

委員会報告 「コンクリートの自己収縮に関する研究委員会報告」

田澤 栄一^{*1}・宮澤 伸吾^{*2}・今本 啓一^{*3}・岸 利治^{*4}

委員長 田澤栄一(中央大学研究開発機構)

幹 事 宮澤伸吾(足利工業大学)

主 査 今本啓一(東急建設(株), 現足利工業大学)

岸 利治(東京大学)

委 員 綾野克紀(岡山大学)

有馬冬樹(大和ハウス工業(株))

鵜澤哲史(大成建設(株))

内海秀幸(千葉工業大学)

浦野真次(清水建設(株))

小田部裕一(住友大阪セメント(株))

笠井哲郎(東海大学)

小島正朗((株)竹中工務店)

後藤孝治((株)太平洋コンサルタント)

坂井悦郎(東京工業大学)

佐藤良一(広島大学)

委 員 佐藤嘉昭(大分大学)

下村 匠(長岡技術科学大学)

新村 亮((株)大林組)

高橋幸一((株)八洋コンサルタント)

壇 康弘(新日鐵高炉セメント(株))

谷村 充(太平洋セメント(株))

名和豊春(北海道大学)

野口貴文(東京大学)

保利彰宏(電気化学工業(株))

山田泰弘(建設基礎エンジニアリング(株))

渡辺博志(独立行政法人土木研究所)

1. はじめに

高強度コンクリート、高流動コンクリート、マスコンクリートなどにおいて、セメントの水和反応に伴う自己収縮がひび割れの発生原因となる場合があることが近年明らかにされた。そのため、JCI 自己収縮委員会(1994～96 年度)ではこの分野に関する包括的な調査研究活動が行なわれ¹⁾、1998 年には JCI 主催で自己収縮に関する国際的なワークショップが開催された²⁾。このワークショップの成果として、①自己収縮の定義および試験法についての国際的な共通認識が必要なこと、②自己収縮を考慮したひび割れの制御方法について検討することが重要であること、などが明らかにされた。

そこで、このような課題について調査研究を行うために、JCI では 2000 年度から 2 年間の予定で本委員会が設置された。

2. 委員会の構成

本委員会では、以下の 3 つのワーキンググループ(WG)を設置し、調査・研究活動を行った。

1) 定義・試験法 WG

自己収縮に関連する用語の定義について海外にアンケート調査を行い、得られた意見を参考にして用語の定義について検討する。また、自己収縮に関連する共通試験を行い、各種試験方法により得られた実験結果を比較検討する。

*1 中央大学機構教授 研究開発機構 工博 (正会員)

*2 足利工業大学教授 工学部都市環境工学科 工博 (正会員)

*3 足利工業大学講師 工学部建築学科 工博 (正会員)

*4 東京大学助教授 生産技術研究所 工博 (正会員)

2) 材料・施工 WG

自己収縮のメカニズムに関する最近の研究報告を調査する。セメント、混和材料、配合、施工などがコンクリートの自己収縮に及ぼす影響、自己収縮の低減法について研究報告を調査する。

3) 応力算定・実構造物 WG

自己収縮が構造物の性能に及ぼす影響についての研究事例を紹介する。また、自己収縮を考慮した国内外の実構造物の事例、および、各指針類への自己収縮の取り込みの現状について調査する。

3. 活動の概要

本委員会の活動成果は報告書としてとりまとめる予定であり、報告書の目次は概略右記のようになる予定である。各 WG の活動成果の概要は以下の通りである。

3. 1 定義・試験法

自己収縮の定義については各国で考え方が異なり、共通認識を得るには至っていない。海外の主な研究者に対して、用語の定義に関するアンケート調査を行い、寄せられた回答を参考にして、用語の定義について検討した。ヨーロッパ諸国ではプラスチック収縮および沈下によるひび割れを取り扱う目的で、凝結以前の体積変化を自己収縮に含めて検討する場合が多いのに対して、本委員会では、凝結以前の体積変化は自己収縮に含めないこととしている。

そこで、表-1 に示すように、他の体積変化との関係について解説を行うとともに、「用語の定義」の解説に以下の記述を行い、本委員会の考え方をより明確に示すこととした。

「練混ぜ後ごく初期のセメント系材料がまだプラスチックな状態にある場合は、水和収縮の進行とともに沈下が生じる。また、凝結以

報告書の概要

- 1 はじめに
- 2 用語の定義
 - 2.1 用語の定義
 - 2.2 各種体積変化
 - 2.3 海外へのアンケート結果
- 3 試験方法
 - 3.1 JCI 法
 - 3.1.1 水和収縮
 - 3.1.2 自己収縮
 - 3.1.3 自己収縮応力
 - 3.2 共通試験
 - 3.2.1 共通試験の概要
 - 3.2.2 使用材料および配合
 - 3.2.3 自己収縮
 - 3.2.4 自己収縮応力
 - 3.2.5 クリープ
 - 3.2.6 応力解析
- 4 自己収縮のメカニズム
 - 4.1 乾燥収縮のメカニズム
 - 4.2 水和収縮と化学組成
 - 4.3 水和組織と水分移動
 - 4.4 空隙構造と収縮
 - 4.5 自己収縮による微細ひび割れ
 - 4.6 自己収縮と乾燥収縮の重ね合わせ
 - 4.7 部材寸法の相違による乾燥収縮・温度との相互作用
- 5 材料・施工
 - 5.1 セメント
 - 5.2 混和剤
 - 5.3 混和材
 - 5.3.1 高炉スラグ微粉末
 - 5.3.2 膨張材
 - 5.3.3 膨張材と収縮低減剤との併用
 - 5.3.4 シリカフューム
 - 5.3.5 フライアッシュ
 - 5.3.6 石灰石微粉末
 - 5.4 軽量骨材
 - 5.5 配合
 - 5.6 養生
- 6 若材齢時の各種物性
 - 6.1 クリープ
 - 6.2 ヤング係数又は圧縮強度
 - 6.3 熱膨張係数
 - 6.4 引張強度または引張限界ひずみ
- 7 実構造物
 - 7.1 部材レベルの検討
 - 7.2 施工事例とひび割れへの影響
 - 7.3 ひび割れ対策施工事例
- 8 指針における自己収縮の取り込み

表ー1 コンクリートの各種体積変化の特徴

種 類			材 齢		備 考	質 量 変 化		
			打 設	フレッシュ コンクリート			凝 結	硬化コンクリート
			流体が連続相を形成				固体が連続相を形成	
外部からは観 察不可能な変 形		水和収縮				フレッシュ時はマクロな体積変化 となり上面に現れるが、凝結後は 大部分が内部空隙の増加となる。	無	
巨視 的 な 体 積 変 化	プラス ティッ ク体積 変化	沈下		鉛直方向・一次的		打ち上がり面の鉛直下方への移動 として観測される。	無	
		プラス ティッ ク収縮	自己 乾燥	水平方向・二次的		内部でも起こる 表面に水が存在する状態でも起こ る	無	
			水分 逸散	水平方向・二次的		上表面の局所的な水平方向の収縮 ブリーディング速度<表面乾燥速 度でなければ起こらない	有	
		プラスティ ック膨張		三次元的		発泡または結晶の生成による	無	
		温度膨張・収 縮		三次元的		水和熱の発生と伝達による温度変 化	無	
	自己体 積変化	自己収縮			三次元的または自己乾燥が起こ る部材全体で生じる	自己乾燥による	無	
		自己膨張			三次元的		無	
	乾燥収縮				三次元的または乾燥面付近に卓 越した大きさで生じる	乾燥による水分の逸散によって生 じる	有	

前において水和収縮の進行により水平方向にプラスティック収縮が生じる。沈下およびプラスティック収縮は、流動または大きな塑性変形を伴うためほとんど応力の発生を伴わない。これらの体積変化に起因するひび割れは、こて押えやタッピング等を行うことにより軽減することができる。

これに対して、コンクリートが凝結した後は硬化体の骨格が形成されるため、自己体積変化は三次元的に生じる。また、体積変化が拘束を受けることによりコンクリート中には自己応力が生じ、この応力が引張の場合はひび割れの発生原因となる。

以上のように凝結以前および凝結以降における体積変化は、発生機構、発生する方向および対策が異なるので、両者を区別して扱うことが各種の工学的対処が容易になる。そこで、自己収縮は、硬化コンクリートのひび割れの検討

に用いることを目的とし、凝結以後に生じる変形と定義する。水和収縮により生じる凝結以前の体積変化は、プラスティック収縮に含めて扱う。」

自己収縮に関する試験方法としては、1996年にJCI自己収縮研究委員会が提案した方法がある¹⁾。しかし、これらの方法の精度や再現性に関して、まだ統一的に調査された例はないようである。そこで、本研究委員会では自己収縮に関する共通試験を実施した。すなわち、同一ロットのセメント、骨材、混和剤を用い、コンクリートの配合を水セメント比 22～50%の範囲で5種類に統一し、自己収縮および自己収縮応力試験を行った。各機関で実施された実験の結果について報告を行っている。

3. 2 材料・施工

1) 自己収縮のメカニズム

自己収縮とそれに伴う諸現象を機構に基づいて解釈することは、設計において自己収縮の影響を合理的に取り扱い、施工において自己収縮に起因した諸問題に適切に対処するために極めて重要である。そこで、自己収縮を理解する上で重要と思われる最近の研究や過去の知見について紹介するとともに、委員会独自の見解も交えて解説している。

・乾燥収縮のメカニズム

自己収縮が生じるのは、水和の進行に伴ってセメント硬化体の骨格が形成されるものの、セメント系材料が水和収縮することにより、空隙内部で自己乾燥が生じ、メニスカスの形成に伴う負圧が骨格に作用するためと考えられている。液状水が失われていく要因こそ異なるものの、自己収縮のメカニズムは乾燥収縮のそれと共通する部分が多いと考えられる。そこで、自己収縮と乾燥収縮の共通点と相違点について、工学的視点と研究的視点の両面から解説を行っている。

・水和収縮と化学組成

セメントの組成におけるアルミネート相の増加は水和収縮の増加に関連すると言われていたが、今後セメント産業がアルミ分の多い廃棄物を社会貢献の一環として恒常的に受け入れていくためには、自己収縮の観点からアルミネート相をどの程度まで多くすることができるのかという視点も重要である。そこで、アルミネート相の組成量を系統的に変化させて水和収縮への影響を検討した最近の研究について紹介している。

・水和組織と水分移動

水分子の存在場および移動場として、あるいは体積変形を生じるマトリックスとして、セメント硬化体の水和組織は重要である。そこで、水和組織モデルの代表的なものを取り上げ、C-S-H ゲルの特徴などについて紹介している。

また、水和組織中における自由水・吸着水・結水などの水分の存在形態と水和や乾燥による水分の形態変化について説明し、乾燥に伴う水分移動現象について、幾つかの機構モデルを紹介している。

そして、水分移動の中でも特に透水性と関係が深いセメント硬化体中における毛管空隙の連続性について、水セメント比との関係に関する Powers らの理論について紹介している。

・空隙構造と収縮

水和による自由水の消費や外部への乾燥による水分移動が生じると空隙内の内部湿度が低下していく。収縮の主たる駆動力としては、空隙内に形成されるメニスカスに起因した毛管力が考えられているが、その大きさは空隙構造の緻密さにも依存すると考えられる。一方、収縮の駆動力に対する抵抗としての剛性も空隙構造に依存している。そこで、空隙構造の特徴と収縮の関係について説明している。

・自己収縮による微細ひび割れ

自己収縮が生じることは、その後に乾燥を受けた際のひび割れに対する抵抗性を引き下げるものと考えられるが、自己収縮が生じただけでは中々部材を貫通するようなひび割れが生じないことが報告されている。ただし、このような状況であっても、微小なひび割れは自己収縮によってセメント硬化体内部に形成される可能性も指摘されており、これらの研究について紹介している。

・自己収縮と乾燥収縮の重ね合わせ

一般に自己収縮は封緘状態で測定され、乾燥収縮は十分に硬化した供試体で測定されるが、水セメント比がある程度低いコンクリートが若材齢で乾燥を受けた場合には、両方の要因が含まれた収縮が生じると考えられる。自己収縮と乾燥収縮では、水分消失の原因こそ異なるものの、収縮の駆動力の発生機構はかなり共通していると考えられ、両者を完全に独立に扱うには仮定の検証が必要である。そこで、自己収縮

と乾燥収縮の重ね合わせの妥当性について、現象論と工学的な取り扱いの両面から解説している。

・部材寸法の相違による乾燥収縮・温度との相互作用

自己収縮および乾燥収縮は、供試体で測定されることが多いが、実際の構造物における部材寸法は供試体とは大きく異なるものであり、水和発熱に伴う温度変化や部位によっては乾燥収縮の関与が生じることになる。また、空隙内の液状水はある程度の連続性を保とうとすることから、水和の進行に伴い、断面内の水分分布も一様でなくなることが報告されている。そこで、部材寸法の影響も含めて、実際の部材で生じる体積変形について概説している。

2) 材料・施工

本章では、材料・施工に関する最近の研究成果について紹介している。

セメントについては、低熱ポルトランドセメントについての最近の研究成果を中心にまとめている。また、混和剤については、高性能 AE 減水剤の影響に関する最近の研究成果や収縮低減剤の効果について紹介している。

混和材については、高炉スラグ微粉末、膨張材、膨張材と収縮低減剤との併用、シリカフューム、フライアッシュ、石灰石微粉末の項を設けて、それぞれについての最近の研究成果について紹介している。

膨張材と収縮低減剤は、それぞれ単独で用いても収縮の低減に効果があるが、両者を併用することにより、その効果は著しく増加することが報告されている。この効果は、低熱ポルトランドセメントを用いた場合に顕著であり、その機構については、低熱セメント単体としての優位性に加えて、水和の進行と膨張効果の発現時期との関係から説明が加えられている。

軽量骨材に関しては、軽量骨材を使用した場合の自己収縮の一般的な特徴について概説するとともに、従来の人工軽量骨材に加えて、近

年開発された高強度フライアッシュ人工骨材を用いた研究事例なども紹介している。

養生の影響に関しては、主として温度変化を受けた場合の自己収縮への影響について説明しており、マスコンクリートを想定した温度履歴下や高温一定温度下における自己収縮の測定事例を紹介している。また、高温高压水中養生という特殊な養生を行った場合の体積変形についても、最近の研究事例を紹介している。

3. 3 応力算定・実構造物

1) 若材齢時の各種物性

自己収縮を考慮したひび割れ制御技術を確立するためには、自己収縮ひずみを拘束することにより発生する応力を精度よく算定することが必要となる。そこで応力算定・実構造物 WG では、まず、そのために必要となる入力値としての各種物性すなわちクリープ、ヤング係数、熱膨張係数、そして引張強度・引張限界ひずみについて、特に若材齢時を対象とした既往の研究を調査した。ここで「若材齢」の定義が問題となるが、RILEM TC 42-CEA³⁾の報告ではコンクリートの圧縮強度が概ね 10MPa 発現するまでの材齢(普通強度コンクリートでは材齢約 1 日)が「若材齢」として取り扱われている。本 WG ではこれを踏まえ、更に広範囲な情報を収集する目的で、材齢約 7 日程度までを「若材齢」として既往の研究をレビューしている。

・クリープ

クリープ試験はこれまで、一般に長期材齢における物性の把握に用いられることが多かったが、近年、若材齢時における研究例も活発に行われている。本項では特に、高強度、高粉体系コンクリートの若材齢時における引張クリープ特性について調査を行っている。

・ヤング係数又は圧縮強度

本項では、硬化初期の段階である凝結の終結付近からの特性を把握することを目的とし、古

くは笠井らの研究⁴⁾に立ち戻り、応力-ひずみ曲線の材齢に伴う変化、ヤング係数の発現、圧縮強度とヤング係数の関係について既往の研究をレビューしている。

・熱膨張係数

コンクリートの自己収縮ひずみを測定するにあたり、供試体の温度が一定に保たれているのであれば、温度ひずみの介在がないので、この補正は特に必要ではないと考えられる。しかし、環境温度が変化する場合や、あるいは、環境温度を一定であっても非常に富配合のコンクリートで比較的高温環境にある場合の自己収縮ひずみを測定する場合では、供試体の温度変化が生じるため、測定されるひずみは自己収縮ひずみと温度ひずみが足し合わさったものとなる。この補正のために、熱膨張係数の把握が必要となる。若材齢時のコンクリートの熱膨張係数の測定から見れば、自己収縮ひずみを排除するための工夫が必要となるが、本項では、この点を考慮した各種の研究事例について紹介している。

・引張強度または引張限界ひずみ

応力を算定し、ひび割れ発生の有無を検証するためには、コンクリートの引張強度または引張限界ひずみの把握が必要となる。本項では、凝結前後を含めた引張強度・引張限界ひずみの測定方法・測定結果の例、および若材齢時におけるひび割れ発生基準に関する既往の研究を紹介している。

2)実構造物

本章では、実構造物および実大構造物の温度応力やひび割れの発生について自己収縮の影響を含めて検討している事例を、比較的最近の文献に基づきまとめた。対象とした実大構造物の例は以下のとおりである。

- ・ 地下駅舎のドームコンクリート
- ・ 橋脚
- ・ ボックスカルバート
- ・ LNG貯槽用のPC防液堤

- ・ 地上3階、地下1階のRC建築物
- ・ ケーソン
- ・ 他

調査事例の中には、必ずしも自己収縮がひび割れ発生の主因とはなっていないものも含まれるが、これらは、温度応力に自己収縮応力を加えた、今後のひび割れ制御技術の確立に資する貴重な資料であると判断し、本章で紹介することとした。

3) 指針における自己収縮の取り込み

本章では、実構造物の設計に用いられる設計基準において、コンクリートの自己収縮がどのように取り扱われているかを解説している。特に、最近完成した土木学会コンクリート標準示方書(2002年版)では、自己収縮について、これまでの国内外の指針類にない進歩的な取り扱いを行うことができたので、この点を中心に解説している。

4. おわりに

本委員会の成果は、2002年9月22日に建築会館(東京)において開催予定の「コンクリートの自己収縮 講演会」において報告する予定である。また、講習会においては、自己収縮をとりまく最新の調査研究成果についての基調講演(4件)も行われる予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:自己収縮研究委員会報告書, 1996.11
- 2) Tazawa, E. (ed.): Autogenous shrinkage of Concrete, E & FN SPON, 1999
- 3) RILEM Committee 42-CEA, Properties of Set Concrete at Early Ages-State of the Art Report -, Materials and Structure, Vol.14, No.84, pp.399-450, 1981
- 4) 笠井芳夫, コンクリートと共に歩んだ45年(論文概要), 2001年6月