

極値統計論に基づいた平行線ケーブルの疲労強度解析

FATIGUE STRENGTH ANALYSIS OF PARALLEL WIRE STRAND CABLES
BASED ON THE STATISTICAL THEORY OF EXTREMES

松川 昭夫* 亀井 正博** 溝口 孝遠*** 佐々木 佳男****

By AKIO MATSUKAWA, MASAHIRO KAMEI, TAKAO MIZOGUCHI and YOSHIO SASAKI

Design S-N curves of parallel wire strand cables are obtained by an approach based on the statistical theory of extremes. Wire length, wire diameter, minimum stress and the number of wires are assumed to be the important factors affecting the fatigue strength of such strands. The effects of those factors are investigated experimentally and analytically. The effect of wire length and the number of wires is estimated by the statistical theory of extremes using the Weibull distribution. The effect of minimum stress can be evaluated by using the equivalent stress range proposed by the authors. Taking these effects into account, the estimated P-S-N curves are introduced as a function of wire length and the number of wires in the range from 10^5 to 2×10^6 cycles. Lastly, the design S-N curves are produced from the results obtained above.

1. まえがき

近年における交通量および交通荷重の増大により、吊構造橋梁のケーブルの設計においても、疲労に関する検討が重要な項目の一つとして取り上げられてきている。この検討にあたっては、ケーブルに発生する変動応力特性とケーブルの疲労特性とを明らかにすることが必要となる。前者の問題に関しては、実橋ケーブルの応力測定やシミュレーションによる活荷重応答解析手法などが有効に利用できる。一方、後者の問題に関しては、疲労試験による究明が必要となる。我が国はもとより諸外国においても、ケーブル素線およびケーブルなどに関する疲労試験が実施され、多くの貴重な資料が蓄積されつつある^{1)~9)}。しかしながら、これらの疲労試験に使用される供試体と、実橋ケーブルとの間には、素線の長さおよびその本数などの点で大

* 大阪市土木局 橋梁課 課長 ㊦ 530 大阪市北区梅田1丁目2番2-500号

** 大阪市土木局 橋梁課 主査 ㊦ 530 大阪市北区梅田1丁目2番2-500号

*** 工博 ㈱神戸製鋼所 機械研究所 要素技術センター 主任研究員
㊦ 651 神戸市中央区脇浜町1丁目3-18番

**** ㈱神戸製鋼所 機械研究所 要素技術センター
㊦ 651 神戸市中央区脇浜町1丁目3-18番

幅な相違がみられる。これらの相違がケーブルの疲労特性に与える影響を明確に把握することが、ケーブルの疲労設計においては不可欠であると考えられる。実橋ケーブルの疲労試験が困難であることから、これらの影響を解析的に評価する手法の開発が望まれるところである。この問題に関連した既往の研究としては、W.Andrä^{6), 7)} および M.Birkenmaier^{8), 9)} 等の素線の長さが疲労強度に影響をおよぼすことを示唆した研究や、E.Castillo¹⁰⁾ の新しい解析モデルを利用した理論的検討などがみうけられる程度である。

著者等はこれまでに疲労強度に対して有利な平行線ケーブルとHiAm (High-Amplitude) 定着形式とを対象として、ケーブル素線およびケーブルなどに関する疲労試験を実施し、素線の長さ、素線の本数、素線径および最小応力などが疲労特性に与える影響について検討を加えてきた。前報では¹¹⁾、平行線ケーブルの疲労強度に大きく影響を与えるこれらの因子をパラメータにして、繰返し数 2×10^6 回における平行線ケーブルの疲労強度を推定する式を提案した。しかしながら、不規則荷重をうける実際の橋梁構造物におけるケーブルの疲労寿命を求めようとすれば、有限寿命域から耐久限度があらわれる長寿命域までを網羅したケーブルのS-N曲線が必要となる。そこで、疲労試験結果から得られたこれらの影響因子の定量的評価をもとにして、極値統計論を利用することにより、実橋に使用されるケーブルの有限寿命域から長寿命域までの疲労強度を解析的に推定することを試みた。本論文は上記一連の研究内容を述べるとともに、実橋ケーブルの疲労設計に有効に利用できる影響因子を考慮したケーブルのS-N曲線を提案したものである。

表-1 化学成分および機械的性質

2. 疲労試験による各影響因子の評価

(1) 疲労試験概要

平行線ケーブルの疲労強度に大きく影響をおよぼすと推定される因子として、ケーブル素線の長さ、本数、素線径および最小応力を選び、これらの影響を解明するために、一連のケーブル素線の疲労試験を行なった。表-1に疲労試験に用いた亜鉛めっき鋼線の化学成分および機械的性質を示す。現在一般に供されているケーブルの素線径はφ5.0とφ7.0が主である。そこで、素線径としてφ5.12およびφ7.0を選んだ。表-2に試験条件を示す。Aシリーズを基本とし、Bシリーズは最小応力の影響、Cシリーズは素線径の影響およびDシリーズは素線長の影響を評価するために設定した。また、表-2には、試験が行なわれた応力範囲 σ_r を式(1)によって基準応力範囲 σ_o に変換した値が併記されている。これは、前報¹¹⁾で報告したように、異なる最小応力条件下で行なわれた疲労試験結果も式(1)に示す基準応力範囲 σ_o に変換すれば、共通した疲労特性値で表せるからである。

a) Chemical Compositions

Unit: %

Chemical Compositions	C	Si	Mn	P	S	Cu
Nominal Value	0.75 ~0.80	0.12 ~0.32	0.60 ~0.90	<0.025	<0.025	< 0.2

b) Mechanical Properties

Item	Nominal Value	
Diameter of Wire (mm)	5.12±0.06	7.0±0.08
Tensile Strength (kgf/mm ²)	160 ~ 180	
Stress at 0.7% Extension (kgf/mm ²)	> 118	
Elongation	4.0% (GL = 250mm)	
Coating Weight	> 300 g/m ²	
Increase of Wire Diameter in Hot-Dip Galvanizing	< 0.12mm	< 0.14mm

$$\sigma_o = \left\{ 250 / (250 - \sigma_{min}) \right\} \cdot \sigma_r \tag{1}$$

ここで、

σ_o , σ_r , σ_{min} ; 基準応力範囲, 応力範囲および最小応力 (kgf/mm²)

図-1に素線の試験体を示す。チャック端部での疲労破壊を防止するために、素線はチャック治具で摩擦力によって定着されており、チャック端部において高い引張応力が発生しないようにくふうしている。素線長さは、チャック前面間隔しで定義されるものとした。疲労試験は軸引張り条件で、試験繰返し速度は約10~20Hzで行なった。使用した試験機は5トン、10トンおよび20トン電気油圧式サーボ型疲労試験機である。表-2からわかるように、使用した試験片の数はAシリーズで170本、BおよびDシリーズでは各100本、Cシリーズは80本の総計450本である。

表-2 ケーブル素線の疲労試験条件

Condition of Test	Length (mm)	Diameter (mm)	$\sigma_{\min}$ (kgf/mm ²)	σ_r (kgf/mm ²)	σ_o (kgf/mm ²)	Number of Specimen
A Series	200	5.12	10	47.5	49.5	20
				50	52.1	30
				55	57.3	30
				60	62.5	30
				65	67.7	30
				70	72.9	30
B Series	200	5.12	25	45	50.0	20
				50	55.6	20
				55	61.1	20
				60	66.7	20
				65	72.2	20
C Series	200	7.0	10	45	46.9	20
				50	52.1	20
				55	57.3	20
				60	62.5	20
D Series	1000	5.12	10	45	46.9	20
				50	52.1	20
				55	57.3	20
				60	62.5	20
				65	67.7	20

(2) 素線の疲労試験結果

図-2、図-3にAおよびCシリーズの試験結果を示す。基本的には各シリーズにおいて最大繰返し数 2×10^6 回まで疲労試験を行なったが、 2×10^6 回以上の長寿命域での疲労特性を確認しておくために、Aシリーズにおいては、 $\sigma_o = 49.5, 52.1$ および 57.3 kgf/mm^2 の各応力レベルにおいて、最大繰返し数 5×10^6 回まで疲労試験を行なった。図中の非破壊記号 (○→) の下の数字は、破断の生じなかった試験片の数を示している。また、Aシリーズにおいて、基準応力範囲 $\sigma_o = 49.5 \text{ kgf/mm}^2$ の応力レベルでは、20本の試験片全てが 5×10^6 回に至っても破断しなかった。

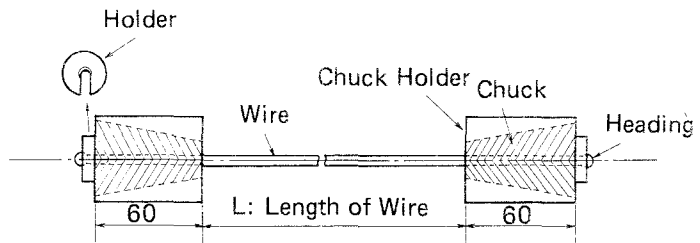


図-1 ケーブル素線の試験体

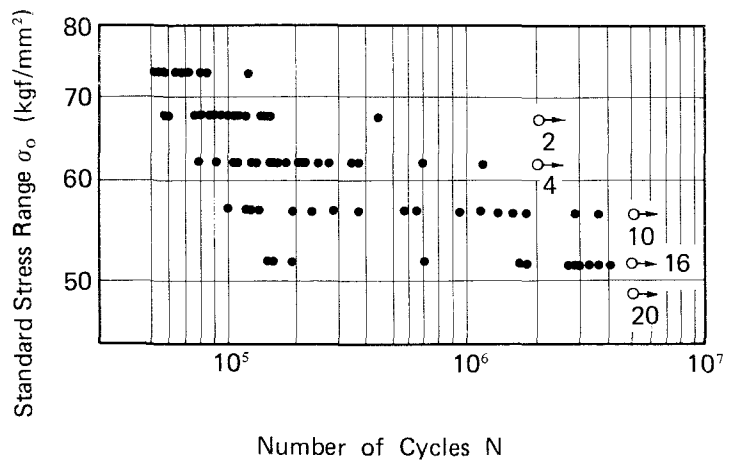


図-2 ケーブル素線の疲労試験結果 (Aシリーズ)

(3) 素線の疲労試験結果に対するワイブル解析

前項で得られた疲労試験結果の個々のデータは、ばらつきを有する統計量である。そこで、これらの試験結果のデータをワイブル解析によって統計的に整理して、P-S-N曲線を求めることにした。疲労寿命を考慮した設計を行なう場合、通常、破壊確率（或いは信頼度）をパラメータにしたS-N曲線、すなわちP-S-N曲線を用いることが多い。P-S-N曲線の決定法¹²⁾としては、寿命分布にもとづく方法と強度分布にもとづく方法がある。本論文では強度分布にもとづく方法を採用

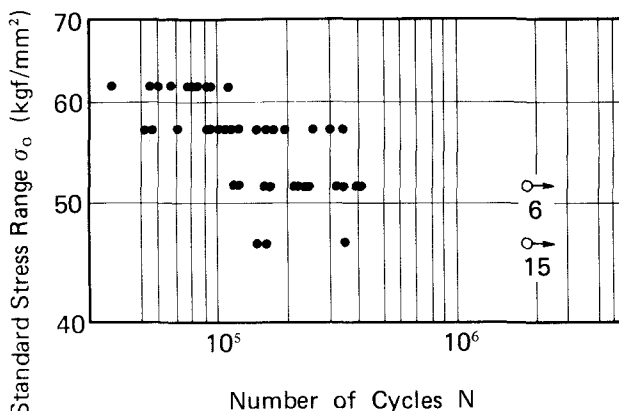


図-3 ケーブル素線の疲労試験結果 (Cシリーズ)

することにした。まず、各シリーズで得られた疲労試験結果から、繰返し数 $N=10^5$ 、 2×10^5 、 5×10^5 、 1×10^6 および 2×10^6 回における各試験応力範囲（基準応力範囲で整理）での疲労強度の破壊確率 P_f (%) を式 (2) によって求めた⁹⁾。

$$P_f = (3r - 1) / (3i + 1) \times 100 \quad (2)$$

ここで、

- r : 各試験応力範囲において設定繰返し数までに破断した試験片の数
- i : 各試験応力範囲における試験片の数

図-4にこのようにして求めた各破壊確率の値を2母数のワイブル確率紙にプロットした結果を示す。図はAシリーズの結果である。図からも明らかなように、各繰返し数における疲労強度の分布は、ワイブル確率紙上で直線になっており、ケーブル素線の疲労強度はワイブル分布で評価できることがわかる。また、B、CおよびDシリーズの場合も同様な結果が得られた。

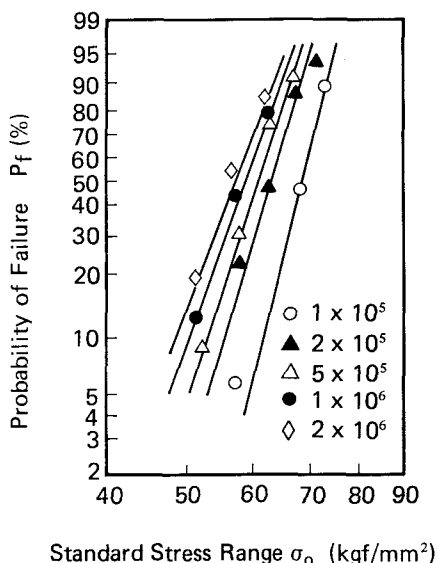


図-4 2母数のワイブル解析結果 (Aシリーズ)

(4) 影響因子が疲労強度におよぼす効果の定量的評価

a) 素線長さの効果

図-5にAおよびDシリーズのワイプル解析結果から、破壊確率5%および50%における基準応力範囲 σ_0 を読み取りプロットした結果を示す。図から明らかなように、素線長さが長くなることによって疲労強度は低下する。疲労強度の低下をまねく原因は、素線長さが長くなると破壊の起点となる非金属介在物などの微細な欠陥の含まれる確率が大きくなるためと思われる。繰返し数 2×10^6 回における5%破壊確率の疲労強度は、 $L = 0.2\text{m}$ の場合で 45.6 kgf/mm^2 、 $L = 1.0\text{m}$ の場合で 42.7 kgf/mm^2 であり、疲労強度の低下率は約6%である。

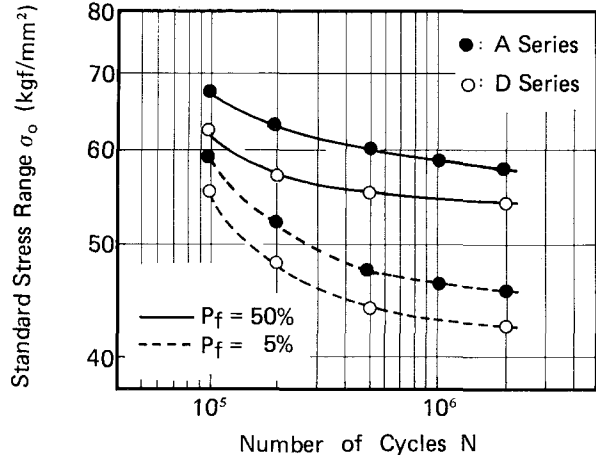


図-5 素線長さの効果

b) 素線径の効果

図-6にAおよびCシリーズのワイプル解析結果から破壊確率5%および50%における基準応力範囲 σ_0 を読み取りプロットした結果を示す。図から明らかなように、素線径が大きくなることによって疲労強度は低下する。この疲労強度の低下は、破壊の危険にさらされる表面積が増えたことによるa)項と同様な寸法効果によるものと考えられる¹³⁾。繰返し数 2×10^6 回における5%破壊確率の疲労強度は $\phi 7.0 \text{ mm}$ の場合 39.2 kgf/mm^2 であり、疲労強度の低下率は約14%である。

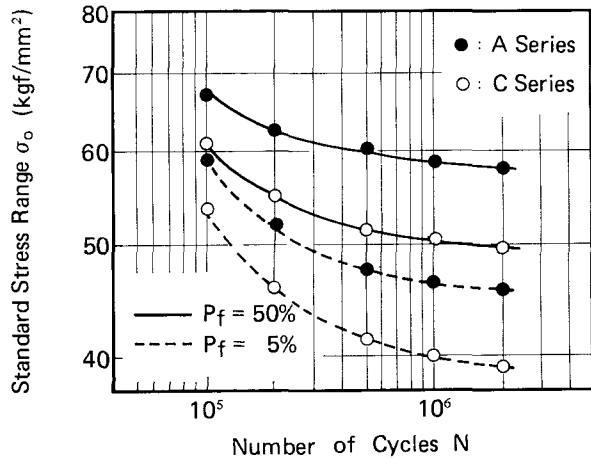


図-6 素線径の効果

3. HiAmケーブルにおける長さおよび本数効果の評価法

現在、ケーブルの長さが約200m、素線本数が約300本の太径のHiAmケーブルが実際に斜張橋で使用されている。このようにケーブルの長さが極めて長く、かつ素線本数が多い場合のケーブルの疲労強度を実験的に推定することは、試験設備、試験期間等の点において不可能に近いものと思われる。したがって、本論文では、現在までに得られている我が国で行なわれたHiAmケーブルの疲労試験結果と2章で述べたケーブル素

線の疲労試験結果ならびに以下に説明する極値統計論にもとづいて、本数および長さ効果の評価法について検討を加えた。

(1) HiAmケーブルの疲労試験結果

図-7に現在までに行なわれたφ7.0 HiAmケーブルの主な試験結果を示す。それらの個々について詳細に調査したところ、ケーブル素線の破断位置はケーブル長全体にばらついていた。このことから以下においては、本数効果を長さ効果に換算して検討を進めることにした。図には断線した本数の全素線数に対する比率、すなわち破断率 β ($=1-\alpha$, α ;信頼度)が約5%である場合がプロットされている。表-3にこれらの試験条件の詳細を示す。表-3の中で、HiAmの数字はケーブル素線の本数(以後、Mで表す)を、Lはケーブルの長さを、 $n (=M \cdot L/0.2)$ は長さ和本数の効果を表すパラメータである。繰返し数を 2×10^6 回以下に限ると σ_o が約34 kgf/mm²以下ではケーブルに破断は生じていない。また、繰返し数が 2×10^6 回を超えるデータは20体あり、そのうち破断率が5%に達したものはHシリーズのうちわずかに1体の試験体(以後、試験体“x”と呼ぶ)のみである。これだけのデータから判断することはむずかしいが、少なくとも繰返し数を 2×10^6 回以下に限定すれば、ケーブルが破断しない疲労強度の最下限値が存在すると考えてもさしつかえない。この疲労強度の最下限値(基準応力範囲で表す)を、以後、“ σ_{olim} ”と呼ぶことにする。ところで、このような最下限値が存在しないとすると、前報でも用いた極値統計論によれば、ケーブ

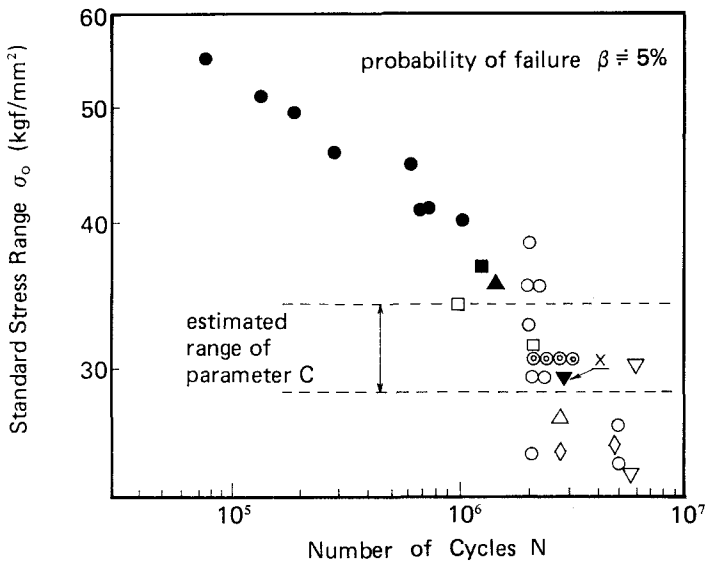


図-7 φ7.0 HiAmケーブルの試験結果

表-3 φ7.0 HiAmケーブルの試験条件

Symbol	Failure Probability	Notation	$n (=M \cdot L/0.2)$
E	● failure (5%)	HiAm 19 (L=1.6m)	152
	○ non-failure		
F	▲ failure (4%)	HiAm 127 (L=1.8m)	1145
	△ non-failure		
G	■ failure (3%)	HiAm 127 (L=2.9m)	1815
	□ non-failure		
H	▼ failure (5%)	HiAm 37 (L=1.6m)	295
	▽ non-failure		
I	⊙ non-failure	HiAm 37 (L=3.7m)	680
J	◇ non-failure	HiAm 163 (L=2.9m)	2330

ルが長くなるほど疲労強度は低下し、0に漸近することになる。これを確認するためには低応力側での疲労試験を多数実施し、疲労強度の分布のすその特性を把握する必要があると考えられる。いずれにしても、ケーブルの疲労強度の分布においてこのような σ_{olim} が存在するということはワイブル分布において位置母数Cが存在することに他ならない。そこで、ケーブルの疲労強度の分布は2母数のワイブル分布よりは3母数のワイブル分布にしたほうがより実体に近くなると考え、ここでは、位置母数Cを σ_{olim} とみなし、その σ_{olim} は実験結果に最も適合するものを選ばよとの考えで議論を進めることにした。

(2) 3母数ワイブル分布の極値統計論による長さ効果の評価

基準長さL。のケーブル素線の疲労強度xは、3母数のワイブル分布にしたがうものとする次式が得られる。

$$f(x) = m \cdot \frac{(x-c)^{m-1}}{\eta^m} \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{x-c}{\eta} \right)^m \right\} \quad (3)$$

ここで、

m, η, c ; 形状母数, 尺度母数および位置母数

また、累積分布関数F(x)は

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x-c}{\eta} \right)^m \right\} \quad (4)$$

で表される。極値統計論⁽⁴⁾によると長さがL(=n・L₀, n; 長さ効果を表す倍数)となった場合の疲労強度xは、式(5)の極小値分布の確率密度関数 $\phi_n(x)$ にしたがうことになる。

$$\phi_n(x) = n \cdot \{1 - F(x)\}^{n-1} \cdot f(x) \quad (5)$$

式(3)および(4)を式(5)に代入してまとめると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \phi_n(x) &= n \cdot \frac{m}{\eta^m} (x-c)^{m-1} \cdot \exp \left\{ -n \left(\frac{x-c}{\eta} \right)^m \right\} \\ &= \frac{m}{\xi^m} (x-c)^{m-1} \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{x-c}{\xi} \right)^m \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$\xi = n^{-1/m} \cdot \eta$$

基準長さL。の疲労強度の分布が3母数のワイブル分布にしたがう時には、式(6)から、その極小値分布もまた同じ3母数のワイブル分布にしたがい、かつ、形状および位置母数の値はもとの基準長さL。の値と同じになり、尺度母数の値のみ変ることがわかる。

本論文では、このような考え方にもとづいて、長さおよび本数の疲労強度におよぼす効果を理論的に推定することにした。この考え方の妥当性を確認するために、Aシリーズ(n=1)およびDシリーズ(n=5)についてワイブル解析を行ない、繰返し数 $N = 1 \times 10^5, 2 \times 10^5, 5 \times 10^5, 1 \times 10^6$ および 2×10^6 における両シリーズの形状母数mを求めた。この結果、両シリーズのmの値はほぼ等しく、この考え方が実際のケーブルの疲労強度に適用できることを確かめた。

位置母数 C の最適値を求めるために、図-7を参考に、 C を 28, 30 および 33 kgf/mm^2 とおいた時の疲労強度をシミュレーション解析で求め、理論値と実験値との比較を行なった。基準長さ L_0 は、A および C シリーズの素線長さ 0.2 m とした。図-8 に破壊確率が 1 % の時の疲労強度の理論値と実験値との比較を示す。 C を 30 kgf/mm^2 に設定した場合、 $n=5$ に対する理論値は D シリーズ ($n=5$) の実験値と良く一致しており、さらに、 $n=1000$ および 2000 に対する理論値も HiAm 127 の実験値 ($n=1145$ および 1815) にそれぞれ良く合致している。また、破壊確率が 5 % の場合についても同様の検討を加えたが、 $C=30\text{kgf/mm}^2$ がよく適合していた。これらの結果から、位置母数は $C=30\text{kgf/mm}^2$ とすることにした。図-9 に図-4 のワイブル解析結果を 3 母数のワイブル分布によって再整理した結果を示す。位置母数は C の最適値の 30 kgf/mm^2 にしている。図からもわかるように、3 母数のワイブル確率紙上においても各破壊確率は直線になっており、3.(1)項でも述べたようにケーブルの疲労強度の分布は、3 母数のワイブル分布で評価できることを確かめた。B、C および D シリーズについても同様な結果が得られた。

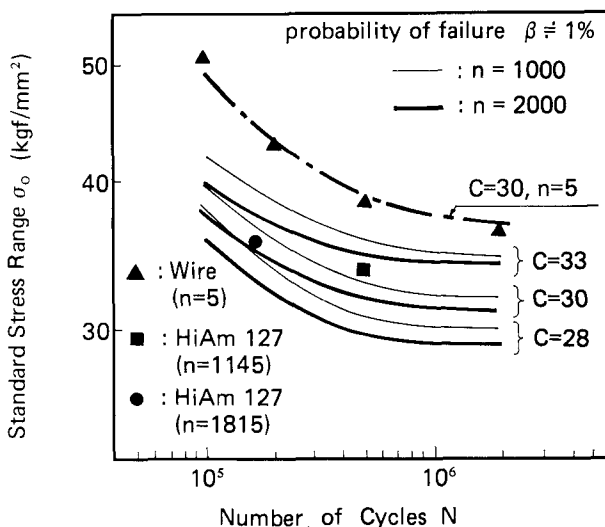


図-8 破壊確率 1 % における理論値と実験値との比較

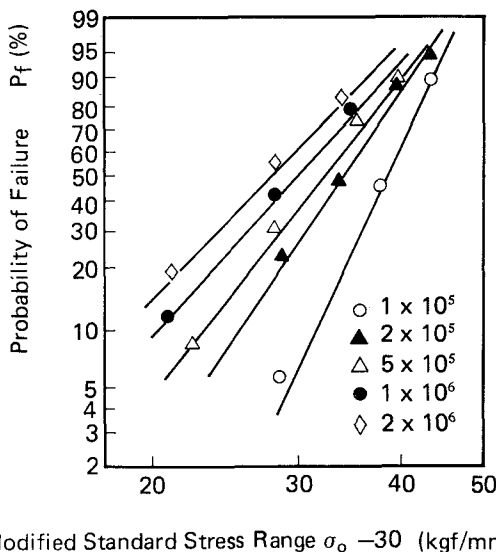


図-9 3 母数のワイブル解析結果 (A シリーズ)

表-4 ケーブル素線のワイブルパラメータ

表-4にAおよびCシリーズについて3母数のワイブル解析を行なって、素線径φ5.12およびφ7.0 に対して求められたワイブルパラメータを示す。

N (cycles)	φ5.12			φ7.0		
	m	η	c	m	η	c
1 X 10 ⁵	10.2	39.3	30	10.0	32.5	30
2 X 10 ⁵	6.8	34.8	30	6.5	26.8	30
5 X 10 ⁵	6.0	32.8	30	5.6	23.3	30
1 X 10 ⁶	4.8	30.8	30	5.3	22.4	30
2 X 10 ⁶	4.7	30.2	30	5.0	21.4	30

4. 長さ効果を考慮したP-S-N曲線および設計S-N曲線の提案

(1) 長さをパラメータにしたP-S-N曲線の誘導

本項では、長さをパラメータにしたP-S-N曲線を誘導するための手順を以下に説明する。3章で述べたように、ケーブル素線の疲労強度の分布は3母数のワイブル分布にしたがうとしているので、設定繰返し数N_jにおける疲労強度（基準応力範囲）σ_{o,j}は次式で表される。

$$\sigma_{o,j} = c_j + \xi_j \cdot [-\ell_n (1 - F(X))]^{1/m_j} \quad (7)$$

ここで、

$$\xi_j = n^{-1/m_j} \cdot \eta_j$$

c_j : L=L_oでの繰返し数N_jにおける位置母数

η_j : L=L_oでの繰返し数N_jにおける尺度母数

m_j : L=L_oでの繰返し数N_jにおける形状母数

n : 長さ効果を表わす倍数 (=L/L_o)

F(x) : 破壊確率

表-4に示されたワイブルパラメータを初期値として、長さ効果を表す倍数nを変化させてケーブル長さが長くなった場合の疲労強度を式(7)にもとづいて計算した。そして、この理論値を通る回帰式として、式(8)に示す2次式を仮定し、これをケーブルのP-S-N曲線とした。

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (8)$$

ここで、

$$Y = \text{Log } \sigma_o, \quad X = \text{Log } N$$

σ_o, N; 基準応力範囲 (kgf/mm²)および繰返し数

式(8)の係数 a 、 b および c は最小二乗法によって求めた。以上のようにして求められた $P-S-N$ 曲線を、長さ効果の倍数 n をパラメータとして図-10および図-11に示す。図-10は素線径が $\phi 5.12\text{mm}$ の場合で、図-11は素線径が $\phi 7.0\text{mm}$ の場合である。図中には、素線の疲労試験結果についても併記しているが、これは $n=1$ に対応するものである。現在架設中もしくは今後架設予定のケーブルの本数(M)およびケーブルの長さ(L)を考慮すれば、 $n (= M \cdot L / 0.2)$ の適用範囲は 10^6 ($M \cdot L = 200\text{km}$)程度までとすれば実用的には十分であると考えられる。

(2) HiAmケーブルの設計 $S-N$ 曲線

前項においては、素線の長さ、径など寸法に關した因子が疲労強度の特性にどのようにかわっているかについて検討し、 $P-S-N$ 曲線を誘導した。しかし、これらの結果をケーブルの疲労設計に適用するためには以下の点について考慮しなければならない。

第1点は荷重変動が一定でないことに対する取扱いである。もしケーブルがその全寿命のうちに経験する最大の荷重がその耐久限度の分布の最下限値を下まわるのであれば、ケーブルは永久に破損しないことになり、その様な条件を満足させる設計が耐久限度設計となる。しかし、少頻度でも耐久限度を超える荷重が作用すると、耐久限度以下の応力も疲労損傷を進行させることが知られており、この応力による寿命を評価するため $S-N$ 曲線を修正して有限寿命設計が行なわれている。どのように修正すべきかは荷重変動のパターン等に影響されるが、例えば、BS5400¹⁵⁾では 10^7 回以上の領域で、

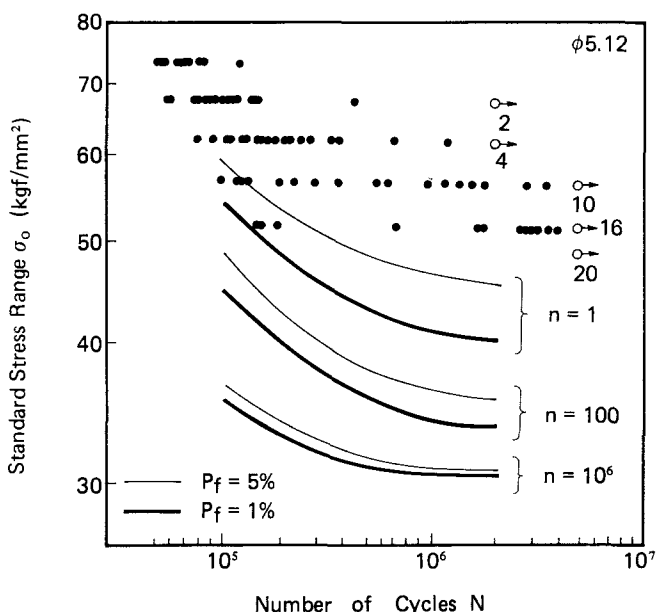


図-10 長さをパラメータとした $P-S-N$ 曲線 ($\phi 5.12$)

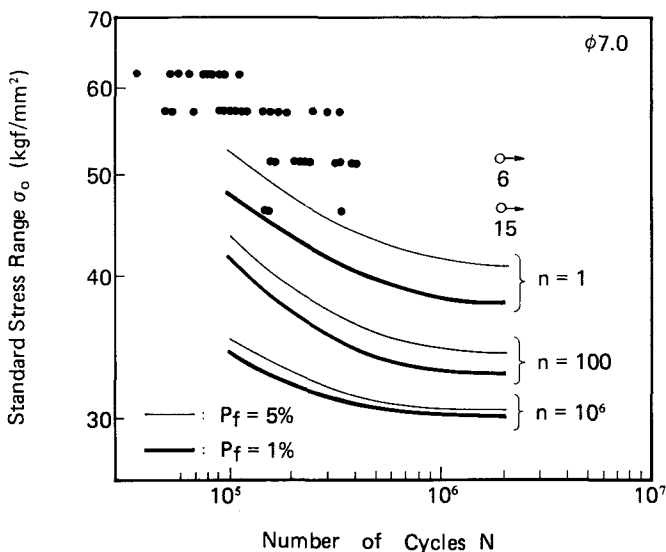


図-11 長さをパラメータとした $P-S-N$ 曲線 ($\phi 7.0$)

S-N曲線の勾配をゆるやかにして耐久限度以下に延長する方法を提案している。

第2点は、ケーブルは素線の集合体であることに対する取扱いである。素線間の摩擦によるフレット疲労やソケット近傍での局部曲げ応力、荷重分担の不均一などの影響が組み合わされてケーブル全体の疲労強度が定まるものと考えられる。これらのことを考えあわせると、前項で求められたP-S-N曲線より安全側に修正した設計S-N曲線を定める必要があり、それらは実体ケーブルの長寿命域での多数のデータから判断す

べきであろうが、実際には図-7からもわかるように限られた数のデータしかなく、しかも、5%の破断率に至っているのは試験体xのみである。そこで、便宜的ではあるが、図-12に示すように、試験体xの実験点を通り、 $n=295$ でかつ5%破断確率のP-S-N曲線に接する直線を引き、これを $\phi 7.0$ の素線を有するケーブルの $n=295$ に対する5%破断確率の設計S-N曲線とすることにした。そして、長さの倍数 n が変った場合の設計S-N曲線は、この直線と同じ傾きで平行移動させて対応する n のP-S-N曲線に接する直線とした。また、 $\phi 5.12$ についても、 $\phi 7.0$ の設計S-N曲線と同じ傾きをもち、対応するP-S-N曲線と接する直線を $\phi 5.12$ の素線を有するケーブルの設計S-N曲線とした。また、図-12には参考のために、M.Birkenmaierらが提案している平行線ケーブルの設計S-N曲線も図示してある。

さて、以上の結果から、提案する設計S-N曲線（破断確率5%）は、 $\phi 5.12$ の場合については式(9)および(10)で、 $\phi 7.0$ の場合については式(9)および(11)で表される。

$$N \sigma_0^{11.8} = C_1 \quad (9)$$

$$\log C_1 = 0.0611 \{\log(n)\}^2 - 0.75 \{\log(n)\} + 25.6 \quad ; \phi 5.12 \text{ の場合} \quad (10)$$

$$\log C_1 = 0.0444 \{\log(n)\}^2 - 0.60 \{\log(n)\} + 25.1 \quad ; \phi 7.0 \text{ の場合} \quad (11)$$

ここで、

$$1 \leq n \leq 10^6 \quad ; \text{長さ効果を表わす倍数} (= M \cdot L / 0.2)$$

$$\sigma_0, N \quad ; \text{基準応力範囲} (\text{kgf/mm}^2) \text{ および繰返し数}$$

このような設計S-N曲線を想定することによって、応力範囲の大きいものから、応力範囲は小さいが頻度の多い変動荷重の影響まで安全に考慮することができるものと思われる。

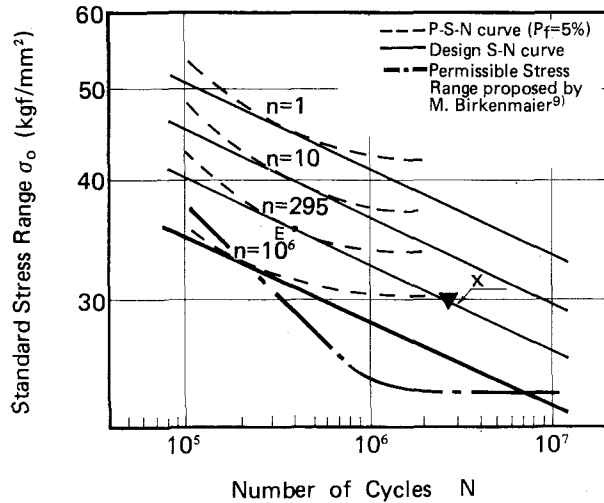


図-12 設計S-N曲線（素線径 $\phi 7.0$ の場合）

5. あとがき

平行線ケーブルで橋梁を設計する場合を想定して、疲労強度の統計的な確率分布を考慮して、ケーブル素線の長さ、本数、素線径および最小応力がケーブルの疲労強度に与える影響を定量的に評価した。また、これらの影響因子をパラメータにして、有限寿命域から 2×10^6 回以上の長寿命域を網羅したケーブルの P-S-N 曲線を誘導した。そして、この結果にもとづいて、ケーブルの疲労設計に有効に利用できる設計 S-N 曲線を提案した。この提案式と実働荷重による応力頻度分布とを対比することにより、実橋ケーブルの疲労に対する安全性が合理的に評価できるものとする。今回提案した設計 S-N 曲線は、式(9)に示すように通常のマイナー則に適用する際の S-N 曲線と同じ形をしているので、ケーブル設計者にとっては利用しやすいものと思われる。本提案式が、実橋ケーブルの設計に少しでも参考となれば望外の喜びである。

参考文献

- 1) 光島, 西, 新家: ケーブルワイヤの疲労強度, R & D, 神戸製鋼技報, Vol.25, No.1, PP.58~63, 1975.
- 2) 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.
- 3) 田中, 原口: HiAmアンカーケーブルの疲労特性, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集, I-56, 昭和54年10月.
- 4) 船越, 吉永, 長井: 川原橋の設計施工とケーブル, 橋梁と基礎, 4, PP.36~39, 1980.
- 5) 建設省土木研究所: 長大吊橋平行線ケーブル用鋼線試作試験報告書(2), 土木研究所資料, No.60, 3, 1965.
- 6) Andrä, W., Saul, R.: Die Festigkeit insbesondere Dauerfestigkeit Langer Paralleldrahtbündel, Die Bautechnik, 56, 4, PP.128~130, 1979.
- 7) Andrä, W., Saul, R.: Versuche Mit Bündeln aus Parallelen Drähten und Litzen für die Nordbrücke Mannheim-Ludwigshafen und das Zeltdach in München, Die Bautechnik, 51, 9, PP.289~298, 1974.
- 8) Birkenmaier, M., Narayanan, R.: Fatigue Resistance of Large High Tensile Steel Stay Tendons, IABSE, Colloquium Lausanne, PP.663~672, 1982.
- 9) Birkenmaier, M.: Fatigue Resistant Tendons for Cable-Stayed Construction, IABSE, Proceedings P-30/80, 5, PP.65 ~79, 1980.
- 10) Castillo, E., Fernandez Canteli, A., Esslinger, V., Thürlimann, B.: Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires Strands and Cable, IABSE, Proceedings P-82/85, 2, PP.1~40, 1985.
- 11) 松川, 亀井, 福井, 佐々木: 影響因子を考慮した平行線ケーブルの疲れ強さ解析, 構造工学論文集, 日本学術会議, 土木学会, 日本建築学会, Vol.31A, 3, PP.327~339, 1985.
- 12) 日本機械学会: 統計的疲労試験法, 1981.
- 13) 伊藤, 小林: 平滑試験片の疲れ強さにおよぼす表面積の影響について, 日立評論, 45-12, 1963.
- 14) 河田他監訳, Gumbel, E.J.: 極値統計学, 生産技術センター新社, 1978.
- 15) British Standard Institution: BS5400, Part 10, Specification for Fatigue, 1980.