

# 論文 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

中田 正文\*1・久保 善司\*2

**要旨:** 過大な膨張を生じた ASR 劣化コンクリートの強度特性に関する研究は少なく、さらに、骨材種類が膨張に伴う力学的性能の変化に与える影響についても十分に明らかにされていない。ASR 劣化構造物の適切な維持管理を行うためには、それらの影響を把握しておく必要がある。本研究では、我が国の代表的な反応性骨材 3 種類を対象として、過大な膨張段階を含む ASR 劣化コンクリートの力学的性能および変形特性を検討した。その結果、骨材種類が膨張に伴う圧縮強度の変化に与える影響は顕著でないものの、検討した範囲では弾性係数および最大応力時のひずみなどの変形特性に影響を与えることが明らかとなった。

**キーワード:** アルカリ骨材反応, 膨張量, 強度特性, 変形特性, 安山岩, チャート, 川砂利

## 1. はじめに

鉄筋によって ASR 膨張が適切に拘束されている場合には、ASR 劣化を生じた部材の構造性能の顕著な低下はないものとされてきた。近年、過大な ASR 膨張によって鉄筋破断や内部のコンクリート強度低下を生じ、補強対策が実施されるに至る構造物も報告されている<sup>1)</sup>。過大な ASR 膨張を生じた構造物に対する耐荷性能の適切な評価手法の確立とともに、補修・補強対策を含む適切な維持管理手法の確立が急務となっている。それらの構造物の補修・補強設計においては、コンクリートの圧縮強度、弾性係数などの力学的な特性値が必要になり、さらには、応力-ひずみ曲線などの力学的なモデルも必要とされる。しかし、現状ではこれらの力学的モデル構築のための基本的なデータは十分でないため、劣化した構造物から採取したコンクリートコアの圧縮強度や弾性係数などを基に補強設計をせざるを得ない現状にある。採取コアによる場合には、応力解放や寸法の影響も含まれており、設計においては安全側を考慮した上で用いられている。

反応性骨材として安山岩を用い、過大な膨張を生じた ASR 劣化コンクリートの力学的性能に関する既往の研究では、膨張量が 0.7%程度までの範囲における圧縮強度特性に関する報告があり、膨張量 0.3%程度までは圧縮強度の低下は顕著ではなく、膨張量 0.5%程度では 30%程度の強度低下が生じたと報告されている<sup>2)</sup>。また、水セメント比の影響については、膨張量 0.3%までの範囲においては水セメント比が与える影響は顕著ではないとの報告がある<sup>3)</sup>。海外では、膨張量に応じた ASR による強度特性の低下について下限値を提案している報告や各種骨材における検討結果を取りまとめた報告がある<sup>4)5)</sup>。なお、上記の我が国の安山岩を用いた検討結果からは、

膨張初期の弾性係数の顕著な低下傾向以外は概ね海外の検討結果の傾向と一致したと報告されている<sup>2)3)</sup>。

一方、骨材種類の影響については、我が国の代表的な反応性骨材であるチャートおよび安山岩を用いた各種配合の ASR 劣化コンクリートの力学的特性に関する検討からは、両者において膨張に伴う圧縮強度特性および微細組織の変化に相違があったことが報告されている<sup>6)</sup>。また、海外においては、骨材種類によって生じる膨張進行速度の相違が微細組織の変化に影響を与え、骨材種類が膨張に伴う強度特性に影響を与えるとの報告がある<sup>7)</sup>。したがって、過大な膨張段階を含めて、骨材種類が膨張に伴う ASR 劣化コンクリートの力学的性能に与える影響を明らかにしておく必要がある。

本研究では、我が国の代表的な反応性骨材として安山岩、チャート、川砂利の 3 種類を用い、過大な膨張範囲を含めた、骨材種類が膨張に伴う ASR 劣化コンクリートの力学的性能に与える影響を明らかにすることとした。さらには、圧縮強度および弾性係数に加えて、ポアソン比、限界応力、および最大荷重時の変形など変形特性についても同時に検討を行うこととした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）を用いた。非反応性骨材として手取川産の川砂利および川砂を細骨材、粗骨材に用いた。反応性骨材（粗骨材）として北海道産の安山岩砕石（略称：安山岩）、養老産チャート砕石（略称：チャート）、および北陸産の川砂利（略称：川砂利）の 3 種類を用いた。各骨材の物理的特性を表-1 に示す。添加アルカリには NaCl を使用し、等価アルカリ量 8kg/m<sup>3</sup> とした。粗骨材に占める反

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 工博 (正会員)

表-1 骨材の物理的性質

骨材種類	細骨材	非反応性	安山岩	チャート	川砂利
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.56	2.60	2.66	2.69	2.66
吸水率(%)	2.88	2.18	2.65	0.90	1.67
粗粒率(FM)	3.08	6.77	6.81	7.18	7.12
Sc(mmol/l)	-	67	196	403	184
Rc(mmol/l)	-	118	111	63	83

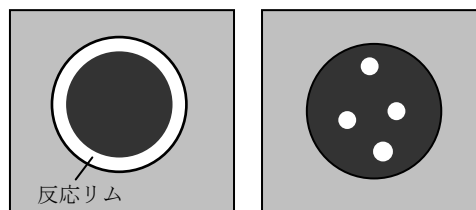


図-1 ASR 反応の種類

表-2 示方配合

W/C(%)	骨材	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
		W	C	S	G1	G2	NaCl	AE 減水剤	AE 剤
55	安山岩	163	300	787	1016	0	12.5	0.9	0.7
55	チャート	163	300	787	822	206	12.5	0.9	0.7
55	川砂利	163	300	787	1016	0	12.5	0.9	0.7

G1：反応性骨材，G2：非反応性骨材

反応性骨材の割合はペシマム量を考慮し、安山岩は100%、チャートについては80%、川砂利では100%とした。限界応力などの特異点応力は、粗骨材率、細骨材率さらには水セメント比の影響を受けるとされており<sup>8)</sup>、本研究ではこれらの影響を考慮するため、粗骨材および細骨材の体積はいずれの配合においても同一となるようにした。同様に、水セメント比を同一とし、標準的なコンクリートの55%とした。示方配合を表-2に示す。

## 2.2 実験要因

### (1) 反応性骨材

我が国の代表的な反応性骨材の中で、膨張速度が速く、大きな膨張量を生じ、かつ、ASR反応が骨材周辺部から生じる反応タイプ(図-1(a)参照)の反応性骨材として安山岩を用いた。川砂利は、混入する反応性骨材の種類によって異なり、その岩種構成は採取箇所や採取時期によって変動するとされている。同河川系で採取した川砂利の岩種構成に関する検討<sup>9)</sup>からは、主な反応性骨材として安山岩が含まれるものを用いた。また、川砂利は一般には採石などよりも骨材自身の強度が高く、それらの影響の有無を把握することとした。最後に、膨張速度が遅く、反応性鉱物が骨材粒子内部に散在する反応タイプ(図-1(b)参照)の反応性骨材としてチャートを用いた。これらの反応性骨材のアルカリ骨材反応試験の結果は、化学法(JIS A 1145)ではすべての骨材が「無害ではない」と判定され、モルタルバー法(JIS A 1146)では、チャート以外の反応性骨材(安山岩、川砂利)は、「無害ではない」と判定された。

### (2) 劣化水準

膨張に伴うASRコンクリートの力学的な性能の変化を把握するため、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対象に、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。また、各骨材を用いたコンクリートの標準的な強度を把握するために、同一配合の標準養生の供試体を用意し、各骨材の膨張量0に相当する強度特性値として比較、検討に用いた。

## 2.3 供試体および促進方法

供試体にはφ100×200mmの円柱供試体を用いた。打設1日後に脱型し、ASR劣化を促進させるものは促進環境下に暴露した。促進環境として、短期間で大きな膨張を発生させるために、50℃飽和NaCl溶液に浸漬した。暴露後の膨張量を測定し、所定の膨張量において圧縮強度試験を実施した。暴露前に、膨張測定用のステンレスバンドを取り付け、室温約20℃で初期値の測定を実施した。なお、膨張量0に相当する供試体については、脱型後、材齢28日まで水中に静置した。

## 2.4 測定および試験項目

### (1) 膨張量

供試体側面にステンレスバンド(ステンレス球埋め込み)を基長100mmで取り付け、コンタクトゲージ(感度0.001mm)を用いて膨張量を測定した。測定間隔は、材齢約100日までは約1週間ごとに、100日以降は約1ヶ月ごととした。

### (2) 圧縮強度試験

所定の膨張量または養生期間に達した時点で養生槽から取り出し、万能試験機を用いて静的一方向圧縮強度試験を行った。試験時には載荷時の荷重、変位、およびひずみ(軸方向および軸直角方向(円周方向))を測定した。荷重は容量500kNのロードセルを用い、変位は容

量 5mm と 10mm の高感度変位計を用いた。ひずみは検長 60mm のひずみゲージを用いて縦ひずみおよび横ひずみを測定した。計測値から圧縮強度、弾性係数、ポアソン比、限界応力、および最大荷重時のひずみを求めた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 膨張挙動

各種骨材の膨張挙動を図-2 に示す。安山岩および川砂利のものでは暴露約 20 日において膨張が発生した。チャートのものではそれらよりも膨張発生は遅く、暴露約 80 日において膨張が発生した。前者のものは、骨材の反応がその周辺部分から生じるため、反応速度が一般的に早いものが多い。断面観察した場合には、図-1(a) に示すように反応リムと呼ばれるものが観察できる。一方、チャートの場合、図-1(b) に示すように反応性鉱物は粒子内部に散在するので、アルカリや OH<sup>-</sup>イオンが内部の粒子と接触し、反応するまでに時間を要するため、一般的に膨張の開始時期は前者よりも遅い。今回採用した配合および促進条件においても反応性骨材の種類の影響によって、膨張開始時期が異なった。所期の設定に対応した膨張挙動が得られたものと考えられる。ただし、チャートの膨張開始後の膨張進行速度は安山岩および川砂利のものとはほぼ同程度であった。既往の膨張速度が与える検討<sup>7)</sup>で用いられた骨材では、膨張速度は今回採用したものより遅く、0.1%以上の膨張を得るのに、1年以上を要したものであった。後述の考察において、チャートにおける膨張挙動の相違の影響については、膨張開始時期の影響を主に検討することとした。

本研究で用いた川砂利は、2.2(1)で述べたとおり主な反応性骨材として安山岩が含まれるとされており、他の反応性骨材も含有するものの、安山岩と同様の膨張挙動を示す反応性骨材であるものと考えられる。

#### 3.2 圧縮強度

各種骨材の膨張量が圧縮強度に与える影響を図-3 に示す。骨材種類にかかわらず、膨張量が大きいものほど圧縮強度は小さくなった。既往の研究<sup>2)~5)</sup>では、膨張に伴い緩やかに低下するとされており、骨材種類にかかわらず 0.5%以上の過大な膨張量においても同様の傾向が得られた。ASR 劣化コンクリートの圧縮強度は骨材種類にかかわらず膨張に伴い低下すると考えられる。なお、膨張に対する低下割合もチャートを除き概ね同程度であった。

骨材種類によって本来の圧縮強度が若干異なるため、同一配合の 28 日強度で各時点での強度を除したものを強度比として求めた。各種骨材の膨張が強度比に与える影響を図-4 に示す。海外において提案されている膨張に伴う強度比の低下割合の下限値<sup>4)</sup>も図-4 に併記した。

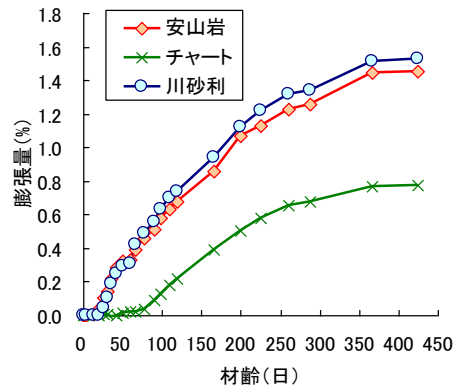


図-2 膨張挙動

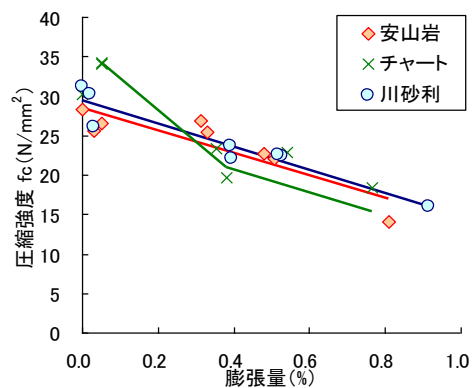


図-3 圧縮強度に与える影響

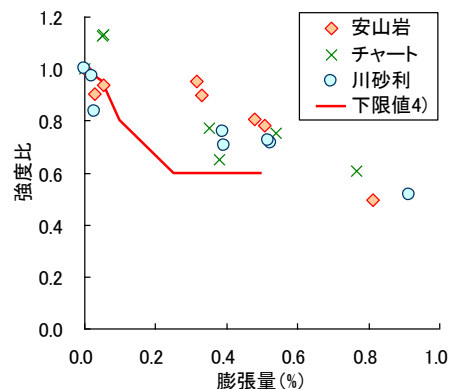


図-4 強度比に与える影響

強度比においても上記と同様に、骨材種類にかかわらず膨張に伴う圧縮強度の低下傾向が認められた。チャートについては、既往の研究においては膨張に対する低下割合が大きいと報告されている。しかし、既往の検討<sup>6)</sup>においては、異なる配合において強度比を同一材齢の非反応性のものに対する比として求めており、水セメント比や添加アルカリなどの影響もそれらに含まれている。単純な比較は困難であるものと考えられる。一方、膨張速度が与える影響を検討した既往の研究<sup>7)</sup>においては、膨張速度が遅いものでは、膨張圧の緩和によってマトリックスの劣化が緩和されることで膨張量が小さい

範囲では、膨張が生じたものでも水和反応の進行によって非反応性のものと同程度の強度増加を示した報告もある。しかし、今回の配合および促進条件においては、3.1で述べたとおりチャートの膨張開始後の膨張速度は他のものと同程度であるため、膨張速度による影響ではなく、膨張開始までの水和反応によるマトリックス強度の増加によって、膨張初期の強度が大きくなった可能性が高い。0.3%以上の膨張段階においては、骨材種類にかかわらず、強度比の低下割合が同程度であるのはその証左と考えられる。

今回検討した骨材においては、海外において提案されている下限値を概ねのものが上回る結果となった。他方、膨張初期については若干下回るものもあった。我が国の反応性骨材は反応速度が諸外国のものより大きいことと、セメントの水和速度等の影響などによって膨張初期の挙動に相違が生じたものと考えられる。

実構造物における ASR 膨張の発生は本試験期間よりも長期間を要するため、水和反応がほぼ終息した後に生じるものと考えられる。同一配合や同一水セメント比における圧縮強度のばらつき、および実環境における膨張開始時期などを考慮すると、骨材種類が膨張に伴う圧縮強度に与える影響は顕著でないものと考えられる。したがって、骨材種類にかかわらず、同程度の水セメント比のコンクリートについては、今回得られた膨張量と強度比の関係を基にして設計における下限値を設定することが可能であると考えられる。

### 3.3 静弾性係数

各種骨材の膨張量が静弾性係数に与える影響を図-5に示す。安山岩のものは、膨張初期において膨張に伴う急激な静弾性係数の低下を示し、それ以降は緩やかな低下を示した。既往の検討結果と同様の傾向が得られた。一方、チャートのものでは、膨張初期における弾性係数の低下は、安山岩のものほど顕著ではなかった。また、その後の弾性係数の低下も他のものより若干小さい傾向にあった。この原因として、膨張速度による影響は小さいとすると、反応タイプが他のものと異なり、ひび割れ性状の相違や膨張開始時期の影響などが考えられる。既往の検討<sup>7)</sup>で、同様の反応タイプと考えられる膨張開始時期および速度の遅い骨材のものは、膨張初期においてマトリックスのひび割れが他のものと異なり、膨張初期段階では、マトリックスに生じるひび割れの特徴として、他のものより微細なひび割れのネットワークが形成される一方、上記のものより大きなひび割れの数は少ないとされている。今回、膨張速度は他のものと同程度であるため、反応タイプが異なることで、母材マトリックスのひび割れ性状が異なり、初期およびその後の弾性係数低下が他のものより小さくなったと考えられる。

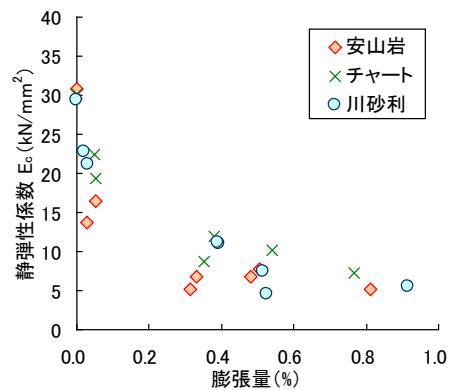


図-5 静弾性係数に与える影響

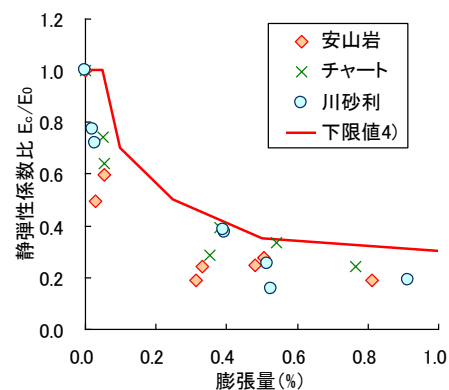


図-6 静弾性係数比に与える影響

各種骨材の膨張量が静弾性係数比に与える影響を図-6に示す。圧縮強度比と同様に、海外で提案されている下限値と比較すると、膨張初期における静弾性係数比の低下が顕著であり、概ね下限値を下回る結果となった。この理由としては、より詳細な検討が必要であるものの我が国の反応性骨材は膨張速度が大きいこと、開始時期が早いこと、またセメントの水和反応速度が速いことなどが考えられる。したがって、これらの要因を考慮した実験条件においては、この傾向は緩和される可能性もある。

しかしながら、実構造物における採取コアの圧縮強度と静弾性係数の関係においても、強度低下よりも静弾性係数の低下が顕著であるとされており、我が国の反応性骨材の場合には、膨張の発生および進展に伴い、静弾性係数が大きく低下する可能性が高いものと考えられる。

### 3.4 ポアソン比

各種骨材の膨張量がポアソン比に与える影響を図-7および図-8に示す。弾性領域と考えられる最大応力の33%時点、および破壊時付近の応力時点として最大応力の90%時点のポアソン比を求めた。なお、コンクリートの標準的なポアソン比は0.14から0.20である。

最大応力の33%時点においては、ばらつきは大きいものの、膨張量0.5%までは概ね同程度、それ以降は膨張量

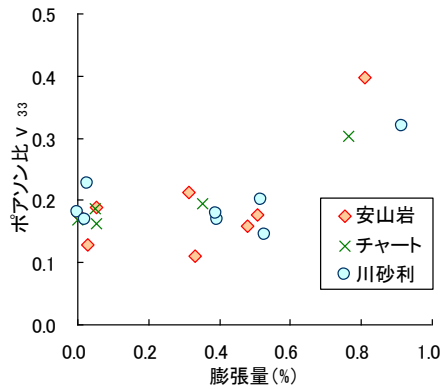


図-7 ポアソン比（応力 33%時）に与える影響

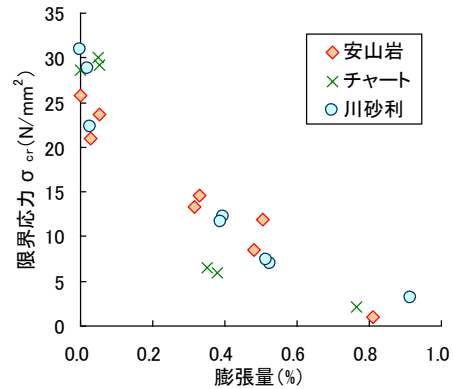


図-9 限界応力に与える影響

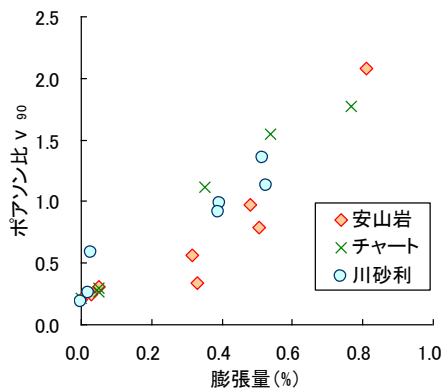


図-8 ポアソン比（応力 90%時）に与える影響

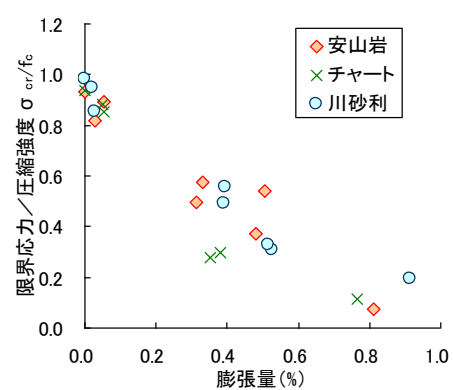


図-10 限界応力／圧縮強度に与える影響

に伴いポアソン比が大きくなる傾向を示した。過大な膨張量を生じた場合には、より早期に変形抵抗性が低下するものと考えられる。既往の研究<sup>2)</sup>では、膨張の増加に対して概ね一定とされている。

最大応力の90%時点においては、膨張が大きいものほど、ポアソン比が大きくなった。この時点においては、通常のコンクリートよりも軸直角方向に大きな変形が生じるものと考えられる。

既往の研究<sup>2),3)</sup>で指摘されている同様に、ASR劣化による内部に生じたひび割れがコンクリートの内部組織を弛緩させ、その影響は最大応力付近で顕著となるとともに、膨張が大きいものほど組織の弛緩も大きいものと考えられる。したがって、膨張量が多いものほどコンクリートの変形抵抗性は小さくなるものと考えられる。なお、ばらつきが大きいので、骨材種類の影響は明確とはならなかった。

### 3.5 限界応力

各種骨材の膨張量が限界応力に与える影響を図-9に示す。体積ひずみが増加から減少にかわる際の応力を限界応力として求めた。限界応力は、コンクリート中のマイクロクラックが相互に連結し、連続クラックが形成される状態とされ、コンクリートの真の圧縮強度と称されることもある<sup>8)</sup>。つまり、限界応力においては実質的な

圧縮破壊が開始されるものと考えられる。

骨材種類にかかわらず、膨張量が多いものほど限界応力は小さくなった。ASR膨張が大きいものほど、内部に多くのASRによるひび割れが存在しており、膨張が大きいものほどひび割れの量も増加するため、より早期にそれらの現象が現れたものと考えられる。

限界応力は、コンクリートの水セメント比、細骨材および粗骨材の容積率などに影響を受ける。これらの影響について詳細な検討を行った既往の研究<sup>8)</sup>において提案されている限界応力／圧縮強度比の算定式を用いると、今回の配合においてはこの比は0.87と推定される。膨張によって圧縮強度が低下するため、これらの影響を検討することとし、限界応力／圧縮強度比を求めた。膨張量が限界応力／圧縮強度に与える影響を図-10に示す。

膨張が大きいものほど限界応力／圧縮強度は小さくなった。膨張による圧縮強度の低下よりも大きな限界応力の低下が生じるものと考えられる。すなわち、通常のコンクリート同様に限界応力に達した時点破壊の開始と考えられると、膨張量が多いものほど低い応力レベルで破壊が開始することとなる。他方、膨張が大きいものほど限界応力から圧縮強度までの応力増分は大きくなった。本来であれば、限界応力以降は速やかに最終的な破壊に至り、圧縮強度までの応力増分はそれほど大きく



はない。この現象の詳細な説明には更なる検討が必要であるものの、限界応力においてひび割れの連結が生じているとすると、その後の荷重増分に伴う巨視的な破壊に抵抗するものとして ASR ゲルの存在が推察される。ゲルの生成、ゲルの膨張によってマトリックスおよび骨材界面にひび割れが発生するものの、これらはゲルで充填されるものもあり、充填されたひび割れ部分は力学的な抵抗を有するものと推察される。

### 3.6 最大応力時のひずみ

各種骨材の膨張量が最大応力時の縦および横ひずみに与える影響を図-11 に示す。最大応力時にはコンクリートの変形やひび割れの影響などによってひずみゲージによる計測が困難となったものもあった。また、過大膨張段階のものではその影響が顕著であった。そのため、縦ひずみは変位より算出し、横ひずみは、最大応力時またはその付近で最大のひずみの値とした。

骨材種類にかかわらず、膨張量が大きいものほど最大応力時のひずみは大きくなった。ASR 膨張が大きいものほど、最大荷重時の変形は大きくなるものと考えられる。その増加傾向は、チャートのものは、他のものより若干小さい傾向を示した。チャートのものは、弾性係数の低下傾向も他のものより小さかった。骨材の反応タイプが異なることによって膨張開始時期およびひび割れの性状の影響が原因として考えられる。詳細なメカニズムについては、セメントの水和反応の進行などの影響とともに今後の更なる検討が必要である。なお、弾性係数における結果と併せて、骨材の反応タイプは変形特性に影響を与えることが明らかとなった。

### 4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 骨材種類にかかわらず、膨張に伴う各種の力学的パラメータの変化の傾向は既往の研究と概ね一致した。
- (2) 骨材種類が膨張に伴う圧縮強度に与える影響は顕著ではなかった。検討したものと同程度の水セメント比であれば、本実験の結果から設計における下限値を設定することが可能である。
- (3) 骨材の反応タイプが膨張に伴う変形特性に与える影響が認められ、微細組織の変化が原因であると推察された。
- (4) 骨材の反応タイプによって影響される力学的パラメータは、弾性係数と最大応力時のひずみであった。

### 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

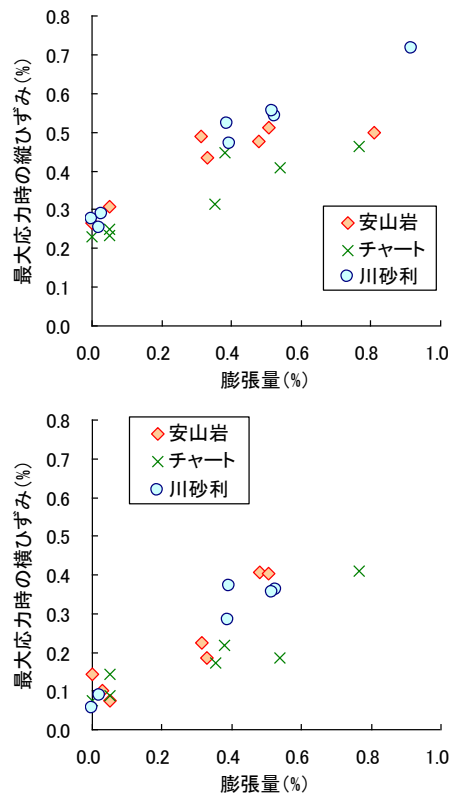


図-11 最大応力時の各ひずみに与える影響

- 2) 東原直, 久保善司, 上田隆雄, 野村倫一: 過大な ASR 劣化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 回年次学術講演会講演概要集, 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特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1691-1696, 2006
- 4) The Institution of Structural Engineering : Structural effect of alkali silica reaction, pp.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) 小林一輔, 白木亮司, 森弥広: ASR を生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する 2, 3 の考察, 土木学会論文集, 第 426 号/V-14, pp.91-100, 1991.2
- 7) G.Giaccio, R.Zerbino, J.M.Ponce, O.R.Batic: Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research 38, pp.993-1004, 2008
- 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) 大代武志, 平野貴宣, 鳥居和之: 富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1251-1256, 2007