

論文 AE 法および AE/UT 法による鉄筋コンクリート床版の劣化損傷評価

友清剛^{*1}・吉沢勝^{*1}・湯山茂徳^{*2}・魚本健人^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート・モデル道路橋床版に対して繰り返し載荷試験を実施し、AE 法および AE/UT 法を適用した。その結果、ヒット数などの AE 活動度は供試体の損傷進行とともに増加することが示された。また、カイザー効果の不成立状態を数値化した CBI 比は、損傷の進行とともに低下し、損傷度を表す有効な指標になることが確認された。さらに、AE/UT 法により、供試体中を伝播する弾性波のエネルギー値は、伝播経路における損傷の進行とともに、著しく低下することが示された。したがって、AE 法および AE/UT 法は、床版の損傷進行程度を評価するのに、実用的かつ有効な手法であることが確認された。

キーワード：AE 法, AE/UT 法, 鉄筋コンクリート床版, 損傷評価

1. はじめに

コンクリート構造物の損傷度を診断する方法として、コンクリート内を伝わる弾性波を用いる検査法がある。その内の一つに、車輛の通行等による負荷の変動など外的刺激でコンクリート中の損傷部から発生する弾性波(AE 波)を検出し、それを解析・評価する AE 法がある。またもう一つに、コンクリート表面に取り付けた AE センサーなど圧電素子を内蔵するパルサーに電気信号を入力することにより弾性波を発生させ、コンクリート内を伝播した後の波動を AE センサーで検出し、パラメータ解析を行う AE/UT 法がある。AE/UT 法は、検出される AE 信号のパラメータ値が、伝播経路の損傷状態に依存して変化するという特性を利用している。AE 法が載荷途中など、動的な環境下で固体内に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 法は静的あるいは動的条件下で、パルサーから入力した弾性波を検出して伝播特性を解析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。通常は同じ計測装置を共用できることから、同一試験で両手

法を併用することにより、信頼性の高い健全性診断が行えると考えられる。

本研究では、鉄筋コンクリート・モデル道路橋床版に対して繰り返し載荷試験を行い、AE 法および AE/UT 法を適用することにより、損傷度を診断する方法について検討した。

2. 試験方法

2.1 供試体

供試体として用いた鉄筋コンクリート・モデル道路橋床版を図-1に示す。供試体の外形寸法は、スパン方向 1500mm, スパン直角方向 2000mm, 中央部の厚さ 200mm である。供試体の支持条件は、図-2に示すように二辺支持であり、200mm × 200mm の面積に対する集中載荷を行った。コンクリートの配合と、物性値を表-1に示す。

2.2 載荷方法

繰り返し載荷試験は電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、荷重制御により行った。載荷試験は表-2に示すように、所定の最大荷重まで負荷

*1 (財)首都高速道路技術センター 技術部 (正会員)

*2 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)

*3 東京大学国際産学・共同研究センター教授 工博 (正会員)

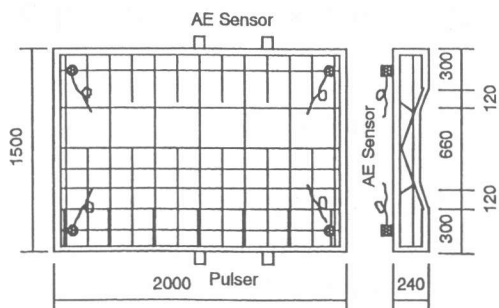


図-1 鉄筋コンクリート床版供試体
およびAEセンサー配置

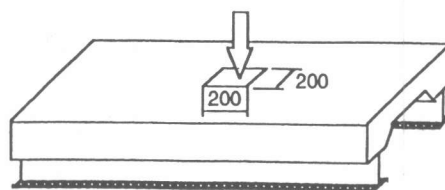


図-2 供試体の支持方法

表-1 コンクリートの配合と物性値

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MN/m ²)	静弾性係数 (MN/m ²)	動弾性係数 (MN/m ²)
		W	C	S	G						
45.5	42.1	161	354	743	1047	25	10.0	4.7	29.7	1.57 × 10 ⁴	2.26 × 10 ⁴

表-2 繰り返し載荷試験における
試験荷重の履歴

載荷段階 (回)	載荷荷重 (kN)
1	0 → 100 → 0
2	0 → 200 → 0
3	0 → 275 → 0
4	0 → 400 → 0
5	0 → 450 → 0

してからいったん除荷し、続いて次の最大荷重まで再負荷するという方法で五段階に分けて実施した。

2.3 AE計測システム

AE パラメータ解析と AE/UT 計測には、それぞれ PAC 社製 LOCAN 320 AE 計測システムおよび MISTRAS AE 計測システムを用いた。センサーおよびパルサーとしては、60kHz 共振型 (PAC 社製 R6) AE センサーを使用した。計測時の増幅率はプリアンプ 40dB、メインアンプ 40dB で合計 80dB である。またしきい値は 40dB に設定した。図-1に示すごとく、AE パラメータ解析では供試体上面の四隅にそれぞれ 1

個ずつ AE センサーを配置し、AE/UT 法では供試体の一側面に 2 個のセンサーを取り付け、相対する側面にパルサーを設置した。

2.4 AE/UT法

AE/UT 法は、コンクリート表面に取り付けた AE センサーなどの圧電素子を内蔵するパルサーに電気信号を入力することにより弾性波を発生させ、伝播特性の経路依存性を調べることで損傷状態を調査する手法である。

いま一例として、図-3のようにコンクリート供試体において、信号入力部 (パルサー) に電気信号 $u(t)$ を入力することにより励起した弾性波がコンクリート中を伝播し、信号検出部 (センサー) から、 $y(t)$ として出力される線形システム¹⁾ を考える。

ここで、パルサーのインパルス応答を $g_p(t)$ 、コンクリート (弾性波伝播媒体) の応答を $g(t)$ 、またセンサーの応答を $g_s(t)$ とし、出力に加わる雑音が無視できる程度なら、たたみ込み積分により、

$$\begin{aligned}
 y(t) &= g_p(t) * g(t) * g_s(t) * u(t) \\
 &= g'(t) * u(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

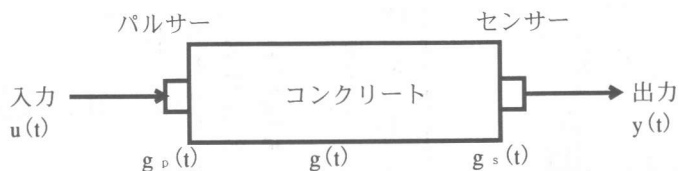


図-3 線形システム

ただし $g'(t) = g_p(t) * g(t) * g_s(t)$ が成立する。

一方、これを周波数領域で表すと、

$$Y(\omega) = G'(\omega) \cdot U(\omega) \quad (2)$$

$$\text{ただし } G'(\omega) = G_p(\omega) \cdot G(\omega) \cdot G_s(\omega)$$

となる。

このシステムにおいて、パルサーおよびセンサーは常に同一であり、また取り付け位置も変化せず、 $G(\omega)$ の周波数領域に対して $G_p(\omega)$ 、 $G_s(\omega)$ が充分広い周波数範囲にあるなら、 $g_p(t) * g_s(t)$ は一定であるから便宜的に定数 k とおけるので、式(1)および(2)は、

$$y(t) = kg(t) * u(t) \quad (3)$$

$$Y(\omega) = kG(\omega) \cdot U(\omega) \quad (4)$$

と書き直される。したがって、コンクリート内における弾性波の伝播特性を表す $g(t)$ あるいは $G(\omega)$ を求めるには、出力 $y(t)$ と入力 $u(t)$ 、あるいは $Y(\omega)$ と $U(\omega)$ 間の関係を調べればよいことになる。

いま入力信号 $u(t)$ として δ 関数を用いるとその定義から明らかなように、式(3),(4)は、

$$y(t) = kg(t) \quad (5)$$

$$Y(\omega) = kG(\omega) \quad (6)$$

となるので、出力信号 $y(t)$ 、あるいは $Y(\omega)$ を調べることにより、コンクリート中の伝播特性の変化、すなわち劣化度の違いを評価できる。

実験的には、使用するパルサーおよびセンサーの周波数帯域は、通常数 kHz ~ 数百 kHz であるので、立ち上がり時間が 100ns 以下のスパイク波をパルサーに入力すれば、近似的に δ 関数を入力したと見なすことができる。

本研究では、各荷重段階ごとに電気信号(立

ち上がり時間約 100ns、最大振幅値約 300V のスパイク波)をパルサーに入力して弾性波を発生させ、反対面に取り付けた R6 AE センサーで検出される信号の、パラメータ解析を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 AE解析

図-4、および図-5に第一回載荷および第二回載荷試験のパラメータ解析結果を示す。図中で、(a)は AE ヒット計数率(包絡線検波した AE 信号の 20 秒ごとの検出数)と荷重の履歴、また (b)は振幅値(ここで 0dB = 1 μ V を参照値とした、センサー出力換算の最大電圧値)の履歴である。さらに、図-6に第三回載荷(a)、および第四回載荷(b)における、AE パラメータ解析結果をそれぞれ示す。以下に、各載荷時の AE 発生状況をまとめてある。

(1) 第一回載荷

図-4に見られる如く、載荷開始直後に多くの AE 信号が検出されているが、これは載荷初期の機械的雑音によるものと考えられる。全般的に載荷に伴う AE 活動度は低く、AE 振幅値はほぼ 60dB 以下に限られている。また、除荷時にかなりの AE 信号が検出されている。

(2) 第二回載荷

図-5に示すように、第一回載荷時の最大荷重(100kN)を越えて初めて顕著な AE 発生が認められ、カイザー効果が存在している。載荷に伴う AE 活動度は第一回載荷時よりかなり大きく、振幅値 60dB ~ 80dB の AE 信号が数多く検出されている。また、除荷時にも微弱ながら AE 発生が見られる。除荷終了時に検出された

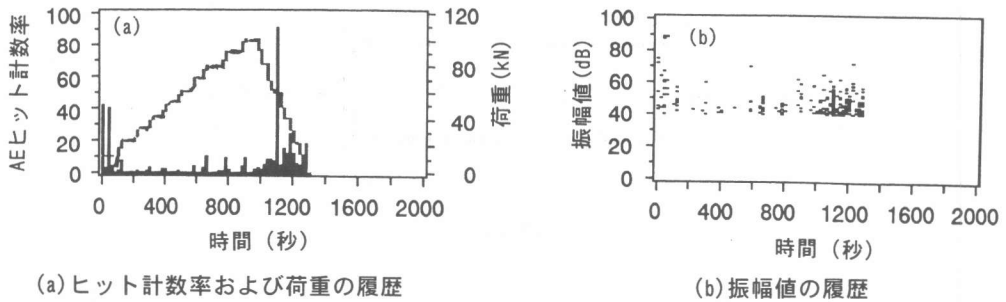


図-4 第一回載荷試験におけるAEパラメータ解析結果

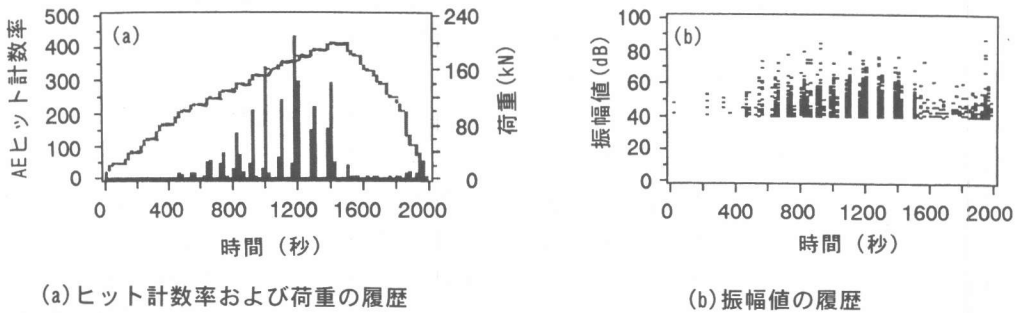


図-5 第二回載荷試験におけるAEパラメータ解析結果

AE 信号は、載荷治具と供試体との間で生じた摩擦などに起因する、機械的雑音によるものと考えられる。

(3) 第三回載荷

図-6の(a)に示すように、最初のAE発生は、荷重値が第二回載荷時の最大荷重(200kN)に至る以前の約130kNで顕著に認められる。したがって、カイザー効果は存在しない。「AE信号が検出された時の荷重/以前に経験した最大荷重」で定義される、カイザー効果の不成立状態を数値化したCBI比^{2),3)}は0.65である。載荷時のAE活動度は第二回載荷時の場合と同じ程度であり、除荷に伴うAE信号がこの場合も検出されている。

(4) 第四回載荷

図-6の(b)に見られるように、荷重値が約160kNを越えたあたりからAEが発生している。このため、CBI比は0.58とさらに小さくなっている。載荷および除荷時のAE発生状況

は第二回載荷、および第三回載荷の場合とほぼ同様である。

(5) 第五回載荷

載荷初期(80kN)から多数のAE信号が検出され、CBI比は0.20であった。除荷時に大きなAE活動が見られた。

以上の結果より、第一回載荷においてはAE活動度が低く、また第二回載荷でカイザー効果が存在しているので、一回目の載荷による供試体の損傷はほとんど進行していないと考えられる。表-3に、各載荷段階での最大荷重値、AE発生時の荷重、CBI比、および供試体中央部の最大たわみをまとめている。これより明らかに、第三回載荷以降カイザー効果は存在せず、損傷部の拡大とともにCBI比が徐々に小さくなる傾向が見られる。したがって、CBI比はコンクリート構造物の健全度を表す一般的な指標になりうる事が理解される。なお各載荷段階において、除荷に伴うAEの発生が認められ

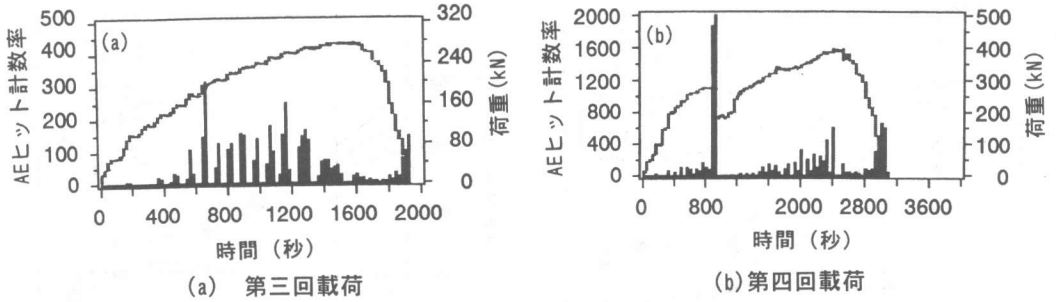


図-6 AEパラメータ解析結果

表-3 各載荷における最大荷重とCBI比, および最大たわみの変化

載荷段階 (回)	最大荷重 (kN)	AE発生時の荷重 (kN)	CBI比	最大たわみ (mm)
1	100	-	-	2.5
2	200	100	1.00	4.3
3	275	130	0.65	6.3
4	400	160	0.58	8.0
5	450	80	0.20	13.2

た。これは、除荷時に載荷治具と供試体との間に摩擦などが生じ、機械的雑音を発生させたことが主な原因と考えられる。

3.2 AE/UT解析

AE/UT解析では図-7に示すように2つのパルサーP1, およびP2に交互に電気信号を入力し、異なる4つの経路E11, E12, E21, E22を伝播したAE波をセンサーS1, およびS2で検出し、そのAEエネルギー値(包絡線検波したAE波形の面積の大きさを表す相対値)を評価した。

図-7に、各載荷試験における最大荷重時(ただし、処女供試体の場合は0)に計測されたAEエネルギー値と、この時負荷された最大荷重値との関係を示してある。また図-8は、各載荷終了後の完全除荷時に計測されたAEエネルギー値と、それまでに負荷された最大荷重値との関係を与えている。いずれの図においても、第三回載荷に至るまで、計測されたAEエネルギー値は減少し続ける。しかしながら、第四回および第五回載荷で計測した値には、あまり差が見

られない。したがって、第三回載荷時までは弾性波の伝播に影響を及ぼすひび割れ発生・進展などの損傷が供試体の載荷部から計測領域内を進行するが、それ以降の載荷では、すでに損傷進行部位が計測領域を通過したため、AE波の伝播特性に大きな変化を生じさせなくなったものと考えられる。以上の結果から、パルサーおよびセンサーを適切に配置することにより、各載荷段階で生ずる損傷進行部の位置をある程度評価可能になると考えられる。

ところで、図-7に見られるように、第一回載荷前後におけるAEエネルギー値の減少量は、第二回載荷前後、および第三回載荷前後の減少量に比べ著しく小さい。したがって、第一回載荷で生じた劣化損傷量は、第二回載荷および第三回載荷で生じた量に比べ、著しく小さいと推察される。これは、AEパラメータ解析で得た事実、すなわち第一回載荷におけるAE活動度は小さく、また第二回載荷でカイザー効果が存在することから、第一回載荷時の損傷進行量は小さい、という結果とよく一致している。この

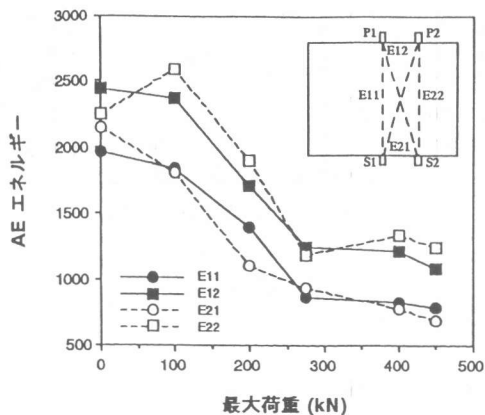


図-7 最大荷重時のAEエネルギー計測値

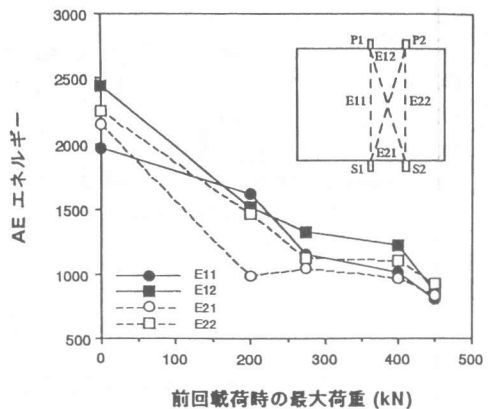


図-8 載荷終了後、完全除荷時のAEエネルギー計測値

ように、AE法およびAE/UT法を併用することにより、信頼性の高い劣化損傷評価が行えるものと考えられる。

4. まとめ

鉄筋コンクリート・モデル道路橋床版に対して、繰り返し載荷試験を行い、AE法、およびAE/UT法を用いて劣化損傷の進行程度を評価することにより、以下の結果を得た。

- (1) 最大荷重値を増加させて行った繰り返し載荷試験において、AEヒット数、振幅値などで表されるAE活動度は、供試体の損傷進行とともに増加することが示された。したがって、これらのパラメータをモニターすることにより、損傷進行程度を評価可能と考えられる。また、カイザー効果の不成立状態を数値化したCBI比は、損傷の進行とともに著しく低下することが示され、損傷度を表す有効な指標になりうることを確認された。
- (2) AE/UT法により、供試体中を伝播するAE波のエネルギー値は、伝播経路の損傷進行とともに、著しく低下することが示された。

したがって、AE/UT法は、床版の損傷進行程度、および部位を評価するのに実用的かつ有効な手法であると考えられる。

- (3) AE法およびAE/UT法で評価した損傷進行程度は、両者でよく一致していた。したがって、同一の試験でこれらを併用することにより、信頼性の高い診断が行えるものと考えられる。

参考文献

- 1) 今村勤：物理とフーリエ変換，岩波全書，1976
- 2) 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，非破壊検査，Vol. 43, No. 10, pp. 645-651, 1994, 10
- 3) Yuyama, S. Okamoto, T. Shigeishi, M. Ohtsu, M. and Kishi, T. : A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission, Standrads and Technology Update, ASTM STP 1353, S. J. Vahaviolos, Ed., American Society for Testing and Materials, 1998