

鋼板とコンクリート間の接着剥離面積が 衝撃弾性波法における検出波形に与える影響

康田 雄太¹・櫻井 裕隆²・川崎 佑磨³・伊津野 和行⁴

¹ 非会員 立命館大学 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)
E-mail:rd0058hf@ed.ritsumei.ac.jp

² 非会員 株式会社日建設計シビル 設計部 (〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町 3-6-4)
E-mail:sakurai.hiroataka@nikken.jp

³ 正会員 立命館大学准教授 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
E-mail:yuma-k@fc.ritsumei.ac.jp

⁴ フェロー会員 立命館大学教授 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
E-mail:izuno@se.ritsumei.ac.jp

1995年に発生した兵庫県南部地震で、多くの橋梁が損傷・倒壊するなど甚大な被害を受けた。それに伴い、多くの橋梁が耐震補強された。損傷を受けた橋脚の大規模な耐震補強として採用実績が多い耐震補強は、鋼板巻立て工法である。鋼板巻立て工法は、鋼板とコンクリートが完全に接着していることを前提として設計されるが、補強後に経年劣化や地震動などの影響で鋼板とコンクリート間で剥離した場合、その内部状態を把握することは困難であるのが現状である。そこで、本研究では鋼板巻立て工法で補強された橋脚の、鋼板とコンクリート間の剥離箇所の推定を目的として衝撃弾性波法で調査した。まずは基礎的研究として、剥離面積が弾性波の検出波形に与える影響分析を行った。その結果、完全に補強した供試体と剥離を模擬した供試体で、最大振幅値や検出波形の相違を確認できた。

Key Words: Acoustic Emission, Non-destructive testing, AIC, Frequency analysis

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、多数の橋梁に甚大な被害が生じた¹⁾。橋梁は、損傷や倒壊をすると、早期復旧が困難になるケースがある。それに伴い、被害を受けた多くの橋脚に大規模な耐震補強が施された。耐震補強工法として RC 巻き立て工法、鋼板巻立て工法および炭素繊維巻き立て工法などが代表的なものとして挙げられる。既設 RC 橋脚の耐震性を向上させるための有効な方策として、鋼板巻き立て工法による補強が従来より多く行われている²⁾。鋼板巻立て工法は、既存の橋脚周囲を鋼板で巻き立てることで、耐力や変形性能を高める効果がある。

しかし、近年では、鋼板巻立て工法が施された橋脚において、鋼板とコンクリート間で腐食が発生している事例も報告されている³⁾。このように、経年劣化や地震動による影響から、鋼板とコンクリート間に劣化や損傷が生じた場合、鋼板とコンクリート間の接着状態を外部か

ら把握することは困難である。大地震後に当該橋脚が継続使用可能かどうかの判断には、現状、目視や打音検査しか手法がなく、効果的かつ客観的な手法の開発が必要である。

そこで、本研究では非破壊試験法の一つである衝撃弾性波法を用いて、鋼板とコンクリート間に接着剥離を検出できるか試みた。鋼板とコンクリート間に欠陥部（接着不良箇所）を模擬し、励起させた弾性波が損傷の大きさによってどのような影響を受けるか分析した。

2. 衝撃弾性波法

(1) 概要

衝撃弾性波法では、物理的な衝撃によって弾性波を入力し、コンクリート中を伝搬した弾性波をコンクリート表面の振動として、振動センサから受信し、計測装置にて受信波形を記録する。弾波の入力方法として、



写真-1 実験で使った AE センサ (R15 : 左, UT1000 : 右)

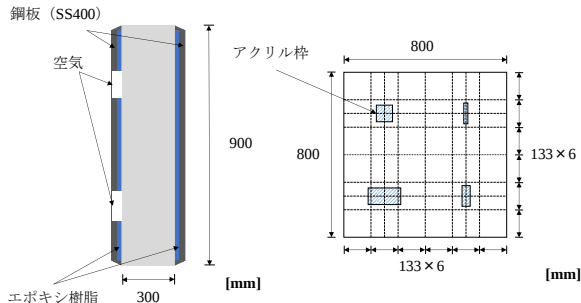


図-1 供試体概要

ハンマー、鋼球などによる機械的な方法又は励磁コイルなどによる磁気的な方法などがある⁴⁾。

本研究では、ハンマーなどによる打撃を実施せず、ファンクションジェネレータにより指定した弾性波を供試体中に励起させた。ハンマー打撃では、一定の弾性波を励起することが困難であるため、ファンクションジェネレータによる励起を採用した。本研究による計測では、ファンクションジェネレータにより指定した波が、供試体中を伝播して、各 AE センサで受信した波を増幅器（プリアンプ）で増幅させ、AE 計測器に記録させた。本研究で使用するセンサの種類を以下で説明する。

(2) AE センサ⁵⁾

AE センサは一般的に PZT（ジルコン酸チタン亜鉛）などの圧電素子で構成されている。AE センサには大きく分けて共振型と広帯域型がある。共振型 AE センサは、検出面から AE センサに入った AE 波は、検出素子内で反射を繰り返し、検出素子の共振周波数と一致する AE 波の周波数の成分がより強調されて残り、他の成分は早く減衰する。つまり共振型 AE センサは検出素子の共振を利用して高い感度を得ている。一方、広帯域 AE センサは、検出素子の周囲をダンパ材で覆う構造になっており、検出素子の境界面での AE 波の反射が抑えられ、その結果共振が抑えられて平坦な感度一周波数特性になる。本研究では励起センサとして広帯域型の UT1000、受信センサとして共振型の R15（共振周波数 150kHz）を使用した。使用した AE センサを写真-1 に示す。AE センサの

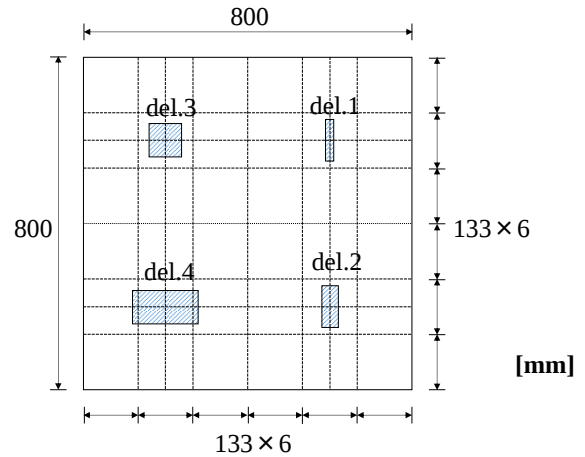


図-2 空洞の配置位置

表-1 損傷箇所の高さ

損傷箇所	高さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)
del.1	100	20	5
del.2	100	40	5
del.3	100	80	5
del.4	100	160	5

貼り付けはグリースで行いアルミテープで保護した。

3. 供試体概要

本研究では鋼板巻き立て工法で補強された橋脚を対象にしている。そこで、鋼板巻き立て工法を想定した供試体を作製し、鋼板とコンクリート間に空洞を設けた。実験で使った供試体概要を図-1 に示す。図-1 で示すようにコンクリート供試体 (900×900×300mm) を作製し、鋼板 (SS400 : 880×880×9mm) を表面と裏面の 2 面に接着させた。供試体の種類は、健全タイプ (S)、損傷タイプ (D)、無補強タイプ (C) の 3 タイプとした。

測定を行う供試体表面は、損傷箇所毎に 4 分割した。その 4 分割された断面の中心に、図-2 に示すように大きさの異なるアクリル枠を 4 箇所に配置した。空洞の寸法は表-1 に示す。各アクリル枠をコンクリート表面に設置して囲んだ後、その上に鋼板を置いてエポキシ樹脂を用いて接着させた。すなわち、アクリル枠で囲まれた範囲にはエポキシ樹脂が充填されないことで接着不良を模擬した。本研究では、図-3 に示す、空隙の最も小さいケース (del.1) と 3 つ目に小さいケース (del.3) を対象とした。

4. 代表波形の選定

(1) 解析概要

AE 計測器で検出した波形から、最大振幅値到達時間

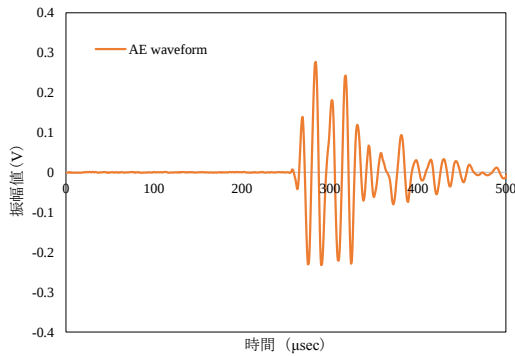


図-3 検出された波形の一例

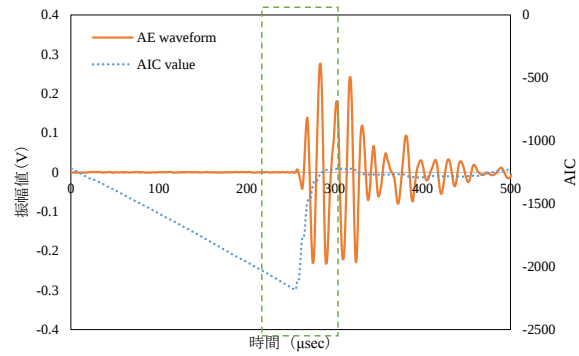


図-4 波形と AIC 算出結果

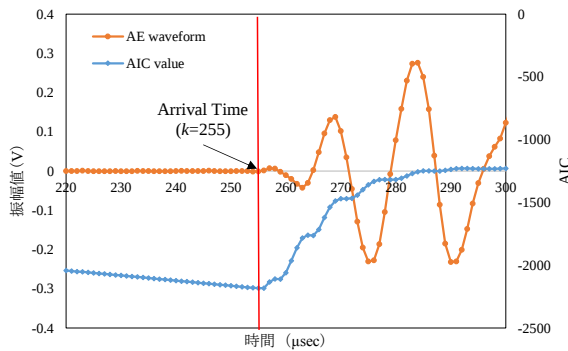


図-5 拡大した波形 (k=220~300)

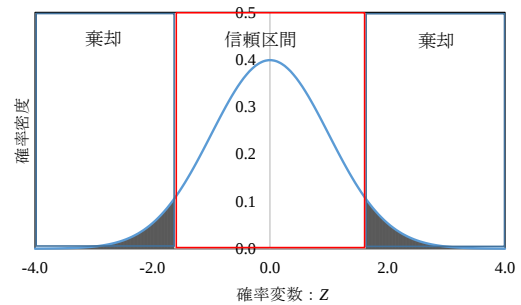


図-6 標準正規分布

「立ち上がり時間」および弾性波初動部到達時間を求めた。最大振幅到達時間は、検出波形を図化して求めた。P 波初動部到着時間を求めるために、赤池情報量規準 (Akaike Information Criterion ; AIC) ^{9) 7)} を利用した。その式を式 (1) に示す。

$$AIC_k = k * \log\{varX[1, k]\} * (N - k) * \log\{varX[k, N]\} \quad (1)$$

ここで、 $\{varX[1, k]\}$ は振幅値 X_1 から X_k の分散、 $\{varX[k, N]\}$ は振幅値 X_k から X_n の分散である。そして、 AIC_k が最小値を示す k の値を、AE 計測で検出した弾性波の到達時間とした ^{9) 10)}。図-3 は検出された波形の一例を示す。図-4 は図-3 に示した波形と AIC の算出結果を示している。図-4 中の破線部分を拡大したものを図-5 に示す。図-5 は AIC_k が最小値を示す k の周辺の時間 ($k = 220 \sim 300$) を拡大している。ここでは、 AIC_k が最小値を示す値が $k = 255$ であり、弾性波の到達時間とした。

(2) 標準正規分布による検出波形の検定

本研究では、1つの領域に対して5回ずつ計測を行った。検出された弾性波の平均を使用した場合、それぞれの波形で到達時間や最大振幅値を得る時間などが異なってくるため、標準正規分布による検定を実施した。

本研究では有意水準を 10%で両側検定を行い、AIC

で算出された弾性波の到達時間と最大振幅値を得る時間の両者が信頼区間 ($|Z| \leq 1.64$) に入っているデータを代表波形として定義した (図-6 参照)。両者のうち 1 波形でも信頼区間に入っていない場合は、その励起回数は棄却した。信頼区間に残った結果のみで再度正規化を行い、各センサの正規化された値の大きさを足し合わせることで、最も総和が小さい施行の結果を代表波形と定義した。

5. 測定方法

測定における AE センサの配置位置を図-7 と図-8 に示す。1つの検査領域 (400×400mm) 内で、AE センサを 133mm 間隔で配列した。空洞を模擬した断面で、励起点とセンサの配置箇所のそれぞれが対応するようにした。図-7 と図-8 に示すように赤丸で示されているのが励起点、青丸で示されているのが AE センサの配置位置となっている。本研究で使用した AE 計測器では、一度に接続できる AE センサは 8ch であるため、検査領域を図-7 および図-8 に示すように A と B に分けて計測を行った。本試験では各 AE センサの弾性波到着時間を明確にするため、TRA モードという計測方法で実験を行った。TRA モードとは、励起点から一番近い AE センサが弾性波を検知すると同時に、その他の AE センサの計測を始める計測

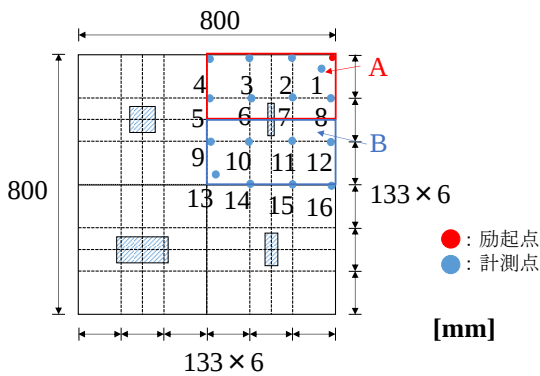


図-7 del.1 のセンサ配置位置

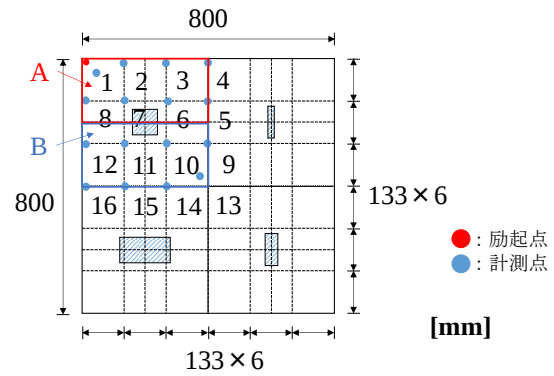


図-8 del.3 のセンサ配置位置



写真-2 ファンクションジェネレータによる励起波形

方法である。励起させる波は振幅値 2.5V、振動数 50kHz の正弦波をファンクションジェネレータで 1 波長とした。励起波の波形は写真-2 に示す。

6. 実験結果

(1) 検出波形の比較

各 AE センサで検出された波形について比較した。励起点から各センサを結んだ直線上に、接着剥離が存在しない箇所 7ch と接着剥離が存在する箇所 10ch を比較した。それぞれの波形を図-9 および図-10 に示す。両者の波形を比較すると、10ch の波形の方が振幅値が大きくなっていることが分かる。つまり、10ch では空洞によって振幅値が大きくなったと考えられる。これらに違いが生じる原因は、音響インピーダンスや鋼板のたわみ振動と考えられる。

(2) 最大振幅値による評価

各 AE センサから検出した波の最大振幅値の比較を行った。その結果を図-11 から図-14 に示す。各図の赤丸は弾性波励起箇所を示し、赤枠は空洞の配置箇所を示

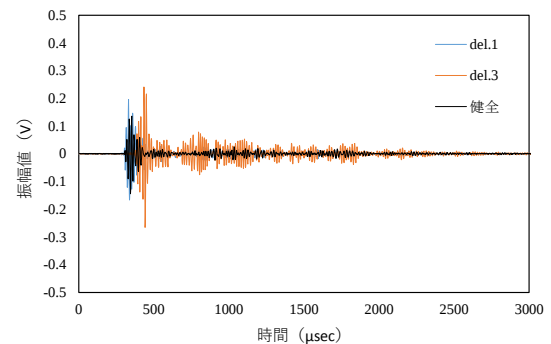


図-9 7ch の検出波形

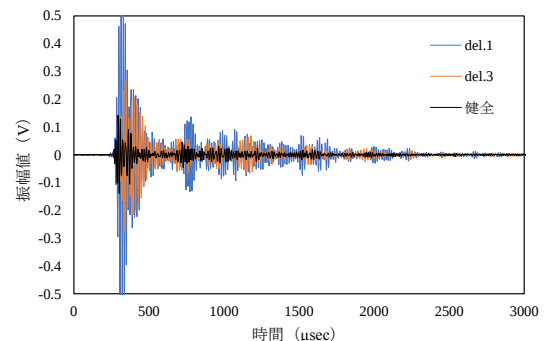


図-10 10ch の検出波形

している。各 AE センサの最大振幅値を各供試体と比較すると、同一の弾性波を励起させているにもかかわらず、最大振幅値が供試体によって異なることが確認された。図-11 および図-12 に示すように健全タイプと無補強タイプの最大振幅値は、概ね距離に応じて減衰して小さくなっていることが確認された。図-11 を見ると、10ch は他のセンサと比べると振幅値が大きくなっていることが確認できる。その原因として実験供試体の健全タイプを作製した際、鋼板とコンクリート間にエポキシ樹脂を完全に注入したが、多少の空気の入りが生じたため振幅値が大きくなったと考えた。

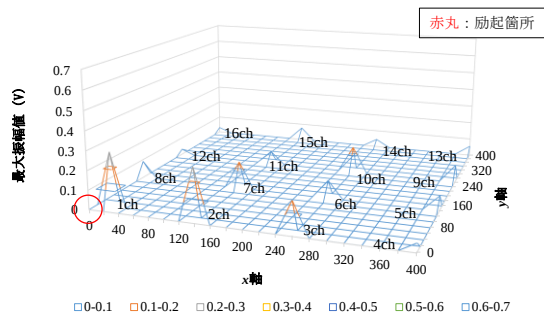


図-11 健全の各センサの最大振動数

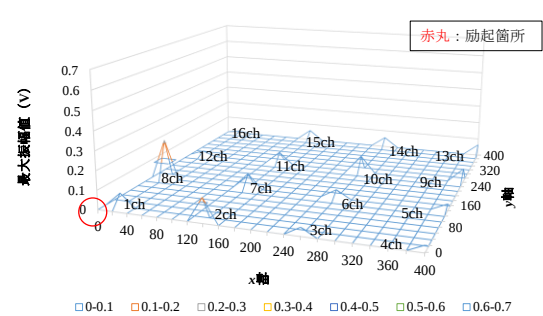


図-12 無補強の各センサの最大振動数

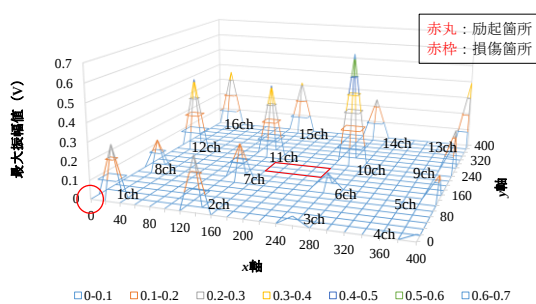


図-13 健全の各センサの最大振動数

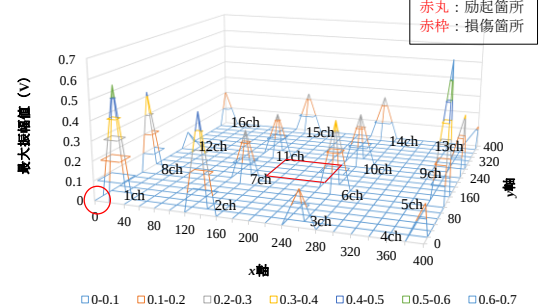


図-14 del3の各センサの最大振動数

表-2 使用材料の音響インピーダンス¹⁾

	密度 (10 ³) kg/m ³	弾性波速度 m/s	音響インピーダンス (10 ³) kg/(m ² *s)
鋼	7.80	5870	45.8
エポキシ	1.70	2500	4.25
アクリル	1.18	2720	3.21
空気	0.0013	344	0.00
コンクリート	2.30	4200	9.66

しかし、図-13および図-14に示すように損傷タイプのdel1およびdel3の最大振幅値は、距離に応じて同様に減衰はしておらず、空洞周辺で最大振幅値が増加する傾向が見られた。これは、空洞の鋼板がたわむことにより生じる影響と音響インピーダンスの違いが反射波に影響を及ぼしたと考えられる。

音響インピーダンスは媒質の密度と媒質中の音速によって算出される。励起波が媒質中を伝播した時の反射率、透過率の割合を把握することができる。鋼板とコンクリート間は空洞のため、波は全反射し、空洞周辺では最大振幅値が増加すると考えられた。本試験で使用了材料の音響インピーダンスを表-2に示す。

(3) 周波数解析による評価

代表波形に対して、フーリエスペクトル解析を行い、その波の周波数特性について検討した。各センサにおいて、フーリエ振幅が最大となる振動数を比較した。その結果を図-15に示す。赤枠で示しているセンサは、弾性波を励起した際に一番影響が出ると推測した箇所である。図-15を見ると、無補強タイプ(C)と健全タイプ(S)

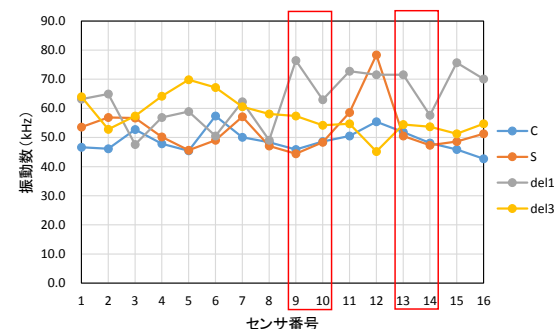


図-15 各センサの最大振動数

の最大振動数の大きな変化はないが、損傷タイプ(del1, del3)では振動数が非常に高くなっている。これは、たわみ振動により、鋼板の共振周波数に近い振動数成分が増加したためだと考えられる。

7. 結論

衝撃弾性波法による完全に補強した供試体と空洞を模擬した供試体の最大振幅値の相違が確認された。これは、使用材料による音響インピーダンスや空洞によるたわみ振動が原因ではないかと考えられる。

周波数解析では、各供試体と比較すると、損傷箇所を有する供試体(del1, del3)の方がフーリエ振幅値が最

が最大となる振動数が大きくなる傾向が確認された。

また、実験で検出された波形には反射波等の多くの成分を含んでいるため、本研究では、空洞の明確な位置を評価することが困難であると考えられる。

本研究では供試体の上側の del.1 と del.3 を対象に実験を行ったが、del.2 と del.4 の測定が行えていないため損傷の大きさによる最大振幅値や振動数の違いについて確認する必要がある。空洞の大きさの推定の評価も今後の課題とする。

謝辞：本研究は、一般社団法人防災研究協会「若手研究者研究助成」による支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会（土木学会，地盤工学会，日本機械学会，日本建築学会，日本地震学会）：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害第1章 橋梁，土木学会，p.934, 1996.
- 2) 鈴木直人，幸左賢二，藤井康男，澤田吉孝：鋼板巻き立て補強橋脚の変形性能に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, p.253, 1999.
- 3) 岡本典之，斎藤博行，知崎桂三，富松泰秀：報告 震災を受けた補強済橋脚の鋼板撤去調査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, pp.1363-1368, 1999.
- 4) 日本非破壊検査協会：コンクリートの非破壊試験－弾性波法－第2部：衝撃弾性波法，p.38, 2014.
- 5) 日本非破壊検査協会：非破壊シリーズ アコースティック・エミッション試験 I，pp.23-24, 2006.
- 6) H. Akaike: Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average process, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Vol.26, No.1, pp.363-387, 1974.
- 7) 赤池弘次，甘利俊一，北川源四郎，樺島祥介，下平榮寿：赤池情報量基準 AIC モデリング・予測・知識発見，共立出版，2007.
- 8) 前田直樹：地震波自動処理システムにおける読み取り及び評価，地震2輯，Vol.38, No.3, pp.365-380, 1985.
- 9) H. Zhang, C. Thurber and C. Rowe: Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Signal-Component Recordings, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.93, No.5, pp.1904-1912, 2003.
- 10) J. H. Kurz and C. U. Grosse, H.W. Reinhardt: Strategies for Reliable Automatic Onset Time Picking of Acoustic Emissions and of Ultrasound signals in Concrete, Ultrasonic, Vol.43, pp.538-546, 2005.
- 11) 社団法人日本非破壊検査協会：非破壊評価工学 p.61, 2012.4.

PEELING AREA BETWEEN STEEL PLATE JACKET AND CONCRETE AFFECT TO DETECTION WAVEFORM BY IMPACT ELASTIC WAVE METHOD

Yuta YASUDA, Hirotaka SAKURAI, Yuma KAWASAKI and Kazuyuki IZUNO

Many bridges suffered huge damage due to 1995 Kobe earthquake in Japan. After this disaster, many concrete bridge piers were repaired and strengthened using steel plate jackets. If between steel plate jacket and concrete is peeled, assessment its inside is so difficult. Then, this study aimed to evaluate the peeling location between steel plate jacket and concrete.

As fundamental study, it has analyzed if the peeling area affected against the detection waveform. From the results, it confirmed that the detection waveforms and the maximum amplitude were different in relationship between no-damaged specimen and damaged specimen.