

CHAPTER 1

ひび割れ対策は 本数と幅の制御が基本



CHAPTER 1-1

建築主の理解得ながら 有害なひび割れを制御

➡ 発生メカニズムを知って科学的に対処

多くの建築実務者の頭を悩ませる、コンクリートのひび割れ。
トラブルを防ぐには、発生メカニズムを理解したうえで、
有害なひび割れを効果的に制御する必要がある。

「前の現場ではひび割れが少なかったのに、この現場では多く発生してしまった」

建築実務者にとって、鉄筋コンクリート(RC)のひび割れ対策は頭の痛い問題の1つだ。同じように施工したはずなのに、なぜかひび割れの発生の度合いが違う。過去の経験や勘に頼りながら試行錯誤を繰り返しても、なかなか一定の結果を得られない。「どんなに頑張っても、ひび割れは避けられないもの」と、半ば諦めている人もいるかもしれない。

本書では、建築実務者の悩みを解決に導く一助として、経験や勘に基づく定性的な一般論よりも、誰もが理解できるように定量的なアプローチを重視し、ひび割れ制御の考え方を解説したい。

そのためには、まずひび割れ発生のメカニズムを正しく理解することが出発点となる。仕組みが分かれば、適切な対応策が見えてくるはずである。

図1 分岐点はどこにある？

【ひび割れ】

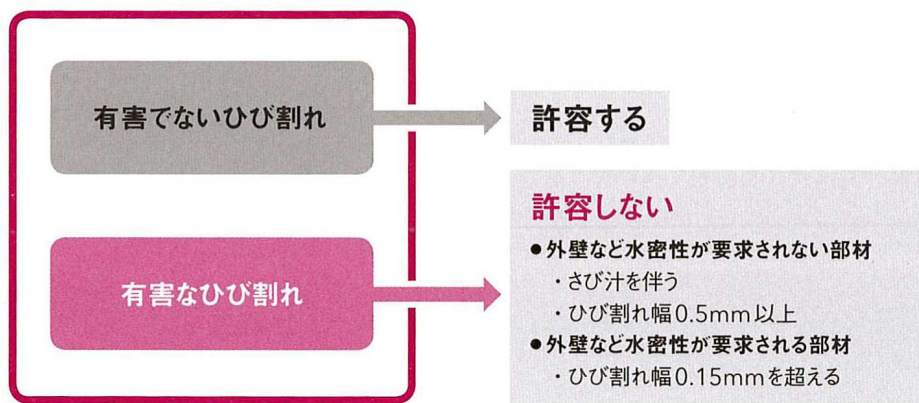


図2 健康管理とよく似た側面が

【咳などの症状】

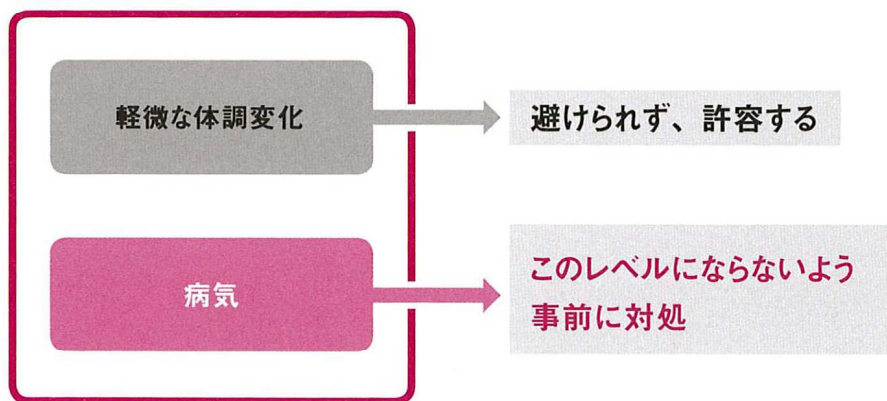
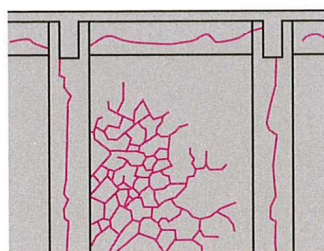
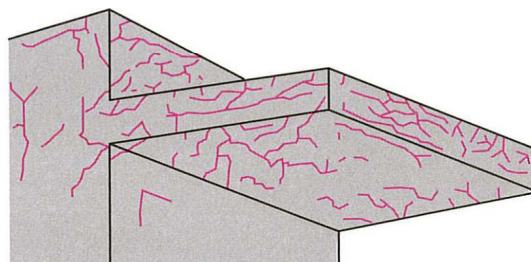


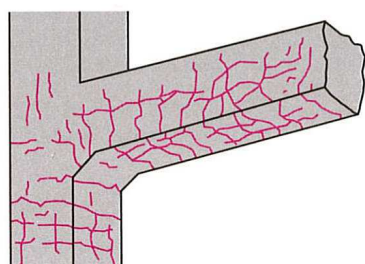
図3 疑問の余地のない有害なひび割れ



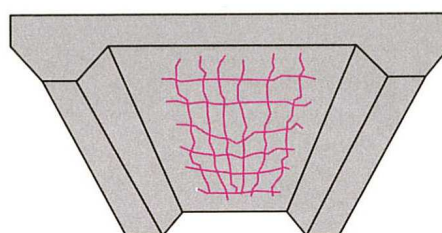
アルカリシリカ反応
(アルカリ骨材反応)



凍結融解サイクル
(寒冷地)

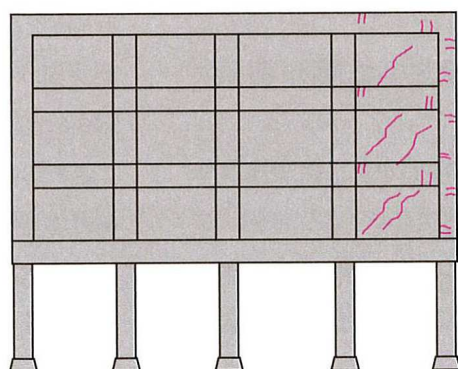


火災による火害



過大なたわみによるひび割れ

アルカリシリカ反応によるひび割れ、凍結融解サイクルによるひび割れ、過大なたわみや不同沈下に伴うひび割れなどは明らかに有害だ(資料: 図5 まで筆者)



不同沈下によるひび割れ

2つの要因をしっかり把握

ひび割れの発生理由はさまざまで、それらは互いに作用し合っている。発生したひび割れを観察しただけで主な原因を特定することは、熟練の技術者であっても難しい。

例えば、ひび割れの原因分析の方法を詳しく示した「コンクリートのひ

び割れ調査、補修・補強指針-2009」(日本コンクリート工学会)には、43もの基本的な要因が示してある。主な原因を特定するために様々な検討が必要であることが述べられている。

しかし、既に発生したひび割れの原因が多様で、かつ発生メカニズムが複雑であっても、建築物を設計・施工する実務にて共通して対処

すべき最も重要なひび割れの要因は、実は比較的限られている。

その主な要因とは、(1)乾燥や温度による収縮、(2)水和熱による膨張とその冷却から生じる収縮であることはよく知られている。収縮や水和熱はコンクリートを用いる限り避けて通ることはできず、多くの建築物でその制御が課題となる。このことから、本書

図4 ひび割れを健康管理に当てはめると…



(イラスト：岡田 丈)

咳は病気にかったときのサインの1つ



鉄筋コンクリート (RC) では、
ひび割れが不具合のサインの1つに相当



ただし、ひび割れ (咳) が、
不具合 (病気) そのものを意味するわけではない

では (1) と (2) を主として取り扱うことにする。

ひび割れ発生で鉄筋が機能

次に、ひび割れをどこまで防止できるかを考えてみたい。

もちろん、技術者にとってはひび割れの発生をゼロに抑えることが理想である。しかし、建設技術は残念ながらそのレベルに達していない。理由の1つは、ひび割れがコンクリートの圧縮強度の1/10、鋼材の降伏強度の1/100という少しの応力 (荷重) で発生するデリケートな現象のためである。

もう1つは、RC造そのものが、ひび割れの発生を許容して設計されていることである。RC造では、ひび割れが生じた時点で、鉄筋が有効に機能し始める。ひび割れが発生する前のRCの歪みは小さく、鉄筋の効果は小さい。ひび割れが発生した時点で、

コンクリートの負担分が移り鉄筋に大きな応力が発生することでその働きが有効となる。つまり、RC造そのものが、ひび割れ発生を前提とした構造物とすることもできる。

これらを踏まえ、本書では、ひび割れの発生を許容するが、有害でないレベルに制御することを基本的な方針とする (図1)。この考え方は、最近の日本建築学会などでも主流であり、現状の技術水準を勘案すると合理的と言える。

有害なひび割れの目安

この考え方をヒトの体調管理に例えて説明したのが 図2 である。体の体調は、日々の生活の中でどうしても避けられないが、われわれは事前に対処することで軽微なレベルに抑え、大きな病気になることを避けようとする。前述のひび割れの基本方針も、これ

とよく似ている。

ある程度のひび割れを許容するという基本方針に立つ以上、有害とされる範囲を明確にしておく必要がある。まず、法律上の規定で有害とされるひび割れは、(1) 幅0.5mm以上のひび割れ、(2) さび汁を伴うひび割れの2つである。

これらは、住宅の品質確保の促進等に関する法律に基づき定められた技術的基準 (建設省告示第1653号) に瑕疵の可能性が高いと記述されており、現状の一般認識に照らしても妥当なものと思われる。

これ以外で信頼の置ける資料としては、日本建築学会の「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」があり、要求性能ごとに定められたひび割れ幅の許容値が定義されている。例えば、外壁で水密性が要求される場合は、ひび割れ幅0.15mmが有

図5 不具合のサインを見落とさない



ひび割れは、少しの荷重で発生する

- ・コンクリートの圧縮強度の1/10
- ・鋼材の降伏強度の1/100 で発生



不具合のサインとして、
ひび割れが多く、かつ過大な幅が生じることが多い

不適切な設計や施工では
ひび割れが多い

害でない範囲の上限値となる。つまり、要求性能が耐久性ではなく水密性である場合には、より条件が厳しくなる。その他、明らかに有害なひび割れを図3に表す。例えば、アルカリシリカ反応によるひび割れ、凍結融解サイクルによるひび割れ、火害によるひび割れ、過大なたわみや不同沈下に伴うひび割れで、これらは疑問の余地なく耐震性など建築物の性能を阻害する。これらが発生した場合には抜本的な対処が求められる。

建築主の理解を求める努力を

しかし、前記の基本方針を実務において徹底するには解決すべき課題も多い。

最も大きな課題は、有害なひび割れの定義について、社会的なコンセンサスが必ずしも十分に得られていない点にある。次節で詳述するが、ひび

割れに関するクレームや訴訟が非常に多いという事実は、この課題が解決に至っていないことを示唆している。

建築主は「ひび割れ＝不具合や瑕疵」と考えがちで、有害であるものとそうでないひび割れを同一視することで、本来なら不必要的な紛争を生んでいる側面もあると思われる。

その一方で、建築実務者はひび割れを完全に防止できない点を謙虚に認めつつ、「ひび割れの発生を許容するが、それを有害でないレベルに適切に制御する」という基本的な方針に沿って、適切にひび割れを制御するとともに、基本方針を地道に発信し、建築主の理解を求めていくことも重要である。

そのためには、今後の重要な課題として、有害なひび割れの定義について、さらに精度を高める必要もあるだろう。上記に述べたように、有害なひび割れの定義は主としてひび割れ

幅で定められている。しかし、幅に加えてひび割れ本数についても、有害なものとする境界を定めれば、直感的に理解しやすい評価指標になると考えられる。

設計や施工での配慮が十分と言えない場合では、ひび割れ本数が増加する傾向が見られる。例えば、施工の場合には養生の不足、設計の場合には鉄筋量の不足などである。

図4や図5に表すように、ひび割れは容易に発生するが、これは不具合のサインとも考えられ、通常と比べて過大なひび割れ本数は、過大なひび割れ幅と同様に有害として制御すべき対象と思われる。ただし、幅に比べ、ひび割れ本数は施工や設計の条件により大きく異なるので、有害でないレベルを定めるには、多くの知見を必要とするだろう。

以上の前提を踏まえ、次節からひび割れ制御の理論と実践を解説する。

ひび割れ対策は 本数と幅に分けて対処

➡ 本数は誘発目地、幅は鉄筋比で対応

コンクリートのひび割れに対する建築主の目が厳しくなり、訴訟に発展するケースも珍しくない。なぜ、ひび割れが発生するのか。ひび割れ対策の意味や効果は何か。効果的な対策を講じるには、原因と対策をセットで考えることが重要になる。

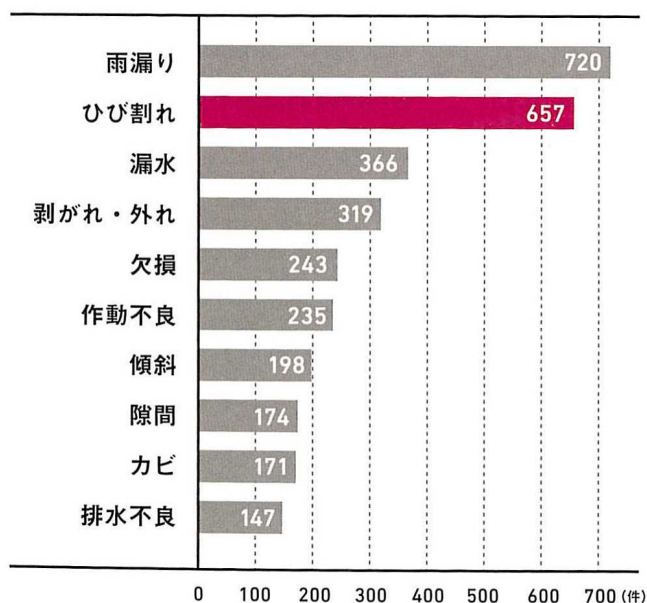
多くの建築実務者が、鉄筋コンクリート（CR）のひび割れ問題に真剣に取り組んでいるが、十分な成果を上げることができないケースも多い。その原因として、ひび割れがなぜ発生するか、ひび割れ対策の意味や効

果は何か、などについての理解不足が挙げられる。誤解に基づく間違っただけの対策により不具合を生じる事例すら見受けられる。このパートでは、合理的なひび割れ対策の考え方をなるべく平易に解説したい。

クレーム件数は第2位

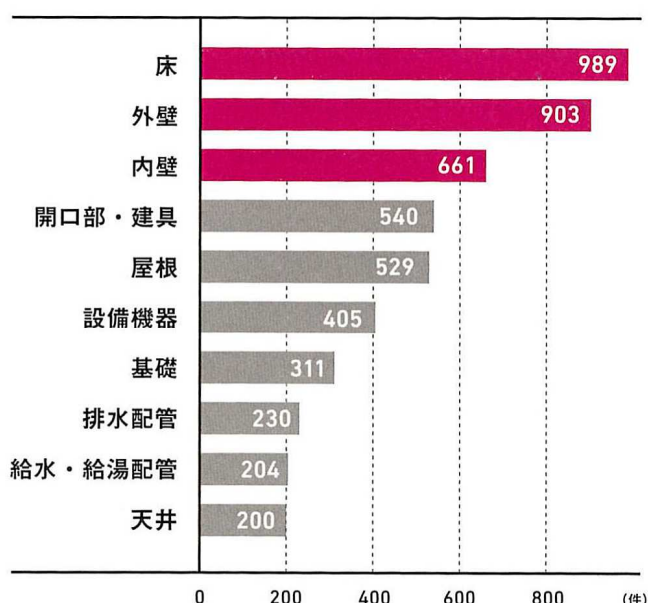
住宅リフォーム・紛争処理支援センターがまとめた資料によれば、不具合発生に伴って寄せられた相談のなかで、ひび割れは雨漏りに次いで2

図1 ひび割れの相談件数は雨漏りの次に多い



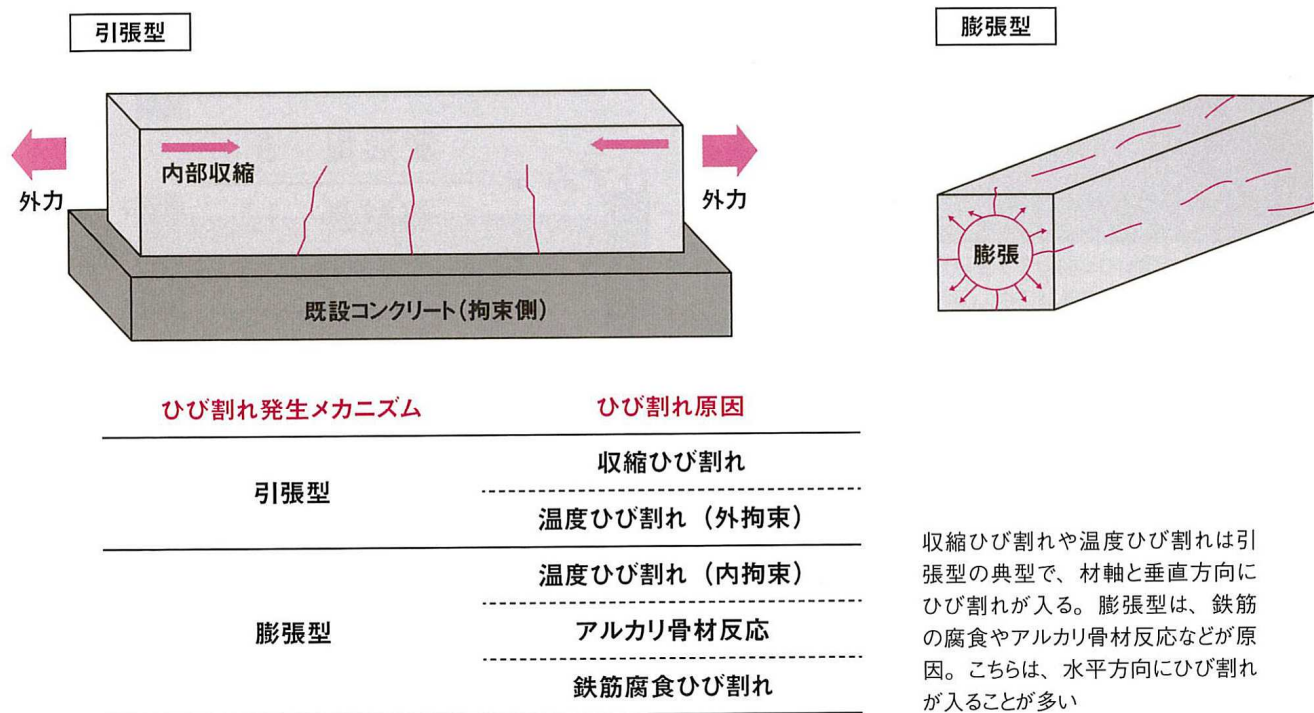
2009年度に住宅リフォーム・紛争処理支援センターに寄せられた不具合発生に関する相談の内容
(資料：右も住宅リフォーム・紛争処理支援センター)

図2 ひび割れが生じやすい部位で不具合が多い



寄せられた相談の内容を、不具合の発生場所に着目して分類した。床や外壁、内壁などひび割れが発生しやすい部位で不具合が多い

図3 発生メカニズムは「引張型」と「膨張型」が代表的



収縮ひび割れや温度ひび割れは引張型の典型で、材軸と垂直方向にひび割れが入る。膨張型は、鉄筋の腐食やアルカリ骨材反応などが原因。こちらは、水平方向にひび割れが入ることが多い

図4 引張型のひび割れに関する「3つの誤解」

1

鉄筋を多量に入ると、ひび割れを防止できる

収縮ひび割れや温度ひび割れの場合、コンクリート部材を多量の鉄筋で補強しても、ひび割れの発生を防止できない。ただし、ひび割れが発生した後に、ひび割れ幅を小さく抑制する働きがある。

2

単位水量さえ減らせば、ひび割れを防止できる

単位水量を少なくすることで乾燥収縮ひび割れが減少する傾向にはあるが、その効果は限定的。収縮ひび割れを防止することは難しいことが最近の研究から分かってきた。

3

マスコンを打つときだけ温度ひび割れが生じる

壁や床などの薄い断面の部材であっても、温度の影響は大きい。乾燥収縮だけでなく、温度の影響も考慮しなければ、適切なひび割れ制御は難しい。

番目に多い（図1）。部位別でみた不具合の相談件数も、ひび割れが生じやすい外壁や床に集中している（図2）。

こうしたひび割れ関連のトラブルを避けるためには、発生メカニズムや合理的対策の基本を、正しく理解することが重要である。

ひび割れの発生メカニズムには様々な原因があるが、実務で問題と

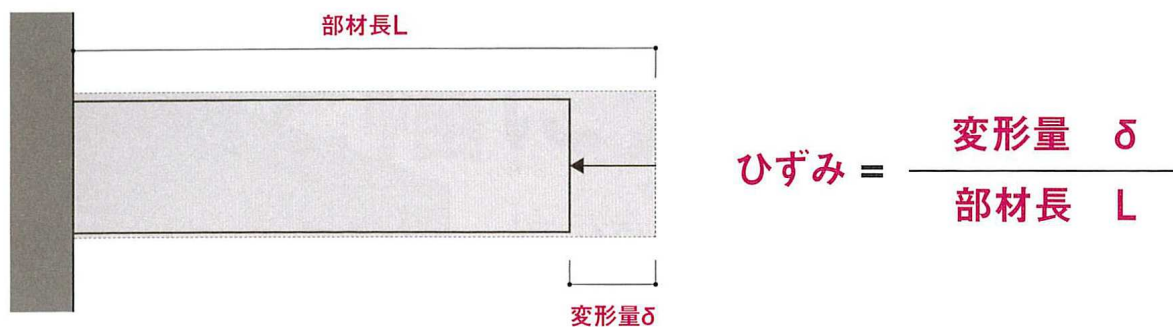
なるのは「引張型」と「膨張型」のいずれかである（図3）。収縮ひび割れや温度ひび割れは引張型で、材軸に垂直方向にひび割れが入る。一方、鉄筋の腐食やアルカリ骨材反応が原因となるのが膨張型で、これは材軸方向にひび割れが入ることが多い。ここでは、現場で最も多く発生し、対策が難しい引張型に力点を置いて説明したい。

解いておきたい3つの誤解

実は、この引張型のひび割れに関して、多くの建築実務者が誤解していることがある（図4）。

1つは、大量に鉄筋を入れるとひび割れを防止できるという誤解である。ひび割れ対策として、ひび割れ防止筋と称する鉄筋を開口部隅などに入れることがある。しかし、ひび割れ発

図5 ひび割れの制御に欠かせない「ひずみ」の概念



要点 1 コンクリート工学の分野ではひずみを μ （マイクロ $=10^{-6}$ ）で表す。

要点 2 ひずみは「比」であって、単位はない。

要点 3 μm （マイクロメートル $=10^{-6}\text{m}$ ）は長さの単位。それと「 μ 」は違う。

例題 部材長10mのコンクリートのひずみが 100μ （マイクロ）だった。
このときの変形量は何 mm か。

解答 10m をミリに換算すると $10 \times 10^3 = 10^4$ (mm)。
100 μ の「 μ 」を分解すると $10^2 \times 10^{-6} = 10^{-4}$
これを上の公式（変形量 = 部材長 $\times$ ひずみ）に代入すると…
変形量 $= 10^4$ (mm) $\times 10^{-4} = 10^{4-4} = 10^0 = 1$ → 答えは 1 (mm)

実際のコンクリートのひずみは、数百マイクロのレベルになることが多い。本書を読み進めるうえで、ひずみという言葉が何度も登場するのでよく理解してほしい

生の有無は、鉄筋とほとんど関係がない。鉄筋は、ひび割れを防止することはできず、ひび割れが生じてから機能する。つまり、鉄筋はひび割れの幅を小さくすることはできる。その意味において、鉄筋は確かに重要な役割を担っている。

2つ目は、コンクリートの単位水量を極力小さくすればひび割れを防げるという過信である。引張型の収縮ひび割れの主因であるコンクリート乾燥

収縮は、確かに単位水量を減らすことで小さくなる傾向がある。しかし、その減少幅は限定的で、単位水量の制限だけでひび割れを顕著に減少させることは難しい。

3番目の誤解は、ひび割れで温度が問題になるのは、基礎梁のような大きな断面の部材だけだという考えである。確かに、大断面の部材は、セメントが硬化する段階で生じる水和熱に起因する温度ひび割れが生じやす

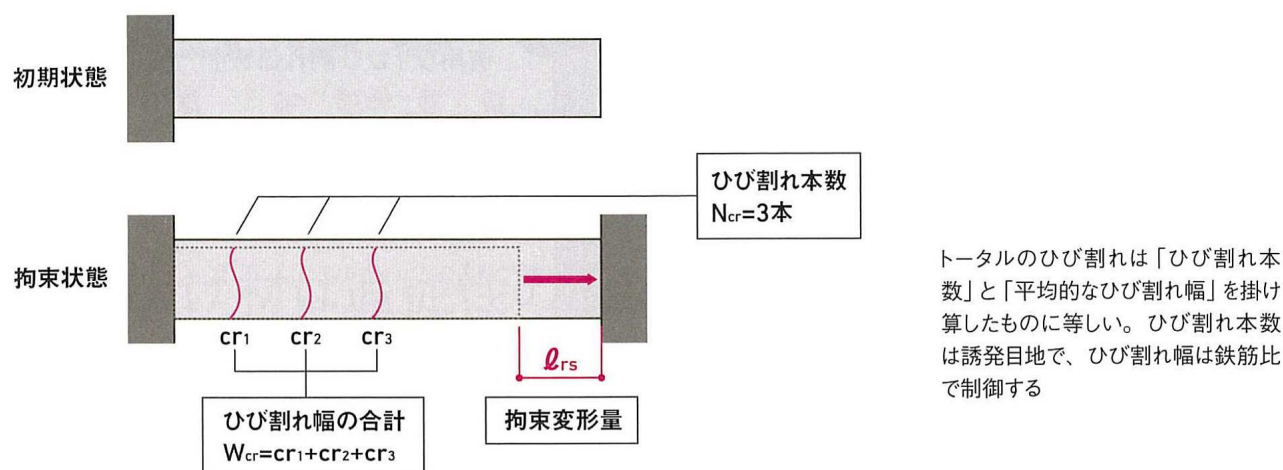
い。しかし、壁や床の薄い部材でも、地下に接する場合などでは、温度が重要な要因となり、ひび割れ発生に大きな影響を与えるので要注意だ。

本数制御に有効な誘発目地

次に、ひび割れのメカニズムを理解するうえで重要な「ひずみ」の概念について説明する（図5）。

ひずみは、変形量（単位：長さ）を

図6 ひび割れは「本数」と「幅」に分けて考える



$$\text{拘束変形量} = \text{ひび割れ幅の合計} = \text{ひび割れ本数} \times \text{平均ひび割れ幅}$$

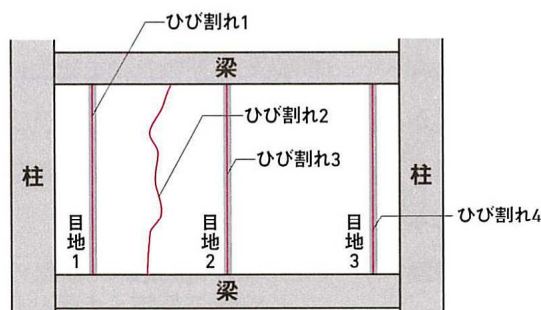
ひび割れ本数

ひび割れ幅

ひび割れ制御の原則 1

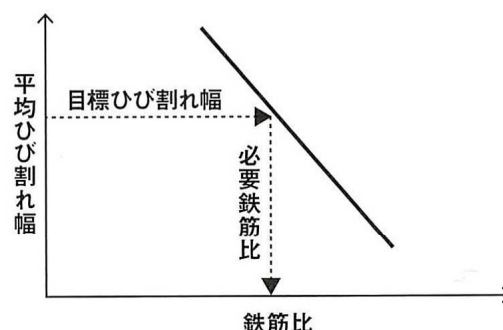
$$\text{ひび割れ本数} \leq \text{目地本数}$$

[失敗例] ひび割れ本数 = 4 > 目地本数 = 3



ひび割れ制御の原則 2

ひび割れ幅は鉄筋比大で小さく



部材長 (単位: 長さ) で割った値で、単位を持たない「比」である。ひずみは非常に小さな値なので、 10^{-6} を乗じた値で表現することが多い。その場合、数字の後に μ (マイクロ) という表記をつける。これは長さの単位である μm (10^{-6}m) とは異なるので注意したい。例えば、長さ10mのコンクリート床部材に 100μ のひずみが生じたときの変形量は1mmとなる。

以上の予備知識をベースとして、

ひび割れの具体的な対策について解説する。引張型のひび割れを制御するには、ひび割れの本数を誘発目地で制御し、ひび割れの幅を鉄筋比で制御するのが原則である (図6)。

引張型のひび割れは、打設された初期状態のコンクリートが乾燥や温度低下によって収縮する際、既設のコンクリート (拘束体) によって拘束され、引張応力が発生することに起因する。コンクリート自体は収縮しようと

するが、拘束体がそれを許さないのので、コンクリートは引張力を受ける。

このとき、拘束されて生じる引張側の変形を拘束変形量と呼ぶ。ひび割れは、拘束変形量の分だけ生じると考えてよい。拘束変形量と、生じたひび割れ幅の合計値は概ね等しくなる。従って、平均的なひび割れ幅に、ひび割れ本数を掛け算すれば、拘束変形量にほぼ等しくなる (ただし、クリープと弾性変形を簡略化のため無視)。

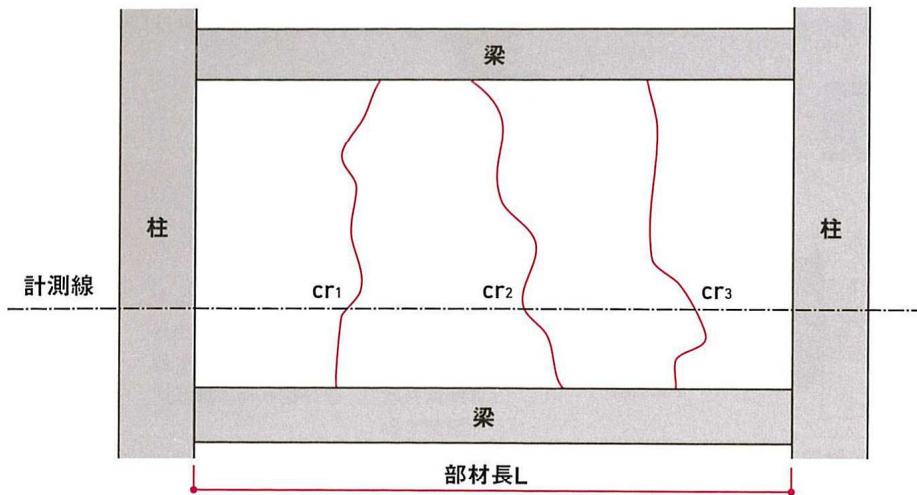


図7

ひび割れの客観評価に
有用な「ひび割れ係数」

$$W_{cr} = cr_1 + cr_2 + cr_3$$

$$\text{ひび割れ係数} = W_{cr} / L$$

ひび割れ係数

0 ~ 20 μ以下
30 ~ 50 μ程度
50 ~ 70 μ以下

ひび割れ評価

ひび割れ少ない	→	問題には至らない
ひび割れ多少発生	→	必要に応じ対処
ひび割れ多発	→	クレーム発展の恐れ

ひび割れ係数は、累加したひび割れ幅 W_{cr} (図中の $cr_1 + cr_2 + cr_3$) を部材長さ L で割ったものである

(資料：小柳光生・坂本寿、日本建築学会大会梗概集、p277 ~ 278、2007)

このことから、ひび割れは、ひび割れ本数と平均ひび割れ幅を制御すればよいとわかる。

ひび割れ本数は、目地本数と関連する。ひび割れ本数が、目地本数より少なければ、全てのひび割れは目地に生じるので問題ない。つまり、(ひび割れ本数) ≤ (誘発目地の本数) とすることが重要である。

一方、平均ひび割れ幅は、鉄筋比が大きいと小さくなる。目標のひび割れ幅 (例えば0.5mm) に対して必要な鉄筋比を決めればよい。

覚えておきたいひび割れ係数

最後に、ひび割れ発生状況の評価方法について述べる。発生時には、ひび割れ幅とひび割れ本数の発生度合いを客観的に評価することが重要

である。ひび割れ幅については比較的明快で、前節でも述べたように各ひび割れの幅が0.5mmを超える場合には瑕疵の可能性が高いとの判断が、旧建設省告示第1653号に明記されている。しかし、後者のひび割れ本数については、普遍的な指標と判断基準がなく、多い少ないを主観的に議論しがちである。

幅と本数を含めた客観的な評価をするには、「ひび割れ係数」が1つ

の有効な指標となる(図7)。ひび割れ係数は、部材表面に引いた直線に沿ってひび割れ幅を累加していくことで得られる。累加したひび割れ幅を部材長さで除したものがひび割れ係数である。

ひび割れ係数が、実際の建物で20μ以下なら、ひび割れは少なくクレームになる可能性は低い。逆に70μを超えるとひび割れが多くクレームのリスクが大きくなると言われている。

ここがポイント

ひび割れ制御は「**本数**」と「**幅**」に分けて考える

「**本数**」は**誘発目地**で、「**幅**」は**鉄筋比**で制御する

ひび割れ係数は、ひび割れ評価の有力指標の1つ

CHAPTER 1-3

有害なひび割れを 仕上げ材でカバー

➡ 仕上げ材は追従性の高いタイプを賢く選択

有害なひび割れを、仕上げ材の有効活用でカバーできる場合がある。

ポイントはひび割れへの追従性が高い材料を選択すること。

仕上げ材のなかには、1mmを超えるひび割れ幅に追従するものもある。

ここでは、適切な仕上げ塗り材を活用することで、有害なひび割れをカバーする方法を紹介する。

多くの建築物の表面には仕上げ材があり、鉄筋コンクリート(RC)躯体のひび割れを直接目にすることは比較的少ない。つまり、ひび割れの不具合は、仕上げ材の有効活用によって予防できるものが実は多い。今回は、

有害なひび割れとは何かを把握し、その対処方法について述べる。

外壁は0.15mm超で有害

まず、これまでも触れてきた有害なひび割れの定義について詳しく説明する。**図1**は国土交通省告示1653号の抜粋で、瑕疵とひび割れの関係

を明示したほぼ唯一の公的資料である。

告示には、瑕疵の可能性が高いひび割れとして、幅0.5mmを超えるものと、さび汁を伴うものが明記してある。告示の対象範囲は住宅だが、住宅以外でもこの技術的基準が援用されることが多く、前記2点に該当しない範囲にひび割れを制御すること

図1 ひび割れと瑕疵の関係

仕上げの種別	レベル	ひび割れの状況	耐力上主要な部分に 瑕疵が存する可能性
湿式による 仕上げ	1	レベル2およびレベル3に該当しないひび割れ	低い
	2	仕上げ材と構造材にまたがる幅0.3mm以上0.5mm未満のひび割れ	一定程度ある
	3	(1) 仕上げ材と乾式の下地材にまたがるひび割れ	高い
		(2) 仕上げ材と構造材にまたがる幅0.5mm以上のひび割れ	
構造材による 仕上げ	(3) さび汁を伴うひび割れ		
	1	レベル2およびレベル3に該当しないひび割れ	低い
	2	幅0.3mm以上0.5mm未満のひび割れ	一定程度ある
	3	(1) 幅0.5mm以上のひび割れ	高い
		(2) さび汁を伴うひび割れ	

ひび割れの状況と瑕疵の関係。構造材の仕上げの場合、幅が0.5mm以上か、さび汁を伴うひび割れは、瑕疵の可能性が高い

(資料：国土交通省告示1653号をもとに筆者が作成)

【図2】建物部位や要求性能別に許容ひび割れ幅を定義

部位	部材	許容値		有害なひび割れ幅
		防水性	耐久性	
屋外	壁	0.15mm 以内	0.3mm 以内	0.15mmを超える範囲
屋内	壁	—	0.5mm 以内	0.5mmを超える範囲
	床	—	0.5mm 以内	0.5mmを超える範囲

外壁のひび割れ幅の許容値は、防水性の観点から0.15mm以内と厳しい
(資料：日本建築学会の資料をもとに筆者が作成)

が重要である。

有害なひび割れの幅については、日本建築学会の資料が参考となる(【図2】)。建物に要求される性能や、部位別に許容できるひび割れ幅が示されている。外壁については防水性と耐久性が要求されるが、防水性は漏水防止の観点から非常に厳しい基準が設定され、許容値は0.15mm以下である。耐久性上の許容ひび割れは0.3mm以下なので、外壁では防水性が優先され0.15mmを超えるひび割れは有害となる。

屋内の内壁、床については、耐久性確保の観点から鉄筋の腐食防止が求められるが、環境が屋外ほど厳しくなく許容値は0.5mmである。

ひび割れ誘発目地を設置

次に、有害ひび割れに対処するときの考え方について述べる。

第一の対策である目地の設置は、前節で述べた通り、ひび割れ本数≤目地本数とすれば、ひび割れの発生を回避できる。この式は、ひび割れ間隔≥目地間隔と置き換えて考えてもよい。一般に、望ましい目地の設置

間隔は一般壁で3～4m以下、パラペットや庇では、1.5m程度以下であることが分かっている。

なぜ部位によって、必要な目地間隔が異なるのだろうか。これには、前節で述べた拘束度の理解が欠かせない。例えば、空中にコンクリートを打設すると仮想した場合、壁部材は拘束がないので自由に収縮変形できると考えられる(【図3】上)。

ところが、大きな基礎梁上に打設した同一の壁部材は、断面が大きく変形しない基礎梁に強く拘束され自由に収縮できない。そのため、大きな拘束変形を受けることになる(【図3】中)。これに対し、小さな梁の上に打設した同一壁部材は、相対的に梁よりも壁のほうが大きく、壁は梁から弱い拘束しか受けない。その分、拘束変形も小さくなる(【図3】下)。

パラペットはひび割れが多い

「拘束変形量」は「ひび割れ本数」と「平均ひび割れ幅」の積で求められる(1-2の【図6】参照)。従って、同一部材の壁に発生する平均ひび割れ幅が同じと仮定すると、【図3】中のケー

スではひび割れ本数が多くなるので、目地間隔を狭くする必要がある。【図3】下では、ひび割れ本数が少ないので目地間隔を広くしてよい。

以上の理論を、通常の壁部材とパラペットのひび割れ防止に広げて考える(【図4】)。ここでは、壁もパラペットも同一断面の梁に拘束されていると仮定する。パラペットは梁に対して断面が相対的に小さいため、梁から大きな拘束力を受ける。このため、パラペットに生じるひび割れの本数が多くなるので、目地の間隔は狭くする必要がある。一方、通常の壁部材は、梁よりも相対的に断面が大きいので、梁からの拘束力は小さい。その分、ひび割れ本数は少ないので、目地間隔を広く取ることができる。

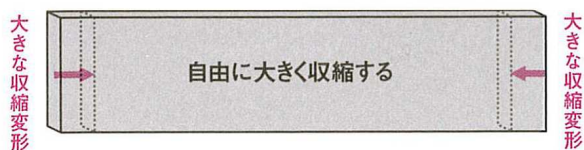
1mm超の追従性持つ仕上げ材

次に、第2の有害ひび割れ対策として仕上げ材の活用を考える。

ポイントは、仕上げ材のひび割れ追従性である。優れた追従性を有する仕上げ材を用いると、ひび割れ幅が変化しても雨水に対する防水性が確保され、鉄筋腐食の原因となる水

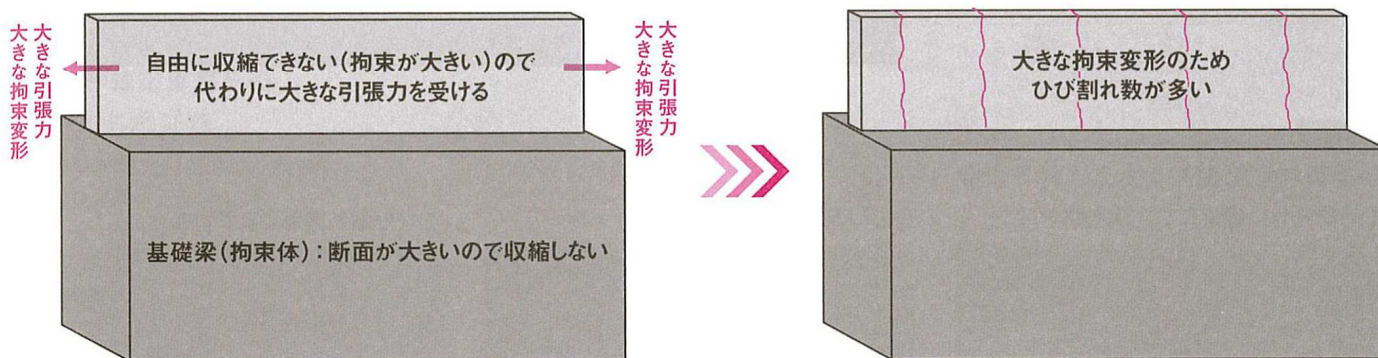
【図3】 拘束度が強いとひび割れ本数が増える傾向に

【① 無拘束：空中で打設した壁部材】

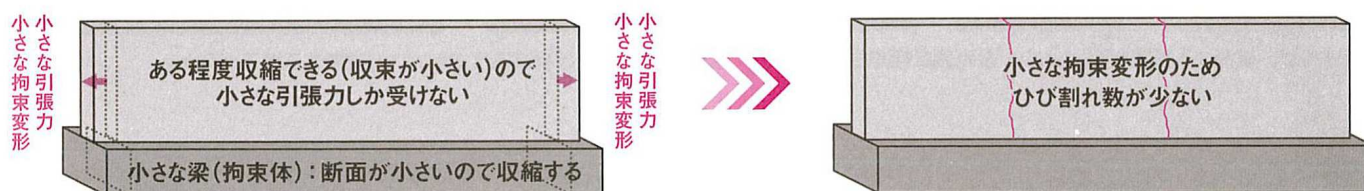


空中にコンクリートを打設すると、壁部材は拘束がないので自由に収縮変形できる（上）。壁部材を大きな基礎梁上に打設すると、梁の断面が大きく拘束力が強いので拘束変形も大きい（中）。壁部材を小さな梁の上に打設すると、梁の拘束力は弱く拘束変形も小さい（下）

【② 強い拘束：大きな基礎梁の上に打設した壁部材】

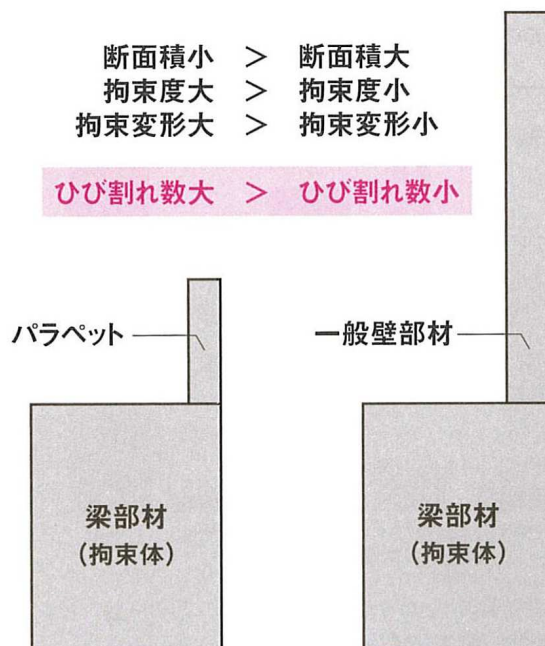


【③ 弱い拘束：小さな梁の上に打設した壁部材】



分と酸素の侵入も抑制でき、耐久性も担保できる。そのため、【図2】の範囲のひび割れでも有害とならないよう躯体を保護することが可能となる。

まず、床の仕上げ材のひび割れ追従性を調べる試験方法を示す（写真1）。試験では、直方体のモルタル下地試験体の中央にあらかじめひび割れを入れておき、ひび割れをまたいで仕上げ材を2面に施工する。その後、両端を引張ってひび割れを拡大させ、仕上げ材が破断したとき



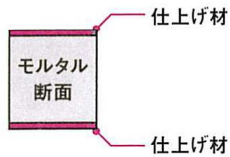
【図4】

パラペットは要注意

パラペットは梁に対し断面が小さく、梁から大きな拘束力を受けるためひび割れ数が多い

写真1

ひび割れ追従試験の試験体例



事前にモルタル下地試験体の中央にひび割れを入れておき、仕上げ材を上下2面に塗布。両端を引張り、仕上げ材が破断したときのひびわれ幅を測る
(写真：下も鹿島)

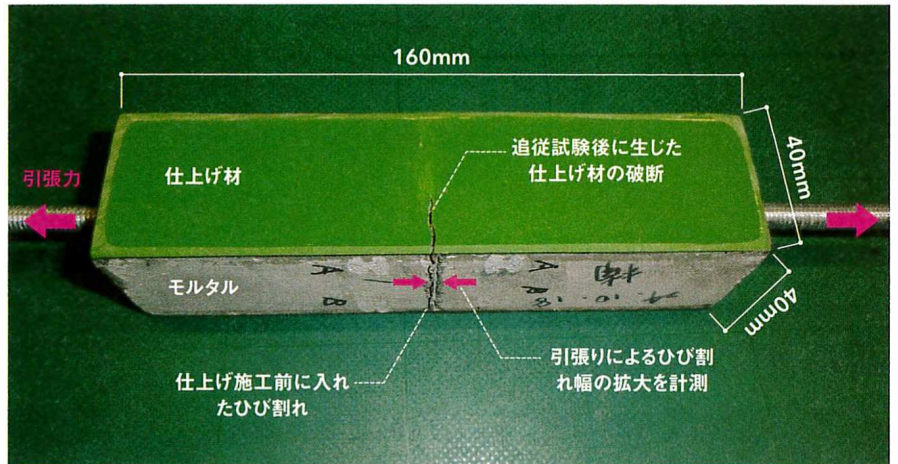


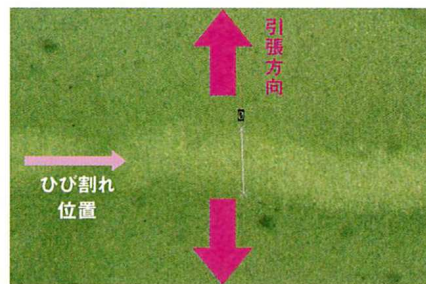
写真2

ひび割れに追従する仕上げ材の表面

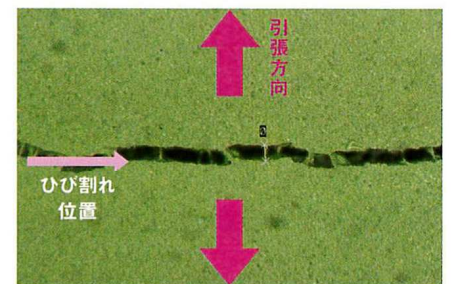
① ひび割れに追従している状態



② ひび割れ追従の限界近く



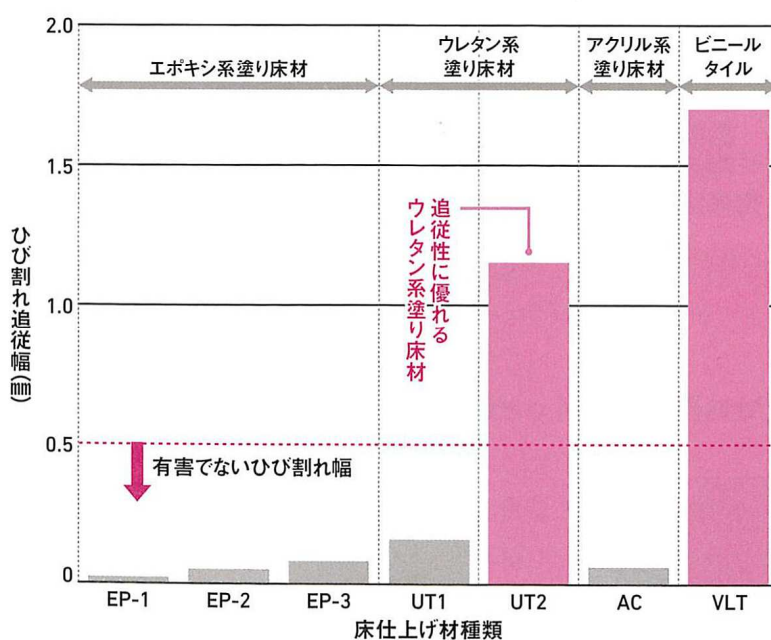
③ ひび割れ追従できず破断



仕上げ材が、破断する過程を示したものの。ひび割れ幅が徐々に拡大し、最後には、仕上げ材が追従できなくなり破断する様子が分かる

図5

床仕上げ材の種類とひび割れ追従幅の関係



エポキシ系の塗り床材は、ひび割れ追従幅の小さいものが多い。ウレタン系の一部、およびビニールタイルは、優れた追従性がある(資料：図7まで鹿島)

のひび割れ幅をひび割れ追従幅と定義する。ひび割れ幅が拡大すると、仕上げ材は追従できずに最後は破断する(写真2)。

図5に結果を示した。塗り床材では、エポキシ系が広く利用されているが、ひび割れ追従幅は0.1mm以下が多く、有害ひび割れ幅の下限とされる0.5mmと比べても、かなり小さい。しかし、ウレタン系のなかには追従幅が1mmを超える材料もある。

また、ビニールタイルは追従性に優れ、これらの仕上げ材を用いればひび割れを効果的にカバーできる。

次に、外壁の有害ひび割れを回避する方法について述べる。外壁に用いる仕上げ塗材とひび割れ追従性

図6 建物部位や要求性能別に許容ひび割れ幅を定義

材料種類	分類	ひび割れ追従性	備考
吹き付けタイル	JIS A 6909 複層塗材 E	×	0.1mm 以下
弾性タイル	JIS A 6909 防水形外装薄塗材 E	△	0.5mm 程度
	JIS A 6909 防水形複層塗材 E	○	1mm 以上

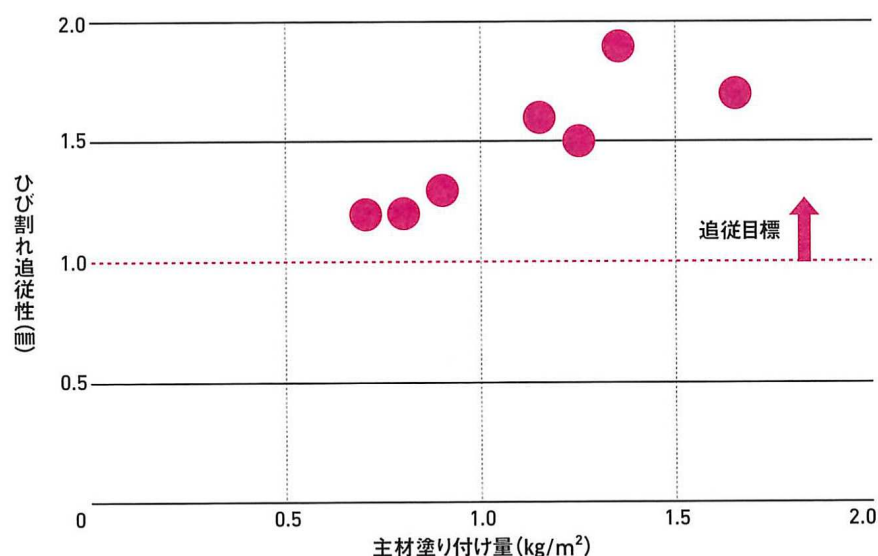
外壁のひび割れへの追従性を確保するには、防水形複層塗材 E と呼ばれる弾性タイルを選択するとよい。

下塗り、主材、上塗りの3層からなり、一定のひび割れ追従性が期待できる

図7

防水形複層塗材 E の ひび割れ追従性

防水形複層塗材 E のひび割れ追従性を調べた試験結果。主材の塗り付け量が多いほど、ひび割れ追従性が向上する傾向がある



を示す(図6)。

防水形複層塗材がおすすめ

注意したいのは、一般的な吹き付けタイルにはひび割れ追従性がほとんどない点である。吹き付けタイルの外観や質感から追従性があるように誤解する人が多いが、そのような性能は期待できない。外壁のひび割れへの追従性を確実に確保するには、図6 下の弾性タイルと呼ばれる防水形複層塗材 E を選択することが確実である。

この材料は下塗り、主材、上塗りの3層からなり、一定のひび割れ追従性が期待できる。この種類の塗り材は、ひび割れに追従する主材の塗り付け

量により追従性が変化し、1mm 以上の追従性を確保できる。外壁の場合は、紫外線により塗り材が経年劣化し、ひび割れ追従性が低下するので、実際のひび割れ幅に対し2倍以上の安全率を取り、少なくとも1mm 以上の追従性を確保したい。また、この経年

劣化の問題から、塗材は定期的に更新することが前提となる。

図7 は防水形複層塗材 E のひび割れ追従試験結果の例である。主材の塗り付け量が多いほど追従性が向上する傾向がある。メーカーとよく協議したうえで仕様を決めてほしい。

ここがポイント

有害なひび割れ幅は外壁で **0.15mm 超**、
内部の壁や床で **0.5mm 超**

パラベットや底では目地間隔を狭くする

ひび割れ追従性に優れる仕上げ材を選定して
ひび割れを効果的にカバーする

ひび割れ幅の抑制は鉄筋比増大が決め手

➡ 大きなひび割れ幅は漏水リスクに直結する

ひび割れは漏水の大敵。その幅が大きくなると、漏水リスクは加速度的に増大する。では、ひび割れ幅はどう抑制すればよいのか。最も有効な対策の1つは、鉄筋比を増やすことである。

ここでは、ひび割れ幅を制御するうえでのポイントについて解説する。

前節で述べたように、発生したひび割れが瑕疵になるかどうかは、ひび割れ幅の大きさが決定的な意味を持つ。そこで、ひび割れ幅と漏水の関係性を明らかにするとともに、ひび割

れ幅がどのように決まるのか、そのメカニズムを説明したい。

ひび割れは漏水の大敵

最初にひび割れ幅と漏水量の関係について触れておく。鉄筋コンクリート

(RC) 部材にひび割れが生じると、雨水などがそこから内部に浸透する。

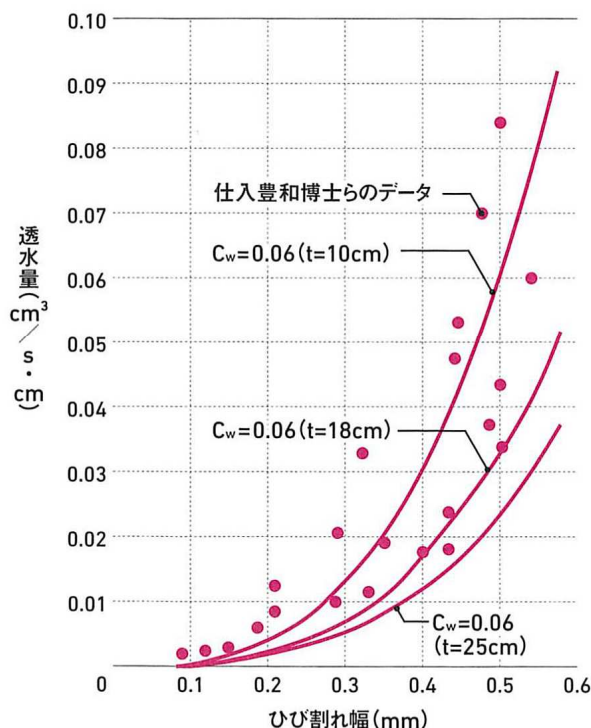
その透水量とひび割れ幅の関係をグラフに示した(図1)。

図中の式に示した通り、透水量は、ひび割れ幅の何と3乗に比例して増加する。

図1
透水量は
ひび割れ幅の3乗に
比例する

右は、ひび割れ幅と透水量の関係を示したグラフ。透水量は、ひび割れ幅の3乗に比例して増大する。透水量がわずかであれば、途中で乾燥して大事に至らないが、一定の限度を超えると漏水として顕在化する

(資料：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」より引用)



$$\text{透水量} = C_w \frac{\text{ひび割れ幅}^3 \times \text{水圧}}{\text{部材厚さ}}$$

C_w : ひび割れ面の凹凸による低減係数

透水量は…

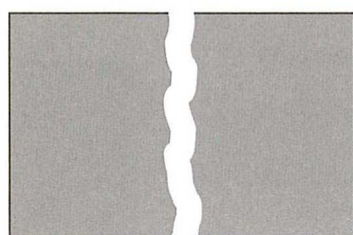
- ひび割れ幅の3乗に比例
- 水圧に比例
- 部材厚さに反比例

ひび割れは、漏水発生の最大のリスク要因である

図2

ひび割れ補修は
冬季に対策を
打つのが原則

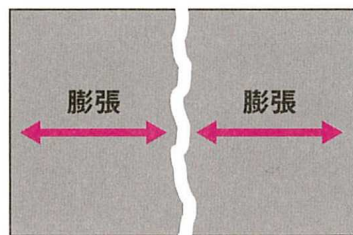
標準期
(春や秋)の
ひび割れ幅



ひび割れ幅は、
夏より大きい
冬より小さい

夏季の
ひび割れ幅

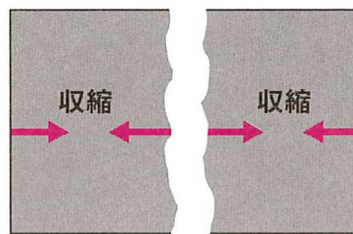
標準期
より
小



気温上昇
↓
コンクリート膨張
↓
ひび割れ幅縮小

冬季の
ひび割れ幅

標準期
より
大



気温低下
↓
コンクリート収縮
↓
ひび割れ幅拡大

ひび割れ補修は、
ひび割れ幅が拡大する
冬季に実施

夏季は温度上昇でRC部材が膨張し、ひび割れ幅は縮小する。
冬季は温度低下でRC部材が収縮し、ひび割れ幅は増大する。
ひび割れは冬季に補修するのが望ましい

(資料：図4 まで筆者)

前にも述べた通り、外壁のひび割れ幅は、防水性の観点から0.15mm以内に抑えるように日本建築学会の資料で規定されている。確かに0.15mm以下の範囲内であれば、透水量はゼロに近いレベルに収まっている。ところが、ひび割れ幅が0.3mm、0.5mmと増えるにつれて、透水量は急激に増大する。

実際の外壁では、透水量が微量であれば途中でコンクリートに吸水されるなどして大事に至らないが、ある限度を超えると漏水として顕在化する。幅の大きいひび割れは、漏水の大敵であることが分かる。

また、透水量が水圧に比例し、部

材の厚さに反比例することも覚えておきたい。水圧が増す台風シーズンなどに漏水事故が多発することや、壁厚が大きいほど漏水が生じにくいことは、多くの建築実務者が経験的に感じていることだと思う。図中の式が意味する内容は、それらの実体験に基づく現象と一致している。

ひび割れ幅は温度で変動

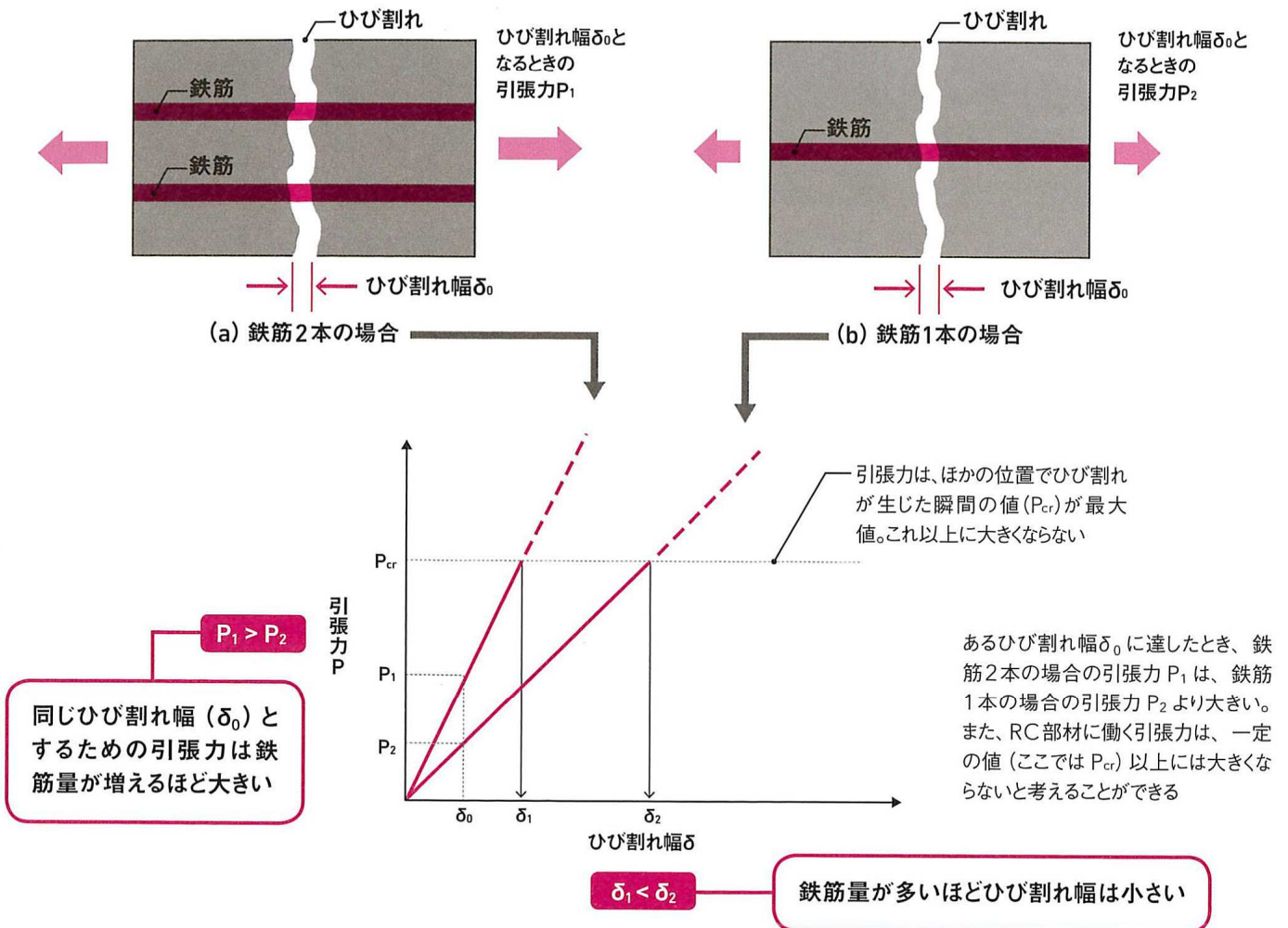
次に、ひび割れの特徴的な挙動を理解するため、ひび割れ幅に与える環境要因の影響について述べる。発生したひび割れ幅に最も顕著な影響を及ぼす環境要因は、温度である

(図2)。

温度上昇によりコンクリートが膨張する夏季にはひび割れ幅は小さくなり、温度低下によってコンクリートが収縮する冬季にはひび割れ幅が拡大する。夏季のひび割れ幅を基準とすると、冬季のひび割れ幅は2倍くらいに拡大することもある。

従って、樹脂などの充填によってひび割れを補修する場合には、施工する季節の選定が重要になってくる。夏季を選ぶと補修後のひび割れ幅拡大により、充填した樹脂とひび割れ面の付着が切れ、せっかくの補修効果が発揮されない恐れがある。ひび割れは、冬季に補修するのが望ましい。

【図3】 鉄筋量が多いほどひび割れ幅が小さくなる理由



幅抑制には鉄筋量増大が効く

ところで、1-2で「鉄筋量を増やしても収縮ひび割れは防止できないが、ひび割れ幅を小さくすることはできる」と述べた。非常に重要なことなので、もっと詳しく説明したい。

最初に、鉄筋量がひび割れ幅に及ぼす影響を模式図に示した(【図3】)。RC部材に引張力が作用し、あるひび割れ幅 δ_0 に達したとき、鉄筋量が多い場合(鉄筋が2本の場合)の引張力 P_1 は、少ない場合(鉄筋1本の場合)の P_2 よりも大きい。これは、同じ幅のひび割れを発生させるには、鉄

筋1本を引っ張るより、鉄筋2本を引っ張る方が大きな力が必要になるからである。

このことを図示したのが【図3】下のグラフである。横軸のひび割れ幅を δ_0 として固定した場合、鉄筋量が多いときの引張力 P_1 は、鉄筋量が少ないときの引張力 P_2 よりも大きい。

このグラフでもう1点、注目してほしい点がある。それは、RC部材に働く引張力が、一定の値(ここでは P_{cr}) 以上には大きくならないという事実である。地震などの外力が直接作用する場合と違い、収縮が拘束されることによってRC部材に生じる引張力は、一定

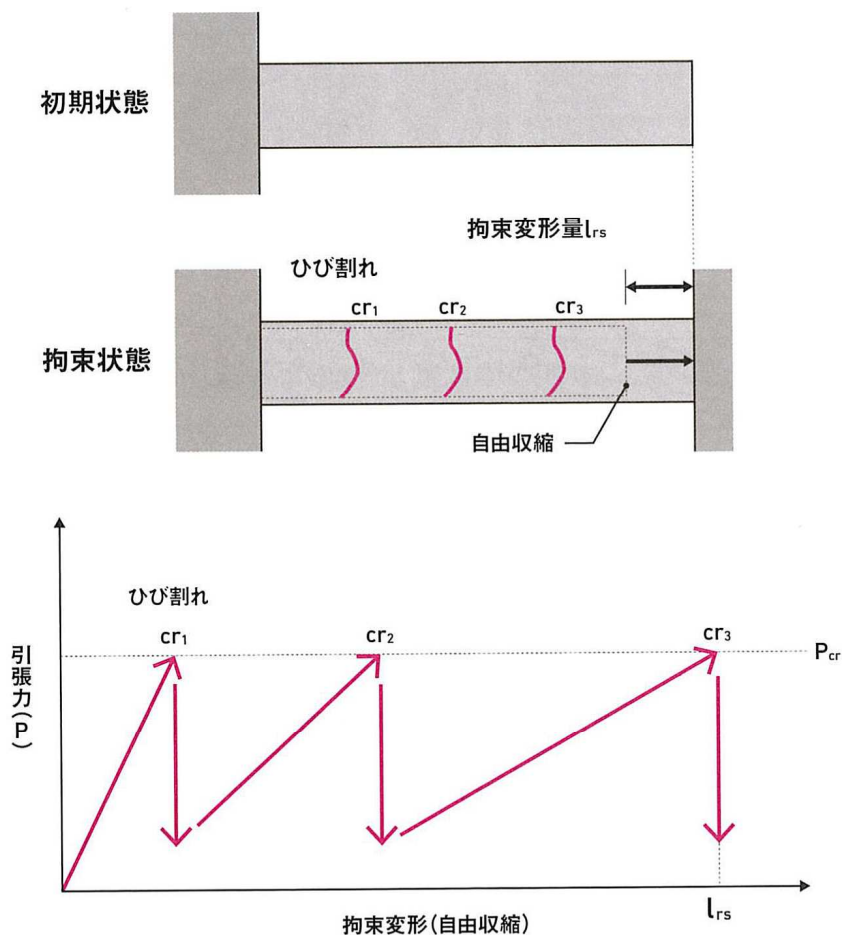
の値を超えて増大しないと見なせる(ただし、コンクリートの引張強度のばらつきを無視)。これも、ひび割れを適切に制御するためには、ぜひ知っておきたい事実である。

ひび割れ発生で拘束が緩む

では、なぜ引張力が一定以上に大きくならないのか。その理由を説明しよう(【図4】)。

収縮ひび割れ現象は、拘束変形(自由収縮)進行 $\rightarrow$ 引張力増加 $\rightarrow$ 引張力が一定値に達して部材にひび割れが発生 $\rightarrow$ 拘束が緩んで引張力

図4 乾燥収縮による引張力は、一定値を超えない



収縮ひび割れ現象は、拘束変形の進行→引張力増加→ひび割れ発生→拘束が緩んで引張力が低下、という一連のサイクルを繰り返す。ひび割れが発生するたびに拘束が緩んでひずみが低下するため、RC内部の引張力は一定値を超えて増大しないと見なせる

が低下、という流れで進む。こうした一連のサイクルを繰り返しながら、複数のひび割れが発生する。ひび割れ発生後に拘束が緩むのは、変形がひび割れに集中し、それ以外の部分に発生するひずみが低下するからである。

図中の P_{cr} は、RC部材に収縮ひび割れが発生したときの引張力に相当する。グラフからわかる通り、 P_{cr} に達するとひび割れが生じて引張力が低下し、その後増大するものの、再び P_{cr} で減少するというパターンを繰り返す。つまり、RC部材に働く引張力は、このひび割れが発生した時点での引

張力 (P_{cr}) 以上には大きくならないと考えることができる。

図3 下のグラフで、 P_{cr} に対応する δ_1 と δ_2 が、それぞれ鉄筋2本と1本のときのひび割れ幅である。 δ_2 より δ_1 の方が小さいとわかる。つまり、鉄筋量が大きい方が、収縮ひび割れの幅を小さくできる。以上が、鉄筋比とひび割れ幅の関係のメカニズムである。

鉄筋比の影響を正しく理解

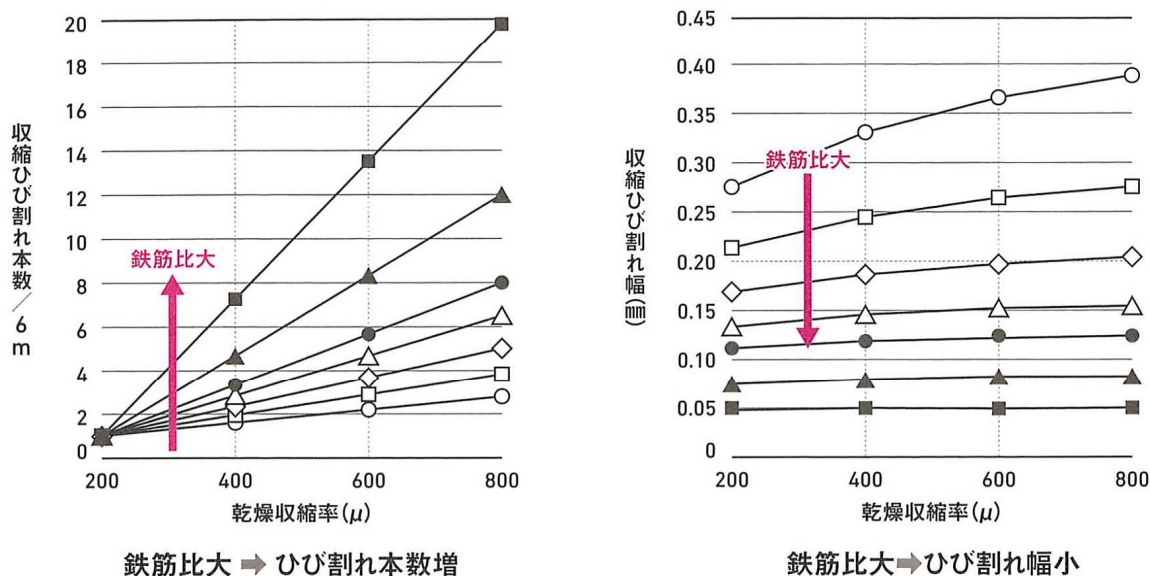
鉄筋比がひび割れ幅を支配するメカニズムを理解したところで、鉄筋比とひび割れ幅の具体的な関係を見て

いこう。

一般的な建築物の壁部材を対象にひび割れ幅と本数を計算した結果を示す(図5)。検討の対象は長さ6mの壁でD13による配筋を想定している。同図左はコンクリートの乾燥収縮率を横軸に取り、収縮ひび割れ本数を縦軸に表した。同図右は横軸に同じく乾燥収縮率を取っているが、縦軸にはひび割れ幅を示してある。

左図の収縮ひび割れ本数は、乾燥収縮率が大きくなると顕著に増加し、鉄筋比が大きいほど増大する。右図のひび割れ幅は、乾燥収縮率によらずほぼ一定で、鉄筋比が大きいと小

【図5】 鉄筋比の増大でひび割れ本数は増え、幅は小さくなる



乾燥収縮率 800 μ

鉄筋比 ρ = 1.3%

拘束変形量 = 収縮ひび割れ幅 × ひび割れ本数 = 0.05 × 20 = 1 (mm)

乾燥収縮率 800 μ

鉄筋比 ρ = 0.6%

拘束変形量 = 収縮ひび割れ幅 × ひび割れ本数 = 0.2 × 5 = 1 (mm)

ひび割れ幅は、鉄筋比を大きくすることで小さくできる。ただし、鉄筋比を大きくするとひび割れ本数は増加するので注意したい (資料: 図1と同じ)

さくなる。これらの図で拘束度は一定として計算してあり、拘束変形量は乾燥収縮率が同じであれば同一となる。拘束変形量 = 平均ひび割れ幅 × 本数となることを1-2で説明したが、例えば乾燥収縮率 800 μ のとき、【図5】中の同じ鉄筋比を表す点の値から計算すると、拘束変形量は鉄筋比によらず 1 mm 程度とほぼ一定である (図5下の計算結果を参照)。

【図5】から読み取れることをまとめると、まず、ひび割れ幅は鉄筋比で制御でき、鉄筋比を大きくすることで幅

を小さくできる。しかし、鉄筋比を大きくするとひび割れ本数は増加する。さらに、コンクリートの乾燥収縮率が大きくなっても幅に与える影響は軽微でひ

び割れ本数が増える、の3点である。

これらはひび割れ幅の制御に関わる原則として重要なので覚えておいていただきたい。

ここがポイント

透水量は、ひび割れ幅の3乗に比例する。

従って、ひび割れは漏水の大敵である

ひび割れ幅は鉄筋比で制御できる。

鉄筋比を大きくすると、ひび割れ幅は小さくなる。
しかし、鉄筋比を大きくするとひび割れ本数は増える。

長過ぎる養生は かえって逆効果？

➡ 弾性係数が大きいほどひび割れの発生が早い

打設したコンクリートをしっかり養生することは基本中の基本。

しかし、ひび割れに限ってみると、長過ぎる養生がかえって逆効果になることがあるという。それでは、最適な養生期間はどの程度なのか。

ここでは打設したコンクリートの初期養生が、ひび割れに及ぼす影響について説明する。

養生を十分に行うことはひび割れ抑制の基本であり、その重要性は建築実務者の間でも広く認識されている。しかし、養生期間を長く取り過ぎると、かえって逆効果となり、早期にひび割れが発生する場合がある。これはほとんど知られていない事実であり、「養生期間を長く取れば取るほど、ひび割れ発生リスクは小さくなる」と誤解している人が多い。

もちろん、養生期間を長く取れば、コンクリートの強度や耐久性は向上する。全体で見れば、良質なコンクリートができることは確かである。ただ、ひび割れだけに限ると、長過ぎる養生がかえってマイナスに働くことがある。

水和生成物が隙間を埋める

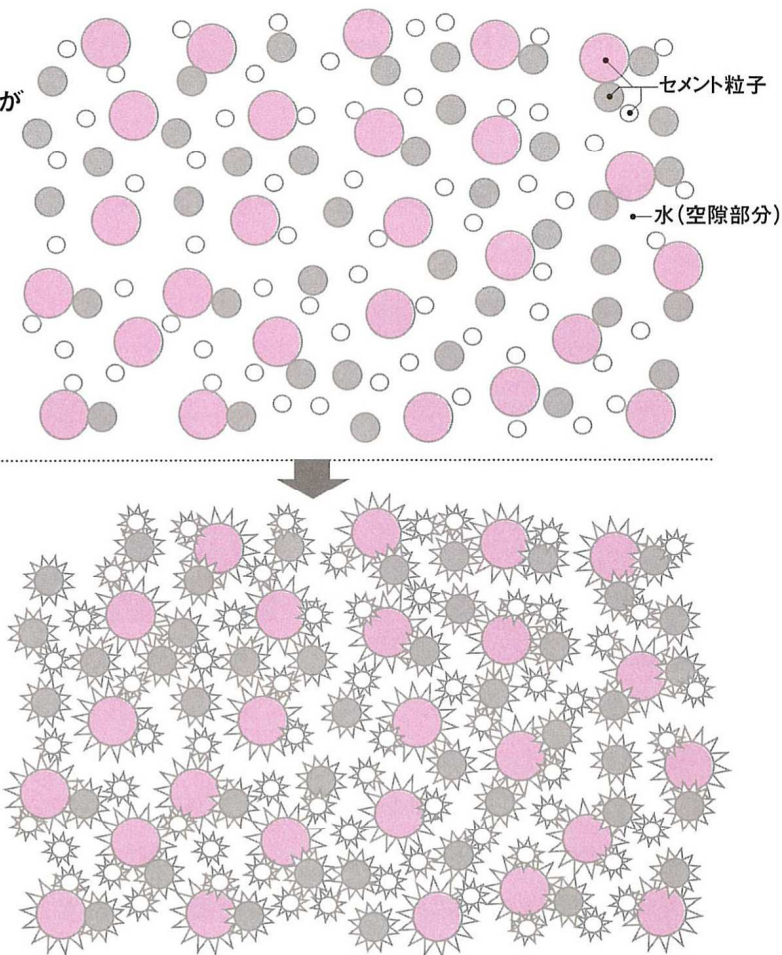
まず、養生の重要性を理解するた

図1

水和生成物が
空隙部分を
埋めていく

硬化前

硬化中

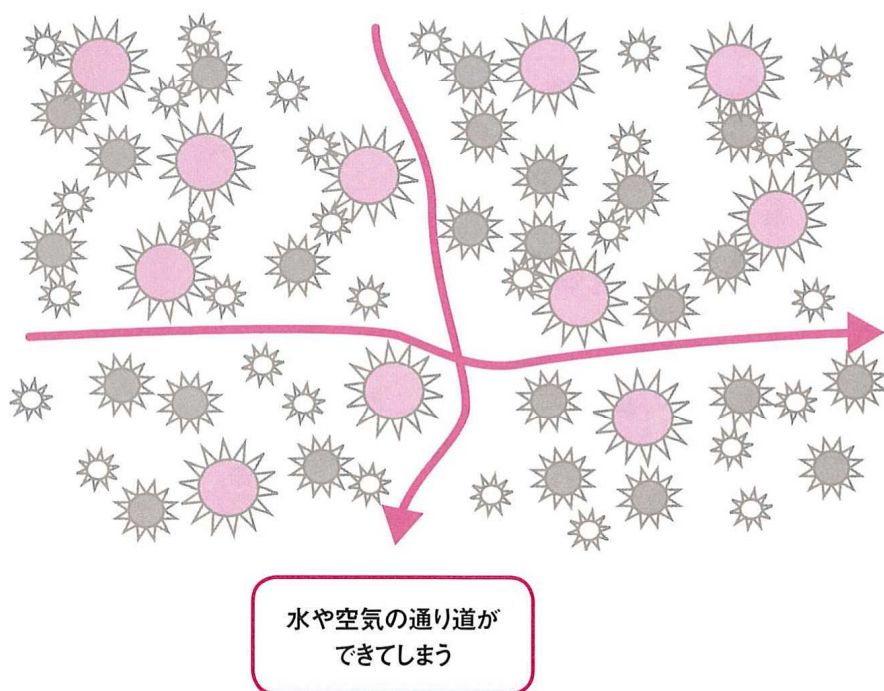


セメント粒子の周囲に水和物が生成され、もともと水だった領域を埋めていく

早期に水分が逸散すると、水和反応が停止し、多くの空隙が残ったままになる

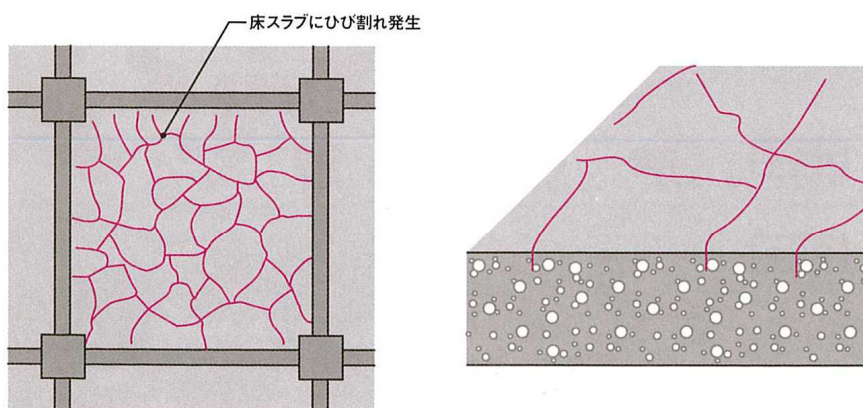
コンクリートの打設直後は、セメント粒子の周りを水が取り巻いている状態。水和反応が進むと、水和生成物が発生し、水の領域を埋めていく（資料：図3 まで特記以外は筆者）

図2 養生が不十分なコンクリートの内部には侵入路ができる



養生が不十分だとコンクリート中の水が蒸発し、以後の水和反応が止まってしまう。このため、コンクリートの内部に、外部からの有害物質が侵入する通路ができてしまい、無防備な状態になる。これでは、鉄筋を保護するというコンクリートの役割を果たせない

図3 養生不足で頻発するプラスチック収縮ひび割れ



不適切な初期養生による不具合の典型例が、このプラスチック収縮ひび割れ。表面だけに発生するのが特徴で、網目状の不規則なひび割れが入る

め、養生中にコンクリートに何が起きているかを見ていく。

図1の「硬化前」は、まだ固まらないフレッシュコンクリートのセメントペースト部分を模式的に表している。この段階で、セメント粒子は水の中に浮かんだ状態になっている。普通強度レベルのコンクリートであれば、水

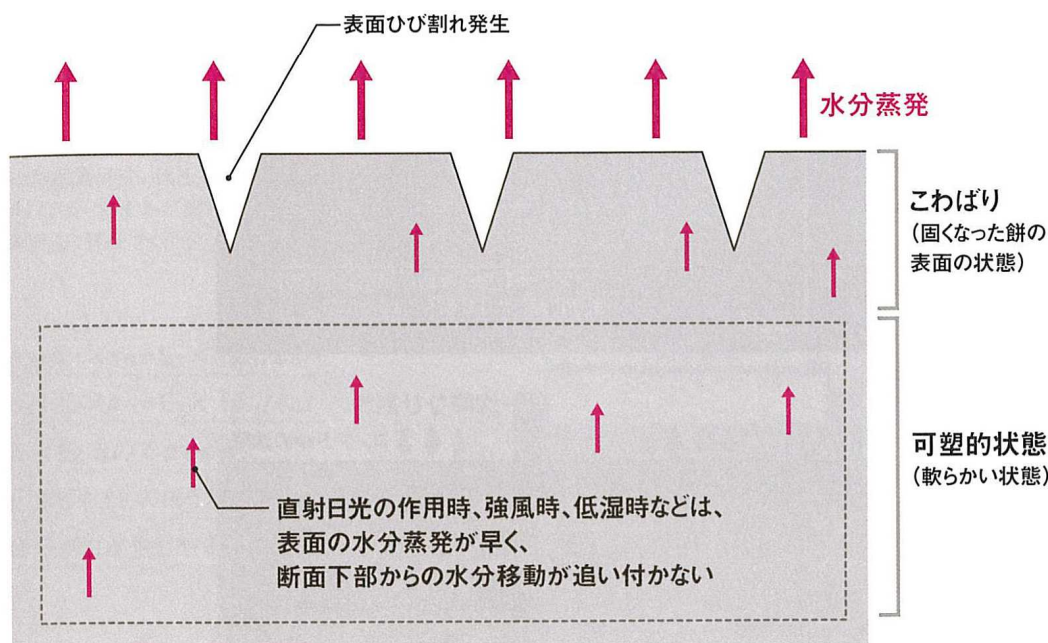
の体積に対してセメント粒子の体積は半分程度以下。つまり、セメント粒子はまばらな状態で存在している。

打設から数時間経過すると、セメントの水和反応が活発になる。水に浮かぶセメント粒子からカルシウムやシリカなどの成分が溶け出し、これが水と反応して体積が膨張する。こうして、

周囲の水だった部分を反応物質（水和生成物）が埋めていく（図1の「硬化中」）。

水和反応のスピードは速い。コンクリート打設の翌日には、外観上はもう十分に固まったように見える。その後、十分に養生してもしなくても、見た目はほとんど変わらない。つまり、材齢

図4 餅の表面にひび割れが入るのによく似たメカニズム



プラスチック収縮ひび割れは、
打設直後から表面の水分が
急速に失われて、表面にこ
わばりが生じて起こる
(資料：建築技術別冊9、p14-
21、2003、「材料・調合に起因
するひび割れ」、野口貴文)

1日で、セメント粒子の周囲に水和生成物が形成され、最初水であった領域が生成物で埋まった状態となる。

一見完成、でも実は未完成

注意したいのは、たとえ養生の有無にかかわらず見た目が同じでも、実際のコンクリートの性能には著しい違いが生じることである。

材齢1日では、水の領域が水和生成物で大ざっぱに埋められた状態にすぎず、実は多くの空隙が残されたままである。この段階で養生を止めると、コンクリート中から水が蒸発し、以降の水和反応が止まる。水が抜けたあとの領域は、そのままコンクリートの内と外をつなぐ通り道になってしまい、外部からの有害物質の侵入に無防備な状態となる(図2)。

こうなると、鉄筋を腐食から守るコ

ンクリートの性能は著しく損なわれ、躯体の耐久性を確保できない深刻な事態となる。

養生不足によるひび割れ

初期の養生不足によって起こるひび割れには、大きく2つのタイプがある。

1つはプラスチック収縮ひび割れである(図3)。このひび割れは、養生不足によってコンクリートの打設直後から表面の水分が急速に失われ、表面にこわばりが生じることで起こる(図4)。これは、直射日光の照射付け、強風、低湿度などの環境下で発生しやすい。表面部だけに、網目状の不規則なひび割れが発生する。

また、設計基準強度が 36N/mm^2 を超える高強度コンクリートによる床スラブでも、もともとセメント量に対して

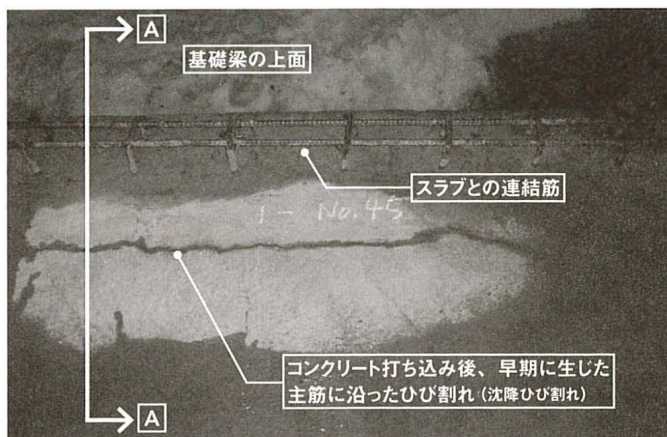
単位水量が不足しているだけに、このタイプのひび割れが頻発する。これを防ぐには、周囲に風除け、日除けの仮設を構築するとよい。また、左官による床スラブ表面押さえが終わった後、速やかに養生マットなどを敷設することも効果的である。

もう1つは、沈降ひび割れと呼ばれるものである。これは、せいが高い基礎梁などで、スランプが大きなコンクリートを打設したときに生じやすい。施工直後から、コンクリート表面へ水が浮き出てくる「ブリーディング」と呼ばれる現象が起こり、その結果コンクリートが沈降する(図5)。

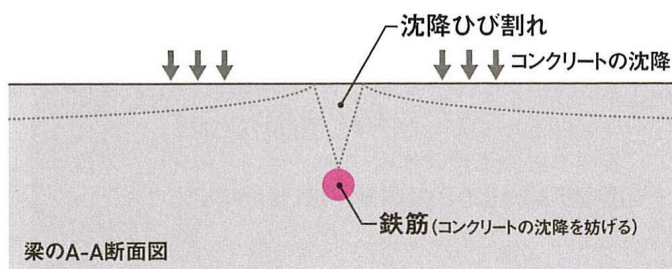
このとき、鉄筋がある部分では沈降が妨げられるので、鉄筋に沿った図5のようなひび割れが生じる。このタイプのひび割れは、コンクリートのブリーディングが落ち着いた後、タンピングと呼ばれる表面たたきを実行する

図5

養生不足でブリーディングが発生し沈降ひび割れを招く



上の写真は床スラブの表面を上から見たところ。下の図は床スラブを下から支える基礎梁の断面図。施工直後からブリーディングが発生し、表面に水が浮き出てコンクリートが沈下する。鉄筋部分だけ沈降が妨げられるため、直上部分にひび割れが発生する
(写真：鹿島)



だけで多くは防止できる。

なぜ長期の養生が逆効果に

最後に、長すぎる養生が、ひび割れ防止にとっては、逆効果になりかねない理由を述べる。

図6 は、養生期間を材齢 t_1 から t_2 に延長したときのひび割れ発生の状況を表している。

実は、養生期間がある一定期間(1週間程度)を超えると、そこから先は期間を延長しても、養生終了後の乾燥収縮が大きく変わらないことが分かっている。

そのため、養生期間だけが異なる同一の部材を想定すると、これらは乾燥収縮量は同じと見なされ、同一の拘束変形および拘束ひずみを受ける。それでは、養生期間の長さによって

何が違ってくるのか。答えはコンクリートの硬さ(弾性係数 E)である。

図1 で説明したとおり、養生期間が長いほど水和生成物の密度が高くなり、コンクリートは硬くなって弾性係数が大きくなる。コンクリートの内部応力は、弾性係数とひずみの積で表されるから、弾性係数が大きいコンクリートほど、乾燥収縮による内部応力が大きくなり、ひび割れが発生しやすくなる。

図7 に、7日で養生を終了したときと、28日で終了したときの内部応力の変化を模式的に比較した。28日で終了したものは弾性係数が大きいので、養生終了後の乾燥収縮による内部応力の増加率が大きい。結果として7日間で養生を終えたものに比べると、早くひび割れ強度に達している。

ただし、この図では養生期間によ

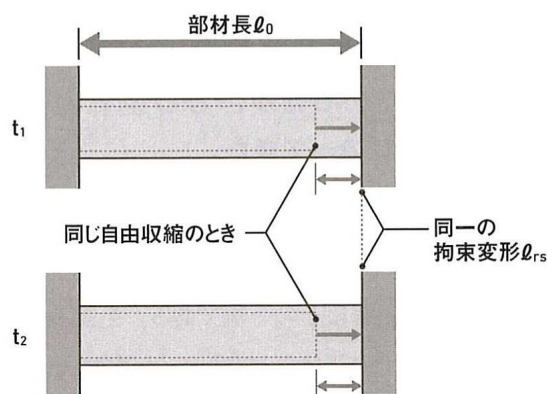
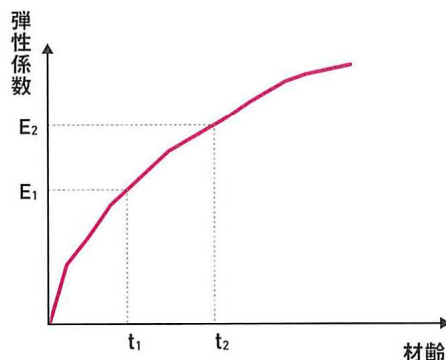
らず、引張強度が一本の線で表現されると模式的に示したが、実際には養生期間が長いほうが引張強度も向上する傾向にあるので、この図に示すほど、長い養生がひび割れまでの期間を明確に縮めるわけではない。しかし、重要なことは養生を長く施したからひび割れが防げるといった考え方は、合理性が薄いと考えられる点にある。この考え方は、下記欄外の文献などにも示されている。

この結果を見て、現場施工者のなかには、どのくらいの養生期間を設定すべきか判断に迷う人もいるかもしれない。強度や耐久性、ひび割れ防止などを総合的に考えると、1～2週間程度の養生期間を取れば、所要の耐久性や強度を満足しながら、ひび割れリスクも軽減できる。このあたりが1つの目安になるだろう。

図6

養生期間が長いほど
弾性係数が大きく
内部応力が増大

右のグラフは、養生期間（材齢）の違いによる弾性係数を比較したもの。養生期間が長いほど、弾性係数が大きくなり、ひずみが同じと仮定すると内部応力も大きくなる



$$\sigma_1 = E_1 \times \varepsilon_{rs} = E_1 \times (l_{rs}/l_0)$$

$$\sigma_2 = E_2 \times \varepsilon_{rs} = E_2 \times (l_{rs}/l_0)$$

$$E_1 < E_2 \text{ なので } \sigma_1 < \sigma_2$$

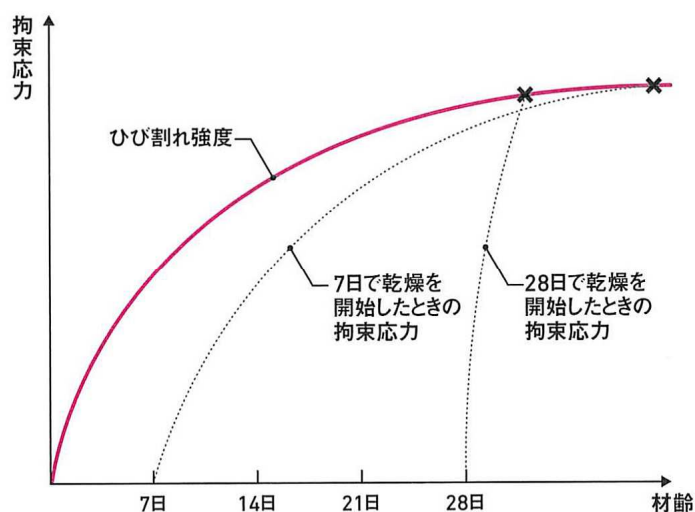
t_1 よりも t_2 のほうが

ひび割れが生じやすい

図7

養生期間28日のほうが
早くひび割れ強度に
達してしまう

養生を7日で終えた場合と、28日で終えた場合の、その後の内部応力の変化を模式的に比較した。28日で終了したものは弾性係数が大きいので、終了後の乾燥収縮による内部応力の増加率が高い。7日で養生を終えたものより早く、ひび割れ強度に達している



ここがポイント

初期養生は極めて重要であり、
これを怠るとコンクリートの基本性能が著しく損なわれて
深刻な事態を招く

養生期間が長過ぎると
弾性係数が大きくなり、乾燥開始後に
早期のひび割れを招く可能性がある

CHAPTER 1-6

ひび割れの幅は 打設前に予測できる

➡ 建築主への説明材料として有効活用

これから打設するコンクリートに、どの程度のひび割れが発生するか——。
これは施工者にとって重大な関心事の1つだが、ひび割れの幅や間隔、発生確率は、かなりの精度で事前に予測できるようになってきた。

「この施工条件でコンクリートを打設すると、どの程度のひび割れが発生するか、事前に予測してほしい」

筆者が勤務する建設会社の技術研究所には、構造設計者や施工担当者から、こうした依頼が寄せられることがある。

図1はその一例である。免震基礎の上に設けた1階のデッキスラブの平面図だ（実際の建物より簡略化している）。この工事では、収縮ひび割れの発生が懸念されるので、ひび割れ発生の確率、幅、間隔などを事前に予測してほしいという要望である。

依頼に対し筆者がまとめた回答の一部が、図2の一覧表だ。ひび割れの挙動は、多くの要因の影響を受けるが、ここではコンクリートの乾燥収縮率、膨張材使用の有無、鉄筋比を変更可能な条件として検討した。

しかし、どのケースでも、打設から

図1
ひび割れに関する
事前予測を求められた
デッキスラブの例

右図は、施工現場の担当者が筆者に対して、ひび割れの事前予測を依頼してきた事例の1つ。免震基礎の上に、1階のデッキスラブを設けた。スラブの下にはRC梁を縦横に架け、一方方向には鉄骨梁も設けている。ひび割れが発生しやすい仕様だ
(資料：図7 まで筆者)

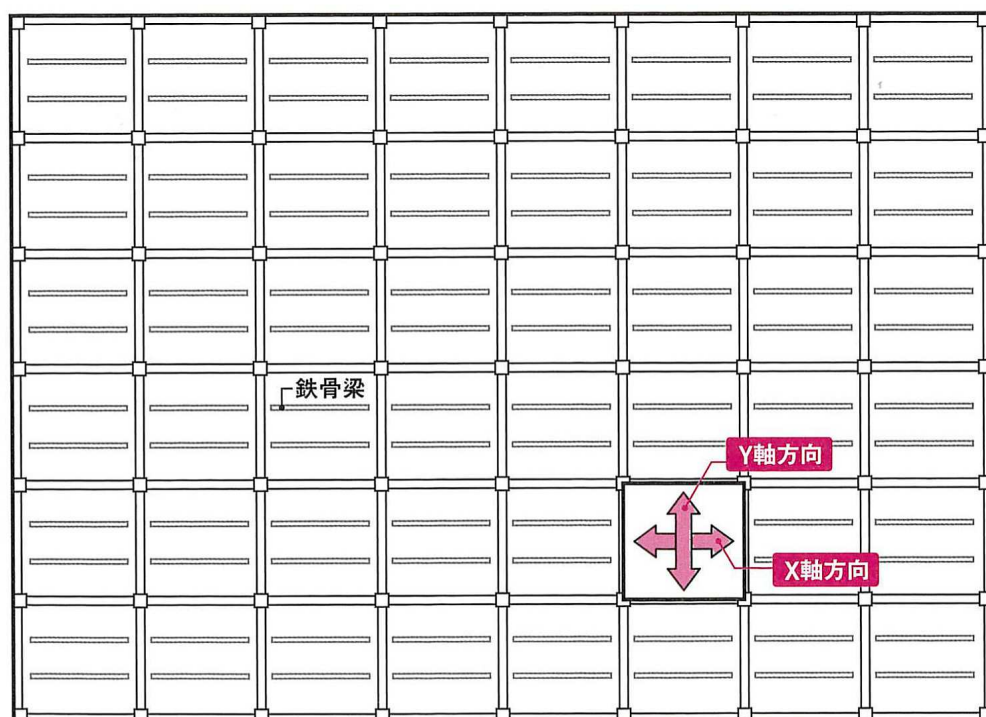


図2

ひび割れの発生確率、幅、間隔などが一目瞭然

	部材			材齢2年				材齢3年			
	厚さ (mm)	配筋 (mm)	鉄筋比 (%)	拘束引張 応力 (N/mm ²)	ひび割れ 発生確率 (%)	ひび割れ 幅 (mm)	ひび割れ 間隔 (m)	拘束引張 応力 (N/mm ²)	ひび割れ 発生確率 (%)	ひび割れ 幅 (mm)	ひび割れ 間隔 (m)
ケース1	200+50	D10@125 シングル	0.23	2.73	99.6	0.84	7.89	3.28	99.9	0.90	7.24
		D10@150 シングル	0.19			0.96	8.43			1.05	7.91
ケース2	200+50	D10@125 シングル	0.23	2.19	96.2	0.77	8.63	2.63	99.4	0.83	8.00
		D10@150 シングル	0.19			0.87	9.01			0.95	8.52
ケース3	200+50	D10@125 シングル	0.23	1.81	84.2	0.71	9.26	2.25	97.0	0.78	8.56
		D10@150 シングル	0.19			0.80	9.48			0.88	8.96
ケース4	200+50	D16@150 ダブル	1.06	2.58	99.3	0.13	2.35	3.10	99.9	0.14	1.75
		上：D13@150 下：D16@150	0.87			0.17	2.94			0.18	2.23
ケース5	200+50	D16@150 ダブル	1.06	2.06	93.9	0.13	3.54	2.49	98.8	0.13	2.50
		上：D13@150 下：D16@150	0.87			0.17	4.26			0.17	3.10
ケース6	200+50	D16@150 ダブル	1.06	1.69	76.8	0.13	5.61	2.12	94.8	0.13	3.41
		上：D13@150 下：D16@150	0.87			0.17	6.33			0.17	4.11

6つの各ケース（分類方法は図3 図4を参照）を、材齢2年と材齢3年の場合に分けて、ひび割れの幅や間隔などを予測した。注意したいのは、X軸方向のケース1 からケース3 のひび割れ幅が、すべて0.5mmを超えている点だ。建築主と何らかの協議が必要になる

3年後のひび割れ発生確率は94%以上である。一般に、床スラブのひび割れを防止することは非常に難しいとされているが、このケースもまさにその一例と言える。

トラブル回避に先手を打て

図2の結果を見て「ひび割れの発生確率が100%に近いのなら、わざわざ予測しても結局無駄ではないか」と思う人がいるかもしれないが、そうとは言いきれない。

ひび割れが発生して建築主からクレームを受けるのと、打設前に予測を立て建築主に説明するのでは大きな違いがある。

また、例えばひび割れの発生は避

けられないとしても、ひび割れ幅が過大となる予測結果が出た場合、幅を小さく抑制すべく事前の対策でリスクを回避できる。

実は、筆者のもとに寄せられる現場からの事前予測の依頼は、現在年間20件程度あり、2005年ぐらいいから着実に増えている。これは、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」（品確法）の施行なども影響していると思われる。この法律で、ひび割れと瑕疵が関連付けられるようになってから、ひび割れに対する建築主の目は以前より厳しくなっている。

このため、十分な配慮をせずにひび割れが多発する設計や施工をしないと、トラブルに巻き込まれるリスクが格段に高くなっている。トラブルを回避

するためにも、事前の予測データを建築主に提示し、施工上の配慮だけでは避けられないひび割れに関して、理解を求めることは大きな意味があると思われる。

6 ケースに分けて判定

では、ひび割れの発生確率、ひび割れ幅、ひび割れ間隔などは、具体的にどう算出するのだろうか。その大まかな流れを見ていこう。

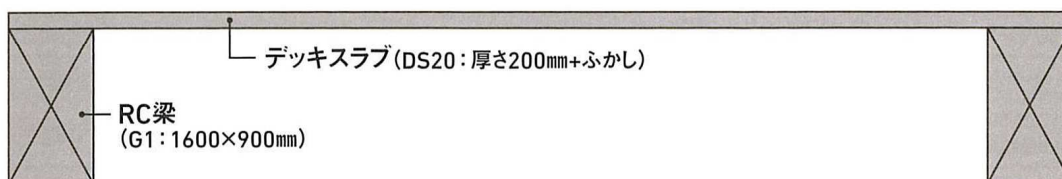
まず、関係する大梁、小梁、床部材について断面を設計図書から読み取る。これらの部材断面に基づいて、長辺方向をX軸、短辺方向をY軸とし、それぞれの解析モデルを設定する（図3）。

図3 設計図書をもとに解析モデルを設定

[X軸方向の1階デッキスラブの解析モデル]



[Y軸方向の1階デッキスラブの解析モデル]



設計図書から関係する大梁、小梁、床部材の断面を決定する。これらの部材断面に基づき、長辺方向をX軸、短辺方向をY軸とし、それぞれの解析モデルを設定する

図4 ひび割れに影響する要素を洗い出し

解析の パターン分類	解析方向	乾燥収縮率	膨張材の 使用有無	鉄筋比 (%)
ケース 1	X 軸方向	800 μ	×	0.19 と 0.23
ケース 2	X 軸方向	650 μ	×	0.19 と 0.23
ケース 3	X 軸方向	650 μ	○	0.19 と 0.23
ケース 4	Y 軸方向	800 μ	×	0.87 と 1.06
ケース 5	Y 軸方向	650 μ	×	0.87 と 1.06
ケース 6	Y 軸方向	650 μ	○	0.87 と 1.06

ひび割れ影響要因として、乾燥収縮率、膨張材の有無、鉄筋比などに着目。それらを組み合わせて6 ケースに分類した

さらに、この時点でひび割れに大きな影響を与え、かつ施工者が変更できる条件は (1) コンクリートの乾燥収縮率、(2) 膨張材使用の有無であったため、これらを組み合わせて6つの解析ケースを設定。

さらに各解析ケースに対し、鉄筋比変更の効果を設計者に対して示すため、それぞれ2つの鉄筋比レベルを設定した(図4)。

ここまでが下準備である。あとは、6つのそれぞれのケースで、コンクリートに発生する内部応力(拘束引張応力)、

ひび割れ発生強度、ひび割れ発生確率、ひび割れ幅、ひび割れ間隔の5要素について、計算式を使って求める。

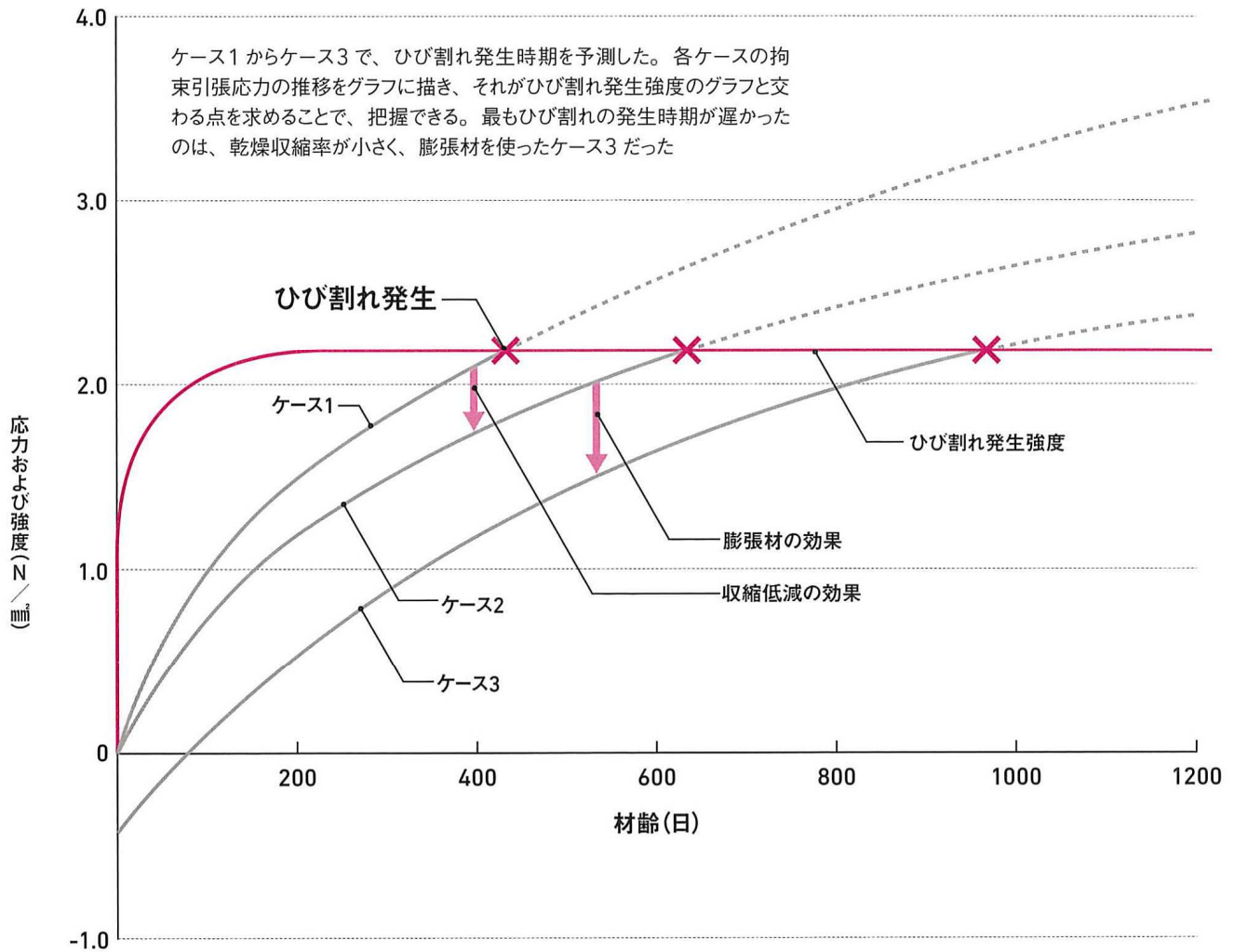
それぞれの計算式は「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」(日本建築学会、2006年発行)に掲載されている。例えば、拘束引張応力の計算式は、同解説の66ページの解3.12に、ひび割れ幅の計算式は79ページの解3.26に、それぞれ示されている。

リスク見極め、事前の協議を

図5は、解析結果をもとにして、拘束引張応力の推移をグラフにしたものだ。図4で設定したX軸方向の3つのケースで、挙動を示している。

拘束引張応力が最も早くひび割れ発生強度に到達するのは、ケース1である。これは乾燥収縮率が800 μ の生コンの使用を想定したもので、約1年を経過した時点でひび割れが発生する。それよりも乾燥収縮率が小さい650 μ のケース2は2年弱でひ

図5 拘束引張応力の推移からひび割れ発生時点を予測



び割れが発生し、さらに膨張材を使用したケース3は3年近く経過してひび割れが発生する。一般に、ひび割れ発生が早いほどひび割れの数も多くなる。同様に、ひび割れ幅、間隔、発生確率なども算出し、それを一覧表にまとめたのが先に示した 図2 である。

注意したいのは、X軸方向のひび割れ幅が、鉄筋比が小さいため打設後2年でどれも0.5mmを超えている点だ。このような場合、瑕疵とひび割れの関係を示した、国土交通省

告示1653号の規定がそのまま適用されると、瑕疵の可能性が高いと判断される恐れがある。

しかし、このような仕様ではひび割れ幅が0.5mmを超えることを防ぐのは難しい。そうすると、設計を見直すか（鉄筋比の増加）、床スラブに生じる幅の大きいひび割れをある程度許容するか、どちらかの選択を迫られる。建築主、設計者、施工者の間でよく協議する必要がある。

ちなみに、ひび割れの幅や間隔などを計算式で求めることは、2001年以

降のひび割れ研究の成果によってもたらされた。

01年以降の研究成果が結実

2001年に、東北大学の三橋博三名誉教授を主査とする研究委員会が日本建築学会内に組織され、ひび割れ制御に関する性能設計の手法を確立する試みが始まった。その成果によって、事前にひび割れの挙動を計算式で予測できるようになり、それに基づく判定が可能となった（図6）。

STEP 1

STEP 2

図6

ひび割れの性能設計が 確立されたプロセス

ひび割れの性能設計が可能になったのは、2001年以降の研究成果によるところが大きい。まず、ひび割れ発生に影響を与える材料特性を洗い出し、それらの特性値を正確に把握したうえで、計算式を使ってひび割れの挙動を予測できるようにした

ひび割れ発生に
影響を及ぼす材料特性を、
高い精度で把握する

ひび割れの 誘発要因

- 収縮ひずみ
- 弾性係数
- 外部からの収縮拘束

ひび割れの 抵抗要因

- 引張クリープ
- 引張強度

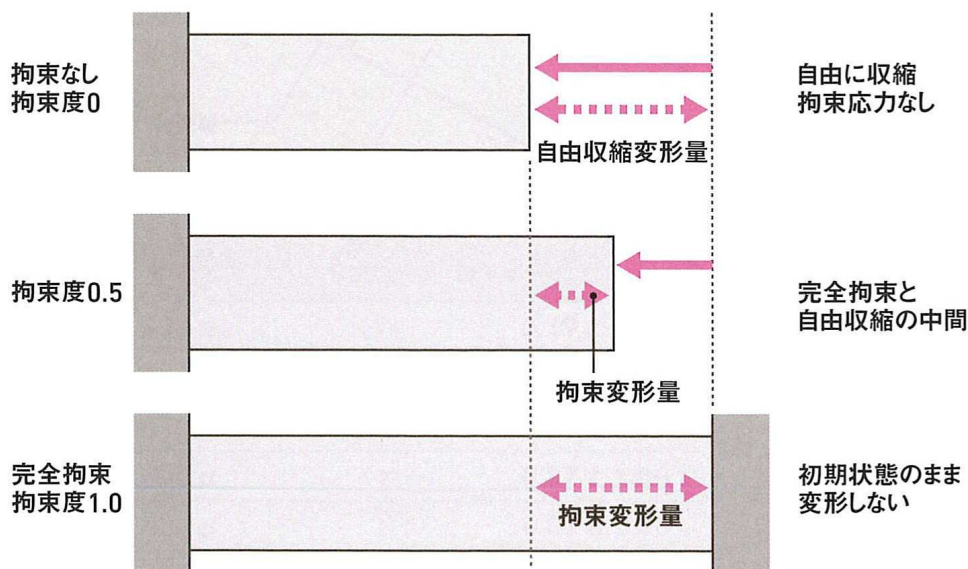
拘束引張応力の算定値から、
ひび割れの発生確率や、
ひび割れ幅を計算式で求める

- 1 拘束引張応力の算出
- 2 発生確率の算出
- 3 ひび割れ幅の算出
- 4 ひび割れ間隔の算出

図7

拘束度を 正確に判定できれば 精度が向上

コンクリートが自由に収縮できる場合は拘束度0、完全に拘束されている場合は拘束度1、拘束度0の半分の収縮量は拘束度0.5としている。しかし、現実の構造物はこう単純ではなく、判定は難しい



$$\text{拘束度} = \text{拘束変形量} / \text{自由収縮変形量}$$

こうした設計指針は諸外国にも例がなく、日本のひび割れ研究は世界的に見ても、トップレベルにあると言える。

ただし、計算式の精度をさらに向上させるためには、研究上の大きな課題がある。それは、拘束度をもっと正確に判定することである(図7)。そもそも拘束度と収縮ひび割れは、切っても切れない関係にある。コンクリートが乾燥して収縮する際、既存構造部がそれを許さず拘束して引っ張るから収縮ひび割れが発生する。

そのため、ひび割れに関する計算式のほとんどは、拘束度の項を含んでいる。

これを正確に把握できれば、ひび割れの性能設計は、さらに精度が向上すると思われる。

ここがポイント

ひび割れの発生確率を予測し、**事前に**
建築主に説明して理解を得ることは大きな意味がある

性能設計の精度をさらに向上させるには、
拘束度の正確な判定が課題になる