

平成 25 年度(一財)港湾空港総合技術センター 研究開発助成報告書

助成番号 : 平成 26 年 1 月 27 日付

第 13-1 号

研究開発項目 : (指定課題①) 港湾、海岸及び空港の施設の健全度
評価に関する研究

40 年間海水に曝されたプレストレスト コンクリート梁の健全度評価 -塩害による有効プレストレスへの影響-

平成 27 年 4 月 30 日

東京工業大学 理工学研究科

国際開発工学専攻

大即信明

目次

1. 序論	1
1.1. 本研究の背景.....	1
1.2. 本研究の目的.....	1
1.3. 本研究の意義.....	2
1.4. 本研究フロー.....	2
2. 既往の研究	3
3. 目視調査	14
3.1. 実験概要.....	14
3.1.1. 本研究で用いた供試体詳細	14
3.2. 調査結果.....	19
3.3. 3章のまとめ	32
4. 载荷試験による最大曲げ引張り耐力評価	34
4.1. 実験概要.....	34
4.2. 実験結果.....	36
4.3. 4章のまとめ	41
5. 残存有効プレストレス力の測定・評価.....	42
5.1. 概要	42
5.2. 計測手法.....	42
5.2.1. コア応力解放法.....	42
5.2.3. 鋼材切断応力解放法	43
5.3. 各供試体の有効プレストレス力分布とその評価.....	43
5.3.1. コア応力解放法と鋼材切断応力解放法実験結果.....	43
5.3.2. 供試体比較項目による測定結果への影響	58
5.3.2.1 曝露環境による影響	58
5.3.2.2 緊張方式による影響.....	60
5.3.2.3 鋼材種類による影響	61
5.3.2.3 緊張力の差による影響.....	62
5.3.2.4 持続载荷荷重による影響.....	63
5.4. 5章のまとめ	64
6. 内部鋼材の腐食挙動.....	66
6.1. 概要	66
6.1.1. 腐食メカニズム.....	66
6.1.2. 鋼材腐食の種類.....	68
6.1.3. pHが鉄筋の腐食に及ぼす影響及び腐食発生限界塩化物イオン濃度	68

6.2.	非破壊試験による腐食の評価	69
6.2.1.	自然電位法による腐食評価	70
6.2.2.	分極抵抗法による腐食評価	70
6.2.3.	不動態グレイド判定による評価方法	73
6.2.4.	各種非破壊試験による腐食評価の結果	75
6.3.	コンクリート中の塩分浸透状況	87
6.3.1.	EPMAによる各供試体の塩化物イオン分布	87
6.3.	のまとめ	93
6.4.	内部鋼材の腐食	94
6.4.1.	腐食状況目視評価	94
6.4.2.	腐食減量と鉄筋周囲の付着塩化物イオン	103
6.4.3.	腐食減量と各種非破壊試験結果	122
6.5.	6章のまとめ	126
7.	鋼材腐食によるプレストレストコンクリートの性能評価	128
7.1.	コンクリート腐食ひび割れ発生までの耐用年数推定	128
7.1.1.	腐食ひび割れ発生推定方法	128
7.1.2.	推定結果	129
7.2.	塩害腐食によるプレテンション方式PCの有効プレストレス伝達長変化	133
7.2.1.	塩害腐食が有効応力分布に与える影響の可能性	133
7.2.2.	電食試験	133
7.3.	7章のまとめ	136
8.	結論	137
8.1	7年海洋環境曝露試験結果との比較	137
8.2	各章から得られた結果	137

1. 序論

1.1. 本研究の背景

現在、コンクリート構造部材に対する要求性能が高まりつつあり、これを満足し得る材料や施工方法が鋭意研究・開発されてきている。中でも、プレストレストコンクリート(以下PCと称す)は、低水セメント比のコンクリートを使用し、またひび割れを許容しない設計のため、塩分の浸透性が低く優れた耐久性が期待できる。これまで、栈橋や矢板護岸、カーテン式防波堤などのプレキャスト構造物、浮栈橋や浮防波堤等の浮遊構造物、橋梁、プラットホーム、沈埋トンネル等に適用された実績がある。また、今後は大津波、軟弱地盤、大深度対策としての適用が期待されている。特に、我が国の経済情勢および人口推移を鑑みると、効果的・効率的な港湾施設の建設、施工並びに維持管理は必須であり、港湾構造部材に対するPCの需要が増加すると考えられる。しかしながら、我が国における港湾施設に対するPCの適用は歴史が浅く、塩害による鋼材の腐食やコンクリートの変質に伴う有効プレストレスへの影響、特に長期供用後の有効プレストレスの減少に関する知見が乏しいのが現状である。そこで、本研究では、40年間海水に曝されたPC梁供試体を対象として、鋼材の腐食状況や塩化物イオンの浸透状況、コンクリートの変質状況を調査するとともに、コアコンクリート採取による応力解放試験(以下コア応力解放試験)や載荷試験により、残存有効プレストレスを評価し、港湾コンクリートにおけるPC構造部材の健全性の評価を実施する。特に、コア応力解放試験は、実際の構造物での健全性評価が可能なことから、今後の港湾PC構造部材の健全性評価に大いに活用されると期待できる。

1.2. 本研究の目的

本研究では、40年間海水曝露されたプレストレストコンクリート供試体の調査に基づき、長期曝露後の耐久性を評価する。具体的には40年曝露後の最大曲げ引張り耐力、残存有効プレストレス力を測定することで塩害鋼材腐食によるプレストレストコンクリートの構造性能への影響を明らかにする。また、供試体は曝露環境、緊張方式、鋼材種類、緊張力、持続載荷荷重が異なり、各条件での長期海洋環境曝露時の影響を把握する。

各長期曝露供試体の比較項目

- 1) 曝露環境による影響
- 2) 緊張方式による影響
- 3) 鋼材種類による影響
- 4) 緊張力の差による影響
- 5) 持続載荷荷重による影響

1.3. 本研究の意義

本研究で扱うプレストレスコンクリート梁供試体は、1973 年に製造され、その後、港湾空港技術研究所の循環水槽（実際の海水を循環させ感潮部を模擬した水槽）に 40 年間曝露されたものである。それら試験体は曝露環境、緊張方式、鋼材種類、緊張力、持続載荷荷重が異なり、各条件での長期海洋環境曝露時の劣化機構を把握することは種々のプレストレスコンクリートの耐久性評価において貴重な知見となる。今後の港湾構造物の維持管理の発展に大いに役立つと期待される。

1.4. 本研究フロー

以下に本研究のフロー図を示す。

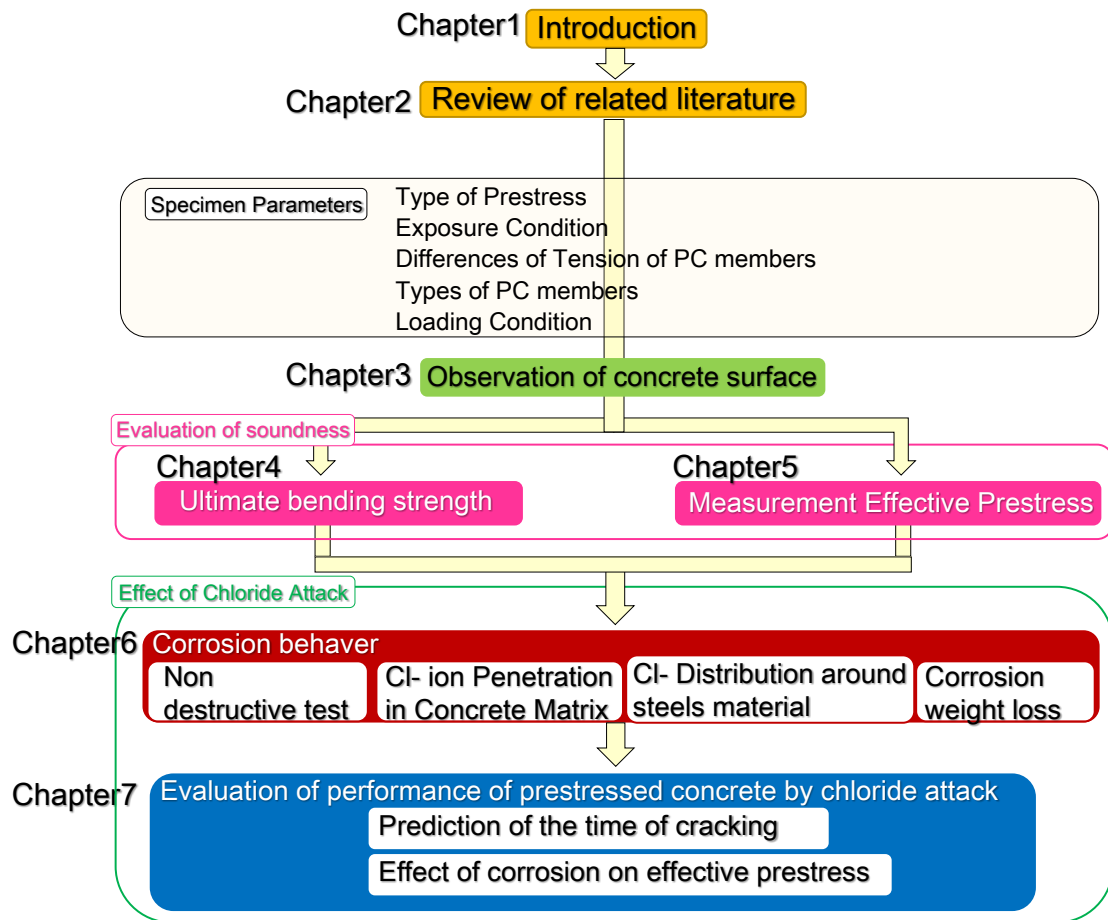


図 1-1 研究フロー

2. 既往の研究

・塩害鉄筋腐食による劣化機構

塩害とは、「コンクリート中の塩化物イオンによって鋼材が腐食し、コンクリートにひび割れ、剥離、剥落などの損傷を生じさせる現象(JIS A 0203)」と定義される。塩化物イオンは、使用した材料に含まれる場合と、外部から供給される場合とがある。

塩害による劣化進行過程は、鋼材の腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れ発生までの進展期、腐食ひび割れの影響で腐食速度が大幅に増加する加速期、および鋼材の大幅な断面減少などにより耐荷性が大幅に低下する劣化期に区分されている。

塩害が進展するにつれて、構造物の損傷の度合いが高まり、必要な補修の規模も大きなものにならざるをえない。そのため、塩害の早期の発見と補修が必要であると言われている。

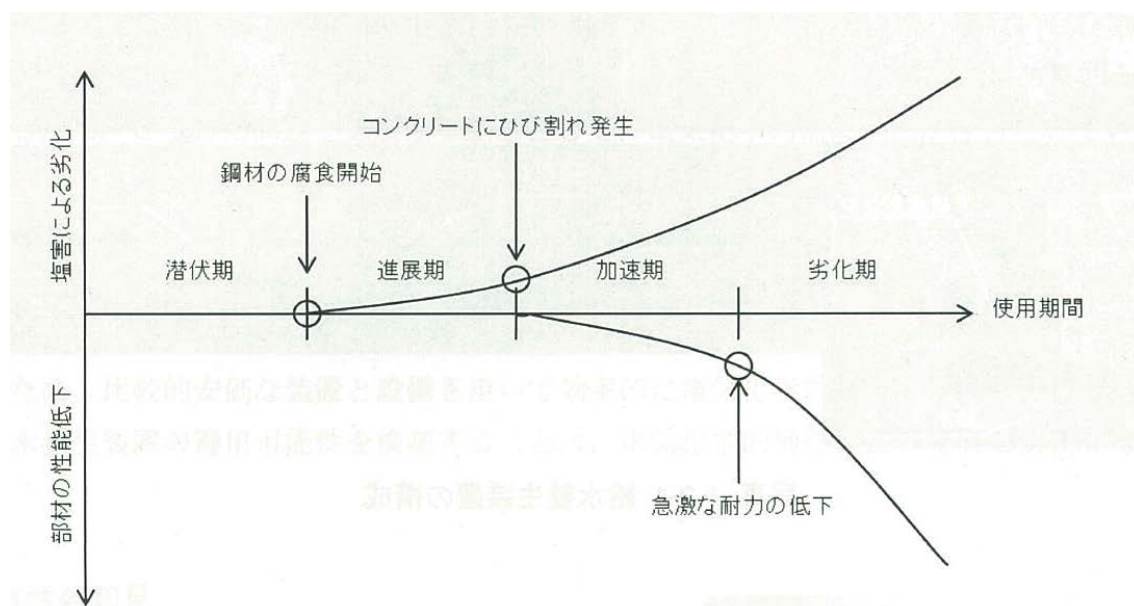


図 2-1 塩害による劣化機構

表 2-1 塩害の劣化過程の区分

劣化過程	定義	各種性能の低下（概念）
潜伏期	鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間	性能低下はない
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食が始まるが性能低下は小さい
加速期	腐食ひび割れ発生により鋼材の腐食速度が増大する期間	第三者影響度、美観・景観の性能低下が始まる
劣化期	鋼材の腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間	加速期後半から、安全性能・使用性能の低下が始まる

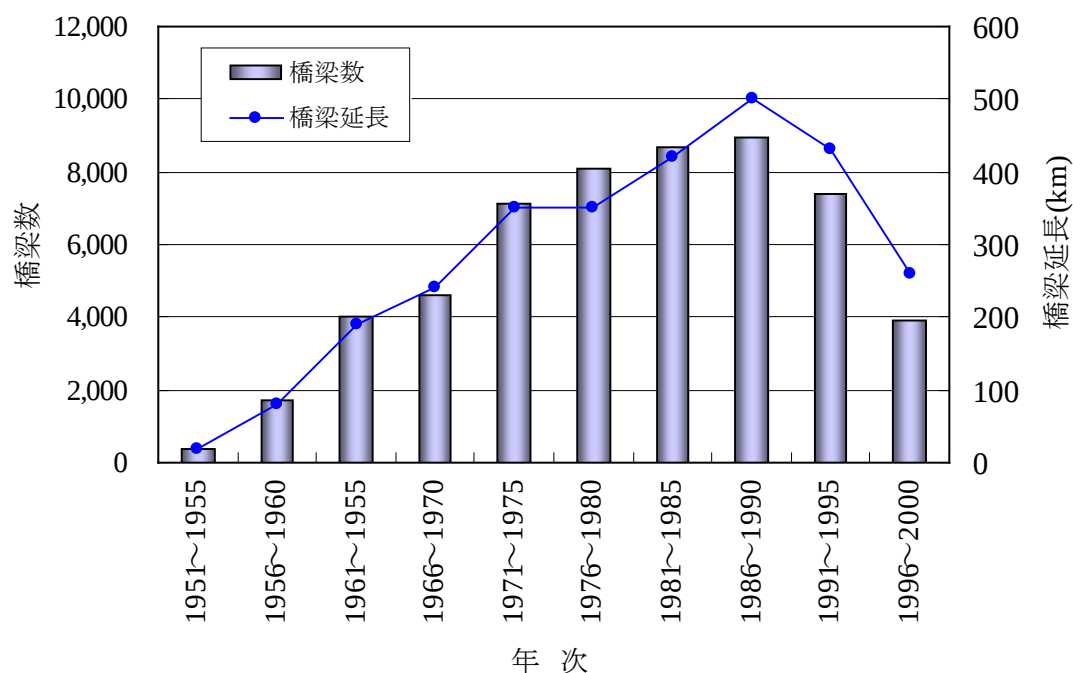


図 2-2 橋の年次ごとの建設状況¹⁾

・建設開始から 50 年経過したプレストレストコンクリート橋の現状と問題点

プレストレストコンクリートは、橋梁の主要材料としてこれまでに多数の橋梁が建設され、市民生活の基盤を支えている。しかしながら、同時にいくつかの問題点も抱えていることも事実である。

1 つ目は、橋梁の高齢化である。プレストレストコンクリート橋は、わが国で建設が始まって 50 年余りを迎え、今後これらの橋梁も徐々に高齢化が進んでいく状況にある。図-1.3 にプレストレストコンクリート橋の年代ごとの建設数と橋梁延長の推移を示す³⁾。1990 年頃までは高度経済成長の社会背景に支えられ、建設数および延長とも年々増加の傾向にあったことがわかる。近年においてはピークを超え、建設数は減少傾向にあるが、それでも年間約 1,000 橋あまりもの橋梁が新設されている。既設橋梁の今後の耐用年数は明らかでないが、供用が継続され建設数がこのまま維持されると仮定すると、2050 年には約半数以上の橋梁が供用後 50 年以上経過することになる。したがって、これらの高齢化が加速していく既設橋梁をいかに維持管理していくかがこれからの命題である。

2 つ目の問題は、既設橋梁の維持管理に関連している。プレストレストコンクリートは、コンクリートの弱点である引張強度を、プレストレスを導入することによって補った合理的な構造である。これにより、鉄筋コンクリート橋と比較して、自重を軽減したり、支間を長大化したりすることが可能となる。したがって、プレストレストコンクリートにとってプレストレスは、構造が成立するために不可欠であり、プレストレストコンクリート橋の維持管理について考えると、コンクリートの有効プレストレスなど、部材に作用する応力度

を把握することは、適切な維持管理を行う上で非常に重要な要素である。ところが、これまでに建設されてきたプレストレストコンクリート橋のうち、特に初期に建設されたものの中には、設計図書が保存されていない場合もあり、設計で考慮されている応力状態や有効プレストレストなどが不明な橋梁もある。また、設計図書は保存されているものの、点検結果などから、設計で考慮された応力状態にないことが疑われる場合もある。

もうひとつの問題は、耐久性である。プレストレストコンクリート橋は、本来耐久性の高い構造物である。ただしそれは、耐久性を十分に考慮した設計を行い、適切な材料を用い、配慮の行き届いた施工を確実に行ったときにはじめて成立する。なぜなら、プレストレストコンクリート構造の主要材料は、コンクリートと鋼材であるからである。コンクリートは、いうまでもなく微細な空隙を持つため、多かれ少なかれ劣化因子が時間の経過とともに、除々に内部に進入していく。また、鋼材は、腐食発生因子が少なく、アルカリ性の十分に高い健全なコンクリート中においてのみ、その表面に不動態被膜を形成し、腐食に対して安定した状態を保つからである。したがって、プレストレストコンクリート橋を建設する場合、一定の性能および機能を確保するためには、橋梁のおかれる環境条件に応じて、設計、材料および施工面において必然的に差異が生じることとなる。

本来、耐久的であるべきプレストレストコンクリート橋も、これまで建設されてきたものの中には、比較的早期に劣化を生じて本来の機能を失ってしまったものも報告されている⁴⁾。これらの主要な要因のひとつには、設計手法が挙げられる。1984年に日本道路協会から道路橋の塩害対策指針（案）・同解説⁵⁾が発刊されるまでは、プレストレストコンクリート橋に関する従来の設計手法は、許容応力度法が主体であり、部材に作用する応力度の照査に設計の主眼が置かれ、耐久性を照査する概念はほとんど存在していなかったといっている。したがって、橋梁の置かれる環境が違っていても、構造的な条件が等しければ設計も等しくなる可能性が高い。たとえば、亜熱帯気候の海岸の飛沫帯に建設される橋梁も、穏やかな気候の内陸に建設される橋梁も、旧設計手法で設計すれば同じ断面で、同じ仕様の材料を使用して、同じ要領で施工されても不思議ではない。もしそうであれば、両者の耐用期間には大きな差異が生じることは明らかである。実際に、日本海沿岸の入り江を跨ぐ位置に建設されたプレストレストコンクリートT桁橋では、道路橋の塩害対策指針（案）・同解説⁵⁾が発刊される以前の1974年に建設され、コンクリートのかぶり是一般環境に建設される橋梁と同様に35mmであったため、建設後8年目には塩害による損傷が発生している⁶⁾。

また、それだけでなく、使用された材料の良否や施工の良否によっても、橋梁の耐久性は左右されていることが考えられる。

・有効プレストレスト力の損失

PC 鋼材を緊張して定着した結果,コンクリートに圧縮応力を与えることになるプレストレスト力は種々の原因によって減少する.すなわち,緊張材端部のジャッキ位置における緊張作業中のプレストレスト力は,プレストレスト導入時にはコンクリートの弾性変形などによって減少し,それを考慮したプレストレスト力が導入直後のプレストレスト力(初期緊張力)と呼ばれる.さらに時間の経過とともにコンクリートのクリープや乾燥収縮などによって時間の経過とともにさらに減少し,プレストレストコンクリートとして最終的に残る有効プレストレスト力となる.これらのプレストレスト力は,次式によって計算される.

$$P_t(x) = P_i - \Delta P_i(x) \quad \text{式 2-1}$$

$$P_e(x) = P_i - \{\Delta P_i(x) + \Delta P_t(x)\} = P_t(x) - \Delta P_t(x) \quad \text{式 2-2}$$

ここに

$\Delta P_i(x)$: プレストレストの導入時に生じるプレストレストの減少量

$\Delta P_t(x)$: 時間の経過とともに生じるプレストレスト力の減少量

導入直後のプレストレスト力 $P_t(x)$ は

- ①コンクリートの弾性変形
- ②緊張材とシースの摩擦
- ③緊張材を定着する際のセット量
- ④その他の要因

によって,緊張作業中の P_i がプレストレストの導入と同時に減少するもので,式 2-1 で表される.

- ・7年間海洋環境下に曝露したプレストレストコンクリートはりの耐海水性について⁷⁾

本研究で用いたプレストレストコンクリート供試体と同材料を用いて同時期に施工され、同一環境下に曝露された供試体の7年間海洋環境曝露試験結果が大即らによって次のような結果が報告されている。

- 1) プレテンション方式PCはり内部のPC鋼より線は、かぶりが同一のコンクリート中の鉄筋、ポストテンション方式PCはりのPC鋼棒等と比較して腐食しやすい。そのため、同一かぶりやより小さなかぶりでは、工場製品であってもプレテンション方式PCはりは防食状不利と判断され、少なくとも既往の鉄筋コンクリートのかぶりは確保する必要がある。
- 2) はり表面に施工したエポキシ樹脂塗装は、コンクリート中への塩素の浸透および鋼材の腐食を少なくし、防食上効果が認められた。また、コンクリート練混ぜ時に添加する防錆剤(亜硝酸ナトリウム系防錆剤)については効果が認められなかった。
- 3) エポキシ樹脂接合は曲げひび割れを発生させない範囲でPC鋼材およびシースの腐食という観点からは弱点となっていなかった。また、(当時一般的に用いられていた)定着部の保護方法による防食は不十分であり、より効果的な保護工法を用いる必要がある。

以下さらに詳細に項目ごとに結果をまとめる

a) コンクリートから取り出した鋼材の腐食

プレテンション方式に関して2本より線、7本より線共通の事項として、

- ・素線の接触部が腐食しやすい
- ・定着部付近10cmは供試体長軸方向の他の位置より腐食しやすい傾向であった
- ・隅角部の(かぶりの小さい)鋼材は腐食しやすい傾向であった
- ・スターラップ折り曲げ部、主筋の下部(ブリーディングによる影響と思われる)では薄い錆が確認された

2本より線に関して

- ・R型の防食方法を用いていないものは、軽いさびを生じていた(図2-3)

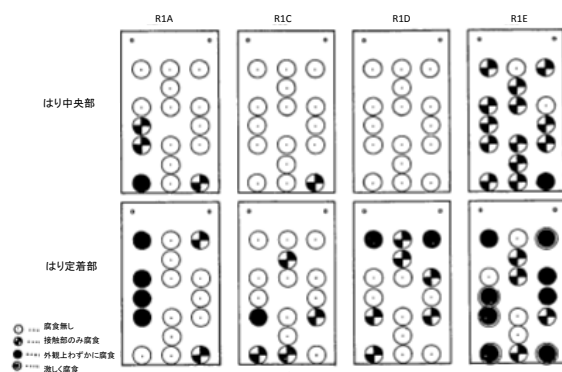


図 2-3 R型はり(2本より線)における腐食状況の概略⁷⁾

・曝露環境の比較は感潮部と陸上部曝露の供試体で行っており,感潮部曝露の供試体中の鋼材であっても全面的に腐食しているものなく,外観上わずかに錆があるものや素線接触部でのさびであった.またそれら鋼材はかぶりが小さいものや隅角部に位置している鋼材であった.

陸上部曝露の供試体の梁中央部では腐食はほぼ確認されず,端部定着部から 10cm の位置でかつ,かぶりの小さい位置の鋼材が素線接触部での腐食が確認された程度であった.

7 本より線に関して

- ・素線の接触部と定着部付近 10cm 以外のさびはなかった
- ・定着部はほぼ定着がない状態であった

ポストテンション方式に関して

- ・シース下部ではブリーディングの影響と思われる赤褐色の錆が発生していた(シース内部でも同様.しかし,海中部曝露供試体ではシースの内側下部の腐食のみ認められた)
- ・鉄筋に関しては表面に薄い錆が確認される程度だった
- ・PC 鋼棒はシースとグラウトに保護されているため,全く腐食は確認されなかった.

b) 塩素含有量

供試体中モルタル部を 5-10g 程度採取し微粉碎した試料を 80℃の湯に 5 分入れることによって塩素を抽出する水溶性塩素をモルタルに対する重量百分率で示した.測定方法は

はり中央部で図 2-4 のとおり上から 2.5,7.5,12.5, 22.5, 27.5cm 付近のモルタルを採取し,塩素含有量を測定した結果を図 2-5 に示す.

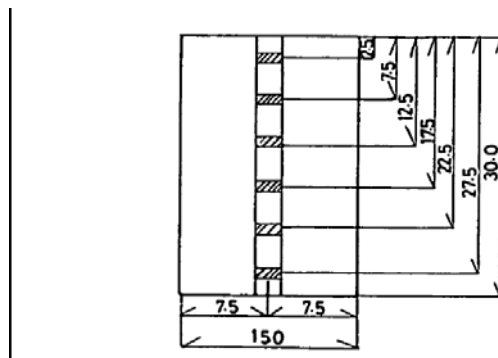


図 2-4 モルタル採取位置⁷⁾

傾向としては,海中部のものが最も多く,感潮部が続く,陸上部の塩素含有量は少ない.またエポキシ塗装の効果は非常に大きいことがわかる.

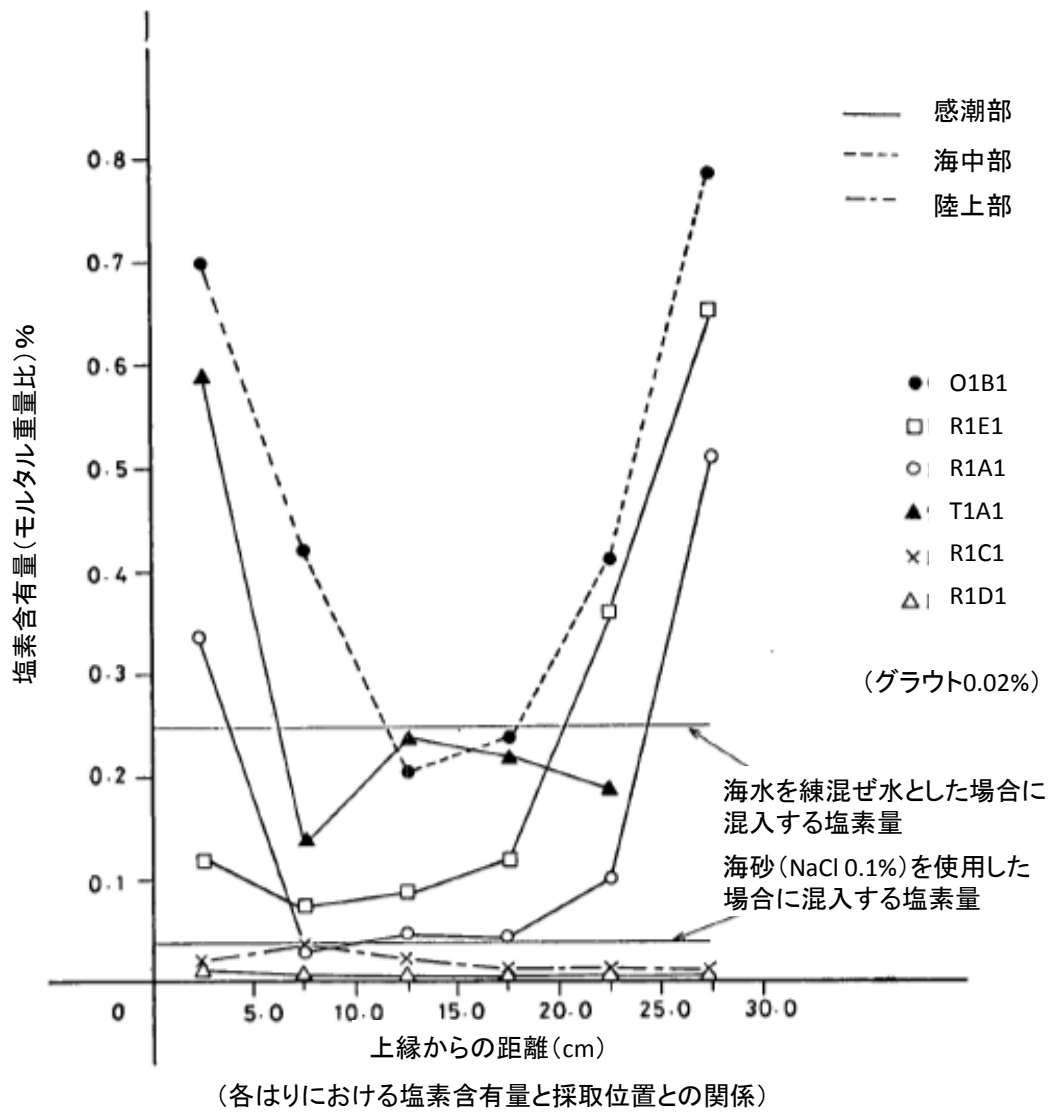


図 2-5 塩素含有量測定採取位置⁷⁾

c) 電気化学的測定

・自然電極電位

自然電極電位の測定結果を図 2-6,表 2-2 に示す.

同一供試体においても,自然電極電位は非常にばらついている.

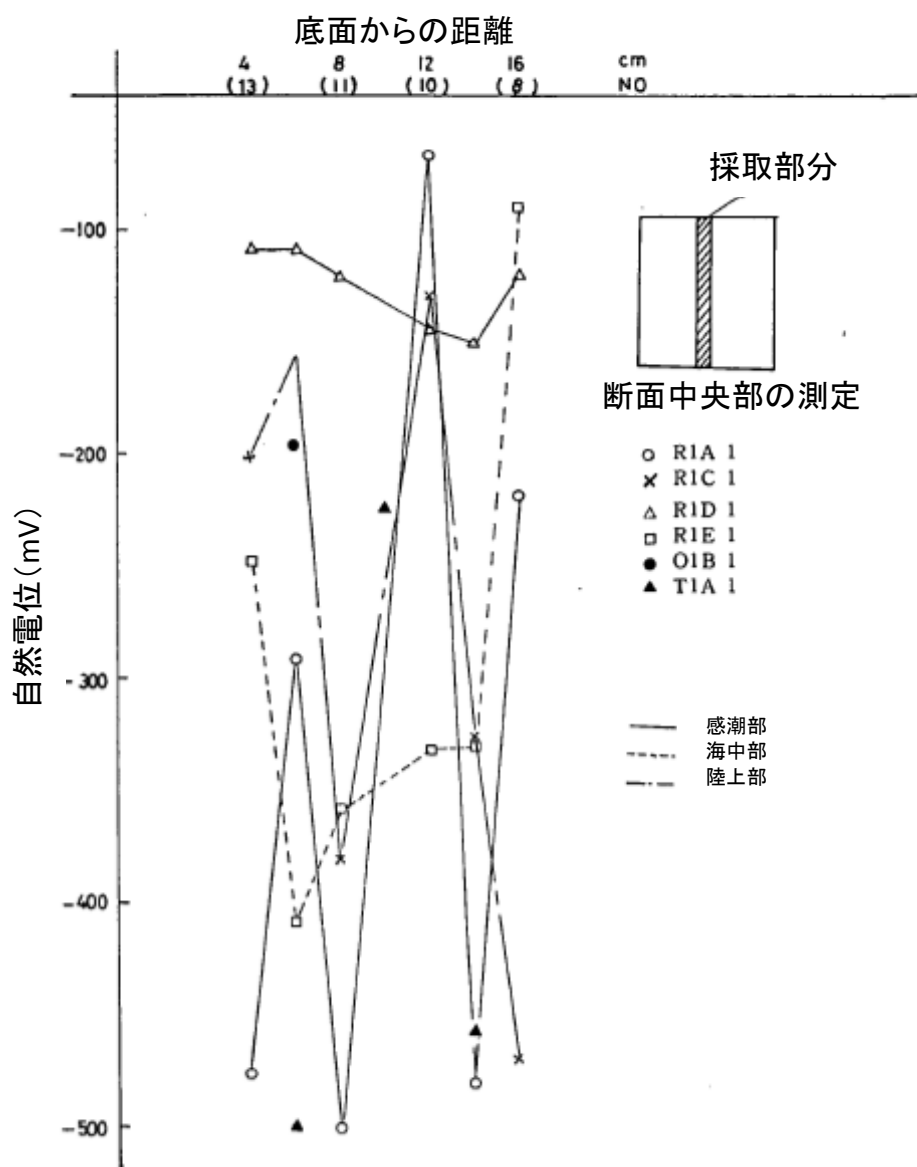


図 2-6 自然電極電位測定結果⁷⁾

表 2-2 各供試体中鋼材の自然電極電位(mV, vs, 海水塩化銀電極)⁷⁾

測定点	はり名	R1A	R1C	R1D	R1E	T1A	O1A	O1A (接合部あり)	O1B
1		-196	-463	-272	-305	-393	-408	-514	-440
2		-196	-463	-272	-305	-284	-574	-514	-341
3		-196	-463	-272	-305	-396	-511	-514	-341
4		-160	-463	-103	-319	-396	-574	-514	-341
5		-200	-463	-100	-305	-458	-203	-130	-522
6		-200	-463	-272	-305	-225	-350	-407	-196
7		-200	-270	-107	-297	-500	-118	-121	—
8	※	-218	-469	-121	-90		-514	-130	—
9		-481	-325	-151	-330				
10		-66	-149	-145	-331				
11		-500	-380	-121	-358				
12		-291	-156	-110	-409				
13		-476	-201	-109	-246				
14		-69	-496	-272	-191				
15		-36	-496	-121	-129				
16		-38	-515	-272	-81				
17		-200	-470	-107	-105				
18		-200	-463	-96	-298				

※ についての平均値および変動係数

はり名	R1A	R1C	R1D	R1E
平 均	-339	-280	-126	-294
変動係数 V	0.47	0.26	0.127	0.35

・導電位分極曲線

結果から不動態が形成されていて、腐食反応が遅くなっている状態と判定された鋼材は少なかった。

表 2-3 動電位分極曲線のパターン分類

はり名 測定点	R1A	R1C	R1D	R1E	T1A	O1A	O1A*	O1B
1	c	c	c	c	c	a	c	c
2	c	c	c	c	c	c	c	c
3	c	c	c	c	c	c	c	c
4	c	c	c	c	a	c	c	c
5	c	c	c	c	a	d	d	c
6	c	d	c	c	c	d	c	c
7	c	c	d	c	a	b	b	c
8	c	c	d	d		b	d	c
9	c	d	d	d	a：腐食している可能性が大である。 b：不動態が形成されていて、腐食反応が遅くなっている。 c：不動態の存在は明確でないが、腐食反応は遅くなっている。 d：ほとんど腐食していない。 * 接合部を有するもの。			
10	d	d	c	c				
11	c	d	c	c				
12	c	d	d	c				
13	c	d	c	c				
14	c	c	c	c				
15	c	c	d	c				
16	c	c	c	c				
17	c	c	c	c				
18	c	c	c	c				

以上,既往の研究より耐久的であるプレストレストコンクリートが海洋環境の塩害腐食の発生が懸念される場合の構造性能の低下を具体的に把握した上での,長期的な耐久性の評価が必須といえる.

本研究で種々の条件下での耐久性評価の知見は非常に有益なものとなる.

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路統計年報 2006, 2006
- 2) 国土交通省：「社会資本整備のあり方について」参照, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/01/010510/02.pdf>, 2006
- 3) プレストレストコンクリート建設業協会：PC 橋のライフサイクルコストと耐久性向上技術, 2005
- 4) 社団法人土木学会：コンクリートライブラリー116, 土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例 [栈橋上部工編]・2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]に基づくコンクリート構造物の維持管理事例集 (案), pp. 137-162, 2005
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説, 1984
- 6) Kyoji Niitani, Satoshi Otani, Masaaki Konno and Masataka Ieiri: "Bridge Maintenance Planning System Considering Deterioration Process and Life Cycle Costs", Proceedings of the 2nd International Workshop on Lifetime Engineering of Civil Infrastructure", 2007
- 7) 大即信明, 下沢治：7 年間海洋環境下に暴露したプレストレストコンクリートはりの耐海水性について, 港湾技術研究所報告書, Vol.21 No.2 June 1982.

3. 目視調査

3.1. 実験概要

コンクリート中鋼材の腐食状況を非破壊で簡便に評価する方法として、目視によるコンクリート表面のひび割れの状況や錆汁の溶出状況の観察がある。本章ではコンクリート表面のひび割れと錆汁の溶出状況、コンクリートの欠落、定着部近傍での腐食状況、コンクリート表面の変質状況について、写真撮影およびスケッチを実施し、40年間海洋環境暴露後の外観評価を行った。

3.1.1. 本研究で用いた供試体詳細

各章に先立ち、本章で供試体の概要を記述する。本研究で取り扱う PC 梁供試体は、1973年に製造され、その後、港湾空港技術研究所の循環水槽（実際の海水を循環させ感潮部を模擬した水槽）に 40 年間曝露されたものである。以下表 3-1 に港湾技術研究所より引き上げたプレストレスコンクリート供試体の詳細を記述、それらより本研究で用いた供試体を表 3-2 に示す。

表 3-1 全プレストレスコンクリート供試体(□表示は本研究で用いた供試体、表 3-2 に抜粋)

No.	供試体	プレ方式	形状	鋼材	緊張力	荷重状態	養生環境	コン強度	打設日	備考		
1	S1A2	プレテン	250 × 15 × 30	SWPR2 φ2.9	0.8σ _y	無載荷 死荷重	感潮部	800				
2	R1A3							1973/9/29				
3	R1A4							1973/9/29				
4	R1A5							1973/9/29				
5	R1A6							1973/9/29				
6	R1B1						海水部		1973/9/27	端部劣化		
7	R1B2								1973/9/27	端部劣化		
8	R1B3								1973/9/27			
9	R1C2						陸上部	1973/9/27				
10	R1E2					ひび割れ 発生荷重	感潮部 防錆剤					
11	R2A3											
12	R2A4						感潮部		1973/10/6	赤タグ		
13	R4A1					設計荷重			1973/10/2	赤タグ		
14	R4A2											
15	T1A3	350 × 15 × 30	SWPR7 φ12.4	0.8σ _y	無載荷 死荷重	感潮部						
16	U1A2		SWPR7 φ12.4 亜鉛メッキ	0.8σ _y					端部劣化			
17	U1A3		SWPR7 φ12.4	0.6σ _y				1973/10/12	端部劣化			
18	V1A2			0.4σ _y				1973/10/13				
19	V1A3			1973/10/11				端部劣化				
20	W1A2											
21	W1A3											
22	O1A4		鋼棒 φ17	0.85σ _y		感潮部		1973/10/19				
23	O1A5							1973/10/18				
24	O1A6	ポステン		250 × 15 × 30			無載荷 死荷重	海水部		1973/10/19		
25	O1B2											
26	O1B3									1973/10/16	端部劣化	
27	ダミー											
28	?								1973/10/2	赤タグ		

表 3-2 本研究で用いたプレストレストコンクリート供試体

No.	Mark	Types of Prestress	Types of PC	Loading condition	Exposure condition	Tensioning Force	Remark
1	R1A3	Pre-tensioning	Strands: SWPR2φ2.9	No Load	Tidal	0.8σ _y	
2	R1B2				Under Water		
3	R1C2				Ground		
4	R2A4			Cracking Load			
5	R4A1			Design Load			
6	T1A3		Strands: SWPR7φ12.4	No Load	Tidal	0.8σ _y	
7	U1A2					0.6σ _y	Zincing
8	V1A2					0.4σ _y	
9	W1A2						
10	O1A4	Post-tensioning	Tendon: φ17	No Load	Tidal	0.85σ _y	
11	O1A5				Under Water		
12	O1B2						
13	O1B3						

表 3-2 より, 試験比較項目は 1) 曝露環境による違い 2) 緊張方式による違い 3) 鋼材種類による違い 4) 緊張力の差による違い 5) 持続載荷荷重による違いとした. なお定着部を含むほかの要因, すなわち, コンクリート強度, 初期養生等は全供試体ほぼ同一である.

供試体の種類はプレテンション方式が R 型, T 型, U 型, V 型, W 型, およびポストテンション方式の O 型である. 供試体寸法は二種類で R 型と O 型は断面 300×150mm, 長さ 2500mm であり, T 型, U 型, V 型, W 型は断面 300×150mm, 長さ 3500mm である. これら供試体の断面, 定着部の概略と配筋図を図 3-1 に示す. また No7. U1A2 は表面を亜鉛メッキでコーティングしてあるものである. 作製当時の資料が残っておらず, 具体的な単位質量が未知なため, 参考資料をもとに (300g/m² 増加) 同様の処理が施されていると仮定し, 他の 7 本より線よりも単位長さ 1mm あたり 0.027g 重くなるとした.

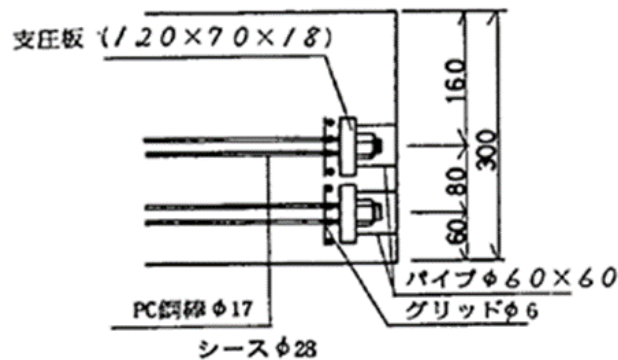


図 3-1-a) O 型定着部概略図

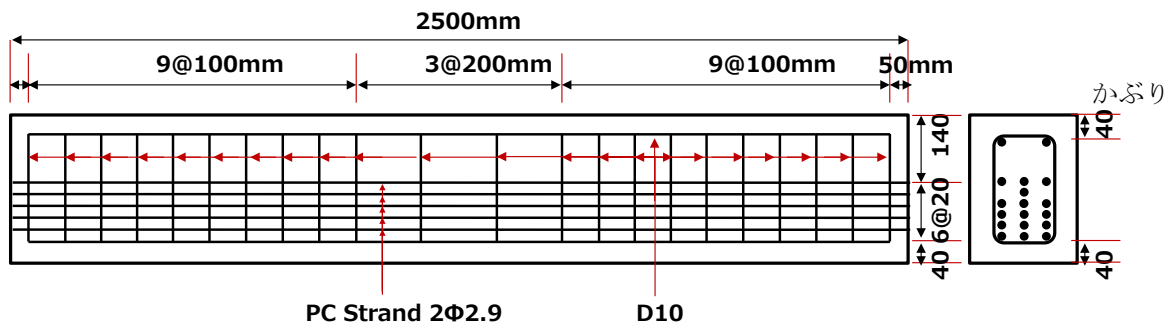


図 3-2-b) R 型供試体寸法・配筋図 (断面：16 本の 2 本より線)

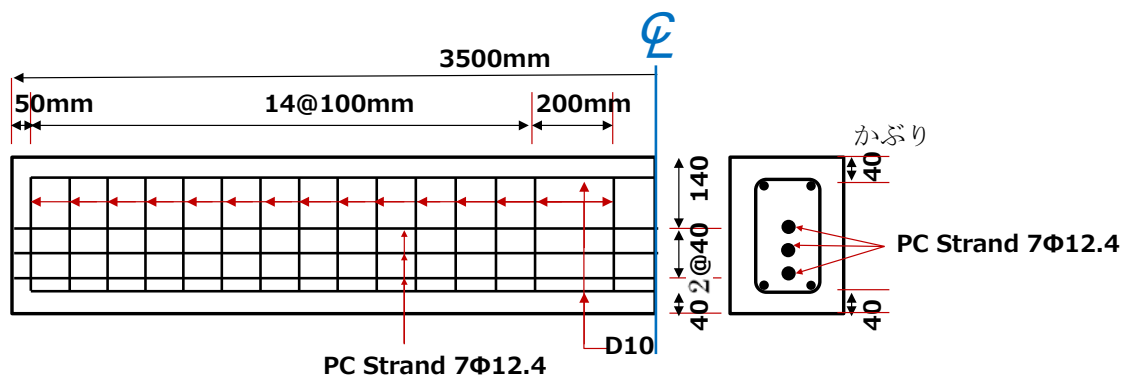


図 3-3-c) T 型供試体寸法・配筋図 (断面：3 本の 7 本より線)

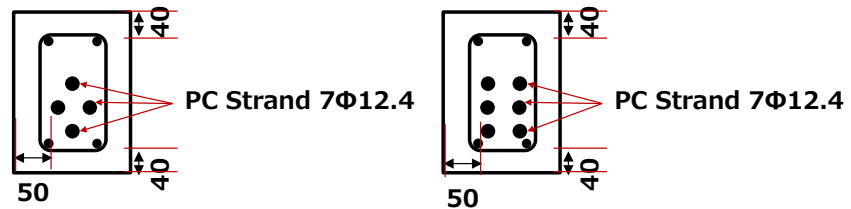


図 3-4-d) U, V 型断面配筋図 (4 本の 7 本より線) 図 3-5-e) W 型断面配筋図 (6 本の 7 本より線)

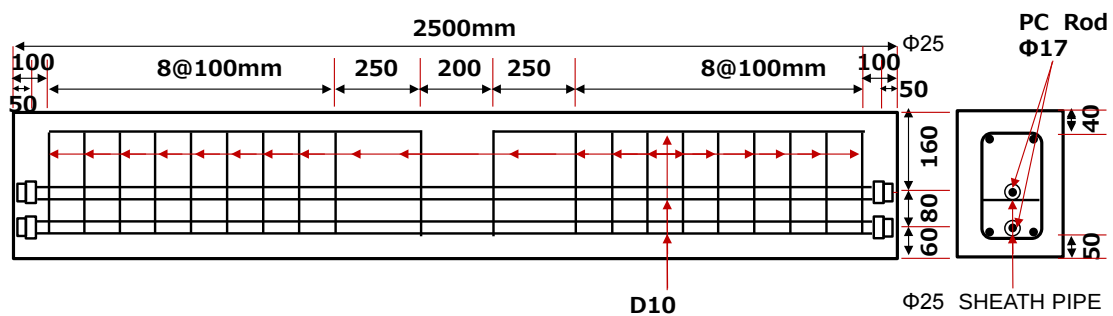


図 3-6-f) O 型供試体寸法・配筋図 (2 本の PC 鋼棒)

1) 使用材料

a) コンクリート

供試体製作に使用したコンクリートの材料は、早強ポスランドセメント(旧日本セメント株式会社、現太平洋セメント株式会社製)、水道水、川砂および川砂利(砕石を含む、神奈川県酒匂川産)およびAE減水剤(プラストクリート)である。コンクリートの配合条件は、配合強度 49kN/mm²、粗骨材最大寸法 20mm、スランプ 5±1cm、空気量 4±1%である。コンクリートの示方配合を表 3-3 に、セメント試験成績表を表 3-4、骨材の物理試験結果を表 3-5 に示す。管理供試体の材齢 3, 7, 28 日のコンクリートの圧縮強度試験結果と 40 年曝露後の供試体より φ 50mm コアを採取して行った圧縮強度試験結果をまとめて表 3-6 に示す。

表 3-3 コンクリートの示方配合

W/C (%)	Slump (cm)	Air (%)	s/a (%)	Maximum size(mm)	Unit weight(kg/m ³)			
					W	C	S	G
37	5±1	4±1	40.5	20	167	460	710	1080

表 3-4 セメント試験成績表

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	フロー値	曲げ強さ(N/cm ²)			圧縮強さ(N/cm ²)		
		水量(%)	始発(時-分)	集結(時-分)			3日	7日	28日	3日	7日	28日
3.12	4110	4±1	40.5	20	良	246	451	579	726	2187	3267	4405

表 3-5 骨材の物理試験結果

細骨材	比重	吸水量	単位容積重量 (kg/m ³)	空隙率 (%)	洗い試験 (%)	有機 不純物	フルイ(mm)を通過する百分率						粗粒率
							5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
	2.65	2.30	1624	38.7	2.21	良	100	89	64	41	19	3	2.84

粗骨材	比重	吸水量	単位容積重量 (kg/m ³)	空隙率 (%)	洗い試験 (%)	フルイ(mm)を通過する百分率						粗粒率
						5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
	2.75	1.04	1690	38.6	0.96	100	93	66	25	2	0	6.80

表 3-6 コンクリートの圧縮強度(材齢 3 日, 7 日, 28 日, 40 年)

材齢	3日	7日	28日	40年
圧縮強度 (N/mm ²)	49.9	59.0	67.6	96.4(感潮部) 75.2(陸上部)

b) PC 鋼材および鉄筋

PC鋼材はJISG 3536¹⁾に定めるSWPR2 2.9mm² 本より線をR型に、およびSWPR7A 7 本より線 12.4mmをT型、V型、W型に使用した。0型にはJISG3109²⁾に定めるSBPR 80/95 Φ17mmを使用した。また、組立て用鉄筋およびスターラップには、JISG3112³⁾に定めるSD30 D10(現: SD295 D10)を用いた。

なお、PC 鋼材、鉄筋ともにコンクリート打設前には、10%クエン酸アンモニウム溶液で表面処理をして、光沢状態として用いた。

c) エポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタル

エポキシ樹脂は 2 液混合型のシーカガード 62(シーカ株式会社製)を用いた.O 型の接合部にはエポキシ樹脂のみを 10mm 厚程度に塗布した.また各梁の端部での定着具の保護には,エポキシモルタル(配合を表 3-7 に示す)を 20mm 厚程度に塗布して用いた.

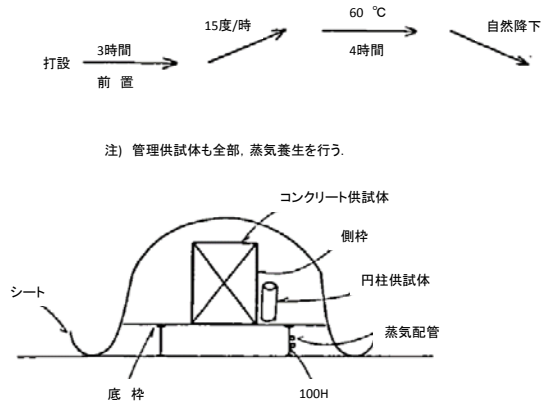
表 3-7 エポキシ樹脂モルタル (重量配合比)

主剤	硬化剤	砂
3	1	3

2) コンクリートの打設

コンクリートは工場(株式会社 PS コンクリート鴨宮工場)内のバッチャープラントにおいて練り混ぜ,フォークリフトによって運搬し打設した.一体の供試体のコンクリートは同一バッチのものとした.コンクリートのスランプおよび空気量は打設の直前に試験し,配合条件を満たすことを確認した.コンクリートの締固めは棒状ヴァイブレータにより行った.3 時間前置きしたのち,蒸気養生を図 3-7 に示す手順で行い,その後は屋外養生とし,コンクリート打設後 28 日に所定の曝露環境に設置した.エポキシ樹脂接合部の製作方法は,蒸気養生後に接合面の表面処理を行い,エポキシ樹脂を塗布(10mm 厚)し,接合面を突き合わせてすぐにプレストレストを導入した.

初期緊張力は,それぞれ R 型で PC 鋼材の降伏点荷重の 80%,T 型で 80%,U と V 型で 60%,W 型で 40%,O 型では 85%とした.その結果得られる有効プレストレスの計算値は表 3-8 に示すとおりである.



注) 管理供試体も全部, 蒸気養生を行う.

図 3-7 蒸気養生手順

表 3-8 初期有効プレストレス計算値

供試体記号	有効プレストレス(kN/mm ²)
R型	12.2
T型	11.8
O型	11.8

3) 定着部の処理

各梁定着部の処理は、プレテンション方式では端部より 2cm で PC より線を切断し、2cm 厚にエポキシ樹脂モルタルで保護した。ポストテンション方式では、図 3-1 に示すように支圧板およびナットで PC 鋼棒をパイプ内に固定したのち、パイプ内にエポキシ樹脂モルタルを充填した。

4) 曝露条件

所定の蒸気養生を完了した供試体は、その後屋外養生とし、材齢 28 日より海洋環境に暴露した。海洋環境としては港湾空港技術研究所の循環水槽における感潮部、海中部、陸上部(海面大気中)の 3 つとした(図 3-3 循環水槽供試体設置図参照)。ここでいう陸上部とは海岸線より 15m 程度離れ、気温は年平均 5℃程度で、四季を通じて激しい潮風を受ける上に、年間数日は荒天時に海水のしぶきを浴びる場所である。感潮部、海中部は、循環水槽中であって、感潮部は 1 日 2 回人工的に潮の干満作用を受ける場所であり、海中部はほとんど常時海水中にある場所である。なお一般的に最も腐食環境として厳しいのは感潮部である。

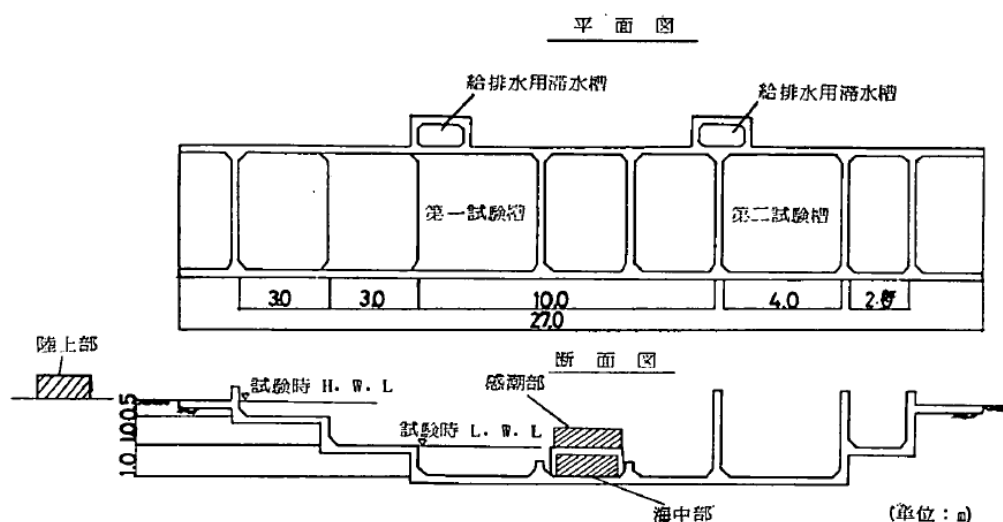


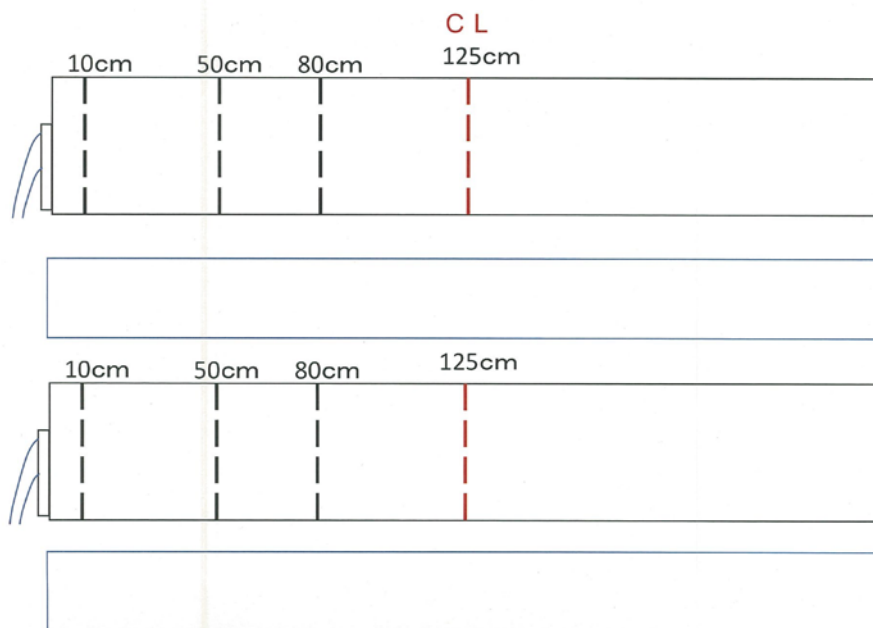
図 3-8 循環水槽供試体設置図

3.2. 調査結果

以下に観察図と顕著な特徴の写真を供試体毎にまとめた。また観察図の一番上には 6 章で電気化学的測定を行った面、上部、測定面と逆側、底部の順に並べた。以降の章において”左端”と表記した際には電気化学的測定面を表とし、観察図と同様の方向を示すこととする。

調査から得られたまとめは 3.3 で扱う。

No1. R1A3 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・無載荷・感潮部



コンクリート表面ひび割れ錆計観察図

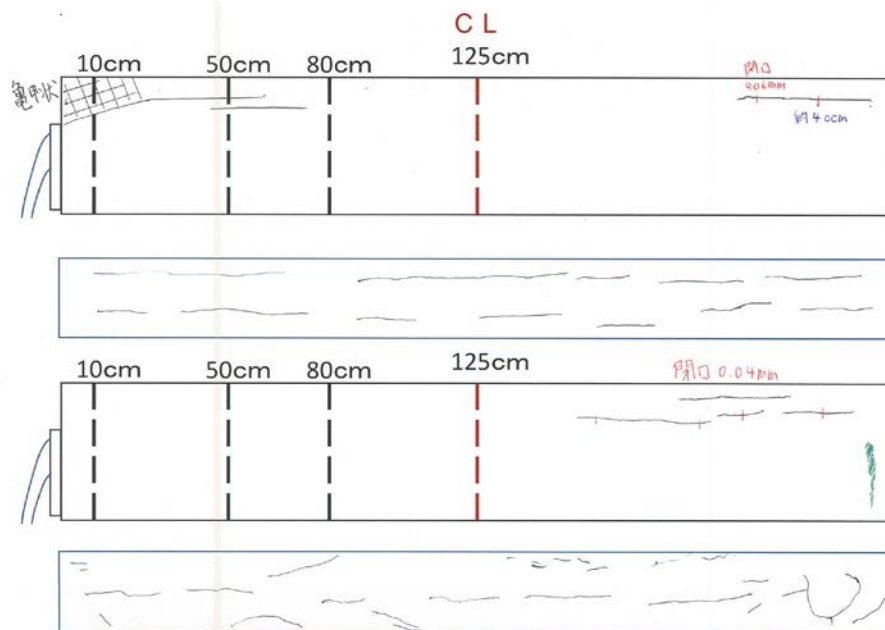


全体写真



端部

No2. R1B2 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・無載荷・海中部



コンクリート表面ひび割れ錆計観察図



全体写真

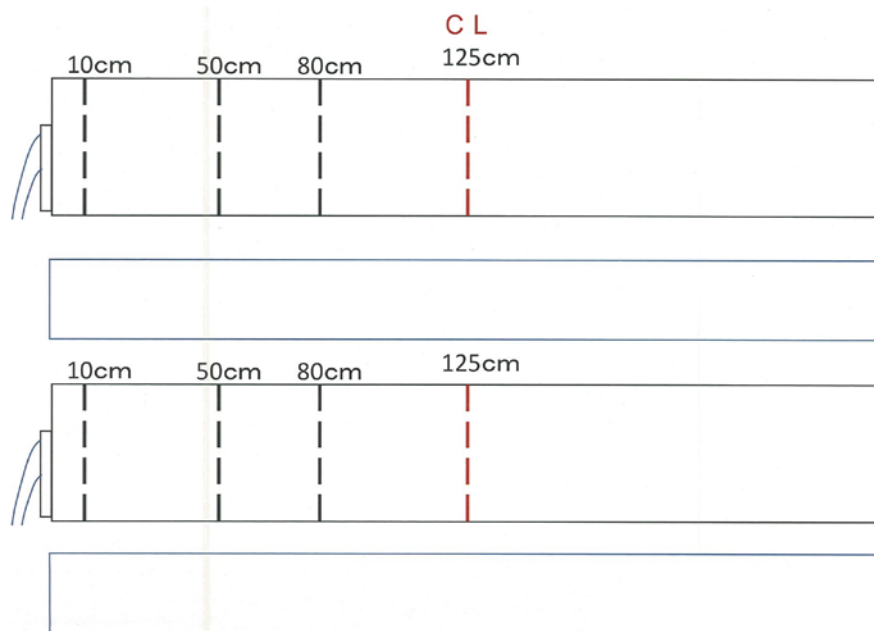


側面ひび割れ状況



供試体底部ひび割れ状況

No3. R1C2 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・無載荷・陸上部

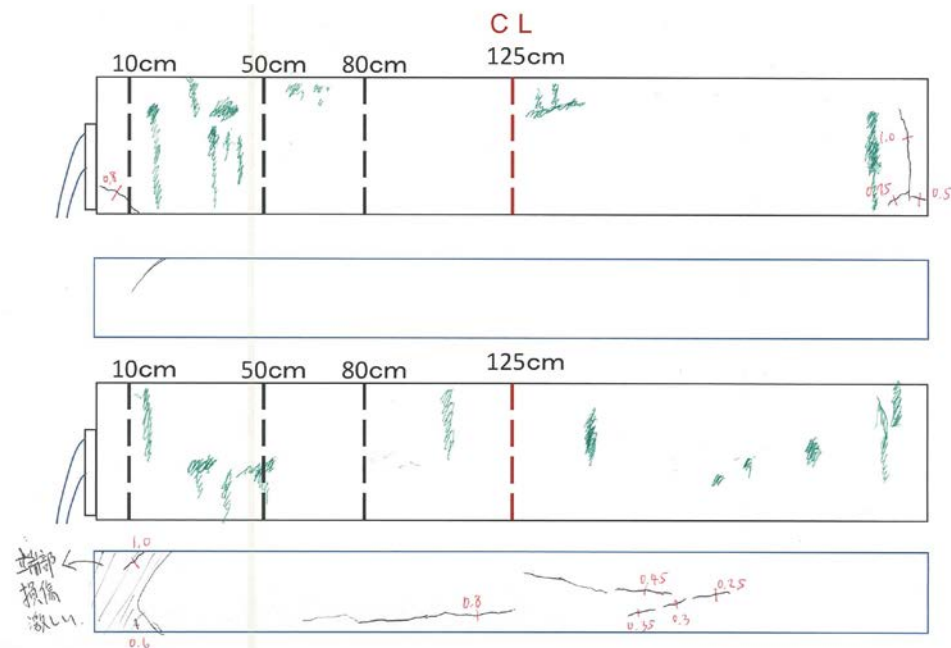


コンクリート表面ひび割れ錆計観察図



端部

No4. R2A4 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部

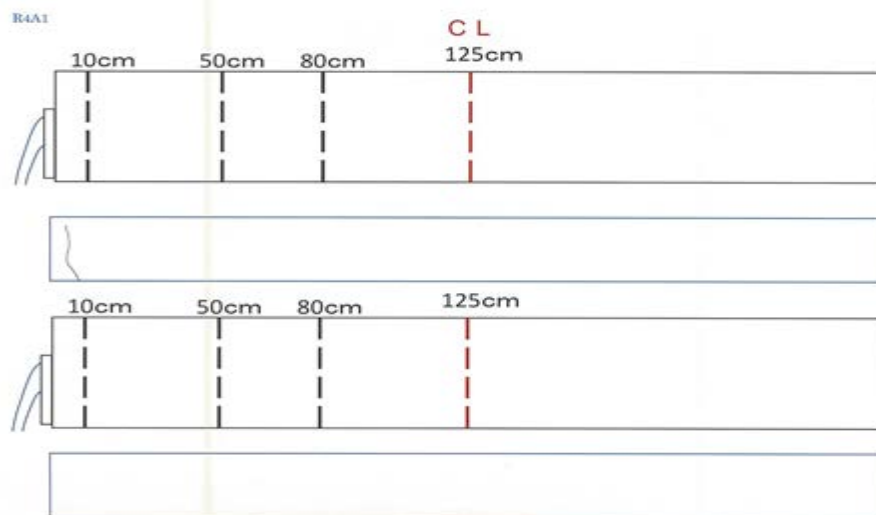


コンクリート表面ひび割れ錆計観察図



全体写真

No5 R4A1 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・設計荷重・感潮部

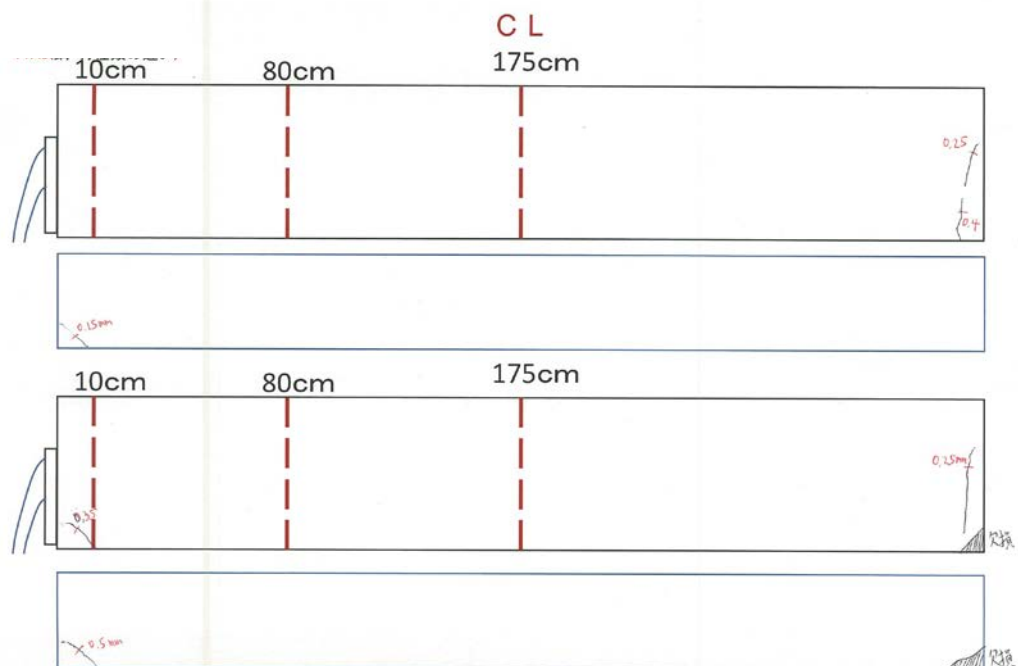


コンクリート表面ひび割れ錆汁観察図



端部

No6 T1A3 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 80\%$ ・無載荷・感潮部

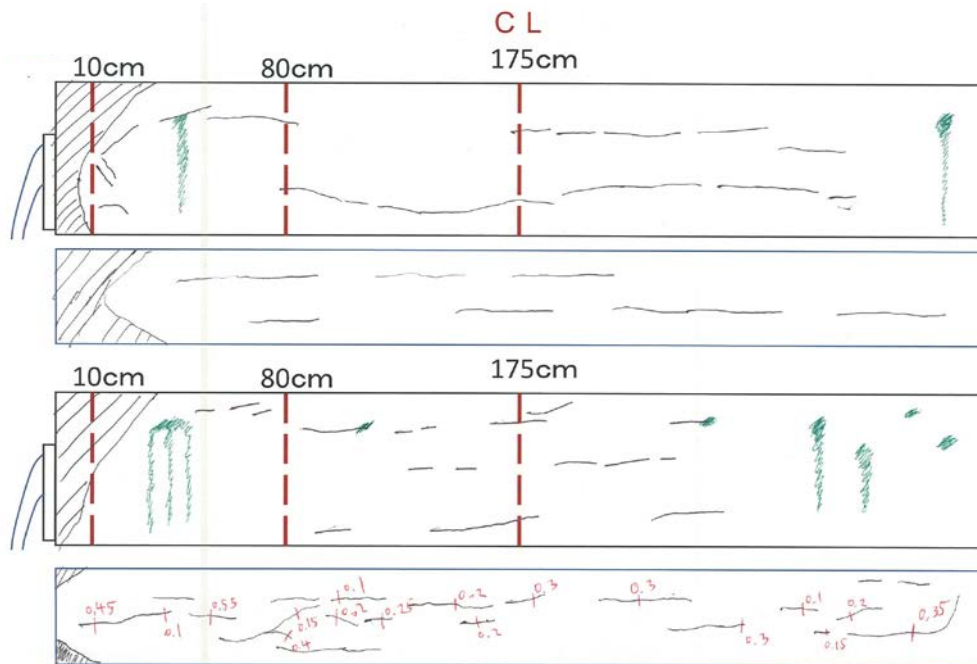


コンクリート表面ひび割れ錆計観察図



端部

No7 U1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部(亜鉛メッキ)



コンクリート表面ひび割れ錆計観察図



全体写真(観察図との関係上、写真は上下逆さま)

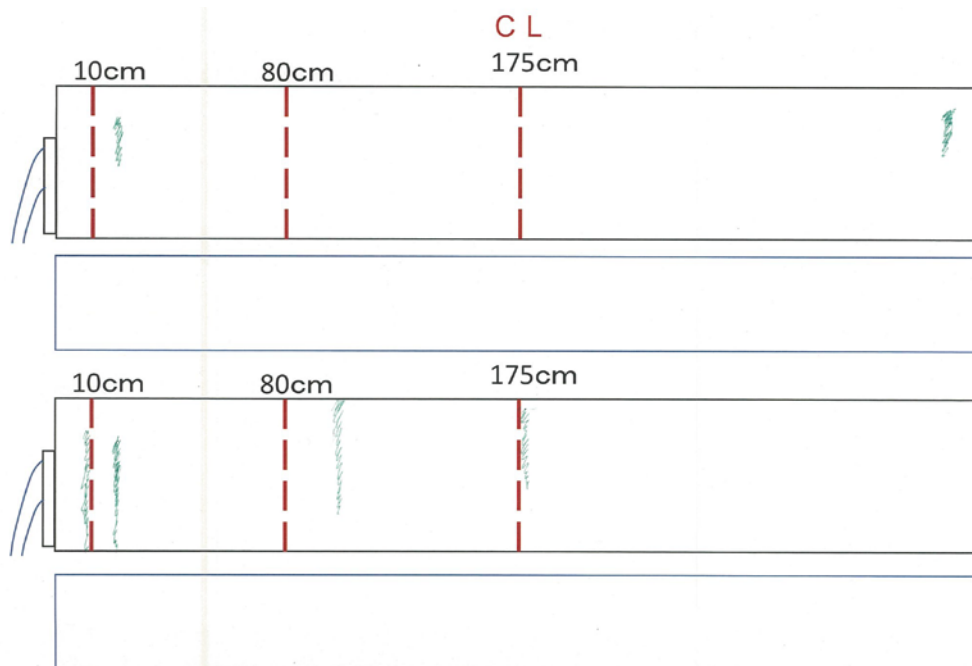


端部劣化状況



供試体底部ひび割れ状況

No8 V1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部



コンクリート表面ひび割れ錆計観察図

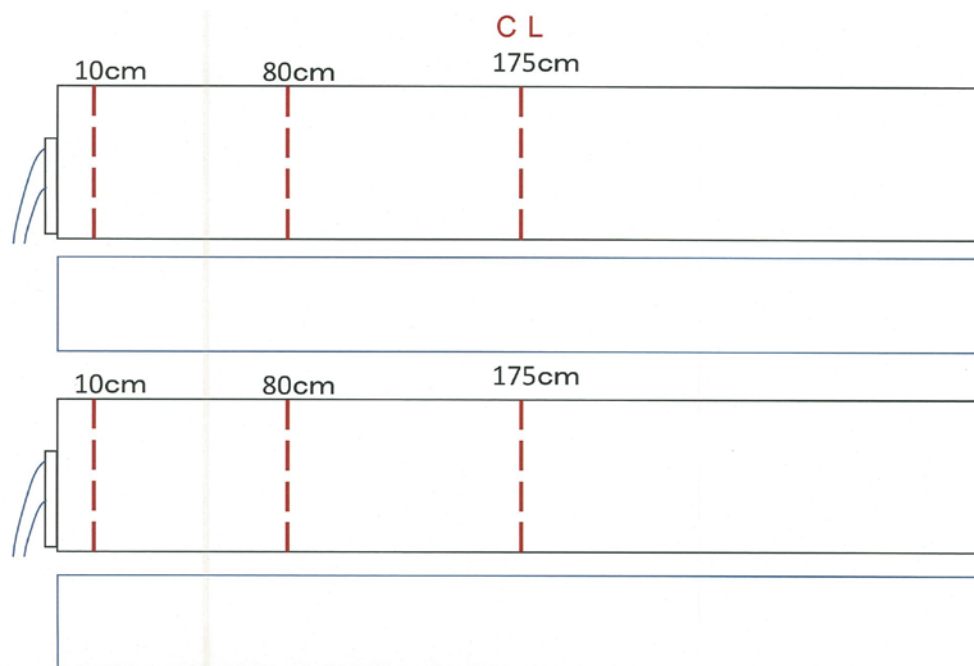


全体写真



端部状況写真(エポキシモルタル除去後)

No9 W1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 40\%$ ・無載荷・感潮部

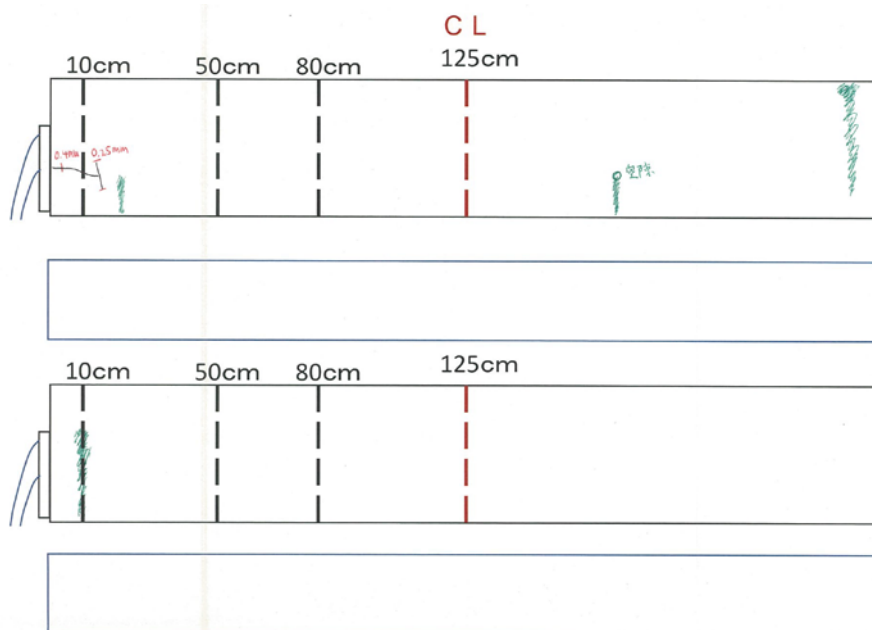


コンクリート表面ひび割れ錆汁観察図



端部状況写真(エポキシモルタル除去後)

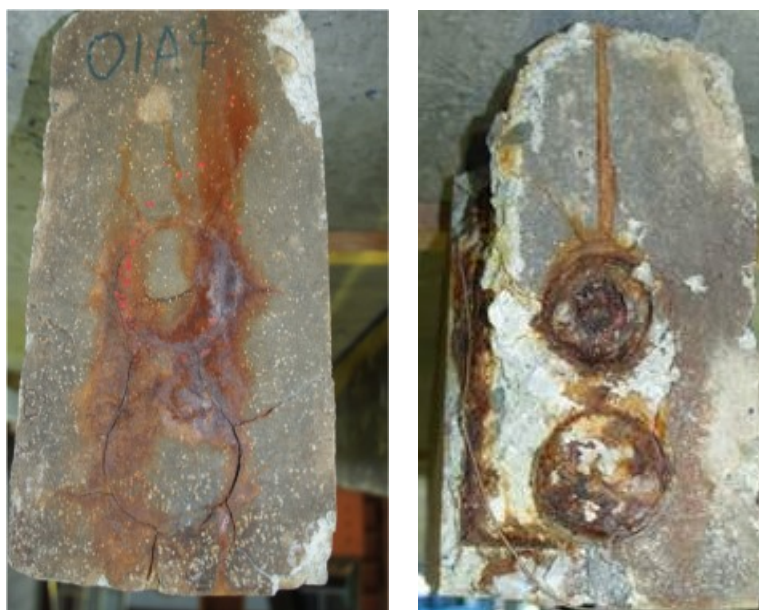
No10 01A4 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部



コンクリート表面ひび割れ錆計観察図

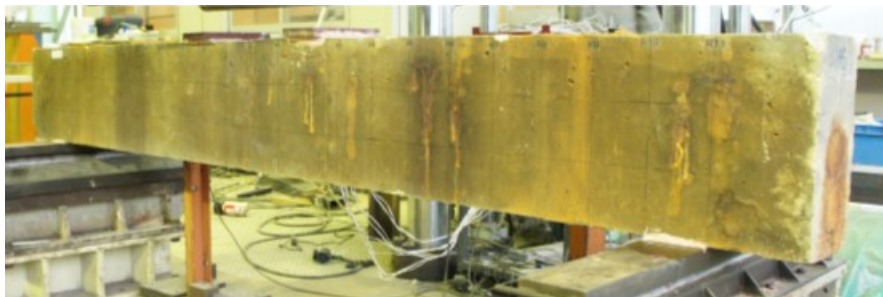


供試体全体写真



端部状況写真

No11 01A5 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部(載荷試験用)

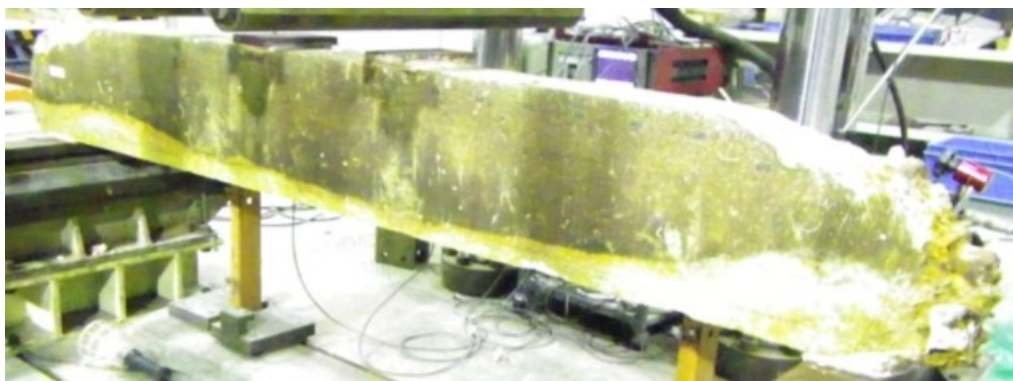


供試体全体写真



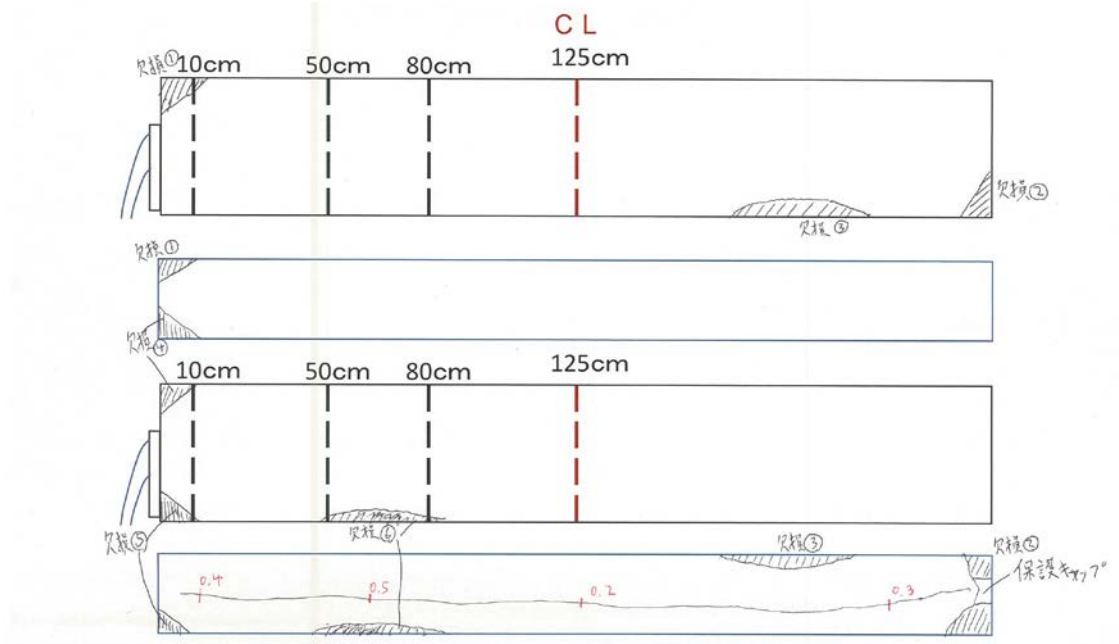
供試体底部ひび割れ状況

No12 01B2 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・海水部(載荷試験用)



全体写真

No13 01B3 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・海水部



コンクリート表面ひび割れ錆計観察図



端部状況写真

3.3. 3 章のまとめ

13 体中 6 体で鋼材腐食にやると思われるひび割れを観察した. 特に海中部曝露の供試体は 3 体中 3 体全てで腐食ひび割れが発生していた. ポストテンション方式の供試体では 4 体中 3 体で腐食ひび割れを確認(その 3 体中 2 体は海中部曝露). ポストテンション方式においては端部の定着具の腐食によるひび割れが目立っていた.

1) 曝露環境による違い

- ・陸上部曝露と感潮部曝露はひび割れもなく健全であった.
- ・感潮部よりも海水部においてよりひび割れも多く, 劣化している状況が伺えた.

2) 緊張方式による違い

- ・ポストテンション方式のほうが端部の腐食が激しかった. 原因としては端部定着具の腐食によるものと考えられる.

3) 鋼材種類による違い

- ・2 本よりと 7 本よりでは明確な傾向は確認出来なかった.

4) 緊張力の差による違い

- ・7 本より線においてその緊張力の違いによる傾向は確認出来なかった.

5) 持続載荷荷重による違い

- ・設計荷重が作用していたものよりもひび割れ荷重が作用していた供試体の方がひび割れも多く劣化していた.

6) その他特徴的な事項

- ・端部の劣化は陸上部を除いて, 全供試体で腐食生成物が確認できた.

参考文献

- 1) 日本工業規格 JIS G 3536 PC 鋼線及びPC 鋼より線
- 2) 日本工業規格 JIS G 3109 PC 鋼棒
- 3) 日本工業規格 JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼)

4. 載荷試験による最大曲げ引張り耐力評価

4.1. 実験概要

本章ではプレストレストコンクリートの性能として最も基本的かつクリティカルな最大曲げ引張破壊耐力を曲げ載荷試験により評価する。

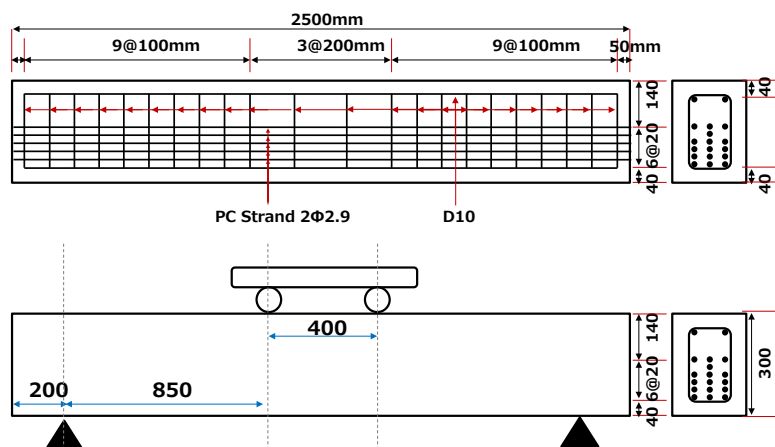
試験を行った供試体は表 4-1 内、赤枠に示す。プレテンション方式は 2 本より線, 7 本より線, ポストテンション方式は感潮, 海中曝露の 4 体である。

破壊形態は PC 鋼材降伏後に圧縮縁側コンクリートが圧縮破壊することを想定し, 各供試体で図 4-1 に示す載荷点と載荷スパンで行った。

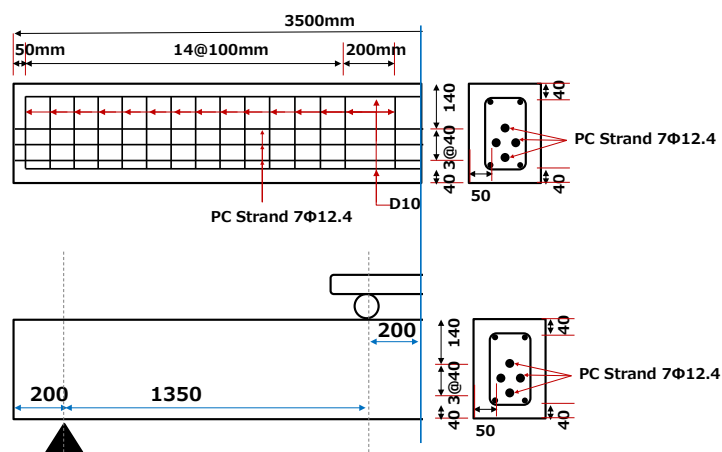
なお, 予め断面詳細より予想荷重を計算し, 試験結果の良否の判定基準とした。計算にあたりコンクリート強度は計画時の圧縮強度 50N/mm^2 とした。

表 4-1 載荷試験を行った供試体

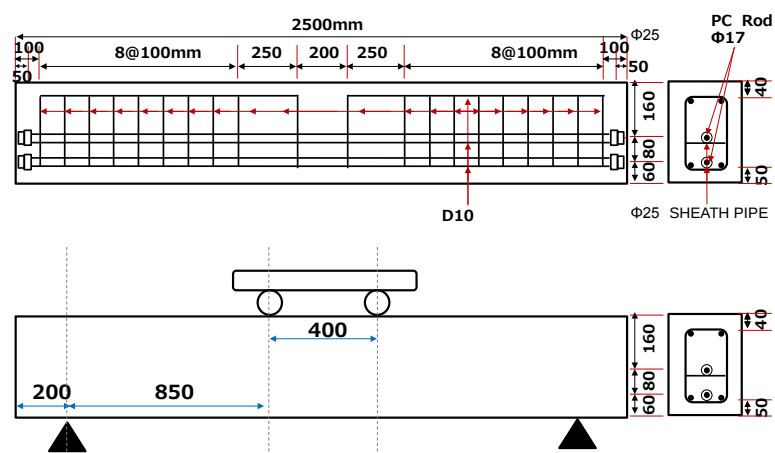
No.	Mark	Types of Prestress	Types of PC	Loading condition	Exposure condition	Tensioning Force	Remark
1	R1A3	Pre-tensioning	Strands: SWPR2φ2.9	No Load	Tidal	0.8σy	
2	R1B2				Under Water		
3	R1C2				Ground		
4	R2A4			Cracking Load			
5	R4A1			Design Load			
6	T1A3		Strands: SWPR7φ12.4	No Load	Tidal	0.8σy	
7	U1A2					0.6σy	Zincing
8	V1A2						
9	W1A2					0.4σy	
10	O1A4	Post-tensioning	Tendon: φ17	No Load	Tidal	0.85σy	
11	O1A5				Under Water		
12	O1B2						
13	O1B3						



a) No4 R2A4 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}$ 2 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部



b) No7 U1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部(垂鉛メッキ)



c) No11(12) 01A5 (01B2) ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部(海中部)

図 4-1 載荷試験 載荷点概要図

4.2. 実験結果

各試験結果を荷重-梁中央部の変位量のグラフで示す.

a) No4 R2A4 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部

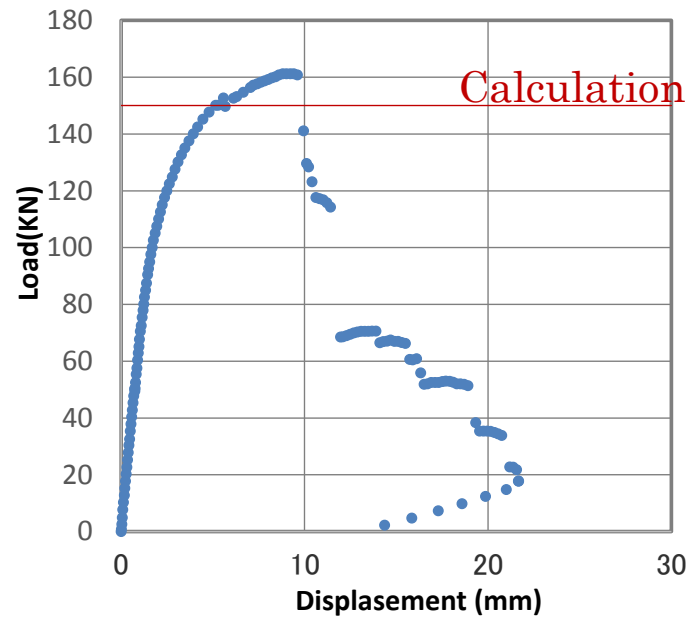


図 4-2 荷重-たわみ曲線

図 4-2 より計算値の 150kN よりも大きな最大荷重 161.2kN を示しており,健全な状態であるといえる. ただ,想定した破壊形態の上縁コンクリートの圧壊は目視でも(図 4.3 参照)上縁コンクリートのひずみゲージの値でも確認できなかった(一般的に 3500μ に達した時に曲げ破壊に至るとされている).



図 4-3 最大荷重作用時,側面

原因としては図 4-3 より梁側面に長軸方向のひび割れがあるため、それより上部と下部でコンクリートの構造が分断されてしまったのではないかと考えられる。この横方向のひび割れに関しては 2 章の目視調査で近傍にひび割れが確認でき、荷重が加わることによりそれが卓越したものと考えられる。図 4-4 に横方向のひび割れ進展の状況を示す。このひび割れは内部の鉄筋の腐食によるものと推察される。内部の鉄筋腐食に関しては 6 章で詳しく論じるが、内部の鉄筋の状況からもひび割れ近傍の主鉄筋が激しく腐食していることが伺える(図 4-5)。

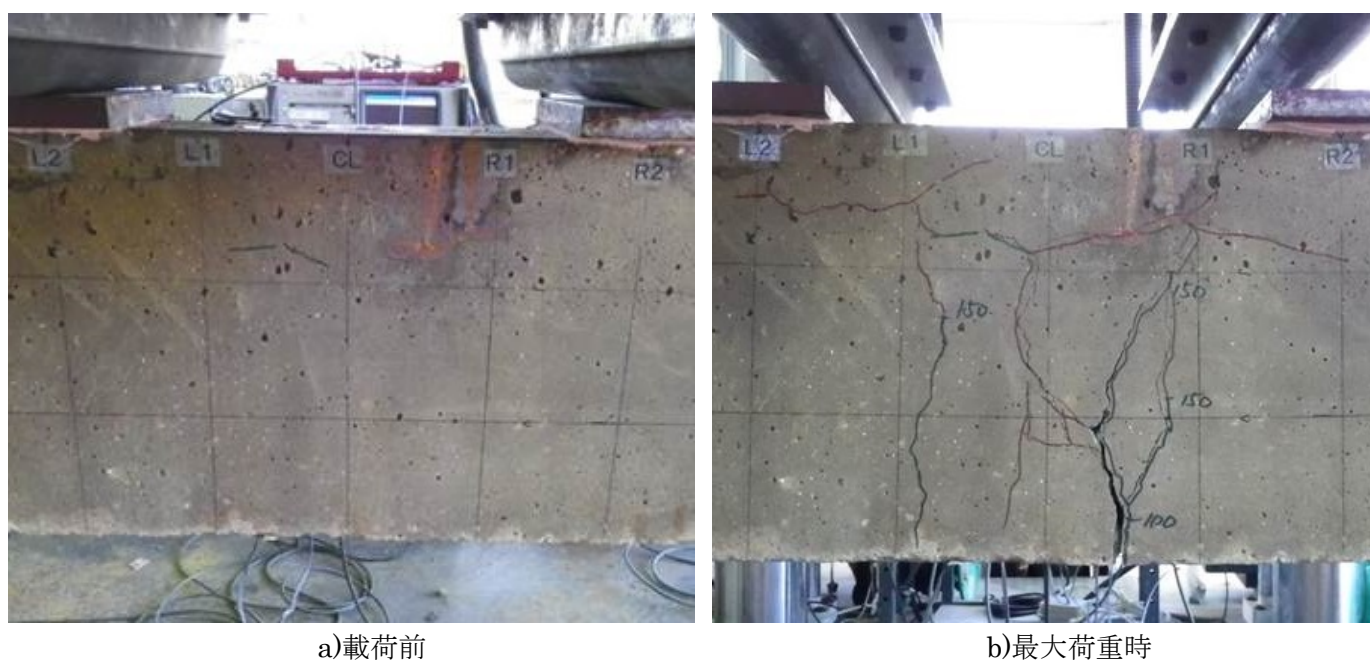


図 4-4 ひび割れ進展状況



図 4-5 内部主鉄筋の腐食状況(上：載荷写真反対側,下：載荷試験写真側)

b) No7 U1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部(亜鉛メッキ)

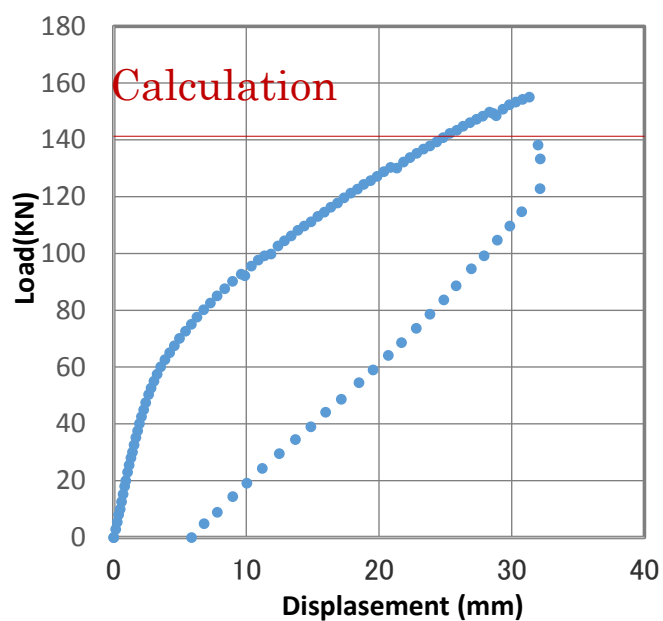


図 4-6 荷重-たわみ曲線

図 4-6 より計算値の 141.3kN よりも大きな最大荷重 155.1kN を示しており,健全な状態であるといえる.上縁コンクリートの圧壊も確認できた(図 4-7 参照).



図 4-7 最大荷重作用時,側面

c) No11 01A5 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部

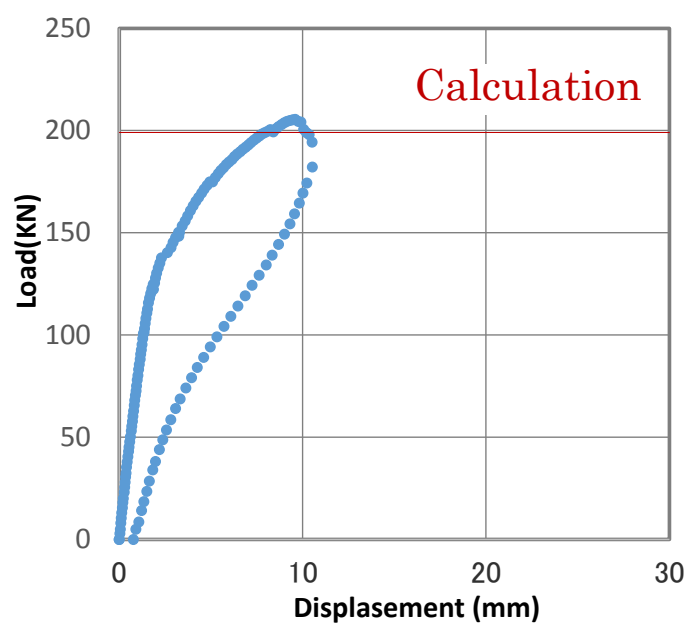


図 4-8 荷重-たわみ曲線

図 4-8 より計算値の 199kN よりも大きな最大荷重 205.5kN を示しており,健全な状態であるといえる.上縁コンクリートの圧壊も確認できた(図 4-9 参照).



図 4-9 最大荷重作用時,側面

d) No12 01B2 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・海水部

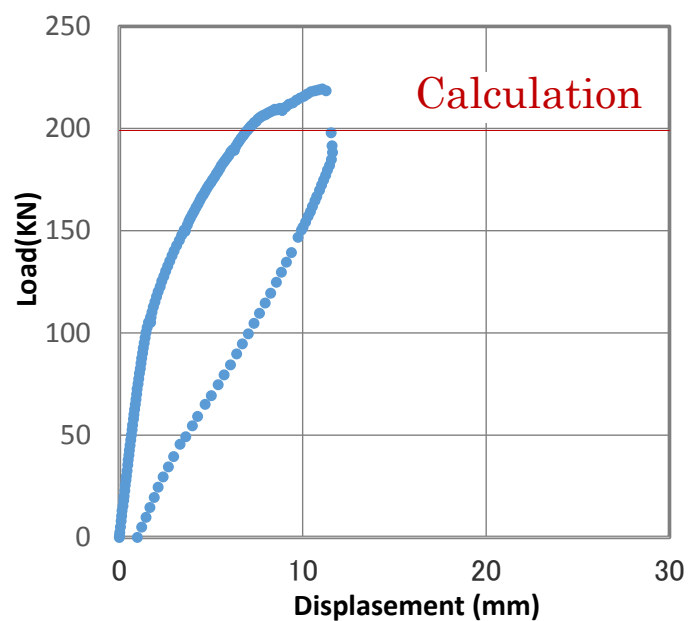


図 4-10 荷重-たわみ曲線

図 4-10 より計算値の 199kN よりも大きな最大荷重 218.5kN を示しており,健全な状態であるといえる.上縁コンクリートの圧壊も確認できた(図 4-11 参照)

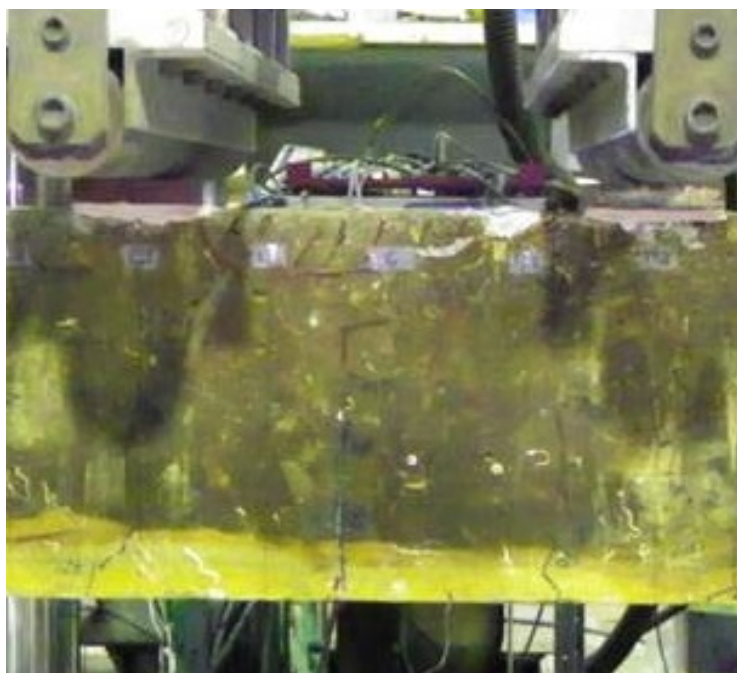


図 4-11 最大荷重作用時,側面

4.3. 4 章のまとめ

40 年間海洋環境に曝露された供試体 4 体, プレテンション方式の 2 本より線と 7 本より線, ポストテンション方式の感満部と海中部曝露においてどの供試体においても断面設計時の耐力以上の曲げ荷重に対する耐力が残存していることが確認された.

5. 残存有効プレストレス力の測定・評価

5.1. 概要

本章では以下に記す2通りの有効応力の測定手法を用いて、40年間海洋環境に曝露されたPC 供試体の残存有効プレストレス力を評価した。それら測定手法の特性上、コア応力解放法では梁長軸方向の有効プレストレス力の分布を求め、鋼材切断応力解放法では梁内の1点ないし2点で行い、コア応力解放法による有効応力の妥当性を評価するために行った。

5.2. 計測手法

5.2.1. コア応力解放法

図 4-1 は、二井谷が提案したコア応力解放法¹⁾による有効応力推定手法の概要である。以下に、その手順を示しながら測定手法の概要を説明する。

- ①有効応力を知りたい位置を中心として、コンクリート表面に持続応力作用軸方向（主方向、 x 方向）およびそれと直角方向（ y 方向）にひずみゲージを貼り付ける。
- ②ひずみの初期値を計測し、初期値をゼロとする。
- ③コンクリート表面と直角方向に、ひずみゲージを含む部分をコンクリートコアカッターによって削孔する。
- ④死荷重やプレストレスなどの持続荷重による応力や、乾燥収縮およびクリープによる内部拘束応力が開放されたことによる弾性ひずみが生じるので、初期値からの差分のひずみを測定する。
- ⑤コア削孔終了後、12時間程度継続的にひずみを測定する。
- ⑥計測の終了した削孔コアにより、コンクリートの弾性係数を測定する。
- ⑦測定された x 方向および y 方向のひずみ、およびコンクリートの弾性係数により、コンクリート部材に作用する有効応力を推定する。

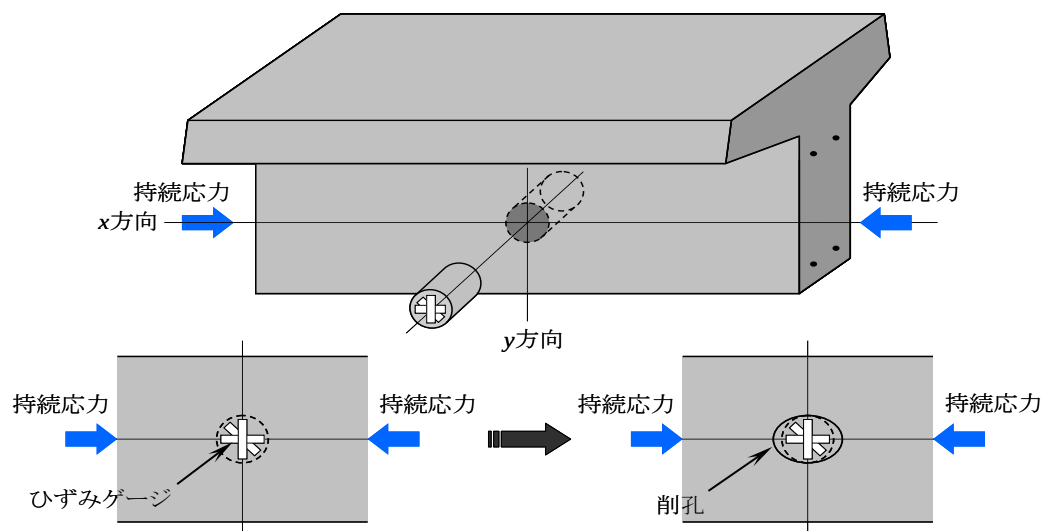


図 5-1 コア応力解放法による有効応力推定手法

5.2.3. 鋼材切断応力解放法

おもにプレストレストコンクリート構造物を対象として、残存プレストレス（有効プレストレス）を推定する方法として開発された方法²⁾がある。鉄筋切断法と称される手法で、図 4-2 に概要を示すように構造物の鉄筋をはつりだし、ひずみゲージを貼り付けた後、鉄筋を切断して開放されるひずみを計測してプレストレスを推定する。コア応力解放法と比べ、コンクリートのヤング率を考慮しなくてよい点、コンクリートの収縮やクリープの影響を除いて有効応力を推定できる点ではメリットが大きい。実際の構造物に適用を考えた場合、鋼材を切断してしまうことによる構造物へのダメージが大きい。本研究ではコア応力解放法による有効応力の妥当性を担保する観点から同手法による有効応力の算出も行った。

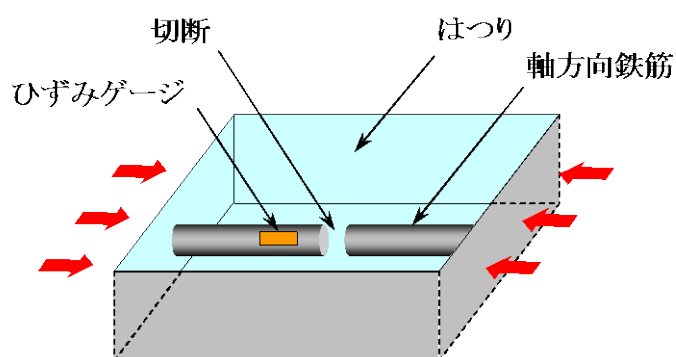


図 5-2 鋼材切断応力解放法

5.3. 各供試体の有効プレストレス力分布とその評価

5.3.1. コア応力解放法と鋼材切断応力解放法実験結果

以下、梁ごとに、コア応力解放法による梁全長の有効応力の分布と鋼材切断応力解放法による実験結果を示す。

a)では有効プレストレス力を梁長軸方向に沿って分布を示す。縦軸に推定有効プレストレス、横軸に梁左端からの距離を示す。なお、目視調査と方向を同じくして左端として扱っている。赤線がコンクリートの収縮・クリープ変形による有効プレストレスの減少と鋼材のリラクセーションによる有効プレストレスの減少を考慮した、現在想定される残存有効プレストレス力である。表 4-1 に各供試体の初期導入プレストレス力、収縮・クリープによる減少率、鋼材のリラクセーションによる減少率、そして現在想定される有効プレストレス力の一覧表を示す。またプレテンション方式の結果において緑破線は有効プレスト力導入直後の鋼材種類毎に必要な伝達長を示している(表 4-2 参照)。

b) では梁長軸方向のひずみ(X)と長軸直角方向のひずみ(Y)の値とそれぞれの近似曲線を示す。

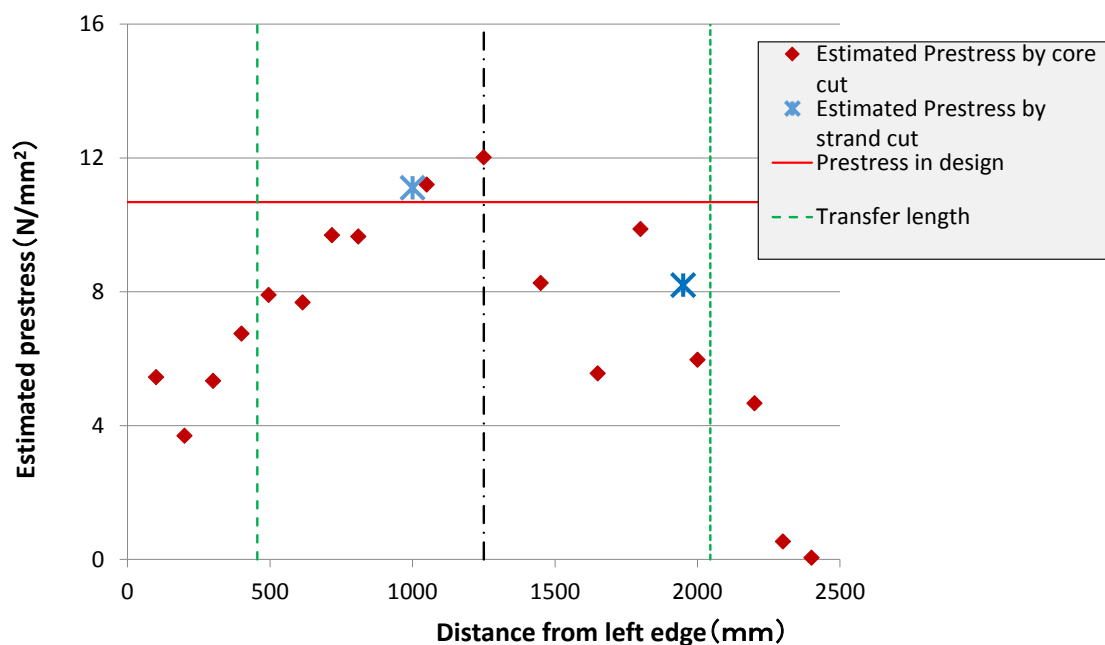
c) では試験実施位置とその地点での各値を表にして示す。特筆すべき事項は備考を加え

た.特にひび割れに関しては場所により測定結果が正常に計測出来ていない可能性が高い.また,スターラップ等内部の鉄筋との位置に近い位置に関しても特異な値を示す傾向にあった(位置関係は付録参照).

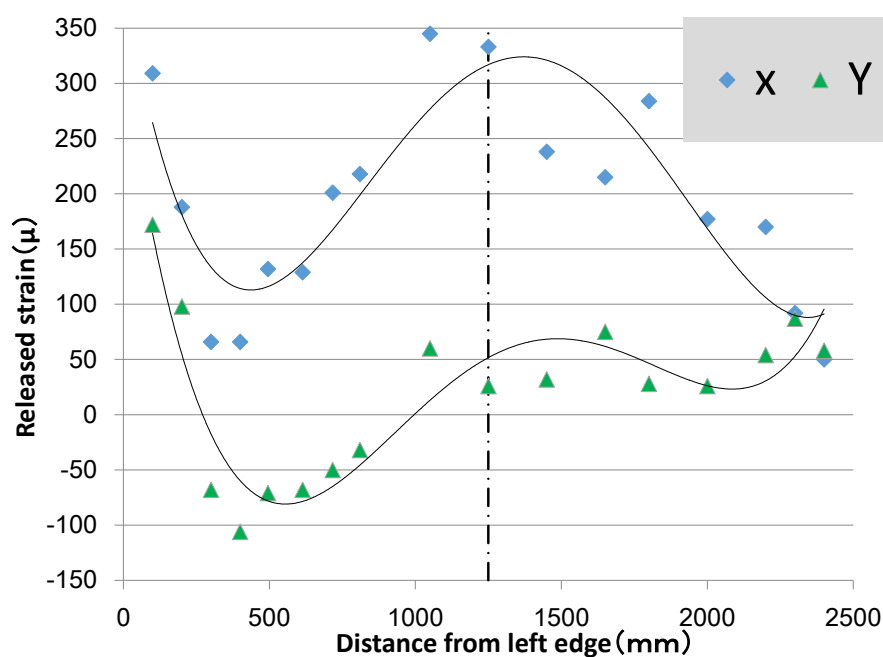
特異と思われる計測結果を除いて,全シリーズ共通して有効応力が設計値以上残存していることが確認できる.またコア応力解放法による実験結果と鋼材切断応力解放法による実験結果が概ね同程度の値を示しており,コア応力解放法による有効プレストレス力の分布は信頼性が高いといえる.

各供試体の比較項目 **1) 曝露環境による影響 2) 緊張方式による影響 3) 鋼材種類による影響 4) 緊張力の差による影響 5) 持続載荷荷重による影響**については 5.3.2 で詳しく比較,評価していく.

No1. R1A3 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・無載荷・感潮部



a) 有効プレストレス分布

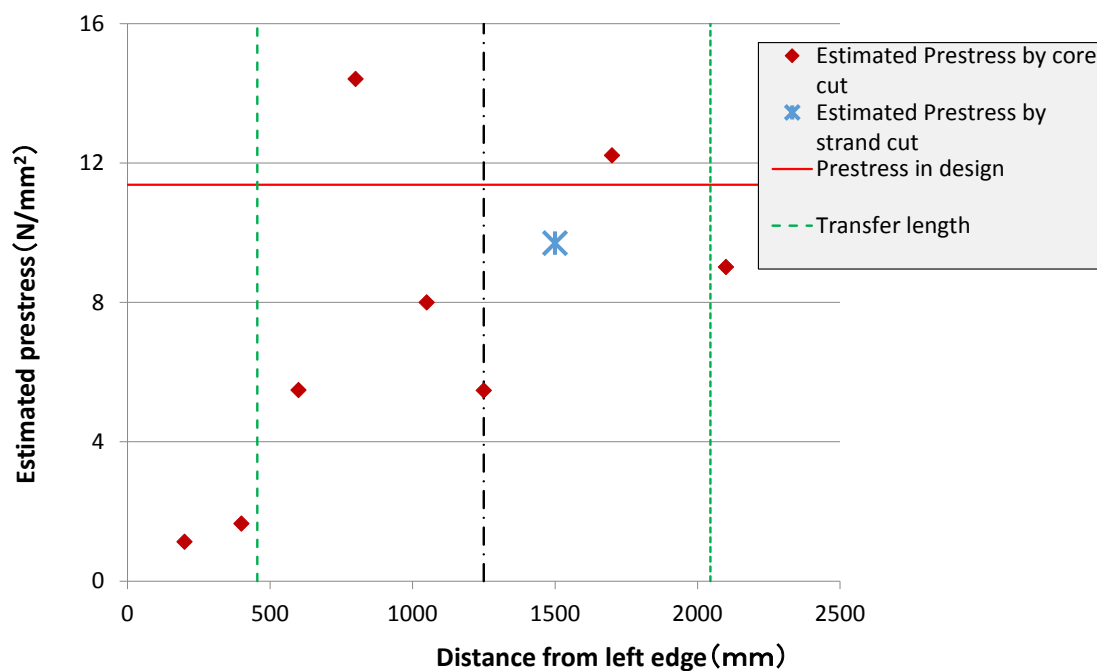


b) X, Y ひずみ分布

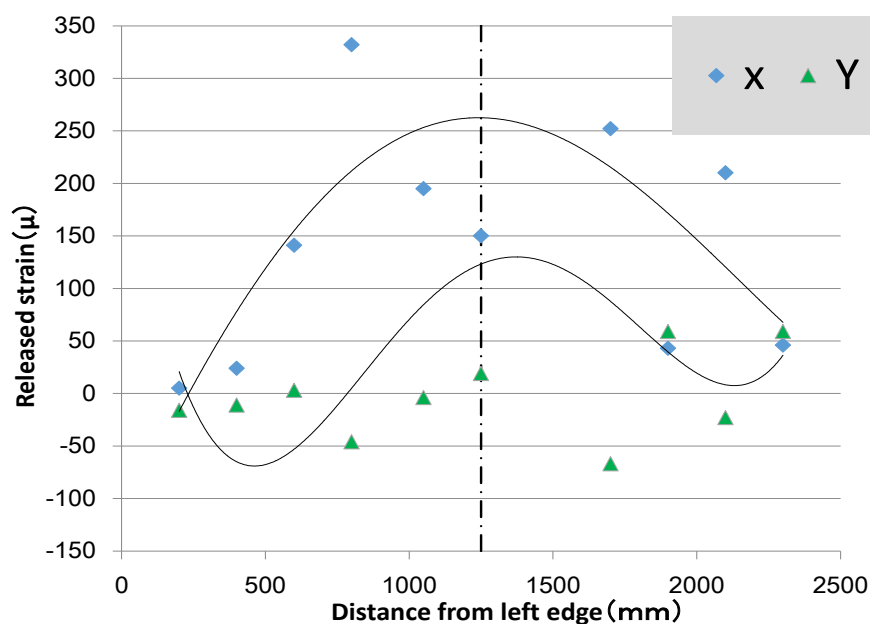
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	100	200	300	400	495	614	717	810	1050	1250	1450	1650	1800	2000	2200	2300	2400
有効プレストレス(kN/mm^2)	5.4	3.7	5.3	6.8	7.9	7.7	9.7	9.7	11.2	12.0	8.3	5.6	9.9	6.0	4.7	0.5	0.1
Xひずみ(μ)	309	188	66	66	132	129	201	218	345	333	238	215	284	177	170	92	50
Yひずみ(μ)	172	98	-68	-106	-71	-68	-50	-32	60	26	32	75	28	26	54	87	58

No2. R1B2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・海中部



a) 有効プレストレス分布

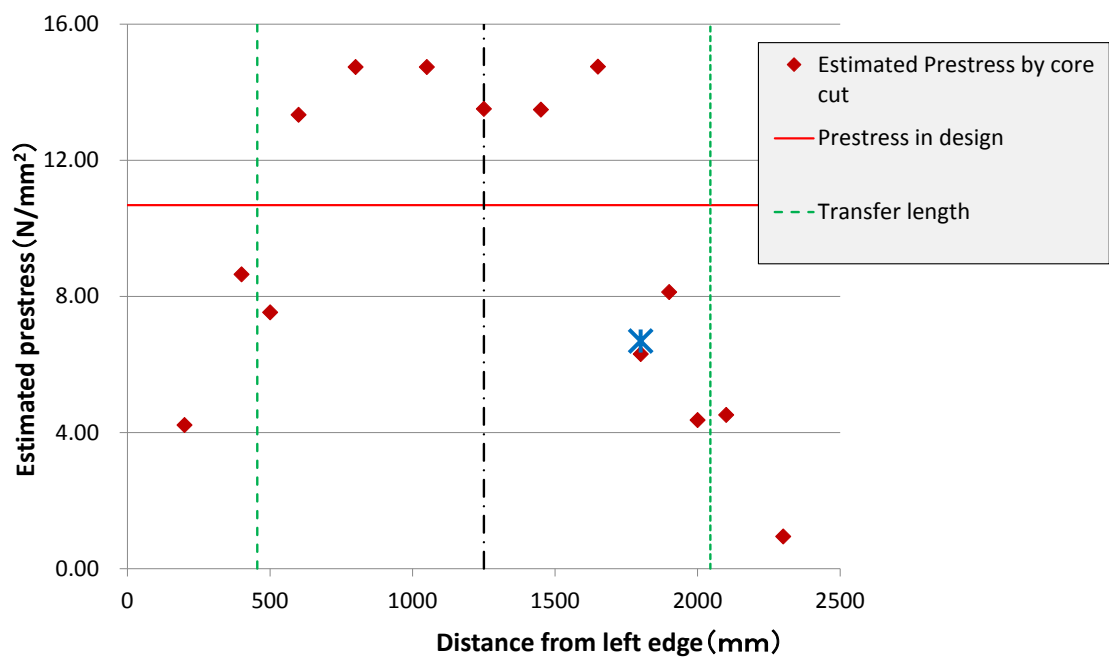


b) X, Y ひずみ分布

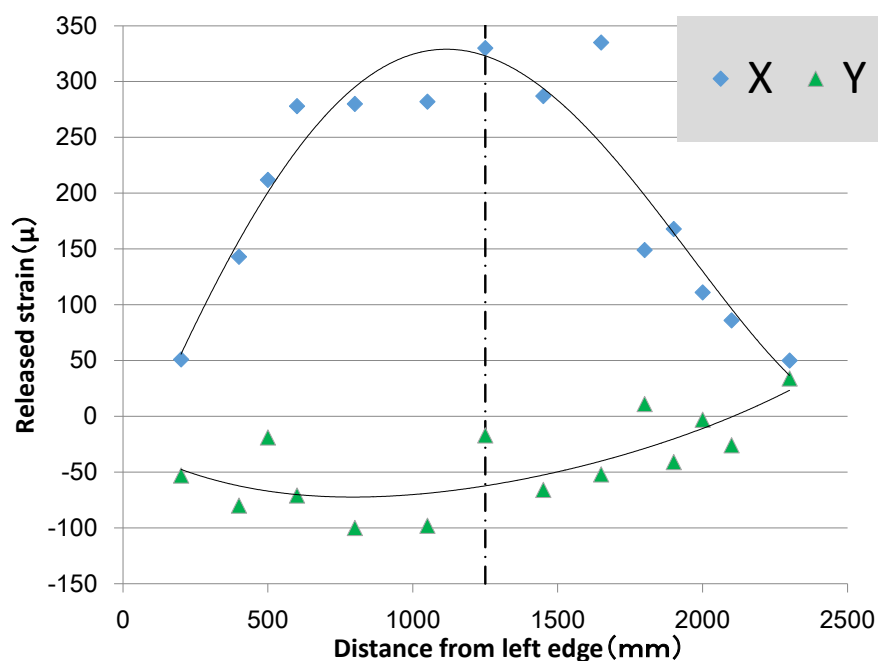
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	200	400	600	800	1050	1250	1450	1700	1900	2100	2300
有効プレストレス(kN/mm ²)	1.1	1.7	5.5	14.4	8.0	5.5	-2.0	12.2	-0.2	9.0	-0.1
Xひずみ(μ)	5	24	141	332	195	150	373	252	43	210	46
Yひずみ(μ)	-16	-11	3	-46	-4	19	442	-67	59	-23	59
備考	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび

No3. R102 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・陸上部



a) 有効プレストレス分布

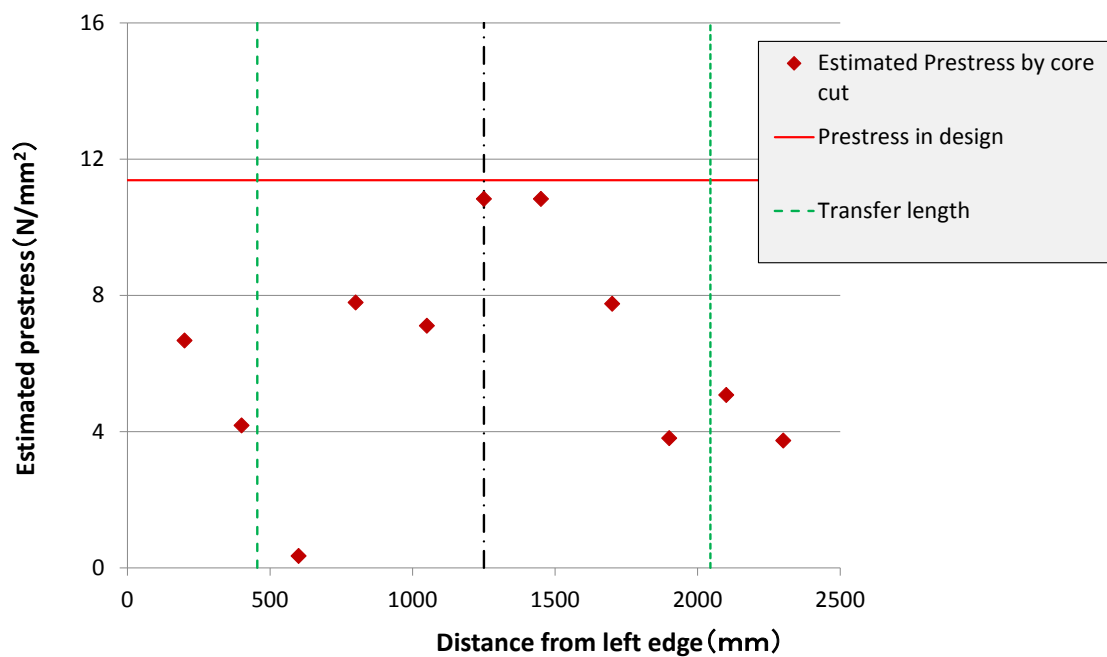


b) X, Y ひずみ分布

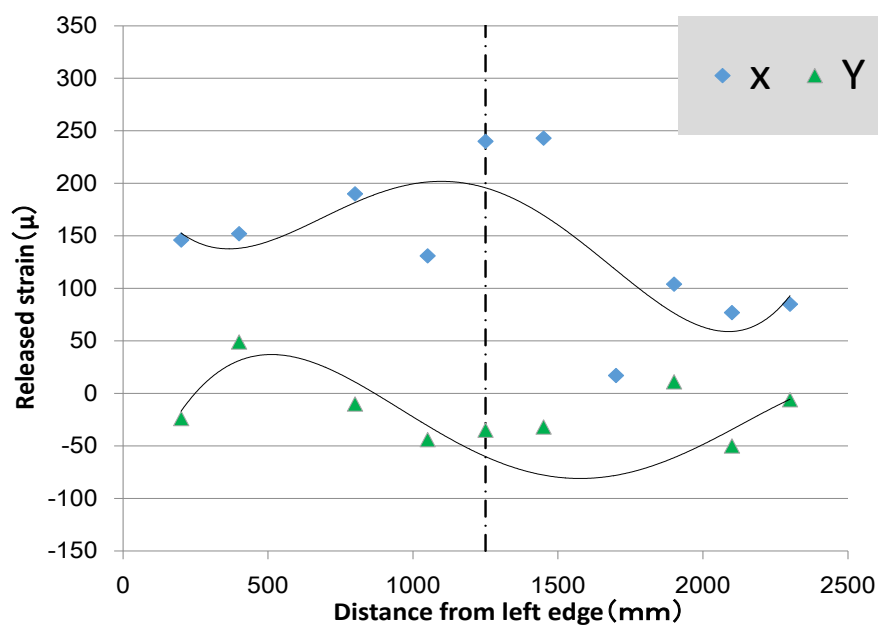
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	200	400	500	600	800	1050	1250	1450	1650	1800	1900	2000	2100	2300
有効プレストレス力(kN/mm ²)	4.2	8.6	7.5	13.3	14.7	14.7	13.5	13.5	14.8	6.3	8.1	4.4	4.5	0.9
Xひずみ(μ)	51	143	212	278	280	282	330	287	335	149	168	111	86	50
Yひずみ(μ)	-53	-80	-19	-71	-100	-98	-17	-66	-52	11	-41	-3	-26	34

No4. R2A4 プレテン・φ2.9mm2 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部



a) 有効プレストレス分布

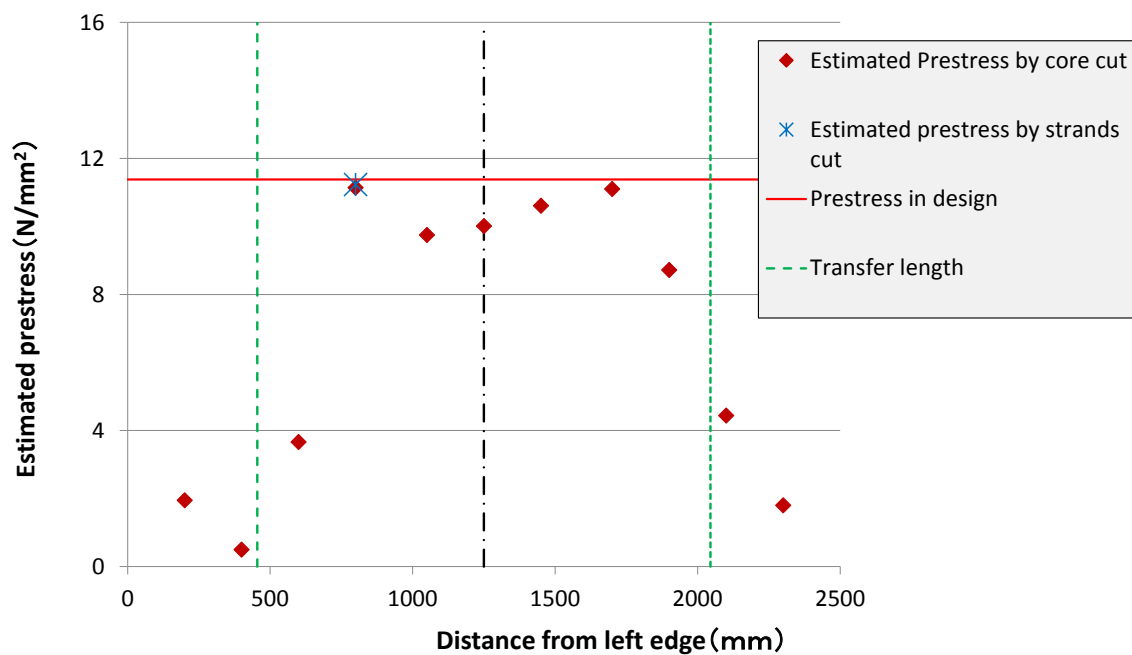


b) X, Y ひずみ分布

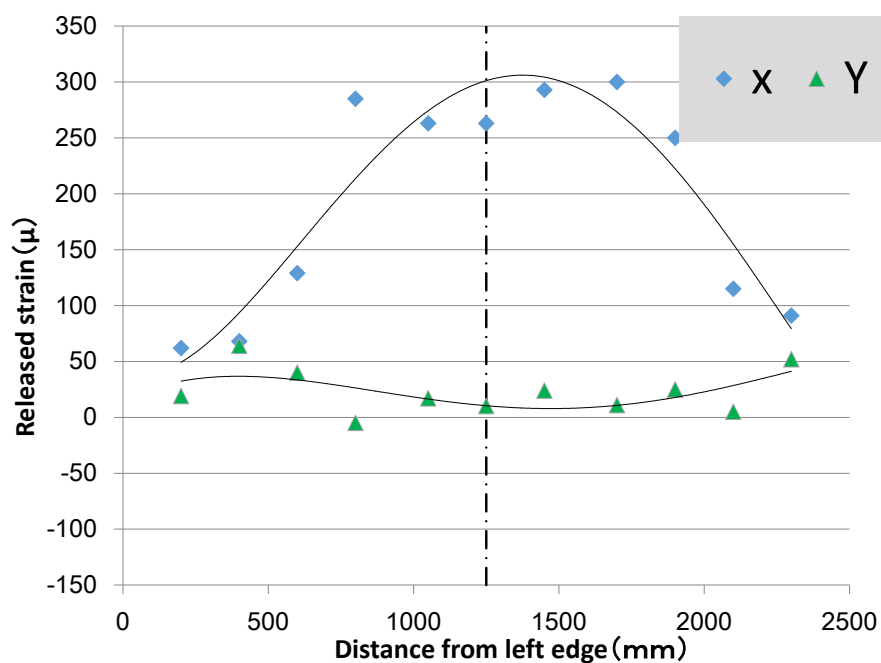
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	200	400	800	1050	1250	1450	1700	1900	2100	2300
有効プレストレス(kN/mm ²)	6.7	4.2	7.8	7.1	10.8	10.8	7.8	3.8	5.1	3.7
Xひずみ(μ)	146	152	190	131	240	243	17	104	77	85
Yひずみ(μ)	-24	49	-10	-44	-35	-32	-182	11	-50	-6
備考				ひび	ひび	ひび	ひび	ひび		

No5 R4A1 プレテン・φ2.9mm² 本より線・設計荷重・感潮部



a) 有効プレストレス分布

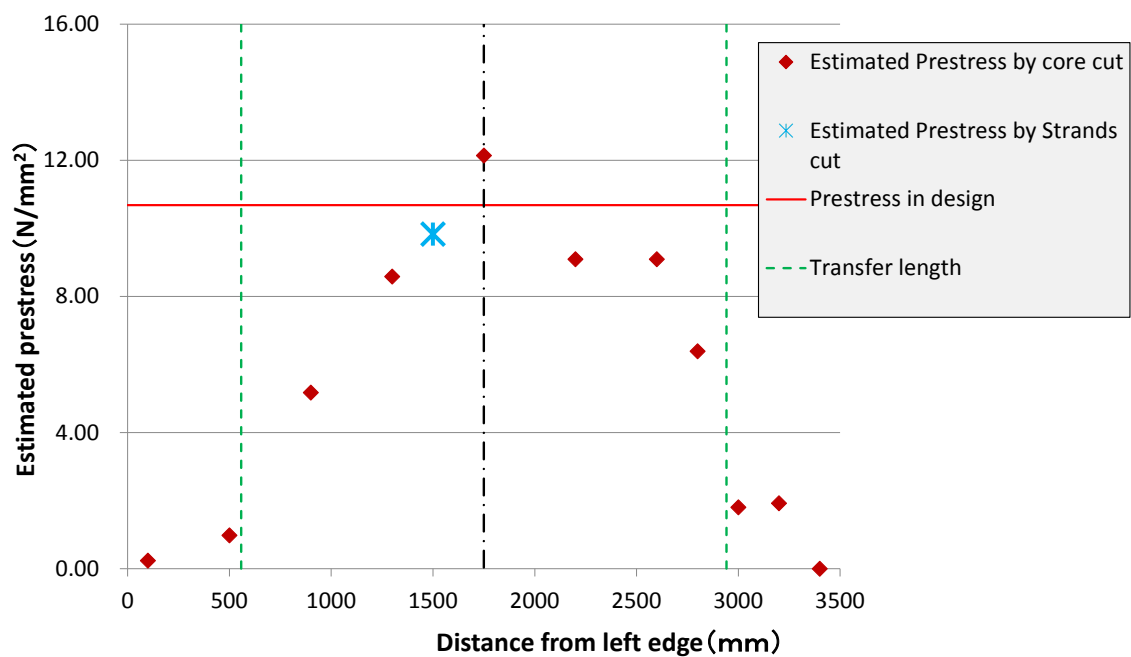


b) X, Y ひずみ分布

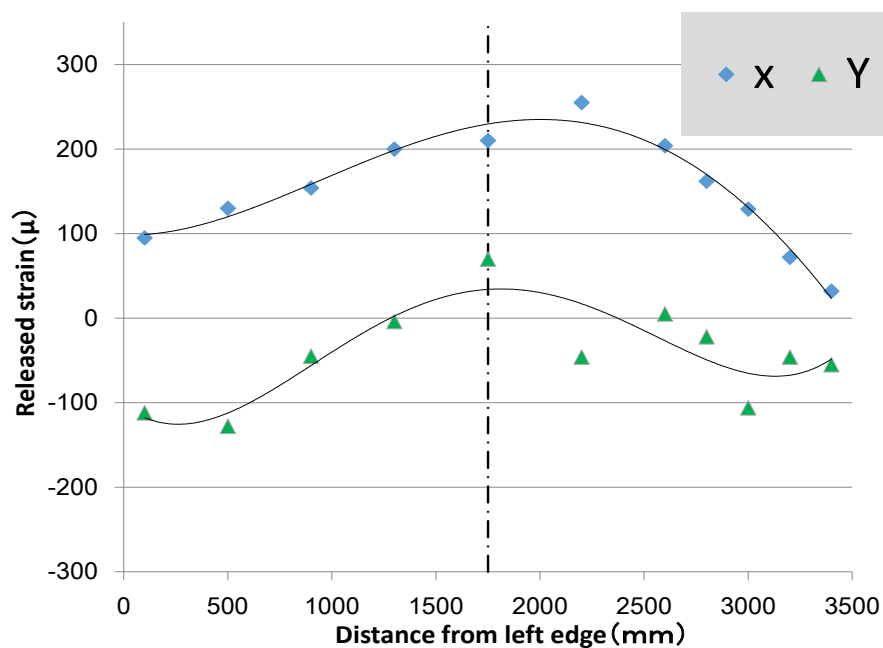
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	200	400	600	800	1050	1250	1450	1700	1900	2100	2300
有効プレストレス力(kN/mm ²)	1.9	0.5	3.7	11.1	9.8	10.0	10.6	11.1	8.7	4.4	1.8
Xひずみ(μ)	62	68	129	285	263	263	293	300	250	115	91
Yひずみ(μ)	19	64	40	-5	17	10	24	11	25	5	52

No6 T1A3 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 80\%$ ・無載荷・感潮部



a) 有効プレストレス分布

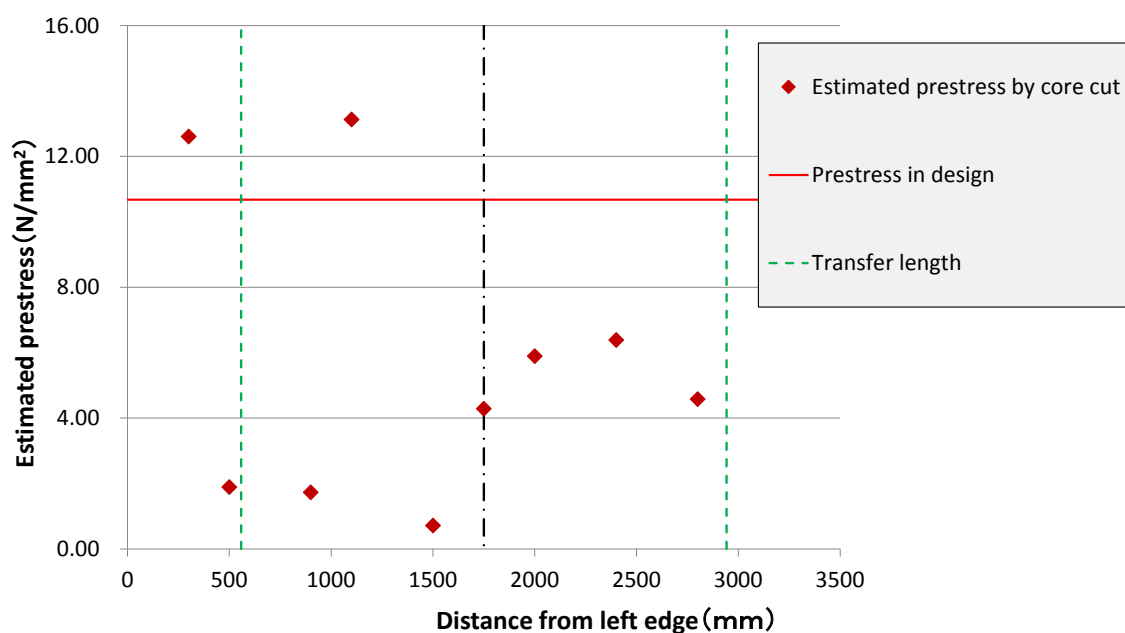


b) X, Y ひずみ分布

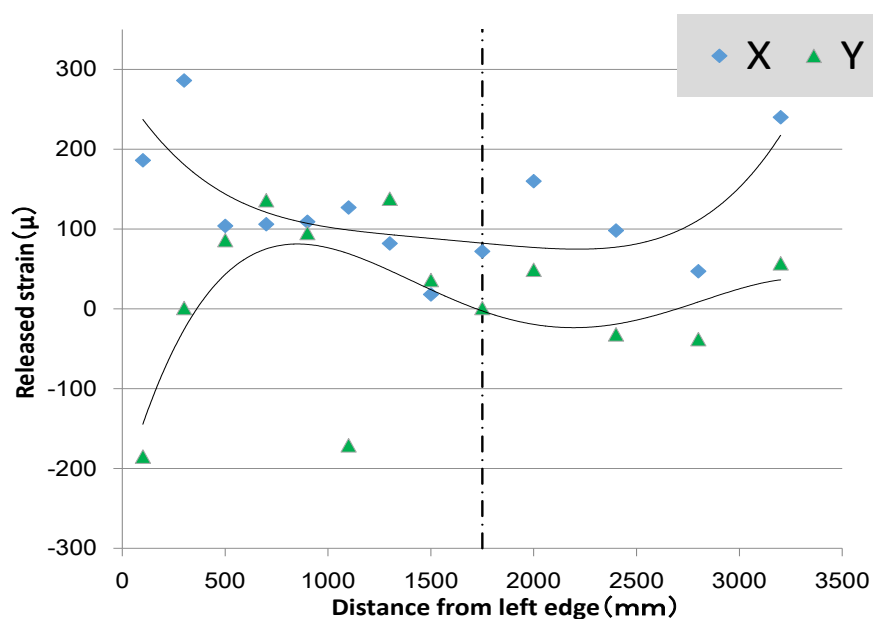
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	100	500	900	1300	1750	2200	2600	2800	3000	3200	3400
有効プレストレスカ(kN/mm^2)	0.2	1.0	5.2	8.6	12.1	9.1	9.1	6.4	1.8	1.9	0.0
Xひずみ(μ)	95	130	154	200	210	255	204	162	129	72	32
Yひずみ(μ)	-112	-128	-45	-4	70	-46	5	-22	-106	-46	-55

No7 U1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部(亜鉛メッキ)



a) 有効プレストレス分布

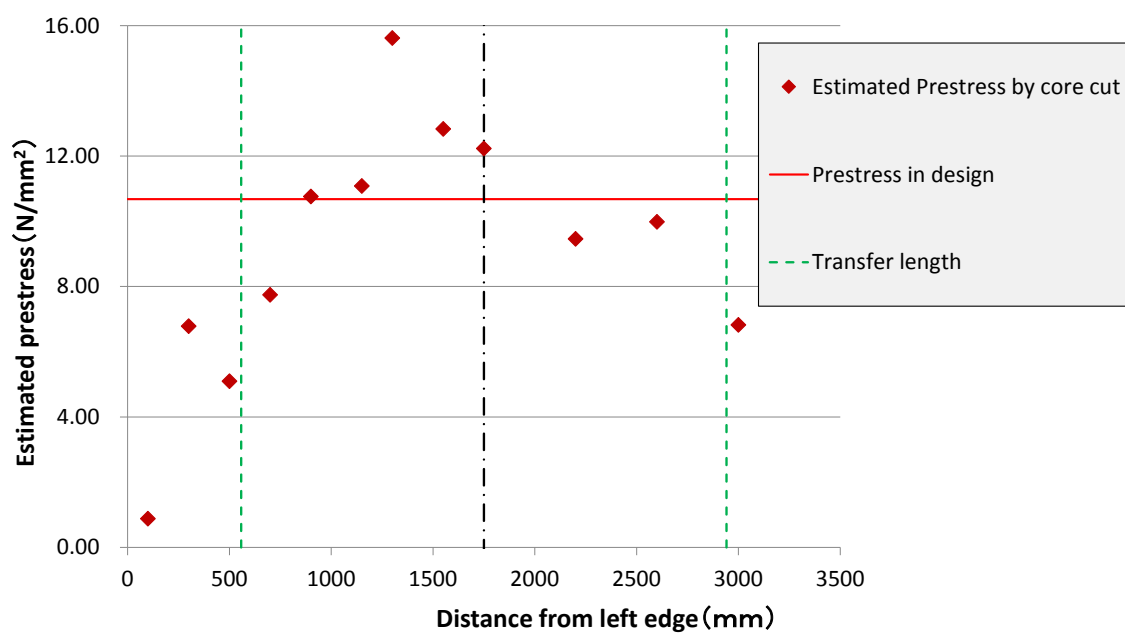


b) X, Y ひずみ分布

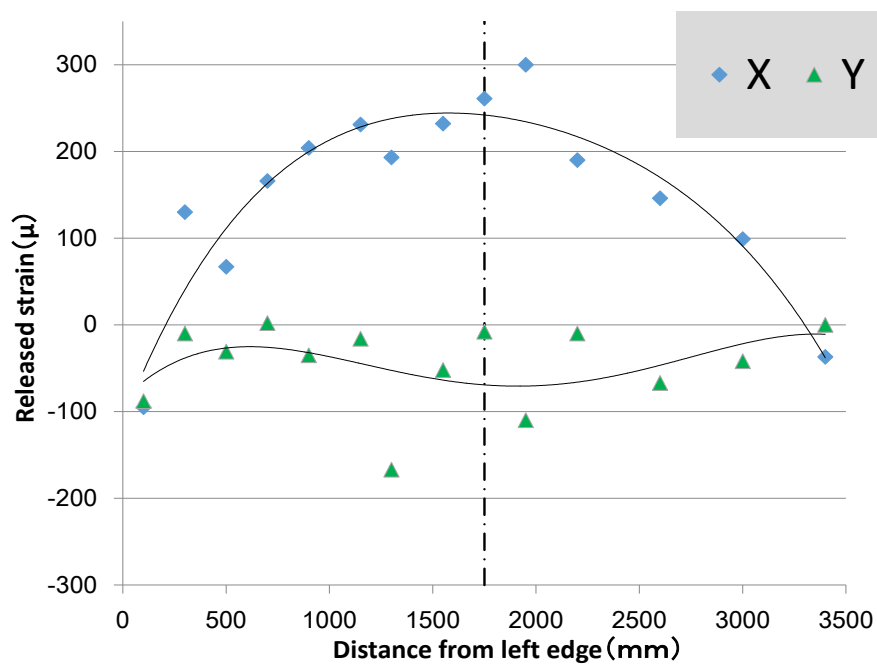
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	100	300	500	700	900	1100	1300	1500	1750	2000	2400	2800	3200
有効プレストレス(kN/mm^2)	16.1	12.6	1.9	0.0	1.7	13.1	-1.1	0.7	4.3	5.9	6.4	4.6	8.5
Xひずみ(μ)	186	286	104	106	109	127	82	18	72	160	98	47	240
Yひずみ(μ)	-185	1	86	136	95	-171	138	36	1	49	-32	-38	57
備考	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび

No8 V1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部



a) 有効プレストレス分布

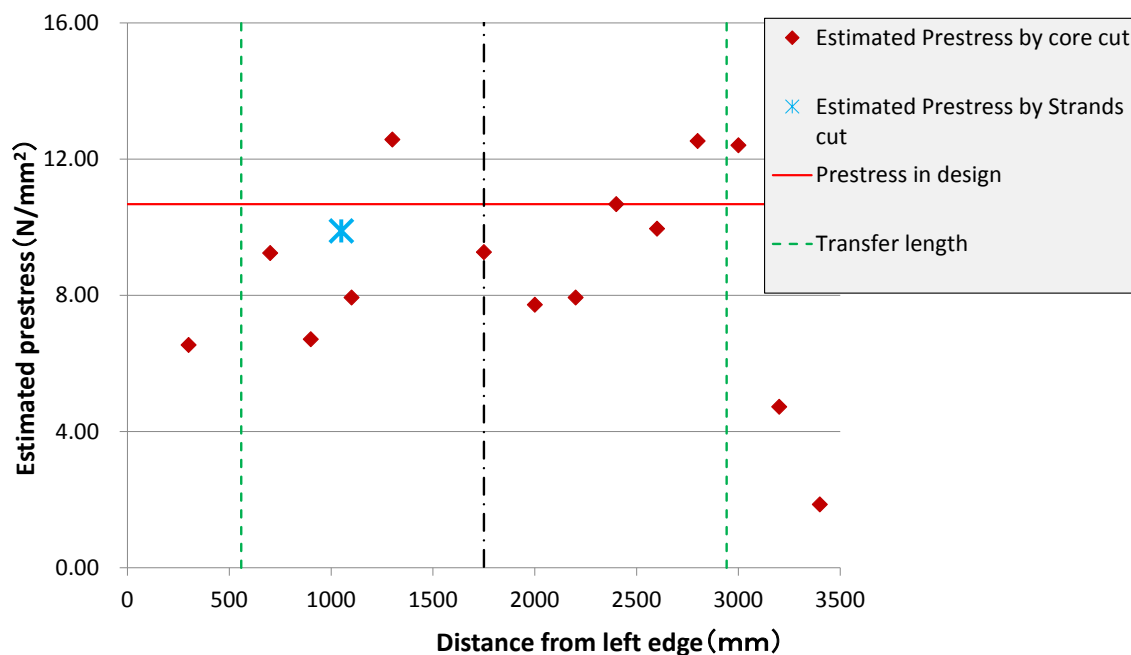


b) X, Y ひずみ分布

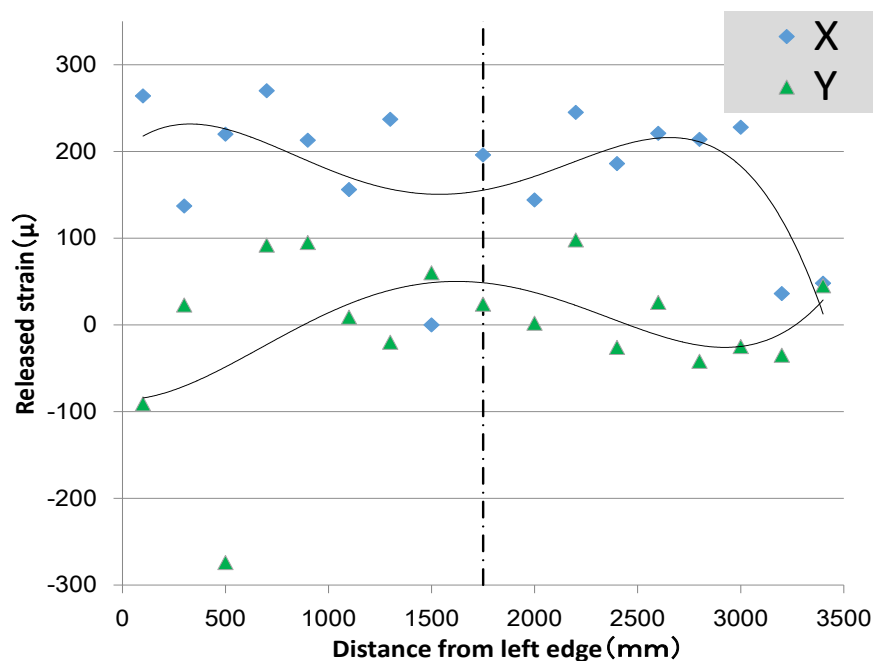
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	100	300	500	700	900	1150	1300	1550	1750	1950	2200	2600	3000	3400
有効プレストレスカ(kN/mm^2)	0.9	6.8	5.1	7.7	10.8	11.1	15.6	12.8	12.2	17.9	9.5	10.0	6.8	-0.3
Xひずみ(μ)	-95	130	67	166	204	231	193	232	261	300	190	146	99	-37
Yひずみ(μ)	-88	-10	-31	2	-35	-16	-167	-52	-8	-110	-10	-67	-42	0

No9 W1A2 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ40%・無載荷・感潮部



a) 有効プレストレス分布

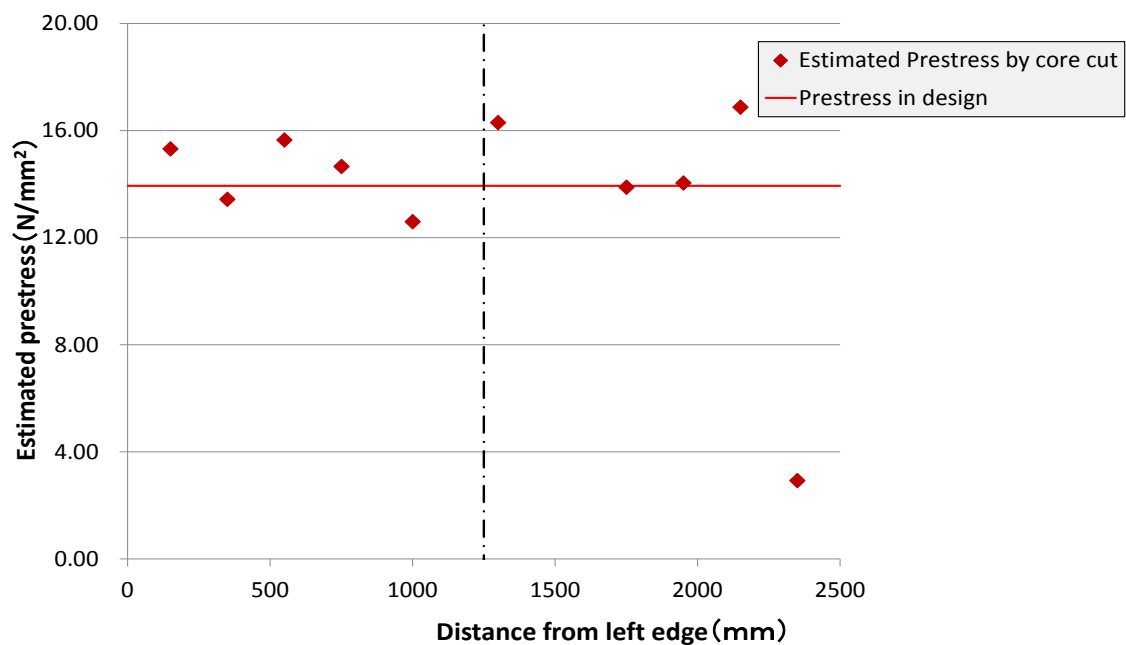


b) X, Y ひずみ分布

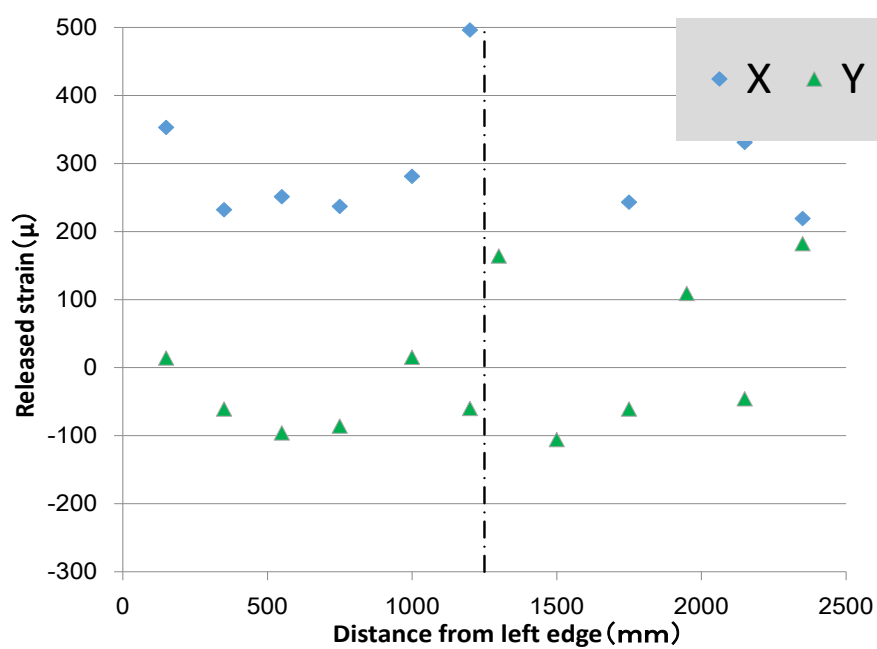
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	100	300	500	700	900	1100	1300	1750	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400
有効プレストレスカ(kN/mm ²)	16.7	6.5	22.6	9.2	6.7	7.9	12.6	9.3	7.7	7.9	10.7	10.0	12.5	12.4	4.7	1.9
Xひずみ(μ)	264	137	220	270	213	156	237	196	144	245	186	221	214	228	36	48
Yひずみ(μ)	-91	23	-274	92	95	9	-20	24	2	98	-26	26	-42	-25	-35	45
備考		欠け	欠け											欠け		

No10 01A4 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部



a) 有効プレストレス分布

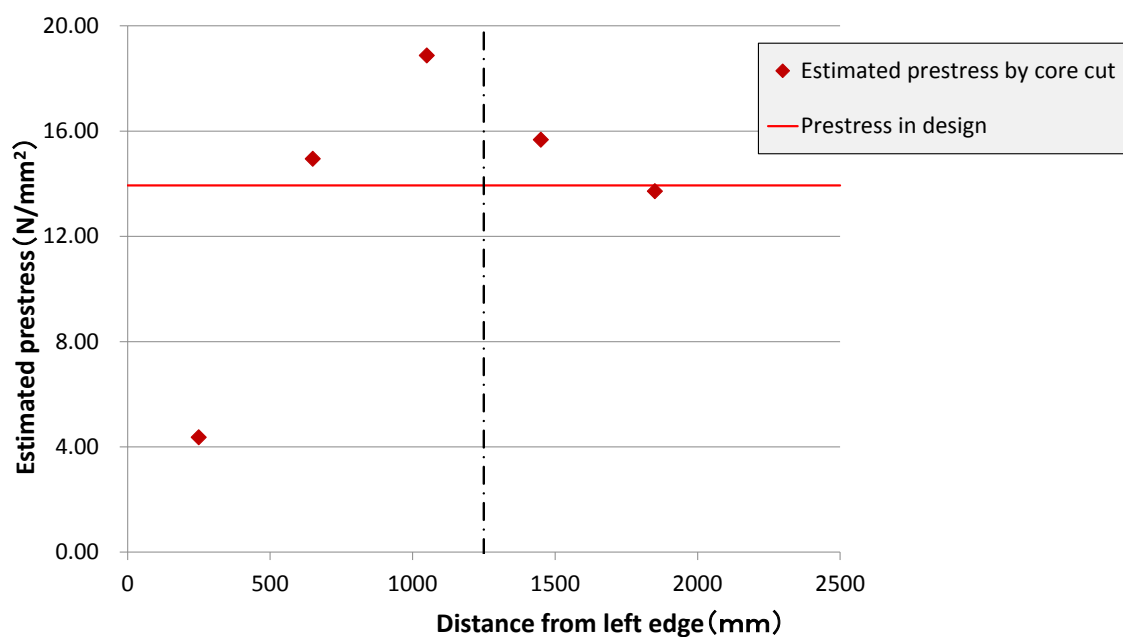


b) X, Y ひずみ分布

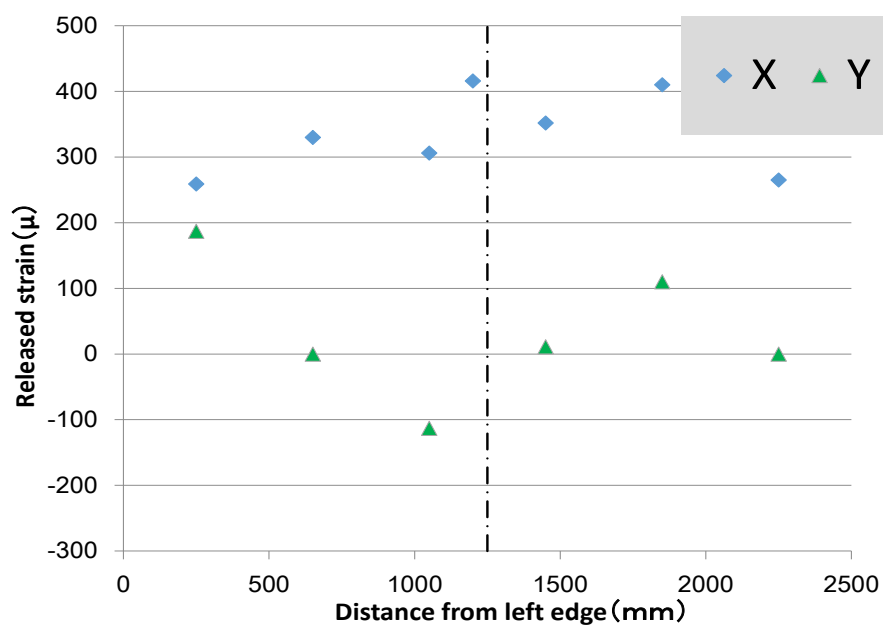
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	150	350	550	750	1000	1200	1300	1500	1750	1950	2150	2350
有効プレストレス力(kN/mm ²)	15.3	13.4	15.6	14.7	12.6	22.3	16.3	27.4	13.9	14.0	16.9	2.9
Xひずみ(μ)	353	232	251	237	281	496	562	521	243	417	331	219
Yひずみ(μ)	14.0	-61.0	-96.0	-86.0	15.0	-60	164	-106	-61	109	-46	182

No11 01A5 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部(載荷試験用)



a) 有効プレストレス分布

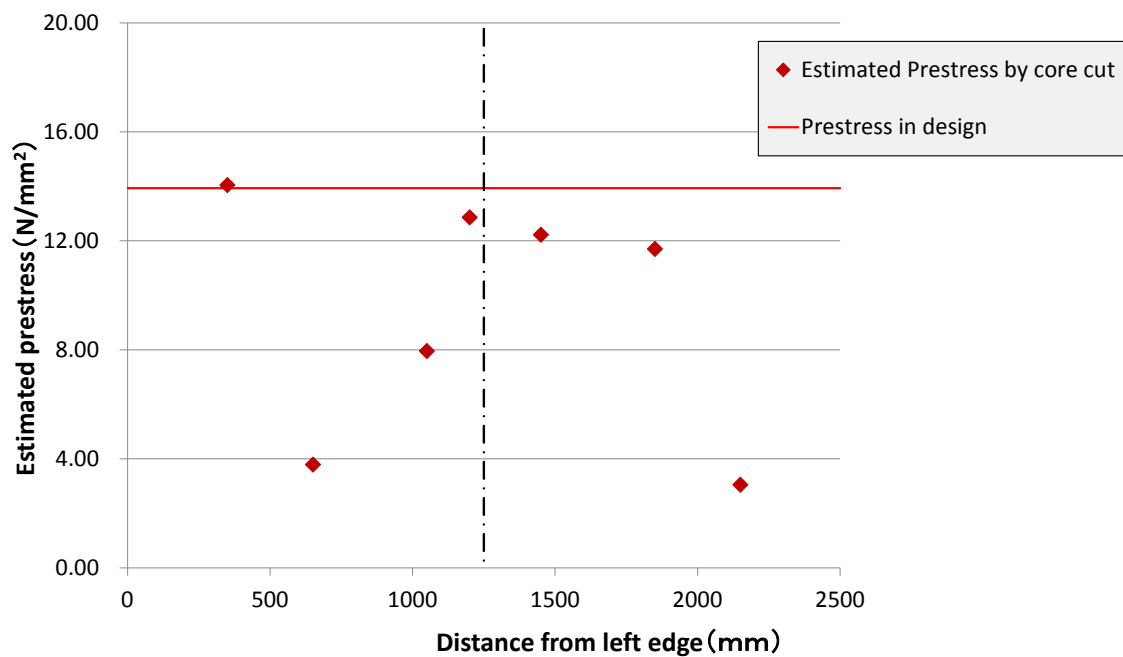


b) X, Y ひずみ分布

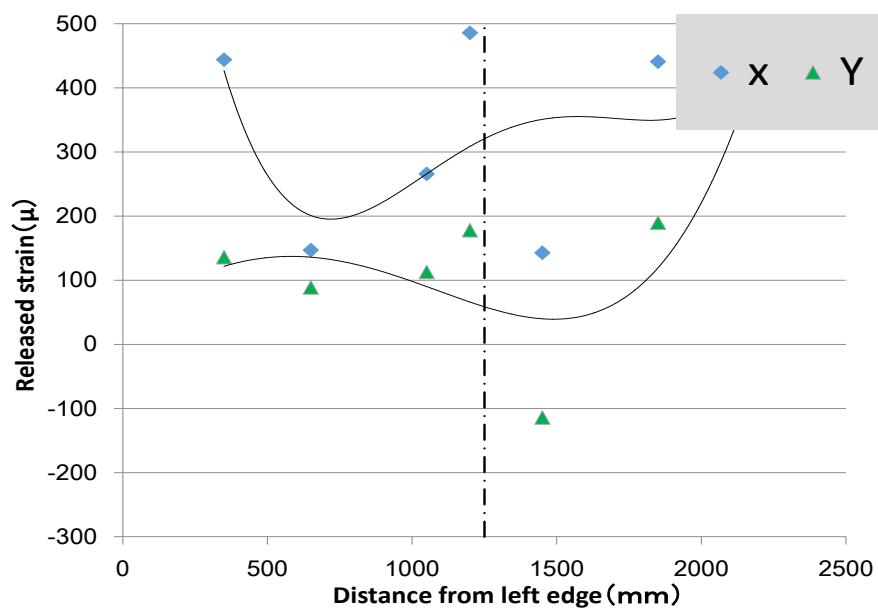
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	250	650	1050	1200	1450	1850
有効プレストレス力(kN/mm ²)	4.4	14.9	18.9	121.0	15.7	13.7
Xひずみ(μ)	259	330	306	416	352	410
Yひずみ(μ)	187	0	-113	-2729	11	110
備考	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび

No12 01B2 ポステン・φ17mmPC 鋼棒・σ85%・無載荷・海水部(載荷試験用)



a) 有効プレストレス分布

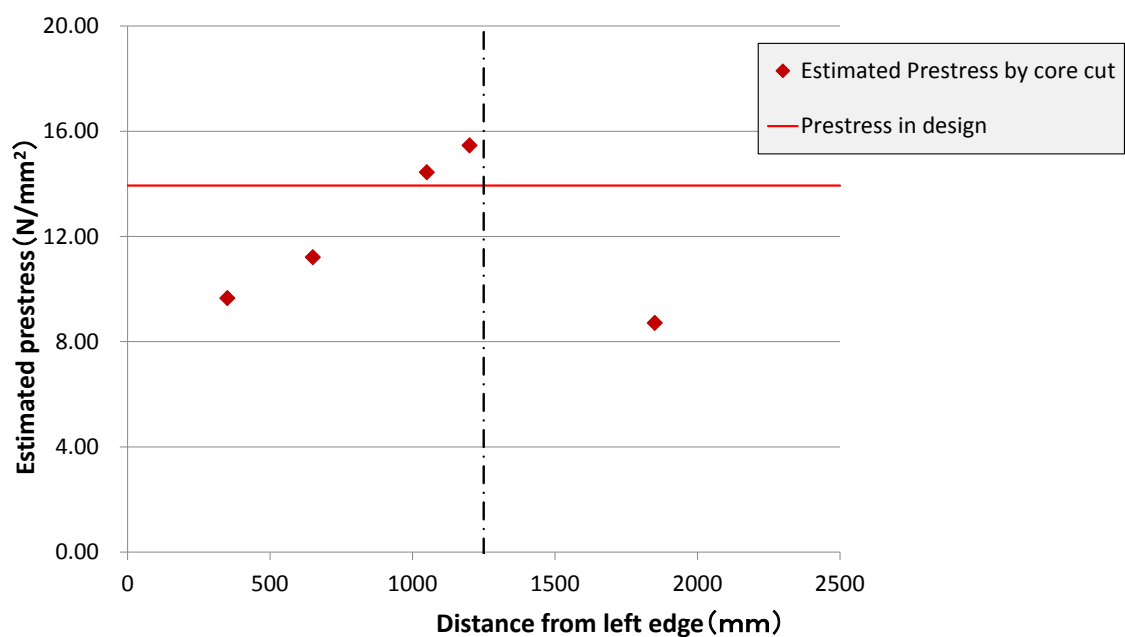


b) X, Y ひずみ分布

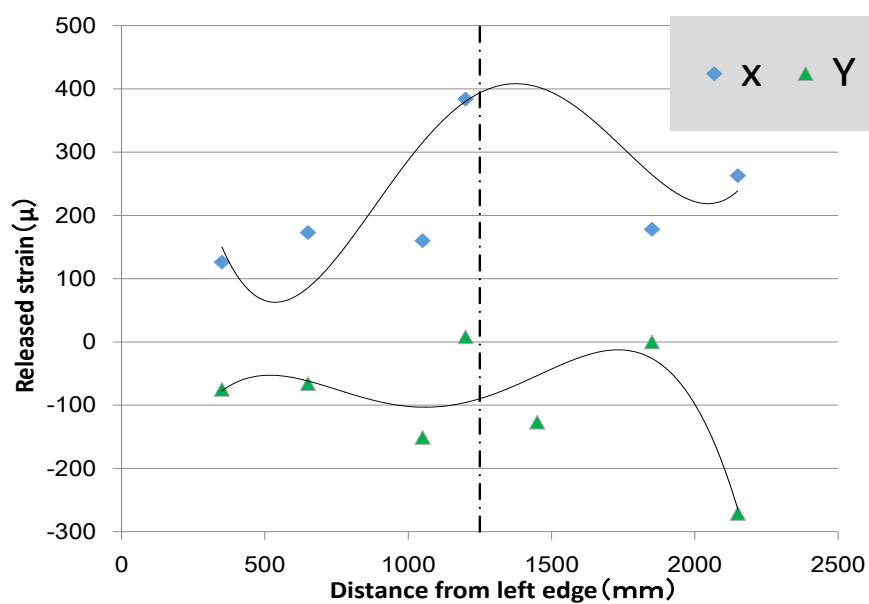
c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	350	650	1050	1200	1450	1850	2150
有効プレストレス力(kN/mm ²)	14.0	3.8	8.0	12.9	12.2	11.7	3.1
Xひずみ(μ)	444	147	266	486	143	441	402
Yひずみ(μ)	136	89	113	178	-114	190	362
備考	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび

No13 01B3 ポステン・φ17mmPC 鋼棒・σ85%・無載荷・海水部



a) 有効プレストレス分布



b) X, Y ひずみ分布

c) 各測定位置での値

左端からの距離(mm)	350	650	1050	1200	1450	1850	2150
有効プレストレス力(kN/mm ²)	9.7	11.2	14.4	15.5	29.6	8.7	23.3
Xひずみ(μ)	126	173	160	384	554	178	263
Yひずみ(μ)	-75	-66	-151	8	-127	0	-271
備考	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび	ひび

5.3.2. 供試体比較項目による測定結果への影響

5.3.2.1 曝露環境による影響

a) プレテンション方式

図 5-3 にプレテンション方式の感潮部(赤)と海中部(青)と陸上部(黄)を重ねて示す。まず、陸上部曝露の有効プレストレス力分布(黄色)が感潮部(赤色)と海中部(青色)の結果に比べて伝達長が延びずにいるように見て取れる。つまり陸上部は中央部から左右にそれぞれ 600mm ほど有効応力が中央部と同程度保持されているのに、感潮部と海中部は主に支間中央部のみ設計値並みの有効プレストレスト力が残存している。干満の繰り返しにより乾燥収縮が頻繁に効く事で応力が PC 鋼材に作用し、その伝達長が延びる可能性も考えられるが、海中部の供試体でも伝達長の長さに影響があったことから、海水の作用による結果、ひいては鋼材腐食による影響と考えるのが妥当である。以後 6 章の内部鋼材腐食の状況と合わせて考察し、7 章で強制的に腐食を進行させた場合の実験を行い、鋼材腐食と有効プレストレスの関係性を明らかにしていく。

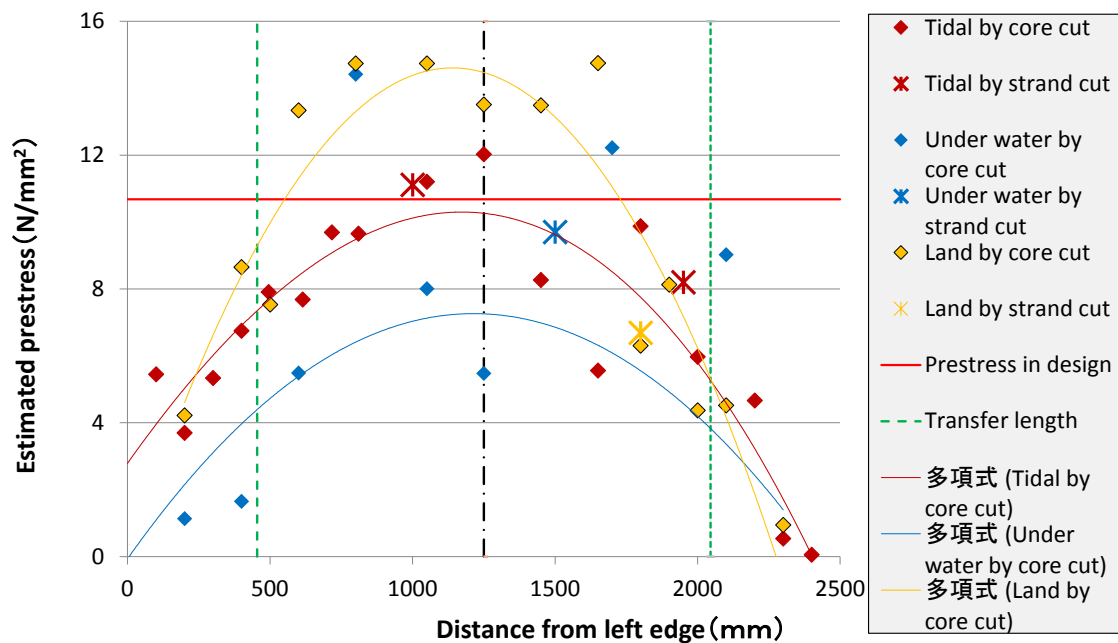


図 5-3 曝露環境比較

b) ポステンション方式

図 5-4 にポステンション方式の感潮部(赤)と海中部(青)の結果を示す。

図から感潮部の方が安定してプレストレスが分布していることが確認できる。3 章の外観調査から海中部はひび割れも多く,劣化が激しいことから有効プレストレスがコア応力解放によって計測できなかった可能性もある。

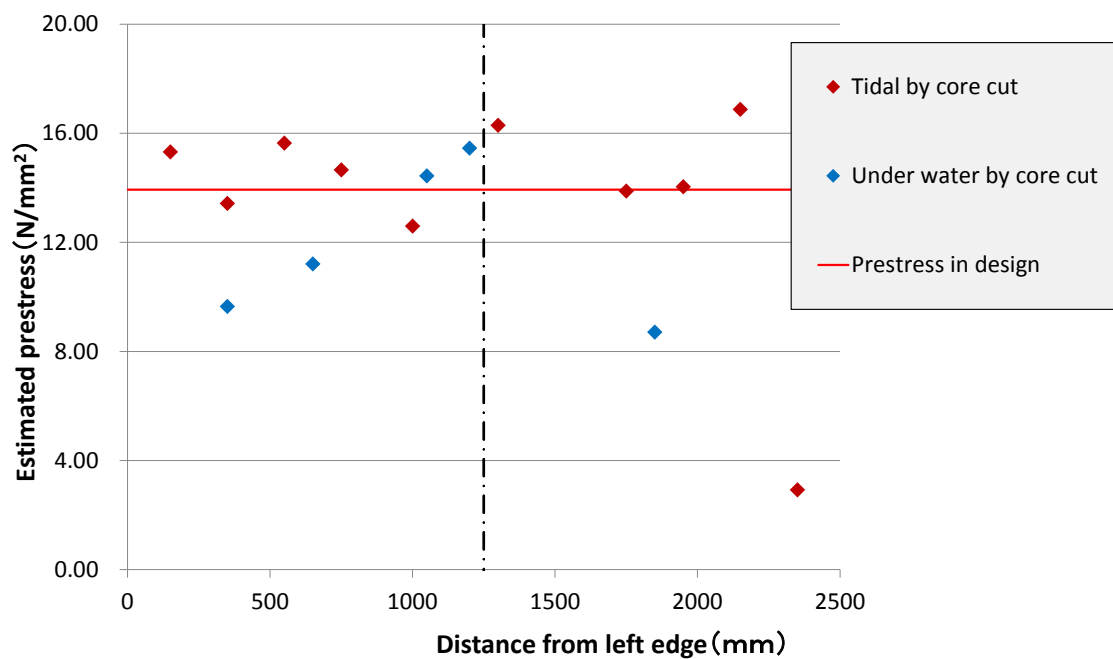


図 5-4 ポステン方式の環境比較

・プレテンション,ポステンション共に海中部の方が劣化が激しく,有効プレストレスも小さく出る可能性がある。

5.3.2.2 緊張方式による影響

図 5-5 から緊張方式の違いによる有効プレストレスト力の分布の違いが表れている。プレテンション(赤)は緊張させた鋼材にコンクリートを打設し、鋼材を切断し、緊張力を与えているため、コンクリートとの付着によりその緊張力を伝えている。よって力を伝えるまでにある程度の距離を要し、中央部でその設計値を確保できるような山形の分布となった。対してポストテンション方式は予めスズ管と呼ばれる中空の管をコンクリートに埋設しておき、コンクリートの硬化後に PC 鋼材をスズ管を通して緊張し、切断。その両端部を支圧板と呼ばれる板で緊張力を直接コンクリートに伝える。そのため、試験体を通してその応力が一様に分布している様を確認できる。よってプレテンション方式では前出の鋼材腐食により、そのコンクリートとの付着機構が変わるとその分布に影響を及ぼす恐れがある。

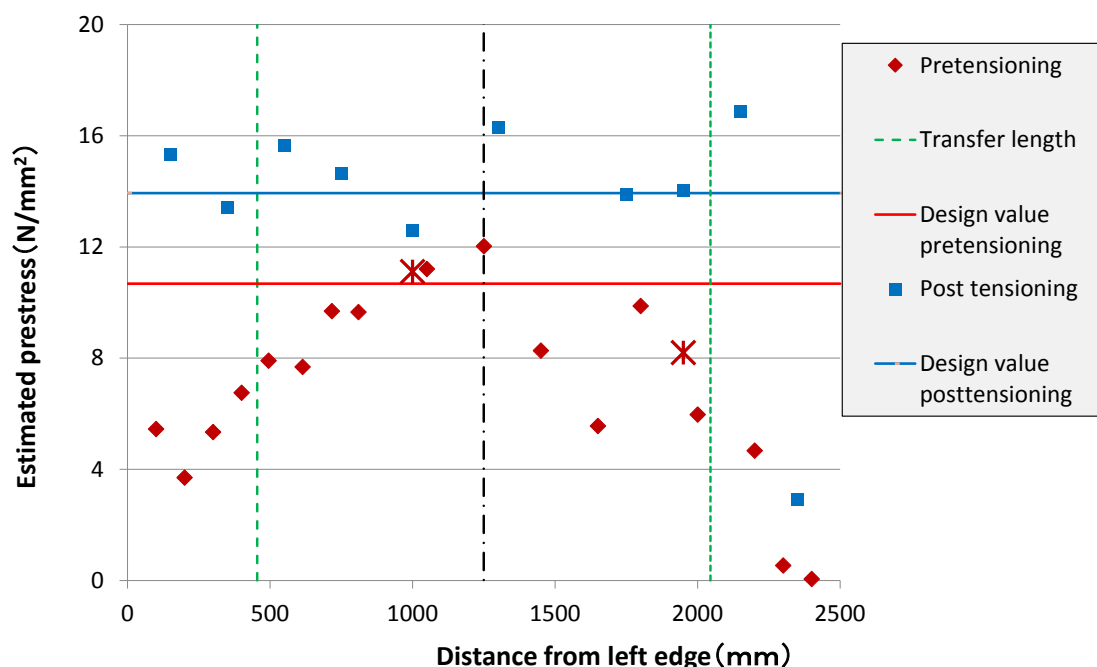


図 5-5 感潮部プレテンションとポストテンション

5.3.2.3 鋼材種類による影響

図 5-6 に 2 本より線(断面積 13.2×16 本)と 7 本より線(93.9×3 本)の有効プレストレスの分布を重ねて示す。

供試体の長さが異なるため、その分布の比較において設計時の伝達長を基準にして試験結果を重ねた。図から 2 本より線よりも 7 本より線の方がより伝達長が延びているように伺える。これはコンクリートとの付着が期待できる周長が断面全体で 2 本よりが 291mm、7 本よりでは 155mm と異なるためにコンクリートと PC 鋼材との付着状況が変わった場合、7 本よりの方がその影響が大きいと考えられる。

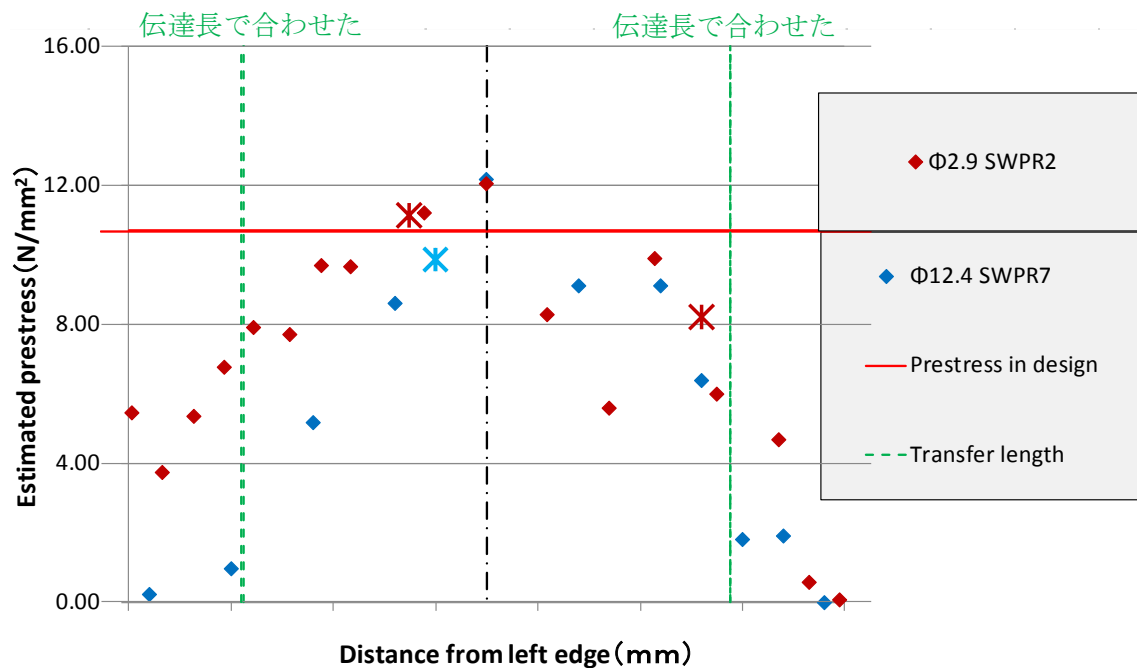


図 5-6 2 本よりと 7 本より試験結果

5.3.2.3 緊張力の差による影響

図 5-7 に 7 本より線の初期鋼材緊張力の異なる有効プレストレス力分布とその近似式を示す。

80 % の緊張力を加えたものが赤, 60 % が青, 40 % が黄色で示している。図から 80%, 60%, 40% の順に伝達長が延びている可能性が示された。これはコンクリートとの付着において一本あたりに加わる応力が異なるために, その付着近傍に変化があった場合により伝達長が延びやすくなっていると考えられる。また鋼材量は緊張力が大きくなるほど少なくなるため, 前出のコンクリートとの付着を受け持つ表面積も小さくなったことも一因と考えられる。

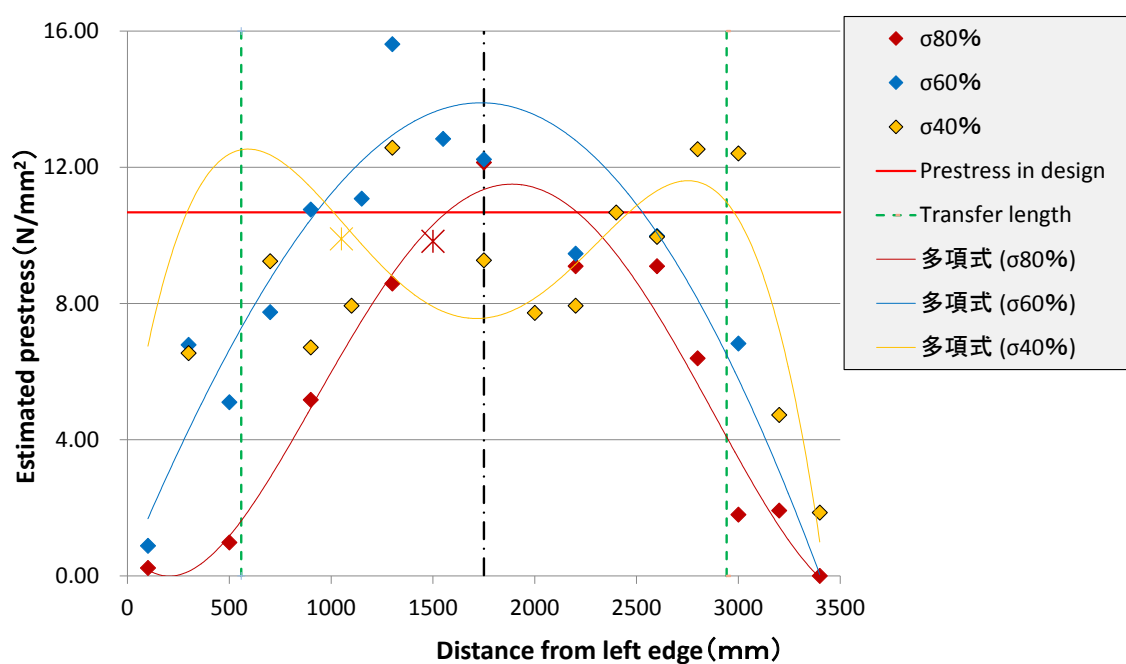


図 5-7 7 本より線の緊張力の違い比較

5.3.2.4 持続載荷荷重による影響

図 5-8 に赤でひび割れ荷重が作用していたもの、青で設計荷重が作用していたものの有効プレストレスの分布を示す。図から青(設計荷重)が比較的明確な分布を示しているのに対し、赤(ひび割れ荷重)が不安定な分布となった。設計荷重の方が部材に対して負荷が大きくより劣化しているのではないかと推察していたが、逆の結果となった。3 章の目視検査と合わせて考えてみても、ひび割れ荷重の方がより劣化している状況であった。

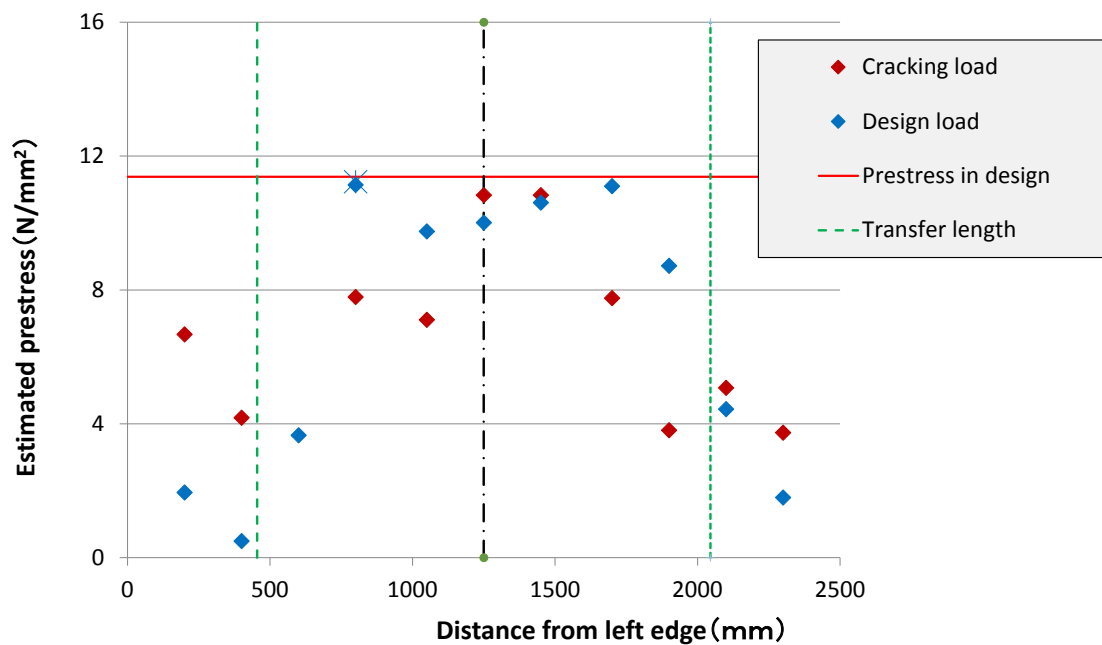


図 5-8 持続載荷荷重の違いによる比較

5.4. 5章のまとめ

全体を通して、特異と思われる計測結果を除いて、全シリーズ共通して有効応力が設計値以上残存していることが確認できる。またコア応力解放法による実験結果と鋼材切断応力解放法による実験結果が概ね同程度の値を示しており、コア応力解放法による有効プレストレス力の分布は信頼性が高いといえる。以下、比較項目それぞれで得られた結果を示す。

1) 曝露環境による影響

- ・陸上部では有効プレストレス力が伝達長が延びずに保持されていることが確認できた。海水の作用、鋼材腐食の影響により有効応力の分布に違いが出ることを示された（鋼材腐食により伝達長が延びる可能性）。
- ・海中部の方が感潮部よりも分布が安定しないことから劣化が激しい様子が伺える。

2) 緊張方式による影響

- ・緊張の違いによるプレストレス力の伝達の違いが明確に現れた。プレテンションでは山形の分布を示し、ポストテンションでは一定の値が部材長にわたり伝達されている。

3) 鋼材種類による影響

- ・2本よりよりも7本の方が伝達長が延びやすい傾向が確認できた。これはコンクリートとの付着面の大きさが影響すると考えられる（同等の緊張力ならば付着面が大きいほうが伝達長が伸びにくい）。

4) 緊張力の差による影響

- ・7本よりの初期の鋼材緊張力が異なる供試体において、付着応力が大きいほど伝達長が延びやすい傾向となった。これは鋼材1本当たりに加わる力が大きくなり、付着性状の影響を受けやすくなっていると考えられる。また、緊張力が大きくなるほど鋼材量も減り、コンクリートとの付着を受け持つ面積が小さくなったことも一因と考えられる。

5) 持続載荷荷重による影響

- ・設計荷重作用の供試体が比較的明確な分布を示しているのに対し、ひび割れ荷重作用の供試体は不安定な分布となった。設計荷重の方が部材に対して負荷が大きくより劣化しているのではないかと推察していたが、逆の結果となった。

参考文献

- 1) 二井谷 教治, 渡瀬 博, 阪田 憲次, 綾野 克紀: コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 20 巻第 2 号, pp.27-37, 2009.5
- 2) 横山 和昭, 長田 光司, 室井 智文, 加藤 卓也: 鉄筋切断法による実 PC 橋の残存プレストレス測定に関する検討, 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.501-504, 2004

6. 内部鋼材の腐食挙動

6.1. 概要

本章では、表 3-2 に示した 40 年間海洋環境に曝露された供試体の内部鋼材の腐食挙動について明らかにする。この結果を用いて第 6 章における腐食ひび割れ発生までの期間予測と最大曲げ引張り耐力の経時的低下の物性値として利用する。また種々の非破壊試験を行い、コンクリート内部鋼材の腐食状況との整合性の確認も行った。

6.1.1. 腐食メカニズム

一般的にコンクリート中の水分は多くの水酸化アルカリを含む飽和水酸化カルシウム溶液として存在しており、溶液のpHは 12.5 程である。このような強いアルカリ性環境下では、鉄はその表面に不動態皮膜と呼ばれる 2~6nmの厚さの水和酸化物($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) となる酸化被膜を形成する。これによってコンクリート中の鉄筋は腐食作用から保護される。しかしながら、炭酸化やアルカリ成分の溶出によるコンクリートのアルカリ度が低下、あるいはコンクリート中に塩化物イオンなどのハロゲンイオン、硫酸イオン、硫化物といった有害成分が浸入するといったことが起きると、鉄筋は活性態となり腐食しやすくなる。このうち塩化物イオンはその作用が最も大きく、またコンクリート中に混入する機会が非常に多いことから、コンクリート中の鉄筋の腐食に対して最も影響を与えるイオンである。

図 6-1 に鉄筋の腐食反応の概要を示す¹⁾²⁾。

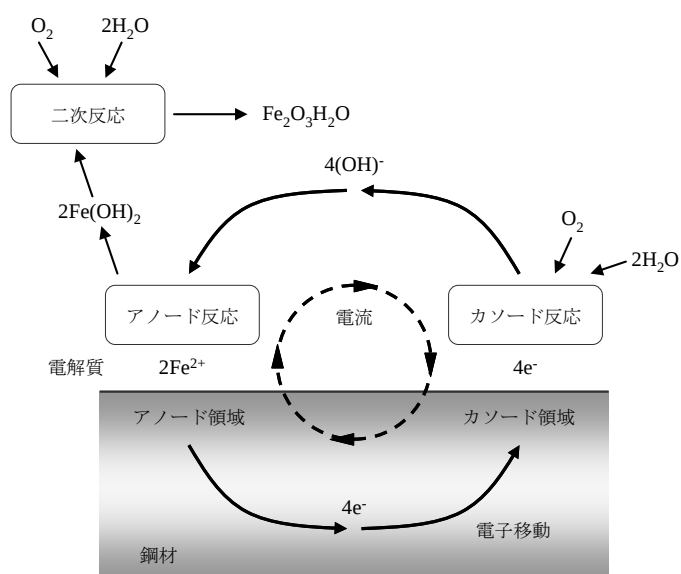
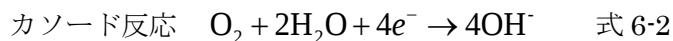
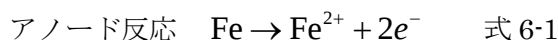


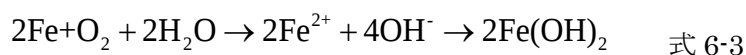
図 6-1 鉄筋腐食反応の概要

コンクリート中铁筋の腐食は式 6-1 に示すアノード反応（酸化反応）、式 6-2 に示すカソード反応（還元反応）によって生じる。不動態が破壊され活性態にある鉄筋は水と溶存酸素の作用により腐食を引き起こす。コンクリート中のアノード反応の速度は、鉄のイオン化のしやすさ（鉄筋近傍の塩化物イオン濃度等）に左右される。一方、カソード反応にお

いては，式 6-2 に含まれる酸素や水の量が律速条件となり，コンクリート中に酸素や水の両方が適量に含まれているときに反応速度が大きくなる．図 6-2 はその概念図³⁾である．



水酸化物イオンはカソード部からアノード部へ移動し， Fe^{2+} イオンと反応する．つまり腐食の全反応は両反応が組み合わさったものとなり，次式 6-3 のように水酸化第一鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が鉄筋表面に析出する．



この化合物は溶存酸素によって酸化し，水酸化第二鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ となる．引き続き，一部は水を失い水酸化物 FeOOH または Fe_2O_3 (赤錆)となる．また一部は酸化不十分のまま， Fe_3O_4 (黒錆)となり鉄筋表面に錆層を形成する．鉄の錆は多孔質であるため，たとえ厚く生成しても腐食を抑制する効果が少なく，下地の鉄筋表面では腐食が絶えず進行する．さらに，腐食生成物は鉄の約 2.5 倍の体積となるため，その膨張圧により，コンクリートのひび割れ・剥離が起こり，これらの腐食の進行をさらに助長する．

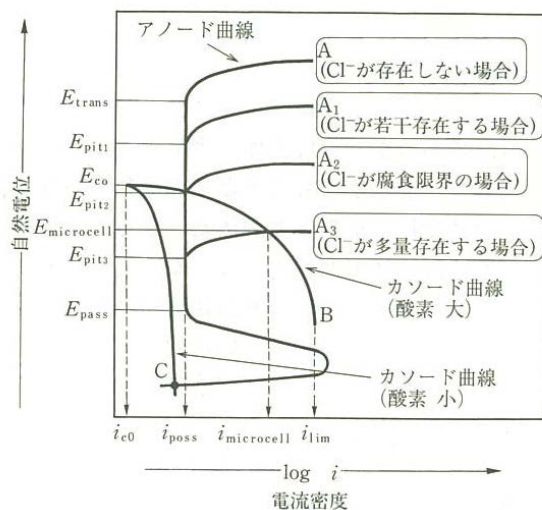


図 6-2 鉄筋に不動態が存在するときの分極曲線の概念図

このように鉄筋の腐食は，電気化学反応に起因するため，鉄筋の腐食速度は電気量であらわすことができる．例えば，腐食電流密度が約 $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の場合，式 6-4 に示すように腐食速度は $1.16\text{mm}/\text{year}$ ⁴⁾となる．

$$\frac{100 \times 10^{-6} (A/cm^2)}{96500 (C)} \cdot \frac{55.85 (g/mol)}{7.86 (g/cm^3)} \cdot 3.1536 \times 10^7 = 1.16 (mm/year)$$

式 6-4

6.1.2. 鋼材腐食の種類

コンクリート中鉄筋の腐食は、アノード部とカソード部の距離の大小によって腐食電池および腐食機構が分類され、一般的にミクロセル腐食とマクロセル腐食に分類することができる。ミクロセル腐食は、アノード部とカソード部の距離が接近している場合の腐食をさし、マクロセル腐食は、アノード部とカソード部が比較的離れている場合の腐食をさす。そして、鉄筋の腐食速度はミクロセル腐食とマクロセル腐食の合計で決定される⁴⁾。

ミクロセル腐食：鉄の表面には表面状態、組織、環境などのわずかな違いにより微視的な陽極部と陰極部からなる局部電池が多数形成されている。これによる腐食をミクロセル腐食といい、比較的穏やかで均一且つ全面的な腐食を引き起こす。

マクロセル腐食：アノード部とカソード部の距離が比較的大きく離れており巨視的電池を形成し、ミクロセル腐食に比べ激しい腐食を引き起こす。この形成には、鉄筋表面あるいはコンクリート中にマクロな不均一がある場合である。

なお、本研究における鉄筋はミクロセル腐食として位置づけ、鉄筋は均一に腐食すると仮定している。

6.1.3. pH が鉄筋の腐食に及ぼす影響及び腐食発生限界塩化物イオン濃度

腐食の発生および進行は、その鉄筋が接触している水溶液の pH の相違に大きな影響を受けることが知られている。図 5-3 によると、コンクリート内部の溶液のように pH が 10 以上の高アルカリ領域では、水溶液の pH の減少とともに、鉄筋の腐食速度は増加することが確認されている。

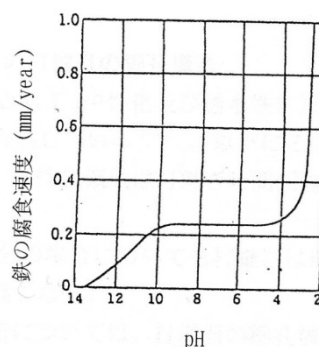


図 6-3 溶液の pH と腐食速度の関係

Pourbaix は塩化物イオンを含まない溶液と含む溶液において、鉄の電位と溶液の pH を

パラメータとした実用的な電位 - pH 図を作成している．図 6-4(a)は塩化物イオンを含まない溶液中, また図 6-4(b)は 0.01mol/L の塩化物イオンを含む溶液中における鉄の電位-pH 図を示している．これらの図によれば, 塩化物イオンの影響を受けない環境下において, pH が高ければ内部鉄筋の腐食は起こりにくいことが確認される．したがってコンクリート中溶液の pH は 12.5 程度であるから, 外部からの電流などがなければ内部の鉄筋表面には不動態が存在すると考えられ, 腐食は発生しない．しかしながら, 塩化物イオンの存在するコンクリート中もしくは中性化により内部溶液の pH が下がったコンクリート中では, 不動態は容易に破壊され, コンクリート中の鉄筋は腐食する可能性が高いことが確認される．

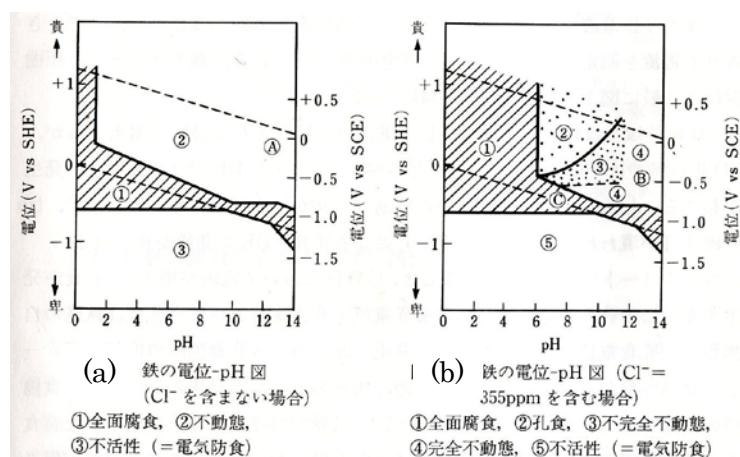


図 6-4 鉄の電位-pH 図

腐食発生限界塩化物イオン濃度に関しては, 大即らはモルタル中のアノード分極曲線から不動態領域の有無を判断している⁵⁾⁶⁾．これによると, 塩化物イオン含有量が多いほど不動態皮膜はなくなる傾向にあることが確認されている．また宮川らの研究成果からは, コンクリート質量に対する塩化物イオン量が約 1kg/m³以下であれば鉄筋は不動態皮膜を有し, 一方, 2.5kg/m³以上であれば鉄筋は活性化する可能性が高いことが確認される．なお, 土木学会では, 混入が許容される塩化物としては 0.3kg/m³とし, 鉄筋腐食を引き起こす腐食発生限界塩化物イオン含有量は 1.2kg/m³としている．

6.2. 非破壊試験による腐食の評価

本節では, 腐食評価方法について示す．本研究では, 主に 3 つの評価方法によって腐食の評価を行っている．一つ目は自然電位法であり, 鉄筋のもつ電位を評価することで腐食状況の経時変化を明らかにする方法である．二つ目は, 鉄筋の腐食状況に与える影響を少なくするため, 微弱な電圧を強制的に印加することで分極させ, 各鉄筋の表面の分極抵抗から腐食電流密度を評価することで腐食の経時変化を明らかにする方法である．三つ目は, 鉄筋表面に電圧を強制的に印加することで, 鉄筋表面の抵抗が変化する．この抵抗の変化に伴い変化する電流密度の変化から, 鉄筋がもつ不動態皮膜を 6 段階の基準によって評価する不動態グレイド判定である．

6.2.1. 自然電位法による腐食評価

自然電位とは金属のある環境における電位のことで、自然電位が相対的に低いほど腐食が起こりやすいことを表す。自然電位測定法とは、コンクリート中の鉄筋が置かれている環境によって鉄筋表面の自然電位が変化することを利用し、これを測ることによって鉄筋腐食の可能性を定性的に調べる方法である。鉄筋が腐食しているアノード部の電位は低くなる方向(卑側)に変化することになり、この負の電荷を検出して鉄筋の腐食傾向を評価する。自然電位による腐食可能性の代表的な評価基準として ASTM C876 がある(表 6-1)。

表 6-1 ASTM C876 によるコンクリート中鉄筋の腐食判定

自然電位(mV vs. Ag/AgCl)	鉄筋腐食の可能性
$-200 + (120 + 1.1 \times (t - 25)) \leq E$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 + (120 + 1.1 \times (t - 25)) \leq E \leq -350 + (120 + 1.1 \times (t - 25))$	不確定
$E \leq -350 + (120 + 2.0 \times (t - 25))$	90%以上の確率で腐食あり

*ただし E:自然電位, t:温度, 電極は硫酸銅電極から銀塩化銀電極に換算を行い, 温度による影響も考慮した。

実際の電位測定は、コンクリート表面に照合電極(飽和塩化銀電極[Ag/AgCl])を設置し、内部の測定を行う。水を含ませたスポンジを介して、測定対象の鉄筋真上のコンクリート表面に照合電極を接触させる。測定には小型腐食モニタ Model CT-8 (理研電子(株)製)を用いる。測定概要図を図 6-5 に示す。

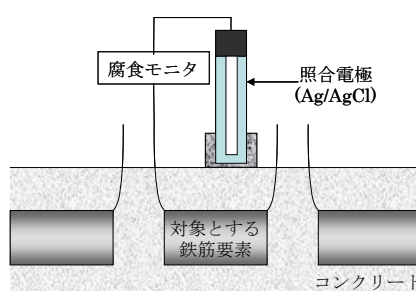


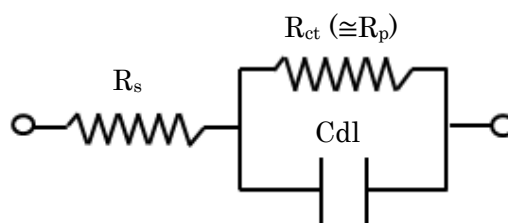
図 6-5 自然電位測定概要

6.2.2. 分極抵抗法による腐食評価

式 5-4 に示したように腐食速度は腐食電流 i_{corr} を求めることで算定される。コンクリートの鉄筋に流れるため、直接測定することはできない。そこで、電気化学的測定法では腐食を起こしている金属に外部から強制的に分極を与えて、その応答から腐食電流密度 i_{corr} を算定する手法をとる。その代表的な測定方法に分極抵抗法がある。

分極抵抗を測定するにあたり、金属の腐食系について考慮しなければならない。水溶液中に金属が置かれた場合、水と接する金属界面には水分子の吸着などにより正電荷と負電

荷が分離した電気二重層と呼ばれる領域(0.01~0.1 μm 程度)が形成されている⁷⁾。この電気二重層は正負の電荷が向かい合った状態にあることから、電気回路素子のコンデンサーCdlとしての特性が存在する。この電気二重層を通じての金属原子から陽イオンへの変化は容易に行われることはなく、そこには抵抗が存在する。このように水溶液中における金属の腐食系は、電気回路素子のコンデンサーと抵抗の両方の働きをすることから図 6-6 に示すように、電気二重層容量(Cdl)と電荷移動抵抗(R_{ct})を並列に組み合わせた回路で近似される。



R_s : 溶液抵抗

R_{ct} : 電荷移動抵抗 ($\approx R_p$: 分極抵抗)

Cdl : 電気二重層容量

図 6-6 水溶液中における金属の等価回路モデル

水溶液中の金属における分極抵抗を測定する方法は直流法(直線分極抵抗法)⁸⁾および交流法(交流インピーダンス法)がある。直流法は金属表面の腐食系に微小電流を印加し、その応答電位により分極抵抗を算出する方法である。しかしながら、電導性の低い溶液つまりコンクリート中の鉄筋においては溶液抵抗 R_s の誤差が大きくなること、また電気二重層容量に起因して定常となるまで充電に長時間を要する可能性もあり、応答電圧を読みとる時間の決め方などにあいまいさが残るなどの問題がある。

一方で、交流インピーダンス法⁹⁾は直流法の問題点を解消するために提案された測定方法である。交流インピーダンス法では、異なる周波数での微小な交流電圧を印加し、その電流応答値を計測して、インピーダンスの絶対値 $|Z|$ と位相差 θ を解析し分極抵抗値 R_p を算出する。図 6-6 に示すような腐食系において、電気二重層容量が充電されない程度の高周波数の電流を印加すると電流は $R_s \sim Cdl$ の回路を通り全体で計測されるインピーダンス $|Z|$ は溶液抵抗(R_s)に収束する。一方で、電気二重層容量が十分に充電される程度の低周波数の電流を印加すると、電流は $R_s \sim R_{ct}$ の経路を通り全体で計測されるインピーダンス $|Z|$ は溶液抵抗と分極抵抗の和($R_s + R_{ct}$)に収束する。このインピーダンスの絶対値 $|Z|$ と位相差 θ を各周波数でプロットしたものが図 6-7(a)に示すようなBode Plotである。また、インピーダンスの実数部を横軸、虚数部を縦軸とした複素数面にプロットしたものが

図 5-7(b)に示すような Cole-Cole Plot (ナイキスト線図)である。交流インピーダンス法の利点としては、各周波数におけるインピーダンスの測定が可能であるため直流法に比べ多くの情報が得られる点、そして腐食性状を詳細に把握できることでより正確な分極抵抗

値の算出が可能な事である.

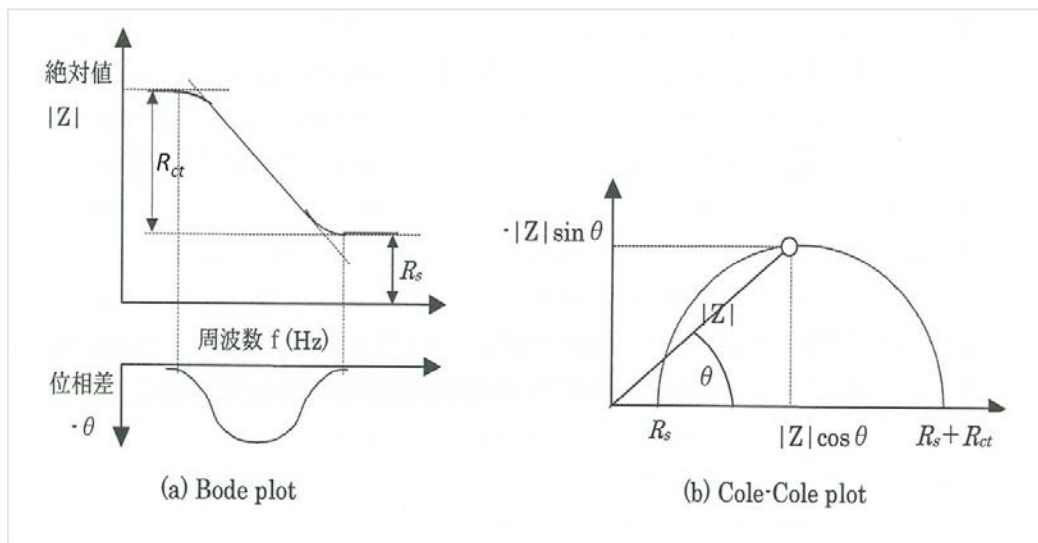


図 6-7 交流インピーダンス法

本研究では、上述した Cole-Cole plot や Bode 線図を用いた評価は行わず、鉄筋コンクリートは一般的に鉄筋かぶりと鉄筋の表面に存在する分極抵抗との間に図 6-6 に示した電気二重層が成り立つとされており、図 5-7 に示す Bode 線図を示すとされている。図 6-8 に示す小型腐食モニタ ModelCT-8 (理研電子(株)製) は図 6-7 に示す Bode 線図の R_{ct} と R_s の値を計測することができる。ここから得られた分極抵抗 R_{ct} を式 6-5 に代入することで腐食電流密度を算出することができる。

$$I_{corr} = \frac{K}{R_{ct} \times S} \quad \text{式 6-5}$$

ただし、 I_{corr} : 鉄筋を流れる電流密度 [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$], R_{ct} : 分極抵抗 [Ω], S : 鉄筋の表面積 [cm^2], K : Stern-Geary 定数 (=0.0209)

得られた腐食電流密度を表 6-2 に示したヨーロッパコンクリート委員会の提案する基準に則り腐食の評価を行った。

表 6-2 分極抵抗法による腐食判定基準(FIB)

分極抵抗値 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	腐食速度測定値 I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	侵食度 PDY (mm/year)	腐食度の判定
130-260より大	0.1-0.2未満	0.00116-0.0023未満	不動態状態(腐食なし)
52以上 130以下	0.2以上0.5以下	0.0023以上0.0058以下	低～中程度の腐食速度
26以上52以下	0.5以上1以下	0.0058以上0.0116以下	中～高程度の腐食速度
26未満	1より大	0.0116より大	激しい、高い腐食速度

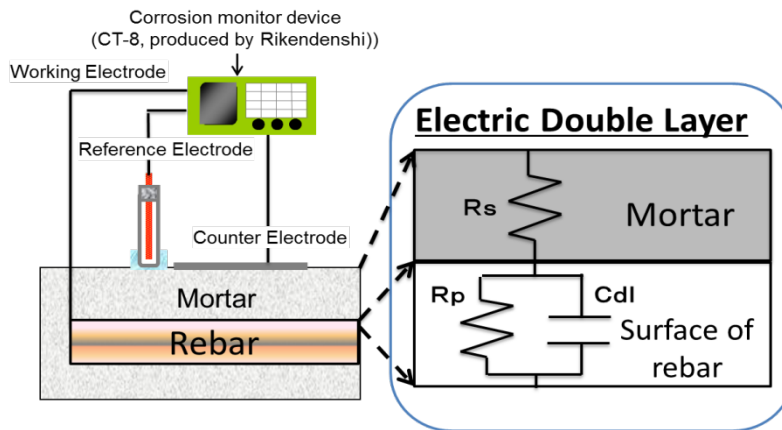


図 3.2.2.3

図 6-8 小型腐食モニタ ModelCT-8 による分極抵抗測定方法

本研究では表 6-2 に示した鉄筋が不動態状態でなくなる腐食電流密度 $I_{corr} = 0.2 \mu A/cm^2$ を腐食発生限界電流密度とした。

6.2.3. 不動態グレイド判定による評価方法

鉄筋の不動態の状況は、大即の研究¹⁰⁾を参考に、各試験体のアノード分極曲線の測定結果を用いて判定した。アノード分極曲線の測定方法の概要を図 6-9 に示す。分極曲線の測定にはポテンシostat (Versa STAT3-30 東陽テクニカ 株式会社)を用いて、参照電極として銀塩化銀電極を、対極としてステンレス鋼板を使用し、分極範囲を自然電位から $\pm 1000mV$ まで、掃引速度 $1mV/sec$ で変化させ、アノード・カソード分極曲線を計測した。

アノード分極曲線の平均的な電流密度を考え、以下に示すような不動態のグレイドを設定した。(図 6-10 参照)。すなわち、鉄筋の自然電位を E_n とし、電位が $E_n + 0.2V < E < +0.6V$ (vs. 飽和甘コウ電極)の範囲において、

- ・グレイド 0：電流密度が一度でも $100 \mu A/cm^2$ を超えるもの
(全く不動態がないと判断)
- ・グレイド 1：電流密度が $10 - 100 \mu A/cm^2$ の範囲にあるもの
(不完全ではあるが、若干不動態があると判断する。)
- ・グレイド 2：電流密度が一度でも $10 \mu A/cm^2$ を超え、かつグレイド 1 または 3 に含まれないもの
- ・グレイド 3：電流密度が $1 - 10 \mu A/cm^2$ の範囲にあるもの
- ・グレイド 4：電流密度が一度でも $1 \mu A/cm^2$ を超え、かつグレイド 1, 2 および 3 に含まれないもの
- ・グレイド 5：電流密度が $1 \mu A/cm^2$ を超えないもの(非常に良好な不動態があると判断)

ここで、電位の範囲として $E_n + 0.2V < E < +0.6V$ (vs. 飽和甘コウ電極)を考えた理由として

は $E < E_n + 0.2V$ ではカソード分極の影響が考えられ、 $+0.6V < E$ では水の分解による酸素の発生などの異なった反応がおこる可能性が考えられるためである。

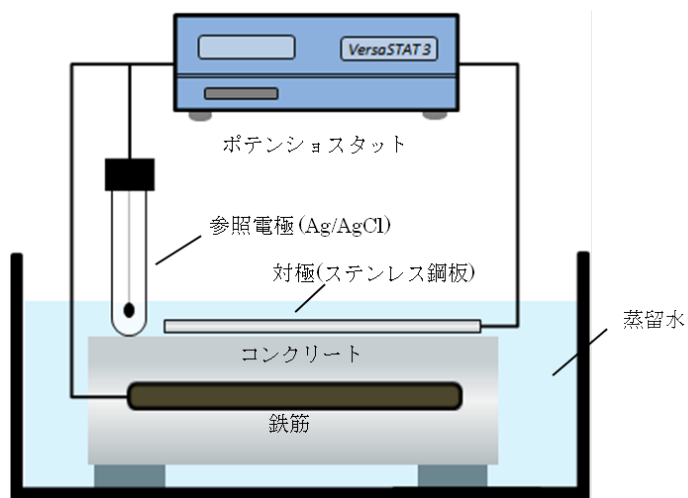


図 6-9 分極曲線測定概要図

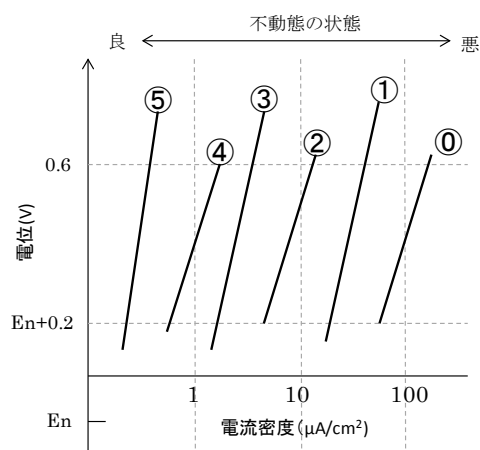


図 6-10 アノード分極曲線を用いた不動態のグレイド判定

6.2.4. 各種非破壊試験による腐食評価の結果

各非破壊試験から得られた結果を供試体毎に表にまとめて示す.

表内に示す鋼材位置の概略図を3章の目視調査結果の図と共に示す.

No1. R1A3 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・感潮部

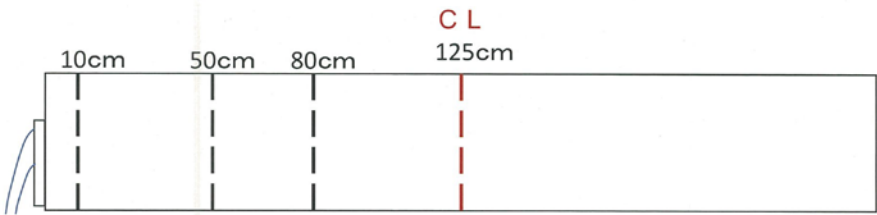
表 6-3 より,自然電位の結果から全ての鋼材が 90%以上の確率で腐食しているという評価になった.傾向を見てみると,供試体端部に近いほど自然電位が若干卑な値となる.かぶりによる違いは認められなかった.鋼材の位置による差は鋼材 No3 において他より卑な傾向となった.

腐食電流密度の結果から,ほとんどの鋼材が腐食発生限界電流密度以上の値を示しており,腐食しやすい状況であるといえる.供試体の左端からの距離による傾向はなかった.かぶりによる影響は 125cm 位置においてかぶり 72.1mm の鋼材が 39.6mm のものに比べて電流密度が小さい結果となった.鋼材位置の違いを見てみると供試体の隅部ほど腐食しやすい値を示しているが,左端から 50cm 位置のかぶり 72.1mm の鋼材 No11 では $0.67 \mu / \text{cm}^2$ という大きな腐食電流密度の部位もある.実際の腐食状況と比較して評価したい.

不動態グレイドの結果は 2-3 であり,不動態皮膜がなく,腐食が疑われる結果となった.位置による傾向は認められない.

表 6-3

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	不動態グレード
R1A3	10cm	39.6	3	-516	0.00	2
			6	-349	0.24	
			7	-319	1.14	
			平均	-395	0.46	2
	50cm	39.6	3	-385	0.00	3
			6	-327	0.19	
			7	-388	0.48	
			平均	-366.7	0.22	3
		72.1	11	-351	0.67	
		全体平均		-363	0.33	3
	125cm	39.6	3	-467	0.00	2
			6	-312	0.76	2
			7	-333	0.67	2
			平均	-371	0.48	2.0
		72.1	8		0.00	2
			11	-310	0.09	3
			平均	-310	0.05	2.5
		全体平均		-356	0.30	2.2
		全体平均			-369	0.35



14	8	3
	9	
15	10	4
16		5
17	11	6
	12	
18	13	7

No2. R1B2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・海中部

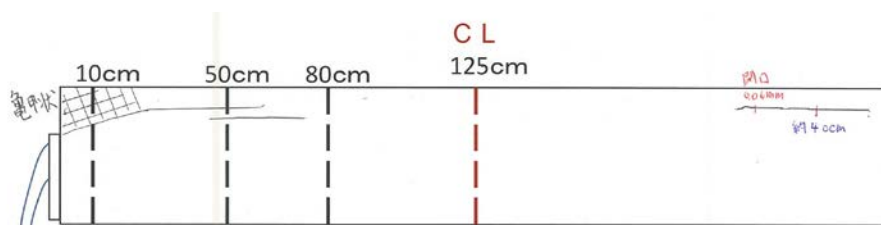
表 6-4 より自然電位の結果から全ての鋼材が 90%以上の確率で腐食していると判定される。左端からの距離による差は認められない。かぶりによる影響はかぶりが大きい方が貴な値を示している。鋼材位置による差は認められない。

腐食電流密度の結果から、ほとんどの鋼材が腐食発生限界電流密度以上の値を示しており、腐食しやすい状況であるといえる。左端からの距離による影響は認められない。かぶりによる影響も確認できない。鋼材位置による差も確認できない。

不動態グレイドは全体で 2 となり、不動態皮膜がなく、腐食しやすい状況といえる。

表 6-4

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	不動態グレイド
R1B2	10cm	39.6	3	-368	0.39	2
			6	-379	0.55	
			7	-371	0.53	
			平均	-373	0.49	2.0
		72.1	8	-342	0.06	
			11	-352	0.85	
			平均	-347	0.46	
		全体平均		-362	0.48	2.0
	50cm	39.6	3	-435	0.59	2
			6	-436	0.14	
			7	-445	0.78	
			平均	-439	0.50	2.0
		72.1	8	-382	1.26	
			11	-402	0.07	
			平均	-392	0.67	
		全体平均		-420	0.57	2.0
	125cm	39.6	3	-400	0.13	3
			6	-399	0.26	2
			7	-400	1.06	1
			平均	-400	0.49	2.0
		72.1	8	-341	0.28	
			11	-368	0.52	
			平均	-355	0.40	
		全体平均		-382	0.45	2.0
	全体平均			-388	0.50	2.0



14	8	3
	9	
15	10	4
16		5
17	11	6
	12	
18	13	7

No3. R1C2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・陸上部

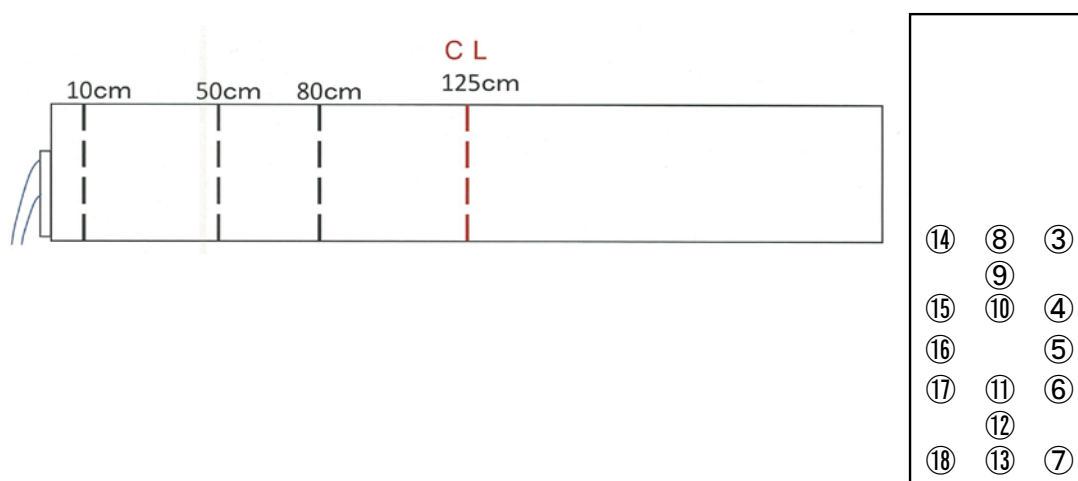
自然電位の結果は全鋼材で90%以上の確率で腐食がないといえる判定基準の-90mVと同程度かそれよりも貴な値となった. 部材端部と中央部では中央部の方が貴な値を示した.

腐食電流密度の結果ではNo3の鋼材は中-高程度に腐食しやすい環境と判定されたが, No7では腐食発生限界電流密度以下の値となった.

不動態グレイドは腐食電流密度の結果とは違い, 125cm位置においてNo7の方がグレイド2とNo3のグレイド4に比べて腐食しやすいと判定された.

表 6-5

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度(μA/cm ²)	不動態グレイド
R1C2	10cm	39.6	3	-81	0.40	4
			7	-91	0.09	
			平均	-86	0.24	4.0
	125cm	39.6	3	-41	0.87	4
			7	-33	0.08	2
			平均	-37	0.47	3.0
	全体平均			-62	0.36	3.3



No4. R2A4 プレテン・φ2.9mm2 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部

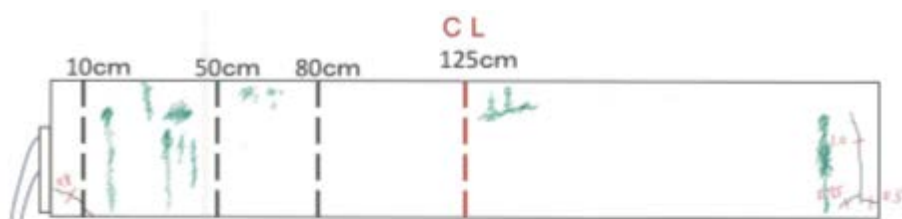
自然電位の結果は全ての鋼材で90%以上の確率で腐食していると判定された。傾向としては隅部の方が貴な値を示した。

腐食電流密度の結果は大きな値を示すものと腐食発生限界電流密度を下回る部位とで傾向無くわかれた。10cm位置のNo7に関しては近傍にひび割れがあるため電流が流れやすくなったのではないかと考える。125cm位置のNo3に関しては測定位置付近に目視で観察できるひび割れはなかったが、No7と同様に見えないひび割れがある可能性もある。

不動態グレイドについては2と0のグレイドとなっている。グレイド0の箇所は自然電位と腐食電流密度の値との整合性が取れていない。

表 6-6

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度(μA/cm ²)	不動態グレイド
R2A4	10cm	39.6	3	-418	0.11	2
			7	-360	173.82	
			平均	-389	86.97	2.0
	125cm	39.6	3	-449	5.24	2
			7	-396	0.13	0
			平均	-423	2.68	1.0
	全体平均			-406	44.83	1.3



⑭	⑧	③
	⑨	
⑮	⑩	④
⑯		⑤
⑰	⑪	⑥
	⑫	
⑱	⑬	⑦

No5 R4A1 プレテン・φ2.9mm2 本より線・設計荷重・感潮部

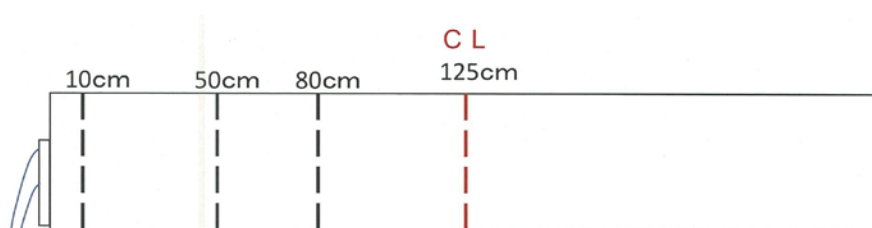
自然電位の結果は全鋼材で90%以上の確率で腐食していることが確認できる. また左端からの距離が10cmの方が125cmのものに比べて貴な電位を示している.

腐食電流密度は全ての鋼材で腐食発生限界電流密度以下の腐食しにくい状況であると示された.

不動態グレイドも3と比較的高い値となった.

表 6-7

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度(μA/cm ²)	不動態グレード
R4A1	10cm	39.6	3	-385	0.01	3
			7	-389	0.06	
			平均	-387	0.03	3.0
	125cm	39.6	3	-410	0.02	3
			7	-491	0.01	
			平均	-451	0.02	3.0
	全体平均			-419	0.03	3.0



⑭	⑧	③
	⑨	
⑮	⑩	④
⑯		⑤
⑰	⑪	⑥
	⑫	
⑱	⑬	⑦

No6 T1A3 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 80\%$ ・無載荷・感潮部

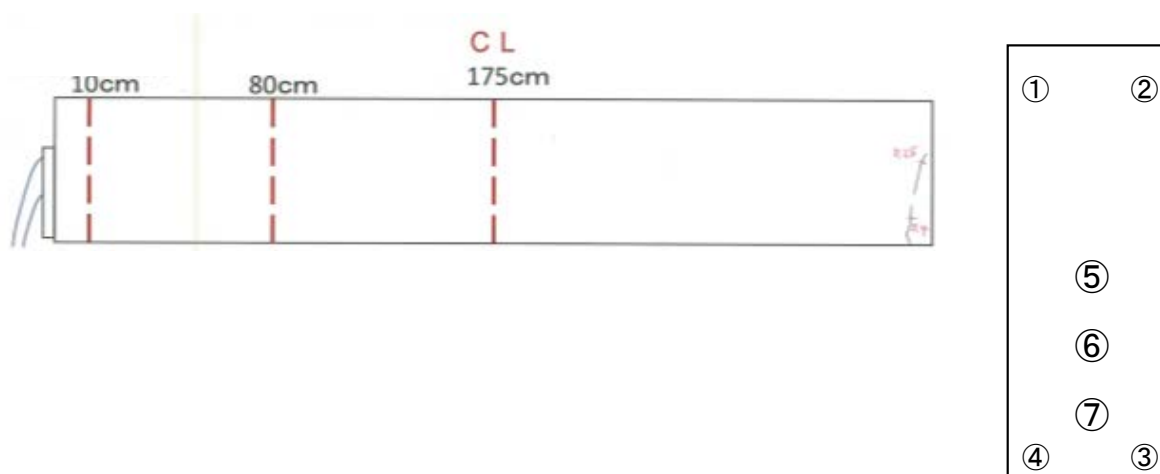
自然電位の結果, 全鋼材が90%以上の確立で腐食しているという結果になった. 左端からの距離による影響は中央部ほど卑な値を示した. また, 各左端からの断面において, 鋼材位置がコンクリート表面に近づくほど, 電位が卑な値となっている.

腐食電流密度の結果は端部に近いほど(左端からの距離が短いほど)負傷電流密度が大きくなった(自然電位と逆の傾向). また, 部材の位置に関しては自然電位の傾向とは逆にコンクリート表面に近づくほど, 小さな電流密度となった.

不動態グレイドは3-4と比較的高い値を示している. こちらは部材端部の方が中央部に比べて腐食しやすい傾向が掴めた.

表 6-8

供試体記号	左端からの距離	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド
T1A3	10cm	5	-274	0.40	3
		6	-318	0.30	
		7	-394	0.17	3
		平均	-329	0.29	3.0
	80cm	5	-300	0.18	
		6	-318	0.14	
		7	-427	0.02	
		平均	-348	0.12	
	175cm	5	-351	0.03	4
		6	-375	0.14	
		7	-455	0.01	4
		平均	-394	0.06	4.0
	全体平均		-357	0.16	3.5



No7 U1A2 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ60%・無載荷・感潮部(亜鉛メッキ)

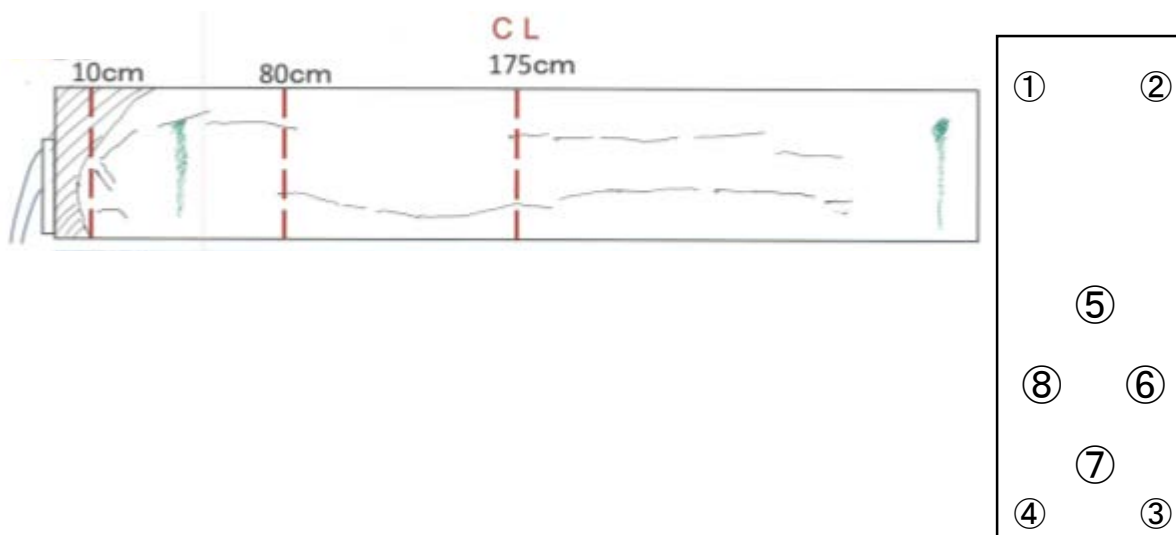
自然電位の結果は全ての鋼材が90%以上の確立で腐食している判定となった. その他特別な傾向は確認できない. 亜鉛メッキが施されているためか, 他の供試体に比べて自然電位が最も卑な値を示している.

腐食電流密度においては端部ほど値が大きい他, 特別な傾向は確認できない.

不動態グレイドの判定でも腐食電流密度同様に端部が腐食しやすい状況であることが確認できた.

表 6-9

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド
U1A 2	10cm	50	6	-523	0.28	3
		68.8	5	-650	0.76	
			7	-411	0.52	3
			平均	-531	0.64	3.0
		全体平均		-528	0.52	3.0
	80cm	50	6	-420	0.00	
		68.8	5	-596	0.15	
			7	-450	0.03	
			平均	-523	0.09	#DIV/0!
		全体平均		-489	0.06	#DIV/0!
	175cm	50	6	-374	0.01	4
		68.8	5	-589	0.08	
			7	-436	0.02	4
			平均	-513	0.05	4.0
		全体平均		-466	0.03	4.0
	全体平均			-494	0.21	3.5



No8 V1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部

7章で説明するが、V1A2は有効応力と塩害腐食との関係性を把握するために、電食試験を行った。ここでは電食試験前とあとの2ケースについて考察する。

a) 電食試験前

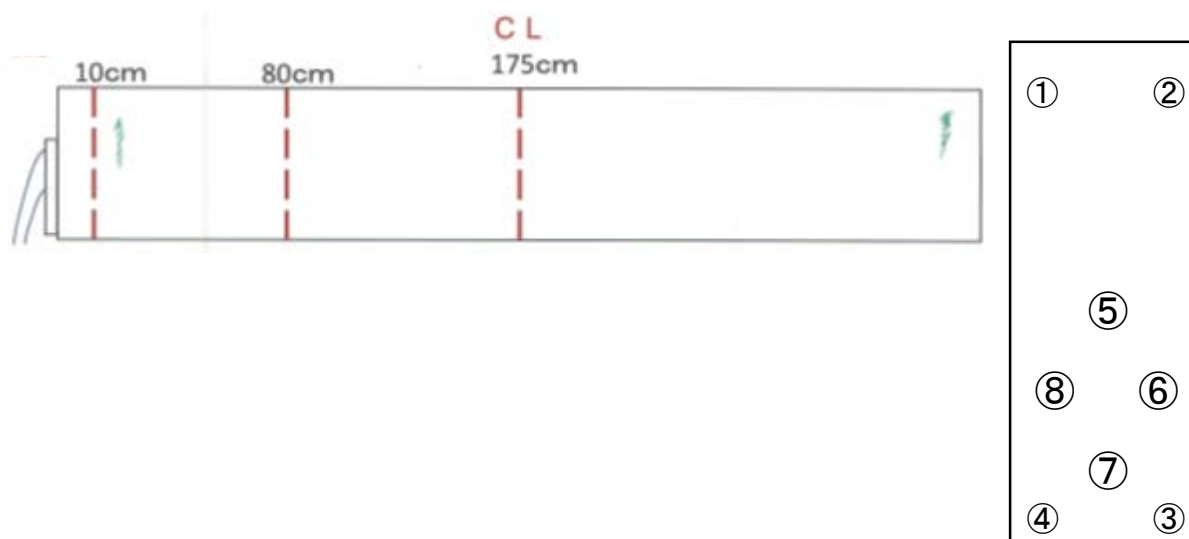
自然電位の結果は全ての鋼材が90%以上の確率で腐食している判定となった。その他特徴的な傾向は表れていない。

腐食電流密度の結果からは鋼材 No5, 6, 7 の順に（高さ方向において上位に位置するものほど）腐食電流密度が高い傾向が確認できる。

不動態のグレイド判定でも同様に鋼材 No5, 6, 7 の順にグレイド 5, 4, 3 となった。

表 6-10

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド
V1A2 (電食前)	10cm	50	6	-447	0.21	4
		68.8	5	-387	0.30	5
			7	-437	0.03	3
			平均	-412	0.16	4.0
		全体平均		-424	0.18	4.0
	80cm	50	6	-496	0.15	4
		68.8	5	-468	0.16	4
			7	-537	0.00	4
			平均	-503	0.08	4.0
		全体平均		-500	0.11	4.0
	175cm	50	6	-472	0.08	4
		68.8	5	-470	0.21	5
			7	-481	0.00	3
			平均	-476	0.10	4.0
		全体平均		-474	0.10	4.0
	全体平均			-466	0.13	4



No9 W1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 40\%$ ・無載荷・感潮部

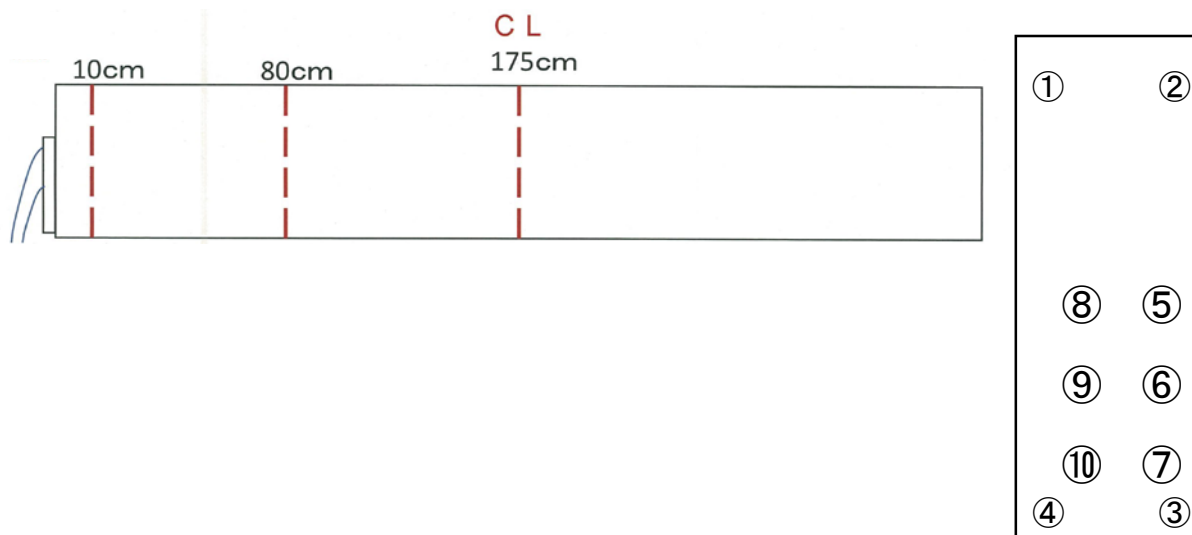
自然電位の結果は全ての鋼材において90%以上の確率で腐食している判定となった。傾向としては左端からの測定断面の距離によるものは確認出来ないが、各断面において高さ方向に上位のものほど(No5, 6, 7の順で)貴な値となった。

腐食電流密度は明確には判断できないが、端部の方が腐食傾向にあるように伺える。

不動態グレイドも腐食電流密度と同様に端部の方が腐食傾向にある。

表 6-11

供試体記号	左端からの距離	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド
W1A2	10cm	5	-377	0.28	3
		6	-420	0.40	
		7	-498	0.11	3
		平均	-432	0.26	3.0
	80cm	5	-414	0.20	
		6	-476	0.44	
		7	-527	0.11	
		平均	-472	0.25	#DIV/0!
	175cm	5	-389	0.42	4
		6	-440	0.01	
		7	-531	0.03	4
		平均	-453	0.15	4.0
	全体平均		-452	0.22	3.5



No10 01A4 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部

ポステンション方式の供試体において、本来であれば PC 鋼材の腐食状況を非破壊試験で判断することが構造性能の評価の観点から望ましいが、シース管に覆われ、その中をグラウトが充填されているため、構造上その計測は困難である。そこでシース管を 3 種の非破壊試験により測定した。

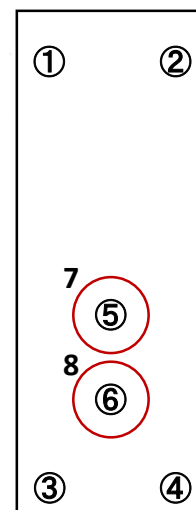
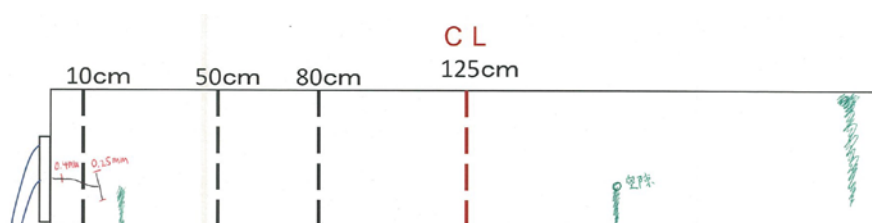
自然電位の結果、どのシース管も 90%以上の確率で腐食していると判定された。その他特別な傾向は掴めない。

腐食電流密度の結果から端部と中央部では比較的小さな値となった。

不動態グレイドは全て 4 と腐食しにくい状況であると判定された。

表 6-12

	左端からの距離	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド
O1A4	10cm	シース⑦	-384	0.02	4
		シース⑧	-361	0.02	4
		平均	-373	0.02	4.0
	50cm	シース⑦	-225	0.02	4
		シース⑧	-347	0.57	4
		平均	-286	0.30	4.0
	125cm	シース⑦	-260	0.01	4
		シース⑧	-410	0.00	4
		平均	-335	0.01	4.0
	全体平均		-331	0.11	4.0



No13 O1B3 ポステン・ $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・海水部

No10 同様にシース管を電気化学測定した.

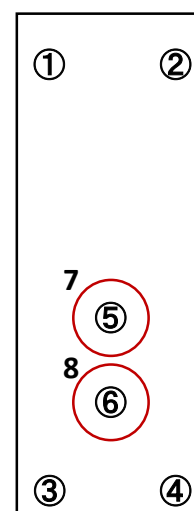
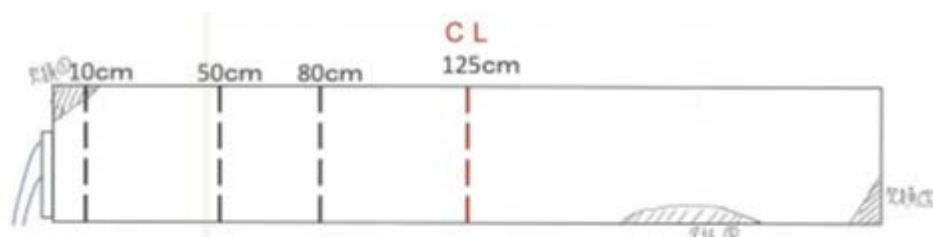
自然電位の結果から中央部の方が卑な値を示した.

腐食電流密度も自然電位の傾向と同様に端部よりも中央部の方が大きな値となった.

不動態のグレイド判定ではどちらも 4 となり,腐食しにくい環境であるといえる.

表 6-13

O1B3	左端からの距離	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド
	10cm	シース⑦	-427	2.80	4
	125cm	シース⑦	-476	3.12	4
	全体平均		-452	2.96	4.0



6.2 のまとめ

以上,非破壊試験結果より,比較項目である下記についてそれぞれ傾向を示す.

1) 曝露環境による違い

a) プレテンション方式

表 6-3, 4, 5 より, 顕著な違いは陸上部曝露の供試体が自然電位と不動態グレイドの評価で感潮部と海中部曝露の供試体に比べて, 極めて腐食しにくいといえる. 腐食電流密度では特段違いは確認できなかった.

b) ポストテンション方式

表 6-12, 13 より, 自然電位と特に腐食電流密度の結果において海中部の方が腐食しやすいと評価された.

2) 緊張方式による違い

ポストテンション方式の方が総じて高い不動態グレイド判定となった. また, 海中部のポストテンションは腐食電流密度が大きく腐食しやすい状況といえる. その他特異な点はない.

3) 鋼材種類による違い

腐食電流密度と不動態グレイド評価において 7 本より線の方が総じて 2 本より線よりも腐食しにくいといえる. 自然電位では特徴的な差は認められない.

4) 緊張力の差による違い

緊張力が強いほうが貴な自然電位を示した. 腐食電流密度では差が認められず, 不動態グレイドはどの鋼材でも 3.5 付近を示しており, 腐食しにくいといえる.

5) 持続載荷荷重による違い

ひび割れ発生荷重載荷の方が腐食電流密度と不動態グレイド評価で腐食しやすいと判定された.

6.3. コンクリート中の塩分浸透状況

塩化物イオンは鋼材を腐食させる物質であり、海洋環境において外部からの塩化物イオンのコンクリート中への浸透が劣化に及ぼす影響が大きい。したがって塩害の主たる原因であるコンクリート中における鋼材腐食を検討する為にはコンクリート中における塩化物イオンの分布を定量的に把握する事が重要である。

6.3.1. EPMA による各供試体の塩化物イオン分布

本研究では EPMA(電子線マイクロアナライザ)により、断面の元素分析を行った。元素分析に使用する試験体は基本 40×80×10mm サイズで梁内から採取し、耐水研磨紙(600~2400 番)で研磨後、ダイヤモンドスラリーを染み込ませたバフで仕上げた。その後、試験体をアセトン中で 30 分間超音波洗浄にかけ、十分に乾燥させた後、白金パラジウムを用いて蒸着した。機器は EPMA(JXA-8100)を用いて加速電圧 15.0kV、照射電流 1.12E-7A、ビーム径 100 μ m で行った。

EPMA を行った供試体は以下の通りである。

- a) No1. R1A3 プレテン・ ϕ 2.9mm2 本より線・無載荷・感潮部：左端より 50cm 位置
- b) No6. T1A3 プレテン・ ϕ 12.4mm7 本より線・ σ 80%・無載荷・感潮部：左端より 10cm, 125cm(中央部)
- c) No10 O1A4 ポステン・ ϕ 17mmPC 鋼棒・ σ 85%・無載荷・感潮部：左端より 10cm, 175cm(中央部)

以下、試験位置概要図と実験結果を示す。

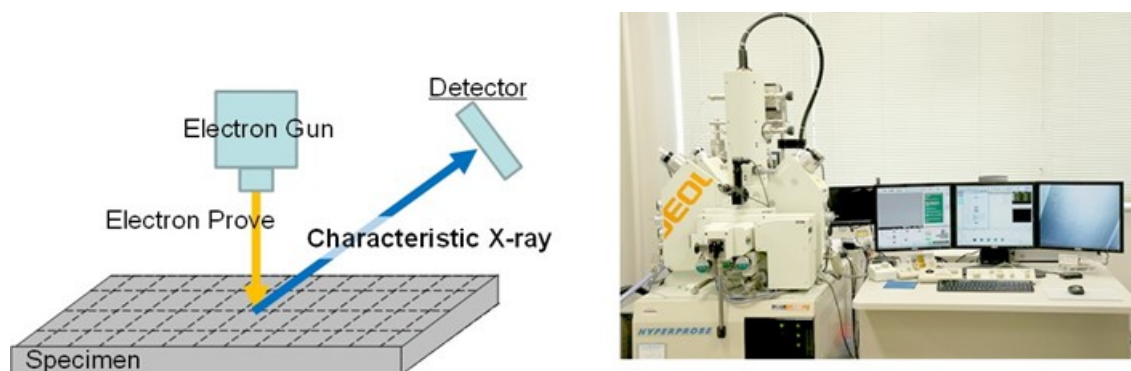


図 6-11 EPMA 測定概要図,測定機器

a) No1. R1A3 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}$ 2本より線・無載荷・感潮部：左端より 50cm 位置

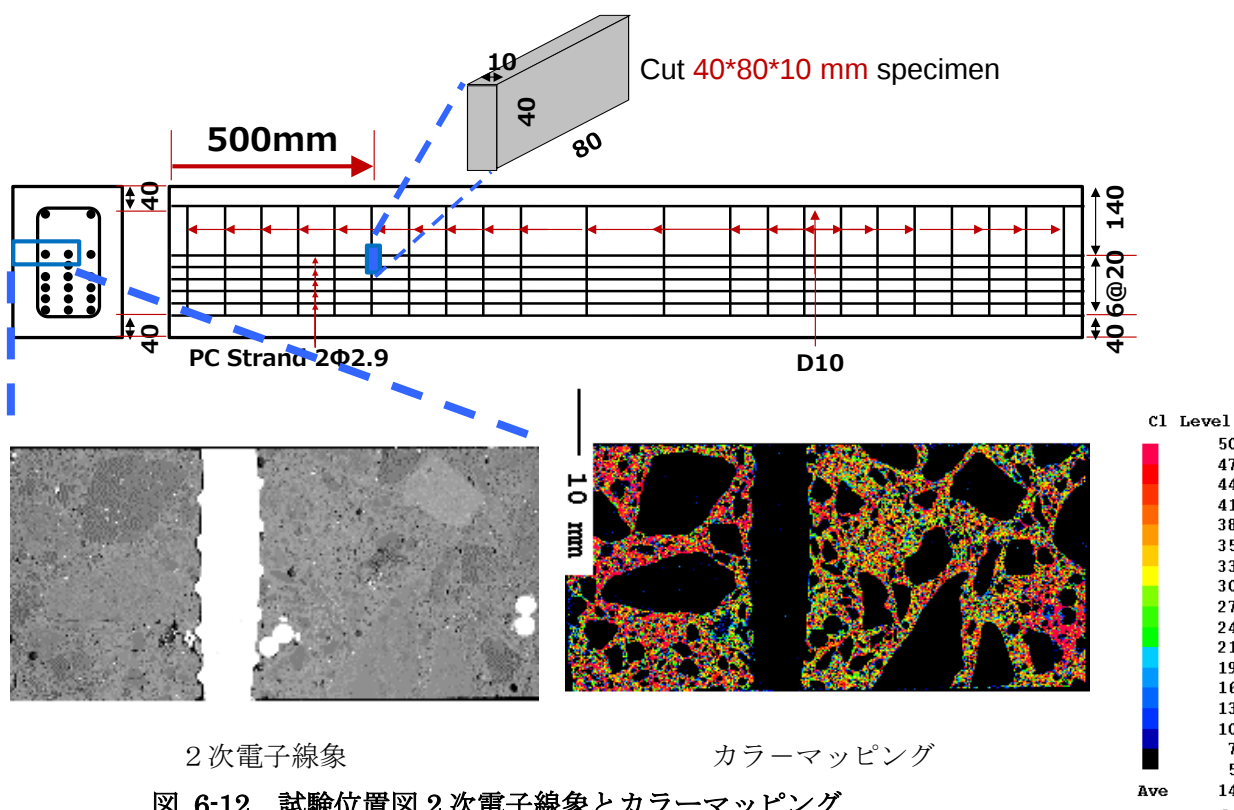


図 6-12 試験位置図,2次電子線象とカラーマッピング

図 6-12 に供試体内での試験位置図と測定された 2 次電子線と塩化物イオンの特性X線の強度をカラーマッピングで示す.より,表層部において若干濃度が高いように伺える.以下図 6-13 で表層部からの各深度における塩分濃度の平均値を質量濃度%表示で示す.図からわかることは表層から約 8 cmの深度まで塩分濃度はおおそ一様な値であることが伺える.また,質量濃度%で表されたこの値を既往の研究¹¹⁾を参考に 1 m^3 あたりに含まれる塩分量に換算し,海水中の塩分濃度と比較してみると,海水中 $18.98\text{kg}/\text{m}^3$ に対し,EPMAの結果ではおおそ $15\text{kg}/\text{m}^3$ 程であると言え,十分高い塩分濃度を示している(図 6-14 参照,コンクリート示方配合も表記).

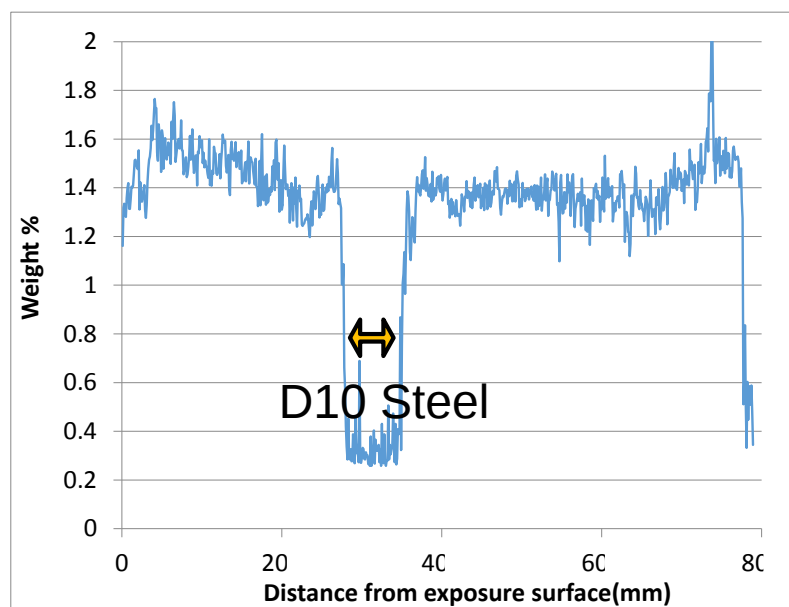
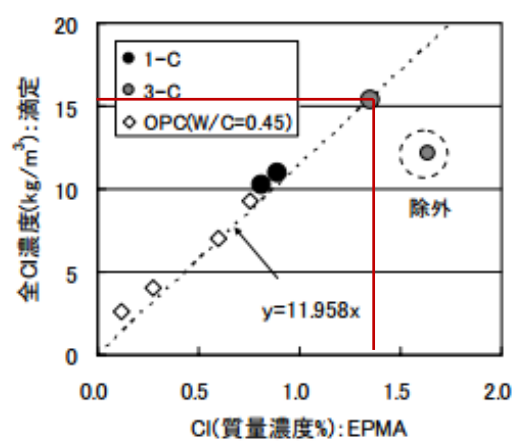


図 6-13 表層部からの塩分質量濃度%



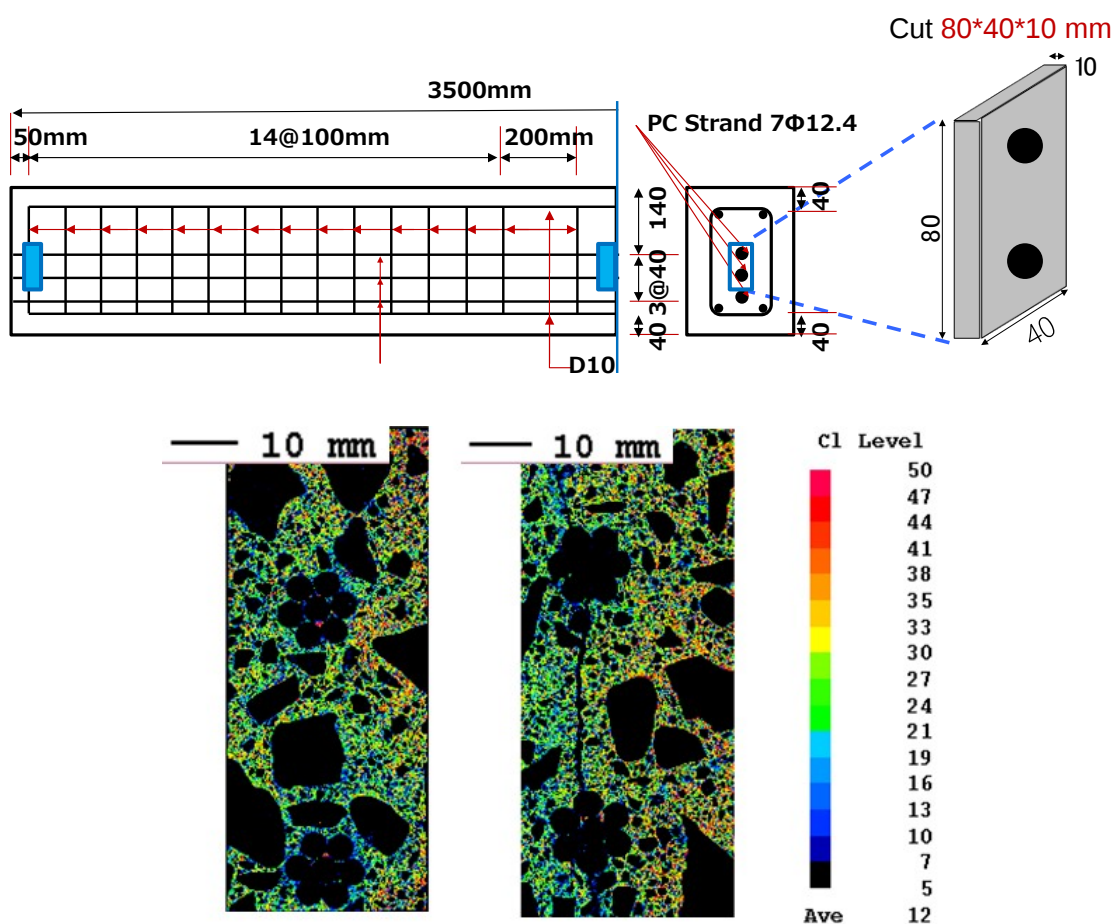
W/C	s/a	単位量(kg/m³)			
		W	C	S	G
0.6	0.48	158	263	894	980

図 6-14 EPMA 質量濃度%換算,コンクリート示方配合

b)No6. T1A3 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 80\%$ ・無載荷・感潮部：左端より 10cm, 175cm(中央部)

a)の試験結果より,内部まで塩分が高濃度で浸透していることが確認できた.

続いて,7 本より線の場合その鋼材周りの塩分の浸透状況が特殊なものとなるのか,またプレストレスの分布により塩分の浸透性状が異なるのか,端部(左端より 10cm 位置)と中央部(左端より 175cm 位置)で試験を行った.



カラーマッピング a)10cm

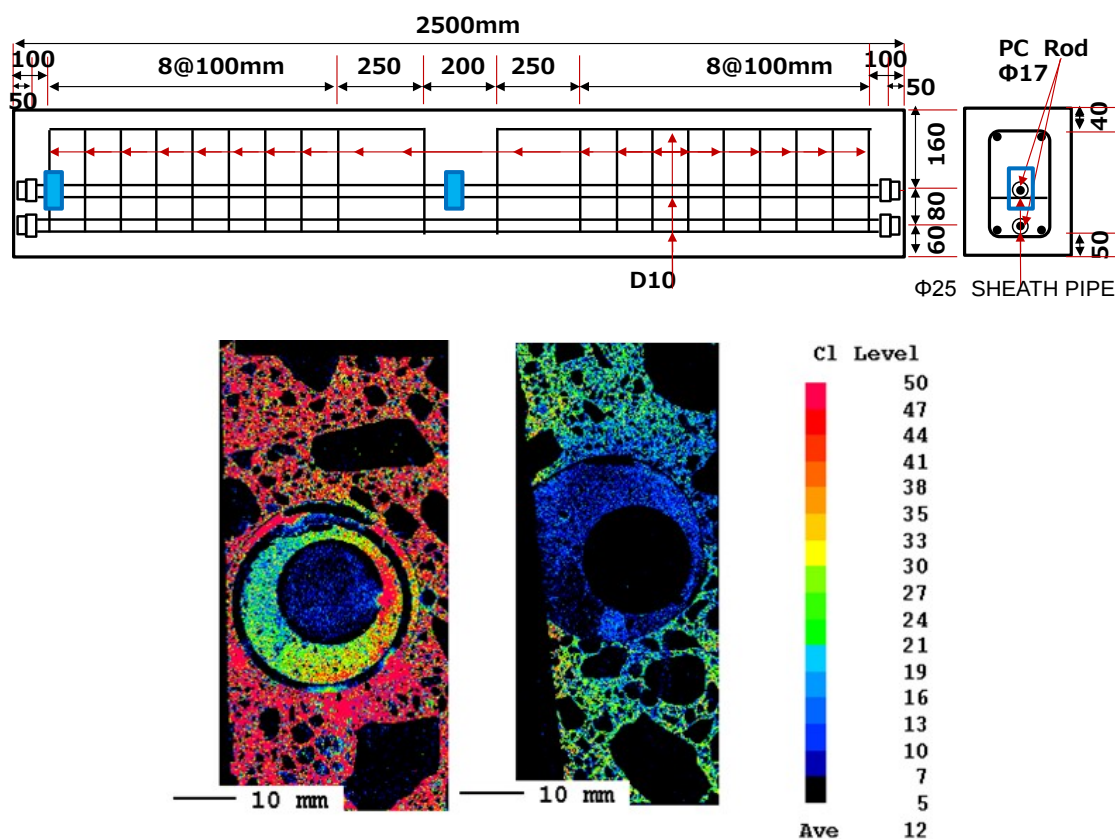
b)175cm

図 6-15 試験位置図,カラーマッピング(10cm,175cm)

図 6-15 カラーマッピングより鋼材中央部に電子線強度が高い位置が確認できるが, 機器の特性上, 平滑な箇所以外ではそのこのように強度が高く出てしまう傾向があるため, 鋼材内部の結果は無視した. 端部と中央部では濃度差がないことが確認できる.

c) No10 01A4 ポステン・ $\phi 17$ mm PC 鋼棒・ $\sigma 85\%$ ・無載荷・感潮部：左端より 10cm, 125cm(中央部)

続いて、鋼材種類の違いを検討するためにポストテンション方式の供試体で試験を行った。試験体は b) の 7 本より線とほぼ同様の位置、サイズで行った。



カラーマッピング a) 10cm

b) 125cm

図 6-16 試験位置図, カラーマッピング(10cm, 125cm)

まず特筆すべきは端部が中央部よりも濃度が高い点である。試験を 2 度行ったがほぼ同様の結果となりこの試験結果からはポストテンション方式の供試体ではその端部と中央部で塩分の浸透性状が異なると言える。このシリーズの他にもポストテンション方式の供試体があるので、再現性を確かめる必要があると考えられる。

また、ポストテンション方式の性質上、鋼材をシース管が覆っているためコンクリート中の塩分浸透を一度シース管が遮っていることが伺える。しかし、端部においてシース管の内部のグラウトまで塩分濃度が高いことが確認できる。これは端部コンクリートの劣化が激しいため(端部の金属性の保護パイプや支圧板の激しい腐食が原因)塩分がより浸透しやすい状況となり、端部に程近い箇所でもシース管内部の塩分濃度が高い分布となったと考えられる。図 6-17 に端部の劣化状況と図 6-18 に内部シース管の端部に近い箇所での局所的な腐食の状況を示す。しかし、内部鋼材では位置による腐食の違い等は確認できなかった(図 6-19 参照)。



a)端部外観



b)内部の腐食(青線位置すぐ右側の断面で EPMA)

図 6-17 端部の外観と内部の腐食

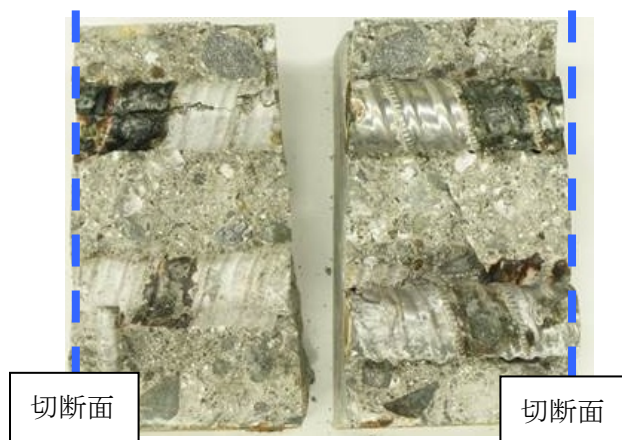


図 6-18 コンクリート割裂後,シース管腐食状況(左右両端が端部近傍)

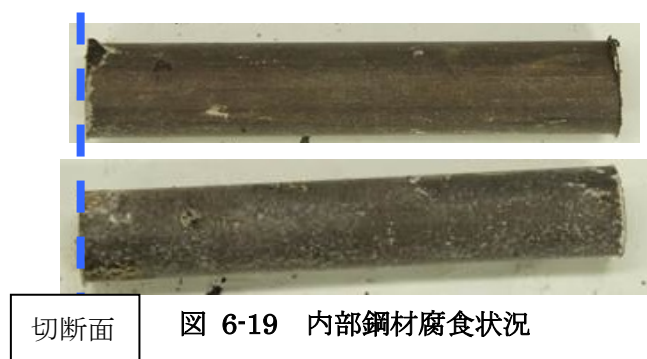


図 6-19 内部鋼材腐食状況

6.3 のまとめ

EPMA の結果より下記がわかった.

- コンクリート表層から内部まで塩化物イオンは海水に近い濃度で均等である.
- 7 本より線の供試体では端部と中央部で塩化物イオンの濃度差は無かった.
- ポストテンション方式の供試体では端部と中央部で濃度差が確認された.他の供試体を用いて,再現性を確認する必要がある.
- ポストテンションの端部はシース管内部にも塩化物イオンが浸透していることが確認できた.原因として定着具の腐食による端部の劣化(ひび)が一因として考えられるため,定着具の腐食には注意が必要である(詳しい腐食状況については 6.4 参照).

6.4. 内部鋼材の腐食

本節では、電気化学的測定を終えた後の内部鉄筋を取り出し、その腐食状況の目視評価と鉄筋周囲の付着塩化物、腐食減量の結果を示す。

6.4.1. 腐食状況目視評価

取り出した鉄筋をコンクリート断面内において鋼材の上部、電気化学的測定の測定面、底部、測定面と逆側の4方向より写真撮影し、その腐食面積の割合を4段階で評価した。以下にその割合を示す。

写真上、目視で確認できる面の

0-25%=1

25-50%=2

50-75%=3

75-100%=4

として数値付けした。

図 6-20 に評価例を示す。



図 6-20 腐食状況目視評価例

以下、供試体毎に結果を表で示す。

No1. R1A3 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・感潮部

表 6-14 より, まず顕著な点は各断面で底部が他の面に比べて数値が大きく, 腐食している面積が大きいことが確認できる. また, 125cm 位置が他の断面に比べて数値が大きくなった.

表 6-14

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	上面	測定面	底面	測定面逆	平均
R1A3	10cm	39.6	3	2	2	4	4	3.0
			4	1	2	4	1	2.0
			5	1	1	1	1	1.0
			6	1	1	2	2	1.5
			7	1	1	3	3	2.0
			平均	1.2	1.4	2.8	2.2	1.9
		72.1	8	1	1	1	1	1.0
			9	1	1	2	2	1.5
			10	2	1	4	2	2.3
			11	1	1	1	1	1.0
			12	2	2	1	1	1.5
			13	2	2	2	1	1.8
			平均	1.5	1.3	1.8	1.3	1.5
		39.6	14	2	2	4	2	2.5
			15	1	1	1	1	1.0
			16	1	1	1	1	1.0
			17	1	2	4	2	2.3
			18	1	1	3	1	1.5
			平均	1.2	1.4	2.6	1.4	1.7
		全体平均		1.3	1.4	2.4	1.6	1.7
	50cm	39.6	3	1	1	2	1	1.3
			4	1	2	4	3	2.5
			5	1	1	1	1	1.0
			6	1	2	2	3	2.0
			7	1	1	2	1	1.3
			平均	1.0	1.4	2.2	1.8	1.6
		72.1	8	1	1	3	1	1.5
			9	1	1	1	1	1.0
			10	1	2	2	1	1.5
			11	1	2	4	1	2.0
			12	1	3	4	2	2.5
			13	1	1	3	2	1.8
			平均	1.0	1.7	2.8	1.3	1.7
		39.6	14	1	1	2	1	1.3
			15	1	2	2	1	1.5
			16	1	2	4	1	2.0
			17	1	1	4	2	2.0
			18	1	1	1	1	1.0
			平均	1.0	1.4	2.6	1.2	1.6
		全体平均		1.0	1.5	2.6	1.4	1.6
	125cm	39.6	3	4	4	4	4	4.0
			4	1	1	3	1	1.5
			5	1	2	4	2	2.3
			6	2	1	2	1	1.5
			7	1	1	1	1	1.0
			平均	1.8	1.8	2.8	1.8	2.1
		72.1	8	4	3	4	4	3.8
			9	3	4	4	4	3.8
			10	3	3	4	4	3.5
			11	2	2	4	2	2.5
			12	1	2	4	2	2.3
			13	2	2	3	3	2.5
			平均	2.5	2.7	3.8	3.2	3.0
		39.6	14	2	2	2	1	1.8
			15	4	4	4	4	4.0
			16	4	4	4	4	4.0
			17	4	4	4	4	4.0
			18	4	4	4	4	4.0
			平均	3.6	3.6	3.6	3.4	3.6
		全体平均		2.6	2.7	3.4	2.8	2.9

No2. R1B2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・海中部

前出の R1A3 のように 125cm 位置では底部において腐食面積が大きいことが伺えるが、端部(10cm 位置)では腐食が発生する位置に偏りが無い。また、端部の方がやや数値が高く、腐食面積が大きいといえる。

表 6-15

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	上面	測定面	底面	測定面逆	平均
R1B2	10cm	39.6	3	4	4	4	4	4.0
			4	1	1	1	1	1.0
			5	1	2	2	1	1.5
			6	1	2	2	1	1.5
			7	1	1	1	1	1.0
			平均	1.6	2.0	2.0	1.6	1.8
		72.1	8	2	2	1	1	1.5
			9	2	3	1	2	2.0
			10	2	2	2	1	1.8
			11	2	2	1	2	1.8
			12	2	3	4	3	3.0
			13	2	2	3	3	2.5
			平均	2.0	2.3	2.0	2.0	2.1
		39.6	14	1	2	2	1	1.5
			15	3	4	4	3	3.5
			16	2	3	3	4	3.0
			17	3	4	3	4	3.5
			18	3	2	3	3	2.8
			平均	2.4	3.0	3.0	3.0	2.9
		全体平均		2.0	2.4	2.3	2.2	2.2
	125cm	39.6	3	3	3	4	3	3.3
			4	2	1	3	3	2.3
			5	1	2	2	2	1.8
			6	2	3	3	2	2.5
			7	1	1	2	1	1.3
			平均	1.8	2.0	2.8	2.2	2.2
		72.1	8	1	2	4	2	2.3
			9	1	1	4	1	1.8
			10	1	1	3	1	1.5
			11	1	2	2	1	1.5
			12	1	1	2	1	1.3
			13	1	1	1	1	1.0
			平均	1.0	1.3	2.7	1.2	1.5
		39.6	14	1	1	2	2	1.5
			15	1	2	3	1	1.8
			16	2	1	1	2	1.5
			17	1	2	2	1	1.5
			18	1	1	3	1	1.5
			平均	1.2	1.4	2.2	1.4	1.6
		全体平均		1.3	1.6	2.6	1.6	1.8

No3. R1C2 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・無載荷・陸上部

ほぼ腐食が認められなかった. 数値で2を示している鋼材においても鋼材近辺に測定端子(詳細不明)が埋まっており, 他に比べ腐食しやすい状況であったために, やや腐食していると言える(図 6-21 に写真で示す).

表 6-16

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	上面	測定面	底面	測定面逆	平均
R1C2	125cm	39.6	3	1	1	2	1	1.3
			4	1	1	1	1	1.0
			5	1	1	1	1	1.0
			6	1	1	2	1	1.3
			7	1	1	1	1	1.0
			平均	1.0	1.0	1.4	1.0	1.1
		72.1	8	1	1	1	1	1.0
			9	1	1	2	1	1.3
			10	1	1	1	1	1.0
			11	1	1	1	1	1.0
			12	1	1	1	1	1.0
			13	1	1	1	1	1.0
			平均	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0
		39.6	14	1	1	2	1	1.3
			15	1	1	1	1	1.0
			16	1	1	2	1	1.3
			17	1	1	1	1	1.0
			18	1	1	1	1	1.0
			平均	1.0	1.0	1.4	1.0	1.1
		全体平均		1.0	1.0	1.3	1.0	1.1



図 6-21 測定端子と周囲の PC 鋼線腐食状況

No4. R2A4 プレテン・φ2.9mm2 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部

断面内で際立った特徴はやはり底部が他の面よりも腐食面積が大きいことを示している。

表 6-17

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	上面	測定面	底面	測定面逆	平均
R2A4	125cm	39.6	3	2	2	3	2	2.3
			4	2	2	3	2	2.3
			5	2	2	4	4	3.0
			6	2	2	2	2	2.0
			7	2	1	2	2	1.8
			平均	2.0	1.8	2.8	2.4	2.3
		72.1	8	1	2	4	2	2.3
			9	1	2	3	1	1.8
			10	2	2	4	4	3.0
			11	2	2	3	2	2.3
			12	1	2	3	2	2.0
			13	1	1	1	1	1.0
			平均	1.3	1.8	3.0	2.0	2.0
		39.6	14	3	3	4	4	3.5
			15	2	2	3	2	2.3
			16	2	1	3	1	1.8
			17	2	2	4	3	2.8
			18	3	3	4	3	3.3
			平均	2.4	2.2	3.6	2.6	2.7
		全体平均		1.9	1.9	3.1	2.3	2.3

No6 T1A3 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 80\%$ ・無載荷・感潮部

端部(10cm 位置)が中央(125cm 位置)よりも腐食面積が大きいことがわかる. ほぼ全面的に腐食している.

表 6-18

	左端からの距離	No	上面	測定面	底面	測定逆面	平均
T1A3	10cm	5	4	4	4	4	4.0
		6	4	4	4	4	4.0
		7	4	4	4	4	4.0
		平均	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	175cm	5	1	1	2	1	1.3
		6	2	2	2	2	2.0
		7	1	1	1	1	1.0
		平均	1.3	1.3	1.7	1.3	1.4

No7 U1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部(亜鉛メッキ)

全面的に腐食している. また, 亜鉛メッキ特有の白錆が大部分を占めている(図 6-22). その点では他のさびとは分けて考える必要がある.

表 6-19

	左端からの距離	No	上面	測定面	底面	測定逆面	平均
U1A2	175cm	5	4	4	4	4	4.0
		6	4	4	4	4	4.0
		7	4	4	4	4	4.0
		8	4	4	4	4	4.0
		平均	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

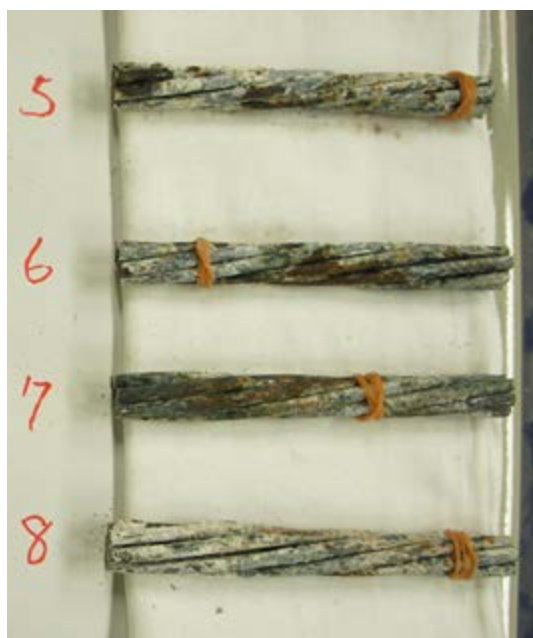


図 6-22 底部状況写真

No8 V1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部(電食試験後)

電食試験後の結果である。端部の腐食面積が大きく、実験の手順によるもの(最初の 82 時間は端部のみ通電)なのか端部の絶縁処理が甘く、より腐食しやすい状況となったのかは不明である。

表 6-20

V1A 2 (電食後)	左端からの距離	No	上面	測定面	底面	測定逆面	平均
	10cm	5	4	4	4	4	4.0
		6	4	4	4	4	4.0
		7	4	4	4	4	4.0
		8	4	4	4	4	4.0
		平均	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	175cm	5	3	1	2	1	1.8
		6	3	2	1	2	2.0
		7	4	4	4	4	4.0
		8	4	2	3	3	3.0
		平均	3.5	2.3	2.5	2.5	2.7

以下, 全体を通して顕著な点をあげる.

- 陸上部曝露は感潮部と海中部に比べ, 全く錆が確認されなかった.
- 素線の接触面は陸上部曝露供試体以外, 全て全面的に腐食していた.
- 2 本より線では底部の腐食面積が他の面に比べて大きくなることがわかった.
- 7 本より線では端部の腐食面積が大きくなった.

6.4.2. 腐食減量と鉄筋周囲の付着塩化物イオン

PC 梁供試体からは取り出した鋼材を対象として、鉄筋周囲の塩化物イオン濃度と腐食減量の測定を行う。6.3 よりコンクリート中の塩分濃度は曝露面と内部で均一と考えられるため、鉄筋周囲の環境によりその腐食量が異なると考えられる。その一因として鉄筋周囲の塩化物イオンに着目し、腐食量との関係性を探る。

6.4.2.1. 実験概要

a) 鉄筋周囲の付着塩化物イオン測定¹²⁾

図 6-23 に実験手順概要を示す。具体的には以下のとおりである。

1. コンクリートから取り出した鋼材を直ちに高精度電子天秤で軽量する。
2. 鉄筋を 100℃で 24 時間乾燥させ、再度鉄筋の質量を計測する。
3. 鉄筋を計量した蒸留水で超音波洗浄 (3 分間) する。
4. 3. の洗浄水中に存在する塩化物イオン量を電位差滴定法により計測する。
5. 鉄筋周囲の付着水量と洗浄水中の塩化物イオン量より鉄筋周囲の塩化物イオン濃度を算出する。

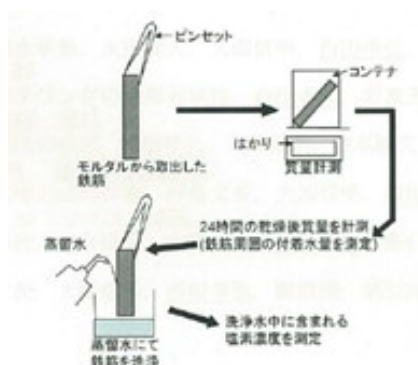


図 6-23 鉄筋周囲の塩化物イオン濃度測定概要図

b) 腐食減量測定

鉄筋周囲の塩化物イオン測定を行った後に、JCI-SCI「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠して、濃度 10% のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に 50℃環境下で 24 時間浸漬する。浸漬後、ブラシ処理を行い、腐食生成物を除去し、質量を計測した。

鋼材長さを計測し、JIS 規格にある単位質量を基準として質量減量を求めた。なお予め健全な鋼材を用いて同様の処理を行った場合の質量減少量を求めておき、その質量減少率を各鋼材から除して、腐食生成物による質量減量を求めた。

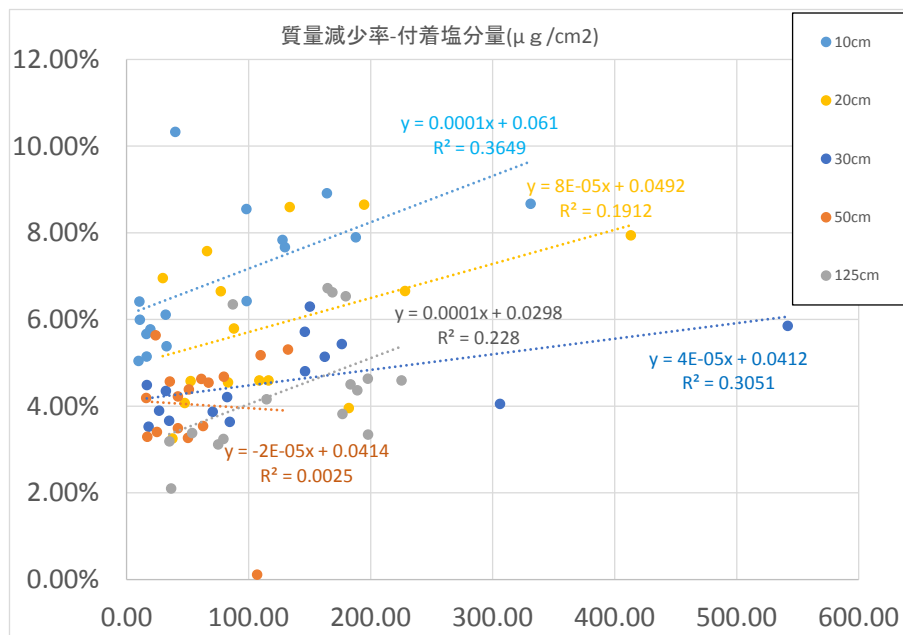
6.4.2.2. 実験結果

以下、a)b) 実験結果を同一表中で供試体毎に示す。塩分については付着塩分量と塩分濃度（付着塩分量を鉄筋周囲の水分量で除した値）を示した。

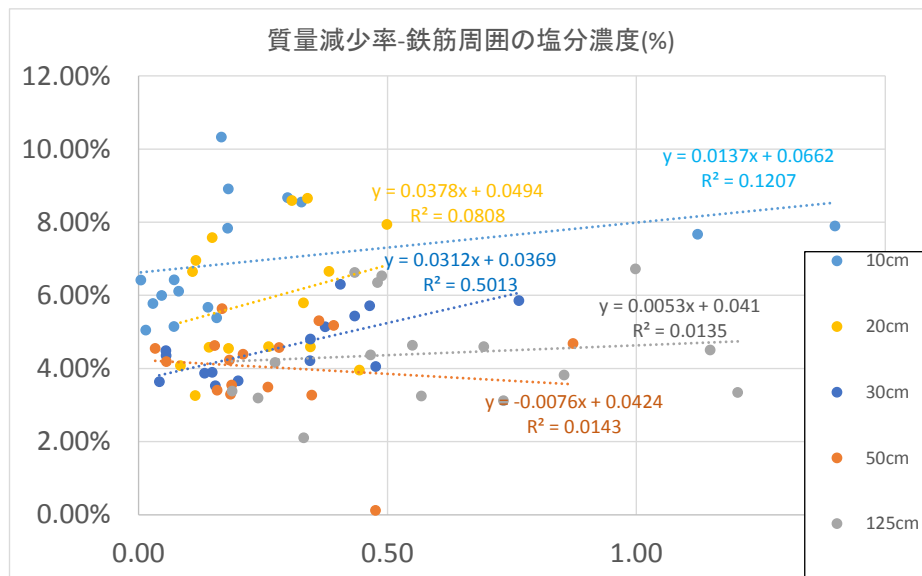
No1. R1A3 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・感潮部

表 6-21 中, まずは質量減少率に着目すると, 端部(10cm)に近いほど質量減少率が大きいことが確認できる(各位置の平均が端部より中央にかけて 7%-5.9%-4.6%-4.0%-4.4%と推移). その他断面内での鋼材位置による顕著な傾向は確認できない.

次に質量減少率と付着塩分量・濃度のグラフをそれぞれ図 6-24 に示す. どちらのグラフからも明確な傾向は確認できない.



a) 質量減少率と付着塩分量



b) 質量減少率と鉄筋周囲の塩分濃度

図 6-24 質量減少率と付着塩分量・濃度

表 6-21

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量(μg/cm ²)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率		
R1A3	10cm	③	187.84	1.40	7.9%		
		④	129.81	1.12	7.7%		
		⑤	32.74	0.16	5.4%		
		⑥	331.06	0.30	8.7%		
		⑦	32.12	0.08	6.1%		
		⑧	9.78	0.01	5.0%		
		⑨	10.58	0.00	6.4%		
		⑩	127.85	0.18	7.8%		
		⑪	10.86	0.05	6.0%		
		⑫	16.19	0.14	5.7%		
		⑬	39.95	0.17	10.3%		
		⑭	98.19	0.33	8.6%		
		⑮	16.45	0.07	5.1%		
		⑯	19.58	0.03	5.8%		
		⑰	164.18	0.18	8.9%		
		⑱	98.32	0.07	6.4%		
		平均					7.0%
		20cm	③	88.02	0.33	5.8%	
			④	228.17	0.38	6.7%	
	⑤		77.15	0.11	6.7%		
	⑥		108.86	0.26	4.6%		
	⑦						
	⑧		29.71	0.12	7.0%		
	⑨		133.81	0.31	8.6%		
	⑩		413.25	0.50	7.9%		
	⑪		194.64	0.34	8.7%		
	⑫		83.11	0.18	4.6%		
	⑬		52.40	0.14	4.6%		
	⑭		65.92	0.15	7.6%		
	⑮		47.68	0.08	4.1%		
	⑯		116.36	0.35	4.6%		
	⑰		37.53	0.11	3.3%		
	⑱		182.12	0.44	4.0%		
	平均					5.9%	
	30cm		③	150.21	0.41	6.3%	
			④				
		⑤	162.42	0.37	5.1%		
		⑥	541.76	0.76	5.9%		
		⑦	18.05	0.15	3.5%		
		⑧	176.35	0.43	5.4%		
		⑨	16.61	0.05	4.5%		
		⑩	32.28	0.06	4.4%		
		⑪	70.63	0.13	3.9%		
		⑫	84.58	0.04	3.6%		
		⑬	305.99	0.48	4.1%		
⑭		146.04	0.46	5.7%			
⑮		82.47	0.34	4.2%			
⑯		34.94	0.20	3.7%			
⑰		146.33	0.35	4.8%			
⑱		26.75	0.15	3.9%			
平均					4.6%		
50cm		③	50.38	0.35	3.3%		
		④	67.26	0.03	4.5%		
	⑤	42.06	0.26	3.5%			
	⑥	106.99	0.48	0.1%			
	⑦	23.77	0.17	5.6%			
	⑧	42.06	0.18	4.2%			
	⑨	16.18	0.06	4.2%			
	⑩	17.02	0.18	3.3%			
	⑪	109.85	0.39	5.2%			
	⑫	51.10	0.21	4.4%			
	⑬	79.73	0.87	4.7%			
	⑭	24.95	0.16	3.4%			
	⑮	62.69	0.19	3.5%			
	⑯	132.36	0.36	5.3%			
	⑰	61.33	0.15	4.6%			
	⑱	35.44	0.28	4.6%			
	平均					4.0%	
	125cm	③	189.04	0.47	4.4%		
		④	79.33	0.57	3.2%		
⑤		177.02	0.85	3.8%			
⑥		75.16	0.73	3.1%			
⑦		35.09	0.24	3.2%			
⑧		53.67	0.19	3.4%			
⑨		197.72	0.55	4.6%			
⑩		114.69	0.27	4.2%			
⑪		225.33	0.69	4.6%			
⑫		197.86	1.20	3.3%			
⑬		183.57	1.15	4.5%			
⑭		36.54	0.33	2.1%			
⑮		87.06	0.48	6.3%			
⑯		168.63	0.43	6.6%			
⑰		179.60	0.49	6.5%			
⑱		164.66	1.00	6.7%			
平均					4.4%		

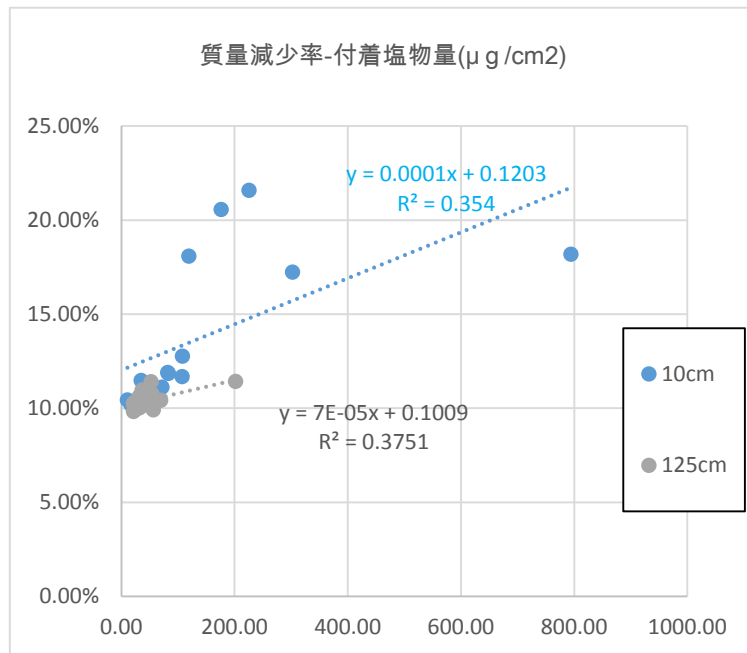
No2. R1B2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・海中部

表 6-22 より端部の方がより質量減少率が高いことがわかる.

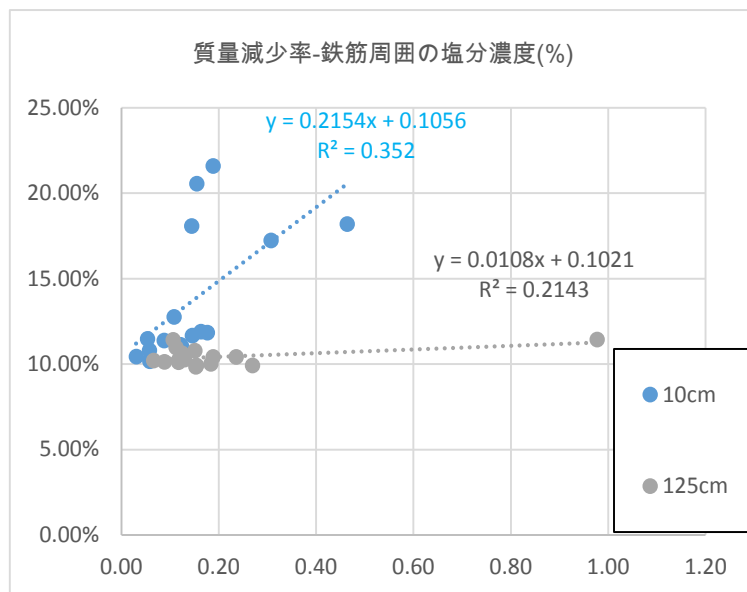
図 6-25 で付着塩分量と鉄筋周囲の塩分濃度のグラフを比べる. 前出のグラフ同様, 明確な傾向は掴めない.

表 6-22

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量(μg/cm ²)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率	
R1B2	10cm	③	302.07	0.31	17.24%	
		④	17.25	0.06	10.17%	
		⑤	45.10	0.06	10.81%	
		⑥	50.57	0.09	11.38%	
		⑦	10.41	0.03	10.44%	
		⑧	48.64	0.12	10.98%	
		⑨	82.82	0.18	11.85%	
		⑩	71.43	0.12	11.13%	
		⑪	106.79	0.15	11.68%	
		⑫	793.85	0.46	18.19%	
		⑬	81.87	0.16	11.90%	
		⑭	34.72	0.05	11.48%	
		⑮	118.65	0.14	18.09%	
		⑯	225.30	0.19	21.59%	
		⑰	176.10	0.15	20.57%	
		⑱	107.82	0.11	12.77%	
		平均				13.77%
		125cm	③	52.19	0.11	11.42%
	④		36.62	0.11	10.98%	
	⑤		21.46	0.07	10.21%	
	⑥		53.07	0.15	10.78%	
	⑦		37.27	0.09	10.15%	
	⑧		69.41	0.24	10.43%	
	⑨		31.08	0.12	10.64%	
	⑩		50.90	0.13	10.27%	
	⑪		21.09	0.12	10.28%	
	⑫		56.36	0.27	9.93%	
	⑬		28.76	0.12	10.13%	
	⑭		31.24	0.18	10.03%	
	⑮		201.74	0.98	11.44%	
	⑯		21.33	0.15	9.84%	
	⑰		27.99	0.19	10.42%	
	⑱		23.92	0.15	9.92%	
	平均				10.43%	



a) 質量減少率と付着塩分量



b) 質量減少率と鉄筋周囲の塩分濃度

図 6-25 質量減少率と付着塩分量・濃度

No3. R1C2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・陸上部

質量減少量が前出の感満部と海中部曝露より明らかに小さい. 表中, マイナスがついているものは, 同規格の新品鋼材を腐食減量の手順によって初期の質量減少分を考慮しているためにマイナス値となってしまった. 言い換えれば, 新品同様に健全な状態であったといえる.

表 6-23

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量(μg/cm ²)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率
R1C2	20cm	③	0.00	0.00	2.3%
		④	8.20	0.04	2.3%
		⑤	0.00	0.00	2.1%
		⑥	0.00	0.00	2.8%
		⑦	0.00	0.00	2.6%
		⑧	0.00	0.00	2.5%
		⑨	0.00	0.00	2.9%
		⑩	0.00	0.00	3.0%
		⑪	0.00	0.00	2.8%
		⑫	0.00	0.00	2.7%
		⑬	5.75	0.00	2.8%
		⑭	0.00	0.00	2.8%
		⑮	0.00	0.00	2.9%
		⑯	0.00	0.00	3.0%
		⑰	2.41	0.04	2.9%
		⑱	0.00	0.00	2.6%
		平均			2.7%
	30	③	2.50	0.02	-1.3%
		④	3.00	0.01	-0.6%
		⑤	7.56	0.05	-1.0%
		⑥	7.38	0.06	-0.7%
		⑦	0.00	0.00	-0.4%
		⑧	3.16	0.02	1.6%
		⑨	0.00	0.00	1.8%
		⑩	3.24	0.02	1.9%
		⑪	0.00	0.00	2.3%
		⑫	2.36	0.02	2.2%
		⑬	0.00	0.00	2.4%
		⑭	5.69	0.03	2.8%
		⑮	0.00	0.00	2.9%
		⑯	0.00	0.00	4.5%
		⑰	5.78	0.03	4.6%
		⑱	2.41	0.02	4.6%
		平均			1.7%
	125cm	③	0.00	0.00	-0.6%
		④	12.97	0.11	-0.7%
		⑤	3.15	0.03	-0.7%
		⑥	3.35	0.05	-0.6%
		⑦	3.20	0.04	-0.7%
		⑧	7.50	0.07	-0.8%
		⑨	3.21	0.02	-0.5%
		⑩	7.49	0.06	-0.6%
		⑪	3.22	0.02	-0.9%
		⑫	3.12	0.03	-0.9%
		⑬	3.27	0.02	-0.6%
		⑭	7.31	0.06	-0.7%
		⑮	3.11	0.04	-0.7%
		⑯	3.17	0.03	-0.8%
		⑰	10.57	0.10	-0.9%
		⑱	0.00	0.00	-1.1%
		平均			-0.7%
	240cm	③	0.00	0.00	2.1%
		④	0.00	0.00	1.9%
		⑤	0.00	0.00	1.6%
		⑥	0.00	0.00	2.1%
		⑦	0.00	0.00	2.4%
		⑧	0.00	0.00	2.2%
		⑨	0.00	0.00	2.4%
		⑩	3.50	0.02	1.9%
		⑪	0.00	0.00	2.5%
		⑫	0.00	0.00	1.8%
		⑬	0.00	0.00	1.9%
		⑭	0.00	0.00	2.6%
		⑮	0.00	0.00	1.4%
		⑯	0.00	0.00	2.1%
		⑰	8.15	0.08	1.6%
		⑱	0.00	0.00	2.2%
		平均			2.0%

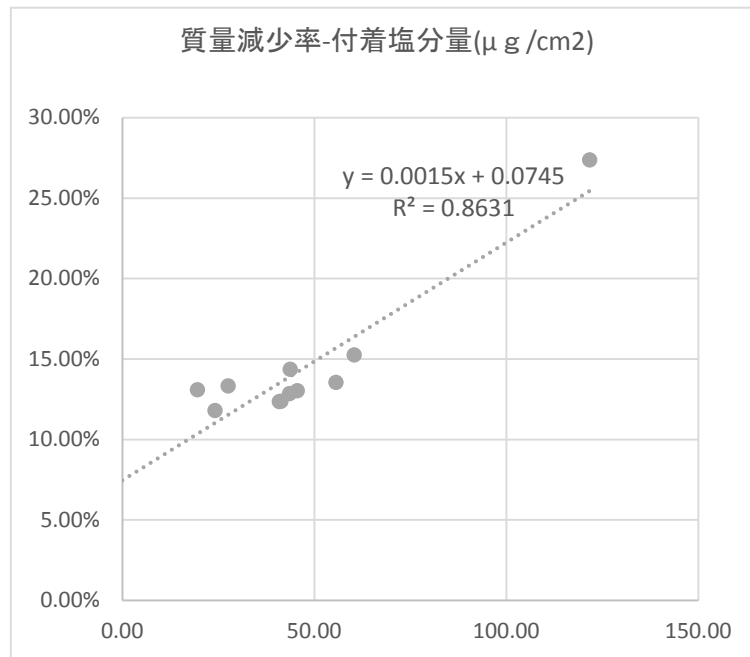
No4. R2A4 プレテン・φ2.9mm2 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部

4 章の載荷試験に用いた供試体であり、鋼材が破断しているものもある(空欄)。

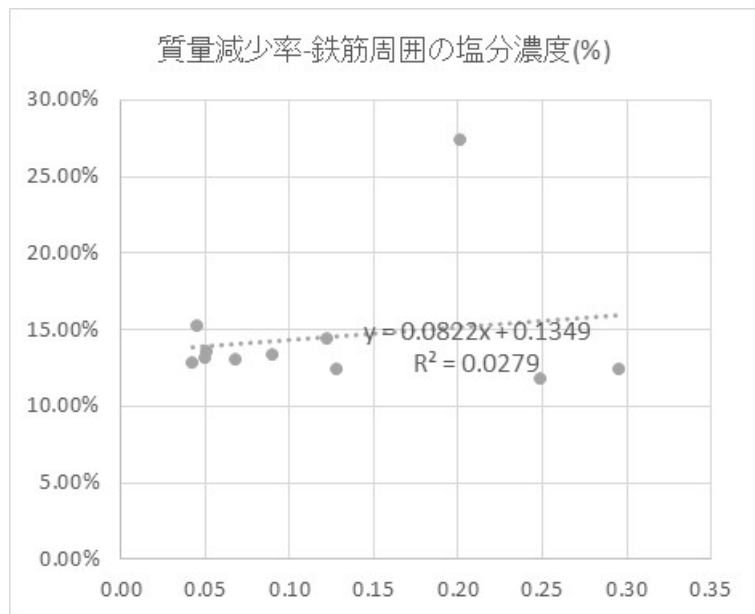
比較的高めの質量減少率を示している。鋼材周囲の付着塩分量・濃度との関係性を図 6-26 に示す。a)においては一点を除いて点が集中しており、関係性を示すには至らない。b)も塩分濃度が高くなっても質量減少率は変わらず、質量減少率と付着塩分濃度との傾向はない。

表 6-24

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率
R2A4	125cm	③			
		④			
		⑤	60.35	0.05	15.3%
		⑥	27.56	0.09	13.3%
		⑦	55.62	0.05	13.6%
		⑧			
		⑨			
		⑩			
		⑪	43.56	0.04	12.9%
		⑫	40.87	0.30	12.4%
		⑬	24.11	0.25	11.8%
		⑭	43.68	0.12	14.4%
		⑮	19.53	0.05	13.1%
		⑯	41.26	0.13	12.4%
		⑰	45.55	0.07	13.0%
		⑱	121.67	0.20	27.4%
		平均			14.5%



a) 質量減少率と付着塩分量



b) 質量減少率と鉄筋周囲の塩分濃度

図 6-26 質量減少率と付着塩分量・濃度

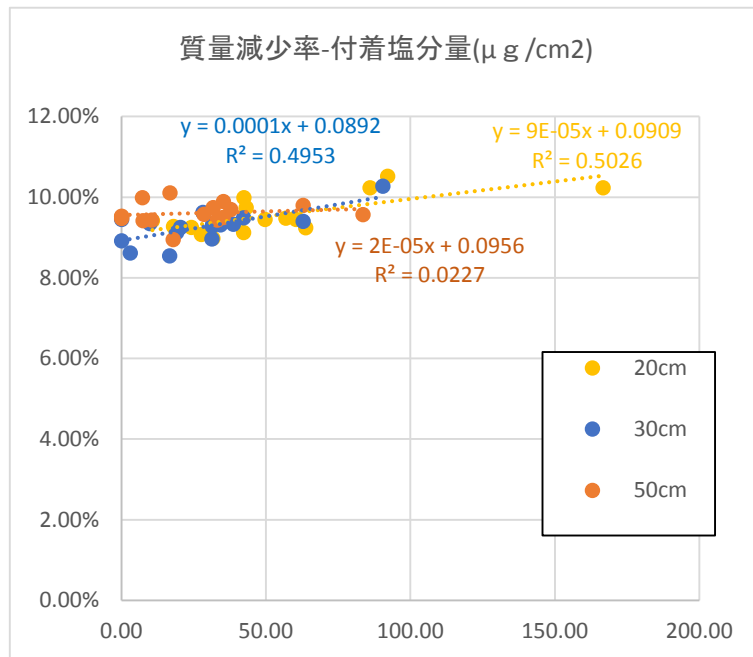
No5 R4A1 プレテン・φ2.9mm2 本より線・設計荷重・感潮部

試験体内位置での質量減少に差はなく, おおよそ 9.3-9.6% で均一な値を示している.

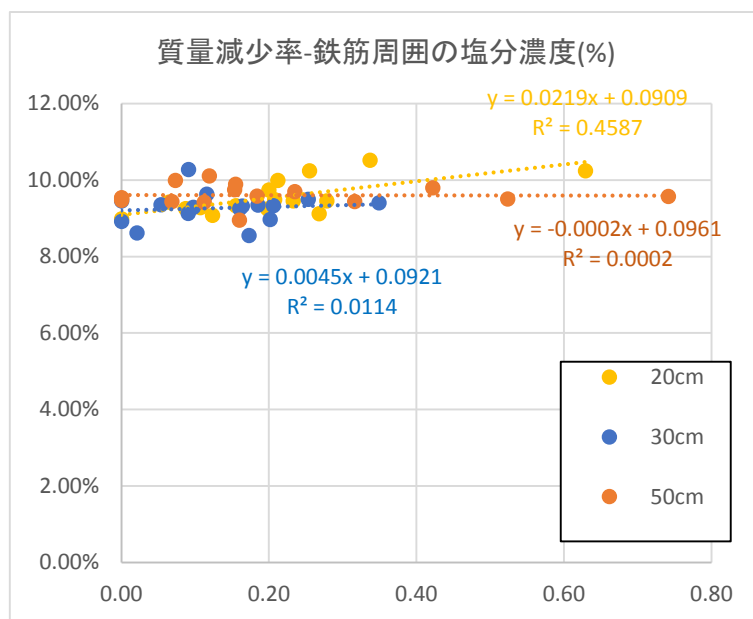
図 6-27 で質量減少率と付着塩分量・濃度との関係を示す. 質量減少率がほぼ均質なのに対して付着塩分量および濃度にはばらつきがある. 従って図からは質量減少率と付着塩分量と濃度との関係性は少ないのではないかと推察できる.

表 6-25

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量(μg/cm ²)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率		
R4A1	20cm	③	17.95	0.11	9.3%		
		④	92.14	0.34	10.5%		
		⑤	166.67	0.63	10.2%		
		⑥	27.58	0.12	9.1%		
		⑦	31.65		9.0%		
		⑧	63.72	0.20	9.2%		
		⑨	10.68	0.06	9.4%		
		⑩	60.39	0.28	9.5%		
		⑪	43.17	0.20	9.7%		
		⑫	56.88	0.21	9.5%		
		⑬	49.71	0.23	9.5%		
		⑭	24.17	0.09	9.3%		
		⑮	86.02	0.25	10.2%		
		⑯	31.86	0.16	9.3%		
		⑰	42.36	0.21	10.0%		
		⑱	42.21	0.27	9.1%		
		平均					9.6%
		30cm	③	28.14	0.12	9.6%	
			④	31.39	0.10	9.3%	
	⑤		90.48	0.09	10.3%		
	⑥		0.00	0.00	9.5%		
	⑦		31.31	0.20	9.0%		
	⑧		19.06	0.09	9.1%		
	⑨		42.29	0.25	9.5%		
	⑩		9.77	0.05	9.3%		
	⑪		20.45	0.16	9.2%		
	⑫		38.76	0.21	9.3%		
	⑬		31.57	0.18	9.3%		
	⑭		34.29	0.16	9.3%		
	⑮		0.00	0.00	8.9%		
	⑯		3.02	0.02	8.6%		
	⑰		62.80	0.35	9.4%		
	⑱		16.64	0.17	8.5%		
	平均					9.3%	
	40-53		③	0.00	0.00	9.5%	
			④	16.82	0.12	10.1%	
		⑤	7.24	0.07	10.0%		
		⑥	37.86	0.23	9.7%		
		⑦	35.20	0.52	9.5%		
		⑧	0.00	0.00	9.5%		
		⑨	35.29	0.15	9.9%		
		⑩	10.41	0.07	9.4%		
		⑪	0.00	0.00	9.5%		
		⑫	62.90	0.42	9.8%		
		⑬	7.44	0.11	9.4%		
		⑭	28.46	0.18	9.6%		
		⑮	31.75	0.15	9.7%		
		⑯	17.89	0.16	8.9%		
		⑰	33.21	0.32	9.4%		
		⑱	83.62	0.74	9.6%		
		平均					9.6%



a) 質量減少率と付着塩分量



b) 質量減少率と鉄筋周囲の塩分濃度

図 6-27 質量減少率と付着塩分量・濃度

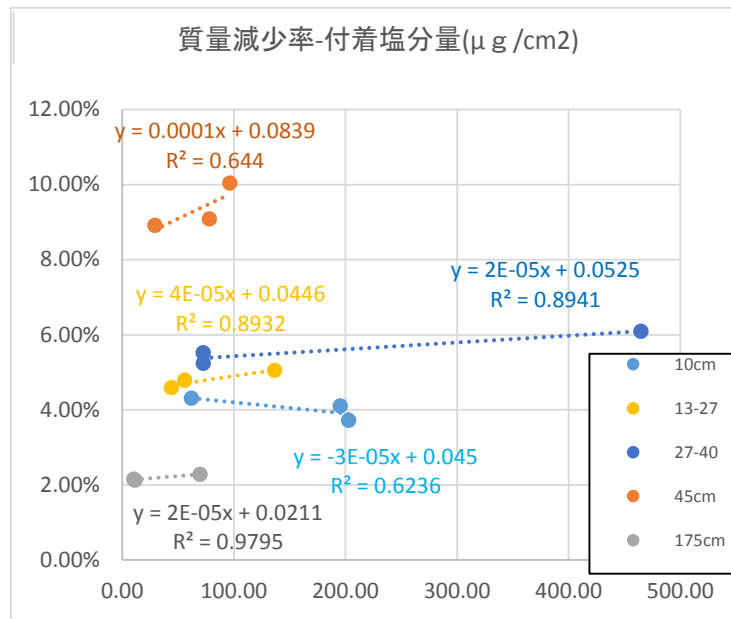
No6 T1A3 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ80%・無載荷・感潮部

表より、質量減少率は50cm位置で平均8.0%と大きな値となった。供試体表面にひび割れもないため原因は不明である。

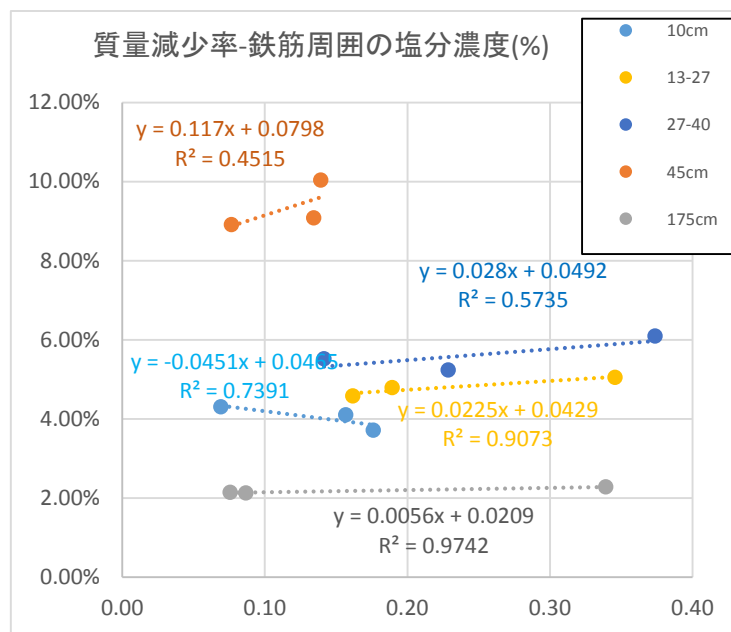
質量減少率と付着塩分量・濃度との関係を図 6-28 に示す。塩分量・濃度が高いからといって質量減少率が大きくなることもなく、ここでも関係性が薄いことが示された。

表 6-26

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率
T1A3	10cm	⑤	202.82	0.18	3.7%
		⑥	61.87	0.07	4.3%
		⑦	195.41	0.16	4.1%
	平均				4.0%
	20cm	⑤	44.14	0.16	3.2%
		⑥	55.76	0.19	3.4%
		⑦	136.61	0.35	3.7%
	平均				3.5%
	30cm	⑤	72.44	0.14	4.2%
		⑥	72.55	0.23	3.9%
		⑦	464.74	0.37	4.7%
	平均				4.3%
	45cm	⑤	29.10	0.08	7.6%
		⑥	78.11	0.13	7.7%
		⑦	96.37	0.14	8.7%
	平均				8.0%
	105cm	⑤	10.70	0.03	3.3%
		⑥	71.77	0.18	4.0%
		⑦	29.61	0.08	4.4%
	平均				3.9%
	175cm	⑤	10.16	0.08	2.1%
		⑥	69.62	0.34	2.3%
		⑦	11.43	0.09	2.1%
	平均				2.2%



a) 質量減少率と付着塩分量



b) 質量減少率と鉄筋周囲の塩分濃度

図 6-28 質量減少率と付着塩分量・濃度

No7 U1A2 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ60%・無載荷・感潮部(亜鉛メッキ)

表より質量減少率は1.5%付近で概ね均一である.

付着塩分量・濃度も概ね均質な値を示しており,傾向は確認できない.

表 6-27

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率
U1A2	175cm	⑤	242.05	0.11	1.1%
		⑥	292.80	0.17	1.5%
		⑦	104.64	0.10	1.8%
		⑧	300.23	0.24	1.3%
	平均				1.4%

No8 V1A2 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ60%・無載荷・感潮部

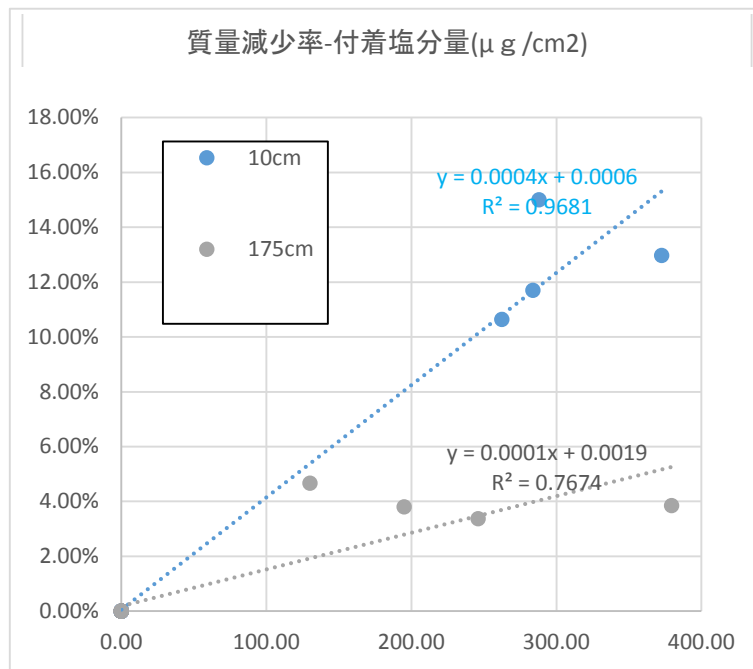
電食試験後の計測である。そのため、他の供試体と区別して考える必要がある。

表 6-28 より、質量減少率は端部が大きな値を示した。6.4.1 腐食面積評価でも述べたが、原因が実験の手順によるもの(最初の 82 時間は端部のみ通電)なのか端部の絶縁処理が甘く、より腐食しやすい状況となったのかは不明である。

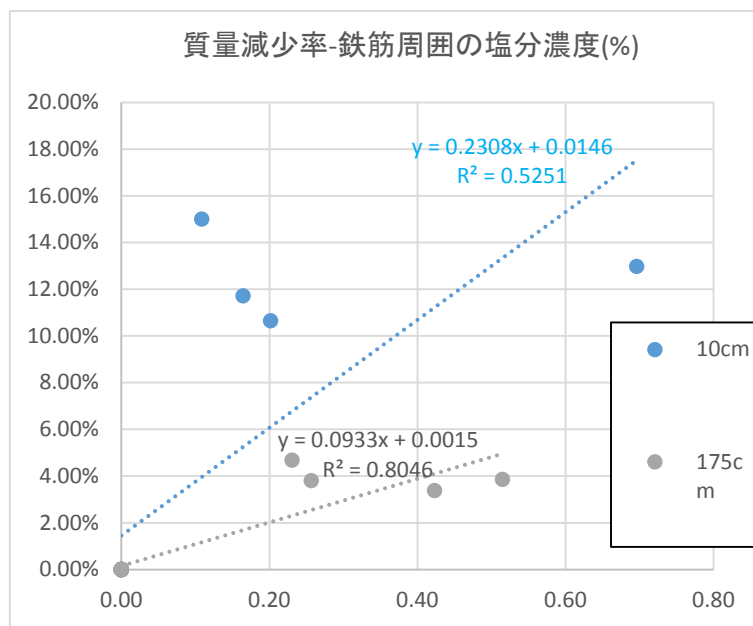
質量減少率と付着塩分量・濃度との関係を図 6-29 に示す。a)10cm においては塩分量が増えると質量減少率も上昇していそうにも見えるが、試料点数が少なく、傾向が確認できるとは言いがたい。

表 6-28

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率
V1A2 (電食試験後)	10 c m	⑤	372.62	0.70	13.0%
		⑥	283.68	0.16	11.7%
		⑦	287.95	0.11	15.0%
		⑧	262.24	0.20	10.6%
	平均				12.6%
	75 c m	⑤	129.91	0.23	4.7%
		⑥	194.86	0.26	3.8%
		⑦	379.41	0.51	3.9%
		⑧	245.91	0.42	3.4%
	平均				3.9%



a) 質量減少率と付着塩分量



b) 質量減少率と鉄筋周囲の塩分濃度

図 6-29 質量減少率と付着塩分量・濃度

No9 W1A2 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ40%・無載荷・感潮部

表より、質量減少率は概ね1%付近であり、鋼材位置での特別な傾向も掴めない。

これだけ質量減少率が密集していると付着塩分量・濃度との関係性も確認が出来ない。

表 6-29

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量(μg/cm ²)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率	
W1A2	20cm	⑤	166.40	0.34	1.3%	
		⑥	46.33	0.13	1.0%	
		⑦	54.62	0.23	0.5%	
		⑧	199.40	0.33	1.1%	
		⑨	247.04	0.30	1.0%	
		⑩	265.11	0.28	1.1%	
	平均					1.0%
	30cm	⑤	26.23	0.10	0.8%	
		⑥	3.94	0.02	0.8%	
		⑦	68.02	0.17	0.4%	
		⑧	82.78	0.22	1.0%	
		⑨	229.99	0.32	0.6%	
		⑩	222.32	0.30	1.1%	
	平均					0.8%
	50cm	⑤	7.04	0.03	1.7%	
		⑥	7.58	0.03	1.5%	
		⑦	131.80	0.18	1.3%	
		⑧	88.03	0.19	1.6%	
		⑨	235.84	0.40	1.8%	
		⑩	121.70	0.19	1.8%	
	平均					1.6%
	80cm	⑤	8.06	0.03	1.7%	
		⑥	120.78	0.11	1.7%	
		⑦	292.41	0.23	1.6%	
		⑧	0.00	0.00	1.7%	
		⑨	106.35	0.22	1.6%	
		⑩	5.80	0.03	1.6%	
	平均					1.6%

No10 01A4 ポステン・φ17mmPC 鋼棒・σ85%・無載荷・感潮部

表より, 腐食量は少なく, 健全な状態であるといえる.

付着塩分量・濃度との関係性も確認が出来ない.

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率
01A4	20cm	⑤	191.85	0.16	0.0%
		⑥	511.47	0.46	-0.2%
	平均				-0.1%
	125cm	⑤	0.00	0.00	0.4%
		⑥	0.00	0.00	0.3%
	平均				0.3%

No13 01B3 ポステン・ ϕ 17mmPC 鋼棒・ σ 85%・無載荷・海水部

表より, 腐食量は少なく, 健全な状態であるといえる.

付着塩分量・濃度との関係性も確認が出来ない.

供試体記号	位置	鉄筋No	付着塩分量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	鉄筋周囲の塩分濃度(%)	質量減少率
01B3	20cm	⑤	176.67	0.17	0.8%
		⑥	87.64	0.00	0.9%
	平均				0.8%
	30cm	⑤	72.14	0.03	-0.1%
		⑥	64.93	0.02	-0.2%
	平均				-0.2%
	40cm	⑤	53.79	0.13	-0.3%
		⑥	64.77	0.04	-0.3%
	平均				-0.3%
	125cm	⑤	86.23	0.05	0.5%
		⑥	109.34	0.05	0.5%
	平均				0.5%

6.4.2 まとめ

次にこれらの結果から顕著な点を以下にあげる.

- ・感潮部よりも海中部の方が質量減少率は大きくなった. またどちらも端部の方が, 質量減少率が大きくなった.
- ・ひび割れ発生荷重が作用していた供試体のほうが, 設計荷重が作用していたものに比べて大きな質量減少量を示している.
- ・2本より線の方が7本より線よりも大きな質量減少率を示した. これは表面積/体積が2本より線の方が大きいため(腐食反応場となる界面の比率が高い)と考えられる.
- ・初期導入緊張力が大きいほうが, 質量減少率が大きいことが確認できた.
- ・ポストテンション方式のPC鋼棒は腐食のない, 健全な状態であると確認できた.
- ・付着塩分量または濃度と質量減少率の関係性は確認出来なかった.

6.4.3. 腐食減量と各種非破壊試験結果

非破壊試験で内部鋼材の腐食状況が推察できれば今後のコンクリート構造物の維持管理において非常に有益となる。本節では 6.2.4 非破壊試験結果と 6.4.2 実際の腐食量との関係性を探る。

非破壊試験結果と質量減少率を同表内に並べて比べる。どの非破壊試験においても実際の腐食減量と整合性がとれるものは見つからない。やはり非破壊試験では大まかな腐食状況(腐食の有無)を判断するには有益かと思われるが、長年蓄積されてきた腐食量を表すには向かないようだ。

No1. R1A3 プレテン・ $\phi 2.9\text{mm}^2$ 本より線・無載荷・感潮部

表 6-30

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度(μA/cm ²)	不動態グレード	腐食減量
R1A3	10cm	39.6	3	-516	0.00	2	7.9%
			6	-349	0.24		8.7%
			7	-319	1.14		6.1%
			平均	-395	0.46	2	7.6%
	50cm	39.6	3	-385	0.00	3	3.3%
			6	-327	0.19		0.1%
			7	-388	0.48		5.6%
			平均	-366.7	0.22	3	3.0%
		72.1	11	-351	0.67		5.2%
		全体平均		-363	0.33	3	3.6%
	125cm	39.6	3	-467	0.00	2	4.4%
			6	-312	0.76	2	3.1%
			7	-333	0.67	2	3.2%
			平均	-371	0.48	2.0	3.6%
		72.1	8		0.00	2	3.4%
			11	-310	0.09	3	4.6%
			平均	-310	0.05	2.5	4.0%
		全体平均		-356	0.30	2.2	3.7%
	全体平均			-369	0.35	2.3	4.6%

No2. R1B2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・海中部

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	不動態グレイド	腐食減量
R1B2	10cm	39.6	3	-368	0.39	2	17.2%
			6	-379	0.55		11.4%
			7	-371	0.53		10.4%
			平均	-373	0.49	2.0	13.0%
		72.1	8	-342	0.06		11.0%
			11	-352	0.85		11.7%
			平均	-347	0.46		11.3%
		全体平均		-362	0.48	2.0	12.3%
	50cm	39.6	3	-435	0.59	2	
			6	-436	0.14		
			7	-445	0.78		
			平均	-439	0.50	2.0	
		72.1	8	-382	1.26		
			11	-402	0.07		
			平均	-392	0.67		
		全体平均		-420	0.57	2.0	
	125cm	39.6	3	-400	0.13	3	11.4%
			6	-399	0.26	2	10.8%
			7	-400	1.06	1	10.1%
			平均	-400	0.49	2.0	10.8%
		72.1	8	-341	0.28		10.4%
			11	-368	0.52		10.3%
			平均	-355	0.40		10.4%
		全体平均		-382	0.45	2.0	10.6%
	全体平均			-388	0.50	2.0	11.5%

No3. R1C2 プレテン・φ2.9mm2 本より線・無載荷・陸上部

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度(μA/cm ²)	不動態グレイド	腐食減量
R1C2	10cm	39.6	3	-81	0.40	4	
			7	-91	0.09		
			平均	-86	0.24	4.0	
	125cm	39.6	3	-41	0.87	4	-0.6%
			7	-33	0.08	2	-0.7%
			平均	-37	0.47	3.0	-0.6%
	全体平均			-62	0.36	3.3	-0.6%

No4. R2A4 プレテン・φ2.9mm2 本より線・ひび割れ発生荷重・感潮部

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位(mV)	腐食電流密度(μA/cm ²)	不動態グレイド	腐食減量
R2A4	10cm	39.6	3	-418	0.11	2	
			7	-360	173.82		
			平均	-389	86.97	2.0	
	125cm	39.6	3	-449	5.24	2	
			7	-396	0.13	0	14.9%
			平均	-423	2.68	1.0	14.9%
	全体平均			-406	44.83	1.3	14.9%

No6 T1A3 プレテン・φ12.4mm7 本より線・σ80%・無載荷・感潮部

供試体記号	左端からの距離	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド	腐食減量
T1A3	10cm	5	-274	0.40	3	3.7%
		6	-318	0.30		4.3%
		7	-394	0.17	3	4.1%
		平均	-329	0.29	3.0	4.0%
	80cm	5	-300	0.18		
		6	-318	0.14		
		7	-427	0.02		
		平均	-348	0.12		
	175cm	5	-351	0.03	4	2.1%
		6	-375	0.14		2.3%
		7	-455	0.01	4	2.1%
		平均	-394	0.06	4.0	2.2%
	全体平均		-357	0.16	3.5	3.1%

No7 U1A2 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ60%・無載荷・感潮部(亜鉛メッキ)

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレイド	腐食減量
U1A 2	10cm	50	6	-523	0.28	3	
		68.8	5	-650	0.76		
			7	-411	0.52	3	
			平均	-531	0.64	3.0	
		全体平均		-528	0.52	3.0	
	80cm	50	6	-420	0.00		
		68.8	5	-596	0.15		
			7	-450	0.03		
			平均	-523	0.09	#DIV/0!	
		全体平均		-489	0.06	#DIV/0!	
	175cm	50	6	-374	0.01	4	1.5%
		68.8	5	-589	0.08		1.1%
			7	-436	0.02	4	1.8%
			平均	-513	0.05	4.0	0
		全体平均		-466	0.03	4.0	1.4%
	全体平均			-494	0.21	3.5	1.4%

No8 V1A2 プレテン・φ12.4mm7本より線・σ60%・無載荷・感潮部(電食試験後)

供試体記号	左端からの距離	かぶり(mm)	No	自然電位	腐食電流密度	不動態グレード	腐食減量
V1A 2 (電食後)	10cm	50	6	-468	0.60		11.7%
		68.8	5	-454	0.34		13.0%
			7	-528	0.94		15.0%
			平均	-491	0.64		13.2%
		全体平均		-483	0.63		13.2%
	175cm	50	6	-413	0.36		3.8%
		68.8	5	-415	0.21		4.7%
			7	-504	0.65		3.9%
			平均	-460	0.43		4.3%
		全体平均		-444	0.41		4.1%
	全体平均			-397	0.52		8.7%

6.5. 6 章のまとめ

6.3 コンクリート中の塩分浸透状況

- ・コンクリート表層から内部まで塩化物イオンは海水に近い濃度で均等である.
- ・7 本より線の供試体では端部と中央部で塩化物イオンの濃度差は無かった.
- ・ポストテンション方式の供試体では端部と中央部で濃度差が確認された.他の供試体を用いて,再現性を確認する必要がある.
- ・ポストテンションの端部はスース管内部にも塩化物イオンが浸透していることが確認できた.原因として定着具の腐食による端部の劣化(ひび)が一因として考えられるため,定着具の腐食には注意が必要である(詳しい腐食状況については 6.4 参照).

6.4.1 腐食状況目視評価

- ・陸上部曝露は感潮部と海中部に比べ, 全く錆が確認されなかった.
- ・2 本より線では底部の腐食面積が他の面に比べて大きくなることがわかった.
- ・7 本より線では端部の腐食面積が大きくなった.

6.4.2 腐食減量と鉄筋周囲の塩化物イオン

- ・感潮部よりも海中部の方が質量減少率は大きくなった. またどちらも端部の方が質量減少率が大きくなった.
- ・ひび割れ発生荷重が作用していた供試体のほうが, 設計荷重が作用していたものに比べて大きな質量減少量を示して.
- ・2 本より線の方が 7 本より線よりも大きな質量減少率を示した. これは表面積/体積が 2 本より線の方が大きいため(腐食反応場となる界面の比率が高い)と考えられる.
- ・初期導入緊張力が大きいほうが質量減少率が大きいことが確認できた.
- ・ポストテンション方式の PC 鋼棒は腐食のない, 健全な状態であると確認できた.
- ・付着塩分量または濃度と質量減少率の関係性は確認出来なかった.

6.4.3 腐食減量と各種非破壊試験結果

- ・実際の腐食減量と整合性のとれる非破壊試験はなかった. 非破壊試験は長年蓄積された腐食量とは整合性を取ることは困難.

参考文献

1. 腐食防食協会編：腐食・防食ハンドブック，丸善，2000
2. 大即信明，檉野紀元，片脇清元，小林明夫，宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(I)，技報堂出版，1986
3. (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技'07 [基礎編]，2009
4. 宮里心一，大即信明，木村勇人，水流徹：モルタルの欠陥部に生じる塩害または中性化による鉄筋腐食の形態と速度，土木学会論文集，No.690/V.53, p83-93, 2001
5. 大即信明，原茂雅光，胡信弘：モルタル中铁筋の腐食に及ぼす曝露条件および塩素イオンの影響，セメント技術年報，No.40, p103-106, 1986
6. 大即信明，横井聡之，下沢治：モルタル中铁筋の不動態に及ぼす塩素の影響，土木学会論文集，Vol.360, p111-118, 1985
7. H.H.ユーリック著，岡本剛監修：腐食反応とその制御 - 原理と応用 - ，産業図書，1968
8. CEB Working Party, commission5 : Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion, ISBN2-88394-040-01, 2004
9. 板垣昌行：電気化学インピーダンス法 原理・測定・解析，丸善，2008
10. 大即信明：海洋環境におけるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究，東京工業大学博士論文，(1987)
11. 山路徹，水間誠治，平崎敏史，浜田秀則：海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27, No. 1, 2005
12. 大即信明，コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究，運輸省港湾技術研究所 港湾技術研究所報告 第24巻 第三号 抜刷，1985.9

7. 鋼材腐食によるプレストレストコンクリートの性能評価

既往の研究で示したようにコンクリートの劣化過程は4つに分類される(図7-1参照).第3章から6章で現在の,海洋環境に40年間曝露された後の性能を評価してきた.本章では各供試体がどの劣化ステージにあるのか評価し,今後その性能がさらなる鋼材腐食によってどのように変遷していくのか評価した.

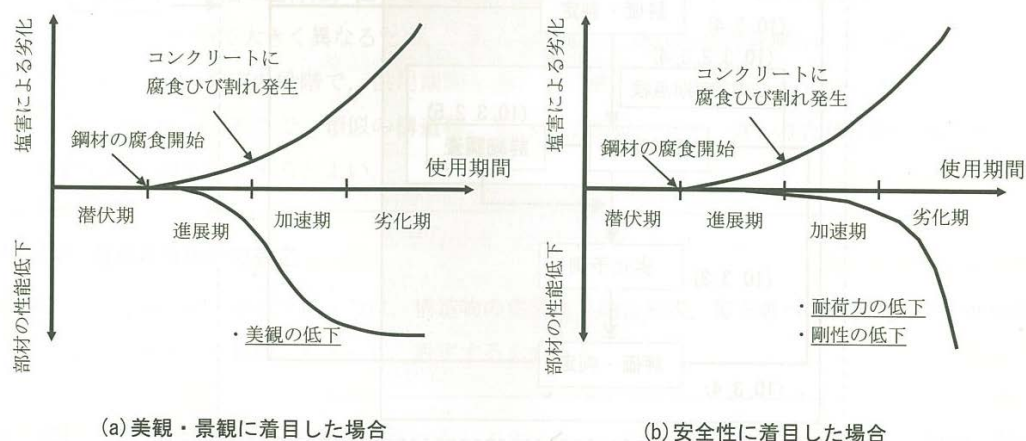


図 7-1 コンクリートの劣化機構¹⁾

7.1. コンクリート腐食ひび割れ発生までの耐用年数推定

7.1 では各供試体が劣化過程のどのステージに属するのか,具体的には腐食ひび割れ発生 の時期を基点としてあと何年腐食ひび割れが発生しないか,あるいはその閾値を超えている 場合はひび割れが実際に現れているのか3章の目視調査の結果をもとに評価する.

7.1.1. 腐食ひび割れ発生推定方法

本研究はコンクリート表面に亀裂が生じるのに必要な腐食生成物量を以下に示す横関ら により定式化された式から決定した.

横関らの研究²⁾では,コンクリートの引張軟化,クリープなどを考慮した非線形FEM解析 を行うとともに,解析結果を既往の実験結果とも比較検証して,腐食ひび割れが発生時の 鉄筋腐食生成物量を式7-1のように定式化した.

$$W_{cr} = -1.841\phi(\phi-8.661)+145.1\alpha^{-1.194}+3809A^{-0.8351}+10.60X-72.30 \quad \text{式 7-1}$$

ここで, W_{cr} は腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食生成物量(mg/cm^2), ϕ はクリープ係数, α は 体積膨張率 (通常は 3.2), A は腐食角度 (通常は 360°), X は形状関数(かぶり/鉄筋径)であ る.

さらに,本研究では劣化過程を図7-2のようにわけた.腐食開始時期(Incubation period の 終わり)は土木学会の基準に基づき,推定した.

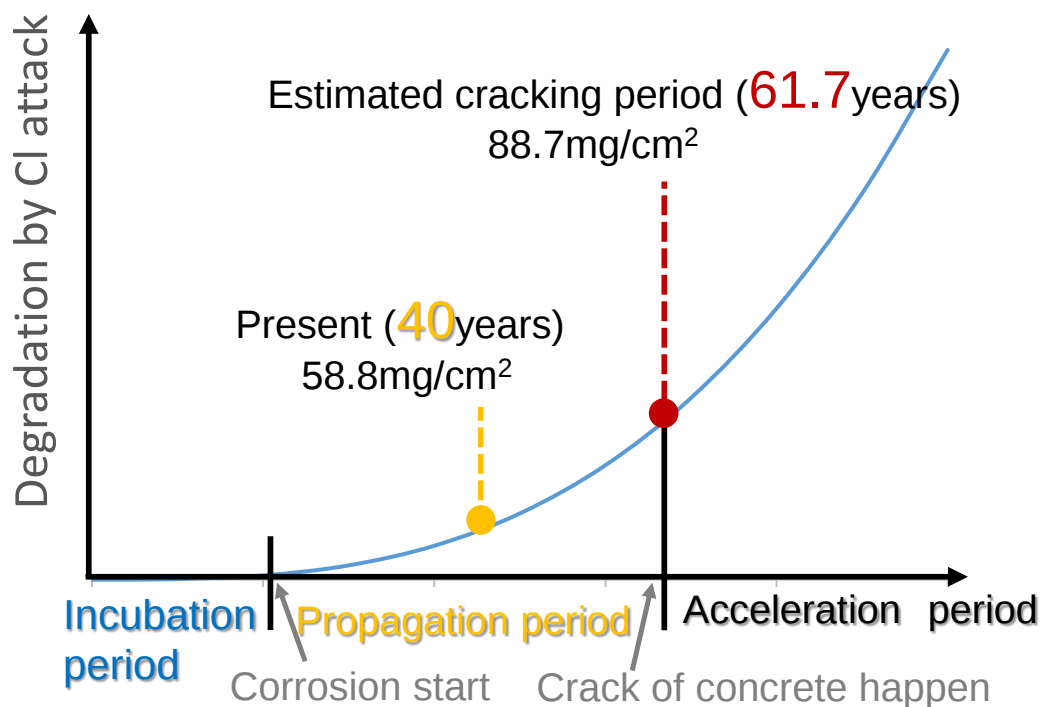


図 7-2 塩害による劣化過程(推定例：R1A3)

7.1.2. 推定結果

まず各供試体の腐食ひび割れ発生時の腐食生成物量を算出する.式 7-1 に用いる変数と腐食ひび割れ発生時の腐食生成物量を表 7-1 に示す.なお,クリープ係数はコア応力解放に用いた値と同じ 2.0 を採用した.

表 7-1 腐食ひび割れ発生時の腐食生成物量とその変数

鋼材種	供試体型	腐食ひび割れ発生腐食生成物量(mg/cm ²)	クリープ係数	鉄筋径(mm)	かぶり(mm)
2本より線	R型	88.7	2	5.8	39.6
7本より線	T1A3	62.3		12.4	53.8
	その他の型	53.8		12.4	43.8

次に現在の腐食量と腐食速度を表 7-2 に供試体毎に示す.

第 6 章の結果より,現在の腐食量は梁内で最も腐食の進行しているものを採用した.また,腐食速度も梁内で最も大きい値を採用した.

以下,計算結果を示す.なお式 5-4 を用いて腐食速度を換算した.

* 100 μ A/cm²の腐

$$\frac{100 \times 10^{-6} (A/cm^2)}{96500 (C)} \cdot \frac{55.85 (g/mol)}{7.86 (g/cm^3) \cdot 2} \cdot 3.1536 \times 10^7 = 1.16 (mm/year) \quad \text{式 5-4}$$

食速度の場合,

表 7-2 ひび割れ発生までの年数(2 本より線)

Specimens		Corrosion weight(mg/cm ²)	Corrosion speed (mg/year)	Critical amount of rust to induce cracking(mg/cm ²)	Period of craccking(year)	Incubation period	Remark
No	Mark					Propagation period	
1	R1A3	58.8	1.38	88.7	61.7	16.9 44.8	
2	R1B2	123.3	1.52	88.7	17.3	16.9 0.4	cracked
3	R1C2	17.1	1.05	88.7	108.1	23.2 84.9	
4	R2A4	156.4	0.77	88.7	-	- -	cracked
5	R4A1	59.9	0.07	88.7	Over 110	- -	

表 7-3 ひび割れ発生までの年数(主筋)

Specimens		Corrosion weight(mg/cm ²)	Corrosion speed (mg/year)	Critical amount of rust to induce cracking(mg/cm ²)	Period of craccking(year)	Incubation period	Remark
No	Mark					Propagation period	
6	T1A3	54.2	0.12	55.3	48.8	17.8	
9	W1A2					31.0	
10	O1A4					17.8	
13	O1B3	95.4	4.56		31.2	13.4	cracked

表内赤字はマイナスの値を示している.以上の結果から R1A3 はひび割れ発生まであと 21.7 年,現在 40 年経過しているので曝露開始から 61 年でひび割れが入る.同様に R1C2 では 108.1 年, 主筋のかぶりが小さい供試体では T1A3, W1A2, O1A4 では 48.8 年でひび割れが入る計算となった.R4A1 に関しては異様に腐食速度が遅いため,電気化学的測定時に鋼材に繋いだ導線の実験系において抵抗値が大きくなってしまいう事由があったのではないかと考えられる.

また,すでにひび割れが入っていると考えられる供試体に関して 3 章のコンクリート用面の目視観察結果と照らしてみると,他の供試体が健全な状態が確認されているのに対して,R1B2 と R2A4, O1B3 に関しては供試体底部や側面でひび割れが確認できたため,比較的良好な推定結果でないかと考えられる(図 7-4 参照).

推定結果の Incubation period と Propagation period を図 7-3 に示す.結果から陸上部曝露の R1C2 が他の供試体に比べて,耐久的であると言える.また曝露環境の影響に目を向けると感満部曝露の R1A3 が海中曝露の R1B2 よりも耐久的であるという結果となった.どうように感満部曝露の T1A3, W1A2, O1A4 は海中部曝露の O1B3 よりも耐久的であった.通常,感潮部の方が海中部に比べて供試体への酸素の供給量が多いため,腐食が進行しやすい環境であるが,その傾向は掴めなかった.原因としては曝露環境が海中部といっても海水面から

非常に近い位置にあり,酸素の供給量が感満と海中で差が無かった可能性がある.

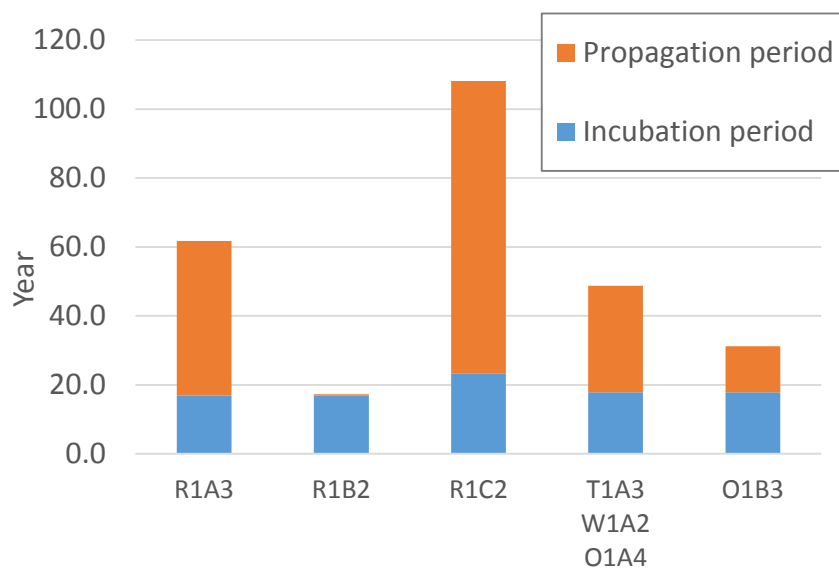
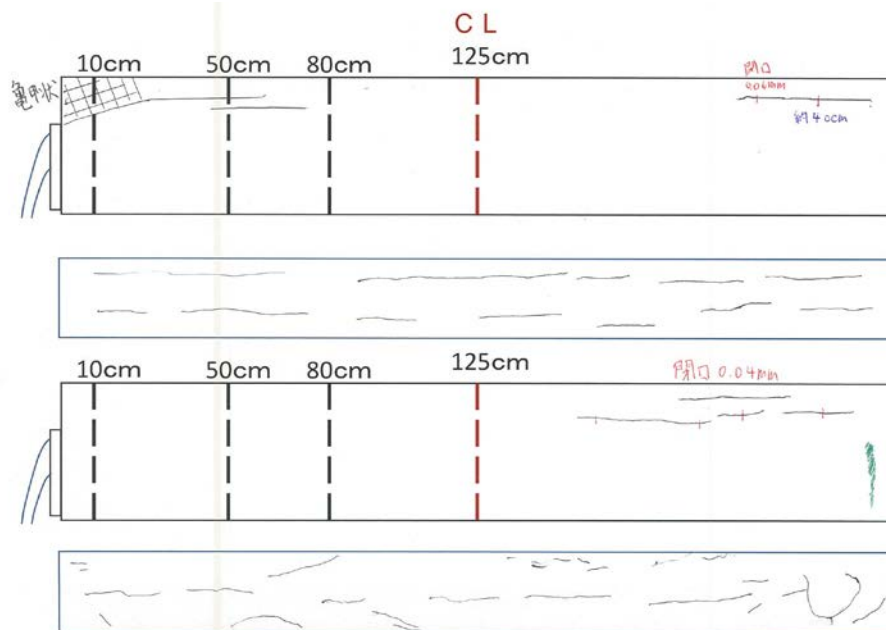
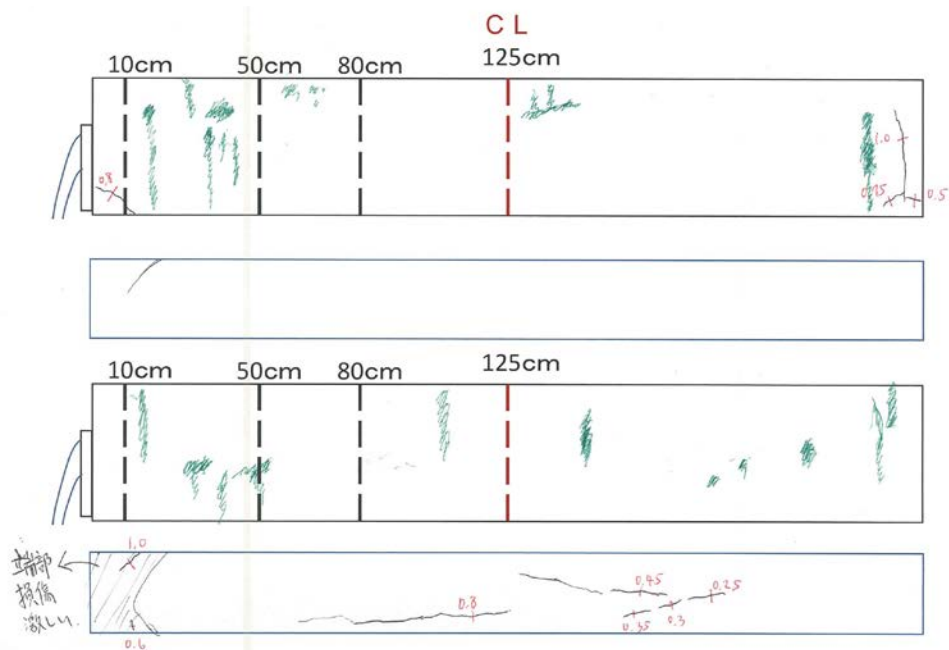


図 7-3 Incubation period , Propagation period



a)R1B2



b)R2A4

図 7-4 目視調査結果

7.2. 塩害腐食によるプレテンション方式 PC の有効プレストレス伝達長変化

プレストレストコンクリートにおいて供用期間中のコンクリートのクリープ・乾燥収縮, 鋼材のリラクセーションによるプレストレス力の損失は日本土木学会や海外の機関でも考慮されている事項である. しかし, 海洋環境において, 鋼材腐食によるプレストレストコンクリートの性能低下は未だ明らかになっていない. そこで本節では 5.3.2.1 プレテンション方式の曝露環境の違いの項で可能性が示された塩害鋼材腐食による有効プレストレスの伝達長の伸び(図 7-6)についてさらに実験を加えて考察していく.

7.2.1. 塩害腐食が有効応力分布に与える影響の可能性

図 7-6 から陸上部曝露の有効プレストレス力分布(黄色)が感潮部(赤色)と海中部(青色)の結果に比べて伝達長が伸びずにいるように見て取れる. つまり陸上部は中央部から左右にそれぞれ 600mm ほど有効応力が同程度保持されているのに, 感潮部と海中部は主に支間中央部のみ設計値並みの有効プレストレスト力が残存している. 6 章の内部鋼材の腐食状況(目視によるさびの観察)から陸上部のものは錆がほとんど確認できない状態であるのに対して, 感潮部と海中部は端部にいくほど腐食が激しくなる状況が観察された(質量減少の観点からは初期のプレストレス導入時の鋼材の伸びを考慮しなくては正確な値が出ないと考えられるため有効プレストレス分布との影響について明言は避ける).

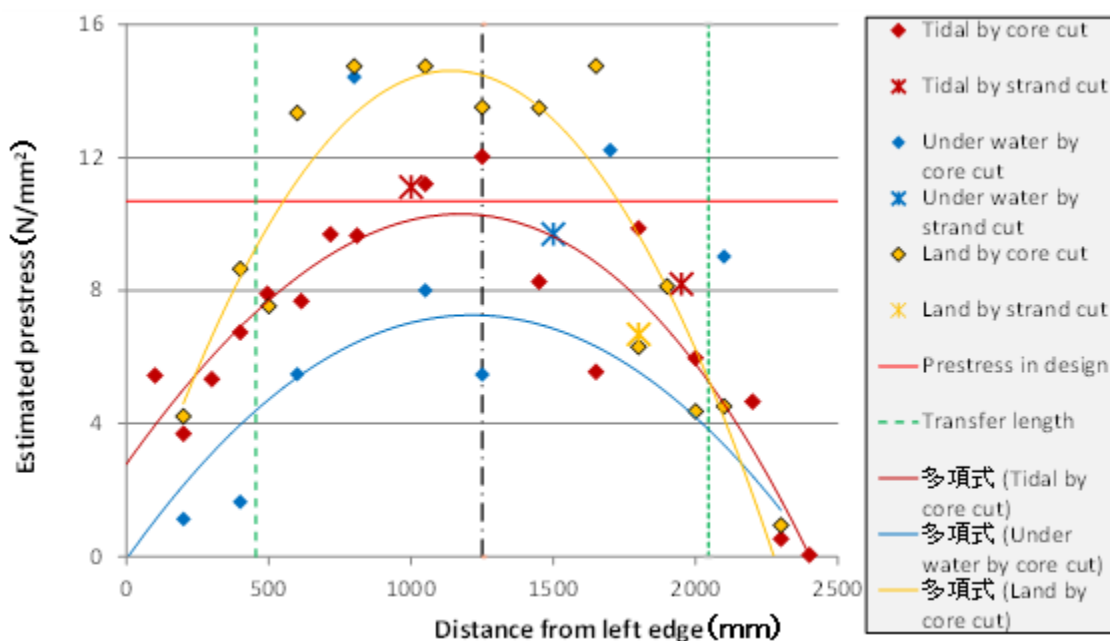


図 7-5 プレテンション方式, 曝露環境の違い

7.2.2. 電食試験

そこで本節では一度有効プレストレスト力分布を把握した供試体において電食試験により電流を流して, 強制的に腐食を進行させた後に, もう一度コア応力解放法により有効プレ

ストレス力の分布を求め,腐食によるプレストレスト力に与える影響を把握することを目的とした。

7.2.2.1. 実験概要

実験に用いた供試体は5章で明確に有効プレストレスト力の分布が確認できた供試体を用いた。以下図 7-7 にその分布を示す。7 本より線の供試体を選定した理由はスターラップ等他の鋼材と接触しておらず,電流を流した際にロス無く PC 鋼材を腐食させられるのではないかと考えたためであった。しかし,電食試験後に鉄筋をはつりだして PC 鋼材との導通を確認したところ,PC 鋼材に比べると抵抗値が大きく電流は流れにくいと思われるが,導通していた。よって,電食効率が落ち,試験で想定していた腐食量は得られなかった。図 7-8 に配筋図と実験系を示す。供試体は端部をエポキシ樹脂でコーティングし絶縁処理を施した。PC 鋼材が浸かる位置まで 3%NaCl 水溶液で満たした,鋼材側を直流電源の+側に,対極にはステンレス板を用いて直流電源の-側に接続した。最初の 82 時間は 0.08A の電流管理をして,有効プレストレスト力を測定。その後再度電食試験を行い,0.1A の電流管理で 19 日間通電し続けた後に,コア応力解放法で再度有効応力を計測した。

No8 V1A2 プレテン・ $\phi 12.4\text{mm}$ 7 本より線・ $\sigma 60\%$ ・無載荷・感潮部

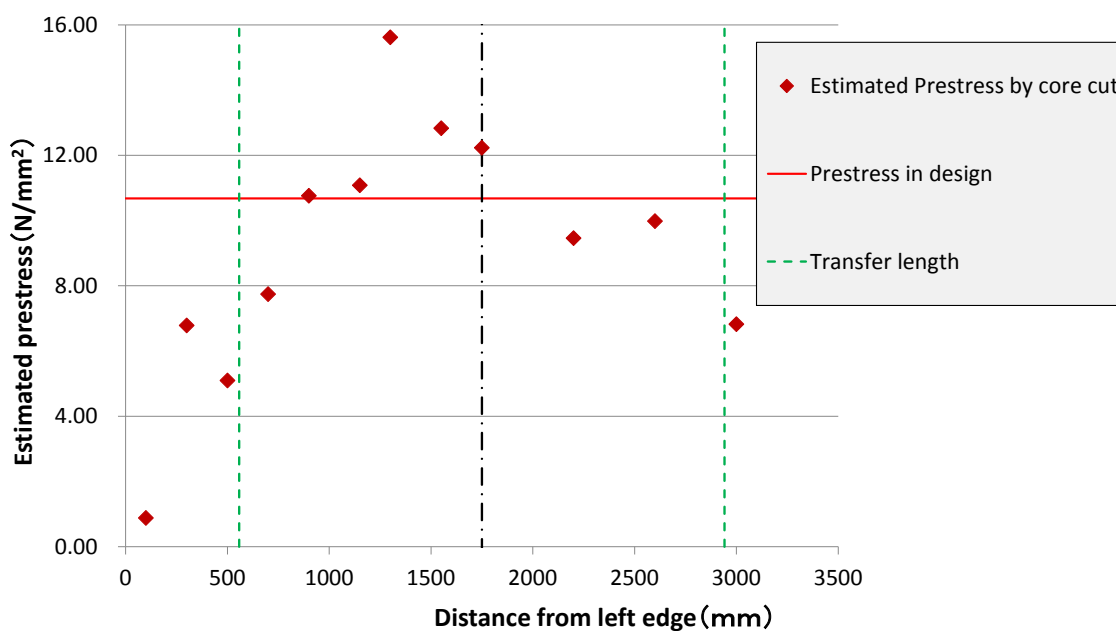


図 7-6 電食前, 有効プレストレス分布

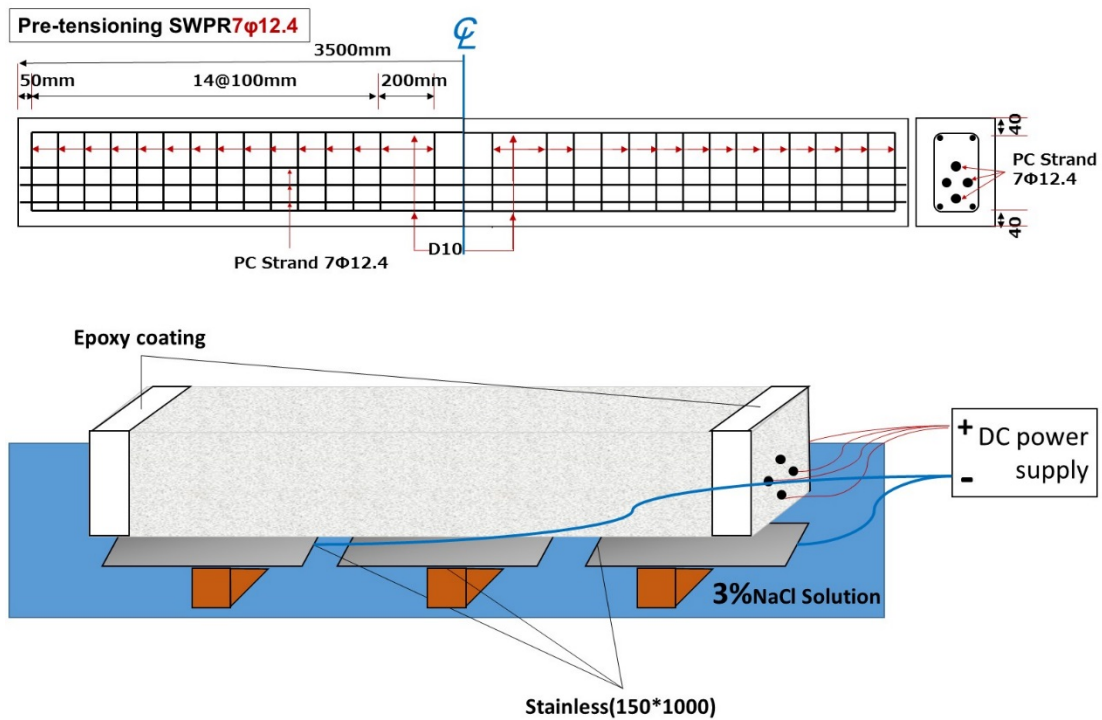


図 7-7 配筋図と実験系

7.2.2.2. 実験結果

図 7-9 に 3 度の有効応力測定結果を重ねて表示する. 青が電食開始前の分布, 黄色が 82 時間後に測定した結果, 赤がおよそ 23 日間通電し続けた結果である.

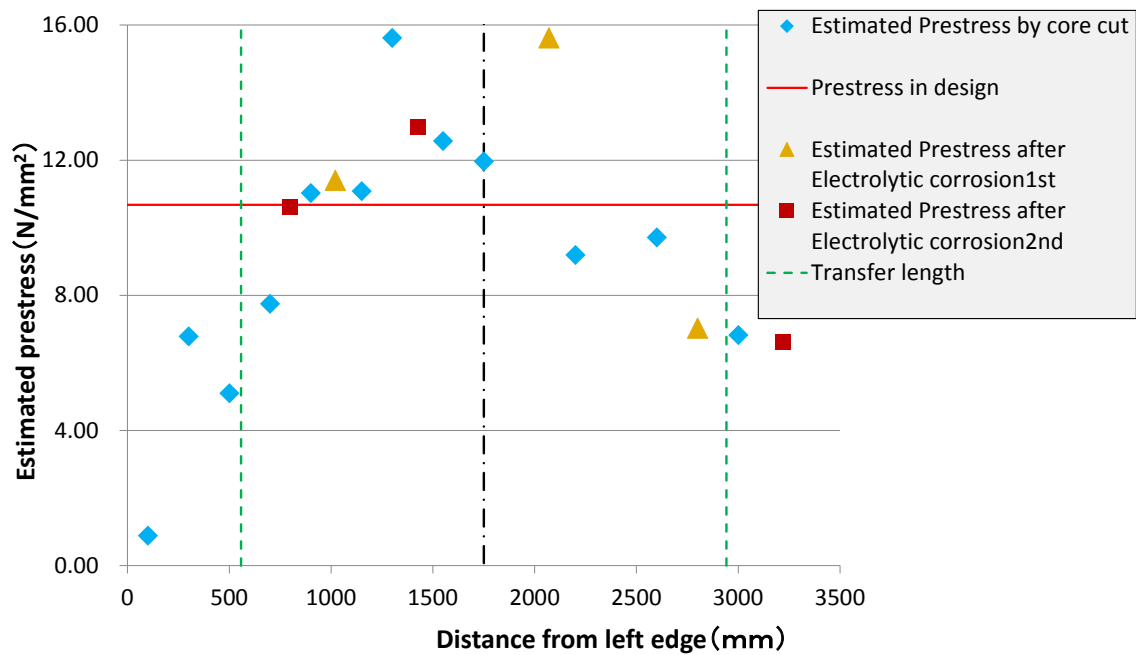


図 7-8 電食前後の有効プレストレス力の分布

試験結果から期待していた有効プレストレス力の伝達長が抜けるような状況は確認出来なかった。これは初めに有効プレストレスを計測した時点において既に伝達長が延びており、その段階からさらに伝達長が延びるには至らなかったと考える。つまり、初期に効いている伝達長は、ある腐食量で鋼材がすべりその後腐食が進行しても影響を与えるほどにはならないことを示している。現に電食試験後にはつり出した鋼材では端部で 15%に至っている。この腐食量は電食前の試験体の環境で計測された腐食速度から換算すると約 331 年分に相当する。よって今後腐食量と有効プレストレス力の分布の関係性を把握するには腐食後、比較的初期の段階で変化が起こると想定される。

7.3. 7 章のまとめ

7.1 コンクリート腐食ひび割れ発生までの耐用年数推定

- ・すでにひびが入っている供試体をのぞき、最低でも今後 21 年、曝露開始から数えて 61 年はクラックが入らないという結果になった。
- ・既にひび割れが発生していると想定される供試体においてコンクリート表面の目視結果とおおよそ整合性がとれていると言えた。

7.2 塩害腐食によるプレテンション方式 PC の有効プレストレス伝達長変化

- ・電食試験で強制的に腐食を進行させても(約 331 年分)その分布に傾向は現れなかった。腐食の初期の段階において伝達長に変化が現れるのではないかと推察する。

8. 結論

目的である 40 年間海水曝露されたプレストレストコンクリート供試体の調査に基づき、長期曝露後の耐久性を評価した結果、厳しい腐食環境で長期間曝されていたにも関わらず、最大曲げ引張り耐力において、何れの供試体においても設計値を下回るような低下は確認されず、健全な性能を有していると評価できた。残存有効プレストレス力に関しては腐食がない場合は初期導入時と同程度保持されていた。また、プレテンション方式の供試体において、その伝達長が鋼材腐食により延びる可能性が示された。よって厳しい塩害環境下ではプレテンション方式よりもポストテンション方式の方が構造性能への影響は小さく、耐久的といえた。ただし、ポストテンション方式でも前出のように端部の定着部が腐食することにより、主筋の腐食や部材端部でシース管内部への塩化物イオンの浸透も確認されたため外部からの塩化物イオンの浸透への十分な配慮が必要であるといえる。以上より曝露環境がプレストレストコンクリートの性能低下に影響を与えることが確認出来た。

さらに今後の劣化による経時的な性能低下を予測し、終局曲げ耐力は少なくとも今後 10 年間は健全な状態であると予測された。しかし、塩害への耐久性に関しては、13 体中 6 体で鋼材腐食によるひび割れを観察した。特に海中部曝露の供試体は 3 体中 3 体全てで腐食ひび割れが発生していた。ポストテンション方式の供試体では 4 体中 3 体で腐食ひび割れを確認できた（その 3 体中 2 体は海中部曝露）。これは PC 鋼材の腐食ではなく、主筋の腐食であった。ポストテンション方式においては端部の定着具の腐食によるひび割れによる劣化から主筋の腐食が進行してしまったことに起因すると考えられる。

8.1 7 年海洋環境曝露試験結果との比較

共通事項

- ・素線の接触面は腐食しやすい
- ・定着部(供試体端部)ほど腐食しやすい傾向であった。
- ・PC 鋼棒はシースとグラウトに保護されているため、腐食は確認されなかった。
- ・スターラップ 折り曲げ部、主筋の下部は腐食しやすい傾向が確認された。

相違点

- ・7 年試験結果ではかぶりの影響が腐食面積に影響を与えていたが、40 年曝露後ではかぶりの影響は確認出来なかった。
- ・40 年海洋環境に曝露された供試体の曝露面からの塩分濃度はすでに飽和していた

8.2 各章から得られた結果

3 章

13 体中 6 体で鋼材腐食によると思われるひび割れを観察した。特に海中部曝露の供試体は 3 体中 3 体全てで腐食ひび割れが発生していた。ポストテンション方式の供試体では 4 体中

3 体で腐食ひび割れを確認(その 3 体中 2 体は海中部曝露). ポストテンション方式においては端部の定着具の腐食によるひび割れが目立っていた.

1) 曝露環境による違い

- ・陸上部曝露と感潮部曝露はひび割れもなく健全であった.
- ・感潮部よりも海水部においてよりひび割れも多く, 劣化している状況が伺えた.

2) 緊張方式による違い

- ・ポストテンション方式のほうが端部の腐食が激しかった. 原因としては端部定着具の腐食によるものと考えられる.

3) 鋼材種類による違い

- ・2 本よりと 7 本よりでは明確な傾向は確認出来なかった.

4) 緊張力の差による違い

- ・7 本より線においてその緊張力の違いによる傾向は確認出来なかった.

5) 持続載荷荷重による違い

- ・設計荷重が作用していたものよりもひび割れ荷重が作用していた供試体の方がひび割れも多く劣化していた.

6) その他特徴的な事項

- ・端部の劣化は陸上部を除いて, 全供試体で腐食生成物が確認できた.

4 章

40 年間海洋環境に曝露された供試体 4 体, プレテンション方式の 2 本より線と 7 本より線, ポストテンション方式の感満部と海中部曝露においてどの供試体においても断面設計時の耐力以上の曲げ荷重に対する耐力が残存していることが確認された.

5 章

全体を通して, 特異と思われる計測結果を除いて, 全シリーズ共通して有効応力が設計値以上残存していることが確認できる. またコア応力解放法による実験結果と鋼材切断応力解放法による実験結果が概ね同程度の値を示しており, コア応力解放法による有効プレストレス力の分布は信頼性が高いといえる. 以下, 比較項目それぞれで得られた結果を示す.

1) 曝露環境による違い

- ・陸上部では有効プレストレス力が伝達長が延びずに保持されていることが確認できた. 海水の作用, 鋼材腐食の影響により有効応力の分布に違いが出ることを示された(鋼材腐食により伝達長が延びる可能性).
- ・海中部の方が感潮部よりも分布が安定しないことから劣化が激しい様子が伺える.

2) 緊張方式による違い

・緊張の違いによるプレストレスト力の伝達の違いが明確に現れた。プレテンションでは山形の分布を示し、ポストテンションでは一定の値が部材長にわたり伝達されている。

3) 鋼材種類による違い

・2本よりよりも7本よりの方が伝達長が延びやすい傾向が確認できた。これはコンクリートとの付着面の大きさが影響すると考えられる(同等の緊張力ならば付着面が大きいほうが伝達長が伸びにくい)。

4) 緊張力の差による違い

・7本よりの初期の鋼材緊張力が異なる供試体において、緊張力が大きいほど伝達長が延びやすい傾向となった。これは鋼材1本当たりに加わる力が大きくなり、付着性状の影響を受けやすくなっていると考えられる。また、緊張力が大きくなるほど鋼材量も減り、コンクリートとの付着を受け持つ面積が小さくなったことも一因と考えられる。

5) 持続載荷荷重による違い

・設計荷重作用の供試体が比較的明確な分布を示しているのに対し、ひび割れ荷重作用の供試体は不安定な分布となった。設計荷重の方が部材に対して負荷が大きくより劣化しているのではないかと推察していたが、逆の結果となった。

6 章

6.3 コンクリート中の塩分浸透状況

- ・コンクリート表層から内部まで塩化物イオンは海水に近い濃度で均等である。
- ・7本より線の供試体では端部と中央部で塩化物イオンの濃度差は無かった。
- ・ポストテンション方式の供試体では端部と中央部で濃度差が確認された。他の供試体を用いて、再現性を確認する必要がある。
- ・ポストテンションの端部はスズ管内部にも塩化物イオンが浸透していることが確認できた。原因として定着具の腐食による端部の劣化(ひび)が一因として考えられるため、定着具の腐食には注意が必要である(詳しい腐食状況については6.4参照)。

6.4.1 腐食状況目視評価

- ・陸上部曝露は感潮部と海中部に比べ、全く錆が確認されなかった。
- ・2本より線では底部の腐食面積が他の面に比べて大きくなることがわかった。
- ・7本より線では端部の腐食面積が大きくなった。

6.4.2 腐食減量と鉄筋周囲の塩化物イオン

- ・感潮部よりも海中部の方が質量減少率は大きくなった。またどちらも端部の方が質量減少率が大きくなった。
- ・ひび割れ発生荷重が作用していた供試体のほうが、設計荷重が作用していたものに比べて大きな質量減少量を示してる。

- ・2本より線の方が7本より線よりも大きな質量減少率を示した。これは表面積/体積が2本より線の方が大きい(腐食反応場となる界面の比率が高い)と考えられる。
- ・初期導入緊張力が大きいほうが質量減少率が大きいことが確認できた。
- ・付着塩分量または濃度と質量減少率の関係性は確認出来なかった。

6.4.3 腐食減量と各種非破壊試験結果

- ・実際の腐食減量と整合性のとれる非破壊試験はなかった。非破壊試験は長年蓄積された腐食量とは整合性を取ることは困難である。

7 章

7.1 コンクリート腐食ひび割れ発生までの耐用年数推定

- ・すでにひびが入っている供試体をのぞき、最低でも今後21年、曝露開始から数えて61年はクラックが入らないという結果になった。
- ・既にひび割れが発生していると想定される供試体においてコンクリート表面の目視結果とおおよそ整合性がとれている(3体中2体、1体は7本よりで他と条件が異なる)と言えた。

7.2 塩害腐食によるプレテンション方式PCの有効プレストレス伝達長変化

- ・電食試験で強制的に腐食を進行させても(約331年分)その分布に傾向は現れなかった。腐食の初期の段階において伝達長に変化が現れるのではないかと推察する。