

### V-3 アルカリ骨材反応抑制対策の再評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）  
研究期間：平 15～平 17  
担当チーム：構造物マネジメント技術チーム  
研究担当者：渡辺 博志、古賀 裕久、  
河野 広隆（平 15 まで）、  
久田 真（平 16 まで）

#### 【要旨】

新設コンクリート構造物におけるアルカリ骨材反応抑制対策は、1986 年にその骨格が定められ、約 20 年の間運用されてきた。この抑制対策の効果を再検証するため、既存構造物における劣化の実態を調査した。また、抑制対策では十分には明確にされていない、海風・凍結防止剤などとして外部から供給されるアルカリ金属の影響を検討した。これらの結果を取りまとめて、現状の抑制対策が概ね適切に機能していることを確認した。さらに、アルカリ骨材反応で劣化した構造物の評価方法に関して、実験および実構造物の調査を行って検討した。  
キーワード：アルカリ骨材反応、健全度診断、骨材、コンクリート構造物、維持管理

#### 1. はじめに

アルカリ骨材反応（以下、ASR、図-1）によるコンクリート構造物の劣化は、1980 年代に特に問題となり、1986 年に抑制対策が導入された。対策の導入から 17 年が経過し、平成 14 年に国土交通省が行った ASR 抑制対策の部分的な見直しに関しては多くのパブリックコメントが寄せられるなど、抑制対策の効果を再評価する機運が高まっている。そこで、既存構造物における劣化実態を調査し、抑制対策の効果を再評価した。また、抑制対策では十分には明確にされていない、海からの飛来塩分・凍結防止剤などとして外部から供給されるアルカリ金属の影響を検討した。この他、国土交通省が行った骨材の ASR 反応性の全国調査に協力し、結果の分析を行った。

ところで、ASR による劣化の進行については、その将来予測を行うことが難しく、ASR で劣化した構造物の評価・診断手法は確立されていないのが現状である。また、近年、ASR による著しい劣化が生じると構造物中の鉄筋が破断する事例もあることが新たに報告された。そこで、本研究課題では、ASR により劣化した既存構造物の再調査を行って、劣化の進行や補修効果に関する知見を収集した。また、構造物中の鉄筋破断を再現するための実験を行った。さらに、鉄筋破断を模擬した供試体を作製し、部材のせん断耐荷力に与える影響を検討した。

本報告書に示した検討内容を図-2に示す。



図-1 ASRにより多数のひび割れが生じた橋脚

#### ASR抑制対策に関する検討

- 現状と課題の整理
- 道路橋における劣化実態調査
- Na<sup>+</sup>の外部からの侵入に関する検討
- 骨材のASR反応性に関する調査

#### ASR劣化構造物の診断手法に関する検討

- 劣化構造物の再調査
- 鉄筋破断メカニズムに関する検討
- 劣化構造物のせん断耐荷力の検討

図-2 この研究課題における検討内容

## 2. ASR 抑制対策の現状と課題の整理

### 2.1 抑制対策の変遷

ASR によるコンクリートの劣化は、1940 年代に米国の Stanton によって最初の報告がなされた。一方、我が国では、1970 年代までは、数例の報告があるのみで全国的な問題としては捉えられていなかった。しかし、1980 年代に劣化事例の報告が相次ぎ、ASR によるコンクリート構造物の早期劣化が社会的な問題となった。

そこで、建設省（当時）では、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」（昭和 60 年度～62 年度）を行うなどして検討を行い、1986 年には、「アルカリ骨材反応暫定対策」<sup>1)</sup>が通達された。この通達による ASR 抑制対策は、以下の 4 種類である。

- ①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）で無害と確認された骨材を使用。
- ②低アルカリ型セメントの使用：JIS R 5210 に規定された低アルカリ型ポルトランドセメントを使用。
- ③混合セメント等の使用：JIS R 5211 に規定された高炉セメント B 種または C 種の使用。その他、ASR 抑制効果の確認された混和材の使用。
- ④コンクリート中のアルカリ総量の抑制：コンクリート中のアルカリ量を  $\text{Na}_2\text{O}$  換算で  $3.0\text{kg}/\text{m}^3$  以下とする。

抑制対策は、これらのいずれか 1 つを行えばよく、選定はコンクリートの製造者に任されていた。

86 年通達に基づく抑制対策としては、「安全と認められる骨材の使用」が、最も多く利用されていたものと考えられる。しかし、骨材のアルカリ・シリカ反応性試験は、試験にかかるコストが大きく、試験法によっては結果が得られるまでに時間がかかること、骨材試験が適切に実施されているかどうかについて問題意識が出されたこと、などの問題点もあった。加えて、一般的なポルトランドセメントが含有するアルカリ量が低下してきたといった技術的変化もあった。

そこで、国土交通省は 2002 年に「アルカリ骨材反応対策」<sup>2)</sup>を新たに通達した。この通達による ASR 抑制対策は以下の 3 種類である。

- ①コンクリート中のアルカリ総量の抑制：コンクリート中のアルカリ量を  $\text{Na}_2\text{O}$  換算で  $3.0\text{kg}/\text{m}^3$  以下とする。
- ②混合セメント等の使用：JIS R 5211 に規定された

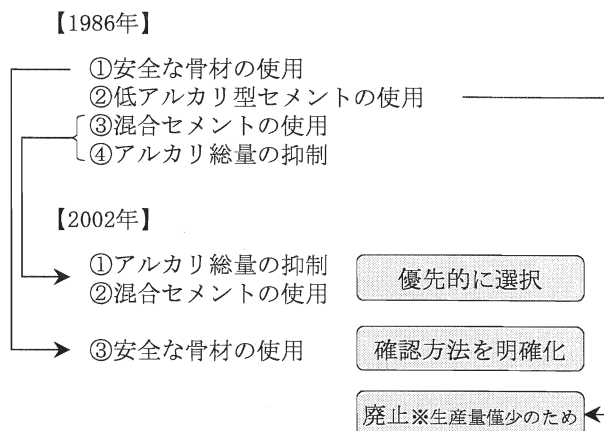


図-3 ASR 抑制対策の変遷

高炉セメント B 種または C 種の使用。または、JIS R 5213 に規定されたフライアッシュセメント B 種または C 種の使用。その他、ASR 抑制効果の確認された混和材の使用。

- ③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）で無害と確認された骨材を使用。

2002 年の通達の大きな改正点は、土木構造物については、①、②の対策を優先することとし対策に優先順位がついたこと、骨材試験を対策とする際には、対策の実施を確認することを定めた（実施要領として記載）ことにある（図-3）。

### 2.2 アルカリ総量抑制による対策の課題

コンクリート中のアルカリ総量の抑制による対策の有効性については、過去に 12 種類の骨材（うち、反応性骨材 9 種）を用いたモルタルバー法によるアルカリ・シリカ反応性試験が行われ、その妥当性が検証されている<sup>3)</sup>。また、これ以降に学会等で発表された文献等を調査したが、アルカリ量の総量規制に関する検討はほとんどなく、 $\text{Na}_2\text{O}$  換算で  $3.0\text{kg}/\text{m}^3$  以下とする対策そのものは問題視されていないものと考えられる。

一方、海からの飛来塩分や凍結防止剤の散布を受ける地域では、コンクリートの外部からアルカリ金属イオン（特に  $\text{Na}^+$ ）が侵入し、その影響で ASR による劣化が生じるおそれがあることが指摘されている<sup>4)</sup>。しかし、実構造物のおかれた環境で、ASR による劣化を引き起こすほどの  $\text{Na}^+$  が侵入するかどうかについては十分には明確になっていない。

### 2.3 混合セメントによる対策の課題

高炉セメントの使用による対策の有効性について



は、過去に我が国で生産されている 12 種類のスラグを用いた実験が行われ、セメント中のアルカリ量が  $\text{Na}_2\text{O}$  換算で 0.85% 以下の場合、スラグ置換率 40% 以上で十分な抑制効果が得られることが検証されている<sup>5)</sup>。また、フライアッシュセメントについては、14 の発電所で生産されているフライアッシュを用いた実験が行われ、20% 程度の混合で十分な抑制効果が得られることが検証されている<sup>6)</sup>。また、これらの検討以後も、高炉スラグ・フライアッシュの ASR 抑制効果については、種々の検討が行われているが、いずれの論文でも混和剤の ASR 抑制効果が確認されており、混合セメントの使用による対策は有効に機能しているものと考えられる。

一方、混合セメントの使用による対策を取った場合についても、アルカリ総量規制を行う場合と同様に、外部からアルカリ金属イオンが侵入しうる場合には、ASR による劣化が生じるおそれがあることが指摘されている。

#### 2. 4 安全な骨材の使用による対策の課題

骨材のアルカリ・シリカ反応性を試験する方法として、抑制対策で認められているのは、化学法 (JIS A 1145) とモルタルバー法 (JIS A 1146) である。試験に要するコストから、化学法がより多く用いられており、化学法で「無害でない」と判定される骨材や、化学法では評価できない骨材に対し用いられているのが実態である。

なお、2002 年の通達以降、安全な骨材の使用による対策を採用する場合には、工事開始前及び工事中に公的機関での試験を行って、試験結果を確認することになった。これに伴い、モルタルバー法の試験結果を採用する場合には、JIS A 1804 の迅速法が確認手法として採用されることが、「アルカリ骨材反応抑制対策 (土木構造物) 実施要領」で定められた。

一方、海外の基準類にも目を向けると、モルタルまたはコンクリート供試体を製作して ASR 膨張を測定する試験方法については、促進条件が異なる種々の試験法がある<sup>7)</sup>。これらの規準は、各国の骨材事情に合致するように定められたものであるが、近年の研究では、我が国の骨材でもこれらの規準を用いることで ASR 反応性を良く評価できるとの報告がある。例えば、鳥居らは、北陸地方で算出される 6 種の骨材 (川砂) を用いて、JIS A 1146、ASTM C 1260、デンマーク法の試験 (表-1) を行ない、これらの骨材を用いた構造物の劣化状況と比較した結果、デンマーク法の試験結果が、骨材のアルカリ・

表-1 種々の基準におけるモルタルバー法の促進条件

試験方法	促進条件	膨張量の判定
JIS A 1146	40℃ 湿度95%	6か月後 <0.10% 無害
		≥0.10% 無害でない
ASTM C 1260	80℃ 1N・NaOH溶液 に浸漬	14日後 <0.10% 無害
		0.10-0.20% 不明確 ≥0.20% 有害
デンマーク法	50℃ 飽和NaCl溶液 に浸漬	3か月後 <0.10% 無害
		0.10-0.40% 不明 ≥0.40% 有害

シリカ反応性を最もよく評価できたとしている<sup>8)</sup>。

このように、ASTM C 1260 やデンマーク法など、外部からアルカリ金属を供給する試験法を用いることで、飛来塩分などとして供給されるアルカリ分の影響を評価できる可能性がある。しかし、外部から多量のアルカリ分を供給すると、アルカリ・シリカ反応そのものは促進されるが、反応によって生じるゲルの性質が変化し、膨張量が減少する場合もあることが指摘されている<sup>9)</sup>。

さらに、複数の試験法が併用されることで生じる混乱を懸念する意見もある。例えば、須藤らはレディミクストコンクリート工場に対するアンケート結果から、化学法やモルタルバー法で「無害」と判定される骨材でも、迅速法では「無害でない」と判定される場合が多く、試験によって判定が異なることが問題となっていることを指摘している<sup>10)</sup>。

#### 2. 5 抑制対策の課題のまとめ

ASR 抑制対策の変遷を整理し、「アルカリ骨材反応暫定対策」の通達以後に発表された研究成果を調査した。その結果、①個々の ASR 抑制対策は概ね有効に機能していると考えられること、②外部から塩分が供給される環境にある場合、ナトリウムイオンの侵入により、抑制対策を行っていても ASR による膨張が生じるおそれがあること、③骨材のアルカリ・シリカ反応性試験については、海外の規準も含め種々の試験方法の活用方法の確立が求められていること、などが明らかになった。本研究では、この結果を踏まえ、①に関して既存構造物の実態を調査し検証した。また、②に関して実験を行って検証した。

### 3. 道路橋における劣化実態調査<sup>11)</sup>

#### 3.1 調査の概要

国土交通省道路局では、2003年3月、「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)」を通知し、全国の直轄国道および高速道路等の橋梁でASRに起因する橋梁の損傷状況等の調査を実施した。当研究チームは、直轄国道分の損傷調査のとりまとめを行った。

#### 3.2 調査方法

調査対象の構造物は、構造物の管理者によりASRによる劣化の可能性がある構造物として抽出された約400橋の道路橋で、橋台・橋脚が2737基、上部構造が1784径間である。

調査は、構造物の管理者(地方整備局、内閣府沖縄総合事務局)が収集した構造物に関する基本的な情報(構造物諸元、竣工年、周辺環境など)と構造物に生じた変状の情報(写真やひび割れ図など)を用いて、部材ごとに表-2に示す5段階の区分で判定することで行った。

部材ごとに整理したのは、特に竣工年や補修・補強の有無について、一つの橋梁でも部材ごとに異なっていることが多くあるためである。判定結果を各橋梁単位で整理する際には、その橋梁を構成する部材のうち、最も劣化が著しい部材の判定結果を用いることにした。

収集した情報の評価は、当研究チームの技術者と管理者らが意見交換しながら検討した。ただし、全国の構造物を一定の判定基準で評価し比較する必要から、判定は一人の技術者(河野)の判断により行った。評価・判定は、2003年から2004年にかけて実施した。

#### 3.3 調査結果

##### 3.3.1 全体概要

橋梁ごとにとりまとめた判定結果を、図-4に示す。ASR劣化が生じていると見られる事例を合計すると287橋で、直轄国道にある全橋梁の約2%に相当する。このうち何らかの補修を行ったり、補修の必要性を検討したりすることが必要と考えられるのは71橋で、ASRによる劣化が生じた橋梁のうちの約4分の1である。したがって、ASR劣化のため、補修を考慮することが必要な橋梁の割合は、直轄国道の全橋梁のうち約0.5%となる。

詳細を見ると、ASRによる劣化が著しく「補強検討」と判定されたものは2橋あった。いずれも、過去に行われた調査で、橋脚の一部に鉄筋の破断箇

所があることが明らかになっていた橋梁であり、それぞれの対策検討委員会などで、補修・補強計画が検討されていたものである。

「補修必要」(図-5)と判定されたものは59橋あった。これらのほとんどは、著しいひび割れが生じた事例である。一部の構造物では、内部の鉄筋の健全性を確認するためはつり調査が行われていた。しかし、この調査では、既に報告されていた2橋以外には、ASRにより内部の鉄筋が脆性的に破断した事例は新たには見つからなかった。

表-2 判定結果の区分

区分	詳細
補強検討	アルカリ骨材反応により構造物が劣化している。鉄筋の一部に破断が見られるなど劣化の程度が著しく、補強の必要性についても検討する必要がある。
補修必要	アルカリ骨材反応により構造物が劣化している。ひび割れ幅が大きく内部の鉄筋が腐食しやすい状態になっているなど、劣化の程度が比較的大きく、補修を行う必要がある。
補修検討	アルカリ骨材反応により構造物が劣化している。コンクリートの劣化範囲や周辺環境などについて調査し、補修を行うかどうか検討するのがよい。
経過観察	構造物に生じた変状は、アルカリ骨材反応によるものであるか、その可能性が高い。しかし、劣化の程度が軽微であったり、既にひび割れが発生してから長い年月が経ち、ほとんどのひび割れが析出物で埋まっていたりするため、すぐに補修を行う必要はない。橋梁点検時に劣化箇所の経過観察を行うとよい。
非AAR	構造物に生じた変状は、アルカリ骨材反応によるものとは考えにくい。

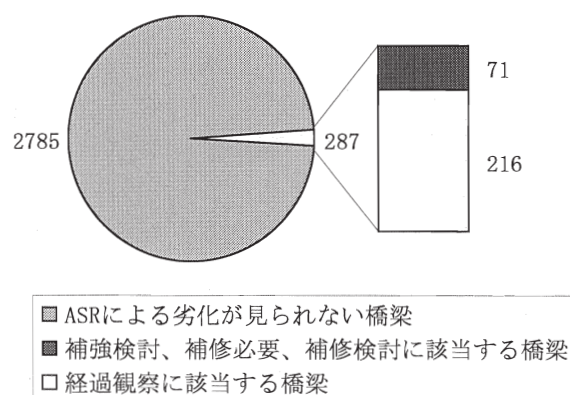
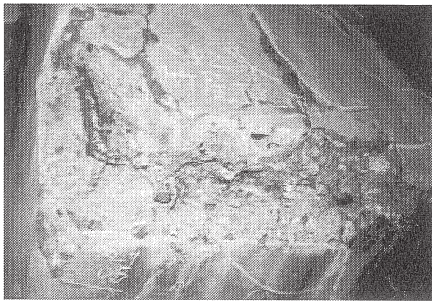
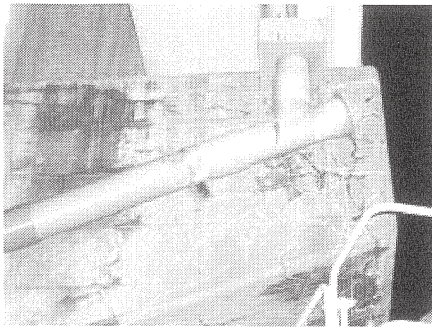


図-4 道路橋のASR劣化調査結果





※橋脚張出し部の端部に幅5mmのひび割れ。内部の鉄筋が腐食。補修必要と判断した。

図-5 補修必要と判定した事例

他に、「補修検討」と判定されたものが10橋、「経過観察」(図-6)と判定されたものが216橋あった。

### 3.3.2 地域ごとの調査結果

判定結果を地域ごとに整理すると図-7のとおりである。ASRによる劣化が生じた橋梁は、特に北陸地方および中部地方に多い。なお、関東地方の事例の多くは長野県を中心とした関東地方整備局管内の西部地域のものである。

この結果は、ASR反応性を有する構造物を含んだ岩帯の分布が、ほぼ全国的に見られること<sup>1)</sup>や、現在実際に販売されている骨材の調査結果(後述、5章)で、「無害でない」と判定された骨材が、東日本で多く、西日本では少ないこと<sup>12)</sup>と、一致していない。この理由は必ずしも明確ではないが、ASRによる劣化構造物が比較的多い地域では、骨材の品質に対する関心が高まり、無害でない骨材が市場から排除された可能性がある。

### 3.3.3 建設年代ごとの調査結果

ASRによる劣化が生じている部材の数を年代ごとに整理すると図-8のようになり、1961~1986年の間に集中していた。一方、1987年以降に竣工した構造物では、劣化事例がほとんどなく、1986年の通達による抑制対策の効果が現れているものと考えられる。なお、ここで1987年以降の竣工とされている



※ASRによるひび割れが発生した橋台。端部には部分的に、幅2mmの比較的大きなひび割れ。はつり調査の結果、内部の鉄筋には腐食無し。そこで、経過観察と判定。

図-6 経過観察と判定した事例

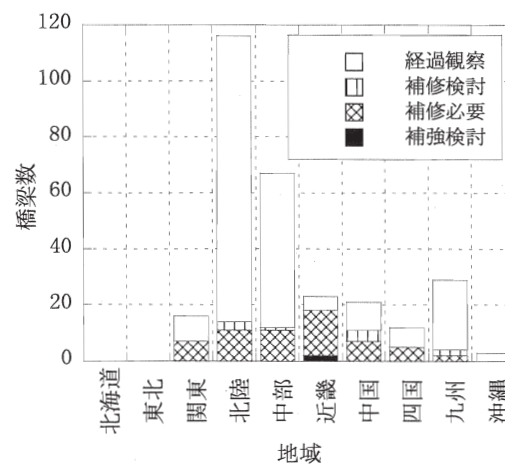


図-7 アルカリ骨材反応による劣化が生じた橋梁数(地域別)

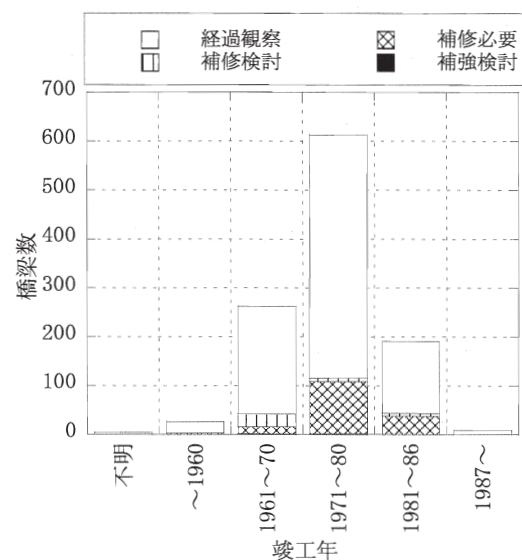


図-8 アルカリ骨材反応による劣化が生じた橋梁数(年代別)

場合でも、その多くの場合は橋梁の下部構造であり、橋梁の竣工に先立って 1986 年以前に建設されていた可能性が高い。

劣化が生じている構造物の竣工年代が特に 1971～1980 年の間に集中している理由としては、この時期に建設された構造物が多かったこと、骨材が川砂利から碎石等に移行するなど多様化したこと、地域によっては、セメントのアルカリ量が大きかったり、使用した海砂に多量の塩分が含まれていたりしたこと、などが考えられる。

### 3. 4 道路橋における劣化実態調査のまとめ

ASR による損傷の実態を把握するため、全国の直轄国道分の ASR 構造物の評価・判定を行った。その結果、①国土交通省が管理する直轄国道にある全橋梁の約 2% が ASR による劣化の症状を呈しており、その約 4 分の 1 が、何らかの補修を行ったり、補修の必要性を検討したりすることが必要と考えられること、②1987 年以降に竣工した構造物では、ASR による劣化がほとんど認められず、1986 年に通達された抑制対策が功を奏していること、③地域的に見ると、道路橋の ASR による劣化事例は、北陸と中部で多く、北日本では発生率は少ないこと、などが明らかになった。なお、文献 11) では、この他、部材の種類や補修の有無についても整理し考察を行った。

## 4. アルカリ金属の外部からの侵入に関する検討

### 4. 1 検討の目的

2 章で整理したように、海からの飛来塩分または凍結防止剤として外部から塩分（主に塩化ナトリウム）が供給される環境では、コンクリートの外部からナトリウムイオンが侵入し、アルカリ量の総量規制などの抑制対策が十分有効に機能しないおそれもあることが指摘されている。

そこで、①ASR により膨張する可能性の高い供試体を外部から  $\text{Na}^+$  が供給される条件で貯蔵し、 $\text{Na}^+$  が ASR による膨張に与える影響を検証した。また、②ASR により膨張する可能性の低い供試体を外部から  $\text{Na}^+$  が供給される条件で貯蔵し、その侵入速度を検証した。

### 4. 2 $\text{Na}^+$ が ASR による膨張に与える影響に関する実験<sup>13)14)</sup>

#### 4. 2. 1 実験方法

実験には、100×100×400mm のコンクリート供試体を使用し、配合は表-3 に示す 4 配合とした。以下、供試体の呼び名として、表-3 における“種類-107 日以降の貯蔵方法”を用いる。

骨材には、反応性骨材として安山岩系の碎石・砕砂、非反応性骨材として硬質砂岩の碎石と川砂を用いた。一部の供試体に対しては、飽和塩化ナトリウム水溶液などへの浸漬を開始する前に膨張やひび割れを導入する目的で、練混ぜ時に  $3.72\text{kg/m}^3$  の水酸化ナトリウムを添加した。しかし、結果として、浸漬開始前に ASR による顕著な膨張が生じた供試体はなかった。

材齢 107 日以降、飽和塩化ナトリウム水溶液への浸漬などを含む 5 種類の環境に約 6 ヶ月間貯蔵し、1 週間おきに外観観察およびダイヤルゲージによる長さ変化の測定を行った。また、浸漬終了時に代表的な 8 供試体について試料を調整し、E PMA による

表-3 配合種類および養生条件

記号	配合種類		セメント	W/C (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	貯蔵環境		
	骨材	NaOH				28日まで	106日まで	107日以降
A	反応性	添加	普通ポルトランドセメント	55	160	20℃ 湿潤養生	40℃ 湿潤養生	1. 飽和NaCl浸漬 2. 人口海水浸漬 3. 飽和NaCl噴霧 4. 蒸留水噴霧 5. 湿潤
B	非反応性	添加						
C	反応性	添加						
D	反応性	-						

※NaOH の添加量は  $3.72\text{kg/m}^3$ 。

※反応性骨材のケースでは、反応性のある骨材と非反応性の骨材を 50% ずつ混合して用いた。



定量分析を行い、コンクリート中に含まれるイオンの量を測定した。分析画像の一例を図-9に示す。

#### 4. 2. 2 実験結果

##### (1) 外観観察および膨張量

ASRによる膨張は、A-1、A-3、A-4 供試体のみで生じ、その他の供試体では膨張量が200マイクロ以下であった。膨張が生じたA-1、A-3、A-4 供試体と、参考としてD-1 供試体の膨張量測定結果を図-10に示す。

外観観察の結果、ひび割れが目視で確認できたのは、A-1が貯蔵後63日、A-4が貯蔵後75日と早かった。その後の膨張量については、A-1は急速に膨張したが、A-4の膨張は緩やかであった。一方、A-3はA-4に比べてひび割れ発生が貯蔵後170日と遅かったが、ひび割れ発生前後の膨張の進行はA-4より顕著であった。A-1、A-3では、貯蔵中に塩化ナトリウムが供給されており、これに含まれるナトリウムイオンがひび割れ部分から多く内部に浸入し、急激な膨張を生じせしめたものと考えられる。

##### (2) EPMA分析による侵入の評価

ここでは代表的な結果として、A-1、A-2、D-1の測定結果を図-11に示す。なお、グラフの縦軸はNa<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>質量パーセント濃度であり標準試料での試験結果を元に推定されたものである。EPMA分析によるコンクリート中のイオン量の定量的推定は、開発途上の技術であり、推定精度は十分には明確でないことに注意が必要である。

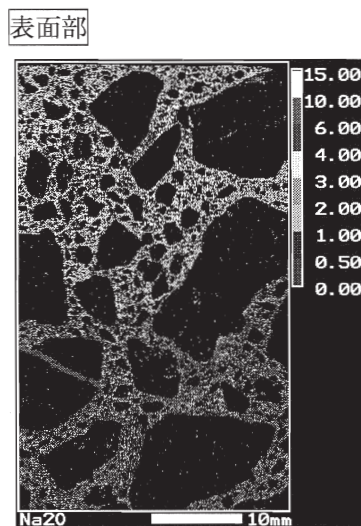


図-9 D-1 供試体 EPMA 分析画像

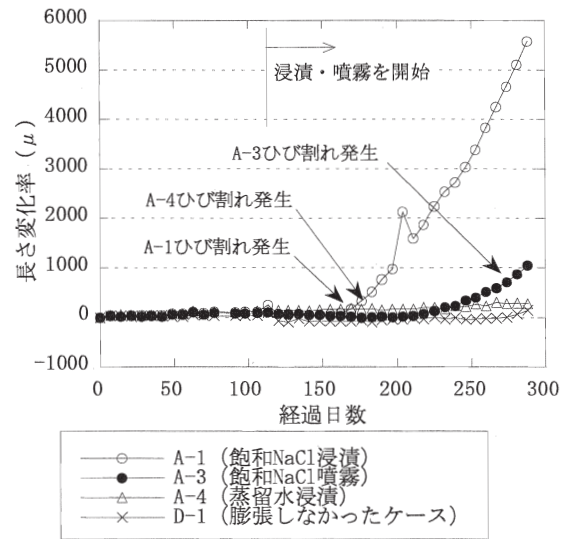


図-10 膨張量測定結果

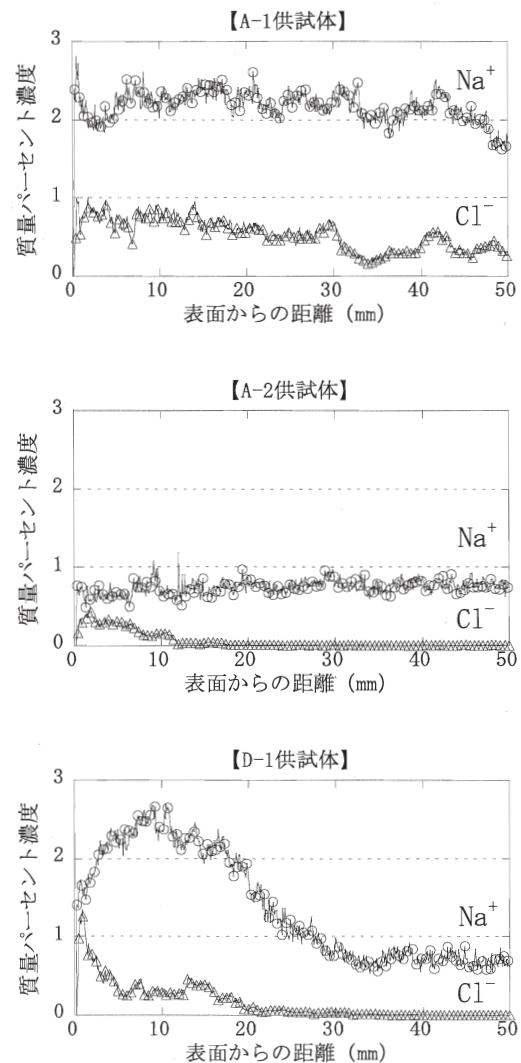


図-11 供試体中のナトリウムイオン、塩化物イオン濃度測定結果 (EPMA 分析による)

D-1 供試体の測定結果を見ると、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>ともに表面から約 35mm 程度の深さまで侵入している様子が認められる。なお、35mm よりも深い位置に含まれる Na<sup>+</sup>は、セメントなどに含まれていたもので浸漬前からコンクリート中に導入されていた可能性が高い。

これに対し、A-1 供試体では、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>ともに測定箇所全体にわたって侵入が認められる。これは ASR によって微細なクラックが生じていたためと考えられる（供試体表面にひび割れが見られた箇所を試料としたが、内部には目視で確認できるようなひび割れはなかった）。

A-2 供試体では、Cl<sup>-</sup>の侵入が認められるが、Na<sup>+</sup>の侵入については明瞭には認められなかった。この理由は明確ではないが、あらかじめ NaOH を添加した供試体内では、Na<sup>+</sup>の濃度が当初から高く、さらに人工海水などの低濃度の Na<sup>+</sup>が含まれる溶液に浸漬しても、外部からそれ以上の Na<sup>+</sup>が侵入しなかった可能性がある。したがって、促進試験で周辺環境の影響を考慮する際には、試験に用いる溶液の濃度などにも考慮が必要になる可能性がある。

#### 4.3 Na<sup>+</sup>のコンクリート中への侵入速度に関する実験<sup>15)</sup>

##### 4.3.1 実験方法

水セメント比 55%、単位水量 160kg/m<sup>3</sup>、細骨材率 46%の配合で、100×100×400mm のコンクリート供試体を使用し、材齢 28 日まで養生した後、表-4 に示す種々の溶液中に浸漬した。約 1 年間の浸漬の後、供試体の化学分析、EPMA 分析などを行って、各種イオンのコンクリート中への侵入状況や侵入量を調べた。

##### 4.3.2 実験結果

###### (1) Na<sup>+</sup>の侵入性状

原子吸光光度法による Na<sup>+</sup>の測定結果を図-11 に示す。NaCl 溶液に浸漬した供試体では、コンクリート表面からの深さ 30~40mm 程度まで、Na<sup>+</sup>が侵入していることが確認された。なお、LiNO<sub>2</sub> 溶液に浸漬した供試体でも Na<sup>+</sup>イオンの侵入が見られるが、その理由は明確ではない。

このデータを元に、コンクリート中での Na<sup>+</sup>の見掛けの拡散係数を計算すると、 $3.30 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$  となり、同一の供試体で検討した Cl<sup>-</sup>の見掛けの拡散係数より小さくなった（表-5）。

###### (2) Li<sup>+</sup>の侵入性状

Li<sup>+</sup>イオンの ASR 抑制効果は、十分には明確にさ

れていないが、アルカリシリカ反応により膨張を生じうるモルタル・供試体に一定量以上の Li<sup>+</sup>イオンを導入すると膨張が抑制されることが報告されている<sup>16)</sup>。このため、ASR が生じた構造物の補修材料として Li<sup>+</sup>を含む材料が用いられている場合がある。しかし、Li<sup>+</sup>のコンクリート中への侵入性状も、Na<sup>+</sup>と場合と同様に、十分には明らかにされていない。

今回の実験では硝酸で抽出した溶液を資料に ICP（高周波誘導結合プラズマ）発光分析法で Li<sup>+</sup>量を測定したところ、浸漬面から 10mm 程度まで 0.5kg/m<sup>3</sup>程度の侵入を確認できた。しかし、補修に用いることを考慮すると、加圧注入のようなより積極的な導入方法が必要であるといえる。

#### 4.4 アルカリ金属の外部からの侵入に関する検討結果のまとめ

外部から Na<sup>+</sup>などのアルカリ金属が供給される場合の ASR による膨張への影響について検討するため、コンクリート供試体を各種溶液中に浸漬させ、長期的に観察した。その結果、①Na<sup>+</sup>の侵入速度は、Cl<sup>-</sup>よりも遅いこと、②海水程度の濃度の溶液では Na<sup>+</sup>の侵入が明確には認められず、影響がない可能性もあること、③ASR によりひび割れが発生した場合には、Na<sup>+</sup>が急速に侵入し ASR による膨張を促進させるおそれがあること、などが明らかになった。

表-4 供試体を浸漬した溶液の種類

溶液名	モル濃度 (mol/l)	溶質濃度 (%)	Cl <sup>-</sup> 濃度 (%)
NaCl溶液	2	10.5	
CaCl <sub>2</sub> 溶液	1	10.0	6.6
KCl溶液	2	13.0	
LiNO <sub>2</sub> 溶液	1	40.0	—
純水	—	—	—

表-5 各種イオンの拡散係数推定結果

イオンの種類	溶液の種類	見掛けの拡散係数 $\times 10^{-6} (\text{mm}^2/\text{s})$	表面濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	初期濃度 (kg/m <sup>3</sup> )
Na <sup>+</sup>	NaCl	3.30	5.8	0.9
	NaCl	4.0		0.0
Cl <sup>-</sup>	CaCl <sub>2</sub>	7.5	22.0	0.0
	KCl	6.5		0.0
Li <sup>+</sup>	LiNO <sub>2</sub>	0.61	0.5	0.23

※Fick の拡散式により推定した値。ただし、Cl<sup>-</sup>については、実験条件から表面濃度および初期濃度が溶液にかかわらず一定となるように推定した。



## 5. 骨材のASR反応性に関する調査<sup>12)</sup>

### 5.1 調査の概要

レディーミクストコンクリートでは、アルカリ骨材反応を抑制するため、四種類（調査開始時）の対策から、一つを選択して実施することになっている。しかし、これまでは、「無害な骨材の使用」による対策が、他の対策よりも広く用いられてきている。一方、骨材は天然資源であり、産地による品質の差が大きいものと考えられる。しかし、我が国でのアルカリ骨材反応性を有する骨材の分布については十分には明らかにされておらず、建設省総合技術開発プロジェクトでの調査結果<sup>1)</sup>があるのみである。

そこで、国土交通省技術調査課では、平成13年度から平成15年度にかけて、全国の工事で用いられている骨材のアルカリ・シリカ反応性試験を行い、現在使用されている骨材の実態を把握した。当研究チームは、調査結果のとりまとめに関して協力を行ったので、その調査の結果を簡単に紹介する。

### 5.2 調査方法

全国のレディーミクストコンクリート工場から使用している骨材の提供を受け、化学法またはモルタルバー法（JIS A 1146）による骨材のアルカリシリカ反応性試験を行った。ここでは中間集計時の結果を報告する（細骨材 1120 試料、粗骨材 1084 試料）。

### 5.3 調査結果

#### (1) 骨材の判定結果

試料のほとんどは、比較的短時間で分析できる化学法によりアルカリ・シリカ反応性を判定した。判定結果を表-6に示す。細骨材では1025試料のうち73試料（7.1%）が、粗骨材では1002試料のうち137試料（13.7%）が、「無害でない」という結果であった。

一方、特に、試料の提供者がモルタルバー法による試験を実施している場合には、モルタルバー法でアルカリ骨材反応に対する有害性を判定した（表-6）。細骨材では108試料のうち27試料（25.0%）が、粗骨材では、116試料のうち31試料（26.7%）が、「無害でない」という結果であった。モルタルバー法の方が化学法に比して「無害でない」と判定された試料が多いが、これは主にアルカリ・シリカ反応性が高い（と予想される）骨材に対して、モルタルバー法による判定を試みたためであると考えられる。

表-6 アルカリ・シリカ反応試験結果

判定結果	化学法		モルタルバー法	
	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材
無害	952	865	81	85
無害でない	73	137	27	31
その他	107	114	1,024	1,000
計	1,132	1,116	1,132	1,116

※その他は、試験が実施されていないか、実施中で判定結果が確定していない場合を指す。

表-7 試験方法による判定結果の比較

	モルタルバー法		計	
	無害	無害でない		
化学法	無害	17	3 <sup>※3</sup>	20
	無害でない	13 <sup>※2</sup>	12	25
	その他 <sup>※1</sup>	1	1	2
計	31	16	47	

※1 その他は、化学法で複数の骨材を混合して試験した結果、無害でないという判定であった事例である。

※2 該当する試料は13あるが、産地は2箇所である（陸砂利・陸砂）。

※3 該当する試料は3あるが、産地は1箇所である（川砂利・川砂）。

化学法とモルタルバー法の両方で試験を行った試料について、双方の判定結果を比較し表-7に示す。化学法で「無害でない」と判定された25試料のうち、13試料はモルタルバー法では「無害」との判定を得た。一方、化学法で「無害」と判定された20試料のうち、3試料はモルタルバー法では「無害でない」と判定された。

#### (2) 無害でない骨材の分布

図-12に、過去の文献におけるアルカリ・シリカ反応性骨材の分布図を示す。調査結果を、都道府県ごとに整理し、図-13に示す。

今回の調査結果を過去の文献と比較してみると、北海道・東北・北陸の各地域では他の地域よりもやや無害でない骨材の割合が多いなど、比較的良く一致している。また、図-12では十分な情報がない関東地方でも、一定の割合で反応性骨材が含まれていることがわかる。一方、近畿地方等では、アルカリ骨材反応による構造物の著しい劣化事例も報告されているが、反応性骨材の割合が比較的小さかった。この理由としては、劣化事例が目されたことで、地域内でASRに対する認識が高まり、市場から反応性骨材が排除されたことが考えられる。

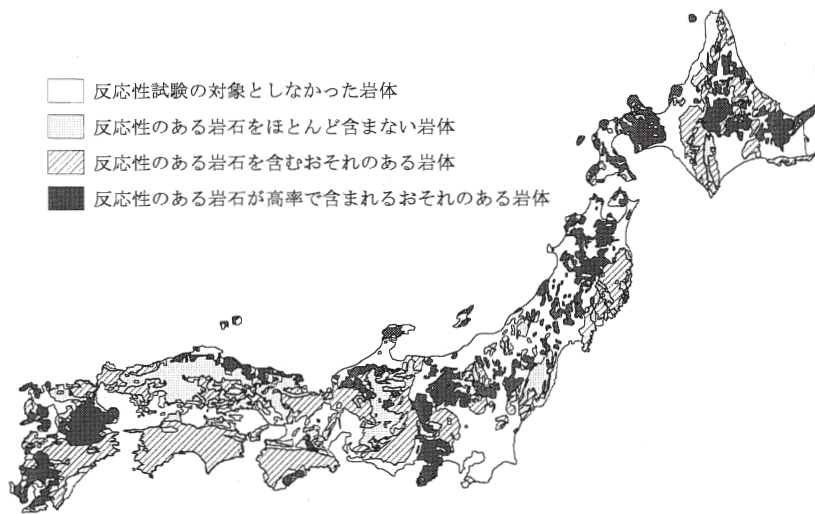


図-12 アルカリ・シリカ反応性骨材分布図<sup>1)</sup>

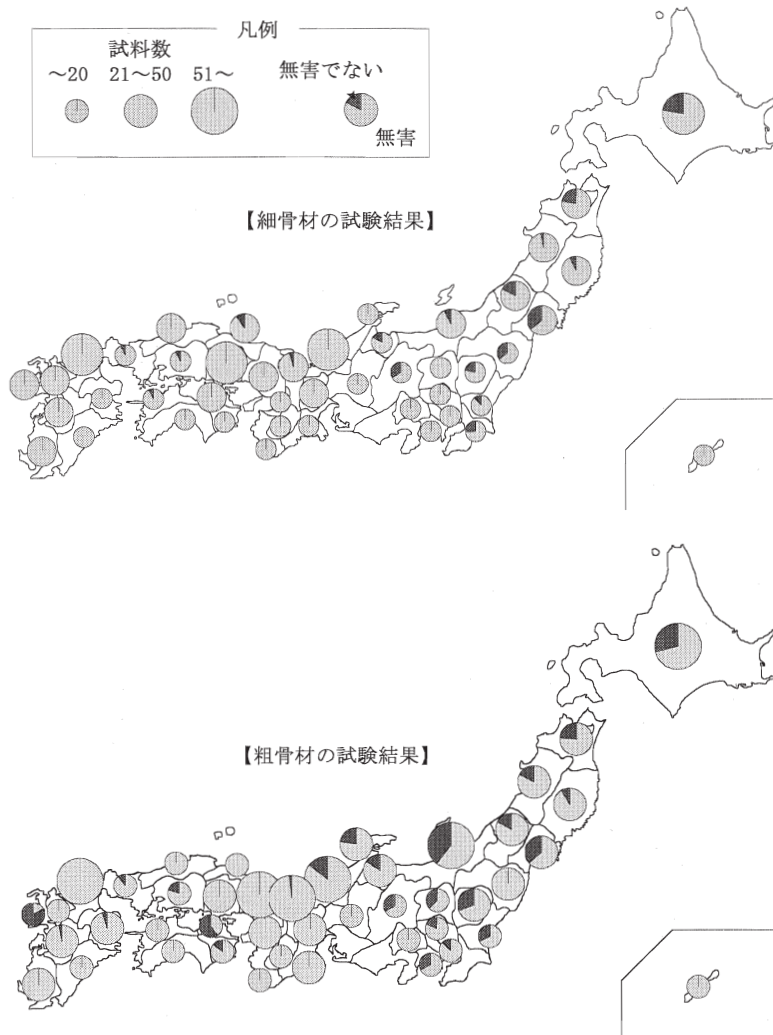


図-13 骨材の判定結果と地理的分布（中間集計）

このように地域により若干の差があるものの、図-13から、アルカリ骨材反応を起こす可能性がある骨材は、全国に広く分布していることがわかる。

#### 5.4 骨材の ASR 反応性に関する調査結果のまとめ

全国の工事で用いられている骨材のアルカリ・シリカ反応性試験結果を整理し、現在使用されている骨材の実態を把握した。その結果、①レディーミクストコンクリートに使用されている骨材のうち、細骨材は約9%、粗骨材は約15%が、アルカリ反応性試験で無害でないと判定された。また、②無害でない骨材は、全国に広く分布していること、③化学法とモルタルバー法では、化学法の方が広く普及していること、が確認された。なお、中間集計時までの調査対象（計2204試料）には、同一の産地から採取されたものも多く含まれているので、全国の砂利採取場数（6517箇所、1990年）や全国の砕石業事業所数（1163、1990年）と比較して十分な量ではない。骨材の地域性を示すには、産地を網羅した調査結果が必要であり、今後、更に調査結果の分析を進め信頼性を向上させる予定である。



## 6. ASRにより劣化した構造物の再調査<sup>17),18),19)</sup>

### 6.1 調査の概要

近年、ASRにより著しく劣化した構造物で構造物中の鉄筋が破断した事例が見つかり、ASRによるコンクリート構造物の劣化について関心が高まっている。しかし、ASRによる劣化の進行には様々な要因が関係しており、これを予測することは容易ではない。

ASRによってコンクリートの膨張が生じるには、①骨材中に反応生成物があること、②コンクリート中のNa<sup>+</sup>またはK<sup>+</sup>などの濃度が高いこと、③コンクリート中の水分が豊富であること、という条件が必要である。したがって、例えば、骨材中の反応性珪物が全て消費されてしまうと①の段階の反応が終わり、ASRによる劣化はほぼ停止すると考えられる。しかし、骨材は天然資源であり、一つ一つの物性の差異が大きいため、反応がいつまで続くかを試験により明らかにすることは困難である。また、構造物に外部から供給される水の量は、部位によっても大きく変わりうる。さらに、ASRが生じる箇所の部材の寸法や、配筋によって、膨張方向が限定される場合や、膨張量が抑制される場合がある。

これらのことを考え合わせると、ASRによる劣化に関係する全ての要因を適切に評価して各構造物の劣化予測を行うことは非常に困難である。そこで、劣化の程度をグレーディングし、また、劣化が進行しているかどうかを経時的に調査して評価することが現実的と考えられる。しかし、これまでに一部の構造物（特に劣化が著しかった構造物）についての追跡調査はあるものの、補修が必要かどうかの境界にあるような劣化程度のASR構造物について、長期的な劣化の進行の有無が報告された事例はほとんどない。

そこで、土木研究所において、過去に何らかの調査が行われ、その結果からASRによる劣化が疑われる構造物を対象に追跡調査を行い、現状を把握するとともに、劣化の進行や補修・補強の効果について整理した。

### 6.2 調査方法

過去の調査結果が残されている構造物の中から、ひび割れの原因がASRによるものかどうか、また、調査者の所見は妥当なものかといった点に留意して構造物の選定を行った。その結果、69件の構造物を選定して、再調査することにした（図-14）。

調査は次に示す手順で行った。

- ① 過去の調査結果から得られる情報(劣化部位の写真、ひび割れ図、当時の調査者の所見等)を参考として、これらの時点における状況に対し劣化度を判定
- ② 選定した構造物について、追跡調査を実施
- ③ 追跡調査の結果を用いて現時点での劣化度を判定
- ④ 対象構造物の過去の調査時点での劣化度と現時点での劣化度を比較

追跡調査では、補修の有無、補修工法、調査者による現在の状態の評価(ひび割れの進行状況等)、劣化写真などを収集した。一部の構造物については、地上から目視できる範囲内で外観調査を実施した。

ところで、構造物の外観調査を行うと、ひび割れの本数やひび割れ幅などについてある程度明らかにすることができる。しかし、各構造物本体に占める劣化部位の大きさや周辺環境は様々であることから、こうした変状の多少と構造物としての耐久性への影響の大きさを結びつけるのは簡単ではない。

そこで、写真と図面から得られる劣化の状況ならびに構造物の重要性などを総合的に判断して、構造物の評価を行った。その評価基準を、表-8に示す。

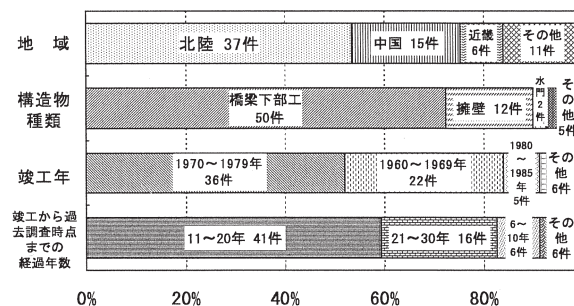


図-14 調査対象構造物の特徴

表-8 評価基準

区分	内容
補修必要	アルカリ骨材反応によりひび割れ(約1mm以上)が発生し、内部の鉄筋が腐食しやすい状態になっているため、補修を行う必要がある。
検討必要	今回の資料だけでは補修が必要か、経過観察でよいか明確にできない。鉄筋の部分的なはつきり出し等追加の調査を行うなどして、判断する必要がある。
経過観察	構造物に生じている劣化の原因は、アルカリ骨材反応によるものか、その可能性が高い。しかし、劣化の程度が軽微であり、当面は劣化箇所の経過観察を行うとよい。
ASRではない	種々の情報から総合的に判断すると構造物に生じた変状はASRによるものとは考えにくい。
情報不足	補修要不要を判断するための情報が不足。
対策済み	構造物は現存し、何らかのASR対策を実施している。
現存せず	理由は明確ではないが、現存していない。

### 6.3 調査結果

#### 6.3.1 調査結果の概要

過去調査時点、現時点における劣化度の評価結果を図-15に示す。結果、過去調査時点での調査結果に対しては、69件中37件(54%)を“経過観察”、30件(43%)を“補修必要”とした。残り2件は、その他の評価であった。

一方、現時点調査結果に対する判定は、69件

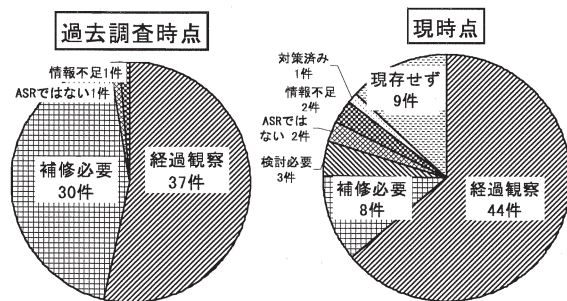


図-15 調査対象構造物の特徴

中44件(64%)が“経過観察”、8件(12%)が“補修必要”、9件(13%)が“現存せず”、残り8件はその他の評価であった。

#### 6.3.2 劣化状態の推移

##### (1) 現存している構造物

現存している構造物について、過去調査時点で“補修必要”、“経過観察”と評価されたものそれぞれの現時点への推移の状況を示す(図-16、図-17)。なお、“現存せず”や“情報不足”等は省いた。また、現時点で“検討必要”と評価されたものは、この図では“補修必要”にまとめた。

図-16で示す「過去調査で“補修必要”と判定された構造物」は23件あった。このうち現時点でも“補修必要”の状態にあるものは8件で、8件中5件は、表面被覆による補修を行ったにもかかわらず、再度補修箇所が劣化していたものである(図-18)。しかし、この劣化がASRによるものか、補修材料自体の経年劣化(耐久性に限界有り)によるものか、明確ではなかった。一方、23件中15件は“経過観

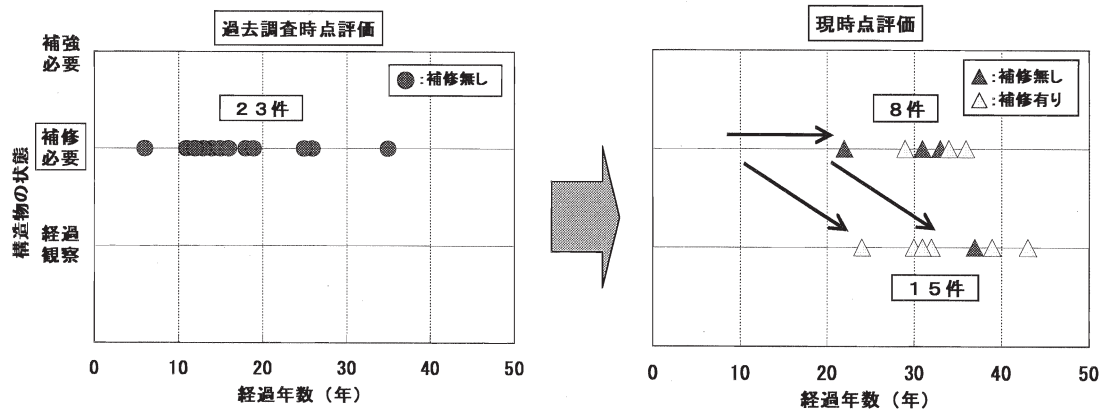


図-16 過去調査時点で“補修必要”と評価された構造物の劣化状態の推移

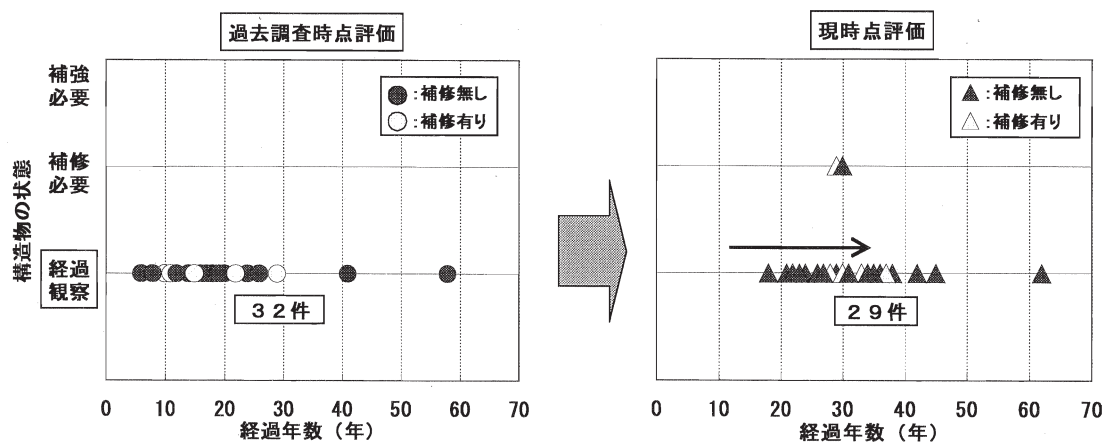


図-17 過去調査時点で“経過観察”と評価された構造物の劣化状態の推移



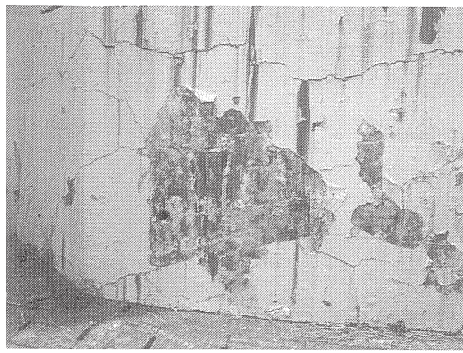


図-18 補修部が再劣化した事例

察”に推移しており、うち12件は補修や補強などの対策がとられていた。残りの3件は過去調査時点ではひび割れの状況等から“補修必要”と判定したが、現時点で竣工から30年以上経過しており、劣化の進行もみられないことから“経過観察”と判定を変更した。

これらの結果を見ると、1986年の抑制対策以前に建設された構造物で、劣化の程度が比較的軽微なものについては、今後数年間の間で急速に劣化が進行するとは考えにくい。

(2) 現存していない構造物

現時点で現存していない構造物は9件あった。9件の構造物が撤去された理由は、報告書等の確認ができなかったため明確でないが、劣化の程度や構造物所在地の現況から推定すると、機能上の変更が3件、ASR劣化によるものが4件、どちらともいえないものが2件である。

6.3.3 補修・補強の効果

現時点での評価が、“ASRではない”、“情報不足”、“現存せず”を除く56件に対して、過去の補修履歴の有無に対する現時点での劣化度評価について整理した(図-19)。なお、いずれも詳細な補修材料や

補修時期は明確ではない場合が多かったため、正確な補修の効果についての考察は困難であった。よって、目視調査による評価を基本にして、補修・補強の効果について考察した。

その結果、29件中21件(72%)の構造物は現時点で“経過観察”の判定であった。その理由としては、補修の効果があった、膨張量が小さかった、膨張の収束段階で補修が行われた等が考えられるが、明らかでない。一方、5件(17%)の構造物は現時点で“補修必要”の判定であった。これらは、補修箇所が再劣化しており、健全性が保たれていない状態であった。原因としては、膨張途中段階での補修や補修材自体の劣化が考えられた。

つまり、補修・補強の効果は、構造物の置かれる環境条件、補修・補強時期に左右され、それが現時点で評価の分かれた原因と考えられる。

一方で、27件中23件(85%)の構造物は、補修・補強を行っていないにもかかわらず現時点で“経過観察”の判定であった。

6.4 ASRにより劣化した構造物の再調査のまとめ

ASRにより劣化した構造物の再調査を行った。その結果、①劣化状況の推移を評価することができた55件のうち約8割が、現時点で“経過観察”の状態であり、過去調査時点から現時点の調査までの間(構造物によって異なるが、5~19年)に著しい劣化の進展はみられなかった。また、②過去に一度でも補修・補強が行われた構造物のうち約7割は、現時点で“経過観察”の状態であった。一方、③約2割は現時点で“補修必要”の判定であり、これらは、補修箇所が再劣化していた。なお、④過去に一度も補修・補強が行われていない構造物のうち約9割は現時点で“経過観察”の状態であった。

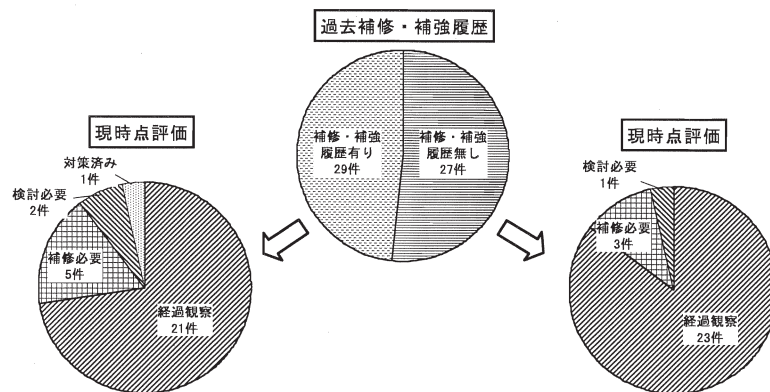


図-19 補修履歴の有無と現時点での評価

## 7. 鉄筋破断メカニズムに関する検討

### 7.1 検討目的

近年、ASRにより著しい劣化が生じた構造物の特にせん断補強鉄筋の曲げ加工部において、鉄筋が破断している事例があることが明らかになった。この鉄筋破断のメカニズムは、まだ十分には解明されていないが、破断面の一部に施工時に付着したと見られるセメントペーストが観察されており、鉄筋の曲げ加工部に建設時から微細なクラックが生じていたことが破断の原因の一つとして有力視されている<sup>20)</sup>。また、破断事例の観察結果から、上記のようなクラックは、曲げ加工部内側の節の付け根に生じること、破断が生じた鉄筋は現在製造されている鉄筋と比較して、節の立ち上がり部の角度が小さいことが明らかになっている。このような観察結果から、鉄筋の節の形状が曲げ加工時の欠陥の発生に影響し、ひいてはASRによる破断が生じるかどうかの要因になっている可能性があると考えられる。

そこで、特に鉄筋の節形状に着目し、節形状を加工した鉄筋試料の曲げ加工を行って、微細クラック発生の有無を観察した。また、曲げ加工を施した鉄筋の引張試験を行った。

### 7.2 検討方法

#### (1) 曲げ加工

鉄筋はSD295、D16のものを用いた。破断が生じていた鉄筋を模擬するため、この鉄筋の節の一部を放電加工により削りとり、節形状の異なる三種類の試料を作成した(図-20)。図-21に示す旧形状が破断事例の節形状に近いものである。新形状は放電加工を行っていないもの、中間形状は旧形状と新形状の間に位置するような形状に加工したものである。

その後、電動式の曲げ加工機を使用し、試料の曲げ加工を行った。曲げ内半径は、1D、2D、3Dの三種類でいずれもの試料も直角に加工した。なお、加工後の試料を観察したところ、曲げ内半径1Dを目標とした試料では約20mmで加工されていた。これは加工機がこのように特に小さな曲げ内半径での加工に対応しておらず、実験計画のとおりには加工できなかったためである。

#### (2) 曲げ加工部の観察

曲げ加工を施した試料に対し、まず磁粉探傷試験でクラックの有無を調べた。そして、磁粉探傷試験で蛍光色が観察された10箇所(いずれも曲げ内半径1D)、および蛍光色が観察されていない14箇所(曲

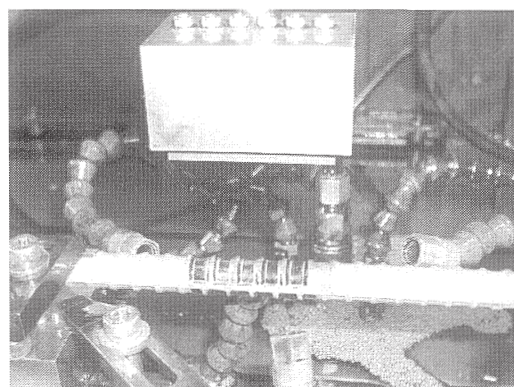


図-20 節形状の加工状況

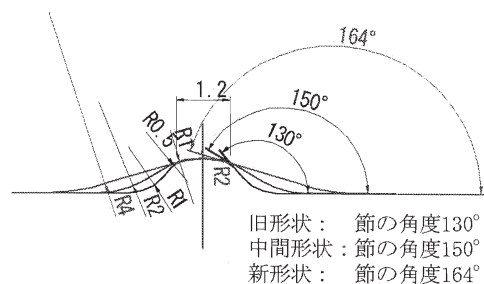


図-21 補修履歴の有無と現時点での評価

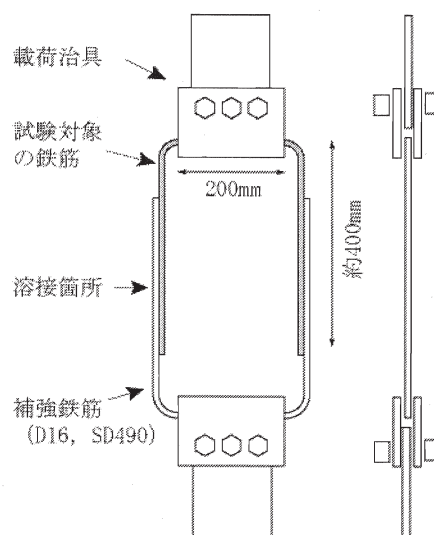


図-22 曲げ加工部の引張試験状況

げ内半径1Dが4箇所と2Dが10箇所)で、鉄筋を軸方向に切断し、SUMP法で切断面の顕微鏡観察を行った。

#### (3) 曲げ加工部の引張試験

ASRによる鉄筋破断を模擬するため、曲げ加工を施した試料と補強鉄筋を組み合わせロ字型の供試体を作成し、引張試験を行った(図-22)。供試体数は、節形状または曲げ内半径の異なるものを一つずつ、計6体とした。曲げ内半径が3Dの場合は、曲げに



よる影響が生じているおそれが小さいと考え、実施しなかった。

### 7.3 検討結果

#### (1) 曲げ加工部の観察結果

磁粉探傷試験では、曲げ内半径 1D の試料の多くで、節形状にかかわらず、節の付け根部に磁粉の付着を示す蛍光色が観察された。しかし、磁粉探傷試験で蛍光色が観察された 10 箇所(いずれも曲げ内半径 1D)、および蛍光色が観察されていない 14 箇所(曲げ内半径 1D が 4 箇所と 2D が 10 箇所)について顕微鏡観察を行った結果、いずれの試料でもクラックは認められなかった。

#### (3) 曲げ加工部の引張試験結果

試験結果を表-9に示す。新形状-曲げ内半径 1D のケースを除くと、全ての試料が曲げ加工部で破断した。旧形状-曲げ内半径 1D のケースでは、曲げ部のほぼ中央付近で破断した(図-23)。一方、これ以外で曲げ加工部で破断した 4 ケースでは、荷重治具の端部付近で破断した(図-24)。最大応力は、今回使用した鉄筋の引張試験を行った結果(約 540N/mm<sup>2</sup>)とほぼ同等かそれ以上となっており、節形状の違いや曲げ内半径の違いによる傾向は認められなかった。先に行った曲げ加工部の観察結果から、今回試験した供試体には欠陥は生じていないものと推察される。このため、鉄筋曲げ部で極端な強度低下を示す供試体がなかったものと考えられる。

### 7.4 鉄筋破断メカニズムに関する検討結果

今回の検討では、特に鉄筋の節形状に着目し、曲げ加工時に鉄筋の内側に生じるとおそれがある微細クラックの再現を試みた。しかし、顕微鏡観察の結果ではクラックの発生を確認することができず、実構造物の損傷状況を再現することができなかった。

曲げ加工部に加工時に欠陥が生じていた原因については、鉄筋の節形状のほかに、曲げ加工半径や鉄筋の材質、加工機械などの影響も考えられる。それぞれの要因の影響程度は、現在でも十分には明らかにされておらず、今後の研究課題である。

表-9 引張試験結果

節形状	曲げ内半径	最大応力 (N/mm <sup>2</sup> )*1	破断箇所	伸び*3	絞り*3
旧	1D	569.0	曲げ部	1.2%	2.6%
	2D	551.9		0.8%	5.4%
中間	1D	772.4	曲げ部	2.7%	9.8%
	2D	507.6		0.6%	10.6%
新	1D	480.4	補強鉄筋*2	—	—
	2D	573.0	曲げ部	1.2%	13.0%

\*1 曲げを行っていない鉄筋の引張試験結果(節形状ごとに1試料ずつ)では、最大応力は 535~540N/mm<sup>2</sup>で、節形状の加工による影響は認められなかった。

\*2 補強鉄筋部で破断した理由としては、溶接時に欠陥が生じたことが考えられるが、明確ではない。

\*3 試験対象の鉄筋の直線部(曲げ半径終了箇所から 4D の区間)で測定した参考値。

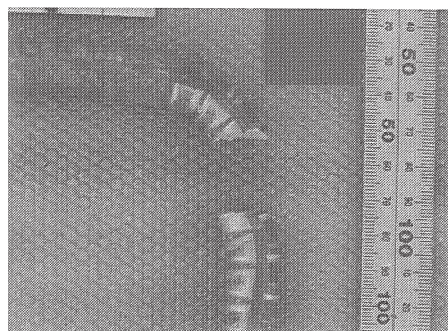


図-23 鉄筋の破断状況(旧形状-曲げ内半径 1D)

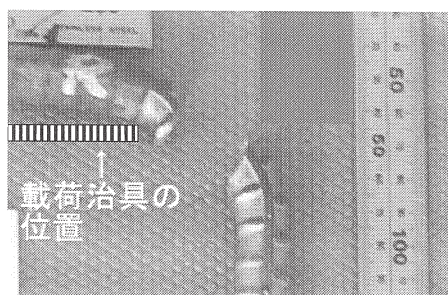


図-24 鉄筋の破断状況(中間形状-曲げ内半径 1D)

## 8. 鉄筋破断が部材のせん断耐荷力に与える影響に関する検討

### 8.1 検討の目的

近年、ASRにより著しい劣化が生じた構造物の特にせん断補強鉄筋の曲げ加工部において、鉄筋が破断している事例があることが明らかになった。このため、ASRによる劣化のためせん断補強鉄筋の一部または全てが破断した部材の耐荷性能を評価する手法が求められている。しかし、せん断補強鉄筋の曲げ加工部での損傷の影響について検討した事例は少ない。そこで、鉄筋の破断を模した供試体を作成し、そのせん断耐荷性状を実験により確かめた。

### 8.2 実験方法

供試体の寸法・形状を、表-10、図-25に示す。この実験では供試体のせん断耐荷力を明らかにすることを目的としているので、引張主鉄筋に高強度の鉄筋を使用し、曲げ耐荷力を高めた。鉄筋の破断は、せん断補強鉄筋を切断し、一部の曲げ加工部を製作しないことで再現した。

表-10 供試体の基本諸元

部材寸法			軸方向引張鉄筋		せん断補強鉄筋		コンクリート
b (mm)	d (mm)	a/d	規格	$P_t$ (%)	規格	$P_w$ (%)	$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )
290	350	3.0	D19 USD685B	1.13	D6 SD295A	0.21	24

※載荷試験時の材齢で、コンクリートの圧縮強度試験を行ったところ、圧縮強度は35.7N/mm<sup>2</sup>であり、耐荷力評価にはこの値を用いた。

### 8.3 実験結果

#### (1) 破壊状況

せん断力-変位曲線を図-26に、破壊時の状況を図-27に示す。

せん断補強鉄筋の損傷の有無にかかわらず、コンクリートが負担できるせん断力の計算値程度までは、荷重・変位特性が概ね等しかった。しかし、この値を超えると、供試体 No.2、No.3 では、供試体 No.1 よりも剛性が低下し、最大作用せん断力は供試体 No.1 の80%程度となった。また、供試体 No.2、No.3 では、最大作用せん断力の後、急激な荷重の低下が見られた。

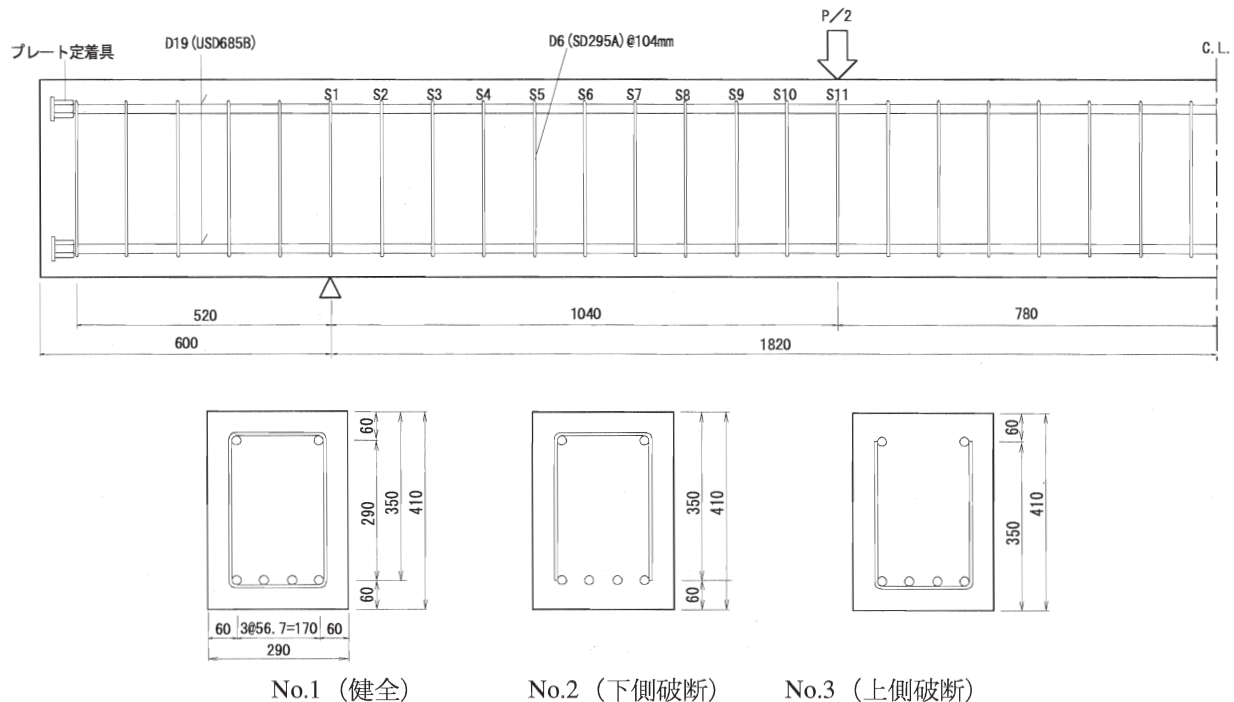
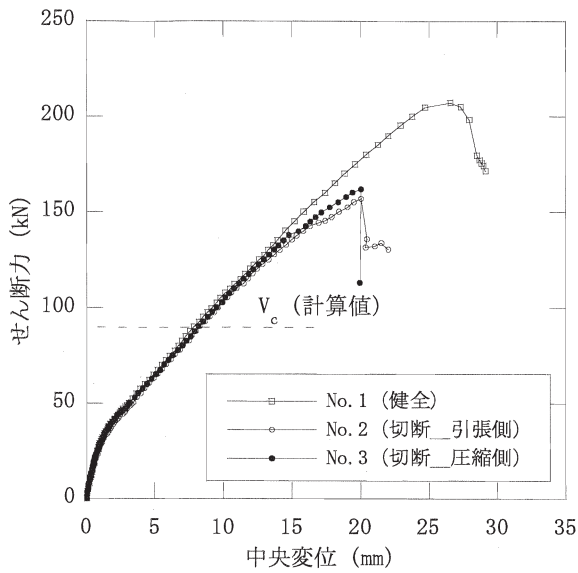


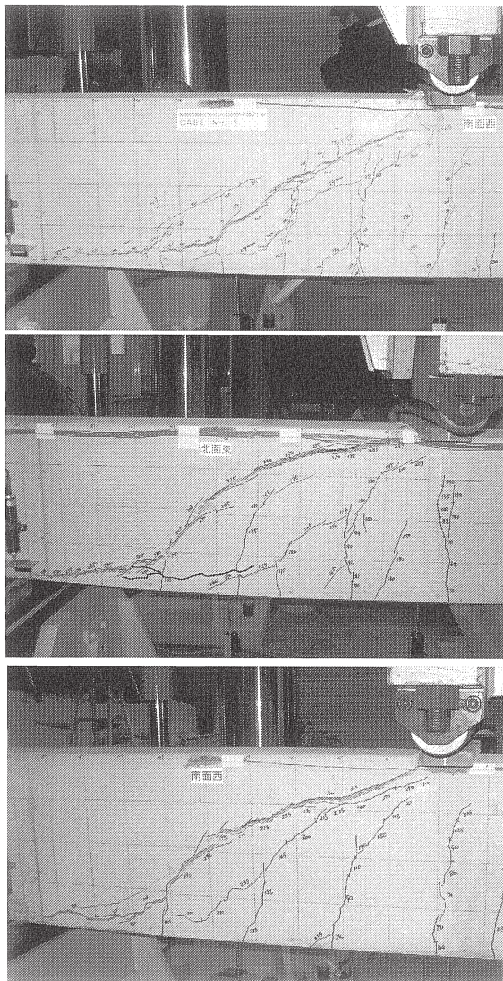
図-25 配筋図





※ $V_c$ は土木学会標準示方書に基づく計算値で、約90kN

図-26  $V_c$  図



※上から、供試体 No.1、No.2、No.3

図-27 破壊時の状況

図-28 に最大せん断力作用時におけるせん断補強鉄筋のひずみ分布を示す。供試体 No.2、No.3 では、ひび割れが上に凸な形状となり、鉄筋が降伏に達している範囲が小さかった。

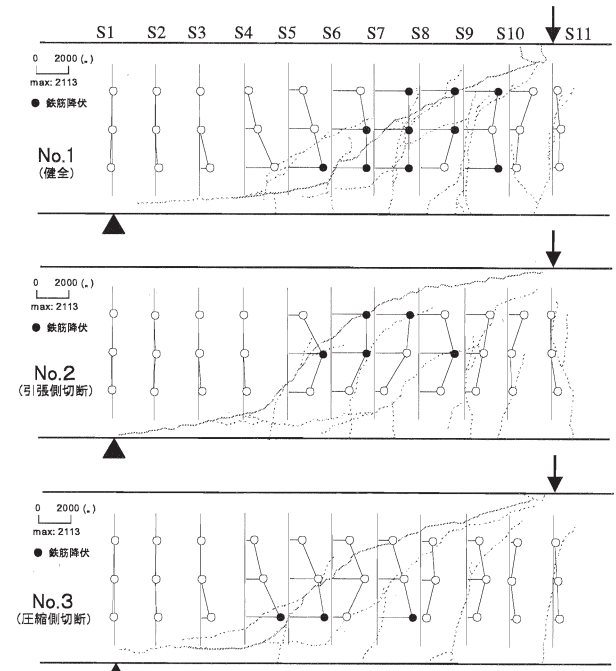
(2) せん断耐荷力予測式との比較

土木学会のアルカリ骨材反応対策小委員会報告書では<sup>21)</sup>、せん断補強鉄筋に破断がある場合の耐荷力評価手法として、①Regan らの実験結果に基づいて、破断した鉄筋の負担応力の応力低下率を求める方法と、②破断箇所から 20φまでの区間を無効として、検討面における有効なせん断補強鉄筋の本数を求める方法が紹介されている。今回の供試体について、これらの二つの方法で計算した最大せん断力と実験値を比較し、図-29 に示す。

計算値はいずれの場合でも実験値より小さく、安全側の評価となった。鉄筋の破断を模した供試体 No.2 および No.3 の方が、供試体 No.1 よりも計算値と実験値が近くなった。

8. 4 鉄筋破断が部材のせん断耐荷力に与える影響に関する検討結果のまとめ

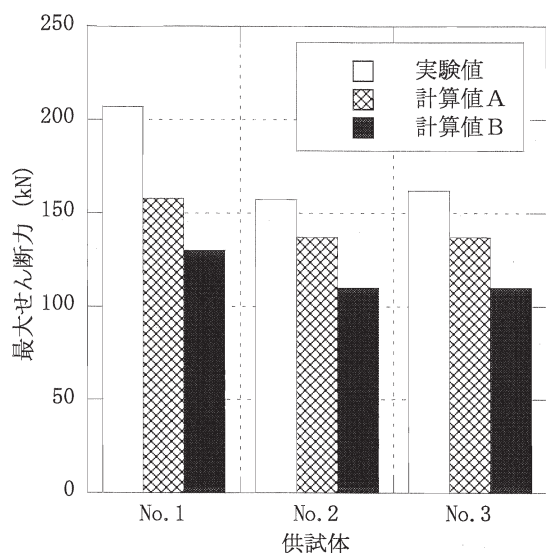
下側または上側主鉄筋位置で鉄筋を切断し鉄筋破



※せん断補強鉄筋の中心、および上下の主鉄筋から 60mm (10φ) の位置でひずみを測定した。

図-28 せん断補強鉄筋のひずみ分布 (最大せん断応力作用時)





※計算値 A は、鉄筋の負担応力の応力低下率を求める方法による。計算値 B は、破断箇所から 20φ までの区間を無効とする方法による。

図-29 計算結果と実験値の比較

断を模擬した供試体を作製して、鉄筋破断が部材のせん断耐荷力に与える影響について検討した。その結果、①コンクリートが負担できるせん断力の計算値程度までは、せん断補強鉄筋の損傷の有無にかかわらず、荷重・変位特性が概ね等しかった。②しかし、コンクリートが負担できるせん断力を上回るせん断力がかかると、せん断補強鉄筋に損傷のある供試体では剛性が低下し、最大せん断力も低下した。③今回の実験の範囲では、土木学会から提案された評価手法を用いることで、鉄筋が破断した供試体の最大せん断力を安全側に評価することができた。

## 9. まとめ

### 9. 1 ASR 抑制対策に関する提案

コンクリート製造時におけるアルカリ骨材反応抑制対策の妥当性を検証するため、主に 1986 年の「アルカリ骨材反応暫定対策」通達以後に行われた調査・研究結果を整理した。その結果、個々の ASR 抑制対策は概ね有効に機能していると考えられること、外部から塩分（塩化ナトリウム）が供給される環境にある場合、抑制対策を行っていても ASR による膨張が生じるおそれがあること、骨材のアルカリ・シリカ反応性試験については、海外の規準も含め種々の試験方法の活用方法の確立が求められていること、などが明らかになった。

抑制対策の効果については、文献調査だけでなく、

ASR により劣化したおそれのある約 400 橋の道路橋の調査を通じて確認した。その結果、全国の道路橋の約 2% で ASR によるものと見られる劣化が生じていたが、1987 年以降に竣工した構造物では、ASR による劣化がほとんど認められず、1986 年に通達された抑制対策が功を奏していることが確認された。

構造物の外から供給される塩化ナトリウムの ASR への影響については、実験を行って検討した。その結果、今回の実験の範囲ではナトリウムイオンの侵入は塩化物イオンの侵入より遅く、また、外部から供給されたナトリウムイオンのために ASR が生じた供試体はなかった。しかし、あらかじめ水酸化ナトリウムを混入して作製した供試体では、ひび割れ発生後に急速に膨張する場合もあり、注意が必要である。なお、道路橋の調査結果では、外部から供給されるアルカリ金属の影響で ASR による劣化が著しく促進されていると見られる事例はなかった。

骨材の試験については、海外では外部からアルカリ分を供給することで試験期間を短くできるモルタルバー法が提案されている。しかし、高濃度のアルカリ環境では反応生成物の膨張性状が変化すると報告もある。なお、2002 年に通達された「アルカリ骨材反応対策」では、モルタルバー法の試験結果を用いて ASR 対策とする場合に、促進モルタルバー法によって試験結果の妥当性を確認することとしている。しかし、それぞれの方法で異なる判定結果が得られる場合もあり、試験方法の統一が望まれる。

以上の検討結果をとりまとめると、ASR 抑制対策については、1986 年通達の「アルカリ骨材反応暫定対策」を改良した「アルカリ骨材反応対策」が 2002 年に通達されていることから、ただちに現状の対策を変更する必要性は小さいものと考えられる。また、構造物の周辺環境によっては、外部からナトリウムイオン等が供給されることにより ASR による劣化が顕在化または促進される可能性が指摘されているが、今回の既存構造物調査や実験の結果を見る限り、早期に著しい劣化を引き起こす要因になるとは考えにくい。ただし、コンクリート中へのナトリウムイオンの侵入や ASR への影響については、まだ十分に明確になっているとは言えず、今後も検討が必要である。

### 9. 2 ASR 劣化構造物の診断手法の提案

ASR で劣化した構造物の診断手法を確立するため、ASR により劣化した構造物の再調査や鉄筋破断メカニズムに関する検討、鉄筋破断が部材のせん断

耐荷力に与える影響に関する検討を行った。

過去に ASR による劣化が発見されていた構造物の再調査を行った結果、過去の調査から 10 年程度が経過しているにも関わらず、ほとんどの事例で劣化の進行は明確でなかった。すなわち、ASR によるコンクリート構造物の劣化は、時間とともに進行するとは限らず、補修を必要としないような軽微な損傷に留まる場合も多いと考えられる。

一方、ASR により著しく劣化した構造物には、数は少ないものの、コンクリート中の鉄筋が破断した事例もあることが確認されている。そこで、実験を行って検討したところ、せん断補強鉄筋の損傷を模した供試体では、せん断載荷時に有効に機能する鉄筋の本数が減少し、せん断耐荷力が低下することが確認された。破断の影響を評価する手法としては、Regan らの実験結果に基づき破断した鉄筋の負担応力の応力低下率を求める方法と、破断箇所から 20φ までの区間を無効として、検討面における有効なせん断補強鉄筋の本数を求める方法が提案されているが、そのいずれの方法でも、部材のせん断耐荷力をやや安全側に評価する結果となった。

この他、鉄筋破断が生じるメカニズムについて、鉄筋の節形状に着目した実験を行ったが、節形状の影響は明確にできなかった。

アルカリ骨材反応対応が生じた構造物の診断手法としては、当研究チームもその作成に協力した「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)」がある。現在、この維持管理要領(案)に従った補修・補強について、より詳細な技術的知見を補足する技術資料を、国土技術政策総合研究所などと協力して作成しているところであり、今回得られた知見を反映させる予定である。

#### 参考文献

- 1) 土木研究センター：「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」、1989
- 2) 国土交通省：「アルカリ骨材反応抑制対策について」(平成 14 年 8 月 1 日付記者発表)、<http://www.mlit.go.jp/>、2002.8
- 3) 建設省土木研究所、(社)セメント協会：「セメントのアルカリ量制御によるアルカリ骨材反応抑制手法に関する共同研究報告書」、共同研究報告書、第 25 号、1989.3
- 4) 例えば、羽瀧貴士ほか：「海洋環境下における反応性骨材含有コンクリートの膨張挙動に関する検討」、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.847-852、2005.6
- 5) 建設省土木研究所：「高炉スラグ微粉末による ASR 抑制に関する共同研究報告書」、土木研究所資料、第 2527 号、1987.12
- 6) 建設省土木研究所：「フライアッシュによる ASR 抑制に関する共同研究報告書」、土木研究所資料第 2653 号、1988.3
- 7) 鳥居和之：「骨材のアルカリシリカ反応性の品質保証」、コンクリート工学、Vol.39、No.5、pp.68-71、2001.5
- 8) 鳥居和之ほか：「促進養生試験による骨材のアルカリシリカ反応性の評価」コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.945-950、2004.6
- 9) 例えば、岩月英治ほか：「ASTM C1260 および JIS A5308 による ASR モルタルバーの膨張挙動と微細構造」、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.687-692、2002.6
- 10) 須藤絵美、竹村雅行、中田善久、笠井芳夫：「関東地区のレディーミクストコンクリート工場におけるアルカリ骨材反応抑制対策の実態調査」、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.117-122、2004.6
- 11) 河野広隆、古賀裕久：「道路橋に見るアルカリ骨材反応の実態」、土木技術資料、Vol.47、No.12、pp.66-71、2005.12
- 12) 古賀裕久、河野広隆：「骨材のアルカリ骨材反応に関する全国調査」、土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部門、pp.1-2、2004.9
- 13) 山口順一郎、渡辺博志、河野広隆、古賀裕久：「コンクリート中のナトリウムイオンの移動と ASR 膨張への影響」、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.5、pp.175-178、2005.10
- 14) 椎名貴快、渡辺博志、中村英佑：「外部から供給される NaCl のイオン浸透特性と ASR 膨張挙動」、第 26 回日本道路会議、14039、2005.10
- 15) 土木研究所：「各種外来イオンのコンクリート侵入特性および ASR 膨張挙動への影響に関する実験(浸漬 1 年目)」、土木研究所資料、第 3986 号、2005.10
- 16) 上田隆雄：「リチウムによるアルカリ骨材反応の膨張抑制に関する研究」、コンクリート工学、Vol.43、No.6、pp.51-56、2005.6
- 17) 山口順一郎、河野広隆、渡辺博志、古賀裕久：「アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の経時変化」コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.1861-1866、2005.6

- 18) 土木研究所：「アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の追跡調査」、土木研究所資料、第 3955 号、2005.2
- 19) 河野広隆、渡辺博志、山口順一郎：「アルカリ骨材反応劣化進行予測と維持管理の考え方」、土木技術資料、Vol.48、No.1、pp.54-59、2006.1
- 20) 眞野裕子、幸左賢二、松本茂、橋場盛：「曲げ加工部での鉄筋損傷メカニズムの検討」、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.963-968、2004.6
- 21) 土木学会：「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たなる対応－」、コンクリートライブラリーNo.124、2005.8
- 22) 国土交通省：「アルカリ骨材反応が生じた橋梁に対する対応について」（平成 15 年 3 月 19 日付記者発表）、<http://www.mlit.go.jp/>、2003.3