

## 論文 AE法を用いたコンクリート床版のひび割れ診断に関する研究

渡辺 健<sup>\*1</sup>・久保陽平<sup>\*2</sup>・二羽淳一郎<sup>\*3</sup>・横田 弘<sup>\*4</sup>

**要旨**：供用されていた道路橋の鉄筋コンクリート(RC)床版において、車両走行中に発生するアコースティック・エミッション(AE)計測を実施した。そして、既に床版に発生しているひび割れの特徴を、既往のAE法に関する研究成果ならびに基礎的実験結果に照らし合わせて検討した。その結果、視覚では判断できない個々ひび割れの特徴の違いを、AE計測を実施することで識別できる可能性のあることが明らかとなった。

**キーワード**：鉄筋コンクリート床版, アコースティック・エミッション(AE)

## 1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート(RC)床版に顕在化している劣化を定量的に診断できる手法の確立が求められており、現在、赤外線法、打音法あるいは超音波法などの適用が報告されている。

コンクリートの破壊の特徴を適切に把握できる手法として、アコースティック・エミッション(AE)法が挙げられる。AEは、コンクリート中に発生した微視的な破壊(ひび割れ)に伴い発生する弾性波であり、その発生頻度あるいは波形の特徴を示すAEパラメータは、コンクリートの破壊挙動と密接な関係があるとされている。センサをコンクリート表面に貼付することで計測可能なAE法は、その操作が簡便であり、これまで様々なコンクリート部材に適用されてきた。とりわけ、RC床版を対象とした研究では、損傷部位の特定あるいは損傷程度の評価に関して、その有用性が主に議論されてきた<sup>1)</sup>。一方で、RC床版の損傷を評価するためには、ひび割れの発生箇所や、その幅あるいは深さを把握しておくことだけでなく、その種類あるいは進展状況も把握しておくことが重要である。

本研究では、RC床版に形成されているひび割れを対象に、視覚的には判断できない個々のひび割れの特徴を、AEを計測することで簡易に識

別できる可能性を考察した。初めに、切欠きを有するコンクリートはりの繰返し3点曲げ試験を実施し、1本のひび割れの異なる破壊進行状態(発生・成長)を、検出したAEパラメータを検討することで識別することを試みた。さらに、首都高速道路のランプとして23年間供用されているRC床版において、車両走行中のAE計測を実施した。そして、既に床版に発生しているひび割れの特徴を、ひび割れ開閉幅の計測結果ならびに繰返し3点曲げ試験結果に照らし合わせて検討を進めることで、AE法によるRC床版の劣化診断に対する有効性を示した。

## 2. 既往の研究成果ならびに基礎実験

## 2.1 既往の研究

コンクリート供試体において、せん断型ひび割れが卓越する一面せん断試験で計測されるAE(せん断型AE)は、開口型ひび割れが卓越する割裂引張試験におけるAE(引張型AE)とは異なる特性を有する。岩波ら<sup>2)</sup>およびUchidaら<sup>3)</sup>は、AEパラメータのうちb値(振幅頻度関係の勾配)、平均周波数(=カウント数/継続時間)あるいはRA値(=立ち上がり時間/最大振幅値)は、ひび割れ種類の識別に有効な指標であることを報告している。すなわち、引張型AEは、せん断型AEと比

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 Ph.D (正会員)

\*2 東京工業大学 工学部土木工学科

\*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

\*4 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 工博 (正会員)

較して最大振幅値および平均周波数が高く、b 値および RA 値が低い傾向にあった。引張型 AE は破壊の進行に起因する AE、およびせん断型 AE は形成されたひび割れ面の摩擦に起因する AE と考えると、これらの指標は、繰返し荷重が作用するコンクリートの破壊進行過程を識別することにも有効であると思われる。これを確認するために、以下に示すとおり、コンクリートはりの載荷実験を行った。

## 2.2 静的繰返し 3 点曲げ載荷試験

図-1 に、作製したコンクリートはりの寸法および配置した計測機器の位置を示す。試験には、スパン中央に 25 mm の切欠きを有する 3 体のはり (No.1~No.3) を用意した。載荷は、荷重が最大値に達した以降 (ポストピーク域) において、0 kN まで除荷した後、再び載荷する繰返し載荷とした。載荷中、計 2 個の 150 kHz 共振型センサ (周波数帯域: 50~200kHz) を、切欠き上部 (センサ名称: CH1) および切欠き先端付近 (センサ名称: CH2) に設置することで、AE を計測した。計測の際、増幅度は 60 dB、しきい値は 40 dB およびカウント数 > 1 とした。

## 2.3 実験結果

1 つの AE が発生し供試体全域に伝播すると、複数のセンサで検出される。そこで、AE 波速度および AE センサ貼付位置間の距離を考慮して、AE 発生源に最も近いセンサでの検出結果のみを、以下の検討に用いることとした。図-2 に、

供試体 No.1 における、時間経過に伴う荷重あるいは CH1, CH2 において検出された AE 数 (ヒット数) の推移を示す。切欠き先端付近に貼付したセンサ (CH2) によるヒット数は、はり上部に設置したセンサ (CH1) によるヒット数と比較して、初期に高い値を示すが、その後両者の関係は逆転する。これは、載荷に伴い切欠き先端に発生し、その後、はり上端に向けて進展するひび割れ挙動と強く関連していると考えられる。2.1 に基づき、図-3 に、ポストピーク域で得られた AE の、最大振幅値および平均周波数の発生度数分布を示

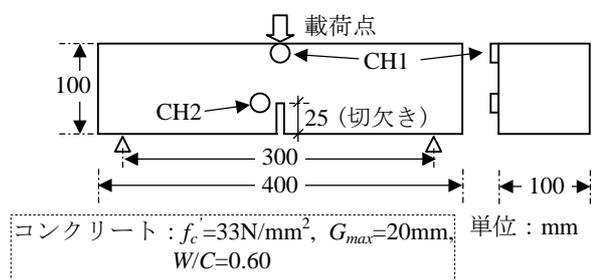


図-1 供試体概要

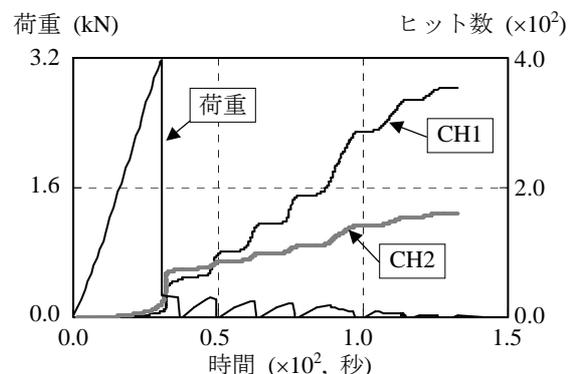


図-2 荷重および AE ヒット数の推移 (No. 1)

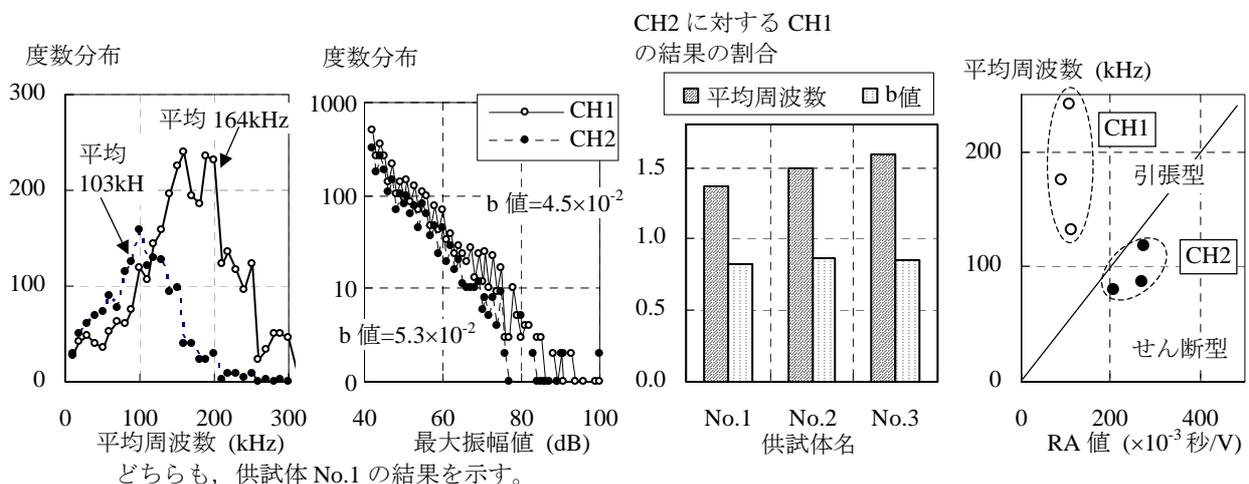
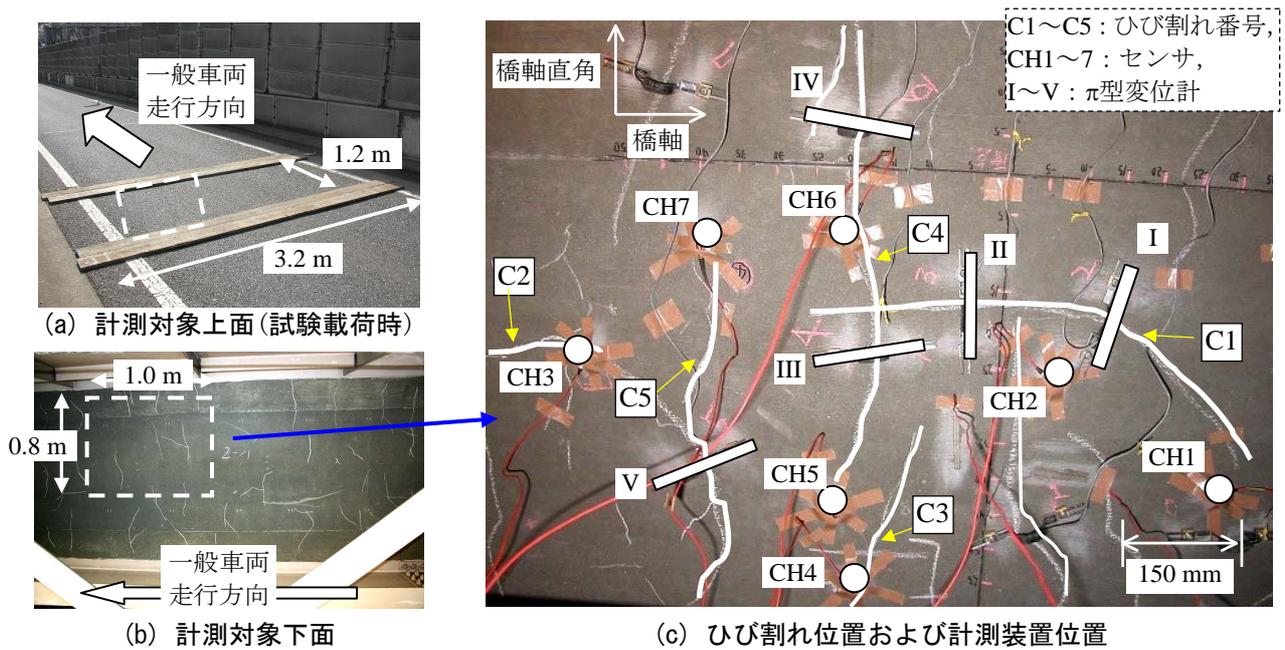


図-3 CH1 および CH2 より得られた平均周波数および最大振幅値



図—4 計測対象および計測機器位置 (ただし、白線は顕著なひび割れを示す。)

す。CH2 において得られた結果と比較して、CH1 において得られた結果は、最大振幅値および平均周波数が卓越して分布しており、一方、最大振幅値の度数分布の傾きとして算出される  $b$  値は低下している。この傾向は、CH2 での計測結果に対する CH1 の計測結果の割合が示すとおり、実験を行った 3 体のいずれにおいても確認された。また、図—3 に示す平均周波数と RA 値の関係は、センサ貼付位置に依存した違いを明確に示しており、その特徴から、CH1 では引張型 AE、CH2 ではせん断型 AE に近い傾向の AE が検出されたことが確認できた。

このセンサ位置に依存した AE パラメータの相違は、AE 発生源であるコンクリートの破壊進行過程の相違に起因した現象であると考えられる。繰返し载荷を実施したポストピーク域において、CH1 は、ひび割れ発生・進展に起因した AE を計測しやすい環境にあると考えられる。一方、CH2 における結果は、既に形成されたひび割れ面における、除荷・再载荷に伴う開閉の際の摩擦に起因した AE が、主に寄与していたものと考えられる。

すなわち、これらの AE パラメータは、同一のひび割れにおいても位置により異なるひび割れ進行過程の相違を、適切に識別できる有効な指

標であると考えられる。

### 3. RC 床版における AE 計測概要

#### 3.1 対象とした構造物の概要

図—4 に、計測対象および配置した計測機器の位置を示す。計測対象は、改築されることになった、首都高速道路のランプに使用されていた RC 床版である。この RC 床版は、23 年間供用されており、参考までに、24 時間の交通量は、3463 台(1998 年)<sup>4)</sup>であった。また、幅は 3.2 m およびランプの橋脚間隔は約 15 m あり、橋脚間には、鋼製の横桁が 4.9 m 間隔で設けられていた。目視観察の結果、床版下面には、主鉄筋に沿った(橋軸直角方向)曲げひび割れとともに、配力筋に沿う方向(橋軸方向)の曲げひび割れが観察できた。計測時の RC 床版は、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に記載されている劣化過程では、状態 II(進展期)にあったと推測される。

#### 3.2 クレーン車による载荷試験の概要

計測対象に対する载荷は、供用期間中の通行車両(通常载荷)、および供用終了後に 2 つの車輪軸を持つ総重量 26.2 tf のクレーン車(試験载荷)により実施した。通常载荷では、平日の 16 時から 10 時の間(18 時間)に計測対象上を通行した一般車両の重量を利用した。一方、試験载荷

では、計測対象上に厚さ 30 mm の板を 2 箇所設置して段差を設け、クレーン車の車輪荷重を衝撃的に与えることで、通常載荷と比較して、大きな荷重作用を再現した。クレーン車の移動速度は時速 5 km 程度とし、計測対象上を 10 往復した。

### 3.3 計測項目および計測方法

図-4(c)に、床版下面において目視により観察されたひび割れ位置、 $\pi$ 型変位計および AE センサ位置を示す。主鉄筋方向および配力筋方向に進展している、残留ひび割れ幅 0.5~1.5 mm を有する顕著なひび割れ(C1~C5)に着目し、計 5 個の $\pi$ 型変位計(I~V)を用いて、ひび割れ直角方向の変位(ひび割れ開閉幅)を計測した。また、計 8 個のセンサ(CH1~CH8)を、計測対象表面におけるひび割れの先端、および十分な幅を有するひび割れ中間部に配置することで、AE 計測を実施した。ただし、車両走行に伴う雑音(ノイズ)が、AE 計測結果に与える影響を確認するために、CH8 は、ひび割れが全く存在しない領域に貼付した。計測の際適用したセンサ、しきい値および増幅率は、2.2 で適用した条件と同一とした。

## 4. 計測結果および考察

表-1 に、ひび割れ進展方向、センサ貼付位置、通常載荷あるいは試験載荷において計測された AE パラメータおよびひび割れ開閉幅の最大値をまとめる。ひび割れが観察されない領域

に貼付した CH8 では、ヒット数が顕著に少なかった。これは、クレーン車の車輪と舗装表面との摩擦などによるノイズが、ほとんど検出されなかったことを示している。

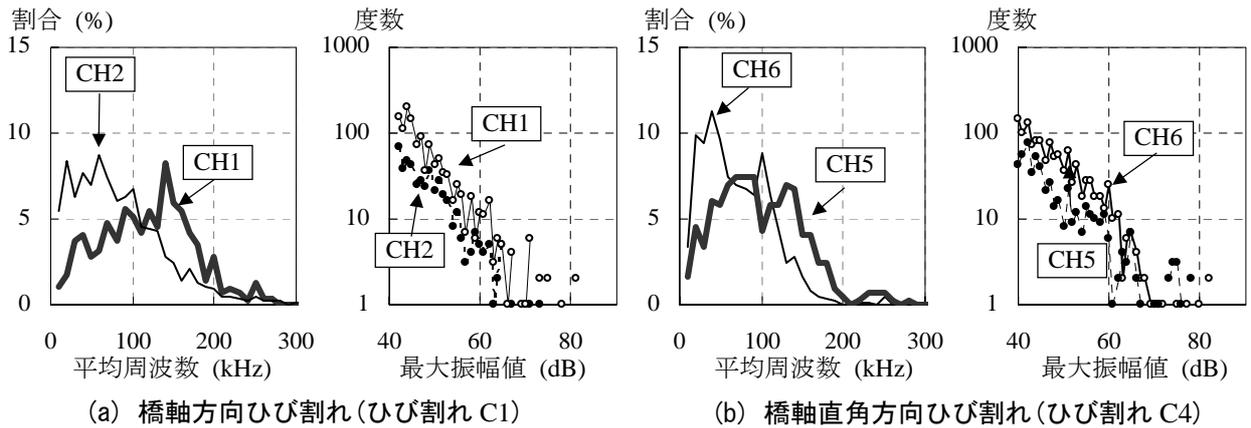
### 4.1 ひび割れの部位と AE パラメータ

試験載荷において得た AE の測定結果を、それぞれのひび割れに対するセンサ貼付位置を考慮して検討する。表-1 に示すとおり、ひび割れ C1 および C4 に着目すると、中間部におけるヒット数は、先端部で計測されたヒット数と比較して大きな値を示した。一方、波形の特徴を調べるため、図-5 に、平均周波数および最大振幅値の発生度数分布に関して、(a) 橋軸方向および (b) 橋軸直角方向に進展しているひび割れの先端および中間部にて計測された結果を示す。いずれのひび割れにおいても、ひび割れ先端にて計測された AE は、中間部にて計測された AE と比較して、100~150 kHz を示す平均周波数が卓越して分布しており、この卓越平均周波数は、2.3 であり上部に設置した CH1 での結果に相当していた。また、最大振幅値は高い値を示し、b 値は低下したことも、CH1 (2.3) の結果と良く一致した。載荷に伴い、ひび割れ先端では、ひび割れが進展している一方、十分なひび割れ幅を有するひび割れ中間部では、ひび割れの進展と言うよりは、開閉挙動が主に卓越していると考えられる。2 における検討結果を併せて考慮すると、図-5 に現れた AE パラメータの相違は、コ

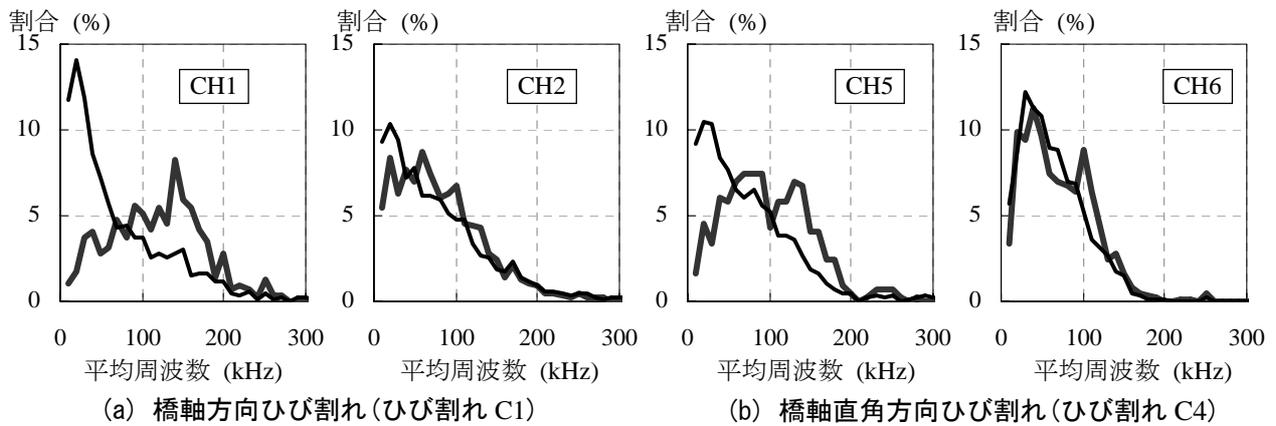
表-1 RC 床版における計測結果

ひび割れ		AE									ひび割れ開閉幅の最大値 (mm)
		センサ	貼付位置	通常載荷			試験載荷				
番号	進展方向			ヒット数	平均周波数* (kHz)	RA 値* $\times 10^{-3}$ (s/V)	ヒット数	b 値 $\times 10^{-2}$	平均周波数* (kHz)	RA 値* $\times 10^{-3}$ (s/V)	
C1	橋軸方向	CH1	先端	2687	69	907	477	5.4	161	177	1.27
		CH2	中間	2184	76	921	974	5.0	106	535	
C2	橋軸方向	CH3	先端	8735	118	491	1293	5.0	180	240	—
C3	橋軸直角方向	CH4	中間	4218	60	568	596	6.5	73	401	—
C4	橋軸直角方向	CH5	先端	5911	71	782	446	4.0	123	109	0.95
		CH6	中間	3863	59	482	961	6.8	66	393	
C5	橋軸直角方向	CH7	先端	2850	36	737	241	4.5	59	296	0.61
無し		CH8	—	121	51	235	16	—	—	—	—

\* 得られたデータの平均値



図—5 平均周波数および最大振幅値の発生度数分布



図—6 異なる载荷方法による平均周波数の度数分布の相違（ただし、細線：通常载荷，太線：試験载荷における結果を示す。）

ンクリートの破壊進行過程の相違（進展あるいは開閉）を適切に評価しているものと考えられる。

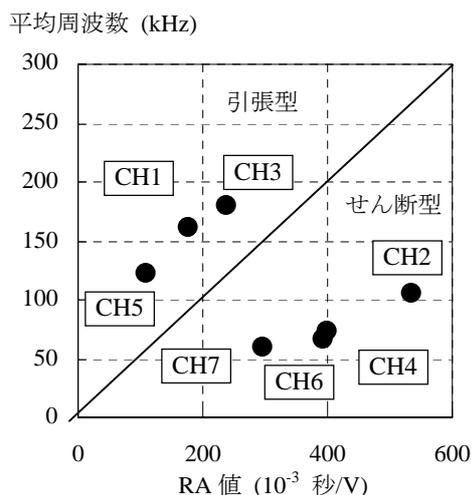
図—6に、異なる载荷方法による平均周波数の度数分布の相違を示す。CH2およびCH6における結果では、その分布が载荷荷重の相違に依存せずほぼ同様の傾向を示しており、一般载荷時においても、ひび割れの開閉挙動が卓越していたことが推測できる。一方、ひび割れ先端において卓越した平均周波数は、明らかに低下した。これは、試験载荷と比較して相対的に負担の小さい通常交通下では、ひび割れは、進展というよりも開閉挙動が主であったということを示していると思われる。

#### 4.2 AEパラメータに基づくひび割れの比較

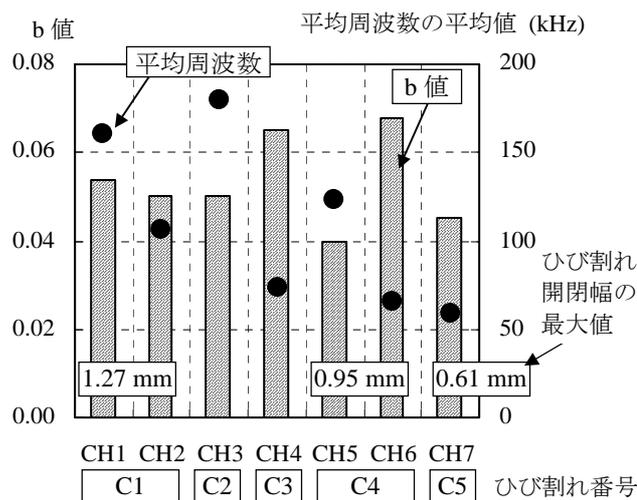
これまでのAEパラメータを用いた検討に基づき、各ひび割れの特徴の違いを検討する。図—7に、(a)RA-平均周波数関係に基づくひび割れ進行過程の識別、および(b)各AEセンサにお

けるb値および平均周波数の平均値を示す。また、図—7(b)には、計測できたひび割れ開閉幅の最大値を合わせて示す。図—7(a)では、各センサにおけるAEを、引張型AEおよびせん断型AEに大別することができた。特に引張型AEは、すべてひび割れ先端部において検出されたAEであった。ただし、同様にひび割れ先端に配置したCH7はせん断型AEに区別された。表—1に示したとおり、ひび割れ開閉幅およびヒット数が、比較的小さい値を示したことを踏まえると、ひび割れC5は、進展が比較的少なかったと推測できる。このように、RA値および平均周波数を用いることにより、ひび割れ進展の有無が推測できると考えるが、さらにひび割れ進展の程度を診断するには、他のAEパラメータを含めて議論することが望ましい。

そこで、図—7(b)において、さらにb値を検討に組み入れた。ひび割れ進展に伴うAEの特徴



(a) RA-平均周波数関係に基づくひび割れ進行過程の識別



(b) b 値および平均周波数の平均値に基づくひび割れ進行過程の識別

図—7 ひび割れ開閉幅と各種 AE パラメータの関係

は、比較的高い平均周波数および低い  $b$  値であったことを考慮すると(2.3), その特徴は、ひび割れ開閉幅の増加に伴い顕著に現れた。すなわち、ひび割れ C1(CH1, 2)では、C4(CH5, 6)と比較して、ヒット数は計測部位ごとにほぼ一致した値であったが、各センサでの  $b$  値に対する平均周波数が高くなった。ひび割れ C1 と同様、橋軸方向に進展していたひび割れ C2(CH3)では、やはり  $b$  値に対する平均周波数が高いことを踏まえると、対象とした RC 床版では、橋軸直角方向のひび割れと比較して、橋軸方向のひび割れが、より活発に進展していたことが推測できる。

## 5. まとめ

本研究で得られた結論をまとめる。

- (1) AE パラメータを検討することで、RC 床版に形成されているひび割れの、先端部で検出された AE を引張型 AE に、ひび割れ中間部で検出された AE をせん断型 AE に識別することができた。
- (2)  $b$  値およびヒット数を併せて検討することで、ひび割れ開閉量より推測されたひび割れ進展に関する活発度の違いが、AE 法を用いて推測できた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、計測に関して首都高速道路公団をはじめ工事関係者の皆様にご助力を頂きました。また、本研究の一部は、平成 14 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1), 課題番号 14205064)および土木学会吉田研究奨励金によって実施しました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Yuyama, S. et al.: Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission, NDT&E International, Elsevier, Vol.34, pp.381-387, 2001
- 2) 岩波光保ほか：曲げを受ける鉄筋コンクリートはりの AE 発生特性とその劣化評価への適用性に関する基礎的検討，土木学会論文集，No.606/V-41, pp.89-102, 1998.11
- 3) Uchida, M., Tsuji, N., and Ohtsu, M.: Identification of cracking in concrete structures by acoustic emission, Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Acoustic Emission Symposium, pp.138-143, 2002.11
- 4) 首都高速道路厚生会：第24回首都高速道路起終点調査 報告書，1998.12
- 5) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001.1