

【要約・第 I 編】2014 年版「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」報告書(2014. 7),  
(公益社団法人)日本コンクリート工学会, pp3-58.

## 第 I 編 ASR のリスクと制御

### 1 .ASR のリスクと制御・・・3

#### 1.1 ASR のリスク・・・3

ASR に関連するコンクリート構造物のリスクマネジメントについて概観する。

・ 構造物を含むシステムの (一般的) リスク管理

次の活動を回転させること

- (1) リスク管理の目標確率
- (2) リスク評価
- (3) リスク対応の実施
- (4) コミュニケーションと協議
- (5) 監視・再調査

・ ASR に特化したリスク

- a) 構造の崩壊
- b) 機能喪失
- c) その他特性への影響

骨材のアルカリ反応性は試験によって白黒と (※無害、有害の厳密な 2 区分には) 判定できない。例えば、モルタルバー試験によって、膨脹量 0.09%で「無害」、0.11%で「無害でない」と判定されるが、膨脹していることにはかわりがない。

前委員会報告書では、総プロ (1980 年代) の抑制対策以降の劣化事例について、数例の事例を提示するとどまったが、一部の事業者において試験法の判定の見直しがなされていることは、実構造物において、現行システム (反応性骨材の検出、抑制対策の実施) が適切でないことを裏付けている。

構造物における ASR の発生確率は、ある骨材が現行の試験をパスして構造物が ASR を生じる確率である。これらが定量的に議論されなければ ASR リスク対応をより良いものにするには出来ない。本研究委員会では現行の試験法の有効性と限界について、可能な限り定量的な議論が出来るように既往の研究事例を整理する必要がある。

#### 1.2 ASR へのリスク対応・・・7

##### 1) リスク回避

非反応性骨材の搬送による (コンクリート構造物建設の) コストアップ、および環境負荷  
・・・△

##### 2) リスクの最適化

起こりやすさを変え、リスクを低減させる・・・○

##### 3) リスク移転

一般に発生確率が低く、発生の影響度が大きいものに適用される (火災、地震、交通関係事故、

ガン他の疾病など)。保険は ASR には適用できない・・・×

4) リスクの保有

重大性の高い構造物（原発や鉄道橋、高層ビルや電波塔）にリスクを保有することは困難である。・・・×

ただし、ASR が発生しても問題のない非構造部材や第三者被害が想定されない部材では、リスクの保有は可能である。・・・△

1.2.1 新設構造物における制御と抑制・・・8

1.2.2 既設構造物におけるマネジメント・・・10

1.3 構造物の重要度と許容リスクレベル・・・10

表-1.3.1 部材の膨張に関連した構造物の脆弱性区分[6]（一部、執筆者の意識を含む）

Level	脆弱性 Vulnerability	例 Examples	影響度 Consequences
V1	無し Null	・膨張や劣化が構造物の耐久性、使用性、安全性に影響を及ぼさない非構造部材 Non structural elements whose expansion and deterioration has no consequences on the durability, the serviceability or the safety of the structure ・取替えが容易な部材 Easy to replace elements, etc.	構造物への影響はない Non consequences on the structure
V2	低 Low	・膨張や劣化が構造物の使用性、安全性に影響を及ぼさない構造部材もしくは非構造部材 Structural elements or non structural elements whose expansion an deterioration has no consequences on the safety or the serviceability of the structure	構造物の耐久性に影響 Consequences on the durability of the structure
V3	高 High	・膨張や劣化が構造物の使用性に及ぼす構造部材もしくは非構造部材 Structural elements or non structural elements whose expansion an deterioration affect the serviceability of the structure	構造物の使用性に影響 Consequences on the serviceability of the structure
V4	最高 Very high	・膨張や劣化が構造物の安全性に及ぼす構造部材もしくは非構造部材 Structural elements or non structural elements whose expansion an deterioration affect the safety of the structure	構造物の安全性に影響 Consequences on the safety of the structure

表-1.3.2 構造物における ASR が生じた場合の重大性区分[7] (一部, 執筆者の意識を含む)

Class	ASR の影響度 Consequences of ASR	ASR の受容性 Acceptability of ASR	例 Examples
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 Safety, economic or environmental consequences small or negligible	ASR によるいくらかの劣化は許容できる Some deterioration from ASR may be tolerated	・建物内の非構造部材 Non-load-bearing elements inside buildings ・仮設構造物(例えば, <5 年) Temporary structures (e.g.< 5years)
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 Some safety, economic or environmental consequences if major deterioration	中程度の ASR のリスクは許容できる Moderate risk of ASR is acceptable	・歩道, 縁石, 排水路 Sidewalks, curbs & gutters ・供用期間<40 年 Service-life < 40 years
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 Significant safety, economic or environmental consequences if minor damage	小規模の ASR のリスクは許容できる Minor risk of ASR acceptable	・舗装 Pavements ・カルバート Culverts ・高速道路のフェンス Highway barriers ・地方の小規模橋梁 Rural, low-volume bridge ・取替え費用が深刻な多くの PCa 部材 Large numbers of precast elements where economic costs of replacement are severe ・供用期間 40-75 年 Service-life normally 40 to 75 years
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 Serious safety, economic or environmental consequences if minor damage	ASR は許容できない ASR cannot be tolerated	・主要な橋梁 Major bridges ・トンネル Tunnels ・調査や補修が困難な部材 Critical elements that are very difficult to inspect or repair ・供用期間>75 年 Service-life > 75 years

今後の ASR 対策を考える上で、構造物の重要度に応じて、リスク低減を行い、それに見合ったコストをかけることが望ましいと考える。

構造物の維持管理においても、新設構造物と同様、構造解析や岩石学的診断を含め、高度な技術を有する技術者（集団）が実施しなければならない。

本研究委員会では「構造物の重要度」に応じた ASR 診断フローの枠組みを提案する。

## 2. ASR を考慮したコンクリート構造物の設計の展望・・・15

### 2.1 性能設計へのASR劣化の考慮・・・15

- ・維持管理区分 A（予防的維持管理）
- ・維持管理区分 B（事後維持管理）

ここでは、S3,S4 にあたる重要な構造物の性能と ASR 対応設計と維持管理について整理する。

### 2.2 ASR に配慮した設計および維持管理の概要と課題・・・16

#### 2.2.1 安全性（遮蔽性）を要求する構造物・・・16

- ・原子力関連施設等

#### 2.2.2 使用性（水密性、気密性等）を要求する構造物・・・16

・貯溜物に対する水密性、気密性が重要視される構造物～ダムや貯水槽などの水利構造物や資源エネルギー関連施設

#### 2.2.3 安全性（第三者影響度）および美観を要求する構造物・・・17

・利用者周辺の第三者の安全を脅かすことのない安全性が要求される構造物。高架構造物の下、路線交差部でのコンクリートのはく落が生じる可能性のある構造物。（※鉄道や道路のトンネル、ボックスカルバートも含まれる）

#### 2.2.4 使用性（使用状態の機能性、構造性能）を要求する構造物・・・18

・通常の使用状況下では ASR に伴う変位や変形によって利用に障害が現れることのない使用性が要求される構造物。例えば、門扉の開閉が必要な水門構造物、軌道の保持に必要な厳しいたわみ制限が要求される鉄道系上部構造物。これらは、①ひび割れの進展を制御できる配合設計、②点検やモニタリングにより必要に応じて行う補修等の維持管理対応、の双方が連動される肝要である。

#### 2.2.5 安全性（終局状態の構造性能）を要求する構造物・・・19

・終局状態で構造安全性が要求される構造物で、基礎を含めた柱部材などが相当する。ASR について必ずしも高い抑制レベルは必要とせず、①ASR を許容した設計、②維持管理区分 B、を連動させる維持管理方針が適用される。ただし、終局時には鉄筋の十分な引張り負担力が要求させるため、曲げ加工部や継手の初期欠陥について確認が必要である。

## 3. ASR による構造物の使用性低下の事例

### 3.1 交通障害の事例・・・21

### 3.2 機械設備への影響の事例・・・23

これまで海外のダムや閘門のコンクリート構造物が ASR 膨脹に伴う変形による使用性の低下に関する報告が多い。（表-3.2.1）

国内でも発電所タービン、発電機支持用コンクリート架台に ASR 膨脹に伴うひび割れや変形が生じた事例が報告されている。電力施設構造物とその付帯設備は比較的高温高湿環境で使用されるため、反応が促進し、変状が顕在化しやすい。

### 3.3 ASR による構造物の使用性低下に関する課題・・・26

ASR をどこまで抑制するかを明らかにするために、部材ではなく構造物としての使用性に着目した実験および解析などの研究が進むことが望ましい。

4. ASR が生じた構造物の性能評価の課題・・・27

ASR がコンクリートを一材料とする構造物を生じる事を踏まえると、鉄筋破断による構造物性能の低下や構造物の使用性に及ぼす影響についてもリスクとして正しく評価し対応を講じなければならぬ。

4.1 ASR 劣化した構造物に生じる不具合と構造要素との関連性・・・27

材料レベル、断面力レベル、部材レベル、構造物レベルでの影響について概説する。

4.1.1 材料レベルの力学的性質・・・28

ASR が生じると圧縮強度、引張り強度、ヤング係数などが低下する。ヤング係数の低下に比べ圧縮強度の低下はそれほど顕著でないことが知られている。

ASR が生じた構造物内部の鉄筋は、ASR 膨脹力によって初期応力的な力が作用し、外力作用時に、応力-ひずみ関係の原点がシフトしているものと考えられる。

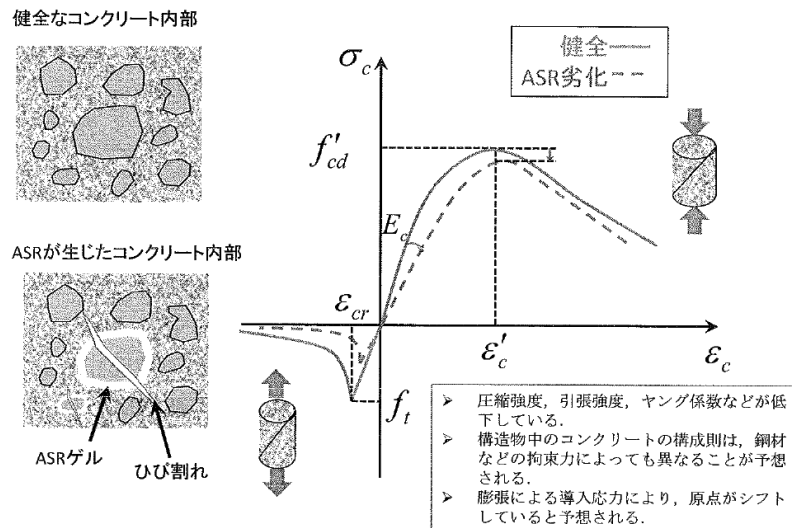


図-4.1.1 材料強度レベル（コンクリート）

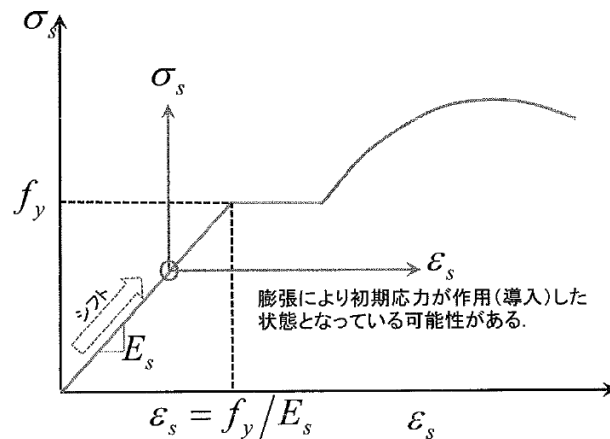


図-4.1.2 材料強度レベル（鉄筋）

4.1.2 断面力レベル・・・28

曲げを受ける RC 部材においては、設計上、圧縮力はコンクリートが、引張り力は鉄筋が負担し、コンクリートの引張り抵抗力は無視される。したがって、コンクリートと鉄筋の付着状態が健全であるという前提の下、コンクリートの圧縮強度がそれほど低下していない場合、終局状態における耐荷力はそれほど（外観から予想できるほどの）低下しないことが説明できる。

・安全性の照査法

- ① 釣り合い条件より得られた断面耐力(設計曲げ耐力)  $M_{ud}$
- ② 設計荷重条件より得られた最大断面力 (設計曲げモーメント)  $M_{d,max}$  (例えば  $Pl/4$ )
- ③  $\gamma_i \times M_d / M_{ud} < 1.0 \dots \text{OK}$

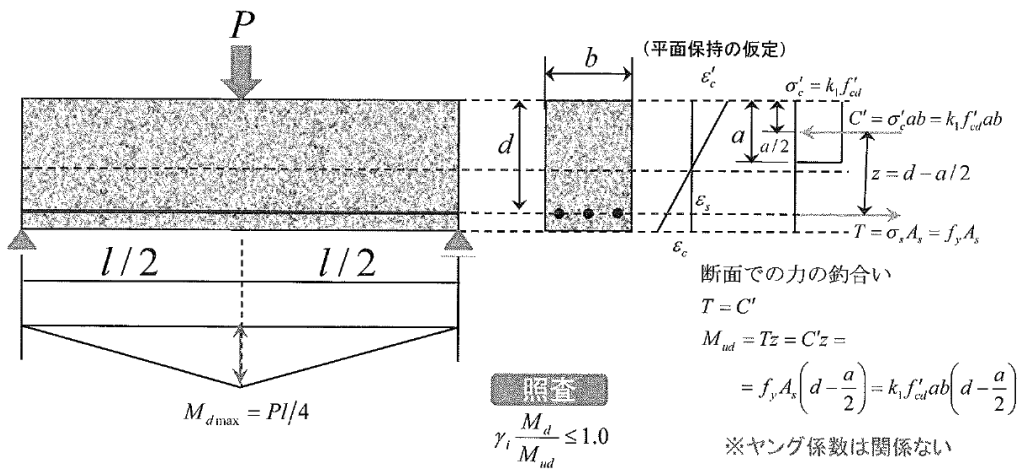


図-4.1.4 曲げを受ける RC 部材の耐力照査の概念図

※図中の記号は、コンクリート標準示方書に準じるものとする。

4.1.3 部材レベル・・・30

ひび割れによる有効断面二次モーメント (I) およびヤング係数 (Ec) の低下により、曲げ剛性 (EI) が小さくなり、たわみが大きくなることが予想される。また、ASR の膨脹により部材の局所的な変形も考えられる。

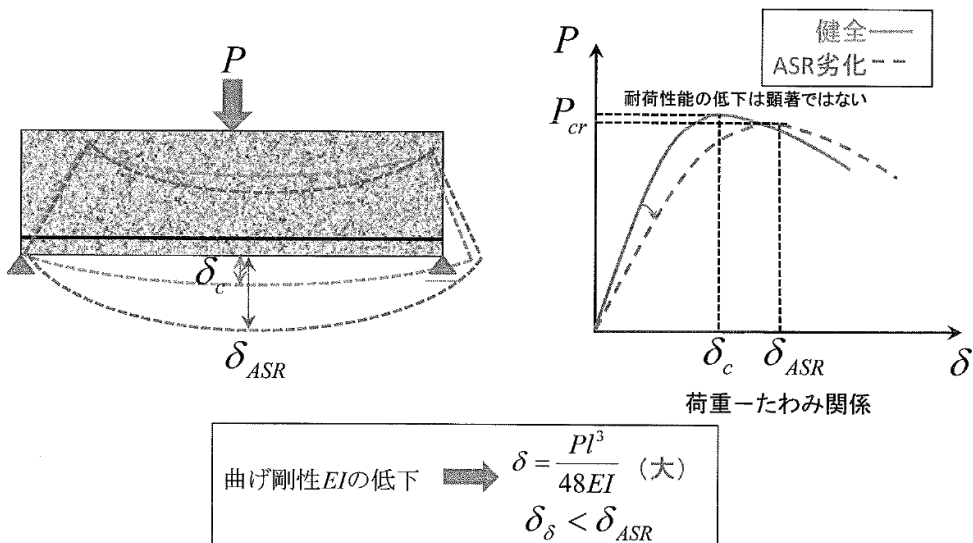


図-4.1.5 曲げを受ける RC 部材の変形挙動の概念図

さらにここで、コンクリートと鉄筋の付着状態が健全でない場合を考える。

- ・ RC ; 鉄筋は端部で曲げ加工（フック）があり部材の耐荷性能低下は顕著でない。
- ・ ポストテンション方式 PC ; 曲げ剛性の低下で部材の負反り（上に凸）が生じる場合がある。
- ・ プレテンション方式 PC ; プレストレスをコンクリートと PC 鋼より線の付着により導入しているため、定着長の変化、有効プレストレスの低下により、耐荷性能が低下し、甚大な影響を及ぼすことが考えられる。
- ・ せん断耐力については、スターラップの配置が鉛直方向の釣り合い条件を保持する働きがあるが、コンクリートと鉄筋の付着状態が十分でない場合は水平方向の釣り合いが取れていても、鉛直方向の釣り合いがとれず不安定な状態となり、定着部（隅角部）での破断や急激なせん断破壊が生じる可能性がある。

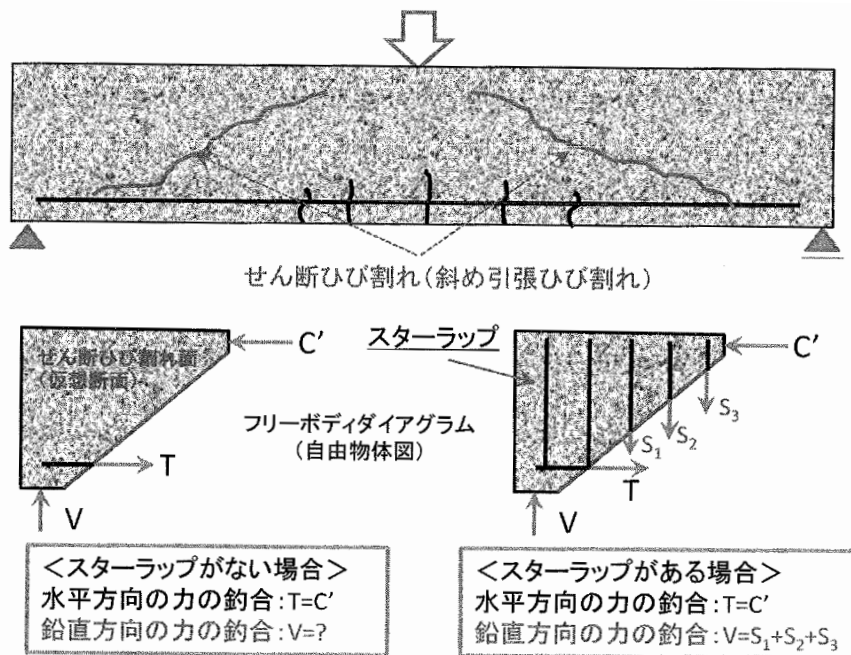


図-4.1.9 せん断ひび割れが生じた後のスターラップの役割

#### 4.1.4 構造物レベル・・・34

上記のような部材が構造物の一部として使用されているのであれば、荷重あるいは自重による大きなたわみや膨脹による部材変形の影響が、構造物レベルとして、使用性、安全性、すなわち要求性能に大きく影響を与えることが予想される。

ある橋梁では、長さの異なる2本の橋脚で支持された陸側・海側のジョイント部において、長い海側の橋脚が ASR による膨脹によってフィンガージョイント部に段差が生じ、通行車両に対してパンクなどが懸念されるなど使用性の低下が生じている。

以上に示したように、ASR 劣化に対して各スケールレベルにおける大まかな整理は可能であるが、現状として定量的な評価・整理は困難である。しかし、スケールレベルごとに定量的なリスク評価が可能となり、かつ、それらを構造系のリスク評価に「ブリッジ（リンク）」する方法（手法）を確立することができれば、コンクリート構造物設計、維持管理に対して ASR を「制御」することが可能となり、より合理的な設計、維持管理が期待できる。

## 4.2 鉄筋腐食の評価事例を参照した ASR の性能評価・・・35

各スケールレベルから構造全体系の ASR リスク評価の在り方（考え方）のひとつとして、鉄筋腐食を生じたコンクリート構造物の断面から構造系全体に至る構造性能に関する耐久性能（以下、構造・耐久性）を評価するための指標の例を紹介し、ASR 劣化構造物への導入可能性を示す。

### 4.2.1 鉄筋腐食を対象とした部材～構造全体系の構造・耐久性能評価の概要・・・35

今、次のような低下率や係数を考える。

- ・ある部材の任意断面の曲げ耐力の健全（初期）状態からの低下率  $\eta_{M(x_i,t)}$
- ・鉄筋腐食率による作用曲げモーメントを考慮した係数  $\alpha_{M(x_i,t)}$ ＝関数 ( $W_{corr}$ )

ここで鉄筋腐食率 ( $W_{corr}$ ) は、ASR を表現しうる係数に置きかえて使用できる

- ・せん断力についても同様に  $\eta_{V(x_i,t)}$  ,  $\alpha_{V(x_i,t)}$  を求める。

ここで、断面  $X_i$  の構造・耐久性能指数  $idj(x_i,t)$  は、各断面耐力のいずれかが大きく低下している場合、その断面の性能を決定付ける要因となる事から次式のように 4 個の低下率・係数の積で表現される。

$$idj(x_i,t) = (\eta_{M(x_i,t)} \cdot \alpha_{M(x_i,t)}) \cdot (\eta_{V(x_i,t)} \cdot \alpha_{V(x_i,t)})$$

以上のような断面を部材  $j$  において  $m$  個所選定し相乗平均をとると部材  $j$  の時刻 =  $t$  における構造・耐久性能指数  $idj(t)$  が算出される。

部材系から全体系に  $idj(t)$  を統合する際に、次の 2 係数を乗ずる。

- ・鉄筋定着部や部材の接合部といった構造細目の健全性に着目した係数  $\alpha_{A_j}$
- ・全体系における部材毎の荷重負担割合に着目した係数  $\alpha_{D_j}$

以上から、安全性に関する供用期間の任意の時点  $t$  における部材数  $n$  の構造全体系の構造・耐久性能指数  $ID(t)$  は次式で表される。

$$ID(t) = 1/n (\sum_{j=1,n} \alpha_{A_j} \cdot \alpha_{D_j} \cdot idj(t))$$

以上、鉄筋腐食劣化を対象とした構造・耐久性能指数の算出手法について、ASR 劣化への導入可能性を視野に入れながら紹介した。まだまだ議論の余地はあるが、劣化の分布を考慮して構造性能を評価し、断面あるいは部材への作用（応答）をあわせ考えた上で、構造系を評価しうる指標として、そのフレームは ASR 劣化への適用も期待される。

## 4.3 拘束条件とひび割れの発生形態・・・37

ASR が発生するコンクリートの劣化は、コンクリート内部の微視的なひび割れにはじまり、コンクリート表面で目視できる巨視的なひび割れに至る過程をとる。コンクリート内部の微視的なひび割れの発生に伴い、コンクリートの力学特性、特に劣化初期には弾性係数に影響が現れやすい。

無筋コンクリートや鋼材量の少ない部材や部位では、全体的な膨張に伴い亀甲状のひび割れが生じ、膨張量が大きい場合、ひび割れ幅が著しく大きくなる。

また、部位の一部が外部拘束を受けると大きな偏りのある変形を生むこともある。ダムや貯水槽にあっては水密性、水門、樋門や開門にあっては門扉の開閉等の使用性に影響する。

一方、橋脚や桁などの鉄筋コンクリート (RC) 部材では、通常十分な鋼材が配置されているため、主筋の配筋方向にひび割れが卓越する。



プレストレストコンクリート（PC）部材では、鋼材量としてのPC鋼材のほか、プレストレスによる圧縮応力が導入されているため、この鋼材軸かつ圧縮応力方向に卓越したひび割れが発生する。PC箱桁ウェブに生じた軸方向のASR膨張ひび割れの例を写真に示す。ただし、PC部材であっても定着部は軸方向に限らない複雑な応力状態になっているため、方向性のないひび割れが発生することもある。

ひび割れを表す指標として、ひび割れ延長だけでなく、ひび割れ延長にひび割れ幅を乗じたひび割れ面積を調査表面積で除した新たなひび割れ密度（ひび割れ延長距離×ひび割れ幅／調査表面積、 $m \cdot mm/m^2$ ）を利用する方法が提案されている。このひび割れ面積を用いたひび割れ密度と材齢（ASR膨張の進行）の関係の一例を図に示す。時間の経過に伴って増大するひび割れ幅の影響を反映してひび割れ密度が増加している。

構造物の構造面でのリスクを定量的に評価したい場合に、後述の構造の理論的解釈や数値構造解析が有用である。このとき、例えば有限要素解析でASR劣化した構造物の耐荷力等を算出するためには、入力情報として劣化したコンクリートや鋼材の力学特性および応力状態を与える必要がある。ASR劣化で特に重要視されるのは、膨張が生じたコンクリートの力学特性と膨張拘束の反力として鋼材に導入される引張ひずみ、およびこれらの分布である。

種々の鋼材拘束下でのASR膨張ひずみの実験結果を整理したものに、膨張エネルギー一定則で近似した膨張ひずみと拘束鋼材比の関係をあわせたものを図に示す。拘束鋼材量の増加に伴ってASR膨張ひずみが抑制される実験結果の傾向が、膨張エネルギー一定則を用いて表現できる様子がわかる。すなわち、任意の鋼材拘束下において、最終的に大きく膨張した場合に、コンクリートおよび鋼材に発生するひずみが推定できることになる。この結果を用いて、将来の構造物としてのリスクが、数値解析等の援用によって表現できる可能性があるといえる。

#### 4.4 今後の課題・・・40

今後の新設設計においては、前節に挙げた考え方を参考にしながら、少なくとも材料規定によって、構造性能の低下に対して合理的に対策を講じていきたい。材料規定によるASR対策は、設計と維持管理がリンクしたものであり、このデータの蓄積は、理想の設計体系に近づくために必要である。

FEM解析をはじめとするシミュレーションに不足しているのは、既設構造物から得られるデータである。海外では、既設構造物の事例をシミュレーションし、その妥当性を評価した事例も幾つか報告されている。設計と維持管理をより綿密に連携させ、設計および維持管理両方の改善を試みながら、材料～構造系に至る課題の解決が不可欠である。

5. 数値解析による性能評価の可能性・・・42

5.1 数値解析による ASR 劣化した構造物の力学挙動の評価・・・42

ASR劣化したコンクリートの材料レベルにおける力学性能や鉄筋との付着劣化を適切にモデル化するとともに、ASR膨張により構造物内部に生じた初期ひずみや初期応力を評価することができれば、ASR劣化した構造物の力学挙動を評価することができる。

しかし、現実にはASR劣化したコンクリートの力学特性や初期ひずみ、初期応力を推定することは必ずしも容易ではないため、ASR劣化した構造物の力学挙動を解析的に得られたとしても、その信頼性については十分に議論する必要があると考える。

5.2 数値解析による ASR 劣化の予測・・・47

海外においては骨材の反応やゲルの吸水膨張といった準微視的なスケールにおける現象を再現することにより、ASRにおいて特徴的な膨張挙動（拘束の影響など）やひび割れ性状、さらにはそれに伴うコンクリートの力学特性の変化を明らかにしようとする試みが精力的に行われている。一方、構造物の力学挙動までを包括した研究はあまり多くないのが現状である。

今後、海外で行われているようなASR劣化を材料レベルの挙動に着目する研究が発展し、将来にわたるASR膨張を予測することが可能となれば、前節で紹介したようにASR劣化構造物の力学挙動をより定量的に評価できるものとする。このことは、ASRを許容した構造設計を行う上で、重要なデータとなる。

6.今後の ASR のあるべき姿・・・57

図-6.1.1 に ASR 抑制対策の今後の方向性の概念を示す。

- ・短期的展望；現在の画一的な ON/OFF 型の材料規定→構造物のリスクに応じた材料規定
- ・長期的展望；最終的に ASR 制御設計を可能としていく。

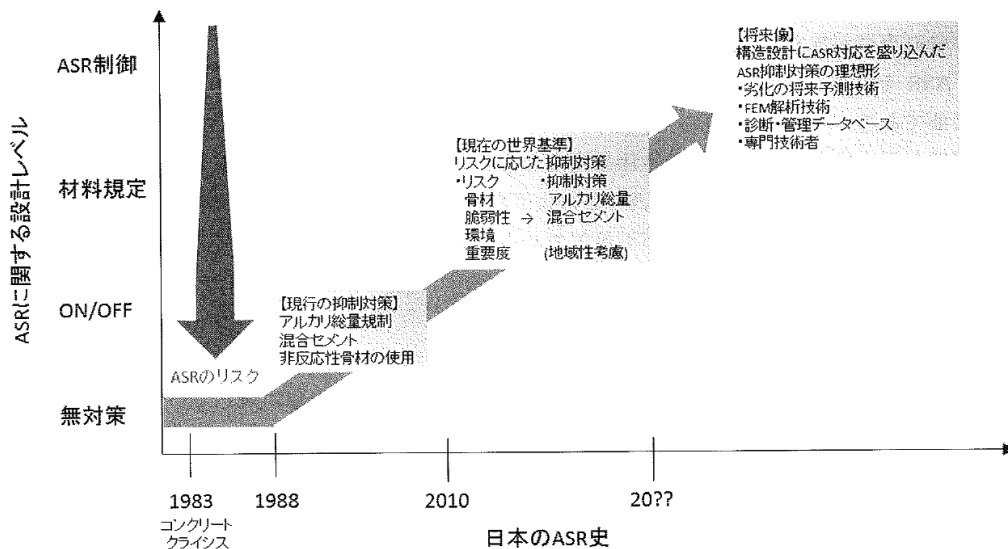


図-6.1.1 日本における ASR 対策の変遷と将来像

6.1 短期的展望・・・57

短期的には、RILEM などの検討結果を参考に、リスクに応じた抑制対策が可能になることが期待される。短期的な将来像をみると、実構造物の調査などをもって抑制対策を検証し、より合

理的な材料規定型を採用していくことが望ましい。このような材料規定型の抑制対策を高度化するためには、既設構造物や材料のデータ蓄積が不可欠である。また、既設構造物における的確な診断、また ASR が生じた構造物の性能低下を整理することが必要である。

## 6.2 中長期的展望・・・58

今後は ASR の抑制ではなく制御を目指さなくてはならない。ASR の制御のためには、材料・構造における相互作用を陽に取り入れた応答解析法が不可欠であり、材料から構造にわたってシームレスに設計できることが望ましい。このような、材料構造連成応答解析技術に関し、わが国の ASR 研究は特に遅れており、今後精力的に研究を進める必要がある。