

論文 各種セメントを用いた膨張コンクリートのひび割れ抵抗性

小田部裕一^{*1}・小林隆芳^{*1}・百瀬晴基^{*2}・関田徹志^{*3}

要旨：収縮に起因するひび割れはコンクリート構造物の初期欠陥となるため，これまで目地等の設計上の配慮，使用材料，施工方法等によって，その抑制対策が講じられてきた。本研究では，乾燥収縮が顕著となる建築物を対象に，膨張材と各種セメントを組合わせた場合のひび割れ抵抗性について検討した。そして，建築物に適用するにあたり，ひび割れ抵抗性に最も優れた膨張コンクリートの仕様について考察を加えた。

キーワード：膨張材，乾燥収縮，建築物，ひび割れ抵抗性

1. はじめに

コンクリート構造物のライフサイクルを考えていく上で，構造物の初期状態を把握することは重要である。初期欠陥とされるひび割れの発生は，コンクリート構造物の劣化進行の促進に繋がるため，初期ひび割れ発生は極力回避することが好ましい。特に，建築物においては一度ひび割れが発生することによって，美観的もしくは耐久的にもそれが持つ本来の性能を損なうことになる。そのような住宅の品質確保を主な目的として，近年，住宅品質確保促進法が施行され，以前にも増して新築住宅の瑕疵（契約で約束された性質・品質を満たさない状態）に対する責任が問われるようになった。したがって，同種構造物の施工にあたっては欠陥となりえるひび割れ等を防止する対策が講じられてきている。建築物に発生するひび割れは主に乾燥収縮に起因するものであり，そのような収縮補償に関しては，膨張材を使用することが有効と考えられる。その収縮補償は初期材齢に導入される膨張によるものであり，土木学会発行の膨張コンクリート設計施工指針においては材齢7日における膨張率が $150 \sim 250 \times 10^{-6}$ の範囲と定められている¹⁾。また，建築学会の指針では，膨張材を使用したコンクリートの調合設計に関し

ては，要求性能を満足するように事前の確認試験が必須とされている²⁾。

本研究では乾燥収縮によるひび割れが卓越する建築物を対象に，ひび割れ低減を目的としたコンクリートの仕様について使用セメント，単位膨張材量の面から検討を加えた。

2. 試験概要

本試験では，初期におけるB法膨張率を測定するばかりでなく，建築物を対象とした一軸拘束試験体を作製し，そこに発生する収縮を拘束することによって応力，ひび割れの発生状況を観察した。使用したコンクリートはセメントの種類，単位膨張材量を変えることによって，ひび割れ低減効果に最も適した仕様を検討した。

2.1 使用材料および調合条件

本試験で使用した材料は表-1に示す通りである。コンクリート調合の一例は表-2に示す通りであり，単位膨張材量が変化する場合に，セメントと膨張材の単位量の和が一定となるように単位セメント量を変化させた。今回の単位膨張材量の範囲は $10 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ であるが，一部の試験では，比較対象として膨張材無混和も含まれている。なお，練上がり後の性状は，スランプ $21 \pm 1.5 \text{ cm}$ ，空気量 $4.5 \pm 0.5 \%$ となる

* 1 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 (正会員)

* 2 鹿島建設(株)技術研究所建築技術研究部 (正会員)

* 3 鹿島建設(株)技術研究所建築技術研究部 主管研究員 Ph.D (正会員)

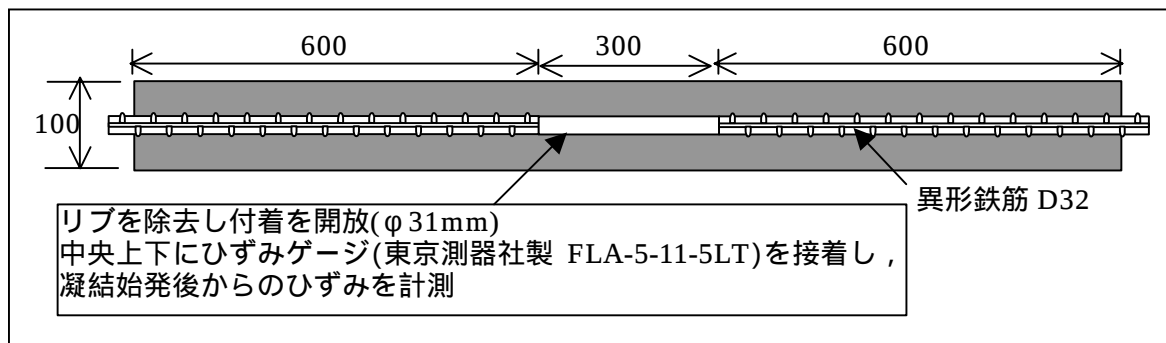


図 - 1 一軸拘束試験体詳細図

ように高性能 AE 減水剤，空気量調整剤により調整した。

表 - 1 使用材料

種別	産地，銘柄および成分
セメント	NC:普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm ³) HC:早強ポルトランドセメント(密度 3.13g/cm ³) LC:低熱ポルトランドセメント(密度 3.24g/cm ³) MC:中庸熱ポルトランドセメント(密度 3.21g/cm ³) BB:高炉セメント B 種(密度 3.04g/cm ³)
膨張材	Ex:イトリガ 卜石灰複合系(密度 3.10g/cm ³)
細骨材	S1:茨城県波崎産陸砂(密度 2.60g/cm ³) S2:栃木県葛生産砕砂(密度 2.70g/cm ³)
粗骨材	G:茨城県笠間産砕石(密度 2.65g/cm ³)
混和剤	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系) 空気量調整剤(陰イオン界面活性剤系)

表 - 2 コンクリート調合の一例

セメント種類	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	S	Ex	S1	S2	G
NC	40	165	393	20	557	248	935
	45		347		583	260	
	50		310		605	269	
HC	40		393		555	247	935
	45		347		582	259	
	50		310		604	269	
LC	40		393		563	251	935
	45		347		589	262	
	50		310		610	271	
MC	40		393		561	250	935
	45		347		587	261	
	50		310		608	271	
BB	40		393		549	244	935
	45		347		576	256	
	50		310		598	266	

2.2 試験項目

(1) 膨張率試験

膨張率の測定は JIS A 6202 付属書 2 の B 法

に従った(B 法膨張率と表記)。これは全てのコンクリートで実施し，膨張特性を確認した。

(2) 強度試験

過度な膨張を与えた場合，コンクリート強度の低下が考えられるため，全てのコンクリートについて圧縮強度試験（供試体寸法 φ 10 × 20cm）を実施し，強度低下の有無を確認した。また，応力，ひび割れを観察する一軸拘束試験体での耐力を把握するため割裂引張強度（供試体寸法 φ 15 × 15cm）を測定した。これら供試体は，コンクリート打設後 3 日間は 20 の恒温室内に置かれた鋼製型枠内で封緘養生を行い，その後，圧縮強度試験用の供試体は標準養生，割裂引張強度試験用は室温 20，湿度 60%の恒温室内で気乾養生とした。

(3) ひび割れ抵抗性評価試験

この試験は，前述した一軸拘束試験体による応力，ひび割れを観察するためのものである。本試験は日本コンクリート工学協会の自己収縮研究委員会報告書に記載されている自己収縮応力測定方法³⁾に類似している。上記測定方法と異なる点は，乾燥収縮ひずみによって発生する応力，ひび割れを確認するため，型枠（厚さ 11mm の木製合板使用）存置期間を 1 日とした後，材齢 3 日まではポリエステルフィルムによって封緘状態とし，その後ポリエステルフィルムを除去し，室温 20，湿度 60%の恒温室内に静置した。試験体の詳細は図 - 1 に示す通りであり，鉄筋による拘束率は 0.35 ~ 0.4（ $np/(1+np)$ ， n :ヤング係数比， p :鉄筋比）である。

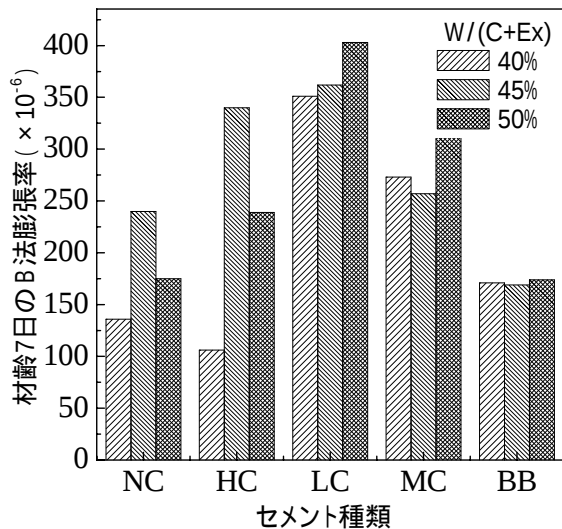


図 - 2 セメント種類によるB法膨張率の比較

この数値は建築物の壁体中央の拘束率に近い値であり^{4),5)}、乾燥収縮によるひび割れ抵抗性を評価する上で妥当と考えた。本試験の測定結果は試験体2本の平均値とした。なお、この試験は水結合法比45%、単位膨張材量0, 20kg/m³のコンクリートを中心に実施した。ただし、ひび割れ抵抗性が良好であったLCのケースについては水結合法比40, 50%で単位膨張材量15, 20kg/m³、水結合法比45%で単位膨張材量10, 15, 24kg/m³とした場合でも実施し、ひび割れ抵抗性に有効な調合について検討した。

3. 試験結果

3.1 膨張特性

図 - 2 は、単位膨張材量 20kg/m³ の場合の材齢 7 日における B 法膨張率をセメント毎に比較したものである。図 - 2 から、B 法膨張率の大小を比べると、何れの水結合法比においても LC の場合が最も大きくなった。これは、LC の初期強度発現が緩やかで大きな膨張発現が得られたためと考えられる。次に、水結合法比 45% 時の単位膨張材量と材齢 7 日の B 法膨張率の関係を図 - 3 に示す。単位膨張材量に応じた B 法膨張率の変化は、NC, HC, BB はほぼ同等であり、それに対して MC が若干大きくなる。LC はそれらに対して単位膨張材量に応じて B 法膨

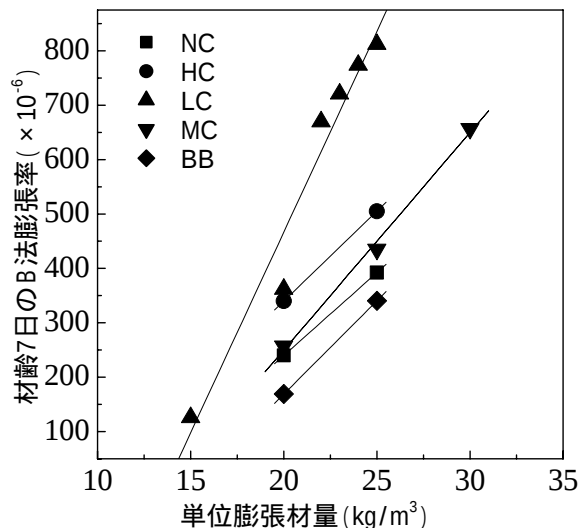


図 - 3 単位膨張材量とB法膨張率の関係

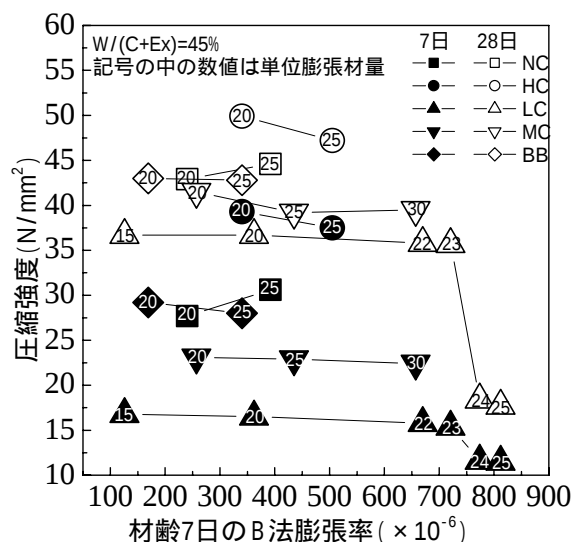


図 - 4 B法膨張率と圧縮強度の関係

張率が最も大きく変化する。

次に、材齢 7 日の B 法膨張率と圧縮強度の関係を図 - 4 に示す。指針¹⁾では材齢 7 日の膨張率を管理の対象としているため、ここでは、何れの圧縮強度の材齢についても材齢 7 日の B 法膨張率との関係を示した。図 - 4 から、NC, HC, MC, BB を使用したケースに関しては、今回の単位膨張材量の範囲においては、特に大きな強度低下は認められない。ただし、LC を使用したケースでは、材齢 7 日における B 法膨張率が 700 × 10⁻⁶ を超えるあたりから強度低下が認められる。この強度低下は、材齢 7 日の時

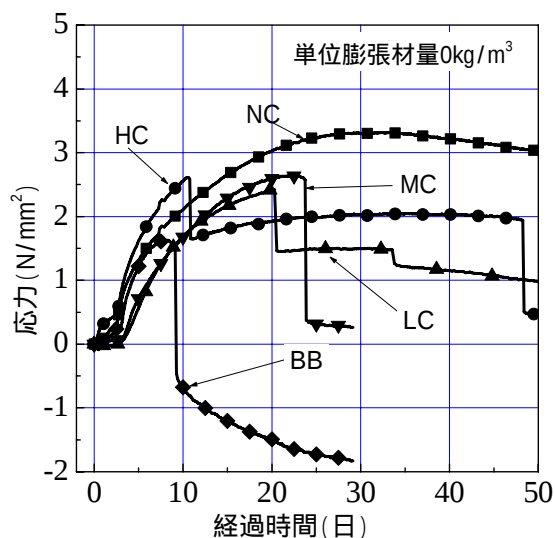


図 - 5 ひび割れ抵抗性評価試験結果

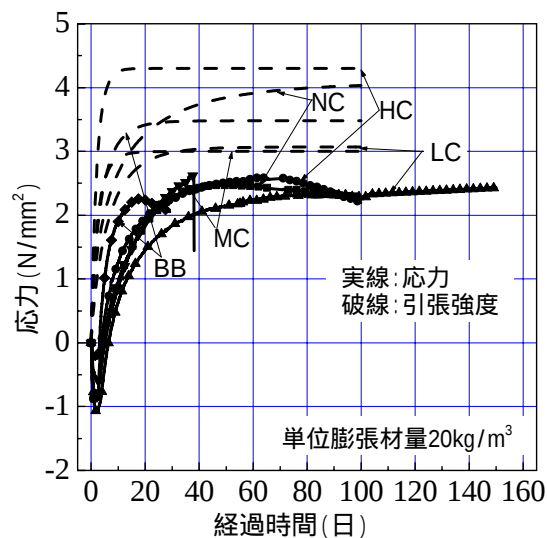


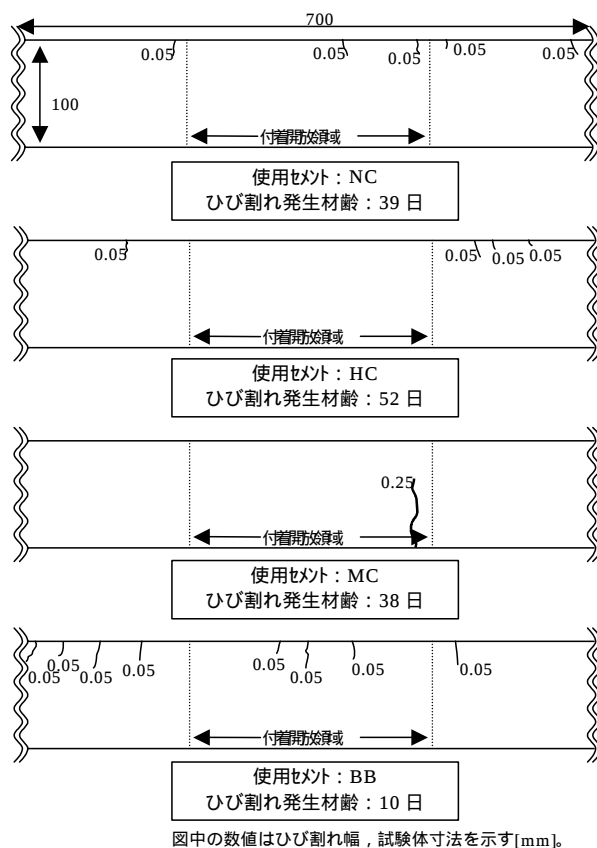
図 - 6 ひび割れ抵抗性評価試験結果

点に比べて材齢 28 日の方が顕著となっている。膨張コンクリートの設計施工指針¹⁾では、収縮補償を目的とした場合、標準養生における材齢 7 日の膨張率の範囲を $150 \sim 250 \times 10^{-6}$ と規定しているが、強度低下等の弊害を回避した上での収縮補償を目的とするのであれば、図 - 4 に示した強度低下が生じない B 法膨張率の範囲を有効に活用することによって、ひび割れに対する抵抗性を更に高めることができると考えられる。

3.2 ひび割れ抵抗性評価

水結合材比 45%，単位膨張材量 0，20kg/m³とした場合のひび割れ抵抗性評価試験結果を図 - 5，図 - 6 に示す（印はひび割れの発生を示す）。図 - 6 中には、試験体に発生する応力と別途供試体で測定した割裂引張強度の結果を基に求めた近似曲線を示した。

図 - 5 から、膨張材を使用しない場合、全てのケースにおいて材齢 40 日以内で付着開放領域にひび割れの発生が確認された。そのほとんどがひび割れ幅 0.5mm 程度の貫通ひび割れであった。次に、単位膨張材量を 20kg/m³とした場合、膨張材を使用しなかった時のような貫通ひび割れはほとんど発生しなかったものの、LC のケースを除いて微細なひび割れが多数発生しているのが確認された（ひび割れ発生状況は図



図中の数値はひび割れ幅、試験体寸法を示す[mm]。

図 - 7 ひび割れ発生状況

- 7 を参照)。引張応力が緩やかに減少していく点が微細なひび割れの発生を示しているが、何れも引張応力が引張強度に達する前にひび割

れが発生している。特に，HC のケースは，応力と引張強度に 3N/mm^2 程度の開きがあるにも関わらず，微細なひび割れが発生している。このような微細なひび割れは，中性化等の影響を受けやすくなる要因になり得るため，長期耐久性確保の面から，回避することが望ましい。一方，LC のケースは，試験開始より 150 日が経過した段階でも微細なものも含めてひび割れの発生はなく，同一水結合材比，単位膨張材量で比較した場合，他のセメントを使用したケースより乾燥収縮によるひび割れ抵抗性が優れていると判断できる。

次に，前記の条件でひび割れの発生がなかった LC 使用ケースについて，単位膨張材量を変化させひび割れ抵抗性評価試験を実施した。その際の単位膨張材量は $10, 15, 20, 24\text{kg/m}^3$ とした 4 ケースである。これら試験結果を図 - 8 に示す。

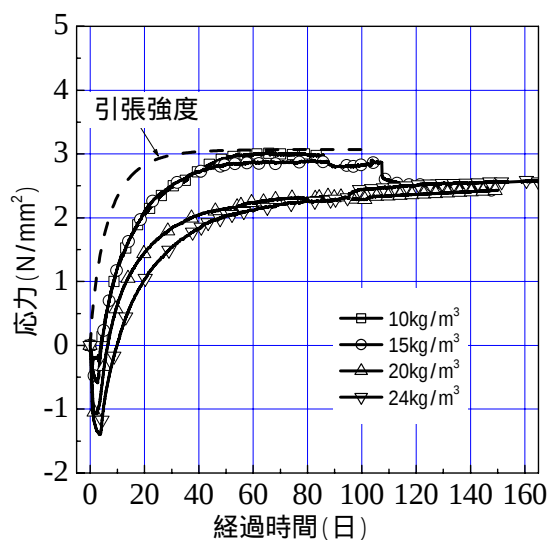


図 - 8 ひび割れ抵抗性評価試験結果

単位膨張材量を $10, 15\text{kg/m}^3$ としたケースでは，ひび割れの発生が確認された。図中に示した破線は引張強度を示しており，何れのケースもほぼ同等であったため，複雑さを避けるために平均値で表示した。LC を使用した場合には，引張応力がほぼ引張強度に達した時にひび割れが発生した。図 - 6 より，他のセメントを使用

した場合には，応力が引張強度に達する以前に微細なひび割れが発生したのに対して，LC のケースでは引張強度に達するまでひび割れが発生しないといった特徴的な結果となった。

図 - 8 からひび割れ発生有無について最大圧縮応力や引張応力増加区間の変化の様子を比較すると，本試験における最大圧縮応力が 0.6N/mm^2 以下では引張応力増加の傾きも大きく引張応力が卓越するのに対して， 1.0N/mm^2 程度かそれ以上の圧縮応力が導入された場合には引張応力増加の傾きは小さく，試験開始から 150 日以上経過しても引張強度に達していないことが分かった。

ここで，LC を使用ケースについて本試験における最大圧縮応力と材齢 7 日の B 法膨張率との関係を図 - 9 に示す。図中には，水結合材比 40, 50% とし単位膨張材量 $15, 20\text{kg/m}^3$ とした試験結果も合わせて示した。これらは試験開始 150 日まで何れもひび割れは発生しなかった。

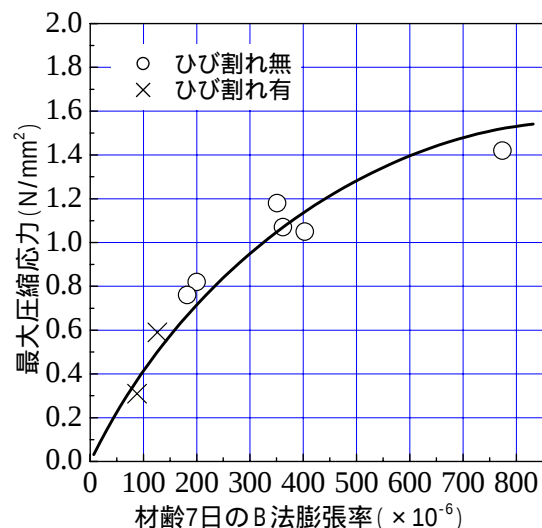


図 - 9 B 法膨張率と最大圧縮応力の関係

図 - 9 では，ひび割れの有無によって，記号を区別させた。これによると，ひび割れ抵抗性評価試験においてひび割れが発生しないためには，材齢 7 日における B 法膨張率が 150×10^{-6} 以上必要であることが分かる。つまり，ひび割れ抵抗性について，B 法膨張率で管理する場合

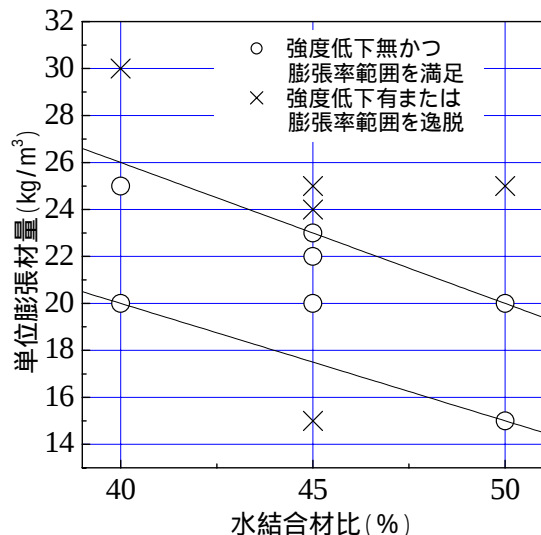


図 - 10 単位膨張材量の最適範囲

には、前記数値以上を確保する必要がある。この数値は膨張コンクリート設計施工指針¹⁾に示されている収縮補償を目的とした膨張率範囲の下限値に相当する。なお、上限値については、図 - 4 に示した強度低下が生じない範囲に着目すると、 700×10^{-6} 以下が妥当であると考えられる。この上限値に関しては指針¹⁾に示される膨張率範囲を大きく逸脱している。よって、この上限値に相当するコンクリートを用いて、厚さ 20cm の壁部材の一部を模擬した供試体を作製し（幅、高さは 80cm、型枠は木製合板を使用し材齢 3 日で脱型）、コア強度を確認することによって、強度低下の有無について確認した。ただし、無拘束状態でのコア強度を確認するため、模擬供試体の内部には鉄筋等は配置していない。その結果、図 - 4 中の材齢 28 日の圧縮強度 37 N/mm^2 に対して、同一材齢のコア強度は 35.3 N/mm^2 であり、無拘束の状態であっても強度低下はほとんどないことが判明した。

したがって、これまでの LC を用いた試験結果より、強度低下がなく、乾燥収縮によるひび割れ抵抗性を有するためには、材齢 7 日の B 法膨張率を $150 \sim 700 \times 10^{-6}$ の範囲とすることが望ましいと考えられる。この条件を満足する各水結合材における単位膨張材量は図 - 10 に示す通りである。図 - 10 から、各水結合材比

(W/B) に対する単位膨張材量 (E) の設定値は式(2)を満たすことが望ましいと考えられる。

$$40 - 0.5(W/B) \leq E \leq 50 - 0.6(W/B) \quad (2)$$

4. まとめ

- (1) セメント種類を変えて、同一水結合材比、単位膨張材量で B 法膨張率を比較した場合、低熱ポルトランドセメントを用いた場合に最もその数値が大きくなった。
- (2) 低熱ポルトランドセメントを用いた場合、材齢 7 日の B 法膨張率が 700×10^{-6} 以上になると強度低下が生じた。
- (3) 材齢 7 日の B 法膨張率を 150×10^{-6} 以上とした場合、乾燥収縮によるひび割れ抵抗性が良好であった。
- (4) 乾燥収縮が顕著となる建築物においては、低熱ポルトランドセメントを使用し、材齢 7 日の B 法膨張率を $150 \sim 700 \times 10^{-6}$ とすることが望ましいと思われる。
- (5) 前記膨張率範囲を満足するためには各水結合材比 (W/B) に対して単位膨張材量 (E) を $40 - 0.5(W/B) \leq E \leq 50 - 0.6(W/B)$ とする必要がある。

参考文献

- 1) 膨張コンクリート設計施工指針，コンクリートライブラリー75，土木学会，1993
- 2) 膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案・同解説，日本建築学会，1982
- 3) 自己収縮研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1996
- 4) 鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・同解説，日本建築学会，p.44，1990
- 5) 大野俊夫，魚本健人：底版により拘束を受ける部材の乾燥収縮ひび割れ性状，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部，Vol.53，pp.766～767，1998