

PWS 定着部の疲労強度

FATIGUE STRENGTH OF PWS IN ANCHORAGE

杉井 謙一* 三田村 武** 奥川 淳志***

By Ken-ichi SUGII, Takeshi MITAMURA, and Atsushi OKUKAWA

The fatigue strength of PWS with zinc-poured anchorage is investigated through fatigue tests using PWS-37 and FEM analysis paying attention to the stress concentration of wires inside a socket. Though it has been said that a heat effect during zinc-pouring and a wire fretting lower the fatigue strength of PWS, in this paper another main cause of the strength drop is newly inferred: it is that the spray point of wires coincides with the stress concentration area of wires caused by the inner shape of a socket. The fatigue tests of the improved PWS-37 presented here shows a good result to support this inference.

1. はじめに

亜鉛鑄込みや亜鉛銅合金鑄込みの定着部を有するPWS（プレファブ平行線ストランド）の疲労限界は、160kgf/mm²級ワイヤを用いた場合、応力範囲で10～15kgf/mm²程度であるといわれてきた¹⁾。疲労実験でのワイヤ破断はそのほとんどが定着部で起こっており、ストランド一般部で破断することは稀である。160kgf/mm²級ワイヤそのものは応力範囲で40kgf/mm²程度の疲労限界を有しているので²⁾、定着部での疲労強度低下が約70%もあることになる。原因は鑄込時の熱影響やワイヤのフレッチングであるとする説が強く、これらを回避する目的でいくつかの定着形式も提案されている^{3) 4)}。しかしPWSの疲労強度が亜鉛鑄込みや亜鉛銅合金鑄込みの定着部で低くなる原因については、いまだ未解明の部分が多い。

本研究は亜鉛銅合金鑄込の定着部を有するPWSに対して、疲労実験および定着部のFEM解析を通じてあらためて疲労強度低下の原因を探るとともに、現状の定着部にあまり大きな構造変更を行うことなく、PWSの疲労強度の向上を図ることを目的としている。

本研究では、まずこれまで行われている標準の製作仕様にもとづいたPWS（以下、標準PWSと呼ぶ）を製作し、疲労実験を行ったのち、鑄込み部をばらして定着部内のワイヤ破断状況を観察した。供試体はソケット前面間長さ1.0mのPWS-37（ワイヤ37本束）で、φ5.0mmの180kgf/mm²級ワイヤを使用した。

* ㈱神戸製鋼所 鉄構橋梁部 課長 (〒651 神戸市中央区脇浜町1-3-18)

** " " 部長 (" ")

*** 工博 本四公団 設計部 設計第二課長 (〒105 東京都港区虎ノ門5-1-5 虎ノ門45森ビル)

180kgf/mm²級ワイヤそのものの疲労限界は応力範囲で約50kgf/mm²である²⁾。

次に、定着部のFEM解析を実施し定着部内のワイヤの応力状態を調べ、この計算結果を用いて定着部内のワイヤ破断原因の推定を行うとともに、定着部の改良方法の提案を行った。

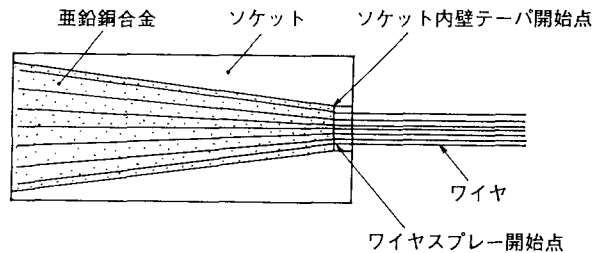
最後に、これらの検討の妥当性を検証するため、提案した改良定着部を持つPWS（以下、改良PWSと呼ぶ）を製作し、疲労実験を行った。供試体は上述の標準PWS同様、ソケット前面間長さ 1.0mのPWS－37で、 $\phi 5.0\text{mm}$ の180kgf/mm²級ワイヤを使用した。

2. 標準PWSの疲労実験

2.1. 標準PWSの製作方法と供試体寸法

標準PWSの製作は次の手順で行っている。

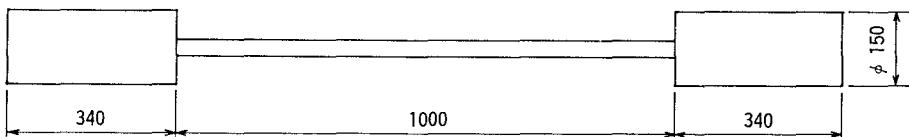
- ①ワイヤを集束し、六角形に成形する。
- ②ソケットにワイヤ束を挿入後、ワイヤを曲げ加工し箒状にスプレーする。
- ③図－1に示すように、ワイヤのスプレー開始点とソケット内壁のテーパ開始点をほぼ一致させるようにセットし、固定する。〔注1〕
- ④厳密な温度管理のもと、亜鉛銅合金の鑄込み作業を行う。



図－1 標準PWS定着部模式図

以上と同様の手順により、図－2に示す寸法の供試体（PWS－37）8体をあらたに製作し、疲労実験を実施した。これらの供試体の製作にあたっては、特に上記③のセッティングに留意した。また亜鉛銅合金の鑄込みは、本州四国連絡橋公団規格 HBS G3503-1979 にしたがった。（亜鉛銅合金＝Zn98%，Cu 2%，鑄込み温度＝460 ±10℃）

疲労実験は、最大荷重を全供試体共通の 59tonで固定し、最小荷重をそれぞれの供試体ごとに変化させることで荷重範囲を設定した。また実験中の荷重範囲を一定に保つ、いわゆる荷重制御を行った。したがって1本目断線後の実質的なワイヤ応力は、最大応力、最小応力とも変化し、応力範囲そのものが大きくなっている。



図－2 供試体全体寸法図（PWS－37， $\phi 5.0\text{mm}$ の180kgf/mm²級ワイヤ使用）

〔注1〕鑄込み金属の初期クリープを完了させる目的で、PWSには鑄込み後、ソケット後方より鑄込み金属をプレスする、いわゆるプレコンプレッションが施される。プレスされるのは鑄込み金属であり、ワイヤが直接押されることはないが、結果的にワイヤ束は数mmだけソケットから押し出されることになる。ここでいうセッティングは、厳密には、プレコンプレッション後にワイヤのスプレー開始点とソケット内壁のテーパ開始点が一致するよう、プレコンプレッションによるワイヤ束の変位量を見込んで行われる。

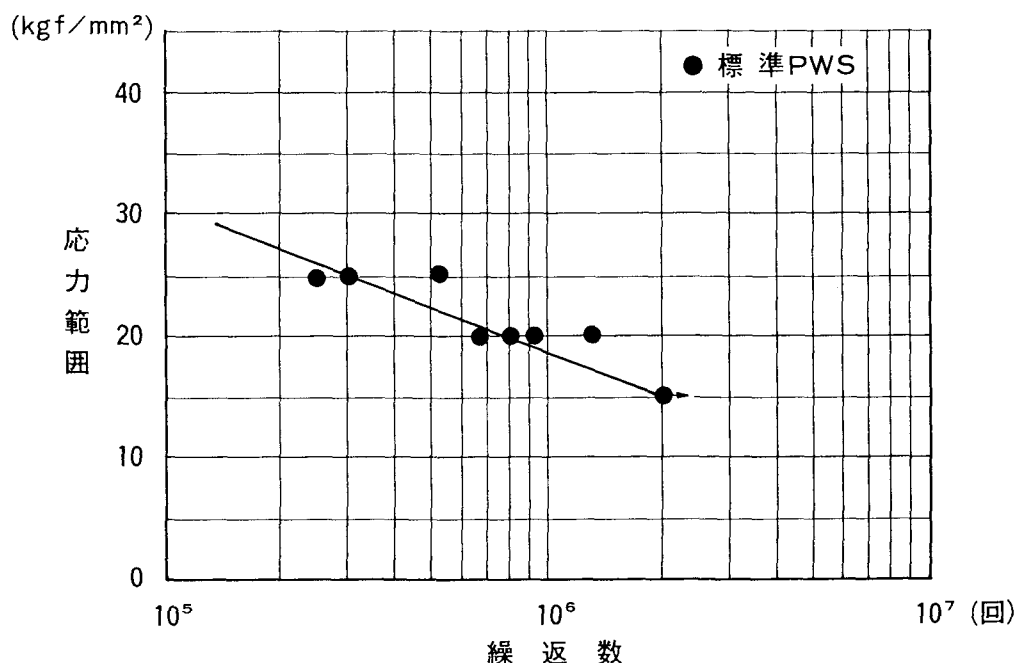
2.2. 実験結果

実験結果を表一および図一に示す。表一に表示の最大応力、最小応力、応力範囲はすべて断線前のストランド断面積で計算した数値である。図一は2本目断線時の繰返し数で整理しており、通常いわれている5%断線疲労強度に相当する。

データ数が少ないが、今回実験した標準PWSの疲労限界は 15kgf/mm^2 程度と推定される。実験結果のバ

表一 標準PWSの疲労実験結果 (PWS-37, $\phi 5.0\text{mm}$ の 180kgf/mm^2 級ワイヤ使用)

供試体No.	最大応力 kgf/mm^2	最小応力 kgf/mm^2	応力範囲 kgf/mm^2	繰返速度 cpm	繰返数 $\times 10^4$		
					1本目 断線時	2本目 断線時	最終 回数
S-1	81.2	66.2	15.0	240	—	—	200.0
S-2	81.2	61.2	20.0	240	61.8	64.8	64.8
S-3	81.2	61.2	20.0	240	112.0	130.0	130.0
S-4	81.2	61.2	20.0	240	58.0	78.8	78.8
S-5	81.2	61.2	20.0	240	81.0	92.0	92.0
S-6	81.2	56.1	25.1	240	48.5	50.9	50.9
S-7	81.2	56.1	25.1	240	19.5	29.8	29.8
S-8	81.2	56.1	25.1	240	22.5	23.4	23.4



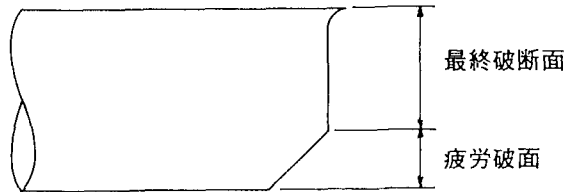
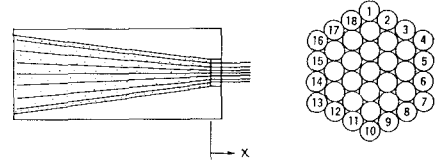
図一 標準PWSの疲労実験結果 (PWS-37, $\phi 5.0\text{mm}$ の 180kgf/mm^2 級ワイヤ使用)

ラッキが比較的大きいのが特徴的であった。

実験を終了したこれらの標準PWS供試体のうち2体（供試体No. S-7, S-8）の鑄込み部をばらし、断線状況を観察した。断線はすべてソケット内で生じており、断線位置は表—2に示すとおりソケット内壁テーパ開始点からソケット内部へ10mmまでの範囲に集中している。破断面は図—4に示すように2つの部分に分かれ、ワイヤに対し約45度の角度で亀裂が入った疲労破面、ほぼワイヤに直角な最終破断面より成っている。

表—2 標準PWSの断線位置

供試体No.	断線本数	断線ワイヤNo.	x (mm)
S-7	2	2	—8
		14	—5
S-8	2	1	—9
		7	—7



図—4 ワイヤ破断面模式図

3. 標準PWS定着部のFEM解析

先述の標準PWSの疲労実験に対応させるため、PWS-37の定着部をモデル化し、FEM解析を行った。モデルは平面軸対称モデルとし、弾性解析を行った。ソケット、ワイヤ、鑄込み金属の弾性係数はそれぞれ21,000kgf/mm²、20,000kgf/mm²、2,000kgf/mm²、ポアソン比はすべて0.3とした。それぞれの要素の間のすべりは考慮していない。メッシュの分割にあたっては、ワイヤ表面の応力分布をみることができるよう最外層ワイヤはワイヤ径方向に4分割とし、内層ワイヤは2分割とした。

メッシュ分割図を図—5に、計算結果と併記して示す。なお、解析には汎用プログラムPLASTOを用いた。

図—5に示す計算結果は最外層ワイヤ表面の応力度の分布であり、ストランド一般部の主応力を1.0として応力比で示したものである。図—5からわかるとおり、ソケット内壁テーパ開始点付近は最外層ワイヤ表面にとって応力の集中箇所となっている。主応力度はまさにソケット内壁テーパ開始点でピークを示し、数値的にはストランド一般部に較べて4割増しである。一方、最大せん断力はソケット内壁テーパ開始点からソケット内へ5mm程度入ったところでピークを示し、これもやはりストランド一般部に較べて4割増しである。主応力度が一点集中的にピークを示すのに対し、最大せん断力は比較的なだらかなピークの現れ方をしている。これらの応力集中はソケット内壁のテーパによる鑄込み合金の楔効果が主たる原因であると考えられる。

4. 標準PWSの疲労強度低下の原因推定と改良方法の検討

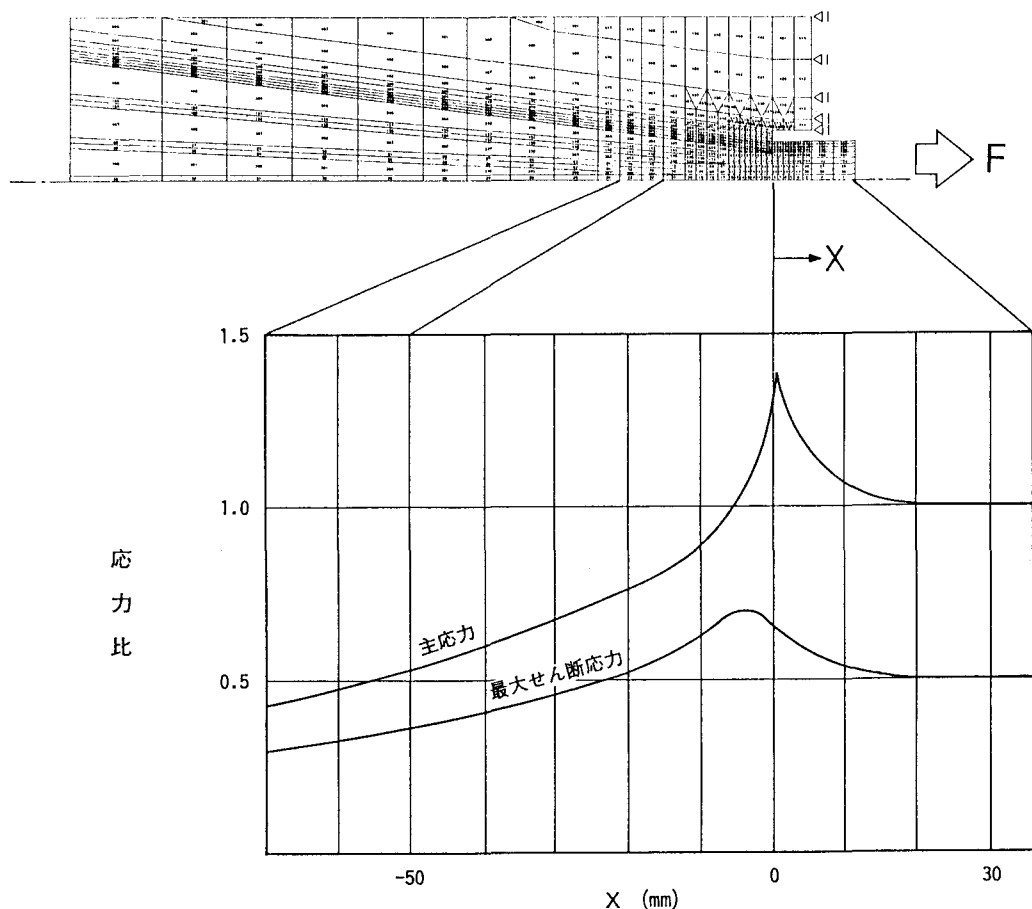
4.1. 疲労強度低下の原因推定

疲労実験結果とFEM解析結果は次のように整理できる。

- ①ソケット内壁テーパ開始点からソケット内部へ20mm付近までは最外層ワイヤ表面の応力集中箇所となっており、主応力度、最大せん断応力度ともそのピーク値はストランド一般部に比べて4割程度増加している。
- ②断線位置はソケット内壁テーパ開始点からソケット内部へ10mmまでの範囲にあり、ワイヤ曲げ加工の影響部に相当する。
- ③破断ワイヤの疲労クラック開始部は、ワイヤに対して約45度の角度で入っている。

これらのことを総合すると、定着部でPWSの疲労強度が低下する原因は次のように推定できる。すなわち、ソケット内壁テーパ開始点付近はもともとワイヤの応力集中箇所となりやすい箇所であるにもかかわらず、曲げ加工の影響を受けたワイヤスプレー開始点を一致させていたことに問題があった。また疲労の開始と進展には最大せん断力が大きく関与しているものと推察される。

一方、標準PWSの疲労実験結果にバラツキが大きいのは次の2つの要因が相互に影響しあうことに起因



図—5 標準PWS定着部のメッシュ分割と最外層ワイヤの応力分布

しているのではないかと考えられる。

- 1) 作業員の個人差により、ワイヤ曲げ加工の程度と範囲にバラツキが生じる。
- 2) ワイヤ曲げ加工影響部と応力集中箇所の相対位置が、プレコンプレッションなどの関係で、供試体ごとに微妙にずれる。

4.2. 定着部の改良方法の検討

上述の推論が正しいとすれば、定着部の改良方法として次のようなことが考えられる。

- ①ソケット内壁のテーパ角をゆるやかにして、ワイヤの応力集中度を下げる。
- ②ワイヤの曲げ加工を行わない。
- ③ワイヤスプレー開始点を応力集中箇所からはずす。

これらのうち、上記①では、架設後のストランド張力による鑄込み合金の抜け出し量が大きくなり、ケーブル体としての見掛けのクリープ量が大きくなるといった問題がでてくる。また②では、鑄込み作業の間ワイヤを弾性的にスプレーし、鑄込み合金が凝固するまでの間ワイヤを保持しておくための装置があらたに必要となるし、以後のプレコンプレッションに先立ちワイヤ端を始末しなければならないなどの問題も生じてくる。

最も簡単にできる改良は上記③の方法であり、具体的には次のように実現できる。すなわち、ワイヤスプレー開始点をソケット内部へ数十ミリメートル移動させ、曲げ加工によるワイヤ曲げ加工影響部を応力集中箇所から外してしまうことである。

今回の検討では、ワイヤスプレー開始点を50mmだけソケット内部へ移動させ、図一6に示すような位置関係とした。

この改良定着部におけるワイヤの応力状態を確認するために実施したFEM解析の結果を図一7に示す。図一7よりワイヤスプレー開始点が応力集中箇所から外れたことが確認できる。またワイヤスプレー開始点を後方に移したことにより、主応力度の集中度が改善されている。

5. 改良PWSの疲労実験

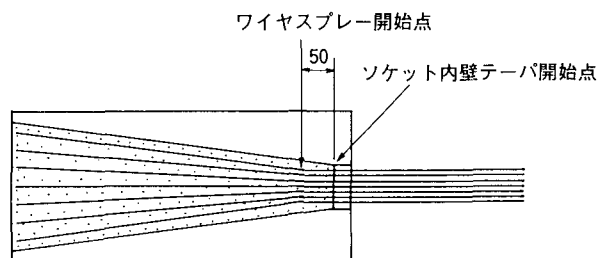
改良PWSを10体製作し、疲労実験を行った。供試体はワイヤスプレー開始点を50mmだけ後方に移したことを除けば、先述の標準PWSとまったく同じ寸法、方法、要員で製作した。

表一3および図一8に実験結果を示す。図一8には標準PWSの実験結果も併記している。図一8から判断して、改良PWSの疲労限界は 35kgf/mm^2 程度あるといえそうである。 180kgf/mm^2 級ワイヤそのものの疲労限界が約 50kgf/mm^2 であるので、改良定着部での疲労強度低下率は30%程度に抑えられたことになる。標準PWSの疲労限界は約 15kgf/mm^2 であったので、この場合の低下率は70%であった。

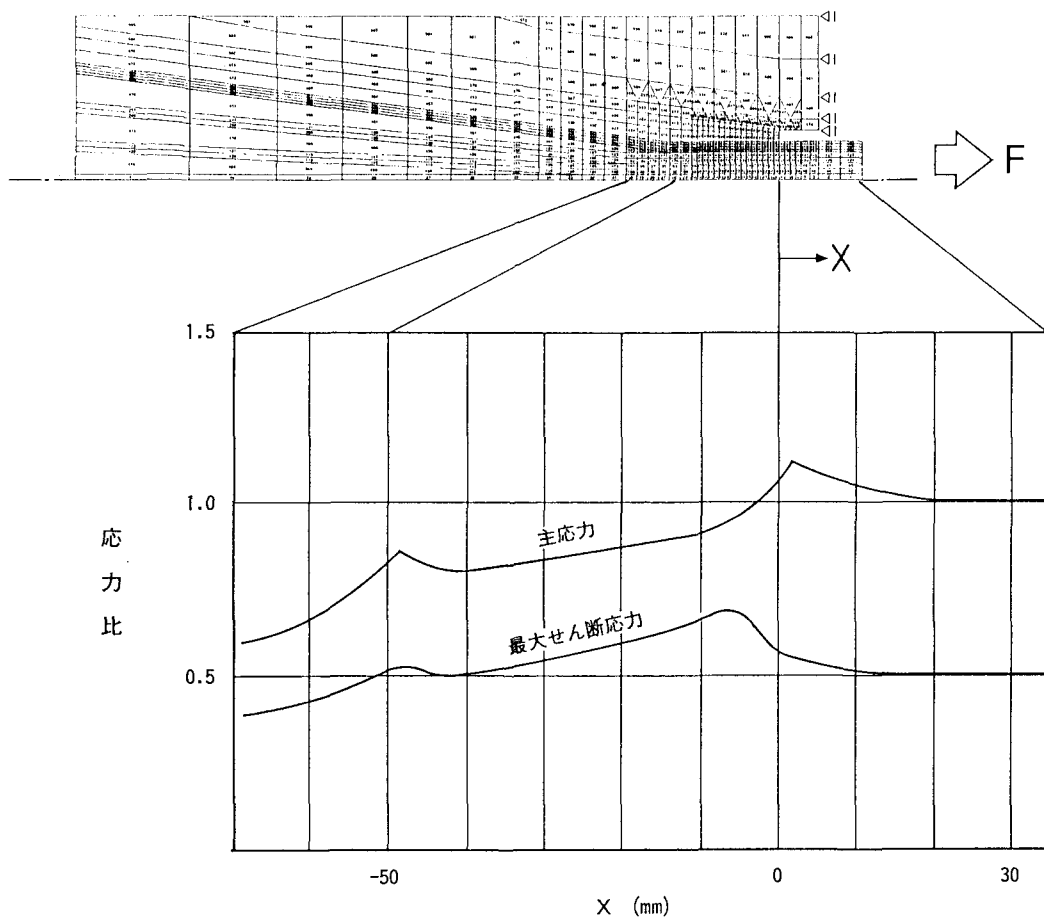
改良PWS供試体のうち2体（供試体No. 1-1, 1-2）の鑄込み部をばらし、標準PWS供試体同様断線状況を観察した。断線位置は表一4に示すとおり、ソケット内壁テーパ開始点からソケット内部へ2mmと15mmの位置であった。破断面は標準PWSの場合と同じく、ワイヤに対し約45度の角度で亀裂が入った疲労破面、ほぼワイヤに直角な最終破断面の2つの部分より成っていた。

6. 考察

以上の結果、ワイヤスプレー開始点を標準PWSよりも50mmだけソケット内部へ移動させた改良PWSで亜鉛銅合金鑄込みPWSの疲労強度を大幅に向上できる可能性のあることがわかった。



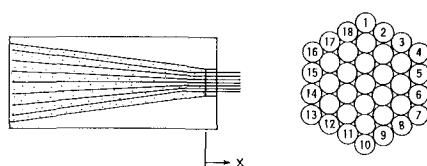
図一6 改良PWS定着部模式図



図一7 改良PWS定着部のメッシュ分割と最外層ワイヤ表面の応力分布

表一4 改良PWSの断線位置

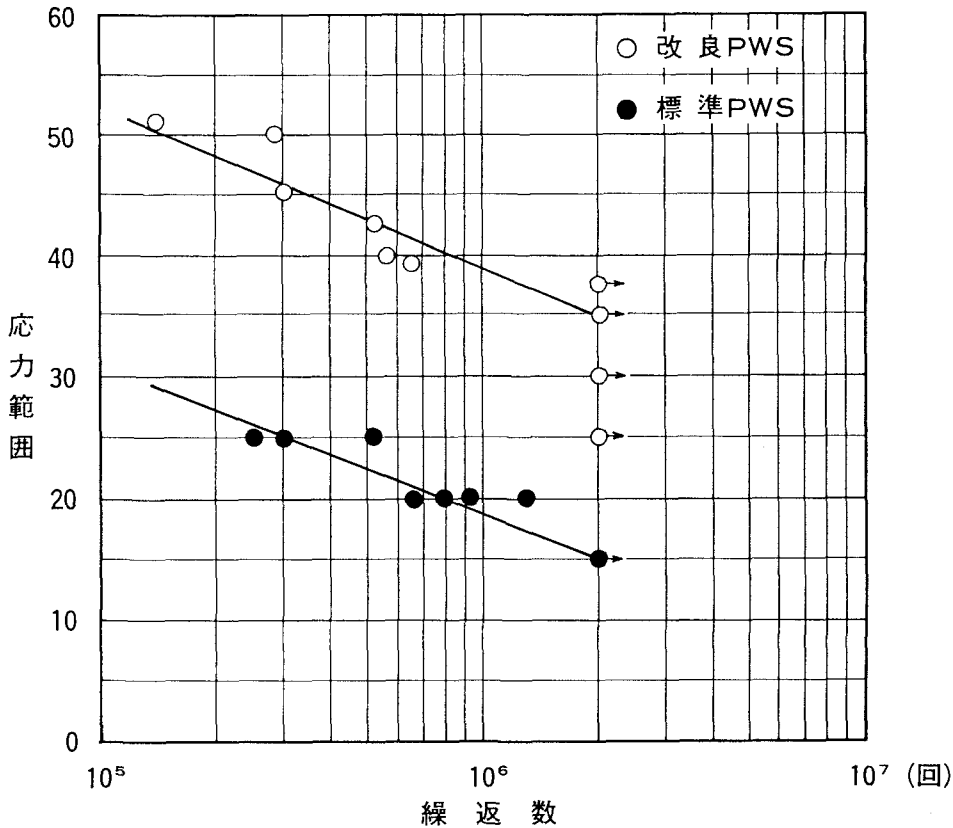
供試体No.	断線本数	断線ワイヤNo.	x (mm)
I - 1	1	1 4	- 2
I - 2	1	9	- 1 5



表—3 改良PWSの疲労実験結果 (PWS—3 7, $\phi 5.0\text{mm}$ の 180kgf/mm^2 級ワイヤ使用)

供試体No.	最大応力 kgf/mm^2	最小応力 kgf/mm^2	応力範囲 kgf/mm^2	繰返速度 cpm	繰返数 $\times 10^4$		
					1 本目 断線時	2 本目 断線時	最終 回数
I—1	81.2	56.1	25.1	240	174.0	—	200.0
I—2	81.2	50.9	30.3	180	139.0	—	200.0
I—3	81.2	46.1	35.1	180	—	—	200.0
I—4	81.2	43.7	37.5	180	68.5	—	200.0
I—5	81.2	42.7	38.5	180	62.3	64.8	64.8
I—6	81.2	41.2	40.0	180	40.6	56.2	56.2
I—7	81.2	38.7	42.5	180	50.5	52.0	52.0
I—8	81.2	36.2	45.0	180	26.2	29.8	29.8
I—9	81.2	31.2	50.0	180	23.9	28.5	28.5
I—10	81.2	28.8	52.4	180	11.8	14.1	14.1

(kgf/mm^2)



図—8 改良PWSの疲労実験結果 (PWS—3 7, $\phi 5.0\text{mm}$ の 180kgf/mm^2 級ワイヤ使用)

定着部の製作法をわずかに変化させることによって亜鉛銅合金鑄込みPWSの疲労強度に差が現れることは、新家らによって既に指摘されているところである⁵⁾。新家らは160kgf/mm²級ワイヤを用いたPWSの亜鉛銅合金鑄込み定着部を、

①従来もっとも一般的に行われている方法でワイヤスプレーを行ったもの（Aタイプ）

②ワイヤスプレー部のワイヤ曲げ加工曲率を若干緩やかにしたもの（Bタイプ）

の2種類に分けて製作し、疲労実験を実施している。さらに単線ワイヤを亜鉛銅合金鑄込みした供試体（Cタイプ）の疲労実験結果⁶⁾と比較し、次のように整理している。

a) Aタイプ、Bタイプの2百万回疲労限界は、それぞれ 20kgf/mm²、25kgf/mm²程度である。

b) Cタイプのそれは、35kgf/mm²程度である。

これらのデータも踏まえて、今回実施した本文の検討、実験結果を考察すると以下のとおりである。

(1) ワイヤの疲労強度は亜鉛銅合金鑄込み定着部で低下するが、その低下率は、曲げ加工のない単線ワイヤ、現状の製作標準よりワイヤ曲げ加工曲率を若干緩やかにしたPWS、現状の製作標準ののっとりワイヤスプレーを行ったPWS、の順に大きくなる。

(2) 亜鉛銅合金鑄込み定着部では、曲げ加工のないワイヤであっても疲労強度が低下する。その大きな原因のひとつは、ソケット内壁テーパ開始点付近におけるワイヤ表面の応力集中であると考えられる。ワイヤ破断面の観察結果からすると、鑄込み金属の楔効果に起因するワイヤ表面の最大せん断力が疲労クラックの開始に大きく関与しているようである。

(3) ワイヤスプレーを行い亜鉛銅合金鑄込みを施す通常のPWSの定着部での疲労強度低下には、ワイヤスプレー部の曲げ加工程度も関係していると考えるのが妥当であろう。すなわち、ワイヤ曲げ加工の程度が大きく、疲労クラックの開始に対する弱点部となっているところほど、より早期に疲労断線する可能性が高いようである。

(4) ワイヤ表面の応力集中度がある範囲に分布するのと同様、曲げ加工されたワイヤの疲労クラックに対する敏感度もある範囲に分布すると考えられ、それぞれの分布の相互関係によって疲労強度に差が生じるようである。たとえば、応力集中のピーク位置とワイヤの最弱点部が一致する場合に最も早期に疲労断線し、これらが相互にずれた場合には、どちらかの要因がクリティカルになって疲労断線するものと考えられる。

ワイヤ曲げ加工の個人差やプレコンプレッションによるワイヤ束押し出し量の微妙な差異で、これらの分布の相互関係がミリメートル単位で変化することは容易に起こり得る。標準PWSの疲労実験結果にかなりのバラツキが生じたのは、このような応力集中部とワイヤ弱点部のわずかなずれが原因になっているのではないかと考えられる。

(5) 上述した原因推定から、次のような改善策が考えられる。

a) 鑄込み合金の抜け出し量等に悪影響を及ぼさない範囲でソケット形状の変更を行い、ワイヤ表面の応力集中度を緩和する。

b) 応力集中箇所に位置するワイヤの曲げ加工程度を緩やかにするか、まったく曲げ加工を施さないですむ方法を工夫することにより、PWSの疲労強度を改善することができる。本文で提案した方法は、応力集中箇所に曲げ加工を施さないワイヤ部分をもっていくことであった。

7. 結論および今後の課題

本研究では、亜鉛銅合金鑄込みを行った 180kgf/mm^2 級PWS—37に対して疲労実験とFEM解析を実施し、これまでの標準PWSの疲労強度低下の原因推定と定着部の改良方法について検討した。以下にその結論を述べる。

- (1) 標準PWSの5%断線疲労強度は、 180kgf/mm^2 級ワイヤを用いた今回の実験では、応力範囲で 15kgf/mm^2 程度であり、実験結果にかなり大きなバラツキを生じた。
- (2) ワイヤ破断面の観察結果と定着部のFEM解析結果から、定着部内でのワイヤの疲労破断の原因は、ソケット内壁テーパ開始点付近におけるワイヤ表面の応力集中箇所とワイヤの曲げ加工影響部が一致していることであると推論した。
- (3) 亜鉛銅合金鑄込みを行うPWSの疲労強度改善策として、ワイヤの曲げ加工部を応力集中箇所から外すことを提案し、検証実験を行った。この結果、 180kgf/mm^2 級ワイヤを用いたPWSの5%断線疲労強度を、応力範囲で、改良前の 15kgf/mm^2 程度から 35kgf/mm^2 程度にまで改善できる可能性のあることが確認された。
- (4) 今後の課題として、次の項目が残されている。
 - ・データ数を増し、S-N曲線を完全なものとする。
 - ・過去のPWSの疲労強度実験との対応をとるために、 160kgf/mm^2 級ワイヤを用いた改良PWSで疲労実験を行う。
 - ・より大きなサイズのPWSで疲労実験を行う。今後これらの実験を実施していく予定であるが、結果については適宜報告していくつもりである。

参考文献

- 1) 土木学会編：鋼斜張橋——技術とその変遷——，1990.9
- 2) 石岡，池田，隠岐，山岡：本四架橋と鋼材，R&D神戸製鋼技報，Vol.38 No.1，pp.23-25，1988.1
- 3) M.Birkenmaier：Fatigue Resistant Tendons for Cable-Stayed Construction，IABSE PROCEEDINGS P-30/80，pp.65-79，1980
- 4) S.Nakamura，H.Hosokawa：A Study on the Fatigue Design of Parallel Wire Strands on Cable-Stayed Bridges，Proc. of JSCE No.410/I-12，pp.157-166，1989.10
- 5) 新家，広中，大石：PWSの疲労強度，R&D神戸製鋼技報，Vol.28 No.2，pp.52-54，1978.4
- 6) 山本，森脇，榊原：長大橋ケーブル用鋼線の疲労およびクリープ性状，土木学会全国大会（昭和44年），I-169，p.469

（1990年10月12日受付）