

葛目 和宏<sup>\*1</sup>, 真鍋 英規<sup>\*2</sup>, 蒔 直樹<sup>\*3</sup>, 伊藤 博幸<sup>\*4</sup>, 宮川 豊章<sup>\*5</sup>

## Examination into Evaluation of the Filling Condition of PC-Grout Using Impact Elastic-Wave Methods

Kazuhiro KUZUME<sup>\*1</sup>, Hideki MANABE<sup>\*2</sup>, Naoki SHITOMI<sup>\*3</sup>, Hiroyuki ITO<sup>\*4</sup>,  
and Toyoaki MIYAGAWA<sup>\*5</sup>

**要旨**：近年、PC 上部工の床版や横桁横締めケーブルを対象とした PC グラウト充てん度の調査は、弾性波を利用した非破壊検査の一種である衝撃弾性波法が適用されている。衝撃弾性波法は PC 鋼材を伝播する伝播エネルギーの減衰と伝播速度を測定することで PC グラウト充てん度を評価するものであるが、実橋梁においてグラウト充てん度の評価を行う場合、種々の条件に影響されることが指摘されている。本研究では、実橋梁における衝撃弾性波法の測定データの分析および実橋梁モデルを用いた動的 FEM 解析により、横締め PC 鋼材長が衝撃弾性波の伝播特性に与える影響を検証し、PC グラウト充てん度評価方法の定量化に関する検討を行った。

**キーワード**：非破壊検査、PC グラウト、衝撃弾性波法、充てん度評価法、動的 FEM 解析

### 1. はじめに

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート (PC と略す) ケーブルのシース内部にグラウト未充てん部分が存在すると、その部分へ雨水や凍結防止剤等の塩分を含んだ水の浸入により、PC 鋼材が腐食し最終的に破断に至ることがある。PC 鋼材の破断は、その衝撃によりコンクリート片が落下し、重大な第三者災害を引き起こす可能性があるばかりでなく、耐荷性能の低下にも繋がる。ゆえに、PC グラウトの充てん度の把握は、PC 構造物の維持管理を行う上で最重要項目の一つと認識され、各機関で積極的に検討が行われている。なかでも、PC グラウトの充てん度の調査は、構造物を傷つけることのない非破壊検査技術の開発・実用化が進められている。

近年、PC 上部工の床版や横桁横締めケーブルに対する PC グラウト充てん度の調査は、弾性波を利用した非破壊検査の一種である衝撃弾性波法の適用が増加している。衝撃弾性波法は、PC 鋼材定着端部の近傍を打撃することにより PC 鋼材軸方向に弾性波を伝搬させ、得られた弾性波の特性によりグラウトの充てん度を評価するものである。しかし、様々な条件が異なる実際の構造物において衝撃弾性波を適用する場合、弾性波の特性とグラウト充てん度の関係について必ずしも明確にはなっておらず、定量的、客観的に評価する判断基準の整備が必要となる。

本研究では、実構造物における衝撃弾性波法の測定データの分析および動的 FEM 解析により、横締め PC 鋼材長が衝撃弾性波の伝播特性に与える影響を検証しグラウト充てん度の評価

\*1 株式会社国際建設技術研究所 代表取締役社長

\*2 株式会社国際建設技術研究所 構造設計部 部長

\*3 大阪市交通局 鉄道事業本部工務部工務課 担当係長

\*4 株式会社大阪メトロサービス 技術部 調査技術課長

\*5 京都大学大学院工学研究科 教授

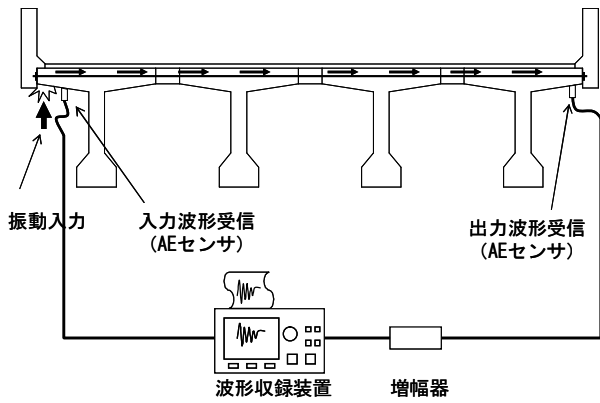


図-1 衝撃弾性波法の測定概要

方法の検討を行うものである。

## 2. 衝撃弾性波法

### 2.1 測定方法

衝撃弾性波法の測定は、PC 鋼材の定着部付近のコンクリート表面をハンマーやバネポインターなどで打撃して衝撃弾性波を入力し、その近傍の入力信号と伝播した弾性波を反対側の定着部付近で出力信号として AE センサを用いて受信する方法である。横締めケーブルの 1 本の全長に対するグラウト充てんの確認に利用されるものであり、グラウト充てん状況によって伝播特性が変化することを利用した非破壊検査手法である。図-1 に測定概要を示す。

### 2.2 現状における評価方法

衝撃弾性波法では、PC 鋼材を伝播する弾性波の伝播エネルギーの減衰程度と伝播速度を測定することで、グラウトの充てん度を評価することを基本としている。

グラウトが充てんされている場合は、グラウトの拘束によって PC 鋼材を伝播するエネルギーが減衰するために、出力波の振幅が小さくなる。一方、グラウトが充てんされていない場合は、PC 鋼材を拘

束するものがないために、伝播エネルギーの減衰が少なくなり、出力波の振幅が減少する程度も少なくなる。

また、PC 鋼材を伝播する弾性波伝播速度は、グラウトが充てんされているものの方が充てんされていないものより遅くなる。グラウトが充てんされていない場合は、主に PC 鋼材中を弾性波が伝播するため伝播速度は速くなる。一方、グラウトが十分充てんされている場合は、硬化したグラウトと PC 鋼材の複合媒体中を弾性波が伝播するため、伝播速度は遅くなる。

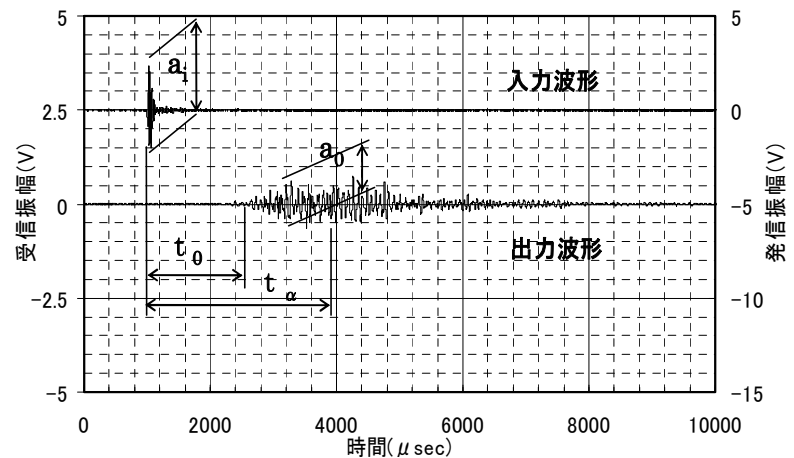
測定データの評価は、伝播速度  $V$  式(1)と、入力最大振幅と出力最大振幅の比である入出力比  $S$  式(2)によって行うことを基本としている。

$$V = L / t_0 \quad (1)$$

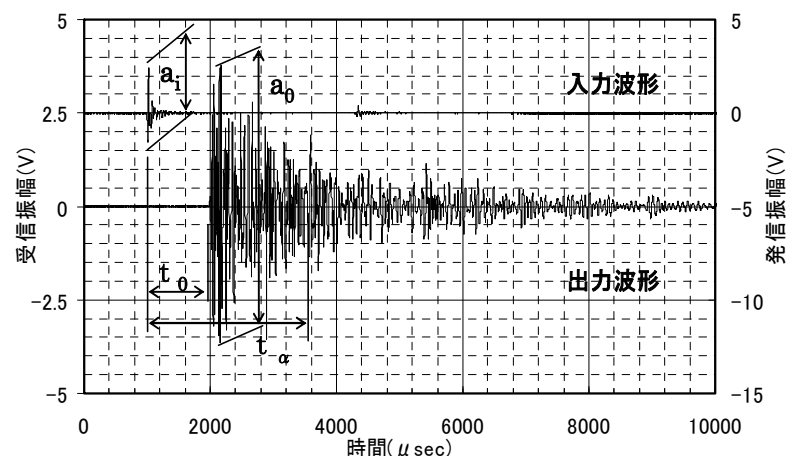
ここに、 $V$ ：伝播速度 (m/sec)

$L$ ：測定間距離 (m)

$t_0$ ：入力波到達時間 ( $\mu$  sec)



(a) グラウトが充てんされている場合



(b) グラウトの充てんが不十分な場合

図-2 衝撃弾性波法の測定波形の例

$$S = a_0 / a_i \quad (2)$$

ここに、 $S$  : 入出力比 ( $\times 10^{-2}$ )

$a_0$  : 出力信号の最大振幅 (mV)

$a_i$  : 入力信号の最大振幅 (mV)

出力側からの弾性波には縦波と横波の2種類が含まれており、入出力比を正確に把握するためには、先に出力側に到達する縦波のみを着目する必要がある。そこで、横波が到達する時間  $t_\alpha$  を算出し、 $t_\alpha$  秒未満の範囲で出力側の最大振幅を設定する必要がある。

$$t_\alpha = L / V_S \quad (3)$$

ここに、 $t_\alpha$  : 横波が到達する時間 ( $\mu$  sec)

$V_S$  : 横波伝搬速度 (2500m/sec)

図-2に測定波形の例を示す。図中の(a)で示すグラウトが充てんされている場合は、出力波形の振幅が小さく波形の立ち上がりは遅い。一方、図中の(b)で示すグラウトの充てんが不十分の場合は、出力波形の振幅は大きく波形の立ち上がりは早い。

入出力比と伝播速度とグラウト充てん度との関係のイメージを図-3に示す。グラウトの充てん度が低い場合は、入出力比が大きく伝播速度が速い傾向を示す。一方、グラウトの充てん度が高い場合は、入出力比が小さく伝播速度が遅い傾向を示す。グラウト充てん度を評価する際には、入出力比と伝播速度を定量的に評価して閾値を設定する必要がある。実橋では、上部工

形式、PC鋼材長、PC鋼材種類、コンクリートおよびグラウトの弾性係数等様々な条件が組み合わさるため、閾値は測定する上部工区間単位で異なる。実際には、既往の実績を基に測定結果から図中でグレーゾーンと評価されるケーブルについて数本を選定し、これらを削孔・目視確認することにより設定を行っている。概ねグレーゾーンは弾性波伝搬速度4300m/sec~4800m/s、入出力比 $0.01 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^{-2}$ を目安としている。

### 3. 実橋における計測データの検証

#### 3.1 PC グラウト充てん度と弾性波伝播速度および入出力比の関係

図-4に実橋梁における床版横締めケーブルのグラウト充てん度に関して衝撃弾性波法により計測を行った結果を示す。なお、縦軸は入出力比、横軸は弾性波伝搬速度である。対象はPC鋼棒、PC鋼より線、PC鋼線の3種類、PC鋼材長は2.0m~19.0mにわたる範囲での5065ケーブルの計測データである。弾性波伝播速度はおよそ2800m/sec~5300m/sec、入出力比はおよそ $0.001 \times 10^{-2} \sim 20 \times 10^{-2}$ の範囲に分布している。

既往の研究<sup>1)2)</sup>では、PCグラウトが未充てんの場合、弾性波伝播速度は5000m/sec以上を示し(図-4の丸の範囲)、一方、グラウトが完全に充てんされている場合は4500m/sec程度以下になることが報告されている。

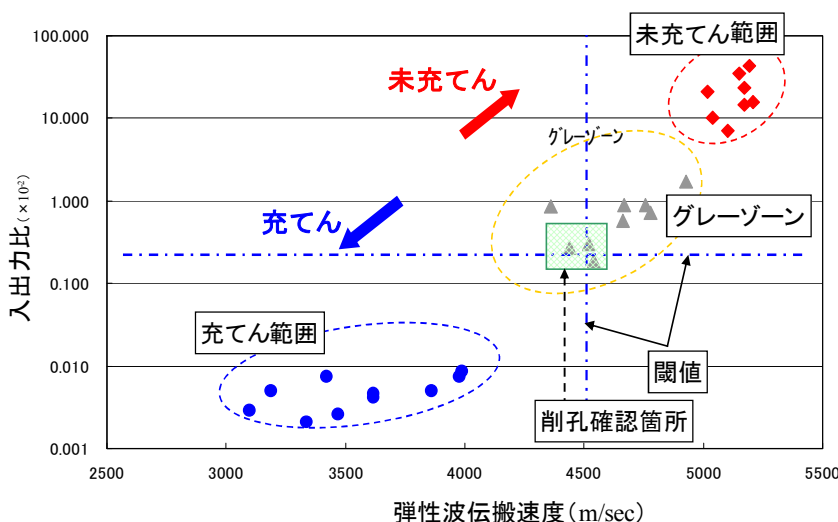


図-3 入出力比、弾性波伝搬速度、グラウト充てん度の関係

図-5にPC鋼より線、鋼材長8.4mの場合におけるPCグラウト充てん前後の比較を示す。この図より、PCグラウトが未充てんの場合は完全に充てんされているものと比較して、弾性波伝播速度が速くなるとともに、入出力比も高くなっている。この結果より、グラウト未充てんと完全充てんされている横締めケーブルの弾性波伝搬特性挙動には明確な差異があり、実橋におけるPCグラウト未充てんケー

ブルの判定が可能であることがわかった。

全計測結果から削孔を行ったデータを図-6に示す。削孔は383ケーブルに対して行い、結果を図中に●：完全充てん、×：充てん不良、△：部分充てんとして表している。弾性波伝播速度が4800m/secを超え、かつ入出力比が $0.1 \times 10^{-2}$ を超えるデータにおいて充てん不良(×)と部分充てん(△)が急激に多くなっている。しかし、従来グレーゾーンとしてきた範囲では充てん不良(×)、部分充てん(△)、完全充てん(●)すべて混在している。図-6には3種類の鋼材、様々な鋼材長を含んでいるため、どの要因が弾性波伝播特性に影響を与えているのかを判断するのは困難である。従って3.2では鋼材種類と鋼材長に分けて考察を行う。

### 3.2 PC 鋼材種類と PC 鋼材長の影響

PC 上部工の横締めケーブルに用いられる PC 鋼材種類は PC 鋼棒、PC 鋼より線および PC 鋼線が一般的である。グラウト充てん不良による問題は全ての鋼材種類で確認されているが、ここでは、衝撃弾性波法による計測データの蓄積が多い PC 鋼棒と PC 鋼より線を取り上げる。

PC 鋼棒は、セットロスが生じないため比較的狭い幅員の橋梁に用いられ、特に鉄道橋では PC 鋼材長が極端に短い(4m 未満)場合にも使用されている。一方、PC 鋼より線(シングルストランドタイプ)は、昭和 50 年代から比較的幅員の広い橋梁に使用されるようになり、平成 6 年に改訂された建設省標準設計(PCT 桁)から標準化がなされている。

#### (1) PC 鋼棒

図-7、図-8 に PC 鋼棒 (①鋼材長 4m 未満, 230 ケーブル, ②鋼材長 4m 以上 12m 未満, 1160 ケーブル) に対する、衝撃弾性波法による弾性波伝播速度と入出力比の関係(a), およびその中から抜き取り削孔調査の結果を(b)にそれぞれ示す。両図を比較すると、一般的な鋼材長の場合②は、弾性波伝播速度、入出力比はある程度のばらつきをもって右肩上がりで分布しているが、極端に短い鋼材長の場合①は、弾性波伝播

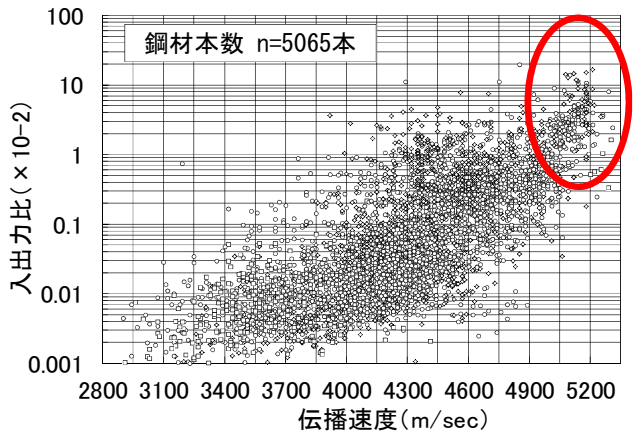


図-4 衝撃弾性波法 実橋計測データ

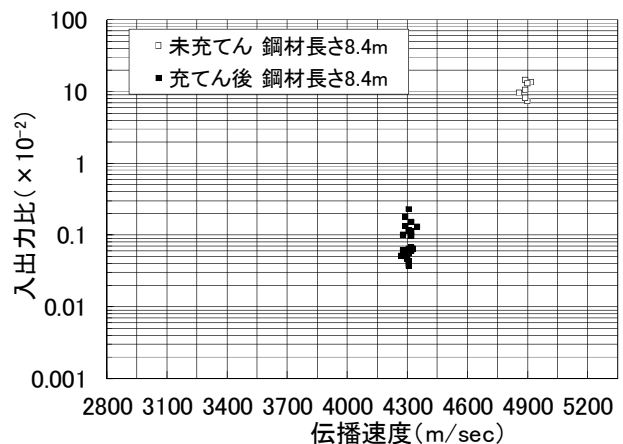


図-5 PC グラウト充てん前後の弾性波伝搬速度と入出力比の比較

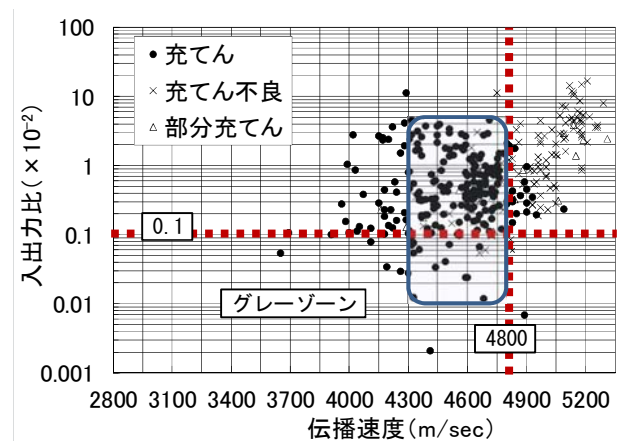
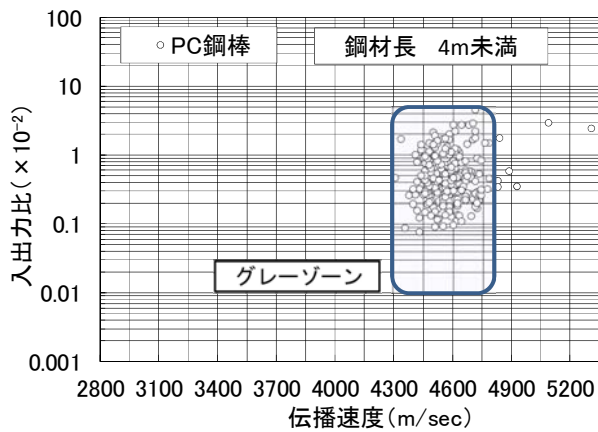
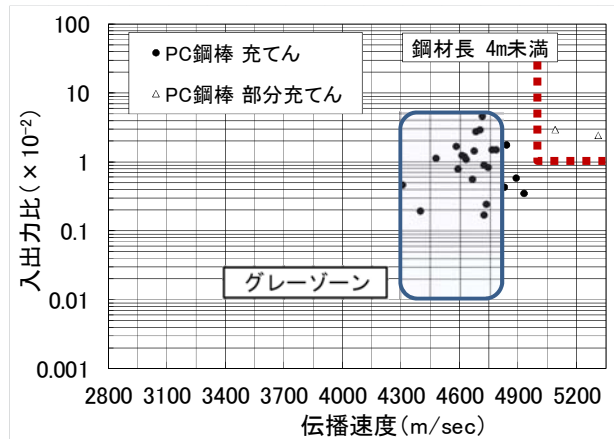


図-6 削孔結果と弾性波伝搬速度および入出力比の関係

速度、入出力比とも大きく、ある部分に固まって分布していることがわかる。また、図-7(b)に示すように、従来グレーゾーン(網掛け囲い)

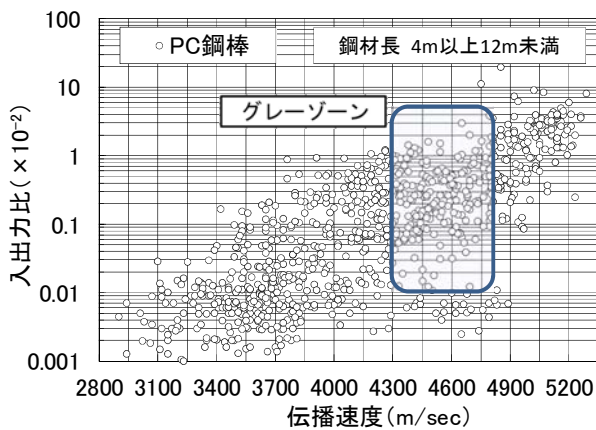


(a) 伝播速度および入出力比

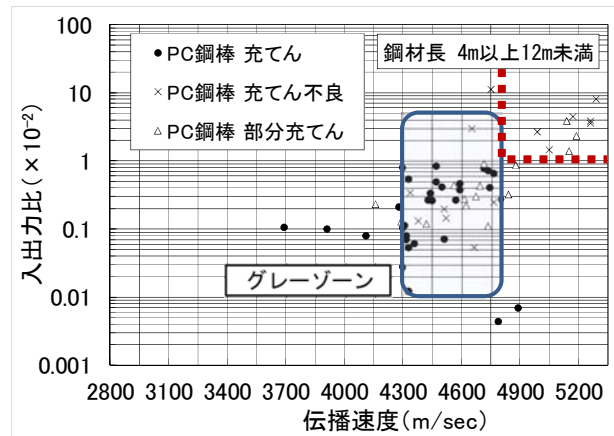


(b) 削孔結果

図-7 PC 鋼棒（鋼材長 4m 未満）衝撃弾性波法による測定結果



(a) 伝播速度および入出力比



(b) 削孔結果

図-8 PC 鋼棒（鋼材長 4m 以上 12m 未満）衝撃弾性波法による測定結果

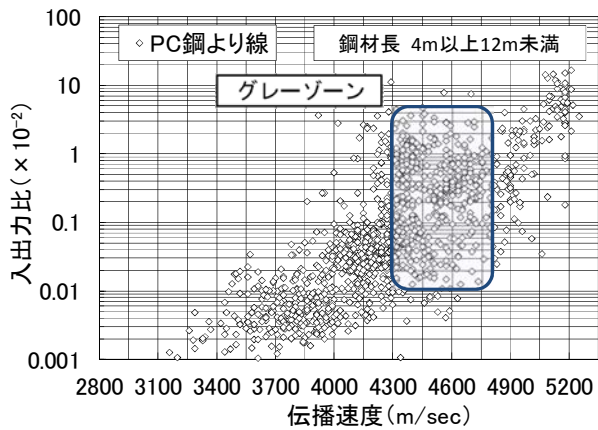
に範囲にあるケーブルで削孔を行った結果、削孔した全数においてグラウトは完全に充てんされていた。一般的な鋼材長の場合②（図-8 (b)）のグレーゾーンでは充てんと充てん不良が混在しており明らかに傾向は違う。

鋼材長が極端に短い場合①は、グラウトが完全に充てんされていても、一般的な鋼材長の場合②と比較して弾性波伝播速度および入出力比は高くなる傾向が認められたので、鋼材長に着目した FEM 解析により検証を行った。また、両者の削孔結果から充てん不良が確認されたのは、一般的な鋼材長の場合②は、弾性波伝播速度が 4800m/sec を超え、かつ入出力比が  $1.0 \times 10^{-2}$  以上の範囲であった。一方、極端に短い鋼材長の場合①では、弾性波伝播速度が 5000m/sec を

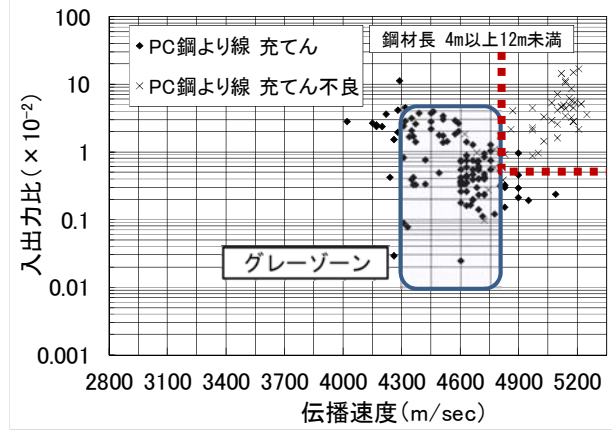
超え、かつ入出力比が  $1.0 \times 10^{-2}$  以上の範囲であった。ただし、①の場合は計測数が比較的小さいので今後データの蓄積が必要である。

## (2) PC 鋼より線

図-9、図-10 に PC 鋼より線（②鋼材長 4m 以上 12m 未満、1236 ケーブル、③鋼材長 12m 以上、769 ケーブル）に対する衝撃弾性波法による弾性波伝播速度と入出力比の関係 (a) およびその削孔結果を (b) としてそれぞれ示す。一般的な鋼材長の場合②（4m 以上 12m 未満）と長い鋼材長の場合③（12m 以上）を比較すると、一般的な鋼材長の場合②の方がグレーゾーンにおける分布割合が多くなっており、入出力比も比較的大きいものが多く認められる。ただし、入出力比が  $1.0 \times 10^{-2}$  を超えているものでも、弾性

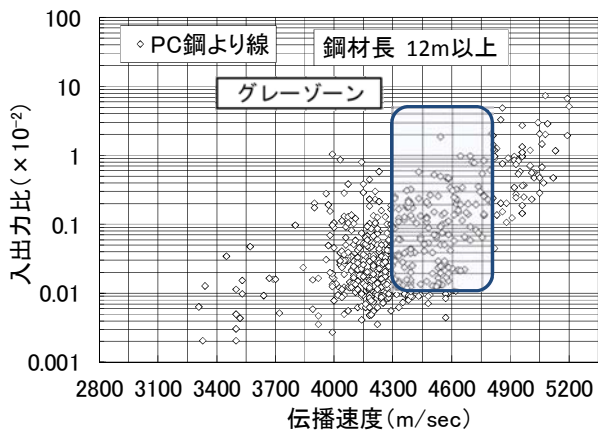


(a) 伝播速度および入出力比

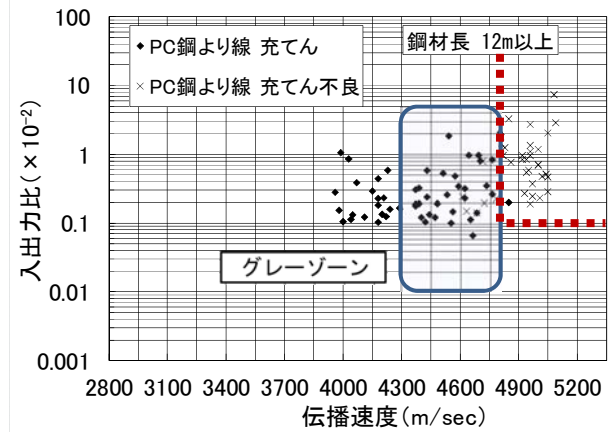


(b) 削孔結果

図-9 PC 鋼より線（鋼材長 4m 以上 12m 未満）衝撃弾性波法による測定結果



(a) 伝播速度および入出力比



(b) 削孔結果

図-10 PC 鋼より線（鋼材長 12m 以上）衝撃弾性波法による測定結果

波伝搬速度が 4600m/sec 程度までであれば多くはグラウトが充てんされており、入出力比のみではなく、弾性波伝播速度と併せて判定を行う必要がある。また、両者の削孔結果から充てん不良が確認されたのは、一般的な鋼材長の場合②は、弾性波伝搬速度が 4800m/sec を超え、かつ入出力比が  $0.5 \times 10^{-2}$  以上の範囲、長い鋼材長の場合③は、弾性波伝搬速度が 4800m/sec を超え、かつ入出力比が  $0.1 \times 10^{-2}$  以上の範囲であった。PC 鋼より線の場合は、極端に短い鋼材長は使用されないため、鋼材長の違いによる弾性波伝搬特性の差異は顕著には現れていない。

#### 4. 動的 FEM 解析による検討

##### 4.1 概要

PC グラウト充てん度を弾性波伝播速度と入

出力比の関係から評価を行い、ある程度の精度をもって PC グラウト充てん不良ケーブルの判定が可能であることが実橋計測データ分析から明らかとなった。しかし、定性的な評価基準を設けるためには、PC 鋼材種類や PC 鋼材長の影響を詳細に検討する必要がある。本稿では、PC 鋼材長が弾性波伝播速度に与える影響を検証することを目的として動的 FEM 解析を行った。

##### 4.2 弾性波伝播速度の理論値<sup>2)</sup>

PC グラウトが全く充てんされていない場合、弾性波が入力されると PC 鋼材を直接伝播する成分と定着具を介してコンクリートを伝播する成分がそれぞれ独立に存在する。その場合弾性波伝播速度は弾性係数が高い PC 鋼材を伝わる成分が支配的となる。PC 鋼材を均質な棒と見なすと式(4)で弾性波伝播速度の理論値は求まる。

$$V_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

ここに、 $V_1$  : 1次元の場合の弾性波速度 (m/sec)

$E$  : 弾性係数 (GPa)  $\rho$  : 密度 (g/cm<sup>3</sup>)

PC グラウトが完全に充てんされている場合の弾性波伝播挙動は、未充てんの場合と異なり、鋼材を選択的に伝播する成分はなく、PC 鋼材、グラウト、コンクリートが完全に一体となった弾性体を伝播すると考えられる。均一 3次元弾性体を伝播するのとして、式(5)で弾性波伝播速度の理論値は求まる。

$$V_3 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5)$$

ここに、 $V_3$  : 3次元の場合の弾性波速度(m/sec)

$\nu$  : ポアソン比

これらの式から判るように、弾性波伝播速度は材料の弾性係数の関数である。コンクリートの場合、弾性係数がばらつくので測定された弾性波伝播速度にその影響を考慮する必要がある。

### 4.3 解析モデルおよびパラメータ

解析は、ポストテンション方式 PCT 桁橋の床版横締めを対象としており、コンクリート、PC 鋼材、シース、グラウトを複合させた 3次元の

簡易的なモデルとした。図-11 に対象とした PCT 桁の詳細と解析モデルを示す。

解析要因は PC 鋼材長が極端に短い場合 A (鋼材長 L=3.55m) と標準的な場合 B (鋼材長 L=9.70m) の 2 種類のモデルを用い、グラウト充てん度を完全充てんから未充てんまで変化させた 5 ケースについてそれぞれ行った。表-1 に解析ケースとグラウト充てん度を示す。また、表-2 に解析で用いた主な構成材料の物性値を示す。なお、本解析で用いた構成材料はすべて線形弾性体として扱った。モデルに入力する衝撃荷重は、鋼材端部の中央に作用する節点荷重として図-12 に示す波形を用いた<sup>1)2)</sup>。

### 4.4 結果および考察

弾性波伝播速度の解析値の比較を表-3 と図-13 に示す。鋼材長が短い A と長い B を比較すると、未充てんの Case2、および Case4 を除いて A の方が 6% 大きな値を示した。実橋梁では PC 鋼材長の影響を考慮する必要がある。完全充

表-1 解析パラメータ

		充てん度	
充てん形態	ケース	3.55mモデル	9.70mモデル
完全充てん	Case1	100 %	100 %
完全未充てん	Case2	0 %	0 %
1/2L充てん	Case3	50 %	50 %
端面1.5m充てん	Case4	42 %	15 %
断面下半分充てん	Case5	50 %	50 %

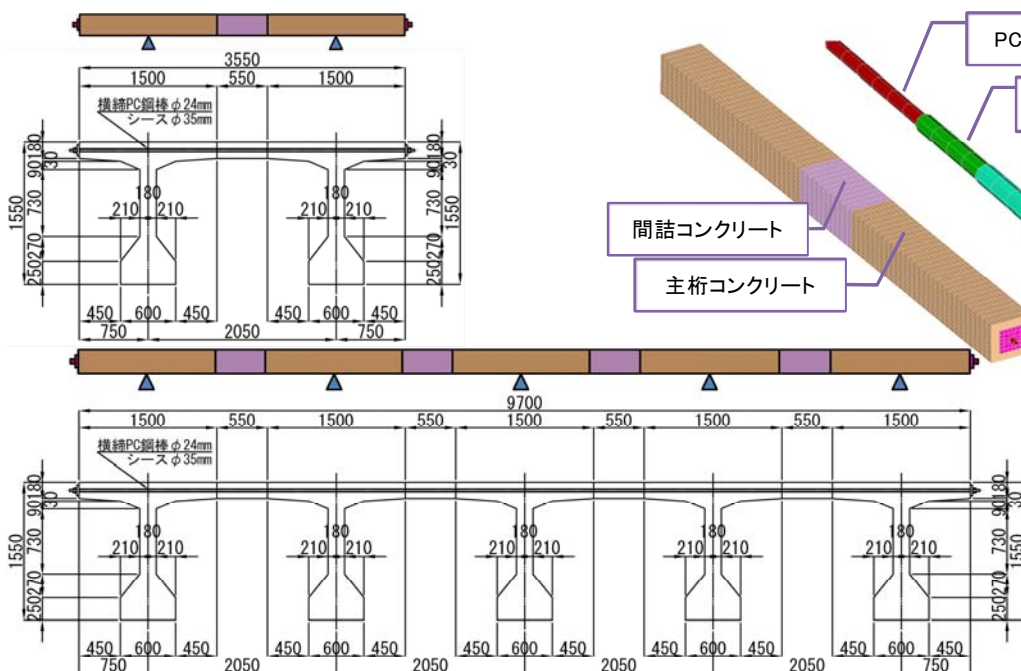


図-11 FEM 解析モデル

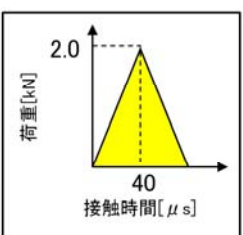
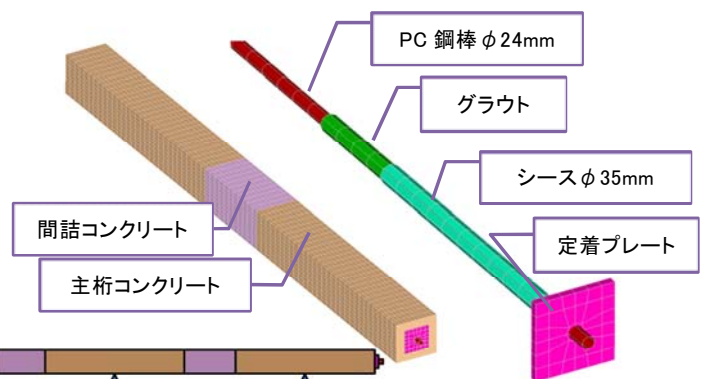


図-12 入力波形

表-3 解析結果 弾性波伝播速度の比較

グラウト充てん状態	解析ケース	A:L=3.55m	B:L=9.70m	A/B	理論値
		伝播速度 m/sec	伝播速度 m/sec	%	
完全充てん	Case1	4039 m/sec	3820 m/sec	106%	3775 m/sec
未充てん	Case2	5299 m/sec	5190 m/sec	102%	5070 m/sec
1/2L充てん	Case3	4721 m/sec	4472 m/sec	106%	-
端部1.5m充てん	Case4	4837 m/sec	4977 m/sec	-	-
断面下半分充てん	Case5	4080 m/sec	3866 m/sec	106%	-

表-2 解析に用いた材料の物性値

構成材料	密度	ポアソン比	弾性係数	備考
	(g/cm <sup>3</sup> )			
桁コンクリート	2.3	0.2	31	$\sigma_{ck}=40N/mm^2$
桁間コンクリート	2.3	0.2	28	$\sigma_{ck}=30N/mm^2$
グラウト	1.7	0.15	23	$\sigma_{ck}=24N/mm^2$
シース	5.6	0.3	119	$\Phi 35mm$
定着プレート	7.4	0.3	138	厚:t=15mm
PC鋼材	7.9	0.3	203	$\Phi 24mm$

てん (Case1) では、A の弾性波伝搬速度の解析値は 4039m/sec であったが、これは弾性係数を設計値  $E_{cd}=31\sim 28GPa$  を用いての解析である。実橋では実際のコンクリートの弾性係数はばらつきがあるため、実測値を用いて閾値を補正することも必要と考える。未充てん (Case2) の弾性波伝搬速度は A:5299m/sec, B:5190m/sec となり実橋での計測値とほぼ合致している。未充てん区間を設けた解析 (Case3, Case4) では、超音波伝播速度は実測のグレーゾーンで計測される値とほぼ合致する。断面下半分充てん (Case5) ではほぼ完全充てんと近似の値を示した。これは PC 鋼材とグラウトを断面半分剛結合にするためほぼ完全充てんと同様の結果となったと推察される。実際には、グラウトが断面半分しか充てんされていない場合、PC 鋼材とグラウトの付着切れを起こしている可能性もあり、結合条件は剛結合より柔であると考えられる。

### 5. まとめ

衝撃弾性波法実測データの分析から、PC グラウト充てん度を弾性波伝播速度と入出力比の関係により評価を行い、ある程度の精度をもって PC グラウト充てん不良ケーブルの判定が可能であることを明らかとした。また、PC 鋼材の種類や鋼材長の違いによる特性の整理を行った。さらに、動的 FEM 解析を行い、PC 鋼材長の違いが弾性波伝搬速度に与える影響を明らかとした。併せて、グラウト充てん度の違いと弾性波伝搬速度の関係を数値的に示した。

グラウト充てん度の評価では、極端に PC 鋼

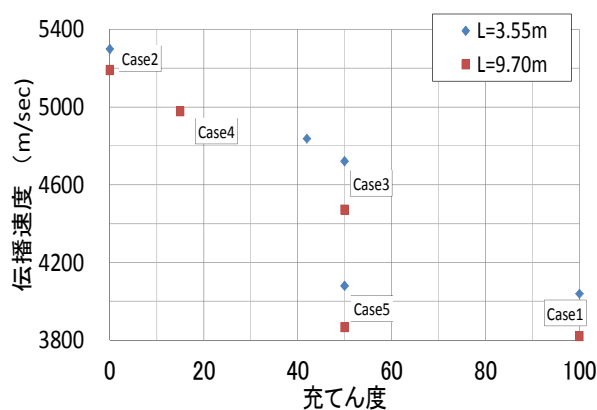


図-13 充てん度と弾性波伝播速度の関係

材長が短い場合、判定基準に長さの影響を考慮する必要がある。未だ評価法に関する定量化は不十分であるため、今後さらなる検討を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝泰祐, 国枝稔, 六郷恵哲: 弾性波特性パラメータを用いた PC グラウト充填評価手法, 土木学会論文集, Vol.61, No.746, pp.25-39, 2003.
- 2) 浅野雅則: 打撃による弾性波を用いたコンクリートの欠陥評価手法, 岐阜大学博士学位請求論文, 2004.3