

論文 鋼材腐食が生じたプレテンション PC 桁の曲げせん断性能に関する実験的検討

田中 泰司*1・山口 貴幸*2・陸 賢*3・井林 康*4

要旨: 鋼材腐食が生じた PC 桁のせん断耐力についての検討を行うために、日本海沿岸部で約 35 年間供用され、塩害劣化が進行していたプレテンション PC 桁橋の破壊試験を行った。a/d を主要因子とし、計 4 体の破壊実験を行った後に、試験体を解体し、PC 鋼材の腐食状況を直接確認した。鋼材の腐食状況から残存プレストレス力とせん断耐力の計算を行ったところ、腐食によって鋼材破断が生じた部分では、有効定着長を考慮することによって、プレストレス力もせん断耐力もおおむね安全側に評価可能となることが示された。

キーワード: プレテンション桁, 鋼材腐食, せん断耐力, 定着長, プレストレス力

1. はじめに

現在わが国で供用されている橋梁のうち、約4割がPC橋梁であり¹⁾、その大部分が高度成長期に建設されたものである。近年、沿岸部にあるPC橋梁の一部で塩害による鋼材腐食が発生しており²⁾、合理的な維持管理方法の確立が急務の課題となっている。

塩害劣化した鉄筋コンクリート構造物の耐荷性能については、近年、精力的な研究が行われてきた³⁾が、検討対象としては、そのほとんどがRC部材にとどまっており、PC部材の検討例⁴⁾はごく少数に限られている。また、RC部材の知見をPC部材に適用する際には、PC部材に特有な、プレストレスの影響やPC鋼材と鉄筋との材料特性の違いの影響を把握しておく必要がある。そこで本研究では、日本海沿岸で約35年供用され、塩害による鋼材腐食が生じたプレテンションPC桁橋を実験室内まで移動し、载荷試験を行うことで、塩害による構造性能への影響を直接確認することにした。

許容応力度法で設計された橋梁の場合は、曲げ破壊に先行して、せん断破壊が生じるような設計がなされている場合もあり、研究対象橋梁もその一例である。また、PC橋で鋼材腐食が生じた場合には、有効鋼材量の減少や、付着の低下に加えて、プレストレス力も減少するので、RC部材に比べてせん断耐力の低下が顕著となる恐れもある。そこで本論文では、曲げせん断性能における鋼材腐食の影響について検討を行うこととした。

2. 曲げせん断試験

2.1 研究対象橋梁の概要

本研究では、新潟県糸川市能生で、自転車道の一部として供用されていた鱗崎橋を研究対象とした。鱗崎橋

は1974年に製造されたプレテンションPC四主桁橋であり、橋長10.4m(支間9.8m)の単純I桁橋である。海岸から約15mの距離に位置していたため、図-1に示すように、塩害による鋼材腐食が進行していた。4本の主桁のうち、海側の2本(A, B桁)で曲げ試験を、山側の2本(C, D桁)の中央部で疲労試験を、山側の2本の桁端付近で曲げせん断試験をそれぞれ行った(図-2参照)。このうち本論文では、C, D桁端部で実施した曲げせん断試験について報告する。なお、橋梁の解体は2010年2月に、主桁



図-1 解体時の鱗崎橋の外観状況 (D桁)

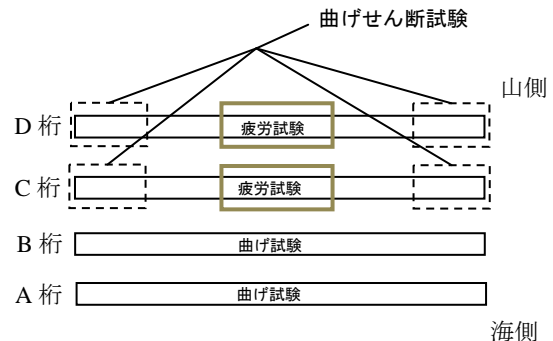


図-2 曲げせん断試験の対象区間

*1 長岡技術科学大学 環境・建設系助教 博(工) (正会員)

*2 長岡技術科学大学 技術職員 修(工) (正会員)

*3 長岡技術科学大学大学院 建設工学専攻

*4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

の曲げせん断試験は2010年9~10月に行った。

図-3に試験体の断面図を示す。試験体の上フランジにはφ2.9の2本より線が4本、φ2.9の単線が2本配筋されていた。また、下フランジにはφ2.9の2本より線が32本、φ2.9の単線が2本、それぞれ配筋されていた。スターラップにはφ6の丸鋼が約380mm間隔で使用されていた。

コンクリートの圧縮強度は、荷重試験終了後に無損傷部からφ63のコンクリートコアを採取し、測定した。コンクリートの圧縮強度はC桁で57.2N/mm²、D桁で49.8N/mm²であった。弾性係数はC桁で27.2kN/mm²、D桁で26.2kN/mm²であった。

図-4にC桁、D桁のウェブの断面方向の全塩分量分布を示す。ウェブ内の塩分量はほぼ一様であり、鋼材の腐食発生限界濃度の標準値⁵⁾である1.2kg/m³と比較すると、はるかに大きい値であった。

2.2 荷重方法

図-5に示すように、荷重は単純支持、1点集中荷重により行った。加力位置を試験区間側に寄せて、試験区間と反対側の作用せん断力を小さくすることで、破壊箇所を限定した。また、主桁の両方の端部で荷重試験を行うために、試験区間と反対側の定着長を3400mmと長めに設定した。表-1に試験水準の一覧を示す。実験因子は、せん断区間と有効高さの比(a/d)とした。斜め引張破壊とせん断圧縮破壊の両方の劣化性状が確認できるように、a/dを1.08~3.25の範囲に設定し、試験を行った。荷重板には荷重点・支点ともに幅が100mmのものを用いた。

2.3 試験結果

(1) 破壊状況

表-1にひび割れ発生荷重、最大荷重および破壊形式を示す。また、図-6に荷重終了後に観察された試験区間付近のひび割れ図を示す。これ以外の範囲では、荷重中にひび割れは発生しなかった。せん断破壊を生じたものは、C-IIとD-IIの2つであった。C-Iではせん断ひび割れ発生後に試験区間外でPC鋼材の降伏が生じたので試験を終了した。また、D-Iでは曲げひび割れ発生後にPC鋼材が次々と破断し、荷重が増加しなくなったために試験を終了した。

(2) 曲げひび割れ発生荷重

図-7は、曲げひび割れ発生荷重の実験値と、腐食がない場合の計算値との比較を行ったものである。計算に際しては、PC鋼材のプレストレス力を道路橋示方書⁶⁾の許容限界値である1170N/mm²と仮定した。また、コンクリートの圧縮強度は一律に49.8N/mm²とし、引張強度⁷⁾は式(1)により求めた。

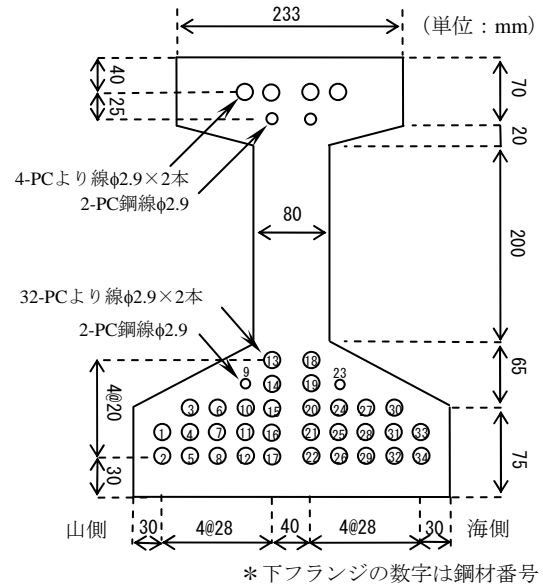


図-3 試験体の断面図

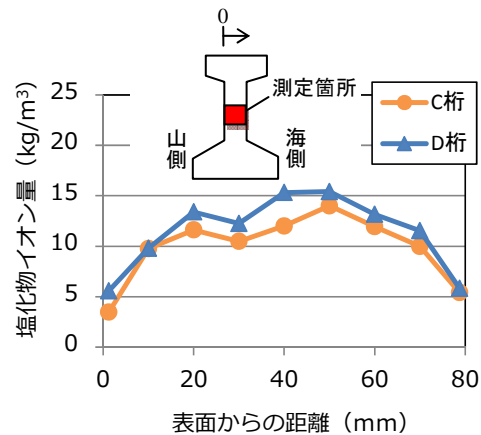


図-4 ウェブ断面の全塩分量分布(桁中央から50cmの位置)

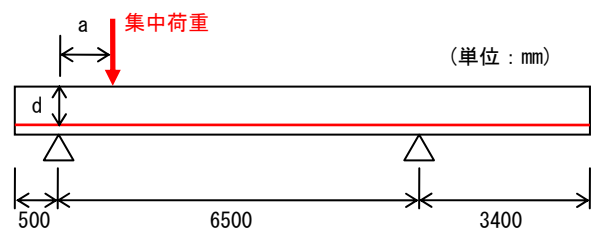


図-5 荷重方法

表-1 試験水準および試験結果の概要

番号	a	a/d	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形式
C-I	400	1.08	250	300	350	鋼材降伏
C-II	1200	3.25	102	107	107	斜め引張
D-I	600	1.63	85	—	96	鋼材破断
D-II	900	2.44	150	150	180	せん断圧縮

$$f_t = 0.23 \times f_c^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 f_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²), f_t は引張強度(N/mm²)である。曲げひび割れ発生荷重の実験値は、健全時の計算値に対して 33~84%と、大きくばらつく結果となった。これは、同じ桁であっても、場所によって腐食量に大きなばらつきがあり、そのばらつきに応じて残存プレストレス力も変動するためである。

(3) 斜めひび割れ耐力

図-8に斜めひび割れ発生時の作用せん断力の実験値と健全時の計算値の比較を示す。健全時の斜めひび割れ耐力は、土木学会の棒部材のせん断耐力式⁵⁾を用いて計算した。

$$V_c = \beta_n \cdot \beta_d \cdot 0.20 \cdot \sqrt[3]{f_c'} \cdot \sqrt[3]{100p_w} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

$$\beta_n = 1 + 2M_0/M_u \quad (3)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad (4)$$

ここに、 V_c は斜めひび割れ耐力、 p_w は有効鉄筋比、 b_w はウェブ厚(80mm)、 d は有効高さ(369mm)である。また、 M_0 はデコンプレッションモーメント、 M_u は軸力を考慮しない純曲げ耐力である。せん断耐力ではなく、斜めひび割れの発生荷重を実験値と比較するため、スターラップによるトラス効果は考慮しなかった。斜めひび割れ発生時の作用せん断力の実験結果は、いずれのケースにおいても健全時の計算値よりも大きくなった。この理由としては、腐食による耐力低下の影響が比較的小さいことのほかに、曲げひび割れの有無の影響が挙げられる。土木学会の棒部材のせん断耐力式は、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て構成されたものであるため、プレストレス力によって曲げひび割れの発生が抑えられている場合には、耐力が過小評価されると考えられる。図-8には、曲げひび割れ発生時の作用せん断力も記した。斜めひび割れの発生は、曲げひび割れと同時か少し大きい程度であり、斜めひび割れに先行して曲げひび割れが発生していることがわかる。

(4) せん断圧縮耐力

図-9に最大荷重時の作用せん断力の実験値と、健全時のせん断圧縮耐力の計算値の比較を示す。健全時のせん断圧縮耐力は、破壊モードがせん断圧縮破壊となることを仮定して、式(5)で示される、土木学会ディープビーム式⁵⁾により求めた。

$$V_d = \beta_n \cdot \beta_d \cdot \beta_a \cdot 0.19 \sqrt{f_c'} \cdot \frac{1 + \sqrt{100p_w}}{2} \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a'/d)^2} \quad (6)$$

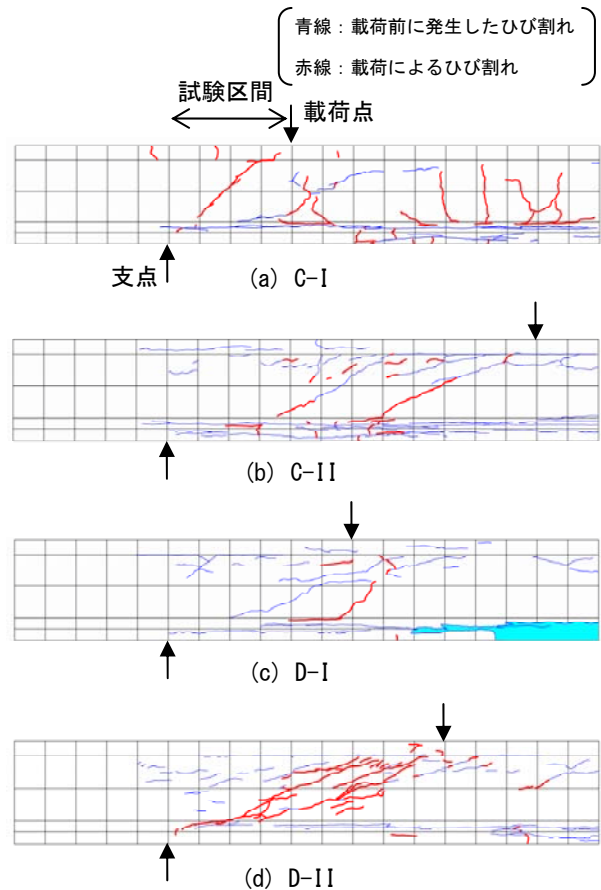


図-6 試験区間付近のひび割れ図

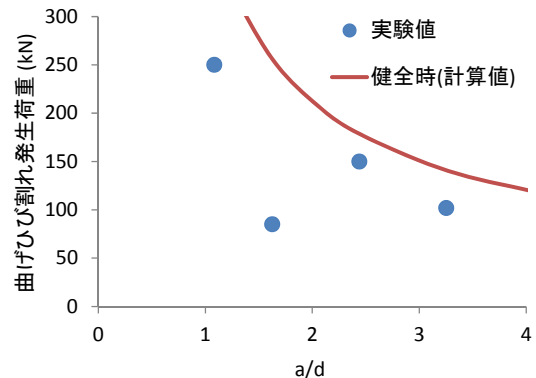


図-7 曲げひび割れ発生荷重の実験値と計算値(健全時)の比較

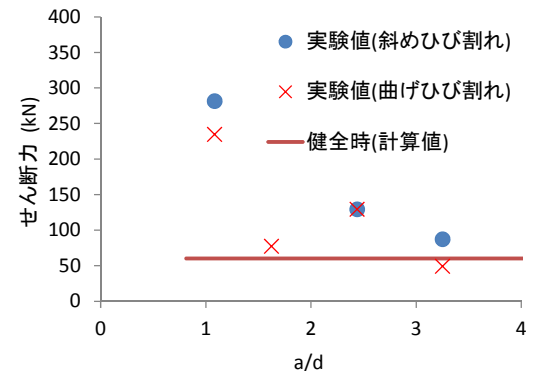


図-8 斜めひび割れ発生時の作用せん断力の実験値と計算値(健全時)の比較

ここに、 V_d はせん断圧縮耐力、 a' は支持部前面から荷重点までの距離である。4試験体のうちせん断破壊が生じた2体(C-II、D-II)では、健全時のせん断耐力の計算値に比べて、実験値のほうが大きくなった。C-I試験体は計算値と実験値が同程度であったが、表-1に示すようにC-I試験体では、PC鋼材の降伏が生じているので、せん断圧縮耐力は最大作用せん断力よりも大きいとみなすことができる。D-I試験体の最大作用せん断力は、せん断耐力の計算値よりも小さいが、これは、破壊形式が異なるためである。

土木学会のディープビーム式では、I型断面の b_w にウェブ部の厚さを用いるなど、安全側に耐力が算定されるように配慮されている。しかし、後述するように、いずれの試験体も鋼材の腐食量は比較的大きかったため、これらの結果は、ある程度の腐食が生じて、せん断耐力は顕著には減少しないことを示唆している。

3. 腐食量測定

3.1 測定方法

荷重後に試験体を300~700mmの間隔で切断し、下フランジにある鋼材を1本ずつ取り出して、PC鋼材の破断状況の確認や腐食量の測定を行った。取り出した鋼材の錆びを取り除いた後に、鋼材の長さや重量を測定して、腐食量を求めた。元のPC鋼材の重量には、規格値⁸⁾(104g/m)を用いた。腐食量の測定範囲は、試験区間および荷重中にひび割れが発生した部分とした。

3.2 測定結果

(1) 断面内の腐食量分布

図-10にC-I試験体から取り出したPC鋼材の腐食量測定結果を示す。なお、この図の腐食量は、取り出した鋼材の重量を残留していた鋼材の長さで除して求めたものであるため、完全に腐食しきって鋼材が消失している部分は腐食量には含まれていない。

近接する鋼材であっても腐食量は大きく異なり、腐食量が2~3%程度に留まっているものと、数十%のものが明確に分かれていることが図-10よりわかる。鋼材腐食の進行は(b)のように、かぶりが小さい部分から進行するとは限らず、(a)のように下フランジの中央部で鋼材破断を伴う腐食が生じているケースもあった。腐食ひび割れの経路と鋼材破断位置はおおむね一致していたため、腐食ひび割れがきっかけとなって、腐食速度が大きくなった可能性が高い。

(2) 破断・消失位置の測定結果

図-11にPC鋼材の破断・消失位置の測定例を示す。線のない部分は腐食によって消失していたことを示す。本橋梁では、細径のPCより線が使用されていたため、腐食によって破断していたり、完全に消失していたりする箇

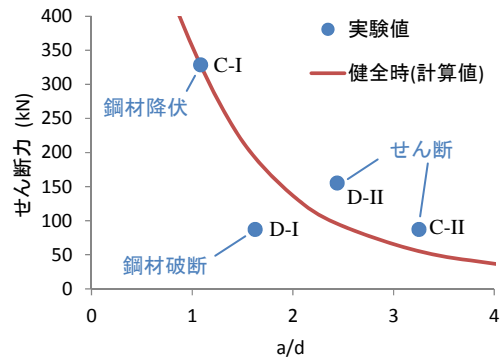
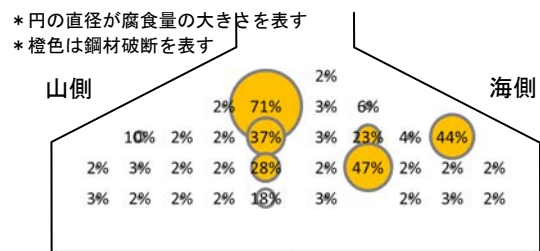
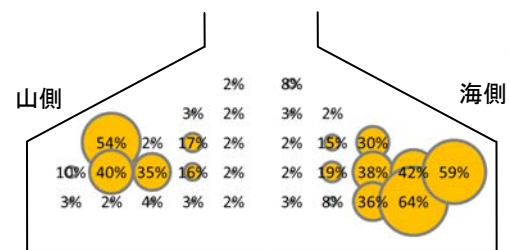


図-9 最大荷重時の作用せん断力の実験値とせん断圧縮耐力の計算値(健全時)の比較



(a) 支点から0~400mm



(b) 支点から700~1200mm

図-10 取り出した鋼材の腐食量測定結果の例(C-I)

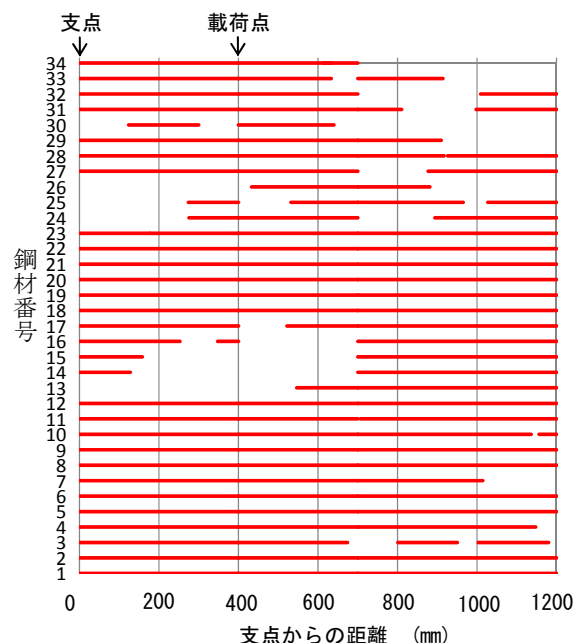


図-11 PC鋼材の破断・消失位置の測定例(C-I)

所が比較的多かった。

(3) 有効鋼材量の推定

PC鋼材の腐食量と破断・消失位置の測定結果を用いて、各断面の有効鋼材量を算出した。ここでPC鋼材の腐食量は測定区間内(300~700mm)で均一と仮定した。図-12に耐荷性能に寄与し得る鋼材の残存率の推定結果を示す。破断箇所に近い鋼材は付着力不足のため、有効に機能しないと考えられるので、破断位置からある程度の範囲を鋼材量の算定から除外するのが適切だと考えられる。そこで、プレテンションPC部材の定着長の設計値⁶⁾を参考にして、定着長を 65ϕ ($65 \times 2.9 = 189\text{mm}$)とした場合と、腐食による付着劣化を考慮して定着長を2倍($130 \times 2.9 = 377\text{mm}$)とした場合の有効鋼材量をそれぞれ算出した。

図-11に示したように、本橋梁では鋼材の破断や消失が比較的多かったので、有効鋼材量の推定値は定着長に大きく影響を受ける結果となった。鋼材の定着長を考慮しない場合(完全付着)と比較すると、有効鋼材量が元の鋼材量の20~30%程度小さくなる箇所もあった。

4. 腐食量測定結果に基づく耐力評価

4.1 プレストレス力

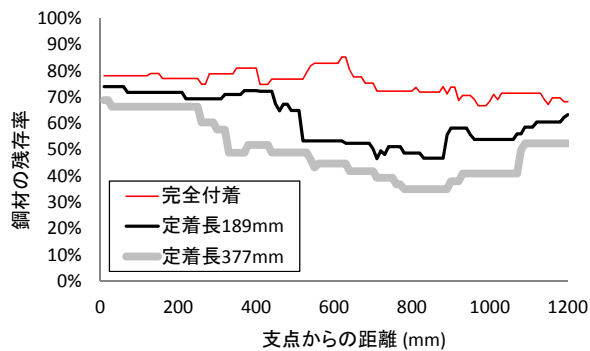
残存プレストレス力については、曲げひび割れ荷重の実験値を用いて考察を行うことにした。図-12のPC鋼材の有効残存率を用いて、各試験体の曲げひび割れ荷重の予測計算を行った。プレストレス力は、鋼材が腐食した分だけ減少すると仮定した。鋼材のプレストレス導入応力は 1170N/mm^2 と仮定した。集中荷重による作用モーメントの分布や自重の影響を考慮することで、支点から0~1200mmの範囲で最も曲げひび割れが発生しやすい位置とその荷重を算出した。

図-13に曲げひび割れ発生荷重の実験値と計算値の比較を示す。腐食量の測定結果を考慮することで、計算値は実験値をおおむね再現する結果となった。これは、プレストレス力が腐食量の分だけ減少するという仮定が妥当であることを示している。PC鋼材の定着長を考慮しない場合には、若干実験値より過大な評価となり、定着長を考慮した場合には、おおむね安全側の評価となった。今回の実験では、鋼材の初期プレストレス力の正確な値が不明であるので、鋼材破断箇所での定着長については、別途、詳細な検討が必要である。

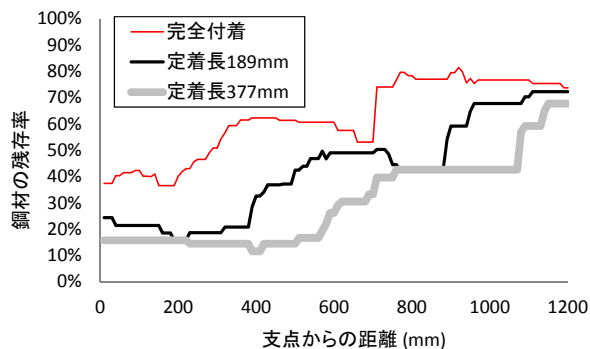
4.2 せん断耐力

鋼材腐食が生じた場合のせん断圧縮耐力は、式(5)の有効鉄筋比 p_w と式(3)のデコンプレッションモーメント M_D 、純曲げ耐力 M_u のそれぞれに腐食による鋼材断面の減少を考慮することで評価することとした。

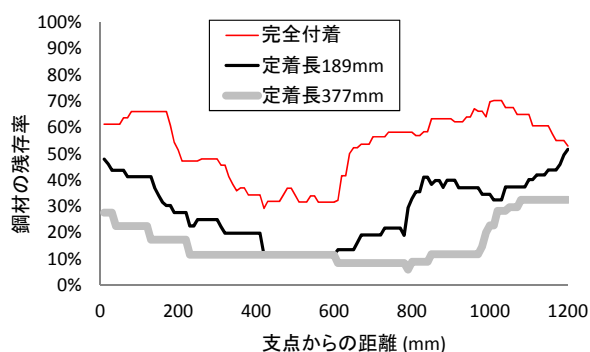
有効鉄筋比にせん断区間の有効鋼材量の最小値を用いた場合のせん断圧縮耐力の計算値を図-14に示す。今



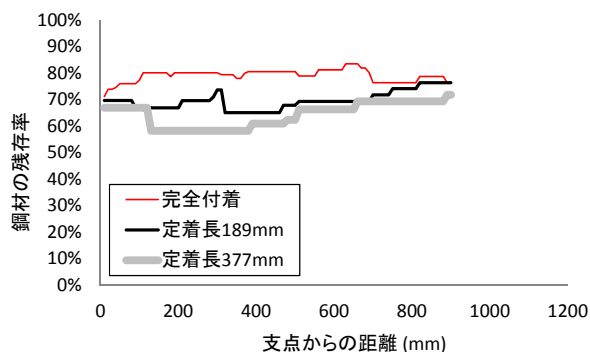
(a) C-I



(b) C-II



(c) D-I



(d) D-II

図-12 耐荷性能に寄与するPC鋼材の残存率の推定結果

回の実験では、せん断破壊が生じた試験体の耐力評価は、示方書ディープビーム式を用いると安全側に評価される結果となった。腐食した部材のせん断圧縮耐力の計算値は、いずれのケースにおいても、健全時よりも若干小

さくなる程度になった。健全時との差が小さい理由としては以下の2点が挙げられる。第1点は、式(5)の有効鉄筋比の感度が1/2乗であり比較的小さいことである。もう1点は、プレストレスの減少率と曲げ耐力の減少率が同等であるので、軸力の効果を示す式(3)の値がほとんど変化しないことである。これらの感度が適切か否かについては、今後検討を進める必要がある。

4.3 降伏荷重

図-15に降伏荷重の実験値と最大荷重の実験値の比較を示す。PC鋼材の降伏強度は引張強度の規格値の93% (1712N/mm²)とした⁹⁾。PC鋼材の腐食の影響は、4.1節の曲げひび割れ荷重と同様に考慮した。鋼材の降伏や破断が生じた試験体に対して、完全付着を仮定した場合には、計算値は実験値を過大評価する結果となった。一方、定着長を489mm (65φ)以上にした場合には実験値よりも安全側に評価される結果となった。破壊モードが異なるため、せん断破壊した試験体に対しては、最大荷重の実験値よりも降伏荷重の計算値のほうが大きくなった。

5. まとめ

本研究では、塩害によって鋼材腐食が生じたプレテンションPC桁の曲げせん断試験を実施した。プレストレス力は鋼材の腐食量だけ減少すると仮定し、破断が生じている箇所では有効定着長を考慮することで、曲げひび割れの発生荷重や降伏荷重がおおむね安全側に予測できることが示された。また、せん断圧縮耐力は示方書ダイブーム式を準用することで評価可能であることが示された。これらの知見の適用範囲については、今後も検討が必要である。

謝辞：本研究の実施に際しては、国土交通省北陸地方整備局および新潟県コンクリートメンテナンス研究会の御助力を得た。ここに甚深なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路統計年報 2007年版，全国道路利用者会議，2007
- 2) たとえば，土田稔，脇本直樹：塩害架替梁(両鬼橋)のボックスカルバート化について，土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，Vol.28，pp.324-327，2010.11
- 3) 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 No.85，土木学会，2009.5
- 4) たとえば，田中良樹，河野広隆，渡辺博志，鈴木正博：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報告集，Vol.21，No.3，

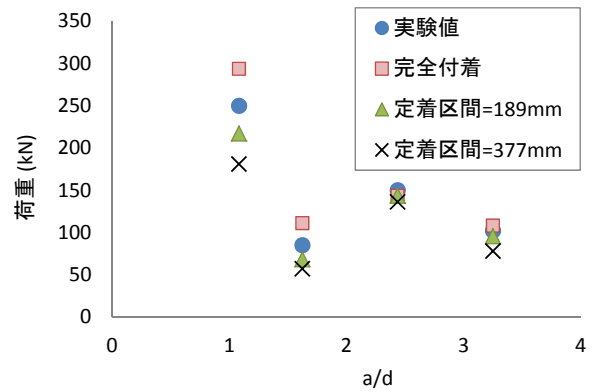


図-13 曲げひび割れ発生荷重の計算値と実験値の比較

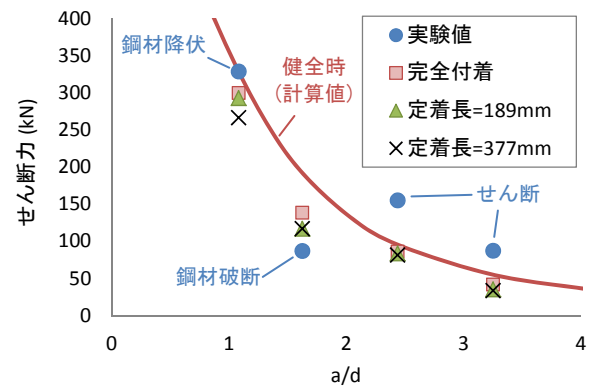


図-14 せん断圧縮耐力の計算値と実験値の比較 (せん断区間の有効鋼材量の最小値で計算)

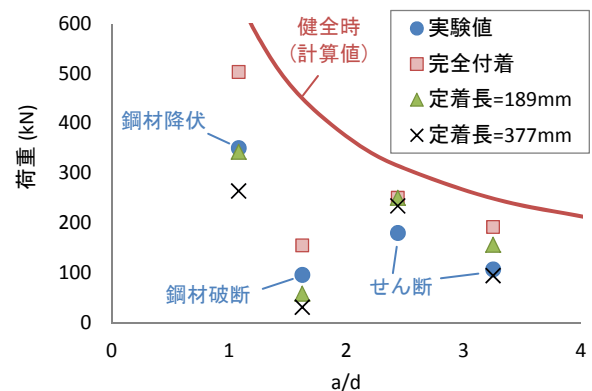


図-15 降伏荷重の計算値と最大荷重の実験値の比較

- pp.973-978，1999
- 5) 2007年版コンクリート標準示方書設計編，土木学会，2008
- 6) 道路橋示方書・同解説/III コンクリート橋編，日本道路協会，2002
- 7) 岡村甫：鉄筋コンクリート工学，市谷出版社，1987
- 8) 2005年制定コンクリート標準示方書規準編，土木学会，2005
- 9) 猪又稔：コンクリート橋の設計と計算，工学出版，1997