

# 論文 コンクリートの超音波伝播に関する数値解析的研究

吉田秀典<sup>\*1</sup>・高橋恵介<sup>\*2</sup>・堺孝司<sup>\*3</sup>・山下英俊<sup>\*4</sup>

要旨：コンクリートの品質評価やひび割れ深さの同定に、非破壊検査法の一つである超音波の利用が試みられてきた。しかしながら、超音波がコンクリート中をどのように伝播しているのかが不明であることに加え、境界条件や内部状況が超音波の伝播にどのような影響を及ぼすかについても、依然として明らかにされていないのが現状である。本研究では、コンクリートの超音波伝播試験を行うと同時に、その伝播状況を解析的に視覚化することを目指し、数値解析的な検討を行った。検討の結果、波は境界上で、あるいは境界に達した後に複雑な伝播をすることなどが判明した。

キーワード：非破壊検査，超音波，可視化，有限要素解析

## 1 はじめに

近年、社会基盤整備における資源の有効利用の観点とその重要性を増している。適切な維持管理の下におけるコンクリート構造物の長寿命化は資源効率の究極の形である。また、コンクリート構造物に関する性能照査型設計法が一般的になりつつあるが、この設計法では構造物の安全性や耐久性をある前提条件の基で照査することになるので、それらの前提条件が実際に確保されているかどうかを「検査」することが重要となる。

こうした命題を満たすための手段として有力視されている技術の一つが非破壊検査である。コンクリートに関する非破壊検査方法としては、X線探査・RCレーダーなど様々な方法が存在するが、弾性体中を伝播する波動を用いる超音波法も有力な方法と考えられ、研究がされてきた<sup>1), 2)</sup>。しかし、弾性波がコンクリート中を伝播し、傷あるいは不連続部に差し掛かると、そこで弾性波は反射、散乱、回折、干渉などが複雑に発生することに加えて、コンクリートそのものがセメント水和生成物、骨材、および空気泡からなる複合材料であることなどにより、測定結果に

バラツキが生じることが多く、この手法の適用限界を形成してきた。

山下・堺ら<sup>3)</sup>はこれまで超音波によるコンクリートの品質評価手法を提案し、一定の条件下においてその有効性を明らかにしてきた。しかし、コンクリート中の様々な状況あるいは境界条件などの弾性波伝播への影響などについては大きな課題として残されていた。こうした問題を解決するためには、超音波伝播の基本的なメカニズムを把握し、その有効性の条件、適用性の範囲について明らかにすることが必要となる。

そこで本研究では、コンクリートの品質評価手法としての超音波法の適用範囲拡大と信頼性向上を念頭に置き、コンクリート中における超音波の伝播挙動について、実験および数値解析により検討することにした。

## 2 超音波法

超音波を用いた非破壊試験法には、反射波や透過波を使って材料内の不連続部などを調べる探傷法と、超音波の減衰、音速および周波数の変化を利用して、材料組成あるいは弾性係数などの物性および応力状態を調べる方法がある。超

\*1 香川大学助教授 工学部安全システム建設工学科 博(工)(正会員)

\*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科 学生

\*3 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博(正会員)

\*4 ハザマ技術研究所 技術研究部 博(工)(正会員)

表-1 コンクリート角柱供試体の配合

W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		水	セメント	細骨材	粗骨材		高性能	AE 剤
		W	C	S	G1	G2	AE 減水剤	
55	49.1	180	327	858	441	439	1.10 %	0.001% C

音波は検査目的や対象物によって、周波数が1～5kHzの低周波域から1GHzの高周波域まで広範囲にわたって使用され、各種金属材料、セラミックス、複合材料、半導体、コンクリートなど、広く適用が図られている。

材料中を伝播する音波の速度は材料の弾性係数と相関があり、理論的には以下のように定義されている。

$$C = \sqrt{\text{体積弾性率}/\text{密度}} \quad (1)$$

例えば、固体中における縦波の速度  $C_L$  は

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

ここで、 $E$  は縦弾性係数、 $\nu$  はポアソン比である。一方、横波の音速  $C_s$  は

$$C_s = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (3)$$

である。ここで、 $G$  は横弾性係数である。

ただし、コンクリートには骨材などが混入されている他に、乾燥収縮やクリープの進行、マイクロクラックの発生、さらには中性化やアルカリ骨材反応が生じている場合もあるため、密度、強度、弾性係数が均一でない複合構造であると言える。そのため、超音波による測定にあたっては、特に伝播経路などについて留意する必要がある。したがって、コンクリート中の超音波伝播機構の解明には、こうしたの影響を総合的に捉えることが重要であるが、本研究ではまず第一段階として、周波数に着目して検討することにした。

### 3 超音波伝播実験

実験に用いた角柱供試体(100mm×100mm×400mm)の材料は、セメントに普通ポルトラン

ドセメント、細骨材に香川県塩江産砕砂、粗骨材に徳島県市場産砕石を用い、混和剤としてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤および AE 剤を添加した。配合を表-1に示す。また、フレッシュコンクリート試験より求まるスランブおよび空気量と、円柱供試体(3体)を用いた圧縮試験より求めた静弾性係数を表-2に示す。

表-2 実測値

スランブ (cm)	空気量 (%)	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
19	4.2	25800	$2.3 \times 10^{-6}$	40.7

超音波伝播速度の測定は、超音波測定器を用いて行った。超音波センサ(探触子)には周波数28kHzのものを採用し、コンクリート表面へはグリースを塗布した上で設置した。なお、この探触子はコンクリートのひび割れ深さ、コンクリートの厚さ、そして音速を計測するためのもので、波形を受信し、記録できるものではない。また、探触子(直径が13mm)の中心部にて超音波を感知することから、速度測定に用いる距離としては、2つの探触子の中心間距離となる。

前述の通り、本稿ではコンクリート中における超音波の伝播特性について検討することを目的としているので、ひび割れなどのない供試体における音速計測の実験を行い、伝播時間の測定を行った。今回の実験では、図-1に示すBおよびDに受振子を置いた。両点における超音波の伝播時間、およびそれを基に計算される伝播速度を表-3に示す。本実験で用いたセンサのマニュアルによれば、表面における(本研究ではDにおける)速度は、表面以外における速度より3%程度遅く出力されるとあるが、本実験においてもD点における速度はB点と比較して2.3%遅

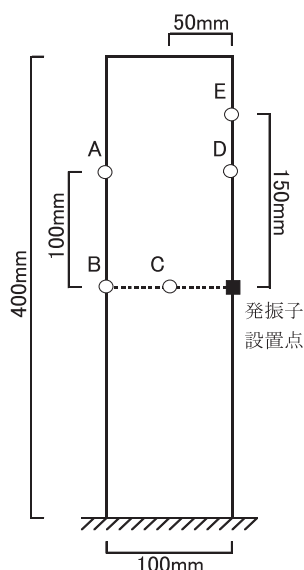


図-1 供試体の概要

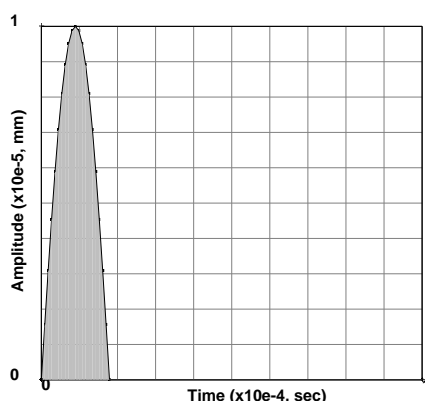


図-2 入力波形 (28kHz)

く計測されている。また、コンクリートのポアソン比を0.2と仮定し、式(2)より動弾性係数を求めると  $35,400 \text{ N/mm}^2$  となり、これは静弾性係数の約1.38倍である。文献<sup>4)</sup>によれば、動弾性係数と静弾性係数の比はおよそ1.04~1.37倍と報告されているが、本実験においてもこれに近い値となった。

#### 4 超音波伝播解析

本解析では、厚さ方向に拘束のない2次元平面応力を仮定し、超音波は図-2に示すように、パルス波を発振子に相当する位置(図-1の右端中央)にサイン波の半波長を圧縮波として与え、受振子に相当する位置であるB、Dの他に図中のA、C、Eにおいて変位を出力した。なお、床と接している底面は、実験でも変位を拘束しているこ

表-3 超音波伝播速度(実験)

	距離 (m)	時間 ( $\mu\text{s}$ )	速度 (m/s)
B	0.1	24.1	4150
D	0.1	24.4	4100

表-4 コンクリートの解析パラメータ

動弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )	ポアソン比	密度 ( $\text{kg/mm}^3$ )
35400	0.2	$2.3 \times 10^{-6}$

とから、解析においても変位固定とした。本研究で用いたセンサによるひび割れ深さの測定では、ひび割れ深さに応じて波の周波数を28kHzあるいは200kHzに設定して入力することから、本解析でもこの2種類を用いた。この際に両者の入力エネルギーが同じになるように設定した。図-2は周波数が28kHzのケースの入力パルスである。またコンクリートの解析パラメータについては、円柱供試体を用いた圧縮試験を参考に決定した。その諸元を表-4に示す。なお、本研究では問題を単純化するために、超音波の減衰や骨材などの影響については考慮していない。

解析では、図-1に示す各点(AからE)において各種変数をピックアップし、整理を行った。周波数が28kHzのケースにおける変位応答を図-3から図-7に、周波数が200kHzのケースにおける変位応答を図-8から図-12にプロットした。ただし、 $y$ 軸は、変位応答の振幅を入力波の最大振幅で除し、正規化した応答である。

周波数が28kHzの場合、A、B、Cの各点では波の到達などが明確であり、発振子からの距離の順に波が到達していることが分かる。ただし、BとCにおいては、初波が到達したすぐ後に最大波が到達しているのに対し、Aにおいては初波の到達より暫くしてから大きな波が到達しており、伝播の傾向が異なる。また、DとEに関しては明らかに上述した3点と傾向が異なり、小さな振幅を数回繰り返した後に、大きな引き波が到達していることが分かる。この状況を説明する目的で、Dを除く各点に初波が到達した時刻における変位分布図を図-13から図-16に示す。

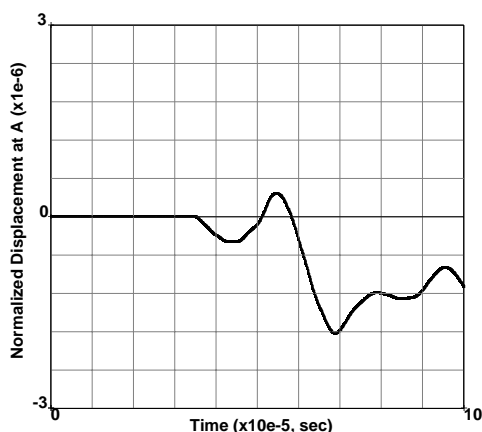


図-3 変位応答 (A点, 28kHz)

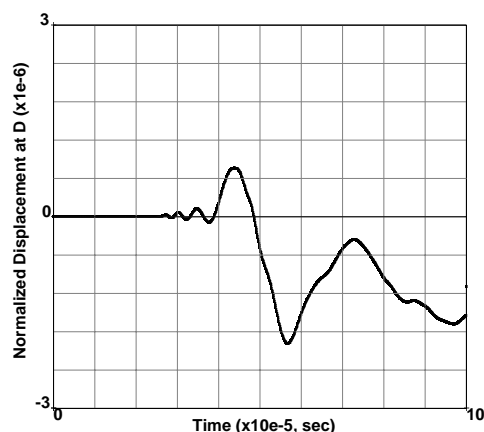


図-6 変位応答 (D点, 28kHz)

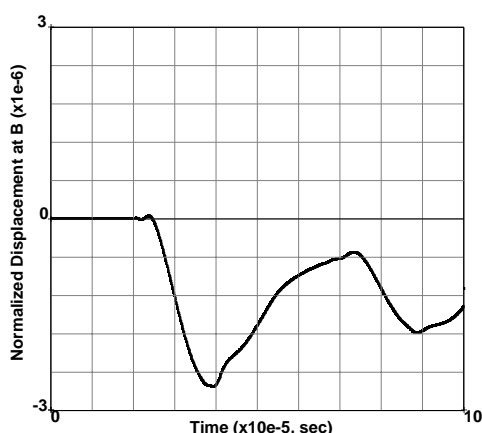


図-4 変位応答 (B点, 28kHz)

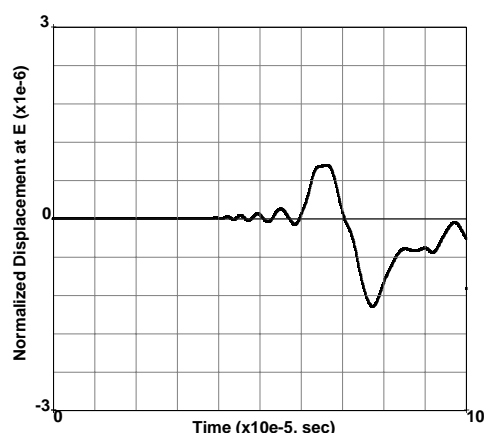


図-7 変位応答 (E点, 28kHz)

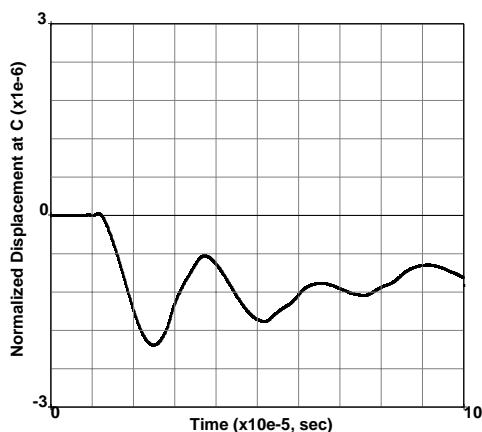


図-5 変位応答 (C点, 28kHz)

なお、図は発振子に近いC、B、A、Eの順に並べている。図より、CおよびBには反射などの現象が無い状態で波が到達しているが、A点に初波が到達した時刻では、既に波が左端で折り返しをしており、波の状態が複雑であることが分かる。Eに初波が到達する頃には、さらに波は複雑な様相を呈している。各点において変位応答が大きく異なるのは、こうした波の伝播の複雑

さに原因があると思われる。これらの結果を基に計算した伝播速度を表-5に示す。ここで、A、B、Cに関しては、初波到達した時間を基に伝播速度を計算したが、DとEに関しては、初波到達の判定が難しいことから、最大の引張波が伝播するまでの時間（最大の引張波の到達時刻 - 入力における最大振幅波の入力時刻 ( $0.90 \times 10^{-5}$  s))を距離で除したものを計算した。このような処理をした理由を以下に述べる。発振子を設置した箇所で圧縮波を与えた場合、本来、初波も圧縮のP波が到達する。A、B、Cでは圧縮のP波が明瞭であるが、D、Eではそれが不明瞭である。また、理論的には、D、Eでは非常に小さなP波しか伝わらない。そこで、D、Eについては、P波の後にくるであろうS波（本解析の場合、引張波になる）に着目をした。その結果、A、B、Cにおける速度は約4100 m/sで、これは前章で計算した理論値に近い。また、DおよびEにおける速度は約2700 m/sで、これは式(3)から求

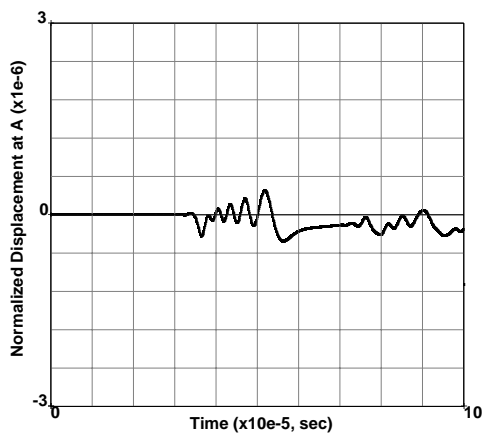


図-8 変位応答 (A点, 200kHz)

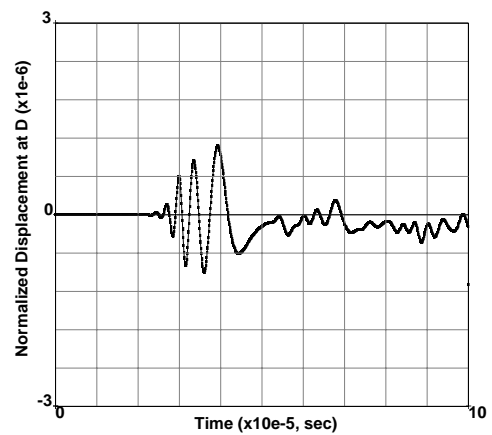


図-11 変位応答 (D点, 200kHz)

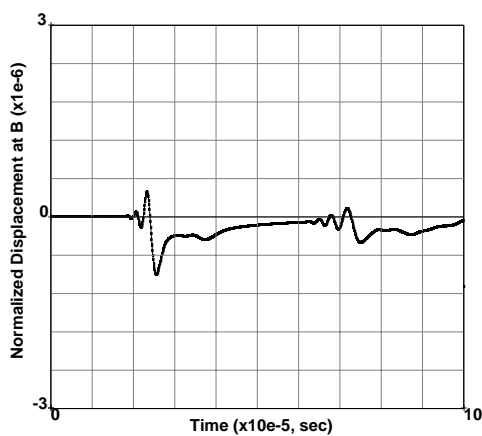


図-9 変位応答 (B点, 200kHz)

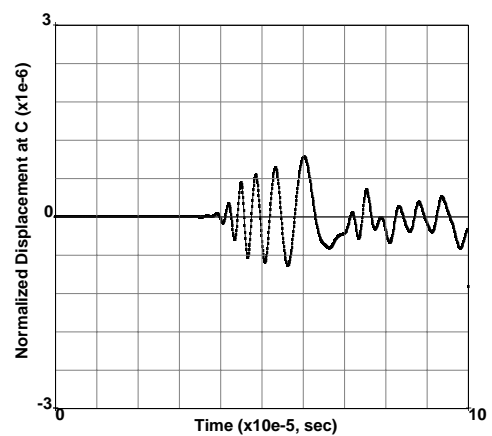


図-12 変位応答 (E点, 200kHz)

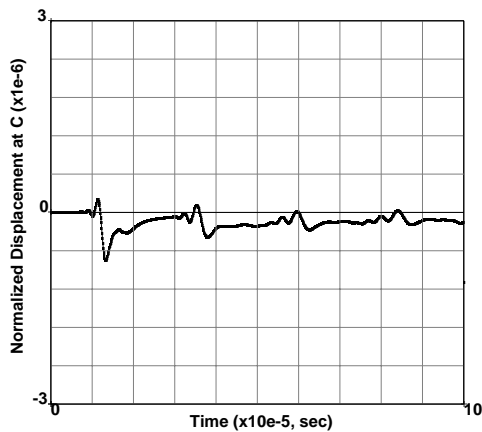


図-10 変位応答 (C点, 200kHz)

まる S 波の理論値 (2540 mm/s) に近い。これより、D および E では明確な P 波の到達が確認できない一方、P 波よりも速度の遅いが、把握可能な S 波を用いた速度計測も可能と思われる。

周波数が 200kHz の場合、周波数が 28 kHz に比べて、全体的に変位応答が小さいことが分かる。例えば、周波数が 28 kHz の場合、境界上にある B では変位が大きく増幅される形となって

いるのに対し、周波数が 200kHz の場合、そうした増幅は見られない。また、周波数が 28 kHz の場合と異なって、B や C においても、初波が到達した後に最大振幅を迎えるという傾向がなく、最大振幅を迎える前にいくつかの小波が存在する。200kHz 場合も、B と C、A、そして D と E という 3 つにグループ分けができ、それぞれのグループ内では波形は似ているが、グループ間においては全く異なった変位応答を示している。紙面の都合上、200kHz については変位分布図を示すことができないが、ほぼ、28kHz の場合と同様のことが言える。200kHz の場合は、図中から初波の到達を読み取ることが難しいので、28kHz における D および E と同じ解釈で、最大振幅が到達するまでの時間を計算し、それを基に速度計算を行った。その結果を表-6 に示す。これより、A、B、C においては最大振幅を含む波から P 波の速度が得られ、また、D および E においては S 波の速度が得られていることが分かる。

表-5 超音波伝播速度：28kHz

測点	距離 (m)	初波到達時間 ( $\times 10^{-5}$ s)		伝播速度 (m/s)
A	0.141	3.48		4050
B	0.100	2.45		4080
C	0.050	1.22		4100

測点	距離 (m)	最大引張波 到達時刻 ( $\times 10^{-5}$ s)	最大引張波 伝播時間 ( $\times 10^{-5}$ s)	伝播速度 (m/s)
D	0.100	4.36	3.46	2890
E	0.150	6.60	5.70	2630

表-6 超音波伝播速度：200kHz

測点	距離 (m)	最大波 到達時刻 ( $\times 10^{-5}$ s)	最大波 伝播時間 ( $\times 10^{-5}$ s)	伝播速度 (m/s)
A	0.141	3.65	3.53	3990
B	0.100	2.55	2.43	4120
C	0.050	1.33	1.21	4130
D	0.100	3.92	3.80	2630
E	0.150	6.02	5.90	2540

## 5 まとめ

本研究は、コンクリートの品質評価やひび割れ深さの同定に超音波法を適用することを念頭において、実験および数値解析なアプローチにより、コンクリート中の超音波伝播機構に関して検討を行った。解析より、周波数が200kHzの場合、周波数が28kHzに比べて全体的に変位応答(出力)が小さく、実験などでは信号情報が欠落する可能性が高いことや、波は境界上あるいは境界に達した後に複雑な伝播をすることが判明した。特に後者に関しては、受振子を置く場所によって得られる出力が異なることを示唆しており、出力波形を基にコンクリート内部の状態を解釈する際には注意が必要である。今後は、さらに伝播機構の解明を進めると同時に、ひび割れ深さなどの同定に超音波法を適用するケースを想定し、超音波測定の可能性や限界などについて検討を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 岩波光保, 大即信明, 二羽淳一郎, 鎌田敏郎, 長瀧重義: コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No627/V-44, pp.223-238, 1999

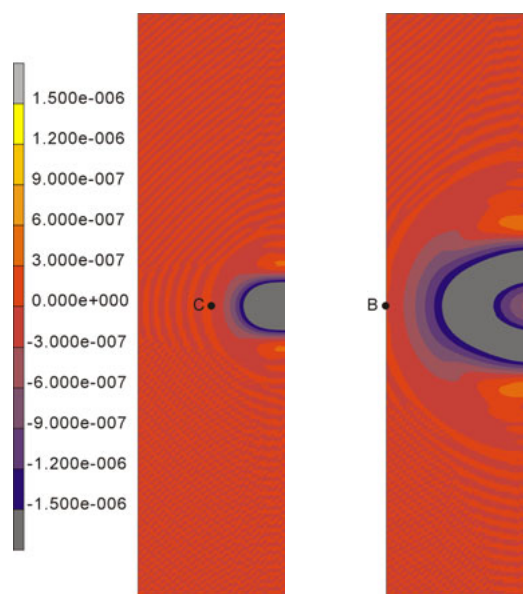


図-13 変位分布(C点) 図-14 変位分布(B点)

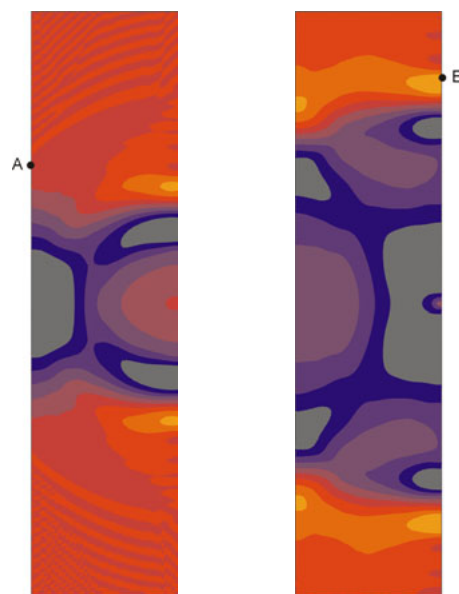


図-15 変位分布(A点) 図-16 変位分布(E点)

- 2) 渡辺健: コンクリートの弾性波動理論欠陥評価に関する研究, 学位論文(熊本大学), 2001
- 3) 山下英俊, 堺 孝司, 熊谷守晃, 喜多達夫: 超音波伝播速度に及ぼす骨材の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol23, No1, pp.583-588, 2001
- 4) 小林一輔, 森弥広: ASRを生じたコンクリートの動弾性係数および超音波伝播速度に関する一考察, 土木学会論文集, 第420号/V13, pp.245-250, 1990