論文 AE-SiGMA 解析における AE 波初動部自動読み取り法の提案

沢田 陽佑*1・大野 健太郎*2・下薗 晋一郎*3・大津 政康*4

要旨:非破壊検査手法の一つであるアコースティック・エミッション(AE)法の理論を基にして開発された SiGMA 解析によって、コンクリート内部の破壊進行状況を把握することが可能である。しかし、現行の SiGMA 解析では AE 波初動部の読み取りは目視によって行われており、多数の AE 波形から初動部を容易かつ定量的 に抽出する方法が求められている。本研究では、AE 波初動部の自動読み取り法を開発し、その有効性につい て検討を行った。また、目視による SiGMA 解析結果と提案手法の結果を比較することで、提案手法の有効性 が確認された。さらに、Post-analysis を実施した結果、初動部自動読み取り法の信頼性が確認できた。 キーワード:アコースティック・エミッション、SiGMA 解析、赤池情報量基準(AIC)、RC 梁、Post-analysis

1. はじめに

コンクリート構造物は社会的基礎構造物として我々 の生活に必要不可欠なものである。しかし,近年,その 維持管理が重要視されており,構造物の劣化や損傷度を 評価するための健全性診断や,またそのための非破壊検 査技術が求められている。現在,様々な非破壊検査技術 が開発されているが,その中でもアコースティック・エ ミッション (AE) 法は微細レベルでの破壊現象に対して 高い検出能力を有する計測技術であり,微小欠陥の検知 に優れていることから注目を集めている。

AEとは、「固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれ と同様なエネルギー開放過程によって発生する弾性波 動現象」であると定義されており¹⁾、検出される AE 信 号からその発生源の位置標定や破壊領域の推定が行わ れている^{2)、3)}。さらに、AE の波形理論は Generalized Theory of Acoustic Emission として確立されており⁴⁾、そ の理論に基づいた AE 波形の逆解析手法 SiGMA

(Simplified Green's functions for Moment tensor Analysis) が開発されている⁵⁾。また,SiGMA 解析結果を三次元空 間上で視覚的に把握するために,VRML を用いた手法も 報告されており⁶⁾,コンクリートの破壊進行状況を AE 源の集積過程として視覚的に把握することができる。こ のように SiGMA 解析により,コンクリート内部で発生 した AE 波を逆解析することで定量的な破壊機構解明へ と適用できる。

しかし,現行の SiGMA 解析では,AE 波の到達時間と 初動振幅値を目視により確認し,抽出する作業が必要と され,莫大な数の波形を扱って解析するには,多くの時 間と労力を必要としている。また,これら二つのパラメ ータは解析する人間の主観に左右される可能性を含ん でいることから,定量的な AE 波初動部の抽出方法が求められている。

本研究では,鉄筋コンクリート (RC) 梁の4点曲げ載 荷試験時に AE 計測を行い,せん断破壊に伴い発生する AE 信号を記録し,AE 波初動部の定量的抽出法⁷⁷を考察 した。信号到達時間の抽出法の精度検証として,従来の しきい値検出による AE 源の位置標定結果と比較し,本 手法の有効性の確認を行った。また,従来の手作業によ り読み取った AE 波初動部を用いて SiGMA 解析を行っ た結果⁸と新しく提案された自動読み取り手法の解析結 果とを比較検討した。さらに,SiGMA 解析結果に対する 信頼性の評価を行うために Post-analysis を実施し,提案 手法の有効性について検討した。

2. 実験概要

実験に使用した供試体の概要とコンクリート配合お よびコンクリートの力学的特性を表-1,表-2,図-1 に示す。また,使用した鉄筋はφ10mm,φ13mmの異形鉄 筋であり,降伏点応力は295N/mm²である。本実験では, 供試体に確実にせん断破壊を発生させるため,せん断ス パン有効高さ比 a/d=1.97 の RC 梁供試体を作製した。ま た,せん断スパンの一方には100mm 間隔でせん断補強 鉄筋(スターラップ,φ5mm)を5本設置し,もう一方 にはせん断補強筋を設置しなかった。載荷試験は,支点 間距離1800mm,載荷点間距離1000mmで実施した。載 荷試験と同時にせん断補強鉄筋を有しないせん断スパ ン内で集中的に AE 計測を行い,供試体の破壊に伴い AE 計測を終了した。AE 計測には DiSP (PAC 社製)を 使用し,周波数帯域は10kHz~2MHz とした。また,AE センサは R15 (共振周波数:150kHz)を用いた。SiGMA

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (正会員) *2 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻 (正会員) *3 日本工営(株) 社会システム事業部インフラマネジメント部 (非会員) *4 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)



Д

500



圧縮強度	引張強度	ポマットチ	弾性係数	P波速度
N/mm^2	N/mm^2	ホノノンロ	Gpa	m/sec
29.7	3.03	0.2	28.2	4230



図-2 AE センサ設置概要図

て次式を解くことによって得られる。

 $R_i - R_{i+1} = |x_i - x'| - |x_{i+1} - x'| = v_p t_i$ ⁽²⁾

これにより,AE発生源を求め,次に各検出点で観測されたP2を式(1)の左辺A(x)に代入することで,モーメントテンソルの成分を決定する。このモーメントテンソルの固有値解析を行って,クラックのせん断寄与率からクラックの種類を,固有ベクトルから運動方向を決定できる⁹。

(2) Post-analysis

77

150

単位:mm

SiGMA 解析結果を直接確認し、その信頼性を検討する ことは通常不可能と考えられる。そこで、Post-analysis と呼ばれる後処理解析を用いることで、SiGMA 解析結果 から信頼性のある解を抽出する¹⁰⁾。

Post-analysis は、SiGMA 解析結果をもとに、マイクロ クラックの幾何学的諸量を仮定し、理論的に求めた理論 波形に SiGMA 解析を適用することで、得られた結果と 元の SiGMA 解析結果を比較し、信頼性を検討する手法 である。今回の Post-analysis における信頼性の評価基準 は、マイクロクラックの位置標定誤差 5mm 以内、せん 断寄与率誤差 10%以内とした。また、理論波形は、SiGMA 解析で決定された AE 発生源とモーメントテンソル成分 を用いることで得られる。

図-1 RC 梁概要図

2000

500

j

解析を行うためには6個以上のAEセンサが必要であり, 本実験では,図-2に示すとおり供試体の片側のせん断 スパン部に8個のAEセンサを取り付けた。AEセンサに よって検出された信号はプリアンプによって40dB増幅 した後,さらにメインアンプにて20dB増幅させて記録 した。DiSPでは、メインアンプ出力のセンサ出力比が 42dB以上となったところでトリガを機能させ、サンプリ ング周波数1MHzで信号波形をA/D変換し、1波形を 1024wordsのデータとして記録した。

3. 解析理論

₽<u>100 | 100 |</u>

100

3.1 AE 波形解析

(1) SiGMA 解析

弾性体内で発生したAEが,弾性体の境界面上に設置されたセンサによって検出されるとき,到達するAE波の初動振幅値*A(x)*は次式によって表される⁴⁾。

$$A(x) = C_s \frac{1}{R} \operatorname{Ref}(t, \gamma) \gamma_p \gamma_q m_{pq}(x') \cdot DA$$
(1)

ここで、*C*_sはセンサ感度も含めた物性値の係数、*R*はひ び割れ発生点x'から検出点xへの距離であり、*Y*_p、*Y*_qは その方向余弦を意味する。Ref(*t*,*y*)は、センサ設置点での 反射を考慮するための検出点への入射角を考慮した反 射係数である。また、*m*_{pq}はAE波の発生源となったひび 割れの種類や運動方向に関する情報を持ったモーメン トテンソルである。またモーメントテンソル*m*_{pq}は、2階 の対称テンソルであることから、式(1)を解き独立な6個 の成分を決定するためには少なくとも6箇所の検出点が 必要となる。

SiGMA解析では、図-3に示す2つのパラメータ(P1: AE波の到達時間, P2: AE波の初動振幅値)を用いて, AE 源の位置, クラックの種類や運動方向を決定する。AE 源x'の位置標定は各検出点x_iでのAE波の到達時間(P1) の差t_iと弾性波速度v_n,検出点間距離R_i(i=1~n-1)を用い

3.2 AE 波形初動部検出

実際に観測される AE 波形には多くの場合雑音(ノイズ)成分を多く含んでおり,目的の信号のみを取り出すためには雑音成分と信号成分の性質を知ることが必要である。地震学の分野では,地震波形は自己回帰(Autoregressive, AR)過程として局所的に定常な区間に分けることができ,信号到達の前後で2つの異なる定常状態を示すとされている¹¹⁾。例えば,特徴的な雑音は低い次数の AR モデルで精度よく表されるのに対し,地震波本体は段階的に高い次数の AR モデルが必要とされる。ここで,AR モデルの適合性判断として赤池情報量基準(Akaike Information Criterion, AIC)が用いられている。

AIC とは、AR モデルが実際のデータをどれだけよく表 現しているかを判断する基準であり、AIC を最小にする モデルがデータを最も良く表現していると判断する¹²⁾。 Sleeman らは、まず AR モデルの次数を固定し、そのモ デルでの AIC を算出して後に、AIC が最小となる点を信 号 到 達 時 間 と し た¹¹⁾。 こ の 方 法 は AR-AIC (Autoregressive-Akaike Information Criterion) 法として知 られている。ただし、この手法では、検出された波形振 幅値を歪める恐れがあるため、初動振幅値を必要とする モーメントテンソル解析には不向きである。一方、前田 ¹³⁾は、AR モデルを使用することなく、検出波形に直接 AIC を適用し、AIC が最小値を示す点を信号到達時間と している。この手法は検出波形を歪めることなく初動部 が検出できる有効な手段である。

以上のことから、本研究では、1 つの AE 波形をある 点 kにおいて区分し、N 個のサンプル数を持つ波形振幅 値 X_i の i=k 点での AIC 値を次式により求めた。



+ $(N-k) \cdot \log \{ \operatorname{var}(X[k,N]) \}$

(3)

ここで、var(X[1,k])は波形振幅値 X_l から X_k の分散であり、var(X[k,N])は波形振幅値 X_k から X_n の分散を表している。そして、AICが最小のときをAE波の信号到達時間とした。 図ー4に実験で記録された波形と式(3)を適用して得られたAIC値を示す。この図より、信号到達時間はAICが最小値を示すk=252の直前であることがわかる。そこで、本研究では、式(3)を用いて以下のような式で到達時間P1の読み取り(AIC-picker)を行った。

 $P1 = T_k \left\{ Min(AIC(k)) \right\} - \Delta T$

ここで, T_k { } は, AIC が最小値を示すi=kでの時間を示し, ΔT とはサンプリング間隔であり,本研究では1 μ sを表す。

(4)

4. 解析結果

4.1 SiGMA 解析への初動部自動検出の適用

式(4)の信頼性を検討するために,実験により得られた AE 波形からランダムに抽出した 88 個の AE 波形(11 イ ベント×8 波形)に式(4)を適用し,CRT 上から目視 (wave-monitor)で読み取った信号到達時間と比較した ものを図-5 に示す。図より,両者の信号到達時間の読 み取りには大きな差は認められず(相関係数 0.9947), 式(4)により精度良よく読み取られていることがわかる。

ここで,実験により,得られた AE 信号から AE 源の3 次元位置標定を行った結果を示す。図-6 は DiSP に装備 されたしきい値基準による位置標定結果を表しており, 図-7 は式(4)による初動値から3 次元的に解析した位置 標定結果を示している。なお,図-6 は供試体に設置し た8 個の AE センサのうち,6 個以上で AE 信号を観測し





図-5 信号到達時間の比較

たものを1イベントとし、リアルタイムで位置標定が行われた結果である。一方、図-7は1CH~5CHを使用し、 供試体右側半分から発生するAEのみを対象とするため、 P波速度との関係よりイベント定義時間EDT(Event Definition Time)を250µs以内にAE波形を記録したもの を1イベントとしている。両図中の黒線は供試体表面に 最終的に形成されたひび割れを表している。これらの図 より、しきい値による位置標定結果は供試体裏面(4CH、 5CH側)付近にAE源が集中し、かつひび割れとはあま り対応していない箇所にAE源が位置標定されているこ とがわかる。一方、図-7では、ほとんどのAE源はひ び割れに沿って位置標定されており、供試体断面にAE 源が一様に広がっていることがわかる。また、AE イベ ントの個数は図-6では1213個であり、図-7では1004

個の AE イベントが供試体に位置標定され, AE イベント

の個数の違いはほとんどないことがわかった。

以上のことから,式(4)による信号到達時間読み取りが しきい値読み取りに比べ高い精度で行えることが明ら かとなり,SiGMA 解析の信号到達時間 P1 に適用するこ ととした。また,初動振幅値 P2 の読み取りについては, 次式の条件を最初に満たす振幅値を読み取ることとし た。

 $P2(I) = X(I) \cdot \{X(I+1) - X(I)\} \le 0$

$$I = k + 1, k + 2, \cdots, N$$
(5)

4.2 自動読み取りによる SiGMA 解析結果と目視による SiGMA 解析結果の比較

実験により得られた AE ヒット数と載荷荷重の時間的 変化を図-8 に示す⁸。図より,載荷荷重の増大に伴い, 3 つの特徴的な発生頻度パターンが存在することが分か り,これらを図に示すように Stage1, Stage2, Stage3 と した。ここで,図-9 に供試体表面に最終的に形成され たひび割れの概要図を示す。Stage1 の段階では,供試体









	Tensile	Mixed	Shear	Total
Stage1	4	1	1	6
Stage2	60	70	161	291
Stage3	46	28	74	148
Total	110 (24.7)	99 (22.2)	236 (53.0)	445

()内は総数に対する%を示す



図-7 自動読み取りによる位置標定結果



図-9 破壊時の RC 梁図

表-4 自動読み取りによるイベント数

	Tensile	Mixed	Shear	Total
Stage1	3	1	0	4
Stage2	50	62	147	259
Stage3	35	19	53	107
Total	88 (23.8)	82 (22.2)	200 (54.0)	370

()内は総数に対する%を示す









動読み取りによる SiGMA 解析結果 (e) 目視読み取りによる SiGMA 解析結果 図-10 SiGMA 解析結果

表-5 Post-analysis により抽出された AE 事象の個数(自動)

	Tensile	Mixed	Shear	Total
Stage1	0	0	0	0
Stage2	8	19	57	84
Stage3	11	5	18	34
Total	19 (16.1)	24 (20.1)	75 (63.6)	118

()内は総数に対する%を示す



図-11 Post-analysis 解析結果(自動)

表面にひび割れは確認されておらず, Stage2 の段階で供 試体中央付近の曲げスパン内底部に多くの曲げひび割 れを確認した。なお,この時点で AE 計測を対象として いるせん断スパン部にはせん断ひび割れは認められな かった。最終段階の Stage3 の時期に,せん断スパン中央 部からひび割れが入り,それらが供試体上面底面を繋ぐ ように一気に進展し,供試体は破壊した。

表-3に検出波形から wave-monitor により初動部を読 み取り SiGMA 解析を行った結果を示す⁸⁾。ここで,1イ

表-6 Post-analysis により抽出された AE 事象の個数(目視)

	Tensile	Mixed	Shear	Total
Stage1	0	0	0	0
Stage2	13	17	64	94
Stage3	10	7	29	46
Total	23 (16.4)	24 (17.1)	93 (66.4)	140

()内は総数に対する%を示す



図-12 Post-analysis 解析結果(目視)

ベントとはせん断スパンで発生する AE のみを対象とす るため、実験に使用した 8 個の AE センサ全てで EDT=120µs として取り出したものであり、その波形から 到達時間と初動振幅値を手作業で読み取り、SiGMA 解析 を行った結果を示している。次に、同じイベント定義で 式(4)、(5)を適用し、SiGMA 解析を行った結果を表-4 に示す。両解析結果より、手作業により行った表-3 で は 445 個の AE イベントが同定されたのに対し、表-4 では 370 個であり、wave-monitor と比較して少ない AE イベント数であることがわかる。しかし,引張型,混合型,せん断型の全体的な傾向はほぼ一致し,せん断型の AE イベントの割合が高いことが確認できる。また,各 Stage においても傾向の一致が認められる。次に,供試体 に最終的に形成されたひび割れと全ての AE イベントを 合わせた結果を図-10 に示す。図より,両解析結果とも ひび割れに沿って AE イベントが集中しており,式(4), (5)を適用した SiGMA 解析結果の精度は手作業によるそ れとほぼ変わらないことが認められた。

4.3 Post-analysis 結果

次に, SiGMA 解析結果に対して解の信頼性あるいは誤 差評価のために行った Post-analysis 結果を表-5, 図-11 に示す。Post-analysis の削除条件により,イベント数が SiGMA 解析の約 1/3 に削除されたものの,微小クラック がせん断破壊面に沿って位置標定されており,またクラ ックの種類においても各 Stage において SiGMA 解析結 果と同様の傾向を示すことがわかった。また,表-6, 図-12 に,目視による SiGMA 解析結果に対し Post-analysis を行った結果を示す。表-5,図-11 と比較 してもイベント数,クラックの位置および種類において, ほぼ同様の結果を得ており,初動部自動読み取り法の信 頼性が認められた。

5. まとめ

- (1) AIC 法による自動読み取りとしきい値による AE 源 位置標定結果の比較では、AIC 法による結果が最終 的に形成されたひび割れ面と非常によく対応してい ることがわかり、AIC 法による自動読み取りの精度 が高いことがわかった。
- (2) wave-monitor で行った SiGMA 解析結果と AIC 法を 適用して行った SiGMA 解析結果では、同定された AE イベント数に僅かな違いは認められたものの、全 体的な傾向は一致し、AIC 法を適用した SiGMA 解析 結果の有効性が確認された。
- (3) SiGMA 解析結果に対して解の信頼性評価のために行った Post-analysis 結果では、イベント数が SiGMA 解析の約 1/3 に削除されたものの、微小クラックの位置や種類は SiGMA 解析結果とほぼ同様の傾向を示すことが確認された。また、目視による SiGMA 解析結果に対し Post-analysis を行った結果、自動読み取り法と比較してもイベント数、クラックの位置および種類において、ほぼ同様の結果を得ており、初動部自動読み取り法の信頼性が認められた。

参考文献

 大津政康:アコースティック・エミッションの特性 と理論(第2版),森北出版,(2005)

- 桃木昌平,塩谷智基, Aggelis, G Dimitrios,寺澤正 人:AE 計測による実大コンクリート梁の継手効果 評価,第16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.37-40, (2007)
- 渡辺健、二羽淳一郎、横田弘、柴桃孝一郎:AE 法 を用いたプレストレストコンクリート梁の破壊性 状の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、 No2、pp.667-672、(2004)
- M.Ohtsu and K.Ono : A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Function in a Half Space, Journal of AE, Vol.3 , No. 1, pp.124-133, (1984)
- 大津 政康,重石 光弘,湯山 茂徳,岡本 亨久: AEモーメントテンソル解析のためのSiGMAコードの開発,非破壊検査, Vol.42, No.10, pp.570-575, (1993)
- M.Ohtsu and M.Shigeishi : Virtual Reality Presentation of Moment Tensor Analysis by SiGMA, J.Korean Soc. for NDT, Vol.23, No. 3, pp.189-199, (2003)
- 7) 大野健太郎,下薗晋一郎,沢田陽佑,大津政康:AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析 の改良,非破壊検査, Vol.57, No.11, pp.531-536, (2008)
- 大野健太郎,下薗晋一郎,沢田陽佑,大津政康: AE-SiGMA解析による鉄筋コンクリート梁のせん断 破壊機構の考察,土木学会論文集 E, Vol.64, No. 1, pp.72-81, (2008)
- M.Ohtsu : Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of AE Source, Journal of Geophysical Pesearch, Vol.94, No.B4, pp.6211-6221, (1991)
- 大津政康: AE モーメントテンソル解析における SiGMA コードの後処理に関する研究,非破壊検査, Vol.43, No.12, pp.776-777, (1994)
- Sleeman. R. and T. van Eck : Robust Automatic P-phase pisking : An On-line Implementation in the Analysis of Broadband Seismogram Recordings, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol.113, No.1, pp.265-275, (1999)
- 12) H.Akaike : Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average processes, Annals of the Institute of Statistical Mathematics Vol.26, No.1, pp.363-387, (1974)
- 13) 前田直樹: 地震波自動処理システムにおける読み取 り及び評価, 地震2輯, 38(3), pp.365-380, (1985)