

鋼材が腐食したプレテンション PC 梁の載荷実験

長岡技術科学大学大学院
 長岡技術科学大学
 長岡技術科学大学
 長岡技術科学大学

○ 陸 賢
 田中 泰司
 山口 貴幸
 正会員 下村 匠

Abstract : At present, there is few studies regarding the structural performance of prestressed concrete beam which contains corroded prestressing steel bars. To investigate the influence of corrosion of prestressing steel bars on load carrying capacity, an accelerated corrosion tests by external current was carried out in this study. Then, these beams were loaded until failure. Totally, ten beam specimens were made in this study. Six specimens were loading in flexural, while the others were loaded in shear-flexural. Through the loading test, the reduction rate in flexural capacity and the performance of flexural deformation was compared with the degree of corrosional deterioration. Finally, we tried to investigate how to reduce the shear performance of prestressing beams due to the corrosion of prestressing steel bars.

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

1. はじめに

近年、劣化した鉄筋コンクリート構造物の耐荷性能についての研究は、数多く行われている¹⁾が、そのほとんどが RC 部材を対象にしたものであり、PC 部材を対象とした研究²⁾はごくわずかというのが現状である。現在我が国で供用されている 15m 以上の道路橋のうち、約 4 割が PC 橋梁であるが、その大部分が高度経済成長期に建設されたものであり、これらが高齢化しつつある状況である。それゆえ PC 橋梁がどのように劣化するのかを把握することは今後の維持管理技術の発展に不可欠である。そこで本研究では、PC 部材のうち、梁部材を対象にプレテンション PC 梁試験体を作成し、室内実験室において劣化促進試験を行い、曲げ載荷実験およびせん断載荷実験を行った。また、緊張材の腐食劣化状況を確認するとともに、部材の構造性能の低下との関係を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体形状

表-1 コンクリートの材料特性

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
シリーズ 1	N	55.7
	D-3	53.6
	D-6	
	D-9	
	D-12	
	D-15	40.9
シリーズ 2	NS	63.7
	D-10S	45.0
	D-30S	62.7
	D-50S	

表-2 PC 鋼材の材料特性

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

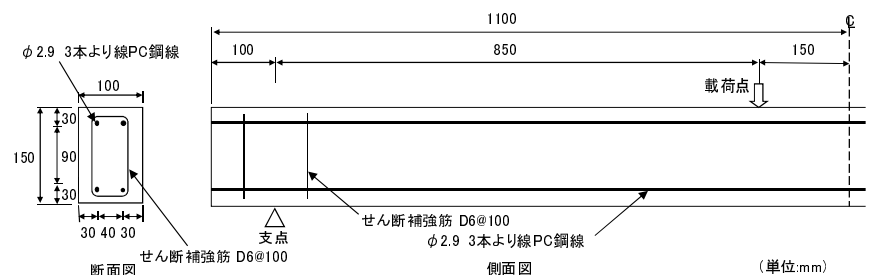


図-1 供試体諸元(シリーズ 1)

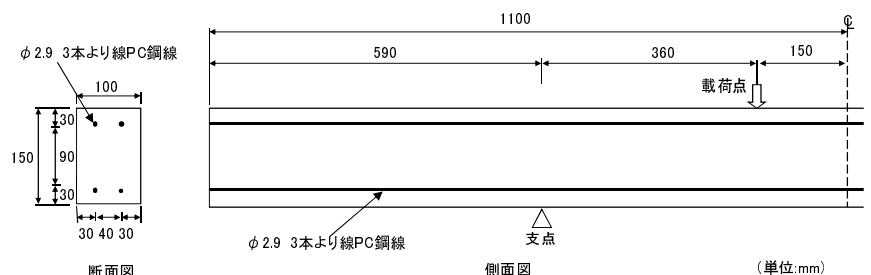


図-2 供試体諸元(シリーズ 2)

図-1 および図-2 に本研究で用いた試験体の寸法形状, および配筋状況を示す。試験体は, 断面が 100×150mm の矩形断面で, 長さが 2200mm のプレテンション PC 梁である。軸方向にφ2.9-3 本よりの PC 鋼より線を緊張材として用い, 定着部補強のためにシリーズ 1 の支点部にはせん断補強鉄筋 (D6) を配置した。なお, シリーズ 2 では定着長を十分に確保したのでせん断補強鉄筋を配置しなかった。試験体に導入した初期プレストレス量は, 道路橋示方書³⁾ で供用中の許容限界値として定められている 1170N/mm² とし, プレストレスによるコンクリート断面の応力の計算値を 6.18 N/mm² とした。コンクリートの圧縮試験結果を表-1 に, φ2.9-3 本よりの PC 鋼より線の物性値を表-2 に示す。試験体の一覧を表-3 に示す。シリーズ 1 では, 曲げ性能に対する鋼材腐食の影響を確認するために, 等曲げ区間で通電腐食を行った。シリーズ 2 では, PC 鋼材の腐食がせん断耐力に及ぼす影響を確認するために, せん断スパンで通電腐食を行った。試験パラメータは鋼材の質量減少率とした。基準となる健全な試験体に加えて, シリーズ 1 では質量減少率の目標値を 3,6,9,12,15% とした試験体を計 6 体, シリーズ 2 では質量減少率の目標値を 10,30,50% とした試験体の計 4 体を作成した。

2.2 劣化促進試験

劣化促進方法として, 本研究では電食法を用いた。電食法の概要を図-3 に示す。電食は, 直流安定化電源を用いて, 試験体の PC 鋼材からコンクリートへと直流電流を流すことにより行った。また, 図-3 に示すように陰極に用いた銅板の上に電食範囲の吸水スポンジを設置し, これを試験体下面に密着させることにより, 所定の範囲に電流が流れるように制御した。

表-3 に電食範囲を示す。シリーズ 1 では, 下段 2 本の等曲げ区間 300mm を電食範囲とした。シリーズ 2 では下段 2 本のせん断スパン 200mm を電食範囲とした。腐食量の調整については, 既往の研究⁴⁾により得られた積算電流量と腐食量の関係式を参考に通電時間を決定した。また, 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/m²) とした。

2.3 荷重試験

(1) 曲げ荷重実験(シリーズ 1)

曲げ荷重試験は, 図-1 に示すように, 等曲げ区間長 300mm, 支点間長 2000mm の単純支持・2点集中荷重で行い, 荷重制御による単調荷重とした。計測項目は, 荷重荷重, 変位, コンクリートのひずみとした。変位は, スパン中央, 荷重点, 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。

(2) せん断荷重実験(シリーズ 2)

せん断荷重試験は, 図-2 に示すように, 等曲げ区間長 300mm, 支点間長 1020mm の単純支持・2点集中荷重で行い, 荷重制御による単調荷重とした。計測項目は, 荷重荷重, 変位, コンクリートのひずみとした。変位は, スパン中央, 荷重点, 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 1 か所, せん断スパン内に 5 か所ひずみゲージを貼付して計測した。

表-3 試験体水準および試験体名

	試験体名	目標質量減少率 (%)	電食範囲 (mm)	電食位置
シリーズ 1	N	0	—	—
	D-3	3	300	等曲げ区間
	D-6	6		
	D-9	9		
	D-12	12		
D-15	15			
シリーズ 2	NS	0	—	—
	D-10S	10	200	荷重点から 80mm の片側せん断スパン
	D-30S	30		
	D-50S	50		

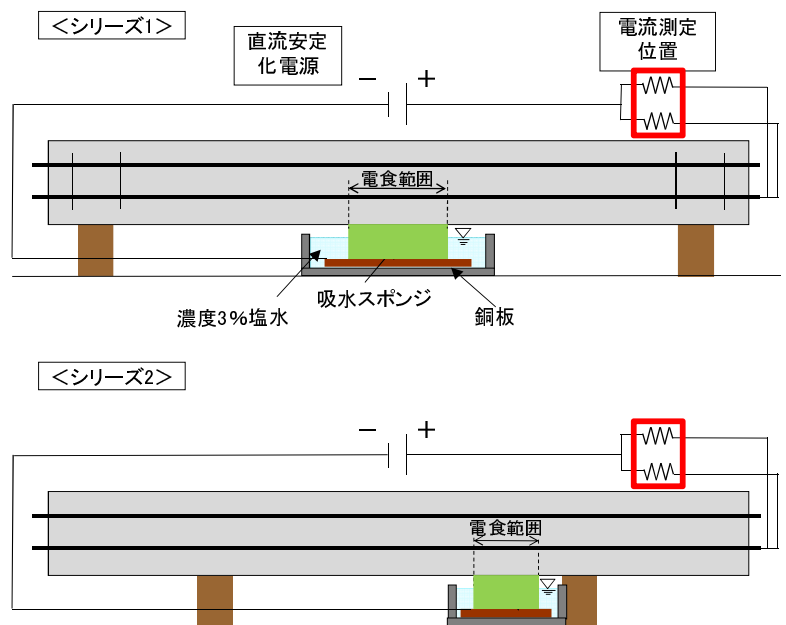


図-3 電食試験概要

せん断荷重試験では、せん断破壊が先行するように、せん断スパンと有効高さの比 (a/d) を a/d=3.0 とし荷重を行った。また、支圧板には荷重点に幅 75mm、支点に幅 100mm の鋼板を用いた。

2.4 PC 鋼材の質量減少率の測定

荷重試験終了後に、試験体から電食範囲の PC 鋼材をはつり出し、濃度 10% のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に常温 (約 10℃) で 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。電食区間の単位長さ当たりの質量を測定し、同等の処理を施した健全な鋼材と比較することにより質量減少率を算出した。

3. 実験結果

3.1 曲げ荷重実験(シリーズ 1)

(1) 荷重変位関係

表-4 にシリーズ 1 の実験結果の一覧、図-4 に荷重-中央変位関係を示す。鋼材腐食が進行するに従い、曲げ耐力と曲げ変形能がともに低下した。また、曲げひび割れ発生荷重も腐食の進行に伴う低下が見られた。しかし、初期剛性の低下はほとんど見られず、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、質量減少率が

最大でも 13.8% と比較的小さいことに加え、既往の研究⁵⁾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すほどにはならないからである。

(2) ひび割れ状況と破壊モード

図-5 に各試験体のひび割れ状況を示す。健全な試験体 (N) および腐食の程度が比較的小さい試験体 (D-3, D-6) では、等曲げ区間の梁下縁におおむね等間隔で曲げひび割れが発生した。ひび割れは荷重とともに進展し、荷重点付近の梁上縁の圧壊による曲げ引張破壊に至った。腐食の程度が大きい試験体 (D-9, D-12, D-15) は、腐食の程度が小さい試験体に比べ、ひび割れ本数が少ないことがわかる。曲げひび割れは、梁上縁まで達せず PC 鋼材の破断により破壊に至った。破壊モードが変化したことが、図-4 で示される最大変形量の低下の一因である。

(3) 各荷重における質量減少率の関係

曲げひび割れ発生荷重と質量減少率の関係を図-6 に示す。曲げひび割れ発生荷重の計算値は以下の式により求めた。

$$M_{cr} = \frac{I}{h/2} (f_b + \sigma'_{pu} + \sigma'_{pd}) \quad (1)$$

ここに、 M_{cr} は曲げひび割れ発生モーメント、 I は矩形断面の断面二次モーメント、 h は梁高さ、 f_b は曲げひび割れ強度⁵⁾でありコンクリート標準示方書「設計編」

表-4 曲げ荷重実験結果(シリーズ 1)

試験体名	質量減少率 (%)	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm)	破壊モード
N	0.00	8.69	23.6	32.2	曲げ引張破壊
D-3	2.71	11.1	23.2	25.3	曲げ引張破壊
D-6	5.18	7.23	21.3	20.9	曲げ引張破壊
D-9	8.14	6.51	18.5	11.3	鋼材破断
D-12	10.4	4.40	18.2	11.9	鋼材破断
D-15	13.8	1.42	10.1	2.82	鋼材破断

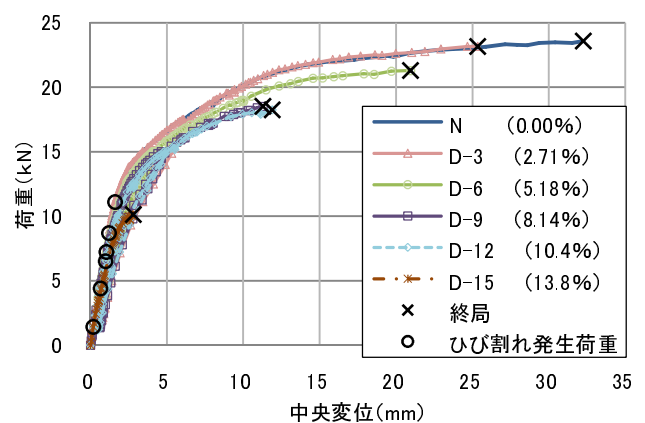
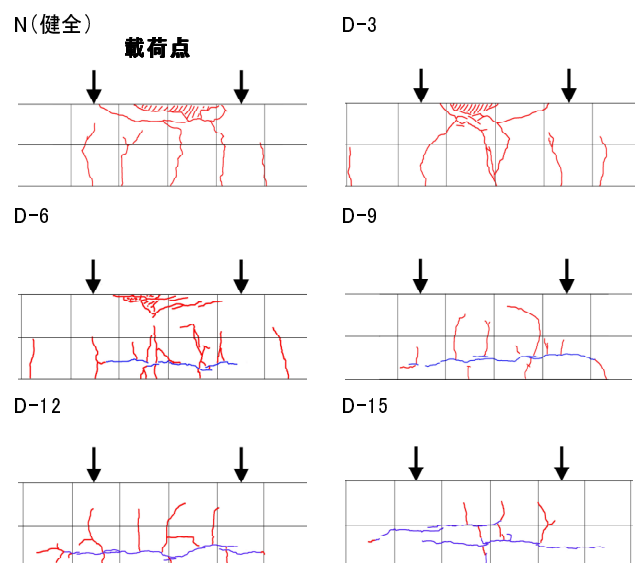


図-4 荷重-中央変位関係



—腐食ひび割れ 〓荷重ひび割れ
図-5 ひび割れ状況(シリーズ 1)

より求めた。 σ'_{pu} は上側のPC鋼材のプレストレス力による引張縁の圧縮応力であり、有効プレストレスではなく、導入したプレストレスより計算した。 σ'_{pd} は下側のPC鋼材のプレストレス力による引張縁の応力であり、鋼材の質量減少率(断面積減少率) x より以下の式により求めた。

$$\sigma'_{pd} = x \cdot \sigma'_{pdo} \quad (2)$$

ここに、 σ'_{pdo} は、腐食がない場合の下側のPC鋼材のプレストレス力による引張縁の応力である。

図-6において、腐食の少ないD-3では計算値を上回るが、その他の試験体では、計算値以上に残存プレストレス力が低下した。これは、計算では等曲げ区間内の腐食が同様であると仮定したのに対して、実験では局所的に腐食が進行し、その影響が顕著にあらわれたためと考えられる。PC鋼材の平均的な腐食量と局所的な腐食量の関係や、残存プレストレス力の評価方法については、別途検討が必要である。

最大荷重と質量減少率の関係を図-7に示す。計算値は、腐食による鋼材の断面減少のみを考慮し、一般のPC断面の計算法を用いて算出した。腐食の程度が小さく、破壊モードが曲げ引張破壊である試験体では、鋼材腐食による曲げ耐力の低下が比較的緩やかであり、等曲げ区間の平均質量減少率を用いることで、耐力を評価できる。一方、腐食の程度が大きく破壊モードが鋼材破断となった試験体では、曲げ耐力の低下率が平均質量減少率から推定される値よりも大きくなった。

3.4 せん断載荷実験(シリーズ2)

(1) 荷重変位関係

表-5にせん断スパンで通電腐食を行ったシリーズ2の実験結果の一覧を示す。また、図-8に荷重-変位関係を示す。表-5に示す通り、D-10Sは電食を行ったにも関わらず、鋼材の質量は減少せず、はつり後の鋼材の観察でも錆の発生が見られなかった。そのためD-10Sの試験結果は健全な試験体とほぼ同様であった。曲げひび割れ荷重はD-50Sを除く3体で、概ね同じ値であった。これは、シリーズ2では、せん断スパン内のみを電食させ、等曲げ区間内の鋼材は腐食していないためである。D-50Sを除く試験体では、等曲げ区間内で第1曲げひび割れが発生したので、腐食量によらず、曲げひび割れ発生荷重が変わらないことは、妥当な結果といえる。図-8の荷重-変位関係に示すように、シ

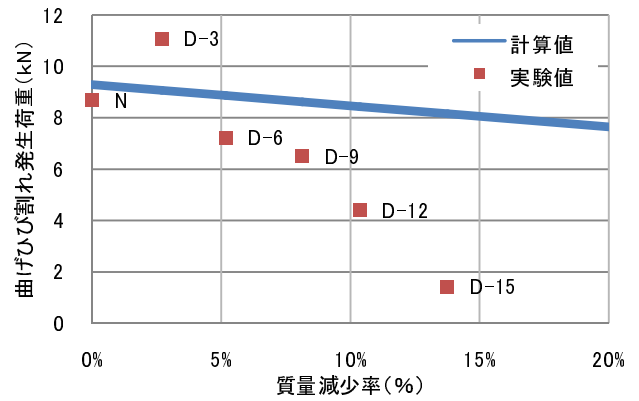


図-6 曲げひび割れ発生荷重-質量減少率の関係

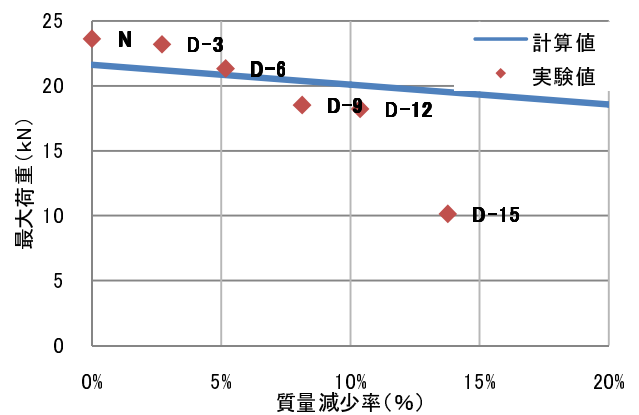


図-7 最大荷重-質量減少率の関係

表-5 せん断載荷実験結果(シリーズ2)

試験体名	質量減少率 (%)	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm)	破壊モード
NS	0.00	20.8	56.4	12.4	曲げ引張破壊
D-10S	-0.10	24.3	55.1	11.7	曲げ引張破壊
D-30S	25.3	24.4	38.0	1.73	鋼材破断
D-50S	44.5	—	12.4	0.30	鋼材破断

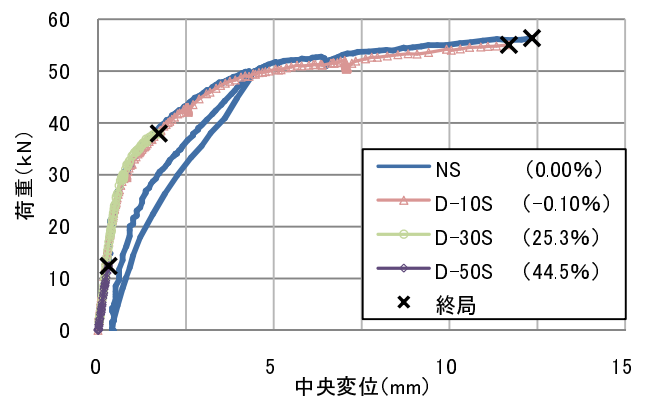


図-8 荷重-変位の関係

リーズ1と同様に鋼材腐食が進行するに従い、曲げ耐力と曲げ変形能がともに低下したが、曲げ剛性の低下は見られなかった。これは、電食箇所をせん断スパン内に限定したため、腐食の部材全体の曲げ剛性への影響が少なかったからだと考えられる。

(2)ひび割れ状況と破壊モード

図-9に各試験体のひび割れ状況を示す。健全な試験体(NS)とD-10Sは、せん断破壊せずに梁上縁の圧壊による曲げ引張破壊が生じた。D-30SとD-50Sでは、事前に生じていた腐食ひび割れから斜めひび割れが発生し、荷重の増加とともに進展していった。最終的には鋼材の破断により破壊に至った。健全な試験体(NS)およびD-10Sとは挙動が異なり、斜めひび割れが発生したが、せん断破壊には至らなかった。これらの試験体は、示方書式を用いてせん断破壊が先行するように設計したが、健全な試験体(NS)とD-10Sでは、せん断スパンで曲げひび割れが生じなかったため、斜めひび割れが生じなかったと考えられる。一方、D-30SとD-50Sでは、腐食区間と非腐食区間の境界部から斜めひび割れが発生した。この境界部が比較的荷重点に近接していたため、斜めひび割れは荷重点の下側に潜り込むように進展した。その結果、強固なコンクリートストラットを有するタイドアーチ機構が形成されたために、せん断破壊が生じなかったと考えられる。

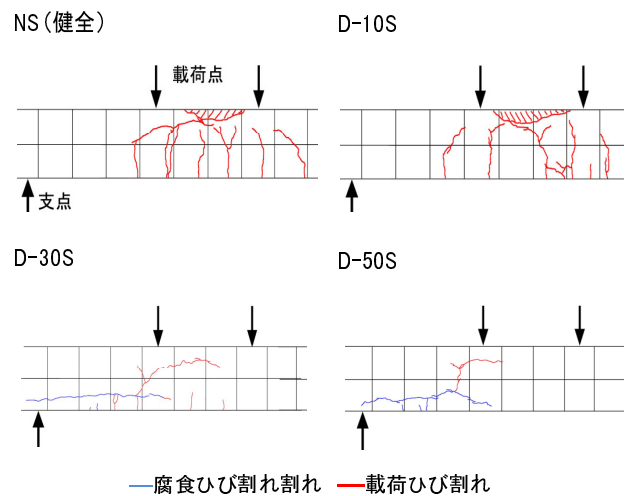


図-9 ひび割れ状況(シリーズ2)

(3)最大荷重における質量減少率の関係

図-10に最大荷重と鋼材の腐食量の関係を示す。図中には、示方書式によるせん断耐力の計算値を併せて示した。せん断耐力の計算値は、腐食による鋼材の断面減少のみを考慮し、一般のPC断面の計算法を用いて算出した。その際、プレストレス力は鋼材断面の減少量と同じ分だけ低下するものと仮定した。なお、せん断耐力はコンクリート標準示方書「設計編」より棒部材の設計せん断耐力式⁶⁾を用いて求めた。

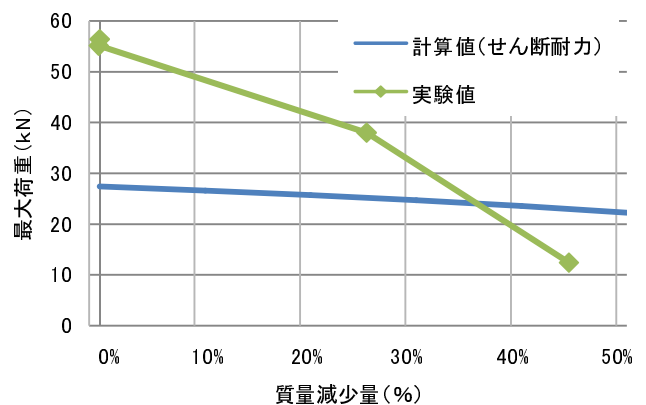


図-10 最大荷重-腐食量の関係

$$V_c = \sqrt[3]{1000/d} \cdot \sqrt[3]{100\rho_w} \cdot (1 + 2M_0/M_u) \cdot 0.20\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

ここに、 V_c はせん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力、 d は有効高さ、 ρ_w は有効鉄筋比、 M_u は軸方向力を考慮しない純曲げ耐力、 M_0 はデコンプレッションモーメント、 f'_c はコンクリートの圧縮強度、 b_w はウェブ幅である。

設計計算上では、曲げ耐力よりせん断耐力の方がはるかに小さいが、実際には、いずれの試験体においてもせん断破壊は生じなかった。これは、計算で用いたせん断補強材を用いない棒部材の設計せん断耐力式が、曲げひび割れの先端から斜めひび割れが発生・進展するような破壊形式を対象としたものであることに起因している。PC部材のせん断スパンのように、軸力方向にプレストレスが導入され、曲げひび割れの発生が抑えられている場合には、純せん断破壊に近い破壊形態となるので、せん断耐力が見かけ上大きくなる。D-30SとD-50Sでは鋼材の局所的な断面減少量が増加したことにより曲げ耐力が大きく低下したため、せん断破壊に先行して鋼材破断をとまなう曲げ破壊が生じたといえる。

3.5 PC梁の腐食箇所の影響

図-11にシリーズ1およびシリーズ2の曲げひび割れ発生時、最大荷重時の曲げモーメント比と質量減少

率の関係を示す。ここで曲げモーメント比とは、各試験体の曲げひび割れ荷重、最大荷重から破壊断面に作用している曲げモーメントを算出し、健全な試験体 (N) の曲げモーメントで除した値である。なお、D-30S と D-50S に関しては、腐食区間と非腐食区間の境界 (支点から 280mm の位置) を破壊面とみなして、作用モーメントを求めた。このように定めた破壊面と鋼材の破断位置は必ずしも一致していないが、腐食ひび割れによって鋼材の付着が低下していたことや、腐食区間と非腐食区間の境界から斜めひび割れが発生したことを勘案して、この位置を破壊断面とみなすことにした。曲げ耐力の減少傾向は、実験シリーズで異なる傾向となった。シリーズ 1 では、平均質量減少率以上に曲げひび割れ荷重も最大荷重も減少する結果となった。これは、シリーズ 1 では、等曲げ区間内でもっとも腐食した箇所が弱点となって、部材のひび割れ荷重や耐力が定まるからである。一方、シリーズ 2 では、質量減少率の平均値と耐力の低下率がおおむね同程度となった。これは、シリーズ 2 では電食範囲がせん断スパン内であったため、腐食範囲の中でも載荷点に近い、ごく限られた部分の鋼材の腐食状況で耐力が決定されたためだと考えられる。このように、載荷方法によって、腐食量の空間的なばらつきが構造性能に与える影響が異なるので、腐食量と耐力低下の関係も、試験体の種類や大きさ、荷重パターンなどに応じて異なる結果になると考えられる。

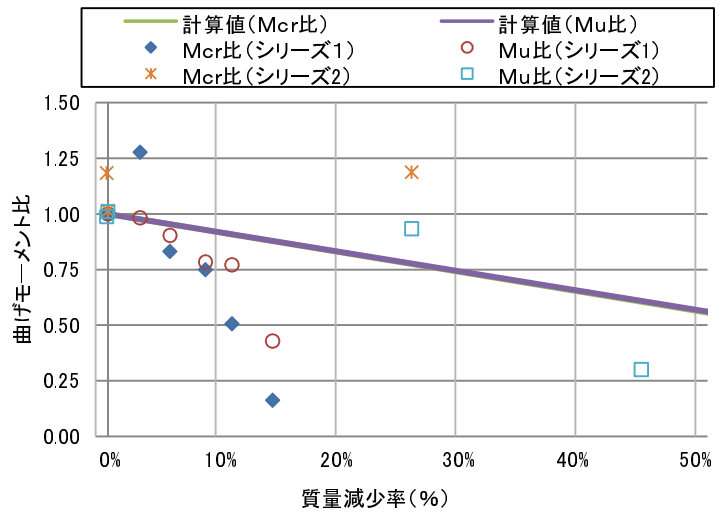


図-11 曲げモーメント比-質量減少率の関係

4. まとめ

- 1) PC 鋼材の腐食が進行すると、部材の曲げ耐力と変形性能は低下する。
- 2) 腐食劣化した PC 梁部材の曲げひび割れ発生荷重は、鋼材の平均的な断面減少率から予想される値以上に小さくなる傾向にある。また、腐食の程度が大きい場合は、鋼材破断が生じることにより曲げ耐力に同様の傾向が見られた。曲げひび割れ発生荷重および最大荷重を適切に評価するには、鋼材断面の局所的な減少率を把握する必要がある。
- 3) せん断破壊が先行すると判定された条件下であっても、せん断ひび割れのきっかけとなる曲げひび割れが生じない場合には、部材のせん断耐力は計算値よりもかなり大きくなるため、結果としてせん断破壊しない場合がある。また、せん断スパン内で局所的な腐食が生じた場合にも、腐食の程度が大きい場合には曲げ耐力が大きく低下するため、せん断破壊に先行して鋼材破断をとまなう曲げ破壊が生じる場合がある。
- 4) 鋼材の腐食箇所の違いにより、同じ腐食量でも耐荷力の低下率が大きく異なることがある。これは荷重条件や腐食箇所の違いによって、腐食量の空間的なばらつきが構造性能に与える影響が異なるためである。

参考文献

- 1) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 85，2009
- 2) 例えば，中村英佑ら：鋼材腐食が生じた PC 梁部材のせん断耐荷挙動の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.411-416，2009.10
- 3) 道路橋示方書・同解説 III，日本道路協会，2002
- 4) 田森清美ら：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988
- 5) 加藤絵方ら：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.57-82，2008.3
- 6) 2007 年制定，コンクリート標準示方書[設計編]，土木学会