

## 論文 AE 法および AE/UT 法による RC 柱の水平交番載荷試験における損傷評価

湯山茂徳<sup>\*1</sup>・李正旺<sup>\*2</sup>・伊東良浩<sup>\*3</sup>・荒添正棋<sup>\*4</sup>

**要旨：**鉄筋コンクリート柱の水平交番載荷試験において、荷重と変形の関係や、表面ひび割れ発生状況を観察し、AE 信号のパラメータ解析を行った。また載荷中断時に AE/UT 法を適用し、ひび割れ観察やひずみ計測で得たデータと比較することにより、AE/UT 法の損傷検出法としての有効性を検討した。その結果、ヒット計数率などの AE 活動度の急増は、曲げひび割れ、およびせん断ひび割れの発生、さらに主筋の降伏に対応することが確認された。また AE/UT 法を用いることにより、せん断ひび割れの発生を検出し、それに続く損傷進行過程をモニター可能なことが示された。

**キーワード：**AE 法, AE/UT 法, RC 柱, 水平交番載荷, 損傷評価

### 1. はじめに

先の阪神・淡路大震災において、開削トンネルの構造部材となる多くの鉄筋コンクリート (RC) 柱が甚大な被害を受けた。震害を被った構造物の健全性を診断し、危険度の評価や補修あるいは補強など事後対策の必要性を判断することは重要であり、客観的かつ定量的な検査手法の開発が望まれている。

コンクリート構造物を診断する検査法に、弾性波を用いる方法がある。その一つに、コンクリート内におけるひび割れの発生や進展に起因する弾性波 (AE) を検出し、それを解析・評価する AE 法<sup>1)</sup>がある。AE 解析法には、検出波形に信号処理を施してパラメータを抽出し、ヒット数 (包絡線検波した AE 信号の検出数) や振幅値 (信号の最大電圧値) を用い、相対的 AE 活動度の変化を調べるパラメータ解析があり、コンクリート内のひび割れ発生や進展を評価するために広く用いられている。

また弾性波を用いる別の検査法として、コンクリート表面に取り付けた圧電素子型パルサー

に電気信号を入力することにより励起された弾性波を AE 計測装置で検出し、弾性波伝播特性の伝播経路依存性を調べることで損傷状態を調査する AE/UT 法がある。AE/UT 法は、最初にプラスチック系複合材料の非破壊検査法の一つとして開発された<sup>2)</sup>。その後、土木工学の分野で鉄筋とコンクリートの付着状態を評価するために用いられたが<sup>3)</sup>、RC 供試体や部材に適用された事例はこれまでに報告されていない。AE 法が載荷で発生する弾性波を検出する、受動的な手法であるのに対し、AE/UT 法はパルサーから入力した弾性波を検出するという能動的な手法であり、両者は相補的な関係にある。

本研究では、RC 柱の水平交番載荷試験において、荷重と変形の関係や、表面ひび割れ発生状況を観察し、また載荷時に検出される AE 信号のパラメータ解析を行い、損傷状況を調査した。さらに、載荷中断時に AE/UT 法を適用し、ひび割れ観察やひずみ計測で得たデータと比較・対照することにより、AE/UT 法の損傷評価法としての有効性を検討した。

\*1 日本フィジカルアコースティクス(株) 代表取締役 工博 博士(学術) (正会員)

\*2 日本フィジカルアコースティクス(株) 工博

\*3 佐藤工業(株) 中央技術研究所 土木研究部 研究員 工博 (正会員)

\*4 佐藤工業(株) 中央技術研究所 土木研究部

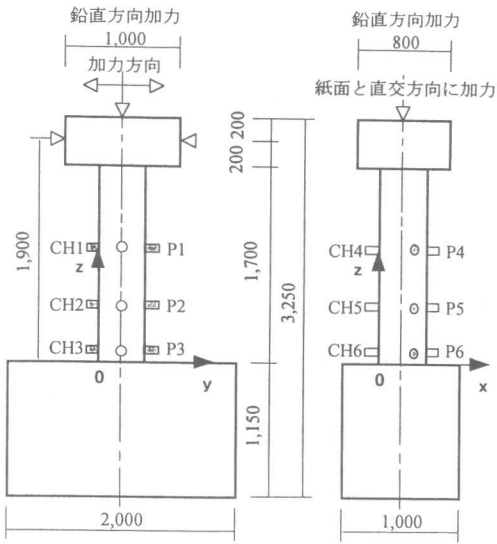


図-1 供試体の形状とセンサーおよびパルサー位置 (単位: mm)

表-1 供試体の諸元

供試体		Case3
荷重方式		カンチレバー荷重
RC 柱寸法 (mm)		400 × 400
軸力		1373kN (8.58MPa)
コンクリート強度		柱 23.5MPa 基礎 20.0MPa
主筋	材質	SD 345 D25
	本数	12
	鉄筋比	3.80%
帯筋	かぶり (mm)	40
	材質	SD 345 D10
	配置 (mm)	100
	鉄筋比	0.36%

## 2. 試験方法

### 2.1 供試体と加力方法

供試体の形状と AE センサーおよびパルサーの位置とその座標系が図-1に、また諸元が表-1に与えられている。供試体は、高さ 1.7m、寸法 0.4 × 0.4m の矩形 RC 柱である。

表-2 AEセンサー、およびパルサー取り付け位置 (単位: mm)

センサーおよびパルサーの配置		座標		
		x	y	z
センサー	CH1	300	0	900
	CH2	300	0	500
	CH3	300	0	100
センサー	CH4	0	200	900
	CH5	0	200	500
	CH6	0	200	100
パルサー	P1	300	400	900
	P2	300	400	500
	P3	300	400	100
パルサー	P4	400	200	900
	P5	400	200	500
	P6	400	200	100

供試体の荷重は、カンチレバー方式で行った。軸力は、反力フレームに取り付けたローラー支承を持つ 2942kN (300tf) アクチエータにより、供試体頂部の回転を拘束しないようにピン治具を介して作用させた。また水平力は、反力壁に取り付けた 981kN (100tf) アクチエータ 1 本により、ピン治具を介して供試体に作用させ、正負交番加力を、きざみ変位制御により荷重した。

### 2.2 AEおよびAE/UT計測法

AE (弾性波) 信号の計測には、PAC 社製 SPARTAN AE 計測システムを用いた。RC 柱の所定位置に取り付けた合計 12 個の 60kHz 共振型 AE センサーを、AE 信号検出用センサー、あるいはパルサーとして使用した。図-1、および表-2に、これらの取り付け位置が示されている。ここでセンサーは CH1 ~ CH6 で、またパルサーは P1 ~ P6 で表示され、CH1 ~ CH3 と P1 ~ P3、また CH4 ~ CH6 と P4 ~ P6 は、RC 柱の中心線をはさんで、それぞれ相対する対称な位置に設置されている。

荷重中断時の AE/UT 計測には、CH1 ~ CH6、

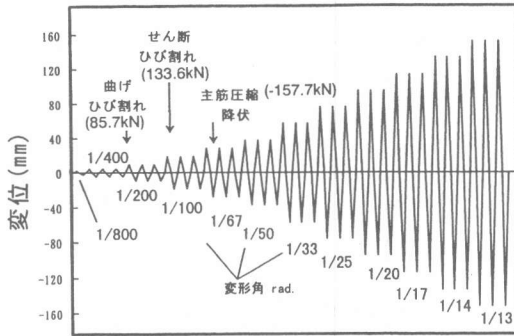


図-2 加力の履歴

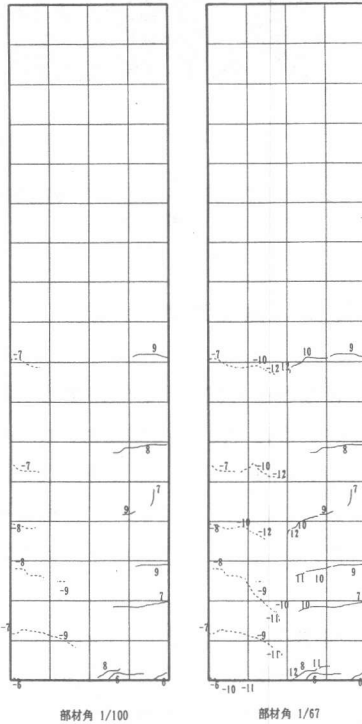


図-3 X=0面上で観察されたひび割れ発生状況

および P1 ~ P6 を用いた。電気信号発生器から振幅値約 300V、信号継続時間約 100ns のスパイク波をパルサーに入力することで AE 波（弾性波）を発生させ、それを AE センサーで検出することにより AE/UT 解析を実施した。

一方、載荷時の AE 計測には、CH1 ~ CH6

に加え、パルサー P1, P3, P4, P6 も AE センサーとして用い、合計 10 個の AE センサーでパラメータ解析を行った。なお、計測時のプリアンプ増幅率は、40dB、また計測しきい値は 40dB であった。

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 荷重および変形の履歴と損傷の進行過程

図-2に、水平荷重作用位置の変位で表される、加力履歴が模式的に示されている。柱の水平方向、および軸方向変位は、供試体の合計 35 箇所に配置した変位計で、また各鉄筋のひずみ分布は合計 100 箇所に貼り付けたひずみゲージで計測した。図-3に、せん断ひび割れ発生時、および主筋降伏時におけるひび割れ発生状況の目視観察結果が示されている。曲げひび割れは、正加力方向の場合、柱頭作用荷重  $Q=85.7\text{kN}$  (8.74tf)、柱頭水平変位  $\delta=9.50\text{mm}$  (部材変形角  $1/200\text{rad}$ ) で脚部に発生した。変形が増すにつれ脚部から頂部へ順次曲げひび割れが発生し、それらが進展し、 $Q=133.6\text{kN}$  (13.62tf)、 $\delta=19.02\text{mm}$  ( $1/100\text{rad}$ ) 時に、脚部から 20cm 付近の位置にせん断ひび割れが発生した。その後、変形角が  $1/67\text{rad}$  となる負方向加力時の第一回載荷において最大変形時 ( $Q=-157.7\text{kN}$  (-16.08tf)、 $\delta=-28.49\text{mm}$ ) に、最初に N 側の主筋が圧縮降伏し、続いて変形角  $\delta=1/50\text{rad}$  となる正方向加力の第一回載荷時に、 $Q=159.8\text{kN}$  (16.30tf)、 $\delta=30.82\text{mm}$  ( $1/62\text{rad}$ ) で S 側の主筋が圧縮降伏した。以後、変形の増大とともに荷重は上昇を続け、正方向加力の場合、 $\delta=52.30\text{mm}$  ( $1/36\text{rad}$ ) で、 $Q=186.0\text{kN}$  (18.97tf) の最大加力が、また負方向加力では、 $\delta=-52.30\text{mm}$  ( $1/36\text{rad}$ ) で、 $Q=-176.2\text{kN}$  (-17.97tf) の最大加力が測定された。さらに変形が増大し、 $\delta=114.00\text{mm}$  ( $1/17\text{rad}$ ) となる負方向加力の第一回載荷の途中、 $Q=-140.9\text{kN}$  (-14.37tf)、 $\delta=-0.04\text{mm}$  で脚部位置の帯筋が引張降伏した。その後、脚部のかぶりコンクリートのはく離が顕著になり、それとともに急激に水平耐力が減少して終局破壊に至った。

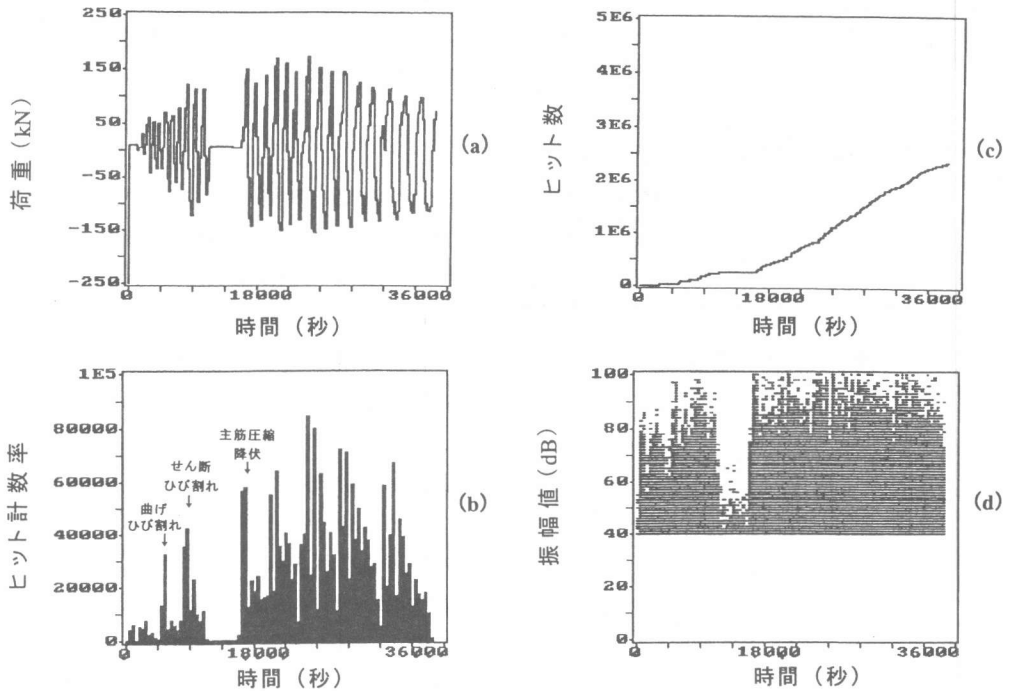


図-4 荷重(a), AEヒット計数率(b), ヒット数(c), 振幅値(d)の履歴

### 3.2 AEパラメータ解析

図-4に、荷重、AEヒット計数率、ヒット数、および振幅値の履歴が示されている。既往の成果により、RC 供試体や部材の破壊過程における AE 発生源として、各载荷サイクルの最大値付近で生ずるひび割れ進展、载荷時あるいは除荷時におけるひび割れ面同士の摩擦音などがあり、さらに破壊が進行して鉄筋とコンクリートの付着が失われると、両者間ですべりが生じ、载荷時および除荷時に AE を発生するとされている<sup>4)</sup>。本計測では、図-2に示される荷重および損傷の進行過程と比べることにより、曲げひび割れ発生時、せん断ひび割れ発生時、そして主筋降伏時に AE ヒット計数率が急増し、また大きな振幅値を持つ AE 信号が多数検出されていることがわかる。したがって、本計測における AE 発生源としては、こうしたひび割れの発生に加え、鉄筋とコンクリート間のすべりが

よる摩擦音などを考慮する必要があると考えられる。このように AE 発生挙動は、RC 柱の損傷発生を敏感に検知する。したがって、AE パラメータ解析を行うことにより、損傷の発生を検出し、進行をモニターできると考えられる。

### 3.3 AE/UT解析

図-5に、部材変形角で表される損傷段階と、载荷中断時にパルサーへの電気信号入力で検出した AE エネルギー値（包絡線検波波形の相対面積の大きさで定義）を、試験開始前の健全（無損傷）供試体で検出した AE エネルギー値で除すことにより規格化した値、すなわち AE エネルギー検出率との関係が示されている。図中では、AE 波の伝播方向が加力方向と平行な場合（CH1～CH3 と P1～P3 の組合せ）および直交する場合（CH4～CH6 と P4～P6 の組合せ）に分け、基礎部からの柱軸方向高さごとに結果が

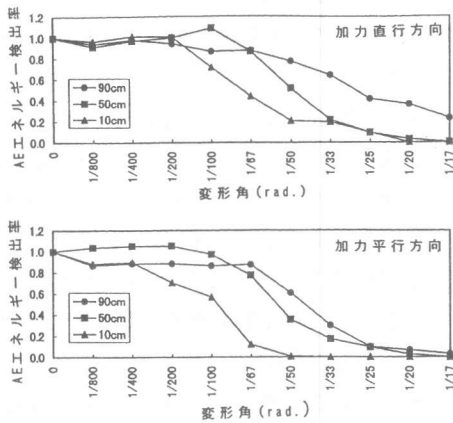


図-5 損傷の進行と検出される AEエネルギーとの関係

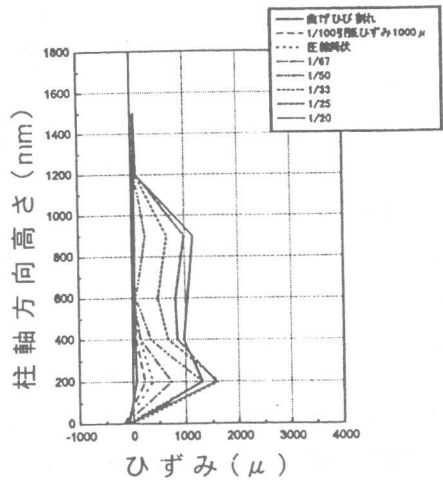


図-6 帯筋の柱高さ方向ひずみ分布

与えられている。いずれの場合も、変形角が  $1/100\text{rad}$  を越えるあたり、すなわちせん断ひび割れが発生して以降急速にエネルギー検出率が低下し、やがて AE 波はほとんど到達しなくなる。これは、せん断ひび割れの発生した後に、RC 柱全体に損傷が進行することで AE 波伝播特性が変化し、AE エネルギーの透過量が減少することによって考えられる。また検出率の低下は、測定位置が下にあるほど小さな変形角で生じており、損傷は柱の下部から拡大していることが容易に理解される。ここで、AE 波の伝播方向が加力方向と平行な場合の方が、直角な場合より、検出率の低下が顕著である。これは、AE 波の伝播方向とひび割れ面がなす角度の影響で、前者の方がせん断ひび割れの発生以降生じた損傷による AE エネルギー透過量の減少を、より直接的に反映するためと考えられる。

図-6に、帯筋で測定されたひずみ量の柱高さ方向に対する分布が与えられている。これによると、変形角  $1/67\text{rad}$  程度までは、高さ 60cm 以下の部位のみにひずみが生じ、それより上部ではほとんどひずみは発生していない。一方、変形角が  $1/67\text{rad}$  を越えると、上部にひずみが発生し始め、終局破壊時には、高さ 100cm 付近において、 $1000\mu$  程度のひずみ量が測定されている。なおこの時の破壊は、脚部の帯筋が

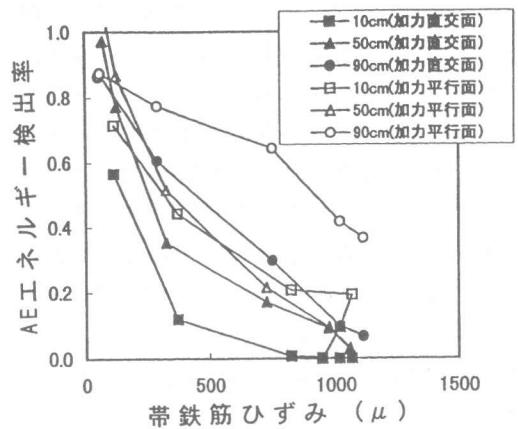


図-7 AEエネルギー検出率と帯筋ひずみとの関係

降伏することによって生じた。

図-7に AE エネルギー検出率と帯筋のひずみ量との関係が示されている。図より両者には相関があり、帯筋のひずみが増大するとともに AE エネルギー検出率は急速に低下することが理解される。その原因の一つとして、かぶりコンクリート、およびコアコンクリートにおけるせん断ひび割れ発生が考えられる。またこのほかに、帯筋位置におけるかぶりコンクリートの離れも一因として可能性がある。しかしながら、帯筋のひずみ量が比較的小さい段階から検出率の低下がある程度認められることから、低

下はかぶりコンクリートのはく離によるものではなく、荷重に起因するせん断ひび割れ発生が影響したと考えられる。

以上の結果から、AE/UT法を用いることにより、健全な段階からせん断ひび割れの発生、さらに図-3に示されるひび割れの進展段階に対応して、RC柱の損傷進行過程をモニター可能なことが示された。すでに前項でまとめられた結果より、AEパラメータ解析を行うことで、AEヒット計数率の増加や大振幅値を持つAE信号の発生で表されるAE活動の急激な上昇は、曲げひび割れ、およびせん断ひび割れの発生、さらに主筋の降伏に対応することが示されている。ここで、AEパラメータ解析は荷重時の動的な計測条件下で、またAE/UT解析は、荷重中断時の静的な計測条件下で行われた。また、AE/UT法に用いられるパルサーは、AEセンサーとしても使用できるため、AEセンサーあるいはパルサーの取り付け位置を変更することなく、すなわち計測条件を何ら変更することなく両解析を同一試験で適用可能であった。したがって、AE法、およびAE/UT法で得た結果を比較し、両者の一致を検証することにより、損傷度評価における信頼性を高めることができると考えられる。

#### 4. まとめ

RC柱の水平交番荷重試験において、荷重と変形の関係や、表面ひび割れ発生状況を観察し、荷重時にAEパラメータ解析を行い、さらに荷重中断時にAE/UT法を適用し、以下の結果を得た。

(1) AEパラメータ解析を行うことにより、AEヒット計数率の増加や、大振幅値を持つAE信号の発生で表されるAE活動の急激な上昇は、曲げひび割れ、およびせん断ひび割れの発生、さらに主筋の降伏に対

応していることが示された。したがって、AEパラメータ解析を用いて、損傷の進行をモニターできると考えられる。

- (2) 荷重中断時に適用したAE/UT法により、変形角が $1/100\text{rad}$ を越え、せん断ひび割れが発生すると、急速にAEエネルギー検出率が低下し、さらに損傷が進行すると検出率は低下し続けることが示された。したがって、AE/UT法を用いることにより、せん断ひび割れの発生を検出し、さらに続いて起こる損傷進行をモニター可能なことが確認された。
- (3) AEエネルギー検出率と帯筋のひずみ量との関係から、検出率の急速な低下は、コンクリート内のせん断ひび割れ発生に起因していると推察された。
- (4) AE法、およびAE/UT法で得た結果を比較し、両者の一致を検証することにより、損傷度評価における信頼性を高めることができると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 天津政康：コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション（AE）研究の歴史と現状，土木学会論文集，Vol. 24, No. 496, pp. 9-19, 1994
- 2) Mitchell, J.R., and Miller, R.K.: Acousto-ultrasonic Principles and Instrumentation, Proc. AECM-2, Montreal, Canada, July 21-25, pp. 222-225, 1986
- 3) Hawkins, N.M., Macabe, W.M., and Nobuta, Y.: Use of Acoustic Emission to Detect Debonding of Reinforcing Bars in Concrete, Progress in AE IV (JSNDI), pp. 342-349, 1988
- 4) 湯山茂徳，岡本享久，重石光弘，天津政康：モーメントテンソル解析適用による鉄筋コンクリート供試体中に生ずるひび割れ進展過程の定量的評価と可視化，非破壊検査，Vol. 43, No. 8, pp. 514-522, 1994