

老朽橋梁の最大履歴応力推定へのA E試験の適用

APPLICATION OF AE TESTS FOR ESTIMATION OF MAXIMUM STRESSES IN OLD BRIDGES

大塚 久哲*・彦坂 熙**・宮武 洋之***・中村聖三****

By H. Otsuka, H. HIKOSAKA, H. MIYATAKE and S. NAKAMURA

This paper investigates the possibility of application of acoustic emission (AE) tests for estimation of maximum stresses in old riveted girder bridges. The stresses estimated by AE tests using Kaiser effect are compared to the theoretical values calculated using the maximum loads experienced in the bridges before they were removed.

The comparison shows that Kaiser effect in AE tests successfully estimates the maximum stresses experienced in old riveted girder bridges.

The characteristics of AE signals in tension tests are also compared for various age materials (new, 60 years old, and 95 years old).

1. 緒言

A E試験は稼働中の構造部材の応力変動、降伏、亀裂の発生・進展などをすみやかに検知できる非破壊試験法として実用化されていることは周知の通りである。このA E試験を橋梁の分野に利用した最初の報告としては、1971年に英国で行われた可搬橋梁の性能実験¹⁾があり、A E発生源を塑性変形箇所特定することに成功している。その後、主に米国においてA E試験による橋梁のモニタリング技術の開発が進められている¹⁾。ところで、応力履歴を受けた材料に対してA E試験を行えば、その材料が既に受けた応力付近まではA E信号がでないという性質(カイザー効果)が知られている²⁾。

最近、老朽橋梁の余寿命評価が重要な課題となっているが、疲労寿命を推定する際の重要な情報の1つとして最大履歴応力があり、これが知ればその橋がそれまで受けた疲労ダメージを算定する有力な手がかりとなる。このような考えから、著者らは老朽鉄道橋の最大履歴応力推定のためのA E試験の適用性を検討したので、その結果を報告する。また製作年度の異なる鋼材のA E信号に明確な差異があるか否かを検討するために、引張試験時にもA E試験を行ったので合わせて報告する。

* 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科 (〒160 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 工博 九州大学教授 工学部土木工学科 (〒160 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 九州旅客鉄道(株)施設部工事課 (〒801 北九州市門司区清滝2-3-19)

**** 川崎製鉄(株)研究開発センター (〒281 千葉市長沼町351)

2. A E 信号解析装置の概要

本試験で用いた A E 信号の測定及び解析には、IME7回路設計ブロック社製の9502U-7'ロットを用いた。本測定機は、A E センサと専用プリアンプそれぞれ2個と解析装置本体、X-Y プロッタ、オシロスコープからなる、いわゆる2チャンネル型イベント解析装置である。本機によれば A E の発生と同時にその時刻、発生位置（到達時間差による）、最大振幅、およびイベント発生時の歪みや荷重などの外部データを収集でき、その結果をX-Y プロッタを用いてハードコピーすることができる。ディスクリベルは50-99 dBを1 dBきざみで設定可能であり、コインシデンス機能により観測範囲を限定できる特徴を有している。写真1に引張試験時のA E 解析装置のセット状況を示す。

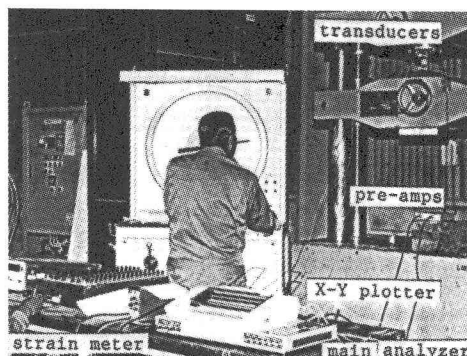


写真1 引張試験時のA E 信号の測定

3. 供試体の概要

本試験に用いた老朽鉄道桁は、供用期間92年の後、3年の放置期間をもつ支間6.700mの桁（以後95年桁という）と供用期間54年の後、7年の放置期間をもつ支間5.994mの桁（以後60年桁という）の2種類であり、いずれも上路式2主桁の単純桁橋である。写真2は2主桁から単桁2本に分離された供試体（95年桁）を示す。これらの桁は錆と塗料を落とすためショットブラスト処理を施した後、九州大学に搬入された。

両桁は共に2軸対称断面であり、フランジは2つのアングルと一枚のカバープレートから構成されている。図1(a)に95年桁の実断面図を示す。60年桁は、95年桁同じ断面構成であるが、1周り小さく、桁高が747mm、桁幅が223mmである。

引き続き予定している疲労実験用の供試体は、試験機の載荷能力の制約から図1(b)に示す断面とした。これは図1(a)中に1点鎖線で示す位置から桁を水平に切断し、圧縮フランジを溶接して製作された。本文に示すA E 試験は、95年桁にあっては加工前の桁と加工後の桁1体ずつ（それぞれ試験桁95-A,Bとよぶ）、60年桁にあっては加工後の桁2体（試験桁60-A,B）に対して行われ、全て供用中に引張側であったフランジのA E 信号が測定された。

引張試験片は加工時に発生した中立軸付近の鋼材から製作した。

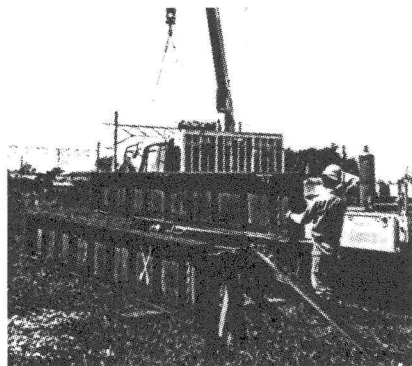
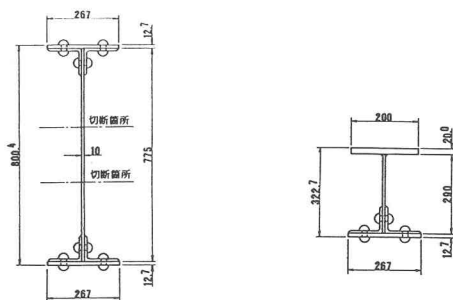


写真2 単桁に切断分離された95年桁



(a) 切断前の形状

(b) 加工後の形状

図1 95年桁の断面図（単位mm）

4. 試験体の化学組成と機械的性質

使用鋼材の化学組成分析結果を表1に示す。表からわかるように両鋼材とも現在の鋼に比し若干リン、イオウなどの不純物が多いものの、SS41材と同等であるといえる。JIS 1号A試験片による引張試験の結果は表2に示すようであり、この結果からも両鋼材はSS41材と同等であるといえる。ただし、伸び能力は95年桁が、強度は60年桁が他と比較して若干低い。また、95年材のシャルピー試験結果によれば、摂氏0度付近に明瞭な延性－脆性遷移温度をもっており、エネルギー吸収値は靱性側で16kgf・m、脆性側で1.5kgf・mであった³⁾。

表1 試験桁鋼材の化学組成表

桁の種類	採取部位	C	Si	Mn	P	S	Al
95年桁	ウェブ	0.14	0.017	0.57	0.057	0.066	0.001
	補剛材	0.12	0.018	0.61	0.055	0.043	0.005
60年桁	ウェブ	0.204	0.01	0.50	0.015	0.037	0.001

表2 引張試験結果

試験桁	降伏点応力 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	ヤング率 (kgf/mm ²)	伸び率 (%)
95年桁	29.5	44.1	2.10×10 ⁴	24.1
60年桁	27.0	41.1	2.11×10 ⁴	29.7
新材	28.9	45.3	2.10×10 ⁴	29.3

5. 引張試験時のAE信号

図1, 2, 3は試験機の荷重の読みを初期断面積で割った公称応力とAE信号の累積カウント数の関係を示したものである(しきい値60dB)。この図から弾性範囲と降伏点以後の信号発生頻度が明確に異なることが知られる。すなわち、降伏点までは信号発生頻度がほぼ同じか若干減少気味に推移し、下降伏点に到達以後、急激に発生頻度が上昇する。また降伏の後、破断に至るまでの発生総数の増加傾向は3種類の鋼材で若干異なることが読み取れる。すなわち、新材では破断強度に近づくにつれて発生頻度が減少していくのに対し、95年桁では逆に増加の傾向にある。60年桁ではその中間の性状を示している。

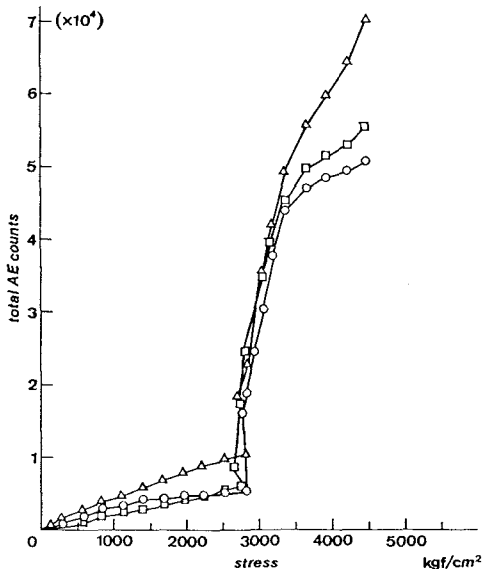


図1 累積カウント数と応力の関係(新材)

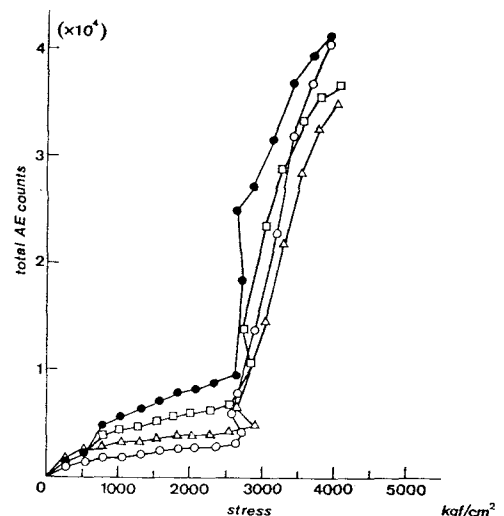


図2 累積カウント数と応力の関係(60年材)

図4は引張試験片によりカイザー効果の確認を行った実験結果の1例(60年桁からの試験片)を示したものである。試験片は前述のように元の桁の中立軸付近から切り取っており、供用中には応力をほとんど受け

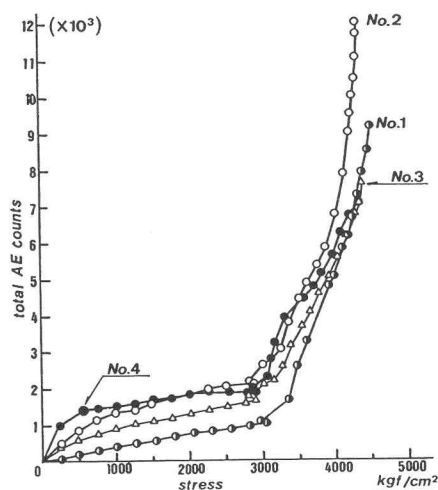


図3 累積カウント数と応力の関係（95年材）

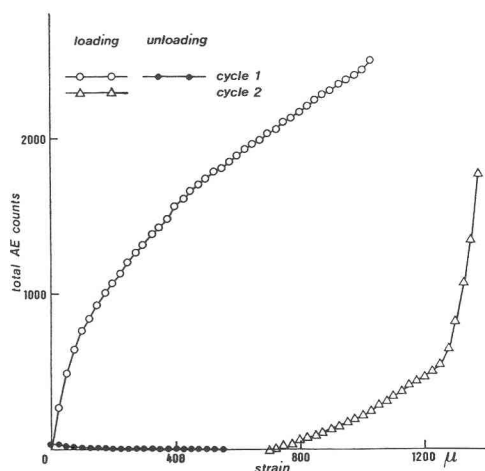


図4 引張試験片によるカイザー効果の確認

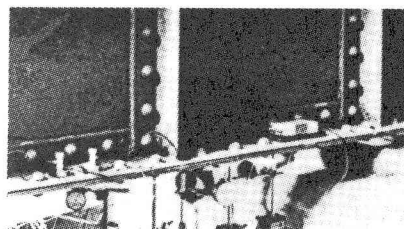
ていないと考えてよい。図から2回目载荷の時、1回目载荷の最大荷重の約70%からAE信号が始めめるがその発生頻度は1回目载荷時と比べて明らかに低く、既往最大荷重付近からの曲線の傾きが1回目载荷時の最終段階と同程度になることがわかる。他の試験片の結果をも総合すると、2回目载荷時に最大履歴応力以下でAE信号は発生し始める（発生時期には試験片によるばらつきがある）が、累積カウント数を示す曲線の勾配が急激に大きくなるのは最大履歴応力付近であると言える。また、除荷時に発生するAE信号はほとんど零である。

6. 桁のAE信号からの最大履歴応力推定

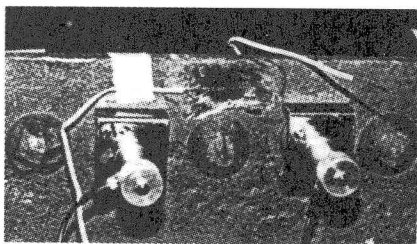
95年桁と60年桁の両桁に対し漸増载荷および漸減除荷を2回繰返し、その間のAE信号の測定を行った。

AEセンサーは95年桁に対してはスパン中央に近い引張側フランジ上面に、60年桁に対しては中央断面の引張側フランジ下面に、リベットを真ん中にして設置した（写真3）。ひずみゲージはリベット外側のいわゆる純断面に貼り、AE信号発生時のひずみを同時に記録した。図5は95年桁の繰返し载荷時の計測結果で、横軸にひずみゲージの読みを縦軸に累積カウント数をとっている。2回目の载荷時には荷重の最終段階付近までAE信号はほとんど発生していない（カイザー効果）が、最終段階でAE信号の発生を見ている。また、除荷時にもAE信号が記録されているが、これはリベット継手における構成要素間の摩擦による雑音と考えられる。

最大履歴応力推定のために、累積カウント数とひずみの関係を、荷重が低い段階での挙動に着目して図示すれば両桁に対して図6、7を得る。累積カウント数の曲線は徐々にその勾配が変化する（特に1回目载荷時）ので、明確な勾配急変部を決めることは困難ではあるが、図に描いたように明らかに勾配の変化した部分から外挿線を引きその交点を勾配急変部と考え、その点の歪みから計算される応力を最大履歴応力とする。このようにすれば、95年桁の平均値が 210μ 、60年桁の平均値が 157μ と図から読み取れる。



(a) 95年桁



(b) 60年桁

写真3 AEセンサーの設置状況

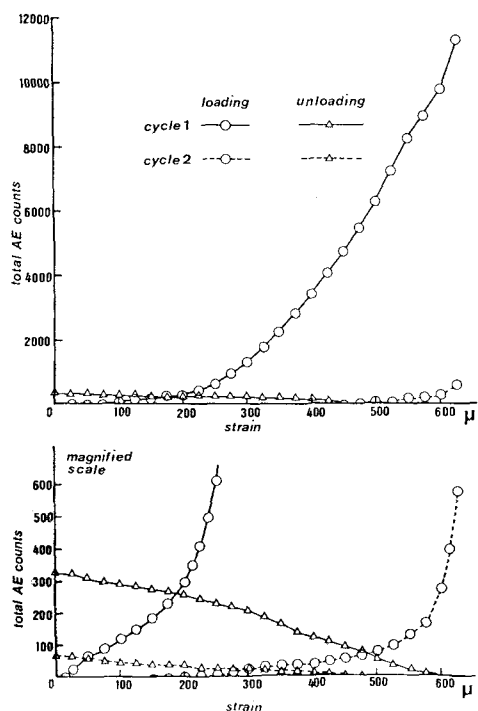


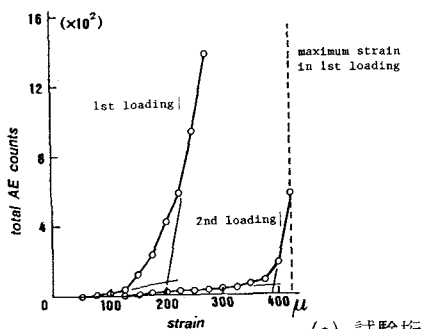
図5 繰返し載荷時のAE信号 (95年桁)

したがって、それぞれ440, 330 kgf/cm²の最大履歴応力を受けているものと推定される。

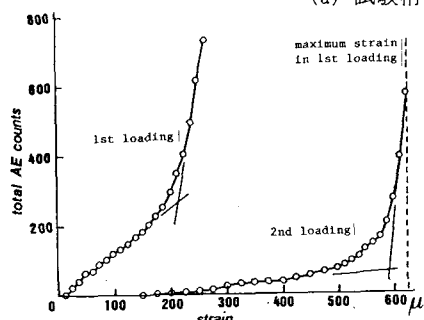
ところで、同様の手法で2回目の載荷から1回目載荷による最大ひずみを推定すれば、95年桁で6.5%, 60年桁で3.3%低めに見積もっていることがわかる。このことは2回目載荷のように、1回目載荷の直後であって、累積カウント数の急変部が明確であれば、数%程度の誤差で最大履歴応力が推定できることを示している。換言すれば、最大応力を受けてからの経過年数が大きいとカイザー効果は必ずしも明確でなく、それだけ応力推定に困難が伴うといえる。

7. 最大入線機からの最大履歴応力推定

本桁は鉄道桁であるのでの最大入線機が判っており、これから最大履歴応力が計算できる。記録によれば、95年桁ではD51(KS相当値=14.5), 60年桁ではC11(KS相当値=10.7)が最大入線機であり、これらの軸重配置より絶対最大曲げモーメントを計算できる。AE信号測定点の最大曲げモーメントを算出するためには荷重の進行方向が

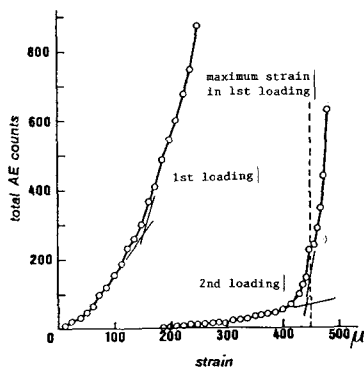


(a) 試験桁 95-A

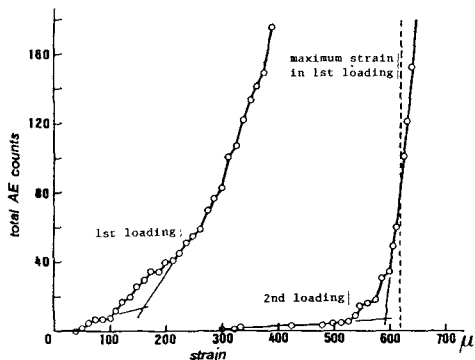


(b) 試験桁 95-B

図6 最大履歴応力の推定 (95年桁)



(a) 試験桁 60-A



(b) 試験桁 60-B

図7 最大履歴応力の推定 (60年桁)

わからねばならないが、あいにく本試験桁ではその点に関する情報がないので、両方とも計算した。なお、表3の最大履歴応力には最大荷重が載っていた頃の腐食状況が不明であるため断面係数は初期断面を用いて計算しており、また衝撃係数⁴⁾は最大速度60km/hとして算出した。

ただし、計算値には死荷重を考慮していないこと、総断面での応力を算出していること（A E試験時のひずみは純断面で測定）によって、最大応力はこれより大きいことも考えられるが、レールの連続性などにより曲げ剛性が計算より大きいことも予測され、その影響が大きい場合には最大応力は低めに修正されるべきである。（対傾構、横構による曲げ剛性の増加がほとんどないことは2主桁のままで静的載荷実験（川崎製鉄(株)にて実施）で確かめている。）

このように、表3の理論値は不確定な要素を多く含んでいるが、以上の点を総合的に判断すると計算値より低めの値が真の最大履歴応力であると考えることが妥当であろう。

さて、これらの値を上述のA E試験による推定値と比較すると、A E試験の結果は5%から15%程度低めにでており、真の最大履歴応力をかなり良好な精度で推定しているものと思われる。

したがって、A E信号発生におけるカイザー効果を利用して実桁の最大履歴応力の推定が実用的な精度で可能であると思われる。

表3 最大履歴応力の計算

桁の種類	最大入線機	絶対最大曲げモーメント (tf・m)	測定点の最大曲げモーメント (tf・m)	断面係数 (cm ³)	衝撃係数	最大履歴応力の計算値 (kgf/cm ²)	A Eによる最大応力推定値 (kgf/cm ²)
95年桁	D51	27.52	24.41or25.14	6739	1.30	471or485	440
60年桁	C11	16.07	15.55or15.91	5451	1.31	373or382	330

8. 結 語

供用中の桁の残存疲労寿命を推定するには、その桁の最大履歴応力が重要な情報の1つであり、それが知ればその橋がそれまで受けた疲労ダメージを算定する有力な手がかりとなる。本研究ではA E信号を利用して、老朽鉄道橋の最大履歴応力推定を行ったところ、本文で述べたように実用上十分な精度の推定値を得ることができた。本研究では最大履歴荷重が推定可能な鉄道橋によりA E試験法の妥当性を検証したわけであるが、本手法は鉄道橋に限らず、道路橋あるいは他の鋼構造に対しても広く利用可能であろう。

参考文献：1)ASNT:Nondestructive Testing Handbook, Vol.5, AE Testing, 1987.

2)Kaiser, J.:Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchung von Metallische Werkstoffen, Archiv fur das Eisenhütten Wesen, Vol.24, No.1-2, pp.43-45, 1953

3)大塚他：90余年供用したリベット鉄道桁の静的載荷実験および疲労実験、構造工学論文集、Vol.37A, 1990.9.

4)大津：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版、1988.

5)土木学会：国鉄建造物設計標準解説、鋼鉄道橋 1983.

(1990年10月12日受付)