

# 論文 反応性粗骨材と細骨材の混入割合が ASR 劣化コンクリートの力学的性能に与える影響

小島 太郎\*1・久保 善司\*2

**要旨:** ASR 劣化コンクリートの力学的性能に関してはこれまで粗骨材を主に対象として研究されてきた。近年では著しい劣化に至ったケースにおいて、細骨材の反応の関与が指摘されている。本研究では、反応性粗骨材および細骨材の両者の反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響について検討を行った。その結果、細骨材あるいは粗骨材の両者に反応が生じた場合には、膨張に伴う力学的性能の変化が粗骨材のみの場合と異なることが明らかとなった。

**キーワード:** アルカリシリカ反応, 膨張量, 細骨材, 粗骨材, 力学的性能

## 1. はじめに

アルカリ骨材反応はコンクリート構造物の代表的劣化原因の一つに挙げられる。従来、アルカリ骨材反応により劣化した構造物の耐荷性能については、鉄筋等の拘束によって適切に膨張が拘束されている場合には、健全なものと比べてその耐荷性能はほとんど低下しないとされてきた。そのため、アルカリ骨材反応対策は膨張によって生じたひび割れと膨張抑制を中心とした補修対策が主に実施されてきた。

しかし、アルカリ骨材反応による過大膨張に伴う、内部へのひび割れの進展、内部コンクリートの強度低下、鉄筋の破断等に至る著しく劣化した構造物が報告された以降、鉄筋破断によって構造物の一体性が損なわれる場合、あるいはそれ以降の膨張進展に伴う性能低下に対する予防保全策として補強が必要とされるケースも報告されている<sup>1)</sup>。補強対策の実施においては、アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の性能評価や補強対策の確立が必要不可欠であるとされているものの、画一的な手法は確立されておらず、工学的な判断によって行わざるを得ないのが現状である。したがって、アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の力学的性能を把握するためには、膨張およびそれに伴うひび割れ、さらには付着および定着などの構造性能に与える影響などの解明が必要とされている。

アルカリ骨材反応により劣化を生じたコンクリートの強度あるいは変形抵抗性などの力学的性能については、既往の研究において幾つかの知見が得られている。アルカリ骨材反応による膨張が圧縮強度に与える影響はそれほど顕著でないものの、膨張に伴う静弾性係数の低下が顕著であるとされている<sup>2), 3)</sup>。海外では、劣化構造物の劣化診断を念頭におき、各種実験によって

得られた膨張量と圧縮強度の関係に基づき、その圧縮強度の下限値をカバーする形で関係式が提案されている例もある<sup>4), 5)</sup>。また、アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの変形特性に与える影響については、膨張量の増加に伴う軸直角方向の変形量の増加と、それによるポアソン比の増加が報告されている<sup>3)</sup>。また、アルカリ骨材反応による膨張が破壊性状に与える影響を破壊力学パラメータの観点から検討した例として限界応力に着目した報告もされている<sup>6)</sup>。限界応力は、一般に応力が最大応力の75%以上でひび割れの進展が活発になる応力レベルであり、体積ひずみの最大値に対応するものとされている<sup>7)</sup>。この限界応力は膨張に伴う低下を示し、それらは圧縮強度の低下よりも大きいとされている。なお、劣化を生じていない通常のコンクリートにおいては、限界応力は細骨材比、骨材の品質、コンクリートマトリックスの力学的性質などに影響されると報告されている<sup>8)</sup>。さらに、膨張が劣化コンクリートの吸収エネルギーに与える影響についての知見は少ないものの、FRPシートによる横拘束をほどこした ASR 劣化コンクリートの力学的性能の検討によれば、非反応性のものよりも劣化したものにシート補強を施した方が、終局時までの吸収エネルギーは大きくなったと報告されている<sup>9)</sup>。

これらの既往の研究においては、反応性骨材として粗骨材が用いられており、細骨材が使用された研究事例はほとんどない。他方、実構造物においては顕著な ASR 劣化を生じ、鉄筋破断にまで至った橋脚の調査報告においては、著しいコンクリート強度低下の原因として細骨材の反応による関与が指摘されている。本研究では、反応性細骨材および粗骨材の両者が反応により劣化した場合の膨張がコンクリートの力学的性能に

\*1 金沢大学 工学部土木建設工学科 (学生会員)

\*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 准教授 博(工) (正会員)

表-1 示方配合

略称	反応性骨材割合 (%)		単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
	細骨材	粗骨材	W	C	Sr	Sn	Gr	Gn	NaCl	減水剤	AE 剤
S30	30	0	163	300	253	551	0	993	12.71	0.856	0.712
S30G50	30	50	163	296	258	581	511	495	12.08	0.856	0.712
S30G100	30	100	163	296	258	581	1022	0	12.08	0.856	0.712
S50	50	0	163	300	421	394	0	993	12.71	0.856	0.712
S50G50	50	50	163	296	431	415	511	495	12.08	0.856	0.712
S80	80	0	163	300	674	157	0	993	12.71	0.856	0.712
S80G50	80	50	163	296	689	166	511	495	12.08	0.856	0.712
G100	0	100	163	300	0	787	1016	0	12.71	0.856	0.712

Sr:反応性細骨材, Gr:反応性粗骨材, Sn:非反応性細骨材, Gn:非反応性粗骨材

与える影響を検討すると同時に、反応性細骨材および粗骨材の混入割合が ASR 劣化コンクリートの力学的性能に与える影響を検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント(密度:  $3.16\text{g/cm}^3$ )を用いた。非反応性骨材として手取川産骨材を細骨材および粗骨材の両方に用いた。反応性骨材として北海道産の安山岩砕石を粗骨材に用い、砕石を粉砕機で砕き、所定の粒度としたものを細骨材として用いた(粒度は JIS モルタルバー法の粒度分布とした)。混和剤として高性能減水剤および AE 剤を用いた。

### 2.2 配合

水セメント比は標準的なコンクリートを想定し 55%とした。添加アルカリとしては NaCl を用い、等価アルカリ量はセメントのアルカリ量を考慮し、短期間で大きな膨張が得られるように  $\text{Na}_2\text{O}$  等量で  $8\text{kg/m}^3$  となるよう調整した。反応性骨材として粗骨材のみを用いるものはペシマム量を考慮し、粗骨材に占める割合を 100%とした。他方、反応性細骨材のみを混入するものの混入割合は、混入量の少ない 30%、それよりも多い 50%および 80%の 3 要因とした。反応性粗骨材と反応性細骨材を組み合わせるものについては、反応性細骨材の混入割合 30%のものでは粗骨材の混入割合 50%および 100%とし、他のものは粗骨材の混入割合を 50%とした。なお、混入割合は粗骨材および細骨材のそれぞれに占める反応性骨材の割合を示す。示方配合を表-1 に示す。

### 2.3 供試体

供試体は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体とした。供試体は打設 1 日後に脱型し、アルカリ骨材反応を促進させるため、 $50^\circ\text{C}$ ・飽和 NaCl 溶液中に浸漬した。膨張

に伴うコンクリートの力学的な性能の変化を把握するため、劣化水準として、膨張初期(コンクリート表面におけるひび割れ発生前)の 0.03%~0.05%、巨視的なひび割れが多数発生した段階として 0.3%前後、さらには過大な膨張レベルとして 0.5%以上の膨張量を生じたものを目安として、所定の膨張量に達した時点で圧縮強度試験を行った。なお、一般的に膨張によるひび割れの発生は 0.05%~0.10%程度の膨張によって生じるとされている。

### 2.4 膨張量測定

脱型後、ステンレス球を埋め込んだステンレスバンドを 1 供試体につき 2 つ、ステンレス球の距離が 100mm となるよう取り付け付けた。基長 100mm のコンタクトゲージ(感度 0.001mm)を使用して測定を行った。膨張量の測定は、膨張量に対するコンクリート供試体温度の影響を除外するため、測定開始 3 時間前に促進養生槽から供試体を取り出し、乾燥を防ぐため供試体をビニール袋で密封し、室内(約  $20^\circ\text{C}$ )に設置した後、行うこととした。

### 2.5 載荷試験

万能試験機を用いて一軸圧縮試験を行った。載荷軸方向と載荷軸直角方向のひずみを測定するために、各方向に 2 枚のゲージを対面に貼付けた。変位は容量 5mm と 10mm の高感度変位計を用いて測定した。荷重はロードセル(容量 5000kN)を用いて測定した。計測値より、圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、吸収エネルギー、限界応力を求めた。

## 3. 結果と考察

### 3.1 圧縮強度

膨張量と圧縮強度の関係を図-1 に示す。反応性粗骨材のみのものは、既往の研究<sup>2)</sup>と同様に、膨張量に伴い圧縮強度が緩やかに低下した。これに対して、反

応性細骨材のみのものでは、膨張初期から大きな強度低下を示し、反応性粗骨材および細骨材の両者を組合せたものではその傾向がより顕著となった。なお、反応性細骨材および粗骨材の混入割合の影響については顕著ではなかった。

反応性骨材が細骨材であった場合には、モルタルマトリックス内に骨材が分散しており、膨張によって生じるひび割れも、反応性粗骨材のみと異なるものと考えられる。膨張に伴うひび割れの分散性が異なること、モルタルマトリックス中に分散した骨材が起点のひび割れを多く有することによって、膨張初期からの圧縮強度の低下に寄与したものと考えられる。

ひび割れ分散性の相違が破壊挙動に与える影響の概念図を図-2 に示す。通常のコンクリートにおいて、破壊(圧縮強度)付近の応力に達すると、粗骨材を起点とするひび割れが連結し、いくつかのブロックが形成されるような形で破壊に至るとされている<sup>10)</sup>。反応性骨材が粗骨材である場合には、膨張によるひび割れも粗骨材を起点として発生し、膨張量に伴いこれらのひび割れが増加する。他方、それらのひび割れには反応ゲルが充填されているものも多く、これらが力学的な抵抗を有することが報告されている<sup>6)</sup>。その抵抗要因としては、ひび割れ間の幾分かの応力の伝達とひび割れの相対変位に対するゲルの粘性抵抗などによって、荷重作用に対して抵抗するものと考えられる。他方、反応性細骨材における膨張によるひび割れも、粗骨材と同様に骨材を起点に生じることが知られている。そのため、反応性骨材に細骨材あるいは両者を組合せた場合には、膨張に伴うひび割れがモルタルマトリックス中にも広範囲に分散しており、それらと荷重作用によるひび割れが連結しやすくなり、早期(荷重レベルの低い段階)にブロック化が生じるため、破壊が生じやすくなるものと考えられる。さらに、モルタルマトリックス中にひび割れが分散することで、形成されるプロ

ックもより細分化されるものと推察される(図-2 右図参照)。したがって、反応性骨材が細骨材である場合、および両者の組合せた場合には、上記の理由によって膨張初期から強度低下が生じるものと考えられる。従来の知見では、膨張が強度に与える影響は顕著でないものとされてきたものの、反応性骨材が細骨材である場合には注意が必要であろう。

### 3.2 静弾性係数

膨張量と静弾性係数の関係を図-3 に示す。反応性骨材の混入形態にかかわらず、いずれのものも膨張初期において静弾性係数は大きく低下し、それ以降は緩やかな低下を示した。反応性骨材の混入形態によってひび割れの分散性状は異なるものの、膨張に伴うひび割れによって静弾性係数は低下し、ひび割れの性状の相違は支配的な要因とはならなかったものと考えられる。

### 3.3 最大応力時の軸方向ひずみ

膨張量と最大応力時の軸方向ひずみの関係を図-4

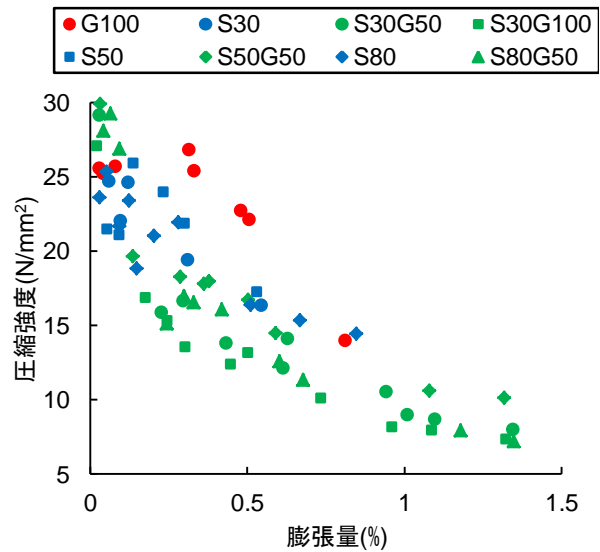


図-1 圧縮強度

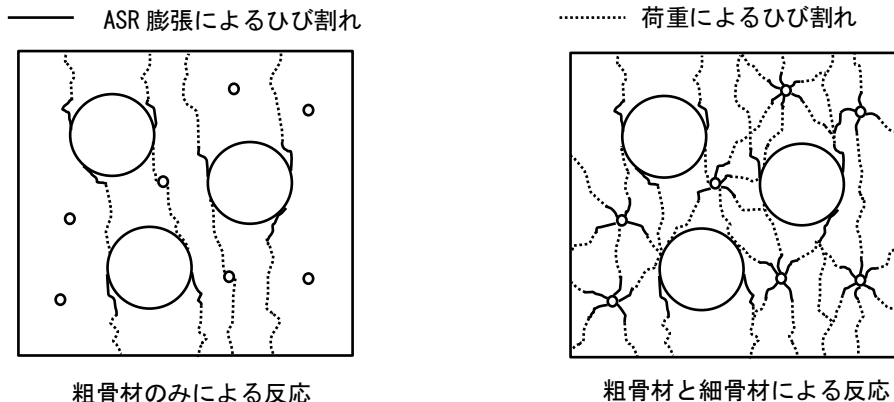


図-2 破壊挙動に与える影響(破壊付近のひび割れ状況)

に示す。反応性骨材の混入形態にかかわらず、いずれのものも膨張に伴い最大応力時の軸方向ひずみは増加傾向を示した。反応性細骨材のみのものは他の要因のものより、若干大きな増加割合を示した。これに対して、反応性粗骨材と細骨材の両者を組合せたものでは、それよりも小さな増加割合となった。なお、混入割合の影響は顕著でなかった。

反応性粗骨材および細骨材の両者を組合せたものでは、3.1で述べたとおり破壊が生じやすくなり、膨張量に伴う強度低下も他の要因のものより大きかった。そのため、破壊が早期に生じ、結果として最大荷重時の軸方向ひずみが他のものより小さくなったものと考えられる。反応性細骨材のみのものでも、同様に破壊が生じやすくなるものの、異なる傾向が得られた原因については更なる検討が必要である。反応性細骨材のみの場合には、膨張ひび割れがモルタルマトリクスに分散して発生していることと関係しているものと推察される。

### 3.4 最大応力時の軸直角方向ひずみ

膨張量と最大応力時の軸直角方向ひずみの関係を図-5に示す。反応性骨材の混入形態にかかわらず、いずれのものも膨張に伴い最大応力時の軸直角方向ひずみは増加傾向を示した。膨張によるひび割れの性状は異なるものの、膨張によるひび割れが増加するほど、軸直角方向の変形が容易となり、軸直角方向のひずみが大きくなったものと考えられる。膨張に伴うひび割れの量が支配的な要因であったものと考えられる。

### 3.5 ポアソン比

膨張量とポアソン比（最大荷重の90%時点）の関係を図-6に示す。膨張量0.5%までの領域においては、反応性骨材の混入形態にかかわらず、いずれのものも膨張に伴いポアソン比は増加した。膨張量0.5%以降の領域においては、反応性細骨材のみのものは概ね一定となり、反応性粗骨材を含んだものは膨張量0.5%以降の領域においても膨張量に伴う増加を示した。3.3で述べたとおり、反応性細骨材のみのものは、膨張に伴う最大荷重時の軸方向ひずみの増加割合は他のものより大きく、その分ポアソン比の増加割合が他のものより小さくなったものと考えられる(ポアソン比の算出時における分母の増加割合が他のものより大きいため)。

### 3.6 限界応力

膨張量と限界応力の関係を図-7に示す。膨張量0.5%までの領域においては、反応性骨材の混入形態にかかわらず、いずれのものも膨張に伴い限界応力は低下し、その後は概ね一定あるいは緩やかな低下傾向を示した。反応性細骨材を含むものでは、膨張量0.5%ま

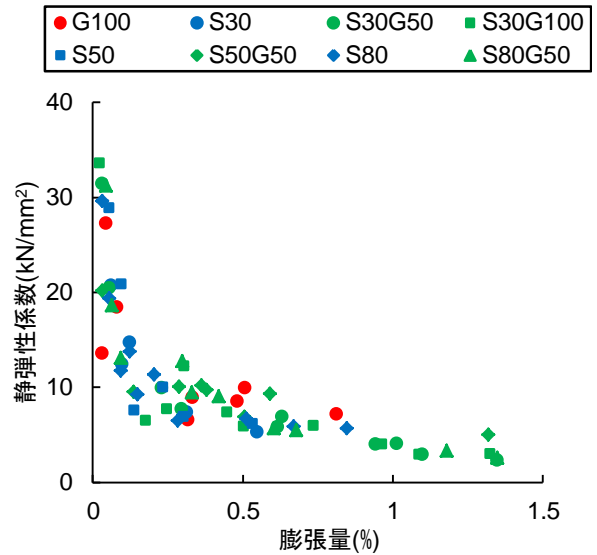


図-3 静弾性係数

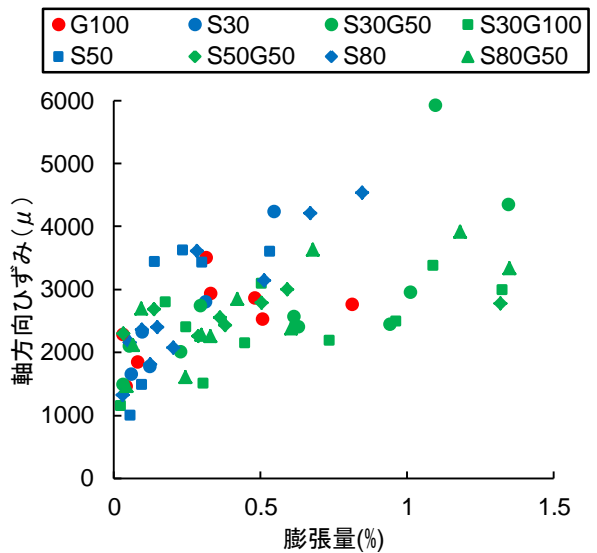


図-4 軸方向ひずみ

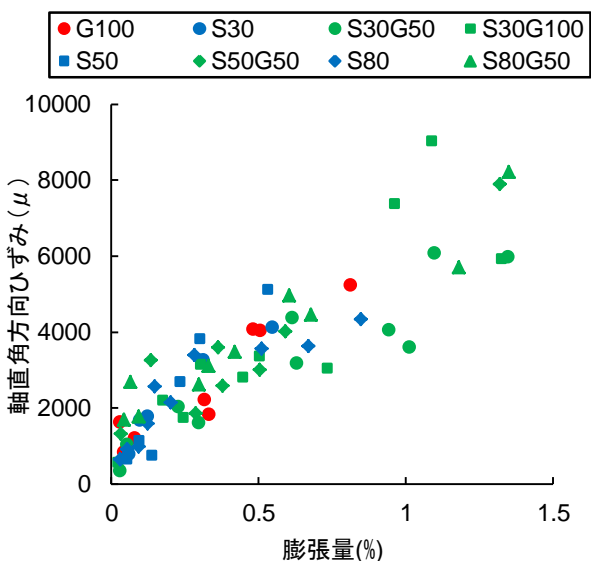


図-5 軸直角方向ひずみ

での領域における限界応力の低下割合は粗骨材のみのものより顕著であった。反応性骨材として細骨材を用いたものは、膨張によるひび割れが粗骨材に比べて分散して存在し、より低い応力レベルにおいて軸直角方向の変形が増加しやすくなり、膨張に伴い限界応力が急激に低下したものであると推察される。また、3.1で述べた反応性細骨材のものの方が破壊を生じやすいこととも対応しているものと考えられる。

### 3.7 吸収エネルギー

膨張量と吸収エネルギーの関係を図-8に示す。吸収エネルギーは最大荷重時以降、最大荷重の80%低下した時点までの応力-ひずみ曲線の面積とした。反応性粗骨材あるいは反応性細骨材のみのものでは、ばらつきはあるものの、膨張量0.3%程度までは吸収エネルギーは増加傾向を示し、それ以降は概ね一定あるいは低下傾向を示した。これに対して、反応性細骨材および粗骨材の両者を組合せたものでは、ばらつきはあるものの、膨張に伴い吸収エネルギーは低下傾向を示し、膨張量0.5%以降の領域においては概ね一定の傾向を示した。3.1および3.3の圧縮強度および最大荷重時の軸方向ひずみで述べた結果が反映されており、反応性粗骨材および細骨材のみのものでは、膨張初期において、圧縮強度の低下よりも軸方向ひずみの増加が大きいため、吸収エネルギーは増加の傾向を示し、それ以降の領域においては膨張に伴う圧縮強度の低下と、軸方向ひずみの増加が相殺し、吸収エネルギーが一定となったものと考えられる。他方、反応性細骨材と粗骨材が混入されたものでは、膨張初期において、膨張に伴う圧縮強度の低下に対して軸方向ひずみの増分が少ないため、吸収エネルギーは緩やかな減少を示し、それ以降においては他のものと同様に、圧縮強度の低下と軸方向ひずみの増加が相殺することで一定の吸収エネルギーが得られたものであると推察される。

### 3.8 応力-ひずみ曲線

これまで述べたとおり、反応性骨材の混入形態は膨張に伴う劣化コンクリートの力学的パラメータに影響を与える。力学パラメータの算出の元となった応力-ひずみ曲線について、膨張に伴う骨材形態が与える影響を検討することとした。反応性粗骨材のみのものと、反応性細骨材および粗骨材の両者を組合せた場合の応力-ひずみ曲線の一例を図-9に示す。

粗骨材のみの場合では、膨張初期の強度低下が顕著でないため、膨張に伴い最大荷重時のひずみが大きくなるとともに、曲線の傾きが小さくなった。それ以降は、最大荷重時のひずみの増加は顕著でなくなるため、最大応力が小さくなり、応力-ひずみ曲線が扁平な形状となった。

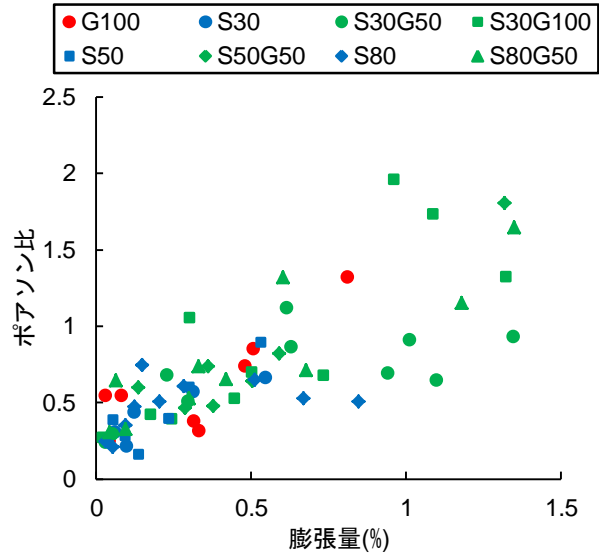


図-6 ポアソン比

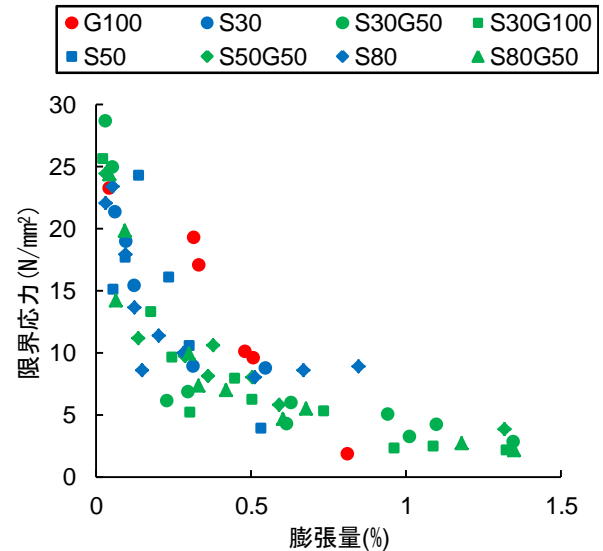


図-7 限界応力

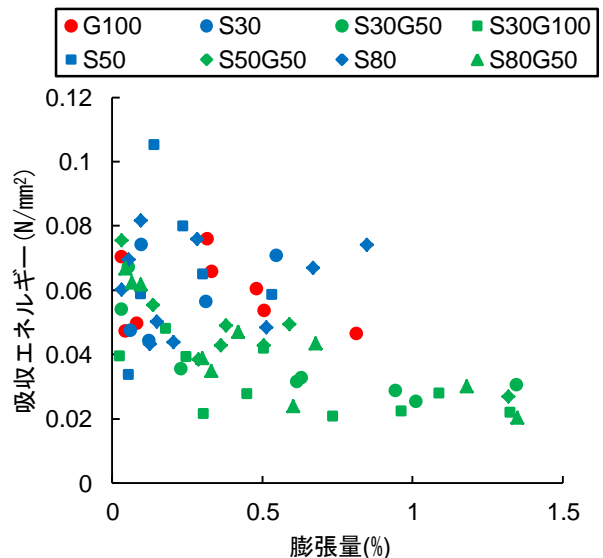


図-8 吸収エネルギー

反応性細骨材および粗骨材の両者の組合せたものでは、膨張初期においても強度低下を生じるため、膨張に伴い圧縮強度が低下するとともに、曲線の傾きも小さくなるため、膨張の進行とともに応力-ひずみ曲線が扁平な形状となった。

したがって、力学的なモデルを構築する際には、対象とする構造物のコンクリートにおける反応が粗骨材、あるいは細骨材であるのか見極め、適切な力学モデルの構築が必要であるものと考えられる。さらに、鉄筋等の拘束がある場合には、それらの力学的性能の低下程度も異なることが予想されるため、拘束の影響を適切に反映するための更なる研究が必要であろう。

#### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 反応性骨材が細骨材の場合には、膨張初期から強度低下が生じ、圧縮強度の低下は大きく、反応性骨材の混入形態が与える影響は大きい。
- (2) 反応性骨材が細骨材である場合、さらには粗骨材も反応性である場合には、粗骨材のみが反応性であるものに比べて、破壊が生じやすくなる(圧縮強度が低下しやすい)。
- (3) 静弾性係数、最大荷重時のひずみ、ポアソン比などの変形特性における骨材の混入形態の影響は比較的軽微であったものの、粗骨材のみのもとは若干の相違が認められるものであった。
- (4) 今後の更なる検討が必要であるものの、ASR劣化コンクリートの力学的モデルの構築においては、反応性骨材が粗骨材か、細骨材か、あるいはその両者であるかを念頭におく必要がある

#### 参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.8
- 2) 東原直，久保善司，上田隆雄，野村倫一：過大なASR膨張にともなうコンクリートの力学的性能の変化，土木学会第61回年次学術講演会概要集第5部，pp.127-128，2006.9
- 3) 久保善司，上田隆雄，黒田保，野村倫一：アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1691-1696，2006
- 4) The Institute of Structural Engineering：Structural effect of alkali silica reaction，p.12-14，1992.7
- 5) Clark L.A.：Structural aspect of alkali-silica reaction，Structural Engineering Review，Vol.2，No.2，pp.81-87，1990.6
- 6) 中田正文，久保善司：骨材種類がASR劣化コンクリートの力学的性能および変形特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1055-1060，2011
- 7) 田澤榮一，佐伯昇：コンクリート工学—微視構造と材料特性—，pp.63-64，1998
- 8) 小阪義夫，谷川恭雄：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響，日本建築学会論文報告集，第233号，pp.21-32，1975.7
- 9) 柴田都江，久保善司，栗原慎介，宮川豊章：ASRにより劣化したコンクリートにおける炭素繊維シートの補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.397-402，2001.7
- 10) 岡田清：最新コンクリート工学，pp.18-pp.25

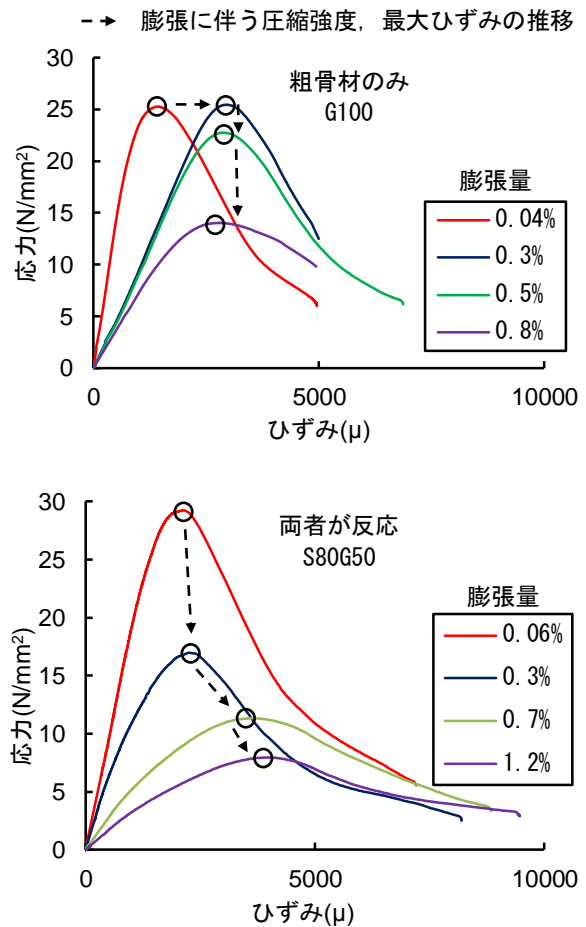


図-9 応力-ひずみ曲線