

論文 ひび割れ抵抗性に優れる高強度コンクリートに関する研究

保利彰宏^{*1}・安藤哲也^{*2}・小田部裕一^{*3}・鈴木康範^{*4}

要旨：近年その利用が増大している高強度・高流動コンクリートは、単位結合材料が多いために水和発熱が大きく、水結合材比が小さいために自己収縮ひずみが大きくなる傾向が認められている。本研究ではこれらの問題を解決する手段として、低発熱形のポルトランドセメント、膨張材および収縮低減剤を併用した高強度・高流動コンクリートを作製し、その物性を把握すると共に、水和発熱や自己収縮に起因するひび割れへの抵抗性を評価した。

キーワード：低熱セメント、膨張材、収縮低減剤、温度ひび割れ、自己収縮ひずみ

1. はじめに

近年その利用が増加している高流動コンクリートは、分離を生じることなく大きなスランプフローが得られるために施工時の締め固めなどが不要となり、施工の簡素化や締め固めに伴う騒音低減に大きな効果を挙げている¹⁾。加えて、構造物の高層化やスリム化を目的として高い圧縮強度が要求される場合も多く、高強度および高流動を併せ持ったコンクリートの需要が増大している。

一方で、高強度・高流動コンクリートは、要求される性能を満足するために水結合材比を小さくする、単位結合材量を多くする、あるいは増粘剤を添加するなどの方法をとる必要がある。その結果、コンクリートの水和発熱や自己収縮が大きくなり、ひび割れが発生しやすくなる傾向が認められている²⁾³⁾。

この問題を材料面で解決する主な方法としては、低発熱形のセメント、膨張性混和材、収縮低減剤、混和材料（高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末など）などが挙げられるが、その効果を定量的に評価した例は少ない。そこで本試験では、低熱セメント、膨張材および収縮低減剤を

併用した高強度・高流動コンクリートを提案することで問題の解決を図るとともに、該コンクリートの物性を把握し、水和発熱や自己収縮に起因するひび割れへの抵抗性を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

実験においては、セメントに普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/m^3 、比表面積 $3290\text{cm}^2/\text{g}$ 、以降「普通セメント」と表記）および低熱ポルトランドセメント（密度 3.24g/m^3 、比表面積 $3650\text{cm}^2/\text{g}$ 、以降「低熱セメント」と表記）、細骨材として鬼怒川産川砂（表乾密度 2.57g/m^3 、吸水率 2.22%, F.M.3.14）および利根川産砕砂（表乾密度 2.55g/m^3 、吸水率 1.99%, F.M.1.55）、粗骨材として岩瀬産砕石（表乾密度 2.66g/m^3 、吸水率 0.60%, F.M.6.76）、カルシウムサルフォアルミネート系膨張材として汎用型膨張材（密度 2.98g/m^3 ）および水和熱抑制型膨張材（密度 2.73g/m^3 ）、収縮低減剤としてアルキレンオキシド系（密度 1.04g/m^3 ）、混和剤としてポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤、AE 助剤としてスルホン酸炭化水素系を用いた。なお、膨張材

*1：電気化学工業(株) セメント特混研究所 工修（正会員）

*2：電気化学工業(株) 特殊混和材事業部 次長（正会員）

*3：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）

*4：住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 関東技術センター所長 工博（正会員）

表-1 コンクリート配合

配合 No	水結合 材比 (%)	細骨 材率 (%)	セメント種	単位量 (kg/m³)							混和剤 (kg/m³)	AE 助剤 (kg/m³)	
				水	セメント	汎用型 膨張材	水和熱 抑制型 膨張材	砂		砂利			収縮 低減剤*
								川砂	砕砂				
1	34.6	53.6	低熱	184	506	25	—	580	248	747	16.0	4.8	0.02
2	34.8		低熱	184	504	—	25				16.0	4.8	0.02
3	34.6		低熱	184	502	30	—				—	4.8	0.03
4	34.8		低熱	184	499	—	30				—	4.8	0.03
5	34.3		低熱	184	535	—	—				—	4.8	0.03
6	36.0		普通	185	515	—	—				—	6.7	0.04

*収縮低減剤は単位水量の一部として使用

表-2 フレッシュ性状

配合 No	スランプフロ- (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
1	60×62	4.3	22.8
2	63×60	4.6	23.0
3	68×63	4.9	20.6
4	64×63	4.8	18.6
5	67×68	4.9	21.9
6	63×60	4.7	23.6

として二種類を検討しているが、これは本研究にて提案するコンクリート配合において、より効果的な膨張材を選定することが目的である。

実験に使用したコンクリートの配合を表-1に、フレッシュ性状を表-2に示す。表-1に示される配合において、配合 No1 および No2 が本論文にて提案するコンクリートであり、低熱セメントに膨張材と収縮低減剤とを併用している。一方の No3 および No4 には収縮低減剤が添加されておらず、No5 に関しては膨張材・収縮低減剤いずれも使用されていない。また、No6 はセメントに普通ポルトランドセメントを用いた配合であり、No1～No5 の比較対象である。コンクリート供試体は、いずれも材齢 56 日における圧縮強度が 60N/mm² 以上、目標スランプフロ-65±5cm、空気量 4.5±1.5% を満足する配合である。

2.2 試験項目および試験方法

2.2.1 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの測定は JCI 超流動研究委員会報告書⁴⁾に準じ、埋込型ひずみ計を用いた。

2.2.2 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみの測定は JIS A1129 に準じた

2.2.3 中性化試験

中性化試験は、炭酸ガス濃度 10.0%，相対湿

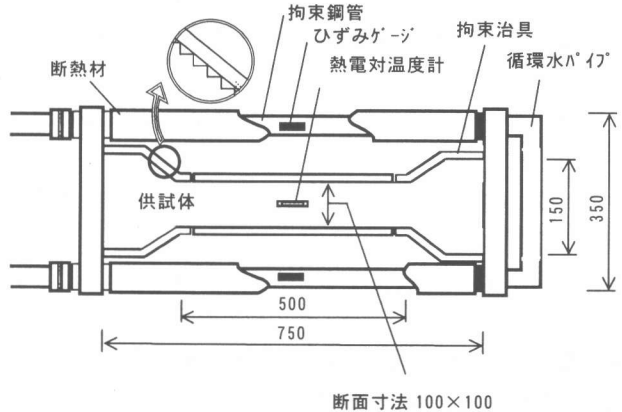


図-1 温度応力試験装置概略図

度 60%，環境温度 30℃ の養生環境下における促進中性化試験を適用した。供試体は 28 日間 20℃ 一定の水中養生を施し、中性化の測定⁵⁾は材齢 7，28，56 および 91 日において行った。

2.2.4 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は「品質評価試験方法研究委員会報告書⁶⁾」に記されたコンクリートの断熱温度上昇試験方法（案）に準じて行った。

2.2.5 ひび割れ抵抗性

コンクリートのひび割れ抵抗性の評価は、図-1 に示す温度応力試験装置（JIS 原案「コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法（案）⁷⁾」）にて行った。2.2.4 にて得られた各コンクリート配合の断熱温度上昇特性から、図-2 に示される解析モデルおよび表-3 に記される解析条件にて FEM 二次元温度解析を行い、その温度履歴下においてコンクリート供試体に発生する温度応力を測定した。なお、材齢 10 日以前は拘束鋼管に 20℃ 一定の循環水を流す

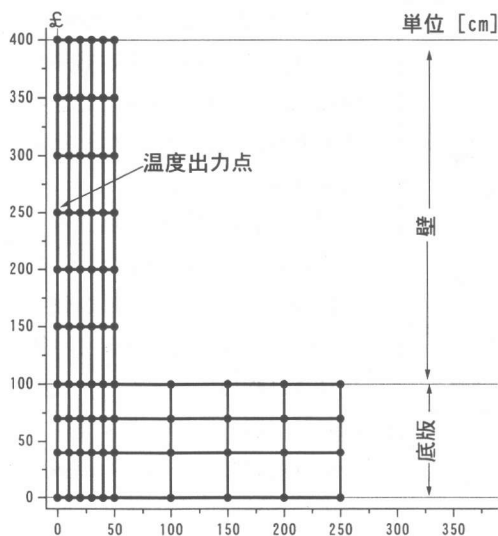


図-2 解析モデル

表-3 温度解析条件

項目	条件および数値
解析対象	厚さ 1m の壁構造物
解析方法	2次元 FEM 解析
解析範囲	底板下面まで
境界条件	壁上面 : 熱伝達境界 $\eta = 14 \text{ W/m}^2\text{℃}$ 壁中央面 : 断熱温度境界 底板上側面 : 熱伝達境界 $\eta = 14 \text{ W/m}^2\text{℃}$ (打継面を除く) 底板下面 : 固定温度境界 20℃ 一定 ※型枠存置期間および脱型後も $\eta = 14 \text{ W/m}^2\text{℃}$ 一定
熱特性値	コンクリートの熱伝導率 : $\lambda = 2.71 \text{ W/m℃}$ コンクリートの熱拡散係数 : $hc^2 = 3.34 \times 10^7 \lambda$ コンクリートの比熱 : $Cc = 3.03 \times 10^3 / \rho$
初期値	コンクリート温度 : 20℃ 外気温 : 20℃
解析時間	1ヶ月

ことで雰囲気温度によって拘束率が変化することを防ぎ、その後は 3℃/日 の速度で循環水を昇温させることで、コンクリート供試体には強制的な引張応力を与えた。

3. 実験結果

3.1 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの測定結果を図-3 に示す。図は横軸が材齢、縦軸が自己収縮ひずみを示している。普通セメントを使用した配合 No6 の自己収縮ひずみが明らかに大きく、材齢 180 日にて 300×10^{-6} を超える自己収縮ひずみを生じている。一方、セメントに低熱セメントを使用した配合 No5 の自己収縮ひずみは材齢 180 日において約 180×10^{-6} であり、自己収縮が半分程度に減少した。また、低熱セメントに膨張材を加えた配合 No3 および No4 は、材齢初期に導入された自己膨張ひずみが収縮補償効果を発揮しており、配合 No3 は材齢 160 日頃、配合 No4 は材齢 120 日頃まで自己膨張ひずみを保っていることがわかる。低熱セメントに膨張材および収縮低減剤を併用した配合 No1 および No2 は、材齢初期に自己膨張ひずみが導入され、かつ自己膨張ひずみがほとんど減少しないため、測定を終了した材齢 180 日においても約 100×10^{-6} の自己膨張ひずみを保つ結果となった。

さらに、初期材齢において導入された自己膨張ひずみを見ると、配合 No1 および No2 の自己

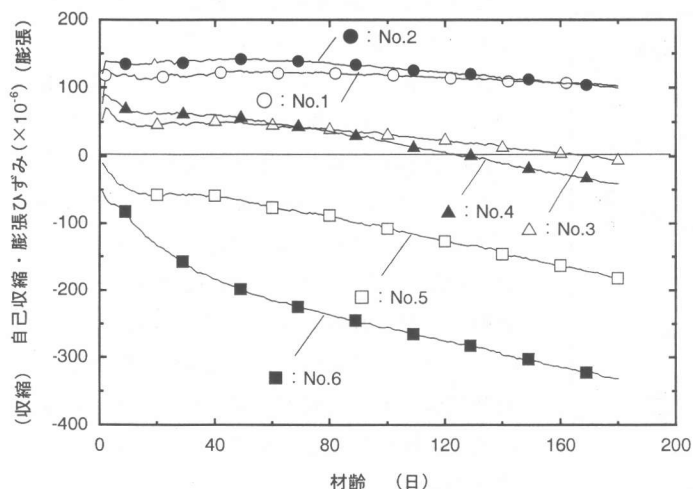


図-3 自己収縮ひずみ測定結果

膨張ひずみが No3 および No4 の自己膨張ひずみに比較して大きい。表-1 に示されるように膨張材の使用量は配合 No3 および No4 に比較して No1 および No2 が少なく、本現象は、膨張材と収縮低減剤とを併用したことによるものと推察される。すなわち、収縮低減剤は膨張材による自己膨張ひずみを増大させる効果を持つことが示唆された。

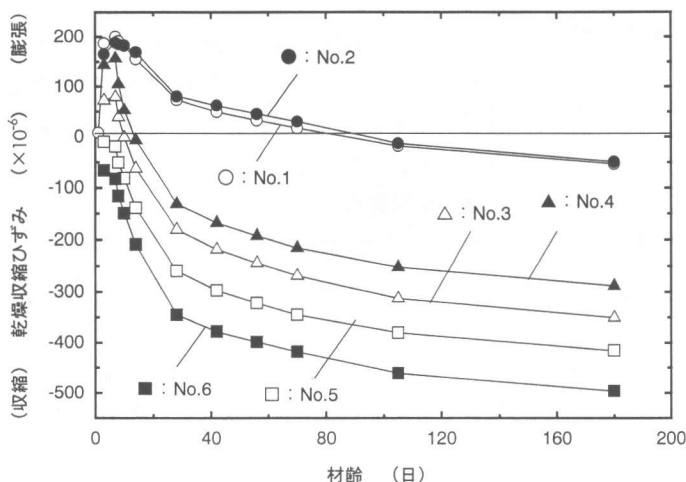


図-4 乾燥収縮ひずみ測定結果

3.2 乾燥収縮

乾燥収縮の測定結果を図-4に記した。図は横軸が材齢、縦軸が乾燥収縮ひずみを示している。通常乾燥収縮ひずみは材齢7日を基点とするが、本試験では膨張材による膨張ひずみも評価する必要があるため、材齢1日を基点として示した。乾燥収縮ひずみに関しても自己収縮ひずみと同様の傾向を示しており、普通セメントを用いた配合 No6 の乾燥収縮が最も大きく、低熱セメントに膨張材と収縮低減剤とを用いた配合 No1 および No2 の乾燥収縮が最も小さい。膨張材と収縮低減剤とを併用することで材齢初期に導入される膨張ひずみが増大する点も、自己収縮ひずみの測定結果と同様である。

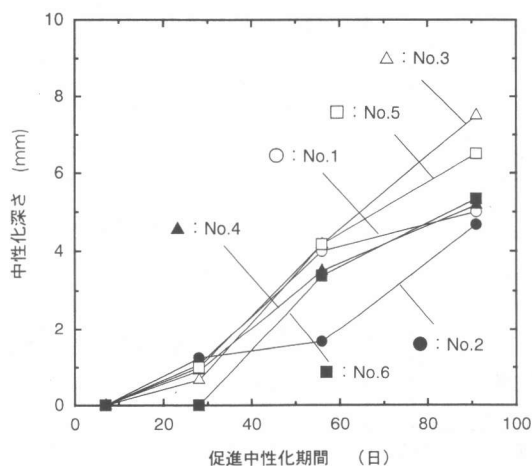


図-5 促進中性化試験結果

3.3 促進中性化試験結果

促進中性化試験の測定結果を図-5に示す。図は横軸に促進中性化材齢、縦軸に中性化深さ (mm)を示している。

材齢 91 日における測定値を用いると、いずれの配合も、汎用的なコンクリート（呼び強度 24N/mm^2 前後）に比較して中性化深さは極めて小さく、中性化に対して高い抵抗性を持つことが確認された。なお、配合 No5 および No3 の中性化深さは他の

配合に比較して 2mm ほど大きい、これは実験誤差と考えられる。

3.4 断熱温度上昇試験結果

断熱温度上昇試験の結果を図-6に示す。図は横軸が材齢、縦軸が断熱温度上昇量を示している。また、(1)にて示される断熱温度上昇特性を表-4に記した。

$$Q = K \{1 - \exp(-\alpha t^\beta)\} \quad (1)$$

ここに

Q : 断熱温度上昇値 (°C)

K : 最高温度上昇量 (°C)

α, β : 発熱速度

図-6 および表-4 より、普通セメントを使用した配合 No6 については一般的な傾向と同様、発熱速度 (表-4 中の α)、最高温度上昇量 (表-4 中の K) いずれに関しても低熱セメントを使用した配合 No1～No5 に比較して大きい結果となった。一方、配合 No1～No5 それぞれの最高温度上昇量 (K) に大きな差は見られなかったが、発熱速度 (α) については、配合 No3～No5 に比較して配合 No1 および No2 が小さい。これらのことから、膨張材の添加によって断熱温度上昇特性値に大きな変化は見られないが、収縮低減剤を併用することで発熱速度が若干遅くなる傾向が確認された。

表-4 断熱温度上昇特性

配合 No	K (°C)	α	β
1	58.7	0.856	1.344
2	58.6	0.772	1.407
3	61.1	1.149	1.270
4	59.5	0.947	1.391
5	59.9	0.997	1.189
6	74.5	1.818	2.021

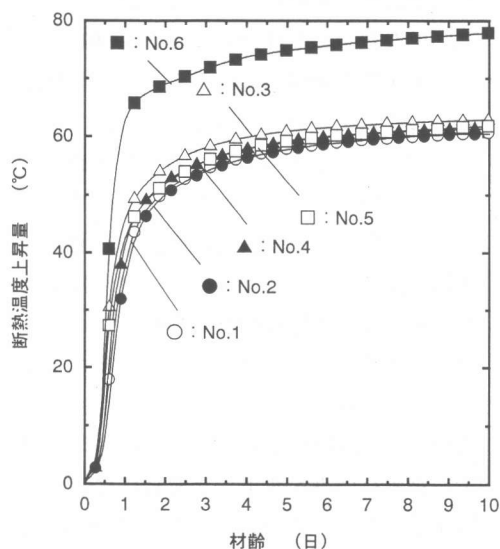


図-6 断熱温度上昇試験結果

3.5 ひび割れ抵抗性試験結果

コンクリートのひび割れ抵抗性を評価するために測定した応力を図-7に示す。図中には測定に際してコンクリート供試体に与えた温度履歴が併記されている。応力の測定結果を示す図については横軸が材齢、縦軸が発生応力であり、温度履歴を示す図については横軸が材齢、縦軸が温度である。なお、応力測定結果の図中において凡例と共に記した数値は、各配合が引張破壊を生じた時点における応力である。なお、本実験に用いた供試体は封緘養生を行っているため、測定値は自己収縮に起因する応力を含む温度応力となる。

圧縮応力について見ると、配合 No1 が最も大きく、ついで配合 No2, No6, No3, No4, No5 の順となった。配合 No1 および No2 の圧縮応力が最も大きくなった理由は図-3 や図-4 に示される膨張ひずみの大きさが影響していると考えられる。一方、膨張材を用いた配合 No3 および

No4 に比較して膨張材を用いない配合 No6 の圧縮応力が大きくなった理由は、図-6 に示される温度履歴によるものと考えられる。ところで配合 No1～No5 を比較した場合、膨張材と収縮低減剤とを併用した配合 No1 および No2 は、膨張材のみを添加した配合 No3 および No4 に比較して圧縮応力が著しく大きく、自己収縮や乾燥収縮に関する試験結果と同様の傾向を示した。すなわち、低熱セメントに膨張材と収縮低減剤とを併用することで、膨張ひずみが増大するのではなく、導入される圧縮応力も増加することが確認された。

引張応力について比較すると、材齢 10 日にて発生した引張応力は配合 No1 および No2 が最も小さく、ついで配合 No3 および No4, No2, No6 の順に大きくなっている。すなわち普通セメントを用いた高強度・高流動コンクリートにおいて、水和発熱および自己収縮に伴って発生する応力は、セメントを低熱セメントに変更することで緩和され、膨張材を用いることで効果は増大した。また、膨張材と収縮低減剤とを併用することでその効果は相乗的に高まることが確認された。

ところで各配合の引張破壊発生時点における応力を比較すると、配合 No1～No5 はほぼ同等であり、配合 No6 が若干高い。このことから、引張破壊強度にはセメントの種類が大きく影響し、膨張材や収縮低減剤による影響は小さいものと推察される。

ひび割れに対する抵抗性を評価するため、材齢 10 日におけるひび割れ指数を算出し、図-8 に示した。ひび割れ指数とは、コンクリートの引張強度をコンクリートに働く引張応力にて除した値であり、これが大きいほどひび割れに対する抵抗性が高いといわれている。本論文では、引張強度として図-7 中に示される引張破壊時の応力を用い、引張応力として図-7 に示される材齢 10 日時点での応力を用いた。図を見ると、配合 No1 および No2 が最もひび割れ指数が大きく、ひび割れに対する抵抗性が高いことが伺え

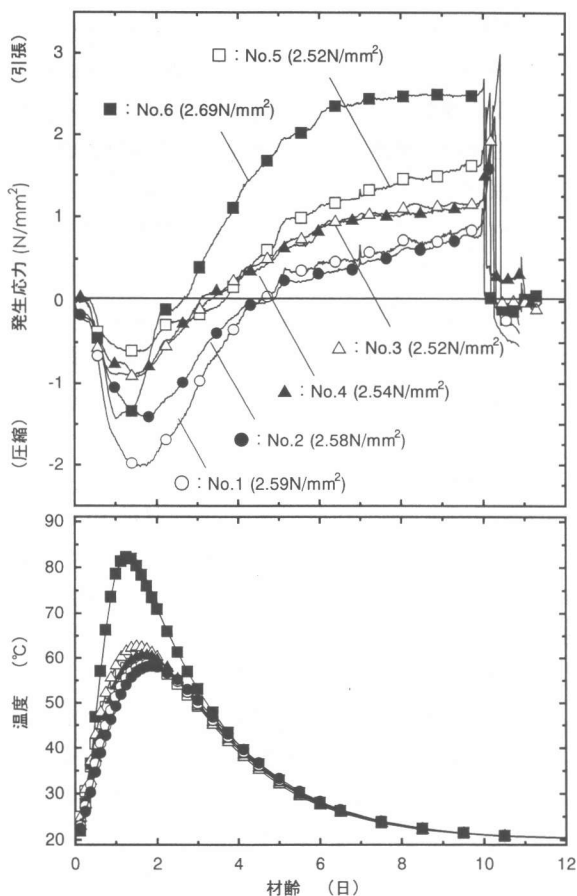


図-7 コンクリートの応力測定結果

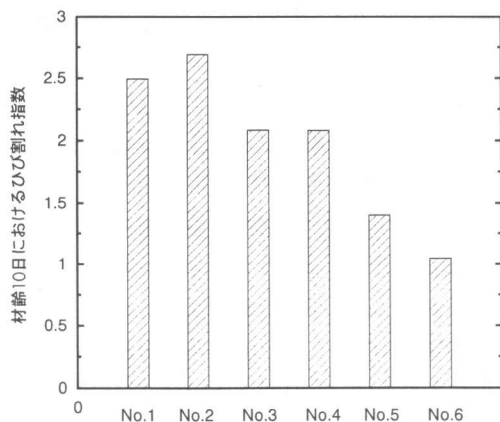


図-8 材齢 10 日におけるひび割れ指数

る。また、配合 No1 と No2、あるいは配合 No3 と No4 との値は同等であり、本試験においては膨張材種による明らかな差は見られなかった。

4. 結論

本研究では、高流動・高強度を満足しつつ、水和発熱と自己収縮に伴うひび割れ発生に対して高い抵抗性を持つコンクリート配合を提案すると共に、該コンクリートの基礎的な物性を把握し、ひび割れ抵抗性を具体的な数値にて評価することを目的とした。本実験の範囲内にて得られた結論をまとめると以下の通りである。

- (1) 本論文にて提案した高強度・高流動コンクリート配合、すなわちセメントに低熱セメントを使用し、膨張材と収縮低減剤とを併用することによって、自己収縮や乾燥収縮が小さく、中性化やひび割れに対して高い抵抗性を持つコンクリートが得られることが確認された。
- (2) 膨張材と収縮低減剤とを併用することで、膨張材のみを使用した配合に比較して膨張材の効果、すなわち膨張ひずみや圧縮応力の導入、ひび割れ低減効果が高まることが確認された。

参考文献

- 1) 岡村甫他：ハイパフォーマンスコンクリート，1996
- 2) 近藤吾郎他：高強度コンクリート部材の水和熱による温度履歴と温度応力の解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No1，pp.163-168,1997
- 3) 日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書，pp.8-12，1996
- 4) JCI 超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ）付録 1（仮称）高流動コンクリートの自己収縮試験方法，pp.209-210，1994
- 5) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針（案）同解説，pp.183，1991
- 6) 日本コンクリート工学協会：品質評価試験方法研究委員会報告書，pp.71-73,1998.12
- 7) JIS 原案：コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法（案），コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.52～54，1985