

第51回
プレストレストコンクリート技術講習会
(オンライン開催)

配信期間:
令和6年6月3日(月)
～6月24日(月)

PC橋のデジタルツインを用いた 構造性能の評価と 維持管理の高度化

神戸大学
大学院工学研究科市民工学専攻
准教授 三木朋広

本日の話題

- PC橋の損傷状態を適切に把握し，影響考慮できる手法として，FEMに基づく分析手法の展開，特に**PC橋のデジタルツイン**による**構造性能の評価**に関する研究について紹介する.
- デジタルツインに導入する各種モデルの高度化に向けた研究についてもあわせて紹介する.
- ✓ **腐食**に伴う**PC鋼より線**のプレストレス力の低下



新都市社会技術融合創造研究会 Research Committee on Technological Development for Infrastructure

国土交通省
近畿地方整備局
における研究会



社会資本の整備、維持、管理に関わる産・学・官の連携・協力による新しい技術の研究・普及等に関する事業を行い、もって都市再生と地域連携による経済活力の回復に貢献し、国民生活の質の向上、安全で安心出来る暮らしの確保、環境の保全・創造に寄与することを目的としています



研究背景 (PC部材の設計と維持管理)

- PC部材の設計: 一般に, 部材にプレストレスを導入してひび割れ発生を許容しないことで, 部材を全断面有効と見なす.
- しかし, 既設PC橋をみると, 過去に主桁に沿ったひび割れや鋼材腐食などの変状が生じた事例がある.



P C 鋼材の腐食が進行すると,



鋼材の断面減少
さらに鋼材破断



影響が大きい
プレストレス消失
部材耐荷力の低下

PC橋においては変状の早期発見と
劣化初期の対策が極めて重要

研究背景(PC橋の予防保全)

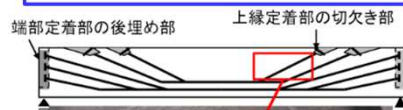
- PC橋では、中期的問題につながる損傷に対する**予防保全的な措置が必要**
- 損傷要因に不確さがあり、橋梁の**供用環境が様々**あるため**損傷の再現が難しく**、そのため**対策手法が多岐**にわたることから、**合理性を欠いた非効率な対応**となっている現状がある。

生じる損傷要因の不確さ



ASR等によるひび割れ

様々な供用環境 損傷再現が困難



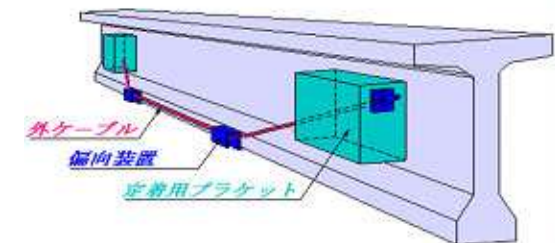
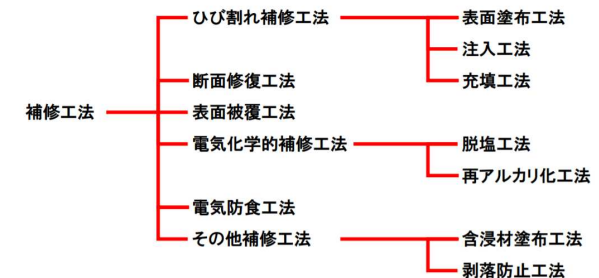
水の侵入
による変状

上縁定着の後埋め部から浸入した水による変状

PC鋼材の腐食



対策手法が多岐



研究目的(第1期, R2~R4)

モチベーション

- できる限り不確実性を排除した上で, 起こり得る劣化・損傷の影響を再現する
- PC橋の点検, 調査, 診断, 補修のメンテナンスループにおける「情報」の伝達をスムーズにする
- 現実的かつ合理的なPC橋の維持管理・更新手法を提案する

- デジタルツイン*を用いたPC橋の補修・部分更新・撤去技術に関する分析ツールを構築する
- PC橋特有の健全度判定の決定要因の分析とその結果に基づく維持管理手引きを作成する

*デジタル上に対象構造物をモデル化して, 力学挙動の再現, 分析, ならびに現実空間とのデータ関連付けを行う技術手法の総称



活動メンバー

構成(学8名, 産16名, 官8名)
合計32名

プロジェクトリーダー

三木朋広(神戸大学)

顧問

宮川豊章(京都大学)

国交省近畿地方整備局 道路部
近畿道路メンテナンスセンター
近畿技術事務所

- **WG1 PC橋を対象としたデジタルツイン**
上田尚史(関西大学), 建設コンサルタンツ協会近畿支部
- **WG2 PC鋼材腐食とプレストレスの関係に関する再現実験**
山本貴士(京都大学), 高谷哲(京都大学), PC建協関西支部技術部会
- **WG3 PC橋の維持管理手引き**
三木, PC建協関西支部保全部会
- **WG4 非破壊検査, モニタリング手法**
寺澤広基(大阪大学), 橋本勝文(京都大学), 建設コンサルタンツ協会近畿支部
- **WG5 PC橋梁の撤去更新技術**
三方康弘(大阪工業大学), PC建協関西支部 技術部会, 施工部会



第1期(R2～R4) 成果公表と社会実装

新都市社会技術融合創造研究会 ホームページ
研究成果(マニュアル等)

<https://www.kkr.mlit.go.jp/road/shintoshikenkyukai/project/80.html>



新都市社会技術融合創造研究会
Research Committee on Technological Development for Infrastructure

トップ 研究会の目的 活動内容 プロジェクト プロジェクト募集



研究成果 (マニュアル等)

- デジタルツインを用いたPC橋の補修・部分更新・撤去技術に関する研究

継続中のプロジェクト

- PC橋維持管理におけるデジタルツインを用いた構造性能の評価に関する研究
- PC橋の健全性に関する評価手法の総合的研究および維持管理における有効性の提案
- 公的交通機関と民間交通情報の融合による異常事象発生時等における交通状況推定及び対策に関する研究

産・学・官の連携で都市と地域の未来をひらく

研究会の目的 活動内容 プロジェクト **プロジェクト募集**

新都市社会技術融合創造研究会

デジタルツインを用いたPC橋の補修・部分更新・撤去技術に関する研究

プロジェクトリーダー
神戸大学大学院 工学研究科
三木 朋広 准教授

研究期間
令和2年7月～令和5年3月

撤去更新研究報告書
維持管理手引き(案)

PDFファイルをダウンロードできます

新都市社会技術融合創造研究会



KOBE UNIVERSITY

PC橋のデジタルツインの構築

- デジタル上に対象構造物をモデル化して、**力学挙動の再現**、**分析**、ならびに**現実空間+時間とのデータ関連付け**と**結果の可視化**を行う。
- **課題**: データ集積の時間とコスト, モデル化の精度, システムのメンテが必要
- 試行として, 2径間連続**PC**中空床版橋を対象として, ①コンクリートのひび割れ, ②**PC**鋼材の腐食と破断, ③部材断面の部分更新の影響分析
- 本研究では, 一つの例として, **PC中空床版橋**を対象としたデジタルツインモデル構築と, **現場展開における作業フローと課題**の提示を目標とする。



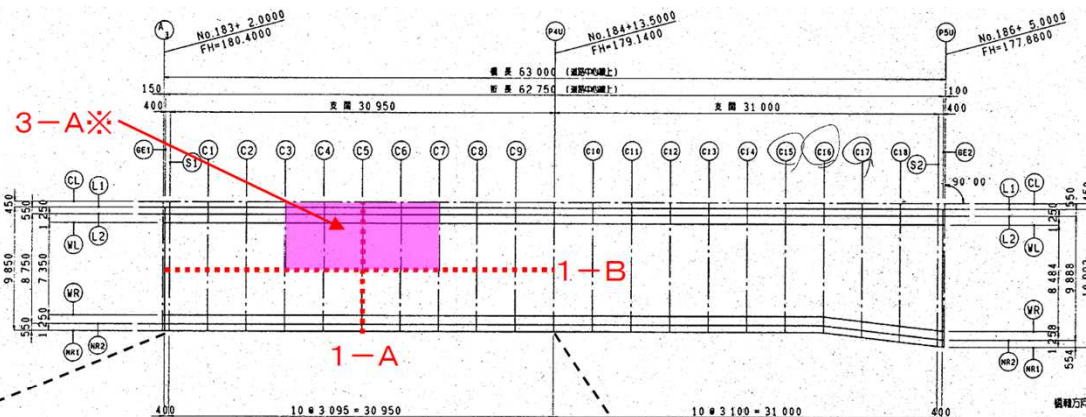
PC橋を対象とした解析(損傷)シナリオ

設定した 解析(損傷) のシナリオ

N○	シナリオ	ケース	損傷内容	損傷箇所
1	コンクリート部材の損傷	1-A	主版下縁のひび割れ	支間中央部, 橋軸直角方向
		1-B	主版下縁のひび割れ	主版中央部, 橋軸方向
2	PC鋼材の損傷	2-A	腐食・破断	支間中央部
		2-B	腐食・破断	桁端部
3	部材の部分更新	3-A	上床版部の陥没(打替)	支間中央部

シナリオ3 部材の部分更新

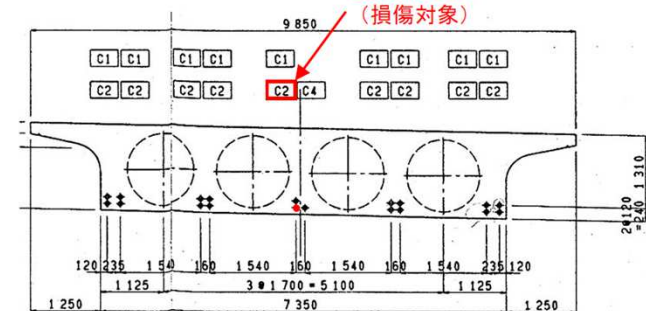
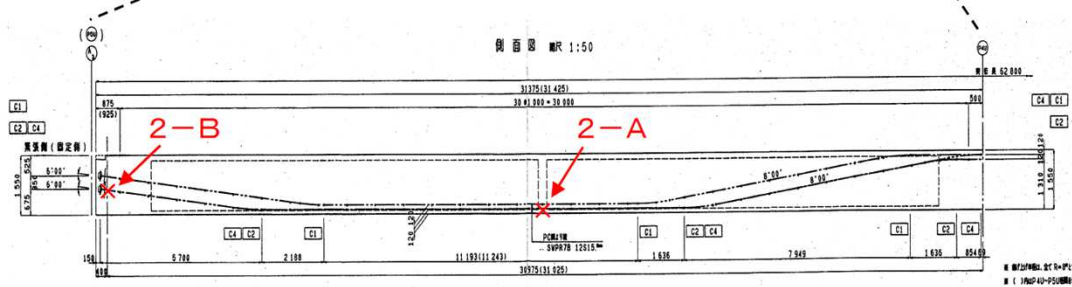
幅 4.93m(全幅員/2)
長さ 15.00m(支間長/2)
深さ 0.15m(上床版厚)



12S15.2B

シナリオ2 ケーブル1束の 断面積を変更

主版中央C2
(損傷対象)



解析モデルと構成則

・橋軸方向のメッシュ分割は下記のとおりとする。

第一径間中央～P4U: 150mm (シナリオ1～3の検討範囲)

その他の区間 : 400mm

部位	使用要素	線形／非線形
主版	ソリッド要素	非線形
打下ろし部	ソリッド要素	線形
支承部	ソリッド要素	線形
鉄筋	離散埋め込み鉄筋要素	非線形
PC 鋼材	離散付着すべり埋め込み鉄筋要素	非線形

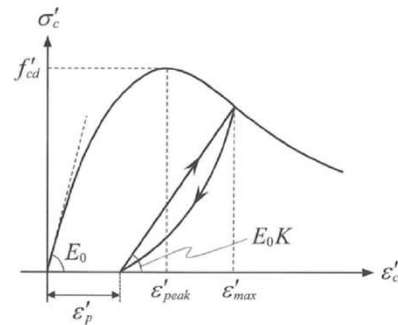


図. コンクリート圧縮特性

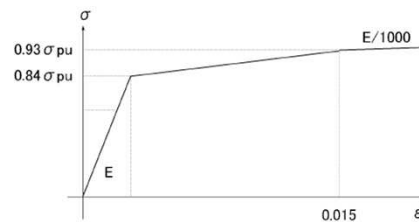
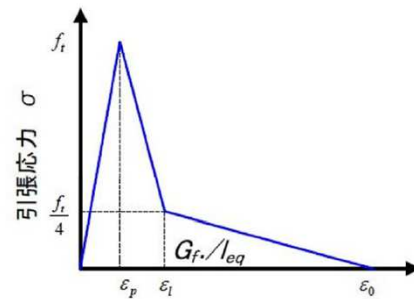


図. PC鋼材引張特性



ひずみ ε
図. コンクリート引張特性

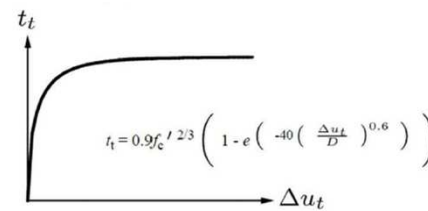
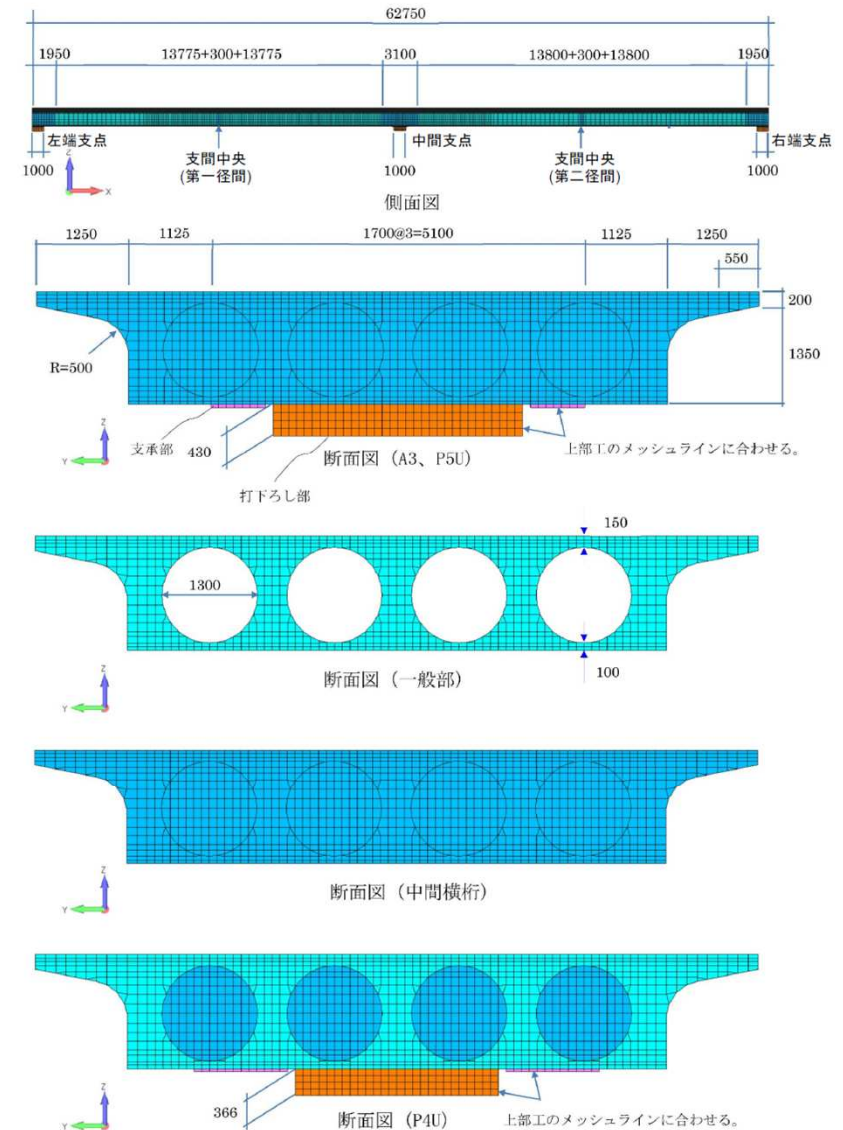
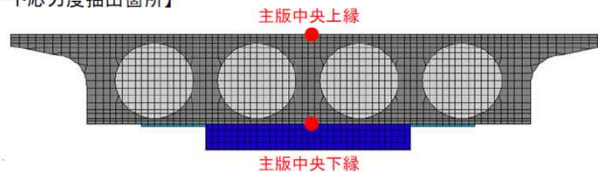


図. PC鋼材の付着応力・変位特性

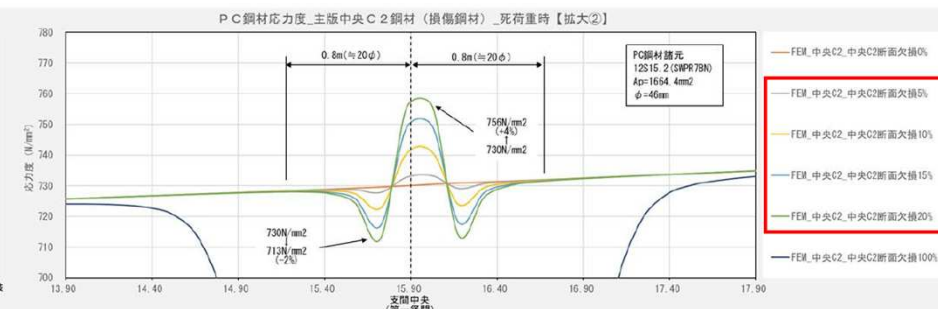
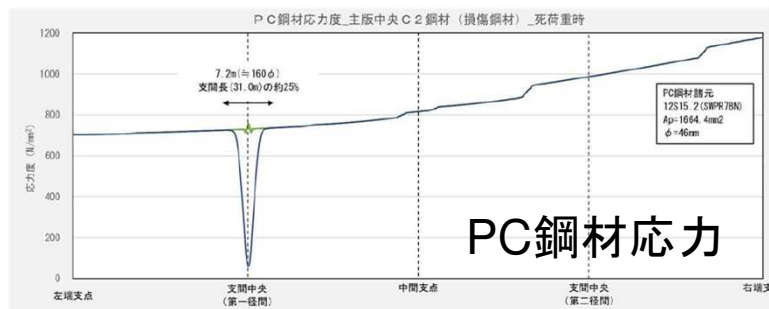
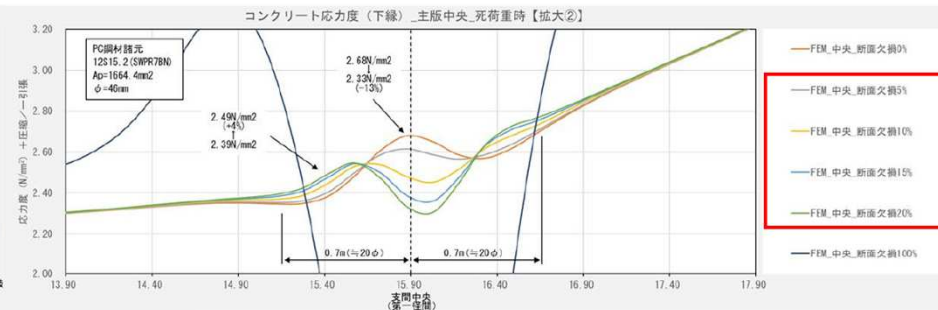
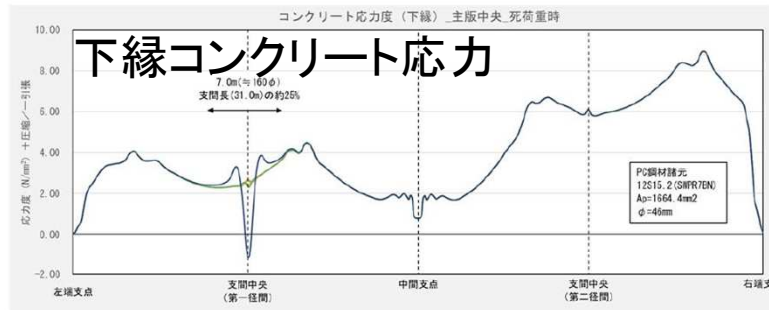
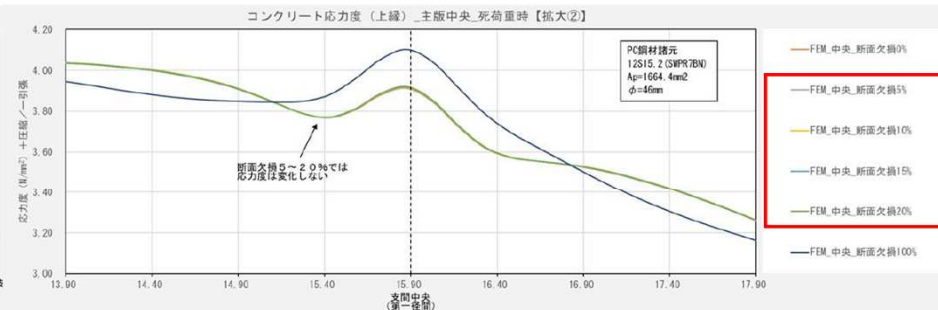
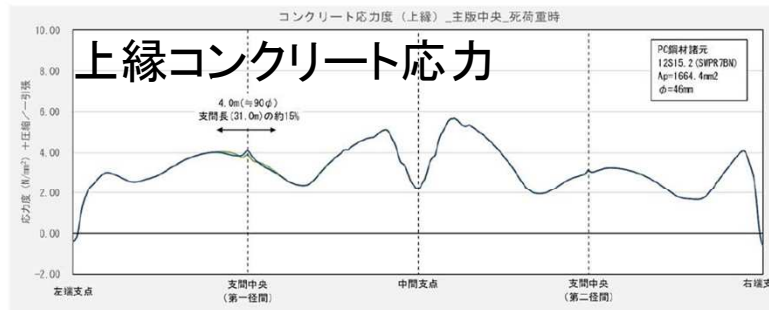
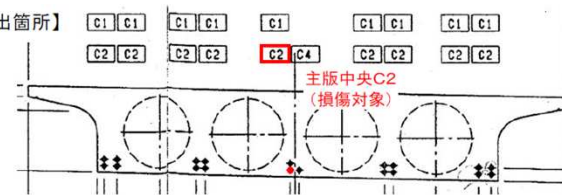


解析結果(支間中央, PC鋼材断面欠損)

【コンクリート応力度抽出箇所】

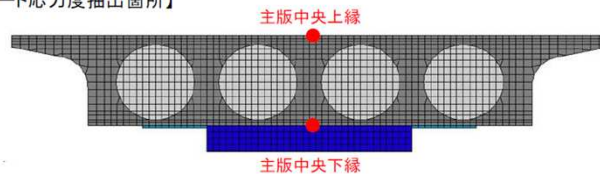


【鋼材応力度抽出箇所】

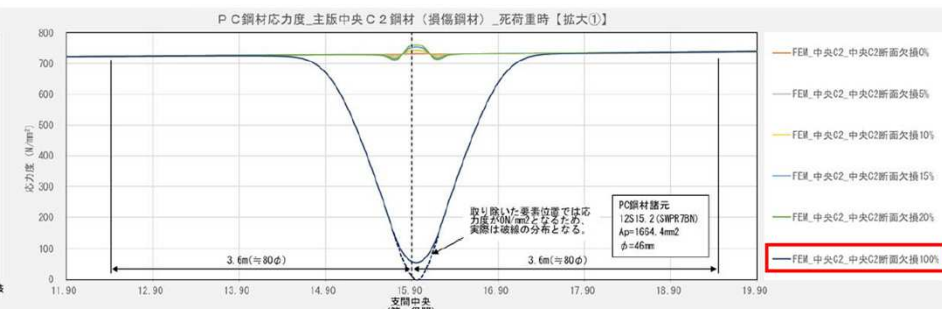
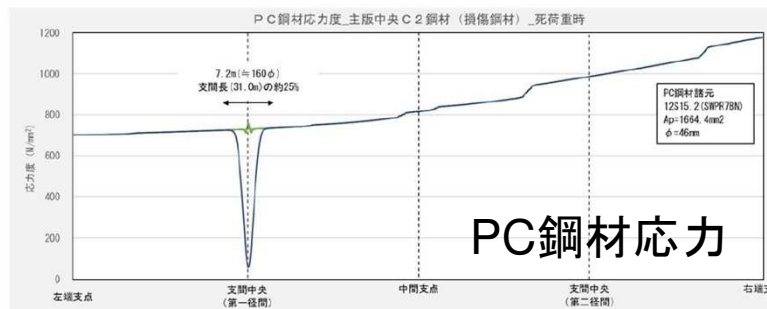
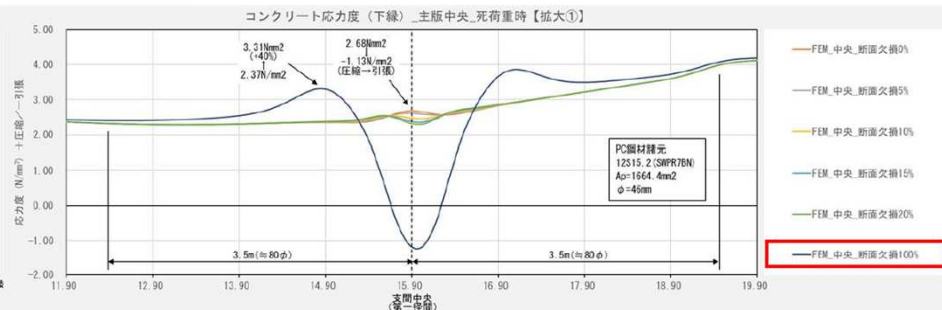
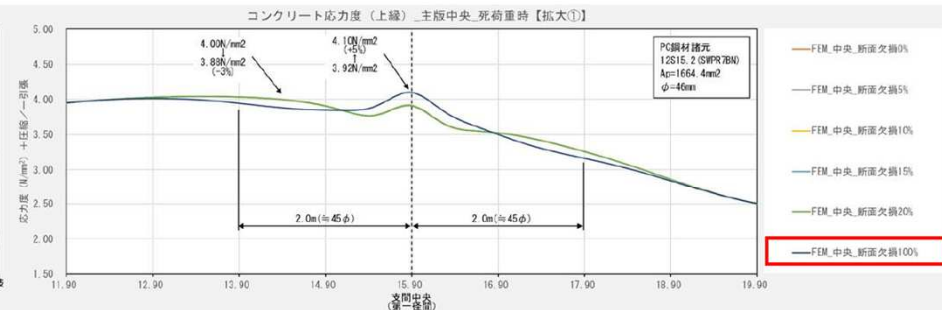
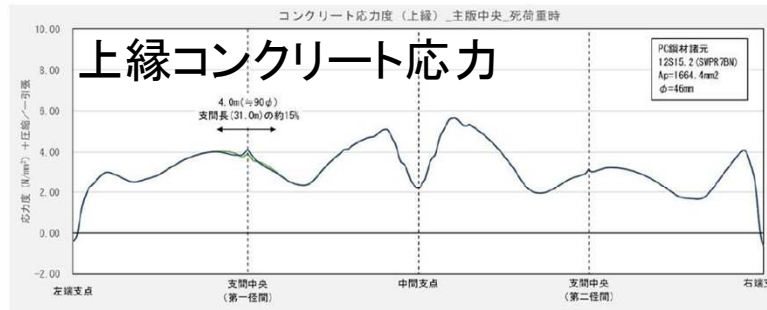
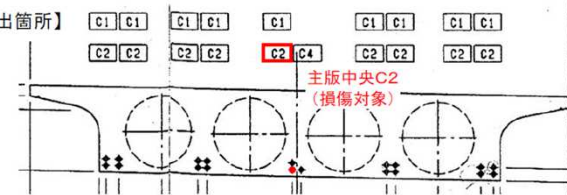


解析結果(支間中央, PC鋼材破断)

【コンクリート応力度抽出箇所】



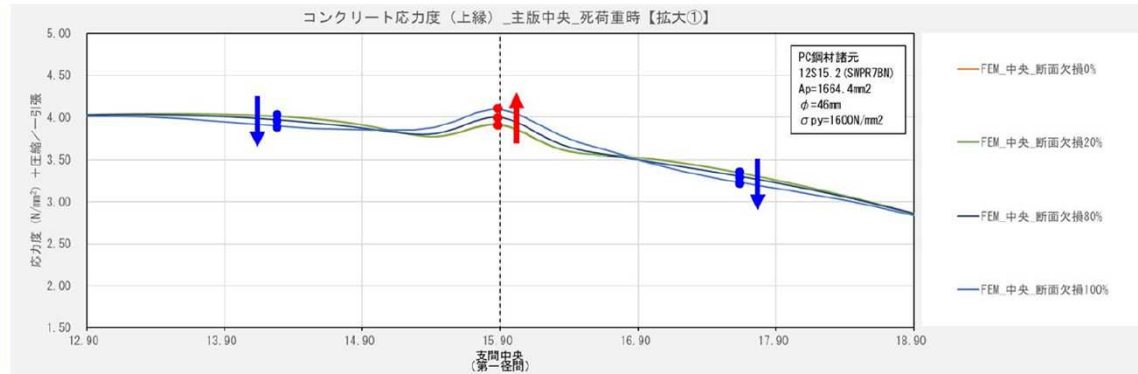
【鋼材応力度抽出箇所】



シナリオ2-A（支間中央，PC鋼材断面欠損or破断）

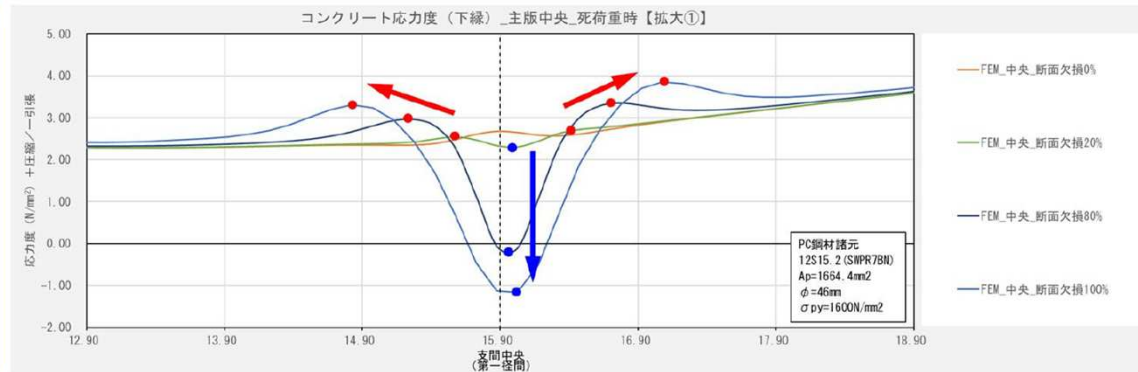
床版上縁

- ・ 損傷が進行するにつれて応力度は一様に**変化**する（損傷位置は増加、損傷位置前後は減少）。ただし、床版下縁に比べて変化の割合は小さい。
- ・ 損傷の進行に関わらず、応力度の**ピーク位置**は**変化しない**。



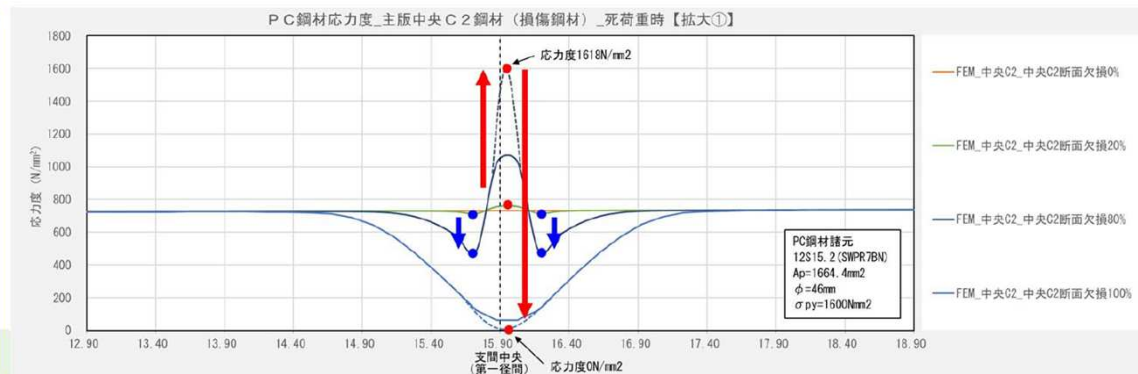
床版下縁

- ・ 損傷が進行するにつれて応力度は一様に**変化**する（損傷位置は減少、損傷位置前後は増加）。
- ・ **損傷位置**では、損傷の進行に関わらず、応力度の**ピーク位置**は**変化しない**。
- ・ **損傷位置前後**では、損傷の進行に応じて応力度の**ピーク位置**が**変化**する（損傷位置から離れる方向に遷移する）。

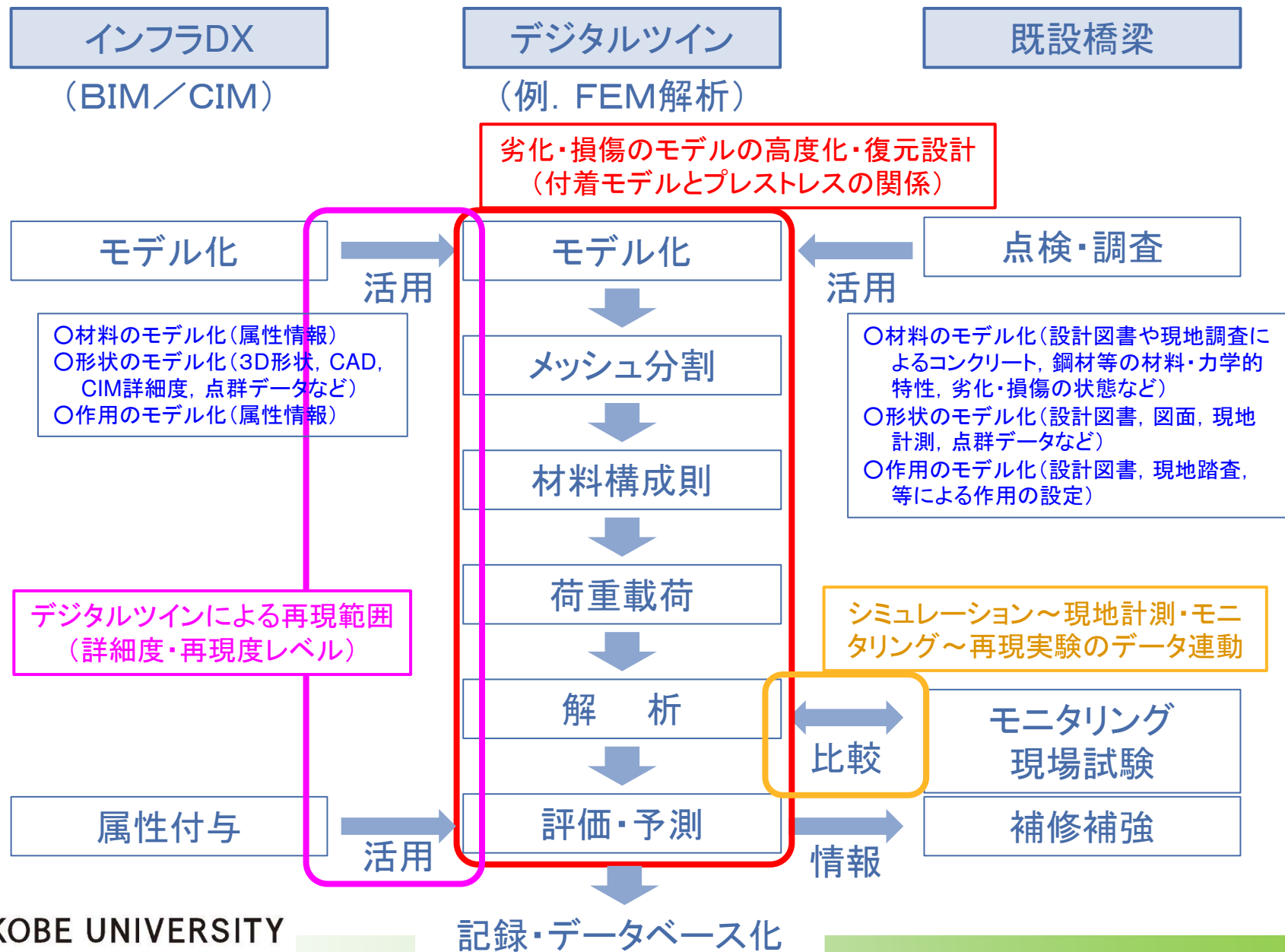


PC鋼材応力度

- ・ 応力度が変化する傾向が**腐食状態と破断状態で異なる**。
- ・ **腐食状態**では、**残存するPC鋼材の応力集中（増加）**が生じる。一方、損傷位置前後では局部的にプレストレスロスが生じる。
- ・ **破断状態**では、残存するPC鋼材の応力集中（増加）が解放され、プレストレスロスの範囲を広めながら**損傷位置の応力度が消失**する。



提案①デジタルツイン実装の作業フロー



腐食に伴うPC鋼より線の プレストレス力の低下

神戸大学大学院博士論文, 2024年3月

Li Jingyuan

Effect of Degraded Characteristics of Corroded PC Steel
Strands on Prestressed Concrete Beams
under Static and Fatigue Loads

(腐食したPC鋼ストランドの特性の低下が
静的荷重と疲労荷重を受ける
プレストレストコンクリートはりに与える影響)

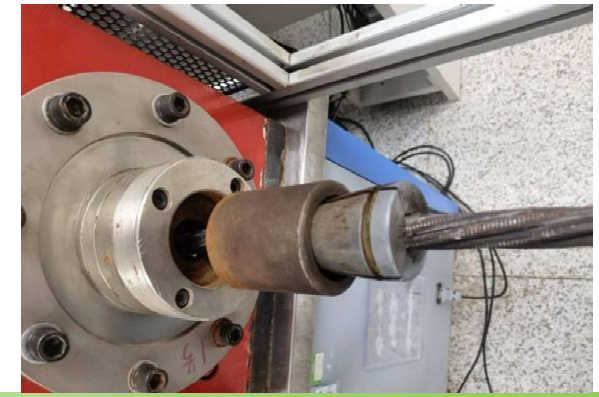
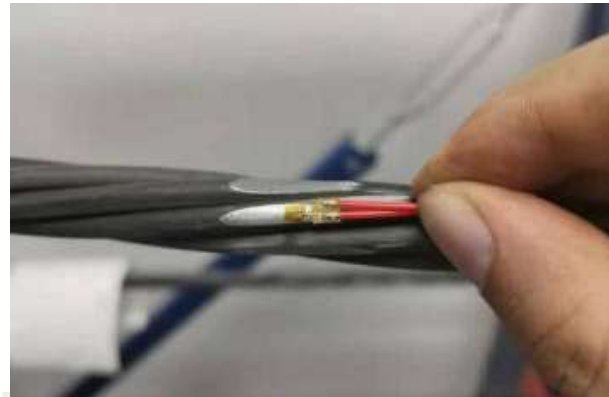
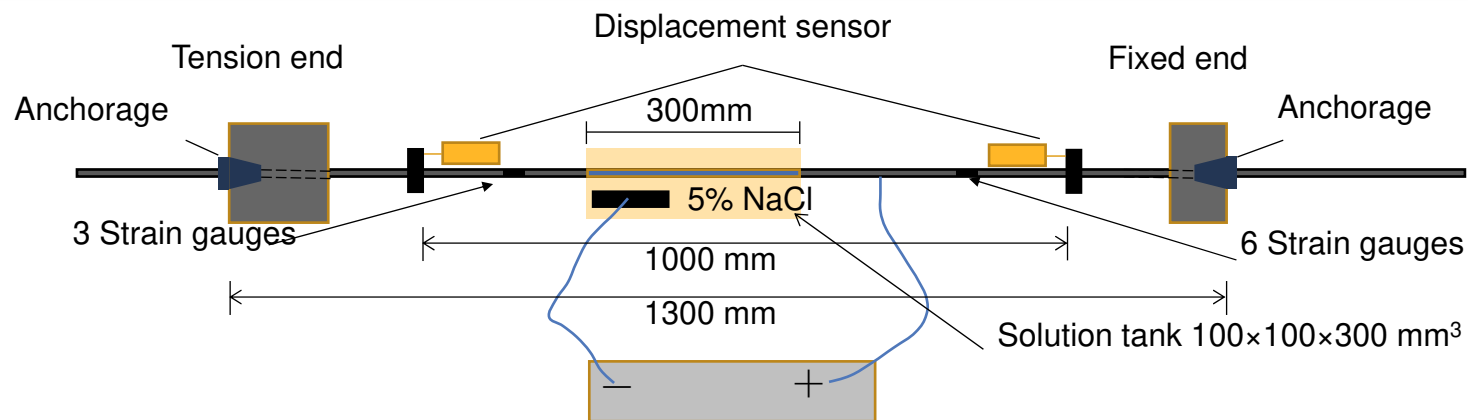


KOBE UNIVERSITY

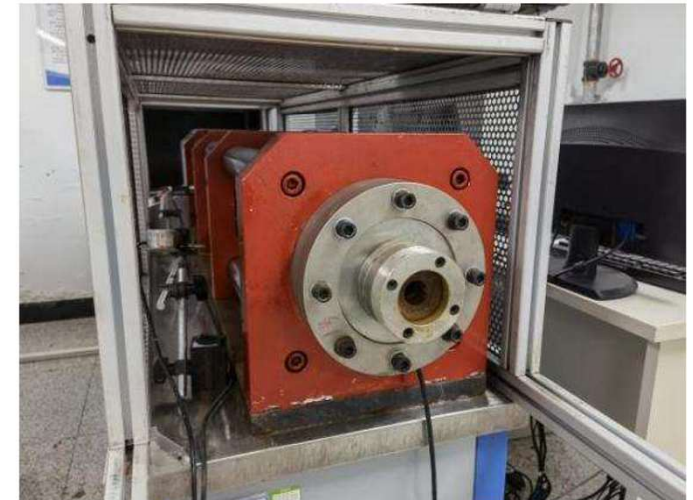
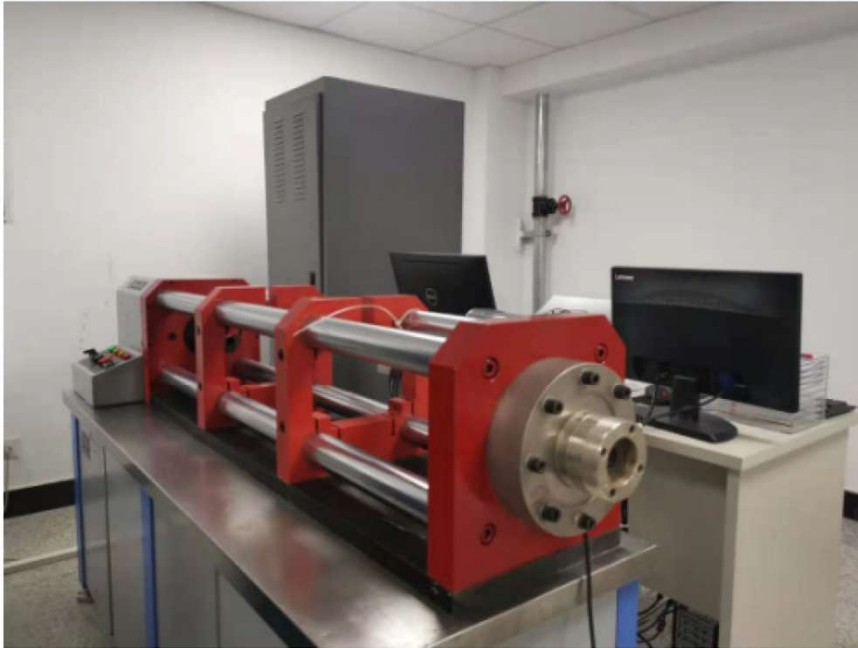
プレストレス作用下における PC鋼より線の腐食試験(第1シリーズ)

Mechanical properties of specimens

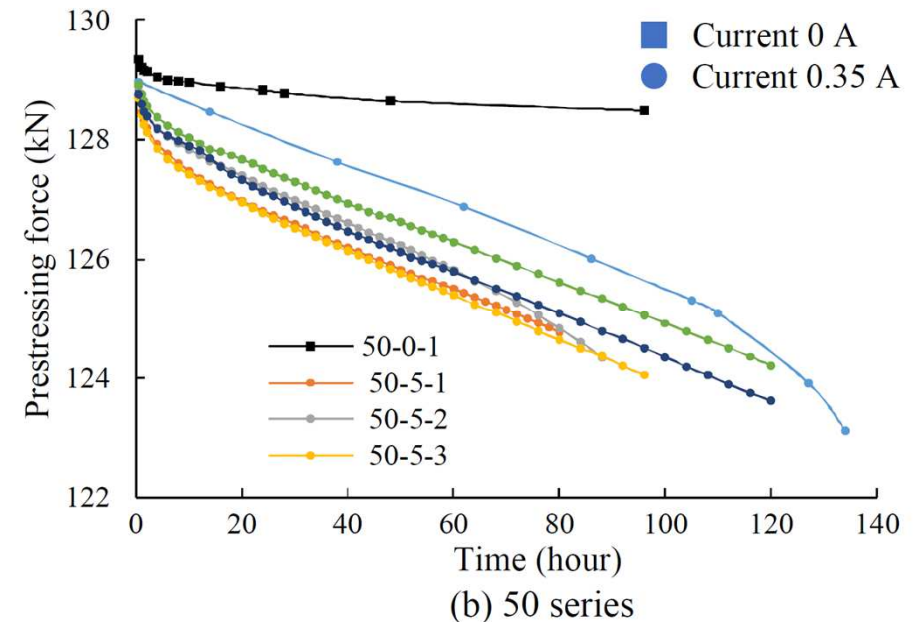
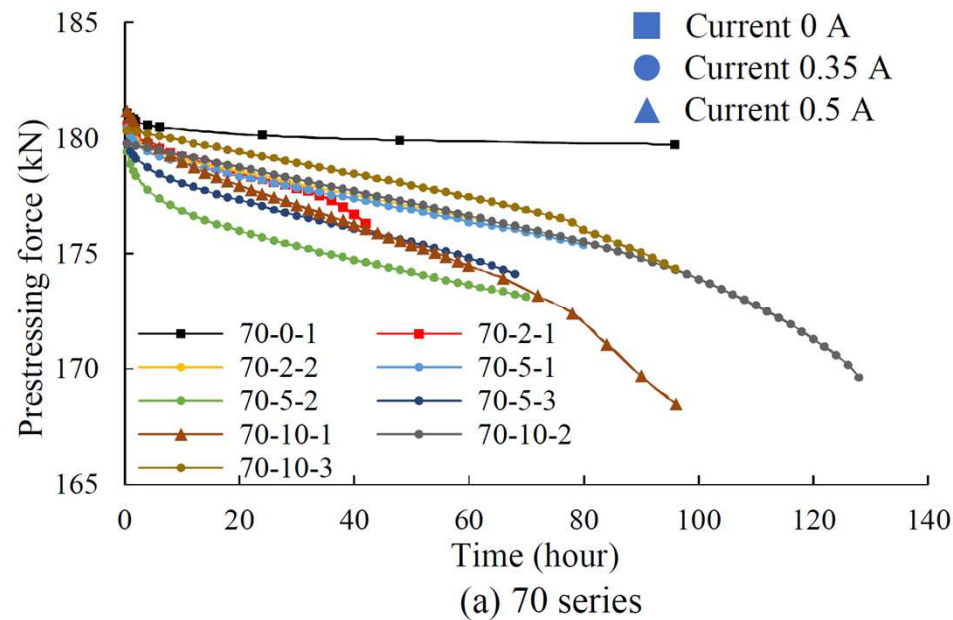
Maximum tensile force	Yield strength	Ultimate strength	Yield Strain	Ultimate strain	Elastic modulus	Elongation rate	Weight per meter
267kN	1830MPa	1938MPa	$0.012\varepsilon_{pu}$	$0.03\varepsilon_{pu}$	195GPa	5.5%	1104g/m



PC鋼材のリラクセーション試験装置

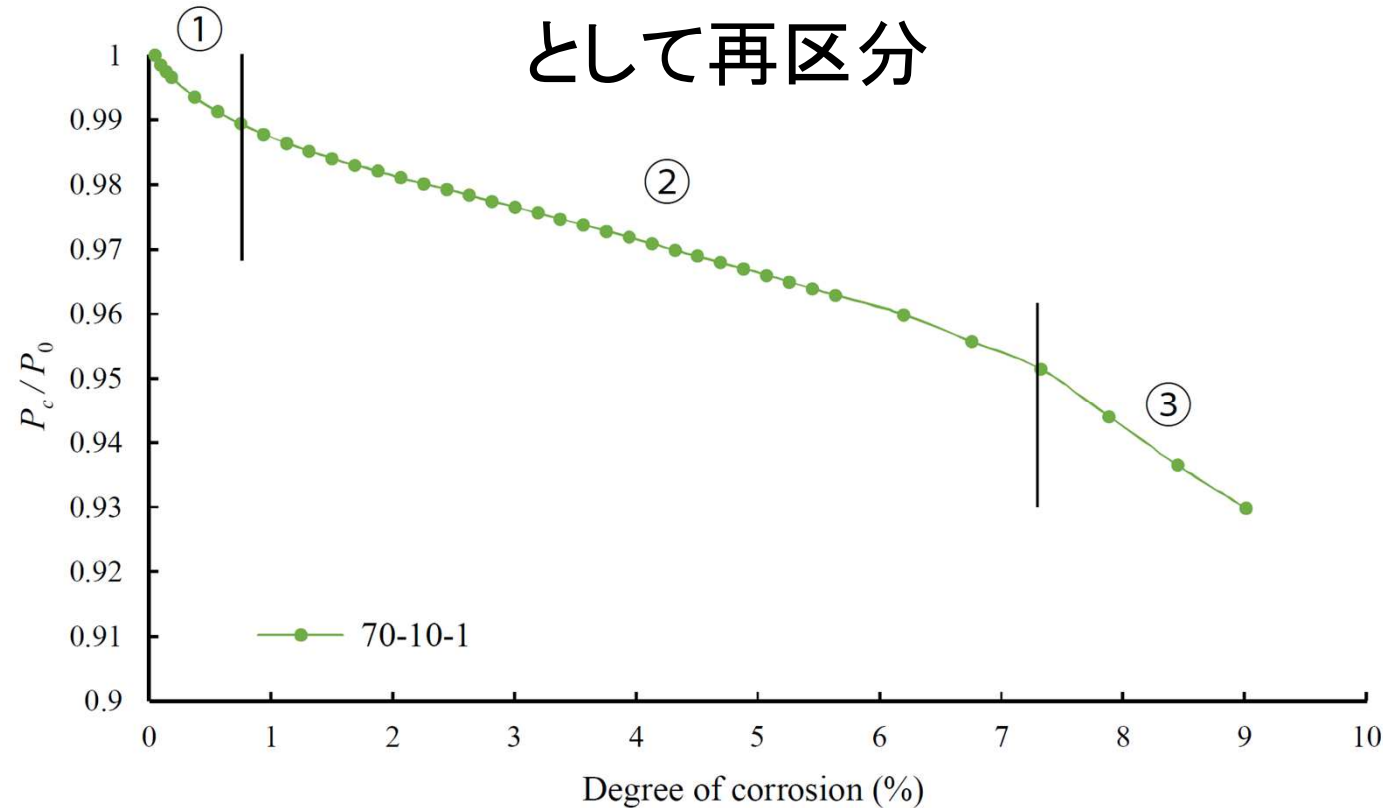


電食試験中のプレストレス力の変化 (第1シリーズ)



プレストレス力低下の3つのステージ

後に2つのステージ(②と③のみ)
として再区分



$$n = a \frac{M}{NFm_0} IT$$

ファラデーの法則に基づく質量減少率

Specimen No.	70-2-1	70-2-2	70-5-1	70-5-2	70-5-3	70-10-1	70-10-2	70-10-3
Measured mass loss (%)	2.0	1.9	6.0	4.5	4.5	9.0	8.2	5.8
Calculated mass loss (%)	2.8	4.1	5.3	4.7	4.5	9.1	8.5	6.4
a	0.71	0.46	1.13	0.98	0.99	0.99	0.96	0.91

Specimen No.	50-5-1	50-5-2	50-5-3	50-10-1	50-10-2	50-10-3
Measured mass loss (%)	5.6	5.1	7.2	8.5	7.8	8.4
Calculated mass loss (%)	5.3	5.9	6.4	8.9	8.0	8.0
a	1.05	0.87	1.12	0.96	0.98	1.05

intensity. Faraday's first law of electrolysis can be expressed as,

$$\Delta w = \frac{M}{NF} IT \quad (1)$$

where Δw is the mass of metal corrosion; I is the current intensity; M is the atomic mass of metal; F is the Faraday constant ($F = 96485$); N is the number of valence electrons lost by oxidation of a metal; T is the corrosion time.

Faraday's law is used to calculate the theoretical mass of metal corrosion. Eq. (1) can be translated into Eq. (2) to calculate mass loss as the degree of corrosion.

$$n = \frac{M}{NFm_0} IT \quad (2)$$

where n is the calculated mass loss of the corroded steel stands and m_0 is the initial mass of the corroded steel

stands. Equation (2) can be written as $T = \frac{nNFm_0}{MI}$ to calculate the corrosion time.

$$n = a \frac{M}{NFm_0} IT \quad (3)$$

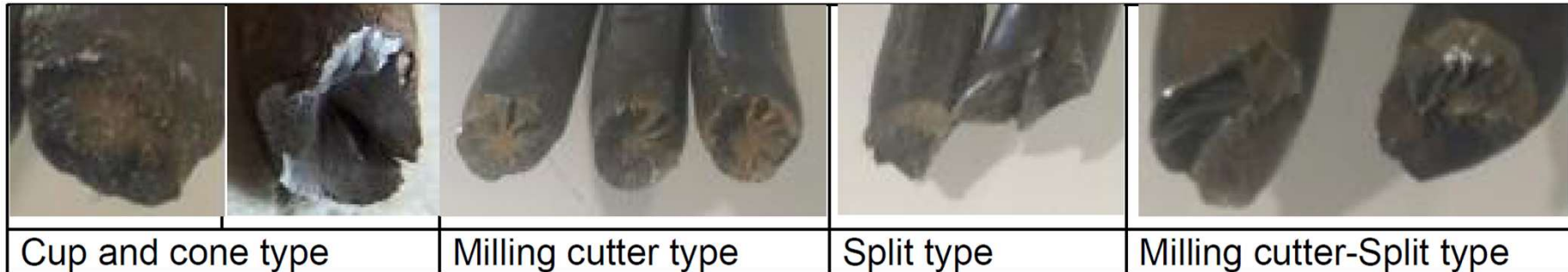
where a is a variable parameter for each specimen and obtained as the measured mass loss divided by the calculated mass loss based on Eq. (2).



電食試験の結果

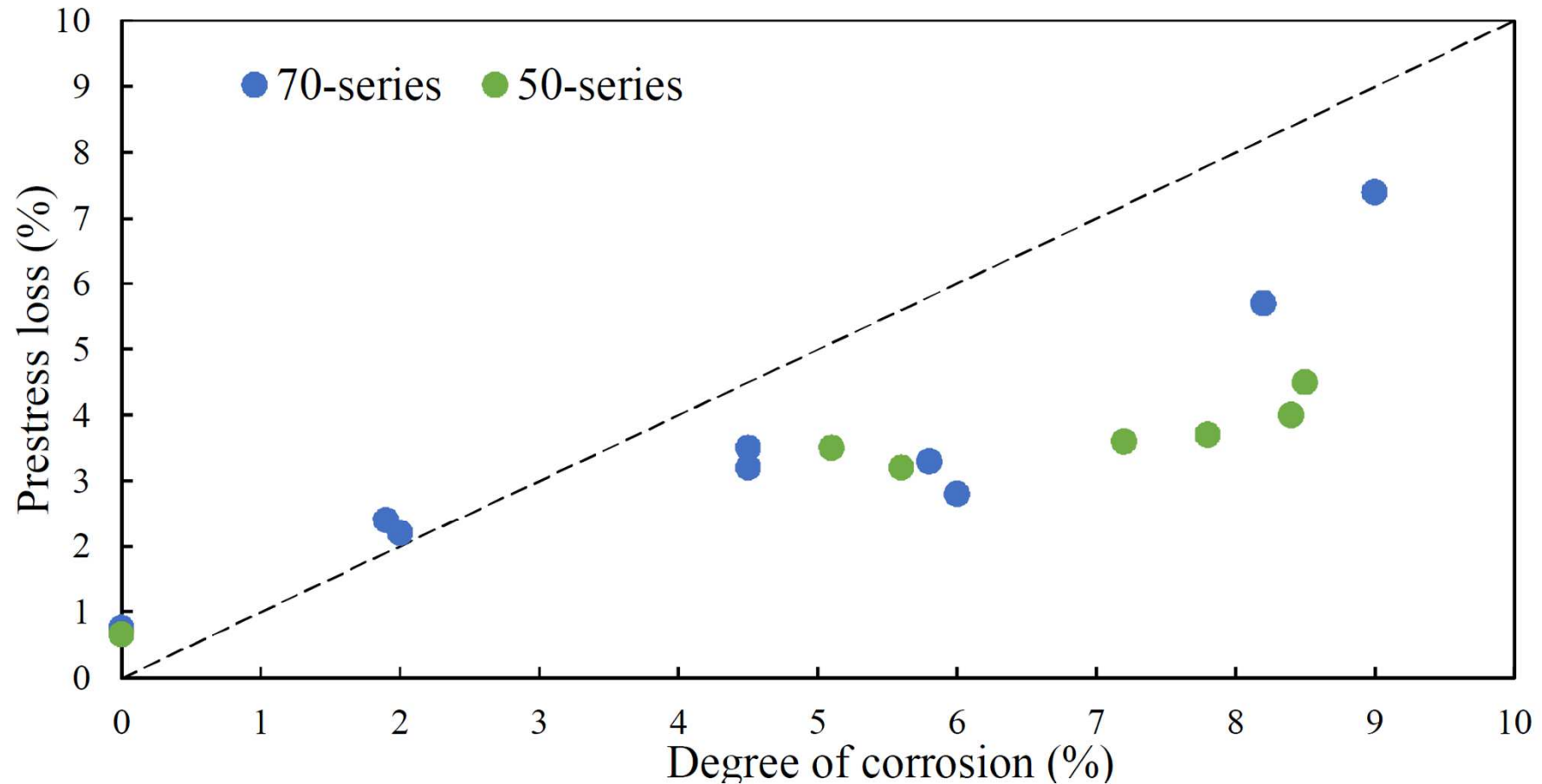
Specimen No.	Prestress degree	Mass loss	Max mass loss	Prestress loss	Failure
70-10-1	70%(182kN)	9.2%	10.7%	7.46%	C
70-10-2		8.8%	10.2%	6.29%	C
70-10-3		5.8%	10%	3.67%	C
70-2-1		2%	2.67%	2.18%	T
70-2-2		1.9%	3.68%	2.36%	T
70-5-1		6%	6.24%	2.78%	T
70-5-2		4.54%	4.95%	3.15%	T
70-5-3		4.46%	5.33%	3.52%	T
50-5-1	50%(130kN)	5.6%	5.85%	3.2%	T
50-5-2		5.1%	6.24%	3.53%	T
50-5-3		7.15%	7.53%	3.61%	T
50-10-1		9.5%	9.92%	4.54%	C
50-10-2		7.8%	8.82%	3.65%	T
50-10-3		8.4%	9.1%	4%	T

PC鋼より線の素線破断面（電食試験）

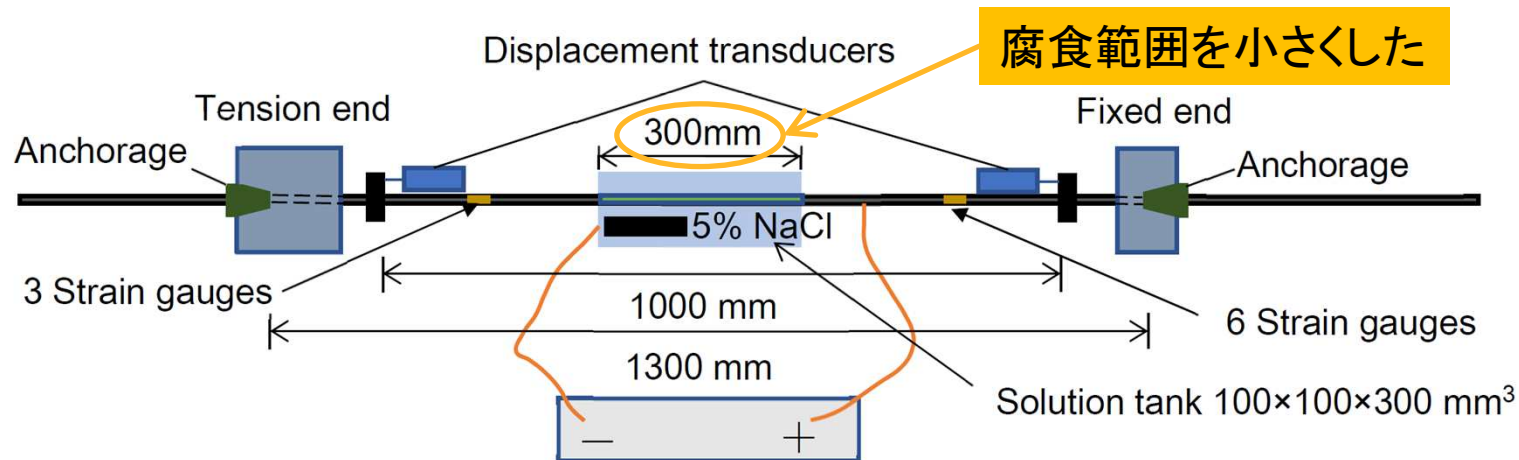


Specimen NO.	Fracture section	Fracture type	Necking degree	Mass loss	Prestress loss
70-10-1		Milling cutter type	Severe	9.2%	7.46%
70-10-2		Milling cutter type Cup and cone type	Severe	8.8%	6.29%
70-10-3		Split type	None	5.8%	3.67%
50-10-1		Milling cutter type Split type	Slight	9.5%	4.54%

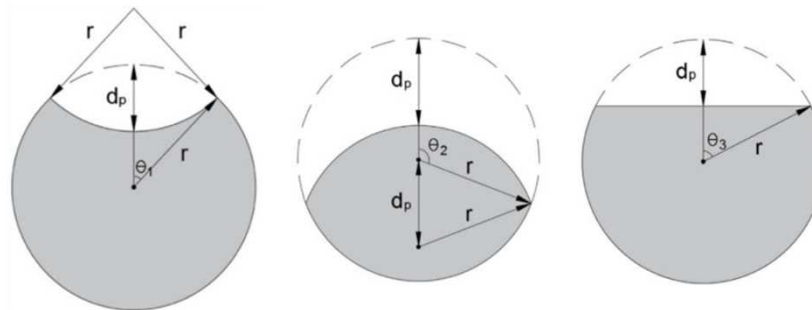
腐食率とプレストレス力低下の関係



腐食に伴う断面欠損量の測定(第2シリーズ)



腐食に伴う断面欠損形状を3つに分類(Type1~3), 欠損深さを測定して, 断面減少量を算出した



(a) Type 1

(b) Type 2

(c) Type 3

$$\text{Type 1: } A_{sl1} = 2r^2(\theta_1 - \sin\theta_1\cos\theta_1) \quad \text{for } 0 \leq d_p \leq 2r \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arccos\left(1 - \frac{d_p}{2r}\right) \quad (2)$$

$$\text{Type 2: } A_{sl2} = r^2(2\theta_2 - \pi - 2\sin\theta_2\cos\theta_2) \quad \text{for } 0 \leq d_p \leq 2r \quad (3)$$

$$\theta_2 = \arccos\left(-\frac{d_p}{2r}\right) \quad (4)$$

$$\text{Type 3: } A_{sl3} = r^2(\theta_3 - \sin\theta_3\cos\theta_3) \quad \text{for } 0 \leq d_p \leq 2r \quad (5)$$

$$\theta_3 = \arccos\left(1 - \frac{d_p}{r}\right) \quad (6)$$



PC鋼より線の腐食試験（第2シリーズ）

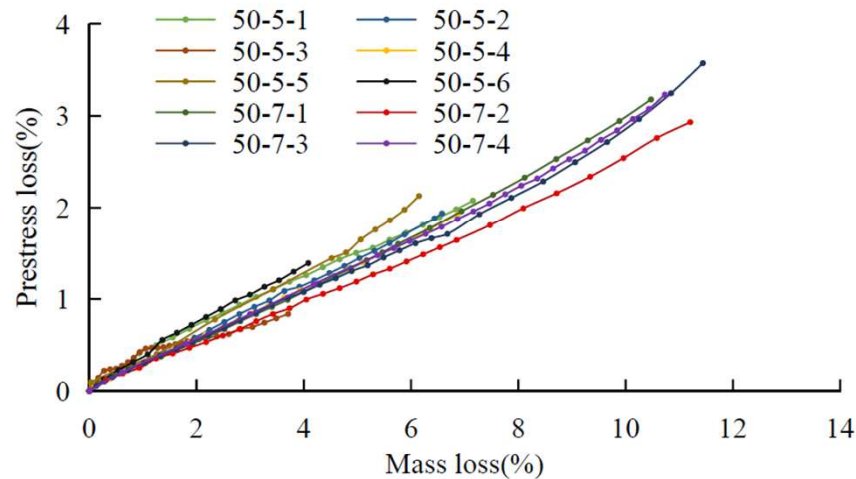
Specimen No.	Mass loss (%)	Maximum cross-sectional loss (%)	Prestress loss (%)	Test series which the wire was ruptured ^{*1}
50-5-1	7.2	22.3	2.1	T
50-5-2	6.6	21.8	1.9	T
50-5-3	3.7	7.8	0.8	T
50-5-4	6.9	24.3	1.9	T
50-5-5	6.6	26.4	2.1	T
50-5-6	4.1	15.3	1.4	T
50-7-1	10.5	30.1	3.2	T
50-7-2	11.2	30.3	2.9	T
50-7-3	11.4	31.9	3.6	T
50-7-4	10.7	31.4	3.2	T
50-7-5	8.4	35.1	3.1	C
50-10-1	12.0	35.9	4.1	C
50-10-2	10.1	47.1	3.3	C
50-10-3	14.7	40.6	4.7	C
50-10-4	7.2	26.5	2.6	C
50-10-5	10.8	37.3	4.0	C

*1 Test series the wire was ruptured: C means failure in the corrosion test and T means failure in the tensile loading test

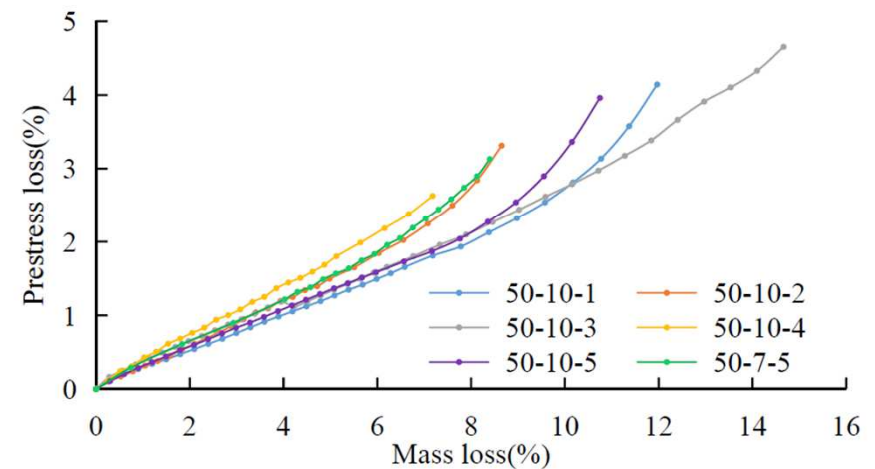


電食試験中のプレストレス力の変化 (第2シリーズ)

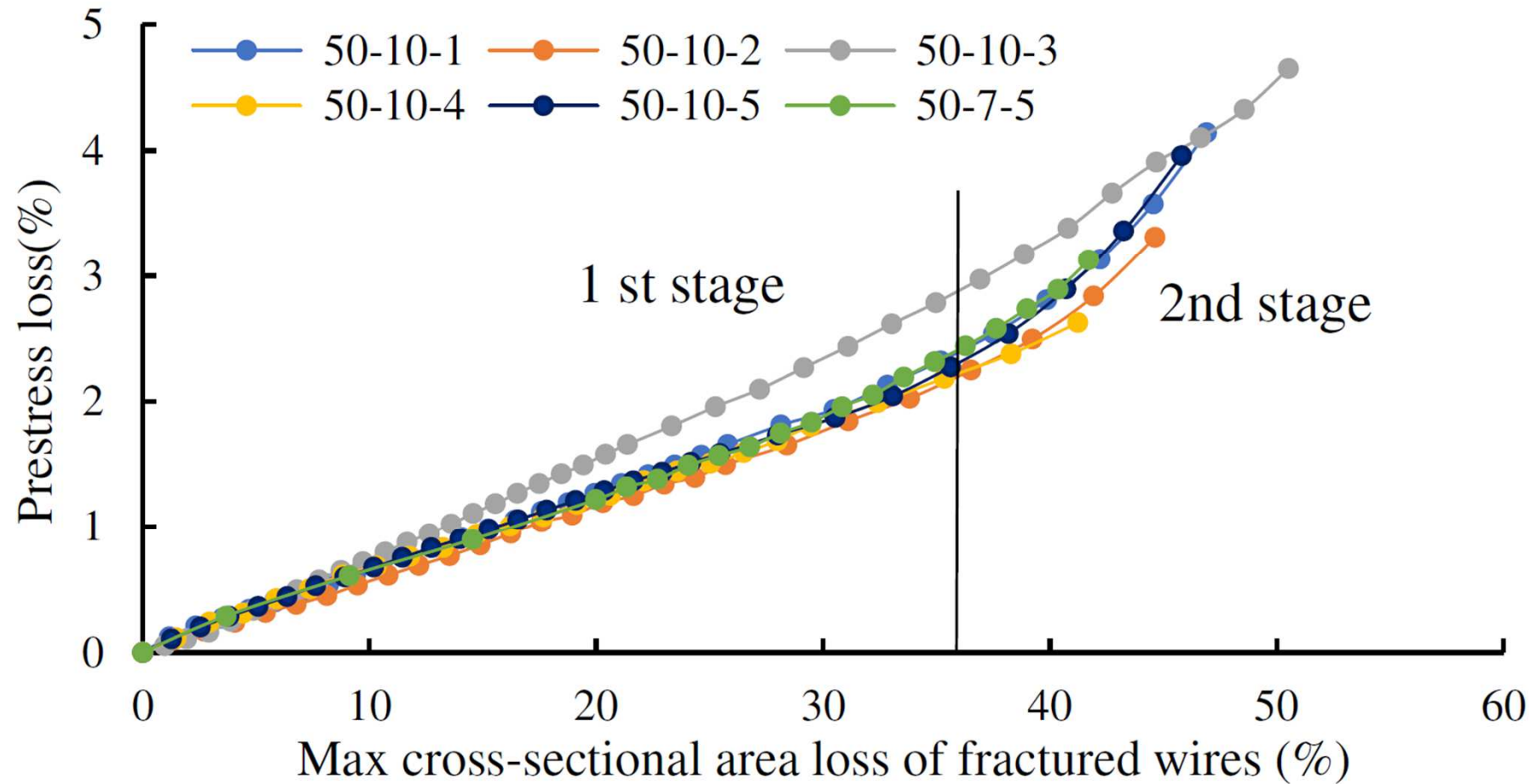
腐食試験で破断なし→引張試験
(腐食率5%, 7%)



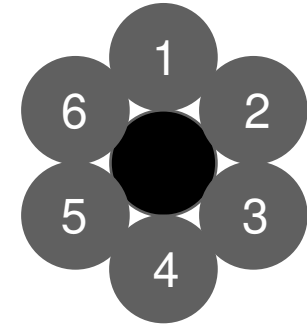
腐食試験で破断した供試体
(腐食率7%, 10%)



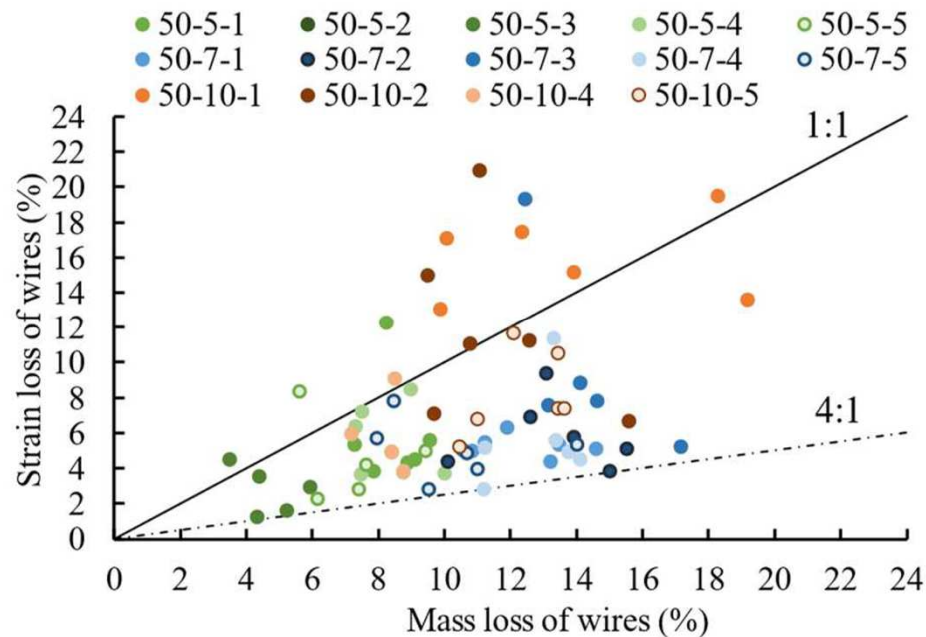
プレストレス力低下の2つのステージ



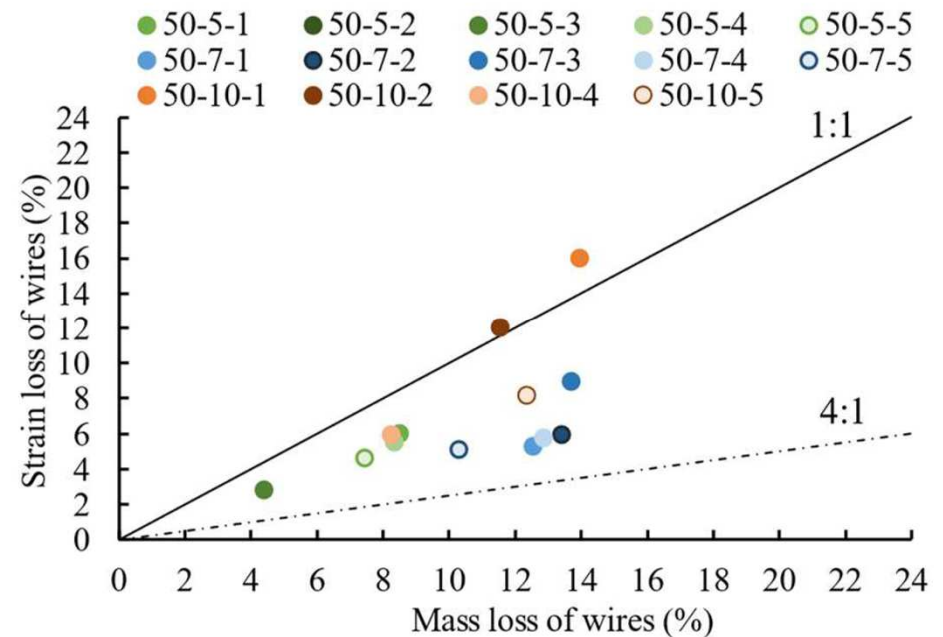
電食試験中のPC鋼より線(7本) 素線(側線6本)のひずみの変化



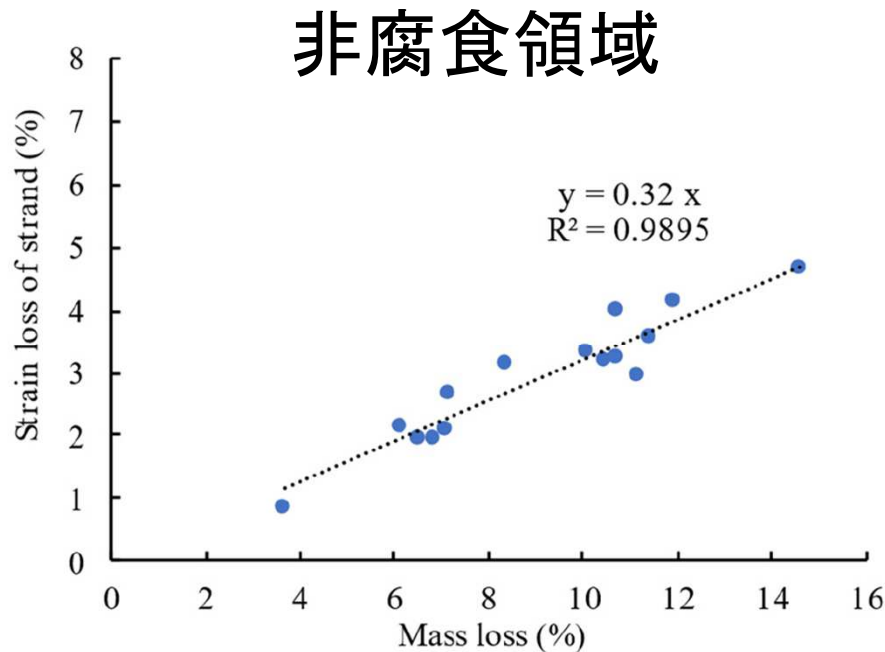
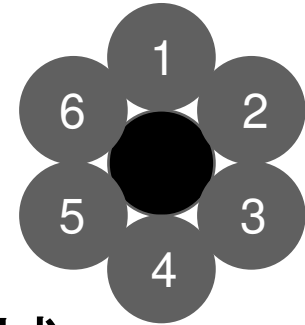
全データ



PC鋼より線1本あたりの
素線(側線6本)の平均値

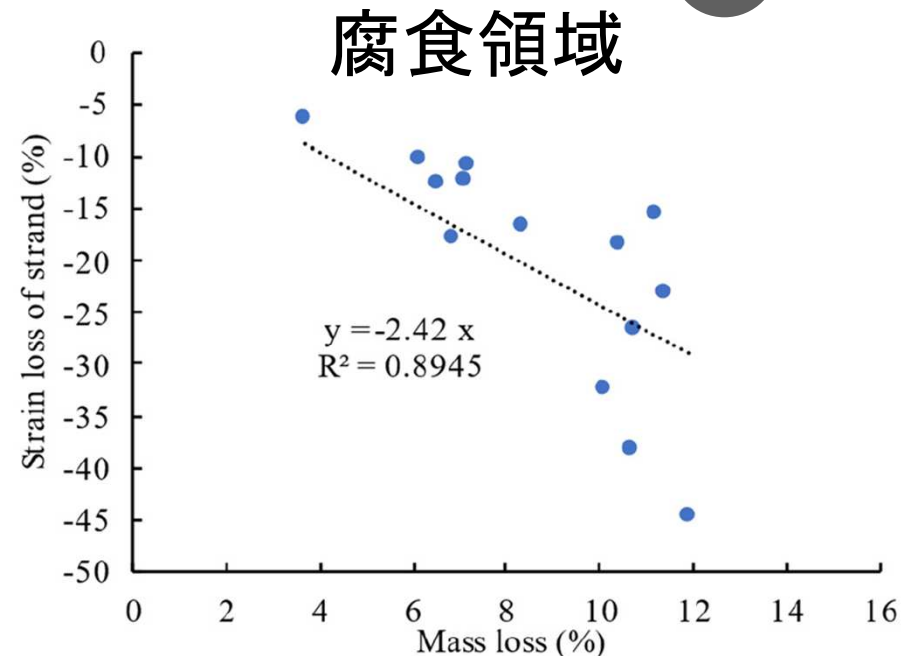


電食試験中のPC鋼より線(7本) 素線(側線6本)のひずみの変化



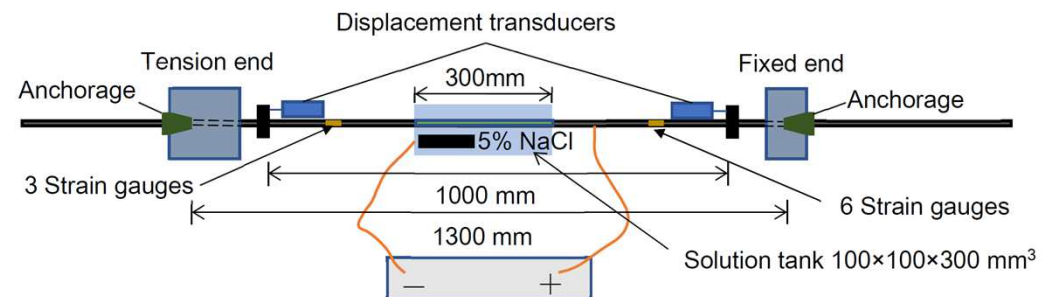
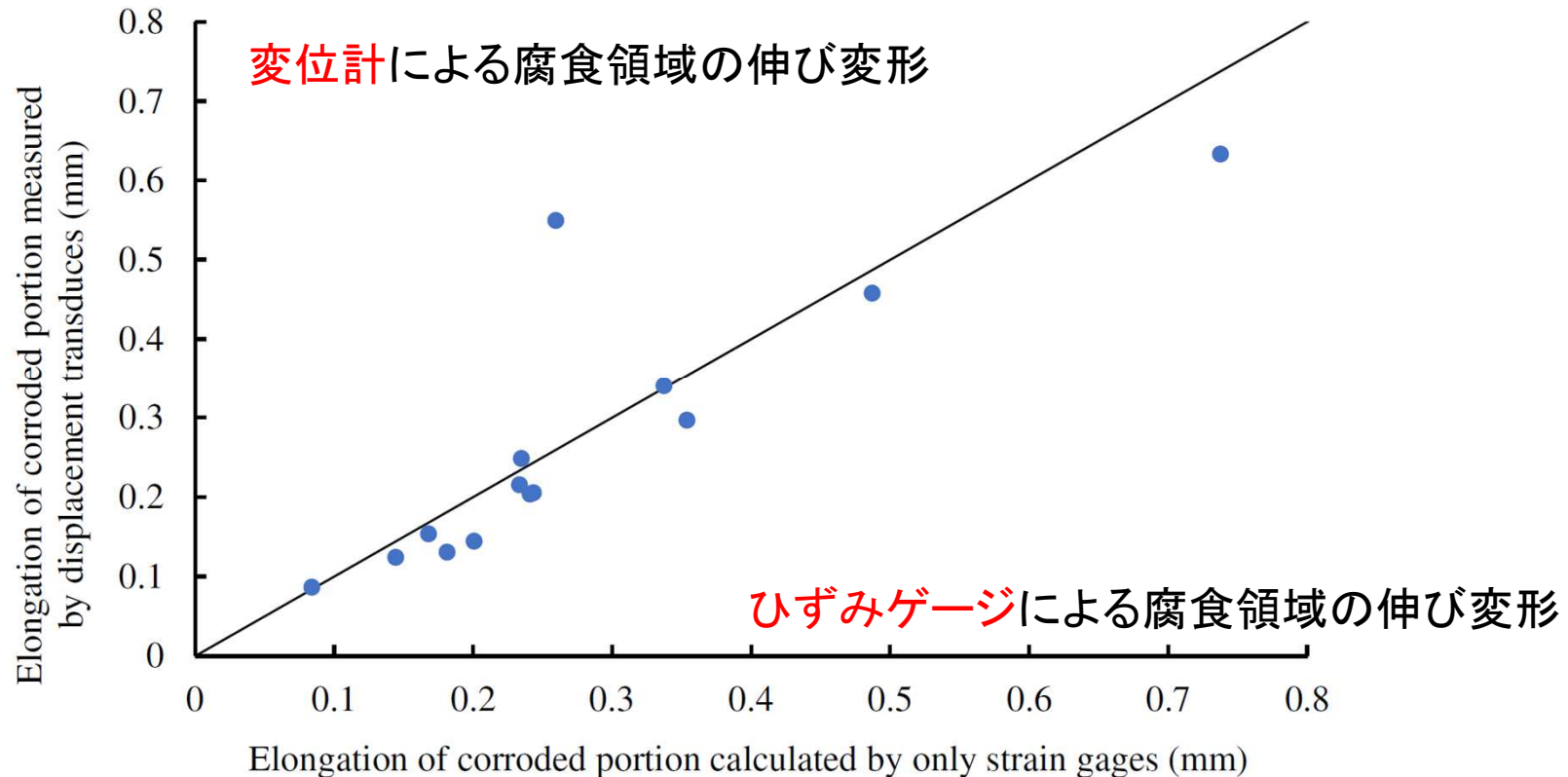
非腐食領域では、腐食の進行に伴い、
ひずみは減少(縮む変形)している

$$\varepsilon_{loss\ uncorroded} = 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{P_c / (E A_c)}{P_0 / (E A_0)} \quad (12)$$

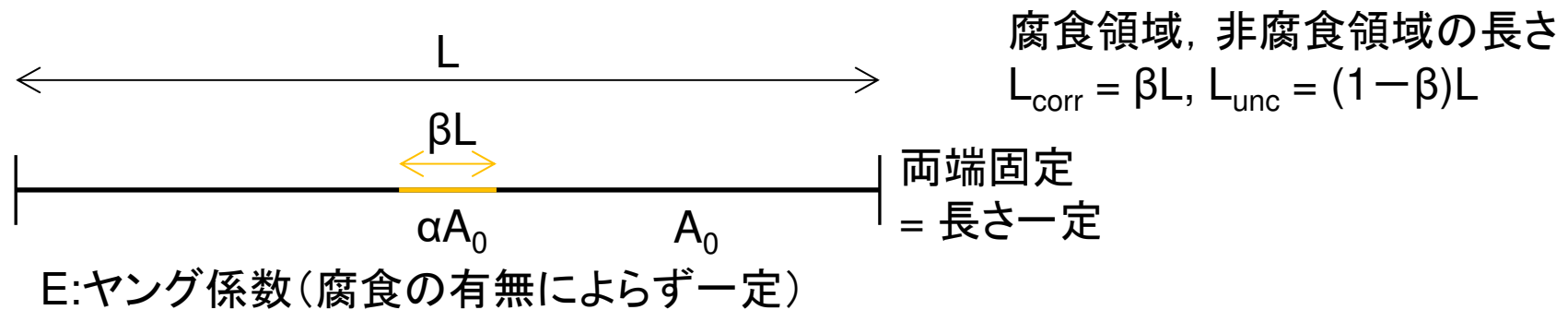


腐食領域では、ストランドのひずみロスの
値がマイナス(増加)であり、腐食の進行に
伴いひずみは増加(伸びる変形)している

ひずみ・変位の計測結果の妥当性



部分的に断面欠損したPC鋼材



初期状態: $P_0 = A_0 E \varepsilon_0$

断面欠損後:

非腐食領域 $P_{\text{unc}} = A_{\text{unc}} E \varepsilon_{\text{unc}} = A_0 E \varepsilon_{\text{unc}}$

腐食領域 $P_{\text{corr}} = A_{\text{corr}} E \varepsilon_{\text{corr}} = \alpha A_0 E \varepsilon_{\text{corr}}$

力の釣り合いより, $P_{\text{unc}} = P_{\text{corr}}$

$\therefore \varepsilon_{\text{unc}} = \alpha \varepsilon_{\text{corr}} \dots \textcircled{1}$

断面欠損前後の鋼材長さ一定の仮定
 (変形の適合)より,

$$\Delta L = \Delta L_{\text{unc}} + \Delta L_{\text{corr}} = 0$$

$$\therefore \Delta L_{\text{unc}} = -\Delta L_{\text{corr}}$$

非腐食領域のひずみ変化

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{unc}} &= \varepsilon_0 + \Delta L_{\text{unc}} / L_{\text{unc}} = \varepsilon_0 - \Delta L_{\text{corr}} / L_{\text{unc}} \\ &= \varepsilon_0 - \Delta L_{\text{corr}} / (1 - \beta)L \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta L_{\text{corr}} = -(\varepsilon_{\text{unc}} - \varepsilon_0) * (1 - \beta)L \dots \textcircled{2}$$

腐食領域のひずみ変化

$$\varepsilon_{\text{corr}} = \varepsilon_0 + \Delta L_{\text{corr}} / \beta L$$

$$\therefore \Delta L_{\text{corr}} = (\varepsilon_{\text{corr}} - \varepsilon_0) * \beta L \dots \textcircled{3}$$

②=③より

$$-(\varepsilon_{\text{unc}} - \varepsilon_0) * (1 - \beta)L = (\varepsilon_{\text{corr}} - \varepsilon_0) * \beta L$$

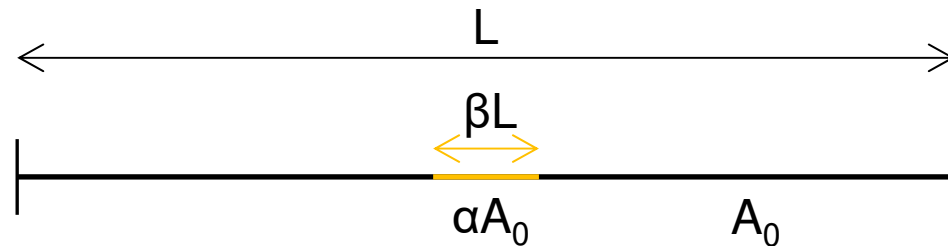
$$\therefore \varepsilon_0 = (1 - \beta) \varepsilon_{\text{unc}} + \beta \varepsilon_{\text{corr}}$$

①より,

$$\varepsilon_{\text{corr}} = \frac{1}{\alpha(1 - \beta) + \beta} \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_{\text{unc}} = \frac{\alpha}{\alpha(1 - \beta) + \beta} \varepsilon_0$$

部分的に断面欠損したPC鋼材



E:ヤング係数(腐食の有無によらず一定)

腐食領域, 非腐食領域の長さ

$$L_{\text{corr}} = \beta L, L_{\text{unc}} = (1 - \beta)L$$

両端固定
= 長さ一定

初期状態: $P_0 = A_0 E \varepsilon_0$

断面欠損後:

非腐食領域 $P_{\text{unc}} = A_{\text{unc}} E \varepsilon_{\text{unc}} = A_0 E \varepsilon_{\text{unc}}$

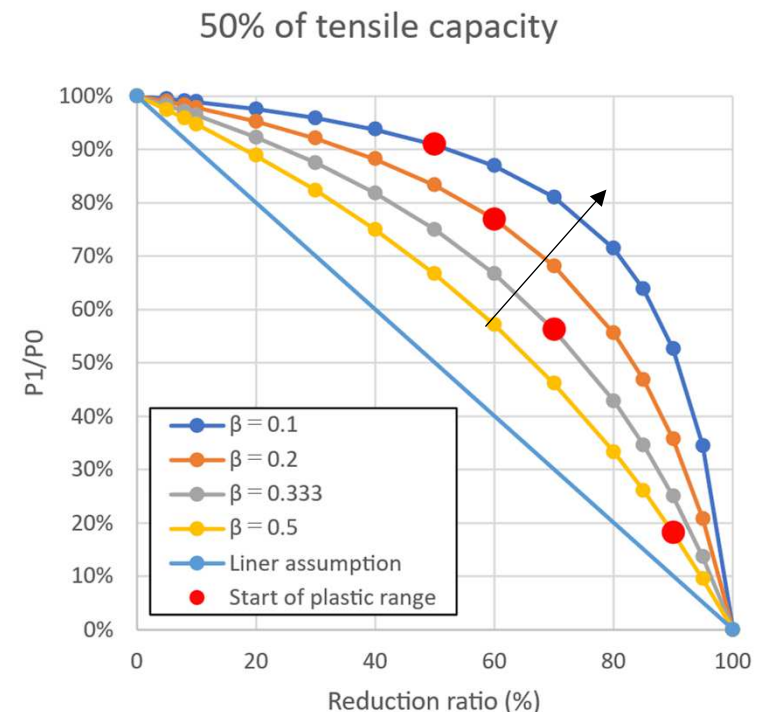
腐食領域 $P_{\text{corr}} = A_{\text{corr}} E \varepsilon_{\text{corr}} = \alpha A_0 E \varepsilon_{\text{corr}}$

非腐食領域と腐食領域は連続していて、
かつ、力は釣り合っていると仮定する。

したがって、断面欠損後の断面力(プレストレス力)は、

$$P_{\text{unc}} = P_{\text{corr}} = P_1 = A_0 E \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta)+\beta} \varepsilon_0 = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta)+\beta} P_0$$

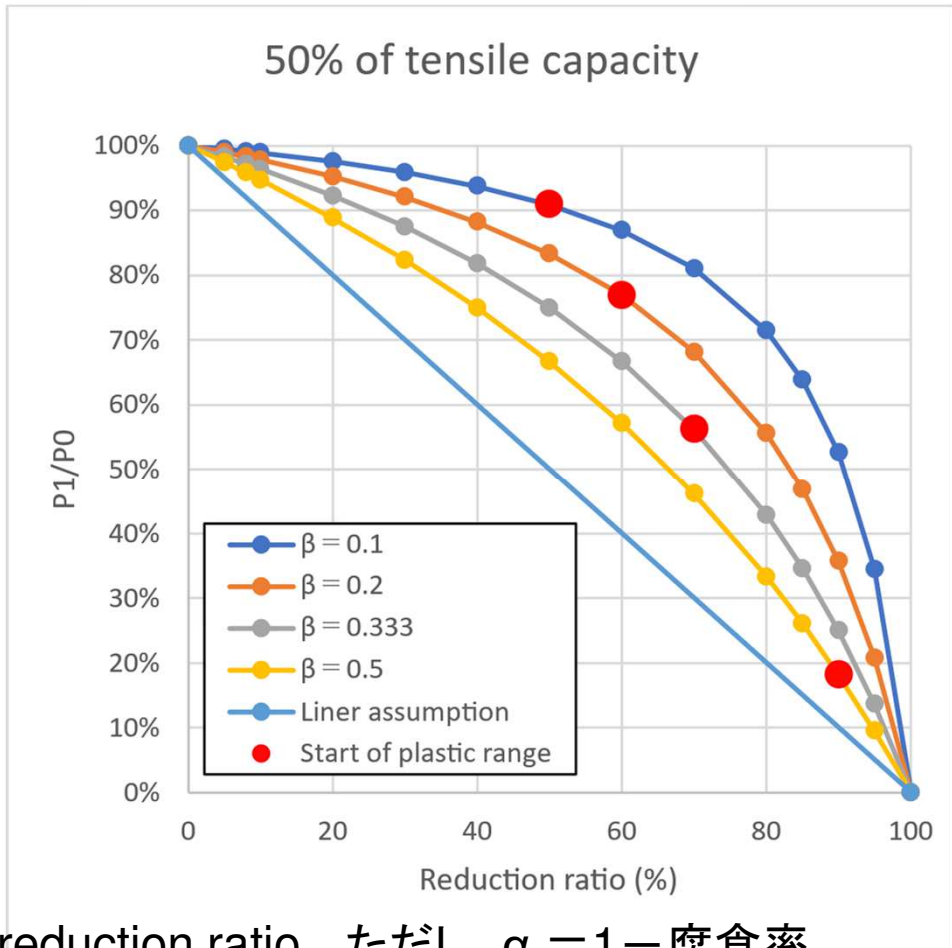
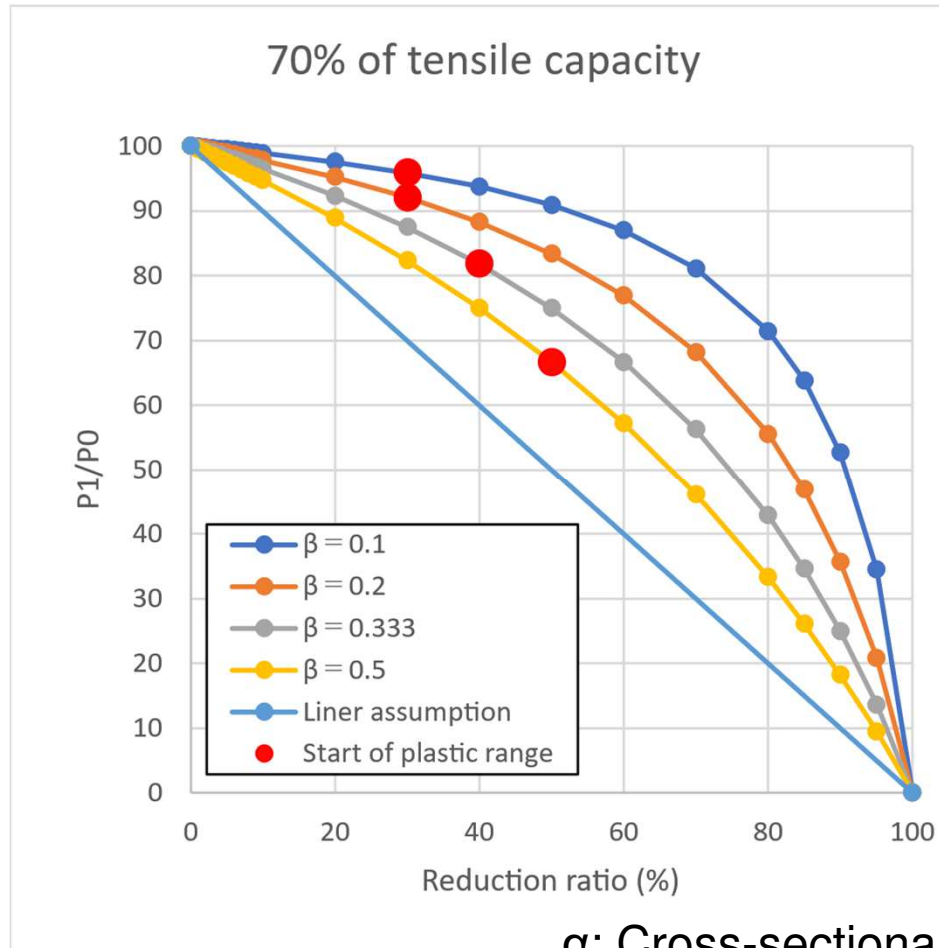
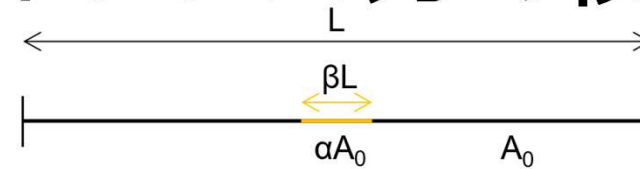
$$P_1/P_0 = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta)+\beta}$$



腐食領域の占める割合が小さくなると、
プレストレスの低下量は小さくなる
ただし、PC鋼材の弾性領域が適用範囲

断面欠損率 α とプレストレスカの関係

$$P_1 = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta)+\beta} P_0$$



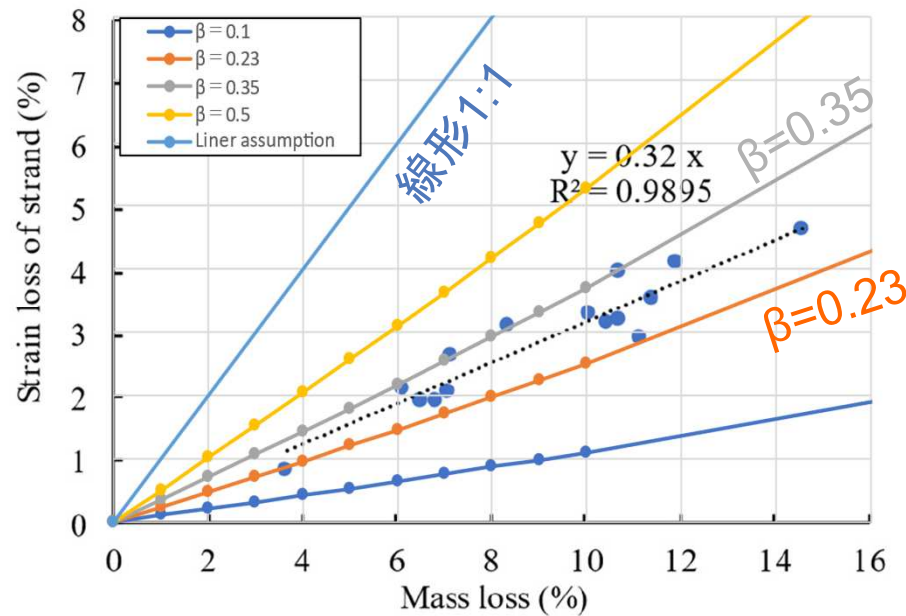
α : Cross-sectional reduction ratio ただし, $\alpha = 1 - \text{腐食率}$

β : Length ratio of portion of reduced cross section

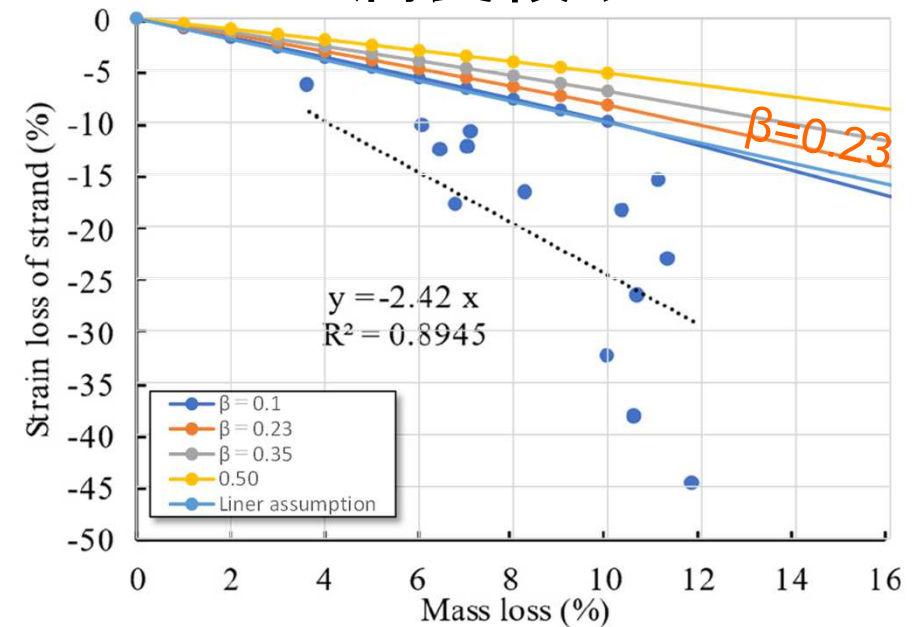


実験値と理論値の比較

非腐食領域



腐食領域



$$P_1/P_0 = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta)+\beta}$$

$$\epsilon_{\text{unc}} = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta)+\beta} \epsilon_0$$

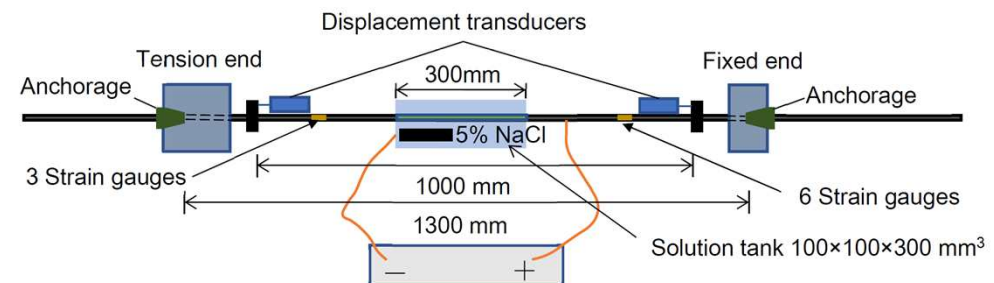
$$\epsilon_{\text{corr}} = \frac{1}{\alpha(1-\beta)+\beta} \epsilon_0$$

今回の実験

定着固定間長さ $L = 1300\text{mm}$

腐食領域長さ $L_{\text{corr}} = 300\text{mm}$

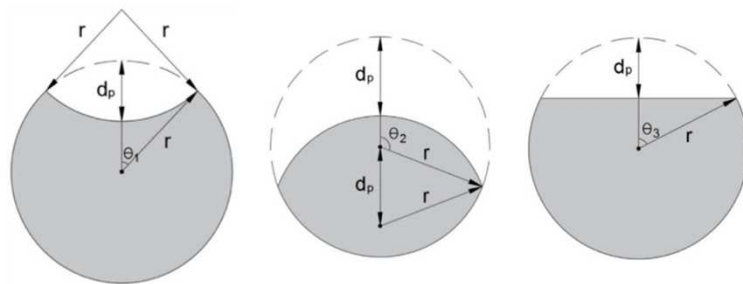
$\therefore \beta = 0.23$



PC鋼より線の引張試験（第2シリーズ）

腐食試験後に引張試験を
実施

→破断した素線の欠損断面
の区分，破断モード，断面
欠損率を計測

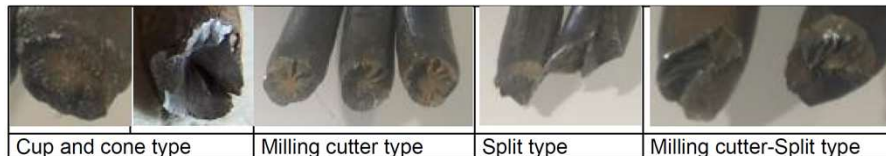


(a) Type 1

(b) Type 2

(c) Type 3

欠損断面の区分

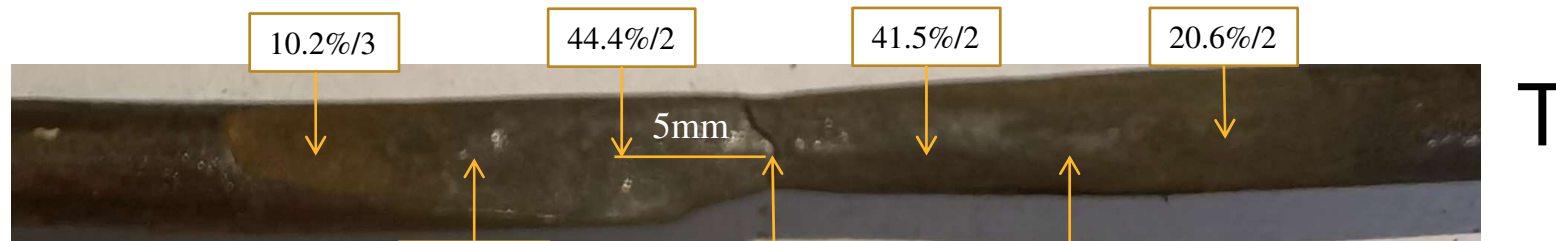


破断モード

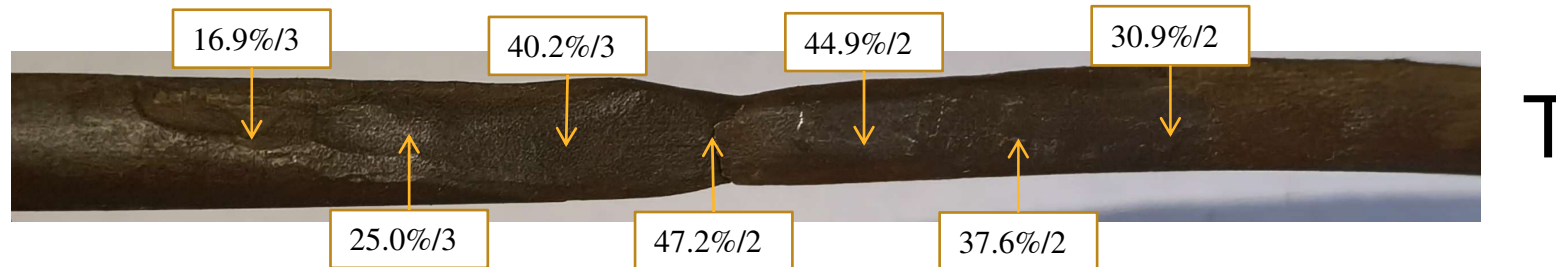
No.	Fracture type	Corrosion pitting	Left (mm)						C	Right (mm)						
			30	25	20	15	10	5	0	5	10	15	20	25	30	
			Cross-sectional area loss (%) / Cross section type of pitting													
5-1-1	S		0.0	0.0	0.6	3.8	6.8	13.3	40.8	28.4	26.1	25.4	18.5	21.8	19.8	
			-	-	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2	
5-1-2	M		3.6	0.0	16.5	19.5	30.9	32.6	29.6	28.6	22.3	18.8	19.0	16.5	16.5	
			2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
5-1-6	M		0.0	0.0	3.1	14.8	19.7	31.4	32.5	23.6	24.9	20.8	19.0	14.4	7.5	
			-	-	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	
5-3-1	M		0.0	0.0	0.0	6.7	7.5	12.6	13.6	11.8	9.0	10.0	11.6	11.3	7.5	
			-	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
5-4-1	S&M		0.5	1.3	6.5	10.2	20.6	44.4	47.2	41.5	21.6	11.8	9.8	4.9	12.9	
			-	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	
5-6-1	M		2.8	2.8	3.9	5.7	14.9	21.6	22.2	17.0	19.0	9.5	8.2	9.0	8.2	
			3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
5-6-6	M		10.6	10.0	7.5	11.8	13.6	22.3	27.6	17.7	38.1	7.5	9.8	9.3	7.5	
			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
7-1-4	S		1.3	15.0	18.2	17.3	27.6	31.9	45.7	43.0	27.9	19.3	15.4	14.7	10.0	
			-	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	
7-1-5	S		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.4	42.4	38.1	20.0	15.7	12.1	9.5	7.5	
			-	-	-	-	-	3	2	2	2	2	2	2	3	
7-2-6	S&M		24.3	17.2	27.1	20.3	24.9	36.6	42.9	36.9	30.4	21.0	22.3	16.5	12.4	
			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
7-3-4	S		0.0	4.1	2.8	7.7	8.5	9.3	36.9	13.6	10.0	9.0	10.3	10.0	9.8	
			-	-	-	-	3	3	2	3	2	2	2	2	2	
7-5-3	S		15.0	28.8	25.4	37.4	33.9	53.3	53.4	37.2	24.0	23.6	17.1	29.4	24.6	
			3	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	2	
7-3-5	S		0.0	7.5	19.9	24.7	25.2	47.6	49.0	44.7	33.9	28.1	21.3	8.8	4.9	
			-	1	3	3	3	3	2	3	2	2	2	2	2	
7-4-4	S		0.0	0.0	12.9	16.9	25.0	40.2	47.2	44.9	37.6	30.9	14.1	7.2	9.5	
			-	-	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	2	
7-4-5	S		0.0	0.0	3.4	8.0	8.2	20.8	40.8	42.3	22.3	22.6	28.1	31.1	22.3	
			-	-	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	
10-1-1	S		4.1	16.2	24.7	28.8	30.0	42.0	59.0	43.3	40.7	36.7	30.5	28.5	11.6	
			2	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	
10-1-2	M		3.6	35.1	42.5	51.8	54.0	56.3	55.2	48.5	29.1	16.5	11.8	10.6	7.7	
			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
10-2-5	M		0.8	2.1	7.0	27.8	50.7	57.0	59.7	55.8	49.5	34.9	19.5	21.3	23.3	
			-	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
10-3-1	S		0.0	0.0	0.0	0.8	45.9	49.7	62.1	58.8	54.2	50.2	44.9	44.7	44.9	
			-	-	-	1	2	3	2	2	2	2	2	2	2	
10-3-2	S		0.0	7.7	16.2	36.2	54.9	58.3	58.4	40.2	45.4	44.7	49.0	47.8	43.0	
			-	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	
10-4-6	S		2.3	0.0	1.7	0.0	34.9	38.7	55.2	41.5	34.1	30.9	26.4	23.1	15.7	
			1	2	1	/	/	2	3	2	2	2	2	2	2	
10-5-4	M		0.0	4.5	16.4	22.4	30.2	51.1	57.9	45.7	38.8	24.3	21.3	19.8	18.0	
			-	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	
10-5-5	M		0.0	0.0	2.1	9.5	17.1	53.3	66.7	48.8	42.7	21.6	27.4	36.1	40.1	
			-	-	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	

Note: The upper values show the cross-sectional area loss, and the lower numbers: 1, 2, 3 show the cross-section type of pitting which was explained in Fig. 5. As for the measurement location, C is the section of the wire was ruptured. Fracture types are S: Split type, M: Milling cutter type and S&M: Split-Milling cutter type, respectively.

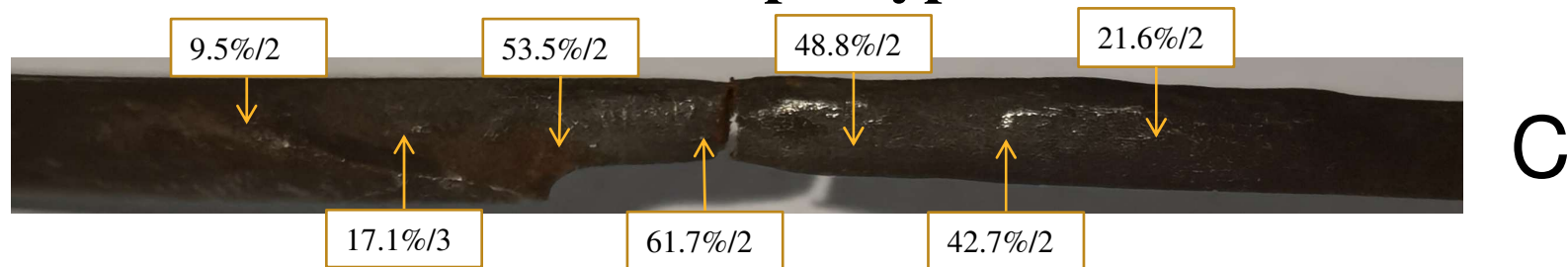
PC鋼より線の引張試験(第2シリーズ)³⁷



50-5-4-1 Split-milling cutter type



50-7-4-4 Split type



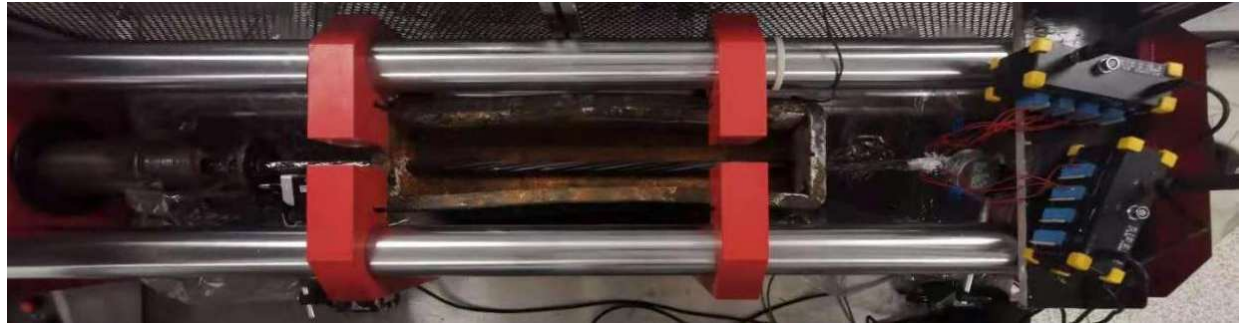
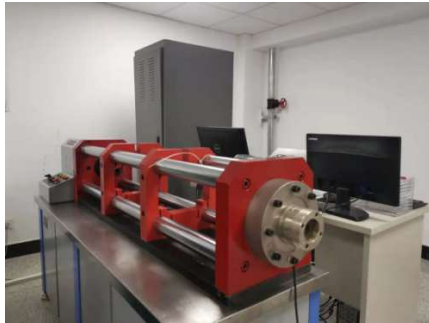
50-10-5-5 Milling cutter type

- 欠損断面周辺の断面が**タイプ3**の場合、破断区分が**split破断**であった。
- 破断した部分がほぼ一様に断面欠損していて、かつ欠損断面の区分は**タイプ2**の場合、**milling cutter破断**もしくは**split-milling cutter破断**であった。

今後の研究課題

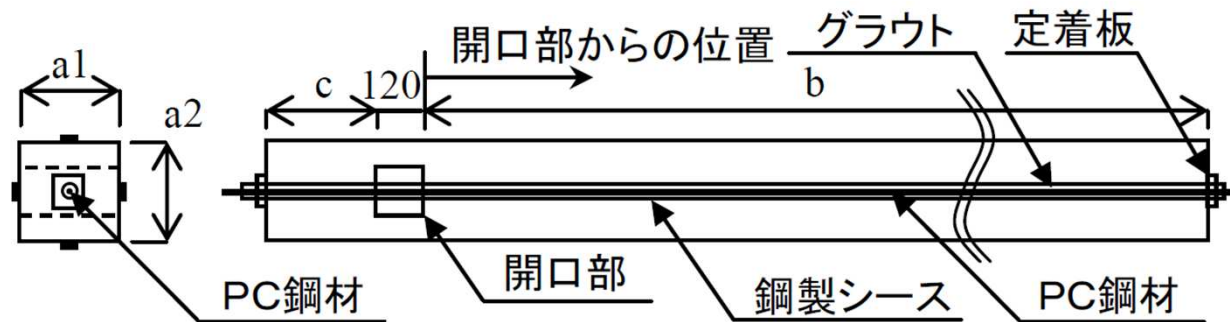
PC橋のデジタルツインによる鋼材腐食, 鋼材破断の影響分析

- 鋼材腐食に伴うPC鋼より線の断面減少とプレストレスの関係

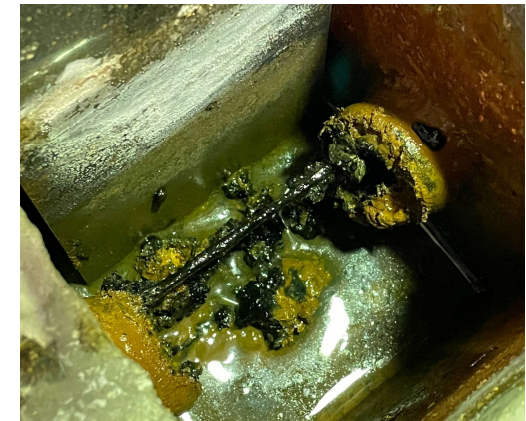


Li, Miki, Yang, Mao: Experimental Study on Prestressing Force of Corroded Prestressed Concrete Steel Strands, JACT 20(9) 550-563 2022

- 鋼材腐食に伴うPC鋼より線の断面減少と応力伝達長の関係



参考にした文献: 前田, 徳永, 田所, 谷村: 鋼材破断時の付着特性に着目したPC梁の曲げ耐力に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 529-534, 2010



まとめ

- PC橋のデジタルツインを用いた構造性能の評価と維持管理の高度化に向けた取り組みとして、**PC橋のデジタルツイン**による**構造性能の評価**に関する研究について紹介した.
- デジタルツインに導入する各種モデルの高度化, 特に**腐食**に伴う**PC鋼より線**のプレストレス力の低下に関する実験の知見を紹介した.
- 今後は、**様々な構造形式のPC橋**を想定し、コンクリート, PC鋼材の**劣化損傷がPC部材の構造性能に与える影響**を分析するとともに、デジタルツインに導入するための**非破壊検査等**を用いた**PC鋼材の劣化・損傷状態の把握**に関する各種の実験研究, ならびに解析研究を進めていく予定です.

ご清聴ありがとうございました

第51回プレストレストコンクリート技術講習会
(オンライン開催)

PC橋のデジタルツインを用いた構造性能の評価と
維持管理の高度化