

論文 超高強度モルタルおよびコンクリートの収縮に関する研究

桃谷智樹*1・山田人司*2・喜多達夫*3

要旨：超高強度モルタルおよびコンクリートにおける乾燥収縮、自己収縮ひずみに及ぼす水結合材比、セメント種類および養生条件の影響について検討を行った。その結果より得られた知見は以下の通りである。①自己収縮は水結合材比、セメントの種類によって異なる。②自己収縮試験終了後の乾燥収縮は、セメントの種類によって異なる。③収縮量は水和に伴って生じる空隙と水分逸散による空隙を含めた総空隙量によって評価することが可能である。

キーワード：超高強度、乾燥収縮、自己収縮、総空隙量

1. はじめに

コンクリートの収縮現象には水分逸散による乾燥収縮とセメントの水和反応により生じる自己収縮が知られている。近年、水セメント比を小さくし、シリカフェーム等の混和材を混入した超高強度コンクリートの自己収縮は通常のコンクリートの自己収縮より大きくなるとの報告がなされており^{[1][2]}、自己収縮がひび割れ発生の原因となることが懸念される。したがって、超高強度コンクリートの収縮量を定量的に把握し、評価する必要があると思われる。そこで、本研究では、水結合材比、セメントの種類および養生期間が乾燥収縮、自己収縮に及ぼす影響について検討を行った。さらに、養生条件の異なるコンクリートの自己収縮、乾燥収縮を水和に伴って生じる空隙と水分逸散による空隙で評価することを試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に用いた使用材料と諸物性を表-1に示す。

2.2 実験内容

実験は以下の2つについて行った。

実験Ⅰ) 気乾、封緘養生を行った収縮試験

実験Ⅱ) 封緘養生後に気乾状態にした収縮試験

各実験における試験項目を表-2に示す。実験Ⅰはモルタルおよびコンクリートで、実験Ⅱはコンクリートで行った。長さ測定は材齢1日を基長とし、JIS A 1129のコンタクトゲージ法に準じた。供試体の寸法はモルタルは4×4×16cm、コンクリートは10×10×40cmとした。養生条件

表-1 使用材料と諸物性

材料名	比重	比表面積 (cm ² /g)	諸物性
普通ポルトランドセメント (N)	3.16	3300	C ₃ S : 48% C ₂ S : 28%
高炉セメントB種 (BB)	3.04	3880	
高炉セメント系セメント (LC)	3.20	4080	C ₃ S : 35% C ₂ S : 46%
シリカフェーム (SF)	2.20	197000	SiO ₂ : 92.4% ig.loss : 2.4
細骨材(川砂)	2.62	吸水率 1.45%、粗粒率 2.89	
粗骨材(碎石)	2.69	吸水率 0.76%、最大寸法 20mm	
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系		

*1 (株) 間組建築本部技術部技術第1課 (正会員)

*2 (株) 間組技術本部技術研究所技術研究部第4研究室主任研究員 (正会員)

*3 (株) 間組技術本部技術研究所技術研究部第2研究室室長、工修 (正会員)

は基長測定後そのまま乾燥させた気乾養生と、基長測定後にゴム系の接着剤で供試体の全面をシールした封緘養生の2種類とし、温度 20℃、湿度 60%RH の恒温恒湿室に静置した。実験Ⅱは、JCI (仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法^[3]に準じた。供試体の寸法は 10×10×40 cm とし、20℃の室内においてコンクリート打込み直後より、包装用ラップフィルムで包装し、ビニールに入れて包装後、直ちに測定を開始した。養生条件は、材齢 31 日まで封緘養生を行い、型枠を脱型後、そのまま温度 20℃、湿度 60%RH の恒温恒湿室で気乾養生を行った。

表-2 試験項目

実験 No.		測定方法	測定項目
I	気乾養生、封緘養生を行った収縮試験	モルタル コンクリート	コンタクトゲージ ・収縮試験 ・重量測定
	封緘養生後に気乾状態にした収縮試験	コンクリート	埋込型ひずみゲージ ・収縮試験 (封緘養生：～材齢31日) (気乾養生：～材齢203日) ・温度測定

2.3 モルタルおよびコンクリートの調査

実験Ⅰに用いたモルタルの調査を表-3に、コンクリートの調査を表-4に、実験Ⅱに用いたコンクリートの調査を表-5に示す。モルタルの調査において基準とした単位水量 (260kg/m³) は、水結合材比 25% 単位水量 160kg/m³ のコンクリートと単位ペースト量が等しくなるように設定した。シリカフェームは、モルタルではすべての調査について、コンクリートでは 25% 以下の調査について、セメントの内割りで 10% 置換した。

表-3 モルタルの調査 (実験Ⅰ)

セメント種類	WB (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad B×%
		W	C	SF	S	
普通 (N)	20	260	1175	130	784	2.9
	22		1067	119	887	2.8
	25		939	104	1011	2.5
	30		783	87	1162	2.3

表-5 コンクリートの調査 (実験Ⅱ)

セメント種類	WB (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					Ad B×%
			W	C	SF	S	G	
高ビークライ系 (LC)	27	46.4	170	630	0	655	950	1.0
	35	45.5		486	0	773		0.8
高炉B種(BB)	35	44.8	160	486	0	753	950	0.7
普通(N)	25	42.0		576	64	671		3.2
	25	39.7		612	68	608		2.9
	27	43.2		593	0	705		1.4
	27	41.3		630	0	650		1.1
	35	43.5		486	0	730		0.75
	60	48.7		292	0	878		0.25

表-4 コンクリートの調査 (実験Ⅰ)

セメント種類	WB (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					Ad B×%
			W	C	SF	S	G	
普通 (N)	20	35.8	160	720	80	529	950	4.2
	22	38.4		655	73	593		3.8
	25	41.4		576	64	670		3.2
	27	43.2		593	0	705		1.4
	35	43.5		486	0	730		0.75
	45	46.4		378	0	821		0.60

3. 実験結果および考察

3.1 実験Ⅰ) 気乾、封緘養生を行った収縮試験結果

図-1、2に材齢 140 日におけるモルタルおよびコンクリートの水結合材比と収縮ひずみの関係を示す。気乾養生の収縮ひずみは、モルタルでは水結合材比の影響が明確にはみられないが、コンクリートでは、水結合材比が大きくなるほど収縮量が大きくなる傾向がみられた。一方、封緘養生を行った自己収縮ひずみは、コンクリート、モルタルとも水結合材比が小さいものほど大きくなる傾向がみられ、既往の研究結果と同じ傾向となった。

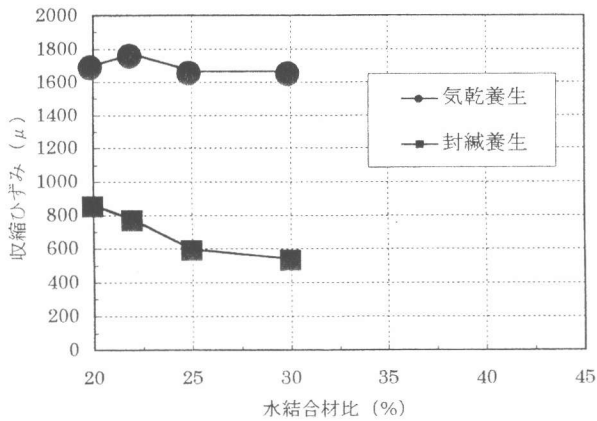


図-1 水結合材比と収縮ひずみの関係
(モルタル)

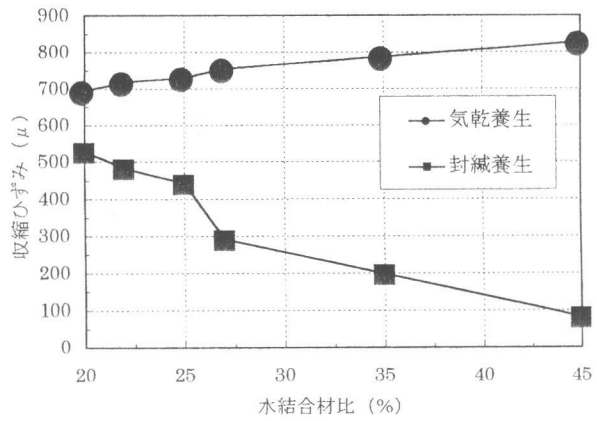


図-2 水結合材比と収縮ひずみの関係
(コンクリート)

3. 2 実験Ⅱ) 封緘養生後に気乾状態にした収縮試験結果

図-3に水結合材比 35、25%における収縮ひずみの経時変化を示す。なお、収縮ひずみはコンクリートの熱膨張係数 α を $10 \mu/\text{C}$ と仮定し温度補正を行った値にした。気乾養生後の収縮ひずみは急激に増加しており、また水結合材比 25%において乾燥期間 170日で 300μ 程度の値となった。図-4に材齢 28日における自己収縮ひずみと水結合材比の関係を示す。普通セメント、高ビーライトセメントとも水結合材比が小さくなるほど自己収縮ひずみが大きくなる傾向がみられ、実験Ⅰの試験結果と同じとなった。水セメント比 35%における収縮ひずみは高炉B種セメント、普通セメント、高ビーライトセメントの順に小さくなった。これは宮沢らによりセメントの構成化合物と封緘養生を行った収縮ひずみの大きさは相関性が

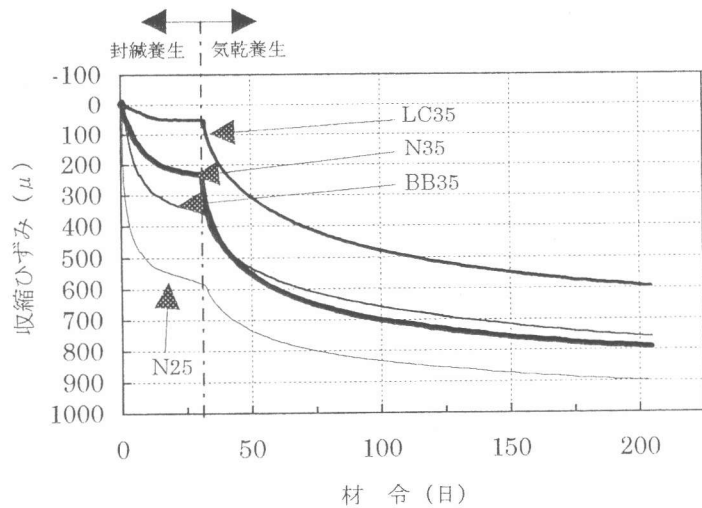


図-3 収縮ひずみの経時変化

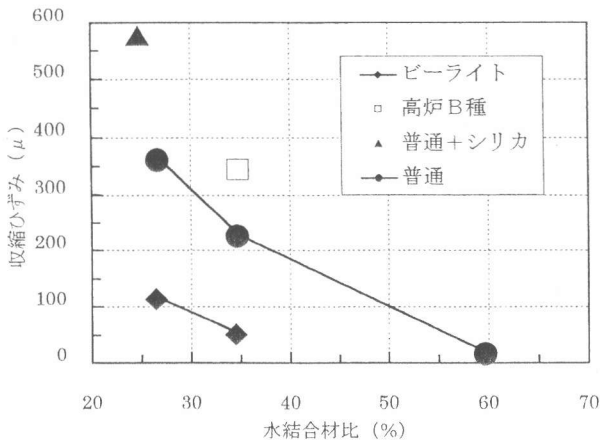


図-4 自己収縮ひずみと水結合材比の関係

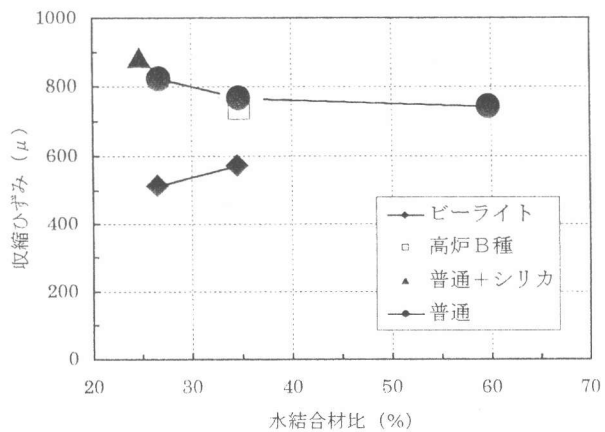


図-5 全収縮ひずみと水結合材比の関係

認められることが知られており^[4]、このことを考慮すると、高ビーライトセメントが普通セメントに比べて C_3S と C_3A の割合が少ないことに起因していると思われる。図-5に材齢203日における全ひずみと水結合材比の関係を示す。水結合材比35%における、全ひずみは、普通セメントと高炉B種セメントでは明確な差は見られないが、高ビーライトセメントでは小さくなった。また、普通セメントでは、水結合材比が小さくなれば、収縮ひずみは大きくなる傾向にあるが、高ビーライトセメントについては逆に小さくなる傾向がみられた。これは高ビーライトセメントの全ひ

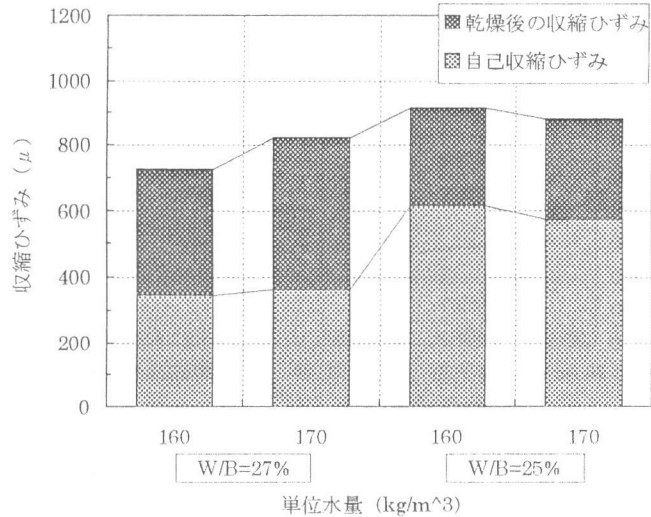


図-6 単位水量が収縮ひずみに及ぼす影響

ずみに対する自己収縮ひずみの割合が小さいために、乾燥収縮ひずみの影響が顕著に現れたと思われる。図-6に水結合材比25、27%における、単位水量が収縮ひずみに及ぼす影響を示す。水結合材比27%では、単位水量が封緘養生を行った収縮ひずみに及ぼす影響は小さいが、気乾養生を行った収縮ひずみには影響を及ぼし、単位水量が大きくなれば全ひずみは大きくなる傾向にある。一方、水結合材比25%では、単位水量が各収縮ひずみに及ぼす影響は小さい。

3. 3 各養生条件における収縮ひずみの評価方法の検討

(1) 検討方法

コンクリートの見かけの収縮には、乾燥収縮および自己収縮が知られており、各収縮のメカニズムは以下であると考えられる。

- ①気乾養生の収縮：水分が外部への水分逸散に伴い、細孔中にメニスカスが形成され、水の毛細管張力の作用に起因する負圧による。^[5]
- ②封緘養生の収縮：セメントと水との水和反応で生じる硬化収縮に起因する空隙にメニスカスが形成され、水の毛細管張力の作用に起因する負圧による。^[6]

この考え方によると、各収縮の空隙が生じる原因は異なるが、収縮のメカニズム自体は同じと考えられる。そこで、空隙量で収縮量を評価することを試みた。なお、空隙量とは、細孔中の水の存在しない空隙のことを意味し、総空隙量は乾燥による空隙量と水和に伴って生じる空隙量の和で表せるとすると、気乾養生、封緘養生の総空隙量 W_1 、 W_2 は以下の式で算定できる。

$$\begin{aligned} \text{気乾養生の総空隙量} & : W_1 = W_R + W_D \\ \text{封緘養生の総空隙量} & : W_2 = W_R \end{aligned}$$

ここで W_R : 水和に伴って生じる空隙 (l/m^3)
 W_D : 外部への水分逸散による空隙 (l/m^3)

なお、 W_R は田澤らにより示されたセメントの鉱物ごとの化学反応式における理論硬化収縮率および反応率により算定を行った。〔6〕〔7〕 図-7 に本検討で用いた、セメントの鉱物ごとの化学反応式を示す。シリカフェームを置換した影響は、図-7 の(7)に示す化学反応式により算定を行い、各材齢における反応率は小菅らにより示された値を用いた。〔8〕ただし、気乾養生と封緘養生の水和反応速度の差異は算定上十分な資料が無かったため、考慮しなかった。 W_D は重量測定試験の結果から、骨材の水分逸散はないものと仮定して算定を行った。

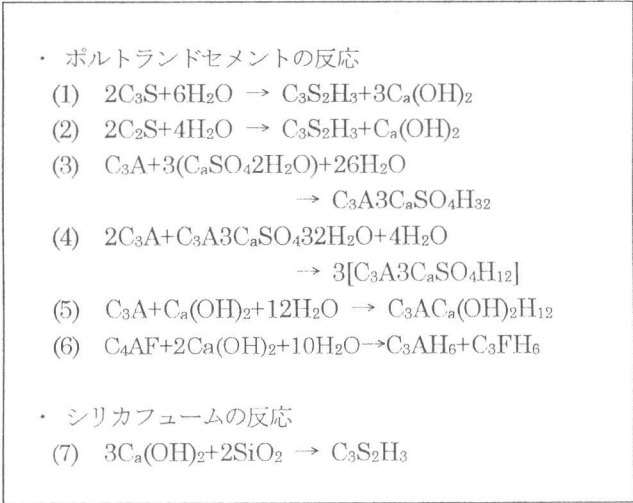


図-7 セメントとシリカフェームの化学反応式

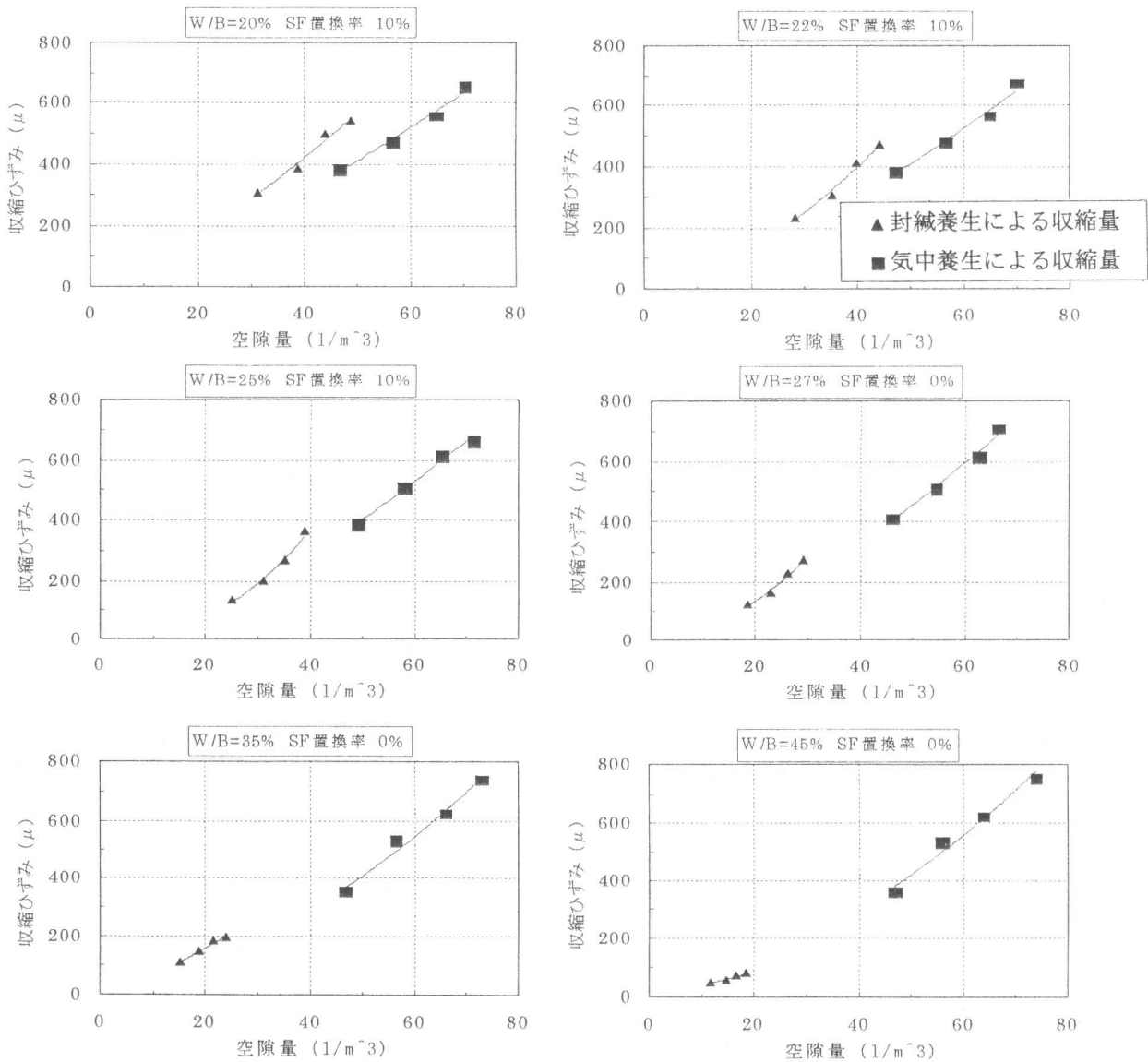


図-8 空隙量と収縮ひずみの関係
(シリーズI コンクリート)

(2) 検討結果

図-8にシリーズIのコンクリートにおける、各調合ごとの空隙量と収縮ひずみの関係を示す。すべての調合において気乾養生、封緘養生とも空隙量が多くなれば収縮ひずみが大きくなる傾向がみられる。また、気乾養生と封緘養生では、空隙量と収縮量の関係は異なっている。さらに、封緘養生において、水結合材比が小さくなるほど同一空隙量であっても、収縮量が大きくなっている傾向がみられる。これは本検討方法では、①気乾養生における水和率の低減を考慮していないため、気乾養生における総空隙量の計算値は大きめに見積もっていること、②気乾養生に比べて封緘養生の水和率が高く、緻密な細孔構造となることにより同一空隙量に対する収縮量が大きくなり、気乾養生と封緘養生の収縮特性（総空隙量とひずみの関係）自体が異なっていることが影響していると思われる。気乾養生における水和率の影響および収縮特性の差異を評価すれば、空隙の発生原因に関係なく、総収縮量で収縮ひずみを評価することが可能であると考えられる。

4. まとめ

本実験の結果より以下のことが考えられる。

- 1) 自己収縮は水結合材比、セメントの種類によって異なる。
- 2) 封緘養生後に気乾養生を行った収縮ひずみは、セメントの種類によって異なる。
- 3) 気乾養生した場合の水和率の影響および各養生条件の収縮特性を定量的に評価できれば、空隙の発生原因によらず総空隙量で収縮ひずみを評価できる可能性がある。

5. 今後の課題

気乾養生の水和率の影響、養生条件における収縮特性を定量的に評価できれば、総空隙量により収縮ひずみの評価方法を確立できる可能性があり、今後の課題として検討してゆく予定である。

【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] 「超流動コンクリート研究委員会 報告書II」：コンクリート工学協会，1994.5
- [4] 宮沢伸吾、田澤栄一、三浦智哉、谷晋太郎：セメントペーストの自己収縮に及ぼすC₃Aの影響，土木学会第49回年次講演会，pp.700-701，1995
- [5] 近藤実，硬化セメントペースト中の水の形態と水分の拡散を考慮した乾燥収縮の関係，セメント技術年報，12，1958
- [6] 田澤栄一、宮沢伸吾、笠井哲郎：セメントの硬化収縮と硬化体の内部空隙について，セメント技術年報，40，pp.75-78，1986
- [7] Tazawa,E./Influence of Curing Time on Shrinkage and Weight Loss of Hydrating PortlandCement.Proceedings of JSCE,No.159,1969
- [8] 小菅敬一、坂井悦朗、大門正機、浅賀喜代志：シリカフェュームのボゾラン反応と反応率測定方法、シリカフェュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム講演論文報告集，pp.1-6，1993