

# 論文 超高強度コンクリートの強度特性および耐久性の検討

陣内 浩<sup>\*1</sup>・黒羽健嗣<sup>\*2</sup>・並木 哲<sup>\*3</sup>・後藤和正<sup>\*4</sup>

**要旨：**ポルトランドセメント、スラグ石膏系結合材、シリカフェームによる3成分系結合材を用いた圧縮強度1000kgf/cm<sup>2</sup>クラスの超高強度コンクリートの強度特性および耐久性を検討した。検討したのは、強度特性に関する7項目（圧縮強度・静弾性係数・ポアッソン比・引張・曲げ・せん断・鉄筋との付着強度）および耐久性に関する5項目（長さ変化・促進中性化・凍結融解・圧縮クリープ・アルカリ骨材反応）である。結論として、本研究の超高強度コンクリートは圧縮強度500kgf/cm<sup>2</sup>クラスの高強度コンクリートに比べ、各種強度特性値の圧縮強度に対する比率が小さいこと、また各種耐久性が高いことを述べている。  
**キーワード：**超高強度コンクリート、強度特性、耐久性、スラグ石膏、シリカフェーム

## 1. はじめに

著者らは、ポルトランドセメント、スラグ石膏系結合材、シリカフェームの3成分を7:2:1（質量比）の割合で組み合わせた結合材を用いたコンクリートにより、高い流動性ととも、柱構造体として圧縮強度1000kgf/cm<sup>2</sup>クラスの超高強度を得られることを報告している [1]。本論では、この3成分系結合材を用いた超高強度コンクリートの各種強度特性、および各種耐久性に関する検討結果について報告する。

## 2. 実験計画

### 2.1 検討要因と水準

調査条件と試験項目を表-1に示す。検討する調査は7調査とし、このうち6調査を標準養生材齢28日の圧縮強度の目標値が800~1400kgf/cm<sup>2</sup>の超高強度クラス、1調査を圧縮強度の目標値

表-1 調査条件と試験項目

調査	目標 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	結合材	細骨材	粗骨材	W/B (%)	単位 水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位結 合材量 (kg/m <sup>3</sup> )	共通条件と試験項目
								粗骨材かさ容積：0.58m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> スランフフロー目標値：40cm以上 空気量目標値：2%
H-1	1400	早強セメント： スラグ石膏： シリカフェーム=7:2:1	石英 片岩 系砕砂	石英 片岩 系砕石	20	150	750	○強度試験項目 1)圧縮強度 2)静弾性係数 3)ポアッソン比 4)引張強度 5)曲げ強度 6)せん断強度 7)鉄筋との付着強度  ○耐久性試験項目 1)長さ変化 2)促進中性化 3)凍結融解 4)圧縮クリープ 5)アルカリ骨材反応
H-2	1200				24	150	625	
N-1	1100	普通セメント： スラグ石膏： シリカフェーム=7:2:1	硬砂岩 系砕砂 ：陸砂 =5:5	硬砂岩 系砕石	20	150	750	
N-2	1000				23	150	652	
N-3	1000				23	165	717	
N-4	800				30	150	500	
N-5	500				50	165	330	

\*1 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループ、工修 (正会員)  
 \*2 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループチームリーダー、工博 (正会員)  
 \*3 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループ (正会員)  
 \*4 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループ、工修 (正会員)

が500kgf/cm<sup>2</sup>の比較用のものとした。

## 2. 2 使用材料

文献[1]の結果から、目標とする圧縮強度ごとに表-1に示す材料を選定した。使用した結合材の試験成績を表-2に、骨材の試験成績を表-3に示す。

結合材には、ポルトランドセメント、スラグ石膏系結合材、シリカフェームの3つの成分を、7:2:1の質量比で組み合わせたものを使用した。

細・粗骨材は、いずれも実積率が高く、吸水率の低い高品質なものを選定した。

化学混和剤としては、アミノスルホン酸系高性能AE減水剤（比重

1.13、固形分量30%）と、これと併用するための補助AE剤を使用した。

## 2. 3 調 合

単位水量は150kg/m<sup>3</sup>を基本とし、水結合材比23%のケースについて、比較のため165kg/m<sup>3</sup>の条件も検討した。また、調合N-5は水結合材比が大きく、単位水量150kg/m<sup>3</sup>ではコンクリート中のペーストが不足して良好な流動性が得られなかったため、単位水量165kg/m<sup>3</sup>、単位結合材量330kg/m<sup>3</sup>とした。粗骨材のかさ容積は、いずれの調合も0.58m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>とした。コンクリートのワーカビリティは、スランプフロー値40cm以上で、各調合ごとに密実な供試体が作製できるように、高性能AE減水剤の使用量で調整した。空気量の目標値は2%とし、補助AE剤を用いて±1%の範囲に調整した。

## 3. 実験結果

### 3. 1 コンクリートの基本性状

使用したコンクリートのフレッシュ時の性能、および標準養生材齢28日の圧縮強度試験結果を表-4に示す。いずれの調合も、所要のワーカビリティを確保し、密実な供試体を作製することができた。また、圧縮強度も目標値に近い値となっており、単位水量の違いの影響はみられない。

### 3. 2 各種強度性状の検討

強度性状に関する試験項目と方法を表-5に示す。試験はすべての調合に関して実施するものとし、養生方法はいずれも標準（20℃水中）養生、試験の材齢は28日とした。

表-2 結合材の試験成績

種 類	記号	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	強熱減量 (%)
普通ポルトランドセメント	NC	3.16	3,290	-	1.6	2.0	-	1.3
早強ポルトランドセメント	HC	3.14	4,540	-	1.6	2.9	-	1.2
スラグ石膏系結合材	BG	2.92	7,580	19.0	3.9	26.3	40.9	0.1
シリカフェーム	SF	2.20	200,000	92.5	0.9	-	0.3	1.8

表-3 細・粗骨材の試験成績

種 類	絶乾 比重	表乾 比重	実積率 (%)	吸水率 (%)	粗粒率
硬砂岩系砕砂:陸砂=5:5	2.61	2.63	-	1.01	3.16
石英片岩系砕砂	2.55	2.58	-	1.02	2.90
硬砂岩系碎石	2.65	2.67	57.7	0.79	6.50
石英片岩系碎石	2.60	2.62	60.4	0.64	6.44

表4 コンクリートの基本性状の試験結果

調合	目標圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	結合材	細骨材	粗骨材	W/B (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	試験結果				
							減水剤使用量 (B×%)	補助AE剤 (B×%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	標準28日圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
H-1	1400	早強セメント： スラグ石膏： シリカフューム=7:2:1	石英片岩系砕砂	石英片岩系碎石	20	150	2.35	0.05	49.0	1.8	1420
H-2	1200				24	150	2.05	0.15	40.0	1.3	1134
N-1	1100	普通セメント： スラグ石膏： シリカフューム=7:2:1	硬砂岩系砕砂： 陸砂=5:5	硬砂岩系碎石	20	150	2.00	0.30	62.0	2.0	993
N-2	1000				23	150	1.85	0.20	68.0	1.3	981
N-3	1000				23	165	1.60	0.40	41.5	2.1	1002
N-4	800				30	150	1.60	0.40	52.0	2.3	774
N-5	500				50	165	1.60	0.50	39.0	2.1	499

表-5 試験項目と方法 (強度特性)

試験項目	試験方法	供試体寸法 (cm)	養生方法	試験材齢	備考	
圧縮強度	JIS A 1108	φ 10×20	標準養生	28日		
静弾性係数	JIS 原案	φ 10×20				
ポアソン比	同上に準じる	φ 10×20				
引張強度 (割裂)	JIS A 1113	φ 10×20				
曲げ強度	JIS A 1106	10×10×40				
せん断強度	JCI-SF6	10×10×40				文献 [2]
鉄筋との付着強度	JCI 案	15×15×15				文献 [3]

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-1に示す。本実験の静弾性係数は、400～600kgf/cm<sup>2</sup>クラスの高強度コンクリートと同様に、圧縮強度の増大とともに高くなる傾向、および骨材の差が顕著に現れる傾向がみられる。また、本実験の結果によると、圧縮強度500kgf/cm<sup>2</sup>程度では建築学会(AIJ)のRC規準式、800～1000kgf/cm<sup>2</sup>ではACI-363式、1000 kgf/cm<sup>2</sup>を超える範囲ではNew RC式との相関性が高い。

圧縮強度とポアソン比の関係を図-2に示す。ポアソン比は0.20～0.23の範囲に分布しており、圧縮強度の向上とともに、やや増加している。また、骨材の種類や単位水量の影響は、ほとんどみられない。

圧縮強度と引張強度の関係を図-3に示す。これによると、引張強度は友澤らの研究 [4] の回帰式の±15%程度の範囲にある。また、

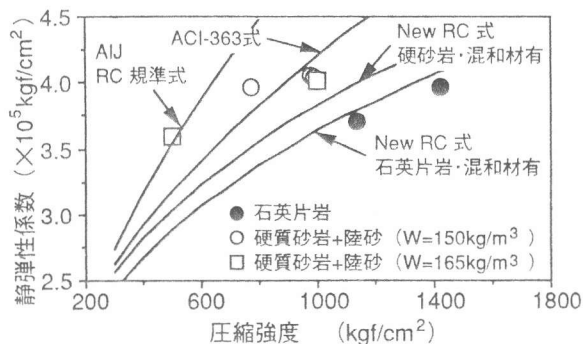


図-1 圧縮強度と静弾性係数の関係

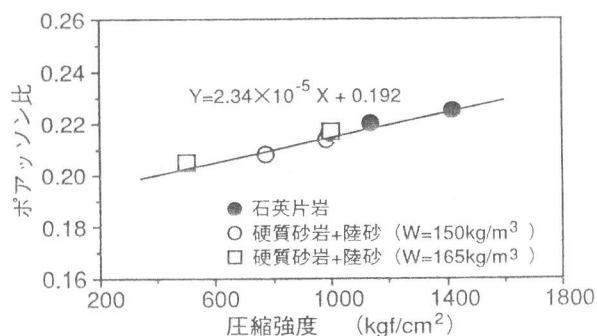


図-2 圧縮強度とポアソン比の関係

引張強度の圧縮強度に対する比率は1/16～1/26であり、圧縮強度200～300kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリート（以下、普通強度コンクリートと称す）で一般に言われている1/5～1/9程度という比率よりもかなり低い。

圧縮強度と曲げ強度の関係を図-4に示す。これによると、曲げ強度は友澤らの回帰式と比較して、800～1000kgf/cm<sup>2</sup>では約1.5倍、1000kgf/cm<sup>2</sup>を超える範囲では1.1～1.3倍の高い値を示している。さらに、曲げ強度の圧縮強度に対する比率は1/6～1/10であり、普通強度コンクリートに近い比率になっている。

圧縮強度とせん断強度の関係を図-5に示す。せん断強度試験の試験方法は、JCI-SF6 [2] に準じた二面せん断試験とした。本実験の結果では、せん断強度の圧縮強度に対する比率は1/11～1/15程度であり、圧縮強度600～800kgf/cm<sup>2</sup>程度のコンクリートの場合の約1/9という比率 [5] よりも、さらに低い。

圧縮強度と鉄筋との付着強度の関係を図-6に示す。実験方法はJCIで提案されている方法 [3] に準じ、φ6mmのスパイラル筋を25mmピッチで埋め込んだ15cm角の立方体から、D19を引き抜く試験とした。引き抜く鉄筋の降伏応力度は7000kgf/cm<sup>2</sup>クラスとし、スパイラル筋にはSR235を使用した。図-6より、付着強度の圧縮強度に対する比率は1/2～1/2.6であり、普通強度コンクリートとはほぼ同等の比率となった。また、実験結果はNew RCの回帰式に比べると高い値を示している。

### 3.3 耐久性の検討

各種耐久性に関する試験項目と方法を表-6に示す。

材齢6カ月における水結合材比と長さ変化率の関係を図-7に示す。本実験の長さ変化率は、水結合材比を低くすること、および単位水量を小さくすることで減少する傾向にある。

また、早強セメントと石英片岩を使用したコンクリートの長さ変化は、普通セメントと硬砂岩を使用したものよりも小さい値となった。さらに、本実験で選定した3成分結合材では、一部にスラグ石膏を使用していることから、水和生成物中にエトリンガイトがやや多く生成されることを

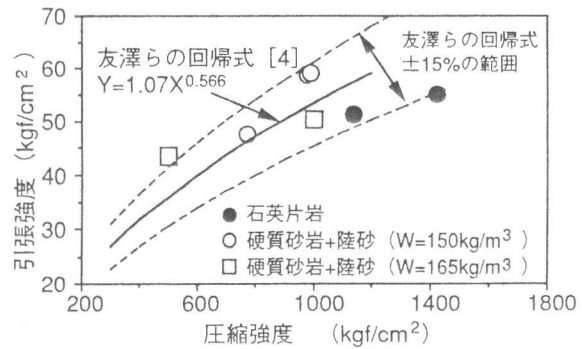


図-3 圧縮強度と引張強度の関係

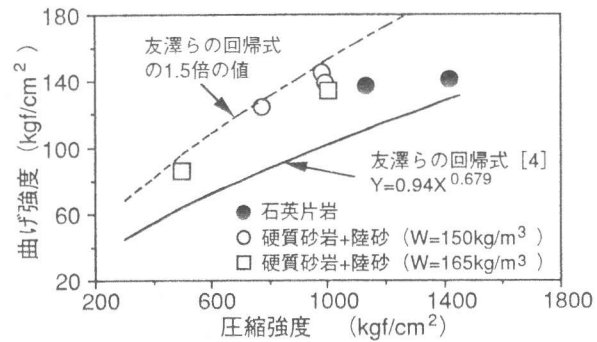


図-4 圧縮強度と曲げ強度の関係

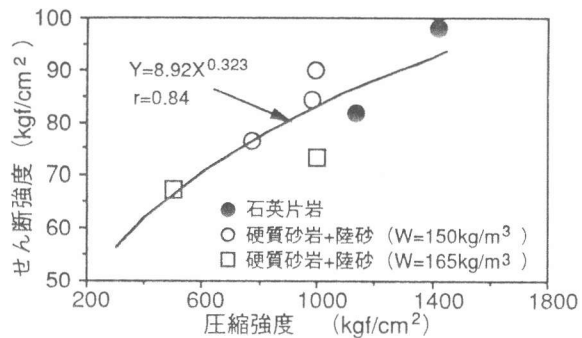


図-5 圧縮強度とせん断強度の関係

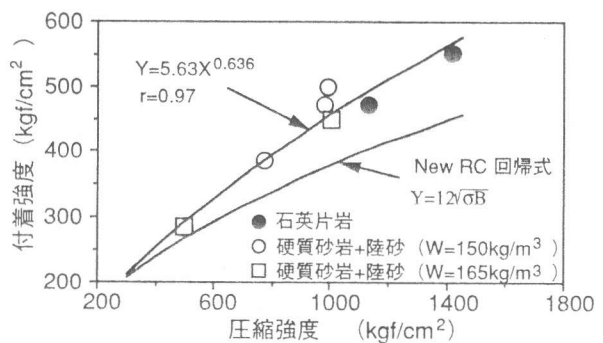


図-6 圧縮強度と鉄筋との付着強度の関係

表-6 試験項目と方法 (耐久性)

試験項目	試験方法	供試体寸法(cm)	試験調合	試験概要	備考
長さ変化(A)	JIS A 1129	10×10×40	全調合	20℃水中養生材齢7日より開始	
長さ変化(B)	同上に準じる	10×10×40	W/B=22%, W=150kg/m <sup>3</sup>	試験期間中は20℃水中養生	
促進中性化	建築学会案	10×10×40	H-1, N-2, N-3, N-5	湿潤4週、乾燥4週後試験 温度20℃、湿度60%、炭酸ガス5%	文献 [6]
凍結融解	JIS A 6204	10×10×40	H-1, N-2, N-3, N-5	20℃水中養生材齢14日より開始	
圧縮クリープ	筆者らの案	φ 10×20	H-2, N-2, N-3, N-5	20℃水中養生材齢28日より開始 載荷応力は圧縮強度の1/3	文献 [7]
アルカリ骨材反応	JASS 5N T-603	10×10×40	H-1, N-2, N-4	添加アルカリ量、1.2、1.8、2.4kg/m <sup>3</sup> 40℃の湿潤状態で貯蔵	

確認している [1]。これがコンクリートの長さ変化にどのような影響を及ぼすかを検討するため、水中養生材齢6カ月における長さ変化率も併せて測定した。この結果は、図-8に示すように、20℃水中、気中のいずれの条件においても、①3成分系結合材、②普通セメントに10%のシリカフェームを置換した結合材、③普通セメントのみ、の3条件のコンクリートの長さ変化率は、ほぼ同等である。また、いずれのコンクリートにも、膨張によるひびわれなどは認められていない。

促進中性化試験の結果を表-7に示す。本実験の結果では、中性化は水結合材比50%の調合N-5にわずかに認められただけである。これは、超高強度コンクリートの中性化速度が、かなり小さいことを示唆している。

凍結融解試験の結果から、サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-9に示す。調合H-1、N-2が良好な結果であったことから、圧縮強度1000、1400kgf/cm<sup>2</sup>といった超高強度コンクリートであれば、空気量2%程度でも、凍結融解抵抗性を確保できることがわかる。ただし、調合N-3およびN-5の凍結融解抵抗性が低いことから、単位水量を大きくすること、および水結合材比を高くすることは、凍結融解抵抗性を低下させるといえる。

材齢35週における圧縮強度と単位クリープ歪の関係を図-10に示す。載荷荷重は、標準養生材齢28日における圧縮強度の1/3とした。図中には、本実験よりも低い強度レベルについて、同じ試験方法で実施した文献 [7] のデータも示す。

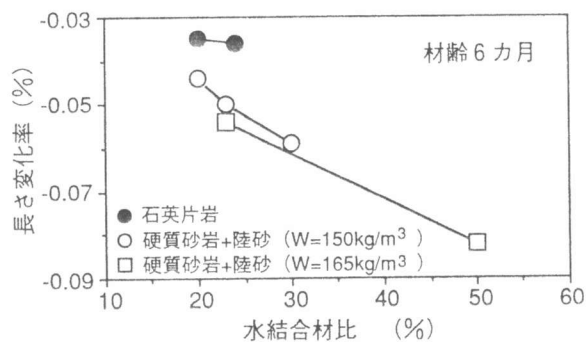


図-7 水結合材比と長さ変化率の関係

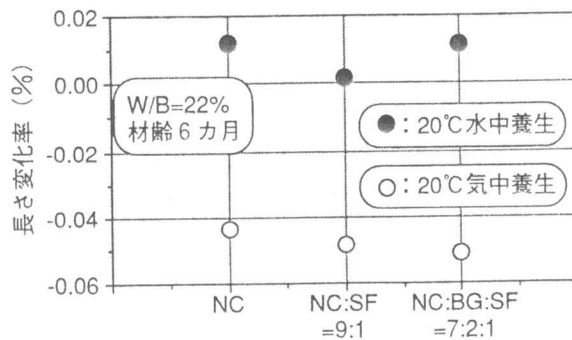


図-8 結合材の種類と長さ変化率の関係

表-7 促進中性化試験結果

	W/B (%)	中性化深さ (mm)		
		8週	12週	26週
H-1	20	0	0	0
N-2	23	0	0	0
N-3	23	0	0	0
N-5	50	0	1.2	8.2

これより、超高強度域になるに従い、単位クリープ歪は減少することがわかる。

圧縮強度800、1000、1400kgf/cm<sup>2</sup>を目標としたコンクリートの、添加アルカリ量と膨張率の関係を図-11に示す。これより、いずれの調合においても、すべての添加アルカリ量の膨張率が0.1%以下であり、また材齢6カ月での膨張率が0.1%となる推定アルカリ量がマイナス1.2 kg/m<sup>3</sup>以下、かつ3.0kg/m<sup>3</sup>以上であることがわかる。日本建築学会 JASS 5N T-603「コンクリートの反応性試験方法(案)」によると、この結果は、アルカリ骨材反応が生じないと考えられる範囲に十分おさまっており、本研究の調合は、普通強度コンクリートよりもかなり大きな単位結合材量を有するが、アルカリ骨材反応が生じる傾向はみられない。

#### 4. まとめ

- ① 超高強度コンクリートの圧縮強度に対する引張・せん断など各強度特性の比率は、圧縮強度400～600kgf/cm<sup>2</sup>程度の高強度コンクリートよりも、さらに小さくなる。
- ② 本研究でとりあげた材料・調合を用いた圧縮強度800～1400kgf/cm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートは、高い耐久性を確保できる。

#### 参考文献

- 1) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・後藤和正：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1 pp.255-260、1994
- 2) 日本コンクリート工学協会：JCI-SF6「繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法」
- 3) 國分正胤編：土木材料実験、技報堂出版、pp.260-261
- 4) 友澤史紀・野口貴文・小野山貴造：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.497-498、1990.10
- 5) 並木 哲・山本康弘・戸祭邦之・黒羽健嗣：超高強度コンクリートの各種強度の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.737-738、1987.10
- 6) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)、pp.179-184
- 7) 飯島真人・戸祭邦之・伊藤 勝・黒羽健嗣・児島次郎：高強度コンクリートの圧縮クリープ性状、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.521-522、1990.10
- 8) 黒羽健嗣・戸祭邦之：新開発高性能減水剤の高強度コンクリートへの適用、大成建設技術研究所報、No.22 pp.249-256、1989

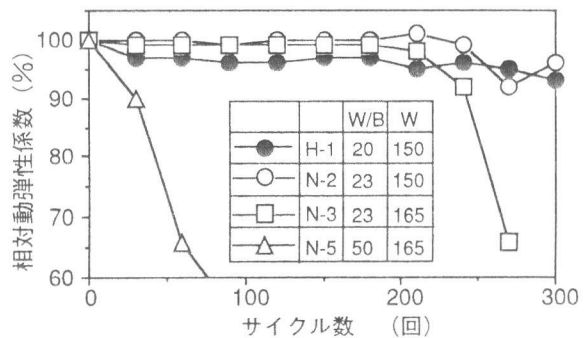


図-9 サイクル数と相対動弾性係数の関係

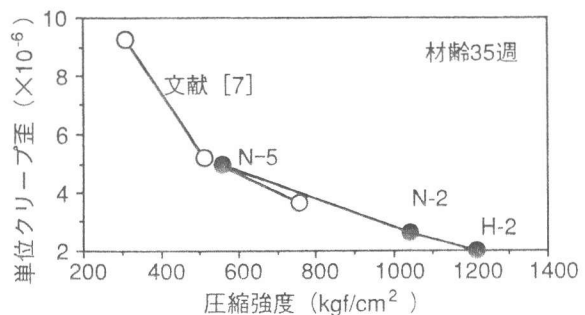


図-10 圧縮強度と単位クリープ歪の関係

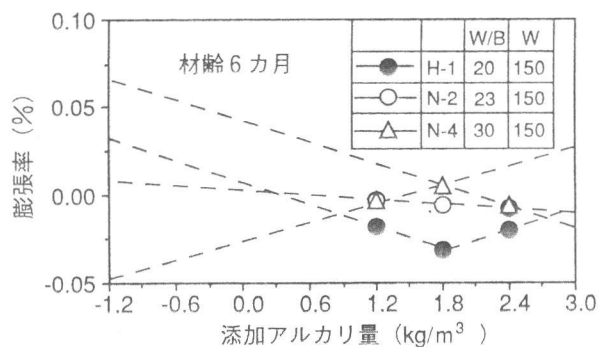


図-11 添加アルカリ量と膨張率の関係