# 投稿論文（和文報告）
# TECHNICAL REPORT

土木学会論文集 No.446／I-19, pp.215~223, 1992.4

# 斜張橋用プレ防食型ケーブルの二次応力および曲げ疲労強度に関する検討

坂本良文*・北條哲男*・江口立也**・
矢野守俊**

ポリエチレンをケーブルに押出被覆したプレ防食型の斜張橋用ケーブルについて，二次応力および曲げ疲労強度を実験的に検討した．その結果，エポキシ樹脂と亜鉛銅合金を用いた二層構造ソケットは，二次応力を低減する機能があることが判った．さらに無破断となる曲げ被労強度は繰り返し回数200～300万回において，曲げ角度で±0.6°程度であることが判った．曲げ疲労破断位置についても数値解析を行って検討した．
***Keywords*** : *cable-stayed bridge, cable fatigue, secondary bending stress*

## 1. はじめに

近年の斜張橋ケーブルはほとんどモノストランドから成るマルチケーブルであり，基本的な力学特性として高い引張強さや弾性係数，高い疲労強度が求められる．加えて，架設現場でのグラウト注入などの防食工事の省力化，風荷重低減などからケーブルの小径化，良好な施工性などが要求される．これらに応えるケーブルとして，最近では，鋼線の亜鉛めっきから樹脂等による表面の防食加工までをケーブル製作工場内ですべて行い，クランプ等で簡単に掴み吊り上げ可能な架設作業性の良いプレ防食タイプのケーブルが増加傾向にある．樹脂系の防食材料としては耐候性などの諸性質に優れ比較的安価なポリエチレンを用いたタイプが多い[1),2)]．

斜張橋の長スパン化とともに目立ってきたのがケーブル振動であり，ポリエチレンを表面防食層としたケーブルに風雨時激しい振動（レインバイブレーション）が観測されて以来[3)]，通行者に与える不安感やソケット部でのケーブル曲げ疲労防止のためにも重要な問題として着目されている[4)]．そして，レインバイブレーションなどの振動現象や制振対策に関する研究[4)~6)]が積極的に行われ，実橋においても制振効果が得られつつある．

これらの対策においては，ケーブルの有する曲げ疲労強度と振動程度を対比した上で制振要否，制振程度，制振すべき時期などが検討されることが一層望ましいと考えられる点から，曲げ疲労強度を把握しておく必要があると思われる．さらに，斜張橋の長大化が進むにつれ，塔，桁とケーブルの連成効果によるケーブル振動なども無視できない問題となる可能性の指摘[7)]がある点からも，曲げ疲労強度を把握する重要性は高まっていると考えられる．

しかし，橋梁用ケーブルの曲げ疲労強度に関する実験報告は極めて少ない現状にある．今までの代表的な研究としては，3種類の実物大ロープを用いた曲げ疲労実験の報告[8)]があるが，いずれも実橋での利用方法を踏まえてソケット前面位置に曲げ緩衝材を設けた実験であり，曲げ疲労上の弱点となるソケット部には着目していない．特にソケット部での曲げ角度をパラメーターとした曲げ疲労実験の報告は見られない．

以上の状況を鑑みて，ケーブルの角折れ対策や制振対策などを検討する上で必要と考えられる二次応力と曲げ疲労強度に関するデータを得ることを目的とし，著者らが開発したプレ防食タイプの斜張橋用ケーブルの曲げ実験と曲げ疲労実験を行ったので報告する．

## 2. 実験に用いたケーブルの概要

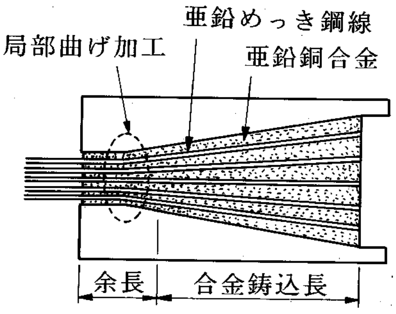
### （1） 引張疲労強度の向上を図ったソケット

吊橋主ケーブルの平行線ストランド（PWS）をはじめ各種ロープ定着用ソケット（図—1）には，鋳込材料として亜鉛銅合金(Zn 98 Cu 2)を用いた合金止めソケットが多用されている．その理由は，クリープ性状と機械的性質が優れていること，亜鉛めっき鋼線（以下素線と言う）に対する付着性が良いこと，溶融点は高いが鋳込作業が容易であること，更には比較的安価であることである．素線の引張疲労限が $\Delta\sigma=40\sim45$ kgf/mm$^2$（392～441 MPa）と高いPWSにおいて，この定着型式（図—1）を用いる場合の疲労強度は，素線と比べ2/1以下に低減し $\Delta\sigma=15\sim20$ kgf/mm$^2$（147～196 MPa）[9)~12)]である．

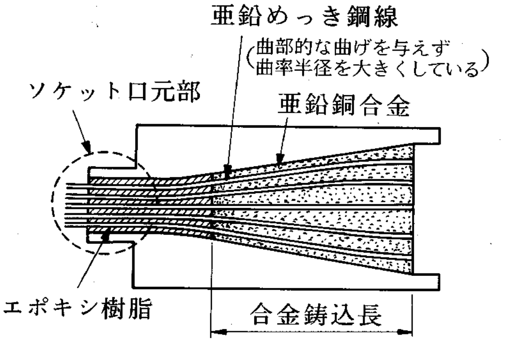
疲労強度低下の要因として以下の事項が考えられているが，実際にはこれらの要因が絡み合っていると思われる[13)]．

第1の要因は，微動腐食による疲労強度の低下である．

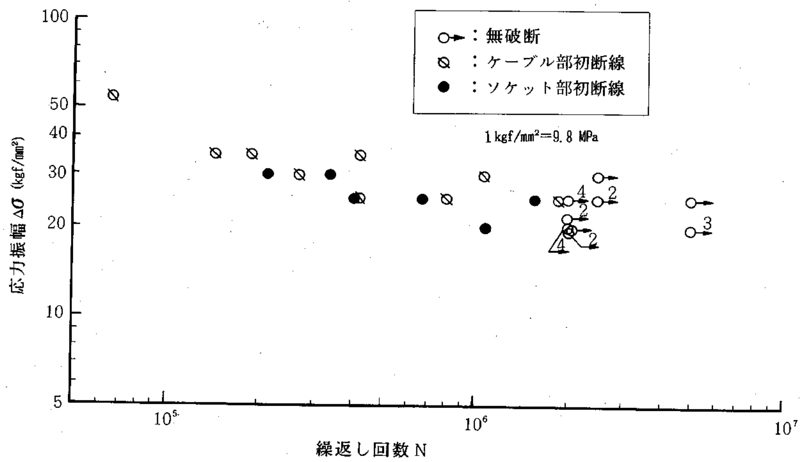
＊正会員　新日本製鐵(株) 橋梁構造部
（〒100-71　千代田区大手町2-6-3）
＊＊同上




図—1　一般的な合金止めソケット




図—2　二層構造ソケット




図—3　本ケーブルの引張疲労実験結果

図—1に示したソケット口元部で，素線同志あるいは素線と鋳込合金との間で微動腐食現象が生じ，疲労強度が低下する．

第2の要因は曲げによる疲労強度の低下である．楔状の定着部を作成するために，素線は局部的な曲げ加工を受けソケット内で拡げられている．このため，素線には張力が導入されると二次的な応力が付加され，更には側圧も増加するから疲労強度が低下する．

第3の要因は熱影響である．亜鉛銅合金は溶融点が高く，さらにソケット内の素線間のわずかな間隙にも鋳込む必要性から，460°±10°C の熱間鋳込み作業を行っており，素線が熱影響を受け疲労強度は低下する．

以上の事項を踏まえて著者らは，図—2に示すようなエポキシ樹脂と鋳込合金とから成る二層構造の疲労強度向上を図ったソケット（以下二層構造ソケットと言う）を開発している．その特徴は以下の通りである．

① 間隙の少ないソケット口元部にも常温にて充塡可能で浸透性が良く，耐微動腐食性に優れているエポキシ樹脂を使用していること．

② このため，素線が応力集中を受けるソケット口元部で熱影響が避けられていること．

③ ソケット口元部の素線曲げ形状をなめらかにすることで局部的な応力集中を避け，合わせて側圧の軽減を図る様にしていること．

④ ソケット内，特に口元部の素線同志の接触を避けるためと，合金を素線間隙に完全に充塡させるために，規則正しい素線配列が成されていること．

**（2） プレ防食されたケーブル**

PWS のように素線が全く平行に集束されているケーブルは，断面の形崩れや偏平化を避けてリールに巻き取ることは出来ない．従って，円形断面を保ったままポリエチレン被覆加工を施すことは難しい．そこで，ケーブルの引張強度及び弾性係数が，完全な平行線ケーブルに比べて低下しない程度の撚りを加えることでこれらの点を解決している．

**（3） 本ケーブルの引張疲労強度特性**

一般にケーブルの疲労強度は，その端末定着であるソケットに支配される．そこで，二層構造ソケットの疲労強度を把握するために，著者らが行った引張疲労試験と今迄発表済のデータ[1),15)]を含め図—3に示す．これらのデータを基に本ケーブルは，以下の引張疲労強度特性を有すると言える．

表—1　供試体寸法

| 供試体 No. | ケーブル サイズ | ケーブル断面積 (mm²) | Lo (mm) | Lc (mm) | Ls (mm) | $L_1$ (mm) | Do (mm) | Ds (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7× 31 | 1193 | 1640 | 2380 | 370 | 272 | 54 | 256 |
| 2 | 7× 31 | 1193 | 1640 | 2380 | 370 | 272 | 54 | 256 |
| 3 | 7× 85 | 3271 | 5426 | 6000 | 450 | 287 | 81 | 280 |
| 4 | 7×139 | 5349 | 5426 | 6000 | 532 | 287 | 106 | 280 |
| 5 | 7×139 | 5349 | 5426 | 6000 | 532 | 287 | 106 | 280 |
| 6 | 7×139 | 5349 | 5426 | 6000 | 532 | 287 | 106 | 280 |
| 7 | 7×139 | 5349 | 5426 | 6000 | 532 | 287 | 106 | 280 |
| 8 | 7×139 | 5349 | 5426 | 6000 | 532 | 287 | 106 | 280 |
| 9 | 7×139 | 5349 | 5426 | 6000 | 532 | 287 | 106 | 280 |

①　繰返し回数200～500万回で無破断となる疲労強度は$\Delta\sigma$=20～30 kgf/mm² (196～294 MPa) であり，直径7 mmφ亜鉛めっき鋼線の疲労限$\Delta\sigma$ = 40 ～ 45 kgf/mm² (392～441 MPa) に比べ約1/2の疲労強度である，しかし，この値は，合金止めソケットを用いたPWSに比べると高い．

②　断線は，ソケット口元部に集中することなくケーブル部にも生じている．特に初断線の位置は，ケーブル部とソケット部にほぼ同じ割合で生じていることから，引張疲労に対して二層構造ソケット部がケーブル部より劣ることなく同等である．

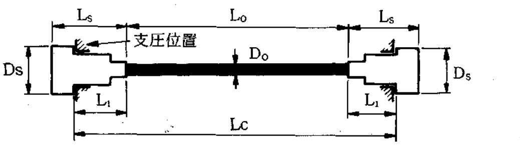
## 3.　実験の概要

### (1)　供 試 体

供試体は，直径7 mmφの亜鉛めっき鋼線を31本，85本，139本集束し，それぞれの最外層素線で3.5°の撚り角度を（中心の素線は真直）与え，断面形状保持のためにテープを巻付け，その上に高密度ポリエチレンを押出被覆（以下PE層と言う）したケーブルである．定着は，No. 9の片側を除いて全て二層構造ソケットである．なお，7 mmφの139本とした理由は，現在我国で引張疲労試験可能な最大サイズのケーブルと同じにしたためである．

供試体寸法を表—1に，供試体概要図を図—4に示す．なお，以下に述べる曲げ実験と曲げ疲労実験では同じ供試体を用いた．すなわち1つの供試体で曲げ実験終了後，直ちに曲げ疲労実験を行った．供試体のうち，No. 1と2は昭和62年，No. 3～9は平成2年に行った．No. 1～9の供試体において，曲げ実験時にケーブル導入張力と曲げ変形に伴う二次応力を測定するため，図—5に示す位置の最外層の素線に一軸歪ゲージを貼付けた．No. 9ではソケット内部の二次応力を把握するために両端ソケット内の素線にも一軸歪ゲージを貼付けた．なお，No. 9では二層構造ソケット内のエポキシ樹脂が，二次応力および曲げ疲労強度へ及ぼす影響を調査するため，片側ソケットにのみエポキシ樹脂を注入して反対側には注入していない．

### (2)　曲 げ 実 験




図—4　供試体概要図

実験は，写真—1に示す実験治具を作成し行った．ケーブル中心の掴み部には，No. 1と2では直径50 mmの丸鋼を，No. 3～9では曲率半径2 000 mmを付けた鋼製クランプを用いてケーブルを上下にボルト締めした．

実験時の計測項目は，曲げ変形を与える前のケーブル張力，曲げ変形に伴う二次応力およびケーブルの鉛直変位量である．

ケーブル張力の導入は，センターホールジャッキによって引込だ状態で支圧板と実験治具との間にシム板を挿入後，ジャッキを開放することにより行った．ケーブル引込み時の初期荷重は，支圧板等の片当りによるガタを除去するためにNo. 1～2で5 tonf，No. 3～9で20 tonfとし，この時歪ゲージのイニシャル値を取った．以降，ほぼ定ピッチでジャッキ圧力から換算した張力と歪ゲージ値との直線関係を全供試体について求めた．ジャッキ開放後に歪ゲージ値を測定し，この関係直線から求まるケーブル張力に初期荷重を加算して導入張力とし，表—2に示す引張応力（以下一次応力と言う）を算出した．

二次応力は，縦型疲労試験機でケーブル中心に静的な鉛直上下変位を与えることにより発生させた．各供試体について与えた鉛直変位および式（1）で定義した曲げ角度を表—2に示す．

$$\theta_b = \tan^{-1}\left(\frac{\delta_c}{L_c/2}\right) \cdots\cdots (1)$$

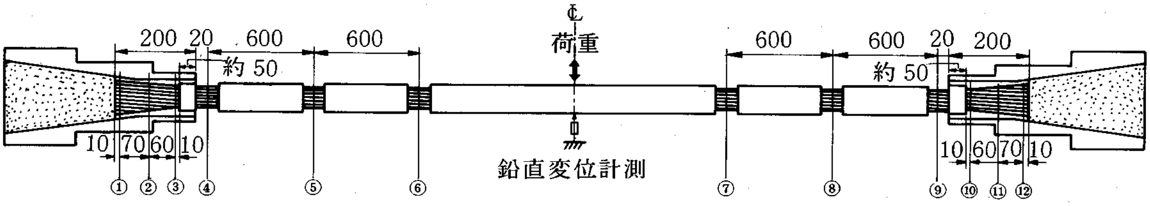
ここに，$\theta_b$；曲げ角度，$\delta_c$；ケーブル中心の鉛直変位，$L_c$；ケーブル支持間長

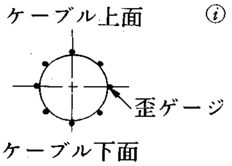
### (3)　曲げ疲労実験

表—2に示す各供試体毎一定の鉛直変位および繰返し速度を与え，変位制御により曲げ疲労実験を行った．

実験中の計測項目は，素線の断線有無，断線位置および断線時の繰返し回数である．断線検出は，加速度センサーを両側ソケットに貼付けて，断線時に発生する衝撃波を捕えることにより行った．断線位置は，衝撃波が両側センサーに伝わる時間差を計測することにより推定した．

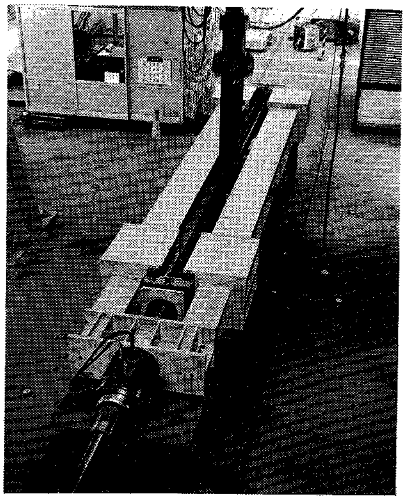
なお，断線位置の推定には，著者らの今までの経験から ±100 mm程度の誤差を生じることが判っているので，正確な破断位置を把握するために実験後ソケットからケーブルを抜取って調査した．曲げ疲労実験の状況を写真—1に示す．なお，曲げ疲労実験中の二次応力の計




ⓘ：歪ゲージ貼付断面（ケーブル円周方向に８点）
供試体No.１～２は④と⑨のみ（但し，ソケット口元先端から100mm）にゲージ貼付
〃　No.３と５～８は④のみにゲージ貼付
〃　No.４は④～⑨のみにゲージ貼付
〃　No.９は①～⑫すべてにゲージ貼付

図―5　歪ゲージ貼付位置

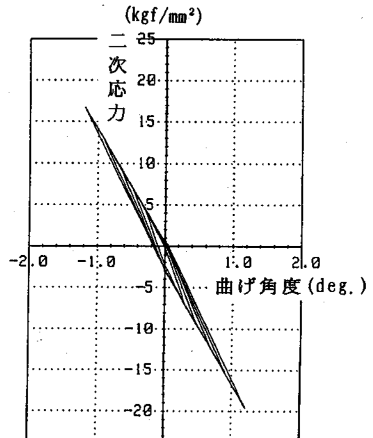


写真―1　曲げ疲労実験状況

表―2　曲げ疲労実験条件

| 供試体 No. | 導入張力 (tf) | 導入応力 (kgf/mm²) | 鉛直変位 (mm) | 曲げ角度 (deg.) | 繰返し速度 (Hz) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 76.4 | 64.0 | ± 8.0 | ±0.5 | 6.0 |
| 2 | 76.4 | 64.0 | ± 8.0 | ±0.5 | 6.0 |
| 3 | 307 | 93.8 | ±31.5 | ±0.6 | 1.7 |
| 4 | 285 | 53.3 | ±63.0 | ±1.2 | 0.9 |
| 5 | 300 | 56.1 | ±42.0 | ±0.8 | 1.4 |
| 6 | 300 | 56.1 | ±31.5 | ±0.6 | 1.5 |
| 7 | 305 | 57.0 | ±52.5 | ±1.0 | 1.0 |
| 8 | 320 | 59.8 | ±37.0 | ±0.7 | 1.6 |
| 9 | 305 | 57.0 | ±73.5 | ±1.4 | 0.8 |

尚，曲げ実験時の曲げ角度は適当に変化させた。　1 kgf/mm²=9.8 MPa




図―6　二次応力の履歴

測は行っていない．

## 4.　実験結果と考察

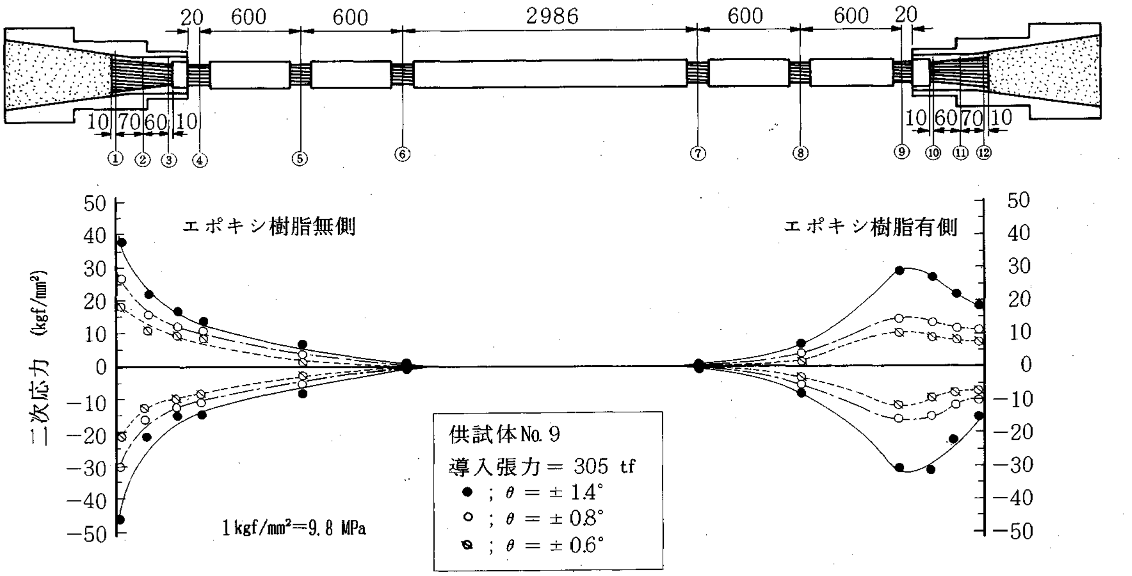
### (1)　二 次 応 力

a)　二次応力分布

本論文の二次応力とは，以下の様に定義した．

ケーブルに鉛直変位を与えた状態では，導入軸力による一次応力，鉛直変位に伴う付加引張応力，ケーブル全体としての曲げモーメント，および素線の曲げ応力が発生する．計測した歪値にはこれらのケーブル軸方向の応力に対応する歪が加算されている．そこで，導入張力に付加張力が加算された状態に相当する歪を，鉛直変位付与後での全歪ゲージ値の平均値と考え，この平均値とケーブル上縁および下縁の歪ゲージ値の差に弾性係数20 000 kgf/mm² (196 000 N/mm²) を掛けて算出した応力，すなわち，ケーブル全体としての曲げモーメントと素線の曲げ応力の和に相当する応力を二次応力とした．但し，以下に述べるような残留応力は考慮していない．

ケーブルが曲げを受けると素線相互に滑りを生じ，曲げを除去しても素線相互の摩擦により滑り量が完全に復元されない．このことは，図―6 に示す二次応力と曲げ角度の関係から判る．同図は供試体 No. 4 のソケット口元先端近傍断面（図―5 の④位置）での二次応力であり，曲げ角度が 0°，すなわち曲げを受けていない状態においても応力がゼロに戻っていない．本論文では図―6 の原点からの応力を二次応力としており，この戻らない応




図—7　二次応力分布

力（残留応力）を差し引いてはいない．

次に，ケーブル長手方向の二次応力分布を図—7に示す．ソケット内の分布は，エポキシ樹脂の有無で全く異なっている．エポキシ樹脂が有る場合，二次応力の最大値はソケット口元先端近傍で発生し，二次応力は亜鉛銅合金との境界に近づくに従い低減している．しかし，エポキシ樹脂のない場合では，亜鉛銅合金との境界において二次応力が最大になっている．その値はエポキシ樹脂が有る場合の最大値よりも大きい．例えば $\theta=0.6°$ の場合には約1.4倍になっている．この相異として，エポキシ樹脂が素線の横方向（ケーブルと直角な方向）変位を弾性的に支持していることが考えられる．

また，ケーブル部ではソケットから1m程度離れると二次応力は，無視しうる程度までに小さくなることが判る．

b）二次応力と曲げ角度の関係

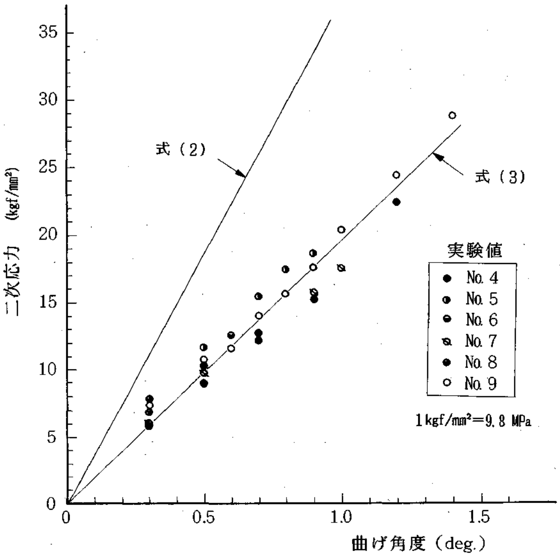
供試体No. 3～9で計測したソケット口元先端部（図—5の歪ゲージ貼付断面④）での二次応力と曲げ角度の関係を図—8に示す．但し，No. 9ではエポキシ樹脂を注入した側のソケットでの値である．縦軸に応力の絶対値を，横軸に曲げ角度の絶対値を示した．ケーブルを円形の棒とみなした時のWyattの式[16]を式（2）に示す．

これに対し本実験で得られた二次応力は，最小二乗法で曲げ角度と二次応力との関係を求めた結果，式（3）に表すことができた．

$$\sigma_b=2\theta_b\cdot\sqrt{E\cdot\sigma_t} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，$\sigma_b$；二次応力，$\theta_b$；曲げ角度（rad），$E$；弾性係数＝20 000 kgf/mm²（196 000 N/mm²），$\sigma_t$；一次応力．

$$\sigma_b=19.2\cdot\theta_b \quad \cdots\cdots(3)$$



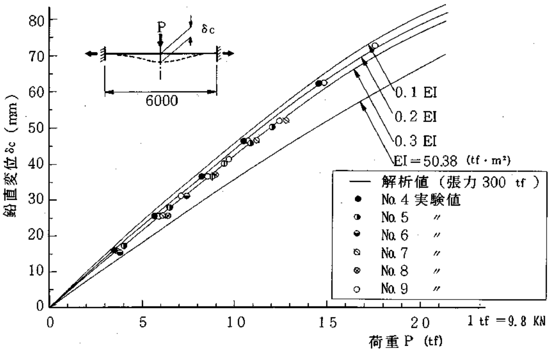

図—8　二次応力と曲げ角度の関係

ここに，$\sigma_b$；二次応力（kgf/mm²），$\theta_b$；曲げ角度（deg）

図—8に示す式（2）の二次応力は，一次応力 $\sigma_t$ として表—2に示す実験値の平均値56.6 kgf/mm²（555 MPa）を代入して算出した．

式（3）は，式（2）に比べかなり低い二次応力を与える．この差が生じる理由としては，式（2）が素線間の滑りを無視した丸棒とした扱いであることに対し，実際には滑りを伴うこと，およびエポキシ樹脂がケーブルを弾性的に支持しているため，ケーブルを固定支持とした式（2）とは境界条件が異なることが挙げられる．

なお，ケーブルの二次応力特性を詳細に検討するため




図―9　本ケーブルの曲げ剛性（7×139）

には，ケーブル全体としての曲げモーメント，素線の曲げ応力それぞれについて定量的な把握が必要であるが，実用上は，これら両者の値が合わさった二次応力の表示式（3）を用いても特に支障はないと考えられる．

### （2） 曲げ剛性

曲げ実験時のケーブル中心鉛直変位と横荷重の実測値および解析値を図―9に示す．解析では，ケーブルを一様な曲げ剛性を持つ両端固定梁とし，導入張力は温度荷重として与えた．解析は有限変位解析である．同図から，本ケーブルの曲げ剛性は，素線間の滑動がないことを前提として各素線の中立軸からの距離を算出して求めた曲げ剛性(50.38 ton・m²)に対し20～30％程度であり，ケーブルと同径の充実した丸鋼に対しては，15～20％程度である．

### （3） 曲げ疲労強度

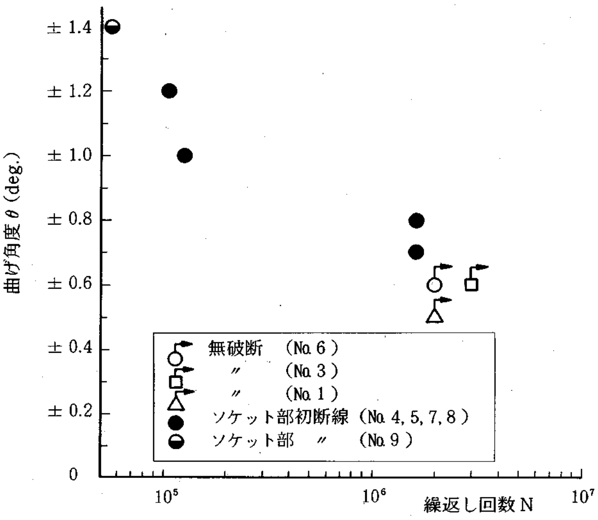
a）曲げ角度と曲げ疲労強度の関係

全供試体について，二次応力振幅，初断線時の繰返し回数などを表―3に示す．また，ソケット部での初断線時の繰返し回数と曲げ角度の関係を図―10に示す．これより，本ケーブルの無破断となる曲げ疲労強度は，繰返し回数200～300万回において，±0.6°であることが判った．

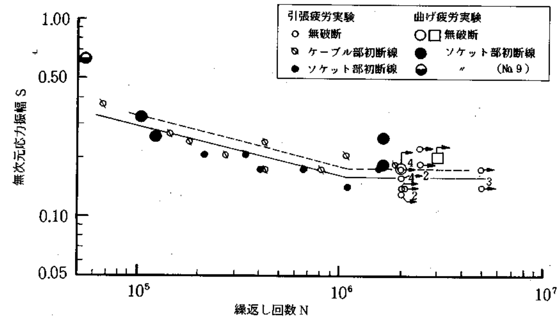
しかし，曲げ疲労強度の角度表示では，一次応力が高い状態で無破断となった供試体No.3と一次応力が低いその他の供試体との相異が考慮されないことから，一次応力の影響を考慮した無次元応力振幅$S$[15]（式（4））を用いて，$S$と繰返し回数$N$との関係を図―11に示した．なお，曲げ疲労で無破断となった時のソケット口元先端での二次応力振幅が，引張疲労で無破断となった応力振幅（図―3参照）と近いため，図―11には引張疲労試験データも式（4）を用いて整理した結果を示した．

$$S=\frac{(\Delta\sigma/\sigma_u)}{\{1-(\sigma_m/\sigma_u)^2\}} \quad\cdots\cdots(4)$$

ここに，$\Delta\sigma$；二次応力振幅，$\sigma_m$；平均応力（一次応力＋曲げ変形時の付加引張応力），$\sigma_u$；引張強さ（＝160 kgf/mm²）




図―10　曲げ疲労強度（$\theta$-$N$関係）




図―11　曲げ疲労強度（$S$-$N$関係）

その結果，無破断時の曲げ応力振幅$S$は0.180となった．この値は，引張疲労の無破断時の応力振幅$S$＝0.131～0.225の間にあり，これらの平均値0.160に比べると，わずかに高いのみであること，さらに，曲げ疲労実験の$S$-$N$曲線は，引張疲労実験の$S$-$N$曲線に比べ高いレベルにあるものの，傾きも大きく異ならないことから，本ケーブルの曲げ疲労強度と引張疲労強度には相関性があるように思われる．しかし，曲げ疲労のデータ数が少ないことおよび曲げ疲労状態と引張疲労状態では，応力性状が異なるため，両者の相関性を論ずるには，今後詳細な検討が必要である．

b）曲げ疲労破断位置

No.2と5のみケーブル中心掴み部に破断が起こり，他の供試体ではソケット内部で破断した．No.2では掴み治具の形状が悪く素線に異常な側圧が作用したためと思われる．No.5では，掴みクランプのボルト軸力が高過ぎ，No.2と同様素線に異常な側圧が作用し，初断線したものと思われる．引張疲労時の破断位置は，先述の通りソケット部に集中しないことが本ケーブルの特徴であるが，本曲げ疲労実験ではソケット口元先端から20

表―3　曲げ疲労実験結果

| 供試体No. | 二次応力振幅(kgf/mm²) | 平均応力(kgf/mm²) | 無次元応力振幅 S | 疲労破断素線本数 | 素線破断時繰返し数(×10⁴) | 素線破断位置 | 最終繰返し数(×10⁴) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12.8 | 64.5 | – | 無破断 | – | – | 200 |
| 2 | 11.4 | 64.5 | – | 1 | 18.0 | 荷重載荷点 | 200 |
| 3 | 20.9 | 94.5 | 0.201 | 無破断 | – | – | 298 |
| 4 | 44.9 | 57.3 | 0.322 | 1 | 10.5 | ソケット口元内部 | 17.4 |
| | | | | 2 | 11.6 | 〃 | |
| | | | | 3 | 12.3 | 〃 | |
| | | | | 4 | 13.7 | 〃 | |
| | | | | 5 | 15.8 | 〃 | |
| | | | | 6 | 16.0 | 〃 | |
| | | | | 7 | 17.0 | 〃 | |
| | | | | 8 | 17.4 | 〃 | |
| 5 | 35.0 | 57.3 | 0.251 | 1 | 103 | 荷重載荷点 | 209 |
| | | | | 2 | 164 | ソケット口元内部 | |
| | | | | 3 | 171 | 〃 | |
| | | | | 4 | 186 | 荷重載荷点 | |
| | | | | 5 | 201 | ソケット口元内部 | |
| | | | | 6 | 202 | 荷重載荷点 | |
| 6 | 25.1 | 56.9 | 0.180 | 無破断 | – | – | 202 |
| 7 | 35.3 | 59.2 | 0.256 | 1 | 12.3 | ソケット口元内部 | 36.3 |
| | | | | 2 | 13.6 | 〃 | |
| | | | | 3 | 14.7 | 〃 | |
| | | | | 4 | 18.7 | 〃 | |
| | | | | • 5 | 20.0 | 〃 | |
| | | | | 6 | 29.3 | 〃 | |
| | | | | 7 | 30.7 | 〃 | |
| | | | | 8 | 34.8 | 〃 | |
| 8 | 25.6 | 61.0 | 0.187 | 1 | 164 | ソケット口元内部 | 217 |
| 9 | 85 | 62.0 | 0.625 | 1 | 5.51 | ソケット内鋳込面 | 7.68 |
| | | | | 2 | 5.64 | 〃 | |
| | | | | 3 | 6.50 | 〃 | |
| | | | | 4 | 6.62 | 〃 | |
| | | | | 5 | 6.76 | 〃 | |
| | | | | 6 | 7.10 | 〃 | |
| | | | | 7 | 7.63 | 〃 | |
| | | | | 8 | 7.68 | 〃 | |

注記・平均応力＝一次応力＋曲げ変形に伴う付加引張応力。
・供試体No. 1～2の　ゲージ位置はソケット口元から100mm離れており，二次応力振幅がNo. 3～8に比べ低いため検討外とした。
・供試体No. 9の二次応力振幅，平均応力，無次元応力振幅は，ソケット内鋳込境界面での値である。

～50 mm 内側に入った位置に集中した．ケーブル断面でみると最外層のほぼ上下の素線に破断が起こった．特に，エポキシ樹脂が無い時には，二次応力が最大となっている亜鉛銅合金面に集中した．疲労破断位置の代表例を図―12 に示す．

静的な曲げ実験では，ソケット口元先端近傍に最大二次応力が発生したにもかかわらず，曲げ疲労実験での素線破断位置が，ソケット口元先端から 20～50 mm 内側に入った位置に集中した理由として以下のことが考えられる．

PE 層にはケーブル軸方向と円周方向の残留応力が存在し，円周方向の残留応力によりケーブルは PE 層で締め付けられ拘束されている．静的な曲げ実験で与えた曲げ変形の回数程度ではポリエチレンの温度上昇が微少であったため残留応力の低下がなく，締付け力は低下しなかった．しかし，曲げ疲労実験時には，多くの大きな繰返し変位を受けて温度が上昇したことが原因で，鉄に比べ温度依存性が高い[1),14)] PE 層が軟化し，締付け力も低下した．そのため，ソケット口元内部にある長さ約 50 mm の PE 層の，ケーブル横方向 (ケーブル直角方向) 拘束程度が低減した．その結果，弾性係数や硬度の高いエポキシ樹脂側に最大二次応力の発生位置が移動したものと考えられる．本実験では素線に歪ゲージを貼るために PE 層の一部を輪切りにしているため，特に残留応力の低下による拘束程度の低減があったと思われる．

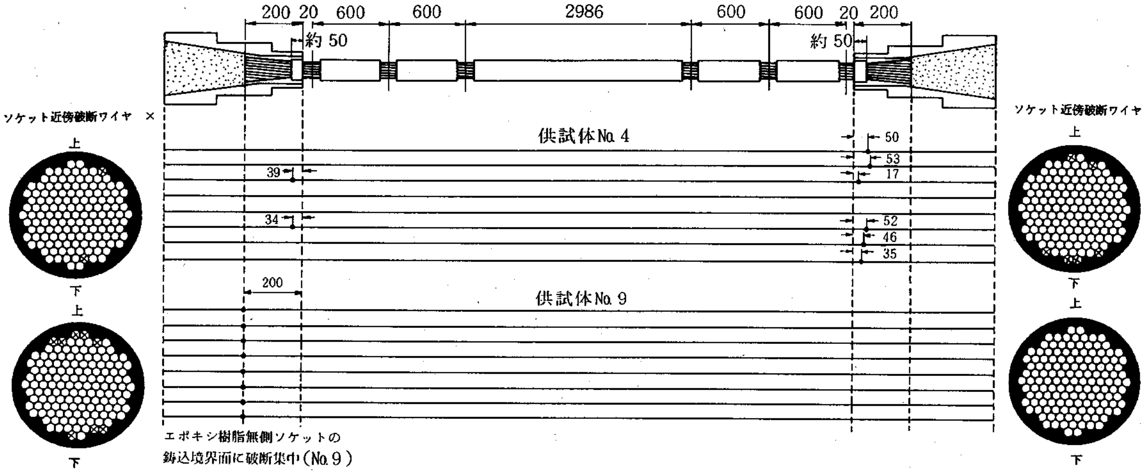
曲げ疲労破断位置と二次応力のピーク値発生位置との関係をより明らかにする試みとして以下の数値解析を行った．

### (4) 数値解析による破断位置の考察

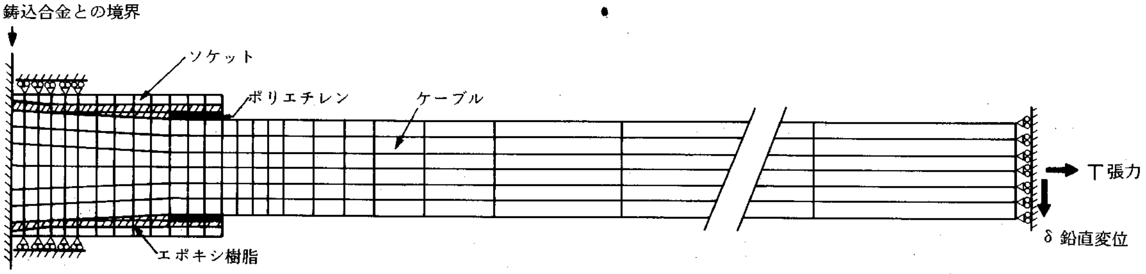
a) 解析モデル

ソケット内部の二次応力分布，特に曲げ疲労破断位置での二次応力とソケット内に在る PE 層のケーブル拘束程度との関係を調べる為に，図―13 に示す平面応力モデルを考え，PE 層の弾性係数を変化させることで拘束程度の相異を考慮することとした．ケーブルの二次応力を詳細に解析するためには，素線間の滑動を考慮する必要があるが，本解析は，上記の関係について考察を加えることを目的としているため，詳細な解析を省きこれを考慮せずケーブルを滑りのない弾性体として扱った．

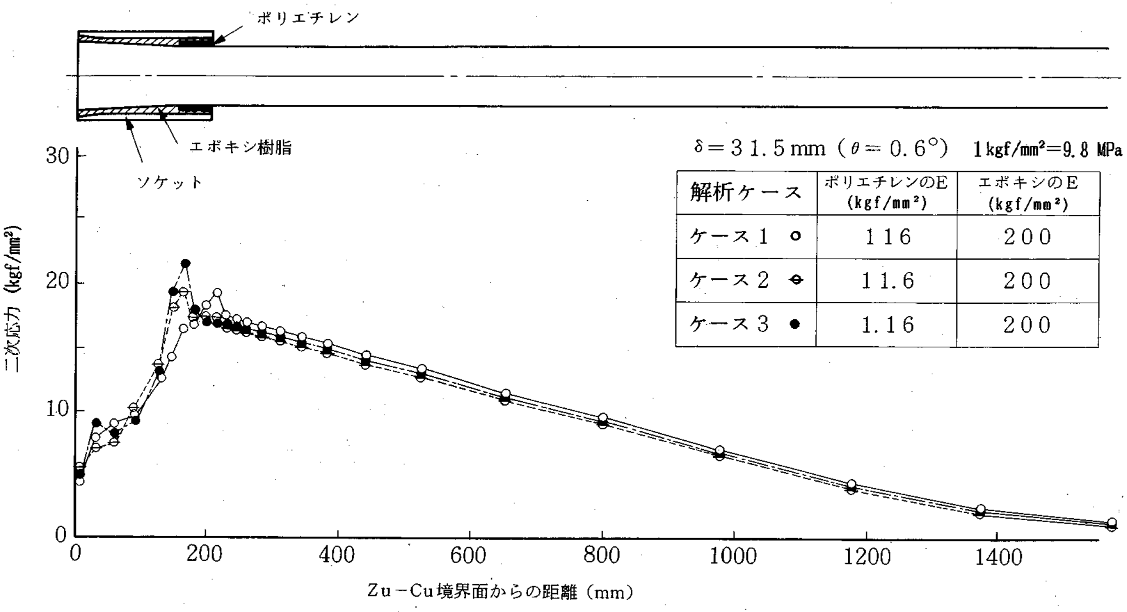
解析対象のケーブルサイズは，曲げ実験に使用したサイズ 7×139 である．モデル化対象範囲は，ソケット内の鋳込合金とエポキシ樹脂との境界面から，曲げ実験の




図—12　曲げ疲労破断位置図




図—13　二次応力解析モデル




| 解析ケース | ポリエチレンのE (kgf/mm²) | エポキシのE (kgf/mm²) |
|---|---|---|
| ケース１ ○ | 116 | 200 |
| ケース２ ⊖ | 11.6 | 200 |
| ケース３ ● | 1.16 | 200 |

図—14　二次応力解析結果

荷重載荷点までとした．ケーブル部のPE被覆層を除き本ケーブルを構成する材料は全て考慮した．

円形なケーブルおよびソケットを２次元でモデル化する際，次の点に留意した．解析では，ソケット上縁と下縁の鉛直変位量が実際の構造と異なることが予想される．そこで，ソケットの上下内側同志を平面応力要素で連結させ，上下の変位量が小さく成るようにした．実際のケーブルでは，素線の滑動が存在するため解析モデル

として曲げ剛性と伸び剛性の両方を忠実にモデル化することは難しい．そこで，断面積とケーブル直径のみを実ケーブルと合せた．

曲げ角度は，ケーブル張力を導入した状態でケーブル先端に鉛直変位を与えて発生させた．

b）解析結果及び考察

ケーブルサイズ7×139のモデルにおいて，PE層の弾性係数を変化させ曲げ角度0.6°，一次応力56.0 kgf/mm²（549 MPa）を与えた場合に得られた二次応力を図—15に示す．同図の応力は，ケーブル上下縁の要素での最大主応力である．

図—14から，PE層の弾性係数が高いケース1では，最大の二次応力がソケット口元先端に発生するが，弾性係数を小さくしたケース2, 3ではソケット内部のPE層後端側（鋳込合金側）に発生している．

すなわち，PE層のケーブル拘束程度が小さいと二次応力のピーク値がソケット内部に移ることが判る．このことは，曲げ疲労時に，ソケット内部のPE層のケーブル拘束程度が低減し，最大二次応力がPE層後端（ソケット口元先端から約50 mm内側に入った位置）に発生した結果，疲労破断がこの位置近傍に集中したことを裏付けていると考えられる．

尚，解析値は実験値に比べ高くなっており，ケーブル長手方向の分布も直線的に減少している．この差は，ケーブルの曲げ剛性の評価，すなわち素線の滑動を考慮していないために生じたと考えられる．

## 5. まとめ

著者らが開発したプレ防食タイプの斜張橋用ケーブルについて，実物大ケーブルを用いた曲げ実験と曲げ疲労実験を実施し，二次応力と曲げ疲労強度を実験的に求めた．さらに，ソケット内部およびソケット口元近傍の二次応力について有限要素法による解析を行い，曲げ疲労破断位置がソケット内部に集中した原因を考察した．得られた成果を要約すると以下のようになる．

（1）本ケーブルの二次応力およびその分布を実験的に求めた結果，二層構造ソケットではソケット口元近傍のケーブル上下縁に最大二次応力が発生し，ソケットから1 m程度離れると二次応力は無視できる．更に，最大二次応力は曲げ角度と比例関係にある．

（2）エポキシ樹脂を用いた二層構造ソケットは，通常の合金止めソケットに比べ二次応力低減を図った構造である．

（3）本ケーブルの無破断となる曲げ疲労強度は，繰返し回数200～300万回において，曲げ角度で±0.6°程度である．

（4）二次応力の数値解析を行った結果，本ケーブルの曲げ疲労破断位置はソケット内のPE層の拘束程度によって支配されたと考えられる．

### 参考文献


1) 俵矢他：斜張橋ケーブル NEW-PWS の開発とその実用化，製鉄研究，332号，1989年1月．
2) 俵矢他：斜張橋ケーブル NEW-PWS の力学的諸特性，製鉄研究，324号，1987年1月．
3) 樋上琇一：斜張橋ケーブルの Rain Vibration，日本風工学会誌，27号，1986．
4) 松本・白石他：斜張橋ケーブルの空力振動に関する研究，土木学会論文集，416，1990.4．
5) 国土開発技術研究センター：斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討報告書，1989年2月．
6) 米田・前田：ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数設定に関する一考察，土木学会論文集，410，1989.10．
7) 藤野陽三：構造物の制振対策（土木分野），日本風工学会誌，44号，1990.7．
8) 岸本・竹之内：橋梁用ロープの曲げ疲労試験，本四技報，No.11，1980.7．
9) 新日本製鐵（株）鉄構開発部：PWS 61 疲労試験報告書，1971年4月，（未発表）．
10) 成井他：櫃石島・岩黒島道路鉄道併用斜張橋の設計（2），橋梁と基礎，1981.2．
11) 広中他：パラレルワイヤストランド（PWS-91）の疲労特性（第1報），32回土木学会年次講演会，1977年10月．
12) 広中他：パラレルワイヤストランド（PWS-91）の疲労特性（第2報），33回土木学会年次講演会，1978年9月．
13) 俵矢他：疲労特性の優れたソケットについて，製鉄研究 306号，1981年11月．
14) 奥田 聡：構造用材料としてのポリエチレン，材料試験，第8巻第73号，1959年10月．
15) Nakamura and Hosokawa : A study on the fatigue design of parallel wire strands on cable-stayed bridges, Proc. of JSCE No.410/I-12, 1989.10.
16) 本州四国連絡橋公団：吊橋のケーブルに関する検討，1978年3月．


（1991.3.27受付）

## A STUDY ON SECONDARY STRESS AND FATIGUE LIVES IN BENDING OF A PRE-COATING CABLE FOR CABLE-STAYED BRIDGE

Yoshifumi SAKAMOTO, Tetsuo HOJO, Tatsuya EGUTI and Moritoshi YANO

A new type of wire strands were developed for stays on cable-stayed bridges. A pre-coating strand consists of slightly helically twisted wires with high fatigue sockets. Bending tests and fatigue tests in bending for these socketed cables were presented. Cable secondary bending stress and fatigue lives in bending were obtained.