

アンボンドPC梁の曲げ耐荷性能に与えるPC鋼材腐食の影響

京都大学		修士課程	○奥野 喜久
西日本旅客鉄道(株)	正会員	修士(工学)	近藤 拓也
京都大学	正会員	博士(工学)	山本 貴士
京都大学	正会員	工学博士	宮川 豊章

Abstract : In this study, in order to clarify the bending capacity of PC beam deteriorated by the corrosion of prestressing bar due to unfilled grout, a flexural loading test was carried out on unbond PC beams which had been damaged by electrolytic corrosion. From this study, following results were obtained; 1) cracks due to the corrosion of prestressing bar can not be observed on the surface of unbond PC beam without grout ; 2) the bending crack moment of PC beam with corroded prestressing bar is decreased by prestress loss due to the corrosion, while the stiffness before cracking is not changed by the corrosion of prestress bar ; 3) the bending capacity of PC beam deteriorated by corrosion was decreased by sectional area loss of prestressing bar.

Key words : Prestressing bar , Corrosion , Cross-sectional area loss , Load-carrying behavior

1. はじめに

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート(以下PC)構造物では、コンクリート硬化後にPC鋼材を緊張することで、コンクリート部材にプレストレスを導入する。PC鋼材緊張後にシース内に充填されるグラウトは、PC鋼材の防食や、PC鋼材とコンクリート部材の一体性を確保する重要な役割を担っている。しかし近年、グラウト充填時に発生するブリーディング水の存在や、中間排気口の未設置などにより、グラウトの充填不良が確認されるようになった¹⁾。

グラウト未充填区間に酸素や水などの劣化因子が侵入しPC鋼材が腐食した場合、PC鋼材とシース間に空隙が存在するためPC鋼材の腐食膨張圧はコンクリートに伝わりにくく、コンクリート表面にひび割れが表れない可能性のあることが報告されている²⁾。その結果、外観上は変状が見られないまま潜在的に腐食が進行し、PC鋼材の破断に至る恐れもある。したがって、様々な位置でのグラウト未充填によるPC鋼材腐食がPC 梁部材の曲げ耐荷性能に与える影響を明らかにすることが、きわめて重要である。しかし、PC鋼材が腐食したポストテンション式PC 梁部材の曲げ耐荷性能については研究事例が少ないのが現状である。

そこで、本研究では、様々な位置でのグラウト未充填によるPC鋼材腐食が曲げ耐荷性能に与える影響を明らかにする第一段階として、PC鋼棒全長にわたって電食させたアンボンドPC梁供試体に対して曲げ載荷試験を行い、その耐荷特性を検討することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状・寸法を図 - 1に示す。供試体は、幅×高さ(有効高さ)×全長(スパン長)=100×200(133)×1600(1300)mmのPC梁を計5体作製した。φ23mm鋼製スパイラルシースの内部にφ13mmPC鋼棒(B種1号、 $f_{pu}=1470\text{N/mm}^2$)を配置し、98kN(引張強度の50%)の緊張力を材令7日で与えた。PC鋼棒は全長にわたりアンボンドとし、コンクリートの目標配合強度は $f'_{cr}=40\text{N/mm}^2$ とした。コンクリートの配

合を表 - 1に、使用材料を表 - 2に示す。なお、2007年度制定コンクリート標準示方書（設計編）³⁾に基づき算出した曲げせん断耐力比は $V_y \cdot a/M_u = 1.45$ である。

2.2 電食方法

本実験では、シース内部に5%食塩水を充填させ、PC鋼棒を陽極、シースを陰極とし、電流密度 $0.865\text{mA}/\text{cm}^2$ で通電を行った。しかし、PC鋼棒とシース間での電食効率を検討する必要がある。そこで、まず図 - 2に示す供試体を用いて電食を行い、実際の腐食量と積算電流量の関係を求めた。その結果を図 - 3に示す。腐食量 $W(\text{g})$ は積算電流量 $I_t(\text{A} \cdot \text{h})$ に比例するというファラデーの法則を仮定すると、式(1)が得られた。

$$W = 0.586 \times I_t \tag{1}$$

この試験結果を基に、実験での目標質量減少量に対する積算電流量を算出した。目標質量減少率は、PC鋼材の破断伸びが著しく減少するとされる 4.5% ⁴⁾ ($124\text{A} \cdot \text{h} = 9.2$ 日間)を2体と、曲げ圧縮部のコンクリートの圧壊時にPC鋼材が破断する可能性のある 30% ($827\text{A} \cdot \text{h} = \text{約}61$ 日間)を2体とした。なお、載荷試験用供試体と電食効率確認用供試体でシース径が異なるが、本実験の電食では、PC鋼棒を陽極、シ-

表 - 1 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (cc/m ³)
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤
40	170	425	728	911	1063

表 - 2 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント $\rho = 3.13\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	滋賀県野洲産の川砂
粗骨材	土山産の砕石
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体

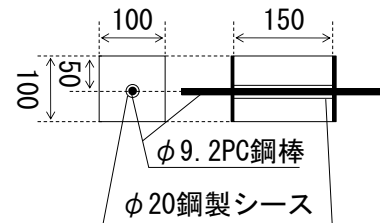


図 - 2 電食効率確認用供試体の形状・寸法 (単位: mm)

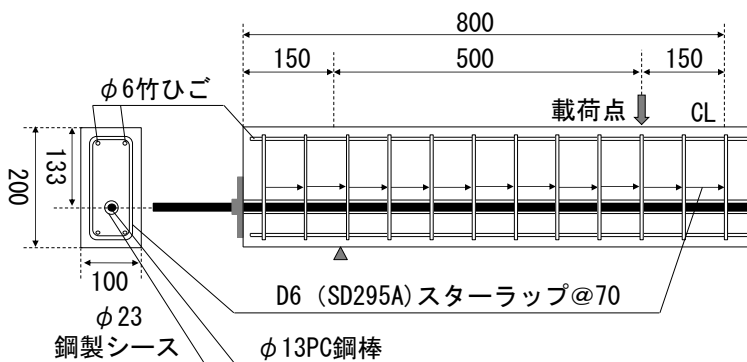


図 - 1 載荷試験用供試体の形状・寸法 (単位: mm)

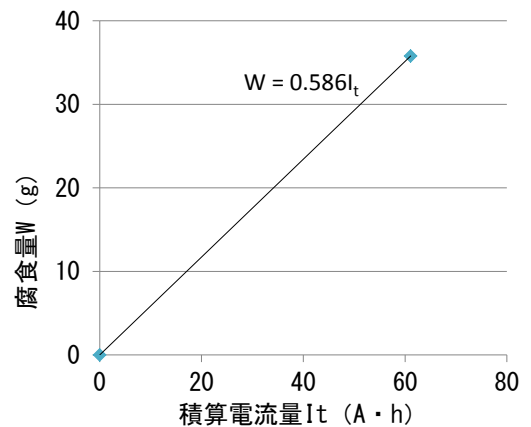


図 - 3 積算電流量と腐食量の関係

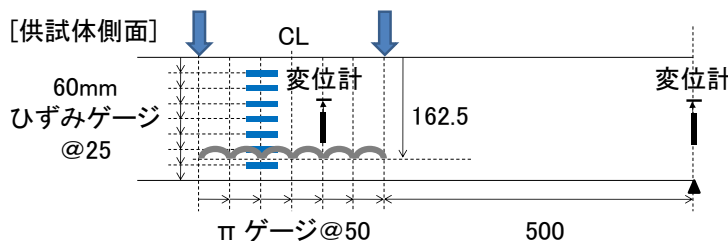


図 - 4 測定項目一覧 (単位: mm)

スを陰極とする回路であり、PC鋼棒表面積あたりの電流密度を一定として供給しているため、シース径の相違は腐食量に影響しない。また、φ20mmのシースであっても、PC鋼棒との空間は十分に確保されており、腐食膨張圧の伝達機構もφ23mmのシースと大きく異なることはないと考えられる。

2.3 荷重試験方法および測定項目

荷重は、図 - 1 示す供試体を用いて、スパン長 1600mm に対し曲げスパン 300mm の対称 2 点 1 方向漸増繰返し曲げ試験とし、PC 鋼棒が降伏するまでは 5kN 毎、降伏後は $2\delta_y$ 毎に繰り返した。なお、 δ_y は、実験時の荷重 - 変位曲線より降伏点を決定し、その時点の変位とした。また、最大荷重 P_m 以降は、荷重が $0.6P_m$ に到達するまで繰り返した。

荷重時の測定項目一覧を図 - 4 に示す。支間中央に発生するひび割れによって変位計が影響を受けないように、支間中央より 50mm の位置に変位計(容量：100mm)を設置し、両支点には変位計(容量：50mm)を設置した。供試体底面には、ひび割れ発生荷重を特定するために、60mm ひずみゲージを 50mm 間隔で等曲げ区間に貼り付けた。供試体側面には、等曲げ区間内における高さ方向の発生ひずみを測定するため、支間中央から 50mm 離れた位置で、高さ方向 25mm 間隔に 60mm ひずみゲージを軸方向に貼り付けた。また、曲げひび割れ幅を測定するために、等曲げ区間内に 50mm 間隔で π ゲージを設置した。さらに、供試体側面には、50mm×50mm 間隔でメッシュを描き、最大荷重に達するまでひび割れ観察を行った。荷重試験終了後、供試体から PC 鋼棒を取り出し、JCI-SC1 法に基づき腐食生成物を取り除いた後、PC 鋼棒の質量を測定するとともに、PC 鋼棒の断面直径を軸方向の 50mm 間隔で、同一断面について直交する 2 方向でノギスを用いて測定した。質量減少率は腐食前後の PC 鋼棒の質量差を腐食前の質量で除して求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 外観および腐食状況

電食後の供試体の側面、底面には腐食ひび割れは見られなかった。既往の研究²⁾と同様に、アンボンドであるため、PC 鋼棒の腐食による腐食膨張圧がコンクリートに伝わらず、コンクリート表面のひび割れに至らなかったものと考えられる。PC 鋼棒の腐食状況を表 - 3 に示す。目標質量減少率 30%では、別シリーズの供試体において、電食中に PC 鋼棒が破断する現象が見られたため、アンボンドであることの危険性を考慮し、目標通電期間には達していないものの、521A・h(=約 38 日間)および 623A・h(=約 49 日間)で適宜電食を終了した。なお、約 38 日間通電の供試体は、上記の破断した別シリーズの供試体の通電期間を考慮し、大きく安全面を重視したため、同一要因でありながら、2 体の積算電流量が相違する結果となったが、質量減少率の差を意図したものではない。表 - 3 より、質量減少率が大きいほど標準偏差が大きく、断面直径のばらつきが大きくなっているといえる。

表 - 3 腐食状況および荷重結果一覧

積算電流量 (A・h)	質量減少率 (%)	平均残存断面直径 (mm)	平均断面残存率 ^{*4} (%)	標準偏差 (mm)	ひび割れ発生荷重 (kN)	残存プレストレス率 (%)	残存緊張力 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形式
0.00	0.00	12.9	100	0.02	36.6	95.8	93.9	79.7	圧壊 ^{*1}
124	6.33	12.4	93.4	0.16	35.1	83.7	82.0	70.8	圧壊 ^{*1}
124	7.32	12.3	91.9	0.25	35.3	90.8	89.0	70.3	圧壊 ^{*1}
521	26.3	10.7	68.6	0.34	31.5	58.8	57.6	58.2	破断① ^{*2}
673	29.7	10.4	65.4	0.44	29.0	39.7	38.9	51.0	破断② ^{*3}

(注)*1…最大荷重時に供試体上縁が圧壊、*2…供試体上縁が圧壊(最大荷重)後、繰返し荷重中に PC 鋼棒が破断

*3…供試体上縁が圧壊する(最大荷重)直前に PC 鋼棒が破断

*4…クエン酸浸漬後の各平均残存断面積/積算電流量 0.00A・h の平均残存断面積

3.2 残存プレストレス率

載荷結果一覧を表 - 3 に示す。底面のひずみゲージ値よりひび割れ発生荷重を特定し、そこから式(2)を用いて計算される PC 鋼棒緊張力と導入時の緊張力の比から残存プレストレス率を算定した。

$$\frac{P_t}{A_c} + \frac{P_t e_p}{I_c} y_c - \frac{M_{cr}}{I_c} y_c = -f_t \times 10^{-3} \quad (2)$$

ここで、 P_t : PC 鋼棒緊張力 (kN), A_c : コンクリートの断面積 (mm^2), e_p : 偏心距離 (mm), I_c : 断面二次モーメント (mm^4), M_{cr} : ひび割れ発生モーメント ($\text{kN} \cdot \text{mm}$), y_c : 中立軸から引張下縁までの距離 (mm), f_t : 引張強度 (実測値) (N/mm^2) である。

表 - 3 より腐食供試体でひび割れ発生荷重が低下している。ここで、残存プレストレス率と PC 鋼棒の平均断面残存率の関係を図 - 5 に示す。残存プレストレス率と平均断面残存率の間には、概ね比例関係が見られる。緊張応力が腐食前後で一定であると仮定すれば、PC 鋼棒の断面減少にともない緊張力が低下し、それに比例してプレストレスが低下する。しかし、PC 鋼棒の断面の減少割合よりもプレストレスの低下割合の方が大きくなっている。特に、質量減少率が大きい場合には、電食期間が長いため、収縮やクリープに起因するプレストレスの減少も大きくなったと考えられる。

3.3 剛性

荷重と側面の高さ方向のひずみ分布より算出した 5kN 毎の曲げモーメント - 曲率関係を図 - 6 に示す。なお曲率算出の際、ひび割れ発生後は、側面ひずみゲージの内、中立軸より上方と考えられる圧縮側の 3 点の値を用いた。また、曲率の算定はひび割れ進展によって、圧縮側の側面ひずみを測定できなくなる点までであり、部材の終局までは測定できていない。

ひび割れ発生までの剛性 (傾き) は健全供試体、腐食供試体とも同様の傾向を示したが、ひび割れ発生荷重低下にともない、腐食供試体で剛性が低下しはじめ曲率が小さくなる傾向が見られた。また、ひび割れ発生後の剛性に大きな差は見られず、PC 鋼棒の断面減少が断面 2 次モーメントに与える影響は小さいことが伺える。ただし、ひび割れ発生後はひずみ分布を 3 点で近似しているため、1 点のひずみゲージの変動が、ひび割れ発生後の

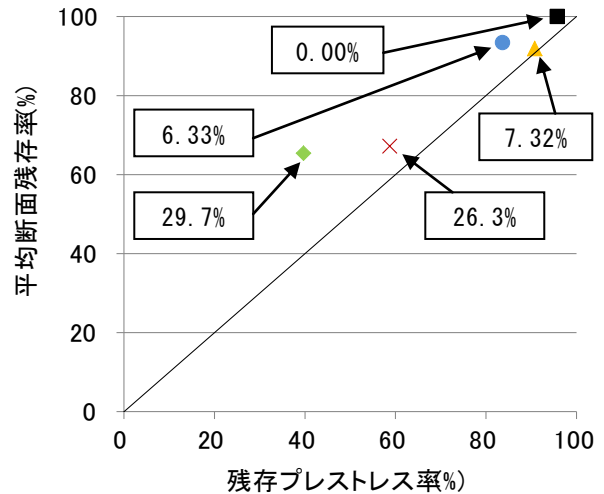


図 - 5 残存プレストレス率と平均断面残存率の関係

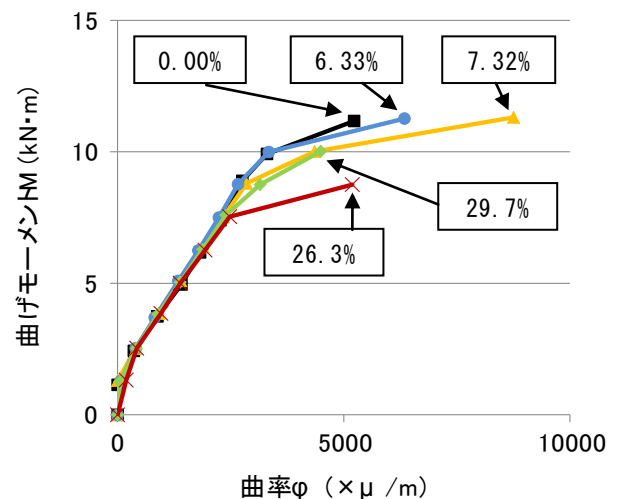


図 - 6 曲げモーメント - 曲率関係

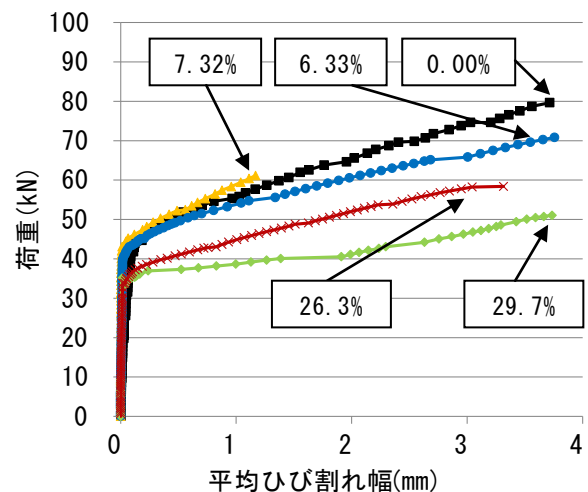


図 - 7 平均ひび割れ幅 - 荷重関係

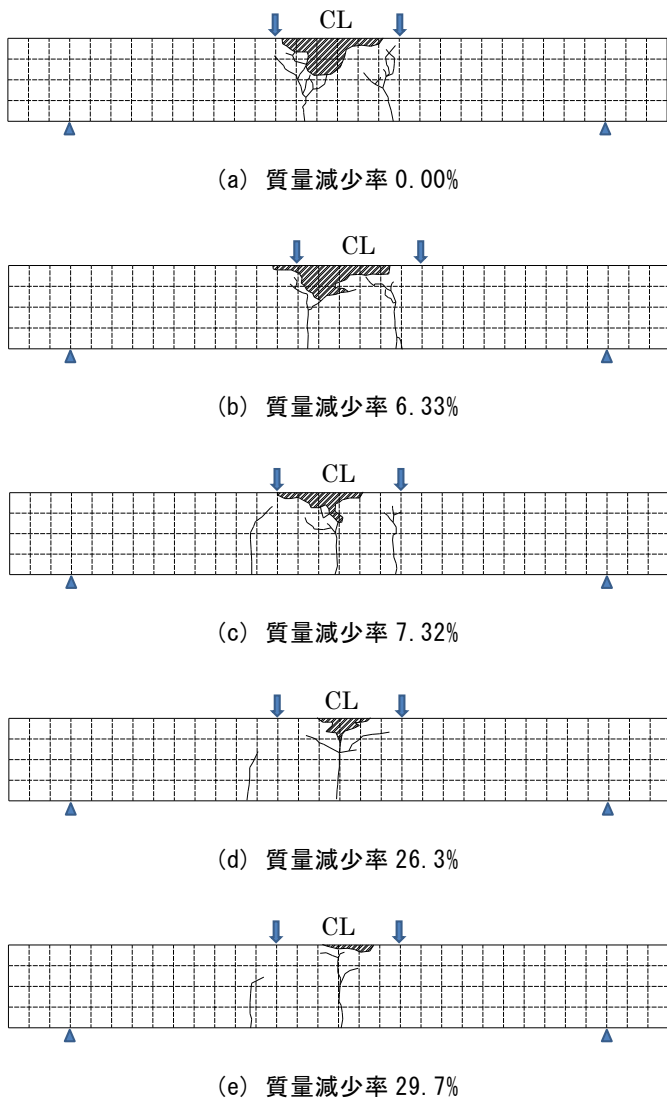


図 - 8 曲げ載荷試験後のひび割れ性状

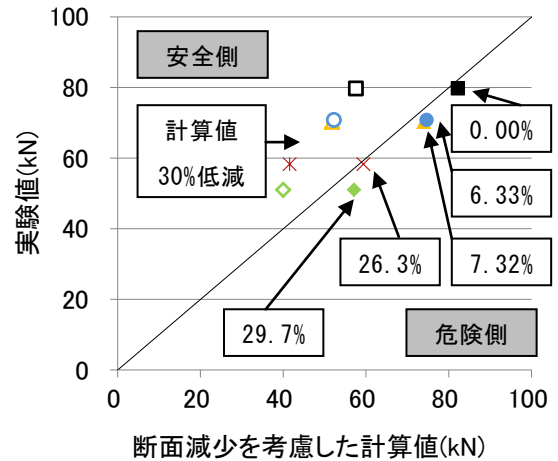


図 - 9 最大荷重の実験値と計算値の関係

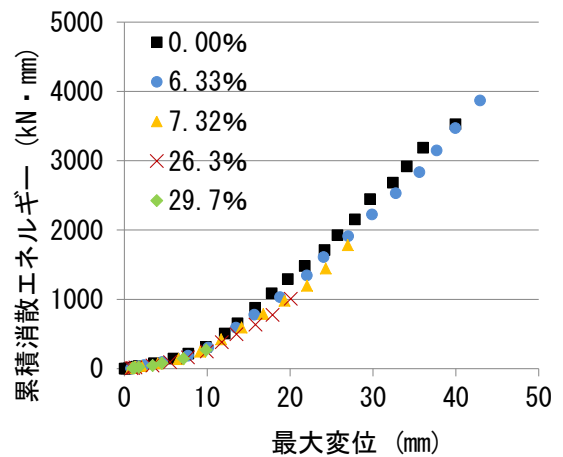


図 - 10 最大変位 - 累積消散エネルギー関係

剛性に大きく影響するため、PC 鋼棒腐食率による相違を明確にできなかった。

3.4 ひび割れ分散性・ひび割れ性状

曲げスパン内の π ゲージから得られる各ひび割れ幅の平均と荷重の関係を図 - 7 に示す。なお、質量減少率 7.32%では最大荷重前に π ゲージの測定を終えている。PC 鋼棒が腐食している供試体では、ひび割れ発生荷重の低下にともない、同一荷重での平均ひび割れ幅が健全供試体よりも大きくなったと考えられる。また、曲げ載荷試験後のひび割れ性状を図 - 8 に示す。PC 鋼棒が腐食している供試体と健全供試体で、ひび割れ本数やひび割れ間隔に明確な差異はみられなかった。

3.5 最大荷重

最大荷重の計算値と実験値の関係を図 - 9 に示す。計算値 P_u (kN) は PC 鋼棒の断面減少とコンクリートの圧縮強度を考慮して式(3)³⁾から求めた。

$$P_u = \frac{2}{500} \times A_p f_{sy} (d - 0.5a) \times 10^{-3} = \frac{2}{500} \times A_p f_{sy} \left(d - 0.5 \frac{A_p f_{sy}}{2 \times 0.85 \times f'_c \times b} \right) \times 10^{-3} \quad (3)$$

ここで、 A_p : PC 鋼棒の断面積 (mm^2)、 f_{sy} : PC 鋼棒の降伏強度 (N/mm^2)、 d : 有効高さ (mm)、 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 b : 断面幅 (mm) である。

計算値は実験値よりも若干大きくなっており、危険側の評価を与えていることとなる。しかし、今

回のアンボンド PC 梁に対してボンドタイプの完全付着を仮定した式(3)で算出しているため、ボンドタイプの耐力に対する 30%の低減³⁾を考慮すれば、安全側の評価も可能である。また、最大荷重の実験値の低下割合は、腐食による PC 鋼棒の断面減少を考慮することで表現できている。しかし、破断により終局に至った質量減少率 29.7%の供試体で実験値と計算値の乖離が若干大きくなっている。これは、圧壊による終局を仮定した式(3)に対して、圧壊前に PC 鋼棒の破断が生じていることが、影響していると考えられる。

3.6 復元特性

漸増繰り返し荷重を行うことにより得られる荷重時のエネルギーと除荷時のエネルギーを差し引いた消散エネルギーの和(累積消散エネルギー)と各荷重ループの最大変位の関係を図-10に示す。なお、各エネルギーは、漸増繰り返し荷重時の荷重-変位曲線が囲む面積として近似した。PC 鋼棒が腐食している供試体の累積消散エネルギーは健全供試体と同様の傾向を示している。

一方、漸増繰り返し荷重時における各ステップでの最大変位-残留変位の関係を図-11に示す。質量減少率 6.33%で最大荷重以降に残留変位が大きくなる傾向がみられたものの、他の腐食供試体、健全供試体の残留変位に明確な差異は見られなかった。質量減少率 6.33%供試体では、圧壊片によって変位計の計測値が影響を受け、残留変位が現れたものと考えられる。ただし、質量減少率 7.32%、26.3%、29.7%では、荷重が $0.6P_m$ に到達するまで繰り返してないことを考慮すると、PC 鋼棒の腐食している場合、PC 鋼棒の回復力が低下し、最大荷重以降の残留変位が大きくなる可能性も考えられ、今後更なる検討が必要である。

4. 結論

本研究で得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1) グラウトが充填されていないアンボンドタイプの PC 梁において、PC 鋼材が腐食してもコンクリート表面にひび割れは生じない。
- (2) PC 鋼棒が腐食した PC 梁では、ひび割れ発生までの剛性に影響はないものの、腐食によるプレストレスの減少でひび割れ発生荷重が低下する。また、ひび割れ発生荷重の低下にともない、ひび割れ発生後、同一荷重時の平均ひび割れ幅が大きくなる。
- (3) PC 鋼棒の断面減少によって最大荷重が低下し、その最大荷重は、PC 鋼棒の断面減少を考慮することで算定可能である。

参考文献

- 1) コンクリート技術シリーズ 52, PC 構造物の現状の問題点とその対策, (社)土木学会, 2003. 6
- 2) 鈴木ら: ポストテンション式 PC 中のシーすおよび PC 鋼材の腐食がひび割れに与える影響, 平成 22 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, V - 31, 2010. 5.
- 3) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書(設計編), 丸善
- 4) 上原子ら: 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, pp1525-1530 (pp1527), 2009

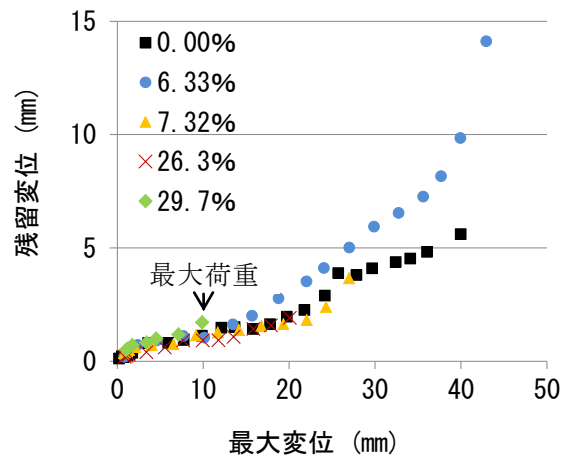


図 - 11 最大変位 - 残留変位関係