

腐食PC鋼棒の表面形状と残存性能

Relation between surface profile and residual properties on corroded PC tendons.

大西弘志*, 松井繁之**, 梅原由紀夫***, 溝口茂****

Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI, Yukio UMEHARA and Shigeru MIZOGUCHI

- * 工修 大阪大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
- ** 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
- *** 大阪大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
- **** 高周波熱錬㈱ 製品事業部 (〒254-0013 平塚市田村 5893)

Recently, the structures using cable members are increasing. For those structures, cable members are most important key members to keep the safety of the structures. It is well known that the major cause of the damage on the cable members is corrosion. Until now, some studies are carried out to investigate of the influence of the corrosion damage. In those studies, however, the relationship between residual performance of cables and corrosion damage couldn't be cleared. Then the authors make a proposal on investigation method of the corroded steel members. The authors carried out the investigation of corrosion damage of the PC tendons applied prestress in some magnitudes. In the same investigation, the authors also researched the influence of the scale of diameter. In this paper, the relation between the corrosion damage of prestressed tendons and the residual performance is discussed.

Key words: Corrosion, PC Tendons, Surface Profiles, Residual Performance, Environmental Accelerated Test

1. はじめに

近年、橋梁建設において、プレストレストコンクリート（以下PCと略記）構造物や吊橋・斜張橋など、PC鋼線やケーブルを使用する構造物が多く見られるようになってきている。それにともない、これらの構造物の生命線ともいべき構造部材であるPC鋼線・ケーブルにおいても多くの損傷事例が報告されている。これらの損傷事例の中では腐食による損傷が圧倒的に多く、その原因として吊橋・斜張橋ケーブルでは雨水、海塩粒子、融雪剤等が考えられていることが多く、PC構造物ではこれらの要因に加えてグラウト不良を考慮する必要があることが知られている。これらの諸要因によって引き起こされる腐食がケーブル部材にどのような影響を与えるのかを把握することは、そのケーブル部材が属する構造物の長期的耐久性を考える上で重要である。

以上のことから、PC鋼材の疲労強度や腐食した吊橋・斜張橋ケーブルに関する残存強度、疲労耐久性を調査した研究が発表されている。しかし、それらの研究では腐食による損傷の調査が十分であるとはいえないものが多く、腐食損傷と残存性能の関係が明確にされたとは言えないのが現状である。

そこで、本研究では環境促進試験により人工的に腐食させたPC鋼棒について、その表面形状を詳細に調査するこ

とで損傷の発生状況を把握した後、引張試験を実施することで、腐食損傷と損傷を受けたPC鋼棒の残存性能の関係を明確にすることを試みた。

2. 実験の概要

2. 1. 供試体

供試体として、JIS G3109 SBPR1080/1230に適合した、直径が9.2mm、11mm、13mmで、全長が250mm（両端から65mmの区間にねじ切り）のPC鋼棒を用意した。試験前に実施した材料試験により確認された物性を表-1に示す。今回の試験では供試体中央の長さ20mmの区間を環境促進試験における腐食区間とし、両端から65mmのねじ切りを施した区間を固定部とした。環境促進試験において供試体に腐食を発生させる時の条件を実橋梁内の状況に近づけるため、環境促進試験中は各供試体を緊張し、

表-1 供試体の材料特性

直径 (mm)	引張耐力 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	弾性係数 (Gpa)	伸び(%)
9.2	1286	1263	201	—注1)
11	1281	1239	204	—注1)
13	1260	1189	202	11.4

注1) 標点区間内で破断しなかったため測定できず

表-2 供試体一覧

供試体シリーズ名	直径(mm)	導入張力	環境促進試験時間(試験サイクル)
C09-00	9.2	0 kN (=0Py)	0, 20, 40, 60, 80, 100
C09-70		58.8 kN (=0.7 Py)	
C11-00	11	0 kN (=0 Py)	
C11-70		82.42 kN (=0.7 Py)	
C13-00	13	0 kN (=0 Py)	
C13-30		47.34 kN (=0.3 Py)	
C13-50		78.9 kN (=0.5 Py)	
C13-60		94.68 kN (=0.6 Py)	
C13-70		110.46 kN (=0.7 Py)	
C13-80		126.24 kN (=0.8 Py)	

注)供試体名称は供試体シリーズ名+「-」+環境促進サイクル数で示す。すなわち、C09-00 シリーズで環境促進試験を 60 サイクル行ったものは「C09-00-060」と表記する。

張力を導入することにした。使用した治具は SS400 の鋼管(外径 200mm, 板厚 30mm)を 40mm の長さに切断したものに、供試体を通すための穴(φ15mm)を 2 箇所にしたものである。張力の導入に際しては、材料試験時に求めた荷重-ひずみ曲線を用い、供試体表面に貼付したひずみゲージの値により導入張力の管理を行った。さらに、リラクセーションにより導入張力が大幅に減少した場合には、再緊張を実施して張力を一定の範囲内に保つようにした。また、環境促進試験を実施するにあたり、供試体に導入する張力を $0.3 \sim 0.8 \sigma_y$ ($=0.28 \sim 0.75 \sigma_B$) の間で変化させて環境促進試験を行い、今回の試験環境において供試体に導入された引張応力が供試体の腐食状況や腐食後の性能にどのような影響を与えるのかを調査することにした。これらの供試体と比較を行うために、張力を導入しないで腐食させた供試体も用意した。張力導入治具を用いて供試体に張力を導入しているときの状況の概要を図-1 に、各供試体の名称とそれに与えられた条件の一覧を表-2 に示す。

また、環境促進試験においては、張力の導入が完了した後、腐食区間以外の部分で腐食が発生するのを防止するため、ゴムの塗布を行い、腐食から保護することにした。

2. 2. 環境促進試験

一般に、P C 鋼材等のケーブル部材を腐食させる自然環境要因として、雨水、海塩粒子、融雪剤中の塩化物などがあげられることが多い。本研究では、P C 鋼材を腐食させるための環境要因として海塩粒子による影響を供試体に与えることとした。実際に環境促進試験において供試体に加えられた腐食環境を表-3 に示す。この環境を付加するために、本研究では環境促進試験機(塩乾湿複合サイクル試験機、ISO-3-CY-R)を用いた。表-3 示した STEP 1~3 の環境の組み合わせを 1 サイクルとし、20 サイクルを一つの単位として最大 100 サイクルまで 7 段階(0,

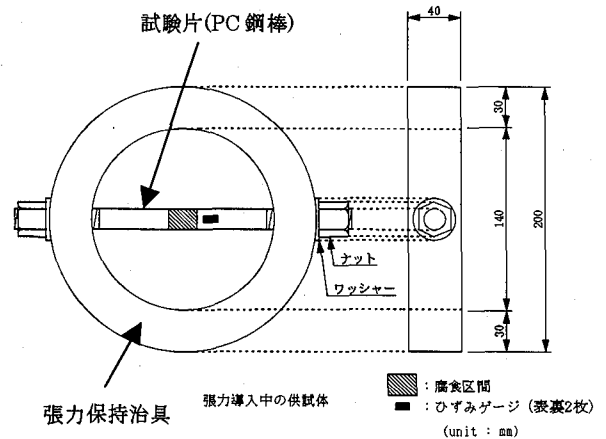


図-1 供試体張力導入状況

表-3 環境促進試験環境

STEP	状態	温度	湿度	時間
1	塩水噴霧	35℃	98%	4時間
2	乾燥	60℃	***	2時間
3	湿潤	50℃	***	2時間
塩水濃度		5%		

注)「***」は測定不能。STEP 2 では 0%，STEP 3 では 100%で試験機を設定。

20, 40, 60, 80, 100 サイクル) に分けて腐食環境を負荷し、供試体に腐食を発生させた。

2. 3. 表面形状の測定方法

所定の環境促進試験を終了した後、供試体の表面に生成した腐食生成物を水洗によって完全に除去し、供試体表面の腐食損傷に伴う形状変化の発生状況を詳細に調査した。今回の調査では、C C D レーザー変位センサ(LK030・LK2000)を用い、表面形状の調査を供試体腐食部の全周にわたって行うことで把握することにした。今回使用した計測システムの概要を図-2 に示す。

このシステムを用いて、鋼材表面の凹凸を 0.001mm の精

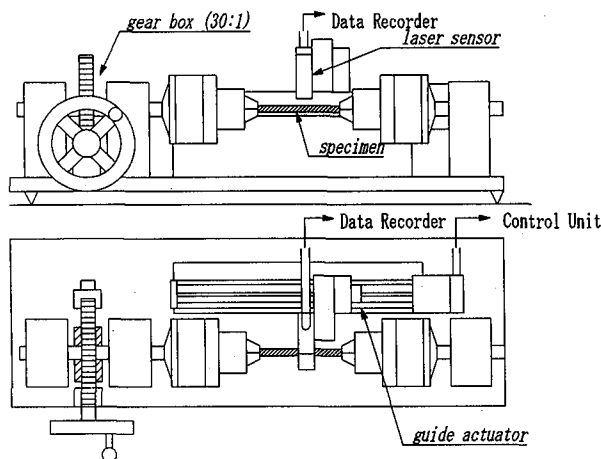


図-2 レーザー変位計による表面形状測定方法

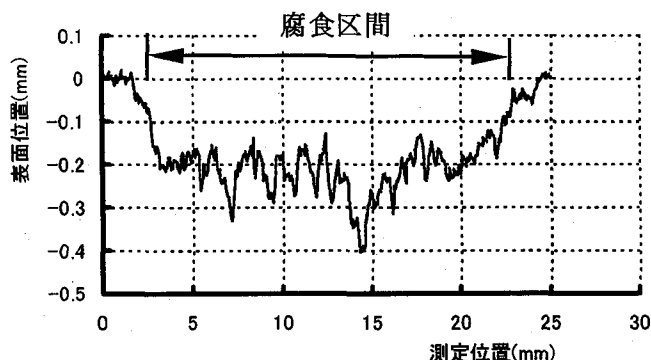


図-3 表面形状測定結果
(供試体: C13-00-100, Line1)

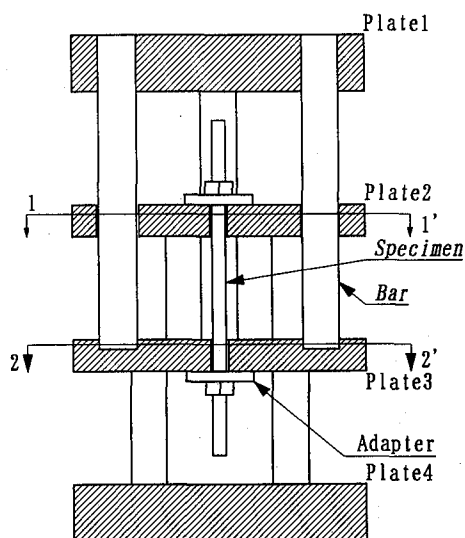


図-4 PC鋼棒引張試験概要

度で測定した。今回の実験では供試体の腐食試験区間で長手方向 0.06mm, 円周方向 12 度 (約 0.96mm (φ 9.2mm) ~ 1.36mm (φ 13mm)) の間隔で表面位置の測定を行い形状の把握を行った。この測定によって得られたデータの一例を図-3 に示す。この図からもわかるように、今回の実験では腐食区間外に腐食が発生しないように保護を行ったにもかかわらず、腐食区間外の部分にまで腐食損傷が広がって

いた。このため、今回の測定では腐食区間外の部分も含めて長さ 25mm の区間で形状の調査を行っている。なお、表面形状の評価に際しては全体的に測定データを検討した結果、図-3 における腐食発生位置で 5mm から 20mm の区間のデータを採用すれば健全な部位のデータの影響を受けないことがわかったので、今回はこの区間のデータを採用することにした。また、全体的な損傷の発生状況を把握するために CCD カメラによる画像撮影も併せて実施した。

2. 4. 引張試験方法

表面形状の調査を行った後、図-4 に示す治具を用いて引張試験を行った。この次具は上から 1, 3 枚目の鉄板と 2, 4 枚目の鉄板が運動して動くことができるようになっており、次具全体を圧縮する方向に力を作用させることで供試体に引張荷重を作用させることができる構造になっている。供試体は 2 枚目の鉄板と 3 枚目の鉄板の中央に設けた孔を通して配置し、張力導入時に用いたナットをねじ切り部に取り付けることで供試体が滑ることなく、試験を実施することができた。

3. 試験結果

3. 1. 表面形状測定結果

1) 表面形状の特性

本研究において得られた表面形状は図-3 に示されるような不規則な凹凸が連続するようなものであった。そこで、この不規則な形状の特性をより正確に表現するために、この凹凸形状を一種の不規則な波形として捉え、フーリエ変換を施して周波数特性を求め、ある特定の周波数成分の表面凹凸振幅で表面凹凸形状の状態を表現することを考えた。本研究で求められた表面凹凸形状の周波数特性の一例を図-5 に示す。この図にも示したように、今回の実験で得られた表面凹凸形状の周波数特性は次の式で比較的精度良く近似できることがわかった。

$$y = A + \frac{B}{x} + \frac{C}{x^2} \quad (1)$$

ここで、y : 表面凹凸振幅 (mm), x : 周波数 (1/mm),

A, B, C : 定数。

この式を用いて得られた表面凹凸形状の表面凹凸振幅がどのように変動しているのかを図-6 に示す。なお、今回の測定結果を評価するにあたって、図-5 の周波数特性を示す曲線が波長 0.1mm ~ 10mm の付近にあったことから、指標として波長 0.1mm, 1mm, 10mm 成分の表面凹凸振幅を採用している。これらの成分の表面凹凸振幅を見てみると、波長 1mm, 10mm の成分の表面凹凸振幅は環境促進試験の進行とともに増大する傾向があり、これらの成分の表面凹凸振幅に関しては供試体の寸法による明確な差異は確認することができなかった。

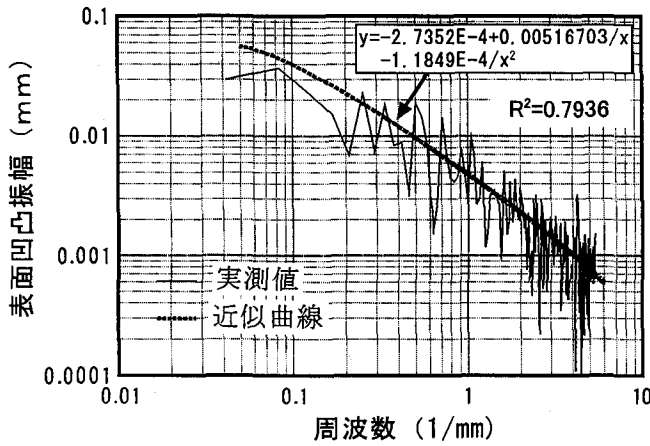


図-5 表面形状の周波数特性
(供試体: C13-00-100, Line1)

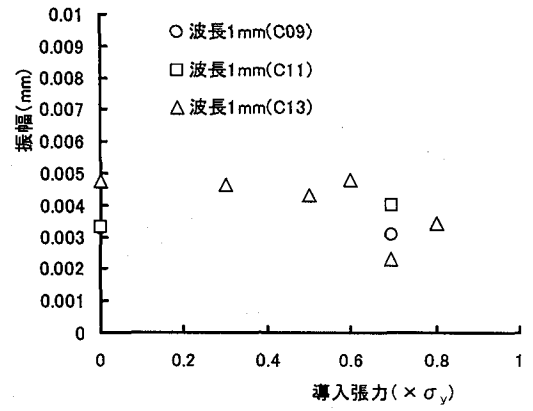


図-7 表面凹凸振幅と導入張力の関係
(促進試験 100 サイクル終了時, 波長 1 mm 成分)

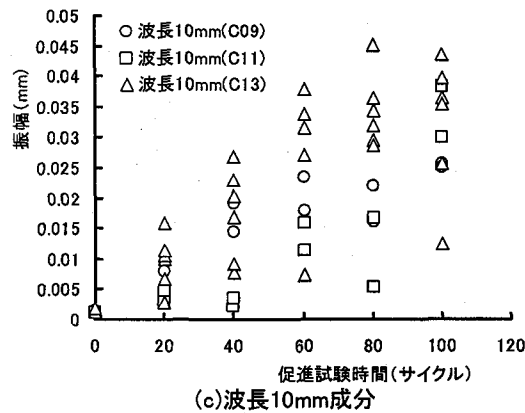
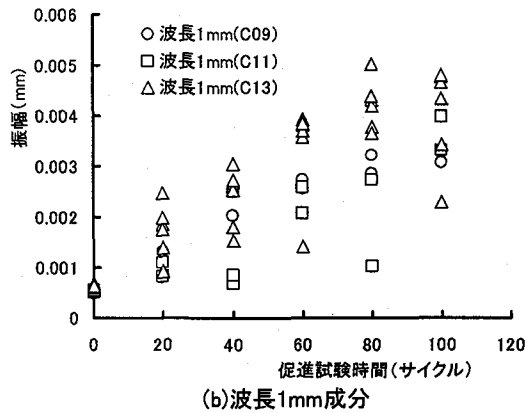
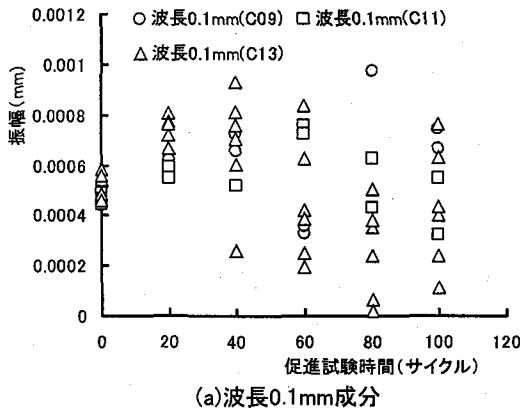


図-6 表面凹凸振幅の変動

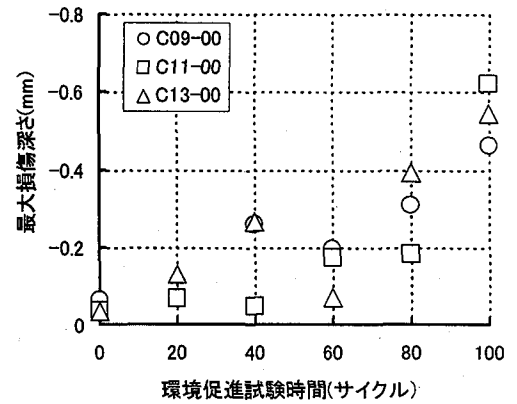


図-8 最大侵食深さの経時変動

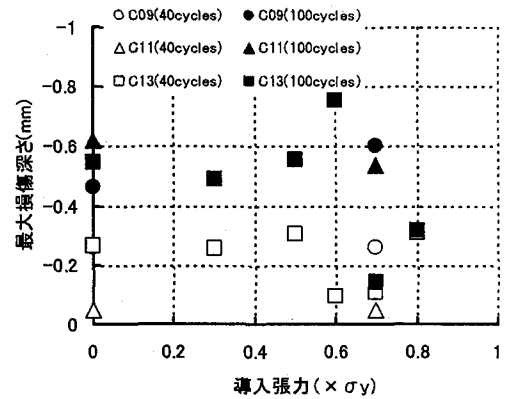


図-9 最大侵食深さと導入張力の関係

次に、波長 0.1mm の成分の表面凹凸振幅を見てみると、この成分の表面凹凸振幅は促進試験開始直後から 40 サイクルを経過することまでは増加する傾向にあり、それ以降は減少する傾向にあることがわかる。このような結果となった原因として考えられるのは、環境促進試験の進行に伴い腐食損傷が進行し、その規模が拡大したために、主要な表面凹凸形状の変動はより波長の長い、大きな波として処理されてしまった結果であると考えられる。この波長成分

の表面凹凸振幅に関しても供試体寸法による差異は認め
ることはできなかった。

また、環境促進試験時に導入した張力の大きさと表面凹
凸振幅の関係の一例を図-7に示す。今回試験した他の供
試体についてもこの図と同じような関係を得ることがで
きたため、今回の試験で使用した供試体では、張力を導入
したことによる腐食損傷の形状への影響は確認できなかつ
た。

2) 最大侵食深さ

今回の実験では表面形状の測定をするにあたって、各々
の測定線の端部に必ず健全な部位が来るように区間長を
定めてあるので、この健全な部位の測定値と比較すること
でその部位における腐食損傷の深さを知ることができる。

今回の調査結果により求めた各供試体における最大侵
食深さの経時変動と導入張力による影響を調査した結果
の一例を図-8、図-9に示す。最大侵食深さの経時変動
は全ての供試体において図-8と同様の挙動を取ること
が確認できており、この結果から、最大侵食深さは促進試
験の進行とともに増加する傾向にあると言える。また、今
回の促進試験における最大侵食深さと導入張力の大きさ
の関係は全ての供試体において図-9のような関係とな
り、導入張力による影響を確認することはできなかった。

3. 2. 引張試験結果

1) 引張耐力

本研究で実施した供試体の引張試験で促進試験の進行
とともに引張耐力がどのように変動したのかを図-10に
示す。この図にも示されるように、今回の引張り試験にお
いては促進試験時間が0~40サイクルの供試体では引張
耐力は材料試験結果と同等の値を示したが、60サイクル
を経過した時点から減少する傾向が認められ、100サイ
クル経過時には最大で13%の減少が確認された。ただし、
引張耐力の大幅な減少が認められたのはC09、C11のシリ
ーズの供試体のみであり、C13シリーズの供試体に関して
は最大でも5%の減少にとどまっている。このような現象
が起こった原因としては、3. 1. で示した結果を見ても
わかるとおり、腐食による損傷は供試体の大きさにかかわ
らず、促進試験時間が同じであれば、ほぼ同程度の大きさ
の損傷が発生するため、より小さな供試体の方が相対的に
大きな損傷を受けていることになるためであることが考
えられる。

2) 降伏荷重

今回の試験で得られた降伏荷重（又は0.2%永久のびに
対する荷重）の経時変化を図-11に示す。今回の引張試験
において降伏荷重は材料試験で求められた降伏荷重と比
較して±5%の範囲で変動しており、明確な変動傾向を見
出すことができなかった。しかし、引張試験の荷重-ひず
み曲線を確認してみると図-12に示すように、促進試験
による影響をより多く与えた供試体では明確な降伏点が

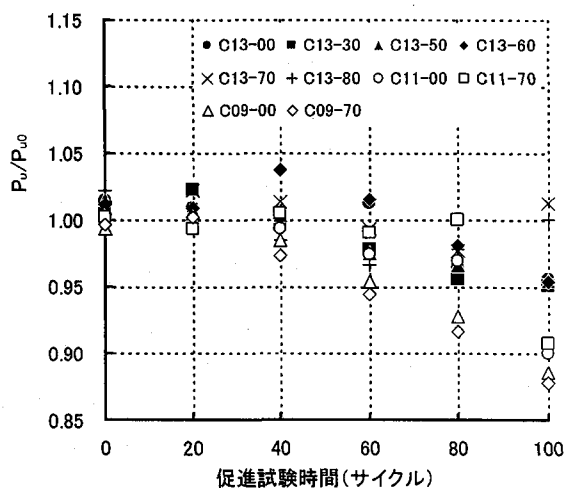


図-10 引張耐力の経時変化

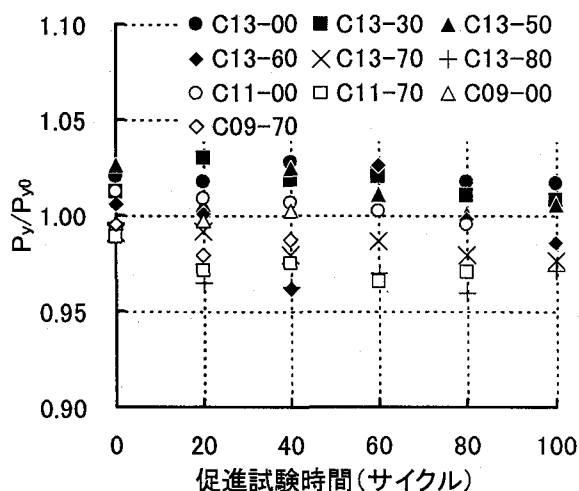


図-11 降伏荷重の経時変化

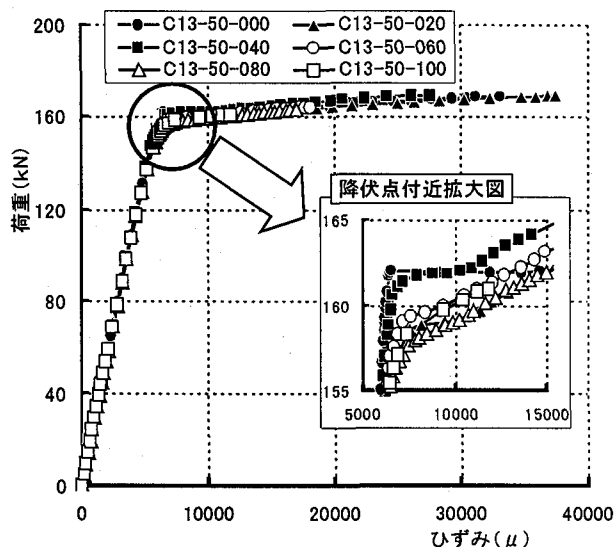


図-12 荷重-ひずみ曲線 (C13-50)

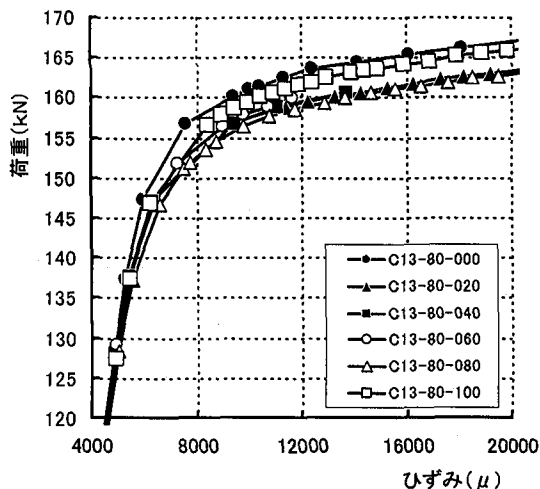


図-13 荷重-ひずみ曲線 (C13-80: 降伏点付近)

見られず、材料試験や促進試験の影響を全く受けていない供試体の結果から確認できる降伏点よりも少し小さい荷重になった時点から急激にひずみが増大している事がわかった。このような現象が見られた原因として、当初は腐食損傷の進展に伴う凹凸形状の発生による影響によるものであり、導入張力とは関係が無いと考えられたが、図-13に示すように促進試験時に降伏荷重の80%の張力を導入した供試体では促進試験の影響の有無に関係なく降伏点が明瞭に現れなくなることが確認された。以上のことから張力が働いている状態で腐食損傷を受けたP C鋼材の降伏点付近の挙動を把握するには、腐食損傷の発生状況とその損傷が発生したときの応力状態をあわせて考える必要があり、今後、これらの要因の影響評価に関してさらに調査を行う必要がある。

3) 破断伸び

引張試験で測定された破断伸びの経時変化を図-14に示す。試験開始時には12~13%あった伸びが、促進試験の影響が増大するとともに減少し、促進試験100サイクル

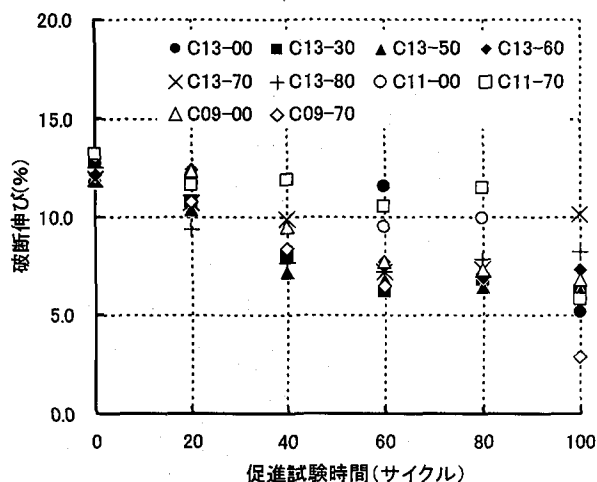


図-14 破断伸びの経時変化

終了時には5%付近の値となる傾向が認められた。このような傾向の中で、一部には伸びの減少量が他の供試体と比較して小さい量にとどまっているものがあるが、これらの結果に関しては後で検討を加えることにする。

4. P C鋼棒の腐食損傷と残存性能の関係

本研究では表面形状特性と引張試験結果の関係を調査するにあたって、各供試体の表面に発生した表面凹凸形状と供試体の残存性能との関係をより明確にするために、供試体直径Dを用いて表面凹凸振幅量を無次元化し、供試体寸法による影響を除くことにした。さらに、各供試体の表面凹凸形状特性の中で着目する波長として、供試体直径Dを採用することで各供試体に対する調査対象形状の相対的寸法が同じになるようにし、全供試体に対して表面凹凸振幅と各項目の値の関係について調査を行った。

1) 表面凹凸形状と引張耐力の関係

表面凹凸形状の波長D成分の振幅と引張試験において得られた引張耐力の関係を図-15に示す。この二つの量

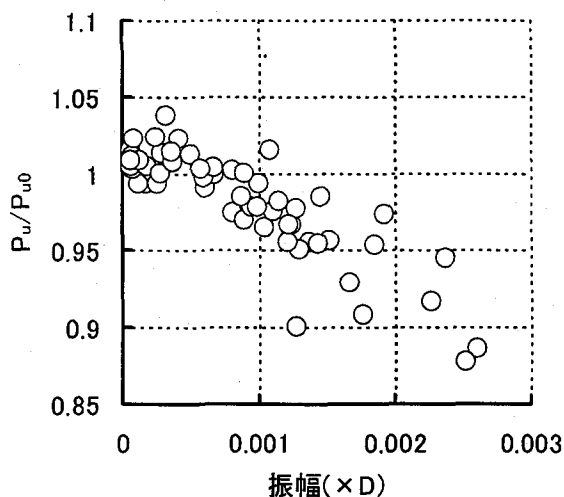


図-15 表面凹凸形状の振幅と引張耐力の関係
(全供試体結果、表面凹凸波長D(供試体直径)成分)

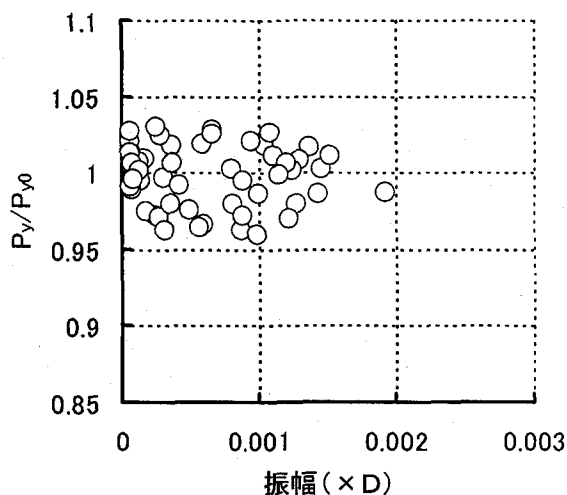


図-16 表面凹凸形状の振幅と降伏荷重の関係
(全供試体結果、表面凹凸波長D成分)

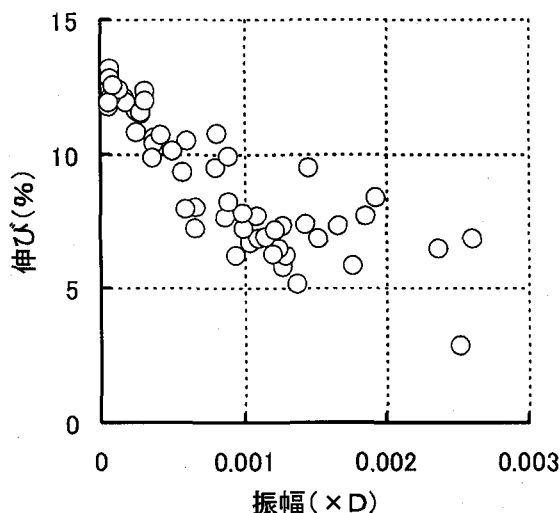


図-17 表面凹凸形状の振幅と伸びの関係
(全供試体結果、表面凹凸波長 D 成分)

の関係をしてみると、波長 D 成分の表面凹凸振幅が 0～0.01mm の範囲にある間は引張耐力に有意な変動は認められないが、この成分の振幅が 0.01mm を超えると引張耐力は減少をはじめ、0.022～0.023mm になると引張耐力が 10～12% 減少することがわかる。このことから、P C 鋼材の表面に腐食損傷による形状変化が発生しても、その変化がある程度の規模にならなければ引張耐力に大きな影響を与えることは無いと考えられる。

2) 表面凹凸形状と降伏荷重の関係

表面凹凸波長 D 成分の表面凹凸振幅と降伏荷重の関係を図-16 に示す。この図を見れば明らかなように、波長 D 成分の表面凹凸振幅は降伏荷重の変動に何ら影響を与えていない事がわかる。このような結果となった理由としては、3. 2. 2) においても述べたように、降伏点付近の挙動の変化に関しては腐食損傷の影響だけでなく、腐食損傷が進行しているときの P C 鋼棒中の応力状態が大きくかわっている可能性が考えられる。そのため、この現象を説明するためには腐食損傷を受けた P C 鋼棒の応力状態を詳細に調査する必要があるものと考えられる。

3) 表面凹凸形状と破断伸びの関係

表面凹凸波形の波長 D 成分の表面凹凸振幅と破断伸びの関係を図-17 に示す。今回行った実験で得られたデータでは、引張耐力の場合と異なり、波長 D 成分の表面凹凸振幅が少しでも認められると破断伸びは減少し始め、波長 D 成分の表面凹凸振幅が 0.02mm を越えると、破断伸びの量が初期の損傷していない P C 鋼棒の半分以下になるという傾向にあることが認められた。この傾向は単一の曲線で表現できるものと考えられたので曲線の当てはめを行ってみたところ、2 次曲線 $\Delta l = 2.0 \times 10^6 a^2 - 6550.6a + 12.848$ (ただし、 Δl : 破断伸び (%), a : 波長 D 成分の表面凹凸振幅 (mm)) を当てはめると、 R^2 値が 0.8064 となり、これらの量の間には比較的良好な相関があることがわかった。

このことから、腐食損傷に伴う P C 鋼棒表面の形状変化は鋼棒の伸び性能の低下と密接に関連していることがわかる。また、表面凹凸発生するとすぐに破断伸びの値に変化が出てきており、さらにその変化量も大きいことから、3. 2. 3) で一部の供試体で伸びの低下があまり見られなかった原因としては、これらの供試体では同一時間の促進試験を経た他の供試体と比較して、表面の損傷の量がかなり小さかったために破断伸びの値の変動が小さなものとどまったためであると考えられる。このようなことが発生した原因としては試験槽内における試験環境の不均一性とそれを解消するために実施する試験槽内での供試体位置の入れ替えなどが良好に機能しなかったためであると考えられ、今後、より適切な試験方法を検討する必要があるものと考えている。

5. まとめ

本研究では 3 種類の直径 (9.2mm, 11mm, 13mm) を有する P C 鋼棒について、最大で $0.7\sigma_y$ の引張応力を導入した状態で海塩粒子の影響を想定した環境促進試験を実施した後、その表面に発生した損傷の状況を詳細に調査し、残存引張耐力や破断伸びとの関係を示すことを試みた。本研究においてここまで得られた結論は以下の通りである。

- 1) 腐食損傷が発生した供試体の表面凹凸形状を調査した結果に対して数値処理を施し、凹凸形状の周波数特性を求め、特定の成分に着目してその変動を調べた結果、各凹凸波形成分の表面凹凸振幅は常に同じような傾向を取ることは無く、波形成分の中には損傷の成長過程において表面凹凸振幅を減少させる成分も存在することがわかった。また、腐食損傷として発生する表面形状の凹凸振幅と供試体寸法の間に関係が無いことも確認できた。
- 2) 本研究で環境促進試験を実施して腐食損傷が発生させるにあたって、腐食時の供試体の応力状態がどのように影響するのかを調査するために、供試体に張力を導入して環境促進試験を行った結果、腐食損傷によって発生する表面凹凸波形の形状には腐食時に働いていた応力の影響は大きくないことがわかった。また、表面凹凸形状を調査するときに確認できた腐食による侵食の深さについても同様のことがいえることがわかった。
- 3) 環境促進試験を行った供試体に対して引張試験を実施した結果、腐食損傷が発生した供試体の残存引張耐力は減少するが、降伏荷重の変動は大きくないことがわかった。また、引張試験時に得られた荷重-ひずみ曲線の形状から腐食損傷によって供試体の降伏点付近での挙動が試験の条件によっては変化することが確認された。挙動変化が起こっている供試体の組み合わせから、この現象の原因は腐食損傷だけでなく、試験中の供試体の応力状態も考えられることがわかった。

た。

- 4) 環境促進試験後の供試体の表面凹凸波形と引張り試験の結果を確認した結果、腐食損傷によって発生する表面凹凸形状はその引張耐力や伸び性能に大きな影響を与えることがわかった。その反面、降伏荷重の変動に対しては全く関係を認めることができなかった。

[参考文献]

- 1) 例えば, 湊 理宙, 杉井謙一: 橋梁用ケーブルの損傷と補修, R&D 神戸製鋼技報, Vol. 38, No. 1, pp. 48-50, 1988. 1
- 2) 例えば, 佐々木, 木内, 新家, 湊, 西, 杉井: 腐食ワ

イヤの疲労強度解析, R&D 神戸製鋼技報, Vol. 38, No. 1, pp. 63-66, 1988. 1.

- 3) 大西, 松井: 腐食 P C 鋼材の表面凹凸がその強度に与える影響, 鋼構造年次論文報告集第 7 巻, pp. 203-208, 1999. 11
- 4) 村中, 皆田, 藤井: 腐食鋼板の表面形状と残存耐荷力, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1063-1071, 1998. 3

(2000 年 9 月 14 日受付)