

## 腐食した PC より線の機械的性質とプレテンション PC 梁の残存耐力の評価

八千代エンジニアリング(株)

○ 陸 賢

長岡技術科学大学

博(工) 田中 泰司

長岡技術科学大学

工修 山口 貴幸

長岡技術科学大学

正会員 博(工) 下村 匠

Abstract : There have been few studies regarding the structural performance of pre-tensioned prestressed concrete beam with corroded prestressing tendons. To investigate the influence of corroded prestressing tendons on load carrying capacity, an accelerated corrosion test by electric corrosion was carried out. After corrosion was induced, the beam specimens were loaded until failure. The reduction rate in flexural capacity and flexural stiffness were investigated under various degree of corrosion. In addition, mechanical properties of prestressing tendons which had been corroded in concrete were tested. As a result, flexural cracking load and flexural strength of corroded pre-tensioned concrete beam was able to be evaluated by considering the mechanical properties of corroded prestressing tendons.

Key words : Corrosion, Pre-tension , Prestressed Concrete Beams

## 1. はじめに

鋼材腐食が生じた PC 鋼材は、軽微な腐食であっても伸び性能が著しく低下することが報告されている<sup>1)</sup>。そのため、鋼材腐食が生じた PC 梁部材の耐荷性能を適切に評価するためには、腐食した PC 鋼材の腐食の程度を把握するとともに、その腐食が鋼材の引張強度、破断伸び等の機械的性質に及ぼす影響についても把握しておく必要がある。

これまでも塩害を受けて撤去された PC 橋から採取した PC 鋼材を用いた引張試験が行われてきた<sup>2)</sup>が、試験によって得られた機械的性質と腐食の空間的なばらつきとの関係や、部材の残存耐荷性能の評価について検討した事例は少ない<sup>3)</sup>。そこで本研究では、実験室内で電食により鋼材腐食を生じさせた供試体から採取した PC 鋼材の引張試験および腐食量の測定を実施し、腐食した PC 鋼材の機械的性質について検討した。また、引張試験により得られた機械的性質をもちいて、プレテンション PC 梁部材で腐食が生じた場合の、残存耐荷力の評価方法について検討を行った。

## 2. コンクリート中において腐食した PC 鋼材の引張試験

## 2.1 供試体形状

鋼材腐食用の供試体諸元および電食試験概要を図-1 に示す。試験片は表-1 に示す物性値を有したφ2.9-3本より PC 鋼より線である。PC 鋼材を 100mm×100mm×400mm のコンクリート角柱供試体に埋め込んで電食を行い、腐食した PC 鋼材を作製した。電食範囲は供試体中央の 200mm とした。

実験因子は腐食量とした。鋼材の腐食量は電食区間 200mm の平均質量減少率で表し、目標値を 0% (健全供試体), 10%, 15%, 20%, 30%, 35%, 40% の 7 水準とした。同条件でも、腐食分布や機械的性質にばらつきが

表-1 PC 鋼材の材料特性

呼び名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
SWPD3L 2.9mm3 本より	1922	201

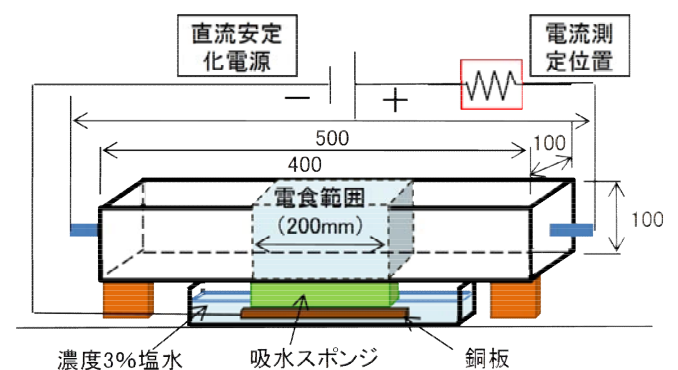


図-1 鋼材腐食用の供試体諸元および電食試験概要

生じると予想されたので、各水準で3~5体の供試体を作製した。

## 2.2 質量減少量の測定

電食試験終了後に、試験片をコンクリートからはつり出し、JCI-SC1「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24時間浸漬し、ブラシ処理を行うことにより腐食生成物を除去した。ただし、浸漬溶液の温度を常温(約10℃)としたことが、規準とは異なる。引張試験終了後に、各試験片の鋼材長さを電食区間である200mmに切断した。電食区間の単位長さあたりの重量を測定し、あらかじめ同等の処理を施した健全な鋼材の単位長さあたりの重量で除することで、各試験片の質量減少率を算出した。

## 2.3 引張試験

図-2に鋼材の引張試験概要を示す。引張試験は、油圧ジャッキを用いて、鋼材をチャックで固定し、加圧することで鋼材を緊張させて行った。鋼材の伸びは、変位計(容量50mm, 定格出力2.5m V/V)を用いて、鋼材の両端の変位を測定し、荷重は、ロードセルにより測定した。鋼材の標点間の距離は、試験片の電食範囲を考慮し335mmとした。

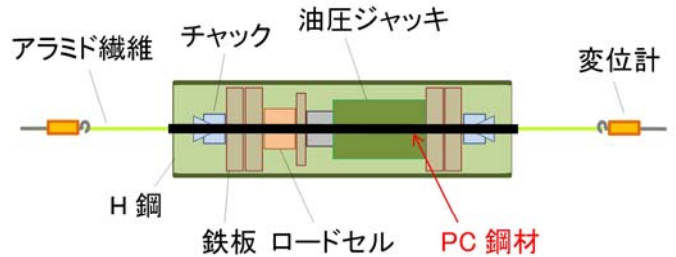


図-2 PC鋼材の引張試験概要

## 3. 引張試験結果

### 3.1 荷重-ひずみ関係

図-3に荷重-ひずみ関係を、表-2に引張試験結果を示す。引張試験を行った結果、腐食が進行するに従い、PC鋼材の降伏荷重および最大荷重、破断伸び率に低下がみられた。ただし、腐食量が少ないP-10およびP-15シリーズは、健全な試験片と同様の挙動を示し、荷重や伸びに腐食の影響がみられなかった。ある程度、腐食が進行すると、鋼材の破断伸び率は急激に低下するようである。また、試験片ごとにばらつきはあるものの、質量減少率が約5%を超える試験片では、鋼材は降伏せずに破断に至るものもあった。ほとんどの試験片で素線1本目の破断時が最大荷重となり荷重が急激に低下したが、P-35AおよびP-35Bでは1本目の素線が破断しても荷重の低下は小さく、荷重はさらに増加する結果となった。これは、電食により1本の素線が局部的に腐食したものと考えられる。質量減少率が27~8%であったP-40AおよびP-40Bになると最大荷重および破断伸び率が著しく低下した。健全な試験片や腐食量が少ないP-10およびP-15シリーズでは、すべての素線が同時に破断した。一方、それ以外のある程度腐食が進行した試験片では、

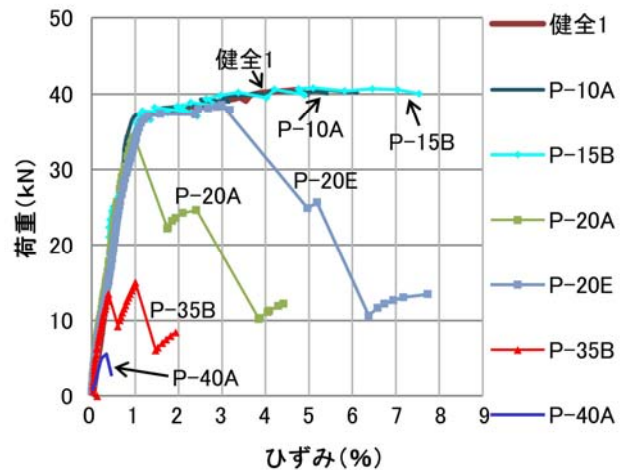


図-3 荷重-ひずみ関係

表-2 引張試験結果一覧

	健全1	健全2	健全3	P-10A	P-15A	P-15B	P-15C	P-20A	P-20B	P-20C	P-20D	P-20E	P-30A	P-30B	P-30C	P-35A	P-35B	P-35C	P-40A	P-40B
降伏荷重 (kN)	36.5	37.1	37.1	37.0	36.1	36.5	34.8	-	-	-	-	36.2	-	33.7	36.6	-	-	-	-	-
最大荷重 (kN)	40.6	40.7	40.8	40.7	40.3	40.8	40.3	34.3	28.3	29.6	27.5	38.6	32.8	34.6	39.2	16.5	13.5	12.5	5.6	6.0
最大変位 (mm)	17.4	17.4	17.0	18.0	16.4	20.7	15.7	3.30	2.80	2.93	2.65	9.54	3.48	4.39	10.2	1.77	1.30	1.28	1.46	0.85
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	178	188	161	199	184	193	206	197	175	174	186	182	180	181	176	162	172	161	78.7	119
破断伸び率 (%)	4.97	5.19	5.09	5.74	5.22	6.97	4.87	0.98	0.87	0.92	0.80	2.99	1.13	1.51	2.90	0.53	0.39	0.38	0.57	0.26
質量減少率 (%)	0.0	0.0	0.0	4.5	3.1	4.1	5.2	2.8	6.0	4.5	7.6	2.2	7.1	6.7	2.9	15.0	11.9	19.1	27.3	28.7

除錆時に鋼材に孔食が見られ、また、素線が一本ずつ破断したので、素線ごとに腐食性状のばらつきがあったと考えられる。

### 3.2 腐食による鋼材の機械的性質への影響

図-4 に PC 鋼材の各機械的性質と質量減少率の関係を示す。ここで、(a)の最大荷重比および(b)の降伏荷重比とは、各試験片の降伏荷重および最大荷重を、健全な試験片の実験値で除したものである。なお、腐食の程度が大きい試験片では、明瞭な降伏現象が確認される前に、鋼材の破断に至るものがあった。その場合、最大荷重と降伏荷重は同値とみなしてプロットしている。ここで、健全な試験片の値は、あらかじめ実施した健全な PC 鋼材の引張試験結果の平均値を採用した。図-4 にこれらの実験値を指数近似した結果を示す。破線は鋼材の断面減少分だけそれぞれの機械的性質が低下する場合の値を示している。降伏荷重比および最大荷重比と質量減少率の関係は、質量減少率以上に各荷重比が低下する傾向がみられた。(c)の破断伸び率比とは、各試験片の腐食部の破断伸び率を、健全な試験片の破断伸び率で除したものである。ここで、電食区間は 200mm であるが、引張試験の標点間距離は健全部を含む 335mm であったため、各試験片の伸び率には、健全部の鋼材の伸びが含まれている。そこで、健全な試験片の実験値を基に、非腐食区間の伸びを計算し、それを伸びの実測値から差し引いて、電食区間 200mm で除したものを鋼材の伸び率とした。図より破断伸び率は、質量減少率が小さい範囲でも著しく低下していることがわかる。また、質量減少率が 10% よりも大きくなると、伸びの低下率は緩やかになる傾向にあった。既往の研究<sup>4)</sup>でも同様の傾向が報告されていることから、PC より線の腐食では破断伸び率の低下に特徴があるといえる。(d)の剛性比とは、各試験片の引張剛性を、健全な試験片の引張剛性で除したものである。剛性の算出には鋼材の降伏前の荷重-ひずみ関係より得られた傾きを使用した。コンクリートに導入されているプレストレス力は、鋼材の剛性の低下に伴い減少すると考えられる。ここで剛性とは実測値より直接求まる荷重-ひずみ関係の傾きであり、弾性係数と断面積の積に相当する。図に示す通り、剛性の低下は緩やかであり、腐食の程度の小さい場合には、腐食による低下はみられなかった。指数関数による近似曲線を求めたところ、質量減少率だけ剛性が低下するような直線とほぼ一致するような曲線が得られた。

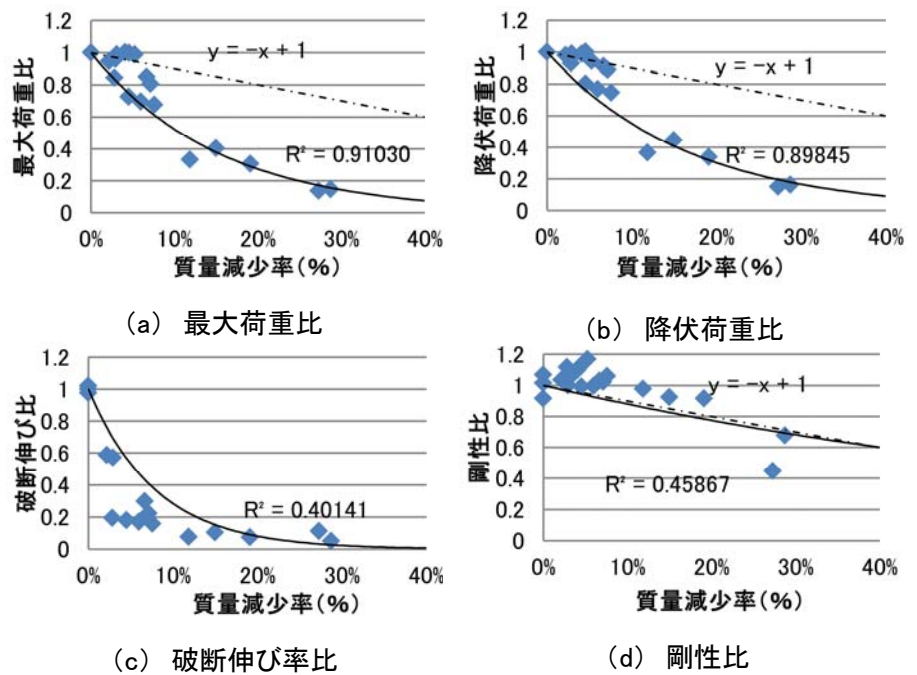


図-4 PC 鋼材の各機械的性質と質量減少率の関係

図-4 にこれらの実験値を指数近似した結果を示す。破線は鋼材の断面減少分だけそれぞれの機械的性質が低下する場合の値を示している。降伏荷重比および最大荷重比と質量減少率の関係は、質量減少率以上に各荷重比が低下する傾向がみられた。(c)の破断伸び率比とは、各試験片の腐食部の破断伸び率を、健全な試験片の破断伸び率で除したものである。ここで、電食区間は 200mm であるが、引張試験の標点間距離は健全部を含む 335mm であったため、各試験片の伸び率には、健全部の鋼材の伸びが含まれている。そこで、健全な試験片の実験値を基に、非腐食区間の伸びを計算し、それを伸びの実測値から差し引いて、電食区間 200mm で除したものを鋼材の伸び率とした。図より破断伸び率は、質量減少率が小さい範囲でも著しく低下していることがわかる。また、質量減少率が 10% よりも大きくなると、伸びの低下率は緩やかになる傾向にあった。既往の研究<sup>4)</sup>でも同様の傾向が報告されていることから、PC より線の腐食では破断伸び率の低下に特徴があるといえる。(d)の剛性比とは、各試験片の引張剛性を、健全な試験片の引張剛性で除したものである。剛性の算出には鋼材の降伏前の荷重-ひずみ関係より得られた傾きを使用した。コンクリートに導入されているプレストレス力は、鋼材の剛性の低下に伴い減少すると考えられる。ここで剛性とは実測値より直接求まる荷重-ひずみ関係の傾きであり、弾性係数と断面積の積に相当する。図に示す通り、剛性の低下は緩やかであり、腐食の程度の小さい場合には、腐食による低下はみられなかった。指数関数による近似曲線を求めたところ、質量減少率だけ剛性が低下するような直線とほぼ一致するような曲線が得られた。

### 4. 鋼材腐食が生じたプレテンション PC 梁の載荷実験

PC 梁部材における鋼材腐食の影響を確認し、残存性能の評価方法を検討するため、プレテンション PC 梁供試体を作製し、電食により鋼材腐食を生じさせた後に曲げ載荷試験を行った<sup>5)</sup>。

#### 4.1 実験概要

図-5 に試験体の寸法形状、および配筋状況を示す。試験体は、断面が 100

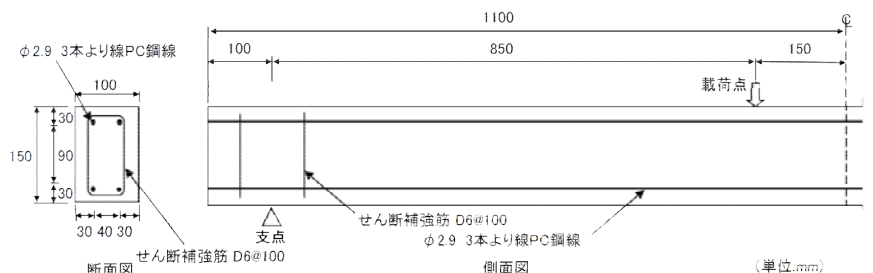


図-5 供試体諸元

×150mm, 長さが2200mmのプレテンションPC梁である。また, 等曲げ区間長は300mm, 支点間長は2000mmとした。軸方向にPC鋼より線φ2.9-3本よりを緊張材として用い, 定着部にはD6の定着補強筋を配置した。導入した緊張力は, 1170N/mm<sup>2</sup>とした。コンクリートに導入されるプレストレスは断面全体で一様であり, 6.18 N/mm<sup>2</sup>となる。コンクリートの圧縮強度及びPC鋼より線φ2.9-3本よりの物性値を表-3に示す。試験パラメータは鋼材の質量減少率とし, 基準となる健全な試験体と質量減少率の目標値を3,6,9,12,15%とした試験体の計6体を作製した。

鋼材の腐食は, 図-1と同様に電食により行った。電食の範囲は, 下段2本の鋼材の中央300mm(载荷試験における等曲げ区間に一致)とした。電流密度は, 電食対象となる鋼材の初期表面積に対して8.65(A/m<sup>2</sup>)とした。

曲げ载荷試験は, 図-5に示すように, 単純支持・2点集中载荷で行い, 荷重制御による単調载荷とした。計測項目は, 载荷荷重, 変位, コンクリートのひずみとした。変位は, スパン中央, 载荷点, 支点の両側面で計測した。コンクリートのひずみは, 上面は梁中央に1か所, 下面は等曲げ区間内に6か所ひずみゲージを貼付して計測した。载荷試験終了後に, 等曲げ区間内の下段のPC鋼材をはつり出し, 2章の方法により除錆したのち, 質量減少率を算出した。

4.2 実験結果

図-6に荷重-中央変位関係を, 表-3に曲げ载荷実験結果の一覧を示す。鋼材腐食が進行するに従い, 曲げひび割れ発生荷重, 曲げ耐力がともに低下した。一方, 初期剛性の低下は比較的小さく, すべての試験体でおおむね同程度の結果となった。これは, 既往の研究<sup>6)</sup>でも指摘されているように, 局部的に腐食が進行しても, 付着劣化の範囲が小さければ部材全体の剛性に大きな影響を及ぼさないためと考えられる。

表-3 曲げ载荷実験結果

試験体名	コンクリート		質量減少率 (%)	Pcr* (kN)	Pu* (kN)	破壊モード
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )				
N	55.7	40.9	0.00	8.69	23.6	M*
D-3	53.6	33.4	2.14	11.1	23.2	M
D-6			4.79	7.23	21.3	M
D-9			7.98	6.51	18.5	S*
D-12			10.4	4.40	18.2	S
D-15	55.7	40.9	14.0	1.42	10.1	S

\*Pcr:曲げひび割れ発生荷重, Pu:最大荷重, M:曲げ引張破壊, S:鋼材破断

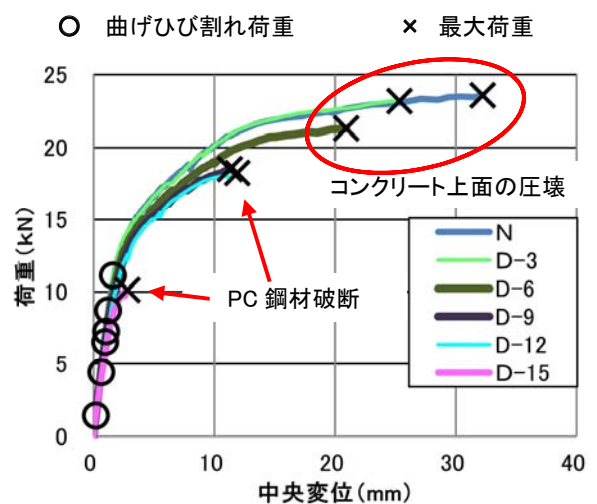


図-6 荷重-中央変位関係

5. 腐食したPC鋼材の機械的性質を考慮したプレテンションPC梁の曲げ解析

4章のPC梁の载荷試験結果を, 3章の腐食したPC鋼材の機械的性質を用いて表現できるか検討を行った。鋼材の機械的性質には, 図-4に示した実験値の近似式(式(1)~(4))を用いることにした。

$$R_{pu} = e^{-6.467C} \quad \text{式(1)} \quad R_{EA} = e^{-1.247C} \quad \text{式(2)} \quad R_{py} = e^{-5.968C} \quad \text{式(3)} \quad R_{\epsilon_s} = e^{-12.57C} \quad \text{式(4)}$$

ここで, R<sub>pu</sub>:最大荷重の残存率, R<sub>EA</sub>:剛性の残存率, R<sub>py</sub>:降伏荷重の残存率, R<sub>εs</sub>:破断伸び率残存率, C:鋼材の質量減少率である。

5.1 残存プレストレスの算定

図-7の単純な力学モデル考えた場合, 残存プレストレスは, PCより線の初期導入ひずみ, 腐食による剛性の低下率, コンクリートの弾性変形を考慮して, 変形の適合と力のつり合いより求めることができる。ただし, 今回の実験ではPCより線に導入した初期ひずみは約7000μであるのに対し, コンクリートの初

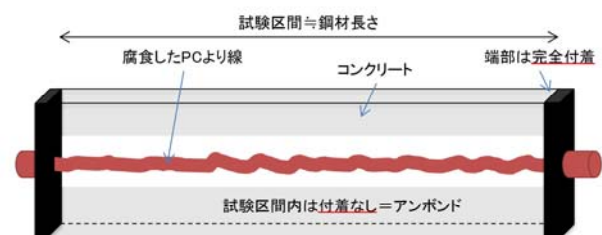


図-7 腐食したPC鋼材による導入プレストレス力の概念図

期弾性変形は約 200 $\mu$  と十分に小さいので、コンクリートは剛体を仮定しても差し支えないと判断される。その場合、PC 鋼材の緊張力の残存率は剛性の残存率に比例することになる。以上の考察より、腐食によるプレストレスの低下率は鋼材の剛性低下率と等しいと考えて、式(2)を質量減少率と緊張力の減少率の関係として採用することにした。ただし、この式は腐食量が比較的小さい範囲でしか使用できない。なぜなら、腐食の程度が大きくなると、鋼材の一部に降伏が生じてしまうからである。

プレストレス導入 (PC より線 1 本あたり約 25 kN) により PC 鋼材に発生するひずみは約 7000 $\mu$  である。仮定した力学モデルに従えば、このひずみは、鋼材腐食後も保持される。その場合、鋼材の質量減少率が 9% 付近に達すると、鋼材は降伏することになる (図-8 参照)。また、質量減少率が約 16% になると、式(4)の破断ひずみに達するので、これ以上の質量減少率では部材内で鋼材が破断していることになる。

上記の考え方により得られた、鋼材の緊張力と質量減少率の関係を図-9 に示す。腐食量が数%程度で十分に小さければ、緊張力の低下は比較的緩やかであると予想される。続いて、腐食量が約 10%程度を超えると、局部的に降伏が生じるために、緊張力が急激に減少し始める。それと同時に、破断伸びも急激に減少するので、腐食量が約 16%を超えると、破断伸びが初期ひずみを下回り、試験体内部で鋼材破断が発生し、残存プレストレスはゼロとなる。このようなモデルの妥当性を検証するため、曲げひび割れ荷重について、実験値との比較を行うこととした。

### 5.2 各荷重における質量減少率の関係

図-10 に曲げひび割れ発生荷重と質量減少率の関係を示す。実線が図-4 のモデルにもとづく計算値であり、破線が鋼材の平均断面減少率分だけ緊張力が低下すると仮定した計算値である。曲げひび割れ発生荷重の計算値は以下の式(5)より求めた。

$$M_{cr} = (f_b + \sigma'_0) \frac{I}{y} \quad \text{式(5)}$$

ここに、 $M_{cr}$  は曲げひび割れ発生モーメント、 $f_b$  は曲げひび割れ強度である。 $\sigma'_0$  はプレストレス力による梁部材下縁における応力であり、鋼材のプレストレス力の低下量  $x$  を用いて以下の式(6)により求めた。 $I$  は矩形断面の断面二次モーメント、 $y$  は図心からの距離である。

$$\sigma'_0 = \sigma_m + \sigma_1 \quad \text{式(6)}$$

$$\sigma_m = \frac{P}{A_c} = \frac{T_u + (1-x)T_d}{A_c} \quad \sigma_1 = \frac{M_1}{I} y$$

$$M_1 = -T_u(y - d_u) + (1-x)T_d(d_d - y) \quad \text{式(7)}$$

ここに、 $\sigma_m$  はプレストレス力が部材断面の図心に作用した場合に断面に一様に発生する圧縮応力であり、 $A_c$  は部材断面積、 $T_u$  は上段 PC 鋼材の引張力、 $T_d$  は下段 PC 鋼材の引張力である。計算に用いるプレストレス力は、ク

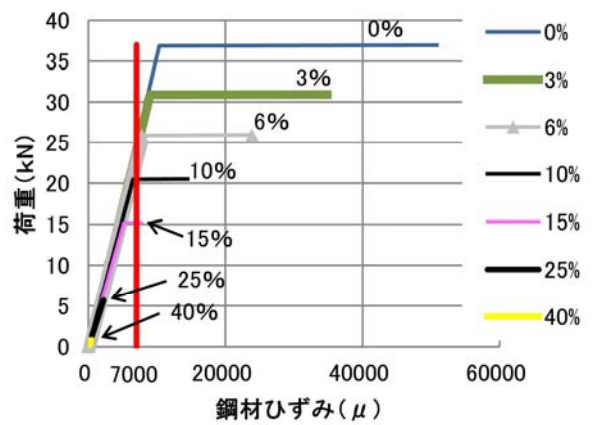


図-8 各腐食量におけるPC鋼材の荷重-ひずみ関係

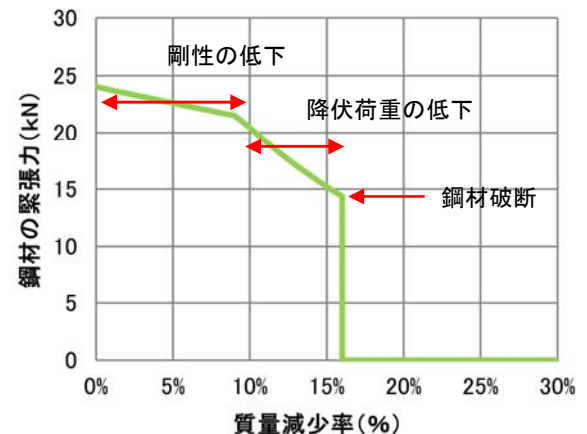


図-9 鋼材の緊張力-質量減少率関係

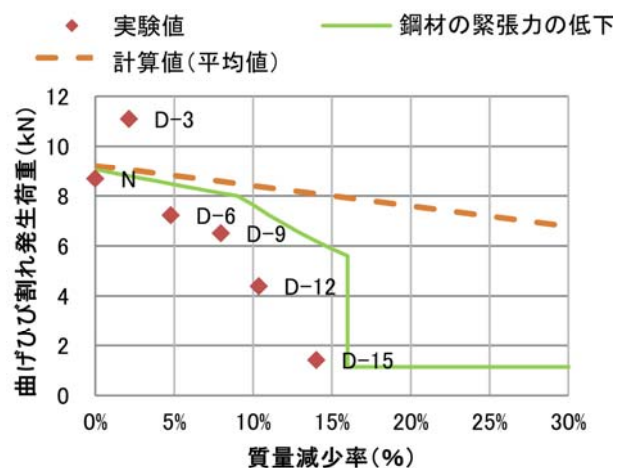


図-10 曲げひび割れ発生荷重-質量減少率関係

リーブ等の影響を考慮した有効プレストレスではなく、初期導入プレストレス力とした。なお、荷重直前まで湿布養生を行ったので、養生中の乾燥収縮は小さい。 $\sigma_1$ は下側の鋼材のみが腐食することによる偏心の影響であり、式(7)により求めた。ここに、 $d_u$ は上段PC鋼材の有効高さであり、 $d_d$ は下段PC鋼材の有効高さである。

図-10に示すように、腐食した鋼材の機械的性質を考慮して残存プレストレスを計算することで、実験で見られた曲げひび割れ発生荷重の低下性状を、平均断面減少率のみを考慮した場合よりも精度よく表現できたが、まだ実験結果を過大評価する傾向にあった。この原因としては、腐食ひび割れが発生していたことによりコンクリートの引張応力負担能力が低下、すなわち曲げ強度が見かけ上低下していたことが考えられる。

最大荷重と質量減少率の関係において実験値と計算値の比較を行ったものを図-11に示す。計算値は、腐食による鋼材の強度低下の式(1)および式(3)、式(4)を用いて、一般的なPC断面の計算法を用いて算出した。実線は図-4に示すモデルを用いた計算値、破線が鋼材の平均断面減少率分だけ降伏強度が低下すると仮定した場合の計算値である。計算上は質量減少率12%になると終局時の鋼材のひずみは破断ひずみに達するため、破壊モードが曲げ引張破壊から鋼材破断に移行する。また、前述のとおり腐食により鋼材の破断ひずみは低下し、質量減少率16%になると初期ひずみに達するため、荷重前に破断する。計算値は実験値をおおむね再現しているといえる。

6. まとめ

本研究では、腐食したPC鋼材の機械的性質をモデル化することで、鋼材が腐食したPC梁部材の耐荷性能を評価できるか検討した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 鋼材の引張試験を行った結果、PC鋼材の機械的性質は、最大荷重、降伏荷重、ともに質量減少率以上に低下する傾向がみられた。
- 2) 実験で得られた腐食したPC鋼材の機械的性質をモデル化し、残存プレストレス力を算定した。その結果にもとづき、曲げひび割れ発生荷重を計算したところ、実験で観察された荷重低下の傾向に近づいた。
- 3) 腐食した鋼材の機械的性質をモデル化し、最大荷重を計算したところ、計算値は実験値をおおむね再現することができた。

参考文献

- 1) 木村哲士, 河野広隆, 田中良樹: 塩害を受けたプレテンションPC桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, vol. 21, No. 3, pp.973-978, 1999
- 2) 例えば岩城一郎ら: 著しく塩害を受けた道路橋PC桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価, 土木学会論文集E, vol. 66, No.4, pp.413-432, 2010
- 3) 大屋戸理明ら: 実構造物の調査結果に基づく腐食鉄筋の力学性状の評価, 土木学会論文集E, Vol.63, No1, pp.143-155, 2007
- 4) 上原子晶久ら: 塩害による鋼材腐食を考慮した実PC上部工の構造性能評価, コンクリート工学年次論文集, vol. 31, No.2, pp.1525-1530, 2009
- 5) 陸賢ら: 鋼材が腐食したプレテンションPC梁の荷重実験, 第20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, V-100, 2011
- 6) 加藤絵万ら: 局所的に生じた鉄筋腐食がRC梁の構造性能に及ぼす影響, 港湾空港技術研究所報告, 第47巻, 第1号, pp.57-82, 2008

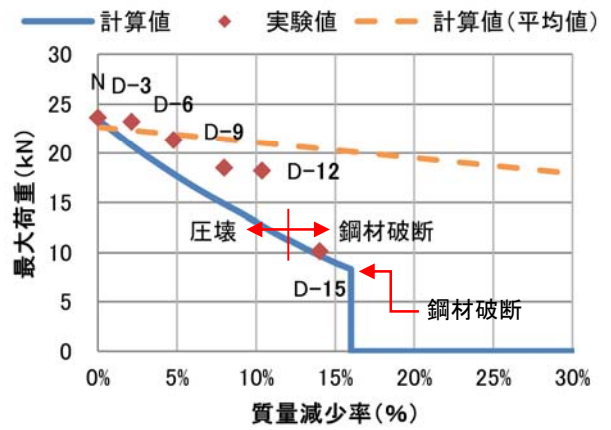


図-11 最大荷重と質量減少率の関係