

# コンクリートの乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮は構造物や建物のひび割れの原因となることが知られており、古くから研究対象となってきました。最近では、ひび割れ制御に対する社会的ニーズから基準類の取り扱いが変更されるなど、特に高い関心が寄せられています。今回は、これまで提案されている乾燥収縮のメカニズムを概説するとともに、基準類の変遷やひび割れ対策方法などについて紹介します。

## Q1

乾燥収縮のメカニズムはどのように考えられていますか？

## A1

セメント硬化体は固体部分とたくさんの微細な空間から成り立っており、固体とその空間にある水は相互作用を生じていると考えられています。乾燥によって水分逸散した時、相互作用に変化が生じることで収縮が発生していると考えられています。この相互作用については、自然科学原理に立脚したいくつかの説が提案されています。

### 解説

一般にコンクリートの乾燥収縮の主体はセメントペーストであり、骨材はそれを拘束する役割を担っています(骨材が収縮しないというわけではなく、それについては後述します)。ではセメントペーストはなぜ乾燥によって収縮するのでしょうか。

まず、セメント硬化体中の水についてお話しします。図-1にセメントペーストに微粉碎シリカを添加していった時の乾燥収縮と水の減少量との関係を示します。100%のセメントペーストの場合、水の減少量と乾燥収縮の間にほぼ比例関係があります。一方、微粉碎シリカの添加率が増加(図中:セメントの割合が低下)すると、収縮にほとんど関与しない水の減少が生じた後、同様に比例関係で収縮しています。これは、セメント水和物

(固体部分)との間に何かしらの作用が生じている水と、ほとんど相互作用がない水(自由水)があるためと考えられています。その他に、セメントの水和物の一部となり乾燥しない化学的結合水があるため、硬化体内の水は大きく3つに分類され、乾燥収縮には、自由水、化学的結合水以外の水が関与していると考えられています。

乾燥収縮に関わる水の作用については、自然科学原理に立脚した諸説があります。主要なものとして、次の4つのメカニズムが挙げられています。

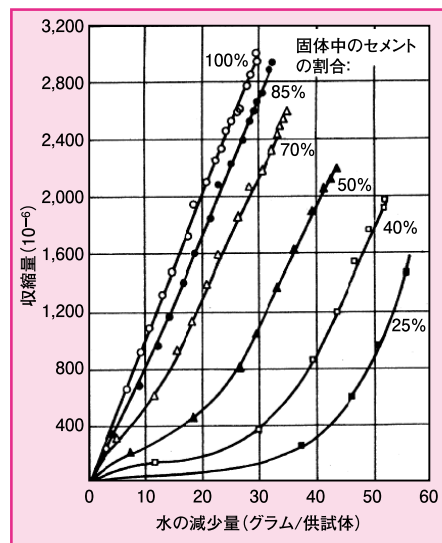


図-1 ペースト供試体(セメント・微粉碎シリカ)における収縮量と水の減少量との関係<sup>1)</sup>

### ①毛細管張力説

毛細管張力説は、細い管を水に立てると管内の液面が上昇するという毛管現象に基づいています。これは、水と管の接触部が直角にならないことと、水の表面には張力(表面張力)があることによって生じ、管径が細くなるほど水の

高さは上昇します。一方、表面張力によって引き上げられた水は負圧を生じ、これが周りの管壁に影響を与える毛細管張力となります。毛細管張力説は、セメント硬化体内にこのような細かい孔が多数あるため、固体部分が縮められているという考え方です(図-2)。

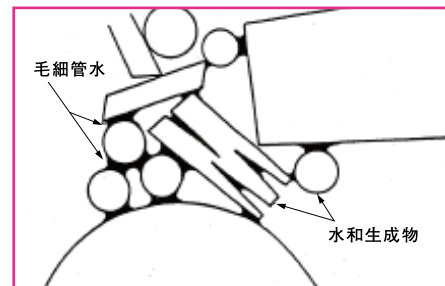


図-2 硬化セメントペースト中の毛細管水<sup>2)</sup>

### ②分離圧説

セメント水和物は、もともと凝集力によって収縮しようとするのを水が押し広げているという考え方が分離圧説です(図-3)。水は、湿度などの環境条件に応じて固体表面に吸着し、その吸着厚さを一定に保とうとします。しかし、セメント硬化体内部には、空間の距離が非常に狭い部分があり、その距離が水の吸着厚さより狭い場合、周りから圧力(分離圧)を受け空間を押し広げようとする。乾燥によって水が逸散すると、この分離圧が開放されることによって収縮するという考え方です。

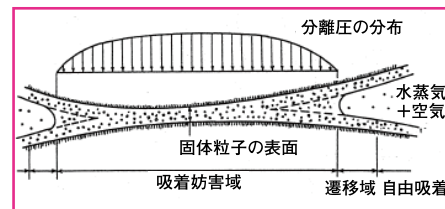


図-3 Powersの分離圧のモデル<sup>3)</sup>

### ③表面張力説

物質の表面は、連続体である内部と異なり、余ったエネルギー(表面エネルギー)を持っています。前述した水の表面張力も表面エネルギーによるものであり、同じくセメント水和物表面にも生じています。また表面張力は、単位面積あたりの表面を最小にしようとする力で、表面エネルギーが高いほど大きくなります。水和物表面に水が吸着している場合、固体表面のエネルギーは低位になるため、表面張力は固体だけの場合よりも小さくなります。しかし、乾燥によって吸着水がなくなってくると水和物の表面張力は大きくなり、収縮するという考え方です。

### ④層間水移動説

セメント水和物は、非常に薄いシート状の結晶が積層されて成り立っていると考えられ、その間に保持されている水を層間水といいます(図-4)。この層間水が離脱すると、結晶格子間が狭くなるため収縮するといわれています。層間水は化学結合水と比べても同じくらい高いエネルギーで吸着していると考えられており、D-乾燥(ドライアイス凝固点(-79℃)での水蒸気分圧(約10万分の1気圧))などの非常に低い湿度領域で生じると考えられています。また、前述の3説はいずれも乾燥後に再度湿潤状態になるとの体積に戻るという可逆的な理論であるのに対し、層間水移動説は不可逆な現象を説明する時にも用いられます。

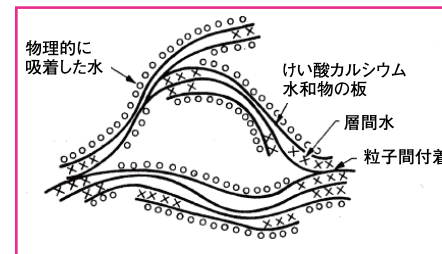


図-4 Feldman, Seredaのモデル<sup>4)</sup>

これらのメカニズムは、自然科学原理に基づき、理想状態では個々には確かめられたものです。しかし、実際のセメント硬化体と理想状態とに違いがあることや、それぞれのメカニズムには適用範囲

があることから、全湿度域にわたり様々な挙動を単独の説で説明できるには至っていません。一般には、中・高湿度域では毛細管張力説と分離圧説が、低湿度域では表面張力説と層間水移動説が有力とされています。

複数あるいは単独のメカニズムを用いて乾燥収縮を説明する考え方も示されてきています。ミュンヘンモデル<sup>5)</sup>では、相対湿度42%以下で表面エネルギー説を、それ以上では分離圧説を用いることで全湿度域の乾燥収縮を説明できるとしています。多田<sup>6)</sup>は、硬化体内部における水の化学ポテンシャル差から生じる分離圧によって乾燥収縮の説明を試み、全湿度域に適用可能な考え方を提案しています。丸山<sup>7)</sup>も分離圧による説明を行っていますが、乾燥による分離圧の変化は雰囲気相対湿度(化学ポテンシャル)変化とは直接関係せず、体積含水率、体積弾性率、比表面積によって硬化体の体積は決定されるとしています。

## Q2

コンクリートの乾燥収縮に関する基準はどのようなものがありますか？

## A2

日本建築学会では、設計供用期間の級が長期および超長期のコンクリートに対し、特記がない場合、乾燥収縮率 $8 \times 10^{-4}$ 以下という規定を設けています。土木学会では最近、乾燥収縮に関連した記述が大幅に見直されています。

### 解説

日本建築学会では「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事1975」に乾燥収縮率の目標値を示しており、一般的なコンクリートの品質の級「常用」に対し「 $8 \times 10^{-4}$ 以下」としていました。その後、1999年「住宅の品質確

保の促進等に関する法律」の規定に基づき、ひび割れによる瑕疵の可能性の技術的基準が示され(表-1)、コンクリートのひび割れは社会的にも高い関心を集めました。2006年「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」では、収縮ひび割れ制御上の仕様として、コンクリートの乾燥収縮ひずみ「 $800 \times 10^{-6}$ 以下」を標準としました。また、より厳しい条件を想定し「標準」の他に「高級」「特級」という2つの仕様を設けました(表-2)。このような経緯を経て、最新版の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事2009」では、本文中に計画供用期間が長期(およそ100年)、超長期(およそ200年)のコンクリートに対し、乾燥収縮率「 $8 \times 10^{-4}$ 以下」という規定を設けるに至っています(表-3)。

ではなぜ「 $8 \times 10^{-4}$ 」という乾燥収縮率が設けられたのでしょうか。古くは「コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説」(1976)に根拠が述べられています。それまでの研究から、拘束が大きい建築物のひび割れを抑制するためには、乾燥収縮率を $3 \sim 4 \times 10^{-4}$

表-1 瑕疵の可能性の技術的基準の例<sup>8)</sup>

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
	鉄筋コンクリート造住宅または鉄骨鉄筋コンクリート住宅		
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(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

表-2 使用するコンクリートの級と乾燥収縮ひずみ<sup>9)</sup>

コンクリートの級	乾燥収縮ひずみ
標準	$650 \sim 800 \times 10^{-6}$
高級	$500 \sim 650 \times 10^{-6}$
特級	$500 \times 10^{-6}$ 以下

表-3 コンクリートの耐久設計基準強度 (JASS 5 2009)

計画供用期間の級	耐久設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	乾燥収縮率: $8 \times 10^{-4}$ 以下
短期	18	
標準	24	
長期	30	
超長期	36*	

\* 計画供用期間の級が超長期で、かぶり厚さを10mm増やした場合は、 $30N/mm^2$ とすることができる。

以下とする必要があり、通常の供試体サイズの乾燥収縮率としては $4\sim 8\times 10^{-4}$ が要求されるというものです。また最近では、収縮ひび割れを予測した結果からも $8\times 10^{-4}$ の妥当性が検証されています。図-5に修正ベース・マレー式による乾燥収縮ひずみと、ひび割れ幅およびひび割れ本数の予測結果の一例を示します。これは、両端完全固定された鉄筋コンクリート一次元部材のひび割れ幅の算定式を、鉄筋コンクリート造外壁のひび割れ状況と整合するよう拘束度などを組み込んだものです。同図より、ひび割れ幅の目標値を0.3mm、1スパンあたりのひび割れ本数を3本程度以下とすると、乾燥収縮率を $800\times 10^{-6}$ 以下とすることにより、有害なひび割れが発生しないレベルにほぼ制御できることがわかります。

一方、土木学会では構造設計に用いる標準値という形で乾燥収縮を示してきました。1931年に発行された「鉄筋コンクリート標準示方書」に「硬化収縮」という表現で「之を温度低下15℃に相当する影響あるものと仮定すべし」( $150\times 10^{-6}$ に相当)と記載されています。これはコンクリート自体ではなく鉄筋などを含めた構造物の収縮を示したものです。その後、1949年制定の同示方書に初めて

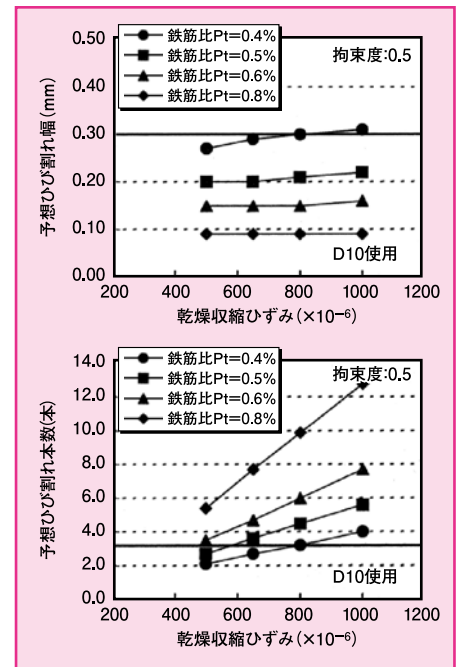


図-5 修正ベース・マレー式による乾燥収縮ひずみとひび割れ幅、ひび割れ本数の計算例<sup>9)</sup>

「乾燥収縮」という項目が記載されました。1996年制定「コンクリート標準示方書」から自己収縮、炭酸化収縮などを含めて「収縮」という記載に変更され、解説中にコンクリートの収縮予測式も記述されました。性能照査型設計に移行した近年の「コンクリート標準示方書」では、基本的に収縮の大小を問うのではなく、実測あるいは予測された収縮ひずみに対し、構造物の応答値が求められる要求性能を満たすかどうかを確認することになっています。しかし最近、コンクリートの収縮が原因とされる構造物のひび割れが問題となったことから、過大な収縮を生じる場合の設計に配慮が必要となりました。そこで、最新の2007年制定同示方書では設計段階での収縮の取り扱いを変更し、実際に使用するコンクリートの試験値や既往の資料に基づくことを原則としました。また、予測式を用いる場合は、最大で $1,200\times 10^{-6}$ 程度の収縮を想定し、算定された予測値(最大 $800\times 10^{-6}$ 程度)を1.5倍に割り増す安全側の対応を取ることとなっています。

### Q3

乾燥収縮ひび割れの対策方法にはどのようなものがあるでしょうか？

### A3

ひび割れを防止あるいは制御する方法としては、材料・配(調)合によってコンクリートの収縮量を低減する方法、拘束を緩和する方法、誘発目地などによりひび割れを集中させる方法があります。また、ひび割れ幅を制御する方法としては、鉄筋量を増加させるなどによってひび割れを分散させる方法があります。

表-4 設計におけるひび割れ対策の例<sup>9)</sup>

コンクリート収縮量の低減	ひび割れの防止・抑制		ひび割れ幅の制御
	拘束の緩和	ひび割れ集中型	ひび割れ分散型
調合 膨張材 収縮低減剤 壁厚の増加	エキスパンションジョイント 壁厚の増加 プレストレス プレキャスト	誘発目地 スリット(絶縁)	鉄筋量の増加 ひび割れ補強筋 中間リブ

### 解説

ひび割れは構造物の耐久性や防水性能、美観などに関連し、適切な対策を施すことが重要となります。ただし適切な対策とは、ひび割れ幅や収縮量といった指標をクリアすることではなく、あくまで構造物の要求性能を満足することであるのはいうまでもありません。表-4に、ひび割れ対策の例を示します。ひび割れを抑制する方法として、ひび割れの主要因である乾燥収縮の低減があり、材料・配(調)合からのアプローチが中心になります。これについては詳しく後述します。次に拘束を緩和する方法があります。乾燥収縮ひび割れは、乾燥収縮が周りの部材や鉄筋などに拘束され、コンクリートに引張応力が生じることが原因で発生します。

そこで、拘束の程度を緩和することが有効になります。また、ひび割れを集中させる方法として誘発目地の設置などがあり、計画位置以外の部位にひび割れを生じさせない方法です。ひび割れ幅を制御する方法として代表的なものは、鉄筋量の増加が挙げられます。これは、前掲図-5に示したように、有害なひび割れを生じさせないためには有効な手段です。

配(調)合によってコンクリートの収縮量を低減する方法には、単位水量を減らし、セメントペーストの収縮を拘束する骨材量を増加させるなどの方法があります。混和剤の種類をより減水率の高いものに変更したり、骨材の粒度調整を行うなどの方法もあります。

一方、乾燥収縮のメカニズムを考慮した制御手法としては、収縮低減効果のある混和剤の使用があります。収縮低減剤は、1980年代に実用化された液体の有機系混和剤であり、標準的な使用

量で無混和のコンクリートに対し15%程度以上の収縮低減が見込めます(図-6)。また、収縮低減剤はこれまで規格がない材料でしたが、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事2009」では、「JASS 5 M-402:コンクリート用収縮低減剤の性能判定基準」が規格化されています。最近では、同じく液体タイプのものとして、「JIS A 6204 コンクリート用化学混和剤」の規格を満足し、収縮低減機能を付与したのも開発されています。

また、混和材としては膨張材の使用が代表的です。膨張材は粉体の無機系混和材であり、硬化初期のコンクリートを膨張させます。拘束下でコンクリートが膨張することで断面に圧縮応力が生じ、以後の乾燥収縮による引張応力を補償する効果を有しています。膨張材の歴史やメカニズムについては、「CEM'S質問箱 第18回」に詳しい説明がありますのでそちらをご覧ください。

コンクリートの乾燥収縮には、骨材の影響が大きいといわれており、骨材の選択も乾燥収縮制御の一手法となります。骨材の影響についてはまだ不明な点も多くありますが、そのなかで石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮が小さいことが知られています(CEM'S質問箱 第24回)。骨材は一般にセメントペーストの収縮を拘束するという役割から、変形抵抗性(弾性係数)が高いものがより収縮抑制効果が大きいと考えられます。しかし、それだけでは説明がつかない場

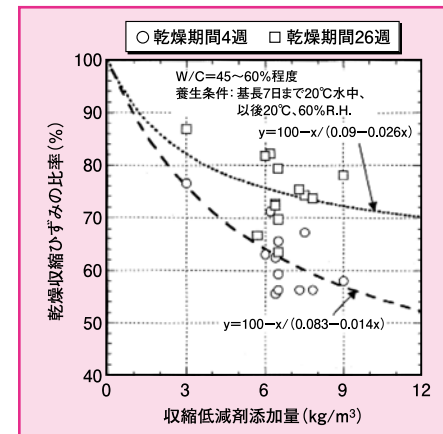


図-6 収縮低減剤の効果<sup>9)</sup>

合もあり複雑です。後藤ら<sup>6)</sup>は、弾性係数が小さい軽量骨材を用いても、普通骨材と比べて必ずしも乾燥収縮が大きくなることに着目し、乾燥に伴う骨材自体の体積変化の影響を指摘しました。石灰石骨材はそれ自体の乾燥収縮が比較的小さい(図-7)ことや、骨材とペースト界面が密実になること、弾性係数が大きいことなどが、乾燥収縮低減に繋がっているのではないかと考えられています。

このように、乾燥収縮ひび割れ対策方法は多岐にわたるため、要求レベルに応じて設計・材料・配(調)合・施工の面から複合的に検討することが重要となります。

太平洋セメント株式会社中央研究所  
技術企画部TBCチーム

兵頭 彦次

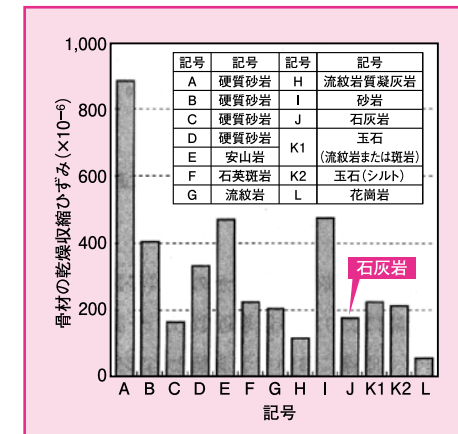


図-7 骨材の乾燥収縮ひずみ<sup>9)</sup>

### 【参考文献】

- 1) A.M.Neville, (三浦尚訳):ネビルのコンクリートパイブル,技報堂出版,2004
- 2) 近藤実:硬化セメントペースト中の水の3形態と乾燥収縮,強さ,動弾性係数の関係,セメント技術年報, No.11, pp.247-255,1957
- 3) T.C. Powers: Mechanism of Shrinkage and Reversible Creep of Hardened Cement Paste, Proceeding of Conference on The Structure of Concrete and Its Behavior Under Load, pp.319-344, 1965
- 4) R.F. Feldman, P.J. Serada: A Model for Hydrated Portland Cement Paste as Deduced from Sorption-Length Change and Mechanical Properties, Materials and Structures, No.6, pp.509-519, 1968
- 5) F.H. Wittmann: Creep and Shrinkage in Concrete Structure-Capture 6, Creep and Shrinkage Mechanisms, Z.P. Bazant&F.H. Wittmann (eds.) John Willey & Sons, pp.129-161, 1982
- 6) 多田眞作:水分移動と乾燥収縮機構,コンクリート工学, Vol.43, No.5, pp.43-50, 2005
- 7) 丸山一平,岸直哉:セメント硬化体の収縮理論, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.642, pp.1395-1403, 2009
- 8) 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-メカニズムと対策技術の現状-, 2003
- 9) 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, 2006
- 10) 後藤幸正,藤原忠司:乾燥に伴う骨材の体積変化,土木学会論文報告集,第247号, pp.97-108, 1976