

コンクリートの自己収縮

近年、コンクリートのひび割れ発生やそのリスク増加の要因として自己収縮が認知されてきました。今回は、自己収縮の定義や発生機構について概説し、その特徴や抑制手法などについて述べます。

Q 1

自己収縮はどのような現象でしょうか？

A 1

乾燥や温度変化などがない条件で、セメントの水和によって、凝結直後のごく初期から体積が減少することです。水セメント（結合材）比が小さい高強度コンクリートなどは自己収縮が大きくなることが知られており、最近では、ひび割れ発生あるいはそのリスク増加要因のひとつとして認識されています。

解説

自己収縮について、日本コンクリート工学会・自己収縮研究委員会では「セメント系材料において、セメントの水和により凝結始発以後に巨視的に生じる体積減少」と定義し、その中に「物質の侵入や逸散、温度変化、外力や外部拘束に起因する体積変化は含まれない」としています。すなわち、自己収縮とは応力伝達できるようになる凝結始発以降の硬化体の現象であること、空隙なども含めた巨視的な（見かけの）体積減少であること、水分蒸発によって生じる乾燥収縮や温度が降下する際に生じる温度収縮などを除いた収縮のことを指しています。

自己収縮は、セメントの水和に起因する収縮 (autogenous shrinkage) として知られており、古くはLynamやDavisの報告があります。ただ、通常のコンクリートではその大きさが乾燥収縮と比べて1桁程度小さく、これまで問題とされることはほとんどありませんでした。しかし、近年実用化された高強度コンクリートのように粉体量が多く水セメント（結合材）比が小さいコンクリートでは、乾燥収縮と同等あるいはそれ以上の自己収縮を生じることが明らかとな

り(図-1)、ひび割れ発生やそのリスク増加の要因としてクローズアップされるようになってきたのです。

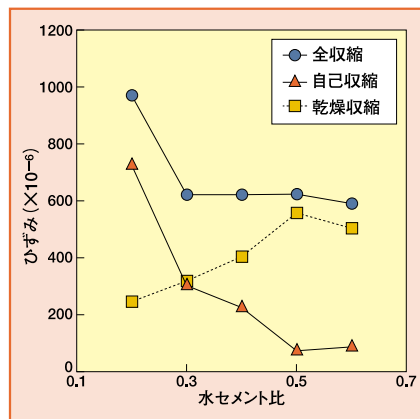


図-1 全収縮に占める自己・乾燥収縮の割合 (宮澤, 2005)

Q 2

自己収縮はどのようなメカニズムで生じているのでしょうか？

A 2

セメントと水が水和する過程で硬化体内部が乾燥状態となり、毛細管張力機構によって体積が収縮すると考えられています。

解説

自己収縮の発生メカニズムは、毛細管張力機構によって生じているという説が有力です。毛細管張力機構とは乾燥収縮を説明するメカニズムのひとつであり、硬化体中の空隙が不飽和となって気液界面が生じると、水の表面張力によってメニスカスが形成され液状水に負圧が生じ、硬化体に弾性的な体積減少を生じさせるというものです。ただし乾燥収縮の場合、水が硬化体外部に蒸発することで空隙が不飽和となり収縮しますが、自己収縮の場合、水分の蒸発や質量変化がない状態で収縮します。ではなぜ、自己収縮は乾燥を受けない状態で生じるのでしょうか。これは、自己収縮が水とセメントが水和する際の水和収縮（硬化収縮、化学収縮ともいわれています）と関与しているためと考えられています。

水和収縮とは、化学量論的に、生成される水和物が元の体積（水の体積+セメントの体積）よりも小さくなることです。表-1にポルトランドセメントを構成する鉱物の水和前後の体積変化の一例を示します。鉱物の種類によって差はありますが、いずれも水和後に体積が小さくなっていることがわかります。

表-1 鉱物の水和前後の体積変化の一例 (日本コンクリート工学会, 2002)

C ₃ Sの水和							
水和反応	C ₃ S	+	5.3H ₂ O	→	C _{1.7} -S-H _{4.0}	+	1.3CH
質量 (g)	228.33		95.51		227.51		96.33
密度 (g/cm ³)	3.12		1.00		1.90		2.24
体積 (cm ³)	73.2		95.5		119.7		43.0
		168.7				162.7	
体積変化	6.0 (−3.6%)						

C ₂ Sの水和							
水和反応	C ₂ S	+	4.3H ₂ O	→	C _{1.7} -S-H _{4.0}	+	0.3CH
質量 (g)	172.17		77.49		227.51		22.23
密度 (g/cm ³)	3.28		1.00		1.90		2.24
体積 (cm ³)	52.5		77.5		119.7		9.9
		130.0				129.6	
体積変化	0.4 (−0.3%)						

C3Aの水和							
水和反応	C3A	+	CS*2H	+	10H2O	→	AFm
質量 (g)	270.20		172.19		180.20		622.59
密度 (g/cm³)	3.03		2.32		1.00		1.95
体積 (cm³)	89.2		74.2		180.2		319.3
			343.6				319.3
体積変化	24.3 (－7.1%)						

S*:SO₃

水和収縮が自己収縮に影響する機構は次のように考えられています。セメントペーストは水和が進行してくると骨格を形成し、次第に変形に対する抵抗性を有してきます。すると、水和収縮に相当する変形を生じることができなくなり、内部に間隙を形成することで体積減少を補うようになります。この時、内部の水は大きな間隙から小さな間隙へ移動が生じるため、大きな間隙から不飽和となり一種の乾燥状態となるのです。これは、一般的な外部への水分蒸発による乾燥と区別して自己乾燥 (self desiccation) といわれています。図-2に、封緘(密封)養生時の硬化体内部の相対湿度を測定した例を示します。同図より、材齢の経過にともなって硬化体内部が乾燥していることがわかります。またその程度は、低水セメント(結合材)比になるほど顕著になっています。これは、単位水量が相対的に少なくなることや、組織が緻密になるため間隙形成速度に水の移動が追いつかないことが原因として考えられており、低水セメント(結合材)比のコンクリートにおいて自己収縮が大きくなる一因となっています。

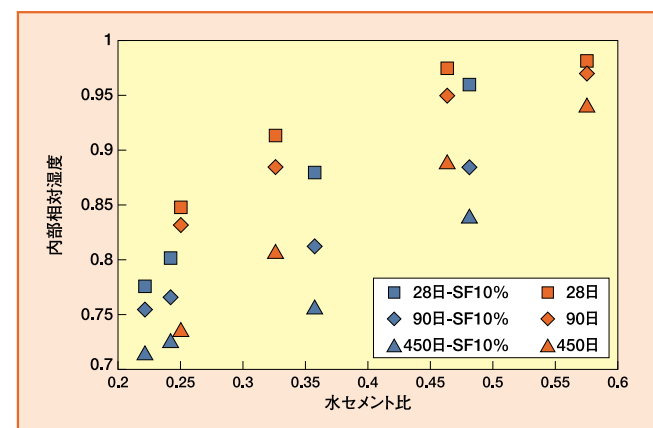


図-2 水セメント(結合材)比と硬化体の内部相対湿度の関係 (Persson, 1997)

Q3

自己収縮に影響を及ぼす要因はどのようなものがあるのでしょうか？

A3

主には、セメント・混和材の種類など材料の影響、水結合材比などの配(調)合の影響、温度などの影響が挙げられます。

解説

1. 材料の影響

自己収縮の大きさはセメントの種類によって異なり、同一配(調)合条件の場合、一般には低発熱型のセメントほど自己収縮が小さくなるといわれています。下式は、宮澤・田澤らが提案したポルトランドセメントの主要な鉱物組成量からセメントペースト(W/C=30%)の自己収縮ひずみの最終値

$$\varepsilon_{p\infty} = 2.15 (C_3S\%) - 5.49 (C_2S\%) + 68.7 (C_3A\%) + 48.5 (C_4AF\%)$$

$$\varepsilon_{p\infty} : \text{材齢1日を原点とした自己収縮ひずみの最終値} (\times 10^{-6})$$

$$(C_3S\%) : C_3S \text{の含有率} (\%), C_2S, C_3A, C_4AF \text{についても同様}$$

を予測する式です。式中の係数から判断すると、C₃AやC₄AFの量の増加が自己収縮の増大に大幅に寄与し、C₂S量の増加が自己収縮を低減することが示唆されます。

このような関係から、自己収縮抑制を目的とする場合、セメントの種類としては低熱あるいは中庸熱ポルトランドセメントなどを選択することがひとつの手段であるといえます。

また自己収縮は混和材の種類や量、性質によって影響を受けることが知られています。しかし、その程度は置換率や粉末度などによって異なります。一般的に、セメントをシリカフュームや高炉スラグ微粉末で置換すると置換率の増大とともに自己収縮が大きくなる傾向が、一方フライアッシュや石灰石微粉末で置換すると置換率の増大に応じて自己収縮が小さくなる傾向が認められています。そのメカニズムは、セメント量、硬化体内部の湿度などから説明が試みられており、これらが複合的に作用しているものと考えられています。

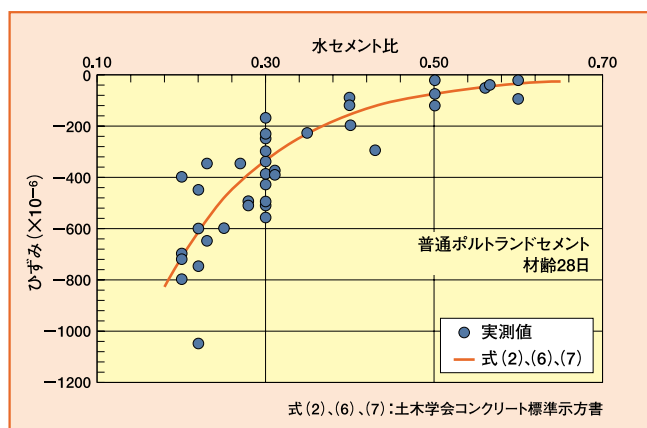


図-3 水セメント比と自己収縮ひずみの関係 (宮澤, 2005)

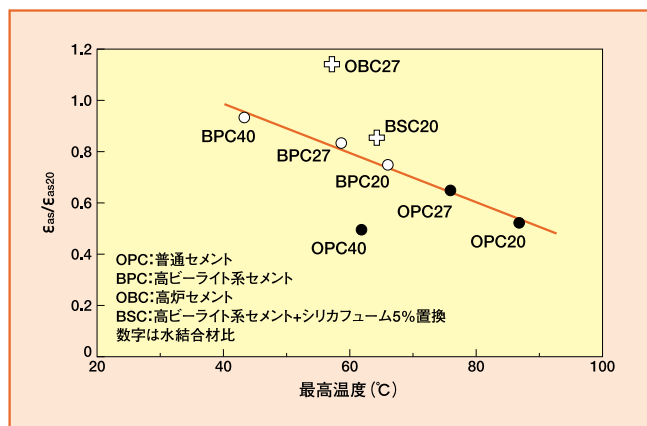


図-4 最高温度と自己収縮比(ε_{as}/ε_{as20})の関係 (橋田ら, 2002)

2. 配(調)合の影響

冒頭に述べたように、自己収縮は低水セメント配(調)合になるほど大きくなることが明確な事実として受け止められています。図-3に、水セメント比と材齢28日におけるコンクリートの自己収縮ひずみの関係を示します。同図より、水セメント比約40%以下から自己収縮が顕著になることがわかります。低水セメント比で自己収縮が大きくなる主な理由は、先に示した相対湿度の低下量の増大に加え、細孔構造が微細化することでメニスカス半径が小さくなり、液状水の負圧が増大するためと考えられています。また、水セメント比が20%程度以下の配(調)合になってくるとシリカフュームを混和することが多く、これにより自己収縮がさらに大きくなる傾向にあります。

3. 温度の影響

水和反応は温度条件によって促進あるいは遅延するため、同様に自己収縮も温度の影響を受けます。自己収縮は高温で進行速度が速く、低温では遅くなる傾向があり、一般的に温度は収縮の進行速度に影響を与えると考えられています。また、温度が急に変化し比較的高温履歴を受けるような場合には、水和物の形態や細孔構造の形成に影響を与えるという理由から、自己収縮の大きさにも影響することもあります。図-4は、20℃一定条件下での自己収縮と簡易断熱養生下での自己収縮の比を、簡易断熱養生時の最高温度で整理したものです。同図より、ポルトランド系のセメントの場合、最高温度が高くなるほど20℃条件下よりも自己収縮が小さくなる傾向がわかります。その一方で、高炉スラグ微粉末を用いた配(調)合では高温履歴を受けた方が20℃条件下よりも2割程度大きくなっています。これは高炉スラグ微粉末の反応の温度依存性が高いことがその理由のひとつとして考えられます。

Q4

自己収縮の抑制方法はどのようなものがあるのでしょうか？

A4

セメントの種類を低発熱型にすることや、収縮低減剤、膨張材といった混和材、含水率の高い軽量骨材などを使用する方法があります。

解説

前述したように、自己収縮の抑制にはセメントの種類を中庸熱、低熱ポルトランドセメントのような低発熱型のものにすることが効果的です。その他にも自己収縮の発生機構に応じたいくつかの手法が提案・実用化されています。毛細管張力を低減するものとしては収縮低減剤があります。収縮低減剤は従来乾燥収縮を抑制するものとして用いられてきましたが、自己収縮にも同様に効果があり実用されています。自己乾燥を抑制するものとしては、含水率

の高い軽量骨材や高吸水性ポリマー微粒子を用いる方法があります。これらは、それ自体が保持していた水が水和の進行とともに硬化体中に移動するため、自己乾燥が軽減され収縮抑制効果が得られます。また体積変化を補償する手法として膨張材の適用があります。膨張材については「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。その他にも、撥水性混和材料、遅延剤と水和熱抑制剤の併用などがありますが、自己収縮は実際には単独で生じることはほとんどなく、その他のひび割れ発生要因と同時に起こります。したがって、構造物や環境の条件に応じて、その他の要因と併せて適切な抑制方法を選択することが重要となります。

太平洋セメント株式会社
中央研究所研究開発部セメント化学チーム
兵頭 彦次

【参考文献】
宮澤伸吾, 田澤榮一: セメント系材料の自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響, コンクリート工学年次論文報告集, No.47, pp.528-533, 1993



イラスト(原画): 平尾 宙