

## 調査検討委員会資料

資料	内容	備考	資料ページ
資料-1	(第2回)調査検討委員会議事要旨		P 1
資料-2	落下にいたるまでの事象の推定		P 2
資料-3	業務の実施内容の確認		P 26
資料-4	再発防止策		P 30
資料-5	調査検討委員会(報告書)目次(案)		P 32

## ■第２回 調査検討委員会議事要旨

鋼少数主桁橋の床版下面吹付コンクリートはく離・落下事象  
調査検討委員会

### 【第2回議事要旨】

■現地調査より、委員会として下記のとおり事実関係を確認した。

- ・当該箇所の既設 PC 床版下面のブラスト処理は、目視調査結果から施工前試験にて設定した処理レベルと同程度であった。
  - ・当該箇所の既設 PC 床版および吹付コンクリートの圧縮強度は、強度試験の結果から設計値以上の強度を有していた。
  - ・はく離・落下した吹付コンクリートは、中性化深さの測定結果から、吹付コンクリートの端部側(支間中央側)で進行している傾向がみられた。
  - ・上空に残る吹付コンクリートにおいて下面から衝撃弾性波試験を行った結果、吹付コンクリートの端部側(支間中央側)がはく離している傾向がみられた。
- 現地調査結果も踏まえ、下記のような討議を行った。
- ・吹付厚が厚いことによるコンクリート収縮による体積変化が影響した可能性がある。
  - ・超速硬コンクリートの場合、若材齢の挙動について十分検証すること。

・吹付コンクリート硬化時に床版の交通振動が影響した可能性がある。

■今後の解析および実験を行って検証し、メカニズム落下にいたるまでの事象の推定を進めることを委員会として確認した。

以上

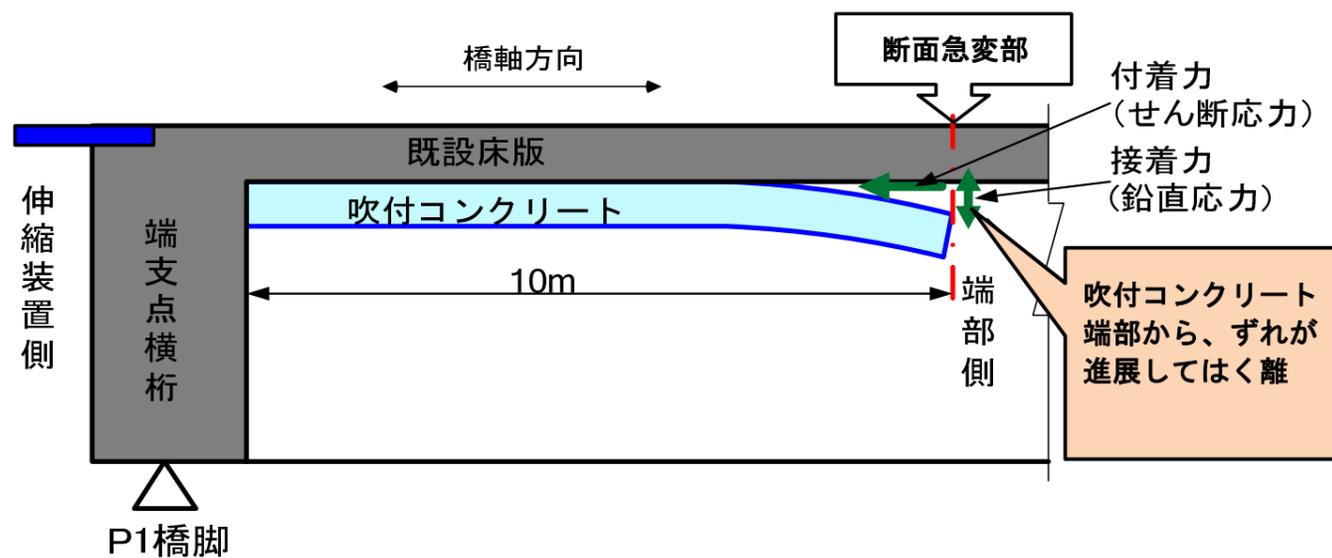
落下にいたるまでの事象の推定

1. 考えられる影響

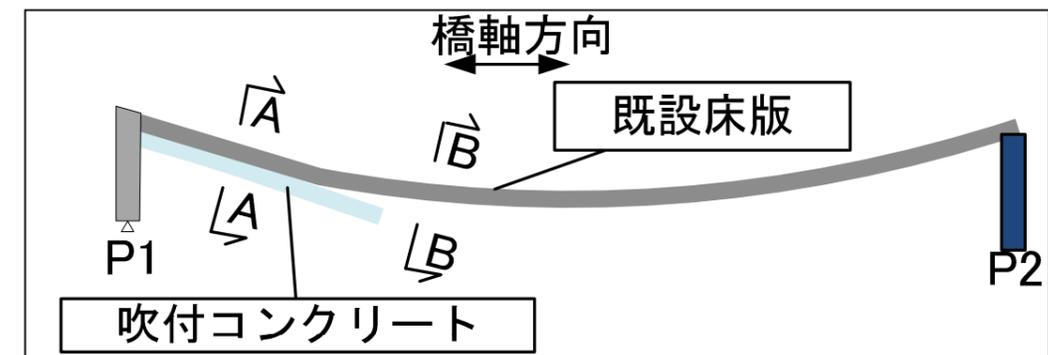
- (1) 吹付厚が厚いことによるコンクリートの温度および収縮による体積変化の影響
- (2) 吹付コンクリート硬化時の振動の影響
- (3) 吹付厚が厚いことによる断面急変部でのせん断力の発生の影響

2. 現地調査、および考えられる影響からの落下にいたるまでの事象の推定(可能性の一つ)

- ・ コンクリートの温度変化と収縮の影響で、端部側の界面に水平方向にずれようとするせん断力が発生
- ・ 硬化時の振動の影響による付着強度や接着強度の低下
- ・ 増厚したことで断面急変部となり、輪荷重の载荷により界面に水平方向にずれようとするせん断力が発生
- ・ 繰り返し荷重の影響もあり、端部側からずれが進展して最終的に落下



体積変化、振動による影響の概念図



輪荷重载荷による影響の概念図

	A-A	B-B	
h=270mm	既設床版	既設床版	E=3.5 × 10 <sup>7</sup> kN/m <sup>2</sup>
h=230mm	吹付コンクリート		E=3.1 × 10 <sup>7</sup> kN/m <sup>2</sup>
b = 1.0m(単位幅)			
A-A断面	$EI = E \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{E \cdot 1.0 \times (0.27+0.23)^3}{12} = 3.43 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$		E : 弾性係数 (材料毎の応力とひずみの比例定数)  I : 断面二次モーメント (部材断面毎の変形のしにくさ)  EI : 曲げ剛性 (変形のしにくさ)
B-B断面	$EI = E \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{E \cdot 1.0 \times 0.27^3}{12} = 0.57 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$		

↑ 約6倍

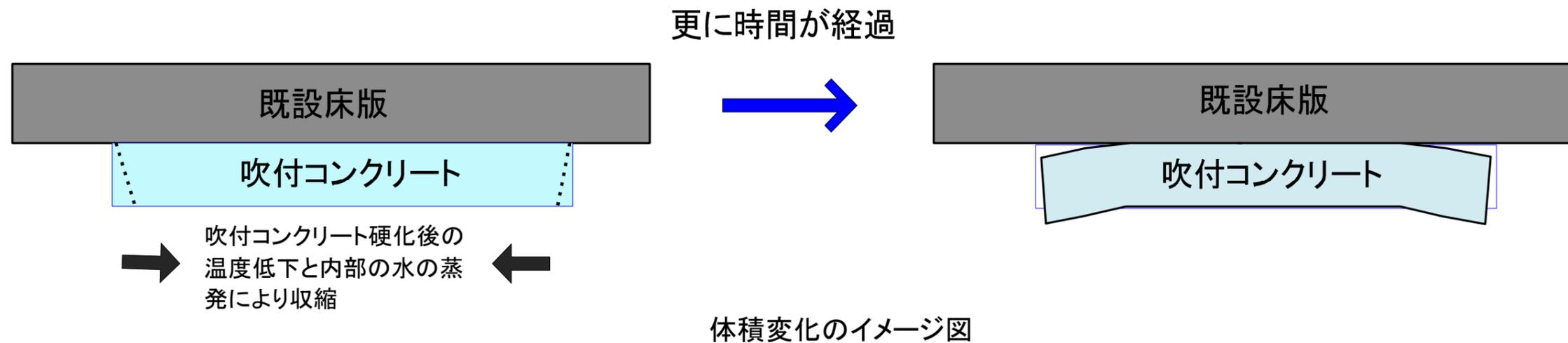
変形のしにくさを表す曲げ剛性(EI)の比較

原因の検証(1)

吹付厚が厚いことによるコンクリートの温度および収縮による体積変化の影響

【検証方法】

- 解析: 温度応力解析
- 実物大実験



原因の検証(2)

吹付コンクリート硬化時の振動の影響

【検証方法】

- 振動実験

原因の検証(3)

吹付厚が厚いことによる断面急変部でのせん断力の発生の影響

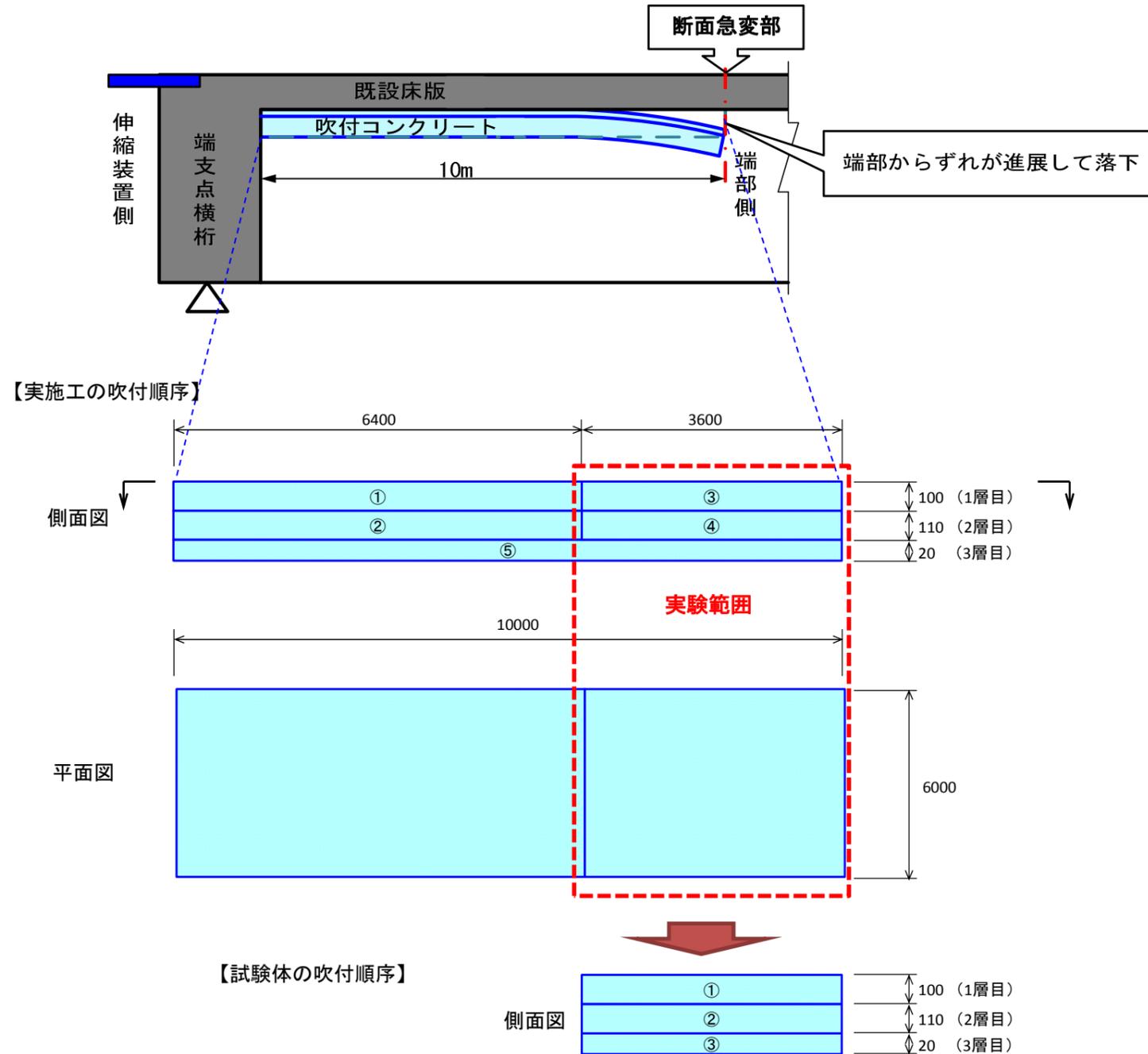
【検証方法】

- 解析: FEM解析

# I 実験の範囲と規模

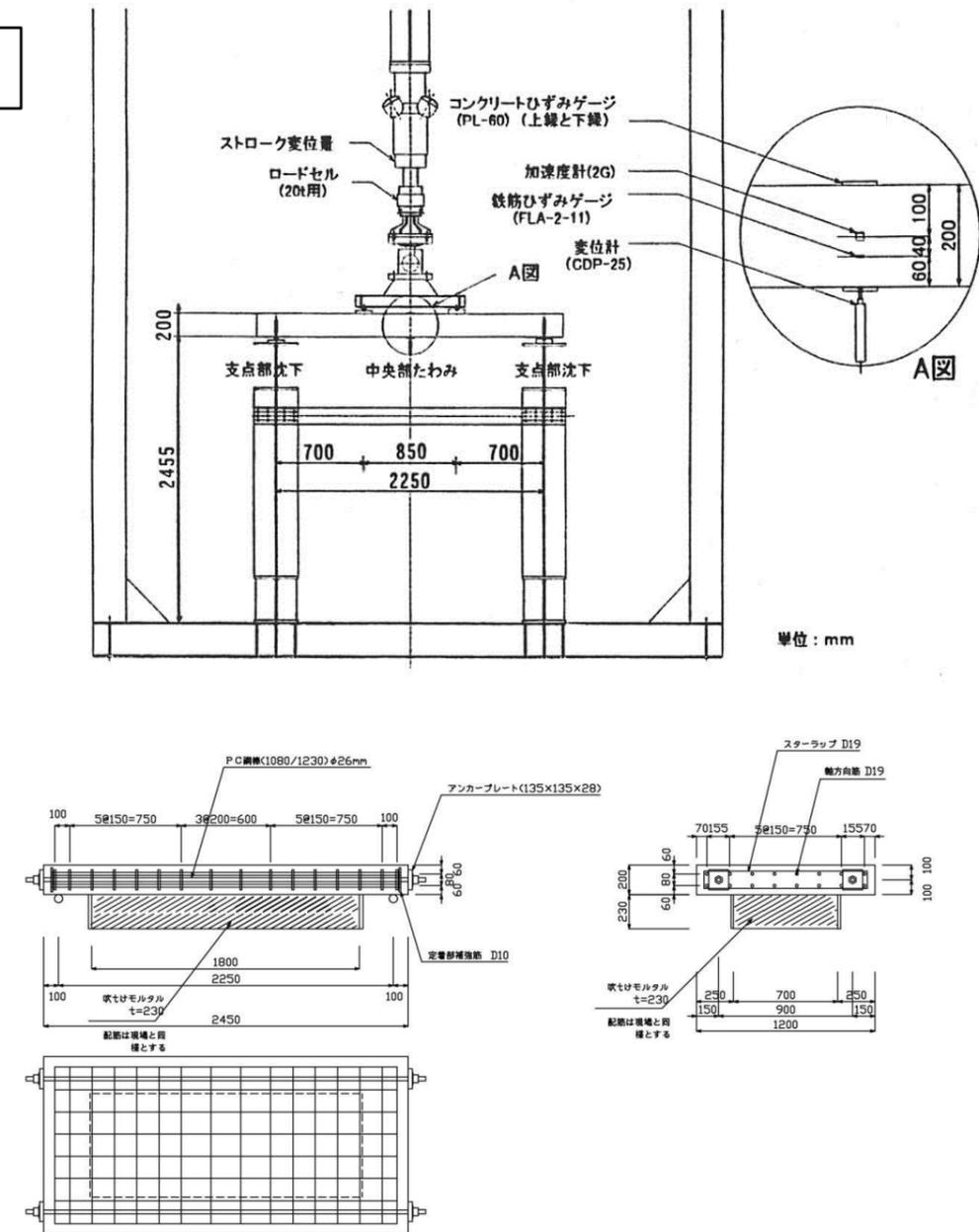
## (1) コンクリートの温度および収縮による体積変化の影響の実験規模(実物大実験)

吹付コンクリートの温度等による体積変化の影響を、実物大規模の試験体に吹付けを行い、界面の挙動や強度を把握する。吹付け厚さと試験体表面の表面処理方法、鉛直方向の鉄筋による影響を確認する。



## (2) コンクリート硬化時の振動の影響の実験規模(振動実験)

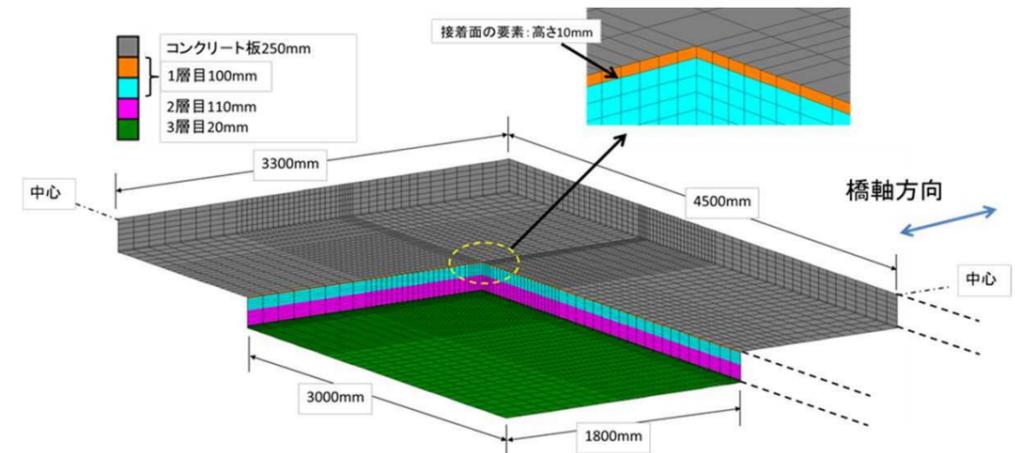
交通振動環境下での影響を把握するため、供用下の実橋振動に相当する振動を試験体に与えながら下面に吹付けコンクリートを施工し、振動有り無しの場合の界面の挙動等を比較し、振動の影響を把握する。



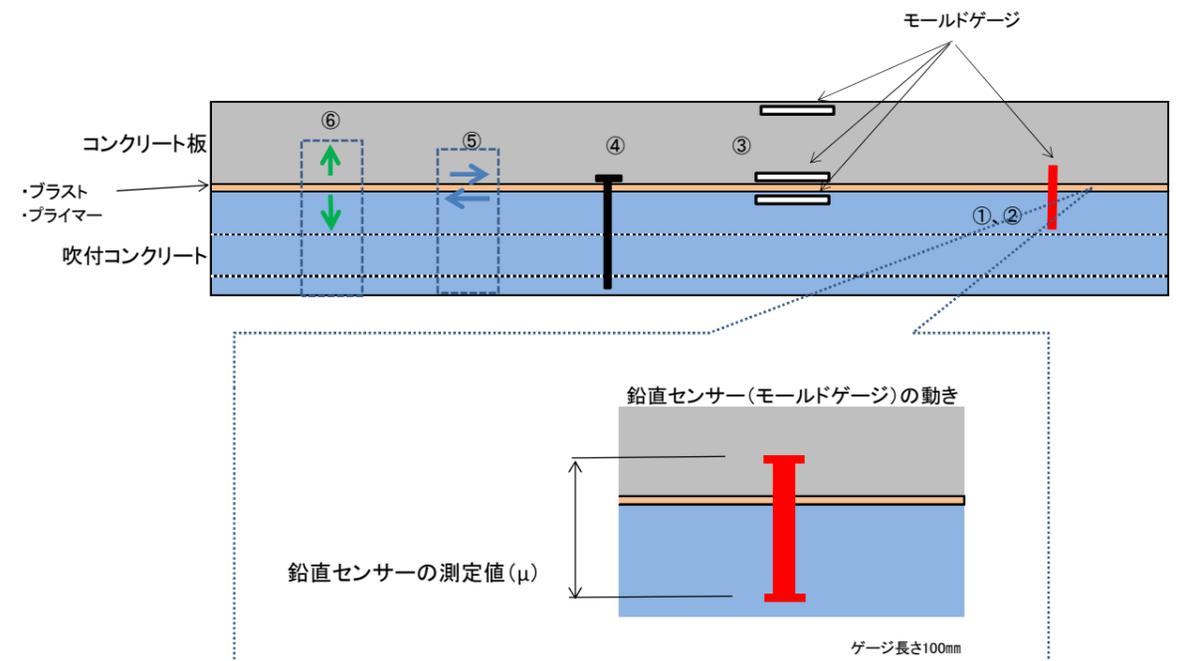
## II 実験、解析の実施内容

推定される影響		(1)コンクリートの温度および収縮による体積変化の影響(実物大実験)			
解析	解析方法	温度応力解析等 (実験A、Bでの計測値を反映)			
	検証内容	温度および材料収縮による体積変化での界面のせん断力の把握			
検証方法	実験方法	鋼繊維入り超速硬モルタルセメント ( $\sigma_3=24\text{N/mm}^2$ )			
	ケース	実験A	実験B	実験C	実験D
	吹付厚	吹付厚さ 230mm ・1層目100mm ・2層目110mm ・3層目20mm	吹付厚さ 70mm ・1層目50mm ・2層目20mm	吹付厚さ 230mm ・1層目100mm ・2層目110mm ・3層目20mm	吹付厚さ 230mm ・1層目100mm ・2層目110mm ・3層目20mm
	ブラスト 投射密度	75kg/m <sup>2</sup>		150kg/m <sup>2</sup>	75kg/m <sup>2</sup>
	鉄筋	有 (鉄筋:水平方向のずれ止め)			有・無の比較
	振動の有無	無			
	試験体規模	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験体:コンクリート板</li> <li>吹付規模:3.6m×6m</li> <li>プライマー処理</li> <li>施工順序を考慮</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>試験体:コンクリート板</li> <li>吹付規模:1.4m×1m (安全上の都合で規模縮小)</li> <li>プライマー処理</li> <li>施工順序を考慮</li> </ul>	
	計測内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>発現温度、界面の挙動、水平方向のひずみ</li> <li>鉄筋のひずみ(ずれ止め)の計測</li> <li>界面の付着強度(水平方向)と接着強度(鉛直方向)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>発現温度、界面の挙動、水平方向のひずみ</li> <li>鉄筋のひずみ(ずれ止め)の計測</li> </ul>	
	検証内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹付厚による比較(実験AとB)</li> <li>ブラスト投射密度による比較(実験AとC)</li> <li>鉄筋の有無による比較(実験D)</li> </ul>			

【温度応力解析のモデル】



【実験の計測内容イメージ】



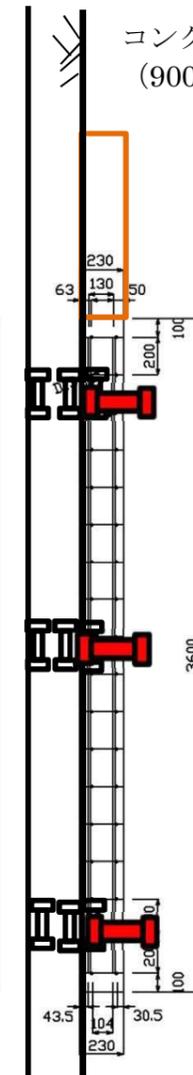
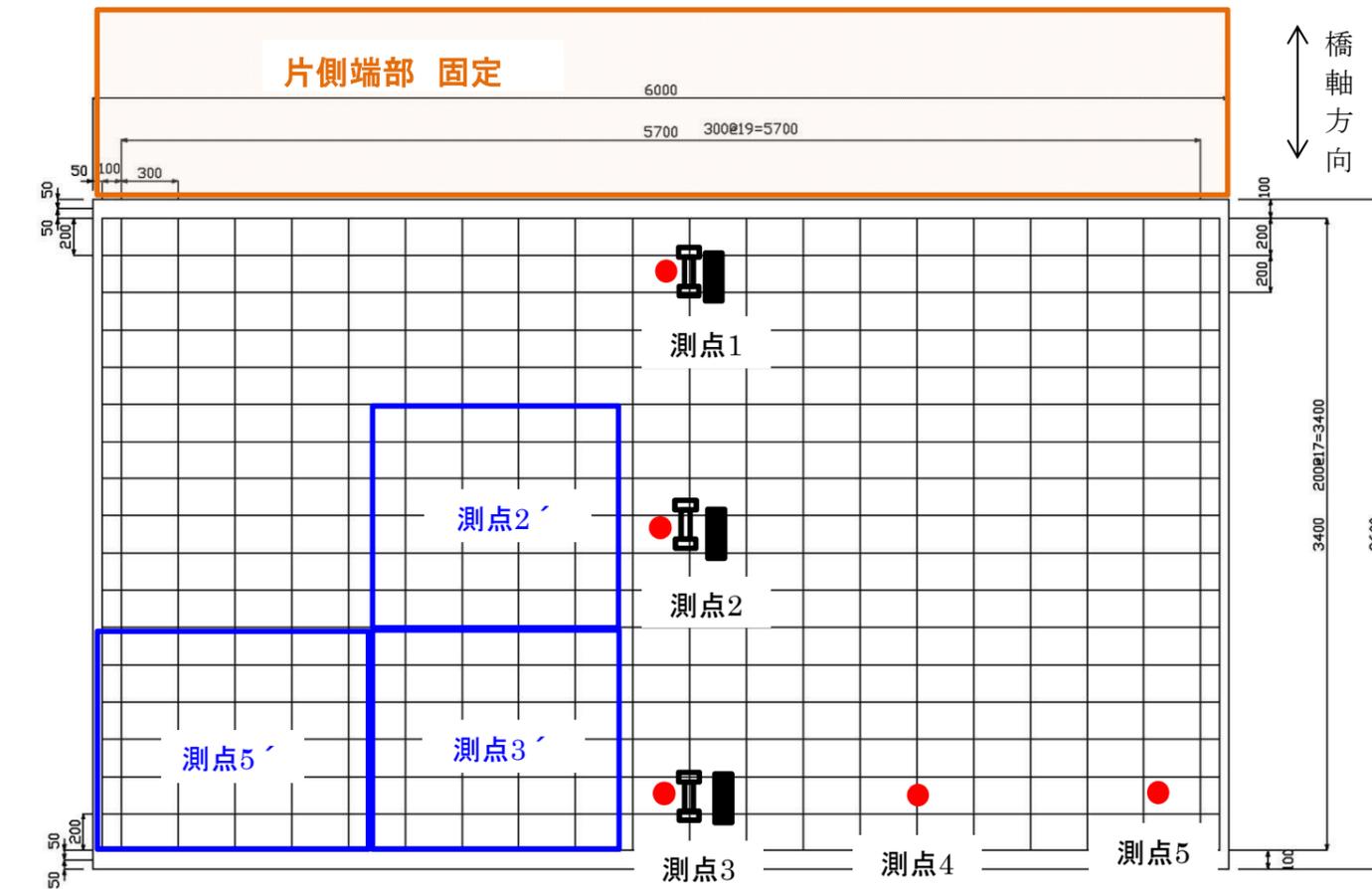
- ①発熱温度:コンクリートの温度履歴
- ②界面の挙動:鉛直センサーの動き
- ③吹付コンクリートと試験体の水平方向のひずみ
- ④鉄筋のひずみ:鉄筋の水平方向の挙動
- ⑤界面の付着強度(別途コア採取して試験)
- ⑥界面の接着強度(別途コア採取して試験)

# 実験A～C 吹付規模と計測器設置位置

モールドゲージの設置位置：凡例

●：①発熱温度、②界面の挙動

⊏：水平方向のひずみ



## 【吹付け部】

●：温度(対象:1層目、厚さ10cm)  
(0～3hr:5分ピッチ, 3～24hr:30分ピッチ, 24hr～:1時間ピッチ)

●：界面のはく離

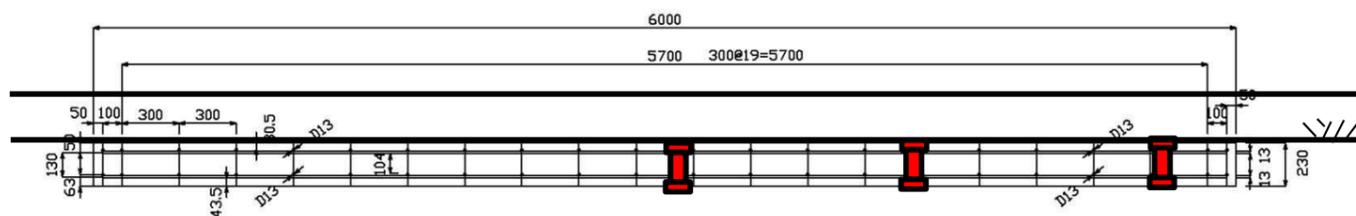
⊏：水平方向(橋軸方向)ひずみ(上面)

■：鉄筋アンカーひずみ

## 【コンクリート板】

⊏：水平方向(橋軸方向)ひずみ(上、下面)

□：界面の付着強度、接着強度試験のコア採取位置(3測点)

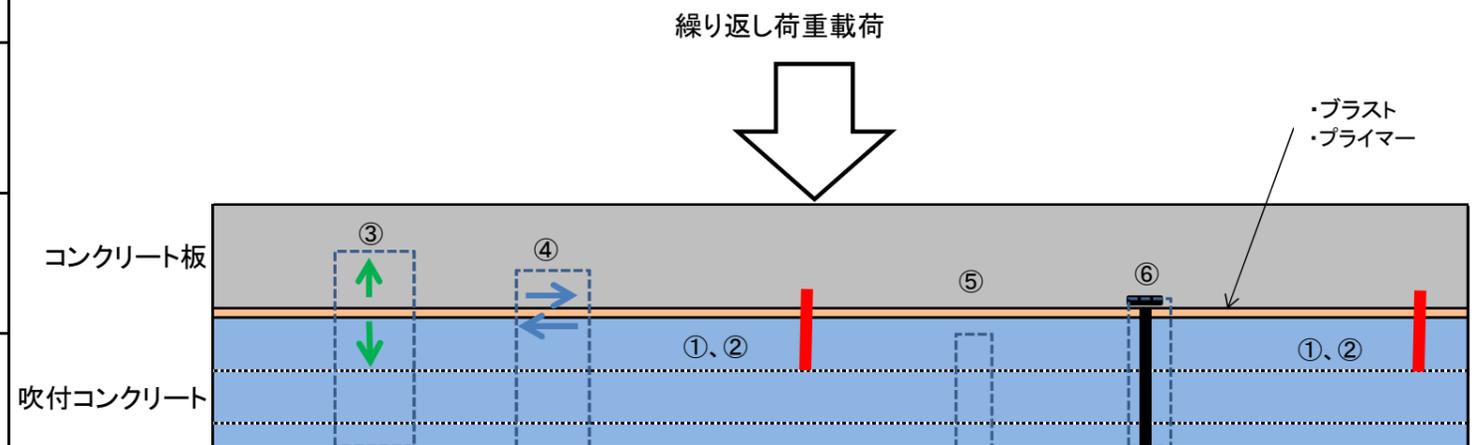


(吹付けコンクリート部：6000×3600×230mm)



推定される影響		(2)コンクリート硬化時の振動の影響(振動実験)				
検証方法	実験	実験方法	試験体に各ケース毎の形状で鋼繊維入り超速硬モルタルセメント ( $\sigma_3=24\text{N}/\text{mm}^2$ )を吹付け、振動の有無による温度変化・挙動等を計測			
		ケース	実験 I-1	実験 I-2	実験 II-1	実験 II-2
		吹付厚	吹付厚 230mm ・1層目 100mm ・2層目 110mm ・3層目 20mm		吹付厚 70mm ・1層目 50mm ・2層目 20mm	
		ブラスト 投射密度	75kg/m <sup>2</sup>			
		鉄筋	有 (鉄筋:水平方向のずれ止め)			
		振動の有無	有	無	有	無
		試験体規模	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験体:コンクリート板</li> <li>・吹付規模:1.8m×0.7m</li> <li>・プライマー処理</li> <li>・鉄筋を配筋</li> </ul>			
		計測内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発現温度、界面の挙動</li> <li>・界面の付着強度(水平方向)と接着強度(鉛直方向)</li> <li>・鉄筋部(白すじの発生が想定)の状況</li> </ul>			
		検証内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・振動影響の有り無しによる相対比較(実験 I、実験 II)</li> <li>・吹付厚による比較(実験 I、実験 II)</li> </ul>			

【実験の計測内容イメージ】

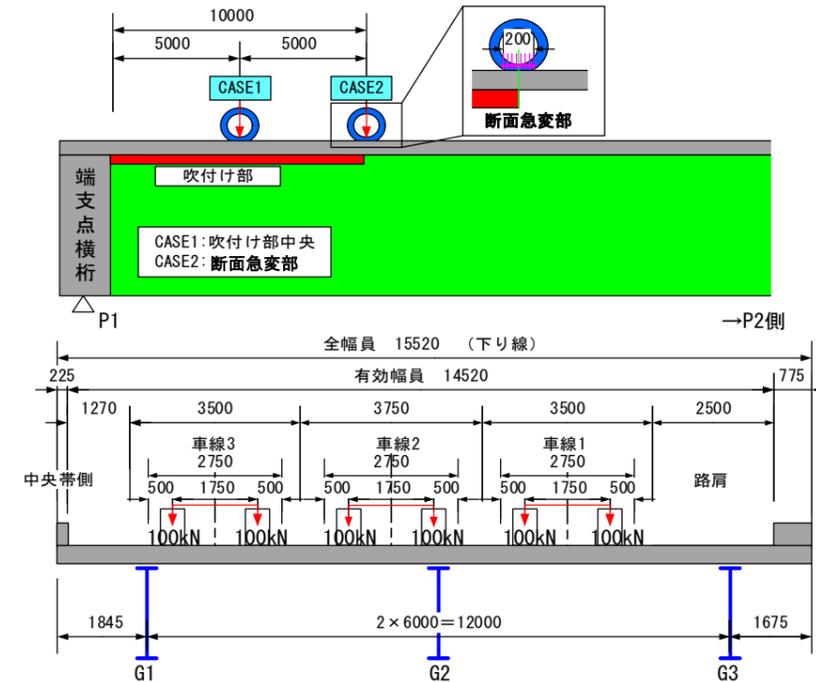


- ①発熱温度:コンクリートの温度履歴(中央荷重載荷部と端部)
- ②界面の挙動:鉛直センサーの動き(中央荷重載荷部と端部)
- ③界面の接着強度(別途コア採取して試験)
- ④界面の付着強度(別途コア採取して試験)
- ⑤圧縮強度(別途コア採取して試験)
- ⑥鉄筋部の白すじの発生状況(別途コア採取して確認)

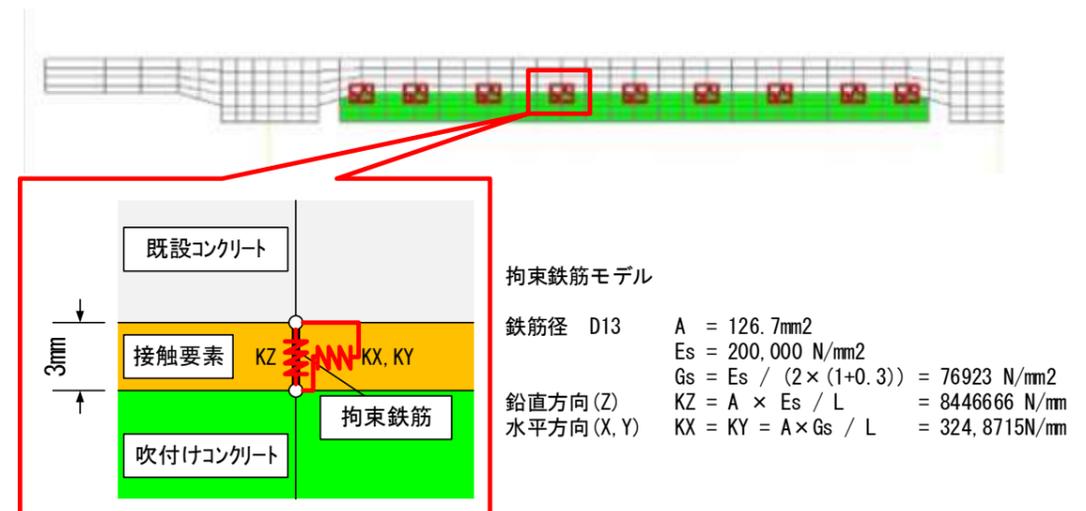
推定される影響		(3) 断面急変部でのせん断力の発生の影響		
検証方法 解析	解析方法	FEM解析		
	解析内容	境界面で発生するせん断力の把握		
	ケース	解析1	解析2	解析3
	作用	輪荷重の影響		
	吹付け厚さ	230mm	230mm	70mm
	断面急変部	有	無	有
	拘束鉄筋 (アンカー部)	有	有	有
	境界面のモデル	弾性		
	検証内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面急変部の有り無し影響(解析1と解析2)</li> <li>吹付け厚の影響(解析1と解析3)</li> </ul>		

【解析における作用荷重】

- ①吹付コンクリート自重 24.5 kN/m<sup>3</sup>
- ②T荷重 100.0 kN (載荷面積200\*500mm) 3組



【拘束鉄筋のモデル】



### Ⅲ 実験、解析結果

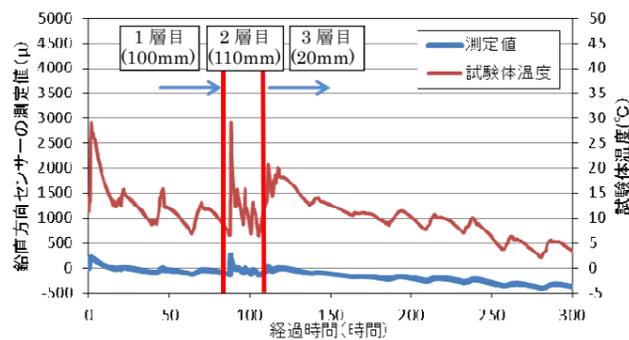
#### 1. 実験による界面挙動

##### (1) コンクリートの温度および収縮による体積変化の影響 (実物大実験)

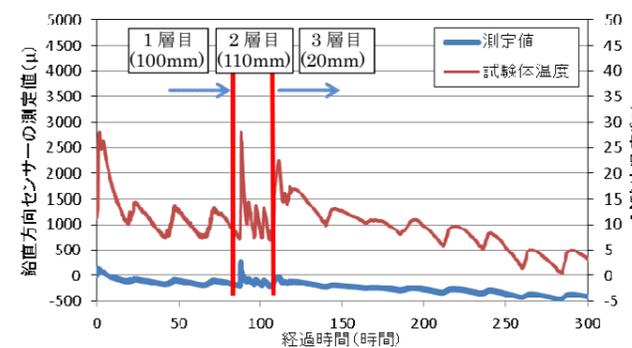
##### 1) 実験 A と実験 B とでの吹付厚さの違いの比較

##### 【実験 A (吹付厚さ 230 mm)】

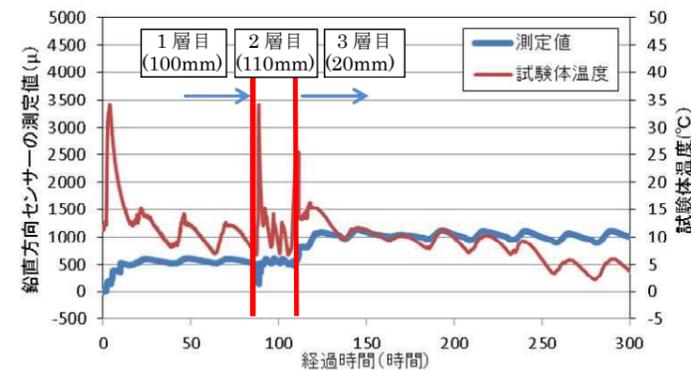
- ① 端部である測定 5 において、1 層目、2 層目の吹付施工時、鉛直方向センサー (はく離しようとする方向) にひずみが発生し、3 層目以降は大きな変動はない。目視でははく離が確認されている。
- ② その他の測点 1~4 において鉛直方向センサーにひずみはほとんど生じていない。代表的な測点 1、3、5 を以下に示す。



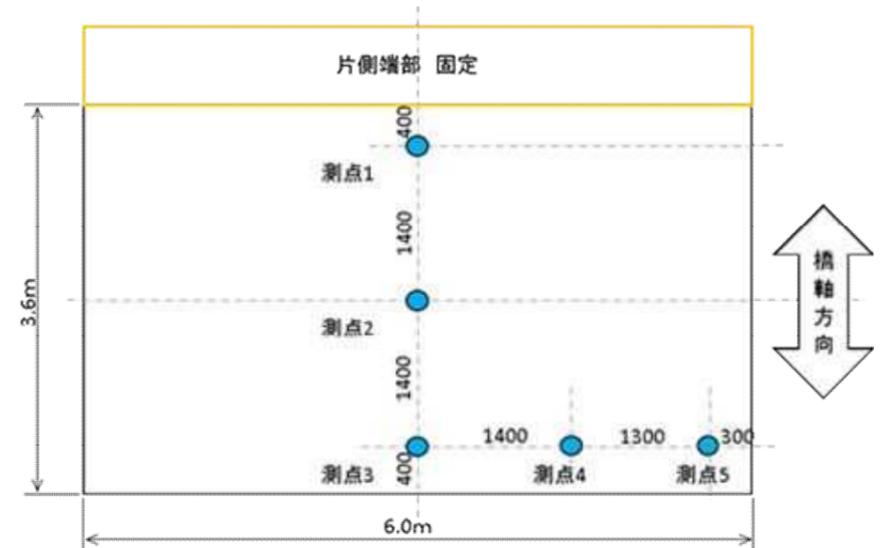
(1) 測点 1



(3) 測点 3



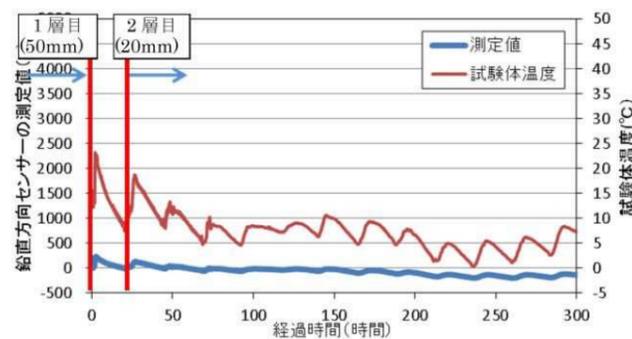
(5) 測点 5



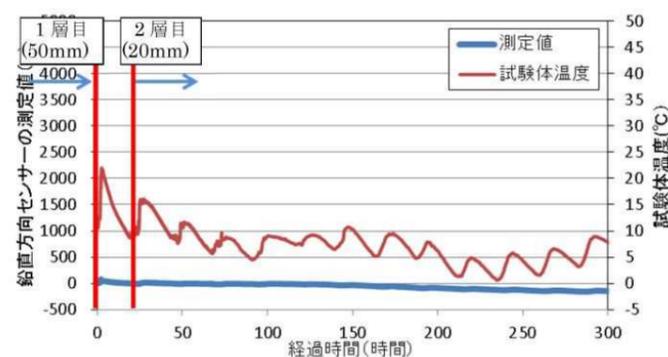
測点 5 のはく離状況の写真 (隙間 0.3mm)

##### 【実験 B (吹付厚さ 70 mm)】

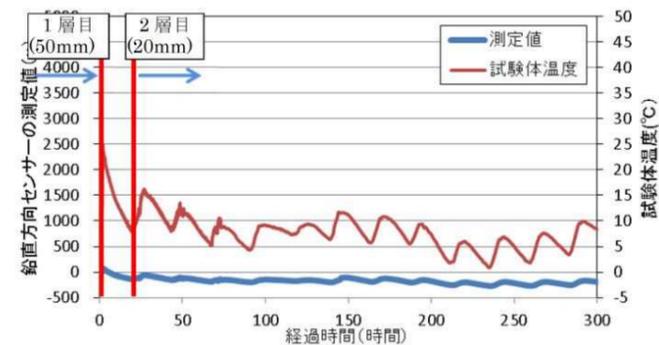
- ① 測点 1~5 において鉛直方向センサーにひずみはほとんど生じていない。代表的な測点 1、3、5 を以下に示す) また端部でも目視でははく離は確認されていない。



(1) 測点 1



(3) 測点 3



(5) 測点 5

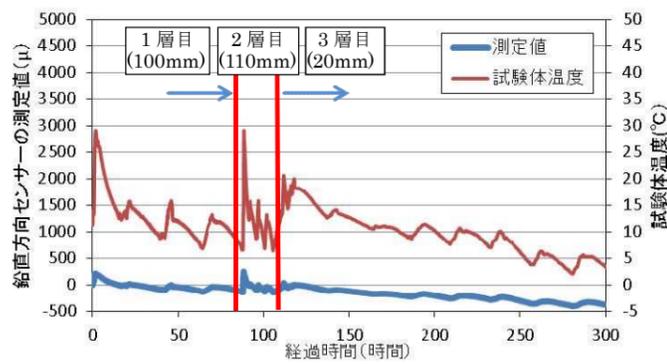


測点 5 の写真 (隙間なし)

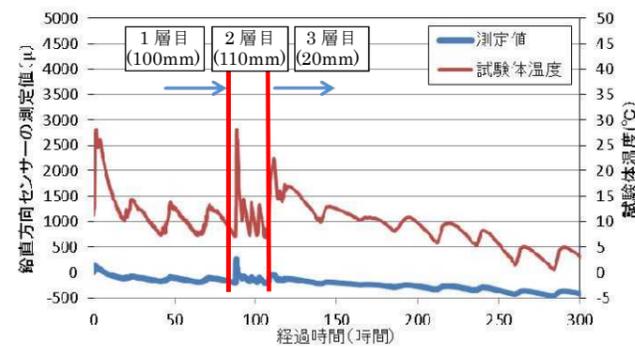
## 2) 実験 A と実験 C とでのブラスト投射密度の違いの比較

### 【実験 A (吹付厚さ 230 mm、ブラスト投射密度 75 kg/m<sup>2</sup>)】

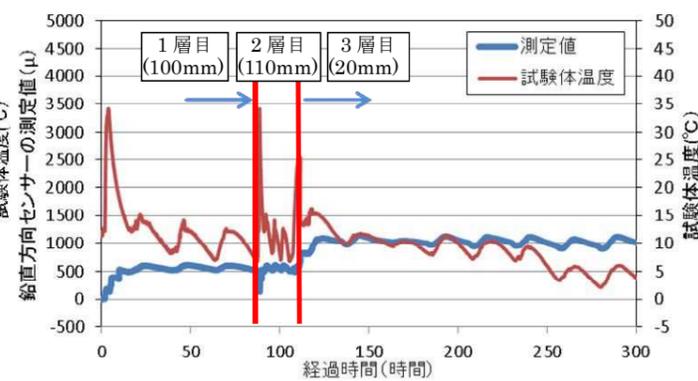
- ① 端部である測定 5 において、1 層目、2 層目の吹付施工時、鉛直方向センサー（はく離しようとする方向）にひずみが発生し、3 層目以降は大きな変動はない。目視でははく離が確認されている。
- ② その他の測点 1～4 において鉛直方向センサーにひずみはほとんど生じていない。代表的な測点 1、3、5 を以下に示す。



(1) 測点 1



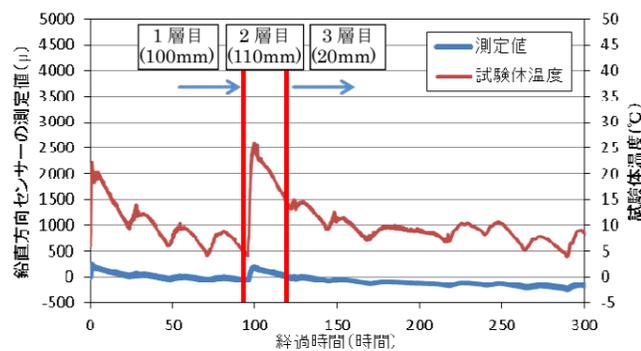
(3) 測点 3



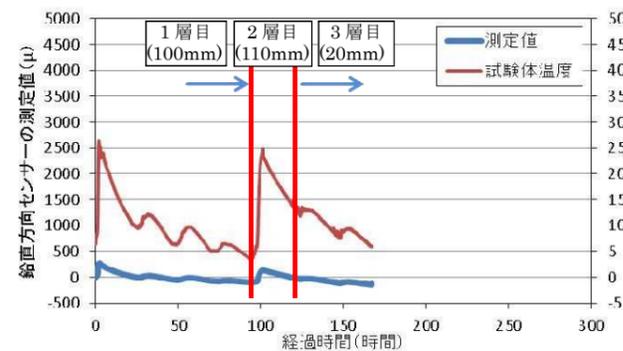
(5) 測点 5

### 【実験 C (吹付厚さ 230 mm、ブラスト投射密度 150 kg/m<sup>2</sup>)】

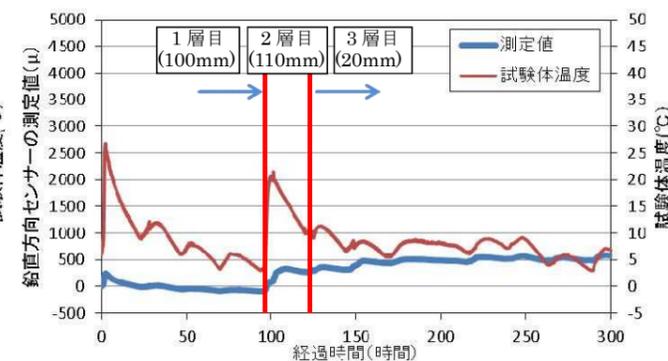
- ① 端部である測定 5 において、2 層目の吹付によって、1 層目の温度が上昇・下降し、これにより膨張・収縮することで、施工の直後に鉛直方向センサー（はく離しようとする方向）にひずみが発生し、3 層目以降は大きな変動はない。ひずみは実験 A と比べて値は小さいが、目視でははく離が確認されている。
- ② 測点 1～4 において鉛直方向センサーにひずみはほとんど生じていない。代表的な測点 1、3、5 を以下に示す。



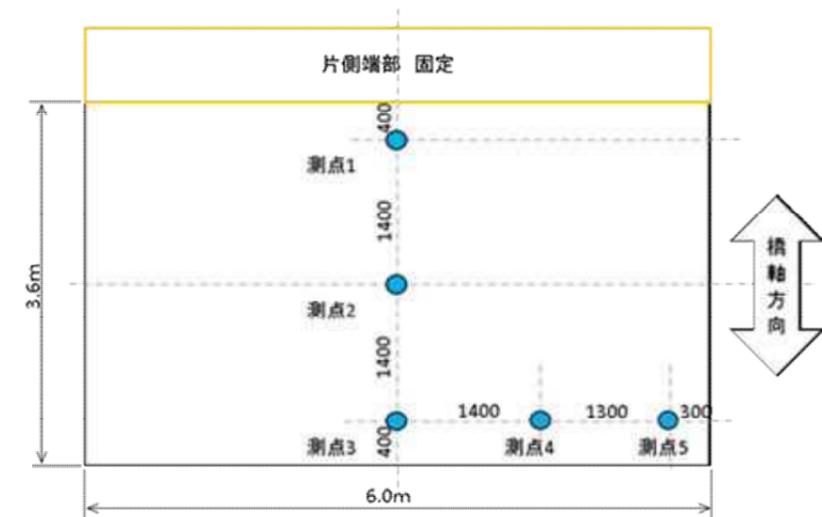
(1) 測点 1



(3) 測点 3



(5) 測点 5

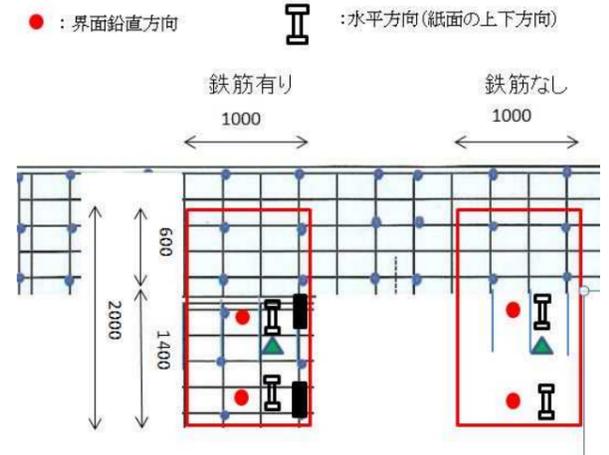


測点 5 のはく離状況の写真  
(隙間 0.3mm)



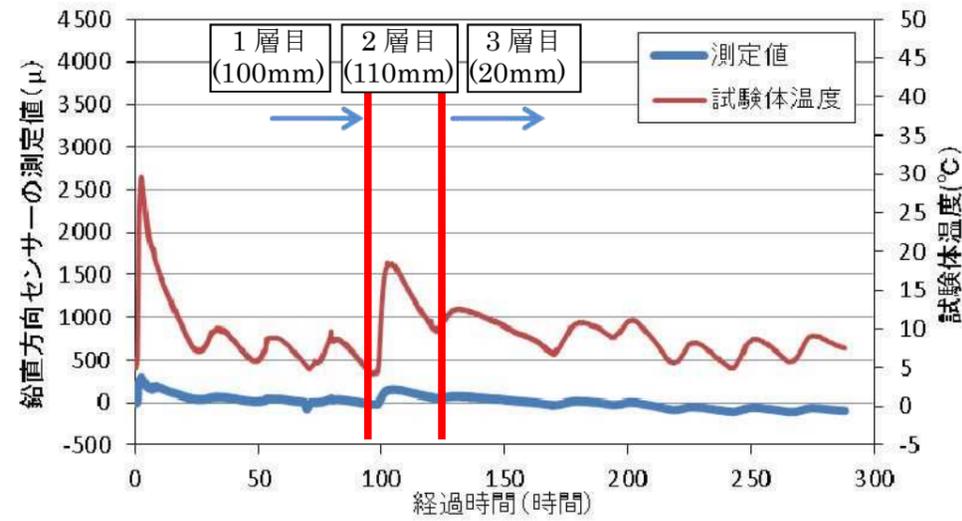
測点 5 の写真  
(隙間 0.4mm)

### 3) 実験Dでの鉄筋（水平方向のずれ止め）の有り無しの比較

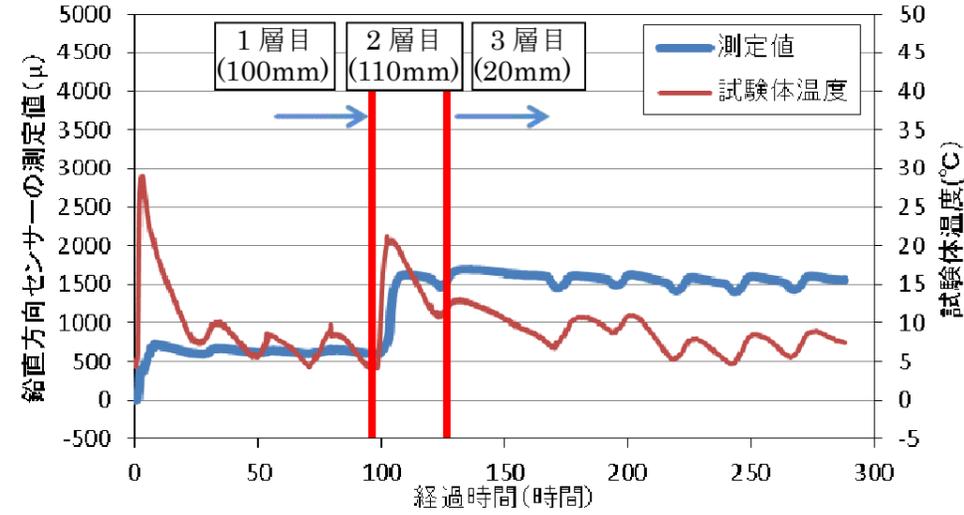


#### 【鉄筋あり】

- ① 端部において1層目、2層目施工時に鉛直方向センサー（はく離しようとする方向）にひずみが発生し、3層目以降は大きな変動はない。目視でははく離が確認されている。
- ② 固定部は鉛直方向センサーにひずみはほとんど生じていない。



(1) 中央部 (鉄筋あり)



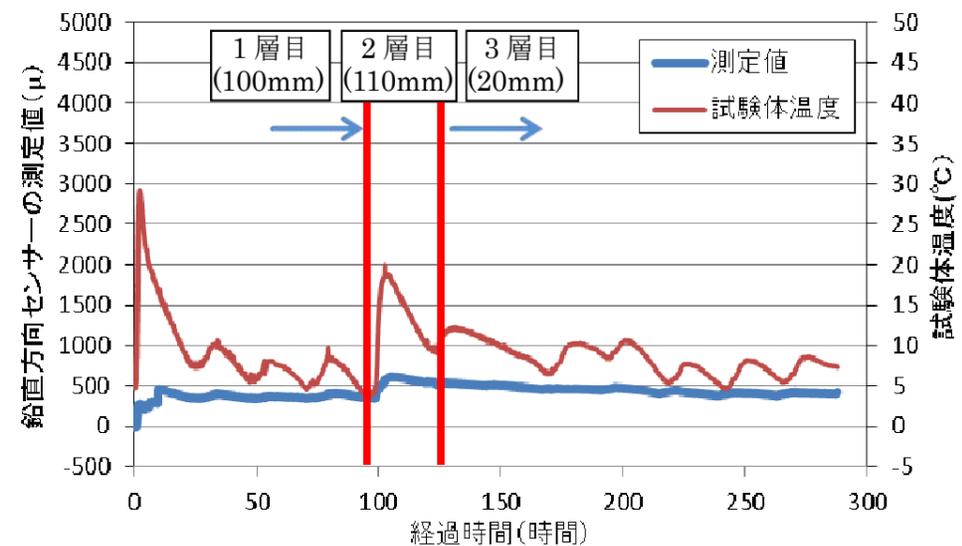
(2) 端部 (鉄筋あり)



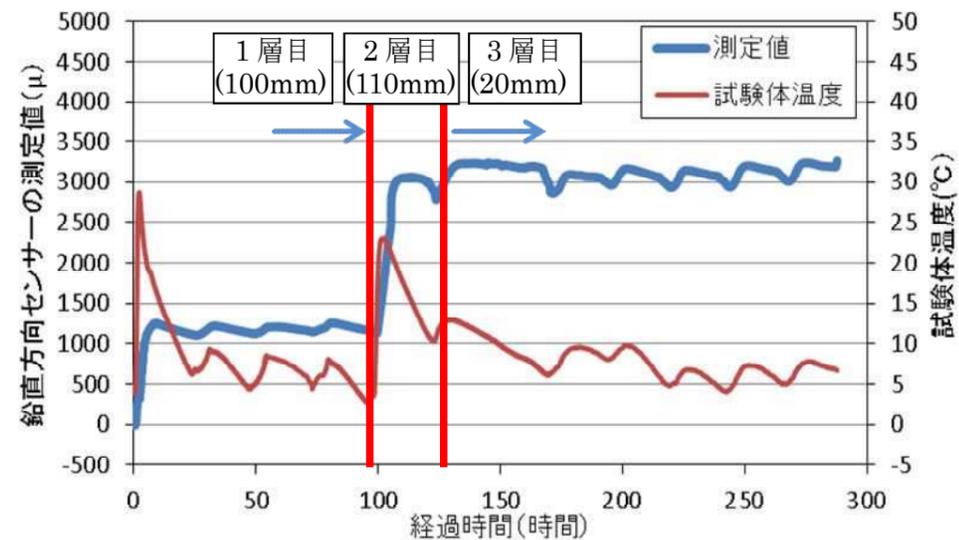
端部の拘束鉄筋ありの写真  
(隙間 0.4mm)

#### 【鉄筋なし】

- ① 端部において1層目、2層目施工時に鉛直方向センサー（はく離しようとする方向）にひずみが発生し、3層目以降は大きな変動はない。センサーのひずみおよび目視によるはく離は、鉄筋ありの場合と比較して大きい。
- ② 固定部は鉛直方向センサーにひずみが生じている。



(1) 中央部 (鉄筋なし)



(2) 端部 (鉄筋なし)



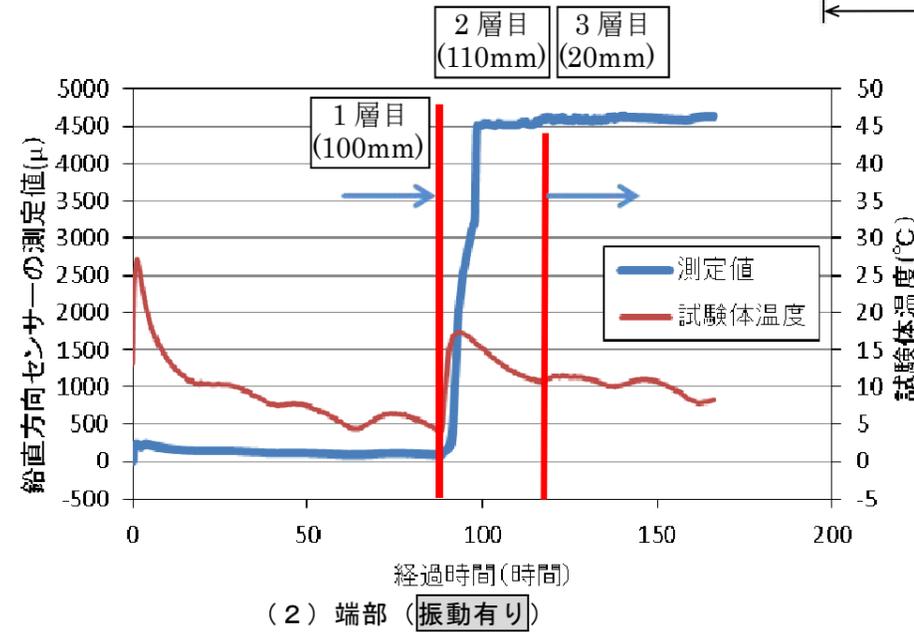
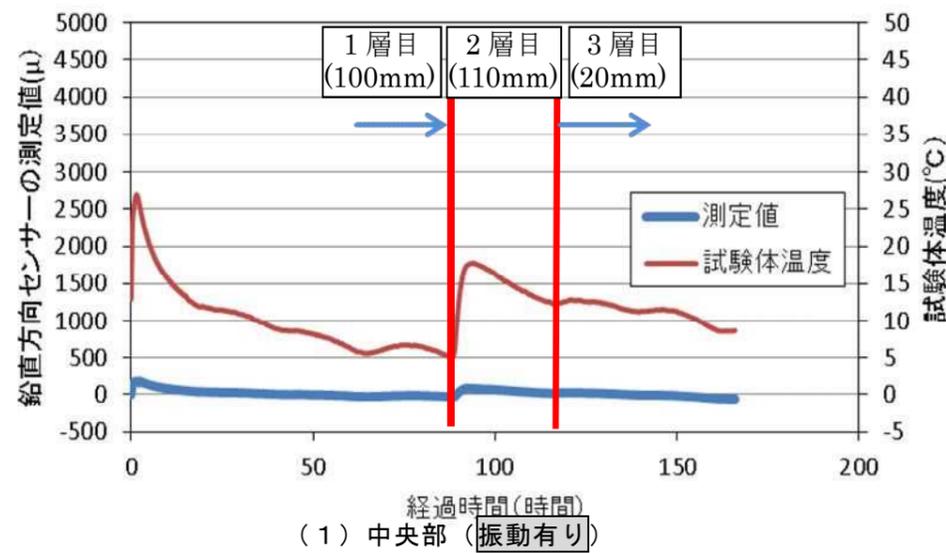
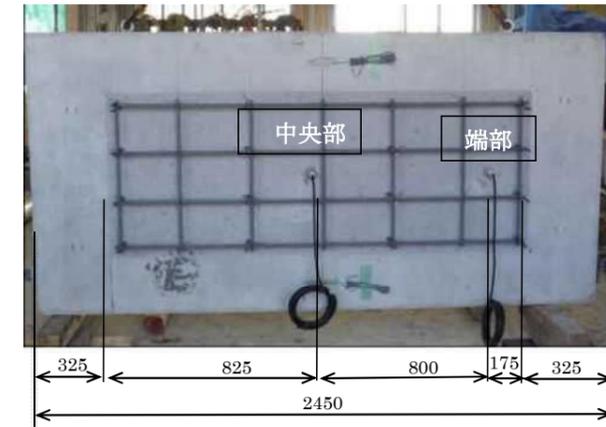
端部の拘束鉄筋なしの写真  
(隙間 1.4mm)

(2) コンクリート硬化時の振動の影響 (振動実験)

1) 実験 I-1 と実験 II-1 での振動の有り無しの比較 (吹付厚さ 230 mm)

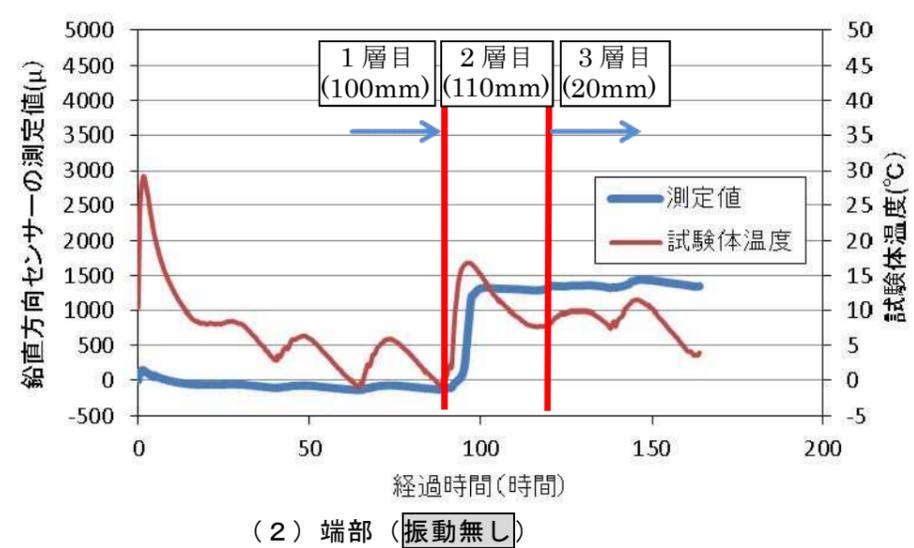
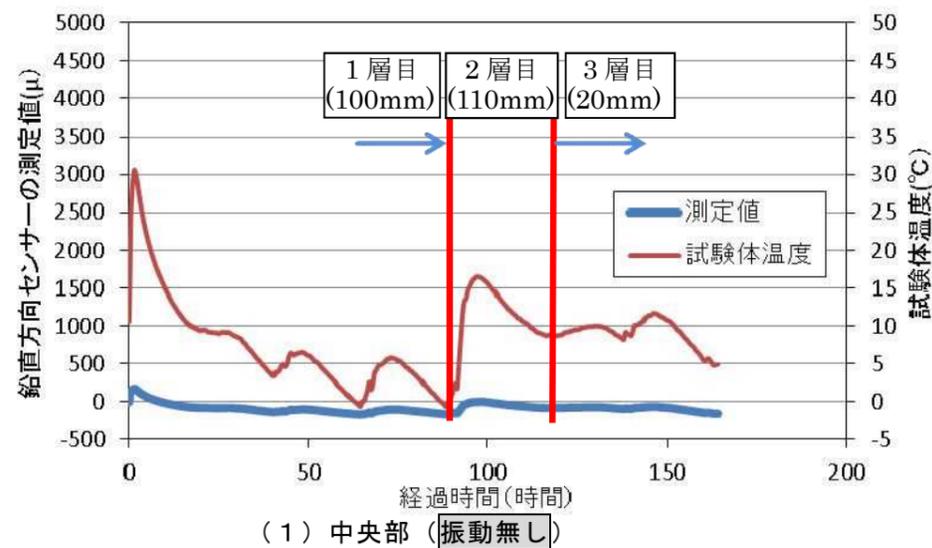
【実験 I-1 (振動あり)】

- ① 端部において 2 層目施工時に鉛直方向センサー (はく離しようとする方向) にひずみが発生し、3 層目以降は大きな変動はない。また、目視でははく離が確認されている。
- ② 中央部では、鉛直方向センサーにひずみはほとんど生じていない。



【実験 I-2 (振動なし)】

- ① 端部において 2 層目施工時に鉛直方向センサー (はく離しようとする方向) にひずみが発生し、3 層目以降は大きな変動はない。また、目視でははく離が確認されている。中央部では、鉛直方向センサーにひずみはほとんど生じていない。

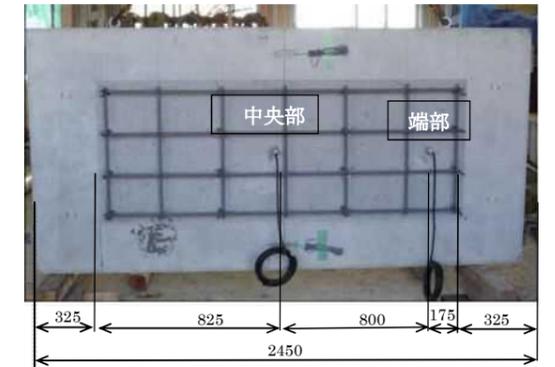
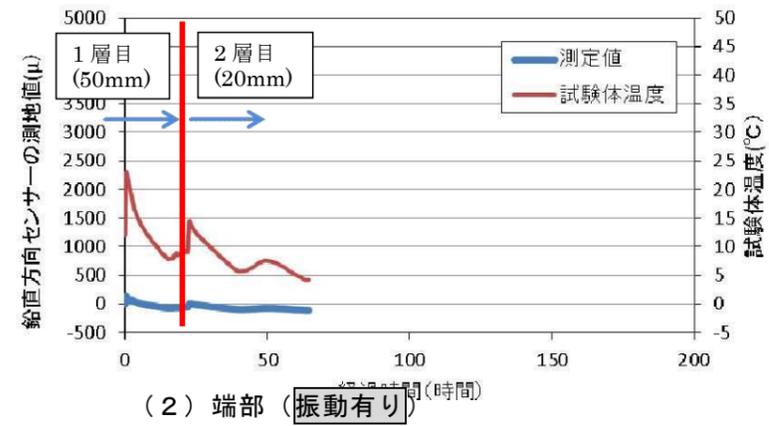
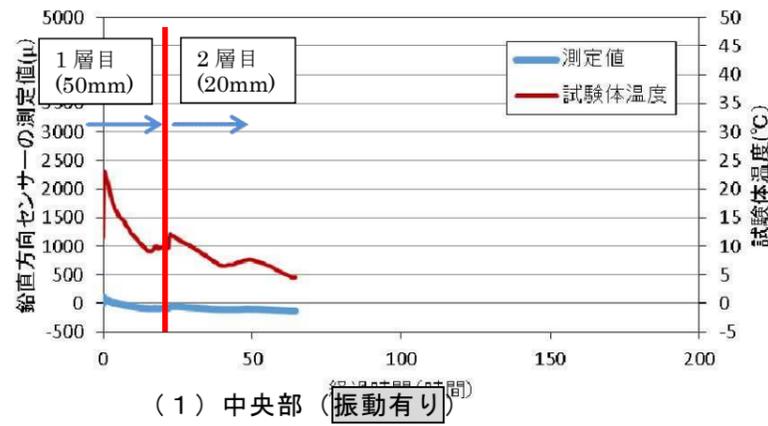


振動有りの場合、振動無しの場合と比較して鉛直センサーのひずみは大きく、目視確認ではく離の値 (隙間) は大きい。

2) 実験Ⅱ-1 と実験Ⅱ-2 での振動の有り無しの比較 (吹付厚さ 70 mm)

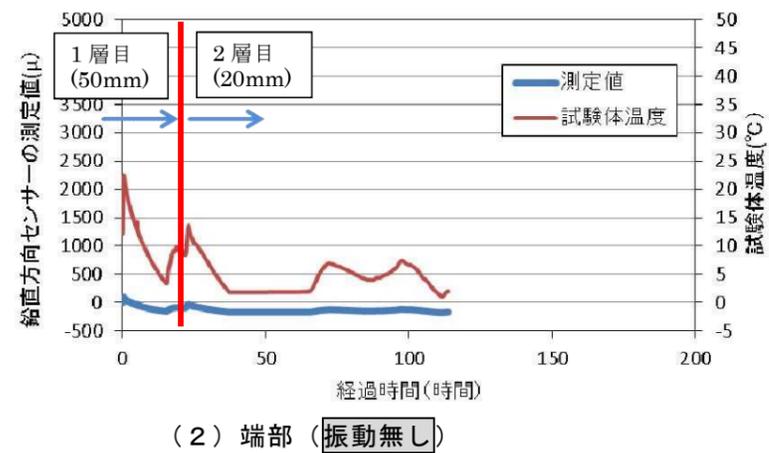
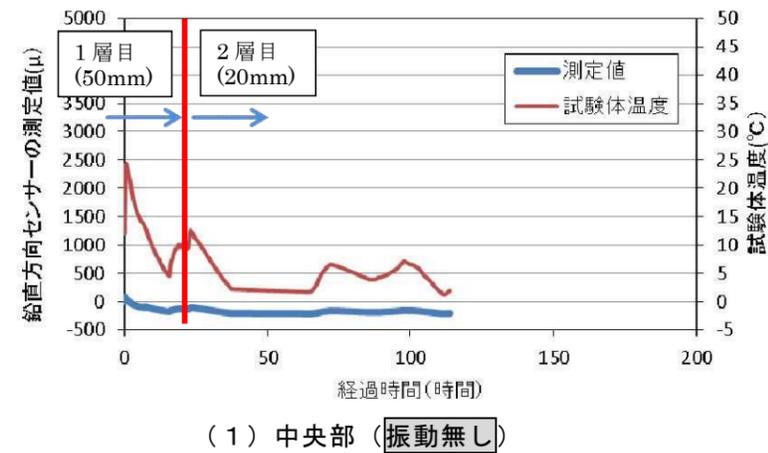
【実験Ⅱ-1 (振動あり)】

① 端部、中央部とも鉛直方向センサー (はく離しようとする方向) にひずみはほとんど生じておらず、目視でははく離は確認されていない。



【実験Ⅱ-2 (振動なし)】

② 端部、中央部とも鉛直方向センサー (はく離しようとする方向) にひずみはほとんど生じておらず、目視でもはく離は確認されていない。

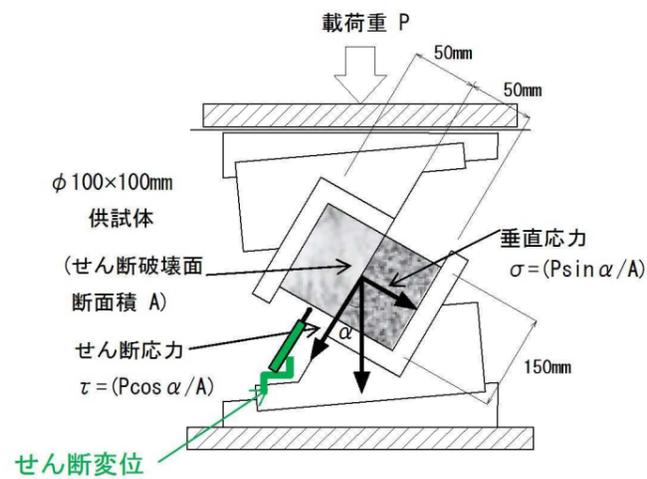


## 2. 実験による界面強度（実物大実験 A、B、C）

### (1) 水平方向の付着強度（せん断強度）の比較

- ① せん断強度は、吹付厚さやブラスト投射密度、測点による差異はあまり見られない。
- ② せん断強度は、ばらつきはあるが、 $1.7\text{N/mm}^2 \sim 4\text{N/mm}^2$  程度の範囲となっている。
- ③ 摩擦係数は  $1.1 \sim 1.3$  程度で、ばらつきは少ない。

簡易一面せん断試験機

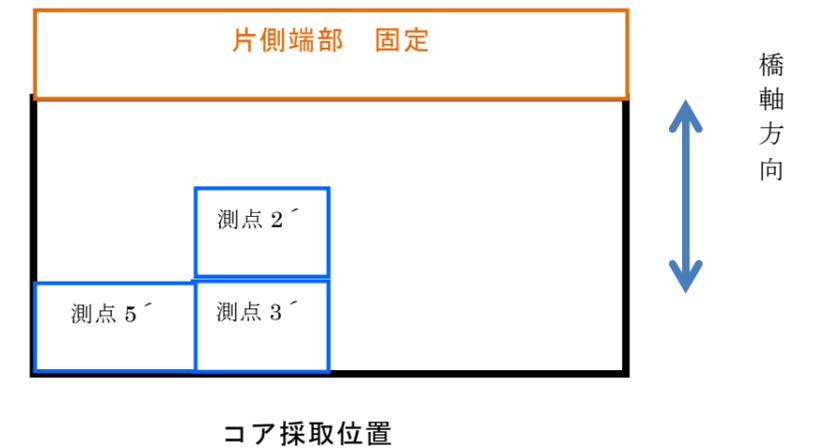


測点毎 傾斜角  $\alpha = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$

せん断強度試験結果

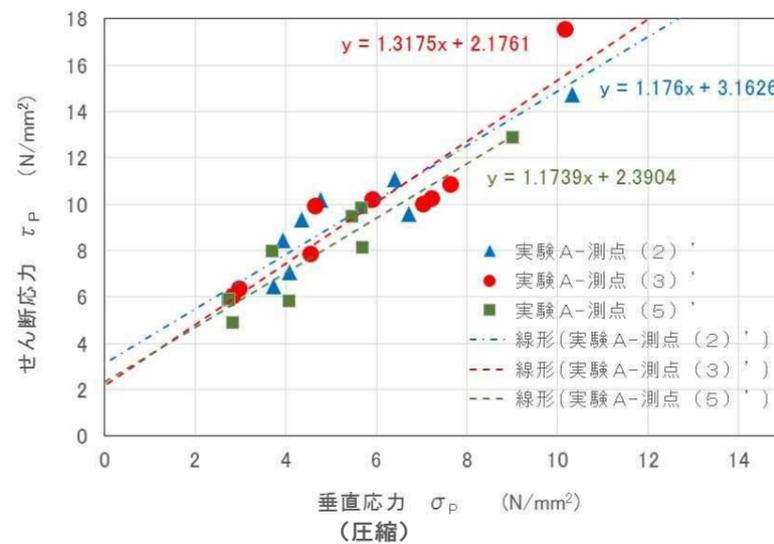
測点	実験A ・吹付厚230mm ・ブラスト投射密度 75kg/m <sup>2</sup>		実験B ・吹付厚70mm ・ブラスト投射密度 75kg/m <sup>2</sup>		実験C ・吹付厚230mm ・ブラスト投射密度 150kg/m <sup>2</sup>	
	せん断強度 $\tau_o$ (N/mm <sup>2</sup> )	摩擦係数 f [傾き]	せん断強度 $\tau_o$ (N/mm <sup>2</sup> )	摩擦係数 f [傾き]	せん断強度 $\tau_o$ (N/mm <sup>2</sup> )	摩擦係数 f [傾き]
測点(2)'	3.16	1.18	1.74	1.34	2.48	1.31
測点(3)'	2.18	1.32	3.73	1.11	3.97	1.17
測点(5)'	2.39	1.17	3.23	1.19	3.08	1.25

※せん断強度は、垂直応力0N/mm<sup>2</sup>におけるせん断応力の推定値

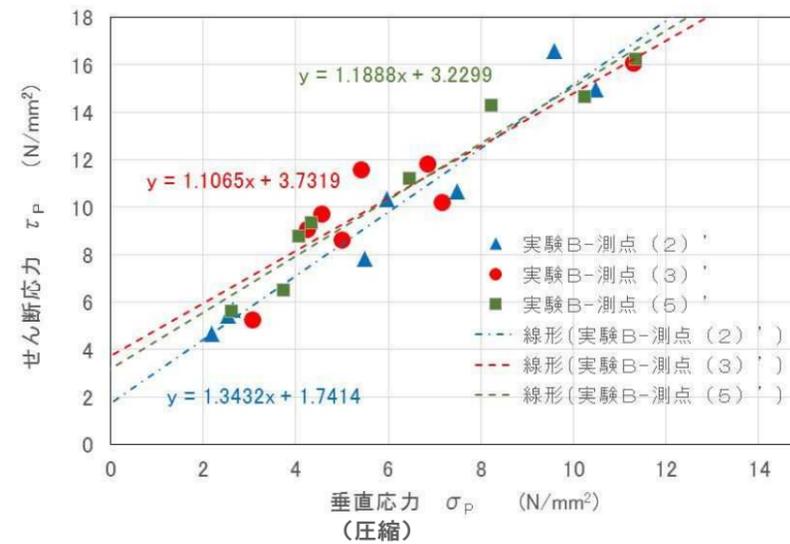


### せん断応力垂直応力との関係

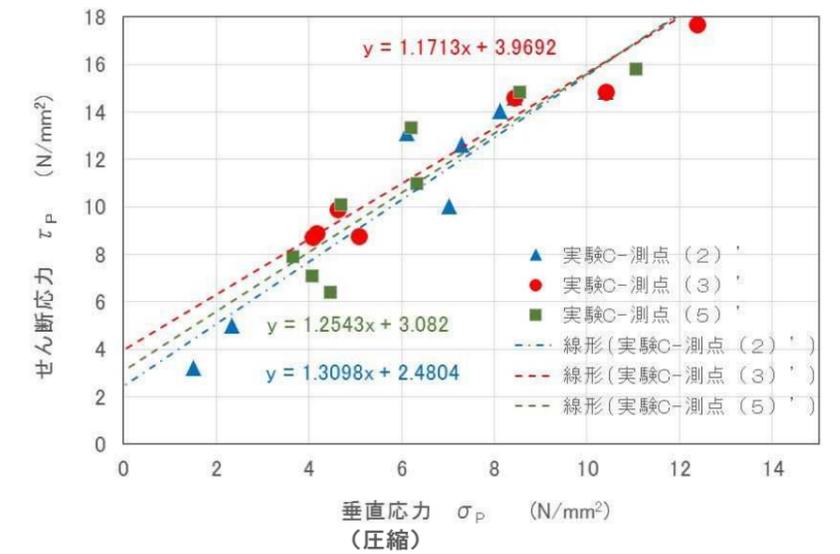
実験A（吹付厚 230mm、ブラスト投射密度 75 kg/m<sup>2</sup>）



実験B（吹付厚 70mm、ブラスト投射密度 75 kg/m<sup>2</sup>）



実験C（吹付厚 230mm、ブラスト投射密度 150 kg/m<sup>2</sup>）



## (2) 鉛直方向の接着強度の比較

破断状況が試験体によって異なり、界面の接着強度を示す値として不明な点があるため、試験体自体の引張（破断）強度として比較とする。

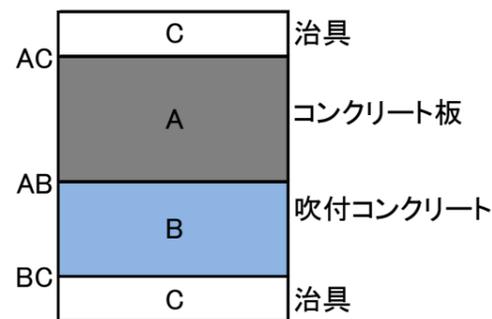
- ① 実験 A（吹付厚 230 mm）は  $0.7 \sim 1.0 \text{ N/mm}^2$ 、実験 B（吹付厚さ 70 mm）は  $1.1 \sim 1.4 \text{ N/mm}^2$  と、厚さが厚い場合、強度が低い傾向となっている。
- ② 実験 A（ブラスト投射密度  $75 \text{ kg/m}^2$ ）は  $0.7 \sim 1.0 \text{ N/mm}^2$ 、実験 C（ブラスト投射密度  $150 \text{ kg/m}^2$ ）は  $1.2 \sim 1.5 \text{ N/mm}^2$  と、ブラスト投射密度が小さい場合、強度が低い傾向となっている。



接着試験状況



コア採取位置



破断位置

橋軸方向

実験名	吹付け厚さ (mm)	ブラストの投射密度 ( $\text{kg/m}^2$ )	No.	測点	接着強度		破断状況
					各値 ( $\text{N/mm}^2$ )	平均値 ( $\text{N/mm}^2$ )	
実験A	230	75	1	測点2'	0.70	0.99	A
			2		1.11		AB
			3		1.16		AとAB
			1	測点3'	0.98	0.74	AとAB
			2		0.98		B
			3		0.27		AB
			1	測点5'	0.89	0.73	AとAB
			2		0.91		ABとB
			3		0.41		AB
実験B	70	75	1	測点2'	1.02	1.35	AB
			2		1.36		AB
			3		1.68		AとAB
			1	測点3'	1.38	1.41	AB
			2		1.59		A
			3		1.27		ABとB
			1	測点5'	1.16	1.14	AとAB
			2		1.32		AとAB
			3		0.95		AB
実験C	230	150	1	測点2'	0.89	1.48	B
			2		1.97		B
			3		1.58		B
			1	測点3'	1.27	1.26	B
			2		1.32		B
			3		1.18		B
			1	測点5'	1.52	1.25	AB
			2		1.11		AとAB
			3		1.11		AB



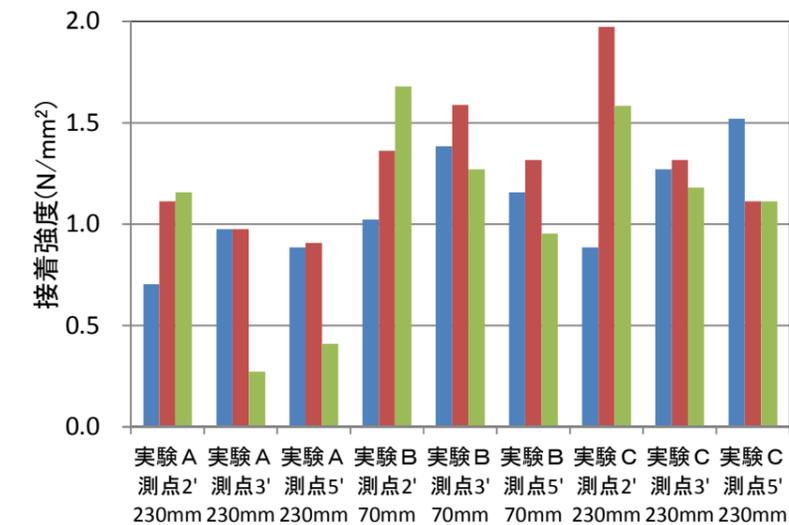
破断位置 A (コンクリート板)



破断位置 AB (界面)



破断位置 B (吹付けコンクリート)

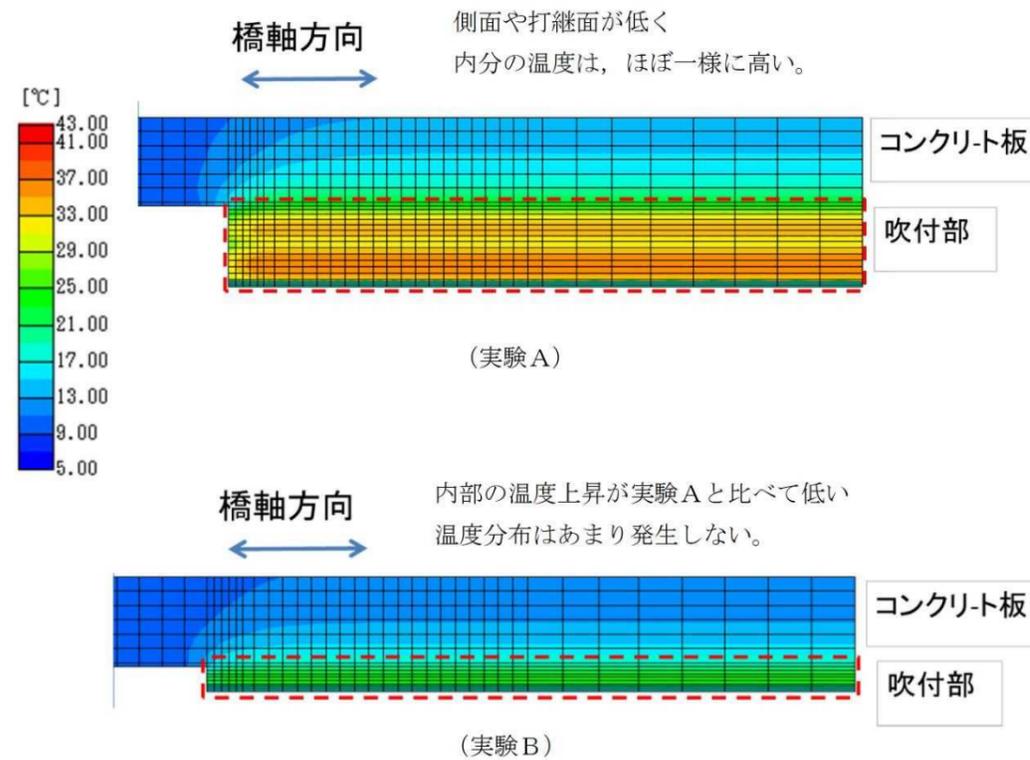


実験ケースおよび測点と強度の関係

### 3. 解析による界面での温度等の影響による挙動

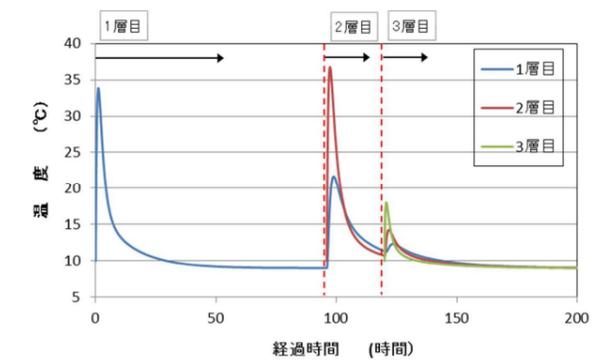
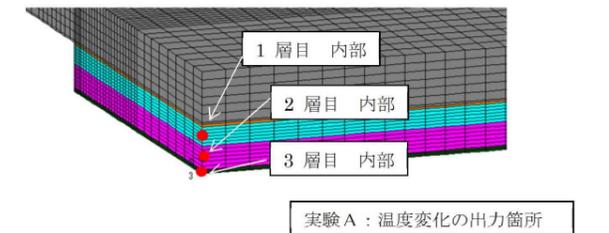
#### (1) 吹付厚さ 230 mmと 70 mmの温度変化の比較

- ① 積層で吹付けることにより、いずれも前層は次層の温度の影響を受け、いったん低下した温度が上昇する。
- ② 吹付厚が 230 mmの場合の 1 層目は、2 層目吹付厚が 110 mmと厚いため 20°C程度まで上昇する。
- ③ 吹付厚が 70 mmの場合の 1 層目は、2 層目吹付厚が 20 mmと薄いため温度上昇は 13°C程度である。

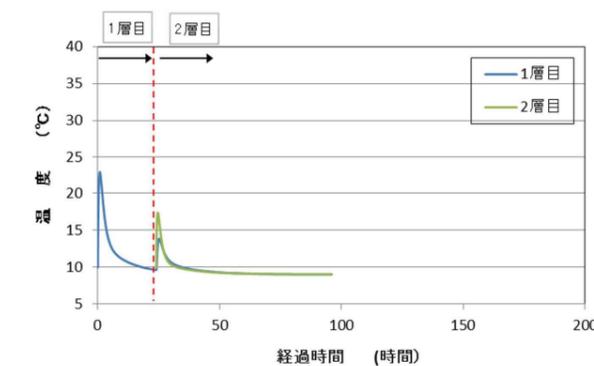
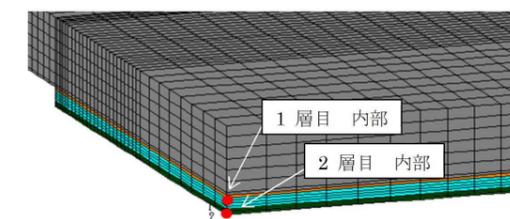


注) 1 層目, 2 層目, 3 層目によって  
最高温度に達した材齢は異なる

上昇した最高温度の断面分布 (経験値図)



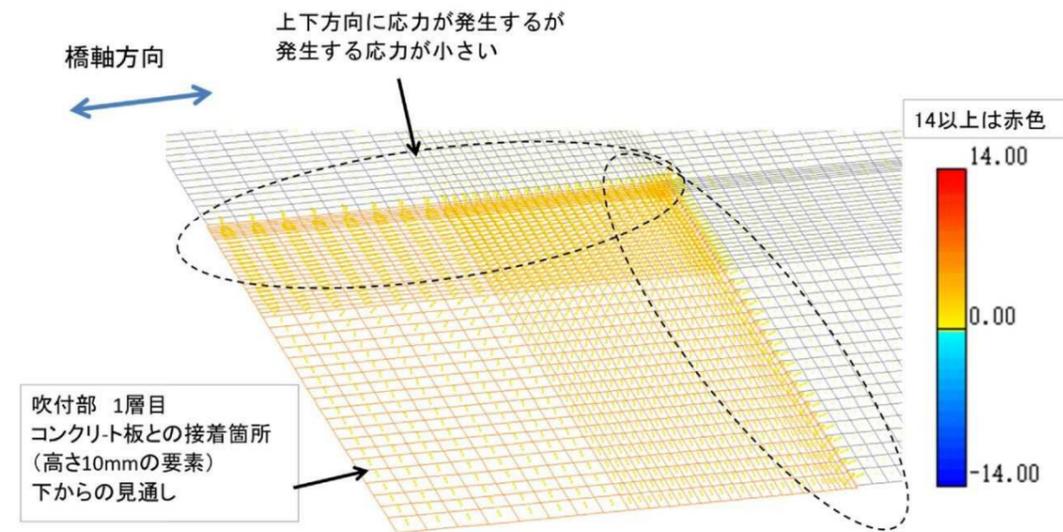
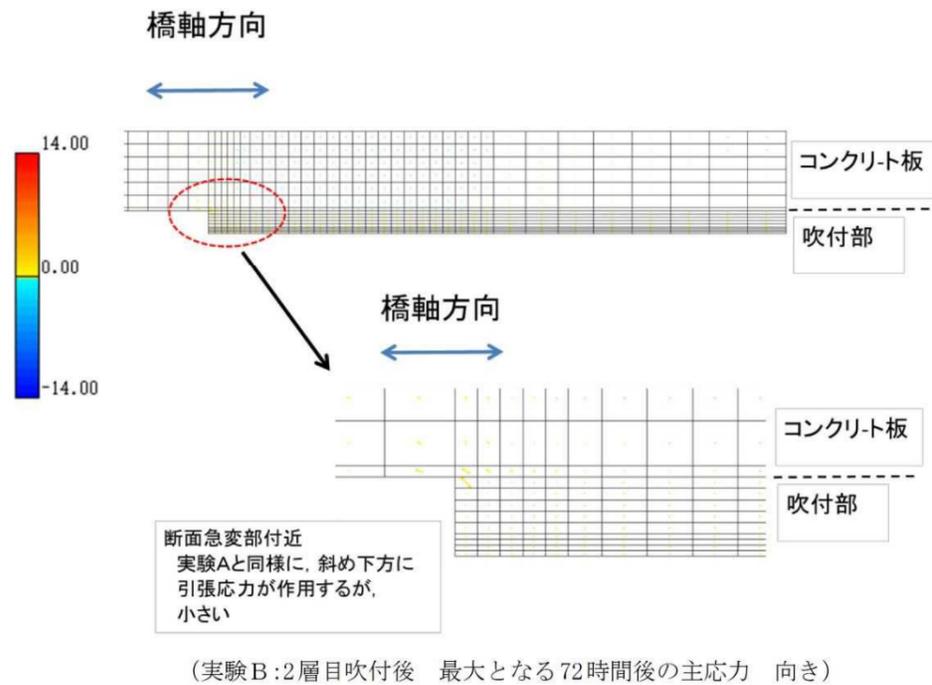
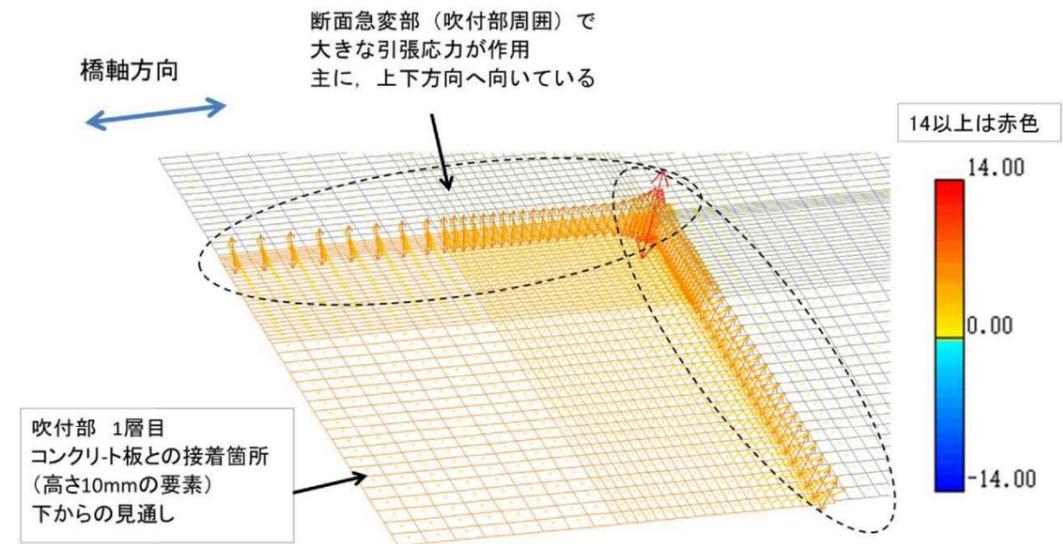
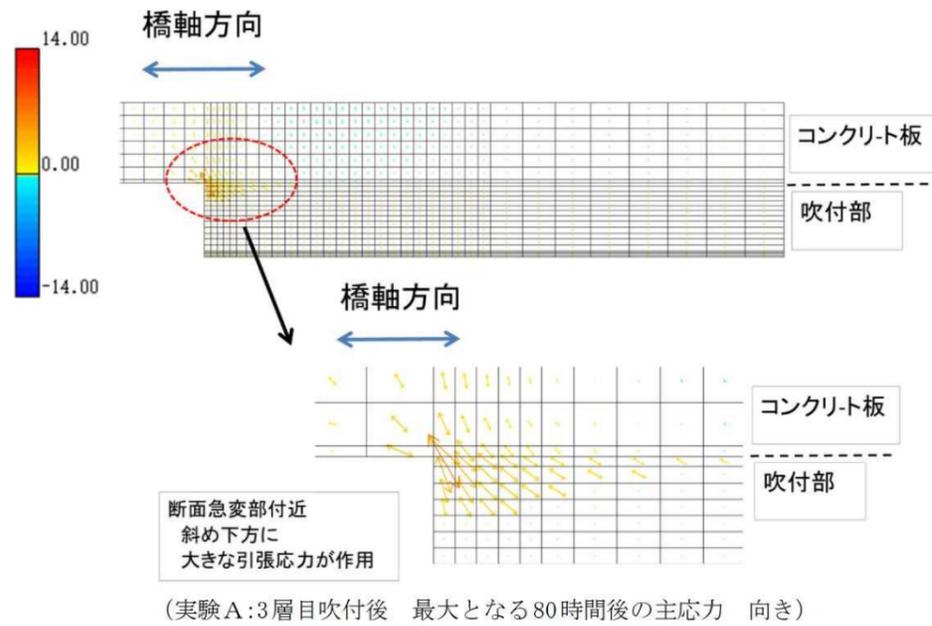
(実験 A : 吹付厚さ 230mm 各層の温度変化)



(実験 B : 吹付厚さ 70mm 各層の温度変化)

(2) 吹付厚さ 230 mmと 70 mmの界面での発生応力（主応力）の作用方向の比較

① いずれも断面急変部に斜め下方向に応力が作用しており、鉛直方向：水平方向＝4：1程度である。

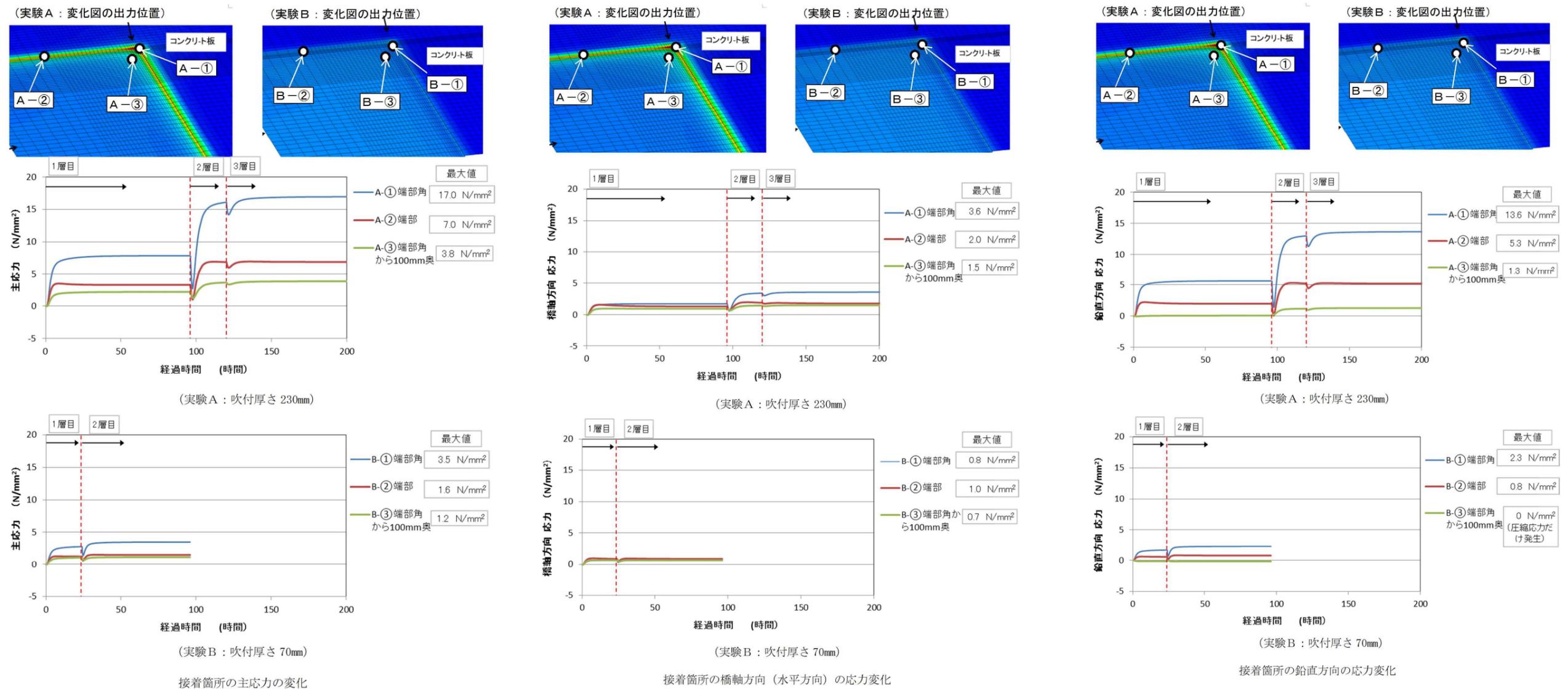


内部の主応力の向き

接着箇所の主応力の向き

### (3) 吹付厚さ 230 mmと 70 mmの界面での発生応力（主応力）の比較

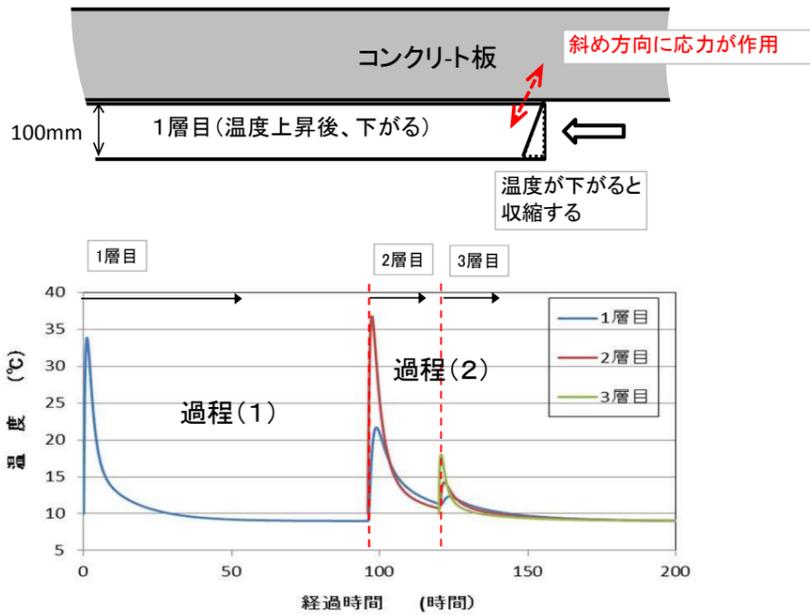
- ① いずれも 2 層目吹付施工後に応力が大きくなる。  
 (2 層目の吹付後、1 層目の収縮後に 2 層目の収縮の力が更に加わり、界面に応力が発生)
- ② いずれも端部角において、発生する応力が最大となる。
- ③ いずれも端部角から 100 mm 内部の位置では緩和される傾向にある。
- ④ いずれも端部では端部角の半分程度の応力となっている。
- ⑤ 吹付厚さ 230 mm は吹付厚さ 70 mm に対して、3~5 倍の応力が発生している。



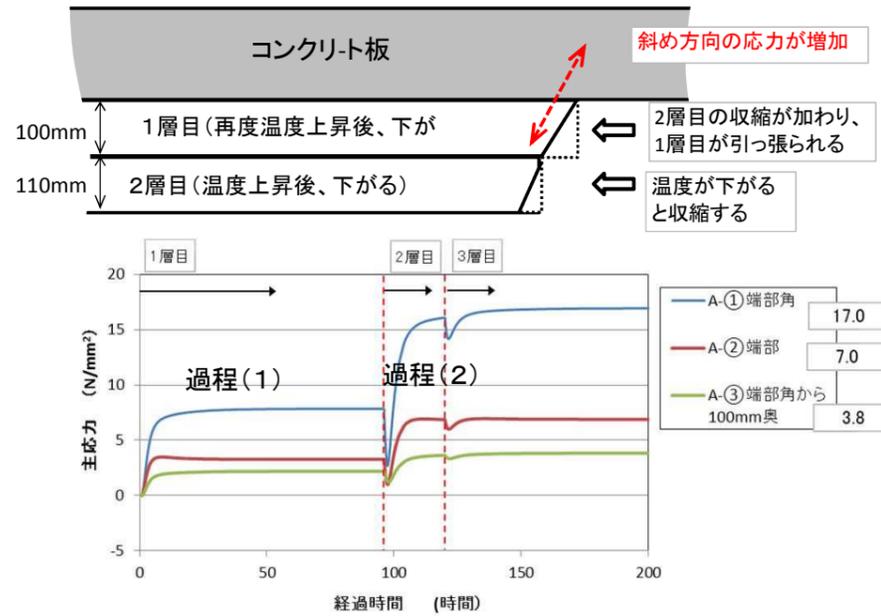
# 温度応力による端部に界面の挙動イメージ

## 【1. 吹付厚 230mm(100mm+110mm+20mm)の場合】

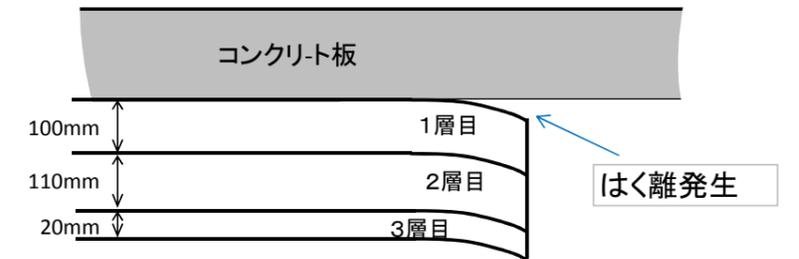
**過程1.** 1層目は吹付厚100mmのため温度が35℃程度まで上昇し、その後降下、収縮する。  
→温度降下による収縮で端部に斜め方向に応力が作用



**過程2.** 2層目は吹付け時に温度が35℃程度まで上昇し、その後降下。  
1層目は2層目の吹付けの影響で再度温度22℃程度に上昇し、降下。  
→1層目の収縮に、2層目の収縮がさらに加わる。  
→端部の応力が増加する

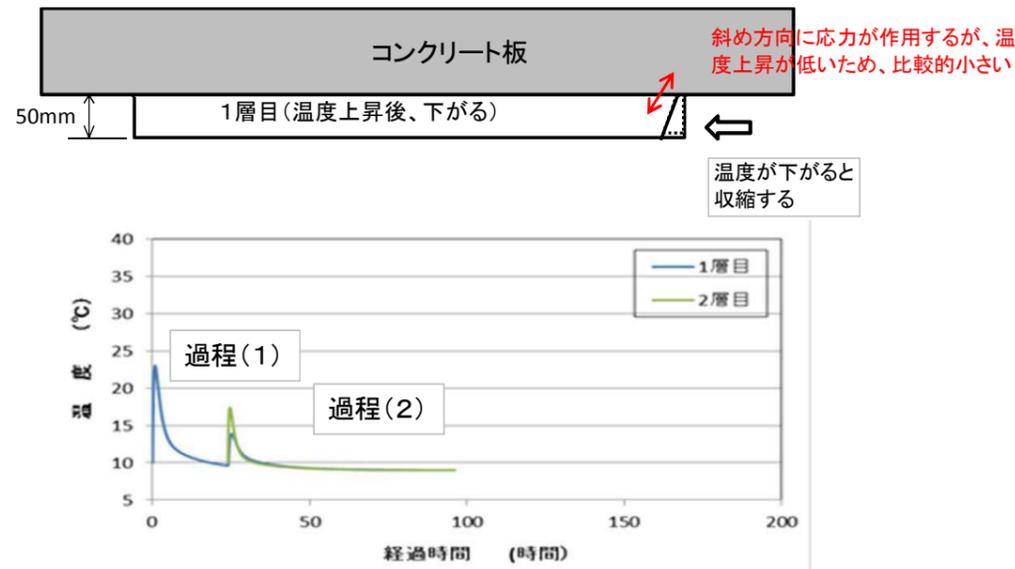


**過程3.** 2層目の収縮が加わることで、応力が増加しはく離が発生する。

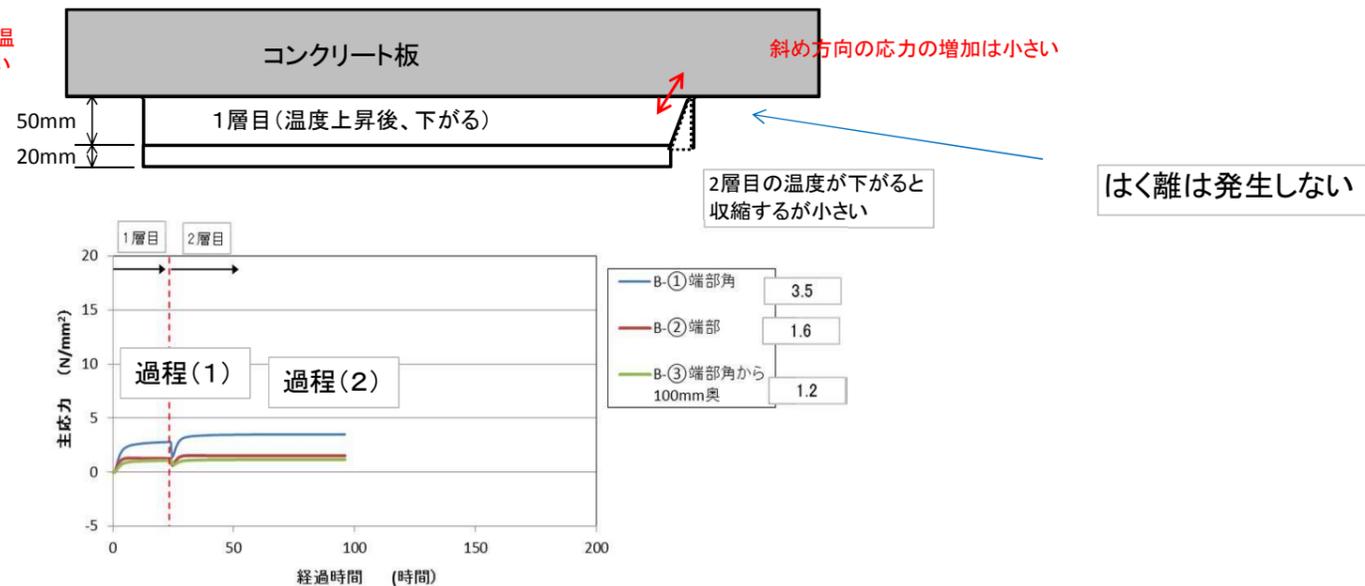


## 【2. 吹付厚 70mm(50mm+20mm)の場合】

**過程1.** 1層目は吹付厚50mmのため温度が25℃程度まで上昇し、その後降下、収縮する。  
→温度降下による収縮で端部に斜め方向に応力が作用



**過程2.** 2層目は吹付け時に温度が17℃程度に上昇し、その後降下する。  
1層目は2層目の吹付けの影響で再度温度が12℃に上昇し、降下する。  
→2層目は20mmと薄く、温度上昇、降下後の収縮は小さい



#### 4. 実験による界面強度と解析による発生応力

(1) 実物大実験でコア採取した試験体の界面の強度と、温度応力解析により界面で発生する応力の関係を以下に整理する。

(2) 解析による界面の発生応力と実験での界面の強度を比べると、鉛直および水平方向とも吹付厚 230 mmの場合、発生応力が界面の強度を上回っている傾向がある一方、吹付厚 70mm の場合は、界面の強度が概ね上回っている傾向がみられる。

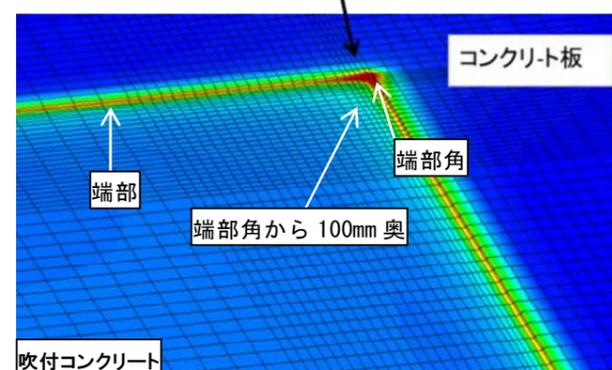
(N/mm<sup>2</sup>)

方 向	区 分	吹付厚さ 230 mm			吹付厚さ 70 mm		
		端部	端部角から 100mm 奥	端部角	端部	端部角から 100mm 奥 (圧縮のみ)	端部角
鉛直方向	発生応力※	5.3	1.3	13.6	0.8	0	2.3
	界面の強度（接着力） 試験体の引張破断強度	0.73~0.99			1.14~1.41		
水平方向	発生応力※	2.0	1.5	3.6	1.0	0.7	0.8
	界面の強度（付着力）	2.18~3.16			1.74~3.73		

数値には、実験条件や材料等によるばらつきその他、解析における各種物性値の外挿による誤差が含まれる。

※：発生応力の値の位置は下図参照

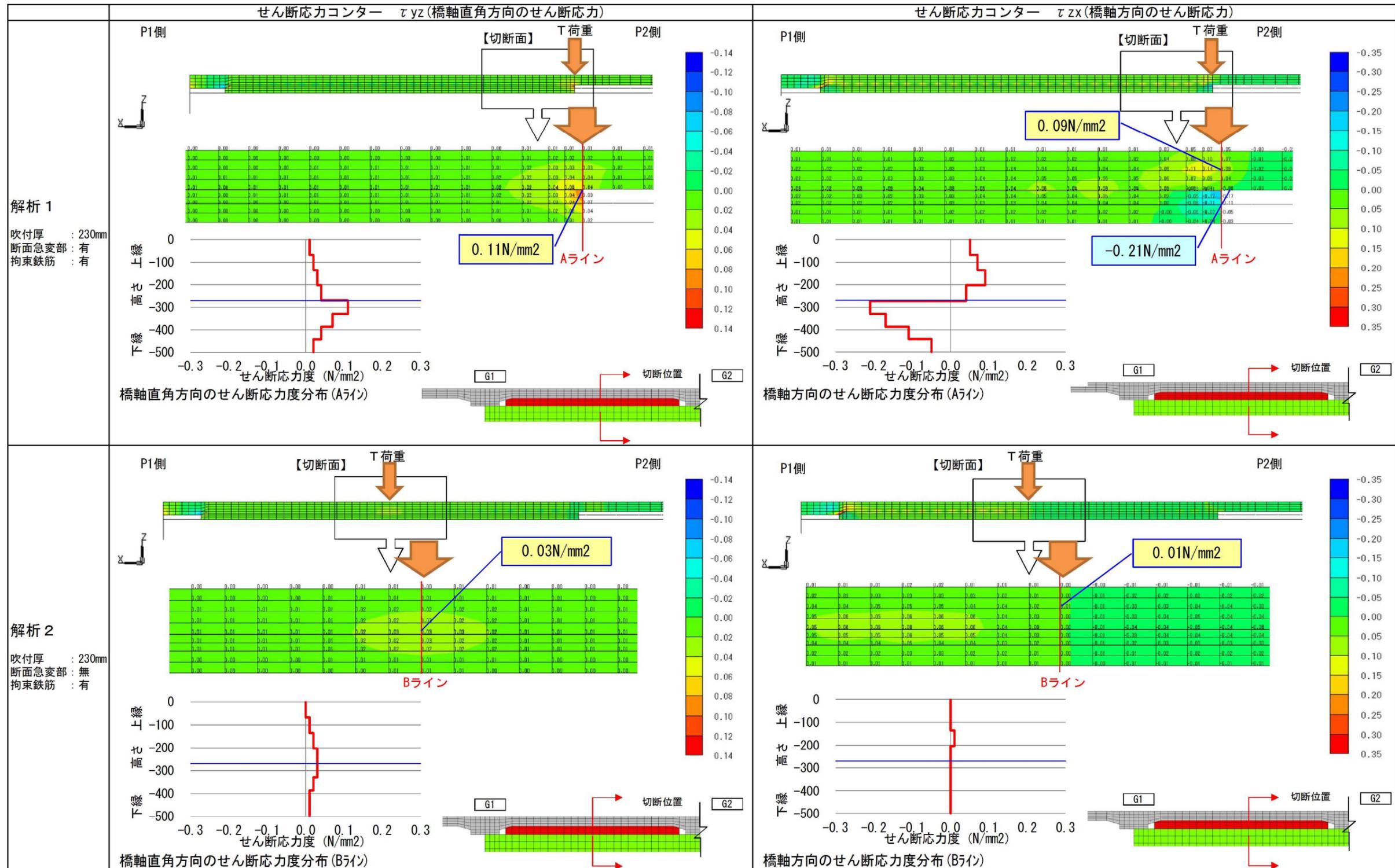
「発生応力の出力位置図」



## 5. 解析による断面急変部での輪荷重の影響によるせん断力

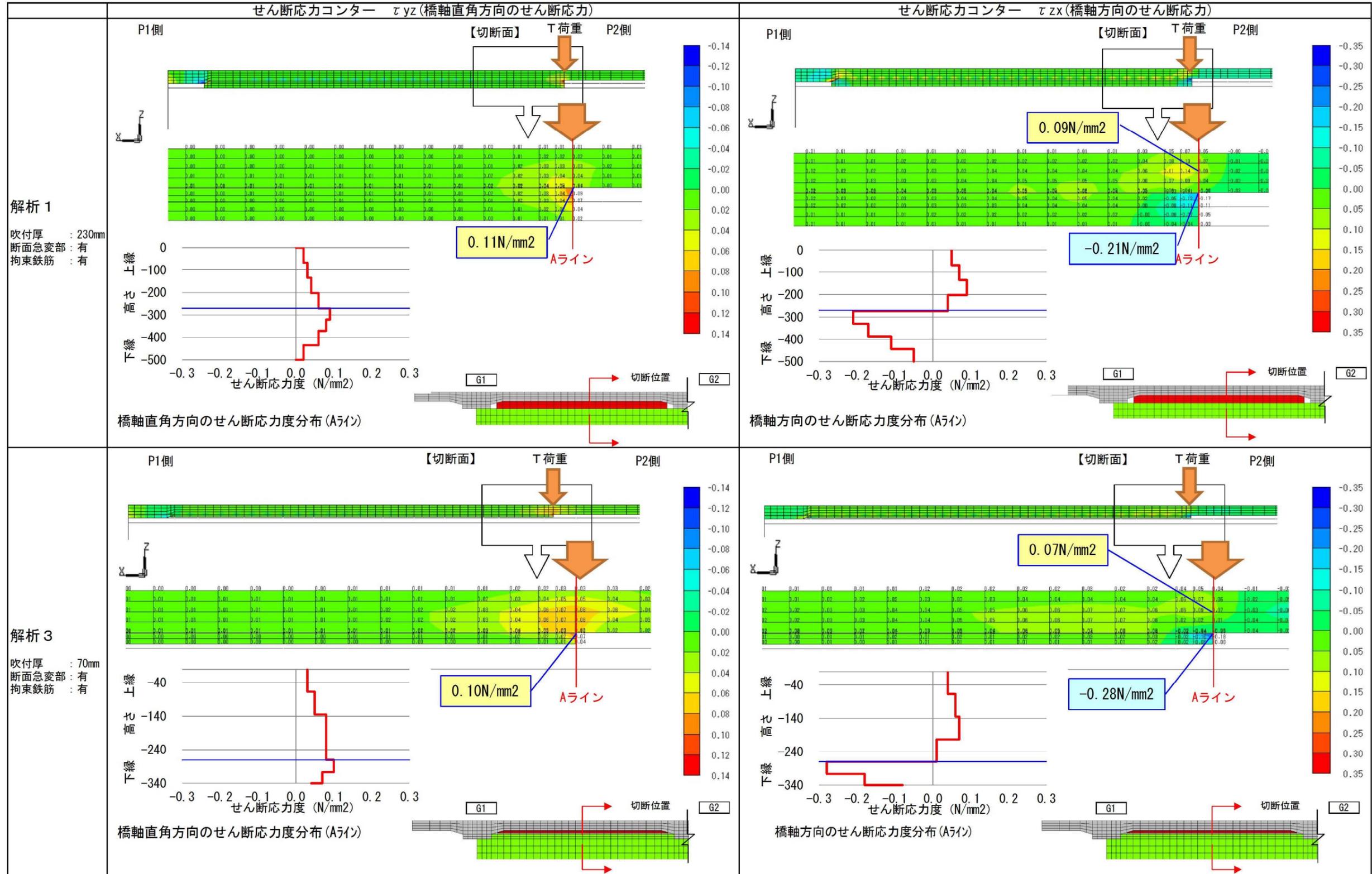
### (1) 吹付厚さ 230 mmで断面急変部有り無しの場合の比較

- ① 断面急変部がある場合、水平方向にずれようとするせん断力が  $0.3\text{N/mm}^2$  程度発生
- ② 断面急変部がない場合、水平方向にずれようとするせん断力は小さい。



(2) 吹付厚さ 230 mm と 70 mm の場合の断面急変部で発生応力の比較

① 吹付厚さ 230 mm の場合 0.3N/mm<sup>2</sup> 程度、70 mm の場合 0.35N/mm<sup>2</sup> 程度と差は少ない。



#### IV 実験、解析結果の考察

実物大実験、振動実験および解析結果より以下のとおり考察する。

- (1) 吹付厚 230 mmの場合、吹付施工後の初期の段階で、端部にはく離が生じる可能性が高い。
- (2) 吹付厚 230 mmの場合、1層目の吹付後（厚さ 100 mm）の温度降下時の収縮により界面に応力が生じ、2層目（110 mm）の吹付け後の収縮による影響がさらに加わることで、界面のひずみや発生する応力は2層目の吹付施工以降、大きくなる傾向がある。
- (3) 吹付厚が 230 mmの場合、コンクリート硬化時の振動は端部のはく離に影響を与えることが推定される。
- (4) 吹付厚 70 mmの場合、吹付厚が1層目 50mm、2層目 20mm と薄いため上昇温度が低く、温度降下時の収縮による影響も小さいため、はく離が生じていないものと推定される。
- (5) 床版下面の断面急変部では、輪荷重の影響で水平方向にずれようとするせん断力が生じる。実橋ではこれが繰り返し作用し、また乾燥収縮の影響もあり、初期の段階で端部に生じたはく離が内部に進展することが想定される。
- (6) 既設床版にアンカー定着した鉄筋は、はく離が生じ進展しようとする場合に抵抗する一定の効果があると考えられる。

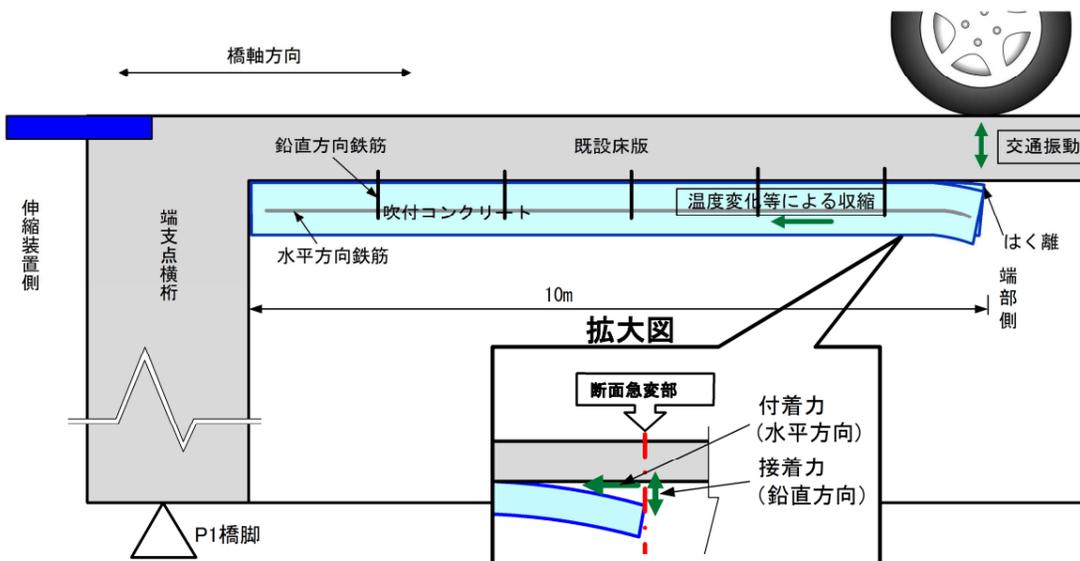
※設計当時の既設床版へのアンカーの設置目的は、施工時の鉄筋の保持、およびコンクリートが硬化して強度（付着強度、接着強度）が発現するまでの間、吹付コンクリートの自重を支えること。

下線部：実験、解析で新たに確認できた内容

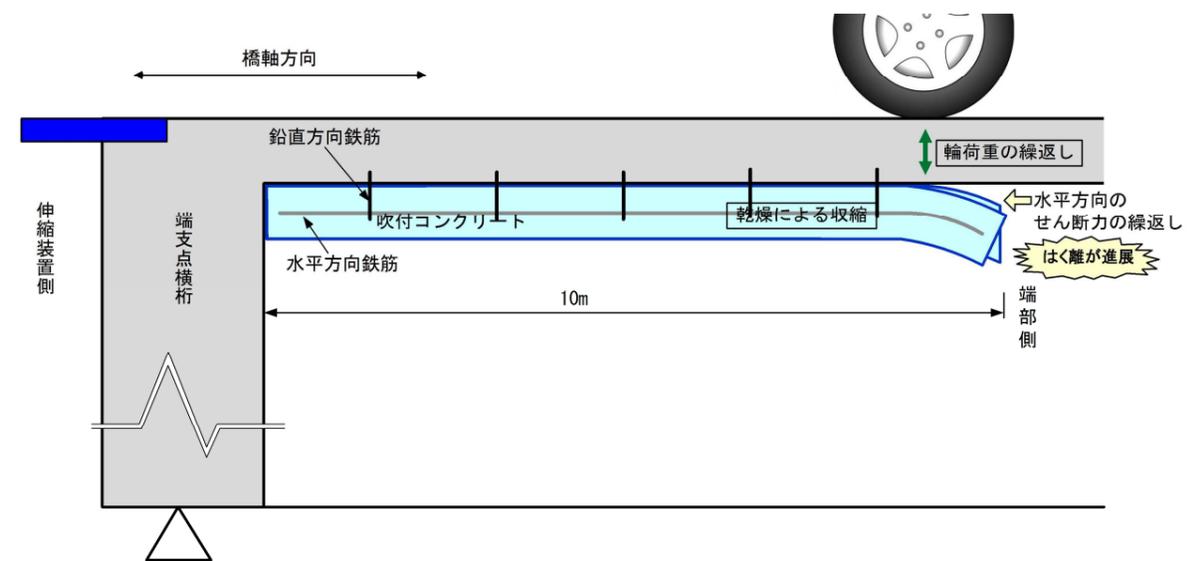
## V 落下にいたるまでの事象の推定

(可能性の一つ)

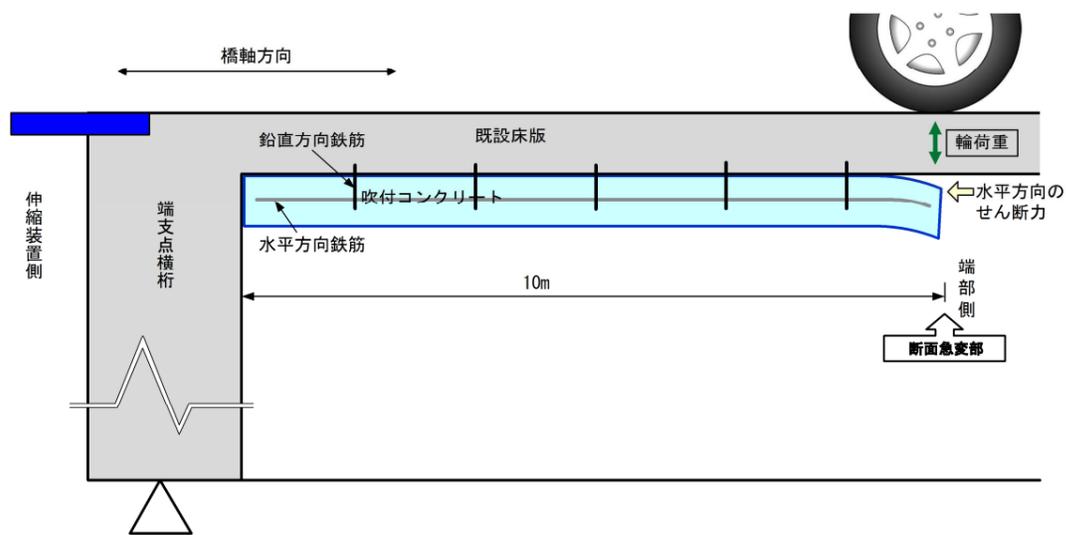
1. 吹付厚が 230mm と厚いため、コンクリートの硬化時の温度変化等による収縮および交通振動の影響で、吹付端部の界面で鉛直方向の接着力および水平方向の付着力が低下し、吹付け端部ではく離が発生



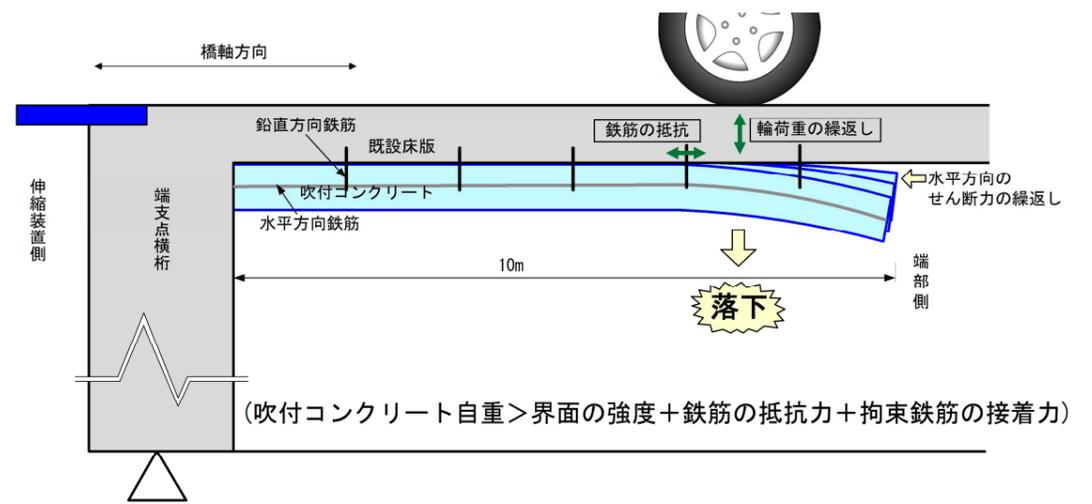
3. 輪荷重による水平方向にずれようとするせん断力の繰返しや、コンクリートの乾燥収縮の影響等で端部に発生したはく離が内部に進展



2. 増厚したことで端部が断面急変部となり、輪荷重(交通車両)の载荷により水平方向にずれようとする応力集中が発生



4. はく離が進展する際、既設床版にアンカー定着した鉄筋はこれに抵抗する一定の効果はあるが、材料や界面の強度の不均等性もあり、最終的にコンクリートの自重を支えきれず落下。



※ 設計当時の既設床版へのアンカーの設置目的は、施工時において配置した鉄筋の保持、およびコンクリートが硬化して強度(付着強度、接着強度)が発現するまでの間、吹付コンクリートの自重を支えること。

## 業務の実施内容の状況調査

### (1) 設 計

○落下にいたるまでの事象の推定結果より、技術基準の適用範囲を超える場合、以下の影響が明確でなかった。

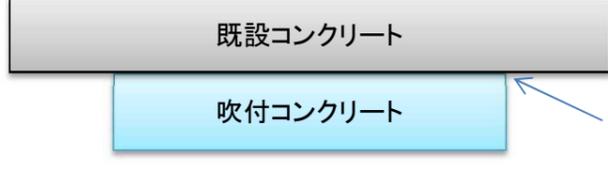
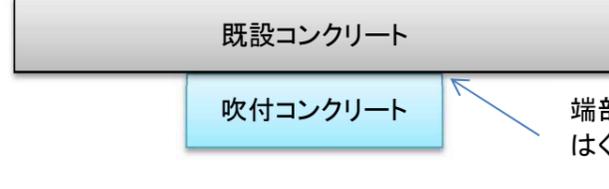
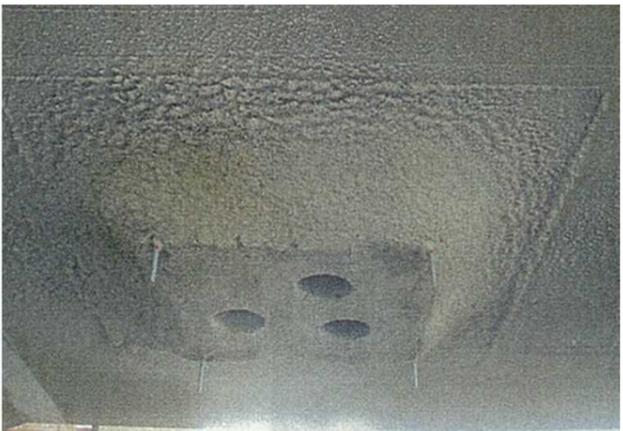
- ・吹付厚が 230mm と厚いため、コンクリートの硬化時の温度変化等による収縮の影響
- ・コンクリートの硬化時の交通振動の影響
- ・増厚したことで端部が断面急変部となり、輪荷重（交通車両）の載荷による応力集中が繰り返し発生する影響

○端部にはく離が発生すること、およびこれが進展して落下にいたることを予測できなかった。

# 業務の実施内容の状況調査

## (2) 施工

### ■ 施工前試験と検証実験の比較

	施工前試験	検証実験	
		実物大実験	振動実験
吹付規模	1.0m X 1.0m	3.6m X 6.0m	1.8m X 0.7m
吹付厚	120mm 1層のみ施工	230mm 1層目:100mm 2層目:110mm 3層目:20mm	230mm 1層目:100mm 2層目:110mm 3層目:20mm
吹付端部形状	既設コンクリートにすり付け(台形状) 	鉛直 	鉛直 
計測内容	①ひび割れの有無 ②界面の接着強度 ③圧縮強度 ④打継目処理状況	①発熱温度:コンクリートの温度履歴 ②界面の挙動:鉛直センサーの動き ③吹付コンクリートと試験体の水平ひずみ ④鉄筋のひずみ:鉄筋の水平方向の拘束効果 ⑤界面の付着強度 ⑥界面の接着強度	①発熱温度:コンクリートの温度履歴 ②界面の挙動:鉛直センサーの動き ③界面の接着強度 ④界面の付着強度 ⑤圧縮強度 ⑥鉄筋部の白すじの発生状況
施工写真			
備考	今回の実証実験は、端部の界面の挙動(はく離)も着眼点とした試験内容に対して、実橋の施工前試験は、界面の接着強度と全体のひび割れなどを主眼としており、端部にはく離が生じにくい試験条件となっている。		

○吹付厚が厚いことにより端部にはく離が生じるという知見がなかったため、施工前試験ではこれが反映された試験条件とはなってなかった。(吹付規模、層厚、層数、形状)  
○施工管理に関する基準の内容を現行と比較した結果、施工時の基準において定められていない項目があった。

## 業務の実施内容の状況調査

### (3) 維持管理

○吹付厚が厚いことにより端部にはく離が生じるという知見がなく、設計・施工において点検のしやすい構造としていなかったため、端部に注目した点検ができていなかった。

○脆性的な落下が早期に発生することを想定していなかった。なお、第三者等に影響が及ばない場所であったことから、安全性向上3ヵ年計画内に対策を完了させる計画で、工事発注に向けて準備中であった。

## 業務の実施内容の状況調査

### (4) プロセス

- 設計・施工基準にない、又はその適用基準を超える工法等を採用する際の審査と維持管理段階の評価において、どのような内容をどのような仕組みで行うか、明確に定められていなかった。

## 再発防止策

今回の事象について、落下にいたるまでの事象の推定と業務の実施内容の状況調査を行い、再発防止策を整理した。

### (1) 設計・施工・維持管理

- 今回のような構造においては、材料や部材強度の不均衡性および荷重作用の不均一性、温度応力や乾燥収縮などに起因する応力作用が局所破壊を発生させ、これが経年的に進行して落下に至る可能性のあることを認識し、単なる安全率を機械的に用いることなく、所定の安全性を確保する。
- 構造部材あるいは非構造部材を設計・施工する場合は、部材自身やその部位の落下の可能性を検討し、必要に応じて二重の安全対策などを含む冗長性を有する構造とする。また、部材や接続部の耐久性に十分配慮するとともに、点検しやすい構造とする。

## 再発防止策

### (2) プロセス

- 現在では、安全性向上3ヵ年計画の取組みの一環として、設計・施工基準に無い新技術や新工法等を採用する際、設計内容、適用範囲、点検方法、維持管理段階での評価方法、補修・取換方法等を記載したカルテを審査内容として定め、それにより審査を行い採用する仕組みを定めている。
  
- 今回の事象を受け、更なる改善策を以下の方針で検討していく。
  - ・設計・施工基準にない、又はその適用基準を超える工法等の採用時における審査体制を強化するとともに、維持管理段階での評価をより適切に行うため、審査時と同じ体制で継続して評価も行う。なお、審査に当たっては、必要に応じて学識経験者等による委員会を設け審議を行う。

鋼少数主桁橋の床版下面吹付コンクリートはく離・落下事象調査検討委員会(報告書)

目 次(案)

- 1. 調査検討委員会
- 2. 委員会審議内容
- 3. 床版下面吹付コンクリートはく離・落下事象の概要
  - 3.1 路線及び橋梁概要
  - 3.2 事象の概要
  - 3.3 事象の経緯と対応状況
- 4. 設計施工及び点検の概要
  - 4.1 設計概要
  - 4.2 施工概要
  - 4.3 点検概要
- 5. 落下にいたるまでの事象の推定
  - 5.1 現地詳細状況調査
  - 5.2 予備検討
  - 5.3 現地調査結果による落下にいたるまでの事象の推定
  - 5.4 実験および解析による検証と実施内容
  - 5.5 実験および解析結果と考察
  - 5.6 実験および解析結果に基づく落下にいたるまでの事象の推定
- 6. 業務の実施内容の確認
  - 6.1 設計
  - 6.2 施工
  - 6.3 維持管理
  - 6.4 プロセス
- 7. 再発防止策
  - 7.1 設計、施工、維持管理
  - 7.2 プロセス