

報告 各種非破壊試験を利用した鉄筋コンクリート梁の損傷測定 に関する基礎的研究

増田克洋^{*1}・矢島哲司^{*2}・魚本健人^{*3}

要旨：繰り返し損傷を受ける鉄筋コンクリート梁に対して、健全な状態から破壊に至るまで経時に各種非破壊試験を適用した。そして、鉄筋コンクリート梁の損傷度と非破壊試験の測定結果を対応させた。また、各種非破壊試験結果がコンクリート梁の損傷度とどのような関係があり、非破壊試験間にには、それぞれどのような関係が存在するのかを把握することを行った。

キーワード：非破壊試験、超音波、打音、AE、消費エネルギー

1. はじめに

一昔前まで、コンクリート構造物は一般にメンテナンスフリーとして考えられてきた。従ってその耐久性に関してはそれほど重要視されてはこなかった。しかし、自動車荷重の増加、過積載による過大荷重、車両通行量増加などの荷重条件の変化や、最近では塩害による鉄筋腐食、中性化に伴う鉄筋腐食、アルカリ骨材反応などの劣化要因が大きな問題となっている。そこで、これらの劣化度の測定が必要となり、各方面で様々な形で行われている。その手法の一つとして各種非破壊試験が挙げられる。現在、用いられている非破壊試験は様々なものがあり¹⁾、それぞれの非破壊試験が対象としている目的別に多くの手法が適用されている。しかし、これらの非破壊試験はそれぞれ単一で劣化程度を測定しているにすぎない。それぞれの方法は構造部材全体ではなく、コンクリート構造物部材のある部分がどの程度劣化したかという局所的な検査でしかない。

そこで本研究では鉄筋コンクリート梁を用い、梁が疲労によって劣化損傷していく過程における各種非破壊試験結果がどのように得られ、各非破壊試験間にどのような関係が存在するのかを把握することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 供試体

本実験で使用した供試体は図-1に示す通り、断面寸法 $15 \times 20 \times 250$ cm の複鉄筋長方形断面鉄筋コンクリート梁を使用した。この梁の降伏変位は約 8mm、降伏荷重は 3.51t である。載荷点の位置は曲げ区間を 60cm として設定し、 $a/d=4.69$ である。

2. 2 載荷方法

本実験ではコンクリート梁を道路構造物部

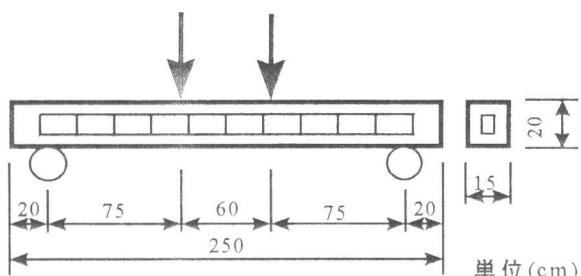


図-1 供試体寸法

表-1 載荷条件

制御方法	荷重制御
載荷速度	0.2Hz
波形	Sin波

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科 (正会員)

*3 東京大学教授 生産技術研究所 第5部、工博 (正会員)

材として仮定し、片振り繰返し載荷による疲労実験を行った。この時の載荷条件を表-1に示す。まずははじめに、500kgfで静的載荷を行い、それと同じ荷重で繰り返し載荷を1000回繰り返した。そして一時停止し、各非破壊試験を行った。その後再び同じ荷重で静的載荷を行った。このように同じ荷重レベルで「静－動－静」の載荷を1ユニットとして載荷を実施した。1ユニットが終了した時点での荷重を500kgf増加させ、次のユニットに進むこととした。動的載荷をはさんで同レベルの荷重で静的載荷を行うことで、AEイベントの発生状況の差を観察するためにこのような載荷方法を設定した。梁が破壊するまで非破壊試験を繰り返し実施した。

2.3 非破壊試験と試験方法

今回の実験で用いた非破壊試験の種類と検出項目は表-2に示すとおりである。ここで「上」「下」「左」「右」「表」「裏」はそれぞれ供試体の面の呼び方とする(図-2)。

(1)超音波法

弾性波速度は、弾性波測定装置(TESCO KH751)により、図-3に示すように番号を設定し、測定の組み合わせは表-3に示すとおりである。表-3の組み合わせ全てに対して伝播時間の測定を行った。伝播時間の測定は1ユニットの繰返し載荷が終了した時点で行った。なお測定で用いた弾性波は周波数50kHzの矩形パルス波である。

表-3 超音波法測定組み合わせ

発振子	透過法					斜角法					表面法					表面法										
	表	1	2	3	4	5	表	1	2	3	4	5	4	3	2	上	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4
受振子	表	1	2	3	4	5	裏	1	2	3	4	5	4	3	2	上	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4
発振子	透過法					表面法																				
	左	圧	中	引	表	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	4	下	1	1	1	1	2	2	2	3	3
受振子	右	圧	中	引	表	2	3	4	5	3	4	5	4	5	5	下	2	3	4	5	3	4	5	4	5	5

発・受振子の接触面

(2)打音法

打音法は既往の研究²⁾により、ひび割れの進展に伴い卓越周波数が低くなることが明らかとされている。そこで本実験では、鉄球を用いて供試体を打撃したときに生じる縦波共振とたわみ共振に注目をして共振周波数の測定を行い、卓越周波数を求めた。使用したマイクの周波数範囲は20~20000Hzである。測定方法は図-4に示すように、たわみ共振は「上」面の中央・左・右の3カ所に鉄球を落させ、「下」面側の中央にマイクを設置し打撃音を測定した。縦波共振は「左」

表-2 非破壊試験と検出項目

非破壊試験	検出項目
超音波	伝播速度
打音	共振周波数
A E	イベント数

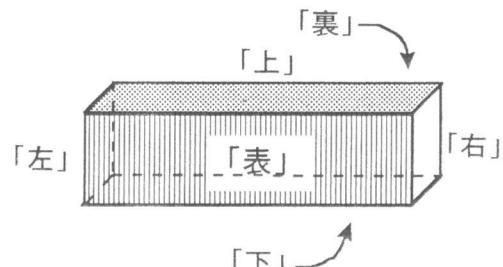


図-2 面の呼称

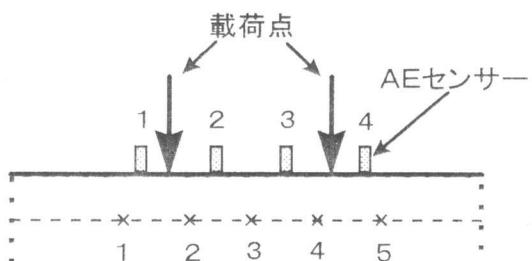


図-3 測定位置

「右」の面に振り子を利用して鉄球を当て、「右」「左」に設置したマイクで打撃音を測定した。また、測定は1ユニットのはじめの静的載荷後と繰り返し載荷後を行った。繰り返し載荷後は供試体を支点上に乗せたままで測定を行ったが、静的載荷後に関しては、支点の影響を除くために供試体をたわみ振動1次モードの節の部分でつり下げて打撃音を測定した。

(3)アコースティック・エミッション(AE)法

AE法の特徴としては常時モニタリングが可能であることと、内部で発生した音に対して反応する点である。そこで今回は前者の常時モニタリングという特徴を生かして、繰り返し載荷と静的載荷の間に発生するAEの計測を行った。AE変換子は共振周波数が50kHzのものを使用した。載荷点、支点と供試体の間にテフロンシートを挿入した。

また、計測パラメーターとしてはAEイベント数、エネルギーを採用した。センサーの位置はひび割れが生じると落下する可能性があるので、ひび割れの生じない圧縮側である「上」面に4点設置し、それぞれの間隔は30cmとした(図-3)。また、計測によって得られたデータを用いてAE解析を行った。

(4)変位量

破壊時までの累積消費エネルギー量³⁾は、ほぼ一定でありこの値から梁の破壊時期の推定に有効であるとされている。そこで供試体中央の中立軸の位置、「表」と「裏」に2カ所変位計を設置し、繰返し載荷の間に連続で測定するようにし、この変位計によって得られた変位量と、同時に測定している荷重を用いて累積消費エネルギー量の計算を行った。

3. 実験結果

3. 1 各非破壊試験結果

(1)超音波法

はじめに、ユニットごとに得られた結果を図-5～7に示す。図-5は「左」「右」に発・受振子を設置し、圧縮側、中立軸、引張側でそれぞれ伝播時間を計測を行い、伝播速度を求めたものである。図-6は「上」「表」「下」の表面法による測定結果である。図-7は「表」「裏」の対称法による伝播速度の測定結果である。これらの結果から図-7のひび割れに対

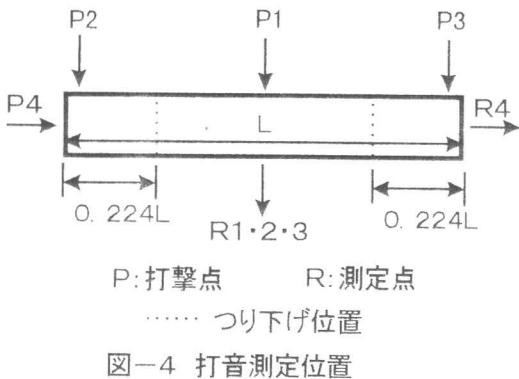


図-4 打音測定位置

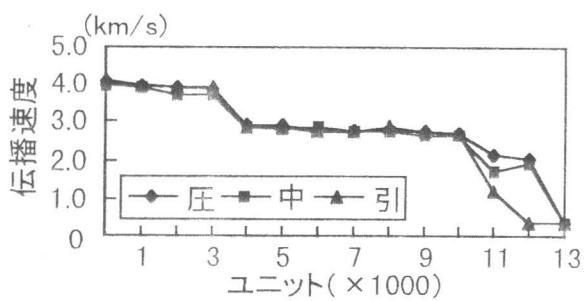


図-5 「左」-「右」伝播速度

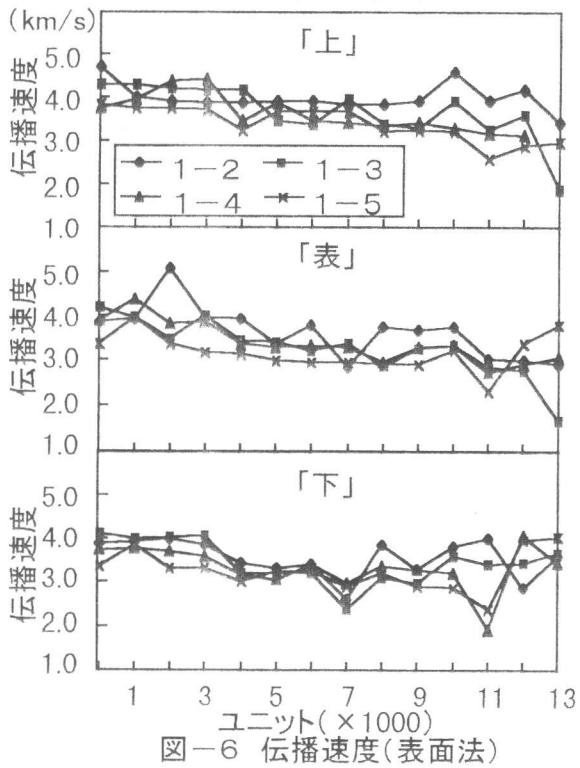


図-6 伝播速度(表面法)

して平行に伝播速度を測定する場合と、図-6の「上」「表」の表面法で測定した場合は梁が損傷を受けても、測定結果が各組合せでばらつき、損傷程度を明らかにすることは困難である。図-5のひび割れに対して直角に伝播速度を計測する場合では第3ユニット以降と第10ユニット以降に伝播速度の低下が見られる。図-6の「下」で表面法による測定では梁の損傷が進行しても、各組み合わせでばらつきもそれほど見られず、第3ユニット以降に低下していることがわかる。このことから、梁の損傷程度まで明らかとできなくても、初期値に対してどのくらい伝播速度が低下したのかを明らかにできる。

(2)打音法

ユニットごとに得られた結果を図-8～9に示す。図-8は供試体をつり下げて測定した打撃音の縦波共振周波数スペクトルと、支点上に乗せたままで測定した打撃音の縦波共振周波数スペクトルを表したものである。この図からわかるように、供試体をつり下げた場合には支点上に乗せた場合より、周波数スペクトルははっきりとしたものになっている。しかし、実際には構造物はつり下げる事が不可能であり、支点上でも識別できないと实用性に欠ける。そこで支点上において測定した周波数スペクトルをみると、つり下げた時と大差がなく同様な傾向を示している。つまり、縦波共振では支点の影響はあまりないと考えられる。

また、同様に図-9でたわみ共振における周波数スペクトルをみると支点上では多少スペクトルに乱れが生じるが、卓越周波数の識別は可能である。図-10は各ユニットごとのたわみ共振と縦波共振によって得られた周波数スペクトルから一番目の卓越周波数をプロットしたものである。この図から、卓越周波数は縦波共振、たわみ共振ともに低下していることがわかる。

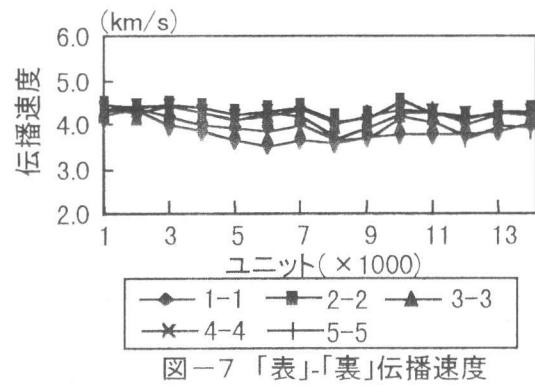


図-7 「表」-「裏」伝播速度

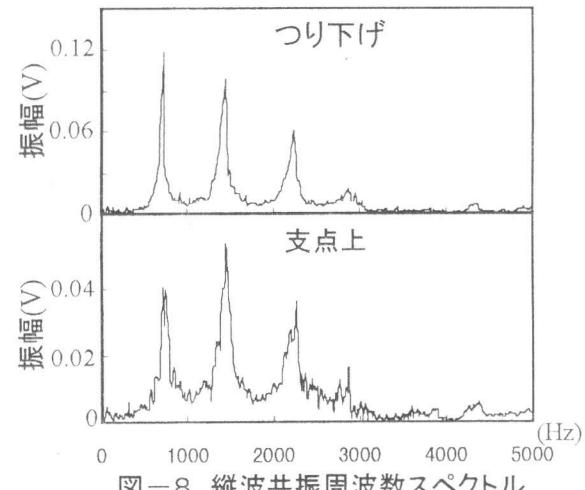


図-8 縦波共振周波数スペクトル

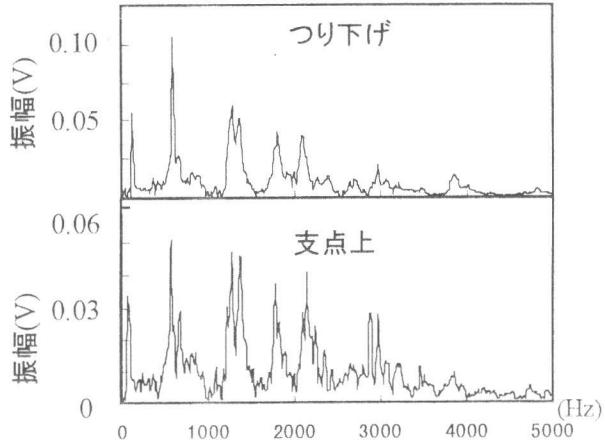


図-9 たわみ共振周波数スペクトル

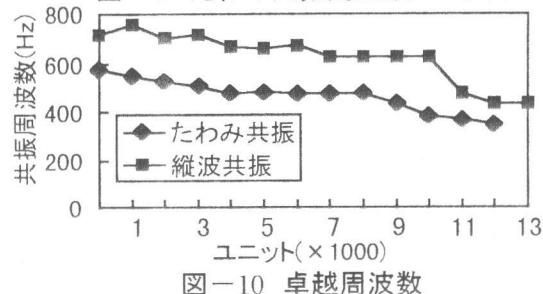


図-10 卓越周波数

また、打撃位置、支持状態に関係なく同様な傾向で卓越周波数が低下することがわかる。卓越周波数の低下はひび割れ深さが大きくなっているのが原因であると思われる。

(3) AE法

1ユニットの中でのAEの発生状況を図-11に示す。最初に静的で載荷したが、前ユニットの最大荷重を越えるまではAEイベントの発生はほとんどみられないが、前ユニットの最大荷重を越えたときからAEイベントの発生が非常に多くなる。これはカイザー効果の現れであると思われる。また、除荷させていく段階でAEが発生するのはひび割れが閉じる時に骨材等がこする音を測定しているものと思われる。図-12に1ユニットで発生したイベント数をプロットしたものと、総AEイベント数を併せて示す。この図からわかるように、AEイベントは疲労損傷を受けている間、同じ割合で発生していることがわかる。

また、AEエネルギーを計算した結果を図-12に併せて示す。イベントの発生に大きな変化がなくてもAEエネルギーは大きく発生していることがわかる。このことから、供試体内部における損傷を把握するのはAEエネルギーが適していると考えられる。

(4) 変位量と消費エネルギー

変位量と荷重-たわみ曲線から求めた消費エネルギーの計算結果を図-13に示す。降伏荷重を越えてからの1ユニット毎での変位量が大きくなっている。この図からわかるように、荷重を上げていくことで1ユニット毎の消費エネルギーは大きくなっている。また、総消費エネルギー量をみると破壊間近のユニットで消費エネルギーが大きくなっている。

3. 2 消費エネルギーと各非破壊試験の比較検討

(1) 各非破壊試験の関係

図-14に繰り返し回数(ユニット)を横軸にした場合の各非破壊試験の結果を示す。打音と超音波の結果は、同様な傾向で伝播速度と卓越周波数が低下していることがわかる。また、AEの結果は累積イベント数との間に打音、超音波とともに相関が見られない。しかし、AEエネルギーとの関係では伝播速度、卓越周波数が大きく低下する時点でエネルギー発生も大きくなっている。このことからAEエネルギーが急増した時点で梁の劣化が進行していることがわかり、

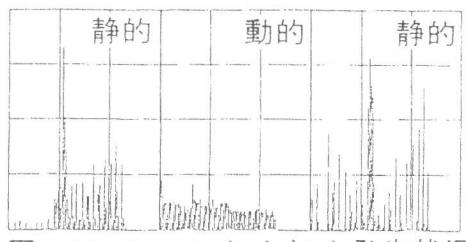


図-11 1ユニットイベント発生状況

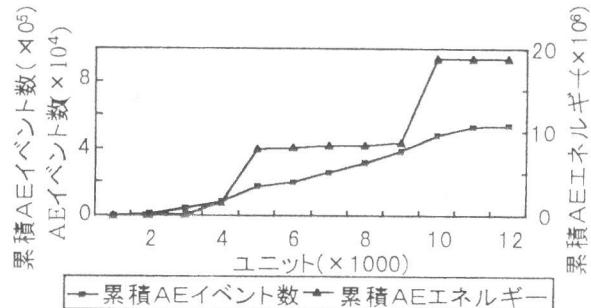


図-12 AEイベント数とAEエネルギー

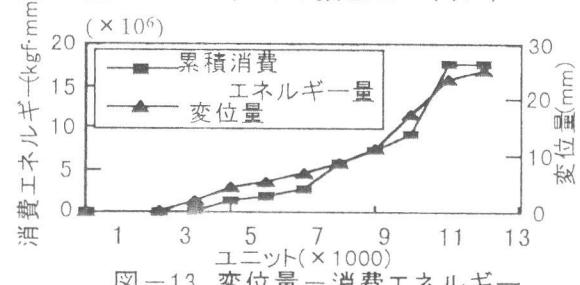


図-13 変位量-消費エネルギー

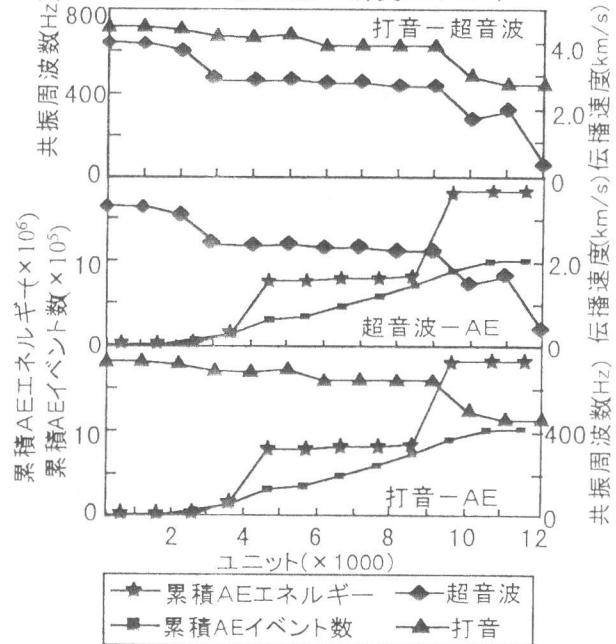


図-14 各非破壊検査の結果

その時期に卓越周波数、伝播速度の低下が生じるものと考えられる。

次に、荷重-たわみ曲線から求めた消費エネルギーを横軸にした場合に各非破壊試験の結果が、どのように変化していくかを表したのが図-15である。打音と超音波の関係をみると、図-14で2000回の時点で弾性波速度が第一の低下をするが、この時の低下は最終破壊時の消費エネルギーの1%に満たないエネルギーを消費して低下していることがわかる。また、繰り返し回数が約9000回から10000回で卓越周波数、伝播速度とともに第二の低下をしているが、この時の消費エネルギーは最終消費エネルギーの約50%である。このことから、卓越周波数、伝播速度が第二の低下をしてからは、それまでに梁が消費したエネルギー一分は梁が耐えることを示している。しかし、この時点で、梁の使用限界は超えているので補修などが必要であると思われる。

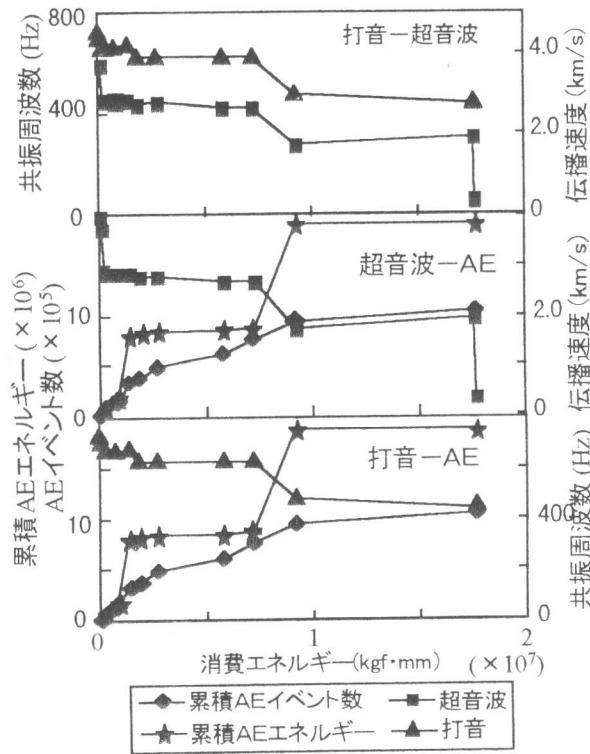


図-15 各非破壊試験と消費エネルギーの関係

4. まとめ

- (1) 卓越周波数、伝播速度は軸方向で測定をすると繰返し載荷に伴うそれとの低下が顕著に現れる。しかし、この方法では実構造物に対しての適用が困難であると思われる所以、測定方法の検討が必要である。
- (2) 卓越周波数と伝播速度の間にはかなりよい関係がみられる。しかし、累積AEイベント数と卓越周波数、累積AEイベント数と伝播速度ではあまり関係がみられない。しかしAEエネルギーを求めて卓越周波数、伝播速度との関係が得られる。
- (3) 梁が破壊間近で損傷を受けたのは総消費エネルギーの約50%のエネルギーを消費した時点であることがわかった。

謝辞 本研究は東京大学生産技術研究所第5部魚本研究室で行ったものであり、本研究にあたりご協力いただいた職員、研究員の皆様ならびに千葉工業大学田中一充君に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 魚本健人、加藤潔、広野進共著：コンクリート構造物の非破壊検査、コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ5、森北出版、1990
- 2) 伊東良浩、魚本健人：コンクリート打撃音の定量的評価に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, pp859-870, 1995
- 3) 魚本健人、矢島哲司：大変形正負交番繰り返し荷重を受けるRC部材の曲げ耐力特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp265-268, 1991