

第2回 FIP PC 鋼材応力腐食シンポジウム報告

坂 村 泉*
山 崎 隆 雄**
田 中 義 人***

1. はじめに

第2回 FIP PC 鋼材応力腐食シンポジウムは、去る9月20および21の両日 FIP Commission of Prestressing Steel (委員長 オランダ Delft 工科大学 Bruggeling 教授) の主催で開かれた。第1回と連続性をもたせるといふ主催者の配慮から、場所は前回と同じ Arnhem の近くの Hotel de Bilderberg で、招待状も前回の参加者にも限定された。

参加者の国別内訳は、オーストラリア1、オーストリア1、ベルギー3、フランス5、西ドイツ8、イギリス5、イタリア3、日本3、スペイン1、スイス1およびオランダ13で、残念ながらアメリカ、ソ連および東ヨーロッパからの参加はなかった。用語は前回は英語のみに限定されたが、今回は英語を主体としながらフランス語とドイツ語も認められた。

会議は終始 Bruggeling 教授の司会のもとに、事故例、研究報告、試験方法および討論の4つに時間を分割して進められた。

2. 事故例

前回のシンポジウムはPC鋼材の応力腐食に関する初めての会議ということで、プレストレストコンクリートが始まって以来の腐食による事故例が活発に発表された。しかし今回は、事故例を系統的に解析しようという主催者の意図にもかかわらず、過去2年間に発生した事故例はほとんどなく、スペイン、オーストラリアなどからPCパイプの事故例について前回の追加的な報告があったにすぎなかった。

3. 研究報告

実験室的な研究報告は6件提出された。従来は応力腐食や水素ぜい性の現象を実験室的に再現する研究が多

かったのに比べ、今回はそれらの現象のメカニズムを電気化学的に解析しようとする研究が目立った。

以下それらの報告の概要を記す。

飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中における PC 鋼線の電気化学的挙動について (オランダ F. Blekkenhorst and L.R.J. Lamers)

冷間伸線で減面率 84% で通常のブルーイングを施した直径 3.5 mm の鋼線 (A) と、減面率 66% で過度のブルーイングを施した鋼線 (B) とを製作し、載荷応力 0 と $0.7\sigma_B$ で温度 80°C の飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の中で電気化学的な測定を行った。また、 CaCl_2 、 CaS 、 PbO および Na_2SO_4 を添加し、それらの影響をも調べた。その結果、次の結論を得た。

- ① 硫化物、塩化物および硫酸塩は鋼線の表面を変化させ、不動態被膜を破壊する。
- ② 添加物の濃度が高ければ高いほど腐食感受性が高くなる。
- ③ 塩化物、硫化物は硫酸塩より強い影響力がある。
- ④ 外部応力を与えると腐食電位および分極抵抗が低下する。したがって腐食感受性が高まる。
- ⑤ 電気化学的測定結果からすると、鋼線 (A) は鋼線 (B) より応力腐食感受性が高い。

工業地帯雰囲気および海水にさらされたコンクリート中の鋼線の腐食 (オランダ W. van Klaveren)

オランダセメント工業会コンクリート研究会では1971年中期より、極端な環境下におけるコンクリート中のPC鋼線の腐食に関する長期研究を開始した。この報告はその中間報告であり、実験の概要は次のとおりである。

コンクリートのポロシチーを変えるために水セメント比 $W/C=0.4$ および 0.6 とし、3種類の鋼線 (いずれも冷間引抜線であるが、加工度を極端に変えた) に比較的高い応力 ($0.8\sigma_B$) をかけて、かぶり厚さ 5 および 15 mm のプレテンション部材を作った。これらの部材を、工業地帯に放置し、または、人工海水槽に入れて周期的に浸漬・乾燥を繰り返す、定期的に導電率法、X線法お

* 住友電気工業株式会社

** 高周波熱錬株式会社

*** 神鋼鋼線工業株式会社

よび破壊試験でチェックしている。

最終は5年後の1976年の予定であるが、1年後の試験で次の結果が得られた。

- ① かぶり厚さ 15 mm ではコンクリートおよび鋼線の種類を問わず腐食や孔食は認められない。
- ② かぶり厚さ 5 mm ではどのコンクリートでも、また、どの鋼線でも腐食が発生しており、 $w/c=0.6$ のコンクリート中では $w/c=0.4$ のコンクリート中の2倍の腐食であった。
- ③ かぶり 5 mm のコンクリート中で、過酷な伸線をした鋼線に縦割れが発生していた。

高強度亜鉛めっき P C 鋼線に関する研究 (西ドイツ G. Rehm, U. Nürnberger and G. Rieche)

P C 鋼材の一時または永久防錆手段の開発において、亜鉛めっきは最も可能性を有するものの1つである。しかし、高強度鋼材に亜鉛めっきを施すと諸特性が変化するであろうことは想像がつくが、具体的にどの程度の影響があるかは明らかでない。そこで、熱式亜鉛めっき、電気亜鉛めっき、またはめっき後伸線して直径 4.5~6 mm の鋼線を作って各種試験を行った。その結果は次のとおりである。

- ① コンクリートとの付着性はめっき線が裸線よりよい結果であった。これは表面粗さの影響と思われる。
- ② コンクリートと亜鉛は化学的に反応して亜鉛酸カルシウムを形成し、コンクリートの硬化を遅らせるが、亜鉛酸塩の生成は比較的短期間に終息する。
- ③ 熱式亜鉛めっきは鋼線の引張強さおよび伸びを低下せしめる。
- ④ めっき後、伸線した鋼線はめっき層が割れた部分があり、母材に対してノッチとなっている。
- ⑤ 亜鉛めっき線は裸線より疲労強度が低いが、P C 鋼材に要求される値は上まわっている。
- ⑥ レラクセーションは伸線のままの裸線に類似している。
- ⑦ 大気腐食条件下では亜鉛による鋼の陰極防食作用は認められなかった。
- ⑧ 応力腐食に対しては亜鉛は反応を防ぎ、鋼を保護する。しかし、めっきに欠陥があればこの抵抗性は失われる。

P C 鋼材の応力腐食挙動とその試験方法 (西ドイツ G. Rehm and G. Rieche)

P C 鋼材を実用構造物に使用する上で大切なことはその耐応力腐食性である。そのためには、実用条件下での耐応力腐食性の試験をする必要があるが、正確を期すためには、応力腐食のメカニズムの研究を待たなければ

ならない。過去において、応力腐食のメカニズムを知らないまま、試験方法を標準化しようとしたが、ばらつきが大きく、正しい結果が得られなかった。

各種の実験結果を理論的に考察すると、P C 鋼材の応力腐食は吸着理論および腐食電位理論に符合する。すなわち、P C 鋼材の応力腐食による破断寿命は吸着されるイオンの種類および電位によって左右されることがわかった。従来の応力腐食試験は溶液の種類、濃度、液温、酸素量などを要因として行われ、電気化学的電位を考慮しなかったために、ばらつきの大きな結果が得られていたが、これを考慮して試験するとばらつきの小さな結果が得られることを証明できた。

アルカリ溶液中の鋼線の応力腐食における電位に関する研究 (イタリア G. Bombara and L. Giuliani)

パテンチングおよび冷間伸線により引張強さ 179, 191.5 および 238 kg/mm² の直径 2 mm の鋼線を作り、沸騰している NaOH 溶液中での応力腐食挙動を、分極電位、応力レベルおよび Cl⁻, SiO₄²⁻, CrO₄²⁻ 添加の影響について調べた。結論は次のとおりである。

- ① 周囲が鋼表面を腐食しない条件のとき、すなわち電解液中でアルカリ性が高く、酸化還元電位が低くなれば、アルカリ溶液中でも応力腐食および水素ぜい性のいずれをも起ることがある。
- ② 水素ぜい性がより起りやすいが、それには硫化物の存在が必要である。
- ③ 鋼材の引張強さについて比較すると、載荷応力を同じ引張強さ比でかけると、強度の高い鋼材の寿命が短い。

オーストラリアにおける人工環境下の P C 鋼線の挙動に関する研究 (オーストラリア E. Phillips)

1) 破壊機構の研究：同じ鋼線でも置かれた環境により応力腐食破断時間が異なるし、また、同じ腐食環境でも鋼線の作り方によってその寿命が異なる。こうした条件の異なる試験結果を計量的につかむために、応力腐食を起させる必要な最少応力を K_{QSCC} で表わし、この値を P C 鋼線について求める研究が Country Roads Board で行われている。

4つのメーカーで作った 7 mm の P C 鋼線にノッチを入れて、いろいろな腐食媒の中で試験し、例えば 3.5% NaCl 溶液中で $K_{QSCC}=11.2\sim 28$ kg/mm²、また飽和 H₂S 中で $K_{QSCC}=7.3\sim 8.5$ kg/mm² を得ている。これらの実験中、疲労割れ直径を電圧降下法で測定しているが、試験後の直接測定と ±15% の差があった。

2) P C パイプの表面電位測定：この研究は 1971 年以来 Monash 大学材料工学部で進められているものであるが、その目的とするところは、P C パイプの表面電

位を測定し、巻付鋼線の腐食の程度を非破壊的に検出しようとするものである。現在のところ、掘り出したパイプについては外面から電位を測定するだけで軽度のさびが検出できるところまでできている。パイプ内面からの測定では、2~3巻の鋼線が極度にさびていれば検出できる程度である。

4. 試験方法

P C鋼材の応力腐食試験あるいは水素ぜい性試験は世界の多くの国で数多く行われてきたが、試験条件がそれぞれ異なるので試験結果を直接比較することは困難である。そこで、ヨーロッパでは次に紹介する2つの組織が、広く受け入れられる一般的な試験方法を確立すべく努力していることが報告された。

(1) Euro Stress Information Service (ESIS) の報告

これはヨーロッパの6つの研究所が4mmの同じ鋼線を使って、陰極分極、20 wt% NH_4SCN および飽和 H_2S などの方法で試験し、データのばらつき、感度、再現性などを調べたものである。

ここで使用された方法は、いずれも水素ぜい性を起させるものであるが、全体として見れば、飽和 H_2S 溶液による方法がばらつきが少なく、再現性が良いという結果であった。

(2) RILEM-FIP-CEB 合同委員会報告

これは3組織が合同で応力腐食研究グループ(オランダ、ベルギー、フランス、西ドイツおよびオーストリア)を結成し、アンケート調査および実験を行った結果の報告で、世界的な統一試験方法を確立しようとするものである。

この研究グループが1971年秋に世界各国の研究機関に対しアンケートを求めたところ、次の理由で統一試験方法を作るのが望ましいという意見が大半であった。

- 1) 応力腐食研究そのもののため。
- 2) 環境変化に対しP C鋼材の品質がどう変化するかを判断するため。
- 3) 品質管理上耐応力腐食性をチェックするため。

そこで、この研究グループは統一試験方法の目標を

- ① 試験結果のばらつきが小さいこと、
- ② 設備や試験費用が高額にならないこと、
- ③ 試験の再現性が良いこと、
- ④ 試験時間が長すぎないこと、

として、参加10試験機関で分担して試験を実施した。

試験片は共通試料で、3.5, 7 および 8 mm の3サイズ、ブルーイング良好、不十分の2種類とし、腐食媒としては NO_3^- , H_2S , NH_4SCN , H_2SO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ およ

び H_2O を用い陰極チャージを組み合せた。

この試験結果を持ち寄って検討したところ NH_4SCN が目標に最も近い結果を与えると判断されたので、これをもとに「ロダン化アンモンによるP C鋼材の応力試験法(案)」を作成した。

5. 討 論

前回のシンポジウムではP C鋼材に亜鉛めっきを施すことは害はあっても益はないという雰囲気であったが、今回のめっきP C鋼線に関する報告に対してはフランスの代表者からP C鋼材にはめっきなど不要ではないかという意見が出たものの、一般には、亜鉛めっきP C鋼材は有益であろうとの見方であった。

議論は主に応力腐食試験方法に集中した。その理由は大別して次の3つの立場の違いによるものである。

その第一は主催者の立場である。すなわち、10年前はP Cの応用はせいぜいスパン数 m の橋桁程度であったが、いまや数百mのスパンの橋梁ができ、PCPV, LNGタンクなどの重要構造物へと発展してきている。単純な試験では不十分なことは十分承知しているが、さしあたって実用的な試験を行って、各国で使っているP C鋼材の品質の比較をするとともに、現在各所でいろいろな方法で実施されている試験をいまのうちに方向づけしておいて、データを比較できるようにしたい。欲をいえば完全な知識を得てから統一試験方法を決めれば良いが、それにはあと100年かかるであろう。しかし土木・建築関係者は明日にもデータを欲しがっているのであるから、現時点でベストな方法を作ってただちに試験を開始すべきである。したがって、できればこのシンポジウムに提出された試験法(案)を仕上げた今回の結論とし、1974年のFIP大会に報告したい。

第二は学術的な立場である。すなわち、簡単な実用試験も結構であるが、応力腐食のメカニズムを十分解明しないうちに1つの試験方法を強制することは、知識の発展を妨げ、将来に禍根を残すことになる。少なくともメカニズムの異なる応力腐食と水素ぜい性は分けて考え、もっと本質的な研究を待つべきではないか。

第三はユーザーの立場からの発言である。P C鋼材のユーザーすなわち、コントラクターは構造物を作って、売るので、その寿命を保証しなければならない。構造物の建設費に占めるP C鋼材の割合は2~10%で大きくはないが、その品質は重要であり、最大限の注意を払っている。現実には、いままでに非常に多くのP C構造物が作られてきたわけであるが、P C鋼材自体に起因する事故はきわめてまれである。しかるに、提案された応力試験方法では試験データと実用時の寿命との間に明確な相関

関係が確立されていないにもかかわらず、それがいったん決ってしまうと、規定の性格上、従来なんの問題もなく使用されているPC鋼材でも、その試験に合格しないと不適格とみなされるという不合理な結果になる心配がある。統一試験法を作るにはまだデータ不足であり、時期尚早といわざるを得ない。

以上のような討論の末、統一試験法の必要性は全員が認めるので、もっと時間をかけて、広い範囲で共同試験を行い、十分な討論を重ねた上で試験方法を作り上げようということに落ち着いた。

6. おわりに

応力腐食の実験には各種要因の組合せが多く、現実に近い状態を作ると非常に長い年月を要するという困難が伴う。しかし、データは早く欲しいということで、非現実的な加速試験を行うわけであるが、それで出てきたデータは現実との対応がつけられず、単なるデータとして宙に浮いてしまう結果となる。この矛盾を解決するのに2つの方法が考えられる。

1つは、過去の応力腐食によると思われる事故例を徹底的に解析し、真の原因をつかむこと、他の1つは、応

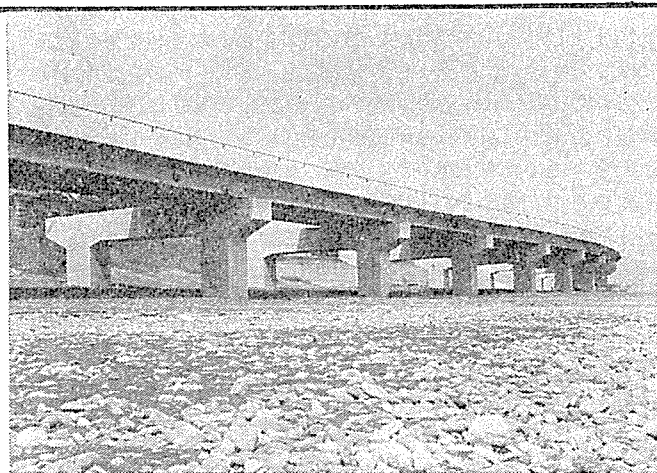
力腐食の本質をきわめ、実験室的な加速試験が活用できるようにすることである。2回のFIPシンポジウムを通じて、この両方からのアプローチがなされていることはその成果として認めてよいであろう。このシンポジウムの主催者は、それなりの理由があって、結論を急ごうとしたが、少なくとも、もう一度開いてからということになったことは、PC鋼材の応力腐食の研究の方向づけができてきたことを意味していると思う。

一方、FIPが応力腐食だけを取り上げてシンポジウムを開くほど応力腐食による事故が起っているかといえばそうではなく、むしろ事故例を探すのに苦勞しているのが現実である。しかし、FIPの狙いは、たとえ事例の少ない事故であっても、それを未然に防止する方法と、応用範囲の拡大してゆくプレストレストコンクリートの安全性を、いかにして確保するかということである。

こうしたシンポジウムを通じて知識を交換し、共同研究を強化してゆき、幅広い賛成を得るPC鋼材の試験方法と応力腐食防止方法とが確立されればプレストレストコンクリートの発展に寄与するものと信じている。

1973.11.8・受付

プレストレスト
コンクリート
建設工事—設計施工
製 品—製造販売



建設省 西湘バイパス道路



日本鋼弦コンクリート株式会社

取締役社長 仙波 隆

本 社 東京都新宿区西新宿1丁目21番1号 電話 (343) 5281 (代表)
 営業所 東京 Tel 03(343)5271 工 場 多摩工場 Tel 0423(64)2681~3
 大阪 Tel 06(371)7804~5 滋賀工場 Tel 07487(2)1212
 中部 Tel 07487(2)1212 相模原工場 Tel 0427(78)1351
 仙台 Tel 0222(23)3842