

## 鉄鋼の環境強度部会終了報告



部会長 駒井 謙治郎\*

## Report of Activity of Committee on Environmental Strength of Steels

Kenjiro KOMAI

## 1. 部会設立の背景と目的

各種の機械、構造物は近年ますます大型化、高速化、効率化の方向にあり、金属材料に課せられる要求は、高強度・高靱性、耐食性、耐熱性、またときには軽量性などますます厳しくなっている。また、それらが稼動する環境も苛酷化の一途をたどっていると同時に、いまだかつて人類が経験したことのない環境が登場しつつある。例えば、石油資源を含む海洋資源の開発と有効利用は人類にとって将来ともますます重要となりつつあり、海洋開発のための海洋構造物の大型化には近年とくに著しいものがある。

酸性油井やガス油井に使用される鋼管においてはしばしば硫化物応力腐食割れが経験されているが、この場合にもエネルギー事情の逼迫に伴い、深井戸の掘削が近年急激に増大し、油井用鋼管に要求される性能も高強度、高耐食性などますます厳しくなりつつある。したがって、このような力学的にも、環境的にも苛酷な条件下で、機械、構造物に長期間にわたって必要十分な信頼性をもたせるため、金属材料強度に及ぼす環境、とくに腐食性環境効果の解明と環境強度設計基準の確立が強く望まれている。

また一方、資源・エネルギー節約の観点からも、高度成長期のスクラップアンドビルドの使い方から、機械、構造物をできるだけ長持ちさせてその寿命を100%生かそうとする使い方が要求されている。このような社会状況下では、本質的に時間依存の性質を有する、環境による材料破壊がクローズアップされてくるのは当然の成り行きであろう。

金属材料の環境強度としては、静荷重下の水素ぜい化割れを含む応力腐食割れ(SCC)と、変動荷重下の腐食疲労、SCCがまず挙げられる。SCCは環境と材料が特

定の組合せのときに生じる現象であるが、腐食疲労にはこのような限定がなく常に起こりうるものである。しかしまた腐食疲労とSCCは共存する場合が多い。とくに最近その開発と普及が著しい高強度材では、腐食疲労とSCCが共存する害が大きい。

腐食疲労を含む環境強度研究は最近になつてとみにその重要性が指摘され始めている。これは疲労に及ぼす環境効果に対する大方の認識が深まったことのほか、原子炉や海洋構造物など大型先端技術が実用段階を経過し、その構造安全性評価に対して腐食疲労強度特性の解明が不可欠となつてきたことに因つている。したがって欧米諸国では産業界、官界、学界などを含んで国を挙げてのみならず、国家間協力により多額の研究資金の投入をはかり、大規模な研究プロジェクトを組んで腐食疲労現象の機構解明とその防止対策、腐食疲労データ収集と設計基準の確立に取り組んでいる現状にある。

金属材料の環境強度は、材料強度学、金属学、腐食化学、信頼性工学などの広範な分野にまたがる学際的な問題であり、かつ、基礎と応用の両面から早急に問題解決を計るためには、学界、官界、産業界に属する諸分野の専門家の緊密な協力関係が最も必要とされている。また、こうした研究に要する設備、費用、期間の面からも、一研究機関、一会社の守備範囲を超えつつあるケースが少なくない。このような観点の下に、1982年鉄鋼基礎共同研究会に「鉄鋼の環境強度部会」が設立され、5か年計画で海洋環境下の鉄鋼の腐食疲労とSCCの共同研究を開始した。当部会の活動の中心は機械・構造物用国産鉄鋼7鋼種の人工海水中共通試験にあり、一研究機関、一会社では実行不可能な系統的な腐食疲労、SCC試験を実施して、コンピュータデータベースを構築するとともに、諸分野の専門家による結果の解釈と破壊機構の解明、データ集約を行い、1987年3月その活動を完了した。

昭和62年8月31日受付 (Received Aug. 31, 1987)

\* 本会鉄鋼基礎共同研究会鉄鋼の環境強度部会 部会長 京都大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sankyo-ku Kyoto 606)

Key words : iron and steel ; offshore structures ; oil well ; stress corrosion cracking ; corrosion fatigue ; hydrogen embrittlement ; round robin data ; database.

## 2. 活動状況

環境強度部会には、表1に示す総数28の研究機関が参加しており、その内訳は大学10、国立研究所3、民間研究機関15である。

環境強度部会ではその活動を開始するにあたってまず、社会的・学問的ニーズを十分に取り入れるため部会委員全員に対してアンケート調査を実施した。そのアンケート結果を踏まえて決定された共通試験条件の概略を示す。

共通試験鋼種—提供先—溶接担当先はつぎのようである。

50 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼—焼ならし材 (HT 50)—日本鋼管—川崎重工業

50 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼—TMCP 鋼 (HT 50-CR)—新日本製鉄—三菱重工業

60 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼 (HT 60)—住友金属—住友重機械

80 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼 (HT 80)—川崎製鉄—石川島播磨重工 (川崎製鉄)

SNCM 439—日本製鋼所

二相ステンレス鋳鋼 (DPSS-C)—神戸製鋼—神戸製鋼

二相ステンレス鍛鋼 (DPSS-F)—大同特殊鋼—大同特殊鋼

共通試験を実施するにあたっては、試験データの信頼性を保証するため「環境強度部会方式腐食疲労標準試験法」を部会で取り決め、データの信頼性を高めた。

各研究機関における共通試験実施状況を鋼種別に見ると、HT 80 と HT 50-CR 材は 20 近くの研究機関でとり挙げられており、両鋼種に対する関心の高さが伺えた。他の鋼種についても相当数の研究機関でとり挙げられており、7 鋼種すべてについてラウンドロビテストとしての実を挙げることができた。つぎに試験方法について見ると、寿命試験、き裂進展試験ともほぼ同数の研究機関で実施されており、き裂進展速度のみならず、破断寿命が注目された。

## 3. 研究成果

### 3.1 シンポジウムの開催

部会活動の成果を社会に還元することを目的として、都合3回のシンポジウムを開催するとともに、それぞれ

表 1 参加研究機関と機関番号一覧

01 京都大学, 02 室蘭工業大学, 03 東北大学, 04 東京大学, 05 東京工業大学, 06 武蔵工業大学, 07 福井大学, 08 名古屋大学, 09 大阪大学, 10 大阪府立大学, 11 金属材料技術研究所, 12 新日本製鉄(第2技研), 13 新日本製鉄(八幡), 14 日本鋼管, 15 川崎製鉄, 16 住友金属工業, 17 神戸製鋼所, 18 大同特殊鋼, 19 三菱重工業, 20 石川島播磨重工, 21 川崎重工業, 22 三井造船, 23 日立造船, 24 日本海事協会, 25 日本製鋼所, 26 住友重機械工業, 27 金属材料技術研究所(筑波支所), 28 船舶技術研究所
---

シンポジウム前刷集を発行した。

第一回シンポジウム—鉄鋼の海洋環境強度 (1983 年 11 月 17 日開催)

第二回シンポジウム—鉄鋼の海洋環境共通試験とその解析 (1985 年 11 月 21 日開催)

第三回最終シンポジウム—鉄鋼の海洋環境共通試験とその解析 (1987 年 5 月 19, 20 日開催)

### 3.2 「鉄鋼の海洋環境強度文献データ抄録集 Vol. 1, Vol. 2」の出版

委員各自が全般的な研究動向を把握し、共通試験内容を充実させることを目的として、委員全員が分担して関連資料・文献の調査を行った。調査対象は機械・構造用鉄鋼の海水(塩水)中腐食疲労と SCC を取り扱った文献とし、調査期間は Vol. 1 (1983 年出版) が 1977 年より 1981 年、Vol. 2 (1987 年出版) が 1981 年より 1986 年とした。本文献データ抄録集は部会内部資料として委員の勉強を目的として少数印刷されたものであるが、一般には入手困難な政府プロジェクト報告等も抄録されており、学術的にも貴重なデータ抄録集として、関係者の間で重宝されている。

### 3.3 「鉄鋼の海洋環境破面写真集 Vol. 1, Vol. 2」の出版

海洋環境共通試験において得られた破面情報を整備することを目的として、標記写真集の Vol. 1 (母材) が 1985 年、Vol. 2 (溶接材) が 1987 年 4 月に出版された。とくに、鮮明な大型写真、低倍率と高倍率写真の対応、破面のみならず腐食損傷部の表面・断面写真、ステレオ写真の収集に重点を置いて編集されたもので、Vol. 1 にはステレオ眼鏡を添付して利用の便を計っている。

### 3.4 共通試験データの集積と「鉄鋼材料の海水中腐食疲労・応力腐食割れ強度データ集」ならびに「同データベース」の出版

共通試験は 1983 年よりスタートし、1986 年 2 月に母材試験を、また 1986 年 8 月に溶接材試験を終了した。集積された共通試験データ数を表 2 に示す。鋼種別に S-N 曲線、 $da/dN-\Delta K$  曲線、S-t 曲線、 $da/dt-K_I$  曲線、低ひずみ速度試験 (SSRT)、静腐食試験のデータ点数をまとめたもので、データ総数 9802 点もの膨大なラウンドロビンデータが得られた。本データは、材料条件、試験条件を厳密に揃えて得られた世界でも稀な、信

表 2 共通試験データ数一覧

鋼種	SN	$da/dN$	St	$da/dt$	SSRT	静腐食
HT50	277	1292	—	—	—	—
HT50-CR	306	1915	—	—	—	16
HT60	144	1001	—	—	4	4
HT80	259	1947	22	3	25	16
SNCM439	28	862	—	430	6	—
DPSS-C	42	555	—	—	—	—
DPSS-F	52	602	—	—	—	—
合計	1108	8174	22	433	29	36

総計 9802

頼性の高い大規模データであり、広く今後の工学、工業技術の進歩に寄与することを期待して、標記データ集と同データベース(準備中)の出版に踏み切った。強度データ集はラウンドロビン試験で得られた全数値を集録した数値データ集(Vol. 1)とプロット線図集(Vol. 2)から成っており、同データベースは、コンピューター利用の便を考えてこれを所定のフォーマットに従って磁気テープ化したものである。

### 3.5 共通試験結果の解析結果

ラウンドロビン試験結果の取りまとめと解析は各作業グループで行われ、その結果は最終報告書である第三回シンポジウム前刷集に詳細に述べられているが、その一部を要約するとつぎのようである。

1) 回転曲げ空中耐久限度  $\sigma_w$  と引張強さ  $\sigma_B$  は

$$\sigma_w = 0.54\sigma_B$$

の関係にあり、試験機関による結果のばらつきは小さかった。

2) 2.2年に及ぶ長期浸漬試験より、各鋼種について、人工海水中の自然腐食速度は天然海水中とほぼ等しいが、3.5% NaCl水溶液中の速度は海水中の2倍以上となった。

3) 今回のラウンドロビン試験の主要目的の一つである、長寿命腐食疲労 S-N 曲線が各鋼種について得られ、最長 500 d ( $f=0.17$  Hz で  $N_f=7.3 \times 10^6$ ) の試験データを含んで腐食疲労強度には高張力鋼種の差異がほとんど見られないことと、両対数表示で上に凸の長時間側で危険な S-N 曲線の形状となることが明らかとなった。

4) 人工海水中腐食疲労き裂進展速度は HT 50, HT 50-CR, HT 60, HT 80 母材においては、 $\Delta K$  による整理

で空中速度と比べて 2~3 倍の加速を示すが、溶接材におけるこの加速は  $\Delta K_{eff}$  による整理で始めて明瞭になり、き裂速度の  $\Delta K_{eff}$  による整理が有効であった。

5) 3次元表面き裂進展速度は空中、人工海水中ともに、CT 試験片による貫通き裂速度と良く一致し、本ラウンドロビン標準試験結果により実機に生じる表面き裂進展特性を評価できることを裏付けた。

6) 腐食疲労き裂進展抑制のためのカソード防食は極めて有用であるが、適正防食電位 (HT 80 では  $-0.9 \sim -0.7$  V vs. Ag/AgCl) が存在し、また二相ステンレス鋼では水素ぜい化によるき裂進展の加速が大きく現れて、その効果をほとんど期待できないことを多数データより明らかにした。

## 4. 結 言

腐食疲労、応力腐食割れ試験を全国的規模で実施することは、欧米ではしばしば行われてきているが、我が国では初めての試みであり、部会メンバー各位の全面的な協力を得てここによりやく膨大なデータの収集を見ることができた。当部会活動の果実である強度データ集、同データベース、および解析結果が、機械・構造物の設計、保守、管理等、産業界の各分野で有効に利用されるだけでなく、腐食材料強度の分野における多くの研究者にとつても大いに活用されることを期待するものである。さらに、情報の国際的互惠主義が台頭しつつある現在、当部会で収集したラウンドロビンデータは国際的にも極めて貴重な国産情報であり、国際的にも大きな評価を受けるものと考えられる。