

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料 第4439号

# 土木研究所資料

## 変状トンネルにおける覆工コンクリートの 応力状態の推定に関する研究報告書

令和5年3月

国立研究開発法人 土木研究所  
道路技術研究グループトンネルチーム

Copyright © (2023) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



# 変状トンネルにおける覆工コンクリートの応力状態の推定に関する研究報告書

国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グループ 上席研究員 日下 敦  
同 前 上席研究員 砂金 伸治  
同 専門研究員 石村 利明

## 要旨

変状したトンネルに対しては、トンネルの構造安定性を確保し、利用者の安全性を確保するために、必要により変状状態に応じた適切な補修工や補強工等の対策工を実施していく必要がある。そのためには、変状の発生メカニズムや要因を確実に正しく判断するための高度な技術的判断が求められる。

本報告書は、トンネルの覆工の応力状態を推定する方法の一つとして超音波伝播速度に着目し、覆工コンクリートの模擬供試体による基礎的実験および実物規模のトンネル覆工供試体を用いた載荷実験により、コンクリート表面のひずみと超音波伝播速度の関係を把握するとともに、実トンネルにおける超音波伝播速度の測定結果の分析を行い、覆工応力の推定可能性について検討した結果を報告するものである。

キーワード：道路トンネル、変状、覆工、超音波伝播速度、覆工載荷実験、現地測定



# 目 次

1. 研究の背景と目的	1
2. 覆工コンクリートの模擬供試体による超音波伝播速度の基礎的実験	2
2. 1 トランスデューサを用いた模擬供試体の伝播速度	4
2. 1. 1 実験の概要	4
2. 1. 2 トランスデューサによる伝播速度の測定	4
2. 1. 3 供試体および実験方法	5
(1) 供試体	5
(2) 実験方法	6
(3) 実験条件	8
2. 1. 4 実験結果	12
(1) データ番号#1-1～#1-4 の測定結果(軸方向載荷)	12
(2) データ番号#2-001～#2-035 の測定結果(曲げ載荷)	14
(3) データ番号#2-036～#2-140 の測定結果(曲げ載荷)	16
(4) まとめ	19
2. 2 簡易な超音波伝播速度計を用いた模擬供試体の伝播速度	20
2. 2. 1 実験の概要	20
2. 2. 2 簡易な超音波伝播速度計による伝播速度の測定	20
2. 2. 3 供試体および実験方法	22
(1) 供試体	22
(2) 実験方法	23
(3) 実験条件	24
2. 2. 4 実験結果	24
(1) 載荷時における応力度とひずみ	24
(2) ひずみと伝播速度の関係	25
(3) まとめ	27
2. 3 まとめ	28
3. 実物大の覆工コンクリート供試体による伝播速度	29
3. 1 トランスデューサを用いた実物大の覆工供試体の伝播速度	29
3. 1. 1 実験の概要	29
3. 1. 2 供試体および実験方法	29

(1) 供試体	29
(2) 実験方法	30
(3) 実験条件	32
3. 1. 3 実験結果	34
(1) NO. 1 (反射 : C 载荷 (くさび型シューあり))	34
(2) NO. 2 (反射 : A 载荷 (くさび型シューあり))	37
(3) NO. 3 (透過 : C 载荷)	40
(4) NO. 4 (透過 : A 载荷)	44
(5) NO. 5 (透過 : C 载荷)	47
(6) NO. 6 (透過 : A 载荷)	55
3. 2 簡易な超音波伝播速度計を用いた実物大の覆工供試体の伝播速度	62
3. 2. 1 実験の概要	62
3. 2. 2 供試体および実験方法	62
(1) 供試体	62
(2) 実験方法	63
(3) 実験条件	66
3. 2. 3 実験結果	67
(1) NO. 1 (透過・表面 : C 载荷)	67
(2) NO. 2 (透過・表面 : A 载荷)	87
3. 3 まとめ	101
4. 簡易な超音波伝播速度計を用いた現地トンネルにおける覆工状況の把握	102
4. 1 現地トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度	102
4. 1. 1 伝播速度測定の概要	102
4. 1. 2 ASトンネルにおける伝播速度	102
(1) トンネルの概要	102
(2) 測定方法および測定箇所	104
(3) 測定結果	108
4. 1. 3 KUトンネルにおける伝播速度	121
(1) トンネルの概要	121
(2) 測定方法および測定箇所	125
(3) 測定結果	130
4. 2 まとめ	144
5. まとめと今後の課題	145

**【参考資料】**

参考資料1 トランスデューサを用いた模擬供試体の伝播速度…………… 149





## 1. 研究の背景と目的

国内の供用中の道路トンネルは、年々増加傾向にあり、令和元年4月時点で箇所数約10,800、総延長約4,700kmとなっている。また、約6割程度のトンネルが供用後約30年以上経過している。これらのトンネルの中には供用後の外力作用によるトンネルの変形や覆工コンクリートのひび割れ、材質劣化等によるうき・はく離やひび割れ等、さまざまな変状が発生しているものがある。これらの変状が発生したトンネルに対しては、トンネルの構造安定性、および利用者の安全性を確保するため、その変状状態に応じて発生要因に応じた適切な補修工や補強工等の対策工を実施していく必要がある。しかしながら、覆工コンクリートに発生したうき・はく離、ひび割れ等の種々の変状の発生要因は、変状の種類によって一義に決まるものではなく、多岐の要因が複雑に関連し合っていることが多く、その発生メカニズムや要因を正しく判断するためには高度な技術的判断が求められる。

そこで、発生したひび割れ等の変状が外力作用によるものか、それ以外の材質劣化等によるものなのかの発生要因を判定するための指標のひとつとして、調査時点の覆工の応力状態に着目することとした。特に、応力を推定する手段として、覆工コンクリートの超音波伝播速度に着目し、伝播速度の値から覆工の応力状態の推定を行う手法について検討を行った。

本報告書は、覆工コンクリートを模擬した供試体を用いた超音波伝播速度の測定、実物大の覆工コンクリート供試体を用いた超音波伝播速度の測定、および実トンネルにおける覆工コンクリートの超音波伝播速度の測定を通して、覆工コンクリートの応力状態の推定方法、およびその適用可能性についての検討結果を報告するものである。

## 2. 覆工コンクリートの模擬供試体による超音波伝播速度の基礎的実験

本章では、覆工コンクリートを模擬した供試体を用いて覆工の応力状態と超音波伝播速度（以下、「伝播速度」）の関係について基礎的な実験を行った。伝播速度の測定は、トランスデューサを用いた方法、簡易な超音波伝播速度計を用いた方法により行った。

基礎的実験に先立ち、ここで、**図-2.1**に示す矩形の供試体に軸方向および曲げ方向の力が作用した場合を想定し、供試体内部の応力状態やひずみ分布、伝播速度を測定する位置や測線の方向による伝播速度との関係について整理する。図中の供試体に軸方向（圧縮・引張）、曲げ（正曲げ・負曲げ）の力が作用した場合、それぞれの供試体は図に示すように変形し、圧縮・引張応力が生じる。供試体の伝播速度は、測定する位置や測定方向によってどの経路の伝播を測定するかによって異なってくる。音弾性理論によれば、理論上の縦波の伝播速度の変化は主応力之和に比

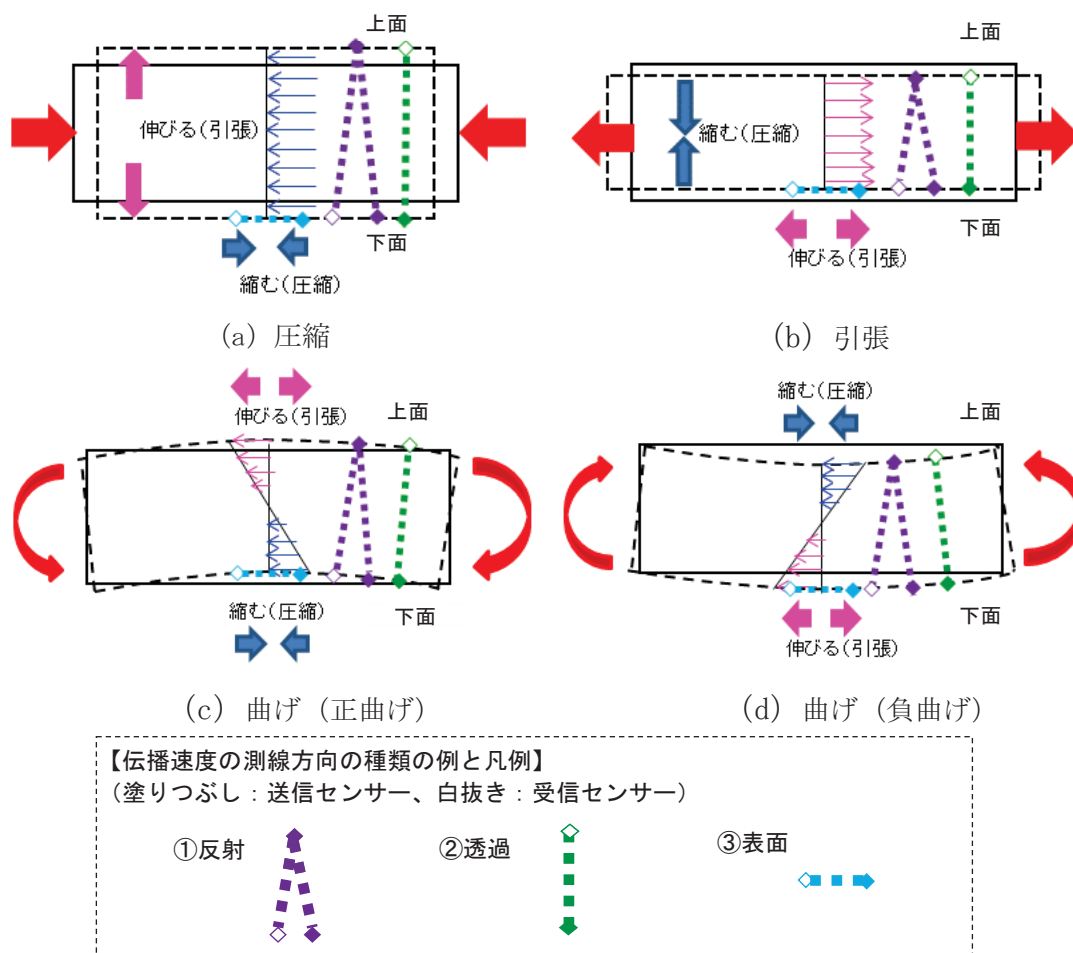


図-2.1 コンクリート供試体に作用する力と伝播速度の測定位置と測線方向の種類

表-2.1 図-2.1 に示す供試体に作用する力と伝播速度の測線方向・測定位置による伝播速度の初期状態からの変化

測線の方向	測定位置 (送信→受信)	供試体に作用する力			
		圧縮	引張	曲げ（正曲げ）	曲げ（負曲げ）
①反射	下面→下面	減少	増加	伝播経路における応力状態によって異なる (圧縮応力が支配的な場合は増加、 引張応力が支配的な場合は減少)	
②透過	下面→上面	減少	増加		
③表面	下面→下面	増加	減少	増加	減少

例するとされ、これまでの研究結果等により圧縮が生じた場合は伝播速度が速くなり、引張が生じた場合には伝播速度が遅くなること確認されている<sup>1)</sup>。今、測線方向を、①反射、②透過、③表面の3方向を想定し、送信・受信センサーを図に示す位置に設置して伝播速度を測定した場合、伝播速度は初期状態（力が作用する前の無応力状態）から表-2.1 に示すように変化すると考えられる。測線の方向が③表面の場合は、測定面の状態（縮む（圧縮）、伸びる（引張））に応じて、伝播速度は圧縮の場合は増加に、引張の場合は減少に変化する。一方で、①反射・②透過の場合の軸方向に圧縮・引張の力が作用した場合は、供試体は载荷と同一の方向にそれぞれ縮む方向・伸びる方向に変形すると同時に、载荷方向と直交する方向にはそれぞれ供試体材料のポアソン比に相当する変形が生じる。このため、測定している伝播経路の応力状態によっては、圧縮応力が支配的か、引張が支配的かによって変わってくると考えられる。

なお、実際のトンネルの覆工コンクリートの応力状態を推定する場合には、覆工背面側へのセンサーの設置が不可能であるため、測線の方向はトンネル内の覆工表面から①反射、もしくは③表面により測定する方法が用いられると考えられる。

本章における伝播速度の測定時の測線の方向は、2.1では①反射を、2.2では②透過・③表面による測定を行い、コンクリート供試体の伝播速度の変化を把握した。

## 2. 1 トランスデューサを用いた模擬供試体の伝播速度

### 2. 1. 1 実験の概要

実験は、トンネル覆工を模擬したコンクリート供試体を作成し、載荷装置により供試体の長手方向の軸力および供試体の横方向から曲げ荷重を与え、載荷段階および除荷段階における供試体内の伝播時間から伝播速度を算出した。

### 2. 1. 2 トランスデューサによる伝播速度の測定

伝播速度の測定は、図-2.1.1に示すように送信および受信用のトランスデューサ（S40HB0.1-0.3、Karl Deutsch社製、 $\phi$  46mm）を用い、シリコングリースを音響カプラとしてコンクリート供試体表面にセットした。使用したトランスデューサの外観を写真-2.1.1に示す。

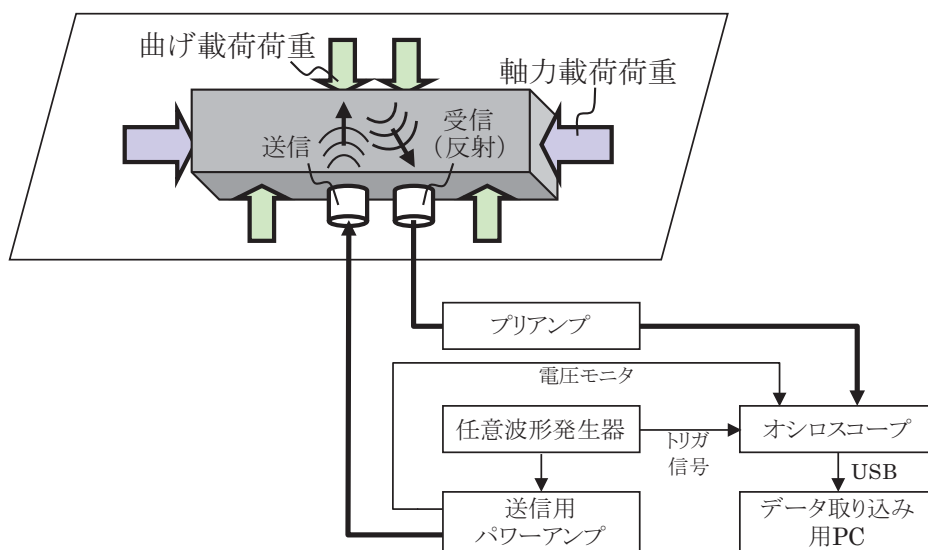


図-2.1.1 トランスデューサによる伝播速度測定の概要図



写真-2.1.1 使用したトランスデューサの外観

まず、任意波形発生器からチャープ波形(周波数帯域 30~80 kHz, パルス長 200  $\mu$ s または 300  $\mu$ s) を繰り返し周波数 10 Hz で発生させ、送信用パワーアンプで 40 dB 増幅した電気信号を送信用トランスデューサに印加した。送信用トランスデューサからコンクリート供試体内に送信された超音波を受信用トランスデューサで受信し、受信用トランスデューサからの電気信号をゲイン 40 dB のプリアンプで増幅してオシロスコープで観察した。同時に、送信用パワーアンプの出力電圧を電圧モニタ端子 ( $\times 1/100$ ) からオシロスコープに入力し、任意波形発生器からのトリガ信号もオシロスコープに入力した。オシロスコープ上で各信号の波形を観察し、データ取り込み用 PC でオシロスコープ観察波形を取り込んだ。伝播速度測定は、送受信トランスデューサをコンクリート供試体の同一表面に設置して、反射波を捉えるよう行った。なお本実験では、音波を供試体の面に対して斜め方向に入射させるためのシューは使用していない。

### 2. 1. 3 供試体および実験方法

#### (1) 供試体

供試体は寸法 1000mm $\times$ 300mm $\times$ 300mm の無筋のコンクリートを用いた。実験に用いたコンクリート供試体は、実験 1 日目は作成後 5 日目の供試体を、実験 2 日目は作成後 6 日目の供試体を使用した。供試体の材料定数の試験は、供試体の作成後 6 日目、7 日目に行った。理論上から算定できる供試体の伝播速度  $c_0$  は式(2.1.1)で求められる。

$$c_0 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots(2.1.1)$$

ここで、 $E$  は縦弾性係数、 $\nu$  はポアソン比、 $\rho$  は密度である。

表-2.1.1 に供試体の寸法および供試体作成後 6 日目、7 日目に行った材料定数結果を示す。また、表中には材料定数から求められる供試体の伝播速度  $c_0$  も示す。

なお、参考までに、コンクリート材料定数の一般的な値 ( $E=20\text{GPa}$ 、 $\nu=0.2$ 、 $\rho=2200\text{kg/m}^3$ ) のとした時の伝播速度  $c_0$  もあわせて示す。

表-2.1.1 供試体の寸法および材料定数

供試体作成後日数	6 日目	7 日目	一般的な値 (参考値)
寸法 [mm]	300×300×1000	300×300×1000	—
縦弾性係数 $E$ [GPa]	12.0	12.7	20.0
ポアソン比 $\nu$	0.165	0.159	0.2
密度 $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	2250	2220	2200
(参考) 強度 [ $\text{N/mm}^2$ ]	6.83	9.17	—
伝播速度 $c_0$ [m/s]	2389	2469	3178

## (2) 実験方法

実験は、(1) で示した供試体を用いて、写真-2.1.2 に示す土木研究所所有の二次元載荷試験装置の反力枠と油圧ジャッキを用いて、供試体の長手方向の軸力および供試体の横方向から曲げ荷重を与え、載荷段階および除荷段階における供試体内の伝播時間を測定した。その後、伝播時間から伝播速度を算出し、各載荷段階における伝播速度の変化を把握した。軸方向・曲げ荷重の概要と伝播速度測定概念図を図-2.1.2 に示す。



写真-2.1.2 二次元荷重試験装置

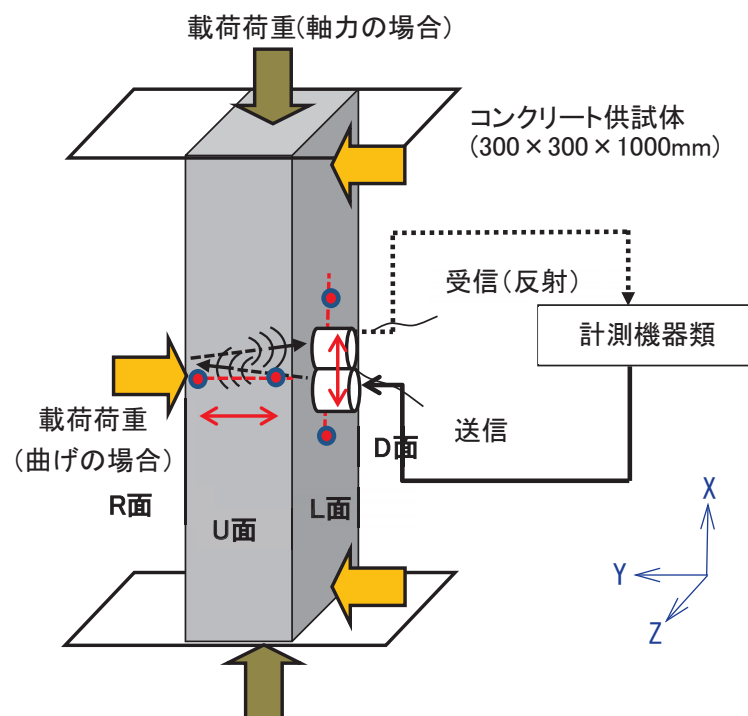


図-2.1.2 軸力・曲げ荷重の概要と伝播速度測定概念図



### (3) 実験条件

送・受信用トランスデューサの設置条件、送信超音波条件および载荷条件を表-2.1.2 に示す。表中の超音波条件の設定にあたっては、使用したトランスデューサおよびコンクリート供試体のパルス特性と周波数特性を考慮したうえで決定した（詳細は「参考資料1」を参照）。なお、载荷条件の「除荷→载荷→除荷」とは、载荷前の除荷状態から徐々に载荷荷重を増加させ、ある荷重まで载荷した後に除荷をしたものである。また、データ番号の頭の「#1-」は実験日1日目を、「#2-」は実験日2日目をそれぞれ意味する。上述のとおり、実験1日目では作製後5日目の供試体（材料定数は未測定）を、実験2日目では作製後6日目の供試体をそれぞれ使用した。計測データの時間サンプリング精度は、全て0.1  $\mu$ sとした。

表-2.1.2 トランスデューサの設置条件および超音波条件

データ番号	トランスデューサ設置条件	超音波条件	载荷条件
#1-1～#1-4	反射、L面設置、隣接1点	チャープ波、30～80 kHz、300 $\mu$ s	除荷→载荷
#2-001～#2-035	反射、U面設置、隣接5点	チャープ波、30～80 kHz、200 $\mu$ s	除荷→载荷→除荷
#2-036～#2-140	反射、L面設置、複数間隔	チャープ波、30～80 kHz、200 $\mu$ s	除荷→载荷→除荷

実験は、表-2.1.2 に示した条件により以下の手順で実施した。実験時における供試体表面に設置したトランスデューサの位置と実験状況を図-2.1.3、図-2.1.4 に示す。また、L面におけるトランスデューサ設置位置と音波経路図を図-2.1.5 に示す。

#### ■反射（軸方向载荷）、L面設置、隣接1点(#1-1～#1-4)

- ①L面に送信および受信用トランスデューサを設置（固定）
- ②载荷前の除荷状態で波形データ（送信電圧波形、受信電圧波形）を1点計測
- ③軸方向に载荷し、荷重が70 kN程度になるまで载荷し、その状態で波形データを1点計測
- ④軸方向に载荷しながら、荷重が140 kN、210 kNの各状態で波形データを1点計測
- ⑤完全除荷して残留ひずみを計測

#### ■反射（曲げ载荷）、U面設置、隣接5点(#2-001～#2-035)

- ①U面に送信および受信用トランスデューサを設置
- ②载荷前の除荷状態で波形データ（送信電圧波形、受信電圧波形）を5点(U1-1、U2-2、U3-3、U4-4、U5-5)計測。送信および受信用トランスデューサは各点の計測を行う際に移動・設置
- ③曲げ方向に荷重が10 kN程度になるまで载荷し、その状態で波形データを5点(U1-1、U2-2、U3-3、U4-4、U5-5)計測。送信および受信用トランスデューサは各点の計測を行う際に移動・設置

- ④曲げ方向に荷重しながら、荷重が 20 kN、30 kN、40 kN の各状態で波形データを 5 点(U1-1、U2-2、U3-3、U4-4、U5-5)計測。送信および受信用トランスデューサは各点の計測を行う際に移動・設置
- ⑤45 kN まで荷重し、ひずみを計測
- ⑥除荷し、荷重が 25 kN、0 kN（完全除荷）の各状態での波形データ（5 点）と残留ひずみを計測

■反射（曲げ荷重）、L 面設置、複数間隔（#2-036～#2-140）

- ①L 面に送信および受信用トランスデューサを設置
- ②荷重前の除荷状態で波形データ（送信電圧波形、受信電圧波形）を 15 点計測
  - ②-1 コンクリート供試体に 20 mm 間隔の線を 5 本書く
  - ②-2 最左線の真ん中に受信用トランスデューサを、その左隣に送信用トランスデューサを設置
  - ②-3 波形データを計測後、受信用トランスデューサを 20 mm 右に移動
  - ②-4 受信用トランスデューサが最右線の真ん中の位置で測定するまで②-3 を繰り返す
  - ②-5 左から 2 番目の線の中央付近に受信用トランスデューサを、その左隣に送信用トランスデューサを設置
  - ②-6 ②-3～②-5 の流れを、最右線の中央付近に受信用トランスデューサを、その左隣に受信用トランスデューサを設置し、波形データ計測するまで繰り返す
- ③曲げ方向に荷重し、荷重が 10 kN 程度になるまで荷重し、その状態で波形データを 15 点計測
- ④曲げ方向に荷重しながら、荷重が 20 kN、30 kN、40 kN の各状態で波形データを 15 点計測
- ⑤45 kN まで荷重し、ひずみを計測
- ⑥除荷し、荷重が 25 kN、0 kN（完全除荷）の各状態での波形データ（15 点）と残留ひずみを計測

なお、トランスデューサ送受信面の反対側の面は $\phi$  56 mm であるため、送信および受信用トランスデューサを隣接させて設置した場合は、両トランスデューサの中心間は 56 mm 離れていることになる。

（3）波形データの分析方法および伝播速度変化率の算出

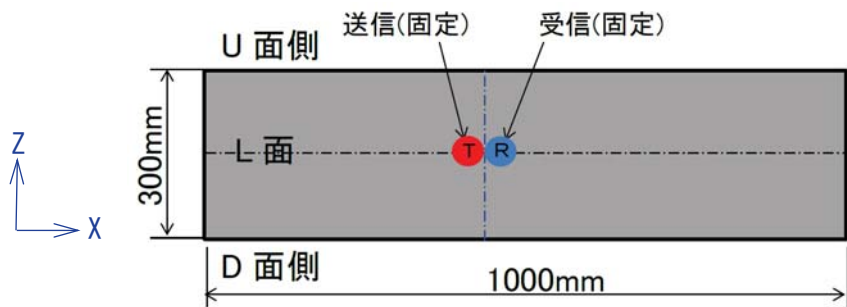
測定した波形データから相互相関法を用いて伝播時間を算出し、算出された伝播時間に対し、伝播時間をもとに式 (2.1.2) により伝播速度変化率  $\Delta c/c_0$  を求めた（データの処理方法等についての詳細は「参考資料 1」を参照）。

ここで、初期の荷重前の荷重が作用していない状態（除荷状態）における伝播時間および伝播

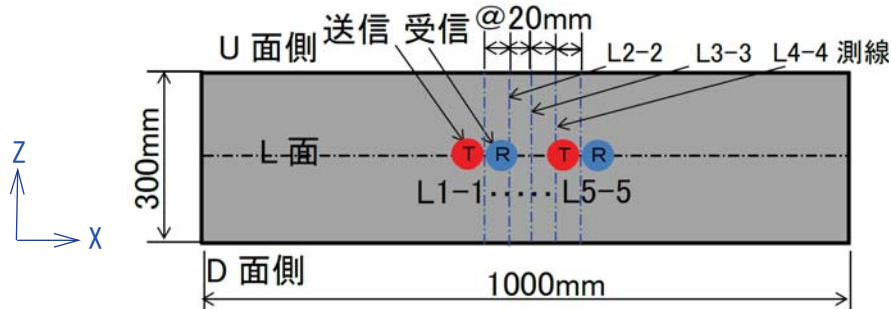
速度を $t_1$ 、 $c_0$ 、載荷時の伝播時間を $t_2$ 、伝播速度の変化量を $\Delta c$ である。

$$\frac{\Delta c}{c_0} = -\frac{\Delta t}{t_1} = -\frac{t_2 - t_1}{t_1} \quad \dots\dots\dots (2.1.2)$$

式(2.1.2)より、伝播距離を一定として、伝播距離＝伝播速度×伝播時間の関係から導くことができる。



(a) L面におけるトランスデューサ設置位置 (#1-1～#1-4)

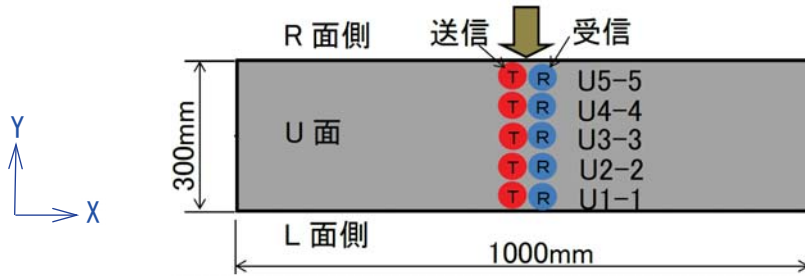


(b) L面におけるトランスデューサ設置位置 (#2-036～#2-140)

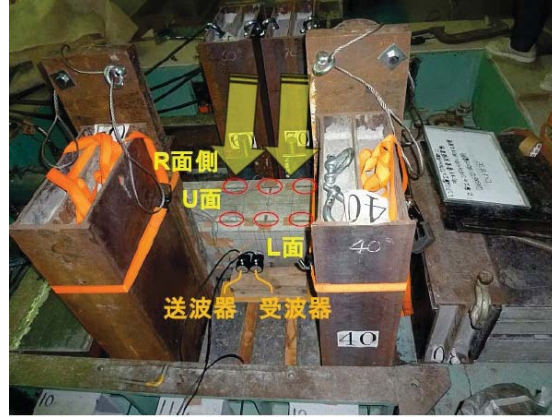


(c) 実験状況

図-2.1.3 L面におけるトランスデューサ設置位置と実験状況

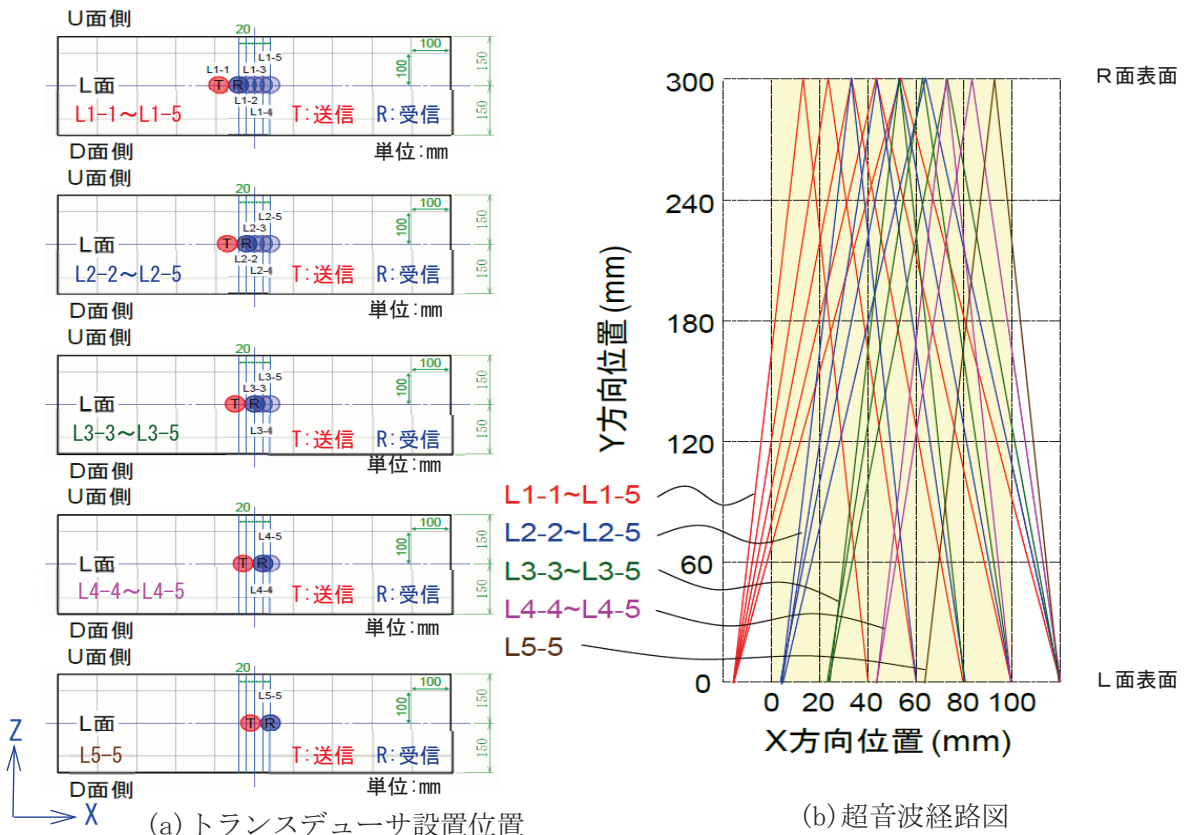


(a) U面におけるトランスデューサ設置位置 (#2-001~#2-035)



(b) 実験状況

図-2.1.4 U面におけるトランスデューサ設置位置と実験状況



(a) トランスデューサ設置位置

(b) 超音波経路図

図-2.1.5 L面におけるトランスデューサ設置位置と超音波経路図 (#2-036~#2-140)

## 2. 1. 4 実験結果

前節（3）の方法により整理した結果を以下に示す。なお、各データ番号の送・受信波形、相互関連波形の結果は「参考資料 1」に示す。

### （1）データ番号#1-1～#1-4 の測定結果（軸方向荷重）

表-2.1.2中のデータ番号#1-1～#1-4における荷重とひずみゲージの測定結果を図-2.1.6に示す。図-2.1.6には、測定番号と各載段階における伝播速度測定の実施の有無を記載した。測定番号1～4は荷重（軸方向の荷重）がそれぞれおよそ0, 76, 140, 210 kNの状態に対応している。本測定では軸方向に単純圧縮の状態で作成したが、U面の垂直ひずみゲージ（U-V1～U-V3）からは圧縮応力が、水平ひずみゲージ（U-H2）からは引張応力がそれぞれ発生しており、供試体には曲げが発生していたと考えられる。このため、本実験で引き続き軸圧縮を増加させていくと、座屈や曲げによるコンクリート供試体の破損等の危険性が高いため、軸力荷重210 kNで実験を中止した。このような曲げ状態になったのは、今回用いた実験装置の構造上の問題や、供試体寸法等の精度では、コンクリート供試体に均等に力を載荷することが困難であったためと考えられる。このほか、コンクリート供試体が作成後から数日しか経過しておらず、十分硬化していないことなども考えられるが、主要な原因は不明である。

図-2.1.7に軸方向荷重時の荷重とL面における伝播速度変化率の結果を示す。これより、伝播速度変化率は、荷重の増加とともに減少している。すなわち、荷重の増加に伴って伝播速度は減少していることが分かる。音弾性理論によれば、縦波の伝播速度の変化は主応力に比例し、一般的に圧縮した場合には伝播速度が速くなり、引張が生じた場合には伝播速度が遅くなる。L面の表面に貼付したひずみゲージの結果は圧縮を示しているが、伝播速度はL面～R面間の供試体内部を反射する測線で測定した結果である。一般に、材料に軸方向の荷重が加わると、圧縮荷重の場合には軸方向は縮み、軸方向と直交する方向はポアソン効果により伸びる状態となる。本測定では、軸方向と直交する方向のL面～R面間の供試体内部の測線上の伝播経路では引張応力が発生していることとなるため、伝播速度は低下することとなる。

本実験においては、トランスデューサをコンクリート供試体にセットしたまま荷重を載荷したので、測定毎に同じ波形を受信できていることから、相関値のピーク時間のずれは測定誤差ではなく、荷重時の応力変化をとらえたものであると考えられる。これは送信帯域幅 50 kHz 程度でも比較的精度の高い測定ができていることを示唆していると考えられる。

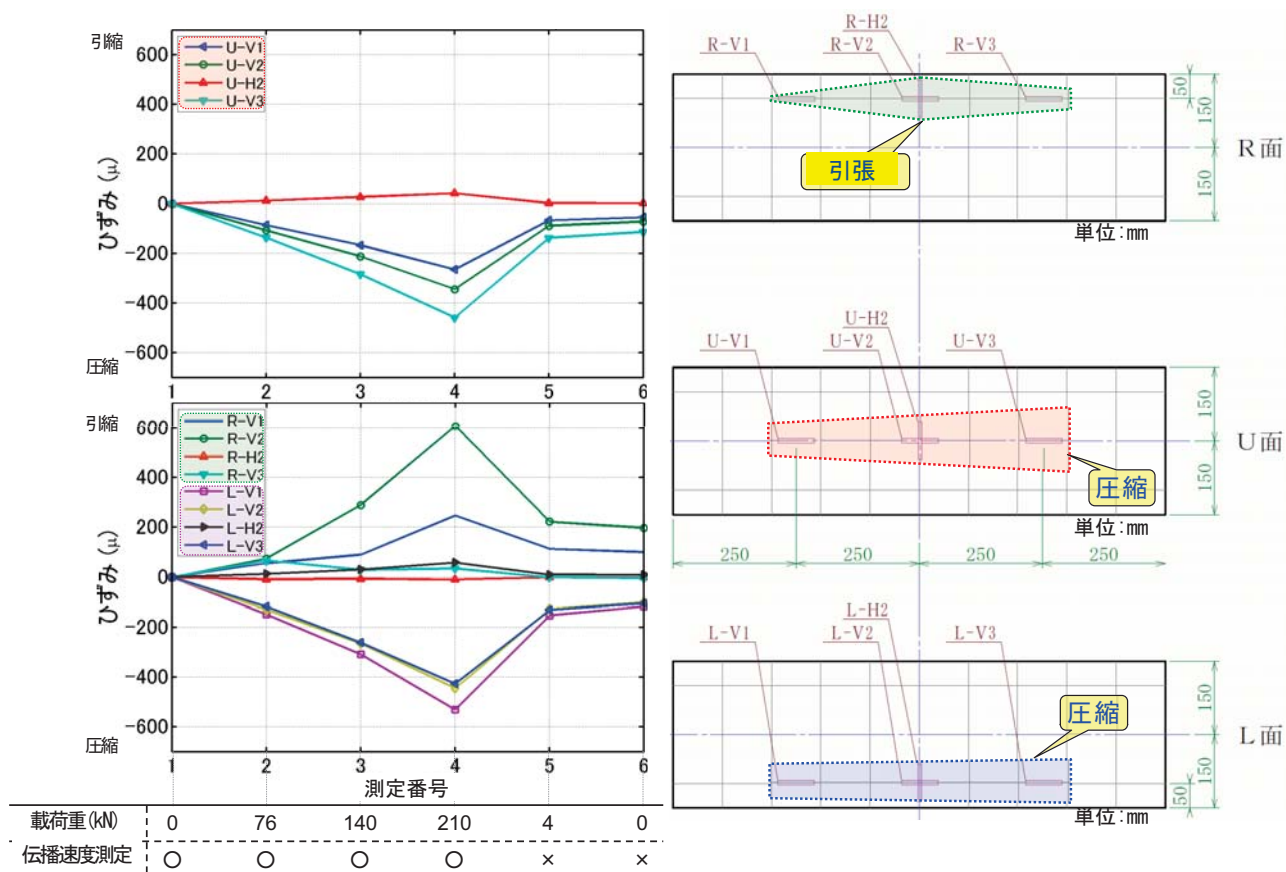


図-2.1.6 軸方向載荷時におけるひずみゲージ設置箇所とひずみ測定結果の概略 (#1-1~#1-4)

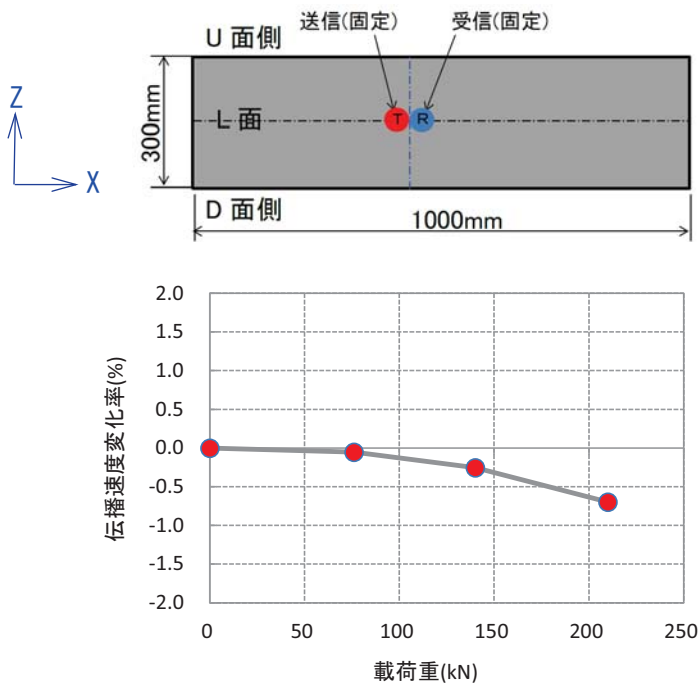


図-2.1.7 軸方向載荷時におけるL面の伝播速度変化率(#1-1~#1-4)

(2) データ番号#2-001～#2-035の測定結果(曲げ载荷)

表-2.1.2中の曲げ载荷時(#2-001～#2-035、#2-036～#2-140)における载荷重とひずみゲージの測定結果を図-2.1.8に示す。図-2.1.8には、測定番号と各載段階における伝播速度測定の実施の有無を記載した。測定番号1～5は曲げ载荷(R面側からL面方向)の载荷重がそれぞれ0, 10, 20, 31, 41kNの状態に対応している。本測定では供試体R面の長手方向の中間付近からL面方向へ载荷を载荷する曲げ载荷を行った。ひずみ測定の結果からは、供試体には载荷面側のR面側で圧縮応力が、载荷面の反対側のL面側で引張応力が発生している。

なお、本測定をする前に事前に別のコンクリート供試体を用いて曲げ载荷を行った。当初、曲げ载荷時の载荷重は100 kNまで上げる予定であったが、供試体の破損限界が予想よりも小さく、80 kN付近でコンクリート供試体が破損した。写真-2.1.3に破損したコンクリート供試体の状況を示す。破壊時のひずみはモニタリングしていたが記録していなかったため正確な値は不明であるが、図-2.1.8に示したひずみの最大値よりは小さい値であった。このため今回の測定では、ひずみの値を見ながら供試体の破損が生じる前に除荷したため、最大载荷重が40 kN程度となった。

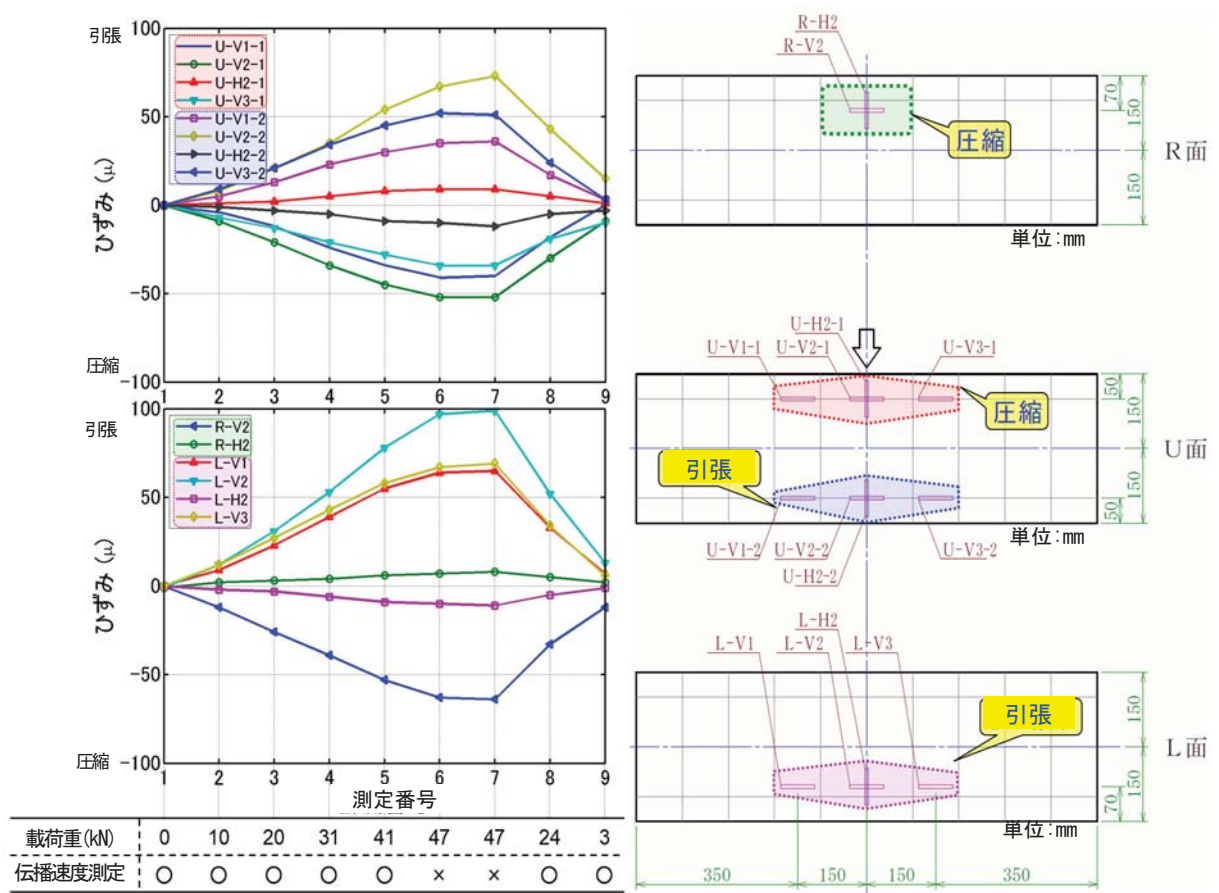


図-2.1.8 曲げ载荷時におけるひずみゲージ設置箇所とひずみ測定結果(#2-001～#2-035)



写真-2.1.3 曲げ載荷荷重時に破損したコンクリート供試体の状況

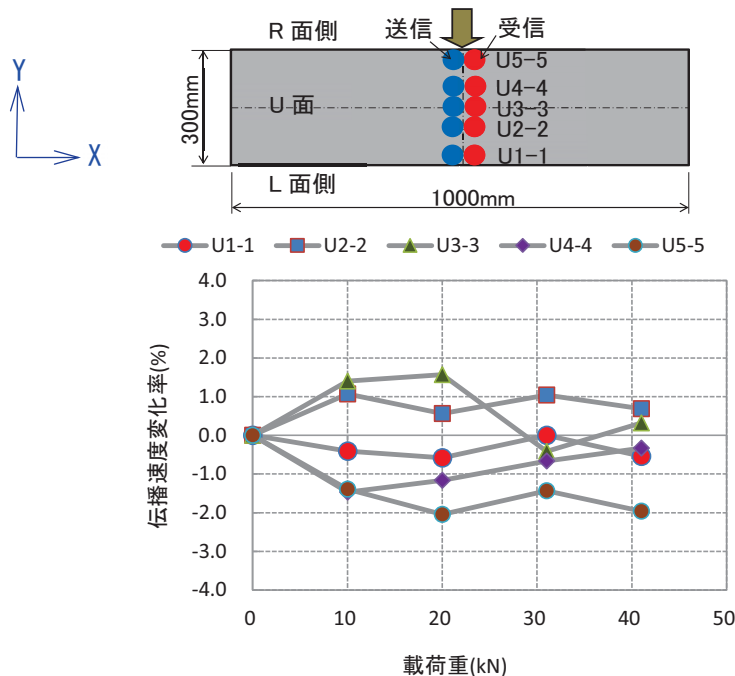


図-2.1.9 曲げ載荷時における U 面の伝播速度変化率(#2-001～#2-035)

図-2.1.9に曲げ載荷時におけるU面の載荷重と伝播速度変化率の結果を示す。これより、伝播速度変化率は、載荷重が増加すると若干の変化を示すものの、本載荷重の範囲での最大の伝播速度変化率は $\pm 2\%$ 程度と非常に小さい結果であった。

図-2.1.8に示したU面の表面に貼付したひずみの値から、R面側に近い部分は圧縮応力が、L面側に近い部分は引張応力が発生している。理論上は縦波の伝播速度の変化は主応力和に比例することから、材料が圧縮されている場合にはそこでは伝播速度が一般に速くなると考えられている。このことから、供試体のU1-1は荷重載荷時の伝播速度変化率は負側に、U5-5は正側に挙動すると考えられる。しかし、伝播速度変化率が負側へ変化したのはU1-1、U4-4、U5-5、正側へ



変化したのはU2-2、U3-3であり、コンクリート供試体の応力状態とは一致していない。

これは、最大載荷重が約40kNと低く、コンクリート供試体の発生ひずみも圧縮側で-60 $\mu$ 程度、引張側で+100 $\mu$ 程度と小さかったため伝播速度の変化量も少なかったことと、本測定においては、まず載荷前の除荷状態でU1-1～U5-5まで測定し、次に載荷重10kNでU1-1～U5-5まで測定、といった手順で測定している。このため、同じ測定位置でも荷重毎にトランスデューサを再セッティングする必要があった。再セッティング毎に、セッティング位置のずれがあったり、音響カプラーとしてのシリコングリースの塗布具合やコンクリート供試体との接着具合で受信音響エネルギーが異なったりするため、本測定においては測定誤差が大きかったことが考えられる。

### (3) データ番号#2-036～#2-140の測定結果(曲げ載荷)

表-2.1.2中の曲げ載荷時(#2-001～#2-035、#2-036～#2-140)における載荷重とひずみゲージの測定結果は図-2.1.8に示したとおりである。図-2.1.8には、測定番号と各載荷段階における伝播速度測定の実施の有無を記載した。測定番号1～5は曲げ荷重(R面側からL面方向)の載荷重がそれぞれ0, 10, 20, 31, 41kNの状態に対応している。本測定では供試体R面の長手方向の中間付近からL面方向へ荷重を載荷する曲げ載荷を行い、図-2.1.5に示した超音波経路図の15通りの伝播時間を計測した。ひずみ測定の結果からは、供試体には載荷面側のR面側で圧縮応力が、載荷面の反対側のL面側で引張応力が発生している。

図-2.1.10に曲げ載荷時における載荷重とL面で測定した測定番号毎に伝播速度変化率の結果を示す。本測定では、これより、各測定番号の伝播速度変化率は、載荷重の増加に伴い概ね正の方向の伝播速度変化率を示している。L面側で測定した伝播速度の伝播経路は、引張の応力が生じているL面側から、圧縮の応力が生じているR面側の領域までの複雑な応力状態下での測定であったが、測定位置による伝播速度変化率の違いは見受けられるものの、比較的安定した結果が得られることが分かった。伝播速度変化率は概ね1%～4%程度であり、最も大きく変化したのはL5-5の約4%であった。前節までに述べたように、コンクリート供試体断面内の応力状態と伝播速度の測定方向によって伝播速度、伝播速度の変化率が変化する。今回の測定結果は伝播速度が正側に变化したことから、L1-1～L5-5までの伝播経路では圧縮応力が支配的であったと考えられる。なお、本実験では最大の載荷重が42kNと小さかったため、供試体表面に貼付したひずみゲージの最大値も $\pm 100\mu$ 以下と、比較的低い応力状態での測定となったため、伝播速度変化率が小さい結果となったが、今後は、コンクリート供試体に、どの方向で、どれくらい荷重をかけたら破壊近傍の応力状態になるかを事前に確認する必要があるとともに、実大規模の覆工コンクリート供試体を用いて高い応力状態下での検証が必要であると考えられる。

また、今回の実験では、避けられる測定誤差の要因として、供試体を作成してから養生期間が少ないコンクリートを使用していること、斜め入射のためのシューを使用しなかったことがあげられる。さらに、必要な養生期間を確保したうえで十分硬化した状態で水分が抜けたコンクリー

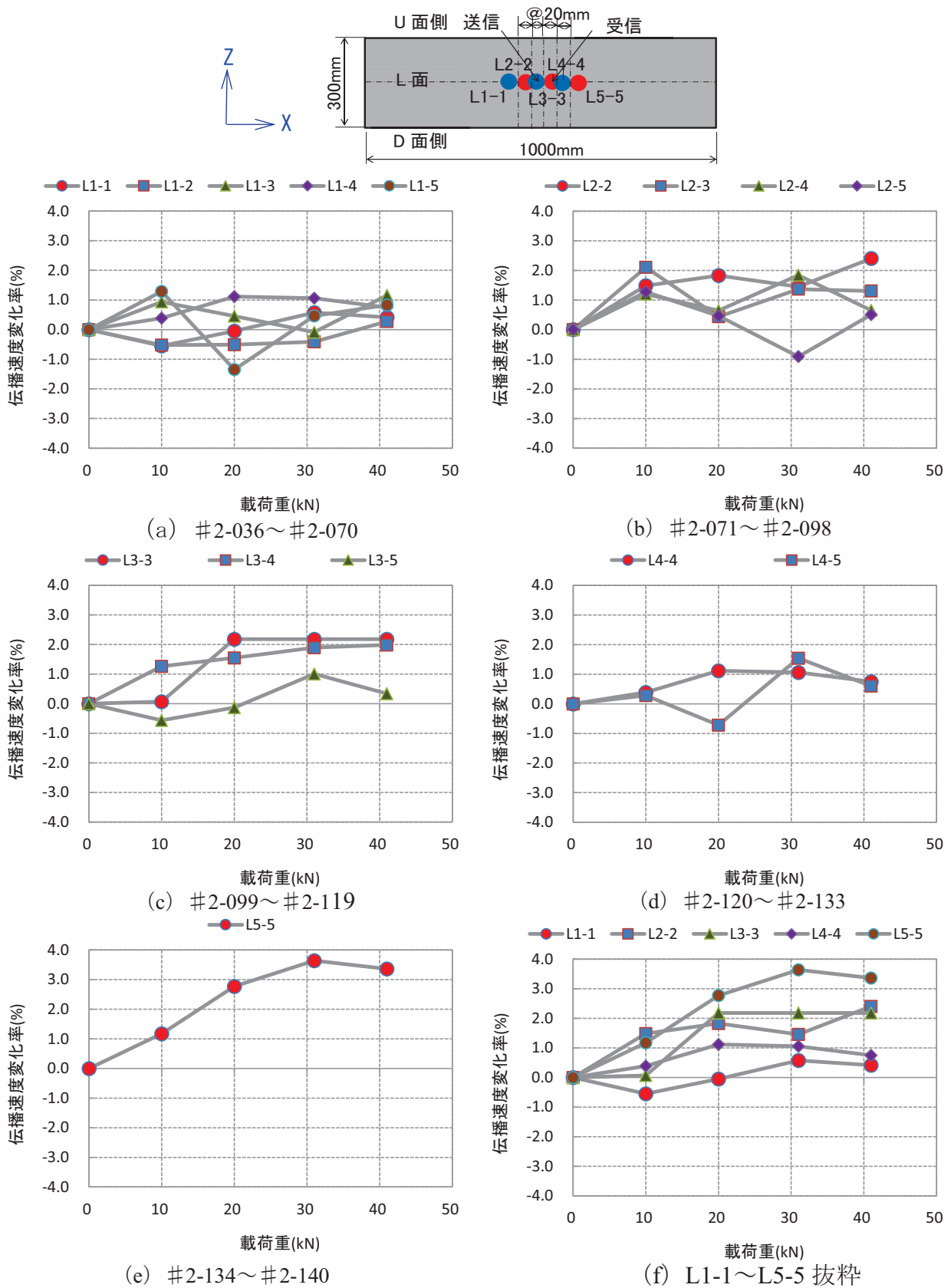


図-2.1.10 曲げ載荷時におけるL面の伝播速度変化率(#2-036~#2-140)

トを用いれば測定箇所毎の伝播速度のばらつきが小さくなる可能性や、今回減衰が大きかった高周波帯域の超音波が使用できる可能性がある。また、今後、シューを使用することより、不要波を除去できる可能性もあり、より精度の高い測定が期待できると考えられる。

#### (4) まとめ

トンネルの覆工を模擬したコンクリート供試体を用いた伝播速度の基礎的実験により、コンクリート供試体の超音波伝播時間から伝播速度変化率を測定した結果、軸方向载荷を行った場合は、载荷方向と直交する方向の供試体内部を反射する測線の伝播速度変化率は低下する計測を示し、軸方向载荷方向と直交する方向に発生する引張応力の発生と整合する傾向が確認できた。また、曲げ载荷を行った場合は、供試体に発生する応力分布と伝播速度の測線の伝播速度は必ずしも整合した結果は確認できなかった。これは、今回の実験ではコンクリート供試体の状態や実験装置上の制約等から载荷荷重の最大が軸方向の载荷時で約 210kN、曲げ方向の载荷時で約 40kN と比較的小さい条件下であったため、コンクリートに発生するひずみもそれぞれ $-50\mu$ ～ $+50\mu$  程度、 $-500\mu$ ～ $600\mu$  程度と小さく、また、伝播速度の測定方法等による測定誤差が大きかったことから、伝播速度と供試体の応力状態が整合する結果が得られなかったと考えられる。

今回の実験では、避けられる測定誤差の要因として、供試体を作成してから養生期間が少ないコンクリートを使用していること、斜め入射のためのシューを使用しなかったことがあげられる。必要な養生期間を確保したうえで十分硬化した状態で水分が抜けたコンクリートを用いれば測定箇所毎の伝播速度のばらつきが小さくなる可能性や、今回減衰が大きかった高周波帯域の超音波が使用できる可能性がある。今後、シューを使用することより、不要波を除去できる可能性もあり、より精度の高い測定が期待できると考えられる。また、今回すべての測定において伝播速度変化率は数%以下と小さいが、これではどれくらいの応力が発生したらその応力レベルが危険／普通／安全かを判断することができない。今後は、模擬供試体や実大規模の覆工コンクリート供試体を用いて高い応力状態下での検証を行い、コンクリート供試体に、どの方向で、どの程度の荷重が作用するかより破壊近傍の応力状態になるかを事前に確認しておく必要がある。

## 2. 2 簡易な超音波伝播速度計を用いた模擬供試体の伝播速度

### 2. 2. 1 実験の概要

実験は、トンネル覆工を模擬したコンクリート供試体を作成し、圧縮試験装置により供試体の長手方向の軸力荷重を与え、載荷段階における供試体の超音波伝播時間を簡易型の測定器を用いて測定し、各載荷段階における伝播速度を把握した。

### 2. 2. 2 簡易な超音波伝播速度計による伝播速度の測定

伝播速度の測定は、実トンネルにおける現場等での測定を考慮して、一般に非破壊でコンクリート構造物の伝播速度やひび割れ深さ、厚さ等の測定に用いられている2つの異なる測定器を用いた。

第一の方法は、送信側と受信側が分かれている簡易な装置（「分離型」と称す）で、供試体内部を透過する伝播速度（以下、「伝播速度（透過）」）とした。分離型の測定器を用いて、送信側・受信側のトランスデューサを供試体側面から挟み込むように配置して伝播速度を測定した。表-2.2.1、写真-2.2.1に分離型の測定器の仕様・外観を示す。

表-2.2.1 分離型の簡易な超音波伝播速度計の仕様

項目	仕様
測定範囲	0.1～999.9 $\mu$ s
測定精度	長さ 250mm で $\pm 0.3 \mu$ s
公称周波数	28kHz
許容使用条件	温度:0～+40°C 湿度:80%RH 以下（結露しないこと）
電源	AC アダプター (AC100V 50/60Hz) または単3形乾電池8本
電源電圧範囲	DC10.8～15.0V
寸法	メーター：240×105×245mm トランスデューサ： $\phi 20 \times 125$ mm
質量	メーター：3.2kg トランスデューサ：0.4kg



写真-2.2.1 分離型の簡易な超音波伝播速度計の外観

第二の方法は、送信・受信センサー間の距離 150mm が固定された簡易な装置(「固定型」と称す。)で、送信・受信センサーを供試体側面に押し当てて、供試体の高さ方向の表面の伝播速度(以下、「伝播速度(表面)」)を測定した。表-2.2.2、写真-2.2.2 に固定型の簡易な超音波伝播速度計を示す。

固定型の簡易な超音波伝播速度計は、固定された送・受信センサー間の距離150mmの超音波伝播時間を測定し、伝播時間から伝播速度を算出するものである。測定時には送・受信センサー先端のスプリング付きのインパクト針を測定対象物表面に押し当てることにより、センサーと接触面の間に潤滑剤等を塗布する必要がない。

表-2.2.2 固定型の簡易な超音波伝播速度計の仕様

項目	仕様
時間測定範囲	15～100ms
超音波音速測定範囲	1500～9990m/s
時間と音速測定精度	±1%
使用超音波周波数	50kHz
送信パルスの周波数	5～20Hz
動作温度	-20～+45°C
電源	アルカリ単3電池 3個
動作時間	100時間
寸法	200×120×35mm
重量	350g

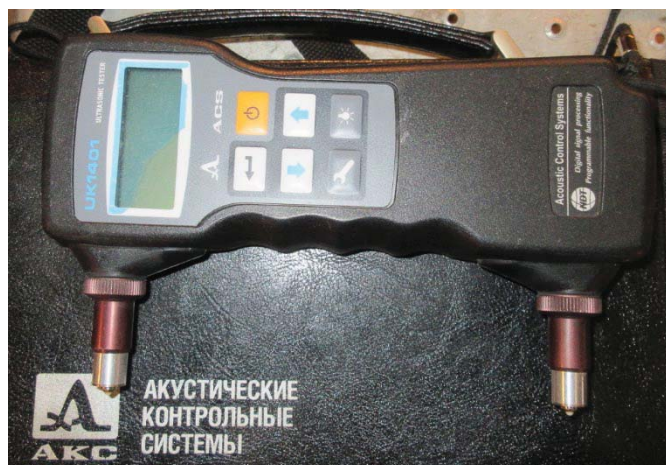


写真-2.2.2 ACS社製の簡易型の超音波伝播速度計の外観

## 2. 2. 3 供試体および実験方法

### (1) 供試体

コンクリート供試体の応力状態と伝播速度との関係を把握するため、写真-2.2.3に示すような呼び強度が異なる3条件の呼び強度15、18、42の角柱供試体（寸法：150mm×150mm×300mm）を作成した。管理供試体（φ100×200mm）を用いた材齢28日による圧縮強度試験時の諸数値を表-2.2.3に示す。3条件の呼び強度を考えたが、結果的に呼び強度15と18はほぼ同程度の圧縮強度、弾性係数の値であった。



写真-2.2.3 角柱供試体（寸法：150mm×150mm×300mm）の外観

表-2.2.3 管理供試体による圧縮試験の諸数値

呼び強度	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
15	17.17	18.27	0.168
18	18.95	17.64	0.180
42	40.00	23.58	0.182

## (2) 実験方法

実験は、コンクリートの応力状態と伝播速度との関係を把握するため、写真-2.2.1 に示す呼び強度が異なる3条件の呼び強度（15、18、42）の角柱供試体（寸法：150mm×150mm×300mm）を用いて一軸圧縮試験を各3供試体について実施した。試験時の測定項目は、供試体表面の縦ひずみ・横ひずみと各ひずみと同方向の伝播速度とした。伝播速度の測定は前述した2つの方法により行った。

第一の方法は、供試体内部を透過する「伝播速度（透過）」として、図-2.2.1 および写真-2.2.4 に示すように角柱供試体の約 1/2 の高さの位置に水平方向に供試体を挟み込むように両側面に送信側・受信側のセンサーを配置して測定を行った。もう一つの第二の方法は、図-2.2.1 および写真-2.2.4 に示すように送信・受信センサー間の距離 150mm の中央部が角柱供試体の約 1/2 の高さの位置になるように超音波伝播速度計のセンサー部を押し当てて供試体の高さ方向の「伝播速度（表面）」を測定した。なお、ひずみは供試体表面の中央部の位置で縦および横方向にひずみゲージを貼付することにより測定した。

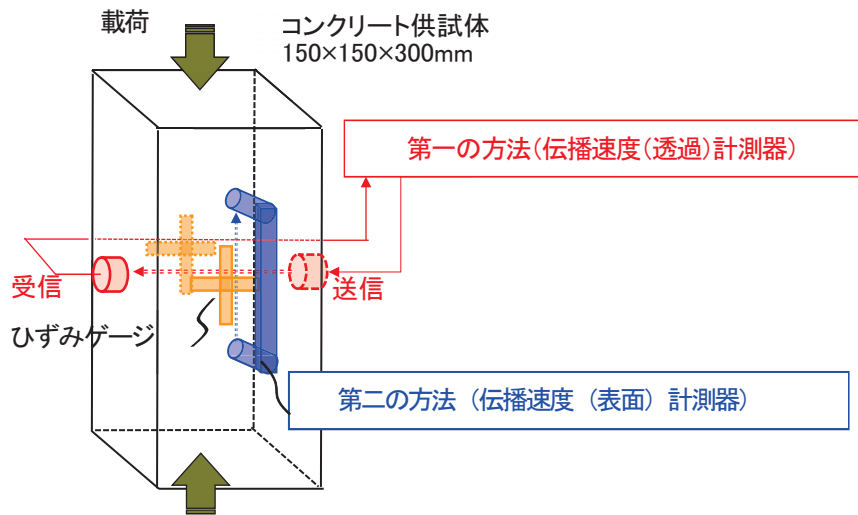


図-2.2.1 角柱供試体を用いた一軸圧縮試験時における伝播速度の測定

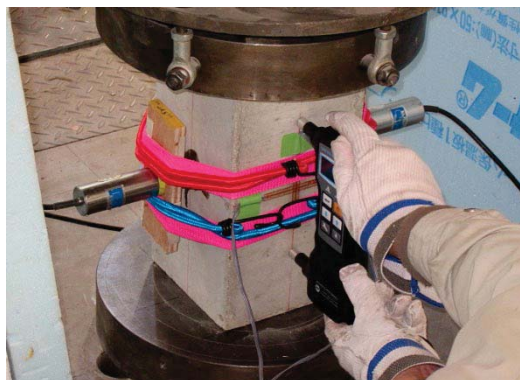


写真-2.2.4 伝播速度の測定状況



### (3) 実験条件

実験は、呼び強度（15、18、42）の異なる角柱供試体の各3本づつを対象として、長手方向に軸圧縮力を作用させた条件で実施した。

## 2. 2. 4 実験結果

### (1) 載荷時における応力度とひずみ

図-2.2.2 に角柱供試体（材齢 40 日）を用いた一軸圧縮試験によって得られた載荷重と供試体表面の縦ひずみとの関係を示す。これより、呼び強度 15 と 18 で管理供試体の結果と同様に、ほぼ同程度の最大荷重であることが分かる。図より、呼び強度 15 と 18 は縦ひずみが概ね  $1000\mu$  程度、呼び強度 42 では概ね  $1500\mu$  程度で傾きが変化していることから、供試体の状態としては、それぞれこの付近までが弾性域であったと考えられる。

図-2.2.3 に縦ひずみと横ひずみの関係を示す。図より横ひずみは、各呼び強度ともに、縦ひずみの傾きが変化する弾性域を超える付近で急激に変化することが分かる。

また、載荷前の状態における2つの方法により測定した伝播速度の結果を図-2.2.4 に示す。図より両値ともに概ね同程度の約  $3500\text{m/s}\sim 4200\text{m/s}$  を示しており、呼び強度が大きくなると伝播速度も高くなる傾向がある。これより載荷前の状態では測定方法による顕著な差はないものと考えられる。

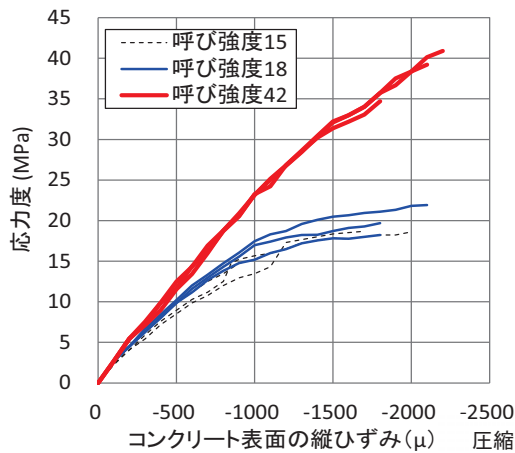


図-2.2.2 応力度とコンクリート表面の縦ひずみの関係

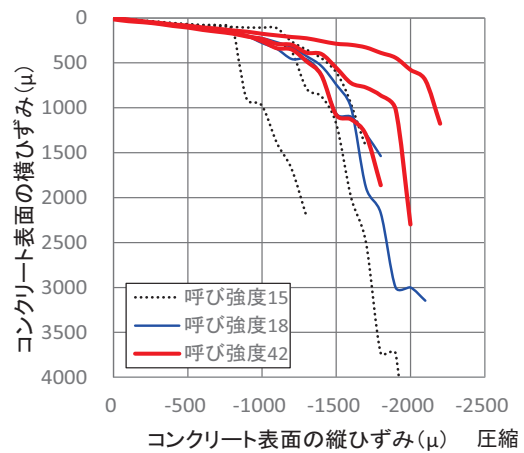


図-2.2.3 縦ひずみと横ひずみの関係<sup>2)</sup>

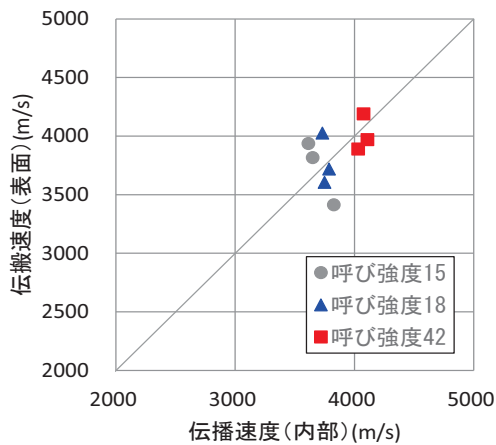


図-2.2.4 荷重前における2つの方法で測定した伝播速度

### (2) ひずみと伝播速度の関係

次に、2つの方法により測定した伝播速度について各伝播速度を測定した区間と同方向の供試体表面のひずみとの関係を整理した。伝播速度(透過)と横ひずみ、伝播速度(表面)と縦ひずみとの関係について、それぞれ荷重時の伝播速度  $c_1$  との関係を図-2.2.5・図-2.2.6に、荷重前における伝播速度  $c_0$  から各荷重段階における伝播速度  $c_1$  までの増分 ( $\Delta c = c_1 - c_0$ ) との関係を図-2.2.7・図-2.2.9に、伝播速度の変化率  $\Delta c / c_0$  との関係について図-2.2.8・図-2.2.10に示す。

図-2.2.5・図-2.2.6より、伝播速度(透過)と伝播速度(表面)は、いずれもばらつきは大きいものの、ひずみの変化に応じて減少または増加している。荷重方向と同一の縦ひずみは圧縮側に变化し伝播速度が増加し、荷重方向と直行する方向の横ひずみは引張側の变化し伝播速度が減少している。これは、それぞれ圧縮されて密度が高まることによる伝播速度の増加と、引張側のひずみにより供試体内部に微細なひび割れ等が生じたことによる伝播速度の減少が考えられる。

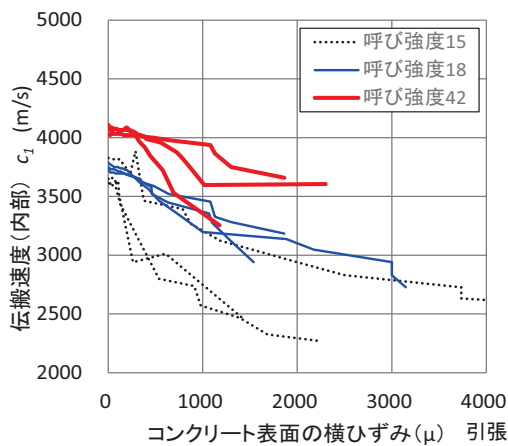


図-2.2.5 伝播速度(透過)とコンクリート表面の横ひずみの関係

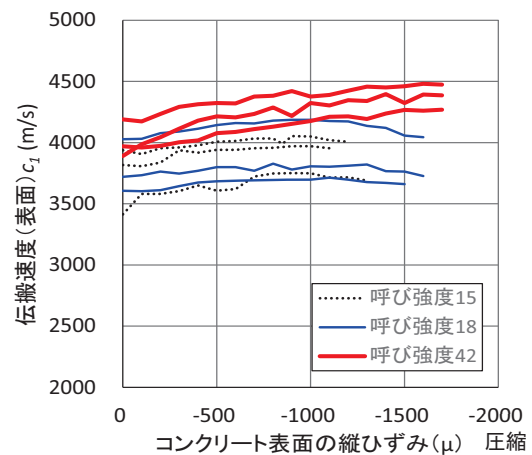


図-2.2.6 伝播速度(表面)とコンクリート表面の縦ひずみの関係

図-2.2.7より伝播速度（透過）の変化は、呼び強度が低い供試体のほうがひずみの増加に伴って減少し始めるのが早く変化量も大きい傾向にあり、数 $100\mu\sim 1000\mu$ 程度の変化量である。図-2.2.9より伝播速度（表面）の変化は、ばらつきがあるが呼び強度が大きい供試体のほうがひずみの減少に伴う変化量が大きい傾向にあり、 $100\mu\sim 500\mu$ 程度の変化量である。図-2.2.8・図-2.2.10より伝播速度（透過）の変化率は最大約 $10\sim 30\%$ 程度、伝播速度（表面）の変化率は最大約 $2\sim 12\%$ 程度であった。

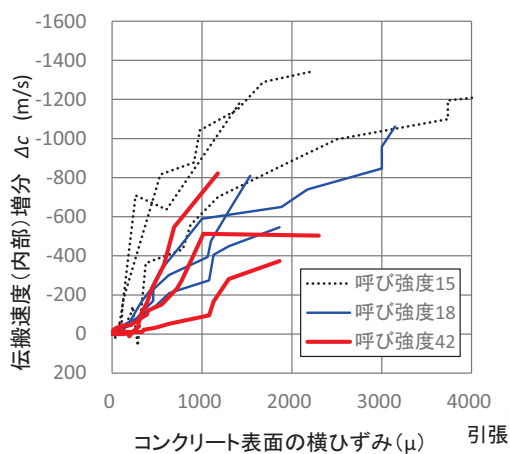


図-2.2.7 伝播速度（透過）増分とコンクリート表面の横ひずみの関係

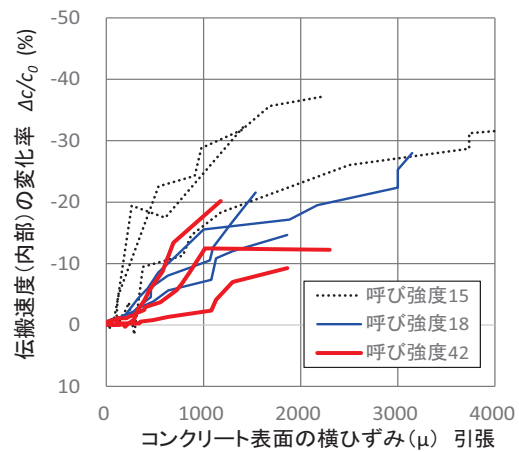


図-2.2.8 伝播速度（透過）の変化率とコンクリート表面の横ひずみの関係

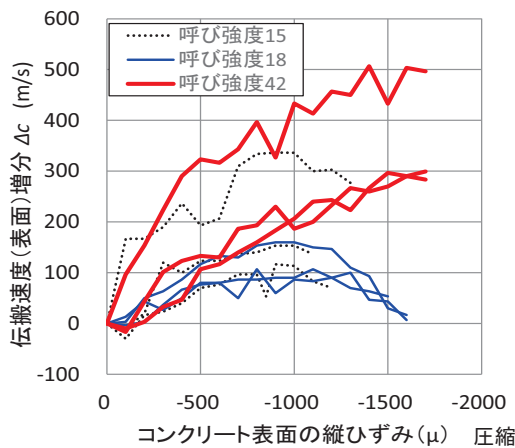


図-2.2.9 伝播速度（表面）増分とコンクリート表面の縦ひずみの関係

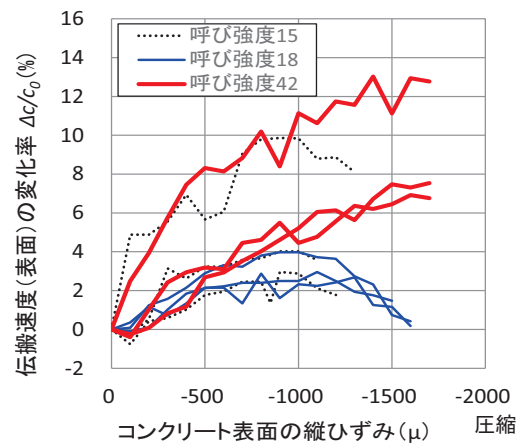


図-2.2.10 伝播速度（表面）の変化率とコンクリート表面の縦ひずみの関係

### (3) まとめ

角柱供試体を用いた一軸圧縮試験時における載荷重と供試体表面のひずみと伝播速度との関係から以下のことが分かった。

軸方向載荷時において、伝播速度を測定する方向のひずみの変化に応じて伝播速度が増減することが分かった。載荷重を段階的に増加すると、供試体の内部を透過する伝播速度（透過）は、横方向の引張ひずみの増加に伴って低下すること、供試体表面の伝播速度（表面）は縦方向の圧縮ひずみの増加に伴って増加することが分かった。本載荷重の範囲において、伝播速度（透過）の変化率は最大約-10~-30%程度、伝播速度（表面）の変化率は最大約2~12%程度であった。今後、覆工内部に発生する応力と伝播速度との関係の把握について実験や供用トンネル等での検証が必要と考えられる。

### 2. 3 まとめ

覆工コンクリートを模擬したコンクリート供試体を用いて、各載荷段階における応力状態と伝播速度の関係について基礎的実験を行った。

トランスデューサを用いた実験から、コンクリート供試体に圧縮もしくは引張のひずみが発生した場合、ひずみと同方向の測線で測定した伝播速度はひずみの変化に応じて圧縮ひずみの場合は正側 (+) に、引張ひずみの場合は負側 (-) に変化することが確認できた。本載荷重の範囲での軸方向載荷時のコンクリート供試体の伝播速度変化率は、載荷重が増加すると若干の変化があるものの、ひずみの発生が $-500\mu\sim+600\mu$ 程度の状況下において $-1\%$ 程度と非常に小さかった。また、本載荷重の範囲での曲げ載荷時のコンクリート供試体の伝播速度変化率は、載荷重が増加すると若干の変化があるものの、本載荷重の範囲でひずみの発生が $-50\mu\sim+50\mu$ 程度の状況下において $\pm 2\%$ 程度と非常に小さいことが分かった。なお、曲げ載荷時の引張のひずみが発生する面におけるコンクリート供試体の伝播速度変化率は、ひずみの発生が $+75\mu$ 程度の状況下において伝播速度変化率は $+4\%$ 程度であった。なお、載荷時における伝播速度は、供試体の伝播速度を測定する伝播経路中の応力状態によって異なり、圧縮が支配的か、引張が支配的かによって変化すると考えられる。

本実験の曲げ載荷および軸方向載荷時における伝播速度変化率が小さかった理由として、本実験においては実験装置、供試体の作成精度等の関係から、供試体に曲げ応力が生じて複雑な応力状態下での伝播速度測定となったこと、そのため最大載荷重が比較的小さく、供試体表面に貼付したひずみの最大値が $\pm 100\mu$ 程度以下と低い応力状態での実験となったことが考えられる。

簡易な超音波伝播速度計を用いた実験から、角柱供試体による軸方向載荷時において、伝播速度を測定する方向のひずみの変化に応じて伝播速度が変化することが分かった。載荷重を段階的に増加すると、供試体の内部を透過する伝播速度（透過）は、横方向の引張ひずみの増加に伴って低下すること、供試体表面の伝播速度（表面）は縦方向の圧縮ひずみの増加に伴って増加することが分かった。本載荷重の範囲において、伝播速度（透過）の変化率は最大約 $10\sim 30\%$ 程度、伝播速度（表面）の変化率は最大約 $2\sim 12\%$ 程度であった。

上記の覆工コンクリートを模擬した供試体による基礎的実験により、トンネルの覆工コンクリートの伝播速度の変化から応力状態を推定する可能性があることが分かった。今後、実物大の覆工コンクリートの供試体や既に供用された実トンネル等において、覆工コンクリートに発生する応力と伝播速度との関係について把握する必要があると考えられる。

### 3. 実物大の覆工コンクリート供試体による伝播速度

#### 3. 1 トランスデューサを用いた実物大の覆工供試体の伝播速度

##### 3. 1. 1 実験の概要

トンネル覆工を模擬したコンクリート供試体を用いて、曲げおよび軸力を載荷した実験では、各載荷段階に応じて供試体内部もしくは表面の伝播速度が変化することが明らかとなった。ここでは、実物大のトンネル覆工コンクリート供試体を用いて、各載荷段階での伝播速度がどのように変化するかの実験を行った。

##### 3. 1. 2 供試体および実験方法

###### (1) 供試体

実験に用いた実物大のトンネル覆工コンクリート供試体の概念図を図-3.1.1に示す。供試体の材料は、プレーンコンクリート（呼び強度  $18\text{N/mm}^2$ 、スランプ  $12\text{cm}$ 、粗骨材最大寸法  $40\text{mm}$ ）である。供試体寸法は、外径半径  $4.85\text{m}$ 、高さ  $1.0\text{m}$ 、厚さ  $0.3\text{m}$  の半円形である。供試体は、土木研究所構内の構造力学実験施設内に型枠を設置し、実験場所でコンクリートを現地にて打設した。

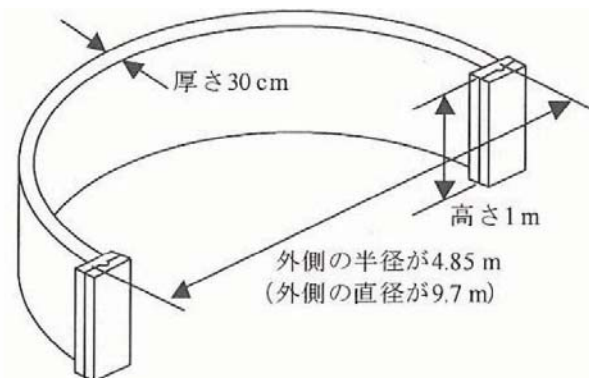
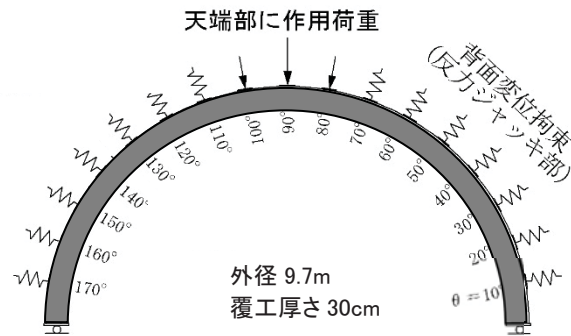


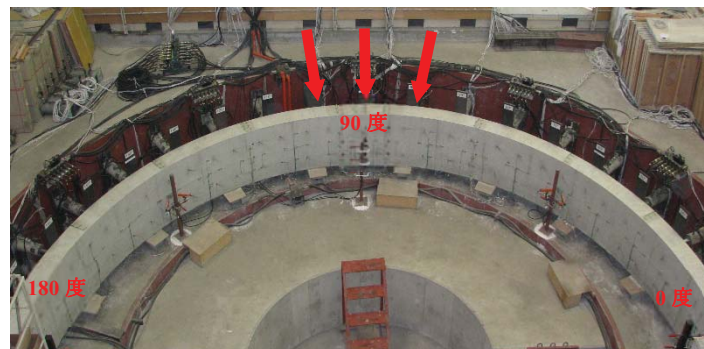
図-3.1.1 実物大のトンネル覆工供試体の概念図

## (2) 実験方法

実験は、覆工载荷試験装置を用いて、実物大のトンネル覆工コンクリート供試体に载荷した。覆工载荷試験装置は、**図-3.1.2**、**写真-3.1.1**に示すように10度ピッチで配置した油圧ジャッキにより覆工外面側から任意に荷重を载荷可能な装置である。



**図-3.1.2** 実物大の覆工载荷実験 (A 载荷 (天端部に荷重を载荷) の場合)



**写真-3.1.1** 覆工载荷実験の状況 (A 载荷 (天端部に荷重を载荷) の場合)

実験は、まず覆工供試体に応力制御により17台全ての油圧ジャッキにより約20kNの荷重を载荷して覆工供試体に軸力を導入した後、トンネル全周から荷重が作用する载荷パターン(C 载荷)により、覆工表面に貼付したひずみゲージが概ね1000 $\mu$ 程度まで载荷した。その後、荷重を除荷し、引き続いて天端部のみに荷重が作用する载荷パターン (A 载荷) によりトンネル覆工供試体が破壊するまで载荷した。各载荷パターンの载荷途中において、適宜、代表的な载荷段階で伝播速度の測定を行った。

伝播速度測定に用いた計測機器は、トランスデューサを用いた。トランスデューサは2.1の測定時と同じものを使用し、トランスデューサの供試体への設置方法も2.1の測定と同じ方法で行った。また、覆工コンクリート供試体の伝播速度の測定方法は、**表-3.1.1**に示すように、①トンネル内面側のみで行う方法 (反射：**図-3.1.3** 参照)、②トンネル覆工の内面側と外面側の厚

み方向で測定（透過：図-3.1.4 参照）の2方法で実施した。

反射の測定は、将来のトンネルの維持管理を考慮して、トンネル覆工内面側から測定する場合を想定して、写真-3.1.2 に示すようにトンネル覆工面とトランスデューサとの接触面にくさび型のシュー（材料：アクリル）を介することで、覆工表面からの超音波の入射角と反射角を変化させた。

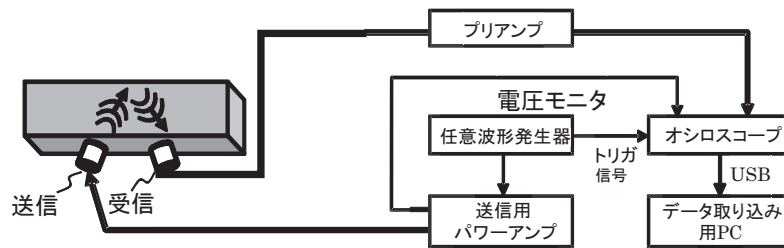


図-3.1.3 伝播速度の測定方法（反射）

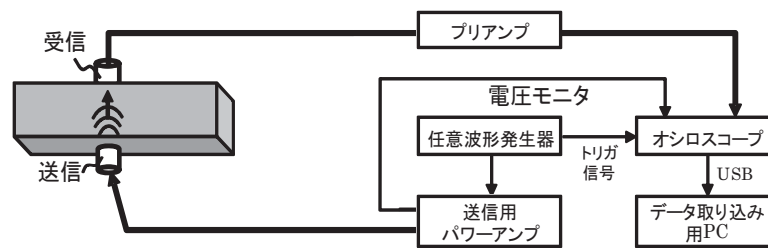


図-3.1.4 伝播速度の測定方法（透過）

表-3.1.1 伝播速度の測定方法

測定方法	トランスデューサの位置		備考
	送信側	受信側	
反射	内面	内面	くさび型シューあり
透過	内面	外面	



写真-3.1.2 反射の伝播速度測定時のくさび型シュー



なお、図-3.1.4 および図-3.1.4 中の送信側トランスデューサからの波形・周波数は、当初、任意波形発生器からチャープ波形（周波数帯域 40～170 kHz、持続時間 3 ms）を 30 ms 間隔で発生させ、送信用パワーアンプで 40 dB 増幅した電気信号を送信用トランスデューサに印加して測定したが、今回の測定条件においては反射波の影響を受けることは少なく、直達波を捉えることが容易なことが確認されたことから、途中から任意波形発生器からはトーンバースト信号（Sin 波、周波数 90 kHz、5cycle）を、3.3 ms 間隔で発生させた測定を行った。送信用パワーアンプで 34 dB 増幅した電気信号を送信用トランスデューサに印加した。トーンバースト信号の Sin 波に 90 kHz を設定したのは、供試体となるコンクリートの周波数特性として約 90 kHz が最も効率よく伝播するためである。

### （3）実験条件

実験は表-3.1.2 に示すように 3 つの供試体を用いて、それぞれトンネル周辺の地盤が膨張性地山等によりトンネル外周面全体から荷重が作用することを想定した荷重パターン（C 荷重）、緩み荷重がトンネルに作用することを想定した荷重パターン（A 荷重）の荷重方式について実施した。

表-3.1.2 実験条件一覧

実験 NO.	供試体 NO.	荷重パターン	荷重方法	備考
NO.1	供試体 1	C 荷重 (CN1)	内面ひずみが約 1000 $\mu$ まで荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>・反射（くさび型シユールあり）</li> <li>・チャープ波</li> </ul>
NO.2		A 荷重 (AN1)	供試体が破壊まで荷重	
NO.3	供試体 2	C 荷重 (CN2)	内面ひずみが約 1000 $\mu$ まで荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>・透過</li> <li>・チャープ波</li> </ul>
NO.4		A 荷重 (AN2)	供試体が破壊まで荷重	
NO.5	供試体 3	C 荷重 (CN3)	内面ひずみが約 1000 $\mu$ まで荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>・透過</li> <li>・トーンバースト信号(Sin 波)</li> </ul>
NO.6		A 荷重 (AN3)	供試体が破壊まで荷重	

表-3.1.3に直径100mm、高さ200mmの管理供試体を用いた荷重実験時におけるコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。理論上における縦波伝播速度 $c_0$ は式(3.1.1)で算出することができる。

表-3.1.3 管理供試体による圧縮試験の諸数値

供試体 NO.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	備考
供試体 1	22.89	20.56	0.173	2312	材令 43 日
供試体 2	24.50	20.18	0.176	2314	材令 43 日
供試体 3	25.34	20.66	0.135	2313	材令 49 日

$$c_0 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \dots\dots\dots(3.1.1)$$

ここで、 $E$ は縦弾性係数、 $\nu$ はポアソン比、 $\rho$ は密度である。

表-3.1.3の諸数値を用いて供試体の理論上における縦波伝播速度 $c_0$ を計算すると表-3.1.4のようになる。表より、各供試体ともに、理論上における縦波伝播速度 $c_0$ は概ね3000m/s程度であり、前述の2.で実施した供試体模型のコンクリート供試体とほぼ同程度であった。

表-3.1.4 管理供試体における各圧縮試験の諸数値から算出した理論上の縦波伝播速度  $c_0$

	供試体 1	供試体 2	供試体 3
縦波伝播速度 $c_0$ (m/s)	3096	3071	3053

### 3. 1. 3 実験結果

#### (1) NO. 1 (反射: C 載荷 (くさび型シューあり))

##### 1) 載荷時の状況

C 載荷における荷重-変位曲線を図-3.1.5 に示す。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、載荷重 P は周方向の  $10^{\circ} \sim 170^{\circ}$  の各載荷位置における 2 台の油圧ジャッキの合計値の平均値を示す。また、載荷時における代表的な載荷段階におけるひずみ分布図を図-3.1.6、図-3.1.7 に示す。

図-3.1.5 より、C 載荷時における各載荷ジャッキの平均値の最大は概ね 700kN 程度、最大変位量は約 7.5mm 程度であった。図-3.1.6、図-3.1.7 より、覆工表面の内外面のひずみはともに同程度の圧縮ひずみが発生しており、覆工供試体は全圧縮状態であることが分かる。

載荷時の覆工の状態は、目視による観察では載荷終了時点までにおいて覆工供試体にはひび割れ等が発生することはなかった。

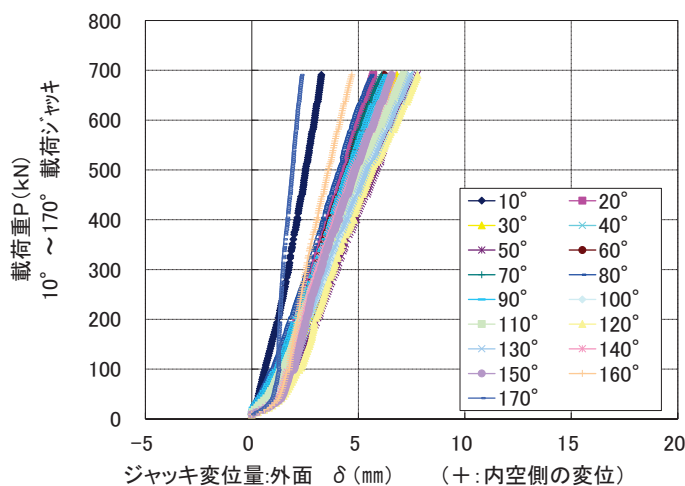


図-3.1.5 荷重-変位曲線

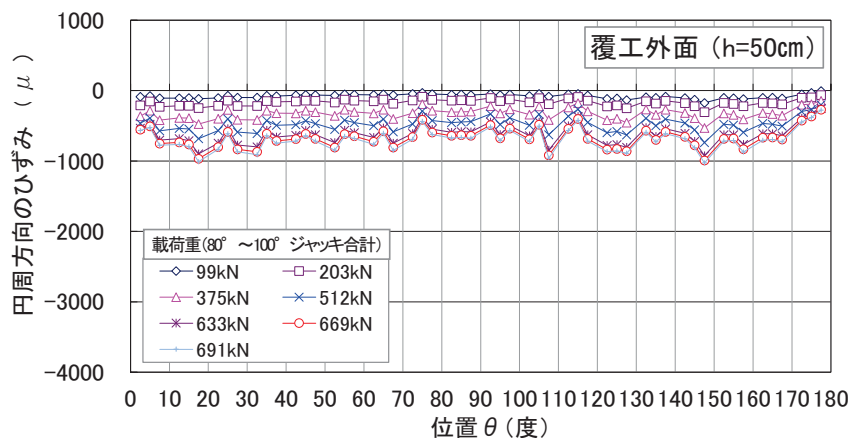


図-3.1.6 覆工外面側のひずみ分布

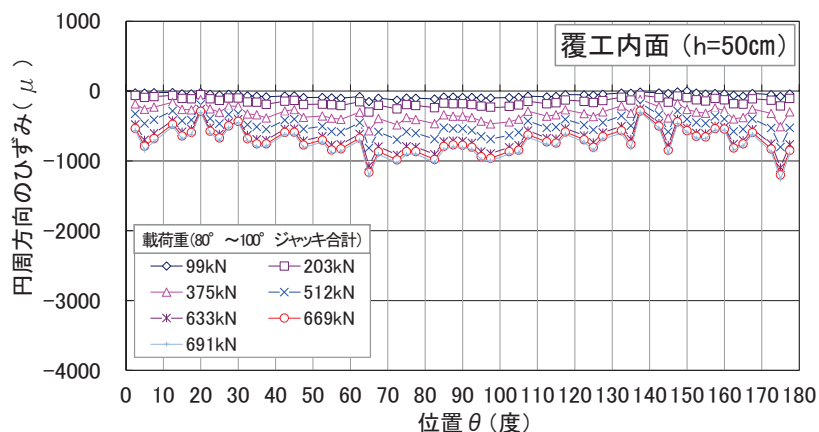


図-3.1.7 覆工内面側のひずみ分布

## 2) 載荷時の伝播速度結果

図-3.1.8 に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側の円周方向のひずみとの関係を示す。伝播速度の各測定箇所について図-3.1.9 に示す。②76° 付近の伝播速度については写真-3.1.3 に示すように載荷初期段階からトランスデューサを固定して測定した。その他の測定箇所については、載荷初期段階と載荷終了間際の段階に、それぞれ伝播速度測定時にその都度トランスデューサをセットし直して測定した。

図より、伝播速度は各測定箇所ともに初期段階から載荷終了間際の段階まで約 4000～約 4700m/s であり、顕著な変化が見られなかった。これは、C 載荷時の載荷重がそれほど大きくなり、覆工内面側の表面ひずみも最大で約 1000 $\mu$  程度であったため、伝播速度も顕著な変化を生じなかったものと考えられる。

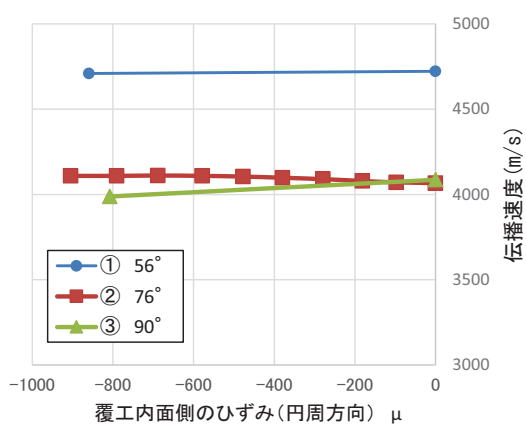


図-3.1.8 覆工内面側のひずみ分布



写真-3.1.3 76° 付近での伝播速度測定状況

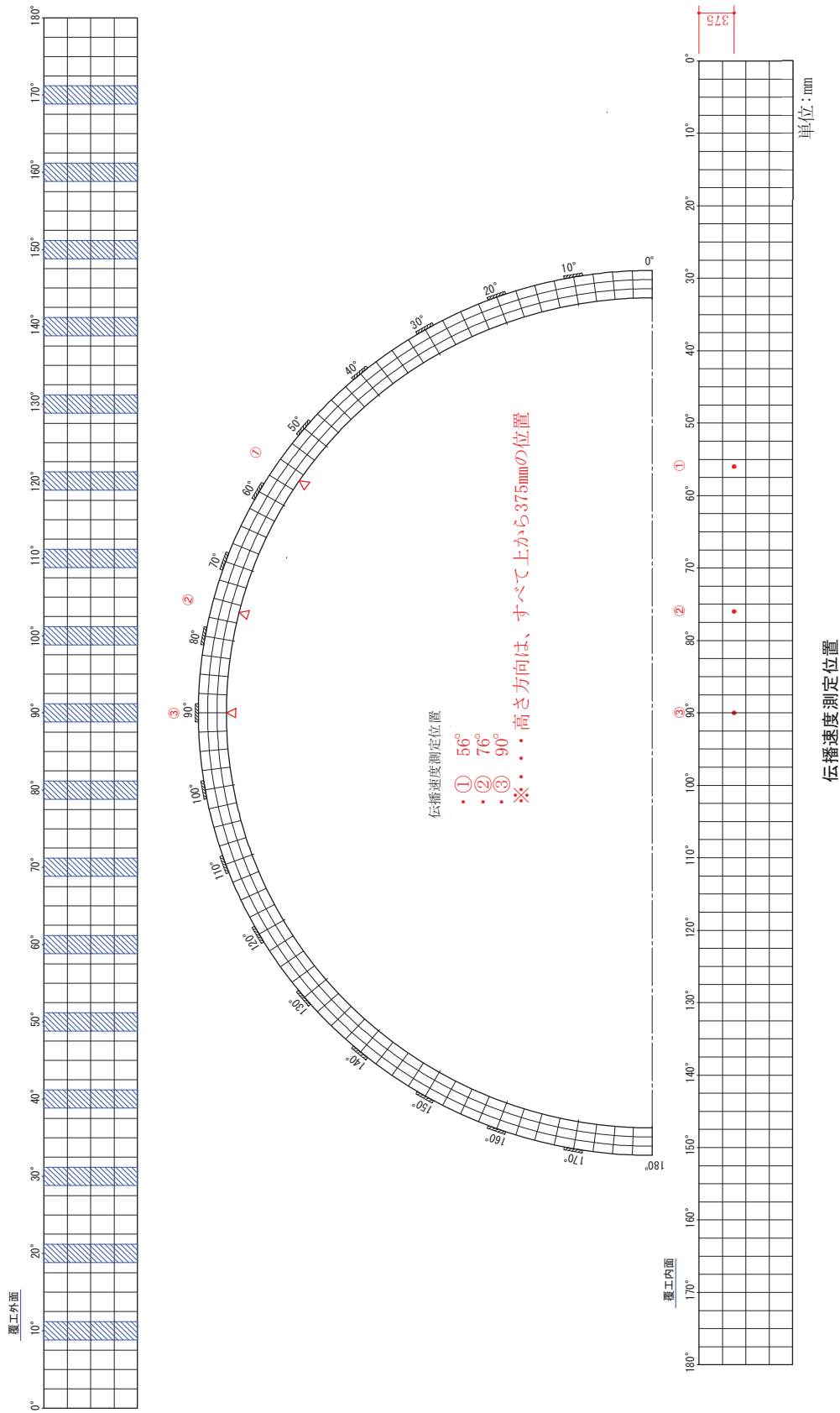


図-3.1.9 伝播速度の測定箇所と測定番号

(2) NO. 2 (反射 : A 載荷 (くさび型シューあり))

1) 載荷時の状況

A 載荷における荷重-変位曲線を図-3.1.10、図-3.1.11 に示す。A 載荷では覆工供試体が破壊するまで載荷することを目標とした。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、載荷重 P は周方向の 80° ~100° の各載荷位置におけるすべての油圧ジャッキの合計値を示す。また、載荷時における代表的な載荷段階におけるひずみ分布図を図-3.1.12、図-3.1.13 に示す。

図-3.1.11 より、A 載荷による破壊時における天端部 (80° ~100° ) の各載荷点では概ね 800kN 程度であり、変位量は 90° で約 30mm、80° と 100° で約 20mm 程度であった。また、図-3.1.12、図-3.1.13 より、覆工表面の内外面のひずみは、90° の外面側で圧縮のひずみが、内面側で引張ひずみが発生した。また、60° ~70° 付近および 110° ~120° 付近の内面側で圧縮ひずみが発生した。これは、天端部からの載荷により、外面側の 90° 付近、内面側の 60° ~70° 付近、110° ~120° 付近で曲げによる圧縮力・引張力が発生したことによる。

載荷時の覆工の状態は、目視による観察では荷重約 200kN (90° ジャッキ平均) で 90° 内面にひび割れを確認、荷重約 280kN (90° ジャッキ平均) で外面 66° のひび割れを確認、荷重 520kN (90° ジャッキ平均) で外面 112.5° のひび割れを確認、荷重約 800kN (90° ジャッキ平均) で外面 90° と内面 65° の圧壊を確認した。その後、載荷能力 850kN 程度まで載荷したものの、覆工供試体を破壊するまでには至らなかった。

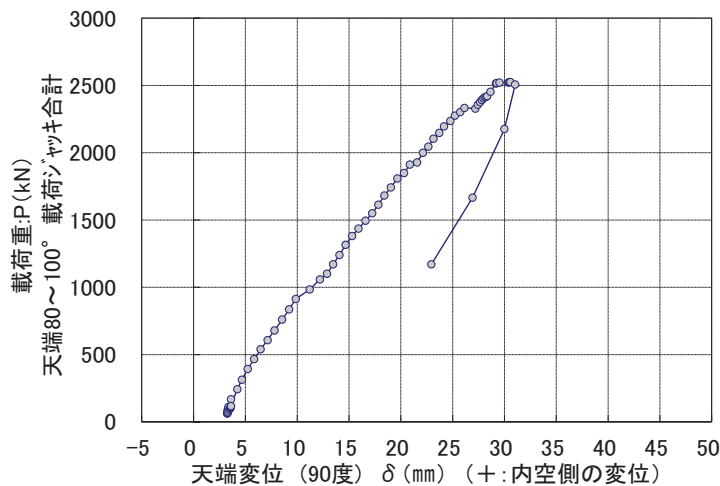


図-3.1.10 荷重-変位曲線 (80° ~100° ジャッキ合計)

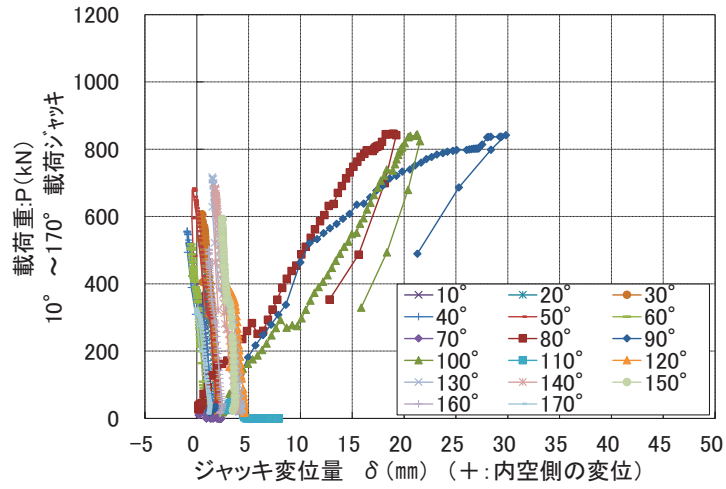


図-3.1.11 荷重-変位曲線 (各载荷点毎)

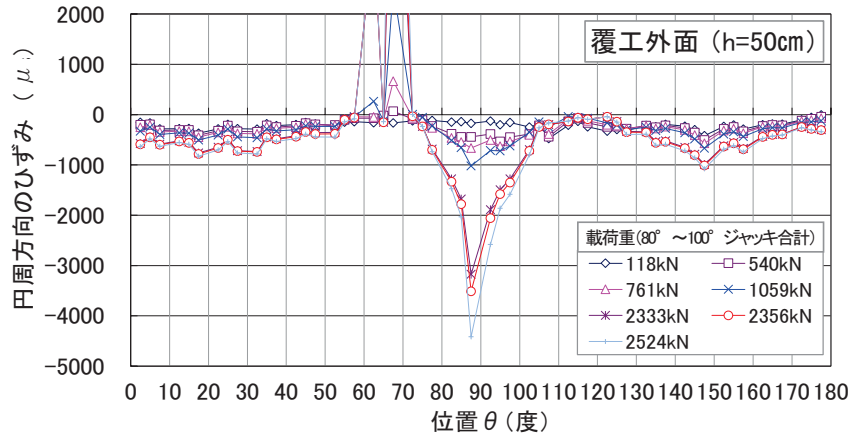


図-3.1.12 覆工外面側のひずみ分布

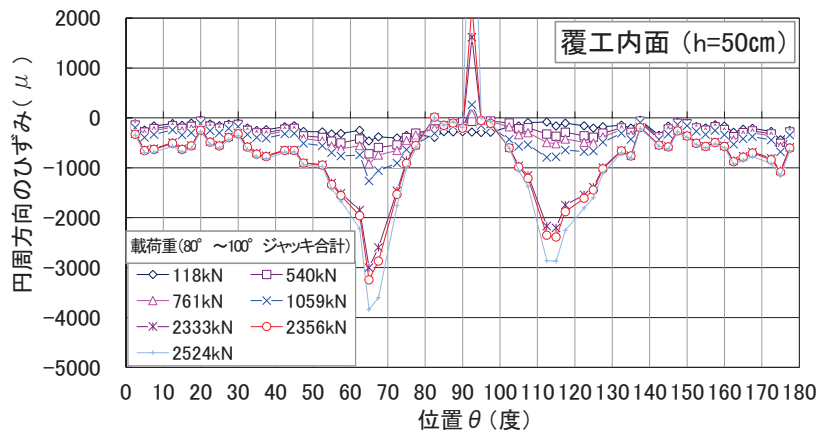


図-3.1.13 覆工内面側のひずみ分布

## 2) 載荷時の伝播速度結果

図-3.1.14 に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側の円周方向のひずみとの関係を示す。伝播速度の各測定箇所についてはC 載荷と同様の図-3.1.9 に示すとおりである。③90° 付近の伝播速度については写真-3.1.4 に示すように載荷初期段階からトランスデューサを固定して測定した。その他の測定箇所については、載荷途中段階等において、それぞれ伝播速度測定時にその都度トランスデューサをセットし直して測定した。

本実験は C 載荷が終了した後に同供試体を用いて引き続いて実施したため A 載荷による残留ひずみ分があり、図-3.1.14 からわかるように初期段階における覆工内面側のひずみ（赤枠マーク）は、必ずしもゼロになっていない。伝播速度は初期段階において測定箇所によって約 4000～5500m/s とばらついている。また、今回、伝播速度の測定箇所周辺のひずみ値の変化は、最大で約 500 $\mu$  程度であった。各測定箇所について個別で見ると、①56°の伝播速度は初期段階時に約 4000m/s 程度から載荷終了間際の段階で約 4700m/s と若干増加しているが、②76°の伝播速度は初期段階時に約 5500m/s 程度から載荷終了間際の段階で約 5400m/s 程度と若干減少している。また、③90°の伝播速度は初期段階の約 4200m/s から載荷終了間際の段階までの間で一時的に増減しているものの、顕著な傾向を示す変化は認められなかった。

次に、これらの伝播速度の変化について考察する。図-3.1.12、図-3.1.13 より、各測定箇所の覆工表面のひずみの挙動を見ると、①56°・②76°の内外面ともに圧縮ひずみを示している。音弾性理論によれば、材料が圧縮力を受けた場合の伝播速度は速くなり、逆に引張力を受けた場合の伝播速度は遅くなるとされていることから、①56°・②76°ともに伝播速度が増加するはずである。ただし、①56°～②76°の間の外面側のひずみを見ると引張ひずみが発生しており、外面側で引張応力が生じていた可能性が考えられ、②76°の伝播速度が低下したものと推察される。③90°の伝播速度については、内面側で引張ひずみが、外面側で圧縮ひずみが発生しており、覆工供試体の厚みの中で圧縮および引張の両方の応力が存在しており、どちらの応力が支配的かによって伝播速度の増減に影響しているものと考えられる。

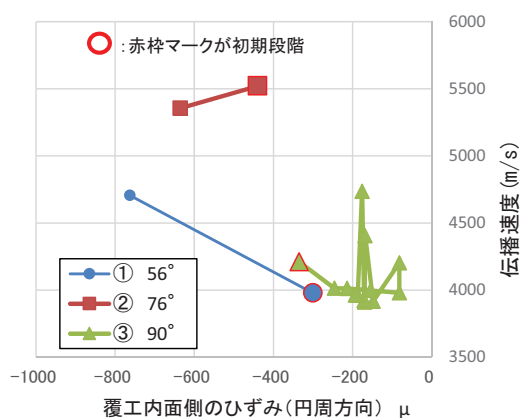


図-3.1.14 覆工内面側のひずみ分布

写真-3.1.4 90° 付近での伝播速度測定状況



(3) NO. 3 (透過: C 載荷)

1) 載荷時の状況

C 載荷における荷重-変位曲線を図-3.1.15 に示す。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、載荷重 P は周方向の  $10^{\circ} \sim 170^{\circ}$  の各載荷位置における 2 台の油圧ジャッキの合計値の平均値を示す。また、載荷時における代表的な載荷段階におけるひずみ分布図を図-3.1.16、図-3.1.17 に示す。

図-3.1.15 より、C 載荷時における各載荷ジャッキの平均値の最大は概ね 800kN 程度、最大変位量は約 9mm 程度であった。図-3.1.16、図-3.1.17 より、覆工表面の内外面のひずみはともに同程度の圧縮ひずみが発生しており、覆工供試体は全圧縮状態であることが分かる。

載荷時の覆工の状態は、目視による観察では載荷終了時点までにおいて覆工供試体にはひび割れ等が発生することはなかった。

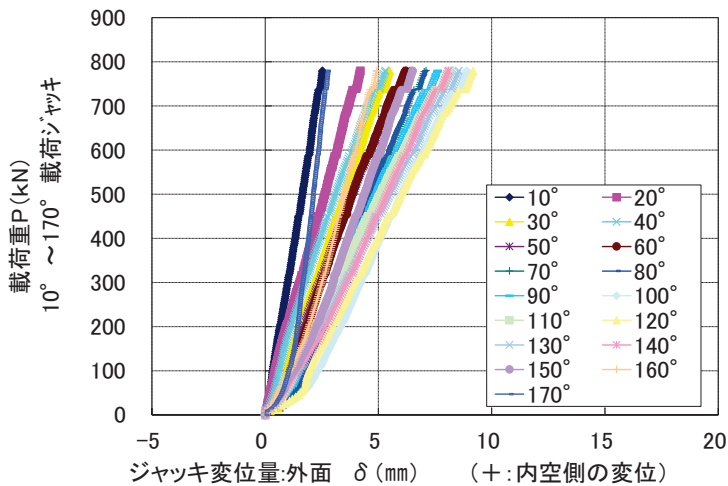


図-3.1.15 荷重-変位曲線

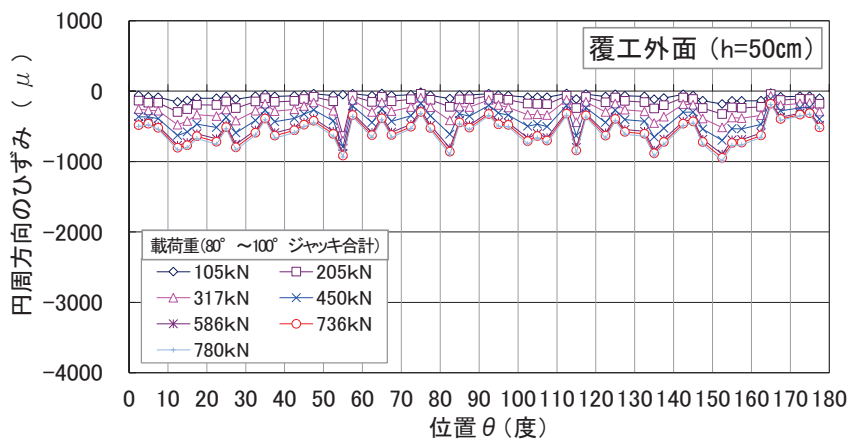


図-3.1.16 覆工外面側のひずみ分布

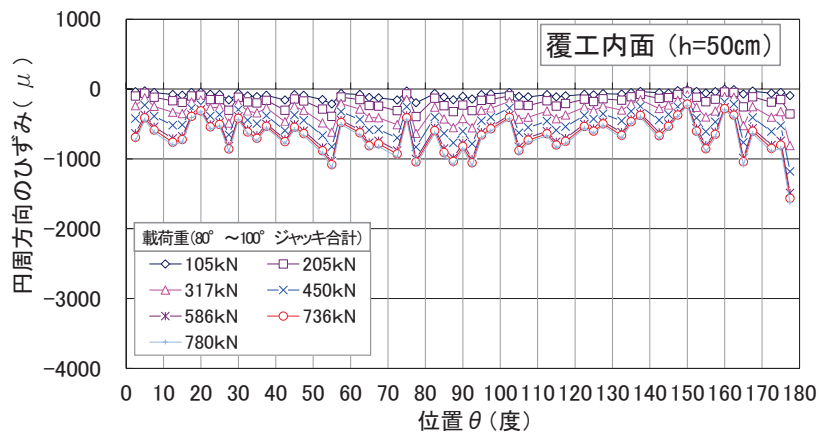


図-3.1.17 覆工内面側のひずみ分布

## 2) 載荷時の伝播速度結果

図-3.1.18 に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側の円周方向のひずみとの関係を示す。伝播速度の各測定箇所について図-3.1.19 に示す。⑥92°の伝播速度については写真-3.1.5 に示すように載荷初期段階からトランスデューサを覆工供試体の内面側と外面側に固定して測定した。その他の測定箇所については、載荷初期段階と載荷終了間際の段階に、それぞれ伝播速度測定時にその都度トランスデューサをセットし直して測定した。

図より、伝播速度は各測定箇所ともに初期段階から載荷終了間際の段階まで約 3700m/s～約 4000m/s であり、圧縮ひずみが大きくなると伝播速度が若干低下する傾向があるものの、顕著な変化が見られなかった。

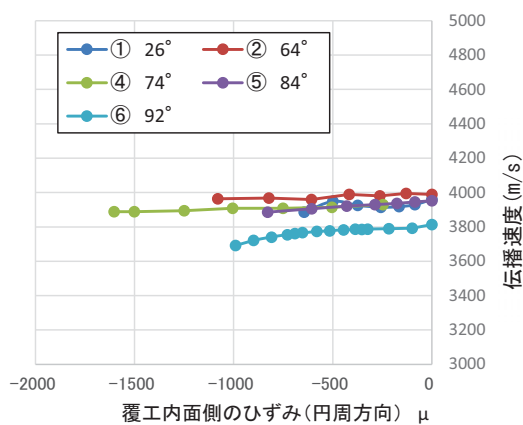


図-3.1.18 覆工内面側のひずみ分布

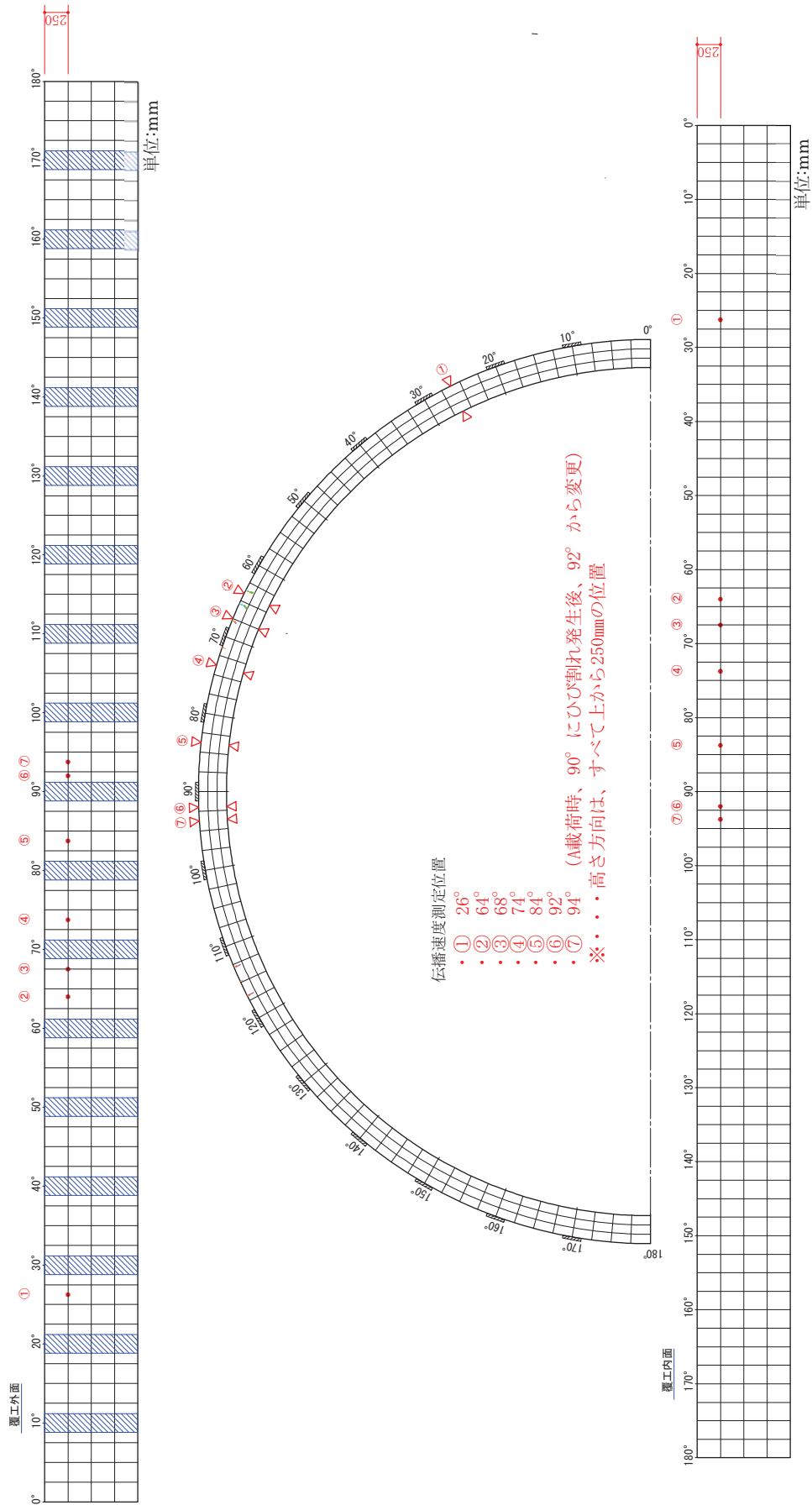


(a) 内面側



(b) 外面側

写真-3.1.5 90° 付近での伝播速度測定状況



伝播速度測定位置

図-3.1.19 伝播速度の測定箇所と測定番号

#### (4) NO. 4 (透過 : A 載荷)

##### 1) 載荷時の状況

A 載荷における荷重-変位曲線を図-3.1.20、図-3.1.21 に示す。A 載荷では覆工供試体が破壊するまで載荷することを目標とした。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、載荷重  $P$  は周方向の  $80^\circ \sim 100^\circ$  の各載荷位置におけるすべての油圧ジャッキの合計値を示す。また、載荷時における代表的な載荷段階におけるひずみ分布図を図-3.1.22、図-3.1.23 に示す。

図-3.1.21 より、A 載荷による破壊時における天端部 ( $80^\circ \sim 100^\circ$ ) の各載荷点では概ね  $850\text{kN}$  程度であり、変位量は  $90^\circ$  で約  $30\text{mm}$ 、 $80^\circ$  と  $100^\circ$  で約  $20\text{mm}$  程度であった。また、図-3.1.22、図-3.1.23 より、覆工表面の内外面のひずみは、 $90^\circ$  の外面側で圧縮のひずみが、内面側で引張ひずみが発生した。また、 $60^\circ \sim 70^\circ$  付近および  $110^\circ \sim 120^\circ$  付近の内面側で圧縮ひずみが発生した。これは、天端部からの載荷により、外面側の  $90^\circ$  付近、内面側の  $60^\circ \sim 70^\circ$  付近、 $110^\circ \sim 120^\circ$  付近で曲げによる圧縮力・引張力が発生したことによる。

載荷時の覆工の状態は、目視による観察では荷重約  $80\text{kN}$  ( $90^\circ$  ジャッキ平均) で  $90^\circ$  内面にひび割れを確認、荷重約  $280\text{kN}$  ( $90^\circ$  ジャッキ平均) で外面の  $65^\circ$  付近、 $115^\circ$  付近のひび割れを確認、荷重約  $820\text{kN}$  ( $90^\circ$  ジャッキ平均) で内面  $115^\circ$  付近の圧壊を確認した。その後、載荷能力  $850\text{kN}$  程度まで載荷したものの、覆工供試体全体を破壊するまでには至らなかった。

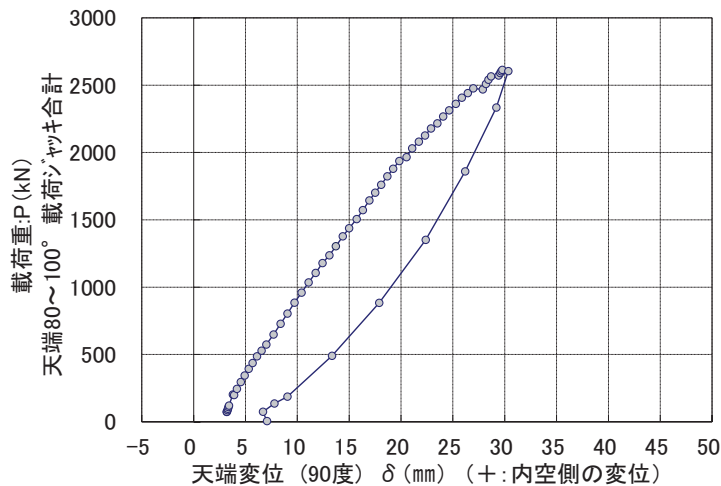


図-3.1.20 荷重-変位曲線 ( $80^\circ \sim 100^\circ$  ジャッキ合計)

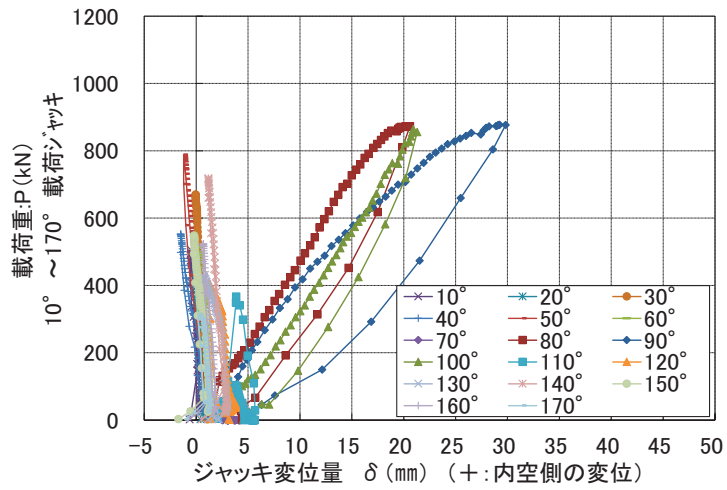


図-3.1.21 荷重-変位曲線 (各載荷点毎)

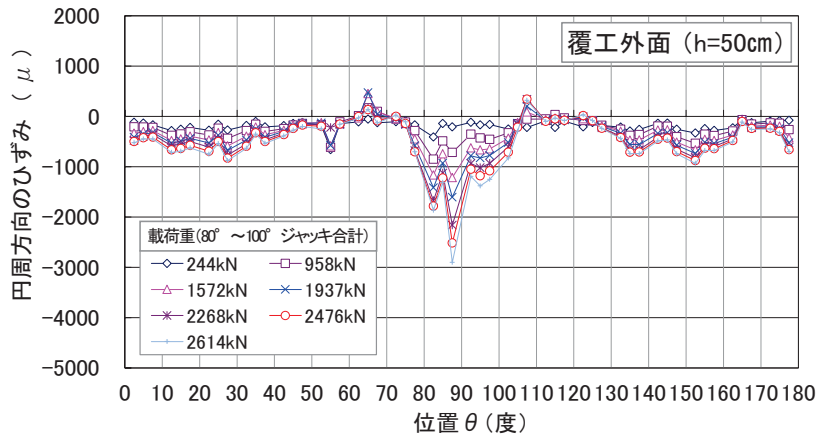


図-3.1.22 覆工外面側のひずみ分布

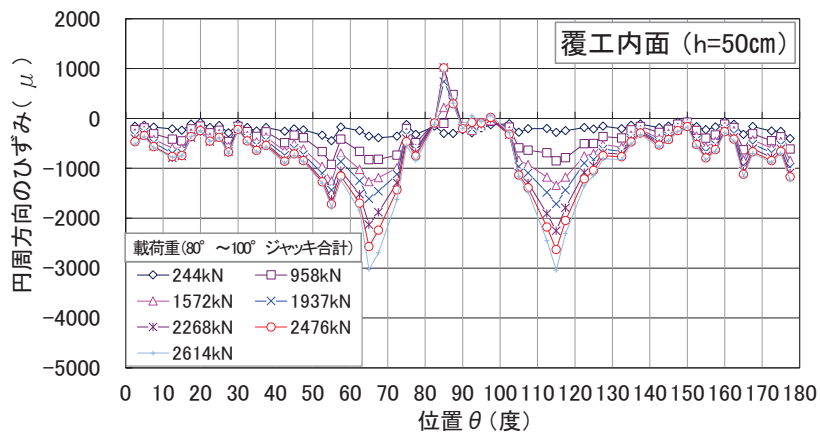


図-3.1.23 覆工内面側のひずみ分布

## 2) 載荷時の伝播速度結果

図-3.1.24 に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側の円周方向のひずみとの関係を示す。伝播速度の各測定箇所については C 載荷と同様の図-3.1.19 に示すとおりである。⑥92° の伝播速度については写真-3.1.6 に示すように載荷初期段階からトランスデューサを固定して測定したが、載荷途中で90° 付近の内面側にひび割れが発生したため、途中で⑦94° に設置し直して測定を行った。その他の測定箇所については、初期段階および載荷途中段階において、それぞれ伝播速度測定時にその都度トランスデューサをセットし直して測定した。

本実験は C 載荷が終了した後に同供試体を用いて引き続いて実施したため、A 載荷による残留ひずみ分があり、図-3.1.24 からわかるように初期段階における覆工内面側のひずみ（赤枠マーク）は、必ずしもゼロになっていない。伝播速度は初期段階において約 3750m/s～3950m/s であった。また、今回、伝播速度の測定箇所周辺のひずみ値の変化は、60° ～70° 付近の測定箇所ですべて約 2500 $\mu$  程度であった。

各測定箇所について個別で見ると、④74° と⑤84° を除いて初期段階時等から約 100m/s～250m/s ほど低下しているのが分かる。図-3.1.22、図-3.1.23 を見ると、覆工供試体表面のひずみは概ね圧縮であるが、外面側約 65° と約 110° 付近、内面側 80° ～90° 付近のひずみが引張となっており、覆工の厚み方向で引張応力、圧縮応力が発生していることが分かる。今回は、覆工の厚み方向の伝播速度を測定していることから、厚み方向に発生する発生応力の引張か圧縮のどちらが支配的になっているかによって伝播速度が変化したものと考えられる。

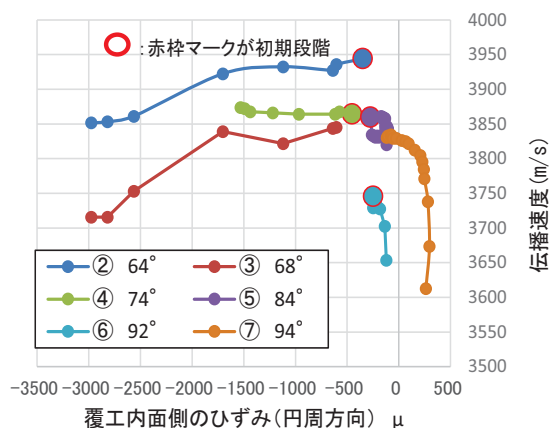


図-3.1.24 覆工内面側のひずみ分布



写真-3.1.6 90° 付近での伝播速度測定状況

(5) NO. 5 (透過 : C 載荷)

1) 載荷時の状況

C 載荷における荷重-変位曲線を図-3.1.25 に示す。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、載荷重 P は周方向の  $10^{\circ}$  ~  $170^{\circ}$  の各載荷位置における 2 台の油圧ジャッキの合計値の平均値を示す。また、載荷時における代表的な載荷段階におけるひずみ分布図を図-3.1.26、図-3.1.27 に示す。

図-3.1.25 より、C 載荷時における各載荷ジャッキの平均値の最大は概ね 800kN 程度、最大変位量は約 8mm 程度であった。図-3.1.26、図-3.1.27 より、覆工表面の内外面のひずみは、内面側の  $50^{\circ}$  付近で大きい圧縮ひずみが計測されているものの、他の箇所は同程度の圧縮ひずみが発生しており、覆工供試体は全圧縮状態であることが分かる。

載荷時の覆工の状態は、目視による観察では載荷終了時点までにおいて覆工供試体にはひび割れ等が発生することはなかったが、除荷後の観察により写真-3.1.7 に示すように内面側  $90^{\circ}$  付近、外面側  $45^{\circ}$  付近にひび割れが発生していることを確認した。

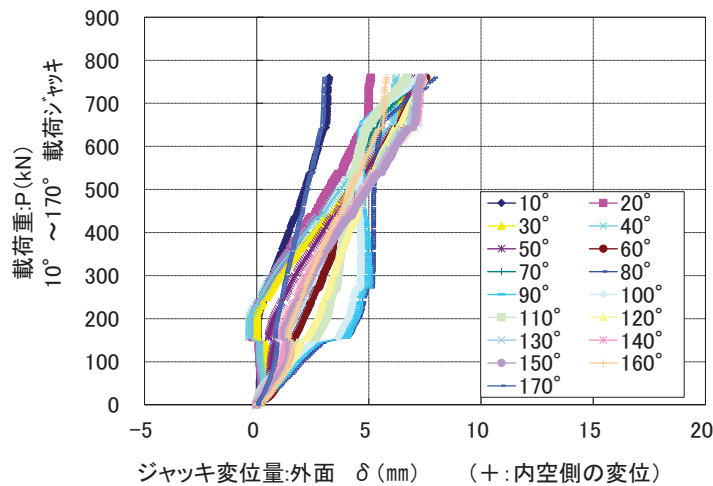


図-3.1.25 荷重-変位曲線



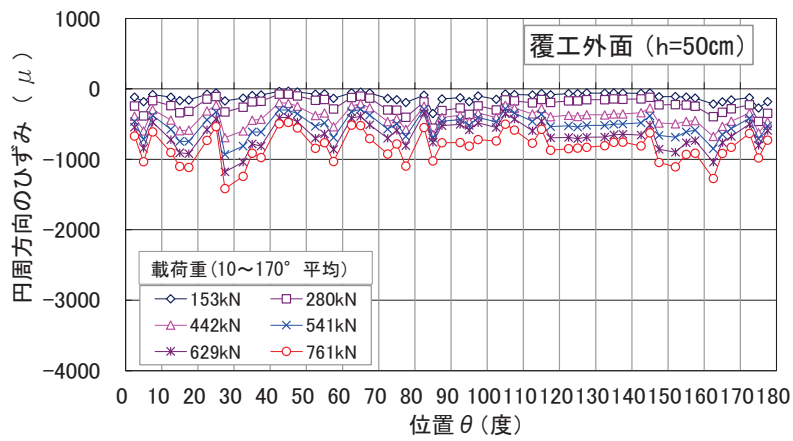


図-3.1.26 覆工外面側のひずみ分布

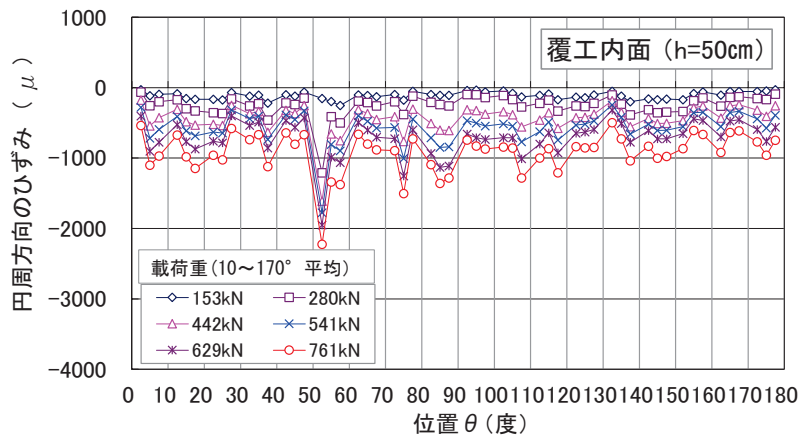


図-3.1.27 覆工内面側のひずみ分布



(a) 内面側 90° 付近のひび割れ



(b) 外面側 45° 付近のひび割れ

写真-3.1.7 除荷後に確認されたひび割れ

## 2) 載荷時の伝播速度結果

図-3.1.28 に伝播速度の各測定箇所を示す。伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工表面に貼付した単軸ゲージもしくは3軸ゲージひずみとの関係を示す。また、図-3.1.29 に各測定箇所の伝播速度結果を示す。図中の凡例記号(●-▲-■-◆)は、●：覆工表面（外面側がO、内面側がI、上面側がU）、▲：円周方向の位置（ $\theta$  角度）、■：供試体底面からの高さ（50cm、75cm）、◆：内面側から見た時のひずみゲージの方向（円周方向 X、高さ方向 Y、X 軸から  $45^\circ$  の方向）を表す。

図-3.1.29(その1～その3)より、載荷初期段階での厚さ方向（30cm）の伝播速度は、約 3700～約 3900m/s であり、荷重の載荷とともに圧縮ひずみは大きくなり、伝播速度が若干低下する傾向がある。しかし、その低下量は最大で約 100m/s 程度であり、顕著な変化が見られなかった。また、載荷初期段階時を基準とした変化量も最大で概ね 2.5%程度と小さい。3軸ゲージのひずみは円周方向（X 方向）が最も大きく、Y 方向、Z 方向のひずみは X 軸に比べて小さい。

図-3.1.29(その4)より、載荷初期段階での縦方向（1000mm）の伝播速度は、約 3700m/s 程度であり、厚さ方向と同様に、荷重の載荷とともに圧縮ひずみは大きくなり、伝播速度が若干低下する傾向がある。また、その低下量は最大で約 50m/s 程度であり、顕著な変化が見られなかった。載荷初期段階時を基準とした変化量も最大で概ね 1.5%程度と小さい。

本実験の C 載荷実験では、覆工供試体の最大ひずみが概ね  $1000\mu$  程度となったところで除荷しているため、このレベルのひずみの状況では伝播速度の変化は顕著な変化は現れないものと考えられる。

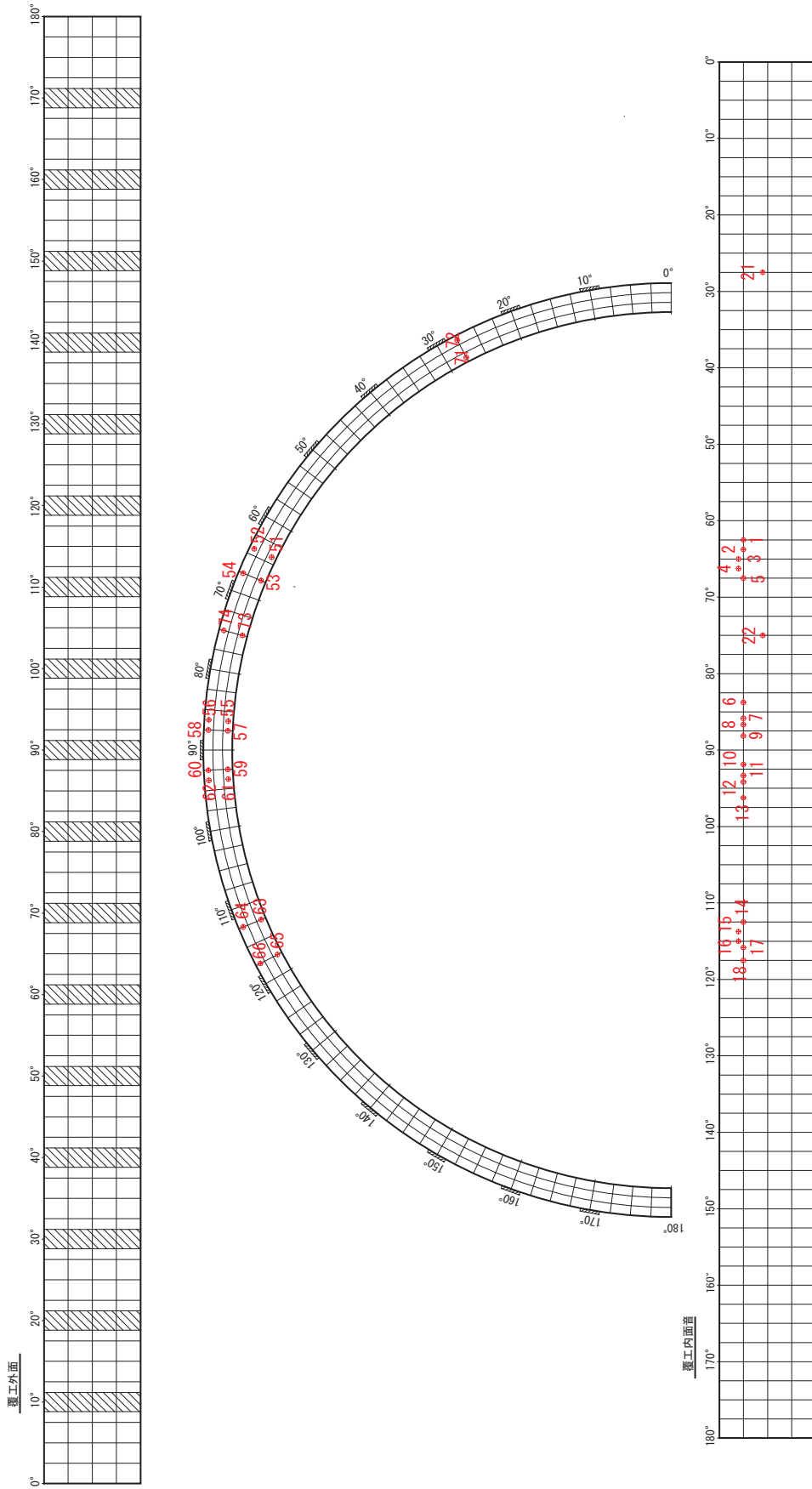


図-3.1.28 伝播速度の測定箇所と測定番号

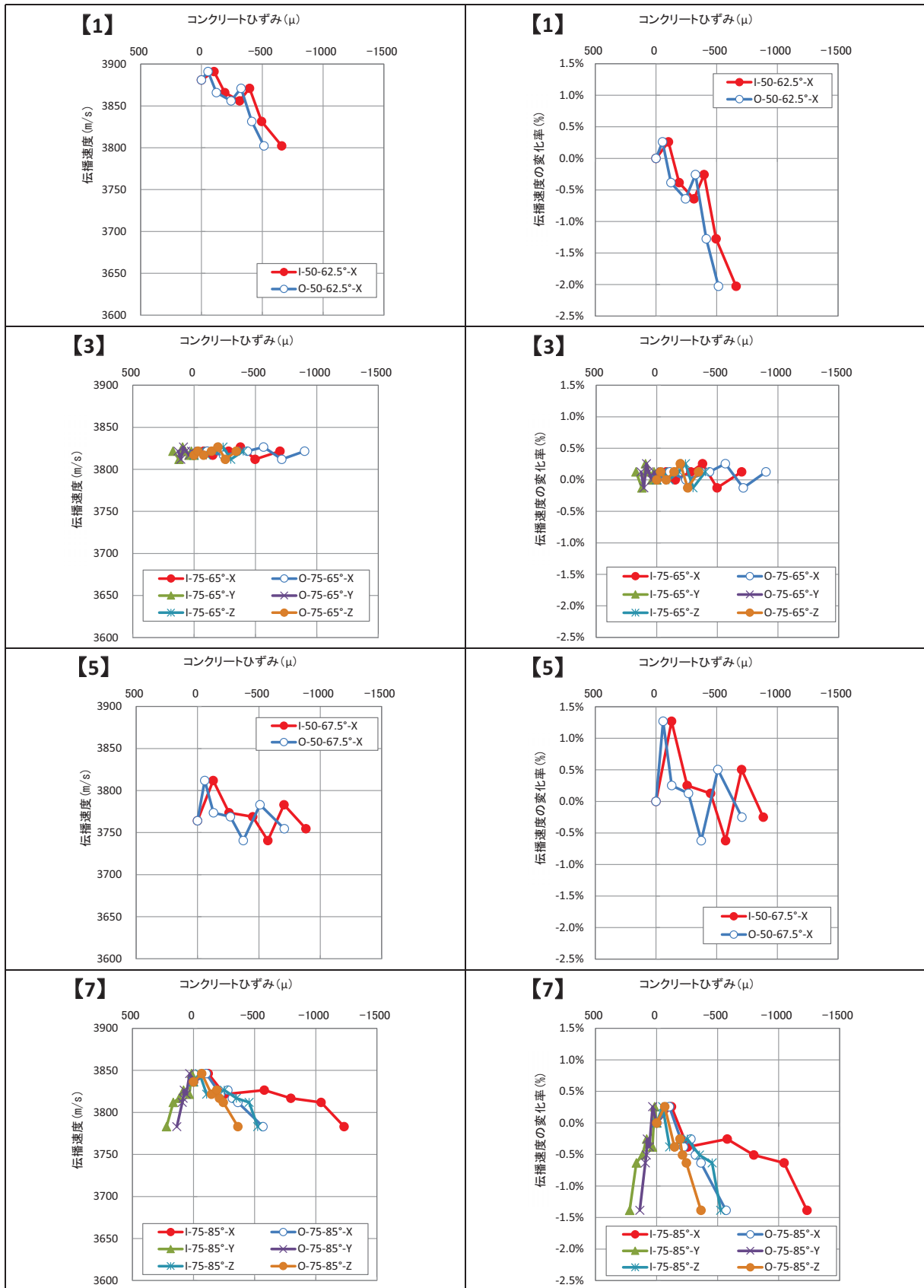


図-3. 1. 29 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 載荷その1)

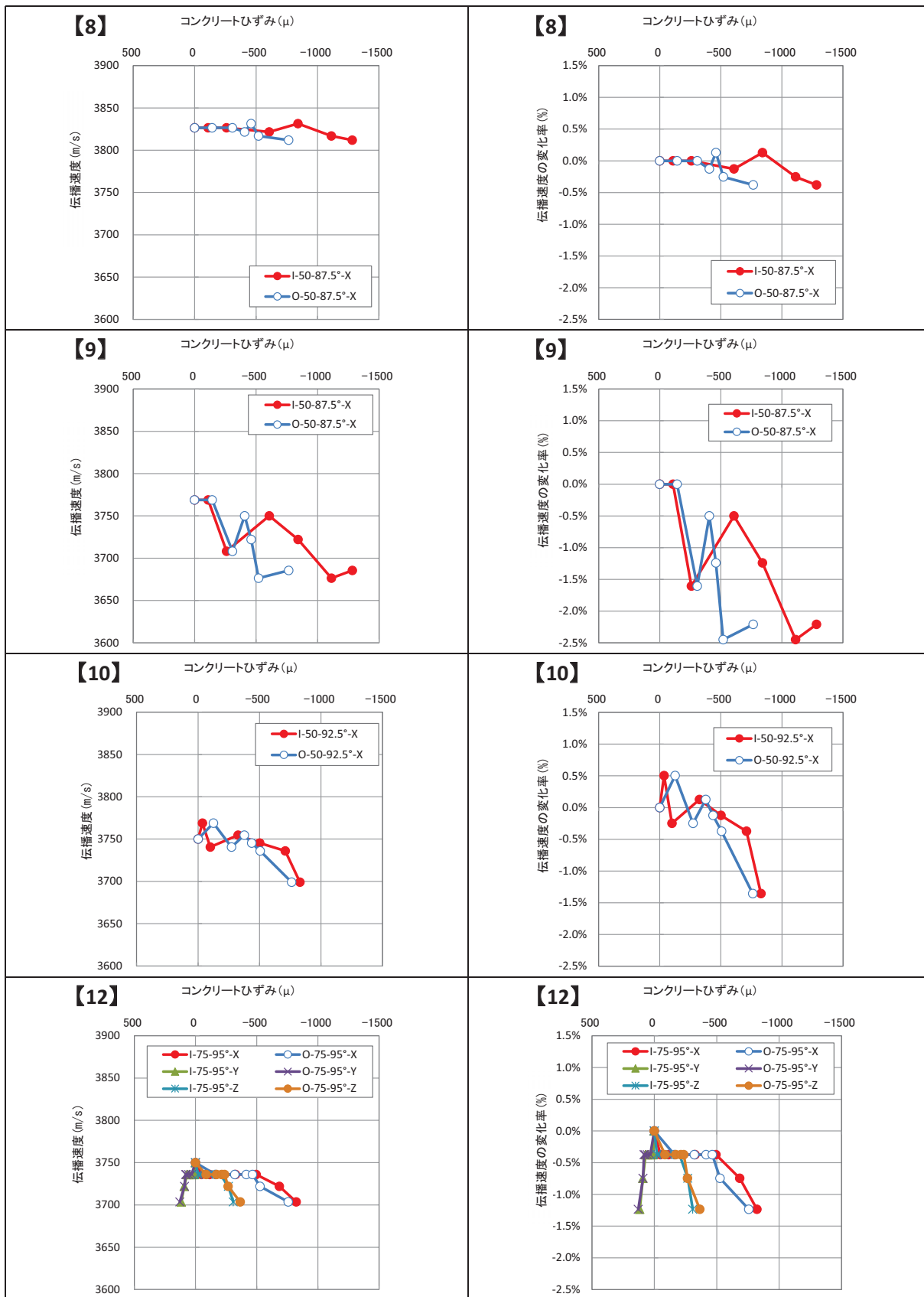


図-3. 1. 29 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 载荷その 2)

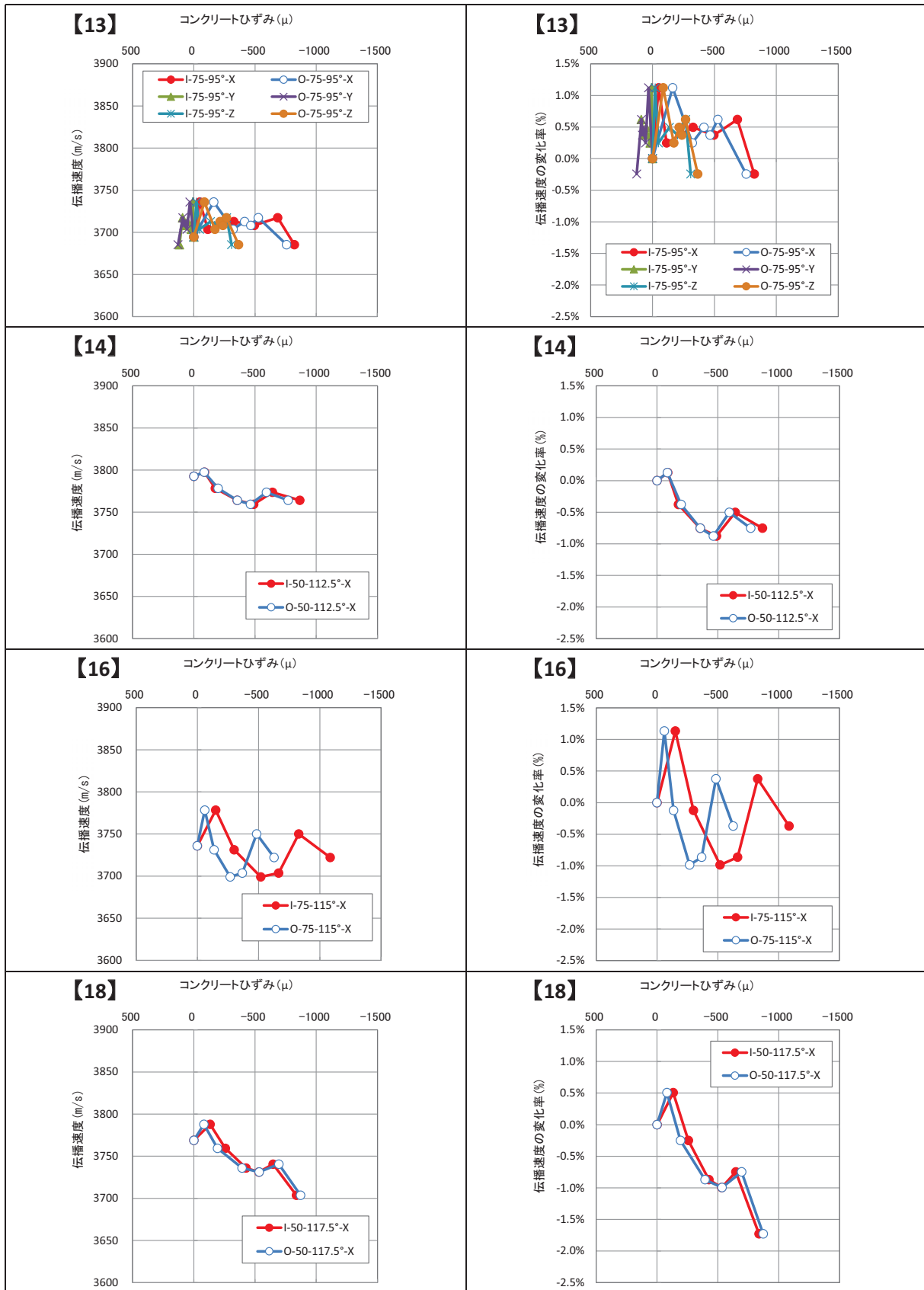


図-3. 1. 29 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 載荷その 3)

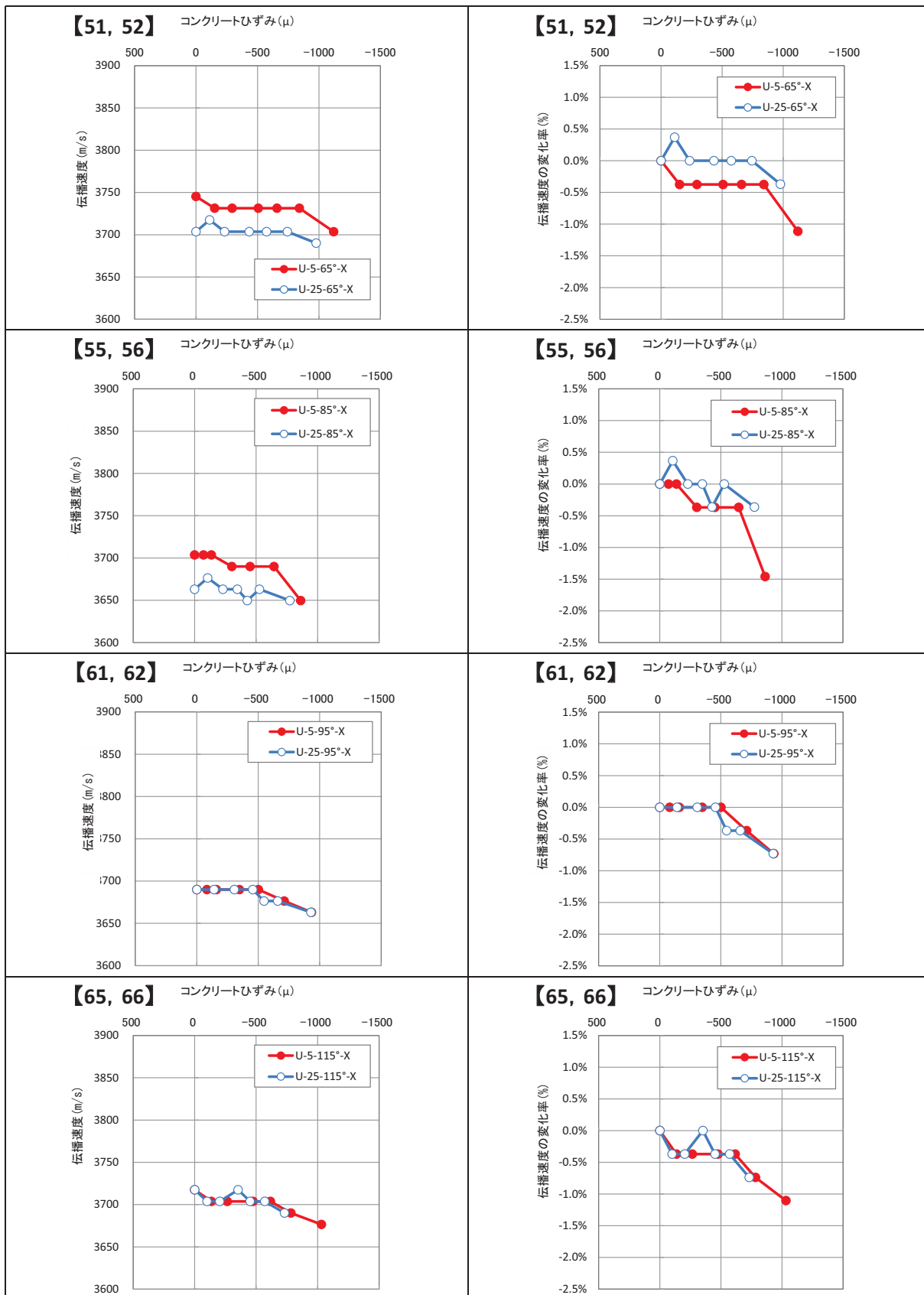


図-3. 1. 29 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 載荷その 4)

(6) NO. 6 (透過 : A 載荷)

1) 載荷時の状況

A 載荷における荷重-変位曲線を図-3.1.30、図-3.1.31 に示す。A 載荷では覆工供試体が破壊するまで載荷することを目標とした。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、載荷重 P は周方向の 80° ~100° の各載荷位置におけるすべての油圧ジャッキの合計値を示す。また、載荷時における代表的な載荷段階におけるひずみ分布図を図-3.1.32、図-3.1.33 に示す。

図-3.1.31 より、A 載荷による破壊時における天端部 (80° ~100° ) の各載荷点では概ね 800kN 程度であり、変位量は 90° で約 30mm、80° と 100° で約 20mm 程度であった。また、図-3.1.32、図-3.1.33 より、覆工表面の内外面のひずみは、90° の外面側で圧縮のひずみが、内面側で引張ひずみが発生した。また、50° ~80° 付近および 100° ~130° 付近の内面側で圧縮ひずみが発生した。これは、天端部からの載荷により、外面側の 90° 付近、内面側の 50° ~80° 付近、100° ~130° 付近で曲げによる圧縮力・引張力が発生したことによる。

載荷時の覆工の状態は、目視による観察では荷重約 190kN (90° ジャッキ平均) で外面側 70° にひび割れ発生、荷重約 340kN (90° ジャッキ平均) で外面側 115° にひび割れ発生、荷重約 355.9kN (90° ジャッキ平均) で外面側 90° 載荷板の際に圧壊が発生、荷重約 710kN (90° ジャッキ平均) で内面側 65° に圧壊が発生した。その後、荷重約 800kN (90° ジャッキ平均) で内面側の 90° から 110° にかけて周方向のひび割れが発生し、ドンと音がして覆工供試体が破壊した。

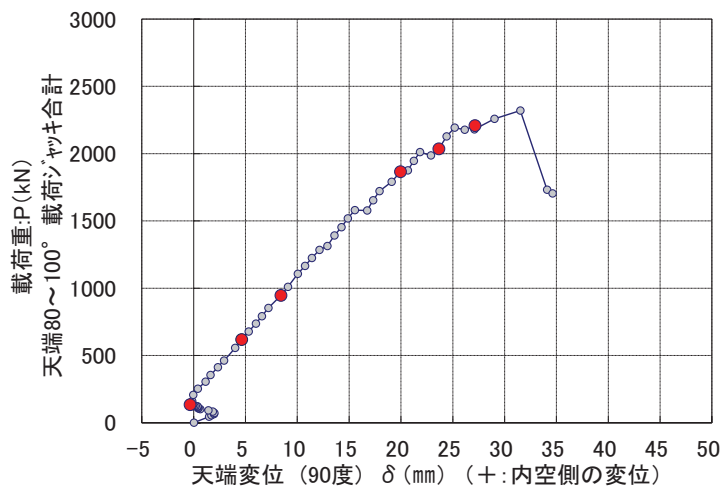


図-3.1.30 荷重-変位曲線 (80° ~100° ジャッキ合計)



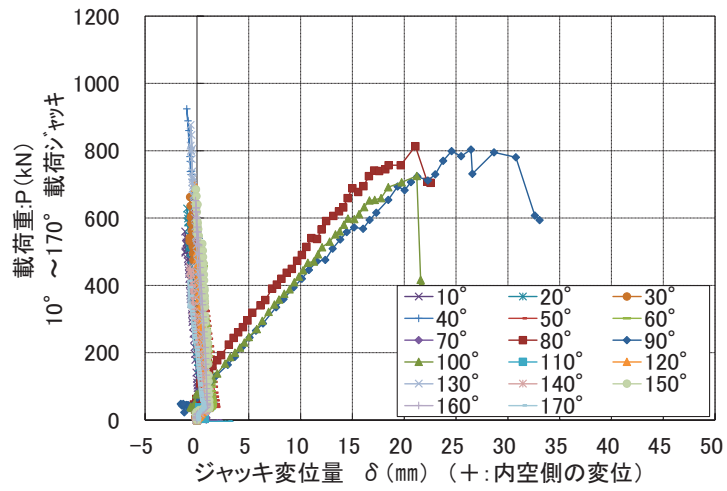


図-3.1.31 荷重-変位曲線 (各載荷点毎)

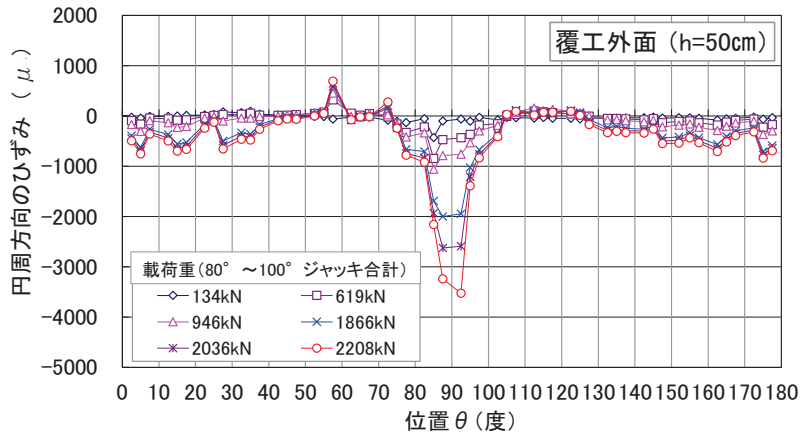


図-3.1.32 覆工外面側のひずみ分布

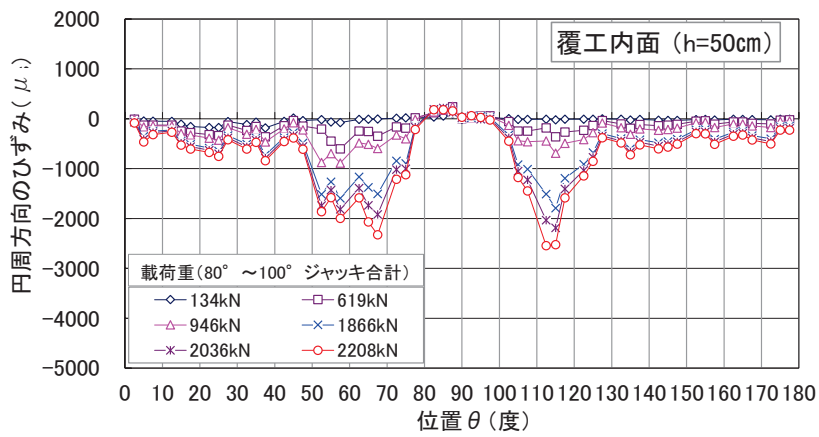


図-3.1.33 覆工内面側のひずみ分布

## 2) 載荷時の伝播速度結果

図-3.1.34 に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側の円周方向のひずみとの関係を示す。伝播速度の各測定箇所については C 載荷と同様の図-3.1.28 に示すとおりである。図中の凡例記号 (●-▲-■-◆) は、●:覆工表面 (外面側が O、内面側が I、上面側が U)、▲:円周方向の位置 ( $\theta$  角度)、■:供試体底面からの高さ (50cm、75cm)、◆:内面側から見た時のひずみゲージの方向 (円周方向 X、高さ方向 Y、X 軸から  $45^\circ$  の方向) を表す。

伝播速度の測定は、載荷初期段階で  $92.5^\circ$  の位置にトランスデューサを固定して実施した。その他の計測箇所については、初期段階および載荷途中段階において、それぞれ伝播速度測定時にその都度トランスデューサをセットし直して測定した。なお、図中のひずみの値は、A 載荷の前に実施した C 載荷による残留ひずみ分があったが、載荷前のひずみ値を基準に増減を示した。

図-3.1.34(その1~その3)より、載荷初期段階での厚さ方向 (30cm) の伝播速度は、約 3650m/s ~ 約 3900m/s であり、荷重の載荷とともに Y 方向のひずみを除いて圧縮ひずみが大きくなり、伝播速度が低下する傾向にあることが分かる。その低下量は  $90^\circ$  周辺で最大で約 400m/s ~ 500m/s 程度と大きく変化しており、変化率も -14% となった。3 軸ゲージのひずみでは円周方向 (X 方向) が最も大きく、Y 方向、Z 方向のひずみは X 軸に比べて小さい。なお、Y 方向 (覆工供試体の高さ方向) のひずみは、全体的に引張側のひずみが発生している箇所が多く、荷重の増加によって覆工供試体の高さ方向にポアソン効果により若干伸びている傾向がうかがえる。

図-3.1.34(その4)より、載荷初期段階での縦方向 (1000mm) の伝播速度は、約 3700m/s 程度であり、厚さ方向と同様に、荷重の載荷とともに伝播速度が低下する傾向にある。伝播速度の低下量は最大で約 200m/s 程度である。載荷初期段階時を基準とした変化率は最大で概ね 6% 程度である。

本実験の A 載荷実験では、覆工供試体が破壊するまで荷重を載荷しており、覆工供試体の表面のひずみも大きな値を示しており、伝播速度、ひずみとも比較的变化が大きくなった、本実験において、覆工供試体内部を透過する方向で伝播速度の測定を実施しており、供試体内部の材料が圧縮もしくは引張応力が同時に作用している場合には、どちらの応力が支配的となっているかによって異なると考えられる。図-3.1.34 の【9】、【10】、【14】、【51、52】、【55、56】、【61、62】、【65、66】の伝播速度とひずみの関係を見ると、圧縮応力が作用した場合においても覆工供試体の表面ひずみが  $500\mu \sim 1000\mu$  程度の変化が生じると伝播速度が低下する傾向にあると考えられる。

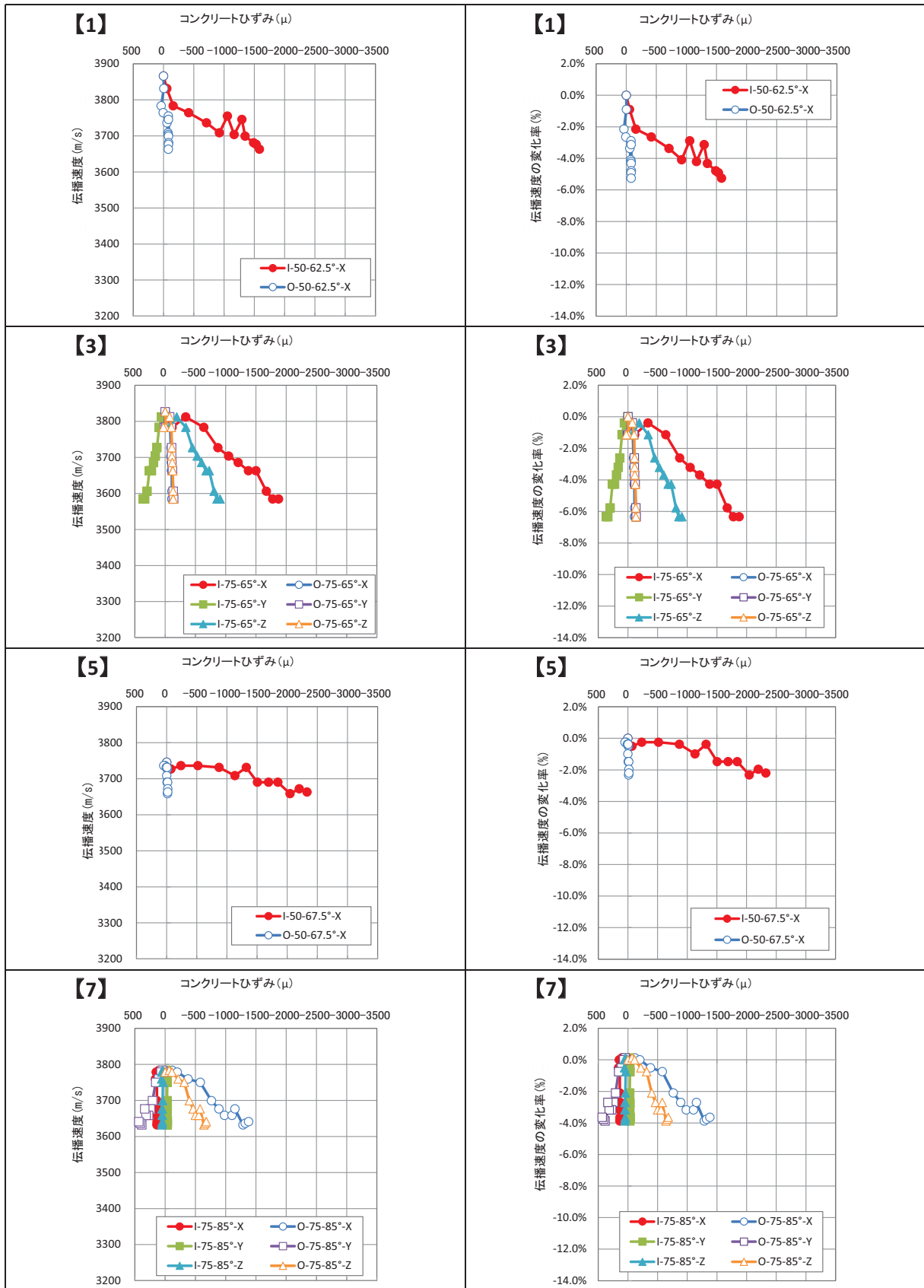


図-3.1.34 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 载荷その1)

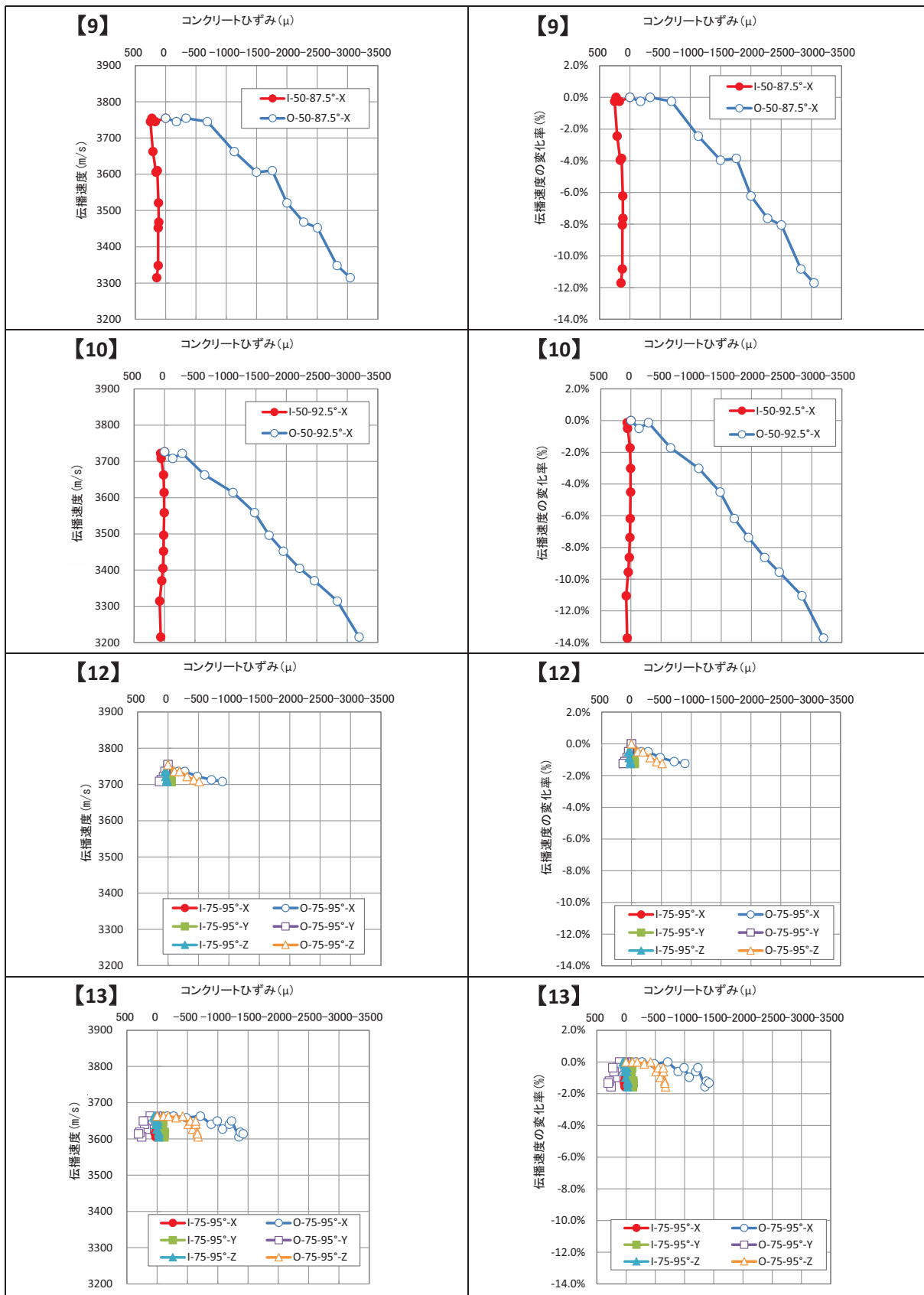


図-3.1.34 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 載荷その2)

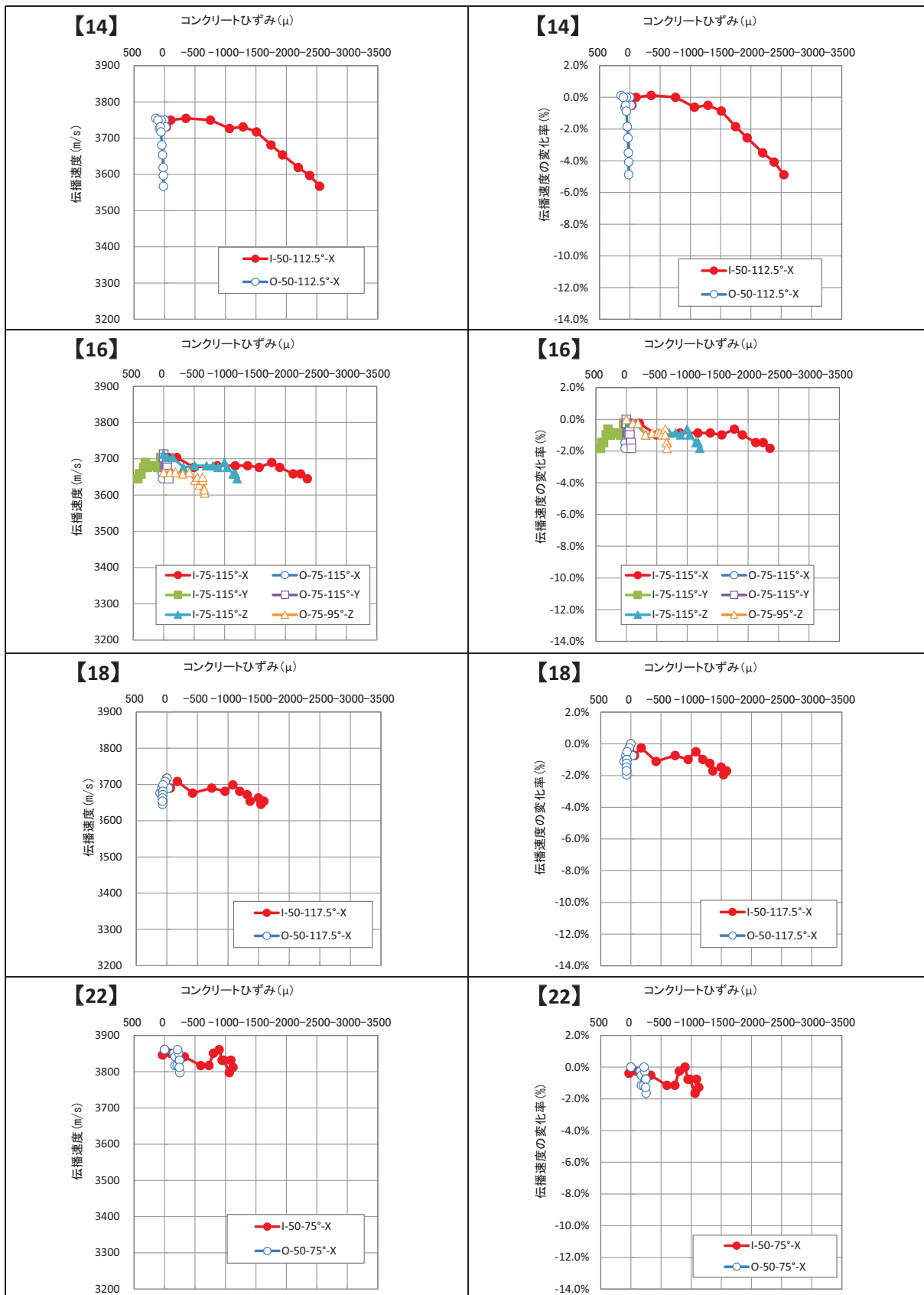


図-3. 1. 34 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 載荷その3)

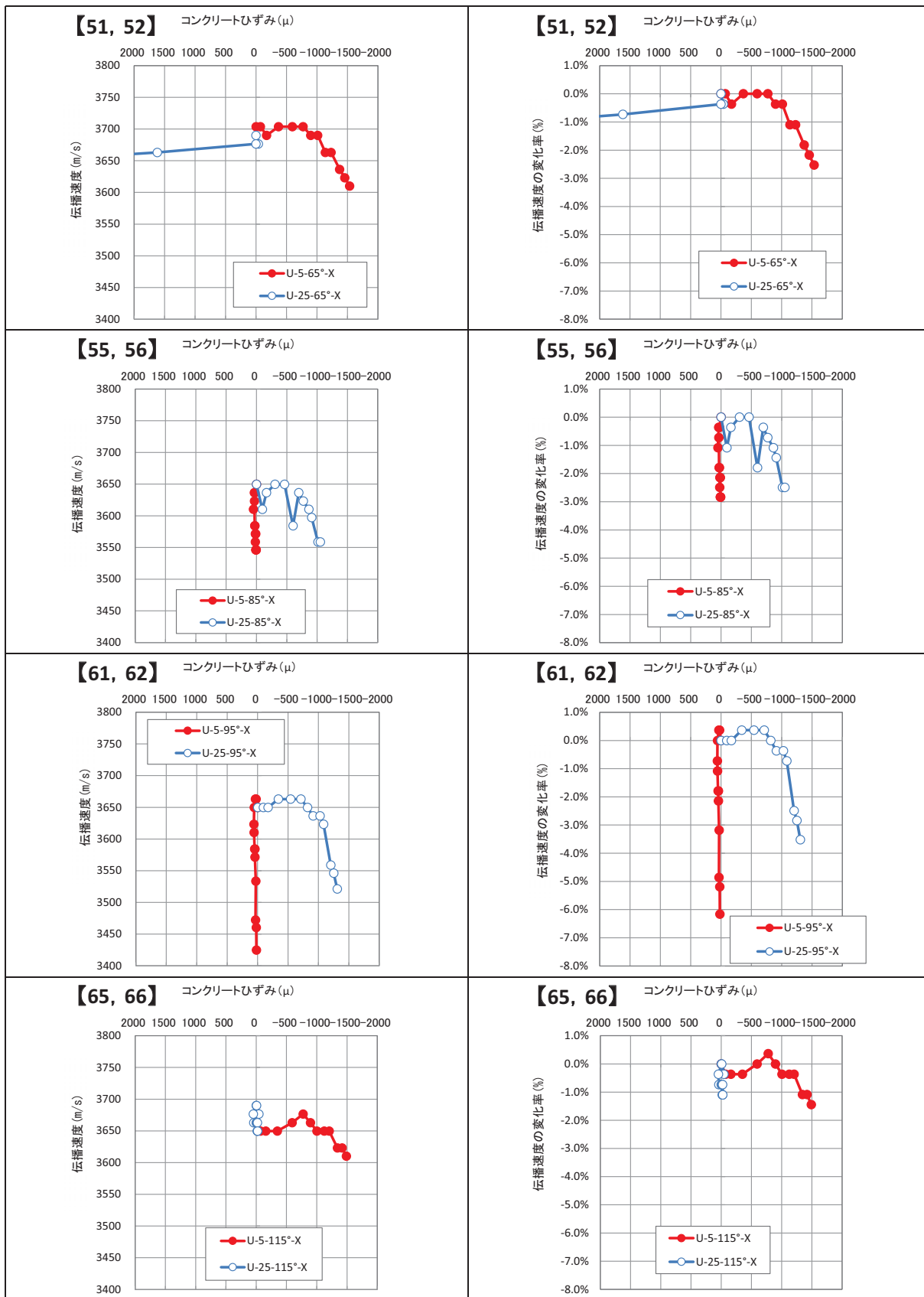


図-3.1.34 各測定箇所におけるひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 载荷その4)

### 3. 2 簡易な超音波伝播速度計を用いた実物大の覆工供試体の伝播速度

#### 3. 2. 1 実験の概要

トンネル覆工を模擬したコンクリート供試体を用いて、曲げおよび軸力を載荷した実験において、トランスデューサを用いた各荷重段階の供試体内部の伝播速度を測定が変化することが明らかとなった。ここでは、実物大のトンネル覆工コンクリート供試体を用いて、簡易な超音波伝播速度計を用いた場合の各載荷段階での伝播速度がどのように変化するかの実験を行った。

#### 3. 2. 2 供試体および実験方法

##### (1) 供試体

実験に用いた実物大のトンネル覆工コンクリート供試体の概念図を図-3.2.1に示す。供試体の材料は、プレーンコンクリート（呼び強度  $18\text{N/mm}^2$ 、スランプ  $12\text{cm}$ 、粗骨材最大寸法  $40\text{mm}$ ）である。供試体寸法は、外径半径  $4.85\text{m}$ 、高さ  $1.0\text{m}$ 、厚さ  $0.3\text{m}$  の半円形である。供試体は、土木研究所構内の構造力学実験施設内に型枠を設置し、実験場所でコンクリートを現地にて打設した。

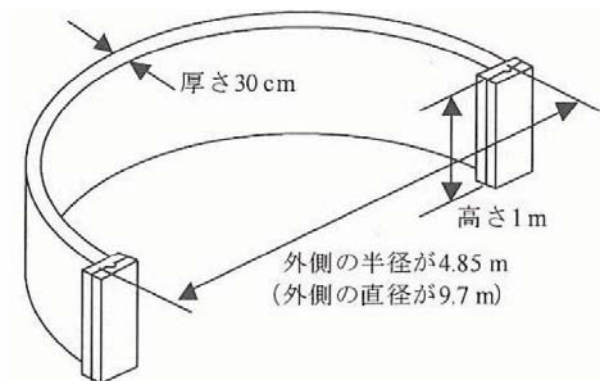
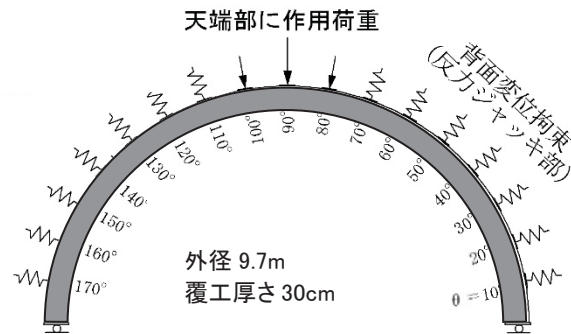


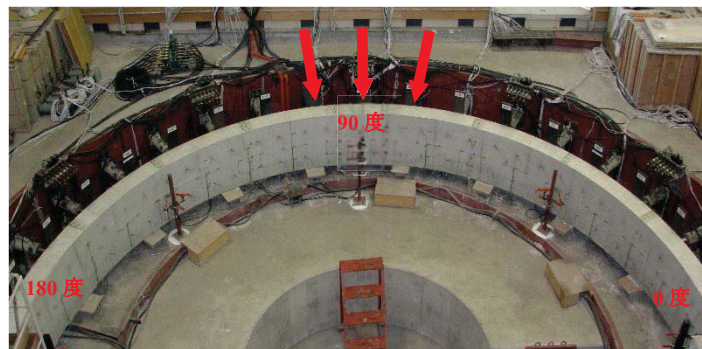
図-3.2.1 実物大のトンネル覆工供試体の概念図

## (2) 実験方法

実験は、覆工载荷試験装置を用いて、実物大のトンネル覆工コンクリート供試体に载荷した。覆工载荷試験装置は、**図-3.2.2**、**写真-3.2.1**に示すように10度ピッチで配置した油圧ジャッキにより覆工外面側から任意に荷重を载荷可能な装置である。



**図-3.2.2** 実物大の覆工载荷実験 (A 载荷 (天端部に荷重を载荷) の場合)



**写真-3.2.1** 覆工载荷実験の状況 (A 载荷 (天端部に荷重を载荷) の場合)

実験は、まず覆工供試体に応力制御により17台全ての油圧ジャッキにより約20kNの荷重を载荷して覆工供試体に軸力を導入した後、トンネル全周から荷重が作用する载荷パターン(C 载荷)により、覆工表面に貼付したひずみゲージが概ね1000 $\mu$ 程度まで载荷した。その後、天端部だけに荷重が作用する载荷パターン (A 载荷) によりトンネル覆工供試体が破壊するまで载荷した。各载荷パターンの载荷途中において、適宜、代表的な载荷段階で伝播速度の測定を行った。伝播速度測定に用いた計測機器および測定方法は、**2.2**で示した機器を使用して**表-3.2.1**に示すように、覆工供試体内部を透視、覆工供試体の表面の伝播速度を測定した。

第一の方法は、供試体内部を透過する伝播速度 (以下、「伝播速度 (透過)」) として、分離型の簡易な装置を用いて、送信側・受信側のトランスデューサを供試体側面から挟み込むように配置して覆工供試体内部の伝播速度を測定した。



第二の方法として、固定型の簡易な伝播速度測定器を用いて、覆工供試体の内面側の表面に送信・受信センサー間の距離 150mm が固定された簡易型の超音波速度測定器を押し当てて伝播速度（以下、「伝播速度（表面）」）を測定した。

表-3.2.1 伝播速度の測定方法

測定方法	測定器センサーの位置		備考
	送信側	受信側	
透過	内面	外面	分離型
表面	内面	内面	固定型

また、第二の方法は、距離を固定した送受信センサー間（150mm）の超音波伝播速度時間を測定し、伝播時間から伝播速度を求める方法である。測定時には測定対象物表面に送受信センサー先端のスプリング付きのインパクト針を押し当てることにより、センサーと接触面の間に潤滑剤等を塗布する必要がない。それぞれの測定器の仕様、外観について、表-3.2.2、写真-3.2.2 に分離型の測定器の仕様・外観を、表-3.2.3、写真-3.2.3 に固定型の簡易な伝播速度測定器の仕様・外観を示す。

表-3.2.2 分離型の簡易な伝播速度測定器の仕様

項目	仕様
測定範囲	0.1～999.9 $\mu$ s
測定精度	長さ 250mm で $\pm$ 0.3 $\mu$ s
公称周波数	28kHz
許容使用条件	温度:0～+40°C 湿度:80%RH 以下（結露しないこと）
電源	AC アダプター (AC100V 50/60Hz) または単3形乾電池8本、
電源電圧範囲	DC10.8～15.0V
寸法	メーター：240×105×245mm、トランスデューサ： $\phi$ 20×125mm
質量	メーター：3.2kg トランスデューサ：0.4kg



写真-3.2.2 分離型の簡易な伝播速度測定器の外観

表-3.2.3 固定型の簡易な伝播速度測定器の仕様

項目	仕様
時間測定範囲	15～100ms
超音波伝播速度測定範囲	1500～9990m/s
時間と伝播速度測定精度	±1%
使用超音波周波数	50kHz
送信パルスの周波数	5～20Hz
動作温度	-20～+45°C
電源	アルカリ単3電池 3個
動作時間	100時間
寸法	200×120×35mm
重量	350g

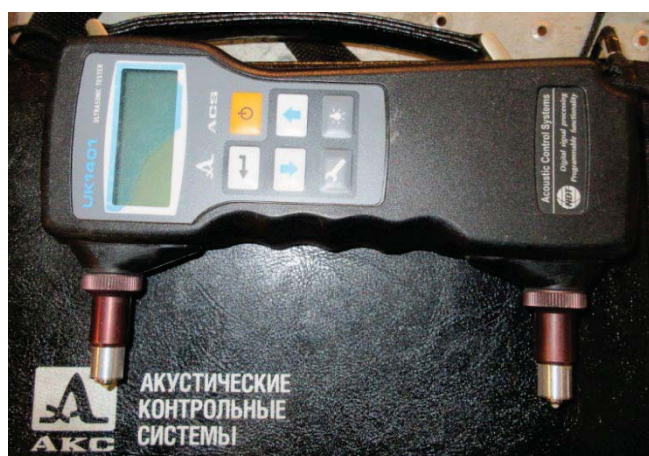


写真-3.2.3 固定型の簡易な伝播速度測定器の外観

### (3) 実験条件

実験は表-3.2.4に示すように1つの供試体を用いて、それぞれトンネル周辺の地盤が膨張性地山等によりトンネル外周面全体から荷重が作用することを想定した荷重パターン(C 荷重)、緩み荷重がトンネルに作用することを想定した荷重パターン(A 荷重)の載荷方式について実施した。

表-3.2.4 実験条件一覧

実験 NO.	供試体 NO.	載荷パターン	載荷方法	備考
NO.1	供試体 4	C 載荷 (CN1)	内面側ひずみが約 1000 $\mu$ まで載荷	透過・表面
NO.2		A 載荷 (AN1)	供試体が破壊まで載荷	透過・表面

表-3.2.5 管理供試体による圧縮試験の諸数値

供試体 NO.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	備考
供試体 4	22.70	20.00	0.149	2263	材令 60 日

表-3.2.5に直径100mm、高さ200mmの管理供試体を用いた載荷実験時におけるコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。表-3.2.5より、供試体の理論縦波伝播速度 $c_0$ を次式により計算すると、理論上における縦波伝播速度 $c_0$ は約3050m/s程度であり、前述の2.で実施した供試体模型のコンクリート供試体とほぼ同程度であった。

$$c_0 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \dots\dots (3.2.1)$$

ここで、 $E$ は縦弾性係数、 $\nu$ はポアソン比、 $\rho$ は密度である。

### 3. 2. 3 実験結果

#### (1) NO. 1 (透過・表面：C 载荷)

##### 1) 载荷時の状況

C 载荷における荷重-変位曲線を図-3.2.3 に示す。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、载荷重 P は円周方向の  $10^{\circ} \sim 170^{\circ}$  の各载荷位置における 2 台の油圧ジャッキの合計値の平均値を示す。また、载荷時における代表的な载荷段階におけるひずみ分布図を図-3.2.4、図-3.2.5 に示す。

図-3.2.3 より、C 载荷時における各载荷ジャッキの平均値の最大は概ね 600kN 程度、最大変位量は約 6mm 程度であった。図-3.2.4、図-3.2.5 より、覆工表面の内外面にはともに同程度の圧縮ひずみが発生しており、覆工供試体は全圧縮状態であることが分かる。

载荷時の覆工の状態は、目視による観察では载荷終了時点までにおいて覆工供試体にはひび割れ等が発生することはなかった。実験終了後における覆工供試体のひび割れ観察結果および伝播速度の測定箇所を図-3.2.6 に示す。

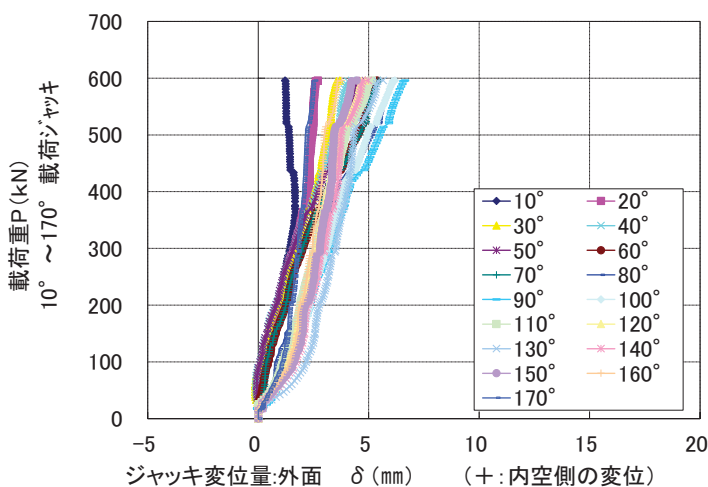


図-3.2.3 荷重-変位曲線

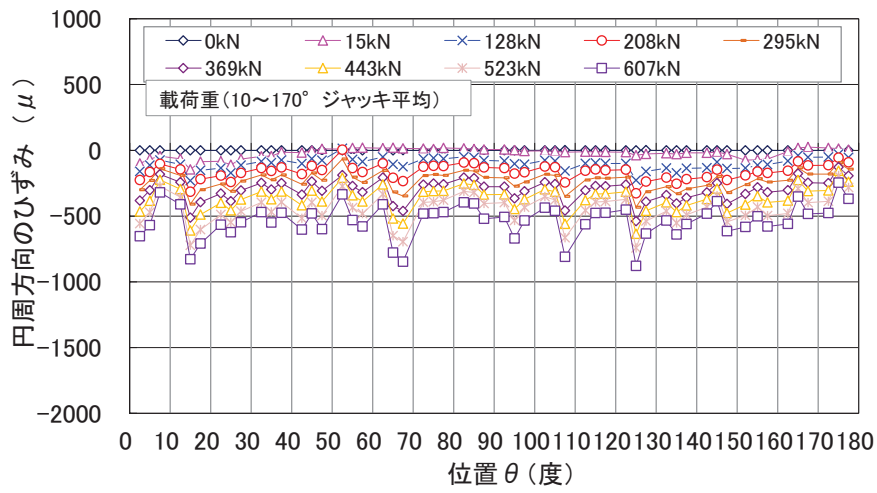


図-3.2.4 覆工外面側のひずみ分布

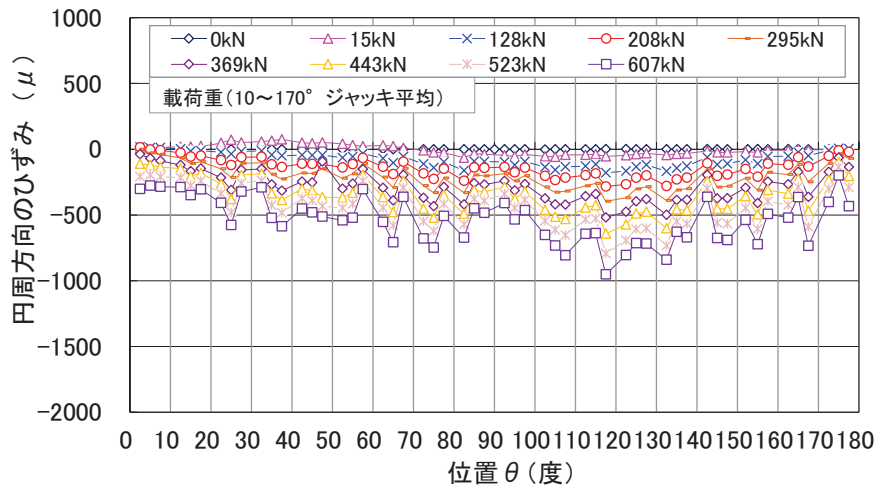


図-3.2.5 覆工内面側のひずみ分布

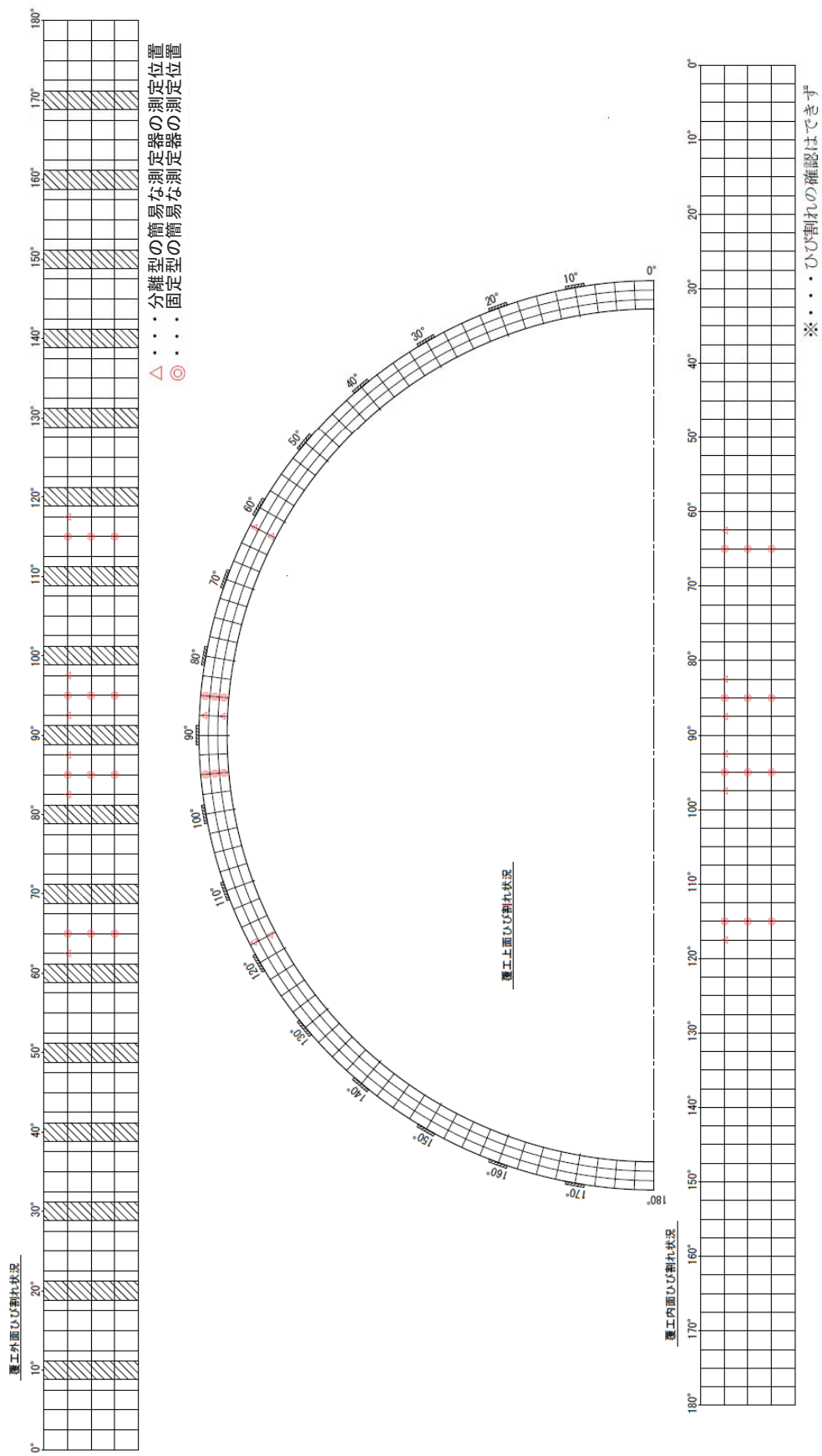


図-3.2.6 実験終了後における覆工供試体のひび割れ観察結果と伝播速度の測定箇所

## 2) 載荷時の伝播速度結果

### ①第一の方法（分離型の簡易な測定器）

第一の方法を用いて図-3.2.6に示した△印の箇所の伝播速度の測定を実施した。本測定は、覆工供試体の厚さ方向および高さ方向の供試体内部を透過する際の伝播速度を測定するものである。測定は、各測定箇所について3回測定を行い、平均値を測定箇所の伝播速度とした。表-3.2.6に各測定箇所における測定位置・記号とともに、載荷前の無負荷状態での伝播速度を示す。これより、無負荷状態での伝播速度は概ね4000m/s程度であり、前述の理論上における縦波伝播速度 $c_0$ の約3050m/sに比較して約3割程度高い値を示した。

表-3.2.6 載荷前の無負荷状態における各測定箇所の伝播速度

測定位置				伝播速度（初期値）m/s		
伝播速度測定の方法	角度（°）	位置（cm）	記号（ひずみゲージとの比較）	測定値	伝播速度（平均値）	
高さ方向 （上面側～下面側）	62.5°	内面側から25	U-62.5°-25	3960	3959	
				3954		
				3962		
		内面側から5	U-62.5°-5	3942		3953
				3957		
				3959		
	87.5°	内面側から25	U-87.5°-25	3923	3931	
				3934		
				3935		
		内面側から5	U-87.5°-5	3906		3919
				3914		
				3937		
117.5°	内面側から25	U-117.5°-25	3937	3934		
			3932			
			3934			
	内面側から5	U-117.5°-5	3973		3979	
			3976			
			3987			
厚さ方向 （内面側～外面側）	62.5°	底面から75	O-62.5°-75 I-62.5°-75	4110	4113	
				4110		
				4121		
	82.5°	底面から75	O-82.5°-75 I-82.5°-75	3958	3954	
				3947		
				3958		
	87.5°	底面から75	O-87.5°-75 I-87.5°-75	3953	3961	
				3958		
				3974		
	92.5°	底面から75	O-92.5°-75 I-92.5°-75	3963	3968	
				3968		
				3974		
97.5°	底面から75	O-97.5°-75 I-97.5°-75	4071	4063		
			4060			
			4060			
117.5°	底面から75	O-117.5°-75 I-117.5°-75	3989	3996		
			4000			
			4000			
			最大値	4121	4113	
			最小値	3906	3919	
			平均値	3978	3978	
			標準偏差	56	57	

図-3.2.7、図-3.2.8に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側、覆工外面側、覆工上面側のひずみとの関係を示す。図中の凡例記号(●-▲-■-◆)は、●：覆工表面(外面側がO、内面側がI、上面側がU)、▲：円周方向の位置( $\theta$ 角度)、■：供試体底面からの高さ(50cm、75cm)、◆：内面側から見た時のひずみゲージの方向(円周方向X、高さ方向Y、X軸から $45^\circ$ の方向)を表す。

両図ともに、覆工供試体の伝播速度の測定箇所付近に貼付した外面側・内面側および覆工上面側のひずみゲージとの関係を示す。両図より、本測定方式による伝播速度の測定結果からは、覆工供試体の圧縮側のひずみが約 $1000\mu$ 程度の変化が生じた場合でも伝播速度は最大で約50m/s程度の変化のみであり、顕著な変化は生じていないことが分かる。



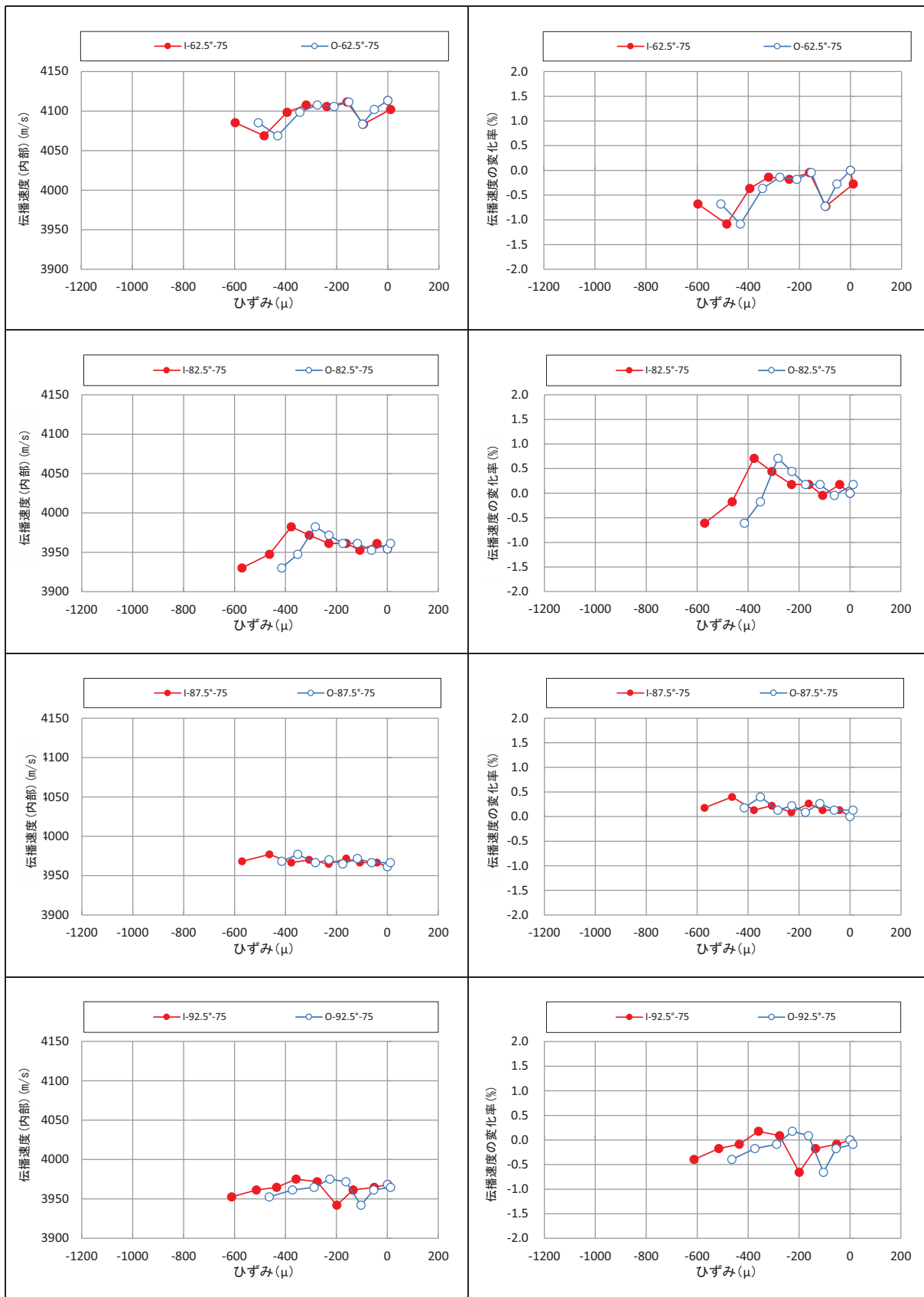


図-3.2.7 覆工内面側・外面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (その1)  
(分離型の簡易な測定器：透過)

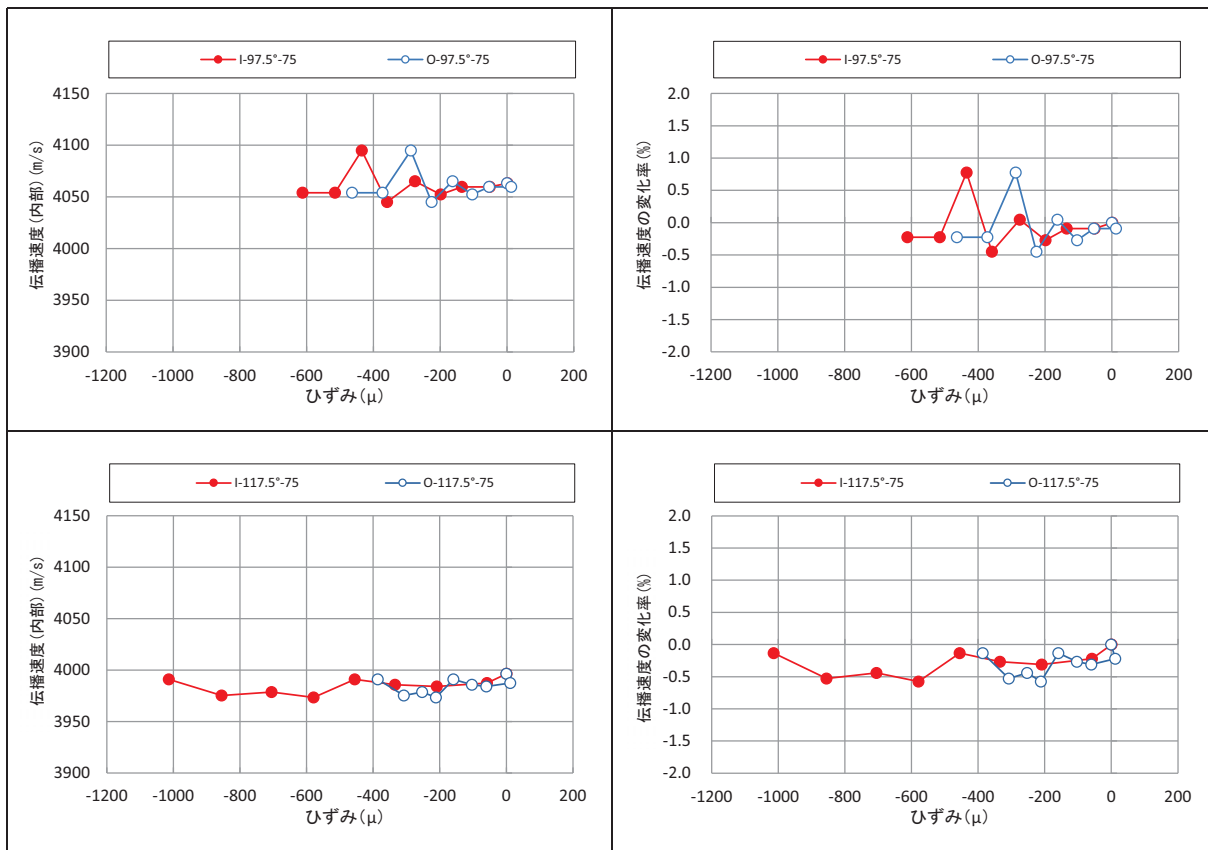


図-3.2.7 覆工内面側・外面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (その2)  
(分離型の簡易な測定器：透過)

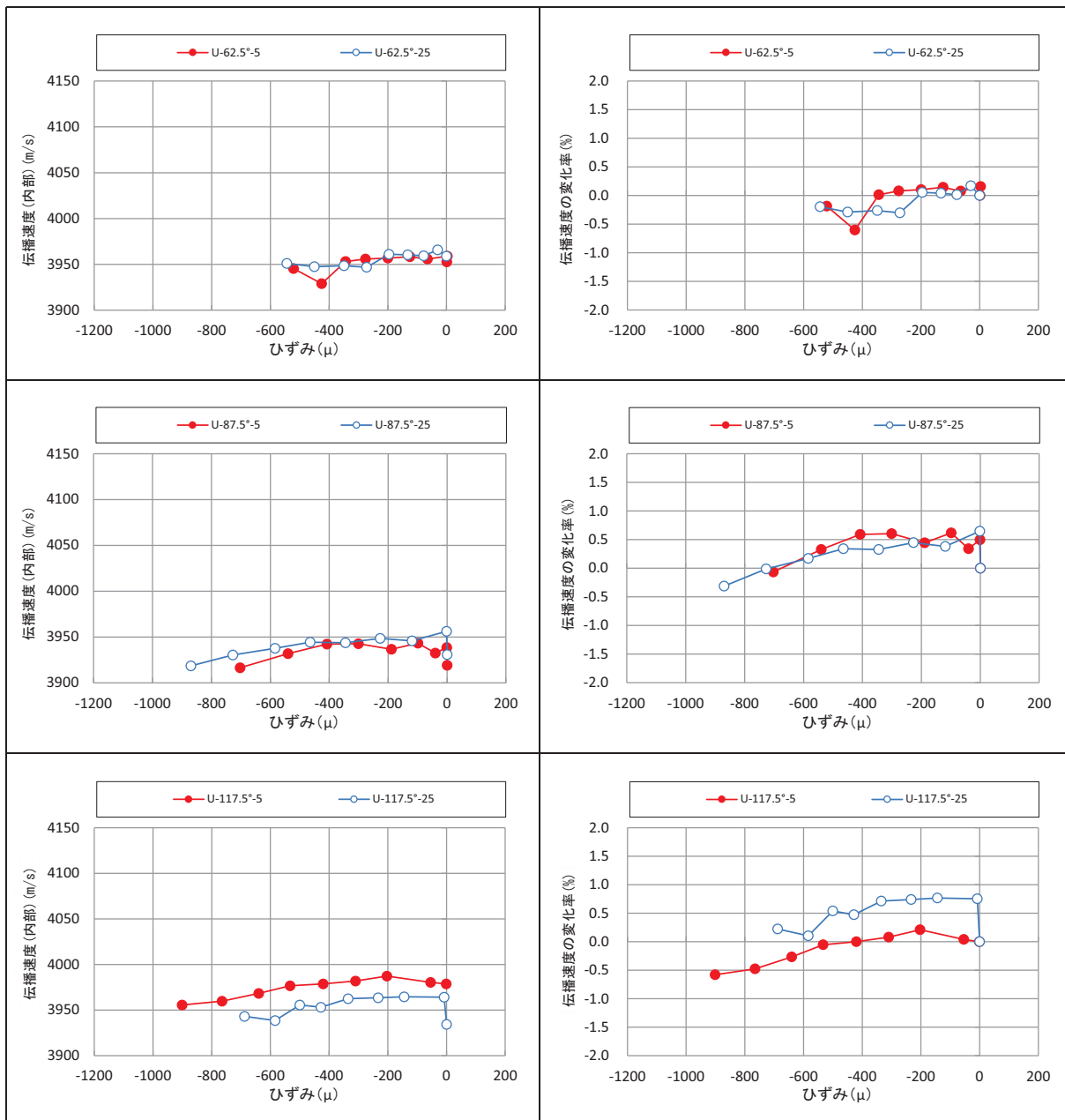


図-3.2.8 覆工上面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係  
(分離型の簡易な測定器：透過)

## ②第二の方法（固定型の簡易な測定器）

第二の方法を用いて図-3.2.6に示した◎印の箇所の伝播速度の測定を実施した。本測定は、覆工供試体の表面の外面側・内面側および上面側の供試体表面付近の伝播速度を測定するものである。各測定箇所について3回測定を行い、その平均値を測定箇所の伝播速度とした。表-3.2.7に覆工供試体の表面の外面側・内面側における各測定箇所における測定位置・記号とともに、載荷前の無負荷状態での伝播速度を示す。これより、無負荷状態での伝播速度は外面側・内面側ともに概ね3600m/s程度であり、前述の理論上における縦波伝播速度 $c_0$ の約3050m/sに比較して約2割程度高い値を示した。

表-3.2.7 載荷前の無負荷状態における各測定箇所の伝播速度（その1 外面側）

測定位置			伝播速度（初期値）m/s			
伝播速度測定面	角度（°）	位置（cm）	記号 （ひずみゲージとの比較）	測定値	伝播速度 （平均値）	
外面側	65°	75	O-65°-75-X	3510	3513	
				3520		
				3510		
			O-65°-75-Y	3610		3613
				3610		
				3620		
		O-65°-75-Z	3510	3507		
			3500			
			3510			
		O-65°-75-Z'	3420	3423		
			3430			
			3420			
	O-65°-50-X		3700		3703	
			3710			
			3700			
	O-65°-50-Y	3590	3593			
		3600				
		3590				
	O-65°-50-Z	3640	3630			
		3620				
		3630				
	O-65°-50-Z'	3670	3677			
		3680				
		3680				
O-65°-25-X		3780		3777		
		3770				
		3780				
外面側	85°	75	O-85°-75-X	3470	3480	
				3480		
				3490		
			O-85°-75-Y	3560		3560
				3560		
				3560		
		O-85°-75-Z	3680	3683		
			3690			
			3680			
		O-85°-75-Z'	3660	3660		
			3650			
			3670			
	O-85°-50-X	3590	3600			
		3610				
		3600				
		O-85°-50-Y		3860	3860	
				3850		
				3870		
	O-85°-50-Z	3470	3477			
		3470				
		3490				
	O-85°-50-Z'	3800	3797			
		3800				
		3790				
25	O-85°-25-X	3610	3610			
		3610				
		3610				
		O-85°-25-Y		3850	3860	
				3870		
				3860		
	O-85°-25-Z	3870	3867			
		3870				
		3860				
	O-85°-25-Z'	3720	3730			
		3740				
		3730				

外面側	95°	75	O-95°-75-X	3400	3403
				3410	
				3400	
			O-95°-75-Y	3620	3620
				3620	
				3620	
		O-95°-75-Z	3510	3510	
			3510		
			3510		
		O-95°-75-Z'	3370	3367	
			3360		
			3370		
	50	O-95°-50-X	3470	3470	
			3460		
			3480		
		O-95°-50-Y	3740	3740	
			3730		
			3750		
	O-95°-50-Z	3690	3690		
		3690			
		3690			
	O-95°-50-Z'	3250	3237		
		3250			
		3210			
25	O-95°-25-X	3720	3730		
		3740			
		3730			
	O-95°-25-Y	3740	3747		
		3750			
		3750			
O-95°-25-Z	3820	3830			
	3840				
	3830				
O-95°-25-Z'	3710	3717			
	3730				
	3710				
外面側	115°	75	O-115°-75-X	3390	3397
				3390	
				3410	
			O-115°-75-Y	3410	3413
				3410	
				3420	
		O-115°-75-Z	3150	3353	
			3460		
			3450		
		O-115°-75-Z'	3330	3327	
			3320		
			3330		
	50	O-115°-50-X	3460	3463	
			3460		
			3470		
		O-115°-50-Y	3420	3430	
			3440		
			3430		
	O-115°-50-Z	3440	3447		
		3440			
		3460			
	O-115°-50-Z'	3500	3500		
		3500			
		3500			
25	O-115°-25-Z	3460	3467		
		3460			
		3480			
最大值	3870	3867			
最小値	3150	3237			
平均値	3583	3583			
標準偏差	163	162			

表-3.2.7 載荷前の無負荷状態における各測定箇所の伝播速度（その2 内面側）

測定位置			伝播速度（初期値）m/s			
伝播速度測定面	角度（°）	位置（cm）	記号 （ひずみゲージとの比較）	測定値	伝播速度 （平均値）	
内面側	65°	75	I-65°-75-X	3600	3600	
				3600		
				3600		
			I-65°-75-Y	3500		3503
				3510		
				3500		
		I-65°-75-Z	3550	3553		
			3550			
			3560			
		I-65°-75-Z'	3700		3693	
			3690			
			3690			
	50	I-65°-50-X	3610	3603		
			3600			
			3600			
		I-65°-50-Y	3630		3643	
			3650			
			3650			
	I-65°-50-Z	3650	3657			
		3660				
		3660				
	I-65°-50-Z'	3690		3683		
		3680				
		3680				
25	I-65°-25-X	3440	3443			
		3440				
		3450				
内面側	85°	75		I-85°-75-X	3350	3350
					3360	
					3340	
			I-85°-75-Y	3510	3500	
				3500		
				3490		
		I-85°-75-Z	3370	3440		
			3580			
			3370			
		I-85°-75-Z'	3540		3530	
			3530			
			3520			
	50	I-85°-50-X	3650	3673		
			3680			
			3690			
		I-85°-50-Y	3610		3620	
			3620			
			3630			
	I-85°-50-Z	3690	3693			
		3690				
		3700				
	I-85°-50-Z'	3710		3723		
		3720				
		3740				
25	I-85°-25-X	3550	3543			
		3540				
		3540				
	I-85°-25-Y	3820		3827		
		3830				
		3830				
I-85°-25-Z	3630	3633				
	3640					
	3630					
I-85°-25-Z'	3610		3610			
	3610					
	3610					

内面側	95°	75	I-95°-75-X	3420	3413
				3410	
				3410	
			I-95°-75-Y	3640	3657
				3670	
				3660	
		I-95°-75-Z	3620	3633	
			3650		
			3630		
		I-95°-75-Z'	3500	3503	
			3510		
			3500		
	50	I-95°-50-X	3720	3707	
			3700		
			3700		
		I-95°-50-Y	3800	3810	
			3810		
			3820		
	I-95°-50-Z	3560	3570		
		3570			
		3580			
I-95°-50-Z'	3600	3607			
	3610				
	3610				
25	I-95°-25-X	3710	3700		
		3700			
		3690			
	I-95°-25-Y	3680	3683		
		3690			
		3680			
	I-95°-25-Z	3760	3770		
		3780			
I-95°-25-Z'	3770	3750			
	3750				
	3740				
内面側	115°	75	I-115°-75-X	3360	3360
				3360	
				3360	
			I-115°-75-Y	3400	3397
				3400	
				3390	
		I-115°-75-Z	3690	3683	
			3670		
		I-115°-75-Z'	3690	3383	
			3380		
			3380		
		50	I-115°-50-X	3340	3343
	3350				
	3340				
	I-115°-50-Y		3400	3403	
			3410		
			3400		
	I-115°-50-Z	3500	3523		
		3520			
		3550			
	I-115°-50-Z'	3250	3263		
3270					
3270					
25	I-115°-25-Z	3680	3683		
		3690			
		3680			
最大值	3830	3827			
最小値	3250	3263			
平均値	3580	3580			
標準偏差	138	138			



図-3.2.9、図-3.2.10 に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側、覆工外面側のひずみとの関係を示す。伝播速度の各測定箇所を図-3.2.9 に示す。図中の凡例記号(●-▲-■-◆)は、●：覆工表面(外面側がO、内面側がI、上面側がU)、▲：円周方向の位置( $\theta$  角度)、■：供試体底面からの高さ(50cm、75cm)、◆：内面側から見た時のひずみゲージの方向(円周方向X、高さ方向Y、X軸から45°の方向)を表す。

図-3.2.9、図-3.2.10 より、覆工内面側、覆工外面側の伝播速度は、初期荷重段階時から荷重荷重の段階的な増加に伴って大きくなっている傾向にある。ただし、覆工供試体の高さ方向(Y方向)のひずみは円周方向(X方向)、斜め45度方向(Z方向)に比べて顕著ではない。これは、覆工供試体全面から荷重を載荷するC荷重では、覆工供試体は全圧縮状態であり、かつ、1200 $\mu$ 程度のひずみが発生した時点で荷重を終了したことから、覆工供試体の高さ方向のひずみの発生が小さかったためと考えられる。

図-3.2.11 に各方向別のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係を整理した。これより、円周方向(X方向)およびX軸から45°の方向(Z方向)の伝播速度・伝播速度の変化率は正の方向に変化し、高さ方向(Y方向)の伝播速度・伝播速度の変化率は負の方向に変化している。本荷重時における主応力方向は円周方向(X方向)であることからX方向の伝播速度・伝播速度の変化率が比較的大きく変化している。Y方向は材料のポアソン効果によりX・Z方向と逆の方向(負の方向)へ変化していることが分かる。

図-3.2.12 に覆工供試体の伝播速度測定箇所付近における外面側と内面側のひずみと、各伝播速度値との関係を抽出して整理した。これより、各測定箇所において外面側と内面側ともにひずみは同程度の増加しており、これに伴って伝播速度も増加する傾向を示している。覆工の厚さ方向にほぼ同程度の軸圧縮力が作用していた状態であったと考えられる。伝播速度の変化率は、ひずみが-1000 $\mu$ 程度の時に約10%であった。

図-3.2.13 に覆工内面側の円周方向の伝播速度・伝播速度の変化率の分布図を示す。これより、トンネル横断面における複数点の伝播速度・伝播速度の変化率は、荷重の増加に伴って徐々に増加していることが分かる。

なお、覆工上面側に貼付したひずみゲージと伝播速度・伝播速度の変化率の関係を図-3.2.14 に示す。覆工上面側の伝播速度・伝播速度の変化率の変化は、覆工供試体の内面側・外面側の変化と同様に、X・Z方向が正の方向へ変化、Y方向が負の方向へ変化しており、ひずみの増減に応じて伝播速度も変化することが分かった。

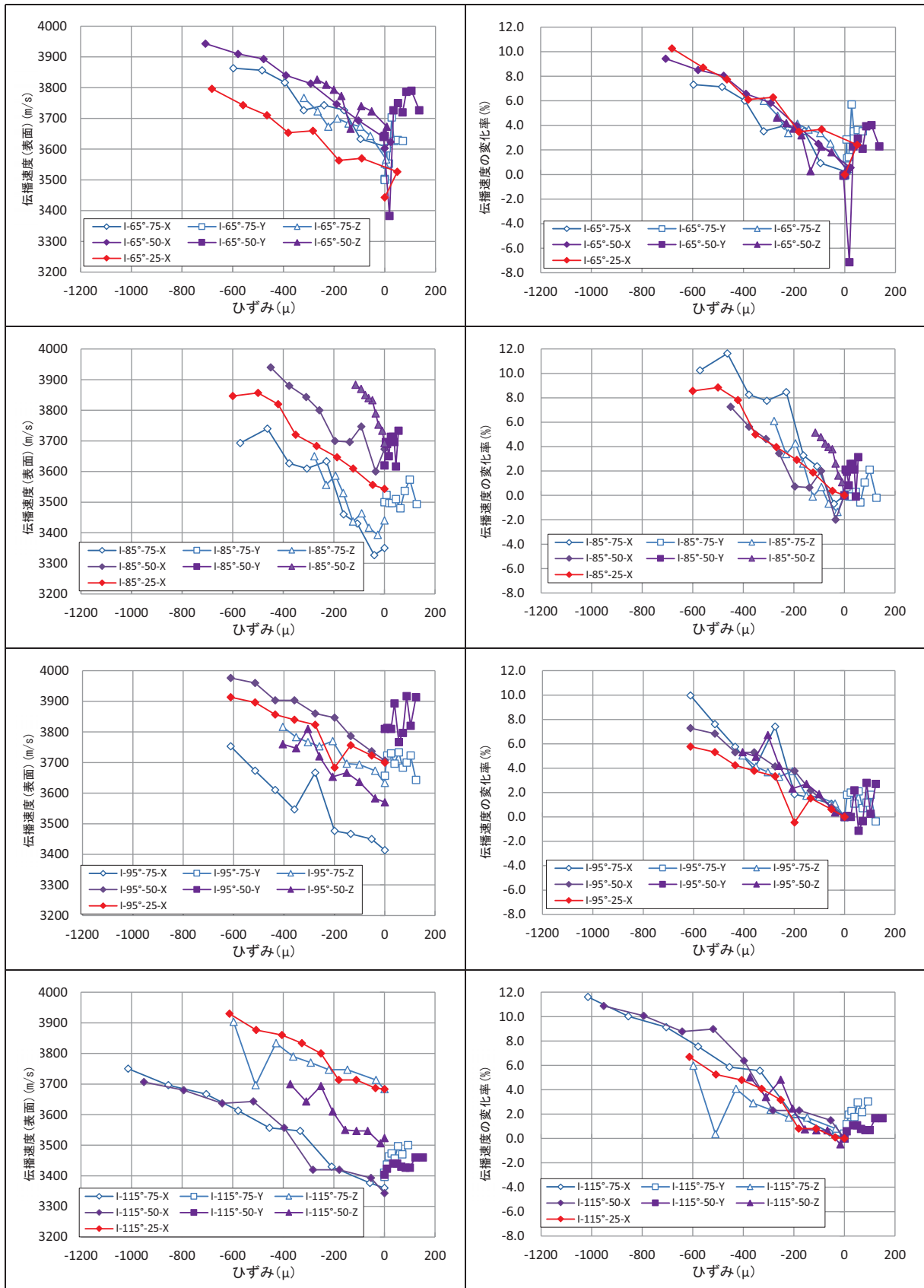


図-3.2.9 各測定箇所における覆工内面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 載荷)

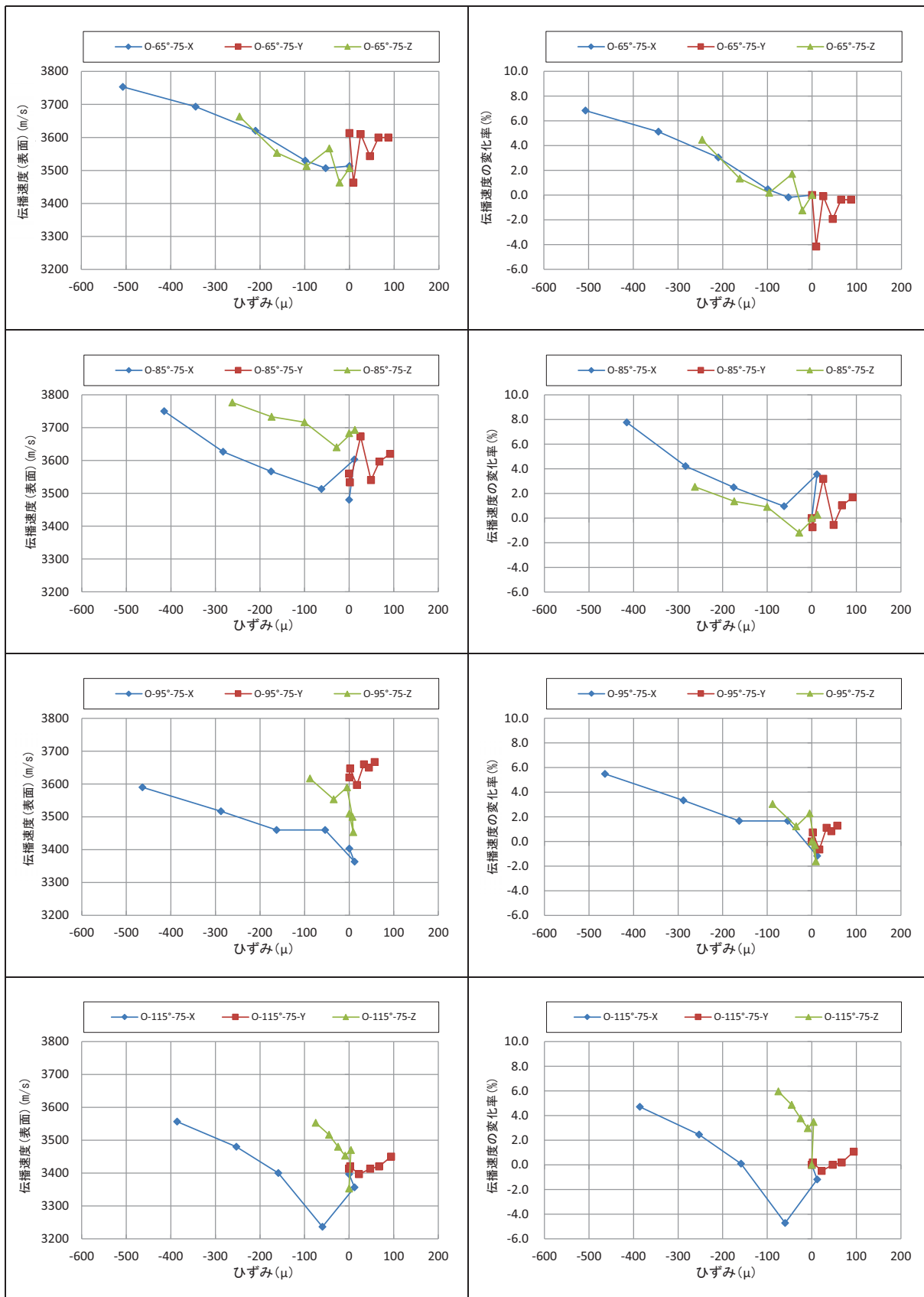


図-3.2.10 各測定箇所における覆工外面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 載荷)

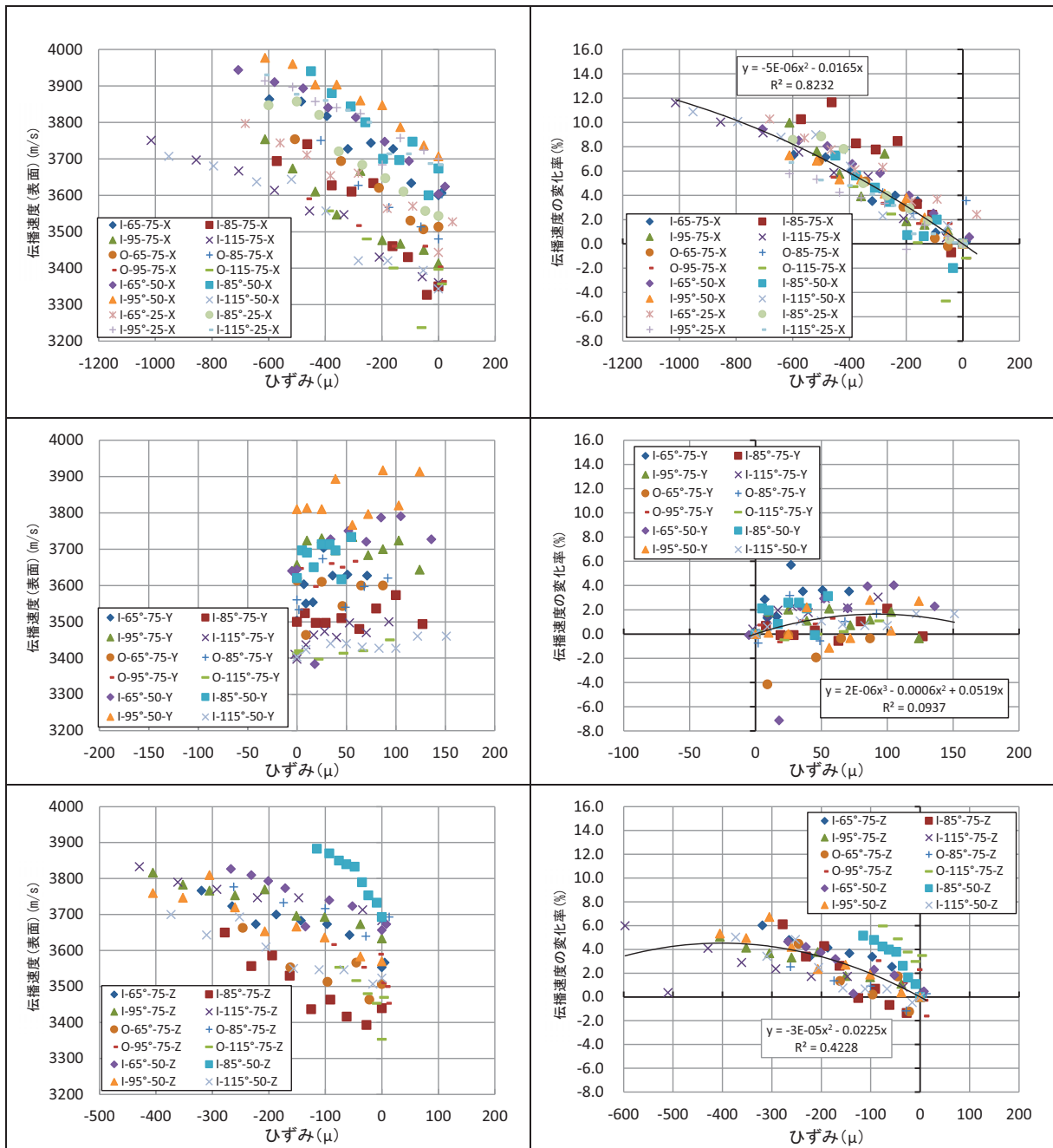


図-3.2.11 覆工表面の各方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 載荷)

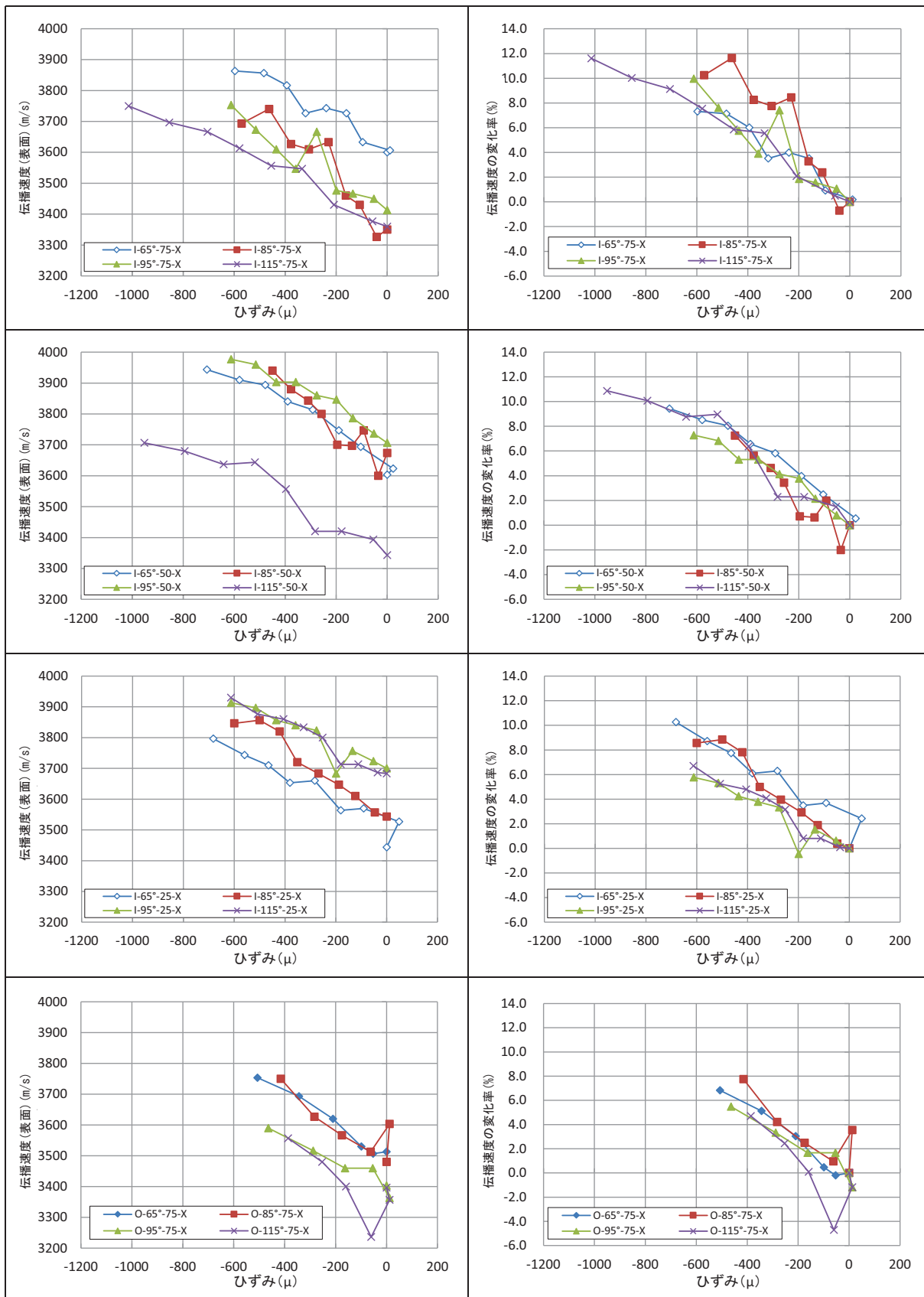
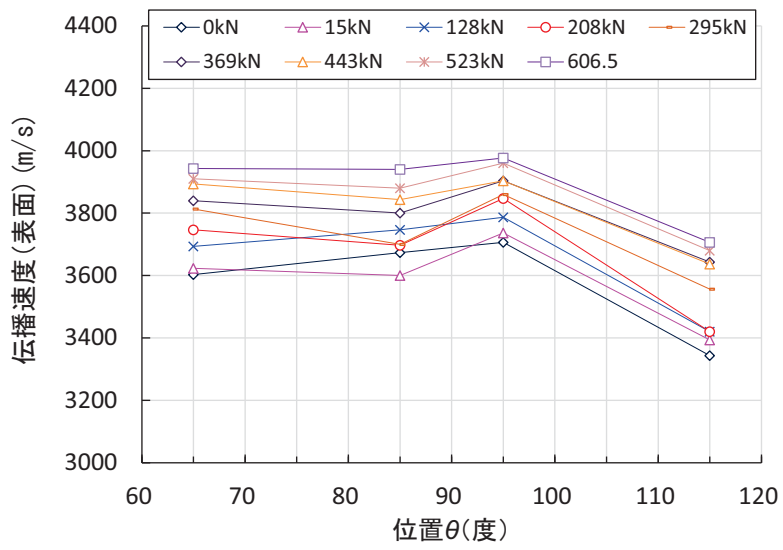
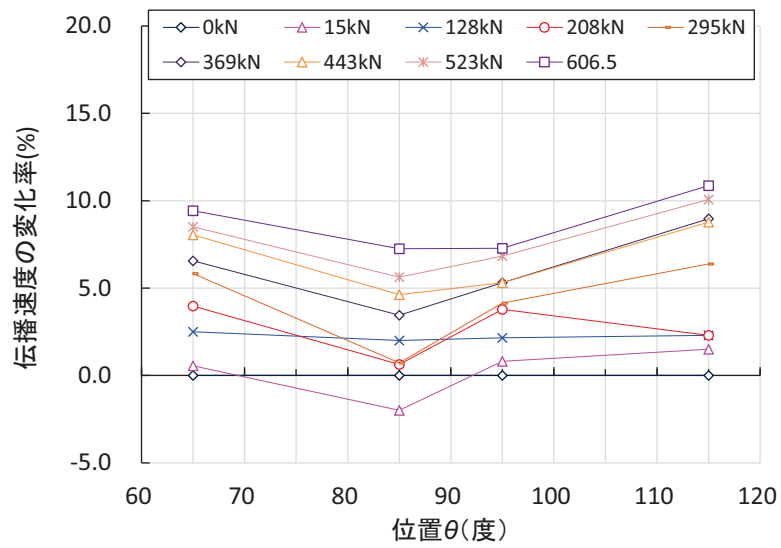


図-3.2.12 覆工外面側・内面側の円周方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 載荷)



(a) 伝播速度の分布図



(b) 伝播速度の変化率の分布図

図-3.2.13 覆工外面側・内面側の円周方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率の分布図 (C 載荷)

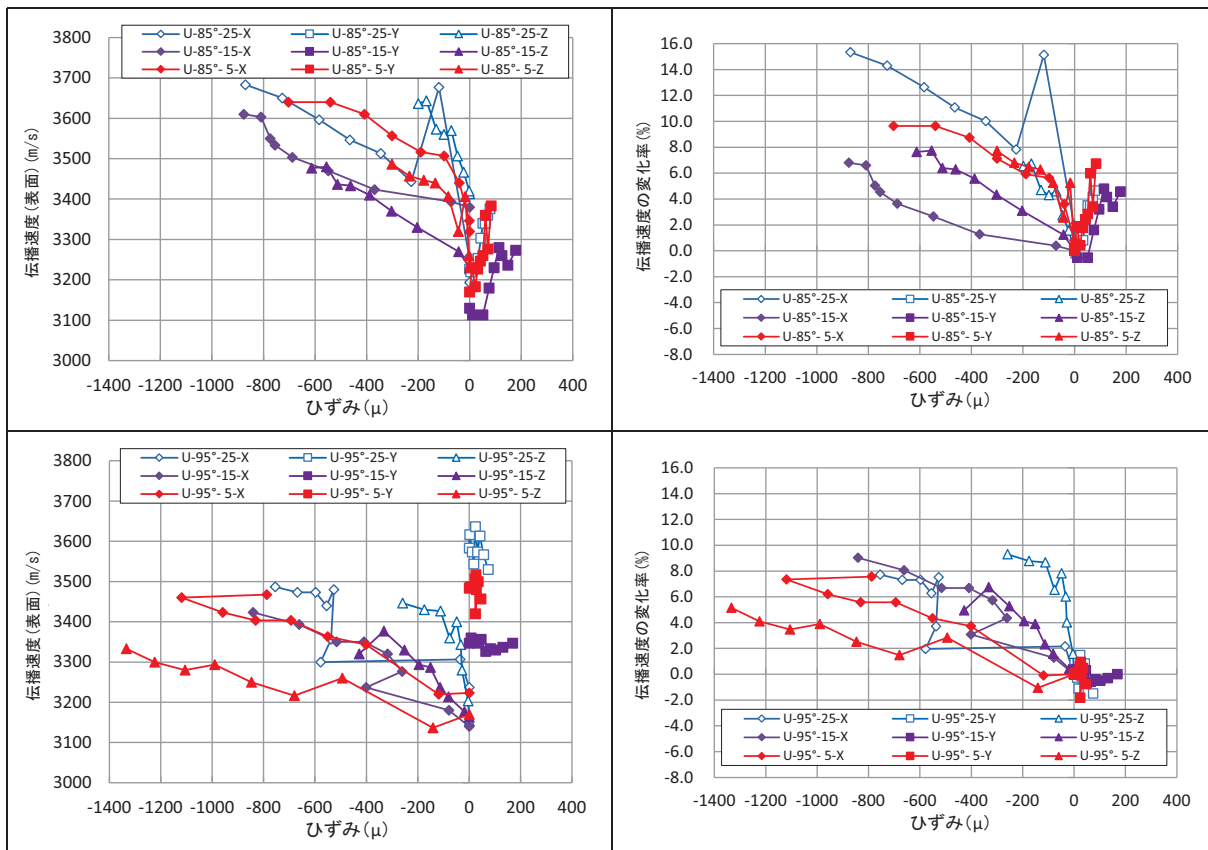


図-3.2.14 各測定箇所における覆工上面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (C 载荷)

## (2) NO. 2 (透過・表面 : A 载荷)

### 1) 载荷時の状況

A 载荷における荷重-変位曲線を図-3.2.15、図-3.2.16 に示す。A 载荷では覆工供試体が破壊するまで载荷することを目標とした。ここで、ジャッキ変位量は覆工外面側の油圧ジャッキの変位量を、载荷重 P は周方向の  $80^{\circ}$  ~  $100^{\circ}$  の各载荷位置におけるすべての油圧ジャッキの合計値を示す。また、载荷時における代表的な载荷段階におけるひずみ分布図を図-3.2.17、図-3.2.18 に示す。

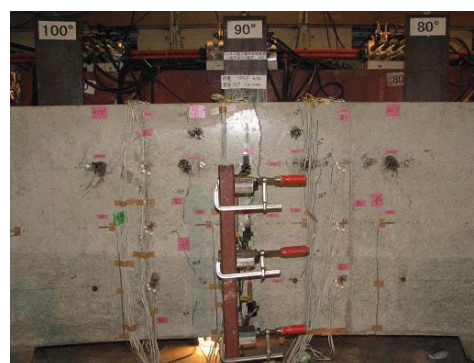
図-3.2.16 より、A 载荷による破壊時における天端部 ( $80^{\circ}$  ~  $100^{\circ}$  ) の各载荷点では概ね 1000kN 程度であり、変位量は  $90^{\circ}$  で約 35mm、 $80^{\circ}$  と  $100^{\circ}$  で約 25mm 程度であった。また、図-3.2.17、図-3.2.18 より、覆工表面の内外面のひずみは、 $90^{\circ}$  の外面側で圧縮のひずみが、内面側で引張ひずみが発生した。また、 $50^{\circ}$  ~  $80^{\circ}$  付近および  $100^{\circ}$  ~  $130^{\circ}$  付近の内面側で圧縮ひずみが発生した。これは、天端部からの载荷により、外面側の  $90^{\circ}$  付近、内面側の  $50^{\circ}$  ~  $80^{\circ}$  付近、 $100^{\circ}$  ~  $130^{\circ}$  付近で曲げによる圧縮力・引張力が発生したことによる。

载荷時の覆工の状態は、目視による観察では荷重約 150kN ( $90^{\circ}$  ジャッキ平均) で内面側  $90^{\circ}$  にひび割れ発生、荷重約 280kN ( $90^{\circ}$  ジャッキ平均) で外面  $112.5^{\circ}$  にひび割れ発生、荷重約 280kN ( $90^{\circ}$  ジャッキ平均) で外面  $112.5^{\circ}$  にひび割れ発生、荷重約 890kN ( $90^{\circ}$  ジャッキ平均) で外面  $90^{\circ}$  に圧壊を確認した。最大荷重約 1050kN ( $90^{\circ}$  ジャッキ平均) で荷重が増加しなくなったため実験を終了した。

実験終了後における覆工供試体のひび割れ観察結果および伝播速度の測定箇所を図-3.2.19 に示す。



(a) 内面側  $90^{\circ}$  付近のひび割れ  
(荷重約 150kN)



(b) 外面側  $90^{\circ}$  付近のひび割れ  
(荷重約 770kN)

写真-3.2.4 除荷後に確認されたひび割れ



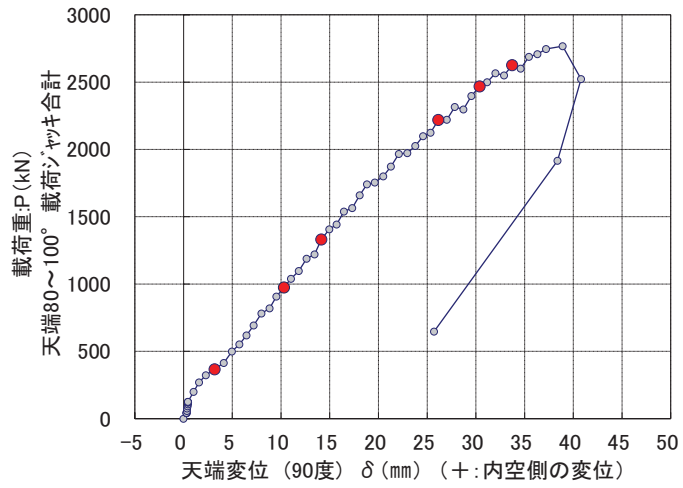


図-3.2.15 荷重-変位曲線 (80°～100°ジャッキ合計)

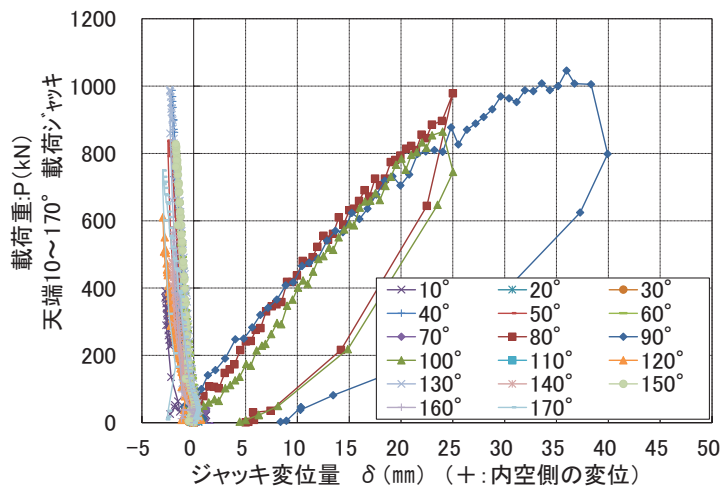


図-3.2.16 荷重-変位曲線 (各載荷点毎)

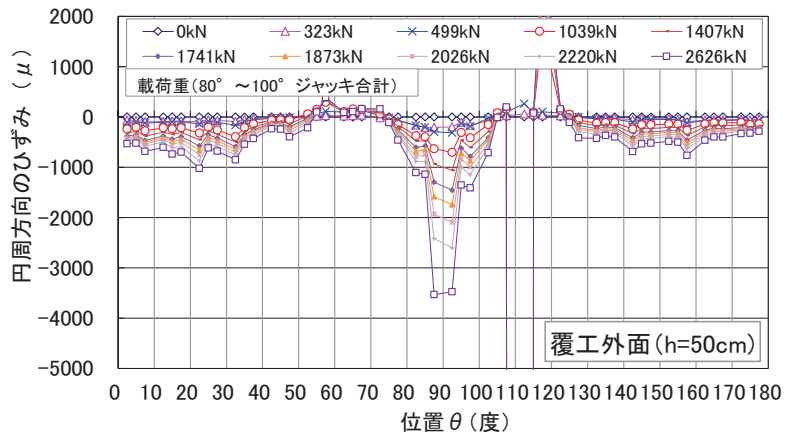


図-3.2.17 覆工外面側のひずみ分布

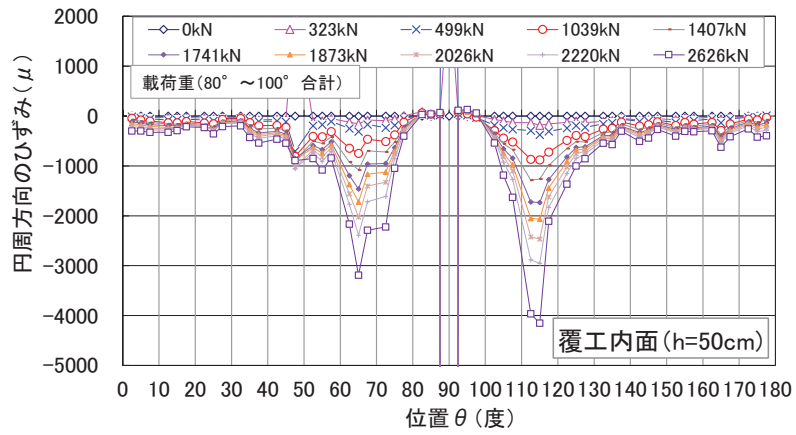


図-3.2.18 覆工内面側のひずみ分布

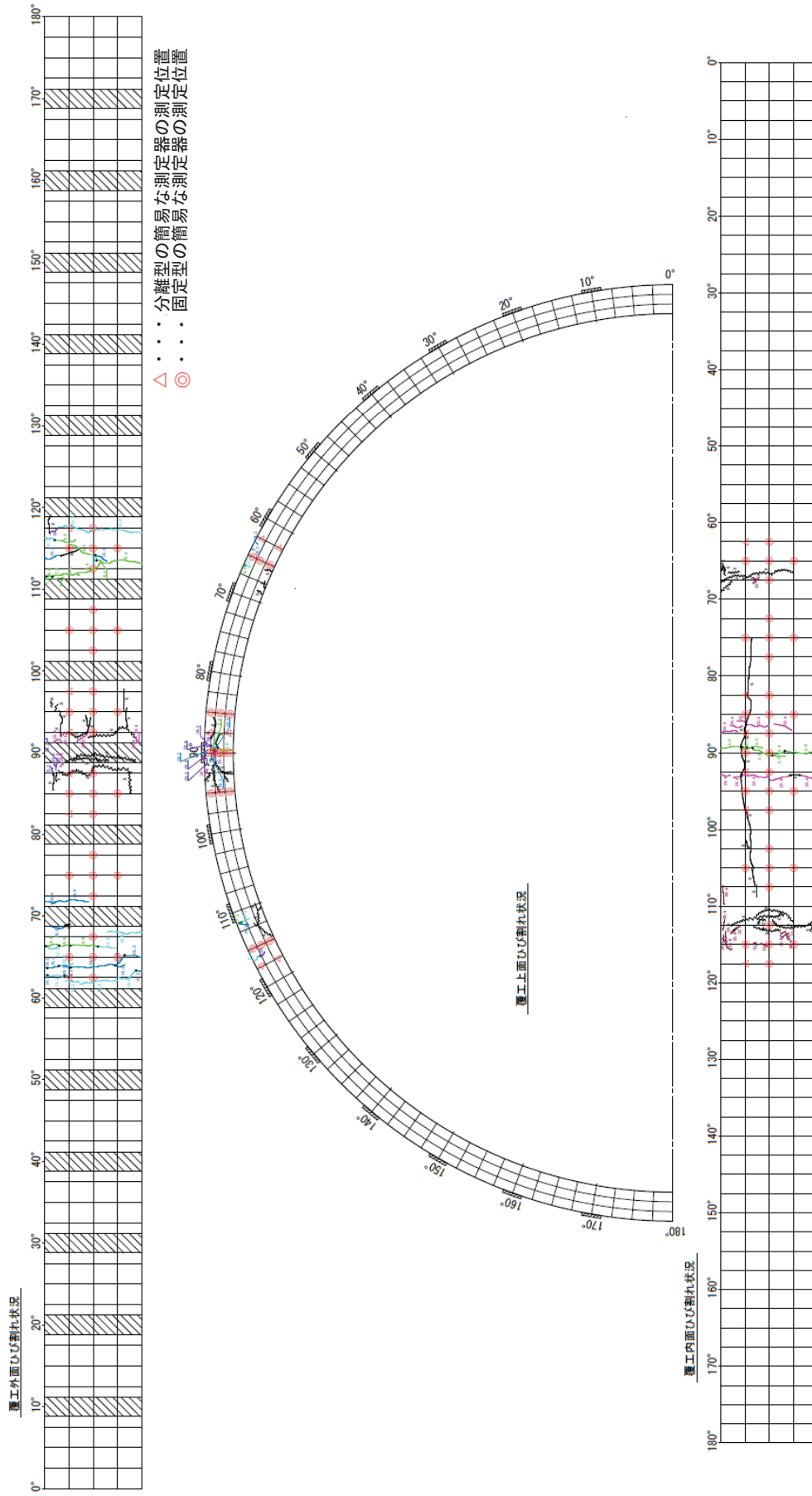


図-3.2.19 実験終了後における覆工供試体のひび割れ観察結果と伝播速度の測定箇所 (A 載荷)

## 2) 載荷時の伝播速度結果

図-3.2.20、図-3.2.21 に伝播速度の各測定箇所における測定結果と、測定箇所近傍における覆工内面側、覆工外面側のひずみとの関係を示す。図中の凡例記号 (●-▲-■-◆) は、●：覆工表面 (外面側が O、内面側が I、上面側が U)、▲：円周方向の位置 ( $\theta$  角度)、■：供試体底面からの高さ (50cm、75cm)、◆：内面側から見た時のひずみゲージの方向 (円周方向 X, 高さ方向 Y, X 軸から 45°の方向) を表す。伝播速度の各測定箇所は C 載荷と同様であり図-3.2.19 に示すとおりである。伝播速度は、測定時にその都度、所定の位置に測定器を押し当てて測定した。

図-3.2.20 より、覆工外面側では天端付近 (85°、95°) の覆工表面のひずみの増加とともに伝播速度も増加する傾向を示している。とくに、円周方向 (X 方向) の変化が大きく、圧縮ひずみが約 1000 $\mu$  程度で伝播速度の変化率が約 14%となった。一方、肩部 (65°、115°) では 115°の円周方向 (X 軸方向) を除いて覆工表面のひずみの変化が少なく、伝播速度の変化も小さい結果となった。115°の円周方向 (X 軸方向) で伝播速度が急激に低下したのは、測定箇所付近で微細なひび割れ等が発生したためと考えられる。

図-3.2.21 より、覆工内面側では肩部 (65°、115°) の円周方向と斜め 45° (X・Z 軸方向) の覆工表面のひずみの増加に伴って伝播速度も変化し、圧縮ひずみが約 3000 $\mu$  で伝播速度の変化率が約 10%~15%程度となっている。なお、圧縮ひずみが約 1000 $\mu$  程度以上となると伝播速度が横ばい傾向を示す。

引張ひずみが発生している覆工供試体の高さ方向 (Y 軸方向) の増加の場合は、概ね 100 $\mu$  ~ 200 $\mu$  程度を境にそれまでは伝播速度が増加、それ以降は伝播速度が低下する傾向を示した。

図-3.2.22 に覆工外面側・内面側の圧縮ひずみが発生する付近の円周方向 (X 方向) のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (-1400 $\mu$ ~600 $\mu$ ) について抽出して整理した。これより、覆工供試体の外面側と内面側の伝播速度の変化はほぼ同様な傾向を示していることが分かる。圧縮ひずみが概ね-1000 $\mu$  程度になると伝播速度・伝播速度の変化率が鈍化する傾向にあることが分かった。これは、文献<sup>2)</sup>と同様な結果であり-1000 $\mu$  程度までは覆工が弾性挙動を示したことによるものと考えられる。

図-3.2.23 に覆工外面側・内面側の圧縮ひずみが発生する付近の円周方向以外 (Y 方向、Z 方向) のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (-1400 $\mu$ ~600 $\mu$ ) について抽出して整理した。これより、覆工供試体の外面側と内面側の伝播速度の変化はほぼ同様な傾向を示していることが分かる。図より、ひずみの方向により伝播速度の変化率の挙動が異なることが分かる。ひずみが小さい場合は各軸ともに+方向を示すが、Y 軸では+100~+300 $\mu$  程度、Z 軸では-1000 $\mu$  程度からそれぞれ変化率が減少傾向を示している。

図-3.2.24 に主に圧縮側となる付近の各方向別のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係を整理した。これより、C 載荷の場合と同様に、円周方向 (X 方向) および X 軸から 45°の方向 (Z 方向) の伝播速度・伝播速度の変化率は正の方向に変化し、高さ方向 (Y 方向) の伝播速度・伝播速度

の変化率は負の方向に変化している。したがって、载荷パターンに関わらず、覆工表面に生じたひずみの方向・大きさに応じて伝播速度も変化する。伝播速度の変化は圧縮の主ひずみが発生する方向で最も大きく、他の方向はひずみの増加に伴い途中から減少傾向を示すことが分かった。

図-3.2.25 に覆工内面側における主な位置での円周方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係を整理した。ひずみと伝播速度・伝播速度の変化率は、測定箇所に関わらず、ほぼ同様な傾向を示している。設置高さが異なる位置（75cm、50cm）においても伝播速度の変化率は他と同様な傾向を示している。この結果をもとに、図-3.2.26 に覆工内面側の円周方向の伝播速度・伝播速度の変化率の分布図をそれぞれ (a) (b) に示す。これより、伝播速度、伝播速度の変化率は、覆工内面側の表面ひずみが主に圧縮側になる区間においては、荷重の増加に伴って徐々に増加していることが分かる。一方、覆工内面側の表面ひずみが主に引張側になる区間においては、荷重の増加に伴う伝播速度・伝播速度の変化率の顕著な変化は認められず、変化があっても減少傾向を示していることが分かる。したがって、トンネル横断面における複数箇所の伝播速度・変化率を測定・把握し、分布図として整理することで覆工の応力分布や外力の作用方向を推定できる可能性がある。また、载荷前の無負荷状態における伝播速度の測定値の平均値 3600m/s を基準とした場合の伝播速度の変化率の分布図を図-3.2.27 に示す。これより、伝播速度の変化率は各測定箇所における初期値を基準にした変化率の図-3.2.26 (b) と同様な傾向を示すことがわかる。したがって、本実験と同様に実トンネルにおいて伝播速度の測定を行った場合、実トンネルにおける覆工の無負荷状態での伝播速度の分布状況から覆工の応力状態、外力の作用している場合は外力の作用方向を推定できる可能性があると考えられる。ただし、覆工の応力状態は、覆工の強度、周辺地山による拘束条件、覆工の自重による影響、周辺の温度環境、ひび割れの有無などに影響されると考えられることから、これらを考慮した無負荷状態の伝播速度を設定することが重要である。

なお、覆工上面側に貼付したひずみゲージと伝播速度・伝播速度の変化率の関係を図-3.2.28 に示す。図より、覆工上面側の伝播速度・伝播速度の変化率の変化は、覆工供試体の内面側・外面側の変化と同様に、圧縮ひずみが発生する付近の測定箇所で X・Z 方向が正の方向へ増加し、Y 方向が負の方向へ変化する。また、引張ひずみが発生する付近の測定箇所で伝播速度が低下する傾向を示した。

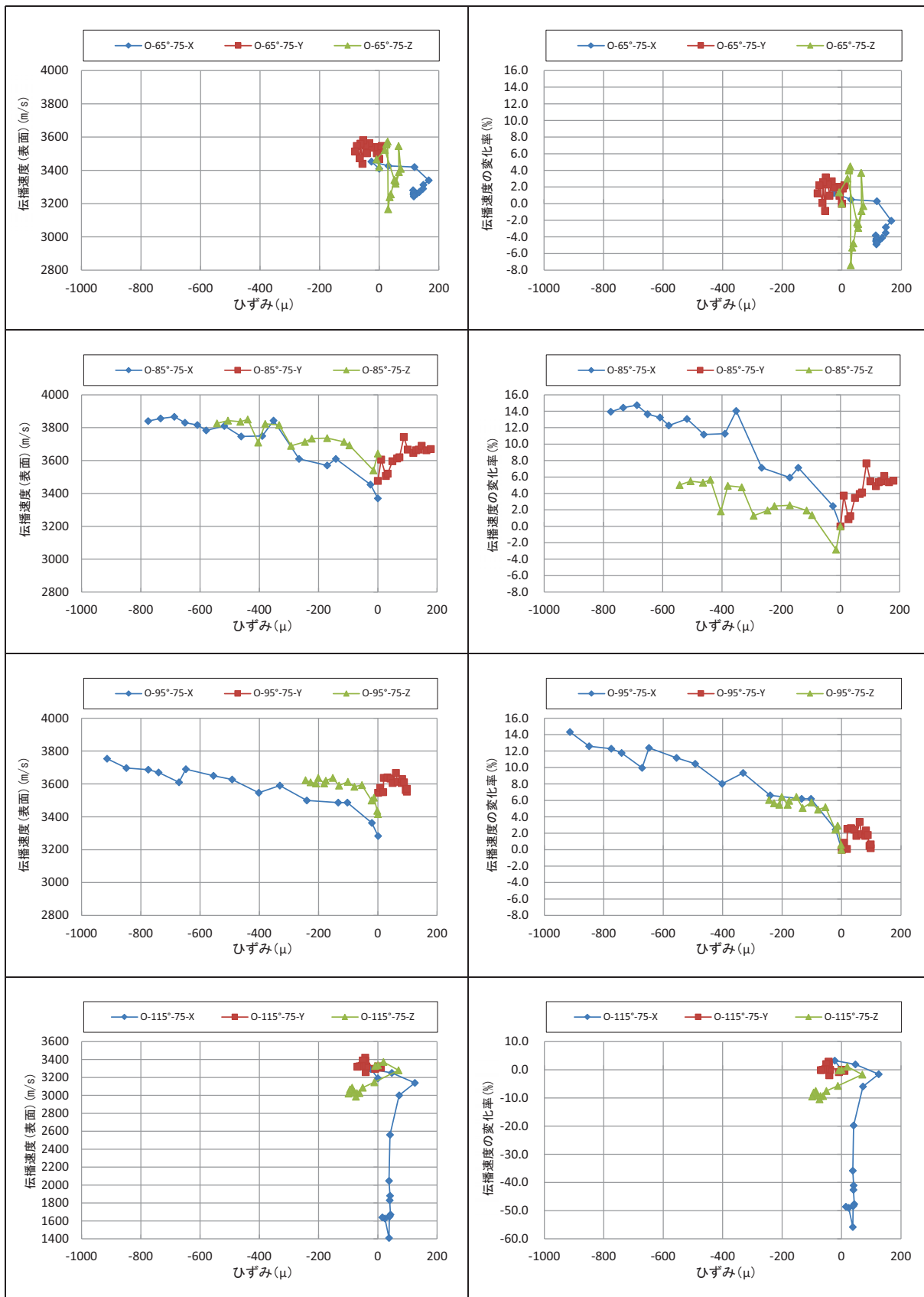


図-3.2.20 各測定箇所における覆工外面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 載荷)

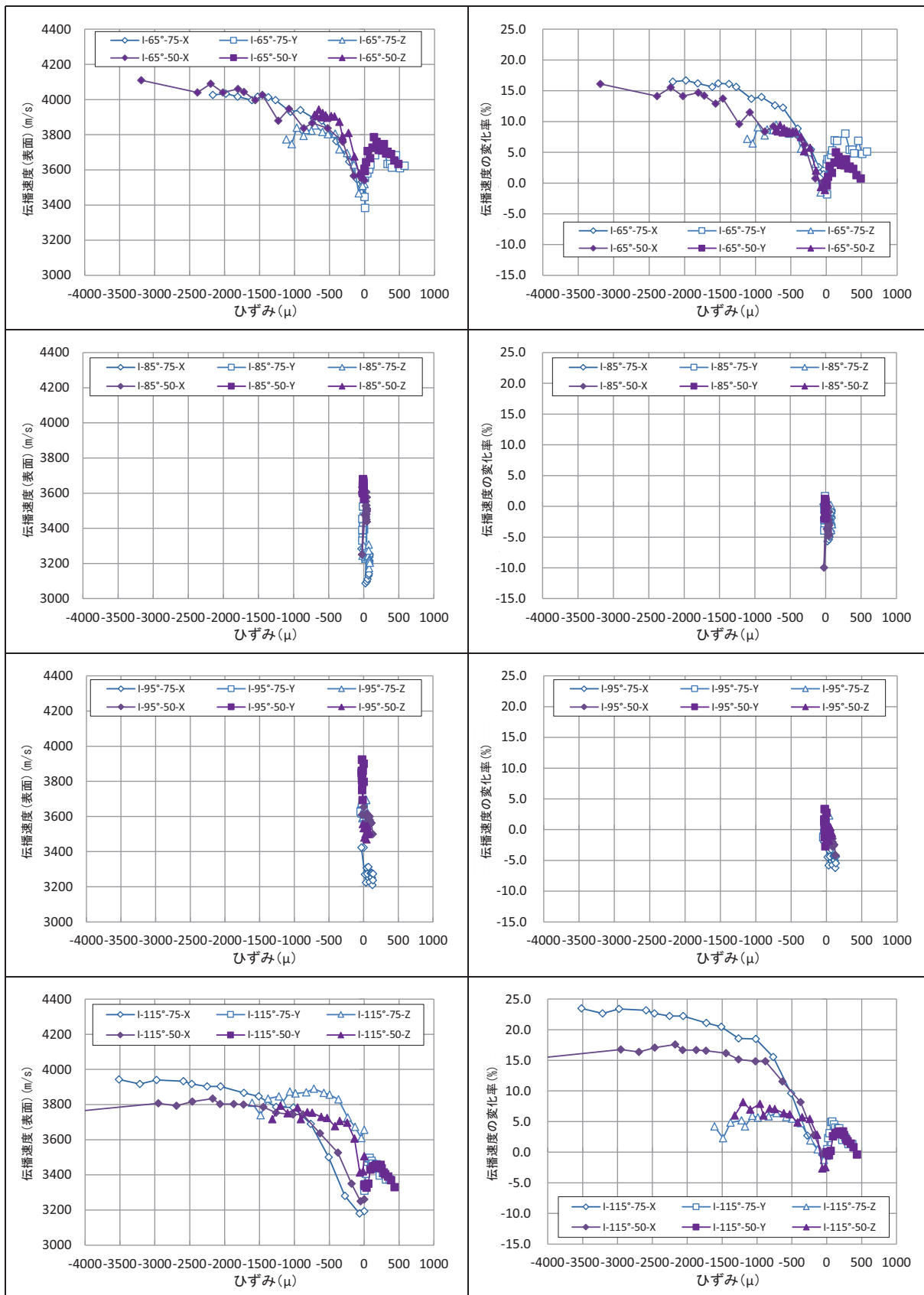


図-3.2.21 各測定箇所における覆工内面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 載荷)

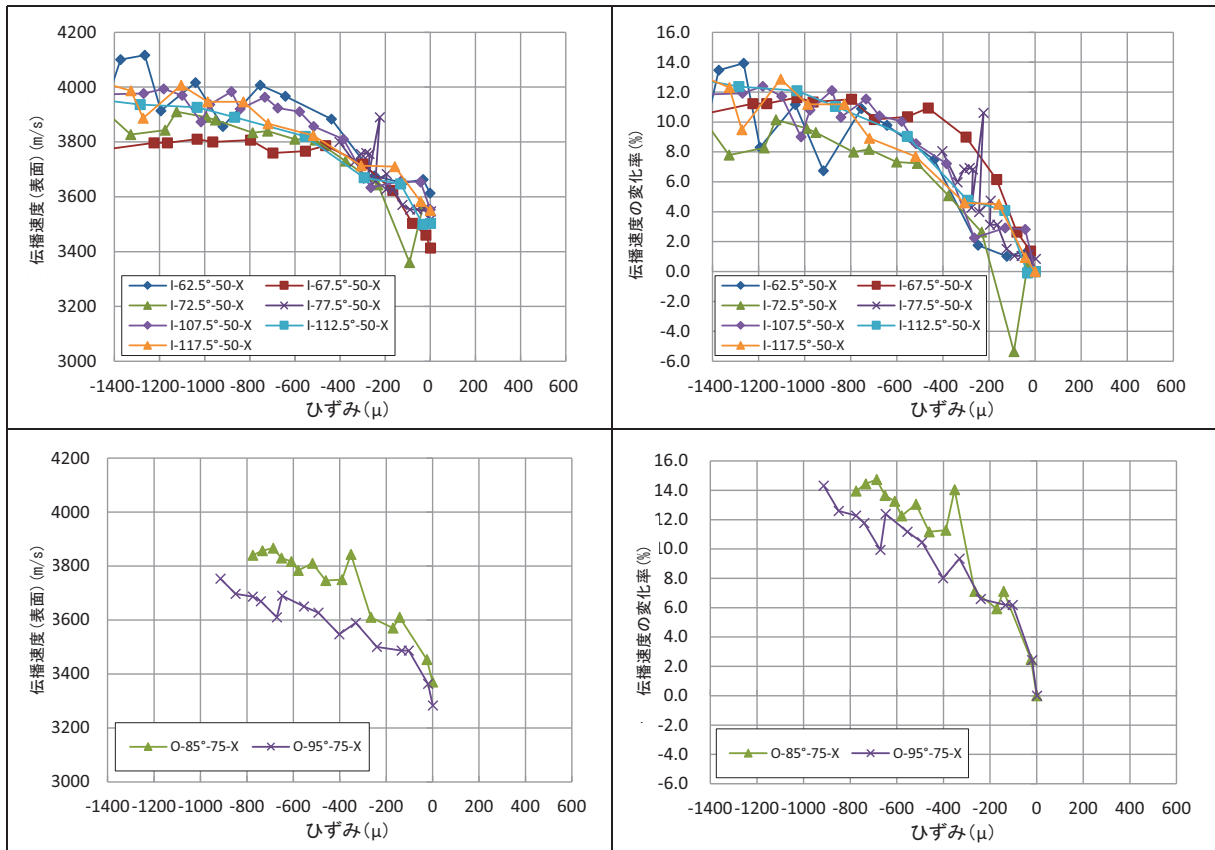


図-3.2.22 覆工外面側・内面側において圧縮ひずみが発生する付近の円周方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 载荷)



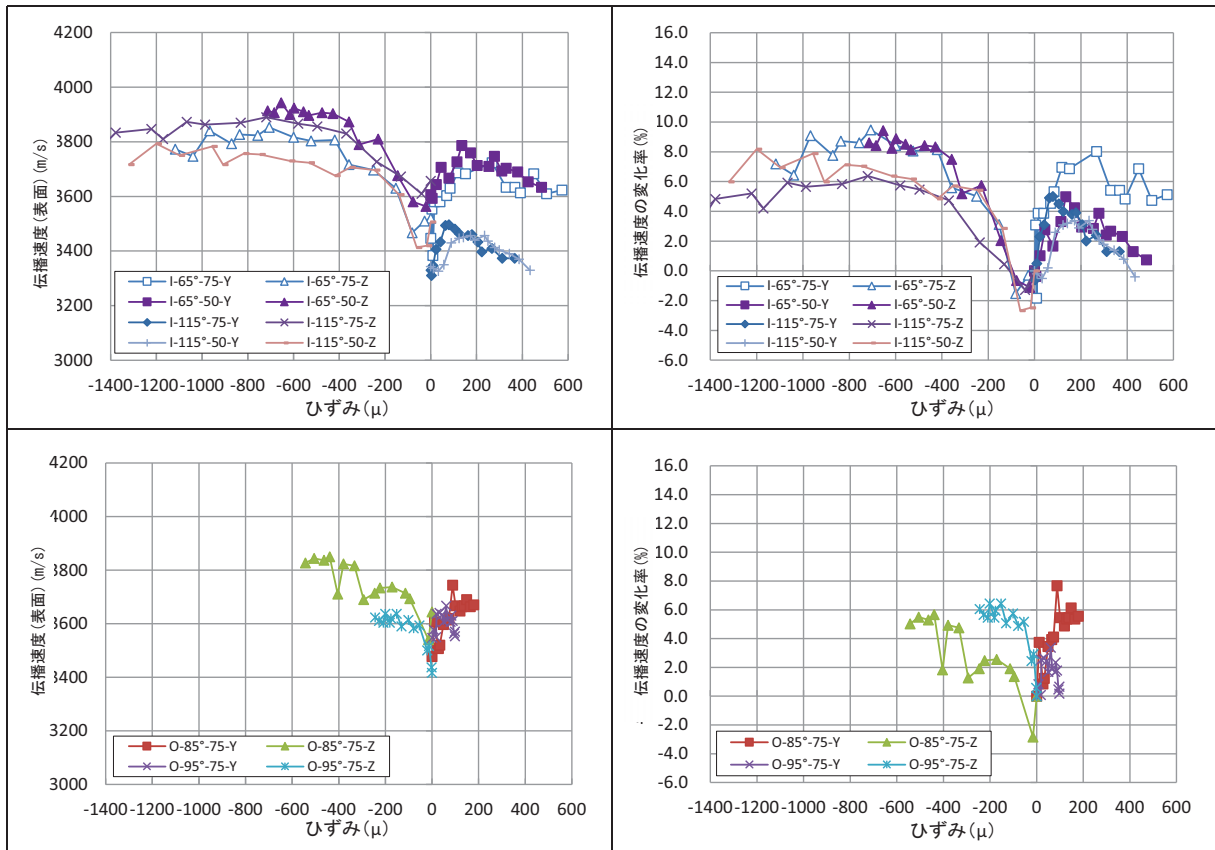


図-3.2.23 覆工外面側・内面側において圧縮ひずみが発生する付近の円周方向以外のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 载荷)

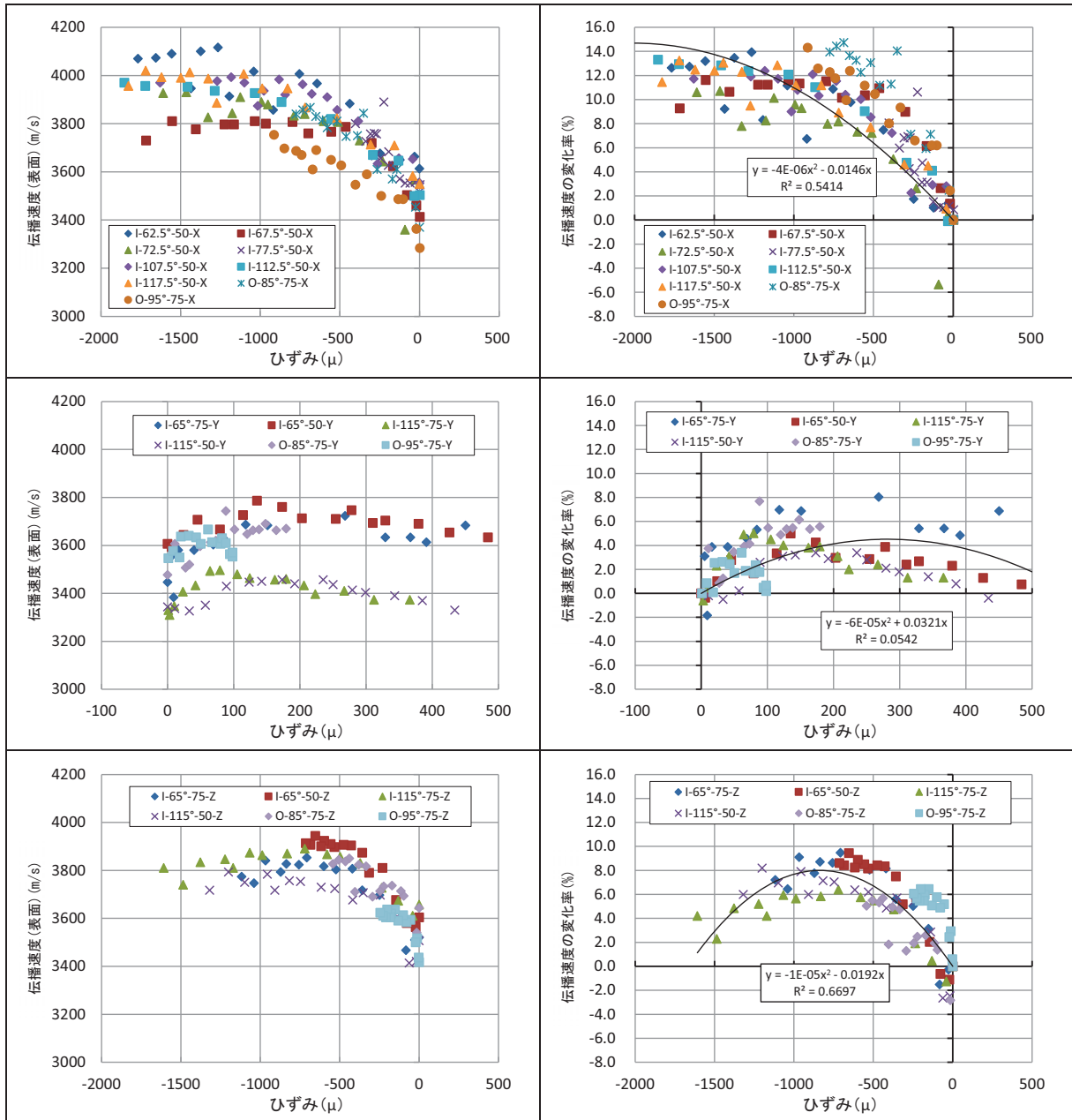


図-3.2.24 主に圧縮側となる付近の各方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 載荷)

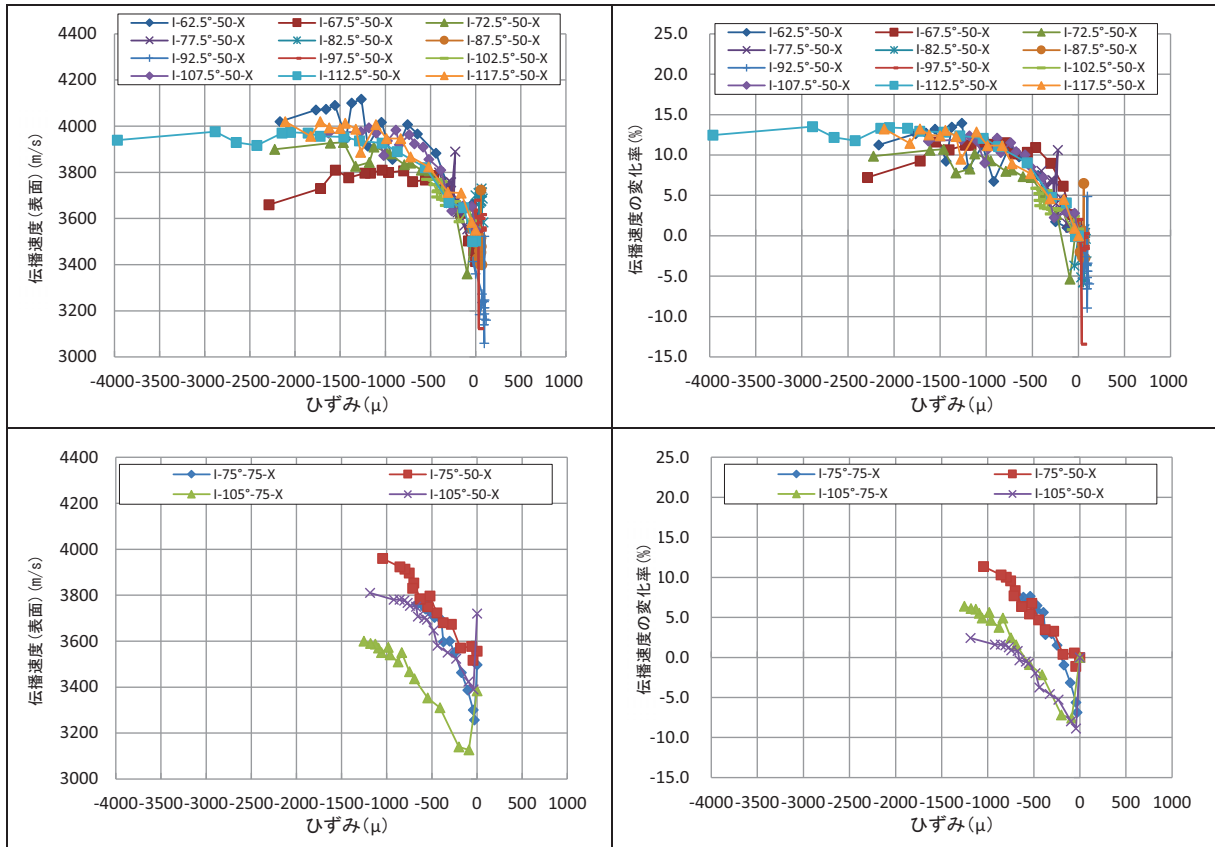
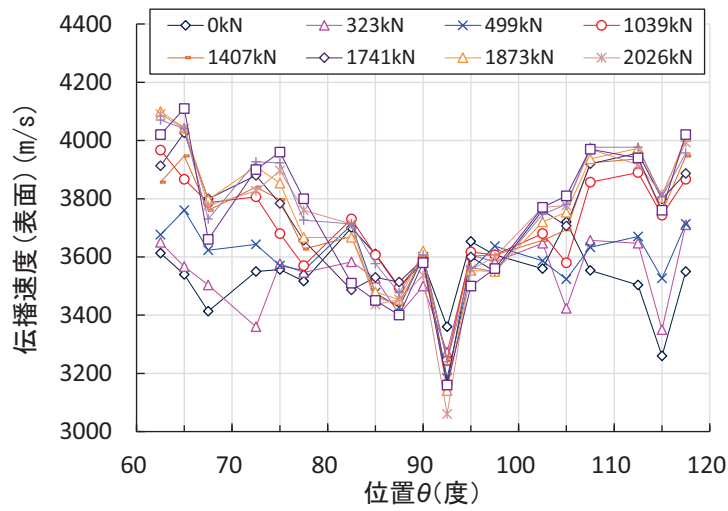
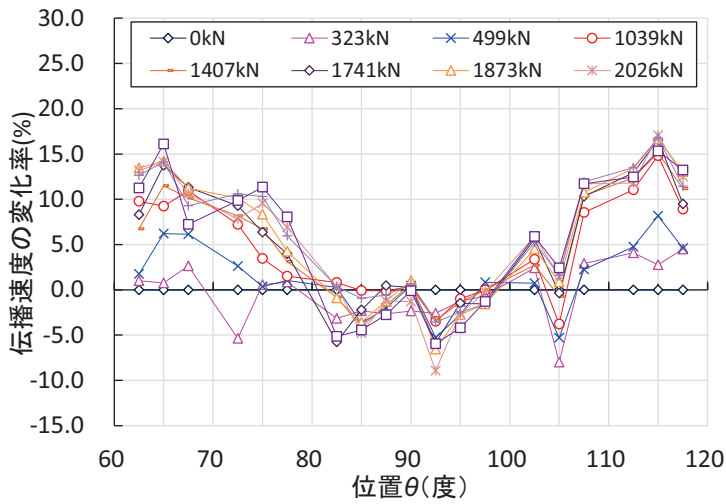


図-3. 2. 25 覆工内面側の円周方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (A 載荷)



(a) 伝播速度の分布図



(b) 伝播速度の変化率の分布図

図-3.2.26 覆工内面側の円周方向のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率の分布図 (C 载荷)

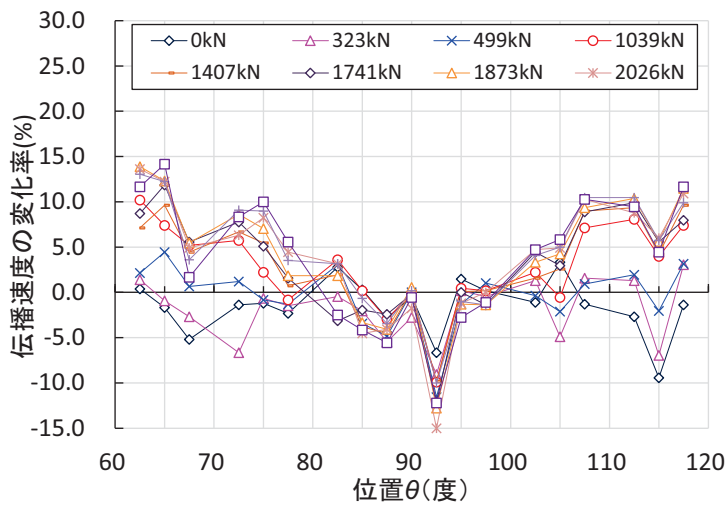


図-3.2.27 覆工内面側の円周方向のひずみと伝播速度の変化率の分布図 (初期値を 3600m/s とした場合)

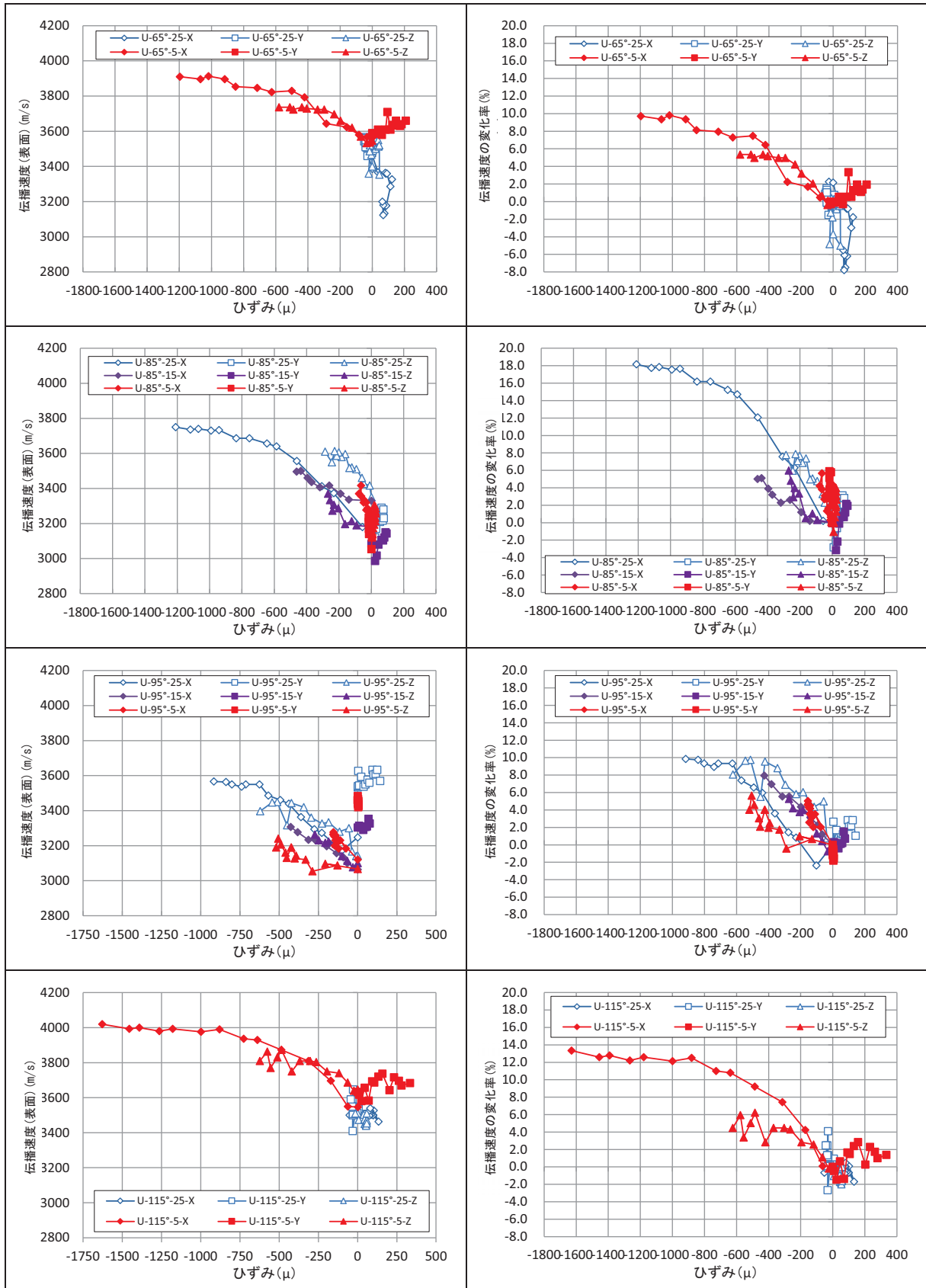


図-3.2.28 各測定箇所における覆工上面側のひずみと伝播速度・伝播速度の変化率との関係 (その1) (A 载荷)

### 3. 3 まとめ

実物規模による覆工载荷実験より、覆工表面の伝播速度は供試体表面に圧縮応力が生じて圧縮ひずみが増加する場合、ある一定の関係で増加すること、伝播速度の変化率は圧縮の主ひずみが発生する方向で最も大きく、他の方向はひずみの増加に伴い途中から減少傾向を示すことが分かった。以上より、同一箇所でも数方向の伝播速度を把握することで各方向の伝播速度の変化率の増減から覆工の応力状態を推定できる可能性があると考えられる。したがって、トンネル覆工に何らかの外力等が作用している場合、同一箇所でも数方向の伝播速度を把握することで各方向の伝播速度の変化率の増減・挙動から圧縮応力が生じている箇所の特定や、外力の作用方向等が推定できる可能性があることが分かった。ただし、伝播速度の変化を精度良く把握するためには、外力等が作用していない段階での伝播速度を的確に把握しておく必要がある。また、伝播速度は覆工コンクリートのひび割れ等の存在に大きく影響を受けることや、トンネルの年間を通した温度環境等の変化による覆工コンクリートへの影響も考えられることから、これらの適切な評価方法の検討が必要である。

#### 4. 簡易な超音波伝播速度計を用いた現地トンネルにおける覆工状況の把握

##### 4. 1 現地トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度

###### 4. 1. 1 伝播速度測定の概要

供用中のトンネルにおいて覆工コンクリートの超音波伝播速度の測定を行い、覆工の応力状態の推定可能性について検討した。伝播速度の測定は、2トンネル（(1) AS トンネル、(2) KU トンネル）で実施した。AS トンネルは、一部の区間で外力作用が要因と考えられる変状（ひび割れ）が生じている周辺、外力が作用していないと考えられる健全部において伝播速度測定を行った。KU トンネルは、外力作用により盤ぶくれが生じており現在は廃道となったトンネルである。本トンネルにおいては、インバート試験施工時に既設の覆工コンクリートの応力測定とともに、インバート施工後における覆工コンクリートのひずみ測定を実施しており、ひずみゲージ周辺、外力が作用していないと考えられる健全部において伝播速度測定を行った。

以下に伝播速度を測定したトンネルの状況および計測結果を示す。

###### 4. 1. 2 AS トンネルにおける伝播速度

###### (1) トンネルの概要

AS トンネルは、寒冷地に位置する延長が 1485m の 2 車線道路トンネルである。本トンネルは、山岳トンネル工法（NATM）で施工された中生代の白亜紀～ジュラ紀の砂岩泥岩互層を主体とする山間部を貫く最大土被りが約 180m、覆工厚さは 30cm のトンネルである（図-4.1.1、図-4.1.2）。なお、本トンネルは両側壁部に高さ約 2m の塗装による内装が施されている。

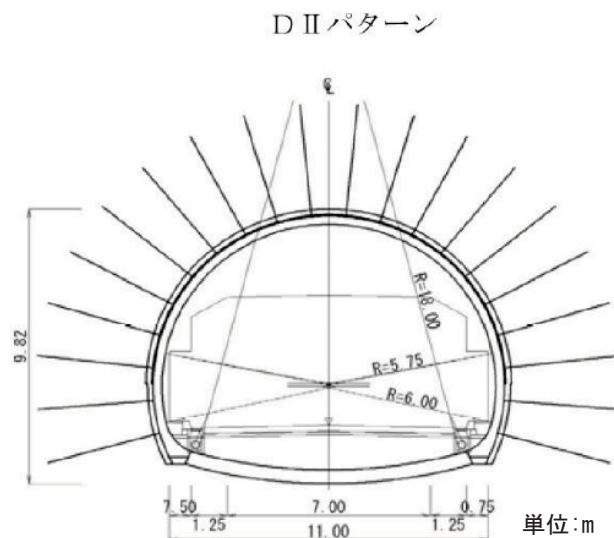


図-4.1.1 AS トンネルの標準断面（D II パターン）<sup>3)</sup>



地質状況	時代・岩種	中生代 白亜紀～ジュラ紀 薄別層群 旭峠層						中生代 白亜紀～ジュラ紀 薄別層群 二線層					
		砂岩		砂岩・流紋岩	砂岩泥岩互層(砂岩主体)			砂岩泥岩互層					
	風化・変質状況	強風化	風化	弱～未風化	変質	未風化				風化～弱風化	強風化		
	地山分類	E	D II	D I	D I～D II	D I・C II	D II	D I	D II	E			
	弾性波速度 (km/S)	0.3～1.5		2.4～2.6	1.3～2.8	4.6～4.8			4.2～4.4		1.1～2.3	0.7以下	
	一軸圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	—	51	100～560	5～103	330～790	70～420	290～920		280～610	—		
主な地山物性値 変形係数=kgf/cm <sup>2</sup>	500～1,700	—	5,000～31,000	600～10,000	22,000～31,000	1,800～4,800	7,500～11,000	—	1,600～3,000	850～1,900			
施工パターン	掘削工法	上半先進ショートベンチカット工法 (一部補助ベンチ付全断面工法)											
	掘削方式	発破											
	支保構造	坑口	D II	D I	D II(一部C II, D I)	D I・C II	D II	D I	D II	E	坑口	坑門	
	補助工法	—	リングカット 一部7φボルト	リングカット 一部ルーフボルト	リングカット	リングカット ルーフボルト	リングカット	リングカット ルーフボルト	リングカット ルーフボルト	リングカット ルーフボルト	—	—	
	覆工厚 (cm)	アーチ 70RC	60RC 35RC 30	30	30	40・30	30(非常駐車帯40)	30	45	50	30	35RC 60RC 30	70RC
	凍結防止工	—	断熱材 t=7cm						—		断熱材 t=5cm		—
施工対策	変状				天端、鏡								
	対策				注入式7φボルト、 掘削機、掘削機								
計測	最大内空変位量 (mm)												
	最大天端変位量 (mm)												
	主な計測値												
湧水状況 切羽湧水(リットル/分)	にじみ～少量						多量部あり		にじみ～滴水				
その他													

図-4.1.2 AS トンネルの地質縦断図<sup>3)</sup>



## (2) 測定方法および測定箇所

伝播速度は、送信・受信センサー間の距離 150mm が固定された固定型の簡易な超音波伝播速度計を用いて、覆工コンクリート表面にセンサーを押し当てて測定した。測定箇所は、写真-4.1.1～写真-4.1.3 に示すように、変状が生じていない箇所（健全部）と変状（ひび割れ）が生じている箇所で行った。変状が生じていない箇所は、伝播速度への内装（塗装）による影響を確認するため、塗料による内装が施されている部分（側壁 1.5m の位置）、コンクリート面が露出している部分（側壁 2.3m の位置）で測定した。

また、伝播速度の測定時期による影響を把握するため、秋期と冬期の 2 回の伝播速度測定をトンネル点検等による車線規制が実施される時期にあわせて複数年にわたって実施した。

### ①変状が生じていない箇所

- ・ スパン 57 (【S057】) : 側壁左 1.5m、2.3m (写真-4.1.1)
- ・ スパン 61 (【S061】) : 側壁左 1.5m、2.3m (写真-4.1.2)

### ②変状が生じている箇所

- ・ スパン 62 (【S062】) : 側壁左 0.6m ひび割れ箇所 (写真-4.1.3)

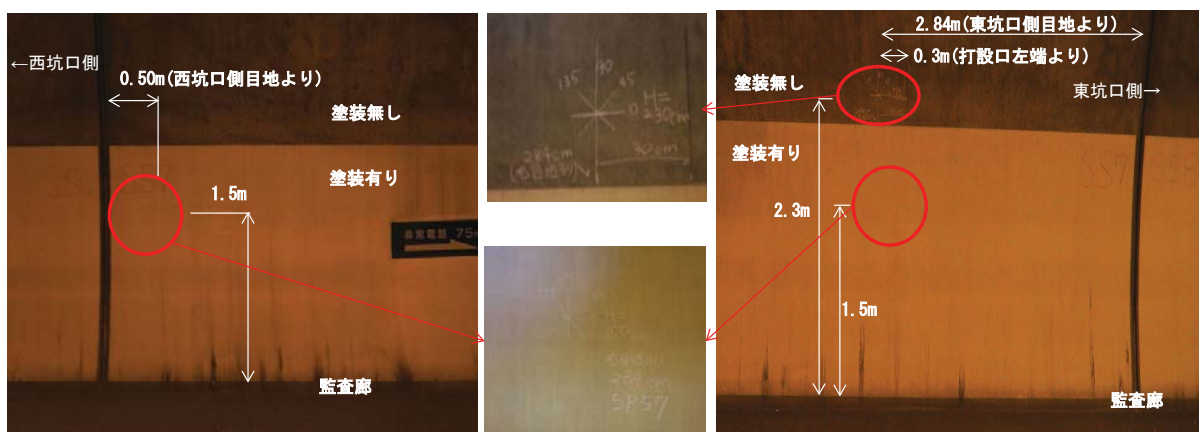


写真-4.1.1 変状が生じていない箇所（健全部）の測定箇所【S057】の状況

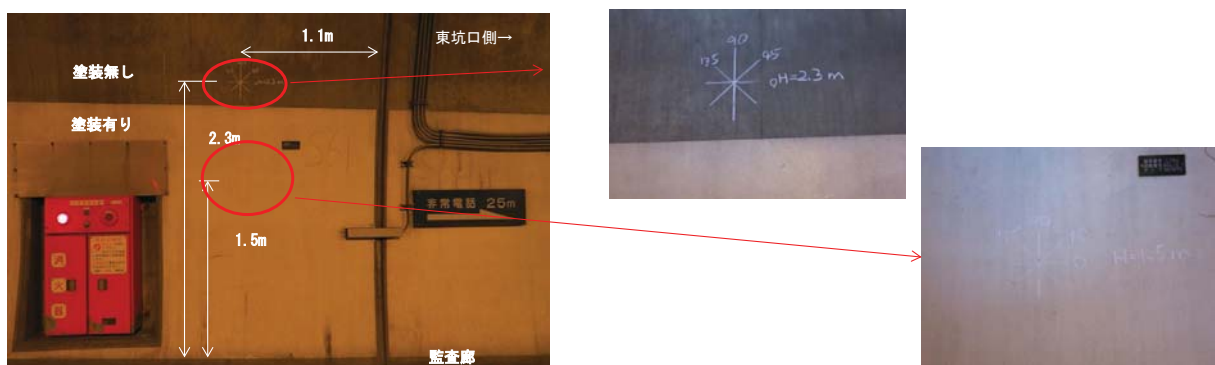


写真-4.1.2 変状が生じていない箇所（健全部）の測定箇所【S061】の状況



写真-4.1.3 変状が生じている箇所の測定箇所【S062】の状況

図-4.1.3 に伝播速度を測定したスパンの変状展開図の概要を、図-4.1.4、表-4.1.1 に測定箇所の詳細、一覧を示す。

各スパンの測定箇所における詳細な測定ポイントは、変状が生じていない健全部では外力等が作用していない伝播速度値を設定することを目的に、図-4.1.4 中の【測定方法】に示すように、ある一点を中心にトンネル軸方向に沿って水平方向を基準（0度）とし、45度ピッチで0度、45度、90度、135度、180度の伝播速度を測定した。また、変状が生じている箇所については、図-4.1.4 中の【測定方法】に示すようにひび割れを基準に、垂直と平行にひび割れからの離れで、垂直は10、20、30、40、-10、-20、-30、-40cmの位置で、水平は2、10、20、30、40、-10、-20、-30、-40cmの位置でそれぞれ伝播速度を測定した。

なお、写真-4.1.4 に健全部、ひび割れ周辺部での測定時の状況を示す。

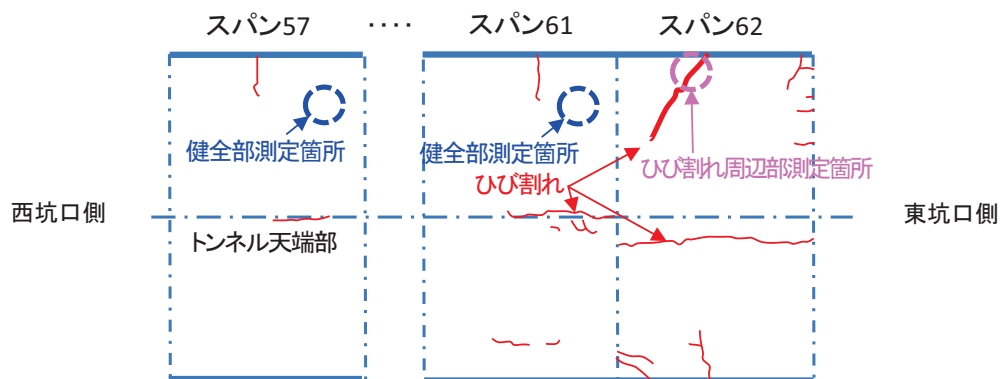


図-4.1.3 伝播速度測定スパンの変状展開図と測定箇所の概要

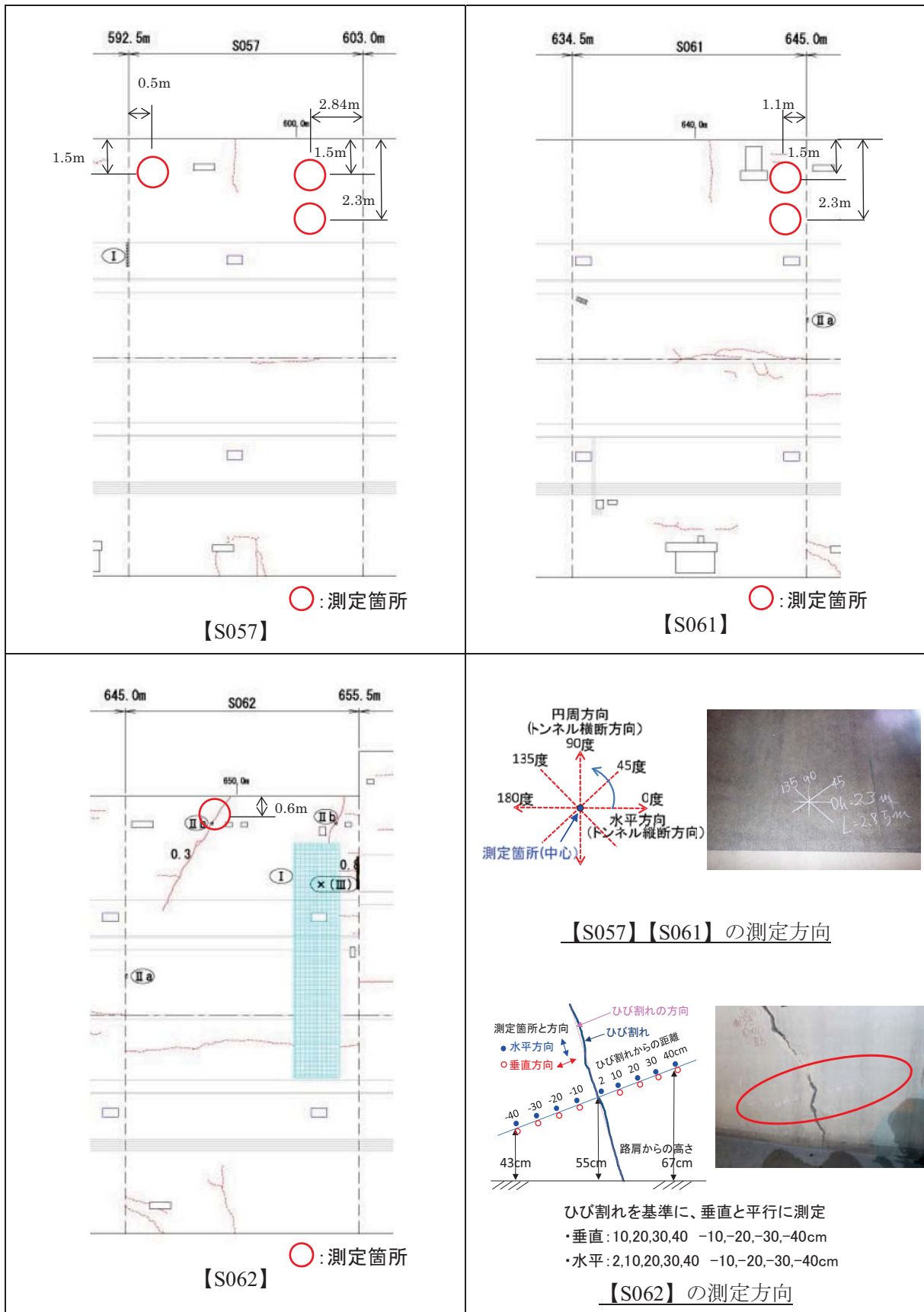


図-4.1.4 伝播速度の計測箇所

表-4.1.1 伝播速度の測定箇所一覧

覆工の状況	スパン番号	対象箇所	測定位置
ひび割れ周辺部	62	側壁部 高さ約0.5m	ひび割れの方角を基準にして、垂直・水平方向にそれぞれ下記の離れた位置 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 垂直方向：10,20,30,40cm                   -10,-20,-30,-40cm</li> <li>・ 水平方向：1,2,10,20,30,40cm                   -10,-20,-30,-40cm</li> </ul>
健全部	57 61	側壁部 高さ約1.5m 高さ約2.3m	測定箇所を中心に下記の方角 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 0度,45度,90度,135度,180度</li> </ul> ※高さ1.5mは壁面塗装あり ※高さ2.3mは壁面塗装なし



(a) 健全部測定箇所での測定状況

(b) ひび割れ周辺部測定箇所での測定状況

写真-4.1.4 測定時の状況

### (3) 測定結果

変状が生じていない箇所（健全部）【S057】、【S061】で計測した伝播速度結果一覧を表-4.1.2に示す。本トンネルは、側壁部において高さ約2m付近まで内装（塗装）が施されている。覆工コンクリート表面の内装（塗装）の有無による伝播速度の違いを確認するため、塗装なし（高さ2.3m）と塗装あり（高さ1.5m）について伝播速度を測定した。

#### 1) 変状が生じていない箇所（健全部 塗装なし（高さ2.3m））

健全部2箇所の高さ2.3mで測定した伝播速度の経時変化について図-4.1.5に示す。図中には当該トンネルから最も近傍にあるアメダス観測地点で測定された10分毎の温度値を用いて測定時間帯における平均気温を示した。また、図-4.1.6に伝播速度と測定時の平均気温との関係を示す。

これらより、伝播速度のばらつきが大きく、また一部の測定点で傾向と一致しない結果となっているが、健全部における各箇所の伝播速度は、測定時の平均気温が高い秋期が冬期よりも高く、一般的に考えられている材料の熱膨張・収縮による覆工コンクリートの挙動と一致することが分かる。

次に、図-4.1.6の伝播速度と測定時の平均気温の関係を用いて0°Cを基準とした伝播速度の温度補正を行った結果を図-4.1.7に示す。測定日によって記録がないのは伝播速度が極端に低い値（3000m/s以下）であったため、覆工コンクリート表面の状態からは確認できなかった微細なひび割れの存在等による影響があったとして図中から除外した。これより、温度補正前の伝播速度のばらつきが大きかったスパン61の45度・90度方向を除き、他の箇所での顕著な変化は認められない。スパン57は水平方向の0度・180度の伝播速度は顕著な変化は見られないものの約4200m/sで推移しており、他の方向に比較して若干高い伝播速度を示している。目視観察では測定箇所のスパン内での際だったひび割れ等の変状は確認できていないものの、覆工がトンネル縦断方向に拘束されるなどにより何らかの力が作用し、覆工に応力が発生しているものと考えられる。とくに、スパン61は、ばらつきが大きい方向の伝播速度を除き、健全部における他の方向の0°Cでの伝播速度は、概ね3800m/s～4000m/sで推移している。

#### 2) 変状が生じていない箇所（健全部 塗装あり（高さ1.5m））

健全部3箇所（スパン57：2箇所、スパン61：1箇所）の高さ1.5mで測定した伝播速度の経時変化について図-4.1.8に示す。図中には図-4.1.5と同様に当該トンネルから最も近傍にあるアメダス観測地点で測定された10分毎の温度値を用いて測定時間帯における平均気温を示した。また、図-4.1.9に伝播速度と測定時の平均気温との関係を示す。

これらより、スパン57の2箇所は、塗装なしの場合に比較して伝播速度のばらつきが大きい。また、温度変化に伴う伝播速度の変動も塗装なしと同様な傾向を示しているものの、塗装なしの場合に比べて顕著でないことが分かる。これは、覆工コンクリート表面に施された塗装の影響に

よるものと考えられる。

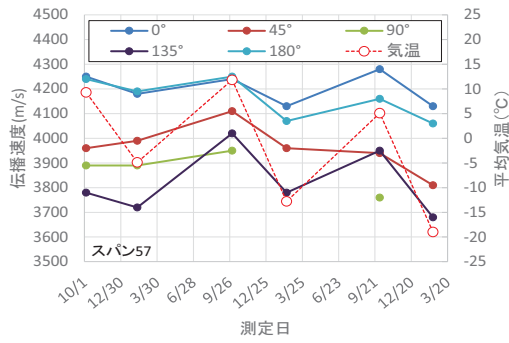
図-4.1.9 の伝播速度と測定時の平均気温の関係を用いて 0℃を基準とした伝播速度の温度補正を行った結果を図-4.1.10 に示す。測定日によって記録がないのは伝播速度が極端に低い値 (3000m/s 以下) であったため、覆工コンクリート表面の状態からは確認できなかった微細なひび割れの存在等による影響があったとして図中から除外した。これより、温度補正後の伝播速度は、スパン 57 の健全部 (塗装あり) の場合は、90 度を除き、塗装なしの場合とほど同様に概ね 3900m/s~4000m/s 程度で推移しているものの、スパン 57 の 2 箇所 (健全部 (塗装あり) の場合は、伝播速度の変動が大きい結果となった。今回、健全部として測定したスパン 57、スパン 61 は目視観察では覆工表面における特段の変状は確認できず、伝播速度の調査期間中における変化も認められなかったことから、覆工に作用している応力の顕著な変化もないと考えられることから、スパン 57 の健全部 (塗装あり) の場合は、温度による影響とともに覆工表面に施された塗装による影響があったものと推測される。

以上より、温度による影響を補正することにより、伝播速度の長期的な挙動から覆工表面の応力変化を把握できる可能性があることが分かった。ただし、覆工表面で計測する伝播速度は覆工の状態によっては微細なひび割れ等が測定結果のばらつきを生じさせることや、覆工コンクリート面の施されている塗装による影響も考えられることから、測定箇所を選定するうえで注意が必要と考えられる。

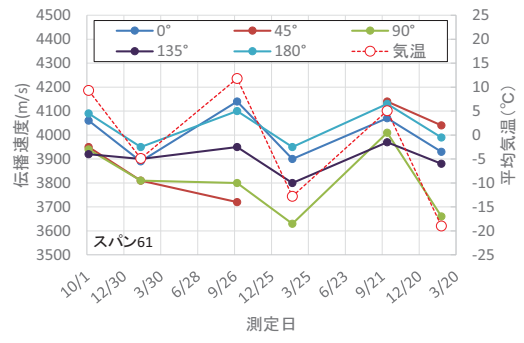
なお、本項で示した健全部における測定箇所が外力等の作用が生じていないと仮定した場合、本トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度の初期値としては 3800m/s~4000m/s 程度と考えることができる。

表-4. 1. 2 変状が生じていない箇所（健全部）における伝播速度測定結果【S057】【S061】

スパン NO.	測定周波状況		クラック 状況	測定方向 クラックと 平行の直角が	UKI401 測定値(m/s)																																									
	側壁 or アーチ	高さ(m)			測定日(2015.2.17)			測定日(2016.10.5)			測定日(2017.02.09)			測定日(2018.10.03)			測定日(2019.02.12)																													
					①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③																											
S057	右 (西坑口側 から見て)	1.5	なし	0°	4120	4090	3890	4067	4160	4190	4180	3940	4100	3920	3868.7	4270	4700	4190	4220	3920	4180	4130	4077	3950	4000	4020	3990	3850	3810	4020	3893															
					3750	3840	3820	3803	3960	3840	3900	3900	2480	2480	2480	2577	1450	1560	1520	1510	2110	2060	2130	2100	2090	2120	2090	2120	2090	2120	2090	2100														
					3850	3840	3700	3797	3980	3920	3940	3947	3690	2310	3670	3223.3	2570	2940	2580	2590	1990	2030	1980	2000	2660	2640	2620	2640	2270	2260	2260	2263														
					3810	3800	3840	3817	3910	3930	3890	3910	3640	3740	3630	3670	4250	4290	4270	4140	4170	4170	4140	4010	4080	3760	3690	3760	3660	3760	3660	3737														
					4120	4090	3890	4067	4140	4160	4140	4147	2740	2730	2740	2736.7	4160	4260	4240	4220	3970	4100	4130	4067	4000	3910	3810	3907	4080	3940	3970	3997														
	側壁	2.3	なし	0°	4250	4260	4250	4253	4160	4180	4200	4180	4200	4180	4250	4230	4240	4240	4130	4070	4180	4127	4280	4300	4290	4283	4260	4080	4050	4130																
					3950	3950	3970	3957	4010	3970	3980	3986.7	4110	4140	4090	4113	3920	3950	4020	3963	3900	4010	3920	3943	3820	3830	3790	3813																		
					3880	3910	3890	3893	3820	3920	3930	3890	3960	3940	3950	3950	3880	2740	2770	3130	3870	3720	3690	3760	2780	2760	2690	2743																		
					3730	3760	3860	3783	3710	3710	3740	3720	3960	4120	3990	4020	3770	3740	3820	3777	3920	3950	3870	3947	3730	3670	3640	3680																		
					4230	4240	4250	4240	4190	4210	4180	4193.3	4250	4230	4247	4070	4110	4040	4073	4270	3920	4300	4300	4163	4130	3860	4090	4060																		
右 (西坑口側 目地より 0.5m)	1.5	なし	0°	4260	4270	4270	4266.7	4310	4270	4320	4300	4250	4290	4250	4263	4500	4490	4493	4390	4390	4390	4390	4390	4390	4390	4390	4390	4390	4390	4390																
				3880	3910	3900	3896.7	4140	4170	4130	4147	3950	3990	3920	3953	4320	4310	4270	4300	4140	4090	4070	4100	4090	4070	4100																				
				3800	3780	3860	3840	4120	3990	4020	4043	2180	2130	2100	2137	4250	4170	4210	4210	3900	3970	3950	3940																							
				4000	4100	4020	4040	4080	4100	4110	4097	4120	4090	4140	4117	4310	4310	4310	4390	4337	4080	4130	4120	4110																						
				4250	4270	4260	4260	4320	4310	4300	4310	4250	4270	4250	4257	4460	4160	4200	4273	4320	4340	4410	4357																							
S061	右or左 (西坑口側 から見て)	1.5	なし	0°	4100	4110	4070	4093	3930	3900	3910	3913	4000	4030	4050	4027	3840	3940	3920	3933.3	3890	3970	3960	3940	2730	2670	2770	2723	4040	4040	4030	4037	3900	3860	3870	3883										
					4130	4130	4160	4140	3960	3930	3880	3923	4170	4130	4140	4147	3940	4000	3950	3963.3	4050	4070	4070	4063	2680	2670	2590	2647	3950	3970	3960	3960	3940	3820	3790	3950										
					4120	4140	4140	4133	3900	3970	3910	3893	3990	4100	4050	4047	3660	3850	3860	3856.7	3910	3990	4020	3973	3610	3660	3740	3670	4130	4100	4100	4110	3880	4010	4130	4040										
					4120	4120	4110	4117	3900	3890	3880	3890	3990	4010	4040	4013	3780	3860	4000	3880	3980	4020	4070	4023	2730	2740	2630	2700	4040	4150	4020	4070	3890	3800	3930	3873										
					4100	4110	4070	4093	3930	3900	3810	3913	4020	4010	4010	4013	3810	3900	3900	3903.3	4010	4010	4020	4013	3840	4010	4000	3950	4050	4070	4020	4047	3900	3890	3860	3893										
	側壁	2.3	なし	0°	3970	3920	3970	3953	3600	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810												
					3960	3930	3920	3937	3800	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810	3810											
					3910	3930	3910	3917	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890	3890										
					4120	4050	4100	4090	3840	3940	3970	3950	4090	4100	4100	4097	3890	3990	3970	3950	4110	4130	4160	4133	4100	4040	4040	4040	4133	4100	4040	4040	3840	3940	3970	3950	4110	4130	4160	4133	4100	4040	3840	3940	3970	3950
					4250	4270	4260	4260	4320	4310	4300	4310	4250	4270	4250	4257	4460	4160	4200	4273	4320	4340	4410	4357																						

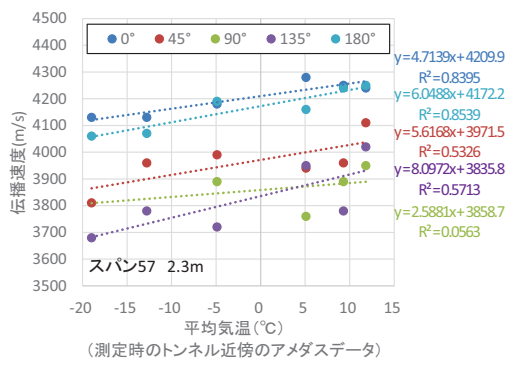


(a) スパン 57

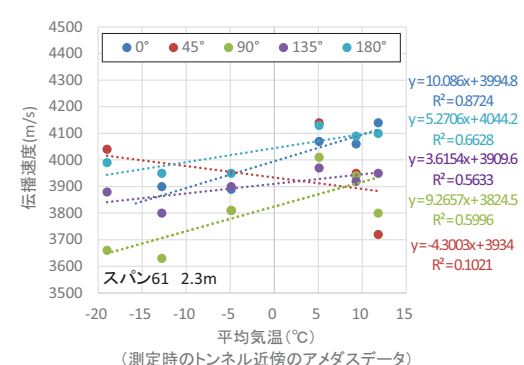


(b) スパン 61

図-4.1.5 健全部（塗装なし）における伝播速度の経時変化

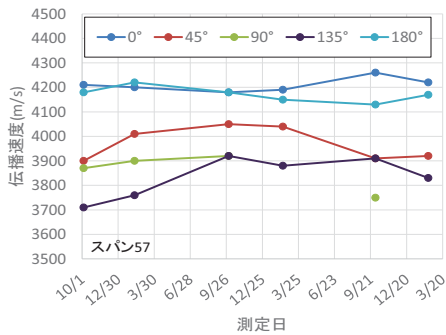


(a) スパン 57

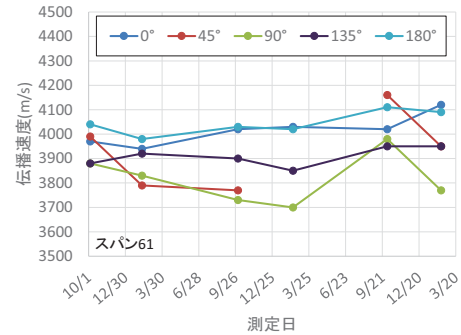


(b) スパン 61

図-4.1.6 健全部（塗装なし）における伝播速度と測定時の平均気温の関係



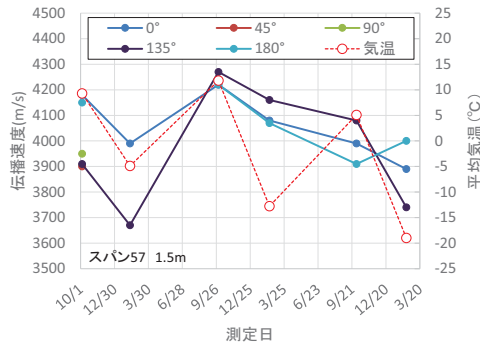
(a) スパン 57



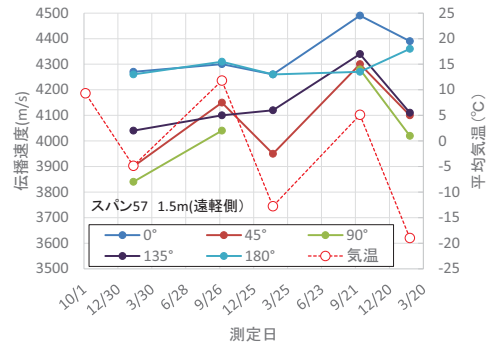
(b) スパン 61

図-4.1.7 温度補正後の健全部（塗装なし）における伝播速度の経時変化  
(平均気温0°Cを基準)

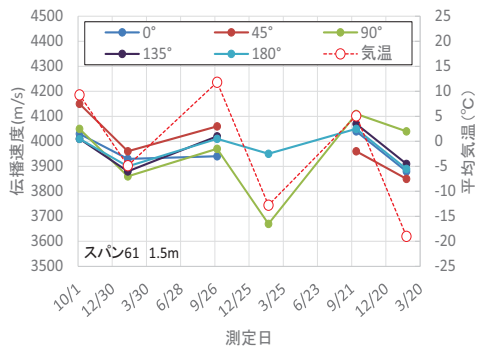




(a) スパン 57(東坑口側)

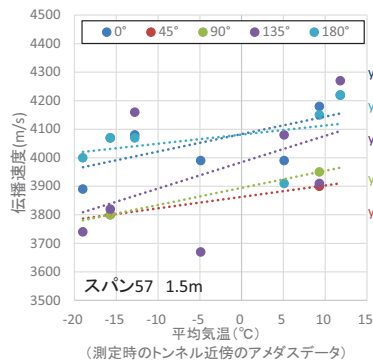


(b) スパン 57(西坑口側)

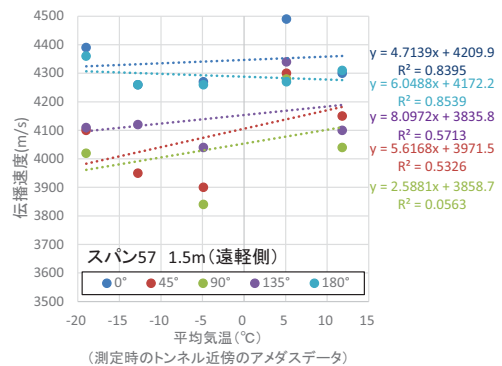


(c) スパン 61

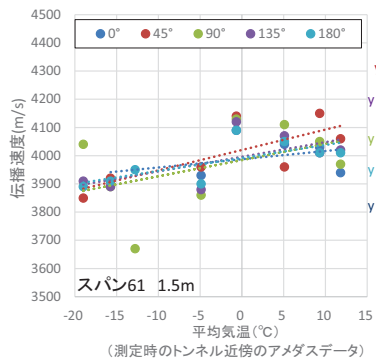
図-4.1.8 健全部 (塗装あり) における伝播速度の経時変化



(a) スパン 57(東坑口側)

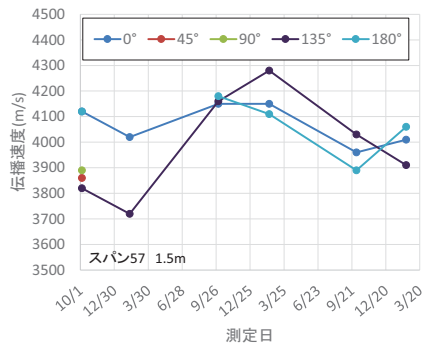


(b) スパン 57(西坑口側)

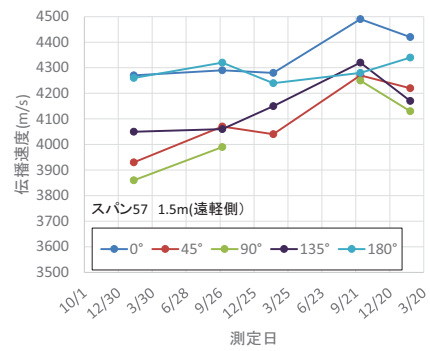


(c) スパン 61

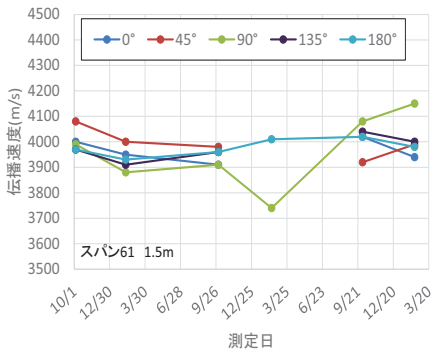
図-4.1.9 健全部 (塗装あり) における伝播速度と測定時の平均気温の関係



(a) スパン 57 (東坑口側)



(b) スパン 57 (西坑口側)



(c) スパン 61

図-4.1.10 温度補正後の健全部（塗装あり）における伝播速度の経時変化（平均気温 0°Cを基準）

### 3) 変状が生じている箇所

【S062】の変状が生じている箇所で計測した伝播速度の測定結果一覧を表-4.1.3に示す。

図-4.1.11 にスパン 62 のひび割れ部周辺における伝播速度と測定時の平均気温の関係を示す。伝播速度は、測定時の平均気温との関係で多少変化しているように見える。この傾向は、健全部の伝播速度と同様である。ただし、ひび割れに平行・垂直方向ともに伝播速度が比較的高い値を示している。ひび割れからの離れが 10cm、-10cm の箇所においては伝播速度の変化が小さい。図-4.1.12 にひび割れからの離れを横軸としてひび割れに平行・垂直方向の各伝播速度の分布図を示す。これより、伝播速度のばらつきは比較的大きいものの、ひび割れに平行・ひび割れに垂直ともに、ひび割れに近い箇所における伝播速度が高い傾向を示している。

図-4.1.13、図-4.1.14 にひび割れ部における伝播速度と測定時の平均気温との関係を示す。これらより、変状が生じている箇所においても健全部における各箇所の伝播速度と同様に、平均気温に応じて伝播速度が変化している。図-4.1.13、図-4.1.14 に示した伝播速度と測定時の平均気温の関係を用いて、0℃を基準として伝播速度の温度補正を行った結果について、図-4.1.15 に伝播速度の経時変化を、図-4.1.16 に伝播速度の分布図を示す。

図-4.1.15 の伝播速度の経時変化より、一部の箇所で伝播速度が変動しているものの、測定期間中における伝播速度の顕著な増減は認められない。また、図-4.1.16 の伝播速度の分布図より、ひび割れ周辺部は、ひび割れから垂直・平行方向に 20～30cm の範囲で伝播速度が高く、局部的に覆工応力が高い状態であると推測される。また、目視による観察によるひび割れ周辺部でのひび割れの進行等も認められないことから、ひび割れ周辺部で変状の進行はないものと考えられる。

ここで、ひび割れ周辺部の覆工表面に発生しているひずみの値を推定する。今回測定した健全部に外力等の作用が生じていないと仮定した場合、測定された伝播速度の 4000m/s を初期値と考えることができる。本ひび割れ部での伝播速度の最大値が約 4400m/s であり、伝播速度の変化率は概ね+10%となる。3.2 で示した実物大の覆工載荷実験における伝播速度の変化率とひずみの関係から、伝播速度の変化率が約 10%の場合においては概ね-500 $\mu$  程度以上のひずみが発生していたことから、ひび割れ周辺部においては概ね-500 $\mu$  以上の圧縮ひずみが発生しているものと推察される。

次に、ひび割れ面の方向に垂直な軸線上において、ひび割れからの離れ左右 10cm の位置を中心として、それぞれ垂直な軸線を基準として 45 度ピッチにおける方向の伝播速度の結果を図-4.1.17～図-4.1.19 に示す。図-4.1.17 は伝播速度の経時変化を、図-4.1.18 は伝播速度と測定時の平均気温の関係を、図-4.1.19 は温度補正後の伝播速度の経時変化を示す。

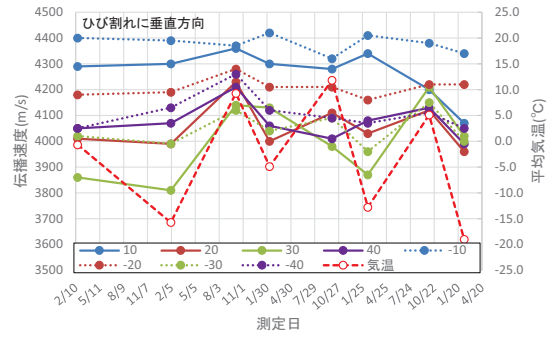
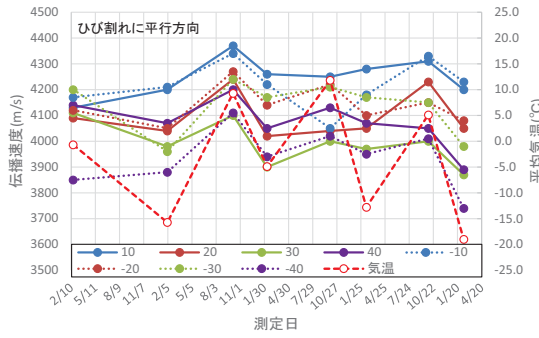
図-4.1.17、図-4.1.18 より、伝播速度は顕著ではないものの測定時の平均気温によって変動していることが分かる。図-4.1.19 の温度補正後の伝播速度の経時変化より、0 度、180 度、135 度の方向の伝播速度が他の方向の伝播速度に比べて大きい値を示している。本ひび割れの周辺部では、トンネル横断面の方向よりもトンネル軸方向の応力のほうが、またひび割れの左側の方が右

側に比べて高い応力が発生していると推察される。

以上の結果より、実トンネルにおいても簡易的な超音波伝播速度計を用いて覆工コンクリート表面の伝播速度を継続的に測定し、その変化を把握することにより覆工の状態を推定できる可能性があることが分かった。ただし、今回は、実トンネルにおける伝播速度と覆工表面のひずみの値との検証をしていないため、今後、検証が必要である。

表-4.1.3 変状が生じている箇所における伝播速度測定結果【S062】

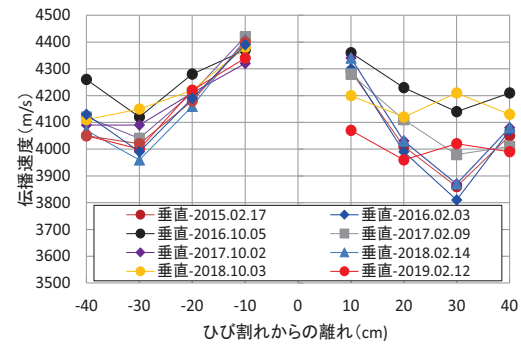
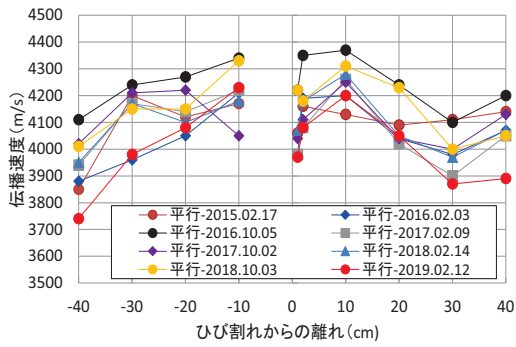
スパン NO.	側壁 No. or アーチ	測定箇所状況 右or左 (形状口側 から見て)	クラック 状況	調査位置・方向 クラックと平行or直 角か	UKI401 測定値(m/s)																																
					測定日(2015.2.17)			測定日(2015.2.3)			測定日(2016.10.5)			測定日(2017.02.09)			測定日(2017.10.02)			測定日(2018.02.14)			測定日(2018.10.03)			測定日(2019.02.12)											
					①	②	③	平均	①	②	③	平均	①	②	③	平均	①	②	③	平均	①	②	③	平均	①	②	③	平均	①	②	③	平均					
S062	側壁	左	あり		右1cm平行	4050	4050	4080	4060	4020	3940	3980	3980	3976.7	4120	4010	3990	4040	4000	4120	4100	4073	4170	4240	4250	4220	3920	3990	3990	3967							
					右2cm平行	4130	4160	4200	4163	4190	4180	4190	4187	4320	4370	4360	4350	4120	4110	4020	4083.3	4090	4100	4130	4107	4140	4200	4210	4183	4190	4240	4100	4177	3960	4160	4090	4077
					右10cm平行	4080	4100	4020	4127	4190	4170	4240	4200	4390	4360	4367	4390	4280	4210	4290	4253	4510	4250	4270	4477	4320	4290	4510	4307	4210	4200	4180	4197				
					右20cm平行	4080	4090	4090	4087	4130	3960	4020	4037	4170	4290	4250	4237	4020	4010	4010	4043	3990	4070	4080	4047	4230	4230	4240	4233	4050	4200	4020	4047				
					右30cm平行	4100	4100	4120	4107	3990	3970	3990	3983	4020	4130	4160	4103	3900	3870	3940	3903.3	4080	3980	3920	4000	3970	4010	3990	3997	3880	3900	3820	3867				
					右40cm平行	4110	4230	4090	4143	4070	4050	4080	4067	4240	4180	4170	4197	4040	4080	4020	4046.7	4180	4040	4170	4130	4090	4050	4070	4070	4030	3920	3870	3890				
					左1cm平行	4210	4160	4190	4187																												
					左2cm平行	4270	4260	4310	4280																												
					左10cm平行	4170	4170	4160	4167	4200	4200	4230	4210	4340	4360	4320	4340	4200	4240	4210	4216.7	4040	4040	4080	4053	4170	4170	4190	4177	4350	4340	4310	4333				
					左20cm平行	4070	4140	4160	4123	4020	4100	4030	4050	4290	4250	4270	4270	4180	4190	4040	4136.7	4170	4350	4130	4217	4090	4040	4170	4100	4180	4140	4160	4153				
					左30cm平行	4190	4160	4230	4200	3960	3950	3980	3963	4230	4260	4230	4240	4120	4130	4270	4173.3	4240	4160	4230	4210	4120	4210	4190	4173	4170	4190	4100	4153				
					左40cm平行	3800	3900	3860	3853	3950	3850	3840	3880	4070	4090	4160	4107	3830	3980	4010	3940	4020	4020	4030	4023	3940	3930	3980	3950	4000	3990	4050	4013				
					0cm垂直	0	0	0	0																												
					右10cm垂直	4300	4270	4280	4287	4270	4320	4310	4300	4400	4350	4320	4357	4250	4350	4310	4303.3	4270	4310	4270	4283	4340	4320	4370	4343	4190	4210	4210	4203				
					右20cm垂直	4030	4020	3990	4013	4010	3960	3990	3987	4240	4260	4190	4230	4090	3900	4020	4003.3	4120	4100	4110	4110	4040	3970	4070	4027	4100	4140	4130	4123				
					右30cm垂直	3860	3870	3850	3860	4000	3840	3790	3810	4100	4160	4140	4140	4020	4410	3960	4130	3820	3950	3950	3983	3910	3870	3820	3867	4210	4230	4180	4207				
					右40cm垂直	4110	3990	4050	4050	4040	4080	4090	4070	4180	4230	4210	4207	4050	4070	4070	4063.3	3980	4080	4090	3970	4010	4140	4010	4100	4100	4120	4160	4130				
					左10cm垂直	4410	4420	4370	4400	4400	4400	4370	4390	4340	4370	4400	4370	4390	4450	4410	4416.7	4270	4440	4300	4323	4420	4410	4390	4407	4310	4410	4420	4380				
					左20cm垂直	4190	4140	4210	4180	4190	4160	4210	4187	4260	4290	4290	4280	4180	4230	4230	4213.3	4170	4240	4210	4207	4110	4230	4130	4157	4210	4200	4260	4223				
					左30cm垂直	4020	4000	4040	4020	3940	4000	4030	3990	4110	4140	4120	4123	4070	4050	4010	4043.3	4100	4100	4070	4090	3980	3930	3970	3960	4130	4200	4120	4150				
左40cm垂直	4050	4070	4040	4053	4070	4120	4190	4127	4270	4260	4260	4263	4110	4110	4130	4116.7	4070	4070	4120	4087	4110	4070	4030	4070	4140	4110	4090	4113									
右10cm 0度					4080	4100	4200	4127	4340	4390	4360	4363	4350	4210	4280	4283.3	4200	4270	4260	4243	4250	4310	4300	4287	4290	4200	4120	4203									
45度					4160	4190	4130	4160	4210	4240	4210	4210	4160	4170	4140	4156.7	4230	4190	4170	4197	4100	4120	4140	4120	4290	4270	4320	4293									
90度					4300	4270	4290	4287	4340	4350	4360	4350	4200	4240	4160	4200	4270	4290	4200	4253	4260	4300	4290	4283	4240	4190	4180	4200									
135度					3970	3740	3830	3847	4240	4230	4210	4227	4180	4170	4160	4170	4120	4040	4080	4080	4200	4080	4180	4153	4300	4250	4170	4240									
180度					4080	4100	4200	4127	4340	4370	4320	4343	4270	4270	4300	4320	4210	4290	4320	4273	4300	4310	4300	4303	4120	4210	4230	4187									
左10cm 0度					4170	4170	4160	4167	4450	4420	4440	4437	4450	4450	4450	4450	4340	4450	4370	4387	4410	4350	4360	4373	4370	4360	4410	4380									
45度					4140	4140	4180	4153	4240	4200	4260	4233	4050	4100	4100	4083.3	4000	4030	4000	4010	3960	4100	4020	4027	4140	4100	4050	4087									
90度					4410	4420	4370	4400	4340	4320	4310	4323	4230	4200	4230	4220	4090	4100	4130	4107	4170	4170	4130	4157	4310	4360	4350	4340									
135度					4340	4340	4450	4377	4400	4410	4460	4423	4540	4380	4380	4353.3	4320	4350	4320	4330	4340	4350	4410	4367	4450	4410	4390	4417									
180度					4170	4170	4160	4167	4350	4350	4350	4350	4440	4410	4410	4420	4340	4310	4390	4347	4370	4380	4360	4363	4320	4310	4340	4323									



(a) ひび割れに平行方向の伝播速度

(b) ひび割れに垂直方向の伝播速度

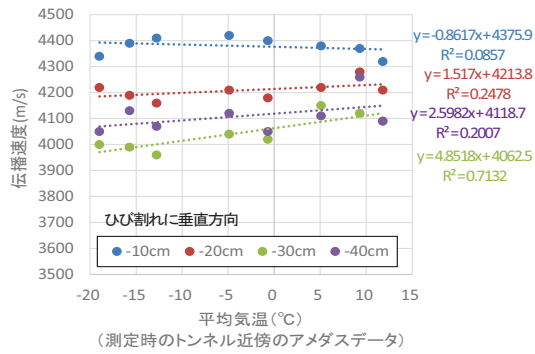
図-4.1.11 ひび割れ部における伝播速度の変化



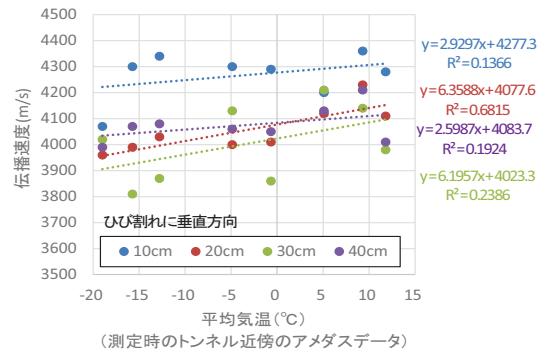
(a) ひび割れに平行方向の伝播速度

(b) ひび割れに垂直方向の伝播速度

図-4.1.12 ひび割れ部における伝播速度の分布図の変化

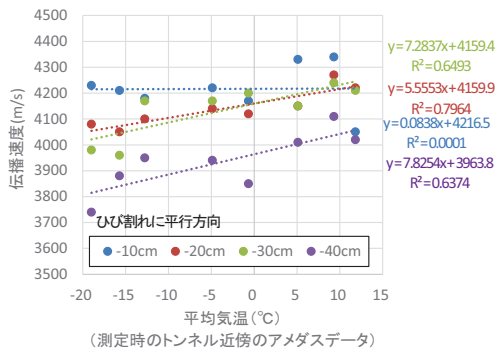


(a) ひび割れの左側 (-)

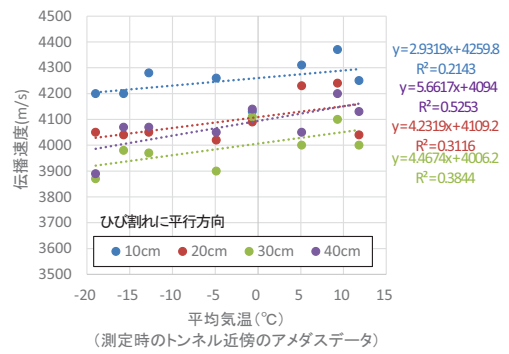


(b) ひび割れの右側 (+)

図-4.1.13 ひび割れ部における伝播速度と測定時の平均気温の関係 (ひび割れに垂直方向)

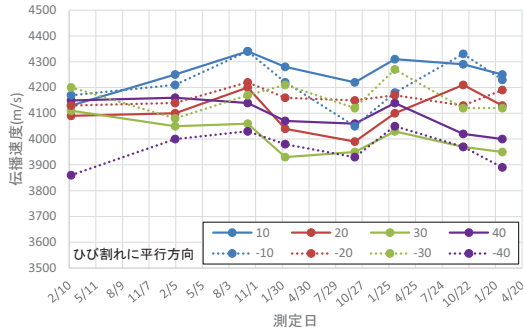


(a) ひび割れの左側 (-)

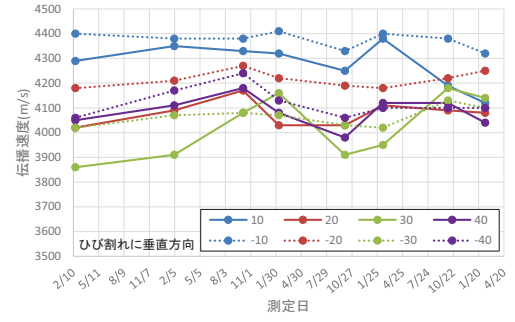


(b) ひび割れの右側 (+)

図-4.1.14 ひび割れ部における伝播速度と測定時の平均気温の関係 (ひび割れに水平方向)

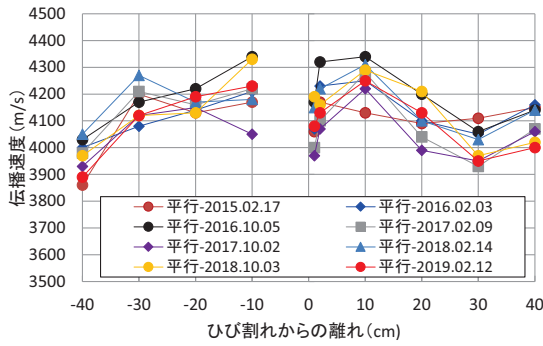


(a) ひび割れに平行方向の伝播速度

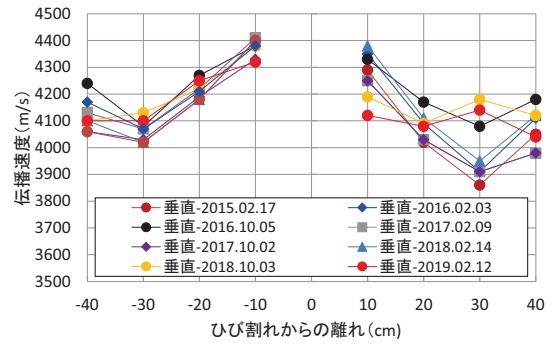


(b) ひび割れに垂直方向の伝播速度

図-4.1.15 ひび割れ部における温度補正後の伝播速度の経時変化



(a) ひび割れに平行方向の伝播速度



(b) ひび割れに垂直方向の伝播速度

図-4.1.16 ひび割れ部における温度補正後の伝播速度の分布図の変化



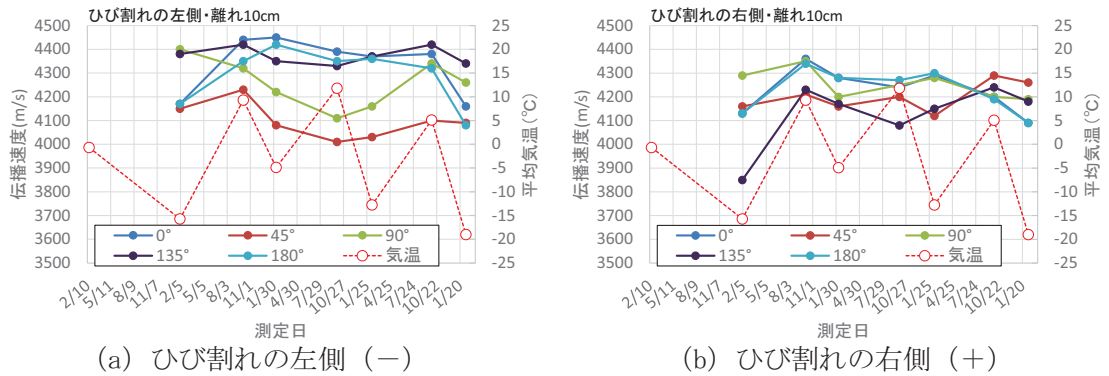


図-4.1.17 ひび割れ部における伝播速度の経時変化 (ひび割れからの離れ: 10cm)

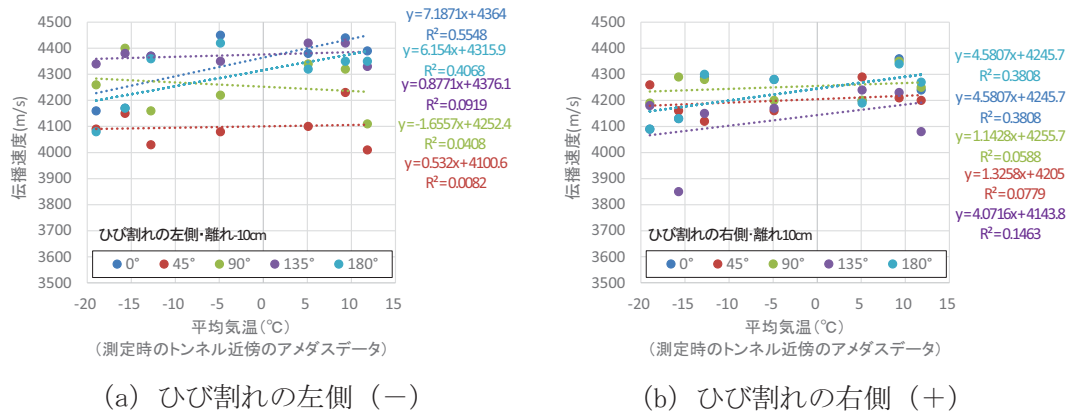


図-4.1.18 ひび割れ部における伝播速度と測定時の平均気温の関係 (ひび割れからの離れ: 10cm)

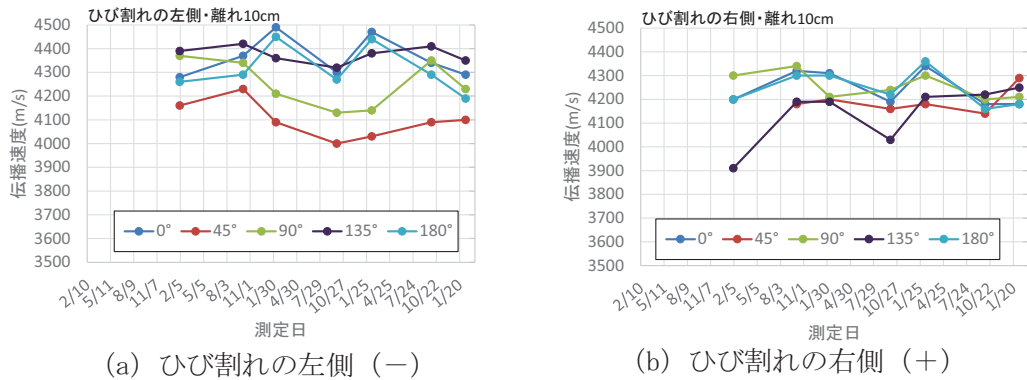


図-4.1.19 温度補正後のひび割れ部における伝播速度の経時変化 (平均気温0°Cを基準) (ひび割れからの離れ: 10cm)

#### 4. 1. 3 KUトンネルにおける伝播速度

##### (1) トンネルの概要

KUトンネルは、寒冷地に位置する延長が915m、トンネル幅約7m、幅員6.0mの道路トンネルである。1967年（昭和42年）に竣工し、50年以上が経過している。トンネルは矢板工法で施工され、底設導坑先進の新オーストリア式で掘削された逆巻覆工による設計巻厚60cmのトンネルである。最大土被りが約120m、地質は主として第三紀層の凝灰質砂岩・泥岩である。

トンネルは下記に示す外力作用による変状が発生・進行したため、本トンネルと併設して新しいトンネルが建設され、1994年から使用されていない。

##### ①変状の状況

- ・中央より起点側（泥岩分布域）では、塑性圧の作用による盤ぶくれ、覆工の変形・せん断ひび割れ・圧ぎ等が各所で確認される。
- ・漏水箇所では、補修材も含め凍害に伴う材質劣化が進行している。
- ・一部では、巻厚不足により覆工の一部が欠損して地山が確認される。

##### ②変状の発生原因（推定）

- ・外力作用：泥岩分布区間（中央より起点側）での塑性圧作用、インバート無
- ・材質劣化：施工時の不具合（巻厚不足、豆板等）と、漏水箇所の冬季の凍結融解

図-4.1.20 にトンネルの標準断面図を、図-4.1.21 にトンネルの平面・縦断面図を、図-4.1.22 にトンネルの縦断面図と各盤ぶくれ区間の路面状況の概要図を示す。写真-4.1.5 にトンネル内の状況を示す。

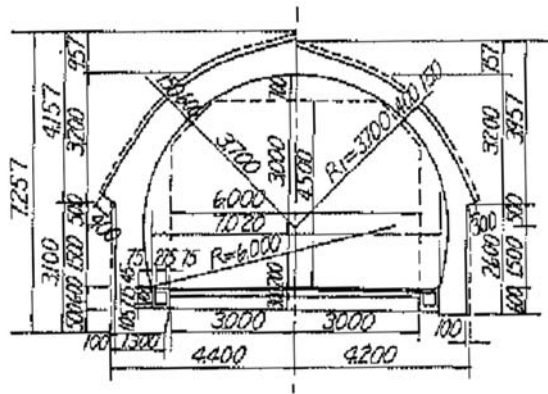
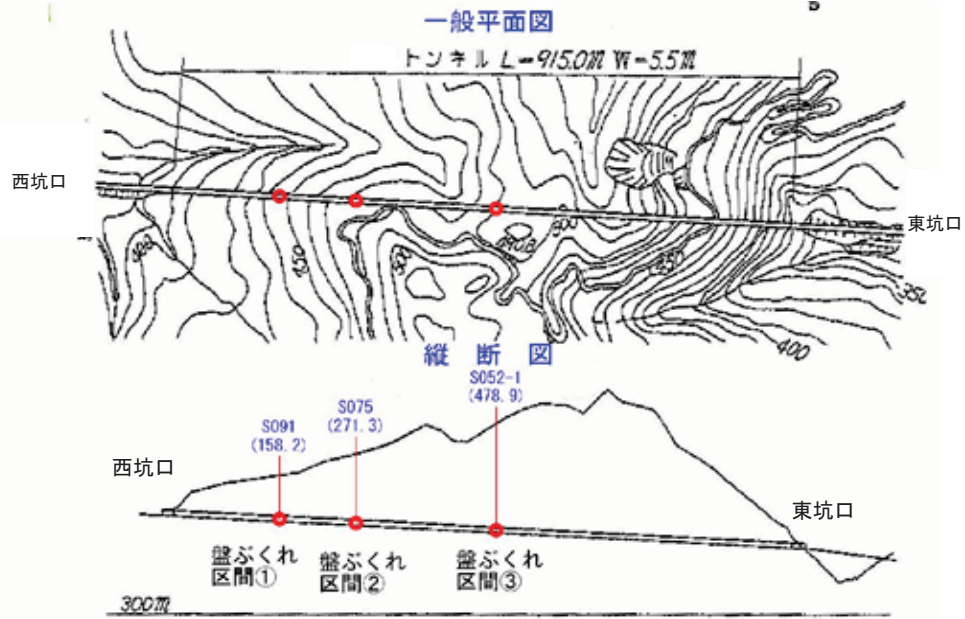


図-4.1.20 トンネルの標準断面<sup>4)</sup>



測 定	25	28	30	35	40	45	50	55	60	65	70
切 削 高	388.567	386.647	385.367	382.167	378.967	375.767	372.567	369.367	366.167	362.967	359.767
法 定 高	363.335										
地 加 差 離	500.00	540.00	600.00	760.00	880.00	900.00	1000.00	1100.00	1200.00	1300.00	1400.00
準 正 差	20.0	40.0	40.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
測 定 差	25	28	30	35	40	45	50	55	60	65	70

$L=3.225$   
 $\sqrt{L}=1000m$

支保工	導坑	915.0m	
	切 掘	C.C. 1.2m	
覆 工	アーチ側壁	465.0m	380.0m
	インバート	60cm	40cm
地質湧水	地質	351.0m	504.0m
	湧水	泥 岩	凝 灰 質 砂 岩

湧水少々あり

図-4.1.21 トンネルの平面・縦断図<sup>4)</sup>





(a) 健全部 (東坑口付近)



(b) 盤ぶくれ部 (区間③ : S52-1) (東坑口側から撮影)



(c) 盤ぶくれ部 (区間③ : S52-1) (西坑口側から撮影)



(d) 鋼アーチ補強工 (S096)



(e) 覆工表面のはく離 (S107)



(f) 漏水 (西坑口付近)

写真-4.1.5 トンネル内の状況

## (2) 測定方法および測定箇所

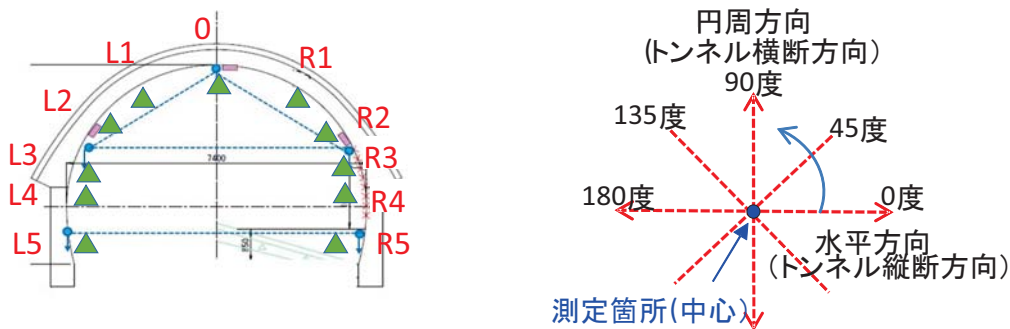
伝播速度は、送信・受信センサー間の距離 150mm が固定された簡易型の超音波伝播速度計 (ACS (Acoustic Control Systems) 社製 : UK-1401) を用いて、覆工コンクリート表面にセンサーを押し当てて測定した。

測定箇所は、本トンネルの盤ぶくれ区間③付近においてインバートの試験施工を実施した区間の覆工コンクリートの応力測定をしている箇所を含めた複数のスパン、断面において、**図-4.1.23** に示すように複数箇所の各方向(0度(水平(トンネル縦断方向))・45度・90度(円周方向))・135度・180度)の伝播速度を測定した。

伝播速度の測定箇所は、本トンネルにおいて平成30年6月にインバートの試験施工を実施した区間の覆工ひずみを測定しているスパン NO.39～スパン NO.42 の6断面 (A4～A9) (**図-4.1.24**) のほか、目視等により変状等が生じておらず、なおかつ外力等も作用していないと考えられる2断面 (スパン NO.28・33)、合計8断面において実施した。各断面において円周方向の11箇所の伝播速度を測定した (**図-4.1.25**)。伝播速度を測定した付近のトンネル状況および測定状況を**写真-4.1.6** に示す。

なお、伝播速度の測定を行った各スパンについて、遠望目視により確認できた主なひび割れ・漏水等の変状展開図 (概略図) を**図-4.1.26** に示す。これより、インバートの試験施工を実施したスパンについては、縦断方向あるいは斜めの方向のひび割れが複数発生している状況であった。

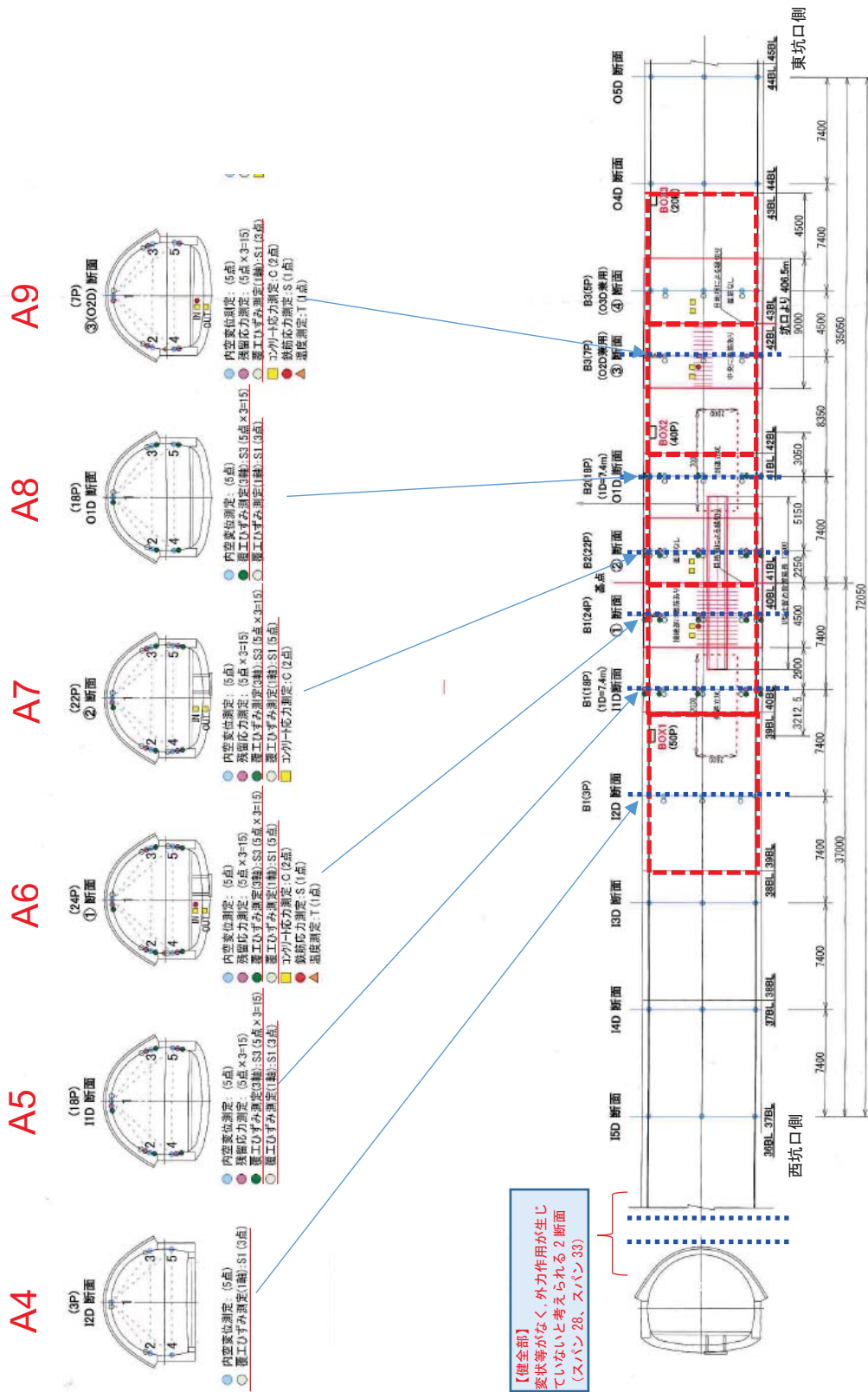
さらに、伝播速度を測定した同時刻において覆工のひずみを計測している箇所のひずみの値と温度の値もあわせて取得し、オーバーコアリングによる既設覆工の応力測定断面の (A5～A7、A9) の4断面については、伝播速度の値とひずみとの関連について整理した。



(a) 各断面における伝播速度測定箇所 (b) 測定箇所における伝播速度の測定方向  
**図-4.1.23** 各断面における伝播速度測定箇所と測定箇所における伝播速度の測定方向



写真-4.1.6 伝播速度を測定した付近のトンネル状況および測定時の状況





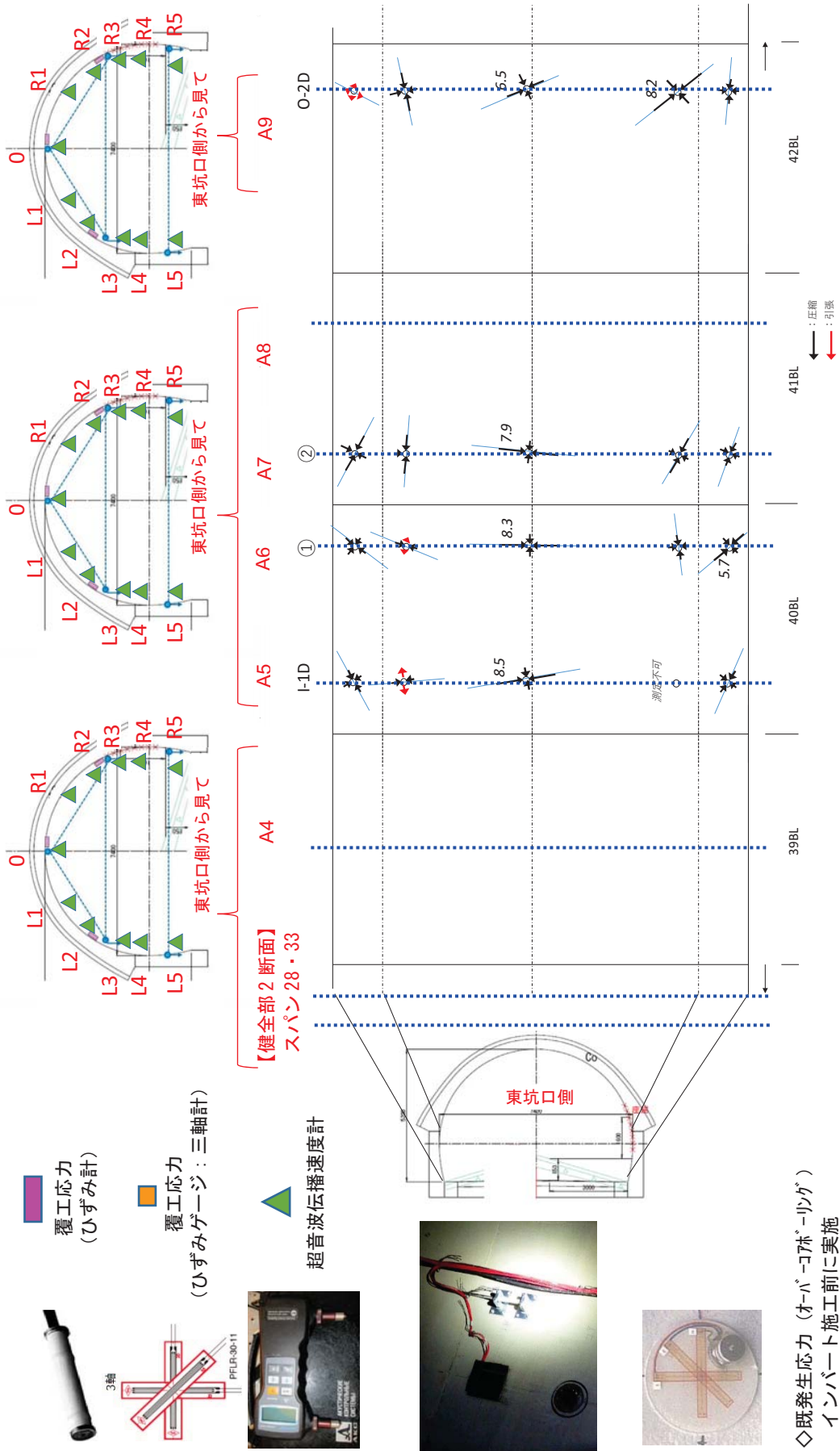
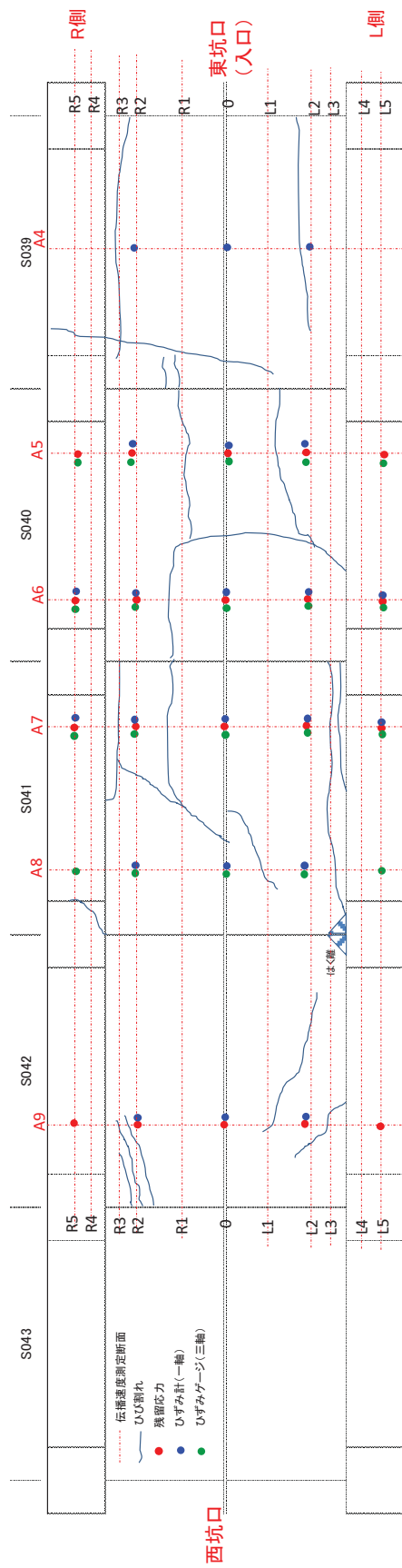
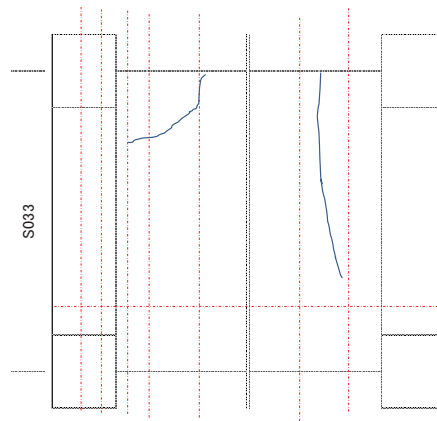


図-4.1.25 オーバーコアリングによる既設覆工の応力測定結果と伝播速度測定箇所との関係



(a) インバート試験施工区間



(b) 健全部

図-4.1.26 遠望目視による主なひび割れ・漏水等の変状展開図(概略図)

### (3) 測定結果

インバート試験施工区間における各測定箇所における伝播速度結果を図-4.1.27～図-4.1.32に示す。図より、伝播速度は各断面および測定箇所によって大きくばらついている。伝播速度は、どちらかと言えばアーチ部よりも側壁部のほうが高い値を示している。

本トンネルは図-4.1.26の変状展開図に示したように外力等によって盤ぶくれや覆工コンクリートに多数のひび割れが発生しており、これらのひび割れの存在によって断面内の覆工コンクリート応力状態は複雑になっており、伝播速度の値も大きくばらついているものと考えられる。また、図中には図-4.1.26をもとに伝播速度を測定した各断面内のひび割れの位置を矢印 ↓ で示した。これより、測定断面や測定箇所によって異なるが、ひび割れの存在が伝播速度へ何らかの影響を与えているものと考えられる。

健全部における各測定箇所における伝播速度結果を図-4.1.33～図-4.1.34に示す。健全部においては遠望目視からは覆工コンクリートのひび割れ等は確認できなかったものの、健全部においてもインバート試験施工区間と同様にばらつきが大きい結果となった。また、インバート試験施工区間と健全部の伝播速度を比較すると傾向としては、健全部のほうが高い結果となった。

また、伝播速度は概ね 4000m/s～4800m/s 程度と若干高い値を示した。これは、伝播速度測定時においてトンネル内の状態が写真-4.1.7に示すように覆工コンクリート表面に結露が発生していたため、水の影響を受けたものと考えられる。文献<sup>5)</sup><sup>6)</sup>等によれば、コンクリートの伝播速度は含水率含水率が高いほど伝播速度が高くなる結果が示されている。

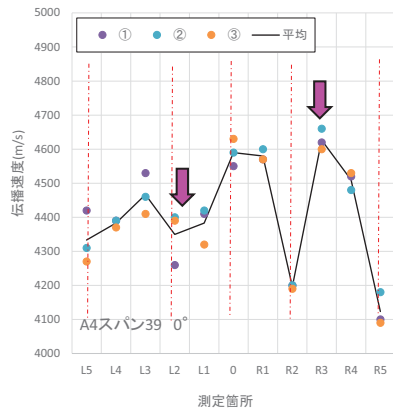


(a) 天端部の状況

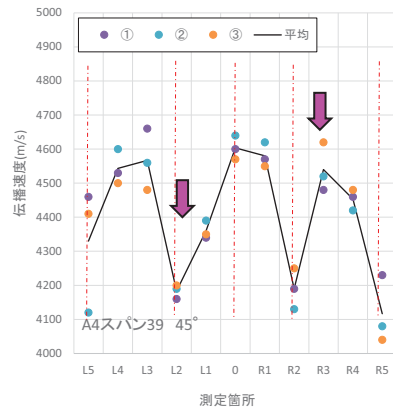


(b) 側壁部の状況

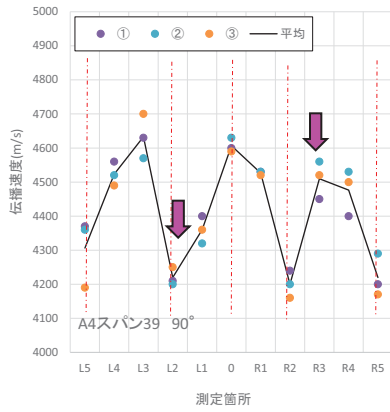
写真-4.1.7 伝播速度測定時のトンネル覆工の結露の状況



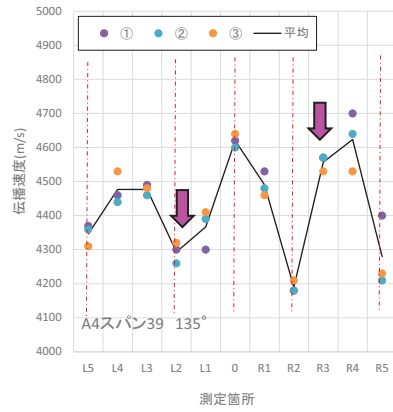
(a) A4 スパン 39 0 度



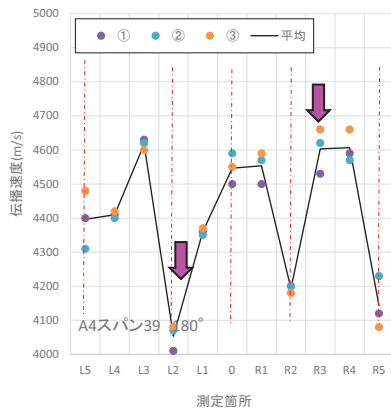
(b) A4 スパン 39 45 度



(c) A4 スパン 39 90 度

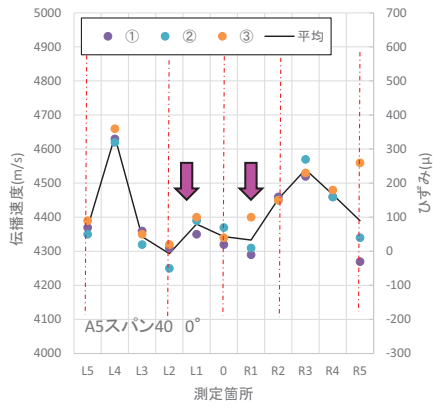


(d) A4 スパン 39 135 度

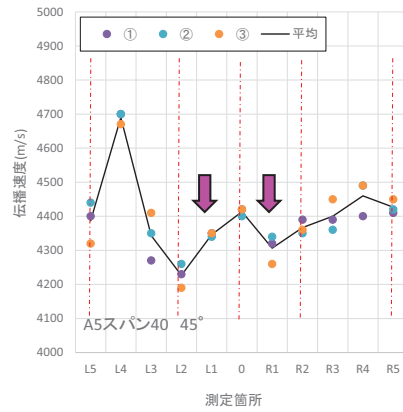


(e) A4 スパン 39 180 度

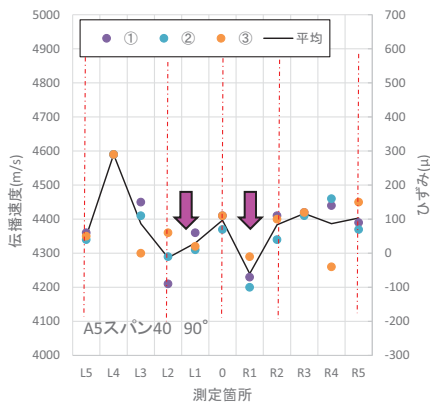
図-4.1.27 各断面の伝播速度結果一覧（インバート試験施工区間）（A4 スパン 39）



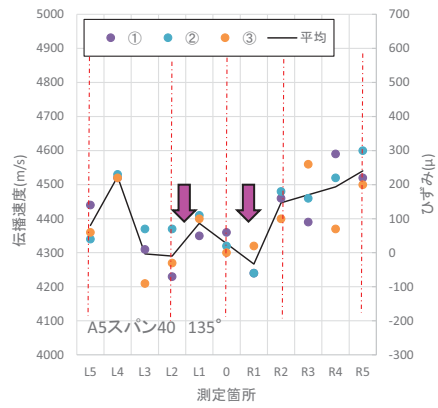
(a) A5 スパン 40 0 度



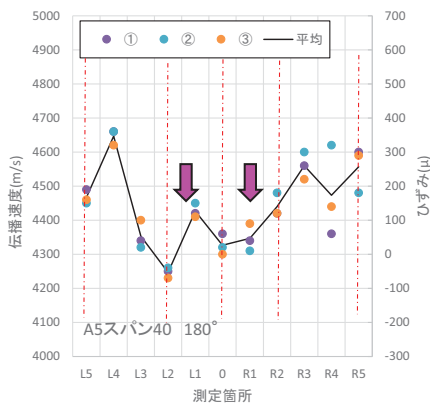
(b) A5 スパン 40 45 度



(c) A5 スパン 40 90 度

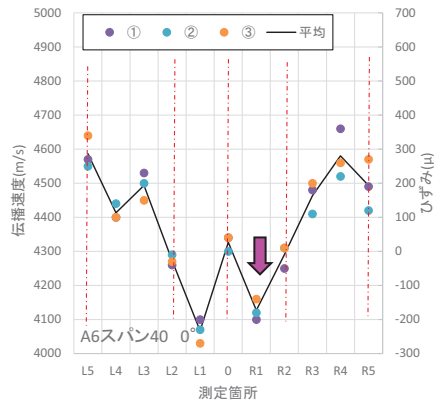


(d) A5 スパン 40 135 度

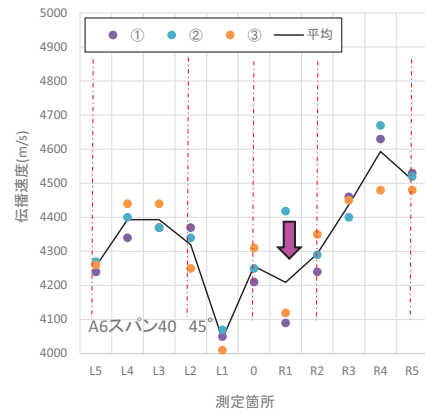


(e) A5 スパン 40 180 度

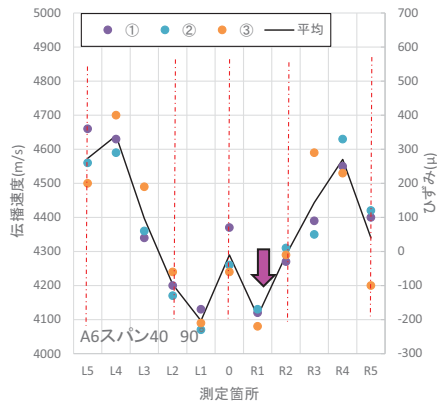
図-4.1.28 各断面の伝播速度結果一覧（インバート試験施工区間）（A5 スパン 40）



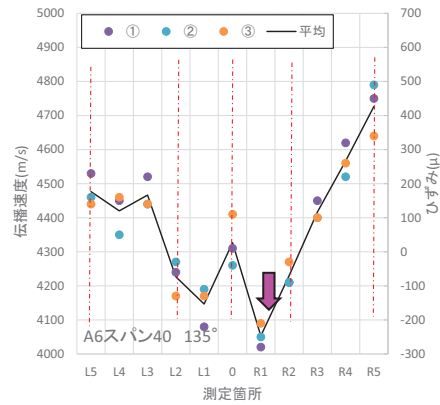
(a) A6 スパン 40 0 度



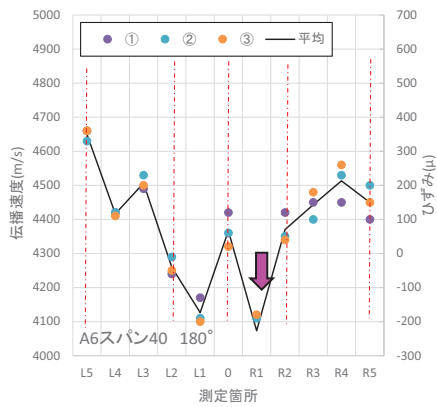
(b) A6 スパン 40 45 度



(c) A6 スパン 40 90 度

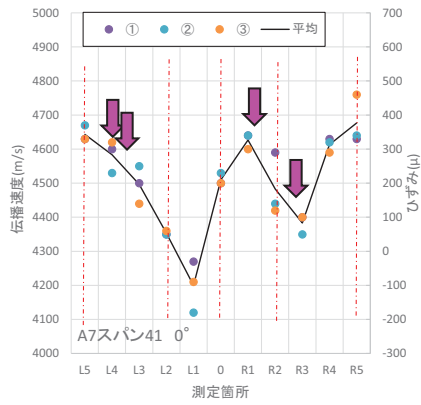


(d) A6 スパン 40 135 度

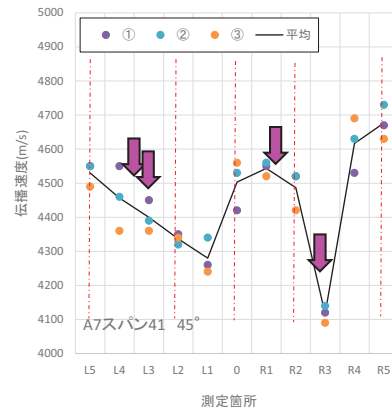


(e) A6 スパン 40 180 度

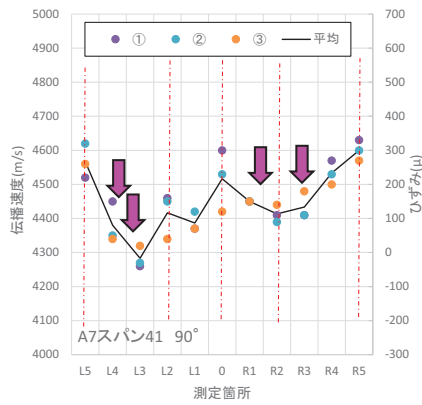
図-4.1.29 各断面の伝播速度結果一覧（インバート試験施工区間）（A6 スパン 40）



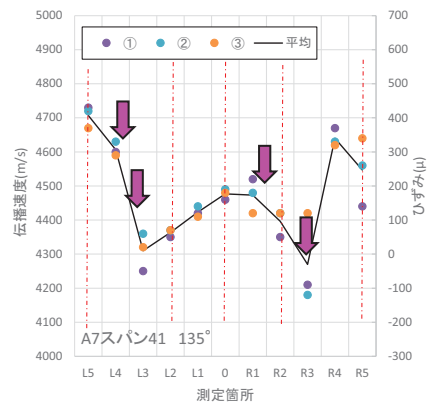
(a) A7 スパン 41 0 度



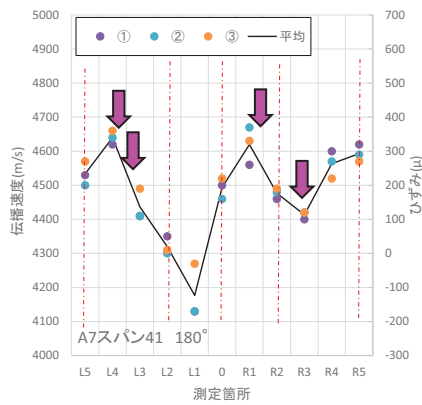
(b) A7 スパン 41 45 度



(c) A7 スパン 41 90 度

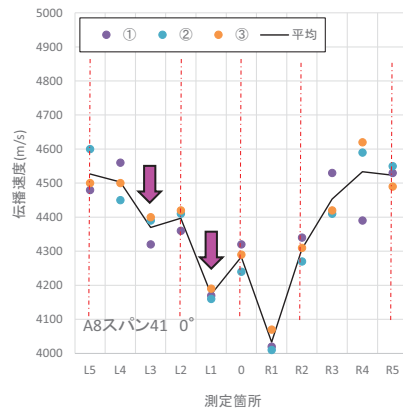


(d) A7 スパン 41 135 度

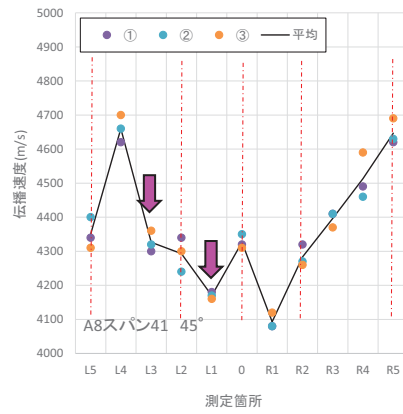


(e) A7 スパン 41 180 度

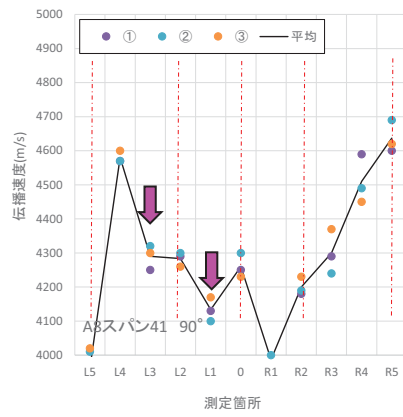
図-4.1.30 各断面の伝播速度結果一覧（インバート試験施工区間）（A7 スパン 41）



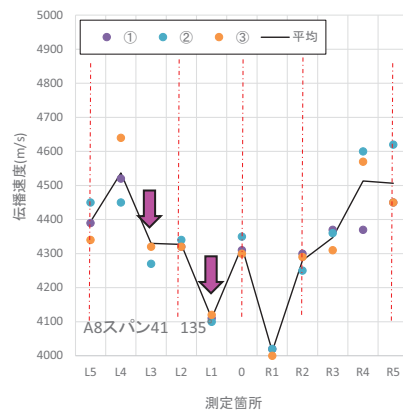
(a) A8 スパン 41 0 度



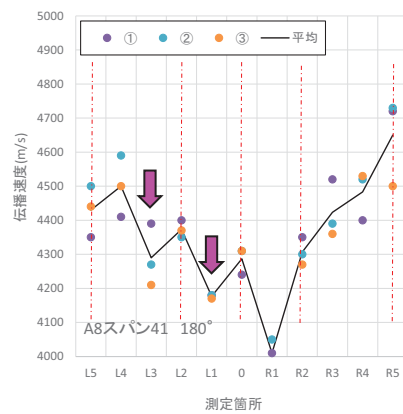
(b) A8 スパン 41 45 度



(c) A8 スパン 41 90 度



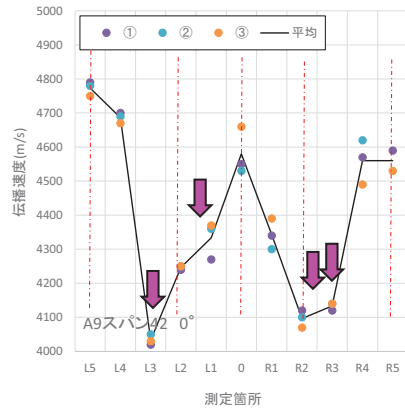
(d) A8 スパン 41 135 度



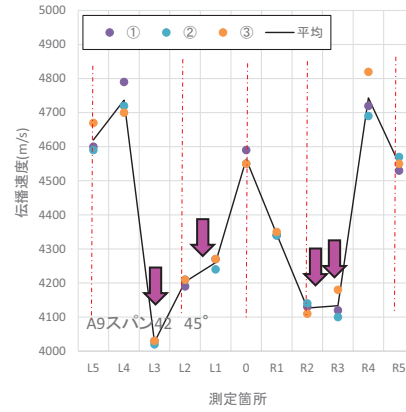
(e) A8 スパン 41 180 度

図-4.1.31 各断面の伝播速度結果一覧（インバート試験施工区間）（A8 スパン 41）

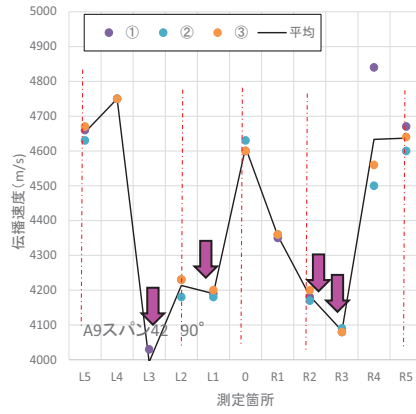




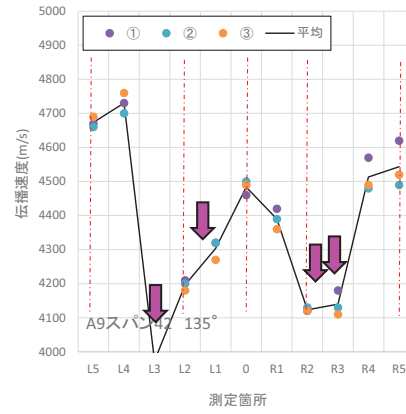
(a) A9 スパン 42 0 度



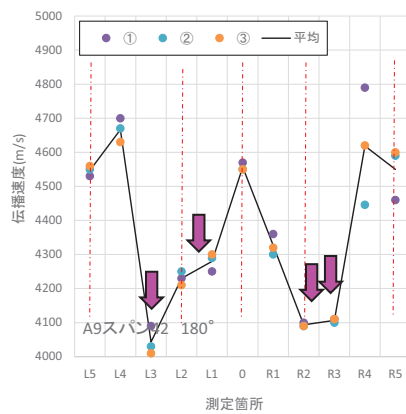
(b) A9 スパン 42 45 度



(c) A9 スパン 42 90 度

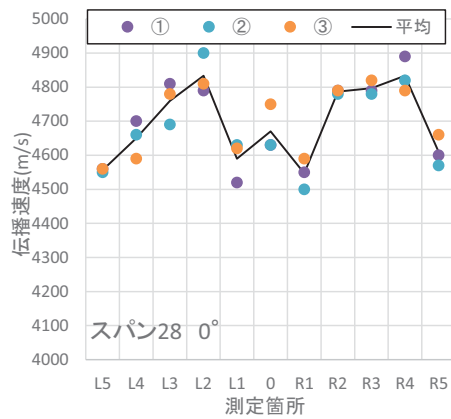


(d) A9 スパン 42 135 度

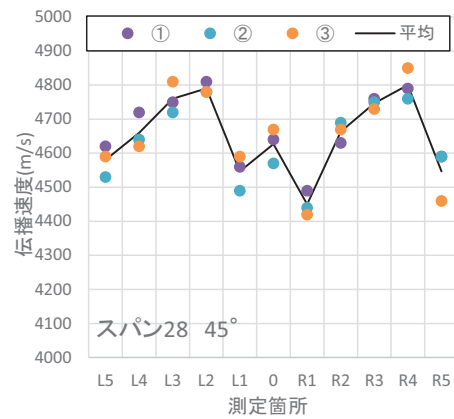


(e) A9 スパン 42 180 度

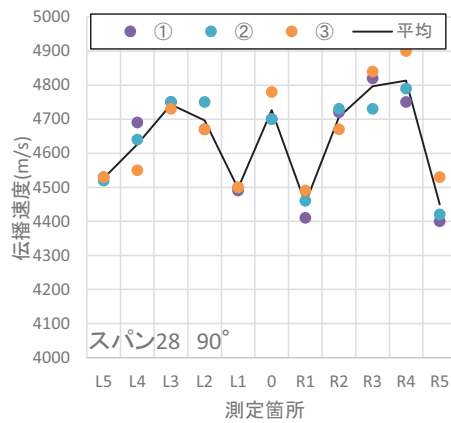
図-4.1.32 各断面の伝播速度結果一覧（インバート試験施工区間）（A9 スパン 42）



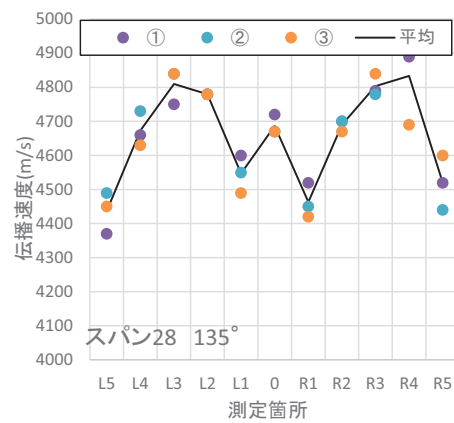
(a) スパン 28 0度



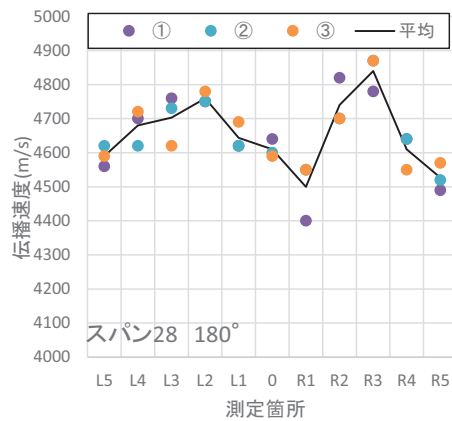
(b) スパン 28 45度



(c) スパン 28 90度

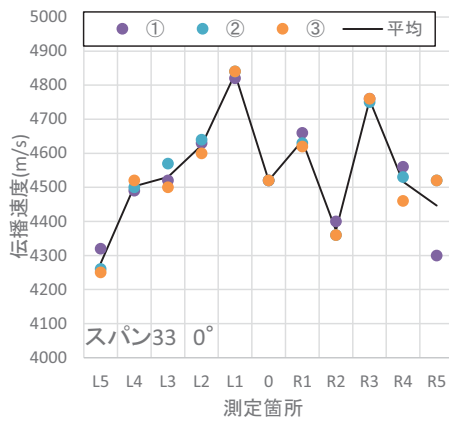


(d) スパン 28 135度

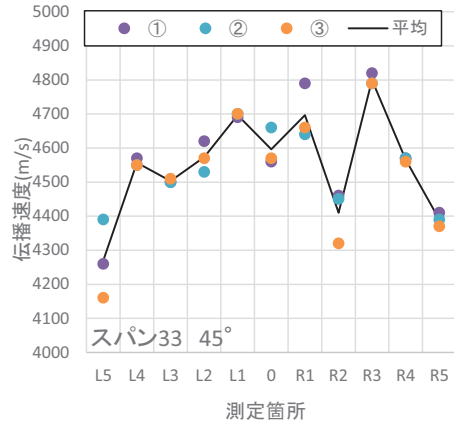


(e) スパン 28 180度

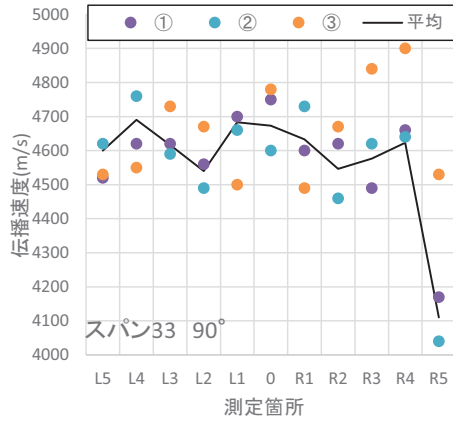
図-4.1.33 各断面の伝播速度結果一覧 (健全部) (スパン 28)



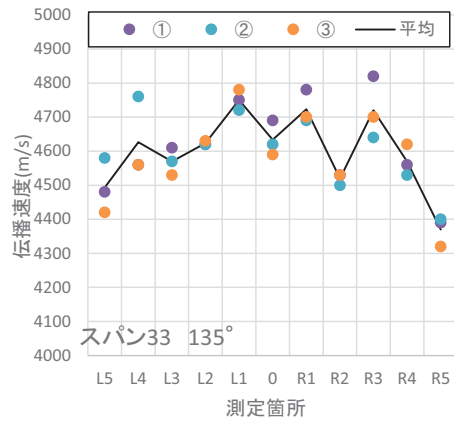
(a) スパン 33 0 度



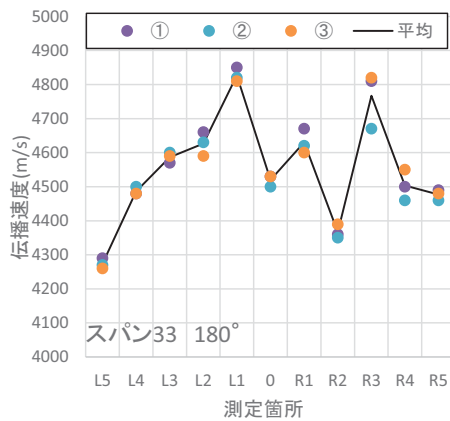
(b) スパン 33 45 度



(c) スパン 33 90 度



(d) スパン 33 135 度



(e) スパン 33 180 度

図-4.1.34 各断面の伝播速度結果一覧 (健全部) (スパン 33)

次に、**図-4.1.25** に示したオーバーコアリングを実施した4断面（A5～A7、A9）について、伝播速度を測定した時間帯に測定した覆工表面の各ひずみ値と、既設覆工の応力測定時に得られた各方向のひずみを加算して、伝播速度測定を行った時間帯における覆工コンクリートに発生しているひずみを求めた。各断面の各測定箇所における伝播速度とひずみの関係を**図-4.1.35(1)～図-4.1.35(3)**に示す。これらの図からは、伝播速度とひずみの顕著な関係は確認できない。

**図-4.1.36** に各測定箇所における伝播速度と覆工のひずみの相関を示す。図より、90度（円周）は相関が見られないが、0度（水平）、135度、180度（水平）は、ばらつきはあるものの全体の傾向は右肩上がりになっていることが分かる。したがって、伝播速度のばらつきが大きかったため、顕著なひずみとの顕著な関係は認められなかったが、測定箇所等によっては関連性が見られることが分かった。

今回の伝播速度の測定が夏季であり、測定時においてトンネル内と坑外との温度差によってトンネル覆工表面に結露が生じていたため、水による影響を受けている条件での伝播速度の結果であったので、今後は結露が発生していない時期における伝播速度とひずみの関係の把握を行うとともに、トンネル覆工背面からの浸水等によるコンクリート含水率等の違いによる伝播速度への影響等を把握していく必要がある。

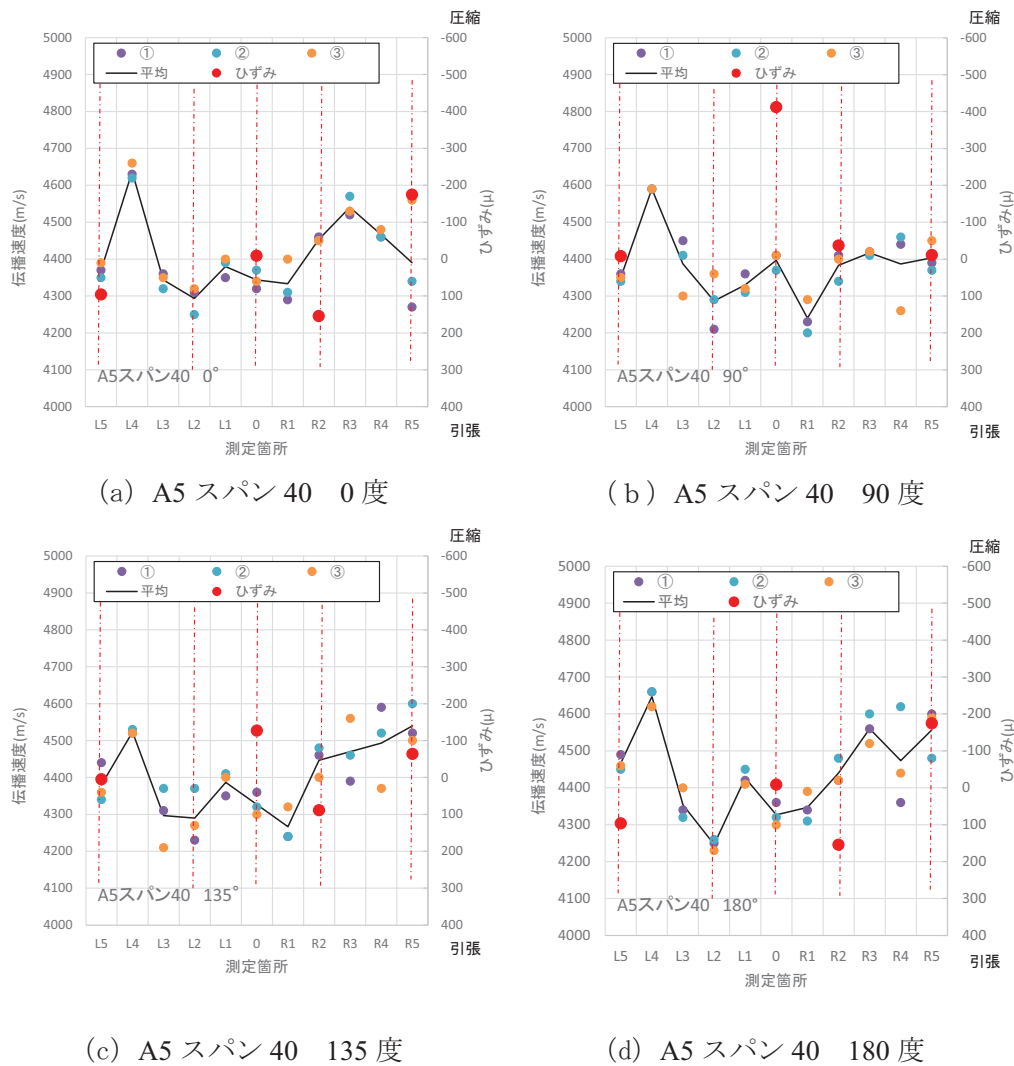
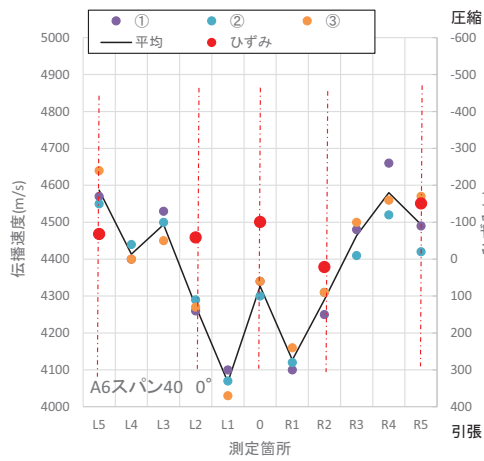
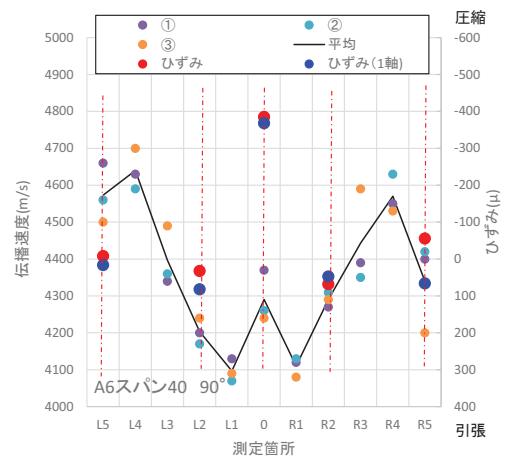


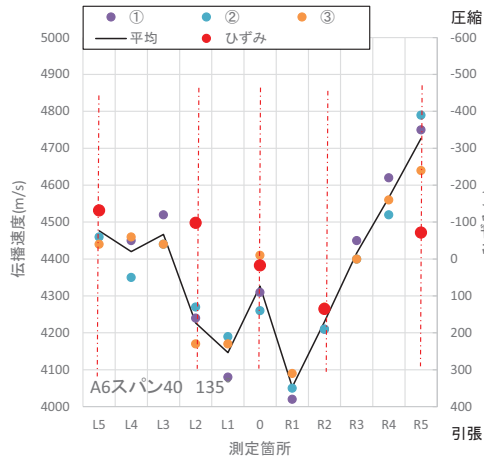
図-4. 1. 35(1) 各断面の各測定箇所における伝播速度とひずみの関係 (A5 スパン 40)



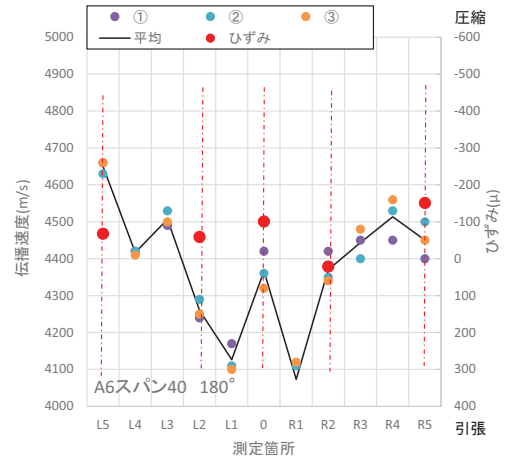
(a) A6 スパン 40 0 度



(b) A6 スパン 40 90 度

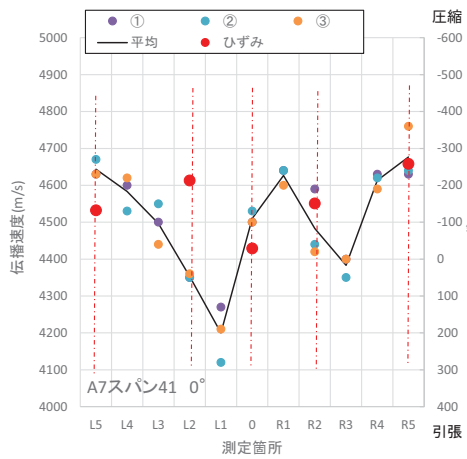


(c) A6 スパン 40 135 度

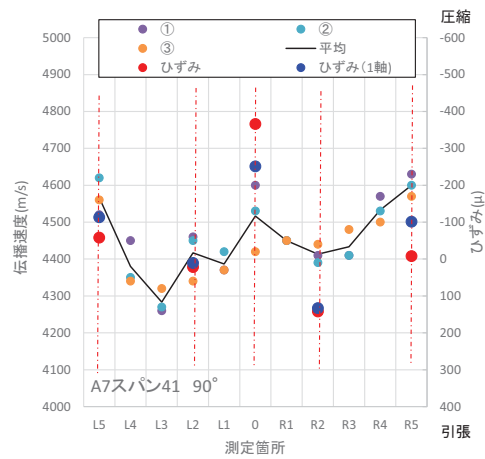


(d) A6 スパン 40 180 度

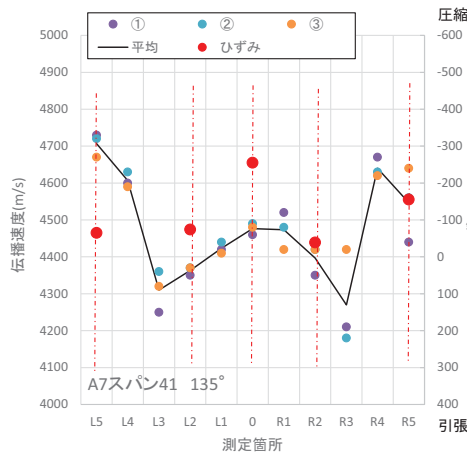
図-4. 1. 35(2) 各断面の各測定箇所における伝播速度とひずみの関係 (A6 スパン)



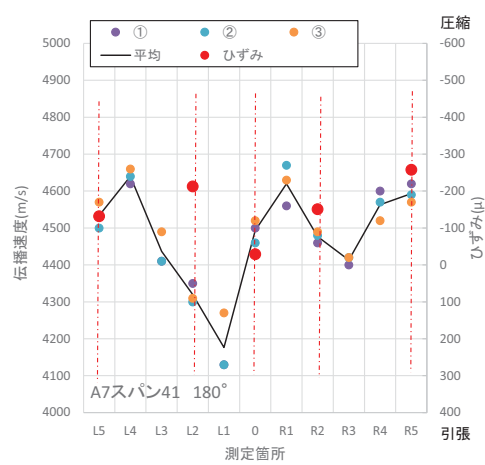
(a) A7 スパン 41 0度



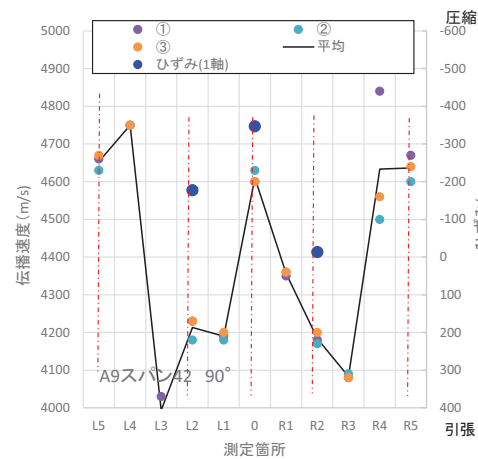
(b) A7 スパン 41 90度



(c) A7 スパン 41 135度

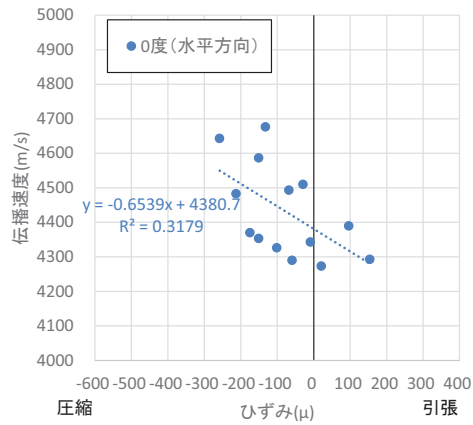


(d) A7 スパン 41 180度

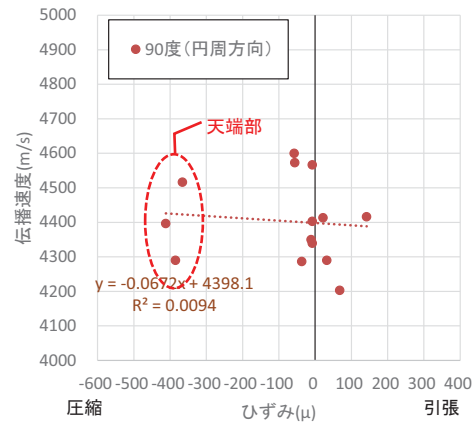


(e) A9 スパン 42 90度

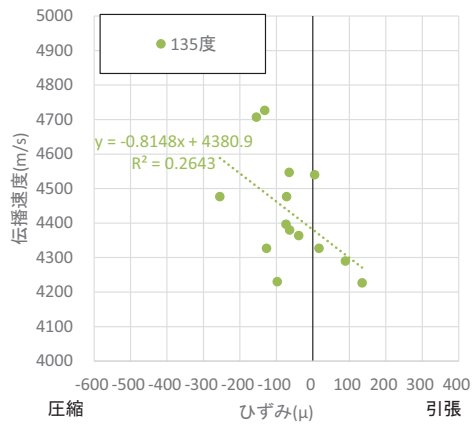
図-4. 1. 35(3) 各断面の各測定箇所における伝播速度とひずみの関係  
(A7 スパン 41・A9 スパン 42)



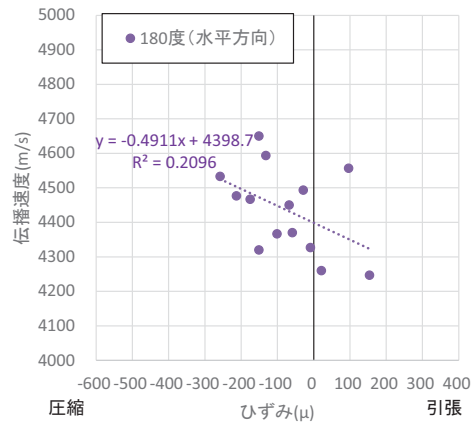
(a) 0度 (水平方向)



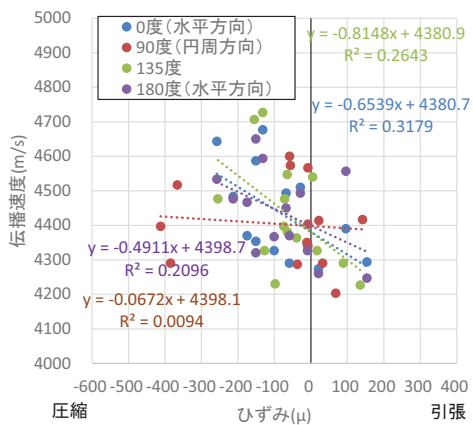
(b) 90度 (円周方向)



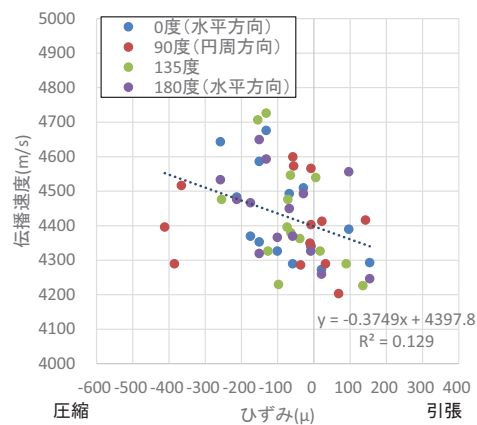
(c) 135度



(d) 180度 (水平方向)



(e) 全データ (各方向の直線回帰)



(f) 全データ (全データを用いた直線回帰)

図-4.1.36 各測定箇所における伝播速度とひずみの相関図



#### 4. 2 まとめ

現地トンネルにおいて簡易な超音波伝播速度計を用いて覆工コンクリート表面の伝播速度の測定を行った。その結果、以下のことが分かった。

AH トンネルでは、何らかの外力作用によって発生したと考えられるひび割れ周辺の伝播速度は、ひび割れに対して垂直・平行方向いずれの値もひび割れ周辺で高い結果が得られ、伝播速度の長期的な挙動から覆工表面の応力変化を把握できる可能性があることが分かった。また、覆工コンクリートの応力状態は温度環境により影響を受けるため、伝播速度の長期的な挙動を把握するためには、温度補正を行う必要があることが分かった。

ただし、覆工表面で計測する伝播速度は覆工の状態によっては微細なひび割れ等が測定結果のばらつきを生じさせることや、覆工コンクリート面の施されている塗装による影響も考えられることから、測定箇所を選定するうえで注意が必要と考えられる。なお、本項で示した健全部における測定箇所が外力等の作用が生じていないと仮定した場合、本トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度の初期値としては3800m/s～4000m/s程度であると考えられた。

KU トンネルでは、覆工コンクリート表面の伝播速度とひずみの関係について把握した結果、測定時期が夏季であったためトンネル内と坑外との温度差によって覆工表面の結露の影響等により伝播速度のばらつきが大きかったため、顕著なひずみとの顕著な関係は認められなかったが、測定箇所等によっては関連性が見られることが分かった。

今回の伝播速度の測定が夏季であり、トンネル覆工表面に結露が生じていたため、今後は結露が発生していない時期における伝播速度とひずみの関係の把握を行う必要がある。

## 5. まとめと今後の課題

変状したトンネルに対して、変状の発生メカニズムや要因を正しく判断するための指標の一つとして、トンネルの覆工コンクリートの応力状態を把握する方法について超音波伝播速度に着目した検討を行った。覆工コンクリートを模擬したコンクリート供試体による基礎的実験、実物規模のトンネル覆工供試体を用いた载荷実験、現地トンネルにおける超音波伝播速度測定を行った。その結果、以下のことが分かった。

### (1) 覆工コンクリートを模擬したコンクリート供試体による基礎的実験

トランスデューサを用いた実験により、コンクリート供試体に圧縮もしくは引張のひずみが発生した場合、ひずみと同方向の測線で測定した伝播速度はひずみの変化に応じて圧縮ひずみの場合は正側 (+) に、引張ひずみの場合は負側 (-) に変化することが確認できた。軸方向载荷時におけるコンクリート供試体の伝播速度変化率については、载荷重の増加に伴い概ね正の方向の伝播速度変化率を示すことが確認できた。一方、曲げ载荷時のコンクリート供試体の伝播速度変化率については、载荷重が増加するとコンクリート供試体内部の応力状態が圧縮側もしくは引張側のいずれの応力が支配的かによってそれぞれ若干の伝播速度変化率の変化を示すと考えられた。なお、本実験が比較的低い応力状態での実験であったこと等から、軸圧縮载荷および曲げ载荷時の最大の伝播速度変化率はそれぞれ+4%程度、±2%程度と非常に小さい結果であったことに注意を要する。

簡易型の超音波伝播速度計を用いた実験により、軸圧縮载荷時において伝播速度を測定する方向のひずみの増減に応じて覆工コンクリート内部および表面の伝播速度ともに変化することが分かった。供試体内部の伝播速度は引張側のひずみにより微細なひび割れ等が生じることにより減少の傾向を、供試体表面の伝播速度は载荷方向と同一方向の圧縮ひずみの増加に伴い増加することが分かった。また、供試体の強度によってその変化率が異なることが分かった。

実際に伝播速度を用いたトンネルの維持管理を行う場合、覆工内面のコンクリート表面で測定できるという面から伝播速度（表面）による方法を用いることが現実的であるが、この方法の場合は、比較的小さい伝播速度の変化量を的確に把握する必要がある。今後、覆工内部に発生する応力と伝播速度との関係の把握について実験や供用中のトンネル等での検証が必要と考えられる。

以上の結果より、覆工表面の伝播速度の変化を把握することで、トンネルの覆工の応力状態を推定できる可能性があることが分かった。

### (2) 実物規模による覆工载荷実験

実物規模による覆工载荷実験により、覆工表面の伝播速度は供試体表面に圧縮応力が生

じて圧縮ひずみが増加する場合、ある一定の関係で増加すること、伝播速度の変化率は圧縮の主ひずみが発生する方向で最も大きく、他の方向はひずみの増加に伴い途中から減少傾向を示すことが分かった。

以上より、同一箇所でも数方向の伝播速度を把握することで各方向の伝播速度の変化率の増減から覆工の応力状態を推定できる可能性があると考えられる。したがって、トンネル覆工に何らかの外力等が作用している場合、同一箇所でも数方向の伝播速度を把握することで各方向の伝播速度の変化率の増減・挙動から圧縮応力が生じている箇所の特定や、外力の作用方向等が推定できる可能性があることが分かった。ただし、伝播速度の変化を精度良く把握するためには、外力等が作用していない段階での伝播速度を的確に把握しておく必要がある。また、伝播速度は覆工コンクリートのひび割れ等の存在に大きく影響を受けることや、トンネルの年間を通した温度環境等の変化による覆工コンクリートへの影響も考えられることから、これらの適切な評価方法の検討が必要である。

### (3) 現地トンネルにおける超音波伝播速度測定

現地トンネルにおいて簡易な超音波伝播速度計を用いた覆工コンクリート表面の伝播速度の測定結果より、何らかの外力作用によって発生したと考えられるひび割れ周辺の伝播速度は、ひび割れに対して垂直・平行方向いずれの値もひび割れ周辺で高い結果が得られ、伝播速度の長期的な挙動から覆工表面の応力変化を把握できる可能性があることが分かった。また、覆工コンクリート表面の伝播速度とひずみの関係は、覆工表面の結露の影響等により伝播速度のばらつきが大きかったこと等により、顕著な関係は認められなかったが、測定箇所等によっては関連性が見られることが分かった。今回の伝播速度の測定が夏季であり、トンネル覆工表面に結露が生じていたため、今後は結露が発生していない時期における伝播速度とひずみの関係の把握を行う必要がある。なお、覆工コンクリートの応力状態は温度環境により影響を受けるため、伝播速度の長期的な挙動を把握するためには、温度補正を行う必要がある。

また、覆工表面で計測する伝播速度は覆工の状態によっては微細なひび割れ等が測定結果のばらつきを生じさせることや、覆工コンクリート面の施されている塗装による影響も考えられることから、測定箇所を選定するうえで注意が必要と考えられる。なお、本項で示した健全部における測定箇所が外力等の作用が生じていないと仮定した場合、本トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度の初期値としては3800m/s～4000m/s程度であると考えられた。

#### 【参考文献】

- 1)たとえば、阿部利彦・王上均・井川克也：鑄鉄の音速に及ぼす応力とひずみの影響、鑄物、第57巻第10号、pp.19-25、1985.10
- 2)石村利明、砂金伸治、日下敦、笹田俊之：変状トンネルにおける覆工状況の診断手法に関する実験的検討、土木学会トンネル工学報告集、第25巻、I-24、2015.11
- 3) 北海道土木技術会トンネル研究委員会：北海道の道路トンネル第3集（1993～2002年）、平成17年12月
- 4)建設省道路局、建設省土木研究所監修：道路トンネル大鑑：土木界通信社、昭和43年9月
- 5)山崎尚志・三田紀行：コンクリートの含水状態を考慮したパルス電磁力音響法によるコンクリートの圧縮強度推定、日本建築学会技術報告集第26巻第62号、pp.43-48、2020.2
- 6)林田宏・田口史雄・遠藤裕丈・草間祥吾：超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究、寒地土木研究所月報 No.656、pp.10-15、2008.1

## 謝辞

現地トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度測定にあたっては、北海道開発局およびその他道路管理者関係機関等の協力をいただいた。本調査に協力いただいた関係機関各位に深甚の謝意を表します。

## 【参考資料】

参考資料 1 トランスデューサを用いた模擬供試体の伝播速度

## 参考資料 1 トランスデューサを用いた模擬供試体の伝播速度

### 1. データ処理方法

計測した波形データから伝播速度を算出する処理手順を以下に示す。

#### (1) 相互相関法による伝播時間算出

- ①送信電圧波形の計測データを取り込み、0.01  $\mu$ s刻みでインターポレーション処理（スプライン補間）
- ②10 kHzのハイパスフィルタにより①のデータを処理し、最大値で正規化
- ③受信電圧波形の計測データを取り込み、0.01  $\mu$ s刻みでインターポレーション処理（スプライン補間）
- ④10 kHzのハイパスフィルタにより③データを処理し、最大値で正規化
- ⑤②の送信電圧波形の時間軸を反転
- ⑥④のデータと⑤のデータのコンボリューション\*演算を行う

$$* \text{関数 } f, g \text{ のコンボリューションの } (f * g)(m) = \sum_n f(n)g(m-n)$$

- ⑦⑥のデータにおいて、時間軸の半分から最後までデータを抽出
- ⑧⑦のデータにおいて所望の振幅ピーク値に対応する時間を求め、伝播時間を算出

#### (2) 伝播速度変化率の算出

(1)の方法により算出された伝播時間に対し、初期の載荷前の荷重が作用していない状態（除荷状態）における伝播時間および伝播速度を $t_1$ 、 $c_0$ 、載荷時の伝播時間を $t_2$ 、伝播速度の変化量を $\Delta c$ として、伝播速度変化率 $\Delta c/c_0$ を式(1.1)から計算する。

$$\frac{\Delta c}{c_0} = -\frac{\Delta t}{t_1} = -\frac{t_2 - t_1}{t_1} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

式(1.1)より、伝播距離を一定として、伝播距離＝伝播速度×伝播時間の関係から導くことができる。

## 2. 実験で使用した送信波形とその周波数帯域

本実験では、送信用および受信用トランスデューサをコンクリート供試体の表面に並べて設置し、トランスデューサを設置していない面からの反射波を受信することを試みた。このような測定系の場合、受信信号には表面波や多重反射、横波等の不要な重畳波が混在しているため、所望の縦波直達波の分離が難しい。また、受信用トランスデューサには縦波直達波ではなく表面波が最も早く到達すると考えられるため、ゼロクロス法では超音波伝播時間の算出が難しい。そこで送信信号を、時間とともに周波数が増加、もしくは時間とともに周波数が減少するチャープ波形を用いて、受信信号との相互相関処理によって高い精度で測定を行うこととした。

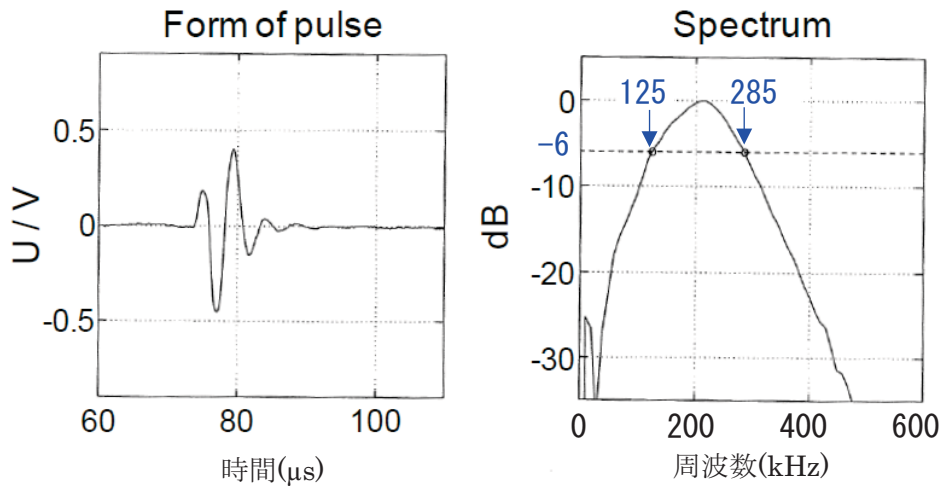
参考図-2.1 (a) にトランスデューサのパルス特性をそれぞれ示した。パルス特性は、購入時に添付されていた Probe inspection report より参照した。-6dB 領域の周波数帯域は 125 kHz~285 kHz であるので帯域幅は 160 kHz あり、この帯域幅すべてを使って送信用のチャープ波形を作れば本実験においては十分な高い精度で測定できると考えられる。

そこで、事前検討としてコンクリート供試体の周波数特性を把握した。送信用および受信用トランスデューサをコンクリート供試体の同一表面に隣接設置した後、周波数 200 kHz、波数 1 の sin 波を送信用トランスデューサで送信し、受信用トランスデューサで受信した結果を参考図-2.1

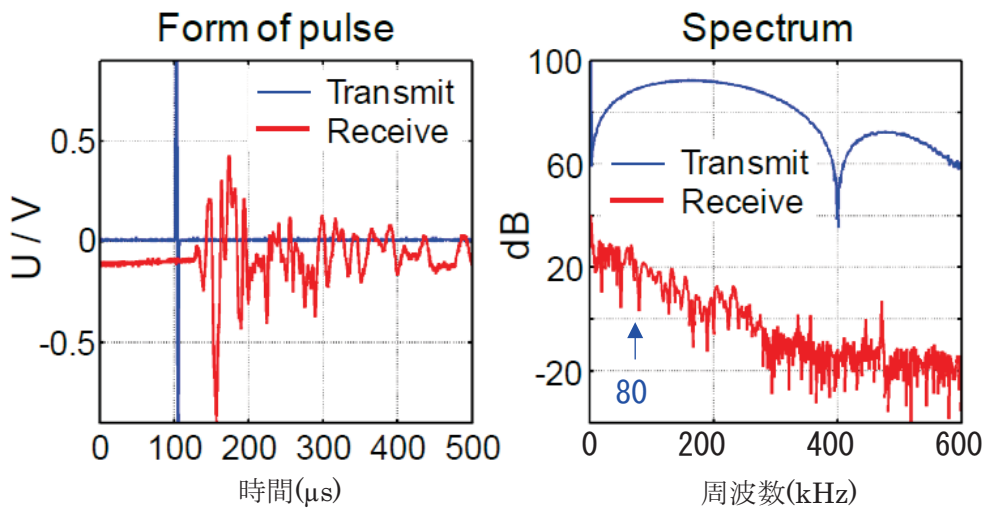
(b) に示した。図中の青色が送信信号波形、赤色が受信信号波形である。受信信号波形をフーリエ変換し、コンクリート供試体の周波数特性を調べたところ、80 kHz 以上の周波数成分が小さいことがわかった。本実験に用いたコンクリート供試体に対しては、実験時には最大出力で音波を送信していたが、最終的には高周波成分の音圧がトランスデューサの受信感度以下になっていた。このことから、本実験に用いたコンクリート供試体は高周波の音波減衰が大きく、トランスデューサの-6dB 領域の周波数帯の音波がほとんど通過できていないと考えられることから、今回使用したようなコンクリート供試体に対して-6dB 領域の周波数帯は使用できないと判断した。

上記の結果をもとに、送受信感度および計測精度は落ちるがコンクリート供試体の音波減衰が小さい 30 kHz~80 kHz の帯域によるチャープ波を用いることとした。





(a) トランスデューサのパルス特性と周波数特性



(b) コンクリート供試体のパルス特性と周波数特性

参考図-2.1 トランスデューサのパルス特性とコンクリート供試体の周波数特性

### 3. コンクリート供試体の伝播速度

前節 2. で記載したとおり、本実験での送信帯域幅は 50 kHz しかなく、トランスデューサの送受信感度も小さいため、受信したい所望の反射波が表面波や横波等の成分に埋もれてしまう可能性が懸念された。このような場合、相互相関処理をしても反射波との相関値が低く算出され、伝播時間を正しく求めることが難しい。

そこで、事前検討として表面波や横波に左右されない縦波の直達波を測定し、コンクリート供試体の伝播速度を把握することを試みた。参考図-3.1 にコンクリート供試体を挟んで送信用および受信用トランスデューサを対向設置して測定した波形データと周波数特性、さらに波形データから、(1) で示した相互相関法により算出した伝播時間の結果を示す。図中の青色が帯域 30 kHz

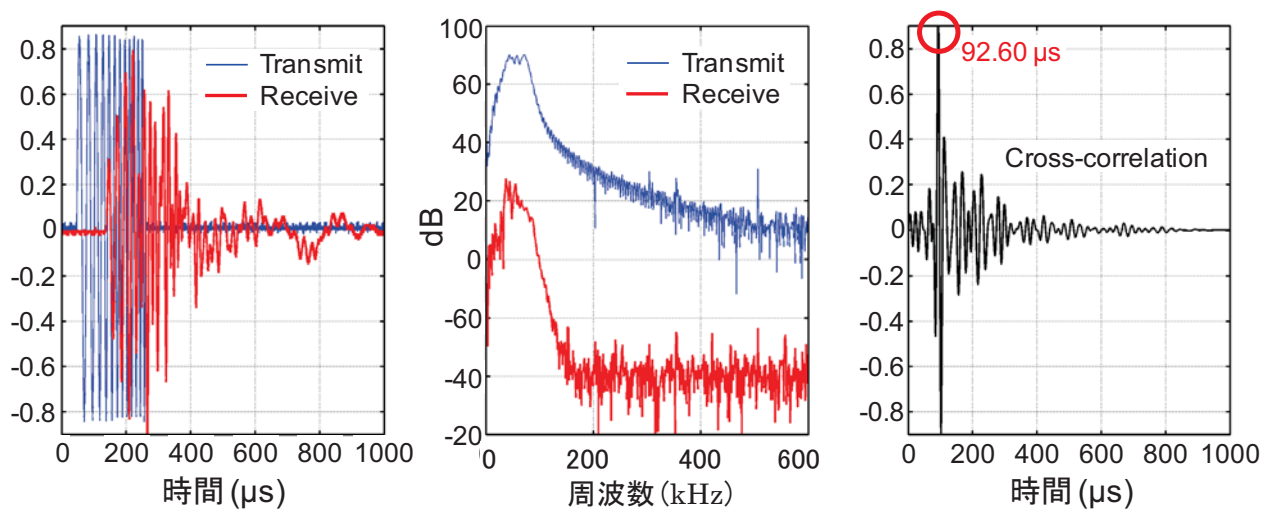
～80 kHz のチャープ波の送信信号波形、赤色が受信信号波形、黒線が送信信号と受信信号の相互相関波形である。受信信号の周波数成分をみると、所望の帯域幅の信号を受信できていることが確認できる。また、相互相関波形のピーク値も高い値が算出されている。

一方、相互相関波形のピーク値に対応する時間は 92.60  $\mu\text{s}$  である。超音波の伝播距離を 300 mm としてコンクリート供試体の伝播速度を算出すると以下となる。

$$\text{伝播速度} = \frac{\text{距離}}{\text{時間}} = \frac{0.3}{92.6 \times 10^{-6}} \approx 3240 \text{ m/s}$$

本文 2. 1. 3 で示したとおり、今回使用したコンクリート供試体の伝播速度を材料定数から求めると、2400～2500 m/s となっている。300 mm の距離を伝播するには 120  $\mu\text{s}$  程度の時間が必要であり、伝播時間から求めた伝播速度と、材料定数から理論的に求めた音速とに大きな誤差がある。この理由として、あくまでも仮説であるが、コンクリート供試体の周波数特性から、今回の実験では、コンクリート供試体が硬化途中であったため、材料定数を求めるための試験でクリープを起こしていたとすると、必要以上にひずみが大きくなり、応力-ひずみ線図から求めたヤング率が見掛け小さくなる。その結果、材料定数から求めた伝播速度は実際よりも遅くなって算出される可能性が考えられる。この可能性は小さいとしても、実際の試験と同様に材料試験も硬化した状態のコンクリートで行うべきと考える。ただし、伝播速度変化率として見れば、同じ計測系の結果の比率をとっているため、若干、影響は緩和されると考えられる。

なお、今回のような反射型の測定においては、この伝播速度の値と各音波伝播経路長からおおよその伝播時間を見積もり、相互相関波形において該当すると考えられるピーク値の時間をピックアップして整理した。



(a) 測定した波形データ

(b) 周波数特性

(c) 相互相関波形

参考図-3.1 コンクリート供試体を挟んでトランスデューサを対向させた場合の測定結果

#### 4. 測定結果

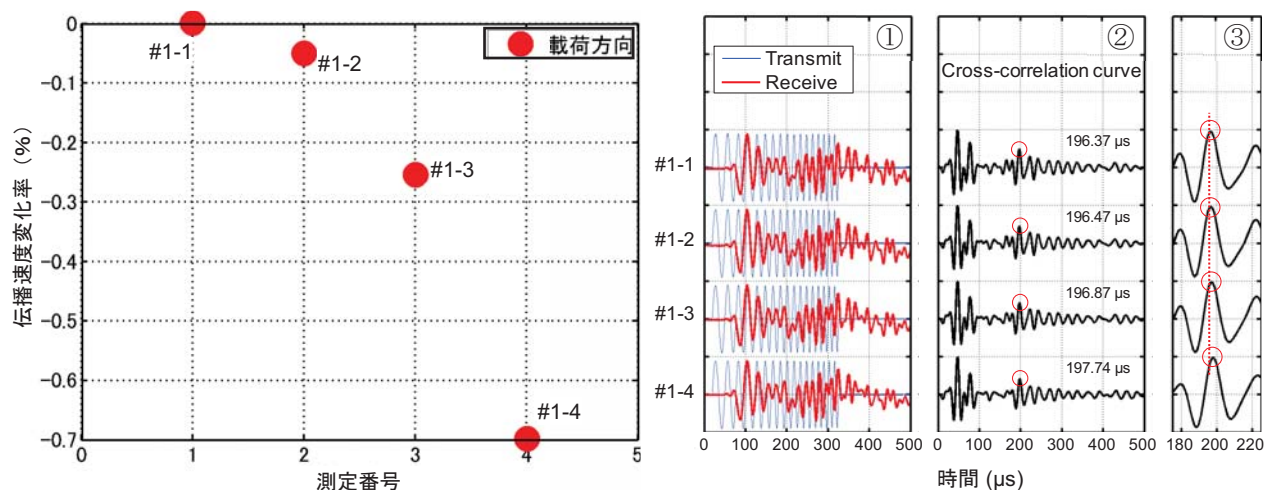
各データ番号の伝播速度の測定結果を以下に示す。

各図において、左図が「測定番号と伝播速度変化率」、右3図が①「送受信信号波形（図中の青線が送信信号波形、赤線が受信信号波形）」、②「相互相関波形（黒線が送信信号と受信信号の相互相関波形）」、③は②の○印付近の拡大図である。

なお、伝播速度変化率の図において、●印プロットは载荷前の除荷状態から载荷状態へ载荷条件を変化させたときのデータであり、○印プロットは载荷状態から除荷状態へ载荷条件を変化させたときのデータである。また、相互相関波形の図における○印は、相互相関法において超音波伝播経路長とコンクリート供試体の伝播速度からおおよその伝播時間を見積もり、該当すると考えられる時間のポイントをピックアップしたものである。

##### (1) データ番号#1-1～#1-4の測定結果（軸方向载荷）

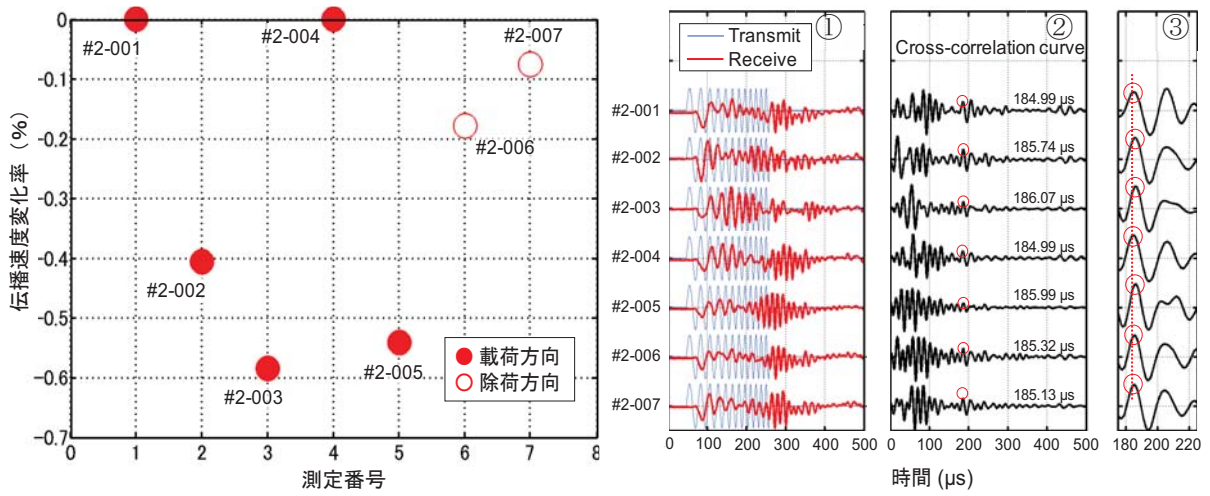
データ番号#1-1～#1-4の測定結果を参考図-4.1に示す。



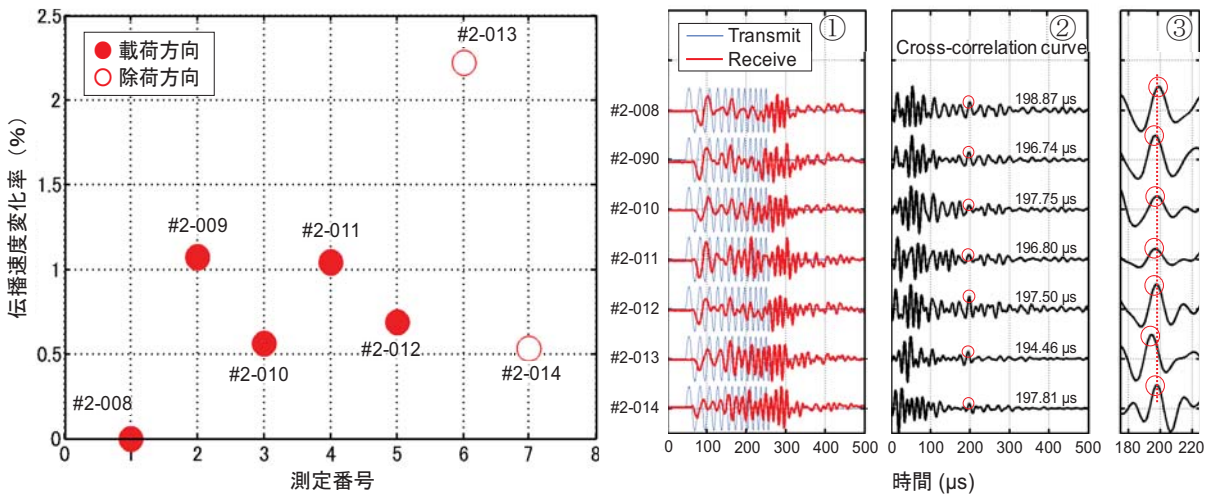
参考図-4.1 伝播速度変化率結果(#1-1～#1-4)

(2) データ番号#2-001～#2-035の測定結果(曲げ载荷)

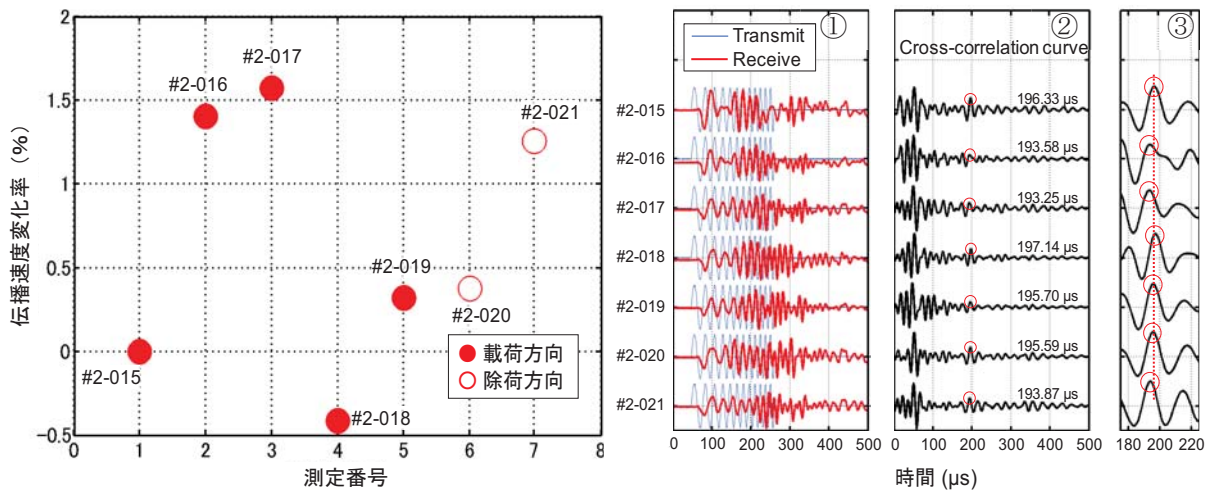
データ番号#2-001～#2-035の測定結果を参考図-4.2～参考図-4.6に示す。



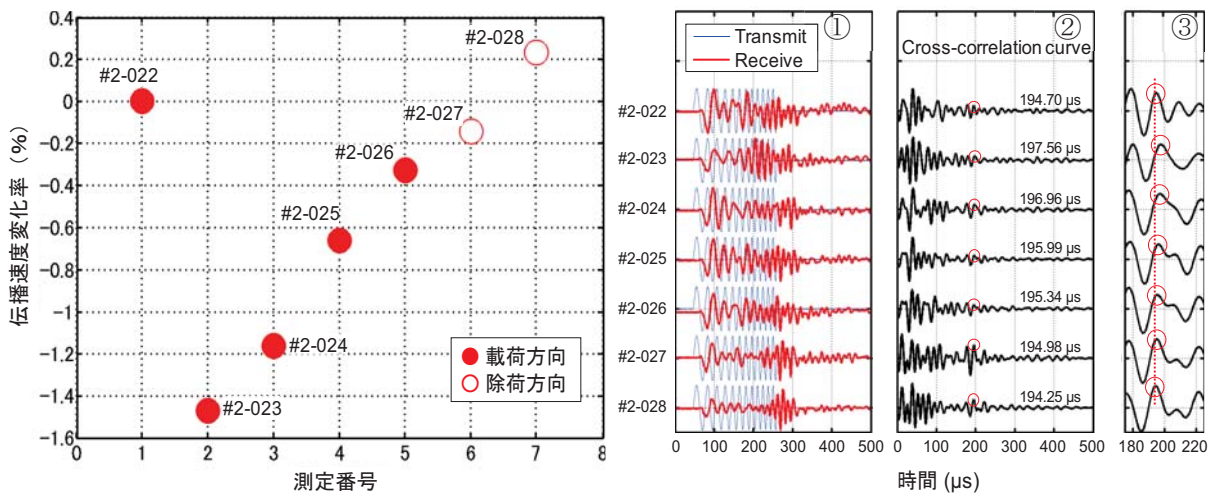
参考図-4.2 U1-1(#2-001～#2-007)の伝播速度変化率



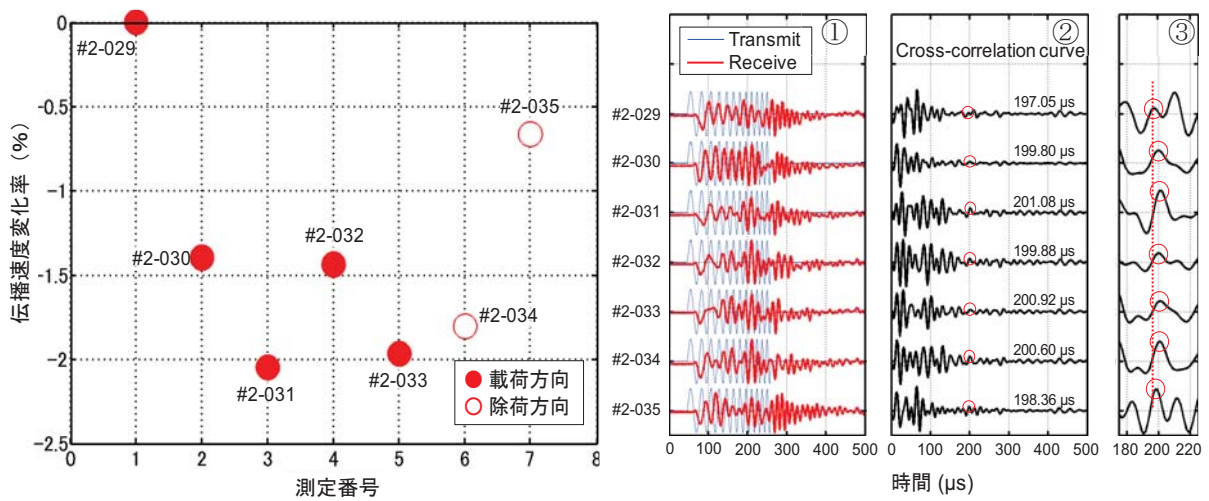
参考図-4.3 U2-2(#2-008～#2-014)の伝播速度変化率



参考図-4.4 U3-3(#2-015~#2-021) の伝播速度変化率



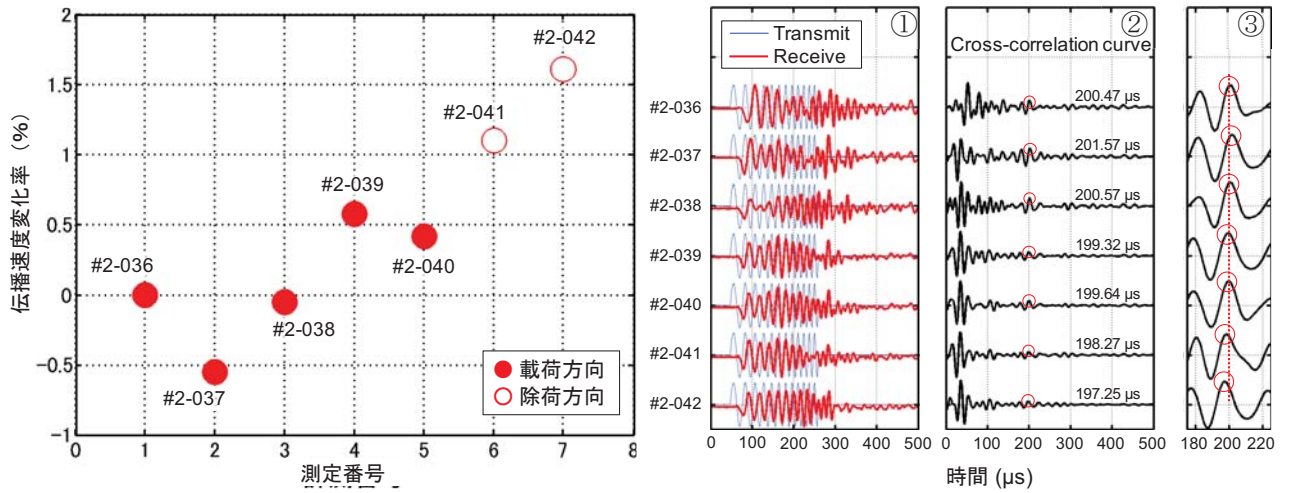
参考図-4.5 U4-4(#2-022~#2-028) の伝播速度変化率



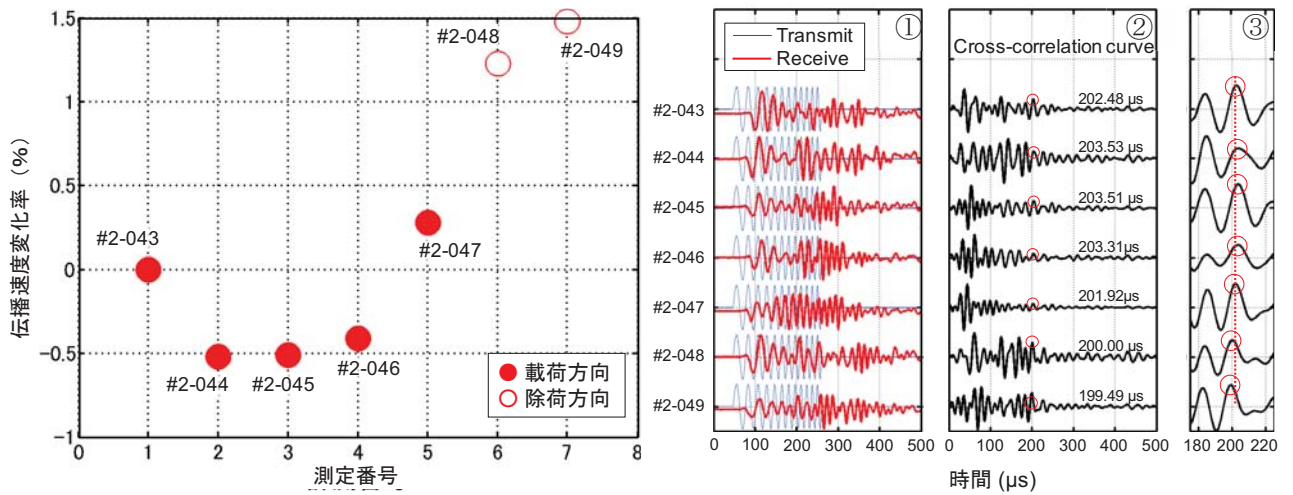
参考図-4.6 U5-5(#2-029~#2-035) の伝播速度変化率

(3) データ番号#2-036～#2-140の測定結果（曲げ载荷）

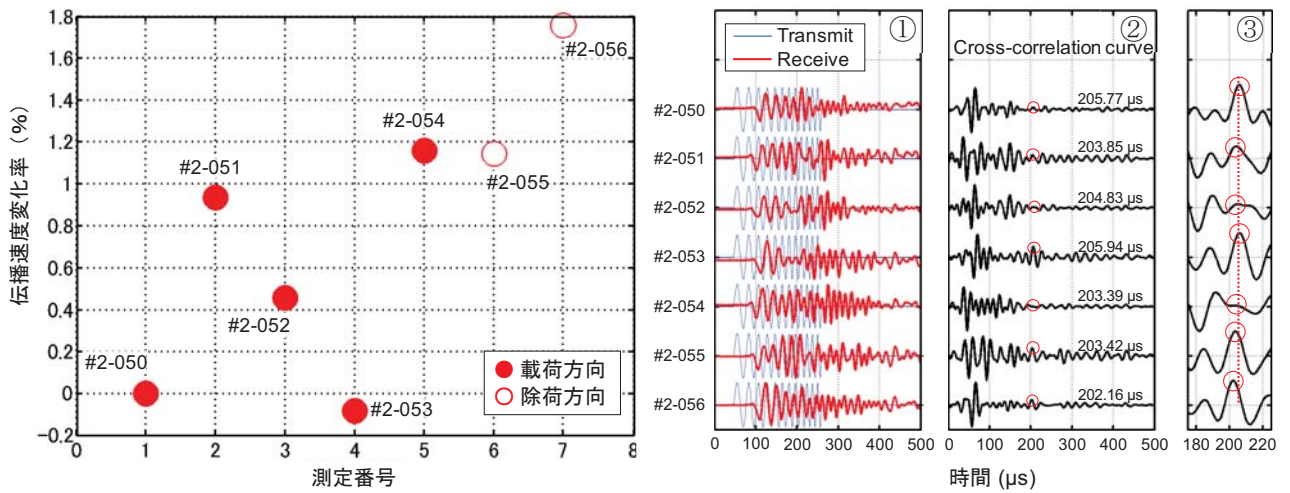
データ番号#2-036～#2-140の測定結果を参考図-4.7～参考図-4.21に示す。



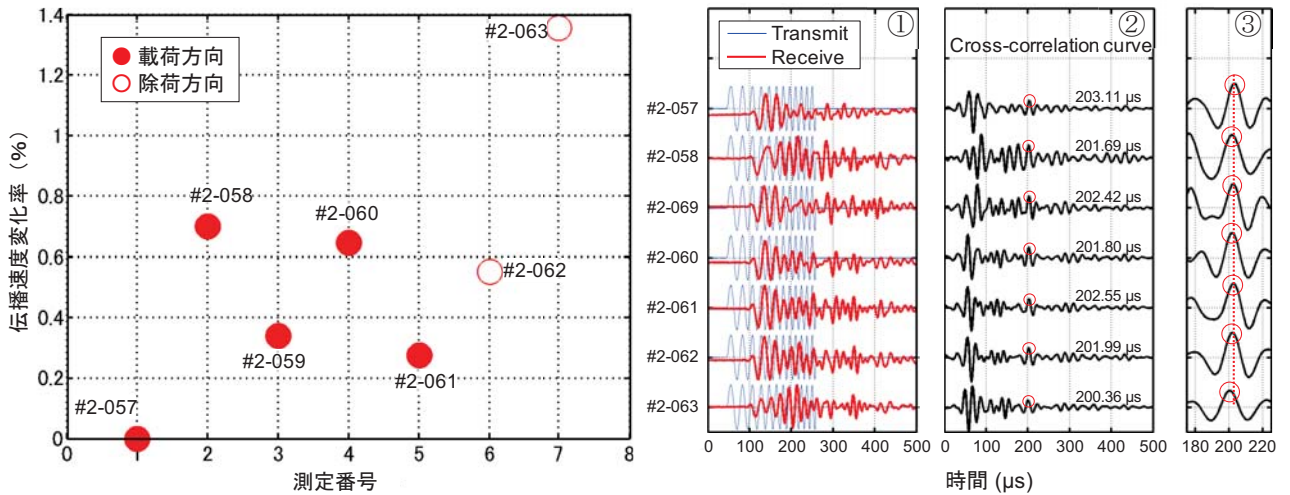
参考図-4.7 L1-1 (#2-036～#2-042)の伝播速度変化率



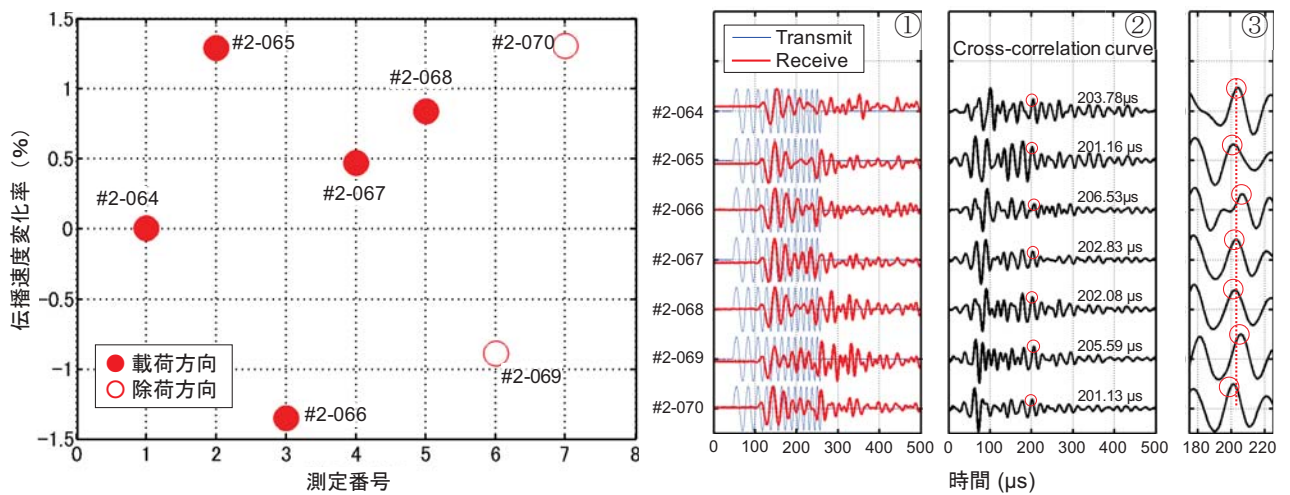
参考図-4.8 L1-2 (#2-043～#2-049)の伝播速度変化率



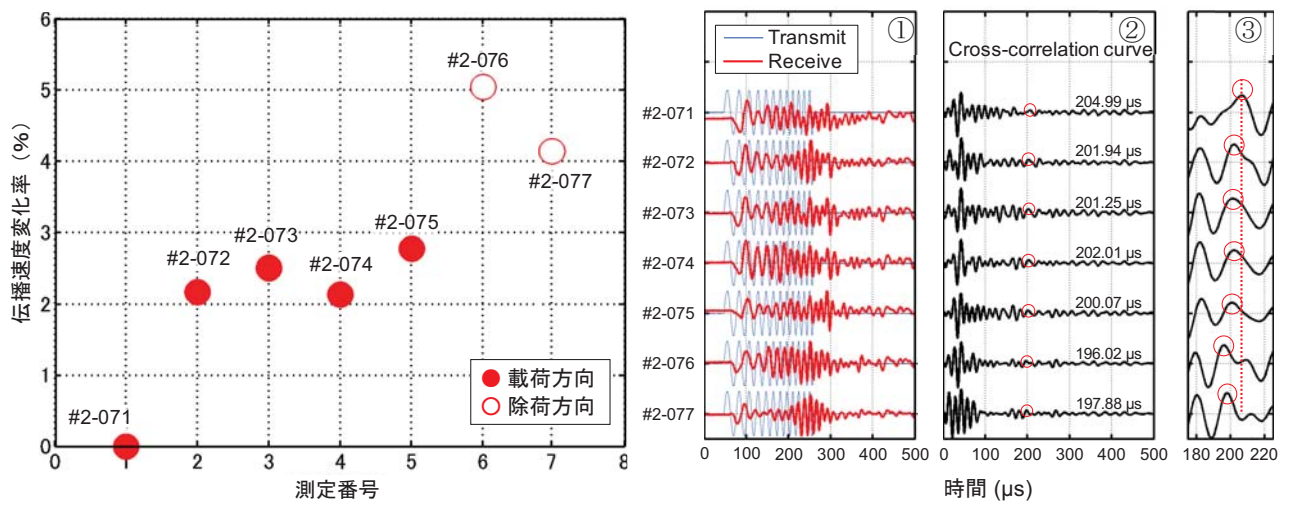
参考図-4.9 L1-3 (#2-050~#2-056) の伝播速度変化率



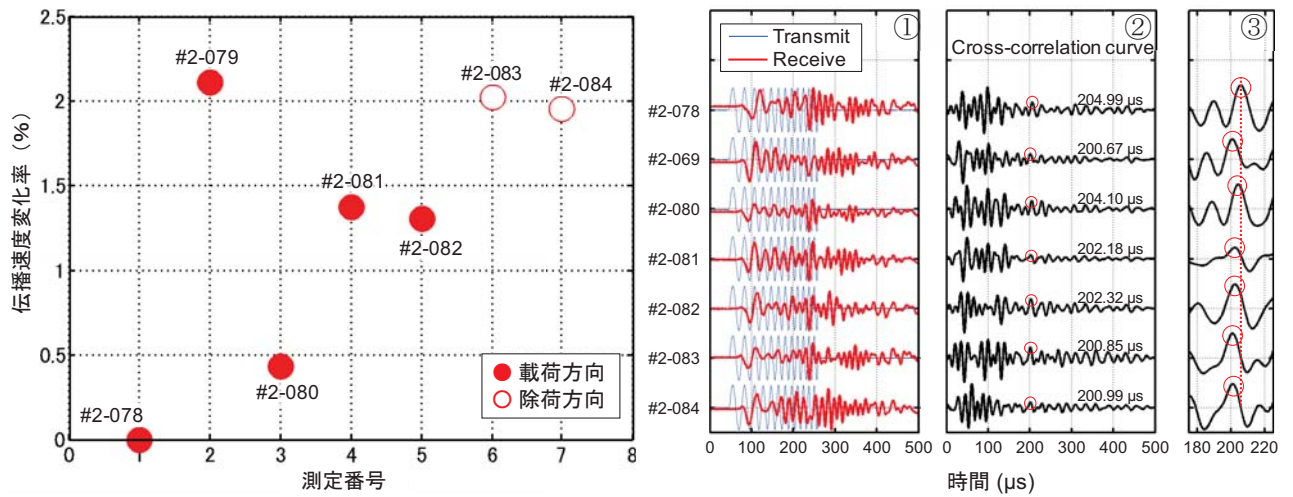
参考図-4.10 L1-4 (#2-057~#2-063) の伝播速度変化率



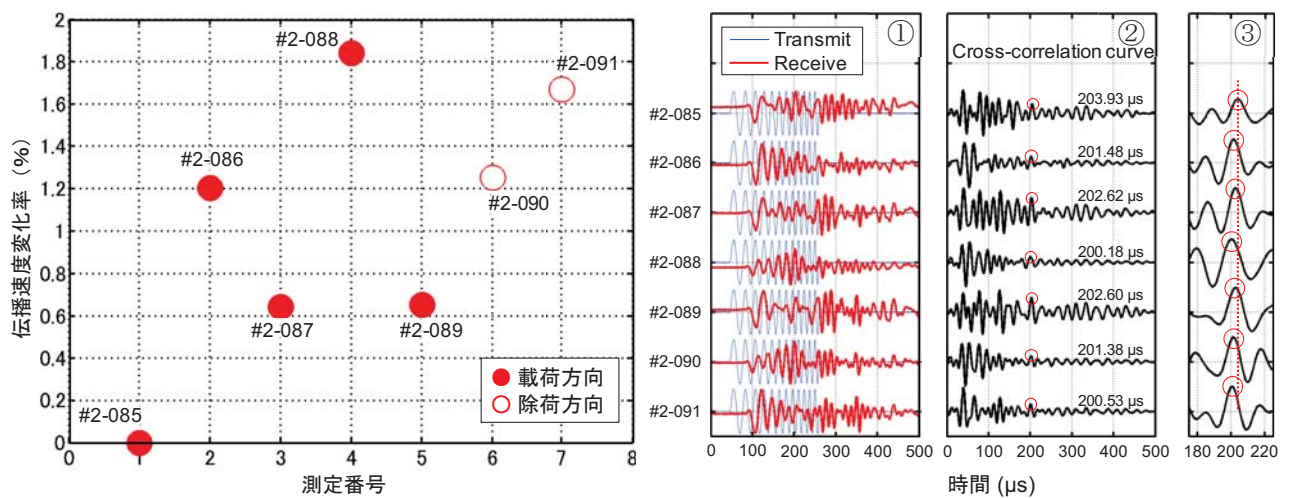
参考図-4.11 L1-5 (#2-064~#2-070) の伝播速度変化率



参考図-4.12 L2-2 (#2-071~#2-077) の伝播速度変化率

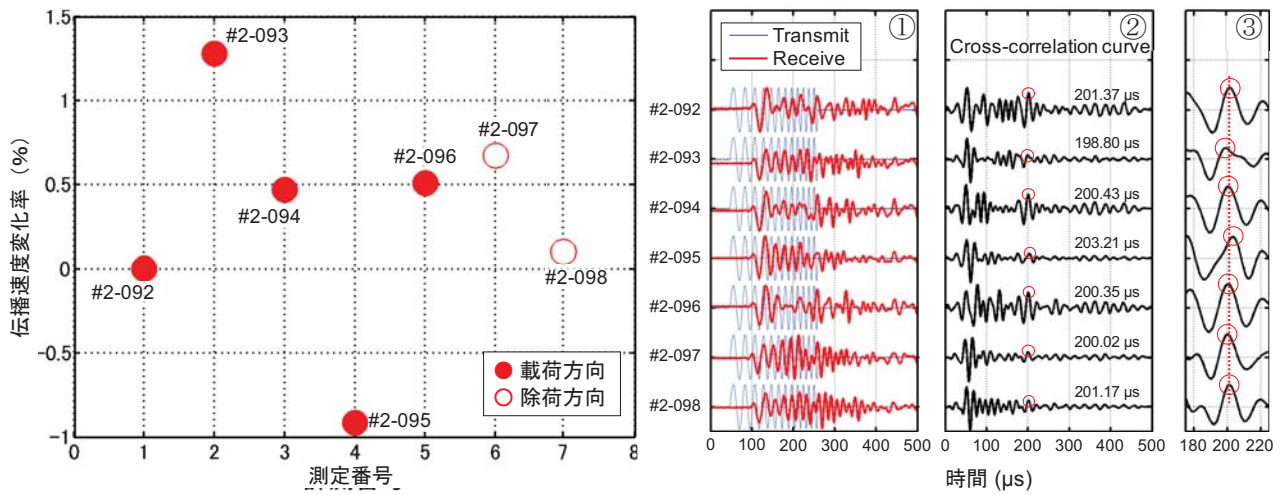


参考図-4.13 L2-3 (#2-078~#2-084) の伝播速度変化率

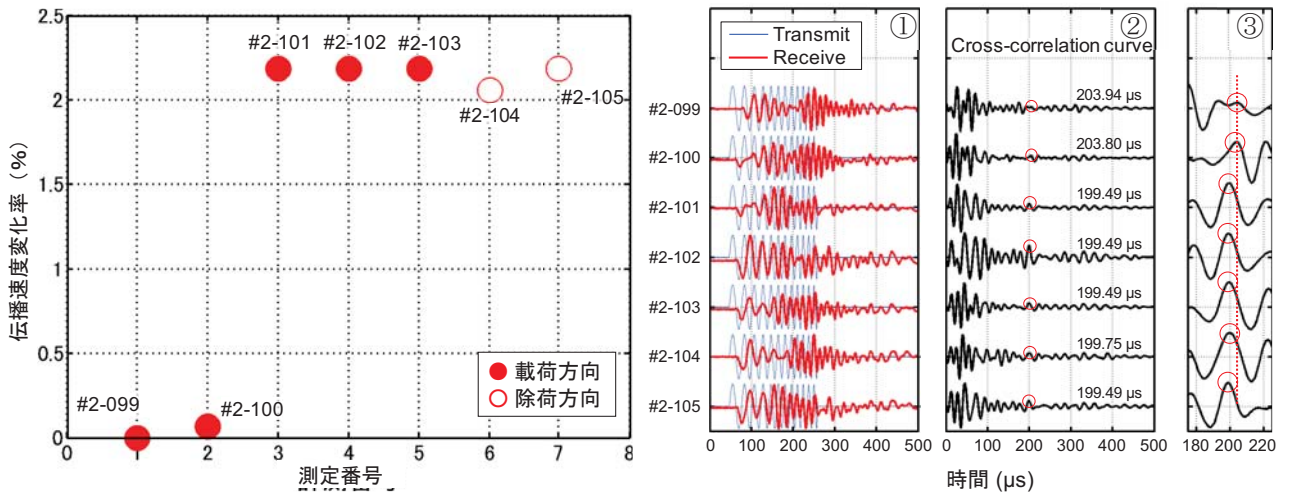


参考図-4.14 L2-4 (#2-085~#2-091) の伝播速度変化率

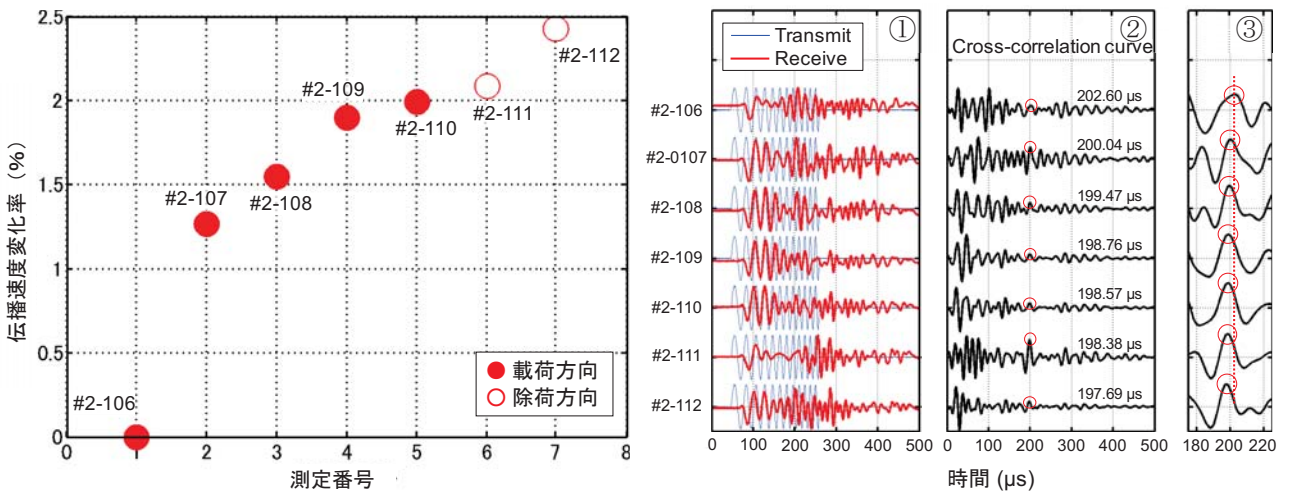




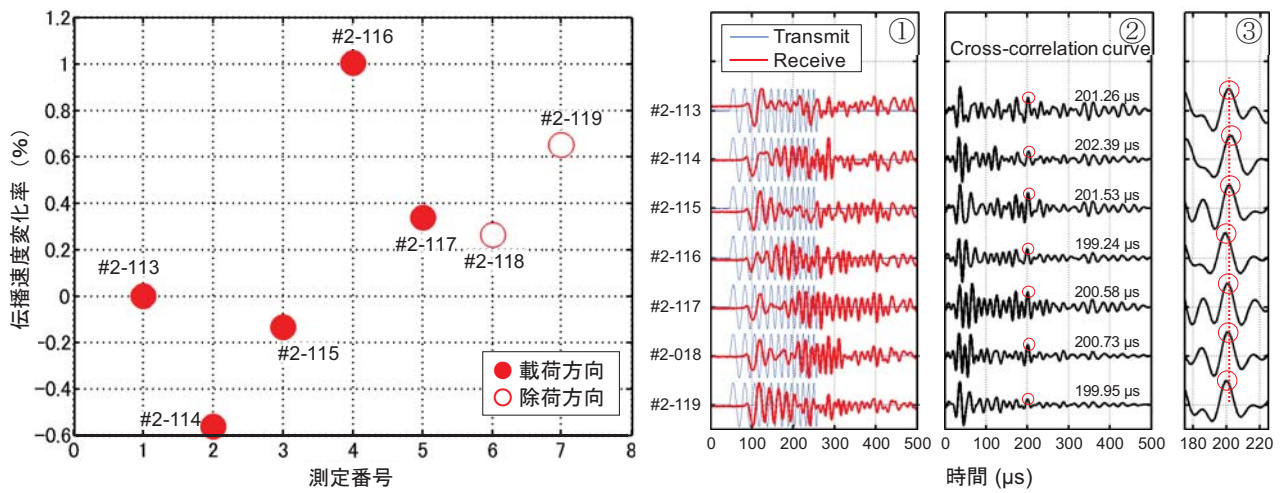
参考図-4.15 L2-5 (#2-092~#2-098) の伝播速度変化率



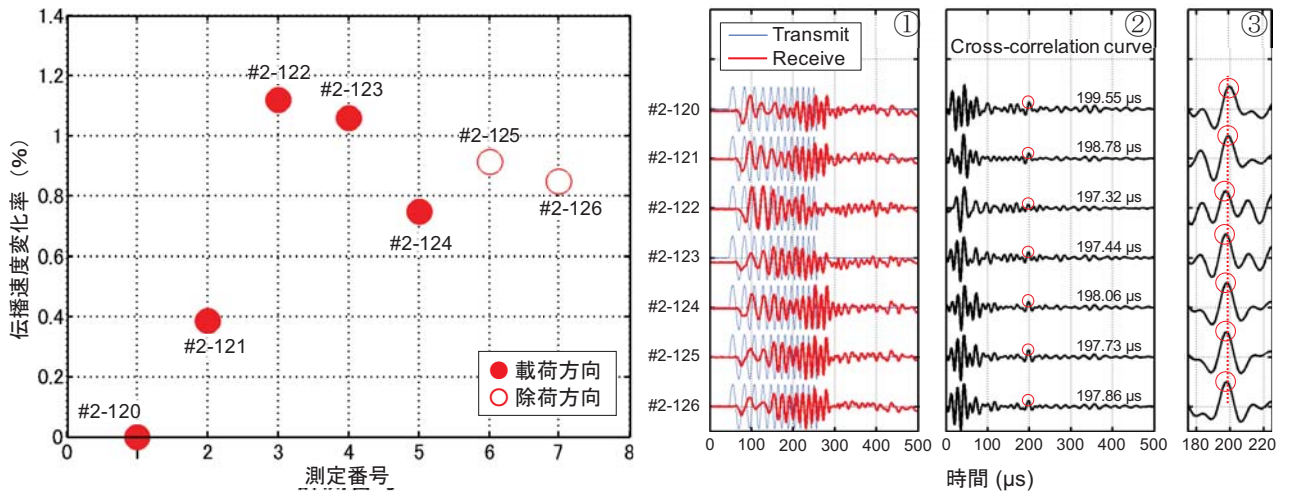
参考図-4.16 L3-3 (#2-099~#2-105) の伝播速度変化率



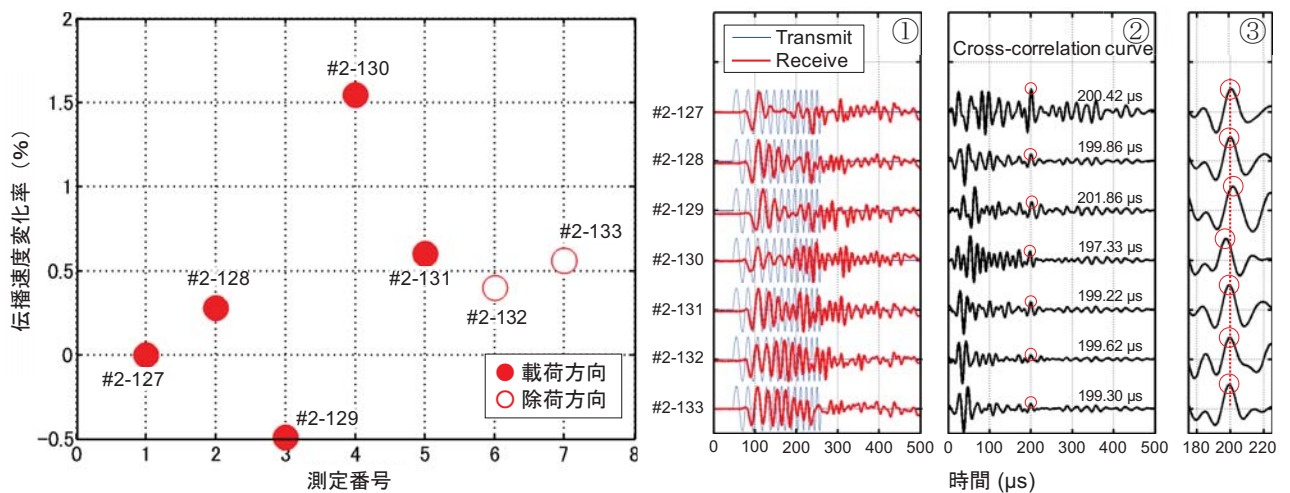
参考図-4.17 L3-4 (#2-106~#2-112) の伝播速度変化率



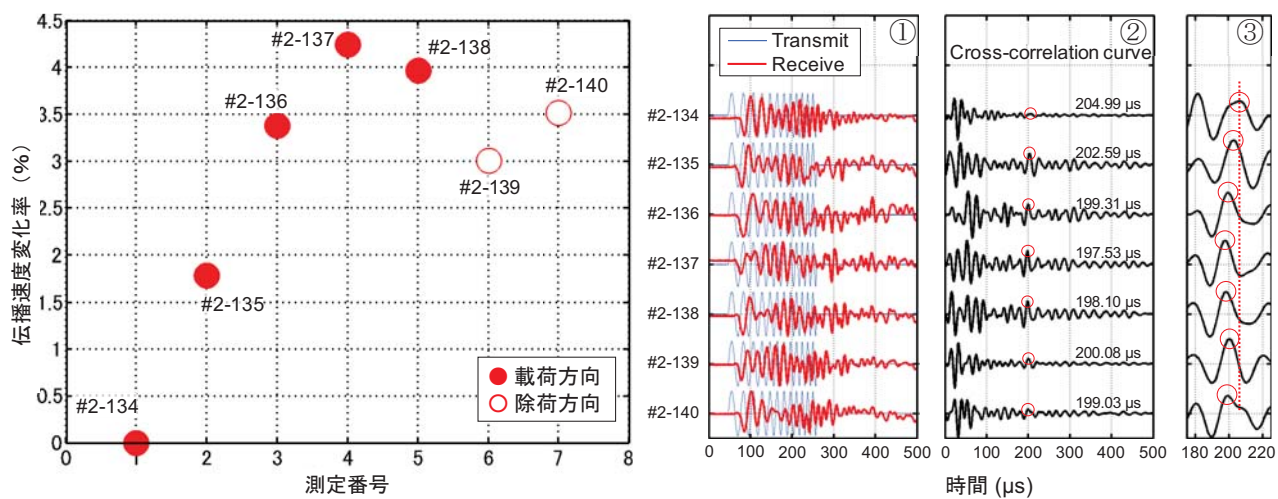
参考図-4.18 L3-5 (#2-113~#2-119) の伝播速度変化率



参考図-4.19 L4-4 (#2-120~#2-126) の伝播速度変化率



参考図-4.20 L4-5 (#2-127~#2-133) の伝播速度変化率



参考図-4.21 L5-5 (#2-134~#2-140) の伝播速度変化率



---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No.4439 March 2023

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754