

キーワード
アコースティックエミッション
カイザー効果
許容ひび割れ幅
健全性評価
コンクリート
モーメント・テンソル解析

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*

湯山 茂徳** 岡本 享久*** 重石 光弘**** 大津 政康*****

Quantitative Evaluation and Visualization of Cracking Process in Reinforced Concrete Specimens by Means of Moment Tensor Analysis

by Shigenori YUYAMA, Takahisa OKAMOTO, Mitsuhiro SHIGEISHI, Masayasu OHTSU

Fracture tests were conducted on three types of reinforced concrete specimens under cyclic loading. Cracking process was quantitatively evaluated and visualized by applying a moment tensor analysis to the AE waveforms detected during the fracture. Firstly flexural tests were performed for reinforced concrete beams. It was found that both tensile and shear cracks were generated around the reinforcement in the early stages. However, the ratio of shear crack generation increased as the cracking process progressed and finally shear cracks were initiated near the interface between the reinforcement and concrete even under unloading. Bond strength tests were made secondly and showed that tensile cracks were produced near the reinforcement in the early stages and spread to outer and greater areas in the later stages. It was also observed that shear crack initiation was strongly concentrated in the interface between the reinforcement and concrete. Thirdly cyclic loading tests were carried out for "L" shaped rigid frames of reinforced concrete. It was revealed that the Kaiser Effect was observed for tensile crack width less than 0.20mm, but broke down for the case of tensile crack width exceeding 0.20mm along with the occurrence of shear cracking.

1. 緒言

現在、建設分野において、維持管理の一環として長期経過した土木構造物劣化度の判定、あるいはひび割れの発生を早期に検出可能な検査方法が求められ、また合理的施工を行うために、内部欠陥の発生を監視しながら工程管理を行う手法の開発が要望されている¹⁾。コンクリート内部で起こるひび割れ発生の検出に敏感なAE法は、こうした要請に対応可能な一手段として注目され、多方面で適用されつつある。AE解析法には、

ヒット数、振幅値などの信号処理パラメータを用い、相対的AE活動度の変化を解析の対象とするパラメータ解析と、複数個の波形で構成されるAE波形セットに理論に基づく解析を適用し、AE発生源に関する定量的情報を求めようとする、原波形解析²⁾や、モーメント・テンソル解析^{3),4)}などの定量的波形解析がある。このうちモーメント・テンソル解析は、汎用ソフトウェアとして、大津・重石が開発したSIGMA^{4),5)}コードを用い、岩盤のグラウト注入監視⁶⁾やコンクリート部材^{7),8)}の破壊試験に適用され、その有効性が報告されている。この解析法の特徴は、AEを発生したひび割れの、三次元的な位置、種類、傾きの方向、さらに運動の方向が定量的に評価できることであり、このため固体中に生ずるひび割れ進展過程の可視化が行える。それゆえ、とりわけせん断型ひび割れの発生が重要な意味を持つコンクリート部材において、ひび割れの発生位置、荷重、発生状況などを解析する手法として、適用性が高いと考え

* 平成5年11月1日受付

** 日本フィジカルアコースティクス(株)(渋谷区東2-17-10)
Nippon Physical Acoustics Ltd.

*** 日本セメント(株)中央研究所
Central Research Laboratory, Nihon Cement Co., Ltd.

**** 熊本大学地域共同研究センター
Cooperative Research Center, Kumamoto University

***** 熊本大学工学部
Department of Civil and Environmental Engineering,
Kumamoto University

られる。

本研究は、異なる3種類の鉄筋コンクリート供試体の繰り返し載荷試験で計測されるAEにモーメント・テンソル解析を適用し、発生するひび割れの種類や位置、方向などを求めることによりひび割れ進展過程を可視化し、さらに表面ひび割れ幅とひび割れの種類及びカイザー効果との関係など、コンクリート部材で一般的に見られるAE発生挙動の特徴を、定量的に評価することを目的として行われた。

2. 試験方法

2.1 供試体

2.1.1. 繰り返し曲げ試験

Fig. 1に試験に用いた鉄筋コンクリート供試体を示す。供試体は角柱で中央下部に、横ふし型で直径19mmの異形鉄筋を1本配置してある。Fig. 2に載荷点とAEセンサー位置が示されている。この供試体に対して、最初に49kNまで曲げ荷重を負荷してその後除荷し、続いて最大荷重を増加させながら負荷-除荷を繰り返すという、繰り返し曲げ試験を行った。こうした試験で、主曲げひび割れは、引張応力側2支点間の中央付近に1本発生するため、そのひび割れ幅を計測する目的で、計測区間が150mmのパイゲージ(変位トランスデューサ)を供試体の下部、引張応力側2支持点の中央部に取り付けられた。

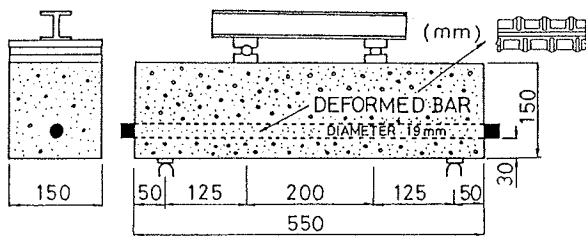


Fig. 1 Reinforced concrete specimen in flexural test

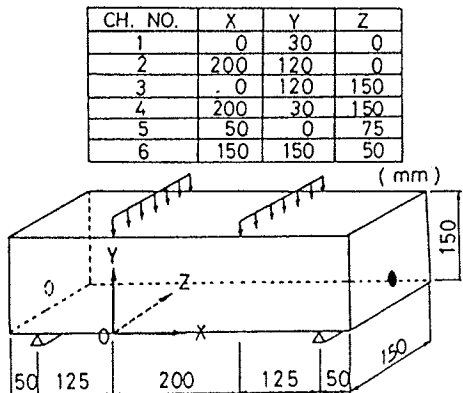


Fig. 2 AE sensor locations for the flexural test

2.1.2. 両引き試験

Fig. 3に、試験に用いた供試体を示す。供試体中央に配置した異形鉄筋に、Fig. 4に示されるように、一軸引張荷重をかけ、負荷-除荷を2回繰り返した。Fig. 4には、このときのAEセンサー位置も示してある。

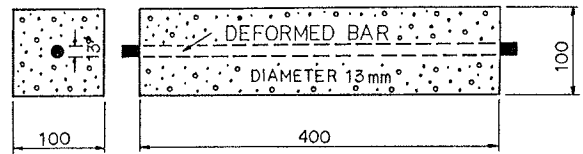
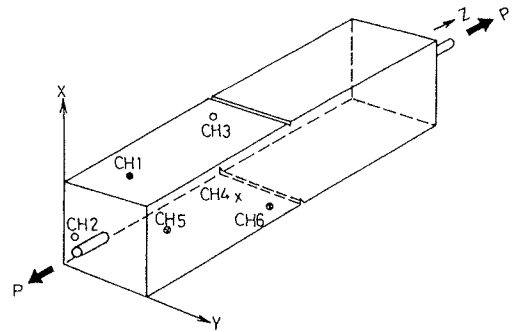


Fig. 3 Reinforced concrete specimen in bond strength test



CH	X	Y	Z
1	100	50	30
2	20	0	20
3	80	0	180
4	0	50	170
5	80	100	30
6	30	100	180

Fig. 4 AE sensor locations for the bond strength test

2.1.3. 箱型ラーメン隅角部の破壊試験

Fig. 5に、試験に用いた実物モデル鉄筋コンクリート箱型ラーメン隅角部を切り取った供試体の見取図と、鉄筋の配置図を示す。またFig. 6には、AEセンサー位置を示してある。この供試体に対して、隅角部が開く方向の負荷をかけ、やがて除荷し、次に最大荷重を増加させて再び負荷し、除荷するという加力過程を供試体が最終的に破壊するまで繰り返した。Fig. 7に、AEセンサーと、曲げひび割れ開口量を計測するためのパイゲージ(変位トランスデューサ)の取付け状況が示されている。パイゲージはラーメン隅角部の最大主引張応力が作用する位置に2箇所、また供試体中央部に2箇所、前面、後面それぞれ合計して8個が取り付けられた。

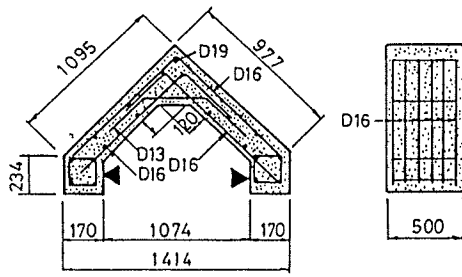
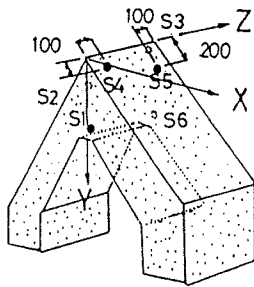


Fig. 5 "L" shaped rigid frame of reinforced concrete



Ch.	Location(m)			Direction(Cosine)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.040	0.200	0.000	0.000	0.000	1.000
2	-0.141	0.141	0.150	0.707	0.707	0.000
3	-0.071	0.071	0.400	0.707	0.707	0.000
4	0.071	0.071	0.100	-0.707	0.707	0.000
5	0.141	0.141	0.350	-0.707	0.707	0.000
6	-0.060	0.200	0.500	0.000	0.000	-1.000

Fig. 6 AE sensor locations for the cyclic loading test of "L" shaped rigid frame

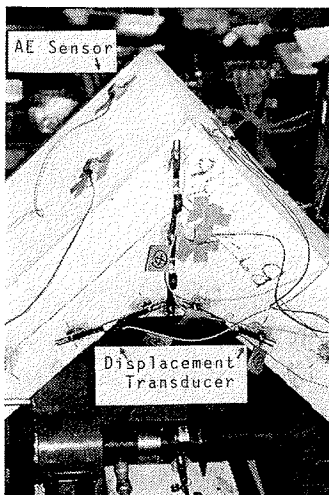


Fig. 7 The AE sensors and displacement transducers to measure crack width

2.2 AE計測装置

使用したAEセンサーは、PAC R15(150kHz共振型)センサーである。それぞれ6個のセンサーで検出されたAE信号はプリアンプにより40dB増幅され、PAC

LOCAN-ATシステムに入力される。その後メインアンプでさらに26dB増幅され、PAC TRA-2.5システムへ出力する。波形信号は、適切なしきい値を設定したマスターチャンネルからのトリガー信号により6チャンネル同時にデジタル波形収録を行い、1つのAE事象に対して、6個の波形で構成されるAE波形データセットを作成する。こうして得られた波形データセットに対して大津ら⁴⁾が開発したSIGMAコードを適用し、モーメント・テンソル解析を行った。

3. 試験結果

3.1 繰り返し曲げ試験

Fig. 8に曲げ荷重の履歴を示してある。最初にI及びII段階として49kNまで荷重した後に除荷し、続いて再荷重後除荷するというように荷重-除荷を、最大荷重を段階的に増加させて3回繰り返した。Fig. 9に、供試体の下部引張応力側中央付近に発生する主曲げひび割れの開口量の変化が荷重に対して示されている。すでにII段階において、0.12mm程度の最大開口量が計測されていることがわかる。

Fig. 10は、荷重変化に対する、全チャンネルで計測されたAEヒット数の変化である。この図より、II段階

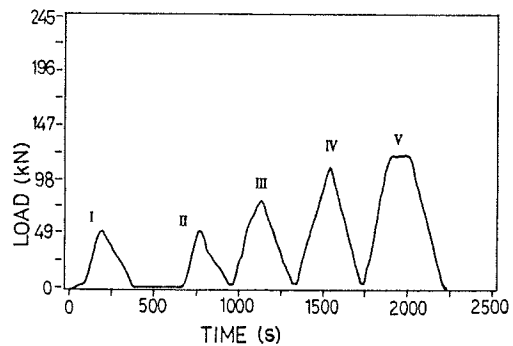


Fig. 8 Loading history in the flexural test

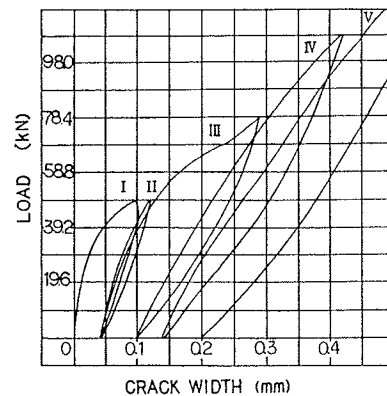


Fig. 9 Relationship between tensile crack width and the applied load in the flexural test

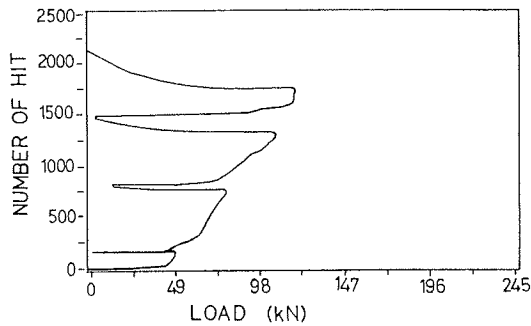


Fig.10 Relationship between number of AE hits and the applied load

(49kNへの再負荷時), すなわちFig. 9より明らかなように, ひび割れ開口量が約0.12mmに至った時点以降は, それ以前の最大荷重 (49kN) 以下の荷重でAEが発生し, カイザー効果の成立しなくなることが認められる。

Table 1及び, Fig. 11に, モーメント・テンソル解析結果が示されている。Table 1に各段階ごとに計測された, 引張型 (せん断率40%以下), 中間型 (同40~60%), せん断型 (同60%以上) ひび割れの個数がまとめられている。得られた波形データセット数は全部で184組であり, このうち100組について解析可能であった。

Table 1 Results of the moment tensor analysis (flexural test)

		Tensile	Medium	Shear	Total
I	loading	3	1	4	8
	unloading	-	-	2	2
II	loading	7	7	18	32
	unloading	-	1	-	1
III	loading	6	4	15	25
	unloading	-	-	3	3
IV	loading	1	1	7	9
	unloading	4	2	14	20

Fig. 11は, 各ひび割れの位置がそれぞれx-y平面及びx-z平面上への投影点として示されている。ここで, 引張型ひび割れは, 両矢印(↔)で与えられ, その矢印の方向が開口方向と一致している。またせん断型ひび割れはクロス (+)で表され, そのクロスの一方向がすべりの方向を示している。一方, 中間型ひび割れは, 両者の合成として表されている。

これらの結果より, せん断型ひび割れは, すでにI段階で破線で示される鉄筋付近に発生しており, II段階, すなわちカイザー効果が成立しない場合には, せん断型ひび割れのみが検出されている。せん断型ひび割れ検出比率は, Iで50%(4/8), IIIで56%(18/32), IVで60%(15/25), Vで78%(7/9)と, 破壊が進展

し, カイザー効果の不成立がより顕著になるとともに増大している。またIV, Vの除荷時に主として, せん断型ひび割れが鉄筋近くに発生しているが, これはせん断型ひび割れ面同士のすべりなどの原因で生じたものと考えられる。

3.2 両引き試験

Table 2及びFig. 12に, モーメント・テンソル解析結果を示す。得られた波形データセット総数は405組であり, そのうち128組が解析可能であった。最初にI段階として1回目の負荷-除荷を行い, 次に2回目の負荷として, 負荷(1)-保持-負荷(2)を施した。Table 2より明らかなようにI段階の負荷及び除荷時にせん断型ひび割れが発生しており, このためII段階においてカイザー効果は成立しなかった。Fig. 12に示されるように, I段階で鉄筋の比較的近くに生ずる引張型ひび割れが, II段階に入ると鉄筋中心からより離れた外側で多く発生するようになる。また, 負荷最終段階(2)では, せん断型ひび割れが鉄筋近くに集中して発生しており, 鉄筋とコンクリートとの境界付近で生ずるすべり現象を検出したものと考えられる。

Table 2 Results of the moment tensor analysis (bond strength test)

		Tensile	Medium	Shear	Total
I	loading	3	5	7	15
	unloading	8	5	10	23
II	loading(1)	15	8	14	37
	hold	3	4	4	11
	loading(2)	13	6	23	42

3.3 箱型ラーメン隅角部の破壊試験

Fig. 13中に, 荷重履歴, 計測された全ヒット数の振幅値の履歴, 及び主曲げひび割れの開口量と荷重との関係が示されている。ここで主曲げひび割れとは, ラーメン隅角部の最大主引張応力が作用する位置に最初に発生する曲げひび割れのことである。構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすと考えられる。振幅値の履歴を見ると, すでに2回目の負荷で最大70dB程度の振幅値を持つAEが計測されているが, これは微小曲げひび割れの発生に対応すると考えられる。また3回目の負荷時には, 80dBを超える振幅値を持つAE信号が検出されており, これは主曲げひび割れの発生・進展に対応すると考えられる。一方, 主曲げひび割れ開口量が, 0.2mmを超えた5回目の負荷時に, 初めてカイザー効果の成立しなくなることが確認され, 以後の負荷ではこの現象はより顕著に観察され, かつ除荷時にも多くのAE信号が検出されている。

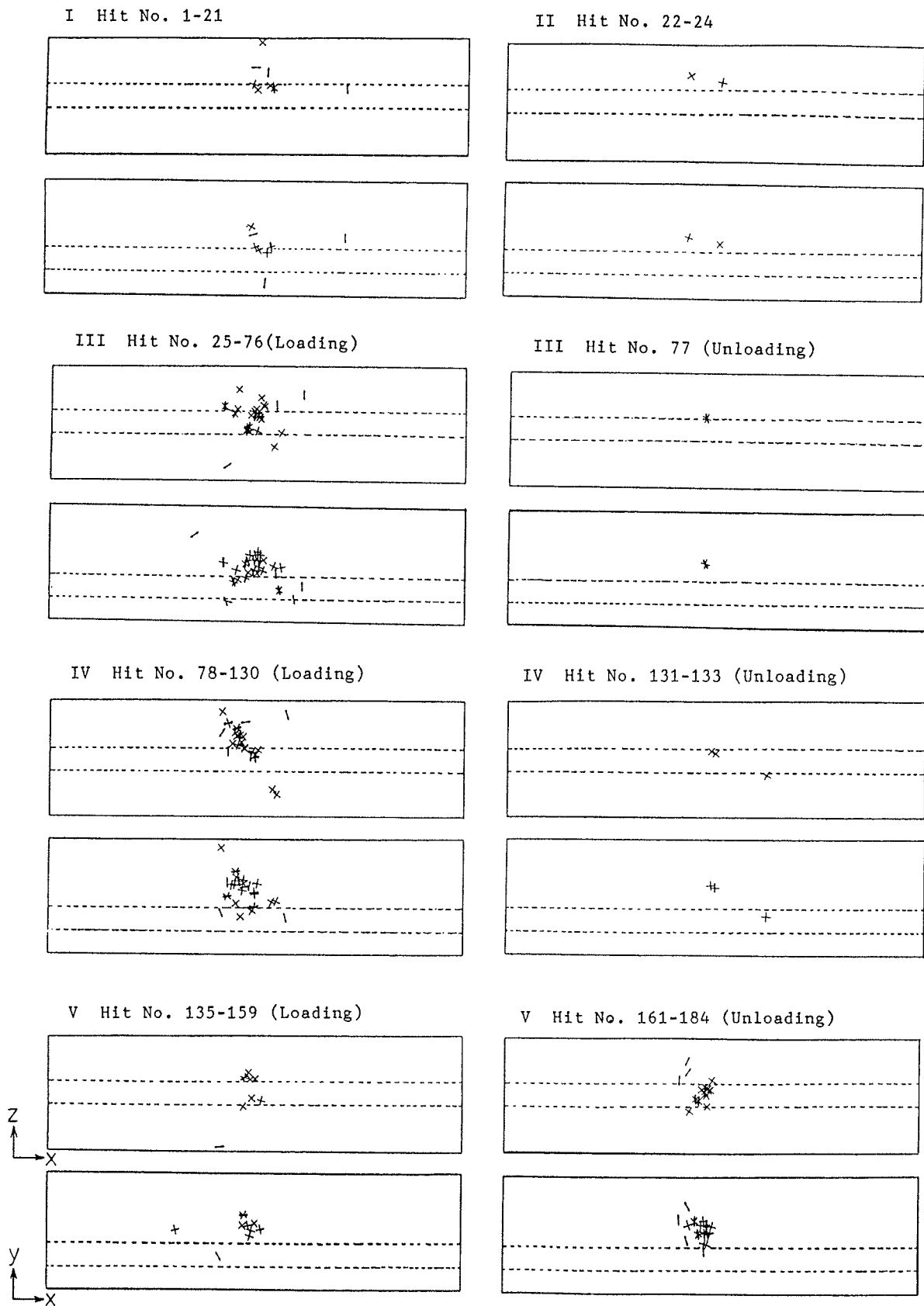


Fig.11 Visualization of cracking process during the flexural test by the moment tensor analysis

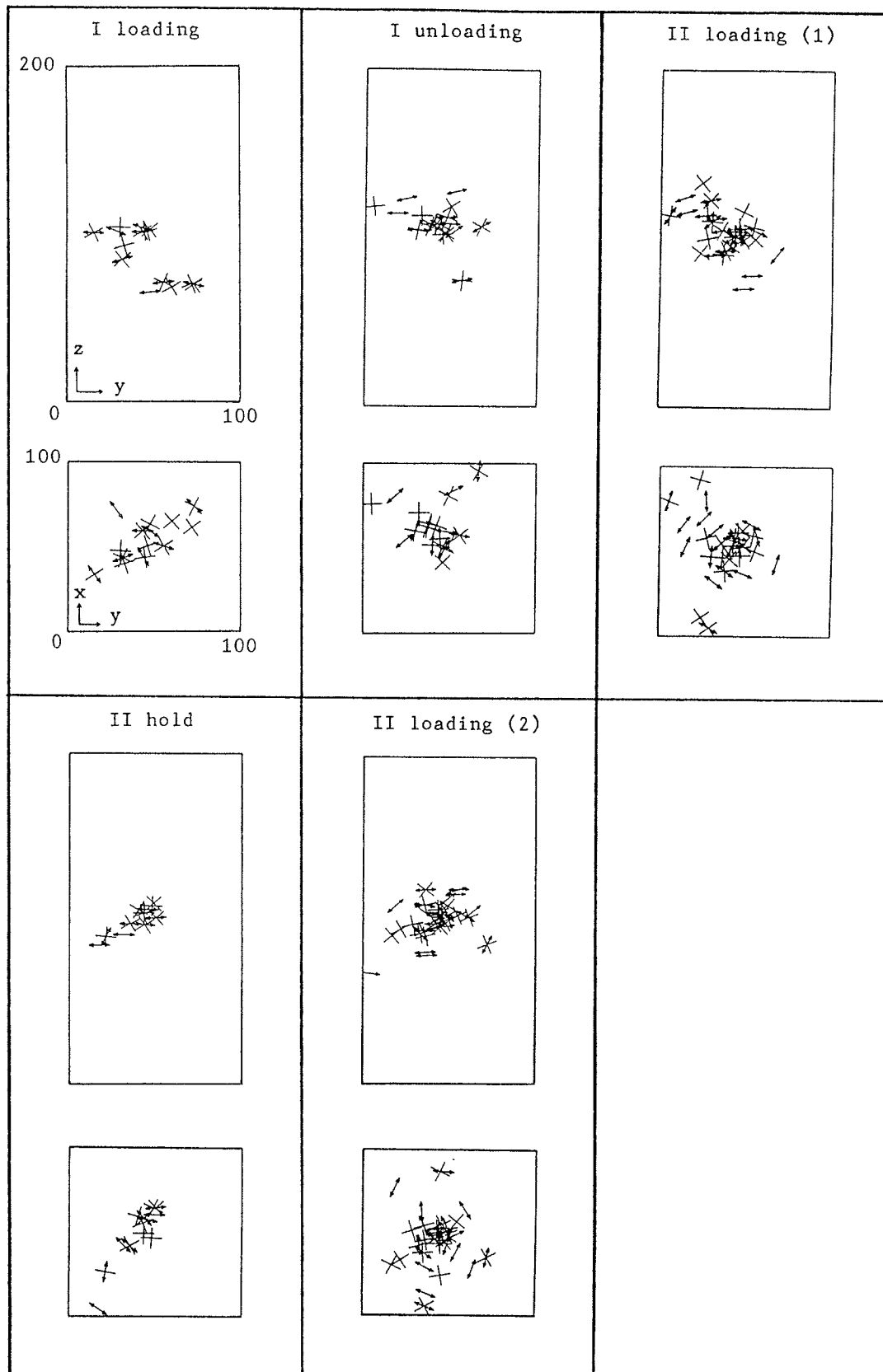


Fig.12 Visualization of cracking process during the bond strength test by the moment tensor analysis

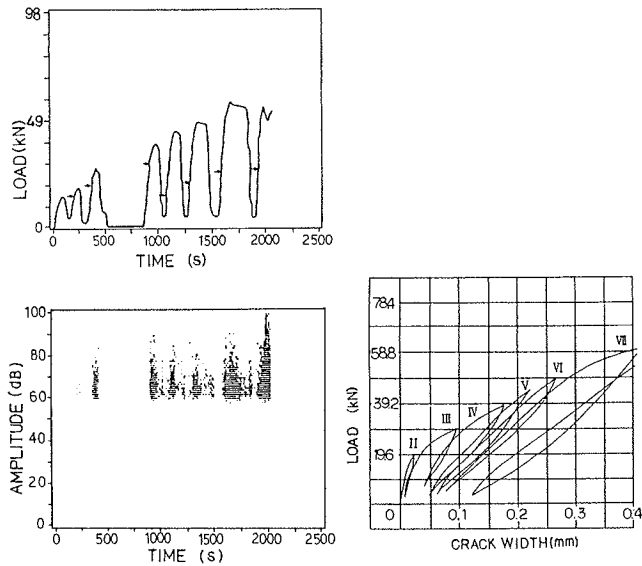


Fig.13 Loading history, amplitude history, and relationship between tensile crack width and the applied load during the cyclic loading test of an "L" shaped rigid frame

Table 3及びFig. 14にモーメント・テンソル解析結果がまとめられている。全部で1024組の波形データセットに対して解析を試みたが、最終的に解析可能なデータセット数は19組であった。本試験における解析可能率は前2例に比べ極めて小さいが、これは供試体の寸法が前2例と比べはるかに大きく、また複雑な形状をしているために、有意な6個の波形からなる波形データセットを得ることがより困難であったためと考えられる。

Table 3から明らかなように、4回目の負荷では引張

Table 3 Results of the moment tensor analysis ("L" shaped rigid frame)

Load Cycle	Event	Shear (%)	Source Location(m)			Crack Motion(deg)	
			X	Y	Z	Shear	Tensile
4	Hit No.31	27.403	-0.082	0.802	0.417		10.360
	Hit No.63	5.134	-0.243	1.034	0.412		-163.820
5	Hit No.73	46.172	-0.096	0.365	0.208	24.549	12.277
	Hit No.96	66.278	-0.060	0.413	0.152	147.623	
	Hit No.101	46.901	0.037	0.336	0.268	36.438	-8.780
6	Hit No.118	100.00	0.056	0.357	0.280	120.376	
	Hit No.126	26.925	-0.169	0.392	0.230		-153.990
	Hit No.130	4.479	-0.151	0.246	0.271		-136.215
	Hit No.131	6.406	-0.267	1.210	-0.239		-174.051
	Hit No.139	100.00	0.202	0.263	0.229	118.254	
	Hit No.142	100.00	0.092	0.159	0.143	-94.677	
7	Hit No.167	31.806	0.068	0.297	0.153		-26.612
	Hit No.184	76.769	0.011	0.222	0.283	161.758	
	Hit No.199	43.471	0.118	0.259	0.224	-56.417	-36.961
	Hit No.202	77.309	0.089	0.281	0.144	154.549	
	Hit No.237	56.393	-0.062	0.246	0.178	16.684	58.811
	Hit No.239	34.667	-0.057	0.228	0.237		-156.347
8	Hit No.320	84.131	-0.048	-0.054	0.227	168.362	
	Hit No.418	3.827	-0.151	0.871	0.479		9.720

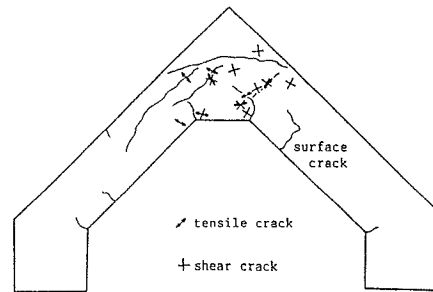


Fig.14 Results of the moment tensor analysis plotted together with the surface cracks observed on the "L" shaped rigid frame

型ひび割れのみが検出されているが、5回目の負荷において、主曲げひび割れの開口量が0.2mmを超え、カイザー効果が成立しなくなると、初めてせん断型ひび割れが検出されるようになる。以後の負荷では、せん断型ひび割れと、引張型ひび割れがほぼ半々ずつ発生している。

Fig. 14には、Table 3にまとめられた各ひび割れの位置と種類及びその運動方向が、表面上に目視されたひび割れ発生状況とともに図示されている。この図より明らかなように、解析結果は目視された結果とよく一致している。

4. 考察

鉄筋コンクリート部材の破壊過程においては、破壊進行中に生ずる主曲げ（引張型）ひび割れ、鉄筋と母材との境界付近に生ずる微小引張型ひび割れ及びせん断型ひび割れ、さらに補修部と母材との境界で生ずるすべり（せん断型ひび割れ）、また繰り返し荷重下では、せん断型ひび割れ面同士のこすれ等が主なAE発生源になると考えられる。

すでに著者らは、無筋のコンクリート梁供試体、鉄筋コンクリート梁供試体、及び補修部を持つ大型梁供試体の繰り返し載荷試験を行い、計測したAEのパラメータ解析を実施することにより^{9),10)},

- ① 引張型ひび割れの進展時にはカイザー効果が成立する、
- ② せん断型ひび割れが内部に存在し、かつ構造物の耐久性を左右する主曲げひび割れの表面開口量が0.15~0.2mmを超えるようになると、再負荷時にせん断型ひび割れ面同士のこすれが生じ、機械的AE発生源となるために、見かけ上カイザー効果が成立しなくなり、さらに除荷時にも同様の要因で多くのAE信号が検出される。

という結果を得ている。

今回、異なる鉄筋コンクリート供試体に繰り返し負

荷をかけ破壊進行過程で発生するAEのモーメント・テンソル解析を行うことにより、②の成立することが定量的に示されたと考えられる。たとえば、繰り返し曲げ試験においては、表面開口量が0.12mmとやや小さい値ではあるが②が成立し、また箱形ラーメン隅角部の破壊試験では、表面開口量が0.2mmを超えると②の成立することが確認された。それゆえ、これは鉄筋コンクリート部材の破壊過程でAEを計測したときに観察される、一般的な現象であると考えられる。

ところで、後藤ら¹⁴⁾は鉄筋コンクリート中の異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れの種類と進展過程を解析し、はじめに1次横(曲げ)ひび割れが生じ、続いて内部ひび割れの進展により、付着界面で、引張型ひび割れとせん断型ひび割れが組み合わさって発生することを明らかにした。一般に、鉄筋コンクリート部材の健全性を評価する際に、鉄筋とコンクリートの付着界面や、補修部と母材コンクリートの境界面において、すべりなどのせん断型ひび割れが発生したかどうかが良い重要な判断基準となる。また、現行の限界状態設計法によれば、表面に見られる許容ひび割れ幅は、0.15~0.2mm以下とされている。それゆえ、②の事実が一般的に成立することが確認されたことから、鉄筋コンクリート部材の健全性評価をAE法を用いて行う際に、カイザー効果成立の有無及び除荷時のAE活動の有無が、極めて有効な判断基準を与えうると考えられる。

5. 結論

異なる3種類の鉄筋コンクリート供試体に対して、繰り返し載荷試験を行い、そのとき検出されるAE波形にモーメント・テンソル解析を適用し、以下の結果を得た。

- (1) 鉄筋コンクリート梁の繰り返し曲げ試験では、負荷初期段階から引張型及びせん断型ひび割れが混在して鉄筋近くに発生し、破壊過程の進行とともにせん断型ひび割れの発生比率が高まり、やがて負荷時のみならず、除荷過程でも鉄筋とコンクリートの境界付近にせん断型ひび割れの発生するのが確認された。また、カイザー効果は、供試体下部引張応力側2支点間の中央付近に発生する主曲げひび割れの開口量が約0.12mmを超え、せん断型ひび割れの発生が顕著になると成立しなくなることが示された。
- (2) 両引き試験では、初期に鉄筋近くで発生する引張型ひび割れが、やがて外側のより広い領域で発生するようになり、さらに破壊過程の進行とともに、鉄筋とコンクリート間のすべりによると考えられるせん断型ひび割れが、両者の境界付近に集中的に発生

するのが観察された。

- (3) 鉄筋コンクリート箱形ラーメン隅角部の繰り返し載荷試験では、最大主引張応力が作用する位置に最初に発生する主曲げひび割れの開口量が、0.2mmを超えるとせん断型ひび割れが発生し始め、カイザー効果が成立しなくなり、さらに除荷時にも多くのAE信号の検出されることが示された。また各ひび割れの発生位置とその種類、及び運動方向は、目視されたひび割れ発生状況とよく一致していた。
- (4) 上述したごとく、モーメント・テンソル解析を適用することにより、コンクリート供試体中に生ずるひび割れ進展過程を定量的に評価し、かつ可視化が可能であることが示された。また表面ひび割れ幅とひび割れの種類、及びカイザー効果成立の有無、さらに除荷時のAE活動度との関係が定量的に評価され、コンクリート部材の破壊過程で一般的に見られるAE発生挙動の特徴が明らかにされた。それゆえ、コンクリート部材の健全性をAE法で評価するにあたり、カイザー効果成立の有無及び除荷時におけるAE活動の有無は、極めて有効な判断指標になりうると考えられる。

参考文献

- 1) 大津政康：コンクリート構造物の健全度診断へのアコースティック・エミッションの適用，コンクリート工学，25(12)，pp.5-11，(1987)
- 2) 大平貴規，岸 輝雄：AE原波形解析と微視割れの動的挙動研究への適用，鉄と鋼，70(16)，pp.12-19，(1984)
- 3) M. Ohtsu：Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of Acoustic Emission Source: Application to in Situ Hydrofracturing Test, J.Geophys. Res., 96(B4), pp. 6211-6221, (1991)
- 4) 大津政康，重石光弘，湯山茂徳，岡本享久：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，42(10)，pp.570-575，(1993)
- 5) M.Shigeishi and M.Ohtsu：Crack Kinematics by Simplified Moment Tensor Inversion of AE, Progress in AE V, JSNDI, pp.211-216, (1990)
- 6) 上田貴夫，鈴木志朗，三木自行，大津政康，重石光弘，湯山茂徳：岩盤グラウト注入に伴うAE発生特性とその波形解析，第4回地下と土木のAE国内コンファレンス論文集，資源・素材学会，pp.91-96，(1991)
- 7) S.Yuyama, R.Tomita, T.Okamoto, S.Kajio, M.

- Ohtsu and M. Shigeishi: Fundamental Study of Acoustic Emission Generated in Corner Part of Reinforced Concrete Rigid Frame Under Cyclic Loading, Progress in AE VI, JSNDI, pp.487-495, (1992)
- 8) 村上祐治, 清水 保, 神山英幸, 松島 学, 湯山茂徳: 送電用鉄塔基礎の定着引抜き実験に関する変形挙動とAE特性, 第5回地下と土木のAE国内コンファレンス論文集, 資源・素材学会, pp.123-128, (1993)
- 9) 湯山茂徳, 岡本享久, 長瀧重義: 補修した鉄筋コンクリートはりのAEによる健全性評価, 第4回地下と土木のAE国内コンファレンス論文集, 資源・素材学会, pp.62-69, (1991)
- 10) 長瀧重義, 岡本享久, 綾田隆史, 湯山茂徳: AE法による鉄筋コンクリート部材のひび割れ進展状況の把握, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, 土木学会構造工学委員会, pp.139-144, (1991)
- 11) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第294号, pp.85-100, (1980)