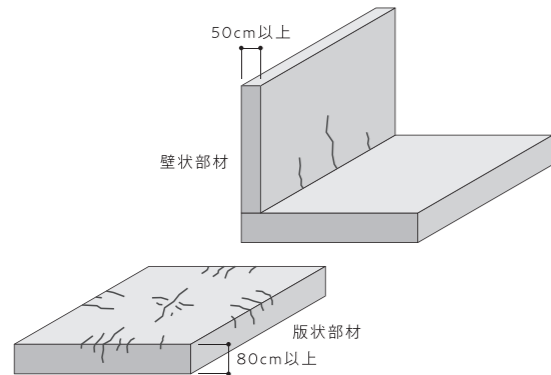


マスコンクリートの温度ひび割れ対策について (2022年版)

01 概要

コンクリート構造物の設計・施工に際しては、コンクリートの収縮やセメントの水和熱に起因する初期ひび割れが、構造物の所要の性能に影響しないことを確認する必要があります。特にマスコンクリートと言われる大断面の部材では、セメントの水和熱に起因する温度変化が顕著になり、美観性だけでなく、耐久性および使用性を損ねる貫通ひび割れの発生が懸念されます。このため、設計段階もしくは施工段階において温度応力解析を実施し、温度ひび割れの傾向と対策の検討を行っています。



マスコンクリートの定義の目安

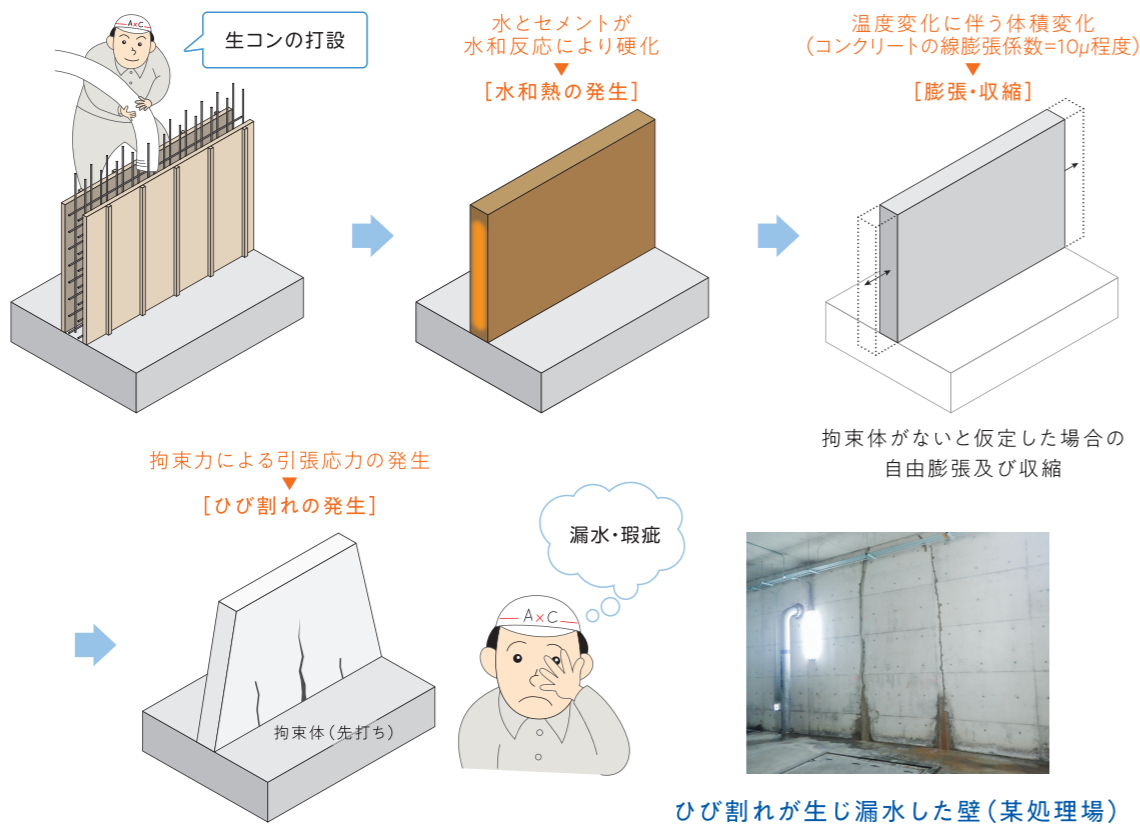
土木学会:コンクリート標準示方書*1

広がりのあるスラブ:厚さ80cm~100cm以上
下端が拘束された壁:厚さ50cm以上

日本建築学会:JASS5*2

マット状・柱状部材:厚さ100cm以上
壁状部材:厚さ80cm以上

02 温度ひび割れ発生のメカニズム

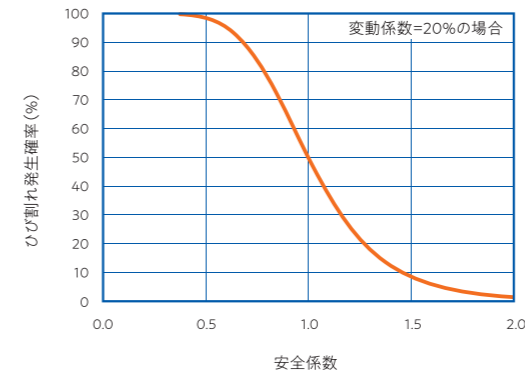


03 温度ひび割れの制御方法

温度ひび割れは、事前検討により予測が可能であり、「ひび割れ発生確率」もしくは「ひび割れ幅」により制御を行います。

1 ひび割れ発生確率による制御方法

ある時点におけるコンクリートの引張強度を同時点の引張応力度で除したものを「ひび割れ指数 I_{cr} 」といいます。ひび割れ指数が1.0以上あれば、理論上、ひび割れは発生しないことを示します。しかし、品質のばらつきや、境界条件の想定等を踏まえ、ひび割れ指数の安全率(安全係数)により、ひび割れ発生確率が関連付けられています。土木学会においては、下に示すように対策レベルに応じて目標値の設定を行うことができます。また、ある地方公共団体の下水道施設においては、別途、目標値が定められています。



対策レベル	ひび割れ発生確率	安全係数(参考目標値)
ひび割れの発生を防止したい場合	5%	1.65以上
ひび割れの発生を制限したい場合	15%	1.35以上
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	50%	1.00以上

安全係数とひび割れ発生確率の関係(変動係数=20%とする場合)*1

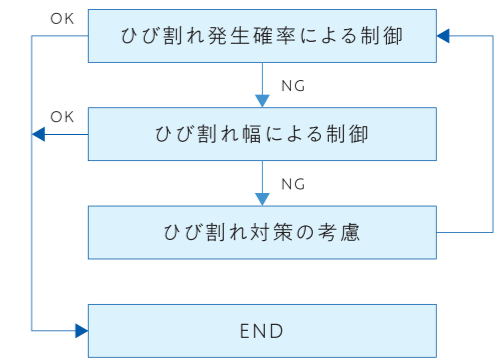
2 ひび割れ幅による制御方法

ひび割れ発生確率が目標値を下回った場合、ひび割れ幅が過大とならないように、ひび割れ幅により制御を行います。ひび割れ幅の目標値は耐久性・耐水性・美観性等に配慮し設定を行います。上下水道の分野では、水密性の確保を目的として、ひび割れ幅の目標値を0.20mm以下と設定することが一般的です。ひび割れ発生確率による目標値を満足させるためには、根本的な応力の発生原因(打設計画や材料種別の変更等)を改善しなければ対策が難しいため、経済性を考慮し、ひび割れ幅による制御方法の適用が一般的となっています。

要求される水密性の程度		高い水密性を確保する場合	一般の水密性を確保する場合
卓越する断面力	軸引張力	— ¹⁾	0.1
	曲げモーメント ²⁾	0.1	0.2

1) 断面力によるコンクリート応力は全断面において圧縮状態とし、最小圧縮応力度を0.5N/mm²以上とする。なお、詳細解析により検討を行う場合には、別途定めるものとする。
2) 交番荷重を受ける場合には、軸引張力が卓越する場合に準じることとする。

水密性に対するひび割れ幅の設計限界値の目安(mm)*1



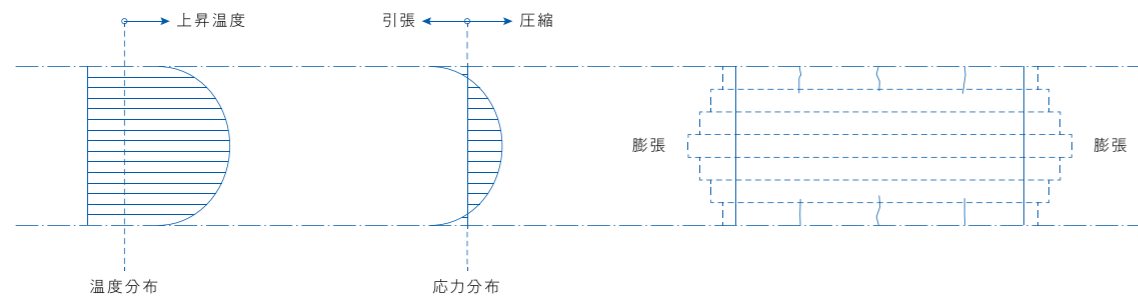
温度ひび割れの制御フロー

04 温度ひび割れ発生メカニズム (内部拘束と外部拘束の違い)

温度応力に起因するひび割れの発生メカニズムは、内部拘束もしくは外部拘束によるひび割れの2パターンに分類することができます。ひび割れが発生する原因を明らかにすることで、より有効な対策方法の検討が可能で、以下に、内部拘束および外部拘束によるひび割れ発生メカニズムを示します。

1 内部拘束によるひび割れ

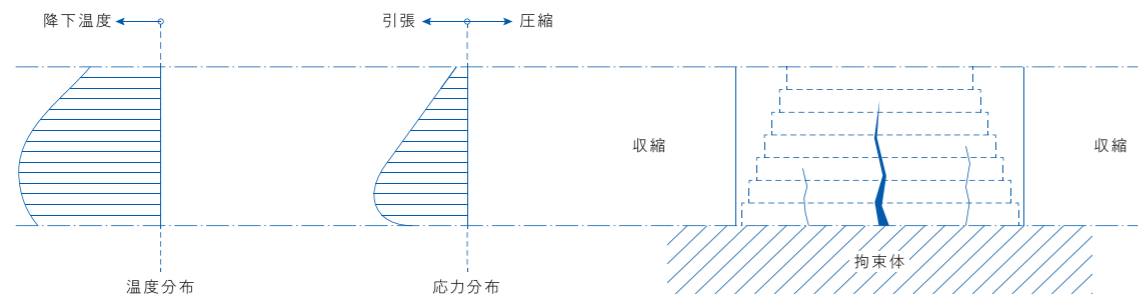
内外の温度差による膨張型のひび割れです。水和発熱により部材の温度が上昇しますが、外気に触れる表面部では熱が放散し中央部と比べて温度が低くなります。温度上昇に伴い部材は膨張しようとするが、中央部は表面部よりも温度の上昇が大きいため、膨張が拘束され表面部に引張力が作用することでひび割れが発生します。



内部拘束によるひび割れ発生メカニズム

2 外部拘束によるひび割れ

自由収縮を拘束されることで生じる引張型のひび割れです。水和発熱により上昇した部材の温度は、外気に熱が放散することで低下し最終的には外気温に漸近します。温度低下に伴い、部材は収縮しようとするが、地盤や既設コンクリートに拘束され、収縮できない分のひずみが引張力として部材に作用することでひび割れが発生します。



外部拘束によるひび割れ発生メカニズム

上下水道の分野では、水槽を間仕切る耐水壁や地下水に触れる外壁に対して水密性の確保が第一優先。上記のメカニズムを踏まえて、貫通ひび割れに着目した検討を行います。



05 ひび割れ幅算定式について

ひび割れ幅の算定方法として実用的によく用いられる3方法を示します。

1 修正統計的方法

ひび割れ幅の実測値に基づき、ひび割れ幅への相関が大きい要因を解析することで得られた最大ひび割れ幅の算定式です*4。打設計画に基づく諸条件他、温度解析に基づく温度降下量等から算定を行います。実状を踏まえたパラメータ設定により、有限要素解析との対応がよく、また、ひび割れ誘発目地によるひび割れ幅の低減降下も検討可能です。

$$Wc = K \times L \times R \times MAC + 0.09$$

$$MAC = -5.62 \times 10^{-4} - 2.19 \times 10^{-5} x_1 - 5.48 \times 10^{-4} x_2 - 1.77 \times 10^{-2} x_3 - 2.44 \times 10^{-2} x_4 + 1.54 \times 10^{-3} x_5 + 7.00 \times 10^{-5} x_6 + 8.13 \times 10^{-3} x_7 - 3.71 \times 10^{-3} x_8 - 6.21 \times 10^{-3} x_9 + 3.31 \times 10^{-4} x_{10} - 3.18 \times 10^{-3} x_{11}$$

ここに、 Wc :最大ひび割れ幅(mm), K :定数(0.92), L :長辺長(m),

R :外部拘束度(外部拘束度算定関*5による), x_1 :長辺長 L (m), x_2 :短辺長 H (m),

x_3 :外部拘束度 R , x_4 :鉄筋比 p (%), x_5 :スランプ(cm), x_6 :単位セメント量 C (kg/m³),

x_{7-9} :打設時期に関する定数, x_{10} :温度降下量(°C), x_{11} :壁厚(リフト高)(m)

2 ひび割れ指数と鉄筋比の関係式

ひび割れ幅の実測値に基づき、ひび割れ指数と鉄筋比の2つのパラメータを用いた最大ひび割れ幅の算定式(学会式)です。土木学会*1や日本コンクリート工学会*3でも紹介されている方法です。

パラメータが少なく簡便性はありますが、ひび割れ指数とひび割れ幅との相関関係が低いことが報告*5されており、適用範囲に注意が必要です。

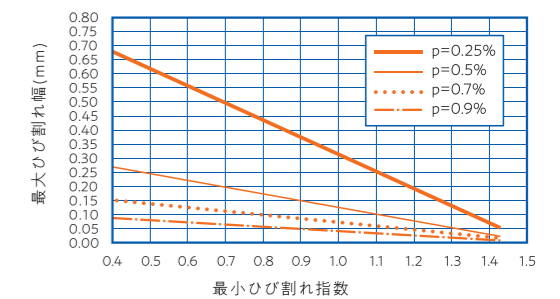
$$Wc = \gamma_a \left(\frac{-0.18}{p} + 0.12 \right) \times (I_{cr} - 1.54)$$

ここに、 Wc :最大ひび割れ幅(mm)

p :鉄筋比(%)であり、
適応範囲は0.25%~0.9%とする。

γ_a :温度ひび割れの幅を評価するための
安全係数であり、一般に1.0としてよい。

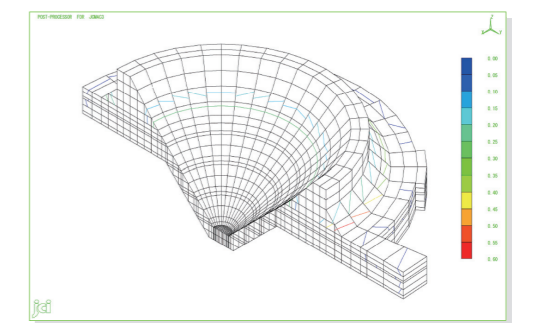
I_{cr} :最小ひび割れ指数



最大ひび割れ幅と最小ひび割れ指数との関係*1

3 有限要素解析

マスコンクリートの温度応力解析プログラムJCMAC3(日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト普及委員会)を用いて、ひび割れ幅解析(非線形解析)を実施することで貫通ひび割れのひび割れ幅を求めることができます。円形タンクや複雑な構造物形状、ひび割れ誘発目地の考慮など、より実状に近い解析検討が可能です。

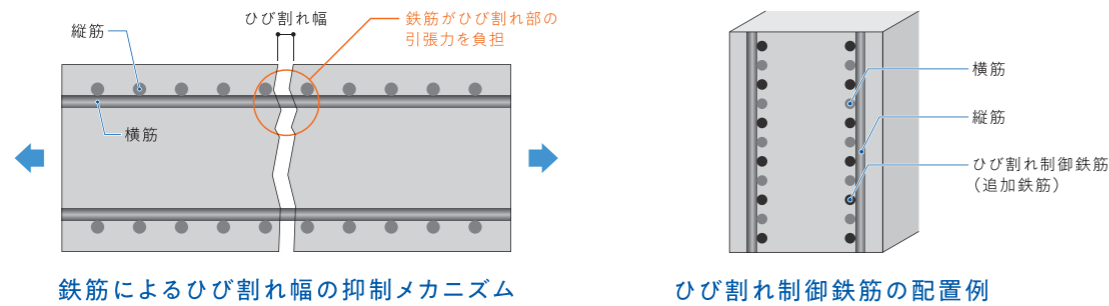


ひび割れ幅の解析例(消化タンク基礎)

06 ひび割れ対策について

1 ひび割れ制御鉄筋

ひび割れを横切る鉄筋は、ひび割れ発生後に引張力を負担しひび割れ幅の拡大を抑制する効果があります。壁部材の場合、外部拘束によるひび割れに対して横筋がひび割れ幅の拡大に抵抗します。ひび割れ制御鉄筋とは、目標とするひび割れ幅を満足させるために追加で配置する鉄筋を指します。水密性が要求される構造物に対してひび割れ誘発目地の設置をなるべく避けたい場合や、その他の対策との併用など、汎用性のある対策方法です。



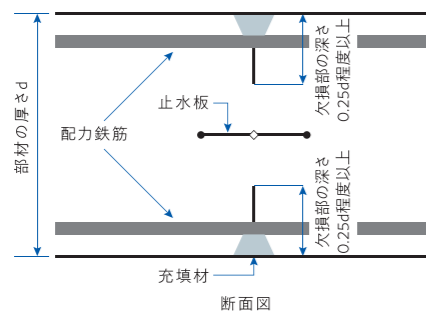
鉄筋によるひび割れ幅の抑制メカニズム

ひび割れ制御鉄筋の配置例

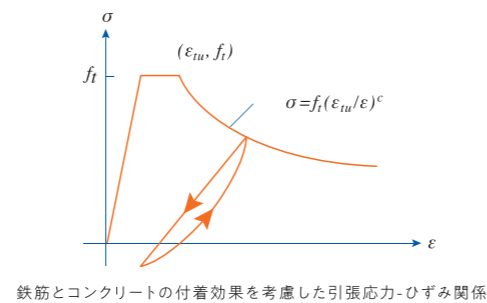
2 ひび割れ誘発目地

ひび割れ誘発目地を用いることで、計画的にひび割れを集中して発生させ、それにより生じる応力緩和により、対象部のひび割れ幅を低減させる効果があります。一方、水密性が要求される構造物においては、ひび割れ誘発部にエポキシ樹脂を注入するなどひび割れ誘発後に止水処置が必要となる他、目地以外の箇所にひび割れが発生するケースなど、十分な注意が必要です。土木学会では、断面欠損率が50%以上確保することで、確実に目地部にひび割れが生じるよう考慮する旨が記載されています。

ひび割れ誘発目地による対策は、ひび割れ誘発目地をモデル化し、ひび割れ発生後の応力緩和を考慮した有限要素解析により検討が可能です。あるいは、ひび割れ幅の改善効果を修正統計的方法*4により算定することができます。



ひび割れ誘発目地の例*1



ひび割れ発生後の応力緩和を考慮した引張軟化特性*1

3 その他のひび割れ対策

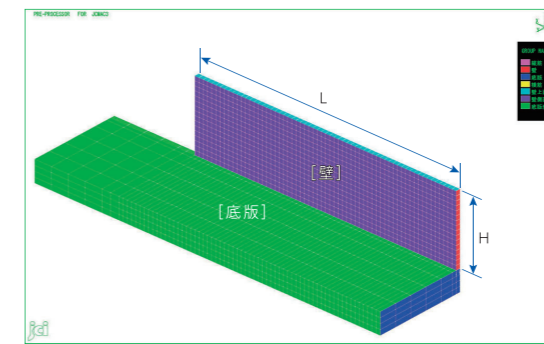
- 膨張材の使用(引張応力を低減させる)
- 低発熱セメントの使用(コンクリートの温度を低減させる)
- 保温養生を行う(温度変化を低減させる)
- 施工打継間隔を小さくする(外部拘束を低減させる)
- 打設リフト高さを大きくする(外部拘束を低減させる)
- ブレーキングの適用(温度変化を低減させる)

07 ひび割れ幅算定式に関する検討事例

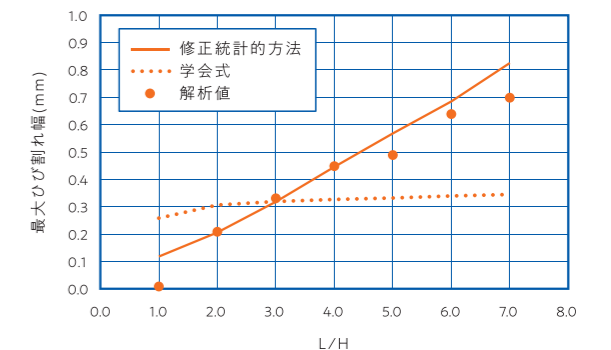
ここでは、[05]で紹介したひび割れ幅算定式を比較検討した事例を示します。底版に拘束された壁を対象とし、壁厚=50(cm)、壁高H=4.00(m)、鉄筋比=0.40(%)のモデルに対して、壁長Lを変動させることで、最大ひび割れ幅に与える影響を検討しました。L/H(壁長/壁高)は、部材の拘束度を示す指標であり、L/Hが大きいほど拘束力が大きく、ひび割れが生じやすいことが知られています。

限られた事例ではありますが、検討結果から以下のような傾向がみられました。ひび割れ幅算定式の適用においては、多角的な判断が必要と考えています。

1. 最大ひび割れ幅の解析値は、L/Hの増大に伴い、比例して大きくなる。
2. 修正統計的方法は、最大ひび割れ幅の解析値を概ね良好に評価できる。
3. ひび割れ指数と鉄筋比の関係式(学会式)は、最大ひび割れ幅に与えるL/Hの影響を評価できていない。



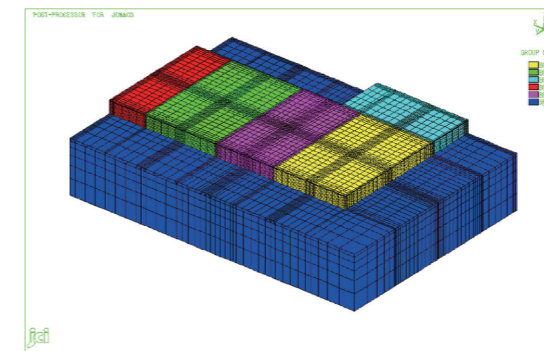
解析モデル



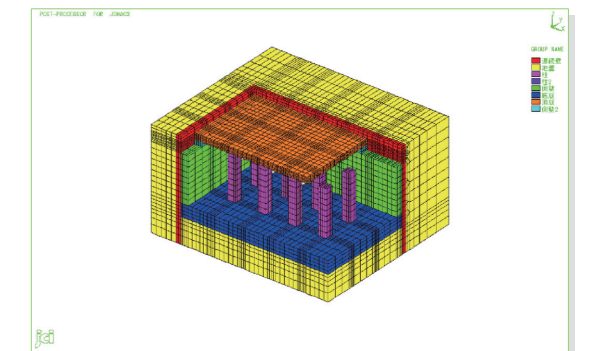
最大ひび割れ幅-L/H関係図

08 解析例

これらの解析例は、JCMAC3(日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト普及委員会)を使用して実施しています。



沈殿池底版の検討



配水池壁の検討

[参考文献]

- *1 土木学会:コンクリート標準示方書2022
- *2 日本建築学会:JASS5 2022
- *3 日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針2016
- *4 小野定:マスコンクリートの温度ひび割れ特性の数値化に関する検討,コンクリート構造物の体積変化によるひび割れ幅制御に関するJCIコロキウム 論文集,1990.8
- *5 植松,本多,小野:統計的方法による温度ひび割れ幅の計算式と温度ひび割れ制御法の提案,土木学会第68回年次学術講演会(平成25年9月),P475-476