

鋼斜張橋ケーブルの疲労安全性と 部材安全率に関する研究

内藤 純也¹・西村宣男²

¹正会員 工修 (株)神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)
E-mail:j-naito@kobelco.jp

²フェロー 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

本論文は、鋼斜張橋の合理的なケーブル安全率について、疲労安全性の観点から考察を行うものである。検討の対象としたのは、3径間連続鋼斜張橋であり、中央径間長、ケーブル安全率を変化させて試設計したモデルである。ケーブルの疲労については、設計で考慮される引張応力の変動だけでなく、定着部での2次曲げによる応力変動も考慮し、実働活荷重を模擬したモンテカルロシミュレーションによって疲労損傷度を評価する。鋼斜張橋のケーブルは、2次曲げ応力を考慮した場合でも十分な疲労耐久性を有しており、安全率を変更したことによる疲労安全性の低下が小さいことを明らかとし、安全率の設定方法について考察を行う。

Key Words : cable-stayed bridge, secondary stress, cumulative fatigue damage, cable safety factor

1. まえがき

我が国における鋼斜張橋のケーブル安全率は、切断強度に対して 2.5 と規定されている。この値は、降伏点 (0.2%永久伸び耐力) に対する安全率に換算すると約 2.0 であり、普通鋼材の降伏点に対する安全率 (約 1.7) に対して高い値となっている。鋼斜張橋のケーブル安全率がこのように規定された数値的根拠は明確でないが、同じ材料規格のケーブルが適用される吊橋主ケーブルとの相対的な特性の違いや海外基準との比較、国内の実績等を考慮して決定されたものである。また、斜張橋のケーブルは吊橋主ケーブルと比較して、活荷重による変動応力が大きく、疲労に対する配慮が必要であることが他の部材よりも安全率が高くなっている要因の一つであると考えられる。

鋼斜張橋のケーブル安全率に関しては、長井ら¹⁾、野口ら²⁾が耐力力の観点から安全率低減の可能性を示唆している。中村³⁾は斜張橋ケーブルに限界状態設計法を適用し、安全率の合理化を提案している。また、コンクリート橋では、PC 斜張橋とエクストラード橋とを斜材により補強された桁構造 (外ケーブル構造) として統一し、斜材の鉛直荷重分担

率によって、斜材の安全率を PC 鋼材の安全率である 1.67 から斜材の安全率である 2.5 の間で線形的に変化させる設計方法が提案されている⁴⁾。近年、建設が進んでいるエクストラード橋では、この考え方にに基づき、斜材の鉛直荷重分担率が小さく、斜材の疲労が問題とならない場合に、安全率 1.67 が用いられている⁵⁾。鋼斜張橋ケーブルの疲労については、DIN1073 の基準を準用した手法⁶⁾が適用されてきたが、この疲労照査法で断面を増加させるケースはほとんどなかったというのが実状である。

本研究は、斜張橋のケーブル安全率と疲労安全性との関係を明らかとし、安全率の合理的決定に関する基礎資料とすることを目的とする。本論文では、中央径間長、ケーブル安全率をパラメータとした斜張橋モデルに対して、実交通流を模擬した活荷重シミュレーションを行い、2 次応力を考慮したケーブルの応力変動による疲労安全性を評価する。さらに、平成 14 年に発行された鋼道路橋の疲労設計指針による照査方法との比較、鋼斜張橋のケーブル安全率と疲労安全性の関係について考察を行う。

2. 鋼斜張橋モデル

(1) 設計条件

検討の対象とする斜張橋モデルは、2面吊りマルチケーブルの3径間対称自定式鋼斜張橋とし、中央径間長、ケーブル安全率をパラメータとして試設計を行った。斜張橋モデルの一般図および断面図を図-1に示す。中央径間長を150m、200m、250mの3ケースとし、側径間長、タワー高さ、ケーブル段数等の形状パラメータは実橋分布をもとに決定した。橋梁の規模については、今後の建設需要を考慮して中小規模の斜張橋を対象としている。ケーブルにはST1570、7.0mm鋼線のPWSを用い、安全率は2.2、2.5の2種類とした。破断強度に対する安全率2.2は、降伏点に対する安全率に換算すると約1.7に相当し、ケーブル以外の鋼引張部材と同等の安全率となる。

(2) ケーブル安全率と構造諸元の関係

表-1に各試設計ケースの主桁、塔、およびケーブルの構造諸元を示す。一般的にマルチケーブル形式の斜張橋では、主桁の曲げモーメントを小さくし、主桁断面が小さくなるようにケーブル張力を決定するため、鉛直荷重のほとんどをケーブルが分担する。そのため、ケーブル安全率を小さく設定した場合、単純に安全率の比率に相当してケーブル断面積を小さく設定できる。ただし、ケーブルの鉛直方向の伸

び剛性が小さくなるため、主桁、主塔の断面を若干大きくする必要がある。また、本研究における試設計では、規格化された平行線ケーブルを用いているため、ケーブルの断面積の低減率が様でない。試設計モデルの鋼重を概算すると、安全率を2.5から2.2に変更した場合、ケーブル重量が15%~18%小さくなるのに対して、主桁、主塔の重量増加は3%程度である。

3. 2次応力を考慮した斜張橋ケーブルモデル

(1) 斜張橋用平行線ケーブル

斜張橋用ケーブルとして、防食性能を向上させるために工場にてポリエチレン被覆された平行線ケーブルが広く用いられている。これらのケーブルには取り扱いを容易にするために若干の撓りが入っている。一般にケーブル部材は、引張力のみに抵抗するものとして設計されるが、活荷重によって生じるたわみや風による振動が発生した場合、ケーブル端部に2次曲げが繰り返し発生し、疲労が問題となる場合がある。そのため、日本で広く用いられているケーブルのソケットには、2次曲げ応力の低減と疲労強度向上のためにソケット口元にエポキシ樹脂が充填されている。本論文では、樹脂によるソケット口元の緩衝効果を回転ばね剛性によってモデル化し、斜張橋の全体モデルに適用する。

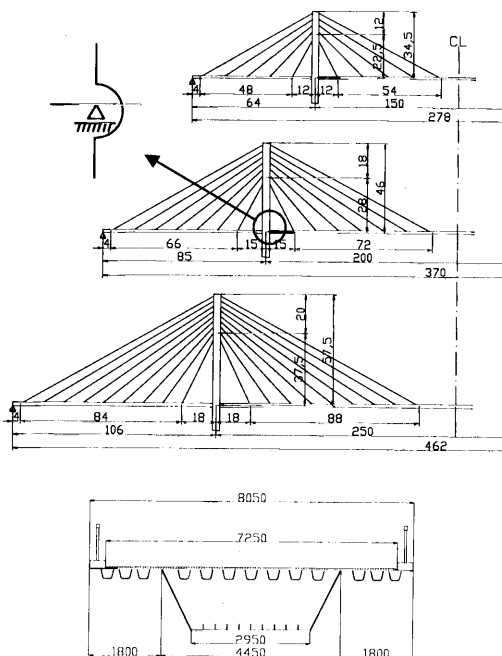


図-1 対象とした斜張橋モデル

表-1 主桁、塔、およびケーブルの構造諸元

支間長_安全率 (桁高(m))	部材	A (m ²)	I (m ⁴)
Model_150_2.5 (1.2)	主桁	0.113~0.138	0.0516~0.0820
	塔	0.816	0.940
	ケーブル	PWC-31, 37, 73	---
Model_150_2.2 (1.2)	主桁	0.115~0.143	0.0524~0.0878
	塔	0.828	0.966
	ケーブル	PWC-19, 31, 61	---
Model_200_2.5 (1.5)	主桁	0.126~0.147	0.0957~0.142
	塔	0.969	1.458
	ケーブル	PWC-19, 37, 85, 91	---
Model_200_2.2 (1.5)	主桁	0.124~0.153	0.0957~0.149
	塔	1.000	1.498
	ケーブル	PWC-19, 31, 73, 85	---
Model_250_2.5 (1.8)	主桁	0.150~0.155	0.186~0.200
	塔	1.012	1.532
	ケーブル	PWC-19, 37, 73, 91, 109	---
Model_250_2.2 (1.8)	主桁	0.150~0.161	0.187~0.214
	塔	1.157	1.978
	ケーブル	PWC-19, 31, 61, 85, 91	---

(2) 斜張橋ケーブルのモデル化

斜張橋用ケーブルの 2 次応力に関しては、藤井ら⁷⁾、中村ら⁸⁾がソケット口元に充填された樹脂による 2 次応力の低減効果を定量的に明らかにしている。本研究では、斜張橋の全体モデルで 2 次応力を算出するため、ソケットの樹脂による 2 次曲げ応力の低減効果をケーブルと桁の間に挿入した回転ばねによって考慮する。

はじめに、図-2 に示す張力と集中荷重の作用する両端固定はりを考える。このモデルは、ケーブル曲げ載荷実験⁷⁾を再現したものである。また、考慮するケーブルの曲げ剛性については、定着部近傍の変形および 2 次曲げ応力の分布に影響するが、端部に生じる 2 次応力の最大値にはほとんど影響を及ぼさない⁸⁾。そこで、簡便のため、ケーブルの曲げ剛性には、素線間が完全滑りの状態を仮定した EI_n を用いる。このとき、固定端での曲げ応力は、次式で表される。

$$\sigma_b = \frac{M d}{I_n} \quad (1)$$

ここに、

$$M = \frac{P}{2\mu} \left\{ \frac{1 - \cosh(\mu l/2)}{\sinh(\mu l/2)} \right\} \quad (2)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{T}{EI_n}} \quad (3)$$

σ_b : 2 次応力, E : 弾性係数, T : ケーブル張力, M : 端部の曲げモーメント, d : 素線径, I_n : 素線の断面 2 次モーメントの総和

ケーブル部材では、同程度の断面を有する通常の部材と比較して曲げ剛性 EI_n が非常に小さく、逆に張力 T は非常に大きい。したがって、 $\mu l \gg 1$ となるため、式(1)は次式のように近似できる。

$$\sigma_b = P \sqrt{\frac{E}{TA_c}} \quad (4)$$

つぎに、図-3 に張力と集中荷重が作用し、両端を回転ばね支持されたはりを考える。両端に回転ばねを有するはりの端部の曲げ応力は、回転ばね剛性 k を用いて次式で表される。

$$\sigma'_b = \frac{M' d}{I_n} \quad (5)$$

ここに、

$$M' = \frac{P}{T} \left\{ \frac{\sinh(\mu l/2)}{\sinh \mu l} - \frac{1}{2} \right\} \left/ \left\{ \frac{\mu \cosh \mu l - \mu}{T \sinh \mu l} - \frac{1}{k} \right\} \right. \quad (6)$$

$\mu l \gg 1$ となることから、式(6)は、

$$M = \frac{Pk}{2(k\mu - T)} \quad (7)$$

$$\sigma'_b = \frac{Pk}{2(k\mu - T)} \frac{d}{I_n} \quad (8)$$

のように近似できる。藤井ら⁷⁾はケーブルの曲げ実験によって、樹脂定着した場合の 2 次応力は、理論値の 70% 程度であるとしており、次式で表される。

$$\sigma'_b = \alpha \sigma_b \quad (\alpha = 0.7) \quad (9)$$

式(9)に式(8)を代入し、整理すると、回転ばね剛性は次式で定義できる。

$$k = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \sqrt{EI_n T} \div 2.3 \sqrt{EI_n T} \quad (10)$$

式(10)にて求まる回転ばね剛性を斜張橋モデルに適用し、定着部の 2 次応力を考慮したケーブル応力の影響線を算出する。

2 次応力に関しては、ソケット製品による違いやケーブル中間部で弾性支持するような 2 次応力緩和構造⁹⁾とする場合で低減効果が異なると考えられる。文献 7), 8), 10), 11) では、それぞれ条件の異なるソケット製品、2 次応力緩和構造で 2 次応力の低減効果を明らかにしており、本論文では、これらの文献における 2 次応力低減率の中で最も安全側となる数値を採用することとした。

(3) ケーブル応力の影響線

試設計した斜張橋モデルに対して骨組解析を行い、ケーブル応力の影響線を算出した。ケーブルにはオイラーはり要素を用い、素線間が完全滑りの状態を仮定した曲げ剛性 EI_n を仮定した。定着部近傍では、既報¹²⁾と同様に 2 次応力を精度よく算出できる要素分割とし、桁要素とケーブル要素との間に前述した回転ばねを考慮した。式(7)における回転ばね剛性を算出する際の張力は完成系 (D+PS) における張力を用いた。図-4 に中央径間長 200m、ケーブル安全率 2.5 のモデルにおける側径間ケーブル S1, S4, S7

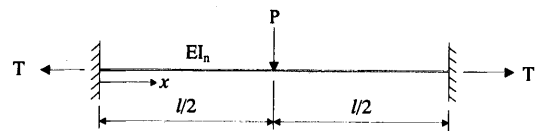


図-2 両端固定はりモデル

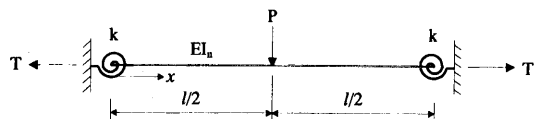


図-3 両端を回転ばね支持されたはりモデル

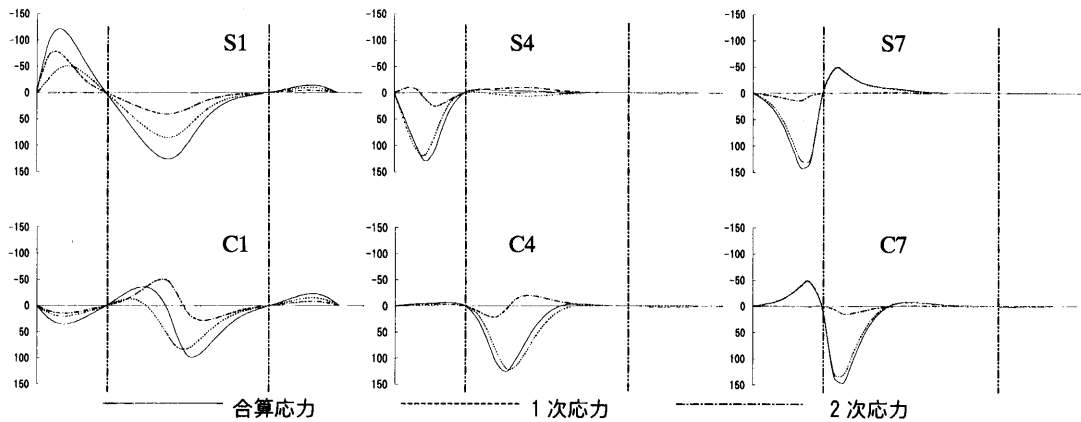


図-4 ケーブル応力の影響線 (Model_200_2.5)
(縦軸：応力 (N/mm²)，横軸：橋梁上の位置 (2点破線：塔位置))

および中央径間ケーブルC1, C4, C7の影響線図を示す。図-5は、図-4の記号のケーブル位置を示しており、S1, C1が最上段位、S4, C4は中段、S7, C7は最下段に配置されるケーブルである。影響線図は、通常、単位荷重に対する応答値で表されるが、ここでは、着目ケーブル側の車線に疲労設計指針¹³⁾における疲労設計荷重 (600kN : T-荷重 (200kN) に活荷重補正係数 $\gamma_T=3.00$ を考慮) を載荷した場合の応答値とした。

アンカーケーブルに相当する側径間最上段ケーブル (S1) を除いては、1次応力振幅は下段側のケーブルで大きくなる傾向を示す。2次応力振幅は桁の曲げ変形の影響を受けやすい上段側のケーブルで大きくなる傾向を示し、特に支点近くに定着点がある側径間最上段ケーブル (S1) で大きくなる。

4. 活荷重シミュレーションの方法

(1) 活荷重シミュレーション

文献14)を参考にして実交通流によってケーブルに発生する応力変動をモンテカルロ・シミュレーションによって算出する。車種、車両重量、および車間距離を確率モデルとして、乱数を用いて活荷重列を発生させ、ケーブル応力の影響線と一定の車速で橋梁上を移動する活荷重列とから変動応力波形を算出する。車頭時間間隔は、自由度3のアーラン分布と仮定し、変動応力範囲の頻度解析にはレインフロー法を用いた。活荷重モデルは、一般国道を代表する活荷重モデル¹³⁾を用いた。

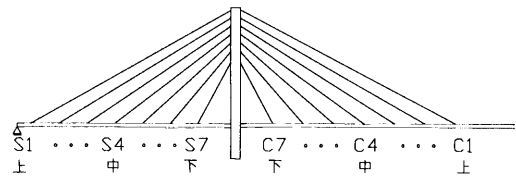


図-5 斜張橋モデルのケーブル番号

(2) 交通量の設定

疲労照査に用いる時間当たりの車両台数および大型車混入率は、橋梁が建設される道路の将来交通量の予測にもとづいて決定されるものである。しかし、検討の対象としている鋼斜張橋は特定の路線を想定していないため、交通量は大型車混入率と1車線当たりの時間交通量をパラメータとした3ケースを設定し、それぞれの状態が1日に8時間ずつ発生するものとして疲労照査を行うこととした。本研究における斜張橋モデルは2車線であるが、両車線とも同じ交通条件とした。表-2に設定した交通条件の1車線当たりの時間交通量と大型車混入率を示す。

本研究では、鋼斜張橋ケーブルの疲労限界および、部材安全率と疲労安全性の関係に着目しているため、交通量、大型車混入率ともに疲労に対して厳しい交通条件としている。

(3) 平行線ケーブルのS-N曲線

累積損傷度 D は線形被害則にもとづいて式(11)によって算出する。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (11)$$

ここに、 n_i : シミュレーションによって算出され

る応力範囲 $\Delta \sigma_i$ の回数, N_i : S-N 曲線によって求められる $\Delta \sigma_i$ に対する疲労寿命

このとき, 疲労寿命に達する条件は $D > 1$ である.

引張の応力変動に対する S-N 曲線は, 式(12)で表される疲労設計指針¹³⁾の疲労強度の高いソケットを有する平行線ケーブルの S-N 曲線が適用できる.

$$\Delta \sigma^m \cdot N = C_0, \quad (C_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_f^m) \quad (12)$$

$$(m = 5, \Delta \sigma_f = 270 \text{ N/mm}^2)$$

斜張橋ケーブルの2次応力による疲労照査に関しては, Nakamura&Hosokawa¹⁵⁾は, 活荷重によって生じる1次応力と2次応力の合算変動応力に対して, 軸方向応力に対するS-N曲線を適用している. また, 斜張橋用平行線ケーブルの曲げ疲労強度に関しては, 遠藤ら¹⁶⁾が曲げ疲労試験を行い, 高い曲げ疲労抵抗を有することを確認している.

本研究で対象としている活荷重によるケーブルの応力変動は, 軸方向応力と2次応力が同時に変動するため, 本来ならば軸方向応力と曲げ応力が同時に変動する荷重条件でのS-N曲線が必要となる. しかしながら, 斜張橋用の平行線ケーブルを対象にこのような応力状態を考慮した疲労試験は試験機の制約上困難である. 本研究では, 遠藤ら¹⁶⁾の曲げ疲労試験において素線間にすべりが観察されており, ケーブルの応力状態が素線単位で直応力と曲げ応力が変動する場合に近いと考え, 軸方向の変動応力と2次応力を含む合算の変動応力の両方に対して式(12)で表されるS-N曲線を用いて累積疲労損傷度を算出する. また, 本研究では, 安全側の評価となるように変動応力に対する打ち切り限界は考慮しないものとした¹⁷⁾.

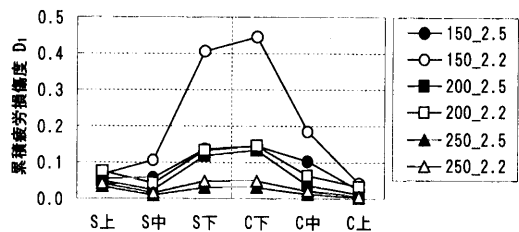
5. シミュレーション結果と考察

(1) 累積疲労損傷度による安全性評価

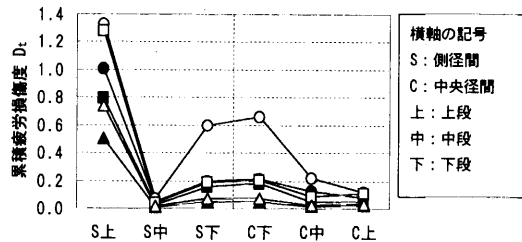
図-6に交通量モデルA, B, Cの状態が1日に8時間ずつ発生し, 供用期間を100年と仮定したときの各ケーブルの累積疲労損傷度を示す. 図-6(a)は1次応力に対する累積疲労損傷度 D_1 , 図-6(b)は2次応力を含む合算応力に対する累積疲労損傷度 D_2 である. D_1 は, 全てのケーブルで1.0以下となるが, 2次応力を考慮した D_2 は, 側径間最上段ケーブルで大きくなり, ケースによっては1.0を上回る. 3径間連続斜張橋の側径間最上段ケーブルは, 他のケーブルと特性が異なり, 塔を支えるアンカーケーブルとしての役割を担うため, 側径間に中間橋脚を設ける等の対策を講じない場合には, 十分な注意が必要となる.

表-2 交通流モデル

交通流モデル		A	B	C
時間交通量 (台/hr/車線)		1500	1000	500
車速 (km/hr)		70	100	100
大型車混入率		20%	40%	60%
車種	乗用車	0.653	0.490	0.327
	小型トラック	0.174	0.110	0.073
	中型トラック	0.020	0.161	0.242
	大型トラック	0.016	0.127	0.190
	大型ダンプ	0.005	0.037	0.056
	タンクローリー	0.003	0.021	0.032
	セミトレーラー	0.005	0.042	0.063
	大型バス	0.001	0.012	0.017



(a) 1次応力に対する累積疲労損傷度



(b) 2次応力を含む合算応力に対する累積疲労損傷度

図-6 累積疲労損傷度 (供用期間 100年)

ケーブル安全率を2.5から2.2に変更した場合, 中央径間長200m, 250mのモデルと比較して, 中央径間150mのモデルでは, 下段ケーブルの累積疲労損傷度が大きくなる傾向を示すが, その値は0.6程度であり問題ない. また, 中央径間が長くなるにつれて累積疲労損傷度が小さくなる傾向を示しており, 長大化することによって斜張橋ケーブルの疲労安全性は向上する.

(2) 交通モデルによる累積疲労損傷度の比較

図-7に1次応力による累積疲労損傷度が最も大きくなるModel_150_2.5のCSケーブル (中央径間最下段) の累積疲労損傷度 D_1 と時間当たりの大型車台数の関係を示す. 斜張橋ケーブルの累積疲労損傷度は,

大型車の通行台数との相関関係が強く、総台数との相関関係は弱い。この傾向は、単純桁の断面力に着目して同様のシミュレーションが行われている既往の研究^{13), 14)}の傾向と一致する。

(3) 影響線振幅と疲労損傷度の関係

鋼道路橋の疲労設計指針¹³⁾では、図-4に示す疲労設計荷重による影響線波形にレインフロー法等の適切な波形処理を行って、応力範囲とその頻度分布を算出し、照査に用いる。ただし、図-4の影響線波形は、ほとんどのケーブルにおいて極大値と極小値を1回ずつ持つ波形であるため、ここでは、影響線の最大値と最小値の差（以下、影響線振幅）を用いて、疲労損傷度との関係について考察を行う。

図-8に1次応力の影響線振幅と累積疲労損傷度 D_i および D_L の関係を示す。1次応力の影響線振幅を用いたのは、実際の設計計算の過程で算出できる値であることを考慮したためである。図-8より、1次応力の影響線振幅と累積疲労損傷度との間には明確な相関関係があり、斜張橋ケーブルの疲労損傷度は、1次応力の影響線振幅（影響線の最大値と最小値の差）によって評価することができる。

図-8中の実線で表される曲線は、式(13)で表される鋼道路橋の疲労設計指針の照査式¹³⁾（第4章 応力度による疲労照査）に表-3に示す各係数を考慮したものである。

$$D_i = \sum_i \frac{nt_i}{N_i} \quad (13)$$

$$nt_i = ADTT_{SLi} \cdot \gamma_n \cdot 365 \cdot Y \quad (14)$$

ここに、 D_i ：車線*i*に対する疲労設計荷重の移動載荷による累積疲労損傷度、 nt_i ：供用期間に考慮する疲労設計荷重の載荷回数、 N_i ：疲労設計曲線式(12)によって求められる $\Delta\sigma$ に対する疲労寿命、 $ADTT_{SLi}$ ：一方向一車線当たりの日大型車交通量、 γ_n ：頻度補正係数、 Y ：供用期間

また、図-8中の破線で表される曲線は、式(13)の照査式が曲線が図-8(a)のシミュレーション結果のプロットを近似するように補正したものである。疲労設計指針における照査式と本研究におけるシミュレーション結果との差は、表-3に示す各係数を決定した基本的なモデル、部材と本研究で対象とする斜張橋ケーブルとの違いによるものである。ただし、図-8(a)より、疲労設計指針の照査式は安全側の評価であることがわかる。

図-8(b)では、縦軸を2次応力を考慮した累積疲労損傷度 D_L としているため、シミュレーション結果のプロット点と破線で表される曲線のずれが2次応力

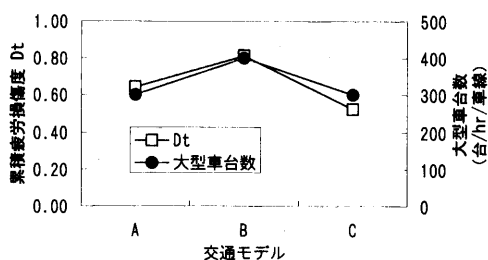
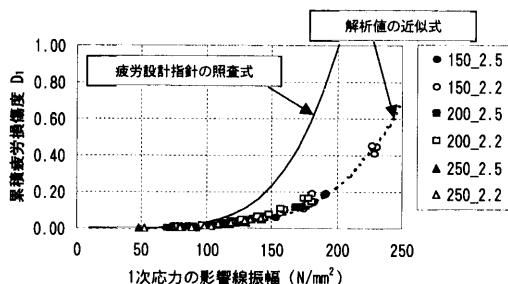
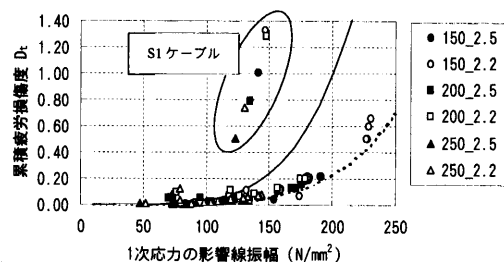


図-7 交通モデルによる累積疲労損傷度の比較
(Molel_150_2.5, C5 ケーブル)



(a) 影響線振幅と D_i との関係



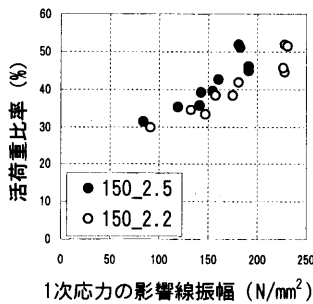
(b) 影響線振幅と D_L との関係

図-8 1次応力の影響線振幅と累積疲労損傷度の関係

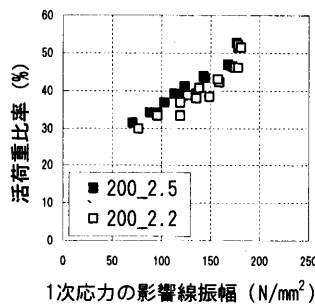
表-3 照査式に用いた各係数の値

T 荷重補正係数	γ_{T1}	3.0
同時載荷係数	γ_{T2}	1.0
衝撃係数	i_f	0.0
構造解析係数	γ_a	1.0
日大型車交通量 (/車線)	$ADTT_{SLi}$	8000 台
頻度補正係数	γ_n	0.03
供用期間	Y	100 年
車線交通量の偏りを考慮する係数	γ_L	1.0

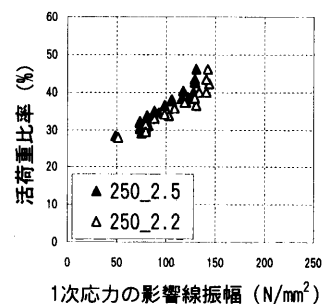
の影響を表している。図-8(b)より、側径間最上段ケーブル (S1) 以外のケーブルでは、累積疲労損傷度に対する2次応力の影響は小さく、疲労照査で考慮する必要がないことがわかる。ただし、側径間最上段ケーブル (S1) については、2次応力を考慮し



(a) 中央径間 150m



(b) 中央径間 200m



(c) 中央径間 250m

図-9 1次応力の影響線振幅と活荷重比率の関係

ない場合には、疲労設計指針の照査式が危険側の評価となる。

(4) 活荷重比率と影響線振幅との関係

一般的に、鋼斜張橋主桁の吊区間は、径間全長にわたっており、図-6に示すように同一モデル内においても各ケーブルの疲労安全性に違いがある。径間中央に吊区間が集中しているエクストラドーズド橋の場合には、このような同一モデル内でケーブルの疲労安全性の変化は見られない⁵⁾。

図-9に各ケーブルの1次応力の影響線振幅と設計張力に対する活荷重張力の割合（以下、活荷重比率）との関係を示す。活荷重比率と影響線振幅の間には線形的な相関関係があり、活荷重比率が大きくなるにつれて影響線振幅も大きくなる。ただし、同じ直線で近似できるのは同一モデル内のケーブルであり、中央径間長、ケーブル安全率が変化すると、近似直線が変化する。また、ケーブル安全率を変更しても活荷重比率、影響線振幅の変化は小さく、中央径間が長くなるほどその割合が小さくなる。

(5) 鋼斜張橋のケーブル安全率について

現在の斜張橋のケーブル安全率は、明確な疲労照査法が確立されてなかった時代に定められたものであり、疲労を不確定要因として考え、安全率を大きく設定していたものと考えられる。

ケーブル安全率を変更して試設計を行った鋼斜張橋を対象に、ケーブルの疲労について検討を行った結果、アンカーケーブルに相当する側径間最上段ケーブルを除いては、2次応力の影響は小さく、鋼道路橋の疲労設計指針の照査方法¹³⁾が十分安全側で信頼性の高い照査方法であることを明らかとした。鋼道路橋の疲労設計指針に従って疲労照査を行うことを前提とすれば、鋼斜張橋のケーブル安全率は、耐力や終局限界状態の観点から提案されている

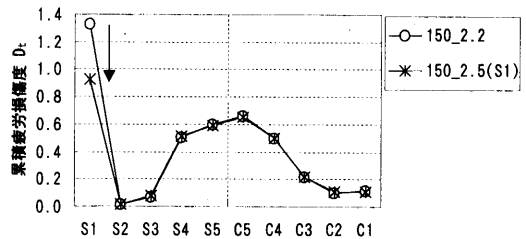


図-10 累積疲労損傷度（供用期間 100 年）

2.0～2.2^{1), 2), 3)}が適切な値となると考えられる。一方、側径間最上段ケーブルに関しては、本論文で設定した斜張橋モデルのように桁側定着点が支点に近くなる場合や側径間に中間橋脚が配置されないような場合には、2次応力の影響が大きくなる。さらに、アンカーケーブルとしての役割を担っており他のケーブルと重要度が異なることを考慮すると、アンカーケーブルに対して2次曲げに対する対策が施されない場合には、他のケーブルと異なる安全率を設定する方法が考えられる。

図-10に中央径間長150mのモデルにおいて、全てのケーブルで安全率2.2とした場合（150_2.2）とS1ケーブルのみ安全率2.5とした場合（150_2.5(S1)）の累積損傷度の比較を示す。S1ケーブルのみ安全率2.5とすることでS1ケーブルの累積損傷度は70%程度に低減できる。このS1ケーブルの累積疲労損傷度は、全てのケーブルを安全率2.5としたときのS1ケーブルの累積損傷度と同レベルである。

6. まとめ

中央径間長（150m～250m）とケーブル安全率（2.2, 2.5）をパラメータとして試設計を行った3径間連続鋼斜張橋を対象に、実働活荷重を模擬した活

荷重シミュレーションを行い、2次応力を考慮したケーブルの疲労安全性について検討を行った。以下に本研究によって得られた結果をまとめる。

- 1) 斜張橋用の平行線ケーブルについて、ソケット口元における樹脂の2次応力低減効果を考慮した、より実際に近い応力値を再現できるケーブルモデルを作成した。
- 2) 側径間最上段ケーブル以外のケーブルでは、2次応力の影響は小さく、鋼道路橋の疲労設計指針の照査方法が十分安全側であることを明らかにした。また、中央径間が長くなる（長大化する）ことによって斜張橋ケーブルの疲労安全性は高くなることを示した。
- 3) 2次応力の影響が大きい側径間最上段ケーブルに対して安全率2.5、その他のケーブルに対して安全率を2.2としたモデルで検討を行い、側径間最上段ケーブルにおいて、現行の設計と同等の疲労安全性を確保できることを示した。
- 4) 鋼斜張橋のケーブルについて、疲労安全性の観点から、現行の基準で用いられている安全率よりも小さく設定できる可能性があることを明らかにした。

参考文献

- 1) 長井正嗣，謝旭，山口宏樹，野上邦栄，新井田勇二：斜張橋ケーブルの非弾性挙動が終局挙動，強度に与える影響及び安全率低減に関する一考察，土木学会論文集，No.661，I-53，pp.85-94，2000.10。
- 2) 野口二郎，北田俊行，引口学：斜張橋の部材安全率と橋梁全体の終局強度の関係，構造工学論文集，Vol.47A，pp.137-146，2001.3。
- 3) 中村俊一：橋梁ケーブルの限界状態設計法に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1247-1254，2001.3。
- 4) 山崎淳，山縣啓二，春日昭夫：斜材により補強されたコンクリート橋の構造特性－斜張橋とエクストラード橋－，橋梁と基礎Vol.95，No.12，pp.33-38，1995.12。

- 5) 社団法人 プレストレストコンクリート技術協会：PC斜張橋・エクストラード橋設計施工規準（案），資料編，2000.11。
- 6) 本州四国連絡橋公団：吊橋のケーブルに関する検討，p.102，1978。
- 7) 藤井学，田中義人，原口俊男：平行線ケーブルの2次曲げ応力緩和に関する研究，構造工学論文集，Vol.42A，pp.399-408，1996.3。
- 8) 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.1063-1073，1993.3。
- 9) 日本道路公団名古屋建設局：名港西大橋工事誌，p.66，1986.3。
- 10) 田中義人，長井洋，原口俊男，小松定夫：平行線ケーブルの2次曲げ応力に関する研究，構造工学論文集，Vol.35A，pp.15-25，1989.3。
- 11) 坂本良文，北條哲男，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.215-223，1992.4。
- 12) 内藤純也，西村宣男：2次曲げを考慮した斜張橋ケーブルの活荷重応力に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp.111-117，2002.11。
- 13) 社団法人 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，pp.81-122，2002.3。
- 14) Miki, C., Goto, Y., Yoshida, H. and Mori, T. : Computer Simulation Studies on the Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, Structural Eng. /Earthquake Eng., Vol.2, No.1, pp.37-45, 1985。
- 15) Nakamura, S., Hosokawa, H. : Study on the Fatigue Design of Parallel Wire Strands on Cable-Stayed Bridges, Structural Eng. /Earthquake Eng., Vol.6, No.2, pp.327s-336s, 1989。
- 16) 遠藤武夫，奥川淳志，竹之内博行，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.91-102，1994.9。
- 17) （社）日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，p.6，1993.4。

(2004.4.14 受付)

SAFETY FACTOR AND FATIGUE DAMAGE OF CABLES FOR CABLE-STAYED BRIDGE

Junya NAITO and Nobuo NISHIMURA

The cable safety factor for cable-supported bridges in Japan is higher for other bridge members. The main reason is that the reliability of cable fatigue damage is not clear. We pay attention to cable fatigue damage due to live loadings, and investigate the relationship between cable fatigue damage and the safety factor of stay cables. We tentatively designed three-span continuous steel cable-stayed bridges by changing the cable safety factor and the center span length. The fatigue damage to the stay cables caused by random traffic flows was evaluated by Monte Carlo simulation. We arrived at the conclusion that the possibility of reduction of the cable safety factor is suggested in viewpoint of the fatigue safety.