
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—

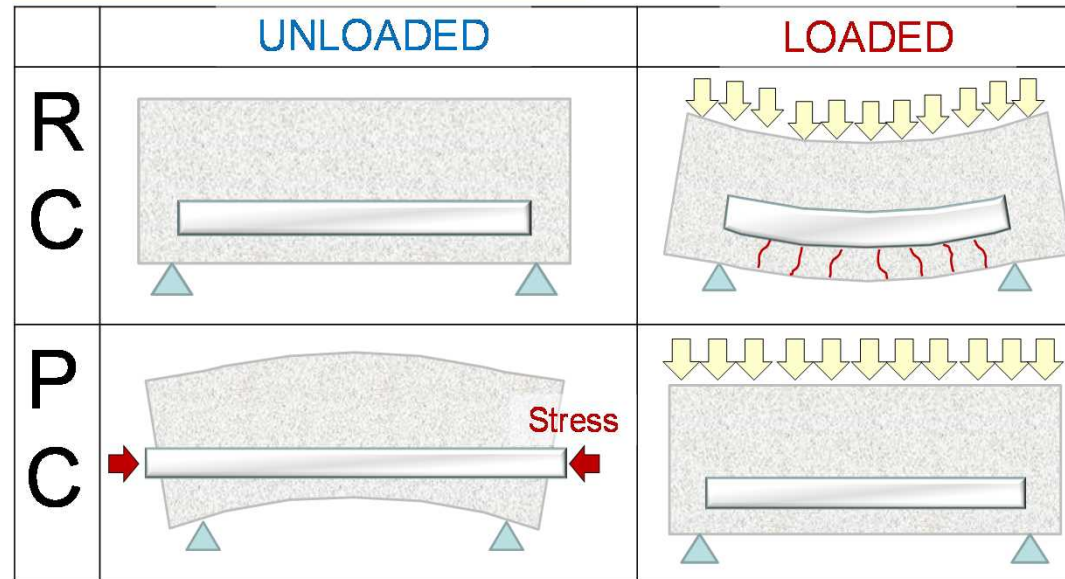
Keywords :

PCはり、長期暴露、塩害、腐食、有効プレストレス

東京工業大学 大即信明

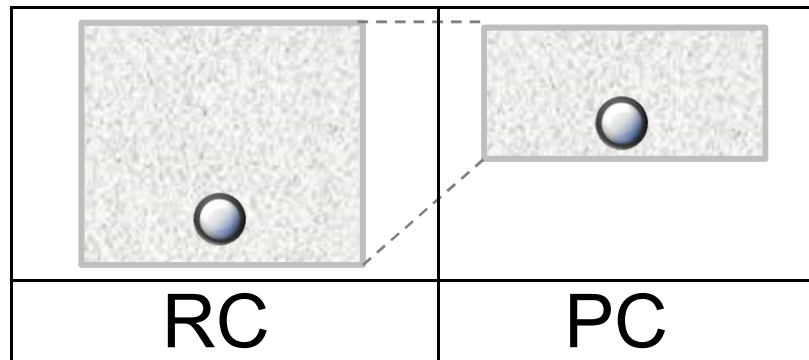
背景 -プレストレストコンクリート-²

▶PCの概念

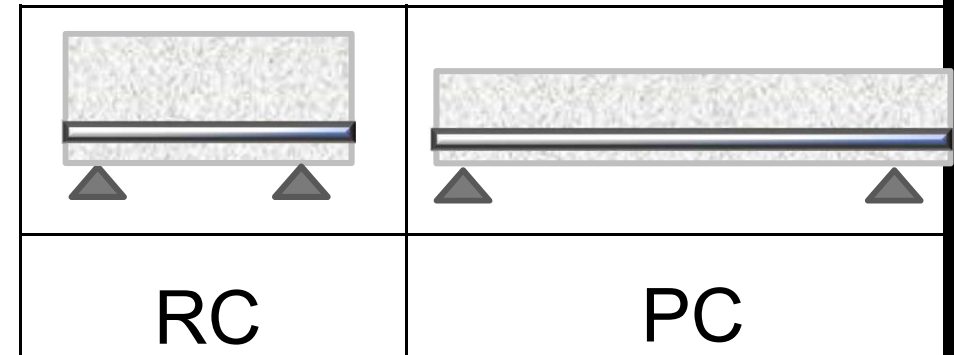


▶特長

1) 軽量化



2) スパン





PC上部工の栈橋例

4

塩害によるどのように PC 構造が影響を受けるかは、
明確ではない。

目的

- ▶ 長期間海洋環境下に暴露された**PC**はりの健全性（耐久性）を検討する。

1st step: 40年間暴露したはり供試体の健全度の評価



- ▶ 表面観察
- ▶ 最大曲げ耐力（モーメント）の検討
- ▶ 有効プレストレスの検討

2nd step: 鋼材の腐食減少量の測定

3rd step: 耐久性の評価—特にひび割れ発生について

- ▶ ひび割れ発生時期の予測も含む

はり供試体

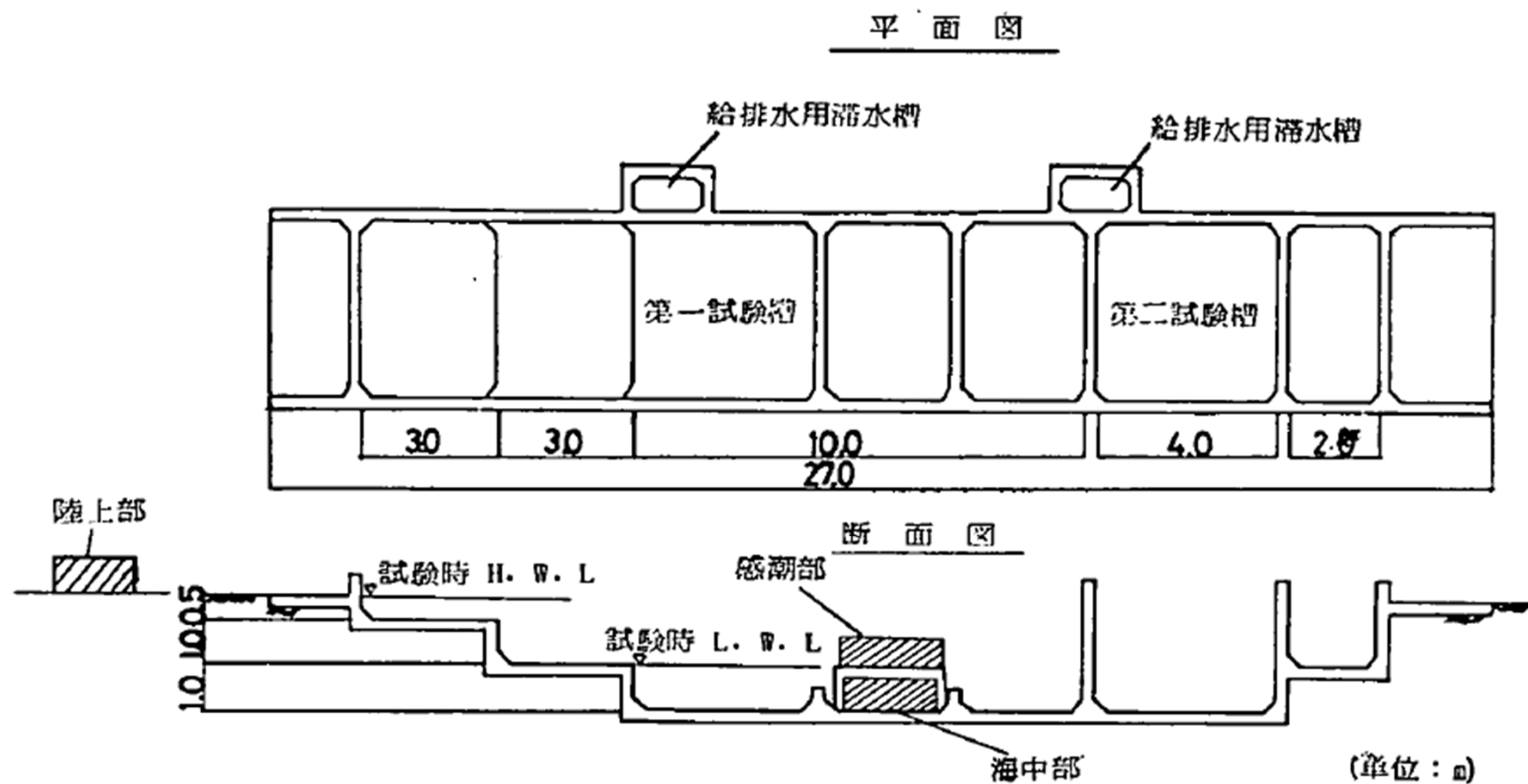
▶ 配合

W/C (%)	Slump (cm)	Air (%)	s/a (%)	Maximum size(mm)	Unit weight(kg/m ³)				Cement Type	Origin
					W	C	S	G		
37	5±1	4±1	41	20	167	460	710	1080	High-early strength Portland Cement	1973

▶ 圧縮強度

材 齢	3 日	7 日	28 日
圧縮強度 (N/mm ²)	49.9	59.0	67.6

- ▶ 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、蒸気養生行った。蒸気養生は供試体をシートで覆い、内部の温度を15℃/時間で上昇させ、60度で4時間保持したのちに、自然降下させた。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。
- ▶ 供試体は1973年より2013年まで40年間港湾空港技術研究所(神奈川県横須賀市久里浜)敷地内の海水循環水槽内とその敷地内に曝露されていたものを用いた。その後、2014年までの約1年間は気中環境(オリエンタル白石株式会社技術研究所、栃木県真岡市) に置かれていた。



循環水槽供試体設置図

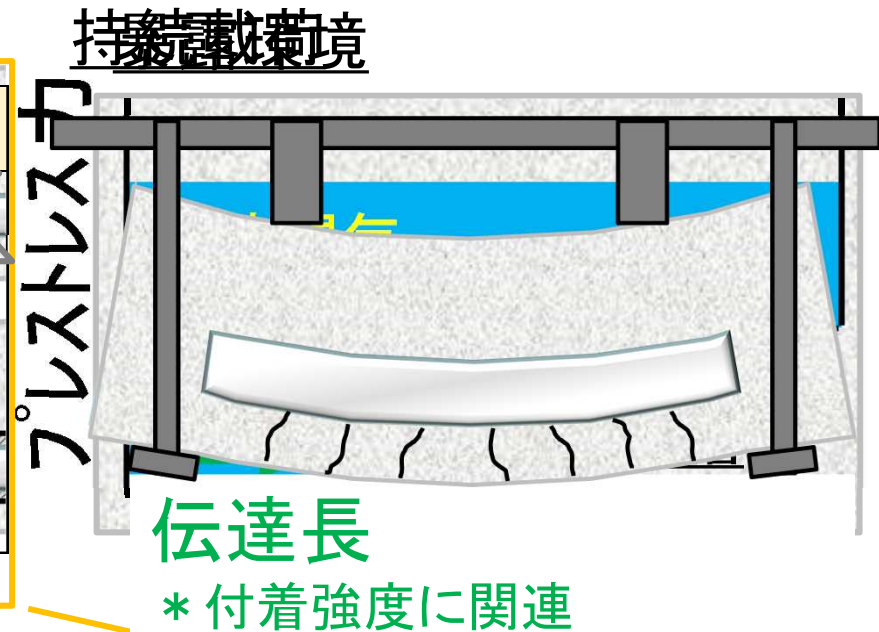
表 本研究で用いたPC供試体詳細

番号	緊張方式	PC鋼材の種類	持続載荷荷重	曝露環境	初期緊張力	備考
2-T-0.8	プレテンション	2本より線: SWPR2φ2.9	無載荷	感潮部	0.8σy	
2-S-0.8				海中部		
2-A-0.8				気中部		
2-T-0.8C			ひび割れ荷重			
2-T-0.8D			設計荷重			
7-T-0.8		7本より線: SWPR7φ12.4	無載荷	感潮部	0.8σy	
7-T-0.6G					0.6σy	亜鉛メッキ
7-T-0.6						
7-T-0.4					0.4σy	
1-T-0.85	ポストテンション	PC鋼棒: φ17	無載荷	感潮部	0.85σy	
1-S-0.85				海中部		

はり供試体

▶ 試験要因

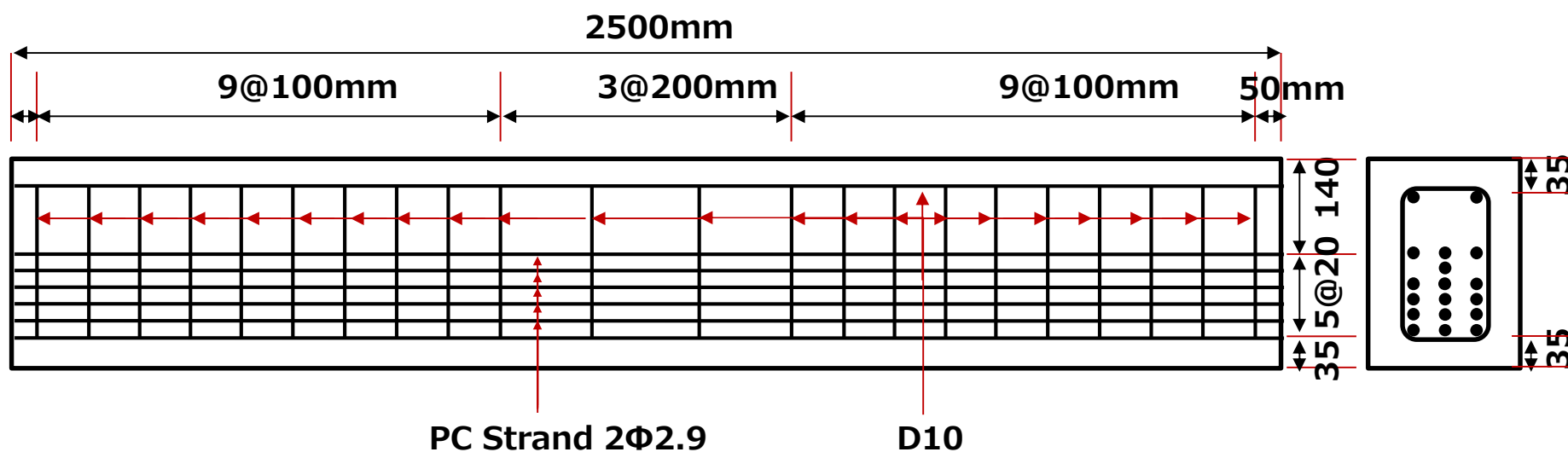
緊張方式	P Cの種類	暴露環境	セメント種類	製造年
プレテンション 方式	2本より線	感潮部		1973
		海中部		
		気中部		
ポストテンション 方式	7本より線	感潮部		1973
		海中部		
		気中部		
プレテンション 方式	P C鋼棒	感潮部		1973
		海中部		
		気中部		



プレストレスの導入方法

プレテンション 方式	1. PC鋼材の緊張 	2. コンクリート打設 	3. 緊張力の解放 
	1. PC鋼材の緊張 	2. コンクリート打設 	3. 緊張力の解放 
ポストテンション 方式	1. コンクリートの打設 (シース管理設) 	2. PC鋼棒挿入、緊張 	3. 緊張力の解放 
	1. コンクリートの打設 (シース管理設) 	2. PC鋼棒挿入、緊張 	3. 緊張力の解放 

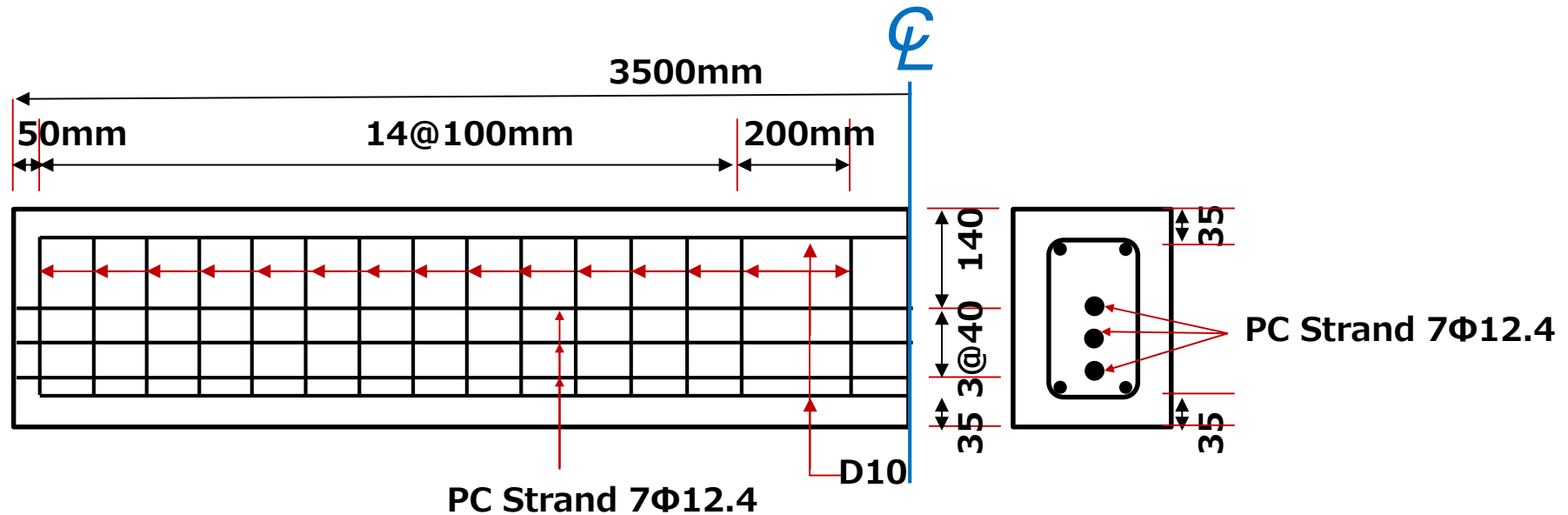
プレテンション方式 2本より線配筋図 2T08,2S08,2A08,2T08C,2T08D



鉄筋かぶり: 30mm

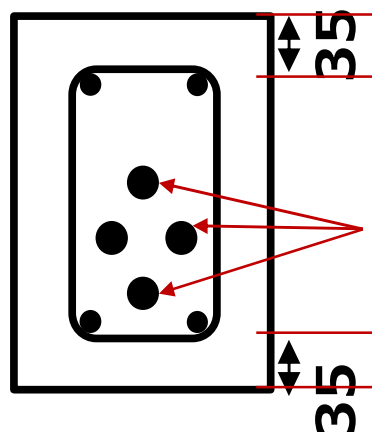
PCかぶり: 40mm

プレテンション方式 7本より線配筋図: 緊張力 80%—7T08



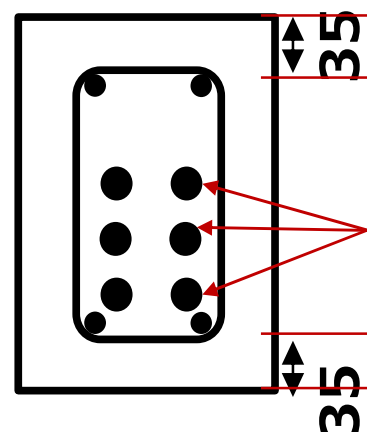
鉄筋かぶり: 35mm
PCかぶり: 54mm

プレテンション方式 7本より線配筋図:
(左) 緊張力**60%**, (右)緊張力**40%**



PC Strand 7Φ12.4

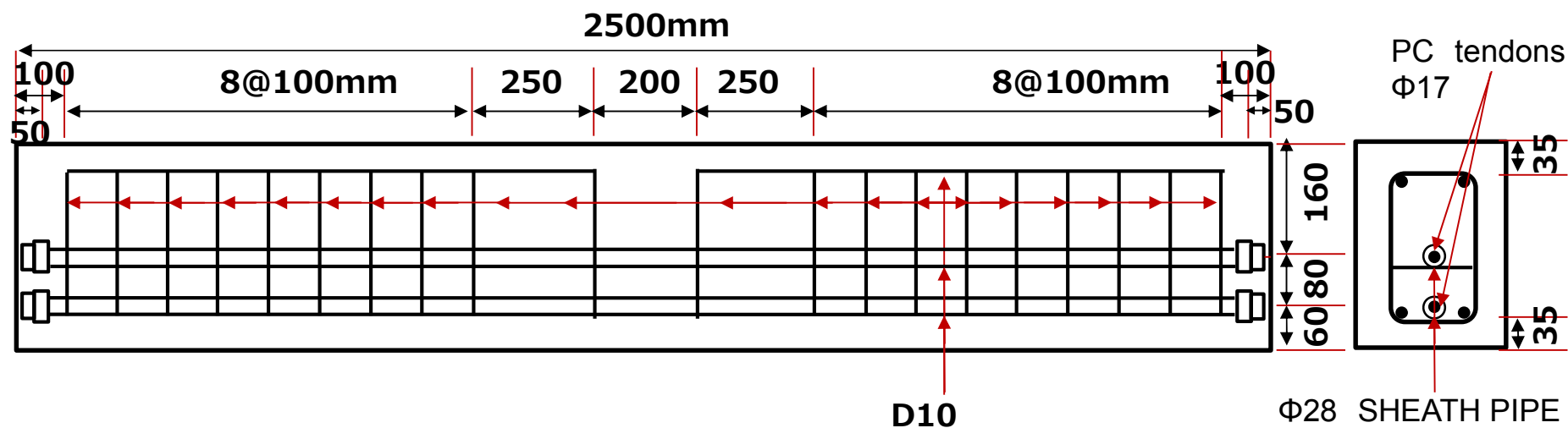
7T06G, 7T06



PC Strand 7Φ12.4

7T04

ポストテンション方式配筋図 1T085,1S085



鉄筋かぶり35mm
PCシースかぶり: 46mm

材料物性値と設計値まとめ

		プレテンション		ポストテンション
		2本より線	7本より線	
材料 物性値	コンクリート設計圧縮強度 (N/mm ²)	50		
	PC鋼材降伏耐力 0.2%永久伸びに対する応力 (N/mm ²)	1913	1720	930
設計値	最大曲げ引張り破壊耐力 (kN)	151.4	141.3	187.8
	有効プレストレス力 (N/mm ²)	11.4	12.1	13.9

* 実験方法

- (1) コンクリート外観目視検査
- (2) 最大曲げ引張破壊耐力の測定
- (3) 有効プレストレスト力の測定
- (4) 塩化物イオン分布の測定
- (5) 腐食減量の測定
- (6) 腐食ひび割れ発生時期の予測

(1) コンクリート外観目視検査

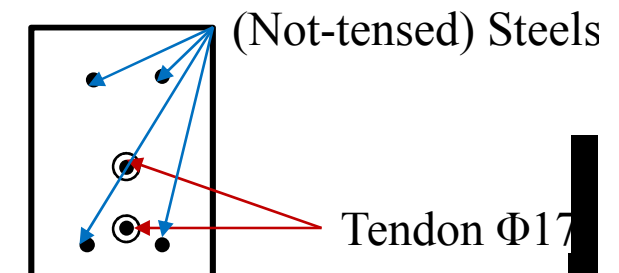
* 腐食ひび割れに注目, 荷重によるものは除外

緊張方式	曝露環境	持続載荷荷重	ひび割れ発生 供試体数/全数	備考
プレテンション 方式	感潮部	無載荷	0/4 (0%)	亜鉛メッキ
			1/1 (100%)	
		ひび割れ荷重	1/1 (100%)	
		設計荷重	0/1 (0%)	
	海中部	無載荷	1/1 (100%)	
	気中部		0/1 (0%)	
ポストテンション 方式	感潮部	無載荷	1/2 (50%)	
	海中部		2/2 (100%)	
合計			6/13 (46%)	

▶ 予想外に海水中が厳しい環境

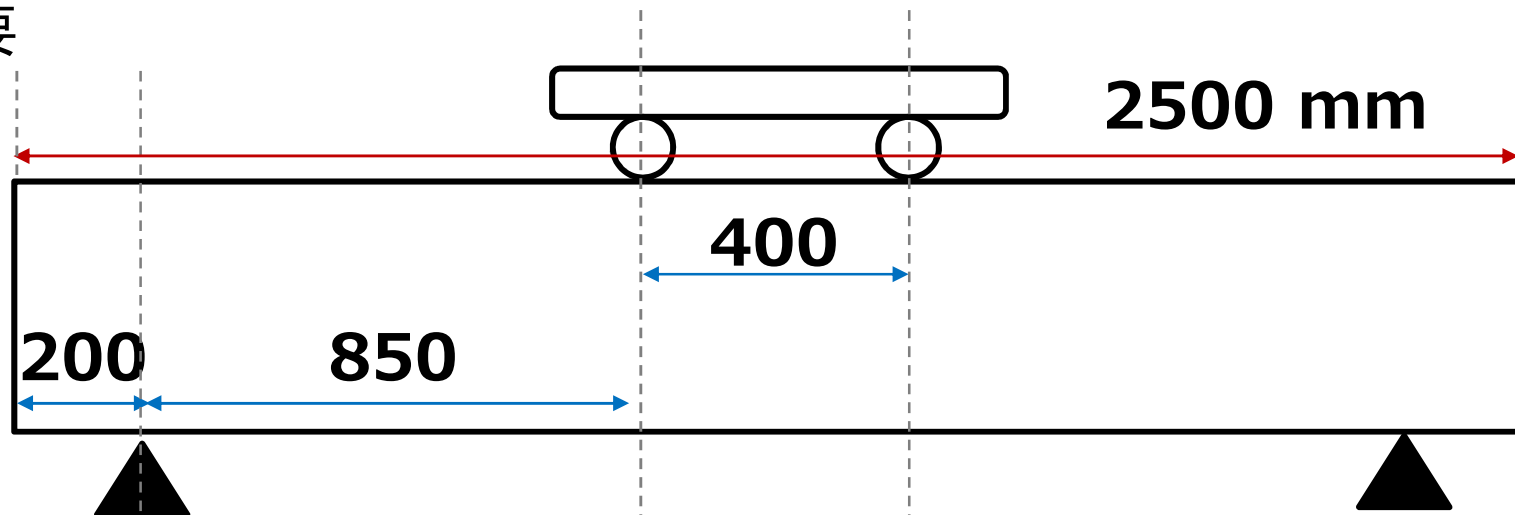
ポステン断面

▶ ポステンでひび割れが多く観察
⇒PC鋼材でなく、鉄筋に腐食



(2) 最大曲げ引張破壊耐力の測定

▶ 概要



- ・荷重制御
- ・変位測定

載荷試験

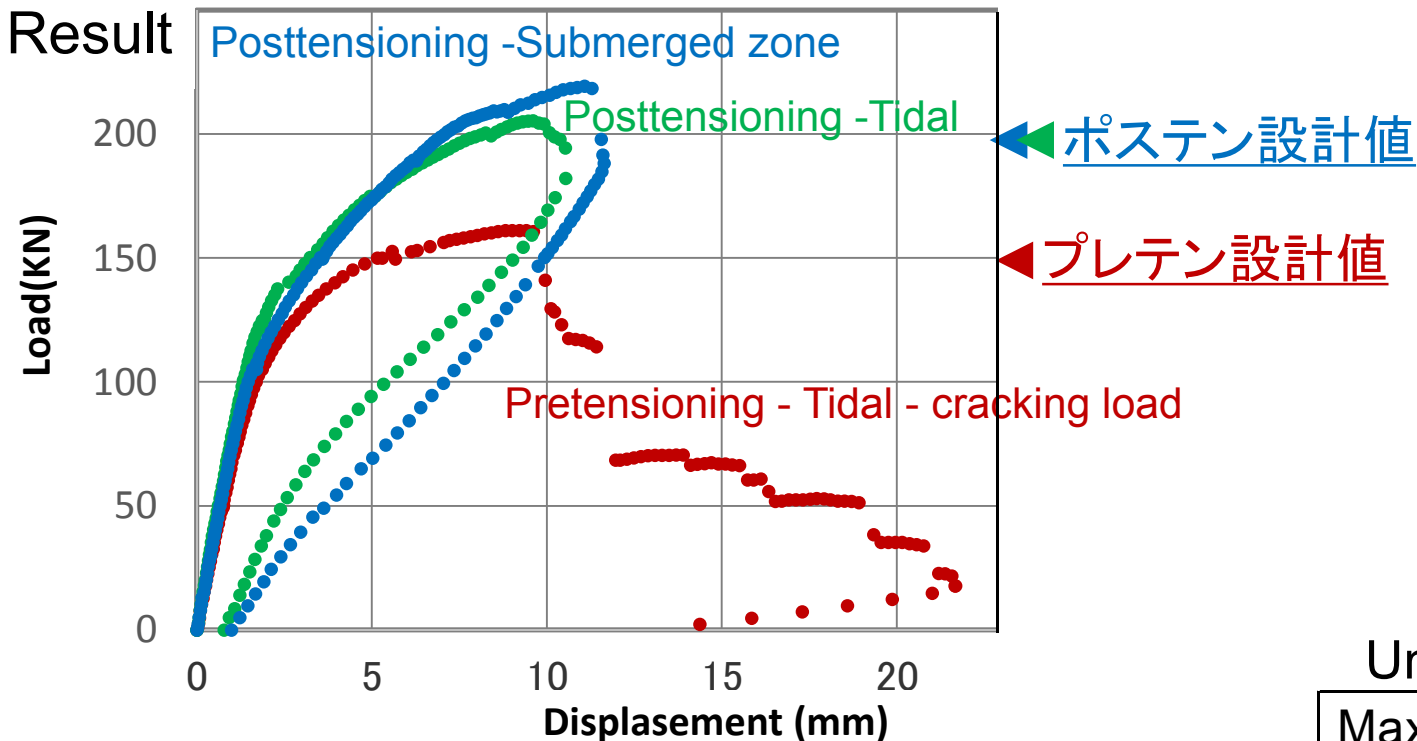


Not yet collapsed

By corrosion crack,
the specimen would be divided into upper part and lower?

曲げ載荷試験結果

▶ Result



▶ すべて曲げ破壊耐力は設計値を上回った。(腐食ひび割れがすべて有)

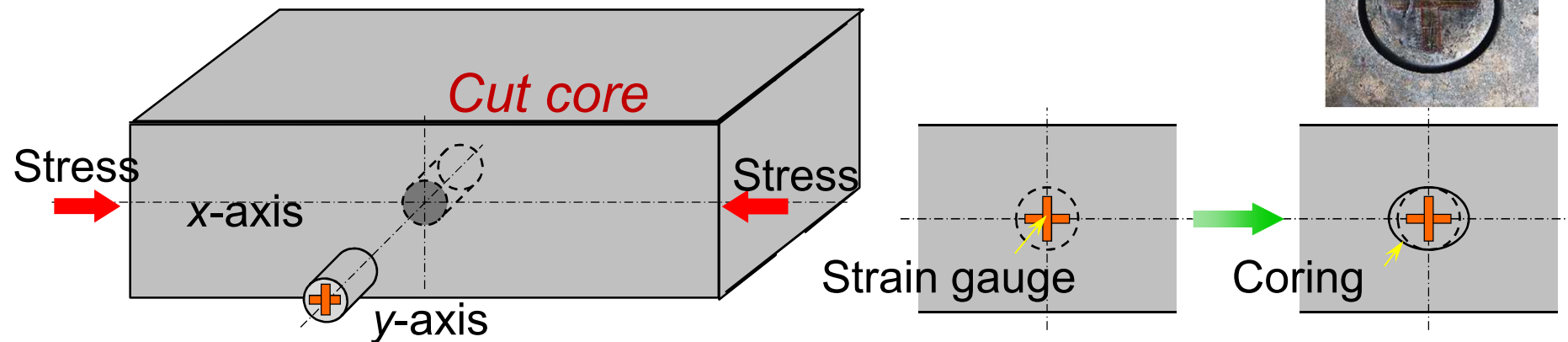
実測最大荷重と 最大曲げ引張破壊耐力設計値

単位：kN		最大荷重	設計値
プレテンション-2本より線-ひび割れ発生荷重		161.2	151.4
プレテンション-7本より線-亜鉛メッキ		155.1	141.3
ポストテンション-感潮部		205.5	187.8
ポストテンション-海水部		219.4	

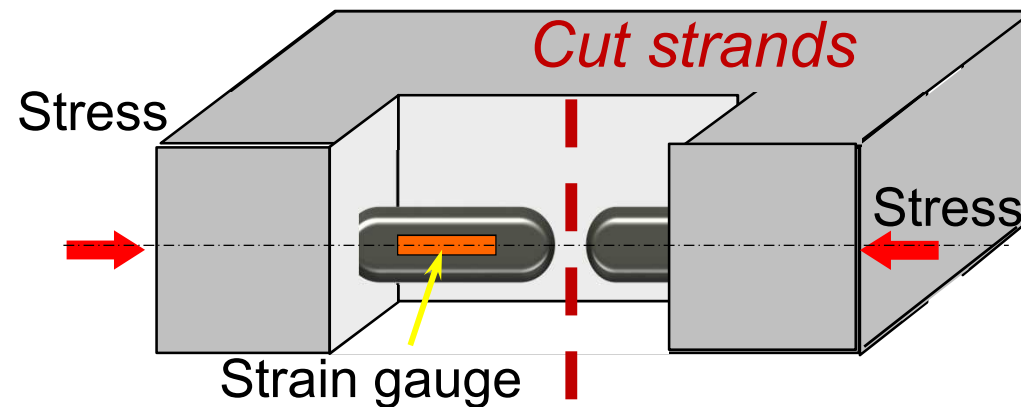
(3) 有効プレストレスト力の測定

2つの方法 – 有効プレストレス-(残存有効プレストレス

▶ ① コア応力解放法

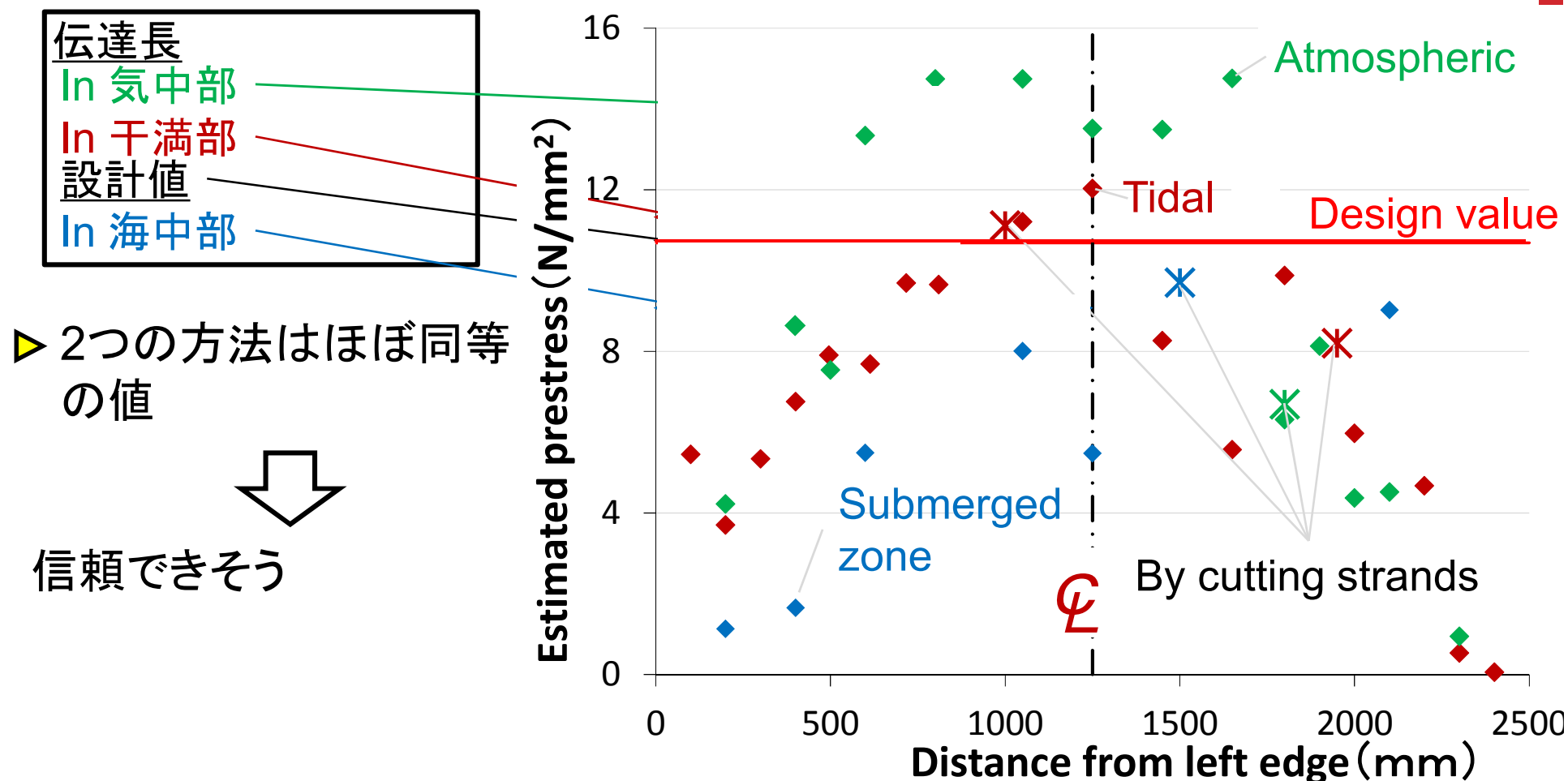


▶ ② 鋼材切断応力解放法



プレテンでの有効プレストレスの測定とその分布

暴露環境の影響

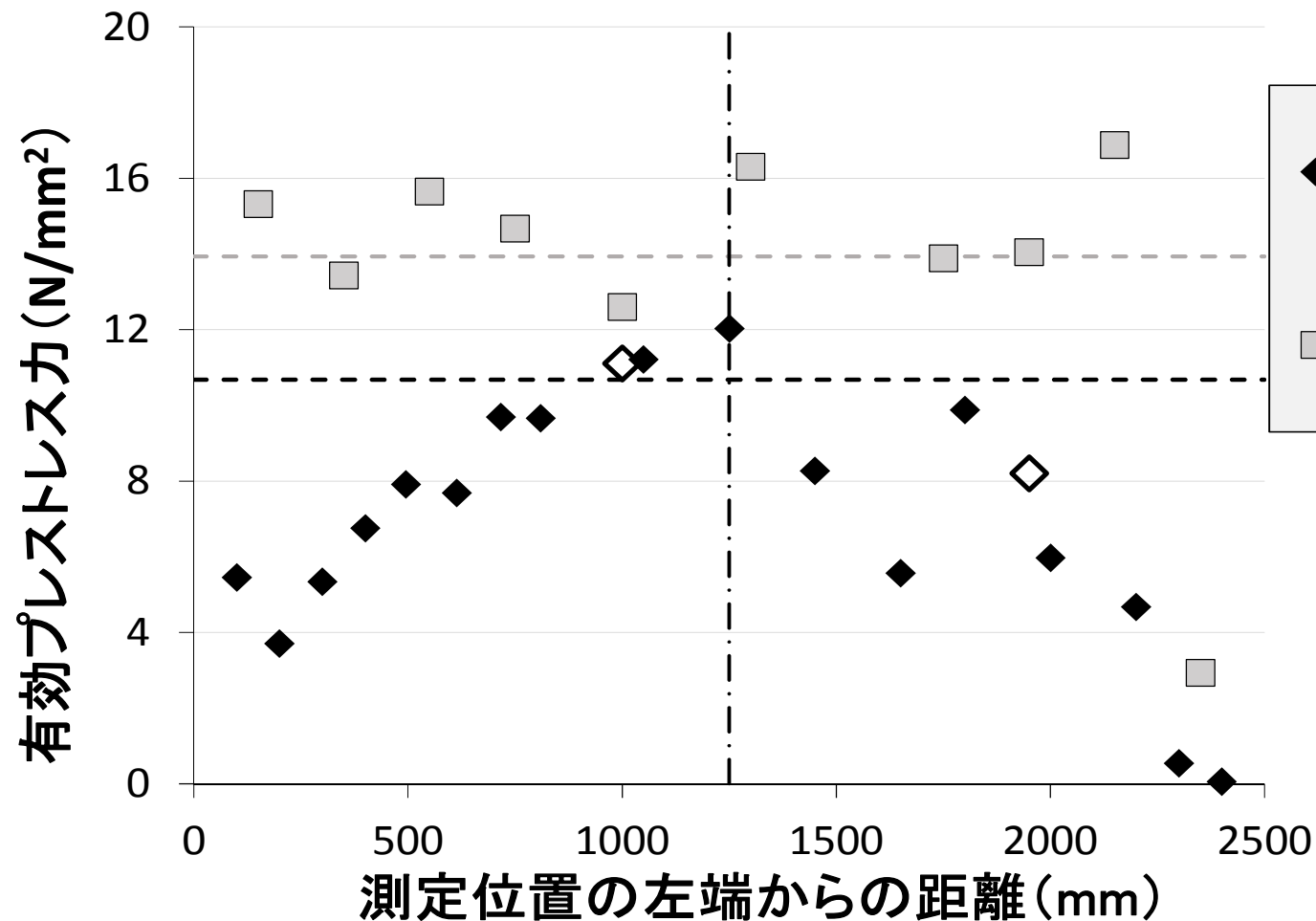


・最大値, 気中部 > 干満部 > 海中部

・伝達長は、気中部で50－60cm、干満と海中100cm以上(腐食?)

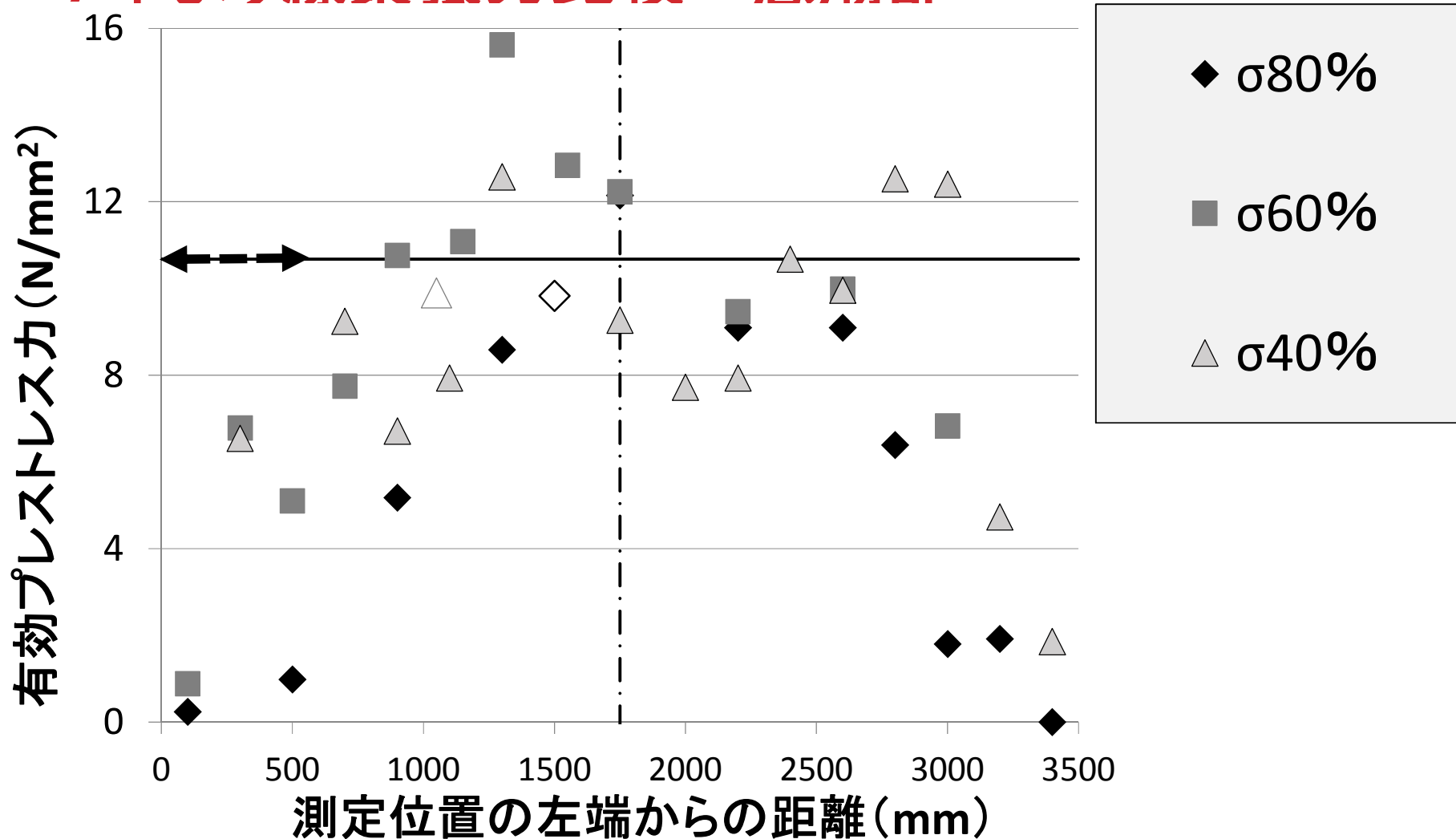
有効プレストレスの測定とその分布

緊張方式比較



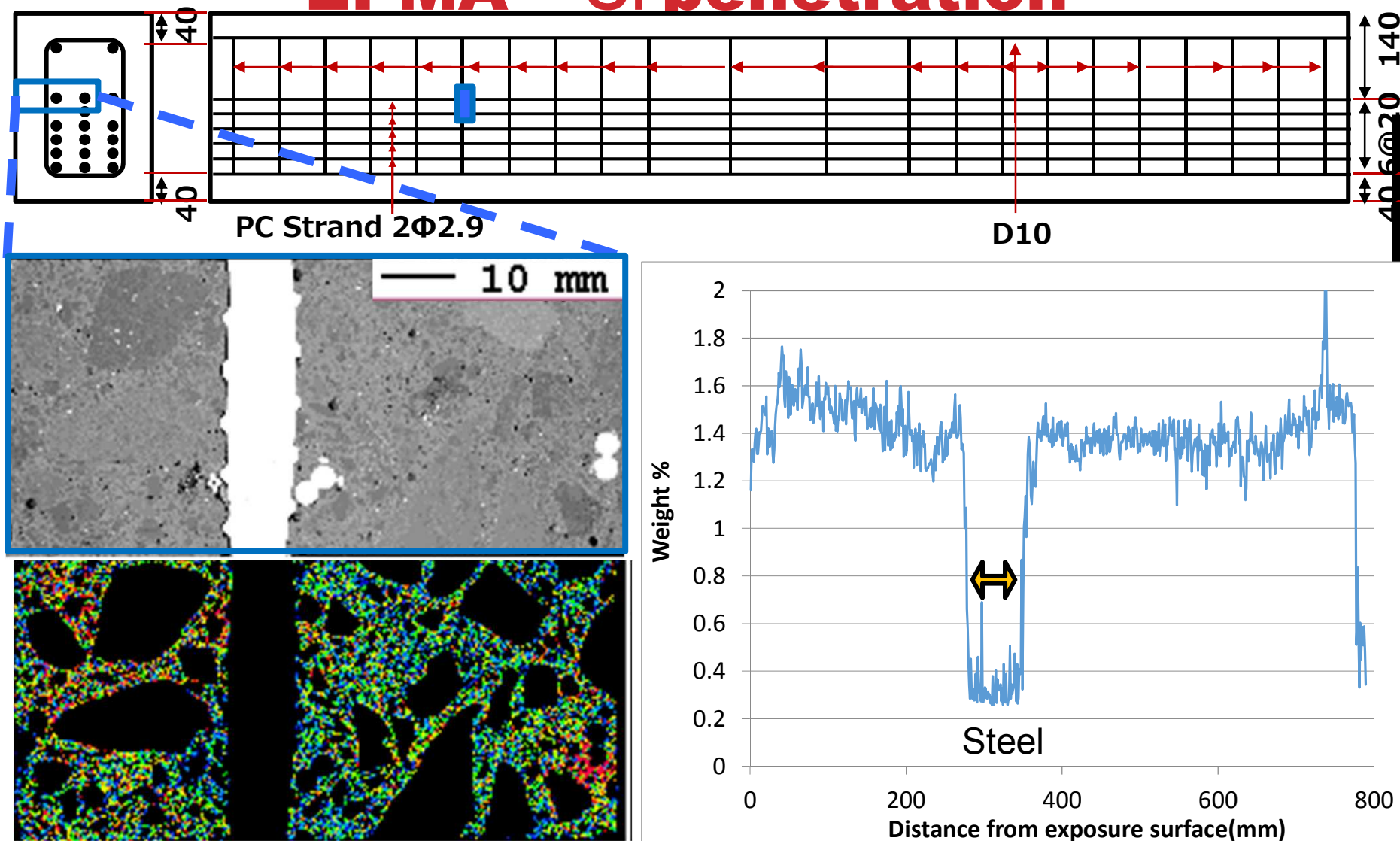
有効プレストレスの測定とその分布

7本より線緊張力比較—感潮部—



80%, 60%, 40%の順に伝達長が延びている可能性が確認

(4) 塩化物イオン分布の測定一端部から²⁵50cm EPMA - Cl-penetration-



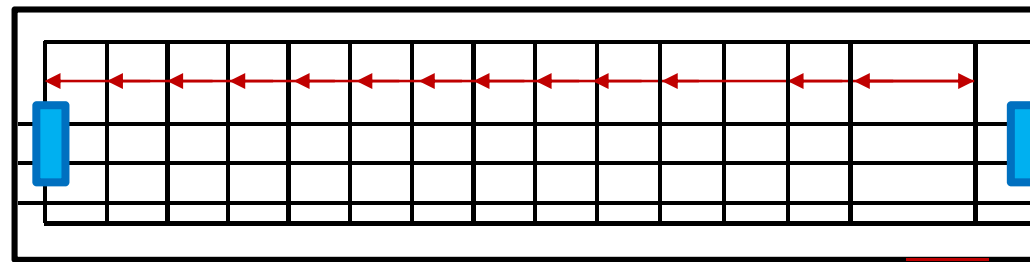
内部も表面もあまり変わらず、1.4% vs mortar 程度、(15kg/m³)

塩化物イオン分布の測定- Pretensioning

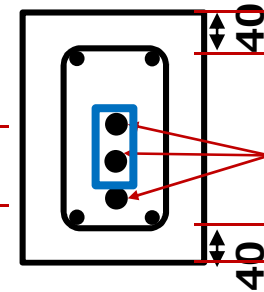
Pre-tensioning SWPR7φ12.4

3500mm

50mm 14@100mm 200mm



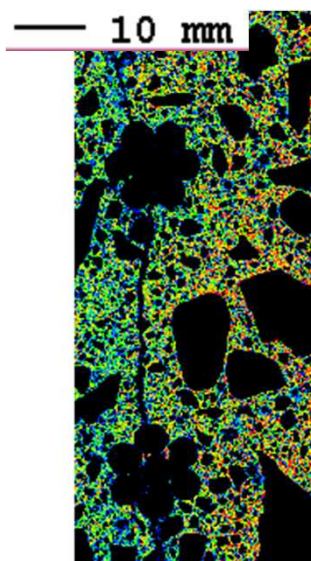
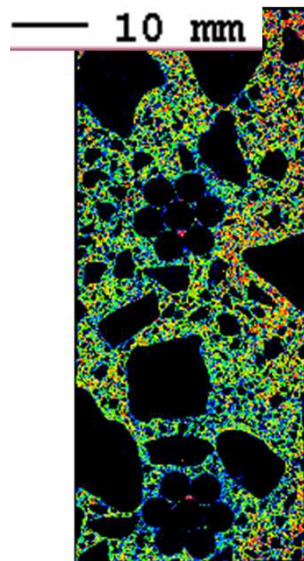
140
40 3@40
40



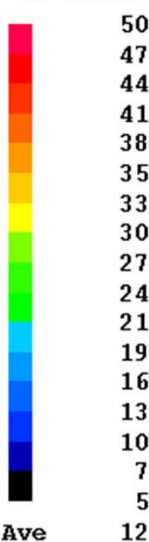
PC Strand 7φ12.4

Edge

center



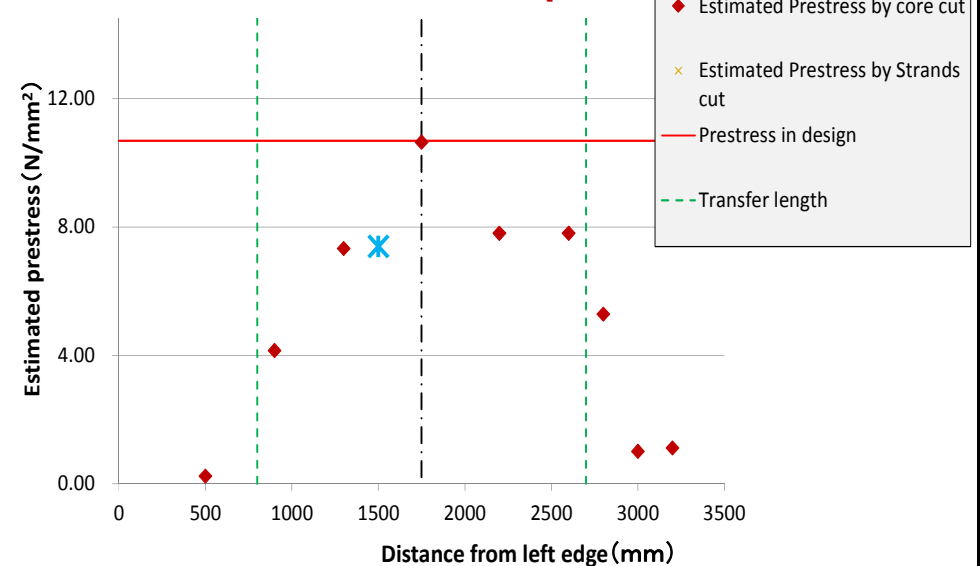
Cl Level



Ave

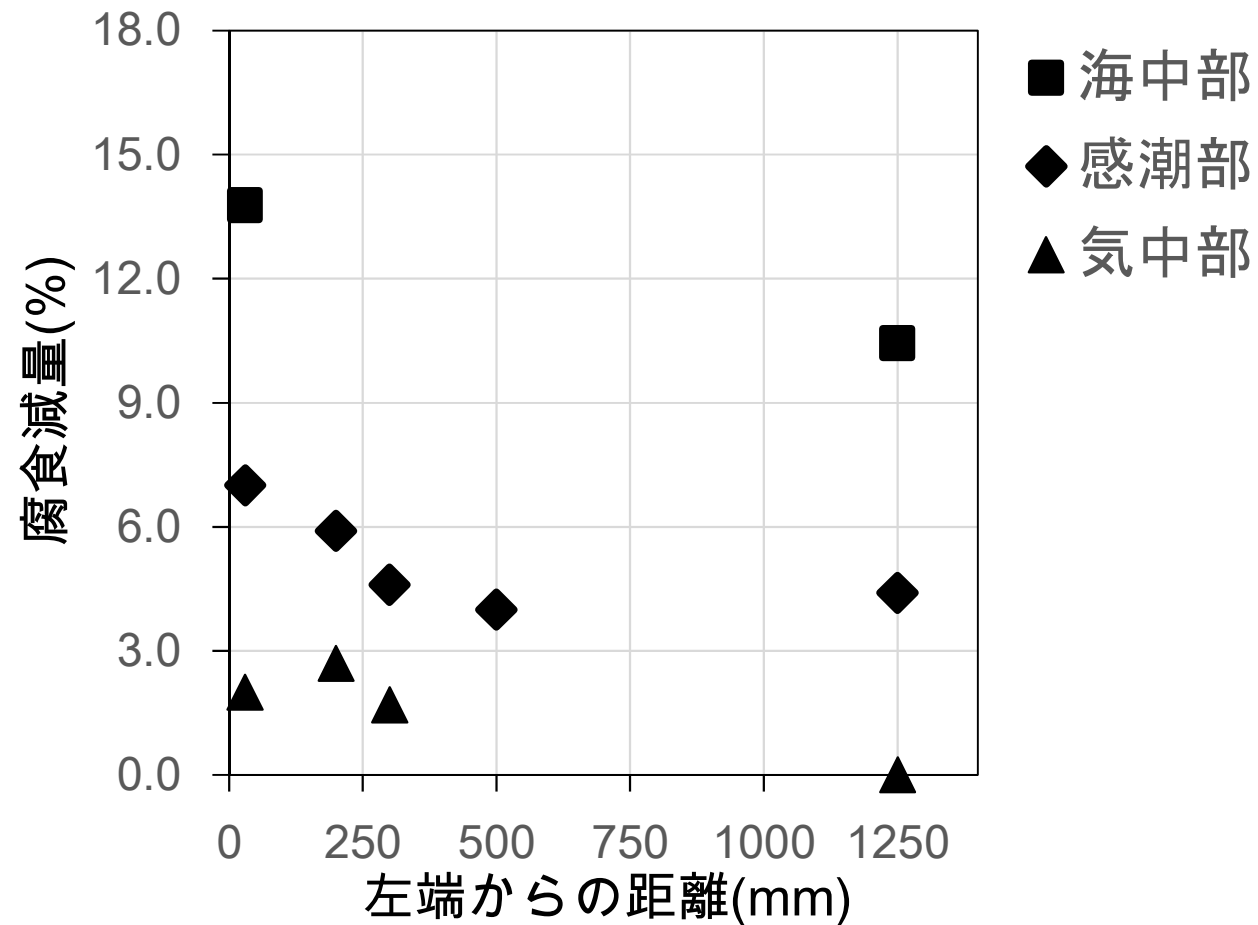
12

Distribution of effective prestress

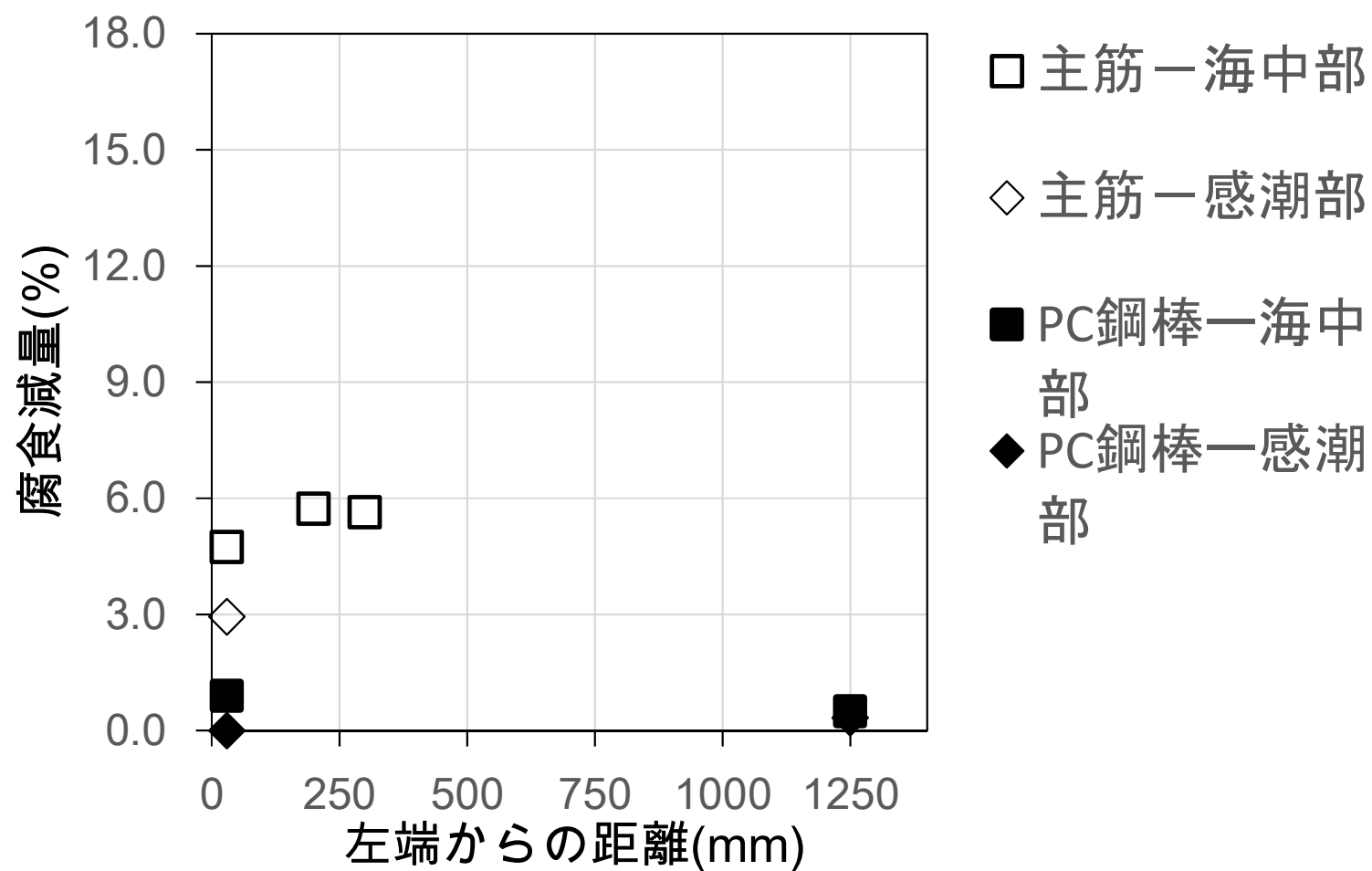


塩化物イオン分布は、有効プレストレスの影響を受けていない。

(5) 腐食減量の測定



腐食減量プレテンション2本より線曝露環境比較



腐食減量-ポストテンション方式

(6) 腐食ひび割れ発生時期 の予測

限界腐食量に到達するまでの期間を分極抵抗から腐食速度を算出し、推定した。

$$W_{cr} = -1.84\varphi(\varphi - 8.661) + 145.1\alpha - 1.194 \\ + 3809A - 0.8351 + 10.60X - 72.30$$

ここで、 W_{cr} : ひび割れ発生限界腐食量(mg/cm^2),
 φ : クリープ係数, α : 膨張係数, θ : 腐食角度(主に 360°),
 X : 形状関数($=c/\theta$: c : かぶり厚さ(mm), θ : 鉄筋径(mm))

腐食ひび割れ発生限界腐食量と算出に用いた材料特性値

緊張方式	PC鋼材種類	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)
プレテンション方式	2本より線	88.7	2	5.8	39.6
	7本より線	55.3		9.53	35
ポストテンション方式	PC鋼棒			9.53	35

予測値と観察結果

供試体番号	腐食減量(mg/cm ²)	腐食速度 (mg/year)	ひびわれ発生限界腐食量 (mg/cm ²)	ひび割れ発生ま での期間(year)	Incubation period Propagation period
2T0.8	58.8	1.38	88.7	61.7	16.9 44.8
2A0.8	17.1	1.05	88.7	108.1	23.2 84.9
7T0.8	54.2	0.12	55.3	48.8	17.8
7T0.4					31.0
1T0.85①					

寿命(*腐食ひび割れ発生まで) 観察および予測 **—赤字が予測値**

番号	緊張方式	暴露環境	寿命*年	備考
2T08	プレ2本	感潮	61.7	PC
2S08	プレ2本	海中	40以下	PC
2A08	プレ2本	気中	108.1	PC
7T08G	プレ7本	感潮	40以下	亜鉛メッキ
7T06 7T04	プレ7本	感潮	48.8	PC
1T085(2)	ポス	感潮	40以下 48.8	鉄筋
1S085	ポス	海中	40以下	鉄筋

**注:あくまで鉄筋かぶり35mm、PCかぶり54mm
実際は、かぶりは70mm以上(最低でも50mm)なので、
2-4倍にはなる。**

結論－1

(1)40年間海洋環境に曝露され、腐食ひび割れがあり、外観上劣化が進行したプレストレストコンクリート梁であっても、最大曲げ引張耐力は計算値以上あることが確認された。

(2)プレテンション方式では、曝露環境の影響が顕著に確認された。気中部曝露供試体では有効プレストレス力は設計値以上残存していることが確認され、伝達長の伸びも感潮部と海中部に比べて小さかった。感潮部曝露供試体では伝達長は伸びており、中央部でのみ有効プレストレス力が設計値以上残存していた。海中部曝露供試体では中央部でも設計値以下の有効プレストレス力となった。また、腐食減量は海中部が最も大きく、ついで感潮部、気中部の順に小さくなった。

結論一2

(3)ポストテンション方式では、有効プレストレス力が設計値以上残存していることが確認出来た。また腐食は主に主筋で発生しており、PC鋼棒はシースとグラウトに保護されているために腐食は確認されなかった。

(4)ひび割れ発生時期の予測では、気中部曝露供試体が最も耐久적であると評価された。

コメント：通常、鉄筋コンクリートでは、感潮部が最も劣化が激しい。にもかかわらず、今回PCでは海中部が最も激しい結果となった。

もしかすると、

養生方法や関連する劣化も考えられる。

なんらかの参考となることを期待する。

注：あくまで鉄筋かぶり35mm、PCかぶり54mm
実際は、かぶりは70mm以上（最低でも50mm）なので、
2－4倍にはなる。