

論文

衝撃弾性波法を用いた PC グラウト充填度評価に関する検討

藤原 規雄^{*1}, 葛目 和宏^{*2}, 蒔 直樹^{*3}, 伊藤 博幸^{*4}, 宮川 豊章^{*4}

Evaluation of the Filling Condition of PC-Grout by Using Impact-generated elastic wave

Norio FUJIWARA^{*1}, Kazuhiro KUZUME^{*2}, Naoki SHITOMI^{*3}, Hiroyuki Ito^{*4} and Toyoaki MIYAGAWA^{*5}

要旨: 近年, ポストテンション方式 PC 橋の PC グラウト充填度の調査には, 弾性波を利用した非破壊検査が用いられている. 横締め鋼材を対象とした衝撃弾性波法, 主鋼棒や主ケーブルおよびせん断鋼棒などを対象としたインパクトエコー法などがあり, それらの評価手法の確立が望まれている. 本稿では, PC 構造を模擬した供試体を用いて横締めの衝撃弾性波法やインパクトエコー法による PC グラウト充填度調査についての実験を行い, 短寸の床版横締め鋼棒に衝撃弾性波法を適用する際の測定方法や, 薄い部材にインパクトエコー法を適用する際の評価指標などについての検討を行った.

キーワード: 非破壊検査, PC グラウト, 衝撃弾性波法, 充填度評価

1. はじめに

近年, ポストテンション方式 PC 橋において横締め鋼棒や主ケーブルが腐食して破断した事例が報告されている. これらの事例には, PC グラウト (以下, グラウトという) が十分に充填されていない背景があり, グラウト充填度を評価する調査手法の確立が望まれている.

グラウト充填度の調査手法としては, X 線透過法や直接シースを開削する削孔法などもあるが, 対象が多数の場合などには, まずは構造物を傷つけず比較的安価に調査できる非破壊的な調査手法で充填不良の疑いのあるものをスクリーニングするのが合理的かつ効率的である.

グラウト充填度の非破壊調査には, 横締め鋼材は横締めの衝撃弾性波法 (以下, 衝撃弾性波法という), 主鋼棒・主ケーブルにはインパクトエコー法がよく用いられるが, 構造条件など

によっては従来の指標でグラウト充填度をうまく評価できない場合もあり, 適切な評価指標や判定基準の確立が望まれている.

本稿は, 実橋床版を模擬した供試体を用いて, 衝撃弾性波法の適用事例が少ない短寸の横締め鋼棒に対する測定方法や, 従来の指標ではグラウト充填度の評価が難しい薄い部材についてのインパクトエコー法の評価方法についての検討結果を取りまとめたものである.

2. 短寸横締め鋼棒への衝撃弾性波法の適用

2.1 床版モデル供試体

道路橋の場合, 床版横締め鋼棒には長さ 8~10m 程度 (10m 以上はカップラー接続で延長) の PC 鋼棒が使用されていることが多く, これらのグラウト充填度調査に衝撃弾性波法が適用された事例も豊富にある. 構造条件や使用材料

*1 (株)国際建設技術研究所 東大阪支店 技術部

*2 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長

*3 大阪市交通局 鉄道事業本部 工務部

*4 (株)大阪メトロサービス 技術部

*5 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授

等によって多少の補正が必要な場合もあるが、測定方法や評価基準についてはおおむね確立されている（図-1～図-2 参照）¹⁾²⁾。

一方、鉄道には上下線分離構造で幅員が非常に狭い PC 橋もあり、過年度の調査では床版横締めには長さ 3.5m 程度の非常に短い鋼棒が用いられている橋梁もあった。このような短寸鋼棒のグラウト充填度調査に衝撃弾性波法を適用した事例はまだ少なく、調査を進めるうちに、長寸鋼棒と同じ測定方法ではグラウト充填度の評価が難しいケースもあることがわかってきた。

このような背景から、幅員の狭い鉄道橋を模擬した短い横締め鋼棒を持った床版モデル供試体を 2 体製作し、短寸横締め鋼棒を対象とした

衝撃弾性波法の適切な測定方法についての検討を行うこととした。

今回の実験に用いた床版モデル供試体 2 体の概要を表-1 および図-3～図-7 に示す。

2 体の供試体は同じ寸法形状で、ともに長さ 3730mm（定着間距離は 3550mm）の横締め PC 鋼棒（Φ23mm，SBPR930/1080，鋼製スパイラルシース φ35mm）が厚さ 180mm の版の中央に 2 本埋め込まれており（シース純かぶり 72.5mm），それぞれのグラウト充填度合いを変化させている。PC 鋼棒の定着部は、緊張完了後に後打ちされた無収縮モルタルで覆われている。

なお、躯体コンクリートの設計基準強度は、 $\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$ である。

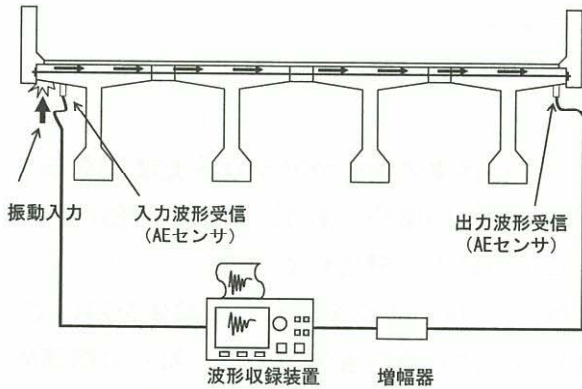


図-1 床版横締めの衝撃弾性波法測定要領¹⁾

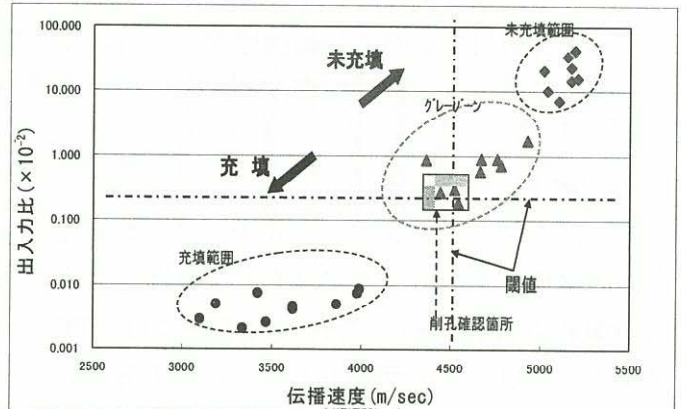


図-2 グラウト充填度の評価方法¹⁾
(伝播速度と出入力比が指標)

表-1 供試体のグラウトの充填条件

| 供試体 No. | 上段 PC 鋼棒 | 下段 PC 鋼棒 | 備考 |
|---------|----------|------------------------|-------------------------------|
| No. 1 | 充填 | 不良 I (部分的充填不良) | 下段鋼棒は端部の 0.5m (定着長の 14%) が未充填 |
| No. 2 | 未充填 | 不良 II (1/2 断面の充填不良) | 下段鋼棒は全長にわたってシース断面の 1/2 が未充填 |

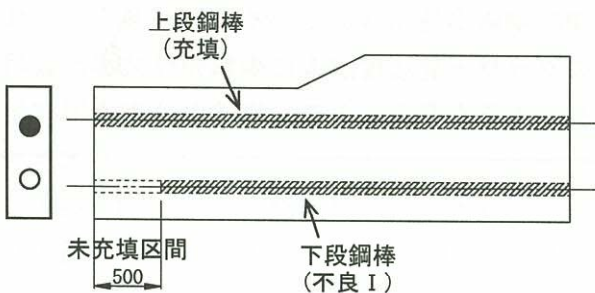


図-3 グラウト充填状況 (No. 1 供試体)

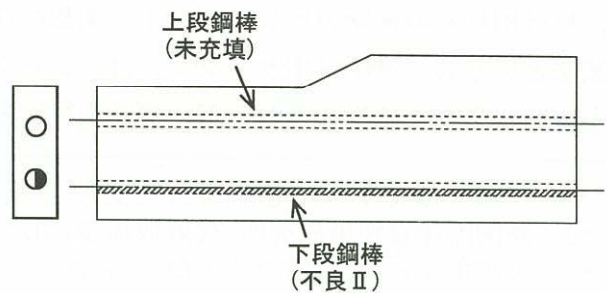


図-4 グラウト充填状況 (No. 2 供試体)

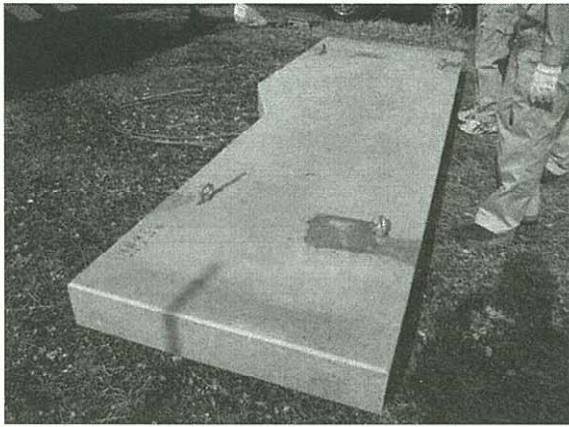


図-5 床版モデル供試体

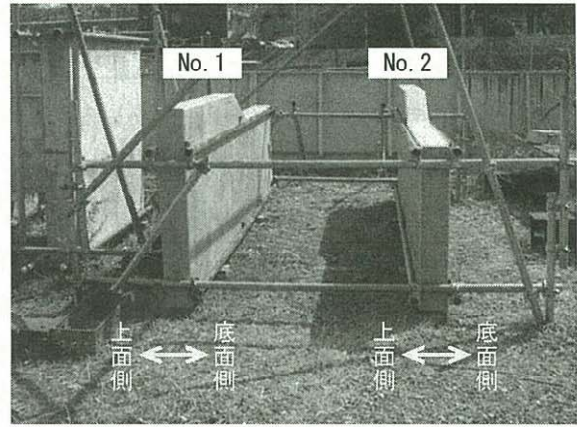


図-6 供試体の設置状況

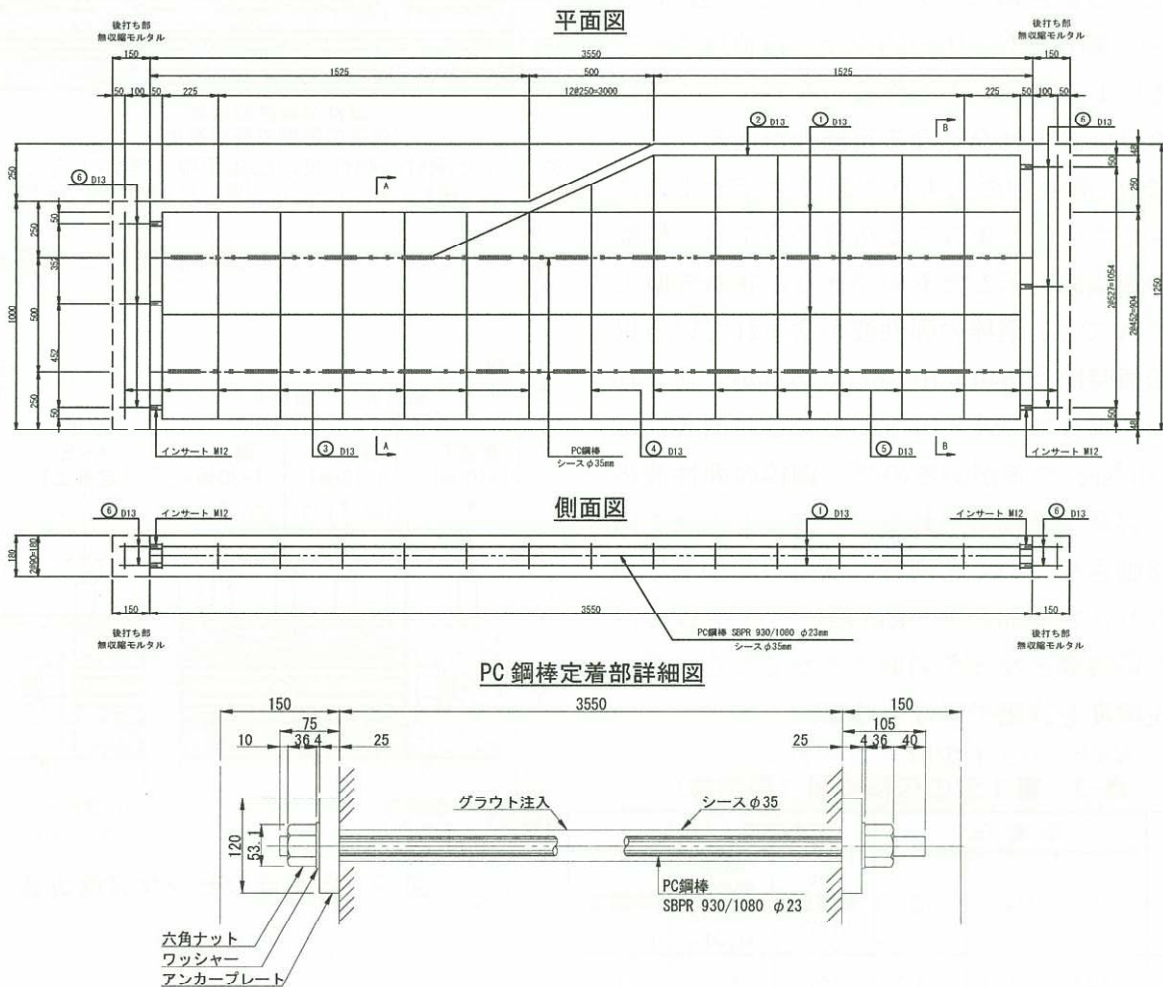


図-7 供試体の配筋およびPC鋼棒定着部詳細

2.2 弾性波の入受信位置の影響

横締め鋼材の衝撃弾性波法では、通常、弾性波の伝播速度と出力力比 (=受信側測定波の最大振幅/入力側測定波の最大振幅) を基にグラウトの充填度を評価する (図-1~図-2 参照)。

シース内にグラウトが充填されていない鋼棒上で測定した場合、受信側の測定波 (以下、受

信波という) には鋼棒を伝播した弾性波が現れる。鋼棒の弾性波は定着部を介して伝播するため、センサ間を直線的に伝播するコンクリートの弾性波よりも伝播距離が長くなるが、鋼材はコンクリートよりも弾性波の伝播速度が速いので (鋼材 $V_s=5900\text{m/sec}$ 程度, コンクリート $V_c=3900\sim 4400\text{m/sec}$ 程度), 受信波の第1波の

到達時間は速くなる。一方、グラウトが充填されている場合は、グラウトによる拘束で鋼棒の弾性波は途中で減衰してしまい、第1波の伝播時間は遅くなる(コンクリートの弾性波と同等)。

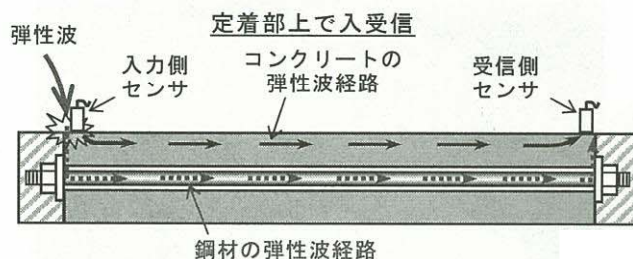
衝撃弾性波法の測定では、通常、弾性波の入受信点を PC 鋼材定着部の直近にするが、実構造物では測点付近の状態などから入受信点を移動せざるを得ないときがある。入受信点を定着部から内側に移動させると、伝播経路が異なる鋼材の弾性波とコンクリート表面付近の弾性波との間で伝播距離の差が大きくなる(図-8 参照)。短寸鋼棒では、比較的少ない移動量でもその影響によって鋼材の弾性波の有無による伝播時間の違いが現れなくなる可能性がある。

表-2 は、弾性波の入力点を図-9 に示すように移動させていった場合の受信波の第1波の伝播時間の理論値を示したものである。定着部直上の測点 A では、鋼棒の弾性波が含まれている場合の伝播時間は $640 \times 10^{-6} \text{sec}$ であるが、含まれていない場合は $751 \times 10^{-6} \text{sec}$ となる。両者には $110 \times 10^{-6} \text{sec}$ の差があるので、鋼棒の弾性波の有無は容易に見極められる。一方、入力点を内側に移動させていくと両者の伝播時間の差は小さくなり、定着部から 30cm 離れた測点 D でほぼ等しい時間となって判別できなくなる(グラウト充填度を評価できなくなる)。

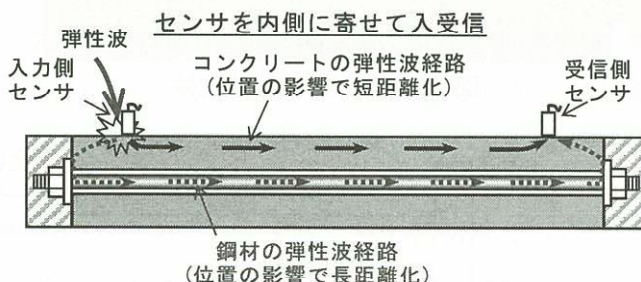
表-2 第1波の伝播時間(理論値)

| 測点 | 距離 (m) | | | 伝播時間 ($\times 10^{-6} \text{sec}$) | | |
|-----|--------|-------|-------|--------------------------------------|------------------------------|-----|
| | L1 | L2 | L3 | Con 弾性波 L1/Vc | 鋼棒 弾性波 L2/Vc +L3/Vs | 時間差 |
| 測点A | 3.520 | 0.180 | 3.550 | 751 | 640 | 110 |
| 測点B | 3.435 | 0.225 | 3.550 | 732 | 650 | 83 |
| 測点C | 3.335 | 0.309 | 3.550 | 711 | 668 | 43 |
| 測点D | 3.235 | 0.403 | 3.550 | 690 | 688 | 2 |
| 測点E | 3.635 | 0.225 | 3.550 | 775 | 650 | 125 |
| 測点F | 3.850 | 0.120 | 3.730 | 821 | 658 | 163 |

- *1 弾性波の入力点と入力側センサの位置は同一とする。
- *2 L1 は「センサ間」、L2 は「入力点～定着中心」+「定着中心～受信点」、L3 「両定着間」の距離とする(図-10 参照)。
- *3 弾性波速度は、コンクリート $Vc=4690 \text{m/sec}$ (No. 1 供試体の板厚エコー周波数より算出)、鋼棒 $Vs=5900 \text{m/sec}$ (標準値) とする。



※ Con と鋼材の弾性波の伝播距離はほぼ等しい
→ 鋼材(速い)と Con(遅い)の弾性波を判別可能



※ Con と鋼材の弾性波の伝播距離の差が大きくなる
→ 鋼材(速い)と Con(遅い)の弾性波を判別困難

図-8 コンクリートと鋼棒の弾性波伝播経路

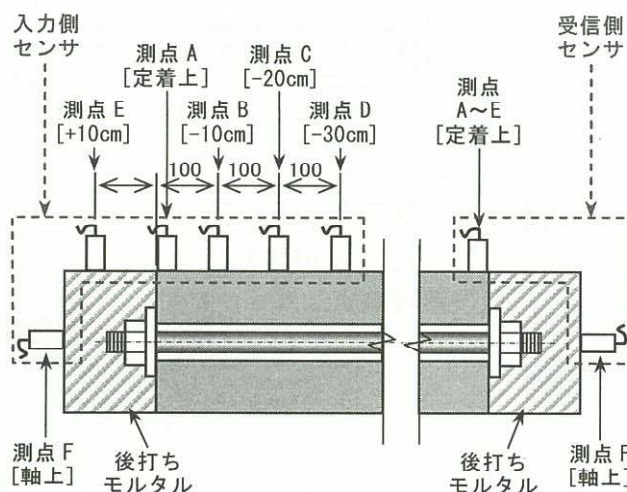


図-9 各測点のセンサ設置位置

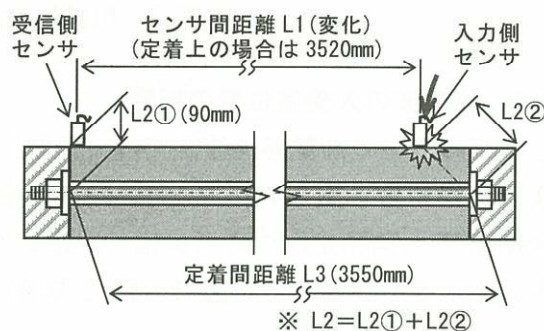


図-10 伝播距離の定義

表-3 第1波の伝播時間の比較（理論値および供試体の実測値）

| 測点 | 伝播時間(×10 ⁻⁶ sec) | | | | | | | 充填度の判定 | 備考 |
|---------------|-----------------------------|------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|----------|--------------------------------|
| | 理論値 | | 供試体の実測値 | | | | | | |
| | Conの弾性波のみ [L1] | 鋼棒の弾性波あり [L2+L3] | ① 充填 No. 1上段 | ② 未充填 No. 2上段 | ③ 不良Ⅱ No. 2下段 | 不良Ⅰ*1 No. 1下段 | | | |
| ④ 充填側入力 | | | | | | ⑤ 未充填側入力 | | | |
| 測点A [定着上] | 751 | 640 (-111) | 752 | 667 (-85) | 720 (-32) | 737 (-15) | 715 (-37) | ④以外は判定可能 | ④は充填と15×10 ⁻⁶ secの差 |
| 測点B [定着-10cm] | 732 | 650 (-82) | 733 | 700 (-33) | 708 (-25) | 723 (-10) | 712 (-21) | ④以外は判定可能 | ④は充填と15×10 ⁻⁶ secの差 |
| 測点C [定着-20cm] | 711 | 668 (-43) | 717 | 705 (-12) | 712 (-5) | 710 (-7) | 705 (-12) | すべて判定困難 | 充填との時間差が小さい |
| 測点D [定着-30cm] | 690 | 688 (-2) | 689 | 683 (-6) | 685 (-4) | 685 (-4) | 680 (-9) | すべて判定困難 | 充填との時間差が小さい |
| 測点E [定着+10cm] | 775 | 650 (-125) | 775 | 713 (-62) | 752 (-23) | 761 (-14) | 750 (-25) | ④以外は判定可能 | ④は充填と14×10 ⁻⁶ secの差 |
| 測点F [鋼棒軸] | 821 | 658 (-163) | 794 | 720 (-74) | 794 (0) | 786 (-8) | 784 (-10) | ②以外は判定困難 | 充填との時間差が小さい |

- *1 表中の()内の数値は、理論値はCon弾性波、実測値は充填鋼棒の伝播時間との差を示したものである。
 *2 「不良Ⅰ」については、弾性波を充填側から入力した場合と未充填側から入力した場合の2ケースを測定した。
 *3 伝播時間は、弾性波の入力（入力側センサで感知）から受信波の第1波の立ち上がりまでの時間とした。なお、今回の測定時のサンプリング時間間隔は1MS/sec、時間読取りの分解能は1×10⁻⁶secである。

表-3は、実際に床版モデル供試体で図-9のように弾性波の入力点を変化させて測定した受信波の第1波の伝播時間を比較した表である。

本供試体（Vc=4690m/sec）の場合、測定距離を3.5mから10cm変化させるとコンクリートの弾性波の伝播時間は21×10⁻⁶sec変化する。実際の測定ではセンサの設置位置が多少ずれる可能性もあるが、意図しないで10cmもずれることはなく、伝播時間にこれ以上の変化があれば、グラウトの充填度など実際の状況が反映された変化と考えることができる。そうした観点から、今回の実験においては、伝播時間が充填鋼棒の測定値（表-3の①の列に示す値。鋼棒を伝播する弾性波は減衰して検出できないためコンクリートを伝播した弾性波のみが検出される）よりも21×10⁻⁶sec以上速い鋼棒については、グラウト充填不良と判定できるものとした。

この基準で各鋼棒の伝播時間を検証すると、測点A（鋼棒定着部の直上）では未充填鋼棒だけでなく、断面の1/2が未充填の不良Ⅱや部分的未充填の不良Ⅰについても充填不良と判定できる。ただし、不良Ⅰについては、充填側で弾

性波を入力した場合と未充填側で入力した場合で伝播時間に差があり、充填側から入力した④のケースについては充填鋼棒との差が15×10⁻⁶secと小さいので判別は困難である。

定着部から20cm離れた測点Cについては、理論値では充填鋼棒と未充填鋼棒に43×10⁻⁶secの差が生じるので十分に判別できると考えていたが、実測での差は12×10⁻⁶secと小さく、伝播時間だけで充填不良と判定するのは困難である。また、定着部から30cm離れた測点Dについては、理論値と同様に未充填鋼棒と充填鋼棒の伝播時間がほぼ同じとなり、伝播時間で両者を判別するのはほぼ不可能であると考えられる。

後打ちモルタルを入力点とした測点Eについては、コンクリートの弾性波の伝播距離が長くなるため充填鋼棒と未充填鋼棒の判別は容易になるが、古い橋梁では後埋めモルタルが劣化して弾性波の伝播特性が悪くなっていることも多いので注意する必要がある。

後打ちモルタルの鋼棒軸上で入受信を行った測点Fについては、充填鋼棒と未充填鋼棒の時間差が最大となったが（74×10⁻⁶sec）、不良Ⅰや

不良Ⅱの鋼棒については充填鋼棒と大きな差はなく判別は困難である。

なお、測点 F 以外の測定ケースでは、充填鋼棒の実測値がコンクリートの弾性波の理論値と近似していたが、未充填鋼棒については実測値と理論値の差が小さいものや大きいものがあった。コンクリート表面から入力した弾性波は、定着部の中心から鋼棒に伝播すると仮定したが、打撃箇所によっては理論値の計算条件と若干異なる経路で伝播している可能性が考えられる。

2.3 適正な測定方法

今回の実験からは、長さ 3.5m 程度の短寸鋼棒で衝撃弾性波法を測定する場合、弾性波の入受信点をできるだけ鋼棒の定着部近傍に設置することが望ましく、移動させる場合でも定着部からの距離を 20cm 未満(10cm 以下が望ましい)に抑える必要があるといえる。

なお、同法では、出入力比も評価指標として用いるが、入受信点を内側に移動させると伝播距離が短くなるコンクリートの弾性波は振幅が大きくなるのに対して、伝播距離が延びる鋼材を伝播する弾性波については減衰が大きくなり、出入力比を指標とした評価も難しくさせる。この影響は、伝播速度と同様に長寸鋼棒よりも短寸鋼棒で大きく現れるので、この観点からも入受信点はできるだけ定着部の近傍にする必要がある。

3. インパクトエコー法の評価

3.1 薄い部材に適用する場合の問題点

部材表面から打撃などにより弾性波を入力すると、部材表面と反対側の面との間で縦波の共振現象が生じる。このとき、部材表面に設置したセンサで振動を測定すると、その受信波形の周波数スペクトルには板厚の縦波共振周波数に相当する周波数にピークが現れる。グラウト充填度調査に適用するインパクトエコー法もこの原理を応用した調査手法で、表面からシース表面までの距離(シースのかぶり)の縦波共振に相当する周波数帯にピークが現れるか否かを指

標としてグラウト充填不良の有無を判定する。

インパクトエコー法の測定は、部材表面から調査対象の PC 鋼材の直上を鋼球で打撃して弾性波を入力し、その直近に設置した高感度の振動センサ(広帯域変位センサ)で測定した受信波の周波数スペクトルを観察する。シースがグラウトで満たされていない場合は、板厚以外にもシースのかぶりで生じる縦波共振の周波数にピークが現れるが、グラウトが充填されている場合は板厚の縦波共振に相当する周波数だけにピークが現れるため両者を判別できる。

しかしながら、円形断面のシースは表面が弧を描いているため弾性波の反射効率が悪い。さらに、古い PC 橋では直径 40mm 程度の細径シースが使われているため、充填不良があっても明瞭な縦波共振が生じにくい対象物である。一方、薄い部材では板厚の縦波共振が強く現れるため、その影響でシースの縦波共振の検出が難しくなる場合があり、薄い部材と細径シースの組み合わせは、インパクトエコー法の適用が非常に難しい条件である。

このような背景から、今回、衝撃弾性波法の実験に使用した床版モデル供試体を用いてインパクトエコー法の測定を行い、薄い部材と細径シースの条件におけるグラウト充填度の評価指標について検討した。

3.2 薄い部材の評価指標についての検討

床版モデル供試体の板厚は 180mm で、道路橋で使用される PC 桁のウェブと同等、シースの径は古い PC 橋の一般的なシースよりも細い $\Phi 35\text{mm}$ で、薄い部材と細径シースの組み合わせといえる(シース径 $\Phi 35\text{mm}$ / 部材厚 180mm = 19%)。この供試体の充填鋼棒と未充填鋼棒の直上で測定したインパクトエコー法の周波数スペクトルを図-11 および図-12 に示す。なお、端面からの反射波の影響をできるだけ抑えるため、充填鋼棒および未充填鋼棒ともに打撃と測定点は供試体の中央付近とした。

未充填鋼棒の周波数スペクトル(図-11)には、シースかぶりの縦波共振周波数の理論値

(11.4kHz) 付近に、充填鋼棒 (図-12) にはない盛り上がりがあることから充填不良の可能性が高いと判定できる。しかしながら、この盛り上がりは明確なピークではないため、比較対象がないと判断に迷う可能性もある。

一方、板厚の縦波共振に相当する周波数付近においては、充填鋼棒では先鋭なピークが現れているのに対し、未充填鋼棒では複数のピークが現れており、もっとも卓越したピークの周波数は理論値よりも 1.5kHz ほど低い値であった。この現象は、弾性波が伝播経路上にある未充填シース (空洞) を迂回するために生じたものではないかと考えられる。

薄い部材においては、細径のシースでも断面に占める割合が厚い部材よりも大きいので、充填シース (弾性波がシースを透過) と未充填シース (弾性波がシースを迂回) では伝播距離の

差が大きくなり、板厚の縦波共振周波数の変化が明瞭になると思われる。今回の実験結果からは、部材厚に対するシースの占める割合が 20% 程度あれば、板厚の縦波共振のピークの形状や周波数の変化を指標としてグラウトの充填度を判定できる可能性があると考えられた。

これを検証するために、不良 I 鋼棒 (No.1 下段鋼棒) のグラウトの未充填部と充填部でインパクトエコー法の測定を実施したところ、未充填部では板厚の縦波共振周波数のピークが理論値よりも 1.5kHz ほど低い周波数に現れた (図-13 および表-4 参照)。一方、充填部においては、理論値と合致する周波数にピークが現れたが、それよりやや低い周波数にも類似のピークが現れており (ピークの二分化)、とくに未充填部との境界ではピークの大きさが同等であるため判定にはかなりの熟練を要すると思われる。

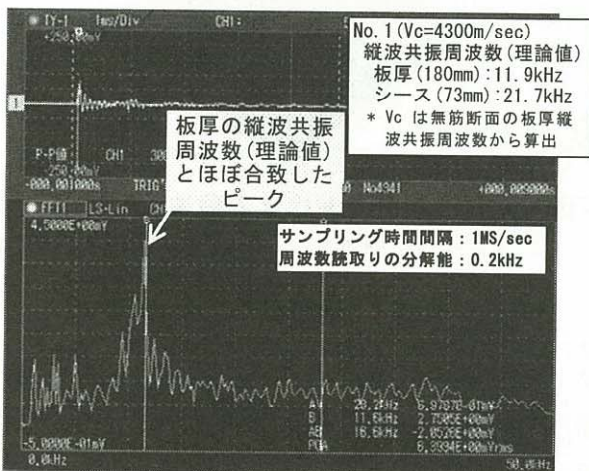


図-11 充填鋼棒の周波数スペクトル

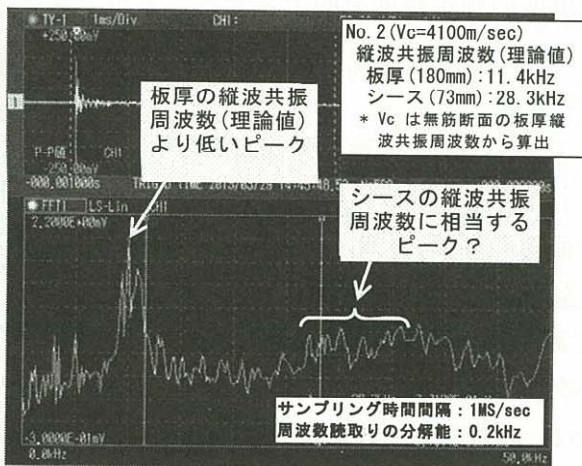


図-12 未充填鋼棒の周波数スペクトル

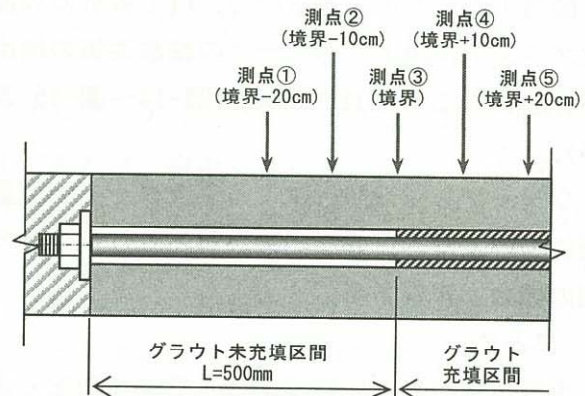


図-13 グラウト未充填境界付近での測定

表-4 グラウト充填境界付近での測定結果

| 測点 | 周波数スペクトル | | 充填度の評価 | 備考 |
|---------------|----------|-------------|----------|--------------|
| | シースの縦波共振 | 板厚の縦波共振 | | |
| 測点① (境界-20cm) | ピーク不明瞭 | 理論値より低い周波数 | 充填不良 | |
| 測点② (境界-10cm) | ピークやや不明瞭 | 計算値より低い周波数 | 充填不良 | |
| 測点③ (境界) | ピーク不明瞭 | ピークが二分化 | 充填不良の可能性 | 同等のピークが2つ現れる |
| 測点④ (境界+10cm) | ピーク不明瞭 | 理論値と合致した周波数 | 充填 | 板厚ピークがやや二分化 |
| 測点⑤ (境界+20cm) | ピーク不明瞭 | 計算値と合致した周波数 | 充填 | 板厚ピークがやや二分化 |

これまでは精度良く判定することが難しかった薄い部材のグラウト充填度調査だが、従来の判定指標であるシースの縦波共振の有無に加えて、板厚の縦波共振周波数付近の変化にも着目すれば、判定精度の向上が図れる可能性がある。

3.3 解析方法の検討

通常のインパクトエコー法では、受信波の周波数スペクトルをFFT解析によって求めているが、実構造物では様々な因子が影響して、グラウトの充填不良があってもシースの縦波共振が明瞭に現れないことも多い。条件が難しい実構造物においてもグラウト充填度を精度良く判定できるように、ウェーブレット解析による評価方法を検討している。

現在は、まだ実測データを基に着目点や評価基準などを検討している段階であるが、ウェーブレット解析では周波数成分ごとの時系列変化を観察することができるので、FFT解析の周波数スペクトル図よりもシースの縦波共振の検出が容易になる可能性がある（図-14～図-15 参照）。

ウェーブレット解析によるグラウト充填度評価については、良好な結果が得られれば改めて別の機会に報告する。

4. まとめ

実施事例が少ない短寸鋼棒を持つ床版を対象とした横締め衝撃弾性波法の留意点や、薄い部材にインパクトエコー法を適用する際の評価指標について、供試体実験により検討した。以下にその結果を示す。

- (1) 短寸鋼棒の場合、入受信位置を鋼棒の定着部から遠ざけると測定結果が大きな影響を受け、弾性波速度（伝播時間）だけではグラウトの充填度を適正に評価できない場合がある。
- (2) 定着間が 3.55m の鋼棒の場合、入受信センサを PC 鋼棒定着部から 20cm 以内の位置（両方の離間距離の合計）に設置する必要がある。
- (3) 薄い部材と細径シースの組み合わせにインパクトエコー法を適用する場合、従来の評価指標であるシースの縦波共振の有無だけではグラ

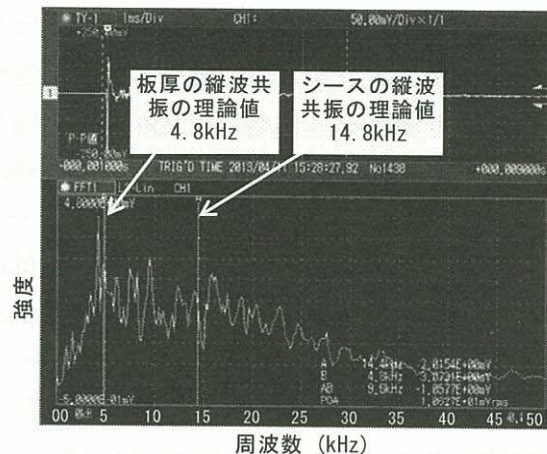


図-14 FFTによる周波数スペクトル
(シースφ48mm, かぶり150mm, 未充填)

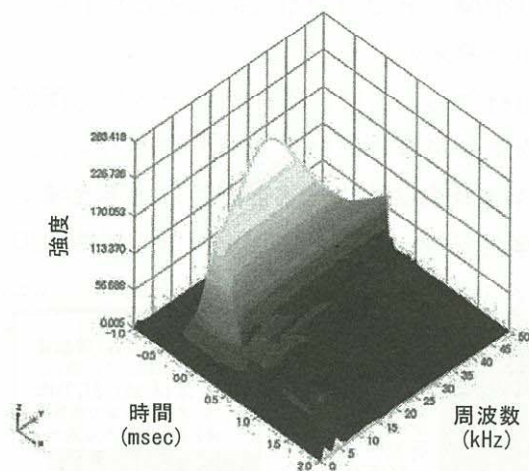


図-15 ウェーブレットによる周波数スペクトル
(シースφ48mm, かぶり150mm, 未充填)

ウト充填度の評価が難しい場合が多いが、測定箇所部材厚に対するシース径の割合が 20%程度の場合は、板厚の縦波共振の周波数付近のピークや形状の変化に着目することでグラウト充填度の判定精度を向上させることができる。

参考文献

- 1) 葛目和宏ほか：衝撃弾性波法を用いた PC グラウト充填度評価に関する考察，コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集，第 12 巻，pp.349-356，2012.11
- 2) 真鍋英規ほか：非破壊調査技術を用いた PC グラウト充填度の評価，コンクリート工学，Vol.49，No.6，pp.18-24，2011.6