

論文 一軸引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ抵抗性

保利彰宏^{*1}・玉木俊之^{*2}・萩原宏俊^{*3}

要旨：膨張材によるひび割れ低減効果を評価するため、JIS 原案に規定される温度応力試験装置を用いて実験を行った。材齢 7 日以前は一定条件下にてコンクリートのひずみを拘束し、それ以降は一定の速度にてコンクリート供試体に一軸直接引張ひずみを加えたところ、ひび割れ発生材齢に大きな違いが認められた。また、引張応力、弾性係数、及びひずみの実測値を用いて、コンクリートに発生する引張応力の低減率を解析した結果、膨張材を混和しないコンクリートに比較して、膨張材を混和したコンクリートは、引張応力の低減効果に優れることが確認された。

キーワード：膨張材、一軸引張応力、ひび割れ発生材齢、ひずみ、引張応力低減効果

1. はじめに

膨張材を使用する主な目的は、乾燥収縮や温度応力等に起因するコンクリートのひび割れ抑制である。膨張材がひび割れ抑制に効果を持つことは一般的にも知られており、実際に施工現場等においても実績を挙げている¹⁾。しかし一方で、膨張材がひび割れを低減する機構については不明な点が多い。一般には材齢初期にケミカルプレストレスが導入されるためであると説明されているが、未だ確証されるに至っていない。

本研究では、膨張材を混和したコンクリート（以降膨張コンクリートと称する）と膨張材を混和しないコンクリート（以降プレーンコンクリートと称する）とを作製し、一軸直接引張ひずみを加えることで、膨張材の有無によるひび割れ発生への影響を確認すると共に、両者の力学的な差について、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：新潟県姫川水系産砕砂（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）
- ・膨張材：カルシウムサルファート系膨張材，比重 2.93，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

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。

表-1 コンクリート配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE 減水剤 (B×%)
			水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	
プレーンコンクリート	50.0	48.0	172	313	—	861	951	0.10
膨張コンクリート				283	30			

*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）

2.2 実験方法

(1) 試験装置

引張応力下におけるコンクリートの挙動を調べるため、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）」³⁾に準拠するものである。

(2) 試験方法

図-1 においてコンクリート供試体に応力を発生させる方法としては、周囲に配置した拘束鋼管に一定温度の循環水を流し、鋼管に温度変化によるひずみが発生しない状態にてコンクリートのひずみを拘束し、応力を発生させる方法と、循環水の温度を変化させることで鋼管に強制的なひずみを与え、応力を発生させる方法とがある。本実験では材齢 7 日以前は鋼管に 20℃一定の水を循環し、その後は 3℃/日の速度で循環水を昇温した。すなわち、材齢 7 日以前はコンクリートの水和に伴う長さ変化を拘束することで応力を発生させ、材齢 7 日以降は強制的に一軸引張応力を与えることで応力を発生させた。測定項目は拘束鋼管のひずみ、コンクリート供試体のひずみ、及び温度である。なお、同一の条件下にて養生したコンクリート円柱供試体（φ15×20cm 及び φ10×20cm）も作製し、それぞれ割裂引張強度及び弾性係数の測定に供した。なお、本試験に用いた供試体は全て环境温度 20℃にて封緘養生を行っている。

拘束鋼管のひずみ測定についてはひずみゲージを、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、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、割裂引張強度の測定は JIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」に準拠し、弾性係数の測定は ASTM C469-65「圧縮におけるコンクリートの静弾性係数およびポアソン比の試験方法」に準拠した。

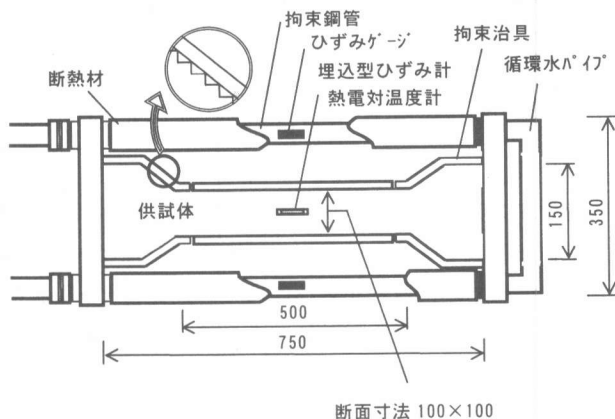


図-1 温度応力測定装置（単位:mm）

3. 実験結果

3.1 温度応力測定結果

コンクリート供試体に生じた応力は、拘束鋼管に生じたひずみの測定値から、式(1)にて算出した。

$$\sigma_c = \varepsilon_s \times E_s \times \frac{A_s}{A_c} \quad \text{式(1)}$$

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

E_s : 拘束鋼管の弾性係数 (1.97×10⁵N/mm²)

A_s : 拘束鋼管の総断面積 (1.40×10³mm²)

A_c : コンクリート供試体の断面積
(1.00×10⁴mm²)

結果を図-2 に示す。図中において、実線が膨張コンクリート、破線がプレーンコンクリートを示している。

材齢 7 日以前について結果を見ると、膨張コンクリートは材齢と共に圧縮応力が増加していることがわかる。ただし、材齢 2 日以降は約 0.25N/mm²にて横這いになっている。一方のプレーンコンクリートは、材齢と共に引張応力が増加し続け、材齢 7 日にて約 0.4N/mm²となった。

コンクリートに一軸引張応力を与えた材齢 7 日以降について結果を見ると、いずれのコンクリートも直線的に引張応力が増加している。応

力の増加速度はほぼ同等であり、プレーンコンクリートについては材齢 14 日頃、膨張コンクリートについては材齢 17 日頃にひび割れが発生した。ひび割れ発生応力はプレーンコンクリートが 1.83N/mm^2 、膨張コンクリートが 1.86N/mm^2 と、こちらもほぼ同等であった。

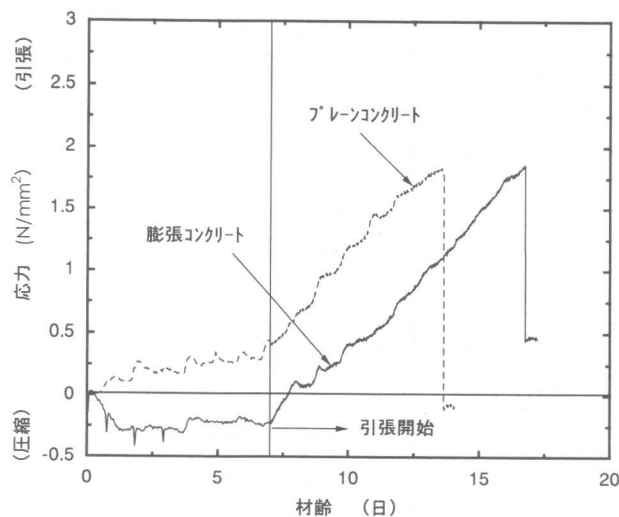


図-2 コンクリートの応力測定結果

3.2 コンクリートのひずみ測定結果

埋込型ひずみ計にて測定したコンクリートのひずみを図-3 に示す。横軸が材齢、縦軸がひずみを示す。また、実線が膨張コンクリート、

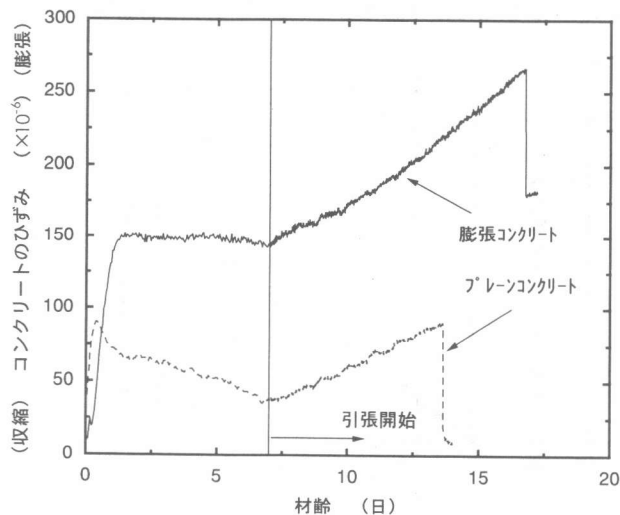


図-3 コンクリートのひずみ測定結果

破線がプレーンコンクリートを示している。

材齢 7 日以前について結果を見ると、膨張コンクリートは材齢 2 日頃までに 150×10^{-6} の膨張ひずみを生じ、その後ほぼ横這いになっていることがわかる。一方のプレーンコンクリートは材齢 1 日頃に約 85×10^{-6} の膨張ひずみを生じた後徐々に減少し、材齢 7 日においては約 40×10^{-6} となった。

コンクリートに一軸引張応力を与えた材齢 7 日以降について結果を見ると、プレーンコンクリートは直線的にひずみが増大しているのに対し、膨張コンクリートのひずみは指数的に増加していることがわかる。

3.3 コンクリートの物性試験結果

コンクリートの割裂引張強度試験結果及び弾性係数測定結果を図-4 に示した。なお、図中の曲線は、実測値より求めた近似値である。割裂引張強度について結果を見ると、プレーンコン

クリートに比較して膨張コンクリートは初期強度の発現が遅いが、材齢 15 日頃を境に両者は逆転している。しかしその差は僅かである。弾性係数については、プレーンコンクリートに比較して膨張コンクリートが大きい、こちらも両者の差は僅かである。

4 クリープ係数

図-2 及び図-4 から、割裂引張強度、弾性係数、及び一軸引張応力下での破壊強度についてはプレーンコンクリートと膨張コンクリートとの間にはほとんど差がないことが確認された。にも関わらず図-3 を見ると、一軸引張応力を与えた材齢 7 日以降のひずみには大きな違いが認められる。膨張コンクリートのクリープひずみは、プレーンコンクリートのクリープひずみに比較して同程度あるいは若干大きくなるとの

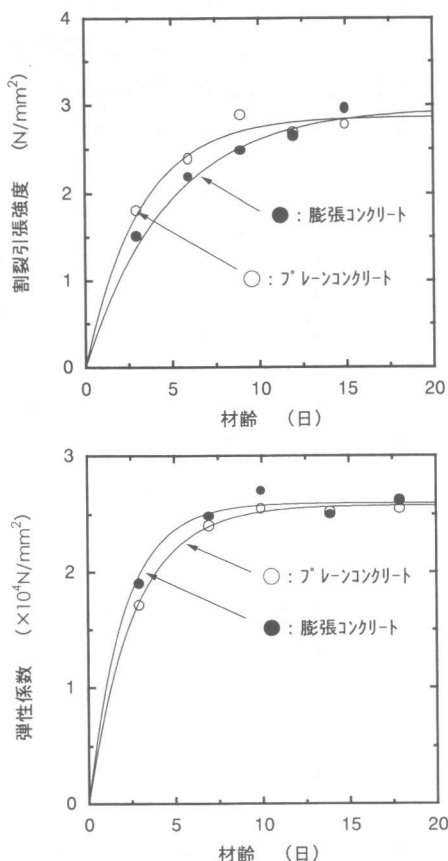


図-4 コンクリートの物性測定結果

報告があり⁴⁾、本試験においても同様の現象が生じていると考えられる。そこで、一軸引張応力を与えた材齢7日以降において、クリープに関する検討を行った。

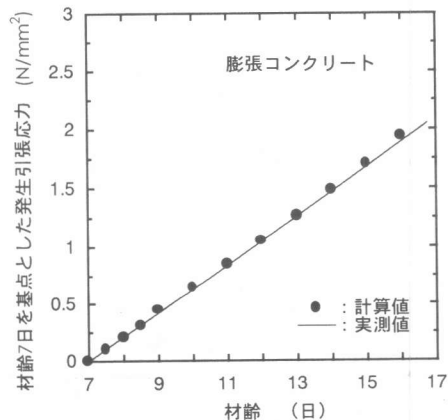
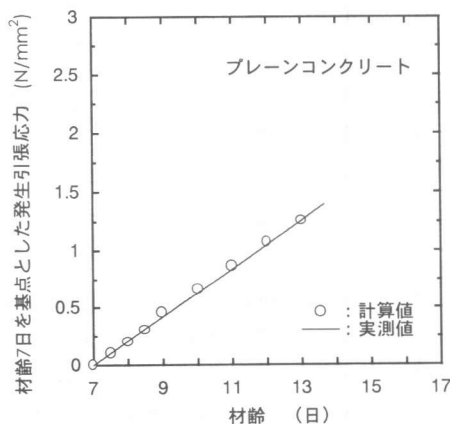


図-5 計算結果と実測値の比較

検討に当たっては、岩城らの提案式⁵⁾を用いた。この方法は、材齢をいくつかの区間 (step) に区分し、各 step ではコンクリートの弾性係数が一定であると仮定した上で、ひずみと弾性係数より算出した弾性解 $\Delta\sigma_i$ を、これに対応するクリープ係数 Φ に基づいて低減させ、式(2)を用いて重ね合わせる方法である。なお、式(2)における $\frac{1}{1+\Phi}$ が、引張応力の低減率と称されており⁵⁾、この値が小さいほど引張応力の低減割合が大きいことを示す。

$$\sigma_n = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_i}{(1+\Phi_{i,n})} \quad \text{式(2)}$$

$$\Phi_{t_0,t_1} = \frac{E_{t_0}}{E_{28}} (\varphi_{t_1} - \varphi_{t_0}) \quad \text{式(3)}$$

ここに、

$\Delta\sigma_i$: i step での応力増分 (弾性解)

$\Phi_{i,n}$: i step での応力増分に対する n step でのクリープ係数

E_{t_0} : 有効材齢 t_0 での弾性係数

E_{28} : 有効材齢 28 日での弾性係数

ψ_t : 有効材齢 t でのクリープ係数である。

計算に用いた数値は、図-2～図-4 から得られた近似式より求めた。ただし、応力とひずみに関しては、材齢7日を基点とする近似曲線より

表-2 計算条件

step		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
プ レ ン コ ン ク リ ー ト	t	7~7.5	7.5~8	8~8.5	8.5~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~13.6	-	-	-
	E _t	2.41	2.44	2.47	2.48	2.51	2.53	2.54	2.55	2.56			
	ε _t	2.9	4.3	4.3	4.3	6.4	8.5	8.5	8.5	7.0			
	P _t	0.051	0.105	0.105	0.105	0.158	0.210	0.210	0.210	0.174			
膨 張 コ ン ク リ ー ト	t	7~7.5	7.5~8	8~8.5	8.5~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~16.7
	E _t	2.52	2.54	2.55	2.56	2.57	2.58	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.60
	ε _t	2.9	4.6	4.8	4.9	7.7	10.8	11.5	12.3	13.1	13.9	14.8	13.8
	P _t	0.051	0.105	0.105	0.105	0.158	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.185

t: 材齢 (日), E_t: 材齢に対応する弾性係数の平均値 (×10⁴N/mm²),

ε_t: 各 step にて生じたひずみ (×10⁻⁶), P_t: 材齢に対応する引張応力増分 (実測値) の平均値 (N/mm²)

表-3 応力の低減率 ($\frac{1}{1+\Phi}$) (%)

step		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ブ レ ー ン コ ン ク リ ー ト	Δσ ₁	97	95	94	92	91	90	89	89	89	-	-	-
	Δσ ₂		98	96	95	93	92	91	91	91			
	Δσ ₃			98	97	95	94	93	93	93			
	Δσ ₄				99	97	95	95	94	94			
	Δσ ₅					98	97	96	96	95			
	Δσ ₆						99	98	97	97			
	Δσ ₇							99	99	98			
	Δσ ₈								99	99			
	Δσ ₉									100			
膨 張 コ ン ク リ ー ト	Δσ ₁	93	88	83	79	71	65	60	56	53	50	47	45
	Δσ ₂		94	88	83	75	68	63	58	55	51	49	47
	Δσ ₃			94	83	79	72	66	61	57	53	50	48
	Δσ ₄				94	83	75	69	63	59	55	52	50
	Δσ ₅					88	79	72	66	61	57	54	51
	Δσ ₆						88	80	72	67	62	58	55
	Δσ ₇							89	80	73	67	62	59
	Δσ ₈								89	80	73	68	64
	Δσ ₉									89	81	74	70
	Δσ ₁₀										89	81	76
	Δσ ₁₁											90	83
	Δσ ₁₂												92

求めた。また、計算期間は引張応力を載荷し始めた材齢7日以降、ひび割れを発生する材齢までとした。

岩城らの報告において、 ψ_{te} には実験結果より求めた式(4)を適用している。本論文では ψ_{te} が未知であるため、式(2)によって得られた値が図-2に示した応力と等しくなるよう最小二乗法にて回帰を行い、それぞれ式(5)及び式(6)を得た。

$$\varphi_{te} = 3.9(1 - e^{-0.17te}) \quad (\text{岩城ら}) \quad \text{式(4)}$$

$$\varphi_{te} = 3.9(1 - e^{-0.47te}) \quad (\text{プレンコンクリート}) \quad \text{式(5)}$$

$$\varphi_{te} = 6.3(1 - e^{-0.028te}) \quad (\text{膨張コンクリート}) \quad \text{式(6)}$$

計算条件を表-2に、計算結果を図-5に示す。計算結果が実測結果にほぼ適合することから、 ψ_{te} の設定は式(5)及び式(6)にて適当であるといる。また、応力の低減率 $\frac{1}{1+\Phi}$ を表-3に、材齢7~7.5日(step1)及び材齢9~10日(step5)にて発生した引張応力(Δσ₁, Δσ₅)の低減率を図-7に示した。図-7は横軸が材齢、縦軸が引張応力の低減率であり、実線が膨張コンクリート、破線がプレンコンクリートである。図より、例えば材齢7日に発生した引張応

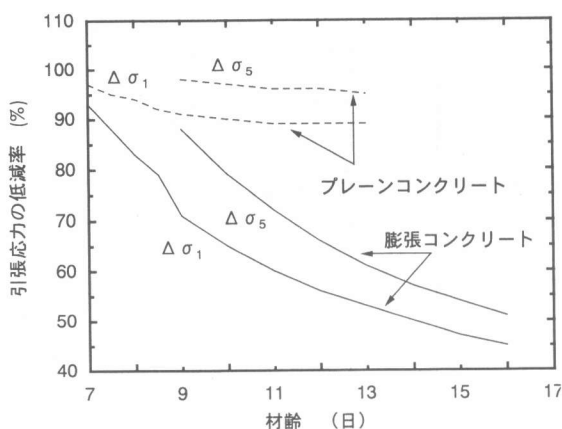


図-7 引張応力の低減率

力 ($\Delta\sigma_1$) の低減率を比較すると、プレーンコンクリートは材齢 12 日において約 90% の引張応力が残存しているのに対し、同材齢における膨張コンクリートについては約 55% まで引張応力が低減されていることがわかる。つまり、プレーンコンクリートに比較して膨張コンクリートは、一軸引張応力の低減率が大きいことは明らかであり、このような膨張コンクリートの性質が、ひび割れ抑制に効果を発揮していると推察される。

ただし今回の計算は、材齢 7 日における応力とひずみを基点として行っているため、膨張コンクリートに働く応力が圧縮から引張に転じる点などは考慮していない。また、同様の現象がセメントの種類、配合、一軸引張応力を与える材齢、一軸引張応力の増加速度などを変化させた場合についても認められるか否かについても確認する必要がある。これらは今後の検討課題としたい。

5. 結論

本研究では、膨張材を混和したコンクリートと膨張材を混和しないコンクリートとを作製し、一軸直接引張応力を加えることで、膨張材の有無によるひび割れ発生への影響を確認すると共に、力学的に両者がどのように異なっているかについて検討を行った。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) 膨張材を混和することで、一軸引張応力下におけるひび割れ発生材齢が遅れることが確認された。
- (2) 一軸引張応力下において、膨張材の有無によるひび割れ発生応力への影響は見られなかった。しかし、コンクリートに生じるひずみは、膨張材の有無によって大きく異なった。
- (3) 膨張材を混和することで、一軸引張応力の低減効果が大きくなることが確認された。

参考文献

- 1) 辻幸和他：膨張材を使用したマスキングの温度応力とミカドプレストレス、セメント技術大会講演集，Vol.36, pp.102-103, 1982
- 2) 藤田正樹他：大規模高度浄水施設における総量 20 万 m^3 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
- 3) 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
- 4) 大沼博志他：膨張コンクリートの圧縮及び引張クリープ特性，セメント技術年報，No.39, pp.368～371, 1985
- 5) 岩城良他：セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法に関する研究，鹿島建設技術研究所年報，No.28, pp.45～52, 1980