

[64] AE手法による鉄筋コンクリート梁の疲労破壊予測に関する研究

正会員 ○ 柿沢 忠弘 (東京大学大学院)

正会員 魚本 健人 (東京大学生産技術研究所)

1. ま え が き

コンクリート構造物には種々の静的外力を受けるのみならず、くり返し荷重を受ける構造物が多数存在する。橋梁の場合を取りあげると、例えば全国各地に建設された高速道路の交通量は設計当初において予想された交通量に比べるとはるかに多量になっているものも多く、その疲労寿命および劣化程度に関しては的確な予測方法が必要となってきた。

現存する構造物の疲労寿命を予測する方法としては、今日までの交通量調査や設計時の疲労特性から計算で求める方法も存在するが、高速道路の橋脚や東海道・山陽新幹線の高架橋などで、アルカリ骨材反応や鉄筋の腐食によるコンクリートの劣化現象が続発して大きな社会問題となっている今日、補修をきちんと実施していく以外に手はなく、そのためには適切な補修時期を知ることは極めて重要である。にもかかわらず、こうしたコンクリート構造物の劣化をも考慮した疲労寿命および劣化程度の予測方法は見当たらず、その出現が強く望まれている。

そこで本論文では、一定応力振幅のくり返し荷重を受ける普通鉄筋コンクリート梁(RC梁)について、荷重くり返し数や梁の変形、アコースティック・エミッション(AE)カウント数などの計測を行なって疲労特性とAE特性との関係を明らかにし、そのAE特性が梁の疲労寿命や劣化程度を予測する手段として利用できるかどうかの検討を加えた。その結果、梁の疲労寿命および劣化程度の推定に対してはAE計測が有効であることが判明したので、以下にこれを報告する。

2. 実験概要

実験に使用したセメントはすべて普通ポルトランドセメントである。粗骨材は最大寸法15mmの秩父両神産の砕石(比重2.71、吸水率0.48%、F.M.6.33)を、細骨材は富士川産の川砂(比重2.62、吸水率1.56%、F.M.2.79)を用いた。鉄筋はD-6およびD-16(SD30)の2種類とした。

コンクリートは表-1に示すように、水セメント比50%で、スランプが10±1cmとなるように配合した。また、疲労試験開始時(材令6週)のコンクリートの圧縮強度を表-1にあわせて示す。

供試体は図-1に示すような寸法形状の梁を普通コンクリートで合計5本作製し、材令6~8週のうちに疲労試験を行なった。

実験で用いたAE計測ブロックダイヤグラムは図-2に示す通りであり、各計測器の設定は、プリアンプの増幅度40dB、メインアンプの増幅度40dB、フィルター帯域0.1MHz~1MHz、ディスクリレベル400mV、サンプリング時間間隔1秒とした。計測されたAE波は合計80dBの利得で増幅され、AE累積数、およびA

表-1 配合表

	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				圧縮強度 (kg/cm ²)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
普通 コンクリート	50	48	195	390	863	960	626

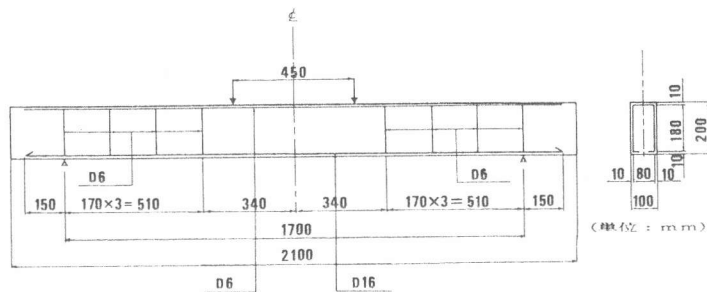


図-1 供試体寸法

Eレート（1秒間に発生するAE数）がX-Yレコーダー上に出力される。

疲労試験時の設定下限荷重はすべて1（ton）とし、設定上限荷重は表-2に示す値とした。ここで設定下限荷重1（ton）はRC梁の静的最大曲げ耐力の約12%に相当している。

疲労载荷開始と同時にAEの計測を開始するが、実験の都合上、梁の中央部のたわみが初期たわみよりも5mm増大した場合、あるいは梁の耐力が静的最大曲げ耐力の5%に低下した場合、またはくり返し载荷数が220万回をこえた時に载荷を中止し、直ちにひび割れをスケッチして破壊形式を観察した。また、RC梁1のみ測定状況に応じて载荷を中止して、ひび割れの進展状況を調べた。

3. 実験結果

3.1 疲労荷重を受けるRC梁のAE特性

実験結果を表-2にまとめて示す。実験した梁のうち、RC梁2と3は载荷くり返し数が220万回をこえても破壊せず、またRC梁1は、ひび割れの発生状況を調べた後、途中で载荷を中止した。その他の梁については、RC梁5がせん断破壊したが、RC梁4は梁中央部のたわみが初期たわみよりも5mm増大したため载荷を中止し、そのひび割れ発生状況から曲げ引張破壊するものと判定した。

図-3には、曲げ破壊した梁、せん断破壊した梁および破壊しなかった梁について、载荷くり返し数NとAE累積数との関係を示したが、それぞれの梁のAE特性は以下のようにまとめることができる。

タイプA：曲げ破壊した梁である。载荷初期でAEは数多く発生しているが、あるくり返し数まで達するとNが増加するにもかかわらずAEがほとんど増加しない区間が現われる。しばらくの間、この区間が継続してから再びAEが活発に発生し始めるが、その後もAEがあまり増加しない区間と頻発する区間をくり返し、やがて破壊にいたる。

タイプB：せん断破壊した梁である。くり返し数Nの増加に伴ってAEは発生し続け、タイプAに見られるようなAE数が一定の区間が現われないまま、梁は破壊した。

タイプC：破壊しなかった梁である。あるくり返し数まで数多く発生していたAEが、その後一定となるが、タイプAとは異なりAEの発生が再び活発になることはなく、载荷くり返し数が220万回をこえても破壊しなかった。なお、ひび割れは梁全体にわたって引張側に良く分散しており、ひび割れ幅もほとんど0.5mm以下であった。

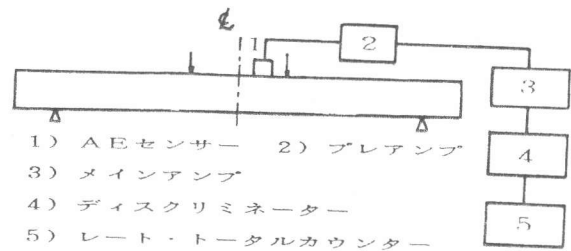


図-2 疲労試験時のAE計測システム

表-2 梁の疲労試験結果

供試体番号	設定上限荷重P(ton)	P/Pmax(%)	くり返し数N(×10 ⁴)	AE総数(×10 ⁴)	破壊形式
1	3.0	35.3	11.89	85.17	—
2	4.4	51.8	>220	10.67	破壊せず
3	5.1	60.1	>220	10.54	破壊せず
4	6.0	70.7	33.8	3.17	曲げ
5	8.0	94.2	1.87	2.31	せん断

Pmax = 8.45 (ton)

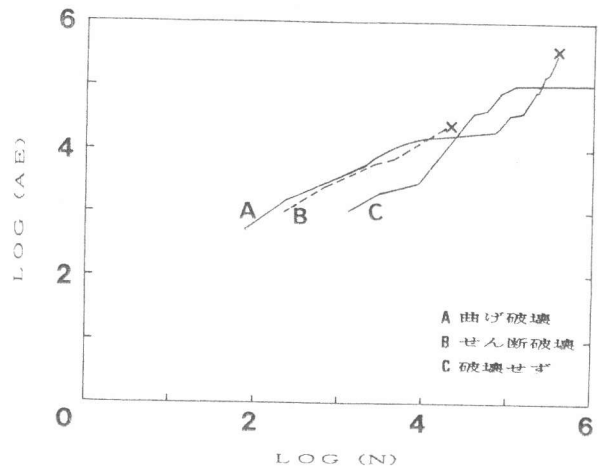


図-3 破壊形式とAE特性

3.2 疲労载荷中のひび割れ進展状況

曲げ破壊した梁の A E 特性に注目すると、A E の発生は単調ではなく増加と停止をくり返すような不連続な現象となっていることがわかる。これは疲労载荷中のひび割れの成長が進展と停止をくり返しており、A E はこの変化に対応して発生したためと思われる。すなわち応力集中箇所にマイクロクラックが発生するとその端部の応力集中のため塑性域が形成され、そのためのエネルギーを要するのでひび割れの成長は一時止むが、しばらくすると再び応力が増加してこのマイクロクラックの端に更にマイクロクラックが発生し、この現象をくり返してひび割れは成長しているのである。

そこで、A E が増加している区間と一定区間が、それぞれひび割れの進展と停止の時期に実際対応しているのかを RC 梁 1 について調べた。図-4 に示す様に

- ① 疲労試験前静的载荷 $N = 1$
- ② A E が一定区間に入るくり返し数 $N = 9500$
- ③ A E が再び増え始めるくり返し数 $N = 19100$
- ④ A E が増加途中にあるくり返し数 $N = 32000$

の各段階で機械を停止させ、ひび割れの進展状況を調べた結果が図-5 である。図中で点線は前段階までのひび割れを、実線はひび割れの新たな発生、進展を表わす。ひび割れの発生状況は以下の通りであった。

$N = 9500$ の時： $N = 1$ で発生したひび割れが進展し、また新たなひび割れも発生していた。

$N = 19100$ の時： $N = 9500$ で見られたひび割れ以外、新しいひび割れの発生・進展はなかった。

$N = 32000$ の時： 既存のひび割れのうち数本が進展していた。

これによれば $N = 9500 \sim 19100$ の A E が一定な区間は、ひび割れが全く進展しない安定期と言える。この安定期では载荷によって供給されるエネルギーはひび割れ先端に塑性域を形成するために消費され、したがってひび割れの成長にはあまり使用されていないものと思われる。

一方、せん断破壊した RC 梁 5 には、この安定期が存在しない。このことは载荷によって供給されるエネルギーは、すべてひび割れ成長のために消費されていることを意味しており、したがってひび割れは常に進展しつづけ、ついには大きなせん断クラックとなって主破壊にいたるものと考えられる。

4. 梁の疲労破壊予測に関する検討

図-3 をサイクル数 (N) と 1 サイクル载荷毎に発生する A E 数 (dAE/dN) で整理し直すと図-6 になるが、破壊形式に応じて特徴ある傾向を示している。曲げ破壊したタイプ A は、 N が小さい段階ではひび割れが形成されるために (dAE/dN) の値は大きい、やがて減少する。 (dAE/dN) 値が小さい区間は A E があまり発生しておらず、梁が安定な状態にある時期である。その後は何度か (dAE/dN) 値が増加しているが、これ

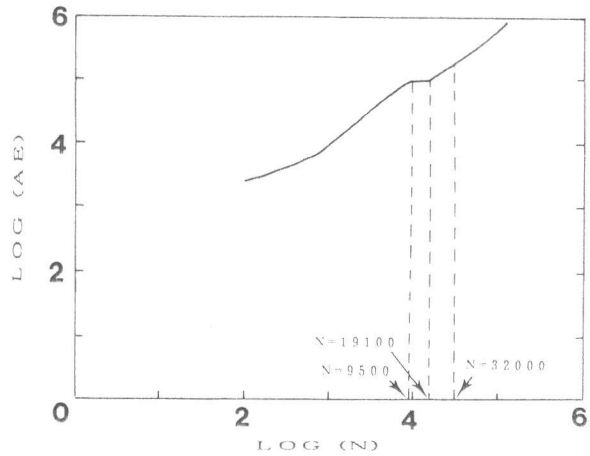


図-4 機械停止時の A E 特性

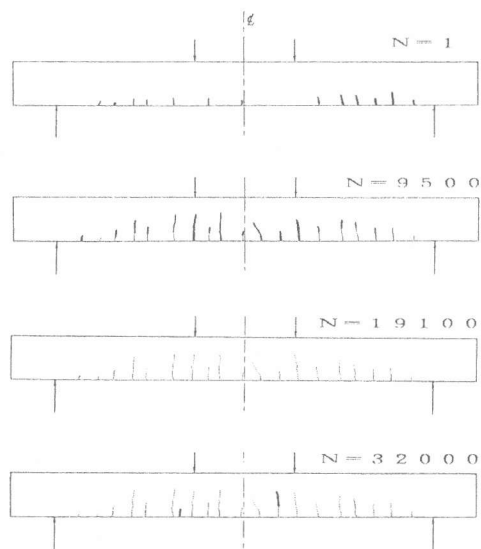


図-5 ひび割れ発生状況

はひび割れの進展期に対応していることは言うまでもない。したがって (dAE/dN) 値の増減を観察することで梁がひび割れの進展している不安定期にあるのか、あるいは安定期にあるのか判断可能であることをこの図は示している。このことを考慮すると、疲労载荷を受ける梁の疲労寿命ならびに現段階での劣化程度の予測が可能である。すなわち、 (dAE/dN) 値が低い時期では梁はひび割れも進展しない安全な状態にあると言えるが、 (dAE/dN) 値が高い時、あるいは増加しつつある時は、ひび割れが進展している危険な時期であり、 (dAE/dN) 値の増加の割合によっては破壊時期をも予想しうるものと考えられる。

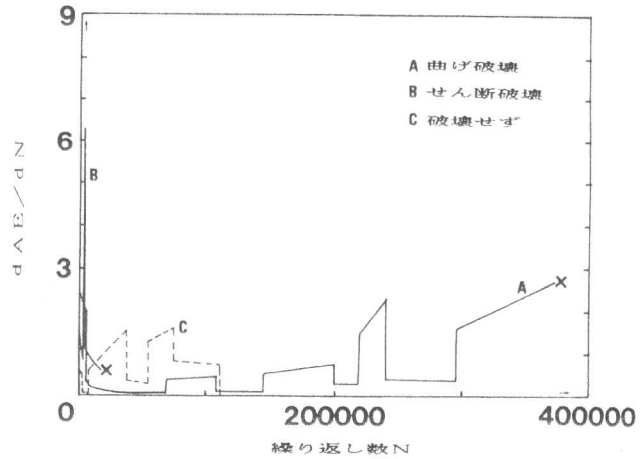


図-6 1 サイクル载荷毎に発生する AE 数

以上の考えを図-7 に模式的に示すが、このモニタリング方法は梁が疲労荷重下にあつて安定期が存在するような、せん断破壊が起こりにくいように設計された梁に限って有効である。 (dAE/dN) 値が低く、かつ一定か、あるいは減少していれば梁は破壊に対して相当安全であり、モニタリングは定期的に行なうだけでよいが、逆にその値が増加していれば、破壊が進行していると考えて、モニタリングを継続し、何らかの対策を講じなければならない。さらに、 (dAE/dN) 値の破壊規準値 (α) が予めわかっているならば、図-7 に示すように破壊までの時間を推定することが可能であり、よりの確なモニタリング方法になり得ると思われる。ただ、この破壊規準値 (α) は本研究の範囲内では定めることはできなかった。

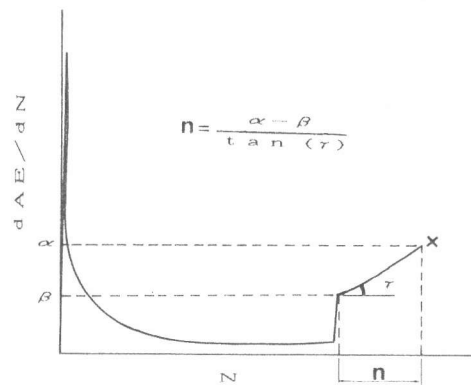


図-7 破壊時期の推定方法

実際の構造物では、一般にせん断破壊が起こりにくいように設計されているが、せん断破壊する梁についても、破壊点近傍では AE の急激な増加が予想されるために、破壊の予知は可能である。しかし、AE は常に発生し続けており、安定期が出現しないため疲労による梁の劣化状況および破壊時期を知るには、その疲労寿命にわたって監視を続けなければならないという問題点が存在する。

5. 結 論

梁の疲労载荷時に AE 計測を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 疲労载荷時において、曲げ破壊した梁では AE の安定期と不安定期がくり返されているが、せん断破壊した梁では安定期が現われずに破壊にいたる。また破壊しなかった梁の場合、安定期の後に AE の発生が再び活発になることはない。なお、梁の安定期と不安定期は、ひび割れの進展期と停止期に対応している。
- (2) 1 サイクル载荷毎に発生する AE 数 (dAE/dN) の値が一定か減少していれば、梁は破壊に対して安全と判断されるが、増加していればモニタリングを継続し、何らかの措置を講じる必要がある。

6. 謝 辞 本研究を行なうにあたり終始御指導頂いた東京大学生産技術研究所・小林一軸教授に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 大津政康「コンクリート材料におけるアコースティック・エミッション特性とその発生機構に関する基礎的研究」1983年
- 2) R.S.Williams and K.L.Reifsnider: Investigation of Acoustic Emission During Fatigue Loading of Composite Specimens J.composite Materials, vol.8, oct. 1974, pp340-355