

4.2. 鉛直 PC 鋼棒の損傷調査

4.2.1. はつり調査による破断位置の確認

「2.5.3 損傷箇所や損傷メカニズムに関する調査」での助言のとおり、鉛直 PC 鋼棒の損傷状況を確認するためには、コンクリートをはつり、直接目視することが最も確実である。

また、助言を受け実施した「4.1.1 構造に関する調査」により、以下のことが確認された。

- ・上部工突起部は、桁が浮き上がった現状では、圧縮力は作用していない。
- ・下部工突起部は、機能上重要な役割を果たしていない。
- ・過去の調査結果や点検結果からは、腐食環境が厳しい部位と想定される。

よって、下部工突起部を前面側からはつり、鉛直 PC 鋼棒の状態を直接確認することが安全で、かつ、損傷部位と状態を把握できるため、以下の手順ではつり調査を行った。

下部工突起部及び上部工突起部のはつり範囲を図 4.9 に示す。東側の下部工突起部から部分的にはつり、一部の鉛直 PC 鋼棒の破断位置を確認した上で、上部工突起部の東側の一部をはつった。その後、中央部、西側の下部工突起部及び上部工突起部をはつり、鉛直 PC 鋼棒の破断位置等を確認した。

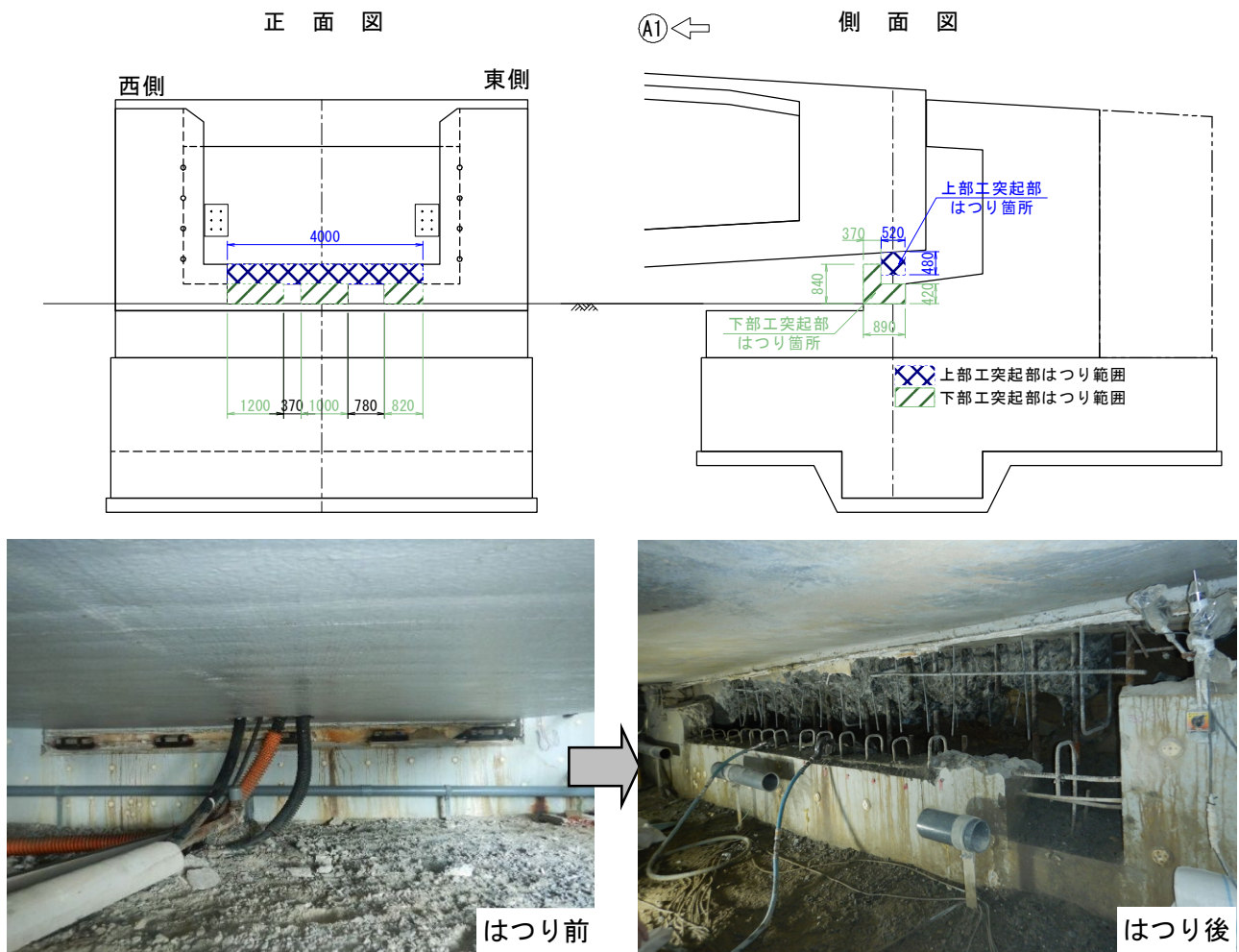
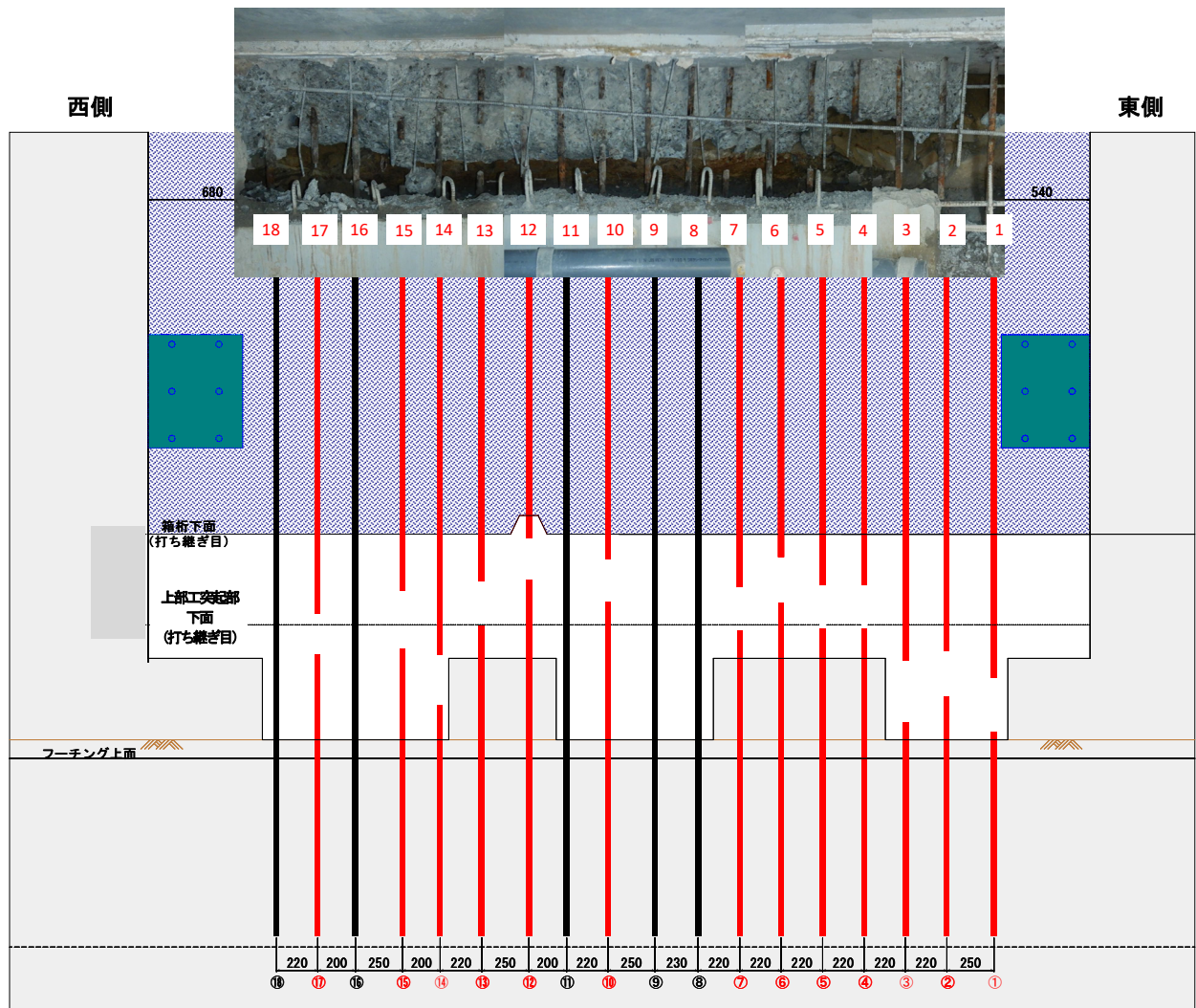


図 4.9 上部工突起部及び下部工突起部 はつり範囲

はつり調査の結果、図 4.10～図 4.11 に示すように、全 18 本のうち 13 本の破断面が確認できた。また、破断位置にはバラツキがあり、上部工突起部内部、上部工突起部と下部工の境界付近、もしくは下部工の内部で破断面が確認できた。なお、残り 5 本については破断面が確認できなかった。

各鋼棒を区別するため、東側を①として①～⑱までの番号を付した。なお、「2.3.4 平成 17 年度の調査」では、鋼棒番号は幅員中央から西あるいは東端に向かって連番で付している（詳細については、表 2.7 参照）。



凡例

- : 破断を確認した PC 鋼棒
- : 破断が確認できなかった PC 鋼棒

図 4.10 鉛直 PC 鋼棒破断位置 正面図

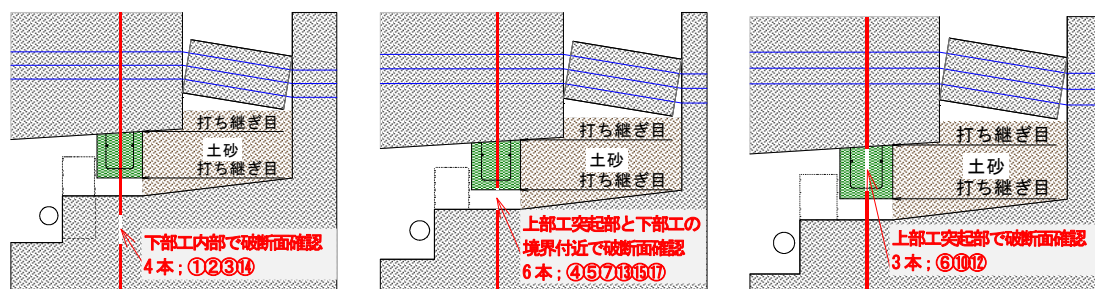
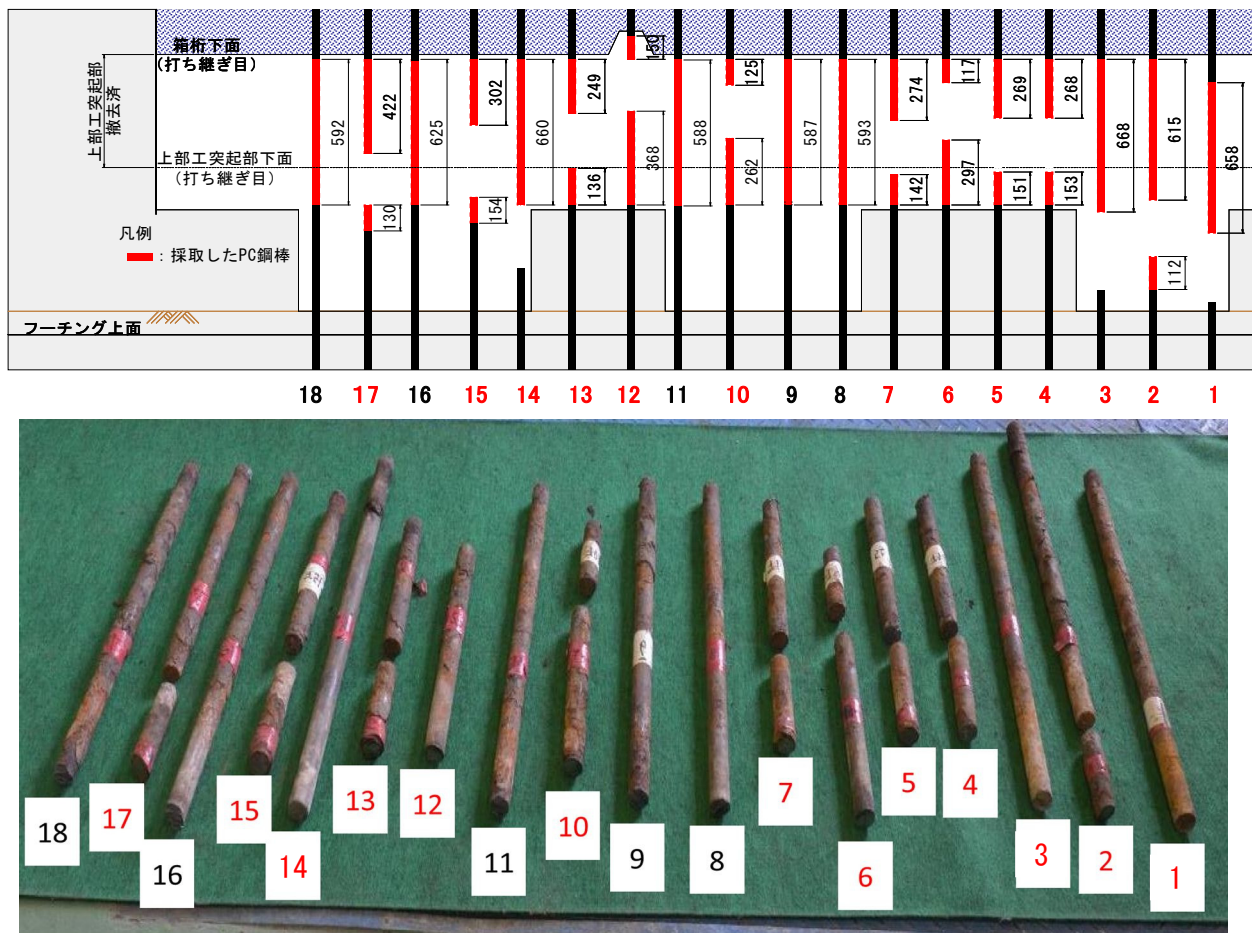


図 4.11 破断位置別の鉛直 PC 鋼棒イメージ図

破断面が確認できた鉛直 PC 鋼棒は、材料試験により破断面等を観察するため、サンプルを採取した。サンプルは、上部工側・下部工側の破断面を観察できるように採取した。一方、破断面が確認できていない鉛直 PC 鋼棒は、作業空間内で取り出せる長さで採取した。採取したサンプル状況図を図 4.12 に示す。



※赤字：破断面が確認できた PC 鋼棒サンプル，黒字：破断面が確認できなかった PC 鋼棒サンプル

図 4.12 鉛直 PC 鋼棒サンプル採取状況図


4.2.2. 材料試験による調査

(1) 外観観察

鉛直 PC 鋼棒全体の状況把握を行うことを目的とし、破断面やサンプル先端の形状確認を行った。PC 鋼棒は破断形態により破断面に刻まれる模様が異なることから、破断面模様を観察することで破断形態を推定することができる。

表 4.8 に示すように、延性破断を起こしたものは中央から外周へと広がるような破断面模様を呈し、脆性的に破断したものは端部の欠損や亀裂等を起点として一定の方向に放射線状で破断面模様が刻まれる。脆性破断の中でも疲労亀裂が生じた場合の破断形状については、疲労亀裂発生部は滑らかな形状を呈し、脆性破断が始まった箇所から、放射線状に破断面模様が刻まれることになる。

















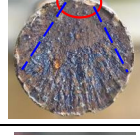

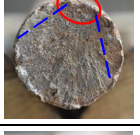
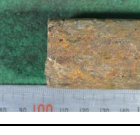

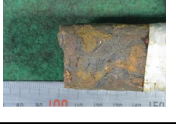
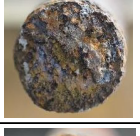

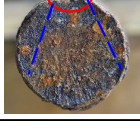



表 4.8 PC 鋼棒の破断形態に関する参考資料（過去に他の構造物で調査された事例）

		引張試験破断時(PC鋼棒)	遅れ破壊破断時(PC鋼棒)	疲労試験破断時(PC鋼より線)
外観	側面	延性破断（細って破断） 	脆性破断（細らず破断）  発錆，孔食	脆性破断（細らず破断）  <small>・PC鋼より線の軸疲労試験による破断面の一例 ・PC鋼棒の疲労破面が同様の形態を呈するか不明</small>
	断面	起点部位置：中心部付近 	起点部位置：表面部 	起点部位置：表面部 
概略図				

※参考資料：過去に他の構造物で調査された事例，出典；検査機関からの提供資料

























破断面の外観観察結果を以下に示す。表 4.9～表 4.10 に示すように鋼棒番号③、⑤、⑭、⑰など脆性破断の特徴を有する破断面がいくつか確認された。また、伸びや絞り等は確認されなかった。

表 4.9 外観観察結果一覧（鋼棒①～⑨）

鋼棒番号	箱桁側		A2橋台側		概説
	断面	側面	断面	側面	
①					箱桁側・橋台側いずれにおいても外縁の一部が欠損しており、脆性的に破断した破断面模様を呈している。先端形状としても伸びや絞りは確認されない。
②					箱桁側に脆性的に破断した破断面模様が確認される。橋台側は腐食が激しく破断面形状を読み取ることができない。箱桁側・橋台側共に先端形状としても伸びや絞りは確認されない。
③					箱桁側・橋台側共に脆性的に破断した破断面模様が確認される。箱桁側・橋台側共に先端形状としても伸びや絞りは確認されない。
④					箱桁側に脆性的に破断した破断面模様が確認される。橋台側は腐食が激しく破断面形状を読み取ることができない。箱桁側に先端形状としても伸びや絞りは確認されない。橋台側の先端の細りは腐食による欠損と推察される。
⑤					箱桁側・橋台側いずれにおいても外縁の一部が欠損しており、脆性的に破断した破断面模様を呈している。先端形状としても伸びや絞りは確認されない。
⑥					箱桁側に脆性的に破断した破断面模様が確認される。橋台側は腐食が激しく破断面形状を読み取ることができない。箱桁側・橋台側いずれにも先端形状としても伸びや絞りは確認されない。
⑦					箱桁側に脆性破断と推定される破断面模様が見られる。橋台側は腐食が激しく破断面形状を読み取ることができない。先端形状としては橋台側に若干の先端細りが見られる。
⑧	破断面 未確認				-
⑨	破断面 未確認				-

※赤丸は破断起点部、青線は放射線状の破断面模様を示す。
検査機関の破断 PC 鋼棒に関する調査結果報告書（2021年6月）より転載

表 4.10 外観観察結果一覧（鋼棒⑩～⑱）

鋼棒番号	箱桁側		A2橋台側		概説
	断面	側面	断面	側面	
⑩					箱桁側・橋台側共に非常に腐食の進行が激しく、破面を読み取ることができない。箱桁側・橋台側共に先端の延びや絞りは見られない。
⑪	破断面 未確認				-
⑫					箱桁側に脆性的に破断した破面模様が確認される。橋台側は腐食が激しく破面形状を読み取ることができない。箱桁側・橋台側共に先端形状としても延びや絞りは確認されない。
⑬					箱桁側に脆性的に破断した破面模様及び破断起点となった外縁の欠損が確認される。橋台側は腐食が激しく破面形状を読み取ることができない。箱桁側・橋台側共に先端形状としても延びや絞りは確認されない。
⑭					箱桁側・橋台側共に脆性破断を示す破面形状が確認される。箱桁側・橋台側共に先端形状に延びや絞りは確認されない。
⑮					箱桁側・橋台側共に腐食が激しく、破面形状を読み取ることができないが、橋台側について錆除去後は脆性破断を示す波紋を確認することができる。箱桁側・橋台側共に先端形状に延びや絞りは見られない。
⑯	破断面 未確認				-
⑰					箱桁側・橋台側共に腐食が激しく、破面形状を読み取ることができない。箱桁側・橋台側共に先端形状に延びや絞りは見られない。全鋼棒の中で最も腐食の進行が著しい。
⑱	破断面 未確認				-

※赤丸は破断起点部、青線は放射線状の破断面模様を示す。
 検査機関の破断 PC 鋼棒に関する調査結果報告書（2021年6月）より転載

(2) 走査型電子顕微鏡による破断面観察 (SEM 観察)

詳細な破断面形状について、走査型電子顕微鏡を用いて 6 倍及び 500 倍による拡大観察を行った。

図 4.13 及び図 4.14 に参考資料として、脆性破断と延性破断の断面の特徴的な模様を示す。

一般に金属材料が延性破断を起こした際の特徴は、図 4.13 に示すように破断面表面がきめ細やかで小さなくぼみが破断面に刻まれる。一方、図 4.14 に示すように、脆性破断を起こした破断面形状は表面が粗くなる傾向にある。

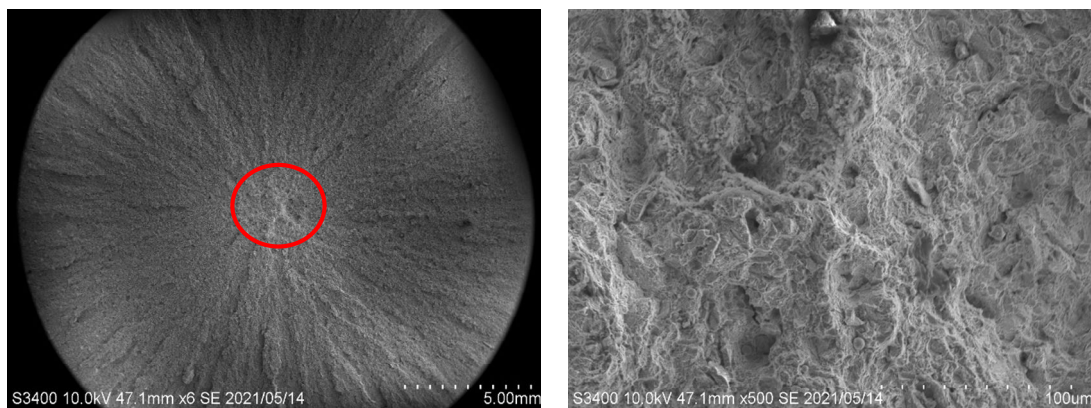


図 4.13 【参考資料】延性破断面模様 (左 : 6 倍、右 : 500 倍)

※赤丸部分は 500 倍観察した箇所を示す。

※参考資料 : 過去に他の構造物で調査された事例, 出典 ; 検査機関からの提供資料

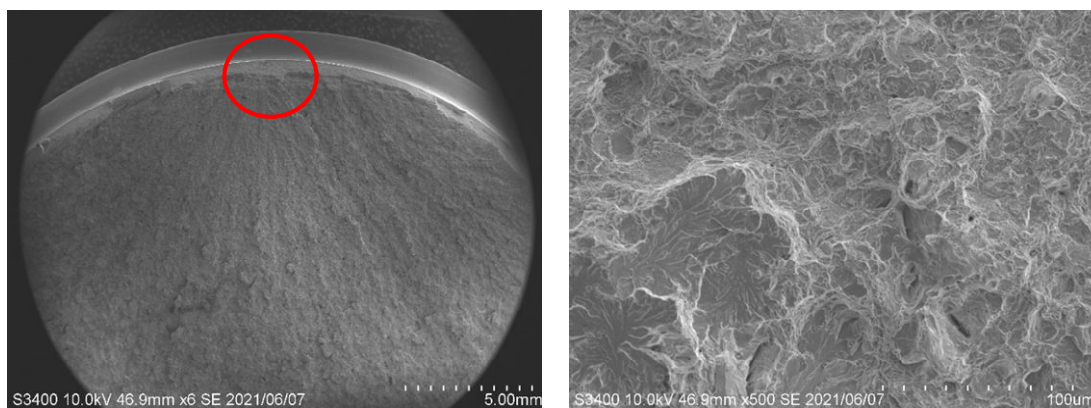


図 4.14 【参考資料】脆性破断面模様 (左 : 6 倍、右 : 500 倍)

※赤丸部分は 500 倍観察した箇所を示す。

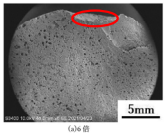
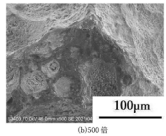
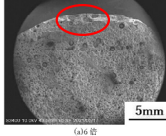
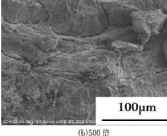
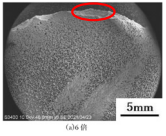
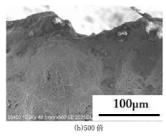
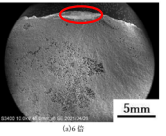
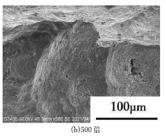
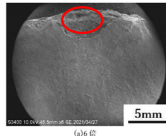
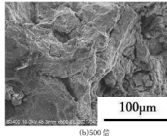
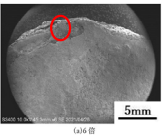
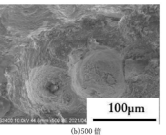
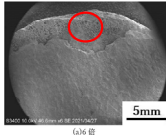
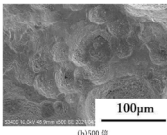
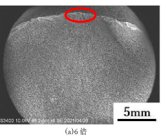
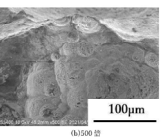
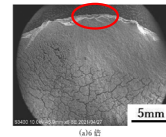
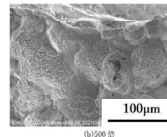
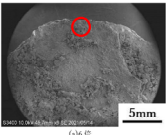
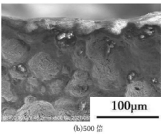
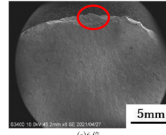
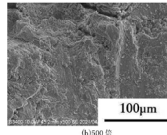
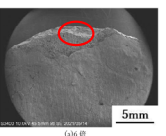
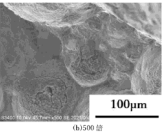
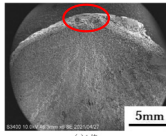
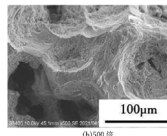
※参考資料 : 過去に他の構造物で調査された事例, 出典 ; 検査機関からの提供資料

SEMは、錆除去後に破断起点部を確認できる一方の破断面を対象として実施した。表 4.11 に、SEMによる破断面観察結果を示す。全ての破断面に、図 4.14 に示すような脆性破断の表面が粗くなる特徴的な模様が確認された。

また、起点部の箇所を 500 倍で拡大観察した範囲では、疲労亀裂が生じた場合に確認されるストライエーションと呼ばれる明瞭なパターンはなく、きめ細かいわれは確認できなかった。また、リバーパターンと呼ばれる明瞭なパターンもなく、方向性のない凹凸がある破面も確認できなかった。

なお、破面の洗浄は、アセトンとクエン酸水素二アンモニウム溶液を用いて行ったが、洗浄しても錆が付着していて、破断面形態が確認できなかった。

表 4.11 SEM 観察結果一覧

鋼棒番号破断位置	6倍	500倍	鋼棒番号破断位置	6倍	500倍
① 箱桁側			⑩ 橋台側		
② 橋台側			⑪ —	破断面 未確認	破断面 未確認
③ 箱桁側			⑫ 橋台側		
④ 橋台側			⑬ 橋台側		
⑤ 橋台側			⑭ 箱桁側		
⑥ 橋台側			⑮ 橋台側		
⑦ 橋台側			⑯ —	破断面 未確認	破断面 未確認
⑧ —	破断面 未確認	破断面 未確認	⑰ 橋台側		
⑨ —	破断面 未確認	破断面 未確認	⑱ —	破断面 未確認	破断面 未確認

※赤丸部分は 500 倍観察した箇所を示す。

検査機関の破断 PC 鋼棒に関する調査結果報告書 (2021 年 6 月) より転載

(3) 単位質量測定

錆の付着量を把握するため、錆除去前後の単位質量測定を行った。このうち、破断面を有する13本についてサンプルごとの腐食の状態を調査するため、**図 4.15** に示すように、破断面を含むサンプルを約50mmに切断後、サンプル表面に認められる錆を除去し、その前後において重量を測定した後、1m換算で重量の変化を調査した。破断面が上部工側・下部工側に別れているサンプルについては、腐食が進行している方のサンプルを使用した。

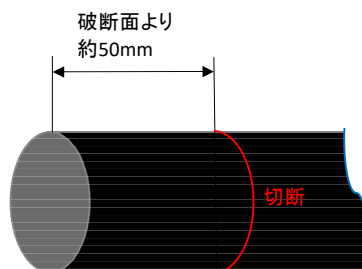


図 4.15 単位質量測定試験範囲

表 4.12 に各サンプルの錆除去前後における重量差を示す。最も重量差が大きかったのはPC鋼棒⑩の443g/mで減少率は7.15%、最も重量差が小さかったのはPC鋼棒⑭の80g/mで減少率は1.28%であった。

また、錆除去後の重量が最も小さかったのは、PC鋼棒⑰の5,279g/mで、かなり腐食が進行しているものと考えられる。

表 4.12 錆除去前後の重量比一覧

PC 鋼棒番号	単位質量 (g/m)			減少率 (%)
	錆除去前	錆除去後	減少量	
①	6,086	5,945	141	2.32%
②	5,945	5,703	242	4.07%
③	5,980	5,839	141	2.36%
④	6,019	5,779	240	3.99%
⑤	6,064	5,903	161	2.66%
⑥	5,923	5,701	222	3.75%
⑦	6,108	5,927	181	2.96%
⑧	-	-	-	-
⑨	-	-	-	-
⑩	6,200	5,757	443	7.15%
⑪	-	-	-	-
⑫	6,019	5,718	301	5.00%
⑬	6,199	5,958	241	3.89%
⑭	6,246	6,166	80	1.28%
⑮	6,206	6,007	199	3.21%
⑯	-	-	-	-
⑰	5,380	5,279	101	1.88%
⑱	-	-	-	-

検査機関の破断 PC 鋼棒に関する調査結果報告書 (2021 年 6 月) より転載

(4) 鋼棒径の計測

発錆による鉛直 PC 鋼棒の形状変化を確認するため、竣工当時の図面の径と採取した鉛直 PC 鋼棒サンプルの径を比較し、減肉の進行程度を数値化した。図 4.16 に示すように、錆を除去した破断面を有する 13 本の PC 鋼棒サンプルの径を計測し、設計径 $\phi 33$ と比較を行った。計測にはマイクロメーターを使用し、破断面から 10mm 間隔で 5 点計測して、その平均値を求めた。

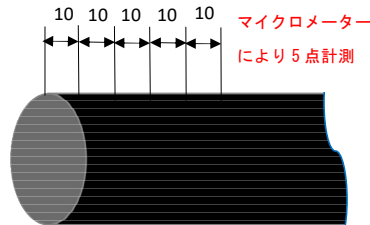


図 4.16 形状計測位置

表 4.13 に設計径との比較結果を示す。また、図 4.17 に設計径に対する錆を除去したサンプルの計測径をグラフで示す。最も計測径が小さいのは PC 鋼棒⑰の $\phi 30.07\text{mm}$ で、2.93mm 減少していた。

表 4.13 設計径との寸法比一覧

PC 鋼棒番号	計測径 (mm)			寸法比 (%)	減少率 (%)
	設計径	錆除去後	減少量		
①	33.00	31.78	1.22	96.30%	3.70%
②	33.00	31.29	1.71	94.82%	5.18%
③	33.00	31.66	1.34	95.94%	4.06%
④	33.00	31.41	1.59	95.18%	4.82%
⑤	33.00	31.61	1.39	95.79%	4.21%
⑥	33.00	31.73	1.27	96.15%	3.85%
⑦	33.00	31.57	1.43	95.67%	4.33%
⑧	-	-	-	-	-
⑨	-	-	-	-	-
⑩	33.00	31.18	1.82	94.48%	5.52%
⑪	-	-	-	-	-
⑫	33.00	31.47	1.53	95.36%	4.64%
⑬	33.00	32.03	0.97	97.06%	2.94%
⑭	33.00	32.29	0.71	97.85%	2.15%
⑮	33.00	32.03	0.97	97.06%	2.94%
⑯	-	-	-	-	-
⑰	33.00	30.07	2.93	91.12%	8.88%
⑱	-	-	-	-	-

※設計径 $\phi 33$ については竣工当時の図面より引用した

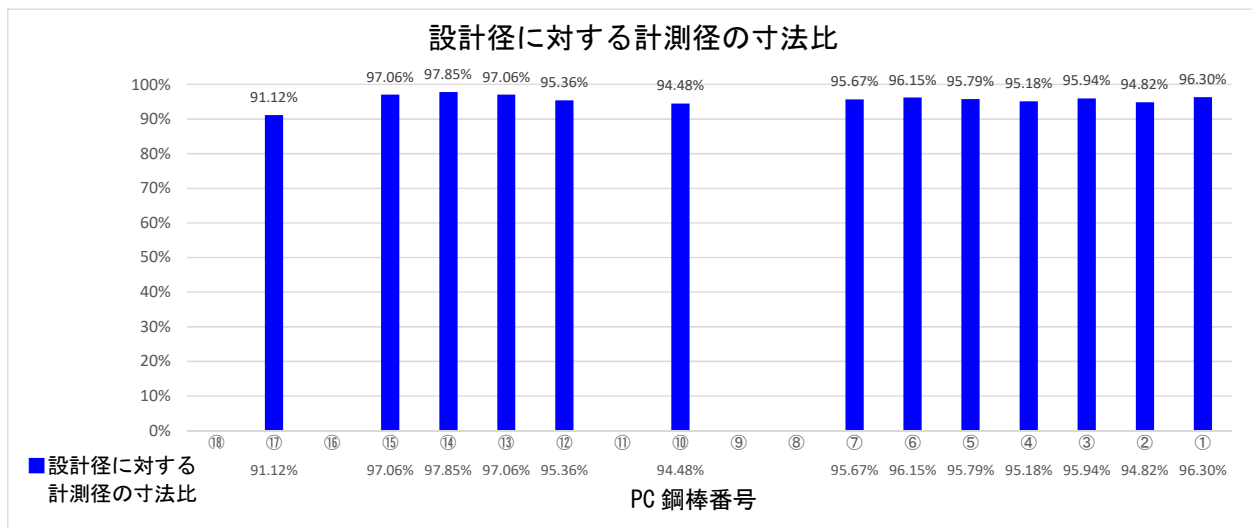


図 4.17 設計径に対する錆を除去したサンプルの計測径

(5) 腐食状況と破断位置の関係

破断した鉛直 PC 鋼棒について、腐食状況と破断位置の相関分析を行った。破断位置により鉛直 PC 鋼棒を 3 つのグループに分け比較を行った。

上部工突起部内で破断している鉛直 PC 鋼棒 (⑥⑩⑫) の重量差が比較的大きかった。設計径との比較では平均値よりもやや減肉量が多かった (表 4.14~4.15、図 4.18~4.19 参照)。

境界部で破断している鉛直 PC 鋼棒 (④⑤⑦⑬⑮⑰) の重量差は平均値と近似していた。設計径との比較では平均値よりもやや減肉量が多かった (表 4.14~4.15、図 4.18~4.19 参照)。

下部工で破断している PC 鋼棒 (①②③⑭) については重量差が平均値より小さかった。設計径との比較においても、平均値より減肉量が少なかった (表 4.14~4.15、図 4.18~4.19 参照)。

以上より、鉛直 PC 鋼棒の破断位置による特定の傾向はみられなかった。

表 4.14 破断位置と JIS 規格重量下限値と PC 鋼棒サンプル重量との比較

破断部位	PC鋼棒 番号	単位重量 (g/m)		破断部位 平均 (g/m)	重量比 (%)	偏差 (%)	破断部位 平均 (%)
		錆除去後	重量差				
上部工突起部	⑥	5.701	-644	-620	89.85%	-10.15%	-9.77%
	⑩	5.757	-588		90.73%	-9.27%	
	⑫	5.718	-627		90.12%	-9.88%	
境界部	④	5.779	-566	-536	91.08%	-8.92%	-8.45%
	⑤	5.903	-442		93.03%	-6.97%	
	⑦	5.927	-418		93.41%	-6.59%	
	⑬	5.958	-387		93.90%	-6.10%	
	⑮	6.007	-338		94.67%	-5.33%	
	⑰	5.279	-1,066		83.20%	-16.80%	
下部工	①	5.945	-400	-432	93.70%	-6.30%	-6.80%
	②	5.703	-642		89.88%	-10.12%	
	③	5.839	-506		92.03%	-7.97%	
	⑭	6.166	-179		97.18%	-2.82%	
平均値	5.822	-523	-	91.75%	-8.25%	-	

※JIS規格重量下限値: 6.345g/m

表 4.15 破断位置と設計径と PC 鋼棒 サンプル計測径との比較

破断部位	PC鋼棒 番号	計測径 (mm)			破断部位 平均 (g/m)	寸法比 (%)	減少率 (%)	破断部位 平均 (%)
		設計径	錆除去後	寸法差				
上部工突起部	⑥	33.00	31.73	-1.27	-1.54	96.15%	-3.85%	-4.67%
	⑩	33.00	31.18	-1.82		94.48%	-5.52%	
	⑫	33.00	31.47	-1.53		95.36%	-4.64%	
境界部	④	33.00	31.41	-1.59	-1.55	95.18%	-4.82%	-4.69%
	⑤	33.00	31.61	-1.39		95.79%	-4.21%	
	⑦	33.00	31.57	-1.43		95.67%	-4.33%	
	⑬	33.00	32.03	-0.97		97.06%	-2.94%	
	⑮	33.00	32.03	-0.97		97.06%	-2.94%	
	⑰	33.00	30.07	-2.93		91.12%	-8.88%	
下部工	①	33.00	31.78	-1.22	-1.25	96.30%	-3.70%	-3.77%
	②	33.00	31.29	-1.71		94.82%	-5.18%	
	③	33.00	31.66	-1.34		95.94%	-4.06%	
	⑭	33.00	32.29	-0.71		97.85%	-2.15%	
平均値		31.55	-1.45	-	95.60%	-4.40%	-	

※設計径φ33については、竣工当時の図面より引用

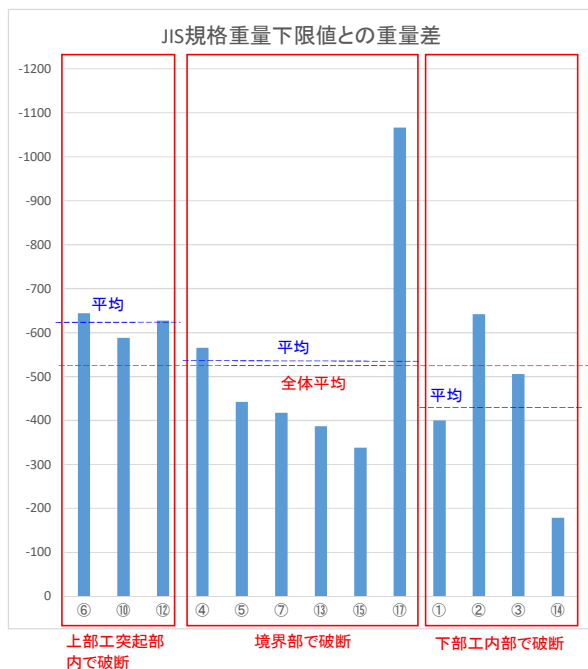


図 4.18 破断位置と JIS 規格重量下限値と PC 鋼棒サンプル重量差

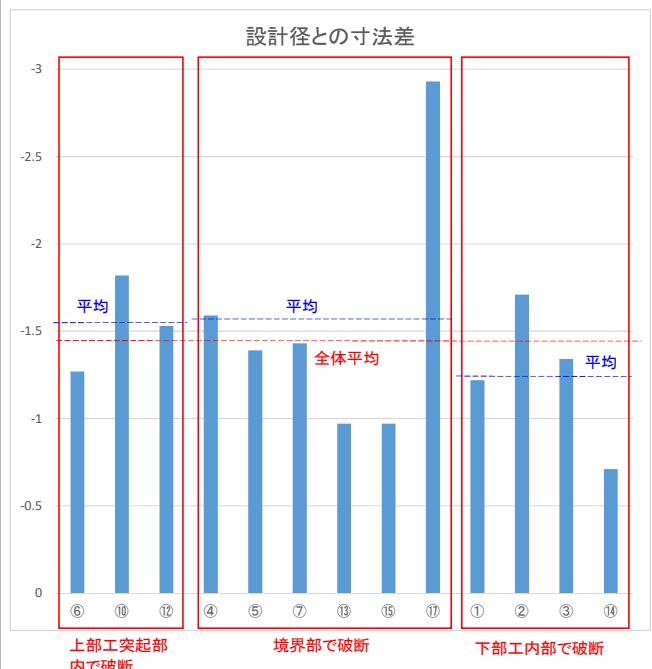


図 4.19 破断位置と設計径と PC 鋼棒 サンプル計測径との寸法比

(6) 腐食状況と設置位置の関係

鉛直 PC 鋼棒の設置位置と腐食状況の相関について分析を行った。設置位置は PC 鋼棒①～⑥を東側、PC 鋼棒⑦～⑫を中央、PC 鋼棒⑬～⑰を西側とした。

東側の重量差は平均値をやや上回る程度であり、平均からの大きな偏差はなかった。設計径との比較においては平均減肉量をやや下回る値となった(表 4. 16～4. 17、図 4. 20～4. 21 参照)。

中央の重量差は、平均値をやや上回る程度であった。設計径との寸法差は、平均減肉量からの乖離が東側・西側と比較して最も大きかった(表 4. 16～4. 17、図 4. 20～4. 21 参照)。

西側の重量差は平均値よりも小さかった。設計径との寸法差においても同様で、平均減肉量よりも小さかった(表 4. 16～4. 17、図 4. 20～4. 21 参照)。

以上より、鉛直 PC 鋼棒の設置位置による特定の傾向はみられなかった。

表 4. 16 設置位置と JIS 規格重量下限値と PC 鋼棒サンプル重量との比較

設置位置	PC鋼棒番号	単位重量(g/m)		設置位置平均	重量比(%)	偏差(%)	設置位置平均
		錆除去後	重量差				
東側	①	5,945	-400	-533	93.70%	-6.30%	-8.41%
	②	5,703	-642		89.88%	-10.12%	
	③	5,839	-506		92.03%	-7.97%	
	④	5,779	-566		91.08%	-8.92%	
	⑤	5,903	-442		93.03%	-6.97%	
	⑥	5,701	-644		89.85%	-10.15%	
中央	⑦	5,927	-418	-544	93.41%	-6.59%	-8.58%
	⑩	5,757	-588		90.73%	-9.27%	
	⑫	5,718	-627		90.12%	-9.88%	
西側	⑬	5,958	-387	-493	93.90%	-6.10%	-7.76%
	⑭	6,166	-179		97.18%	-2.82%	
	⑮	6,007	-338		94.67%	-5.33%	
	⑰	5,279	-1,066		83.20%	-16.80%	
平均値		5,822	-523	-	91.75%	-8.25%	-

表 4. 17 設置位置と設計径と PC 鋼棒 サンプル計測径との比較

設置位置	PC鋼棒番号	計測径(mm)			設置位置平均	寸法比(%)	減少率(%)	設置位置平均
		設計径	錆除去後	減少量				
東側	①	33.00	31.78	-1.22	-1.42	96.30%	-3.70%	-4.30%
	②	33.00	31.29	-1.71		94.82%	-5.18%	
	③	33.00	31.66	-1.34		95.94%	-4.06%	
	④	33.00	31.41	-1.59		95.18%	-4.82%	
	⑤	33.00	31.61	-1.39		95.79%	-4.21%	
	⑥	33.00	31.73	-1.27		96.15%	-3.85%	
中央	⑦	33.00	31.57	-1.43	-1.59	95.67%	-4.33%	-4.83%
	⑩	33.00	31.18	-1.82		94.48%	-5.52%	
	⑫	33.00	31.47	-1.53		95.36%	-4.64%	
西側	⑬	33.00	32.03	-0.97	-1.40	97.06%	-2.94%	-4.23%
	⑭	33.00	32.29	-0.71		97.85%	-2.15%	
	⑮	33.00	32.03	-0.97		97.06%	-2.94%	
	⑰	33.00	30.07	-2.93		91.12%	-8.88%	
平均値			31.55	-1.45	-	95.60%	-4.40%	-

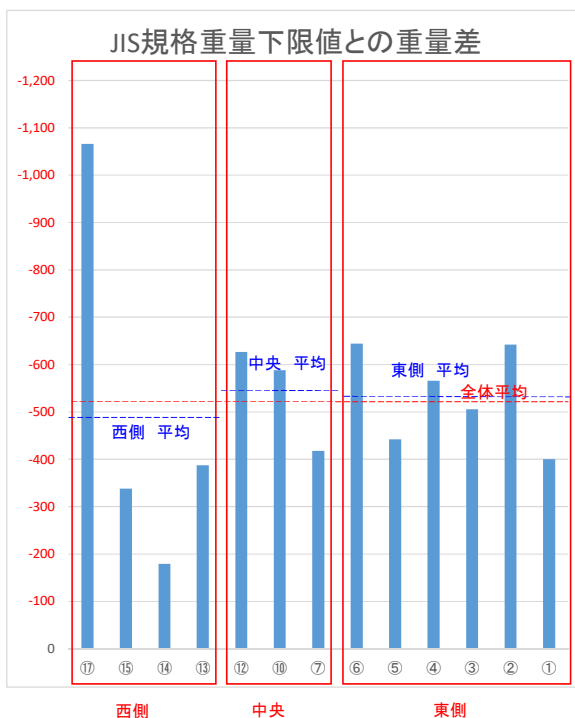


図 4. 20 設置位置と JIS 規格重量下限値と PC 鋼棒サンプル重量差

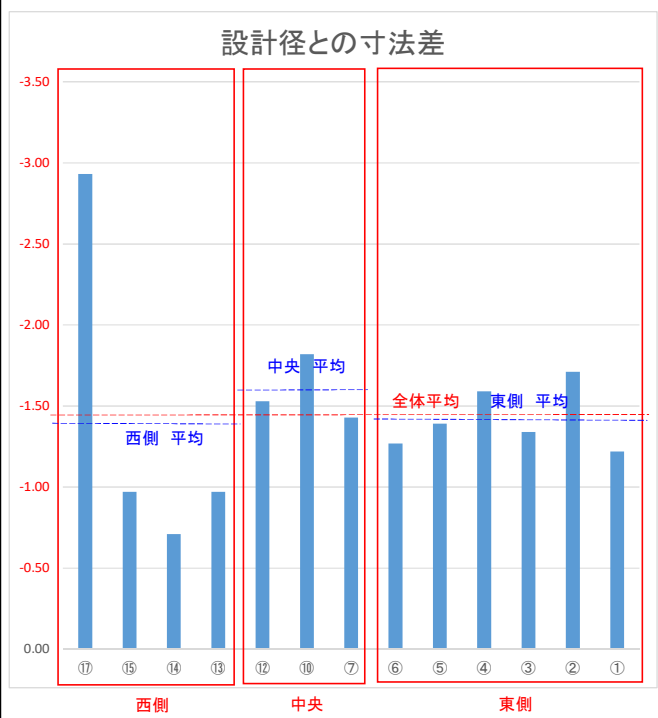


図 4. 21 設置位置と設計径と PC 鋼棒 サンプル計測径との寸法比

(7) 金属組織観察

破断した鉛直 PC 鋼棒の材質について、異常がなかったかを確認するため、鉛直 PC 鋼棒から資料を採取し、図 4.22 に示すように光学顕微鏡を用いて金属組織を観察した。

なお、図 4.23～図 4.24 に通常の PC 鋼棒の金属組織を例示する。

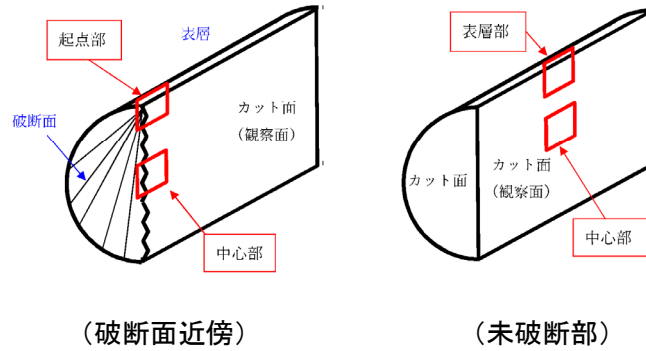


図 4.22 金属組織観察箇所

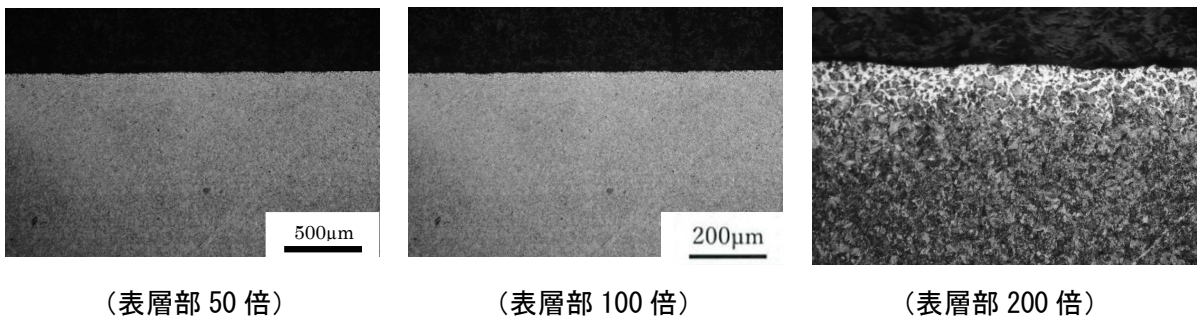


図 4.23 通常品の表層部の金属組織 (参考)

※参考；通常品の表層部の金属組織，出典；検査機関からの提供資料

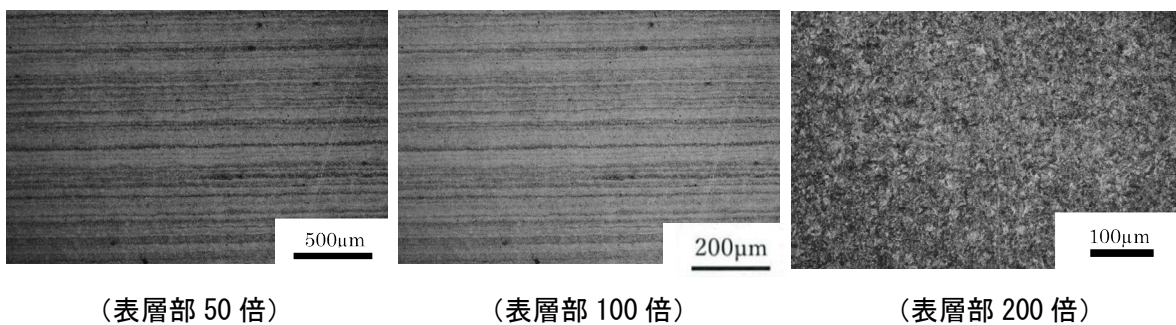
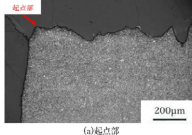
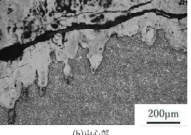
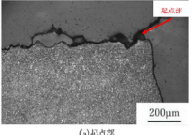
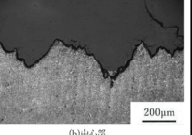
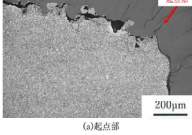
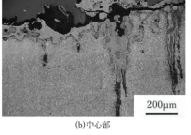
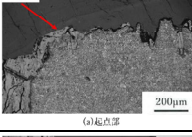
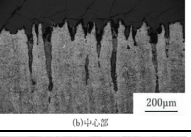
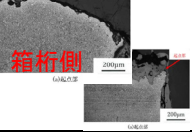
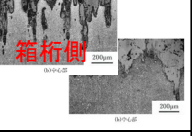
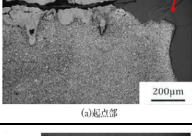
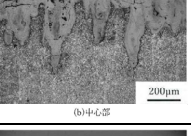
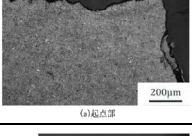
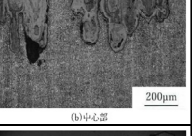
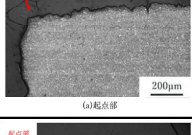
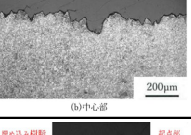
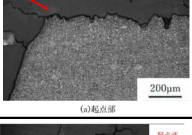
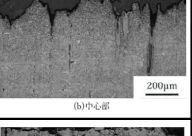
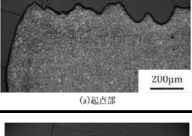
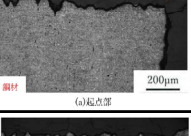
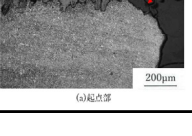
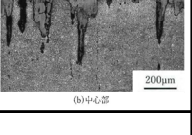
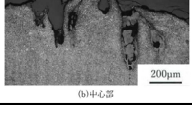
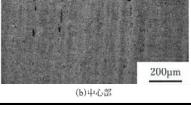
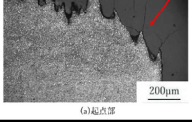
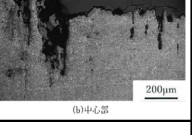


図 4.24 通常品の中心部の金属組織 (参考)

※参考；通常品の表層部の金属組織，出典；検査機関からの提供資料

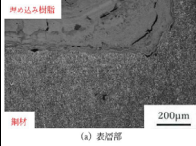
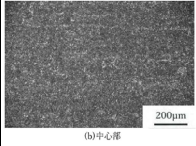
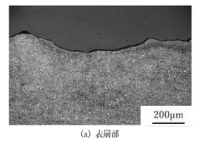
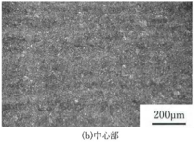
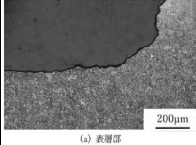
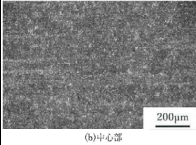
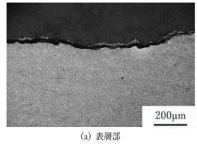
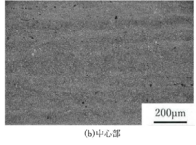
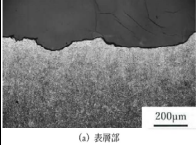
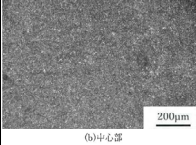
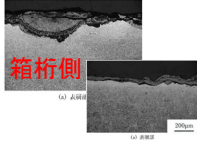
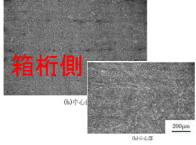
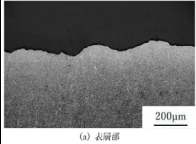
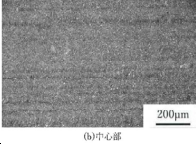
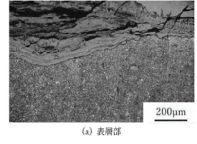
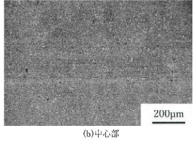
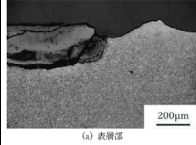
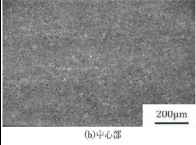
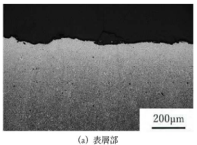
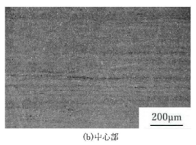
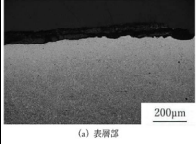
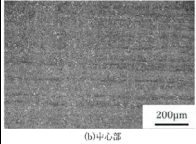
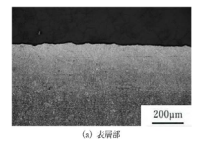
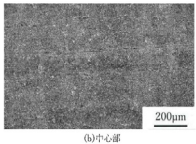
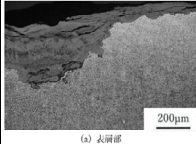
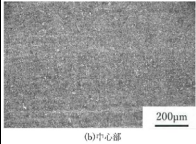
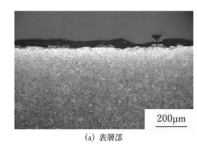
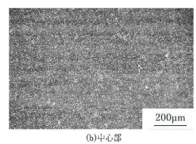
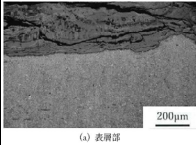
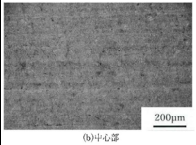
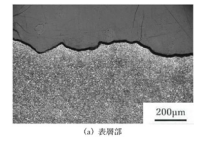
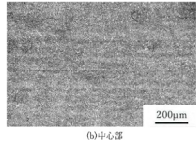
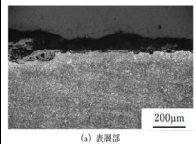
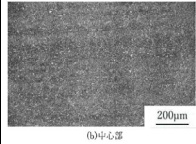
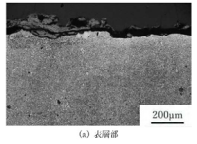
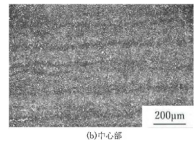
表 4.18 に、破断面を有する鉛直 PC 鋼棒 13 本の破断面近傍の金属組織観察結果を示す。また、全 18 本の鉛直 PC 鋼棒の未破断面の金属組織観察結果を表 4.19 に示す。破断面近傍及び未破断面ともに、金属組織は正常なパーライト組織であった。

表 4.18 金属組織観察結果一覧（破断面近傍）

	起点部	中心部		起点部	中心部
①	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm	⑩	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm
②	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm	⑪	破断面 未確認	破断面 未確認
③	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm	⑫	 (a) 起点部 200µm 箱桁側	 (b) 中心部 200µm 箱桁側
④	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm	⑬	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm
⑤	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm	⑭	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm
⑥	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm 層状剥離 鋼材	⑮	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm
⑦	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm	⑯	破断面 未確認	破断面 未確認
⑧	破断面 未確認	破断面 未確認	⑰	 (a) 起点部 200µm	 (b) 中心部 200µm
⑨	破断面 未確認	破断面 未確認	⑱	破断面 未確認	破断面 未確認

検査機関の破断 PC 鋼棒に関する調査結果報告書（2021 年 6 月）より転載

表 4.19 金属組織観察結果一覧（未破断部）

	起点部	中心部		起点部	中心部
①	 ① 表面部 200μm	 ① 中心部 200μm	⑩	 ⑩ 表面部 200μm	 ⑩ 中心部 200μm
②	 ② 表面部 200μm	 ② 中心部 200μm	⑪	 ⑪ 表面部 200μm	 ⑪ 中心部 200μm
③	 ③ 表面部 200μm	 ③ 中心部 200μm	⑫	 ⑫ 表面部 200μm	 ⑫ 中心部 200μm
④	 ④ 表面部 200μm	 ④ 中心部 200μm	⑬	 ⑬ 表面部 200μm	 ⑬ 中心部 200μm
⑤	 ⑤ 表面部 200μm	 ⑤ 中心部 200μm	⑭	 ⑭ 表面部 200μm	 ⑭ 中心部 200μm
⑥	 ⑥ 表面部 200μm	 ⑥ 中心部 200μm	⑮	 ⑮ 表面部 200μm	 ⑮ 中心部 200μm
⑦	 ⑦ 表面部 200μm	 ⑦ 中心部 200μm	⑯	 ⑯ 表面部 200μm	 ⑯ 中心部 200μm
⑧	 ⑧ 表面部 200μm	 ⑧ 中心部 200μm	⑰	 ⑰ 表面部 200μm	 ⑰ 中心部 200μm
⑨	 ⑨ 表面部 200μm	 ⑨ 中心部 200μm	⑱	 ⑱ 表面部 200μm	 ⑱ 中心部 200μm

検査機関の破断PC鋼棒に関する調査結果報告書（2021年6月）より転載

(8) 硬度測定

今回採取した鉛直 PC 鋼棒のサンプルについて、図 4.25 に示すように破断部近傍及び未破断部の硬度測定を行った。なお、測定はビッカース硬さ試験により行い、測定値はビッカース硬さ (HV) を示す。

測定は、表層部と中心部に測定箇所を設け、各点 10 回計測し、その平均値を求めた。

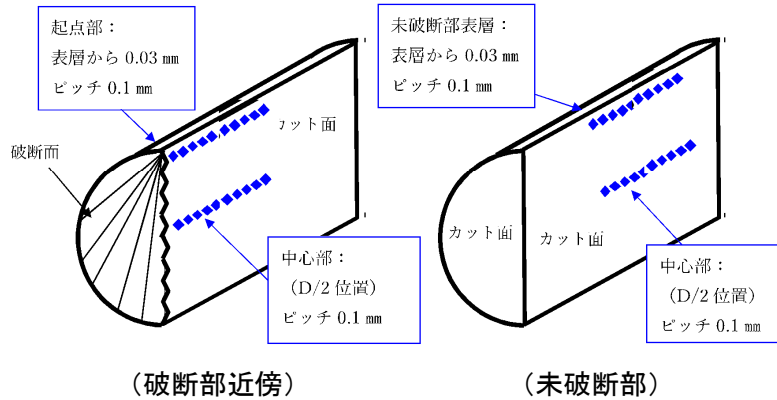


図 4.25 硬度計測位置図

表 4.20 に破断部近傍及び未破断部の硬度計測結果の平均値を示す。通常品 (PC 鋼棒 3 種 製造品) と硬度比較を行ったが、大きな差異はなかった。

表 4.20 硬度計測結果一覧

硬度測定結果		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
破断部近傍	表層部	376.2	379.5	374.5	384	381.5	377.9	378.1	-	-
	中心部	380.6	398.3	381.3	390	383	377.8	396.4	-	-
未破断部	表層部	364	389.3	362.6	351.8	394.3	362	371.4	369.6	370.1
	中心部	395	392.8	398.9	373.7	401.8	381.3	394.8	377.6	375.9

硬度測定結果		⑩	⑪	⑫	⑫ (箱桁側)	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	通常品 (参考値)
破断部近傍	表層部	388.6	-	386.3	384.8	377.9	390.3	372.7	-	365.4	-	-
	中心部	402.1	-	387.8	387.7	383.7	390.3	386.5	-	368.3	-	-
未破断部	表層部	389.9	361.7	386	372.2	377.5	355.2	360.3	359.9	369.5	370.2	367.1
	中心部	404.1	389.8	393.1	393.1	402.7	367.2	397.9	393.1	373.6	379.8	376.5

検査機関の破断 PC 鋼棒に関する調査結果報告書 (2021 年 6 月) より転載

(9) 化学成分分析

破断した鉛直 PC 鋼棒の材質に異常がなかったかを確認するため、採取したサンプルの化学成分分析を行った。JIS G 3109 に規定されている PC 鋼棒の成分規格値と比較して、サンプル内の検出成分値が規格値内に収まっているかを確認した。

比較を行う成分は、鋼材にとって不純物となり、鋼材性能を低下させる以下の成分とした。

P (リン) 0.030%以下

S (硫黄) 0.035%以下

Cu (銅) 0.30%以下

図 4.26 に示すように、成分分析の実施は、破断面もしくは切断面から 200mm 程度離れた箇所サンプルを使用して、成分分析を行った。

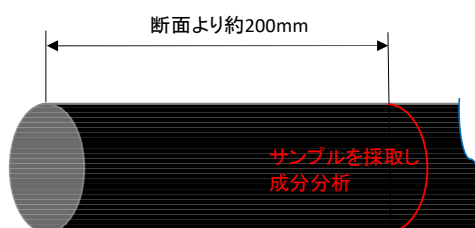


図 4.26 化学成分分析サンプル採取位置図

表 4.21 に化学成分分析結果を示す。18 本全てのサンプルは JIS 規格を満足していた。

表 4.21 化学成分分析結果一覧

PC鋼棒番号	JIS規格			判定
	P	S	Cu	
	≤0.030	≤0.035	≤0.30	
①	0.011	0.013	0.07	満足
②	0.011	0.012	0.07	満足
③	0.012	0.012	0.07	満足
④	0.012	0.013	0.07	満足
⑤	0.011	0.012	0.07	満足
⑥	0.011	0.013	0.07	満足
⑦	0.012	0.012	0.07	満足
⑧	0.012	0.013	0.07	満足
⑨	0.012	0.012	0.07	満足
⑩	0.011	0.013	0.07	満足
⑪	0.012	0.013	0.07	満足
⑫	0.011	0.012	0.07	満足
⑬	0.012	0.012	0.07	満足
⑭	0.012	0.013	0.07	満足
⑮	0.012	0.012	0.07	満足
⑯	0.011	0.013	0.07	満足
⑰	0.011	0.013	0.07	満足
⑱	0.012	0.013	0.07	満足

検査機関の破断 PC 鋼棒に関する調査結果報告書 (2021 年 6 月) より転載

(10) 水素含有量測定試験

鉛直 PC 鋼棒の破断要因の一つとして、厳しい腐食環境で、腐食に伴い水素が蓄積され水素脆化割れの可能性が考えられるため、鉛直 PC 鋼棒のサンプルに含まれている水素量を測定した。水素含有量測定試験で用いるサンプルは A2 橋台の東側・中央・西側にて水素量の比較を行うため、下記の 3 本とした。

- ・ PC 鋼棒②サンプル 橋台側
- ・ PC 鋼棒⑩サンプル 箱桁側
- ・ PC 鋼棒⑰サンプル 橋台側

水素含有量測定試験に用いるサンプルの採取箇所を図 4.27 に示す。

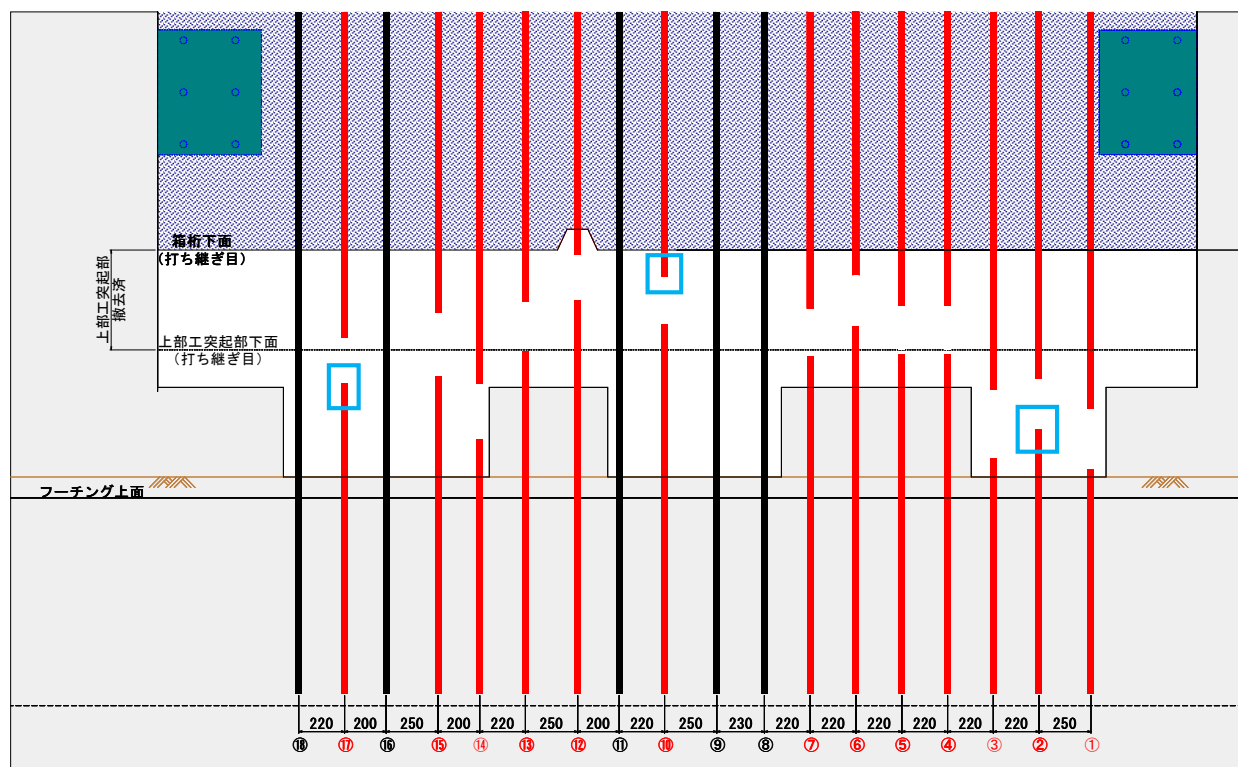


図 4.27 化学成分分析サンプル採取位置図

鉛直 PC 鋼棒のサンプルに含まれる水素量は、試験の結果、検出可能下限値を下回る数値であった。

PC 鋼棒②橋台側 0.2ppm 未満 (0.00002%未満)

PC 鋼棒⑩箱桁側 0.2ppm 未満 (0.00002%未満)

PC 鋼棒⑰橋台側 0.2ppm 未満 (0.00002%未満)