

多面的アプローチによる RC 構造物の  
ASR 劣化への包括的対策

2018 年 3 月

高木 雄介



# 多面的アプローチによる RC 構造物の ASR 劣化への包括的対策

## 目次

### 要旨

	頁
第 1 章 序論	1
1.1 ASR の歴史的経緯	1
1.2 研究の目的	2
1.3 本論文の構成	2
第 2 章 ASR の現状と既往の研究	4
2.1 ASR によるコンクリートの劣化	4
2.1.1 ASR 劣化メカニズム	4
2.1.2 ASR に対する現状の対策	4
2.2 既往の研究	5
2.2.1 FA を用いた ASR 抑制研究	5
2.2.2 亜硝酸リチウム内部圧入工法	7
2.2.3 後施工型鉄筋差込補修	10
2.2.4 ASR ひび割れの再現	10
第 3 章 ASR の発生を抑制する技術	12
3.1 本章の目的	12
3.2 FA 原粉を用いた ASR の発生抑制	12
3.2.1 使用材料	12
3.2.2 供試体概要および配合	14
3.2.3 膨張量測定	17
3.2.4 圧縮強度試験	19
3.2.5 塩化物イオン浸透試験	19
3.2.6 凍結融解試験	20
3.3 実験結果および考察	21
3.3.1 ASR 抑制	21
3.3.2 圧縮強度とヤング係数	25
3.3.3 塩化物イオン浸透抵抗性	30
3.3.4 耐凍害性	34
3.4 まとめ	39
第 4 章 ASR の進行を抑制する技術	42
4.1 本章の目的	42
4.2 亜硝酸リチウム内部圧入による ASR 抑制研究	42

4.2.1	供試体概要及び配合	42
4.2.2	リチウム圧入量の算定	42
4.2.3	リチウム事前混合供試体の概要	43
4.2.4	リチウム圧入供試体の概要	44
4.2.5	リチウム圧入手順	44
4.2.6	膨張量測定	46
4.2.7	亜硝酸リチウムの浸透状況の確認試験	46
4.3	実験結果および考察	48
4.3.1	リチウム事前混合の効果	48
4.3.2	リチウム圧入の効果	50
4.3.3	圧入した亜硝酸リチウムの浸透状況	52
4.4	まとめ	56
第5章	ASRを受けた構造物を補修する技術	58
5.1	本章の目的	58
5.1.1	ASRによるRC部材のせん断耐力の低下およびその補修に関するモデル実験	58
5.1.2	亜硝酸リチウム圧入によって補修したASR部材の耐荷性能に関する実験的研究	58
5.2	ASRによるRC部材のせん断耐力の低下およびその補修に関するモデル実験	59
5.2.1	使用材料および配合	59
5.2.2	供試体概要	59
5.2.3	ASR促進	62
5.2.4	膨張量測定	62
5.2.5	補修方法	63
5.2.6	曲げ載荷試験	64
5.2.7	実験結果および考察	65
5.2.8	まとめ	74
5.3	亜硝酸リチウム圧入によって補修したASR部材の耐荷性能に関する実験的研究	75
5.3.1	使用材料および配合	75
5.3.2	円柱供試体	77
5.3.3	はり供試体	78
5.3.4	実験結果および考察	80
5.3.5	まとめ	92
第6章	ASRひび割れを再現するモデル試験	93
6.1	本章の目的	93
6.1.1	ASR再現性の評価方法	93
6.2	使用材料および配合	94
6.2.1	静的破砕剤	94
6.2.2	膨張性模擬骨材	94

6.2.3	ブロック供試体概要	96
6.2.4	樹脂注入	96
6.3	ASR ひび割れ再現結果	98
6.3.1	膨張量, ひび割れ幅およびひび割れ形状による比較	98
6.3.2	樹脂注入状況による比較	100
6.3.3	強度試験による比較	101
6.3.4	X線 CT スキャン画像による比較	102
6.4	膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR の ASR 再現性	104
第 7 章	結論	105
7.1	本研究により得られた結論	105
7.2	ASR に対する維持管理シナリオ	109

謝辞

# 第1章 序論

## 1.1 ASR の歴史的経緯

アルカリ骨材反応（以下、ASR とする）によるコンクリート構造物の劣化は、1930 年代にアメリカ合衆国において初めて報告された。その後、1940 年に Stanton<sup>1)</sup>が ASR の存在を発表し、米国では橋脚、海岸擁壁をはじめとした様々なコンクリート構造物において ASR による劣化が確認された。それに伴い、各種の検討が行われ、ASR に関する試験法が確立されることとなった<sup>2), 3)</sup>。

わが国日本においても、1983 年「NHK 特集：コンクリートクライシス」の報道を契機にアルカリ骨材反応が重大事であると認識された。これまで、コンクリート構造物はメンテナンスフリーの構造物として重宝されてきたが、マスコミに大々的に取り上げられ、コンクリート関係者のみならず、建設業界にも大きな衝撃を与えた<sup>4)</sup>。

日本では、1980 年頃の阪神地区での ASR の劣化事例が発見された後、北陸、中国、四国、九州などの様々な地域で ASR 劣化事例が報告された。これらを契機として、日本コンクリート工学協会（当時）において 1983－1987 年にアルカリ骨材反応調査委員会<sup>5)</sup>が開催され、1989 年には建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果）報告書」<sup>6)</sup>が発刊された。骨材の試験法、ASR 抑制対策と共に、ASR 劣化構造物の調査、診断、補修方法などが提案され、ASR への対策について一定の効果をあげることができた。その後、2006－2007 年に「作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会」が活動を行い、ASR の膨張機構が整理され、JIS の抑制対策には限界があり、より確実な抑制には実構造物の ASR 診断による現状を理解することが重要であるとしてまとめた。

ASR は、骨材中の特定の鉱物とコンクリート中の細孔溶液中の Na、K といったアルカリとの間で化学反応が生じ、この反応によってコンクリート内部で膨張が生じ、ひび割れが生じる劣化であり、コンクリートの強度や弾性率の低下が生じることが特徴である。ASR が生じた構造物に共通してみられる特徴は、コンクリート表面に発生するひび割れである。亀甲状のひび割れと表現されることが多く、ひび割れに方向性がないのが特徴である。また、アルカリシリカゲルと呼ばれる白色のゲル状の物質がひび割れから滲出している場合もある。しかし、軸方向鉄筋や PC 鋼材を用いた鉄筋コンクリート構造物では、ASR による膨張が鉄筋および鋼材に拘束され、軸方向鉄筋や PC 鋼材に沿った方向性のあるひび割れが発生することが多い。ASR によって過大な膨張量が発生しひび割れが確認された構造物には、コンクリートの強度が低下するのみならず、鉄筋曲げ加工部や圧接部周辺で鉄筋が破断する例も報告されている。また、ASR が生じると、凍害や化学的侵食に対する抵抗性が低下し、コンクリート中の鋼材が腐食する可能性が増大することが知られている。

多くの実験の報告から、RC 部材においては鉄筋によって拘束されることにより導入されるケミカルプレストレスの影響により、耐荷力は必ずしも低下しないことが確認された。そこで、ASR の劣化因子のひとつである水に着目し、表面被覆などを用いて外部からの水分供給を遮断する補修が多く施された。しかし、このような ASR 抑制対策が施された構造物においても環境条件によっては、ASR 劣化後の補修した構造物において再劣化する事例が報告されるなど、現在に至るまで ASR を完全に抑制する方法は明確になっていない。

ASR の進行を完全に停止させることは困難な為、構造物の重要性、部材の要求性能、環境条件や

ASR の進行度合いによって、ASR の維持管理に対するシナリオをどのように構築していくのが重要となっている。

## 1.2 研究の目的

ASR 劣化は構造物の重要性を考慮し、構造物の設計、建設段階から維持管理段階までの構造物の一生を、総合的に検討する必要がある。そのため、施工前からの ASR 対策や、劣化が顕在化した後の対策、その中でも、完全に ASR を抑制する必要があるのか、補修のみで対応をするのかを考える必要がある。

そこで本研究では、ASR 劣化したコンクリートに対して、以下の項目のように、ASR の発生前の段階から膨張が進展した後の段階までの対策を包括的に行うこととした。

- ・ ASR の発生を抑制する技術
- ・ ASR の進行を抑制する技術
- ・ ASR を受けた構造物を補修する技術
- ・ ASR を再現するモデル試験

それぞれの劣化段階での ASR 対策技術を確立することにより、ASR の維持管理シナリオの中での有効な選択肢を提供することができると考えられる。

## 1.3 本論文の構成

本論文は、ASR の劣化前から進展後までの対策を行い、ASR に関する一連の研究をまとめたものである。

本論文は全 7 章で構成した。

第 1 章「序論」では、ASR の歴史的経緯や本研究の背景と目的、構成について述べた。

第 2 章「ASR の現状と既往の研究」では、ASR の劣化機構、補修対策、それぞれの対策についての既往の研究について取りまとめた。

第 3 章「ASR の発生を抑制する技術」では、設計段階から ASR の発生を抑制するためにできる対策として、フライアッシュを用いた実験を行った。ASR をフライアッシュ（以下、FA）により抑制することを目的とし、JIS に適合するものだけでなく、FA 原粉による抑制効果を明らかにすることを目指した。2 種類の反応性骨材を用いて ASR を発生させ、その上で FA のうち主に流通している JIS II 種 FA に加え、FA 原粉も使用し、長期的な実験を行うことで比較・検討し、FA 原粉利用の有効性について考察することを目的とした。

第 4 章「ASR の進行を抑制する技術」では、亜硝酸リチウムの内部圧入を行い、ASR の進行を抑制させ、どの程度の劣化の段階で圧入を行うことが効果的か検討を行った。リチウム圧入による補修は、

一般的に ASR がある程度進行した膨張量 1500~2000 $\mu$  程度で施されることが多い。その為、早期に圧入した場合の知見が少なく未解明な部分も存在する。

本章では、反応性骨材を使用した ASR 供試体を用いて、圧入を行う時期、圧入量をそれぞれ 3 段階に設定し、亜硝酸リチウム圧入を実施した。圧入を行う時期については、ひび割れが発生する前の段階、ひび割れが目視で確認できた段階（膨張量 400 $\mu$  程度）、一般的に圧入補修が適用される段階（膨張量 2000 $\mu$  程度）とし、比較検討を行った。また、浸透範囲を確認する為、試薬 TDI（トルエン・ジ・イソシアナート）を用いて呈色反応試験を行った。

第 5 章「ASR を受けた構造物を補修する技術」では、ASR 劣化による主鉄筋やせん断補強筋の破断が、RC 部材の耐荷性能に与える影響を明らかにし、劣化した供試体の耐力を回復させるための補修工法を検討することを目的とした。そこで、反応性・非反応性の骨材を用い、主鉄筋の曲げ定着部が破断している場合と破断していない場合、せん断補強筋が破断している場合を模擬した供試体を作製した。反応性骨材を使用した供試体を高温多湿環境下に置くことで意図的に ASR を発生させ、劣化した供試体に対して後施工型鉄筋によるせん断補強を行い、補修による耐荷性能の検討を行った。

第 6 章「ASR を再現するモデル試験」では、直接的な ASR 抑制対策に関する研究ではなく、ASR に関する研究を今後補助する題材になりえる研究を行った。短期間で ASR ひび割れの再現を図るため、膨張材の一種である静的破砕剤をひずみ硬化型セメント系複合材料（以下 SHCC）に添加することで膨張性を有す模擬骨材を作製した。膨張性を有す模擬骨材をコンクリート中の粗骨材に置換することで、短期的に実際の ASR 劣化によるひび割れ発生メカニズムを再現できると考えた。

第 7 章「結論」では、各章で得られた結論をまとめ、ASR 劣化への包括的対策の維持管理シナリオを提案した。

## 参考文献

- 1) Stanton, T. E. : Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, Proceedings of ASCE, Vol.66, pp.1781-1811, 1940.
- 2) ASTM C227-50 : Standard Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates Combinations (Mortar Bar Method), ASTM, 1950.
- 3) ASTM C289-52 : Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), ASTM, 1952.
- 4) 例えば、: 新年号特別企画/コンクリート構造物の寿命をどう考えるか、コンクリート工学, Vol.22, No.1, 1984.1
- 5) (社)日本コンクリート工学協会：アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書，1989
- 6) (財)土木技術センター：建設総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果）報告書」，1989

## 第 2 章 ASR の現状と既往の研究

### 2.1 ASR によるコンクリートの劣化

#### 2.1.1 ASR 劣化メカニズム

コンクリートは高いアルカリ性を有している。しかし、アルカリ分を多く含んだセメントや海砂などを使用することにより、コンクリート中のアルカリ濃度が高まると、高濃度のアルカリ溶液が骨材中に浸透し、非晶質の  $\text{SiO}_2$  を溶解し、水ガラスを生成する。この生成された水ガラスが骨材表面に溶出し、カルシウムイオンと接触することにより水ガラスがゲル化する。骨材内部での水ガラスの生成と表面でのゲル化を繰り返すことによりアルカリシリカゲルの層が形成される。アルカリシリカゲルは強力な吸水膨張性をもっており、これが水を吸水することにより膨張圧を生じさせる。このアルカリシリカゲルの膨張によってコンクリート内の組織に内部応力が発生し、反応性骨材周囲のセメントペーストを破壊する。時間の経過に伴って ASR が進行すると、反応性骨材の周囲に発生した微細なひび割れが進展し、やがてコンクリート構造物の表面に巨視的なひび割れが生じる。これが ASR によるコンクリートの劣化メカニズムである。

アルカリシリカゲルの生成は、全ての種類の骨材で発生するのではなく、ある種の不安定な鉱物に見られ、代表的なものとしてクリストバライト、トリジマイト、カルセドニー、隠微晶質石英、オパールや火山ガラスなどが挙げられる。これらは主に、火山岩が起源の骨材（安山岩、流紋岩など）や堆積岩が起源の骨材（チャート、砂岩、頁岩など）などが挙げられる<sup>1)</sup>

#### 2.1.2 ASR に対する現状の対策

セメント中のアルカリ性に寄与する成分はカルシウムであるが、それ以外にもナトリウムやカリウムなどが若干含まれており、これらの含有量は  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  の形で表され、セメント中の質量比率でアルカリ量として表される。一般的にセメント中のアルカリ量というのは次式で示される等価アルカリ量で示される。

$$[\text{等価アルカリ量}] = \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$$

また、現在日本では ASR 抑制対策として、3 つの対策があり、土木構造物については i)、ii) を優先している<sup>2)</sup>。

##### i) コンクリート中のアルカリ総量の抑制

アルカリ量が表示されたポルトランドセメント等を使用し、コンクリート  $1\text{m}^3$  に含まれるアルカリ総量を  $\text{Na}_2\text{O}$  換算（以下、等価アルカリ量）で  $3.0\text{kg}$  以下にする。

##### ii) 抑制効果のある混合セメント等の使用

JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント[B 種または C 種]あるいは JIS R 5213 フライアッシュセメントに適合するフライアッシュセメント[B 種または C 種]、もしくは混和材をポルトランドセメントに混入した結合材でアルカリ骨材反応抑制効果の確認されたものを使用する。

##### iii) 安全と認められる骨材の使用

骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法またはモルタルバー法）の結果で無害と確認された骨材を使用する。

## 2.2 既往の研究

### 2.2.1 FA を用いた ASR 抑制研究

コンクリート内部のアルカリ金属と反応性の鉱物が反応することでアルカリシリカゲルが生成され、それが吸水膨張することでひび割れが発生する。これが ASR のメカニズムであるが、石炭灰の一種であるフライアッシュ（以下、FA）をコンクリートに混和すると、ASR を抑制することが既往の研究<sup>3) 4)</sup>より知られている。

図-2.1 にフライアッシュ混和による ASR 抑制効果について示す<sup>4)</sup>。図-2.1 ではフライアッシュをセメントの内割置換とし、フライアッシュのアルカリ量を考慮せず、セメントの全アルカリ量は 1.2% となるように設定した。使用するセメントの内、JIS I 種フライアッシュ（FA1）を 10～20%，JIS II 種フライアッシュ（FA2）を 15～25% 置換した。なお、比較用にフライアッシュ未置換の結果も同時に示している。フライアッシュ置換の結果、膨張率が大幅に低減していることが分かる。フライアッシュの種類及び置換率を変化させても膨張率にあまり差は見られず FA1 については低置換率である 10%，FA2 では 15% でも膨張率低減の効果が顕著に見られる。

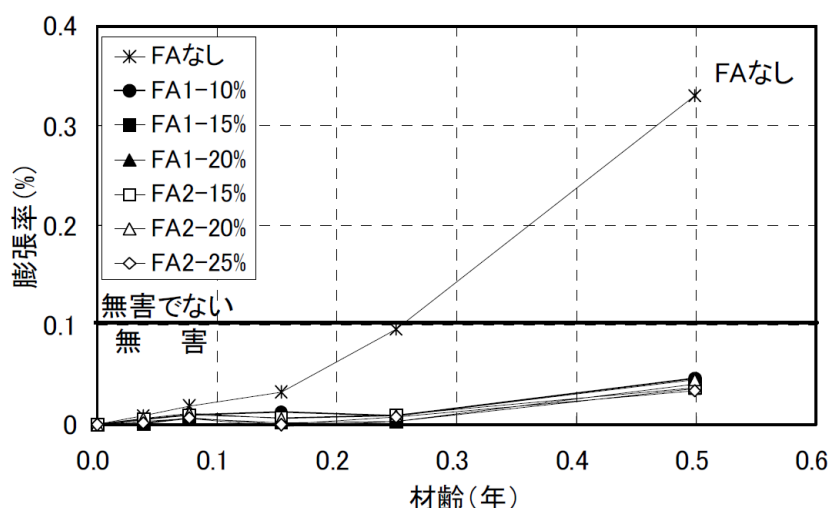
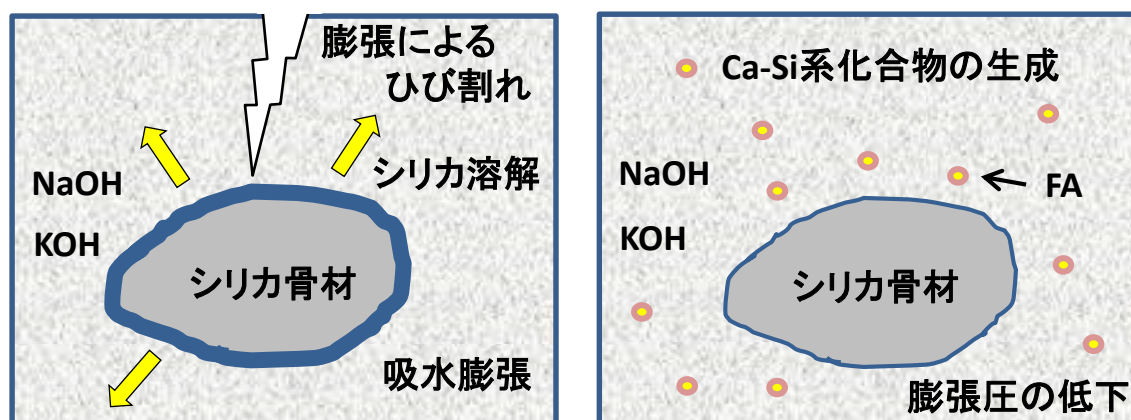


図-2.1 フライアッシュ混和による ASR 抑制効果<sup>4)</sup>

次に、図-2.2 にフライアッシュ混和による ASR 抑制メカニズムのイメージ図を示す。フライアッシュを混和した場合、フライアッシュから溶出したアルカリが骨材近傍のアルカリシリカゲルに取り込まれ、ゲルのアルカリ量を高める。フライアッシュ混合による高アルカリのゲルの形成は、ゲルの粘性を低下させ、ゲルの膨張圧力を低下させる効果をもたらすため、ASR 抑制効果が確認される<sup>5)</sup>。また、コンクリート中の  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{OH}^-$  は前述の通り ASR を誘発するイオンであり、 $\text{Ca}^{2+}$  は ASR を助長するイオンと考えられている。ポゾラン反応により、フライアッシュ粒子周辺に  $\text{Ca-Si}$  系化合物が生成されることで  $\text{Ca}$ 、および  $\text{OH}^-$  濃度が低下し、細孔中の pH の低下がセメントの可溶性の  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  の濃度を低下させる。これらの反応系がフライアッシュによる ASR の抑制メカニズムの一つであると考えられる。



(a) FA 無混和の場合

(b) FA 混和の場合

図-2.2 フライアッシュ混和による ASR 抑制メカニズム（イメージ図）

標準的な品質である JIS II 種フライアッシュを使用したコンクリートの特長として ASR 抑制効果の他にも既往の研究より次のような項目が挙げられる。

#### i) 長期強度の増進

ポゾラン反応が長期間継続するため、セメントだけの場合よりも長期強度が増進し、耐久性に富んだ構造物が建設できる。また、ポゾラン反応は養生温度を上昇させることで著しく増進し、ポゾラン特有の効果がより発揮するため、セメントの使用量の節減をはかることが可能である。

#### ii) 乾燥収縮の減少

フライアッシュの代替率が増加する程セメント量が減少するため、硬化後の収縮率が小さくなり、ひび割れ現象が起りにくく堅牢な構造物となる。図-2.3 に乾燥収縮の減少について示す。

#### iii) 水和熱の減少

水和熱による温度上昇は代替率が増加するほど減少するので、マスコンクリート工事、特にダム工事や原子炉格納容器等には極めて有効である。マスコンクリートの場合、フライアッシュを用いないものに比べて 7 日材令で 6℃ 程度温度上昇が少なくなる。図-2.4 に水和熱の減少について示す。

#### iv) 水密性の向上

セメント中の遊離石灰とフライアッシュのシリカやアルミナが結合することで不溶性の固い物質を作り、コンクリートの組織を緻密にすることで水密性を増し、時間経過とともに著しく効果を発揮する。

#### v) 化学抵抗性の向上

ポゾラン反応の際に生成されるけい酸カルシウム水和物が組織を緻密にするとともに、反応によって遊離した不安定な水酸化カルシウムがフライアッシュの成分と結合するので、硫酸塩、海水、薬液等に対して顕著な効果を発揮する。

#### vi) ワークビリティーの向上および単位水量の減少

フライアッシュは微細な球形をしているため、混和すると流動性が著しく改善され、コンクリートの打設が効率的に行えるようワークビリティーが向上する。また、同一スランプを得るための所要水量がフライアッシュの代替率に比例して減少する。近年ではコンクリート構造物の高性能化に伴い、この性質を利用して高流動コンクリートなどにも用いられる。

### vii) 初期強度の発現が遅い

フライアッシュで置換するため、初期に強度発現するセメント量が減少しており初期強度の発現が遅くなる。このためフライアッシュの混合率が高いほど初期強度が低下する。

### viii) 連行空気の阻害

フライアッシュに含まれる未燃カーボン量が AE 剤を吸着してしまうため、この量の多少により空気量の変動する。多い場合には所用の空気量を得るために多量の AE 剤を必要とする場合がある。近年では対応できる「フライアッシュ用 AE 剤」も開発されている。

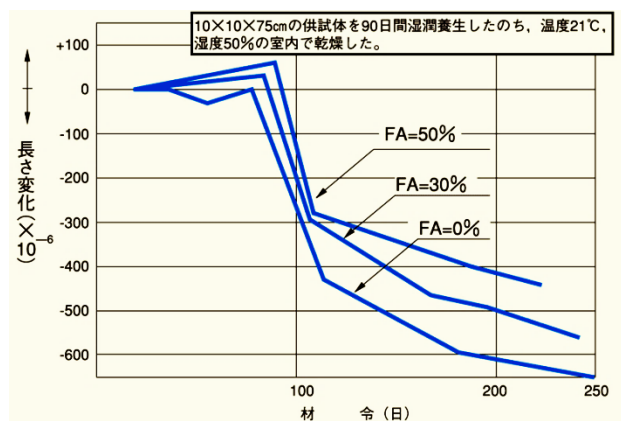


図-2.3 乾燥収縮の減少<sup>6)</sup>

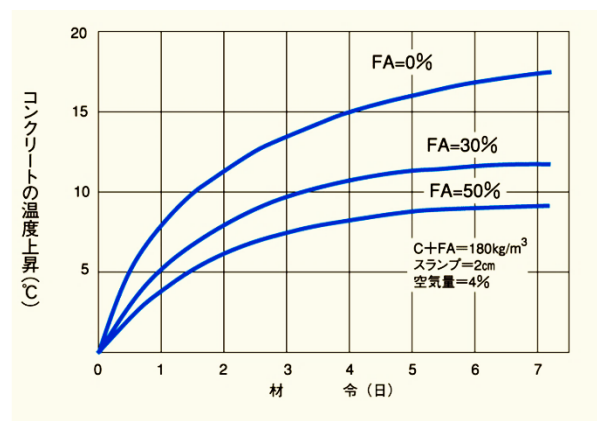


図-2.4 水和熱の減少<sup>6)</sup>

## 2.2.2 亜硝酸リチウム内部圧入工法

図-2.5 にリチウムイオンによる ASR 抑制メカニズムのイメージ図を示す。コンクリート内部において、 $\text{Na}^+$ や $\text{K}^+$ といったアルカリ金属イオンと反応性骨材内のシリカ成分が化学反応を起こし、吸水膨張性をするアルカリシリカゲルが生成される。そのゲルが吸水膨張し、膨張圧によりコンクリートにひび割れが生じ、そのひび割れからまた新たな水分が供給され、以後の膨張、ひび割れが助長されコンクリートの劣化が進行する。しかし、同じアルカリ金属イオンであってもリチウムイオンがコンクリート内部に存在すると、アルカリシリカゲル中の $\text{Na}^+$ や $\text{K}^+$ とリチウムイオンとがイオン交換することにより、反応性骨材の周囲にシリカ被膜が形成され、シリカの溶解を防ぐことができ、また、このシリカ被膜は吸水膨張を起こさない。

リチウムイオンを用いた ASR 補修工法には、塗布工法、ひび割れ注入工法、電気化学的浸透工法および内部圧入工法がある。塗布工法とひび割れ注入工法は併用して使用される場合が多いが、リチウムイオンの供給範囲がコンクリートの表層部およびひび割れ周辺部に限定されるという問題点がある。そこで、コンクリート表面に削孔を行い、そこから亜硝酸リチウムを加圧注入して内部に浸透させることにより、コンクリート内部の広範囲にリチウムを供給することが可能であるリチウム内部圧入工法が開発された。

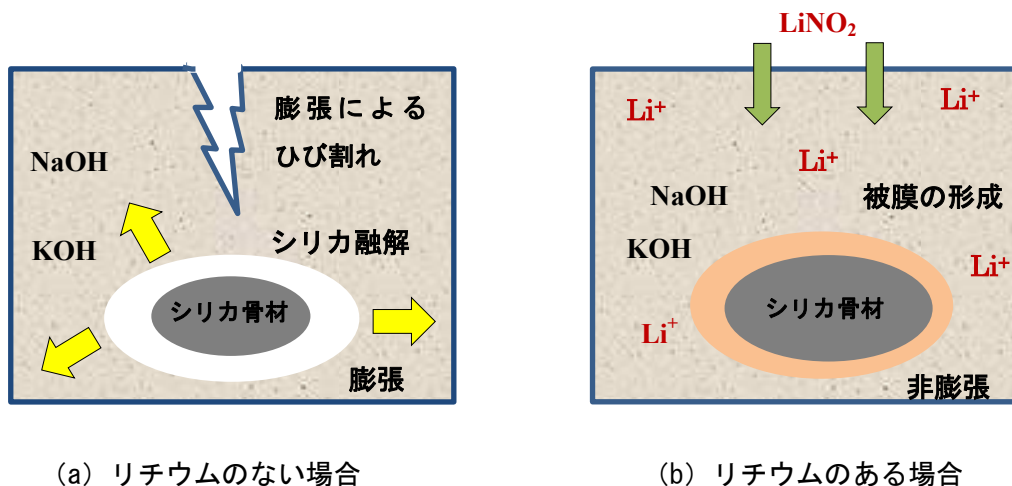


図-2.5 リチウムのASR抑制メカニズム（イメージ図）

### i) リチウム圧入工法について<sup>7)</sup>

江良はASRにより劣化したコンクリート構造物の補修工法として近年注目されてきている。リチウムイオン内部圧入工法について、その技術の確立を目的とした研究を行った。ここでは、リチウムイオン内部圧入およびリチウムイオン事前混入によるASR抑制効果について示す。反応性骨材を用いたASRコンクリート供試体を作製し、小型（円柱）供試体において練り混ぜ時に亜硝酸リチウムを事前混合した場合と、硬化後にASR劣化が顕在化したコンクリートに内部圧入した場合を設定した。促進環境は恒温恒湿室（温度40℃、湿度95%以上）とした。内部圧入は供試体の膨張量が1500 $\mu$ （促進188日目）に達した時点で行った。

小型供試体の膨張量変化を図-2.6に示す。亜硝酸リチウムを事前混入した場合、促進開始から670日経過した時点でいずれのLi/Naモル比においても膨張傾向は表れておらず、亜硝酸リチウムを事前混合したことによりASR抑制効果があったと言える。また、内部圧入に関しては、Li/Naモル比0.6、0.8の場合において圧入を境に膨張が収束しており、内部圧入によりASR膨張が抑制されていることが分かった。しかしモル比0.4では圧入後、一旦は膨張が収束されたが、409日目から再び膨張し始め、圧入直前から1500 $\mu$ 程度の膨張が進行した。このことから、反応性骨材、アルカリ量、促進環境が同一条件のコンクリートであっても、亜硝酸リチウムの供給方法を変えることによってASR膨張を抑制するための必要量が異なることが分かった。

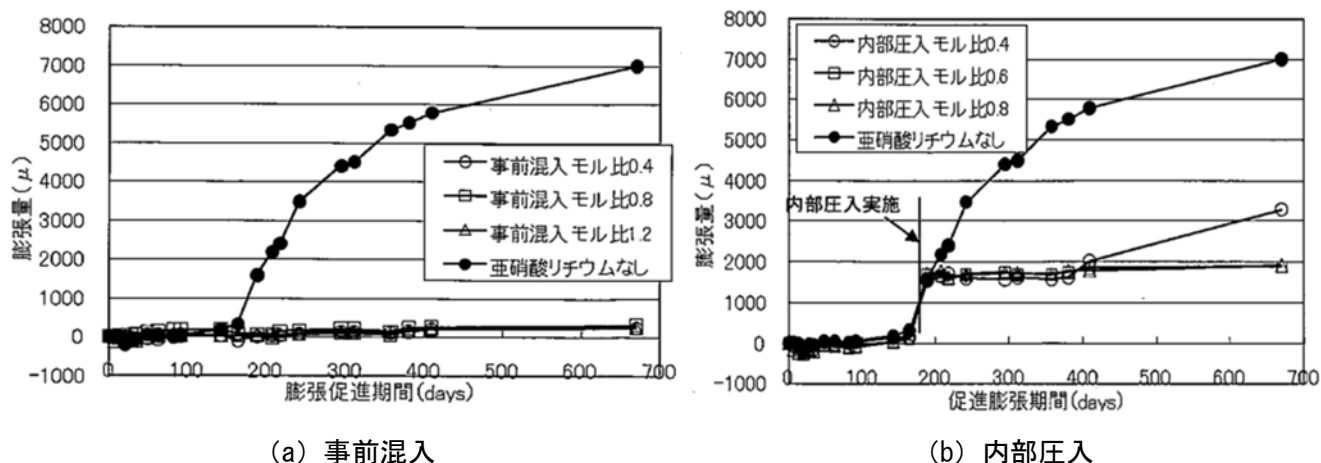


図-2.6 リチウムによる小型供試体の膨張量変化<sup>7)</sup>

## ii) 施工手順<sup>8)</sup>

本研究における、はり供試体の亜硝酸リチウム内部圧入工法の手順および施工時の状況(写真-2.1)を以下に示す。

### ① 表面漏出防止工

リチウム圧入時に、リチウムがコンクリート表面から漏れ出さないようにするための工程。大きなひび割れ（幅 0.2mm 以上）にはマーキングを行い、その位置から水を注入し、ひび割れ注入材が円滑に注入できるようにコンクリート内のひび割れを濡らし、その後、同位置から超微粒子セメント系ひび割れ注入材を注入した。この工程を、先に供試体上面および側面から行い、その後、供試体下面からひび割れ注入を行った。さらに、供試体全面をポリマーセメントモルタルもしくはエポキシ樹脂により厚さ約 2mm で被覆し、微細なひび割れについても漏出防止処理を行った。

### ② 削孔工

鉄筋を回避した位置に削孔を行う箇所を設け、コアドリルにて、直径 10mm、深さ 100mm の圧入孔の掘削を行った。

### ③ 圧入装置の設置

加圧パッカー、リチウム供給用カプセル、耐圧ホース、分配器、加圧注入機を配置する。

### ④ 加圧注入工

加圧注入機の注入圧力を 5MPa に設定し、算出した圧入時間圧力を加え続け、コンクリート内にリチウムを供給する。



(a) ひび割れ注入



(b) 表面漏出防止材被覆



(c) 圧入孔の削孔



(d) リチウム加圧注入

写真-2.1 亜硝酸リチウム内部圧入施工状況

円柱供試体については、全面をポリマーセメントモルタルにより厚さ 2mm で被覆し、硬化後に圧入孔の削孔および加圧注入を実施した。

通常であれば加圧注入完了後に、圧入孔を無収縮グラウト材にて充填する必要がある。しかし、本研究ではリチウム圧入後に再度 ASR 促進を行い、リチウムによる膨張抑制効果を評価するため、圧入孔をそのままにし、ASR 促進時にコンクリート内に水の供給を行えるようにした。また、5 章の梁供試体では、載荷試験直前にグラウト材の充填を行うこととした。

### 2.2.3 後施工型鉄筋差込補修

#### 後施工型鉄筋による補修について<sup>9)</sup>

羽田野らは後施工型の鉄筋を用いて、一方向からの施工で、新旧打継面でのずれせん断破壊を防止するとともに、部材のせん断補強を行う施工法の開発を目的とした研究を行った。ここでは、後施工型鉄筋によるせん断補強効果に関する研究結果を示す（※この研究では ASR 劣化は生じさせていない）。図-2.7 に供試体形状を示す。試験体 A3, A4 では、はり高に等しいせん断補強を、A5, A6 でははり下面鉄筋の上側までのせん断補強筋高（全高の 80%）とした。

載荷試験結果を図-2.8 に示す。フックのない直線状の鉄筋を用いて、後施工型のせん断補強をすることは、有効な補強方法であることがわかった。また、直線状の後施工型のせん断補強筋を用いた部材の耐力は、端部定着が不足することの影響が発生するため、標準的なスターラップに比べ 20% 程度低下することがわかった。

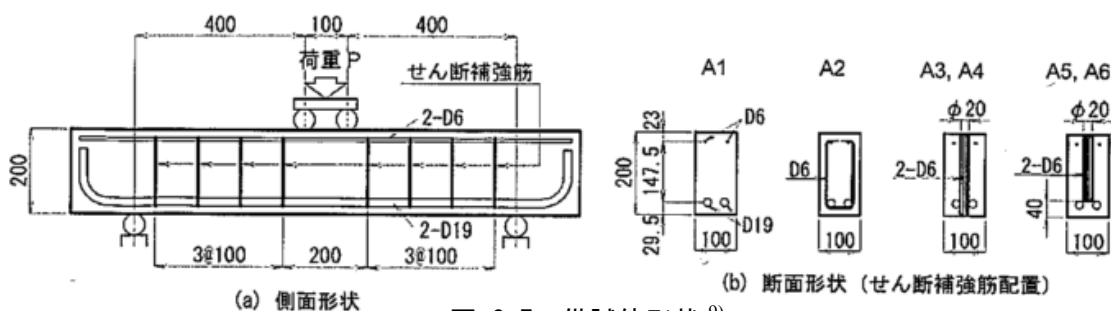


図-2.7 供試体形状<sup>9)</sup>

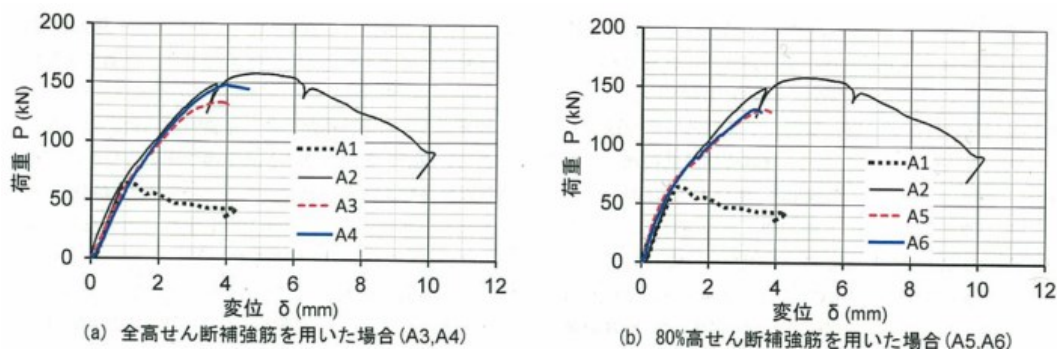


図-2.8 曲げ載荷試験結果

### 2.2.4 ASR ひび割れの再現

ASR によるコンクリートの膨張によって、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋が破断する問題に対して、関して検討している研究も存在する<sup>10)</sup>。鉄筋破断の機構解明には、ASR 膨張を忠実に再現することが重要であり、ASR に最も近い挙動を示す膨張性球状塊の製造を行った。そして ASR 再現試

験に関する基礎的検討がなされている。

膨張材と細骨材と遅延剤に少量の水を添加して混練し、球状に造粒させた人工粗骨材を用いて ASR 再現試験を行った結果、鉄筋の破断までは確認できなかったが、亀甲状のひび割れを確認できた。そのため膨張性人工粗骨材を製造することによって、実際の ASR に近い現象をほぼ再現できたとされている。

## 参考文献

- 1) 小野紘一，川村満紀，田村博，中野錦市：アルカリ骨材反応，技報堂出版，1986.5
- 2) 国土交通省：アルカリ骨材反応抑制対策，2002
- 3) 山本武志，廣永道彦：フライアッシュのアルカリシリカ反応抑制メカニズムに関する実験的検討，電力中央研究所 研究報告 N07016，2007.12
- 4) 坂本真紀，井口重信，小林和行：フライアッシュを混和材として用いたコンクリートの初期強度特性，東日本旅客鉄道(株)，新潟生コンクリート協同組合
- 5) 山本武志，金津努：フライアッシュのポゾラン反応性とアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究 -促進化学試験法(API 法)の適用性評価-電力中央研 7 究所 研究報告 U00034，2001.3
- 6) 日本フライアッシュ協会HP より
- 7) 江良和徳：リチウムイオン内部圧入による ASR 抑制効果に関する研究，京都大学大学院社会基盤工学専攻博士後期課程 博士論文，2010.3
- 8) ASR リチウム工法協会：アルカリ骨材反応抑制工法 ASR リチウム工法技術資料改訂版，2012.4
- 9) 羽田野英明，中島隆，原田祐一，六郷恵哲：後施工型の鉄筋を用いた RC 部材のせん断補強，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.1369-1374，2011.7
- 10) 西村次男，岸利治，小田部裕一，田中泰司，魚本健人：膨張性球状塊の製造とアルカリ骨材反応の再現試験に関する基礎的検討，土木学会第 60 回年次学術講演会,2007.9

## 第3章 ASR の発生を抑制する技術

### 3.1 本章の目的

第2章に示したようにフライアッシュ混和によってASRが抑制されることなどが知られている中で、2011年に発生した東日本大震災の影響により火力発電の需要が高まり、産業副産物である多くの石炭灰が排出されている。しかし石炭灰の中でフライアッシュとしてJISに適合するのは1割程度であり、その他の原粉はセメント原料として使用されているが、新設構造物の減少などにより将来的には有効に活用することが困難になると予想される。フライアッシュ原粉の性能を検討し、JISに適合するフライアッシュと代替できる性能が確認できれば、有効に活用されず産業廃棄物となる可能性のある石炭灰を削減することが可能となり、今後のフライアッシュを用いたコンクリート構造物の建設・維持管理等におけるコストの削減が期待できる。さらに積極的にフライアッシュを使用していくことで、セメントクリンカ焼成におけるエネルギー消費量およびCO<sub>2</sub>排出量が削減できるため省エネルギーと環境影響の見地からも望まれ、限りある天然資源の消費を抑制できるなど多くの面から期待されている。

本研究では、ASRをフライアッシュにより抑制することを目的とするが、JISに適合するものだけでなく、フライアッシュ原粉による抑制効果を明らかにすることを目指す。そのため反応性骨材を用いて供試体を高温多湿環境下で促進養生することで意図的にASRを発生させ、その上でフライアッシュのうち主に流通しているJISⅡ種FAに加え、FA原粉も使用し、

- i) ASR抑制
- ii) 圧縮強度
- iii) 塩化物イオン浸透抵抗性
- iv) 耐凍害性

の4項目について長期的な実験を行うことで比較・検討し、フライアッシュ原粉利用の有効性について考察することを目的とする。

### 3.2 FA原粉を用いたASRの発生抑制

#### 3.2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材および粗骨材の両方に反応性骨材を用いたコンクリート供試体を作製した。反応性骨材には北海道産と雲仙産の安山岩の2種類を使用した。

反応性骨材のアルカリシリカ反応性を判定するため、40×40×160mmの供試体を作製し膨脹量測定を行った。なお計測方法はJIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」に準拠して行った。試験結果を図-3.1に示す。本章では使用していないが、粗骨材のみ入手できた大分産の反応性骨材についてもここで示す。すべての反応性骨材において平均膨脹率が高く、「無害でない」と判定された。北海道産骨材の粒度分布について図-3.2および図-3.3に、雲仙産骨材の粒度分布について図-3.4および図-3.5に示す。大分産粗骨材の粒度分布について図-3.6に示す。北海道産細骨材は雲仙産細骨材と比較して粒径が大きいものが多い傾向が見られる。

本研究で使用した石炭灰は碧南火力発電所で採取されたフライアッシュ原粉（以下、FA原粉）と

JISⅡ種フライアッシュ（以下、JISⅡ種 FA）を使用した。両者の品質について表-3.1 に示す。FA 原粉は JISⅡ種 FA と比較して粉末度が低く粗いこと、活性度が低いため発現強度に差が見られる可能性があること、などが特徴として挙げられる。

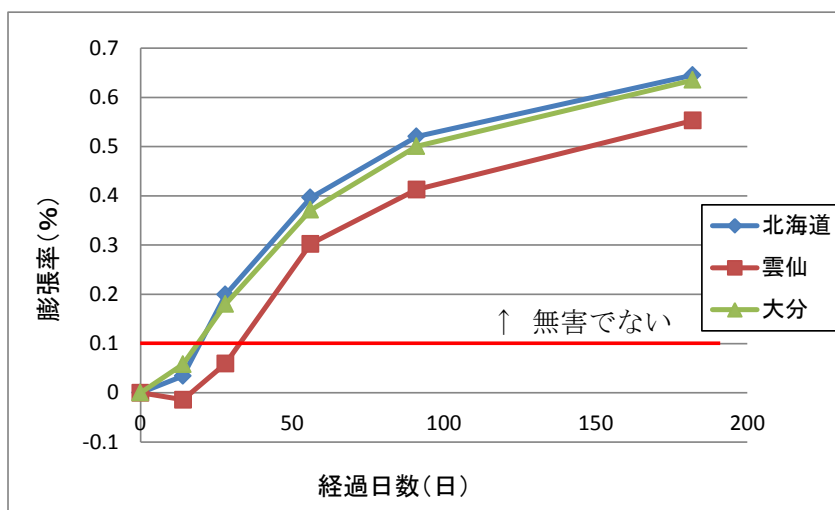


図-3.1 モルタルバー法における膨張率

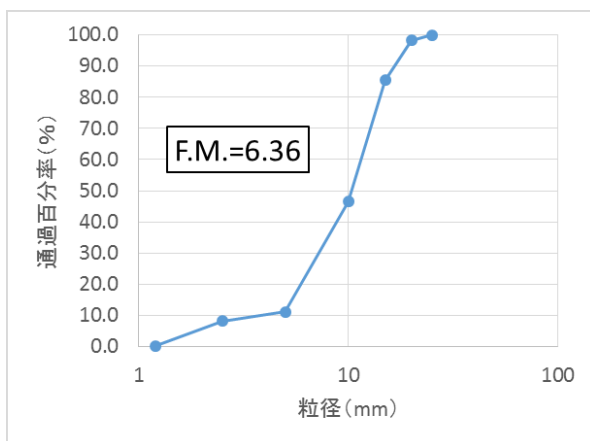


図-3.2 粒度分布（北海道産粗骨材）

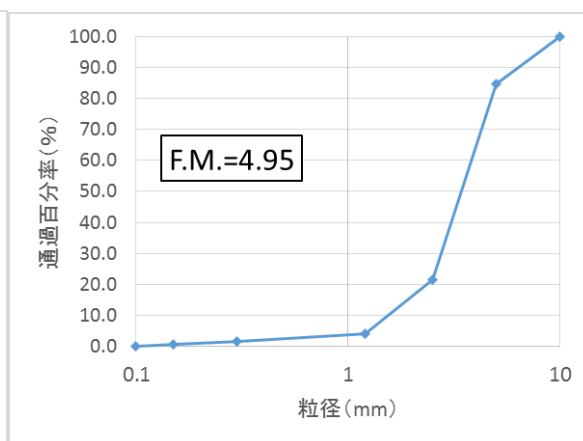


図-3.3 粒度分布（北海道産細骨材）

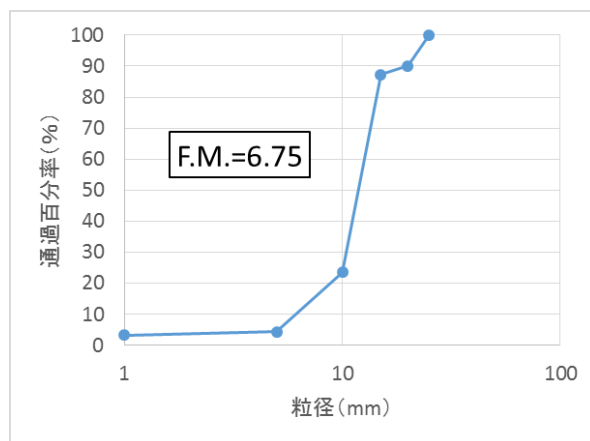


図-3.4 粒度分布（雲仙産粗骨材）

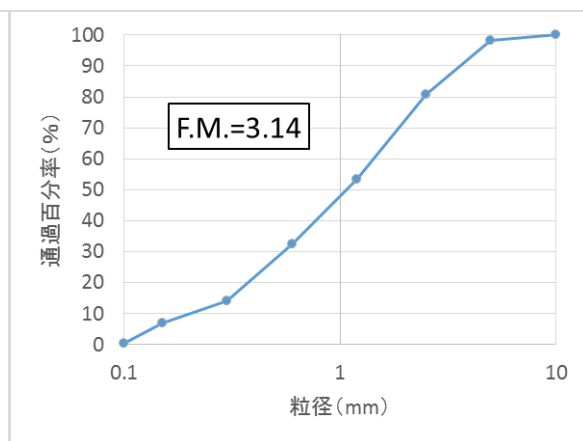


図-3.5 粒度分布（雲仙産細骨材）

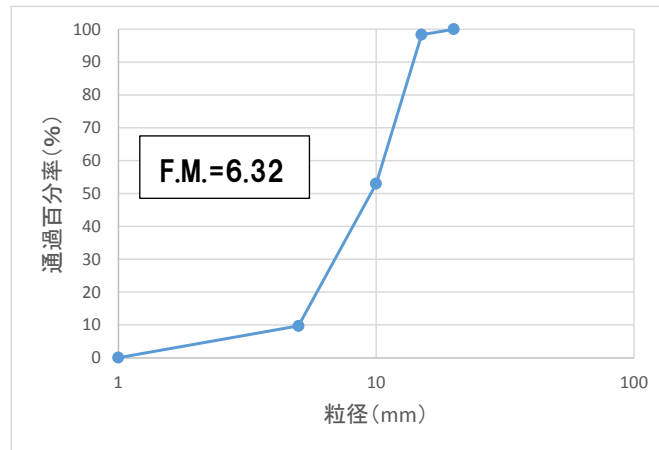


図-3.6 粒度分布（大分産粗骨材）

表-3.1 フライアッシュ品質

項目		単位	規定値	JIS II 種FA	FA原粉
JIS項目	SiO <sub>2</sub> 含有量	%	45.0以上	61.6	61.6
	湿分	%	1.0以下	0.1	0.1
	強熱減量	%	5.0以下	2.5	2.4
	密度	g/cm <sup>3</sup>	1.95以上	2.24	2.22
	粉末度	網ふるい方法	%	40以下	11
		ブレン方法	cm <sup>2</sup> /g	2500以上	3610
	フロー値比	%	95以上	105	104
	活性度	材齢28日	%	80以上	84
		材齢91日	%	90以上	102
参考値	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含有量	%		25.31	22.96
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含有量	%		5.06	5.78
	CaO含有量	%		2.56	2.14
	MgO含有量	%		1.18	1.15
	Na <sub>2</sub> O含有量	%		—	0.06
	K <sub>2</sub> O含有量	%		—	0.08
	メチレンブルー吸着量	mg/g		0.33	0.38

### 3.2.2 供試体概要および配合

供試体として、100×100×400mm の角柱供試体と φ 100×200mm の円柱供試体を作製した。配合表を表-3.2～表-3.6に示す。ASRを生じさせるため、コンクリート中の等価アルカリ量が 12kg/m<sup>3</sup> となるように NaNO<sub>2</sub> を添加した。打設時に測定した供試体の空気量およびスランプ値について、表-3.7に示す。

北海道産の安山岩については、反応性細骨材として安山岩砕砂を 40%使用し、反応性粗骨材には安山岩碎石を 50%使用した。この骨材の骨材ペシマム量は細骨材 70%、粗骨材 50%であるが、コンクリートのブリーディング量が大きいなど、良好なワーカビリティにならなかったため、非反応性骨材と反応性骨材の割合を前述の数値に変更し、かつ石灰石粉で細骨材の微粒粉分を補って打設を行った。そのため ASR の発現の確認、および使用する FA 原粉の ASR 抑制効果の確認のため、予備

試験として、この反応性骨材の置換率のコンクリートで結合材全てを普通ポルトランドセメントとした供試体 H-FA0 と、結合材の 40%を FA 原粉とした供試体 H-FA40 に対し ASR 膨張量の測定を行った。測定方法については 3.2.3 節にて後述する。その予備試験の結果を図-3.7 に、供試体の様子を写真-3.1 に示す。ASR 膨張および FA 原粉による ASR の抑制を確認できたため、骨材比率として採用することとした。

表-3.2 配合表（北海道産骨材 内割置換配合）

供試体名	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )											
		水	セメント		細骨材			粗骨材			AE減水剤 (kg)	AE剤 (kg)	NaNO <sub>2</sub> (kg)
			OPC	FA	普通	石灰石粉	反応性	普通		反応性			
								小	大				
H-FA0	57	168	295	0	549	100	439	182	182	371	0.738	0.059	23.0
H-FA20	57	168	236	59	543	100	433	180	180	367	0	0.047	23.8
H-FA20S	57	168	236	59	543	100	433	180	180	367	0	0.047	23.8
H-FA40	57	168	177	118	537	100	429	178	178	363	0	0.035	24.5
H-FA40S	57	168	177	118	537	100	429	178	178	363	0	0.035	24.5

表-3.3 配合表（北海道産骨材 外割置換配合）

供試体名	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )											
		水	セメント		細骨材			粗骨材		AE減水剤 (kg)	AE剤 (kg)	NaNO <sub>2</sub> (kg)	
			OPC	FA	普通	石灰石粉	反応性	普通					反応性
								小	大				
H-FA0	57	168	295	0	549	100	439	182	182	371	0.738	0.059	23.0
H-FA20+	57	168	295	59	549	29	439	182	182	371	0	0.059	23.0
H-FA20S+	57	168	295	59	549	29	439	182	182	371	0	0.059	23.0

表-3.4 配合表（北海道産骨材 W/B 50%配合）

供試体名	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									
		水	セメント		細骨材			粗骨材		AE剤 (kg)	NaNO <sub>2</sub> (kg)
			OPC	FA	普通	石灰石粉	反応性	普通	反応性		
								小			
H-FA0-W	50	168	336	0	523	95	417	346	354	0.040	23.0
H-FA20-W	50	168	269	67	532	97	425	352	360	0.118	23.8
H-FA40-W	50	168	202	134	525	96	419	347	355	0.336	24.5

※供試体名について、H：北海道産骨材，S：JISⅡ種 FA，S 無し：FA 原粉，  
20+：20%外割置換，-W：W/B=50%

雲仙産の安山岩については、予備試験の骨材ペシマム量の測定結果を図-3.8 に示す。図-3.8 より、早期から膨張を示し、反応性骨材の使用量が少ないことから反応性細骨材として安山岩砕砂を 50% 使用し、反応性粗骨材には安山岩碎石を 50%使用した A の配合を採用した。

フライアッシュについては、セメントの質量の 20%および 40%分を内割置換して混和したものを FA 原粉と JISⅡ種 FA でそれぞれ作製した（表-3.2）。比較のためフライアッシュを混和していない供試体も同時に作製した。また、北海道産骨材についてはセメントの質量の 20%を外割置換して混和したものを FA 原粉と JISⅡ種 FA でそれぞれ作製した供試体（表-3.3）と、水結合材比を 50%としてセメントの質量の 20%および 40%分を内割置換して混和したものを FA 原粉と JISⅡ種 FA でそれぞれ作製した（表-3.4）。供試体名については、フライアッシュを使用しないものを FA0，FA 原粉を 20%，40%分混和したものをそれぞれ FA20 および FA40，JISⅡ種 FA を 20%，40%分混和したものをそれぞれ FA20S および FA40S とした。

表-3.5 配合表（雲仙産骨材 内割置換配合）

供試体名	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										
		水	セメント		細骨材		粗骨材		AE減水剤 (kg)	AE剤 (kg)	NaNO <sub>2</sub> (kg)	
			OPC	FA	普通	反応性	普通					反応性
							小	大				
U-FA0	57	168	295	0	422	448	240	240	507	0.738	0.059	23.0
U-FA20	57	168	236	59	417	443	237	237	502	0	0.047	23.8
U-FA20S	57	168	236	59	417	443	237	237	502	0	0.047	23.8
U-FA40	57	168	177	118	413	438	235	235	496	0	0.035	24.5
U-FA40S	57	168	177	118	413	438	235	235	496	0	0.035	24.5

表-3.6 配合表（雲仙産骨材 W/B 50%配合）

供試体名	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										空気量 (%)
		水	セメント		細骨材		粗骨材			AE剤 (kg)	NaNO <sub>2</sub> (kg)	
			OPC	FA	普通	反応性	普通		反応性			
							小	大				
U-FA40-W	50	147	175	117	419	444	238	238	502	0.035	22.3	6.2
U-FA40-W	50	147	175	117	419	444	238	238	502	0.035	22.3	4.1

表-3.7 空気量およびスランプ試験結果

内割置換 W/B = 57%					
供試体名	空気量 (%)	スランプ (cm)	供試体名	空気量 (%)	スランプ (cm)
H-FA0	4.4	8.5	U-FA0	5.5	12.0
H-FA20	4.4	9.0	U-FA20	5.3	13.5
H-FA20S	4.2	8.5	U-FA20S	5.5	14.5
H-FA40	4.4	12.5	U-FA40	5.4	16.0
H-FA40S	4.3	17.0	U-FA40S	4.1	11.5

外割置換 W/B = 57%			内割置換 W/B = 50%		
供試体名	空気量 (%)	スランプ (cm)	供試体名	空気量 (%)	スランプ (cm)
H-FA20+	5.6	7.5	H-FA0-W	4.4	12.0
H-FA20S+	5.2	6.0	H-FA20-W	5.3	14.9
			H-FA40-W	6.2	19.8

※供試体名について、H：北海道産骨材，U：雲仙産骨材，  
 S：JISⅡ種 FA，S無し：FA 原粉，  
 20+：20%外割置換，-W：W/B=50%

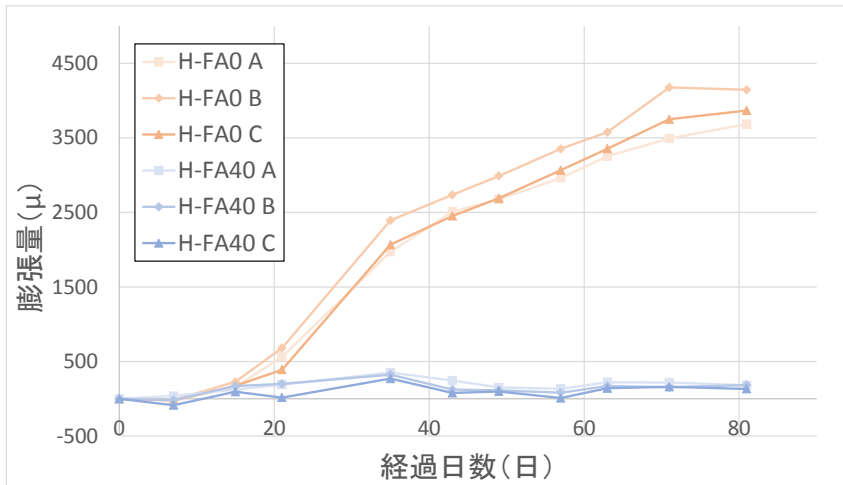


図-3.7 予備試験結果（北海道産骨材）

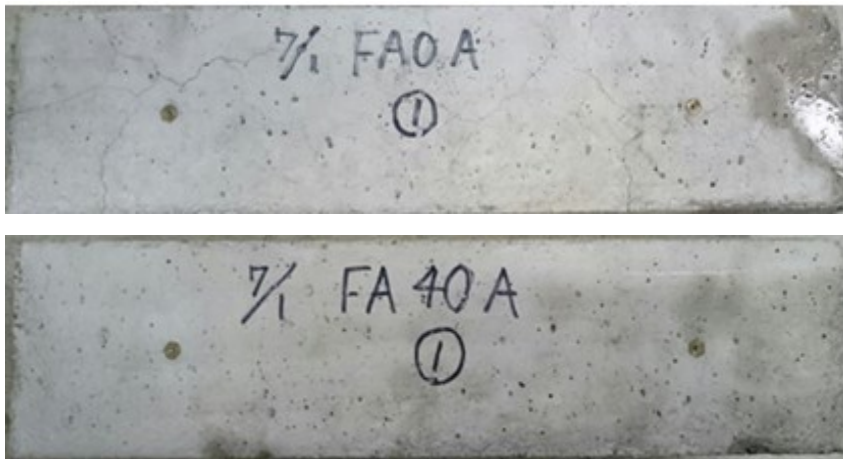


写真-3.1 予備試験の供試体（北海道産骨材）

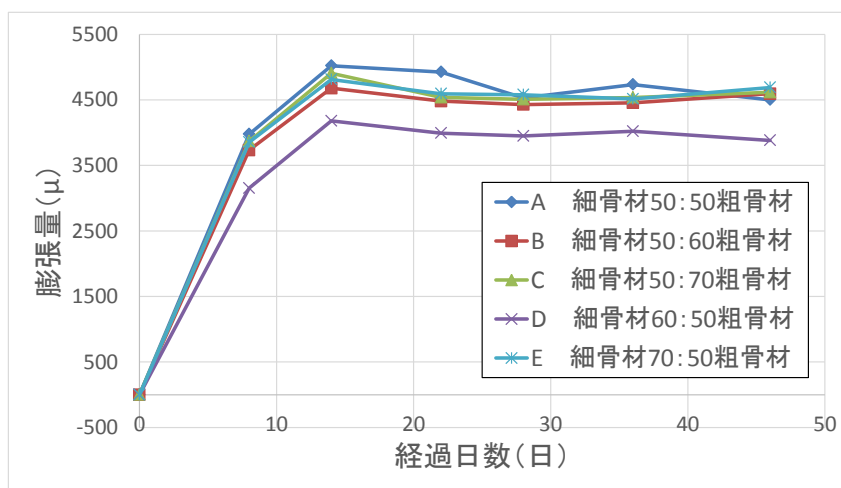


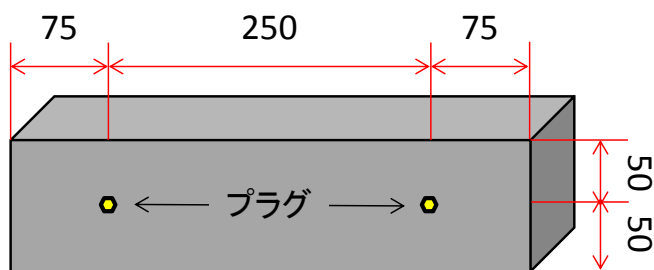
図-3.8 骨材ペシマム量測定結果（雲仙産骨材）

### 3.2.3 膨張量測定

フライアッシュ混和による ASR 抑制効果について検討するため、膨張量の経時変化を測定した。角柱供試体を 1 配合につき 3 本ずつ作製し、脱型翌日から作製後 1 週間まで 20℃の恒温で湿布養生した後、後述する ASR 促進室で促進養生を行った。

膨張量測定を行うためにコンタクトゲージ用プラグを図-3.9 に示す位置に埋め込んだ。膨張量測定に使用したコンタクトゲージを写真-3.2 に示す。プラグは角柱供試体の両側面に、端部から 75mm の場所より片面に 2 か所、両面をあわせて 4 か所に埋め込んだ。基長を 250mm とし、2 つのプラグの区間の長さ変化を測定し、各供試体の膨張量の経時変化を計測した。

ASR 促進室は温度 35～45℃・湿度 100%を維持し、促進養生を行った。ASR 促進室を写真-3.3 に示す。また、熱が外部に逃げないようにするため、促進室外壁には断熱材を貼った。



単位(mm)

図-3.9 角柱供試体プラグ位置



写真-3.2 コンタクトゲージ



写真-3.3 ASR 促進室

### 3.2.4 圧縮強度試験

フライアッシュを混和した場合、ポゾラン反応が長期にわたり継続することにより、コンクリート長期強度が増進すると推測されるため、長期材齢における圧縮強度試験を行った。試験中の供試体を写真-3.4に示す。円柱供試体を各配合につき9本ずつ作製した。供試体は作製後20℃の恒温室で湿布養生した後、材齢1ヶ月、3ヶ月および12ヶ月時点での圧縮強度とひずみを計測し、ヤング係数を求めた。



写真-3.4 圧縮試験機

### 3.2.5 塩化物イオン浸透試験

フライアッシュコンクリートは、塩化物イオン浸透抵抗性が高いとされているため、塩化物イオンの浸透性を調査した。角柱供試体を各配合につき2本ずつ作製した。供試体は作製後28日間湿布養生した後、NaCl 10%水溶液に2ヶ月および12ヶ月間浸漬し、コンクリート内部の塩化物イオン量を計測するため削孔を行った。削孔位置を図-3.10（図中黄色部が削孔部分）に示す。供試体のブリーディングを考慮し、削孔は側面から行うこととした。削孔部分は端部から100mm間隔で3か所とし、削孔の直径は10mmで行った。2ヶ月浸漬供試体の深さは15mm毎にコンクリート粉を採取し、深さ45mmまで3か所で行った。12ヶ月浸漬供試体はより詳細に塩化物イオンの浸透状況を調査するために、深さ10mm毎にコンクリート粉を採取し、深さ50mmまで5か所で行った。その後、採取したコンクリート粉を写真-3.5に示す蛍光X線分析装置を用いて解析し、塩化物イオン量を計測した。

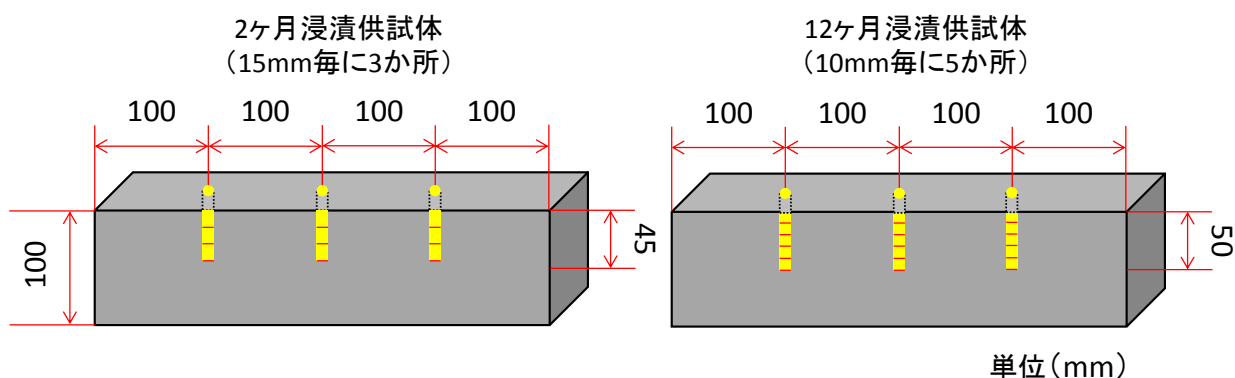


図-3.10 角柱供試体概要図

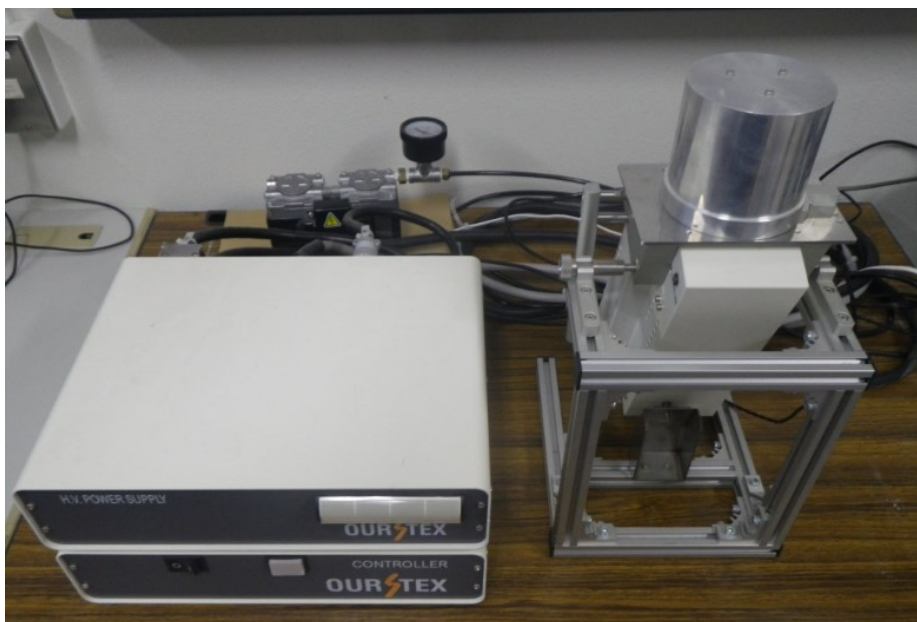


写真-3.5 蛍光 X 線分析装置

### 3.2.6 凍結融解試験

フライアッシュコンクリートは空気連行性が低く、凍害の発生が懸念されるため耐凍害性の調査を行った。角柱供試体を各配合につき 2 本ずつ作製し、28 日間水中養生した。供試体を凍結試験機で  $-18^{\circ}\text{C}$  まで冷却した後、 $5^{\circ}\text{C}$  まで融解させる。これを 1 サイクルとして、30 サイクル毎に質量と一次たわみ共鳴振動数を計測した。凍結融解試験機を写真-3.6 に、一次たわみ共鳴振動数測定機を写真-3.7 に示す。なお計測方法は JISA1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断性係数および動ポアソン比試験方法」によるものである。この試験で計測した一次たわみ共鳴振動数から、JISA1148「コンクリートの凍結融解試験」に規定される相対動弾性係数を以下の式 (1) より求めた。

$$P_n = \left( \frac{f_n^2}{f_0^2} \right) \times 100 \quad (1)$$

ただし  $P_n$  :  $n$  サイクル毎の相対動弾性係数 (%),  $f_n$  :  $n$  サイクル毎の一次たわみ共鳴振動数,  
 $f_0$  : 凍結融解試験開始前の一次たわみ共鳴振動数, とする。



写真-3.6 凍結融解試験機



写真-3.7 一次たわみ振動数測定機

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 ASR 抑制

図-3.11～図-3.14 に ASR 膨脹試験で使用した配合についてそれぞれの ASR 膨脹量の経時変化を示す。また、各促進後の供試体を写真-3.8～3.11 に示す。

##### i) FA 置換率および骨材の種類による影響

図-3.11 に示すように、北海道産の骨材を使用した供試体については、H-FA0 が促進 27 日より膨脹が確認され、促進 315 日で  $8200\mu$  まで膨脹挙動が続き収束した。雲仙産の供試体においても同様に図-3.12 に示すように、FA 未混和の U-FA0 の配合については、促進 56 日目までは他の配合と膨脹挙動に差は見られなかったものの、促進 70 日以降からは ASR 膨脹が確認でき、促進 322 日で  $5500\mu$  まで膨脹挙動が続き収束した。また写真-3.8 および写真-3.9 に示すように、FA 未混和の FA0 の供試体に方向性のない亀甲状のひび割れが多数確認できることから、この膨脹挙動は ASR によるものといえる。FA をセメントに内割置換したその他の供試体については、FA 未混和の FA0 の供試体と比較して膨脹が大きく抑制されている。このことから FA の ASR 抑制効果が発現していることが確認できる。

FA 置換率で比較すると、北海道産の骨材を使用した配合については促進 56 日目までは FA を 20%、40%置換に膨脹挙動の差は見られなかった。しかし促進 77 日時点では、FA 原粉および JISⅡ種 FA とともに、20%置換の配合で  $500\mu$  程の膨脹が見られ、促進 369 日では約  $4000\mu$  の膨脹が確認できた。FA 原粉および JISⅡ種 FA とともに、40%置換の配合では促進養生を始めてから終了までほぼ変化なく約  $300\mu$  の膨脹となった。雲仙産の骨材を使用した配合のうち、FA を混和した 4 配合の供試体については、促進 224 日目までは FA の 20%、40%置換に膨脹挙動の差は見られなかった。しかしそれ以降 20%置換の配合では徐々に膨脹が続き、促進 377 日の終了時点では、FA 原粉および JISⅡ種 FA とともに、20%置換の配合で  $1000\mu$  程度の膨脹が確認できた。雲仙産骨材による ASR が潜伏期間

を経て発現したものだと考えられる。FA を 20%置換した配合について継続して膨張量を測定し、促進 468 日で約 1200 $\mu$  まで膨張し収束した。一方、FA 原粉および JISⅡ種 FA とともに、40%置換の配合では促進養生を始めてから終了まではほぼ変化なく約 300 $\mu$  の膨張となった。したがって、両骨材において FA 置換率が多いほど ASR 膨張抑制効果が大きいことが確認された。

骨材の種類について、今回使用した両骨材の配合に対して早期に ASR 膨張を起こさせるためにアルカリ量を 12kg/m<sup>3</sup> の高アルカリを想定したが、FA を 20%置換した配合では長期的な膨張の抑制には至らず、40%置換した配合では長期的な膨張の抑制を確認できた。

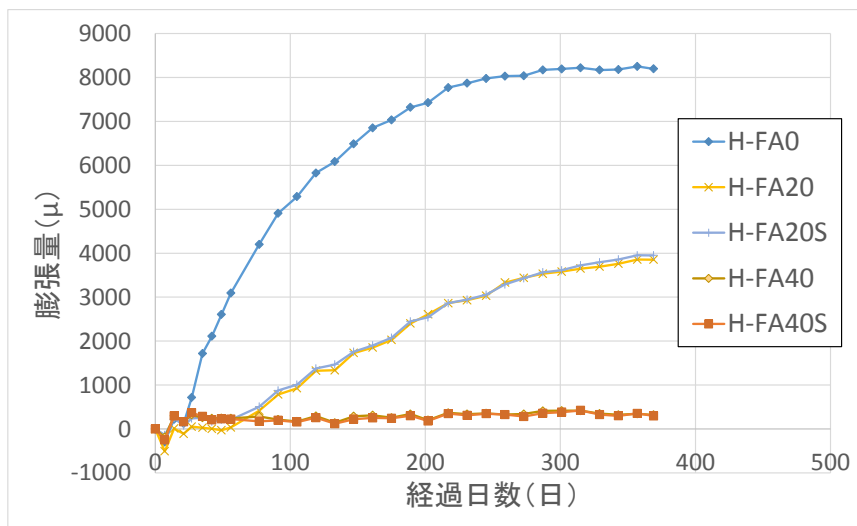


図-3.11 ASR 膨張量（北海道産骨材）

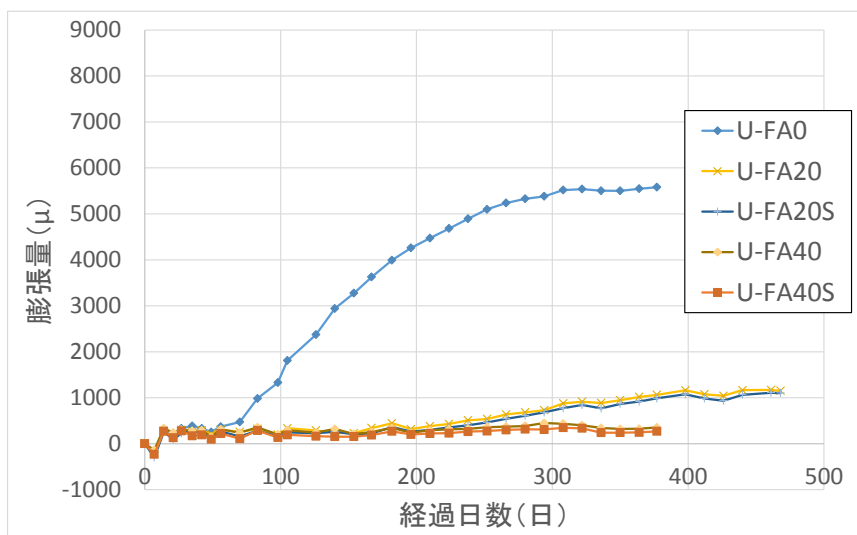


図-3.12 ASR 膨張量（雲仙産骨材）

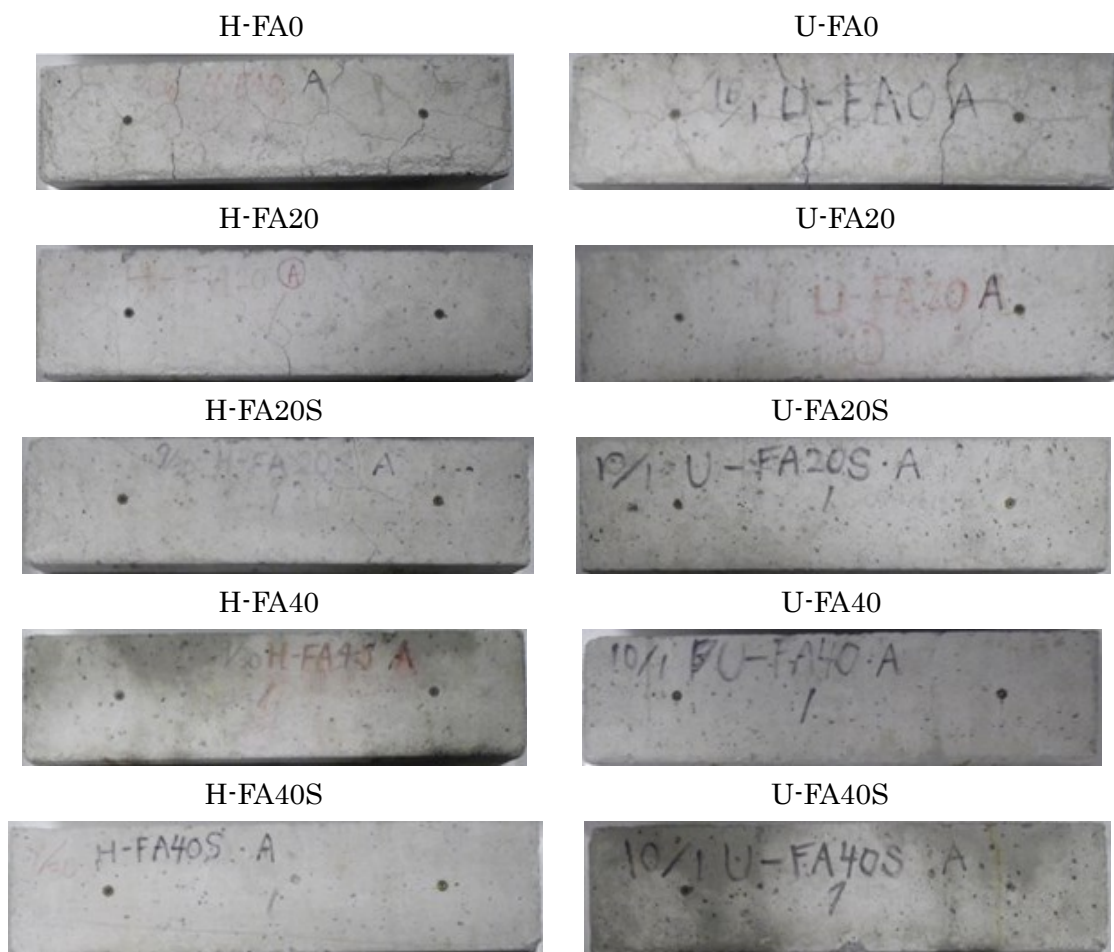


写真-3.8 促進供試体（北海道産：369 日）

写真-3.9 促進供試体（雲仙産：377 日）

## ii) FA 原粉および JIS II 種 FA の比較

図-3.11 と図-3.12 を比較すると、今回使用した FA 原粉と JIS II 種 FA では、ASR 膨張の抑制効果に差は見られなかった。JIS 試験項目のフライアッシュ品質結果から考察すると、FA の ASR 抑制において重要な成分である  $\text{SiO}_2$  の含有量が、FA 原粉および JIS II 種 FA でともに JIS II 種 FA の規定値を満たしており、規定値の判断基準となる小数点第 1 位まで同値であるために、今回使用した FA 原粉と JIS II 種 FA では同様の結果が出たものと思われる。

## iii) 内割置換と外割置換の比較

図-3.13 に、内割置換と外割置換の膨張量を比較する。FA を外割置換した配合において促進 56 日までは内割置換した配合と膨張挙動に差は見られなかったものの、それ以降は ASR 膨張が発生し、促進 370 日で約  $5000\mu$  まで膨張挙動が続き収束した。収束時点では内割置換と外割置換で  $1000\mu$  程度の差が生じた。この理由として、外割置換の方がセメントの量における FA の割合が小さいため、FA の抑制機構から考えても、内割置換よりも高い膨張量を計測されたと推察される。

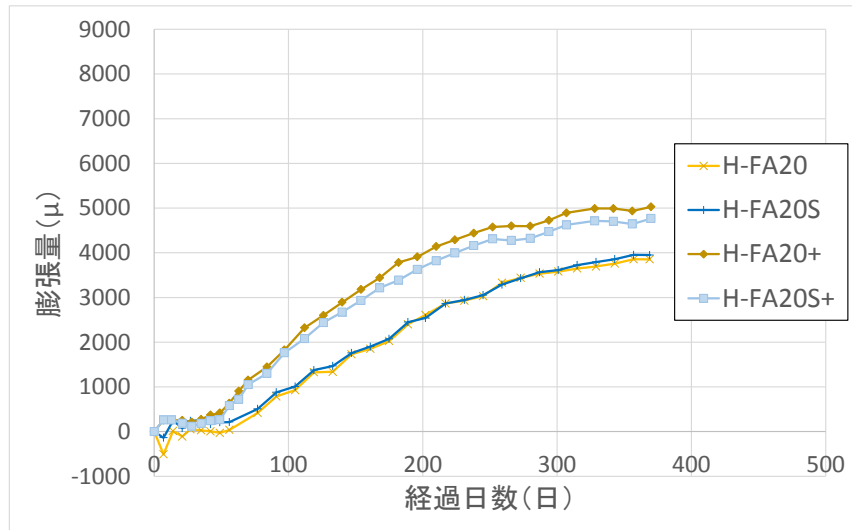


図-3.13 ASR 膨脹量（内割置換と外割置換）

#### iv) 水結合材比の違いが与える影響

図-3.14 より、水結合材比の低い H-FA0-W, H-FA20-W の方が H-FA0, H-FA20 よりも早期に ASR 膨脹が発生していることが分かる。これは水結合材比の低い H-FA0-W, H-FA20-W の配合の方がセメントの割合が大きいため、膨脹量が大きくなっていると考察される。しかし、促進 84 日の時点では H-FA0-W, H-FA0 の差はほぼなくなっており、H-FA20, H-FA20-W においても継続して測定を行っていけば同程度の膨脹を示す可能性も考えられる。

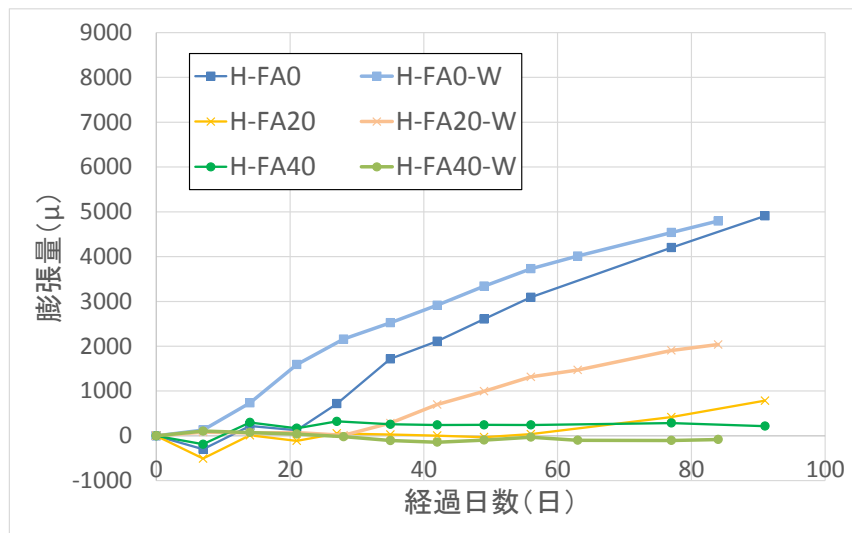


図-3.14 ASR 膨脹量（水結合材比による差）

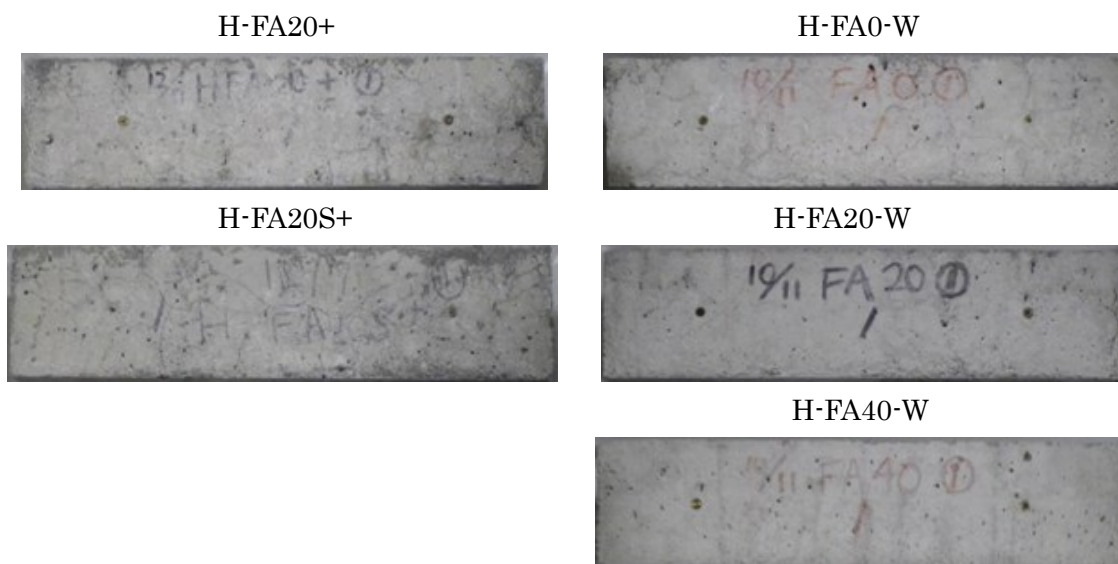


写真-3.10 促進供試体（外割置換：370 日）

写真-3.11 促進供試体（低水結合材比：84 日）

### 3.3.2 圧縮強度とヤング係数

図-3.15～図-3.22 に圧縮強度試験で使用した配合についてそれぞれ圧縮強度とヤング係数を示す。各配合について圧縮強度、ヤング係数を FA0 と比較した結果、および材齢 1 ヶ月、3 ヶ月と 12 ヶ月で比較した結果を表-3.5、表-3.6 に示す。

#### i) FA 置換率および骨材の種類による影響

図-3.15 および図-3.17 より、H-FA0 を除く全ての配合について材齢 1 ヶ月から 3 ヶ月、12 ヶ月にかけて圧縮強度の増進を確認した。養生期間が長くなることにより水和およびポズラン反応が進み、強度が増進したと考察される。H-FA0 については写真-3.12 から分かるように、ひび割れが生じていた。これは養生期間 3 ヶ月以降に ASR が発生したことにより、12 ヶ月時点の試験で圧縮強度、ヤング係数が低下したと考えられる。また同様に図-3.16 および図-3.18 より、H-FA20、H-FA20S、U-FA0 においてヤング係数が低下している。これは表面にはひび割れが生じてはいなかったが、内部的に ASR が進行しておりヤング係数が低下したと推察される。一方で FA を 40%置換した配合では低下しておらず、FA 置換率が多くなるほど長期強度が増進していることが分かる。初期強度についてはフライアッシュのポズラン反応が、セメントの水和よりも活性度が低く、FA を混和したコンクリートは未混和のコンクリートと比較して材齢初期の圧縮強度が低くなる傾向があるため、それによるものと思われる。一般的に、強度の低下を懸念し、FA のセメントに対する置換率の上限は 30%とされているが、今回の実験ではより多くの FA を利用できるよう、40%置換の配合を作製した。材齢 12 ヶ月の長期材齢になれば FA40%置換でも十分な強度が得られることを確認した。両骨材の FA を混和した全ての配合において、材齢 12 ヶ月時点の圧縮強度が H-FA0、U-FA0 よりも高く発現した。FA に含まれる  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  が継続してポズラン反応を発生させたことが要因の一つではないかと推測される。

表-3.5 より、骨材の種類による影響について考慮すると、圧縮強度が北海道産骨材と比較し、雲仙産骨材を使用した配合の方が多少高くなったものの、ほぼ同様の傾向を示しており骨材の種類による影響は小さいと考察される。

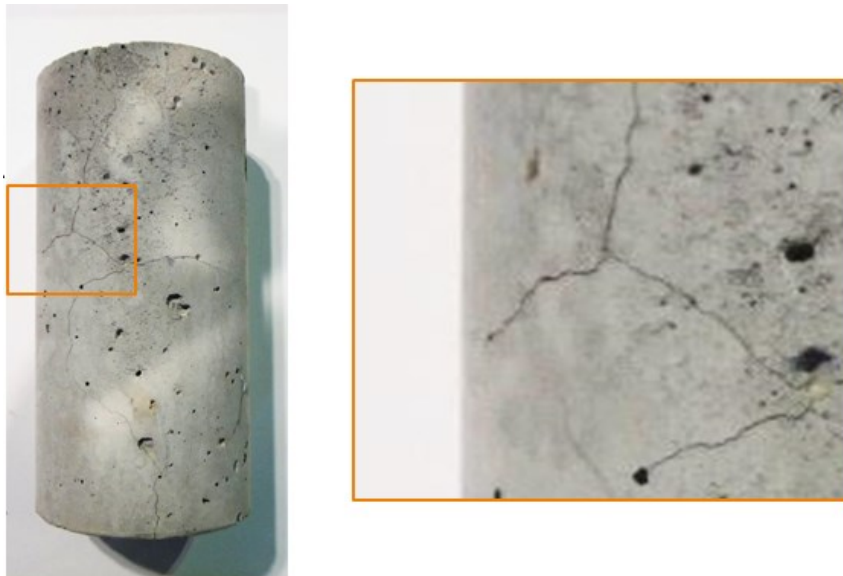


写真-3.12 H-FA0 供試体（材齢 12 ヶ月）

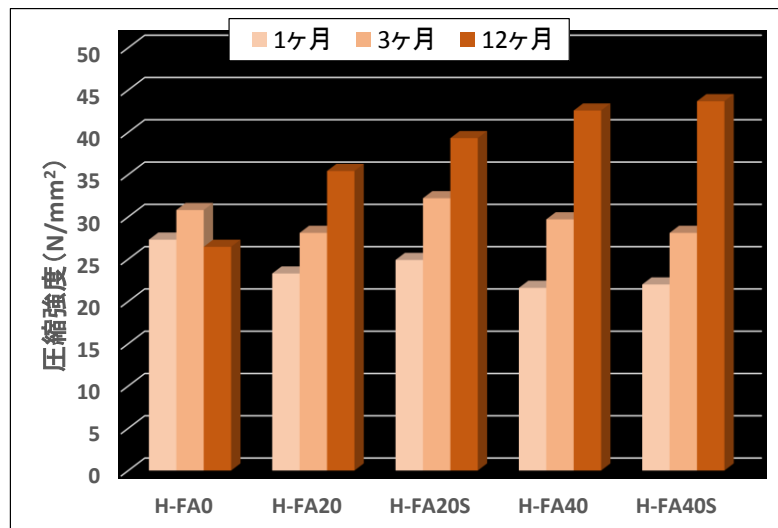


図-3.15 圧縮強度（北海道産骨材）

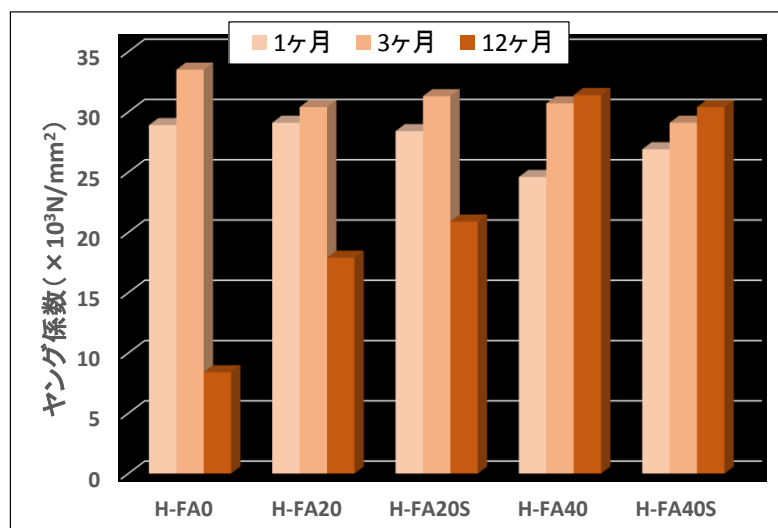


図-3.16 ヤング係数（北海道産骨材）

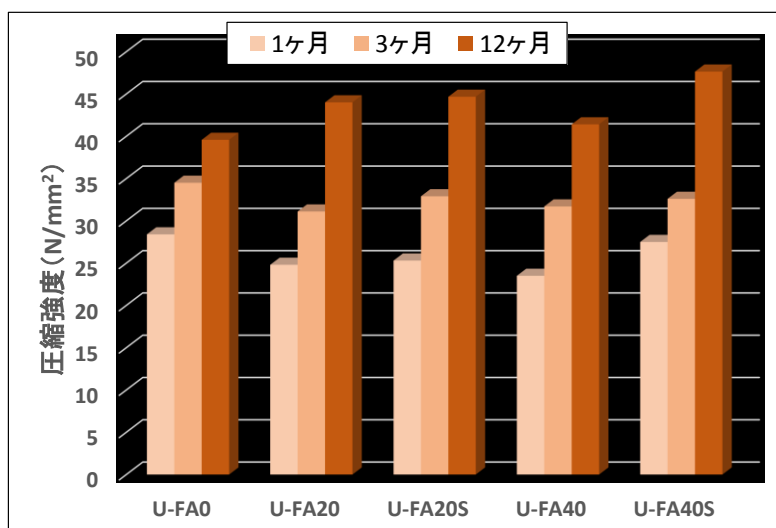


図-3.17 圧縮強度（雲仙産骨材）

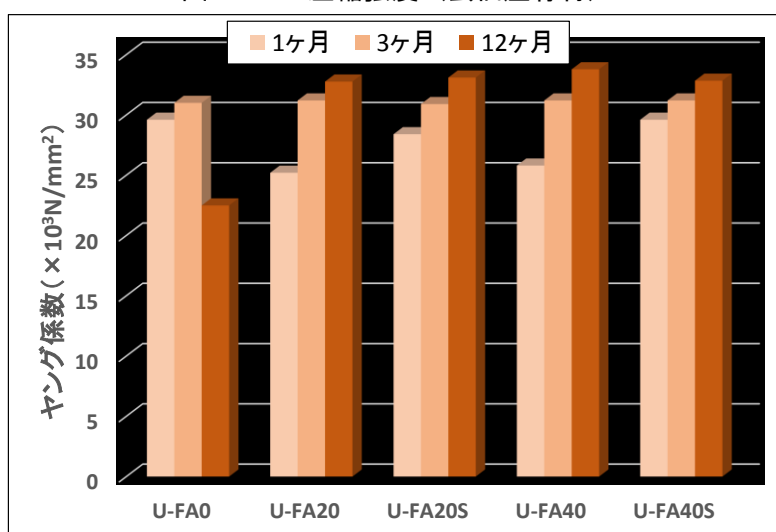


図-3.18 ヤング係数（雲仙産骨材）

表-3.5 圧縮強度結果比較

	1ヶ月		3ヶ月		12ヶ月		1ヶ月との FA0強度比 (%)
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	FA0強度比 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	FA0強度比 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	FA0強度比 (%)	
H-FA0	27.3		30.8		26.5		97
H-FA20	23.3	85	28.1	91	35.4	134	130
H-FA20S	24.9	91	32.2	105	39.3	149	144
H-FA40	21.6	79	29.7	96	42.6	161	156
H-FA40S	22.0	81	28.1	91	43.7	165	160
H-FA20+	29.3	107	44.1	143	43.2	163	158
H-FA20S+	33.5	123	43.8	142	40.0	151	147
H-FA0-W	26.8		31.2				
H-FA20-W	25.8	96	34.9	112			
H-FA40-W	21.9	82	31.6	101			
U-FA0	28.4		34.5		39.6		139
U-FA20	24.8	91	31.1	90	44.0	111	155
U-FA20S	25.3	93	32.9	95	44.7	113	157
U-FA40	23.5	86	31.7	92	41.4	105	146
U-FA40S	27.5	101	32.6	94	47.6	120	168

表-3.6 ヤング係数結果比較

	1ヶ月		3ヶ月		12ヶ月		1ヶ月との FA0ヤング 係数比(%)
	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	FA0ヤング 係数比(%)	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	FA0ヤング 係数比(%)	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	FA0ヤング 係数比(%)	
H-FA0	28.9		33.5		8.4		29
H-FA20	29.1	101	30.4	91	17.9	213	62
H-FA20S	28.4	98	31.3	93	20.9	249	72
H-FA40	24.6	85	30.7	92	31.4	374	109
H-FA40S	26.9	93	29.1	87	30.4	362	105
H-FA20+	29.2	101	32.8	98	16.6	198	58
H-FA20S+	30.1	104	33.0	99	19.7	234	68
H-FA0-W	25.3		26.6				
H-FA20-W	26.6	105	29.2	110			
H-FA40-W	24.8	98	27.2	102			
U-FA0	29.6		31.0		22.5		76
U-FA20	25.2	87	31.2	101	32.8	146	111
U-FA20S	28.4	98	30.9	100	33.1	147	112
U-FA40	25.8	89	31.2	101	33.8	150	114
U-FA40S	29.6	102	31.2	101	32.8	146	111

## ii) FA 原粉および JIS II 種 FA の比較

表-3.5 より, 養生 12 ヶ月の FA 原粉と JIS II 種 FA の圧縮強度を比較すると, H-FA20+ と H-FA20S+ を除くすべての配合において JIS II 種 FA を混和した供試体の方が多少高くなる傾向が見られる。しかし, 養生 12 ヶ月の圧縮強度において FA 原粉と JIS II 種 FA の圧縮強度の差は最大でも  $6 \text{N/mm}^2$  程度と小さいため, 強度のみから判断すると, FA 原粉でも十分に利用できると考察される。

## iii) 内割置換と外割置換の比較

図-3.19 より, 外割置換の配合における圧縮強度が内割置換の配合よりも高い値を示しており, セメント量を減らしていないため圧縮強度が高いと考えられる。H-FA20+ と H-FA20S+ は養生 12 ヶ月において圧縮強度の低下がみられるが, これは写真-3.12 と同じようにひび割れが生じていたため養生中に ASR が発生し, 低下したものと推察される。

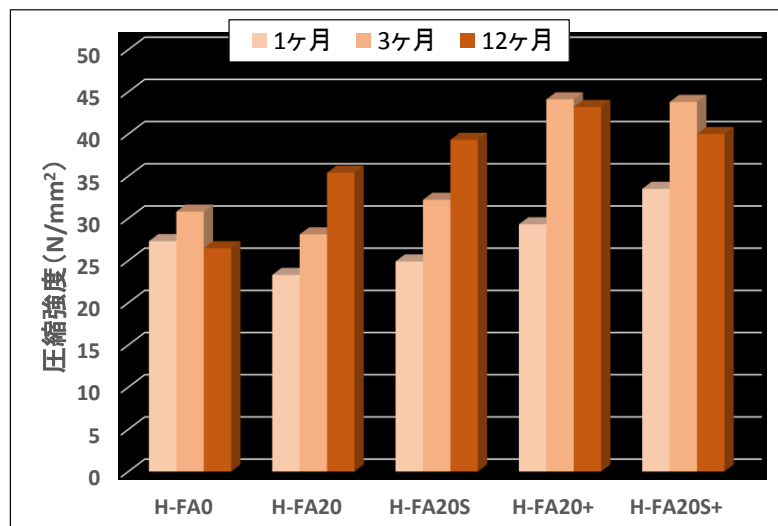


図-3.19 圧縮強度 (内割置換と外割置換)

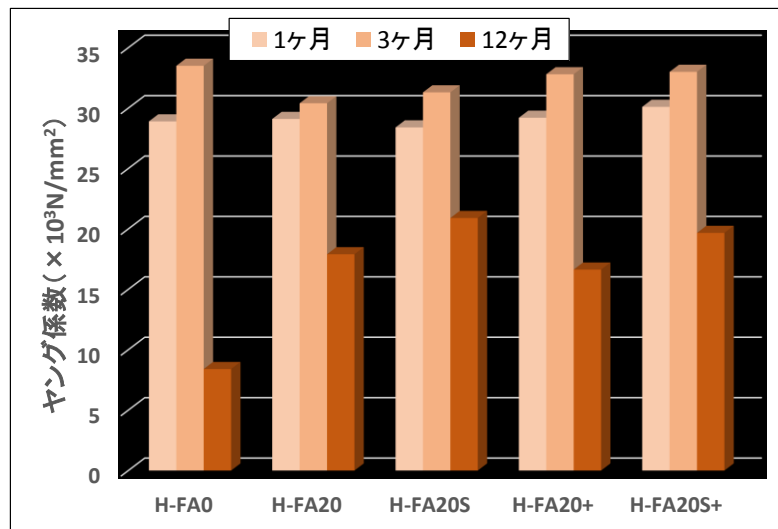


図-3.20 ヤング係数（内割置換と外割置換）

#### iv) 水結合材比の違いが与える影響

図-3.21 より、水結合材比が低い配合の方がセメントの割合が大きいため圧縮強度が高くなると予想していたが、ほぼ同等の値を示した。さらに図-3.22 よりヤング係数をみると、水結合材比が低い配合の方がむしろ低くなっていることが分かる。この理由として、水結合材比が低い配合の方が使用した粗骨材量が減っていること、また、水結合材比が低い配合の方が空気量・スランプが大きく空気量を調整する際に AE 剤を通常よりも多く入れたことなどが影響し、このような結果になったと考察される。

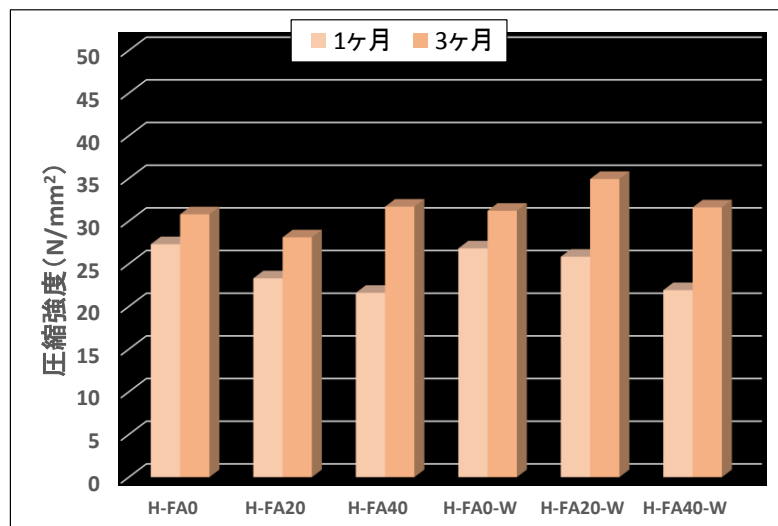


図-3.21 圧縮強度（水結合材比）

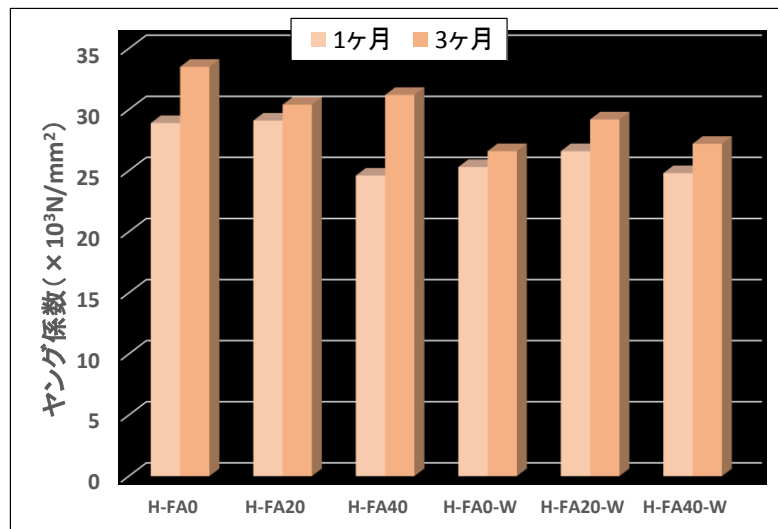


図-3.22 ヤング係数（水結合材比）

### 3.3.3 塩化物イオン浸透抵抗性

図-3.23～図-3.27 に塩化物イオン浸透試験で使用した配合についてそれぞれの塩化物イオン浸透量と深さの関係、測定値から推定した近似曲線を示す。また、塩化物イオン浸透試験から得られた浸漬2ヶ月と浸漬12ヶ月の各測点での塩化物イオン量の測定値、およびそれらを用いて算出した表面塩化物イオン量 ( $C_0$ )、見かけの拡散係数 ( $D_{ap}$ ) をそれぞれ表-3.7、表-3.8に示す。

表-3.7 塩分浸透試験結果（浸漬2ヶ月）

内割置換 W/B = 57% (単位: kg/m³)											
供試体名	深さ(mm)			C <sub>0</sub> (kg/m³)	D <sub>ap</sub> (cm²/年)	供試体名	深さ(mm)			C <sub>0</sub> (kg/m³)	D <sub>ap</sub> (cm²/年)
	15	30	45				15	30	45		
H-FA0	11.56	1.38	1.28	21.07	4.68	U-FA0	14.59	1.27	0.93	28.87	3.80
H-FA20	12.00	1.27	1.13	22.59	4.29	U-FA20	13.32	1.30	0.98	25.66	4.06
H-FA20S	11.73	1.50	1.24	21.05	4.88	U-FA20S	9.90	1.14	1.04	18.22	4.56
H-FA40	8.07	1.09	1.27	14.07	5.28	U-FA40	11.37	1.18	0.89	21.55	4.22
H-FA40S	8.27	1.17	1.21	14.30	5.41	U-FA40S	7.74	1.24	0.96	13.05	5.87

外割置換 W/B = 57% (単位: kg/m³)						内割置換 W/B = 50% (単位: kg/m³)					
供試体名	深さ(mm)			C <sub>0</sub> (kg/m³)	D <sub>ap</sub> (cm²/年)	供試体名	深さ(mm)			C <sub>0</sub> (kg/m³)	D <sub>ap</sub> (cm²/年)
	15	30	45				15	30	45		
H-FA20+	18.37	1.64	1.50	36.06	3.87	H-FA0-W	12.78	1.88	1.36	22.13	5.41
H-FA20S+	13.54	1.76	1.59	24.13	4.97	H-FA20-W	6.17	1.36	1.18	9.24	8.78
						H-FA40-W	5.79	1.58	1.29	8.02	11.96

表-3.8 塩分浸透試験結果（浸漬 12 ヶ月）

内割置換 W/B = 57%（単位: kg/m <sup>3</sup> ）							
供試体名	深さ(mm)					C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /年)
	10	20	30	40	50		
H-FA0	20.43	15.55	9.16	3.48	2.70	24.71	3.68
H-FA20	18.01	5.33	2.82	1.82	1.23	25.16	0.87
H-FA20S	22.38	9.47	2.70	2.32	1.98	29.79	1.19
H-FA40	15.58	5.38	1.72	1.90	1.43	21.56	0.94
H-FA40S	14.21	4.27	2.60	2.19	1.99	19.02	1.03
U-FA0	22.01	6.05	1.34	1.08	0.82	33.21	0.65
U-FA20	19.36	4.99	1.61	1.61	1.16	29.28	0.64
U-FA20S	22.51	4.27	2.60	1.67	1.72	36.34	0.50
U-FA40	16.75	2.67	1.78	1.49	1.23	28.41	0.43
U-FA40S	20.72	3.84	1.87	1.66	1.36	33.99	0.48

外割置換 W/B = 57%（単位: kg/m <sup>3</sup> ）							
供試体名	深さ(mm)					C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /年)
	10	20	30	40	50		
H-FA20+	25.41	9.26	2.01	1.57	2.01	35.78	0.90
H-FA20S+	25.64	8.82	1.66	1.53	1.58	36.78	0.82

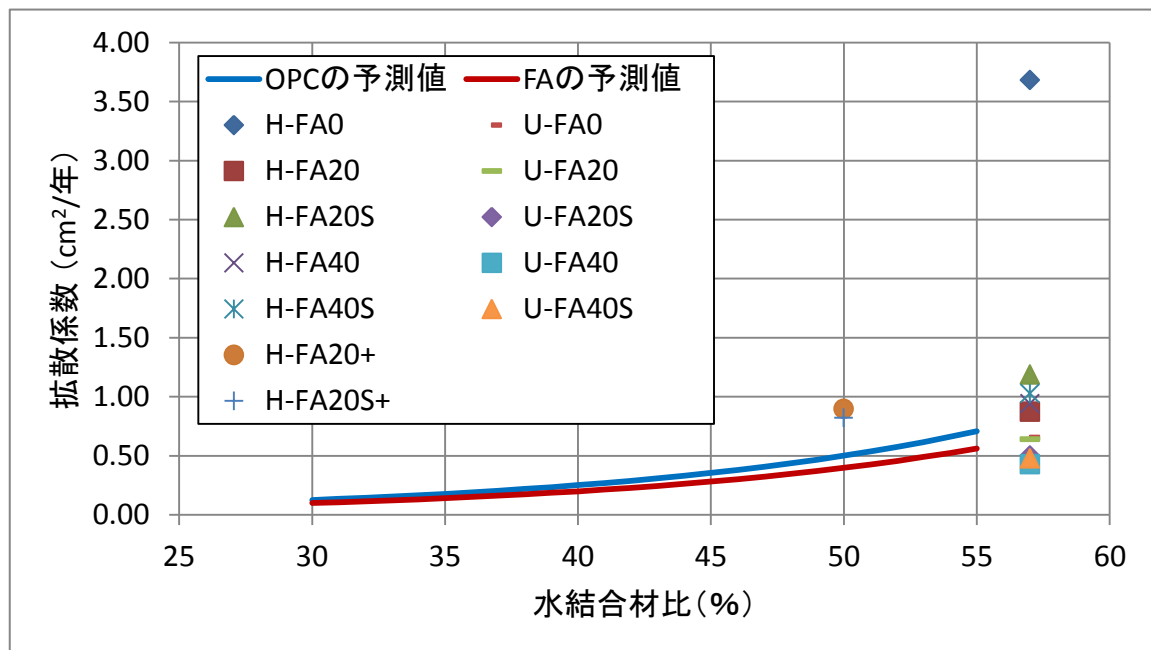


図-3.23 見かけの拡散係数（浸漬 12 ヶ月）

コンクリート標準示方書より、水結合材比から推定した見かけの拡散係数の予測値と浸漬 12 ヶ月の測定値を図-3.23 に示す。水結合材比 57% は適用範囲外ではあるが、雲仙産の配合については見かけの拡散係数が予測値より小さい値になる。しかし、北海道産の配合については実験より求めた測定値が予測値より大きい。この理由として、3.2.1 節の図-3.4、図-3.5 に示す粒度分布から分かるように、北海道産細骨材が雲仙産細骨材に比べて粒径が大きく、粒度分布が大きい。そのため、打ち込み時に内部で水分の上昇により水道が形成され、拡散係数が大きくなった可能性が考えられる。

i) FA 置換率および骨材の種類による影響

図-3.24 より、北海道産骨材の配合について、表面～10mm の範囲において H-FA0 よりも H-FA20S の方が高い塩化物イオン量を計測したがそれより内部では低く、FA を混和することによる塩化物イオンの浸透抵抗性の向上を確認した。また FA 置換率について見てみると、H-FA20S は多少高い値を計測したが、FA を 20% 置換した配合よりも 40% 置換した配合の方が塩化物イオン量の値が低く、浸透抵抗性の向上を確認した。これは FA が多く含まれているためポズラン反応が起きやすく供試体内部が緻密化したと考えられる。

図-3.25 より、雲仙産骨材の配合について、北海道産骨材の配合と比べて各配合の差はほとんどないが、表面～20mm の範囲において U-FA0 の塩化物イオン量が多少高い値を示しており FA を混和することによる浸透抵抗性の向上が分かる。また FA 置換率について見てみると、北海道産と同様に FA を 20% 置換した配合よりも 40% 置換した配合の方が塩化物イオン量の値が低く、浸透抵抗性の向上を確認した。骨材の種類による影響については、塩化物イオンが浸透しやすい場合もあるが FA を混和することによる浸透抵抗性の向上効果を確認した。

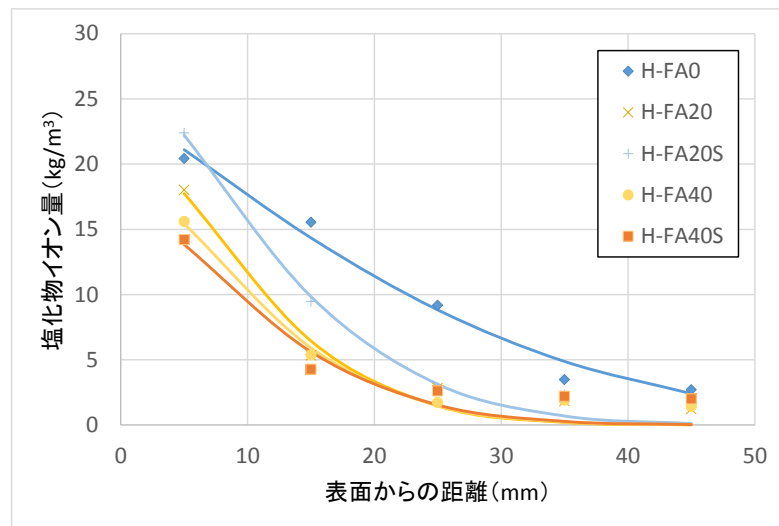


図-3.24 塩化物イオン浸透量（北海道産骨材：浸漬 12 ヶ月）

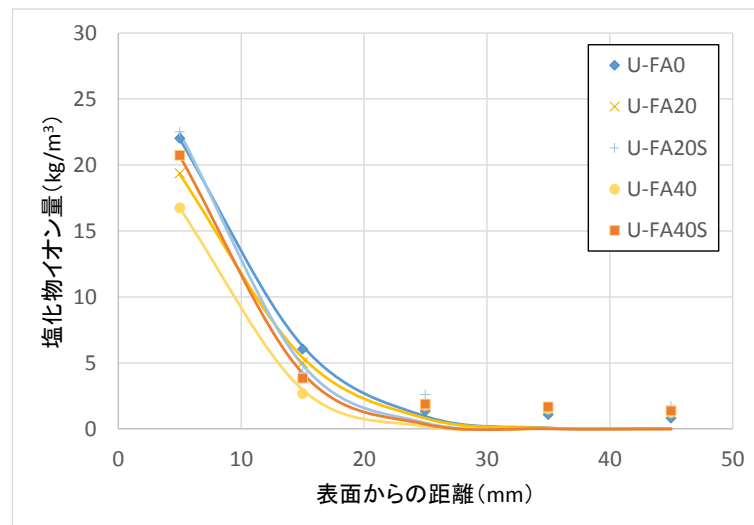


図-3.25 塩化物イオン浸透量（雲仙産骨材：浸漬 12 ヶ月）

## ii) FA 原粉および JIS II 種 FA の比較

図-3.24, 図-3.25 より FA 原粉および JIS II 種 FA を用いた配合について、置換率 20%と 40%の配合の表面～20mm の範囲の塩分量を比較してみると、FA 原粉を混和した供試体の方が JIS II 種 FA を混和した供試体よりもわずかに塩化物イオン量の値が低く、浸透抵抗性が高くなっている傾向が見られる。これは今回使用した FA 原粉が JIS II 種 FA と同等の  $\text{SiO}_2$  および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を含有しており、ポゾラン反応を起こしたため浸透抵抗性が高いと考えられる。また、両骨材の H-FA20S, U-FA20S の配合が表面付近で塩化物イオンが高い値を計測したが、コンクリート内部では他の FA を混和した配合と同程度の値を計測し、塩化物イオン浸透抵抗性が高いことが確認できる。そのため、FA 原粉と JIS II 種 FA は同等な塩化物イオン浸透抵抗性を発現し、利用できると推察される。

## iii) 内割置換と外割置換の比較

図-3.26 に示すように、表面～10mm の範囲において外割置換の配合は内割置換の配合に比べて高い塩化物イオン量を計測したが、それより内部では同程度の塩化物イオン量を計測した。これはやはり外割置換の配合の方がセメントの量が多く、水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される。FA を混和した配合において表面付近で H-FA0 よりも高い塩化物イオン量を計測した配合もあった。しかし、コンクリート内部では H-FA0 よりも低い塩化物イオン量を計測し、塩化物イオン浸透抵抗性が高いことが確認できる。

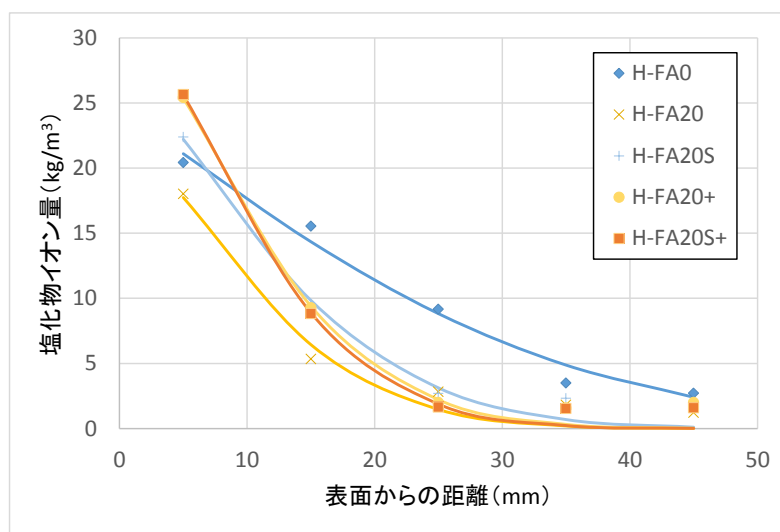


図-3.26 塩化物イオン浸透量（内割置換と外割置換：浸漬 12 ヶ月）

## iv) 水結合材比の違いが与える影響

図-3.27 より、各配合を FA 置換率ごとに比較してみると表面～15mm の範囲においてある程度のばらつきはあるが、それより内部では同程度の塩化物イオン量を計測した。今回の実験（浸漬期間 2 ヶ月、3 か所で計測）では水結合材比 50%、57%における差を確認できなかったが、前述してきた浸漬期間 12 ヶ月、5 か所で計測することで水結合材比の影響を確認できると予想される。

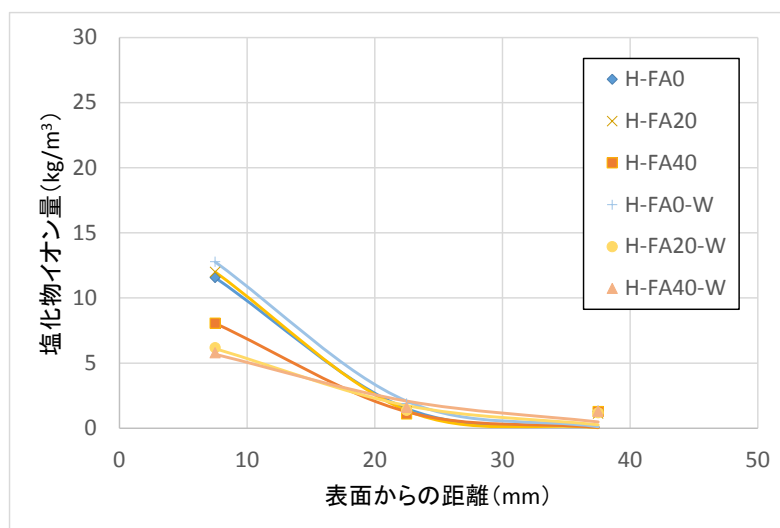


図-3.27 塩化物イオン浸透量（水結合材比：浸漬2ヶ月）

### 3.3.4 耐凍害性

計測した一次たわみ共鳴振動数より，3.2.6節で示した式(1)を用いて相対動弾性係数を計算した．同様に，計測した質量より求めた質量減少率を求めた．図-3.28～図-3.29 に凍結融解試験で使用した配合についてそれぞれ相対動弾性係数と質量減少率を示す．測定は相対動弾性係数が60%を下回った段階で測定不能とした．

#### i) FA置換率および骨材の種類による影響

図-3.28 より，北海道産骨材を使用した5配合のうち，H-FA0，20，20Sの3配合が120サイクルまでは計測できたが，150サイクル時点で相対動弾性係数が60%を上回る配合は20Sのみであり，全ての供試体が180サイクルで測定不能となった．FA0については，120サイクルまでは5配合の中で凍害の劣化進行が最も遅い結果となった．また図-3.30より，雲仙産骨材を使用した5配合のうち，U-FA20，20Sの2配合が150サイクルで測定不能，U-FA0，40の2配合が90サイクルで測定不能，U-FA40Sについては60サイクルで測定不能となった．U-FA0については，U-FA20および20Sと比較して劣化が激しいという結果となった．FA未混和の配合はASRゲルの空気泡内への析出などが考えられるが，FA置換率について置換率が高い40%配合の方が20%配合と比較して劣化進行度合いが速く，図-3.29，図-3.31の質量減少率の経過からも分かる．写真-3.13に特に劣化が激しかったU-FA40Sの供試体を示す．150サイクル後では粗骨材が見え，慎重に扱わなければ碎けてしまうほどであった．

また，骨材の種類について比較すると，両骨材のFA40Sがともに60サイクルで測定不能という結果となった．FAを置換した配合のコンクリートはフライアッシュに含まれる未燃カーボンにAE剤が吸着されるため，良質な空気を連行するのが難しいとされているが，本研究ではAE剤を通常使用量の10倍以上用いて4%以上の空気量とした．にもかかわらず，FA混和の配合で耐凍害性が低くなった理由としては，FAを混和したことで良質な空気を連行しづらい，凝結過程における微細な空気が消失した，水中養生1ヶ月で凍結融解試験を開始するのに対し，FA混和の配合はその時点ではまだ水和が十分でないために劣化進行が速くなった，などが考えられる．

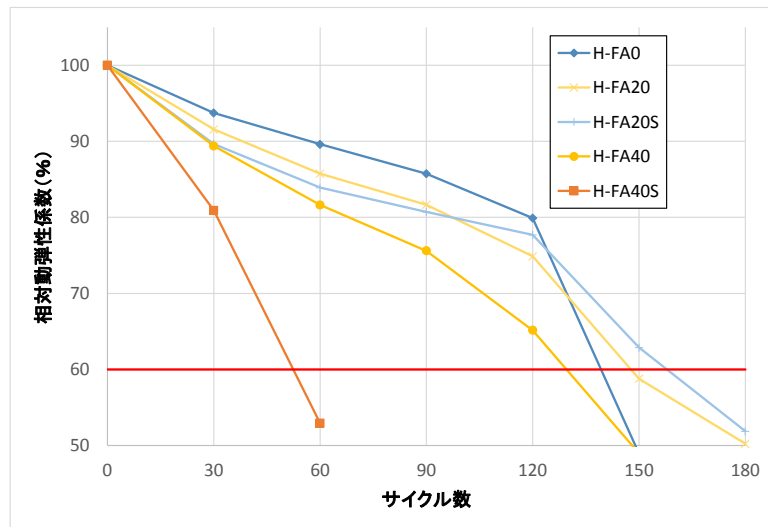


図-3.28 相対動弾性係数（北海道産骨材）

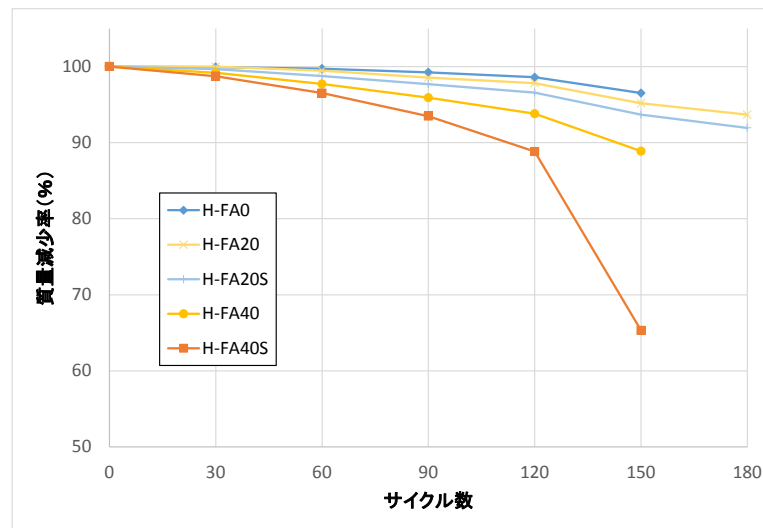


図-3.29 質量減少率（北海道産骨材）

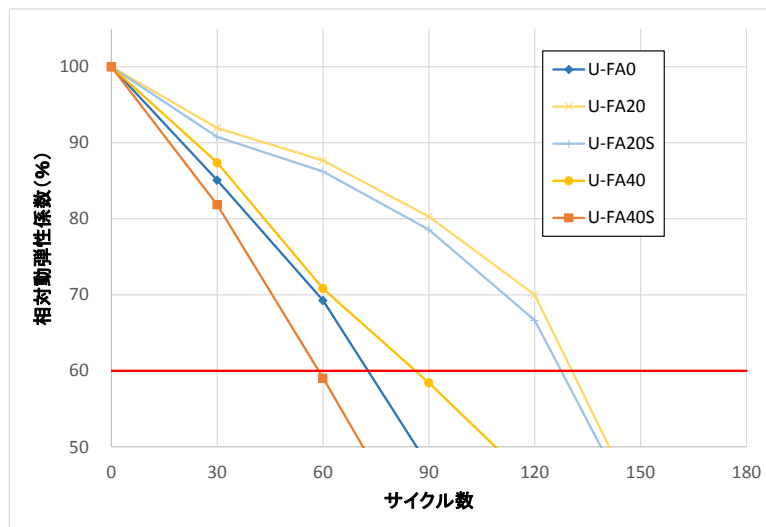


図-3.30 相対動弾性係数（雲仙産骨材）

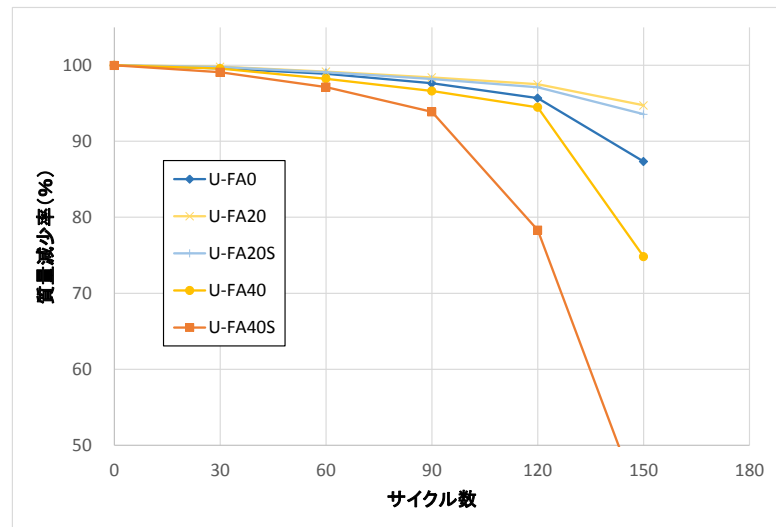


図-3.31 質量減少率（雲仙産骨材）

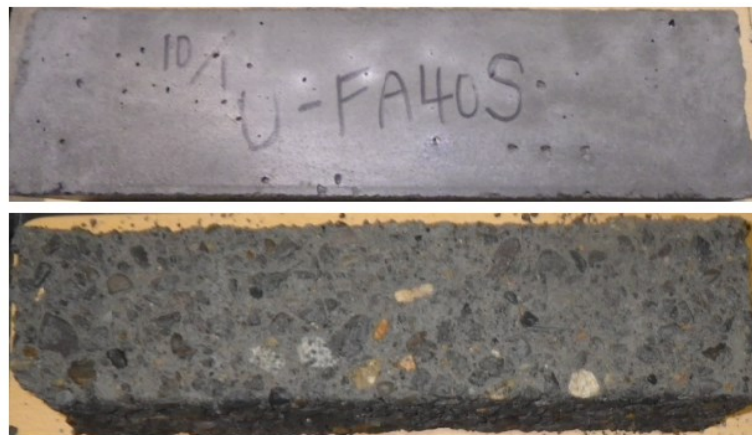


写真-3.13 U-FA40S 供試体（上：0 サイクル，下：150 サイクル後）

## ii) FA 原粉および JIS II 種 FA の比較

図-3.27 および図-3.29 より，FA 原粉および JIS II 種 FA に着目して比較すると，両骨材ともに凍害劣化の進行は原粉と比較して JIS II 種 FA の配合で速く，FA40%置換の供試体ではその特徴が顕著であった．この結果については検討が必要であるが，FA 原粉でも JIS II 種 FA と同等以上の耐凍害性を発現することができると推察される．

## iii) 内割置換と外割置換の比較

図-3.32 より，FA 原粉を用いた配合では外割置換の供試体は内割置換の供試体に比べて相対動弾性係数が高い傾向が見られ，JIS II 種 FA を用いた配合では外割置換の供試体が 120 サイクルで低い値を計測したが，180 サイクル終了時点では同等の相対動弾性係数を計測した．これはやはり外割置換の配合の方がセメントの量が多く，水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される．

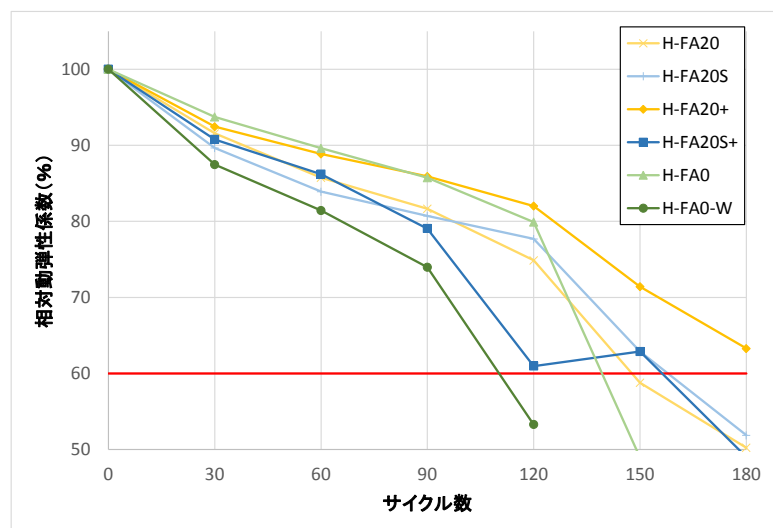


図-3.32 相対動弾性係数（内割置換と外割置換，水結合材比）

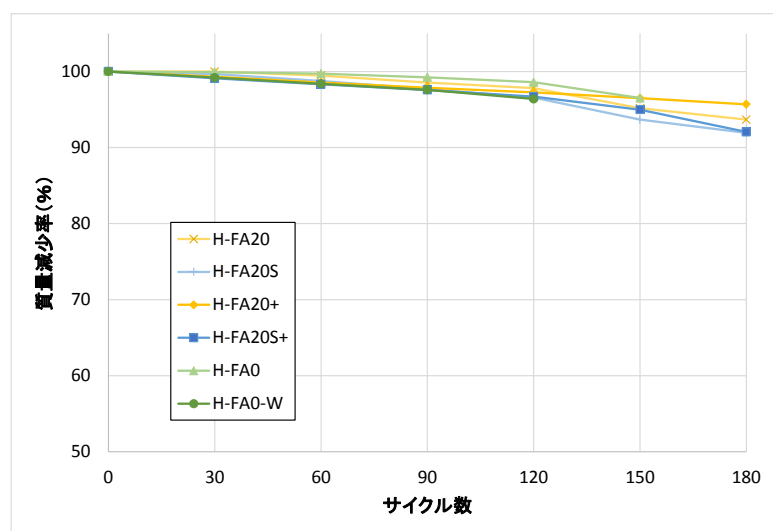


図-3.33 質量減少率（内割置換と外割置換，水結合材比）

#### iv) 水結合材比の違いが与える影響

北海道産の骨材について図-3.33より，水結合材比の低い（50%）の配合の方が水結合材比の高い（57%）の配合よりも相対動弾性係数が低い傾向が見られ，図には載っていないがFA置換率20%，40%の配合に至っては，30サイクル時点で計測不能という結果であった．本来であれば水結合材比の低い配合の方がセメントの割合が多くなり，耐凍害性が優れるはずであるが凍結融解試験に必要な微細な空気が連行できていなかったのではと推察される．

図-3.35に雲仙産骨材を使用し，水結合材比50%，FA原粉を40%置換した供試体について空気量を6.2%，4.1%に変化させた供試体の相対動弾性係数を示す．養生期間を短縮するため，水中養生1週間後に促進養生を1週間行い，水中養生1ヶ月の供試体と同等の相対動弾性係数を計測したため，凍結融解試験を開始した．

雲仙産の骨材について図-3.30の水結合材比57%の供試体では60サイクルで対動弾性係数が60%を下回り，測定不能だったが，水結合材比50%の供試体では300サイクルまで計測することができ

た. また, 空気量 6.2%の供試体では約 8 割の相対動弾性係数を有しており, 高い耐凍害性を確認した. このことから, FA 原粉を混和した場合でも通常のコンクリートよりも多く空気量を入れることで高い耐凍害性を持たせることができると考察される.

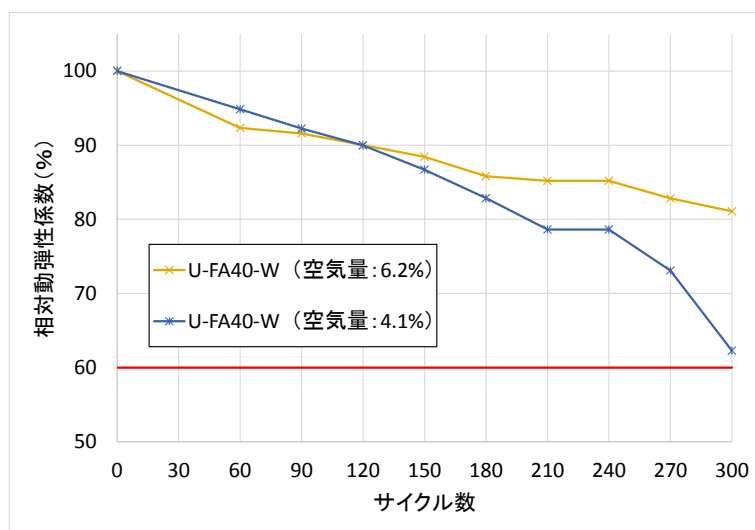


図-3.34 相対動弾性係数 (水結合材比, 空気量)

#### v) 養生期間の違いによる比較

北海道産骨材を使用し, FA 原粉と JISⅡ種 FA を 20%外割置換した供試体について水中養生期間を 1 ヶ月, 3 ヶ月に变化させた供試体の相対動弾性係数を図-3.35 に示す. 配合は本論文の 3.2.2 節の表-3.2 に示す配合表を使用した.

水中養生 1 ヶ月で凍結融解試験を開始するのに対し, FA 混和の配合はその時点ではまだ水和が十分でないために劣化進行が速くなった, と推察した. しかし, 図-3.35 から分かるように水中養生 3 ヶ月で凍結融解試験を開始した供試体についてもほぼ同様の相対動弾性係数の低下傾向を示した. この理由として, 3.2.1 節の図-3.4, 図-3.5 に示す粒度分布から分かるように, 北海道産細骨材が雲仙産細骨材に比べて粒径が大きく, 粒度分布が大きい. そのため, コンクリート内部に粗の部分が多く存在し, 相対動弾性係数が低く, 耐凍害性が低い可能性が考えられる.

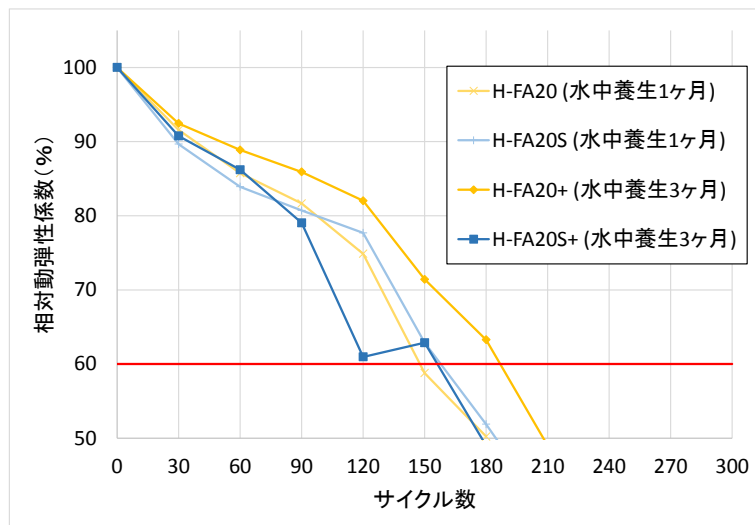


図-3.35 相対動弾性係数 (養生期間)

#### vi) ブリーディング試験

耐凍害性に影響する要因の一つであるブリーディングについて北海道産骨材を用いてブリーディング試験（JIS A 1123 に従い、容器は実積率試験容器：φ24×22cm を使用）を行った。得られた結果を図-3.36 に示す。

図-3.36 よりブリーディング試験の結果を見てみると、FA 混和の有無による影響は小さいため、ブリーディングが耐凍害性に与えた影響も小さいと考えられる。また、実積率試験容器を使用することで過剰にブリーディング率が計測される報告<sup>1)</sup>もあるが、それを考慮しても 2%前後の値になると推察される。

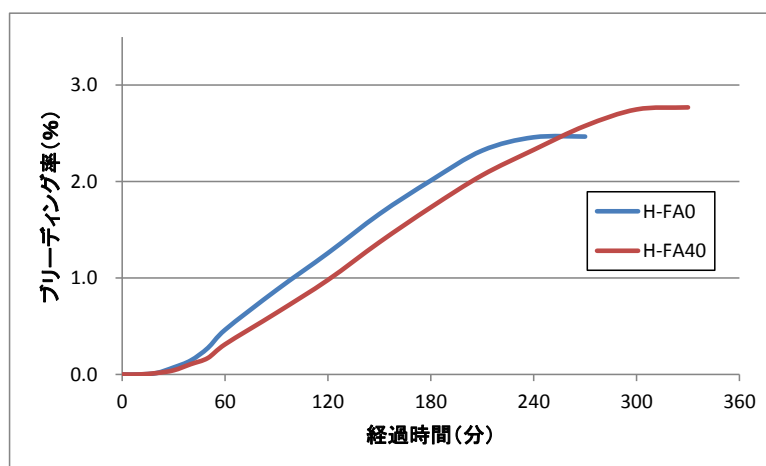


図-3.36 ブリーディング率（北海道産骨材）

### 3.4 まとめ

本研究では、ASR をフライアッシュにより抑制することを目的としつつ、JIS に適合するものだけでなく、フライアッシュ原粉による抑制効果を明らかにすることを目指した。そのため 2 種類の反応性骨材を用いて ASR を意図的に発生させ、その上でフライアッシュのうち主に流通している JIS II 種 FA に加え、FA 原粉も使用し、

- i) ASR 抑制
- ii) 圧縮強度とヤング係数
- iii) 塩化物イオン浸透抵抗性
- iv) 耐凍害性

の 4 項目について長期的な実験を行うことで比較・検討し、フライアッシュ原粉利用の有効性について考察することを目的とした。

今回の研究によって得られた結論は以下の通りである。

#### i) ASR 抑制

- ・北海道産骨材において、FA 未混和の配合は膨脹量が約 8000  $\mu$  で収束し、FA20%置換、FA40%置換の配合ではそれぞれ約 4000  $\mu$ 、約 300  $\mu$  で収束した。同様に雲仙産骨材においても、FA 未混和の配合は膨脹量が約 5500  $\mu$  で収束し、FA20%置換、FA40%置換の配合ではそれぞれ約 1000  $\mu$ 、約 300  $\mu$  で収束した。FA 混和による ASR 膨張の抑制、および FA20%置換の配合においてはアル

カリ量  $12\text{kg/m}^3$  の高アルカリでは膨張の十分な抑制に至らないことから FA 置換率が多いほど ASR 抑制効果が大きいことが確認された。

- FA 原粉と JISⅡ種 FA では、ASR 膨張の抑制効果に差は見られなかった。FA の ASR 抑制において重要な成分である  $\text{SiO}_2$  の含有量に差が無かったためと考えられる。
- 内割置換と外割置換では、FA を外割置換した配合の方が早期に ASR 膨張が発生し、収束時点では内割置換に比べて  $1000\mu$  程度多く膨張が生じた。外割置換の方がセメント量における FA の割合が小さく、FA の抑制機構から考えても、内割置換よりも高い膨脹量を計測されたと推察される。
- 水結合材比の低い配合の方が早期に ASR 膨張が発生した。水結合材比の低い配合の方がセメントの割合が大きく、膨脹量が大きいと考察される。

## ii) 圧縮強度とヤング係数

- 北海道産、雲仙産骨産の両骨材において、FA 混和の配合では、材齢進行による圧縮強度の増進を確認した。FA の特長であるポゾラン反応により強度が増進したと考察される。また、FA 未混和および FA20%置換における配合の一部で、養生期間中に ASR が発生し、圧縮強度およびヤング係数が低下したと考えられる供試体があった。FA40%置換の配合ではなかったため、FA 置換率による差を確認した。
- 圧縮強度において、FA 原粉よりも JISⅡ種 FA を混和した配合の方が多少高くなる傾向が見られた。しかし、その差は最大でも  $6\text{N/mm}^2$  程度と小さいため、強度のみから判断すると、FA 原粉でも十分に利用できると考察される。
- 内割置換と外割置換では、圧縮強度をみると、FA を外割置換した配合の方が内割置換の配合より高い値を計測した。セメント量を減らしていないため圧縮強度が高いと考えられる。
- 水結合材比が低い配合の方がセメントの割合が大きいため圧縮強度が高くなると予想していたが、ほぼ同等の値を示した。さらにヤング係数をみると、水結合材比が低い配合の方がむしろ低くなっている。水結合材比が低い配合の方が使用した粗骨材量が減っているためだと考察される。

## iii) 塩化物イオン浸透抵抗性

- 北海道産骨材において、FA 未混和の配合に比べて、FA 混和の配合の浸透抵抗性の向上を確認した。FA 置換率についても、FA20%置換の配合よりも FA40%置換の配合において浸透抵抗性の向上を確認した。FA が多く含まれているためポゾラン反応が起きやすく供試体内部が緻密化したと考察される。
- FA 原粉と JISⅡ種 FA では、表面付近では多少のばらつきがあったが、コンクリート内部では塩化物イオン量の値が低く、同程度の浸透抵抗性が見られた。FA 原粉が JISⅡ種 FA と同等の  $\text{SiO}_2$  および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を含有しており、ポゾラン反応を起こしたためだと考えられる。
- FA を外割置換した配合の方が表面付近で高い塩化物イオン量を計測したが、それより内部では同程度の塩化物イオン量を計測した。外割置換の配合の方がセメントの量が多く、水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される。
- 水結合材比の違いが与える影響について、表面～ $15\text{mm}$  の範囲においてある程度のばらつきはあるが、それより内部では同程度の塩化物イオン量を計測した。今回の実験（浸漬期間 2 ヶ月、3 か所で計測）では水結合材比 50%、57%における差を確認できなかった。浸漬期間 12 ヶ月、5 か所

で計測することで水結合材比の影響を確認できると予想される。

#### iv) 耐凍害性

- ・両骨材において、今回の配合では 60～180 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回り、300 サイクルを待たず測定不能となってしまった。FA 未混和の配合は ASR ゲルの空気泡内への析出などが考えられる。FA 混和の配合で耐凍害性が低い理由としては、FA を混和したことで良質な空気を連行しづらい、凝結過程における微細な空気が消失した、初期強度が低く、水中養生 1 ヶ月で凍結融解試験を開始するため劣化進行が速くなった、などが考えられる。
- ・FA 原粉と JISⅡ種 FA では、両骨材ともに凍害劣化の進行は原粉と比較して JISⅡ種 FA の配合で速く、FA40%置換の供試体ではその特徴が顕著であった。この結果については検討が必要であるが、FA 原粉でも JISⅡ種 FA と同等以上の耐凍害性を発現することができると推察される。
- ・内割置換と外割置換では、FA を外割置換した配合の方が内割置換した配合と同等以上の相対動弾性係数を計測した。外割置換の配合の方がセメントの量が多く、水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される。
- ・水結合材比の低い配合において相対動弾性係数が低い傾向が見られた。本来であれば水結合材比の低い配合の方がセメントの割合が多くなり、耐凍害性が優れるはずであるが凍結融解試験に必要な微細な空気が連行できていなかったのではと推察される。

以上より、今回使用した FA 原粉について、北海道産、雲仙産骨産の両骨材で ASR 膨張の抑制効果は JISⅡ種 FA と同等であり、ASR 抑制目的の使用では代替できるものと考えられる。他の試験においても、JISⅡ種 FA と大きく異なることはなく、代替できる可能性が十分あると考えられる。FA 原粉を使用する場合、その FA 原粉について成分構成を事前に分析することでより細かな検討ができると推察される。

#### 参考文献

- 1) 高畑友彦，高橋敏樹，青木一久：測定条件の違いがブリーディング試験の結果に及ぼす影響，土木学会第 57 回年次学術講演会 2002.9

## 第4章 ASRの進行を抑制する技術

### 4.1 本章の目的

リチウムイオンを用いた ASR 補修工法には、塗布工法、ひび割れ注入工法、電気化学的浸透工法および内部圧入工法がある。塗布工法とひび割れ注入工法は併用して使用される場合が多いが、リチウムイオンの供給範囲がコンクリートの表層部およびひび割れ周辺部に限定されるという問題点がある。そこで本研究では、コンクリート表面に削孔を行い、そこから亜硝酸リチウム（以下、リチウムと表記）を加圧注入して内部に浸透させることにより、コンクリート内部の広範囲にリチウムを供給することが可能であるリチウム内部圧入工法について検討することとし、本研究では、北海道産、大分産の2種の反応性骨材を用いて供試体を作製し、それぞれの骨材での適切な圧入量や、圧入位置、膨張抑制挙動を検討することを目的とした。

### 4.2 亜硝酸リチウム内部圧入による ASR 抑制研究

#### 4.2.1 供試体概要及び配合

セメントに普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 57%として、反応性骨材を用いたコンクリート供試体を作製した。事前混合供試体では、反応性骨材に北海道産、雲仙産、大分産の3種類を使用した。本試験では膨張が確認されなかった雲仙産を除いた、北海道産、大分産の2種類の反応性骨材を使用し、圧入供試体を作製した。本試験で使用した配合を表-4.1に示す。前章で述べたように、北海道産反応性骨材を用いた供試体の配合では、細骨材が通常の骨材よりも粗いため、ペシマム比率とは違う比率とした。さらに石灰石粉を添加することで、打設時の流動性を考慮した配合となっている。コンクリート中の等価アルカリ量が北海道産、大分産は  $9\text{kg/m}^3$  となるように NaCl を添加した。

表-4.1 配合表

産地	反応性骨材の割合	水セメント比(%)	単位量(kg/m³)								AE減水剤	NaCl
			水	セメント	細骨材			粗骨材				
					普通	石灰石粉	反応性	普通		反応性		
								小	大			
北海道	細骨材40% 粗骨材50%	57	168	295	549	100	438	182	182	371	0.7375	13.87
雲仙	細骨材50% 粗骨材50%				422	-	448	240	240	507		19.53
大分	粗骨材80%				844		-	96	96	371		13.87

#### 4.2.2 リチウム圧入量の算定

以下の一例では Li/Na モル比が 0.8 となるよう、亜硝酸リチウム 40%水溶液を圧入した。圧入量の算定結果を以下に示す。

- ① コンクリート中のアルカリ総量  

$$Z = 9.0 \text{ kg/m}^2$$
- ②  $\text{Li}^+/\text{Na}^+$  の mol 比の設定 Li/Na モル比は 0.8 とした。
- ③  $\text{Na}_2\text{O}$  の分子量 = 62

Na<sub>2</sub>O のコンクリート中の mol 数を k<sub>1</sub> とすると、

$$k_1 = 9.0 \div 62 = 0.145 \text{ mol}$$

そのうち、Na<sup>+</sup>の mol 数を k<sub>2</sub> とすると、

$$k_2 = k_1 \times 2 = 0.290 \text{ mol} \quad (\text{Na}_2\text{O} \text{ 中に Na}^+ \text{ は 2 つ存在するため})$$

④ 亜硝酸リチウム LiNO<sub>2</sub> の分子量 = 53

Li<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>の mol 比を 0.8 とするため、LiNO<sub>2</sub> の必要 mol 数 k<sub>3</sub> は、

$$k_3 = k_2 \times 0.8 = 0.232 \text{ mol}$$

コンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの LiNO<sub>2</sub> 必要量を X とすると、

$$X = k_3 \times 53 = 12.310 \text{ kg/m}^3$$

⑤ 使用する亜硝酸リチウム水溶液の濃度 = 40%

コンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの亜硝酸リチウム水溶液の必要量を X' とすると、

$$X' = X \div 0.4 = 12.310 / 0.4 = 30.77 \text{ kg/m}^3$$

#### 4.2.3 リチウム事前混合供試体の概要

まず、ASR 抑制に必要なリチウム量を明らかにするために、供試体作製時にリチウムを事前混合する場合について検討した。ASR 抑制剤として添加するリチウム化合物は、国内での使用実績が最も多い亜硝酸リチウム (LiNO<sub>2</sub>) を使用し、コンクリート中への浸透性を阻害しない範囲で高濃度である 40% 水溶液とした。使用した亜硝酸リチウムを写真-4.1 に示す。Li/Na モル比 (添加するリチウムとコンクリート内部のナトリウムの比) が 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 の 4 種類の φ100×200mm の円柱供試体を作製し、打設翌日に脱型後、7 日間 20℃ で湿布養生、その後、ASR 促進室に静置し、劣化促進させた。それぞれの混合したリチウムの量を表-4.2 に示す。



写真-4.1 亜硝酸リチウム

表-4.2 亜硝酸リチウム事前混合量

1m <sup>3</sup> あたり	Li/Na モル比別 リチウム混合量 (kg)			
	0.2	0.4	0.6	0.8
北海道産	7.7	15.4	23.1	30.8
雲仙産	10.3	20.5	30.8	41.0
大分産	7.7	15.4	23.1	30.8

#### 4.2.4 リチウム圧入供試体の概要

図-4.1 に圧入供試体の寸法と削孔位置，表-4.3 に圧入供試体一覧を示す．圧入用の供試体寸法は  $150 \times 200 \times 400\text{mm}$  で作製した．リチウムを圧入する段階を3段階とし，ひび割れが発生する前の段階を無劣化供試体，ひび割れが目視で確認できた段階を早期圧入供試体，一般的に圧入補修が適用される段階を通常圧入供試体とした．圧入するリチウム量が異なる Li/Na モル比 0.4, 0.6, 0.8 の3種類の供試体と無圧入の供試体を作製し，劣化促進させた．圧入施工時のリチウム圧入量の算定は，ASR リチウム工法協会の基準書<sup>1)</sup>に準拠した．また，早期圧入供試体においては，削孔位置，削孔数の違う A 供試体と B 供試体の2種類とし，リチウムの圧入量が同じであっても，削孔数を増やすことで抑制効果が增大するかを検討することを目的としている．反応性骨材には北海道産骨材を使用した．また，通常圧入供試体においては，A 供試体のみとし，北海道産，大分産の骨材を使用し作製した．供試体は打設翌日に脱型後，7日間湿布養生，その後は劣化促進室（温度  $35 \sim 40^\circ\text{C}$ ，湿度 100%）に静置し，劣化促進を開始した．

早期圧入供試体はひび割れが目視で確認することができた膨張量  $400\mu$ ，通常圧入供試体は膨張量  $2000\mu$  に達した時点でリチウム圧入を行った．

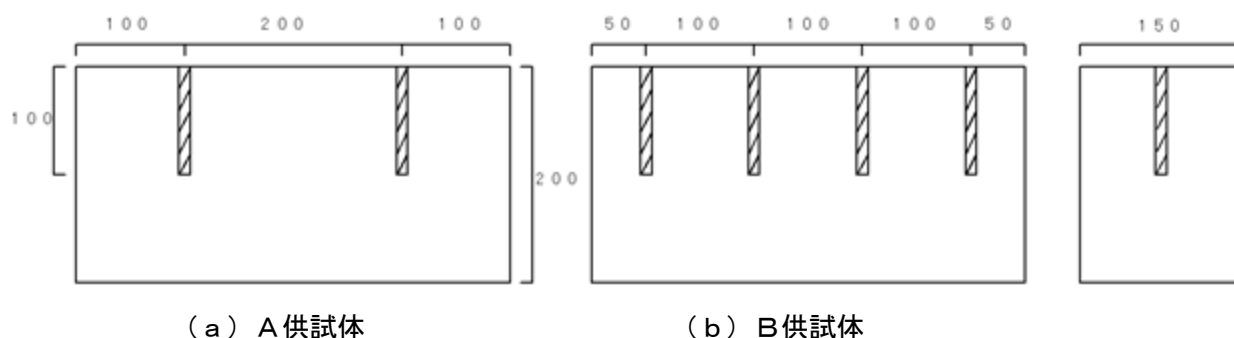


図-4.1 供試体概要 (mm)

表-4.3 供試体一覧

Li/Na モル比	無劣化	早期圧入		通常圧入
無圧入	—	A 供試体	—	A 供試体
0.4	A 供試体	A 供試体	B 供試体	A 供試体
0.6	A 供試体	A 供試体	B 供試体	A 供試体
0.8	A 供試体	A 供試体	—	A 供試体
使用骨材	—	北海道産		北海道産
	—	—		大分産

#### 4.2.5 リチウム圧入手順

劣化後，通常圧入供試体では，リチウムが圧入時にひび割れからリチウムが漏出することを防止するために供試体の上面以外を大分産供試体では PCM で，北海道産ではエポキシ樹脂で 2mm 程度被覆した．なお，この被覆は ASR の進行に必要な水分の供給を阻害する可能性があるため，リチウム圧入完了後に全て削り取った．次に，リチウム圧入のための  $\phi 10 \times 100\text{mm}$  の圧入孔を A 供試体で 2ヶ所，

B 供試体で4ヶ所削孔した。供試体の削孔位置を図-4.1（図中斜線が削孔位置）に示す。無圧入供試体は、圧入供試体と同様の条件でどの程度膨張するのかを検討するために、リチウム圧入は実施しないものの削孔は行った。無劣化、早期圧入供試体については、注入圧力を0.4MPaに、通常圧入供試体では上面からのリチウム漏れを考慮して0.2MPaとした。圧入する亜硝酸リチウムはコンクリート中のLi/Naモル比がそれぞれ0.4、0.6、0.8となる量（1体あたり、148g、222g、295g）とし、圧入を行った。なお、コンクリート練り混ぜ時に亜硝酸リチウムをあらかじめ練り込むプレミクス方式の場合には、モル比が0.4であっても膨張が生じないことをあらかじめ確認している（4.3.1参照）。

無劣化供試体については、材齢14日に圧入を行ったが、すべての供試体において1つの圧入孔につき規定量のうちの50g程度（約0.2モル）しか圧入をすることができなかった。早期圧入と通常圧入の供試体については、所定の量のリチウムの圧入を完了できた。

削孔の様子を写真-4.2に、圧入の様子を写真-4.3に示す。圧入期間は通常2日間程度だが、今回は規定量のリチウムを圧入することを目的としているため、圧入が完了するまで、最大で1週間程度まで圧入を続けた。その後、再びASR促進室に戻し、劣化促進を行った。使用した器具を写真-4.4に示す。



写真-4.2 削孔の様子



写真-4.3 リチウム圧入の様子



写真-4.4 使用器具

#### 4.2.6 膨張量測定

膨張量測定を行うために埋め込んだコンタクトゲージ用プラグの位置を図-4.2に示す。プラグは供試体の側面に、端部から 50mm の位置より片面 8 ヶ所に埋め込んだ。鉛直方向は 100 mm，供試体軸方向は 200 mm を基長とし，鉛直方向 4 ヶ所（区間 1～4），供試体軸方向の上面側 3 ヶ所（区間 5～7）および上面側 3 ヶ所（区間 8～10），計 10 ヶ所で長さ変化を測定し，各供試体の膨張量の 1 週間ごとの変化を計測した。リチウム事前混合供試体は 180°正対する側面 2 ヶ所に基長 100 mm でプラグを埋め込み，各供試体の膨張量の 1 週間ごとの変化を測定した。

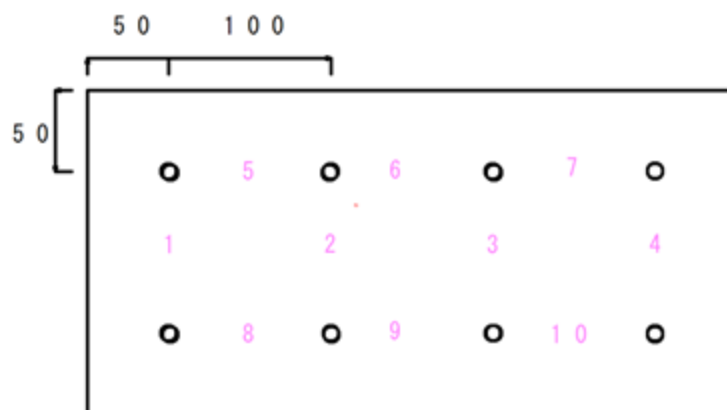


図-4.2 供試体プラグ位置 (mm)

#### 4.2.7 亜硝酸リチウムの浸透状況の確認試験

早期圧入供試体は圧入後 50 日，通常圧入供試体は圧入後 20 日後にコンクリートカッターにより供試体を圧入孔に沿って 75×200×400mm に切断し，切断面の水気を取った後，露出面に呈色反応試薬 TDI（トルエン・ジ・イソシアナート）を噴霧した。切断時の様子を写真-4.5 に示すように，切断時に水を使用するが，本研究では水の影響は考慮していない。TDI は亜硝酸リチウム内の亜硝酸イオンと反応して茶褐色に変色する性質を持つため，変色した範囲を亜硝酸イオンの浸透範囲と見なすことができる。ASR 抑制に効果を発揮するのはリチウムイオンであり，実際に検出すべき対象は亜硝酸イオンでなくリチウムイオ

ンであるが，両イオンは共に圧入によって移動し，その後の拡散による移動量は小さいため，変色範囲をもって，概ねリチウムイオンの分布状況を示すことができると報告されている<sup>1)</sup>．使用した試薬を写真-4.6に，呈色試験による変色した例を写真-4.7に示す．供試体切断面の変色範囲をプランニメーターにより測定し，浸透面積とした．これを断面積で除した値を浸透率とした．

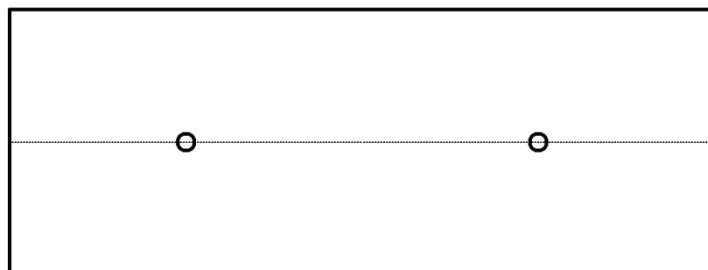


図-4.3 圧入供試体切断図



写真-4.5 供試体切断の様子

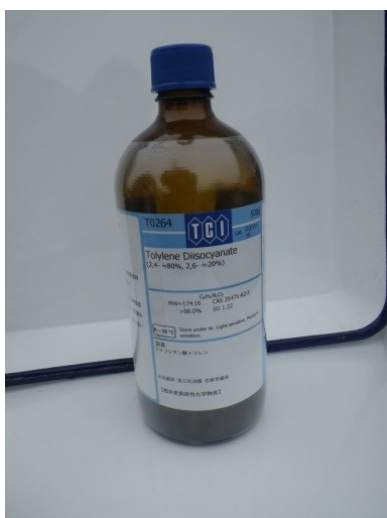


写真-4.6 TDI



写真-4.7 呈色試験による変色例

### 4.3 試験結果

#### 4.3.1 リチウム事前混合の効果

各反応性骨材を使用したリチウム事前混合供試体の膨張量の測定結果一覧を表-4.5 に示す。また、図-4.4 に北海道産反応性骨材、図-4.5 に雲仙産反応性骨材、図-4.6 に大分産反応性骨材を用いたリチウム事前混合供試体の膨張量の変化を示す。それぞれの正の値は膨張を表す。

##### (1) 北海道産反応性骨材

表-4.5、図-4.4 より、ASR 促進 50 日経過までは Li/Na モル比による膨張量の大きな差はなかった。しかし、ASR 促進 53 日経過後に Li/Na モル比 0.2 の供試体が膨張傾向になった。その後、ASR 促進 100 日経過時には膨張量が 4000 $\mu$  を超えた。同時期に作製したものではないが、同配合のリチウム事前混合をしていない供試体と同程度の膨張量となった。少量のリチウムでは、膨張量を低下させるのではなく、殆どリチウムイオンの効果が現れない可能性がある。一方、Li/Na モル比 0.4 で十分な ASR 抑制効果があることが確認された。

##### (2) 雲仙産反応性骨材

表-4.5 より、ASR 促進 80 日経過しても Li/Na モル比の違いによる膨張量の変化は見られない。図-4.5 より、各 Li/Na モル比の平均の膨張量では Li/Na モル比 0.2 の供試体の膨張量が最も少ない。このことより、雲仙産反応性骨材を用いたリチウム事前混合では、若干の差はあるが Li/Na モル比 0.2 でも ASR 抑制効果があると言える。

##### (3) 大分産反応性骨材

表-4.5、図-4.6 より、ASR 促進約 50 日で Li/Na モル比 0.2 の供試体が膨張傾向になった。これは、図-4.6 における北海道産反応性骨材を用いたリチウム事前混合と似ており、リチウムを混合しない場合と同程度の膨張量に達している。また、大分産反応性骨材においても、Li/Na モル比 0.4 で ASR 抑制効果があると言える。

表-4.5 事前混合 膨張量最終測定結果

Li/Na モル比	供試体番号	膨張量		
		北海道産	雲仙産	大分産
0.2	1	6595	270	3255
	2	4865	275	5650
	3	5470	100	4225
0.4	1	-495	165	80
	2	-240	70	645
	3	-50	205	945
0.6	1	-335	40	35
	2	-460	240	-95
	3	-115	150	-30
0.8	1	-585	210	-220
	2	-280	-35	-250
	3	20	365	-55

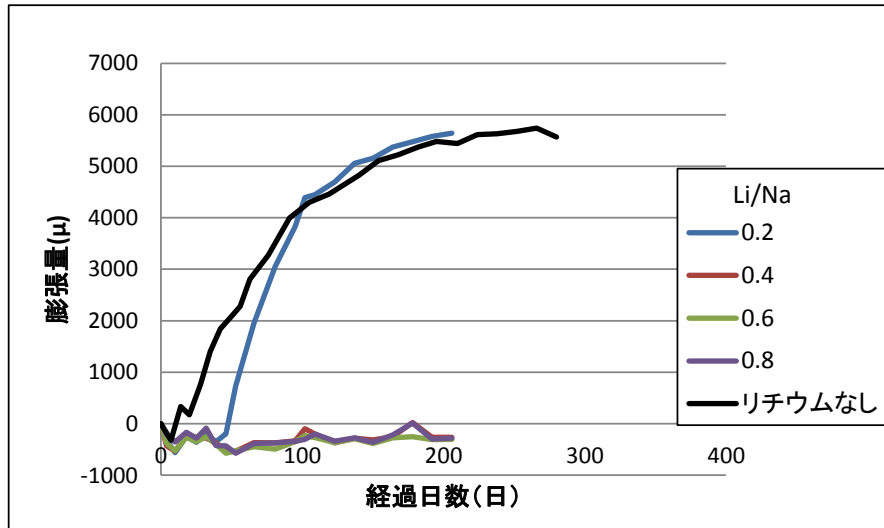


図-4.4 北海道産事前混合 膨張量の経時変化

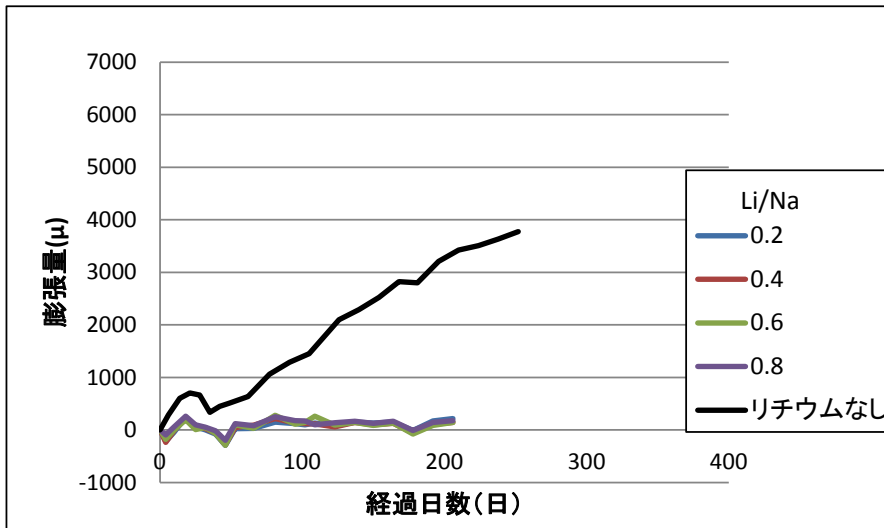


図-4.5 雲仙産事前混合 膨張量の経時変化

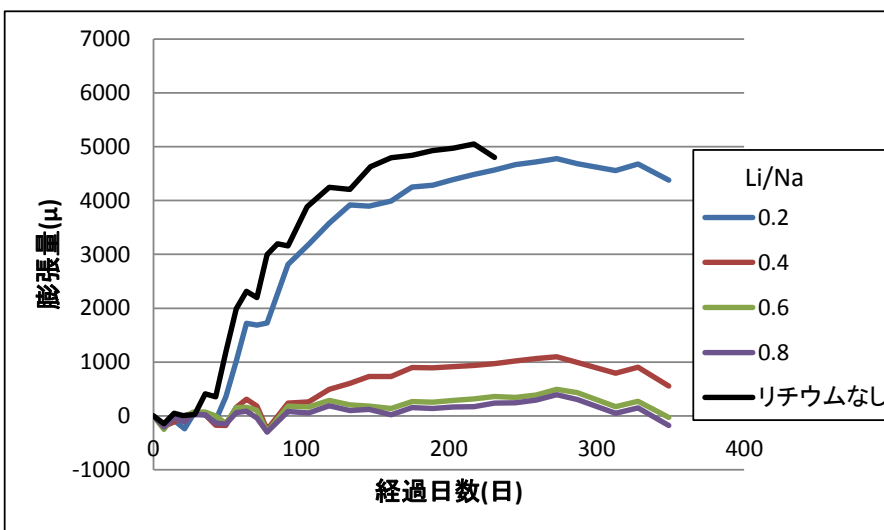


図-4.6 大分産事前混合 膨張量の経時変化

#### 4.3.2 リチウム圧入の効果

リチウム圧入を行った供試体の膨張量の測定結果一覧を表-4.6 に示す。また、表中の「鉛直方向」の値は図-4.2 における区間 1～4 の膨張量の平均値、「水平方向上側」の値は区間 5～7 の平均値、「水平方向下側」の値は区間 8～10 の平均値となっている。各供試体の鉛直方向の膨張量変化を図-4.7～図-4.9 に示す。図中の点線はリチウム圧入を行った時期を表し、それぞれの正の値は膨張を示す。

##### i) 圧入量・削孔数の影響

図-4.7 より、リチウム事前混合は、Li/Na モル比 0.4 で効果があったのに対し、早期にリチウム圧入を実施した場合では、圧入を行わなかった供試体と比較して膨張量が 2000 $\mu$  程度減少しただけに留まり、膨張抑制効果が減少した。早期に圧入を行った場合、供試体内部のひび割れの入りが不十分であったために、リチウムが供試体内に十分に行きわたらず、リチウムの浸透状況が変わってしまったためであると考えられる。圧入するリチウムを増加させることにより、膨張抑制効果は大きくなる結果が得られた。また、削孔数を増加させた B 供試体と A 供試体を比較すると、同量の 0.4 モルの供試体で膨張抑制効果に大きな差が生じた。これらより、試体内部のひび割れが不十分な場合、削孔間隔を短くすることにより、同量のリチウムでより効率的に膨張抑制をすることができることを確認した。

図-4.8, 図-4.9 の 2000 $\mu$  時にリチウムを圧入したそれぞれの供試体では、事前混合と同様に 0.4 モル以上のリチウム量で膨張が完全に抑制された。

表-4.6 圧入供試体 膨張量最終測定結果

圧入時期	骨材産地	供試体種類	Li/Na モル比	膨張量 ( $\mu$ )			促進 日数
				鉛直方向	水平方向上側	水平方向下側	
早期 (400 $\mu$ 時圧入)	北海道産	A	未圧入	7750	4973	5147	418
			0.4	5713	2897	3297	
			0.6	2840	2413	2963	
			0.8	2220	1737	2257	
		B	0.4	2270	3233	3453	
			0.6	3698	2300	4507	
通常 (2000 $\mu$ 時圧入)	北海道産	A	未圧入	5433	3930	3603	313
			0.4	2613	4490	2747	
			0.6	2403	2010	1387	
			0.8	1725	2783	1663	
通常 (2000 $\mu$ 時圧入)	大分産	A	未圧入	4780	4307	4617	509
			0.4	1728	2233	1887	
			0.6	1475	2630	2177	
			0.8	2403	3060	1783	

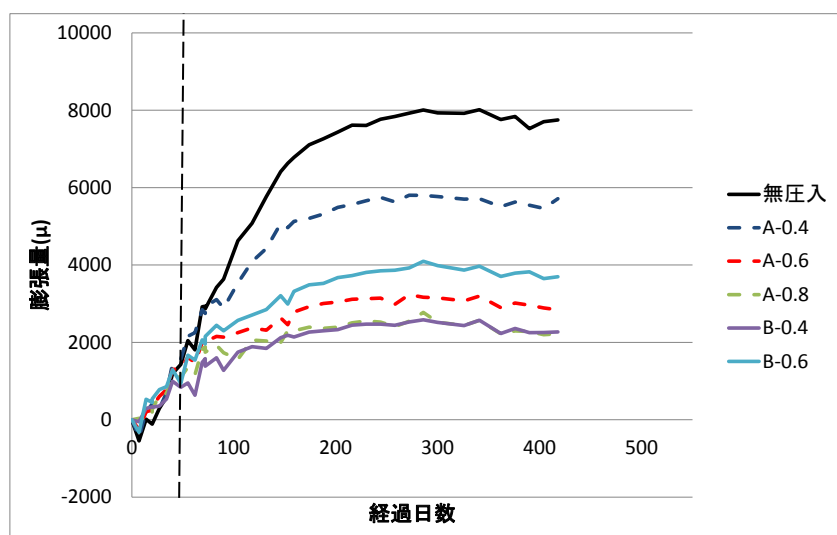


図-4.7 北海道産早期圧入供試体 膨張量の経時変化

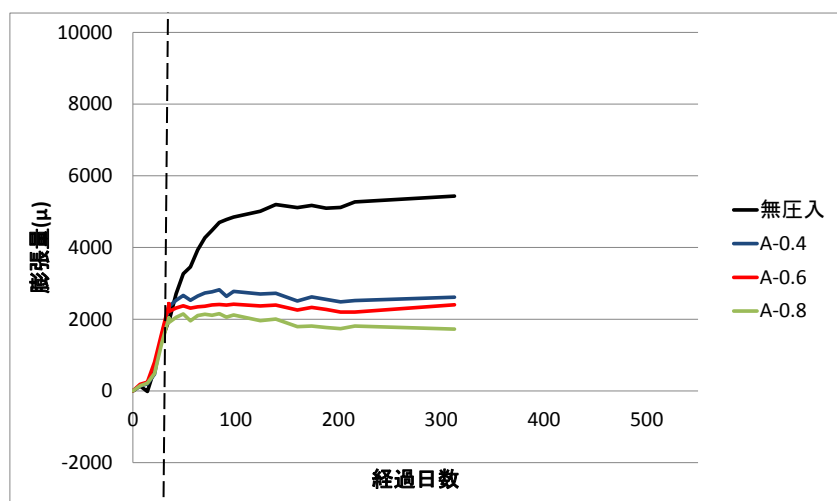


図-4.8 北海道産通常圧入供試体 膨張量の経時変化

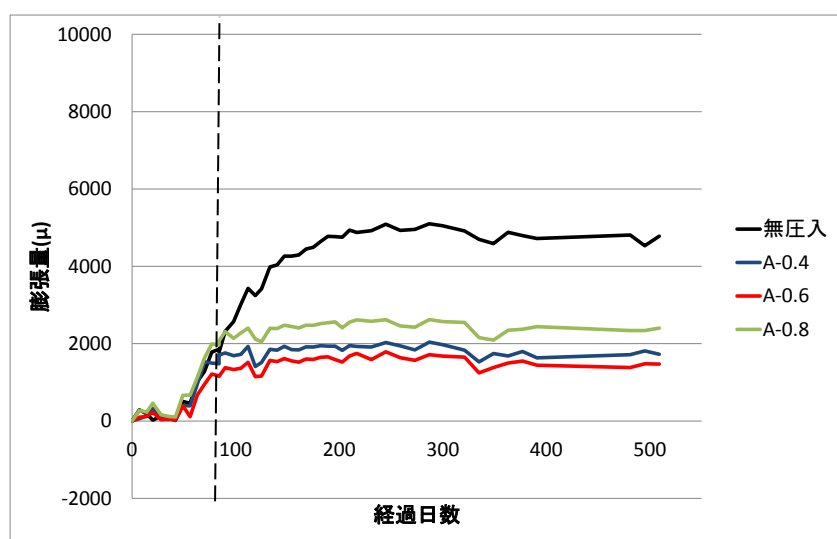


図-4.9 大分産通常圧入供試体 膨張量の経時変化

## ii) 圧入時期の影響

i) より、早期に圧入を行った場合では“リチウム量を増加”“圧入孔を増加”させることで膨張抑制効果が見られた。しかし、これらの供試体は 400 $\mu$  時にリチウム圧入を行ったにもかかわらず、圧入直後から抑制効果はみられず、最終的な膨張量のみ減少した。2000 $\mu$  時に圧入を行った図-4.8、図-4.9 の供試体ではそれぞれ圧入直後から膨張が完全に抑制されている。これらから、圧入段階のシリカゲルの状態によって抑制効果が変化する可能性が存在する。

### 4.3.3 圧入した亜硝酸リチウムの浸透状況

リチウム圧入を行った供試体をコンクリートカッターで切断し、切断面に対して呈色反応試薬 TDI を噴霧したところ、写真-4.8～写真-4.19 に示すような亜硝酸イオンの存在を示す茶褐色の呈色反応が見られた。また、表-4.7 に浸透面積および浸透率を示す。ここでの早期圧入供試体は北海道産骨材の供試体、通常圧入は大分産骨材の供試体を示す。

#### i) 膨張量との関係

図-4.7 において早期に圧入を行った 0.4 モル A 供試体の ASR の抑制効果が低い結果となっていたが、表-4.7、写真-4.11 より、今回の呈色試験においては他の供試体よりも浸透範囲は若干低い値となったが、顕著な差は見られなかった。また、どの供試体においても削孔した供試体上側は、リチウムイオンが浸透しているが、削孔位置から遠い供試体下側はリチウムイオンが浸透していないことが分かる。しかし、図-4.7～図-4.9 のように膨張抑制効果は確認されていることから、膨張抑制されている範囲が、それ以外の部分を拘束する為、本研究の供試体では膨張が停止しているのだと考えられる。

#### ii) 圧入量による比較

写真-4.11～写真-4.13 において④～⑥の供試体を比較すると、④の供試体の茶褐色に変色した面積が小さかった。⑤、⑥の供試体は④と比較すると変色した面積は若干大きかった。また、⑤の供試体においてリチウムイオンが鉛直方向にあまり浸透していなかったことが分かった。これは写真-4.12 において、圧入孔の先端に削孔時に発生したとみられる削孔粉が堆積しており、それがリチウムイオンの鉛直方向の浸透を妨げたと考えられる。

写真-4.14、写真-4.15 において⑦、⑧の供試体を比較すると、⑦の供試体の方が変色した面積が大きかった。⑦の供試体は削孔間も変色しているが、⑧の供試体は供試体中央部が変色していないように見える。浸透面積を比較しても、⑦の供試体の方が広く浸透しており、これにより、図-4.7 において⑧の供試体の膨張量が大きかったと考えられる。

#### iii) 削孔数による比較

写真-4.11、写真-4.14 において④、⑦の供試体を比較すると、明らかに削孔数によりリチウムイオンの浸透具合が違うのが分かる。写真-4.12、写真-4.15 において⑤、⑧の供試体を比較しても、⑧の供試体の方が茶褐色に変色した面積が大きいたことが分かる。これにより、削孔数を増加させることにより広い範囲にリチウムイオンが浸透し、図-4.7 のように同量のリチウムで膨張効果に差が生じたものだと考えられる。

表-4.7 呈色反応試験結果

供試体名		削孔数	浸透面積(cm <sup>2</sup> )	浸透率(%)	写真番号
無劣化	0.4 モル	2 (A 供試体)	150.7	18.8	①
	0.6 モル		196.7	24.6	②
	0.8 モル		240.4	30.0	③
早期圧入 (北海道産)	0.4 モル	2 (A 供試体)	354.7	44.3	④
	0.6 モル		384.5	48.1	⑤
	0.8 モル		393.5	49.2	⑥
	0.4 モル	4	580.4	72.6	⑦
	0.6 モル	(B 供試体)	547.9	68.5	⑧
通常圧入 (大分産)	0.4 モル	2 (A 供試体)	421.6	52.7	⑨
	0.6 モル		499.9	62.5	⑩
	0.8 モル		574.6	71.8	⑪

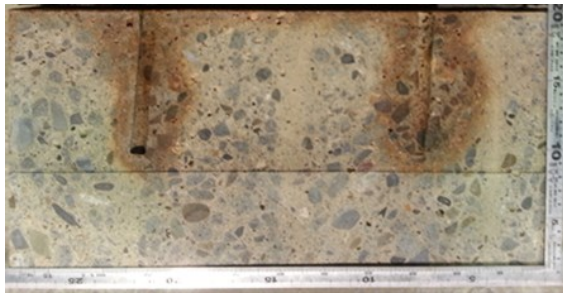


写真-4.8 ① 無劣化 A-0.4 モル

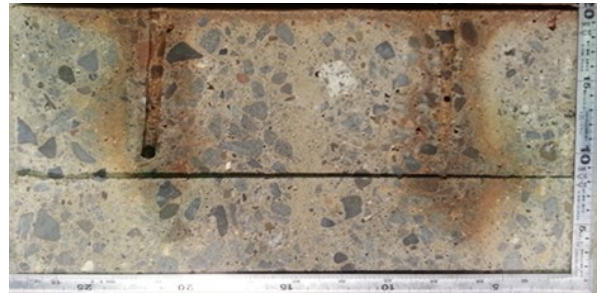


写真-4.9 ② 無劣化 A-0.6 モル



写真-4.10 ③ 無劣化 A-0.8 モル

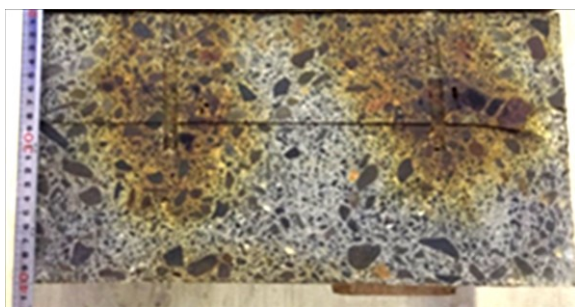


写真-4.11 ④ 早期圧入 A-0.4 モル

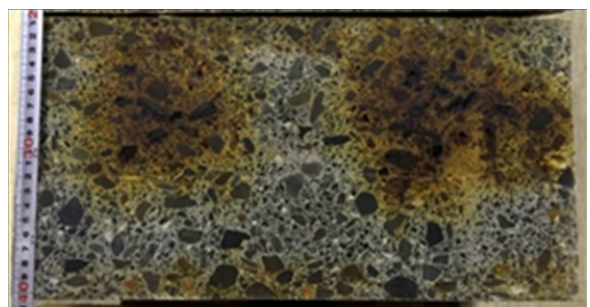


写真-4.12 ⑤ 早期圧入 A-0.6 モル

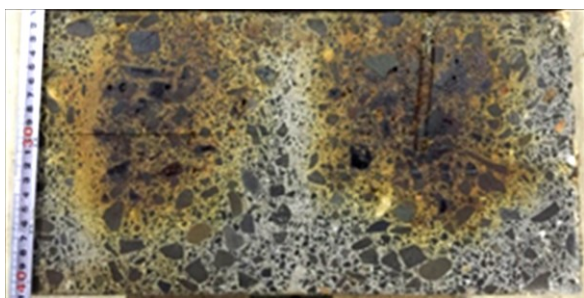


写真-4.13 ⑥ 早期圧入 A-0.8 モル

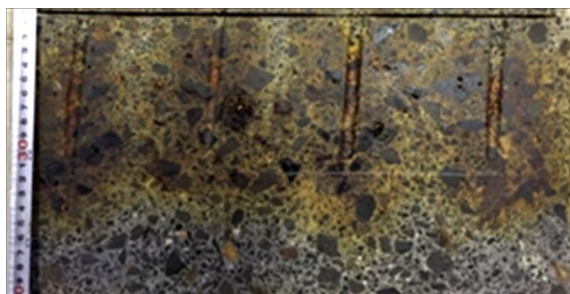


写真-4.14 ⑦ 早期圧入 B-0.4 モル

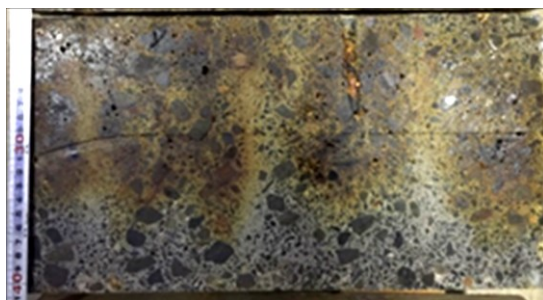


写真-4.15 ⑧ 早期圧入 B-0.6 モル



写真-4.16 ⑨ 通常圧入 A-0.4 モル

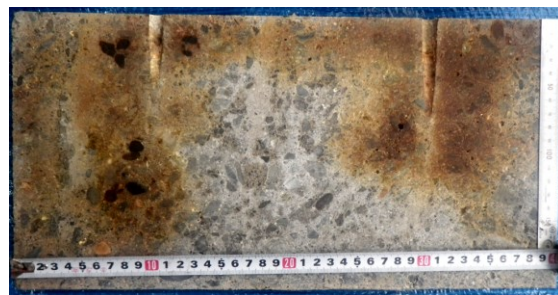


写真-4.17 ⑩通常圧入 A-0.6 モル

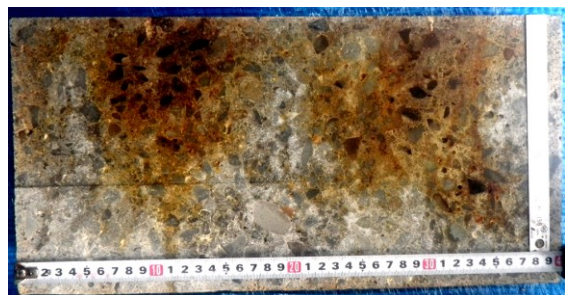


写真-4.18 ⑪ 通常圧入 A-0.8 モル



写真-4.19 ⑨ 断面呈色写真

#### iv) 圧入時期の違いによる浸透範囲の差

早期に圧入した④～⑧の供試体と劣化が進展した後に圧入を行った⑨～⑪の供試体を比較すると、早期に圧入を行った場合よりも浸透範囲が高い傾向が見られた。しかし、その差は著しいものではなく、同量のリチウム量である④と⑨を比較しても2割程度であり、写真からも浸透していない範囲が十分に確認できる。しかし、図-4.9に示したように、圧入直後から抑制効果は確認されている。4.3.2節 i)や ii)に示したように抑制された範囲の拘束や、圧入段階のシリカゲルの状態によって大きく変化している可能性が存在する。

#### v) 表面被覆による影響

写真-4.20～写真-4.23に膨張が2000 $\mu$ 時に圧入を行った北海道産供試体の呈色反応試験結果を示す。本供試体は浸透範囲が広く、プランニメーターによって測定することができなかった為、写真のみ掲載している。同じ通常圧入供試体である⑨～⑪の供試体と違い全体に万遍なく浸透していることが確認された、最も圧入量が多い⑭の供試体では浸透面積が100%に近い浸透範囲である。これらの供試体は、⑨～⑪の供試体とは4.2.4に示した表面被覆の材料が違い、⑨～⑪の大分産の供試体ではPCM、⑫～⑭の北海道産の供試体では樹脂で被覆した。より硬く、表面に空気の逃げ場がない樹脂で被覆した場合、より内部に広く、万遍なく浸透したものと考えられる。

写真-4.23に写真-4.20 ⑫供試体の骨材周囲の写真を示す。写真から分かるように、骨材や、骨材周囲がASRによって割れており、そこを辿って茶褐色に変色していることが分かる。このようにリチウムがひび割れをとおって浸透していることが確認できた。また、写真-4.8～写真-4.10に劣化していない場合のリチウム浸透範囲を示した。既往の研究ではひび割れがない状態でもリチウムが浸透するとされてきたが本試験では確認できなかった。膨張量とは別に、供試体内部の水分状態等も同時に測定する必要があると思われる。

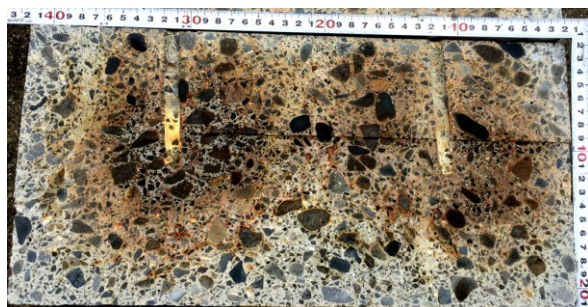


写真-4.20 ⑫ 通常圧入 A-0.4 モル

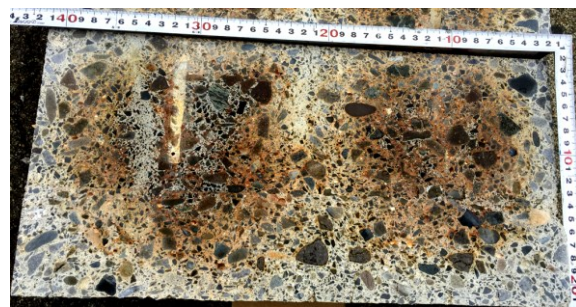


写真-4.21 ⑬ 通常圧入 A-0.6 モル

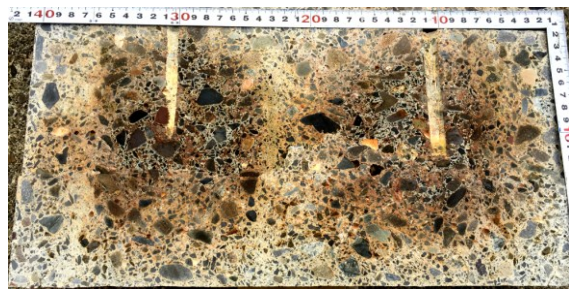


写真-4.22 ⑭ 通常圧入 A-0.8 モル

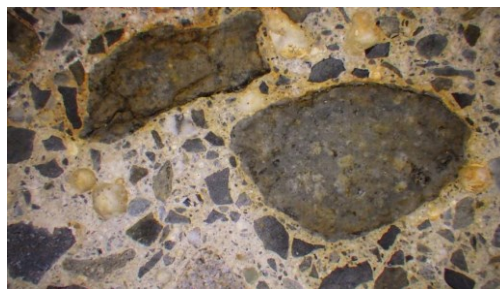


写真-4.23 ⑫供試体骨材周辺状況

#### 4.4 まとめ

本研究では、北海道産、大分産の2種の反応性骨材を用いて供試体を作製し、それぞれの骨材での適切な圧入量や、圧入位置、膨張抑制挙動を検討することを目的とした。本研究より得られた結論を以下に示す。

##### (1) リチウム事前混合

- ASR 促進 50 日経過までは Li/Na モル比による膨張量の大きな差はなかった。しかし、ASR 促進 53 日経過後に Li/Na モル比 0.2 の供試体が膨張傾向になった。少量のリチウムでは、膨張量を低下させるのではなく、殆どリチウムイオンの効果が現れない可能性がある。また、その他の北海道産反応性骨材を用いたリチウム事前混合では、Li/Na モル比 0.4 で十分な ASR 抑制効果があることが確認された。
- 雲仙産反応性骨材においては、ASR 促進 80 日経過しても Li/Na モル比の違いによる膨張量の変化は見られない。このことより、Li/Na モル比 0.2 でも ASR 抑制効果があると言える。
- 大分産反応性骨材においては、ASR 促進約 50 日で Li/Na モル比 0.2 の供試体が膨張傾向になった。これは北海道産反応性骨材を用いたリチウム事前混合と似ており、大分産反応性骨材においても、Li/Na モル比 0.4 で ASR 抑制効果があると言える。

##### (2) リチウム圧入

- 圧入量、削孔数によって ASR 抑制効果に影響はあったが、“Li/Na モル比 0.6、削孔数 4 ヶ所”の供試体にあまり効果がなかったことから、供試体のひび割れの入り方などのコンクリートの条件が、リチウム圧入による ASR 抑制効果の影響が大きいと考えられる。
- 北海道産反応性骨材を用いたリチウム事前混合と比較すると、リチウム事前混合では Li/Na モル比 0.2 では ASR 抑制効果が見られなかったが、Li/Na モル比 0.4 以上では ASR 抑制効果があったと言える。しかし、リチウム圧入では Li/Na モル比による膨張量の差は見られたが、無圧入の供試体と大きな違いはなかった。これは、圧入によるロスが原因だと考えられる。
- 早期に圧入を行った場合では“リチウム量を増加”“圧入孔を増加”させることで膨張抑制効果が見られた。しかし、これらの供試体は 400 $\mu$  時にリチウム圧入を行ったにもかかわらず、圧入直後から抑制効果はみられず、最終的な膨張量のみ減少した。2000 $\mu$  時に圧入を行った供試体ではそれぞれ圧入直後から膨張が完全に抑制されている。これらから、圧入段階のシリカゲルの状態によって抑制効果が変化する可能性が存在する。

##### (3) 亜硝酸リチウムの浸透状況

- 早期に圧入を行った 0.4 モル A 供試体の ASR の抑制効果が低い結果となっていたが、呈色試験においては他の供試体と比較して顕著な差は見られなかった。また、どの供試体においても削孔した供試体上側は、リチウムイオンが浸透しているが、削孔位置から遠い供試体下側はリチウムイオンが浸透していないことが分かる。しかし、膨張抑制効果は確認されていることから、膨張抑制されている範囲が、それ以外の部分を拘束する為、本研究の供試体では膨張が収束しているのだと考えられる。
- 削孔数を増加させることにより広い範囲にリチウムイオンが浸透し、同量のリチウムで膨張効

果に差が生じたものだと考えられる。

- ・ 早期に圧入を行った場合よりも劣化が進展した後に圧入を行った供試体の方が浸透範囲は高い傾向が見られた。しかし、その差は著しいものではなく、同量のリチウム量である供試体を比較しても2割程度であり、浸透していない範囲が十分に確認できる。しかし、圧入直後から抑制効果は確認されていることから、膨張が抑制された範囲の拘束や、圧入段階のシリカゲルの状態によって大きく変化している可能性が存在する。
- ・ 同じ通常圧入供試体の中でも、表面被覆の違いにより、PCMと樹脂では、樹脂で被覆した場合、より内部に広く、万遍なく浸透した結果が得られた。

## 参考文献

- 11) ASR リチウム工法協会：アルカリ骨材反応抑制工法 ASR リチウム工法技術資料改訂版，2012.4

## 第5章 ASR を受けた構造物を補修する技術

### 5.1 本章の目的

平成15年春、ASRが原因で大阪の高速道路をはじめ石川県内の有料道路、広島県内にある山陽新幹線の橋脚合わせて約1500本の鉄筋が破断している事例が報告された。これらの橋脚は造られてから20年から30年経ったもので、長い年月、圧力がかかり続けていたと思われる。一般にASRは反応が起きててもひび割れ程度で、平成元年にまとめられた対策はひび割れを抑えるという程度の認識でしかなかった。

現在、鉄筋破断が発生している地域では、コンクリート材料として大きな膨張を発生する安山岩系の反応性の骨材が使用されている。鉄筋破断の生じやすい環境としては、ASR劣化が進行しやすい日射、降雨の影響を受けやすい部位に多いこと、凍結防止剤としてNaClが散布されているような使用環境があげられ、山間部や都市内に関わらず鉄筋破断が生じる危険性がある。

#### 5.1.1 ASRによるRC部材のせん断耐力の低下およびその補修に関するモデル実験

本章では、ASR劣化による主鉄筋やせん断補強筋の破断が、RC部材の耐荷性能に与える影響を明らかにし、劣化した供試体の耐力を回復させるための補修工法を検討することを目的とした。比較的容易に、安価に行える後施工型鉄筋差し込み工法をASR劣化した部材に応用した。

反応性の骨材を用い、主鉄筋の曲げ定着部が破断している場合(以下、フックなし)と破断していない場合(以下、フックあり)、せん断補強筋が破断している場合を模擬した供試体を作製した。反応性骨材を使用した供試体を高温多湿環境下に置くことで意図的にASRを発生させ、劣化した供試体に対して後施工型鉄筋によるせん断補強を行い、補修による耐荷性能の検討を行う。

#### 5.1.2 亜硝酸リチウム圧入によって補修したASR部材の耐荷性能に関する実験的研究

また、後施工型鉄筋による補修はASR劣化が進展した、末期状態に対する補修工法となる。本来であればこのような状態になる前に補修を行う必要があり、ASRが早期に確認された場合の補修工法を検討する必要がある。ASRの生じた構造物では、シリカゲルの吸水膨張により表面のみならず内部にまで劣化が生じる。ASRの劣化因子の一つである水に着目し、外部からの水分供給を遮断することを目的とした表面被覆等の補修が施されることが多いが、水分供給を完全に止めることは難しく、再劣化が生じる構造物も多い。そのような中、近年では亜硝酸リチウムを構造物の内部に圧入する補修工法が注目されている<sup>1)</sup>。これは、ASRの生じた構造物に亜硝酸リチウムを加圧注入してコンクリート内部に浸透させることにより、ASRによる膨張を抑制する手法であり、既往の研究<sup>1)</sup>においても、内部圧入実施後におけるASR膨張の抑制効果が確認されている。

本章では、ASRの生じた供試体に対して亜硝酸リチウム圧入を適用し、主に適用後の力学的性能について検討を行うこととした。またリチウムを圧入する時のASRによる劣化度が異なることが、その後の性能に影響を及ぼすかを検討するため、劣化程度の異なる供試体に圧入を行った。

## 5.2 ASR による RC 部材のせん断耐力の低下およびその補修に関するモデル実験

### 5.2.1 使用材料および配合

セメントに普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 57%として、普通コンクリート（以下、NC）、細骨材および粗骨材の両方に反応性骨材を用いたコンクリートの 2 種類を作製した。それぞれのコンクリートの配合を表-5.1、表-5.2 に示す。反応性細骨材には北海道産の安山岩の砕砂を 70%使用し、反応性粗骨材には北海道産の安山岩を 50%使用した。この混合比率は最も大きい膨張を示したペシマム比率を採用した。また、等価アルカリ量が  $12\text{kg/m}^3$  となるように NaCl を添加した。

### 5.2.2 供試体概要

表-5.3 にはり供試体一覧と、図-5.1、図-5.2 にそれぞれの供試体概要図を示す。破壊モードを検討するため、供試体の長さを 1100mm と 1600mm にしたものの 2 種類を作製した。1100mm の供試体ではせん断スパン比  $a/b$  が 2 となり、せん断補強筋を配置しない場合にはせん断圧縮破壊を、1600mm の供試体ではせん断スパン比 2.75 で同じく斜め引張破壊が発生する。それぞれの供試体には主筋 D16(SD345)を 2 本使用し、全ての供試体に、主鉄筋両端部（支点より外側）に、組立筋として D6 のせん断補強筋を配置した。また、せん断補強筋として D6 を 100mm 間隔で配置した供試体(以下、S と表記)と、せん断補強筋の破断を模擬してせん断補強筋を配置しない供試体(以下、N と表記)を作製した。1600mm の供試体中央 200mm 区間には、D6 の横拘束筋を 100mm 間隔で配置して曲げ区間の配筋を統一した。また、1100mm の供試体では曲げ定着部での主筋の破断を模擬するため、フックがある供試体とない供試体を作製した。

反応性骨材を使用しない健全なコンクリートとしては、せん断補強筋を配置した場合とそうでない場合の 2 種類とし、それぞれ 1100 mm の供試体と 1600 mm の供試体を 2 体ずつ作成した。

また、今回作成した供試体とは別に、昨年度の福島らの研究に用いた供試体についても実験を行う。この供試体は昨年から ASR 劣化させ続けたもので、著しく ASR 劣化が進行した場合の耐荷性能を検討する。これらの供試体の概要図を図-5.3 に示す。主筋には D13 を 3 本使用し、せん断補強筋として D6 を 100mm 間隔で配置した供試体（以下、D6）と、せん断補強筋の破断によるせん断補強筋量の低下を模擬するために  $\phi 3$  を 100mm 間隔で配置した供試体（以下、 $\phi 3$ ）、およびせん断補強筋を配置しない供試体（以下、0）を作製した。

表-5.1 NC 配合表

水セメント比 (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )					
	水	セメント	細骨材	粗骨材小	粗骨材大	AE減水剤
57	180	316	797	592	296	0.79

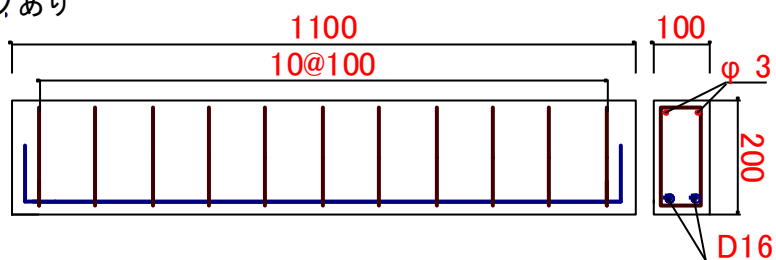
表-5.2 反応性コンクリート配合表

水セメント比 (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )						
	水	セメント	細骨材	反応性 細骨材	粗骨材	反応性 粗骨材	NaCl
57	168	295	253	608	490	487	19.5

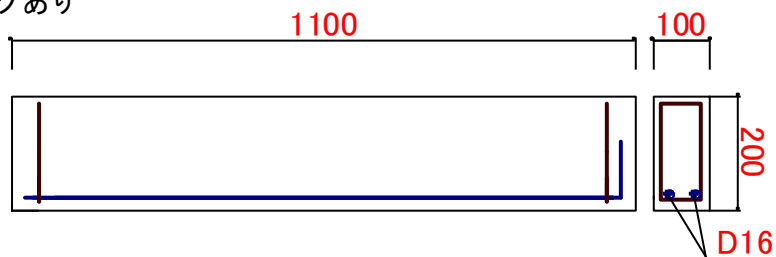
表-5.3 はり供試体一覧

供試体名	供試体長さ (mm)	ASR劣化	スターラップ	フックの有無
1100mm S-フックあり	1100	あり	あり	あり
1100mm N-フックあり			なし	
1100mm S-フックなし			あり	なし
1100mm N-フックなし			なし	
1600mm S-フックあり	1600	あり	あり	あり
1600mm N-フックあり			なし	
1100mm S-NC	1100	なし	あり	あり
1100mm N-NC			なし	
1600mm S-NC	1600	なし	あり	あり
1600mm N-NC			なし	

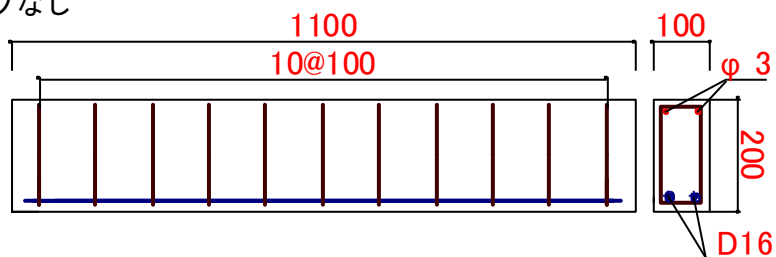
S-フックあり



N-フックあり



S-フックなし



N-フックなし

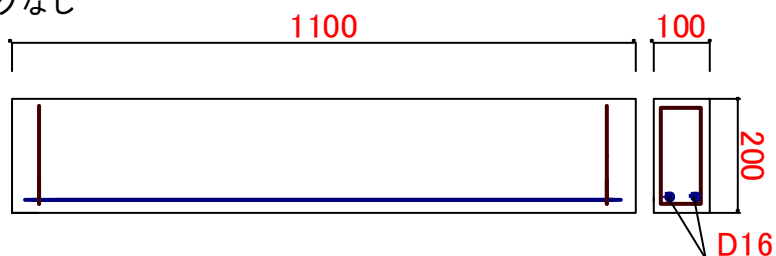


図-5.1 1100 mm供試体概要図一覧 (単位:mm, 有効高さ 177.5 mm)

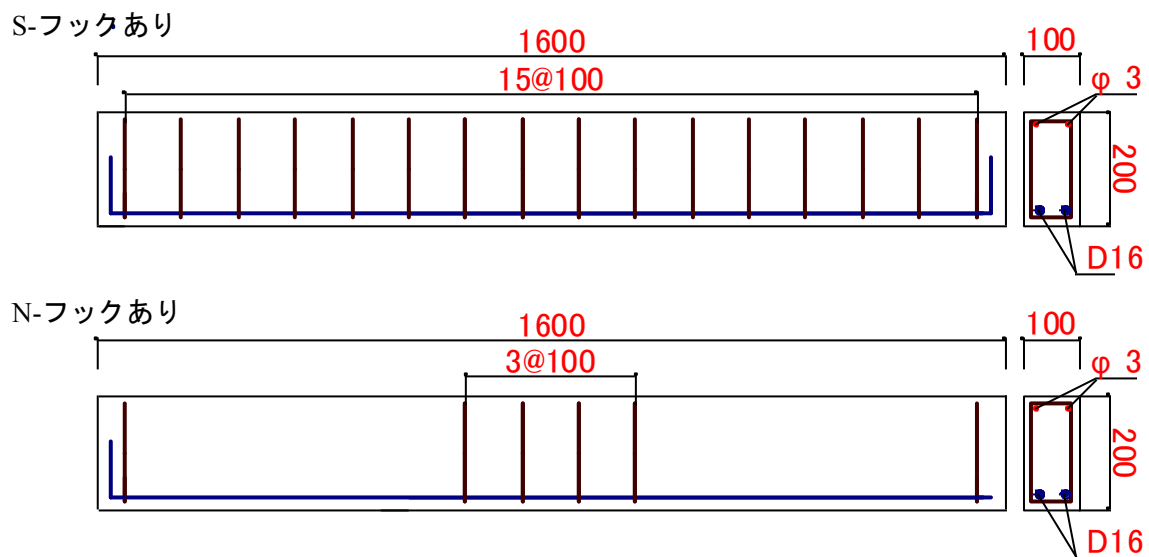


図-5.2 1600 mm供試体概要図一覧 (単位:mm, 有効高さ 177.5 mm)

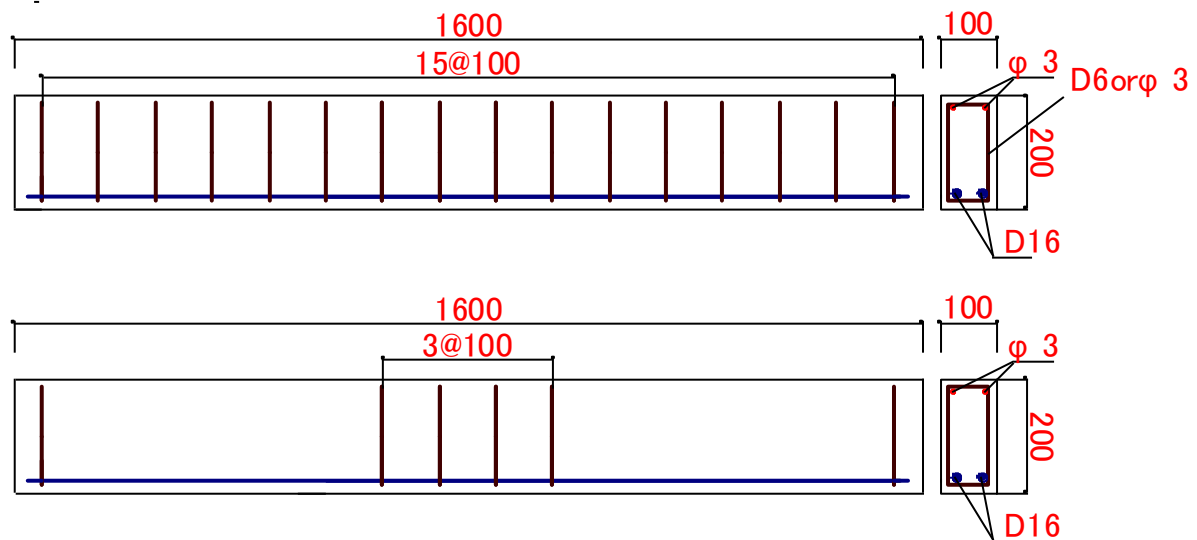


図-5.3 旧供試体概要図一覧 (単位:mm, 有効高さ 177.5 mm)

### 5.2.3 ASR 促進

ASR 促進室を写真-5.2 に示す。ASR 促進室は温度 35～45℃・湿度 100%を維持し、供試体を室内に約 8 か月間、長期劣化させているものは 22 か月間静置し、劣化させた。また、熱が外部に逃げないよう促進室外壁には断熱材を貼った。



写真-5.1 ASR 促進室

### 5.2.4 膨張量測定

膨張量測定に使用したコンタクトゲージは 3.2.3 と同じものを使用した。供試体に埋め込んだコンタクトゲージ用プラグの位置を図-5.3、図-5.4 に示す。はり供試体は片面 8 ヶ所にプラグを埋め込んだ。鉛直方向は 100mm、供試体軸方向は 200mm を基長とした。供試体軸方向に上面側 2 ヶ所（区間 1, 3）下面側 2 ヶ所（区間 2, 4）および鉛直方向に 4 ヶ所（区間 5～8）、計 8 ヶ所で長さ変化を測定し、各供試体の膨張量の経時変化を観察した。



写真-5.2 コンタクトゲージ

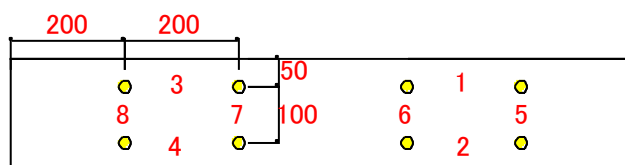


図-5.3 1100 mm供試体プラグ位置（単位:mm）

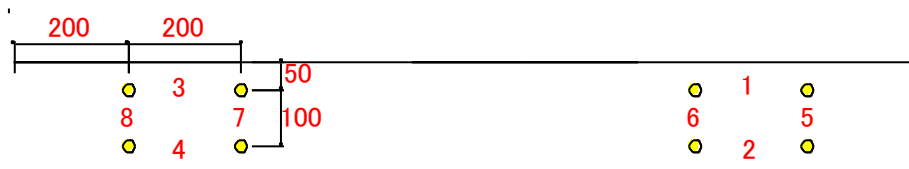


図-5.4 1600 mm供試体プラグ位置 (単位:mm)

### 5.2.5 補修方法

補修方法は、後施工型の差し込み鉄筋とし、ASR劣化した1100 mm供試体の“N-フックあり”，“N-フックなし”に対して行った。

ASR劣化後にコアドリルによりコア抜きを行い、供試体上面10ヶ所に直径22mm・深さ200mmの穴を100mm間隔で開け、その穴に長さ200mmのD6鉄筋を2本ずつ配置し無収縮モルタルを流し込み、せん断補強を行う。無収縮モルタルの配合を表-5.4、差し込み位置の概要図を図-5.5に示す。

表-5.4 無収縮モルタル配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
	水	セメント	7号珪砂	石灰石粉	膨張材	AE減水剤 ※1	増粘剤
46	380	832	345	379	27	1.896	1.074

※1 は高性能 AE 減水剤(紛体)

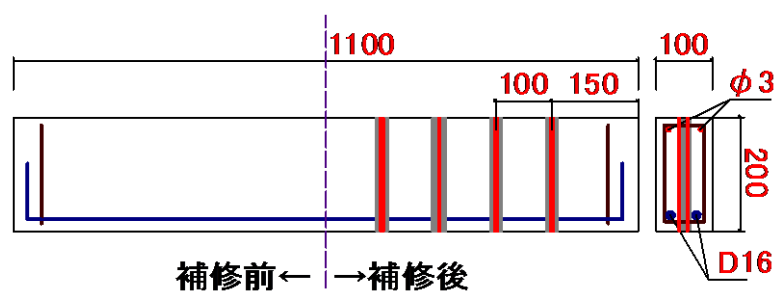


図-5.5 差し込み位置概要図(単位:mm)



写真-5.3 補修状況

### 5.2.6 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、図-5.6、図-5.8に示すように、1100mm 供試体では、等モーメントスパン 100mm，せん断スパン 400mm の 2 点載荷とし、1600mm 供試体では、当モーメントスパン 300mm，せん断スパン 550mm の 2 点載荷，計測項目を，荷重・変位・ひび割れ幅とした．荷重をロードセルにより検出し，変位を高感度変位計により，支点位置 2 ヶ所，荷重載荷位置 2 ヶ所およびその中点，計 5 ヶ所で計測した．また，ひび割れ幅の計測のための  $\pi$  型ゲージを，曲げひび割れが発生すると想定した 4 ヶ所，せん断ひび割れが発生すると想定した 2 ヶ所，コンクリートと鉄筋の付着消失によりひび割れが発生すると想定した 2 ヶ所，計 8 ヶ所に設置した（各箇所に設置した  $\pi$  型ゲージを以下，“曲げ  $\pi$ ”，“せん断  $\pi$ ”，“付着  $\pi$ ” とする）。図-5.7，図-5.9 に  $\pi$  型ゲージの設置概要図を示す．

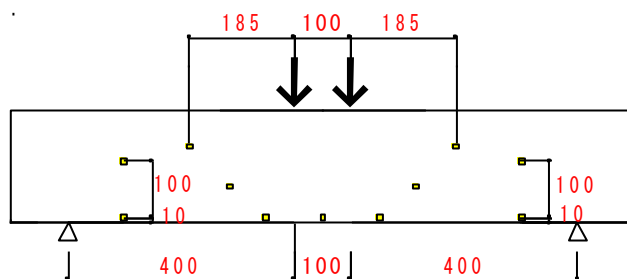


図-5.6 1100 mm 供試体曲げ載荷試験（単位：mm）

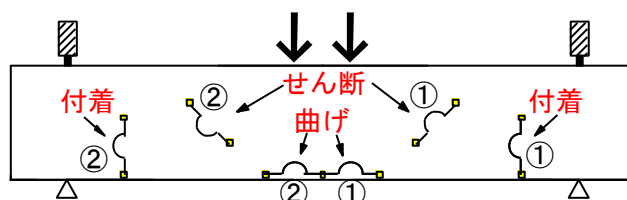


図-5.7 1100 mm 供試体  $\pi$  型ゲージ取付位置

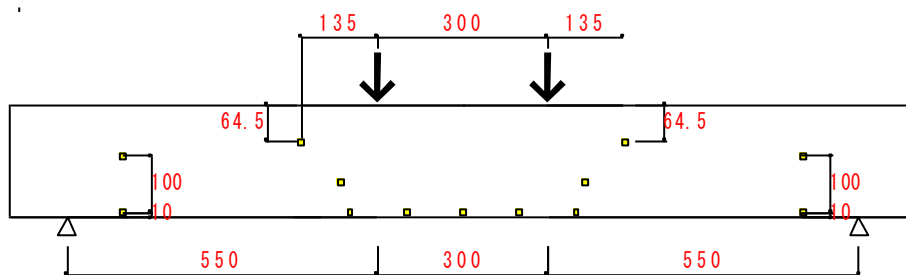


図-5.8 1600 mm 供試体曲げ載荷試験（単位：mm）

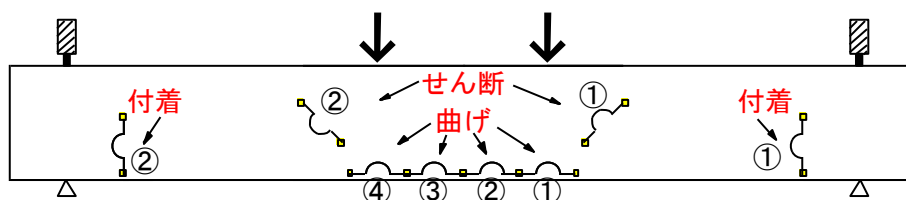


図-5.9 1600 mm 供試体  $\pi$  型ゲージ取付位置

## 5.2.7 実験結果および考察

### i) 膨張量

はり供試体の膨張量の載荷直前の測定結果一覧を表-5.5, 表-5.6, 表-5.7 に, それぞれの経過日数と膨張量の変化の例を図-5.10~図-5.16 に示す.

1100mm 供試体と 1600mm 供試体では促進室静置後, 70 日目, 174 日目, 222 日目にコンタクトゲージにて膨張量を測定した. 長期劣化供試体では促進室静置後, 53 日目, 186 日目, 311 日目, 456 日目, 526 日目, 630 日目, 678 日目に膨張量を測定した. また, 表中の「軸方向上側」の値は図-5.3 における区間 1, 3 の膨張量の平均値, 「軸方向下側」の値は区間 2, 4 の平均値, 「鉛直方向」の値は区間 5~8 の平均値となっている. それぞれの負の値は供試体の収縮を表し, 正の値は膨張を表す. ほとんどの供試体において, 膨張量は鉛直方向(5~8), 軸方向上側(1, 3), 軸方向下側(2, 4) の順に大きい. これは, 主鉄筋によって軸方向に拘束力が作用するため, 鉛直方向よりも膨張量が小さくなり, その中でも軸方向下側は, 上側よりも拘束力が大きいいためこのような結果になったものと考えられる. セン断補強筋がある S 供試体では, 主鉄筋と同様にセン断補強筋によって拘束されるため, 鉛直方向の膨張が N 供試体よりも小さい.

表-5.5 1100 mm供試体最終膨張量

梁(短) 222日経過	膨張量( $\mu$ )		
供試体名	鉛直方向	軸方向上側	軸方向下側
Sフックあり-1	3737.5	3100.0	675.0
Sフックあり-2	2717.5	2765.0	862.5
Sフックあり-3	4732.5	3342.5	1477.5
Sフックあり-4	2837.5	2447.5	805.0
Nフックあり-1	7267.5	2472.5	657.5
Nフックあり-2	7225.0	2815.0	787.5
Nフックあり-3	7527.5	2500.0	172.5
Nフックあり-4	7615.0	2270.0	935.0
Nフックあり-5	7787.5	2027.5	592.5
Nフックあり-6	5877.5	3547.5	670.0
Nフックあり-7	5900.0	2512.5	655.0
Sフックなし-1	3230.0	3125.0	1507.5
Sフックなし-2	2355.0	2925.0	1620.0
Sフックなし-3	4440.0	2600.0	1265.0
Sフックなし-4	4395.0	3110.0	1417.5
Nフックなし-1	4765.0	2220.0	927.5
Nフックなし-2	6242.5	2602.5	1065.0
Nフックなし-3	7917.5	2785.0	1837.5
Nフックなし-4	5195.0	1687.5	322.5

表-5.6 1600 mm供試体最終膨張量

梁(長) 222日経過	膨張量( $\mu$ )		
供試体名	鉛直方向	軸方向上側	軸方向下側
Sフックあり-1	4222.5	2410.0	547.5
Sフックあり-2	5997.5	2917.5	1192.5
Nフックあり-1	7890.0	1587.5	905.0
Nフックあり-2	9427.5	2325.0	1135.0

表-5.7 長期劣化供試体最終膨張量

梁(古) 678日経過	膨張量(μ)		
供試体名	鉛直方向	軸方向上側	軸方向下側
D6フックなしB-1	8790	4285	1590
D6フックなしB-2	7848	3638	2373
φ 3フックなしB-1	7298	5143	1405
φ 3フックなしB-2	7795	5108	1543
0フックなしB-1	12643	2183	523
0フックなしB-2	11143	4523	1173

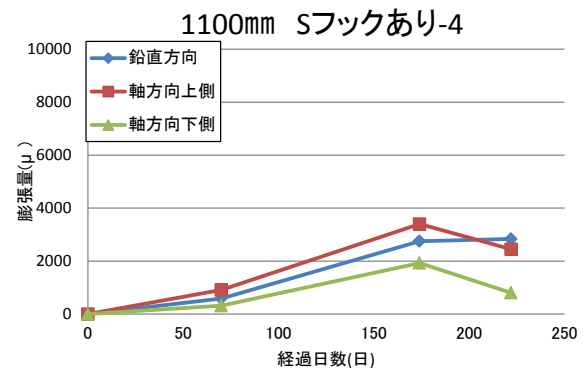
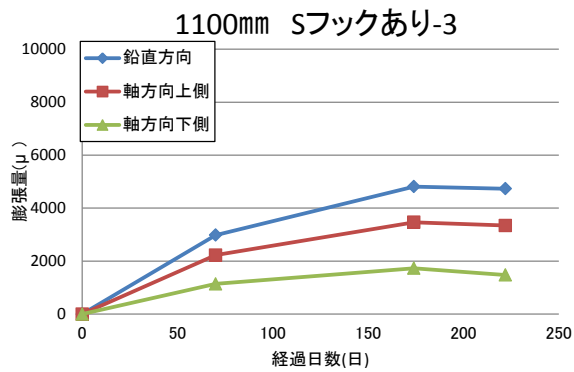
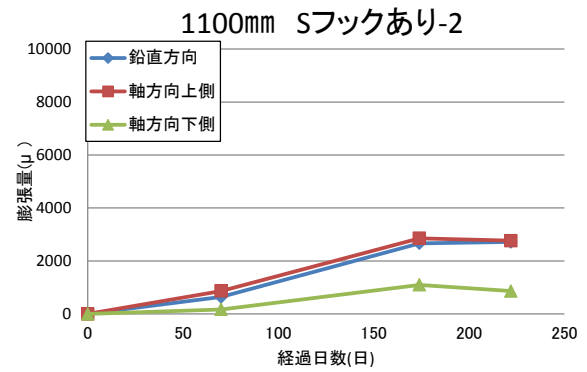
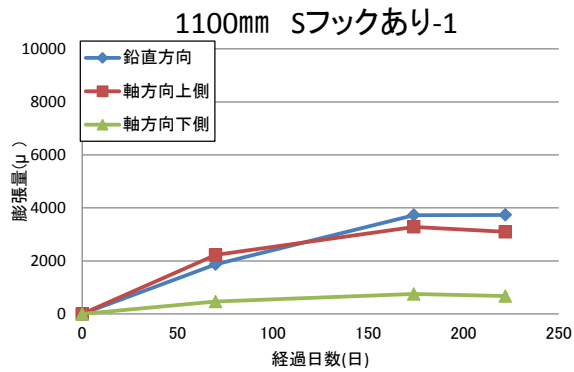
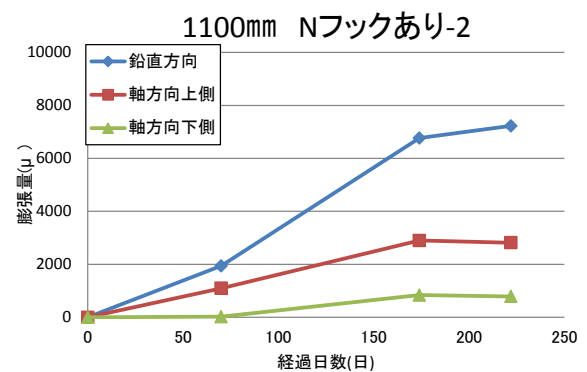
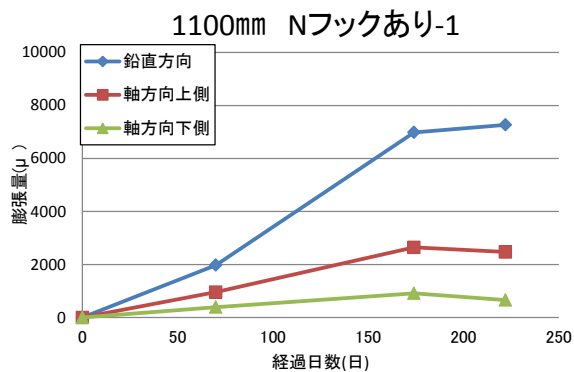


図-5.10 1100 mm供試体 Sフックあり 膨張量



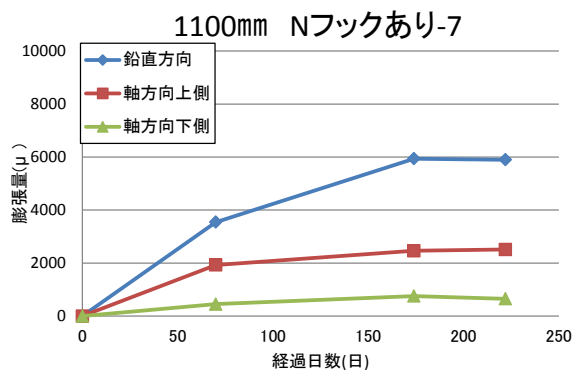
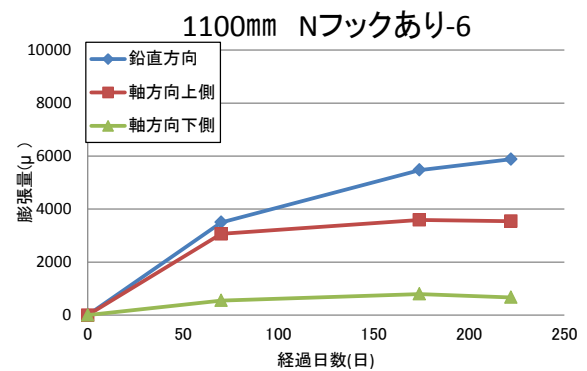
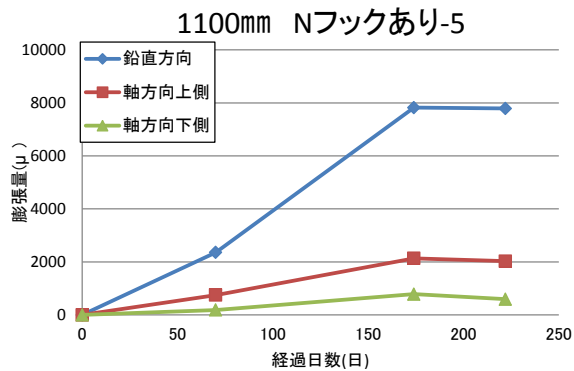
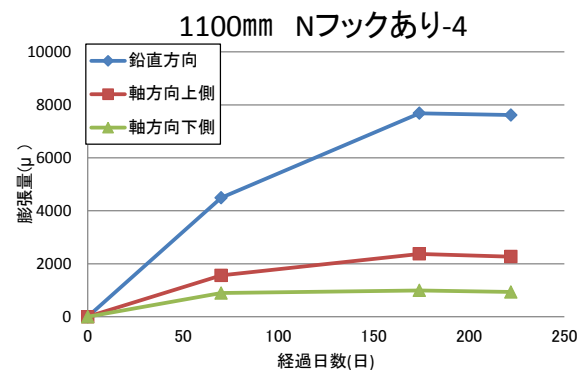
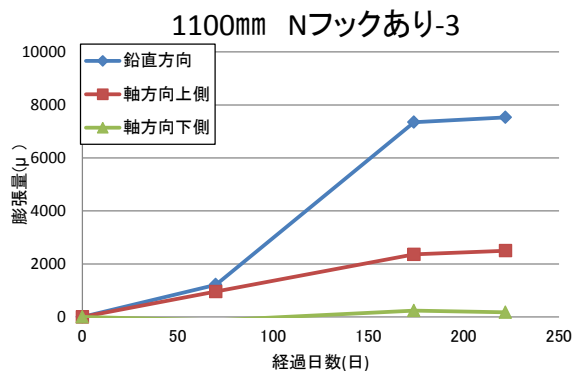
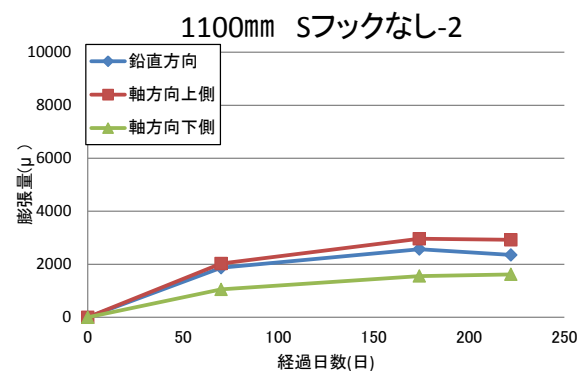
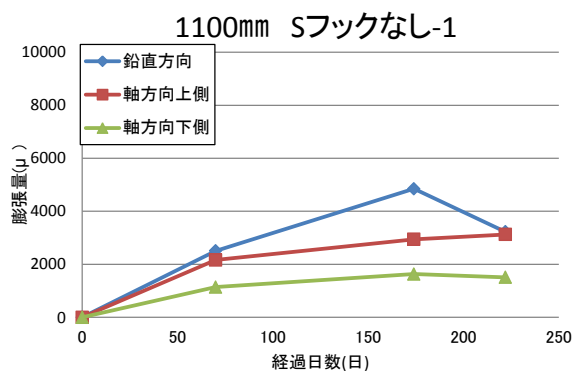


図-5.11 1100 mm供試体 Nフックあり 膨張量



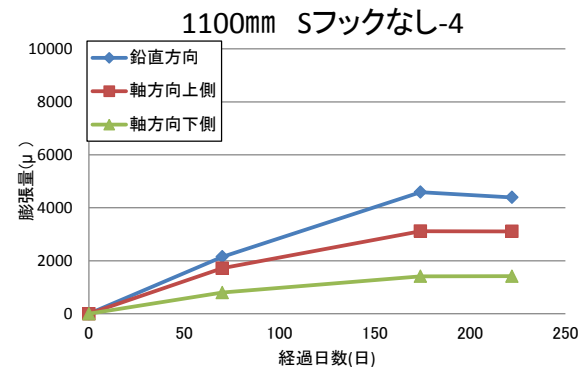
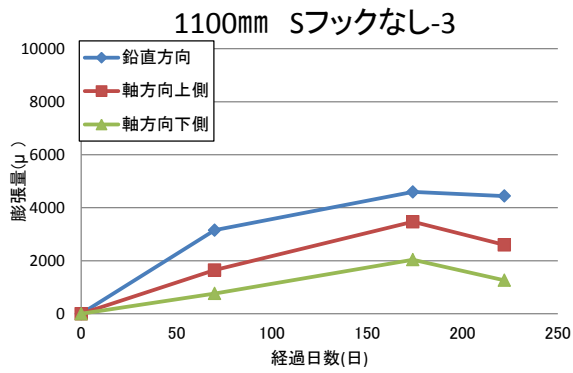


図-5.12 1100 mm供試体 Sフックなし 膨張量

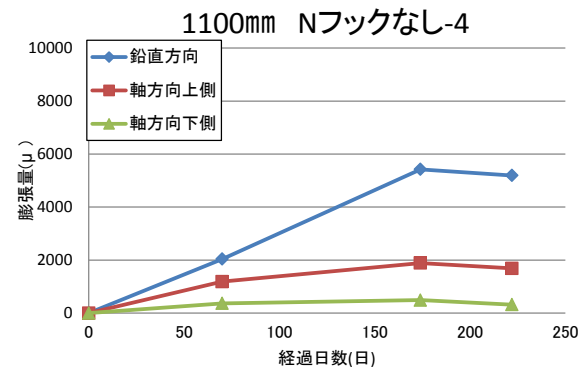
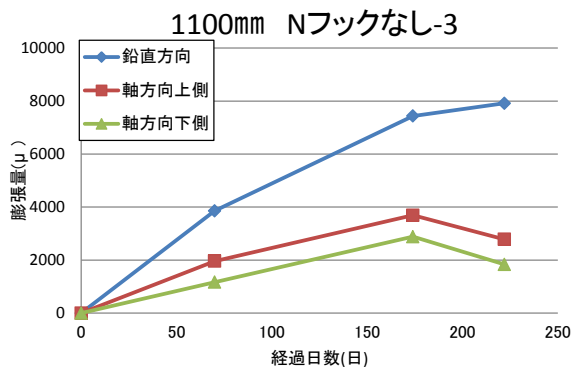
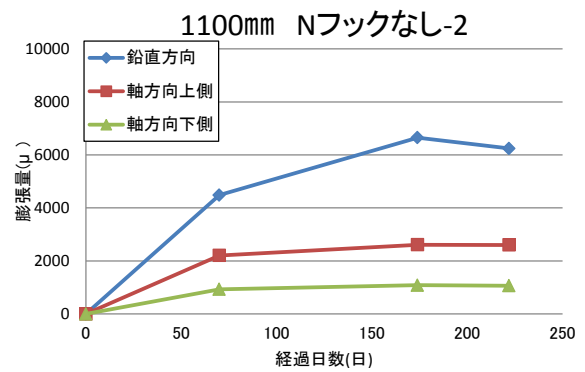
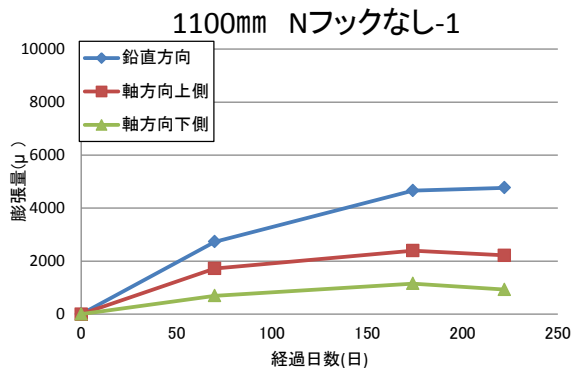


図-5.13 1100 mm供試体 Nフックなし 膨張量

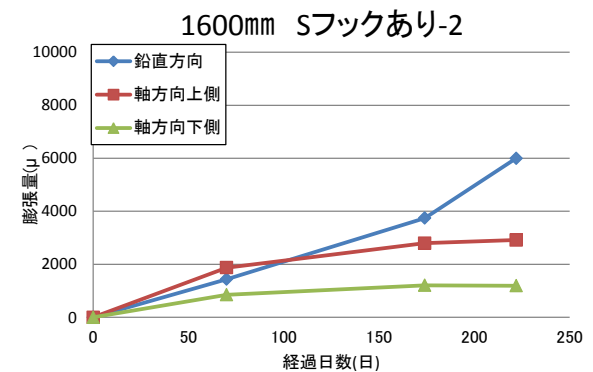
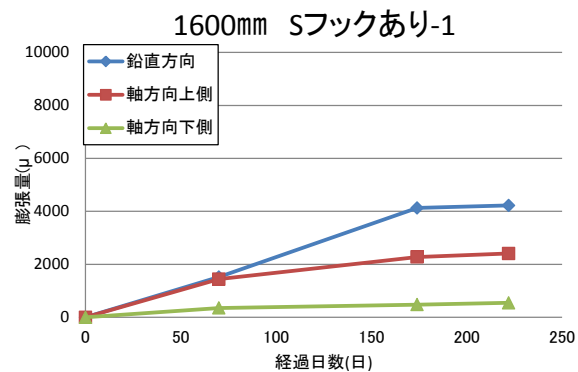


図-5.14 1600 mm供試体 Sフックあり 膨張量

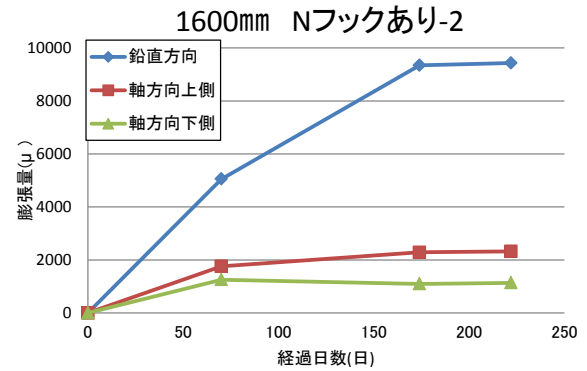
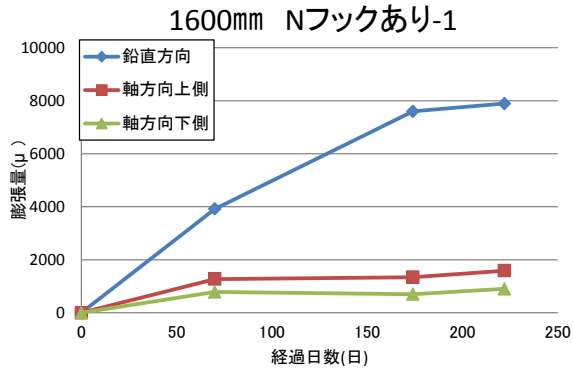


図-5.15 1600 mm供試体 N フックあり 膨張量

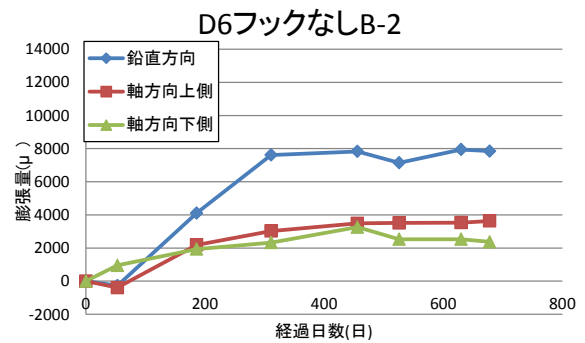
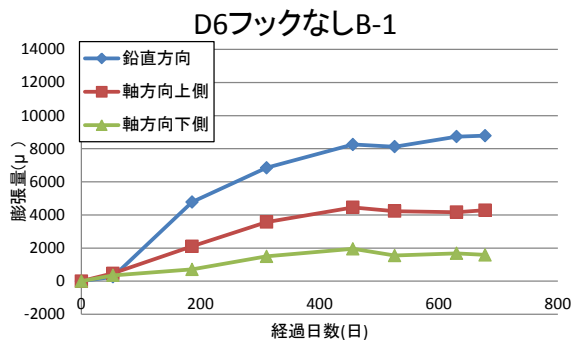
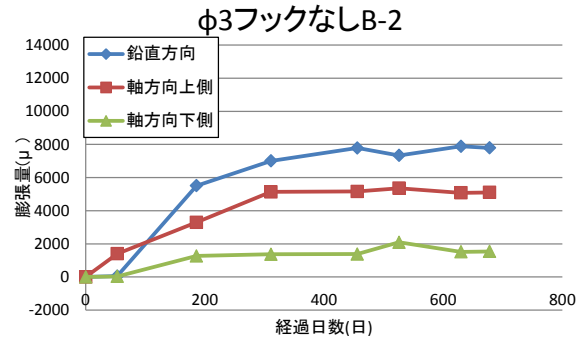
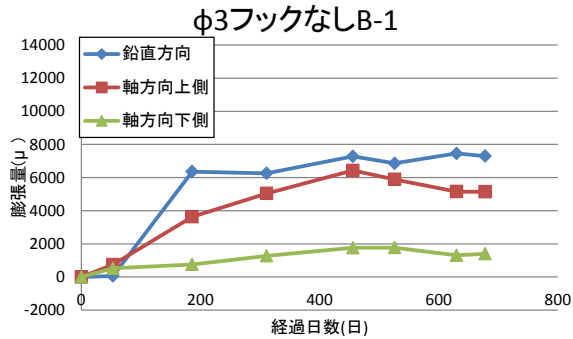
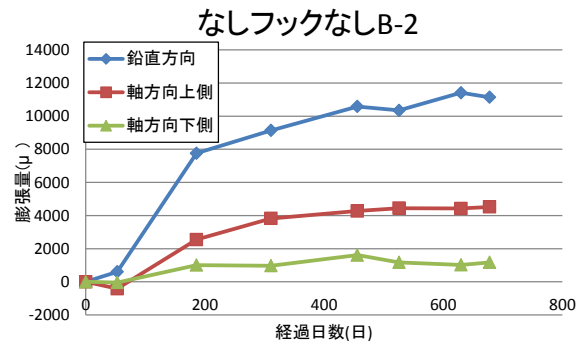
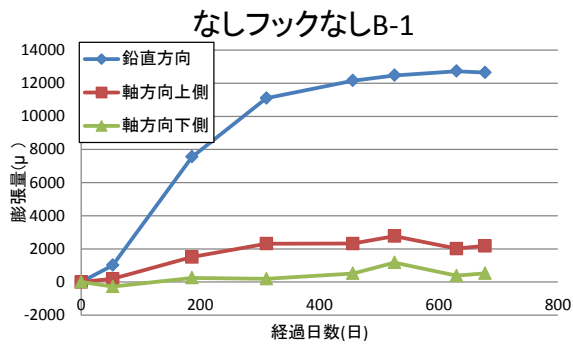


図-5.16 長期劣化供試体膨張量



1100 mm供試体 N フックあり-7



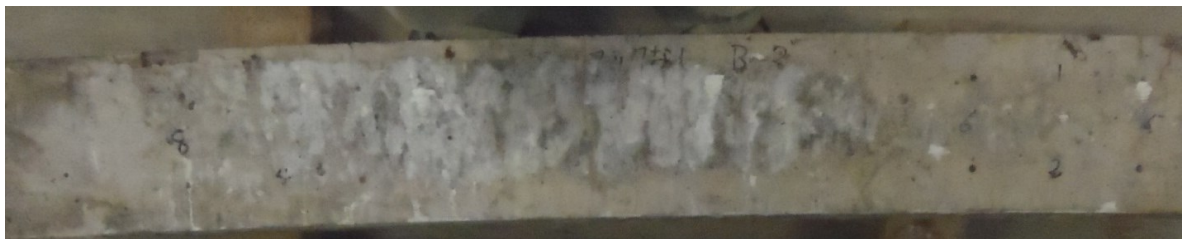
1100 mm供試体 S フックあり-5



1600 mm供試体 N フックあり-2



長期劣化供試体 なしフックなし B-1



長期劣化供試体  $\phi 3$  フックなし B-2

写真-5.4 膨張状況一例

## ii) 曲げ載荷試験

### ① ASR 劣化が耐荷性能に及ぼす影響

NC と ASR 供試体の圧縮強度試験の結果を表-5.8, はり部材の曲げ載荷試験時の最大荷重と破壊性状を表-5.9 に, 各荷重変位曲線を図-5.17~5.20 に示す.

せん断補強筋を配置した S 供試体においては, ASR によってコンクリートの圧縮強度が低下していたにもかかわらず, 1100mm, 1600mm のいずれのはり部材も最大荷重の低下は見られなかった. ただし, 表-5.8 にも示したように ASR によってコンクリートの静弾性係数が著しく低下したため, 部材降伏前の剛性は低下した. さらに, コンクリートの終局ひずみが大幅に増大したため, 降伏後の部材靱性は大きくなった.

せん断補強筋のない N 供試体においては, ASR によってせん断耐力が大幅に増加し, 1600mm のはり部材の場合には破壊モードがせん断破壊から曲げ破壊に移行した. せん断スパン比が小さな

1100mm のはり部材の場合には破壊モードはせん断破壊のままであるが、せん断耐力が 2 倍近くまで増加したものもある。

ASR によるせん断耐力の向上については、以前からケミカルプレストレスの作用が原因であるとされているため、その効果を考慮してせん断耐力の計算を行った。まず、はり部材で測定された軸方向の膨張ひずみから鉄筋のひずみを算出し、ケミカルプレストレスの大きさを算出した。例えば 1100mm 供試体のケミカルプレストレス量の平均値は 44kN 程度となる。この値から、以下のコンクリート標準示方書の方法を用いて<sup>6)</sup>、ケミカルプレストレスのせん断耐力への寄与分を算出しても、計算上せん断耐力は 1 割程度増大するのみである。

$$\beta_n = 1 + 2M_0/M_{ud} \quad (1)$$

ここで、 $\beta_n$ ：棒部材のせん断耐力に対する軸方向力の影響を考慮するための係数、 $M_{ud}$ ：軸方向力を考慮しない純曲げ耐力、 $M_0$ ：デコンプレッションモーメント

ただし、本式により算出されるプレストレスによるせん断耐力の向上の程度は、かなり安全側の値を示すとされており<sup>2)</sup>、今後他の算定方法による検討も必要である。

さらに本研究で用いたはり部材には圧縮鉄筋が配置されていないため、表-5.5 等にも示すように断面内の膨張量が一律でなく、部材がアーチ状に変形していることも、せん断耐力を向上させた一因であると考えられる。また、既報でも述べたように<sup>3)</sup>、せん断補強筋が配置されていない場合には ASR によるひび割れは部材軸方向に卓越して発生するため、載荷時に発生するせん断ひび割れは、斜め方向へ一気に進展していくのではなく、ASR による水平ひび割れが徐々に開口していくという形で発達していくため（図-5.18 の 60kN 以上の領域）、結果としてせん断耐力が向上する。

また、引張鉄筋にフックが存在しない場合には付着割裂破壊が生じることが懸念されたが、載荷時にそのような現象は観察されず、耐荷性状や破壊性状にフックの有無の影響は見られなかった。フック曲げ始点は支点から数十 mm の位置にあり、この位置で鉄筋が切断されていても、鉄筋が十分に定着されたものと考えられる。

長期劣化させた供試体では 1 年前の曲げ載荷時<sup>3)</sup>から部材耐力の大きな変化は見られなかった。しかし、φ3 の供試体では破壊性状が曲げ破壊からせん断破壊へと変化した。この供試体内部を見ると鉄筋の腐食が進んでおり、特にせん断補強筋が細い φ3 の場合には、腐食により完全に破断している箇所も見られた。載荷後の供試体写真を写真-5.5 に示す。既報<sup>3)</sup>では、せん断破壊が ASR によって曲げ破壊に移行したのであったが、せん断補強筋の腐食が進行することによって、再びせん断破壊が生じた。既報<sup>4)</sup>では材齢 5 年の ASR 供試体でもケミカルプレストレスの効果は維持されていると示されていることから、ケミカルプレストレスの消失によりせん断破壊が生じたのではなく鉄筋の腐食によりせん断破壊が生じたものと推測される。本実験では配合に NaCl を添加しており、高温多湿状態で静置させていた為、ASR との複合劣化により鉄筋腐食が進行し、せん断耐力の減少、せん断破壊に繋がったものと考えられる。

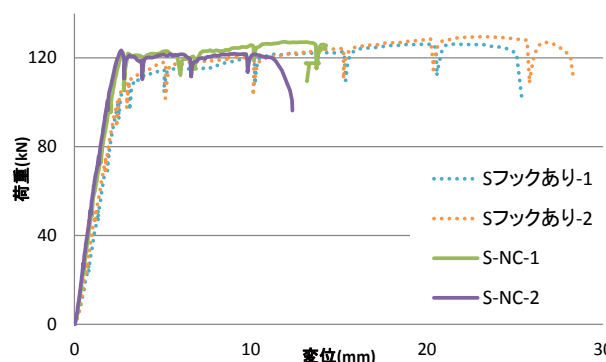


図-5.17 1100 mm供試体 NC-ASR (S) 荷重変位曲線

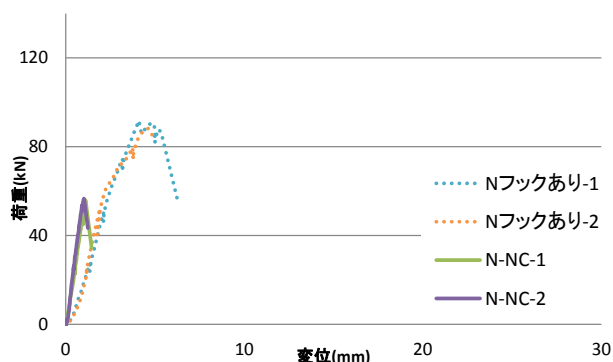


図-5.18 1100 mm供試体 NC-ASR (N) 荷重変位曲線

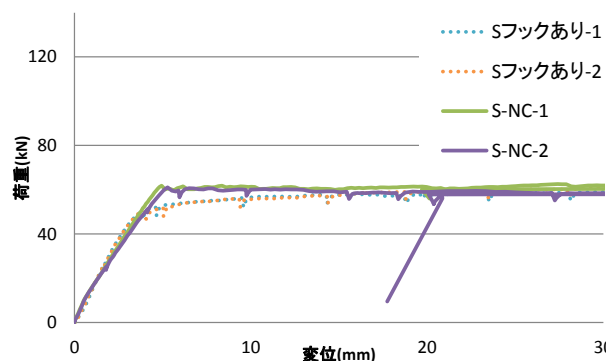


図-5.19 1600 mm供試体 NC-ASR (S) 荷重変位曲線

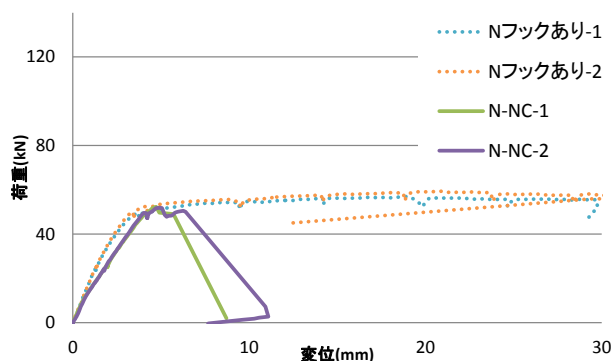


図-5.20 1600 mm供試体 NC-ASR (N) 荷重変位曲線

表-5.8 圧縮強度試験結果

供試体	試験材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
NC供試体	32日	29.8	23.5
ASR供試体	約280日	23.4	7.2
旧供試体	28日	52.8	28.1
	約1年	41.0	11.8
	約2年	41.0	16.1

表-5.9 曲げ載荷時の最大荷重と破壊性状

供試体長さ(mm)	供試体名	Pmax(kN)		破壊性状	供試体長さ(mm)	供試体名	Pmax(kN)		破壊性状
		計算値	実験値				計算値	実験値	
1100	S-NC-1	114.3	127.3	曲げ破壊	1600	S-NC-1	83.1	62.9	曲げ破壊
	S-NC-2		123.4	曲げ破壊		S-NC-2		61.1	曲げ破壊
	N-NC-1	44.4	55.7	せん断破壊		N-NC-1	44.4	52.3	せん断破壊
	N-NC-2		56.6	せん断破壊		N-NC-2		51.9	せん断破壊
	Sフックあり-1	107.8	126.2	曲げ破壊		Sフックあり-1	78.4	60.4	曲げ破壊
	Sフックあり-2		129.6	曲げ破壊		Sフックあり-2		61.0	曲げ破壊
	Nフックあり-1	40.9	91.6	せん断破壊		Nフックあり-1	40.9	57.0	せん断破壊
	Nフックあり-2		88.2	せん断破壊		Nフックあり-2		59.4	せん断破壊
	Sフックなし-1	107.8	130.7	曲げ破壊		D6フックなしB-1	84.5	83.1	曲げ破壊
	Sフックなし-2		126.9	曲げ破壊		D6フックなしB-2		83.6	曲げ破壊
	Nフックなし-1	40.9	104.0	せん断破壊		φ 3フックなしB-1	72.5	81.1	せん断破壊
	Nフックなし-2		87.0	せん断破壊		φ 3フックなしB-2		79.3	せん断破壊
	補修フックあり2-3	107.8	118.8	曲げせん断破壊		0フックなしB-1	48.6	81.2	せん断破壊
	補修フックあり2-4		121.6	曲げせん断破壊		0フックなしB-2		55.4	せん断破壊
	補修フックなし2-3		116.6	曲げせん断破壊					
	補修フックなし2-4		116.2	曲げせん断破壊					

## ② 後施工型鉄筋によるせん断補修効果

せん断補修を行った供試体, ASR 劣化したせん断補強筋有り供試体(S), ASR 劣化したせん断補強筋無し供試体(N)の3種類の供試体の荷重-変位曲線を図-5.21 に示す. 表-2.9 に示した曲げ載荷試験時の最大荷重と破壊性状から分かるように, 補修をすることによって耐荷力は増加し, 補修はせん断耐力の向上に一定の効果はあった. 事前に行った後施工型鉄筋の補強<sup>5)</sup>では, はり供試体上面から主鉄筋の上面までの深さしか補強していなかったため, 引張鉄筋位置で付着割裂破壊が発生したのに対し, 今回の補強では供試体の下面まで補強鉄筋を挿入することによりこれを防ぐことができた. しかし, 部材の降伏直後にせん断破壊が生じ, 補修によってせん断破壊を完全に防ぐことはできなかった.

写真-5.6 に曲げ載荷試験時の供試体の破壊性状, 図-5.22 に3種類の供試体のせん断ひび割れ幅を示す. ひび割れ幅を比較すると, 補修した供試体のみがせん断ひび割れ幅が徐々に大きくなっている. また, 写真では供試体に複数のせん断ひび割れが入っていることが分かる. このことから荷重が増えるにつれて, 母体であるコンクリートと後施工によって注入した無収縮モルタルとの付着力が低下し, せん断補修の効果が失われたと考えられる.



写真-5.5 載荷後φ3 フックなし  
B-2 供試体支点部付近

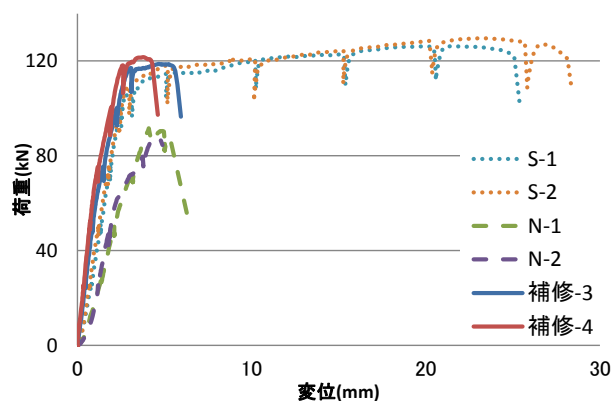


図-5.21 1100mm 供試体フックあり  
荷重変位曲線



写真-5.6 破壊性状  
(1100mm 補修フックあり 2-3)

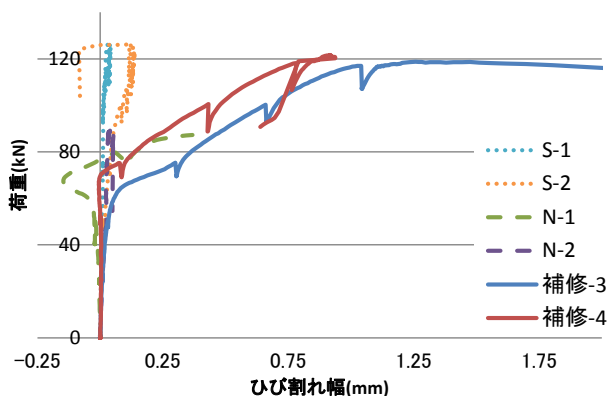


図-5.22 1100mm 供試体フックあり  
せん断ひび割れ幅

### 5.2.8 まとめ

本研究では、ASR 劣化、および、それに付随する鉄筋の破断が、RC 部材の耐荷性能に与える影響を明らかにすることを目的とした。そのため、反応性・非反応性の骨材を用い、主鉄筋およびせん断補強筋が破断している場合と破断していない場合を模擬した供試体を作製し、膨張量測定、曲げ載荷試験を行った。反応性のものについては ASR 劣化後に試験を実施した。また、ASR 劣化した供試体については、後施工型鉄筋によるせん断補修を行い、その補修効果についても検討を行った。本研究により得られた結論を以下に示す。

#### i) 曲げ載荷試験

- ・ ケミカルプレストレス効果等により ASR 劣化した供試体のせん断耐力は大幅に向上するがコンクリート標準示方書の算定式によると、その効果は 1 割程度であり、ほかの効果も作用している可能性がある。
- ・ ASR 劣化によって静弾性係数が低下し、曲げ載荷時の降伏前の部材の剛性が低下した。また、コンクリートの終局ひずみが大幅に増大したため、降伏後の曲げ靱性は向上した。
- ・ 長期劣化させた供試体では 1 年前の曲げ載荷時から部材耐力の大きな変化は見られなかったが、 $\phi 3$  の供試体ではせん断補強筋の腐食によって、破壊性状が曲げ破壊からせん断破壊へと変化した。

#### ii) 後施工型鉄筋によるせん断補修

- ・ 後施工型鉄筋によるせん断補修を行った供試体は、補修を行わなかった供試体よりも耐力は増加するが、補修によってせん断破壊を防ぐことはできなかった。
- ・ 補修によってせん断破壊を防ぐことができなかった要因として、母体のコンクリートと後施工によって注入した無収縮モルタルとの付着力が十分でなかったと考えられる。

## 5.3 亜硝酸リチウム圧入によって補修した ASR 部材の耐荷性能に関する実験的研究

### 5.3.1 使用材料および配合

細骨材および粗骨材の両方に反応性骨材を用いた ASR コンクリートと、比較対象とする普通コンクリート（以下、NC）を作製した。本章で用いた NC および ASR 配合については、表-5.1、表-5.2 と同様の配合とした。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、骨材の種類や反応性骨材の混合比率についても 5.2 節と同様である。

亜硝酸リチウム内部圧入施工時に使用した材料を表-5.10、写真-5.7 に示す。ASR 抑制剤として添加するリチウム化合物は、国内での使用実績の最も多い亜硝酸リチウム（ $\text{LiNO}_2$ ）を使用し、浸透性を阻害しない範囲で最も高濃度である 40%水溶液とした。ひび割れ注入材は、適用ひび割れ幅 0.2～0.5mm のセメント系注入材、表面漏出防止材にはアロンカチオクリート（ポリマーセメントモルタル）を使用し、ベースにはカチオン性アクリルエマルジョン、フィラーには F-1（こて塗り専用既調合セメントフィラー 1 回塗り厚：3mm 以下薄塗り用）を用いた。内部圧入のために削孔した孔を充填するグラウト材には、非金属骨材系高性能無収縮グラウト材であるマスターフロー870 を用いた。本研究で用いた、表面漏出防止材およびグラウト材の物性値を表-5.11<sup>6)7)</sup>に示す。

表-5.10 リチウム圧入施工材料一覧

亜硝酸リチウム	プロコン40 (田島ルーフィング社)
ひび割れ注入材	アーマ#600 (三菱マテリアル株式会社)
表面漏出防止材	アロンカチオクリート(ベース+フィラーF1) (東亜合成株式会社)
グラウト材	マスターフロー870 (BASFジャパン株式会社)

表-5.11 材料物性値<sup>6)7)</sup>

(a) アロンカチオクリート（フィラーF-1 使用時）

項目	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	長さ変化率	透水量 (g)
値	31.9	10.8	2.1	$-7.9 \times 10^{-4}$	1.0
備考	JIS A1171 28 日乾燥養生				JIS A1404 1 時間 0.1MPa

(b) マスターフロー870

項目	練上がり 温度(°C)	養生温度 (°C)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			
			1 日	3 日	7 日	28 日
値	20.0	5.0	3.4	27.6	43.0	69.2
備考	—	—	JIS A1108 に準じた			



(a) プロコン 40



(b) アロンカチオクリート（ベース・フィラーF-1）



(c) アーマ #600

(d) マスターフロー-870

写真-5.7 リチウム圧入施工材料

### 5.3.2 円柱供試体

円柱供試体一覧を表-5.12 に示す。NC 配合の供試体（以下、NC 供試体）、ASR 配合の供試体（以下、ASR 供試体）を作製し、NC 供試体と ASR 供試体のうちの 3 体（“リチウムなし 劣化なし”）は ASR 劣化前の基準値を得るために、打設 28 日後に圧縮試験を行った。残りの ASR 供試体については ASR 促進を行い、はり供試体の鉛直方向での膨張量がおおよそ  $2000\mu$ 、 $4000\mu$  に達した時点でリチウム圧入を行うこととした。これにより、リチウム圧入時の ASR による劣化度が異なることが、その後の性能に影響を及ぼすかを検討する。

なお、表-5.12 中に示されている圧入時期については、第 1 回目は膨張量が  $2000\mu$  付近に達した時点（促進 81 日目）、第 2 回目は膨張量が  $4000\mu$  付近に達した時点（促進 147 日目）とした。リチウム圧入を行わずに ASR 促進を行った供試体を“リチウムなし 劣化あり”，劣化促進 81 日目（第 1 回目）にリチウム圧入を行った供試体を“劣化小 リチウムあり”，劣化促進 147 日目（第 2 回目）にリチウム圧入を行った供試体を“劣化大 リチウムあり”とし、載荷時期を 2 回に分け 3 体ずつ載荷するため、9 体ずつ準備した。実験に用いた円柱供試体の寸法は  $\phi 100\text{mm} \times H200\text{mm}$  とし、リチウム内部圧入のための削孔を行う供試体図を図-5.22 に示す。削孔は供試体上面の中心に行い、削孔深さは 100mm とした。

また、後述のリチウム圧入の際に行うポリマーセメントモルタルの表面漏出防止処理の影響を考慮する為、載荷前にリチウム圧入を行わず表面漏出防止処理のみを行った供試体を準備した。

圧縮試験は上記の第 1 回目と第 2 回目のリチウム圧入時に加え、第 2 回目の圧入から約 100 日後（促進 249 日目）、およびそれから約 1 年後（促進約 513 日目）に実施した。

表-5.12 円柱供試体一覧

供試体名	劣化の有無	圧入時期	表面漏出防止処理	載荷時期
NC	なし	なし	なし	打設 28 日後
リチウムなし劣化なし	なし	なし	なし	打設 28 日後
リチウムなし劣化あり	あり	なし	なし	促進 81 日目
				促進 147 日目
				促進 513 日目
			あり	促進 513 日目
劣化小リチウムあり		促進 81 日目 約 2000 $\mu$	あり	促進 147 日目
				促進 249 日目
		促進 513 日目		
劣化大リチウムあり		促進 147 日目 約 4000 $\mu$		促進 249 日目
				促進 513 日目

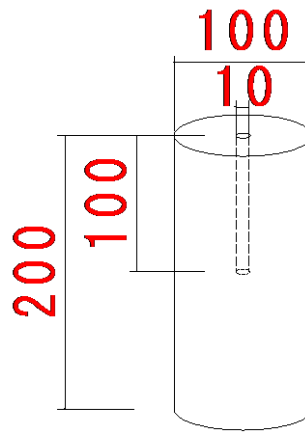


図-5.23 円柱供試体削孔時概要図（単位:mm）

### 5.3.3 はり供試体

表-5.13 にはり供試体を一覧として示す．NC 供試体を 2 体，ASR 供試体を 24 体作製し，NC 供試体は比較用として打設 28 日後に曲げ載荷試験を行った．残りの ASR 供試体については ASR 促進を行い，円柱供試体と同様に鉛直方向での膨張量が  $2000\mu$ ， $4000\mu$  に達した時点でリチウム圧入を行うこととした．圧入と載荷の時期および供試体名については，5.3.2 で述べた円柱供試体の場合と同様とする．ASR 促進方法および膨張量測定方法については，円柱供試体，はり供試体共に 5.2.3 および 5.2.4 と同様とした．

また，円柱供試体と同様に表面漏出防止処理の影響を考慮する為，載荷前にリチウム圧入を行わず表面漏出防止処理のみを行った供試体を 4 体準備した．この内の 2 体は，下面から削孔し，修復することを模擬した．これは，実際に構造物に適用する際に，天井に対して下から注入する場合があることによる．上面削孔では削孔位置に圧縮力が作用するのに対し，下面には引張力が作用する為，削孔位置による影響を考慮する必要がある．

なお，さらに長期劣化させた場合の耐荷性能を評価する為，“劣化ありリチウムなし”の 2 本と“劣化大リチウムあり”の 2 本については ASR 促進を継続中である．

作製したはり供試体の寸法を図-5.24 に，リチウム圧入時の削孔位置を図-5.25（図中赤色が掘削孔）に示す．引張側鉄筋に 2-D13( $f_y=390\text{N/mm}^2$ )，せん断補強筋には D6 鉄筋を配筋し，せん断スパン比  $a/d$  を 3.10 として，曲げ引張破壊が先行するように設定した．

“劣化小 リチウムあり”には圧入孔を 8 ヶ所，“劣化大 リチウムあり”には圧入孔を 6 ヶ所設けた．

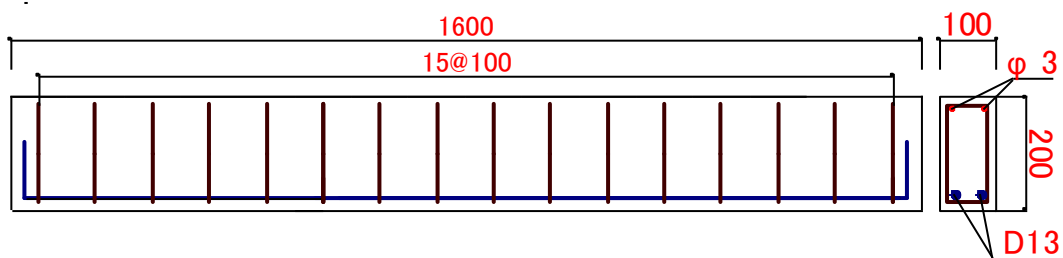


図-5.24 はり供試体概要図（単位:mm）

表-5.13 はり供試体一覧

供試体名	供試体番号	劣化の有無	圧入時期	載荷時期
NC	1,2	なし	なし	打設 28 日後
リチウムなし劣化あり	1,2	あり	なし	促進 81 日目
	3,4			促進 147 日目
	5,6			促進 513 日目
	7,8			—
劣化小リチウムあり	1,2		促進 81 日目 約 2000 $\mu$	促進 147 日目
	3,4			促進 249 日目
	5,6			促進 513 日目
劣化大リチウムあり	1,2		促進 147 日目 約 4000 $\mu$	促進 249 日目
	3,4			促進 513 日目
	5,6			—
上面削孔	1,2		なし	促進 513 日目
下面削孔	1,2			

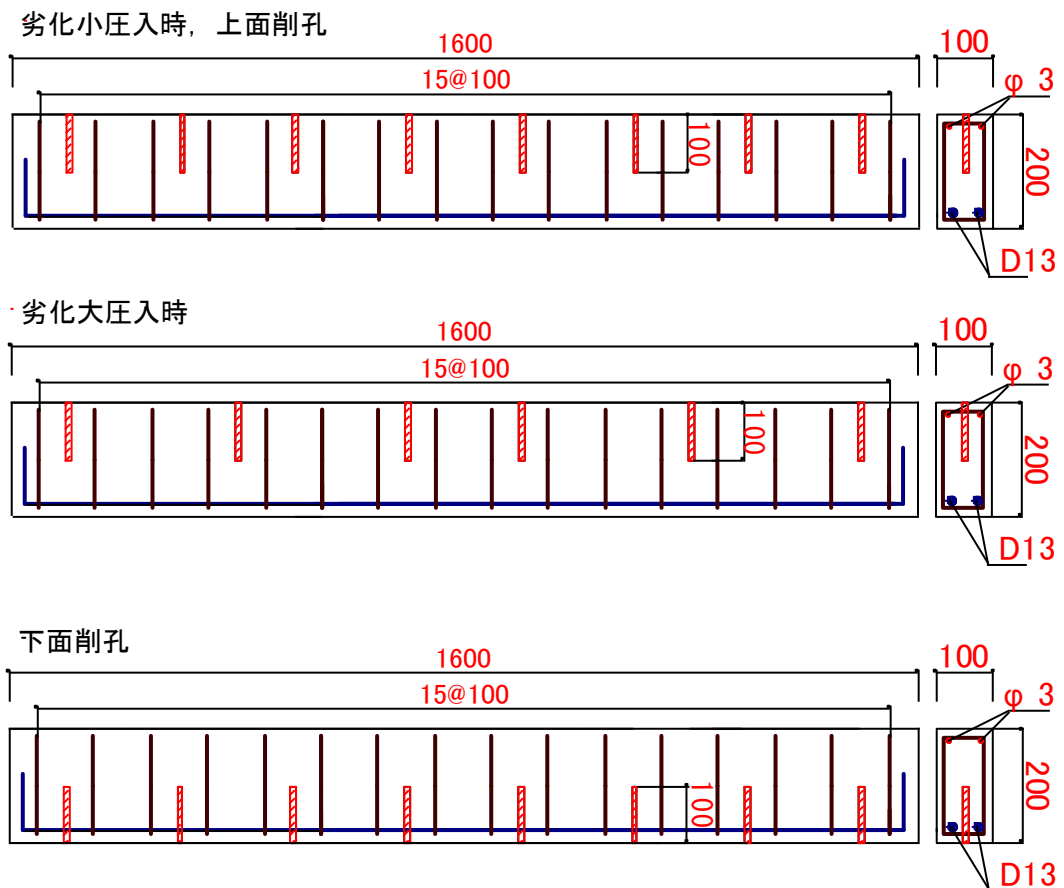


図-5.25 はり供試体掘削孔位置 (単位:mm)

## 5.2.4 実験結果および考察

### i) 膨張量

はり供試体の載荷直前の膨張量の測定結果一覧を表-5.14に示す。また、表中の「軸方向上側」の値は図-5.3および図-5.4における区間1,3の膨張量の平均値、「軸方向下側」の値は区間2,4の平均値、「鉛直方向」の値は区間5~8の平均値となっている。それぞれの値のプラスは膨張を表す。

表-5.14より同じ促進日数の供試体同士を比較すると、2000 $\mu$ 時にリチウム圧入を行った供試体の膨張量は、4000 $\mu$ 時に圧入を行った供試体の膨張量よりも小さく、促進147日目では2000 $\mu$ 時に圧入を行った劣化小の供試体と圧入を行わなかった供試体では、若干の差しか見られなかったが、513日目を比較すると軸方向上側では約2500 $\mu$ 程度差が生じていることから、リチウムによる膨張の抑制が見られる。

円柱供試体の載荷直前の膨張量の測定結果一覧を表-5.15に示す。こちらでもはり供試体同様リチウムの抑制効果が見られ、はり供試体と同じく促進147日目では劣化小の供試体とリチウム圧入を行わなかった供試体の差は約1200 $\mu$ 程度なのに対し、促進513日目では約3000 $\mu$ 程度差が出ていることが分かる。円柱供試体ははり供試体と違い、内部に鉄筋が入っていないため鉄筋による拘束力がなく、顕著にリチウムの影響が表れているものだと考えられる。

図-5.26に円柱供試体の膨張量の変化を示す。図中の赤線は“劣化小リチウムあり”と“劣化大リチウムあり”に対するリチウム圧入時期を表す。個体差が少ない円柱供試体の膨張量を比較すると、リチウム圧入をしていない供試体は膨張が6000 $\mu$ 程度まで達したのに対し、2000 $\mu$ 時、4000 $\mu$ 時にリチウムを圧入した供試体はそれぞれ圧入直後に収束傾向にある。このことからリチウムによってASR膨張が十分に抑制されていることが確認された。

一方、同様に、図-5.27~5.30にはり供試体の膨張量の経時変化を示す。円柱供試体の場合と比較すると、リチウム圧入の実施の有無や適用の時期が膨張の進展に与える影響は小さい。これは鉄筋による拘束の影響があること、また、円柱供試体と比較して、一つの圧入孔でカバーするコンクリート中の体積が大きいことから、リチウムのコンクリート中への浸透にばらつきが生じたものと考えられる。しかし、圧入により膨張が抑制される傾向は見られる。

2000 $\mu$ 時にリチウムを圧入した場合と4000 $\mu$ 時に圧入した供試体、それぞれ2体ずつを例に各測点での変化を図-35.31に示す。先に示したように膨張が抑制される傾向が見られる。しかし、軸方向上側である区間1,3の膨張量の変化を劣化小、劣化大で比較すると劣化大では膨張はほぼ見られないのに対し、劣化小では若干の膨張が認められる。実際に促進513日目の載荷前の状態を写真-5.8に示す。供試体の黒線がひび割れを示したものであり劣化小に多く見られる。リチウム圧入時に表面漏出防止処理を行っているため、ひび割れはリチウム圧入後に発生した。これは、はり供試体では円柱供試体に比べリチウムが注入しにくく、2.2.2節に示した圧入時間を超過し、圧入を打ち切った箇所が存在した。そのため、リチウムのコンクリート中への浸透量が減少し、抑制効果が低下したものと考えられる。

表-5.14 はり供試体 膨張量最終日測定結果

供試体名	供試体番号	膨張量(μ)			圧入時期	促進日数
		鉛直方向	軸方向上側	軸方向下側		
リチウムなし 劣化あり	1	1998	2725	1013	なし	81日間
	2	2125	2728	1050		147日間
	3	3728	5145	1818		
	4	3650	5713	1920		
	5	4865	9685	2975		513日間
	6	5185	7233	2888		—
	7	6475	9115	3105		
	8	5250	9293	3083		
劣化小 リチウムあり	1	2243	3563	1548	促進81日目 約2000μ	147日間
	2	2623	5048	1278		249日間
	3	2970	4405	1633		
	4	2898	3943	1278		
	5	4220	5833	2075		513日間
	6	4965	6853	2443		
劣化大 リチウムあり	1	4180	5820	2138	促進147日目 約4000μ	249日間
	2	4385	6043	1860		513日間
	3	4743	6330	2443		
	4	3405	6225	2816		
	5	4433	7393	2563		—
	6	4905	6593	2538		
上面削孔	1	5450	7648	1980	なし	513日間
	2	5310	7503	2375		
下面削孔	1	4013	8078	2835	なし	513日間
	2	5640	7085	2705		

表-5.15 円柱供試体 膨張量最終日測定結果

供試体名	供試体番号	膨張量(μ )	圧入時期	促進日数	供試体名	供試体番号	膨張量(μ )	圧入時期	促進日数	
リチウムなし 劣化あり	1	2148	なし	81日間	劣化小 リチウムあり	1	2555	促進81日目 約2000μ	147日間	
	2	1770				2	2233			249日間
	3	2190				3	2815			
	4	3608		4		2343	513日間			
	5	4060		5		2143				
	6	3548		6		2283				
	7	6968		7		3495	劣化大 リチウムあり		促進147日目 約4000μ	249日間
	8	5918		8		3213				
	9	5565		1	4503	—				
	10	5453		2	4878					
	11	6053		3	4968					
	12	6443		4	4288					
	13	5823		5	4273					
	14	5923		6	4320					
	15	4068		7	3433					
	16	6813		8	3010					
	17	5755		9	5248					
	18	6225								
	19	7125								

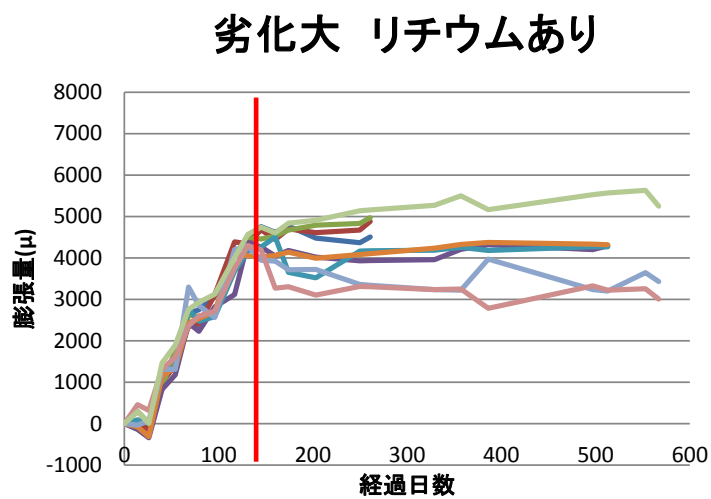
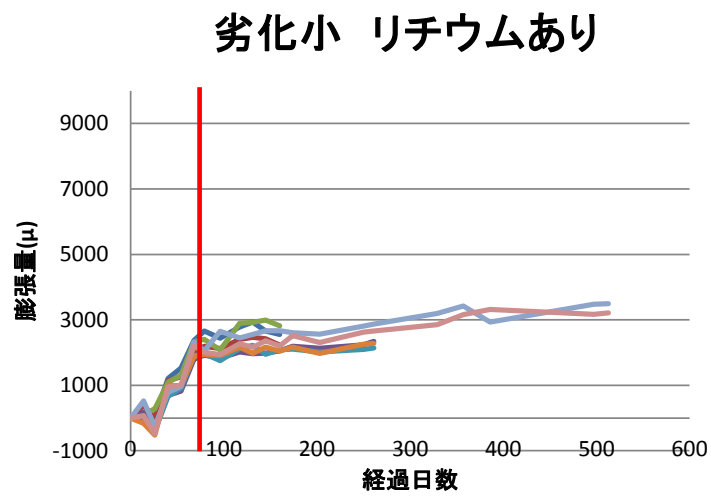
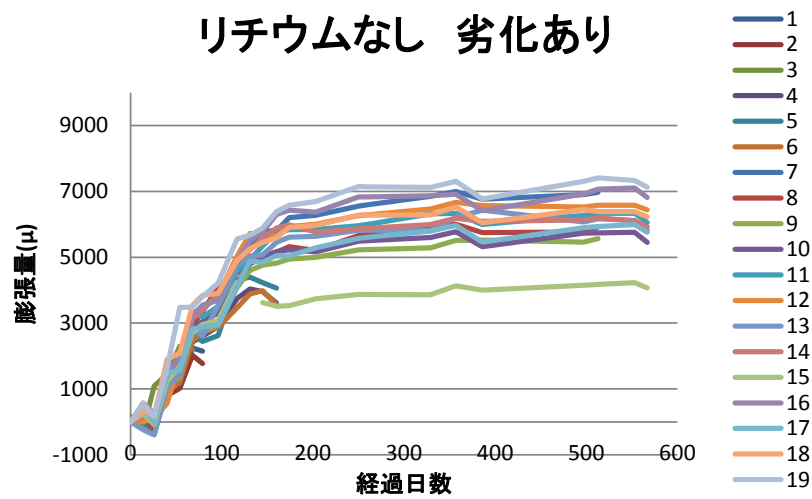


図-5.26 円柱供試体 膨張量の経時変化

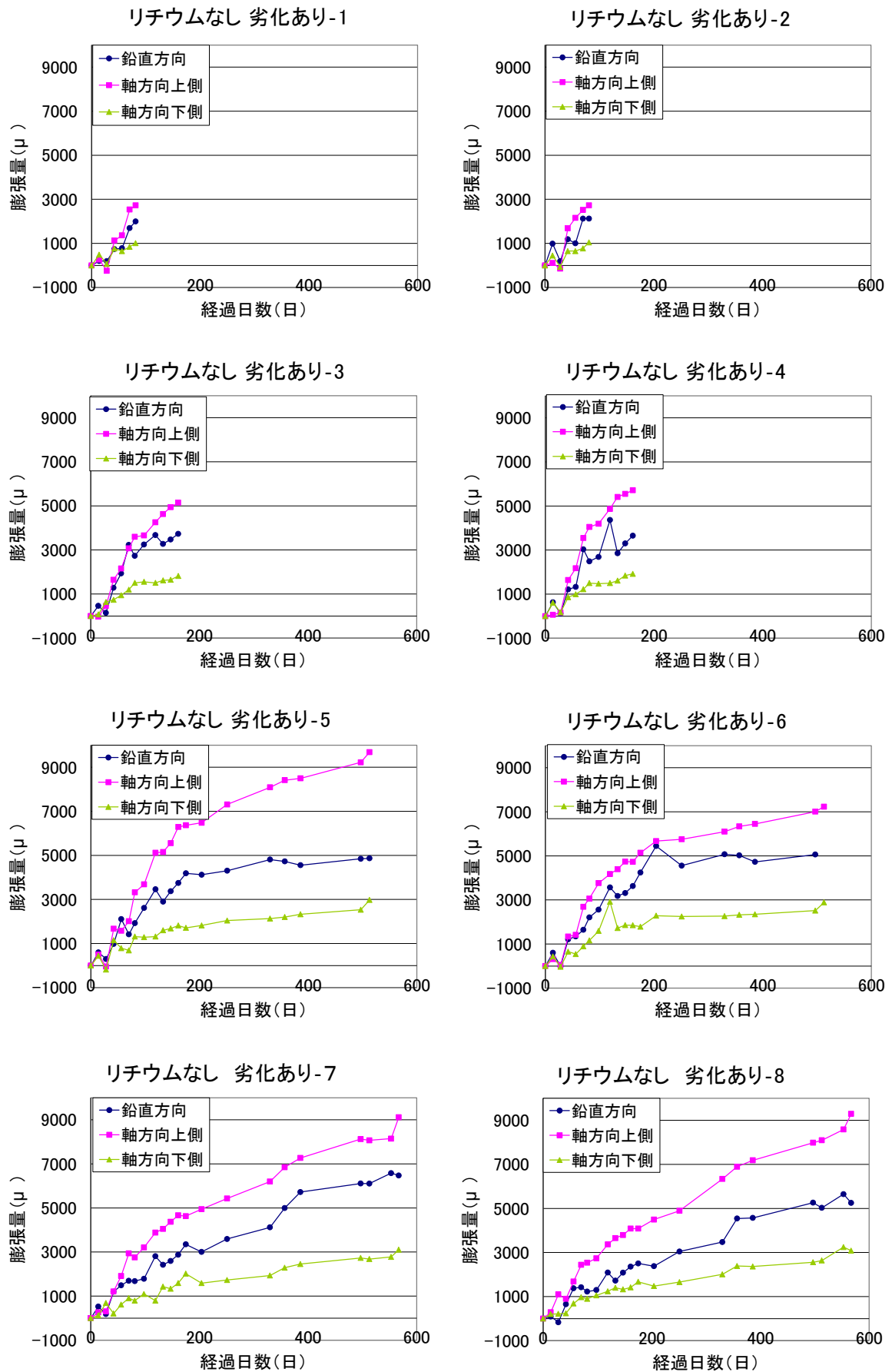


図-5.27 リチウムなし 劣化あり供試体 膨張量の経時変化

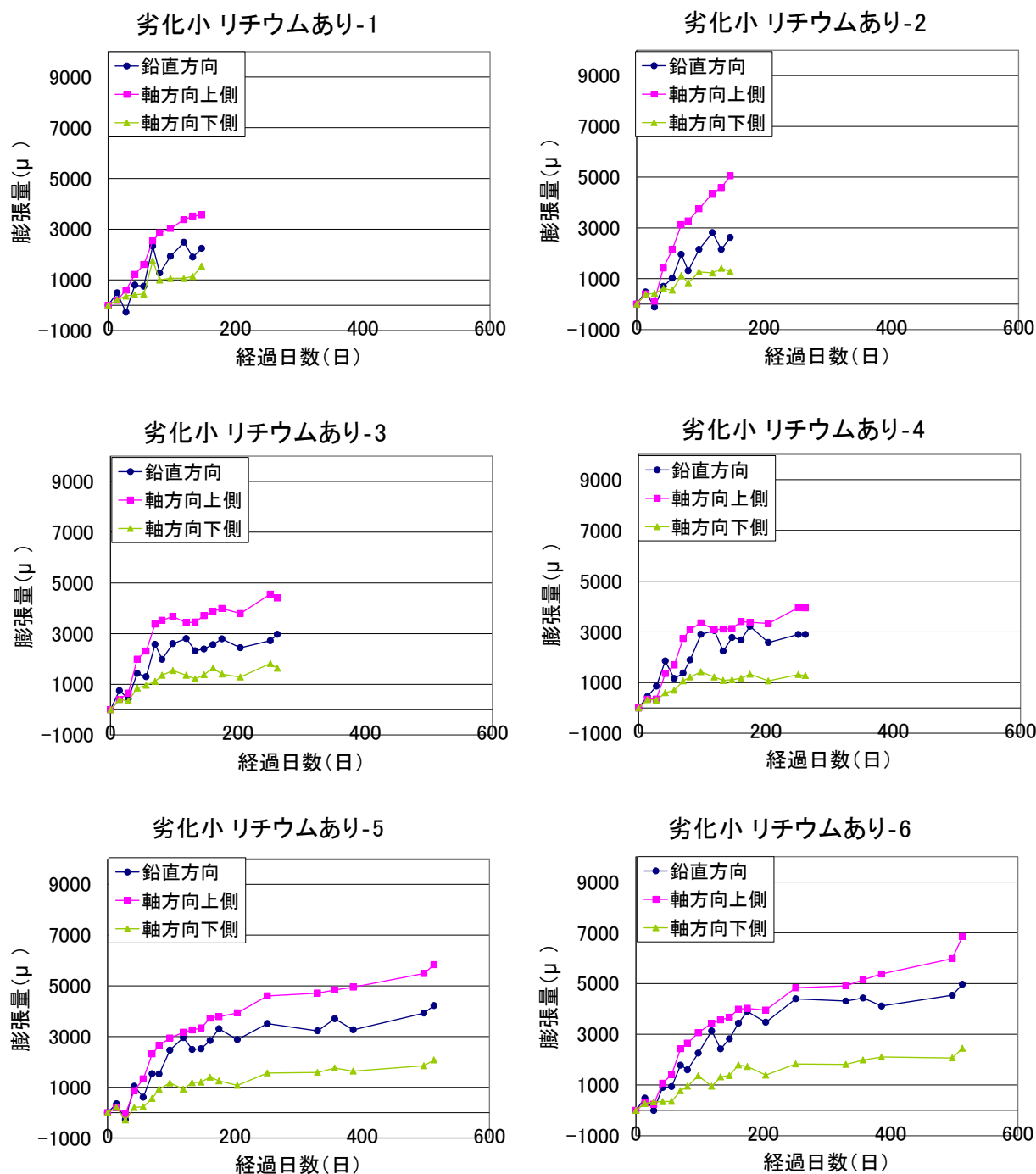


図-5.28 劣化小 リチウムあり供試体 膨張量の経時変化

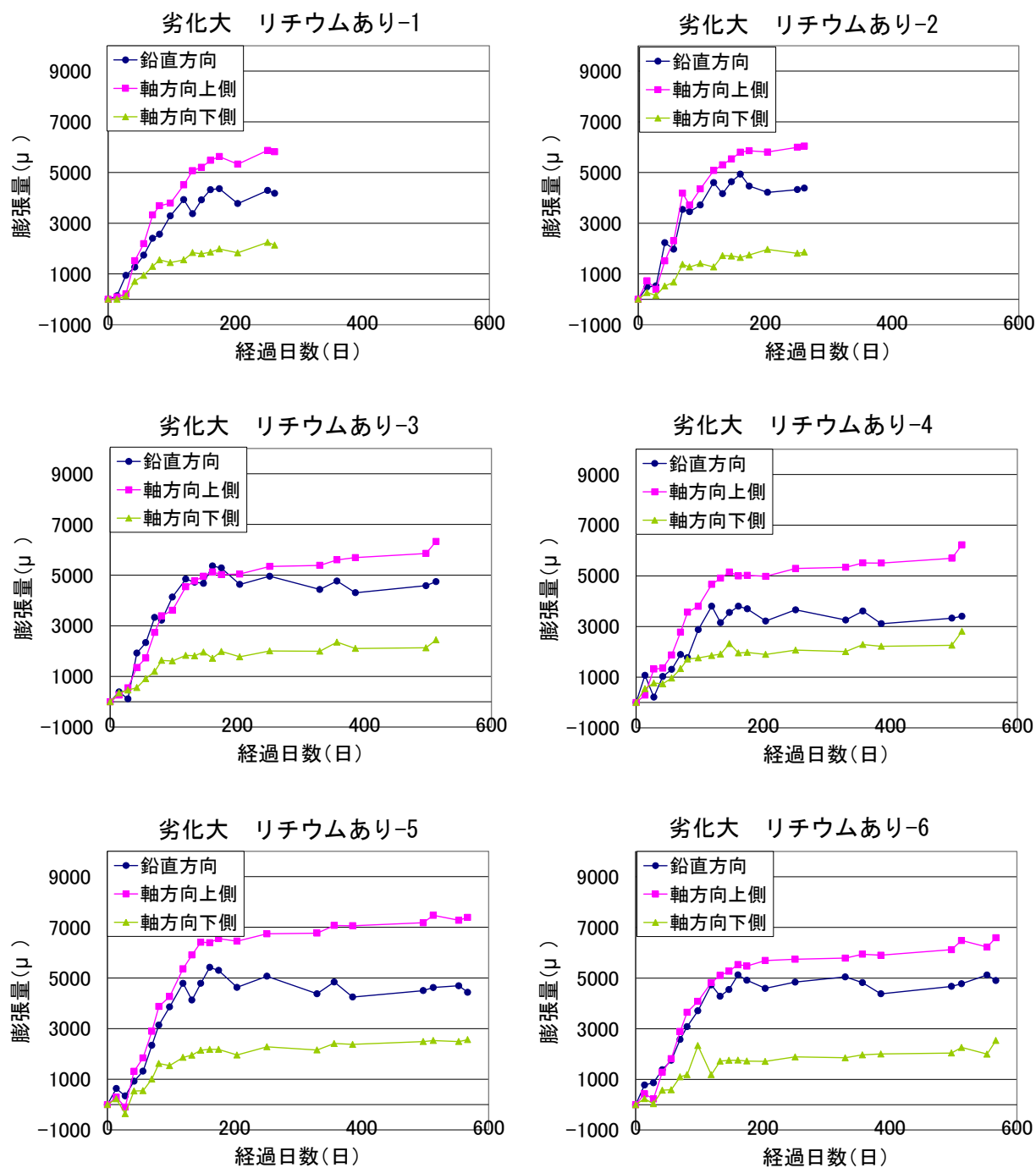


図-5.29 劣化大 リチウムあり供試体 膨張量の経時変化

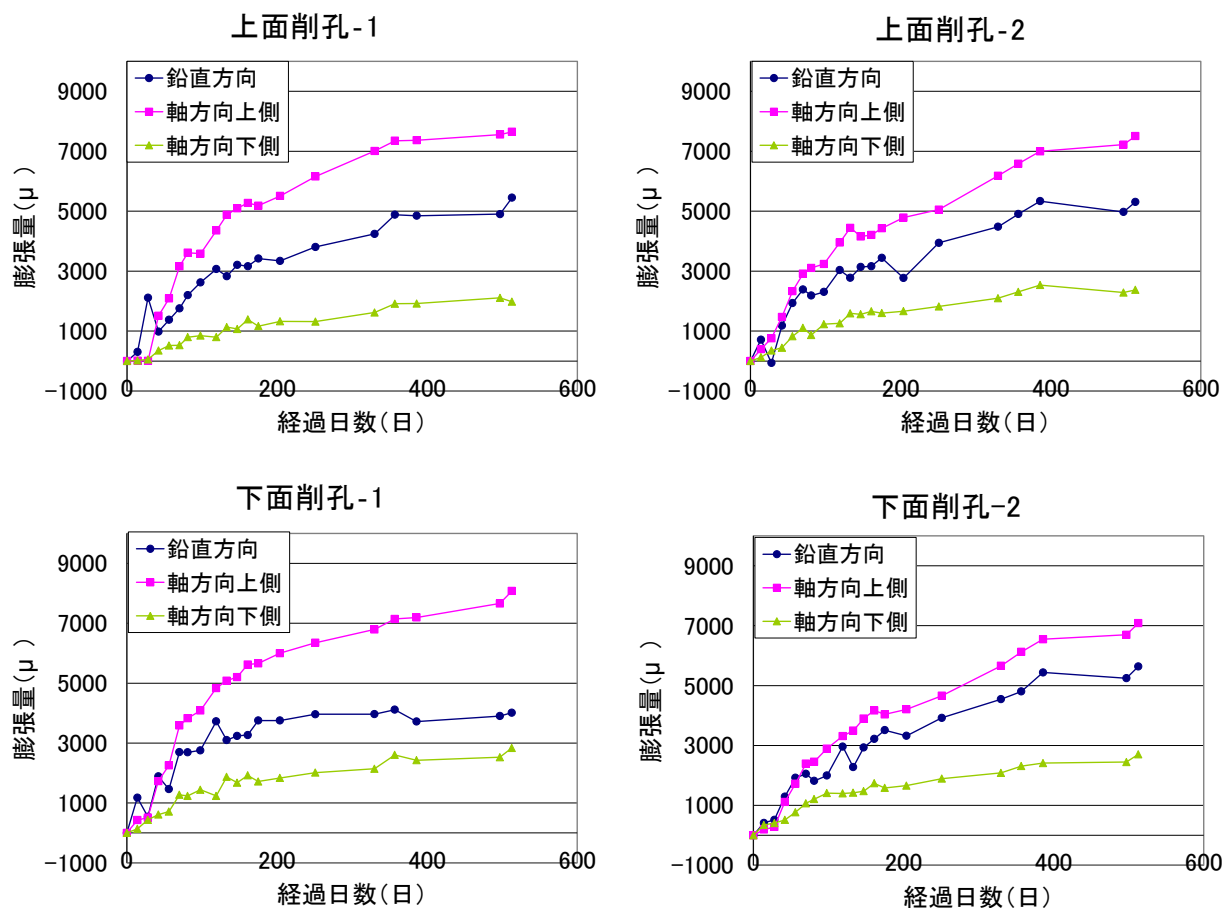


図-5.30 上面・下面削孔供試体 膨張量の経時変化

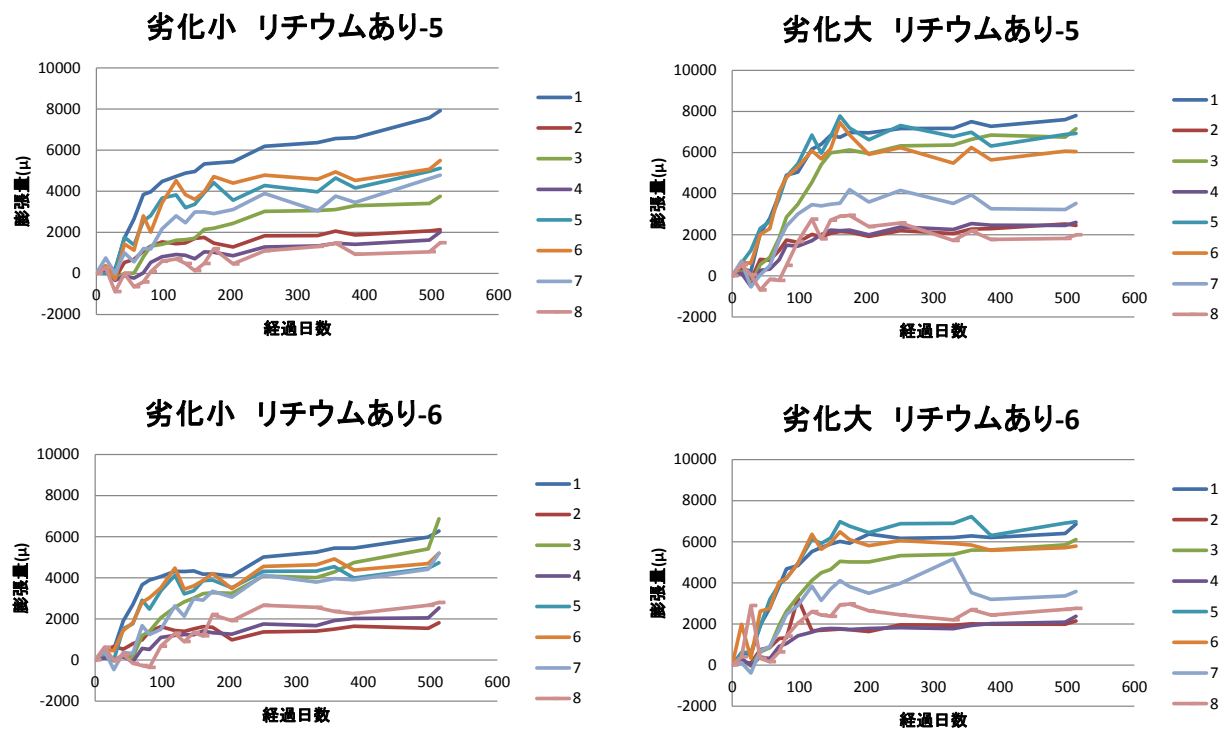


図-5.31 各測点での膨張量の経時変化



劣化小 リチウムあり-5



劣化大 リチウムあり-5

写真-5.8 載荷前はり供試体写真

## ii) 圧縮強度試験

円柱供試体の圧縮強度試験を、各パターン3体ずつ行い、その結果を表-5.16に示す。膨張量測定用のプラグの有無によってプラグありの方がなしよりも圧縮強度、静弾性係数が約15%減少していることが分かる。また、表面漏出防止処理を行った供試体とそうでない供試体を比較すると表面漏出防止処理によって圧縮強度は1割、静弾性係数は4割程度大きい。ただし、供試体間のばらつきが大きく、例えば膨張によって不均一な変形が供試体に生じているため、これらの値がコンクリートの物性を正確に反映していない可能性はある。

“リチウムなし”については、促進81日目の圧縮強度は劣化前と比べてほぼ同じであるが、ASR劣化により静弾性係数が7割程度低下している。促進147日目では圧縮強度が3割程度低下し、静弾性係数もさらに低下している。促進513日目になると圧縮強度はさらに低下し、4割近く低下している。しかし、促進81日目（2000 $\mu$ 付近）にリチウム圧入を行った供試体では促進147日目でも圧縮強度は維持され、静弾性係数の低下率も4割程度に留まった。さらに劣化させた促進249日目の圧縮試験では、圧縮強度の若干の低下は見られるものの静弾性係数では低下することではなく、513日目でもこれとほぼ同等の値を示した。先に示した表面漏出防止処理の圧縮強度の影響を考慮してもリチウム圧入によって圧縮強度は低下が抑制されるという結論が得られ、補修による効果を確認することができた。

表-5.16 圧縮強度試験結果

供試体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧入時期	膨張量測定用 プラグ	削孔	表面被覆	載荷時期
NC	37.8	28.8	なし	なし	なし	なし	打設28日後
リチウムなし 劣化あり	32.7	28.8	なし	あり	なし	なし	劣化前
	31.6	8.4					促進81日目
	25.3	7.1					促進147日目
	20.9	11.9					促進513日目
	24.2	13.7		なし	あり	あり	促進513日目
	22.4	11.5					促進513日目
	24.5	16.2					促進513日目
劣化小 リチウムあり	31.9	15.7	促進81日目 約2000 $\mu$	あり	あり	あり	促進147日目
	27.3	18.7					促進249日目
	27.7	16.4					促進513日目
劣化大 リチウムあり	23.0	9.1	促進147日目 約4000 $\mu$	あり	あり	あり	促進249日目
	26.8	17.1					促進513日目

### iii) 曲げ載荷試験

はり部材の曲げ載荷試験時の最大荷重および曲げ剛性の計算値および実験値を表-5.17 に、荷重-変位関係の実験値を図-5.32、図-5.34 に示す。また、図-5.32 内の範囲 A の拡大図を図-5.33 に示す。

表-5.17 の計算値は、表-5.16 に示したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数より、等価応力ブロックを用いて求めた。また、梁中の鉄筋は発錆が生じているが、本実験では錆の考慮はしていない。

一方、部材の曲げ剛性のうち、ひび割れ発生時までの曲げ剛性の計算値を次式にて求めた。

$$EI = E_c \cdot I_g \quad (1)$$

ここで、 $E_c$ ：圧縮試験から求めた静弾性係数、 $I_g$ ：コンクリートの全断面を有効とした時の断面二次モーメント。

また、引張鉄筋降伏時の曲げ剛性の計算値は、次式にて求めた。

$$EI = E_c \cdot I_{cr} \quad (2)$$

ここで、 $E_c$ ：圧縮試験から求めた静弾性係数、 $I_{cr}$ ：引張域のコンクリートを無視したひび割れ断面の断面二次モーメント。

一方、部材の曲げ載荷試験の結果から、曲げ剛性の実験値を次式に求めた。なお、本来は部材内で断面剛性は一定ではなく、特に本研究の場合のように ASR が生じて膨張ひび割れが多数発生している場合にはさらにそのばらつきは大きい、ここでは簡易的に一定として求めている。

$$EI = \frac{Pa}{24\delta_{max}}(3l^2 - 4a^2) \quad (3)$$

ここで、 $P$ ：載荷点 1 つにかかる荷重、 $l$ ：スパン長、 $a$ ：支点から載荷点までの距離、 $\delta_{max}$ ：スパン中央のたわみ。

また、実験値から求める曲げ剛性のうちの載荷初期の値については、NC 供試体では曲げ載荷中のひび割れ発生時における荷重および変位を用いて算出したが、ASR 供試体では劣化によるひび割れが載荷前から生じており、 $\pi$ ゲージによる測定結果からも曲げひび割れ発生点が不明瞭である。そこで、載荷初期のグラフの傾きの変曲点（約 10kN 程度）の荷重と変位を用いて曲げ剛性を算出した。

5.3.4-ii) で述べたように“リチウムなし”では圧縮強度は約 4 割近く低下していた。曲げ載荷試験でも同様に ASR による若干の耐力の低下が見られるが、低下率は 1 割程度でありそれほど大きくはない。はりの耐力にコンクリートの強度が及ぼす影響がそれほど大きくないため、コンクリートの強度が ASR によって大きく低下してもはり自体の耐力には影響が小さい為である。また、ASR の膨張により、はりが大きく反り上がりアーチを形成したため耐力が上昇したことも要因として考えられる。

普通コンクリート供試体や、比較的劣化の少ない供試体はたわみ 15mm 程度で圧壊が生じ、荷重の急激な低下が見られるのに対して、ASR が進行したものは急激な低下は見られない。これは ASR によって生じたひび割れが多数存在し、これらが載荷によって徐々に開口し、急激な圧壊が生じにくかったためであると考えられる。

また、現時点ではリチウムを圧入したことによる RC はり部材の耐力性能への影響は殆ど見られない。圧縮試験の結果から、リチウム圧入により ASR の進展が抑制され、コンクリートの強度がある程度維持されていることが分かり、500 日以上促進を続けた今でもその性能は保持し続けている。

曲げ剛性の計算結果と実験値を比較すると、初期剛性では ASR によってはりが反り上がっているため実験値での差が大きく見られるが、降伏時を比較すると概ね再現できていると言える。曲げ剛性には耐荷力とは異なり、ASR の影響が大きく、“リチウムなし”の供試体の初期曲げ剛性は  $1000\text{kN}\cdot\text{m}^2$  を大きく下回るものが殆どであるのに対し、リチウム圧入を行った“劣化小”の供試体では促進 513 日まで平均  $1100\text{kN}\cdot\text{m}^2$  以上を維持している。“劣化大”の供試体では  $1000\text{kN}\cdot\text{m}^2$  を維持しているがやはり自体が ASR によって劣化し、ひび割れが多く発生しているため細かな数値は誤差の範囲内と考えられ、必ずしもリチウム圧入による影響だとは断言することができない。

また、上面・下面削孔を行った供試体間での実験値および荷重変位曲線ではほとんど差が見られない。写真-5.9 に示すように曲げ載荷時のひび割れは削孔位置から発生することがなかった。これは、やはり供試体そのものが ASR によってあらかじめ劣化し、ひび割れが生じていたため、削孔の影響よりも先に ASR でのひび割れが進行したためだと考えられる。これらから、上下での削孔による耐荷力の影響は無視できるという結論を得られた。

“上面削孔”の供試体と“リチウムなし”の供試体の促進 513 日目の実験値の最大荷重の値を比較すると大きな差は見られず、ひび割れ注入材や表面漏出防止処理の影響は小さいと考えられ、“劣化小”の供試体のはりの物性はリチウム圧入によって ASR の進行が抑制された効果であると言える。また、劣化が進行した“劣化大”の供試体では、“劣化小”の供試体ほど顕著な違いは見られないが、リチウム圧入を行わなかった供試体より最大荷重は高い傾向にある。

表-5.17 曲げ載荷試験結果及び計算値

供試体名	供試体 番号	計算値			実験値			破壊性状	載荷時期
		最大荷重 (kN)	曲げ剛性(kN・m <sup>2</sup> )		最大荷重 (kN)	曲げ剛性(kN・m <sup>2</sup> )			
			初期	降伏時		初期	降伏時		
NC	1	58.0	2199	903	61.6	1398	499	曲げ破壊	打設28日後
	2					874	686	曲げ破壊	
劣化あり リチウムなし	1	56.9	794	583	58.6	614	596	曲げ破壊	促進81日目
	2					892	608	曲げ破壊	
	3	55.2	697	539	55.4	899	552	曲げ破壊	促進147日目
	4					756	511	曲げ破壊	
	5	54.8	1170	713	57.6	723	549	曲げ破壊	促進513日目
	6					1363	671	曲げ破壊	
劣化小 リチウムあり	1	57.0	1308	749	59.3	1219	698	曲げ破壊	促進147日目
	2					1684	727	曲げ破壊	
	3	55.8	1514	794	53.8	836	663	曲げ破壊	促進249日目
	4					1474	724	曲げ破壊	
	5	56.0	1357	760	58.1	922	755	曲げ破壊	促進513日目
	6					1331	723	曲げ破壊	
劣化大 リチウムあり	1	54.4	844	604	53.4	884	659	曲げ破壊	促進249日目
	2					1028	729	曲げ破壊	
	3	55.7	1405	771	58.0	1331	665	曲げ破壊	
	4					707	602	曲げ破壊	
上面削孔	1	54.9	1343	757	58.8	1049	577	曲げ破壊	促進513日目
	2					952	687	曲げ破壊	
下面削孔	1	54.9	1343	757	58.3	854	612	曲げ破壊	
	2					1104	629	曲げ破壊	

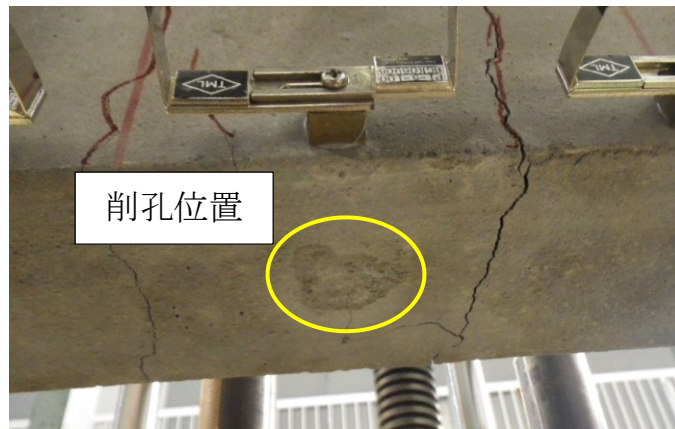


写真-5.9 下面削孔供試体 曲げ載荷時の下面中央部の状況

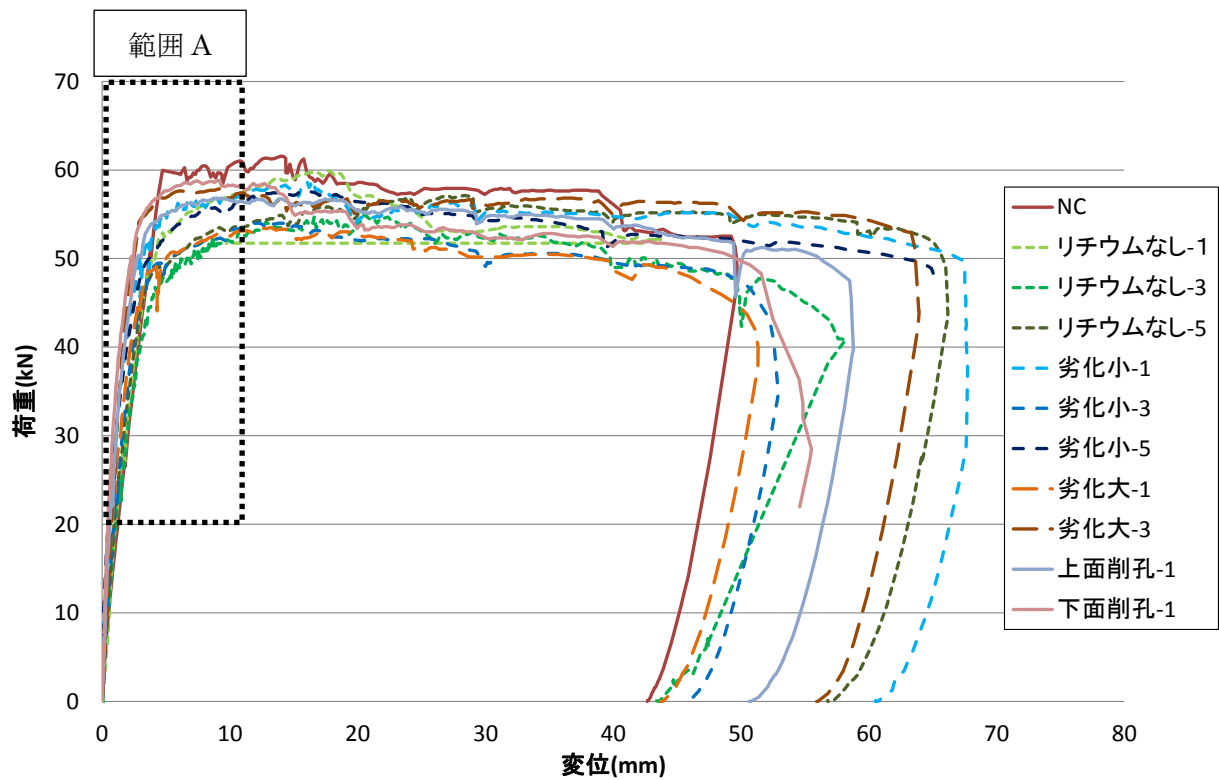


図-5.32 荷重-変位曲線

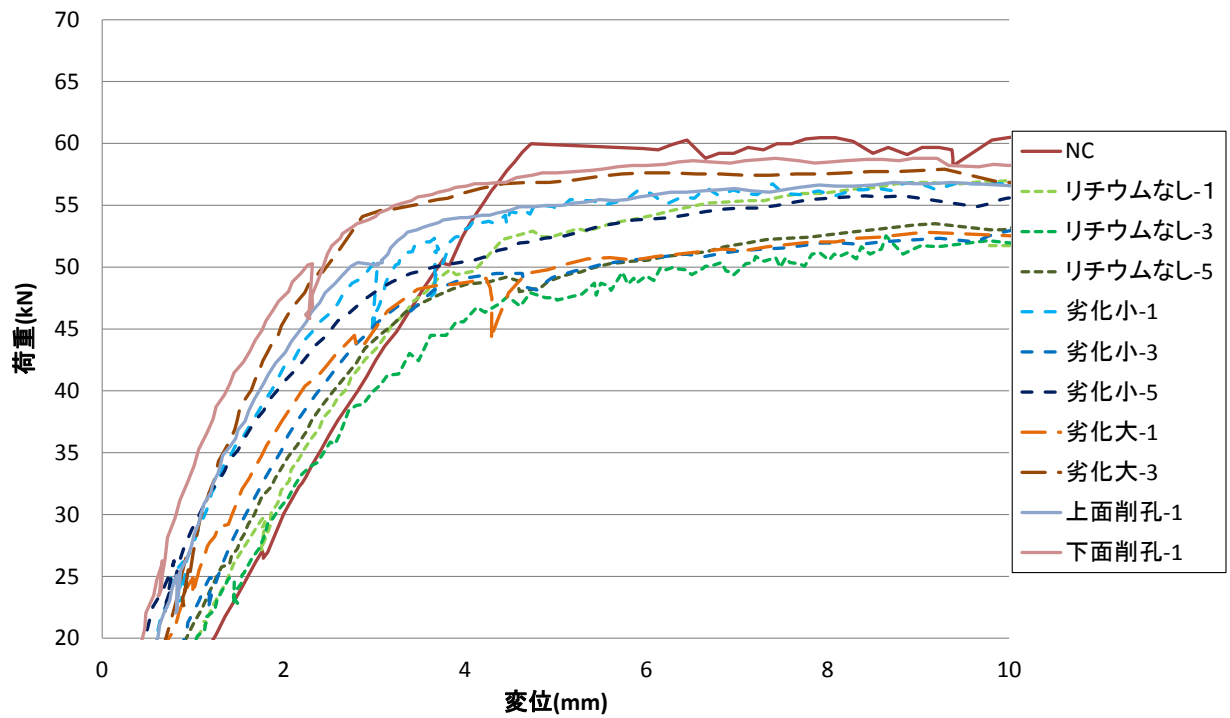
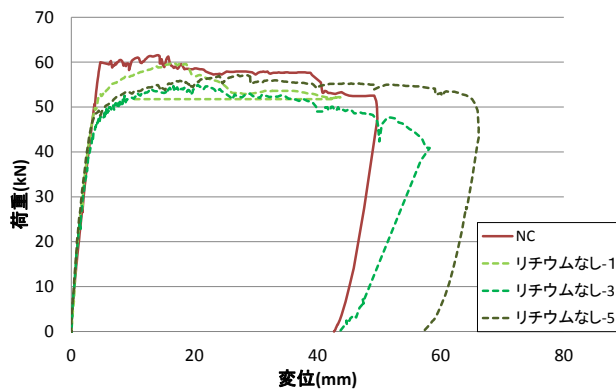
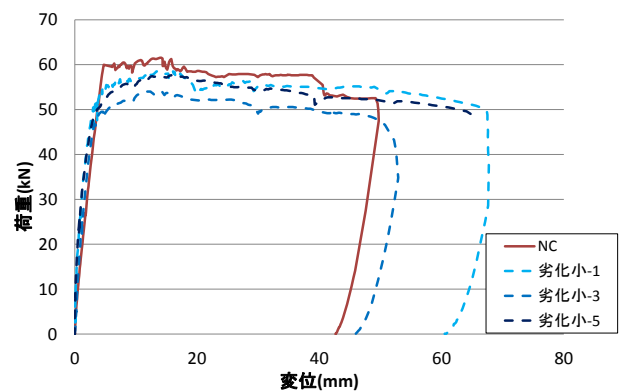


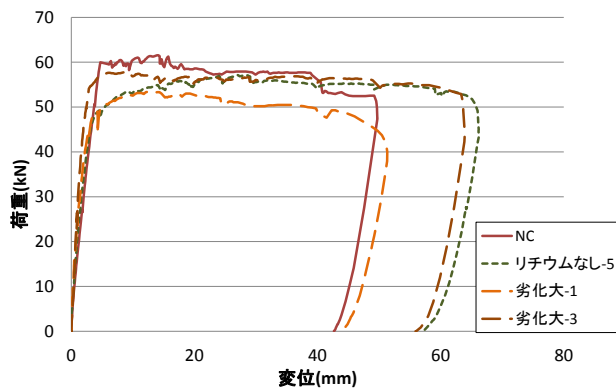
図-5.33 荷重変位曲線（範囲 A 拡大）



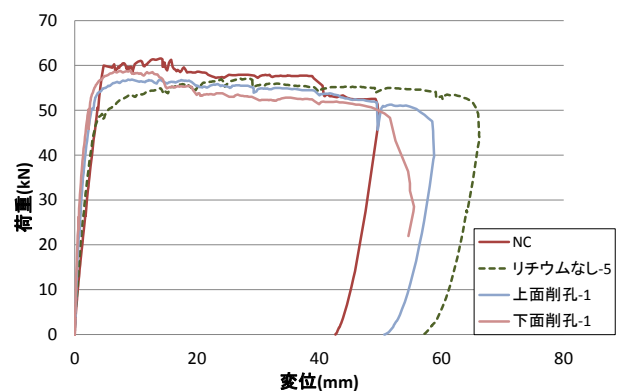
荷重-変位曲線（リチウムなし）



荷重-変位曲線（劣化小）



荷重-変位曲線（劣化大）



荷重-変位曲線（上・下面削孔）

図-5.34 荷重-変位曲線 比較図

### 5.3.5 まとめ

本研究では、ASR 劣化した RC 部材に亜硝酸リチウム圧入を行い、再度 ASR 促進環境下に一定期間置き、その後載荷試験を行うことで、圧入後における部材の耐荷性能を評価することを目的とした。反応性骨材を用いた供試体を ASR 促進させ、膨張量を基準とした劣化度によってリチウムの圧入時期および載荷時期を分けた。また、劣化の大きい供試体に対してもリチウム圧入を行い、この補修方法による膨張抑制効果について検討を行った。本研究より得られた結論を以下に示す。

#### (1) 膨張量

- ・ リチウム圧入を行った供試体では膨張が収束している傾向にあり、リチウム圧入による膨張抑制効果がみられた。

#### (2) 圧縮試験

- ・ リチウム圧入によって圧縮強度および静弾性係数の低下を軽減できた。
- ・ 円柱供試体では供試体間のばらつきが大きく、例えば膨張によって不均一な変形が供試体に生じているため、圧縮試験から得られた値がコンクリートの物性を正確に反映していない可能性はある。

#### (3) 曲げ載荷試験

- ・ 曲げ剛性の計算値、実験値ともに、リチウムの供給がなく膨張が大きい“劣化あり リチウムなし”の値が特に低下し、“劣化小 リチウムあり”の供試体が一番高かった。
- ・ リチウム圧入工を実施することで剛性の低下が緩和され、補修の効果を確認したが耐荷性能に対しては大きな影響は見られなかった。
- ・ ひび割れ注入材や表面漏出防止処理の影響は小さいと考えられ、“劣化小”の供試体のはりの物性はリチウム圧入によって ASR の進行が抑制された効果であると言える。

### 参考文献

- 1) 江良和徳：リチウムイオン内部圧入による ASR 抑制効果に関する研究，京都大学大学院 社会基盤工学専攻博士後期課程 博士論文，2010.3
- 2) 三方康弘，井上晋，小林和夫，仁枝保：せん断補強筋のない PC はり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.3，pp.319-324，1998.
- 3) 福嶋孝啓，小林孝一，六郷恵哲：ASR 劣化した RC 部材のせん断耐荷性能および後施工型鉄筋によるせん断補強効果に関する検討，アップグレード論文報告書，第 12 巻，pp.1042-1049，2012.10
- 4) 棚橋和夫，岩永武士，小柳洽，浅野幸男：ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学挙動について，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp-843-848，1996.
- 5) 羽田野英明，中島隆，原田祐一，六郷恵哲：後施工型の鉄筋を用いた RC 部材のせん断補強，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.1369-1374，2011.7
- 6) 東亜合成株式会社，カチオン性アクリルポリマーセメントモルタル アロンカチオクリート 商品資料，2002 年 7 月版
- 7) BASF ジャパン株式会社，特殊セメント系/非金属骨材系 高性能無収縮グラウト材 マスターフローー870 商品資料

## 第6章 ASR ひび割れを再現するモデル試験

### 6.1 本章の目的

ASR は反応が進み、コンクリートにひび割れが生じるまでに数ヵ月から数年かかる。そのため ASR 劣化コンクリートの実験は長期的に及ぶことが多い。例えば、5 章で検討した亜硝酸リチウム圧入による ASR の補修については、亜硝酸リチウムのコンクリート内への浸透にひび割れの分布が大きく影響すると考えられるが、骨材が膨張して実験要因として求められるひび割れ分布状態となるまでには、数か月間を要するため、ASR によるひび割れを早期に再現できれば今後の ASR における研究の飛躍が期待できる。そこで、短期間で ASR ひび割れの再現を図るため、膨張材の一種である静的破碎剤をひずみ硬化型セメント系複合材料（以下 SHCC）に添加することで膨張性を有する模擬骨材を作製した。膨張性を有する模擬反応性骨材をコンクリート中の粗骨材に置換することで模擬 ASR 供試体を作製し、短期的に実際の ASR 劣化によるひび割れ発生状況を再現できると考えたからである。

#### 6.1.1 ASR 再現性の評価方法

模擬 ASR 供試体について、実際の ASR 劣化をどの程度再現できているかを定量的に示す方法として、本研究では、「ひび割れ幅および膨張量」「樹脂注入による比較」「力学試験」「X 線 CT スキャン」の 4 項目を採用し、ASR の再現性についての評価を行うこととする。

##### i) ひび割れ幅および膨張量

模擬 ASR 供試体のひび割れ幅、膨張量を測定し、実際の ASR 劣化供試体と比較を行う。ひび割れ幅に関しては、クラックスケールにて最大ひび割れ幅を測定する。膨張量については、コンタクトゲージにて測定した。また、同時に目視によるひび割れの観察も行った。

##### ii) 樹脂注入

樹脂注入を行う際に、樹脂注入状況、充填状況の違いを ASR 供試体、模擬 ASR 供試体について比較を行う。樹脂は、ひび割れが連続していなければ、ひび割れに充填されない。一方、ASR によって劣化が生じた場合には、析出物がひび割れに充填されるため、樹脂注入には不利となることが予想されるので、樹脂注入状況から ASR、模擬 ASR ひび割れの違いを確認する。

##### iii) 力学試験による評価

コンクリートの圧縮試験の結果から模擬 ASR がどの程度、実際の ASR 劣化を再現できるか評価する。

##### iv) X 線 CT スキャンによる評価

X 線 CT スキャンにより、実際の ASR 劣化供試体と模擬骨材を用いて作製した模擬 ASR 劣化供試体のそれぞれの内部構造を画像解析する。X 線 CT スキャン画像からひび割れの連続性、ひび割れ分布状況を比較、評価する。CT 画像からひび割れ部、樹脂充填部、生成ゲル部が視覚化できれば、断面積当たりのひび割れ面積など、ASR と模擬 ASR の再現性の評価が可能となる。

## 6.2 使用材料および配合

### 6.2.1 静的破碎剤

静的破碎剤は一般的に振動，騒音，粉塵など公害問題を伴う破碎作業を低公害で実施する際に用いられる．破碎対象となる岩石や鉄筋コンクリートにあらかじめ削孔し，その中に水と練り混ぜた静的破碎剤を充填すると，静的破碎剤と水が反応し，静的破碎剤が膨張することで亀裂を発生させ破碎することができる．また既往の研究<sup>1)</sup>で，静的破碎剤を骨材として置換した供試体は，脱型後材齢 1 日から材齢 7 日まで水中養生を行い，その後気温 20℃，湿度 60%の恒温室内に養生すると，打設してから膨張のピークに到達するまで約 1 ヶ月かかり，そのうち最初の 1，2 週間で最大膨張量の 7～8 割の膨張が進行することが分かっている．

### 6.2.2 膨張性模擬骨材

ASR により膨張する骨材を再現するため，ひずみ硬化型セメント系複合材料（SHCC）に静的破碎剤を一定量添加したものを粒形に成形し，膨張性模擬骨材とした．SHCC を用いたのは，静的破碎剤による膨張で模擬膨張骨材自体が分解しないようにするためである．

膨張模擬骨材自体の配合は表-6.1 に，材料と物性を表-6.2 に示す．また，模擬骨材を膨張させるために使用した静的破碎剤は，粉碎したうえで 0.6mm 以下にふるい分けて使用した．ふるい分け前後の静的破碎剤の状態を写真-6.1 に示す．

表-6.1 膨張性模擬骨材配合（静的破碎剤添加量：100 kg/m<sup>3</sup>）

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
	水	早強 セメント	石灰石粉	珪砂		静的 破碎剤	繊維	増粘剤	高性能 AE 減水剤
				6 号	7 号				
50	390	780	234	183	275	100	12.1	1.01	9.13

表-6.2 材料と物性

材料名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	銘柄・種類
セメント	3.13	早強セメント（住友大阪セメント）
細骨材	2.59	川砂（揖斐川産）
粗骨材	2.61	川砂利，Gmax25mm（揖斐川産）
石灰石粉	2.71	粉末度 3000cm <sup>2</sup> /g
高性能 AE 減水剤	1.07	マスターグレニウム SP8HU（ポゾリス）
AE 減水剤	1.25	ポゾリス No.70（ポゾリス）
静的破碎剤		クイカッターE（太平洋マテリアル）
膨張骨材	2.0	SHCC
増粘剤	2.5	MC（メチルセルロース）
繊維	0.97	PE 繊維（高強度 12μm×12mm） 引張強度 2.6GPa、弾性係数 88GPa

材料はオムニミキサーにて練り混ぜを行い、繊維を均一に練り混ぜ後、写真-6.2に示すような型枠に打設を行った。この型枠は、農業用プラグの上部を電熱線により切断し、下部（平らな面）を養生テープによって固定を行ったものである。打設の様子と成型後の模擬骨材をそれぞれ写真-6.3、写真-6.4に示す。

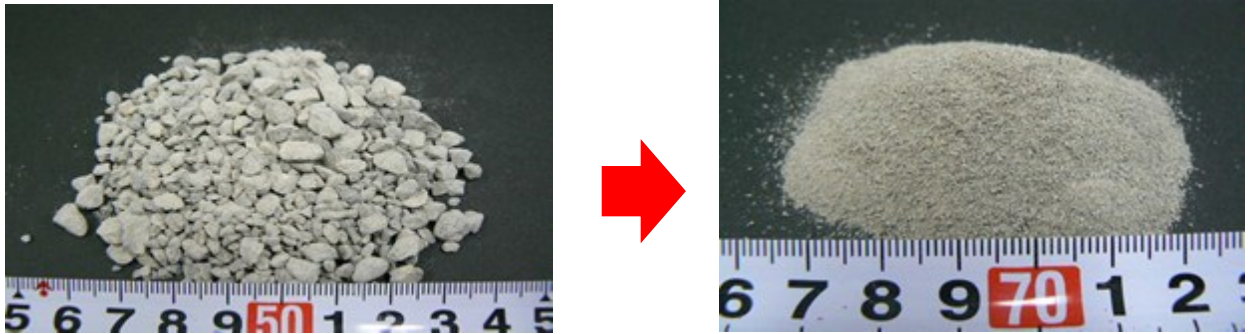


写真-6.1 ふるい分け前後の静的破碎剤

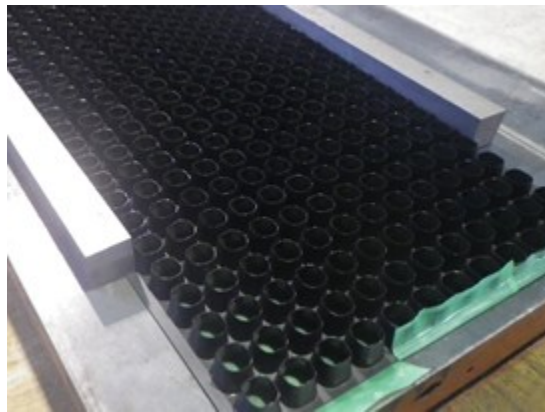


写真-6.2 模擬骨材型枠

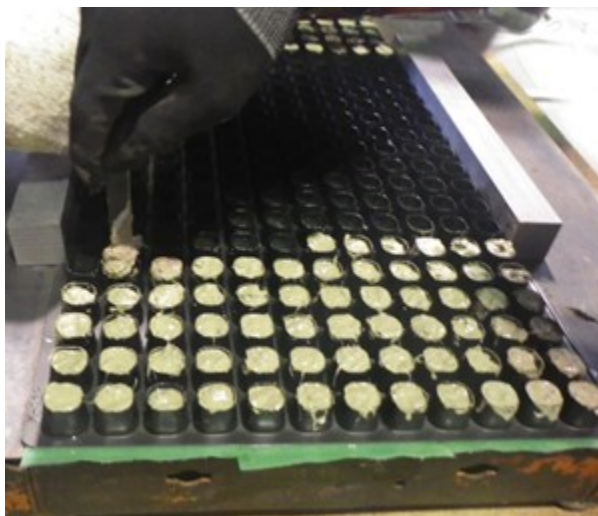


写真-6.3 模擬骨材打設様子



写真-6.4 模擬骨材一例

### 6.2.3 ブロック供試体概要

表-6.3 に配合を示すようなコンクリートで、ブロック供試体を作製した。配合では粗骨材を模擬骨材で 30%置換している。これは、既往の研究<sup>1)</sup>により、目視で見た場合、ASR のひび割れを最も再現していた配合である。比較用に、表-4.1 中に示した、北海道産反応性骨材を使用した ASR コンクリートも用いて、同様にブロック供試体を作製した。圧縮試験コア用ブロック供試体 (150×200×400mm) を 2 体、断面確認用ブロック供試体 (150×200×250mm) を 2 体作製した。膨張によるひび割れ発生のために、ブロック供試体からのコア供試体採取が困難になることも考慮し、円柱供試体 (Φ100×200mm) も 3 体作製した。また、膨張量を測定するための膨張量確認用ブロック供試体 (150×200×400mm) を 2 体作製した。コンタクトゲージ用プラグ位置は、図-6.1 に示す通りである。

1 週間の湿布養生後、室温 20℃、湿度 60%の恒温室にて気中養生を行い、ひび割れの進展状況と膨張量測定を行った。最大ひび割れ幅が 1mm 前後に達した時点で樹脂注入を行った。

表-6.3 模擬 ASR 配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
	水	早強 セメント	細骨材	粗骨材		模擬骨材	AE 減水剤
				大	小		
55	165	300	809	0	697	229	0.94

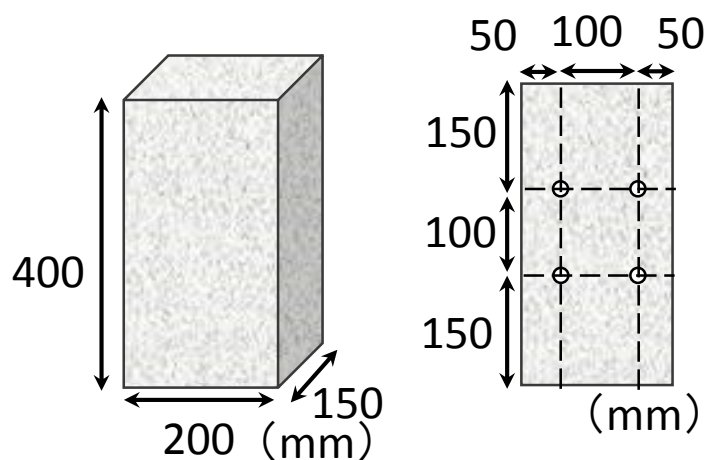


図-6.1 ブロック供試体概略図

### 6.2.4 樹脂注入

ひび割れ部への樹脂注入には内圧充填接合補強工法<sup>2)</sup> (IPH システム) を用いた。この工法は、注入器具が空気抜き機能を備えていること、コンクリート内部まで削孔すること、低圧で樹脂を注入することに特徴がある。樹脂注入に用いる器具を写真-6.5 に示す。ひび割れ位置から注入位置を決め、注入位置にドリルで削孔 (孔径 7mm、深さ 70mm 程度) した。削孔位置に台座をシール材で取り付け、台座の口を塞がないように供試体全体を速硬性のモルタルで被服を行った。

ASR、模擬 ASR の圧縮試験用ブロック供試体はともに、200×400mm の面に片側 6 カ所、計 12

カ所から、樹脂が注入できなくなるまで注入を行った。ドリル、削孔の例、台座、をそれぞれ写真-6.6～写真-6.8に示す。モルタルが硬化した後に、注入器具を台座に取り付け、流動性の高いエポキシ樹脂を低圧（注入圧  $0.06\text{N/mm}^2$  程度）で加圧注入し、3日間静置した後に注入器具を取り外した。今回注入に用いたエポキシ樹脂の物性を表-6.4に、樹脂注入状況を写真-6.9に示す。



写真-6.5 樹脂注入器具



写真-6.6 削孔器具



写真-6.7 削孔の例



写真-6.8 台座取り付けの例



写真-6.9 樹脂注入状況

表-6.4 エポキシ樹脂の材料物性

物性	粘度 (CPS)	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	付着強度 (MPa)
エポキシ樹脂 (E-396H)	550CPS±220	58.8	83.3	6.0～

### 6.3 ASR ひび割れ再現結果

#### 6.3.1 膨張量、ひび割れ幅およびひび割れ形状による比較

ASR 供試体と模擬 ASR 供試体の膨張量を比較したものを図-6.2 に示す。図からわかるように ASR 供試体の膨張量は、促進材齢 80 日程度で、約 6000 $\mu$  に達した。一方、模擬 ASR 供試体は、促進材齢 20 日程度の比較的若材齢で 18000 $\mu$  と大きな膨張量を示し、それ以降あまり膨張傾向を示すことはなかった。模擬 ASR 供試体は、早期に大きな膨張挙動を示し、膨張量が ASR の約 3 倍の値となったことから、膨張量の観点から今回の配合の膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR 供試体は、ASR の再現性は低いと言える。また、樹脂注入直前の ASR および模擬 ASR 供試体のひび割れの様子を写真-6.10 から写真-6.11 に示す。写真からもわかるように模擬 ASR ひび割れの方が ASR ひび割れに比べ、ひび割れ幅が大きく、最大ひび割れ幅は、模擬 ASR ひび割れが 1.10mm, ASR ひび割れが 0.60mm と 2 倍程度大きい結果となった。しかし、ひび割れの分布に関しては、ASR 特有の亀甲状のひび割れを再現できており、膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR 劣化が ASR のひび割れ発生状況をよく再現できていることがわかる。

本研究の範囲で模擬 ASR の膨張量は、ASR の膨張量の 3 倍程度の値を示し、再現性が高いとは言えなかった。これは、模擬骨材への静的破砕剤の添加量（本研究は 100kg/m<sup>3</sup>）が多く、模擬骨材が ASR に用いた反応性骨材より大きな膨張力を持っていたからだと考えられる。ひび割れ分布は高い再現性を示したことから、模擬骨材の使用量、静的破砕剤の添加量を調整することにより、ASR 劣化コンクリートの再現を行うことは可能であると考ええる。

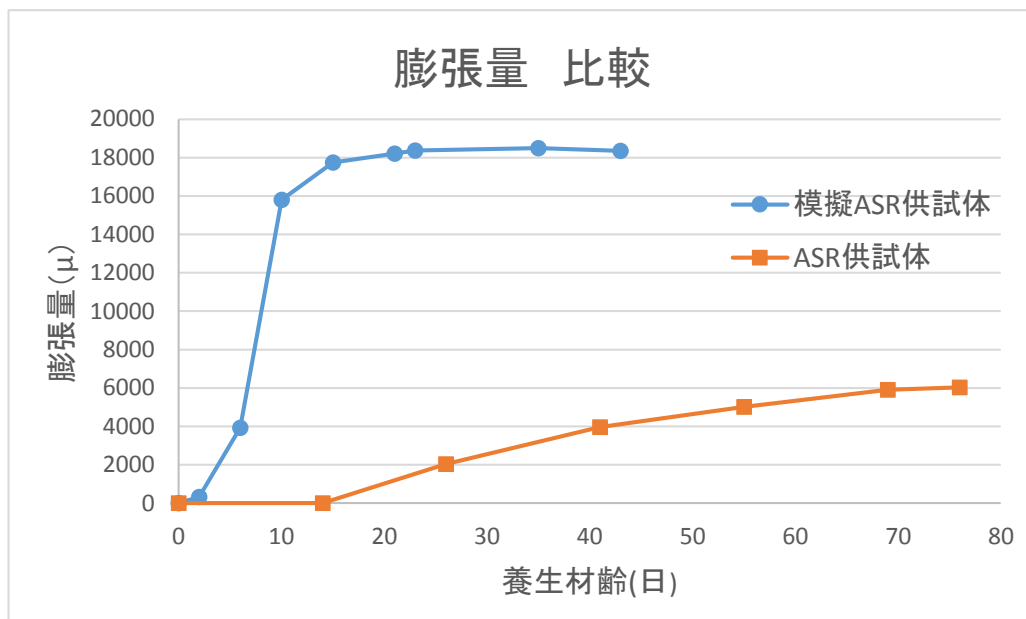


図-6.2 ASR, 模擬 ASR 供試体膨張量 比較

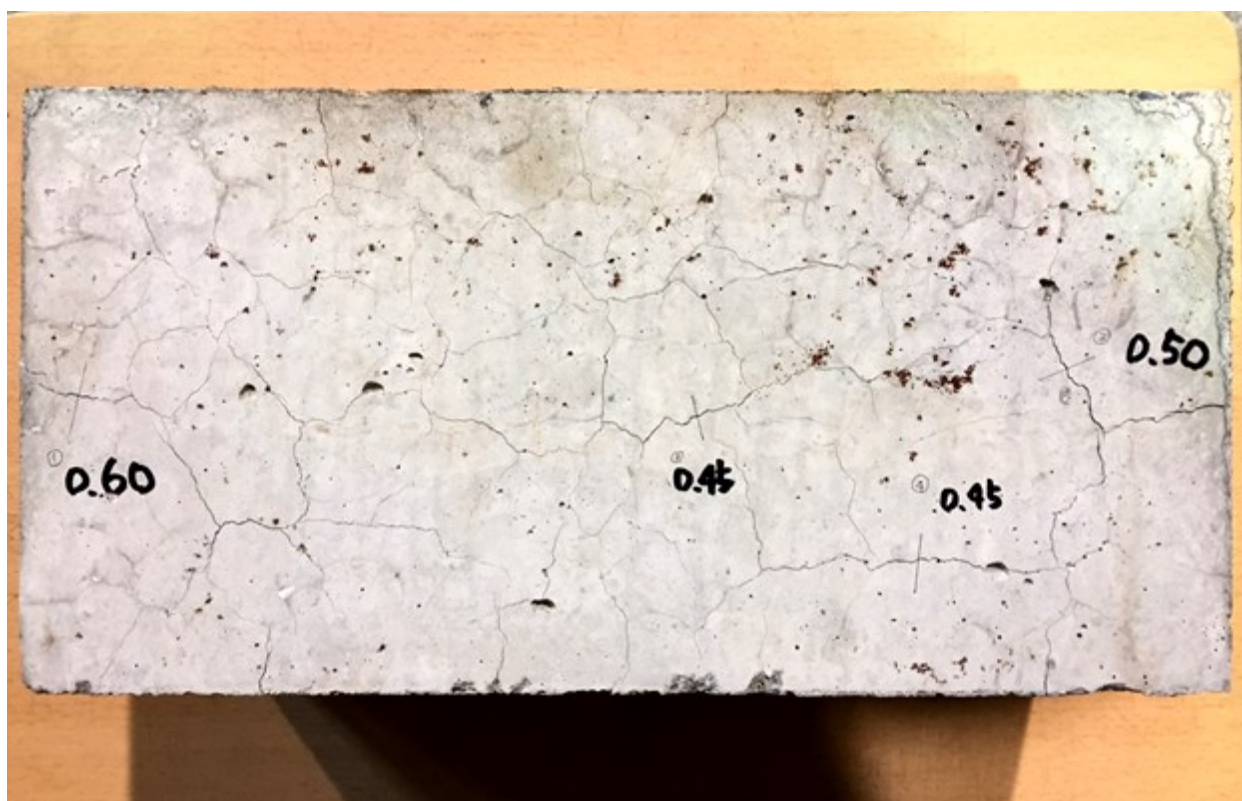


写真-6.10 ASR ひび割れ

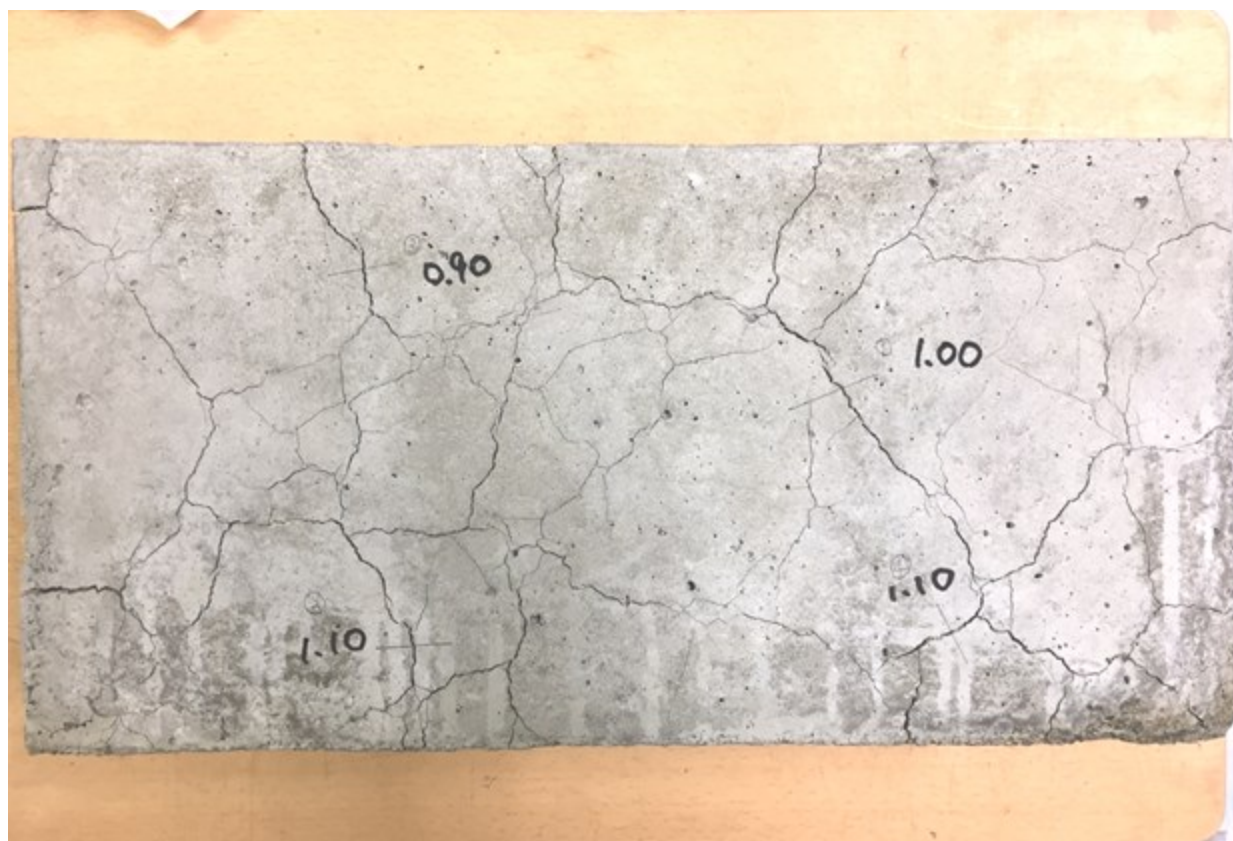


写真-6.11 模擬 ASR ひび割れ

### 6.3.2 樹脂注入状況による比較

ASR, 模擬 ASR 供試体に対して樹脂注入し, 樹脂注入状況からの結果を以下に示す. 圧縮試験用ブロック供試体 (150×200×400mm) に対しての樹脂注入本数 (40mL/本) は, ASR 供試体 12 本, 模擬 ASR 供試体 23 本となった. 模擬 ASR 供試体の方が, ASR 供試体に比べ樹脂追加量が多い結果となった. 樹脂注入の際, 写真-6.12 に見られるように模擬 ASR 供試体は, 樹脂注入の際に注入を行っていない台座の空気口部分から樹脂が漏れ出る現象が見られた. これは, 供試体内部のひび割れが繋がっていることを示している. それに対して, ASR 供試体は樹脂が漏れ出るといった現象は見られなかった. また, 樹脂注入に用いた樹脂は, 紫外線を照射することで白く発光する. 樹脂が発光することを利用し, 樹脂充填状況を確認する. ASR および模擬 ASR のコア供試体に紫外線照射を行った写真を写真-6.13, 写真-6.14 に示す.



写真-6.12 樹脂注入時の注入口様子



写真-6.13 ASR コア供試体



写真-6.14 模擬 ASR コア供試体

写真からわかるように、模擬 ASR コア供試体は紫外線照射により、亀甲状に白く発光していることがわかる。一方、ASR コア供試体は紫外線照射による発光部分がほとんど見られなかった。これは、模擬 ASR 供試体の内部のひび割れが連続しており、樹脂注入の際、ひび割れを通り樹脂が全体に充填されているのに対し、ASR ひび割れは模擬 ASR ひび割れに比べ膨張量が少なく、ひび割れが細いことや ASR により生成したゲルがひび割れに充填されることで、ひび割れが不連続となり樹脂の注入を妨げたことなどが考えられる。

以上の結果から、膨張量が異なる本研究の範囲内では、模擬 ASR での ASR 内部ひび割れの再現性は高いとは言えない。今後は、膨張量や最大ひび割れ幅の関係についての更なる研究が必要であると考えられる。

### 6.3.3 強度試験による比較

強度試験により得られた結果から、膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR の ASR 再現性について検討する。ブロック供試体から採取したコアを用いた圧縮試験によって得られた結果を表-6.5 に示す。圧縮試験に関して模擬 ASR は、樹脂注入の有無で力学的性能が大きく回復し、樹脂注入後の強度と注入前に対する比は 254% となった。また、模擬 ASR は、によって一体性が回復し、樹脂注入前にはコンクリートがコア抜き中に粉砕されてしまったが、樹脂注入によってコア抜き可能になるまでになった。供試体断面を確認する為、φ25mm のコア供試体の断面を露出させた。樹脂注入あり ASR、模擬 ASR 供試体の破壊断面を写真-6.10、写真-6.11 に示す。

表-6.5 強度試験結果

		樹脂注入前	樹脂注入後
ASR 供試体	圧縮強度 (kN)	18.1	18.5
	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	7.6	5.4
模擬 ASR 供試体	圧縮強度 (kN)	12.9	32.8
	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	6.9	22.5

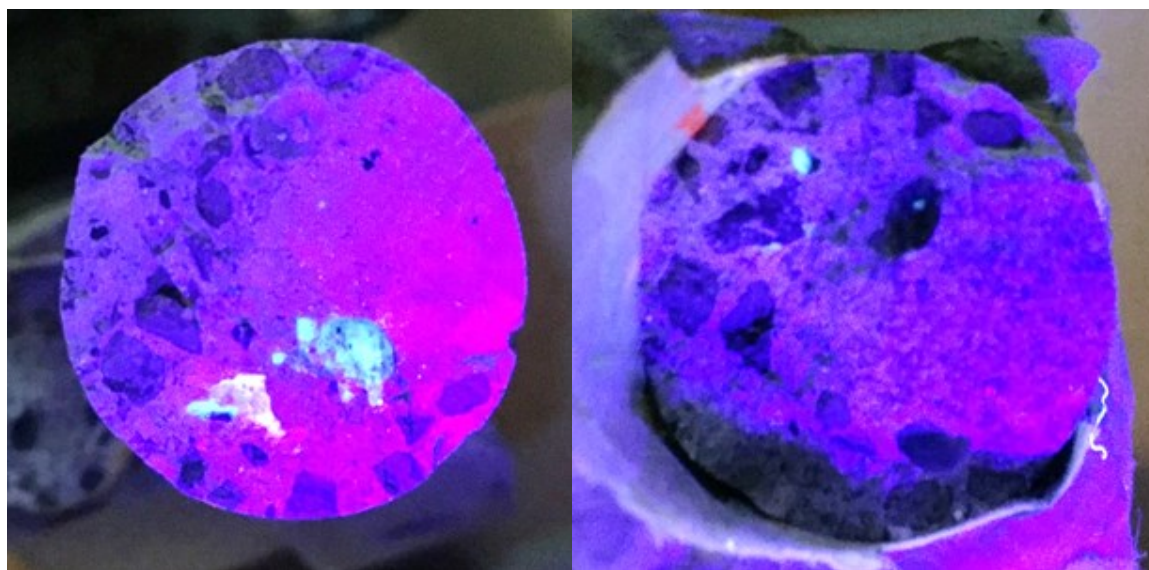


写真-6.10 注入あり ASR 供試体断面



写真-6.11 注入あり模擬 ASR 供試体断面

写真から充填の状況を見ても、ASR 供試体の破壊断面には不連続で一部にしか樹脂はなく、樹脂が占める面積が小さい。一方で、模擬 ASR 供試体の破壊断面からは、樹脂がひび割れに沿って連続しており、樹脂が占める面積が多いことがわかる。このことから、ASR 供試体のひび割れと模擬 ASR 供試体のひび割れ及びそのひび割れに対しての樹脂注入性能は大きく違うことがわかる。つまり、模擬 ASR の内部ひび割れと実際の ASR 内部ひび割れは大きく違うと考えられる。

力学的性能に関しては、ASR 供試体、模擬 ASR 供試体ともに樹脂注入することで回復する傾向が見られた。しかし、その回復率は違い、模擬 ASR 供試体の方が ASR 供試体に比べ、回復率が大きくなった。また、破壊断面の樹脂割合も大きく異なり、本研究の条件では、模擬 ASR の ASR 再現性は低いと言える。反応性骨材の選定や静的破砕剤の添加量、膨張性模擬骨材の置換率などを検討、調整することで、膨張性模擬骨材を用いて実際の ASR に近い劣化を再現できると考える。

#### 6.3.4 X線 CT スキャン画像による比較

ASR および模擬 ASR 供試体の樹脂注入していない円柱供試体（φ100×200mm）を X 線 CT スキャンにより観察した。図-6.3、図-6.4 にそれぞれ ASR 供試体、模擬 ASR 供試体の X 線 CT スキャン画像を示す。図からわかるように、ASR 供試体のひび割れは細かく、骨材とモルタルの境界かひび割れなのかが判断しづらい。これは、ASR によって生成したゲルがひび割れに充填されている、もしくは、ひび割れ自体が細く見えづらいからだと考えられる。一方で、模擬 ASR 供試体の X 線 CT スキャン画像は、ひび割れが大きく位置も鮮明にわかる。また、この X 線 CT スキャン画像からひび割れが連続していることも確認できる。

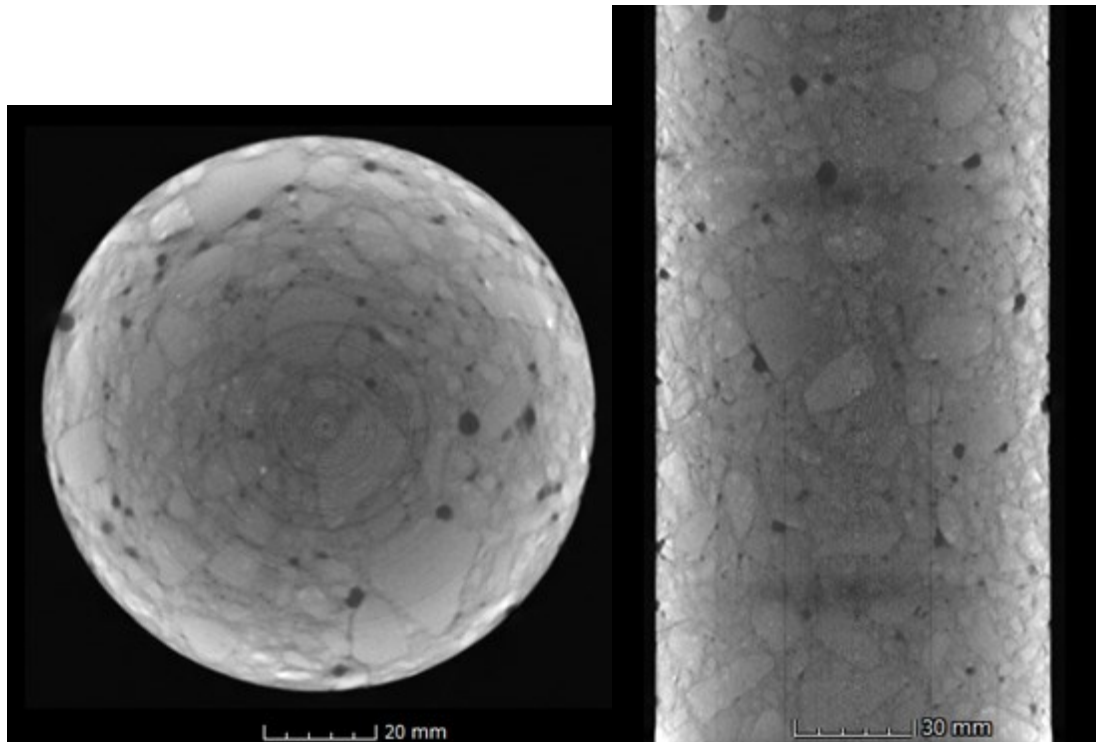


図-6.3 ASR 供試体 X 線 CT スキャン画像

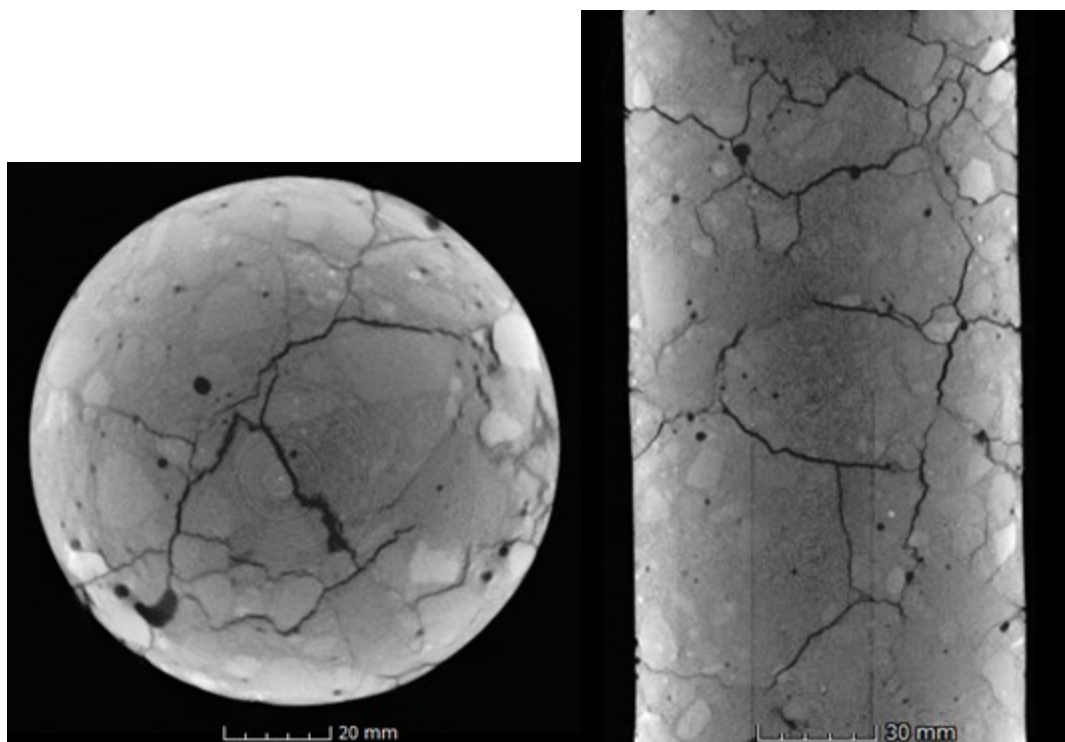


図-6.4 模擬 ASR 供試体 X 線 CT スキャン画像

## 6.4 膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR の ASR 再現性

静的破砕剤を添加して作製した膨張性模擬骨材を用いて、ASR 再現を目的とした模擬 ASR 供試体を作製した。ASR 供試体について、膨張量及びひび割れ幅測定、樹脂注入状況の確認、力学性能試験、X 線 CT スキャンによるひび割れの調査を行った。模擬 ASR 供試体についても ASR 供試体と同様の試験を行って両者の結果を比較することで、膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR 供試体の ASR 再現性について検討した。得られた結果を以下に示す。

ASR 供試体は、促進養生 80 日前後で約  $6000\mu$  の膨張量を示した。一方で模擬 ASR 供試体は養生材齢 20 日程度で約  $18000\mu$  の膨張量を示し、1/3 以下の期間で 3 倍程度の膨張する結果となった。ひび割れ幅についても、ASR 供試体の最大ひび割れ幅が  $0.6\text{mm}$  程度で模擬 ASR 供試体の最大ひび割れ幅が  $1.2\text{mm}$  前後となり、2 倍近く大きくなる結果となった。

樹脂注入状況に関して、ASR 供試体の樹脂注入量は、どの供試体であっても少量で注入が止まってしまったのに対し、模擬 ASR 供試体の樹脂注入は、2 倍近く多い結果となった。また、模擬 ASR 供試体への樹脂注入時に空気口から樹脂が漏れ出る現象が見られたが、ASR 供試体にはこの現象は見られなかった。

注入時の供試体の状態が違うものの、樹脂注入による ASR 供試体と模擬 ASR 供試体の圧縮強度の回復率は大きく異なることがわかった。 $\Phi 25\text{mm}$  コア供試体採取では、ASR 供試体は、樹脂注入があってもなくてもコア抜き位置のひび割れの状況によって採取の可否が左右される。一方、模擬 ASR 注入なし供試体は採取不能で、模擬 ASR 注入あり供試体では、概ねコア供試体採取が可能であった。

X 線 CT スキャン画像から、表面のひび割れだけでなく、ASR 供試体の内部ひび割れに対して、模擬 ASR の内部ひび割れの方が大きいことが確認できた。

本研究の範囲では、膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR による ASR の供試体表面のひび割れ分布再現性は高いが、供試体内部のひび割れ再現性は、高い結果とは言えなかった。混合する、膨張性模擬骨材の膨張量が大きすぎたためと考えられる。模擬膨張性骨材中の静的破砕剤の添加量をさらに細かく検討し、コントロールすることにより、実際の ASR ひび割れを再現でき、この分野の研究の発展に大きく貢献できると考える。

## 参考文献

- 1) 河村将史：膨張性材料を用いた微膨張型 HPFRCC の開発，岐阜大学 卒業論文，2015.2
- 2) 土木学会技術評価第 9 号：鉄筋コンクリート構造物における内圧充填接合補強工法（IPH システム）の設計施工法，2011.6

## 第7章 結論

### 7.1 本研究により得られた結論

ASR 劣化は構造物の重大性を考慮し、構造物の設計、建設段階から維持管理段階までの構造物の一生を、総合的に検討する必要がある。本論文では、ASR 劣化したコンクリートに対して、ASR の発生前の段階から膨張が進展した後の段階までの対策をまとめたものである。

以下に、各章で得られた結論を総括する。

#### 「第3章 ASR の発生を抑制する技術」では

東日本大震災の影響により火力発電の需要が高まり、産業副産物である多くの石炭灰が排出されている。省エネルギーの観点からも、これらを有効利用する方法が期待されている。本章では、フライアッシュを用いて ASR を抑制することを目的とした。JIS に適合するものだけでなく、現在有効利用されにくいフライアッシュ原粉による抑制効果を明らかにすることを目指す。そのため反応性骨材を用いて供試体を高温多湿環境下で促進養生することで意図的に ASR を発生させた。フライアッシュのうち主に流通している JIS II 種 FA に加え、FA 原粉も使用し、ASR 抑制、圧縮強度、塩化物イオン浸透抵抗性、耐凍害性、の4項目について長期的な実験を行うことで比較・検討し、フライアッシュ原粉利用の有効性について検討した。

以下に3章で得られた主な結論を示す。

#### 1) ASR 抑制

- FA 原粉と JIS II 種 FA では、ASR 膨張の抑制効果に差は見られなかった。FA の ASR 抑制において重要な成分である  $\text{SiO}_2$  の含有量に差が無かったためと考えられる。
- 内割置換と外割置換では、FA を外割置換した配合の方が早期に ASR 膨張が発生し、収束時点では内割置換に比べて  $1000\mu$  程度多く膨張が生じた。外割置換の方がセメント量における FA の割合が小さく、FA の抑制機構から考えても、内割置換よりも高い膨張量を計測されたと推察される。
- 水結合材比の低い配合の方が早期に ASR 膨張が発生した。水結合材比の低い配合の方がセメントの割合が大きく、膨張量が大きいと考察される。

#### 2) 圧縮強度とヤング係数

- 北海道産、雲仙産骨産の両骨材において、FA 混和の配合では、材齢進行による圧縮強度の増進を確認した。FA の特長であるポズラン反応により強度が増進したと考察される。また、FA 未混和および FA20%置換における配合の一部で、養生期間中に ASR が発生し、圧縮強度およびヤング係数が低下したと考えられる供試体があった。FA40%置換の配合ではなかったため、FA 置換率による差を確認した。
- 圧縮強度において、FA 原粉よりも JIS II 種 FA を混和した配合の方が多少高くなる傾向が見られた。しかし、その差は最大でも  $6\text{N/mm}^2$  程度と小さいため、強度のみから判断すると、FA 原粉でも十分に利用できると考察される。

#### 3) 塩化物イオン浸透抵抗性

- 北海道産骨材において、FA 未混和の配合に比べて、FA 混和の配合の浸透抵抗性の向上を確認し

た。FA 置換率についても、FA20%置換の配合よりも FA40%置換の配合において浸透抵抗性の向上を確認した。FA が多く含まれているためポズラン反応が起きやすく供試体内部が緻密化したと考察される。

- ・ FA 原粉と JISⅡ種 FA では、表面付近では多少のばらつきがあったが、コンクリート内部では塩化物イオン量の値が低く、同程度の浸透抵抗性が見られた。FA 原粉が JISⅡ種 FA と同等の  $\text{SiO}_2$  および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を含有しており、ポズラン反応を起こしたためだと考えられる。
- ・ FA を外割置換した配合の方が表面付近で高い塩化物イオン量を計測したが、それより内部では同程度の塩化物イオン量を計測した。外割置換の配合の方がセメントの量が多く、水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される。

#### 4) 耐凍害性

- ・ 両骨材において、今回の配合では 60～180 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回り、300 サイクルを待たず測定不能となってしまった。FA 未混和の配合は ASR ゲルの空気泡内への析出などが考えられる。FA 混和の配合で耐凍害性が低い理由としては、FA を混和したことで良質な空気を連行しづらい、凝結過程における微細な空気が消失した、初期強度が低く、水中養生 1 ヶ月で凍結融解試験を開始するため劣化進行が速くなった、などが考えられる。
- ・ FA 原粉と JISⅡ種 FA では、両骨材ともに凍害劣化の進行は原粉と比較して JISⅡ種 FA の配合で速く、FA40%置換の供試体ではその特徴が顕著であった。この結果については検討が必要であるが、FA 原粉でも JISⅡ種 FA と同等以上の耐凍害性を発現することができると推察される。
- ・ 内割置換と外割置換では、FA を外割置換した配合の方が内割置換した配合と同等以上の相対動弾性係数を計測した。外割置換の配合の方がセメントの量が多く、水和反応によりコンクリート内部が緻密になっているためだと推察される。
- ・ 水結合材比の低い配合において相対動弾性係数が低い傾向が見られた。本来であれば水結合材比の低い配合の方がセメントの割合が多くなり、耐凍害性が優れるはずであるが凍結融解試験に必要な微細な空気が連行できていなかったのではと推察される。

### 「第 4 章 ASR の進行を抑制する技術」では

リチウムイオンを用いた ASR 補修工法には、塗布工法、ひび割れ注入工法、電気化学的浸透工法および内部圧入工法がある。塗布工法とひび割れ注入工法は併用して使用される場合が多いが、リチウムイオンの供給範囲がコンクリートの表層部およびひび割れ周辺部に限定されるという問題点がある。そこで本研究では、コンクリート表面に削孔を行い、そこから亜硝酸リチウム（以下、リチウムと表記）を加圧注入して内部に浸透させることにより、コンクリート内部の広範囲にリチウムを供給することが可能であるリチウム内部圧入工法について検討することとし、本研究では、北海道産、大分産の 2 種の反応性骨材を用いて供試体を作製し、それぞれの骨材での適切な圧入量や、圧入位置、膨張抑制挙動を検討することを目的とした。

以下に 4 章で得られた主な結論を示す。

#### 1) リチウム事前混合

- ・ ASR 促進 50 日経過までは Li/Na モル比による膨張量の大きな差はなかった。しかし、ASR 促進 53 日経過後に Li/Na モル比 0.2 の供試体が膨張傾向になった。少量のリチウムでは、膨張量を低下させるのではなく、殆どリチウムイオンの効果が現れない可能性がある。また、その他の北海

道産反応性骨材を用いたリチウム事前混合では、Li/Na モル比 0.4 で十分な ASR 抑制効果があることが確認された。

- ・ 雲仙産反応性骨材においては、ASR 促進 80 日経過しても Li/Na モル比の違いによる膨張量の変化は見られない。このことより、Li/Na モル比 0.2 でも ASR 抑制効果があると言える。
- ・ 大分産反応性骨材においては、ASR 促進約 50 日で Li/Na モル比 0.2 の供試体が膨張傾向になった。これは北海道産反応性骨材を用いたリチウム事前混合と似ており、大分産反応性骨材においても、Li/Na モル比 0.4 で ASR 抑制効果があると言える。

## 2) リチウム圧入

- ・ 圧入量、削孔数によって ASR 抑制効果に影響はあったが、“Li/Na モル比 0.6、削孔数 4 ヶ所”の供試体にあまり効果がなかったことから、供試体のひび割れの入り方などのコンクリートの条件が、リチウム圧入による ASR 抑制効果の影響が大きいと考えられる。
- ・ 北海道産反応性骨材を用いたリチウム事前混合と比較すると、リチウム事前混合では Li/Na モル比 0.2 では ASR 抑制効果が見られなかったが、Li/Na モル比 0.4 以上では ASR 抑制効果があったと言える。しかし、リチウム圧入では Li/Na モル比による膨張量の差は見られたが、無圧入の供試体と大きな違いはなかった。これは、圧入によるロスが原因だと考えられる。
- ・ 早期に圧入を行った場合では“リチウム量を増加”“圧入孔を増加”させることで膨張抑制効果が見られた。しかし、これらの供試体は 400 $\mu$  時にリチウム圧入を行ったにもかかわらず、圧入直後から抑制効果はみられず、最終的な膨張量のみ減少した。2000 $\mu$  時に圧入を行った供試体ではそれぞれ圧入直後から膨張が完全に抑制されている。これらから、圧入段階のシリカゲルの状態によって抑制効果が変化する可能性が存在する。

## 3) 亜硝酸リチウムの浸透

- ・ 早期に圧入を行った 0.4 モル A 供試体の ASR の抑制効果が低い結果となっていたが、呈色試験においては他の供試体と比較して顕著な差は見られなかった。また、どの供試体においても削孔した供試体上側は、リチウムイオンが浸透しているが、削孔位置から遠い供試体下側はリチウムイオンが浸透していないことが分かる。しかし、膨張抑制効果は確認されていることから、膨張抑制されている範囲が、それ以外の部分を拘束する為、本研究の供試体では膨張が収束しているのだと考えられる。
- ・ 削孔数を増加させることにより広い範囲にリチウムイオンが浸透し、同量のリチウムで膨張効果に差が生じたものだと考えられる。
- ・ 早期に圧入を行った場合よりも劣化が進展した後に圧入を行った供試体の方が浸透範囲は高い傾向が見られた。しかし、その差は著しいものではなく、同量のリチウム量である供試体を比較しても 2 割程度であり、浸透していない範囲が十分に確認できる。しかし、圧入直後から抑制効果は確認されていることから、膨張が抑制された範囲の拘束や、圧入段階のシリカゲルの状態によって大きく変化している可能性が存在する。
- ・ 同じ通常圧入供試体の中でも、表面被覆の違いにより、PCM と樹脂では、樹脂で被覆した場合、より内部に広く、万遍なく浸透した結果が得られた。

「第 5 章 ASR を受けた構造物を補修する技術」では

ASR によって過大な膨張量が発生しひび割れが確認された構造物には、コンクリートの強度が低

下するのみならず、鉄筋曲げ加工部や圧接部周辺で鉄筋が破断する例も報告されており、構造物に重大な被害をもたらす可能性が危惧されている。そこで本章では、劣化がある程度進行した後の ASR に対しての補修について検討を行った。

本章前半では

ASR 劣化、および、それに付随する鉄筋の破断が、RC 部材の耐荷性能に与える影響を明らかにすることを目的とした。そのため、反応性・非反応性の骨材を用い、主鉄筋およびせん断補強筋が破断している場合と破断していない場合を模擬した供試体を作製し、膨張量測定、曲げ載荷試験を行った。反応性のものについては ASR 劣化後に試験を実施した。また、ASR 劣化した供試体については、後施工型鉄筋によるせん断補修を行い、その補修効果についても検討を行った。

本章後半では

ASR 劣化した RC 部材に亜硝酸リチウム圧入を行い、再度 ASR 促進環境下に一定期間置き、その後載荷試験を行うことで、圧入後における部材の耐荷性能を評価することを目的とした。反応性骨材を用いた供試体を ASR 促進させ、膨張量を基準とした劣化度によってリチウムの圧入時期および載荷時期を分けた。また、劣化の大きい供試体に対してもリチウム圧入を行い、この補修方法による膨張抑制効果について検討を行った。

以下に 4 章で得られた主な結論を示す。

#### 1) ASR による RC 部材のせん断耐力の低下およびその補修に関するモデル実験

- ・ ケミカルプレストレス効果等により ASR 劣化した供試体のせん断耐力は大幅に向上するがコンクリート標準示方書の算定式によると、その効果は 1 割程度であり、ほかの効果も作用している可能性がある。
- ・ ASR 劣化によって静弾性係数が低下し、曲げ載荷時の降伏前の部材の剛性が低下した。また、コンクリートの終局ひずみが大幅に増大したため、降伏後の曲げ靱性は向上した。
- ・ 長期劣化させた供試体では 1 年前の曲げ載荷時から部材耐力の大きな変化は見られなかったが、 $\phi 3$  の供試体ではせん断補強筋の腐食によって、破壊性状が曲げ破壊からせん断破壊へと変化した。
- ・ 後施工型鉄筋によるせん断補修を行った供試体は、供試体よりも耐力は増加するが、補修によってせん断破壊を防ぐことはできなかった。
- ・ 補修によってせん断破壊を防ぐことができなかった要因として、母体のコンクリートと後施工によって注入した無収縮モルタルとの付着力が十分でなかったと考えられる。

#### 2) 亜硝酸リチウム圧入によって補修した ASR 部材の耐荷性能に関する実験的研究

- ・ リチウム圧入を行った供試体では膨張が収束している傾向にあり、リチウム圧入による膨張抑制効果がみられた。
- ・ リチウム圧入によって圧縮強度および静弾性係数の低下を軽減できた。
- ・ 円柱供試体では供試体間のばらつきが大きく、例えば膨張によって不均一な変形が供試体に生じているため、圧縮試験から得られた値がコンクリートの物性を正確に反映していない可能性はある。
- ・ 曲げ剛性の計算値、実験値ともに、リチウムの供給がなく膨張が大きい“劣化あり リチウムなし”の値が特に低下し、“劣化小 リチウムあり”の供試体が一番高かった。

- ・ リチウム圧入工を実施することで剛性の低下が緩和され、補修の効果を確認したが耐荷性能に対しては大きな影響は見られなかった。
- ・ ひび割れ注入材や表面被覆の影響は小さいと考えられ、“劣化小”の供試体のはりの物性はリチウム圧入によって ASR の進行が抑制された効果であると言える。

## 「第 6 章 ASR ひび割れを再現するモデル試験」では

直接的な ASR 抑制対策に関する研究ではなく、ASR に関する研究を今後補助する題材になりえる研究を行った。ASR は反応が進み、コンクリートにひび割れが生じるまでに数ヵ月から数年かかる。そのため ASR 劣化コンクリート実験は長期的に及ぶことが多い。例えば、5 章で検討した亜硝酸リチウム圧入による ASR の補修については、亜硝酸リチウムのコンクリート内への浸透にひび割れの分布が大きく影響すると考えられるが、骨材が膨張して実験要因として求められるひび割れ分布状態となるまでには、数か月間を要するため、ASR によるひび割れを早期に再現できれば今後の ASR における研究の飛躍が期待できる。そこで、短期間で ASR ひび割れの再現を図るため、膨張材の一種である静的破砕剤をひずみ硬化型セメント系複合材料（以下 SHCC）に添加することで膨張性を有す模擬骨材を作製した。膨張性を有す模擬骨材をコンクリート中の粗骨材に置換することで、短期的に実際の ASR 劣化によるひび割れ発生の状況を再現できると考えた。

以下に 6 章で得られた主な結論を示す。

- ・ ASR 供試体は、促進養生 80 日前後で約  $6000\mu$  の膨張量を示した。一方で模擬 ASR 供試体は養生材齢 20 日程度で約  $18000\mu$  の膨張量を示し、1/3 以下の期間で 3 倍程度の膨張する結果となった。ひび割れ幅についても、ASR 供試体の最大ひび割れ幅が  $0.6\text{mm}$  程度で模擬 ASR 供試体の最大ひび割れ幅が  $1.2\text{mm}$  前後となり、2 倍近く大きくなる結果となった。
- ・ 樹脂注入状況に関して、ASR 供試体の樹脂注入量は、どの供試体であっても少量で注入が止まってしまったのに対し、模擬 ASR 供試体の樹脂注入は、2 倍近く多い結果となった。また、模擬 ASR 供試体への樹脂注入時に空気口から樹脂が漏れ出る現象が見られたが、ASR 供試体にはこの現象は見られなかった。
- ・ 注入時の供試体の状態が違ふものの、樹脂注入による ASR 供試体と模擬 ASR 供試体の圧縮強度の回復率は大きく異なることがわかった。引張試験用の  $\Phi 25\text{mm}$  コア供試体採取では、ASR 供試体は、樹脂注入があってもなくてもコア抜き位置のひび割れの状況によって採取の可否が左右される。一方、模擬 ASR 注入なし供試体は採取不能で、模擬 ASR 注入あり供試体では、概ねコア供試体採取が可能であった。
- ・ 本研究の範囲では、膨張性模擬骨材を用いた模擬 ASR による ASR の供試体表面のひび割れ分布再現性は高いが、供試体内部のひび割れ再現性は、高い結果とは言えなかった。混合する、膨張性模擬骨材の膨張量が大きすぎたためと考えられる。模擬膨張性骨材中の静的破砕剤の添加量をさらに細かく検討し、コントロールすることにより、実際の ASR ひび割れを再現でき、この分野の研究の発展に大きく貢献できると考える。

## 7.2 ASR に対する維持管理シナリオ

ASR の発生は必ずしも構造物の性能を著しく低下させるものではない。構造物の重要性、部材の要求性能、環境条件や追跡調査などによってリスクレベルを明確にし、ASR を考慮した設計維持管

理シナリオが必要である。例として表-7.1 に ASR に対する構造物の重大性レベルについて示す<sup>1)</sup>。

材料の面から考えると、ASR 発生抑制の中で最も重要で容易なのは、安全と認められる骨材の使用である。しかし、コンクリート材料の中で水に次いで安価な骨材は、経済性の観点から地産地消が基本であり、反応性骨材であっても使用した上で対策を講じた方が経済的である場合がある。

例えば 3 章で検討を行った ASR の発生を抑制する研究では、設計段階から対策を講じるため、表-7.1 に示す S1~S4 すべてのレベルに対して対応することができ、やむなく設計段階から反応性骨材を使用することになっても安価に対応することができる。

しかし、現在の ASR 補修、維持管理では、実際に ASR 劣化が進展した後の事後保全型であることが殆どである。4 章で検討を行った、亜硝酸リチウム内部圧入であれば、アルカリシリカゲルを非膨張化することにより、他の補修工法とは違い根本的に ASR 解決することができる。しかし一方で、他の工法に比べて手間や施工費用が嵩む傾向にある。また、本研究からの結論のように、リチウム内部圧入の効果は確認することができたが、早期にリチウム圧入を実施した場合、その抑制効果は薄れ、施工費用がさらに嵩む可能性も存在する。

さらに劣化が進行し、隅角部の鉄筋が破断するような状態になった 5 章の場合でも、後施工型鉄筋によるせん断補修を行った供試体は、耐力は増加するが、補修によってせん断破壊を防ぐことはできず、一時的な対応策となった。

ASR の発生状況を模擬骨材で再現することにより、短期間で同様のひび割れを発生させることができ、膨張圧を生じさせることができるため、構造物に作用する ASR の力を短期間で再現することができる。また、添加量を調整することで細かな検討もできる可能性がある。

表-7.1 ASR に対する構造物の重大性レベル

レベル	設計段階	ASR の受容性	例
S1	安全性や経済性、環境への影響度が小さい、もしくは、無視できる	ASR によるいくらかの劣化は許容できる	非構造部材、仮設構造物（例えば、<5 年）
S2	主要な劣化であれば、安全性や経済性、環境に影響がある	中程度の ASR リスクは許容できる	歩道、縁石、排水路、供用期間 <40 年
S3	小規模な劣化でも、安全性や経済性、環境に大きな影響がある	小規模の ASR リスクは許容できる	舗装、カルバート、小規模橋梁、取り換え費用が深刻な PCa 部材、供用期間 40-75 年
S4	小規模な劣化でも、安全性や経済性、環境に深刻な影響がある	ASR は許容できない	主要な橋梁、トンネル、調査や補修が困難な部材、供用期間 >75 年

以下に、ASR 対策のシナリオを考える上での本研究の適応性について示す。

#### ① 設計・施工段階で ASR 対策が必要な環境であるか？

- ・ ASR によるいくらかの劣化は許容できるかを検討する。
- ・ 事前に ASR 対策を講じられるのであれば、多量の FA を混入することで環境にも配慮した構造物となる。

## ② 構造物の ASR はどのグレードにあるか？

- ・リチウム圧入の適用範囲は進展期および加速期である。
- ・本研究のように潜伏期で圧入を行った場合抑制効果が減少する。
- ・劣化期では膨張が収束しているため、膨張抑制対策が不要となる。

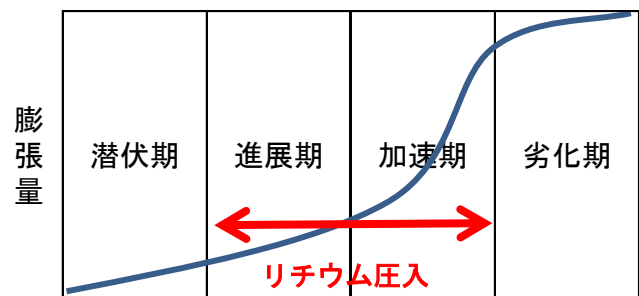


図-7.1 劣化過程と適用範囲の関係

## ③ 対象構造物の水分供給環境は？

- ・特に水分供給が厳しい構造物では、表面被覆工や表面含浸工では十分な ASR 抑制効果が得られず、さらには再劣化を引き起こす可能性がある。
- ・このような環境にある構造物には、抑制効果が水分条件に左右されないリチウム圧入が効果的である。

## ④ 対象構造物の耐荷性能はどのレベルにあるか？

- ・強度や弾性係数の著しい低下、鉄筋破断などの構造物の耐荷性能が低下する前に、ASR 進行を止めることが重要であり、リチウム圧入であれば耐荷性能の低下を防ぐことができる。
- ・鉄筋破断が確認された場合は、鉄筋差し込み工法であれば、一時的ではあるが安価に、素早く対応することができる。

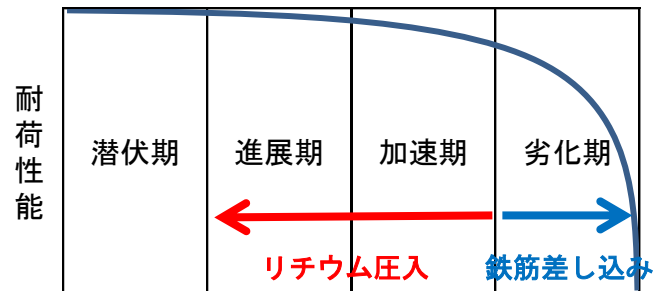


図-7.2 耐荷性能と適用範囲の関係

## ⑤ 対象構造物の劣化予測と対策

- ・模擬膨張骨材を用いることにより、実験室内で ASR の膨張圧を短期間で再現することができる。
- ・残存膨張量が多い場合、ASR 抑制効果が左右されないリチウム圧入が適すると考えられる。

以上で述べたとおり、ASR 対策は構造物の重要性、部材の要求性能、環境条件や追跡調査、実施工に至れば事前の詳細な検討が必要となってくる。構造物に一度 ASR が発生すると、その構造物の補修・補強には多大な労力と費用を要するのが現状であり、補修を行った後も再劣化する事例も多く報告されている。したがって、効率的な補修・補強の確立を目指して、本研究で検討を行った技術を含む全ての補修技術の汎用化が望まれている。

そのような中、本研究の成果が ASR を維持管理する上での参考となり、ASR 対策の更なる発展に繋がれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書,2014.7

## 謝辞

本論文は、著者が岐阜大学工学部社会基盤工学科に入学し研究室に配属されて以来、取り組んでまいりました一連の研究成果を取りまとめたものです。

本研究の遂行にあたり、終始適切な御指導を頂きました岐阜大学工学部社会基盤工学科教授小林孝一先生、六郷恵哲先生（現・名誉教授）には心から感謝の意を表します。特に、小林教授には数えきれないほどのご迷惑をお掛けしました。それでも研究を楽しくやり切れたのは先生のおかげです。当時、岐阜大学客員教授浅野幸男氏におきましては、実験方法の提案、助言を頂き、円滑に実験を進めることができました。深く御礼申し上げます。リチウム圧入工に際には、極東興和株式会社 江良和徳様をはじめ、一般社団法人コンクリートメンテナンス協会に所属されている方々に、施工の実施やリチウム圧入工に関するご指導、その他現場における工夫、知識等研究室だけでは得られないような知識を教えて頂き、大変貴重な経験をさせて頂きました。深く御礼申し上げます。

また、本研究の実施にあたり、破壊診断工学研究室（現・維持管理工学研究室）の学生には実験の補助、様々なアドバイスやご協力をして頂きました。誠に感謝いたします。中でも一緒に ASR グループとして研究をした、福嶋孝啓氏、恩田尚明氏、大谷智也氏、谷口修太氏には大変お世話になりました。研究が思い通りに進まないこともあり、苦しいことも楽しいことも、数多くありそれでも乗り越えていけたのはグループとして支えてきてくださった皆様がいたおかげだと思います。心より感謝いたします。

最後に、これまで自由に勉強することを許し、筆者を励ましてくれた両親、そして学生時代から衣食住を支えてきてくれた祖母に深く感謝の意を表し、本論文の謝辞といたします。