

コンクリートの
新知見

ひび割れ トラブル 完全**克**服法

New knowledge of Concrete

著 閑田徹志 鹿島技術研究所

必読! 最新のコンクリート研究の成果

単位水量より骨材の影響が大!

床スラブのひび割れは防げない?

夏の打設を避けたい本当の理由

まえがき

「ひび割れのないきれいな建物を造ってほしい」。この発注者のシンプルな要望に確実に応えられる技術が、膨大な設計・施工技術の蓄積にも関わらず、いまだ確立されていないことについて、ひとりの技術者として責任を感じてきました。

しかし、ここ10年ほどの間に、ひび割れに関わる研究が大きく進捗し、課題を解決する糸口が見えてきました。キーワードは「数値化」と「制御」です。数値化とは、これまで経験的に扱ってきたひび割れを定量的に予測する技術が進展したことを受け、ひび割れが発生するリスク、ひび割れ幅、ひび割れ間隔などを用いて定量的に議論することを意味します。制御とは、ひび割れを完全に無くすることがさまざまな要因から難しいことを考慮して、ひび割れを許容するが有害でないレベルに抑制するという方針を指します。これら2つは、ひび割れによる不具合を合理的に回避するための大きな武器になるもので、本書における最も重要なコンセプトです。

本書は、設計者、施工管理技術者、建築専門知識を有する発注者などを対象に書かれています。それぞれの立場で、ひび割れに対する考え方は異なる場合もあるかもしれませんが、より良質の建物を実現するという目標は共通しています。数値化と制御という2つのキーワードに沿って、ひび割れに関する共通認識を形成することは目標の達成に有効で、本書ではその手助けとなる材料を提供したいと考えました。執筆に際しては、現象をなるべく単純化するなど、研究的な視点からの正確性よりも直感的に理解できることを優先しています。

昨今、ひび割れに関わるトラブルが広く発生していると言われています。このトラブルは、非技術者であるユーザー側と技術者側とのひび割れに関する認識ギャップが要因の1つになっていると考えられます。さまざまな制約や知見の不足により、ひび割れ防止が難しい技術課題であることは事実です。その事実を専門家はユーザー側に丁寧に説明して理解を得ていくことがトラブル回避に重要です。本書は、この難しさを定量的に説明し、理解を得る一助とすることも意図しました。

鉄筋コンクリート建築物の設計・施工における古くて新しいリスク要因であるひび割れ問題の解決に向け、読者の皆さんのお役に立つことができれば幸いです。

鹿島技術研究所建築生産グループ長
閑田徹志

目次

CHAPTER 1

ひび割れ対策は、本数と幅の制御が基本 7

- 1-1 建築主の理解得ながら有害なひび割れを制御 8
 - 1-2 ひび割れ対策は本数と幅に分けて対処 12
 - 1-3 有害なひび割れを仕上げ材でカバー 17
 - 1-4 ひび割れ幅の抑制は鉄筋比増大が決め手 22
 - 1-5 長過ぎる養生はかえって逆効果? 27
 - 1-6 ひび割れの幅は打設前に予測できる 32
-

CHAPTER 2

誘発目地が効かない? 理由と対策を徹底解説 37

- 2-1 目地を設けたのに失敗した理由とは 38
-

CHAPTER 3

かぶり厚さの確保は、品質維持の生命線 45

- 3-1 かぶり厚さの確保がさび防止に効く理由 46
 - 3-2 標準仕様の施工でもかぶりの不良が発生 51
 - 3-3 かぶり不足の補修材は防火性と耐久性で選ぶ 56
-

CHAPTER 4

リスクを左右する生コンの乾燥収縮率 61

- 4-1 骨材の収縮に要注意、乾燥ひび割れを助長 62
 - 4-2 工場で異なる生コンの品質、適材適所で賢く使い分け 67
 - 4-3 JISマークがなくても採用できる生コンがある 72
-

CHAPTER 5

床スラブはひび割れ多発箇所 77

- 5-1 完全には防げない床スラブのひび割れ 78
 - 5-2 甘く見るとケガのもと、土間床の施工は慎重に
コンクリートこぼれ話① 83
-

CHAPTER 6

誤解だらけの温度ひび割れ対策 89

- 6-1 温度ひび割れは温度低下時に注意 90
- 6-2 セメント量を削減しても温度ひび割れに効果なし 95
- コンクリートこぼれ話② 100

CHAPTER 7

悪条件が重なる夏の打設に要注意 101

- 7-1 夏冬間の気温低下で温度ひび割れが発生 102
- 7-2 施工季節を誤ると「後打ち帯」は逆効果 107
- コンクリートこぼれ話③ 112

CHAPTER 8

環境に優しい高炉セメントを利用 113

- 8-1 環境に配慮するなら高炉セメントの検討を 114

CHAPTER 9

選択肢が広い混和剤、適材適所で有効活用 119

- 9-1 過剰な期待は禁物、膨張材を賢く利用 120
- 9-2 高コストでも効果大、収縮低減剤を利用 124
- 9-3 目地なしでもひび割れなし、無収縮コンクリートの威力 129
- コンクリートこぼれ話④ 134

対談 厳しい目向ける発注者、専門家は十分な説明を 135

資料編 143

索引 151

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】

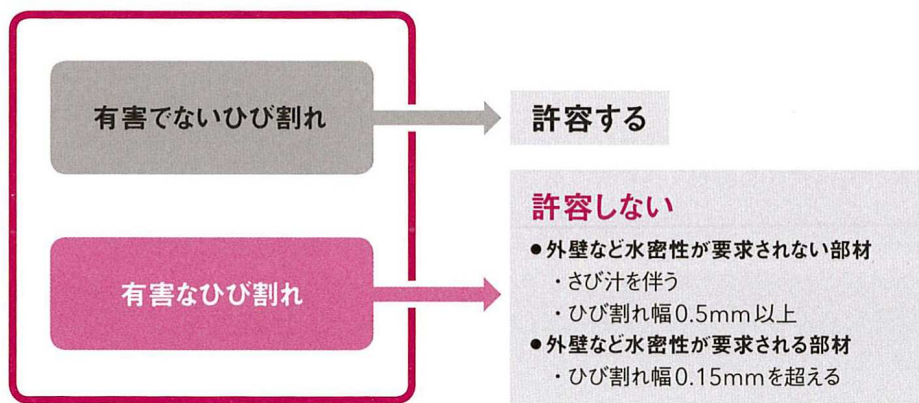


図2 健康管理とよく似た側面が

【咳などの症状】

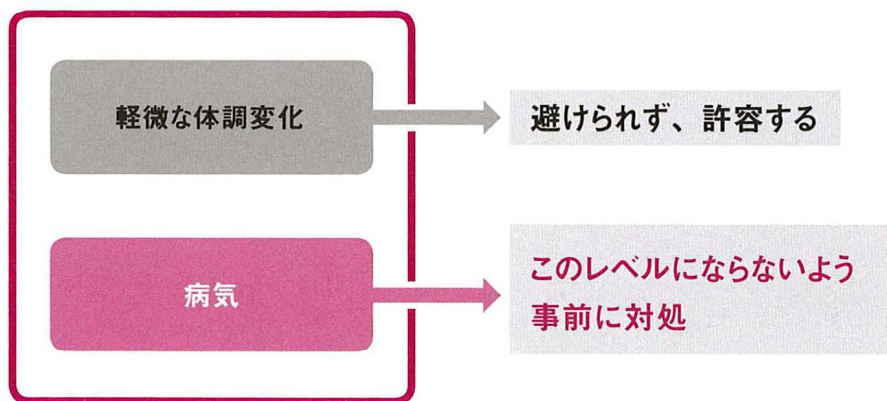
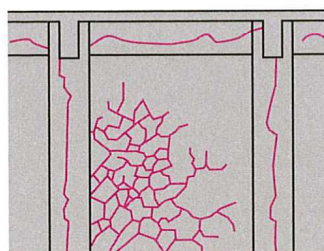
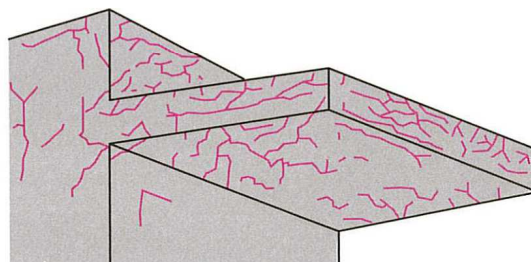


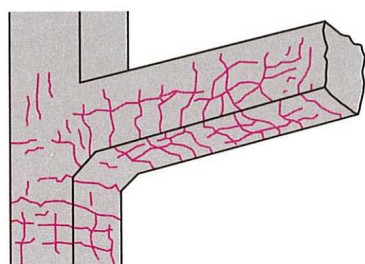
図3 疑問の余地のない有害なひび割れ



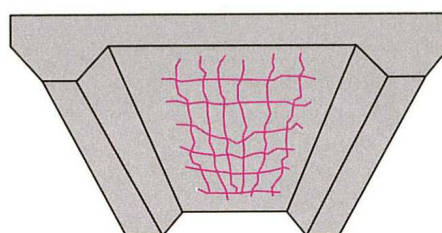
アルカリシリカ反応
(アルカリ骨材反応)



凍結融解サイクル
(寒冷地)

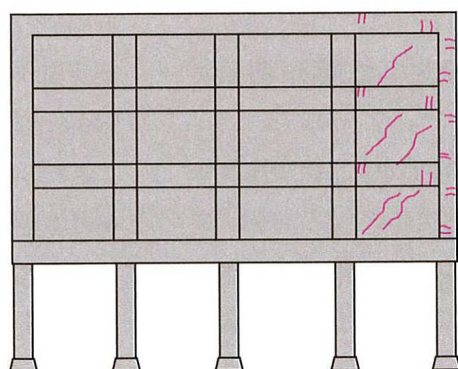


火災による火害



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、有害なものとするのでない境界を定めれば、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。

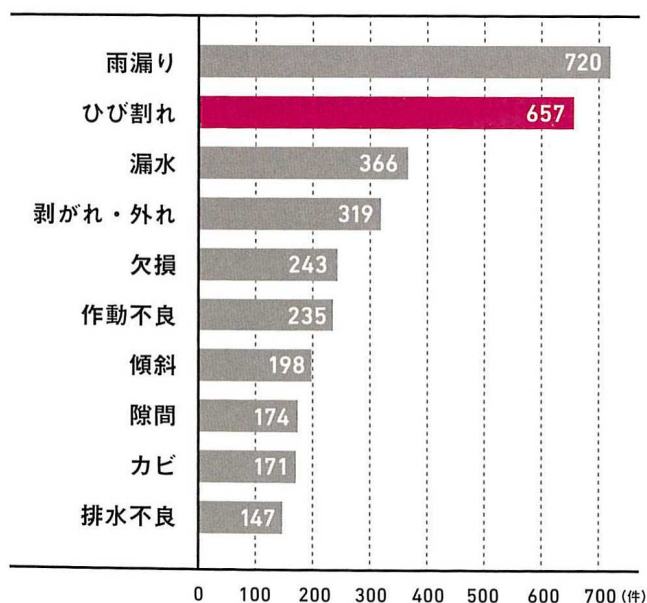
多くの建築実務者が、鉄筋コンクリート（CR）のひび割れ問題に真剣に取り組んでいるが、十分な成果を上げることができないケースも多い。その原因として、ひび割れがなぜ発生するか、ひび割れ対策の意味や効

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

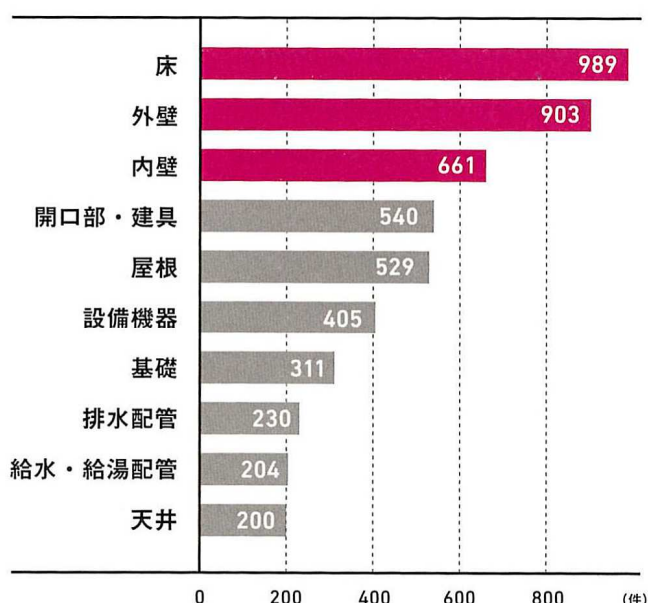
住宅リフォーム・紛争処理支援センターがまとめた資料によれば、不具合発生に伴って寄せられた相談のなかで、ひび割れは雨漏りに次いで2

図1 ひび割れの相談件数は雨漏りの次に多い



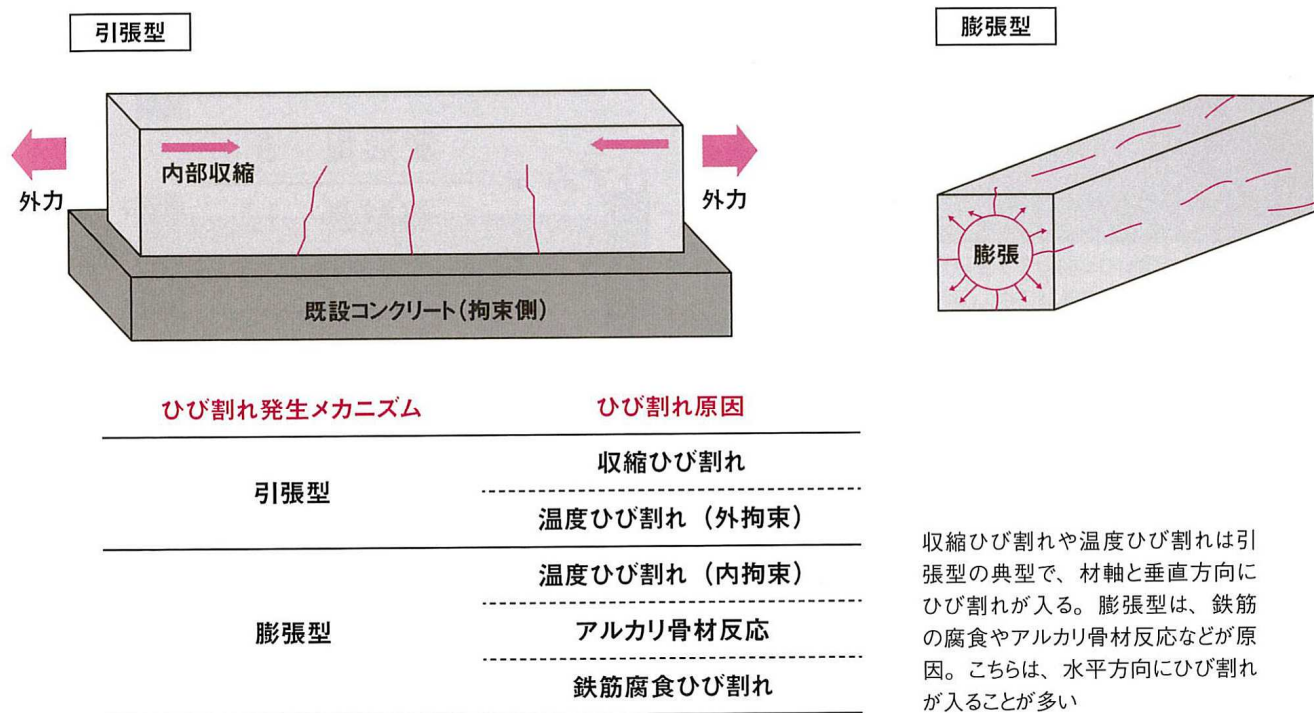
2009年度に住宅リフォーム・紛争処理支援センターに寄せられた不具合発生に関する相談の内容
(資料：右も住宅リフォーム・紛争処理支援センター)

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

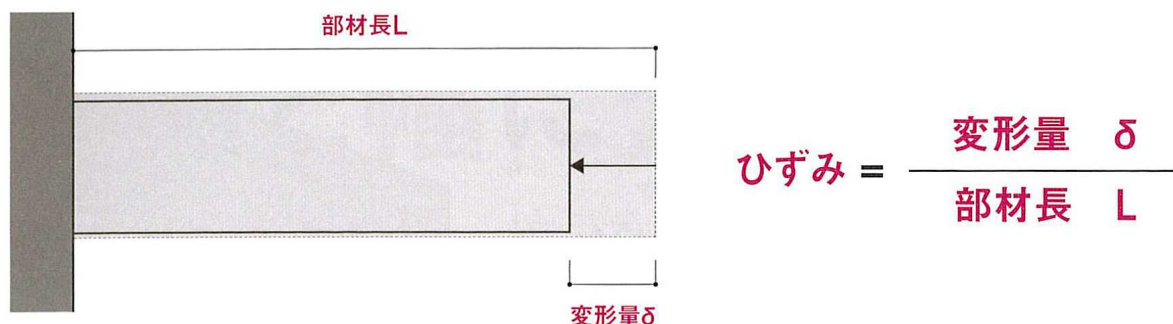
なるのは「引張型」と「膨張型」のいずれかである（図3）。収縮ひび割れや温度ひび割れは引張型で、材軸に垂直方向にひび割れが入る。一方、鉄筋の腐食やアルカリ骨材反応が原因となるのが膨張型で、これは材軸方向にひび割れが入ることが多い。ここでは、現場で最も多く発生し、対策が難しい引張型に力点を置いて説明したい。

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

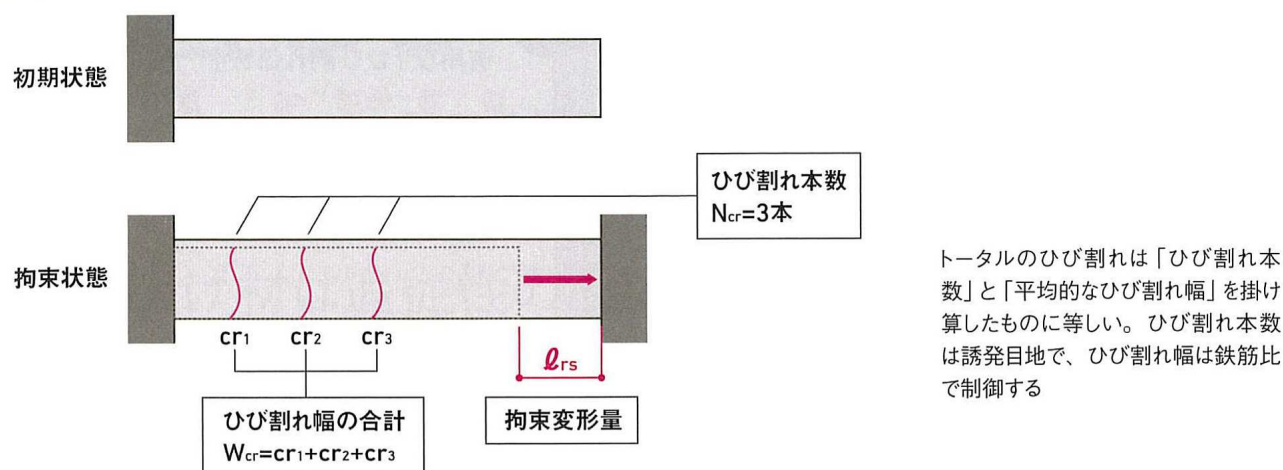
い。しかし、壁や床の薄い部材でも、地下に接する場合などでは、温度が重要な要因となり、ひび割れ発生に大きな影響を与えるので要注意だ。

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



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

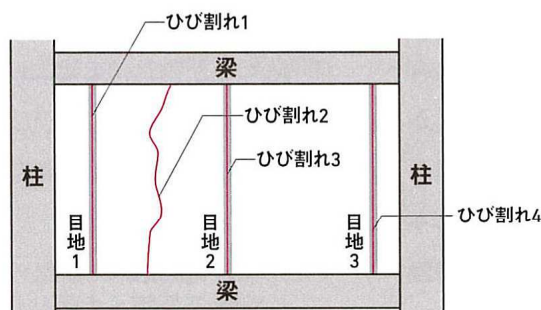
ひび割れ本数

ひび割れ幅

ひび割れ制御の原則 1

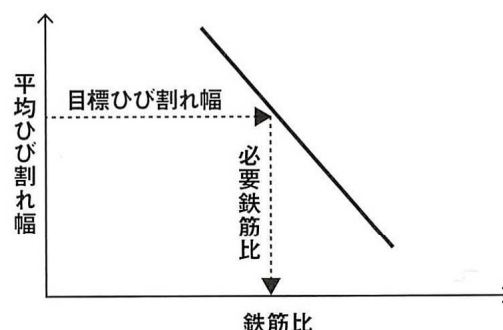
$$\text{ひび割れ本数} \leq \text{目地本数}$$

[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)。

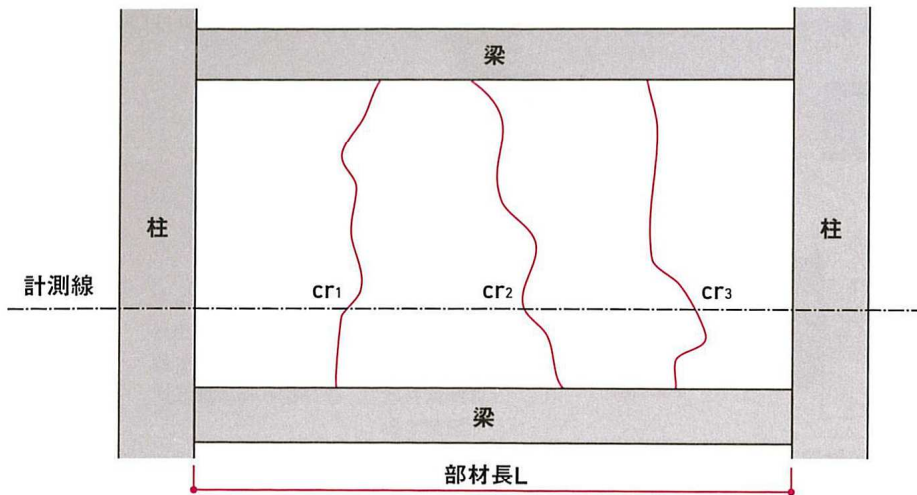


図7

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の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。

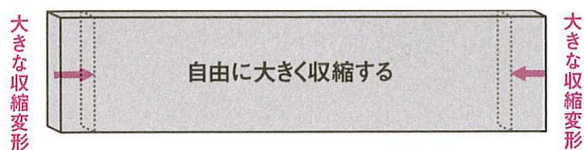
1mm超の追従性持つ仕上げ材

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

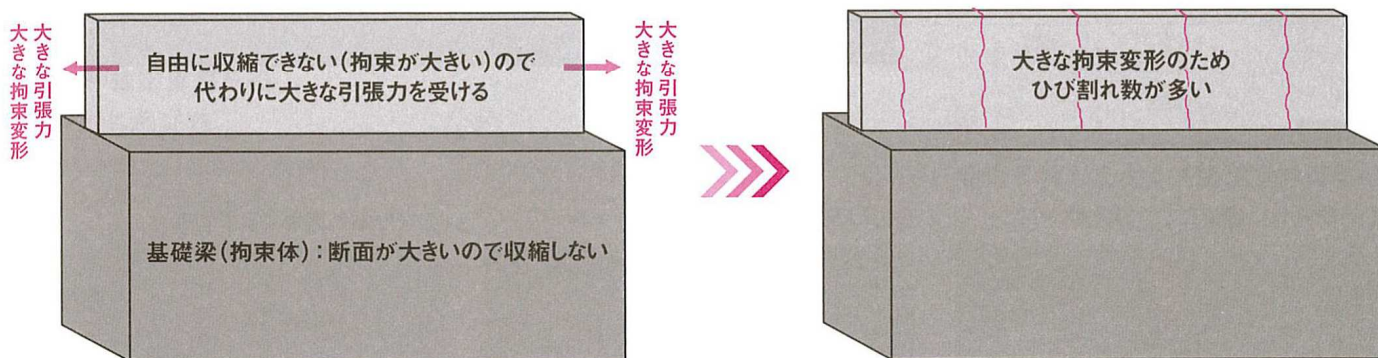
【図3】 拘束度が強いとひび割れ本数が増える傾向に

【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】

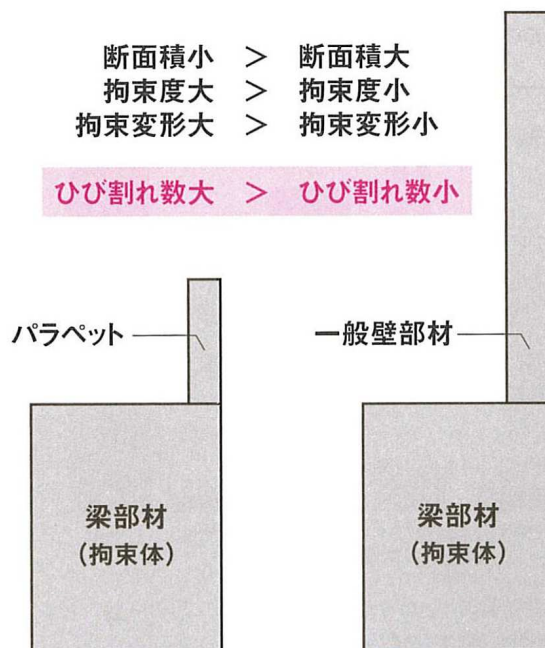


【③ 弱い拘束：小さな梁の上に打設した壁部材】



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



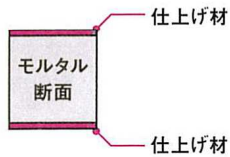
【図4】

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)

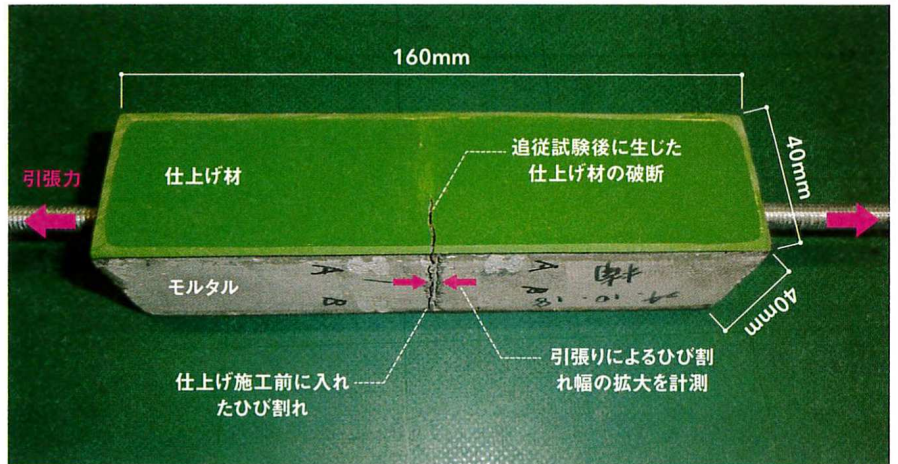


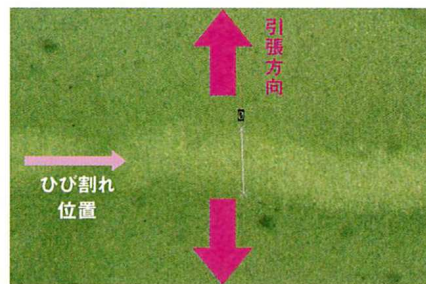
写真2

ひび割れに追従する仕上げ材の表面

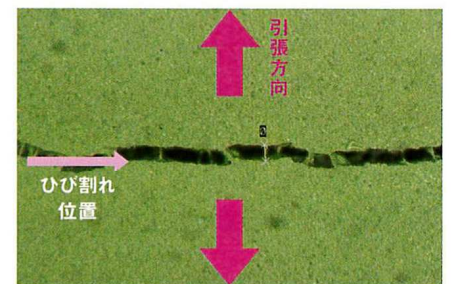
① ひび割れに追従している状態



② ひび割れ追従の限界近く



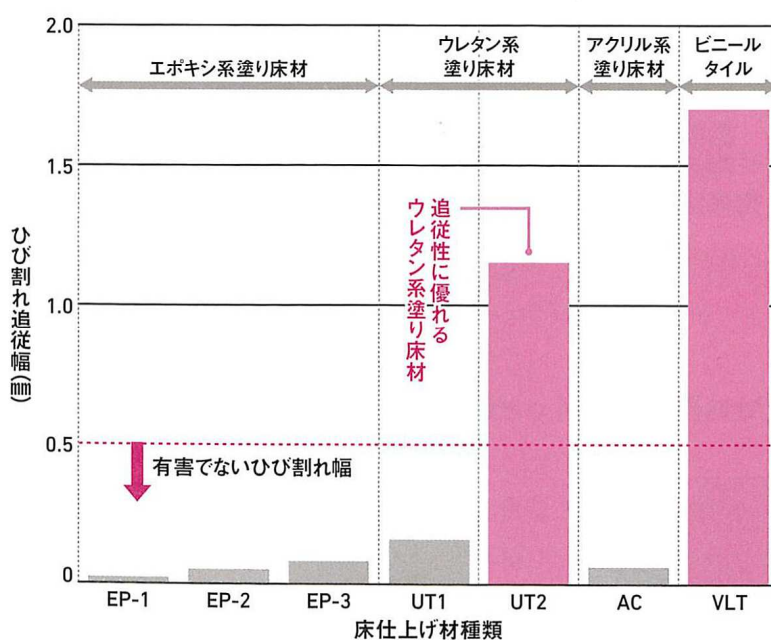
③ ひび割れ追従できず破断



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

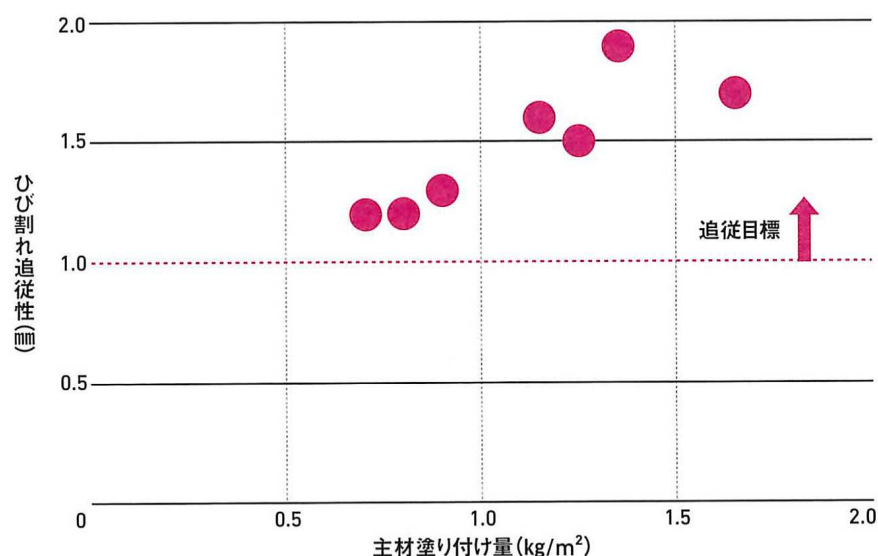
外壁のひび割れへの追従性を確保するには、防水形複層塗材 E と呼ばれる弾性タイルを選択するとよい。

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进行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)。

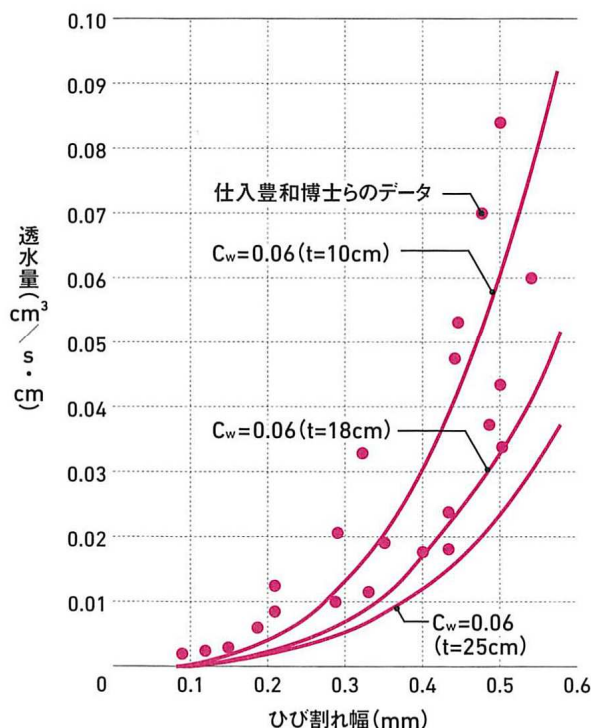
図中の式に示した通り、透水量は、ひび割れ幅の何と3乗に比例して増加する。

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…

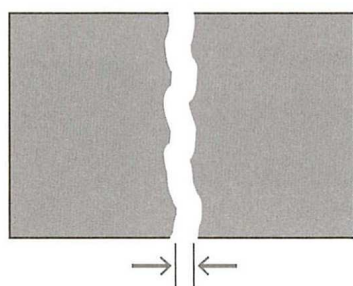
- ひび割れ幅の3乗に比例
- 水圧に比例
- 部材厚さに反比例

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

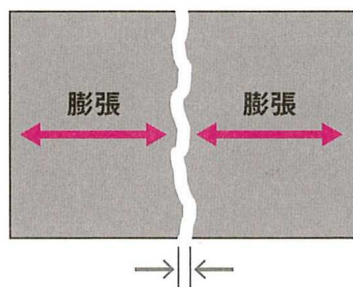
標準期
(春や秋)の
ひび割れ幅



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

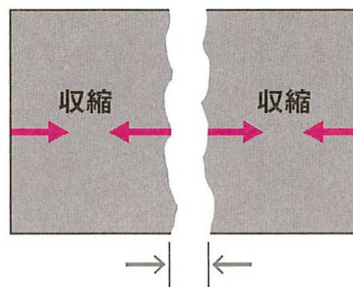
標準期
より
小



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

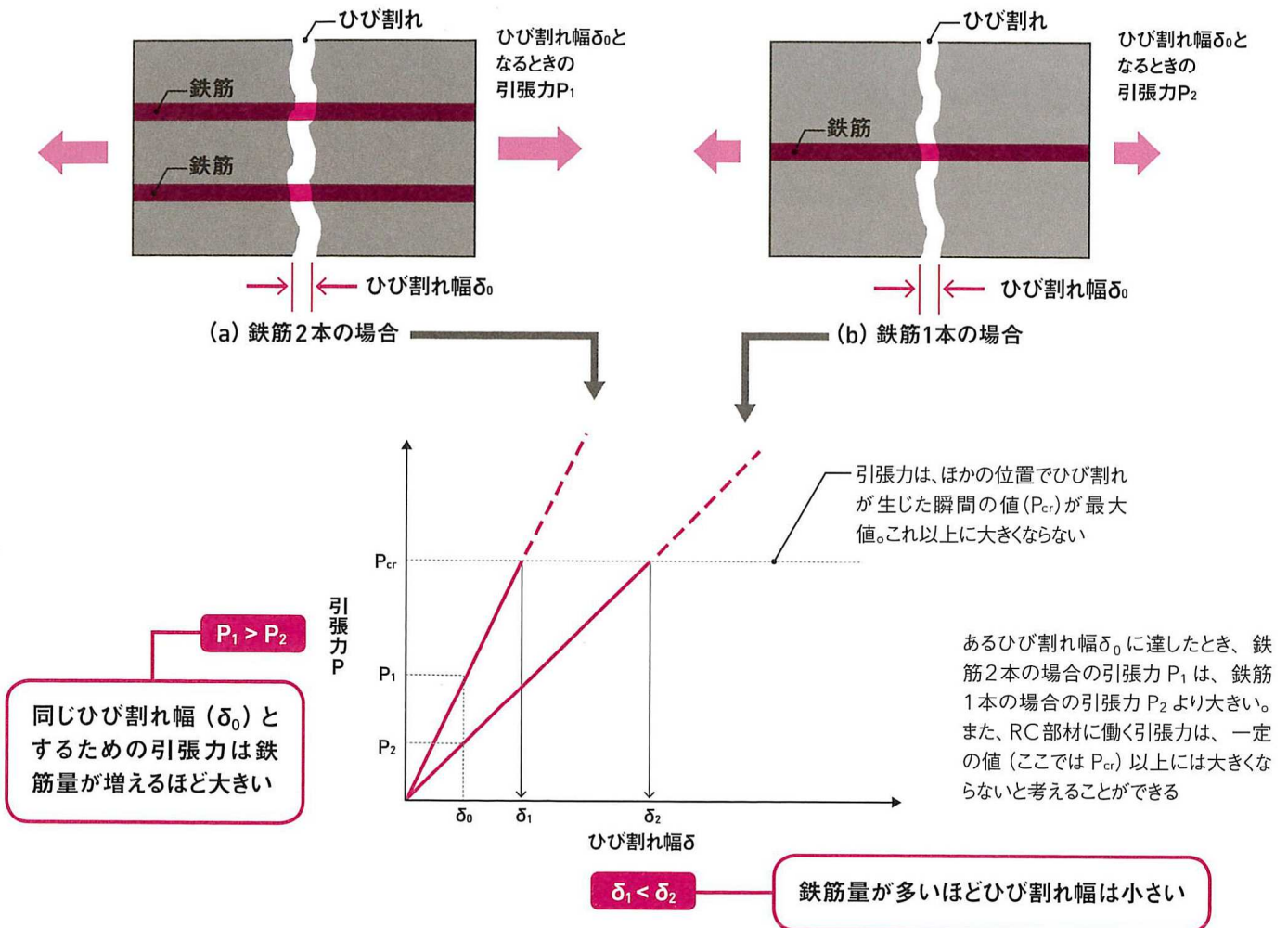
次に、ひび割れの特徴的な挙動を理解するため、ひび割れ幅に与える環境要因の影響について述べる。発生したひび割れ幅に最も顕著な影響を及ぼす環境要因は、温度である

(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

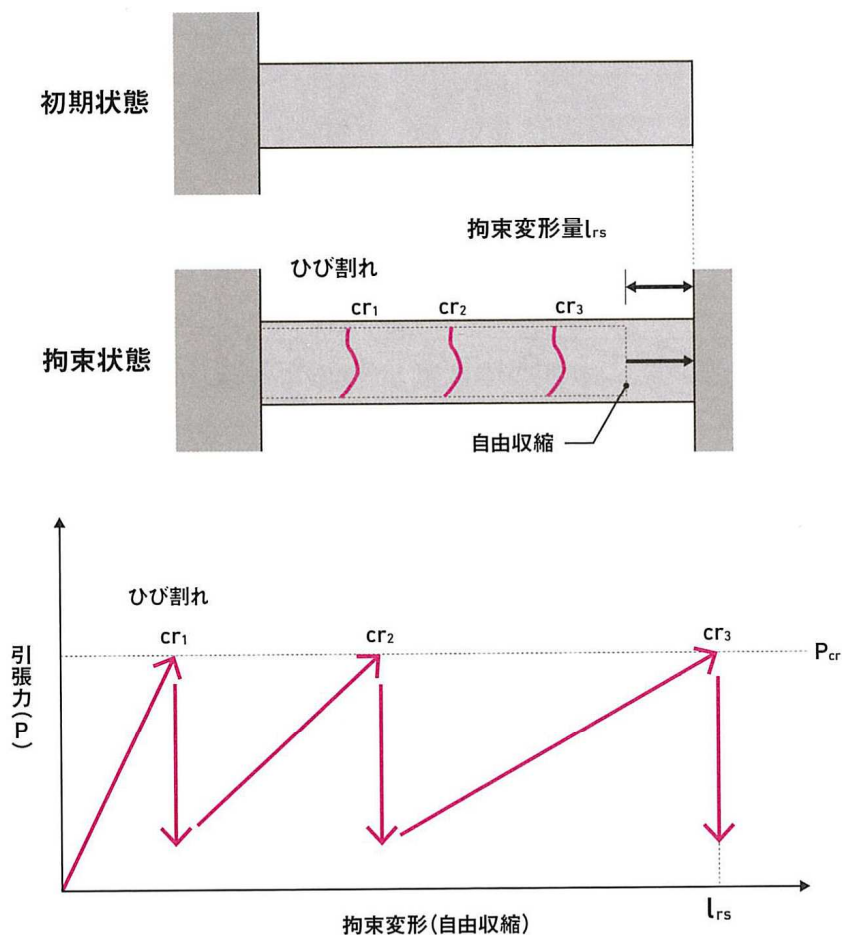
の値を超えて増大しないと見なせる(ただし、コンクリートの引張強度のばらつきを無視)。これも、ひび割れを適切に制御するためには、ぜひ知っておきたい事実である。

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

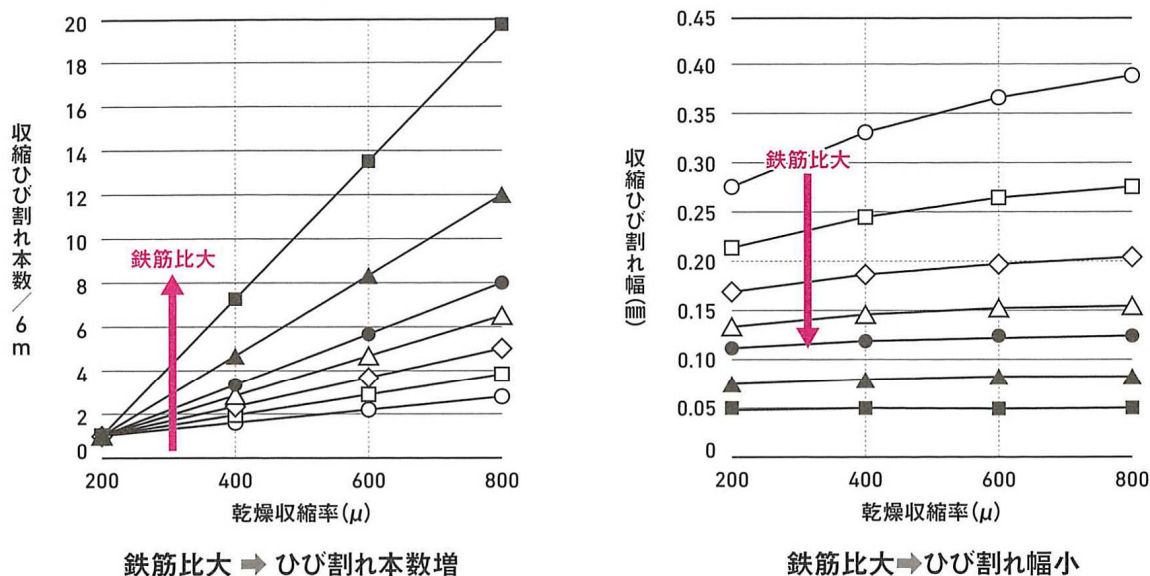
鉄筋比がひび割れ幅を支配するメカニズムを理解したところで、鉄筋比とひび割れ幅の具体的な関係を見て

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 $\rho = 1.3\%$

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

乾燥収縮率 800 μ

鉄筋比 $\rho = 0.6\%$

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

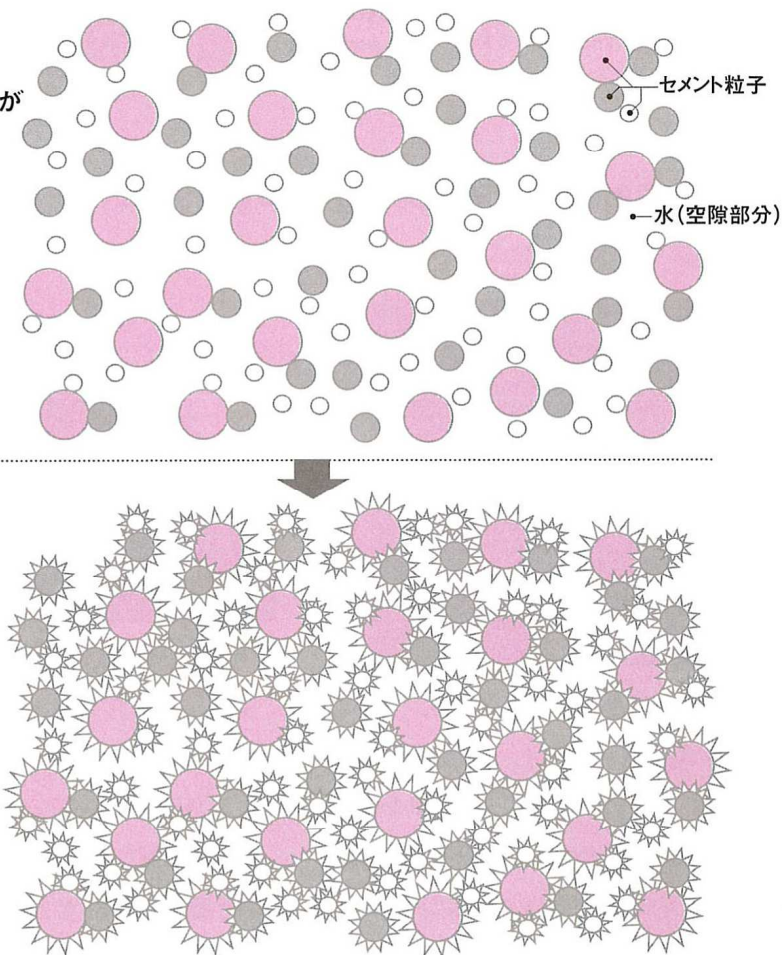
まず、養生の重要性を理解するた

図1

水和生成物が
空隙部分を
埋めていく

硬化前

硬化中

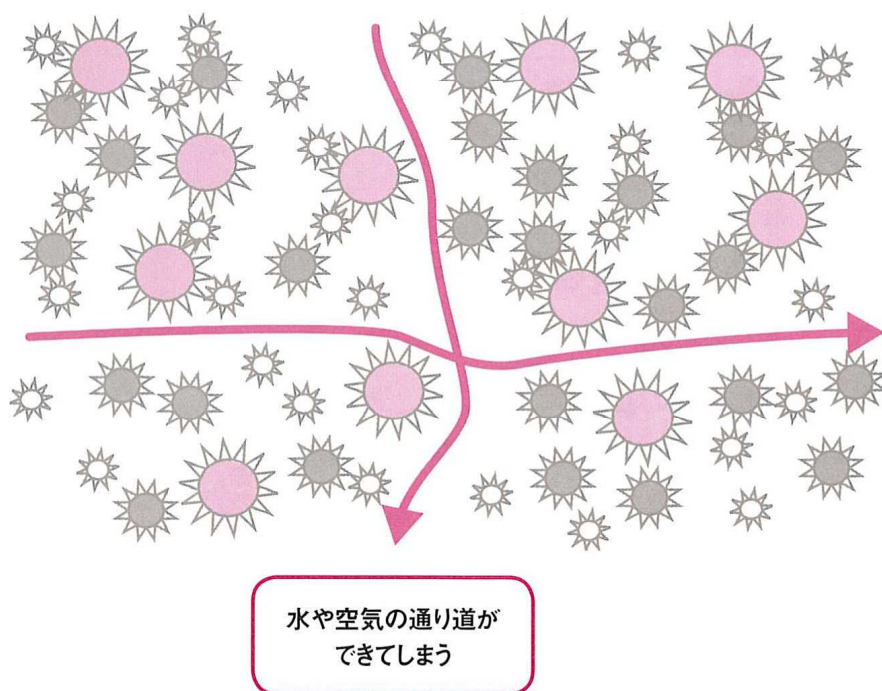


セメント粒子の周囲に水和物が生成され、もともと水だった領域を埋めていく

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

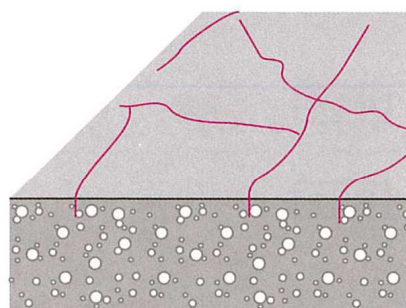
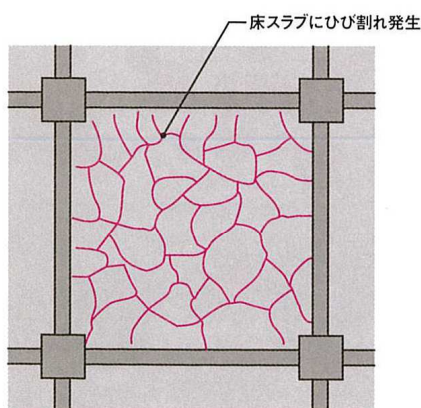
コンクリートの打設直後は、セメント粒子の周りを水が取り巻いている状態。水和反応が進むと、水和生成物が発生し、水の領域を埋めていく（資料：図3 まで特記以外は筆者）

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

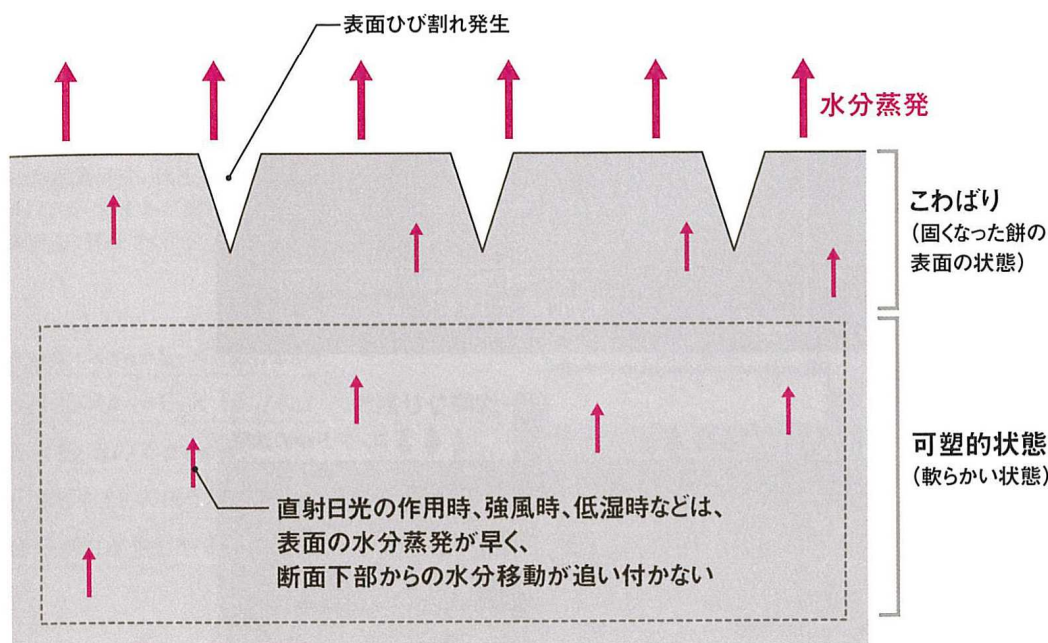
の体積に対してセメント粒子の体積は半分程度以下。つまり、セメント粒子はまばらな状態で存在している。

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、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/mm²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

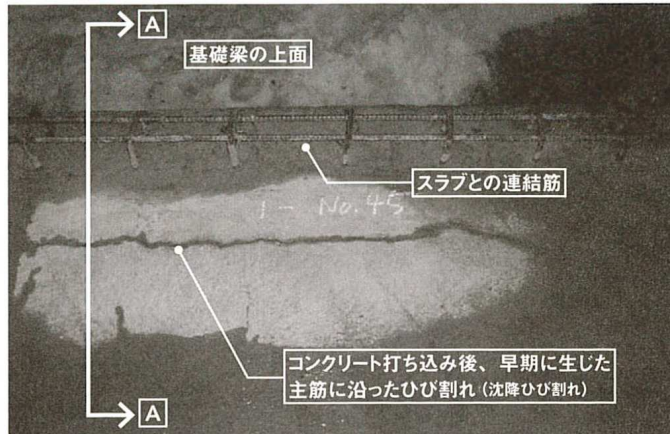
単位水量が不足しているだけに、このタイプのひび割れが頻発する。これを防ぐには、周囲に風除け、日除けの仮設を構築するとよい。また、左官による床スラブ表面押さえが終わった後、速やかに養生マットなどを敷設することも効果的である。

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)。

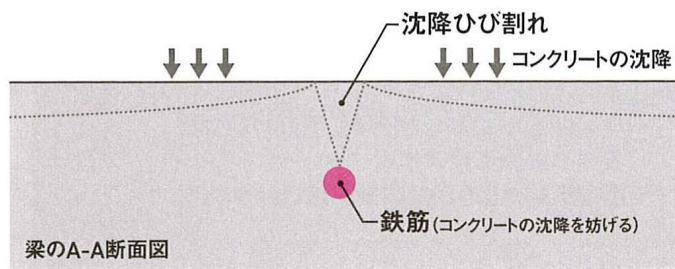
このとき、鉄筋がある部分では沈降が妨げられるので、鉄筋に沿った図5のようなひび割れが生じる。このタイプのひび割れは、コンクリートのブリーディングが落ち着いた後、タンピングと呼ばれる表面たたきを実行する

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

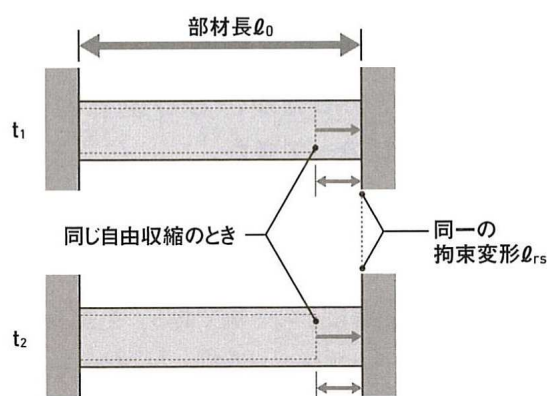
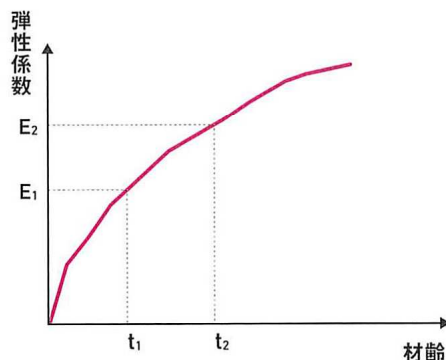
らず、引張強度が一本の線で表現されると模式的に示したが、実際には養生期間が長いほうが引張強度も向上する傾向にあるので、この図に示すほど、長い養生がひび割れまでの期間を明確に縮めるわけではない。しかし、重要なことは養生を長く施したからひび割れが防げるといった考え方は、合理性が薄いと考えられる点にある。この考え方は、下記欄外の文献などにも示されている。

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



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

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

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

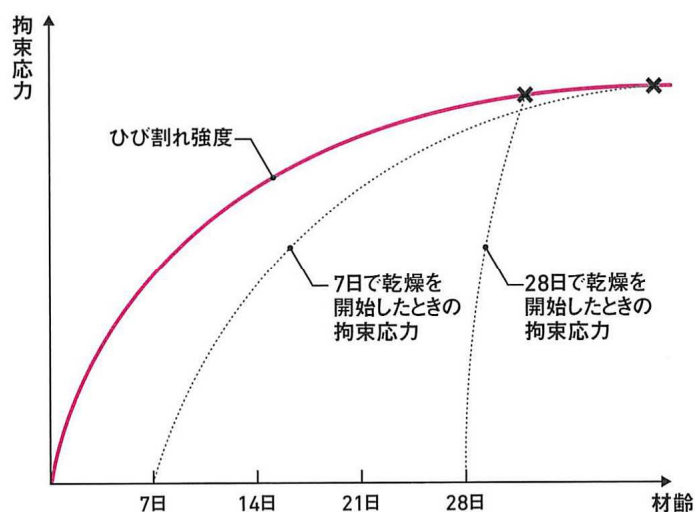
t_1 よりも t_2 のほうが

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）

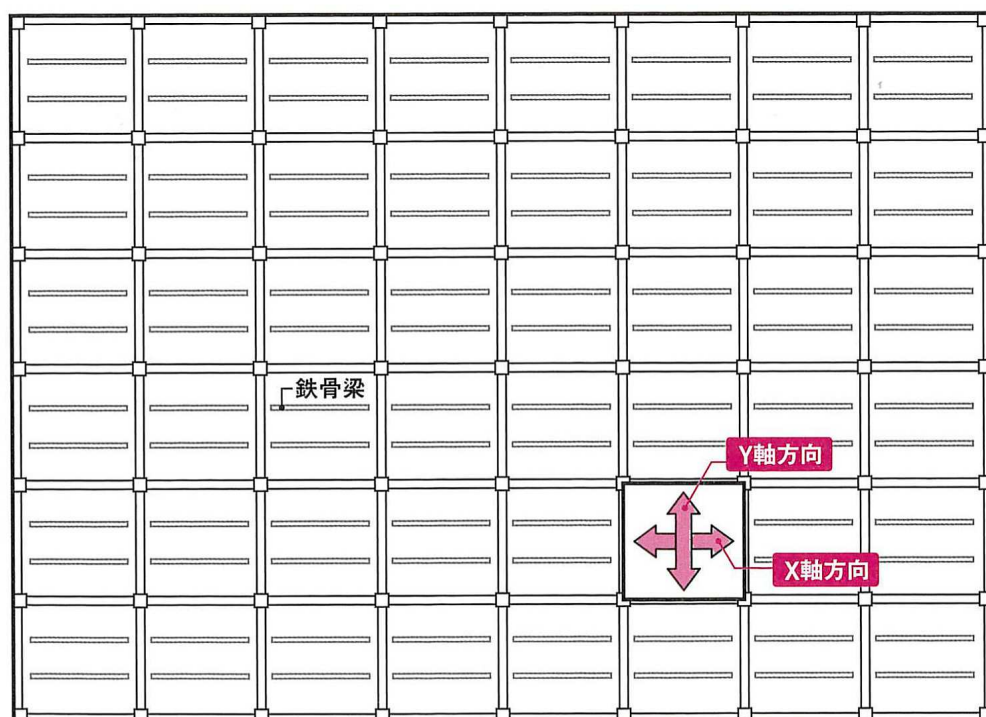


図2

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すると、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。

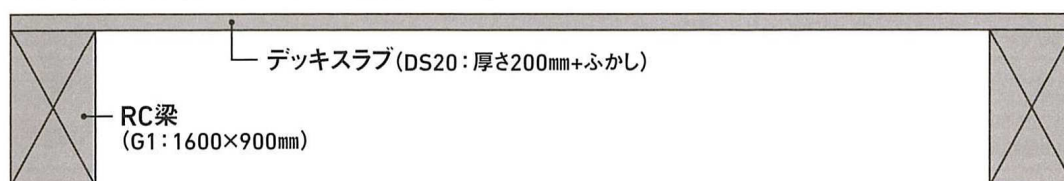
まず、関係する大梁、小梁、床部材について断面を設計図書から読み取る。これらの部材断面に基づいて、長辺方向をX軸、短辺方向をY軸とし、それぞれの解析モデルを設定する（図3）。

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。

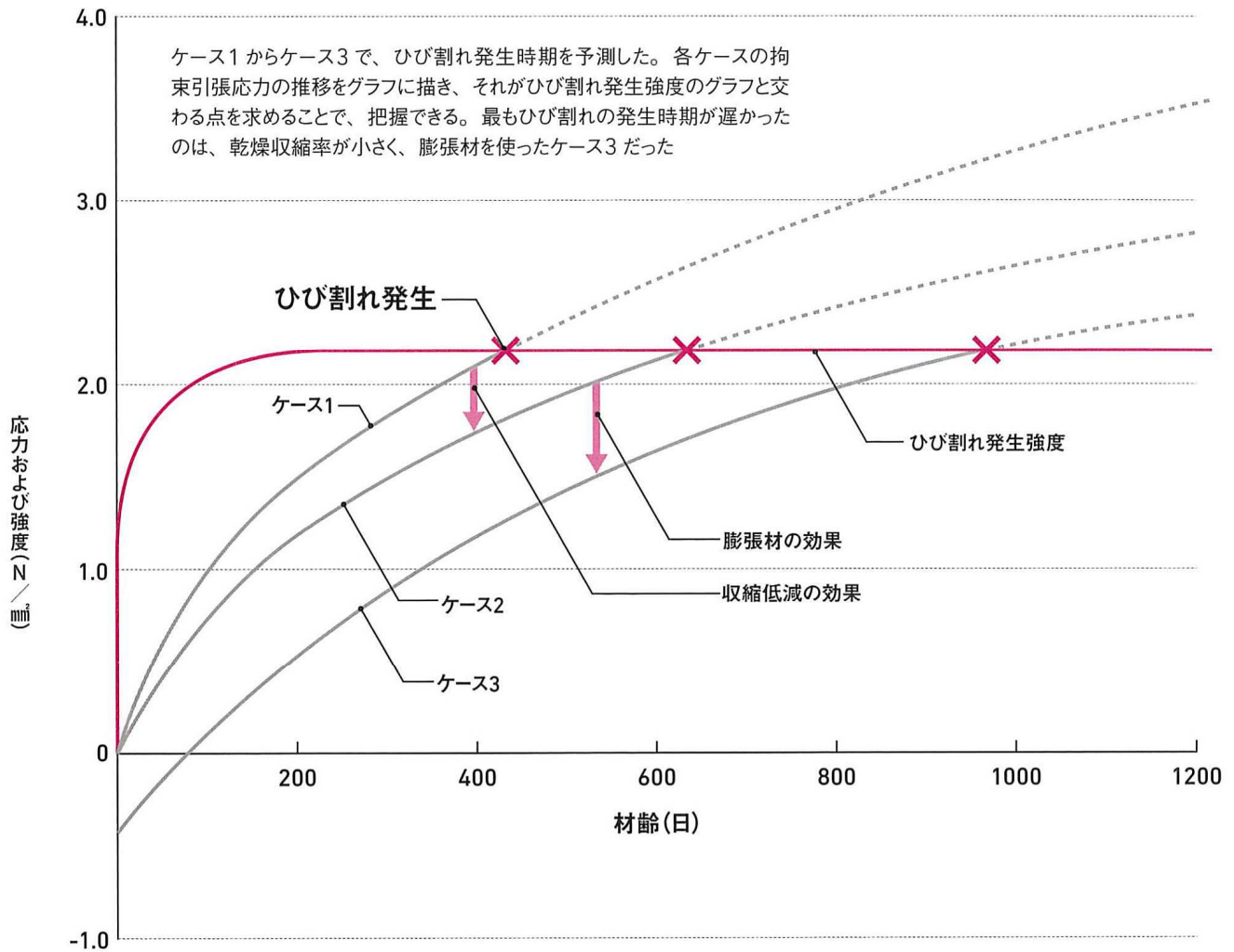
それぞれの計算式は「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」(日本建築学会、2006年発行)に掲載されている。例えば、拘束引張応力の計算式は、同解説の66ページの解3.12に、ひび割れ幅の計算式は79ページの解3.26に、それぞれ示されている。

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

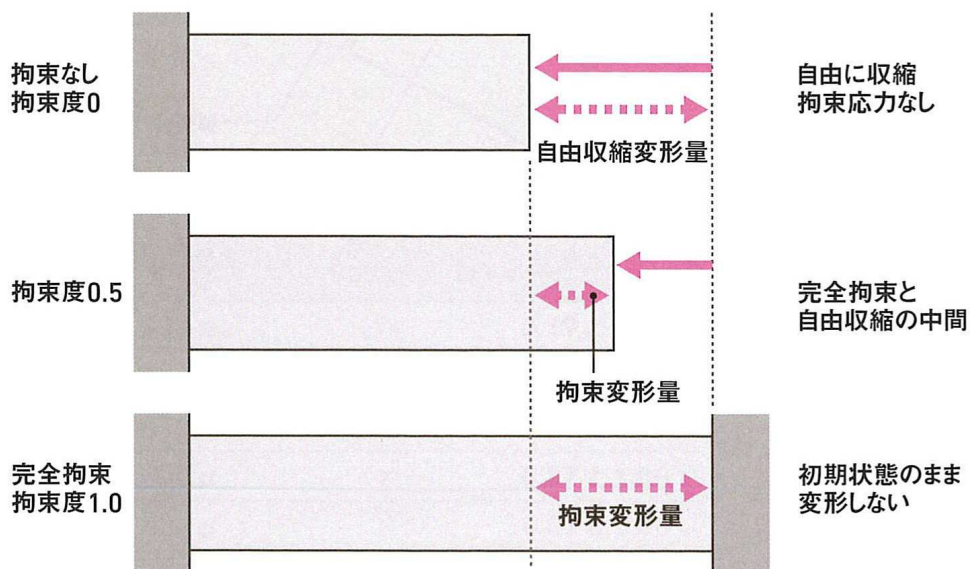
拘束引張応力の算定値から、
ひび割れの発生確率や、
ひび割れ幅を計算式で求める

- 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

CHAPTER 3

かぶり厚さの確保は 品質維持の生命線



かぶり厚さの確保が さび防止に効く理由

➡ 鉄筋腐食のメカニズムから重要性を検証

鉄筋の腐食によるひび割れは、建物の耐久性を損なう深刻なトラブルだ。それを避けるには、何よりもかぶり厚さを十分に確保することが大切だ。その理由とメカニズムを解説する。

ここでは、鉄筋の腐食によるひび割れを取り上げる。鉄筋腐食によるひび割れは、これまで説明してきた収縮ひび割れ以上に、建物の耐久性に直接かつ深刻な影響を与える。これを防止することは建物を長く供用するうえで、非常に重要である。

図1は、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」（品確法）に関連し、ひび割れと瑕疵の関係について規定した国土交通省告示1653号の内容

をまとめたものである。この表は2-2で掲載した表の一部だが、さび防止の観点からも非常に重要な表なので、もう一度よく見てほしい。さび汁を伴うひび割れは瑕疵の可能性が高いと明記してある。鉄筋腐食ひび割れは、一般にさび汁を伴うことから、トラブルに発展するリスクが高い。

典型的な鉄筋腐食ひび割れを生じたコンクリート構造物を写真1に示す。最外縁の鉄筋に沿ってひび割れが生

じ、赤茶色のさびやさび汁が表面に浮き出ているのが分かる。こうした事例を、海岸近くのコンクリートで目にしたことがある読者も多いと思う。このような鉄筋腐食ひび割れは、どのようなメカニズムで生じるのか。まずは、そこから説明したい。

特に塩化物の侵入に要注意

コンクリートは健全であればアルカ

図1 ひび割れの状況と瑕疵の関係

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在する可能性
構造材による仕上げ	1	レベル2およびレベル3に相当しないひび割れ	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 (2) さび汁を伴うひび割れ	高い

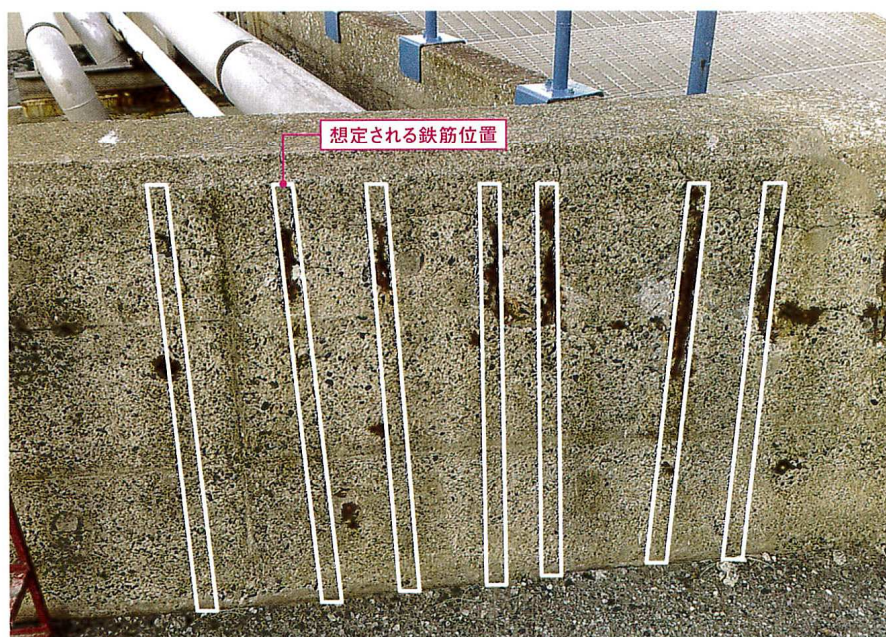
国土交通省告示1653号では、さび汁を伴うひび割れは瑕疵の可能性が高いと明記してある
(資料：国土交通省告示1653号をもとに筆者が作成)

写真1

かぶり厚さの不足が 鉄筋腐食ひび割れを招く

最も外側に配置した鉄筋に沿ってひび割れが生じ、赤茶色のさびやさび汁が見られる。かぶり厚さの不足が原因だ

(写真：写真3まで鹿島)



り性が強く、鉄筋を腐食から守る保護機能がある。しかし、外部からの二酸化炭素の侵入により、表面から徐々に中性化が進行すると保護機能が失われる。

また、沿岸地域に建物がある場合には、同じく表面から塩化物が浸透することで保護機能がなくなる。中性化の進行や塩化物の侵入が鉄筋位置まで到達し、さらに十分な水分と酸素が存在すると鉄筋腐食が始まる。

さらに、鉄筋が腐食すると、鉄筋の体積が膨張し、コンクリート中に図2に示すような膨張圧が発生する。この膨張圧に起因する引張応力がひび割れ強度を超えると、鉄筋腐食ひび割れが生じる。

注意したいのは、この鉄筋腐食ひび割れが、かぶり厚さの小さいコンクリートで発生する確率が高いことである。理由は2つある。1つは、かぶり厚さが小さいと、中性化や塩化物が早期に鉄筋に達し、鉄筋を保護する機能が失われるからである。

2つ目は、いったん保護機能が失われて鉄筋の腐食が始まると、かぶり厚さが小さいほど、容易にひび割れを起こすからである。かぶり厚さが小さいと、引っ張りに抵抗する断面積も小さくなる。つまり、比較的小さな膨張力で簡単にひび割れが入ってしまう。以上の理由から、かぶり厚さの不足が、鉄筋腐食ひび割れの引き金になることが分かる。

根本の原因は収縮ひび割れ

ところで、塩化物の浸透や中性化の進行は、収縮や曲げによるひび割れが起点となって引き起こされることも多い。

図3は、収縮や曲げによるひび割れが生じた後、中性化や塩分浸透が生じる様子を示している。中性化や塩分浸透は、まずひび割れに沿って縦向きに進み、その後、鉄筋に沿って横向きに進む。

中性化や塩分浸透が鉄筋に沿

て進行する理由は、収縮や曲げによるひび割れが生じると、ひび割れ面で鉄筋が引っ張られ、コンクリートと鉄筋の付着が失われて、相互に隙間が生じるからだ。これらが二酸化炭素や塩化物の通り道となる。

図3のように中性化や塩分浸透が進むと、屋外であれば同時に水分も供給されるから、鉄筋腐食が進行しやすい状況となる。一般に、収縮ひび割れが耐久性を損なうと言われるのは、以上のメカニズムによる。

屋内側はリスクが小さい

中性化は、一般的な建物では耐久性を損なう最も注意すべき事象であるが、室内の部材で生じた中性化は深刻とならないことも多い。

写真2は、築50年の鉄筋コンクリート(RC)造で中性化と鉄筋腐食について調査した例である。左は、外壁の屋外側のコンクリートをはつり、中性化の進行範囲を調べる薬剤を塗布し

たものだ（中性化していない部分は紫色に変色する）。鉄筋位置まで中性化は及んでいないし、鉄筋にも腐食は生じていない。

一方、右は外壁の屋内側の調査結果だ。鉄筋位置の奥まで中性化が進んでいるが、鉄筋腐食は生じていない。中性化した後、鉄筋腐食が実際に生じるには水分が必要である。しかし、屋内では腐食に必要な水分が供給されないため、中性化している部分でも鉄筋が腐食しなかったと考えられる。

コンクリートの中性化の進行は、外気や雨などに触れる屋外側で進行するイメージが強いが、実際には、室内側のほうが顕著だ。屋外側の進行が遅い理由は、雨水などでコンクリート中の水分が多いと中性化の進行が遅れる性質があることに加え、仕上げ材で保護されることが多いからだ。

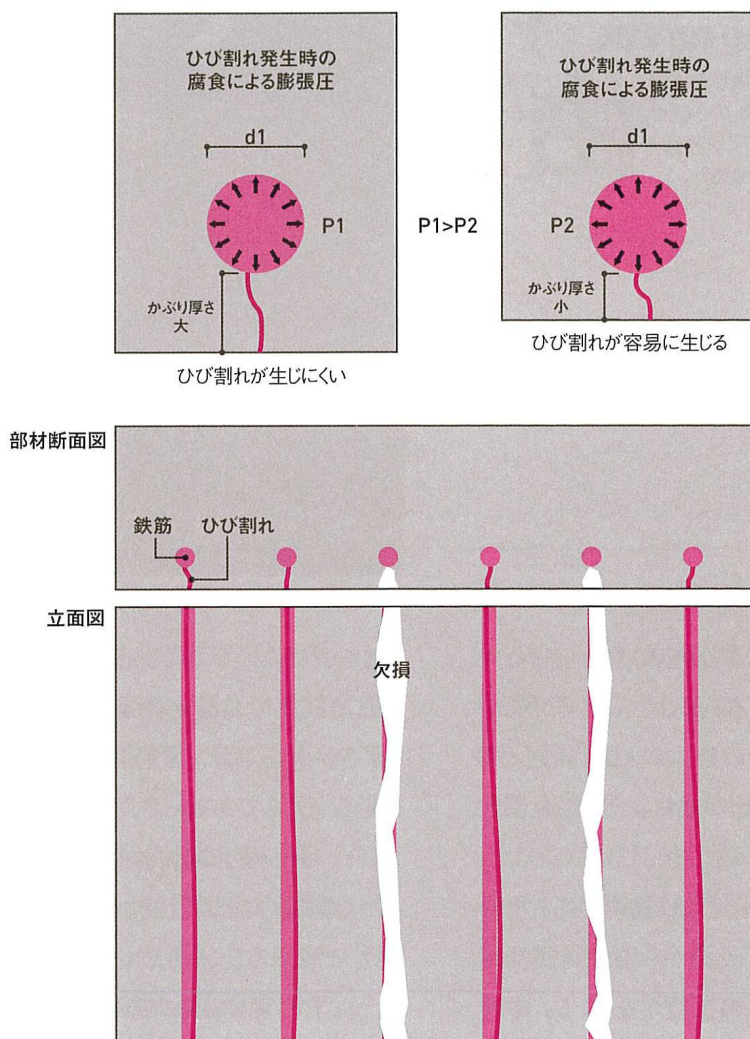
しかし、この例に見られるように、屋内側で生じる中性化は鉄筋腐食を誘発するに至らず、耐久性上の問題は小さいことも多い。

かぶり厚さは打設前に確認

かぶり厚さ不足は鉄筋腐食ひび割れを誘発するうえ、建築基準法で定められた値を下回る場合には、それ自体が明確な法律違反となる。従って、かぶり厚さの確保には、施工時に十分な注意を払う必要がある。

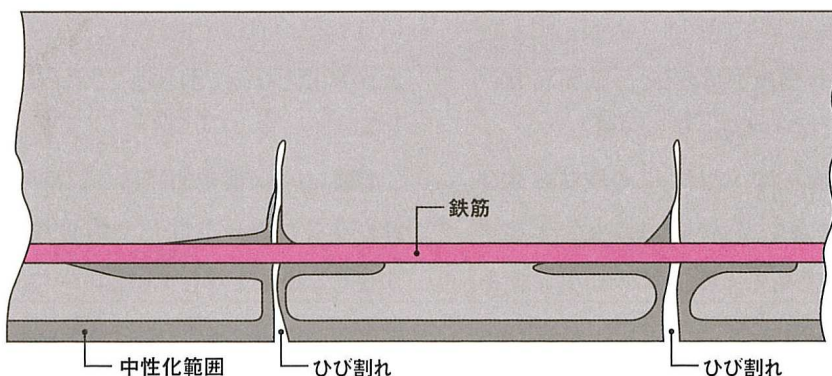
かぶり厚さを確保するための最も簡易で確実な施工管理の方法は、コンクリート打設前に、スペーサーなどに

図2 鉄筋の腐食によって膨張圧が増大する



鉄筋の腐食によってコンクリート内部に膨張圧が発生し、引張応力がひび割れ強度を超えたところで鉄筋腐食ひび割れが発生する
(資料：図4 まで筆者)

図3 収縮ひび割れを起点に中性化や塩分浸透が進行



中性化や塩分浸透は、まずひび割れに沿って進行し、その後、鉄筋に沿って進む。収縮ひび割れによって、鉄筋とコンクリートの間に隙間が生じ、それが二酸化炭素や塩化物の通り道になる



写真2 中性化が進んでも屋内側の鉄筋は腐食しにくい

築50年のRC造で中性化と鉄筋腐食の関係を調べた例。左は、外部の壁をはつたもの。鉄筋位置まで中性化が進んでいないし、鉄筋にも腐食は生じていない。右は屋内の壁をはつたもの。鉄筋位置の奥まで中性化が進んでいるが、鉄筋腐食は生じていない

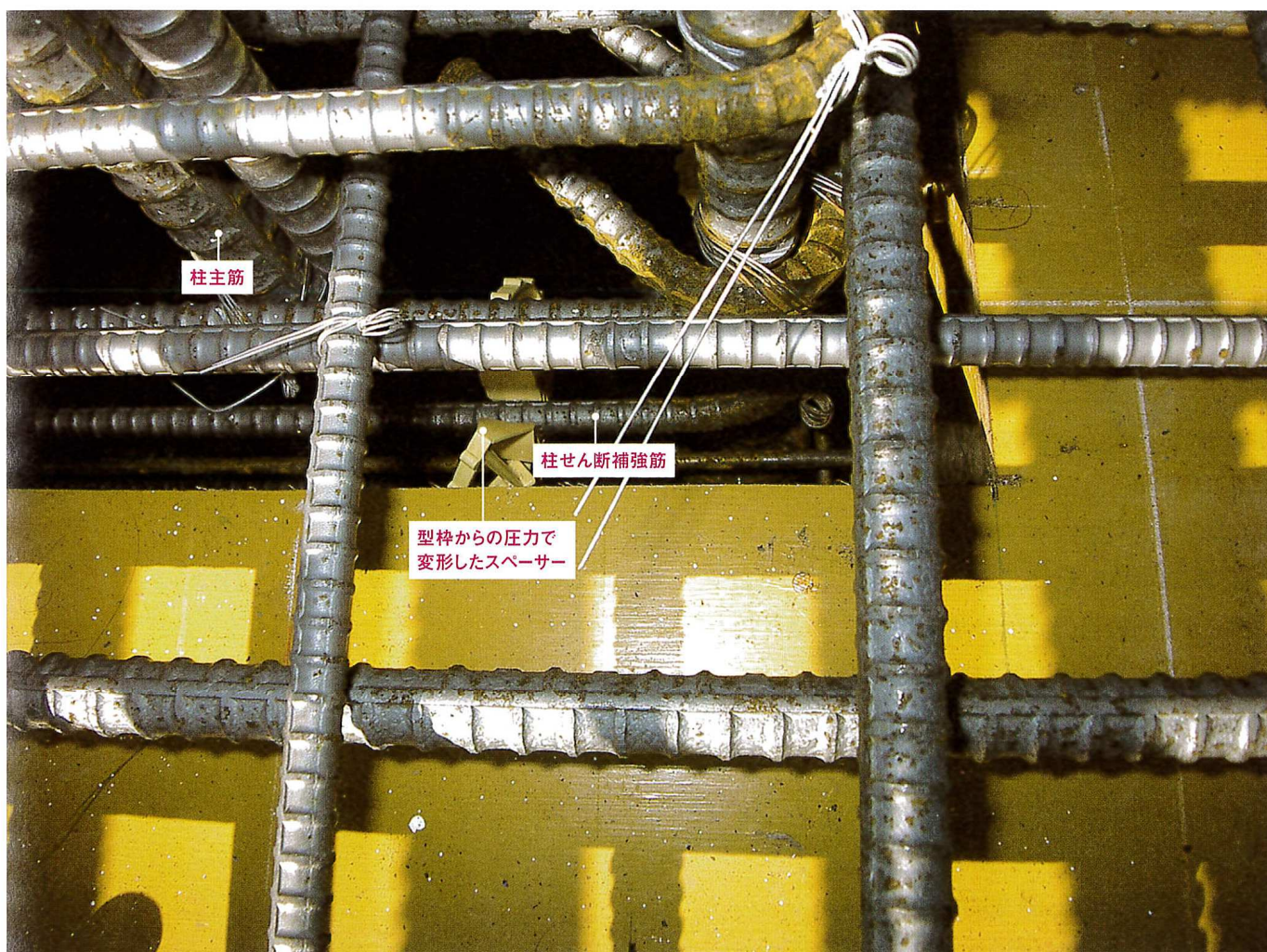
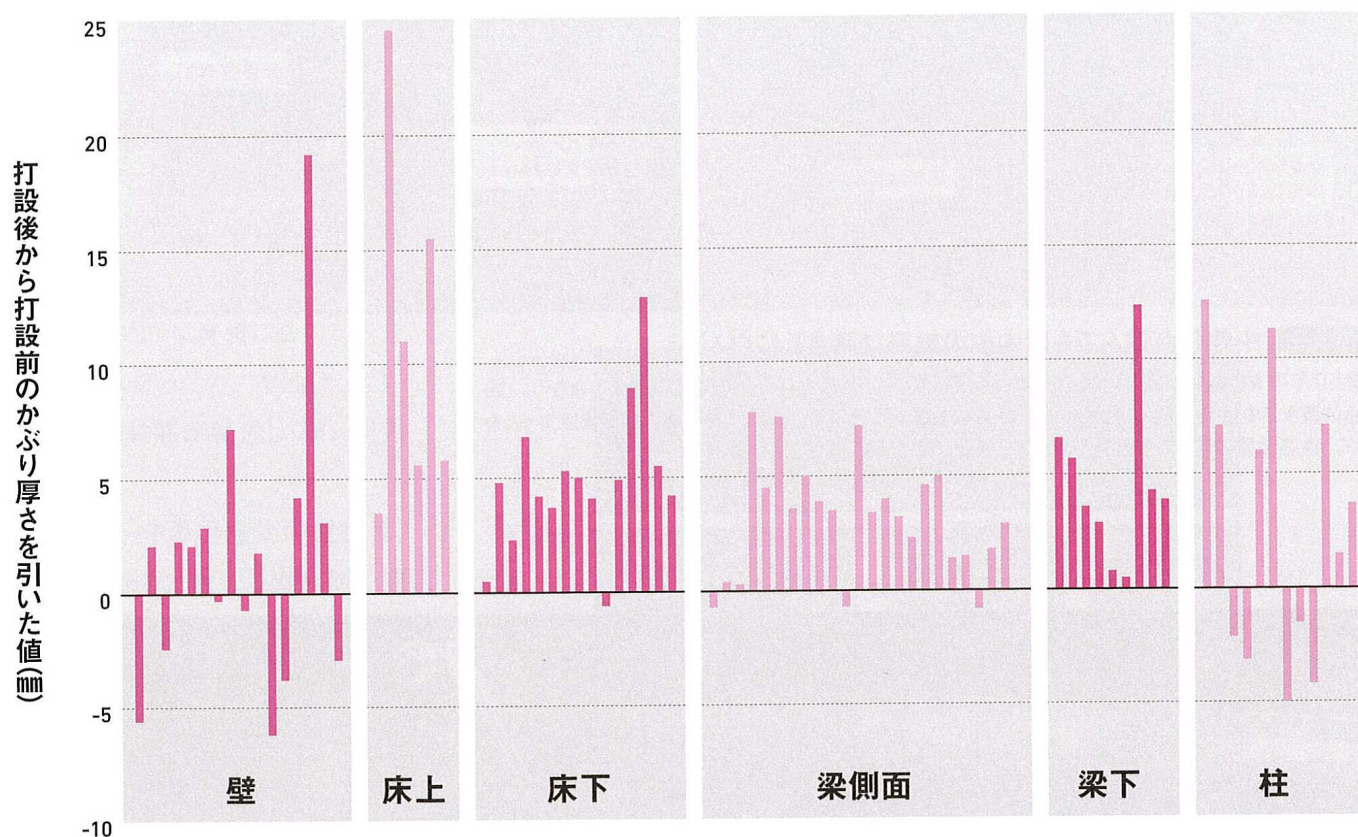


写真3 スペーサーの変形には要注意

かぶり厚さを確保するための確実な施工管理の方法は、打設前にスペーサーで鉄筋と型枠の距離を一定以上確保しておくこと。ただし、鉄筋径が大きいと、スペーサーが変形する場合があるので注意したい

図4 打設前にかぶり厚さを確認しておけば安心

部位ごとに、打設後から打設前のかぶり厚さを引いたもの。ほとんどが、正の値になっている。つまり、打設後にかぶり厚さが大きくなる傾向があるので、打設前に確認しておけばまず安心だ



より鉄筋と型枠の距離（打設前のかぶり厚さ）を一定の値以上にしておくことである。

ただし、スペーサーを設置していても、鉄筋径が大きい場合には、組み上げた鉄筋の剛性が高く、写真3のようにスペーサーが変形し、打設前のかぶり厚さを確保できない場合がある。これらはコンクリート打設前に発見し、是正する必要がある。

コンクリート打設前の鉄筋と型枠の距離のチェックにおいて、是正をするしきい値は、設計かぶり厚（最小かぶり+10mm）でなく、最小かぶり+5mm程度でよいと筆者は考えている。

理由は、コンクリート打設後にかぶり厚さが増大する傾向があるからだ。

図4は、打設後のかぶり厚さを非破壊試験で調査し、打設前のかぶり厚さに対する変化をまとめたものである。多くの場合、打設後から打設前のかぶり厚さを差し引いた数値は正の値となり、打設後のほうがかぶり厚が大きくなることが分かる。

これを統計的に処理したところ、前

述のしきい値で施工管理すれば、かぶり不足はほとんど生じないことが分かった。

大きなトラブルの原因となる鉄筋腐食ひび割れを生じさせないためには、かぶり厚さの確保が最も重要だ。コンクリート打設前によく確認して、信頼性の高い施工をしてほしい。

ここがポイント

**鉄筋の腐食によるひび割れは、
建物の耐久性に直接かつ深刻な影響を与える**

**かぶり厚さを確保するには、
スペーサーなどで鉄筋と型枠の距離を取ることなども
有効である**

CHAPTER 3-2

標準仕様の施工でもかぶりの不良が発生

➡ 最小かぶり厚さには許容されるバラツキがある

かぶり厚さの確保は、ひび割れ防止の観点からも極めて重要だ。しかし、かぶり厚さの定義や規定を正確に理解することは意外と難しい。かぶり厚さには複数の定義があるので、その違いを押さえておきたい。

3-1で、鉄筋腐食によるひび割れを防止するには、かぶり厚さの確保が重要であることを述べた。しかし、かぶり厚さの定義を正しく理解し、適切に施工することはそう簡単ではない。

第1の難関は、用語の複雑さにある。かぶり厚さには「法令かぶり厚さ」「最小かぶり厚さ」「設計かぶり厚さ」など複数の定義がある。まず、これらの違いを正確に理解しなくてはなら

ない。

第2は、かぶり厚さを規定する仕様書の分かりにくさである。かぶり厚さの規定は、建築基準法施行令や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）などにまとめてある。しかし、コンクリート工事のバイブルとして使われている JASS5 は、専門性の高い記述が多いうえ、内容也多岐にわた

る。一般の建築技術者が、JASS5 の意図するところを正確に理解することは容易ではないと思われる（写真1）。

JASS5 の規定で、特に誤解を招きやすいのが最小かぶり厚さに関するものである。建築主のなかには、JASS5 の仕様に従って施工すれば、目標とする最小かぶり厚さを100%確保する必要があると誤解している人も多い。しかし、仕様通りの施工をしても、理論的には最大15%の不良率が発生することが JASS5 に示してある。これは許容される誤差であって、瑕疵ではないと考えることも可能である。

これらの疑問を解消するために、ここでは、かぶり厚さの定義を正確に理解するとともに、建築基準法や JASS5 で規定されているかぶり厚さの意味を詳しく解説したい。

かぶり厚さには複数の定義

はじめにかぶり厚さの定義と規定について説明する。かぶり厚さとは、

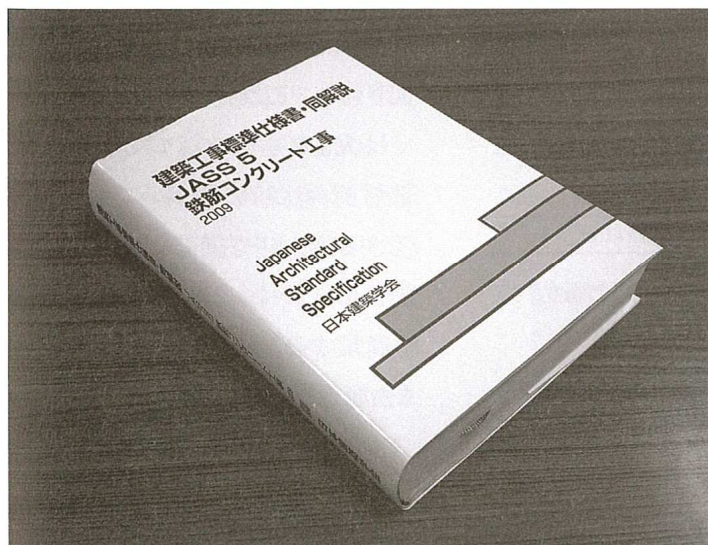
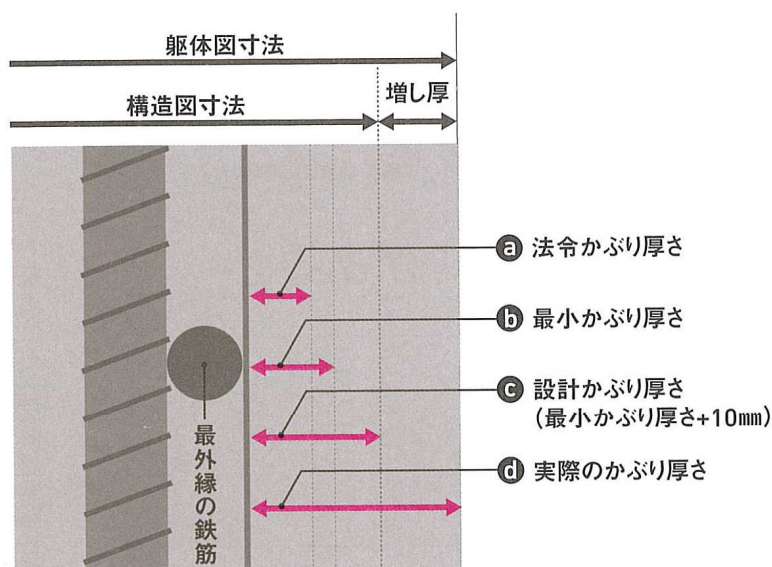


写真1 JASS5はコンクリート工事のバイブル

「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」の内容は多岐にわたり、理解するのがなかなか容易ではない（写真：日経アーキテクチュア）

【図1】 かぶり厚さには複数の定義がある



$$\text{法令かぶり厚さ} \leq \text{最小かぶり厚さ} \leq \text{設計かぶり厚さ} \approx \text{実際のかぶり厚さ}$$

かぶり厚さには4種類の定義があり、明確に区別されている。
これらを正しく理解することが重要だ（資料：【図5】まで特記以外は筆者）

【図2】 建築基準法施行令と JASS5 でかぶり厚さを規定

(1) JASS5 の規定

部材の種類	最小かぶり厚さ (mm)		設計かぶり厚さ (mm)	
	屋内	屋外	屋内	屋外
柱、梁、耐力壁	30	40	40	50
床スラブ・屋根スラブ	20	30	30	40
直接土に接する柱、梁、壁、床 および布基礎の立ち上がり部	40		50	
基礎	60		70	

(2) 建築基準法施行令の規定

適用される鉄筋コンクリート造の構造部分		法令かぶり厚さ
直接土に接しない部分	床、耐力壁以外の壁	20mm 以上
	柱、梁、耐力壁	30mm 以上
直接土に接する部分	柱、張り、壁、床 布基礎の立ち上がり部分	40mm 以上
基礎（布基礎の立ち上がり部分を除く）		60mm 以上

法令かぶり厚さは建築基準法施行令で、最小かぶり厚さと設計かぶり厚さは JASS5 で規定されている。違いを理解することが重要だ

（資料：建築基準法と JASS5 をもとに筆者が作成）

【図1】にあるように、主筋、せん断補強筋の区別を問わず、鉄筋コンクリート (RC) 部材の最外縁の鉄筋表面からコンクリート表面までの距離を表す。

かぶり厚さは、目的によっていくつかの用語を定義して使い分けている。最も重要なのが、建築基準法に定められている「法令かぶり厚さ」である。こ

れは全ての建築物で満足されている必要がある。そうでない場合は法令違反であり、瑕疵とされる（【図1】のa）。

個別の工事では、設計図書に「最小かぶり厚さ」を明記する。最小かぶり厚さは、法令かぶり厚さ以上の値を確保しなくてはならない。その標準値は JASS5 に明示してある。最小かぶり厚さが満足されていない場合は契約違反となり、これも瑕疵と判断されることが多い（【図1】のb）。

設計かぶり厚さは目標値

さらに「設計かぶり厚さ」という用語もある。これは、規定値である前述の法令かぶり厚さ、最小かぶり厚さと異なり、施工における目標値である。従って、この値を下回る箇所を不良とすることは誤りである。

設計かぶり厚さは、最小かぶり厚さ +10mm とすることが JASS5 の標準である（【図1】のc）。この10mmは、施工のばらつきを補うための余裕代^{よゆうしろ}と考えてよい。

設計かぶり厚さは、設計図書に明記されないことも多いが、施工段階では大きな意味を持つ。なぜなら、部材断面リストに基づいて鉄筋を加工する際、柱や梁部材のせん断補強筋の寸法は、この設計かぶり厚さを満足するように定めるからである。また、通常、スパーサーの寸法は、設計かぶり厚さと同一とする。

【図2】は、JASS5 と建築基準法施行令のかぶり厚さの規定をまとめたものである。JASS5 の規定では、屋内における最小かぶり厚さは、(2) に示す

法令かぶり厚さと同じであり、屋外では10mm大きくなっている。

かぶり厚さのばらつきは許容

工事では、設計かぶり厚さを目標に配筋と型枠を施工するが、現場作業であるため、施工後の部材のかぶり厚さには相当のばらつきが生じる。この点について、JASS5 の考え方を整理する。

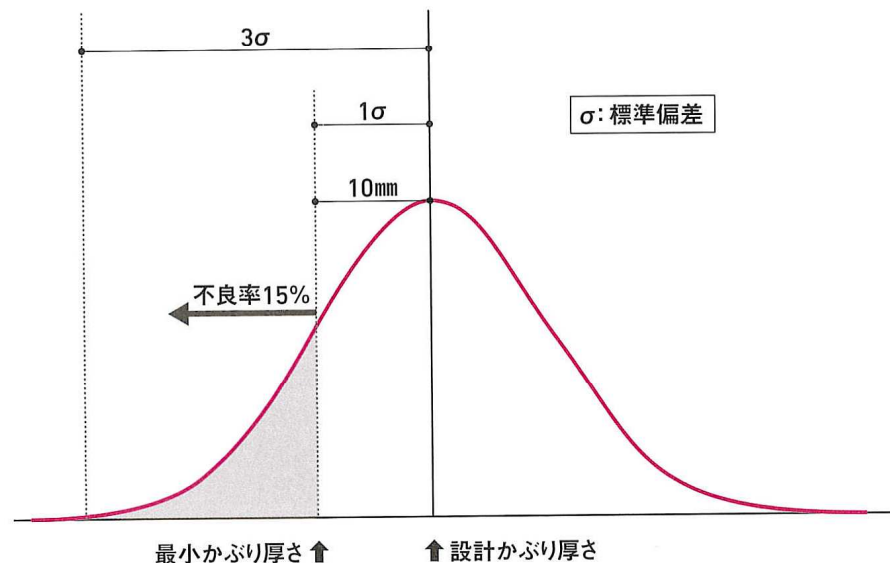
研究者による過去の調査結果を総合すると、施工後のかぶり厚さのばらつきを表す標準偏差は、部材種類などにより異なるが、最大10mm程度である。これは、設計かぶり厚さの設定で、最小かぶり厚さに上乗せした10mmとほぼ同じである。

施工後のかぶり厚さの分布が標準分布に従うと仮定したとき、最小かぶり厚さに安全のため上乗せした10mmが標準偏差と同じであれば、そのかぶり厚さを満足できない確率（不良率）は容易に計算でき、15%となる（**図3**）。

つまり、標準的な仕様に基づいて施工した場合、最小かぶり厚さを下回る不良箇所が最大15%の確率で発生する（以下、不良率の理論値）。

ただし、不良率の理論値は、実際の工事における不良率よりかなり大きい。これは、施工においてかぶり厚さを確保する工夫を行っていることに加え、実際の建物にはさまざまな理由から増し打ちがあることなど、かぶり厚さが自然と大きくなる要因があることによる。筆者らの調査によれば、不良率は最大でも5%程度で理論値の3分の1であった。

図3 最小かぶり厚さに対して最大15%の不良率が発生



JASS5 の標準仕様に基づいて施工しても、理論上、最小かぶり厚さに対して最大15%の不良率が発生する。これは瑕疵ではないと考えられる

しかし、低い値とはいえ不良率が存在するにもかかわらず、建築主は、最小かぶり厚さが100%満足されていると期待する。この点で、建築主と建築技術者との間に大きな認識ギャップがあるのは確かである。技術者側は専門家でない建築主に対して、一定の不良率が存在することは避けがたい事実であることを丁寧に説明する必要がある。

非破壊試験機器で測定

JASS5では、コンクリート工事後にかぶり厚さを検査するフローについても定めている（**図4**）。電磁誘導法という方式の非破壊試験機器を用い、コンクリートの表面にセンサーを接触させてかぶり厚さを測定する（**写真2**）。

この検査フローでも、前述した不良率の理論値15%が大きな意味を持つ。不良率が15%以下であれば、標準的な施工品質を満足していると判断する。**図4**の第1段階では、抜き取り検査の要領で、同一工区中の10%の部材数を選んでかぶり厚さを測定し、「最小かぶり厚さ>測定値」となる不良率が15%以下であれば合格と見なす。

15%を超えた場合、第2段階として対象部材数を20%に増やして同様に測定し、同じく不良率15%以下であれば合格とする。ここでも不合格の場合、第3段階として部材全数に対し検査を行い、同じく15%以下であれば合格となるが、不合格の場合には耐久性、耐火性、構造性能が設計図書の条件を満たすよう全面的

図4

判定基準は

「最小かぶり厚さに
対する不良率 $\leq 15\%$ 」

JASS5に規定されている、
かぶり厚さを検査するときの
フロー。ここでも、不良率の
理論値15%が大きな意味を
持つ。不良率が15%以下
であれば標準的な品質を満た
していると判断する

(※1) 検査箇所は、同一打ち込み日、同
一工区の柱、梁、壁、床または屋
根スラブから、かぶり不足が懸念さ
れる部材をおのおの10%選択し、
測定可能な面についておのおの10
本以上の鉄筋のかぶり厚さを測定
する。測定結果に疑義がある場合
は、破壊検査によって確認する

(※2) 第一段階での判定基準を満たしな
い場合は、かぶり不足が懸念され
る部材からおのおのさらに20%選
択してかぶり厚さを測定する

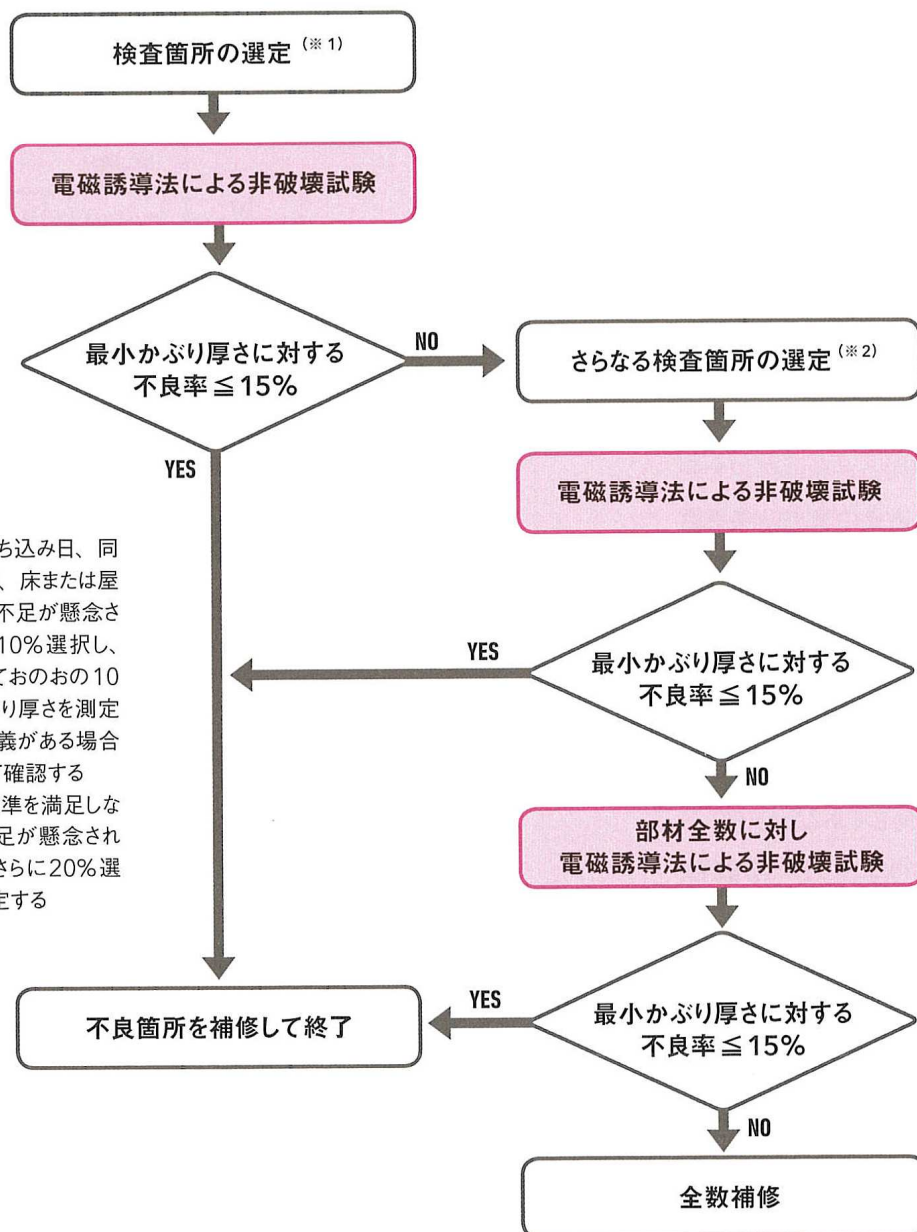


写真2 非破壊試験機器でかぶり厚さを測定

コンクリート内のかぶり厚さの測定には、電磁誘導法による非破壊試験機器を用いることが多い。これは、かぶり厚さが変化すると、交流電流による磁束が変化する原理を応用したもの。最初に鉄筋位置の間隔を確認したあと、かぶり厚さを測定する。かぶり厚さは、機器本体のディスプレイに表示される
(写真：鹿島)



1 鉄筋位置の間隔を確認

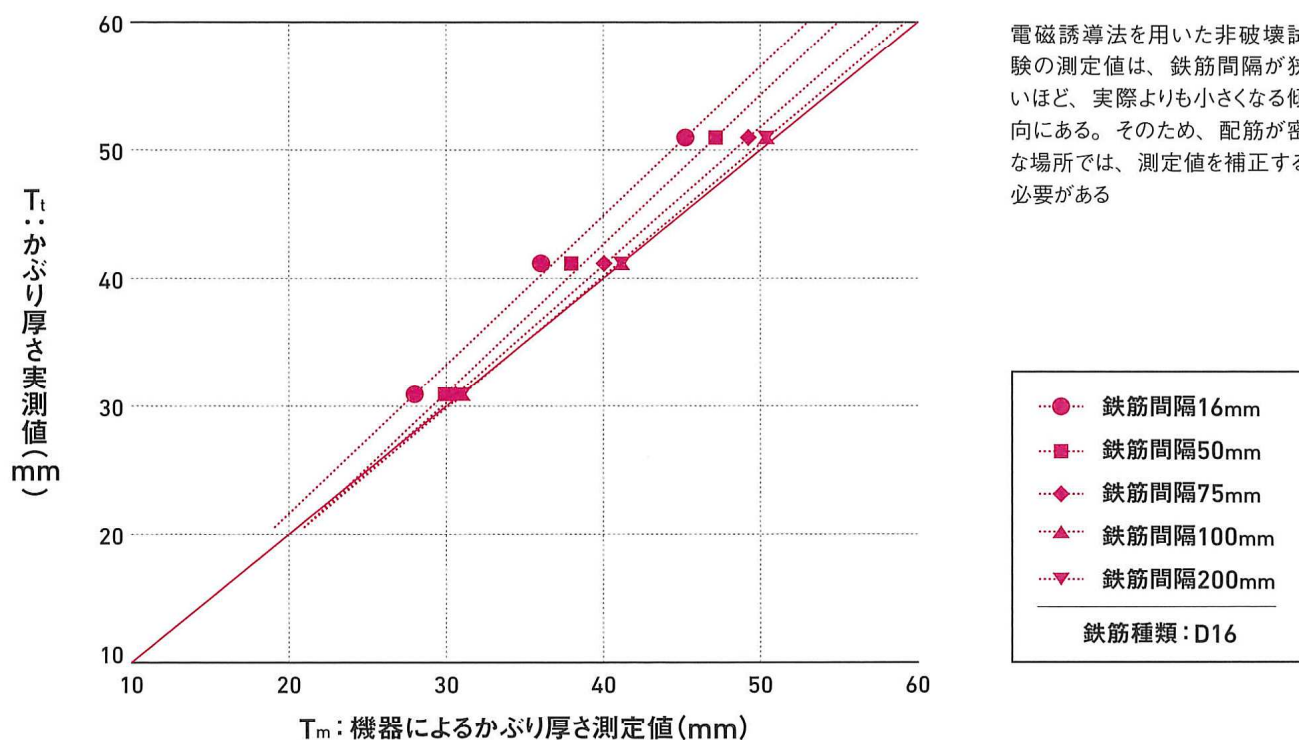


2 電磁誘導法によりかぶり厚さを測定



3 機器本体に結果を表示

図5 鉄筋間隔が狭いほど測定値が小さくなる



な補修が必要となる。

なお、第1、第2段階で合格の判定であっても、最小かぶり厚さが確保されていないことが判明した箇所については、補修によりかぶり厚さを回復する必要がある。また、かぶり厚さの非破壊試験に用いる電磁誘導法の機器が表示する測定値にも注意が必要である。

については、事前によく配筋状況を把握し、密な場合には適切に測定値を補正することが安全である。補正方法については、JASS 5付録のJASS5T-608に定められている。

かぶり厚さの重要性は社会的にもよく知られるようになっており、その不足をめぐってトラブルとなる事例も増えている。トラブルの根幹には、不良率を

ゼロにすることが工学的にほぼ不可能であるにもかかわらず、契約面では不良率ゼロが期待されているという、大きな認識ギャップがあると思われる。このギャップを埋めていくことが必要である。ここで述べた規定、検査方法などをよく理解し、設計と施工において、かぶり厚さ確保の信頼性を向上すべく、できる限りの努力をしてほしい。

測定値の補正も必要に

図5に、電磁誘導法の機器を用いた測定値と、実際のかぶり厚さの傾向を示した。測定値は鉄筋間隔が狭いほど小さい値を示す。すなわち、配筋が密な箇所は実際よりも小さな測定値となるリスクがある。測定箇所

ここがポイント

建築基準法上の「**法令かぶり厚さ**」を
満たしていないものは法令違反であり、瑕疵となる
 「**最小かぶり厚さ**」には**許容されるバラツキ**がある。
 これは発注者に丁寧に説明する必要がある。

かぶり不足の補修材は 防火性と耐久性で選ぶ

➡ 爆裂しない PCM 材料で剥落を防止

かぶり厚さの不足を発見した場合には適切な補修が必要だ。

ここでは、2013年に公表された建築研究所と日建連の共同研究の成果に基づき、効果的な補修方法について解説する。

鉄筋腐食によるひび割れを防止するには、かぶり厚さの確保が極めて重要である。しかし、仕様書通りの標準的な施工をしても、かぶり厚さが必ず規定値を上回るとは限らない。施工後の部材のかぶり厚さには、どう

してもばらつきが生じる。そのため、標準的な施工をしても、最小かぶり厚さを下回る不良箇所が、最大15%の確率で理論上発生する。これは、既に述べた通りである。

大切なことは、施工時に躯体のか

ぶり厚さの不足を発見しとき、適切な補修方法によって是正することだ。ここでは、2013年に建築研究所と日本建設業連合会（日建連）がまとめた共同研究の成果なども踏まえながら、かぶり厚さ不足を効果的に補修する

図1

かぶり厚さ不足の 補修材料には防火の 具体的な規定がない

かぶり厚さ不足の補修の規定には、材料強度を規定した告示第1372号と、防火性能を規定した第1399号がある。しかし、1399号には具体的な仕様の記述がない

（資料：国土交通省および建設省告示をもとに筆者が作成）

補修に関する規定

補修材料の 強度に関する規定

平成13年国土交通省
告示 第1372号

規定の内容

補修に使用する樹脂（ポリマー）が、JIS A 6203（セメント混和用ポリマーディスページョンおよび再乳化形粉末樹脂）に適合するか、または同等以上の品質を有するものであること

JIS A 1171（ポリマーセメントモルタルの試験方法）に規定する曲げ強度、圧縮強度、接着強度、接着耐久性の試験結果が、下記に示す値以上であることが確かめられたもの

- ・曲げ強度 $\geq 6\text{N/mm}^2$
- ・圧縮強度 $\geq 20\text{N/mm}^2$
- ・接着強度 $\geq 1\text{N/mm}^2$
- ・接着耐久性 $\geq 1\text{N/mm}^2$

具体的に
記述されている

補修材料の 防火に関する規定

平成12年建設省
告示 第1399号

かぶり厚さが、告示1372号第2項の基準によるものにあつては、防火上、支障のないものに限る

具体的に記述されていない

方法について解説したい。

曖昧な補修材料の耐火規定

かぶり厚さの補修を規定したものには、国土交通省告示第1372号と建設省告示第1399号の2つの告示がある。

1372号は、補修の材料に関する規定である。コンクリートに代わり、かぶりとして認められる材料は、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）もしくはエポキシ樹脂モルタルと明記してある。これらの材料性能として、曲げ強度、圧縮強度、接着強さ、接着耐久性に関し、必要な値が具体的に定められている（図1）。

例えば、JIS A 1171（ポリマーセメントモルタルの試験方法）に規定する曲げ強度の試験結果が、 6N/mm^2

以上であることを確かめるように求めている。同様に、圧縮強度は 20N/mm^2 以上、接着強さは 1N/mm^2 以上、接着耐久性は 1N/mm^2 以上と具体的に記述されている。

このことから、かぶり厚さの補修に使用できる材料はPCMかエポキシ樹脂モルタルのみであり、従来の工事で慣用的に用いられてきたモルタルを使用した補修は、かぶり厚さとしては認められない。

もう一方の1399号は、防火に関する規定をまとめたものだ。ここには、補修後の部材が耐火構造としての性能を満たす必要があると規定されている。PCMかエポキシ樹脂モルタルを用いる場合であっても、それらが防火上支障のないものに限定と定められている。

しかし、どのような条件を満たせば

防火上支障がないと見なされるのか、具体的な記述がない。

1399号で防火上支障がない材料に限定するとすると、1372号でPCMとエポキシ樹脂モルタルがコンクリート代替のかぶり材料として採用できると明記されていても、その通りにはいかない。なぜなら、局所的な場合を除き、防火性能に問題があるエポキシ樹脂モルタルは採用できないと考えられるからだ。特に部材を面で補修する場合には採用が難しく、PCMしか使えないことになる。

さらに、防火だけでなく、耐久性の問題もある。かぶり補修後の部材が、補修の必要がない鉄筋コンクリート（RC）部材と同等の耐久性を有しているか確認する必要がある。これは、補修後の部材の耐久性が、採用する補修材料の性能により影響を受けるためである。

建研と日建連が共同研究

防火性と耐久性の問題を解決すべく、建築研究所と日建連は共同で研究を進め、2013年3月、その結果を「建築研究報告 No.147」にまとめた（図2）。筆者もこの報告書の取りまとめに関わったので、ここで内容を詳しく解説したい。

研究では、第一の課題である防火性を、耐火実験により確認している。図3のように、市販のPCM製品を使って、RC壁部材を補修した模擬部材を製作し、 1000°C を超える範囲まで加熱した。

耐火実験では、部材断面の鉄筋

図2
共同研究の成果を報告書に

防火性と耐久性の問題を解決するために、建築研究所と日建連は共同研究を進め、その成果を報告書にまとめた
（資料：建築研究所）

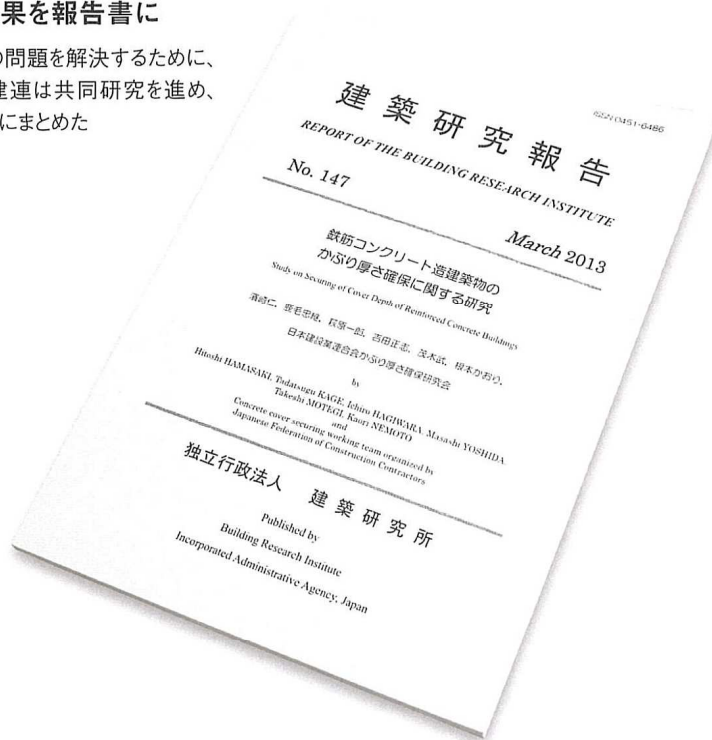
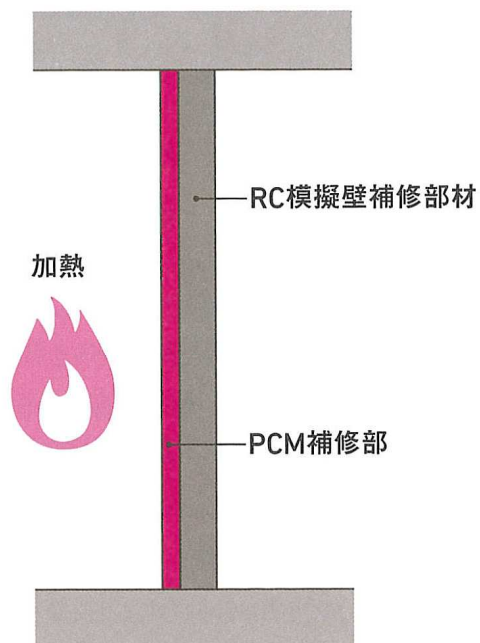
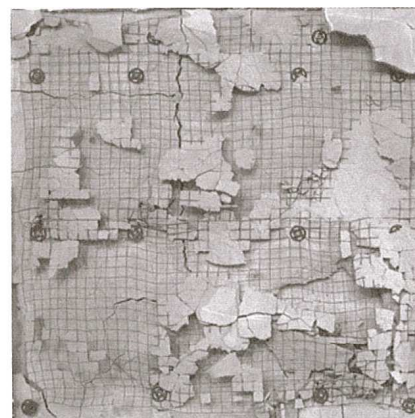


図3

市販のPCMで耐火性能に差



問題なし

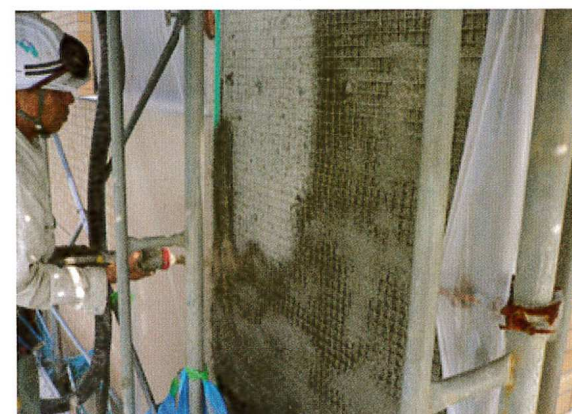
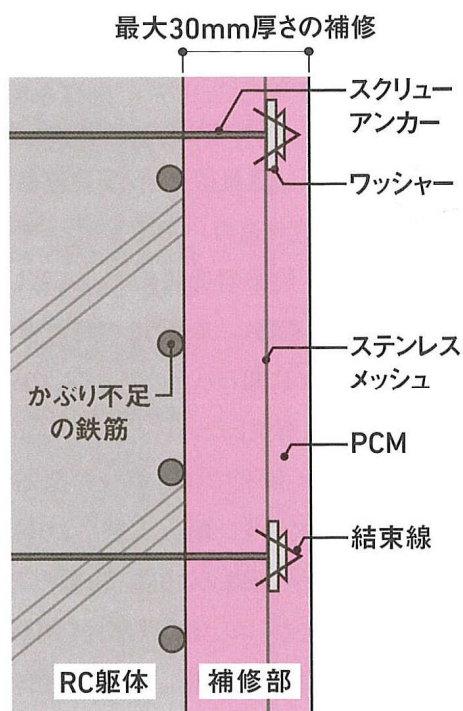


爆裂が発生

上図のような耐火実験を実施したところ、市販PCMの多くが爆裂を起こしたが、6製品は爆裂がなく使用可能と分かった
(資料と写真：図6まで「建築研究報告 No.147」をもとに筆者が作成)

図4

剥落防止措置を講じた工法



ここで示したのは、爆裂しないPCM材料を選定したうえで、補修部の剥落防止措置を講じた工法だ。この方法なら崩落の心配は少ない

写真1

メッシュとアンカーを緊結して固定

まず、下地処理として躯体表面を高圧洗浄。続いてドリルで削孔してアンカーを設置した後、ステンレスメッシュと緊結する。最後に、躯体表面にPCMを吹き付ける

1 下地処理（超高压洗浄など）



2 アンカー用削孔（ドリル）



3 メッシュとアンカーの緊結



4 吹き付け施工



温度を測定するとともに、加熱中の爆裂の有無、加熱後の表面状況を調べた。この実験で防火上支障がないことの条件は、鉄筋温度が550℃を超えないこと、PCMが爆裂しないこと、PCMによる補修部が既存部から剥離、剥落しないことである。

実験の結果、一部の製品を除いて、多くのPCM製品で爆裂が発生。過半のPCM製品はかぶり補修材料として適していないことが明らかとなった。また、加熱中に補修部と既存部の一体性が保たれていれば鉄筋温度を550℃以下にできるが、補修部の剥落が発生した場合には550℃以下を維持できなくなるので、確実な剥落防止措置が必要であることも分かった。

かぶり厚さ補修の施工法

これらの結果から、爆裂しないPCM材料を選定し、剥落防止措置を施した工法を図4のように提案した。具体的材料については日建連のウェブページに公開されている報告書を参照してほしい (<http://www.nikkenren.com/publication/search.html?current=2>)。

この工法は、既存躯体にスクリー式アンカーを設置し、このアンカーとステンレスメッシュをワッシャーと結束線で固定した方式である。

これらの研究成果は、「建築工事監理指針」（公共建築協会発行）の平成25年版のかぶり補修に関わる解説記述（6章9節）でも引用されていることから、標準的な工法として認知されたとみてよいだろう。

この工法の詳細な施工手順を、

写真1に示す。まず、既存躯体の表面を高圧洗浄などで目粗して下地処理を行う。次に、スクリーアンカー用の下穴をドリルで開け、アンカーを設置した後、これをステンレスメッシュと緊結する。続いて、既存躯体表面へPCMを吹き付けるか、こて塗りをして、最後に表面をこてで仕上げる。図5に、剥落防止措置に用いる材料の詳細をまとめておいた。

これらの仕様は、前記の耐火実験で効果が確認された組み合わせであり、これと異なる仕様を採用する場合には、耐火実験による確認が原則として必要となる。

補修部材の耐久性も検討

もう1つの課題である耐久性の検討も重要である。かぶりをPCMにより補修した部材は、コンクリートによるかぶりの場合と同等以上の耐久性を有している必要がある。この耐久性を確認するため、ポリマーセメントモルタルの中性化抵抗性を中心に、乾燥収縮特性、凍結融解抵抗性などについても実験で確かめた。

かぶりを補修した部材の耐久性のうち、最も重要な中性化抵抗性について述べる。図6は、市販のPCMを対象に実施した中性化促進試験の結果である。縦軸の中性化速度係数は中性化の速さを表しており、この値が小さいほど中性化への抵抗性が高く、高品質であることを示している。図中に破線で示した値は、標準的なコンクリートの中性化速度係数を表し

図5

剥落防止工事に用いる材料の仕様

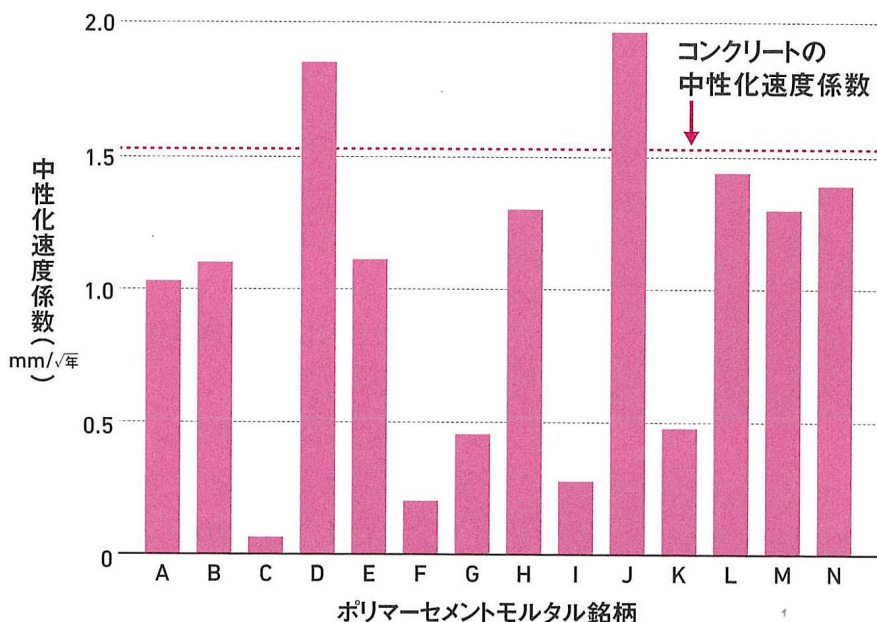
上記仕様は、耐火実験で効果が確認されたもの。異なる仕様を採用する場合は、耐火実験による確認が原則として必要となる

種別	適用
アンカー	ネジ固定式（スクリュー）アンカー （ステンレス製、埋込み深さ 30mm 以上）
ワッシャー	吹き付け工法用 ステンレス製丸ワッシャー（φ 20mm 程度）
	こて塗り工法用 ステンレス製丸ワッシャー（φ 20 ～ 40mm 程度）
補強用メッシュ	ステンレス製メッシュ （線径φ 1.0 ～ 1.2mm、メッシュ間隔 25mm 程度）
ステンレス結束線	ステンレス製 #20 程度

図6

ポリマーセメントモルタルの 銘柄別の中性化速度

市販 PCM の中性化促進試験の結果をまとめた。縦軸の値が小さいほど中性化抵抗性が高い。図中の破線は、コンクリートの中性化速度係数。大半の PCM がコンクリートの耐久性を上回っている



ており、少なくともこのレベルよりも PCM の値が小さいことが望ましい。14 銘柄のうち、2 つを除いてはコンクリートの性能を上回っており、ほとんどの PCM 材料で耐久性上の問題は少ないことが分かる。

かぶり厚さを高い信頼性で確保することは施工者の責任であるが、補修が必要となった場合には、補修が必要でない部材と同等の性能を確保するため、ここで示した内容を参考に補修をしてほしい。

ここがポイント

規定のかぶり厚さを下回る不良箇所が発見されたときは、
適切な補修方法によって是正する

**補修材は、防火・耐久性の両面で
問題のない性能を備えていることが
必要である**

CHAPTER 4

リスクを左右する 生コンの乾燥収縮率



骨材の収縮に要注意 乾燥ひび割れを助長

➡ 工場ごとに乾燥収縮率を調べるのが確実

硬いはずの骨材が収縮し、コンクリートの乾燥ひび割れに大きな影響を及ぼす——。

最近の研究から、意外な事実が明らかになってきた。

トラブルを未然に防ぐにはどんな手を打てばよいのか。

乾燥収縮によるコンクリートのひび割れを抑制するには、何が最も効果的か。多くの技術者が真っ先に思い浮かべるのが、単位水量の低減である。コンクリートは乾燥による水分逸散で収縮するから、水分を減らせば乾燥ひび割れを抑制できそうに思える。

ところが、単位水量の低減は、さほど大きな効果を望めないことが最近の研究で分かってきた。確かに、乾燥収縮ひずみが多少減る傾向はあるものの、その効果は限定的で、これだけでは乾燥収縮によるひび割れを防止できない。

その一方で、乾燥収縮ひび割れを引き起こす新しい要因が浮かび上がってきた。骨材の収縮である。

実は、骨材がコンクリートの収縮特性に影響を与えることは古くから分かっていたが、最近の研究によって、骨材の岩質や産地によって収縮率に

[生コン工場による乾燥収縮率の違い]

サンプル数：353 平均値：689 μ

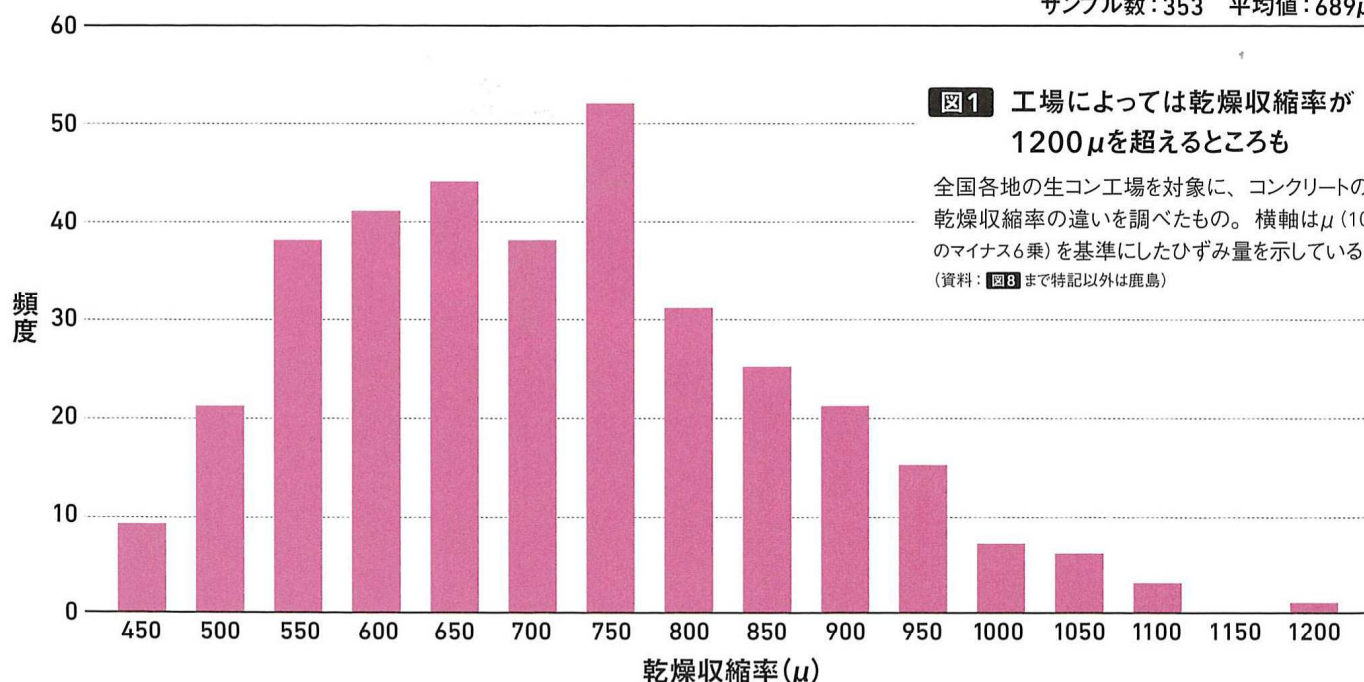
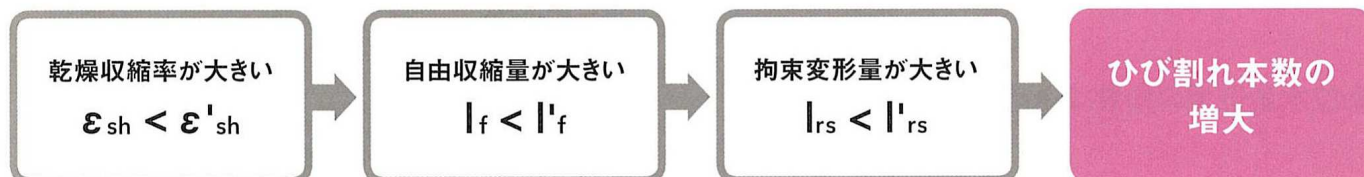
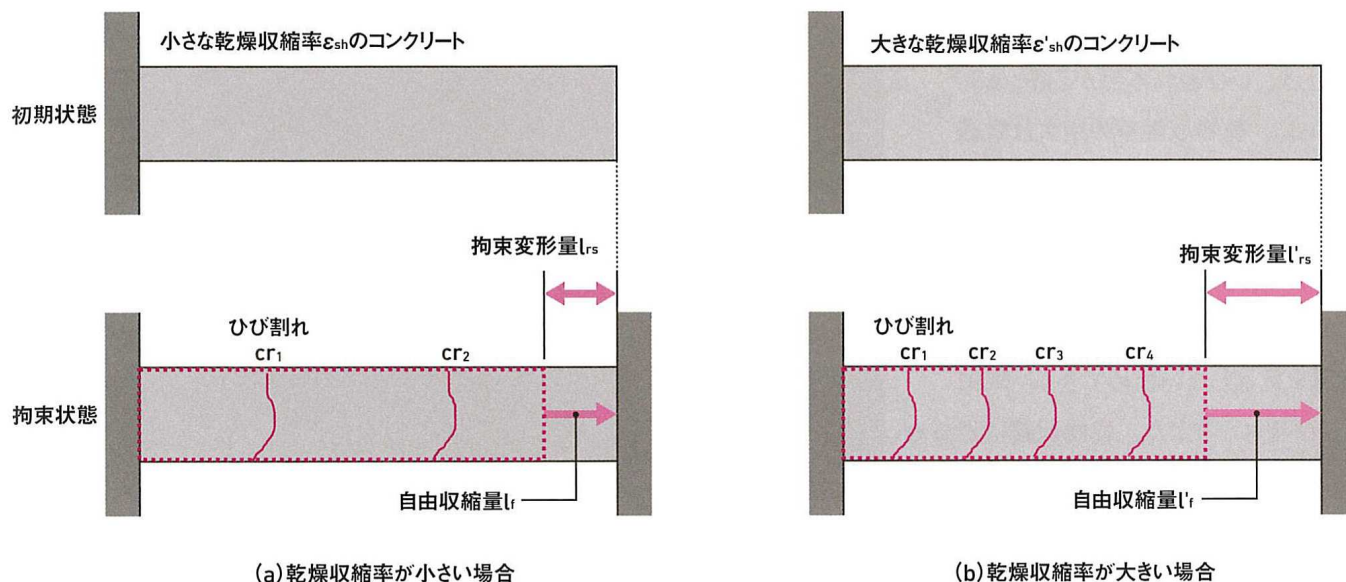


図2

拘束変形量が大きいほどひび割れ本数が多い

コンクリートは乾燥収縮すると、既設コンクリートによって拘束され引張力を受ける。この引張力によって生じた変形量を拘束変形量と呼ぶ。これはひび割れ幅の総和にほぼ等しい。乾燥収縮率が高いほど拘束変形量は大きくなり、ひび割れ本数が増える

[ひび割れが発生するメカニズム]



大きな違いがあることが明らかになってきた。どの程度のばらつきがあるのか、まずはそこから話を始めたい。

工場によって3倍の開き

最初に全国各地の生コンの乾燥収縮率の分布の例を示す(図1)。

グラフの横軸には生コンの乾燥収縮率を示し、縦軸に頻度を取った。横軸はひずみで表され、変形量を部材長で割った数値である。

ここで、乾燥収縮率の分布の広がり注目してほしい。最も小さい450 μ

から最大の1200 μ まで分布は非常に広い。これほど大きなばらつきがあると、同じひび割れ対策を講じても効果は大きく異なってくる。

一般に、膨張材による乾燥収縮率の低減幅は150 μ 程度である。それに対して、骨材による乾燥収縮率の差は、グラフから750 μ と5倍程度もあることが分かる。

つまり、知らずに乾燥収縮率1200 μ の生コンを採用すれば、たとえ膨張材を使用しても1050 μ と少し減るだけで、標準的な800 μ の生コンのレベルに遠く及ばない。

一方、450 μ の生コンに膨張材を用いれば高水準の低収縮コンクリートとなり、ひび割れを効果的に抑制できる。つまり、膨張材は乾燥収縮が小さい生コンに使用して初めて効果を発揮するのである。

1200 μ ではひび割れ多発

ここで、乾燥収縮率の増加がひび割れ発生に及ぼすメカニズムをおさらいしておく(図2)。

コンクリートは乾燥収縮すると、既設コンクリートによって拘束され引張

力を受ける。この引張力によって生じた変形量を拘束変形量と呼び、これはひび割れ幅の総和にほぼ等しい。また、ひび割れ幅は鉄筋比で決まる。

以上二つの事実から、鉄筋比が同じコンクリートであれば、乾燥収縮率が2倍（拘束変形量が2倍）のコンクリートは、ひび割れ本数が2倍となる。

さらに、乾燥収縮率の増大は微細なひび割れの増加をもたらす、影響はさらに深刻になる。**図3**は、乾燥収縮率が 1200μ のコンクリートを用い、耐震壁の試験体を製作した例である。壁厚を貫通しない極めて多くの微細なひび割れが生じた。乾燥収縮は表面から内部に向かい徐々に生じるため、乾燥収縮率が大きいと表面だけの浅いひび割れが多発して、美観上大きな問題となる。

単位水量低減の効果は限定的

次に、単位水量と乾燥収縮率の関係を見てみよう（**図4**）。

単位水量の低減が乾燥収縮率を抑制するなら、単位水量が多いほど乾燥収縮率が大きくなり、グラフは右肩上がりとなるはずである。しかし、実際には両者の間にはっきりした相関関係は見られない。

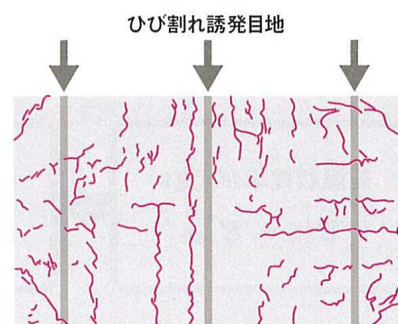
そのため、乾燥収縮率の低減のために、例えば「単位水量の上限 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 」と設計図書に明記し、その通りに施工しても、実際の生コンの乾燥収縮率は $450\mu\sim 1200\mu$ と幅広く分布するので期待する効果を得ることは難しい。

もう1つ、単位水量と乾燥収縮率

図3 極めて多くの微細なひび割れが多発

意図的に乾燥収縮率が 1200μ のコンクリートを用い、耐震壁の試験体を製作した。ひび割れは目地のなかに収まりきらず、コンクリートの表面全体を覆うように多数発生した（写真：鹿島）

[乾燥収縮率が 1200μ のコンクリート試験]



に関連する話として、高性能 AE 減水剤の効果にも触れておきたい。単位水量を減らすには、スランプを下げずに高性能 AE 減水剤を採用するのが普通である。しかし、実は期待したほど乾燥収縮率は抑制されないことが最近の研究から分かっている。

図5は、一般的な AE 減水剤（左端の棒グラフ）と比べて、高性能 AE 減水剤を使い単位水量を $10\text{kg}/\text{m}^3$ 低減したときの乾燥収縮率の減少の程度を銘柄ごとに示したものだ。最も効果がある場合でも乾燥収縮率の低減効果は6%（約 50μ ）程度に留まる。

ただし、単位水量の抑制には、乾燥収縮低減以外の重要な目的もあるので、この点は十分配慮してほしい。

工場ごとの調査が効果的

単位水量の抑制効果が薄いとすると、どのような対策をとればよいのだろうか。最も有効と最近考えられているのが、乾燥収縮率を直接調べることである。

図6は、ある工事で採用予定の2つの生コン工場のコンクリートについて、JIS A 1129 で規定されている試

図4

単位水量とひび割れには 明確な関係はない

単位水量の低減が乾燥収縮率の抑制に効くのなら、グラフは右肩上がりとなるはずだが、実際には両者の間にはっきりした相関関係は見られない

〔単位水量と乾燥収縮率の関係〕

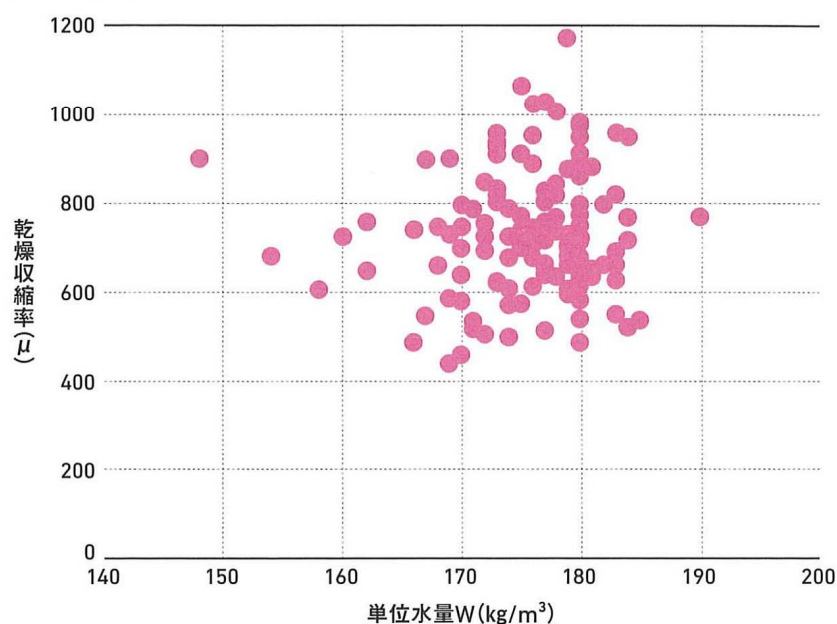


図5

高性能 AE 減水剤に 顕著な抑制効果は期待できない

左端の棒グラフ (S) が「AE 減水剤」。ほかの棒グラフは、いずれも単位水量 10kg/m^3 低減のために用いた「高性能 AE 減水剤」の銘柄

(資料：日本建築学会、高性能 AE 減水剤コンクリートの調合・製造および施工指針 同解説、1999)

〔高性能 AE 減水剤と乾燥収縮率の関係〕

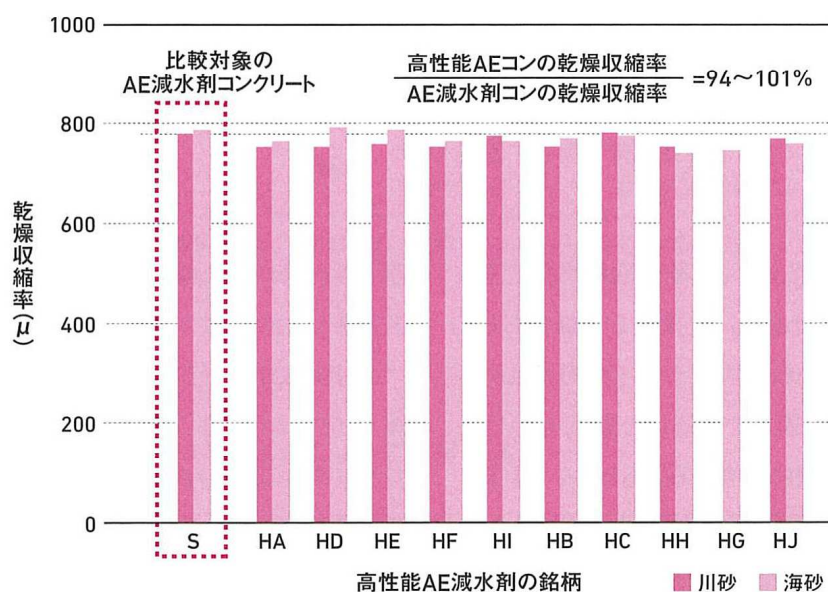


図6

近隣の生コン工場でも 乾燥収縮率に 300μ の差

近接する2つの生コン工場のコンクリートを、JIS A 1129で規定されている試験法で乾燥収縮率を実測した。約 300μ の開きが出た。当然、乾燥収縮率が小さなA工場のコンクリートが望ましい

〔2つの工場の乾燥収縮率を比較〕

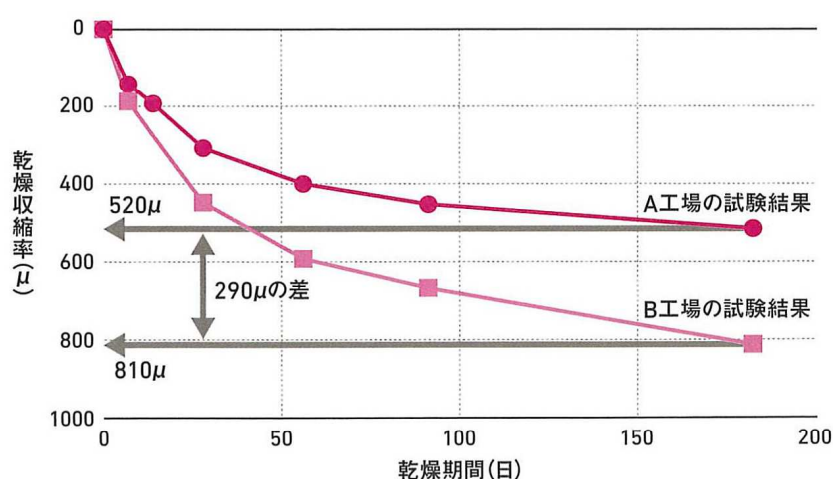


図7

種類によって骨材の 乾燥収縮ひずみに大差

乾燥収縮ひずみは、骨材の種類によって大きな差がある

(資料：コンクリート工学年次論文集、vol31、No.1、p553-558、2009、「骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響」田中、橋田)

〔岩種ごとの骨材の乾燥収縮ひずみ〕

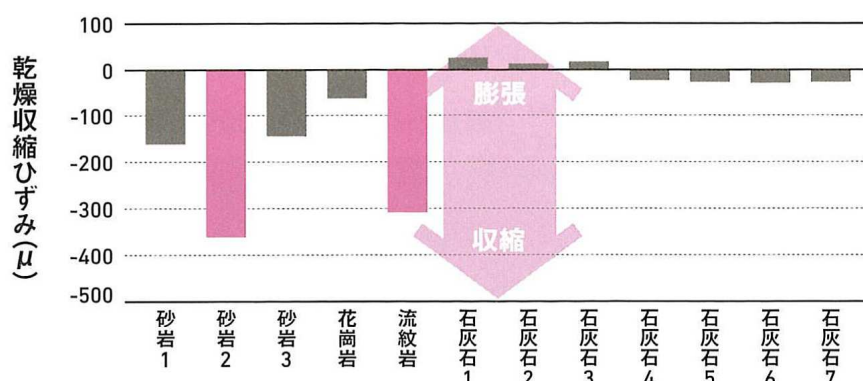
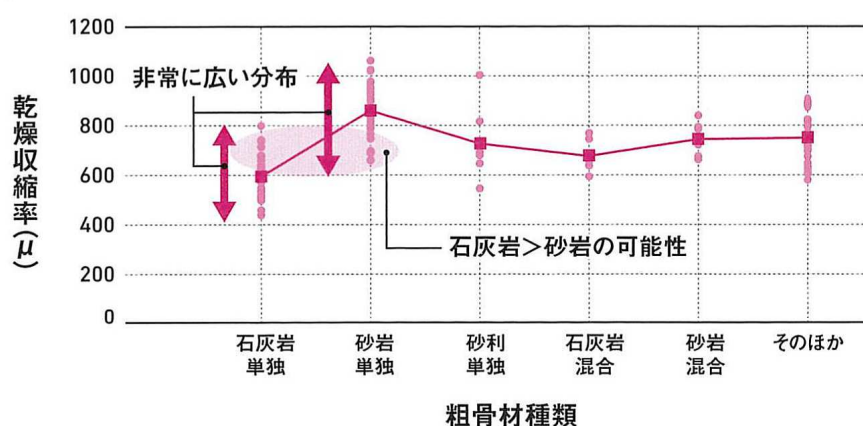


図8

岩種だけでコンクリートの 乾燥収縮率は予測できない

同じ岩の種類による骨材でも、それを用いたコンクリートの乾燥収縮率に差が出るのが分かる。従って、岩の種類だけで乾燥収縮率を推定することは難しい。結局、直接試験をすることが最も確実だ

〔同じ岩種の骨材によるコンクリートの乾燥収縮率を比較〕



験方法によって、乾燥収縮率を実測した例である。近接する工場であるにもかかわらず、2つの工場の差は約300μに達し、前述した膨張材の効果の2倍に相当する。もちろん、望ましいのは収縮が少ないA工場である。

工事に先立ち乾燥収縮率を知るための環境も、整いつつある。最も簡便なのは、生コンクリート工業組合や工場に乾燥収縮率を問い合わせることである。最近では、自社の生コンの乾燥収縮率を自主的に計測している工場も多い。

前記の乾燥収縮試験は6カ月の試験期間が必要で、工事に先立ち実施することは工程上難しいが、日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工

事」の11節には、1カ月程度で予測する方法も記述されている。

以上のように、工場ごとに乾燥収縮率が大きく異なる理由の1つは、骨材にあることが分かってきた。かつて、骨材は乾燥しても収縮せず、乾燥収縮を抑制すると考えられてきた。しかし、図7の通り、砂岩2や流紋岩のように、骨材自体も種類によって

は収縮し、コンクリートに使用すると乾燥収縮を助長する。

一般には、乾燥収縮率が小さくなるのは石灰岩碎石の骨材を使用した場合と言われている。しかし、同じ岩種でも差が大きく、石灰岩や砂岩というだけで乾燥収縮率の推定は難しい(図8)。結局、直接試験を行うことが最も確実である。

ここがポイント

単位水量を低減しても、コンクリートの乾燥収縮ひび割れを抑制する効果は薄い

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、**骨材の種類や産地で大きな違いがある。**
また、同じ岩の種類でも乾燥収縮率を**予測するのは困難で、**
工場ごとに調査するしかない

工場で異なる生コンの品質 適材適所で賢く使い分け

➡ 生コン工場からのデータ収集がカギ

ひび割れを抑制するためには、乾燥収縮の少ない生コンを使うのが理想だ。
しかし、現実には生コンは協同組合による共同販売が原則で、
施工者は自由に工場を指定できない。その制約を克服する工夫とは。

鉄筋コンクリート (RC) 工事でひび割れが発生したとき、その責任は施工者に帰せられることが多い。しかし、実際のひび割れ発生は乾燥収縮が大きいコンクリートを使用した場合など、生コンの品質の良しあしに左右されることも多い。

ここでは、ひび割れが発生したときに施工者が負うべき責任範囲に触れながら、実際の工事で適切にひび割れを抑制するための生コン発注の在り方について説明する。

JASS5 の用語を正確に理解

RC工事の責任範囲を明確にするうえで、ぜひ知っておきたい重要な用語がある。RC工事のバイブルとされる日本建築学会の「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)に頻繁に出てくる「使用するコンクリート」と「構造体コンクリート」の2つだ。

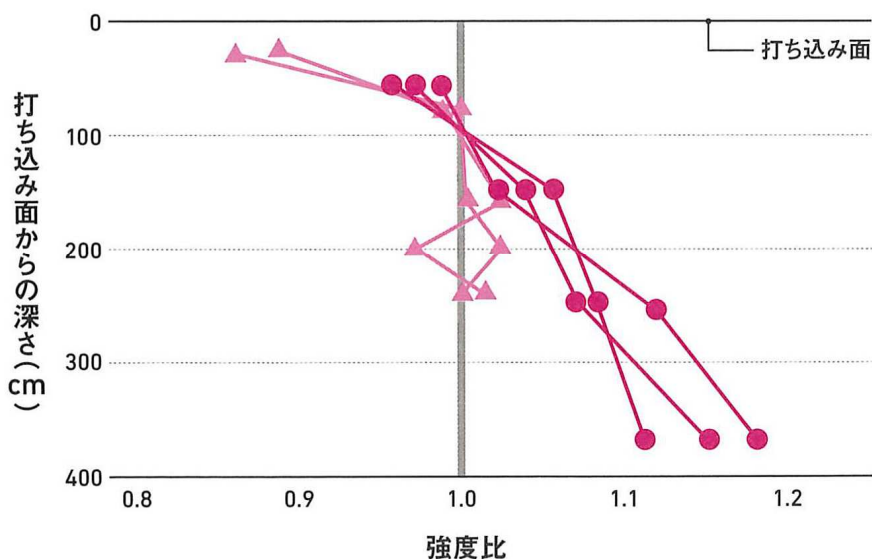
使用するコンクリートとは工事に使

図1 使用するコンクリートと構造体コンクリートの違いとは



どちらも JASS5 で頻繁に出てくる用語だが、使用するコンクリートは生コンのことを指し、構造体コンクリートは施工した躯体コンクリートを表す
(資料：筆者)

図2 同じ生コンでも部位によって強度は違う



柱部材のコア強度の高さ方向分布を表したものの。上下で約3割の差がある。同じ生コンでも高さ位置により強度が違う (資料：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」)

図3 生コンが製造されるまでの流れ

生コンは、セメント、細骨材、粗骨材などの原材料を調達したうえで、それらを生コン工場のバッチャープラントで練り混ぜて製造する。これを生コン車で施工現場に搬送する（資料：アサノコンクリート）

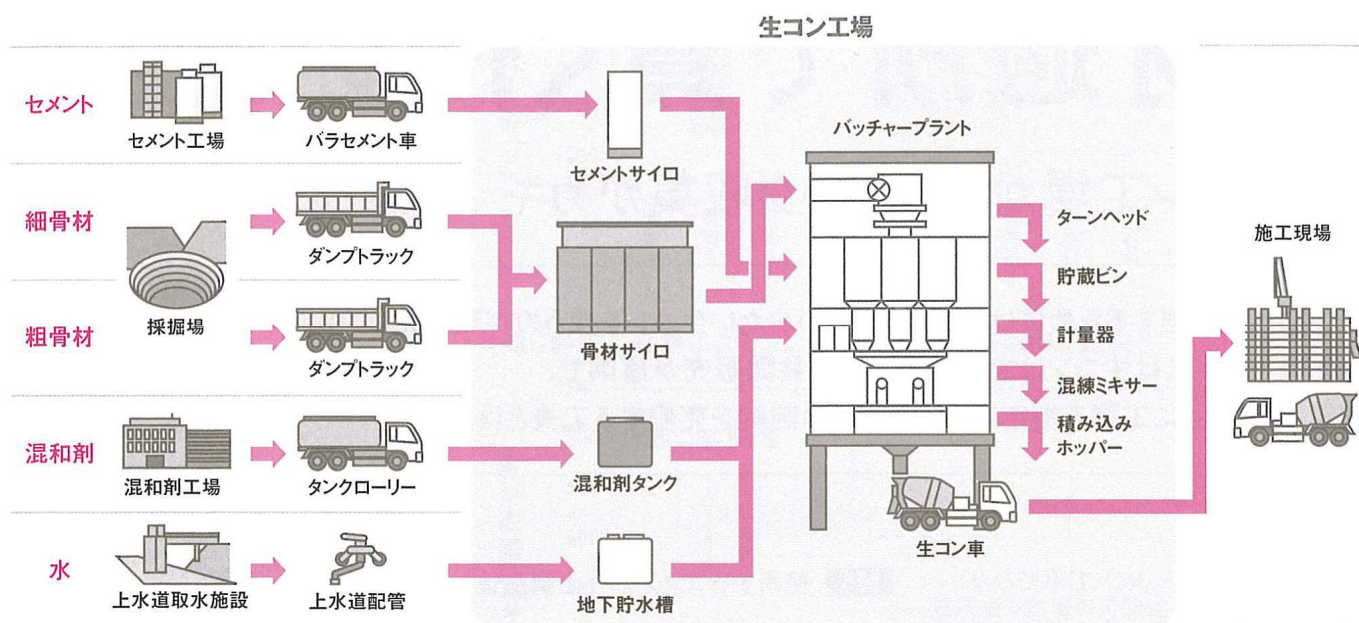


図4

生コン車とポンプ車の 接点が責任範囲の 分岐点

RC工事における生コン工場と施工者の技術的な責任区分は、生コン車からポンプ車に荷卸しするときに分岐点となる

（写真：日経アーキテクチャ）

生コン工場の責任 ← → 施工者の責任



用する生コンを指し、構造体コンクリートとは躯体に打ち込まれたコンクリートを表す（図1）。この違いを理解し、どちらについて記述しているかを意識するだけでJASS5の内容は格段に理解しやすくなる。

使用するコンクリートと構造体コンクリートの違いについて圧縮強度を例に説明する。前者は、荷卸し時に採取したテストピースを20℃の水中で養

生したときの28日材齢強度で表す。後者は、躯体から採取したコア供試体の91日強度で定義する。

使用するコンクリートは材料そのものであり、理想的な状態（20℃水中）で養生されたときの性能（ポテンシャル）で代表される。

これに対し、構造体コンクリートは、ポンプ圧送、打設、養生の施工過程を経ており、一般にポテンシャルの性

能には及ばない。このため、構造体コンクリートの要求性能である設計基準強度（ F_c ）を満足するため、 F_c に3N/mm²や6N/mm²を上乗せした値で生コンの発注呼び強度を決める。

構造体コンクリートの性能にはばらつきがあり、ポテンシャルに及ばない可能性がある。この事実を示す例を図2に示す。これは柱部材のコア強度の高さ方向分布を表しており、上

図5 法的な責任はほとんど施工者が負う

工程	トラブル例	技術上の責任	制度上の責任
打設	沈降ひび割れ	施工者 生コン工場	施工者
養生	プラスチック収縮ひび割れ 温度ひび割れ	施工者	施工者
竣工後	収縮ひび割れ	施工者 生コン工場	施工者

ひび割れのトラブルに関する技術的、法的責任の区分をまとめた。法的責任は、ほとんどの場合、施工者に帰せられる
(資料：図7まで筆者)

下で30%の強度差が生じている。特に柱上部でポテンシャルより強度が低くなる傾向が強い。

使用するコンクリート(生コン)は、図3に示すようにセメントなどの原材料を調達して、生コン工場で製造される。生コンは「JIS A 5308」という規格を満足する工業製品であり、定められた品質管理基準に従い製造され、建設現場へ納入される。

ひび割れの責任は主に施工者

RC工事における生コン工場と施工者の技術的な責任区分は、荷卸し時点で明確に線引きできる(図4)。生コン車からポンプ車にコンクリートを受け渡すときが、責任範囲の分岐点となる。その前が生コン工場、その後が施工者の責任範囲だ。

この原則を受け、施工の各工程で生じるひび割れによるトラブルとその責

任の所在を図5にまとめた。注意してほしいのは、技術的な責任と制度面の責任(法的責任)が必ずしも一致しないことである。

ひび割れの発生原因を時系列で見ると、打設、養生、竣工後の3つの段階に分けることができる。

まず、技術面の責任を各段階で見っていくと、施工者が単独で責任を負うべきものは養生だけであり、そのほかの打設や竣工後の段階では、施工者と生コン工場の双方に関係することが多い。例えば、最も多いとされる竣工後の収縮ひび割れを例にとると、施工者の品質管理上の責任が大きいのは確かであるが、生コンの乾燥収縮は工場によって大きく異なるので、生コン工場側にも責任の一端があるものと考えられる。

しかし、法的な責任で見ると、品質が劣る生コンを使用したことを含め、最終的にはすべての段階で施工者

の責任に帰せられることが多い。

生コン工場から情報収集

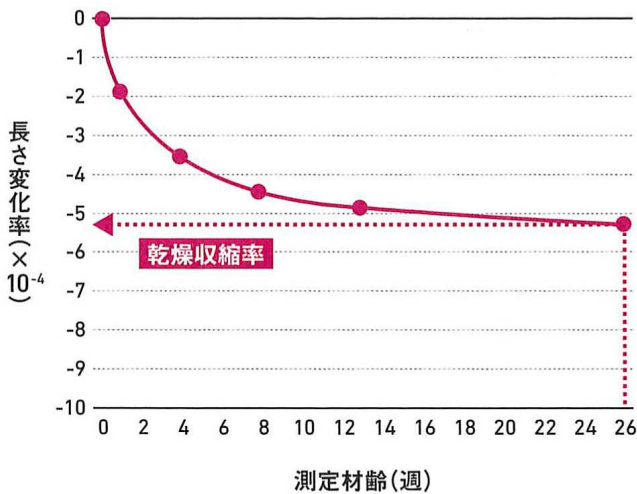
収縮ひび割れのトラブルが起こったとき、技術的には原因の一端を担うはずの生コン工場が法的な責任を負わないのは、生コンの規格である「JIS A 5308」に乾燥収縮の規定がないからである。こうした事実を踏まえ、施工者はひび割れに関する広範囲な法的責任を負うことを認識し、適切な対策を講じる必要がある。

第1の対策は、ひび割れ誘発目地を適切に設けるなど、通常の施工上の配慮をしっかりとすること。第2の対策は、乾燥収縮率に関するデータを生コン工場から入手して上手に使い分けることだ。近年、施工者の強い要望を受け、生コン工場のなかには、乾燥収縮試験を実施して、問い合わせに応じてデータを開示するところも

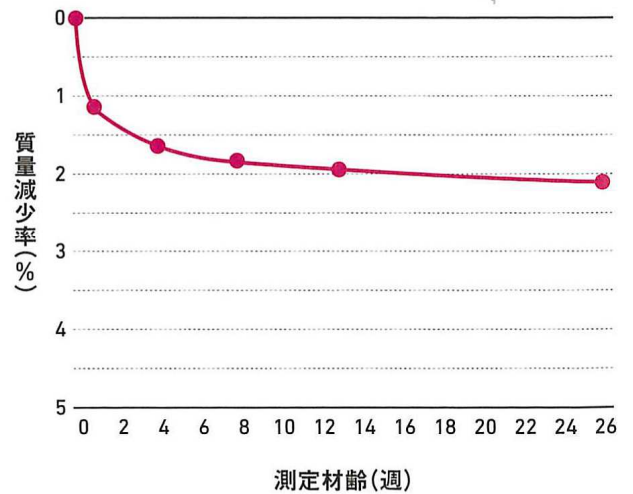
図6 生コン工場のデータを積極的に入手

項目	供試体の番号	測定材齢（週）						有効長さ		
		基長	1	4	8	13	26			
測定日時	月日	—	6月15日	6月23日	7月14日	8月11日	9月15日	12月15日	—	
	時刻	—	14:00	11:00	13:20	13:10	14:00	13:10	—	
測定時の環境	温度（℃）	—	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	—	
	湿度（％）	—	60	60	60	60	60	60		
長さ変化試験	長さ変化率 （×10 ⁻⁴ ）	1	測定値（mm）	0.430	0.362	0.299	0.267	0.252	0.237	361.13
			変化率	0	-1.88	-3.63	-4.51	-4.93	-5.34	—
		2	測定値（mm）	0.581	0.515	0.453	0.423	0.408	0.395	361.10
			変化率	0	-1.83	-3.54	-4.38	-4.79	-5.15	—
		3	測定値（mm）	1.391	1.324	1.262	1.230	1.216	1.201	362.00
			変化率	0	-1.85	-3.56	-4.45	-4.83	-5.25	—
	変化率平均値		0	-1.85	-3.58	-4.45	-4.85	-5.25	—	
	質量減少率 （％）	1	測定値（g）	9527.8	9421.1	9376.5	9353.9	9340.9	9330.5	—
			減少率	0	1.12	1.59	1.83	1.96	2.07	
		2	測定値（g）	9446.6	9340.1	9293.9	9270.9	9258.1	9247.8	—
			減少率	0	1.13	1.62	1.86	2.00	2.10	
		3	測定値（g）	9483.1	9378.5	9331.4	9308.5	9295.7	9285.4	—
			減少率	0	1.10	1.60	1.84	1.98	2.08	
	減少率平均値		0	1.12	1.60	1.84	1.98	2.08	—	

長さ変化率



質量減少率



上の表は、ある生コン工場が開示しているデータをまとめたもの。JIS A 1129 で定められている乾燥収縮率の標準試験の結果を示している。下は、長さ変化率と質量減少率の経時変化をグラフに表したもの。長さ変化率の26週材齢の値が乾燥収縮率に相当する。この例では、500 μ (マイクロ) と一般的な値 (800 μ) より小さく、ひび割れトラブルの心配は小さい。 μ は10のマイナス6乗を表す

増えている。

【図6】はある生コン工場が開示しているデータの一例である。「JIS A 1129」で定められている乾燥収縮率の標準試験の結果をまとめたものだ。また、下の2つのグラフは、同じ工場の生コンについて、長さ変化率と質量減少率の経時変化を表したものである。長さ変化率を表すグラフの26週材齢の値が一般に言われる乾燥収縮率である。

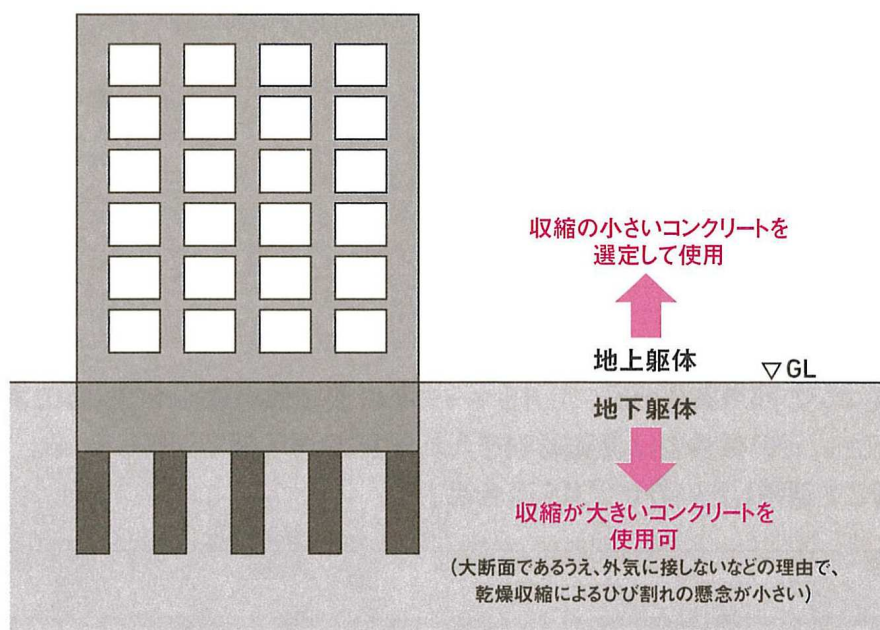
この例では、 500μ （マイクロ）を少し超える程度の値で、標準的な値である 800μ に比べかなり小さい。ひび割れを抑制するうえで理想的なコンクリートである。

ちなみに、生コン工場の乾燥収縮率のデータは、スランプ、呼び強度などが異なる生コン製品の全てを測定したものでなく、開示されたデータは代表的な配合を対象としたものであることが多い。しかし、建築工事に用いるスランプ15～18cm、呼び強度24～36N/mm²の範囲では、同一工場の製品で乾燥収縮率が例えば 100μ 以上異なることは少ないので、代表値でその工場の生コンの乾燥収縮率をある程度判断できる。

部位により生コンを使い分け

乾燥収縮率のデータを入手したら、部位による生コンの使い分けを考えたい。生コンは協同組合による共同販売が一般的で、乾燥収縮が小さいからといって、特定工場の生コンだけを施工者が購入することは原則できない。協同組合から購入する以上、

【図7】 地上躯体と地下躯体で生コンを賢く使い分け



施工者にとって、使用する生コンの工場を自由に指定できなくても、乾燥収縮率の大小を把握して、上手に使い分けることは十分可能である。上の図はその一例だ

組合内のどの工場から生コンが供給されるか施工者には分からない。このことを踏まえ、上手な使い分けを考えなくてはならない。

【図7】は使い分けの一例を表している。RC建物では、基礎・地下構造で用いるコンクリート量はかなり多く、上部躯体で使用する量と同規模となることも一般的である。上部躯体の壁や床は部材断面が小さいので乾燥収縮によるひび割れが懸念される。しか

し、基礎・地下構造の部材では、部材断面が大きいし、外気にさらされず乾燥もしない場合が多いので、乾燥収縮率が高い生コンを使用しても問題となるリスクは小さい。

協同組合と相談のうえ、生コン工場ごとにコンクリートを打ち込む部位を割り振ることで、現在の生コンの流通システムにおける枠組みのなかでも、収縮ひび割れを少なくする努力を払ってほしい。

ここがポイント

生コン工場と施工者の責任区分は、
生コン車からポンプ車に荷降ろしするときが分岐点
になる

**乾燥収縮率のデータを把握できれば、
ひび割れリスクに応じて使い分けることも可能となる**

JISマークがなくても採用できる生コンがある

➡ 分かりにくい「JIS 適合品」をざっくり理解

生コンの採用条件として、JIS マーク品の取得が指定される建築工事は多い。
だが、その条件では混和材料を入れた生コンすら使用が難しくなる。
そこで活用したいのが「JIS 適合品」だ。

「使用する生コンクリートは、JIS マーク認証製品であること」

最近の工事では、コンプライアンス重視の流れから、生コンの採用条件がこのように指定されることも多い。しかし、この工事仕様だと、施工者の選択肢は大幅に制限される。例えば、ひび割れ低減に効果がある膨張材を入れた生コンについて、JIS マーク認証製品（以下、JIS マーク品）を出荷できる生コン会社はごくわずかである。

もちろん、JIS マーク品を使用するのが原則であるが、そうでなくても、膨張材を使った生コンを利用することは可能である。ここでは、建築基準法で使ってよいとされている生コンの範囲をできるだけ明確にするとともに、混和材料を使うときの注意点にも触れたい。

出発点は建築基準法37条

【図1】は建築工事に使用できるコンクリートの規定をまとめたものだ。最も

【図1】 使用できる生コンを建築基準法37条と JASS5 で規定

建築基準法 第37条第1号

II

生コンなど指定建築材料は、以下のいずれかでなければならない

37条第1号：その品質が、指定建築材料ごとに国土交通大臣の指定する日本工業規格（JIS）または日本農林規格（JAS）に適合するもの

同第2号：指定建築材料ごとに国土交通大臣の認定を受けたもの



構造体に用いる生コンは、具体的には次のいずれかの条件を満足する必要がある

(1) JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）の規定に適合している

(2) 指定性能評価機関で性能評価を受け、国土交通大臣の認定を受けたもの（高強度コンクリートなど）

日本建築学会

「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」

6節 コンクリートの発注・製造および受け入れ、6.1項 総則 b.

II

(1-1) JIS A 5308 に適合することが、第三者機関によって認証されているコンクリート（JIS マーク品）

●(1-2) JIS A 5308 に適合するが、適合性の認証は受けていないコンクリート（JIS 適合品）

(2) JIS A 5308 に適合しないレディーミクストコンクリートを使うときは、建基法第37条第2号によって国土交通大臣が認定したコンクリートでなくてはならない

この規定の存在が、あまり知られていない

構造体に用いる生コンは、建基法37条の規定に基づき、JIS A5308 の規定に適合するものとして、JASS5 で (1-1) JIS マーク品の生コン、(1-2) JIS マーク品ではないが、JIS A5308 に適合すると判断できる生コンの2つを列挙している（資料：建築基準法、JASS5 をもとに筆者が作成）

図2 JISマーク品は配合計画書と認証書で確認できる

レディーミクストコンクリート配合計画書

島根建設 (株) 島根

〒690-0024 島根県松江市大森町1-10-10
(有) 中山生コンクリート工場
112-0001 松江市大森町205-40
配合計画書 発行: 2024.05.22

1. 品名: 40Mpa 高強度コンクリート

2. 用途: 橋脚基礎

3. 配合設計者: 中山生コンクリート工場

4. 配合設計日: 2024.05.22

5. 配合設計場所: 島根県松江市大森町205-40

6. 配合設計内容: 高強度コンクリート

7. 配合設計条件: 高強度コンクリート

8. 配合設計結果: 高強度コンクリート

9. 配合設計確認: 高強度コンクリート

10. 配合設計承認: 高強度コンクリート

11. 配合設計完了: 高強度コンクリート

12. 配合設計完了日: 2024.05.22

13. 配合設計完了場所: 島根県松江市大森町205-40

14. 配合設計完了内容: 高強度コンクリート

15. 配合設計完了確認: 高強度コンクリート

16. 配合設計完了承認: 高強度コンクリート

17. 配合設計完了完了: 高強度コンクリート

18. 配合設計完了完了日: 2024.05.22

19. 配合設計完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

20. 配合設計完了完了内容: 高強度コンクリート

21. 配合設計完了完了確認: 高強度コンクリート

22. 配合設計完了完了承認: 高強度コンクリート

23. 配合設計完了完了完了: 高強度コンクリート

24. 配合設計完了完了完了日: 2024.05.22

25. 配合設計完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

26. 配合設計完了完了完了内容: 高強度コンクリート

27. 配合設計完了完了完了確認: 高強度コンクリート

28. 配合設計完了完了完了承認: 高強度コンクリート

29. 配合設計完了完了完了完了: 高強度コンクリート

30. 配合設計完了完了完了完了日: 2024.05.22

31. 配合設計完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

32. 配合設計完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

33. 配合設計完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

34. 配合設計完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

35. 配合設計完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

36. 配合設計完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

37. 配合設計完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

38. 配合設計完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

39. 配合設計完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

40. 配合設計完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

41. 配合設計完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

42. 配合設計完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

43. 配合設計完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

44. 配合設計完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

45. 配合設計完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

46. 配合設計完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

47. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

48. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

49. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

50. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

51. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

52. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

53. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

54. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

55. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

56. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

57. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

58. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

59. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

60. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

61. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

62. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

63. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

64. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

65. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

66. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

67. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

68. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

69. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

70. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

71. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

72. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

73. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

74. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

75. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

76. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

77. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

78. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

79. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

80. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

81. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

82. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

83. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

84. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

85. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

86. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

87. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

88. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

89. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

90. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

91. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

92. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

93. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

94. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

95. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了: 高強度コンクリート

96. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了日: 2024.05.22

97. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了場所: 島根県松江市大森町205-40

98. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了内容: 高強度コンクリート

99. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了確認: 高強度コンクリート

100. 配合設計完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了完了承認: 高強度コンクリート

認 証 書

(認証番号) GB0806013

有限会社中山生コンクリート工場

代表取締役社長 中山 伸夫 殿

部本県松本市北區堤川町 1102 番地

工業標準化法第19条第1項の規定により日本工業規格の表示について下記のとおり認証します。

記

1. 証工業品の名称 : レディーミクストコンクリート

2. JIS規格番号、名称及び : JIS A 5308 レディーミクストコンクリート
JISの規格又は等級 : 普通コンクリート・高強度コンクリート

3. 認証の区分 : 同上

4. 工場の名前及び所在地 : 有限会社中山生コンクリート工場
部本県松本市北區堤川町 1102 番地

(認証日) 平成 16 年 8 月 14 日
(再発行) 平成 24 年 5 月 22 日

GBRC JIS
CERTIFICATION
INSTITUTION

一般財団法人 日本建築総合試験所
〒100-0001 東京都千代田区千代田 1-1-1

認証書別紙

(認証番号) GB0806013

(認証日) 平成 16 年 8 月 14 日
(再発行) 平成 24 年 5 月 22 日

認証証工業品の種類: 下表のとおり

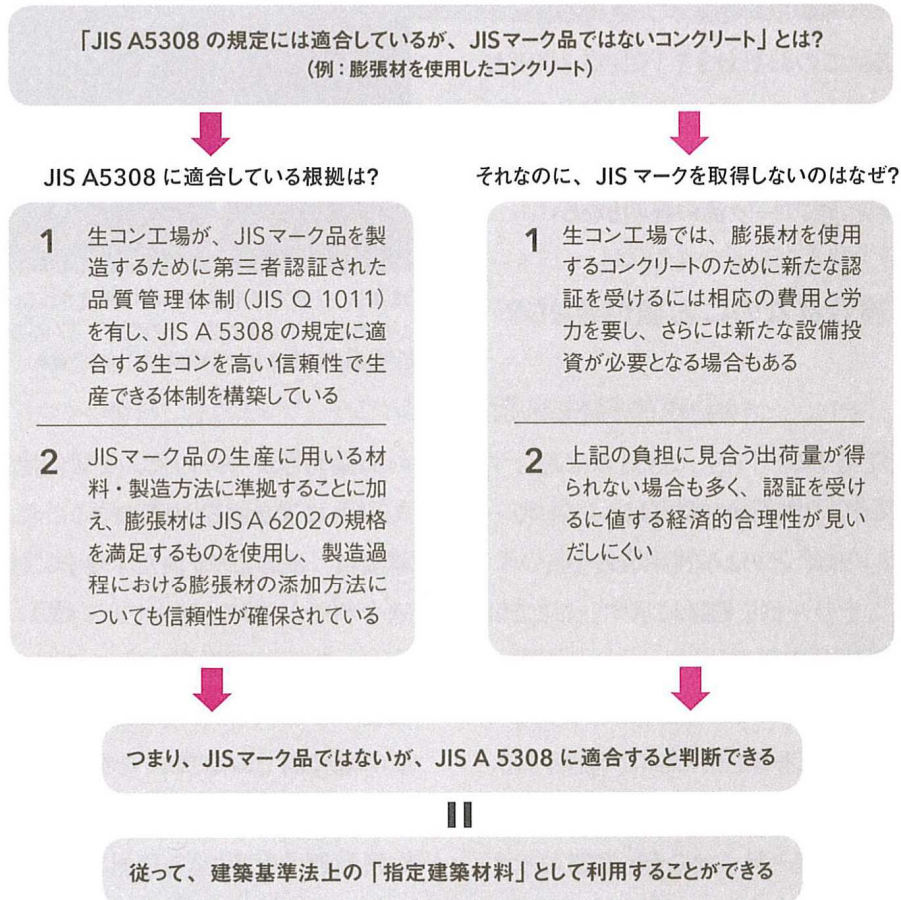
コンクリートの種類	コンクリートの最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	圧縮強度 (MPa)											
			18	21	24	27	30	33	36	40	45	48		
普通コンクリート	30	18, 21, 24, 27	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
高強度コンクリート	40	30, 33, 36, 40	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

「JISマーク品」 JISマーク品は、生コン製品が JIS に適合していることに対して、第三者の認証機関がお墨付きを与えたもの。配合計画書 (左) と認証書 (中) で確認できる (資料: 中山生コンクリート工場)

図3 分かりにくい「第2の適合品」をひもとくと…

重要なのは建築基準法第37条である。これは、主要構造部などに使用する建築材料の品質を定めたもの。建築物の性能を左右する重要な材料を「指定建築材料」と定義し、その品質は JIS または JAS に適合するか、国土交通大臣の認定を受けたものと定められている。

構造体に用いる生コンは、この指定建築材料の1つである。使用条件は、(1) JIS A5308 に適合するもの、または (2) 大臣認定を受けたものに限定されている。設計者や施工者の判断で、新しい材料を生コンに勝手に使用することはできない。大臣認定品の代表には、高強度コンクリート (例えば $F_c=60\text{N/mm}^2$) があり、生コン工場または施工者が大臣認定をあらかじめ取得している場合だけ使用できる。



JIS マーク品でなくても、JIS A5308 に適合していると判断できる場合がある。膨張材を使用したコンクリートを例に取り、どんな場合がそれに該当するかを示した (資料: 筆者)

JISマーク品は品質のお墨付き

【図1】の下に日本建築学会の「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）の規定をまとめた。JASS5では、基準法37条の(1) JIS A5308の規定に適合するコンクリートとして次の2つを示している。すなわち、(1-1) JISマーク品と、(1-2) JIS A5308には適合するが、JISマーク品ではないコンクリート（以下、JIS適合品）である。

前者のJISマーク品は、生コンを発注する際に施工者が受け取る配合計画書で確認できる（【図2】）。

JISマーク品として出荷するためには、その生コン製品がJISに適合していることについて、認証機関からいわゆるお墨付きを得ることが必要となる。このお墨付きを「JIS Q 1001 および JIS Q 1011 に基づく製品認証」という。【図2】のような認証書が発行され、JISマーク品の証明となる。

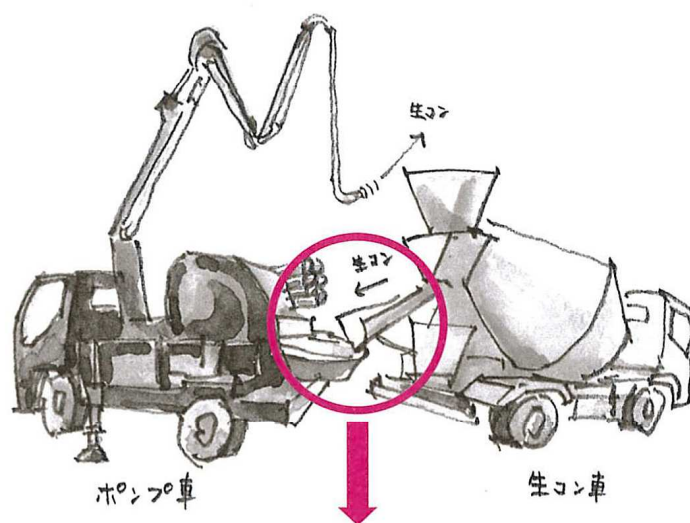
適合品なのにお墨付きなし？

次に、2つ目のJIS適合品について説明する。「JIS A5308には適合するが、JISマーク品ではないコンクリート」とは、どのようなものだろうか。

その一例を【図3】に示す。ここでは、膨張材を使用した生コンクリート（以下、膨張コンクリート）がJIS適合品と判断できる場合を例に挙げて説明する。JIS適合品とは、JIS A5308の規定を満足すると見なせるが、【図2】に示す認証書を取得していないものである。

ここで1つの疑問が湧く。認証書

【図4】 建基法の材料規定が及ぶのは荷卸しまで



建基法37条で指定建築材料に指定されているのは生コンクリート。その規定が及ぶ範囲は、生コンが荷卸しされるまでだ。その先は、37条の規定の枠外とされる
(イラスト：岡田雅人建築設計事務所、写真：鹿島)

のお墨付きがないのに、なぜ、JIS A5308に適合すると判断できるのか。筆者は、次の2つを満たす場合には適合判断ができると考えている。

(1) 生コン工場がJISマーク品を製造するために第三者認証された品質管理体制（JIS Q 1011）を有し、JIS A5308の規定に適合する生コンを高い信頼性で生産できる仕組みを構築している。(2) もともとベースとなる生コンがJISマーク品であり、その材料

や製造方法に準拠して膨張コンクリートを生産している。膨張材を混入するので正式なJISマーク品とにならないが、膨張材そのものにもJIS規格（JIS A6202）があり、その規格を満足する材料を使用している。

ここで、さらに新たな疑問が湧く。膨張コンクリートの品質がそこまで担保されているなら、なぜその生コン工場は、膨張コンクリートのJISマークを取得しないかという疑問だ。これは

写真1 PCaは指定建築材料の枠外



PCaは生コンではなく構造体コンクリートなので、指定建築材料の枠外とされる（写真：本誌）

経済性の問題が大きいと思われる。膨張コンクリートは汎用品であっても日常的に大量出荷するものではない。JISマーク品の認証書を取得するメリットに比べ、必要なコストや労力が大きければ、取得しない判断もありうるわけだ。

荷卸しまで建築材料の枠内

建基法37条の適用範囲に関しては、誤解も多いので補足説明したい。以下の説明は、2000年に建築基準法が大改正され、現在の枠組みになった際に、その取りまとめに参画した広島大学の久保孝昭教授（当時、建築研究所）が執筆された解説記事^(注1)を

ベースにしている。同37条が対象とする指定建築材料はあくまで生コンクリートであり、構造体コンクリートではない。

つまり、37条の規定が及ぶ範囲は、生コンの荷卸し時点までで、そこから先は37条の枠外と考えることができる。責任の所在も、荷卸し時点より前が生コン会社、その先は施工者となる（図4）。

この原則に従えば、荷卸し後に流動化剤を添加する場合、添加後のコンクリートの品質は施工者の責任となる。また、プレキャスト（PCa）コンクリートは、生コン製品を購入せずPCa工場で独自に製造したものを使用する場合、37条の適用を受けない

と解釈されている（写真1）。

もちろん、この場合も自社製造するコンクリートは37条の規定に準拠する必要がある。

混和材料の取扱い

最後に、ひび割れを低減させる効果のある混和材料について触れておきたい。

膨張材などの混和材料を使用した生コンは、建築現場ではよく導入される。これをJIS適合品として扱えるかどうかは、建築実務者にとっては関心事の1つだろう。

図5は、混和材料の例として「2007年版建築物の構造関係技術

（注1） 久保孝昭、長谷川拓哉著、「鉄筋コンクリート工事をめぐる諸問題（建築基準の性能規定化研究協議会資料）」、2002年、日本建築学会大会、5～19ページ

図5 JISマーク品でなくても使用できると考えられる混和材料の種類

分類	JIS 規格	名称	概要	備考
JIS A5308 に 含まれるもの (「7.4 混和材料」に規定)	JIS A6201	コンクリート用 フライアッシュ	フライアッシュⅠ種～Ⅳ種	(1) コンクリートおよび鋼材に有害な影響を及ぼすものであってはならない (2) 混和材料の種類および使用量について、購入者は生産者と協議のうえ、必要に応じて指定することができる
	JIS A6202	コンクリート用膨張材	コンクリートまたはモルタルを膨張させる混和材料	
	JIS A6204	コンクリート用 化学混和剤	主としてその界面活性作用によってコンクリートの諸性質を改善するために用いる混和剤 (AE 剤、減水剤、AE 減水剤、高性能 AE 減水剤、硬化促進剤、流動化剤)	
	JIS A6205	鉄筋コンクリート用 防せい剤	コンクリート中の鉄筋が使用材料中に含まれる塩化物によって腐食することを抑制するために用いる混和剤	
	JIS A6206	コンクリート用 高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末 4000、6000、8000	
	JIS A6207	コンクリート用 シリカフューム	コンクリートの性能および品質の向上効果を有する混和材料	
JIS A5308 に 含まれないもの (実績のある一例)	—	躯体防水材	コンクリートの性能および品質向上効果を有する混和材料。	1960年代から使用
	—	収縮低減剤	JIS 規格はないため、ベースコンクリートの性状および物性に悪影響がないことを確認して使用する	1980年代から使用
	—	水中不分離	水中コンクリートに使用するもので、コンクリートに粘性を与え、水中での骨材とペーストとの分離を防ぐために用いる混和剤	1980年代から使用

ここに掲載した混和材料は、JIS 規格が存在するか多くの実績を持つもので、これらを使用した生コンは、JIS マーク品でなくても JIS 適合品と判断できると考えられる (資料: 「2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書」)

基準解説書」(国土交通省住宅局ほか監修)に掲載されているリストである。掲載されている混和材料は、JIS 規格が存在するか、または多くの実績があり、これらを使用する生コンが JIS マーク品でなくとも JIS 適合品と判断できると考えられる。

その際、図5で「JIS A5308 に含まれるもの」と分類されている材料は (例えば、膨張材)、品質を規定する個々の JIS 規格が存在しているので、その規格に適合したものを用いなければならない。一方、JIS A5308 に含まれない分類の材料に JIS 規格は

ないが、実績がある限られた製品を用いることで、JIS 適合の生コンと判断できると考えられる。

この表に「JIS A 5308 に含まれないもの」として挙げられている収縮低減剤は、ひび割れの抑制を目的とする

生コンに使用される代表的な混和材料であるが、これを用いた場合も、JIS 適合と判断してよいと考えられる。なお、これら JIS 適合の判断については、少なくとも工事監理者の了解を得ることが必要である。

ここがポイント

JIS 適合品とは、JIS5308 には適合するものの、JIS マークを取得していないコンクリートである

収縮低減剤などの混和材料も、JIS 適合品と判断できると一般には考えられている

CHAPTER 5

床スラブは ひび割れ多発箇所



完全には防げない 床スラブのひび割れ

➡ 建築主の理解を求めることが重要に

床スラブのひび割れを完全に防ぐことは非常に難しい。

床スラブでは、ひび割れ誘発目地を施工できないうえ、長期荷重による曲げ応力が発生するからだ。品質管理に十分注意を払いつつ、ひび割れリスクが高いことを建築主に事前に説明する必要がある。

ここでは、不具合の事例が多い床スラブのひび割れについて説明する。結論から言えば、床スラブのひび割れを防止することは非常に難しい。かなりのひび割れが生じるリスクがあることを、建築主にもきちんと説明する必要があると考えている。

もちろん、難しいからと言っていい加減な施工をしてよいはずはない。細心の注意を払って施工する必要があるのは、ほかの部位とまったく同じである。ただ、床スラブには、ひび割れの制御を難しくする固有の理由がある。

図1に、その理由として3つのポイントを挙げた。第1は、本来なら有効な対策であるはずのひび割れ誘発目地（以下、目地）を一般には設置できないことである。

第2は、壁部材と異なり、床スラブには固定および載荷荷重による曲げ引張応力が常に生じることだ。これと、収縮を拘束して生じる引張応力とを合算したものが内部応力として働くこ

とになる。

第3は、床スラブの部材形状にある。表面積は大きいのに断面厚さは小さいので、乾燥収縮が速い。さらに、大断面の梁部材などから大きな拘束を受けるので拘束変形量が大きくなり、ひび割れが発生しやすい。

床の打ち増しは構造に影響

まず、目地を設置できない理由から述べる。

壁部材では、壁厚を打ち増して、その分を欠き込み目地とするのが一般的である。ひび割れを目地だけに

図1 床スラブでひび割れ制御が難しい理由

1 ひび割れ誘発目地を設けることができない

ひび割れ誘発目地を設ける場合、目地深さに相当する厚さのコンクリートを打ち増しする必要がある。しかし、床は壁よりも面積が広いので、打ち増しによって建物全体の重量が大幅に増え、構造計算にも影響を与える。従って、勝手に目地を設けてはならない。

2 鉛直力による曲げ応力でひび割れが発生しやすい

床コンクリートは、壁と違って鉛直力による曲げ応力が発生する。曲げ応力はスパン中央付近と両端で大きくなる。この部分のひび割れには特に注意が必要である。

3 部材断面が小さいので収縮ひび割れも生じやすい

床コンクリートの表面積は大きいので、打設後の水分の蒸発速度が大きい。しかも、部材断面が小さいため、拘束変形量が大きくなり、収縮ひび割れが発生しやすくなる。

床スラブは、壁部材と異なり、ひび割れ制御が難しい固有の事情が存在する。かなりのひび割れが生じることを前提に、対策を考えることが必要になる（資料：図8まで特記以外は筆者）

集中させれば、効果的に不具合を防止できる。

ところが、床スラブでは表面積が大きい、壁と同様に「打ち増し+目地」の手法を取ると、建物重量が大幅に増大し構造性能への影響が大きい。【図2】に、有効床断面厚さが200mmの床スラブを例示した。断面欠損率を20%確保するには、深さ50mmの目地を設置し、同じ厚さ分のコンクリートの打ち増しが必要となる。単純計算すると、打ち増しによって固定荷重が5～15%増加する。これは、構造設計の見直しが必要になる増加量である。

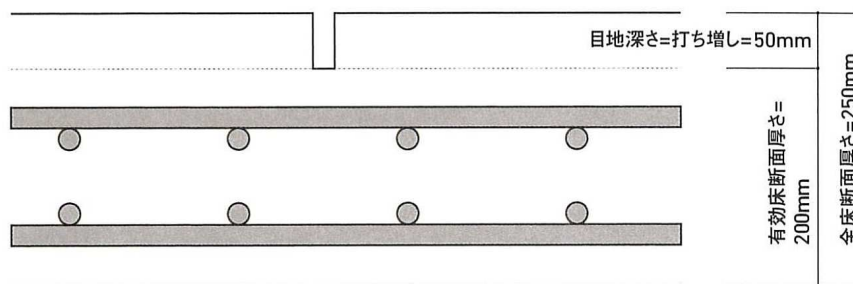
現実として、部材断面の打ち増しと目地の設置は、設計段階ではなく施工段階で決定する。しかし、構造性能に影響を与えるような施工を、設計変更なしで採用することはできない。施工者の勝手な判断で、床スラブに目地を設置することは通常できないのである。

無視できない長期荷重の影響

次に、長期荷重による影響について述べる。壁部材では長期荷重による応力は小さく、ひび割れへの影響はほとんど無視できる。ところが、床スラブでは、その影響が無視できないほど大きい。

【図3】は、床スラブの引張応力の分布を表している。(1)は収縮を拘束して生じる引張応力で、部材断面で一樣となる。(2)は長期荷重(自重)の曲げモーメントによる引張応力の分布を表す。これは梁端部で上側、中央

【図2】 床に目地を設けると固定荷重が1割増



全床断面厚さ 250mm、目地による断面欠損率を 20%とする



目地の深さ = 打ち増しコンクリートの厚さ = 50mm (250mm × 0.2)



120kg / m² ほど自重が増加する (厚さ 50mm で概算)



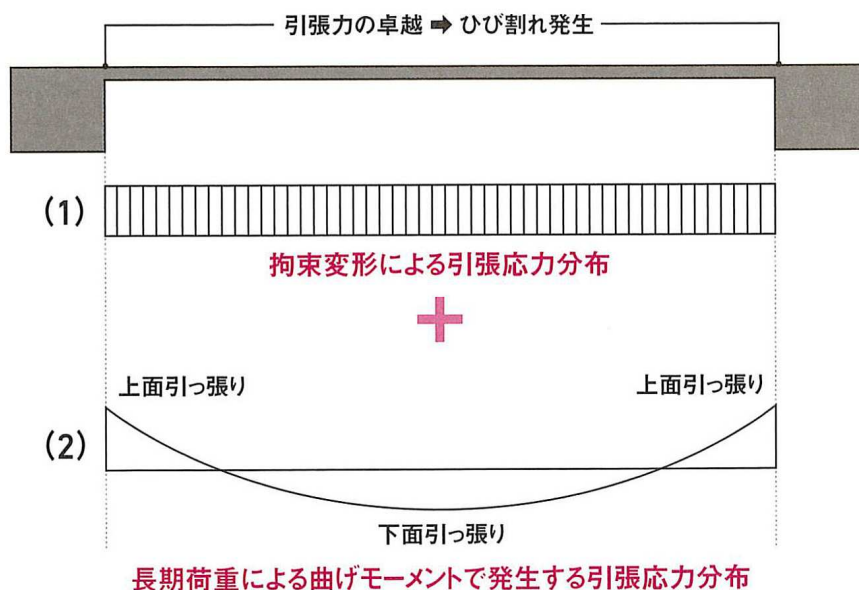
延べ床面積 1万 m² で 1200t の増加 ⇒ 固定荷重が 5～15% 増加



建物全体の構造設計に影響 ⇒ だから勝手に目地を切ってはいけない

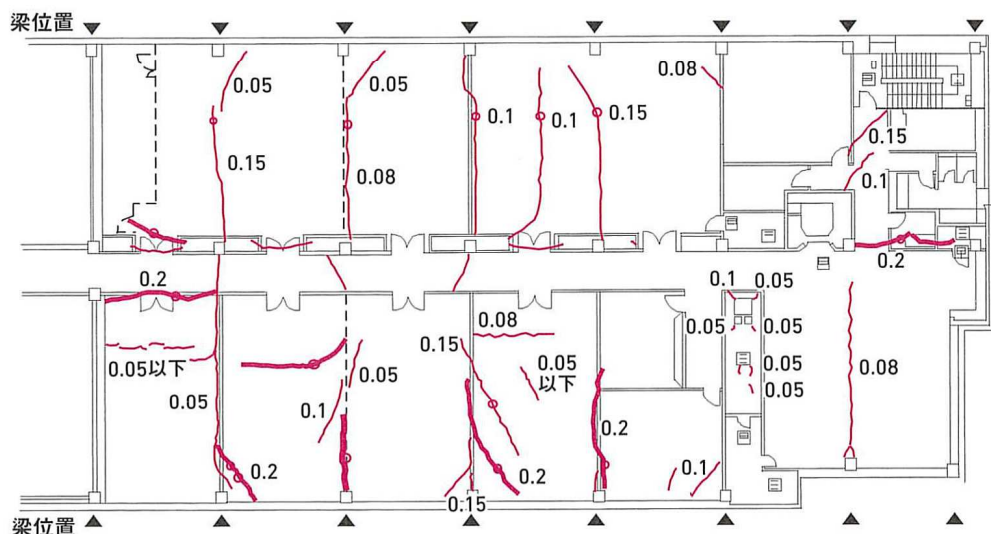
壁部材と異なり、床スラブの打ち増しは、構造設計にも影響を与えるほどの大幅な固定荷重の増大を招く。そのような施工措置を、施工者の判断で行うことはできない

【図3】 床スラブの内部応力が大きくなる理由



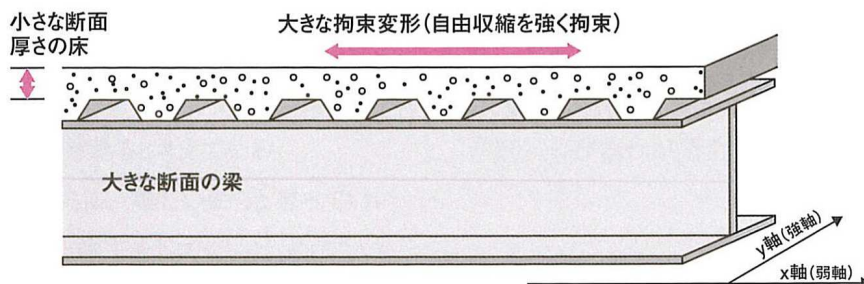
床部材には拘束変形による引張応力と、固定荷重の曲げモーメントによる引張応力がかかる。両方を合計した引張応力が生じることになり、その分、ひび割れが発生しやすくなる

【図4】 大梁位置の材軸に沿ってひび割れが多発



床スラブでは、梁際とスパン中央の断面で引張応力が大きくなるため、大梁位置の材軸に沿ってひび割れが多数発生していることが分かる

【図5】 異形断面デッキスラブのひび割れ発生メカニズム



- 1 デッキプレートのx方向は、大断面の梁（H形鋼）に拘束されるので、自由収縮が強く拘束され、大きな拘束変形を受ける
- 2 x方向の床断面は、厚さの大きい部分と小さい部分があるが、引張力に有効に抵抗するのは小さい方だけ。引張抵抗力は小さい
- 3 一方のy方向は、拘束が比較的弱い。
また、床断面は、厚さの大きな部分も引っ張りに対して有効に抵抗する



結論

従って、ひび割れリスクがより大きいのはx方向。
この向きの引張力により、
x方向と垂直な向き（y方向）のひび割れがほぼ不可避

部で下側に生じる。(1)と(2)を合計した引張応力は、梁の端部と中央部で卓越するので、梁端部にはスラブ上面、中央部ではスラブ下面にひび割れが生じやすい。スラブ上面のひび割れは目立つので、梁端部のひび割れがよく問題になる。

【図4】は床スラブ上面のひび割れを平面図に記したもので、梁際とスパン中央の断面で引張応力が大きくなるため、大梁位置の材軸に沿ってひび割れが発生している状況が分かる。

ちなみに、床の構造や形状で比較すると、筆者の経験では、鉄筋コンクリート（RC）の一般構造スラブが最もひび割れの不具合が少ない。これは、ひび割れ幅を0.3mm以下に制御するため、鉄筋比を原則0.4%以上確保することが推奨されているからだと推測される。

日本建築学会の「鉄筋コンクリート

図6 異形断面デッキスラブで x 軸と垂直方向にひび割れ

x 方向が大きな引張力を受けるので、ひび割れは x 方向と垂直方向 (y 方向) に入る

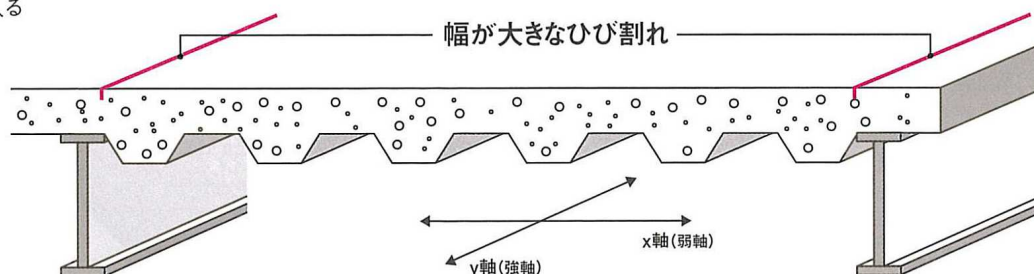
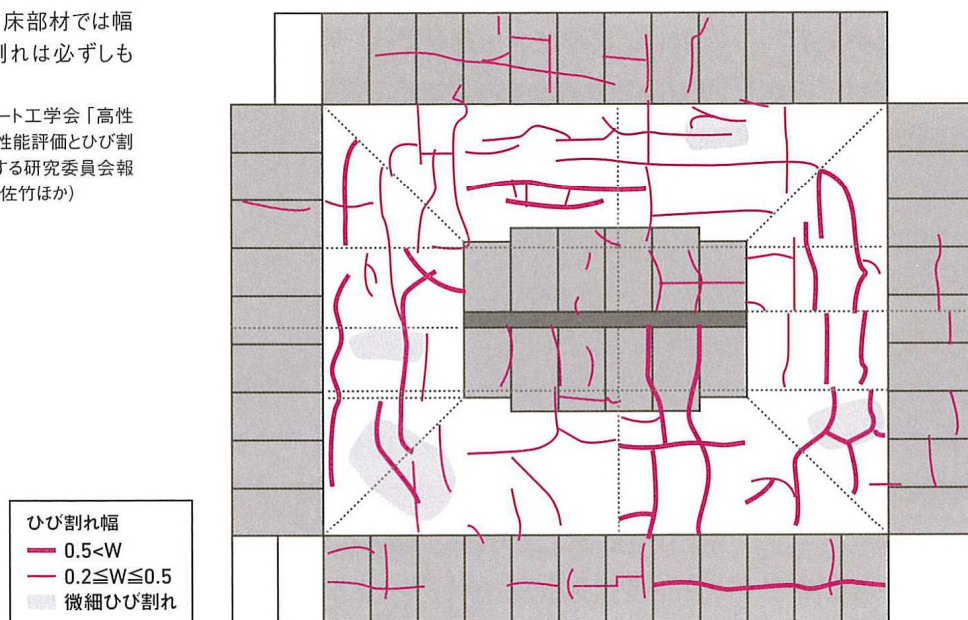


図7 幅0.5mm以上のひび割れが床スラブで多発した例

条件によっては、床部材では幅0.5mmのひび割れは必ずしも瑕疵とは言えない

（資料：日本コンクリート工学会「高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書」p433-438、佐竹ほか）



構造計算規準・同解説2010」では、RCスラブの構造設計上、長期荷重による梁際の引張応力をひび割れ強度以下に収め、長期荷重による応力だけでは、ひび割れ強度を超えない配慮がなされている。ただし、その場合も、図3の(1)と(2)を加算するとひび割れ強度を超過する傾向があり、実際にはひび割れが避けられない設計が多いことに注意したい。

強い拘束がひび割れの原因

続いて、第3の理由である「強い拘束力」によるひび割れのメカニズムについて説明する。

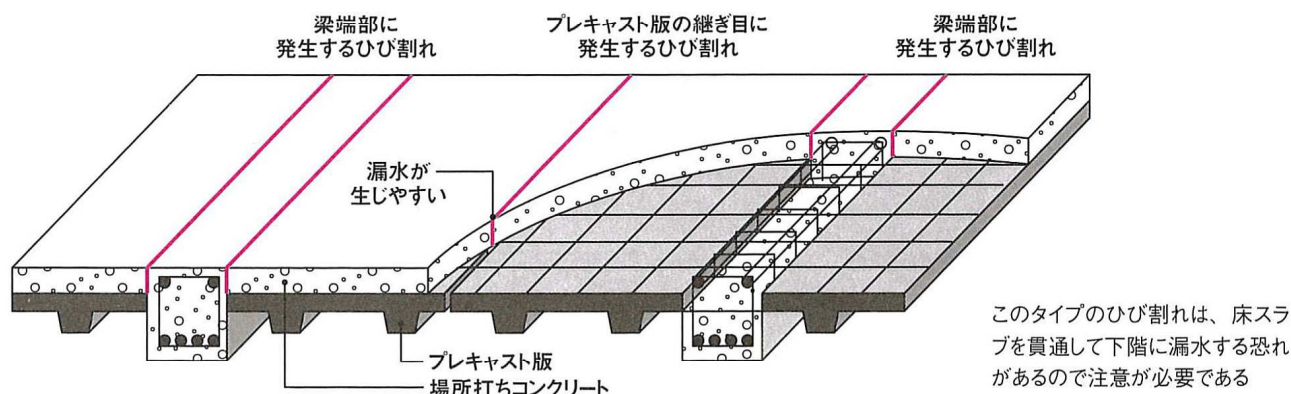
図5は、梁部材が床スラブに及ぼす拘束の影響について、模式的に示したものである。ここでは、拘束度が最も大きい異形断面のデッキプレート床スラブ（以下デッキスラブ）を例に挙

げた。

注目してほしいのは、図のx方向に沿って大きな断面の梁（H形鋼）が固定されていることだ。このような大断面の梁に床スラブが拘束されると、大きな拘束変形を受けて床スラブはひび割れを生じやすくなる。

加えて、x方向の引張抵抗力が弱い点にも留意したい。x方向のデッキスラブ断面を見ると、上部は平板部

図8 プレキャスト版の継ぎ目上に発生するひび割れでは漏水リスクに注意



が連続し、下部は凸部と凹部が交互に連続する。x方向に引張力が生じると、有効に抵抗力を発揮するのは上部の平板部分のみである。つまり、x方向は大きな拘束変形を受けるうえに、引張抵抗力も弱い。

一方、y方向は小梁がないので拘束度は小さい。また、y方向の床スラブ断面をみると、平板部だけでなく凸部も引っ張りに対して有効に抵抗力を発揮する。

従って、ひび割れリスクが特に高いのはx方向（弱軸方向）であり、このとき実際のひび割れはx方向と垂直方向に生じる（図6）。

異形断面デッキスラブに注意

図5の異形断面のデッキスラブでは、ひび割れ幅の拡大により不具合リスクがさらに深刻となる。そもそも、異形断面デッキスラブは一方向スラブとして設計され、弱軸方向（x方向）については詳しく検討しないことが普通で、鉄筋量も少ない。

特に、異形断面床部材では、弱軸方向の鉄筋は溶接金網が配置されるのみで、図6のようなひび割れが発生すると大きく拡大し、幅が1mmを超える場合もある。そのため、図7のように大きな幅のひび割れが多発する状況となる。

ここで注意すべきは、図7のような状況は、施工者が最大の努力を払っても起こり得ることであり、必ずしも瑕疵とは言えないことである。図7には0.5mmを超えるひび割れが多くあり、ひび割れと瑕疵の関係を示した告示1653号の規定をそのまま適用すると瑕疵の可能性が高いと判定される（なお、デッキスラブは、住宅には通常採用

されないので告示1653号の適用外とするのが一般的）。

しかし、そもそも異形断面デッキスラブは、幅0.5mmを超えるひび割れが発生しやすい仕様である。この点は、建築主、設計者、施工者との間で事前に協議しておく必要がある。ひび割れ発生リスクの回避を重視するのであれば、仕様を変更することも対策の1つである。このほか、典型的なひび割れとして、ハーフプレキャスト（PCa）版を用いた床スラブに生じるPCa版の継ぎ目上のひび割れがある（図8）。このひび割れは、床スラブを貫通するので下階へ漏水しないように配慮が必要である。

ここがポイント

床スラブでは目地を設置できないし、
長期荷重による曲げも生じるので、
ひび割れが発生しやすい

ひび割れ発生リスクについては、
建築主、設計者、施工者の間で
事前に協議しておく必要がある

甘く見るとケガのもと 土間床の施工は慎重に

➡ 補修が困難、大きなトラブル招く恐れも

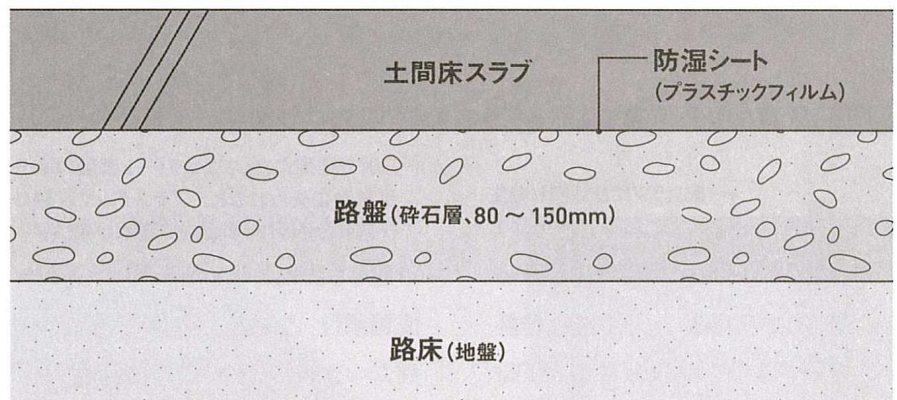
土間床スラブは構造的に重要でない部位と見なされ、品質管理に十分な関心が払われていない。しかし、実はトラブルが発生しやすい場所。
施工面積が広いだけに、ひとたび問題が起こると影響は甚大だ。

ここでは、生産施設などに広く採用されている土間床スラブを取り上げる。土間床スラブは、一般の構造床スラブと比べて経済的に施工できることもあって、さまざまな用途に導入されている。ただ、建築基準法上は主要構造部材と見なされていないこともあり、これまで品質管理の面ではほかの部材より軽い扱いを受けることが多かった。

しかし、近年ではクリーンルームなど先端的な生産施設でも土間床スラブが採用されるなど、その重要度は主要構造部材に劣らない。十分に配慮することなく施工すれば、ひび割れだけでなく土間床スラブの沈下など、重大なトラブルを招く恐れがある。万一、不具合が生じた場合は、高度に制御された室内環境への影響を最小限に抑えながら、土間床スラブを広範囲にわたって補修するなど、極めて難しい課題に直面する。

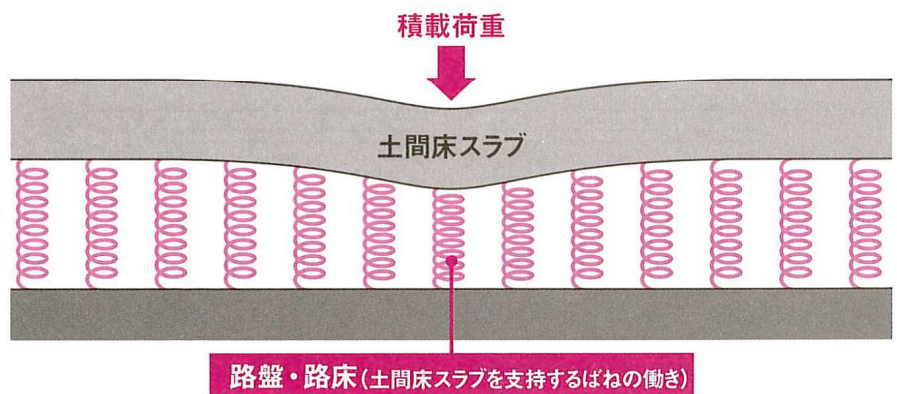
こうした事態を防ぐためにも、「たかが土間床スラブ」と侮ることなく、

図1 スラブ上の載荷荷重は分散して地盤に伝わる



一般の構造床スラブは柱や梁で支えられるが、土間床スラブは、路盤と路床で支えられる。路盤は、砕石を敷き詰めた80～150mm厚さの層で、路床は基礎となる土の部分だ
(資料：図8まで筆者)

図2 地盤で支えるので大きな曲げモーメントが生じない



土間床スラブの模式図。路盤と路床は、土間床スラブを支持するばねに例えることができる。このように、地盤全体でスラブを支える構造なので、大きな曲げモーメントが生じないことが特徴だ

図3 乾燥に対する配慮が施工上のポイント

- 1 露地でコンクリートを打設する場合には、直射日光や強風を避けるように工夫する
- 2 湿潤養生後、直ちにカッター目地を十分な深さで施工する
- 3 夏季に施工する土間スラブでは、目地間隔を小さくする
- 4 防湿シートの敷設は、防湿効果に加えて収縮に対する拘束を小さくするうえでも有効
- 5 打ち継ぎ目地の施工に当たっては、垂直方向のずれを防止する処置が必要になる
- 6 反りを抑制するためには、150mm 程度以上のスラブ厚さを確保することが望ましい

土間床スラブの施工上のポイントを6つ列挙した。共通するのは乾燥対策。急速な乾燥が、ひび割れ発生の大きな要因となるので、絶えず注意したい

図4 急激な水分蒸発で生じるプラスチック収縮ひび割れ

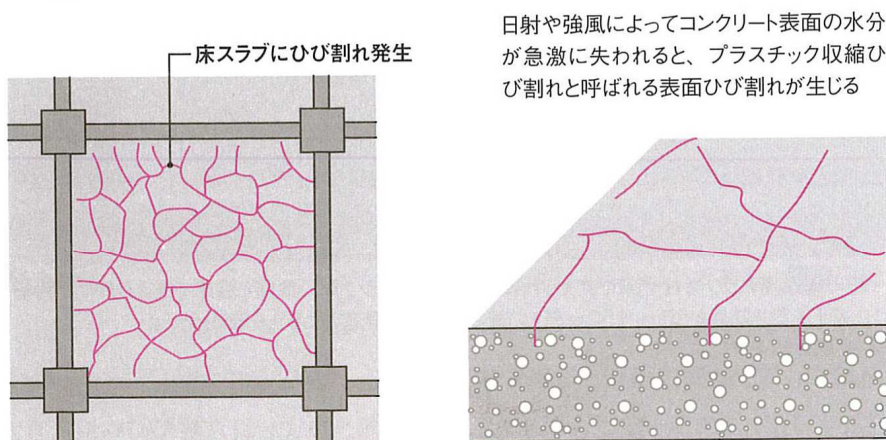
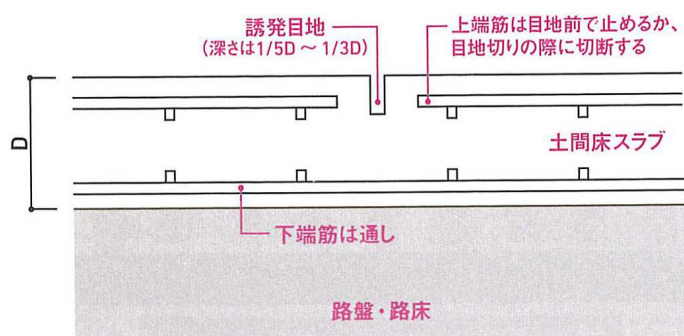


図5 構造床スラブと違って目地を施工しても大丈夫



構造床スラブでは、一般に目地を施工できないことが多い。しかし、土間床スラブでは、ひび割れ誘発目地を施工し、目地断面で鉄筋を切断する。また、コンクリートの打ち増しも必要ない

施工段階でポイントを抑えた品質管理を徹底したい。

地盤がスラブを支える構造

最初に土間床スラブの構造を説明する(図1)。土間床スラブは、路盤、路床に支持されている。スラブの載荷荷重はすぐ下の路盤で分散され、さらに路床に伝達される。路盤とは、一般に碎石を敷き詰めた80～150mmの厚さの層で、路床とは基礎となる地盤の部分である。土間床スラブ上に載った荷重は、図2に模式的に示すように、路盤や路床に直接支持される。一般の構造床スラブと比べ、さほど大きな曲げモーメントが生じないことが特徴である。

しかし、路床が軟弱な場合には沈下が起こり、大きなトラブルとなる恐れがある。そのため、路床に用いる地盤の耐力や反力係数には十分な注意を払い、調査結果によっては地盤を改良する必要も生じる。

しかし、たとえ路盤や路床が十分堅固であっても、施工の進め方によって収縮ひび割れが多発することがある。

土間床スラブ施工上の留意点

図3に、土間床スラブの施工上の留意点をまとめた。

最初の留意点として、コンクリートを打設する際に、直射日光、強風への対処をする必要がある。土間床スラブは露地で施工する場合も多いので、日射や強風によりコンクリート表

写真1

十分に湿潤養生しても 表面には微細なひび割れ

X線を透過しない造影剤を使い、ひび割れの発生状況を調べた。対象は、4週間の水中養生後、3カ月間乾燥させたコンクリート。表面の白い部分がひび割れに浸透した造影剤（写真：武田三弘東北学院大学教授）

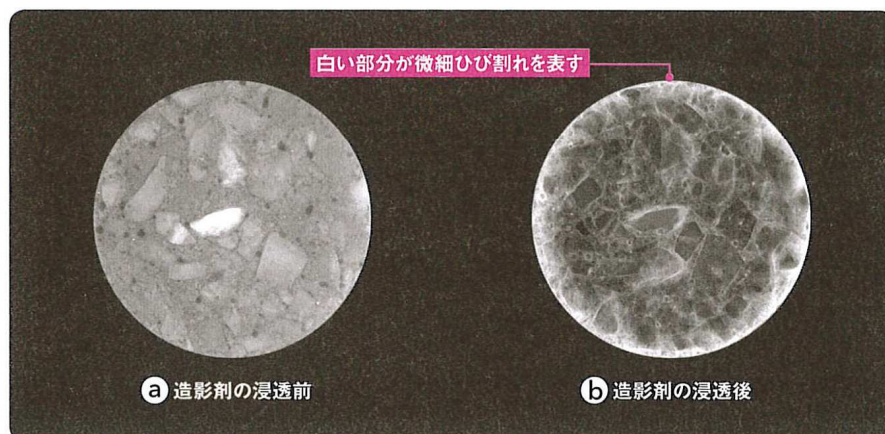
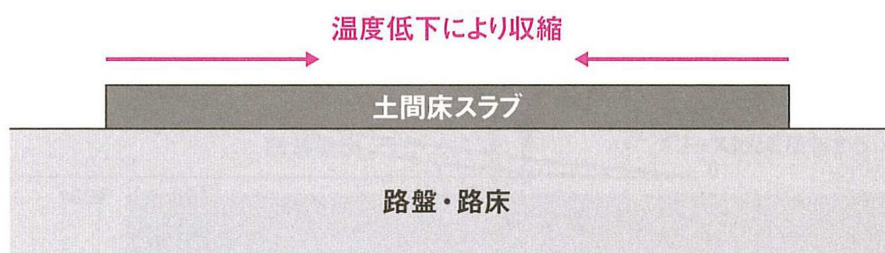


図6

表面は気温低下によって 収縮が進行

夏季にコンクリートを打設するときには、注意が必要だ。夏季から冬季にかけて気温が低下するに伴い、コンクリートの表面近くでは収縮が進み、収縮ひび割れが生じやすくなる



面の水分が急激に失われ、プラスチック収縮ひび割れと呼ばれる表面ひび割れが生じやすい（図4）。

これを防ぐには、仮設の日除けや風除けを設置するのが有効で、特に夏季の露天施工の場合の効果が大きい。また、表面のこて仕上げ後に湿潤養生をできるだけ速やかに始めることも重要だ。コンクリート打設の翌朝早くに墨出しをして、その直後に養生マット敷設や散水を開始するのが望ましい。

2番目の留意点として、湿潤養生後、直ちにカッター目地を十分な深さで施工する。この点については、前節で述べた「床スラブには目地を切ってはならない」と混同する誤解もあるので解いておきたい。

確かに、一般の構造床スラブでは、

ひび割れ誘発目地を施工できないことが多い。構造床スラブは大きな曲げモーメントを負担するので、目地断面で鉄筋を切断することができない。鉄筋を保護するために目地の深さに相当するコンクリートの打ち増しが必要となる。

ところが、その打ち増しによって建物重量は1割前後も増えてしまい、建物全体の構造計算に影響を与えてしまう。

構造性能に影響を与えるような施工を、設計変更なしで採用してはならない。つまり、施工者の勝手な判断で床スラブに目地を設けることはできないのである。これは、既に述べた通りだ。

その点、土間床スラブは地盤全体で支持されていて大きな曲げモーメン

トが発生しないので、鉄筋を切断しても一般的には問題ない。ひび割れ誘発目地を設置し、図5のように目地断面で鉄筋を切断する。このとき、コンクリートの打ち増しをしないのが普通である。

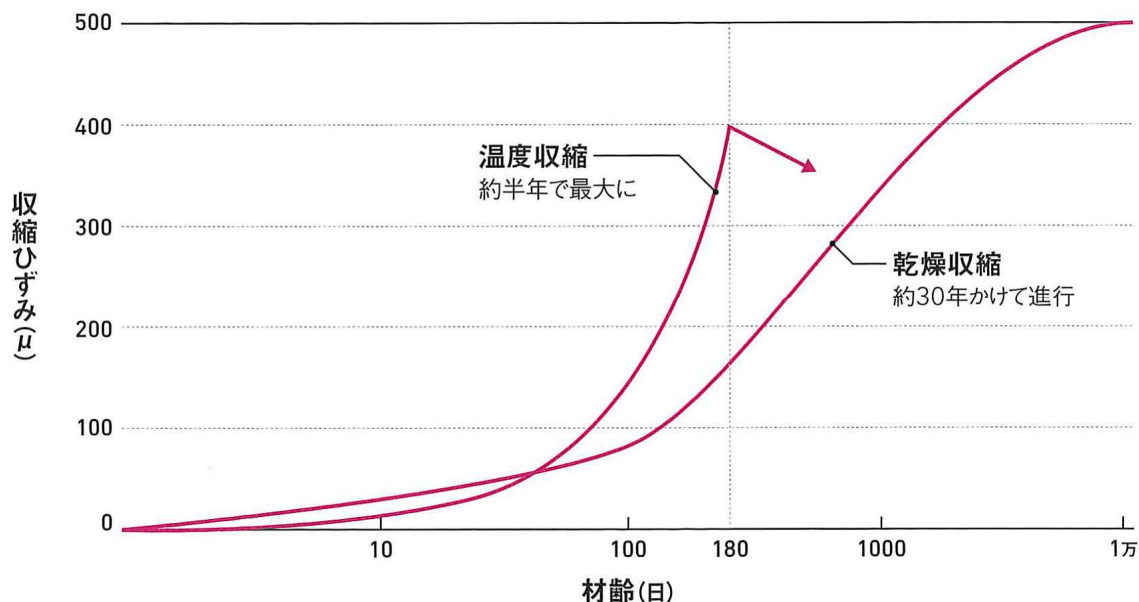
目地は乾燥前に施工する

ひび割れ誘発目地は、道路用の湿式カッターで施工する 경우가多いが、打設後3～5日間の湿潤養生終了後に、速やかに目地を切ることが重要だ。理由は、いったん湿潤養生を終了して乾燥させた後にカッター目地を施工しても、目地にひび割れが生じない例が多いためである。

なぜ乾燥した後では、誘発目地の効果が薄いのか。それは写真1に示

図7 夏季のコンクリート打設では温度ひび割れが発生しやすい

夏冬間の気温低下によるコンクリートのひずみは、打設後から約半年で400 μ と最大になる。これが乾燥収縮によるひずみと重なり、ひび割れリスクが増大する



す微細ひび割れによるものと推測される。この写真は、水中養生4週間を経て、温度20℃、湿度30%の乾燥状態に3カ月間置いた後、微細ひび割れを検出できる特殊なX線造影法で撮影した円柱供試体の断面を示したものである。

この測定法では、特殊な造影剤が微細ひび割れに浸透し、その部分がX線を通さず白色に映る。左の写真が造影剤浸透前、右が造影剤浸透後だ。浸透後、外周が白く表示されており、この部分に微細ひび割れが生じていることが分かる。

この実験では、十分な水中養生をしたが、それでも表面近くには微細ひび割れが生じた。従って、材齢初期のごく短期間で乾燥したコンクリートは、これ以上の微細ひび割れが生じることが容易に想像される。

こうした微細ひび割れは、目視レベルのひび割れの起点になると言われている。ひび割れ誘発目地を設けても、ひび割れの起点となる微細ひび割れが表面を覆っている状態では、その効果は大幅に低下する。

目地の間隔にも注意

3番目の留意点は目地間隔である。これは一般に3～5mで、土間床スラブの厚さが大きいほど間隔を広げてよいとされる。

例えば、スラブ厚さ200mmのとき5m程度に間隔を設定することが多い。しかし、効果を発揮させようとするれば、目地の間隔はコンクリートの乾燥収縮や施工時期によって変えざるを得ない。特に夏季にコンクリートを打設すると、通常の乾燥収縮ひずみに加え、

夏季から冬季に向かう季節間の温度収縮ひずみが重なる。この影響でひび割れは発生しやすくなるので、目地の間隔は少なくとも通常の3分の2程度に狭める必要がある(図6、図7)。

4番目の留意点は防湿シートだ。土間床スラブと路盤の間にポリエチレンなどのフィルムを必ず敷設する(写真2)。理由は、地盤からの湿気の上昇を遮断することに加え、土間床スラブの収縮に対する路盤の拘束を緩和する効果があるからだ。拘束が小さいほどひび割れ間隔が大きくなり、ひび割れ誘発目地が計画通りに機能する可能性が高まる。

5番目の留意点は打ち継ぎ目地の処理である。打ち継ぎ断面では、拘束度を小さくするため通し鉄筋を無くし、打設工区の土間床スラブを周囲から独立させる考え方もあるが、これでは

写真2

打設するときには 防湿シートを敷設する

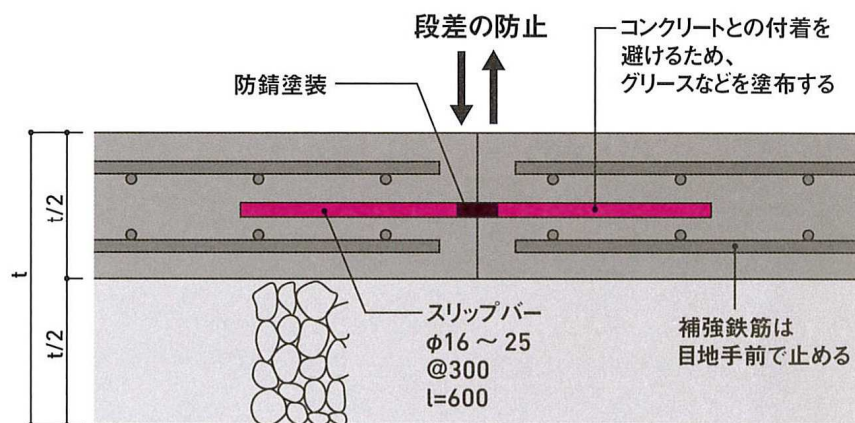
路盤と土間スラブの間には、防湿シートを敷設する。現場では、ポリエチレンなどのフィルムが使われることが多い（写真：リーフ）



図8

打ち継ぎ面にはスリップバーを設ける

打ち継ぎ面には、コンクリートとの付着を避けるため、グリースなどを塗布したスリップバーを施工する。これによって、打ち継ぎ面の段差を解消できる



打ち継ぎ部で段差ができる恐れがある。

そこでよく使われるのが、スリップバーだ。これは、打ち継ぎ面を貫通させるバーを施工することによって、両側を一体化して段差の発生を防ぐのが狙いだ。また、表面にはグリースを塗ってコンクリートとの付着を低減、拘束度を小さくする（図8）。

この方法は、打ち継ぎ面の処理に広く採用されている。

最後の6番目は反りの防止である。土間床スラブは、下面が路盤に接して乾燥しにくいのにに対し、上面からは乾燥し大きく収縮するので断面内にひずみの分布ができる。この分布は

外部荷重で曲げを受けた場合と類似し、端部に反りが起こる。反り変形を受けて路盤から浮いた状態にて載荷荷重を受けることで、この部分にひび割れが生じる。

反りを防止するためには、目地部

に通しの鉄筋を配置する、スラブ厚さを一定以上確保するなどの対策が重要である。スラブ厚さが100mm程度では反りのリスクが大きいいため、150mm程度以上のスラブ厚さを確保することが安全と考えられる。

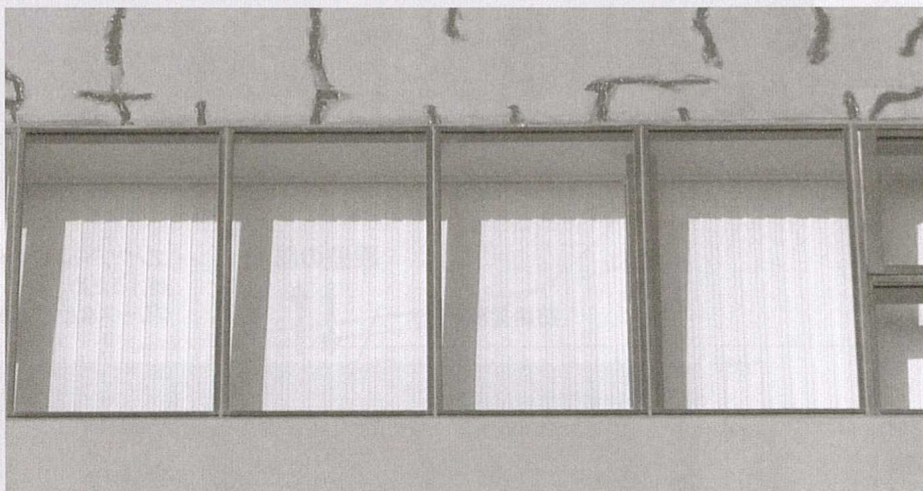
ここがポイント

**土間床スラブでは、急激な水分の蒸発で
プラスチック収縮ひび割れが生じやすい**

**土間床スラブには一般構造床スラブと異なり、
ひび割れ誘発目地を設けることは可能である**

コンクリートこぼれ話 ①

微小なひび割れから漏水



ひび割れからの漏水が多発した超高層マンション（左）。ひび割れ箇所には、エポキシ樹脂を注入したうえで、ウレタン防水を施している（写真：日経アーキテクチャ）

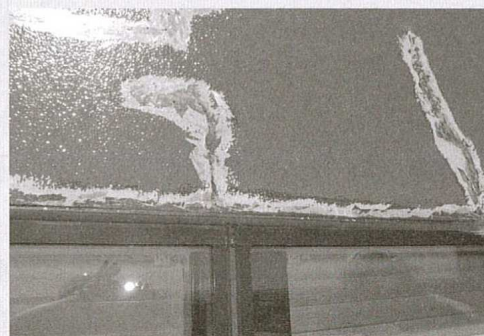
2

000年代に入って、首都圏を中心に大量供給されるようになった超高層マンション。そのなかには、漏水トラブルを抱えた建物が少なくありません。

上の写真もその1つ。首都圏に建つ築7年の28階建て鉄筋コンクリート造（RC造）で、約50カ所で漏水が見つかりました。漏水の起点となった場所は、躯体のひび割れが34カ所、シーリング材周辺が3カ所、カーテンウォールが12カ所でした。躯体のひび割れが、全体の約7割を占めています。

この超高層マンションは、免震装置を導入したうえで、圧縮強度約70N/mm²の高強度プレキャストコンクリートを導入していました。構造的にみれば十分な安全性を備えています。それでも、乾燥収縮や地震、強風などの影響で、幅0.2～0.25mm程度のひび割れが多数発生。そこから雨水が浸入しました。

外観に目を向けると、外壁の躯体コンクリートとガラスのカーテンウォールを同面（フラットな平面）で構成しています。超高層マンションの外壁は、厳しい暴風雨にさらされるもの。ひとたび、躯体のひび割れから雨水が浸入すれば、簡単にガラス面の背後に回って室内に入ります。本来は、ガラス面を壁面よりも後退させ、庇やバルコニー、水切り板などで雨水を切るのが基本。この建物は、意匠設計に無理があったようです。



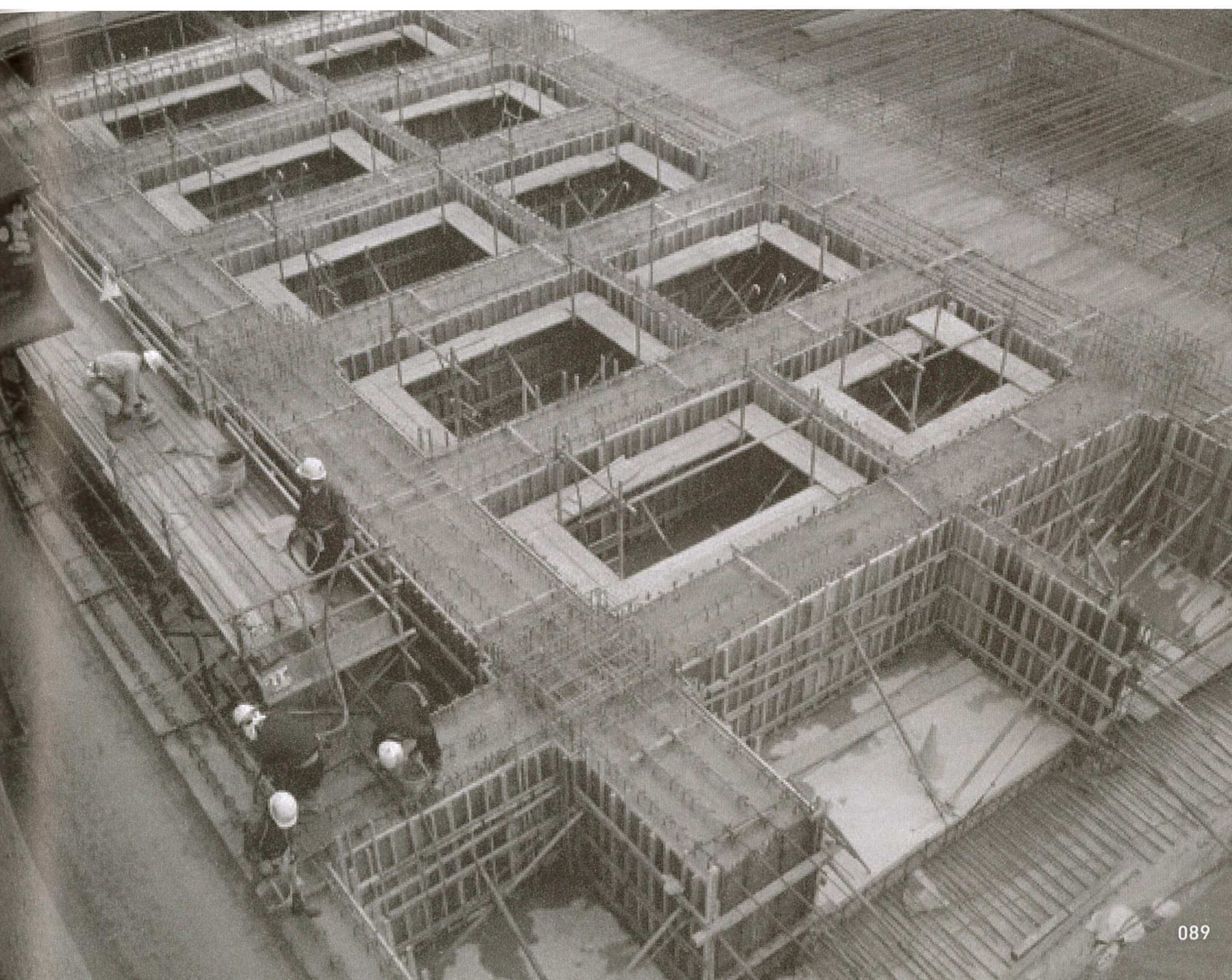
ちなみに、日経アーキテクチャ編集部で、東京都や神奈川県を中心に約20棟の超高層マンションの外観を無作為に調べたところ、タイルの剥落が多数発生しているものや、プレキャストコンクリートの外壁のひび割れを補修した跡が残っているものなど、明らかな不具合を抱えたものが3棟ありました。

多くの超高層マンションが、これから大規模改修の時期を迎えます。改修工事は足場を組むことができないので、費用もかさみます。場合によっては、修繕積立金だけでは対応できないケースが出てくるかもしれません。超高層マンションの漏水やタイルの落下事故を防ぐには、構造躯体の安全性だけでなく、仕上げ材の挙動にも設計段階で十分配慮する必要があります。

（文責＝日経アーキテクチャ編集）

CHAPTER 6

誤解だらけの 温度ひび割れ対策



温度ひび割れは 温度低下時に注意

➡ 時間の経過とともに広がる外部拘束ひび割れ

マスコンクリートの温度ひび割れは、水和熱が大量発生する温度上昇時に起こりやすい——。そんな先入観を抱きがちだが、実際は温度低下時の収縮ひび割れに注意が必要だ。その理由を発生メカニズムに基づいて解説する。

ここまでは、乾燥収縮によるひび割れを取り上げてきた。ここでは、収縮と並んで問題となることが多いマスコンクリート（以下、マスコン）の温度ひび割れについて解説する。

マスコンクリートの定義

まず、温度ひび割れを発生させやすいマスコンとは何か。その定義を押さえておこう。

日本建築学会の「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）では、「部材断面の最小寸法が大きく、かつセメントの水和熱による温度上昇で有害なひび割れが入る恐れのある部分のコンクリート」とだけ定義している。その目安として最小断面が壁状部材で80cm以上、マット状または柱状の部材で100cm以上と規定している（図1）。

マット状に比べて壁状部材で最小断面寸法が小さいのは、温度ひび割

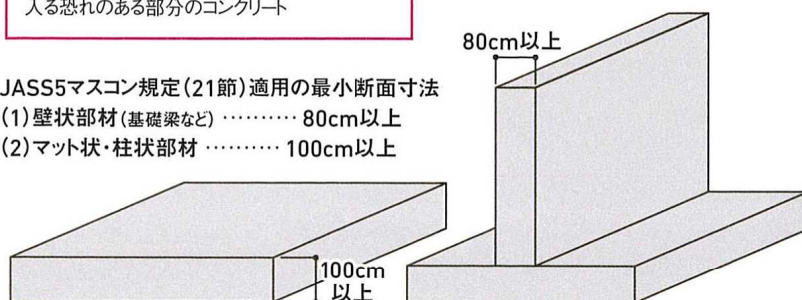
図1 マスコンクリートの定義

JASS5によるマスコンクリートの定義

部材断面の最小寸法が大きく、かつセメントの水和熱による温度上昇で有害なひび割れが入る恐れのある部分のコンクリート

JASS5マスコン規定(21節)適用の最小断面寸法

- (1) 壁状部材(基礎梁など) …… 80cm以上
- (2) マット状・柱状部材 …… 100cm以上



JASS5では、マスコンクリートの目安として最小断面が壁状部材で80cm以上、マット状または柱状の部材で100cm以上としている（資料：日本建築学会のJASS5をもとに筆者が作成）

れがより生じやすく、適用条件を厳しくしているからだ。ちなみに、セメントが初期硬化する際に生じる水和熱は非常に大きく、大きい断面の部材では内部の最高温度は80℃を超えることもある。

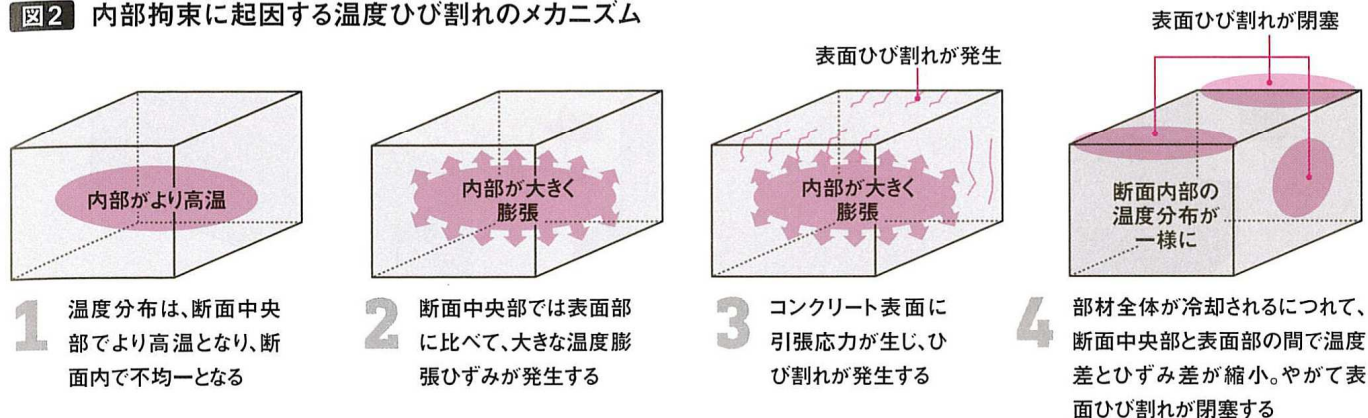
温度ひび割れの種類

マスコンの温度ひび割れには、内

部拘束に起因するものと外部拘束に起因するものの2つの種類があり、それぞれ発生の状況やメカニズムが大きく異なる。

第一の内部拘束ひび割れは、断面内部が外周部より高い温度になることで膨張し、外周部が引っ張られるために生じる（図2）。この現象は、餅を焼いたときに表面に割れ目が生じる現象に似ている。しかし、時間が

図2 内部拘束に起因する温度ひび割れのメカニズム



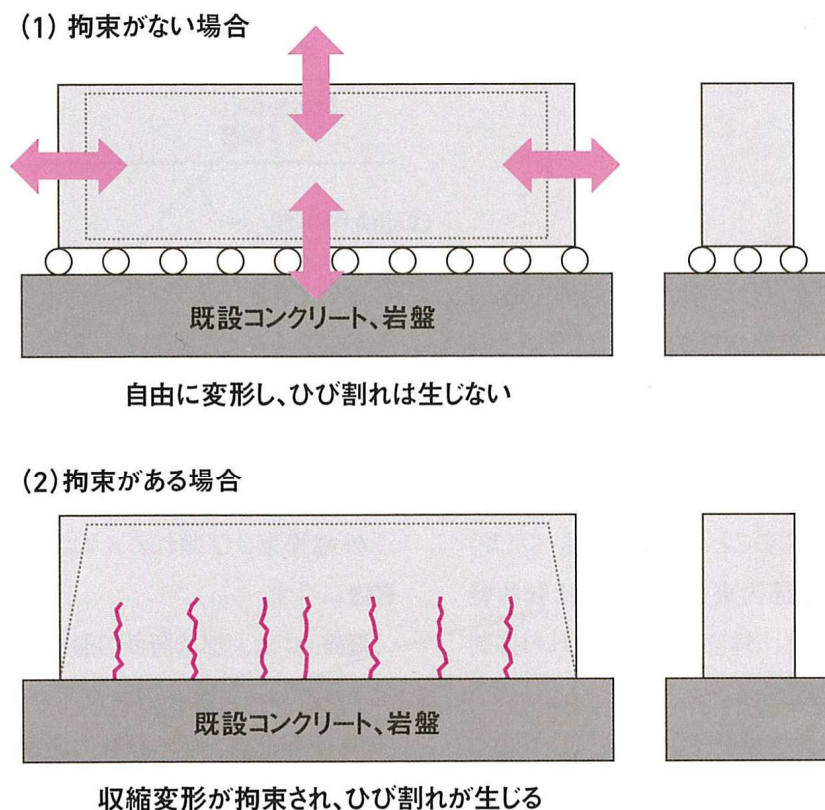
内部拘束に起因するひび割れは、断面内部が膨張し、外周部が引っ張られるために生じる。しかし、冷却されると表面ひび割れが閉塞する（資料：図5 まで特記以外は鹿島）

経過して断面内部の温度が低下して平準化すると、内部拘束ひび割れは閉じる性質がある。従って、内部拘束ひび割れはあまり問題としなくてよいとされている。

本丸は第二の外部拘束ひび割れであり、これは適切に対策を講じなくてはならない（図3）。

セメントの水和熱により初期に温度が上昇し、その後、外部からの冷却で低下すると、部材は全体として膨張した後に収縮することになる。このとき、コンクリートが岩盤や既設コンクリートの上に打設されていると、この膨張と収縮の変形が妨げられ、特に温度低下時には硬化して弾性係数が大きくなったコンクリートの収縮が拘束されるので、大きな引張応力が発生しひび割れに至る。

図3 外部拘束に起因するひび割れは乾燥収縮ひび割れと類似



温度上昇が終わって温度低下が始まると、部材は収縮する。このとき、コンクリートが岩盤や既設コンクリートの上に打設されていると、変形が拘束されて引張応力が発生し、ひび割れに至る

外部拘束型が危険な理由

内部拘束と外部拘束によるひび割れを図4 でまとめて比較した。内部拘束ひび割れは部材の温度が上昇する期間で生じるので、材齢1～3日

程度までの初期段階で起こりやすい。

これに対して、外部拘束ひび割れは温度低下時に進行するので、材齢1週間後ぐらいから発生し始める。

また、内部拘束ひび割れは、表面だけの浅いもので材軸方向を中心に、直交方向にも生じる。これは、部材を貫通し材軸直交方向だけに生じる

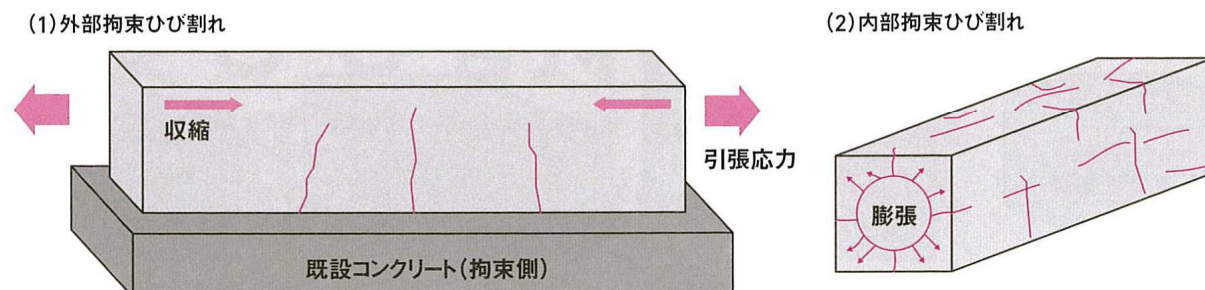


図4

内部拘束ひび割れと 外部拘束ひび割れの違い

内部拘束ひび割れは、材齢1～3日程度の初期段階で起こりやすい。外部拘束ひび割れは温度低下時に進行するので、材齢1週間後ぐらいから発生し、時間の経過とともに拡大する傾向がある

	外部拘束ひび割れ	内部拘束ひび割れ
発生時期	部材温度が低下している過程 (材齢1週間程度以降)	部材温度が上昇している過程 (材齢1～3日程度まで)
ひび割れの形態	材軸に直交方向、断面を貫通するひび割れ	材軸方向を中心に様々な方向、表面だけの浅いひび割れ
ひび割れ幅の経時変化	時間の経過とともに拡大する傾向	時間の経過により閉塞
耐久性などに与える影響	大きい	比較的小さい

外部拘束ひび割れと対照的である。また、外部拘束ひび割れは時間の経過とともに拡大する傾向があるが、内部拘束ひび割れはいずれ閉塞して見えなくなる。

これらのことから、先に述べたように、内部拘束ひび割れは比較的小さいとされ、外部拘束ひび割れの抑制が重要となる。

外部拘束ひび割れは、(1) 自由な収縮が妨げられ、(2) 引張応力が発生し、(3) ひび割れ強度を超えるとひび割れが発生するというプロセスで進行する。このメカニズムは、これまで説明してきた乾燥収縮によるひび割れと似ている。

異なるのは収縮変形の原因で、乾燥収縮ひずみによるものか、温度低下による温度収縮ひずみによるものか

の違いである。以下、外部拘束ひび割れに焦点を当て説明する。

ひび割れの発生メカニズム

外部拘束ひび割れのメカニズムを図5に示す。

図5 (1) は、部材断面の温度履歴である。経過日数 t_0 の時点でコンクリートが打ち込まれ、部材の温度は T_0 だった。その後、材齢 t_1 (実際は1～3日程度) までに温度が急激に T_1 まで上昇して、その後時間の経過とともにゆっくりと低下して t_2 の時点で T_0 に戻る。

この温度変化に伴い、外部拘束されたマスコンクリート部材には、図5 (2) の応力が発生する。温度が上昇している t_0 から t_1 の期間では部材は

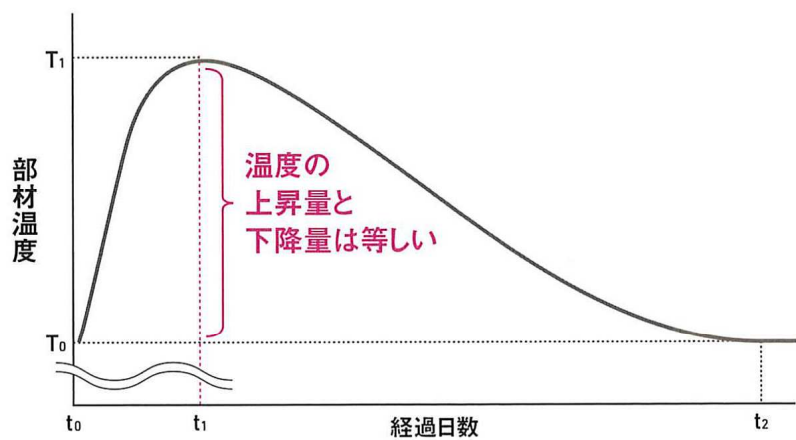
膨張し、その膨張が拘束されることによって圧縮応力 Δa が t_1 の時点で生じる。

その後、圧縮応力は急激に減少し、さらに引張応力 Δb が卓越して、ある時点でひび割れ強度を超えひび割れが発生する。このプロセスの重要な点は、 t_1 での圧縮応力 Δa がその後の引張応力 Δb に比べ小さいことである。

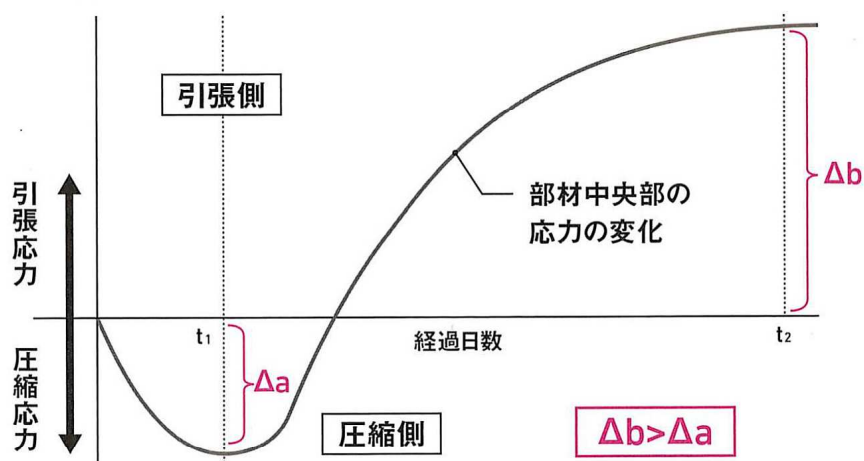
この点に疑問を感じる読者もおられるかもしれない。図5 (1) で述べた通り、温度上昇分と温度低下分が等しいなら、それに伴う膨張と圧縮のひずみも同じになり、結果として内部応力も差し引きゼロになりそうである。ところが、実際には収縮による引張応力が、膨張による圧縮応力を大きく上回る。

【図5】 温度低下時の弾性係数が大きい

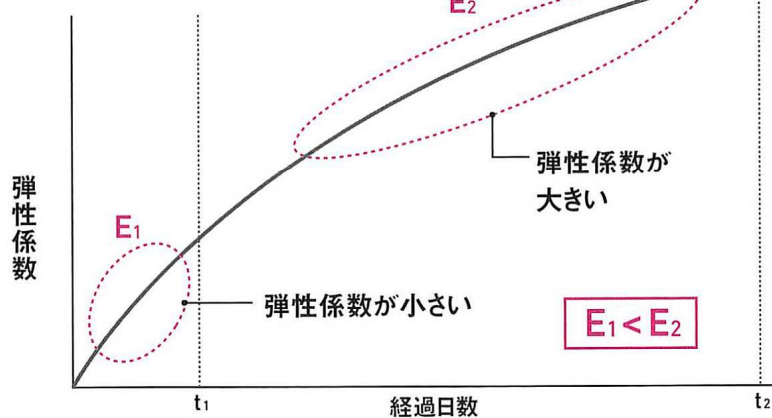
(1) 温度の変化



(2) 応力の変化



(3) 弾性係数の変化



膨張時の温度上昇量と収縮時の温度下降量は等しいのに、コンクリートの引張りと圧縮の応力は等しくならない。昇温時と降温時で、コンクリートの弾性係数が大きく異なるからだ

弾性係数の違いに起因

このメカニズムを示したのが図5 (3)である。注目すべき点は、コンクリートの弾性係数が、時間の経過とともに変化していることだ。温度上昇時の t_0 から t_1 の間は、コンクリートが硬化する過程であり、まだ弾性係数 E_1 は小さい。しかし、 t_1 の前後で高い温度を受け、さらに材齢も経過したコンクリートは水和反応が大きく進み、弾性係数 E_2 は E_1 に比べ顕著に増進する。ここが重要なポイントである。

その結果、発生する応力は、温度ひずみ×弾性係数で表現されるから、同じ温度ひずみに対して温度上昇時の E_1 のときの応力 Δa と下降時の E_2 による Δb では後者が大きくなる。これが図5 (2)の原因となる。

大規模な基礎梁に要注意

実際のマスコンクリート部材の例を写真1に示す。これは基礎梁の写真で、升目状に大きな梁部材を施工している。

写真2は、写真1の環境下で発生した温度ひび割れを示したものだ。縦向きのひび割れが2mピッチ程度に生じている。このひび割れは、梁の両側面に生じていたことから貫通ひび割れと推測される。梁部材が基部のマットに拘束されて生じており、外部拘束型の温度ひび割れの典型と言えるものだ。

以上の説明から、温度ひび割れは、内部拘束よりも外部拘束によるひび割れのほうが問題となることを理解して

写真1 大規模な基礎梁に注意



土木構造物に比べると、建築の構造物でマスコンクリートを打設するケースは比較的少ない。しかし、左のような大規模な基礎梁を施工するときには、温度ひび割れに対する配慮が必要になる (写真: 下も鹿島)

写真2 縦向きに温度ひび割れが発生

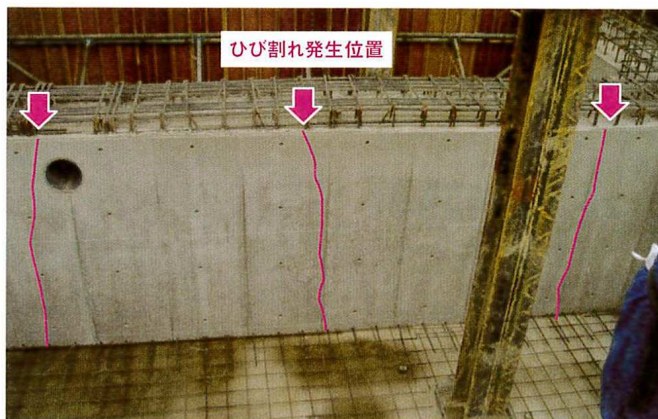


写真1の環境下で施工したところ、縦向きのひび割れが約2m間隔で生じた。基礎梁が基部のマットに拘束されて生じた、外部拘束型のひび割れと推測される。梁の両側面に生じていたので、断面を貫通したひび割れの可能性がある

いただけたと思う。

その理由を掘り下げていくと、コンクリートが硬化している過程で弾性係数が変化するために生じるコンクリート特有の現象であることが分かる。このメカニズムとマスコンクリートの定義をま

めて理解しておけば、温度ひび割れのリスク軽減につながると思われる。

ここで説明した温度ひび割れのメカニズムを踏まえて、次のページから効果的なひび割れ制御方法について述べていこう。

ここがポイント

温度上昇時の内部拘束型より、
温度低下時の外部拘束型のほうが、
ひび割れにはリスクが大きい

コンクリートの弾性係数は
温度上昇時より低下時の方が大きくなる。
これが、温度低下時にひび割れリスクが増大する理由である

セメント量を削減しても 温度ひび割れに効果なし

➡「拘束度」と「線膨張係数」が効いてくる

温度ひび割れの抑制策として、真っ先に思い浮かぶのは単位セメント量の削減だろう。しかし、削減量には限度があり、たとえ減らしたとしても、ひび割れ抑制の効果はさほど期待できない。その理由を解説する。

前ページまでではマスコンクリートの温度ひび割れの発生メカニズムについて説明した。これを受けて、温度ひび割れ発生リスクの指標と、これを用いた効果的な温度ひび割れ抑制対策について述べる。

まず、温度ひび割れを抑制するうえで、ぜひ知っておきたいポイントを2つ挙げておきたい(図1)。

1つは、単位セメント量を削減しても、温度ひび割れの抑制効果が限定的だということだ。これは多くの建築技術者が誤解しているの、最初にその誤解を解いておきたい。もう1つのポイントは、温度ひび割れを抑制するときに、何を指標とするかという問題である。この指標には、応力強度比(温度応力とひび割れ強度の比)が用いられる。

温度ひび割れ抑制のポイント

最初に、1つ目のポイントについて詳しく説明する。

図1 温度ひび割れを抑制するための2つのポイント

1 セメント量削減によるひび割れ抑制効果は限定的

単位セメント量を削減すれば、水和熱が減少して温度ひび割れの発生を抑制できると思いがち。しかし実際には、水和熱による温度上昇やひび割れの発生に対する抑制効果は、限定的だ

2 応力強度比でひび割れリスクを制御する

応力強度比(=温度応力の予測値÷ひび割れ強度の予測値)でリスクを管理する。漏水抵抗性を確保するには、応力強度比を0.8以下に、耐久性を確保するには1.3以下に収めることが目安となる

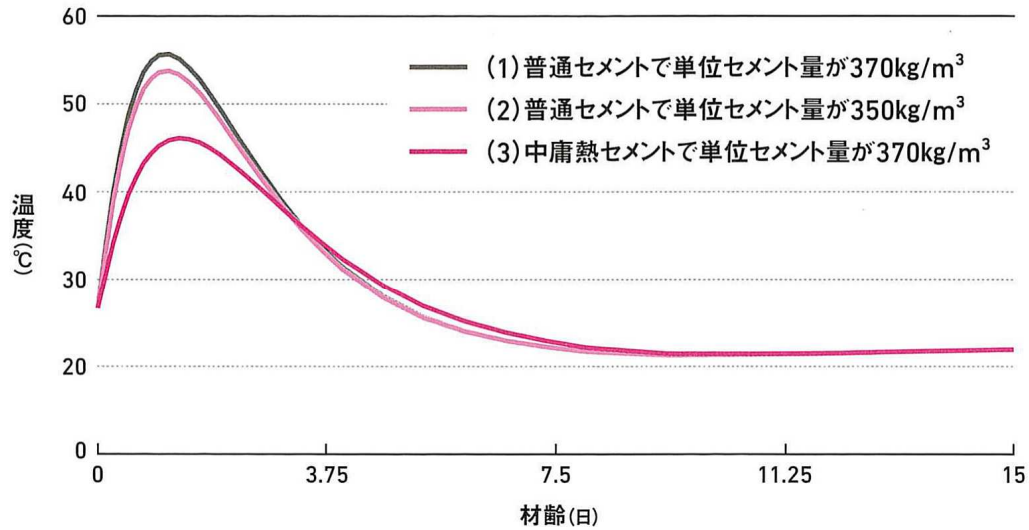
1つは、セメント量を減らしても温度ひび割れの抑制効果が限定的であること。もう1つは、応力強度比(温度応力/ひび割れ強度の予測値)を指標として温度ひび割れを制御することだ(資料: 図8まで特記以外は筆者)

温度ひび割れを抑制するために、多くの建築技術者がまず考えるのは単位セメント量の削減だろう。温度ひび割れの原因は、セメントの水和熱による部材内部の温度上昇である。水和熱量を小さくするには、セメント量の抑制を試みるのはごく自然な考え方である。

しかし、セメント量を減らすといっても限界がある。なぜなら、建築部材

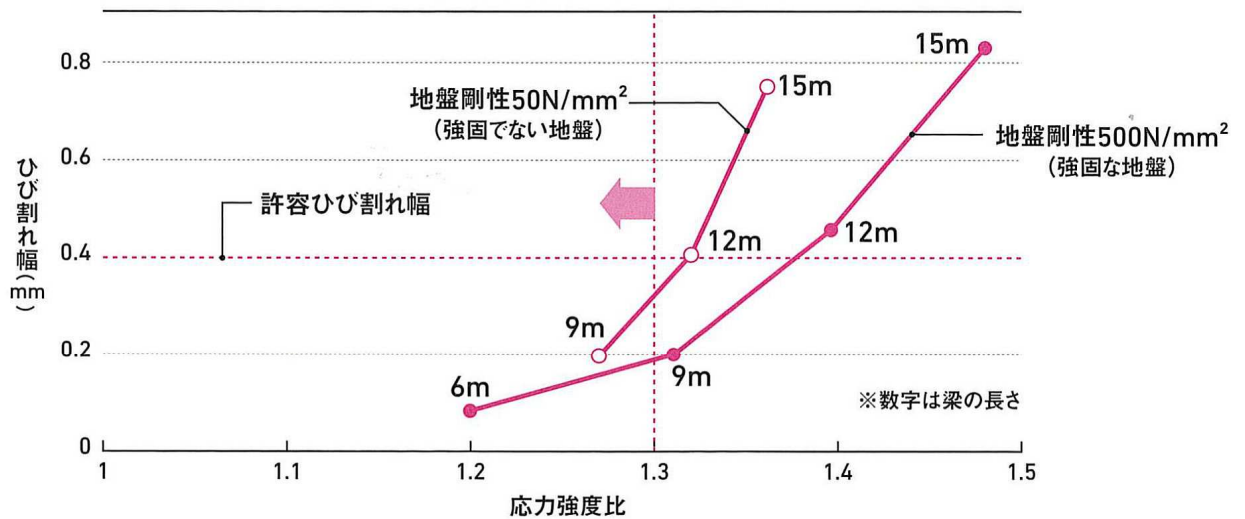
では鉄筋を密に配置するので、スランプ値は15cm程度が下限であり、それより小さくすることが難しい。さらに、強度確保の点から水セメント比は呼び強度ごとに固定されており、セメント量を小さくするために水セメント比を増大させるのは許されないからである。これらの制約から単位セメント量の削減は、最大でもマイナス20kg/m³程度が限度とされている。

【図2】 セメント量を20kg /m³減らしても2℃しか下がらない



普通セメントで単位セメント量を20kg /m³減らしても、コンクリートの中心温度は2℃程度しか下がらない。
ただし、中庸熱セメントに変えると、約10℃の温度低下が見られた

【図3】 応力強度比が1.3以下であれば有害なひび割れは生じにくい



基礎梁コンクリートの応力強度比の変化による、ひび割れ幅の変化を示した。
梁の長さが9m以下では、応力強度比が1.3以下であればひび割れ幅は0.4mm以下に収まる
(資料：日本建築学会の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針」)

図4 温度応力は4つの要素に左右される

$$\sigma_t = \Delta T \times \lambda \times \alpha \times E_c$$

σ_t	温度応力
ΔT	温度変化
λ	拘束度（収縮や膨張を拘束する度合い）
α	線膨張係数（1℃当たりの長さ変化の割合）
E_c	ヤング係数

温度応力は、温度変化、拘束度（コンクリートの収縮や膨張を拘束する度合い）、線膨張係数（1℃の温度変化で生じるひずみ）、ヤング係数の積で表される。これらの数値が小さいほど温度応力も小さくなる

それでは、マイナス20kg/m³のセメント量削減でどれほどの効果があるのだろうか。

これを示したのが図2である。水セメント比50%の普通セメントを用いたコンクリートで、単位セメント量を370kg/m³から350kg/m³に減らす場合を想定。1m厚さの部材を対象として、中心部の温度変化を示した。この図から、20kgのセメント量を削減しても、温度上昇の差はわずか2℃程度にすぎないことが分かる。ひび割れリスクの抑制にはほとんど効果がない。

温度ひび割れリスクの指標

続いて、2つ目のポイントについて解説する。

日本建築学会の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針」（以下マスコン指針）では、温度ひび割れリスクの指標として、応力強度

比が採用されている。応力強度比は、設計時に算定される温度応力の予測値をひび割れ強度の予測値で除した値で、大きいほどひび割れリスクが大きいことを表す。

マスコン指針では、地下外壁など漏水の懸念があって、漏水抵抗性を確保したい場合には応力強度比を0.8以下に、一般的な環境では鉄筋の腐食を抑制し耐久性を確保することを念頭に1.3以下に抑えることを目標値として示している。

前者は、温度ひび割れをできるだけ回避する、後者はひび割れを許容するが有害とならないように抑制するという考えに基づいている。この場合の有害とは、ひび割れ幅0.4mmを超える場合を指し、応力強度比がおおむね1.3以下であれば、ひび割れ幅0.4mm以下を実現できるとの解析結果による（図3）。

以上の前提を踏まえ、ここからは応力強度比を小さくし、設計や施工

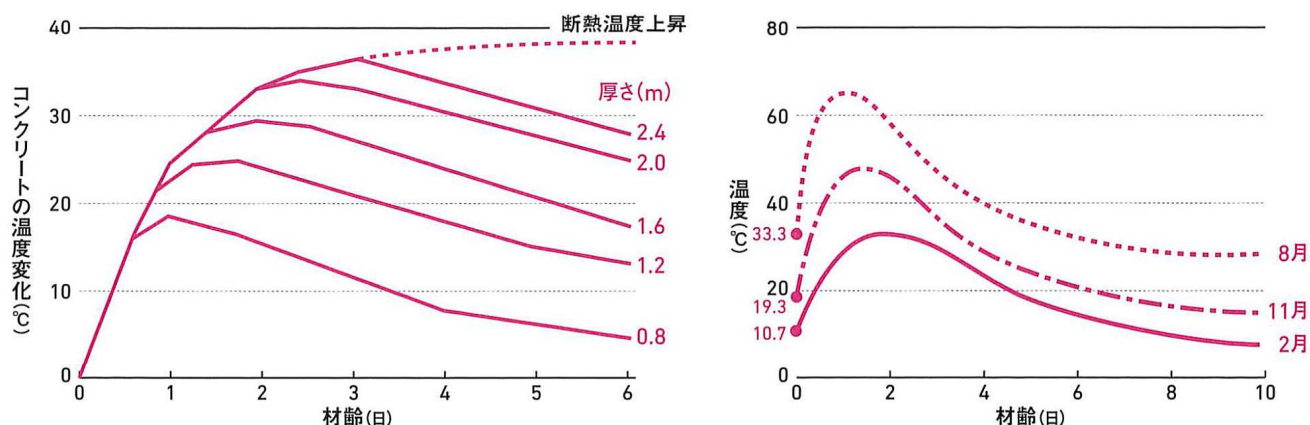
をこれらの許容範囲に収めるための具体的な方策について述べる。なお、応力強度比の分母であるひび割れ強度は、コンクリートによる違いが小さいので、応力強度比を小さくすることは分子にある温度応力を低減することとほぼ同義となる。

温度応力の算定式

マスコンクリート部材の温度応力 σ_t は、単純化すると図4のように表される。この図にあるように、 σ_t は、(1) 温度変化 ΔT 、(2) 拘束度 λ 、(3) 線膨張係数 α などの積として表される。これらの値が小さいほど温度応力は小さく、温度ひび割れのリスクが軽減される。

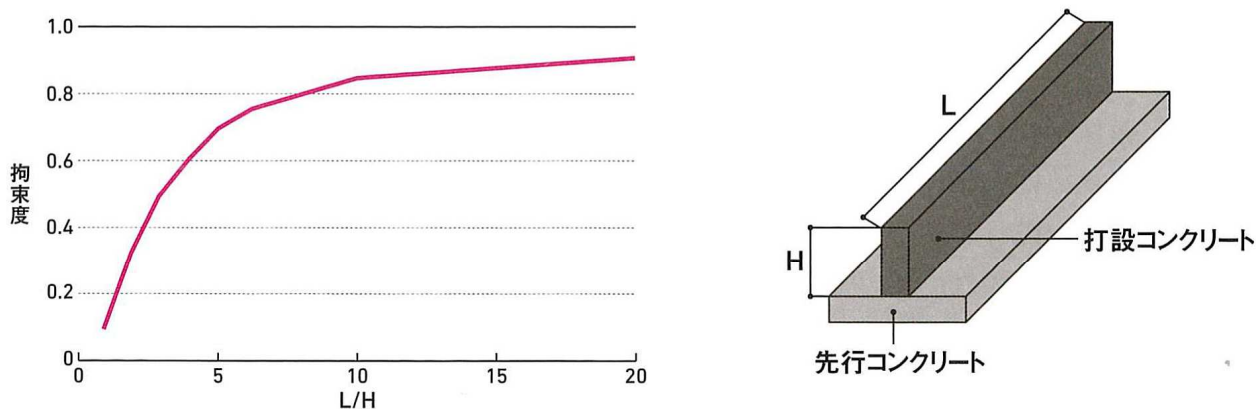
第一の要因である ΔT は、単位セメント量を低減しても効果的に下げることができないことを図2で述べた。しかし同じ図から、セメントの種類を中庸熱セメントに変えると、同じセメン

図5 温度上昇は部材の厚さと施工時期に左右される



左図は、コンクリートの部材厚さによって、コンクリートの温度がどう変化するかを示したものの。厚さが大きいほど温度上昇が大きい。
右図は、施工時期の違いによるコンクリートの温度変化を示したものの。夏季施工では30℃近い温度変化がある（資料：日本建築学会のマスコン指針）

図6 「長くて低い壁」は温度ひび割れが発生しやすい



左のグラフは、基礎梁が先行コンクリートから受ける拘束度を調べたもの。基礎梁の長さLと高さHの比による変化を示した。
梁の長さが大きく、高さが小さいほど拘束度が増大する傾向がある

ト量でも普通セメントに比べ温度変化が顕著に小さくなることが分かる。

このようにセメントの種類を変更することは有効であるが、普通セメントを高炉セメントB種に変更しても、これまで一般にいわれてきた傾向と異なり、ほとんど効果は見られない。この点に

は注意が必要である。

また、図5にあるように部材の厚さ、施工時期により ΔT は大きく異なる。

図5 左で、部材厚さの影響は大きく（部材の長さではないことに注意）、厚くなるほど顕著に ΔT が増大する。また、図5 右の施工時期も影響が大

きい。特に夏季施工の温度変化が大きいので注意したい。

拘束度の抑制も重要に

拘束度 λ とは、自由な変形を妨げられる度合いである。乾燥収縮による

ひび割れでも、ひび割れの発生に影響を与える要素として、繰り返し説明してきた。

λ は、温度ひび割れでも同様に重要である。乾燥収縮ひび割れの場合は、部位で拘束度がおおむね決まり、パラペットや基礎梁上の壁部材などで拘束度が大きくなることを述べた。マスコンクリート部材の場合の拘束度は、一度に施工する数量に大きな影響を受ける。

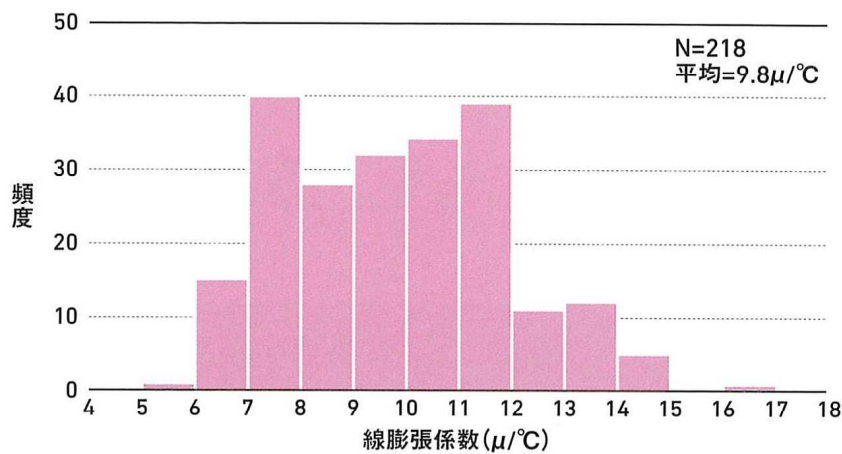
図6は、基礎梁の施工を例に取り、先行して打設したコンクリートからどのような拘束を受けるかを調べたものだ。基礎梁の長さLと高さHの比によって、拘束度がどう変化するかを示した。図からL/Hが大きくなるほど（Lが大きく、Hが小さいほど）拘束度が増大する傾向が分かる。つまり、基礎梁が先行コンクリートから受ける拘束度は、施工する長さLを小さくすれば効果的に低減でき、施工高さHを高くするほどよい。

図6から、2mの高さの梁を長さ30m施工するのと比べ（L/H=15）、同じ高さで長さ10mの施工（L/H=5）では拘束度が0.2程度低減でき、図4に従えば温度応力は20%程度小さくできることになる。

線膨張係数の影響

最後に述べる線膨張係数 α は、重要性があまり知られていないが、その影響は非常に大きい。 α は、1℃の温度変化に対して生じるひずみを表している。図4から、他が同一の条件であっても温度応力は α に比例して増

図7 コンクリートの線膨張係数にはばらつきがある



コンクリートの線膨張係数は、平均で10μ/℃程度だが、ばらつきが大きい。5～15の範囲に広く分布している

図8 ばらつきの原因は骨材の種類による違い

線膨張係数がばらつく原因の1つは、骨材の種類による違いだ。石灰岩の碎石骨材では小さく、砂岩などは大きい（資料：日本建築学会のマスコン指針）

骨材の種類	コンクリートの線膨張係数 (× 10 ⁻⁶ /°C)
砂利	12.2
花こう岩	8.6
珪岩	12.2
粗粒玄武岩	8.5
砂岩	10.1
石灰岩	6.1

減するから、その影響は一般に最も重要視されるΔ Tと同様に大きい。

α は、平均で10μ/℃程度であることが知られている。しかし、コンクリートによってばらつきが大きく、5～15の範囲に広く分布している（図7）。このばらつきの原因の1つは、使用す

る骨材の種類であることが知られている。 α は、石灰岩の碎石骨材では小さく、砂岩などでは大きい（図8）。このことから、石灰岩碎石の骨材を使用することがマスコンクリートの温度ひび割れ抑制に有効であることを覚えておいてほしい。

ここがポイント

温度ひび割れを抑制するには、
温度変化量、拘束度、線膨張係数などに
着目する必要がある

コンクリートの線膨張係数は、ばらつきが大きい。
その原因の1つは、**骨材の種類による影響**である

コンクリートこぼれ話 ②

名作に見る補修の大切さ



住宅とは思えない圧倒的なボリューム感を放つ城戸崎邸。
写真は2014年に撮影したもの(写真:安川千秋)

西

の住吉、東の城戸崎——。東京・世田谷区の閑静な住宅地に建つ城戸崎邸は、安藤忠雄氏の代表作の1つです。

この住宅を初めて見た人は、新築の住宅だと思うかもしれません。1986年の完成から約30年が経過するのに、打ち放しコンクリートの外観には、汚れやクラックがほとんど見当たりません。建て主でもあり、建築家でもある城戸崎博孝氏(城戸崎建築研究所代表)が、絶えず最先端の補修、塗装技術を導入しながら、美観や耐久性の維持に並々ならぬ熱意を注いできたからです。

最初に補修したのは、竣工から8年が経過した95年8月のこと。まず、躯体の微細なひび割れにエポキシ樹脂を注入して補修。続いて、浸透性吸水防止剤を塗布した上に中塗り材を重ね、フッ素樹脂クリア塗料を上塗りして二回施工しました。

2001年には、樹液による汚れが激しかった北面の壁6m²に、前年に市販され始めたばかりの光触媒塗料を塗布しています。光触媒塗料とは、紫外線によって有機物を分解するセルフクリーニング機能を備えた塗料です。

さらに、11年3月には静電反発塗料(光酸化塗料)をコンパネ幅の上部2面に試験的に施工しました。光酸化塗料の特徴は、汚れを壁面に寄せ付けられない性質を備えていること。もともと、有機物系の汚れはプラスの電化を帯びたものが多いのですが、光酸化塗料にもプラスの電荷を持たせることで相互に電気的な反発力を生む仕組みです。まだ、導入実績の少ない新しい塗料です。

城戸崎氏が汚れや耐久性に細心の注意を払ってきたからこそ、新築同然の美観を維持しているのでしょう。城戸崎邸は、メンテナンスの大切さを教えてくれる住宅です。

(文責=日経アーキテクチャ編集)

CHAPTER 7

悪条件が重なる 夏の打設に要注意



夏冬間の気温低下で 温度ひび割れが発生

➡ 乾燥収縮と重なればリスクは飛躍的に増大

外気温の低下によるひび割れトラブルは実に多い。

しかし、打設する季節と、問題となる施工条件に注意を払えば、リスクを低減できる。
そのポイントを解説する。

前パートでは温度ひび割れについて解説したが、実は温度ひび割れには、2つのタイプがある。

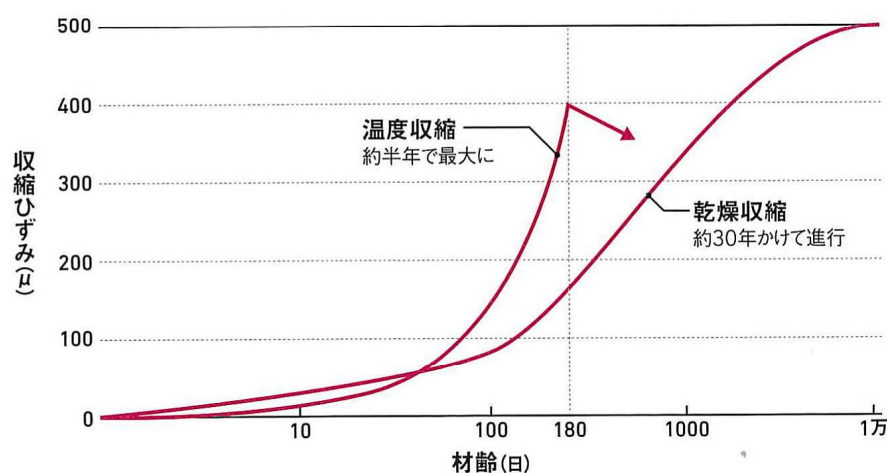
1つは、いわゆるマスコンクリートを打設するときに問題となるひび割れである。大断面の部材では、内部で大量の水和熱が発生して温度が上昇するが、その後、外部から冷却されて急激に温度低下することで部材が収縮し、その収縮を外部から拘束されることで起こる。

もう1つは、季節変動による外気温の低下によって生じるひび割れである。夏から冬に向けて外気温が低下するとコンクリートは収縮するが、外部の既設構造物がそれを拘束する。そのため、コンクリートは既設構造物から引張力を受ける形になり、内部応力が限界を超えてひび割れが生じる。

特に注意したいのは後者の外気温の低下によるひび割れで、関連するトラブルが後を絶たない。

このタイプは、マスコンの温度ひび

図1 温度収縮によるひずみは半年間で最大になる



温度収縮によるコンクリートのひずみは、打設後から約半年で400 μ mに達して最大となる。
一方、乾燥収縮によるひずみは、数十年かけてゆっくり進行する（資料：図8 まで筆者）

割れとは異なり、部材断面が小さくても発生する。また、マスコンの場合には、材齢7日程度で早期にひび割れが生じるのに対して、外気温の低下によるひび割れは夏から冬に向かう季節変動のなかで生じるため半年のスパンで発生する。

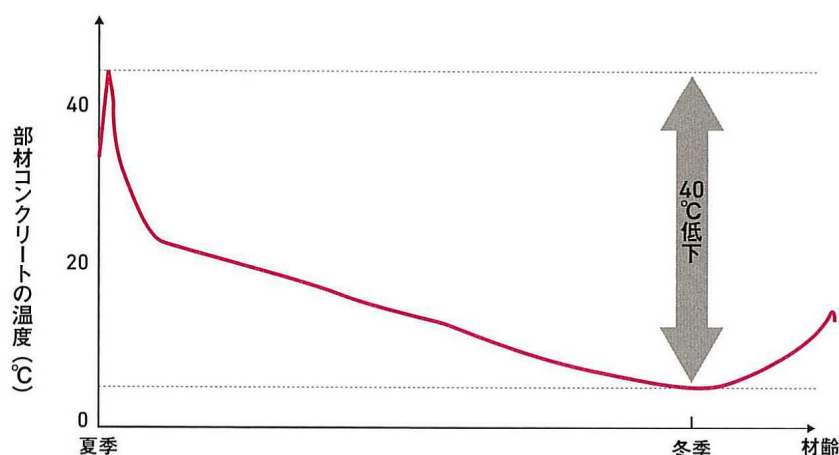
そこで、ここでは外気温の低下に

よるひび割れに的を絞って詳しく解説したい。

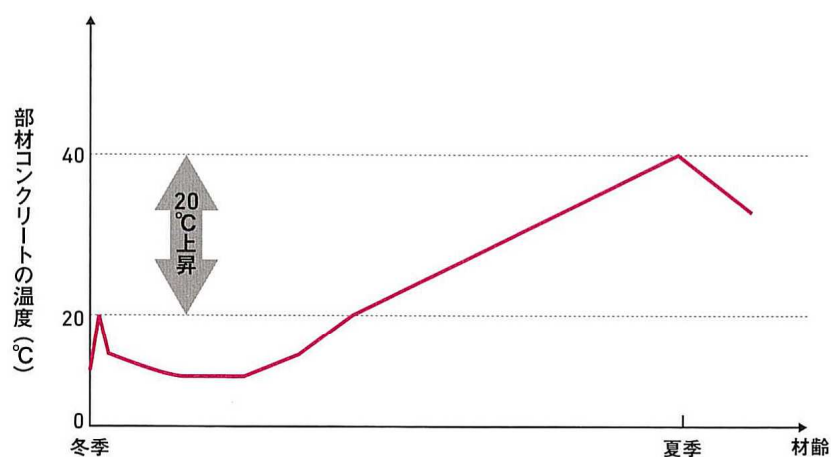
乾燥収縮より温度収縮が速い

図1で、温度低下による温度収縮ひずみの変化と、乾燥収縮によるひずみの変化を比較した。

【図2】 夏季に打設すると半年間で温度が約40℃低下



【図3】 冬季に打設すると半年間で温度が約20℃上昇



例えば、夏にコンクリートを打設すると、次の冬までのわずか半年間で、温度低下による収縮ひずみが約400 μ （マイクロ）まで増大する。一方、乾燥収縮の速度は比較的緩慢で、特に大断面のコンクリートでは10年単位でゆっくり進行する。約10年経過して、やっと温度ひび割れの最初の

半年間と同じくらいのひずみが生じる。

つまり、短期的には温度収縮の影響がはるかに大きく、ひび割れに直結しやすいことが分かる。

次に、コンクリート打設後の内部の温度変化を、夏に打設した場合と、冬に打設した場合で比べてみる（【図2】 【図3】）。

夏季に打設すると水和熱が加わり、鉄筋コンクリート（RC）部材の温度は50℃程度に上昇し、その後、厳寒期までに約40℃低下する。温度が低下すると、コンクリートは1℃当たり10 μ 程度収縮するので、この温度差によって400 μ の温度収縮ひずみが生じる。一方、冬季に打設すると、外気温は夏に向かって上昇していくから、コンクリート部材は膨張する。つまり、収縮による温度ひび割れのリスクが小さくなる。

ここで、温度収縮によるリスクを、乾燥収縮によるリスクと合わせて考えてみたい（【図4】）。夏季にコンクリートを打設すると、冬季を迎えるまでに温度収縮が進み、これが乾燥収縮に累加されるので、ひび割れリスクは一層増大する。

反対に、冬季に打設すると夏季に向けて温度膨張が生じ、これが乾燥収縮を打ち消す効果をもたらす。これによって、ひび割れリスクが大きく低下する。つまり、ひび割れ抑制の視点に立つと、コンクリートは、冬に打設するのが望ましいことを覚えておいてほしい。

温度収縮が問題となる条件

乾燥収縮に加え温度収縮がひび割れを助長する具体的な施工例を【図5】に示す。

温度収縮が問題になる典型例は、同図左のような地盤に接したスラブである。夏季から冬季に向けて温度が低下すると、床スラブの温度が低くなり温度収縮が発生する。これに対し、

図4

夏の打設は乾燥収縮を助長、ひび割れリスクが増大

夏に打設すると、乾燥収縮と温度収縮が重なり、ひび割れリスクが増大する。冬に打設すると、温度膨張が乾燥収縮を打ち消す効果が期待でき、ひび割れリスクを減らせる

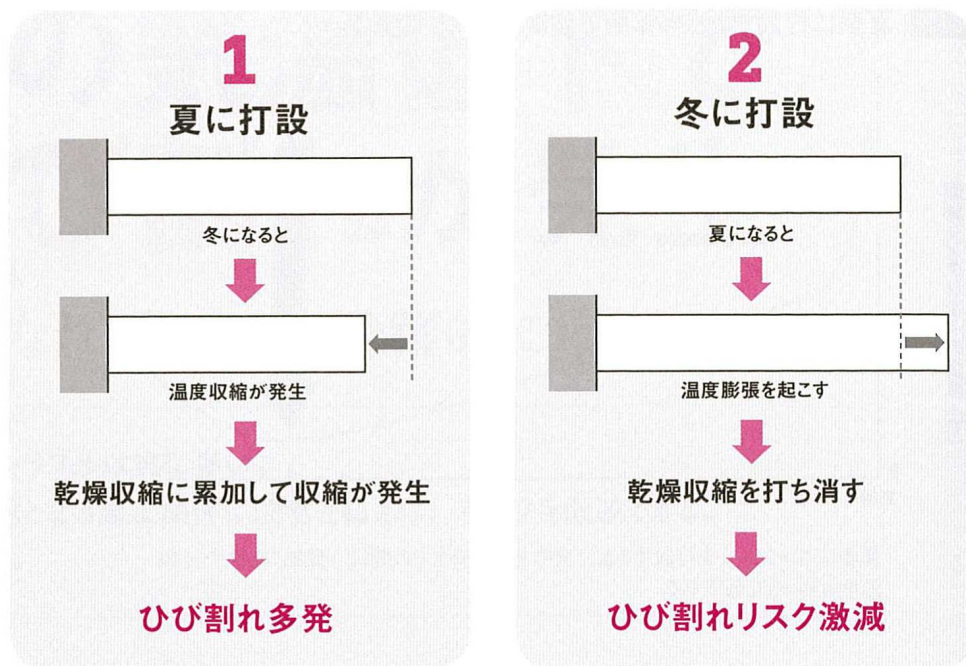
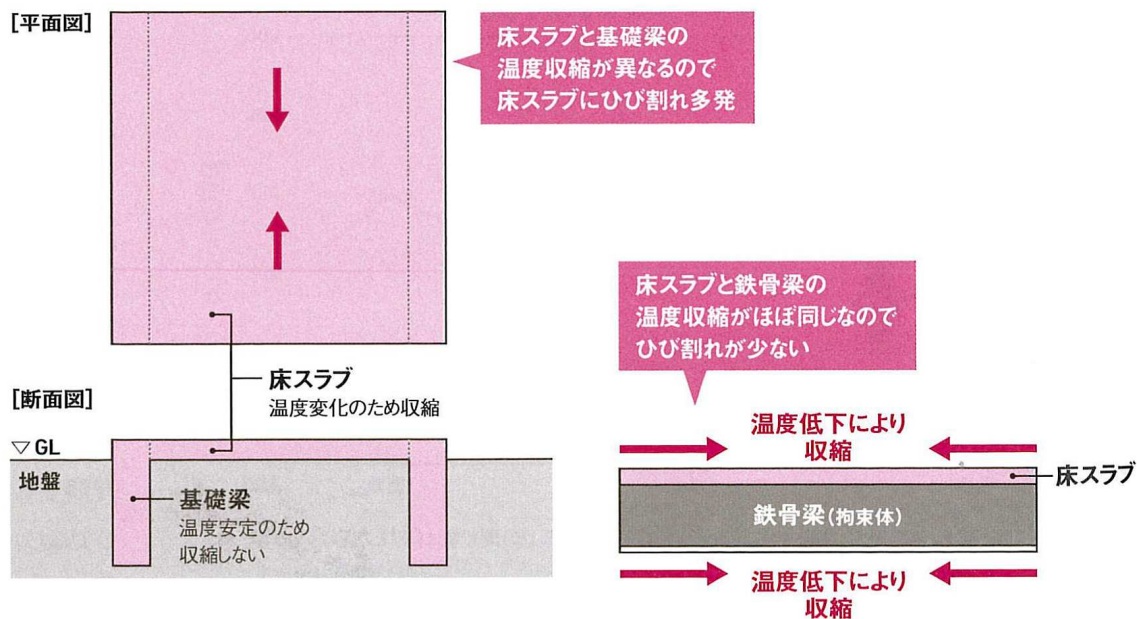


図5

温度収縮のリスクが最大になる施工とは

左はリスクの大きい施工例。ひずみの小さい地中梁が床スラブを拘束するため、ひび割れが発生しやすい。右の鉄骨造 RCスラブでは、両方の収縮率がほぼ等しく、梁はスラブを拘束しない



拘束体となる地中の梁部材は温度変化が小さく、ひずみも小さい。梁部材は床スラブの温度収縮を拘束するので、床スラブに拘束変形が生じる。つまり、このケースでは、乾燥収縮に加えて、温度収縮もひび割れの原因となる。

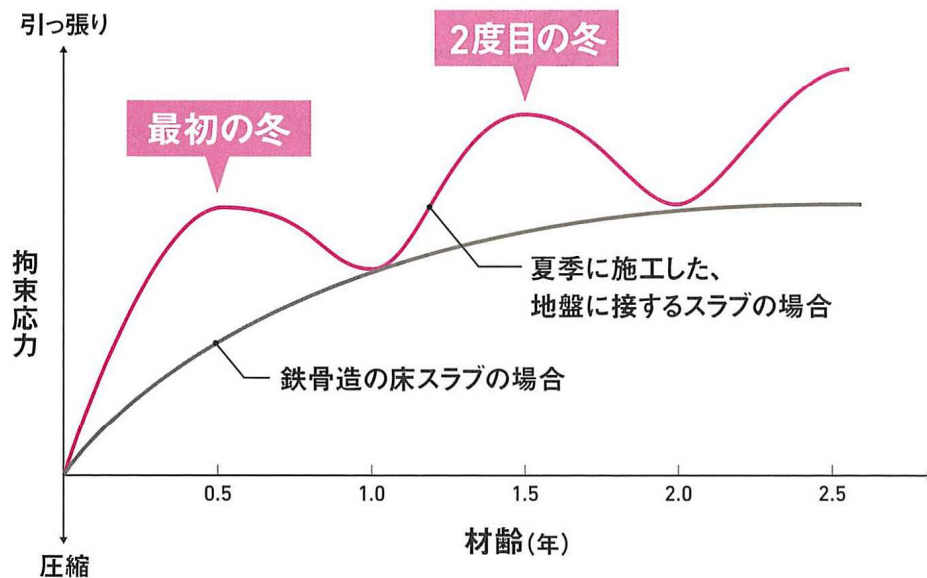
これに対し、同図右は大きな問題とならない、鉄骨造の床スラブの

ケースである。これは、RCの床スラブを鉄骨の梁が下から支えている構造だ。夏季から冬季にかけて、温度収縮が床スラブに生じると、ほぼ同等の温度収縮が拘束体である鉄骨梁にも生じる。なぜなら、コンクリートと鉄の温度変化に対する温度収縮の割合（線膨張係数）がほぼ同じだからである。その結果、床ス

ラブは温度収縮による拘束を鉄骨梁から受けることがないので、ひび割れの要因は生じず、乾燥収縮のみとなる。

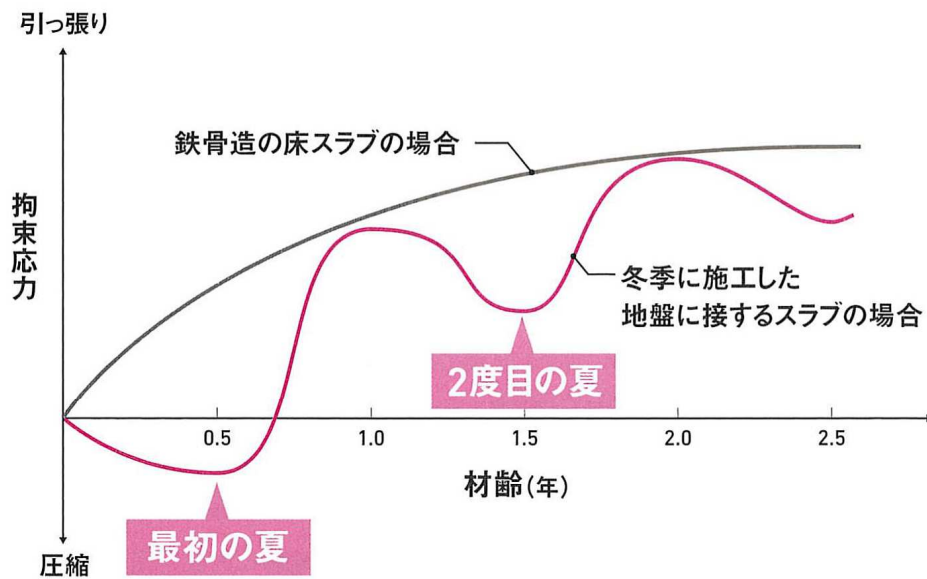
このように、温度収縮によるひび割れを考えるときには、施工時期のタイミングに加え、拘束体に温度収縮が生じるかどうかを見極めることが重要となる。

図6 地盤に接したスラブを夏に打設すると危険が増大



赤の線は、図5左の構造物を夏に打設したときの内部応力の推移。黒線は、図5右の構造物を夏に打設したときの变化

図7 問題になる構造物こそ冬に打設



冬に打設したときの内部応力の推移。地盤に接したRCスラブの内部応力は、鉄骨造の床スラブを超えることはない

建築主にも十分な説明を

さらに、施工時期と拘束体の温度収縮の問題を組み合わせ考えてみる。

まず、図5左の地盤に接する床スラブについて、夏に施工した場合と冬に施工した場合を比較する。同様に、図5右の鉄骨造の床スラブも夏と

冬に分けて検証する。図6に夏に施工した場合を、図7に冬に施工した場合をまとめた。それぞれ、横軸に経過年数を、縦軸にコンクリートの内部応力（拘束体から引っ張られることによる拘束応力）をとった。

まず、夏季から見てみよう。鉄骨造の床スラブでは、スラブと梁の熱膨張率がほぼ等しいので、温度収縮に

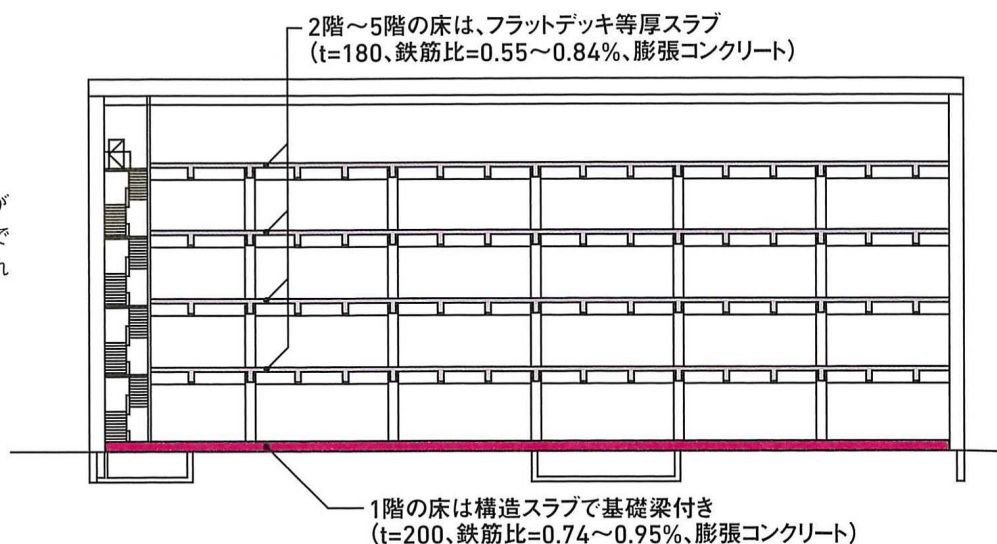
よる内部応力は無視できる程度と考えてよい。そのため、影響するのは乾燥収縮だけとなり、内部応力は緩やかなカーブを描いて増加する。

これに対し、地盤に接する床スラブでは、夏の施工と同時に乾燥収縮に加えて温度収縮が起こる。これらの影響で内部応力は急速に増加し、半年後の最初の冬に第1のピークを

図8

夏季施工で温度収縮による ひび割れが顕著だった実例

2階から5階の床スラブはほとんどひび割れが発生しなかったが、1階は土に接するスラブであったため、基礎梁の拘束を受けてひび割れが発生した



2階から5階の
フラットデッキスラブは、
乾燥収縮の心配だけ

ひび割れはわずか

1階の
構造スラブは、
温度収縮の問題も重なる

ひび割れ発生

迎える。

この後、冬から夏にかけてはコンクリートが膨張するので、1年後の夏にはいったん温度の影響がなくなり、鉄骨造の床スラブと同じ位置まで内部応力が減少する。しかし、その後、冬に向かって再び温度が低下するとともに応力は増加する。

続いて、冬季の場合である。鉄骨造の床スラブは、夏季と同じ変化をたどる。一方、地盤に接する床スラブは、施工後、気温が上昇するため膨張し、半年後の最初の夏に圧縮側に最初のピークを迎える。その後、1年後の冬まで拘束応力が増加するが、鉄骨造の床スラブを超えることはなく、以後、同様の周期的な挙動を示す。

このように、夏の打設はひび割れリスクが高いが、やむを得ず施工する

場合は、事前に建築主にリスクを説明することが重要である。

最後に、夏季施工による温度収縮の影響が顕著であった実例を示す。

図8は、中規模の物流施設の断面図を表しており、1階が図5左の地盤に接するスラブ、2階以上が図5右の鉄骨造の床スラブであった。施工時期は8月で、乾燥収縮率が600 μ 程度と小さなコンクリートを採用し、さら

に膨張材も添加してひび割れ制御のため材料面から十分に配慮した事例である。

その結果、2～5階の床スラブには、期待通りひび割れがほとんど発生しなかったが、1階の床スラブでは、基礎梁の強い拘束を受けてひび割れを十分に抑制できなかった。この結果は、図6の内部応力の模式図とほぼ一致している。

ここがポイント

外気温の低下に伴う温度収縮による
ひび割れを抑制するには、
冬季にコンクリートを打設するのが望ましい

土に接する RC スラブなど、
特に**温度収縮によるひび割れを生じやすい**
施工条件には注意が必要である

施工季節を誤ると 「後打ち帯」は逆効果

➡ 長大建物のひび割れを正しく抑制する

長大建物のひび割れ抑制法の1つとして効果があるとされる「後打ち帯」の施工。しかし、施工の季節を間違えると、かえって逆効果になる場合がある。有効に機能させるためのポイントを解説する。

ここでは、ひび割れの不具合が生じやすい長大建物（横幅の大きな建物）に焦点を当ててみたい。

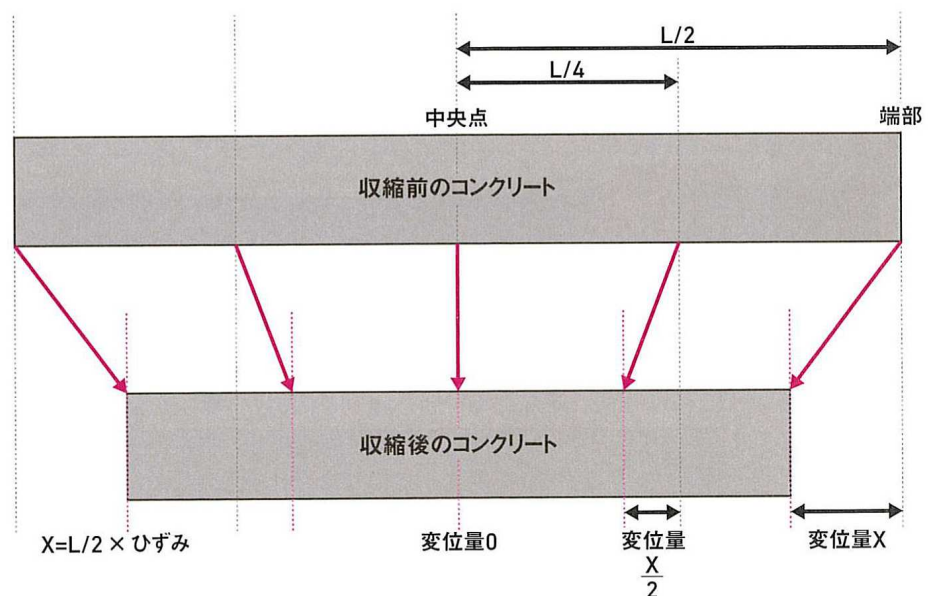
鉄筋コンクリート造（RC造）の長大建物にひび割れが発生しやすいことは、建築専門家の間で経験的に広く知られている事実である。

そのため、かつては横幅が60mを超えるような長大建物を設計する場合には、エキスパンション・ジョイント（Expジョイント）によって建物を分割することが一般的であった。

しかし最近では、初期コストがかかるうえ、維持管理費の増加や段差による使用性低下のため、Expジョイントは建物ユーザーに敬遠されるようになった。今や横幅が100mを超える、Expジョイントのない建物も珍しくなくなっている。

ここでは、長大建物にひび割れが発生しやすい原因について説明するとともに、その抑制策の1つである「後打ち帯」を有効に機能させる方法を解説する。

図1 部材長が大きい建物ほど変位量が大きくなる



端部の変形量 X は、中央点からの距離（ $L/2$ ）とひずみの積となる。中央点からの距離が半分の地点の変形量は $4/L$ とひずみの積になり、端部の変形量の半分になる（資料：図5 まで筆者）

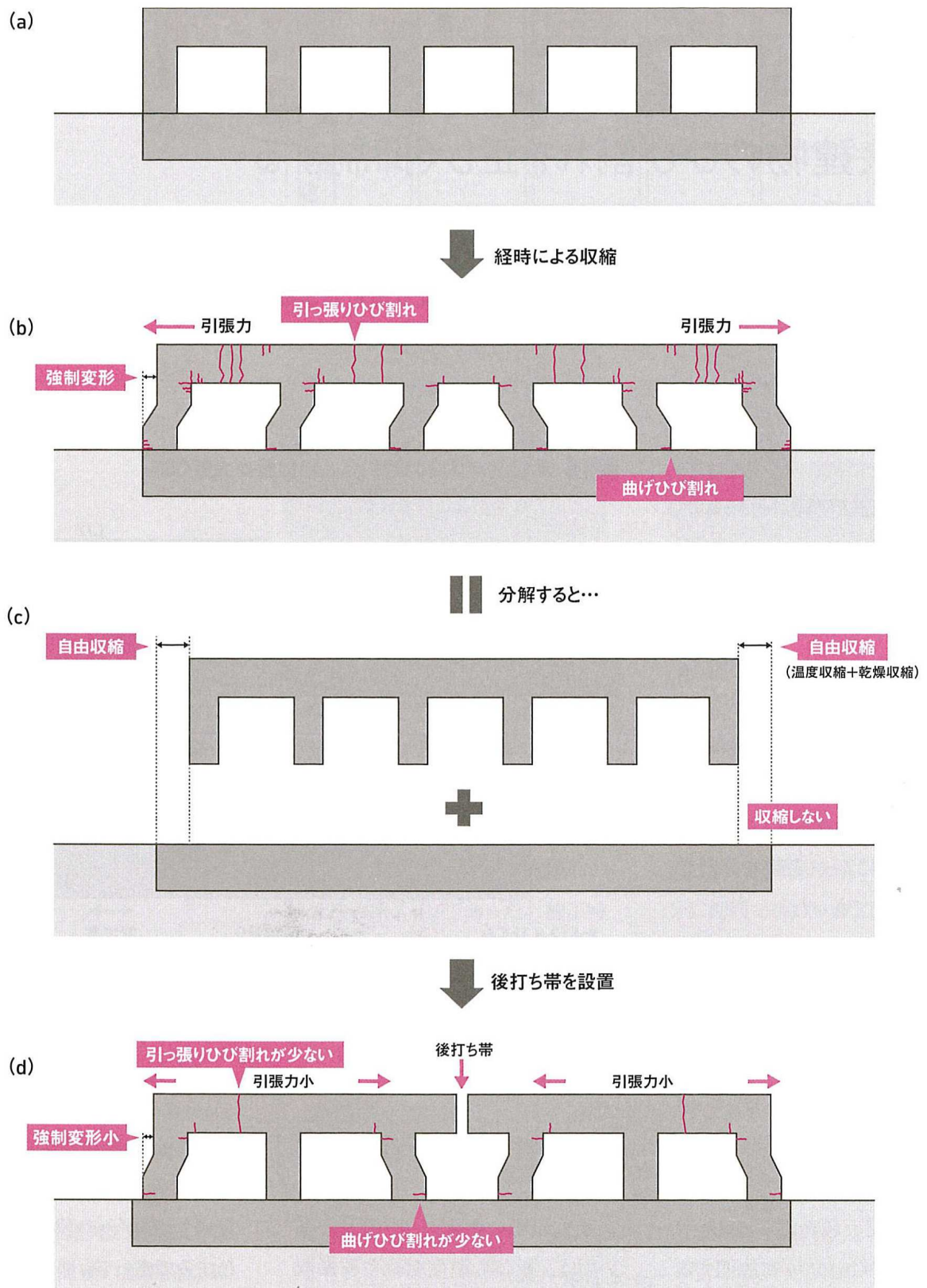
長大建物のリスクが高い理由

長大建物の躯体のひび割れが多いのは、躯体の温度収縮や乾燥収縮に起因する自由変形が大きくなるからである。

図1 は、RC 部材の収縮による変形

を模式的に示したものである。まず、端部の変形量 X は、部材長 L の2分の1とひずみの積で表され、同じひずみであっても部材長に比例して大きくなる。さらに、部材中の位置によって変形が異なり、端部が最も大きく中央部で0となる。変形量 X は、

【図2】 梁の中央にスリットを入れると変形量が小さくなる



コンクリート打設後の経時収縮により、(b) のようなひび割れが生じる。(c) はその原因を上部と下部の構造に分解して考えたもの。(d) のようにスリットを入れるとひび割れは少なくなる

温度収縮と乾燥収縮の影響を合わせると、例えば200m長さの建物では長期的には最大100mm程度に達する。

典型的な長大建物のひび割れを図2に示す。

図2 (a) はコンクリート施工直後を表し、温度収縮と乾燥収縮で図2 (b) のようなひび割れが生じる。ここで、収縮によるひび割れのメカニズムを理解するため、図2 (b) の状態を、図2

(c) に示すように、上部構造と下部構造に分解して考えてみる。

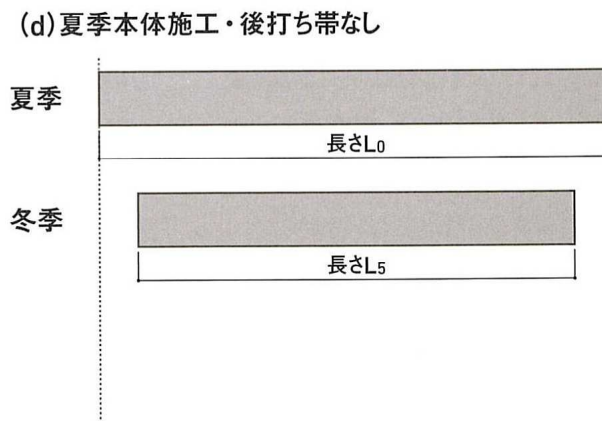
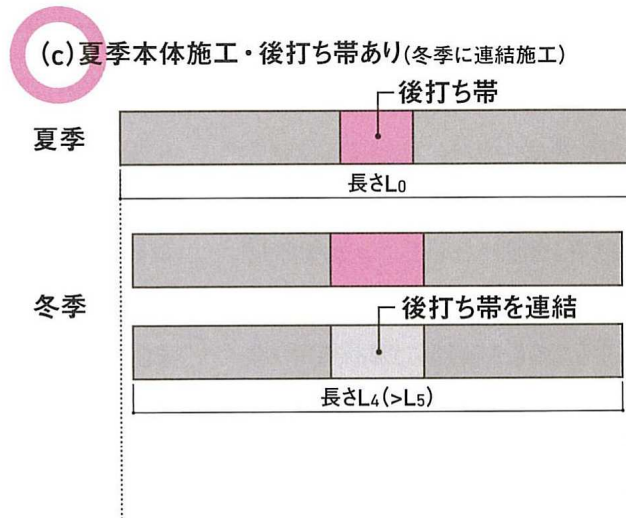
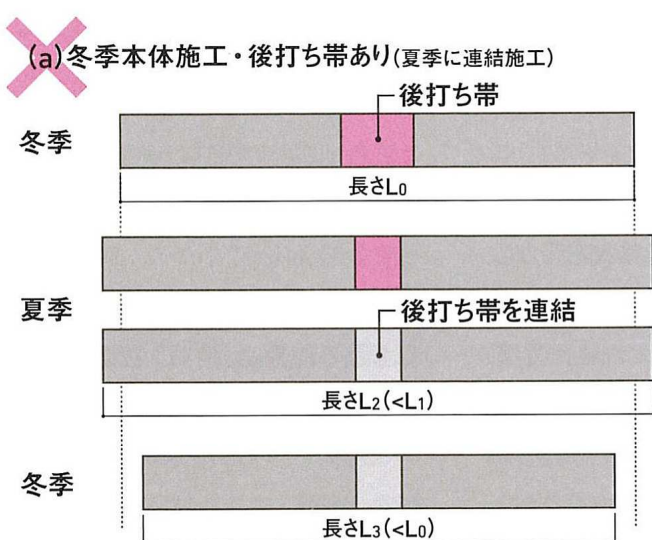
上部構造には温度低下と乾燥による自由収縮変形が生じているが、これを支える下部構造（基礎梁）では温度変化と乾燥の影響は少なく、収縮変形は小さい。このため、上部構造は剛性の高い基礎梁に拘束されて引張力を受ける。このとき、柱の水平変形、梁の引っ張り変形とも、端部ほど大きくひび割れも発生しやすい。

後打ち帯でひび割れを抑制

図2 (b) の状況の緩和に有効なのが、後打ち帯または収縮帯と呼ばれる部分を設けて施工する方法である。これについては、適切でない施工方法も散見されるので、ここで詳しく説明したい。

後打ち帯は、Exp ジョイントに相当するスリットを、施工中のある期間に限って設けるもの。後打ち帯は、コン

図3 注意したい後打ち帯の施工時期



温度収縮に対する後打ち帯の効果は、季節によって大きく異なる。夏季の本体施工では、大きな効果が期待できる半面、冬季の本体施工では逆効果となる場合が多い。この点に関しては、十分な注意が必要である

クリートを打ち込まず鉄筋を組んだだけの状態で帯状に残しておき、その後、一般には1カ月から数カ月後にこの部分にコンクリートを打設して連結するものだ。後打ち帯の幅は狭くてよいが、鉄筋をここで切断する場合は、重ね継ぎ手分の距離は最低でも必要である。(例えば500mm程度)。

図2 (d) が後打ち帯の効果を表している。後打ち帯は、その両側が施工されてから当該部分にコンクリートが打設されるまでの間に、建物を分割する役割を果たしている。RC部分に比べれば、後打ち帯部分の鉄筋を分割せずに通したままとした場合でも、その剛性は無視できる程度なので、コンクリートを打設しなければ、後打ち帯はスリットに相当する役割を果たす。

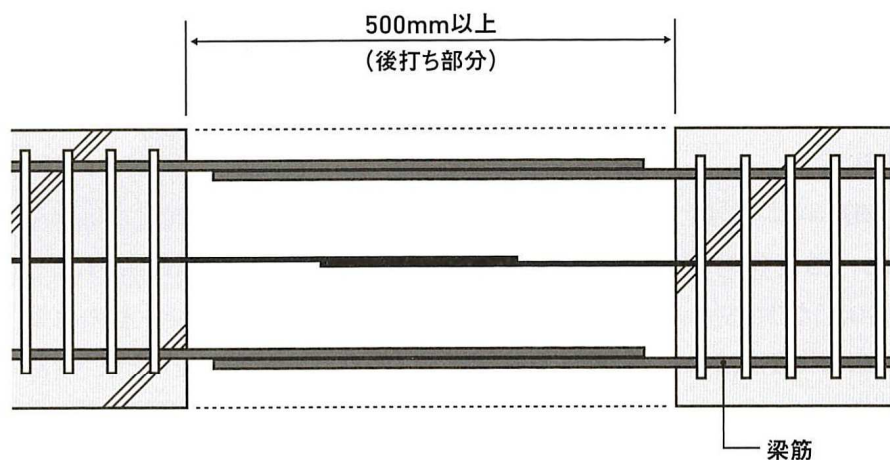
スリットを設けた期間は、建物の長さが短くなり、**図1**に示した変形が小さくなるため、柱部材、梁部材に生じるひび割れも少なくなる。

連結の季節を間違えるな

後打ち帯を残す期間をどの程度にするかの判断基準は特に設けられていないため、現状ではもっぱら経験に頼っている。正しい判断の一助とするため、後打ち帯の効果が外気温と密接な関係があることを説明したい。

図3に、施工時期による後打ち帯の効果の違いを模式的に示した。分かりやすくするため、乾燥収縮の効果を無視し、温度変化による収縮の影響だけを考慮し後打ち帯の連結は、コンクリート施工後半年と仮定した。

図4 気温が下がりきってからスリットを連結する



後打ち帯では、鉄筋も含めてその両側の躯体を完全に分離させる。
また、後打ち帯の部分の鉄筋は、重ね継ぎ手となる(資料:日経アーキテクチャ)

図3 (a)と**図3** (b)は、冬季に本体コンクリートを打設する場合だ。(a)は後打ち帯あり、(b)は後打ち帯なしである。(b)の後打ち帯なしでは、コンクリートを冬季に打設した後、夏季までに温度膨張し(長さ L_1)、翌年の冬季には収縮して元の長さ L_0 に戻る。

これに対し、(a)の後打ち帯ありでは、冬季に本体コンクリートを打設した時点でスリットを入れておき、夏季に後打ち帯を施工する。注目してほしいのは、夏季に膨張したときの長さ L_2 が、(b)の夏季の長さ L_1 より小さくなることだ。理由は、冬季にスリットを入れたので、部材長が小さくなり、同じ温度膨張ひずみがあっても、夏季にかけての膨張量も小さくなるからである。最終的に、翌年の冬季の部材長 L_3 も、後打ち帯なしの L_0 より小さくなる。

最終的な部材長が小さくなるという

ことは、収縮変形が大きくなるということ。つまり、それだけひび割れが発生しやすくなる。

反対に、夏季の本体施工では後打ち帯の効果は大きい。**図3** (d)は、後打ち帯なしの場合で、夏季にコンクリートを打設すると冬季までに部材長は L_0 から L_5 へ大きく収縮変形する。しかし、**図3** (c)の後打ち帯ありでは、夏季にスリットを入れるので部材長が小さくなり、冬季までの温度収縮変形が小さくなる。つまり、翌年冬季の長さ L_4 は、後打ち帯なしの L_5 よりも大きい。このことは、ひび割れが少なくなることを表す。

後打ち帯を残す期間

以上のメカニズムは少し難しかったかもしれないが、結論として「後打ち帯を設けるときには、スリットを入れた

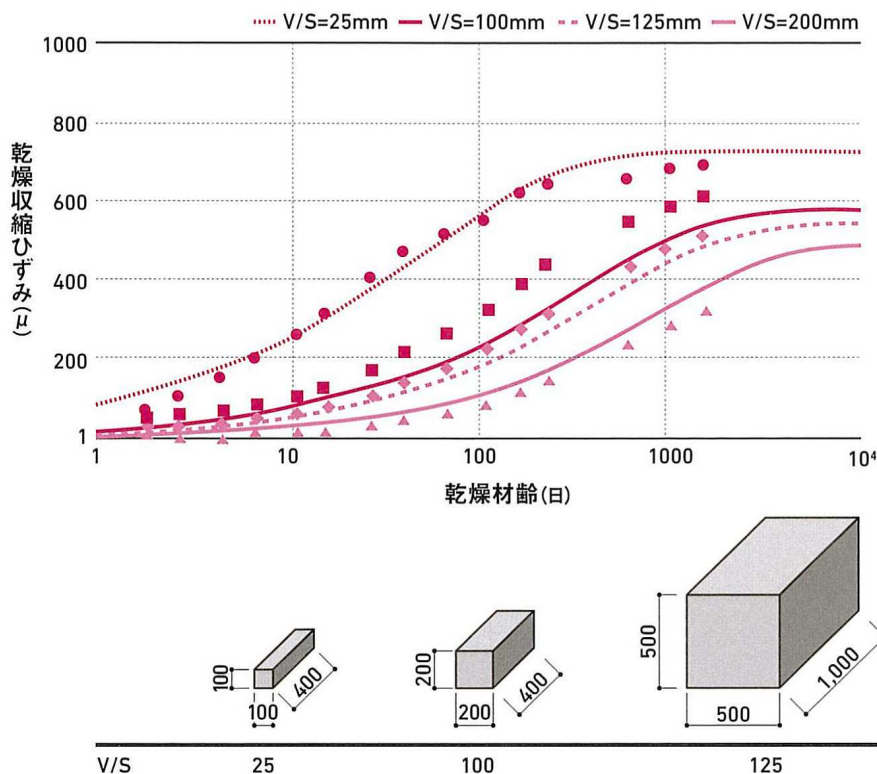


図5

乾燥収縮は 部材断面の大きさが 大きく影響

V/Sの指標は、部材の体積を乾燥にさらされている表面積で除したもの。この数値が小さい（表面積が大きい）ほど乾燥収縮が早い

あとに、十分に収縮ひずみを進展させてから連結する」と覚えてほしい。

問題は、スリットを入れた後、どのくらいの期間を置いて連結するかだ。収縮ひずみは、温度収縮と乾燥収縮の累加となるが、それぞれ特性が異なる。温度収縮ひずみは、p103の図2にあるように、夏季に打設して最高温度に達してから冬季に気温が下がった状態を考えると、40℃程度の低下幅がある。温度収縮ひずみはわずか半年の期間に400μ（マイクロ）になる（コンクリートの線膨張係数を10μ/℃と仮定）。この値は、梁部材などの長期的（例えば10年）な乾燥収縮ひずみに匹敵する。

次に乾燥収縮ひずみに関し、部材断面の大きさが同ひずみの進展に及ぼす影響を図5に示す。

部材断面が大きいほど乾燥収縮ひずみの進展が遅く、最終値も小さくな

る。図中のV/Sとは、部材体積を乾燥にさらされる表面積で除した値で、例えば500mm角で4面乾燥の梁のV/Sは125mmとなる。図中のV/Sが125mmの乾燥収縮ひずみを見ると、最終値500μに対して、100日ではまだ200μ程度である。つまり、100日後に後打ち帯を打設した場合には、過半の乾燥収縮が打設後に生じることになり、後打ち帯の効果が不十分になる。

以上をまとめると、温度収縮に対し

ては、夏季にコンクリートを打設してスリットを設けたときには、厳冬期に気温ができるだけ下がってから連結することが重要である。また、冬季にコンクリートを打設するときに、スリットを設けることはむしろ逆効果となる可能性がある所以要注意である。

また、乾燥収縮に対する効果を合わせて考えると、夏季に本体の打設工事を行う場合、3ヵ月以上の期間を確保してから連結することが最も有効であると考えられる。

ここがポイント

後打ち帯は、**夏季の本体施工・冬期連結では大きな効果を期待できるが、冬季の本体施工・夏季連結では逆効果になる可能性**

後打ち帯の連結は、**十分に気温が低下してから施工すべきだ**

コンクリートこぼれ話 ③

地下の漏水問題が顕在化



築25年のマンションで発生した漏水事故例。地下水位の上昇に伴い、土間コンクリートの打ち継ぎ面から漏水が発生した（写真：日経アーキテクチャ）

最

近、RC造の個人住宅の地下居室をめぐる漏水トラブルが増えています。今や地下居室は、個人の趣味を楽しむ隠れ家的な場所。ホームシアターやオーディオルーム、ワインセラーなどを設けて自分の時間を楽しむ人が少なくありません。しかし、ひとたび地下居室で漏水が起こると、十分な補修ができないため、訴訟に発展するケースもあります。

地下漏水の原因の1つとして、地下水位の上昇が挙げられます。例えば、東京都墨田区京島の地下水位は1965年には地下約60mまで下がっていましたが、2010年には地下10m付近まで上昇しています。これは、70年代に地下水の汲み上げが規制されたことが原因です。それまで産業用水に大量の地下水が使用されたため、地盤沈下や地下水位の低下を招きました。それを抑制するために地下水の汲み上げが規制された結果、大都市圏では地下水位の上昇が続いています。

もともと、地下には水が入りやすい部位がたくさんあります。コンクリートの打ち継ぎ部やひび割れ部をはじめ、パイプや

杭頭など躯体貫通部もあります。地下水位の上昇に伴って、これらの場所から浸水するケースが後を絶ちません。居住者にとっては、深刻な問題です。

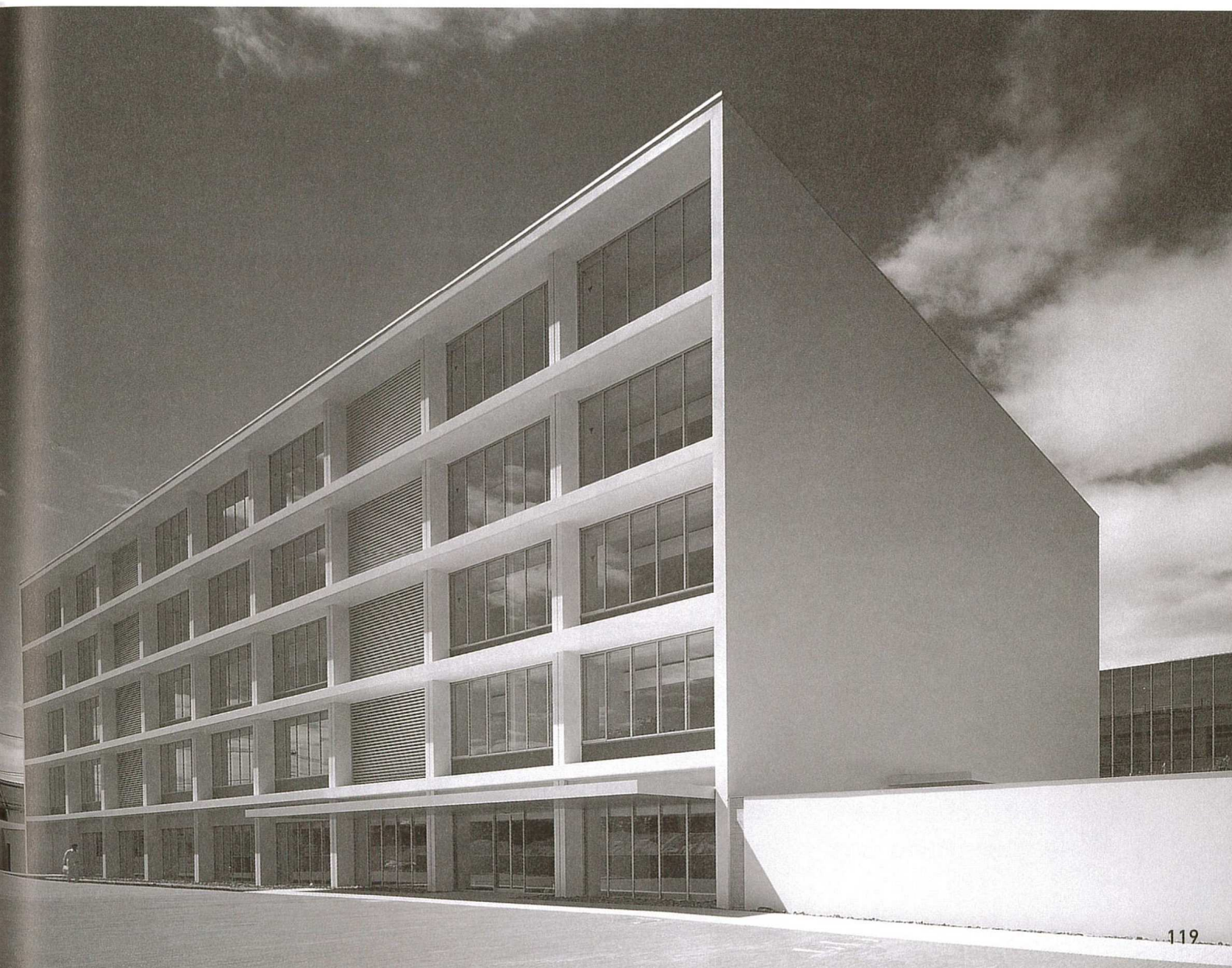
ひとたび地下居室で漏水トラブルが起こると、なかなか有効な対策を打ちにくいのが実状です。防水工事を施工するにしても、コンクリートの躯体は地下に埋まっているので手の施しようがありません。せいぜい、ドライエリアなどを設けて排水経路を新たに設けるか、二重壁で漏水箇所の影響を遮断するくらいしか、有効な手立てがありません。

上の写真は、築25年のマンションで、1階土間コンクリートの打ち継ぎ部から漏水が発生した事例です。打ち継ぎ部は、地表面より低い場所にあったため、長年にわたる地下水位の上昇と、コンクリートの劣化などで地中の水が浸入しました。この現場では、土を撤去して打ち継ぎ面を露出させ、止水処理を実施しています。地下の漏水対策は、トラブルが発生してから対処するよりも、設計段階で入念な対策を講じるほうが得策です。

（文責＝日経アーキテクチャ編集）

CHAPTER 9

選択肢が広い混和剤 適材適所で有効活用



過剰な期待は禁物 膨張材を賢く活用

➡ ベースコンクリートの乾燥収縮率が重要に

ひび割れ抑制の切り札として、利用されることが多い膨張材。

しかし、決して万能薬ではない。

機能上の限界と使用上の注意点をよく知って、効果的に活用することが重要だ。

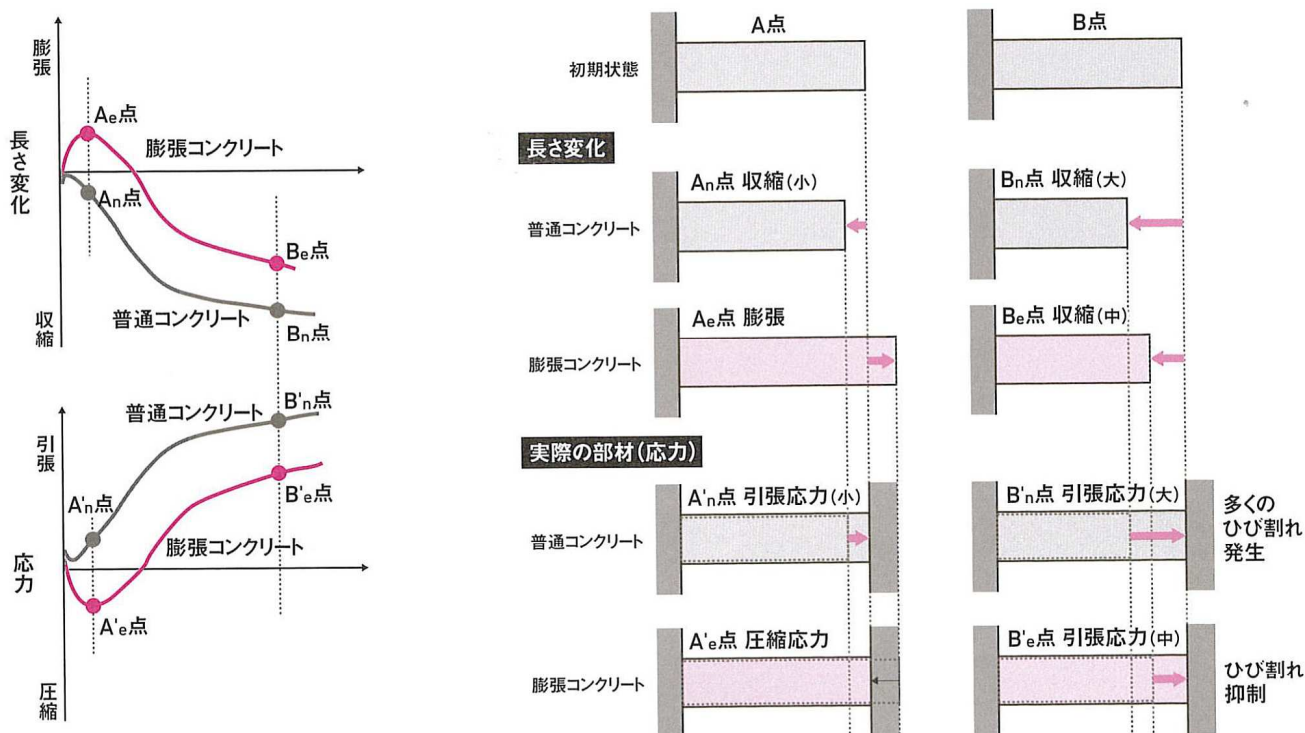
コンクリートのひび割れを抑制するため、広く採用されているのが膨張材だ。膨張材を用いたコンクリート（以下、膨張コンクリート）は、汎用材料としては最も優れたひび割れ抵

抗性を示すが、万能ではなく、使用に際して注意すべき点もある。ここでは、膨張コンクリートのひび割れ抵抗のメカニズムを示し、その効果と留意点を解説する。

最近、膨張コンクリートを採用する工事は増えているが、その効果や使い方を誤解している技術者も少なくない。最も多い誤解は、以下の3つだ。
(1) 膨張コンクリートを採用すれば、

【図1】 硬化初期段階の膨張で圧縮応力を発生させる

膨張材は、硬化初期段階にコンクリートを膨張させて圧縮応力を発生させ、その後の収縮による引張応力を緩和する。膨張材によるひずみは約200 μ （マイクロ）。一般的なコンクリートの乾燥収縮率の約4分の1だ（資料：【図5】まで特記以外は関田 徹志）



ひび割れが無条件に無くなる。(2) 乾燥収縮率が大きなコンクリートに採用すると、ひび割れの抑制効果が大きい。(3) 普通コンクリートと同じく、発注すれば自動的に供給され、施工にも特別な配慮は要らない。

それぞれ、なぜ間違っているのか、順に説明したい。

ひび割れが完全に無くなる？

まず、1番目の誤解を解くために、膨張コンクリートのひび割れ低減のメカニズムから解説する(図1)。

簡単に述べると、硬化初期段階にコンクリートが膨張することで圧縮応力を発生させて“貯金”とし、その後の収縮による引張応力を緩和する。これが、膨張コンクリートの仕組みである。

膨張量はひずみにして200μ(マイクロ=10⁻⁶)程度で、膨張による圧縮応力は0.5N/mm²程度だ。200μの膨張ひずみは、膨張コンクリートが膨らむという一般のイメージからはほど遠く、わずかな量である。一般的なコンクリートの乾燥収縮率は800μ前後だが、それに比べると4分の1程度。また、圧縮応力についても、ひび割れ強度が2N/mm²程度であるので、同じく4分の1程度の貯金ということになる。

このように膨張量と、それによって生じる圧縮応力の影響を合わせて考えると、膨張コンクリートを採用したからといって無条件にひび割れが無くなるのではなく、ひび割れ数が少なくなると考えるのが妥当だ。

図2 膨張材利用の注意点

1

膨張材投入手順、練り混ぜ時間延長などの生コン製造条件を、生コン会社、膨張材メーカーと事前に協議する

2

通常のコンクリートに増して、初期養生を徹底する

3

冬季は膨張材の反応が遅れるので養生期間を延長する

膨張コンクリートは普通コンクリート以上に、より慎重な取り扱いが求められる。特に冬季には膨張材の反応が遅れるので、十分な養生期間を確保することが重要だ

図3 主な膨張材メーカーと製品名

メーカー名	膨張材製品	
	通常型	水和熱抑制型
電気化学工業	デンカパワー CSA タイプ S	デンカパワー CSA タイプ R
太平洋マテリアル	太平洋ハイパーエクスパン	太平洋ハイパーエクスパン M
住友大阪セメント	スーパーサクス	—

上は主な膨張材メーカーと製品名。投入手順については、メーカーと事前協議するのが望ましい

収縮率が大きいものに効果？

次に、2番目の「乾燥収縮率が大きなコンクリートに採用すると、ひび割れの抑制効果が大きい」という誤解について述べる。

先に述べた膨張ひずみ、膨張による圧縮応力は、ベースとなるコンクリートの乾燥収縮率によらず、ともに一定と考えてよい。これは、乾燥収縮率の小さなコンクリートに使用の方が効果は高く、乾燥収縮率が大きくなるほど効果が顕著でなくなることを意味する。

従って、膨張コンクリートを採用する場合は、品質向上への投資を有効とするためにも、ベースコンクリートの

乾燥収縮率を調べることが重要だ。

以上2つの誤解は、いずれも膨張材の材料特性をよく知らないことから生じている。この点を認識しないまま使用すると、「膨張コンクリートを採用したのにひび割れが生じた」と建築主からのクレームに発展する事態になりかねない。注意が必要だ。

3番目の誤解も解いておきたい。これは、多くの施工者が陥っている問題ではないかと推察する。膨張コンクリートには使用上の3つの留意点があり、普通コンクリートと違う取り扱いが必要だ(図2 図3)。

膨張コンクリートは、生コン工場で膨張材をミキサーに投入して練り混ぜる。このとき、他のセメントなどの

写真1

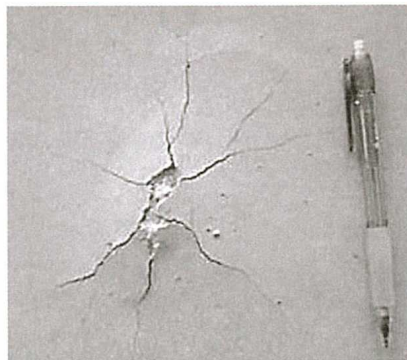
多すぎると膨張ひび割れも



膨張材が過剰に使用されると、膨張ひび割れが生じる場合がある（写真：右も日経アーキテクチャ）

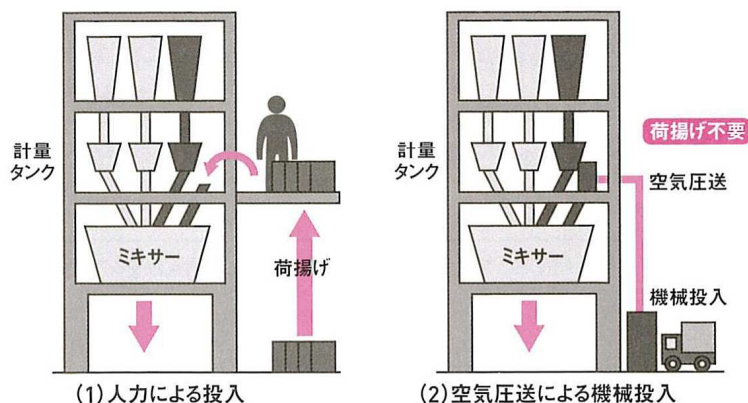
写真2

練り混ぜ不足もトラブルに



膨張材の練り混ぜ時の分散が不十分だと、躯体表面にポップアウトが生じることもある

図4 膨張材の投入方法は2種類



ミキサーに膨張材を人力で直接投入する人力投入法と、圧送装置を用いて送り込む圧送法のいずれかで製造する

（資料：日本建築学会「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する現状」をもとに日経アーキテクチャが作成）

原材料と異なり、膨張材を計量して自動投入する設備を生コン工場が備えていることはまだだ。代わって、**図4**のようにミキサーに膨張材を人力で直接投入するか（人力投入法）、外付けの圧送装置を用いて膨張材をミキサーに送り込む方法（圧送法）のいずれかで製造する。どちらを選ぶかは、施工者の判断であり、膨張材メーカー、生コン工場と事前によく相談して決定する。

人力投入法は、生コン工場のプラ

ント棟に専門の投入作業員を配置し、トランシーバーなどで生コン工場のオペレーターからタイミングの指示を受けながら、20kg詰めの紙袋を解体して膨張材をミキサーに落とし込むものだ。この方法には長い歴史があり、熟練の作業員が行うことからミスはほとんど起こらないと言われているが、投入のトレーサビリティが取れない点など、最近の生コン製造の技術水準からすると時代遅れの感は否めない。

一方、圧送法では、外付けの圧送装置をあらかじめ設置しておくことで、生コン工場のオペレーターがスイッチを自ら押して投入することができる。記録も残るので、投入のタイミングなどを間違うリスクも格段に少ない。従って、筆者は圧送法による膨張コンクリートを強く推奨している。しかし、膨張コンクリートの発注量が100m³/日にも満たない場合などは、圧送法を準備することは不経済で必ずしも現実的ではない。やむなく人力投入法を選ばざるを得ないケースも少なくない。

冬季の養生期間は十分確保

膨張材の投入管理が不適切だと、**写真1** **写真2** に示すような事故を引き起こす恐れがある。例えば、膨張材が過剰に使用されると異常膨張が起こり、**写真1**の膨張ひび割れが生じる。また、膨張材の練り混ぜ時の分散が不十分な場合には、**写真2**のように、打ち込み後の躯体表面にポップアウト（コンクリート表面が部分的に剥離する現象）が生じる例が報告されている。これらの例からも、投入管理の重要性が分かる。

2番目の留意点は、養生である。膨張コンクリートは、通常のコンクリートよりも養生条件に敏感であり、初期に湿潤養生を怠ると膨張が十分に生じない。床スラブの施工では特に養生が不十分になりやすい（**写真3** **写真4**）。膨張コンクリートを使用した場合には、散水など湿潤養生を徹底する必要がある。

3番目は、冬季における留意点で

ある。冬季低温時には膨張材の反応が遅れ、効果が十分に発揮されるまでに夏季よりも長い時間を要する。従って、養生期間も長くなると考えるべきで、安全をみて7日程度の養生を行うことが必要となる。

施工者側は膨張量の確認を

最後に、膨張コンクリートの性能に関する責任区分を 図5 に示す。一般的なコンクリートに要求される圧縮強度などの基本的な性能と品質については、生コン工場が保証すべきものである。

しかし、膨張コンクリートの重要な性能である膨張量については、JIS A 6202 レディミクストコンクリートには規定がない。従って、コンクリート工場ではなく、施工者側の責任範囲となる可能性がある。このことから、施工者は膨張量について何らかの確認を品質管理の一環として実施することが望ましい。

膨張量の確認には、日本コンクリート工学会の「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」(http://www.jci-net.or.jp/j/jci/study/jci_standard/JCIS-009-2012_v2.pdf) が参考になる。ここに示されている実験方法は比較的容易であり、工事管理にも利用できると思われる。

膨張材の採用が、現状では最も汎用的で効果的なひび割れ対策であることは明かだ。ここで述べたポイントを踏まえ、膨張材メーカーや生コン会社などと協議を重ね、ひび割れを抑制する効果を最大限に引き出してほしい。



写真3
床スラブの施工は特に注意
床スラブはひび割れ誘発目を施工できないため、ひび割れが生じやすい。膨張材を使うときにも、十分な配慮が必要だ
(写真：下も鹿島)



写真4
養生期間は十分に確保
床スラブを打設し終わったあとは、散水など湿潤養生を徹底する必要がある

図5 膨張コンクリートに関する責任区分

品質項目	責任区分	
	生コン工場	施工者
スランプ、空気量、 圧縮強度、塩化物含有量	○	—
膨張量	—	○

膨張量については JIS A6202 のレディミクストコンクリートに規定がないので、施工者の責任範囲となる可能性が高い。注意が必要だ

ここがポイント

膨張コンクリートの膨張量は 200 μ程度。
コンクリートの乾燥収縮率の 4 分の 1 程度である

性能確保は、施工者の責任範囲となる可能性がある。
管理試験で膨張量を確認することが望ましい

高コストでも効果大 収縮低減剤を利用

➡ 水分が逸散しても収縮を抑制する働き

膨張材と同様に、収縮低減剤もコンクリートのひび割れを抑制する働きを持つ。

しかし、働きのメカニズムや使い方はまったく違う。

両方の違いを知って、賢く使い分けたい。

ここ数年、ひび割れを抑制するために収縮低減剤が使用されるケースが増えている。液体の薬剤である収縮低減剤は、膨張材に比べ少量で効果を発揮する。ここでは、収縮低減剤を用いたコンクリート（収縮低減コンクリート）のひび割れ抑制のメカニズムと、効果や留意点などについて説

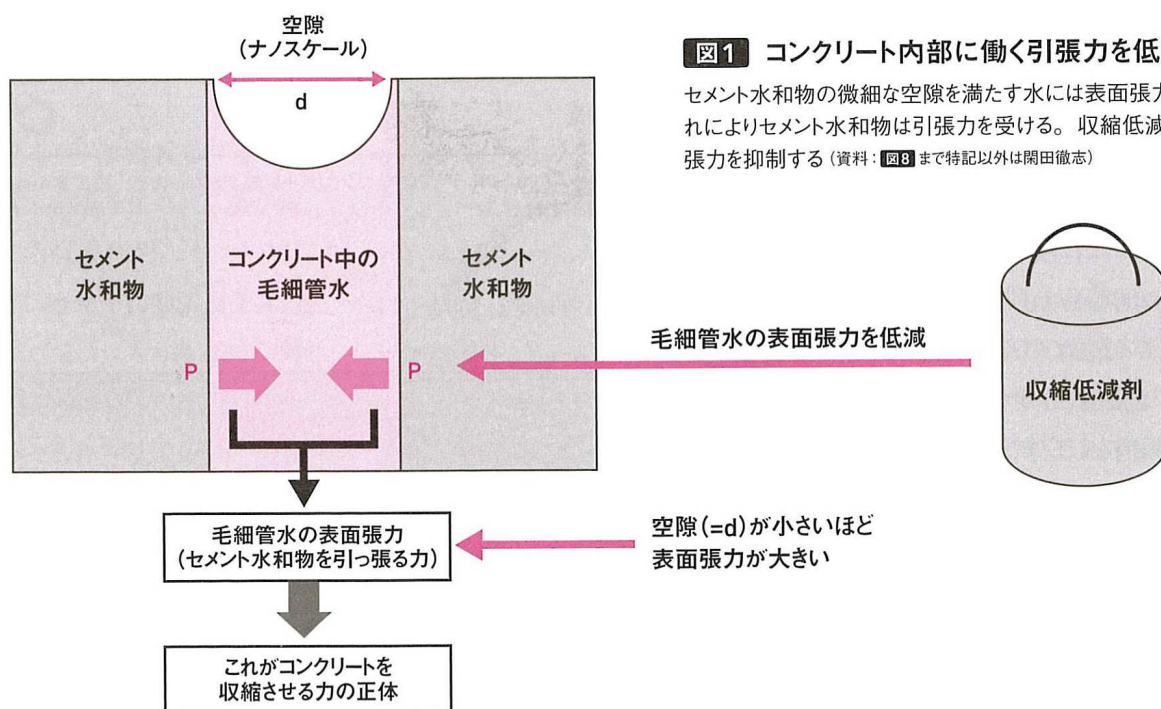
明する。

膨張材と異なるメカニズム

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート中の水分が逸散することで生じるが、収縮低減剤には水分が逸散しても、それに伴う収縮を抑制する働き

がある。そのメカニズムについてはよく分かっていない点もあるが、一般には図1のように解釈されることが多い。

水とセメントの化学反応によって生成されるセメント水和物には、ナノスケールの微細な空隙が数多く分布し、養生中はその空隙に水が満たされている。これを毛細管水という。



【図2】 目的は同じでも添加方法などに大きな違い

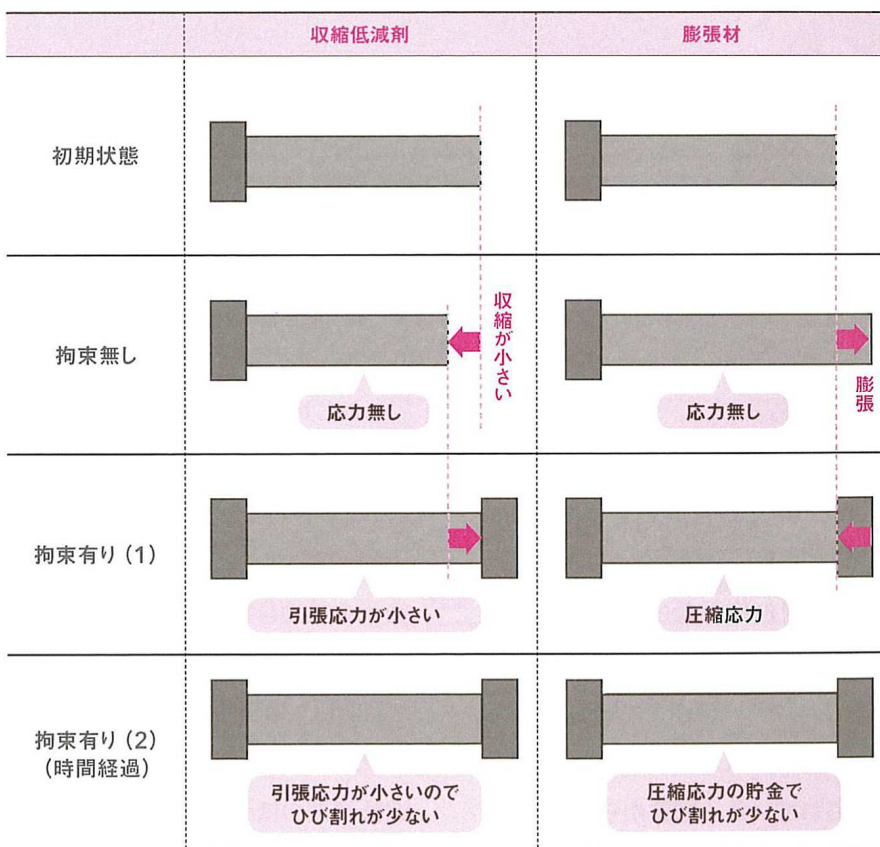
項目	混和材料	
	収縮低減剤	膨張材
荷姿	液体	紛体
コンクリートへの添加	主として生コン車へ現場で後添加	生コン工場での練り混ぜ時に添加する
ひび割れ低減のメカニズム	乾燥収縮を低減	硬化初期に膨張して圧縮応力を付与することでその後の乾燥収縮を緩和
ひび割れ低減の効果	収縮低減剤の使用量を増やせるので、乾燥収縮率の大きなベース生コンでも有効	膨張材の使用量を換えられないので、乾燥収縮率の大きなベース生コンでは効果が小さい
生コン材料単価の増加割合	20～50%	10～20%
材料規格	JIS規格は無く、JASS5の独自規格であるJASS5 M-402がある	JIS A 6204
混和材料を使った生コンの法規上の取り扱い	生コン JIS A 5308 に適合しているとの解釈が可能	生コン JIS A 5308 に適合しているとの解釈が一般的

収縮低減剤と膨張材は、ともにひび割れを抑制するのが目的だが、メカニズムや添加方法などは大きく異なる。収縮低減剤は、添加量を増やすことができる

乾燥が始まると、大きな空隙から順に毛細管水が蒸発し、小さな空隙にだけ水分が残る。このとき、水には表面張力という内側に引き込む力が作用する。コンクリート中では、毛細管水が存在する空隙の直径が小さいほど、表面張力が大きくなる性質がある。つまり、小さな空隙ほど周囲のセメント水和物を引っ張る力が大きく働く。このセメント水和物を引っ張る力こそ、コンクリートを収縮させる力の正体だ。

収縮低減剤には、毛細管水に作用する表面張力を小さくする働きがある。その働きによって、コンクリートの収縮を抑制し、ひび割れ発生を緩和する。

【図3】 ひび割れ抑制のメカニズムも異なる



収縮低減剤と膨張材の比較

次に前述した膨張材と収縮低減剤を比較する(【図2】)。

まず、収縮低減剤は液体であるが、膨張材は紛体である。また、どちらも

ひび割れ低減という同じ目的で用いる混和材料であるが、メカニズムは大きく異なる(【図3】)。膨張材を使ったコンクリート(膨張コンクリート)は、初期膨

張によって圧縮応力を発生させ、その後の収縮による引張応力を緩和する。一方、収縮低減コンクリートは、収縮自体を小さくすることで引張応力

図4

使用量を増やすほど 乾燥収縮率が小さくなる

収縮低減剤の添加量を増やすほど、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる
(資料：図6まで日本建築学会「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」をもとに本誌が作成)

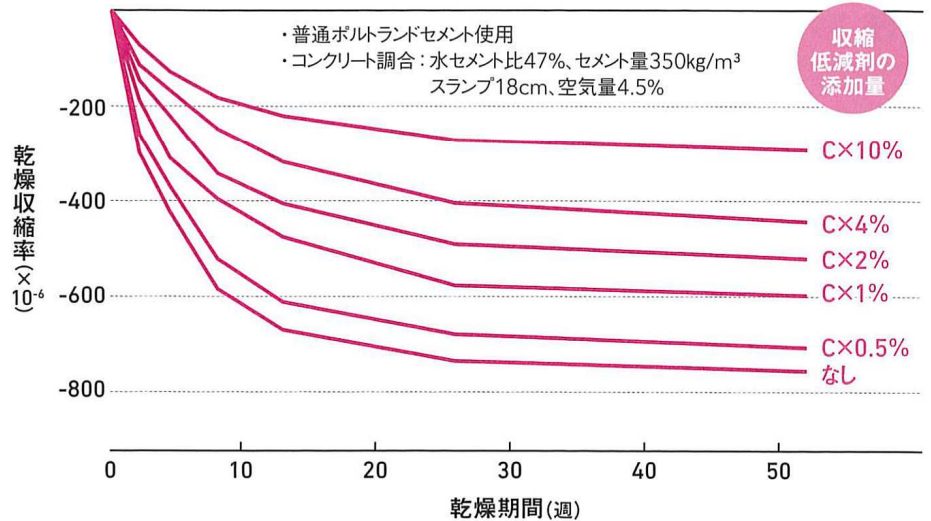
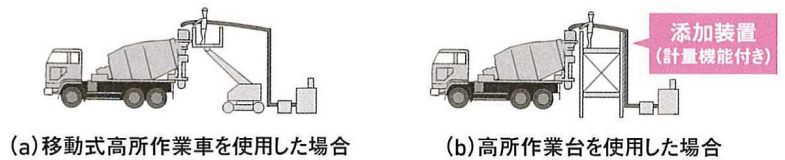


図5

ミキサー車に直接投入するのが主流

収縮低減剤の添加方法には、生コン工場で添加する直接混練法とミキサー車に投入する後添加法とがある。実務では後添加法を用いることが多く、高所作業車や作業台から投入する



1

直接混練法

収縮低減剤投入

生コンプラントでコンクリートを通常通り練り混ぜ

アジテート

運搬

荷卸し

打設

2

後添加法

ベースコンクリート製造

アジテート

運搬

トラックアジテータに収縮低減剤添加後、かくはん

荷卸し

打設

を抑制する。

収縮低減剤の特徴は、ベースとなるコンクリートの乾燥収縮率が高いときほど効果を発揮する点にある。収縮低減剤の使用量は、単位セメント量に対する質量の比率で表す。通常は1～2%の範囲で用いるが、5%程度まで増やしても実用上は問題ないとされている。図4から分かるように、使用量が増えるほど乾燥収縮率は小さくなる。

この特性を踏まえ、ベースコンクリートの乾燥収縮率と最終目標とする乾燥収縮率の値から、収縮低減剤の使用量を決定できる。

これに対し、膨張材は使用量が決まっており、原則として勝手に増やすことができないため、乾燥収縮率が高いベースコンクリートでは十分な効果を発揮しにくい。この点では収縮低減剤の採用が有利となる。

しかし、経済性の面では、同レベルの効果をj得るための材料単価は収縮低減剤のほうがやや高い。特に使用量を増やすと、コストの負担も大きくなる。例えば、使用量5%の場合、生コンの材料単価は一般的なコンクリートの約1.5倍になることもある。効果と経済性とのバランスを考えて判断したい。

収縮低減剤の使用方j法

膨張材は紛体であるため分散が難しく、生コン工場での練り混ぜ時に添加するのが鉄則である。投入管理が不適切だとトラブルを生むリスクもある。

その点、収縮低減剤は液体のため分散が容易で、図5に示すように生コン工場で添加する方法(直接混練法)もあるし、ミキサー車に直接投入する方法(後添加法)もある。

実務で用いることが多いのは後添加法だ。この場合、収縮低減剤を図5のように高所作業車や作業台から直接ミキサー車に投入し、高速で

図6 アルコール系の寒冷地での使用は避ける方が安全

タイプ	メーカー名	商品名	標準使用量	
			C×%	kg/m ³
アルコール系	太平洋マテリアル	テトラガード AS20	0.5 ～ 2.0	7.5 ～ 10.5
		テトラガード AS21	—	6 ～ 9
		テトラガード PW（粉体）	1 ～ 3	—
	電気化学工業	エスケーガード	1 ～ 4	3 ～ 12
	フローリック	チヂミガード	—	2 ～ 12
		ヒビガード	1 ～ 4	—
	竹本油脂	ヒビダン	2 ～ 6	—
		ヒビダン B	0.5 ～ 10	—
	日本シーカ	コントロール	—	1 ～ 8
	花王	SR-1000	—	0.5 ～ 3
	ライオン	レオソルブ 703B	0.6 ～ 1.8	2 ～ 6
	ADEKA	セムサーフ DSR-350	1 ～ 5	—
	グレースケミカルズ	e-SRA	1 ～ 3	—
	日油	シュドックス DSP-E40	2 ～ 6	—
		シュドックス DSP-E60	2 ～ 6	—
鉱物油系	フローリック	シュリンクガード	—	2 ～ 12
保水系	日本触媒	アクアガード	—	10 ～ 30

表中のアルコール系は、コンクリートの収縮を抑制する効果が高いが、耐凍害性能を低下させるので寒冷地での利用は避けた方が安全だ

かくはんした後に荷卸して施工する。高速かくはんの時間は一般に2分前後である。

入手可能な収縮低減剤の製品名とメーカー名を図6に、使用上の留意点を図7にまとめた。多くの製品がアルコール系と呼ばれるカテゴリーに属し、前述の表面張力を抑制する働きが強い。

ただし、アルコール系には弱点があり、耐凍害性を著しく低下させる場合がある。このため、北海道など寒冷地ではアルコール系を使用しないことが原則で、図6の鉱物油系、保水系を選定する。

図7

圧縮強度は最大で10%程度低下する

コンクリート中の空気量が安定しないので、AE剤で頻繁に空気量を調整する。また、圧縮強度が最大で10%程度低下するので、水セメント比を通常より低めに設定する

強度低下にも要注意

このほか、収縮低減剤を用いるときの留意点として、空気量のばらつきと強度低下がある。

収縮低減コンクリートの空気量が安

性能	注意点
耐久性	アルコール系の場合、凍結融解抵抗性が低いものがあり、寒冷地での使用は原則として避ける方が安全
フレッシュ性能	空気量が不安定となる場合がある
圧縮強度	10%程度の強度低下が生じる場合がある

定しないのは、収縮低減剤が空気量を変動させる性質を持っていることに起因する。従って、出荷時の空気量をチェックしたうえで、頻繁にAE剤による空気量調整をするように生コン工場へ依頼するほうが安全である。



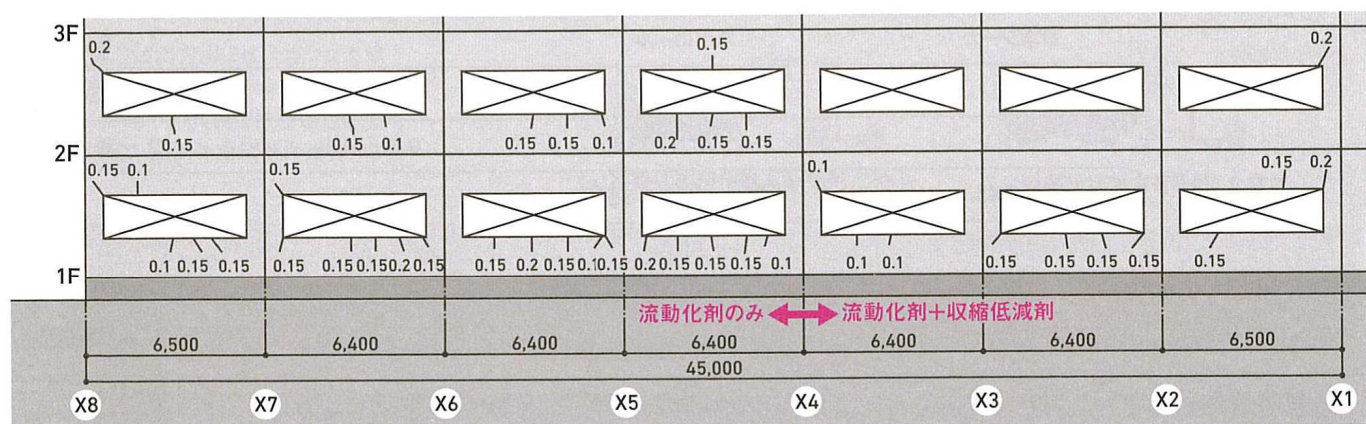
写真1

仕上げ材との接着性に注意

床スラブの使用時にブリーディングが多い場合、仕上げ材との接着性に注意する（写真：鹿島）

図8 収縮低減剤を使用した領域ではひび割れが少ない

収縮低減剤を使わない領域（左側）より、使った領域（右側）のほうが、ひび割れが少ないことが分かる
（資料：日本建築学会「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」をもとに日経アーキテクチャが作成）



また、圧縮強度については最大で10%程度低下することが知られている。調査を決める際には必ず試し練りを行い、同じ呼び強度の普通コンクリートよりも水セメント比を若干低め（例えば、3%程度低め）に設定することを推奨する。

施工における留意点にも触れておきたい。床スラブに収縮低減コンクリートを用いる際には、通常と同様の施工（写真1）と養生でよいが、ブリーディングが多いときには、収縮低減剤が水分と一緒に床スラブ表面に湧出する場合がある。このとき、床スラブ表面に収縮低減剤の成分が残るので、その上に仕上げを施す仕様では、仕上げ材との接着を阻害して剥

離などを引き起こすことがある。仕上げがあるときは、接着性を実際のスラブで事前に確認したい。

最後に、収縮低減剤を使用したときの効果を示す（図8）。この図は開口付の外壁について、収縮低減剤を使用した領域と使用しない領域に分け、ひび割れ発生状況を調べたもの

だ。全体的に拘束が強い1階でのひび割れ発生量が多いが、1階、2階ともに収縮低減剤を使用した領域のほうがひび割れが減少している。ただし、収縮低減剤を使用してもひび割れがなくなるわけではなく、発生量を抑制するにすぎない。これは、前述した膨張材と同様である。

ここがポイント

収縮低減剤には、水分が逸散しても
コンクリートの収縮を抑制する働きがある

使用時には、空気量のばらつきと
強度低下に注意を払う必要がある

目地なしでもひび割れなし 無収縮コンクリートの威力

➡ 長期にわたって圧縮応力が残存

ひび割れの発生を極限まで抑えたい。そんなニーズに応えてくれるのが無収縮コンクリートだ。
目地を打たなくても、有害なひび割れをほとんど抑制できる。
そのメカニズムから導入方法まで幅広く解説する。

ひび割れを抑制する切り札として無収縮コンクリートが最近の研究により開発され、実際の建築物に採用されている。ここでは、現状では最もひび割れ抑制効果が高い無収縮コン

クリートに焦点を当てる。

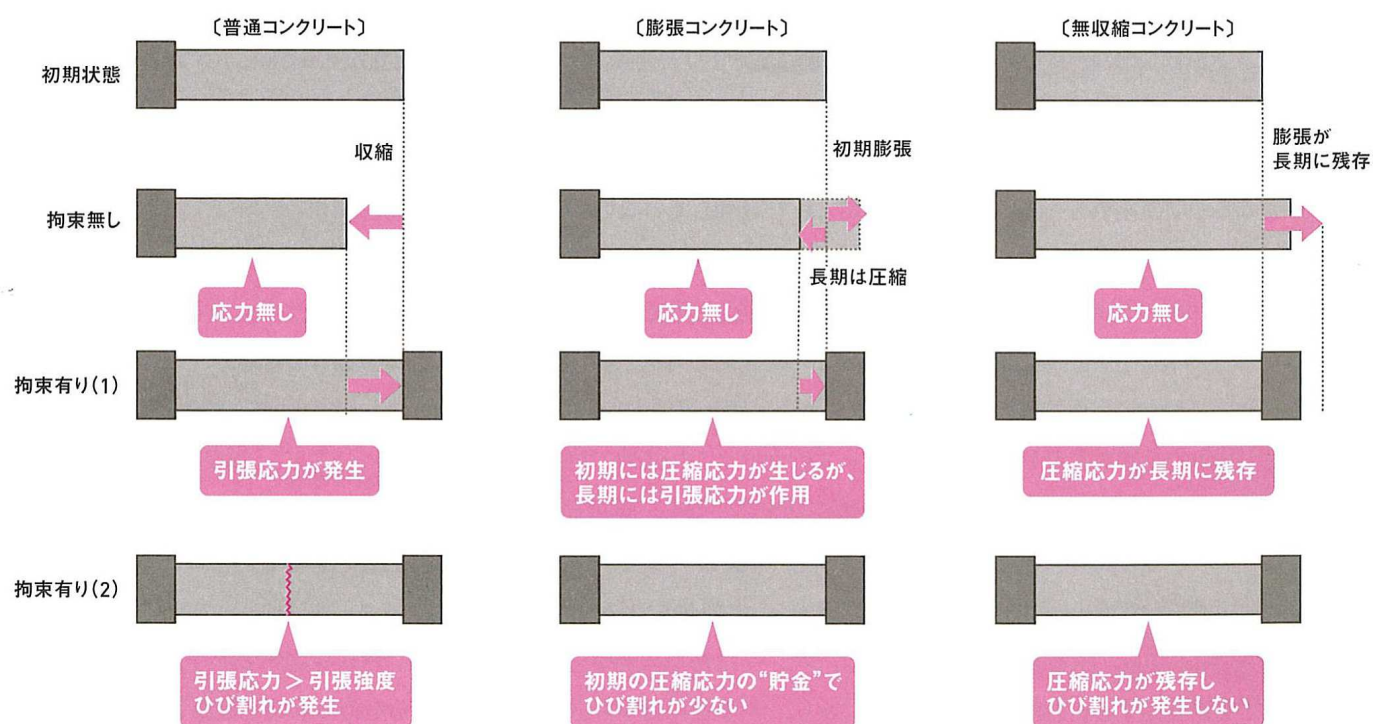
従来技術とはここが違う

無収縮コンクリートは、前に説明し

た膨張コンクリートの性能を高めたもので、膨張材の利用が前提となる。

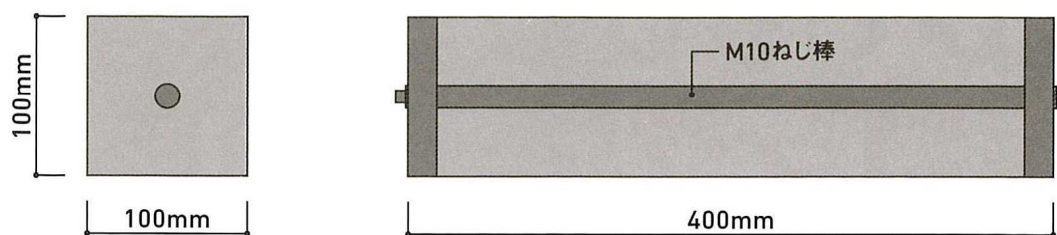
図1で無収縮コンクリートのひび割れ低減効果を、普通コンクリートや膨張コンクリートと比べた。普通コンク

図1 無収縮コンクリートは圧縮応力が残存する



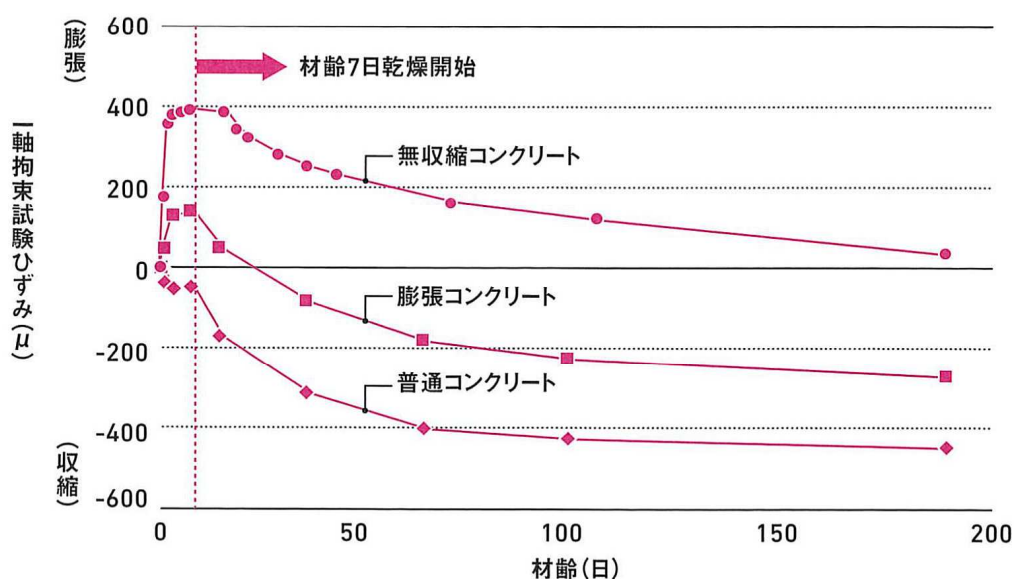
無収縮コンクリートは、初期の膨張による圧縮応力が大きいうえ、その後の収縮が小さい。圧縮応力が長期にわたって残存するのが特徴だ
(資料: 図8まで特記以外は関田徹志)

【図2】 コンクリートの膨張量を測定（一軸拘束試験）



この試験は、膨張材を使用したときのコンクリートの膨張量を測定するもの。JIS規格（JIS A 6202）に沿って実施する試験だ

【図3】 半年経過しても膨張ひずみが残存



無収縮コンクリートは、初期の膨張ひずみが400μ程度と大きい。さらに、半年経過した段階でも膨張ひずみが残存している。ひずみ特性は、ほかのコンクリートと大きく異なる

リートでは大きな収縮が発生するが、外部の拘束によって収縮が妨げられることで引張応力が生じ、引張強度を超えたところでひび割れが発生する。膨張コンクリートは、硬化の初期段階に膨張し、外部の拘束によって圧縮応力が発生する。初期の圧縮応力の「貯金」によって、その後の収縮による引張応力を緩和しひび割れ発生を抑制する。

無収縮コンクリートは初期の膨張による圧縮応力が大きいうえ、その後の収縮が小さいことから、圧縮応力が長期にわたって残存する。このため、引張応力がほとんど発生せず、ひび割れの発生リスクを非常に小さくできる。

無収縮コンクリートの定義

無収縮コンクリートはまだ一般的な名称として定着していないが、筆者は以下のように定義している。

【図2】は、膨張材を使用したときのコンクリートの膨張量を測定する試験だ（一軸拘束試験）。JIS規格（JIS A 6202）に沿って行うが、この試験で約半年の乾燥期間を経た後も、膨張ひずみが残るものを無収縮コンクリートと呼ぶ。

【図3】に試験結果の例を示す。普通コンクリートは初期段階から収縮領域にあり、半年後には400μを超える大きな収縮ひずみを示す。これに対し、膨張コンクリートでは初期に200

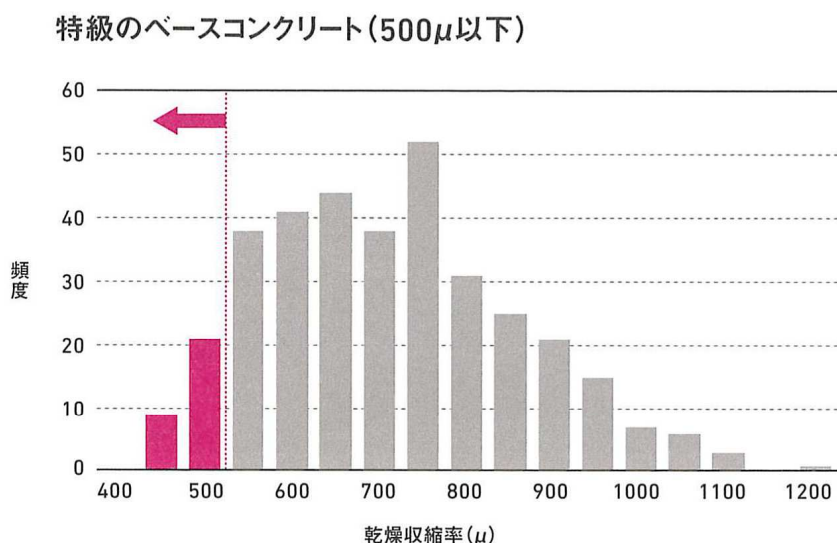
μ程度の膨張を示すが、数週間後に収縮が始まり、最終的には250μ程度の収縮ひずみを記録する。一方、無収縮コンクリートでは、初期の膨張ひずみが400μ程度と大きく、その後の収縮が小さいので、最終ひずみが膨張側にとどまっている。無収縮コンクリートのひずみ挙動は、ほかのコンクリートと大きく異なることが分かる。

特級仕様の生コンを採用

次に、無収縮コンクリートを実現するための手順を【図4】に示す。

第1のステップは、生コンの乾燥収縮率を調べ、500μ以下の特級仕

図4 無収縮コンクリートの必須条件



1

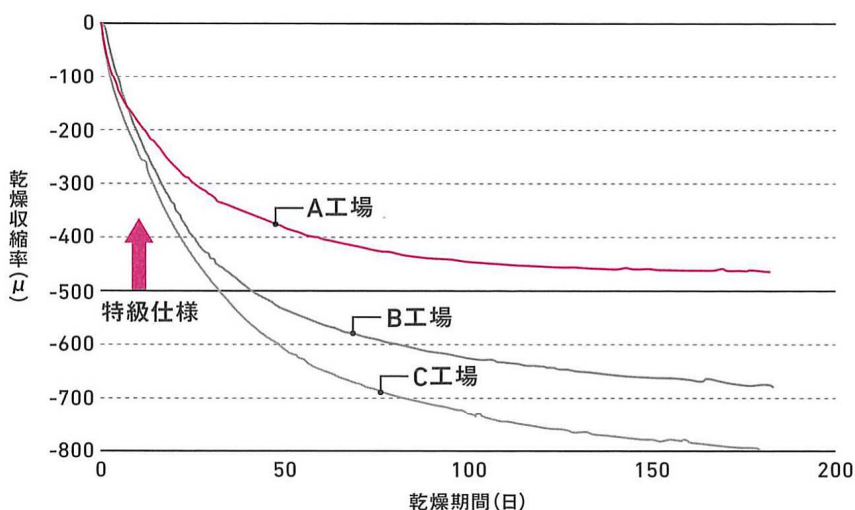
事前の調査などにより、ベースとなるコンクリートの乾燥収縮率を特級レベル(500 μ 以下)に抑制する

2

膨張材に加え、セメントに中庸熱または低熱ポルトランドセメントを採用するか、もしくは収縮低減剤を採用する

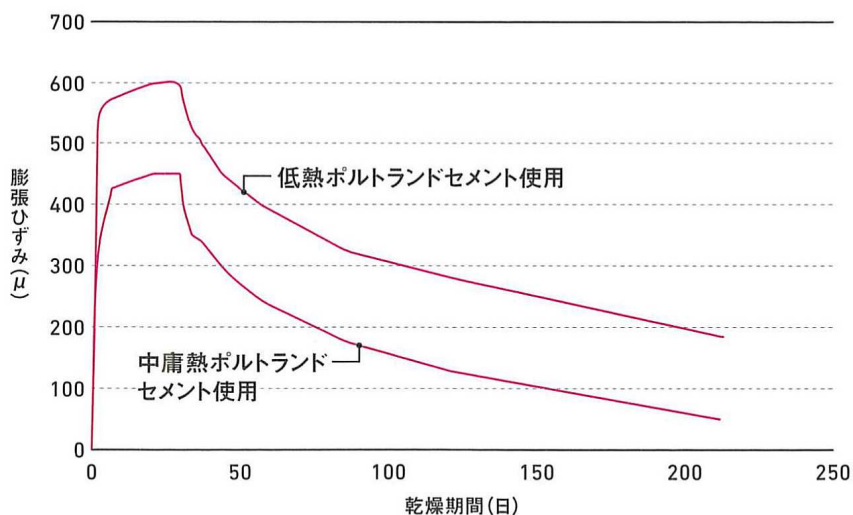
無収縮コンクリートを施工するには、特級仕様の生コンが必須。乾燥収縮率が500 μ 以下のものを選択する。左のグラフは、全国各地の生コン工場を対象に調べた乾燥収縮率の分布

図5 導入前に実験によって生コンの収縮ひずみを確認



生コンの乾燥収縮率を調べるため、A、B、Cの3工場を対象として乾燥収縮試験を実施。A工場が特級仕様のコンクリートを供給できると分かり、同工場の生コンの採用を決めた

図6 低熱ポルトランドセメントの残存膨張ひずみが大きい



A工場でセメントの種類別に残存膨張ひずみを測定した。その結果、低熱系の2つのセメントのうち、中庸熱より低熱ポルトランドセメントのほうが、残存膨張ひずみが大きいことが分かった



写真1 ひび割れリスクがある建築物に導入

7種類のサイズを持つボツ窓が、ランダムに配置された建築物。開口の隅角部からのひび割れや漏水が懸念されるので、無収縮コンクリートを採用した。竣工後6年経ても有害なひび割れがない(写真:日経アーキテクチャ)



写真2 大面積の妻壁を目地なしで施工

鹿島技術研究所の妻壁には、無収縮コンクリートを採用している。これほどの大面積で、目地なしのコンクリートを打設することは通常ありえない。無収縮コンクリートだから実現できた事例だ(写真:鹿島)



写真3 ひび割れリスクのあるデッキ床スラブに導入

鉄骨造の駐車場のデッキ床スラブに無収縮コンクリートを導入した。一般に、デッキ床スラブは鉛直力による曲げ応力によって、ひび割れが発生しやすい。無収縮コンクリートは、こうしたリスクが高い場所で効果的に使いたい(写真:鹿島)

様を選ぶことだ。生コンの乾燥収縮率は地域により大きく違うので、特級仕様の生コンをどの工事でも必ず調達できるわけではないが、例えば東京地区では入手できる可能性が高い。第2のステップは、膨張材に加えて、低熱系セメント(中庸熱もしくは低熱ポルトランドセメント)か収縮低減剤のどちらかを採用することだ。

図5 は、無収縮コンクリートの導入に当たり、生コンの乾燥収縮率を調

べるため、A、B、Cの3工場を対象に実施した乾燥収縮試験の結果である。工場間の乾燥収縮ひずみの差は大きく、最大のC工場と最小のA工場では300 μ 以上の差があった。A工場が特級仕様のコンクリートを供給できると分かり、採用を決定した。

図6 は、そのA工場で調合した無収縮コンクリートの試験結果である。工場内で試し練りをして、どの程度の残存膨張ひずみが期待できるか調

べたものだ。低熱系の2つのセメントのうち、中庸熱より低熱ポルトランドセメントのほうが残存する膨張ひずみが大きい。ただし、低熱セメントは気温が低くなる秋以降には適していないうえ、中庸熱よりコストが高い。

実プロジェクトで効果を実証

膨張材と低熱系セメントの無収縮コンクリートを実際の建物に適用した当

図7

床スラブのひずみを計測

デッキ床スラブのコンクリートのひずみを実測した。一般に、床スラブは梁際とスパン中央でひび割れが発生しやすい。こうしたポイントに計測点を置いた

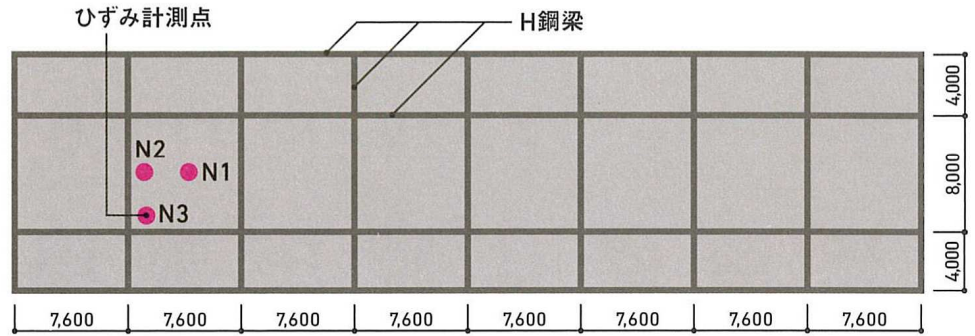
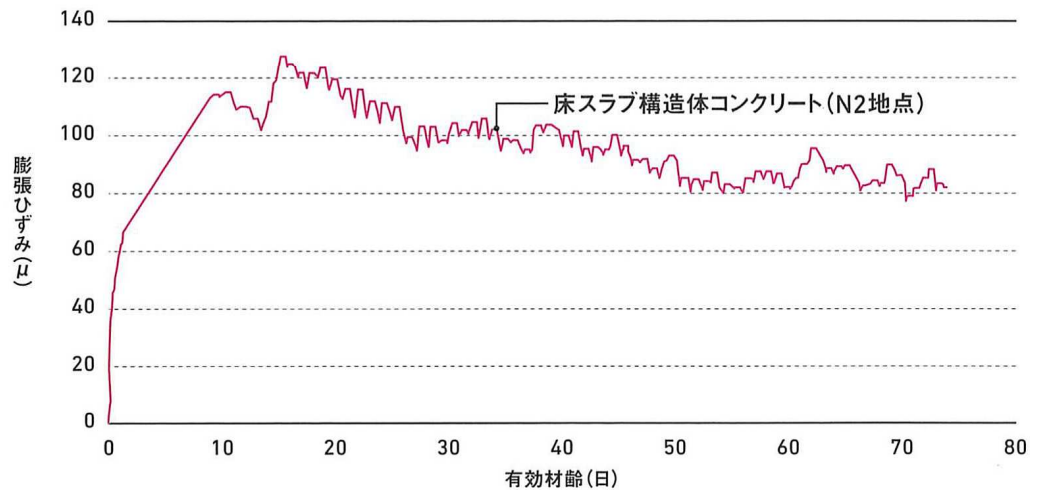


図8

2カ月以上経過しても膨張ひずみが残存

膨張ひずみの推移。硬化初期に120 μ の膨張ひずみが計測され、その後80 μ 程度まで減少しているが、2カ月以上経過しても安定的に推移している



社の施工例を紹介する。

写真1 は煙突状の外殻壁式免震建物で、外壁にはランダムに窓を多数配置している。計画段階で、ランダムに配置された開口の隅角部からのひび割れや漏水の発生が懸念された。そこで無収縮コンクリートを導入した結果、竣工後6年を経ても建物に有害なひび割れは観察されず良好な状態を保っている。

写真2 は、当社の技術研究所に導入した例である。大面積（20×30m）の妻壁（耐震壁）に無収縮コンクリートを導入した。フラットな平面外装を実現するため、目地なしで施工している。このような大面積の外壁をひび割れ誘発目地なしで施工することは一般にはありえない。無収縮コンクリートだ

からこそ実現できた例だ。

次に、膨張材と収縮低減剤を併用した無収縮コンクリートの適用例を**写真3**に示した。この工事では、鉄骨造の駐車場建物のデッキ床スラブに無収縮コンクリートを採用した（**図7**）。床スラブの構造体コンクリートのひずみを実測したところ、硬化初期に120 μ の膨張ひずみが計測され、その後80 μ 程度まで減少しているが、安定

的に推移している（**図8**）。竣工して3年後でもほとんどひび割れが発生していない。

無収縮コンクリートは、材料供給上の制限やコスト面の課題（材料単価は、普通コンクリートの約4割増）があり、ひび割れが完全になくなる保証はないが、抑制効果は顕著だ。ひび割れリスクが懸念される建物には有効な解決策になる。

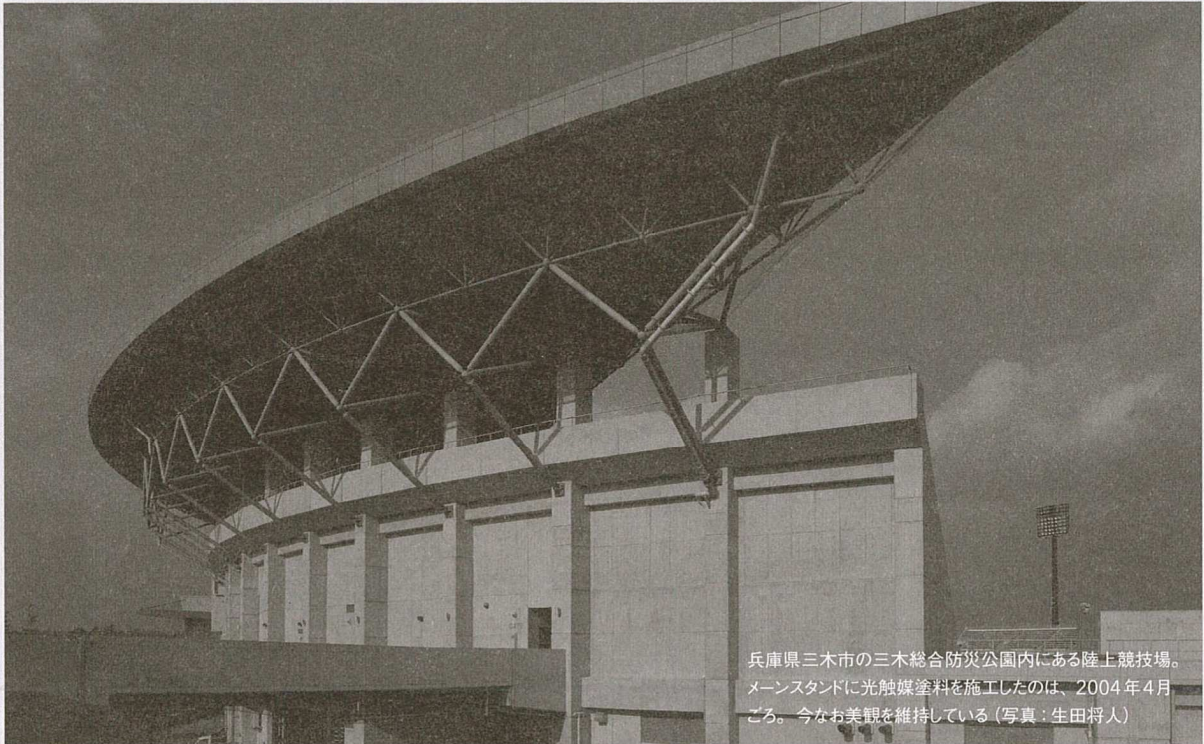
ここがポイント

圧縮応力が長期にわたって残存するので、
ひび割れ発生リスクが非常に小さい

厳格な品質管理が求められるが、ひび割れリスクが
懸念される建物では有効な解決策になる

コンクリートこぼれ話 ④

光触媒は膜圧管理が重要



兵庫県三木市の三木総合防災公園内にある陸上競技場。メインスタンドに光触媒塗料を施工したのは、2004年4月ごろ。今なお美観を維持している（写真：生田将人）

今 なお意匠設計者の間で根強い人気があるコンクリートの打ち放し。しかし、安易に導入すると耐久性や美観が短期間で損なわれ、建築主からクレームを受けることになりかねません。特に気になるのが汚れ。アクリルやウレタンなどの塗料をクリア仕上げで塗装すると、完成後2、3年で汚れが目立ち始めます。

そこで、長期の美観維持を目的として、光触媒塗料が採用されることがあります。特徴は、セルフクリーニング機能を備えていること。紫外線を当てるだけで、有機物（汚れ）を分解します。その効果のほどは、兵庫県三木市にある三木総合防災公園内の陸上競技場で垣間見ることができます（写真上）。

塗料を施工したのは2004年4月。既に10年以上経過していますが、今なお美観を保っています。公園内で同時期に施工した別区画の打ち放しは、雨水のくさび状の汚れが目立ちます（写真右）。両方を比べると、光触媒塗料の効果を実感できます。

ただし、光触媒塗料を導入した建物がすべて美観を維持しているわけではありません。なかには、効果が現れていない建物も少なくありません。主な理由は膜圧管理の難しさにあります。光触媒塗料の塗膜の厚さは、通常1ミクロン以下。普通の塗料は10～20ミクロンですから、それと比べると相当な薄さです。塗り過ぎると白濁やチョーキングが生じるし、逆に不足すると汚れが目立ちます。

三木陸上競技場では、光触媒塗料メーカーのピアレックス・テクノロジーズが直接施工を担当しました。当時は厳格な膜圧管理ができる専門工事がまだ少なかったため、慎重を期して塗料メーカーが直接施工したそうです。これほど大規模な打ち放しが美観を保っているのは壮観です。

（文責＝日経アーキテクチャ編集）



対談

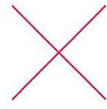
厳しい目向ける発注者 専門家は十分な説明を



閑田徹志氏

鹿島技術研究所
建築生産グループ長

対談



金箱温春氏

構造設計家



(写真：安川千秋)

精緻な予測と丁寧な説明で 発注者との認識ギャップ解消

➡ 定量的なアプローチでひび割れを制御する時代に

現在の技術水準で、ひび割れをどこまで制御できるのか。

発注者との認識ギャップを埋めるには、何が必要なのか。

構造設計の第一人者である金箱温春氏を招き、本書著者の閑田氏が話し合った。

金箱 閑田さんが日経アーキテクチュア誌上で連載されていた「ひび割れトラブル完全克服法」を、毎号興味深く拝見させてもらいました。

閑田 ありがとうございます。

金箱 私はもう40年近く、構造設計に携わっていますが、正直言って、いまだにひび割れがよく分かりません。私だけではなく、多くの構造設計者がそうだと思うのです。少し言い方は良くないかもしれませんが、もう諦めの心境に近かった(笑)。設計や品質管理に気を配り、最大限の努力をしているのに毎回結果が違ふ。そうすると、もうひび割れは仕方がないといった心境になるのです。

閑田 よく分かります。

金箱 連載を読んで、ひび割れに対する認識がずいぶん変わりました。毎号ポイントを絞って、ひび割れの原因やメカニズムを明快に説明したうえで、解決策がきちんと提示されている。しかも、われわれ構造設計者が納得しやすいような、定量的なアプローチで説明されていました。

閑田 この連載を始めたきっかけも、まさにその点にありました。これまでのひび割れ対策は「こうするとうまくいく」「あんな施工をしたら失敗する」といった定性的な話が多かったと思います。そうではなく、構造設計と同じようにきちんと数値に基いて計算し、定量的に分析したいと考えたのです。数値でみていくと、何が大事なことが自然と見えてくるし、適切な対策も分かってきます。

こうしたアプローチが可能になったのも、ここ10年くらいの間に、ひび割

れ制御に関する性能設計の手法がしっかりと確立されてきたからです。材料の分野では「制御設計」という言葉をよく使うのですが、この分野の知見が相当蓄積され、現象と理論の整合性がかなりとれてきた。こうした制御設計の成果を紹介することも、連載の1つの目的でした。

金箱 なるほど。その制御設計という言葉が広く定着するといいですね。

生コンの収縮率に注目

金箱 さっそくですが、連載のなかで、私からみて重要と思われるポイントをリストアップしてみました(図1)。

最も大きなインパクトを受けたのは、生コンクリートの乾燥収縮率の問題です。これは非常に新鮮でした。なぜなら、ひび割れを抑制するには、単位水量の低減が一番効果的だと思っていたからです。ところが、解説によると、生コン会社によって乾燥収縮率が大きく異なり、これがひび割れ発生のリスクを大きく左右するとあります。

これほど生コンの乾燥収縮率が違うとすれば、本来は仕様書のなかで、きちんと指定すべきですね。ところが、現状ではそうなっていません。

閑田 確かに、一般の設計仕様書で明示することはほとんどありません。しかし、建築学会の指針レベルでは仕様書での明示を視野に入れた記述を既にしています。

金箱 これは、なるべく早い時期に仕様書でも指定するのが望ましいと思うのですが、何か支障があるのではし

うか。

閑田 問題の1つとして、乾燥収縮率を仕様書で明示したとき、その値を工事で実現できるか懸念される点があります。また、生コンの乾燥収縮率のデータが必ず既にあるわけではなく、工事に着手してから試験しては間に合いません。

しかし、実はここ5年くらいの間に、建設会社の間でも乾燥収縮率に対する問題意識が高まり、生コンの品質に厳しい目を向けるようになりました。こうした動きを踏まえ、生コン会社も乾燥収縮率のデータを公開するところが増えていきます。

構造設計者や施工者が黙っているとデータは出てきませんが、きちんと問い合わせをすれば、生コン会社からデータが出てくるケースが多いと思います。

金箱 生コンの乾燥収縮率を左右する要因として、骨材の収縮を挙げていましたね。単位水量よりも生コンの骨材にもっと目を向けるべきだということですか。

閑田 ここは非常に重要な点ですから、詳しくご説明します。

単位水量が重要であることは、今も昔も変わりません。特に、かつて砂利を使っていた時代は、単位水量を指標とすることに大きな意味がありました。どこの砂利を使っても、乾燥収縮率の違いがほとんどなかったからです。今でも、生コンの材料をすべてフィックスして実験すると、単位水量の増減がひび割れ発生の度合いに直結します。

しかし、現在の材料は砂利ではな

床スラブの対処法

金箱 もう一つ、驚いたことがあります。連載のなかで「床スラブのひび割れを防ぐのは不可能に近い」とズバリ指摘されている。これには驚きました。随分大胆なことを書かれているなと。その一方で、正直それを読んでホッとした面もあります。

これまで、新築建物の工事監理をするときには、施工者に「散水養生を徹底してください」ときめ細かく指示を出してきました。しかし、細心の注意を払っても、床スラブのひび割れがなかなか減らない。私は古い建物の耐震診断をすることも多いのですが、どの建物を見ても、床スラブはひび割れだらけです。なぜ、床スラブのひび割れがこれほど多いのか、ずっと疑問に感じていました。

関田 床スラブのひび割れについては、ここ10年ほどの実験や解析で、定量的な把握が進んでいます。

現在の標準的な仕様で床スラブを施工しますと、積載荷重がかからない状態でも、ほとんどの場合、コンクリートの引張応力がひび割れ強度を超えてしまいます。つまり、普通に施工してもひび割れが入ってしまうわけです。積載荷重が加わる状況では、ほとんど防ぎようがありません。

発注者の方から見ると、床にひび割れが入るとやはり不安になるでしょうし、実際にお叱りを受けることもあります。しかし、これは正直に説明したほうが良いと思うのです。申し訳ありませんが、床スラブのひび割れは、ある程度避けられません。現状では

金箱温春

かねばこよしはる

建築構造家。金箱構造設計事務所代表。工学院大学特別選任教授。東京工業大学連携教授。1953年、長野県生まれ。東京工業大学大学院修了。横山建築構造設計事務所を経て92年に独立。2011年～2015年6月まで日本建築構造技術者協会会長を務める。原広司、安藤忠雄、青木淳など多くの建築家の構造設計を手掛ける



ゼロに抑えるのは難しいですよ。

金箱 その際、ひび割れをどのくらいのレベルに抑えるか、目安を示す必要がありますね。

関田 おっしゃる通りです。結論から先に言いますと、床スラブについては、ひび割れの発生本数にはある程度目をつぶる。しかし、ひび割れ幅については一定値以下に収める。そういう考え方で対処するしかないと考えています。

実は、ひび割れがどこまで許されるかという問題について、建築基準法には具体的な規定がありません。規定を設けているのは品確法だけで、そこにはひび割れ幅が0.5mm以上であれば瑕疵の可能性が高いと示され

ています。ひび割れ幅を制御するには、鉄筋比を確保することが最も効果的です。例えば、0.4%の鉄筋比を確保すれば、ひび割れ幅が0.5mmを超えることは少ないです。

発注者には床スラブの特性を説明したうえで、「ひび割れ幅を規定値以下に抑える努力をします」とはっきり伝える。そういう説明をすれば、大きな問題になることは少ないと思います。

夏季の施工はハイリスク

金箱 次にお尋ねしたいのが、季節的な温度変化によるひび割れの発生です。これも私は誤解していました。

温度ひび割れと言ったら、最初に

1

生コンクリートの収縮率の重要性

従来の常識では、製造に関しては単位水量の減少が重要と認識していた。骨材の収縮率は、どの程度影響するのか。また、生コンクリートの収縮率を仕様書で規定できるか？

2

床スラブのひび割れ防止はほぼ不可能

乾燥収縮による引張応力を算定すると、ほぼひび割れは不可避であるとのことだが、それを抑制するには、どのような対策が考えられるのか？

3

ひび割れの幅や本数は、事前に予測可能

ひび割れの発生確率や、幅や本数などを、計算式などによって事前に予測ができるとのことだが、精度はどの程度か。また、予測結果をどのように活用できるか。

4

温度変化とひび割れの関係

マスコンとしての問題だけでなく、季節的な温度変化によってもひび割れが生じることは重要な事実だ。となると、夏季施工のリスクをどのように避けられよいか。ほかに、マスコン対策で誤解されていることはないか。

5

最小かぶり厚さ+10cmでも不良率15%でよいのか？

最小かぶり厚さ+10mmで施工しても、15%程度はかぶり不足になるというが、建築基準法では“最低基準”として規定されている。社会的には不良率ゼロの認識だ。ギャップを埋める努力が必要では？

6

収縮低減コンクリートなどの可能性

膨張コンクリート、収縮低減コンクリート、無収縮コンクリートについては、さまざまな場面で有効活用できそう。例えば、床スラブのみに収縮低減コンクリートを使用することはできるか？

7

社会に対して十分な説明が必要に

ひび割れが不可避であることや経年変化があること、また、コストをかけるとうひび割れが減らせることなど、建築主に知ってもらわなければならない。啓蒙用のツールは何が考えられるか？

く碎石です。その碎石の種類によって乾燥収縮率が大きく異なり、ひび割れの発生にダイレクトに効いてきます。その影響度は、単位水量と比べ物にならないくらい大きいのです。

影響の大きさが違う

閑田 具体的な数字を使って説明しましょう。

単位水量を10キロ減らしてもコンクリートの乾燥収縮率は30マイクロ程度しか下がりません。一方、生コンの乾燥収縮率は、生コン工場によって最大800マイクロくらいの差があります。つまり、単位水量の削減効果は、生コン工場の違いによる削減の5%以下に過ぎません。収縮率がひと桁違うわけです。

今でも単位水量が重要であることは事実ですが、その重要性が相対的に低下したわけです。

金箱 なるほど。それでも生コンの収縮率のばらつきは大きいですね。構造設計者や施工者から見ると、品質の良い生コンを的確に選定することが重要になりますね。しかし、現実には生コンの協同販売制があるので自由に選べない。生コン工場の方で、乾燥収縮の少ない碎石を使う努力をしてくれるといいのですが…。

閑田 その方向に向かっているのは確かだと思います。収縮率に関するデータの整備も含め、多くの生コン会社が品質のばらつきを押さえながら、収縮率低減に取り組んでいます。

金箱 ぜひ、その方向に進んでほしいと思います。



関田 徹志

かんだてつし

鹿島技術研究所建築生産グループのグループ長。1963年生まれ。九州大学大学院修士課程、米ミシガン大学博士課程を修了。2008年に「鉄筋コンクリート構造物のひび割れ制御を目的とした解析技術とその応用に関する研究」で日本建築学会賞（論文）を受賞

す。そういう設計上の配慮というのは、非常に効いてくると思います。

金箱 マスコンの問題も気になります。これは、どう対処すればよいのですか。例えば、発熱の小さいセメントを使うのは有効ですか。

関田 はい、有効ですね。例えば、最近のトレンドとして、ゆっくり発熱する中庸熱セメントが使われるケースが増えています。これは大きな効果が期待できるのですが、安定的に供給できる生コン会社が少ないのが難点です。首都圏では普通に入手できますが、地方ではなかなか安定的に入手するのが難しい。

しかし、中庸熱セメントを使わなくても、例えば基礎梁を短く分割して打設するだけでも大きな効果があります。一度に長く打設するほど、既存構造物の拘束度が大きくなってひび割れが発生しやすくなります。細かく分割すると拘束度が小さいので、多少温度が上昇しても応力がそれほど大きくなりません。例えば、長さ40mの基礎梁を一度に打設すると先行コンクリートから大きな拘束力を受けるのでひび割れが多発しますが、これを20mまで短くするだけでかなりひび割れが低減します。

かぶり厚の不良が15%?

金箱 それから、ぜひお聞きしたかったのが、鉄筋のかぶり厚さの話です。連載記事では「仕様通りの施工をしても、理論的には最大15%の不良率が発生する」とありました。これも驚きました。

思い浮かぶのはマスコンの問題です。ところが、連載記事のなかでは、もちろんそれもあるけれども、夏から冬にかけての温度変化による収縮ひび割れのほうが要注意だと強調されていましたね。

私はある時期、打ち放しコンクリートをいくつか担当した時期がありました。そのときに経験的に感じたのは、冬に打設したものは1、2年経過しても明らかにクラックが少ない。ところが、夏季に打設したコンクリートはひび割れが入りやすい。夏季は急激に乾燥するので収縮ひび割れが生じやすいためだと考えていました。しかし、実際には夏冬間の気温低下の影響による収縮ひび割れの問題が大きかったの

ですね。この情報は、大変参考になりました。

でも、現実問題として夏場のコンクリート打設をすべてやめるわけにはいきませんよね（笑）。夏に打設するときには、どこに注意すべきですか。

関田 収縮が大きくなることを前提に、拘束度をなるべく減らす工夫をするしかないと思います。

夏季のコンクリート打設で、一番ひび割れが発生しやすいのは、地下に拘束された部材の立ち上がり部分です。例えば、基礎梁に拘束された床スラブのひび割れを防ぐには、スラブを土間の上に載せたまま、基礎梁と切り離してしまう。そうすると拘束度が減るので、かなりひび割れが減りま

10mmプラスして設計かぶり厚さを決めることで最小かぶり厚さを確保できると考えていました。それでも、15%の確率で最小かぶり厚さを下回ってしまうのですね。

しかし、発注者の認識は違うと思います。法令かぶり厚さを下回るものは法律違反であり、最小かぶり厚さを下回るものは設計図書に従わないから契約違反である。それが発注者の認識です。当然不良率はゼロで、すべて合格していると考えています。

発注者に不良率ゼロとしないことを理解してもらう必要があるかもしれませんが、われわれ専門家が不良率をゼロにする努力を払うべきではないでしょうか。完璧にゼロにするのは難しくても、1～2%レベルの不良率に抑えるのが望ましいと思います。例えば、最小かぶり厚さにさらに5mmプラスすることも考えられます。

閑田 まず、不良率15%という根拠ですが、これはJASS5（建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事）の2009年版で明記された数字です。最小かぶり厚さに10mmの余裕をもたせた場合、どれだけのばらつきがでるかを統計理論に従って数学的に計算した値です。ですから、あくまで机上の数値です。

実際に私どもが社内のいろいろなケースを調べたところ、不良率はすべて5%以下でした。いくつか理由が考えられますが、1つは増し厚コンクリートの施工です。これが安全側の要素として働きます。それから、今は必ずスペーサーが入っていますが、これもばらつきの抑制に効いている。

それらを勘案すると、実際には15%ということではなくて、ひと桁の下の方に収まるケースが多いと思います。

もしも金箱さんがおっしゃったように、最小かぶり厚さにさらに5mmプラスすれば、不良率はゼロに近い水準になるかもしれません。今は5%前後の不良率が、1%前後になる。そんなイメージでしょうか。あとは、費用対効果をどう見るかという点にかかってくると思います。

15%を超えた場合は

金箱 JASS5では、不良率15%も許容してよいと規定しているのですか。

閑田 コンクリートを打設した後に検査をして、不良率が15%を超えると、これはアウトです。抜本的な対策を打たなくてはなりません。不良率が15%を下回るときは、一応合格ですが、不良部分の補修をするように求めています。

JASS5で必ずしも明確に対策を規定しているわけではありませんが、該当部分を読むとそのように解釈できるのです。

金箱 そのときの検査は、抜き取り検査ですか。

閑田 抜き取り検査です。

金箱 しかし、打設後の抜き取り検査は、それほど一般化しているとは思えません。それを考えると、15%という目安を提供するのも良いのですが、やはり打設前にきちんと検査するほうが重要ではないでしょうか。ちなみに、打設前の検査をしたものは、不良率が何%くらいでしょうか。

閑田 その場合は、1～2%程度で相当少ないですね。

金箱 私どもで工事監理をするときも、アンカーの収まり状態とかぶり厚さのチェックを重視しています。特に、かぶり厚さを確保するには、スペーサーの選択と配置が非常に重要です。その部分をきちんとやっていれば、プラス10mmの余裕もあるので、まずかぶり不足はほとんどないと考えていました。

ですから、15%の不良率と聞いたときには少し驚いたのですが、今の詳しい説明を聞いて安心しました。でも、不良率をさらに下げる努力をする余地はありそうですね。

混和剤を有効活用

金箱 混和剤についてもお聞きしたいことがあります。

連載では、膨張コンクリート、収縮低減コンクリート、無収縮コンクリートなどが紹介されていました。これらを床スラブの施工にうまく活用できないでしょうか。先ほど、床スラブのひび割れ防止はなかなか難しいという話がありましたが、そういう場所に少しコストをかける考え方もあると思います。

閑田 そうですね。逆に言いますと、床スラブについては、そのくらいしか打つ手がありません。ただ、ご指摘の通りコストは増大するので、発注者の理解を得られるかという問題は残ります。

金箱 発注者の話が出てきましたが、連載を通して感じたのは、やはり発

注者と建築専門家の間に横たわる認識ギャップの大きさです。

最近、発注者の方々は、建築物の品質に対して厳しい目を向けるようになりました。特にひび割れには厳しい。極端な場合、パラペットに少しひび割れが入っただけでも「これは不良品でないか」と見る人もいます。

構造設計でも似たような問題があります。私たち専門家は、大地震が発生した場合、建築物の一部が損傷するのは当然だと考えて構造設計をします。ところが、一般の方はそれでは納得しない。「日本は世界一の耐震設計技術を持っているはずなのに、なぜ地震がきたときに壁にひびが入ってしまうのか」と考える。

閑田 確かに発注者のひび割れに対する見方は、厳しくなっていますね。

発注者に精緻な説明を

金箱 発注者に説明するとき、先ほどの制御設計の考え方が生きてくると思うのです。数値に基づいた定量的な把握ができると、発注者に対して説明しやすくなる。

構造設計を例にとると「大地震が起ると、建物の一部が壊れます」といった大まかな説明ではなく、「この規模の地震だと、これ程度の被害が出る恐れがあります。その被害を抑えたいなら、このくらいの追加コストをかける必要があります」といった精緻な説明が可能になります。

ひび割れ対策も同じです。制御設計の成果を、発注者の理解を深めてもらうための材料として役立てる。そ

うすれば、きめ細かい説明ができるはずですよ。

閑田 それを工事前に予測して発注者に説明することが重要ですね。結果的にひび割れが生じて、事前に説明したのとそうでないのでは大きな違いがあります。

金箱 先ほどコンクリートの打設は冬が望ましいという話がありましたね。専門家がこうした正しい知識をもっていれば、発注者の立場に立った適切なアドバイスも可能になります。

例えば、打ち放しコンクリートの発注者は、デザインや品質にこだわりをもった人が多い。そうした人に対しては、冬季のコンクリート打設となるような工事スケジュールを推奨する。それがひび割れリスク軽減につながることを丁寧に説明すれば、こだわりを持つ発注者なら理解してくれると思う。

そうした個人でできる努力を継続しながら、団体活動を通して発注者に周知徹底を図っていくことも大切です。

ね。一般の方は、コンクリートのひび割れというのは、どうしても瑕疵と結びつけて考えがちです。

しかし、許容されるものと、そうでないものがあることを分かりやすく伝えなくてはならない。建築団体としては、どこがリーダーシップを取るとよいでしょうかね。

閑田 施工に関しては日建連（日本建設業連合会）や、学術団体の日本建築学会や日本コンクリート工学会などがふさわしいかもしれません。

金箱 JSCA（日本建築構造技術者協会）でも、ひび割れについて社会に発信していくべきかもしれません。構造設計者や施工者はもちろん、意匠設計者も含めて丁寧に説明していく努力が必要ですね。

閑田 そうですね。発注者への説明材料は、それなりに揃ってきました。それらを効果的に活用することで、認識ギャップを埋めていくことは可能だと考えています。



DATA

資料編

2 前項の規定は、水、空気、酸又は塩による鉄筋の腐食を防止し、かつ、鉄筋とコンクリートとを有効に付着させることにより、同項に規定するかぶり厚さとした場合と同等以上の耐久性及び強度を有するものとして、国土交通大臣が定めた構造方法を用いる部材及び国土交通大臣の認定を受けた部材については、適用しない。

3. ひび割れ幅の規定

住宅紛争処理の参考となるべき技術的基準（旧建設省告示第1653号）

住宅の品質確保の促進等に関する法律（平成十一年法律第八十一号）第七十条の規定に基づき、住宅紛争処理の参考となるべき技術的基準を次のように定める。

第1 趣旨

この基準は、住宅の品質確保の促進等に関する法律（平成11年法律第81号）第70条に規定する指定住宅紛争処理機関による住宅紛争処理の参考となるべき技術的基準として、不具合事象の発生と構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性との相関関係について定めるものとする。

第2 適用範囲

この基準は、住宅に発生した不具合である事象で、次に掲げる要件に該当するもの（以下「不具合事象」という。）について適用する。

- 1 新築時に建設住宅性能評価書が交付された住宅で、指定住宅紛争処理機関に対してあつせん、調停又は仲裁の申請が行われた紛争に係るものにおいて発見された事象であること。
- 2 当該住宅を新築する建設工事の完了の日から起算して十年以内に発生した事象であること。
- 3 通常予測できない自然現象の発生、居住者の不適切な使用その他特別な事由の存しない通常の状態において発生した事象であること。

第3 各不具合事象ごとの基準

1 傾斜

（中略）

2 ひび割れ

次に掲げる部位及びその仕上げの区分に応じ、それぞれ次に掲げる表の(ろ)項の住宅の種類ごとに掲げる不具合現象が発生している場合における構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性は、同表の(は)項に掲げるとおりとする。

(1) 壁、柱、床、天井、はり又は屋根 (パラペット及び庇の部分を除く。)

イ 乾式の仕上材 (布その他これに類する材料を除く。以下同じ。) による仕上げ

(い)	(ろ)			(は)
レベル	住宅の種類			構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性
	木造住宅	鉄骨造住宅	鉄筋コンクリート造住宅又は鉄骨鉄筋コンクリート造住宅	
1	レベル2及びレベル3に該当しないひび割れ	レベル2及びレベル3に該当しないひび割れ	レベル2及びレベル3に該当しないひび割れ	低い。
2	複数の仕上材にまたがったひび割れ (レベル3に該当するものを除く。)	複数の仕上材にまたがったひび割れ (レベル3に該当するものを除く。)	① 複数の仕上材にまたがった幅0.3mm以上のひび割れ (レベル3に該当するものを除く。) ② 仕上材と構造材にまたがった幅0.3mm以上0.5mm未満のひび割れ (レベル3に該当するものを除く。)	一定程度存する。
3	① 複数の仕上材 (直下の部材が乾式であるものに限る。) にまたがったひび割れ ② 仕上材と乾式の下地材又は構造材にまたがったひび割れ	① 複数の仕上材 (直下の部材が乾式であるものに限る。) にまたがったひび割れ ② 仕上材と乾式の下地材又は構造材にまたがったひび割れ ③ さび汁を伴うひび割れ (構造耐力上主要な部分でない壁、柱又ははりに発生したものを除く。)	① 複数の仕上材 (直下の部材が乾式であるものに限る。) にまたがったひび割れ ② 仕上材と乾式の下地材にまたがったひび割れ ③ 仕上材と構造材にまたがった幅0.5mm以上のひび割れ ④ さび汁を伴うひび割れ (構造耐力上主要な部分でない壁、柱又ははりに発生したものを除く。)	高い。

ロ 湿式の仕上材による仕上げ

(い)	(ろ)			(は)
レベル	住宅の種類			構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性
	木造住宅	鉄骨造住宅	鉄筋コンクリート造住宅又は鉄骨鉄筋コンクリート造住宅	
1	レベル2及びレベル3に該当しないひび割れ	レベル2及びレベル3に該当しないひび割れ	レベル2及びレベル3に該当しないひび割れ	低い。
2	乾式の下地材又は構造材の表面まで貫通したひび割れ(レベル3に該当するものを除く。)	乾式の下地材又は構造材の表面まで貫通したひび割れ(レベル3に該当するものを除く。)	仕上材と構造材にまたがった幅0.3mm以上0.5mm未満のひび割れ(レベル3に該当するものを除く。)	一定程度存する。
3	①仕上材と乾式の下地材又は構造材にまたがったひび割れ	①仕上材と乾式の下地材又は構造材にまたがったひび割れ ②さび汁を伴うひび割れ(構造耐力上主要な部分でない壁、柱又ははりに発生したものを除く。)	①仕上材と乾式の下地材にまたがったひび割れ ②仕上材と構造材にまたがった幅0.5mm以上のひび割れ ③さび汁を伴うひび割れ(構造耐力上主要な部分でない壁、柱又ははりに発生したものを除く。)	高い。

ハ 構造材による仕上げ

(い)	(ろ)			(は)
レベル	住宅の種類			構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性
	木造住宅	鉄骨造住宅	鉄筋コンクリート造住宅又は鉄骨鉄筋コンクリート造住宅	
1			レベル2及びレベル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(レベル3に該当するものを除く。)	一定程度存する。
3			①幅0.5mm以上のひび割れ ②さび汁を伴うひび割れ	高い。

(2) 基礎

イ 乾式の仕上材による仕上げ

(い)	(ろ)	(は)
レベル	住宅の種類	構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性
	木造住宅、鉄骨造住宅、鉄筋コンクリート造住宅又は鉄骨鉄筋コンクリート造住宅	
1	レベル2 及びレベル3 に該当しないひび割れ	低い。
2	①複数の仕上材にまたがった幅0.3mm以上のひび割れ(レベル3 に該当するものを除く。) ②仕上材と構造材にまたがった幅0.3mm以上0.5mm未満のひび割れ(レベル3 に該当するものを除く。)	一定程度存する。
3	①複数の仕上材(直下の部材が乾式であるものに限る。)にまたがったひび割れ ②仕上材と乾式の下地材にまたがったひび割れ ③仕上材と構造材にまたがった幅0.5mm以上のひび割れ ④さび汁を伴うひび割れ。	高い。

ロ 湿式の仕上材による仕上げ

(い)	(ろ)	(は)
レベル	住宅の種類	構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性
	木造住宅、鉄骨造住宅、鉄筋コンクリート造住宅又は鉄骨鉄筋コンクリート造住宅	
1	レベル2 及びレベル3 に該当しないひび割れ	低い。
2	仕上材と構造材にまたがった幅0.3mm以上0.5mm未満のひび割れ(レベル3 に該当するものを除く。)	一定程度存する。
3	①仕上材と乾式の下地材にまたがったひび割れ ③仕上材と構造材にまたがった幅0.5mm以上のひび割れ ③さび汁を伴うひび割れ	高い。

ハ 構造材による仕上げ

(い)	(ろ)	(は)
レベル	住宅の種類	構造耐力上主要な部分に瑕疵が存する可能性
	木造住宅、鉄骨造住宅、鉄筋コンクリート造住宅又は鉄骨鉄筋コンクリート造住宅	
1	レベル2 及びレベル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(レベル3 に該当するものを除く。)	一定程度存する。
3	①幅0.5mm以上のひび割れ ②さび汁を伴うひび割れ高い。	高い。

4. 生コン工場の選定

建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009 6節6.2

- a. 施工者は、工事開始前に工事現場周辺のレディーミクストコンクリート工場を調査して、レディーミクストコンクリートを発注する工場を選定し、工事監理者の承認を受ける。
- b. JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) の規定に適合するレディーミクストコンクリートを使用する場合、原則として使用するコンクリートが JIS Q 1001(適合性-日本工業規格への適合性の認証-一般認証指針)および JIS Q 1011 (適合性-日本工業規格への適合性の認証-分野別認証指針 (レディーミクストコンクリート)) に基づいて JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) に適合することを認証されている製品を製造している工場を選定する。
工場が、使用するコンクリートについて上記適合性の認証を取得していない場合は、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) の規定に適合するレディーミクストコンクリートを安定して製造・供給できると認められる工場とする。
- c. JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) の規定に適合しないレディーミクストコンクリートを使用する場合、使用するコンクリートの製造実績があるか、または安定して製造・供給できると認められる工場とする。
- d. 工場には (社) 日本コンクリート工学協会が認定するコンクリート主任技士またはコンクリート技士、あるいはコンクリート技術に関してこれらと同等以上の知識経験を有すると認められる技術者^(注1) が常駐していることとする。
(注1) 技術士 (コンクリートを専門とするもの)、一級および二級 (仕上げを除く) 建築施工管理技士、一級および二級建築士をいう。
- e. 工場は、7節に定められた練混ぜから打込み終了までの時間の限度内にコンクリートを打ち込めるように運搬できる距離にあることとする。
- f. 工場の選定にあたっては、同一打込み工区に2つ以上の工場のコンクリートが打ち込まれないように配慮する。

図1 レディーミクストコンクリートの種類 (JIS A 5308:2009)

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ又はスランプフロー (cm)	呼び強度													
			18	21	24	27	30	33	36	40	42	45	50	55	60	曲げ 4.5
普通コンクリート	20,25	8,10,12,15,18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
		21	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
	40	5,8,10,12,15	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—
軽量コンクリート	15	8,10,12,15,18,21	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—
舗装コンクリート	20,25,40	2.5,6.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
高強度コンクリート	20,25	10,15,18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—
		50,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	—