

## 鋼板の孔食による降伏荷重の低下とそのメカニズム

### Decrease in yield load of steel plate due to pitting corrosion and its mechanism

社会システムコース

1095514 谷口 津美

#### 1. はじめに

現在まで多くの橋梁が建設されているが、経済成長による自動車の大型化などの活荷重の増大が問題となっている。橋梁の架け替えには交通荷重の増加による機能上の問題によるものが多いが、鋼材の腐食も架け替えの大きな要因の一つである。腐食は耐久性や安全性に大きな影響を及ぼす。橋梁の場合、適切なメンテナンスを行えば半永久的に供用できる。しかしながら、現状では十分なメンテナンスが行われておらず、腐食している橋梁が多く存在する。腐食するということは、減厚し、断面積が減少するということである。断面積の減少により作用応力が増加することから、腐食橋梁に所定の安全性が確保されているかは保証の限りではない。しかし、実際には腐食した状況でも供用されている。また現在、腐食した鋼構造物の保有性能を精度よく評価することは難しく、確立された残存耐荷力の評価法もない。

既存橋梁の安全性を検討するに当たっては、現在の橋梁の残存耐荷力に加えて、直ぐに対処できない場合の腐食の進展予測、橋梁の設計荷重と実際または将来の交通荷重などが問題になると考えられる。残存耐荷力評価の基礎となるのは、橋梁を構成する鋼板の強度である。本研究では最も基本となる腐食鋼板の引張強度に焦点を絞って検討する。

自然に腐食した鋼板の表面不整はランダムであり、強度と表面不整の因果関係を分析的に考察するのは容易でないと考えられる。本研究では、人工的に制御された錆を生成して、腐食した鋼板の力学特性と腐食パターンとの関係に考察を加えた。また、孔食の影響をより明確にするため、ランダム性を排除した模擬孔食試験片を用いて引張試験、および数値解析を行い、促進腐食の結果や既往文献に報告されている降伏応力低下のメカニズムを解明する。

メカニズムが解明されれば、孔食の規模や分布を表すパラメータの変化による強度への影響を評価でき、腐食を模擬した解析で残存耐力の推定が可能となることが期待される。残存耐力の評価が可能となれば、効率的なメンテナンス計画立案に資する所が極めて大きいと考えられる。

#### 2. 促進腐食試験と腐食鋼板の引張試験

促進腐食期間は研究期間の制限から 15 ヶ月とし、腐食期間が短期間であることから、相対的に腐食の影響が大きくなるように試験片は薄板の板厚 2.1mm と 1.6mm の 2 種類の鋼板から JIS 5 号試験片を作成し試験に供した。また、孔食が生じた場合に強度低下が著しいとの報告があるので、孔食が発生し易いように、黒皮除去後に両面を塗装し、格子状や点状など 10 パターンの形状で塗膜を剥がした。塗膜剥離部から腐食が進行し、孔食が生じることを期待したものである。これらの試験片を塩水噴霧試験機によって促進腐食させた。3 ヶ月ごとに試験片を 1 組取り出し、錆除去後、表面不整を計測し、引張試験を行った。

その結果、線状に塗膜を剥がしたもののほうが断面積減少率は大きく、深い孔食がしやすいこと、腐食によって引張強度、降伏応力ともに低下することが分かった。また、板厚変動係数、断面積変動係数と強度、降伏応力には相関があり、変動係数の増加に伴い、両者とも低下することが明らかとなった。

### 3. 孔食模擬試験片の引張試験と数値解析

促進腐食試験によりある程度制御した腐食を発生させる試験を試みたが、腐食は自然現象であり、本質的にはランダムである。また、表面不整のためひずみの計測は不可能である。これらのことから、孔食の代わりに機械的にくぼみを設けた試験片を用いた載荷試験を試みた。

二つのくぼみを設けた孔食模擬試験片の引張試験の結果、くぼみの近くではくぼみとくぼみの間で大きな応力が発生し、くぼみのラインでは低い応力分布となっている。しかし、少し離れた所ではこれとは逆の応力分布が発生することがわかった。

試験体へ細かくひずみゲージを貼り計測することは困難なため、数値解析による現象の解明を試みた。当初、三次元解析を行ったが、載荷荷重を大きくすると不安定になり解析ができないなどの問題があったため、板厚方向の応力が長手方向の応力より極めて小さいことから、二次元解析に変更した。三次元解析、二次元解析とも孔食模擬引張試験と似た現象を再現することができた。しかしながら、定性的には現象を表しているものの、定量的な一致を見るにはいたっていない。

### 4. 降伏応力低下のメカニズム

模擬孔食引張試験で見られた現象は、二次元解析結果の変位分布にも現れている。くぼみの中心から10mm程度離れた所では変位は大きく見れば放物線状の分布となっている。一方、くぼみから十分離れた場所では Saint-Venant の原理によって変位は一様な分布となる。この間では、くぼみの影響が少ない外側で伸びが大きいことになる。実験における応力の逆転現象は、この変位分布によるものではないかと思われる。ただし、実験で見られた応力低下を説明できる程の極端な変位分布とは思われず、詳細は今後の検討課題である。

試験片全体の伸びに占めるくぼみの影響範囲の伸びの割合を見ると、荷重の増加とともに、くぼみの影響範囲の伸びが全体の伸びを占める割合が増すことが分かる。したがって、くぼみの範囲が先に降伏して、くぼみ付近が大きく伸びることによって、部材全体が降伏する前に、全体の伸びが大きくなると言える。これが部材の見かけ上の降伏が早くなった原因と考えられる。

### 5. 結論

- ・ 腐食は線状に塗膜を剥離させたほうが断面積減少率は大きく、深い孔食が発生しやすい。
- ・ 既往文献にあるように、板厚・断面積変動係数の増加に伴って、引張強度、降伏応力は低下する。
- ・ 模擬孔食試験片の結果と数値解析による結果は、定性的には現象を再現できるが、定量的には一致していない。
- ・ 載荷荷重が増加すると全体の伸びはくぼみの影響する範囲の伸びに支配される。従って、くぼみの範囲の伸びが増加し、健全な部分が降伏していなくても部材としての見かけ上の降伏が下がったように見える。これが降伏応力低下のメカニズムであると考えられる。

## **Decrease in yield load of steel plate due to pitting corrosion and its mechanism**

Tsuyoshi Taniguchi

### **1. Preface**

A lot of bridges were built until now. And, the increase of live load by the heavy vehicle due to economic growth is mattering. Though the major reason of rebuilding the bridge is the problem on the function due to increase in traffic loads, the corrosion of the steel material is one of the large factors. Corrosion seriously influences durability and safety. The steel bridges can be use semipermanently by adequate maintenance. However, there are many corroded steel bridges because of poor maintenance. Corrosion decreases thickness and sectional area, and it increases working stress. Therefore, the corroded bridge can not assure the necessary safety. But, there are many corroded structures served for traffics. In addition the evaluation method for the load carrying capacity of the corroded structures has not been established.

In order to examine the safety of an existing bridge evaluation of the load carrying capacity of the bridges, the forecasting of corrosion progress and actual traffic load of present and in future. The base of evaluation of the load carrying capacity is strength of corroded steel plates. In this study, the tensile strength of corroded plate is examined as the most basic strength.

The surface irregularity of the naturally corroded steel plates is random. And, the causal linkage between tensile strength and surface irregularity is difficult to analytically consider it. In this study, the artificially controlled corrosion was generated, and the relation between the mechanical characteristic and the corrosion pattern is examined. Moreover, the tensile test and the numerical analysis are done by using test piece with the machined pit excluding randomness in order to clarify the effect of pitting. And, the mechanism of the decrease in yield stress reported in the reference and observed in the accelerated corrosion test is investigated.

If the mechanism is clarified, the effect of corrosion on strength can be predicted by the parameter of the size and the distribution of the pitting. The prediction of the load carrying capacity is expected to become possible using simulated corrosion. It is thought that the evaluation of remaining load carrying capacity make it possible to contribute to the efficient maintenance plan.

### **2. Accelerated corrosion test and its tensile test**

The accelerated corrosion period is 15 months from the limitation at the study period. The test pieces are used thin steel plate so that the influence of corrosion might relatively grow, because the corrosion period was a short term. The JIS-5 standard test pieces of 2.1 mm and 1.6 mm in thickness were used for the test. Since there is a report that the pitting corrosion remarkably reduces the strength, the test pieces are processed aiming at the generation of pitting corrosion. First, the mill scale was removed. Then they were painted once, and the paint film was partially scratched in order to make the pitting corrosion. The corrosion may start from the scratched part and it is expected to lead to the pitting corrosion. The test pieces suffered accelerated corrosion by the misting of the saltwater. The corroded test pieces were examined every three months. First, the irregularity of corroded surface was measured after the removal of the rust. Then, the loading test was performed.

As a result, the reduction rate of sectional area is large, in the case of line pattern scratch and a deep pitting corrosion is generated. Both strength and the yield stress decrease with the pitting corrosion. And, there are

correlations between the coefficients of variation in thickness and the sectional area with strength and the yield stress. They both decrease with the increases in coefficient of variation.

### **3. Tensile test and numerical analysis of test piece on the machined pit**

The research mentioned above, the control of the corrosion was intended to make it easy to understand the effect of the corrosion on the mechanical characteristics. However, the corrosion is the natural phenomenon and is inherently random. In addition, the measurement of the strain is impossible because of the surface irregularity. Therefore, instead of the pitted corrosion, loading test was attempted on the test piece using the machined pit.

The result of the test of the two machined pit reveals that, the large stress is generated between the pit and the stress is small near the pit. However, it is found that the control stress distribution is generated apart from the pit.

Because densely attaching of the strain gauge on the test piece is difficult, the examination of the phenomenon by the numerical analysis is attempted. At first, three dimensional the numerical analysis was tried. However, the analyses became unstable when the tensile load was increased. Therefore, two dimensional analyses were done, because the stress in the thickness direction is extremely smaller than the stress in the loading direction. The phenomenon observed in the tensile test with machined pit is represented by both three-dimensional analysis and two dimensional analyses. Though the analytical result coincides with the experimental one qualitatively, quantitative agreement could not be obtained.

### **4. Mechanism of decrease in yield stress**

The phenomenon observed in the test of the machined pit pieces appears in the displacement distribution of an analytical result. About 10mm away from the pit, elongation is almost parabolic distribution. On the other hand, displacement distribution is uniform following the Saint-Venant principle at the plate away enough from the pit. Thus, the elongation should be at large the outside where the effect of the pit is small. The reversal of the stress distribution observed in tensile test may be caused this displacement distribution. However, the displacement distribution can not explain the drastic variation observed in the experiment, and the details are the subject in future study.

The ratio of the elongation of the pit affected to the total elongation is investigated. The ratio of the elongation of the area pit effected area effect increases with an increase in the tensile load. Therefore, the area near the pit yields first and the total elongation increase by the yield of the vicinity of the pit before the total material yield. It is considered that this is the mechanism of the global yield occurs earlier than material yield.

### **5. Conclusion**

- The reduction rate of sectional area is increased, if the paint film was scratched in line pattern, and deep pitting corrosion is generated easily.
- The yield stress decreases with both the coefficient of variation in thickness and the sectional area.
- Numerical analysis can represent the phenomenon observed in the test qualitatively, but quantitative agreement can not be gained.
- The ratio of the elongation in the vicinity of the pit to the total elongation increases with an increase in the tensile load. Therefore, it can be said that the total elongation increase by the elongation in vicinity of the pit before the total material yield. It is considered that the yield the member appears earlier than the material yield.