

## 論文

## [1177] ASR によるコンクリートの膨張に及ぼすアルカリ量の影響

王 鉄成\*<sup>1</sup>・西林新蔵\*<sup>2</sup>・中野錦一\*<sup>3</sup>・吉野 公\*<sup>4</sup>

## 1. まえがき

アルカリ骨材反応の主要反応物質であるアルカリはコンクリートの内部（セメントなど）と外部（海水など）から供給されるものである。これらの中でセメント中のアルカリの影響についてはかなり明らかにされてきている。セメント中のアルカリは主としてセメントの原料である粘土から持ち込まれて、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$  などのアルカリ化合物として存在し、一定の条件下にコンクリート中にアルカリ骨材反応を引き起こすと考えられている。

コンクリートのアルカリ骨材反応には、ある程度のアルカリ量、反応性骨材量が存在している必要がある。反応性骨材の影響は、骨材中のアルカリや有害反応性鉱物によって異なり、一方、アルカリの影響はアルカリ化合物の種類や組成によって異なる。アルカリシリカ反応による膨張は、一定の反応性骨材量に対しては、同一骨材、同一水セメント比の場合、一般にアルカリ量が多いほど膨張量が大きくなるとは限らず、いわゆるベシマムアルカリ量の存在がモルタル試験によって確認されている [1], [2]。しかし、コンクリートの場合は、アルカリ量による膨張の変化は、反応性骨材、セメント中のアルカリ、環境条件等と密接、かつ複雑に関係し、とくにアルカリの影響については不明確な点が多く残されている [3]。

本研究はコンクリート供試体を対象として、アルカリ骨材反応に及ぼす諸要因の影響を明らかにするための一検討事項として、アルカリシリカ反応による膨張特性に及ぼすアルカリ量の影響を検討したものである。

## 2. 実験概要

試験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、アルカリ含有量が  $\text{Na}_2\text{O}$  当量で 0.5% である。添加アルカリ化合物としては試薬 1 級の  $\text{NaOH}$  を練混ぜ水に溶かして使用した。粗骨材は非反応性骨材 NT と反応性骨材 T2、細骨材は非反応性骨材 NS と反応性骨材 T2（化学法による分析結果より、 $R_c=67.5$ 、 $S_c=301$ 、 $S_c/R_c=4.46$ ）でいずれも鳥取県産である。

実験計画を表-1 に示す。コンクリートの配合は、単位セメント量は 350, 450, 550  $\text{kg/m}^3$  の 3 種類、アルカリ量は 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5% の 5 水準、水セメント比は 0.45 で、アルカリの無添加の状態におけるスランプが 12~15 cm になるように単位水量を試し練りによって決定した。なお、アルカリの添加によるスランプの変化に対する水量の補正は行っていない。

供試体は初期値を測定した後、40°C、R.H.100% および屋外暴露状態で保存した。供試体の寸法は 10×10×40 cm で、供試体の記号は（反応性粗、細骨材の割合）—（アルカリ含有量）で表した。供試体は全て、材令 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 ヶ月、それ以降は 1 ヶ月ごとに長さ変化、動弾

\*1 大阪セメント(株)中央研究所主任研究員、工博（正会員）

\*2 鳥取大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

\*3 大阪セメント(株)中央研究所長、工博（正会員）

\*4 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

表-1 実験計画

|  |  |
|--|--|
| Non reactive aggregates: NT,NS   | Alkali content per cement weight (%): 0.5                  |
| Reactive aggregates: T2  | Unit weights of cement (kg/m <sup>3</sup> ): 350, 450, 550 |
| Kind of added alkali: NaOH   | Reactive aggregate contents (%): 0, 50, 100                |
| Slump (cm): 12~15  | Size of specimen (cm): 10×10×40                            |
| Total alkali contents (Na <sub>2</sub> O eq. %): 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5                 |  |
| Storage conditions: 40°C, R.H.100 % and outdoors   |  |
| Items of measurement: Length change, Dynamic modulus of elasticity (E.D.), Crack partten |  |

性係数を測定し、フラクタル解析[4]によってひびわれを評価した。

### 3. 反応性骨材の混合割合によるアルカリの影響

図-1は、反応性粗骨材を100%を使用した場合のアルカリ量別の膨張量の経時変化を示す。図より、膨張が発生するアルカリ量の下限値は約1.0% (Na<sub>2</sub>O eq.)である。アルカリ量が1.0%以上では、アルカリ量の増加に伴って膨張量が大きくなり、アルカリ量2.5%で材令12ヵ月における膨張量が約0.4%となることからわかる。

図-2は、反応性細骨材を100%使用した場合のアルカリ量別の膨張量の経時変化を示す。膨張が発生するアルカリ量の下限値は0.7%で、この場合膨張は材令6ヵ月頃から開始する。また、アルカリ量の増加に伴って膨張量は大きくなるが、最大膨張が発生するアルカリ量は2.0%であり、アルカリ量が2.0%以上となると膨張量は逆に低減する傾向が現れることから、ペシマムアルカリ量は2.0%であると考えられる。また、この場合、材令12ヵ月における膨張量の最大は約0.8%となることからわかる。

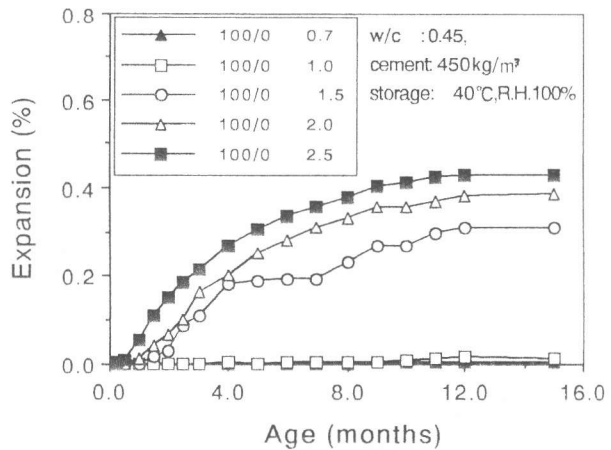


図-1 膨張に及ぼすアルカリ量の影響 (反応性粗骨材100%)

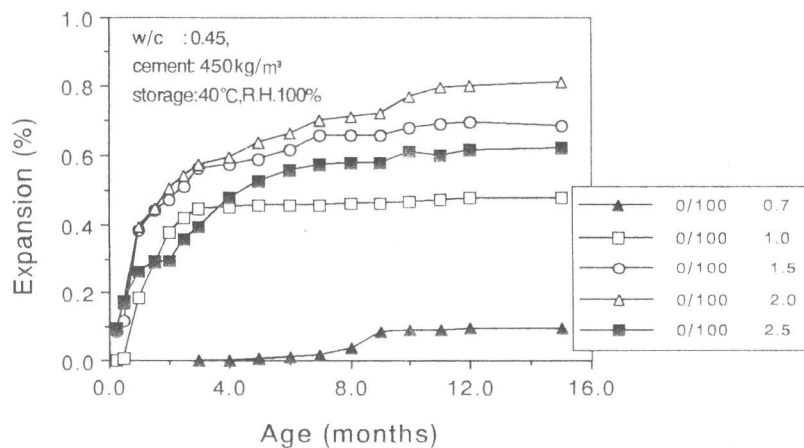


図-2 膨張に及ぼすアルカリ量の影響 (反応性細骨材100%)

図-3は、反応性粗、細骨材とも100%を使用した場合のアルカリ量別の膨張量の経時変化を示す。この場合、膨張が発生するアルカリ量の下限値は約1.0%で、アルカリ量の増加に伴って膨張量が大きくなり、アルカリ量が2.5%で、材令12ヵ月における膨張量は約0.5%である。

図-4は、反応性粗、細骨材とも50%を使用した場合のアルカリ量別の膨張量の経時変化を示す。この場合、膨張が発生するアルカリ量の下限値は約1.0%で、アルカリ量の増加に伴って膨張量が大きくなり、アルカリ量2.5%、材令12ヵ月で膨張量は約0.65%である。

図-5は、反応性骨材の混合割合によるアルカリ量と膨張量との関係を示す。この図より、アルカリ量の増加に伴って膨張量は大きくなるが、反応性骨材の混合割合によってその傾向が異なり、反応性細骨材だけ(0/100)を使用した場合の膨張量は他の混合割合のそれよりも大きく、アルカリ量2.0%で膨張量が最大になり、アルカリ量にもベシマム値が存在することが確認される。また、他の混合割合の場合は、アルカリ量2.5%まではアルカリ量が増加するに従って膨張が大きくなり、ベシマム値が存在するとすればアルカリ量が3.0%以上の場合であると考えられる。

図-6は、反応性骨材の混合割合別のアルカリ量と相対動弾性係数との関係を示す。この場合の相対動弾性係数は、材令0.5ヵ月の動弾性係数を100として、動弾性係数の相対値を求めたものである。図より、アルカリ量が1.5%以上、反応性骨材の混合割合100/0、0/100、50/50の場合の相対動弾性係数は85%以下となる。また、反応性細骨材だけを使用した場合の相対動弾性係数は他の混合割合のそれよりも低く、アルカ

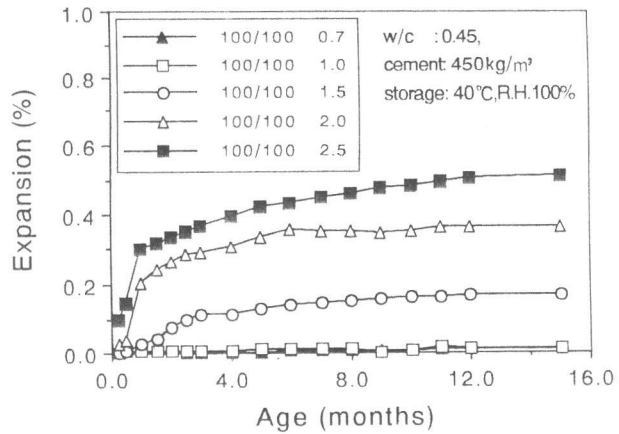


図-3 膨張に及ぼすアルカリ量の影響 (全骨材反応性)

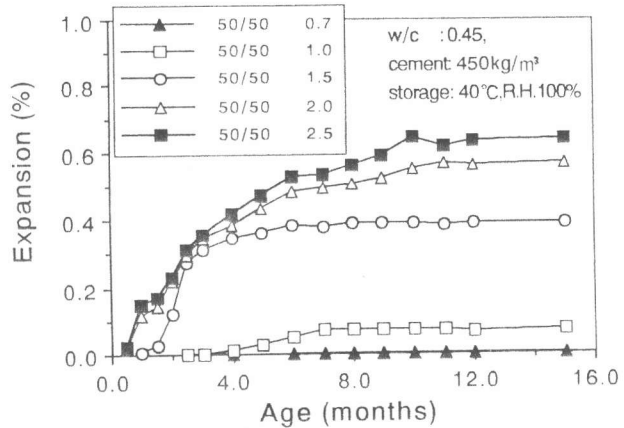


図-4 膨張に及ぼすアルカリ量の影響

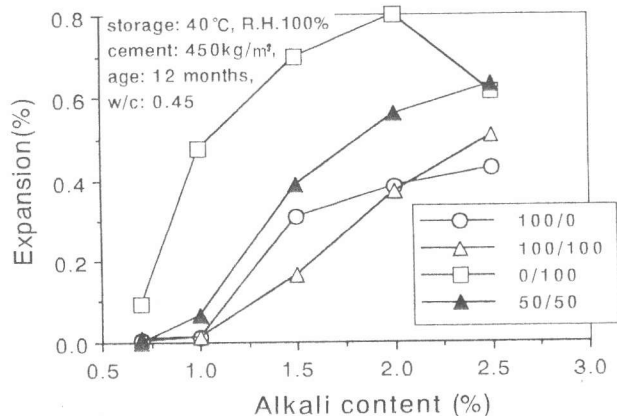


図-5 アルカリ量と膨張量との関係

り量0.7%でも、相対動弾性係数は85%以下となっており、膨張によるひびわれの発生などでコンクリートが劣化している事が伺われる。

日本をはじめ諸外国において、アルカリ総量の限界値が規定されている。その値はイギリスでは3 kg/m<sup>3</sup> オーストラリアでは約2 kg/m<sup>3</sup> ニュージーランドでは5 kg/m<sup>3</sup> アメリカでは3.3 kg/m<sup>3</sup> 南アフリカでは2.1 kg/m<sup>3</sup> である[5]。日本においては、コンクリート中のアルカリ総量が3 kg/m<sup>3</sup> 以下の場合には反応性骨材を使用しても膨張は生じないとしている[6]。しかし、反応性粗、細骨材、アルカリ量との組み合わせによる本試験の結果から、図-2に示すように、反応性細骨材だけを使用した場合、アルカリ量が0.7%（アルカリ総量3.15 kg/m<sup>3</sup>）の低い値で、材令12ヶ月で約0.1%の膨張量が生じた。すなわち反応性骨材の混合割合の条件を考慮に入れると、膨張が生じない総アルカリ量の限界値は3 kg/m<sup>3</sup> 以下、2.5kg/m<sup>3</sup>程度とするのが適当であると考えられる。

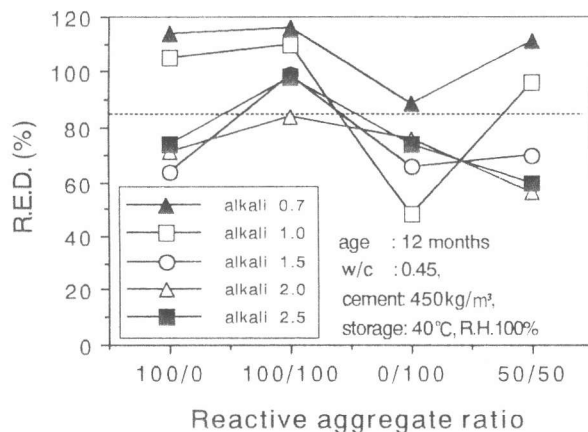


図-6 アルカリ量と相対動弾性係数との関係

#### 4. アルカリ量に及ぼすセメント量の影響

アメリカで規定されているアルカリ含有量の限界値は、セメントのアルカリ量 (Na<sub>2</sub>O当量) が0.6%であるが、この場合には、セメント中のアルカリ含有量だけではなく、単位セメント量も考慮されなければならない重要な要因とされている。ここでは反応性骨材T2を100%使用したコンクリートについて、膨張挙動に及ぼす単位セメント量の影響を検討した。

図-7にアルカリ量別の単位セメント量と膨張量との関係を示す。図より、セメントのアルカリ量を一定にすると、セメント量の増加に伴って膨張量は増大する。アルカリ量0.5%と低い場合は、550kg/m<sup>3</sup>以下の単位セメント量では全く膨張が生じていない。アルカリ量2.5%の場合、単位セメント量550kg/m<sup>3</sup>でアルカリ総量は13.75 kg/m<sup>3</sup>となり、かなりの膨張となることがわかる。

反応性細骨材のみを使用した場合に膨張量は最大となるので、そのペシマム条件を考慮して、膨張が生じないコンクリート中のアルカリ総量の限界値をそれぞれ2.5, 3.0, 3.5 kg/m<sup>3</sup>と仮定すると、アルカリ量に対応する単位セメント量の限界値は図-8に示すようになり、セメントのアルカリ量の増加に伴って単位セメント量は減少する。図の各曲線の上側は膨張領域、下側は非膨張領域である。単位セメント量を多量に使用する構

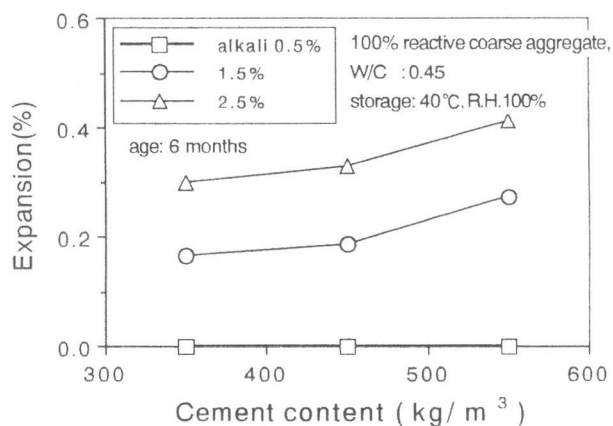


図-7 単位セメント量と膨張量との関係

造物、例えばプレストレストコンクリート構造物のような場合はアルカリ量の低いセメントを使用しなければならないことになる。

### 5. アルカリ量によるひびわれ特性

コンクリートのひびわれ特性をフラクタル解析によって検討した。その結果を表-2に示す。フラクタル解析はコンク

リート供試体の打設面、側面と底面のひびわれを展開図に写し取り、その展開図を一辺の長さ $r_0$  ( $r_0$ の値はそれぞれ異なる)の正方形のます目を有する透明のスケールで覆い、ひびわれを含む一辺 $r_0$ の正方形の数 $N$ を求めるものである。 $N$ と $r_0$ を両対数上にプロットし、 $N$ と $r_0$ の関係曲線の勾配からフラクタル次元 $D$ が求められる。表中、フラクタル次元 $D$ はひびわれの相似特徴(線状、面状、網状)を表す物性値、形状因子 $\phi$ はひびわれの分岐の程度を表す物性値、ひびわれ度 $C.D.$ はひびわれの密度を表す物性値である。線状のフラクタル次元 $D$ は1.0~1.4、面状のそれは1.2~1.6、亀甲状のそれは1.5~1.8となる。 $D$ が大きくなると $\phi$ は小さく、 $C.D.$ は大きくなる、つまり、ひびわれが多く発生し網状になると、ひびわれの分岐が発達し、ひびわれが供試体面全体に広がって行くことを示している。

表より、フラクタル次元 $D$ などの因子はアルカリ量によって変化することがわかる。また、コンクリートの有害膨張0.1%と対応して考えると、反応性細骨材を使用し、アルカ

リ量0.7%の場合のひびわれについての諸特性値がわかる。

図-9に反応性細骨材だけを使用した場合の材令12ヶ月のひびわれパターンを示す。図より、ひびわれの状態がアルカリ量によって変化し、アルカリ量の増加に伴ってひびわれの数が増えることがわかる。フラクタル次元 $D$ は、アルカリ量の増加に伴って変化し、アルカリ量0.7%でフラクタル次元 $D$ は1.596になり、前述の膨張量が0.1%のとき、 $D=1.6$ 、 $C.D.=0.15$ となり、ひびわれの状態を直観的に認識でき、さらに、実際のひびわれの損傷状態を把握することによって、適当なひびわれ対策を採ることができると考えられる。また、アルカリ量2.0%で $D$ は

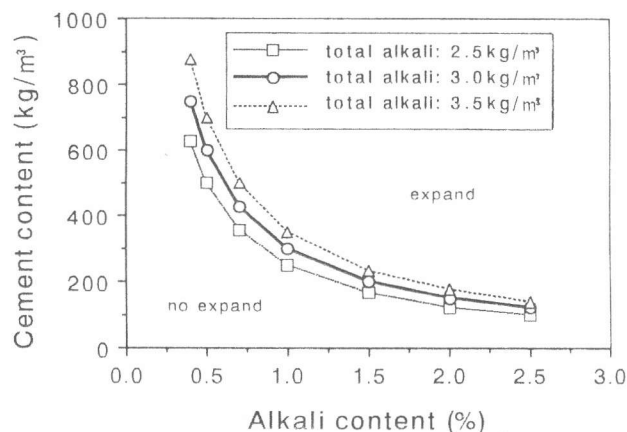


図-8 セメント量とアルカリ量による膨張発生の限界

表-2 コンクリートひびわれの $D$ ,  $\phi$  と $C.D.$

| Specimen  | $D$   | $N(r_0/M=1/16)$ | $\phi$ (S.F.) | $C.D.$ ( $\epsilon=2$ ) |
|-----------|-------|-----------------|---------------|-------------------------|
| 50/50 1.0 | 1.0   | 14              | 4.348         | 0.026                   |
| 50/50 1.5 | 1.951 | 229             | 1.087         | 0.424                   |
| 50/50 2.0 | 1.952 | 230             | 1.084         | 0.425                   |
| 50/50 2.5 | 1.978 | 249             | 1.047         | 0.456                   |
| 0/100 0.7 | 1.596 | 84              | 1.747         | 0.138                   |
| 0/100 1.0 | 1.946 | 228             | 1.102         | 0.412                   |
| 0/100 1.5 | 1.985 | 251             | 1.031         | 0.470                   |
| 0/100 2.0 | 1.990 | 252             | 1.020         | 0.481                   |
| 0/100 2.5 | 1.981 | 248             | 1.036         | 0.465                   |

1.99になり、網状であることが認められ、ひびわれが著しく増進していることがわかる。

## 6. まとめ

本研究はアルカリ量とそれに関係する単位セメント量の要因を設定し、コンクリートの膨張特性に及ぼすアルカリ量の影響を検討した。以下に得られた結果を要約する。

(1) 反応性骨材別のアルカリ量の膨張量に及ぼす影響については、アルカリ量の増加に伴って膨張量が増大するが、反応性細骨材だけ (0/100) を使用した場合に膨張量は最も大きく、この場合にのみベシマムアルカリ量が存在し、その値は約 2.0% にあることが確認できた。

(2) セメント中のアルカリ量を一定にすると、セメント量の増加に伴って膨張量も増大する。膨張が発生するベシマム条件を考慮し、膨張が生じない限界値はアルカリ総量 $3\text{kg/m}^3$ とすれば、アルカリ量に対応した単位セメント量の限界値が示された。

(3) アルカリ量によってひびわれ特性は異なり、フラクタル解析におけるフラクタル次元  $D$  などの因子はアルカリ量によって変化する。

## 参考文献

- 1) Vivian, H.E.: XII. The Effect of Amount of Added Alkalies on Mortar Expansion, CSIR 0 Bull. No. 256, pp. 31, ~37, 1950.
- 2) H.Y. Xu.: On the Alkali Content of Cement in AAR. Proceedings of the 7th ICAAR in Concrete, Ottawa, pp. 451-455, 1986.
- 3) コンクリート法によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp. 45 ~46, 1991.
- 4) 高安秀樹: フラクタル科学, 朝倉書店, 1987.
- 5) Hobbs, D.W.: Expansion of Concrete due to Alkali Silica Reaction, The Structural Engineer, Cement and Concrete, Association, 1984.
- 6) セメントの選定等によるアルカリ骨材反応の抑制対策, JIS A 5308, 付属書 6, 1989.12.

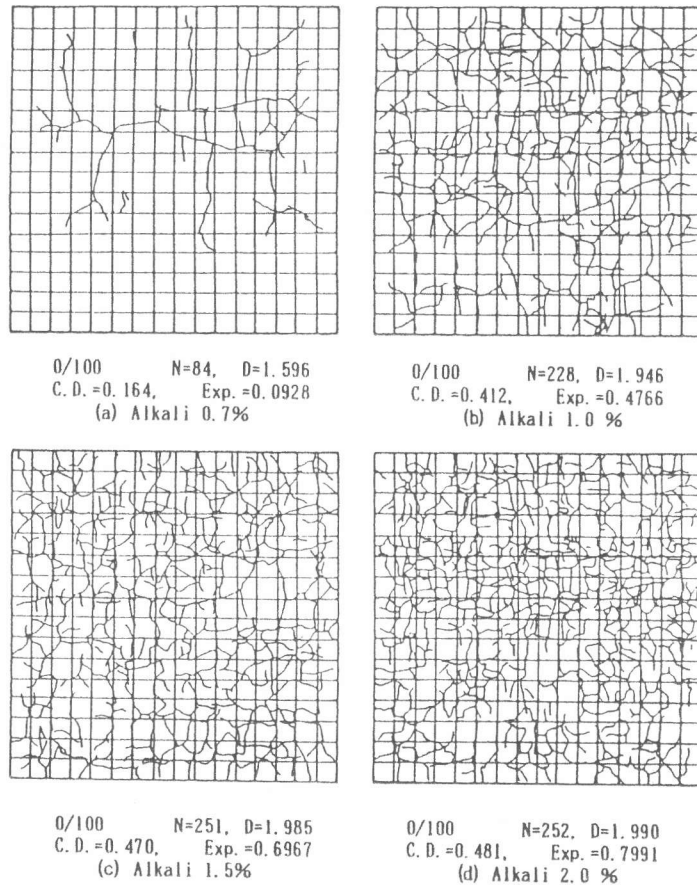


図-9 アルカリ量による膨張ひびわれのパターン (12 months)