

積層ゴム支承の非破壊検査による性能評価へ向けた 実験的検討

川崎佑磨¹・寺村直人²・伊津野和行³

¹正会員 工博 立命館大学助教 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

²学生会員 立命館大学大学院生 理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

³フェロー会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降から、免震あるいは地震時水平力を分散する構造として、積層ゴム支承が多く橋梁で使用されている。積層ゴム支承の普及から16年後の2011年、東北地方太平洋沖地震が発生し、地震動の影響により積層ゴム支承のゴムと鋼板の間で破断するという被害が初めて報告された¹⁾。破断原因として、ゴムの品質が基準を満たせていなかったこと、示方書の許容値を超える変位があったことが挙げられているが、未だ究明には至っていない。現在使用されている積層ゴム支承の多くは、供用から10年以上が経過しており、交通荷重や温度荷重など様々な負荷が与えられている。そのため、それらの影響が経年劣化として積層ゴム支承内部に蓄積されていると考えられる。

そこで本研究では、非破壊検査法の一つであるアコースティック・エミッション法（以降、AE法）を用いて、積層ゴム支承内部に蓄積された損傷の評価を繰り返し圧縮試験により検討した。

2. AE法とAEパラメータ

AE法²⁾は、固体材料内部に蓄えられたエネルギー

の解放により発生する弾性波を、固体材料表面に設置したAEセンサーにより検出する方法である。検出される波形の例を図-1に示す。

検出されたAE信号には、その発生要因に関する情報および伝達経路に関する情報などが含まれている。しきい値を超えてAEセンサに入力された一つのAE波形を1ヒットとしている。AEによる評価法は、時間や荷重などの外部パラメータに基づく履歴評価が主となる。本研究では、AEヒットと荷重履歴を確認した。さらに、AE源の破壊規模に関連すると考えられるAEエネルギーの履歴も確認した。

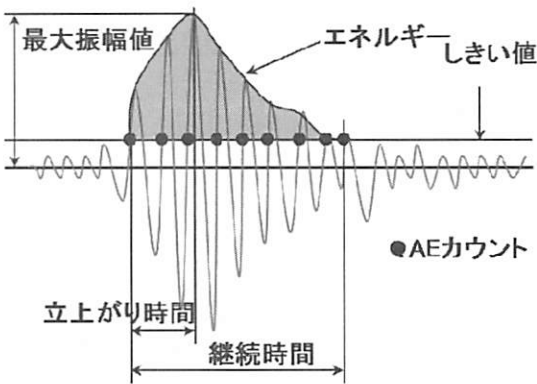


図-1 AE 波形の例とパラメータ

表-1 供試体緒元

1層厚	層数	総厚	側被覆厚	S1	S2	E
te(mm)	nr(層)	Σte(mm)	cl(mm)			N/mm ²
4	5	20	5	10.00	8.00	540

表-2 事前に行われた低温依存性確認試験

表示記号	実験内容	
Y-1	-30℃ ; PL175%+SR100%→PL175%+SS3kine -10℃ ; PL175%+SR100%→PL175%+SS3kine 常温 ; PL175%	PL ; プレローディング SR ; シンプルリラクゼーション試験 SS ; 単純せん断試験 sin ; 正弦波加振 MSR ; マルチステップリラクゼーション試験 EQ ; 地震波 % ; せん断ひずみ
Y-2	-30℃ ; PL175%+SR150%→PL175%+SS11kine -10℃ ; PL175%+SR100%→PL175%+SS11kine 常温 ; PL175%	
Y-3	-30℃ ; PL175%+SR175%→PL175%+SS17.5kine -10℃ ; PL175%+SR175%→PL175%+SS17.5kine 常温 ; PL175%	
Y-4	-30℃ ; PL175%+sin -10℃ ; PL175%+sin 常温 ; PL175%	
Y-5	-30℃ ; PL250%+ MSR250% -10℃ ; PL250%+ MSR250% 常温 ; PL175%	
Y-6	-30℃ ; EQ25mm→EQ25mm -10℃ ; EQ25mm→EQ25mm 常温 ; PL175%	
Y-7	-30℃ ; PL250%→MSR250%	
Y-8	-30℃ ; PL250%→MSR250%	

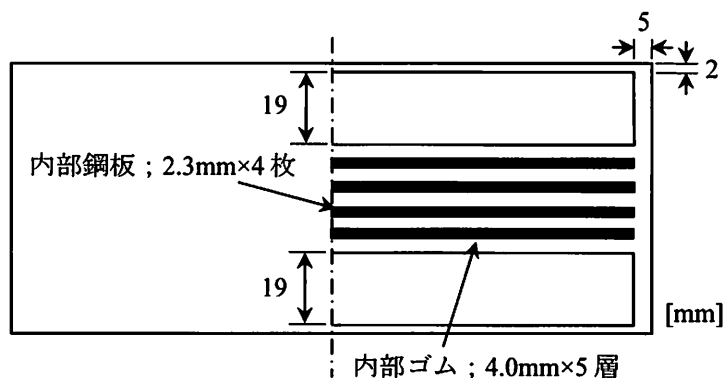


図-2 使用したゴム支承断面

3. 実験概要

(1) 供試体

本研究で使用した供試体は、寒地土木研究所で各種低温依存性確認試験で使用した高減衰積層ゴム支承である。供試体緒元および事前に行われた試験内容を表-1および表-2に、供試体の断面を図-2に示す。なお、供試体の幅および奥行きは170mmである。

(2) AEセンサの設置位置

本研究では、材料として減衰の大きいゴムを対象としており、AEパラメータは、検出されたAE事象とセンサの設置箇所の伝播距離に依存する。したがって、150kHzに共振周波数を有するAEセンサをゴムと19mmの鋼板の間に設置した。支承サイズの関

係から、5個のAEセンサを使用した。AEセンサの設置位置を図-3に示す。

(3) 载荷実験

本研究では、交通振動を模擬した繰返し圧縮载荷試験を行った。载荷試験の概要を図-4に示す。なお、上部構造の死荷重相当反力である153.6kN（面圧6MPa）を初期面圧として与えた³⁾。その後、一次形状係数によって決定される最大圧縮応力度³⁾の10%、20%、50%に相当する荷重を10サイクル繰返した。すなわち、10%の場合は153.6kNから167.1kN、20%の場合は153.6kNから180.6kN、50%の場合は153.6kNから221.1kNで载荷した。

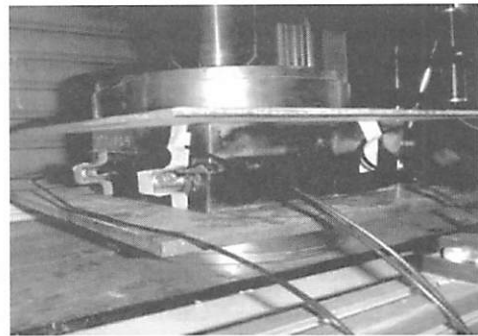
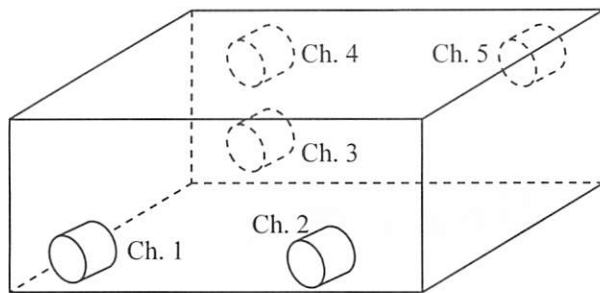


図-3 AE センサ設置位置

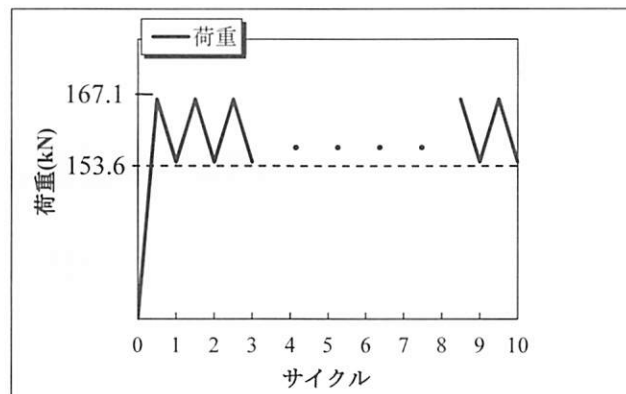


図-4 载荷条件 (10%の場合)

4. 実験結果

(1) 累積AEヒット数

10%, 20%, 50%荷重載荷時の各供試体における累積AEヒット数を図-5～図-7に示す。なお、検出されたAE事象の内、パラメータのカウント数Cが1, AEエネルギーEが0のデータは、全てスパイクノイズと仮定し削除している。結果より、Y-5では、10%で231個、20%で689個、50%で4670個のAE事象が検出され、全ての荷重割合において累積AEヒット数が他の供試体に比べて非常に多いことが確認された。なお、Y-3では、10%で31個、20%で78個、50%で157個のAE事象が検出され、2番目に累積AE

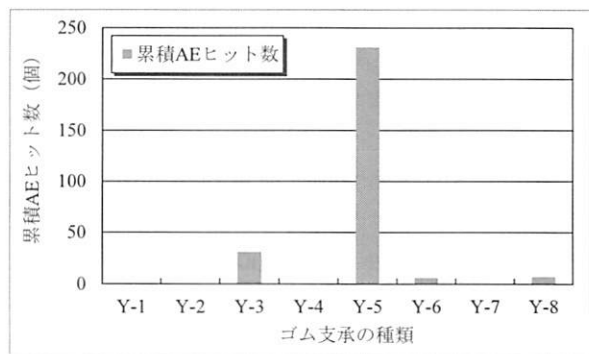


図-5 累積 AE ヒット数 (10%の場合)

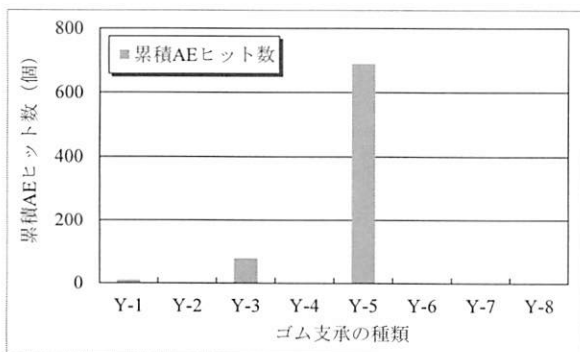


図-6 累積 AE ヒット数 (20%の場合)

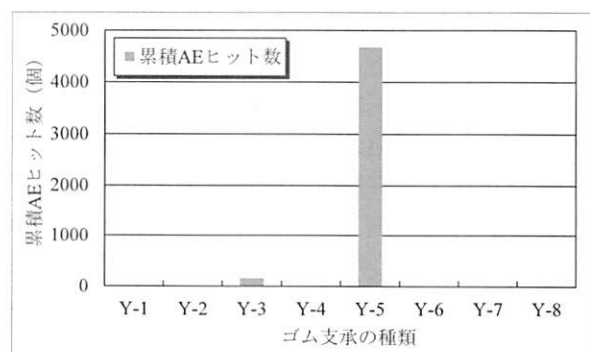


図-7 累積 AE ヒット数 (50%の場合)

ヒット数が多い結果となった。表-2より、事前に行われた確認試験において、Y-5はせん断ひずみ250%のせん断を受けており、他の供試体よりも過酷なせん断履歴を受けたことが上記の結果に繋がったと考えられる。

上記より、Y-3およびY-5において多くのAE事象が検出され、他の供試体よりも損傷している可能性がわかった。各供試体において損傷箇所をさらに限定するため、図-3に示す各センサ毎のAE事象検出数を確認した。その結果を表-3および表-4に示す。表より、Y-3ではCh.2のみでAEが検出されており、Y-5ではCh.1およびCh.3で多くのAEが検出された。特にY-5のCh.3が最も多くのAEが検出されていることから、Y-5ではCh.3付近に損傷が存在する可能性が考えられる。

(2) AEエネルギー

検出されたAE事象にはその発生要因に関する情報が含まれている。したがって、AEパラメータの中から、ひび割れ等の大きさと関係があるAEエネルギーに着目した。Y-3の各荷重割合におけるAEエネルギーの推移を図-8～図-10に、Y-5の各荷重割合におけるAEエネルギーの推移を図-11～図-13に示す。

Y-3の結果では、AEエネルギーは約50付近に多く推移している。また、荷重割合が50%の結果では、最大AEエネルギーが250以上となった。AEエネルギーが100以上のAE事象が多くなっていることから、供試体内部の損傷による影響が考えられる。

一方、Y-5の結果では、荷重割合が10%の段階で、最大AEエネルギーが約400となった。荷重割合が20%の時にAEエネルギーが2000を超え最大となった。荷重割合が50%では、継続して高いAEエネルギーのAE事象が検出されている。Y-5のAEエネルギー推移の結果から、高いAEエネルギーは全てCh.3から検出されていることが分かる。したがって、Y-5供試体のCh.3付近で損傷が存在する可能性がAE事象のパラメータからも確認できた。

(3) マイクロスコープによる観察

AE計測によりY-3およびY-5において供試体内部に損傷が存在する可能性が確認できたため、供試体を切断し、卓上マイクロスコープ（最大倍率1000倍）により観察をした。なお、観察に使用した供試体は、AE計測により、特に損傷の可能性が顕著に確認されたY-5供試体と、損傷していないと推測されるY-6供試体とした。切断箇所と観察箇所の概要

表-3 Y-3 の各センサ毎の AE ヒット数

センサNo.	荷重割合		
	10%	20%	50%
Ch.1	0	0	0
Ch.2	31	78	157
Ch.3	0	0	0
Ch.4	0	0	0
Ch.5	0	0	0

表-4 Y-5 の各センサ毎の AE ヒット数

センサNo.	荷重割合		
	10%	20%	50%
Ch.1	74	302	339
Ch.2	1	0	9
Ch.3	156	383	4322
Ch.4	0	2	0
Ch.5	0	2	0

を図-14に示す。

図-15(a)に示すように、Y-5のCh.3付近では、内部鋼板とゴムの界面で、横長の空隙が数か所確認された。せん断载荷方向に平行に空隙が存在することから、事前に行われた低温依存性確認試験によって、内部鋼板とゴムの界面付近に損傷が出来たと考えられる。本研究で圧縮载荷を行ったことで、これらの空隙が開閉して多くのAE事象が検出されたと考えられる。

一方、Y-6では図-15(b)に示すように、内部鋼板とゴム付近に損傷と考えられる空隙は確認されなかった。内部に損傷が存在しないため、圧縮载荷してもゴムが体積変化をするのみで、特徴的なAE事象の変化が確認されなかったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、積層ゴム支承内部の損傷を非破壊検査で検出し評価することを目的とし、繰返し圧縮载荷を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1). 事前に行われた低温依存性確認試験で最も損傷を受けたとされるY-5において、多くのAEヒット数が確認され、その他の供試体では特徴的なAEヒット数の増加が確認されなかった。

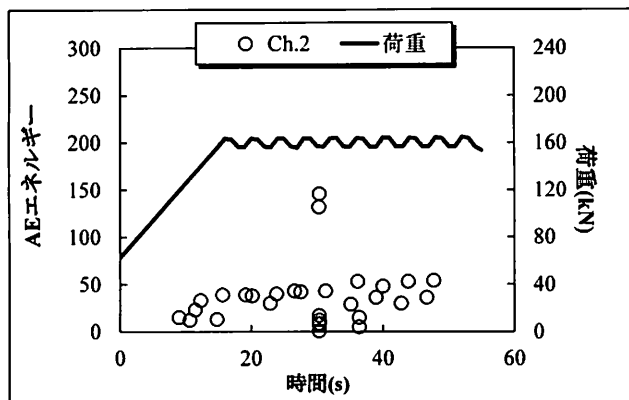


図-7 AEエネルギーの推移
(Y-3, 10%の場合)

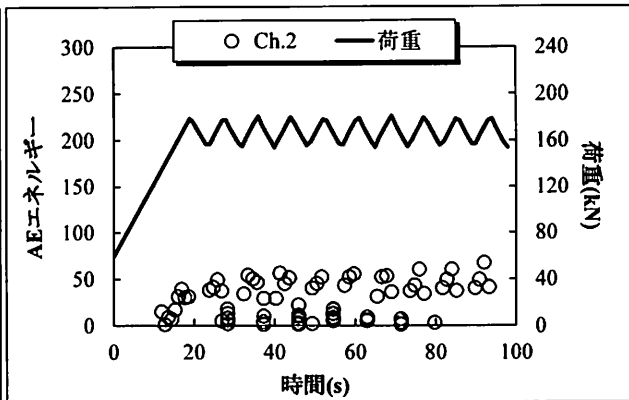


図-8 AEエネルギーの推移
(Y-3, 20%の場合)

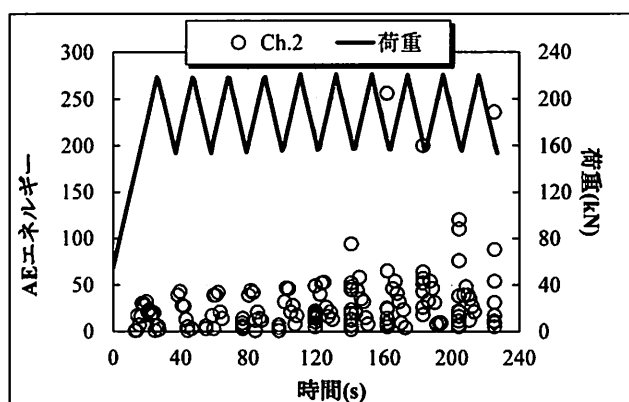


図-9 AEエネルギーの推移
(Y-3, 50%の場合)

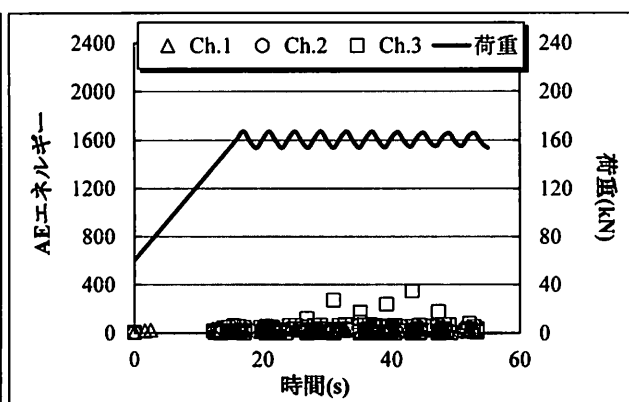


図-10 AEエネルギーの推移
(Y-5, 10%の場合)

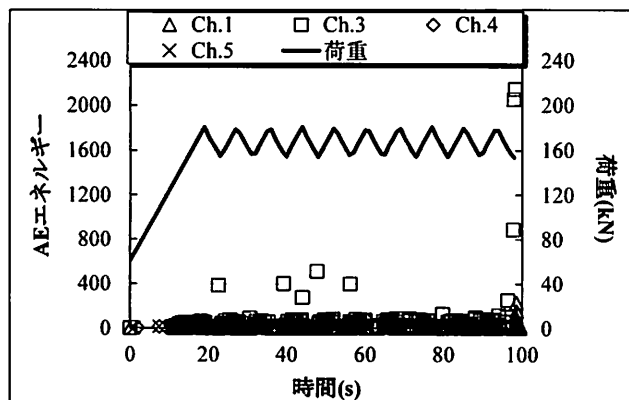


図-11 AEエネルギーの推移
(Y-5, 20%の場合)

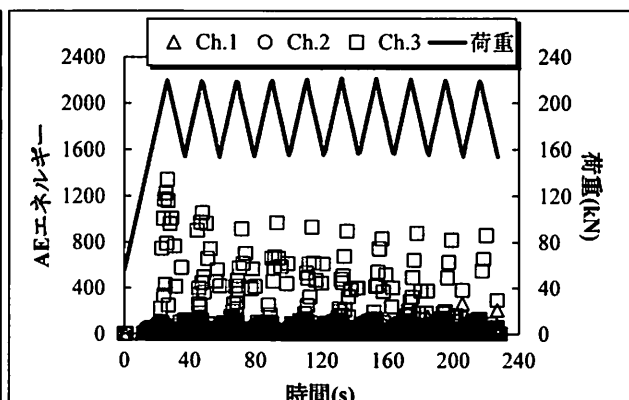


図-12 AEエネルギーの推移
(Y-5, 50%の場合)

2). AEエネルギーの推移では、Y-5供試体で検出されたAE事象において、高いAEエネルギーが確認された。また、高いAEエネルギーは全てCh.3で検出されており、Y-5供試体のCh.3付近に損傷がある可能性が示された。

3). マイクロスコープにより観察した結果、内部に

損傷があると推定されたY-5では、内部鋼板とゴムの界面に接着剥離と考えられる長細い形の空隙が複数確認された。損傷無しと推定されたY-6では、内部鋼板とゴムの界面で接着剥離は確認されなかった。

4). AE法による結果とマイクロスコープによる内

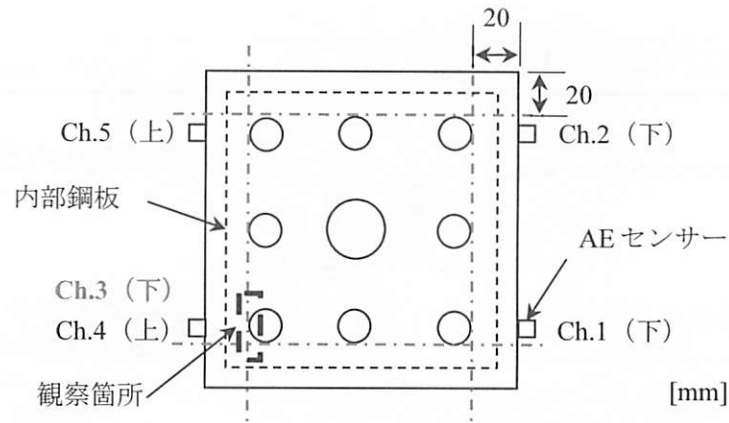
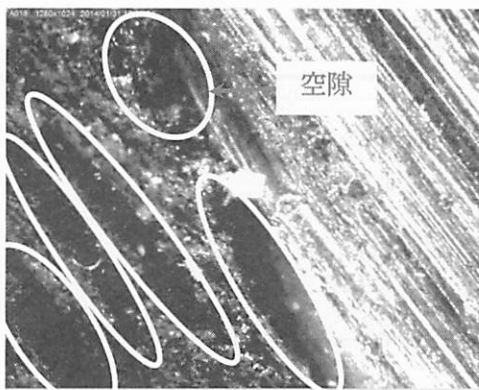
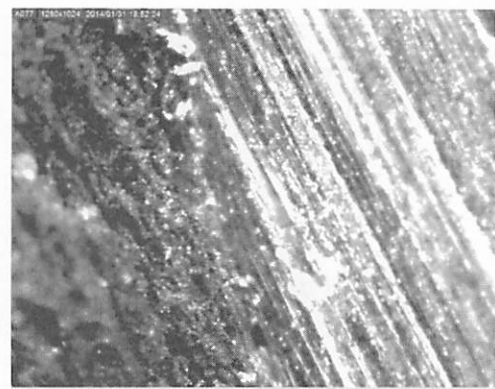


図-14 切断および観察箇所



(a) Y-5 の Ch.3 付近



(b) Y-6 の Ch.3 付近

図-15 マイクロ스코ープによる観察

部の観察結果から、積層ゴム支承の性能評価が非破壊検査により可能であることが示された。

- 5). 本研究では、交通荷重を模擬した圧縮繰返し試験を行った。この方法を応用することで、供用中の積層ゴム支承の交通振動による加振状況をモニタリングすることで健全性評価ができると考えられる。

6. 謝辞

本研究の実施にあたり、独立行政法人土木研究所の寒地土木研究所およびゴム支承協会に多大な協力

を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション：東日本大震災の教訓土木編 インフラ被害の全貌，日経BP，2011.
- 2) (社) 日本非破壊検査協会：非破壊検査技術シリーズ アコースティック・エミッション試験Ⅱ，2008.
- 3) 日本規格協会：JIS 道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム—試験方法 JIS K 6411，P. 13，2012.
- 4) (社) 日本支承協会，ゴム支承協会：ゴム支承の鋼材部の設計標準（案），P. 16，2005.