

5章 非破壊検査技術の適用性検証実験

5.1 概要

国内で建設されている道路橋のおよそ4割を占めるPC橋の健全性を評価する場合、残存プレストレス量が重要な指標になると考えられることから、4章までにおいて、弾性波（超音波、衝撃弾性波）を用いた非破壊検査技術により、残存プレストレス状態の検知の可能性を評価した。

本章では、まずPC橋の実大桁(写真 5.1.1(a))に対し、汎用性のある非破壊検査手法(弾性波法)を用い、応力状態の相違が弾性波の伝播性状等におよぼす影響について検討した。その上で、プレストレス状態の変化による弾性波の伝播特性の相違を詳細に分析するため、ポストテンション方式T桁橋を模擬した梁部材の模型桁(写真 5.1.1(b))について、導入プレストレス量を変化させ、弾性波の伝播特性の変化からプレストレス状態を推定する手法について検討した。その結果、弾性波の伝播特性とコンクリート部材の応力状態とは相関が認められ、弾性波によって応力状態の相違を検知できる可能性を示すことが出来た。



(a) 実大桁



(b) 模型桁

写真 5.1.1 実験供試体

5.2 非破壊検査技術及び評価手法

(1) 超音波の透過伝播特性

ウェブ片側から反対側に向けて超音波を透過させ、その到達時間を計測することで伝播特性を評価する手法である。計測箇所は鉄筋位置を避け、プレストレスによる応力が異なる位置を網羅できるように、支間中央部近傍とした。

波動伝播速度は、伝搬距離としてウェブ厚である 350mm (一定間隔)、伝搬時間を受信波形の初動点 (立ち上がり点) として算出した。受信波形の初動点は、読み取り誤差の影響が小さい第 1 振幅のゼロクロス点 (図 5.2.2 拡大中「▽」) とした。

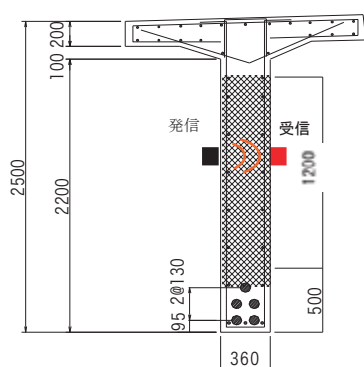


図 5.2.1 計測概要

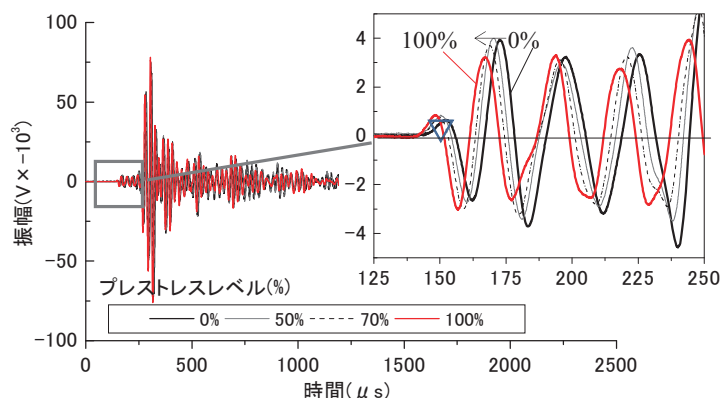


図 5.2.2 受信波形

(2) 超音波の表面伝播特性

超音波探子からの入力点を中心とし、受発信間距離 150mm 毎にそれを取り巻くような位置関係で受信子を配置し、算出される表面伝播速度から伝播特性を評価する手法である。伝搬速度は、伝搬時間を受信波形の初動点、伝搬距離を受発信端子中心間隔として算出した。図 5.2.3 に計測方法の概要を示す。

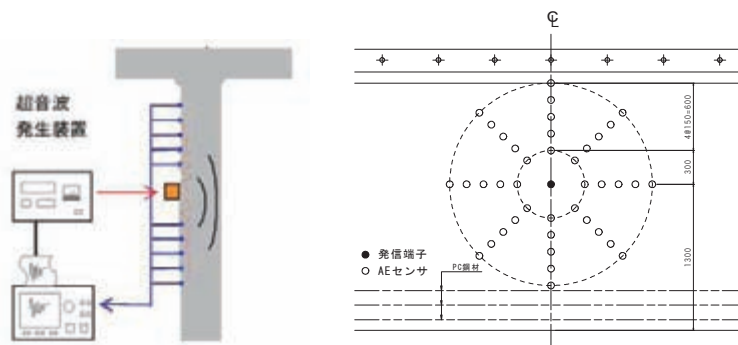


図 5.2.3 超音波 表面伝播計測概要

(3) 衝撃弾性波の表面伝播特性

$\phi 9.6\text{mm}$ の鋼球打撃による入力波を 300mm 一定間隔の 2 点で受信し、受信器間を通過する弾性波の時間差から算出される表面伝播速度より伝播特性を評価する手法である。計測は応力状態の差を評価するため水平方向の伝播速度とし、ウェブ高さ方向に測線高さを変えて行った。

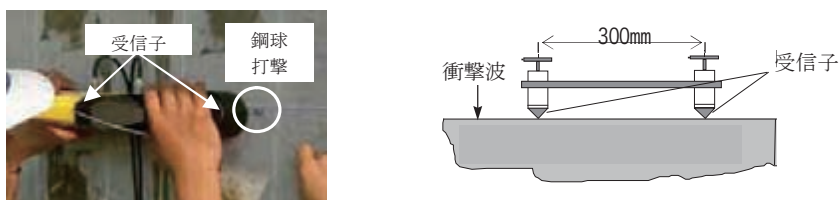


図 5.2.4 衝撃弾性波 計測概要

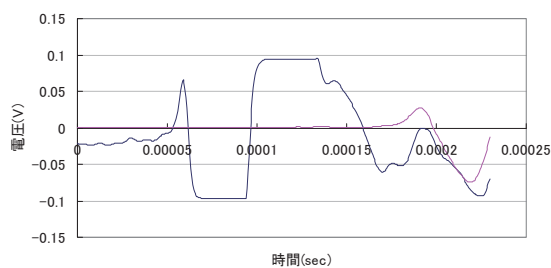


図 5.2.5 出力波形

(4) 周波数分布特性

応力状態の異なる躯体中を弾性波が伝播する場合の受信波形の特性を比較するため、周波数成分の分布特性に着目し、(a)重心周波数と(b)高周波度（周波数分布図の高周波域が占める割合）を定義した。

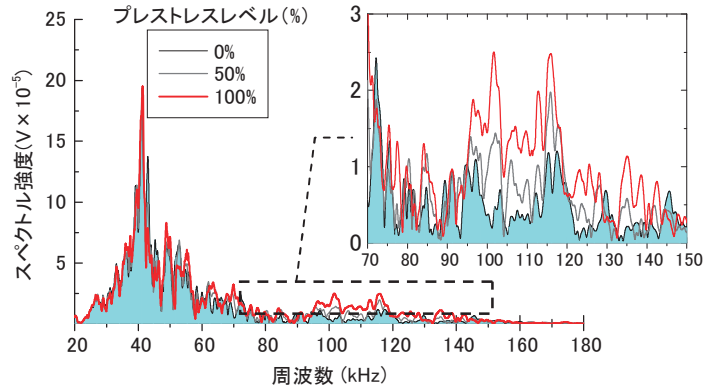


図 5.2.6 周波数解析

(a) 重心周波数

周波数分析で得られた関数の積分値の重心位置をその波形の特性値として評価した。

$$\text{重心周波数(kHz)} = \frac{\sum E_i \cdot F_i}{\sum E_i}$$

ここで、

E_i : 周波数成分の大きさ

F_i : 周波数

※共振周波数 100kHz の発信子を使用した場合は、0~180kHz の成分から重心周波数を算出した。

(b) 高周波度

部材の伝搬過程で波動の透過し易さに相違があるのであれば、高周波数成分が散乱しにくくなることが推察される。周波数分布の変化を定量化するため、高周波度として、単純に周波数分布図から、70kHz~180kHz の面積が 0kHz~180kHz の面積に占める比率(%)と定義した。

$$\text{高周波度 (\%)} \quad f_{(70-180/0-180)} = \frac{\sum (70\sim 180\text{kHz})}{\sum (0\sim 180\text{kHz})} \times 100$$

5.3 実験条件

5.3.1 実大桁実験

(1) 実験対象桁

実大 PC 桁は、ポストテンション T 桁橋(桁長 44.8m, 支間長 43.8m, 桁高 2.5m, 設計基準強度 40N/mm², 計測時の材齢約 1 年)である。表 5.3.1 に配合条件及び圧縮強度試験結果を、図 5.3.1 及び 5.3.2 にそれぞれ PC 鋼材配置図及び鉄筋配置図を示す。また図 5.3.3 に、鋼材配置及び支間中央断面位置の応力状態の計算値を示す。

表 5.3.1 配合条件及び圧縮強度試験結果

配合	現場計測結果			水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					高性能 AE減水剤 (%)
	圧縮強度 $\sigma_{3, 7, 28}$ N/mm ²	スランプ SL	空気量 Air			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
40-12-20H	39.2, 46.7, 54.2	12.0	4.4	36	37.8	175	486	604	1019	4.37	0.03

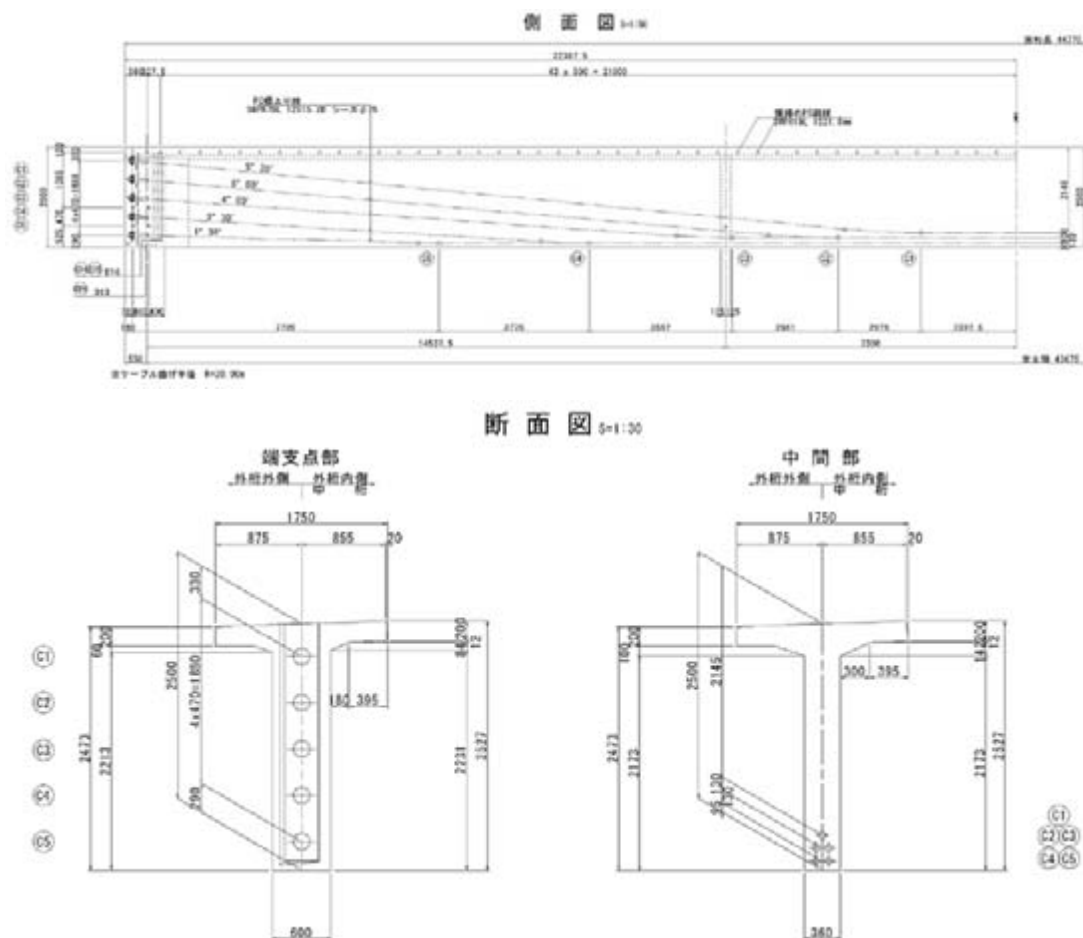
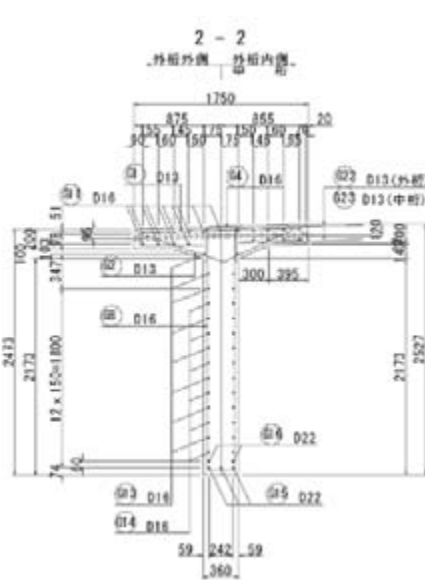
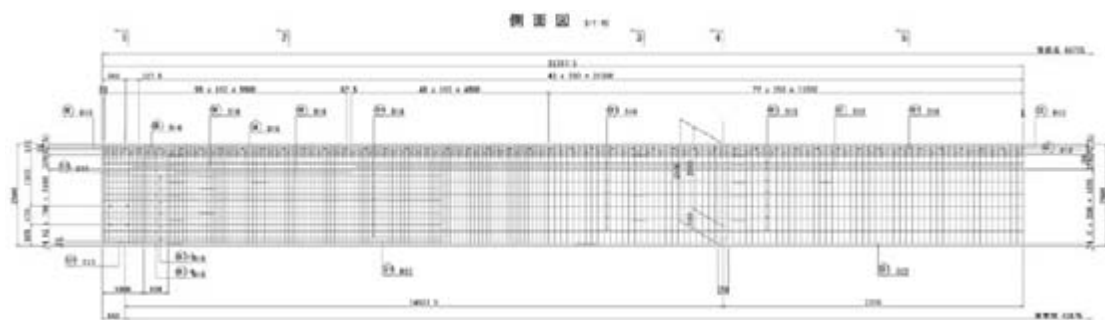
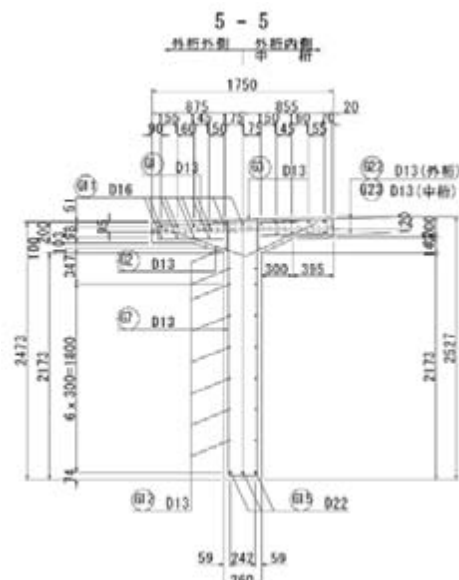


図 5.3.1 PC 鋼材配置図



1/4 支点断面



支間中央断面

図 5.3.2 鉄筋配置図

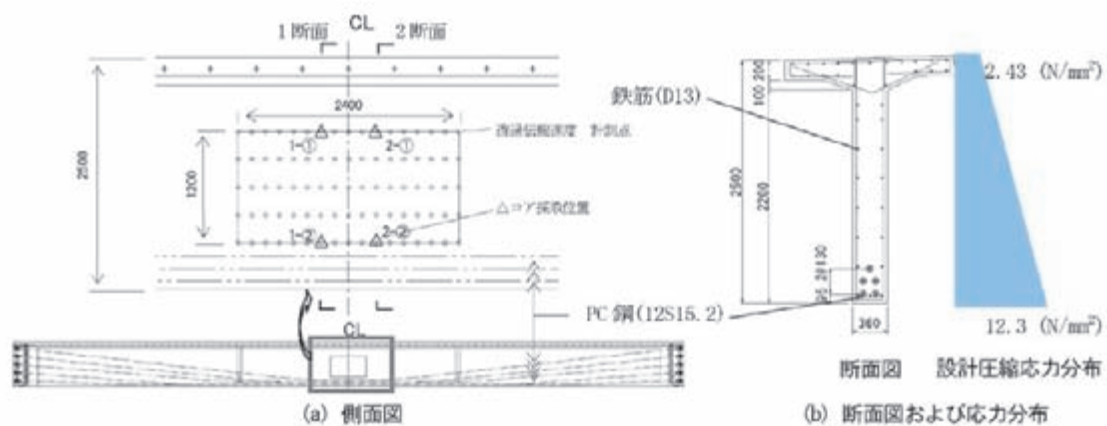


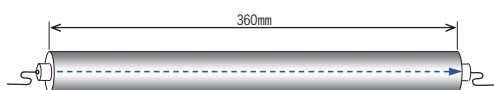
図 5.3.3 実大桁の鋼材配置及び応力状態

表 5.3.2 に、試験時のウェブ直角方向に採取したコア強度(直径 $\phi 80\text{mm}$)を示す。コアは、支間中央から左右 300mm の位置において桁下から 500mm 及び 1700mm の高さより採取した。採取した 360mm のコアを 200mm と 160mm にカットし、試験値としてそれら 2 本の平均値を用いた。

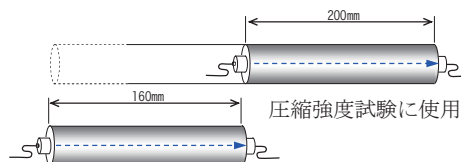
表 5.3.2 コア供試体の物性試験値

コア採取位置※	1断面		2断面	
	1-①	1-②	2-①	2-②
圧縮強度 (N/mm ²)	49.6	64.9	58.4	59.4
静弾性係数 (N/mm ²)	24900	25000	29500	26400
密度 (kg/m ³)	2210	2280	2260	2320

※コア採取位置：支間中央から左右の300mmの断面位置で、桁下縁から1700mm(①)と500mm(②)の高さ位置で採取した。



採取コア



採取コア切断状況

写真 5.3.1 計測用コア供試体

(2) 計測機器及び計測箇所

(a) 超音波の透過伝播特性

ウェブ厚さ方向に透過させる超音波として、印加電圧 1200V、共振振動数 40kHz とし、計測箇所は支間中央部の 2250mm の範囲の 150×300mm 格子点とした。使用した計測機器の特性を表 5.3.3 に、計測箇所を図 5.3.4 に示す。

表 5.3.3 計測機器の特性

受発信センサ (共振周波数kHz)	40kHz
印加電圧 (V)	1200V
サンプリング周期	200ns
サンプリング時間	200 μ s



写真 5.3.2 計測機器

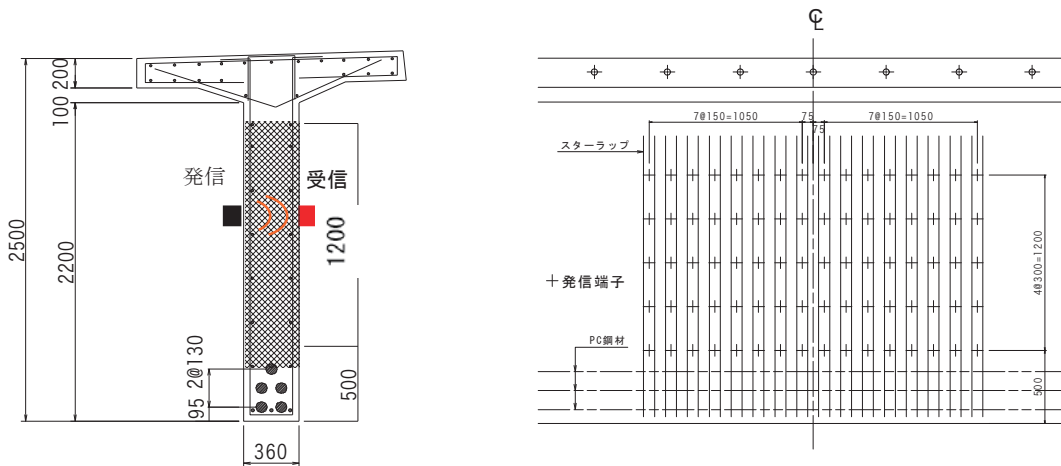


図 5.3.4 計測概要図及び計測点



写真 5.3.3 計測状況

(b) 超音波の表面伝播特性

ウェブ表面を伝搬させる超音波として、印加電圧 400V、共振振動数 40kHz とし、計測箇所は支間中央部を中心とする半径 900mm の円の範囲内の点とした。使用した計測機器の特性を表 5.3.4 に、計測箇所を図 5.3.5 に示す。

表 5.3.4 計測機器の特性

発信センサ (共振周波数kHz)	40kHz
受信センサ	AEセンサ (125~150kHz)
印加電圧 (V)	400V
サンプリング周期	200ns
サンプリング時間	200 μ s



写真 5.3.4 計測機器

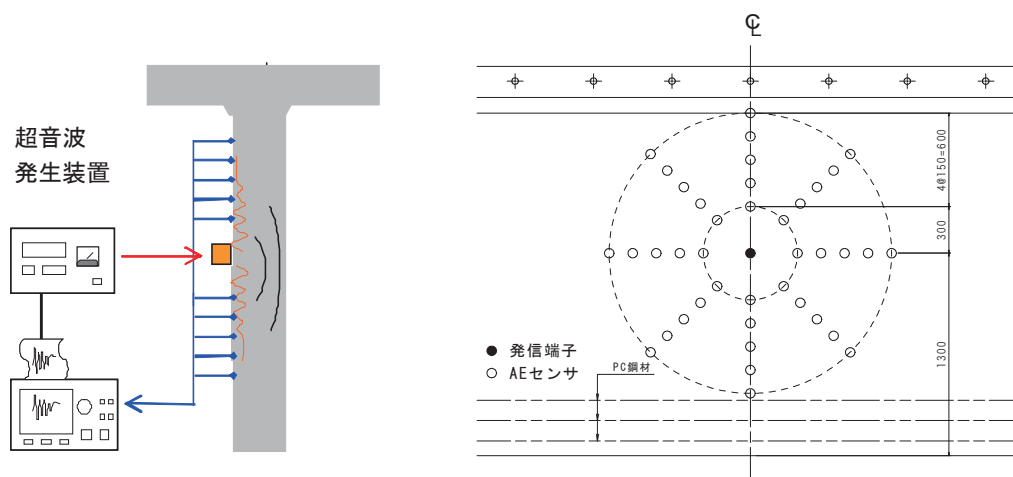


図 5.3.5 計測概要図及び計測点

(c) 衝撃弾性波の表面伝播特性

計測箇所は支間中央部近傍の 1500×1500mm の範囲内とした。使用した計測機器の特性を表 5.3.5 に、計測箇所を図 5.3.6 に示す。

表 5.3.5 計測機器の特性

受信センサ	表面波用ImPact-Echo Instruments
打撃鋼球	φ 9.6mm
センサ間隔	300mm

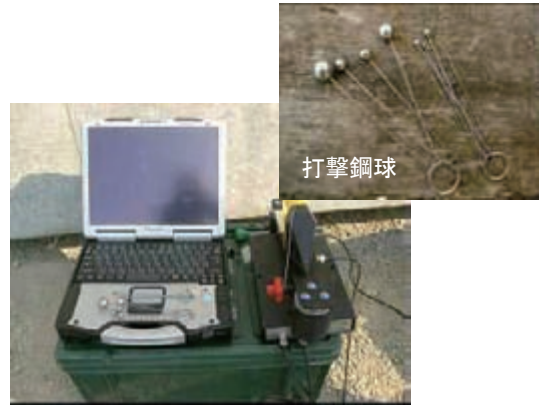


写真 5.3.5 計測機器

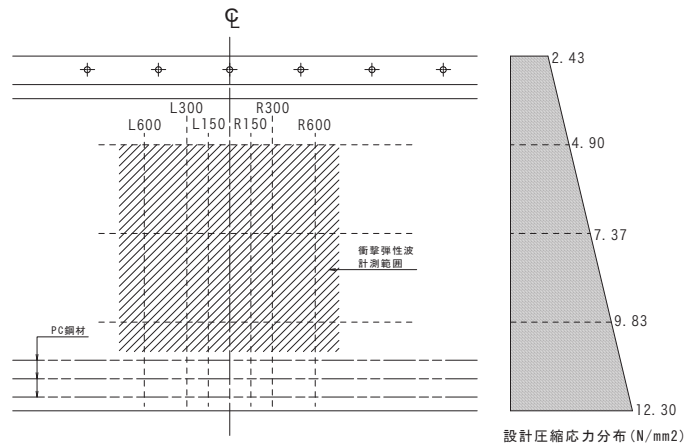
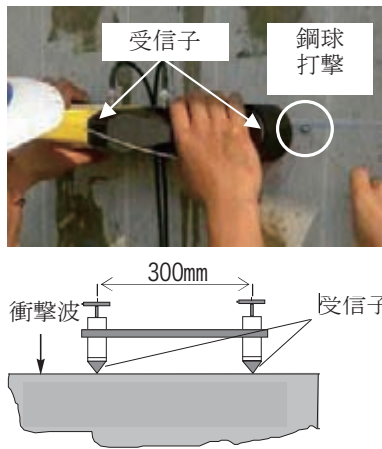


図 5.3.6 計測概要図及び計測点

5.3.2 模型桁実験

(1) 実験対象桁

実験対象桁の側面図及び断面図をそれぞれ図 5.3.7 及び図 5.3.8 に、使用材料及び供試体配合表をそれぞれ表 5.3.6 及び表 5.3.7 に示す。PC 鋼材端部に設置したジャッキの緊張・解放により、導入するプレストレス量を変化させ、部材表面近傍を伝播する弾性波の変化を評価した。プレストレスレベルは、標準的な PCT 桁橋の桁下縁応力と同等となるプレストレス量を基準値のプレストレスレベル 100%とし、75%、50%、0%の 3 水準を加えた全 4 水準とした。プレストレスレベルと PC 鋼材緊張力の関係を表 5.3.8 に示す。各プレストレスレベルに相当する応力状態は、本供試体に取付けたひずみゲージから実測した。プレストレス導入に伴う部材の応力状態を図 5.3.8(b)に示す。

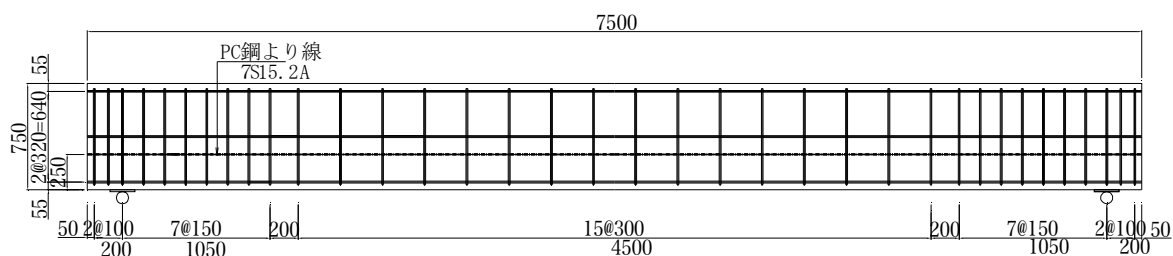
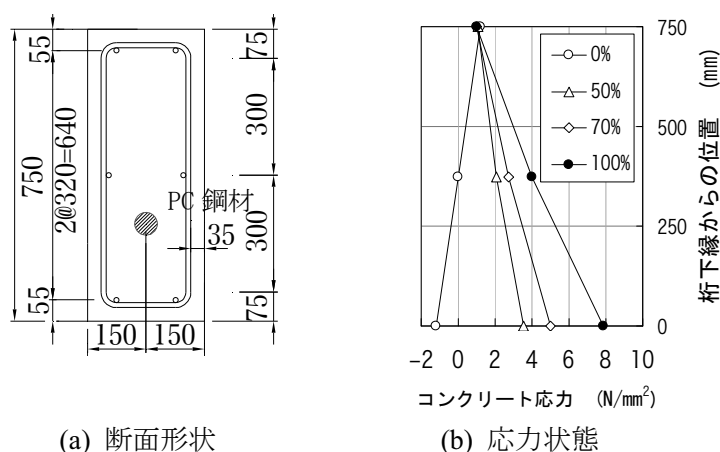


図 5.3.7 供試体側面図



(a) 断面形状

(b) 応力状態

図 5.3.8 供試体断面図

表 5.3.6 使用材料

	規格	備考
コンクリート	設計圧縮強度 40 (N/mm ²)	
鉄筋	SD345	
PC鋼材	7S15.2	ねじ式定着
シース	φ 55mm	亜鉛メッキ

表 5.3.7 供試体配合表

設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材 最大 寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		混和材料	
									5mm~ 20mm	mm~ mm	混和材	混和剤
40.0	20	12	4.5	58.0	47.0	150	259(H)	877	1015	-	2.07	1.04

表 5.3.8 梁供試体の応力状態

プレストレス レベル	プレストレス 導入量 (kN)	コンクリート ひずみ実測値(μ) ^{※1}		換算 応力度(N/mm ²) ^{※2}	
		上縁	下縁	上縁	下縁
0%	0	0	0	1.20	-1.21
50%	583	-5	157	1.05	3.53
70%	816	-6	205	1.01	4.98
100%	1165	-8	301	0.97	7.85

※1:コンクリート表面に貼付したひずみゲージの実測値 (+:圧縮, -:引張)

※2:ひずみゲージの実測値より算出したコンクリート応力度

表 5.3.9 プレストレスレベルと導入緊張量の関係

プレストレスレベル (%)	0	50	70	100
PC 鋼材緊張力 (kN)	0	583	816	1165

(2) 計測機器及び計測箇所

(a) 超音波の表面伝播特性

実験は高さ位置の異なる水平方向 3 測線を設定し、部材表面に超音波(100kHz)を入力した。それぞれ入力した測線上に 100mm 間隔で設置した各受信位置(発信センサより 50mm、150mm、250mm、350mm、450mm、550mm、650mm)において、表面伝播波を広帯域型の AE センサ(共振周波数 125kHz)で受信した。使用した計測機器の概要を表 5.3.10 に、計測箇所を図 5.3.9 に示す。各測線ごとの受信子は設置したままとし、同入力波を計測した。

表 5.3.10 計測機器の特性

発信センサ (共振周波数kHz)	100kHz
受信センサ (共振周波数kHz)	AEセンサ (125kHz)
サンプリング周期	0.1 μ sec
サンプリング時間	5005 μ sec

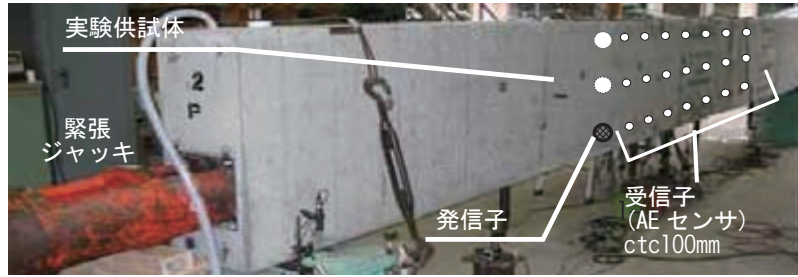


写真 5.3.6 実験状況

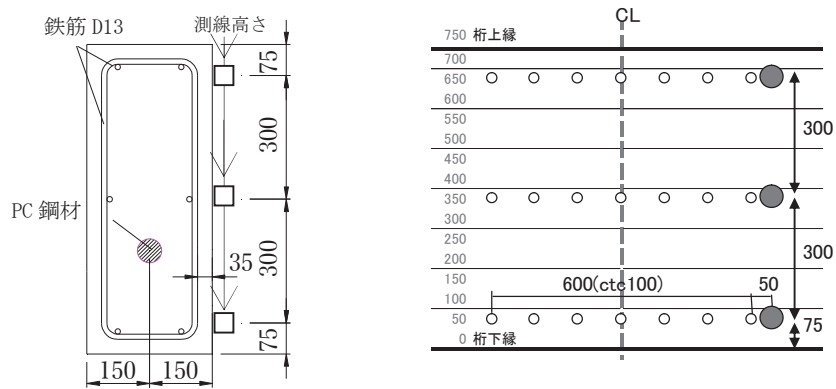


図 5.3.9 計測箇所

5.4 結果及び考察

5.4.1 実大桁実験

(1) 超音波の透過伝播特性

計測された伝播速度分布を図 5.4.1(a)に、設計圧縮応力と計測結果の関係を図 5.4.1(b)に示す。結果にばらつきはあるものの桁高方向に透過伝播速度が異なる傾向がみられる。施工に起因するコンクリート物性の相違結果に影響している可能性もある¹⁾ため、採取したコア供試体の状態で透過伝播速度(図 5.4.2)を計測した。コア試験体の透過伝播速度を計測(L300-桁下から 500mm のコアは端部が折れたため未計測)したが、桁下側位置のコアで伝播速度が小さくなる結果となった。以上より、微少な相違ではあるがプレストレスによる内部応力と超音波の透過伝播速度を関係づけて評価できる可能性があると考えられる。

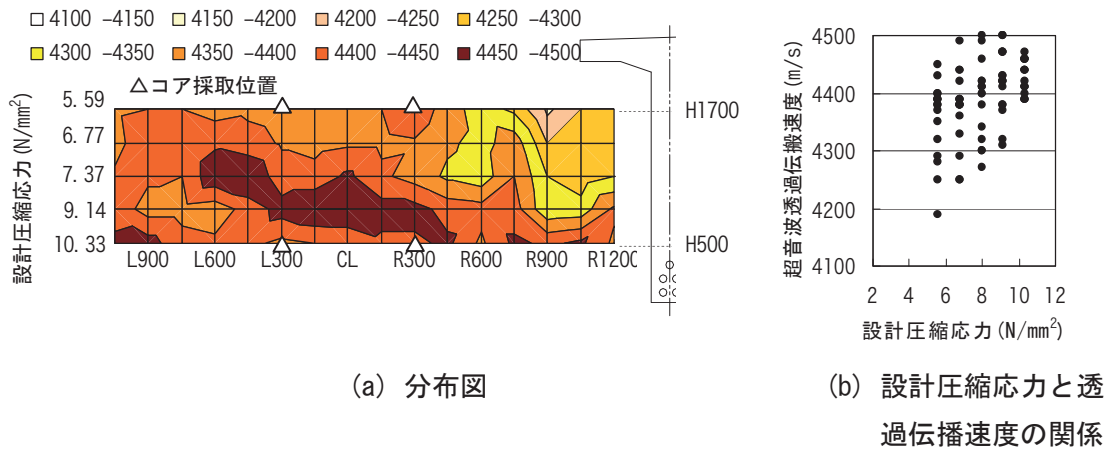


図 5.4.1 超音波ウェブ透過伝播速度

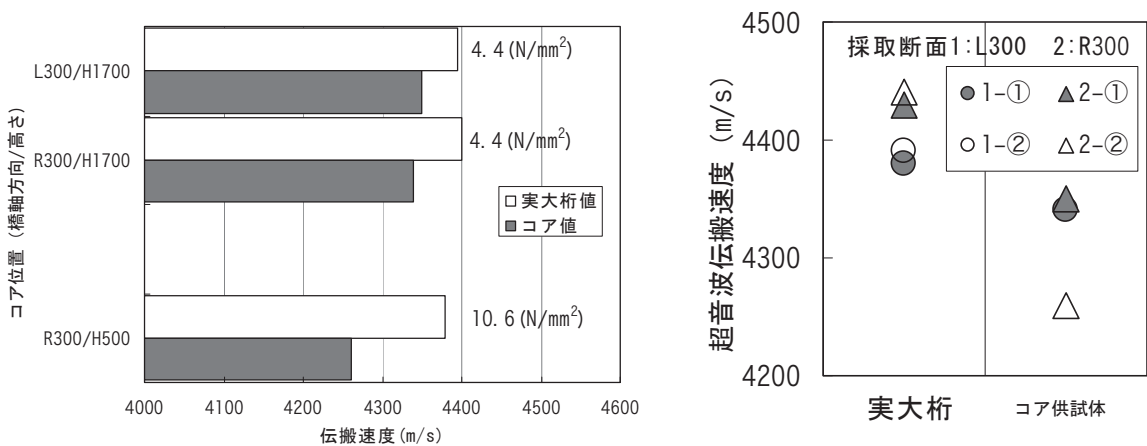


図 5.4.2 採取したコアによる伝播速度の比較

(2) 超音波の表面伝播特性

入力点と各受信間の伝播速度を図 5.4.3 に示す。既往の研究²⁾では、超音波の表面伝播速度を計測すると波動減衰の影響により、算出される見かけの伝播速度は小さくなることが報告されており、本結果でも伝播距離に応じて速度が低く算出される傾向が見られた。一方、図 5.4.4 に示す部材の応力状態の相違に対応する桁高さ毎に整理した伝播速度では、同距離の伝播にもかかわらず応力状態の異なる桁上方向領域の伝播と下方向領域での伝播に、速度差がある傾向が伺える。この結果は、波動の伝播過程の減衰・コンクリートの品質による影響も含まれているため精査が必要であるものの、コンクリート内部応力状態は表面伝播速度を計測することで評価できる可能性があることを示していると考えられる。

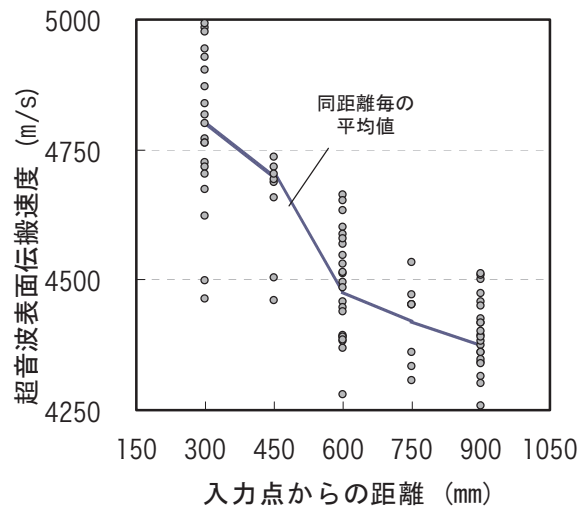


図 5.4.3 入力点と各受信間の伝播速度

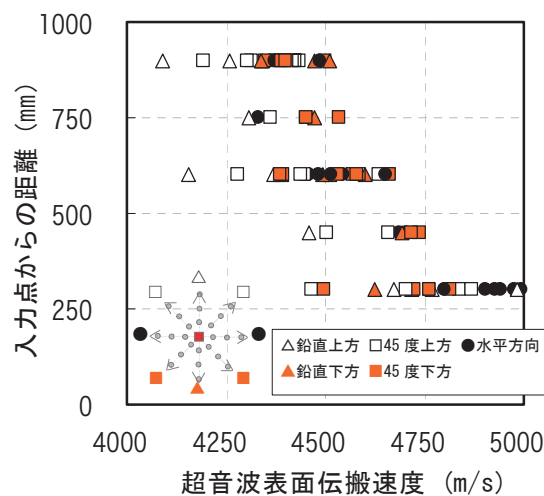


図 5.4.4 桁高さ方向毎の伝播搬速度

(3) 衝撃弾性波の表面伝播特性

桁高さ位置の応力状態と水平方向伝播速度の計測結果の関係を図 5.4.5 に示す。ばらつきはあるものの内部応力と伝播速度に相関が見られ、前述の透過伝播速度結果と同様の傾向が得られた。同じ計測位置の透過伝播速度と水平方向伝播速度の関係を図 5.4.6 に示す。応力状態の相違による速度差は、コンクリート表面 2 点間伝播速度の方が大きいことが分かった。

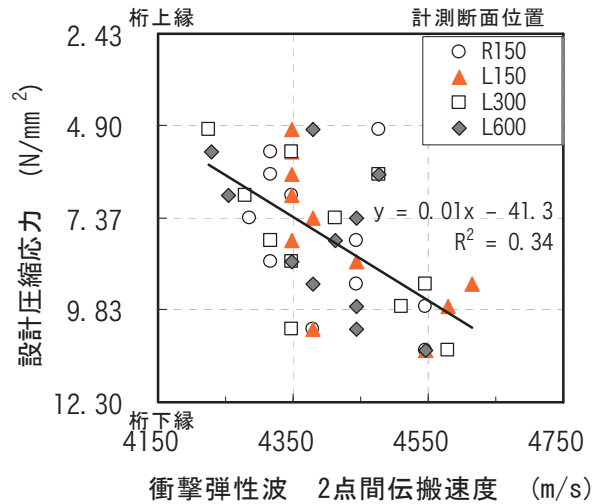


図 5.4.5 衝撃弾性波の 2 点間伝播速度

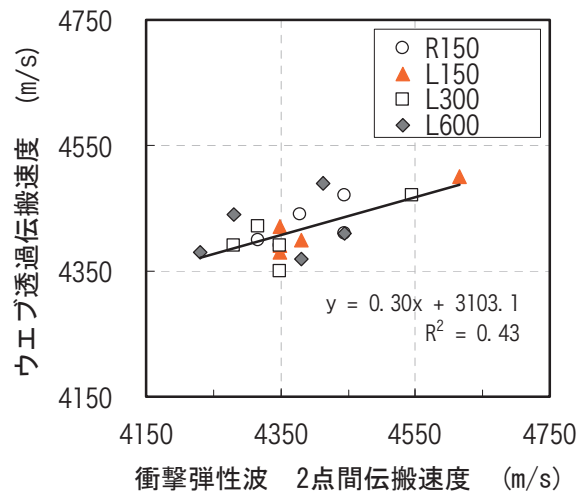
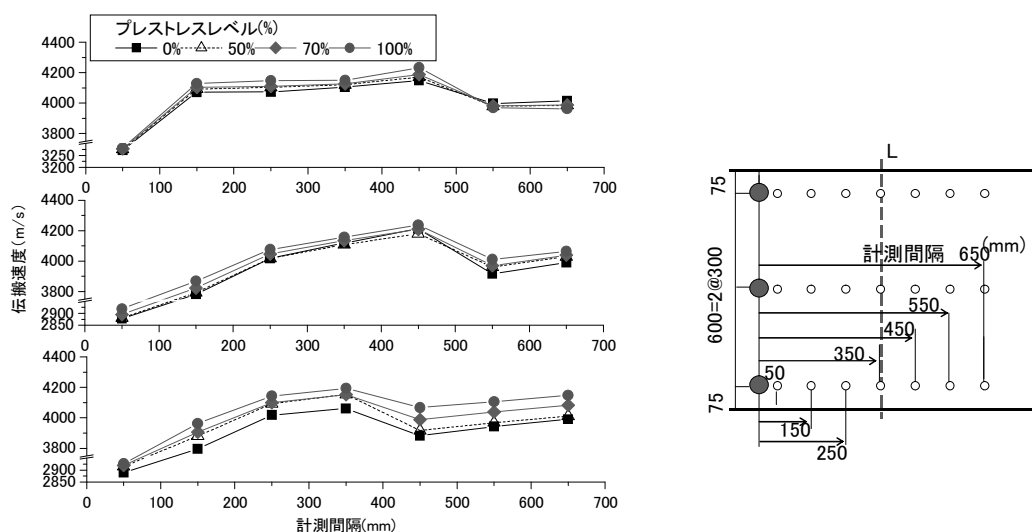


図 5.4.6 超音波透過伝播速度と衝撃弾性波表面伝播速度の関係

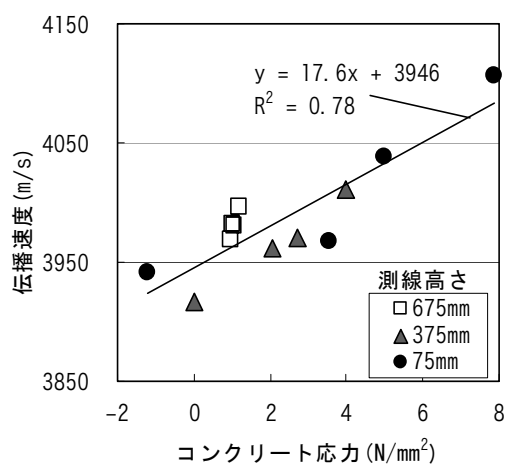
5.4.2 模型桁実験

(1) 弾性波の表面伝播特性

図 5.4.7(a)に、供試体側面に設置した3測線の結果を示す。プレストレス導入量の相違による応力変化が大きい下側測線(最下段グラフ)では、計測間隔(伝播距離)に関わらず伝播速度がプレストレス導入量に応じて変化する傾向が明確であった。図 5.4.7(b)は3測線全ての伝播間隔 550mm のデータから当該測線位置での推定コンクリート応力と伝播速度の関係のプロットしたものである。応力状態に関係した明確な相関が見られた。



(a) プレストレスレベルと計測間隔の関係



(b) 推定応力と伝播速度の関係 (550mm 間隔計測結果)

図 5.4.7 模型桁実験 表面伝播速度

(2) 周波数分布特性

図 5.4.8 に計測間隔(伝播距離)と受信波の重心周波数を示す。わずかながら下側測線で重心周波数が応力の相違によって変化していることが確認できる。また伝播距離が大きくなるにつれ重心周波数が下がる傾向が顕著であった。図 5.4.9 に応力と重心周波数(計測間隔 550mm)の関係を示す。ばらつきが大きいものの応力状態に相関する傾向がみられた。

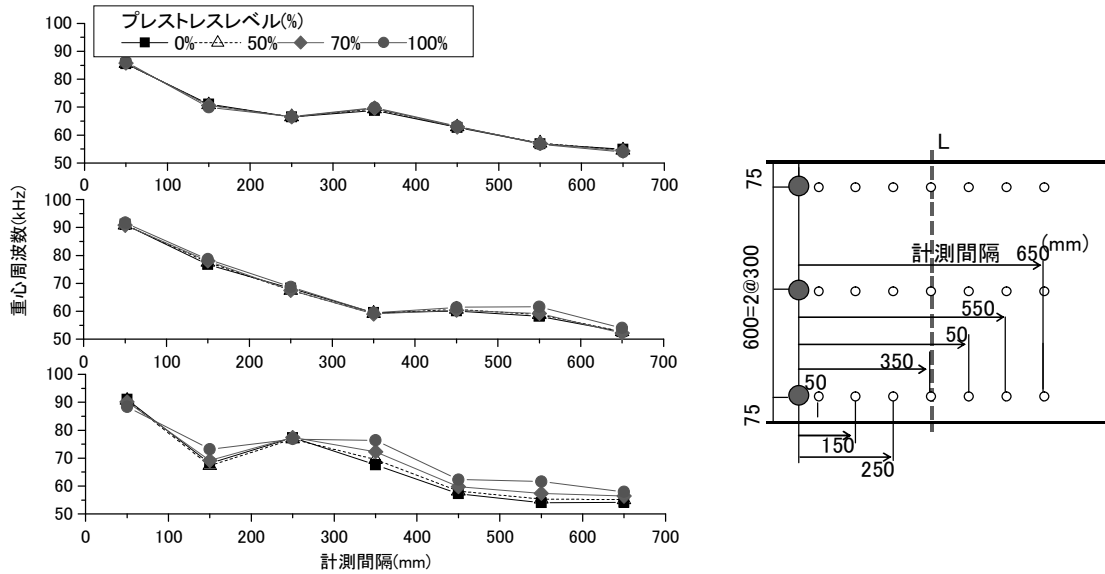


図 5.4.8 周波数特性分析結果 (重心周波数)

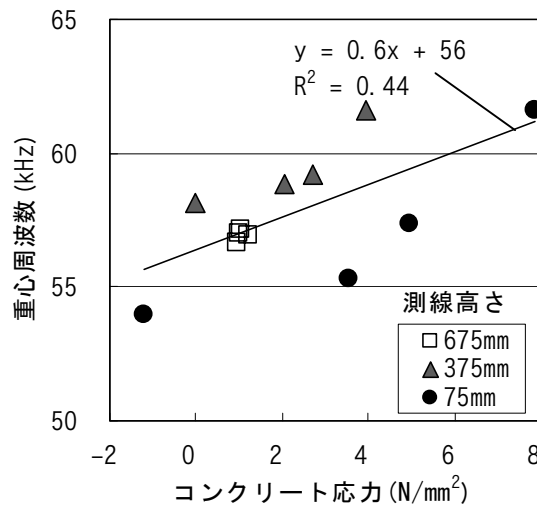


図 5.4.9 推定応力と重心周波数の関係 (550mm 間隔計測結果)

図 5.4.10 に高周波領域(70kHz~180kHz)の割合を示す。重心周波数の傾向と同様、下側測線で高周波領域の比率が応力の相違によって変化しており、また伝播距離が大きくなるにつれ高周波領域の比率が下がる傾向が顕著に示された。図 5.4.11 に示す重心周波数と高周波度の関係より、両者に高い相関があることが分かる。このように応力状態の相違と伝播距離の大小によってコンクリート表面を伝播する波は、計測可能で傾向をもった有意な特性変化を示す可能性があることが伺える。

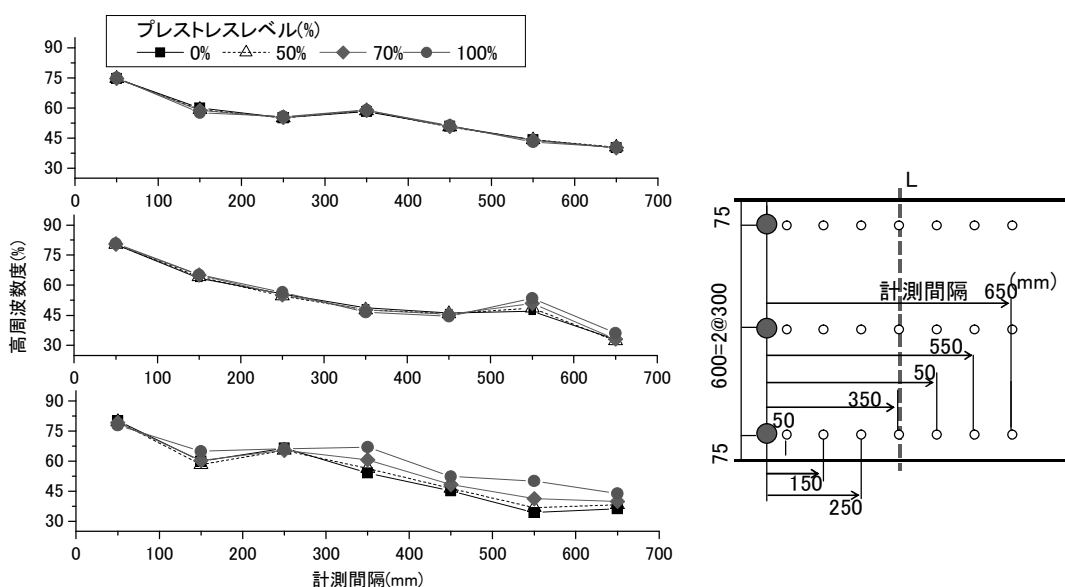


図 5.4.10 周波数特性分析結果（高周波度）

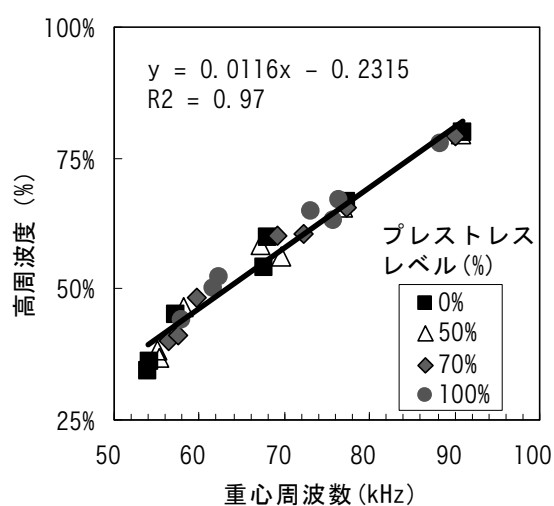


図 5.4.11 高周波度と重心周波数の関係

5.5 今後の展開の可能性

残存プレストレス量を検知する技術の課題として、実構造物における計測結果は、使用材料、施工品質、コンクリートの劣化状態等により影響を受ける³⁾ため、これらを応力状態に起因するものと区別して評価することが必要である。そのため今後、面的に異なる応力分布状態を伝播した弾性波を比較することで、応力状態の異常を相対的に評価する手法が必要となると考えられる。また伝播波の評価手法として、伝播時間・周波数成分に着目し、その両者の情報を合わせて展開する解析手法（短時間周波数解析）を適用することにより、異なる応力状態の伝播波動の相違をより明確に現すことができると考えられる。

- 短時間周波数解析

(a) 解析方法

信号を時間的に細かく区切り部分的に解析していく、短時間フーリエ変換（STFT：Short-Time Fourier Transform）での検討である。下記に関数式を示す。

$$STFT_{x,\omega}(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(T)\omega(T-t)e^{-i\omega T} dT$$

$$\omega(x) = \frac{I_0\{\pi\alpha\sqrt{1-(2x-1)^2}\}}{I_0(\pi\alpha)}$$

ここに、

(t)：窓関数(カイザー関数窓)

t ：時間

ω ：角周波数

T ：周期

I_0 ：変形ベッセル関数

α ：実数パラメータ

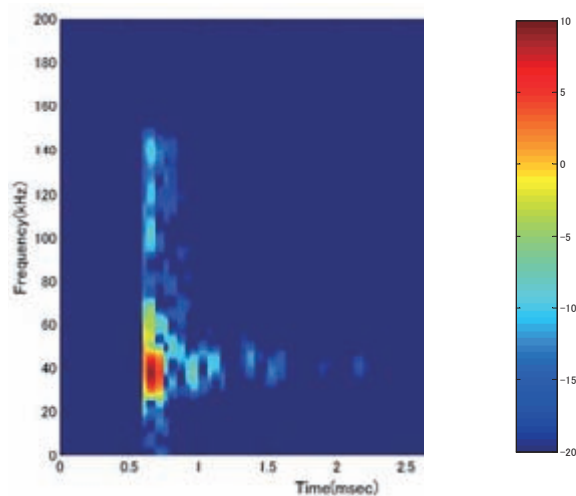


図 5.6.1 短時間周波数解析例

(b) 模型供試体による解析結果

図 5.6.2 に示す模型供試体の桁高さ 75mm 位置での、水平方向の導入プレストレス変化時 (0、70、100%時) の短時間周波数解析結果を図 5.6.3～図 5.6.9 に示す。

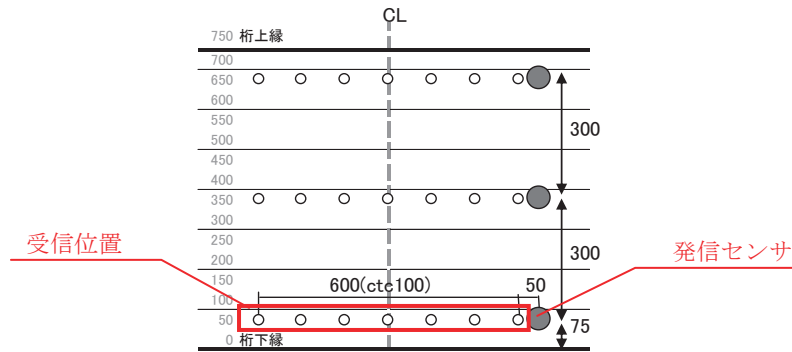


図 5.6.2 解析箇所

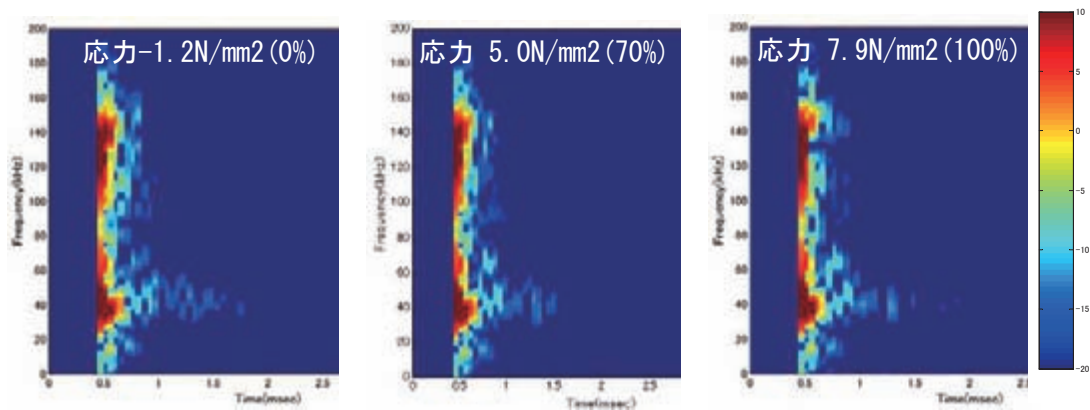


図 5.6.3 発信センサからの距離 : 50mm

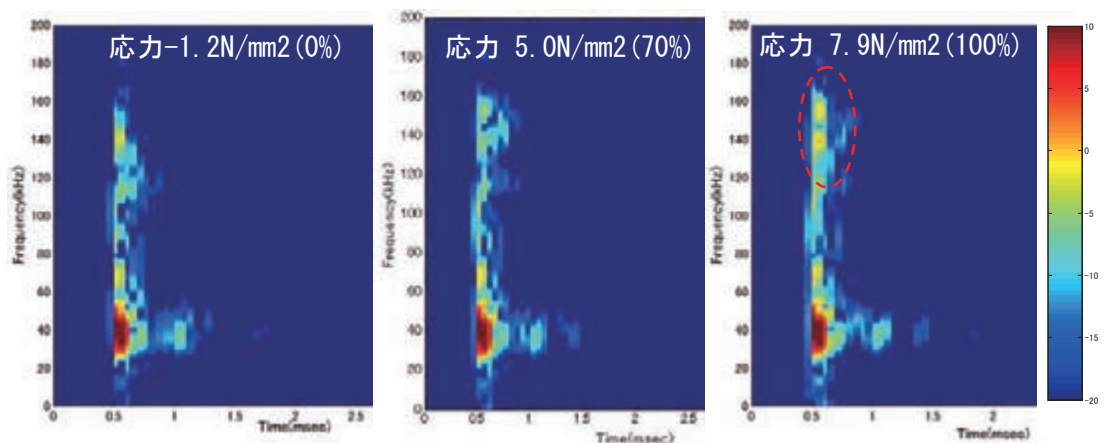


図 5.6.4 発信センサからの距離 : 150mm

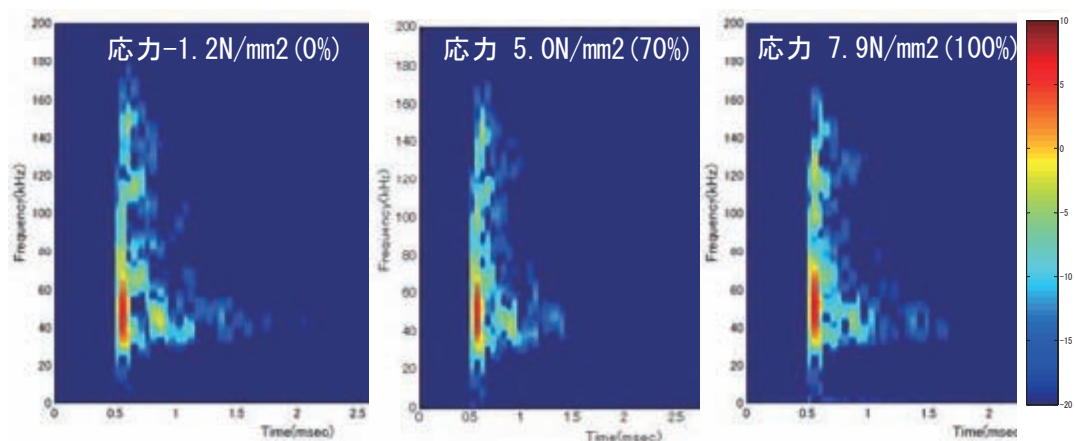


図 5.6.5 発信センサからの距離 : 250mm

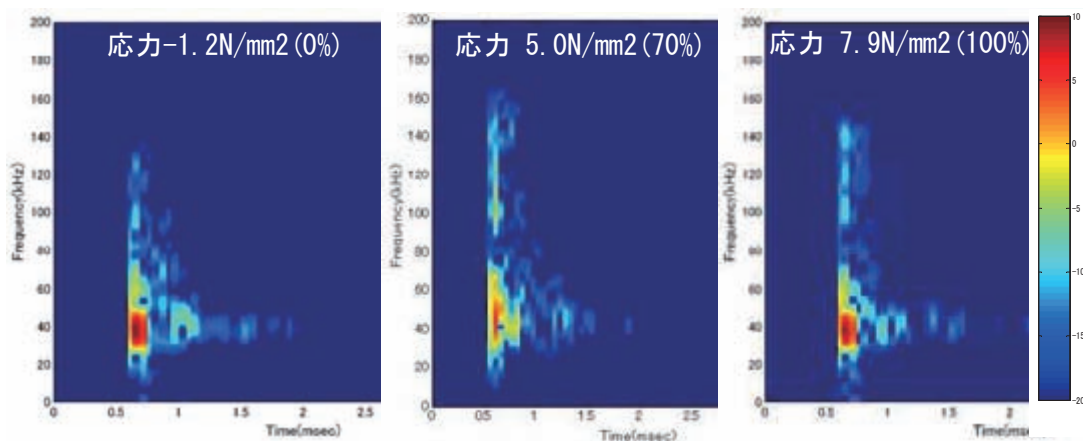


図 5.6.6 発信センサからの距離 : 350mm

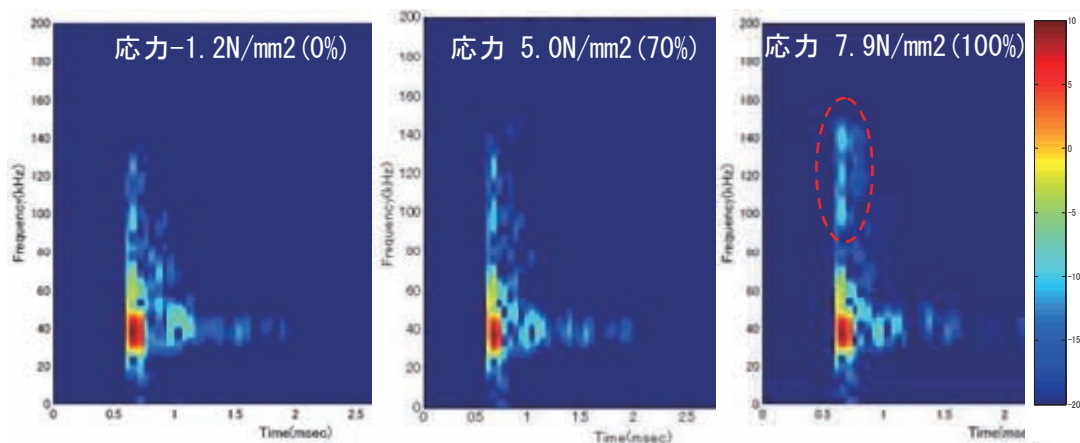


図 5.6.7 発信センサからの距離 : 450mm

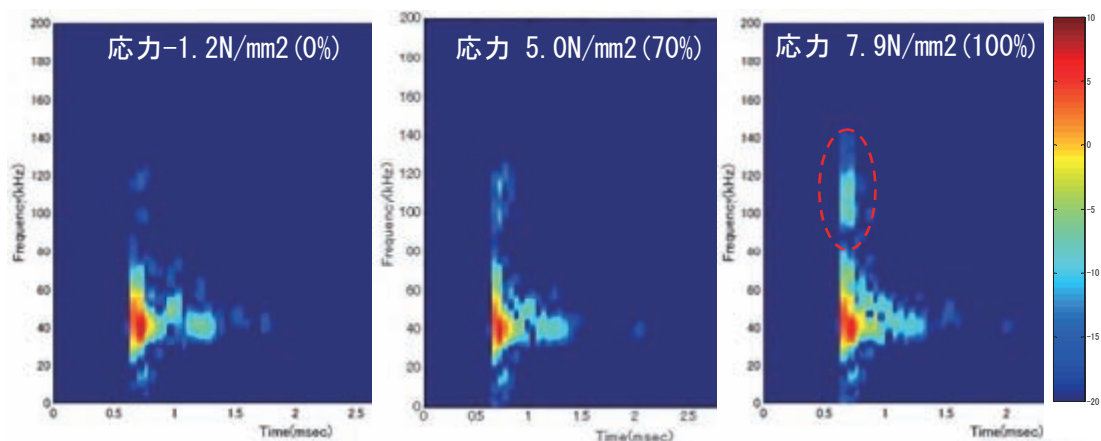


図 5.6.8 発信センサからの距離：550mm

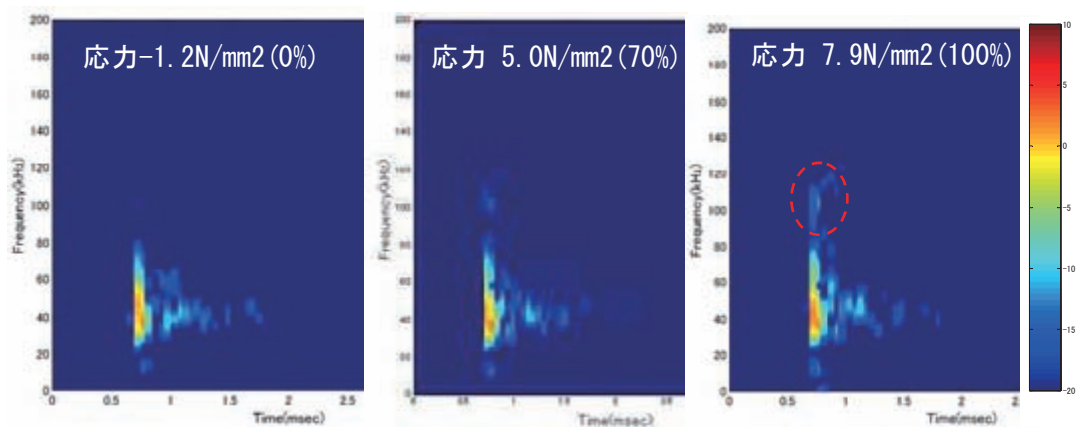


図 5.6.9 発信センサからの距離：650mm

以上のおり、発信センサからの距離が離れていくに従い、高周波数の波が観察される頻度が多くなっている傾向を確認することができた。このことから、応力状態の相違を視覚的に検知できる可能性があることが分かった。

5.6 まとめ

実大桁実験及び模型供試体の実験から得られた知見について以下にまとめる。

- コンクリートを媒体とした超音波や衝撃弾性波の伝播特性がプレストレスによる内部応力状態の相違に対応して異なる傾向があること、さらにそれらが実用性のある非破壊検査手法を用いて検出できる可能性が高いことを、実橋に限りなく近似した条件の実大桁供試体によって確認することができた。
- 弾性波の伝播特性(伝播速度, 周波数分布特性)がコンクリートの応力状態と関連して評価する指標となる可能性があることが分かった。
- 伝播時間、周波数成分に着目した解析手法(短時間周波数解析)を用いることにより、応力状態の相違を視覚的かつより明確に検知できる可能性があることが分かった。

【5章 参考文献】

- 1) 尼崎・宮川・小林: 超音波法による構造物コンクリートの品質評価に関する 2、3 の考察、
コンクリート工学年次論文報告集 13-1、pp.479-484、1991
- 2) 浅野・国枝・鎌田・六郷ら: コンクリート部材における衝撃により入力された弾性波の
伝播速度計測に及ぼす影響因子の検討、土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集、
pp.789-790、2003
- 3) 尼崎・山本: コンクリートの弾性波速度に及ぼす鉄筋の影響および表面法による弾性波
速度の測定、コンクリート工学論文集、第 18 巻第 2 号、pp.95-102、2007.5