

論文 膨張コンクリートによるひび割れ制御に関する研究

井手一雄*¹ 樋口正典*² 辻幸和*³

要旨：鋼材で拘束された膨張コンクリートの一軸引張試験を、単位膨張材量および試験材齢を変化させて行い、一軸引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ制御効果を検討した。その結果、ケミカルプレストレスの導入に伴い、また、材齢が経るにつれ、ケミカルプレストレスを導入したコンクリートのひび割れ発生までの引張ひずみは増大することが確かめられた。また、ひび割れ幅の低減効果は、導入されたケミカルプレストレスにほぼ相当する量であると考えて差し支えないが、材齢2日程度の若材齢では、導入されたケミカルプレストレスを上回る低減効果が認められた。
 キーワード：膨張コンクリート, ひび割れ制御, 温度ひび割れ, 一軸引張試験

1. はじめに

セメントの水和発熱に起因する外部拘束応力による温度ひび割れを制御する方法の一つに、膨張コンクリートによるケミカルプレストレスやケミカルプレストレスを利用する方法がある¹⁾。膨張コンクリートがひび割れ制御に効果を発揮することは、実物大規模の実験によって確認されており²⁾、実施工においても実績を挙げている³⁾。その一方で、事前にひび割れ制御効果を評価する手法が確立されていないため、必ずしも十分な効果が得られなかった例も見受けられる。

本研究では、鋼材で拘束された膨張コンクリートの一軸引張試験を、単位膨張材量および試験材齢を変化させて行い、一軸引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ制御効果を検討した。

2. 実験概要

実験水準を、表 - 1 に示す。シリーズAでは、単位膨張材量Eを0 kg/m³、30 kg/m³および40 kg/m³とし、試験材齢を材齢5日とした。

また、シリーズBでは、Eを0 kg/m³および40 kg/m³とし、試験材齢を材齢2日、5日および28日とした。供試体の数は、それぞれ4体とした。

表 - 1 実験水準

	単位膨張材量 E (kg/m ³)	試験材齢 (日)
シリーズA	0, 30, 40	5
シリーズB	0, 40	2, 5, 28

供試体の形状寸法を、図 - 1 に示す。供試体は、JIS A 6202「コンクリート用膨張材」の附属書2(参考)「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」に規定されているB法に準じて作製した。その際、長さ方向の中央部には、深さ10mm、幅2mmの切り欠きを両側面に設けた。切り欠きは、型枠に取り付けたアルミニウム製の平板で設け、切り欠き部におけるケミカルプレストレスの伝達を防止するため、アルミニウム製平板にはグリースを塗布した。また、拘束棒は全長にわたってねじ転造されおり、ひずみゲージを貼付するため、一部ねじを切削した。

* 1 三井建設株式会社 技術研究所 主任研究員 (正会員)

* 2 三井建設株式会社 技術研究所 材料研究室室長 工博 (正会員)

* 3 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

そのため、一般部の公称断面積 95.03mm^2 に対して、ゲージ貼付部の断面積は、シリーズ A で 84.88mm^2 、シリーズ B で 61.86mm^2 となった。

一軸引張試験装置を、図 - 2 に示す。供試体の設置は、定着部のすべりや荷重の偏心を極力なくするため、供試体の拘束端板にあらかじめ溶接してあるナット()に、球座がついたボルト()をねじ込む方法で行った。引張試験は変位制御で行い、載荷速度が JISA 1113-1993 「コンクリートの引張強度試験方法」の載荷速度(毎分 $0.4 \sim 0.5\text{N/mm}^2$) と同等となるように変位速度を調整した。供試体は、コンクリートの打込み翌日まで湿布養生し、その後は試験の直前まで水中養生した。また、試験中には水を噴霧するなどして、極力乾燥の影響を防いだ。

計測項目は、ケミカルプレストレイン、引張荷重、拘束棒ひずみおよび切り欠き位置におけるひび割れ幅とした。ケミカルプレストレインおよび拘束棒のひずみの計測は、拘束棒の中央部に貼付したひずみゲージ()により行い、引張荷重の計測は、引張試験機に設置されたロードセル()により行った。また、ひび割れ幅の計測は、切り欠きを跨いで設置した標点間距離 50mm のパイ型変位計()で行った。

コンクリートの配合を、表 - 2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、骨材には鬼怒川水系産川砂(表乾密度 2.57kg/l 、吸水率

2.25% 、F.M.2.45)および秩父産砕石(最大寸法 20mm 、表乾密度 2.71kg/l 、吸水率 0.64% 、F.M.6.59)を、それぞれ使用した。また、膨張材には、エトリンガイト系(構造用)を使用した。

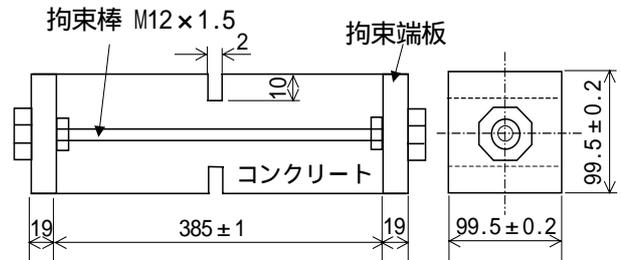


図 - 1 供試体の形状寸法

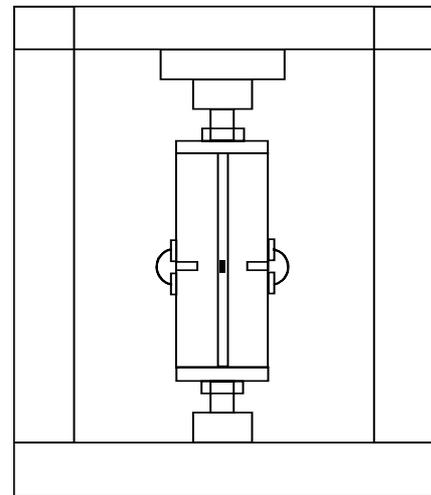


図 - 2 一軸引張試験装置

表 - 2 コンクリートの配合表

	配合種別	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単体量 (kg/m ³)					
					水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	混和剤
シリーズ A	E0A	51.9	44.0	4.5	165	318	0	778	1044	0.64
	E30A					288	30			
	E40A					278	40			
シリーズ B	E0B	51.9	46.0	4.5	175	337	0	796	985	0.25
	E40B					297	40			

3. 実験結果および考察

3.1 プレストレインとプレストレス

引張試験直前のケミカルプレストレインの計測結果と、式(1)によって求めた引張試験直前のケミカルプレストレスを、表 - 3 にまとめる。

$$cp = sp \times Es \times As / Ac \quad (1)$$

ここに、

cp : ケミカルプレストレス(N/mm²)

sp : ケミカルプレストレイン

Es : 拘束棒のヤング率(N/mm²)

シリーズA : 1.78×10^5 N/mm²

シリーズB : 2.02×10^5 N/mm²

As : 拘束棒の断面積(mm²)

シリーズA : 84.88mm²

シリーズB : 61.86mm²

Ac : コンクリートの断面積(mm²)

シリーズA : 7915mm²

シリーズB : 7938mm²

3.2 ひび割れ発生時の荷重と拘束棒ひずみ

ひび割れ発生時の荷重と拘束棒ひずみの関係を、図 - 3 ~ 図 - 6 に示す。縦軸および横軸とも、載荷時を原点に採っている。したがって、膨張コンクリートでは拘束棒のひずみは、横軸の値に表 - 3 に示したケミカルプレストレインが生じていることになる。図中、黒塗りのデータは、各水準の平均値を示している。また、破線は、原点と各水準の平均値を直線で結んだものである。

シリーズAの結果から、ケミカルプレストレスの導入に伴いひび割れ発生時の荷重は増加するとともに、ひび割れ発生時の拘束棒ひずみは増加しており、また、破線の傾きは小さくなる傾向を示した。また、シリーズBの結果から、材齢が経るにつれ、ケミカルプレストレスの有無による破線の傾きの差は大きくなる傾向を示した。すなわち、ケミカルプレストレスの導入に伴い、また、材齢が経るにつれ、ケミカルプレストレスを導入したコンクリートのひび割れ発生までの引張ひずみは増大することが確かめられた。

表 - 3 ケミカルプレストレインとケミカルプレストレス

配合種別	材齢(日)	ケミカルプレストレイン(×10 ⁻⁶)	ケミカルプレストレス(N/mm ²)
E30A	5	234	0.45
E40A	5	422	0.81
E40B	2	374	0.58
	5	429	0.68
	28	535	0.89

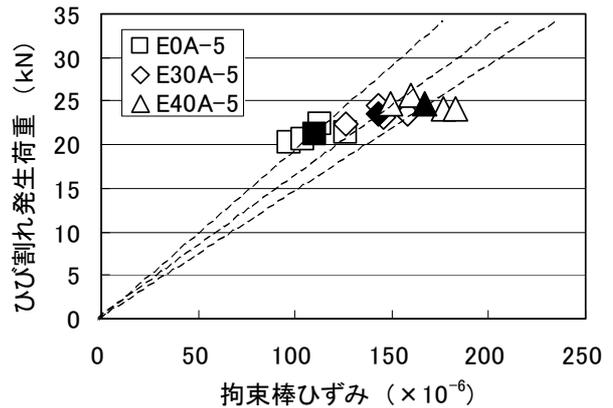


図 - 3 ひび割れ発生荷重と拘束棒ひずみ (シリーズA)

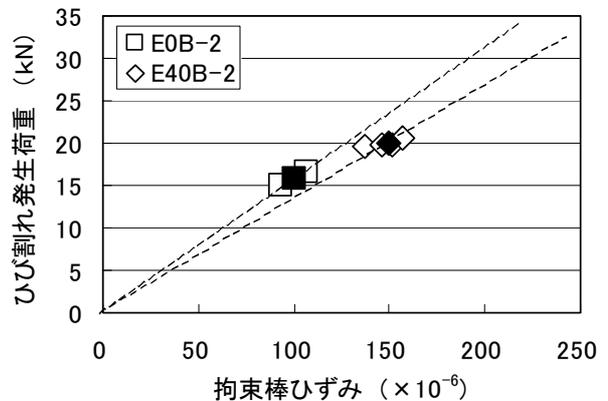


図 - 4 ひび割れ発生荷重と拘束棒ひずみ (シリーズB 材齢2日)

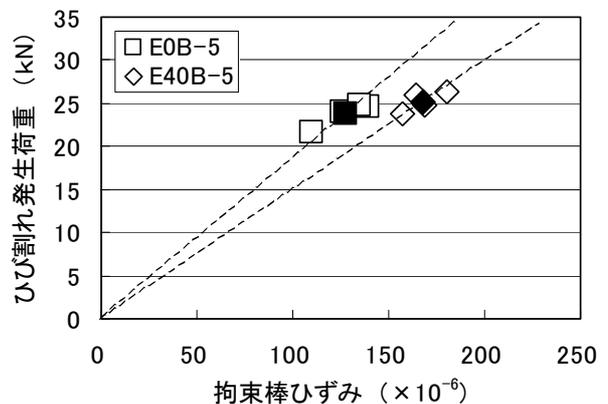


図 - 5 ひび割れ発生荷重と拘束棒ひずみ (シリーズB 材齢5日)

表 - 4 には、ひび割れ発生時の荷重の計測値とケミカルプレストレス分を荷重に換算した場合に得られる膨張コンクリートのひび割れ発生荷重の推定値を、シリーズBについて示す。

膨張コンクリートのひび割れ発生時の荷重は、材齢が経るにつれ大きくなる傾向を示した。しかし、ケミカルプレストレスの導入に伴うひび割れ発生荷重の増分は、材齢 2 日ではケミカルプレストレスを荷重に換算した量の 86%程度であるのに対し、材齢 28 日では 31%程度となり、材齢が経るにつれ小さくなる傾向を示した。

これらの結果から、ケミカルプレストレスを導入したコンクリートのひび割れ制御機構には、引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ発生までの引張ひずみが重要な役割を果たしていることが確かめられた。そのため、ケミカルプレストレスによるひび割れ制御効果を検討する場合には、引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ発生までの引張ひずみを適切に評価することが重要であると考えられる。

そこで、引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ発生までの引張ひずみを表現する方法のひとつとして、低減率を用いて引張ヤング率を低減する方法²⁾について検討した。ここで、低減率は、平面保持を仮定して求めたコンクリート引張応力の最大値をその時の拘束棒ひずみで除したヤング率について、ケミカルプレストレスを導入したヤング率を導入しないヤング率で除した値とした。なお、切り欠き部の応力集中は考慮していない。その結果、本実験の範囲では、材齢 2 日、5 日および 28 日(シリーズB)において、低減率はそれぞれ 0.84、0.79 および 0.67 となった。低減率は、拘束度や載荷速度、配合、材齢、養生などの影響を受けるものと考えられる。これらの影響については、今後さらに検討したい。

3.3 ひび割れ発生後の拘束棒ひずみと荷重

ひび割れ発生後の拘束棒ひずみの絶対量と荷重の関係を、表 - 5 にまとめる。また、一例

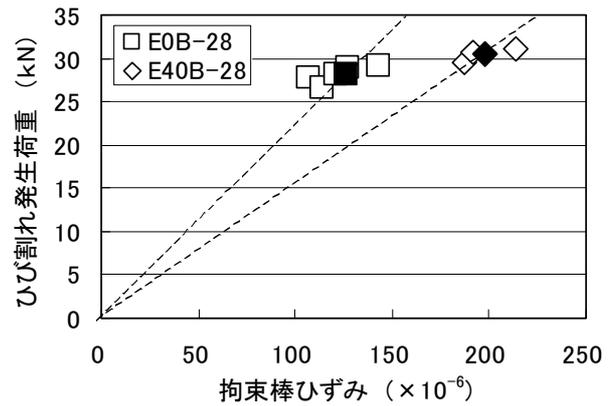


図 - 6 ひび割れ発生荷重と拘束棒ひずみ (シリーズB 材齢 28 日)

表 - 4 ひび割れ発生荷重の計測値と推定値

水準	ひび割れ発生荷重		
	計測値 (kN)	推定値 (kN)	ひび割れ発生荷重の増分 ((Bn-An)/(Cn-An)) (%)
E 0B-2	15.7(A1)	-	-
E40B-2	20.0(B1)	20.7(C1)	86
E 0B-5	23.7(A2)	-	-
E40B-5	25.9(B2)	29.5(C2)	38
E 0B-28	28.2(A3)	-	-
E40B-28	30.5(B3)	35.7(C3)	31

表 - 5 拘束棒ひずみの絶対量と荷重

水準	荷重 (kN)				
	1300	1500	1700	1900	2100
E 0A-5	23.0	25.8	28.6	31.4	34.3
E30A-5	23.1	26.0	28.9	31.7	34.6
E40A-5	22.3	25.3	28.2	31.2	34.1
E 0B-2	19.5	22.2	24.8	27.4	30.0
E40B-2	20.0	22.6	25.2	27.8	30.4
E 0B-5	21.3	23.7	26.2	28.7	31.2
E40B-5	20.6	23.2	25.8	28.4	31.0
E 0B-28	21.2	23.9	26.5	29.2	31.8
E40B-28	22.1	24.6	27.0	29.5	32.0

として、シリーズAの結果を、図 - 7 に示す。

同一材齢におけるひび割れ発生後の拘束棒ひずみは、いずれの試験材齢においても、ケミカルプレストレスの導入に伴い小さくなった。減少の程度は、いずれの水準もほぼケミカルプレストレスに相当する量であった。すなわち、本実験の範囲では、同一試験材齢において拘束

棒ひずみの絶対量（コンクリート打込み前の拘束棒ひずみを0とした場合の引張試験における拘束棒ひずみ； s ）が等しい場合には、ケミカルプレストレスの導入量に関わらず、荷重が同等となることが確かめられた。

3.4 ひび割れ幅の低減効果

拘束棒ひずみの絶対量とひび割れ幅の関係を、図 - 8 ~ 図 - 11 に示す。ひび割れ幅の増分は、ケミカルプレストレスの有無や試験材齢に関わらず、拘束棒ひずみの増分に対してほぼ一定となった。また、拘束棒ひずみの絶対量が等しい場合には、ケミカルプレストレスの増大に伴いひび割れ幅が減少する結果となり、材齢2日の場合には、他の材齢よりも減少の程度が大きくなった。

拘束棒ひずみの絶対量が等しい場合には、荷重が同等となるため、拘束棒ひずみの絶対量が等しい場合にケミカルプレストレスの増大に伴いひび割れ幅が減少するということは、ケミカルプレストレスを導入することにより、同一荷重におけるひび割れ幅を小さくできることを意味する。

表 - 6 は、ひび割れ幅の計測値と計算値を示している。ひび割れ幅の計算は、式(2)を用いて、それぞれの試験材齢において単位膨張材量が 0kg/m^3 における拘束棒ひずみの絶対量（ s ）とひび割れ幅の計測結果から、まず係数 w を算出する。その w の値を用いて、ケミカルプレストレスが導入された場合のひび割れ幅の計算値とひび割れ幅の計測値を比較したものである。

E40B-2 以外の水準では、計算値と計測値は、良好に一致した。E40B-2 では、計算値よりも計測値の方が明らかに小さく、計算値を計測値と一致させるためには、ケミカルプレストレスをおよそ1.7倍する必要がある。これらの結果から、膨張コンクリートによるひび割れ幅の低減効果は、導入されたケミカルプレストレスに相当する量であると考えて差し支えなく、若材齢ほどその効果が高いものと考えられる。

$$w = (s - sp) \quad (2)$$

ここに、

- w : ひび割れ幅 (mm)
- : 付着性状や供試体の形状などに関する補正係数
- s : 拘束棒ひずみの絶対量
- sp : ケミカルプレストレイン

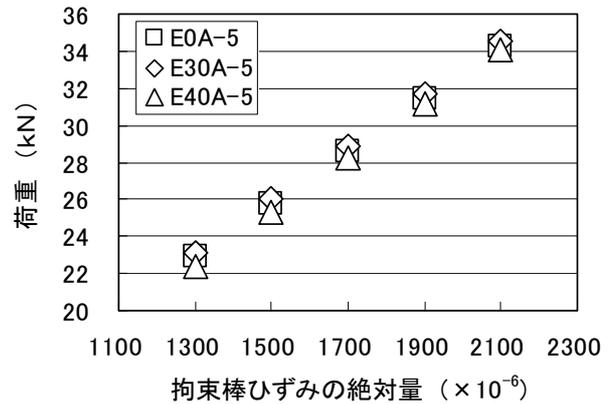


図 - 7 拘束棒ひずみの絶対量と荷重 (シリーズA)

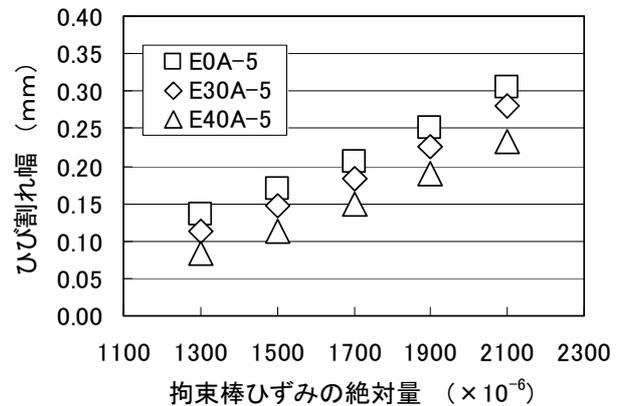


図 - 8 拘束棒ひずみの絶対量とひび割れ幅 (シリーズA)

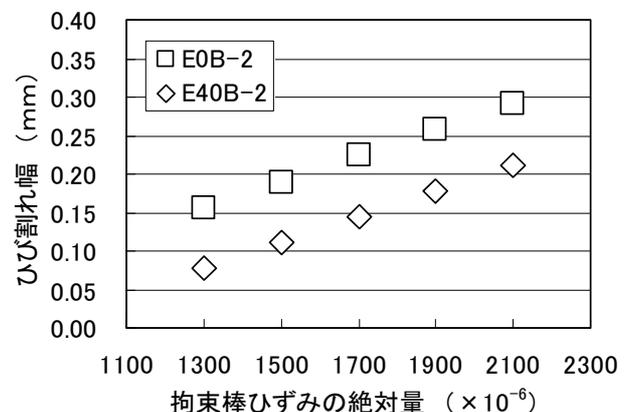


図 - 9 拘束棒ひずみの絶対量とひび割れ幅 (シリーズB 材齢2日)

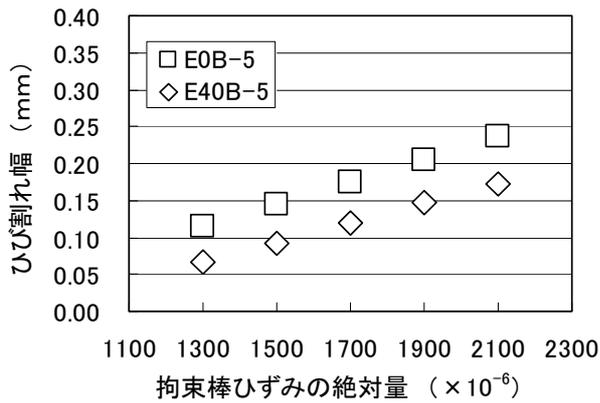


図 - 1 0 拘束棒ひずみの絶対量とひび割れ幅 (シリーズB 材齢5日)

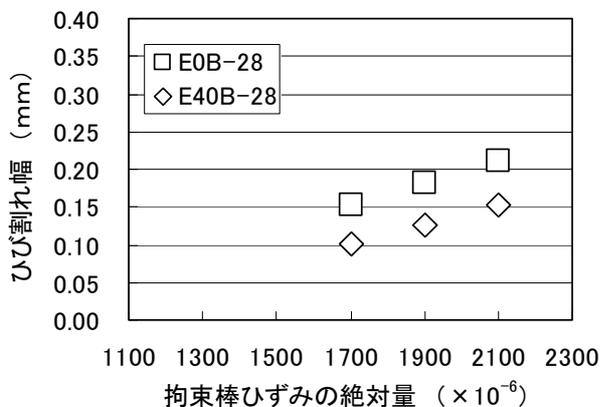


図 - 1 1 拘束棒ひずみの絶対量とひび割れ幅 (シリーズB 材齢28日)

4. まとめ

本研究では、鋼材で拘束された膨張コンクリートの一軸引張試験を、単位膨張材量および試験材齢を変化させて行い、一軸引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ制御効果を検討した。本実験の範囲で得られた結果をまとめると、以下のようである。

(1) ケミカルプレストレスの導入に伴い、また、材齢が経るにつれ、ケミカルプレストレスを導入したコンクリートのひび割れ発生までの引張ひずみは増大し、ケミカルプレストレスを導入したコンクリートのひび割れ制御機構に重要な役割を果たしていることが確かめられた。

(2) 同一試験材齢において拘束棒ひずみの絶対量が等しい場合には、ケミカルプレストレスの導入量に関わらず、引張荷重が同等となることが確かめられた。

表 - 6 ひび割れ幅の計算値と計測値

		ひび割れ幅(mm)			
		$s (\times 10^{-6})$			
水準		1500	1700	1900	2100
E30A-5	計測値	0.15	0.18	0.23	0.28
	計算値	0.14	0.18	0.22	0.27
		112	121	132	145
E40A-5	計測値	0.11	0.15	0.19	0.23
	計算値	0.12	0.15	0.20	0.24
		112	121	132	145
E40B-2	計測値	0.11	0.14	0.18	0.21
	計算値	0.14	0.17	0.21	0.24
		126	131	136	139
E40B-5	計測値	0.09	0.12	0.15	0.17
	計算値	0.10	0.13	0.16	0.18
		96	103	108	112
E40B-28	計測値	-	0.10	0.13	0.15
	計算値	-	0.10	0.13	0.16
		-	90	96	100

(3) ひび割れ幅の低減効果は、ケミカルプレストレスの導入量や試験材齢に関わらず、ほぼ導入されたケミカルプレストレスに相当する量であると考えて差し支えないこと、また、材齢2日程度の若材齢では、導入されたケミカルプレストレスを上回る低減効果のあることが、それぞれ認められた。

参考文献

- 1) コンクリートライブラリー75 膨張コンクリートの設計施工指針、土木学会、1993年7月
- 2) 辻幸和ほか：膨張材のマスコンクリートへの適用、セメント・コンクリート、No.405、pp.20-26、1980
- 3) 藤田正樹ほか：大規模高度浄水施設における総量20万 m^3 の低発熱型高流動コンクリートの適用、土木学会論文集、No.592/V-39、pp.147-154、1998