

# 論文 凍害およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの力学特性

高柴保明\*<sup>1</sup>・堺孝司\*<sup>2</sup>・熊谷守晃\*<sup>3</sup>

要旨：コンクリートの力学特性に及ぼす凍結融解作用およびアルカリ骨材反応の影響について検討を行った。本研究から、凍結融解作用およびアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化は圧縮強度より曲げ強度および静弾性係数に大きく影響すること、土木学会コンクリート標準示方書に示されているコンクリートの材料係数 1.3は、凍結融解作用を受けた場合で相対動弾性係数が50, 60%程度の劣化までは安全側にあるが、アルカリ骨材反応が進むとこの係数は危険側となること、圧縮強度と曲げ強度あるいは静弾性係数に関する一般的な関係は劣化したコンクリートには成立しないこと、などが明らかになった。

キーワード：凍害, アルカリ骨材反応, 圧縮強度, 曲げ強度, 静弾性係数, 材料係数

## 1. まえがき

コンクリート構造物の設計は、広義には、所定の荷重・環境作用の下で構造物が要求される性能を保有するかどうかを照査することである。このような性能に基づく設計は性能設計と呼ばれ、最近非常に注目されている。理想的には、構造物の設計はあらゆる経時的挙動の理解に基づくべきではあるが、現実的には都合のよい限界状態を設定してその妥当性を検討していると言える。合理的な性能設計を実現するためには、構造物を構成する材料の経時変化およびそれらが部材あるいは構造物に及ぼす影響を適切に評価しなければならないが、これらに関する研究は少ない。

このような状態を考慮して、本研究では、コンクリートが凍結融解作用を受けた場合、およびアルカリ骨材反応を起こした場合の基本的な力学特性を検討することとした。アルカリ骨材反応については、コンクリートの力学特性に関する研究<sup>1), 2), 3)</sup>および構造挙動に関する研究<sup>4), 5)</sup>がこれまでも行われてきたが、必ずしも十分なものとは言えない。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(比重

表-1 骨材の物理特性

	比重	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材-海砂	2.73	0.97	2.86
普通碎石	2.67	1.58	6.71
反応性碎石	2.70	2.03	6.56

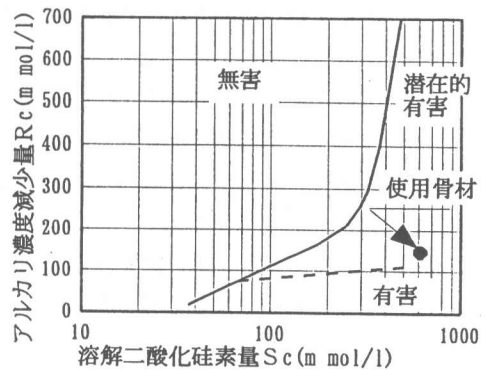


図-1 使用粗骨材の反応性試験成績

\*1北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室研究員 (正会員)

\*2北海道開発局開発土木研究所構造部長 工博 (正会員)

\*3北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室長

表-2 コンクリートの配合

シリーズ	水セメント比	粗骨材の種類	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					A E 減水剤
				W	C	S	G	NaCl (R <sub>2</sub> O)	
凍害(A)	55	普通	46	143	260	932	1086	-	650g
アル骨(B)	BO	反応性	51	149	271	996	945	0 (1.7)	678g
	BL			149	271	996	945	4 (3.8)	678g
	BM			149	271	996	945	10 (7.0)	678g
	BH			149	271	996	945	20 (12.3)	678g
	BU			149	271	996	945	30 (17.6)	678g

: 3.16, R<sub>2</sub>O : 0.60%, 粉末度 : 3390cm<sup>2</sup>/g) を使用した。表-1 に骨材の物理特性を示す。細骨材は苫小牧市樽前産の海砂を使用し、粗骨材には最大骨材寸法20mm, 道内産の普通砕石と両輝石安山岩種の反応性砕石を使用した。反応性骨材のJIS A 5308付属書7, 化学法によるアルカリシリカ反応性試験結果を図-1 に示す。付属書7による判定では「無害でない」ものにあたる。なお、図中の破線は、ASTM-C287による「潜在的有害」と「有害」の境界線である。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、凍害を対象とするAシリーズと、アルカリ骨材反応を対象とするBシリーズから成る。表-2 にコンクリートの配合を示す。いずれの配合もコンクリートの目標スランプを8±2.5cmとし、リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体系A E減水剤を使用するとともに、A E助剤による空気量の調整を行った。Bシリーズでは目標空気量を5±1%としたが、Aシリーズでは凍害を促進させるために2.5±0.5%とした。また、Bシリーズではアルカリ骨材反応を促進させるために、コンクリートに塩化ナトリウムを0~30kg/m<sup>3</sup>加え、複数の配合によって反応程度の調節を行った。

2.3 供試体および試験方法

10×20cmの円柱供試体と、10×10×40cm角柱供試体を用いて各種試験を行った。供試体の養生条件を表-3 に示す。供試体はコンクリート

打設後24時間まで20℃で湿気養生を行い、脱型の後、材齢14日まで20℃で水中養生を行った。その後、凍害を対象とするAシリーズでは、水中凍結融解試験(JSCE-G501-1986)を行った。試験は、凍結融解サイクル数が97回、125回および205回となるまで行った。なお、供試体A0は比較のための基準供試体である。所定の回数に達したのち、供試体をビニールで密封し、試験中の供給水を遮断することで凍結融解作用による劣化が生じないものとして、通算300回まで試験を継続し、その後-18℃での凍結保存を行った。なお、凍結融解試験終了後の相対動弾性係数は角柱供試体を用いた試験により求めた。

アルカリ骨材反応を対象とするBシリーズでは、同様に材齢14日まで水中養生を行った後、アルカリ骨材反応を促進させるために、材齢91

表-3 養生および試験条件

シリーズ	供試体	打設後材齢		
		1日	14日	91日
凍害	A0	初期	劣化促進期間	
	AL	+20℃	-18℃	97cyより
	AM	水中養生	~+5℃	125cyより
	AH		水中凍結融解試験	205cy 密封
アル骨	BO		0cyより密封気中凍結融解試験 <sup>300cy</sup>	
	BL		-18℃	
	BM	+20℃	40℃, RH95%	
	BH	水中養生	湿潤気中養生	
	BU			

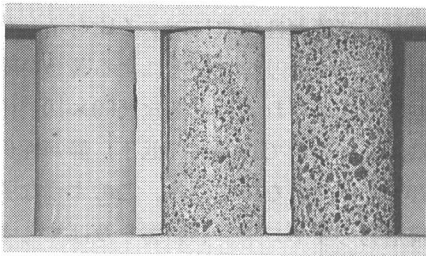
日まで40℃, RH95%の恒温恒湿槽で養生した。

試験は、いずれのシリーズとも、圧縮強度試験、曲げ強度試験、および一軸圧縮クリープ試験を実施した。試験は、20℃, RH60%の恒温恒湿室でそれぞれ3体の供試体について行った。なお、クリープ試験は各シリーズ、3種類の劣化進行程度の2体について行った。曲げ強度試験は、JISA1106-1993に規定される3等分点載荷法に基づいて行った。一軸圧縮クリープ試験は、自動荷重制御方式、油圧式6連載荷装置を使用し、載荷は、各シリーズの基準供試体(A0, B0)の載荷時圧縮強度の40%となる荷重を導入して行った。クリープ供試体に並置した無載荷供試体を用いて、載荷期間中の収縮ひずみ(主として乾燥収縮)を測定した。また、載荷開始時における弾性ひずみよりクリープ係数を算出した。なお、Bシリーズでは、クリープ試験載荷中の膨張進行の影響を低減させるため、打設後材齢141日で試験を開始した。

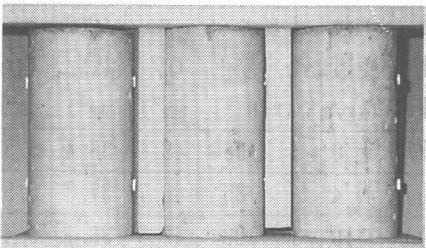
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 劣化供試体の外観

各供試体の圧縮およびクリープ試験前の外観を写-1, 2に示す。



(A0 AM AH)  
写-1 Aシリーズ外観(凍害)



(B0 BM BU)  
写-2 Bシリーズ外観(アル骨)

#### 3.2 凍結融解作用による劣化

表-4に各供試体の相対動弾性係数、強度、および静弾性係数を示す。劣化程度が増大すると、圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数が低下する。影響の程度としては、圧縮より曲げおよび静弾性係数の方が大きい。図-2は劣化進行程度を示す指標として、試験時の相対動弾性係数を使用し、劣化の生じていない供試体A0の圧縮強度、曲げ強度、および静弾性係数に対する比を示したものである。凍結融解抵抗性については一般に相対動弾性係数として60%を目安として考えることが多い。図-2から相対動弾性係数が60%の時、圧縮強度は20%程度の低下、

表-4 相対動弾性係数と強度試験結果

供試体	凍結融解繰返 (cy)	相対動弾性係数 (%)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )
A0	0	102	36.8	36.0	5.07
AL	97	94	33.9	33.3	3.83
AM	125	87	33.0	32.0	3.21
AH	205	49	29.6	22.8	1.50

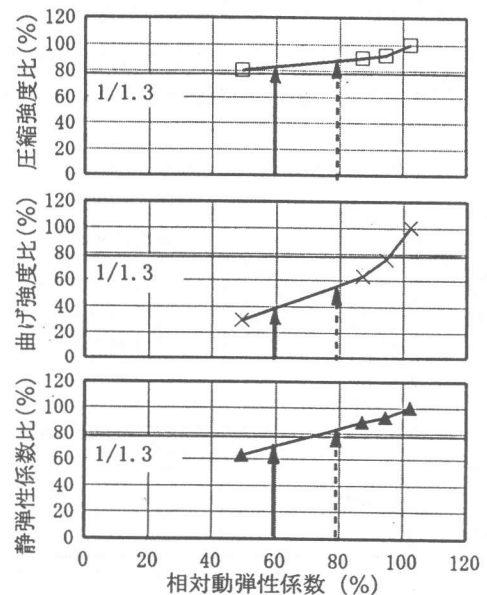


図-2 相対動弾性係数と各種強度比および静弾性係数比

曲げ強度は、60%程度の低下、そして静弾性係数で30%程度低下していることがわかる。また、相対動弾性係数として80%を考慮すれば圧縮強度で10%、曲げ強度で40%、静弾性係数で15%程度の低下となっている。土木学会のコンクリート標準示方書（設計編）では、終局限界状態の検討を行う際のコンクリートの材料安全係数として、経時的な劣化やその他の影響を含めて  $\gamma_c = 1.3$  が示されている。本実験結果によれば、圧縮強度については、この材料係数で安全性の保証がなされている。しかし、曲げ強度については、同じ係数を用いることができない。

一般に、静弾性係数の低下は変形の増大を意味する。上記示方書では、使用限界状態の検討に用いる材料および部材係数には 1.0 を標準とされているが、本結果によればコンクリートの劣化程度によっては必ずし適切ではない。

図-3は、クリープおよび収縮ひずみの経時変化を示す。クリープひずみは収縮ひずみの影響を取り除いたものである。なお、クリープ試験においては、それぞれの圧縮強度を考慮すると、供試体AOで0.40 $\sigma_c$ 、AMで0.45 $\sigma_c$ 、AHで0.50 $\sigma_c$ に相当する荷重を作用させたことになる。図-3から、劣化程度の大きいものは、クリープひずみも大きくなる挙動を示したが、その差は小さい。表-5に弾性ひずみに対する

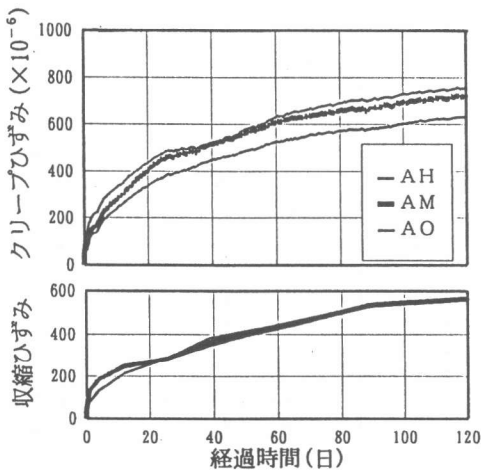


図-3 クリープひずみおよび、収縮ひずみの経時変化

クリープひずみの比 (=クリープ係数) を示す。現行の示方書では、材齢91日の場合、クリープ係数は  $\phi = 1.3$ 、材齢365日では  $\phi = 1.1$  を与えている。本実験における載荷材齢を考慮するとほぼ妥当なものと言える。このことは、凍害によるコンクリートの劣化は圧縮クリープ挙動にほとんど影響しないと考えることができることを意味する。

表-5 劣化進行程度とクリープ係数

供試体	相対動弾性係数 (%)	クリープ係数( $\phi$ ) (載荷後経過期間100日)
AO	102	1.21
AM	87	1.00
AH	49	1.12

### 3.3 アルカリ骨材反応による劣化

表-6に、各供試体の長さ変化、強度、および静弾性係数を示す。表-6から、劣化の著しい供試体BHおよびBUでは、圧縮強度、静弾性係数、および曲げ強度の何れも著しく低下することがわかる。図-4は劣化進行程度を示す指標として角柱供試体の長さ変化を用いて、劣化の生じていない供試体BOの圧縮強度、曲げ強度、および静弾性係数に対する比を示したものである。アルカリ骨材反応による著しい膨張ひびわれが認められる長さ変化  $2500 \times 10^{-6}$  の場合には、曲げ強度で約60%の低下、静弾性係数で約70%の低下となっている。このような劣化は、構造物の変形に著しい影響を及ぼすと考

表-6 長さ変化と強度試験結果

供試体	NaCl 使用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ( $\times 10^{-6}$ )	長さ 変化 ( $\text{mm}^2$ )	$f_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$E_c$ ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )	$f_b$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
BO	0	96	48.1	36.4	5.50
BL	4	85	46.7	37.3	5.55
BM	10	102	42.5	36.1	5.48
BH	20	714	30.6	12.7	3.79
BU	30	2527	28.4	11.4	1.87

られる。また、圧縮強度でも40%の低下となり、現行示方書に示されているコンクリートの材料係数  $\gamma_c = 1.3$  で安全側に評価することは出来ない。アルカリ骨材反応による力学的特性の低下は既往の研究<sup>1)~5)</sup>でも指摘されているが、今後これらを定量的に評価することが必要である。

図-5にクリープおよび収縮ひずみの経時変化を示す。クリープ試験においては、それぞれ

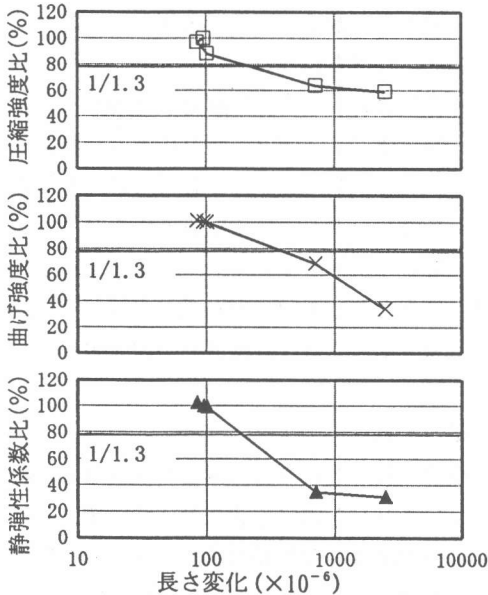


図-4 長さ変化と各種強度比および静弾性係数比

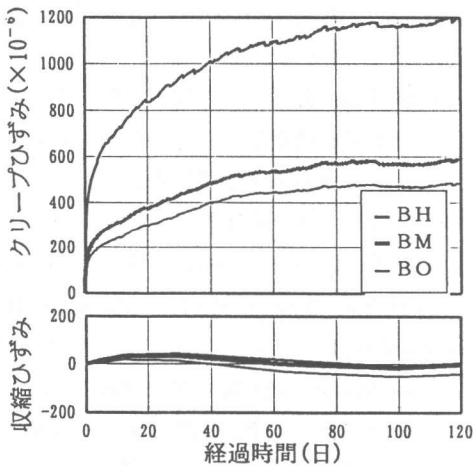


図-5 クリープひずみおよび、収縮ひずみの経時変化

の圧縮強度を考慮すると、供試体B0で  $0.40 f_c$ 、BMで  $0.45 f_c$ 、BHで  $0.63 f_c$  に相当する荷重を作用させたことになる。なお、収縮量が全体として小さなものとなっているのは、試験期間中にアルカリ骨材反応が進行していたことによるものと思われる。クリープひずみは、劣化程度の大いものほど大きなものとなっている。供試体BHの著しく大きなクリープひずみは、前述した静弾性係数の低下に対応している。表-7に、劣化進行程度ごとのクリープ係数を示す。クリープ係数は、荷重初期では劣化程度による差異が認められるが、荷重日数の増加とともにその差異は小さくなる傾向であった。

表-7 劣化進行程度とクリープ係数

供試体	長さ変化 ( $\times 10^{-6}$ )	クリープ係数( $\phi$ )	
		荷重後経過期間	
		10日	100日
BO	96	0.367	0.722
BM	102	0.437	0.802
BH	714	0.502	0.813

#### 4. 劣化供試体の圧縮強度と曲げ強度、静弾性係数および単位応力クリープの関係

図-6および7は、それぞれ劣化供試体の圧縮強度と曲げ強度および静弾性係数の関係を示したもので、図中の破線は、現行示方書で示されているそれぞれの関係曲線である。図-6より、曲げ強度に関しては、 $f_c = 35 \text{ N/mm}^2$  まではこの曲線で評価できるが、圧縮強度の低下、すなわち劣化の進行に伴い、これらの関係が成立しなくなることがわかる。また図-7に示すように、静弾性係数に関しては、実験で得られた値の方が大きくなる傾向はあるが、曲げ強度の場合と同様、劣化による圧縮強度の低下が進むと、著しく静弾性係数が低下することがわかる。

図-8に、圧縮強度と単位応力クリープの関係を示す。圧縮強度が劣化により低下すると、単位応力クリープは、ほぼ線形的に増大するこ

とがわかる。

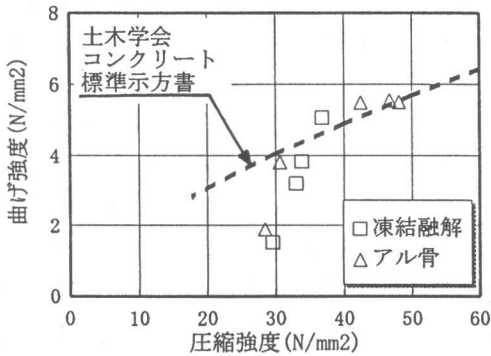


図-6 劣化供試体の圧縮強度と  
曲げ強度の関係

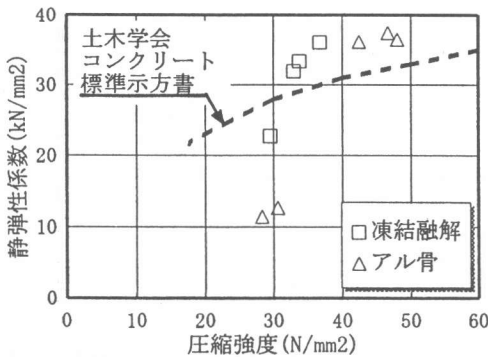


図-7 劣化供試体の圧縮強度と  
静弾性係数の関係

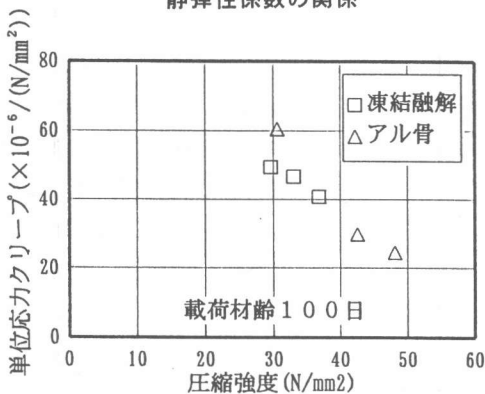


図-8 劣化供試体の圧縮強度と  
単位応力クリープ

## 5. 結論

今回行った実験の範囲において以下のことが明らかとなった。

(1) 凍結融解作用およびアルカリ骨材反応によ

るコンクリートの劣化は、圧縮強度より曲げ強度および静弾性係数に大きく影響する。

- (2) 土木学会コンクリート標準示方書に示されているコンクリートの材料係数 1.3は、凍結融解作用を受けた場合で相対動弾性係数が50, 60%程度の劣化までは安全側にある。しかし、アルカリ骨材反応が進むとこの係数は危険側となる。
- (3) 圧縮強度と曲げ強度あるいは静弾性係数に関する一般的な関係は劣化したコンクリートには成立しない。
- (4) 凍害による劣化が相対動弾性係数で50, 60%程度では圧縮クリープに大きく影響しない。しかし、アルカリ骨材反応による膨張の場合、量が大きくなると圧縮クリープは著しく増大する。
- (5) 劣化により圧縮強度が低下すると、単位応力クリープはほぼ線形的に増大する。

## 参考文献

- 1) 小林一輔, 野村謙二: アルカリシリカ反応がコンクリートの諸性状に及ぼす影響(Ⅱ) - 圧縮強度及び弾性係数の変化 -, 生産研究, Vol. 40, No. 4, pp. 31-32, 1988. 4
- 2) Swamy, R. N. and Al-Asali, M. M.: Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, Vol. 85, pp. 367-374, Nov/Dec. 1988
- 3) 立屋敷久志, 窪山 潔, 高田 潤, 中村 亨: 大型供試体によるアルカリ骨材反応の劣化特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 801-806, 1990
- 4) Swamy, R. N. and Al-Asali, M. M.: Effect of Alkali-Silica Reaction on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, Vol. 86, pp. 451-459, July/Aug. 1989
- 5) 小林和夫, 井上 晋, 山崎鷹生, 中野錦一: アルカリ骨材反応を受けたPCはり部材の耐荷性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp. 615-620, 1987