

(41) 表面 SH 超音波によるコンクリート中の鉄骨溶接部の非破壊検査法に関する基礎研究

Basic experimental study on surface SH wave for flaw direction in welds of composite structure

松木 克幸*, 立花 正彦**, 南 宏一***

Katuyuki Matsuki, Masahiko Tachibana, Kouichi Minami

*東京電機大学大学院工学研究科建築学専攻 (〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2)

**工博、東京電機大学教授 工学部建築学科 (〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2)

***工博、福山大学教授 工学部建築学科 (〒729-0292 広島県福山市学園町一番地三蔵)

This study examined whether the surface SH wave ultrasonic test method could apply to flaw direction of steel weld zone in concrete experimentally. Main experimental variable are existence of the covering concrete, shapes of weld zone, working sensitivity, flaw direction distance, etc. From these a series of experimental result, the conclusion of the following was got. The steel edge can be detected, even if the concrete has been covered. However, the echo attenuates by existence of concrete. The injury echo greatly reacts will that the slit on the assumption of the defect in big. Basic data which should apply this non-destructive inspection method in the composite structure were obtained.

Keywords: composite structure, surface SH wave, non-destructive inspection

1. はじめに

地震の被害では溶接欠陥が破断の起点となって、鉄骨造（以下：S 造）建築物が破壊する事例が少なからず観測されている。S 造建築物の溶接部の施工品質を管理し性能評価を保証する検査方法の一つとして、超音波探傷法がある。これらの溶接欠陥検査により欠陥の程度と強度及び変形能力との関係が明らかにされ、欠陥を適切に評価し実用化されている。また、S 造建築物の溶接欠陥の検査において耐火被覆がなされていても超音波のひとつである表面 SH 波の超音波探傷¹⁾、²⁾によってその欠陥を探傷することが可能であることが報告され、超音波法のひとつとして確立されつつある。

一方、1995 年 1 月に発生した阪神大震災では、鉄筋鉄骨コンクリート（以下：SRC）構造物も他の構造物と同様に倒壊、大破などの被害が報告されている³⁾。倒壊、大破とは至らなかったものの被害のあった建物や、建物にほとんど構造的な被害はなかったが、今後の地震に対応を講じる手段として耐震診断が適用されている。しかし、構造図の紛失などの諸問題により、建築物の性能・品質が不明確となり、耐震診断が適用できないケースも考えられる。そこで既存建築物の性能・品質を評価、把握し、この性能を明確に検査する方法の開発が望まれている。また、近年では建築物に対するニーズの多様化などにより設計法が性能指向型設計へと移行しているが、既存の建物では設計段階での性能と施工後の建物との性能、品質が必ずしも一致

しているかは疑問である場合もあり、建築にとって施工後の性能・品質を確認する手段が必要となる。

本報告は SRC 構造の鉄骨要素に着目し、コンクリート中の鉄骨の溶接形状、状態を把握するために、鉄骨構造の耐火被覆下でも有効とされている表面 SH 波探傷法がコンクリート中でも使用可能であるかを検討するとともに、SRC 構造における溶接部の非破壊検査法の確立のための基礎資料を得るものである。

2. 実験計画及び試験体形状

2.1 基礎実験

基礎実験(a)の実験計画を表-1(a)に示す。基礎実験の目的はコンクリート中における鉄骨の傷（欠陥）を探知する場合の表面 SH 波の基本的な性状を把握するものである。実験変数は、コンクリート被覆（以下：被覆とする）の有無(2 水準)、板厚におけるスリット深さの割合(5 水準)、探傷距離(2 水準)、断面内におけるスリットの位置(2 水準)、探傷感度(3 水準)の 5 種類とし、表-1(a)に示す 80 パターンについて測定する。

基礎実験(b)の実験計画を表-1(b)に示す。本実験は表-1(b)に示す様に 2 つのシリーズから構成している。シリーズ 1 の主な実験変数は探触子の周波数で、シリーズ 2 の主な実験変数は軸方向力である。

基礎実験の試験体の形状及び寸法を図-1 に示す。鉄骨断面は 12×50mm で、長さは 410mm とする。探傷部のスリットは、鉄骨端面より 31mm の位置に、幅が 4mm、深さが 2,4,6,8,10mm の 5 通りで鉄骨断面全幅

表一(a) 実験計画 (基礎実験 (a))

名称	L (mm)	コンクリート被覆有 (Cシリーズ)		コンクリート被覆無 (Sシリーズ)	
		260 (250) mm	340 (330) mm	260mm	340mm
A	2 (17%)	6※1	6	2※2	2
B	4 (33%)	6	6	2	2
C	6 (50%)	6	6	2	2
D	8 (67%)	6	6	2	2
E	10 (83%)	6	6	2	2

d:スリット深さ (mm) t:板厚 (12mm) L:探傷距離 (mm) L':被覆距離 (mm)
 ※1:60, 70, 80 dBの3種類でtype I, IIとも測定
 ※2:60 dBの1種類のみでtype I, IIとも測定

type I

type II

SA260-60

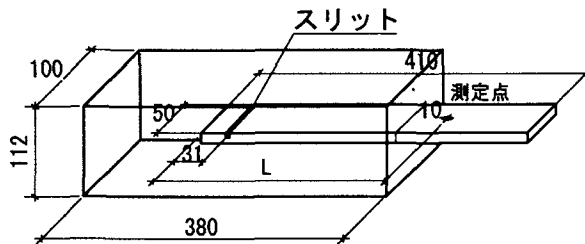
スリット深さ
 A: 2 mm
 B: 4 mm
 C: 6 mm
 D: 8 mm
 E: 10 mm

測定面
 I: type I
 II: type II

コンクリートの有無
 S: 鉄骨のみ
 C: コンクリート被覆

表一(b) 実験計画 (基礎実験 (b))

実験変数	シリーズ I	シリーズ II
周波数	1MHz、2MHz	2MHz
スリット深さ	d=2,6,10 (mm)	
軸方向力	$\sigma = 0 \text{ N/mm}^2$	$0 \leq \sigma \leq 0.37 \sigma_B$ ※
探傷感度	60,70,80dB	エコー高さが50%のときの探傷感度



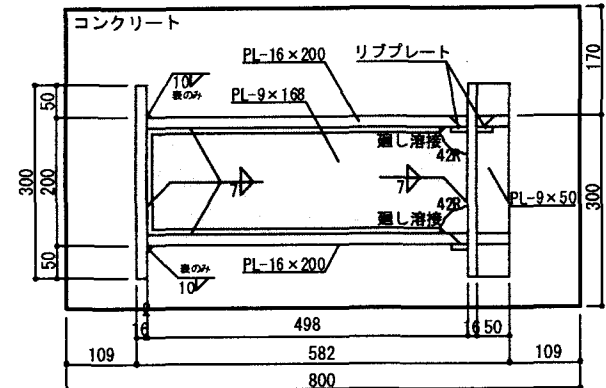
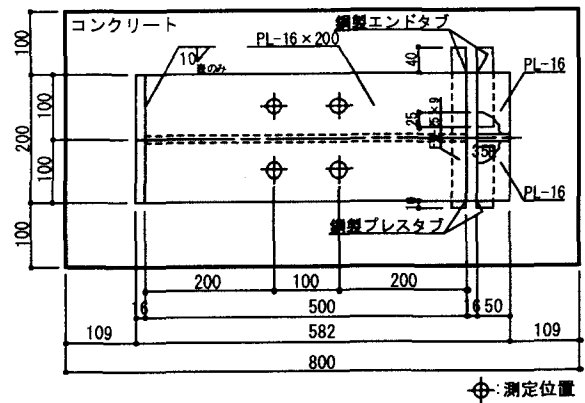
図一 試験体形状および寸法 (基礎実験 (a),(b))

表二 実験計画 (鉄骨溶接部探傷実験)

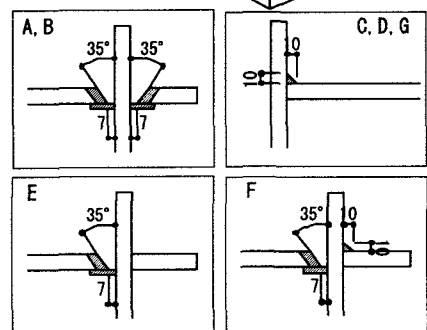
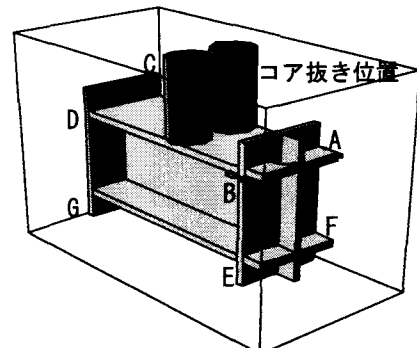
測定	溶接形式	裏当て金		スカーラフ
A	突合せ	FB-25×9	鋼製エンドタブ	35R
B		FB-25×9	鋼製プレスタブ	35R
C	隅肉	なし	-	-
D		なし	-	-
E	突合せ+隅肉	FB-25×9	-	なし
F		FB-25×9	-	なし
G	隅肉※	なし	-	-

※測定点Gに関してはプレート間を2mm空けて溶接

に設ける。被覆後のコンクリート断面は100×112mm、長さは380mmとなっており、鉄骨のかぶりは上下ともに50mmとする。鉄骨に対する被覆長さは250,330mmの2種類で、被覆部分から10mm離れた位置で測定するため、探傷距離Lは260,340mmとする。試験体のコンクリート強度は20 (N/mm²)とする。



図二 試験体形状および寸法 (鉄骨溶接部探傷実験)



図三 コア抜き位置および溶接寸法

2.2 鉄骨部材の溶接部探傷実験

鉄骨部材の溶接部探傷実験の実験計画を表-2に示す。溶接部探傷実験の目的は「隅肉溶接」「突合せ溶接」など溶接の違いによってどのような影響があるかを確認し、また、その後コンクリートを打設、コア抜き後に再度測定をすることで鉄骨溶接部における表面SH波の有効性を検討する実験である。実験変数は、被覆

の有無(2水準)、溶接方法(3水準)の3種類とし、14パターンを測定する。

試験体形状及び寸法を図-2に、コア抜き位置及び溶接形状を図-3に示す。鉄骨断面はBH200×200×9×16にプレートが溶接されており、全長、全幅で300×582mmとする。各位置での溶接は、A、Bは両方向からも突合せ溶接、C、D、Gは片方向のみ隅肉溶接で、Gのみプレート間を2mm離しての溶接とする。Eは片方向のみ突合せ溶接、Fは突合せ溶接と隅肉溶接の組合せとする。被覆後のコンクリート断面は400×470mmで長さは800mmとする。かぶりは上フランジまでが170mm、下フランジまでが50mmとする。また、基礎実験圖と同様に溶接箇所から200mm、フランジ端部から50mmの位置を中心に100φでコア抜きし、その穴から探触子を挿入、測定する。試験体のコンクリート強度は20(N/mm²)とする。

3. 実験方法

全測定ともデジタル超音波探傷器及び周波数2MHz又は1MHzの表面SH波斜角探触子を用い測定する。測定範囲、音速を3.22km/sに設定し、STB;A2(超音波斜角探傷用A2形感度標準試験片)を用いてパルス位置を設定し、探傷器を調整する。また、測定は測定箇所に接触媒質を塗布して左右に探触子の首振り走査を行い最大エコーを見つけ、その後5秒間押し付けを行う。また、測定に際し、基礎実験はコンクリート中における表面SH波の性状をみるために探傷感度を固定とし、溶接部探傷実験はエコー高さ50(%)を基準とする。

基礎実験および溶接部探傷実験は、コンクリート打設後に鉄骨表面までのコア抜きをし、その穴から探触子を挿入し同様に測定する。

4. 実験結果及び考察

4.1 基礎実験

[1]超音波の距離特性

得られた測定結果の代表例を図-4に示す。縦軸はエコー高さ(%), 横軸はビーム路程(mm)をそれぞれ示す。

図-4における①の反応はスリット位置の反応である傷エコーである。②は鉄骨端部における端面エコー、③～⑤はスリット部と鉄骨端部とを反響する波が減衰しながら反応しているエコーである。スリット位置、鉄骨端部位置での反応が確認され、正確な距離を把握できることが明らかとなる。

[2]コンクリート被覆の影響

図-4から被覆に関わらず傷エコー(①)と端面エコー(②)がはっきりみられるが、被覆することによって

約60%エコー高さが減少している。また、他の試験体でも被覆することにより平均して約65%程度エコー高さが低下する傾向がみられる。しかし、スリット(260mm)や鉄骨端部(290mm)の位置はコンクリートで被覆されていても、正確に検出できる。このことからコンクリート中の鉄骨に表面SH波は適用可能であると考えられる。

[3]コンクリート被覆距離の影響

傷エコーの反応のみを拡大したものを図-5に示す。探傷距離が大きくなると同じ深さのスリットでもその傷エコーは減衰していることが確認できる。スリットが深いほど、傷エコーのエコー高さも高くなるが、被覆距離が大きくなりエコー高さが低くなっても同様の減少率で、その比率は変わらない。

[4]スリット深さの影響

スリットの深さによるエコー高さの違いを拡大したものを図-6に示す。

図-6よりスリットの深さが深くなるにつれ、傷エコーのエコー高さも高くなることがわかる。スリット深さが8mm($d/t=67\%$)以上になると急激にエコー高さが上昇しており、スリットの深さがエコー高さに影響を与えていることが明らかとなる。

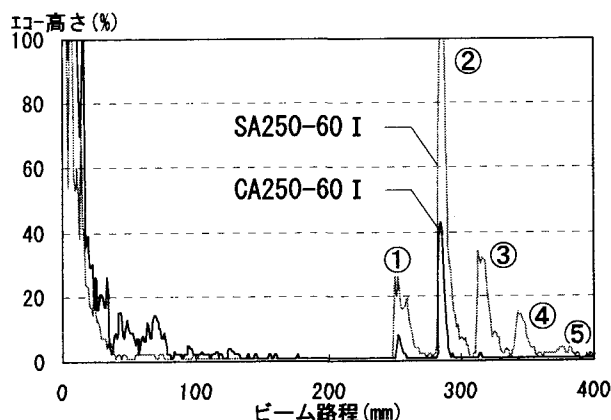


図-4 コンクリート被覆の影響

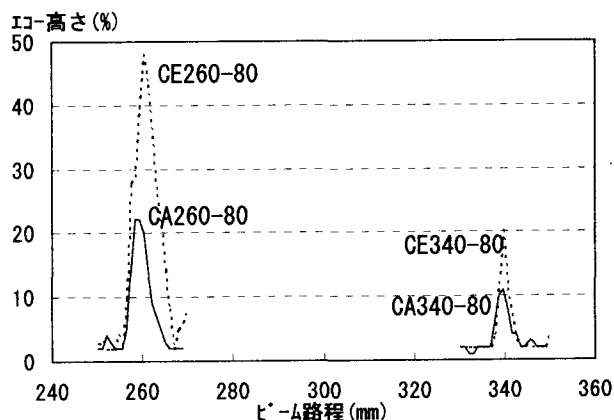


図-5 コンクリート被覆距離の影響

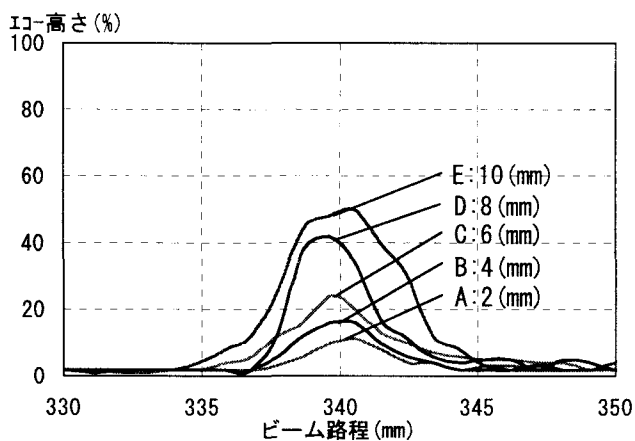


図-6 スリット深さの影響

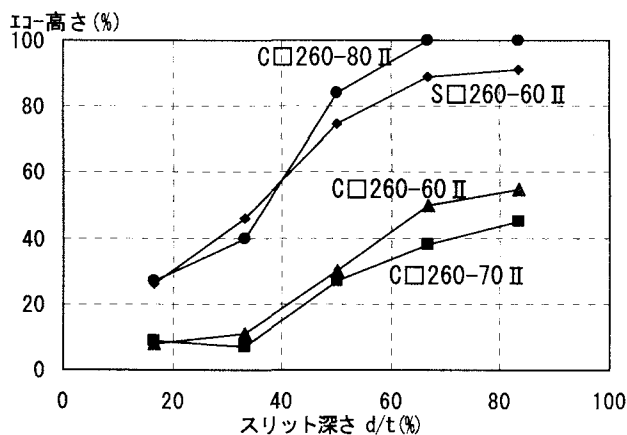


図-7 スリット深さの影響

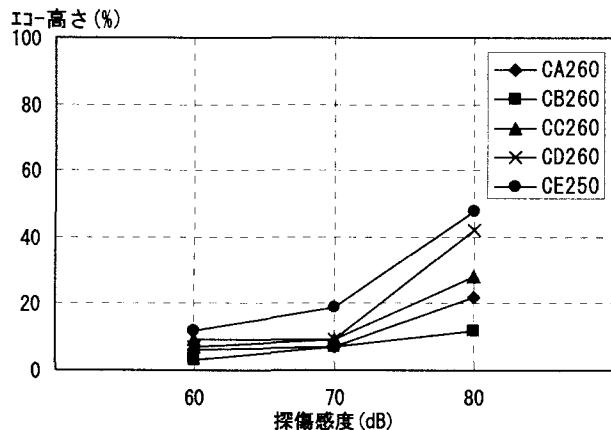


図-8 探傷感度の影響

板厚に対するスリット深さの割合(d/t)と傷エコーのエコー高さの最大値(%)との関係を図-7に示す。探傷感度が上がりスリットが深くなるにつれエコー高さの上昇が確認できる。また、スリット深さ 6mm までのエコー高さは比例的な上昇を示しておりスリットの深さを推測できる。

[5]探傷感度の影響

探傷感度(dB)とエコー高さ(%)の関係を図-8に示す。被覆試験体では探傷感度 60dB で測定した場合、スリットが深くなってもエコー高さに明確な差が認められ

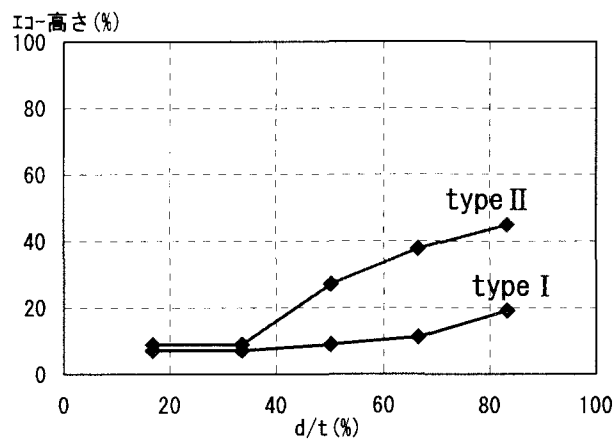


図-9 スリット位置の影響

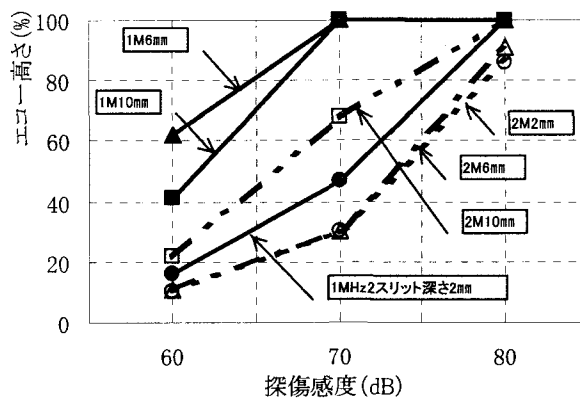


図-10 周波数とエコー高さの関係

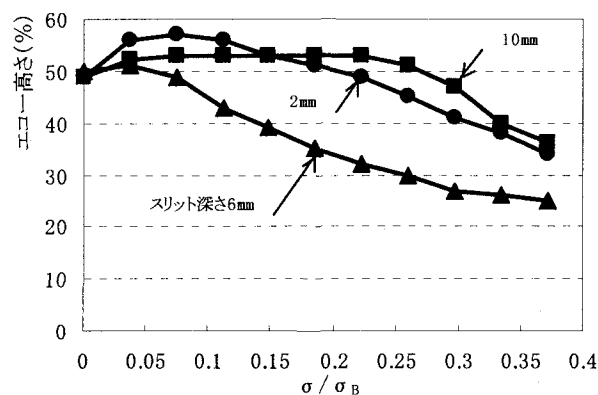


図-11 軸圧縮力とエコー高さの関係

ない。探傷感度を上げることで傷エコーのエコー高さは高くなる。探傷感度を 60dB から 70dB に上げただけではエコー高さの上昇は少なく、60dB と比べてもまだそれほど明確な差があらわれない。しかし、80dB から急激にエコー高さが高くなり、スリットが深くなるにつれエコー高さの上昇度の傾斜がきつくなることが明らかとなる。

[6]スリット位置による影響

スリット位置の違いによる影響である type I と type II との比較を図-9 に示す。縦軸はエコー高さ(%)を、

横軸は板厚に対するスリット深さの割合(%)をそれぞれ示す。スリット深さ4mm($d/t=33\%$)までに type I と type II のエコー高さに相違は認められない。しかし、スリットが深くなるにつれ type I のエコー高さがほぼ一定の値で検出されるのに対し、type II はスリット深さ4mm($d/t=33\%$)以降にエコー高さの急激な上昇が見られ、type I と比べても高く検出されていることがわかる。このことから探触子から出た表面 SH 波は鉄骨表面だけを伝搬しているものではなく、厳密には鉄骨表面から鉄骨中腹にかけて波に広がりを持ち伝搬しているものであり、そのため type II の反応が大きくなるものと推測される。

[7]周波数による影響

探触子の周波数の探傷感度とエコー高さの関係を図-10に、また、探触子の周波数とエコー高さの関係を図-11に示す。これらの図より、2MHz のときのエコー高さは1MHz のエコー高さの46%である。探傷感度が60dB、70dB でスリット深さが2mm、10mm のとき、2MHz のエコー高さは1MHz のそれよりも32%、46%と低い。同様の探傷感度でスリット深さ6mm のとき、2MHz のエコー高さは1MHz のエコー高さより82%、

70%低い。スリット深さで減衰の割合が異なるものの、探触子周波数が小さい方が減衰が少ない傾向がみられた。

[8]軸方向力の影響

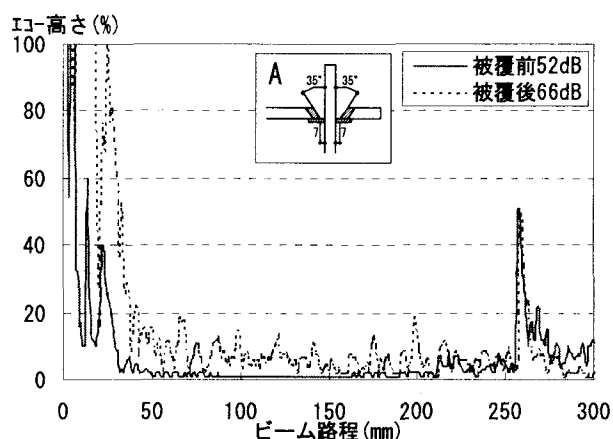
軸圧縮力とエコー高さの関係を図-12に示す。この図より、軸力が作用するといったんエコー高さが上がる傾向があるが、軸力が増加すると減衰を示し、 $\sigma/\sigma_B=0.33$ (6.58N/mm^2) ではスリット深さ2mm、10mm でそれぞれ $\sigma/\sigma_B=0.0$ のときより24%、18%と減衰している。6mm のときは47%減衰と値が大きい。ただ、減衰は見られたもののスリットからの傷エコーは検出された。

4.2 鉄骨部材の溶接部探傷実験

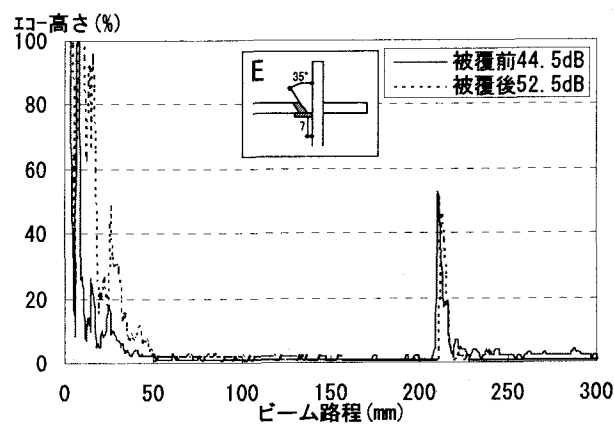
代表的な測定結果を図-13(a)~(d)に、A~G 箇所の測定感度の推移を図-14に示す。図-13の縦軸はエコー高さ(%)を、横軸はビーム路程(mm)を、図-14の縦軸はエコー高さ50%での探傷感度(dB)を、横軸は測定箇所をそれぞれ示す。

測定箇所 A、B では両方向とも突き合わせ溶接を用いており鉄骨端部265mm でのエコーが確認できる。

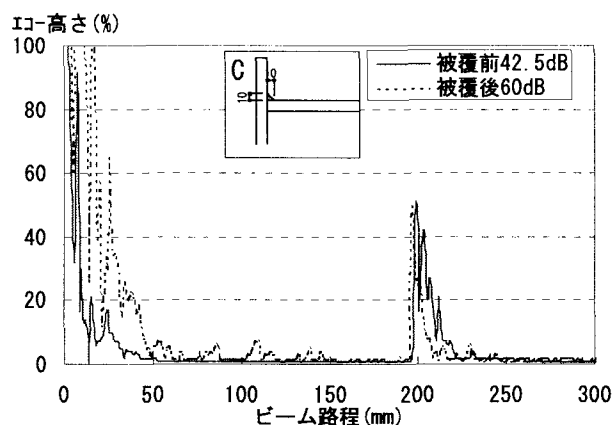
C、D は被覆に関わらず200mm の位置にエコーがみ



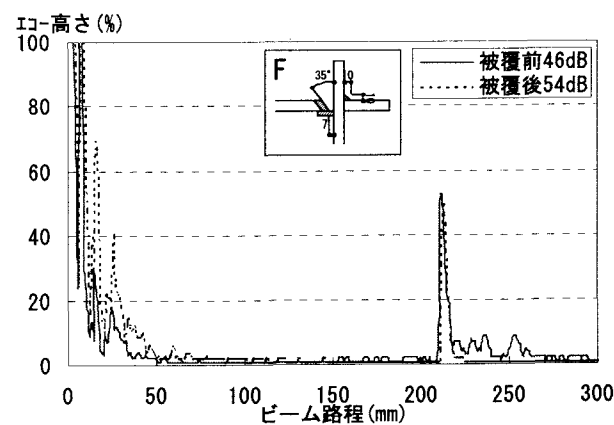
(a) 両方向とも突き合わせ溶接



(c) 片方のみ突き合わせ溶接



(b) 隅肉溶接



(d) 突き合わせおよび隅肉溶接の組合せ

図-13 各種溶接による距離振幅特性曲線

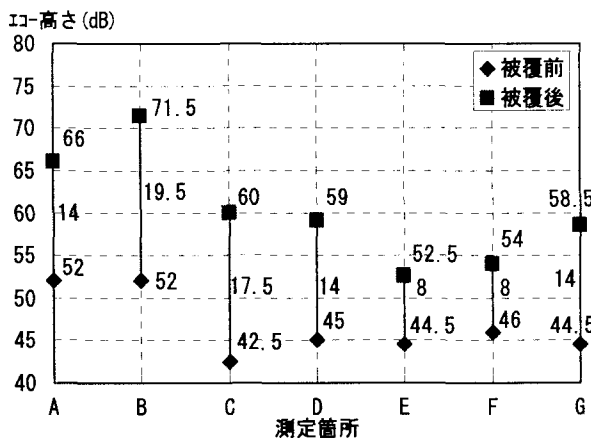


図-16 測定箇所別のエコー高さ

られ隅肉溶接ではフランジプレートに表面 SH 波が伝播していかない事が明確となる。E、F では216mm でエコーが確認され、C、D の結果と同様に表面 SH 波は突合せ溶接部は通過し、隅肉溶接部で反応していることが明確となる。

図-16 より、コンクリートを被覆することで平均して 13dB 程探傷感度を上げる必要があることが確認できる。

5. まとめ

コンクリート中における溶接欠陥などを想定した 2 つの実験シリーズを周波数 2MHz および 1MHz の探触子を用い、表面 SH 波探傷法で実験した結果、以下の事が明らかとなった。

- 1) コンクリート部分に覆われていても鉄骨のみの試験体と比べエコー高さは約 65% 程度減衰する傾向にあるが、鉄骨の破断部までの距離を正確に知ることができる。また、軸方向力が作用しても同様に鉄骨の破断部までの距離を正確に知ることができる。
- 2) スリットが深くなるとスリット位置での傷エコーは高くなる。またスリット深さが深くなるにつれ、探

傷部より遠方にある反応のエコー高さは減少する傾向にある。

3) 探傷感度を上げることで探傷部の傷エコーのエコー高さは高くなり、70dB 以降急激な上昇がみられる。

4) コア抜きを行う事で鉄骨表面に円形の傷が発生するが、探触子から探傷部までの距離が近い場合においては特に影響はないと推測できる。

5) 周波数が小さい探触子は減衰が少なく、測定距離が長くなる。

6) 溶接方法の違いによって表面 SH 波の伝わりに違いがあり、隅肉溶接では溶接部で明確なエコーが確認され、突き合わせ溶接では溶接部を通過する。また、普通コンクリートを被覆することで平均 13dB 探傷感度を上げる必要がある。このことより、コンクリート中における鉄骨溶接部が隅肉溶接か突き合わせ溶接かの判断は、表面 SH 波探傷法で確認できることが明らかとなった。

【謝辞】 本研究は日本鋼構造協会合成構造性能評価手法開発小委員会(主査 南宏一:福山大学教授)の委員会活動の一環として行われました。また、基礎実験 I に関し吉村鉄也氏(駒井鉄工)に、実験に際し西村雅史氏(平成 12 年度東京電機大学卒論生)、石田純也・小川雄二氏(平成 14 年度東京電機大学卒論生)に協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 笠原基弘、他：建築鉄骨溶接部の表面 SH 探傷法に関する研究(その 1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp299-300, 1996.9
- 2) 池ヶ谷靖、他：建築鉄骨の震災等による破断部の表面 SH 波による検出方法に関する実験的研究(その 1,2,3,4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp299-306, 1997.9
- 3) 日本建築学会：阪神大震災被害報告書 建築編-2、鉄骨鉄筋コンクリート造建築物, 1998.8