

コンクリート収縮ひび割れ防止対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：材料資源研究グループ（基礎材料）

研究担当者：渡辺博志、片平博

【要旨】

コンクリートの収縮ひび割れ防止対策として、膨張材等の混和材が使用されている。その収縮低減効果と、強度や耐久性に与える影響について検討した。その結果を受けて、膨張材を使用する場合のマニュアル（案）を整理した。

キーワード：コンクリート、収縮ひび割れ、乾燥収縮、自己収縮、膨張材

1. はじめに

近年、骨材の低品質化等により、コンクリートの乾燥収縮が大きくなる場合¹⁾があり、収縮ひび割れ防止対策に関する関心が高まっている。対策の一つとして、収縮低減剤や膨張材の使用が模索されつつある。これらの材料の使用に伴い、コンクリート材料単価が相当上昇するが、その有効性については十分に検証されていない。本研究では、特に膨張材を用いた場合の収縮低減効果と、強度や耐久性に与える影響について検討した^{2),3),4)}。また、その結果を受けて、膨張材を使用する場合のマニュアル（案）を整理した。

2. 膨張材の概説と実験の目的

膨張材は、初期材齢に体積が膨張する水和生成物を形成することにより、コンクリートに膨張をもたらすものである。

コンクリートの乾燥収縮の測定試験では、コンクリート供試体作製後、材齢1週まで水中養生を行った後に供試体の基調を測定し、その後、室温 20℃相対湿度 60%の乾燥状態に置いて、供試体の長さ変化を測定するのが一般的である。

これと同様の養生条件における膨張コンクリートの膨張挙動は図-1 のようである。膨張の進行は概ね1週間程度の材齢で終了する。膨張が収束した後に乾燥を受けた場合の乾燥収縮の量は、膨張材を用いないコンクリートとほぼ同等か若干小さい程度であるので、長期的に進行する乾燥収縮ひずみそのものを大きく低減するものではない。

従って、初期材齢での膨張ひずみを適切に発生させることが重要であり、コンクリート練混ぜ後、一週間程度の水和反応の進行状況が、膨張コンクリートの効果を左右する鍵を握っていると言える。

このような背景から、実験 I では、セメントの種類、水セメント比、初期材齢の温度履歴や養生方法等を広範に変化させた実験を行い、膨張コンクリートの膨張特性を測定した。この実験の結果、低水セメント比の領域では、自己収縮の影響によって膨張材を添加した場合でも、ひずみが膨張側に転じないケースが確認された。そこで、実験 II として、低水セメント比の条件を想定して、膨張材の添加量を増やした場合の収縮低減効果や、強度や耐久性に与える影響に関する実験を行った。

3. 実験 I：配合条件や環境条件と膨張材の効果

3.1 実験方法

実験条件の水準を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比は3水準、セメントの種類は4種類、膨張材（石灰系、低添加型、標準使用量 20kg/m³）の添加量は0または20kg/m³とし、これらの配合でコンクリートを練混ぜ、JIS A 6202 附属書 2「膨張コンクリートの拘束膨張および収縮試験方法」の B 法に準拠して、図-2に示す角柱供試体を2本ずつ作製した。供試体には図に示すように拘束治具を配置し、ねじ切り鋼材の中央部にひずみゲージを貼り付けた。このひずみゲ-

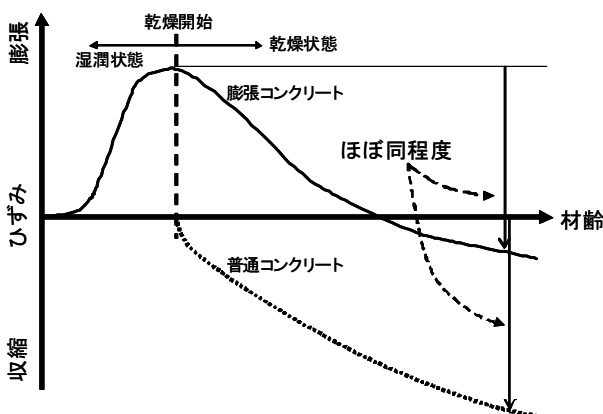


図-1 収縮補償の概念図

表-1 実験の水準

配合条件	温度条件	セメントの種類	養生条件
W/C : 55,40,30%	10℃ 20℃ 50℃	普通 早強 高炉B種 低熱	水中7日 封緘7日
膨張材: 有、無 (表-2参照)	(図-3 参照)		

表-2 コンクリートの配合

W/C※1 (%)	単位量(kg/m ³)					目標空気量 (%)	混和剤 (%)※2		
	水	結合材	膨張材		細骨材※3		粗骨材※3	Ad1	Ad2
			実験 I	実験 II					
55	172	313	0,20	0,30	809	976	4.5	0.31	0
40	172	430	0,20	0,20,30	732	956	4.5	0.31	0
30	172	573	0,20	0,20,30,40	649	1000	1.5	0	1

※1 C=結合材(セメント量+膨張材量)

※2 Ad1:AE減水剤、Ad2:高性能AE減水剤、添加量は(C+Ex)に対する質量%

※3 表中の細骨材、粗骨材の量は普通セメント使用時の値、他のセメント使用の場合は僅かに値が異なる

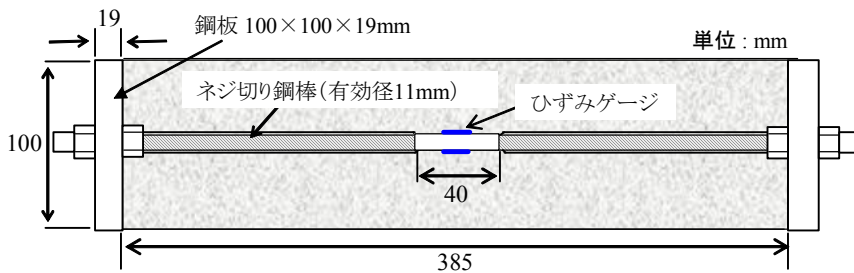


図-2 供試体の形状・寸法

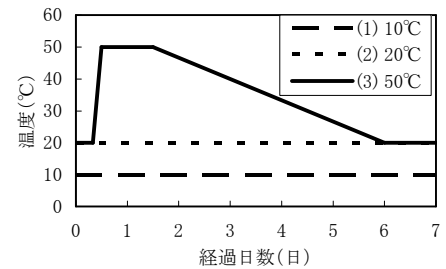


図-3 打設および養生時の温度設定

ジによって膨張ひずみを7日間測定した。

打設時および材齢7日までの温度・養生条件としては、温度条件を3水準、水分条件を2水準設定した。温度条件としては、図-3に示すように(1)打設・養生とも10℃一定、(2)打設・養生とも20℃一定、(3)打設は20℃でその後はマスコンクリートの温度上昇を想定して50℃までの昇降温を与える条件の3水準とした。(3)の温度上昇のタイミングとしては、打設後8~9時間経過時点から昇温を開始し、4時間後に50℃とし、その後24時間、50℃を維持した。

養生中の供試体の水分状態としては、打設直後に封緘状態とし、50℃のケースでは昇温を開始する時間から、10℃および20℃のケースでは打設の翌日から(a)水中養生または(b)封緘養生の2水準の水分条件とし、材齢7日まで養生した。

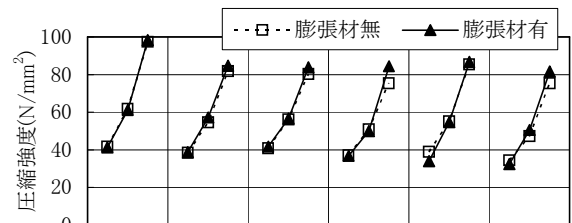
上記の角柱供試体とは別に、φ100×200mmの円柱供試体を2本ずつ作製し、材齢7日まで角柱供試体と同様の養生を行った後、20℃、60%R.H.の条件とし、材齢28日で圧縮強度試験を実施した。

3.2 圧縮強度試験結果

図-4~6に材齢28日の圧縮強度試験結果を示す。膨張材(標準添加量)が材齢28日時点の圧縮強度に与える影響は認められなかった。また、材齢7日までの養生が水中と封緘とでは水中養生のほうが僅かに高い強度を示した。

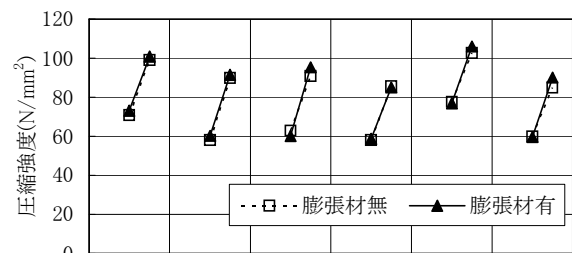
3.3 ひずみ測定結果

材齢7日における角柱供試体のひずみの測定結果を図-7~9に示す(膨張を+で示す)。この図では膨張材無



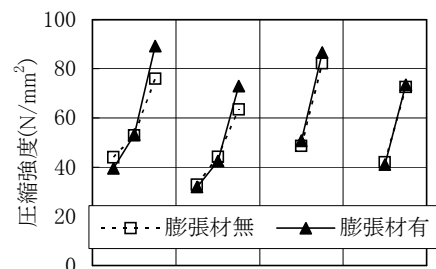
W/C	55	40	30	55	40	30	55	40	30	55	40	30	55	40	30			
養生	水中			封緘			水中			封緘			水中			封緘		
温度	10℃						20℃						50℃					
セメント	普通(N)																	

図-4 圧縮強度試験結果(普通セメント)



W/C	55	40	30	55	40	30	55	40	30	55	40	30	55	40	30			
養生	水中			封緘			水中			封緘			水中			封緘		
温度	10℃						20℃						50℃					
セメント	早強(H)																	

図-5 圧縮強度試験結果(早強セメント)



W/C	55	40	30	55	40	30	55	40	30	55	40	30
養生	水中			封緘			水中			封緘		
温度	20℃						20℃					
セメント	高炉(BB)						低熱(L)					

図-6 圧縮強度試験結果(高炉B、低熱セメント)

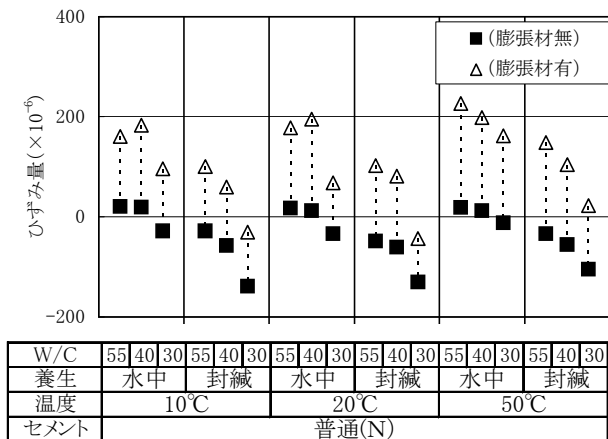


図-7 材齢7日のひずみ量(普通セメント)

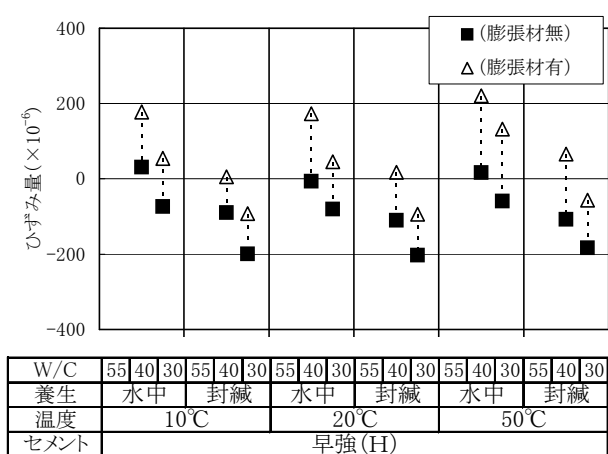


図-8 材齢7日のひずみ量(早強セメント)

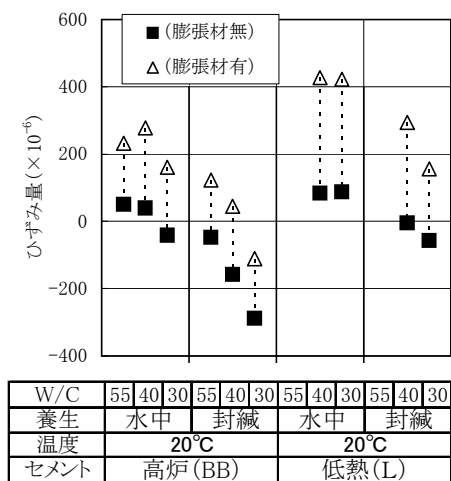


図-9 材齢7日のひずみ量(高炉、低熱セメント)

のひずみ量を■で、膨張材有のひずみ量を△で示した。従って膨張材の効果は破線の長さで示される。この図から以下の傾向が認められた。

- (1) 膨張材無の配合で封緘の条件では、低水セメント比で大きな収縮が認められた。この収縮はセメントの種類によって大きく異なり、早強セメントで大きく、高炉セメントB種では更に大きかった。逆に低熱セ

メントでは小さかった。

- (2) (1)の収縮に関して、普通セメントと早強セメントの配合では温度条件を変化させたが、温度に対する依存性は認められなかった。
- (3) 膨張材の効果は、温度が低いほど、また、水セメント比が低いほどやや小さくなる傾向を示した。また、セメントの種類に対しては低熱セメントで大きく、早強セメントではやや小さい傾向を示した。水中養生と封緘養生とで有意な差は認められなかった。
- (4) 膨張材の効果膨張材有と無との差で捉えた場合には、いずれの配合でも概ね 100×10^{-6} 程度以上の膨張効果が認められた。
- (5) 低熱セメントの結果を除き、(1)の自己収縮の影響のため、水セメント比が30%で封緘の条件だと、膨張材を添加しても、ひずみが膨張側に転じないものが多く認められた。

4. 実験Ⅱ：膨張材の添加量の影響

4.1 実験方法

表-2に示すように、水セメント比は30, 40, 55%の3水準とし、膨張材の添加量を $0, 20, 30, 40 \text{ kg/m}^3$ と変化した。なお、膨張材にはエトリンサイト系膨張材(E1)と石灰系膨張材(E2)の2種類(いずれも標準使用量は 20 kg/m^3)を使用した。セメントは普通セメント、打設温度は 20°C として、円柱供試体($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$)と図-2に示す角柱供試体、さらに、拘束治具を有しない $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ 角柱供試体を作製した。供試体の養生はいずれも 20°C 水中養生とし、円柱供試体は材齢28日で圧縮強度試験を実施した。角柱供試体は材齢7日までのひずみを測定した。また、材齢28日後にJIS A 1148による凍結融解試験を実施した。試験本数としては圧縮強度試験は3本、その他の試験は2本とした。

4.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-10に示す。今回実験に使用した膨張材の標準添加量はいずれも 20 kg/m^3 であるが、添加量が 30 kg/m^3 を超えると、圧縮強度がやや低下する傾向が認められた。

4.3 ひずみ測定結果

材齢7日におけるひずみの測定結果から得られる膨張材の効果を図-11に示す。この図は、図-2に示す拘束治具を配置した供試体の膨張材無の配合と膨張材有の配合の膨張量の差を示したものである。これによると、膨張材の効果は水セメント比が小さいほど小さくなる傾向を示した。また、添加量を増やすことで、膨張量を増加させることが可能で、添加量を増加させるほど膨張

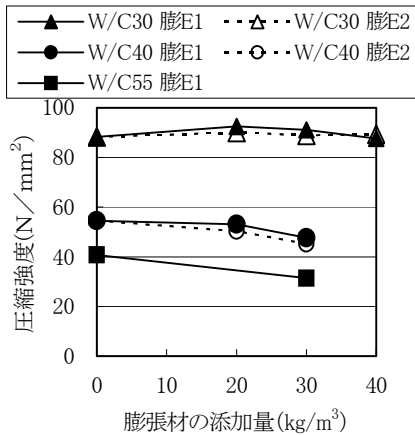


図-10 膨張材の添加量と圧縮強度の関係

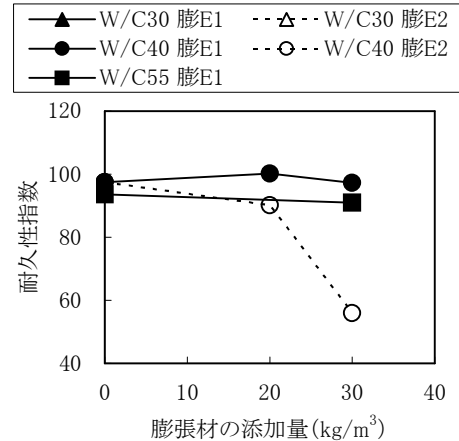


図-12 膨張材の添加量と耐久性指数の関係
(自由膨張供試体の結果)

量が急激に大きくなる傾向を示した。

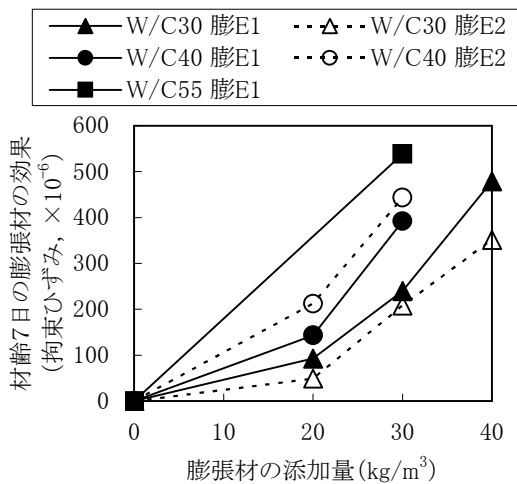


図-11 膨張材の添加量と膨張量の関係

4.4 凍結融解試験結果

拘束治具を有しない $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 角柱供試体の凍結融解試験から得られる耐久性指数を図-12 に示す。これより、膨張材の添加量が標準添加量(20kg/m^3)の場合の耐久性指数は、膨張材無しのものと同色ないが、添加量が 30kg/m^3 を超えると、配合によっては耐久性指数が低下する傾向が認められた。

5. 実験のまとめ

実験の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 膨張材の膨張量は、材齢7日までの拘束膨張試験によって求めるのが一般的であるが、その間の養生方法によってひずみの挙動が大きく異なるので注意が必要である。すなわち、水セメント比が小さな配合で、供試体を封緘養生とすると、自己収縮の影響で膨張材による膨張量が相殺される場合がある。自己収縮は早強セメントや高炉セメントで特に大きかっ

た。水中養生の場合の自己収縮量は小さかった。

- (2) 膨張材無と膨張材有のひずみの差を膨張材の効果と考えると、本実験の範囲では、いずれの配合でも概ね 100×10^{-6} 以上の効果が確認された。
- (3) 膨張材の添加量を増やすと、膨張量を大きくすることができるが、圧縮強度や耐久性指数が低下する傾向が認められた。

6. 膨張材使用マニュアル (案)

上記の実験結果等を踏まえて、収縮ひずみ抑制のために膨張材を使用する場合(収縮補償用コンクリート)のマニュアル(案)を整理した。

(1) 適用範囲

コンクリートの収縮ひび割れを抑制するために膨張材を使用する場合の、基本的な考え方と標準的な使用方法について示すものである。

(2) 対象とする膨張材の種類

現在市販されている膨張材は、成分によって石灰系とエトリンガイト系とに分類されるが、膨張ひずみの発現状況には大きな差が認められないので、ここでは両者を区分せずに扱うこととする。

ただし、これらの膨張材の従来型の標準添加量は 30kg/m^3 であるが、標準添加量が 20kg/m^3 で従来型と同等の膨張性能を発揮する低添加型も開発されている。このため、膨張材の使用量決定時には、標準添加型か低添加型かの区別を確認しておく。

(3) 膨張材使用コンクリートの配合の考え方

膨張材はセメント量の一部として、セメントに置き換えて添加する。すなわち、膨張材を使用したコンクリートの水結合材比を算定する際は、膨張材も結合材の一部と見なして計算を行うこととする。

標準添加量の範囲であれば、膨張材の添加がコンクリートのフレッシュ性状（スランプや空気量）に与える影響は小さいので、一般には AE 減水剤や AE 剤の添加量等の配合修正は行わないで良い。

(4) 膨張材による収縮低減の考え方

(4.1) 基本的な考え方

通常のコンクリートの乾燥収縮率を測定する場合には、作製したコンクリート供試体を7日間水中養生し、その時点の供試体の長さを基長として、その後 20°C、60% R.H.の乾燥条件で6ヶ月間にわたって供試体の長さ変化を測定するのが一般的である。

これに対して膨張材を使用した膨張コンクリートの挙動は図-1に示すように材齢7日程度までの間に膨張がほぼ完了する。従って、乾燥収縮率の測定試験に準拠して材齢7日以降の測定を行っても膨張材の効果は確認できない。

また、膨張材が膨張するとき、鉄筋や既存のコンクリート部材等によってその膨張が拘束されることによってコンクリート内に拘束圧縮応力（ケミカルプレストレス）が発生し、これが収縮低減に寄与することになる。従って、拘束のない条件で膨張材と使用しても、その効果は期待できない。

(4.2) 膨張効果の評価方法

コンクリートの乾燥収縮率の試験では、無拘束状態でのひずみが測定される。これに対して膨張コンクリートの試験では、JIS A 6202 の附属書2に準拠した拘束供試体に対して測定が行われる。無拘束状態における膨張材の収縮低減効果を求めるには、JIS A 6202 の附属書2に準拠したコンクリートの試験を、鉄筋比を変えて実施し、図-13に示すように鉄筋比0の場合の有効自由膨張ひずみを推定する必要がある。そかしながら、その試験の実施は容易ではない。

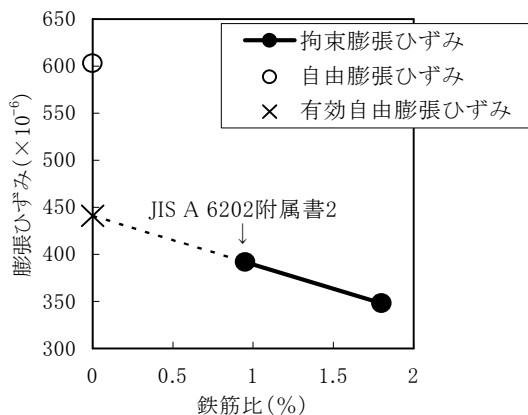


図-13 拘束膨張ひずみと有効自由膨張ひずみとの関係

JIS A 6202 附属書2の試験で指定している拘束鉄筋比は 0.95%であるが、図-13 から分かるように、この試験で得られる拘束膨張ひずみは有効自由膨張ひずみよりやや小さいものの、値としては近いものである。そこで、JIS A 6202 附属書2の方法で得られる拘束膨張ひずみの量で代用して良いこととした。

(4.4) 自己収縮との関係

水セメント比の小さなコンクリートでは、初期材齢において自己収縮が発生する。100×100×400mmの角柱供試体を用いた試験では、打設後の養生条件によって自己収縮の値は大きく異なり、水中養生では小さく、封緘養生では大きくなる。また、セメントの種類としては早強セメントでやや大きく、高炉B種セメントでは更に大きい。逆に低熱セメントでは小さい。これらの自己収縮が発生する条件では、膨張材が膨張効果を発揮しても、自己収縮で相殺されて、その効果が小さくなる。

今回の実験で得られた材齢7日における自己収縮の値を参考として図-14に示す。

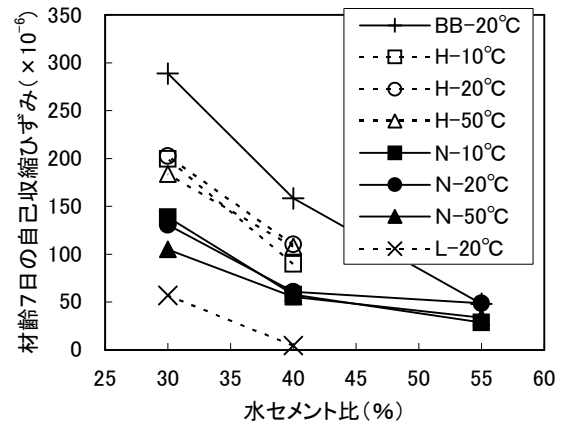


図-14 材齢7日における自己収縮ひずみ

(4.5) 相対膨張ひずみと絶対膨張ひずみ

膨張材無の配合と膨張材有の配合とのひずみの差を「相対膨張ひずみ」と定義する。また、膨張材有の配合における膨張ひずみの絶対値を「絶対膨張ひずみ」と定義する。絶対膨張ひずみは相対膨張ひずみよりも自己収縮分だけ小さくなる。膨張材の効果をどちらの値で評価するかは、設計思想によるため、利用者の判断に委ねる。

(5) 膨張効果の求め方

(5.1) 基本

実際に使用するコンクリート材料と配合で、実際の施工の温度条件、養生条件を模擬し、JIS A 6202 の附属書2の方法によって材齢7日の膨張ひずみを測定することで、絶対膨張ひずみを測定する。相対膨張ひずみを測定

する場合は膨張材有と無の配合でひずみを測定し、その差から求める。なお、過去の類似の条件による実績から膨張効果が確認されている場合にはその値を用いてよい。

(5.2)試験を行わないで求める場合

膨張材を標準添加量とした場合の相対膨張ひずみは、 100×10^{-6} とみなしてよい。それ以上の効果を期待する場合は(5.1)による。

(5.3)強度や耐久性の確認試験

膨張材を標準添加量の範囲で使用する場合は、強度や耐久性に与える影響は無いものとみなして良い。

標準添加量を超えて膨張材を使用する場合には、強度や耐久性に悪影響が無いことを試験か過去の実績により、確認しなければならない。

参考文献

- 1) 渡辺博志、片平博、伊佐見和大、山田宏：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮率に与える影響と評価試験法に関する研究、土木研究所資料、No.4199、2011.3
- 2) 天谷公彦、片平博、渡辺博志：膨張材を使用したコンクリートの拘束度と凍結融解抵抗性に関する実験的研究、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.65、No.5、pp.863-864、2010.9
- 3) 片平博、松本健一、天谷公彦、渡辺博志：水セメント比、温度、養生条件が膨張材の効果に及ぼす影響、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.66、No.5、pp.873-874、2011.9
- 4) 松本健一、片平博、渡辺博志：膨張材によるコンクリートの収縮低減、土木技術資料、Vol.53、No.9、pp.36-39、2011.9

A STUDY ON PREVENTION AGAINST SHRINKAGE CRACK IN CONCRETE STRUCTRE

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2009-2011

Research Team : Materials and Resources Research
Group(Concrete and Materials)

Author : Hiroshi WATANABE

Hiroshi KATAHIRA

Expansive additive has been more often used to reduce risk of crack for concrete structures. However, the performance of expansive additive under various mix proportion or temperature condition has not been researched. The usage of expansive additive can increase cost of concrete material, and excessive dosage can impair durability of concrete. We studied the influence of expansive admixture on concrete properties as drying shrinkage, strength and durability.

According to the test results, we have proposed the manual for using an expansive additive.

Key words : Concrete, Shrinkage crack , Drying shrinkage, Autogeneous shrinkage, Expansive admixture