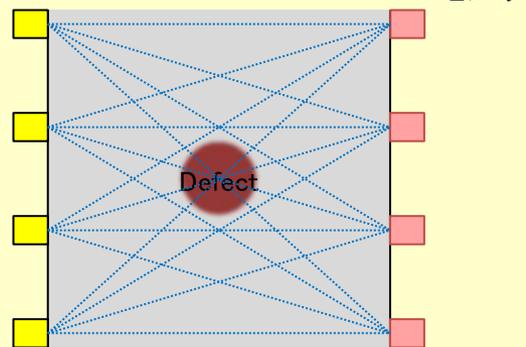




# トモグラフィ手法を用いた 調査・診断

## 弾性波に基づくトモグラフィの種類と違い

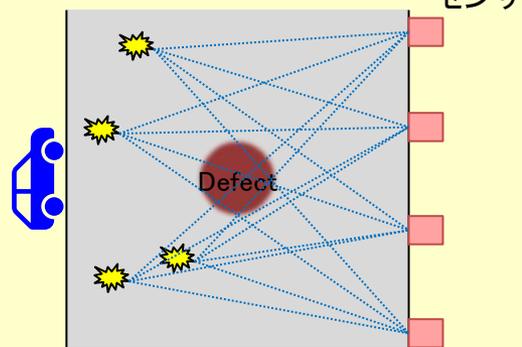
【弾性波トモグラフィ】



センサ

縦波の伝達時間から速度構造を評価  
(入力位置および発信時間が必要)

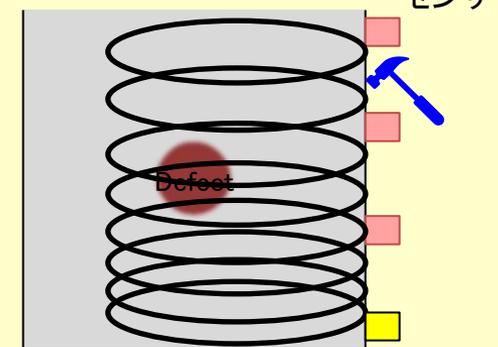
【AETモグラフィ】



センサ

縦波の伝達時間から速度構造を評価  
(入力位置および発信時間が不要)

【表面波トモグラフィ】



センサ

表面波伝達時間から入力周波数に応じた深さ部分の評価

- ◆ トモグラフィ手法として、弾性波の励起(発信)により3種類がある
- ◆ トモグラフィ法の特徴として、空隙や劣化, 損傷等の影響を受けると、弾性波の到達時間が健全時より遅くなることを利用して評価している
- ◆ 弾性波の時間だけでなく、エネルギーの減衰を利用したりと他のパラメータを用いることもある

## 2.2 表面波トモグラフィの適用現場

### 地下構造物のひび割れを対象

計測場所は、ボックスカルバートの側壁600x600mmで、鉛直方向に0.2mm程度のひび割れが生じているが、漏水は発生していない。調査箇所を図に示す。



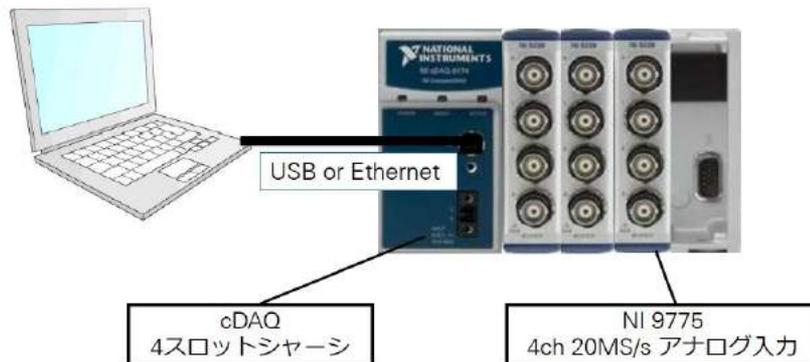
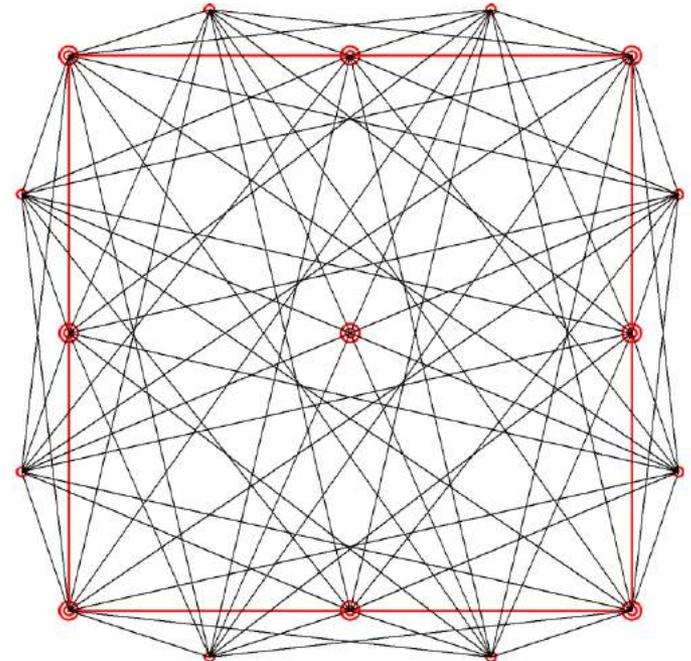
□ 調査範囲  
— ひび割れ

図-調査箇所

## 2.3 表面波トモグラフィの概要

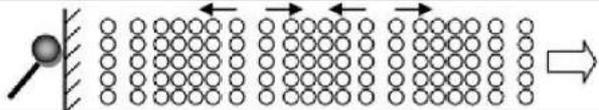
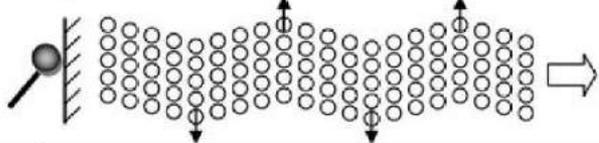
### 計測装置-収録装置

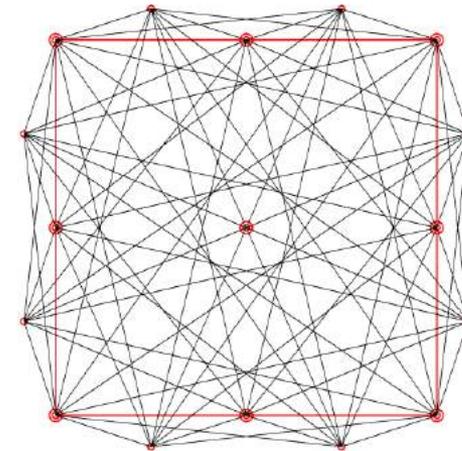
- ・BNC接続
- ・SN比68 dBで最大20 MS/秒/chの分解能計測(サンプリング間隔: 50nsec)
- ・SN比74 dBで最大5 MS/秒/chの分解能計測
- ・14ビットの分解能
- ・アナログ基準トリガを内蔵



- 調査範囲
- 発信点
- ◎ 受信点
- 波線

## 着眼する波

(a) 縦波 (P波) : 波の進行方向と同じ方向に振動	
(b) 横波 (S波) : 波の進行方向と垂直方向に振動	
(c) 表面波 (レイリー波) : 表面に鉛直、楕円状に振動	

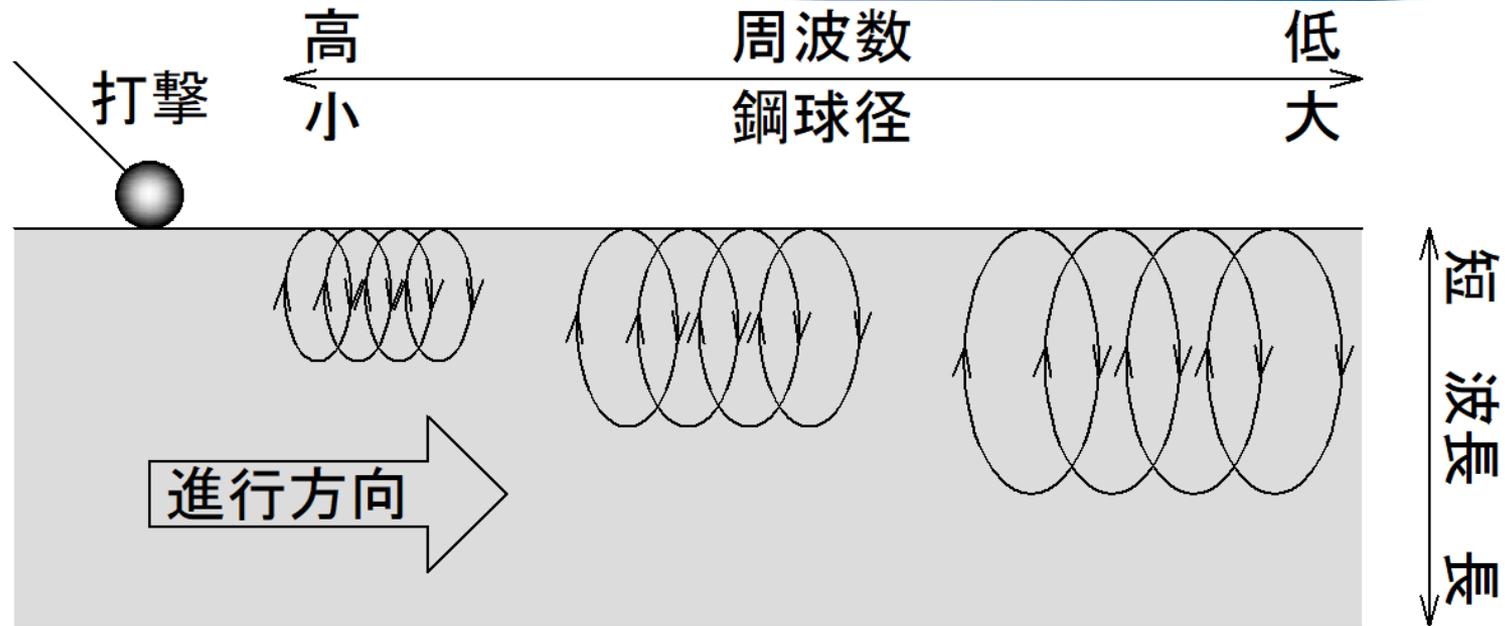


- 調査範囲
- 発信点
- ◎ 受信点
- 波線

- ◆ 弾性波の成分のなかで表面を伝播するレイリー波に着目
- ◆ レイリー波は縦波と横波の混合波で、粒子の振動は進行する面に対して直角方向に楕円状を描きながら伝播することが知られている

## 2.5 表面波トモグラフィの概要

### 表面波トモグラフィの概要

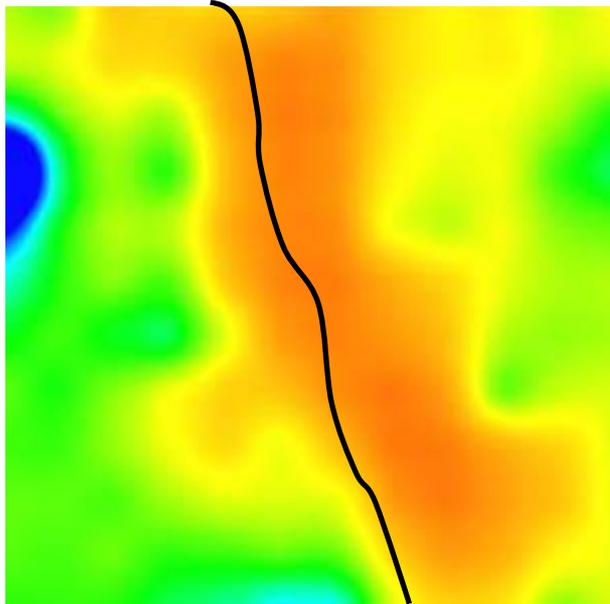


鋼球を打撃した場合の接触時間は、既往の実験式より、 $TC=0.0043D$ を採用。  
この接触時間×2を1波長として周波数及びレイリー波の1/2波長を、速度を2,400m/sと仮定して計算すると、  
下表の通りとなる。

鋼球直径 (m)	接触時間 $T_c$ ( $\mu s$ )	重心周波数 (kHz)	レイリー波の1/2波長(mm)
0.003	12.90	38.8	31.0
0.010	43.00	11.6	103.2
0.020	86.00	5.8	206.4

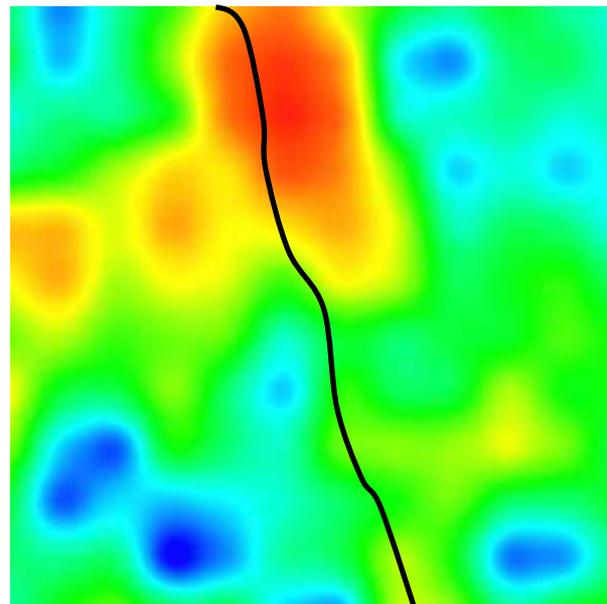
## 2.6 表面波トモグラフィの結果

### 解析結果- 入力鋼球径による比較



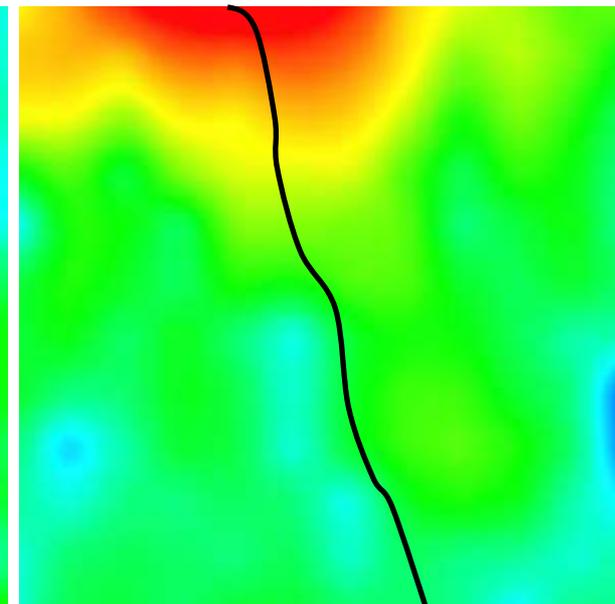
CASE3 : D3

影響を受ける深さ:31mm



CASE4 : D10

影響を受ける深さ:103mm



CASE5 : D20

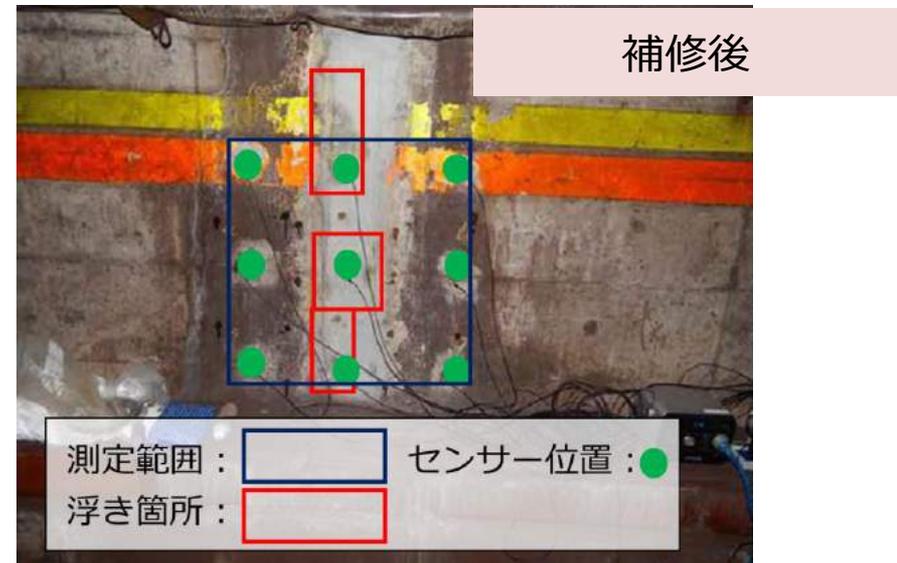
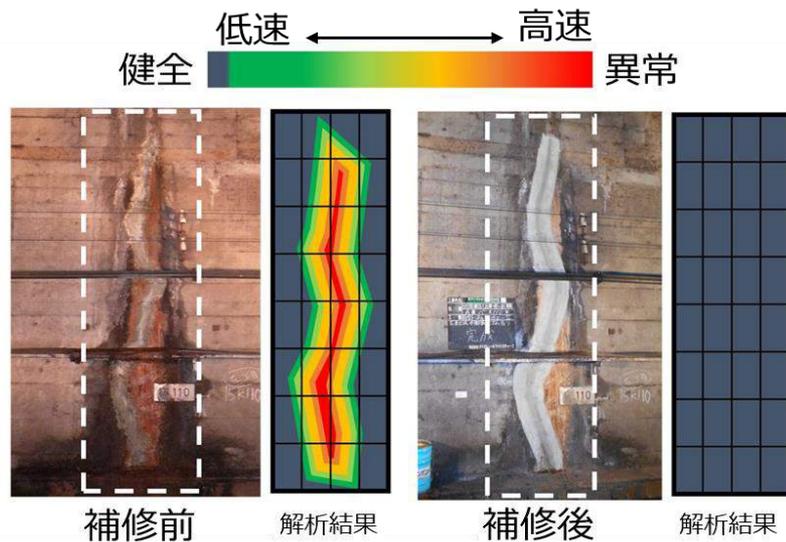
影響を受ける深さ:206mm

鋼球を分けて、深度方向を評価した。今回の結果では、ひび割れは閉塞している可能性が高いのでは。

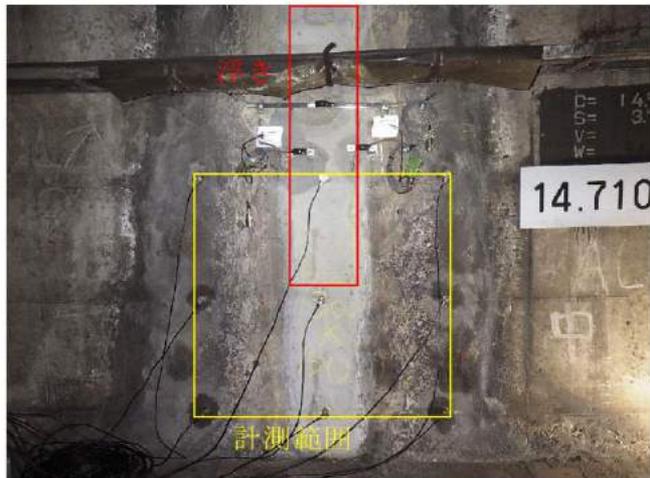
# 2.7 補修後のモニタリング

## 適用事例

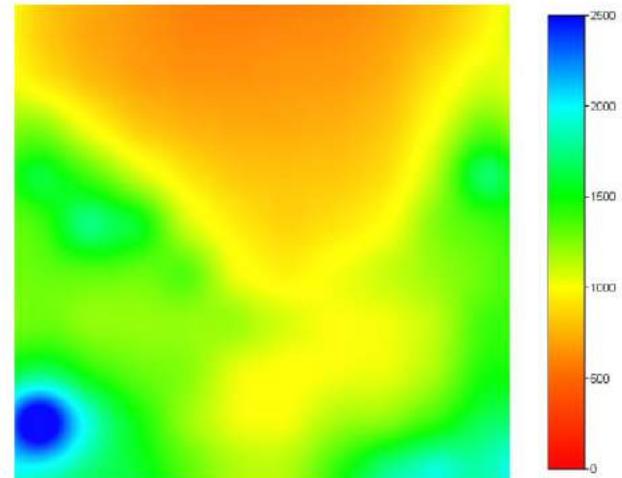
### 補修後で確認, モニタリング



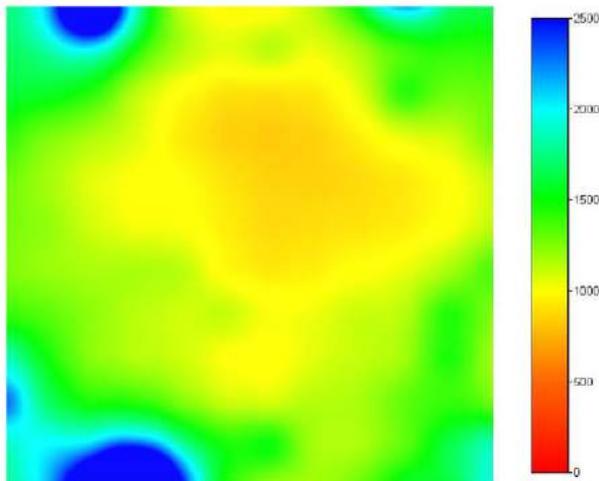
# 2.8 補修後のモニタリング



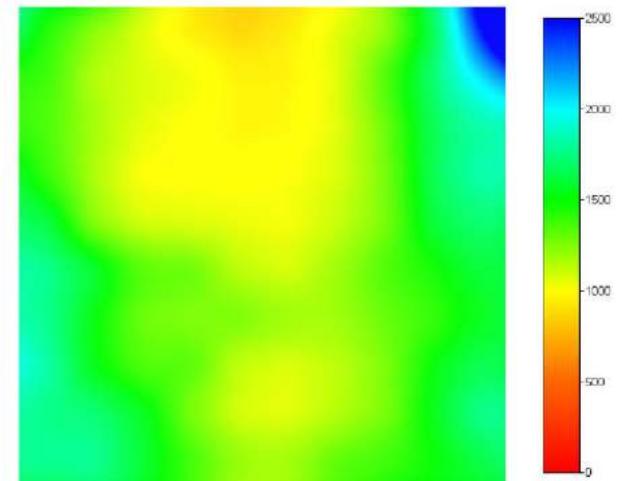
外観状況



D10mm 深さ103mmまで



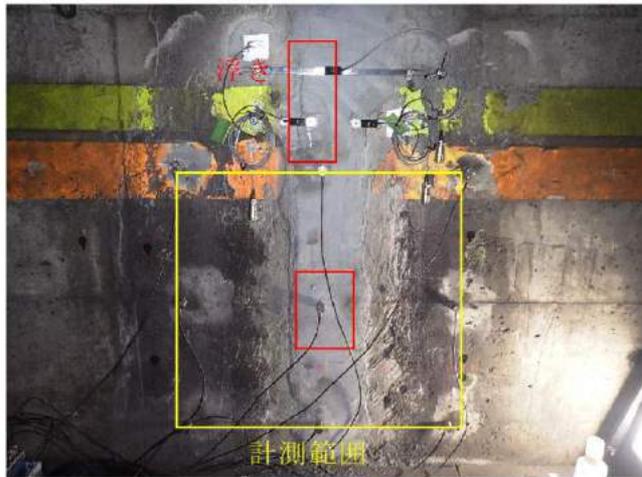
過年度トモグラフィ結果 (D10)



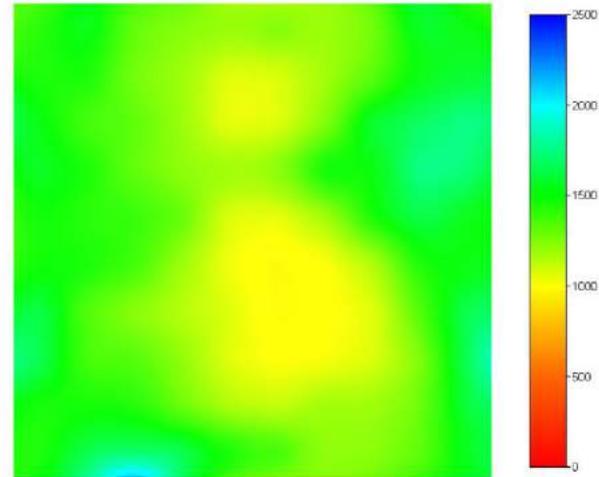
D5 深さ52mmまで

図-3.2.1 AEトモグラフィ解析結果 (千代田線A線14k710m)

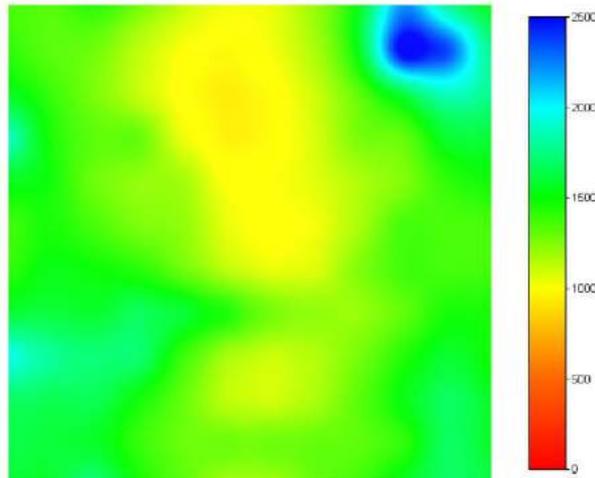
# 2.9 補修後のモニタリング結果



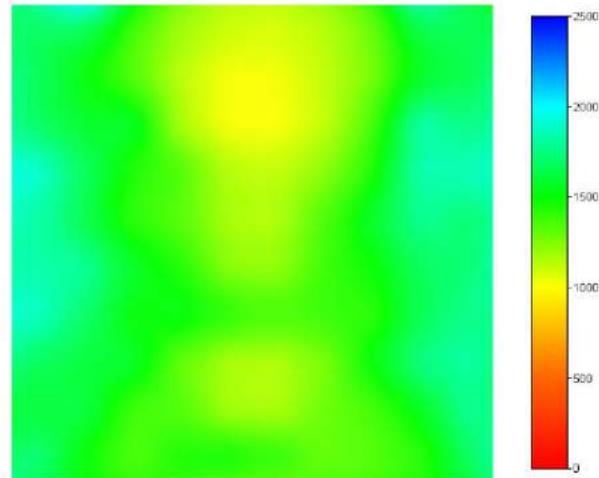
外観状況



D10mm 深さ103mmまで



過年度トモグラフィ結果 (D10)

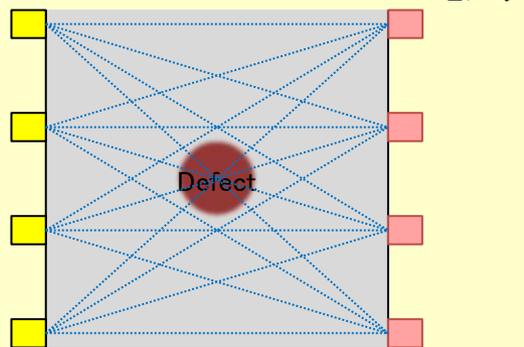


D5 深さ52mmまで

図-3.2.2 AEトモグラフィ解析結果 (千代田線A線15k175m)

## 弾性波に基づくトモグラフィの種類と違い

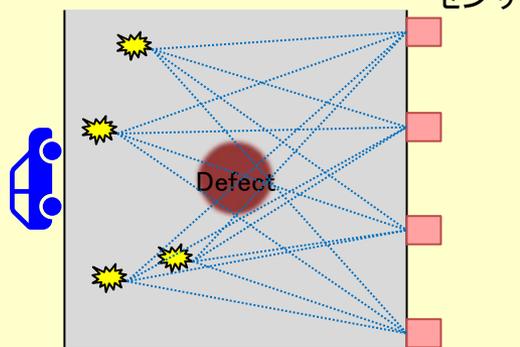
【弾性波トモグラフィ】



センサ

縦波の伝達時間から速度構造を評価  
(入力位置および発信時間が必要)

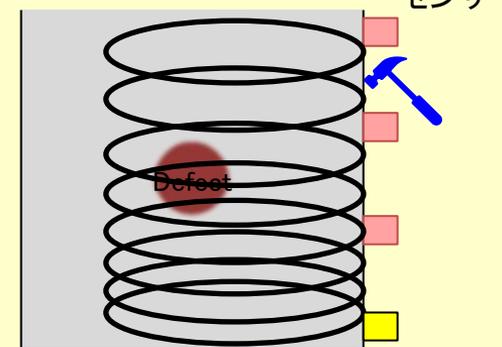
【AETトモグラフィ】



センサ

縦波の伝達時間から速度構造を評価  
(入力位置および発信時間が不要)

【表面波トモグラフィ】



センサ

表面波伝達時間から入力周波数に応じた深さ部分の評価

- ◆ トモグラフィ手法として、弾性波の励起(発信)により3種類がある
- ◆ トモグラフィ法の特徴として、空隙や劣化, 損傷等の影響を受けると、弾性波の到達時間が健全時より遅くなることを利用して評価している
- ◆ 弾性波の時間だけでなく、エネルギーの減衰を利用したりと他のパラメータを用いることもある

# 2.11 弾性波トモグラフィ法の改良 (ASR調査での適用)



図 調査箇所全景(A2橋台)

# 2.12 調査箇所

正面図

側面図

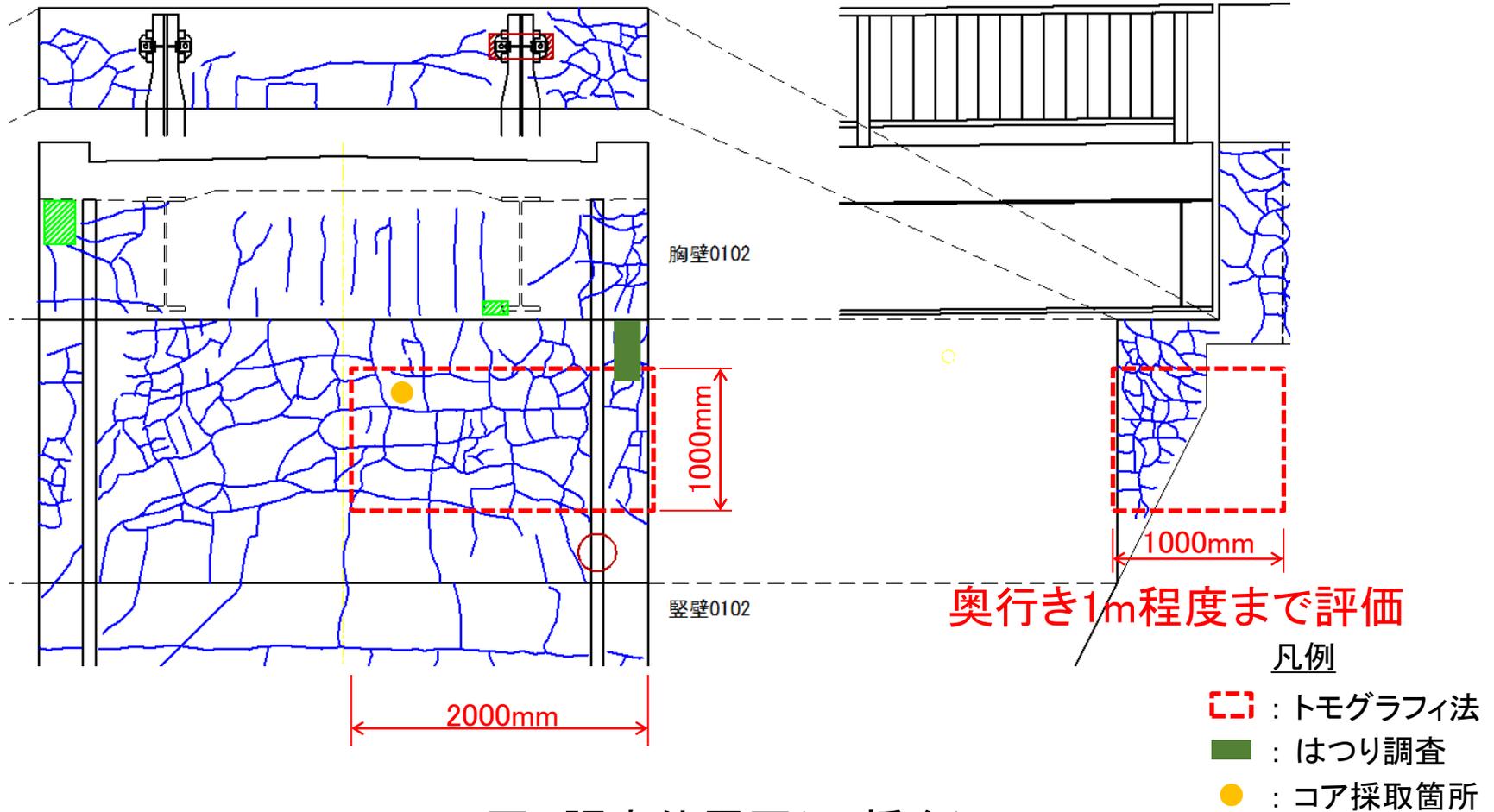
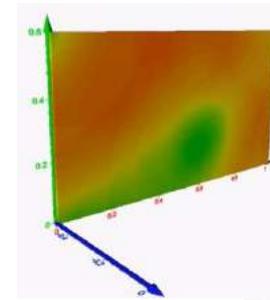
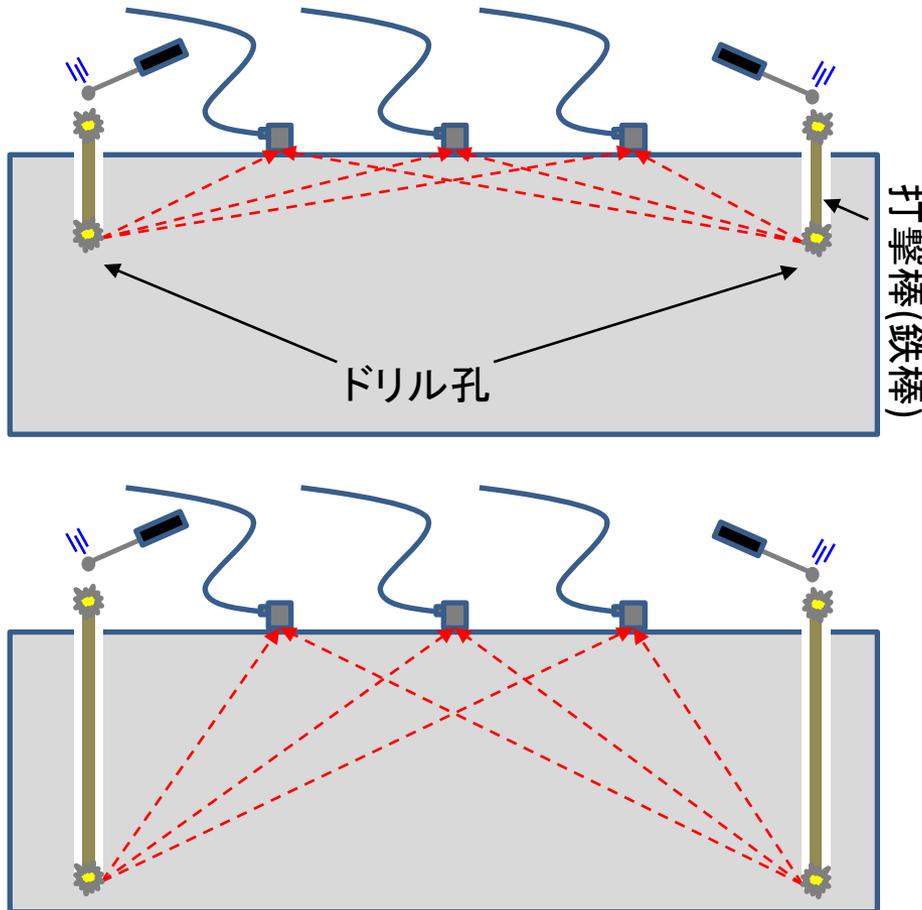


図 調査位置図(A2橋台)

# 2.13 ドリル削孔3Dトモグラフィ法

## ドリル削孔3Dトモグラフィ法



3次元

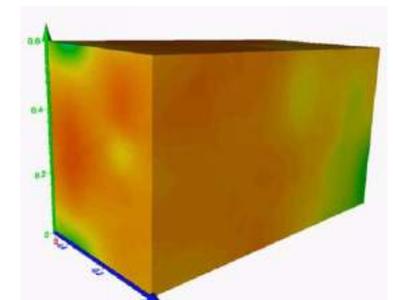
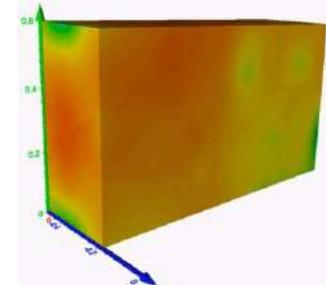


図 ドリル削孔を用いた概要

## 2.14 調査結果

### 1. ドリル削孔3Dトモグラフィ法

12箇所ドリル削孔穴を使用してドリル削孔穴の最深部を鋼棒で打撃することにより弾性波を入力した。打撃による弾性波の入力深度は0mm、50mm、100mm、200mm、300mm、500mm、700mm、1000mmの8深度で実施した。解析範囲は1000×2000mmとした。

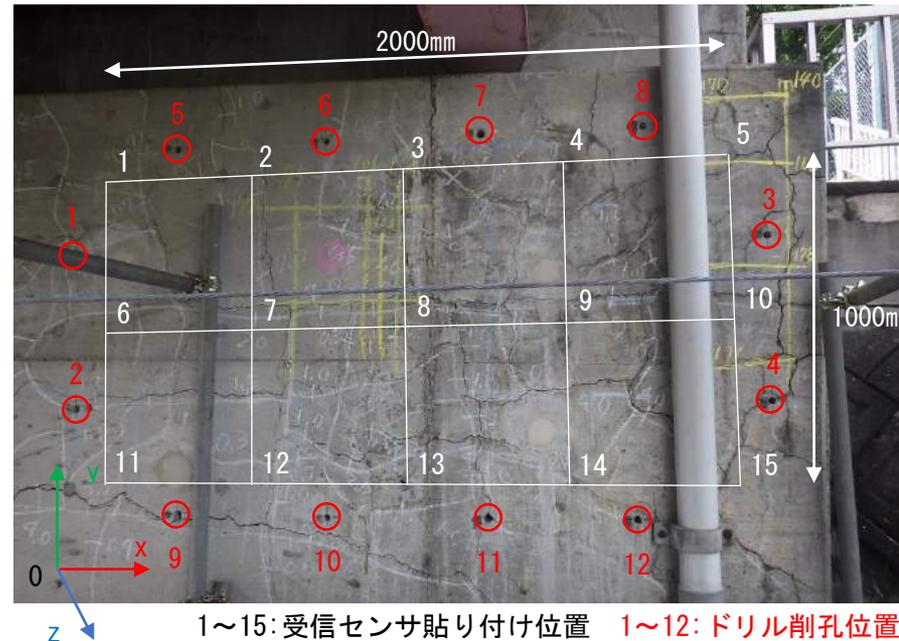


図 調査位置図

# 2.15 調査結果

## ドリル削孔3Dトモグラフィ法

### 各深度から入力された弾性波の特性値

ドリル削孔穴より入力した弾性波が、打撃点から受信点まで直進したと仮定した場合の、打撃深度毎の弾性波伝播速度(平均値)を分析した結果、表層から10cmまでで入力された弾性波伝播速度は、それより以深で打撃した場合の伝播速度より低下する傾向が確認された(コンクリートが劣化している状態と考えられる)。

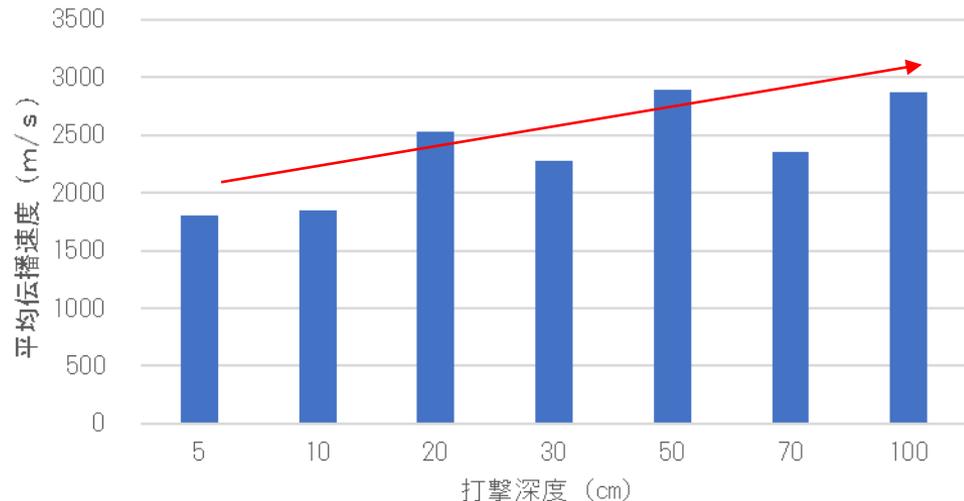
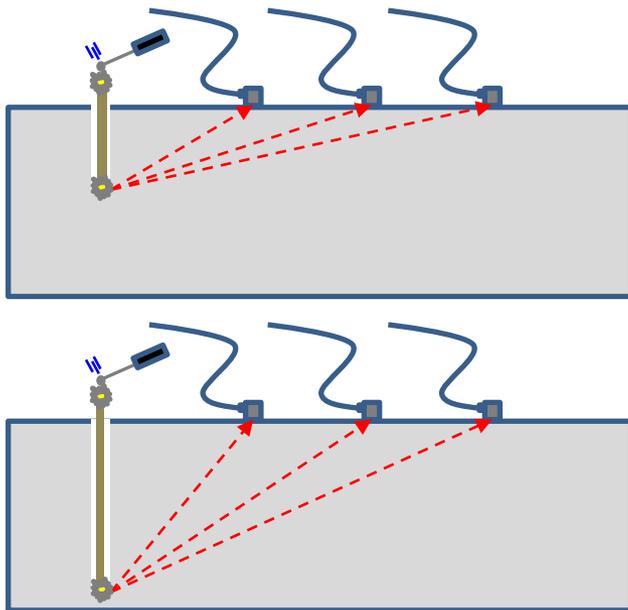
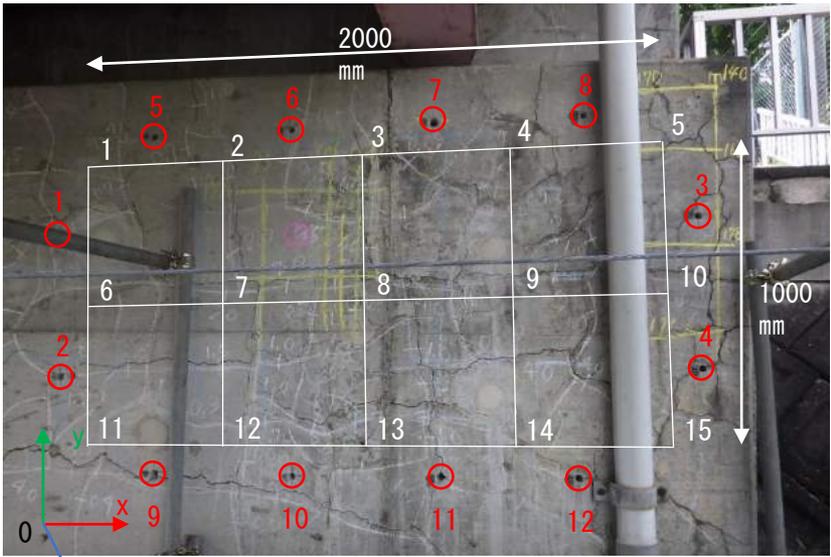


図 弾性波伝搬速度の平均値

# 2.16 調査結果

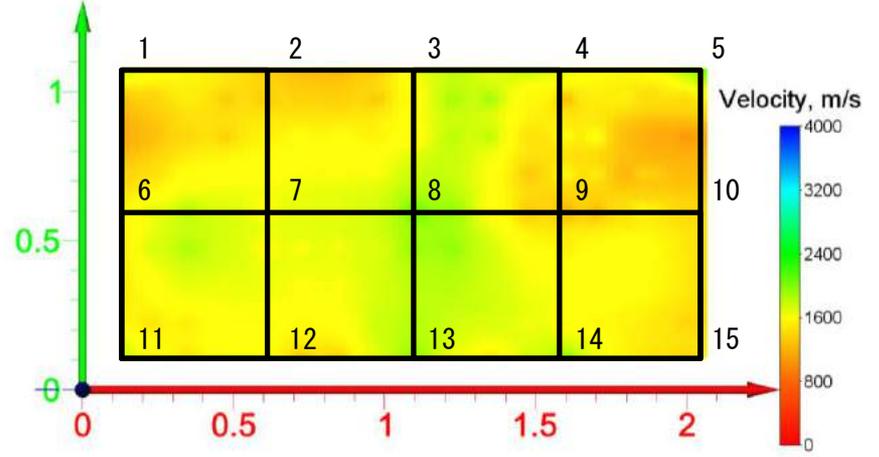
## ドリル削孔3Dトモグラフィ法

3Dトモグラフィ法による解析結果



1~15: 受信センサ貼り付け位置 1~12: ドリル削孔位置

2D(表層)



3D

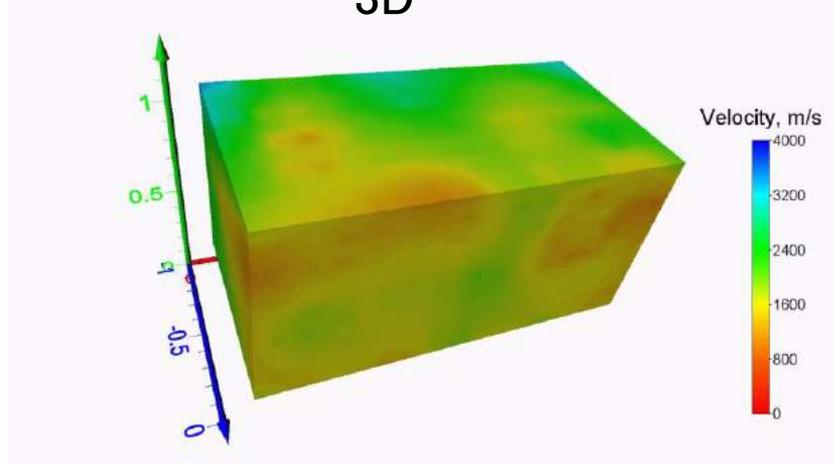


図 トモグラフィ解析結果

# 2.17 調査結果

## ドリル削孔3Dトモグラフィ法

### 3Dトモグラフィ法による解析結果

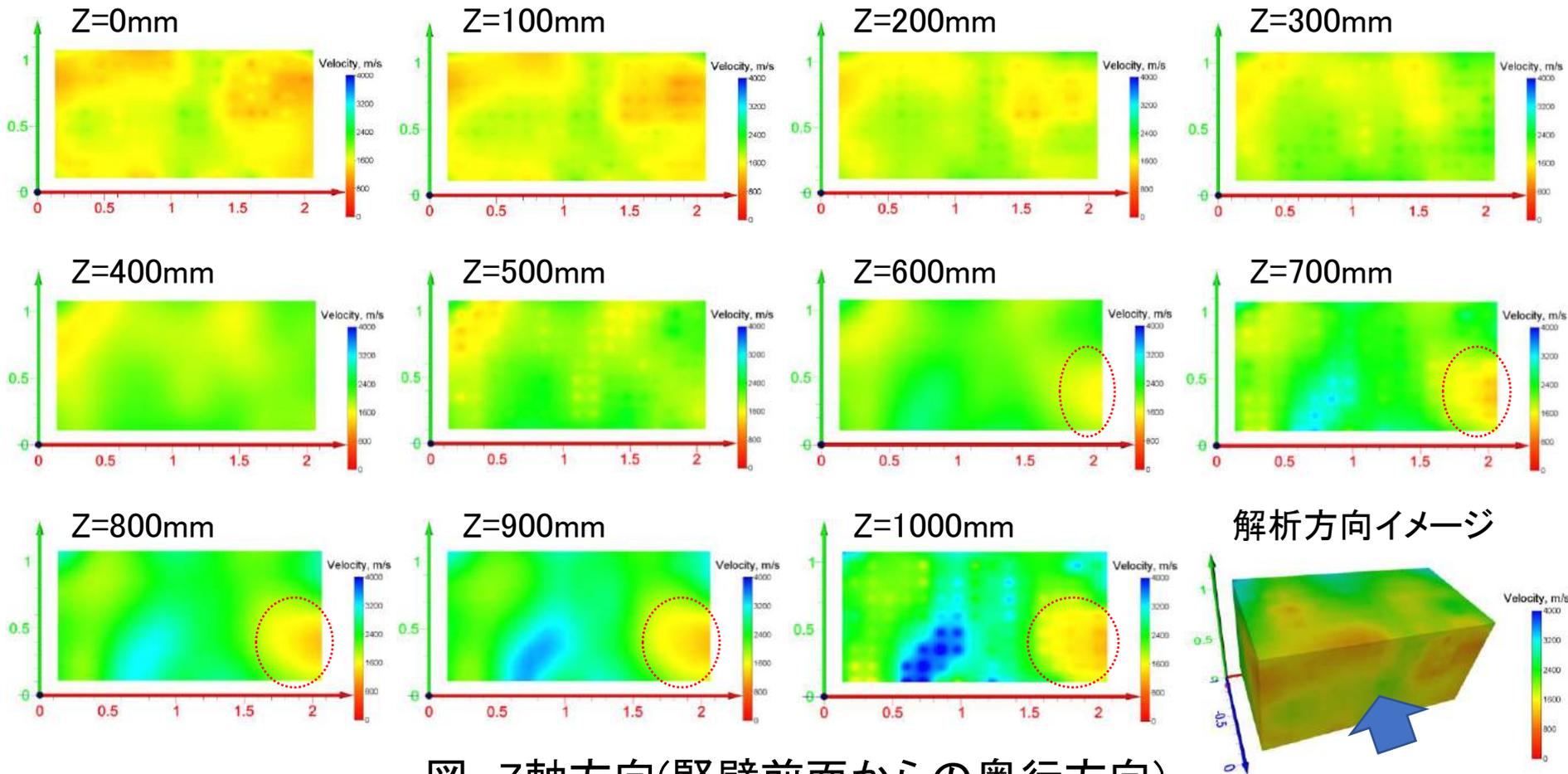


図 Z軸方向(縦壁前面からの奥行方向)

## 2.18 調査結果

# ドリル削孔3Dトモグラフィ法

### 3Dトモグラフィ法による解析結果

Z軸方向の0～-200mmで速度が比較的低い状況が広範囲に確認され、-300mm以深では速度が比較的高い状態が確認された。このことから、コンクリートのASRによる劣化は縦壁前面より深さ200mmまで顕著に生じており、300mm以深では表層部よりは健全な状態であると考えられる。

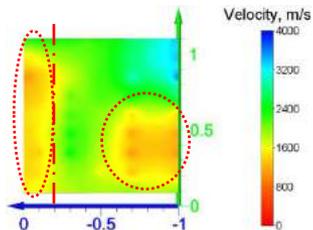
Z軸方向の-600mm以深、X軸方向1800～2000mmでは速度が比較的低い部分が確認されているが、速度の低い範囲は縦壁側面に集中しており、これは解析範囲の右端が構造物側面に近接していることから、側面で進行している劣化の影響を受けているものと考えられる。

# 2.19 調査結果

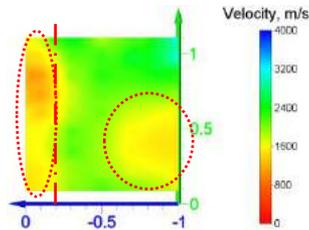
## ドリル削孔3Dトモグラフィ法

### 3Dトモグラフィ法による解析結果

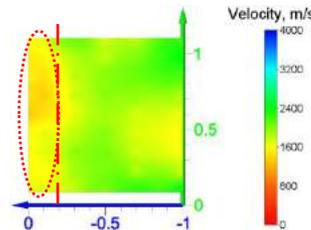
X=2000mm



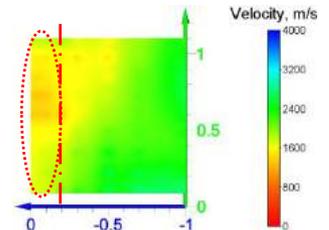
X=1800mm



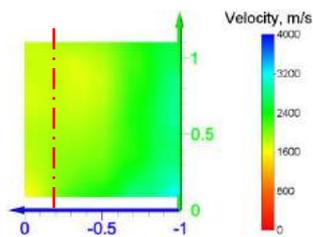
X=1600mm



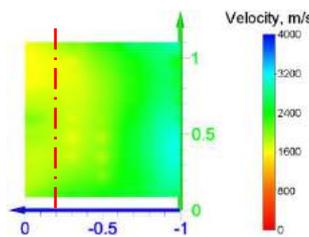
X=1400mm



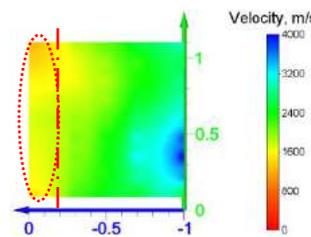
X=1200mm



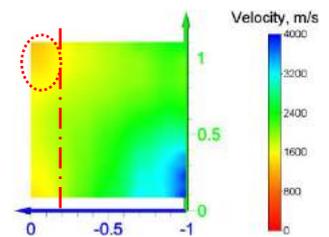
X=1000mm



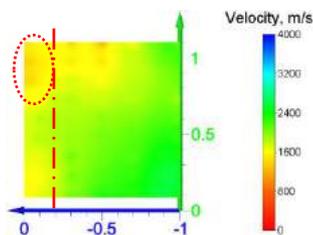
X=800mm



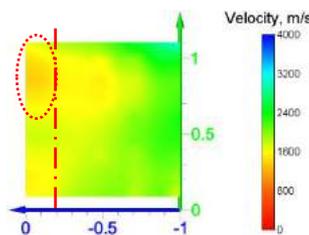
X=600mm



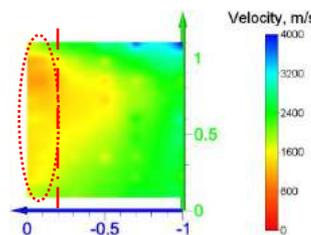
X=400mm



X=200mm



Y=0mm



解析方向イメージ

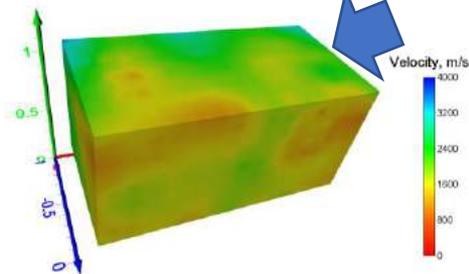


図 X軸方向(縦壁側面からの奥行方向)

## 2.18 調査結果

# ドリル削孔3Dトモグラフィ法

### 3Dトモグラフィ法による解析結果

Z軸方向の0～-200mmで速度が比較的低い状況が広範囲に確認され、-300mm以深では速度が比較的高い状態が確認された。このことから、コンクリートのASRによる劣化は縦壁前面より深さ200mmまで顕著に生じており、300mm以深では表層部よりは健全な状態であると考えられる。

Z軸方向の-600mm以深、X軸方向1800～2000mmでは速度が比較的低い部分を確認されているが、速度の低い範囲は縦壁側面に集中しており、これは解析範囲の右端が構造物側面に近接していることから、側面で進行している劣化の影響を受けているものと考えられる。