

論文 超音波横波トモグラフィ装置を用いた RC 構造物の診断における周波数依存性の検証

新井 佑一郎*1・坂本 浩之*2・柳田 佳伸*1・牛島 栄*3

要旨：社会資本の長寿命化が求められる今日において、既設の RC 構造物の改修を効率よく進めていくことが重要となる。RC 構造物の改修では、構造物の状態を設計計画時点で把握しなくてはならないが、建設当時の資料のみで調査を行うことは困難である。特に、工事計画重要な鉄筋位置は設計図書通りではないことが多く、非破壊的手法により調査を行う必要がある。本論では、超音波横波を用いた検査装置で、各種コンクリート構造物の鉄筋位置の検出および、せん断波速度の計測を行った。以上の検出および計測結果と、せん断波の起振周波数の関係を検討し知見を得た。

キーワード：非破壊試験法、超音波トモグラフィ、鉄筋検出、超音波周波数、せん断波速度

1. はじめに

我が国の社会インフラの大部分は 1960～1970 年代の高度経済成長期に供給されており、2020 年代後半には、その半数が耐用年数である 50 年を超過する。老朽化した RC 構造物を継続して共用し続けるためには、性能を回復させるための改修工事が不可欠となる。また、社会のニーズの変化により、供用開始時とは異なる機能への切り替えや性能向上が必要となるケースもある。このような機能の追加変更が必要な場合でも、解体新設ではなく改修工事で対応するケースが増えている。

改修工事では、既存の構造躯体に削孔や開口新設、増し打ちなど手を加える作業が行われる。その際に、RC 構造物の内部を、施工前の計画・設計段階で把握しておく必要があるが、設計図書通りの配筋となっていることはないため、非破壊的な手法で実地調査を行っている。従来および本論で用いる非破壊試験法の適用範囲を表-1 に示す。一般に、RC 構造物の内部探査には電磁誘導法や電磁波レーダーが用いられている。しかし、探査可能な範囲はコンクリート表面より 10cm 程度と浅く、特に大規模な構造物では能力不足となる。また、電磁誘導法は簡便で効率が良い手法であるが、鉄筋以外の検出（空隙、非金属の異物など）はできない。さらに、検出できるのは 1 段筋のみのため、多段配筋の検出は不可である。そのため、現行の調査手法では十分な検出ができず、例えば削孔時に鉄筋と干渉するなどのトラブルが発生し、工事の中断や想定外の補修作業が発生することが考えられる。

また、コンクリートの強度や緻密さといった品質を知る簡便な非破壊試験法として、弾性波の伝搬速度に注目

表-1 各非破壊試験法の適用範囲^{1),2)}

試験法	探査深さ (cm)	検出項目		
		鉄筋	空隙・欠陥	コンクリート品質
電磁波レーダー	20	○ (上筋)	○	×
電磁誘導	10	○ (上筋)	×	×
衝撃弾性波	250	×	○	○
超音波横波	100~200*	○ (多段)	○	○

*: 鉄筋量が多い場合は探査深さが浅くなる

する方法（衝撃弾性波法など）がある。しかし、鉄筋位置とコンクリート品質を同時に計測する方法はなく、それぞれ独立した試験を行わなくてはならない。よって項目が増えれば手間も増えるという課題がある。

本論では、新しい原理の試験法として、超音波横波による鉄筋位置の検出、波の伝搬速度計測を行う。本試験法は表-1 に示すように、鉄筋位置とコンクリート品質の評価が 1 回の試験で可能であり、調査・診断の省力化に貢献できる。

本試験法および装置を用いた予備的な検証は既報^{3~4)}で発表済みであり、良好な検出精度および安定した弾性波速度計測能力を有することが確認されている。本論の検証は、適用範囲の確認として、起振する超音波の周波数が鉄筋検出結果および弾性波速度に与える影響を、過密配筋の高強度コンクリート試験体と、通常の配筋を模擬した普通コンクリート試験体で検証する。

2. 実験方法

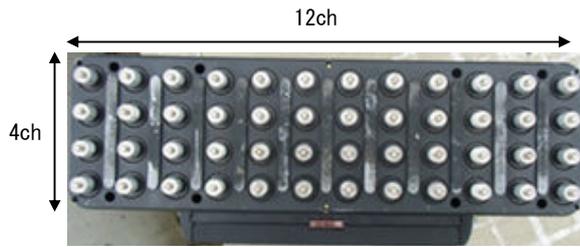
2.1 装置の概要

本論で用いた装置は、既報の実験^{3~4)}と同様の超音波横波トモグラフィ装置（ロシア ACS 社製 MIRA-A1040）である。装置には、図-1(a)で示すように超音波横波を

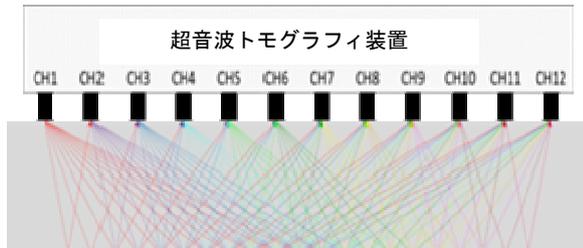
*1 青木あすなろ建設（株） 技術研究所 構造研究部 博士（工学） （正会員）

*2 （株）地球システム科学 開発事業部

*3 青木あすなろ建設（株） 常務執行役員 技術研究所所長 博士（工学） （フェロー会員）



(a) アレイセンサの配置状況



(b) 超音波伝搬のイメージ

図-1 超音波トモグラフィ装置の概要

発振および起振するセンサが $4 \times 12 = 48$ 個アレイ配置され、図-1(b)のように多経路からの反射波を検出することでトモグラフィ画像を作成する。起振された超音波横波は、音響インピーダンスが異なる面（鉄筋、空隙、ジャンカ、躯体端面等）で反射する。また CH1 で起振、CH12 で受振することで、計測位置におけるせん断波速度 V_s の値を 1 回計測することによって得ることができる。

2.2 試験体概要

試験体は、鉄筋量が多い高強度コンクリートの柱を模擬した高強度柱試験体と、普通コンクリートで構成された鉄骨建物の基礎梁を模擬した普通基礎梁試験体の 2 種

である。各試験体の断面図を図-2、図-3 に示す。断面図には、計測位置および 2.3 節で後述する鉄筋はつり位置も載せている。高強度柱試験体は主筋（縦筋）に D38 の太径鉄筋が用いられ、150mm ピッチで、せん断補強筋（横筋）として D13 の細径鉄筋が 100mm ピッチに配置されている。また、計測位置（柱 C 位置）では、図面上の寸法で深さ約 400mm の位置に D38 の太径縦筋および D13 の横筋（中子筋）が配置され、大断面の多段配筋となっている。以上より、鉄筋量が多い構造物を模擬したものである。普通基礎梁試験体は、図-3 が伏図方向となっているため、検出対象の縦筋 D13 はせん断補強筋に対応する。配筋のピッチは 50~100mm であるが、高強度柱試験体と比較して鉄筋量は少ない。

試験体の製作に用いたコンクリートの配合を表-2 に、コンクリートの圧縮試験結果を表-3 に示す。圧縮試験結果は、打設時に採取したテストピースと計測直後に採取したコアの結果を載せている。高強度柱試験体に用いたコンクリートは、水セメント比が 31.1% と小さく、コンクリート強度も 100N/mm^2 を上回り、テストピースとコアの差異も小さかった。普通基礎梁試験体は、比較的強度が低い普通コンクリートとなるように配合を決定したため、水セメント比が 62.5% と大きい。圧縮試験結果は、テストピースで 23.8N/mm^2 と呼び強度 21N/mm^2 を若干上回る程度だったが、計測後に採取したコアの結果は 33.5N/mm^2 と比較的高い値となった。

2.3 実験方法

計測は、図-2 に示す柱 A~D 位置および、図-3 の基礎 A 位置で超音波トモグラフィ装置を接触させ、トモグ

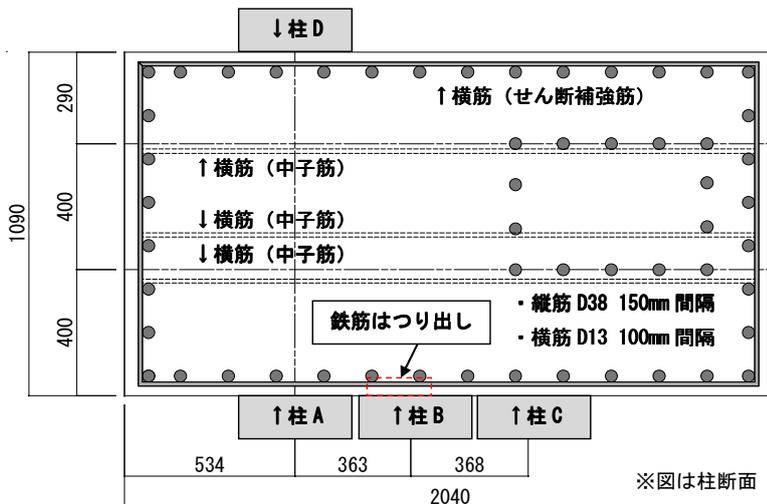
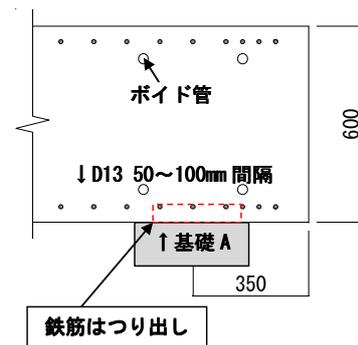


図-2 高強度柱試験体の断面図



※図は伏図方向
※縦筋（せん断補強筋）のみ検出対象

図-3 普通基礎梁試験体の断面図

表-2 各試験体のコンクリート配合

試験体	呼び強度 (N/mm^2)	最大骨材寸法 (mm)	スラブ or フロー(cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
高強度柱	63	20	50	31.1	3	170	547	768	907	7.11
普通基礎梁	21	20	18	62.5	4	183	293	887	888	4.66

表-3 コンクリート圧縮試験結果

試験体	供試体	材齢 (day)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
高強度柱	テストピース	56	101.4	—	—
	採取コア	152	105.0	37800	0.23
普通基礎梁	テストピース	28	23.8	22300	0.19
	採取コア	233	33.5	26000	0.17

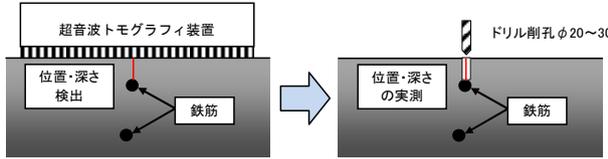


図-4 ドリル削孔による実測方法

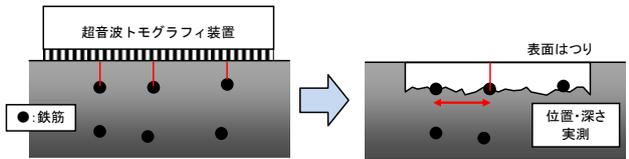


図-5 はつり出しによる実測方法

ラフィ画像とせん断波速度 V_s を取得する。柱 A~C 位置の縦筋を対象に、せん断波の起振周波数 f を 10~100kHz (10kHz 刻み) で変化させ計測を行った。また、基礎 A 位置でも f を 20~100kHz (20kHz 刻み) で変化させ計測を行った。柱 A~C (横筋) 柱 D は周波数をこれまで行ってきた標準値として $f=50\text{kHz}$ に固定した。

実測は既報⁴⁾を参考に、超音波トモグラフィ装置での計測後にドリルでケガキ位置を削孔し、鉄筋位置を実測する方法を用いた。実測のイメージを図-4 に示す。また、各試験体 1 箇所 (図-2 柱 B, 図-3 基礎 A) で、鉄筋のはつり出しを行った。はつり出しによる実測のイメージを図-5 に示す。

3. 鉄筋位置検出結果

3.1 標準周波数による鉄筋の検出結果

実験結果として、鉄筋位置の検出結果について述べる。本節では、既往の実験^{3~4)}と比較するため、せん断波の起振周波数 f を標準値である 40~50kHz と設定し、高強度柱試験体および普通基礎梁試験体の鉄筋かぶり厚さと水平位置の計測を行った。鉄筋位置の実測は 2.3 節の実験方法で示すように、超音波トモグラフィ装置により検出された位置をマーク (写真中の赤線はトレースしたもの) し、対象位置をドリル削孔もしくははつり出しを行った。ドリル削孔後および鉄筋はつり出し後の高強度柱梁試験体の状況を写真-1、写真-2 に示す。削孔およびはつり出し作業時の状況から、計測により求められた鉄筋位置と実測値はおおむね一致していた。

計測装置から出力された結果の例として、高強度柱 (A, C 位置) および普通基礎梁試験体のトモグラフィ画像を

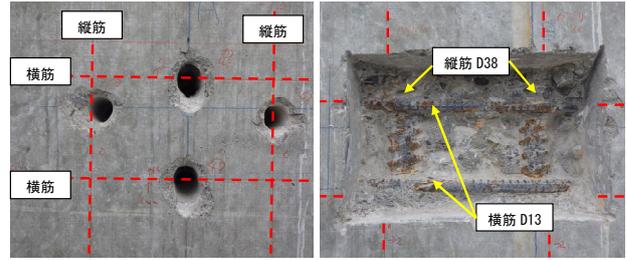


写真-1 ドリル削孔状況 写真-2 はつり出し状況

図-6 に示す。周波数 f は高強度柱が 50kHz、普通基礎梁が 40kHz である。

得られたトモグラフィ画像すべてで、深さ 50~100mm の位置に鉄筋と思われる反応が見られた。また、図-6 で表す高強度柱試験体の深さ 350mm の位置に A 位置で弱い反応 C 位置で強い反応が見られた。これは、深さ約 400mm の位置に A 位置で D13 横筋、C 位置で D13 横筋と D38 縦筋が配置されているためだと考えられる。このことから、配筋量が多い断面でも、深い位置にある 2 段筋の検出が可能であることが確認された。なお、版厚については 1090mm と厚く、鉄筋量も多いため明瞭な反応は得られなかった。次に、標準周波数における鉄筋位置を検出し、既往の研究⁴⁾と比較する。鉄筋のかぶり厚さは、鉄筋径が既知であるとし、式(1)を用いて評価した。

$$d_{ce} = d_{peak} - D/2 \quad (1)$$

d_{ce} : かぶり厚さの計測値 d_{peak} : 鉄筋反応のピーク深さ D : 鉄筋径

各試験体の鉄筋位置計測値と実測値の比較結果を示す。ここで、表-4 は高強度柱試験体、表-5 は普通基礎梁試験体の比較結果を表す。表中の網掛けは、水平位置で誤差が見られた結果を示すもので、誤差 3mm 以下を薄い灰色、誤差が 3mm を超える場合を濃い灰色で表している。また、本実験により得られたかぶり厚さの実測値と計測値の誤差率と実測かぶり厚さの関係を図-7 に示す。グラフ中には、2018 年度の土木学会年次学術講演会にて発表した RC 壁試験体を対象とした既往の実験⁴⁾ (JSCE'18 シリーズとする) の結果も載せている。なお、表中およびグラフ中の誤差率 P の算出は式(2)を用いて行った。

$$P = \left| \frac{d_{ce} - d_c}{d_c} \right| \quad (2)$$

d_c : 実測かぶり深さ

各試験体のかぶり厚さおよび水平位置誤差の計測結果から、実測かぶり厚さが小さくなるにつれて、かぶり厚さの計測値の誤差が大きくなる傾向が見られた。また表中の水平誤差が見られた結果も、実測かぶり厚さ d_c が概ね 50mm 以下の場合である。

誤差率 P - 実測かぶり厚さ d_c の関係 (図-7) から、

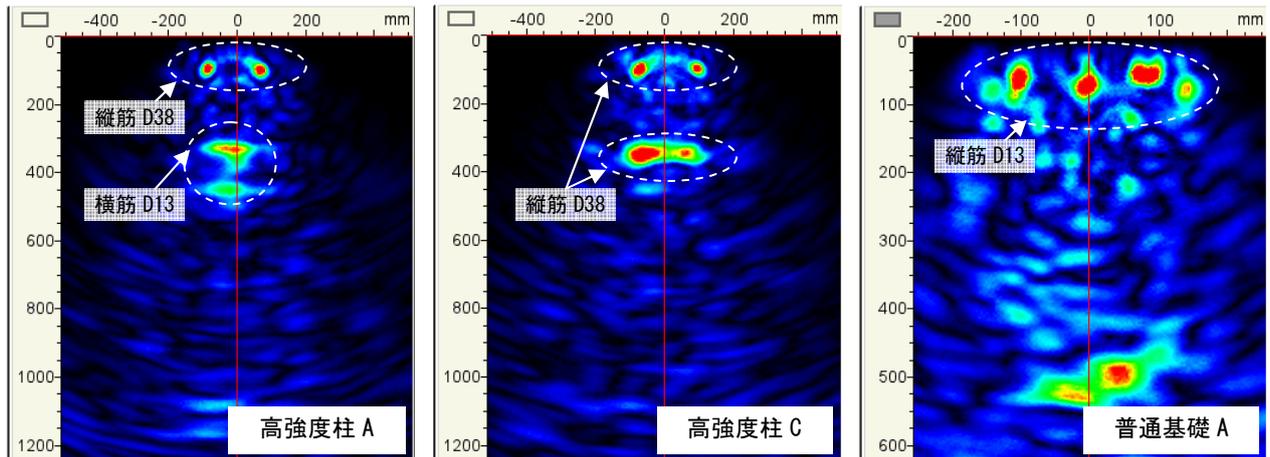


図-6 標準周波数で計測した際のトモグラフィ画像

表-4 高強度柱試験体の鉄筋位置計測・実測値

位置	コンクリート	鉄筋方向 (径)	かぶり厚さ			水平位置 誤差(mm)
			計測(mm)	実測(mm)	誤差率	
柱A	高強度	縦(D38)	66.0	63.0	0.05	0
		縦(D38)	71.0	62.0	0.13	0
		横(D13)	55.5	48.0	0.14	6
		横(D13)	55.5	45.0	0.19	6
柱B	高強度	縦(D38)	71.0	63.0	0.11	2
		縦(D38)	76.0	66.0	0.13	0
		横(D13)	57.0	47.0	0.18	0
		横(D13)	57.0	48.0	0.16	0
柱C	高強度	縦(D38)	76.0	62.0	0.18	0
		縦(D38)	76.0	62.0	0.18	0
		横(D13)	56.0	50.0	0.11	3
		横(D13)	56.5	49.0	0.13	0
柱D	高強度	縦(D38)	71.0	63.0	0.11	0
		縦(D38)	71.0	62.0	0.13	0
		横(D13)	52.0	50.0	0.04	0
		横(D13)	52.0	51.0	0.02	3

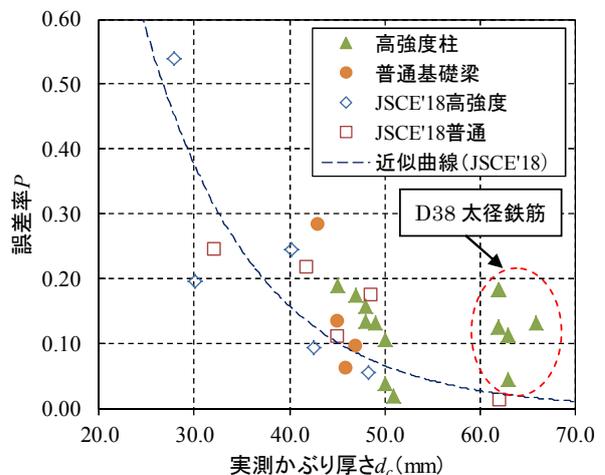


図-7 誤差率-実測かぶり厚さの関係

表-5 普通基礎梁体の鉄筋位置計測・実測値

位置	コンクリート	鉄筋方向 (径)	かぶり厚さ			水平位置 誤差(mm)
			計測(mm)	実測(mm)	誤差率	
基礎梁 A	普通	縦(D13)	49.0	46.0	0.06	4
		縦(D13)	52.0	45.0	0.13	4
		縦(D13)	52.0	47.0	0.10	0
		縦(D13)	60.0	43.0	0.28	-

本実験の結果は JSCE'18 シリーズの結果（白抜きのプロットおよび近似曲線）とほぼ同様の傾向を示した。また、本実験においてもコンクリート強度が誤差率 P に与える影響はほぼ見られなかった。ただし、JSEC'18 シリーズでは誤差がほとんどなかったかぶり厚さ 60mm の領域で、本実験の結果は誤差率 $P=0.05\sim 0.18$ と大きくなった。この要因として、JSEC'18 シリーズの鉄筋は D13 と細径であるのに対し、本実験では D38 と太径の鉄筋が検出対象となっていることが考えられる。太径の鉄筋は、細径と比較してトモグラフィ画像のピーク領域が広く、鉄筋位置の断定が難しい。鉄筋径が計測結果に与える影響については知見が不足しているため、今後の検討課題とする。

3.2 起振周波数が鉄筋検出結果に与える影響

本試験法の適用範囲の検証を行うため、トモグラフィ

装置の起振周波数を変化させ、鉄筋検出結果の周波数依存性を確認した。結果の例として高強度柱試験体 A 位置の $f=10, 30, 80\text{kHz}$ のトモグラフィ画像を図-8 に示す。結果より、 $f=10\text{kHz}$ では深さ方向 1100~1300mm で版厚と思われる反応が見られるものの、解像度が低く鉄筋を検出することはできなかった。周波数 $f=30\text{kHz}$ では深さ方向 50~100mm の領域に鉄筋の反応が見られ、明瞭ではないものの深さ方向 1050~1200mm の領域で版厚と思われる反応が見られた。これに対し、 $f=80\text{kHz}$ の結果では、解像度は高まるものの、骨材境界面からと思われる反射がノイズとして入り、鉄筋位置を検出することができなかった。なお、A 位置の $f=80\text{kHz}$ におけるせん断波速度 V_s は 2730m/s となるため、波の波長 λ は 34mm となる。これは、粗骨材寸法（最大 20mm）の約 1.7 倍である。

さらに、周波数が高いため、透過能力が低く、版厚の反応も見られなかった。この傾向は普通基礎梁試験体でも見られ、鉄筋の検出は $f=40\text{kHz}$ のみで可能だった。以上より、標準とされる周波数 ($f=50\text{kHz}$) 近傍が、標準的な鉄筋コンクリート構造物の診断を行う上で有効なパ

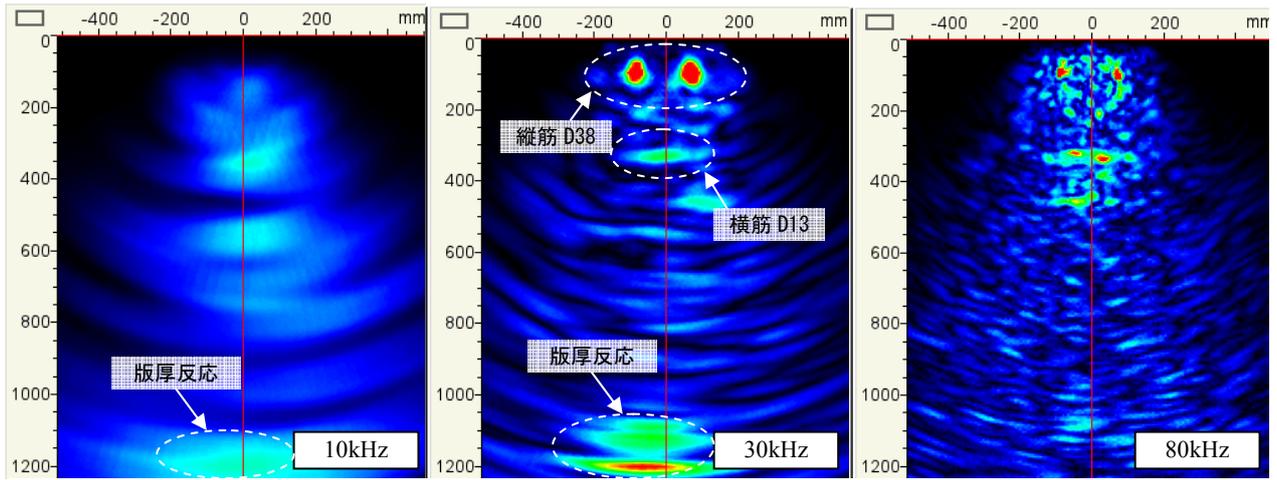


図-8 周波数を変化させた場合の高強度柱試験体 A 位置のトモグラフィ画像

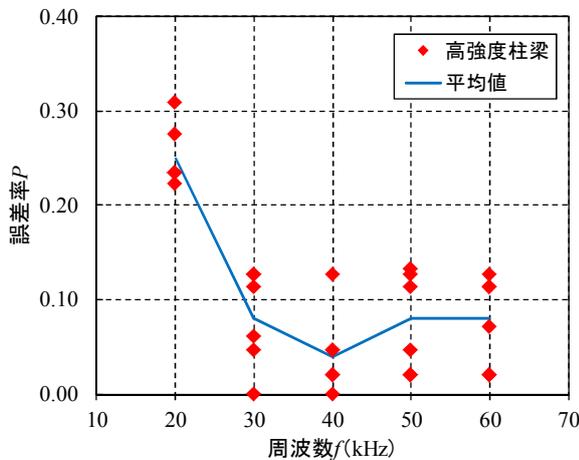


図-9 誤差率 P - 周波数 f 関係

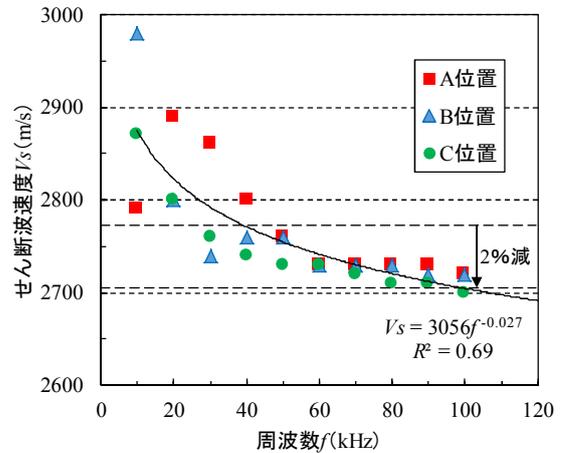


図-10 高強度柱試験体 V_s - f 関係

ラメータであるといえる。

高強度柱試験体の縦筋 (D38) を対象に、鉄筋かぶり厚さ検出の周波数依存性を検証した。検証は、鉄筋の検出が可能だった $f=20\sim 60\text{kHz}$ で行った。誤差率 P -周波数 f 関係を図-9 に示す。結果から、周波数 20kHz で誤差率の平均が 0.25 と大きくなった。これに対し、周波数 f が 30kHz 以上になると、誤差率 P が 0.04~0.08 程度の一定値に収束する傾向が見られた。以上の結果からも、標準的な鉄筋コンクリート構造物の診断では、 $f=50\text{kHz}$ 近傍が適しているといえる。

4.せん断波速度と周波数の関係

4.1 各試験体の計測結果

せん断波の起振周波数を変化させた高強度柱試験体と普通基礎梁試験体を対象に、計測時に得られたせん断波速度 V_s の依存性について検討する。各試験体のせん断波速度 V_s -周波数 f 関係を図-10、図-11 に示す。

高強度柱試験体の結果を表す図-10 では、3 か所の調査位置ごとに色分けをしてプロットを行い、3 か所すべてを対象とした近似曲線 (指数近似) を載せている。また、普通基礎梁試験体の結果を表す図-11 の近似曲線は、

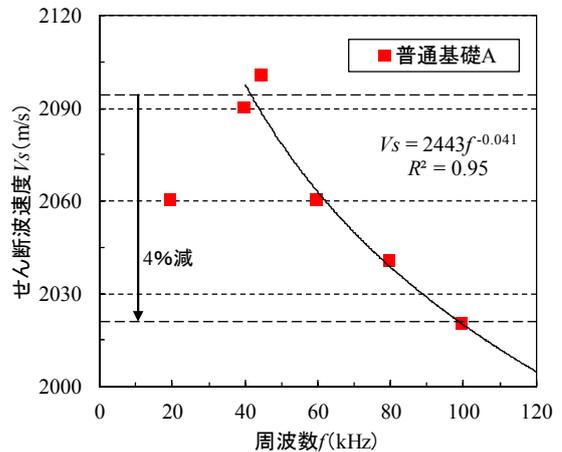


図-11 普通基礎梁試験体 V_s - f 関係

20kHz の結果が他の周波数と異なる傾向を示したため、40kHz 以降の結果を対象に決定した曲線を載せた。

検討結果から、図-10 に示す高強度柱試験体、図-11 に示す普通基礎梁試験体ともに、周波数 f が増加するにつれて、せん断波速度 V_s が低下する傾向が見られた。高強度柱試験体の結果を見ると、周波数が 40kHz 以下の低周波領域で V_s の値のバラつきが大きく、60kHz を超えるとバラつきは小さくなり、 V_s の値も 2700m/s 程度に収束す

表-6 波の伝搬速度と各値の関係

波の伝搬速度	遅 ←————→ 速
含水率	小 ←————→ 大
総有効細孔量	大 ←————→ 小

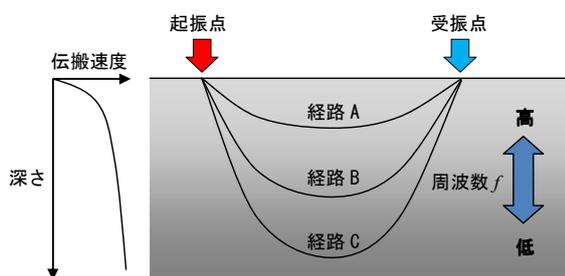


図-12 コンクリート中の弾性波伝搬イメージ

る傾向が見られた。普通基礎梁試験体では、調査を行った 100kHz まで V_s が低下する傾向が見られ、高強度柱試験体のような収束する傾向は見られなかった。

比較的バラつきが小さい領域でのせん断波速度 V_s の低下率を見ると、図-10 の高強度柱試験体で、 $f=100\text{kHz}$ の V_s は 40kHz に対して 2%、図-11 の普通基礎梁試験体で 4% 程度低下した。また、近似曲線の指数部分も高強度柱が -0.027 に対し、普通基礎梁は -0.041 と小さいことから、高強度コンクリートよりも普通コンクリートの方が V_s の低下率は大きいことが分かる。

4.2 せん断波速度と周波数の依存性に関する考察

高強度コンクリートおよび普通コンクリートで構成された試験体のせん断波速度-周波数関係から、高周波になるにつれてせん断波速度が低下する現象が確認された。その要因について考察する。

一般に、コンクリートは脱型後から表面が乾燥し、含水率が低下する。また、有効細孔量分布も表面になるにつれて大きくなり、細孔構造が粗いコンクリートとなる。その範囲は、水セメント比 60% 程度の普通コンクリートでは表面から 5cm 程度の範囲であり、それより深い範囲では概ね一定値となる⁵⁾。また、緻密な高強度コンクリートの場合、含水率の低下領域、有効細孔量が大きくなる領域は、普通コンクリートよりも浅くなる。

コンクリート中を伝搬する弾性波と含水率および総有効細孔量の関係は表-6 のようになる⁶⁾。以上の関係から、コンクリート内部を伝搬する波は図-12 の模式図のように、伝搬経路により速度が異なる。波の伝搬速度は、表面よりも内部の方が大きいため、経路 C > 経路 B > 経路 A の関係となる。

本論の検討より、コンクリート中を伝搬するせん断波速度 V_s と周波数に依存性があることが確認された。その要因として、周波数が高くなるにつれてコンクリート中を伝搬する波の振動領域が狭くなり、表面側を伝搬することが考えられる。現段階ではデータが不足しているた

め、傾向と考えられる要因を示し、詳細は今後の検討課題とする。

5. まとめ

本論では、高強度および普通コンクリートで構成された試験体を対象に、超音波横波トモグラフィ装置を用い、鉄筋位置検出精度およびせん断波速度 V_s と周波数 f の関係について調査した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 標準周波数 ($f=50\text{kHz}$) にて鉄筋位置の検出精度を検証した結果、実測かぶり厚さの増加に伴い誤差率 P が低下した。これは既報の実験結果と同一の傾向である。
- 2) 周波数の低下に伴い、かぶり厚さの誤差率が増加する傾向が見られたが、 $f=30\text{kHz}$ 以上の領域では誤差が概ね一定値に収束した。また、周波数の増加に伴い、骨材境界からの反射と思われるノイズ成分が増加し、 $f=70\text{kHz}$ を超えると鉄筋位置の検出ができなくなった。
- 3) 周波数 f を高くすると、高強度および普通コンクリート試験体ともにせん断波伝搬速度 V_s の値が低下する傾向が確認された。周波数 f とせん断波速度 V_s の相関性は、コンクリート中の振動領域の違いが影響していることが考えられる。

参考文献

- 1) 坂本 浩之, 三上 創史, 牛島 栄: 超音波トモグラフィ・非破壊検査装置を用いたコンクリート構造物の調査事例, セメントコンクリート, No.810, pp.50-58, 2014.8
- 2) 土木研究所・日本非破壊検査協会: 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル, pp.141-148, 2010.8
- 3) 新井 佑一郎, 坂本 浩之, 三上 創史, 佐藤 俊男, 牛島 栄: 超音波横波トモグラフィ装置によるコンクリート内部調査事例, 土木学会 第 72 回年次学術講演梗概集, pp.509-510, 2017.9
- 4) 新井 佑一郎, 坂本 浩之, 三上 創史, 牛島 栄: 超音波横波トモグラフィ装置による配合が異なる RC 壁の鉄筋探査事例, 土木学会 第 73 回年次学術講演梗概集, pp.343-344, 2018.8
- 5) 湯浅 昇, 笠井 芳夫, 松井 勇: 乾燥を受けたコンクリート表面から内部にわたる含水率・細孔構造の不均質性, 日本建築学会構造系論文集, 509 号, pp.9~16, 1998.7
- 6) 湯浅 昇: 非(微)破壊試験のための構造体コンクリートの物性解説, 日本非破壊試験協会, 非破壊検査, Vol.53, No.9, pp.538~544, 2005.9