

論文

[1090] 結合材の種類がコンクリートの硬化収縮に及ぼす影響

近松竜一*1・竹田宣典*2・鎌田文男*3・十河茂幸*4

1. はじめに

コンクリートの収縮現象には、硬化後に生じる乾燥収縮のほかに、水和反応に伴い凝結の過程から生じる硬化収縮が知られている。一般に、硬化収縮量は乾燥収縮量に比べて小さいと考えられていたが、単位結合材量を多く使用した場合などには、比較的大きな収縮量となると、最近報告がなされている[1], [2], [3]。一方、種々の混和材を組み合わせ、単位結合材量を多くし、流動性と分離抵抗性を向上させたコンクリートの研究[4]も進められているが、このようなコンクリートの硬化収縮についても、明らかにされていない。また、コンクリートの硬化収縮の測定方法も確立されておらず、その量も定量的に把握されていないのが現状である。そこで、セメントペーストおよびコンクリートの硬化収縮特性を定量的に把握することを試み、結合材の種類が硬化収縮量や速度に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験内容

実験は大別して次の2つについて行った。

- 1) セメントペーストの体積変化実験 (実験Ⅰ)
- 2) コンクリートの長さ変化実験 (実験Ⅱ)

それぞれの実験における測定項目および測定方法を表-1に示す。図-1にセメントペーストの体積変化の測定方法を、図-2にコンクリートの長さ変化の測定方法を示す。実験Ⅱにおける円筒管の内面には、スポンジとビニールシートを張りつけ、コンクリートは自由に膨張・収縮が可能な構造とした。コンクリートの天端は乾燥を防ぐために、ビニールシートで覆い、また温度変化の影響を少なくするために、円筒管を水温20℃の水中に静置した。

2.2 使用材料

実験に用いた材料を表-2に示す。セメントには、普通、早強、中庸熟ポルトランドセメントおよびビーライト(C₂S)を多く含む低熱セメントを用いた。混和材には、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末を用いた。

表-1 測定項目・測定方法

実験シズ		測定方法	
Ⅰ	セメントペーストの体積変化	三角フラスコ(容量500ml)中にセメントペーストを100g入れ、水位変動を測定、試料は20℃の室内に静置	
	コンクリートの長さ・ひずみ変化	供試体	円筒管(直径150mm,長さ1000,400mm)にコンクリートを打設し、20℃水中に静置
Ⅱ	長さ変化率	測定項目	高感度変位計によりコンクリート天端の沈下量を測定
		内部ひずみ	埋込み型ひずみ計により内部ひずみを測定
		温度	コンクリート中心部の温度

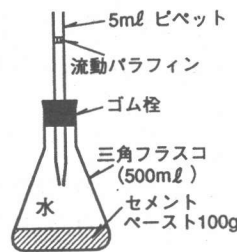


図-1 ベーストの体積変化測定

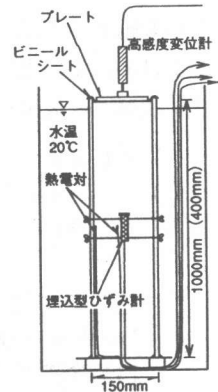


図-2 コンクリートの長さ変化測定

* 1 榊大林組 本店 工修 (正会員)
 * 2 榊大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員, 工修 (正会員)
 * 3 榊大林組 本店 (正会員)
 * 4 榊大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員, 工博 (正会員)

2.3 セメントペーストおよびコンクリートの配合

実験Ⅰに用いたセメントペーストの配合を表-3に示す。結合材として、普通(N)、早強(H)、中庸熱(M)の各ポルトランドセメントあるいはビーライトを多く含んだ低熱セメント(L)のみを用いるものと、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末(Sg)、フライアッシュ(Fa)、石灰石微粉末(Lf)を混合したものとした。実験Ⅱに用いたコンクリートの配合を表-4に示す。結合材として高炉セメントB種(BB)、MおよびLを用いたものと、BBに高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末を混合したものとした。いずれの配合も、スランブフローは65±5cmとし、単位粉体量を500kg/m³とした。比較のため、BBを用いた普通コンクリートについても同様の実験を行った。

2.4 コンクリートの硬化収縮量の計算方法

図-3に実験Ⅱにおけるコンクリートの長さ変化のモデル図を示す。(Ⅰ)の期間では、圧密やブリージングによる沈下(ε_b)と硬化収縮による長さ変化(ε_{a1})が同時に起こるが、これらを分けて計測することはできない。(Ⅱ)の期間では、セメントの水和熱によりコンクリートの温度が上昇する期間であり、熱膨張と硬化収縮(ε_{a2})が長さ変化の主要因となる。(Ⅲ)の期間では、コンクリートの温度は下降するため、温度収縮と硬化収縮(ε_{a3})の和が収縮として現れる。従ってここでは、各期間のみかけのひずみ量(ε₁、ε₂、ε₃)を以下の式で簡略的に表せると仮定した。

$$(Ⅰ) \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{a1}(t) + \varepsilon_b(t) \cdots (1)$$

$$(Ⅱ) \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{a2}(t) - \alpha \cdot \Delta T \cdots (2) \text{ (温度上昇時)}$$

$$(Ⅲ) \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_{a3}(t) + \alpha \cdot \Delta T \cdots (3) \text{ (温度下降時)} \quad (\alpha: \text{熱膨張係数}, \Delta T: \text{温度変化}, t: \text{時間})$$

表-2 使用材料

材料名	比重	比表面積 (cm²/g)	化学組成 (%)	実験	
				I	II
普通ポルトランドセメント(N)	3.16	3440		○	
早強ポルトランドセメント(H)	3.13	4480		○	
中庸熱ポルトランドセメント(M)	3.21	3390	C₂S:33%, C₃S:45%	○	○
高炉セメントB種(BB)	3.04	3790			○
低熱セメント(L)	A	3.22	C₂S:76%, C₃S:12%	○	
	B	3.24	C₂S:53%, C₃S:26%		○
高炉スラグ微粉末	A	2.90	SiO₂:35%	○	
	B	2.91	CaO:41%	○	
	C	2.91	Al₂O₃:14%	○	○
フライアッシュ	A	2.22	SiO₂:51%	○	
	B	2.28	SiO₂:52%		○
石灰石微粉末	A	2.71	MgO:55%	○	
	B	2.73	MgO:0.3%		○
細骨材(山砂)	2.61	粗粒率 2.69, 吸水率 1.97%			○
粗骨材(碎石)	2.64	粗粒率 6.76, 最大寸法 20mm			○
高性能A/E減水剤		ナフタリン系			○

表-3 セメントペーストの配合(実験Ⅰ)

No.	材料の種類		W/P* (%)	配合				
	セメント種類	混和材種類		混合比率 (%)				
				C	Sg	Fa	Lf	
1	普通	-	35	100	0	0	0	
2	低熱	-		100	0	0	0	
3	早強	-		100	0	0	0	
4	中庸熱	-		100	0	0	0	
5	普通ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末		B	75	25	0	0
6				B	50	50	0	0
7				B	20	80	0	0
8				B	0	100	0	0
9	普通ポルトランドセメント	フライアッシュ		A	50	50	0	0
10				C	50	50	0	0
11	普通セメント	フライアッシュ		75	0	25	0	
12	普通セメント	石灰石粉末A		50	0	50	0	
13	普通セメント	石灰石粉末A		75	0	0	25	
14	普通セメント	石灰石粉末A		50	0	0	50	

$$(*) P \text{ (粉体量)} = C + Sg + Fa + Lf$$

表-4 コンクリートの配合(実験Ⅱ)

No.	略号	使用セメント	配合										フレッシュコンクリートの試験				
			W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)							70-cm	air (%)	空気率 (%)	凝結時間 h:m		
					W	C	Sg	Fa	Lf	S	G				始発	終結	
1	BB300	高炉セメントB種	55	49.0	165	N165	135	0	0	0	890	937	15	2.8	2.15	5:25	7:35
2	BB		52.5	N275	225	0	0	0	867	792	60	4.0	0.95	7:25	9:20		
3	BB+Sg		52.2	N165	135	200	0	0	855	792	70	4.5	0.27	5:25	8:55		
4	BB+Fa		50.7	N165	135	0	200	0	850	792	67	3.2	4.00	40:55	45:00		
5	BB+Lf		51.8	N165	135	0	0	200	842	792	66	2.4	0.96	11:00	13:50		
6	M	中庸熱ポルトランドセメント	33	53.1	165	M500	0	0	0	885	792	67	5.5	1.88	8:00	9:30	
7	L	低熱セメント	33	53.2	165	L500	0	0	0	889	792	68	4.1	2.19	10:05	11:45	

(*) クリンカーの種類、N:普通クリンカー、M:中庸熱クリンカー、L:高ビーライト系クリンカー

(I)の期間では、発熱量が少なくセメントの水和反応が進んでいないことから、圧密やブリージングによる沈下が大部分を占むと考えられ、硬化収縮量は無視できると仮定した。

(I)から(II)の期間に移り変わる時間は、コンクリートの発熱の始まる時間であり、この時間を本実験では一律に360℃・hrと仮定し、打込み12時間後の内部ひずみおよびコンクリート天端の位置を初期値とし、温度によるひずみを差引いた値を硬化収縮量とした。従って、各期間の硬化収縮量(ε_a)を以下の式で計算した。

$$\varepsilon_{a1}(12^H) = 0 \quad \dots (4)$$

$$\varepsilon_{a2}(t) = \varepsilon_2 + \alpha \cdot \Delta T \quad \dots (5)$$

$$\varepsilon_{a3}(t) = \varepsilon_3 - \alpha \cdot \Delta T \quad \dots (6)$$

3. 実験結果および考察

3.1 セメントペーストの体積変化

図-4に各種セメントの体積収縮率を示す。体積収縮率は、早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱セメントの順に大きく、材令28日では、早強ポルトランドセメントは14%以上となり、低熱セメントの6%に比べて2倍以上の値となる。このことより、体積収縮の大きさは、セメントの凝結速度および硬化速度の影響を受けると考えられる。

図-5に高炉スラグ微粉末(ブレン値: 6400cm²/g)の混入比率を変化させた場合の体積収縮率を示す。結合材に対する混入率が内割りで50%までの範囲では、スラグの混入率による収縮率の差はほとんどないが、混入率80%では材令28日における収縮率は、混入しないものに比べて75%程度となる。これは、スラグの混入率を増加していくと凝結・硬化速度が遅くなることに起因していると考えられる。

図-6に高炉スラグ微粉末の粉末度を变化させた場合の体積収縮率を示す。粉末度が8400cm²/gのものは、6400cm²/g、4300cm²/gのものに比べて、材令28日における収縮率は約15%大きくなった。これは、高炉スラグ微粉末の粉末

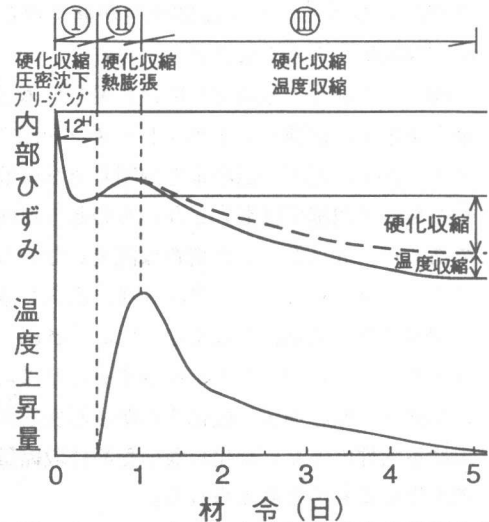


図-3 コンクリートの長さ変化のモデル図

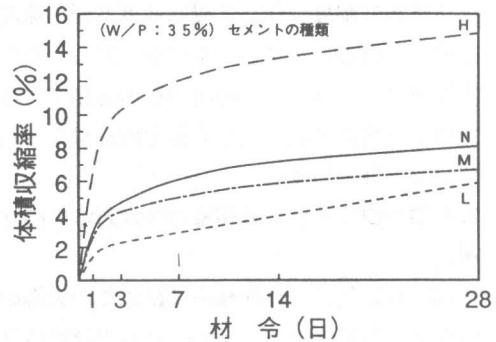


図-4 各種セメントの体積収縮率

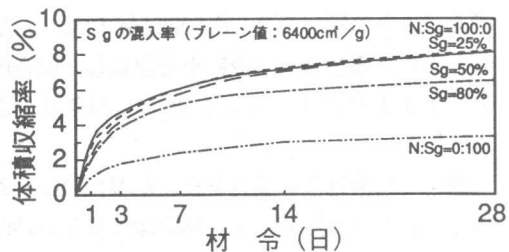


図-5 高炉スラグ微粉末の混入量が収縮率に及ぼす影響

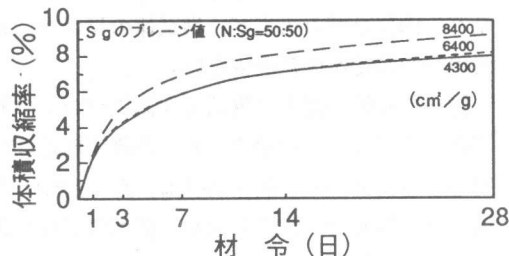


図-6 高炉スラグ微粉末の粉末度が収縮率に及ぼす影響

度が高くなると、若干凝結速度が遅くなるため、収縮率が大きくなると考えられる。

図-7に種々の混和材を用いた場合の体積収縮率を示す。普通ポルトランドセメントにフライアッシュ、石灰石微粉末を内割りで25%混入したものの収縮率は混入しないものとはほぼ同等であるが、50%混入した場合は混入しないものに対し、フライアッシュで約10%、石灰石微粉末で約25%、収縮は少なくなった。これは、フライアッシュはセメントと混合することによってポゾラン反応を示し硬化するが、石灰石微粉末は不活性であり、硬化しないために収縮量に差が生じるものと考えられる。

以上の結果より、セメントペーストの硬化に伴う体積収縮は、総じて凝結速度と硬化速度の影響を受ける。しかし、本実験で得られた収縮率はセメントペーストの実体積の変化をとらえていると考えられ、正しく硬化収縮量をとらえているとはいえない。

3.2 コンクリートの収縮量の測定方法に関する検討

図-8に長さが1000mmの供試体での天端の変位量より求めたひずみ (ϵ_{out}) および埋込み型ひずみ計による内部ひずみ (ϵ_{in}) を示す。高炉セメントB種 (BB) を 500kg/m^3 使用した配合とBBと高炉スラグ微粉末を混合した配合のいずれにおいても、 ϵ_{out} と ϵ_{in} の差は少ない。

図-9に供試体の長さを変えた場合のひずみ (ϵ_{out} と ϵ_{in}) を示す。供試体の長さが1000mmと400mmの場合を比較すると、 ϵ_{out} は最大 80μ 程度の差があるが、 ϵ_{in} は最大 30μ 程度であり、内部ひずみの方が、供試体の長さを変えた場合の測定値の差が少ない。

図-10に同一配合の供試体4体についての内部ひずみ (ϵ_{in}) を示す。 ϵ_{in} の標準偏差は、材令14日において、長さ1000mm、長さ400mmの場合いずれも 10μ 程度であり、測定のばらつきは極めて少ないものであった。

従って、自由に膨張・収縮ができる円筒管内

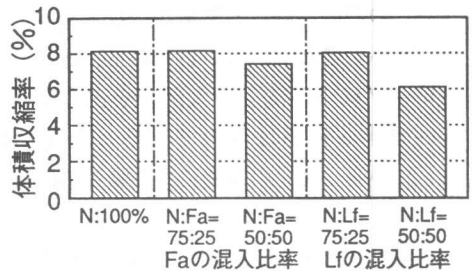


図-7 各種の混和材を用いた場合の収縮率

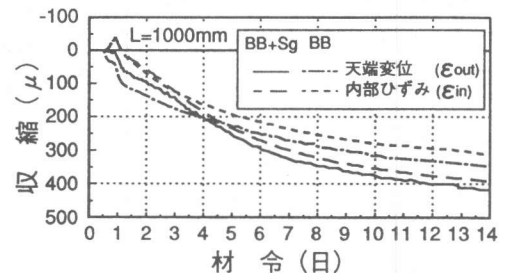


図-8 天端の変位より求めたひずみと内部ひずみ

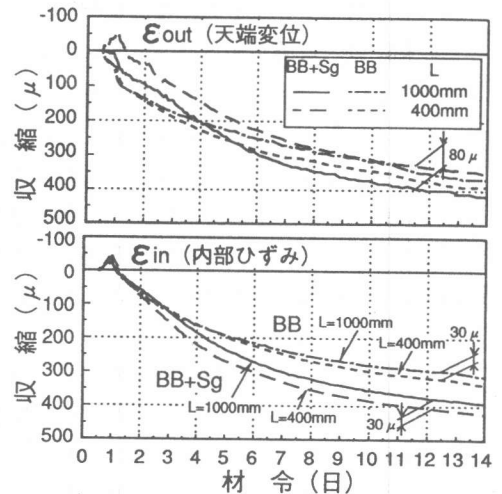


図-9 供試体の長さが収縮ひずみに及ぼす影響

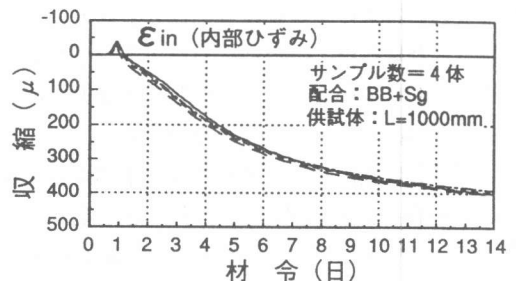


図-10 内部ひずみ測定値のばらつき

のコンクリートの内部ひずみにより、硬化収縮量の測定が可能であると考えられる。ただし、天端の変位により収縮ひずみを計測する場合は、その精度は供試体の長さに関係すると考えられる。

3.3 各種の結合材を用いたコンクリートの収縮ひずみの測定結果

(1) セメントの種類の影響

図-11に各種のセメントを用いたコンクリートの内部ひずみ (ϵ_{in}) を示す。

BBを用いた単位セメント量 300kg/m^3 の普通コンクリートの材令14日における内部ひずみは、約 70μ であるが、同一セメントを用いた単位セメント量 500kg/m^3 のコンクリートのそれは、約 330μ であり、前者の約5倍となった。

高炉スラグ微粉末に比べて反応の遅い C_2S などの成分を多く含む中庸熟ポルトランドセメントおよび低熱セメントを用いたコンクリートの内部ひずみは 100μ 程度であり、同一単位セメント量の高炉セメントB種を用いたコンクリートに比べて約 $1/3$ の収縮量であった。

硬化収縮量は単位セメント量が多い方が大きい傾向にあり、また、セメントの種類では、高炉セメントB種、中庸熟ポルトランドセメント、低熱セメントの順に大きいことが確認された。

図-12に供試体の中心温度の履歴を示す。図中に最高温度に達する時点を示しているが、本実験では、コンクリートが最高温度に達するまでの時間と硬化収縮量との間には、明確な相関関係は認められなかった。

(2) 混和材の種類の影響

図-13に高炉セメントB種に各種の混和材を混合したコンクリートの内部ひずみを示す。いずれも単位粉体量は 500kg/m^3 であり、混和材の混入比率は全粉体量の40%である。

材令14日における収縮ひずみは、高炉セメントB種(BB)を基準にすると、高炉スラグ微粉末を混入したもの(BB+Sg)は約1.2倍、フライアッシュを混入したもの(BB+Fa)は約1.9倍、石灰石微粉末を混入したもの(BB+Lf)は約0.56倍となり、混和材の種類によって硬化収縮量は大きく変化することが確認された。

高炉スラグ微粉末やフライアッシュのように混和材がポゾラン反応により硬化するものを混入すると、硬化収縮ひずみは大きく、石灰石微粉末のように不活性なものを混入すると、硬化収縮ひずみは小さくなると考えられる。

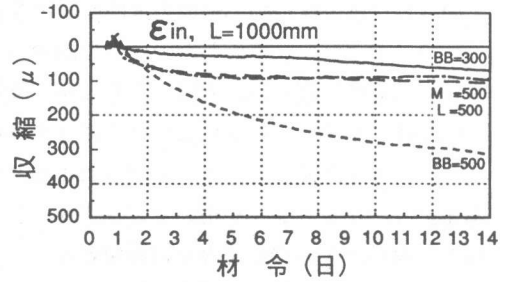


図-11 コンクリートの内部ひずみ

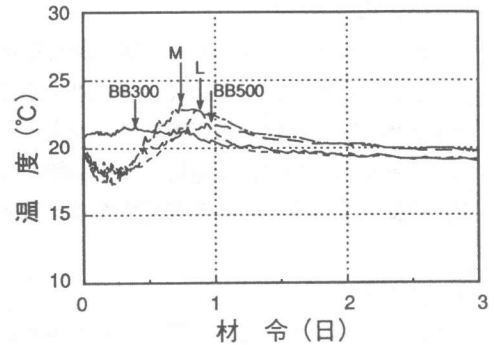


図-12 各種コンクリートの温度変化

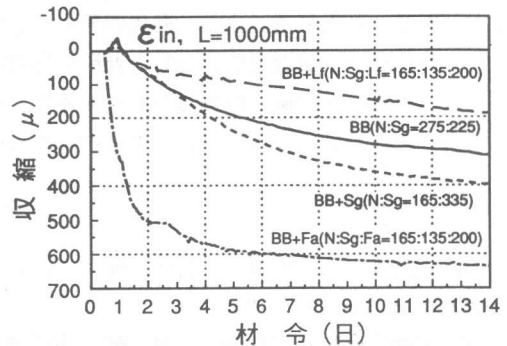


図-13 各種コンクリートの内部ひずみ

図-14に供試体の中心部の温度履歴を示す。

フライアッシュを用いたものは、発熱が始まる時間が非常に遅く50時間以後であるが、凝結時間が遅い場合、凝結開始までの収縮ひずみが大きく、硬化収縮量は大きく算定されることがある。フライアッシュを用いたコンクリートの場合、凝結終了時のひずみを初期値として、それ以後の収縮ひずみを硬化収縮量とすると 150×10^{-6} 程度となり、他の混和材を用いた場合より小さくなる。

また、フライアッシュをを多量に混合した場合などは、ブリージングが長時間に渡って継続するために、これによる収縮ひずみが大きくなることもあるために、凝結終了時を基準にした硬化収縮で算定することが適切であると考えられる。

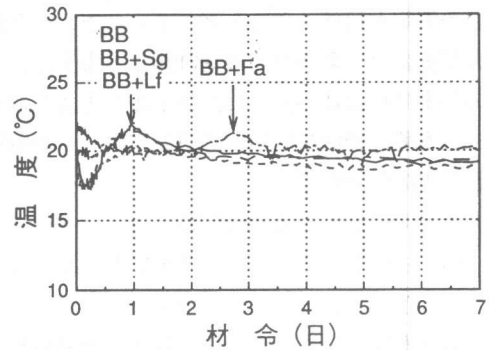


図-14 各種コンクリートの温度変化

4. まとめ

実験の結果以下のことが明らかになった。

- (1) セメントペーストの硬化に伴う体積収縮は、セメントの種類、混和材の種類、粉末度、混入量などに大きく影響されることが確認された。また、収縮量にはセメントの水和反応速度が影響すると思われる。
- (2) 自由に膨張・収縮ができる円筒管内のコンクリートの内部ひずみあるいは天端の変位を計測することにより、コンクリートの硬化収縮量の測定が可能であることが確認された。しかし、コンクリートの凝結過程のいずれの時期からの変形を硬化収縮としてみなすかが、今後の課題である。
- (3) コンクリートの硬化収縮量は、結合材の種類や単位量によって異なるが、 300×10^{-6} 以上になることもある。また、硬化収縮量は、セメントの反応速度、コンクリートの凝結時間、ブリージング量などの複合した要因に影響されると考えられる。

コンクリートの硬化収縮量を測定することを試み、結合材の種類の影響について検討したが、さらに硬化収縮のメカニズムや養生中の水分の影響などについて検討する必要があると考える。

【参考文献】

- [1] 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤 剛: セメントペーストの自己収縮, 第46回セメント技術大会講演集, pp.730-735, 1992
- [2] 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤 剛, 小西謙二郎: コンクリートの自己収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.561-566, 1992
- [3] 十河茂幸, 近松竜一, 鎌田文男, 仙名宏: 各種低発熱セメントを用いたコンクリートの硬化に伴う体積変化, 土木学会47回年次学術講演会概要集, pp934-935, 1992
- [4] 小沢一雅, 前川宏一, 岡村甫: ハイパフォーマンスコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11-1, pp.699-704, 1989