

論文 膨張材を添加したコンクリートの物理的性状に関する実験的検討

保利彰宏^{*1}・玉木俊之^{*2}・萩原宏俊^{*3}

要旨：水和熱抑制型の膨張材を添加したコンクリートの温度応力に関する実験を、セメントの種類、練上り温度、及び膨張材の有無を要因として、温度応力試験装置を用いて行った。その結果、膨張材はコンクリートの発熱量を増大させる場合があるものの、そのような場合を含めて温度応力の低減に対して有効であることが確認された。また、その効果は、セメントに高炉セメントを用いた配合に比較して普通ポルトランドセメントを用いた配合がより効果的であり、環境温度 30℃にて打設した場合に比較して環境温度 15℃にて打設した場合がより効果的であることも明らかとなった。

キーワード：膨張材、温度応力、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、環境温度

1. はじめに

マスコンクリートの水和熱によるひび割れに関しては過去より多くの論文が発表されており¹⁾、対策についても種々の検討が行われてきた²⁾。その対策の一つにコンクリートの混和材料として膨張材を用いる方法が挙げられ³⁾、実際に施工現場等においても実績を挙げている⁴⁾。しかし、膨張材によるひび割れ低減効果に関して定量的に評価した論文⁵⁾は少なく、特にコンクリートの練上り温度による影響を考慮した報告は皆無である。

そこで本研究では、セメントの種類及び練上り温度を変化させ、膨張材を添加して作製したコンクリート試料を用い、温度応力試験装置によって実構造物を想定したモデル実験を行うことで、膨張材のひび割れ抑制効果に関する実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

実験に使用した材料を以下に示す。

- ・セメント：普通ポルトランドセメント（比重 3.15, 比表面積 2980cm²/g）
- ・細骨材：新潟県姫川水系産細砂（表乾比重 2.56, 吸水率 2.0%, F.M.2.81）
- ・粗骨材：新潟県姫川水系産碎石（最大寸法 25mm, 表乾比重 2.67, 吸水率 0.9%, F.M.6.8）
- ・混和材料：高炉スラグ微粉末（比重 2.88, 比表面積 4980cm²/g）
- ・膨張材：水和熱抑制型膨張材（カルシウムサルフォアルミネート系, 比重 2.71, 比表面積 2900cm²/g）
- ・AE 減水剤：リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
- ・AE 助剤：陰イオン界面活性剤

表-1 コンクリート配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)						AE 減水剤 (kg/m ³)	AE 助剤 (kg/m ³)
			水	セメント	高炉スラグ	膨張材	細骨材	粗骨材		
NP	50.0	48.0	172	313	—	—	861	951	0.470	1.25
NE				283	—	30				1.88
BP				188	125	—				1.25
BE				170	113	30				1.88

*1：電気化学工業（株）セメント特殊混和材研究所 工修（正会員）

*2：電気化学工業（株）セメント特殊混和材研究所主任研究員（正会員）

*3：電気化学工業（株）セメント特殊混和材研究所所長（非会員）

実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリート供試体はいずれも、呼び強度 24N/mm²、目標スランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5%の配合である。

2.2 実験方法

(1) 実験要因

実験要因はセメントの種類、練上り温度、及び膨張材の有無とした。セメントの種類は普通ポルトランドセメント及び高炉セメントB種（高炉スラグ微粉末置換率 40wt.%）の二通りとし、それぞれのセメントに膨張材を添加した。これらを 20℃及び 35℃にて練り上げてコンクリート供試体とし、試験に供した。なお比較のために、同一配合、同一練り上がり温度のコンクリート試料で、膨張材を添加しない供試体も準備した。

(2) 試験装置

水和発熱に起因する温度応力を測定するため、図-1に示す温度応力試験装置を用いた。この装置は 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）」に準拠するものであり、応力はコンクリートの長さ変化を拘束する拘束鋼管の実測ひずみから算出するため、コンクリートのクリープ等を考慮した応力、すなわち実際にコンクリートに働く応力を測定することができる。また、拘束鋼管内には一定温度の水が常時循環しているため、拘束鋼管には温度変化に起因するひずみは発生せず、コンクリートの長さ変化を拘束することによって生じるひずみのみを知ることができる。

なお、拘束治具以外の部分には拘束が発生しないよう、型枠底面にはテフロンシートを敷き、さらに内側面及びコンクリート打設面には乾燥を防ぐためにビニールシートを敷き詰めた。

(3) 試験方法

コンクリート供試体には実構造物を想定した温度履歴を与えるが、これはあらかじめ行った断熱温度上昇試験結果より、FEM 二次元温度解

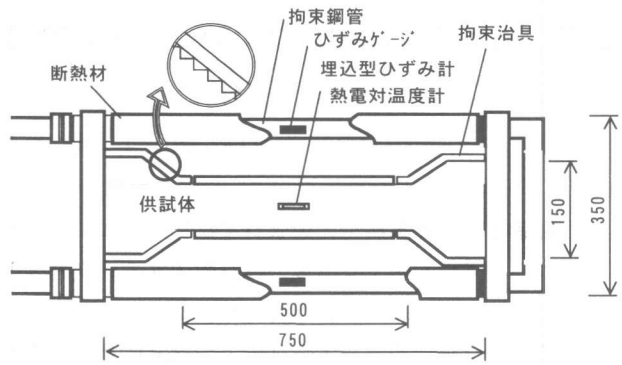


図-1 温度応力測定装置 (単位:mm)

析によって算出した。計算条件は二種類 (A 及び B) を設定したが、両者の違いは練上り温度と環境温度のみである。なお、詳細を表-2に示す。この温度履歴をコンクリート供試体に与えながら、拘束鋼管のひずみ、コンクリート供試体のひずみ、及び温度を測定した。なお、同一の温度履歴を与えたコンクリート円柱供試体 (φ15×20cm) も作製し、引張強度の測定を行った。

拘束鋼管のひずみ測定についてはひずみゲージを用い、コンクリート供試体のひずみについては埋込み型ひずみ計を用い、温度については熱電対温度計を用いて測定を行った。また、引張強度の測定は JIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」に準拠して行った。

表-2 温度解析の計算条件

条件	A	B
解析対象	厚さ 1.2m の壁体中心部	
練上り温度	20℃	35℃
環境温度	15℃	30℃
熱伝導率	2.91×10 ⁻³ (W/mm・℃)	
熱伝達率	9.30×10 ⁻⁶ (W/mm ² ・℃)	

3. 温度応力測定結果

コンクリート供試体に生じた温度応力は式(1)を用いて算出した。

$$\sigma_c = \epsilon_s \times E_s \times \frac{A_s}{A_c} \quad (1)$$

σ_c : コンクリートに生じた応力 (N/mm²)

ϵ_s : 拘束鋼管のひずみ (×10⁻⁶)

E_s : 拘束鋼管の弾性係数(N/mm²)

As : 拘束鋼管の総断面積 (mm²)

Ac : コンクリート供試体の断面積 (mm²)

結果を図-2及び図-3に示す。図-2が環境温度15℃、図-3が環境温度30℃における結果である。図中において、実線が膨張材を添加した配合、破線が膨張材を添加しない配合を示している。また、コンクリート供試体に与えた温度履歴も併記している。

また、表-3にはそれぞれの配合及び環境条件における最高温度、及び材齢10日においてコンクリート供試体に生じた引張応力を示した。ただし、環境温度30℃におけるBP及びBEは、それぞれ材齢6日及び8日にてひび割れを生じたため、その時点における引張応力を記載している。

表-3 最高温度及び材齢10日における引張応力

環境温度 (°C)	膨張材	配合名	最高温度 (°C)	引張応力 (N/mm ²)
15	無	NP	54.1	0.631
	有	NE	53.9	1.16
	無	BP	46.8	2.11
	有	BE	49.5	1.45
30	無	NP	70.7	1.46
	有	NE	64.7	1.29
	無	BP	62.6	1.13*
	有	BE	64.7	1.77**

* : 材齢6日における値, ** : 材齢8日における値

3-1 環境温度15℃の場合

(1) 温度履歴

膨張材の有無にて比較した場合、NPとNEについて温度履歴はほとんど同一であるが、BPとBEを比較すると、BEがBPに比較して3℃程発熱が大きくなっていることがわかる。

また、セメントの種類にて比較すると、NPに比較してBPが、NEに比較してBEの最高温度が低くなっており、セメントに普通ポルトランドセメントを用いた配合に比較して、高炉セメントB種を用いた配合の最高温度が低くなる結果となった。

(2) 温度応力

温度応力について結果を見ると、打設直後からNP、NE、及びBEには圧縮応力が生じていることが判る。その後、徐々に圧縮応力は減少し、引張応力に転じた後は材齢と共に引張応力が増加している。またBPについては、打設直後より引張応力が生じ、材齢と共に増大していることが図より読みとれる。

膨張材の有無によって比較すると、BEはBPに比較して大きな圧縮応力が導入され、引張応力は小さくなっている。表-3からも、BEはBPに比較して材齢10日における引張応力が0.66N/mm²低減されていることが判る。NEはNPに比較して大きな圧縮応力が導入されているが、引張応力は材齢10日において逆に0.529N/mm²大きくなった。

セメントの種類によって比較すると、NPはBPに比較して大きな圧縮応力が導入され、引張応力も材齢10日において1.48N/mm²小さくなっている。同様にNEはBEに比較して材齢10日における引張応力は0.29N/mm²小さくなった。

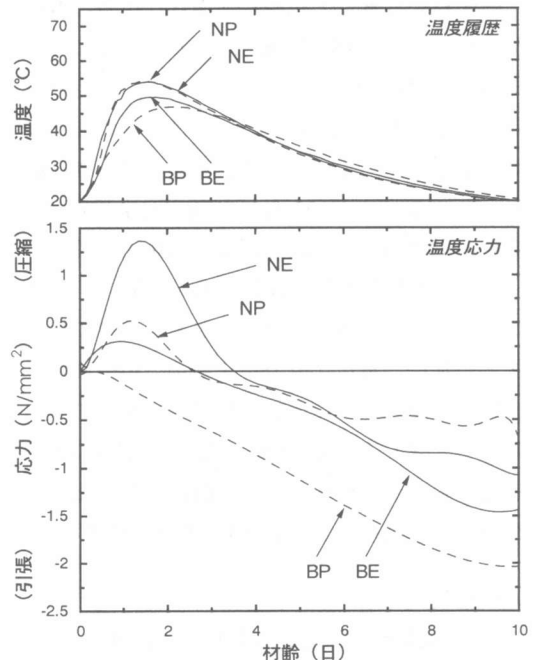


図-2 温度応力測定結果 (環境温度15℃)

3-2 環境温度 30℃の場合

(1) 温度履歴

膨張材の有無にて比較すると、NE が NP に比較して最高温度で約 6℃低くなっている。しかし、BE は BP に比較して 2℃程最高温度が高くなった。

セメントの種類によって比較した場合、環境温度 15℃の場合と同様、セメントに普通ポルトランドセメントを用いた配合に比較して、高炉セメント B 種を用いた配合の最高温度が低くなる結果となった。

(2) 温度応力

温度応力についてみると、全ての配合において、打設直後から圧縮応力が導入されていることが判る。その後は材齢と共に圧縮応力は減少し、引張応力に転じた後は引張応力は材齢と共に増大し、BP 及び BE については測定期間中にひび割れを生じた。BP については材齢 6 日にひび割れを生じ、BE についても同様に材齢 8 日にひび割れが確認された。ひび割れ発生時の引張応力は、表-3 から判るようそれぞれ 1.13N/mm^2 、 1.77N/mm^2 であった。

膨張材の有無にて比較した場合、引張応力は測定期間中常に NP に比較して NE が小さくなっており、材齢 10 日において 0.17N/mm^2 低減されている。BE 及び BP についてはいずれもひび割れが生じたため、応力による比較はできないが、BP に比較して BE はひび割れ発生材齢が 2 日程遅れていることは図より明らかである。

セメントの種類にて比較すると、NP は BP に比較してほぼ同等の圧縮応力が導入されていることが判る。また、応力が圧縮から引張に転じる材齢は NP が BP に比較して早期であるにも関わらず、BP の引張応力増加が速く、材齢 4.5 日付近で両者が逆転している。NE と BE を比較した場合も、これと全く同様の現象が確認された。

4 結果の考察

4-1 試験要因によるひび割れへの影響

温度応力によるひび割れ発生確率を検討する

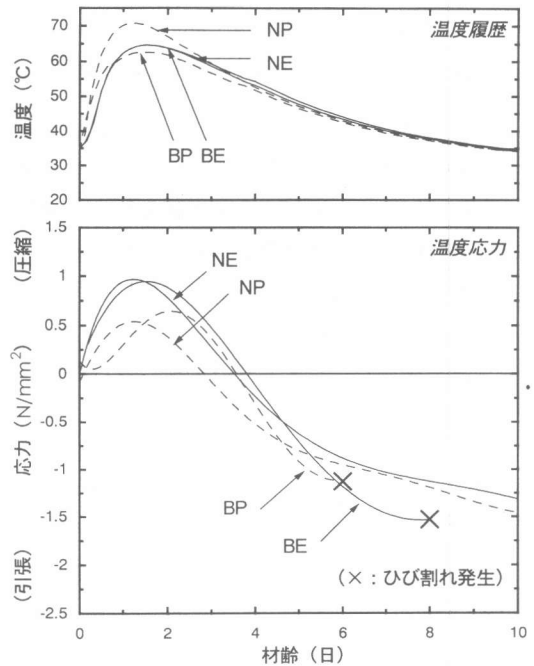


図-3 温度応力測定結果 (環境温度 30℃)

際には、コンクリートに生じる引張応力とコンクリートの引張強度の双方を加味する必要がある。すなわち、たとえ大きな引張応力が生じる配合であっても、引張強度がそれを上回ればひび割れは生じ難く、逆に引張応力は小さくとも、引張強度が著しく低い場合にはひび割れの発生もあり得る。そこで、図-4 及び図-5 にコンクリート供試体の引張強度と引張応力との関係を示した。図-4 が環境温度 15℃、図-5 が環境温度 30℃における結果である。横軸の引張強度は、応力試験に用いたコンクリート供試体と同一の温度履歴を与えたコンクリート供試体による引張強度試験の結果から、任意材齢における引張強度を近似して求めたものである。

(1) 環境温度 15℃の場合

いずれの配合についても、引張強度の増加と共に圧縮応力が増大するが、その後徐々に減少し、引張応力に転じている。

膨張材の有無にて見た場合、同一の引張応力において引張強度を比較すると、NE は NP に比較して、BE は BP に比較してそれぞれ引張強度が大きくなっており、膨張材の添加によってひ

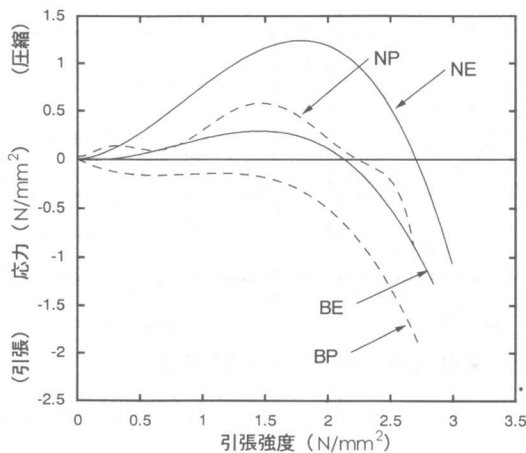


図-4 引張強度と引張応力の関係（環境温度15°C）

び割れへの抵抗性が高まっていることが確認された。そして、セメントの種類にて比較した場合、同一の引張応力における引張強度が、BP, BE, NP, NE の順に大きくなることから、セメントに普通ポルトランドセメントを用いた配合が、セメントに高炉セメントB種を用いた配合に比較して、よりひび割れへの抵抗性が高いと推察される。

(2) 環境温度 30°C の場合

環境温度が 30°C の場合も、全体的な傾向は環境温度 15°C の場合と同様である。しかし環境温度 15°C の場合と比較して、引張強度の増進に対する引張応力の増加が著しく速いことは図より明らかである。

膨張材の有無にて見た場合、同一の引張応力において引張強度を比較すると、環境温度 15°C の場合と同様、NP に比較して NE が、BP に比較して BE が、引張強度が大きくなっていることが判る。しかし、その割合は環境温度 15°C の場合に比較して小さく、温度応力によるひび割れを防止するためにも、環境温度が 15°C 程度の常温での打設が望ましいと考えられる。

セメントの種類にて比較した場合は環境温度 15°C の場合と同様であり、同一の引張応力における引張強度が BP, BE, NP, NE の順に大きくなることから、普通ポルトランドセメントの使用がより好ましいと考えられる。

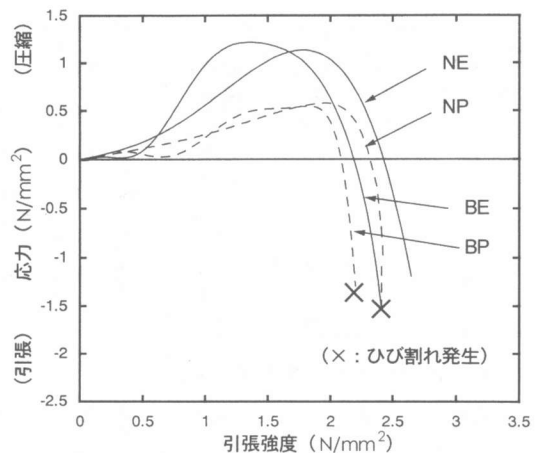


図-5 引張強度と引張応力の関係（環境温度30°C）

4-2 試験要因による長さ変化率への影響

4-1 にて示された膨張材によるひび割れ抵抗性の増加は、膨張材の持つ特性によるものと考えられる。従って、膨張材を添加することでコンクリート供試体のひずみにも影響が現れると思われるため、図-6 及び図-7 に、それぞれ環境温度 15°C 及び 30°C におけるコンクリート供試体の、温度と長さ変化率との関係を示した。横軸に温度、縦軸に埋込型ひずみ計にて測定した長さ変化率をとっている。また、図中に記した数値は温度降下過程における曲線の傾きを最小二乗近似したものであり、表-4 にも示した。なお、線膨張係数は温度上昇過程及び降下過程においてそれぞれ求めることができるが、温度応力に起因する引張応力は、自己収縮を考慮する必要があるような高強度あるいは高流動コンクリート⁹⁾を除いて主に温度降下過程において生じるため、ここでは温度降下過程における線膨張係数のみを求めた。

いずれの環境温度下においても、NE は NP に比較して、BE は BP に比較して線膨張係数が小さくなっており、膨張材によって温度降下に伴う収縮が緩和されていることが伺える。またその傾向は、4-1 に記した結果と同様、環境温度 30°C の場合に比較して環境温度 15°C の場合が顕著である。

表-4 線膨張係数

環境温度(°C)	膨張材	配合名	線膨張係数
15	無	NP	8.88
	有	NE	4.99
	無	BP	12.8
	有	BE	9.81
30	無	NP	7.37
	有	NE	6.61
	無	BP	9.29
	有	BE	7.15

4-3 温度履歴とひび割れ抑制効果

図-2 及び図-3 の温度履歴にて示されるように、膨張材を添加することによって最高温度が上昇する配合があった。しかし、4-1にも記したように、いずれの配合においても膨張材の添加によってひび割れ低減効果は確認されており、最高温度が上昇するような配合でも、ひび割れ低減効果は得られることが明らかとなった。

5. 結論

本実験では、膨張材を添加した普通ポルトランドセメント及び高炉セメントB種を用いてコンクリート供試体を作製し、練上り温度を変化させて水和発熱に起因する温度応力の測定を行った。そしてその結果を用いて、膨張材を添加することによる温度ひび割れの低減効果について実験的検討を行った。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)膨張材は温度応力に起因するひび割れ低減効果を持つことが確認された。なお、膨張材の添加によってコンクリートの水和発熱を増大させる配合もあったが、その様な配合も含めて、膨張材によるひび割れ低減効果が確認された。
- (2)膨張材によるひび割れ低減効果は、高炉セメントB種を用いた配合に比較して普通ポルトランドセメントを用いた配合がより効果的であり、また、環境温度 30°Cにて打設した場合に比較して 15°Cにて打設した場合が、より効果的であることが明らかとなった。

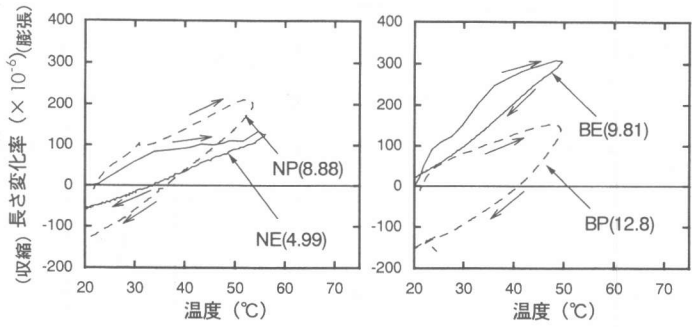


図-6 温度とひずみの関係 (環境温度 15°C)

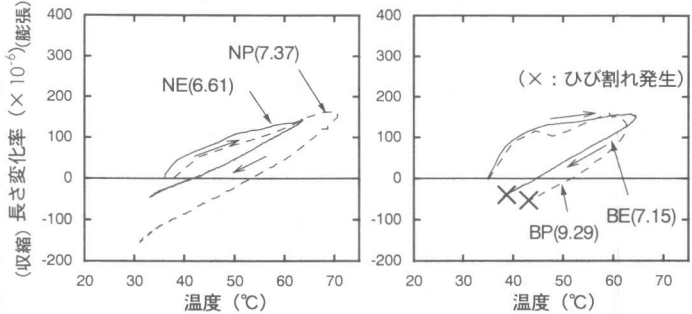


図-7 温度とひずみの関係 (環境温度 30°C)

参考文献

- 1)例えば、長滝重義・佐藤良一：マスコニートとひびわれ、セメント・コンクリート、No.451,pp.76-87,1984
- 2)例えば、芳賀孝成他：最近のコンクリート技術、土木技術、Vol.44,No.10,pp.100-108,1989
- 3)辻幸和他：膨張材を使用したマスコニートの温度応力とケミカルプレストレス、セメント技術大会講演集、Vol.36,pp.102-103,1982
- 4)藤田正樹他：大規模高度浄水施設における総量 20 万 m³ の低発熱高流動コンクリートの適用、土木学会論文集、Vol.39,No.592,pp.147-154,1998.5
- 5)竹田宣典他：低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20,No.2,pp.997-1002,1998
- 6)中村博之他：自己収縮を考慮したコンクリートの温度応力の試算、土木学会第 53 回年次学術講演会、No.5,pp.710-711,1997