

論文 ASR 劣化コンクリートの AE 発生挙動に基づく劣化評価手法

久保 善司^{*1}・山梨 竜揮^{*2}・森 寛晃^{*3}・佐藤 彰^{*4}

要旨：アルカリ骨材反応による過大な膨張を生じ、鉄筋の降伏・破断に至る著しく劣化したコンクリート構造物が報告されており、そのような場合も含めてアルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の維持管理手法の確立が急務とされている。本研究では、アルカリ骨材反応を生じた構造物について既往の評価手法を用いた劣化評価を行うとともに、対象構造物から採取したコンクリートコアの載荷時に発生する AE の発生挙動を計測し、両者の検討結果から AE 発生挙動に基づく劣化評価手法について検討した。

キーワード：ASR, AE 発生挙動, 非破壊検査, 劣化度評価

1. はじめに

アルカリ骨材反応(以下,ASRと略する)および鉄筋腐食は代表的な劣化原因として挙げられ、これらを含めた種々の劣化原因によるコンクリート構造物の早期劣化は、深刻な社会問題となっている。重要な社会資本であるコンクリート構造物の合理的な維持管理を行うことが必要不可欠な要求とされ、これらの劣化構造物に対する適切な維持管理手法の確立が急務とされている。近年では、ASRによる過大な膨張により、コンクリート強度の低下、コンクリートと鉄筋の付着低下、鉄筋の破断・降伏などを生じ、ASRにより著しく劣化したコンクリート構造物も報告されている¹⁾。

一方,ASR劣化構造物の診断・評価手法については、ASRを生じた構造物内部の劣化を弾性波法を用いて非破壊的に診断する手法²⁾、採取したコンクリートコアに炭素繊維シートによる横拘束を与え、載荷試験を行い、横拘束コンクリートの性状から ASR 劣化度を判定する手法³⁾など ASR 劣化構造物の評価・診断手法に関する検討がされている。また、AE法を用いた手法には、レートプロセス解析を用いた劣化評価手法⁴⁾や、圧縮時の AE 発生挙動に着目し AE イベントレートピーク時の荷重レベルと膨張量の関係に基づ

き劣化評価を行う手法⁵⁾などが検討されており、AE法の適用可能性が示唆されている。しかし、これらの検討においては、力学的な性能が十分に把握できない、あるいは検討対象が供試体であり、実構造物への適用の検討がなされないなどの課題も残されており、ASR劣化評価手法については十分に確立されていないのが現状である。

そのため、外観観察、超音波伝搬速度測定、採取コアの外観観察および強度試験をもとに、工学的判断によって定性的な劣化評価が行われているのが現状である。ASR劣化構造物の補修・補強設計をより合理的に行うためには、ASR劣化構造物の力学的性能の定量的な評価手法の確立が急務とされる。そこで、ASRを生じた実構造物において既往の評価手法による劣化度調査を実施するとともに、対象構造物から採取したコンクリートコアに AE 法を適用し、載荷時の AE 発生挙動の把握を行い、両者の検討結果から AE 発生挙動に基づく劣化評価手法について検討した。

2. 対象構造物および劣化度調査

対象構造物は積雪寒冷地域に位置する4橋台である。凍結防止剤が散布される橋台においては、路面排水の飛散および継ぎ手からの漏水によっ

*1 金沢大学 工学部土木建設工学科助手 博士(工学)(正会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻(正会員)

*3 太平洋セメント 中央研究所 工学修士(正会員)

*4 日本道路公団 金沢技術事務所技術指導課(非会員)

て、凍結防止剤を含む水分が供給され、それらの影響を受けた箇所劣化が顕著であることが報告されている¹⁾。いずれの橋台も凍結防止剤の影響を受けていた。また、橋台においては背面土砂からの水分の供給があることも特色として挙げられる。対象構造物の概要を表-1に示す。これらの構造物に対して既往の評価手法を用いて劣化度調査を行った。

2.1 劣化度調査の概要

(1) 外観観察

目視によりひび割れ、ゲルの滲出、コンクリートの変色などの外観観察を行った。また、ひび割れの発生程度に基づき外観上のひび割れグレーディングを行った。なお、グレーディングは、図-1に示す3段階評価とした。

(2) 採取コアの外観観察

橋台の上下線の縁切りがされている中分付近、路肩側およびその中間である中央部の下段位置より前面から背面部へと貫通コア（コア径55mm）を採取した（図-2参照）。採取したコアの破断箇所数を目視によって確認した。

(3) 超音波パルス伝播速度および圧縮強度

採取したコンクリートコアの超音波パルス伝播速度測定および圧縮強度試験を行った。

2.2 劣化度調査結果

(1) 外観観察

橋台前面部を中分付近、中央部、路肩側の3箇所に加えて、それぞれの上下段の計6箇所の領域に分けて外観観察を行った。外観観察結果を表-2にまとめて示す。外観観察からは、橋台Aの劣化状況は比較的軽微なものであり、橋台Cおよび橋台Dの劣化状況が比較的厳しい状況であった。また、いずれの構造物においても、上段側のひび割れが進展しているのが特徴として認められた。

(2) 採取コアの外観観察

採取したコアの破断箇所数の大小は内部のコン

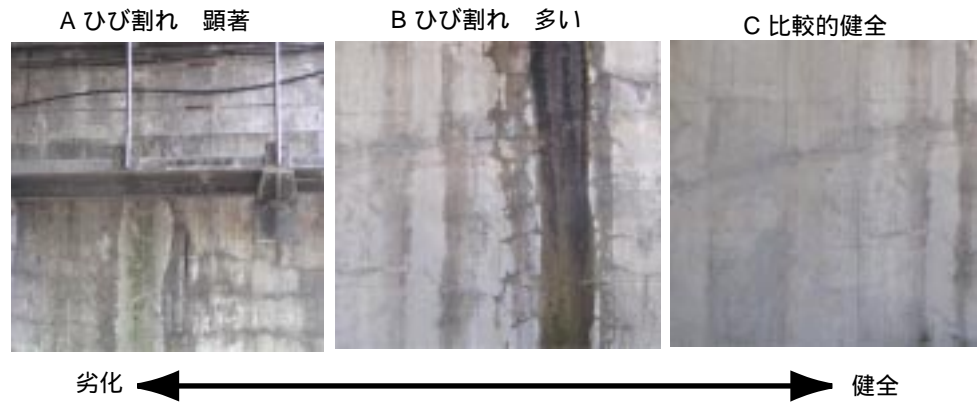


図-1 ひび割れグレーディング

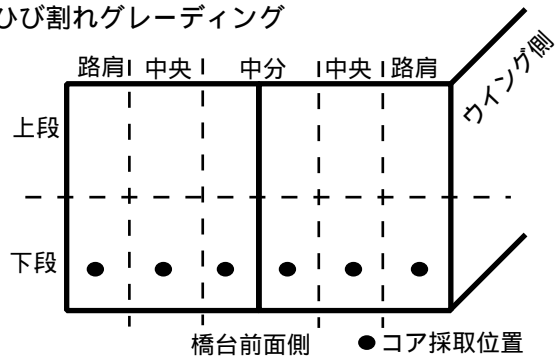


図-2 コア採取位置

表-1 供試体概要

供用期間	設計基準強度	粗骨材最大寸法	環境条件
28年	24N/mm ²	25mm	路面排水の漏水・背面土砂からの水分供給有り、凍結防止剤の影響有り

表-2 外観観察結果

橋台	位置	ひび割れグレード			ゲルの滲出	変色
		中分	中央	路肩		
A	上段	B	C	A	小	小
	下段	C	C	B		
B	上段	A	C	B	中	中
	下段	A	C	B		
C	上段	B	B	A	大	大
	下段	B	C	B		
D	上段	A	B	A	大	大
	下段	B	B	B		

クリートの劣化程度の指標となるものと考えられる。そこで、深さ方向に表面部、中央部および背面部のそれぞれに分け、各採取箇所のコアの単位長さ当たりの破断箇所数を求めた。採取コアの単位長さ当たりの破断箇所数を表-3に示す。外観観察によるひび割れ状況と破断箇所数には対応関係が認められ、比較的劣化が軽微であった橋台Aの破断箇所数は少なく、これに対してひび割れが顕著であった橋台CおよびDのものでは、破断数が多かった。採取箇所の影響に

については、中分および路肩側の破断箇所数が多く、深さ方向では、背面部の破断箇所数が多い結果となった。

採取位置のひび割れ状況とコアの破断箇所数は対応しており、本研究で対象とした橋台においては、外観

的な劣化状況と内部の劣化状況とは概ね対応しているものと考えられる。背面部での破断数が多くなった理由としては、背面土砂の水分の供給によってASRによる劣化が、中央部や表面部より進行していたものと考えられる。

(3)超音波パルス伝播速度および圧縮強度

各橋台の採取コアの圧縮強度と超音波パルス伝播速度の関係を図-3に示す。橋台Dのものは他のものより圧縮強度および超音波パルス伝播速度が小さい。橋台DにおいてはASR膨張による劣化が進行しているものと考えられる。他の橋台のものは、外観およびコアの破断数などからは、劣化程度が異なるものと判断されたが、圧縮強度および超音波パルス伝播速度においては、それらのばらつきの範囲内にあるため、劣化程度を判定することは困難であった。

圧縮強度および超音波パルス伝播速度については、実構造物より採取した場合、骨材の品質、施工の良否など種々の原因によるばらつきが存在することが知られている^{3),5)}。したがって、劣化が大きく進行している場合を除き、劣化がそれほど進行していない段階においては、劣化程度の判別は困難であったものと考えられる。また、同様の理由により、採取位置および深さに関する劣化程度の違いも圧縮強度および超音波パルス速度からは明確な違いが認められなかった。

(4)劣化度の評価

各橋台の外観観察、採取コアの破断数、超音波パルス伝播速度および圧縮強度試験の結果から、

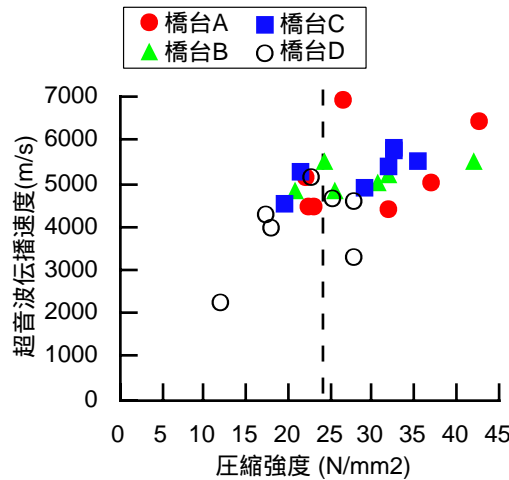


図-3 圧縮強度と超音波パルス伝播速度の関係

表-3 採取コアの破断箇所数

橋台	位置	表面部	中央部	背面部
A	中分	0.0	5.0	1.7
	中央	5.0	0.0	0.0
	路肩	0.0	0.0	5.0
B	中分	5.3	5.3	5.3
	中央	1.8	0.0	5.3
	路肩	1.7	3.4	5.2
C	中分	4.0	2.0	10.0
	中央	0.0	2.7	0.0
	路肩	6.4	2.1	8.5
D	中分	8.0	6.0	16.0
	中央	6.0	6.0	10.0
	路肩	10.0	12.0	14.0

*単位長さ当たりの破断箇所数を示す(本/m)

総合的に判断し、橋台Dの劣化程度が最も大きく、橋台Aおよび橋台Bの劣化は比較的軽微であるものと判断した。また、橋台Cについては両者の中間程度の劣化であるものと判断した。

3. ASR劣化構造物より採取したコンクリートコアへのAE法の適用

(1)ASR劣化コンクリートのAE発生挙動

ASRコンクリートの一軸圧縮下のAE発生挙動については、低い荷重レベルからAEが発生し、AE発生総数も健全なものより増加することが知られている。これらの現象を劣化評価に利用した手法として、レートプロセス理論を用いた方法やイベントレートピーク時の荷重レベルから劣化評価を行う方法などが検討されている。しかし、実構造物に劣化評価手法として適用する場合には、以下のような問題がある。採取されたコアには、マイクロクラック以外にも巨視的ひび割れが存在すること、実験室で促進された供試体とは異なり、劣化が局所化するなど、実構造物で劣化したコンクリートのAE発生挙動は、供試体のものと大きく異なることが予想される。本研究では、既往の研究を参考にして、実構造物で採取されたコアのAE発生挙動を明らかにし、劣化評価手法への適用性について検討することとした。

(2)AE計測方法

AEセンサは、共振周波数150kHzの圧電型センサを使用し、シリコングリスをカップラントして供試体に密着させた。AEセンサにより検出し

た信号は、プリアンプ（PAC社製）で40dBの増幅を行い、AE計測器（PAC社製 MISTRAS）により収録した。計測時のしきい値を45dBに設定した。AE計測システムを図-4に示す。圧縮時の載荷速度は、毎秒500N程度の荷重増加とした。

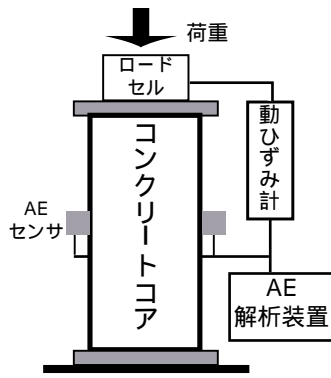


図-4 計測システム

イベントレートおよび総AE発生数を求める際には、計測したAEの中から以下のようなAEを除去した。計測したAEの中でエネルギーが0となるものについては、電気ノイズと考えられるものであったため、データの中から取り除くこととした。さらに、平均周波数が40kHz以下のものも除去した。

実構造物により採取したコンクリートコアにおいては、巨視的なひび割れが存在し、その周辺からはマイクロクラックからの引張型破壊のAEのみでなく、ひび割れ面のずれ変形に伴うせん断型破壊のAEが発生する。既往の研究においては、平均周波数が40kHz以下ではせん断型破壊から生じるAEが卓越するとされる⁶⁾。巨視的なひび割れは、ASR膨張によって引き起こされているものの、これらはコンクリート強度や品質の低い部分で局部的に生じたひび割れであり、その箇所での本来のASR膨張による劣化程度と対応していないものと考えられる。したがって、本質的なASR膨張による劣化進行は、マイクロクラックからの引張型破壊によって把握できるものと考え、平均周波数が40kHz以上のAEのみを考察の対象とした。

(3)AE発生挙動に基づくASR劣化評価指標

AE発生挙動からASR劣化評価を行う方法の一つとして、イベントレートピーク時の荷重レベルを劣化指標とする方法が提案されている⁵⁾。レートプロセス解析を利用することも考えられるが、実構造物においては、巨視的なひび割れの影響やコンクリートの品質のばらつきも存在するため、現象論的な観点から劣化評価を試みる

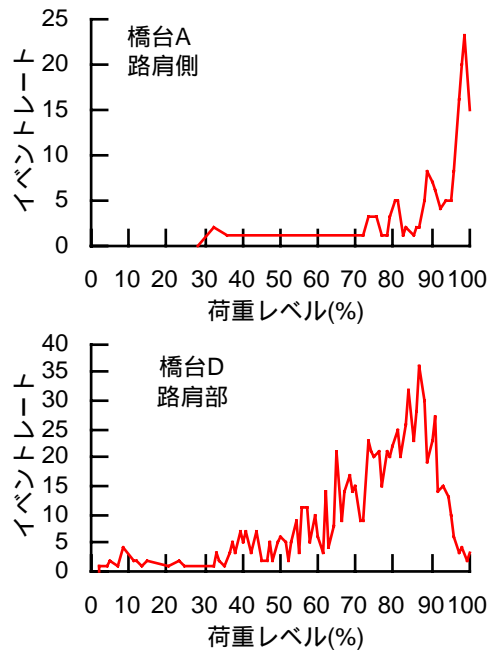


図-5 荷重レベルとイベントレートの関係

こととし、イベントレートピーク時の荷重レベルによる評価手法を適用した。既往の研究⁵⁾と同様に最大荷重を100%として載荷時の荷重レベルを定義した。イベントレートは単位時間におけるAE発生数である。載荷速度を一定として行ったことを考慮して、本研究においては、荷重レベルが1%増加する間に発生した荷重レベル1%区間のイベント数をイベントレートとして算出し、ピーク時の荷重レベルを求めた。既往の研究によればイベントレートピーク時の荷重レベルが低いものほど、ASR膨張量が大きいとされている。本研究においては、イベントレートピーク時の荷重レベルを劣化指標とし、その有効性について検討を行うこととした。

(4)AE法によるASR劣化評価の適用性

圧縮載荷時の荷重レベルとイベントレートの関係を図-5に示す。劣化度調査によって比較的健全であると判断された橋台Aおよび劣化が進行していると判断された橋台Dのものを一例として示した。橋台Aのものでは、荷重レベルの低い段階のイベントレートは小さく、荷重レベル80%付近からイベントレートが増大し、最大荷重付近でピークに達した。これに対して、劣化が進行していると判断された橋台Dのものでは、低い荷重レベルからイベントレートが増大し、最大荷重より小さい荷重レベルでピークに達した。

これらのAE発生挙動は、既往の研究⁵⁾における結果と一致しており、実構造物における劣化指標としての可能性を示唆するものと考えられる。

劣化指標としての有効性を検討するために、橋台前面からの採取位置(中分、中央部、背面部)および採取深さの異なるコンクリートコアについて求めたイベントレートピーク時の荷重レベルについて考察することとした。

対象とした構造物の外観観察および採取コアの破断数から、中央部よりも路肩あるいは中分における劣化の進行が大きいものと判断され、また、橋台前面からの深さ方向に関しては、背面側の劣化が進行してものと判断された。すなわち、同一橋台内においても採取位置によって劣化度が異なる。各橋台のコンクリートコアの採取位置(採取箇所および採取深さ)におけるイベントレートピーク時の荷重レベルを図-6に示す。

採取箇所による劣化程度の違いについてはいずれの橋台においても、イベントレートピーク時の荷重レベルからは明らかとならなかった。この理由として、同一箇所においても劣化程度のばらつきが存在したためと考えられる。外観上のひび割れ程度は、採取箇所で顕著に異なり、軽微とされる部分から採取した場合にも、局所的に劣化が大きい場合もある。また、かぶり部においては軽微とされる箇所にもひび割れ幅の大きなコアサンプルも存在するため、その影響が顕著に現れたものと考えられる。さらには、コンクリートの品質のばらつきもこれに加わるため、採取箇所による劣化程度の違いが明らかに

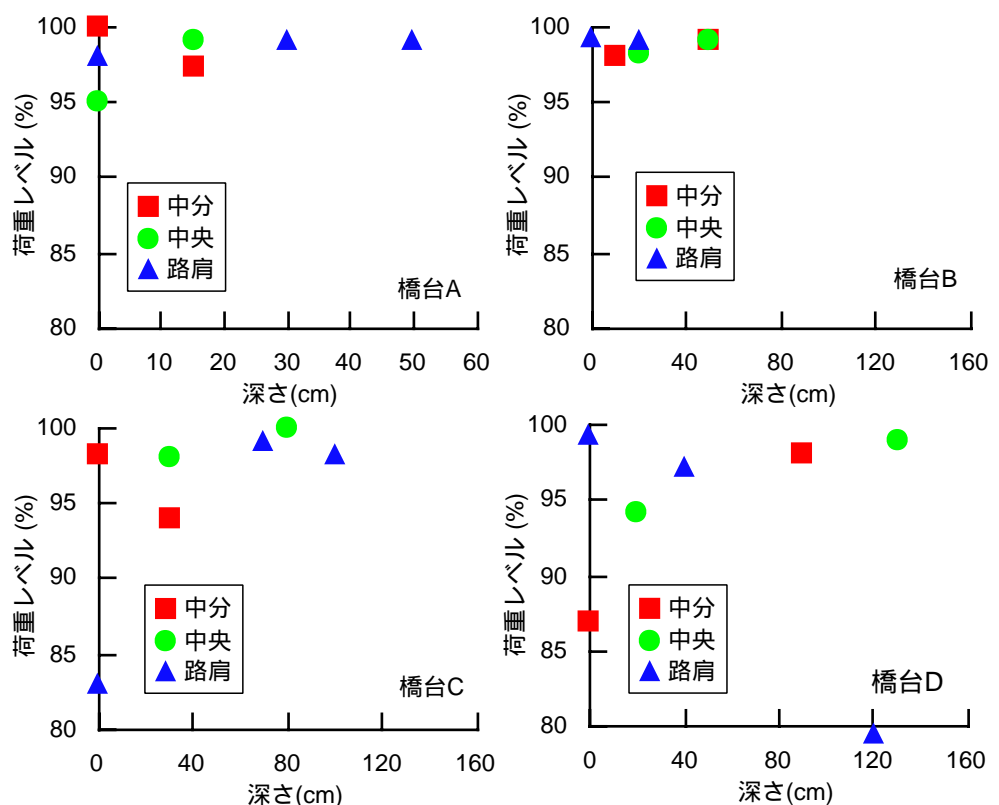


図-6 採取位置と荷重レベルの関係

ならなかったものと考えられる。圧縮強度、超音波パルス伝播速度においても同様の傾向が認められた。

採取深さの影響については、比較的健全であると判断された橋台 A および B に比べて劣化が進行していると判断された橋台 C および D においては、表面部および背面部において荷重レベルの低いものがあり、低下の程度も劣化の程度と対応していた。同一箇所内でのばらつきを考慮すれば、イベントレートピーク時の荷重レベルにより深さ方向の劣化程度は把握が可能であるものと考えられる。

以上の結果から、供試体を用いた既往の研究に比べ、実構造物においては、劣化進行程度、コンクリートの品質などのばらつきの影響が大きく、これらの影響を考慮し、劣化評価を行うことがきわめて重要であると考えられる。また、評価を行う際のサンプル数もばらつきを考慮できるように確保する必要があるものと考えられる。

本研究においても、サンプル数には限りがあるため、サンプル数については今後の検討が必要であるが、上記のばらつきを考慮するために、

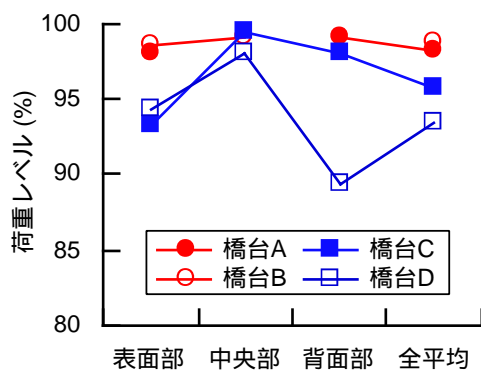


図-7 各橋台の劣化度評価

劣化指標であるイベントレートピーク時の荷重レベルの平均値を以下のように求めることとした。橋台構造物は表面部においては、路面排水の漏水等により、水分の供給が大きくなるとともに、凍結防止剤の影響を受ける。また、背面部においては、背面土砂からの常時背面土砂からの水分の供給を受けている。これらの橋台構造物の劣化の特性を踏まえて、橋台前面から深さ方向に、表面部、中央部、背面部と大きく分類し、各深さにおけるイベントレートピーク時の荷重レベルの平均値および各橋台の全てのデータの平均値（全平均）を求めた。

上記の方法で求めた各橋台のイベントレートピーク時の荷重レベルを図-7に示す。深さ方向については、全ての橋台において、中央部の荷重レベルが大きく、表面部および背面部の劣化が進行しているものと判断される。また、表面部および背面部においては、劣化の進行が大きいと判断されるものほど、荷重レベルが小さく、劣化進行程度の指標としての有効性が示唆される。また、全平均の荷重レベルも劣化程度と対応しており、圧縮強度および超音波パルス速度などの場合には、劣化進行が他のものより大きな橋台Dの劣化程度を把握できるに過ぎなかったのに対して、劣化指標として荷重レベルを用いた場合には、各橋台の劣化程度の違いが適切に現れていた。したがって、荷重レベルを用いて劣化評価を行う場合には、構造物の劣化の特性を踏まえ、構造物そのものが持つ劣化のばらつきやコンクリートの品質のばらつきなどを考慮し、適切なサンプル数を設定すれば、現状よりも詳細な劣化グレーディングが可能となり、有用な

劣化評価手法となるものと考えられる。ただし、本手法については、AEの計測条件を始めとし、今後の検討すべき点も残されており、劣化評価の信頼性および精度の向上に向けてさらなる検討が必要であろう。

5. まとめ

(1)実構造物においては、同一構造物内、さらには、同一箇所においても劣化進行の程度にばらつきが存在し、加えてコンクリートの品質のばらつきも存在するため、これらのばらつきを考慮し、劣化評価を行う必要がある。

(2)イベントレートピーク時の荷重レベルは、構造物の特性を踏まえ、ばらつきを考慮して適切に用いるならば、より詳細な劣化グレーディングが可能であり、劣化評価に有用である。

参考文献

- 1) 久保ほか：アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術，コンクリート工学，Vol.40，No.6，pp.3-8，2002.6
- 2) 葛目ほか：アルカリ骨材反応を生じた構造物に適用する非破壊検査，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文集，Vol.2，pp.171-178，2002.10
- 3) 山梨ほか：アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物の劣化評価手法に関する研究，コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集，pp.21-26，2002.12
- 4) 油野ほか：AE発生挙動の確率過程論解析によるコンクリートの劣化度評価研究，土木学会論文集，No.520，V-28，pp.13-23，1995.8
- 5) 久保ほか：ASRコンクリートの力学的特性と劣化度評価について，コンクリート工学年次論文報告集，Vo.25，No.1，pp.1799-1804，2003.7
- 6) 内田ほか：AE法によるコンクリート構造物のひびわれ評価技術，AE法によるコンクリート構造物のひびわれ評価技術，第12回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp.77-82，1999.11