

委員会報告 「膨張コンクリートによる構造物の高機能化 / 高耐久化研究委員会報告」

辻 幸和^{*1}・坂井 悦郎^{*2}・野口 貴文^{*3}・岸 利治^{*4}

委員長 辻 幸和（群馬大学）

幹 事 坂井悦郎（東京工業大学）

野口貴文（東京大学）

岸 利治（東京大学）

委 員 稲葉洋平（鹿島建設(株)）

浦野知子（(株)大林組）

遠藤達巳（(財)電力中央研究所）

大久保孝昭（(独)建築研究所）

小田部裕一（住友大阪セメント(株)）

大友 健（大成建設(株)）

大西弘志（大阪大学）

岡井大八（大阪ガス(株)）

小川秀男（(株)エヌエムビー）

鹿野善則（日本道路公団）

嘉村武浩（(株)日建設計）

菅野征雄（鶴見コンクリート(株)）

Supratic GUPTA（群馬大学）

委 員 小林 薫（東日本旅客鉄道(株)）

佐久間隆司（太平洋マテリアル(株)）

佐藤嘉昭（大分大学）

佐藤良一（広島大学）

山東徹生（日本鉄道建設公団）

高瀬和男（(社)日本橋梁建設協会）

橘 吉宏（(社)日本橋梁建設協会）

伊達重之（石川島建材工業(株)）

田中博一（清水建設(株)）

谷村 充（太平洋セメント(株)）

萩ノ谷克範（都市基盤整備公団）

細田 暁（東日本旅客鉄道(株)）

三品文雄（日本下水道事業団）

三井健郎（(株)竹中工務店）

盛岡 実（電気化学工業(株)）

山本貴士（京都大学）

1. はじめに

近年、コンクリートの収縮ひび割れ抑制が高耐久性確保の観点から益々重要な課題となっており、再び膨張コンクリートへの期待が高まりつつある。膨張材は、単にコンクリートの収縮を補償するのみならず、ひび割れ抵抗性を向上させ、ひび割れ幅も低減することが知られている。膨張材の添加量を増やしケミカルプレストレスを導入することによって、これらの効果は一層高まり構造性能も向上する。このように、膨張コンクリートは、収縮およびひび割れという耐久性上のコンクリートの弱点を抜本的

に改善できる可能性を有した材料といえる。

しかし、膨張コンクリートの効用は、配合条件・拘束条件・環境 / 養生条件に大きく依存するので、過去には現場施工において十分な効果が認められなかった事例もあり、二次製品用の特殊コンクリートとしてはその性能と効果に十分な認知を得ているものの、一般の構造物の信頼性向上に広範に活用されるまでには至っていなかった。膨張コンクリートの挙動の複雑さゆえに、ひび割れの発生抑制、ひび割れ幅の低減、および温度応力の緩和などの膨張材の効果を、設計において定量的に評価する手法が十分には

*1 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博（正会員）

*2 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科材料工学専攻 工博（正会員）

*3 東京大学助教授 大学院工学系研究科建築学専攻 工博（正会員）

*4 東京大学助教授 生産技術研究所物質・生命大部門 博（工）（正会員）

確立されていないことの影響も大きい。一方、膨張材の高性能化に関する研究は最近になって大きく進展し、高強度化や高流動化などの新たなコンクリート技術の展開に伴って膨張材の使用形態も多様になってきた。

そこで、本研究委員会では、膨張材および膨張コンクリートの効用が構造物の高機能化／高耐久化に一層活かされるように、関連する知見の整理と技術の体系化を目的として、2001年度から2年間にわたって活動を行ってきた。

2. 委員会の構成

本委員会では、膨張機構・材料物性WG、構造挙動・部材特性WG、施工・ひび割れ対策検討WGの3つのワーキンググループを設置し、調査・研究活動を行った。本委員会の活動成果は報告書としてとりまとめており、報告書の目次は概略右記のようになる予定である。各WGの活動成果と報告書の概要は以下の通りである。

3. 膨張機構・材料物性WGでの検討

膨張機構・材料物性WGでは、材料面からの膨張材の整理や水和膨張機構さらに膨張材の性能に与える各種要因などを整理した。また、膨張コンクリートの自己収縮や長期的な性状について整理するとともに、膨張材を用いた高性能コンクリートの提案を行なった。

1章では、現在使用されている膨張材について最近新たに開発された膨張材も含めて整理し、分類を新たに行なった。表-1に現在市販されている膨張材の化学組成と物理的な性質を示す。表-2に各種の膨張材を主な生成物と化学反応式から4種類に分類した。A,Dはアウイン、遊離石灰、無水セッコウを主成分として、エトリンガイトを主に生成させるものである。BはC₃Aとセッコウを主体としてエトリンガイトを生成し、C,Fは生石灰を主体として水酸化カルシウムを生成するものであり、Eについては両者の生成が生じている。

また、最近開発された新しい膨張材として、図

報告書の概要

序

1 膨張材の種類

1.1 膨張材の分類

1.2 新しい膨張材

2 膨張材の水和と材料レベルの膨張メカニズム

2.1 水和機構

2.2 膨張機構

3 膨張材の性能に与える各種要因

3.1 練混ぜ方法や投入方法の影響

3.2 養生の影響

3.3 セメントの種類

3.4 混和剤の影響

3.5 配合の影響

3.6 拘束条件の影響

4 膨張材を用いたコンクリートの自己収縮

5 膨張材を用いたコンクリートの長期的性状

6 膨張材を用いた高性能コンクリートの提案

7 膨張材の使用実績

8 膨張コンクリートを用いた部材の挙動

9 膨張ひずみ・ケミカルプレストレスとひび割れ幅の予測手法

10 膨張コンクリート部材の応力解析手法

11 膨張材の適用事例とニーズ

11.1 板状構造物のひび割れ補償

11.1.1 道路構造物

11.1.2 鉄道構造物

11.1.3 下水道構造物

11.1.4 建築構造物

11.2 マスコンクリートのひび割れ補償

11.3 ケミカルプレストレス導入

12 膨張コンクリートに関するアンケート調査結果

13 膨張コンクリートに関する失敗例

14 普及に向けての課題

15 おわりに

表 - 1 膨張材の物理的性質及び化学成分

銘柄	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分 (%)							
			強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	計
A	2.91	2500	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9	99.5
B	3.00	3200	1.2	3.1	6.3	0.4	58.0	0.3	29.6	98.9
C	3.14	3500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0	99.5
D	3.01	2800	1.0	1.5	13.0	0.5	51.2	1.5	29.3	99.5
E	3.10	2800	1.1	1.7	5.5	2.6	70.3	0.5	18.2	99.9
F	3.18	3010	1.6	4.2	1.1	1.0	74.0	0.51	16.5	98.9

表—2 化学反応式 (主成分 生成物)

銘柄	化学反応式
A, D	$3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 + 6\text{CaO} + 8 \text{CaSO}_4 + 96\text{H}_2\text{O}$ $\rightarrow 3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$
B	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{CaSO}_4 + 32\text{H}_2\text{O}$ $\rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
C, F	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$
E	$3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 + 6\text{CaO} + 8 \text{CaSO}_4 + 96\text{H}_2\text{O}$ $\rightarrow 3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$ $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$

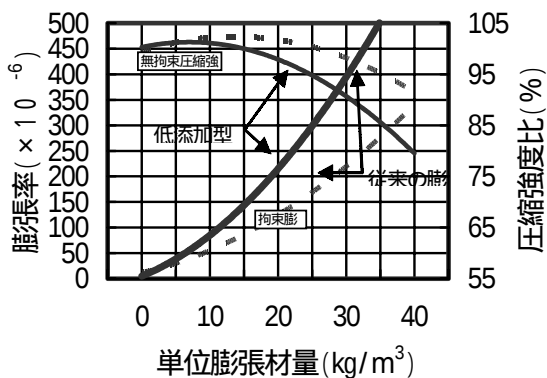


図 - 1 単位膨張材量と拘束膨張率ならび無拘束圧縮強度比の関係

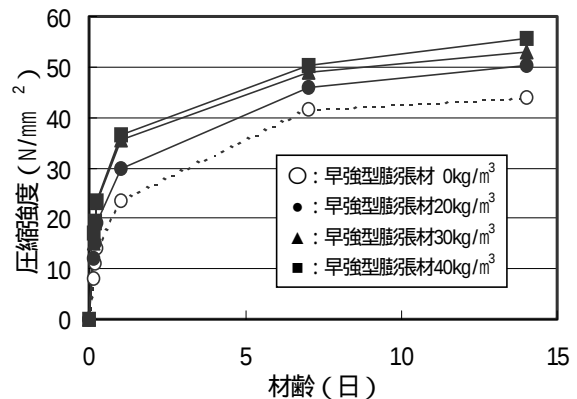


図 - 2 早強型膨張材の圧縮強度試験結果 (簡易蒸気養生)

- 1 に示すように単位量を 30kg/m³ から 20kg/m³ としても同様の膨張量が確保できるものや、図 - 2 のように、さらに早強性を付与したものを紹介している。

2 章膨張材の水和と材料レベルの膨張メカニズムでは、膨張材の水和について定量的な検討を加えた結果を紹介している。その結果、水和反応により、膨張材は水和収縮するので、膨張は、小さな空隙を有する水和物の生成により生

じていると考えるのが妥当であるとしている。図 - 3 は、C₃A-二水セッコウ-膨張材の系の水和に伴う相組成の変化である。アウイン系や生石灰系でもセメントでは初期の反応に C₃A が関与する。なお、同様な組成としてアウイン、遊離石灰、無水セッコウを主体とするが、それぞれ試料の合成方法が異なっている H-CSA(1)、H-CSA(2)と H-CSA(3)は、膨張特性は大きく異なっている(図 - 4)。すべての生成物をクリ

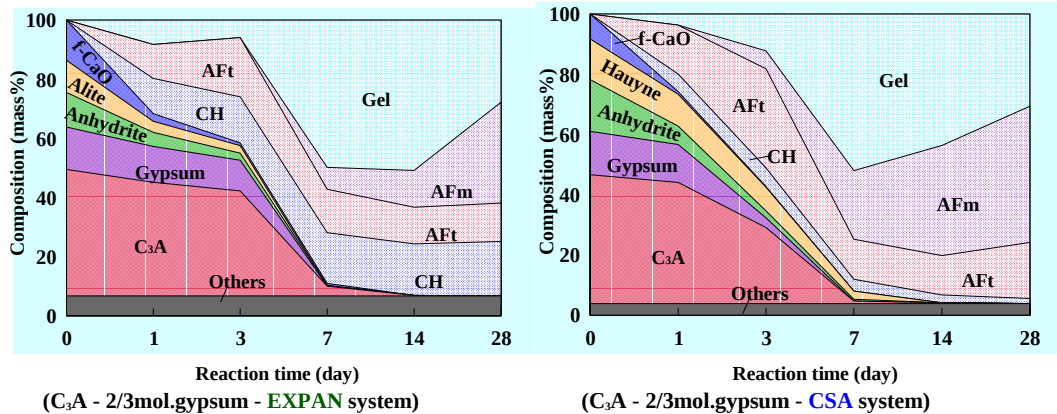


図 - 3 C_3A -二水セッコウ-膨張材系の水和と相組成変化

ンカーとして焼成した H-CSA(1)が最も大きな膨張量を示しており、ただ単に上記の化合物を混合しただけでは十分な膨張量を確保することが出来ないことを示している。

3 章の膨張性能に与える各種の要因としては、練混ぜ方法や投入方法の影響、養生の影響、各種混和剤の影響、配合の影響と拘束条件の影響について整理した。特に、設定した膨張性能を確保するためには、初期の湿潤養生が重要である。また、水結合材比をどの程度まで下げて膨張材を使用することが出来るかについては、水結合材比が 25%以下であると非常に長期にわたり膨張が継続する結果となっており、水結合材比を 30%～25%以下にするような場合には、長期間の膨張性状の把握が必要である。なお、制御して遅れ膨張を利用できれば、ひび割れの自己治癒も可能であるとの指摘もなされている。

4 章では膨張コンクリートの自己収縮を、5 章では膨張コンクリートの長期的な性状についてまとめた。強度、耐久性としては中性化、塩化物イオン透過性、水密性、耐酸性や耐硫酸塩抵抗性について整理した。これらはいずれも拘束条件の影響を受け、拘束条件下では、膨張コンクリートは密実になることが報告されている。耐凍害性についても同様な整理を行い、さらにひび割れや長さ変化についてもまとめている。以上の結果を踏まえて、低熱セメント、膨張材および収縮低減剤と高性能 AE 減水剤よりなる

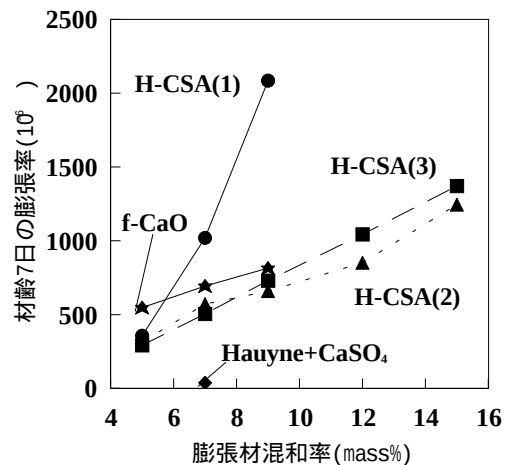


図 - 4 膨張材の調整方法の影響

高性能コンクリートでは、温度応力も小さいこと、また、自己収縮が生じないことを報告している。さらに繊維補強を組み合わせた高性能コンクリートなどについても報告している。

最後に、膨張材の使用実績をコンクリート製品と工事用に大別して整理している。

4. 構造挙動・部材特性WGでの検討

構造部材としてのケミカルプレストレストコンクリートが、種々の条件下で示す特徴的な挙動と効果について紹介し、膨張コンクリートの挙動に関して提案されているモデルや概念を整理した。そして、膨張ひずみ・ケミカルプレストレスとひび割れ幅の予測手法や膨張コンクリート部材の応力解析手法などについて、機構や原

理に着目して整理・検討を行った。

8 章では、まず、土木学会「膨張コンクリート設計施工指針」¹⁾に取りまとめられている膨張コンクリートを用いた RC 部材の力学的性状や、膨張ひずみの発現に影響を及ぼす各種要因などについて再度整理を行い、ケミカルプレストレスト部材の構造挙動の概略について説明する。その後、種々の条件下における膨張コンクリートの性能や挙動について紹介することで、膨張材使用による効果を示すとともに、膨張コンクリートの複雑な構造挙動を解釈する上で重要と思われる特徴を整理し、その機構についても検討する。具体的には、膨張コンクリートを用いた連続鉄筋コンクリート舗装において、通常の RC に比べて高いひび割れ抑制効果が確認された事例、膨張コンクリート曲げ部材の高いひび割れ抵抗性に及ぼすケミカルプレストレスとケミカルプレストレインの効果、引張応力下であるにも関わらずひび割れ発生に至る以前に膨張コンクリートが示す非線形的な挙動、主鉄筋だけでなくせん断補強筋などによって膨張が多軸に拘束された場合の効果、一旦は膨張が収束した膨張コンクリートはりに曲げ持続荷重を作用させることによって生じる追加膨張、通常の RC では乾燥を受けることによってひび割れ抵抗性は低下するが、長期においてひび割れ抵抗性が回復した膨張コンクリートの事例などについて紹介する。

9 章では、膨張ひずみ・ケミカルプレストレスに関する概念について整理を行い、これらのモデルに基づいたひび割れ幅の予測手法とその手順について整理した。また、膨張コンクリートの挙動に関する用語の整理も行った。

膨張コンクリートの膨張量については、「配合・養生条件・材齢が一定であれば、単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量は一定である」という、いわゆる仕事量一定則が知られている²⁾。この規則性は、実用的な鉄筋比の範囲で極めて高い精度を有しており、標準供試体における測定結果を元に任

意の鉄筋比における膨張ひずみとケミカルプレストレスを評価するのに有効である。ただし、無筋コンクリートの場合はもとより、極めて鉄筋比が小さい場合や逆に極めて鉄筋比が大きい場合には、仕事量一定則が成立しないことも知られている。これに対して、無筋を含む任意の鉄筋比に適用するには、膨張コンクリートを圧縮・引張・膨張の 3 つの要素に分解して取り扱うべきという複合モデルの概念も提案されている。また、有効自由膨張ひずみという考え方もあり、膨張という同一の現象を対象としたこれらの異なる概念について考え方を整理することとした。

続いて、膨張コンクリートを用いた場合のひび割れ幅の評価手法として、膨張コンクリート設計施工指針の予測式（外荷重を受ける曲げ部材）、膨張と収縮の統一的な取り扱いとしてのデコンプレッション概念、膨張コンクリートの効果を Tension Stiffening で考慮するひび割れ幅の予測手法の 3 つの方法について紹介する。

10 章膨張コンクリート部材の応力解析手法では、応力解析における膨張材の効果の取り扱いについて、自由膨張ひずみと拘束膨張ひずみの差が膨張材の効果によって蓄えられた圧縮ひずみとして取り扱う方法、拘束条件下で発現する膨張ひずみ自体を膨張材の効果として取り扱う方法、膨張材の効果を有効ヤング係数を低減させて考慮する方法、膨張と収縮およびクリープを時系列に重ね合わせて評価する方法などについて紹介し、膨張効果の評価方法の特徴と問題点について整理する。

5. 施工・ひび割れ対策検討WGでの検討

実務への対応を念頭に置き、膨張材の適用事例とニーズの整理、膨張コンクリートの施工と効果に関するアンケート調査、失敗学の考え方に基づいた失敗事例の整理などについて整理・検討を行った。

11 章膨張材の適用事例とニーズでは、板状構造物におけるひび割れ補償効果として、道路構造物、鉄道構造物、下水道構造物、建

築構造物を取り上げ、ひび割れ本数やひび割れ幅が減少した事例や膨張材の使用に対するニーズについて紹介し、また、マスコンとなるPCLNG 貯槽工事における膨張材の利用と効果について紹介している。

12 章では、膨張コンクリートの適用事例を幅広く調査し、現状を把握するためにアンケート調査を行った。その結果の一部を図 - 5 に示す。膨張コンクリートに期待された性能としては、乾燥収縮ひび割れ抑制が 55%程度と最も多く、続いて温度ひび割れ抑制が比較的多かった。また、膨張コンクリートの効果については、87%程度が「十分効果あり」または「少し効果あり」と回答しており、膨張コンクリートの適用効果が実感されている事例が多いことがわかる。ただし、ひび割れ対策として膨張材と他の対策を併用される場合も多く、効果がすべて膨張材のみによるかは不明なものもある。

膨張コンクリートを使用した際に、種々の場面で期待していた効果が発揮されなかった事例は当然生じることである。このような失敗事例は、成功体験に比べて忘れがたく、また適切な整理方法・知識化を行うことで確実な成功のもととなる、という「失敗学」の考え方が最近注目されている。そこで、13 章では、その考え方に従い、できるだけ失敗した当事者の主観的な情報を盛り込み、役に立ち、記憶に残るような知識化のプロセスを踏む形で、失敗事例集を作成した(図 - 6)。

6. おわりに

本委員会の成果は、2003 年 9 月 19 日(金)にあいおい損保新宿ホール(東京)において開催予定の「膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化」に関するシンポジウムにおいて報告する予定である。また、シンポジウムにおいては、委員会の研究成果の報告を行うとともに、膨張材・膨張コンクリートに関する研究論文を募集し、34 件の論文発表と討議を行う予定である。

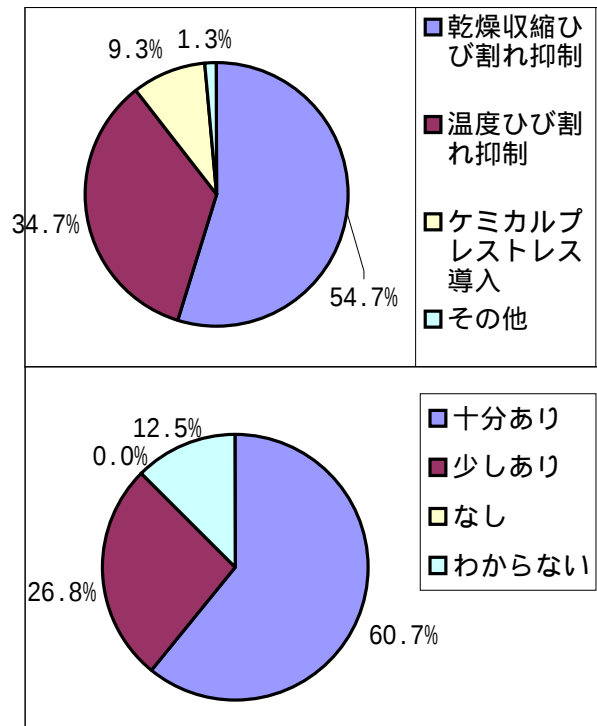


図 - 5 アンケート結果
上：膨張コンクリートに期待された性能
下：膨張コンクリートの効果

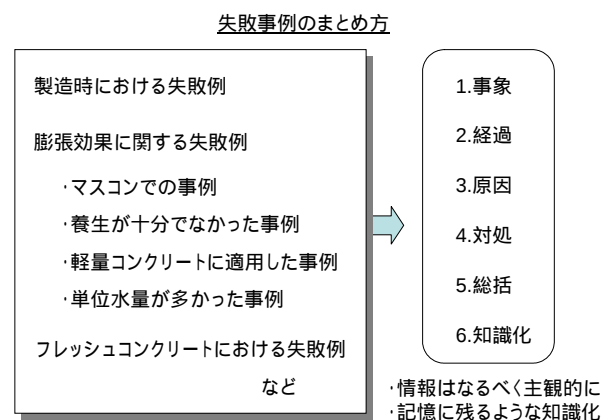


図 - 6 失敗事例のまとめ方

参考文献

- 1) 膨張コンクリート設計施工指針:土木学会, コンクリートライブラリー75, 1993.7
- 2) 辻 幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第 235 号, pp.111-124, 1975.3