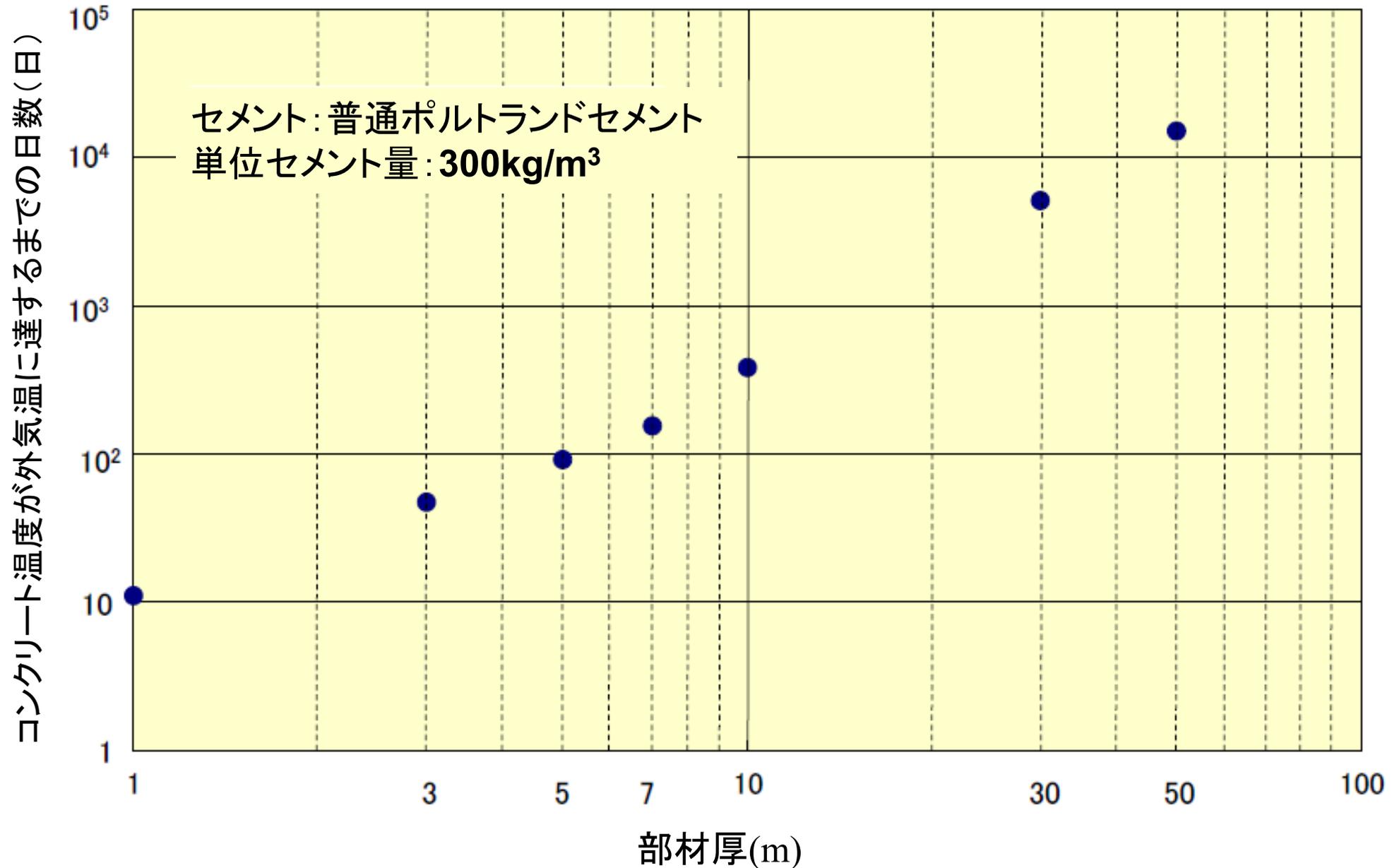
部材厚の違いがコンクリートの温度履歴に与える影響



部材厚の変化と温度履歴との関係



コンクリート温度が外気温に達するまでの日数

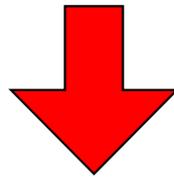


温度応力発生メカニズム

22
of
60

コンクリート温度の上昇(下降)に伴い
コンクリート自体は膨張(収縮)する。

10mの長さのコンクリート部材の温度が20°C上昇



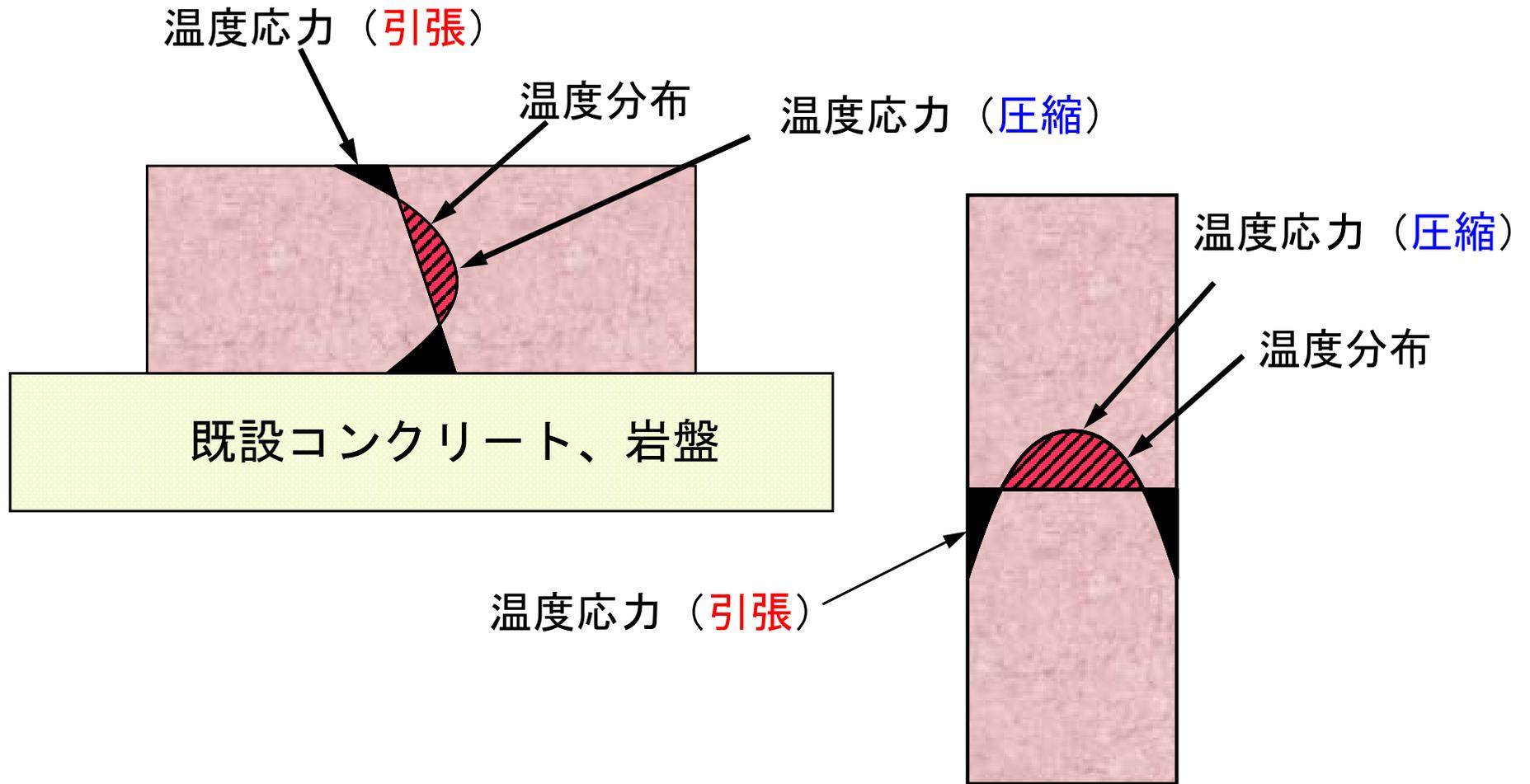
コンクリートは約2mm膨張

1°Cの温度変化に対してコンクリート1m当り約0.01mm

この変化の割合を熱膨張係数という

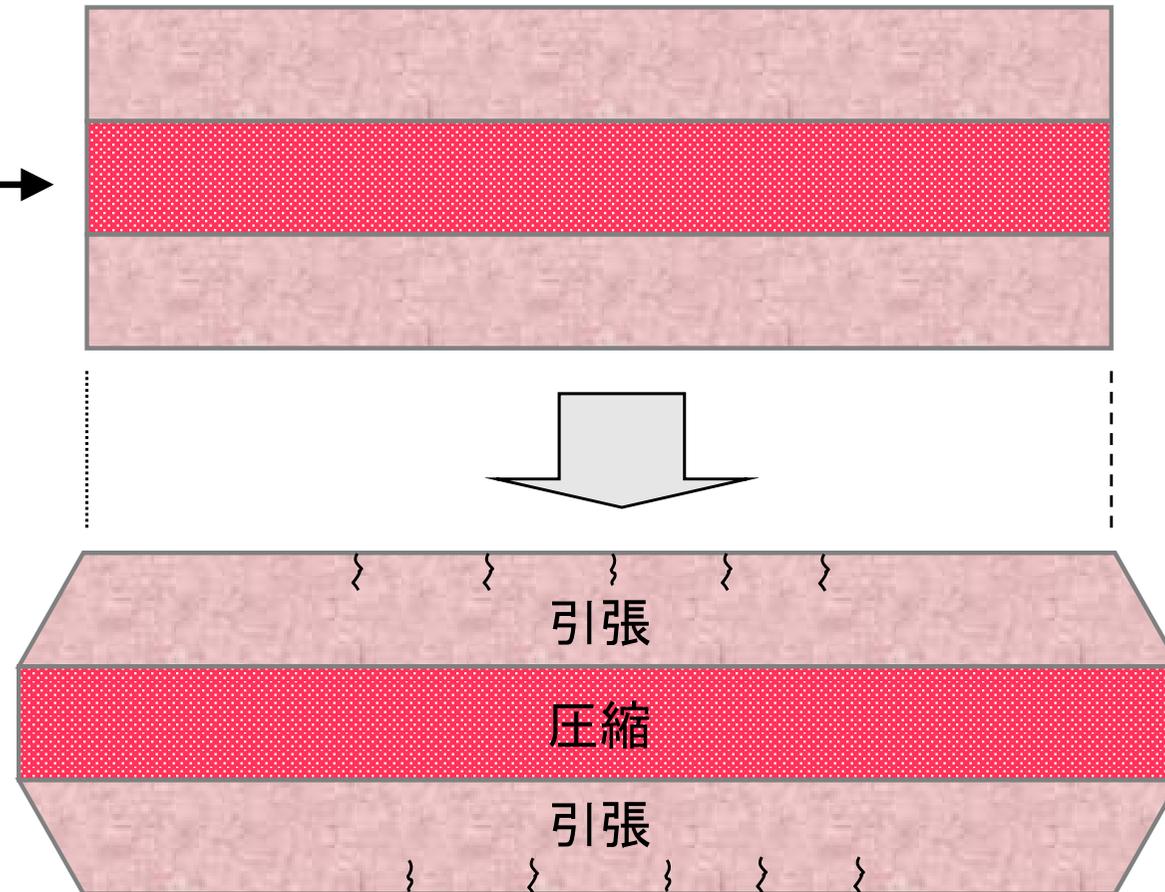
$$10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

温度応力の発生メカニズム（内部拘束応力）

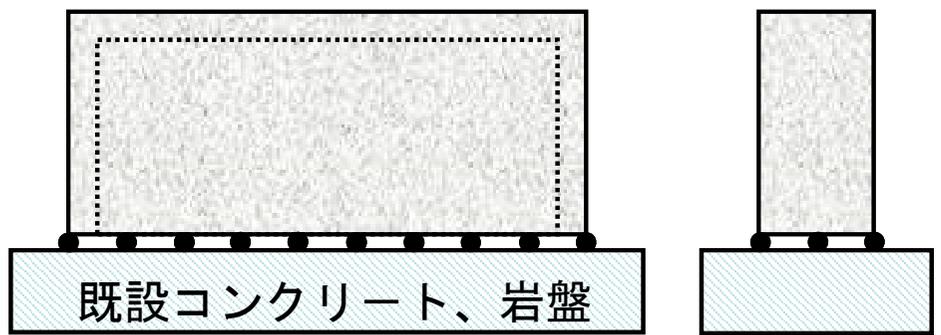


内部拘束応力の概念図

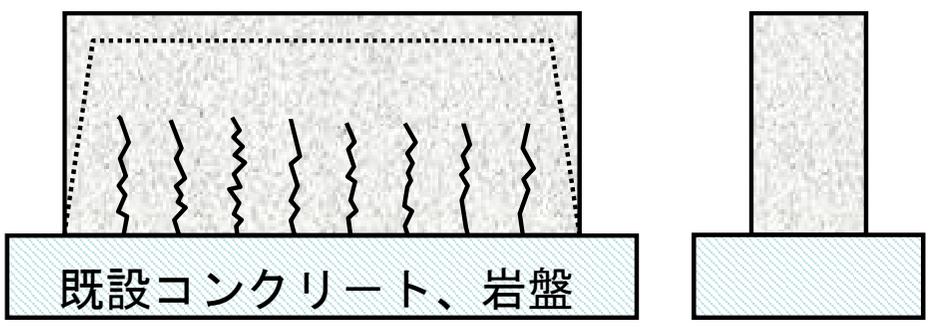
この部分のみ
温度上昇



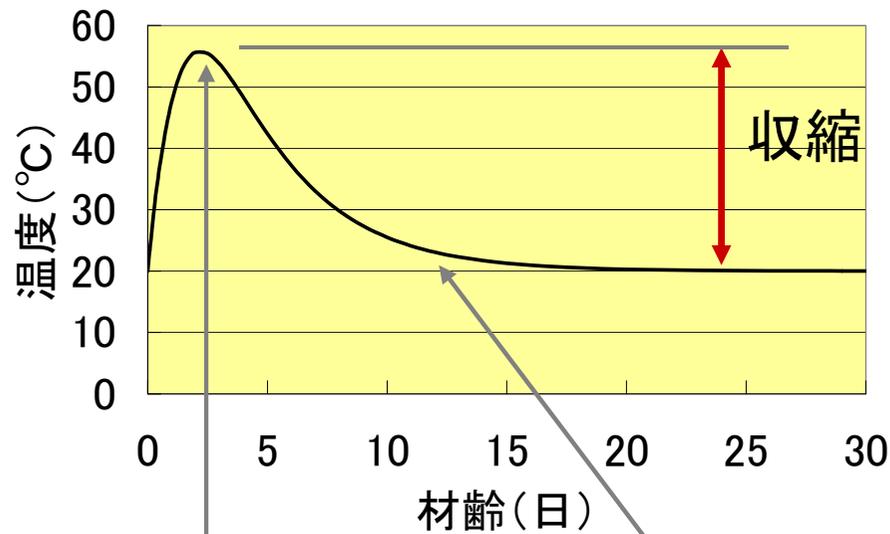
温度応力の発生メカニズム(外部拘束応力)



拘束がない場合 → 自由に変形し、ひび割れを生じない。
(点線は温度低下後の自由変形)

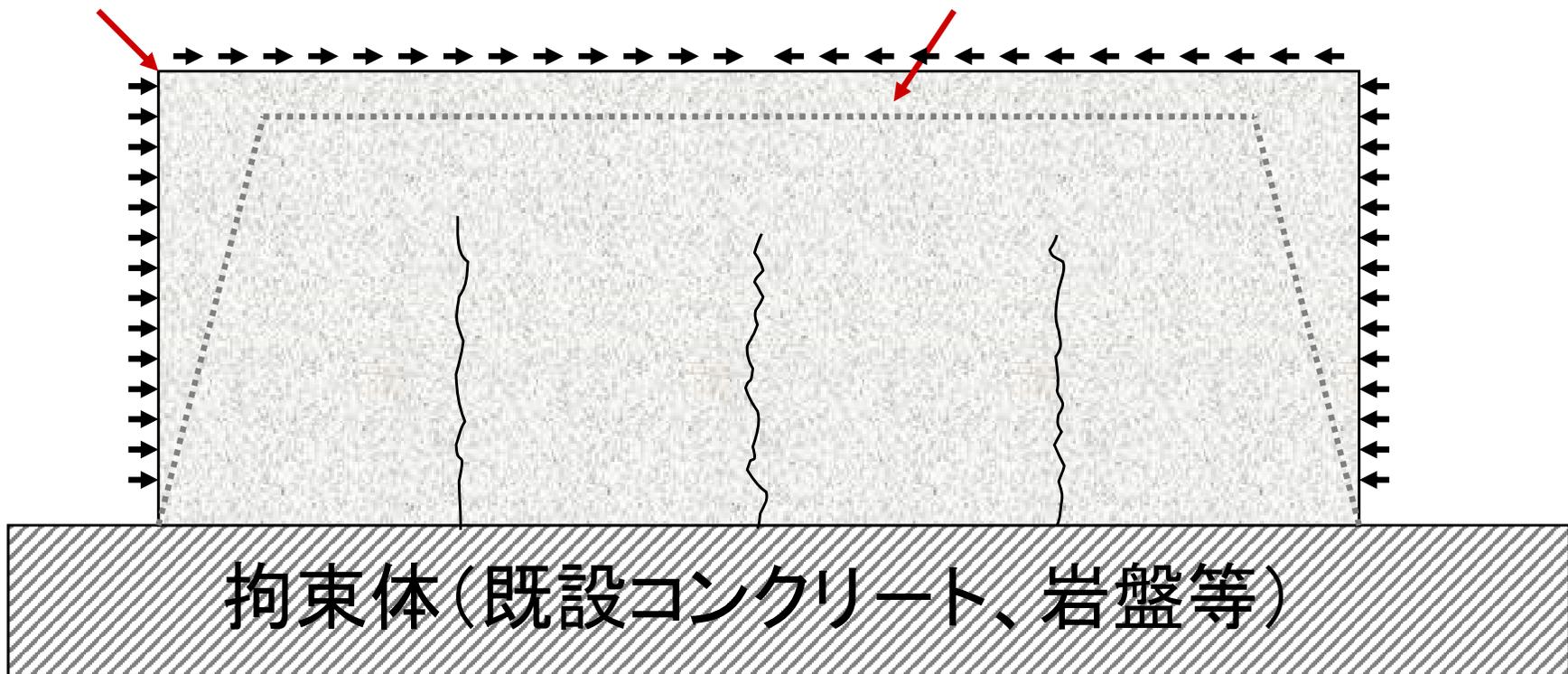


拘束がある場合 → ひび割れを生じる。
(点線は温度低下後の拘束された変形)



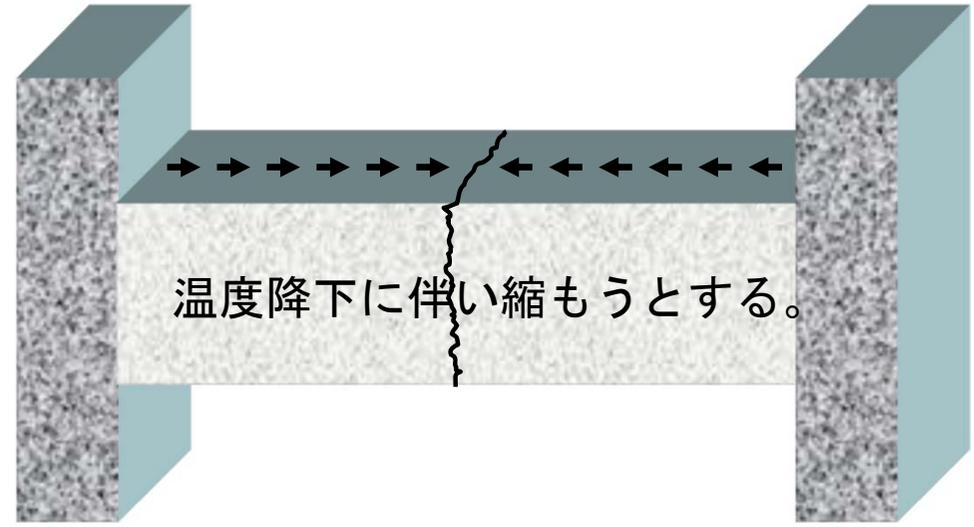
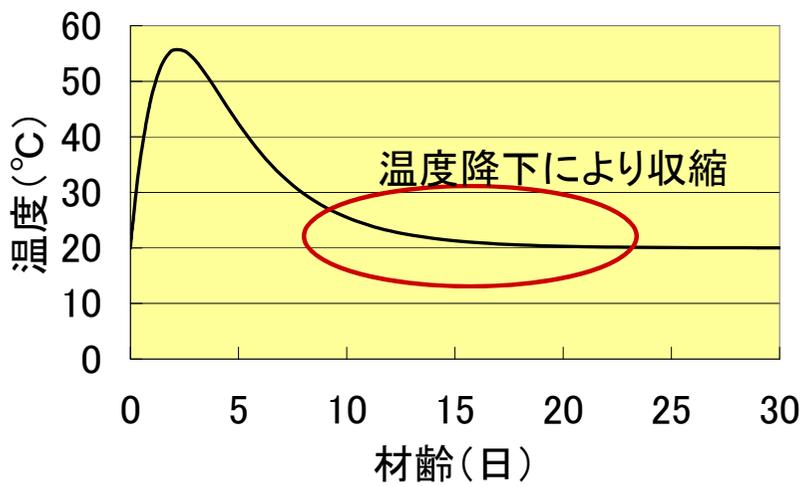
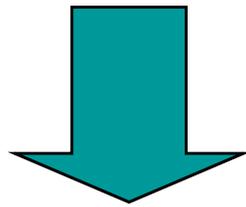
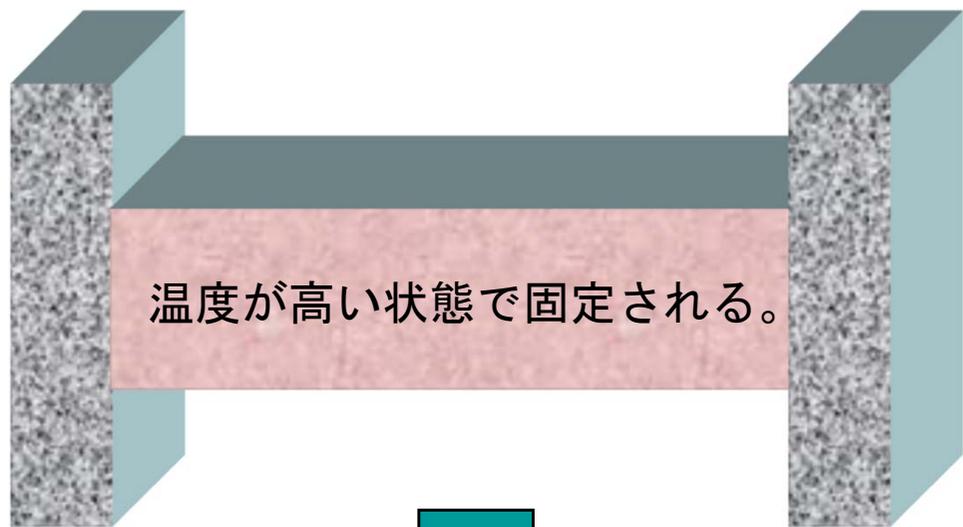
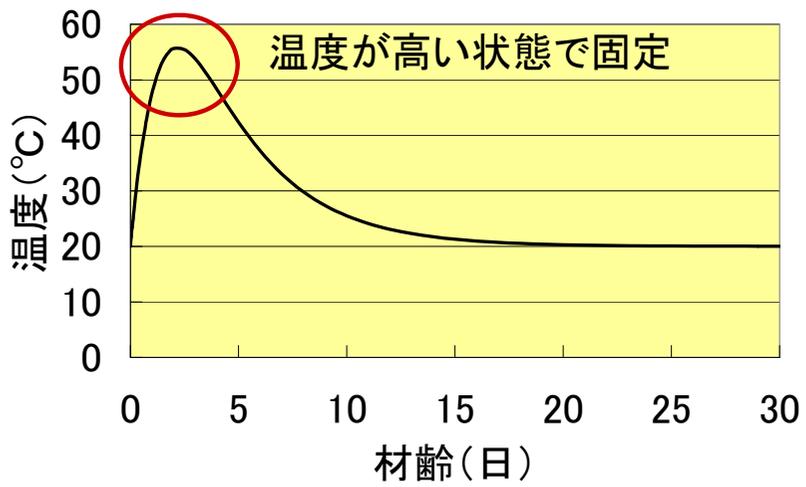
温度が高い状態で固まる

温度降下とともに収縮が始まる



拘束により縮むことができない。➡ ひび割れの発生

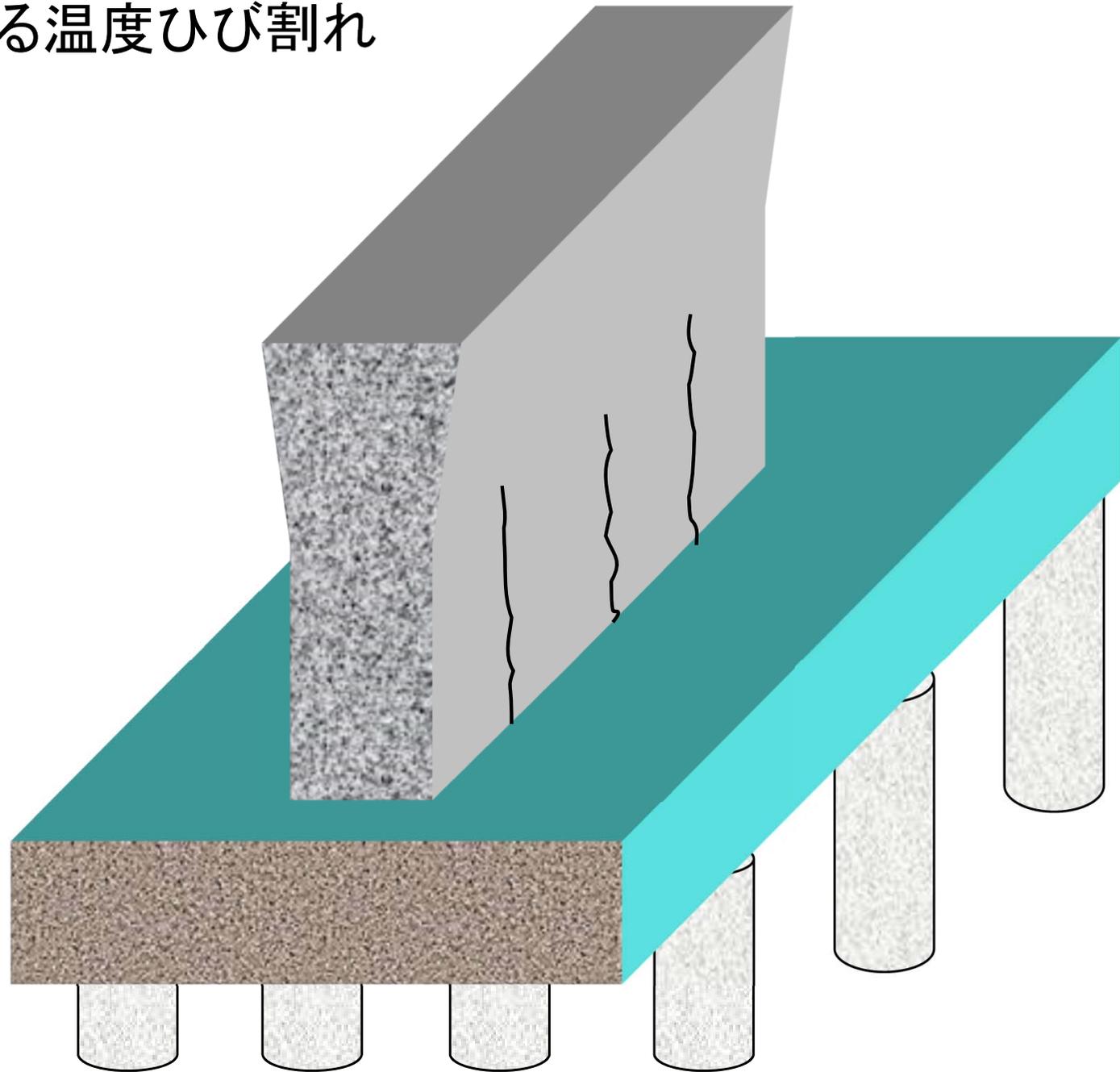
外部拘束応力の概念図



拘束されているためひび割れが発生

外部拘束応力によるひび割れの例

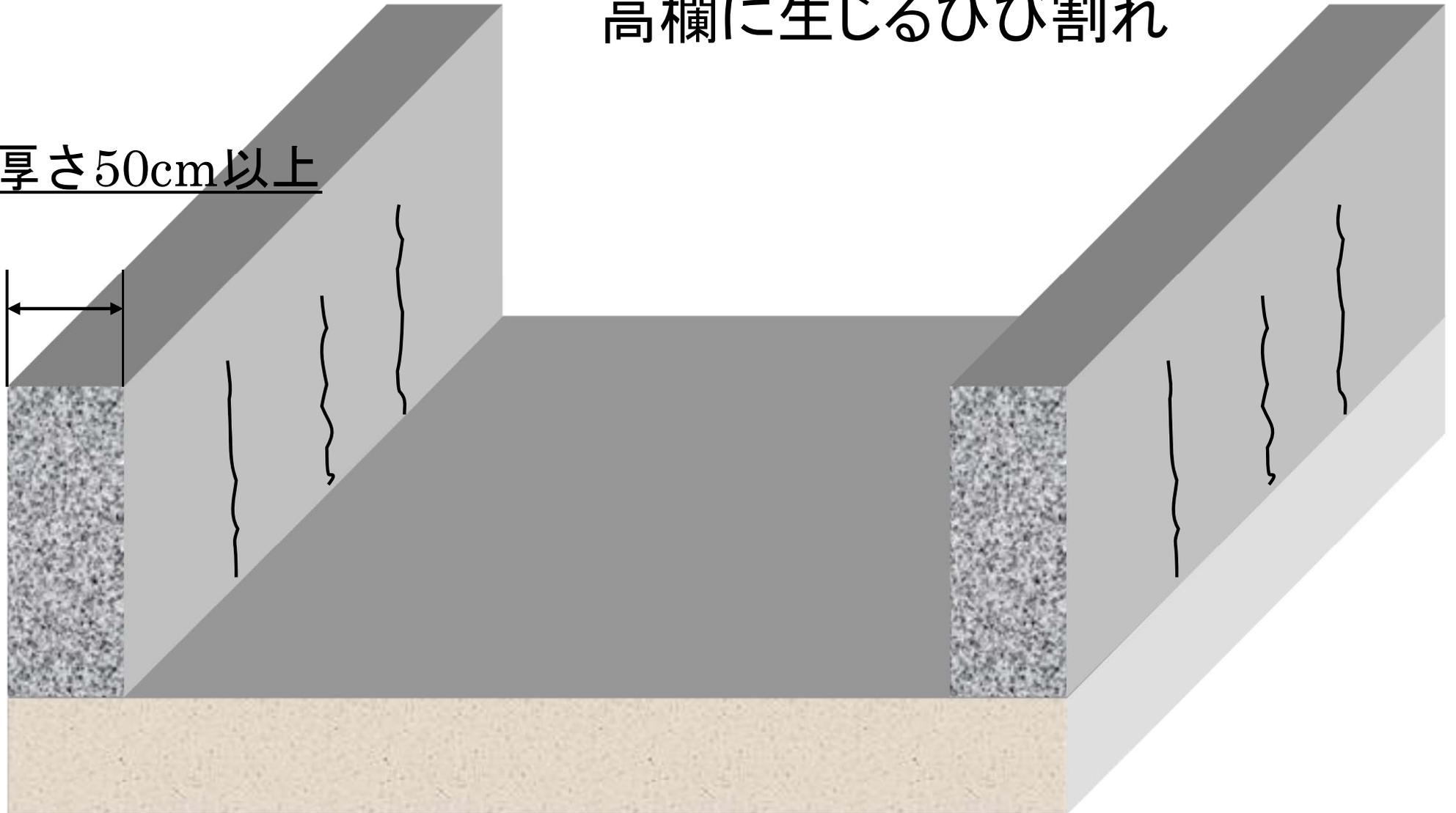
橋脚に生じる温度ひび割れ



外部拘束応力によるひび割れの例

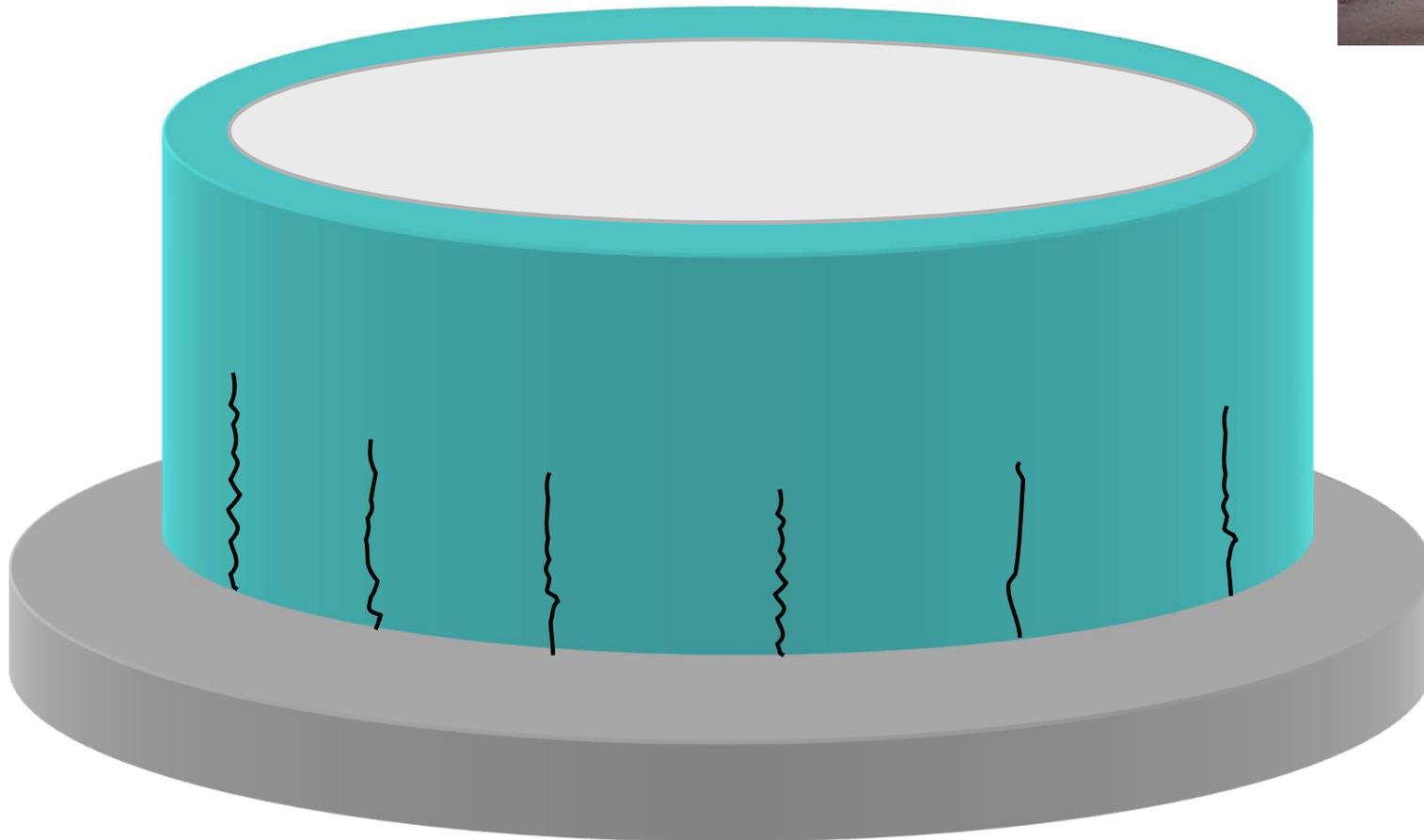
高欄に生じるひび割れ

厚さ50cm以上

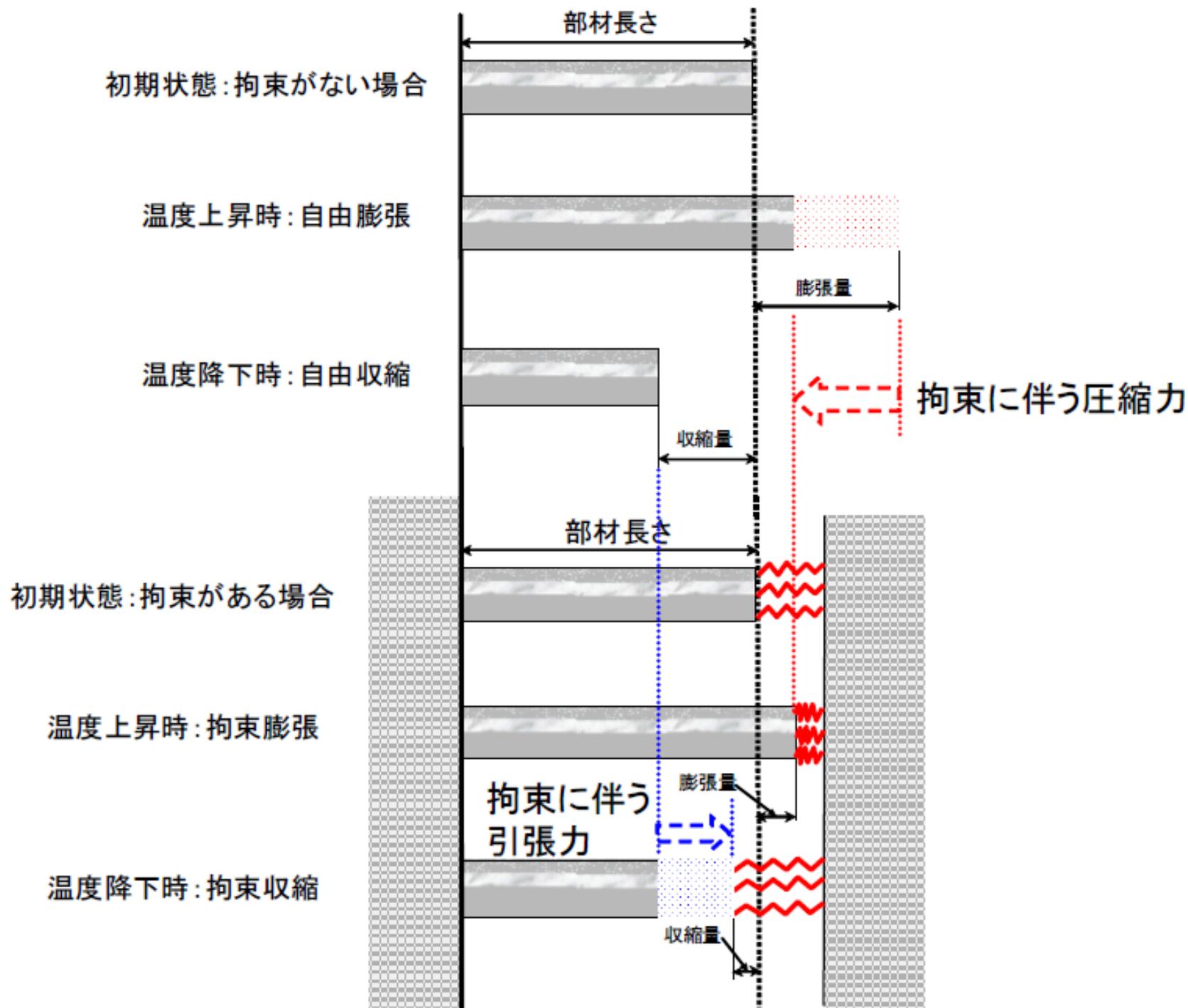


外部拘束応力によるひび割れの例

PCタンクに生じる温度ひび割れ



自由及び拘束状態での膨張・収縮の概念

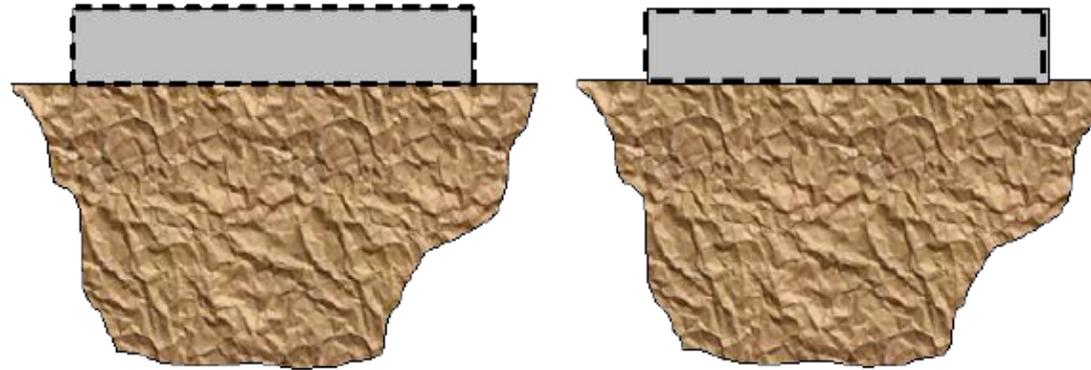


外部拘束に影響を及ぼす要因

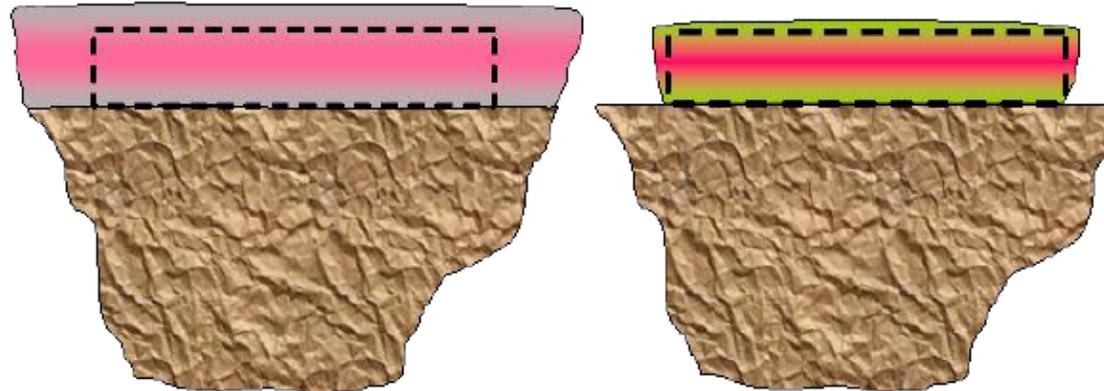
拘束体の剛性が小さい場合

拘束体の剛性が大きい場合

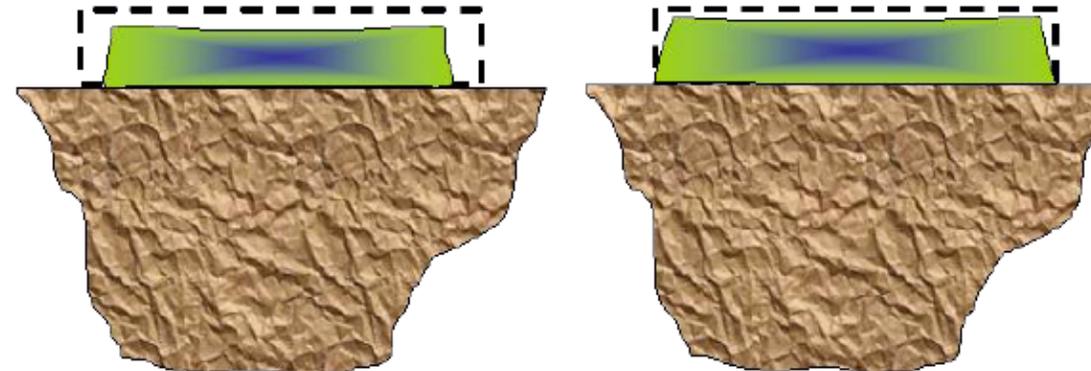
初期状態



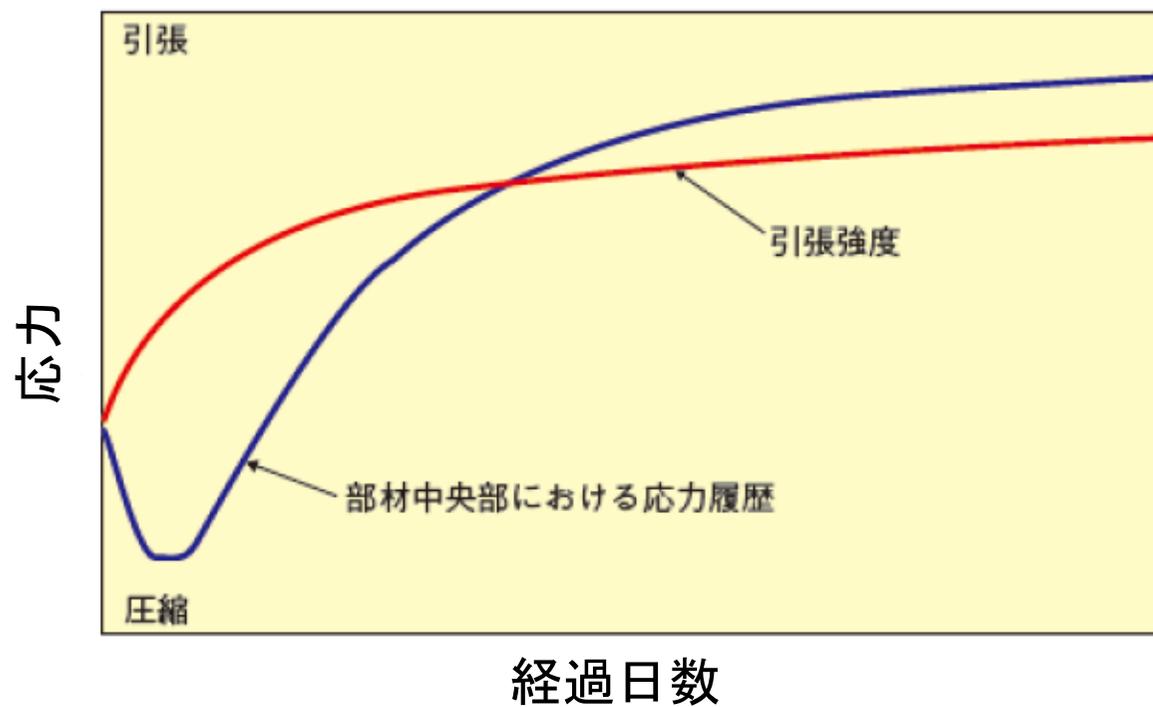
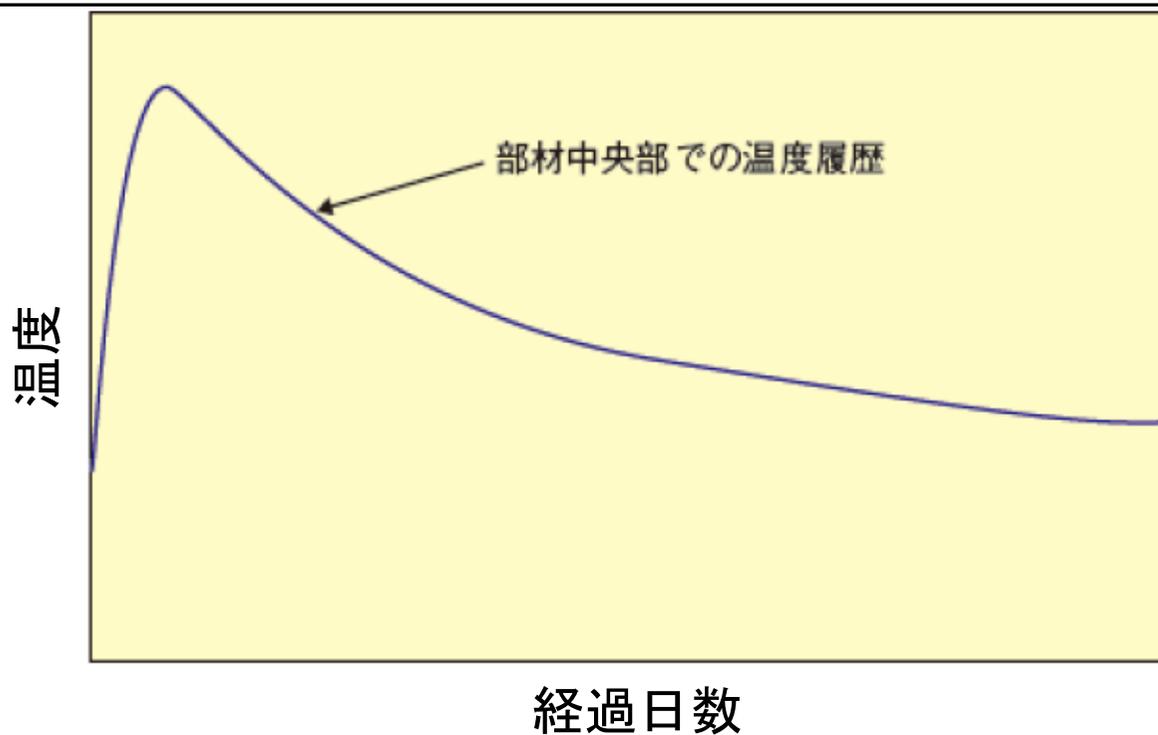
温度上昇時



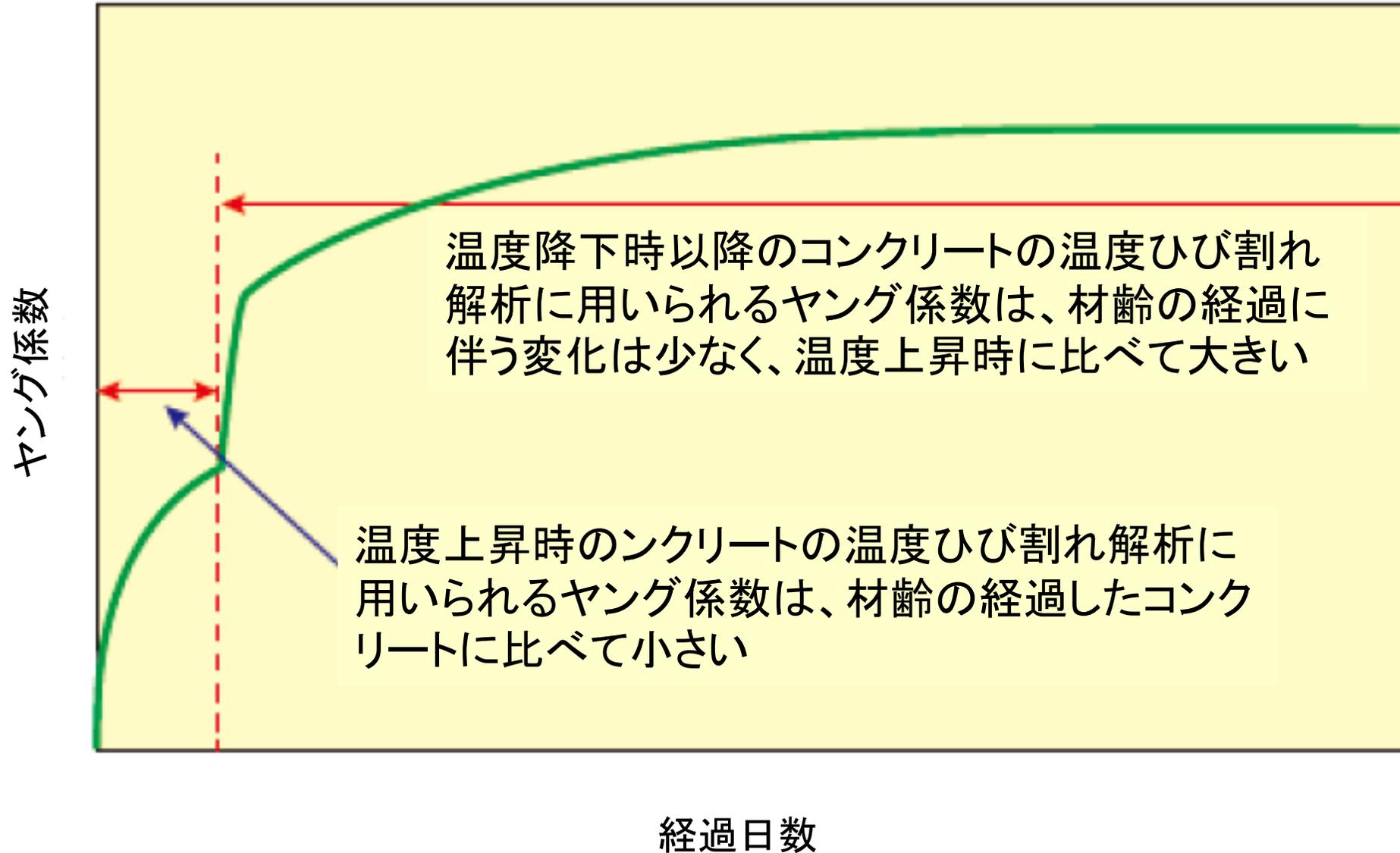
温度下降時



外部拘束による部材中央部の温度履歴と応力履歴のイメージ



解析に用いるヤング係数発現のイメージ



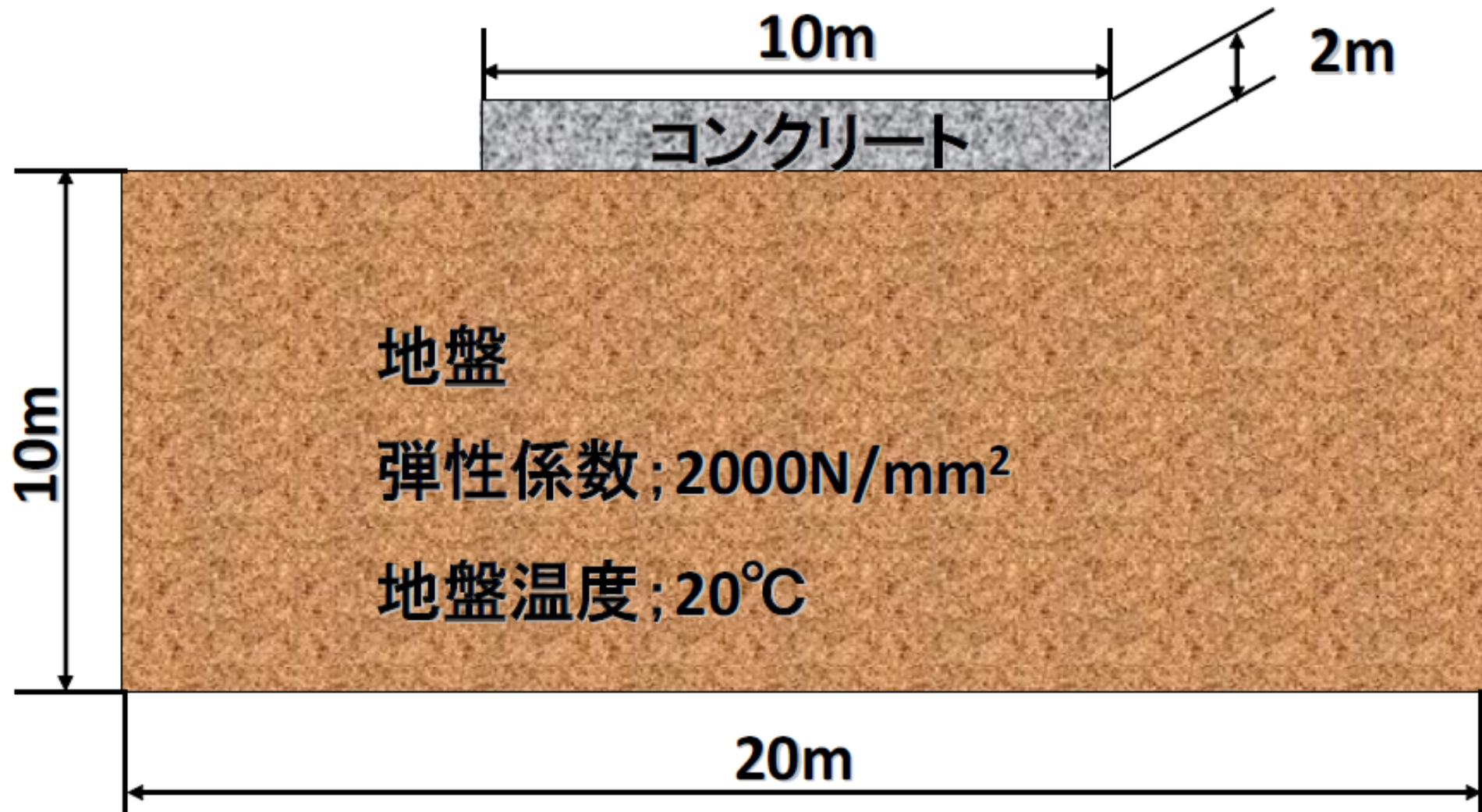
温度応力における二つの疑問

35
of
60

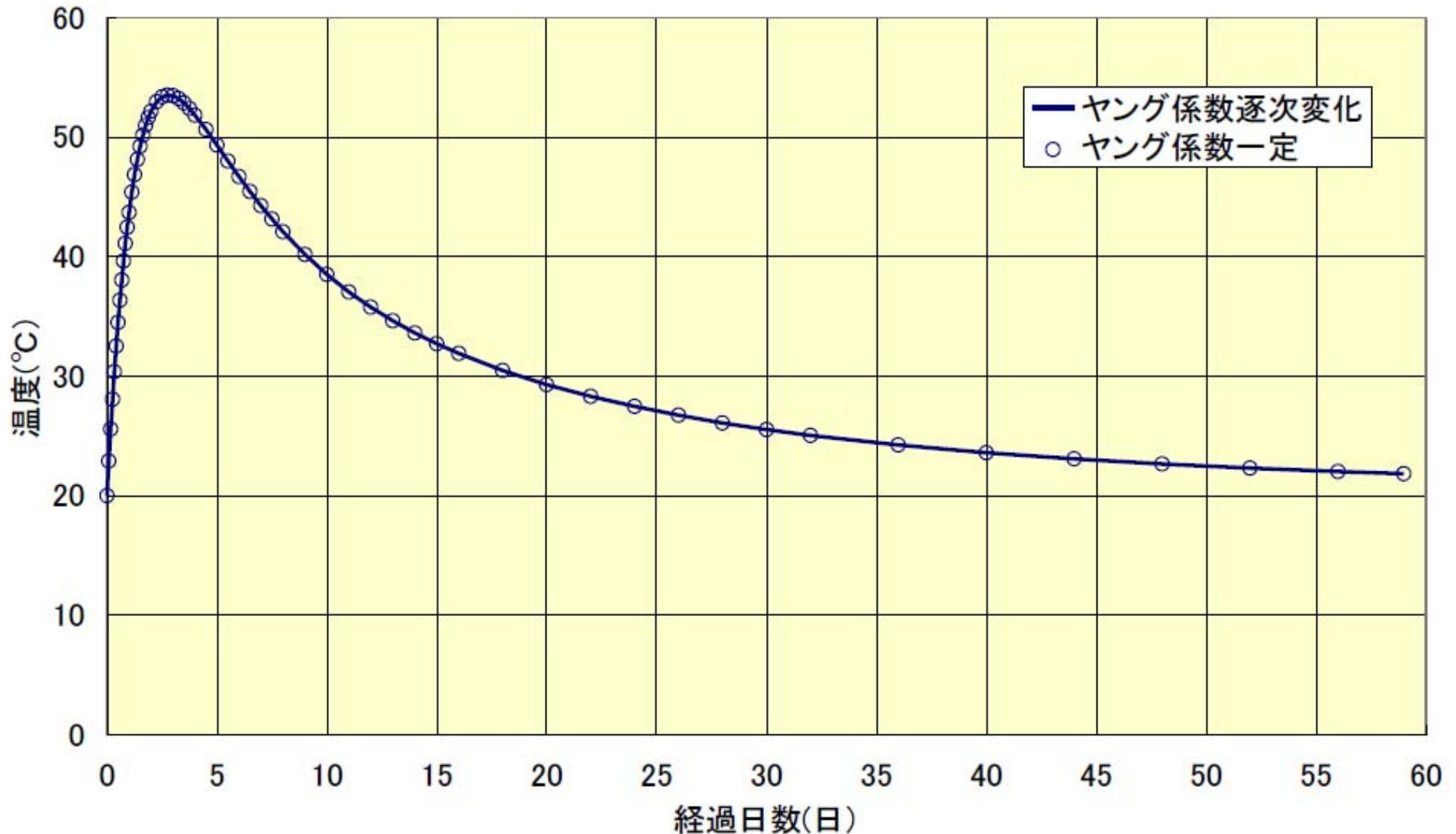
- なぜ圧縮時にひび割れが生じず、
引張時にひび割れが生じるか。
- 温度上昇量と温度降下量が同じ場合、
なぜ発生応力がゼロにならないか。

剛性の逐次変化に関する数値実験

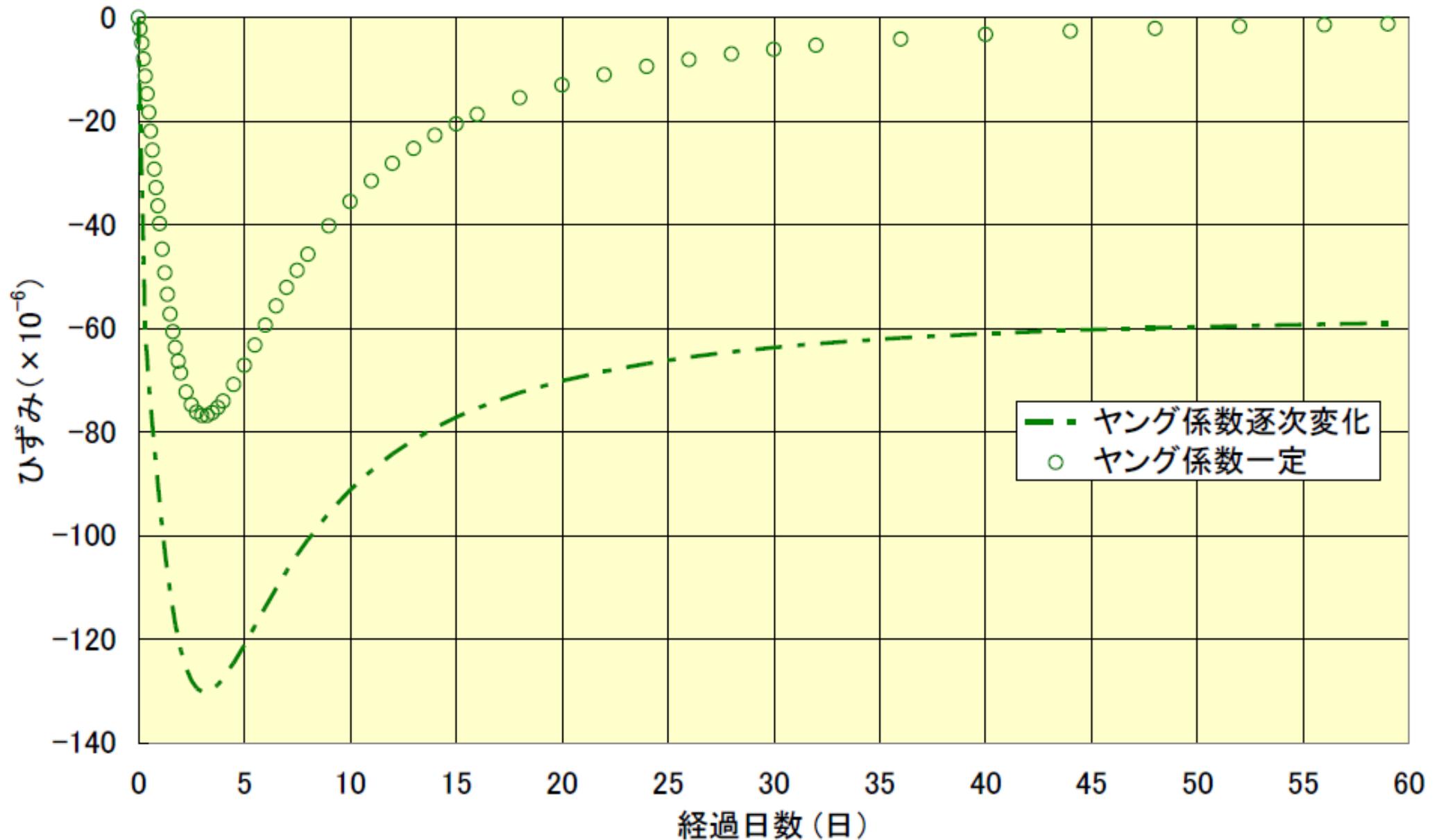
36
of
60



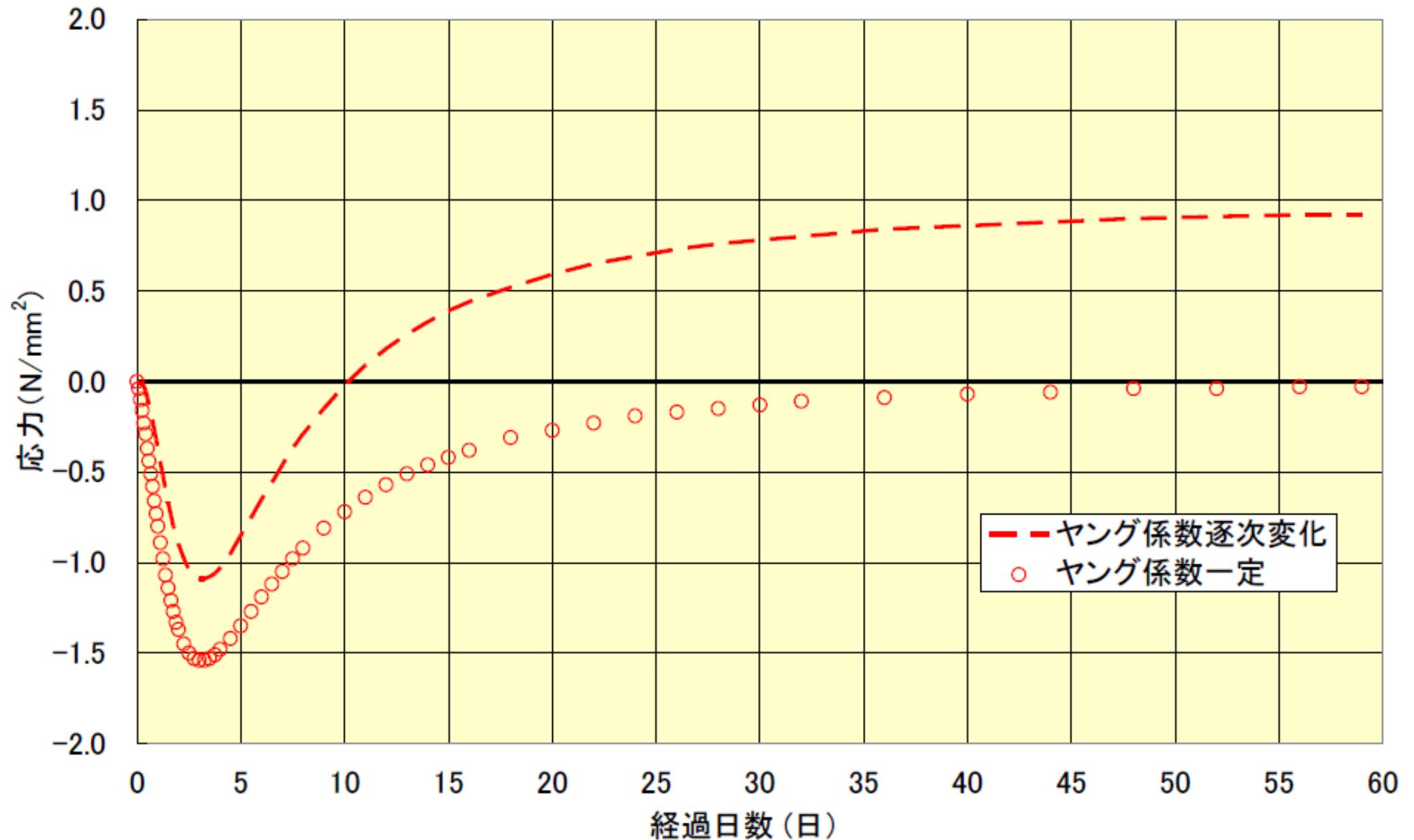
コンクリートの温度履歴



コンクリートのひずみ履歴

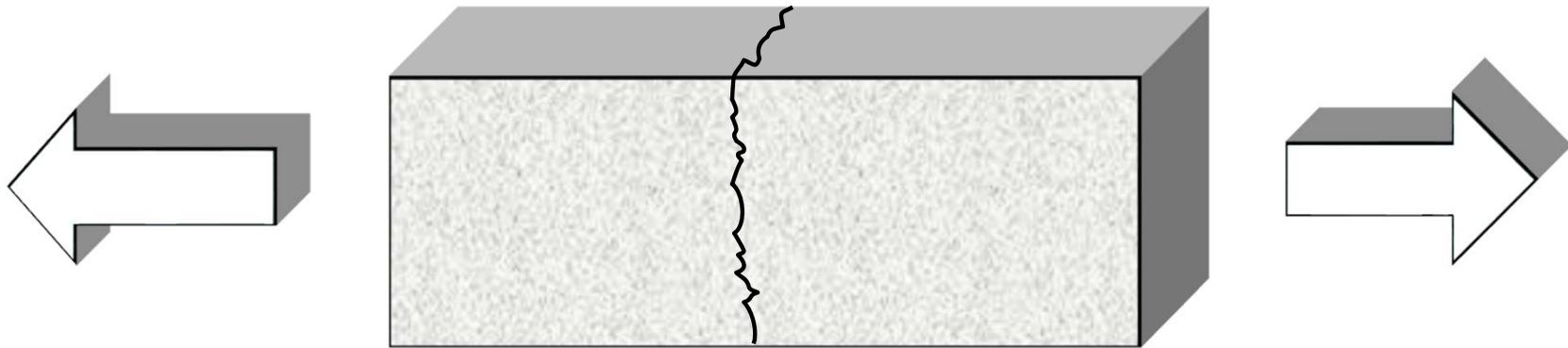


コンクリートの応力履歴



ひび割れの発生

40
of
60



引張応力 < 引張強度



ひび割れは発生しない

引張応力 > 引張強度



ひび割れ発生

温度ひび割れの検討

41
of
60

温度解析

FEM(有限要素法)

応力解析

FEM, CP法(CL法)

温度ひび割れの発生評価

ひび割れ指数

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{tk}(t)}{\sigma_t(t)}$$

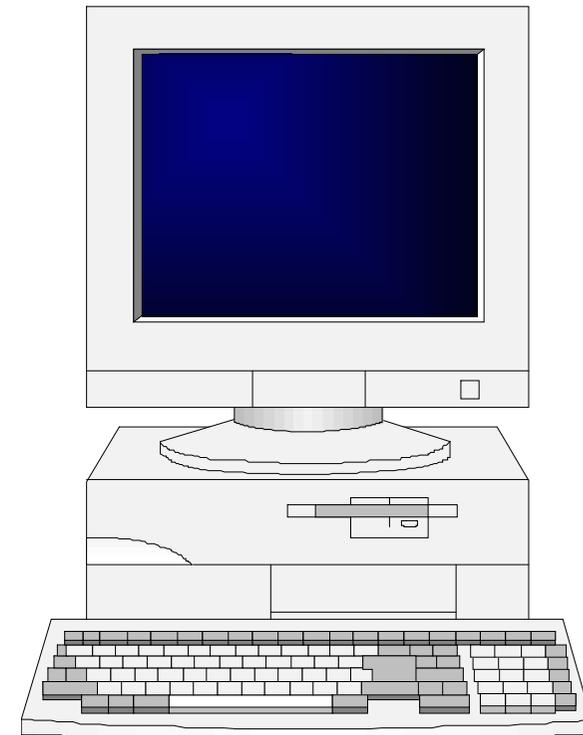
マスコンクリートの温度解析

42
of
60

有限要素法による非定常熱伝導解析

温度解析に必要な熱特性値

- ・ コンクリートの発熱特性
- ・ 熱伝導率
- ・ 熱伝達率
- ・ 比熱・密度
- ・ 外気温、打込み温度



マスコンクリートの応力解析

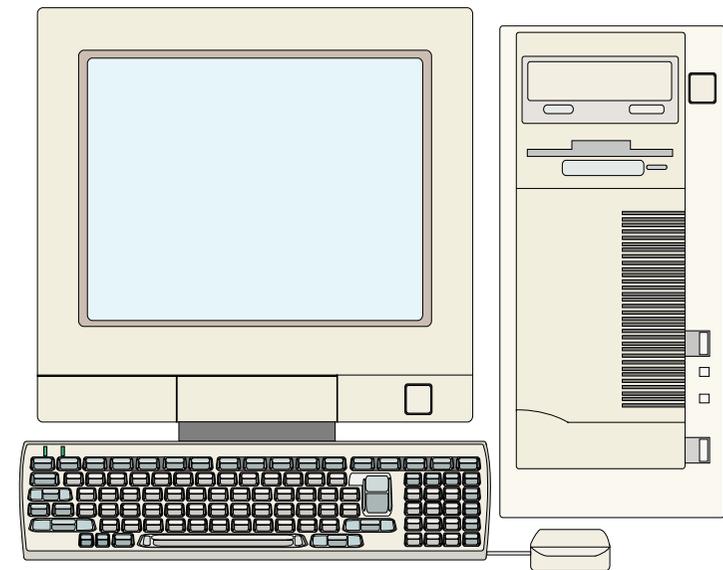
43
of
60

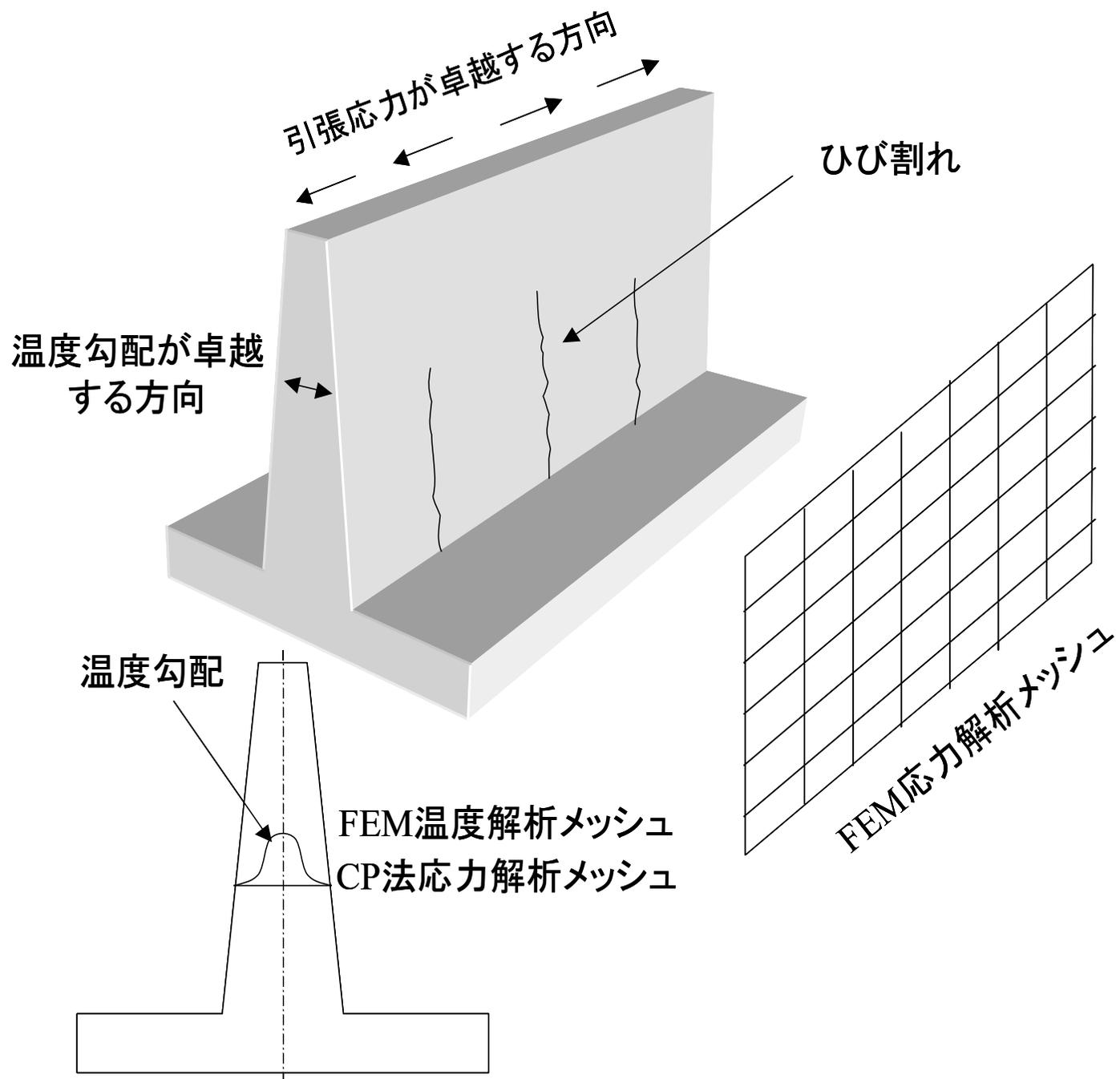
C L 法、C P 法

有限要素法

応力解析に必要な熱特性値

- 熱膨張係数
- 圧縮強度、引張強度
- ヤング係数
- クリープ特性
- 外部拘束係数、外部拘束度





ひび割れ指数の定義

45
of
60

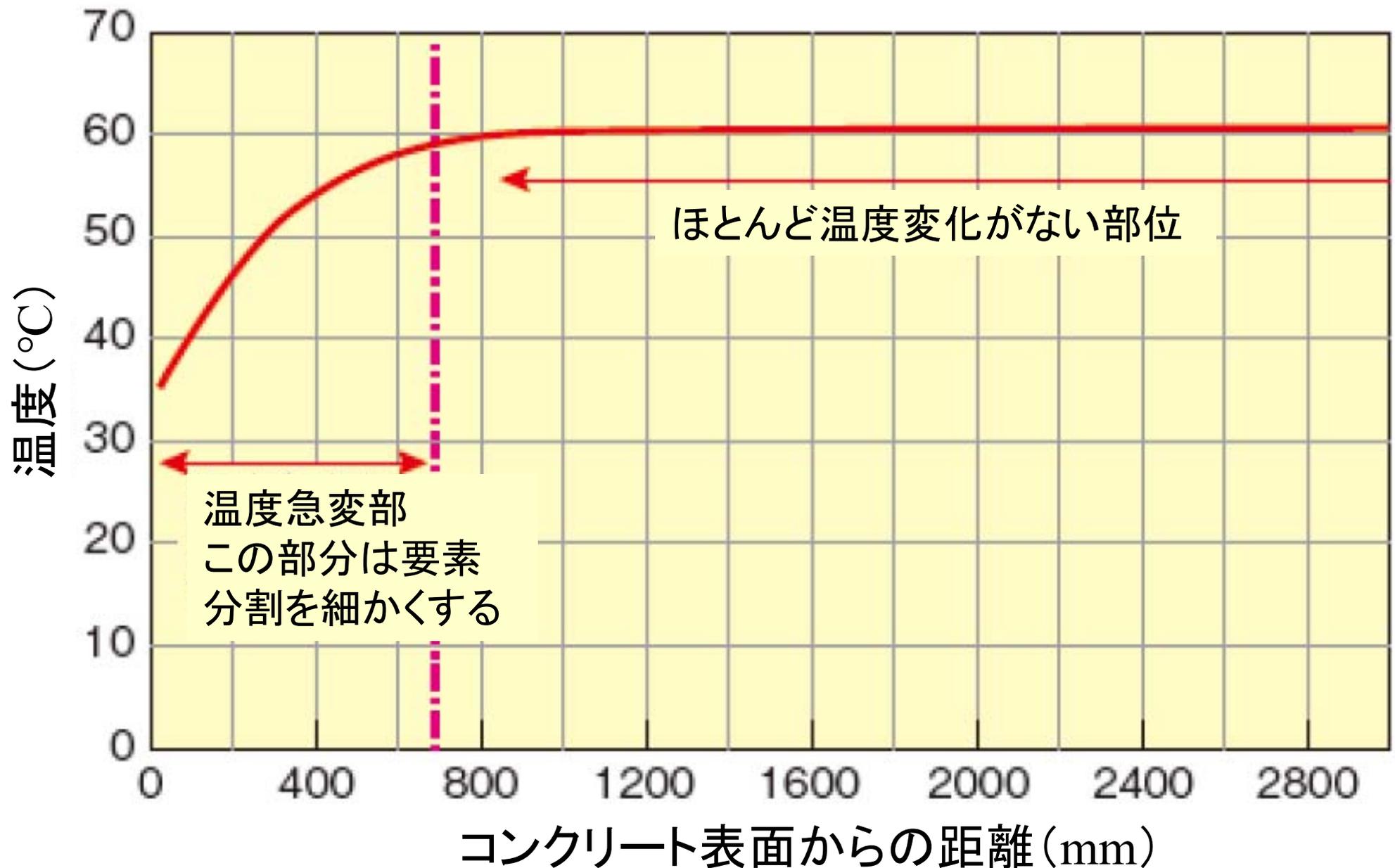
$$I_{cr}(t) = \frac{f_{tk}(t)}{\sigma_t(t)}$$

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度特性値

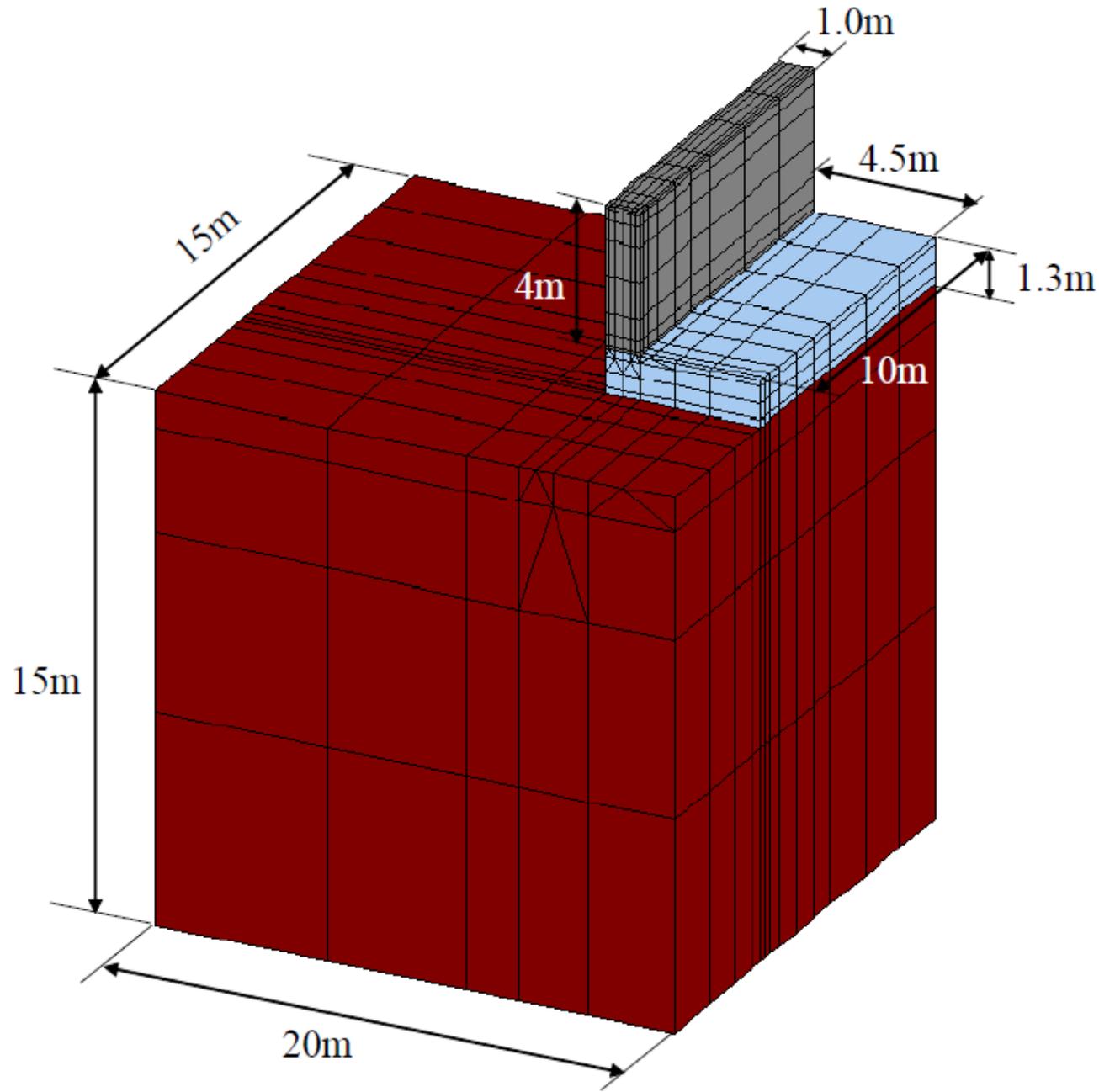
$\sigma_t(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート最大主引張応力度
(自己収縮を考慮した応力度)

ひび割れ指数は材齢によって変化するので一番小さくなる値を材齢を変えて求める。

温度応力解析で注意すべき点

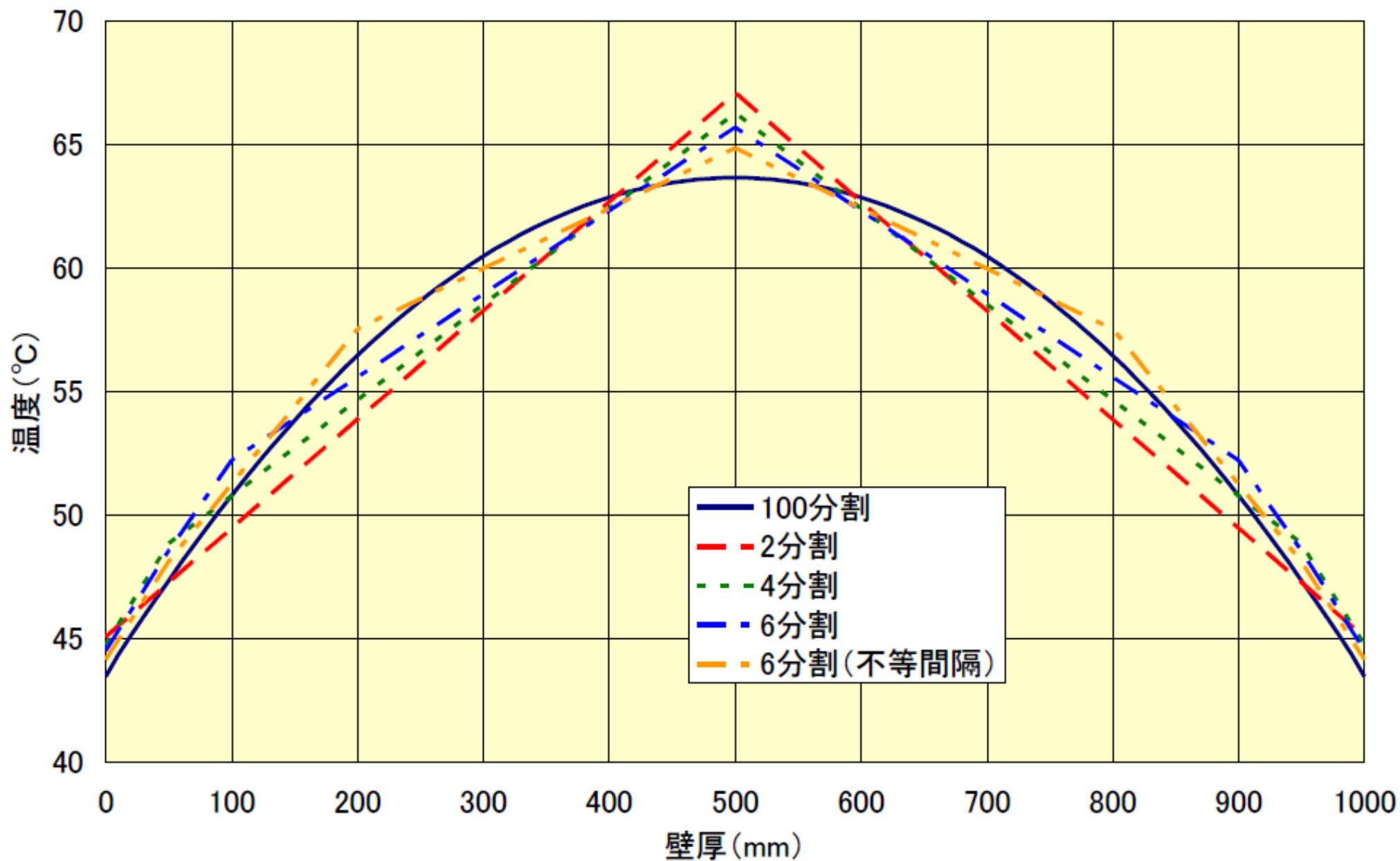


要素分割検討モデル

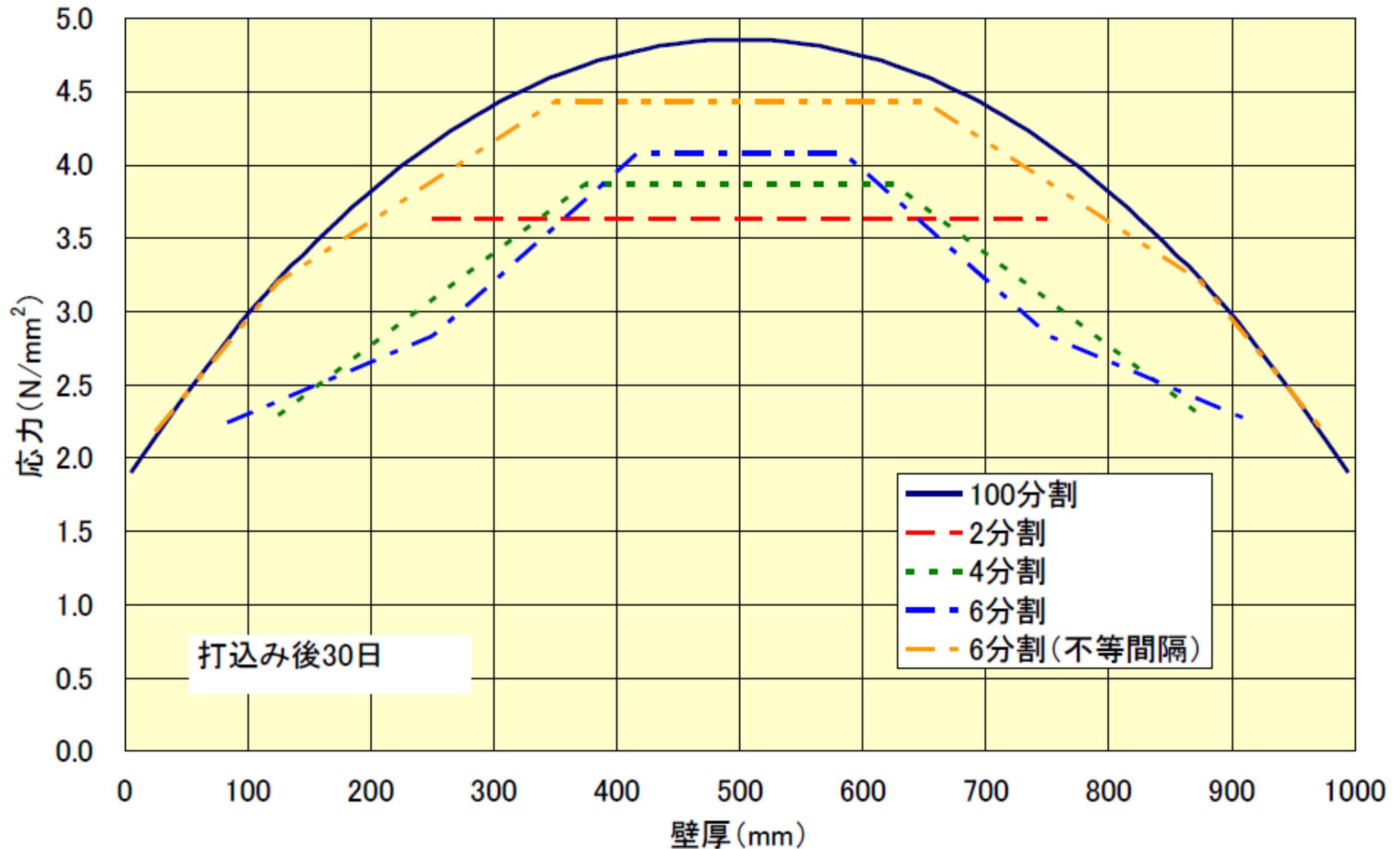


分割数と温度分布

48
of
60



分割数と応力分布



JCMAC3の主な特徴

構造物の建設時から供用までの間に、コンクリートに生じる初期ひずみ(温度/乾燥収縮/自己収縮/)による応力/変形を総合的に解析可能

- 乾燥収縮ひずみ: JCI-TC911推定式、CEB式に対応
- 自己収縮ひずみ: 示方書、制御指針に対応
- 膨張ひずみ: 制御指針に対応
エネルギー一定則に対応

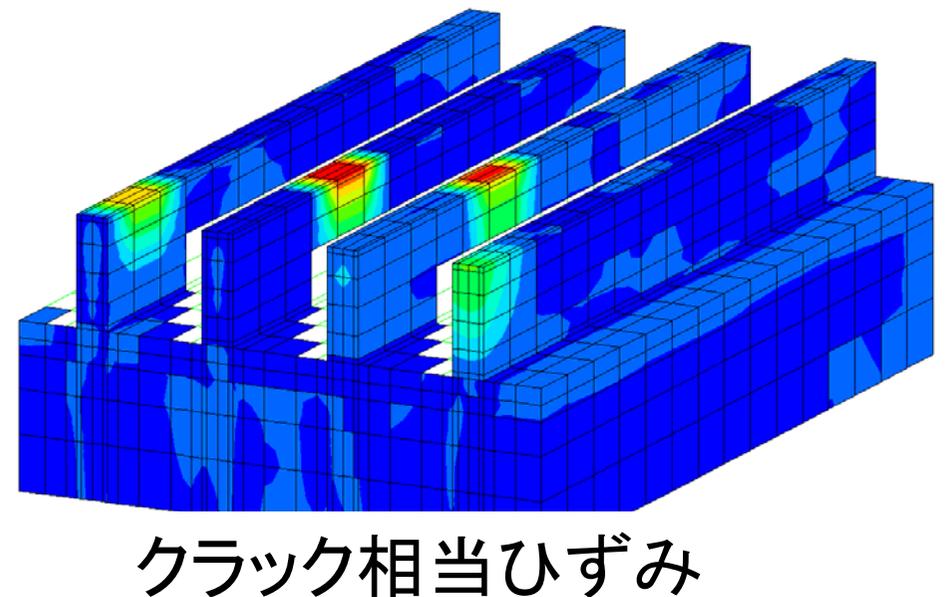
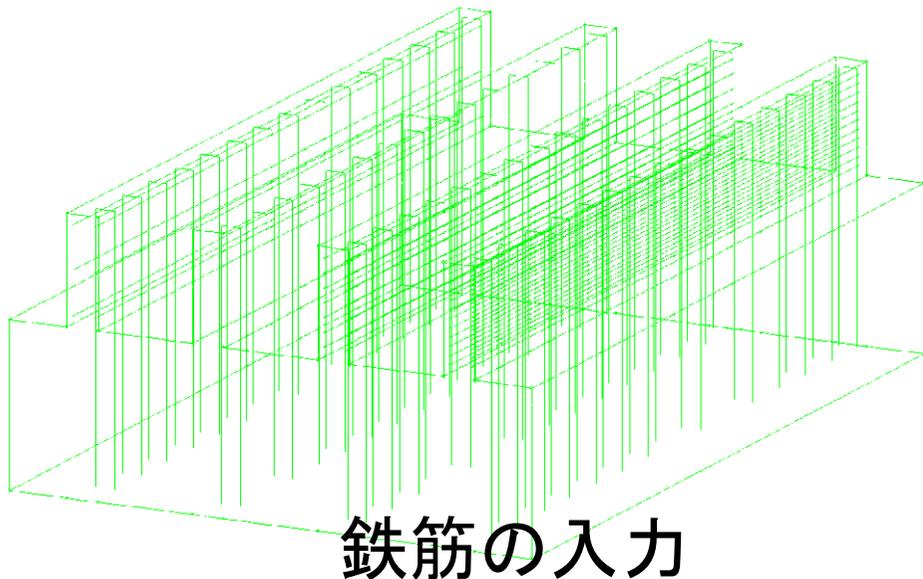
- ★境界面のすべり
- ★鉄筋の付着

今後取り組む課題

JCMAC3の主な特徴

ひび割れの幅、パターンの解析が可能

- 鉄筋の効果を鉄筋比という形で簡単に考慮
- 非線形構成則をコンクリートおよび鉄筋に導入
 - 分布ひび割れモデル(Smeared Crack Model)
 - 破壊エネルギーと軟化肢勾配
 - クラック相当ひずみ



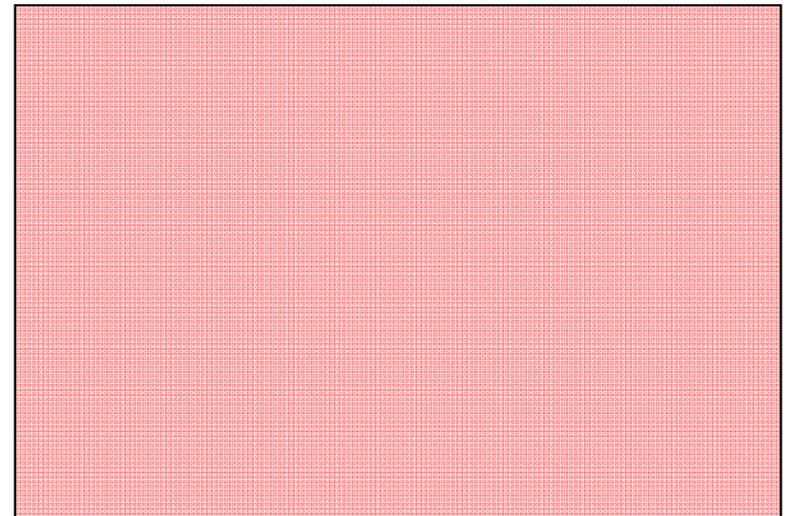
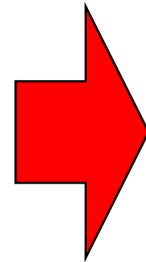
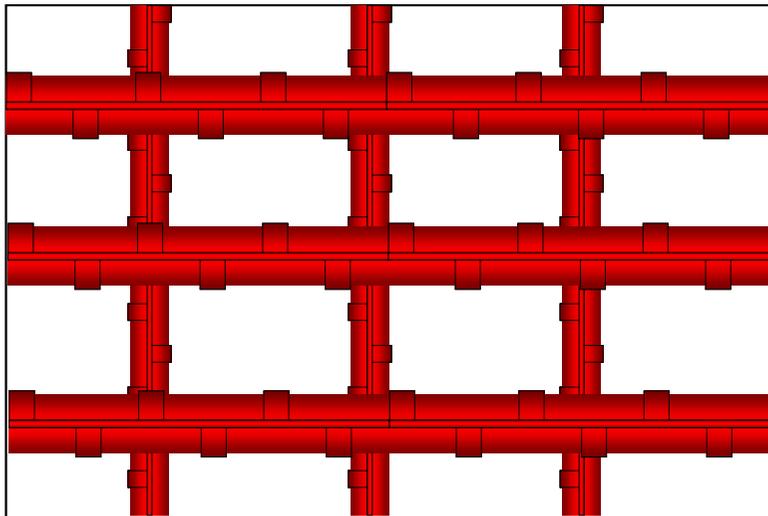
ひび割れ幅解析

- ひび割れによるひずみ軟化やそれに伴う応力再分配が客観的に自動的に考慮される
- 補強材の効果について明確に知ることができる
- ひび割れパターンおよびひび割れ間隔が陽に計算できる

ひび割れ幅解析

- ・ひび割れ発生前は連続体
- ・ひび割れ発生後は直交異方性モデル
- ・分布ひび割れモデルによりひび割れを表現
Smeared Crack Model

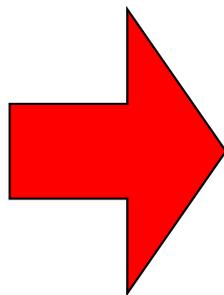
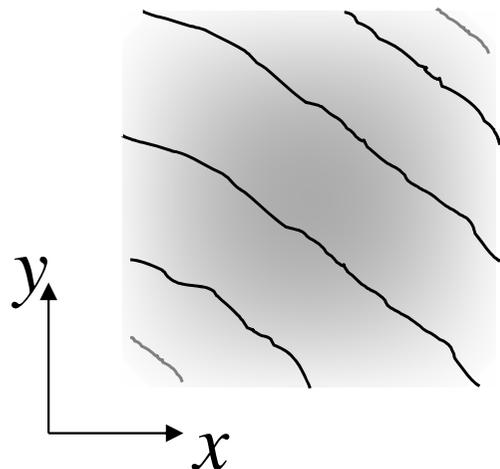
↓
クラック相当ひずみ



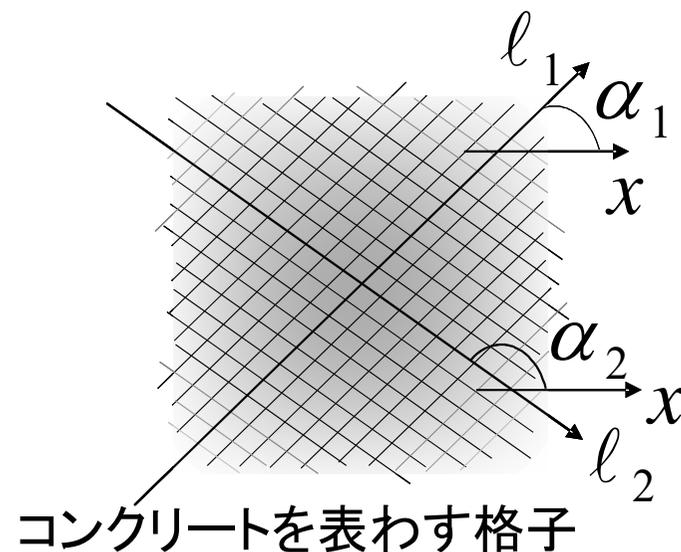
直交異方性モデル

- 構成則の記述が単純
- 収束性が極めて良い
- 鉄筋の影響も容易に導入可能

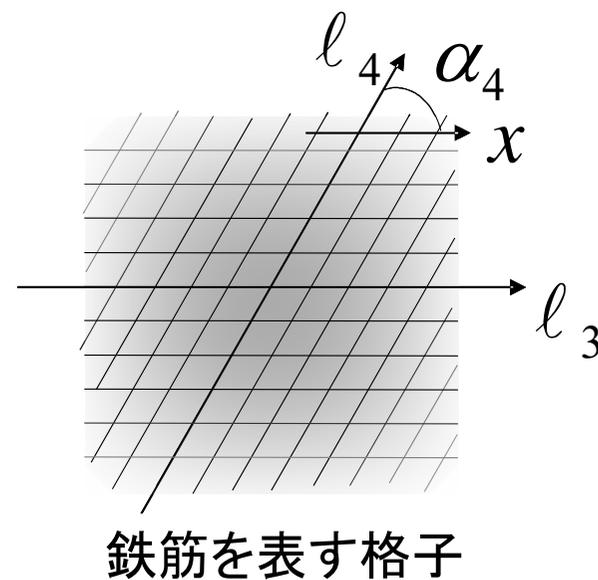
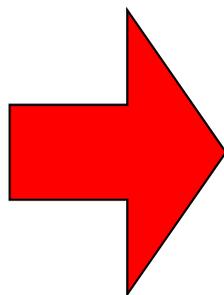
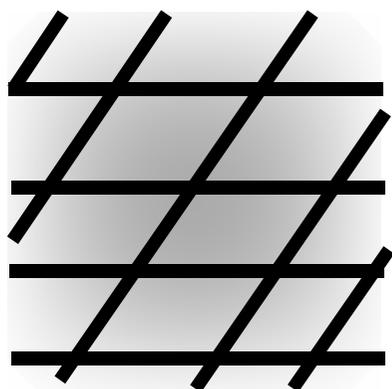
ひび割れ後のコンクリート



等価な格子に
置き換える



鉄筋



JCMAC3の主な特徴

効率の良いクリープ解析手法の導入

- クリープ : Rate type理論 (Dirichlet級数)

効率の良い数値解析法(連立一次方程式の解法)を採用

- 直接法 (Pardiso)
- 間接法 (RICCG法 Robust Incomplete Cholesky Cojugate Gradient)

九州大学 藤野清次 教授

Rate type理論に基づく増分型 クリープモデルの導入

クリープモデル(一軸)

$$\varepsilon^{ve} = \int_0^t \phi(t, \tau) d\sigma(\tau)$$

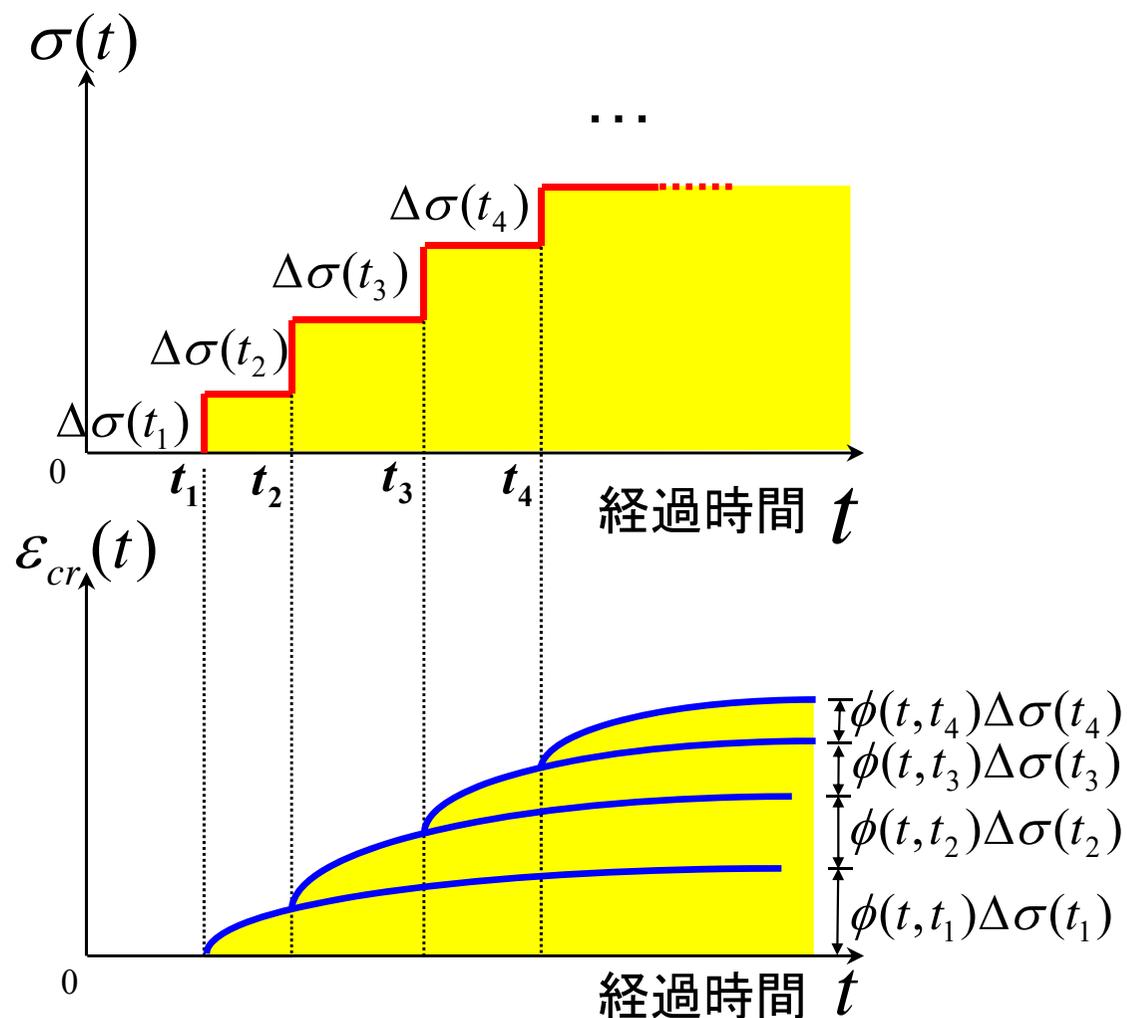
$\phi(t, \tau)$: クリープ関数

τ : 応力が作用する時間

Step by Step法
(重ね合わせ法)

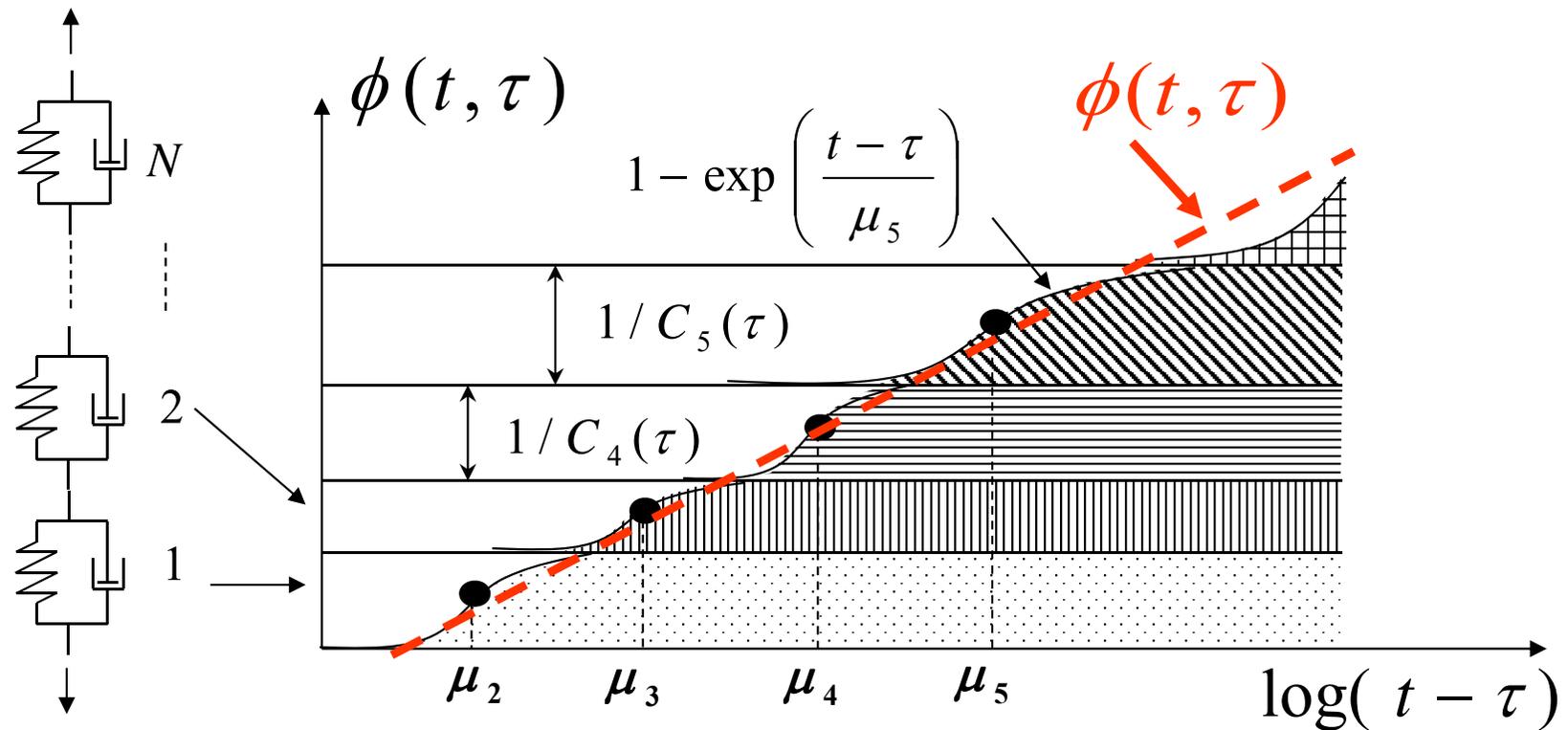


多くの記憶容量および計
算時間を必要とする



(Dirichlet級数)

クリープ関数 $\phi(t, \tau)$ を Kelvin Chain モデルで近似



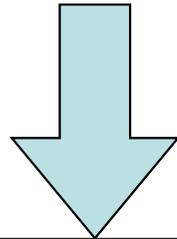
“全ステップ”ではなく“前ステップ”の情報のみで
クリープひずみ増分を計算することが可能

JCMAC3の機能

1. 温度解析
2. 湿気移動解析
3. 温度応力
 - ・乾燥収縮ひずみ
 - ・自己収縮ひずみ
 - ・膨張ひずみ
 - ・クリープ解析
4. ひび割れ幅解析
5. プリ/ポスト処理 (FORUM8)

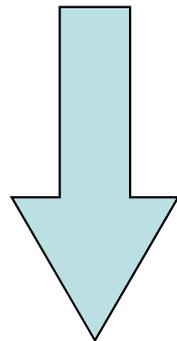
JCMAC3の構成

FEMIS (プリプロセッサ)



メッシュ分割、データ入力

JCMACソルバー (温度、湿気移動、応力)



温度解析 : **JCMAC3T**

湿気移動解析 : **JCMAC3H**

応力解析 : **JCMAC3S**

ひび割れ幅解析 : **JCMAC3C**

FEMOS (ポストプロセッサ)

結果出力、アニメーション等

JCMAC3モジュール

