

葛目 和宏<sup>\*1</sup>, 木村 清敏<sup>2</sup>, 前野 裕文<sup>\*3</sup>, 榊原 浩孝<sup>\*4</sup>, 梅原 秀哲<sup>\*5</sup>Impact Elastic-Wave Methods for Evaluating the Grouting Condition  
in Prestressed Concrete PierKazuhiro KUZUME<sup>\*1</sup>, Kiyotoshi KIMURA<sup>\*2</sup>, Hirofumi MAENO<sup>\*3</sup>, Hiroataka SAKAKIBARA<sup>\*4</sup>,  
and Hidetaka UMEHARA<sup>\*5</sup>

要旨：名古屋高速道路公社では新規路線の建設においては、高耐久性の構造物を建設することを重要課題の一つとしている。都市内高速道路建設においては建設用地の制約条件等から橋脚梁部分にプレストレスを導入した PC 梁橋脚を建設することがある。

本研究では、実橋において PC 鋼より線を用いた場合のグラウト施工を衝撃弾性波法によって非破壊的に管理する方法を検討した。入力方法としてはハンマーを用いて低周波の高エネルギーを与え、データ処理にはノイズの少ない波形収録装置を用いることで測定精度が高められ、鋼材長さ 28m であっても充填度の評価が可能であることが分かった。

**キーワード**：衝撃弾性波法，PC 梁橋脚，グラウト，施工管理， PC 鋼より線

## 1. はじめに

PC 構造物ではプレストレスによってその安全性能を担保することから、とくにポストテンション方式では、その構造安全性は PC 鋼材の耐久性によって左右されると言えよう。

ポストテンション方式の PC 構造物の耐久性を高めるには、シースと PC 鋼材との間にグラウトが十分に充填されていることが重要である。1989 年には藤井らがグラウト充填状況の非破壊的な検査方法について概観しているように<sup>1)</sup>、建設することが第一義とされた時代にはグラウトを完全に充填する方法や使用材料に関する意識が低かったようである。グラウト充填度の低い PC 橋では、横締め PC 鋼材の腐食が進行すると、PC 鋼材が破断し、定着部から突出することがあり、第三者被害を引き起こす危険性が高くなる。主鋼材が腐食して、破断するようになる

と、耐荷性能が低下してさらには、ひび割れの発生につながることもある。

このため PC 構造物の建設する場合、グラウト充填度を非破壊的に検査する手法を併用して確実性を高めることは持続的発展を可能とする社会資本の整備に欠かせないものである。グラウトの施工現場で適用できる非破壊検査手法として、衝撃振動法が 1995 年に提案された<sup>2)</sup>。また、実橋での対応についての報告もなされている<sup>3)</sup>。

現在 PC 梁橋脚の建設においては、PC 鋼材として PC 鋼より線が使用される。これは、PC 鋼棒を使用した場合に比較して PC 鋼材とシースとの空隙が大きくなるだけでなく、さらに長尺であってもカップラーを使用する必要がないことから、グラウト充填の観点からは施工性が向上するためである。

\*1 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長

\*2 (株)国際建設技術研究所 名古屋支店 次長

\*3 名古屋高速道路公社 建設部長

\*4 前田建設工業(株) 中部支店 土木施工グループ マネージャー

\*5 名古屋工業大学 社会開発工学科 教授

本研究では名古屋高速道路・高速 4 号東海線で平成 22 年 5 月に建設された門型 PC 梁橋脚を対象に衝撃弾性波法を取り上げて、その現場適用性を検討した。

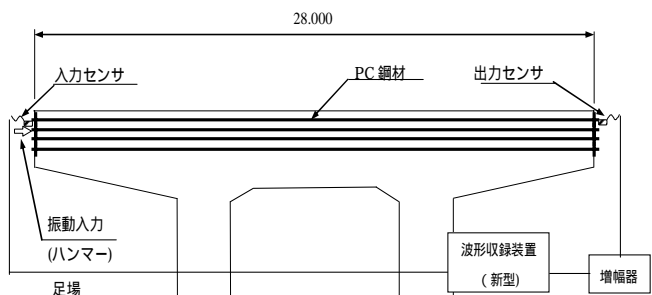
## 2. 現場測定

測定手法は、測定対象とする鋼材の片側の定着部から弾性波を入力して、シーす内の PC 鋼材を伝達させ、もう一方の定着部に AE センサを取付けて得られた波形を観察して、グラウトの充填状況を推定するものである。



写真 2.1 衝撃弾性波法測定状況

測定対象とした PC 梁橋脚は、図 2.1 に示すように、梁部にプレストレスを導入する PC 鋼より線は SEEE-F200 タイプ、長さ 28.0m であった。鋼材長が過去の実績 21.0m に比べて長いことから、弾性波の入力方法や、収録した波形のノイズを可能な限り小さくできるような波形収録装置を検討する必要があった。



使用機器	
センサ	AE センサ AE-901S (エヌエフ回路設計ブロック社製)
増幅器	プリアンプ 9913 (エヌエフ回路設計ブロック社製)
波形収録装置	マルチレコーダー GR-7000 (KEYENCE製)

図 2.1 衝撃弾性波法測定要領

## 2.1 入力方法

弾性波の入力方法については、通常使用しているバネポインターと今回使用したハンマーによる打撃とを比較検討した。その一例を図 2.2-1、図 2.2-2 に示すが、図中の上段が、入力波形を示しており、下段が受信波形である。ハンマーの場合、入力信号の大きさは受信振幅が過大になりすぎないように加減した。受信波形の振幅値は図中左側の軸に示しており、波形のレンジはグラウト充填後は充填前の 10 倍の感度となっている。

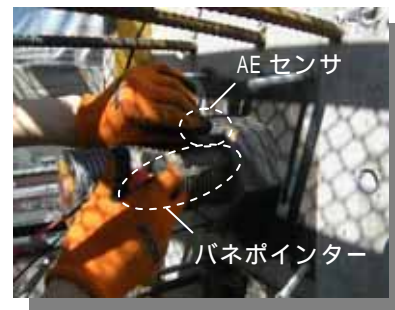


写真 2.2 バネポインターによる入力状況

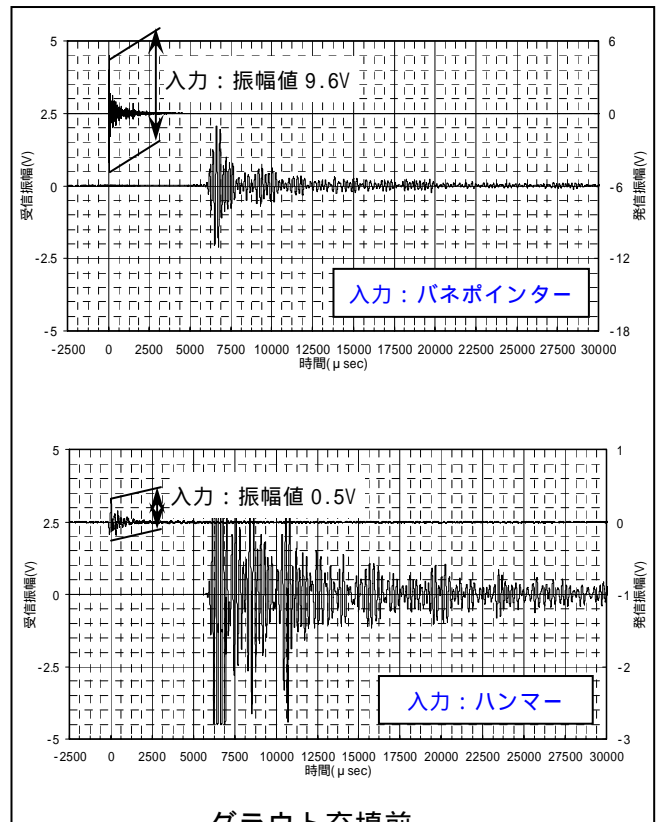


図 2.2-1 入力方法による受信波形の相違 (グラウト充填前)

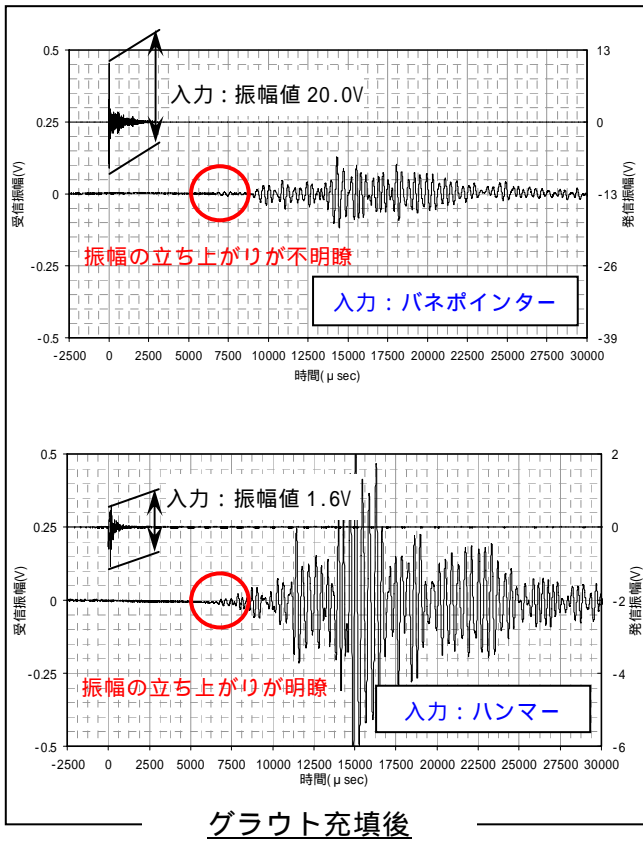


図 2.2-2 入力方法による受信波形の相違 (グラウト充填後)

グラウト充填前のバネポインターの入力値は 9.6V ,ハンマーでの入力値は 0.5V であるのに対し, 受信した振幅値は, ハンマーの方が 2 倍以上大きい. またグラウト充填後においても, バネポインターでの入力値が 20.0V, ハンマーでの入力値が 1.6V であったにも関わらず ,ハンマ

ーでの打撃入力の方が, 受信波の振幅値は大きかった.

一般に, バネポインターによる弾性波の入力では, 高周波成分の入力に, 逆にハンマーでの入力は低周波成分の入力に適しているといわれている. 高周波成分を多く含む波は, 伝播距離が長くなるとエネルギーを減衰しやすいことから, 今回のように伝播距離が長い場合は, ハンマーでの入力方式の方が有利であると考えられた. このことは, 受信波形の初動波の立ち上がりについても, ハンマーでの入力方式の方がより明瞭であったことから裏付けられる.

## 2.2 波形収録装置の選定

グラウト充填後の受信波形を, 波形収録装置の違いに着目して比較した結果を図 2.3 に示す. 波形収録装置以外は, 全て同じシステムとしている.

受信波の縦軸のレンジは両者とも同じとしているが, 従来型装置の波形に比べて新機種の波形の方がノイズの幅が小さく, 初動波の立ち上がり明瞭になっている. 新機種の方が伝播時間や受信振幅値の読み取り精度を向上させることが可能になると期待されたため, 本研究では, S/N 比の大きい(ノイズに比べて信号が大きい)新機種を採用することとした.

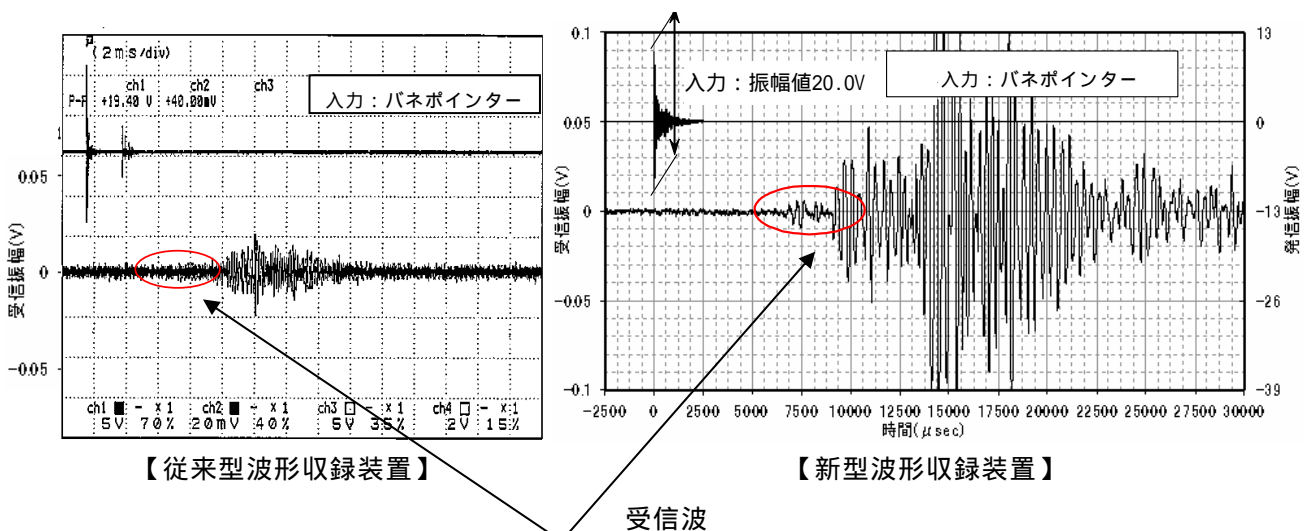


図 2.3 波形収録装置の違いによる受信波 (グラウト充填後)

### 3. 測定結果

衝撃弾性波法による測定は、配置されている鋼材 20 本全てを対象に行った。PC 鋼材配置、および測点位置図を図 3.1 に示す。

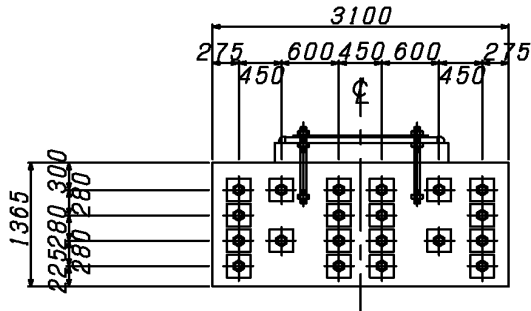


図 3.1 PC 鋼材 測点位置図(右側梁部)

測定は PC 鋼材緊張後のグラウト前とグラウト硬化後とに行ったが、衝撃弾性波法の測定は 3 回行っており、そのうち入出力比が最大のデータを代表値とした。入出力比とは、出力振幅 / 入力振幅で表わされるもので、衝撃弾性波法では、グラウト充填度を評価する指標の 1 つとして使用される<sup>4)</sup>。入力された振動が受信側へ伝わるまでの伝播時間と PC 鋼材長さから見かけ上の伝播速度を求めた。

グラウト充填前後での入出力比と伝播速度との変化を図 3.2 に示した。

測定結果から、入出力比はグラウト前が  $3.231 \sim 16.041 \times 10^{-2}$ 、グラウト後が  $0.104 \sim 0.622 \times 10^{-2}$  となっており、グラウト前後では、30 倍以上の

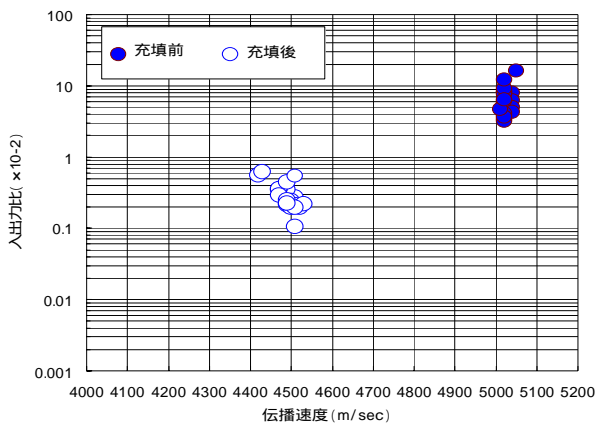


図 3.2 入出力比と伝播速度との関係  
(SEEE-F200 L=29.4m)

差が生じている。また、伝播速度は、グラウト前が 5010 ~ 5040m/sec、グラウト後が 4420 ~ 4530m/sec であり、グラウト前後の差は 500m/sec 程度認められた。

以上のことから、梁長さが 30m 程度の PC 鋼材のグラウト充填状況の評価においても、弾性波の入力手法や波形収録装置の改善を施すことによって、グラウト前後では入出力比、および伝播速度には明確な差が生じており、衝撃弾性波法による調査手法は十分適用できることが分かった。

### 4. 考察

#### 4.1 測定方法

衝撃弾性波法は、主に PC 桁橋の横締め鋼材のグラウト充填状況を非破壊的に調査する手法として適用されてきた。横締めの場合、長さ 10m 前後の PC 鋼材が使用されていることが多く、弾性波の入力には、エネルギーが小さくても指向性の良い、高周波成分を含む弾性波を入力するためにバネポインターを使用してきた<sup>4)</sup>。

名古屋高速道路で建設される PC 梁橋脚の場合は、長さ 20m 程度以上の PC 鋼材が使用されている場合が多く、横締め鋼材と同様の測定が可能か否かを評価する必要があった。

弾性波の入力方法については、「2.1 入力方法」の項において、従来のバネポインターとハンマーとの周波数の違いを検討した。

図 4.1 は、バネポインターとハンマーを用いた場合の入力側定着プレートの振動波形の卓越周波数を FFT 解析で比較したものである。卓越する周波数は、それぞれ 25kHz、4.5kHz となっており、バネポインターの方が周波数の高い入力を与えられることが分かる。

一方、ハンマーは卓越周波数が 4.5kHz とバネポインターよりも低いいため、伝播距離が長くなっても減衰し難く、PC 鋼材が 20m を越えるような長さになっても、受信波の初期の立ち上がりを見事に把握できると考えられる。

波形収録装置に関しても、伝播距離が長くな

表 4.1 物性値<sup>7)</sup>

	密度( $\text{g/cm}^3$ )	ポアソン比	弾性係数(GPa)	弾性波伝播速度( $\text{m/s}$ )
コンクリート	2.3	0.2	35.0	4112
PC 鋼より線	7.9	0.3	193	5735
グラウト	1.7	0.15	23.0	3780
シーす	5.6	0.3	119	5348
アンカープレート	7.9	0.3	203	5881
カブラ	7.9	0.3	203	5881

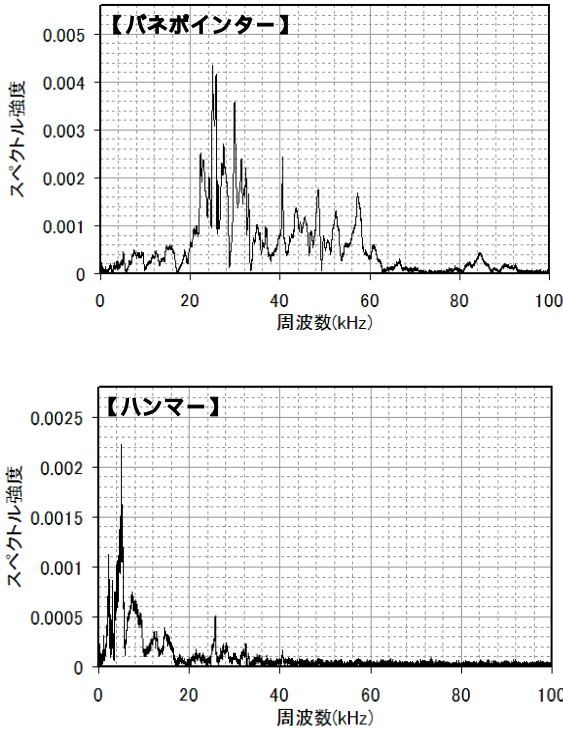


図 4.1 入力される弾性波の周波数分布の相違

ると受信波の初期の立ち上がり振幅が小さくなり、ノイズと区別し難くなる。このため S/N 比の大きな波形収録装置を使用すると、鋼材長さが大きくなっても衝撃弾性波の測定が可能になると考えられる。

#### 4.2 伝播速度

PC 構造物のグラウト充填評価において、弾性波伝播速度が評価手法として有効であるといわれている<sup>5)</sup>。

本研究では、測定対象とした PC 梁橋脚の梁

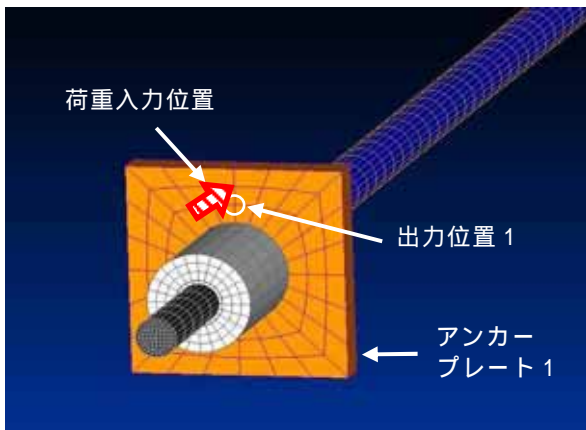


図 4.2 PC 鋼材定着部

部分を以下のようなモデルに設定して、FEM 解析を用いてハンマー入力した弾性波の伝播速度をグラウト充填前後で解析的に検討した。

コンクリート梁の形状は、縦 1365mm × 横 1365mm × 長さ 28000mm の立方体で、その中央に内径 55mm × 外径 56mm × 長さ 28000mm のシーすを配置し、その定着部は図 4.2 のような構造とした。

モデル要素は 8 節点ソリッドで、要素寸法は PC 鋼より線部分で約 5mm、コンクリート部分で約 50mm であった。物性値は既往の研究を参考に、表 4.1 に示す値とした<sup>7)</sup>。

ハンマー打撃による入力波形は、図 4.2 の矢印位置の節点に半 Sin 波として入力したが、衝撃荷重の継続時間や最大荷重値は、直径 20mm の鋼球を高さ 100mm 前後から自由落下させたと仮定して算出した。この結果、荷重の継続時間は 66.04  $\mu\text{s}$ 、最大荷重は 1101N となった。

解析におけるサンプリング時間間隔は 1  $\mu\text{s}$ 、解析時間は 17000  $\mu\text{s}$  とした。図 4.3 に受信側の速度波形を示すが、グラウト前には 5520  $\mu\text{s}$  で到着した弾性波がグラウト充填後には到達に 6350  $\mu\text{s}$  要することになった。

これから、伝播距離を 28000mm とした時の伝播速度を算出すると、グラウト充填前が、5072m/s、グラウト充填後が 4409m/s となり、図 3.2 に示した測定値とほぼ一致することが分かった。また、グラウト充填前の 5072m/s は鋼材の棒波速度として妥当であり、グラウト充填後の 4409m/s は鎌田らの報告とほぼ一致している<sup>6)</sup>。



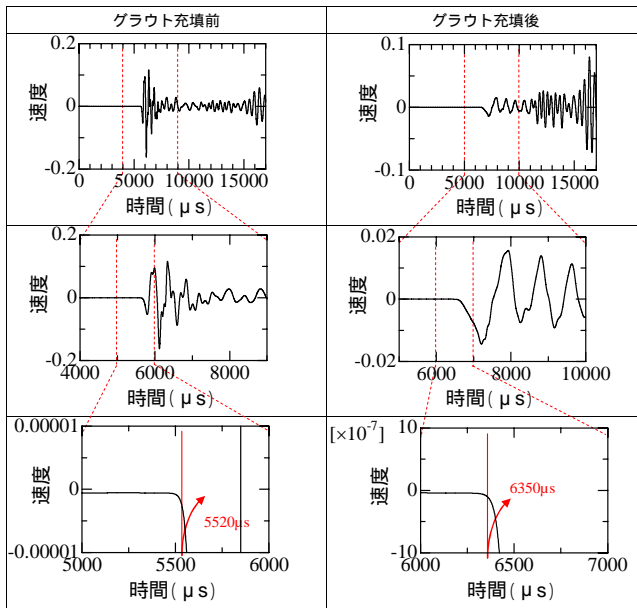


図 4.3 受信位置での速度波形

## 5.まとめ

建設段階における PC グラウト充填度評価方法として、衝撃弾性波法が有効であることが判明した。

(1) PC 鋼材長が 30m 程度であっても、衝撃弾性波法を用いて、グラウト充填の有無を評価できる。

(2) PC 鋼材長が、10m 前後であればバネポインターのような高周波数成分の入力を与えるとよいが、20m を越えるような場合には低周波成分の入力を与えるハンマーを用いる方が適している。

(3) 波形収録装置も、20m 前後と PC 鋼材が長くなる場合には、S/N 比の大きなものを用いると、ノイズの影響をうけにくくなって精度が高まる。

衝撃弾性波法では、入出力比と伝播速度の関係からグラウト充填度を評価することができると考えている。今回伝播速度に関しては解析的

な検討も行ったが、今後は入出力比の基礎となる伝播エネルギーについても研究する必要がある。

## 参考文献

- 1) 藤井 学, 宮川豊章: PC グラウト充填状況の非破壊探査法, 土木学会論文集, 第 402 号, V10, 1989.2
- 2) K.Kobayashi, T.Miyagawa, Y.Hatta, K.Kuzume, NDT of Grouting in Transverse Prestressing Steel in T-beam Bridge, Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Faults and Repair.1995.
- 3) 望月秀次, 本間淳史, 上東 泰: PC グラウトの施工技術の現状と非破壊検査による点検, コンクリート工学, Vol.34, No.6, 1996.6
- 4) 葛目和宏, 前野裕文, 森下宣明, 塚田卓, 梅原秀哲: 打音振動法による PC グラウト充填度評価について, コンクリート構造物のアップグレード論文報告集, Vol.6, pp.393-400, 2006. 10
- 5) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 川島雅道, 内田慎哉, 六郷恵哲: 弾性波による PC グラウト充填評価手法の実構造物への適用, 土木学会論文集, Vol.62, No.3, pp.569-586, 2006.9
- 6) 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
- 7) 應江虹, 鎌田敏郎, 浅野雅則, 六郷恵哲: 弾性波による PC グラウト充填評価法の適用性に関する解析的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1899-1904, 2004

