

橋梁ケーブルの限界状態設計法に関する一提案

A Proposal on the Limit States Design Method of Bridge Cables

中村俊一 *

Shun-ichi NAKAMURA

*Ph.D. 東海大学 工学部 土木工学科 教授 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

New types of cables and new forms of cable-supported bridge systems have been developed recently. Safety factors based on the allowable stress method have been used for the bridge cables in our country, however, it is in some cases not rational and economical for these new technology. A limit states design code for the bridge cables is proposed in this paper and compared with the conventional method. A new fatigue design code is also proposed and compared with the conventional DIN 1073 code. Several case studies have been conducted to show that these new codes would give more rational results than the conventional method.

Key Words : cables, limit states design, performance based design, fatigue design, cable-stayed bridges, suspension bridges

1. はじめに

斜張橋や吊橋などの吊り形式橋梁において、ケーブルは命綱とも言える重要な構造要素である。また、その安全率や許容応力度の設定は、橋全体の経済性にも影響を及ぼす。最近、橋梁ケーブルに関して新技術が開発されており、さらに新しい設計法を模索する試みもある。

新形式の吊り形式橋梁として、エクストラドーズド橋が注目されている¹⁾。使用されるケーブルの安全率は1.67と規定されており、斜張橋ケーブルの安全率2.5に比べ格段に小さい。エクストラドーズド橋では、ケーブルはPC鋼線と同等とみなされ、さらに死荷重の占める割合が高いためこの安全率を規定していると推定されるが、ケーブルの安全率には腐食や施工性の影響を考慮する必要があり、低すぎる安全率は好ましくない。

我が国の鋼斜張橋では、工場製作される準平行線ケーブルが多く用いられてきた。鋼斜張橋では、活荷重の占める割合がPC斜張橋より相対的に高く、高疲労強度を有する特殊な定着構造が要求されるためである。しかし、近年、高疲労強度を有する現地定着方式のケーブルも開発されており²⁾、ケーブルの多様化に対応するためにもケーブル設計強度を明確にする必要がある。

さらに、将来の橋梁設計法として性能照査設計法が検討されている。従来、ケーブルの設計では、ケー

ブルの種類に応じて許容応力度を規定されてきたが、将来の性能照査設計では設計基準強度や安全率は設計者が決定することになる。そのためには、ケーブルに対する要求性能や、設計基準強度や安全率の設定法の方針を明確化する必要があると考えられる。

斜張橋ケーブルの活荷重による疲労の照査は、従来DIN 1073の基準を適用していたが、この照査式はケーブル一般部の疲労に対しての照査式であり、定着部の疲労強度は一般部より高いことが前提となっている。また、疲労照査荷重としては設計活荷重の50%が用いられているが、その根拠はあいまいであり、より合理的な疲労照査式が必要と考えられる。

吊橋ケーブルには、主として平行線ケーブルが用いられる。全体鋼重の中でケーブルの占める割合は斜張橋よりさらに高く、ケーブル設計強度が橋全体の経済性を決定する重要な要素である。瀬戸大橋以前は、ケーブルを構成する亜鉛メッキ鋼線の引張強度は1,568 MPaであり、許容応力度は安全率2.5で割った627 MPaとしていた。明石海峡大橋以降では、引張強度は1,764 MPaであり、許容応力度は安全率2.2で割った802 MPaであった。将来の東京湾口吊橋などでは、亜鉛メッキ鋼線のさらなる高張力化および安全率の低減が検討されている。

吊橋のハンガーは、補剛桁をケーブルと結合する役割を担うため、その定着結合構造が重要な要素となる。また、風や車両通行による振動が生じやすく、定着部での疲労に配慮しなければならない。

本論文では、斜張橋ケーブル、エクストラドーズド橋ケーブル、吊橋の主ケーブルおよびハンガーを対象としたケーブルの限界状態設計法を提案する。すなわち、終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態について橋梁用ケーブルの照査基準を提案し、数例のケーススタディーにより提案式の妥当性を検証する。

2. ケーブルの種類

本章では、吊り形式橋梁に用いられるケーブルの種類について概説する³⁾。

現代斜張橋は、1950年代後半から1960年代まではドイツで盛んに建設された。これら初期の斜張橋ケーブルには図-1に示すロックドコイルロープが主に使われていた。ソケット部の定着は亜鉛・銅合金が用いられた。

1960年代後半から、各国で斜張橋が建設され初めた。英国の Wye Bridge や Erskine Bridge では図-2に示すスパイラルロープが用いられた。ソケット部の定着はやはり亜鉛・銅合金定着である。日本の初期の斜張橋である豊里大橋や大和川橋梁では、図-3に示すプレファブ平行線ケーブルを用い、プラスチックカバー方式により防食された。

1980年代には日本で多くの斜張橋が建設されるようになり、平行線ケーブルに PE (ポリエチレン) 管を被せ、その隙間に現地でセメントミルクやポリブタジエン系ポリウレタンなどの樹脂を注入するタイプのケーブルが使われた。本四架橋の櫃石・岩黒島橋がその代表である。

同じ頃から PC 斜張橋も建設され初めた。これらの橋では、より線ワイヤーを現地で平行に束ねてケーブルにし、外側に PE 管を被せ現地でグラウトする図-4に示すタイプのケーブルが使われた。ソケット部には種々のくさび定着方式が利用されている。

現在の鋼斜張橋では、工場で予めケーブル外層を PE 被覆した図-5に示すプレファブケーブルが主流である。工場でのハンドリングをやすくするため、素線には緩やかなよりが入れられており、準平行線 (セミパラレル) ケーブルまたは long lay cable と呼ばれている。定着部は、鋼球とエポキシ樹脂を併用した図-6に示す Hi-Am アンカー、および図-7に示すエポキシ樹脂を組み合わせた NS ソケットが主流である。PE 被覆したケーブルにはレインパイブレーションが発生しやすいため、PE 被覆に平行突起をつけたり (東神戸大橋)、ディンプルをつけた例 (多々羅大橋) もある。最近、ポリエチレン被覆した PC 鋼線を平行に束ね、現地でくさび定着する図-8に示す新形式ケーブルが開発され、新尾道大橋で用いられた²⁾。

吊橋の主ケーブルは、我が国においては図-3に示すプレファブ平行線ケーブルが主流である。定着構造は亜鉛・銅合金ソケットが用いられる。

吊橋ハンガーでは、ハンガーを主ケーブルに鞍掛けする場合には柔軟性に富む図-9に示す CFRC が用いられ、ハンガーの両端をピン定着する場合にはスパイラルロープおよび準平行線ケーブルが用いられる。

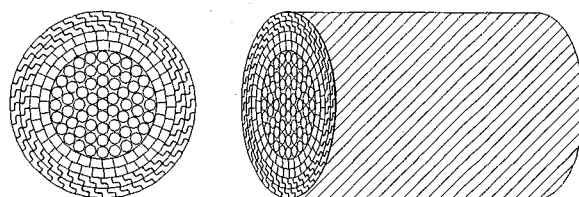


図-1 ロックドコイルロープ

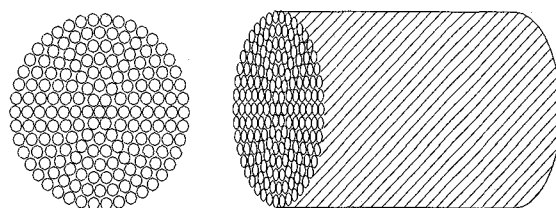


図-2 スパイラルロープ

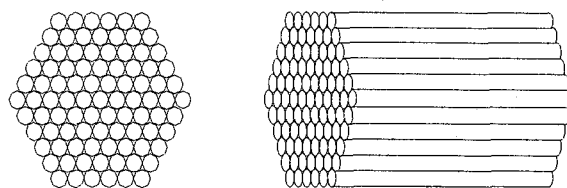


図-3 平行線ストランド

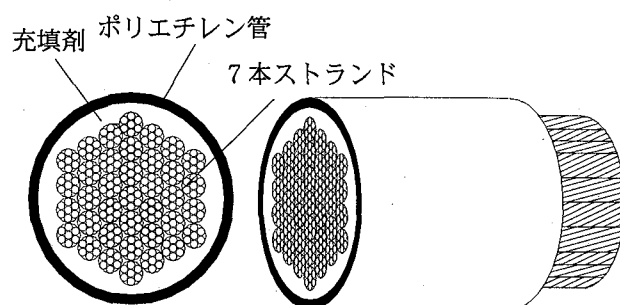


図-4 PC 鋼より線ロープ

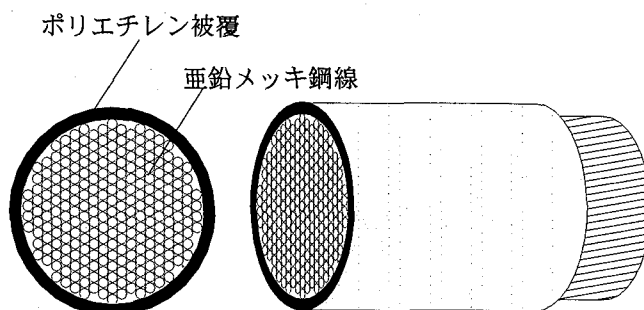


図-5 セミパラレルロープ

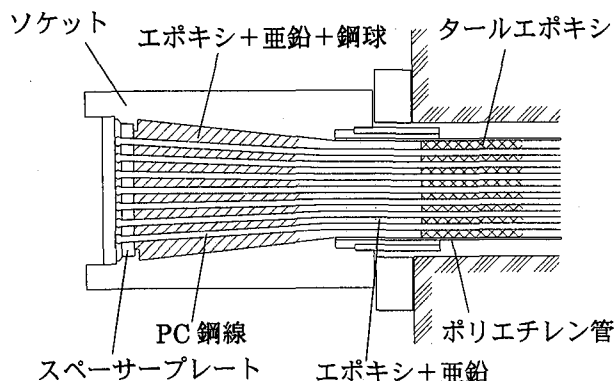


図-6 Hi-Am ソケット

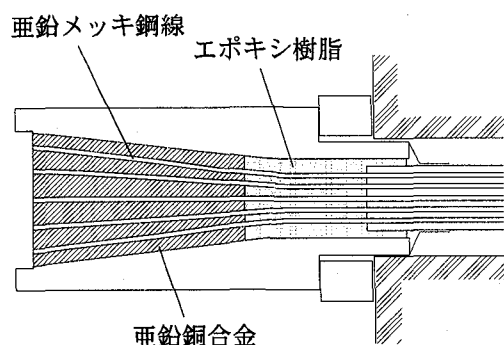


図-7 NS ソケット

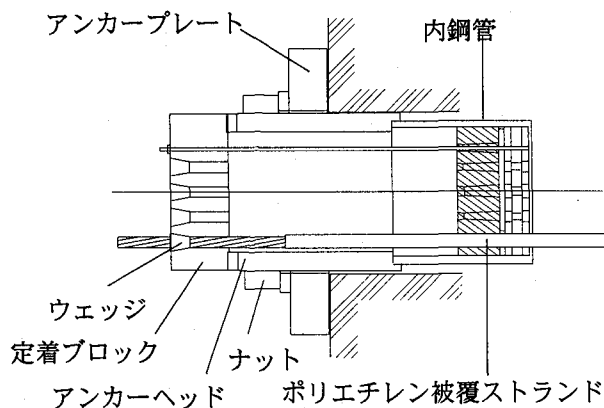


図-8 ポリエチレン被覆ロープ

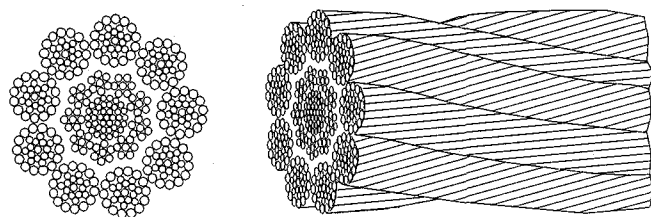


図-9 CFRP ロープ

3. 終局限界状態

吊り形式橋梁は100m以下の中スパンから2000mにもおよぶ大スパンにまで適用され、死荷重と活荷重の比率が大きく異なる。現行の許容応力度法では、これらの影響を考慮できず、合理的はいえない。そこで、本章では終局限界状態に関する設計基準を提案する。

3.1 終局限界状態の照査基本式

終局限界状態の照査に関する基本式は次式とする。

$$\Sigma (v_i P_i) \leq Nu \quad (1)$$

$$Nu = F_u A_n \quad (2)$$

ここで、 v_i :終局限界に対する荷重係数、 P_i :設計荷重、 Nu :ケーブル部材の設計強度、 F_u :設計基準強度、 A_n :ケーブル部材の公称断面積である。

3.2 終局設計荷重

終局限界状態を照査する荷重は次式とする。

$$1.3 (D + PS + T) + 2.5 (L + I) \quad (3)$$

ここで、 D :死荷重、 PS :ケーブルプレストレス、 T :温度荷重、 L :活荷重、 I :衝撃荷重とする。この式は、道路橋示方書コンクリート編において終局状態照査用の荷重の組み合わせに指定されている。

3.3 設計基準強度

鋼板の設計基準強度は降伏応力度であるが、ケーブルには明確な降伏強度がないため、降伏強度に相当する F_y として次式を提案する。いろいろなケーブルの応力・ひずみ曲線に対応するため、3種類の降伏相当強度の最小値とする。(図-10)

$$F_y = \min (F_1, F_2, F_3) \quad (4)$$

F_1 は0.2%残留伸びに対応する耐力であり、明確な降伏点を有しない高張力鋼板やPCケーブルで一般的に採用されている降伏耐力である。

F_2 は全伸びに対応する耐力であり、本四架橋で採用されている。なお、素線すなわち亜鉛メッキ鋼線の引張り強さが1,568 - 1,764 MPaについては0.7%全伸びとし、素線の引張り強さが1,764 - 1,960 MPaについては0.8%全伸びとする。

F_3 は0.85 F_t とする。ここで、 F_t は素線の引張り強さである。現在の鋼ケーブルでは、この F_3 により決定されることはないと考えられるが、新素材などを用いた高降伏比のケーブルが開発された場合を想定し、降伏強度の上限を規定する。

設計基準強度 F_u は、ケーブルの種類、施工法、防食、形状を考慮して次式とする。

$$F_u = F_y / \phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4 \quad (5)$$

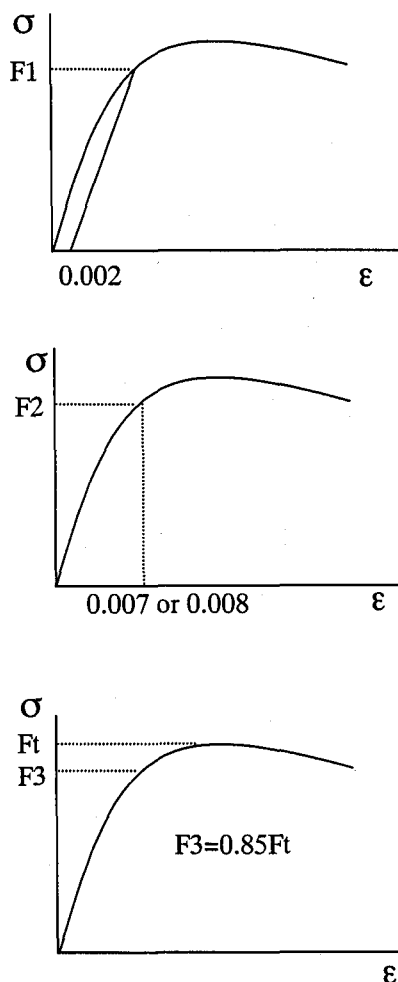


図-10 3種類の降伏相当強度

ケーブル強度は素線強度より低下するため、 ϕ_1 はその安全係数である。これはケーブルの種類に依存し、平行線ケーブルおよび準平行線ケーブル 1.05、スパイラルケーブル 1.1、ストランドケーブル 1.15、CFRCケーブル 1.20 とする。これらの値は、ロープのよりべりを考慮した道路橋示方書に示されている低減係数とほぼ同一の値である。

ϕ_2 は、ケーブルの施工に関する安全係数で、収束や定着が工場製作される場合は 1.0、現地製作される場合は 1.05 とする。現地施工する場合には、品質のばらつきがやや高いと想定されるためである。

ϕ_3 はケーブルの防食に関する安全係数であり、工場で防食される場合は 1.0、現地防食される場合は 1.1 とする。現地防食される場合には、品質のばらつきが高いと想定されるためである。なお、素線は亜鉛メッキすることを前提とする。

ϕ_4 はケーブルがサドル部などで曲げられる場合の安全係数であり、直線の場合は 1.0、曲線の場合は 1.2 とする。なお、道路橋示方書に準じて、平行線ケーブルでは曲率半径がケーブル径の 8 倍以上、より線ケーブルでは曲率半径がケーブル径の 5.5 倍以上は直線と

みなす^{4),5)}。

3.4 定着部の強度

ケーブル終局強度に対して、定着部すなわちソケット部の終局強度 F_s は、素線の引張強度 F_t の 95% 以上でなければならないとする。

$$F_s > 0.95 F_t \quad (6)$$

ここで、定着部の終局とは、過大なソケットの変形や素線の抜けが生ずる状態とする。なお、くさび定着では素線強度の 100% を保証することは不可能であるため、95% と設定した。

3.5 現行の設計強度との比較

本章で提案した設計基準強度および安全係数値の妥当性を検討するため、以下の 3 ケースについて既存の設計強度と比較する。

(1) 明石海峡大橋の主ケーブル

明石海峡大橋の主ケーブルには、引張強度 1,764MPa の亜鉛メッキ鋼線 (5mm 径) で構成されるプレファブ平行線ケーブル (PWS) が用いられた。亜鉛メッキ鋼線の引張試験により得られた 3 種類の降伏相当強度を表-1 に示すが、2 つのデータは同一ロールから得たサンプルのため相当強度はほぼ同一であるが、いずれも F_2 が最小値を与える。

明石海峡大橋においては、0.8% 全伸びに対応する値を降伏相当応力度 1,372MPa として製作管理に用いた。実施設計では、引張強度を安全率 2.20 で割ることにより、許容応力度を 802MPa としている。一方、本提案式によれば、工場製作、現地防食を考慮すれば、設計基準強度 F_u は以下となる。

$$\phi_1=1.05, \phi_2=1.0, \phi_3=1.1, \phi_4=1.0$$

$$F_u = 1,372 / 1.05 / 1.1 = 1,187 \text{ MPa} \quad (7)$$

$L=0.1D$ とした場合、本案を現行に換算すると、許容応力度は $1,187 \times (1+0.1) / (1.3+2.5 \times 0.1) = 842 \text{ MPa}$ となり、安全率は 2.09 となり、現行よりやや低くなる。

明石海峡大橋で実際に用いられた亜鉛メッキ鋼線の引張強度 (規定値: 1,764-1,960MPa) と 0.8% 伸び耐力 (1,372MPa 以上) の測定結果を図-11 と図-12 に示すが、全ての試験体はいずれも規定値を上回り、しかも品質が一定していることが理解できる。したがって、規定値を用いた本ケーススタディーの安全率はやや安全側であると考えられる。

表-1 亜鉛メッキ鋼線 (5mm 径) の降伏相当強度

	F1	F2	F3
Sample 1	1,553	1,472	1,525
Sample 2	1,553	1,475	1,525

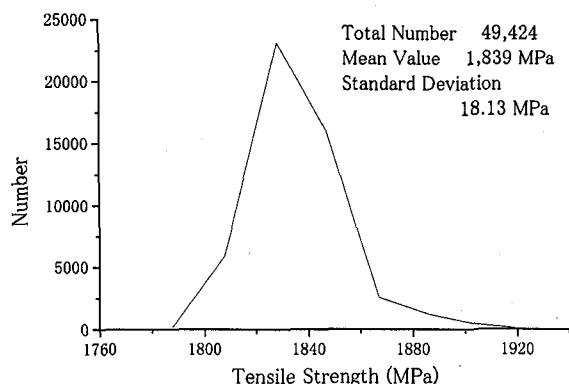


図 11 亜鉛メッキ鋼線の引張強度

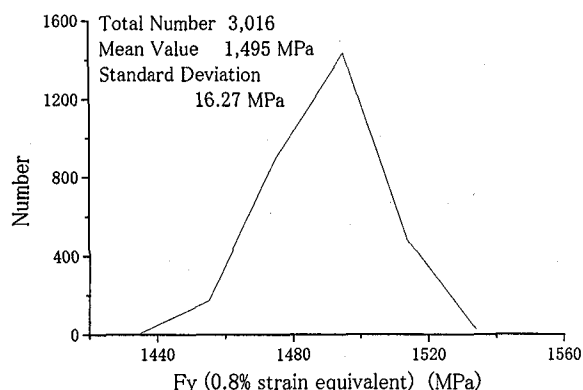


図-12 亜鉛メッキ鋼線の 0.8%耐力

表-2 亜鉛メッキ鋼線(7mm 径)の降伏相当強度

	F1	F2	F3
Sample 1	1417	1331	1418
Sample 2	1418	1320	1421

(2) 斜張橋用プレファブ準平行線ケーブル

プレファブ準平行線ケーブルを用いた斜張橋ケーブルを検討する。通常、亜鉛メッキ鋼線の径は 7mm で引張強度 F_t は 1,568 MPa である。表-2 に 2 つのサンプルの引張試験結果を示すが、0.7% 全伸びに相当する降伏応力 F_2 が最小値である。一般の斜張橋用プレファブケーブルでも、 F_2 に相当する降伏応力 1,156 MPa を保証している。本提案式によれば、すべて工場製作であることを考慮して、設計基準強度 F_u は以下となる。

$$\phi_1=1.05, \phi_2=1.0, \phi_3=1.0, \phi_4=1.0$$

$$F_u=1156/1.05=1101 \text{ MPa} \quad (8)$$

道路橋示方書では、 $D+Pr+L$ に対して許容応力度 627 MPa、安全率 2.50 としている。 $L=0.25(D+Pr)$ とした場合、本案を現行に換算すると許容応力度は $1101 \cdot (1.0+0.25)/(1.3+2.5 \cdot 0.25)=751 \text{ MPa}$ 、安全率 2.19 となる。本形式ケーブルは工場で作製され、品質も安定

しているため、規定値を用いた本ケーススタディーの安全率はやや安全側であると考えられる。

(3) エクストラードズド橋の被覆ストランドケーブル

工場にてポリエチレン被覆された亜鉛メッキ鋼より線を現地でくさび定着する被覆ストランドケーブルを用いたエクストラードズド橋ケーブルを検討する²⁾。ケーブルを構成する亜鉛メッキ鋼より線の引張強度 F_t は 1,764 MPa であり、0.2% 残留伸びに対応する降伏応力は 1,372 MPa としている。本提案式によれば、設計基準強度 F_u は以下となる。

$$\phi_1=1.15, \phi_2=1.05, \phi_3=1.0, \phi_4=1.0$$

$$F_u=1372/1.15/1.05=1136 \text{ kgf/mm}^2 \quad (9)$$

現行では、 $D+PS+L$ に対して、許容応力度は引張強度 F_t の 60%、すなわち $0.6 \cdot 1764=1058 \text{ MPa}$ を用いており、安全率は 1.67 である。ここで、 $L=0.05D$ とした場合は、本案を現行に換算すると許容応力度は $1136 \cdot (1.0+0.05)/(1.3+2.5 \cdot 0.05)=892 \text{ MPa}$ 、安全率は 2.10 となる。エクストラードズド橋においては、コンクリート桁内部に設置される PC 鋼線を基準にして安全率が設定されているが、本例に示すように、現行の安全率は危険側である可能性が認められた。

4. 使用限界状態

使用限界状態に関しては、常時荷重に対して有害なクリープ・リラクゼーションが発生してはならない。亜鉛メッキ鋼線そのもののクリープおよびリラクゼーションは小さく、橋の使用性を損なうレベルではない⁶⁾。さらに、平行線あるいは準平行線ケーブルのクリープおよびリラクゼーションは亜鉛メッキ鋼線とほぼ等しいことも実験により確かめられている⁷⁾。しかし、より角度が大きいケーブルでは、一般的にその値が大きくなるため注意を要する。

また、ケーブルは風や通行車両により振動しやすく、疲労の問題も生じやすい。したがって、振動を抑制する措置を施すことが望ましい。

5. 疲労限界状態

5.1 疲労照査の基本式

従来、ケーブルの疲労照査は DIN 1073 鋼道路橋計算基準によって照査されることが一般的である。これは、次式で表される⁸⁾。

$$\sigma_w < \sigma_{fa} \quad (10)$$

$$\sigma_{fa} = \min \{ 245/(1-0.895R), 0.45\sigma_t \} \quad (11-1)$$

$$R = \sigma_{L\min} / \sigma_{L\max} \quad (11-2)$$

ここで、 σ_w : 発生応力振幅、 σ_{fa} : 許容応力振幅、 R : 応力比、 $\sigma_{L\min}$: 最小応力、 $\sigma_{L\max}$: 最大応力、 σ_t : 引張強度である。

本式は、ケーブル一般部の疲労限度 245MPa とし、ソケット部はこれ以上の疲労強度を有することを前提としている。また、発生応力振幅の算定にはL荷重の50%を用いており、その妥当性はこれまで十分に検討されていない。本論文では、ケーブルの疲労は Miner の累積損傷度法により照査する。

$$D = \sum \{ n_i / N_i \} \leq 1.0 \quad (12)$$

ここで、D：損傷度、 n_i ：応力振幅 σ_i または曲げ角度 θ_i の発生回数、 N_i ：応力振幅 σ_i または曲げ角度 θ_i の限界回数である。なお、素線の疲労強度はソケット近傍の疲労強度より相対的に高いため、疲労限界回数はソケット近傍部のものとする。

5.2 活荷重に対する照査

疲労照査する代表荷重は鋼構造物の疲労設計指針にしたがい T20 荷重 (196kN) とする^{8),9),10)}。これを、1車線上を移動させ、最大応力度 σ_{TMAX} および最小応力度 σ_{TMIN} から応力振幅を算定し、これに橋軸方向の同時載荷係数 γ 、幅員方向の同時載荷係数 β を乗ずる。

$$\sigma = \gamma \beta (\sigma_{Tmax} - \sigma_{Tmin}) \quad (13)$$

ここで、 γ および β ：は藤野らの提案式¹¹⁾によるものとした。

$$\gamma = 1.0 \quad \text{for } \lambda L \leq 3.0 \quad (14-1)$$

$$= 1.0 + 0.044 (\lambda L - 3.0) \quad \text{for } \lambda L > 3.0 \quad (14-2)$$

$$\beta = \text{Min} \{ 1.0 + 2.0(\lambda L), 1.0 + 0.1333q + 1.8q^2 - 133q^3 \} \quad (15)$$

ここで、 λ ：アーラン分布を仮定した係数 ($= 3Q / 1000V$)、 Q ：交通量 (台数/hr)、 V ：走行速度 (km/hr)、 L ：影響線長、 q ：各車線上の車両による応力の比である。

ケーブルには、2種類の疲労、すなわち純引張応力および2次曲げ応力による疲労が生ずる。純引張応力変動により生じるソケットの疲労強度に関する限界回数は、過去の研究に基づき^{8),12)}、プレファブ準平行線ケーブルに関しては次式を提案する。

$$N = 300 / S^5 \quad \text{for } S > 0.143 \quad (16-1)$$

$$= \infty \quad \text{for } S \leq 0.143 \quad (16-2)$$

ここで、 σ ：発生応力振幅、 σ_{min} ：最小応力度、 σ_t ：引張強度、 S は無次元応力振幅であり次式で定義する。

$$S = (\sigma / \sigma_u) / \{ 1 - (\sigma_{min} / \sigma_u) \} \quad (17)$$

疲労実験結果および照査式の比較を NEW-PWS ケーブル¹¹⁾について図-13 に、Hi-Am ケーブル⁷⁾について図-14 に示すが、いずれも良く一致している。また、ストランドケーブルには次式を用いる。

$$N = 30 / S^5 \quad \text{for } S > 0.0786 \quad (17-1)$$

$$= \infty \quad \text{for } S \leq 0.0786 \quad (17-2)$$

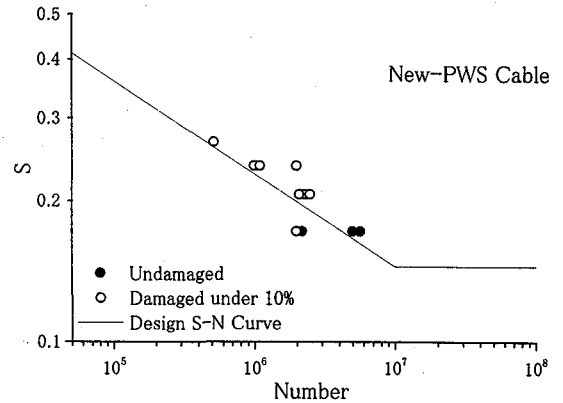


図 13 S-N 曲線 (New-PWS ケーブル)

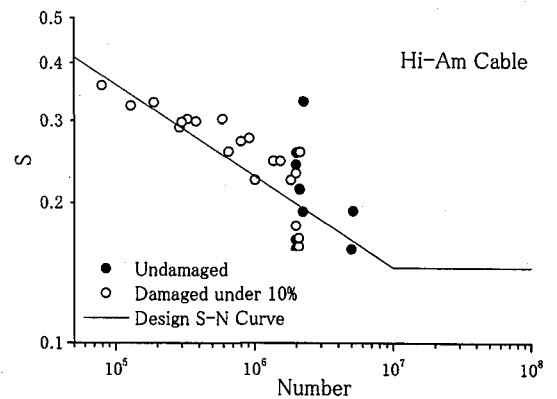


図 14 S-N 曲線 (Hi-Am ケーブル)

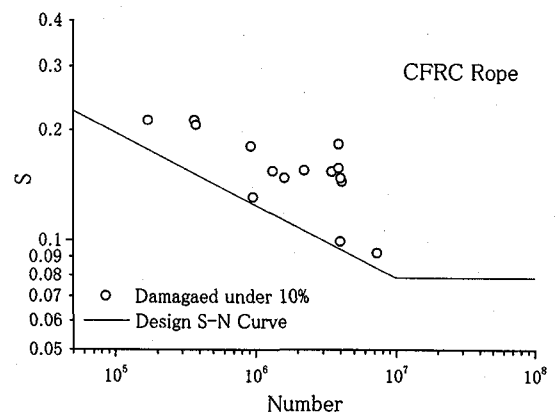


図 15 S-N 曲線 (CFRC ケーブル)

ストランドロープの一種であるCFRCに関する疲労実験結果¹³⁾および照査式を図-15に示すが、両者は良く一致している。なお、くさび定着に関しては疲労データが少なく、別途検討が必要であると考えられる。

2次曲げ応力疲労の照査法については次章において述べる。なお、活荷重載荷時の純引張り応力と2次曲げ応力による組み合わせ疲労については不明確な要素も多く、疲労設計法も確立していない^{14),15)}。したがって、角折れ緩衝装置などを使い、極力2次曲げが生じないような措置を講ずることが必要である。

5.3 活荷重照査のケーススタディー

3径間鋼斜張橋（スパン：100+250+100m）を対象として、最も疲労に敏感であるアンカーケーブルの照査方法を示す。一般図を図-16に、断面図を図-17に、アンカーケーブル張力の影響線を図-18に示す。橋梁の設計荷重はB活荷重とした。

ケーブルは準平行線プレファブケーブルとした。引張強度 σ_t は1,568 MPaとした。アンカーケーブルの断面積 A_c は80cm²とすると、死荷重応力 σ_D は303 MPa、最大活荷重応力 σ_{LMAX} は287 MPa、最小活荷重応力 σ_{LMIN} は-130MPaである。

交通量の多い道路橋を想定し、計画走行車両を大型車両 3000 台/車線/日、標準走行速度を 50km/hr、橋梁の耐用年数を 50 年とした。累積回数 n は次式となる。

$$n=3000 \times 365 \times 50=5.475 \times 10^7$$

影響線の長さ L を 300m とすると、同時載荷係数は以下のように計算される。

$$\lambda = 3 \times (3000/24) / (100 \times 50) = 0.0075$$

$$q = 10.75 / 14.25 = 0.744$$

$$\lambda L = 0.0075 \times 300 = 2.25$$

$$\gamma = 1.0, \beta = \min \{1.45, 1.548\} = 1.45$$

衝撃係数は側径間が 0.133, 主径間が 0.067 であるため、代表荷重 T20 による最大応力 σ_{TMAX} 、最小応力 σ_{TMIN} 、無次元応力振幅 S は以下となる。

$$\sigma_{TMAX} = 1.0 \times 1.45 \times 196000 \times (14.25/18.0) \times 0.995 \times 1.067 / 8000 = 29.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{TMIN} = 1.0 \times 1.45 \times 196000 \times (14.25/18.0) \times (-0.775) \times 1.133 / 8000 = -24.7 \text{ MPa}$$

$$S = \{(29.9+24.7)/1568\} / \{1 - (303-24.7) / 1568\} = 0.0423$$

したがって、式(16-2)および式(12)より

$$N = \infty, D = n / N = 0 < 1.0 \text{ OK!}$$

となる。本例を、この DIN 1073 によって照査すると、以下となる。

$$\sigma_w = \sigma_D + 0.5 \times \sigma_{LMAX} = 303 + 0.5 \times 287 = 447 \text{ MPa}$$

$$R = (303 - 65) / (303 + 144) = 0.532$$

$$\sigma_{fa} = 245 / (1 - 0.895 \times 0.532) = 467 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w < \sigma_{fa} \text{ OK}$$

したがって、本例の場合は、上記2つの方法とも疲労に対しては安全となる。しかし、照査に用いる応力振幅に関しては、L 荷重の 50%を用いた DIN 方式が T20 荷重による応力振幅の 3.8 倍となっており、きわめて厳しい荷重設定となっていることが理解できる。

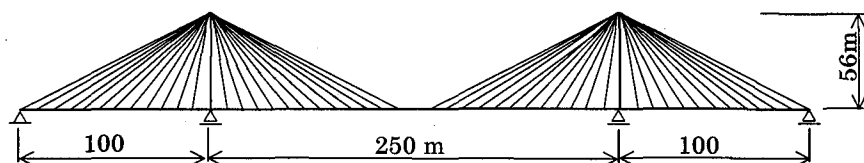


図-16 検討に用いた斜張橋の一般図

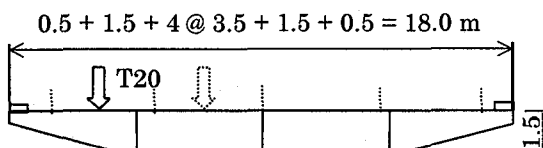


図-17 断面図および代表荷重の載荷位置

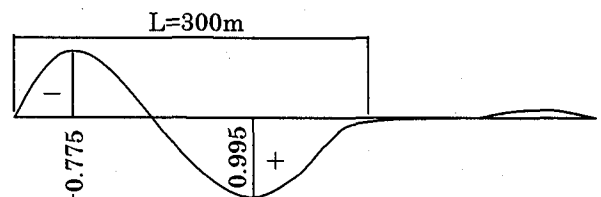


図-18 アンカーケーブル張力の影響線

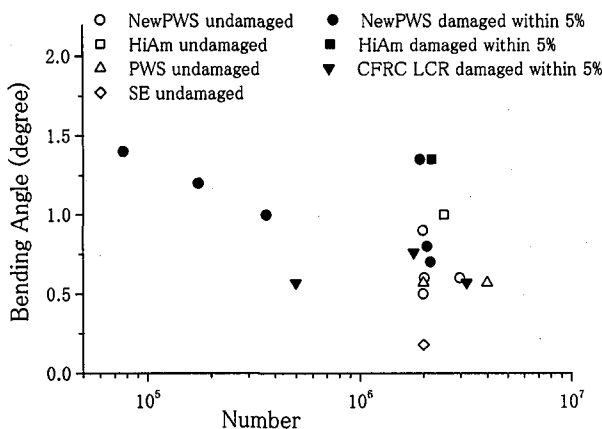


図-19 2次曲げ疲労実験強度

5.4 風による振動する場合の照査

風によりケーブルが振動する場合には、2次曲げ応力変動により生じるソケット部の疲労を照査しなければならない。2次曲げ疲労強度に関する限界回数は、過去の研究に基づき、次式を提案する^{16),17)}。(図-19)

$$N_i = 0.6^3 \cdot 2,000,000 / (k_B \phi_i \theta_i)^3 \quad (10)$$

ここで、 θ_i :発生曲げ角度(度)である。 k_B はソケットの種類に応じて変化すべきであるが、データ数が少ないため1.0とした。 ϕ_i はケーブルの施工に関する係数で、工場製作1.0、現地製作1.05とする。

しかし、図-19に示すデータは種類の異なるケーブルの結果を一括して示しており、データ数も少なく、ケーブルによっては曲げ角度の小さいものもある。したがって、式(10)は照査として使用するのが良い。したがって、振動を抑制するダンパーなどの対策を施し、かつ2次曲げ応力が生じないような角折れ緩衝装置を設置するのが望ましい。

6. まとめ

本論文では、斜張橋ケーブル、エクストラドーズド橋ケーブル、吊橋の主ケーブルおよびハンガーを対象にしてケーブルの限界状態設計法を提案した。ケーブルの設計基準強度は、ケーブルの種類、施工法、防食法、形状を考慮して設定した。

本提案式によれば、明石海峡大橋クラスの長大吊橋ケーブルに関しては、現行より約5%低い安全率となる。斜張橋用のプレファブ・セミパラレルケーブルでは、約12%低い安全率となる。一方、エクストラドーズド用のケーブルでは、現行より約25%高い安全率となり、現行安全率が危険側である可能性が認められた。

疲労に関しては、代表荷重を基準とし、実際の疲労実験結果を反映させた照査法を提案した。試設計され

た斜張橋でのケーススタディーによれば、DINの方法は本提案式に比べ安全側の照査値を示した。

以上、橋梁ケーブルに関する新設計法を提案したが、ケーススタディー数も十分ではないため、今後さらに発展させていくつもりである。本研究が、橋梁ケーブルの合理的な設計に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 城野嘉明, 小野寺勇, 中道淳, 塩田良一: 西湘バイパス・世界初のエクストラドーズドPC橋小田原港橋の設計と施工, 橋梁, No.5, pp.2-10, 1994.
- 2) 小松原仁, 北川竜三, 金子正猪: 斜張橋より線ケーブルの材料特性と架設一新尾道大橋, 橋梁と基礎, No.5, pp.11-15, 1999.
- 3) 土木学会鋼構造委員会: 鋼斜張橋—技術とその変遷—, 1990.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 14章ケーブル, 1996.
- 5) 本州四国連絡橋公団: 上部工設計基準・同解説, 1989.
- 6) 土木学会: 鋼構造物の終局強度と設計, 鋼構造シリーズ6, 4.5吊橋のケーブル構造, 1994.
- 7) 坂本良文, 江口立也, 北条哲男, 小村敏, 和田克哉: プレ防食型斜張橋用ケーブルのクリープ, リラクゼーションに関する実験的研究, 橋梁と基礎, No.3, pp.27-32, 1992.
- 8) 三木千壽: 鋼構造物疲労設計指針, 日本鋼構造協会, 1993.
- 9) 三木千壽, 館石和雄, 杉本一朗: 道路橋の疲労照査のための活荷重に関する一考察, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.63-68, 1991.
- 10) 三木千壽, 杉本一朗, 宮崎早苗, 森猛: 鋼道路橋の疲労照査のための荷重に関する研究, 構造工学論文集, No.36A, pp.975-984, 1990.
- 11) 藤野陽三, パルティア B.K., 三木千壽, 伊藤學: 車両の同時載荷が道路橋の疲労損傷に及ぼす影響, 構造工学論文集, No.33A, pp.775-785, 1987.
- 12) Nakamura S. and Hosokawa H.: 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.
- 13) 奥川淳志: 吊橋ハンガーロープの引張および疲労試験, 本四技報, Vol.2, No.5, pp.2-7, 1978.
- 14) 坂本良文, 北条哲男, 江口立也, 矢野守俊: 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, 土木学会論文集, No.446/I-19, pp.215-223, 1992.
- 15) 中村俊一, 高見伸一, 坂本良文: 斜張橋用セミパラレルワイヤーケーブルの二次曲げについて, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1063-1073, 1993.
- 16) 建設省土木研究所構造研究室: 斜張橋並列ケーブルのウエークギャロッピング制振対策検討マニュアル(案), 1995.
- 17) 遠藤武夫, 奥川淳志, 竹ノ内博行, 三木千壽: 橋梁用ケーブルの曲げ疲労強度, 鋼構造論文集, 第1巻3号, pp.91-102, 1994.

(2000年9月14日受付)