

# 断面修復時の構造安全性に関する検討および施工報告

## — やいたに 矢居谷橋(下り線) —

広島支店	土木営業部	新宮正憲
大阪支店	土木工事部 (広島支店駐在)	難波勝彦
大阪支店	土木工事部 (広島支店駐在)	岩崎大輔
大阪支店	土木技術部	山村智

**概要** : 既設 RC 中空床版橋下面の断面修復を実施するにあたって、交通車両を共用しながら広範囲の部材断面をはつり出すような施工方法を採用した場合、主桁自体の構造安全性を確保できるか不明であったため、簡易解析や高度解析を実施し、構造安全性を確保できる断面修復方法の検討を行った。その結果、広範囲に及ぶ断面修復部を分割施工とすることで施工時および設計荷重時の許容値を満足し、構造安全性の確保が可能であることを確認した。一部許容値を満足しない箇所については、炭素繊維シートによる補強を行い、構造安全性を確保した。

**Key Words** : RC 中空床版橋, 断面修復, 分割施工, 炭素繊維シート補強

### 1. はじめに

成羽川橋他 2 橋床版取替工事では、床版取替の対象橋梁に隣接する橋長 71.227m、4 径間連続の既設 RC 中空床版橋下面の断面修復工が含まれていた。発注図で示された断面修復範囲は部分的で、一般的な断面修復方法で対応可能と想定していた。しかし、事前調査の結果、断面修復範囲が想定以上の広範囲に及ぶことが判明した。交通車両を共用しながら広範囲の部材断面をはつり出すような施工方法を採用した場合、主桁自体の構造安全性を確保できるか不明であったため、簡易解析や高度解析を行い、構造安全性を確保できる断面修復方法の検討を行った。断面修復時の橋梁の構造安全性については、RC 中空床版橋下面の鉄筋応力に着目し、断面修復範囲の大小が鉄筋応力の変動に与える影響について格子解析を用いて検討した。また、広範囲に渡って一度に施工した場合や分割施工とした場合の影響については、格子解析と FEM を用いて検討し、鉄筋応力の推移について整理し、構造安全性を確保できる施工方法を検討した。工事では、それらの検討結果を踏まえ、施工方法へ反映し、断面修復工を実施した。ここでは、解析を用いた設計検討ならびに施工方法に関して報告する。



新宮正憲



難波勝彦



岩崎大輔



山村智

## 2. 橋梁概要および現況調査結果

### 2.1 橋梁概要

断面修復が必要となる矢居谷橋下り線 P3～A2 径間は、橋長 71.227m の 4 径間連続 RC 中空床版橋である。橋梁概要を図-1 に示す。

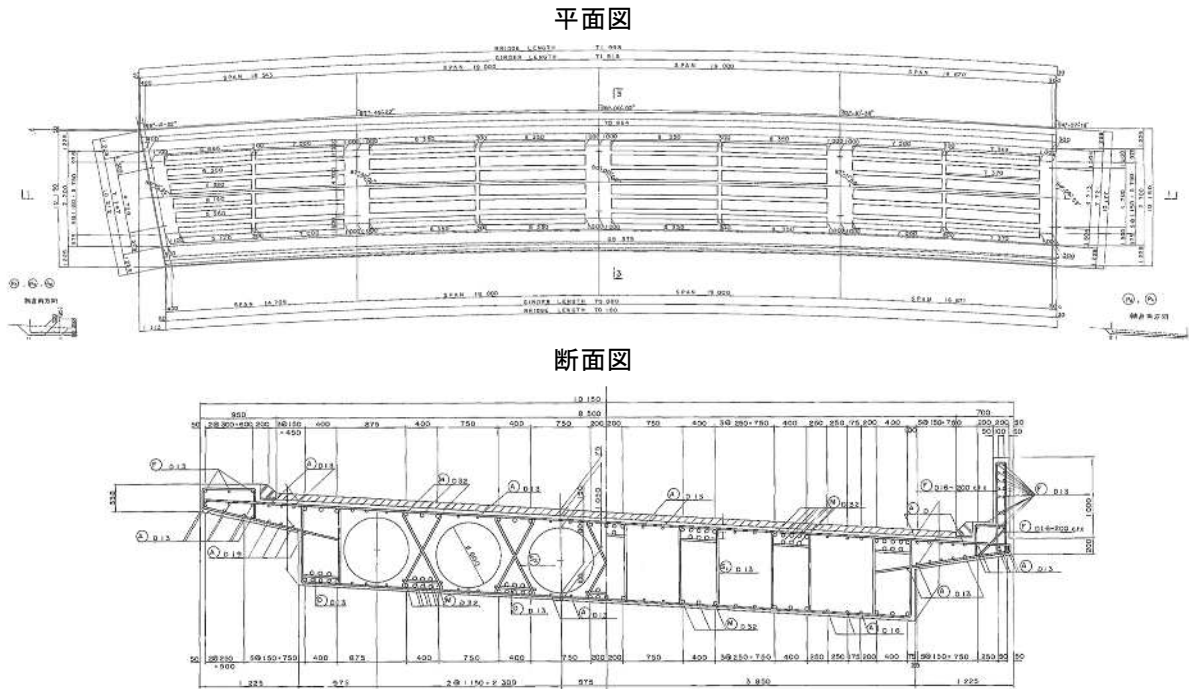


図-1 橋梁一般図

### 2.2 現況調査結果

#### 2.2.1 発注時と詳細調査時の断面修復範囲の比較

発注時の断面修復範囲と詳細調査後の断面修復範囲を図-2 に示す。発注時の断面修復範囲よりも詳細調査後の断面修復範囲は各径間ともに広範囲になっており、P6～A2 径間では、発注時と比較し、3 倍程度の断面修復範囲となった。部分的な断面修復とは異なり、規制を行わない供用中の状況での断面修復方法では、主桁の構造安全性の確保ができるか不明であったため、解析的な検討が必要と判断した。

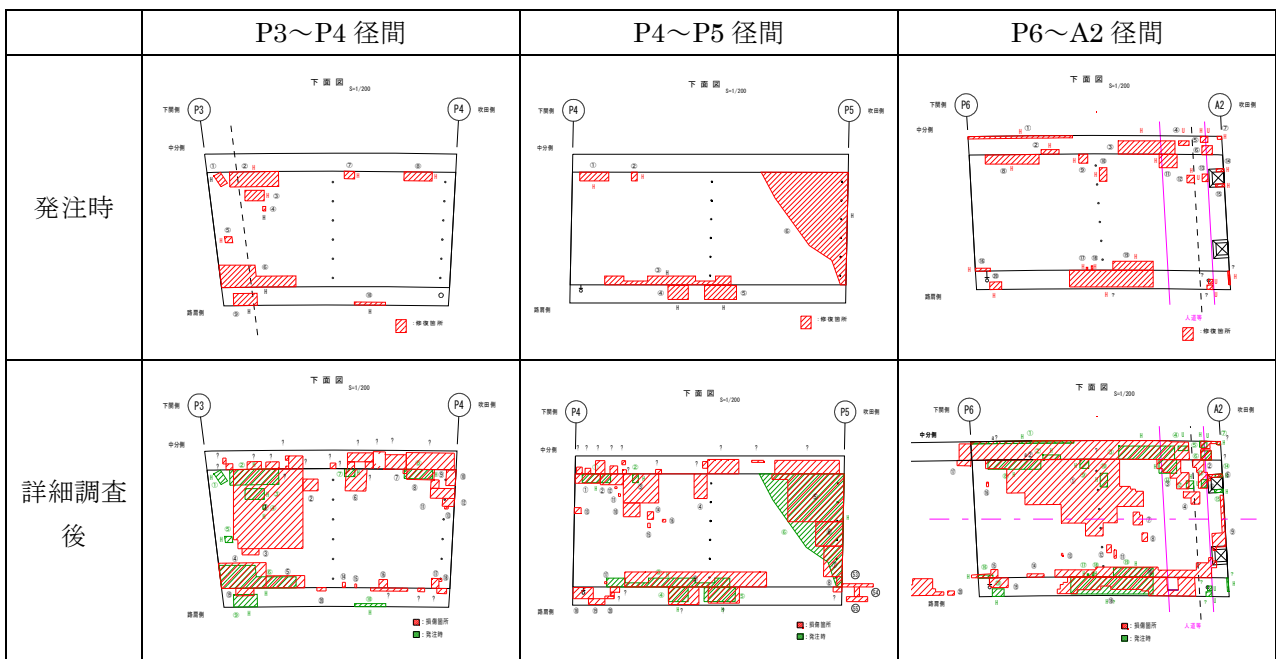


図-2 発注時と詳細調査後の断面修復範囲

### 2.2.2 床版下縁の鉄筋状況

断面修復範囲確定後、P6～A2 径間でのコンクリート浮きを除去し、内在鉄筋の状況を確認した。現地確認状況を写真-1、写真-2 に示す。鉄筋の状態を確認した結果、鉄筋は比較的健全であり、鉄筋自体の有効性は確保されていると判断した。



写真-1 現地状況確認(P6～A2 径間)



写真-2 鉄筋状況(P6～A2 径間)

## 3. 構造安全性の検討

### 3.1 簡易解析による検討

#### 3.1.1 一度期に全面的断面修復を実施すると想定した場合の応力照査

矢居谷橋下り線 P3-A2 径間 RC 中空床版橋の断面修復工について、床版下面の断面修復範囲が発注時に比べ、詳細調査後、大幅に増加したことを受け、断面修復時の構造安全性を把握するため、応力照査を棒解析(簡易検討)により行った。なお、断面修復範囲の再現として、断面修復範囲に掛かる床版最下段の橋軸方向鉄筋(D32)を無効とし、RC 中空床版橋の全断面幅を有効とした一本棒モデルにて、はつり範囲以外での有効鉄筋本数のみで照査することとした。

応力照査結果を表-1 に示す。応力照査の結果、断面修復範囲を一度に全面はつった場合、有効な鉄筋本数が減少することから、P3～P4 および P6～A2 径間において構造安全性が死荷重時および設計荷重作用時において確保できないことが確認された。

表-1 応力照査結果(棒解析)

	ピアNo.		P3										P4										P5
	セクションNo.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
最下段D32	有効本数		28	4	8	8	35	35	28	28	35	32	28	32	21	26	30	30	30	30	20	13	0
B活荷重 (フル載荷)	死荷重時 ( $\sigma_s \leq 100\text{N/mm}^2$ )		83.7	121	150	76.6	71.3	61.5	27.3						46.9	73.1	84.2	74.3	44.8				
	判定		OK	NG	NG	OK	OK	OK	OK						OK	OK	OK	OK	OK				
	設計荷重時 ( $\sigma_s \leq 180\text{N/mm}^2$ )		145	211	267	140	135	129	80	9.16					32.5	112	148	165	151	107	43.7		
	判定		OK	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK					OK	OK	OK	OK	OK	OK			

	ピアNo.		P5										P6										A2
	セクションNo.		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
最下段D32	有効本数		0	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	32	25	22	14	10	14	26	29	29	20
B活荷重 (フル載荷)	死荷重時 ( $\sigma_s \leq 100\text{N/mm}^2$ )					37.2	62.6	70.5	59.5	31.1						34.7	99.2	156	151	105	79.6	46.9	
	判定					OK	OK	OK	OK	OK						OK	OK	NG	NG	NG	OK	OK	
	設計荷重時 ( $\sigma_s \leq 180\text{N/mm}^2$ )				27.3	92.3	131	143	127	84.8	16				7.97	95.5	200	288	267	182	136	79.6	
	判定				OK	OK	OK	OK	OK	OK					OK	OK	NG	NG	NG	NG	OK	OK	

#### 3.1.2 構造安全性を確保するための対応策

簡易解析(棒解析)の結果より、一度期に断面修復範囲をはつり取る場合、P3～P4 および P6～A2 径間において構造安全性が死荷重時および設計荷重作用時において確保できないことが確認されたため、断面修復時の構造安全性を確保するための対応策を表-2 に示す。

表-2 断面修復時の構造安全性を確保するための対応策

①支保工構築によるジャッキアップ	
内容	発生断面力を低減することで鉄筋応力の制限値超過を制御する.
	※ジャッキアップのためには支保工を構築する必要があり、支保工設置範囲の地盤支持力の測定や整地、ベースコンの設置なども必要となり、現状設置している足場の解体も発生することから時間を要する。また、活荷重が作用する状況にてジャッキアップにおける反力等の载荷箇所、制御が困難であるため、現実的な方法ではないと判断した(発注者と協議の上)。
②断面修復範囲の分割施工	
内容	断面修復範囲を分割施工とすることで施工時の鉄筋応力を低減する.
	※他の対策案と比べ、現実的な対応方法と判断した(発注者と協議の上)。

### 3.1.3 断面修復を分割施工した場合の鉄筋応力の変化の考え方

分割施工とした場合の鉄筋応力の分担概要を図-3に示す。ここでは、床版下面を3分割し、引張側鉄筋の1段目、2段目それぞれの分担率を仮定したものである。なお、断面修復の順番は、範囲①はつり⇒範囲①断面修復⇒範囲②はつり⇒範囲②断面修復⇒範囲③はつり⇒範囲③断面修復の順と仮定している。

断面修復範囲を分割して施工することで、はつり取られ露出した箇所の鉄筋が負担していた応力を残りの鉄筋で負担することとなり、一度にすべてのはつり取る場合よりも負担した鉄筋への発生応力の低減が行えることとなる。ただし、局部応力の発生量や応力分担の変化については、さらに詳細な解析を行い、確認する必要がある。

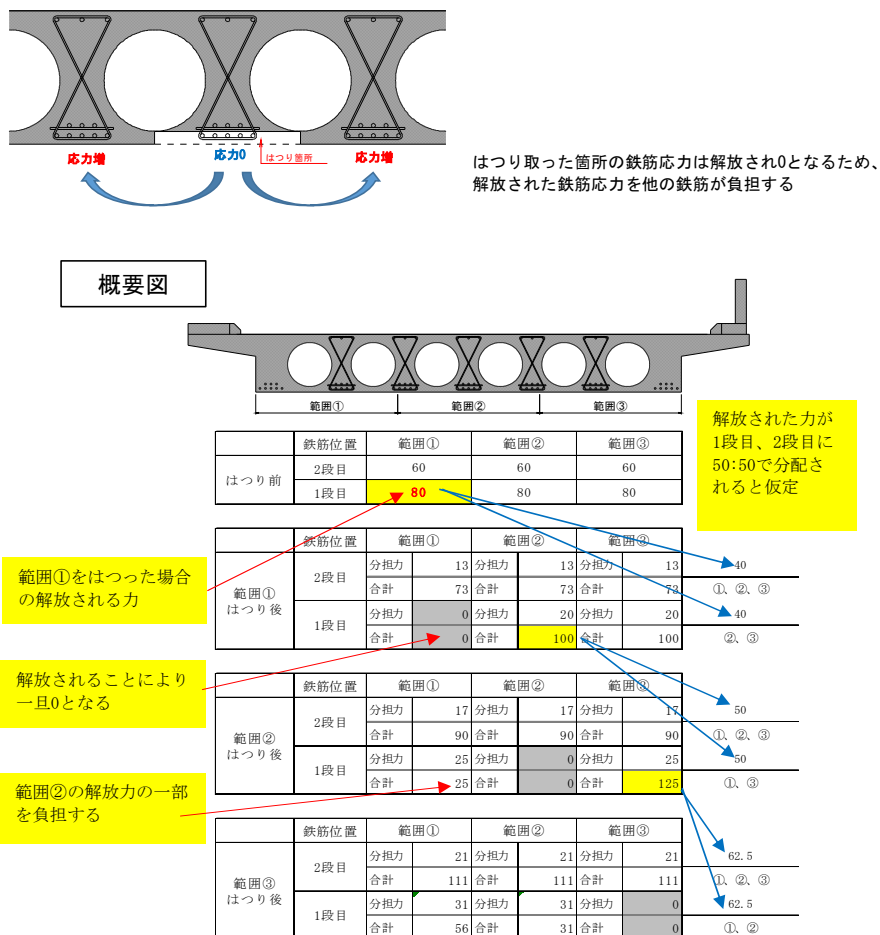


図-3 はつりによる鉄筋応力の分担概要

### 3.1.4 分割施工を想定した応力照査

応力照査の検討ケースとして、施工分割数は、3 分割、5 分割、7 分割の 3 種類とし、活荷重のケースは B 活荷重フル載荷、レーン載荷の 2 種類とした。応力照査の許容値については、断面修復施工時を対象とすることから、設計荷重時の鉄筋応力の許容値である 180N/mm<sup>2</sup> の 1.25 倍の 225N/mm<sup>2</sup> を許容値として照査を行った。床版下面分割方法を図-4 に示す。なお、施工時の許容値については、発注者と協議の上決定した。

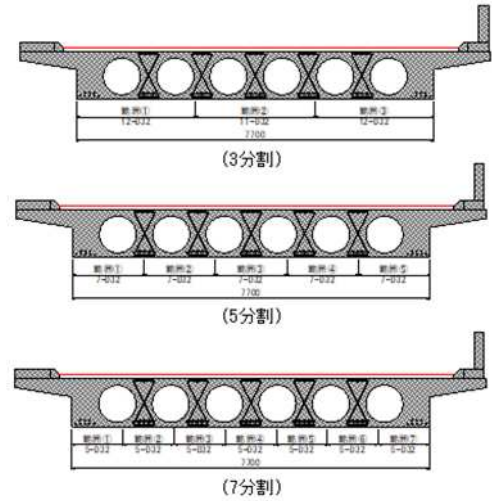


図-4 中空床版下面分割方法

#### (1) P6~A2 径間

各分割施工時の応力照査結果を表-3 に示す。P6~A2 径間における応力照査結果より、分割数を多くすることにより、下縁鉄筋 1 段目および 2 段目の鉄筋応力は低減できることが確認された。

しかしながら、各分割施工で施工時における鉄筋の許容値である 225N/mm<sup>2</sup> を超過することが確認された。また、設計荷重時に対しても応力超過していることから、構造性能を確保するためには、補強等の対応が必要と考えられる。

表-3 各分割施工時における応力照査結果

			はつり前	範囲① はつり後	範囲② はつり後	範囲③ はつり後	制限値				
3分割	死荷重時	2段目	71.6	92.3	116.2	149.8	≤ 225N/mm <sup>2</sup>				
		1段目	81.2	104.7	131.7	65.2					
	施工時 (B活フル)	2段目	131.9	187.4	209.1	244.9					
		1段目	149.6	203.4	227.9	163.9					
	施工時 (B活レーン)	2段目	-	181.5	203.6	239.0					
		1段目	-	196.7	221.7	157.2					
5分割	死荷重時	2段目	71.6	82.4	94.8	109.0	125.4	144.3	≤ 225N/mm <sup>2</sup>		
		1段目	81.2	93.4	107.5	123.7	142.3	70.2			
	施工時 (B活フル)	2段目	131.9	166.4	178.8	193.0	209.4	228.3			
		1段目	149.6	179.5	193.6	209.8	228.4	156.3			
	施工時 (B活レーン)	2段目	-	162.9	175.3	189.5	205.9	224.8			
		1段目	-	175.5	189.6	205.8	224.4	152.3			
7分割	死荷重時	2段目	71.6	79.0	87.1	96.1	106.0	116.9	129.0	142.3	≤ 225N/mm <sup>2</sup>
		1段目	81.2	89.6	98.8	109.0	120.2	132.6	146.3	71.8	
	施工時 (B活フル)	2段目	131.9	158.5	166.6	175.6	185.5	196.4	208.5	221.8	
		1段目	149.6	170.6	179.8	190.0	201.2	213.6	227.3	152.8	
	施工時 (B活レーン)	2段目	-	156.0	164.1	173.1	183.0	193.9	206.0	219.3	
		1段目	-	167.8	177.0	187.2	198.4	210.8	224.5	150.0	

#### 3.1.5 簡易解析による照査結果について

簡易解析においては、一度期にはつり取る場合に主桁の構造安全性が確保されるのかをまず確認し、確保が困難であることが判明したため、分割施工とした対応策により断面修復で生じる鉄筋応力の超過の低減を検討した。応力超過は低減でき、施工時の許容値も満足するものの、設計荷重時の許容値は満足しなかった。しかしながら、簡易解析による断面修復における応力変化については、横分配を考慮できていないため、詳細な検討を行うためには、高度解析 (FEM など) を行う必要がある。

### 3.2 高度解析による検討

#### 3.2.1 検討概要

矢居谷橋（下り線）P3～A2 径間 4 径間連続 RC 中空床版橋の桁下面において、断面修復範囲が発注当初より大幅に増加したことから、橋梁の構造安全性を簡易解析で検討した。その結果、鉄筋応力が設計荷重時の許容値を超過することが判明し、断面修復後には補強が必要であることを確認した。そこで、断面修復時の詳細な鉄筋応力を把握し、補強範囲、補強量を確認することを目的に FEM による高度解析（以降、FEM 解析）を実施した。なお、断面修復は分割して施工することから、FEM モデルにおいても断面修復範囲を分割したモデルでの検討を行った。なお、FEM 解析は断面修復を行う P3～P4 径間、P4～P5 径間および P6～A2 径間の内、断面修復が支間中央部で広範囲に及ぶ P6～A2 径間を対象とし行うこととした。

#### 3.2.2 FEM 概要

##### (1) FEM モデル

FEM モデル形状を図-5 に、鉄筋位置を要素中心とした中空床版断面グリッドを図-6 に、中空床版断面分割モデルを図-7 にそれぞれ示す。FEM モデルは 4 径間連続 RC 中空床版橋の全体モデルとし、断面修復箇所をモデル化する。また、断面修復箇所は P6～A2 では 5 分割して施工することから、分割ステップ毎にモデル化した。

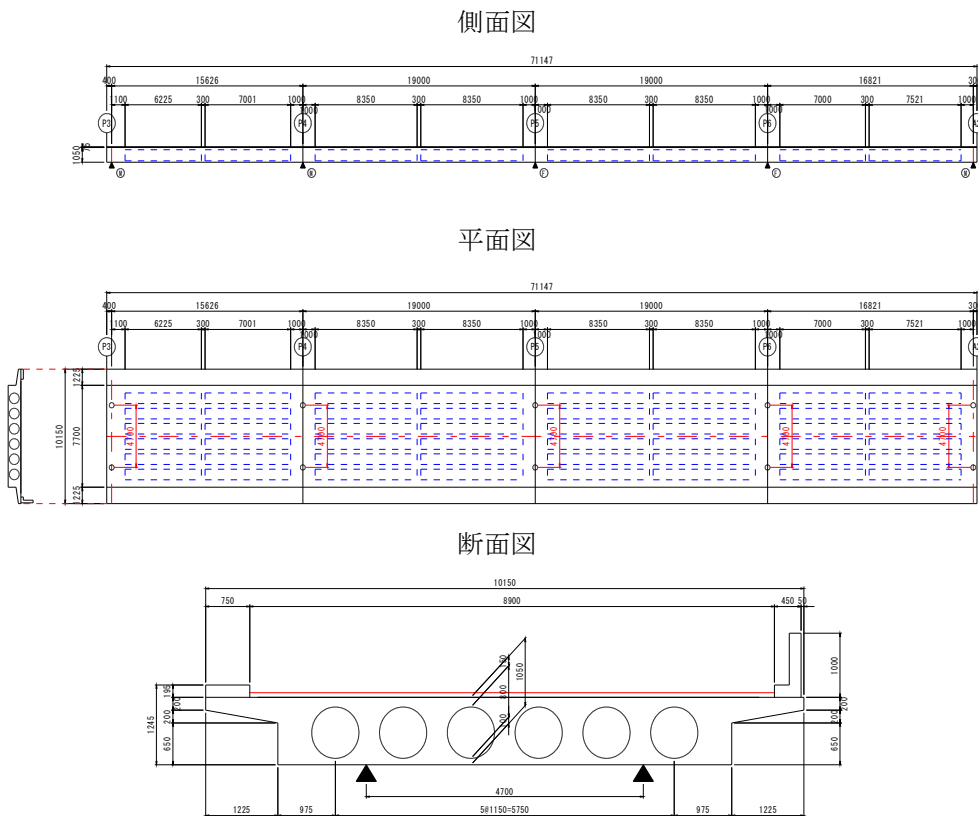


図-5 モデル形状・寸法

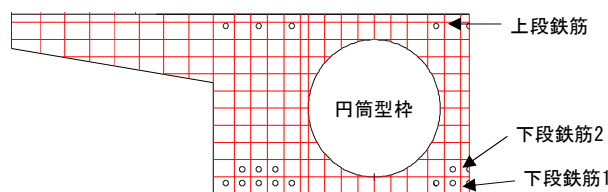


図-6 中空床版断面グリッド

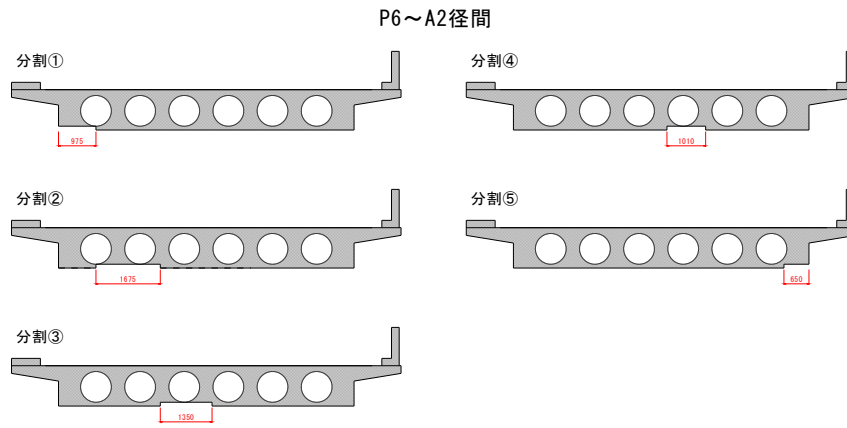


図-7 中空床版断面分割モデル形状

(2) 検討ケースおよび分割モデル

P6～A2 径間の FEM における検討ケースおよび分割モデルを図-8 に示す。FEM における荷重条件は死荷重のみとし、分割モデル毎の断面力を整理し、健全モデルからの変化率を算出した。

・ P6～A2 径間

Case No.	断面修復箇所	荷重条件
3-1	無	死荷重
3-2	分割①	
3-3	分割②	
3-4	分割③	
3-5	分割④	
3-6	分割⑤	

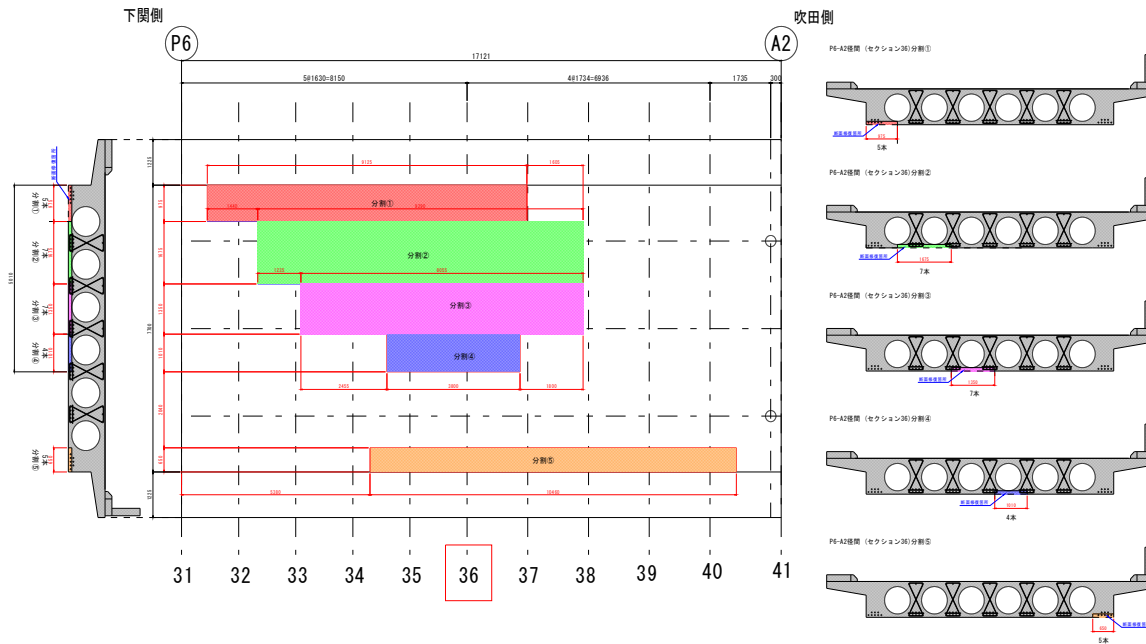
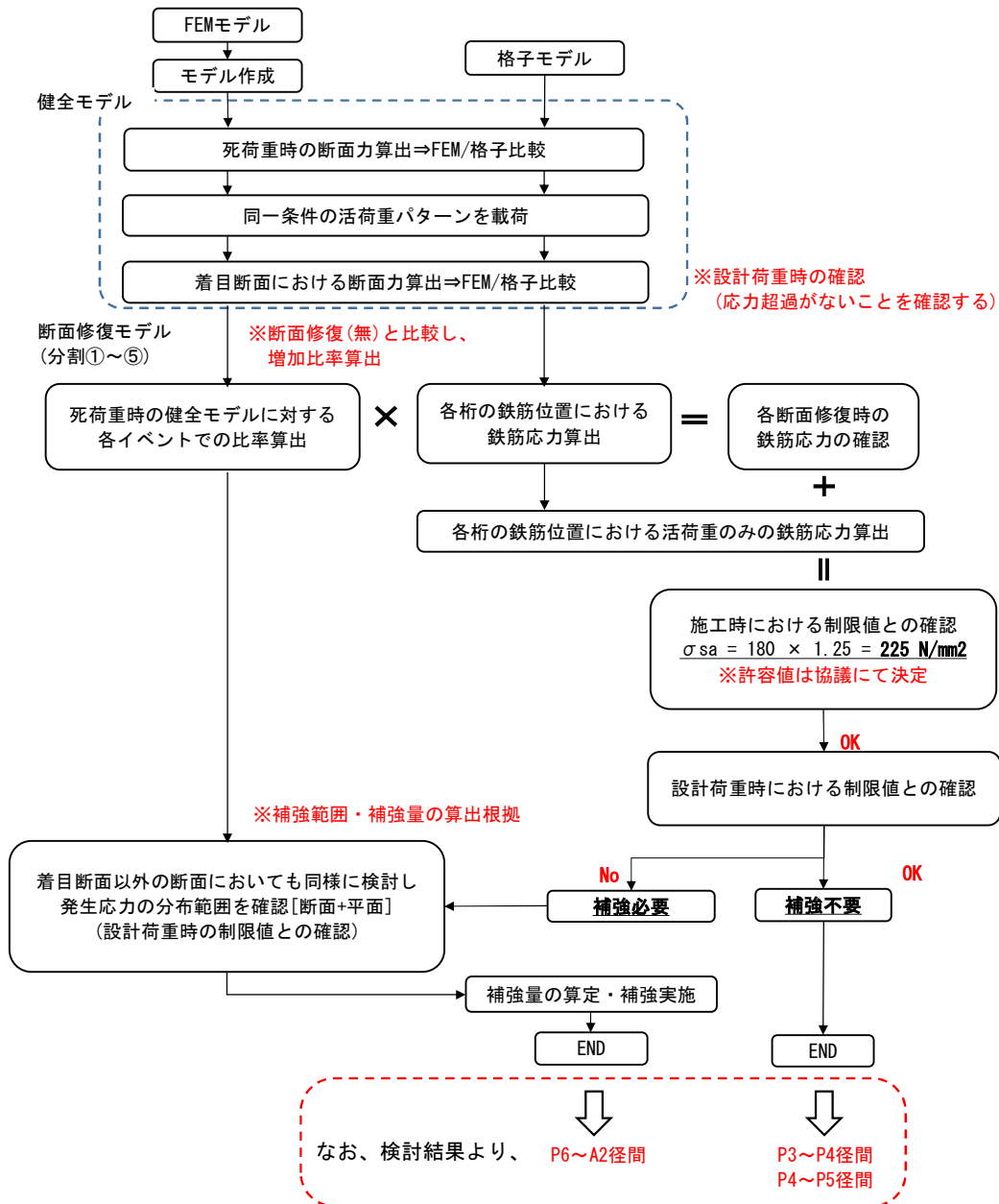


図-8 断面修復箇所分割範囲図

### 3.2.3 解析結果の整理方法

高度解析による検討フローを図-9 に示す。フローには解析結果の整理方法も示す。



### 3.2.4 解析結果

(1) 健全ケースで P6～A2 径間における着目断面での断面力 FEM/格子解析の比較

P6～A2 径間における着目断面での死荷重時の断面力の比較を表-4 に、設計荷重時の断面力の比較を表-5 にそれぞれ示す。また、設計荷重時における下段鉄筋応力を表-6 に示す。

表-4 着目断面(cut36)における断面力(死荷重時)

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	合計
格子計算	532	401	408	414	422	429	589	3195
FEM	536	404	401	401	405	410	546	3103
FEM/格子 比率	1.01	1.01	0.98	0.97	0.96	0.96	0.93	0.97

(kNm)



表-5 着目断面(cut36)における断面力(設計荷重時)

	(kNm)							合計
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	
格子計算	843	633	644	652	663	672	921	5028
FEM	935	703	699	699	704	710	948	5398
FEM/格子 比率	1.11	1.11	1.09	1.07	1.06	1.06	1.03	1.07

表-6 着目断面(cut36)における下段鉄筋応力(設計荷重時)

	(N/mm <sup>2</sup> )						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
格子計算	-157.3	-120.6	-122.7	-124.2	-126.3	-128.0	-171.9
FEM	-174.5	-133.9	-133.1	-133.1	-134.1	-135.2	-176.9
制限値	-180						
判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

FEM 解析に対する格子解析断面力の比率は P6~A2 径間の死荷重時で 97%, 設計荷重時で 107%であった。また、格子解析の断面力から算出した設計荷重時の下段鉄筋応力は設計荷重時の制限値(180N/mm<sup>2</sup>)を満足しており、FEM/格子解析の比率を考慮した場合でも制限値を満足している。

(2) 各断面修復部における死荷重時の健全モデルに対する比率算出 (FEM 解析より)

①比率の算出方法

- ・ FEM 解析より得られた各桁での鉄筋位置における要素に作用する力を集計する。
- ・ 健全なモデルでの作用力と各断面修復時のモデルでの作用力の差分を計算 (分割①-健全, 分割②-健全, etc)
- ・ 上記で計算した差分を健全モデルの作用力に累積することで、各断面修復箇所の施工完了時の作用力を算出する。
- ・ 健全モデルと各断面修復時モデルの作用力の比率を計算する。

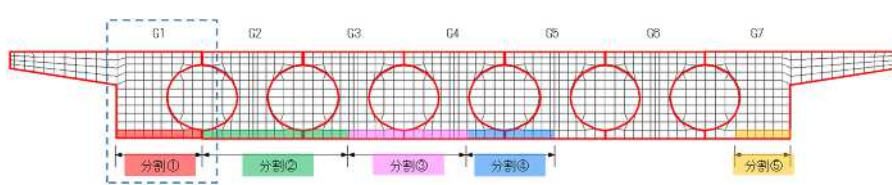


図-10 中空床版橋断面 桁区間および断面修復分割箇所

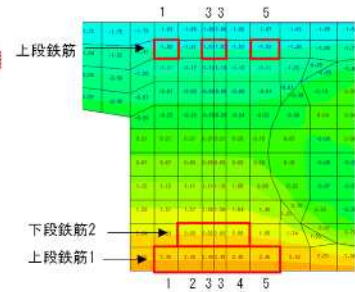


図-11 FEM 要素データ抽出箇所

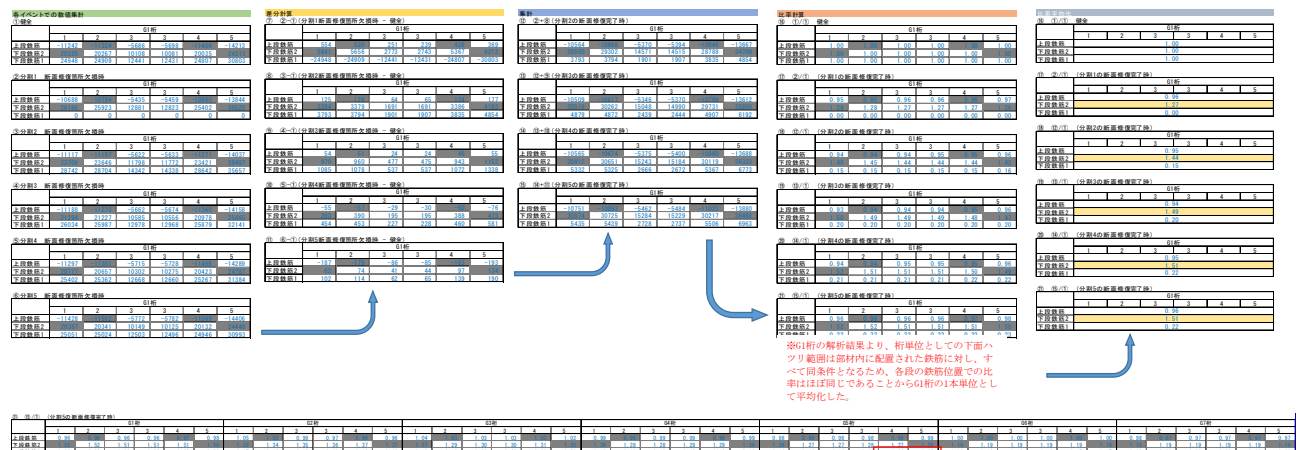


図-12 比率計算の流れ(例)

※G6桁の解析結果より、桁単位としての下面ハブリ範囲は部材内に配置された鉄筋に対し、すべて同条件となるため、各径の鉄筋位置での比率はほぼ同じであることからG6桁の1本単位として平均化した。

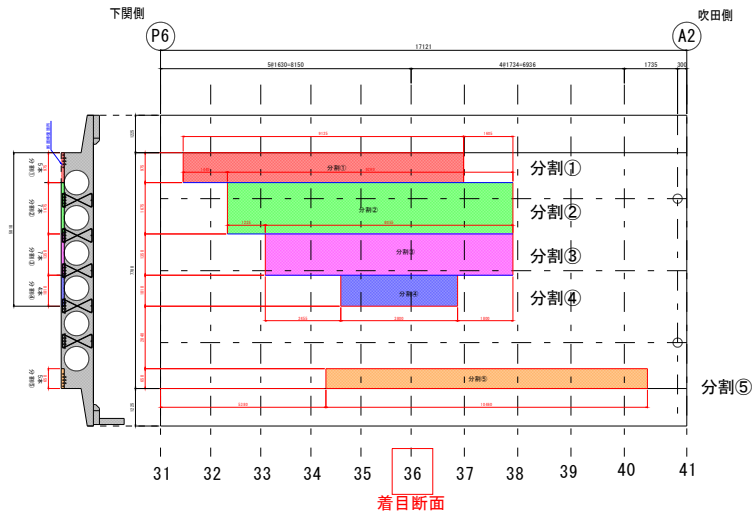
※G6桁のように、断面修復範囲が桁の中で分割される場合は、桁内での比率が変化する箇所が生じる。その場合、比率を平均化すると危険側での評価をすることとなることから、比率の最大値で応力を確認しておく必要がある。  
→発注者との協議の上、比率は最大値を用いて評価することとした。

②比率算出結果

P6～A2 径間の比率算出結果を表-7 に示す。

表-7 比率算出結果(P6～A2 径間)

【断面修復施工前】							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
下段鉄筋1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
【施工順序1】 分割⑤ 断面修復完了時							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.10
下段鉄筋1	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	0.00
【施工順序2】 分割④ 断面修復完了時							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.02	1.04	1.07	1.11	1.16	1.11	1.13
下段鉄筋1	1.03	1.04	1.07	1.09	1.14	1.11	0.04
【施工順序3】 分割③ 断面修復完了時							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.07	1.10	1.16	1.20	1.22	1.15	1.16
下段鉄筋1	1.07	1.10	1.14	0.10	1.19	1.15	0.06
【施工順序4】 分割② 断面修復完了時							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.24	1.27	1.25	1.26	1.26	1.18	1.18
下段鉄筋1	1.23	0.10	0.15	0.16	1.23	1.17	0.08
【施工順序5】 分割① 断面修復完了時							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.52	1.37	1.31	1.29	1.28	1.19	1.19
下段鉄筋1	0.23	0.18	0.20	0.19	1.24	1.18	0.09



(3) 断面修復後の鉄筋応力の算出

P6～A2 径間における断面修復後の鉄筋応力の算出結果を表-8 に示す。表-8 より、P6～A2 径間では、G1 桁の下から 2 段目の橋軸方向鉄筋で許容値を満足しないことが確認された。よって、P6～A2 径間については、構造安全性の確保のために G1 桁下面への補強が必要と判断した。

表-8 断面修復後の鉄筋応力の算出結果

	(N/mm <sup>2</sup> )						
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
上段鉄筋	33.8	44.2	44.6	43.9	44.4	45.6	36.9
下段鉄筋2	-181.1	-126.7	-125.0	-125.8	-126.8	-92.7	-167.1
下段鉄筋1	-80.5	-58.3	-60.5	-60.4	-145.8	-142.7	-71.5
判定 ( $\sigma_{sa}=180\text{N/mm}^2$ )	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK

### 3.3 既設 RC 中空床版橋下面に対する連続繊維シートによる補強検討

#### 3.3.1 検討概要

3 章 3.2 節において、断面修復後の鉄筋応力の検討を行った結果、P6～A2 径間 G1 桁の下縁鉄筋が設計荷重時の鉄筋応力の許容値を満足しないことが確認されたため、構造安全性を確保するため、G1 桁下面への補強対応を行うこととなった。3 章 3.2 節の結果を踏まえ、より詳細に応力超過範囲を検討し、補強範囲の決定、補強量の算定を行う。なお、床版下面への補強は炭素繊維シートによる補強を想定し検討を行った。

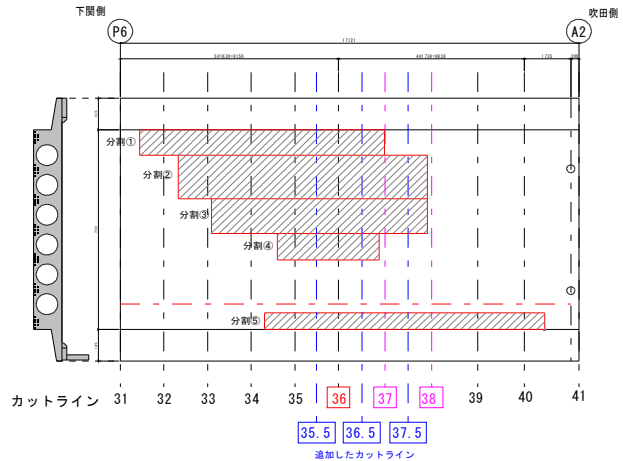


図-13 P6～A2 径間 平面図(カットライン追加)

#### 3.3.2 補強範囲および補強量の算定

P6～A2 径間の G1 桁への補強について、カットライン 36 の位置での応力超過を確認している。より詳細に補強範囲を把握するため、図-13 に示すようにカットラインを追加し、各カットラインにおいて 3.2 と同様に FEM 解析より比率を求め、応力超過となる範囲を確認した。

表-9 各カットラインの断面力比率

・カットライン35.5							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.56	1.34	1.28	1.28	1.27	1.18	1.19
下段鉄筋1	0.22	0.13	0.17	0.17	1.22	1.16	0.08
・カットライン36.5							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.52	1.38	1.31	1.34	1.33	1.19	1.18
下段鉄筋1	0.22	0.16	0.18	0.20	1.26	1.18	0.08
・カットライン37							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.76	1.39	1.30	1.28	1.21	1.16	1.17
下段鉄筋1	0.21	0.16	0.17	0.92	1.19	1.15	0.07
・カットライン37.5							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.08	1.39	1.37	1.22	1.09	1.14	1.16
下段鉄筋1	1.07	0.10	0.19	1.12	1.09	1.12	0.06
・カットライン38							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	1.06	1.01	1.51	1.48	1.07	1.11	1.15
下段鉄筋1	1.06	0.54	1.03	1.31	1.06	1.10	0.04

#### (1) 断面修復後の比率および鉄筋応力の算出

P6～A2 径間 G1 桁の応力超過範囲を詳細に把握するため、図-13 に示す追加したカットライン (35.5, 36.5, 37.5) およびカットライン 37, 38 での断面修復後の鉄筋応力を算出した。鉄筋応力の算出方法は、3.2 で示した方法と同様とし、格子解析により得られた健全モデルでの鉄筋応力をベースに、FEM 解析により各分割断面修復部に変化する断面力の比率を格子解析の断面力を RC 断面計算により求めた鉄筋応力に乗ずることにより行った。

表-10 各カットラインの断面修復完了後の鉄筋応力

・カットライン35.5							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	-162.59	-109.71	-108.46	-110.19	-110.93	-107.14	-147.67
下段鉄筋1	-72.80	-49.60	-53.04	-53.33	-126.30	-124.36	-65.26
・カットライン36.5							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	-188.72	-131.97	-128.87	-133.29	-134.68	-126.29	-172.74
下段鉄筋1	-81.28	-57.36	-59.61	-62.11	-151.65	-146.80	-71.48
・カットライン37							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	-217.68	-137.15	132.43	-133.42	-129.83	-128.08	-177.51
下段鉄筋1	-81.25	-57.36	-59.47	-124.82	-150.43	-148.79	-70.35
・カットライン37.5							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	-151.77	-135.10	-135.74	-126.63	-118.69	-124.41	-174.74
下段鉄筋1	-173.79	-50.88	-59.48	-140.41	-139.19	-144.39	-66.53
・カットライン38							
	G1桁	G2桁	G3桁	G4桁	G5桁	G6桁	G7桁
下段鉄筋2	-141.81	-96.80	-130.74	-131.27	-105.69	-110.06	-156.59
下段鉄筋1	-162.99	-78.17	-116.55	-140.15	-123.23	-127.88	-57.22

各カットラインの断面修復完了時の比率を表-9 に、各カットラインの断面修復完了後の鉄筋応力算出結果を表-10 に示す。表-9 より、カットライン 37 において、1.76 と比較的大きい比率を示した。また、表-10 より、最も応力超過が大きかった箇所はカットライン 37 であり、下段鉄筋 2 の位置で 217.68N/mm<sup>2</sup> であった。よって、この値に対して補強を検討することとした。

#### (2) 補強必要範囲の検討

各カットラインにおける断面修復後の鉄筋応力算出の結果、応力超過を生じた箇所はカットライン 36.5 および 37 であった。今回検討したカットラインで応力超過が認められなかった箇所はカットライン 35.5, 37.5 および 38 であった。以上のことから、橋軸方向の補強必要範囲は鉄筋応力の超過が生じなくなったカットライン範囲とし、起点側の端部をカットライ

ン 35.5, 終点側の端部をカットライン 37.5 とした. 補強必要長は 3416mm とした. 補強必要範囲を図-14 に, 炭素繊維シート設置範囲を図-15 にそれぞれ示す.

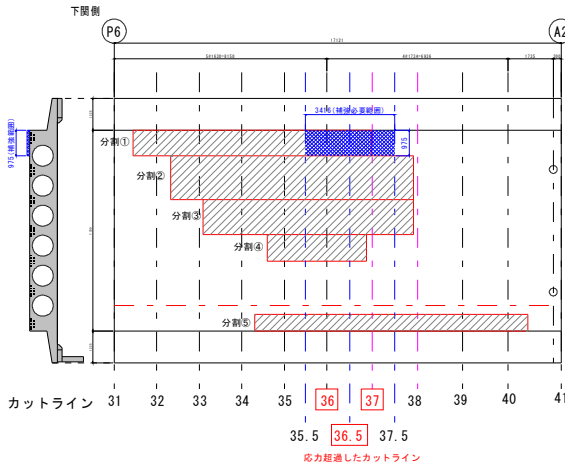


図-14 補強必要範囲

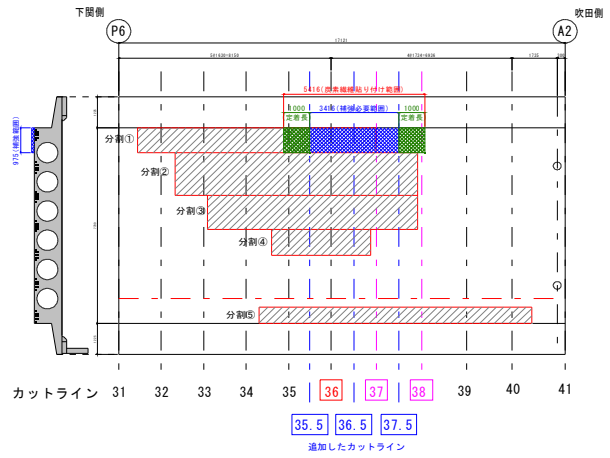


図-15 炭素繊維シート設置範囲

(3) 補強量の算定

補強量の算定は, カットライン 37 における鉄筋応力の最大値-217.68N/mm<sup>2</sup>に対して, 設計荷重時の許容値を満足するように補強量を決定した. 補強量の算定方法は, 鉄筋応力の最大値(-217.68N/mm<sup>2</sup>)が生じる断面力(曲げモーメント)を計算し, その断面力を用いて, 炭素繊維シートを追加した RC 断面計算を実施することで, 補強量のトライアル計算を行った. 図-16 に RC 断面計算結果を示す. 補強する範囲は G1 桁下面であるが, RC 断面計算では, 計算の都合上, 図-16 に示す耳桁形状を 2 つ合わせた主桁断面として計算している. よって, 鋼材量や補強幅も 2 倍としているため, 計算結果から得られた補強量の 1/2 が実際に G1 桁に必要な補強量となる. なお, 補強材については, 発注者との協議の結果, 設計要領第二集橋梁保全編に記載のある炭素繊維シート(高弾性タイプ, 目付量:400g/m<sup>2</sup>, 引張強度:1900N/mm<sup>2</sup>, 厚み:0.190mm)を用いることとした.

計算の結果, G1 桁下面に 2 層貼り付けることで, 設計荷重時の鉄筋応力の許容値(180N/mm<sup>2</sup>)を満足することが確認された.



図-16 補強量算定結果(RC断面計算)

## 4. 断面修復工

### 4.1 施工概要

#### 4.1.1 施工数量

矢居谷橋下り線 P3～A2 径間における断面修復工の範囲を図-17 に、施工数量を表-11 にそれぞれ示す。断面修復を実施する径間は P4-P5 径間を除く、3 径間である。図-17 の緑ハッチングは発注時の範囲であり、赤ハッチングは詳細調査後に確定した断面修復範囲である。図-17 および表-11 に示すように詳細調査後、断面修復範囲は大幅に増加しており、P6～A2 径間で約 3 倍となっている。

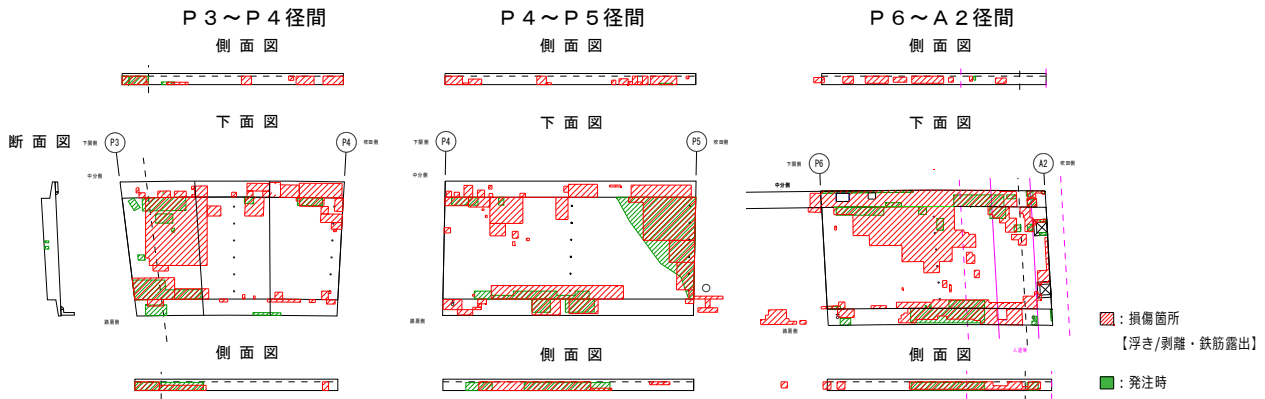


図-17 断面修復範囲(発注時：緑，詳細調査後：赤)

表-11 施工数量比較

施工範囲	当初	詳細調査後	比率 (詳細調査後/当初)
P3～P4	2,171	5,803	2.67
P4～P5	3,982	7,541	1.89
P6～A2	2,832	8,908	3.15
合計	8,985	22,252	2.48

#### 4.1.2 施工工程

図-18 に断面修復工に関する工程表を示す。設計検討の結果、各径間の断面修復箇所は P3～P4 径間で 3 分割、P4～P5 径間で 3 分割、P6～A2 径間で 5 分割とした。

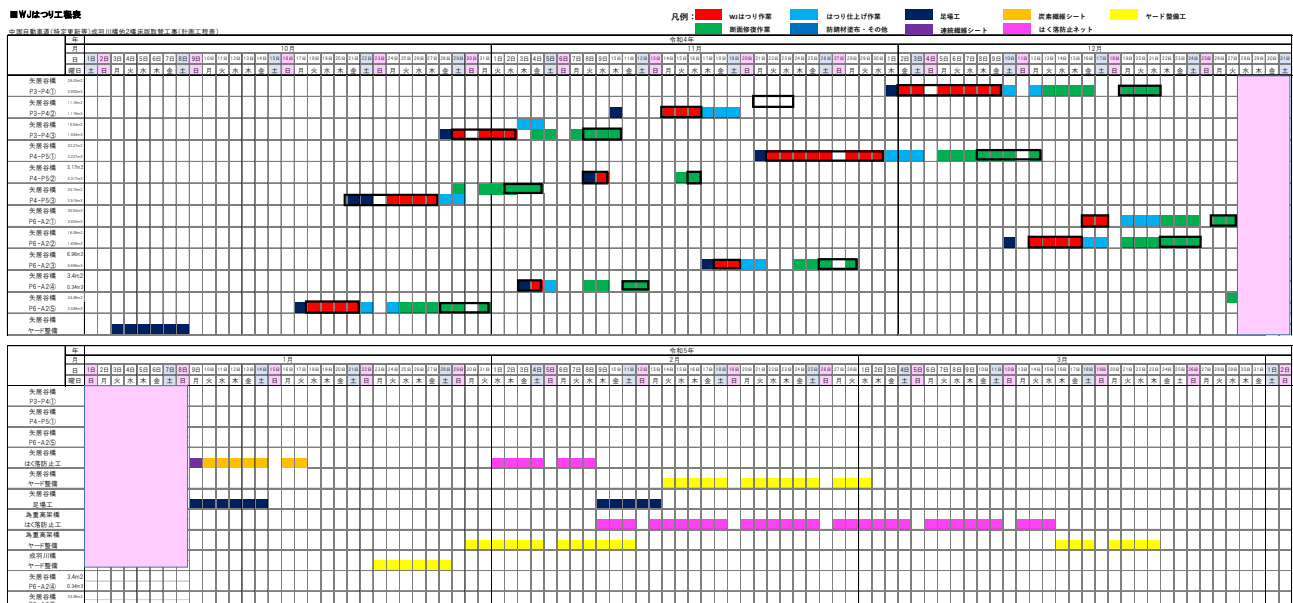


図-18 断面修復工に関する工程表

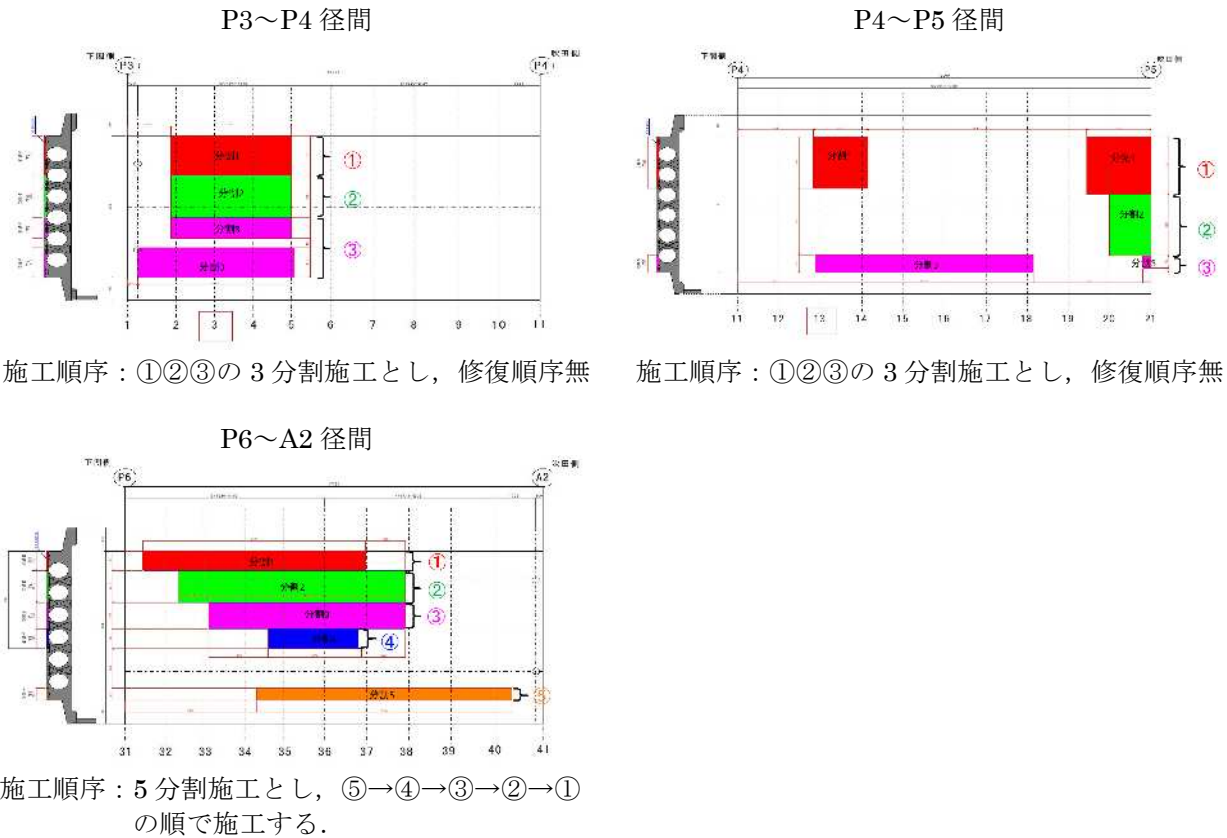


図-19 施工順序

## 4.2 施工方法

### 4.2.1 断面修復工

#### (1) 施工フロー

断面修復工の施工フローを図-20 に示す。



図-20 断面修復工の施工フロー

## (2) 損傷調査・範囲確定

劣化した構造物の補修について計画するにあたり、事前に対象構造物の損傷調査を実施した。損傷調査では、断面補修を計画する部材や箇所について、劣化の程度や範囲が発注図書と相違ないか現地ですできるだけ対象構造物に接近して目視観察や打音調査で状況を確認し、大きな変化がないかを確認したが、大きく相違があったため発注者の立会確認を受け、断面修復箇所が広範囲に及ぶことになった。

## (3) カッター目地

損傷調査・範囲確定時にマーキングしたラインに沿ってコンクリートカッターで 1 cm 程度の切込みを入れ、既設鉄筋を傷つけない様に注意し、上向きの施工のため作業員に負担が掛かることが予想されたため、15 分程度作業をしたら 5 分以上休憩させ、作業前・作業再開時には必ず保護具・保護メガネと集塵機付コンクリートカッターを着用させた。

## (4) WJ はつり

### ①機械式 X-Y タイプ

本工事では当初、矢居谷橋の構造物はつりを機械式 X-Y タイプでの施工を行っていた。

機械式 X-Y 移動式タイプは、一定範囲内を X-Y 自動移動ができるガイドフレームにノズルユニットを装着したフレーム方式である。

機械方式はハンドガン施工と違って作業員がはつり箇所へ直接近づくことなくコントロールボックスを操作することで安全な離隔を確保しながらの施工が可能であり、また連続的な大規模施工にその能力を発揮するが、作業中はオペレーターから直接目視確認をすることが出来ず、作業を中断し作業断面の確認した際に、はつりすぎていた場合があった。

### ②直射固定式ランス

直射固定式ランスは、ノズルユニットの重さと反力を軽減するために単管などにハンドランスを固定させ、人力で移動する方法である。従来の直射ハンドランスに比べ、噴射角度とスタンドオフ距離を一定に保てるため、高い噴射力での作業が可能であり、またハンドランスを固定しているため、作業員への負担を軽減し大水量での施工が可能であった。機械式 X-Y タイプでは施工不可能な範囲や複雑な面への施工でもでも対応でき、またハンドガン保持者から直接作業断面を目視確認することができたため、円筒型枠の破損頻度を低減することが可能となった。

## (5) はつり殻撤去

WJ はつりに伴うはつり殻撤去は、補助作業員 2 名で WJ 作業中断時に行った。施工箇所の廻りに堆積したはつり殻をスコップ・手箕・竹ぼうきにて 1 箇所的人力にて集積し、特殊強力吸引車から吸引ホースを伸ばし回収した。はつり殻撤去完了後は元請職員と監視員で目視確認を行い、問題ないことを相互に確認の上で作業を再開した。

## (6) 鉄筋防錆処理

錆および汚れを取り除いた鉄筋面が乾燥状態であることを確認し、問題ないことを確認した後に材料を十分に攪拌し、刷毛・点検ミラーにより鉄筋の裏側も塗り残しが無いように、均一にムラなく鉄筋防錆材を塗布した。塗布完了後は元請職員による目視確認を実施し、塗り残しが無いことを確認した。

## (7) プライマー塗布

プライマー塗布は下地コンクリートに断面修復モルタル中の水分が吸収され、付着阻害を生じることを低減する目的で行う。プライマー塗布時はコンクリート躯体が乾燥状態であることをコンクリート水分計により測定し、含水率が 8% 以下を確認した。含水率測定後に問題ないことを確認し、コンクリートはつり面にプライマーを簡易スプレー、刷毛等で均一にムラなく塗布した。

## (8) 含侵材塗布

含侵材は鉄筋に不動態被膜に替わる保護層を形成し、RC 構造物の鉄筋腐食抑制となるプロテクトシル CIT を使用した。塗布施工に着手する前にコンクリート躯体が乾燥状態であることを確認し、施工面は油脂、汚れ、塵垢等を除去し清浄な面にしてから施工を行った。塗布施工は 4 回程度に分けて、施工間隔を 20 分以上空けて行い、手動式噴霧器やローラー、刷毛を用いて均一に塗布した。

(9) 断面修復 (吹付け工法)

床版下面下の吹付け工法では、ポリマーセメントモルタル 1 袋 (25 kg) に対して使用水量 3.5~4.5 kg の水を加えモルタルミキサで材料を 3 分間攪拌した。ポリマーセメントモルタルの圧送に先立ち、配管に水、セメントペーストの順に先送りを行い、その後モルタルを圧送し、ホース先端から健全なモルタルが噴出したことを確認した。確認後に吹付けノズルを取付け、吹付け作業は鉄筋裏面および隅角部から行った。吹付けの注意事項として、モルタルがノズル先から直線状に飛び出しているのを確認し、ノズルを吹付け面に対して直角にし、適切な距離を保ちムラが少ない均一な面に仕上げた。作業を中断する場合は圧送ホース内にポリマーセメントモルタルを残し、中断時間も 20 分以内とした。吹付けは 1 層の吹付け厚を 20 mm とし、マーキングピンを設置して吹付け厚を確認した。吹き重ねの間隔は冬季施工だったので 6 時間以上時間を空けた。吹付け後、30 分~60 分程度養生し、金コテにて仕上げて必要に応じてその後 30 分程度養生を行い、再度金コテ仕上げを行った。

4.2.2 炭素繊維補強工

(1) 施工フロー

炭素繊維補強工の施工フローを図-21 に示す。

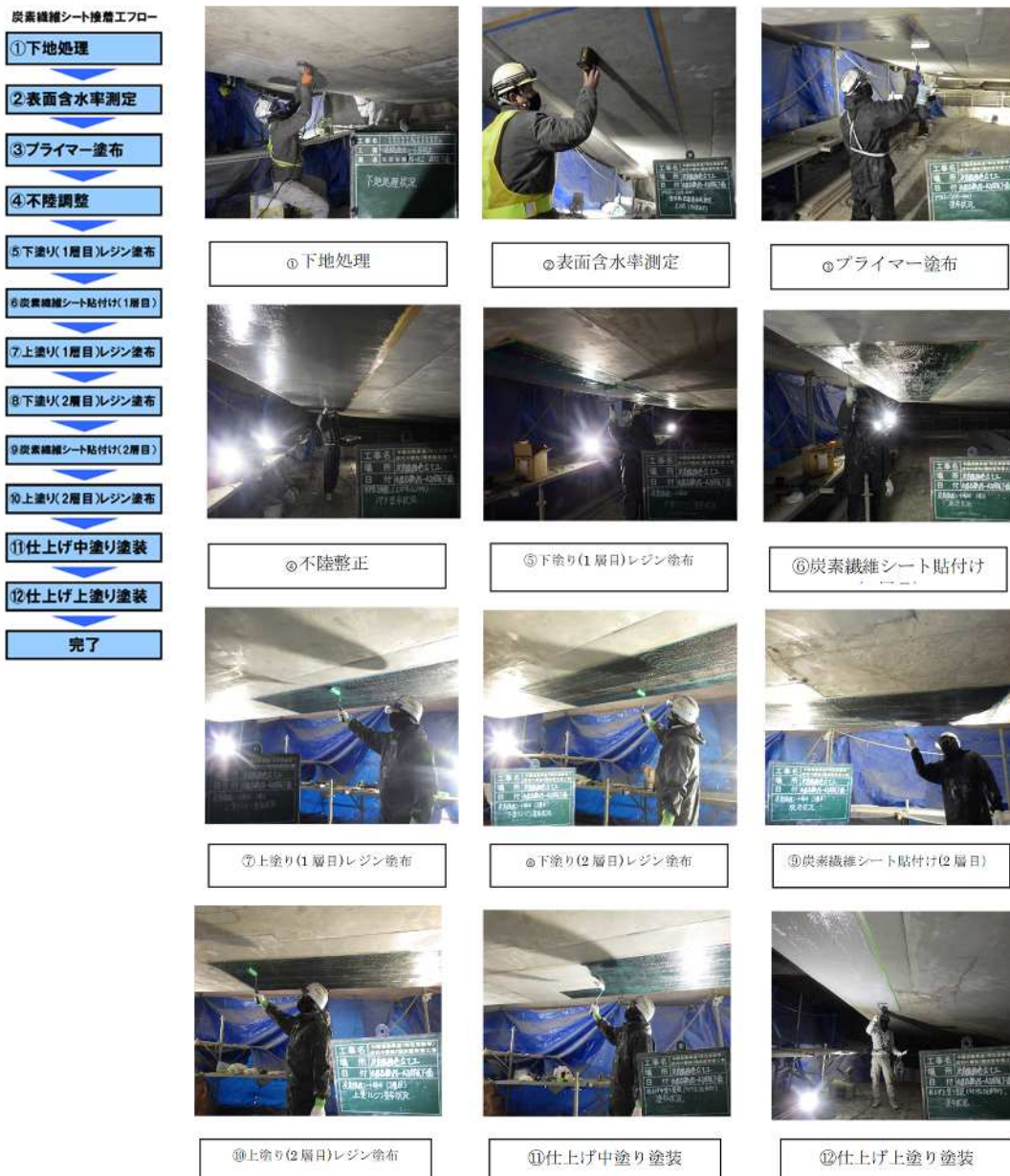


図-21 炭素繊維補強工の施工フロー



## (2) 下地処理

炭素繊維シートを接着剤で断面修復部と既設コンクリート部表面に貼り付けるために、コンクリート素地面の仕上げが必要となり、炭素繊維シートの接着性・強度低下を引き起こす原因となるコンクリート表面の脆弱部、汚れ、段差、突起部などはディスクサンダーを使用し適切に除去した。

## (3) 表面含水率測定

プライマー塗布を行う前に、コンクリート躯体が乾燥状態であることをコンクリート水分計により測定し、含水率が 8%以下になっていることを確認した。

## (4) プライマー塗布

プライマー塗布は、コンクリート表面にしみ込みコンクリート表面の強度を高めて、コンクリートと形成される炭素繊維シートとの接着性を向上させるための工程である。プライマー塗布作業には刷毛やローラー等を用いてコンクリート表面に均一に塗布し、上向き作業のため、液ダレが生じないように塗りムラの無いよう丁寧に塗布した。

## (5) 不陸調整

不陸調整は、炭素繊維シートを施工するコンクリート素地面の状態を平滑にする工程である。不陸調整を施工するための環境条件として、施工環境を気温 5℃以上、湿度 85%以下とし、プライマーの指触乾燥確認、施工面の状態確認を行い、天候が雨の場合、原則作業中止とした。これらの作業環境で養生を行い環境条件が改善できる場合は施工を継続したが、できない場合は施工を完全に中止した。不陸調整はパテの塗布を行い、金ゴテを使用して表面に均一に塗布した。塗布量はコンクリート表面状態により異なったが、段差が 1 mm以下となるよう十分に塗布した。

## (6) 下塗り (1 層目) レジン塗布

炭素繊維シートによりコンクリート躯体を補強するため、躯体との接着、複合材形成用のレジンを塗布した。必要量を均一に塗布することが重要であった。施工環境条件は不陸調整と同様であり、下塗りレジンの塗布は刷毛やローラー等を用いて表面に均一に塗布し、塗布量が少ない部分は浮きや膨れの要因となるので、塗りムラのないように均一に塗布した。

## (7) 炭素繊維シート貼付け (1 層目)

炭素繊維シートは、下塗りレジンの塗布後速やかに施工位置へ貼り付けた。炭素繊維が風などで煽られ下塗りレジンに付着し、レジンが剥がれた場合、そのまま施工を行うと、浮きや膨れが生じやすいため、剥がれた箇所にレジンを再塗布する。繊維の直線性を保つように軽く繊維方向へ引っ張りながら、一端から他端へ、または、中央から両端へ貼り付け、ゴムヘラを使用して繊維方向へしごきながらシワなどを平らにし、脱泡ローラーを用いて脱泡、含侵作業を行った。

## (8) 上塗りレジン塗布

必要に応じてゴムヘラで表面を均すように平滑に仕上げた。この際、レジンを掻き取らないように注意した。繊維の中にある空気が抜け、表面に細かな気泡の発生や、膨れ、シワ等が発生した場合にはゴムヘラや脱泡ローラーを用いて直ちに修正した。含侵に時間を要し未含侵部分が発生しやすいため、下塗りレジンの含侵の確認を十分に行うとともに、上塗りレジン塗布後、脱泡ローラーで十分な脱泡、含侵作業を行った。その後繊維目付量 400 g/m<sup>2</sup>、450 g/m<sup>2</sup> の場合は必要に応じてゴムヘラで表面を均すようにし、平滑に仕上げた。この際、レジンを掻き取らないよう注意し、繊維の中にある空気が抜け、表面に細かな気泡が発生したり、膨れ、シワ等が発生した場合にはゴムヘラや脱泡ローラーでこれを修正した。

## (9) 下塗りレジン塗布 (2 層目)

目付量 400 g/m<sup>2</sup>型の炭素繊維シートを 2 層以上貼り付けるため、1 層目の炭素繊維シートを貼り付け後、上塗りレジンを塗布した工程でその日の作業を終了した。その翌日以降に、指触硬化時間を確認して下塗り (2 層目) レジン塗布作業を開始した。

## (10) 炭素繊維シート貼付け (2 層目)

炭素繊維シート貼付け (1 層目) と同様の施工を行った。

(11) 上塗りレジン塗布 (2 層目)

上塗りレジン塗布 (1 層目) と同様の施工を行った。

(12) 仕上げ中塗り塗装

塗装面のレジンの指触硬化を確認し、レジンの硬化と表面が濡れていないことを確認した後、仕上げ中塗り材を電動攪拌機にて混合・攪拌してローラーや刷毛を使用してムラの無いよう均一に塗布した。また、施工環境として、気温 5℃以下、湿度 85%以上の時は保温養生対策を行った。

(13) 仕上げ上塗り塗装

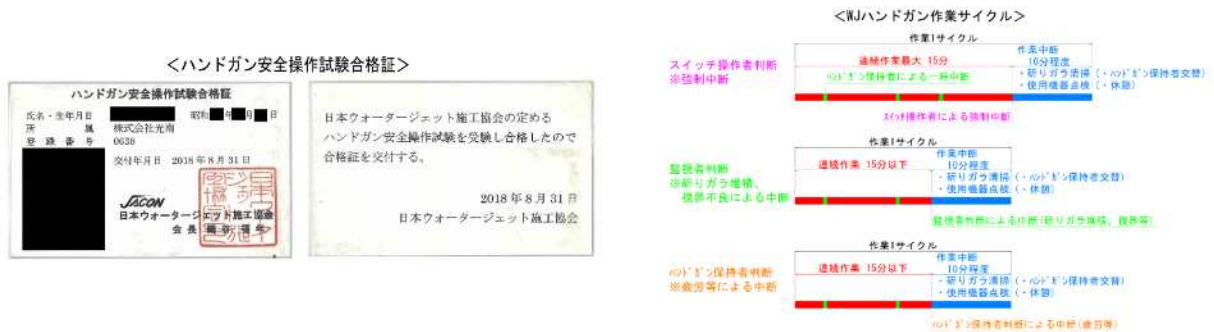
仕上げ中塗り塗装と同様の施工を行った。

4.3 施工時の安全対策

本工事では WJ はつり施工を始める前にその危険性を勘案した上で現場での基本事項を設けた。WJ ハンドガンによるはつり作業は、ハンドガン先端から高エネルギー密度の水を発生させ、人力の操作により対象とするコンクリート構造物に噴射することにより、コンクリートを粉砕するものであるため、危険要因となるハンドガン先端の水噴流と人体が最も近くなる作業である。よって WJ ハンドガン作業による安全な施工方法を定めて遵守することとした。

4.3.1 現場で定めた安全基本事項

- (1) WJ ハンドガンはつりの連続作業を最大 15 分とし、15 分たった時点でスイッチ操作者が強制的に作業を中断させる。また、WJ ハンドガン保持者自身の疲労等の判断による作業の中断は適宜行った。
- (2) 作業中断時にはつり殻の清掃及び使用機器の点検を行い、点検・清掃についてはハンドガン保持者以外の 4 名で対応した。
- (3) 中断後の作業開始に向け、作業中断時に監視者は WJ ハンドガン保持者に声を掛けて疲労具合等を確認し、人員配置のローテーションを行う。ただし、スイッチ操作者は最も重要な職務となるため、「ハンドガン安全操作試験合格証」(図-22 参照)を保有する作業員が担当した。なお人員配置については、現場に常駐する元請職員もその都度確認した。また、監視者及び元請職員が表-12 に示すチェックシートにて作業再開前の確認を行った。



(ハンドガン安全操作試験合格証) (WJ ハンドガン作業サイクル)  
 図-22 安全操作試験合格証および作業サイクル

表-12 WJ ハンドガン施工開始時チェックシート

チェック完了時間	チェック項目													確認者		作業時間	備考	
	使用機器の点検完了		使用機器の設置完了		照明・送風機設置完了		新りガラ清掃完了		人員配置の確認完了		保護具の着用状態確認		立入禁止範囲の明示完了		協力業者			元請業者
	協力業者	元請業者	協力業者	元請業者	協力業者	元請業者	協力業者	元請業者	協力業者	元請業者	協力業者	元請業者	協力業者	元請業者				
例) 9:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	●	例) 9:03 ~ 9:18		
⋮																⋮ ~ ⋮		
⋮																⋮ ~ ⋮		

(4) 1 班 5 名体制での施工とした。

WJ ハンドガン保持者の異常発生に即座に対応できるよう、スイッチ操作者 1 名に対して WJ ハンドガン 1 台の施工とした。また、施工箇所には監視者 1 名と補助作業員 2 名を配置し、1 班 5 名体制での施工とした。また、図-23 に示す作業時の人員配置図を基本として、施工時は WJ ハンドガン保持者の半径 5m 以内に人が立ち入らないよう配置を計画した。

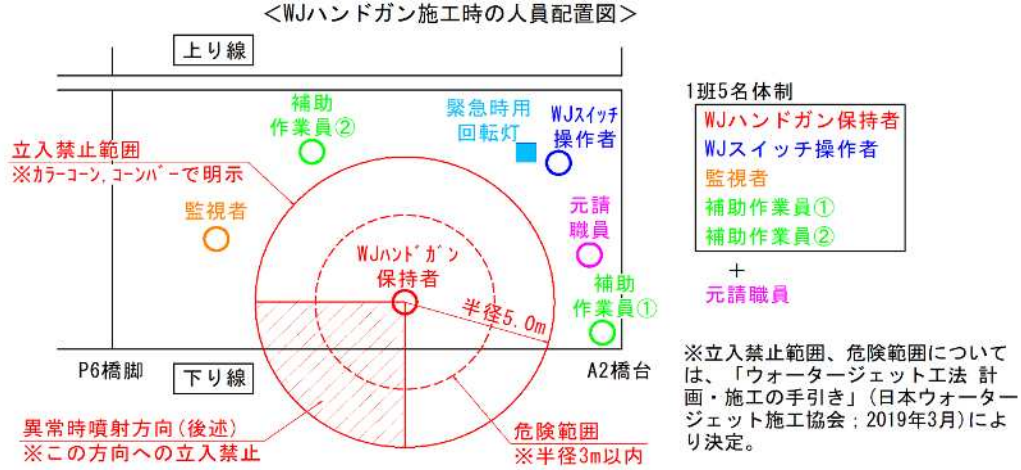


図-23 WJ ハンドガン施工時の人員配置図

(5) ハンドガンに接続されるトリガー制御用エアース (写真-3 参照) の閉塞 (折れや潰れ) を未然に防止するため保護カバーに収納した。



写真-3 ハンドガン作動確認状況

(6) 防護服は図-24 に示す防護範囲の広い防護服を使用し、作業に従事した。



図-24 ウォータージェット防護服

#### 4.4. まとめ

今回現場で施工した RC 中空床版橋下面の断面修復を経験したことで、今後の課題等を以下に整理する。

(1) 断面修復箇所が広範囲に及ぶと、事前に考えていた作業工法の変更や工程の遅延、構造安全性や現場の危険リスクが高まるため、断面修復工の発注図を基に出来るだけ早期に事前調査を実施し、断面修復箇所との相違箇所を比較検討して発注者と協議し、安全な工法を選択出来るよう問題を解決しておく必要がある。

(2) NEXCO 西日本の高速道路リニューアルプロジェクト工事では断面修復に伴う構造物はつりにウォータージェット工法を用いる現場が多いが、ウォータージェット工法は打撃工法等と比べ、危険性が高まる工法であるため、安全に施工するためにはしっかりとした人員配置計画が必要である。人員が増加すれば当然、労務費や人員配置計画で現場の負担が増えるため、発注者との折衝・会社への報告・協力業者との打合せを事前に行い問題を解決しておく必要がある。

#### 5. 最後に

既設 RC 中空床版橋の断面修復に関して、構造安全性の確保を目的に設計的な検討を行い、得られた知見を整理した。矢居谷橋下り線 P3～A2 径間の 1 橋の検討結果ではあるが、本報告が今後の同種工事の参考となれば幸いである。