

腐食鋼板の力学的挙動に関する実験的研究

An experimental study on mechanical behavior of corroded steel plates.

大西弘志*, 松井繁之**

Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI

*工修, 大阪大学助手, 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** 工博, 大阪大学教授, 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

In general, it is said that the number of road bridges controlled by Land, Infrastructure and Transportation Ministry is over 130,000. And the service period of many bridges will be over the life span considered in design of bridges. Then it is expected to establish the rational maintenance methods for the road bridges.

The authors suggested the utilization of the information of surface properties in the evaluation of the corrosion damage on the steel members. But there is not reasonable expression of the relation between the surface properties and the performance in the corroded steel members. Then the authors carried out the tensile strength test with the corroded steel specimens and surveyed the mechanical behavior of corroded steel.

Key Words: corrosion, steel member, surface roughness, mechanical behavior, environmental acceleration test

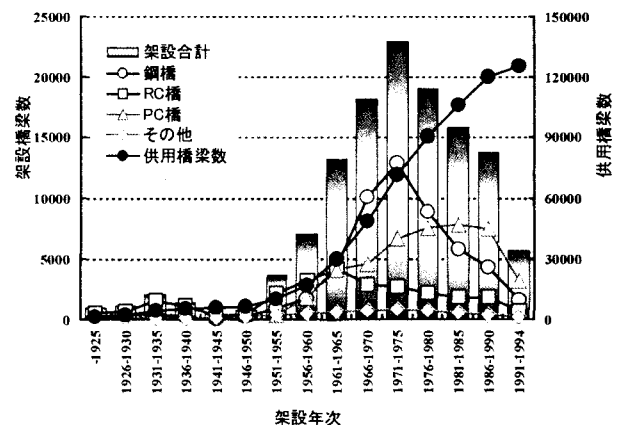
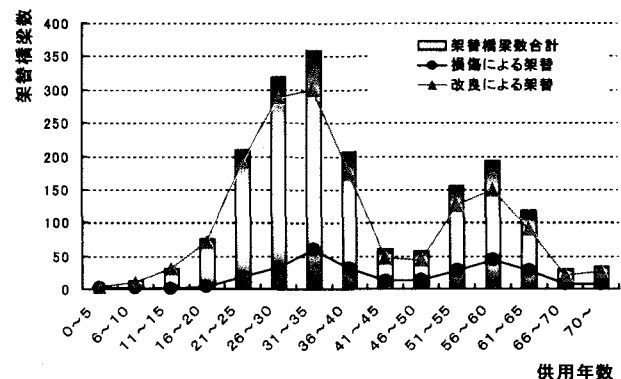
キーワード: 腐食, 鋼部材, 表面凹凸, 力学的挙動, 環境促進試験

1. はじめに

わが国においては図-1 に示されるように, 国土交通省管轄の橋梁 (15m 以上) だけでもその数量は 130,000 橋を超過している¹⁾。これらの橋梁の多くは 1960 年代後半から 1970 年代にかけてのいわゆる高度経済成長期に建設されている。これらの橋梁は供用開始から既に 30 年を超過しており, 中には補修・補強が必要な橋梁が数多く含まれているものと考えられている。

既往の文献²⁾によると, 橋梁の架替え時期の分布は図-2 に示すように供用開始後 31~35 年と 56~60 年の時期にピークを持つ分布形状を有していることがわかっている。この分布と図-1 に示した橋梁建設数量の変化とを照らし合わせてみると, 今後, 橋梁の架替えが必要と見られる深刻な損傷の発生やそれよりも程度は軽いものの何らかの対処が必要となる損傷が増加することは容易に予想されることである。このような状況から近年では橋梁の維持管理 (点検調査・診断・補修・補強) に関する研究が盛んになされている。

橋梁の架替えにおいて, その損傷が理由とされたものに関して, 第一の理由として挙げられた損傷の割合の変遷を図-3 に示す。この図を見ると近年になって「床版の損傷」が橋梁の架替えの理由として顕著に増加し, 「鋼材の腐食」は大きく減少している。しかし, 依然として 1/4 超の橋梁の架替えが腐食を理由として実施されている。このこと

図-1 橋梁架設・供用数量の変化¹⁾図-2 橋梁の架替え時期の分布²⁾

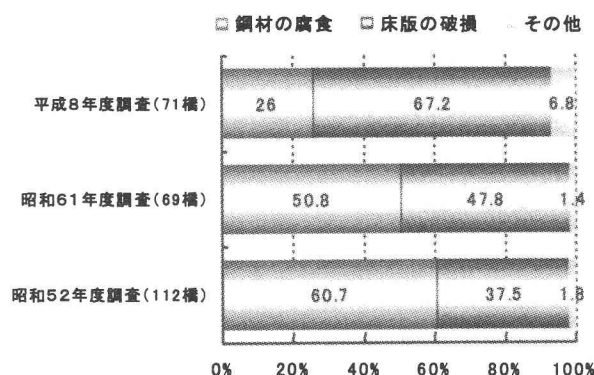


図-3 損傷が原因となった場合の橋梁の架替理由²⁾

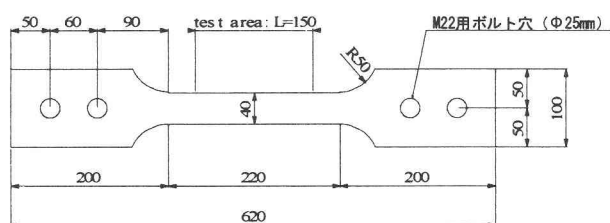


図-4 試験片の形状

から橋梁の適切な維持管理を考える上で、鋼材の腐食をどのように点検・評価し、管理していくのかという問題は極めて重要であるといえる。

以上のことから著者らはこれまでも腐食した鋼材の性質について調査研究を行い、腐食損傷を受けた鋼材の性能を評価する指標として鋼材の表面形状が有望であることを報告してきた^{3)~5)}。しかしながら、これらの調査・研究においては鋼材の形状と破断伸びや降伏荷重、引張耐力との比較・検討が主であったため、腐食した鋼材の静的引張試験中の挙動に関しては全く調査していないのが実情であった。そこで、本研究では腐食した鋼材の表面にセンサーを取り付けるなど形状に変化を伴う加工を施すことなく試験片の変形を調査するための手法としてデジタルカメラを用いた手法を採用し、鋼材に発生した腐食損傷がその挙動にどのような影響を与えているのかを調査した。

2. 実験の概要

本研究では腐食鋼材の引張試験を実施するため、実験自体を2段階に分けて実施した。すなわち、第一段階として試験片に腐食損傷を与えるために環境試験機を用いた腐食試験を行い、その後、腐食損傷の状況を確認してから引張試験を実施した。この章ではこれらの手法に関して簡単ではあるが説明を加えている。

2.1 供試体の概要

今回使用した供試体の形状を図-4に示す。この試験片は全長620mm、並行部長さ220mm、並行部幅40mmとなっており、JIS 1号試験片に準拠した形状となっている。使用した鋼板はSS400材であり、公称厚さ9mmの板を用

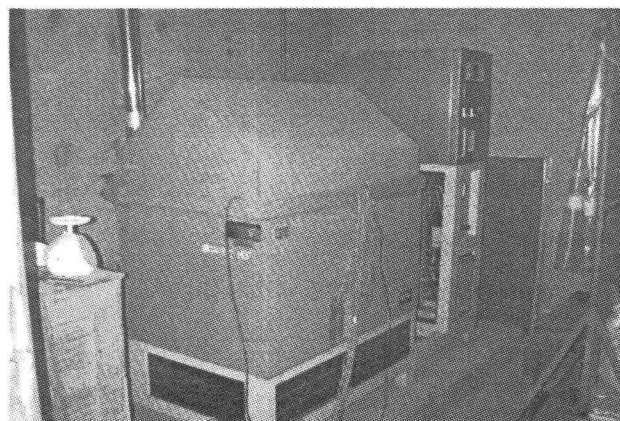


写真-1 ISO-3-CY・R

表-1 環境促進試験設定条件⁶⁾

Step	状態	温度	湿度	時間
1	塩水噴霧	35℃	98%	4時間
2	乾燥状態	60℃	—	2時間
3	湿潤状態	50℃	—	2時間
—	塩水濃度	5% (重量濃度)		

いて製作している。本研究においては、試験片の側面（コバ面）については試験時の評価対象から外して調査を実施した。

なお、試験片のつかみ部に設けられたボルト孔は本研究と同時に進行で進められている別の試験研究に試験片が転用されることを想定して設けられているものであり、本研究を遂行する際には使用されなかったものである。

2.2 環境促進試験

本研究においては試験片を腐食させるための手段として塩乾湿複合サイクル試験機を用いた環境促進試験による腐食損傷付加を行った。今回使用した試験機はスガ試験機製塩乾湿複合サイクル試験機、ISO-3-CY・R（写真-1）である。今回の運転条件は表-1に示すような条件であり、これは既往の研究において鋼材に速やかに腐食損傷を与えるのに適している条件であることが確認されている条件である⁶⁾。今回の試験では表-1に示された3つのステップを1サイクルと定義し、20サイクルを一つの単位として20サイクル、40サイクル、60サイクルの運転を行い、試験片に腐食損傷を与えた。本研究においてはこれらの腐食損傷水準の供試体を各5体作成し、試験を行った。

今回の試験においては、試験片の表面と裏面で腐食状況が極端に異なるような状況を回避するため、試験片を塩乾湿複合サイクル試験機の試験槽内に横向きに設置し、評価対象面である表面・裏面がほぼ鉛直になるように並べた。このような方法をとることにより、試験片の表裏による腐食状況をほぼ同じにすることができた。なお、今回の試験において腐食させる部位は試験片の並行部の中央100mmの区間である。この区間から外れる部位に関しては環境促進試験中に腐食を生じないように粘着テープを用いた養生を行い、腐食が発生するのを防止した。

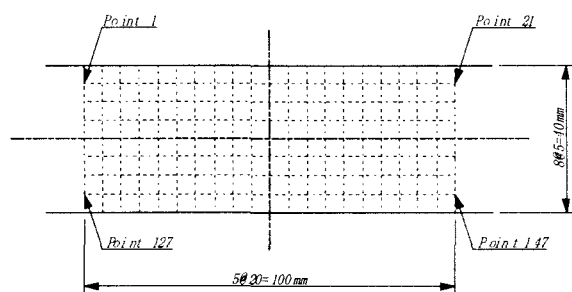


図-5 板厚計測位置

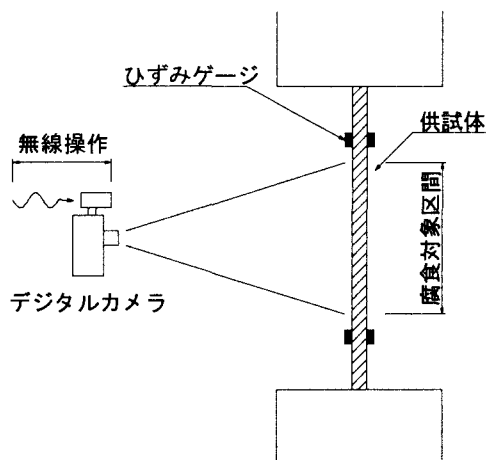


図-6 腐食鋼材引張試験の概要

本研究では環境促進試験によって供試体に与えられた腐食損傷の程度を評価するために以下の 3 つの項目について調査を行った。なお、本研究では、環境促進試験において発生した腐食生成物は、供試体をクエン酸水素二アンモニウム 10%溶液に浸漬した後、丁寧に水洗を行うことにより、供試体に大きな影響を与えない範囲で可能な限り除去した。

(1) 供試体質量の変化

腐食損傷の程度を表す上で、最も基本的な表現となる腐食減量を算出するために、環境促進試験の前後でどの程度の質量変化があったのかを電子はかりを用いて調査した。

(2) 板厚

環境促進試験により供試体に与えられた腐食損傷の状況を把握するため、供試体の板厚を計測した。板厚の計測位置は図-5に示されるように、腐食試験の対象区間である供試体の並行部中央の 100mm の区間の端部付近を除いた長さ 100mm×幅 30mm の範囲内に 5mm 間隔で設定された計 147 点である。計測にはデジタルマイクロメーターを使用した。

(3) 表面の形状

鋼材の表面に発生した腐食損傷の状況をより正確に把握するために、著者らが以前より提案していたレーザー変位計を用いた鋼材表面の形状測定⁹⁾を実施した。今回の計測は供試体の長手方向に供試体端部を除いた 36mm の区間に 1mm 間隔で計 37 本の計測線を設定し、レーザー変位計の応答値を動的に計測した。今回の計測データを整理し

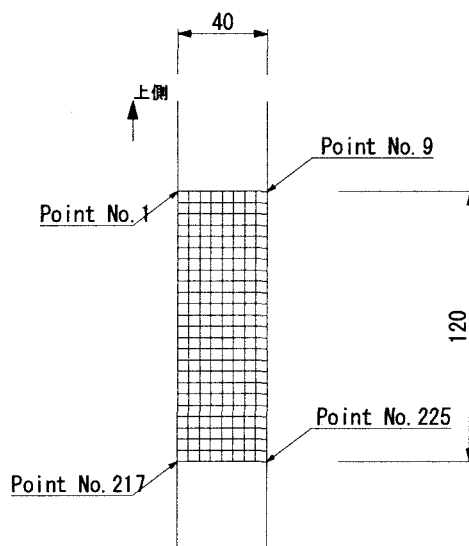


図-7 引張試験における変位監視点の配置

た結果、計測線内の測定データを 0.08mm 間隔で回収することができた。

2.3 引張試験

本研究においては環境促進試験で供試体に発生させた腐食損傷の形状をそのまま保持して引張試験を実施することが必要であるため、腐食対象区間へのひずみゲージ等のセンサーの設置は極力避けなければならない。しかしながら、この区間における力学的挙動を把握するには直接的に何らかの計測を実施しなければならないことは明らかである。このような矛盾する課題を解決するために、供試体に極力影響を与えない計測手法を考案する必要性が生じた。

そこで、著者らが着目したのがデジタルカメラを活用した計測手法である。この計測手法の概略図を図-6に示す。本研究では腐食対象区間外にひずみゲージを設置し、その値を確認しながら三脚に固定されたデジタルカメラの視野内(=腐食対象区間)に設置された標点の動きを無線操作可能なデジタルカメラにより記録し、引張試験終了後、画像処理ソフトにより標点の動きを把握する方法を採用した。この手法を用いることにより、適切な方法により標点を設置できれば、鋼材の形状に全く影響を与えないで試験を行うことができる。本研究においては、腐食生成物を除去した際に供試体表面にあった酸化皮膜(黒皮)が全て除去されていたことから極細のサインペンにより供試体

表-2 環境促進試験結果概要

供試体	環境促進 サイクル	初期質量 (g)	腐食後質量 (g)	質量減量 (g)	腐食区間内 質量減量 (%)
A1	20	2942.9	2929.6	13.3	4.7
A2		2937.8	2923.4	14.4	5.1
A3		2923.7	2909.4	14.3	5.1
A4		2935.4	2919.6	15.8	5.6
A5		2916.8	2902.5	14.3	5.1
B1	40	2920.9	2897.8	23.1	8.2
B2		2925.1	2903.2	21.9	7.8
B3		2939.7	2918.0	21.7	7.7
B4		2934.0	2911.6	22.4	8.0
B5		2941.5	2918.3	23.2	8.3
C1	60	2941.9	2904.2	37.7	13.4
C2		2925.8	2888.7	37.1	13.2
C3		2935.3	2899.1	36.2	12.9
C4		2933.9	2900.3	33.6	12.0
C5		2934.1	2897.6	36.5	13.0

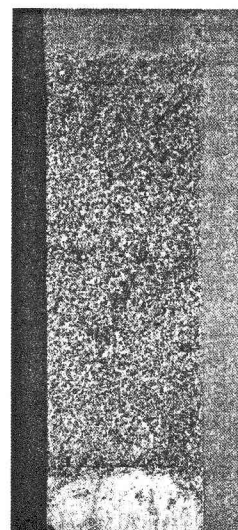
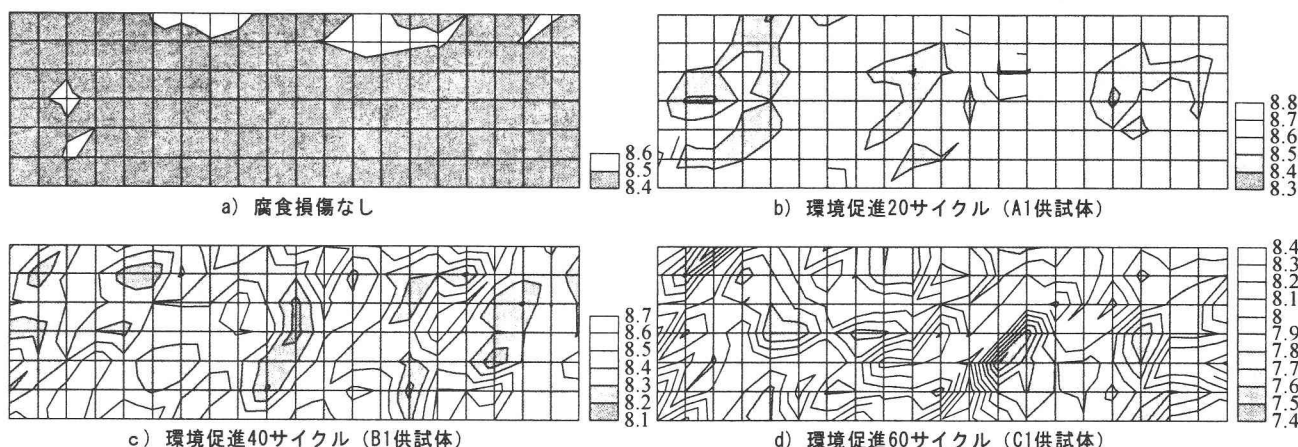
写真-2 腐食損傷状況
(C1 供試体)

図-8 板厚分布状況

表面に格子を描き、その格子点を標点として計測を実施した。今回の試験において設置された標点の配置を図-7に示す。

本研究で使用したデジタルカメラはニコン(株)製D100である。今回の実験に際してはデジタル画像のサイズを3008×2000ピクセルとし、レンズにマニュアル操作が可能なAF Micro-Nikkor 60mm f2.8Dを用いてマニュアルフォーカスにて撮影を行った。今回のこのシステムを使用することにより、カメラに起因する実験中の画角・焦点のブレを回避し、予定通りのタイミングで供試体の画像を取得することができた。なお、取得した画像を確認した結果、変位監視点間(約5mm)には33~35ピクセルが入っており、供試体表面の変形を確認するには十分な精度が確保できていることが確認できた。

また、デジタルカメラの撮影において腐食区間内に発生するひずみの値と今回設置したひずみゲージの応答値の関係を明らかにするための予備試験も実施し、画像の選択に必要な情報を得た。

3. 実験結果の概要

3.1 環境促進試験結果

本研究で実施された環境促進試験により得られた結果の概要を表-2に示す。また、環境促進試験により腐食損傷を受けた供試体の外観の一例を写真-2に示す。今回実施した環境促進試験では20サイクル単位での腐食レベルの設定を試みた結果、質量減量の平均値でそれぞれ5.1%, 8.0%, 12.9%程度の腐食を全面にわたって与えることができた。また、写真-2にも見られるように、腐食損傷は腐食対象区間に限定して発生しており、環境促進試験の際に懸念される、腐食区間端での異常腐食は全ての供試体において確認されなかった。

腐食生成物を除去した後に実施した板厚測定の結果の一例を図-8に示す。この図を見ると、環境促進試験のサイクル数が増加するに従い、腐食が進行し、供試体の板厚

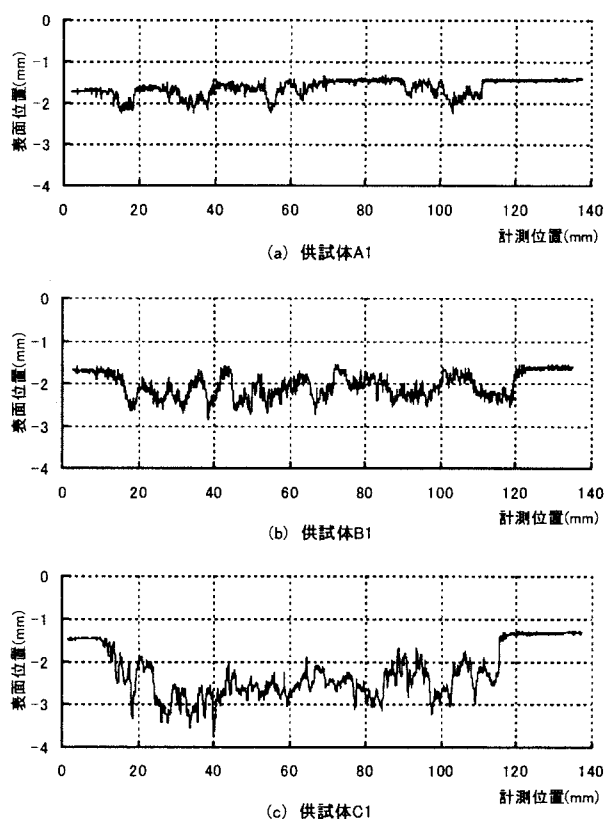


図-9 表面凹凸計測結果（供試体中央）

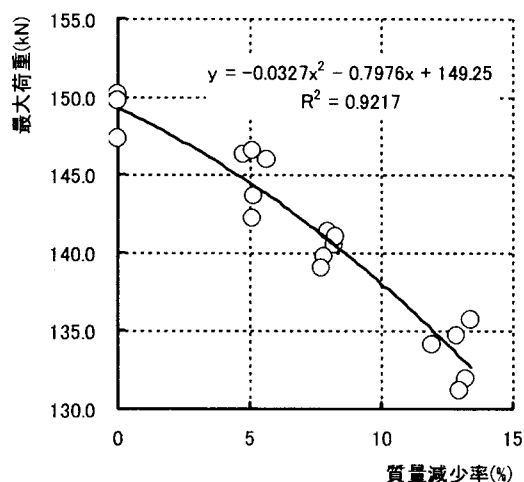


図-10 質量減少率と最大荷重の関係

に不規則なばらつきが生じていることがわかる。

さらに腐食損傷の発生状況を詳細に確認するために実施した表面凹凸の計測結果の一例を図-9に示す。この図に示されているのはそれぞれの供試体の中央にあたる計測線上の凹凸分布である。この図を見ると、供試体表面において発生している腐食損傷は、環境促進試験の進行に伴い、板厚測定等の調査で採用した測定点間隔（5mm）よりもさらに小さなスケールで大きな形状の変動をもたらしているものの、全体的にみれば腐食の集中は確認できないことがわかった。以上のことから、本研究で実施した環境促進試験によって与えられた腐食損傷は全面腐食による均一的なものとして扱ってよいと判断した。

表-3 引張試験結果概要

供試体	環境促進 サイクル	最大荷重 (kN)		伸び (%)	
		計測値	平均	計測値	平均
R1	0	147.3	149.0	31.3	32.6
R2		150.1		34.9	
R3		149.7		31.5	
A1	20	146.3	144.9	30.2	30.2
A2		143.6		30.4	
A3		142.2		29.2	
A4		145.9		32.5	
A5		146.5		28.8	
B1	40	140.5	140.3	29.3	28.9
B2		139.7		31.3	
B3		139.0		27.7	
B4		141.3		27.9	
B5		141.0		28.3	
C1	60	135.7	133.5	29.2	27.6
C2		131.9		26.7	
C3		134.7		26.4	
C4		134.1		27.5	
C5		131.2		28.3	

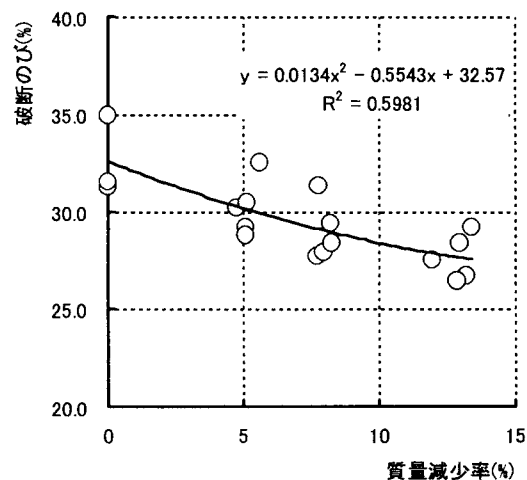


図-11 質量減少率と破断のびの関係

3.2 引張試験結果

本研究で実施した引張試験の結果を表-3に示す。この表を見ると、環境促進試験でより大きな腐食損傷を与えられた供試体の最大荷重や破断時の伸びが減少していることがわかる。これらの傾向をより的確に把握することを目的として、腐食損傷の程度を示す最も基本的な指標の一つである質量の減少率と最大荷重、破断伸びとの関係を図-10、11に示す。これらの図を見ると、質量減少率と最大荷重の間には良好な相関関係が認められたが、破断伸びとの間にはそれほど良い相関関係があるわけではないことがわかり、これは著者らの既往の研究結果と合致する結果である³⁾⁻⁵⁾。

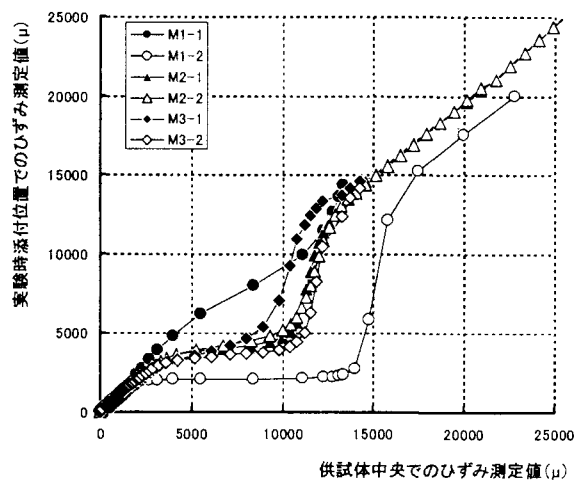


図-12 供試体中央と引張試験時ひずみゲージ貼付位置におけるひずみ発生状況の比較

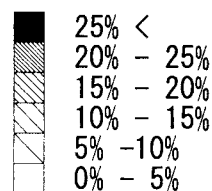
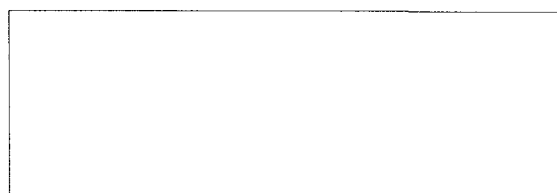
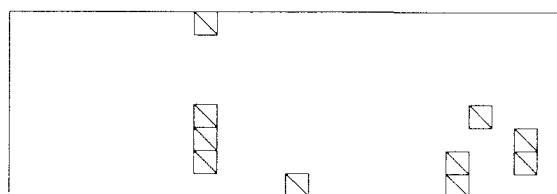


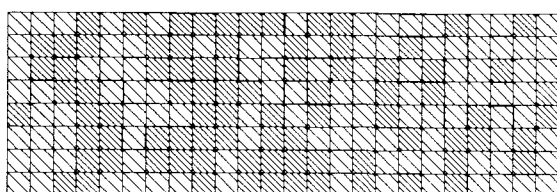
図-13 伸び分布状況図における伸び量の表示



a) ひずみ計測値3000 μ 時

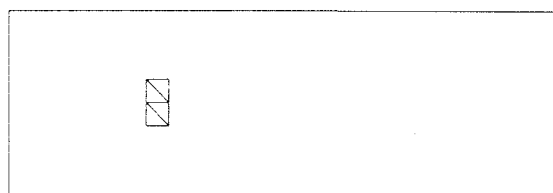


b) ひずみ計測値20000 μ 時

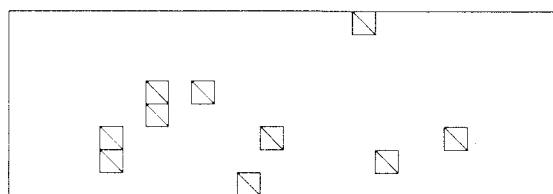


c) 荷重最大時

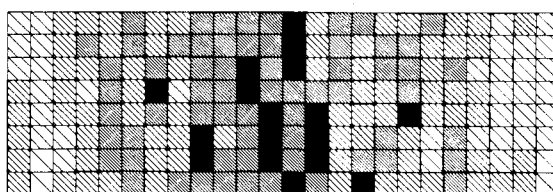
図-14 伸びの分布状況 (供試体 R1)



a) ひずみ計測値3000 μ 時



b) ひずみ計測値20000 μ 時



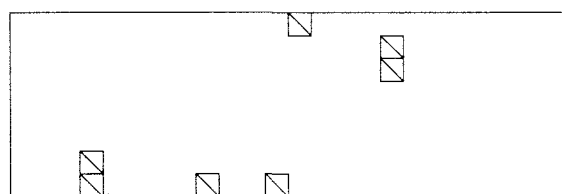
c) 荷重最大時

図-15 伸びの分布状況 (供試体 A1)

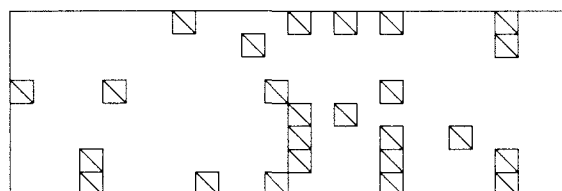
3.3 荷重過程における伸びの発生状況

本研究の目的である、荷重過程における腐食鋼材の挙動を調査するのに先立ち、引張試験中の供試体画像を取得するタイミングを検討するための予備試験を実施した。この試験では、実際の引張試験に用いられるのと同じ材料で作成された同形状の供試体を3体用意した。これらの供試体に対して、供試体の中央と引張り試験時のひずみゲージ貼付位置にゲージを設置し、引張り試験を実施した。このときに計測された供試体中央と引張試験時ゲージ配置位置とのひずみ計測値の関係を図-12 に示す。この図を見

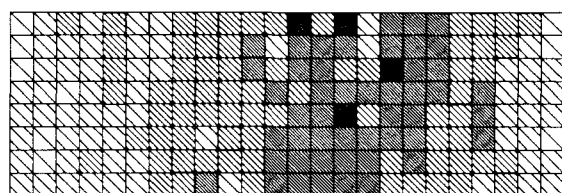
るとひずみが約3000μから15000μの間で2つのゲージの出力の間に顕著な差が発生することがわかった。このことは供試体中央と本研究でひずみゲージを配置する位置とでは鋼材の降伏が発生した際にひずみの増加速度に差が生じることを意味しており、この間に取得されたデータには誤差が多く含まれる可能性が高くなると考えられる。そこで、本研究では引張試験時に取得した画像データのうち、ひずみゲージの応答値が3000μ、20000μを示したときと荷重が最大となったときの画像データを使用して供試体の各部に発生した変形を調査することにした。このときの調査によって得られた結果を図-14～図-17 に示す。これらの図で示した供試体のうち、腐食損傷を受けていない



a) ひずみ計測値3000 μ 時

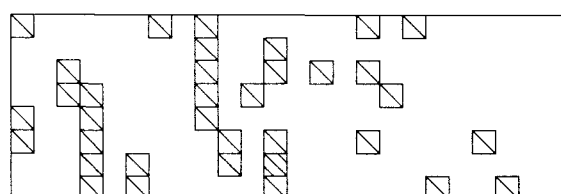


b) ひずみ計測値20000 μ 時

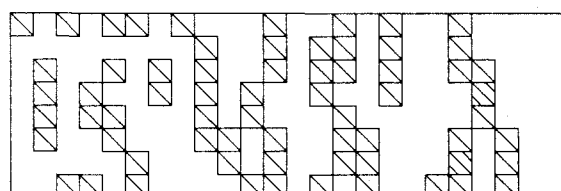


c) 荷重最大時

図-16 伸びの分布状況 (供試体B1)



a) ひずみ計測値3000 μ 時



b) ひずみ計測値20000 μ 時



c) 荷重最大時

図-17 伸びの分布状況 (供試体C1)

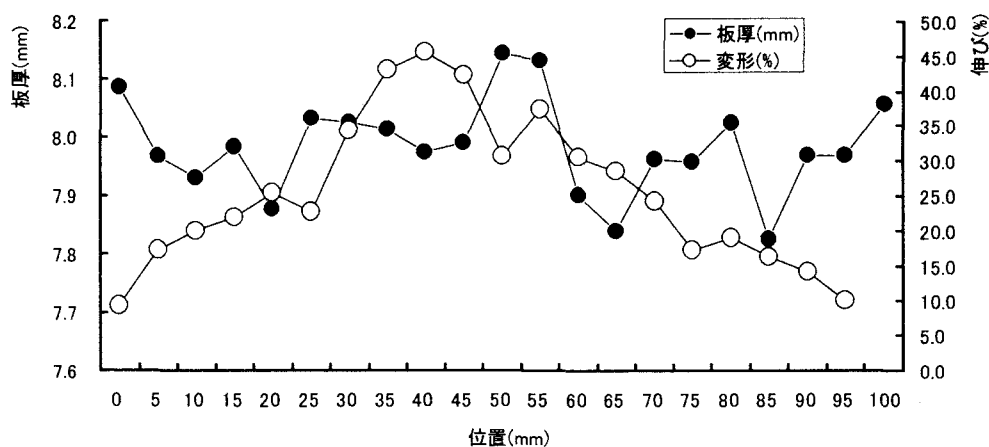


図-18 板厚の平均値と変形量の比較 (最大荷重時)

R1 供試体では、試験の各段階において一様に変形が発生していた。これに対し、腐食損傷を受けている供試体A1、B1においては、ある一定の幅を持った範囲の中で大きな変形が観測されるようになり、さらに大きな腐食損傷を受けている供試体C1においては供試体中央に集中して大きな変形が発生し、腐食区間の端部ではほとんど変形が発生していないという現象が確認できた。この現象の発生機構を推定するために板厚に着目して比較を行った結果を図-18に示す。この図を見ると最も大きな変形量が確認された部分（腐食区間端部から40mm付近）における板厚の平均値は供試体全体の最小値を与えておらず、さらには各測定値に関して確認してもその部位の値は最小値ではなかった。このことから、本研究において実施した程度の板厚測定では腐食した鋼材における変形の分布状態を推定することは困難である可能性が高い。

4. 結論

本研究では環境促進試験により腐食損傷を与えた鋼材の引張試験を実施し、その載荷過程における鋼材の挙動について調査を行った。その結果以下のような知見を得ることができた。

- (1) 鋼材に腐食損傷が発生することで、鋼材に荷重が作用したときの変形状況に大きな変化が生じる。特に、腐食損傷が大きくなってくると変形可能部位が限定される恐れが高いので注意が必要である。
- (2) 腐食損傷による質量減少量と鋼材の残存引張耐力の間には良い相関があるが、鋼材の破断伸びとの間にはあまりよい相関はない。
- (3) 腐食損傷が進行した鋼材において、荷重が作用したと

きに最大の変形を示す部位は必ずしも板厚が最小の部位というわけではない。

- (4) デジタルカメラを活用した計測手法により表面形状を変えることができない供試体に関しても各部位の変形の計測は可能である。

謝辞

この研究は科学研究費補助金若手研究(B) (研究代表者：大西弘志，課題番号：15760351) の補助を受けて実施された。ここに記して関係各位に謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：ミニマムメンテナンス橋に関する研究，土木研究所資料第3506号，平成9年6月
- 2) 建設省土木研究所：橋梁の架替に関する調査結果(Ⅲ)，土木研究所資料第3512号，平成9年10月
- 3) 大西，松井，梅原，溝口：腐食PC鋼棒の表面形状と残存性能，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1055-1062，2001.3
- 4) 大西，梅原，松井，溝口，岡村：張力を導入したPC鋼材の腐食損傷と機械的性能の相関，鋼構造年次論文報告集，Vol.8，pp.247-254，2000.11
- 5) 大西，松井：腐食PC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，Vol.7，pp.203-208，1999.11
- 6) 例えば，神谷，藤原，三宅：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，日本道路公団試験研究所報告，Vol.31，pp.65-97，1994.10

(2004年9月17日受付)