

ケーブル腐食を考慮した斜張橋の終局強度および疲労寿命

Ultimate strength and fatigue life of cable-stayed bridges considering cable corrosion

中村俊一[†], 青木由香利*
Shunichi Nakamura, Yukari Aoki

[†]Ph.D., 東海大学, 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4 丁目)

*Ph.D., 東海大学, 国際教育センター (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4 丁目)

Cable corrosion significantly decreases the ultimate and fatigue strength of cable-stayed bridges, which was parametrically studied with three different span lengths and different corrosion levels. The ultimate strength of the healthy bridge models was about 2.5 of the design loads, which satisfied the required safety of 1.7. Whereas, the ultimate strength lowered by about 25% as the loss of cross-sectional area increased due to corrosion. The elongation also decreases due to corrosion. The ultimate strength was found to sharply drop when the elongation became 1.0%. The fatigue strength of stays was studied taking a 500kN heavy lorry as the representative load. The fatigue strength sharply lowers as corrosion progresses and the severely corrode anchor cable becomes less than 4% of the healthy one.

Key Words: cable-stayed bridges, ultimate strength, cable corrosion, fatigue

キーワード: 斜張橋, 終局強度, ケーブル腐食, 疲労

1. はじめに

吊橋, 斜張橋やアーチ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. 近年, ケーブルの腐食事例が数多く報告されており^{1)~5)}, それ原因で橋全体の耐力が低下し崩壊した吊り形式橋梁もある.

2019 年 10 月に生じた台湾の南方澳大橋の崩壊は, ケーブル腐食の危険性を示す典型的な事例である^{1),2),5)}. 同橋は下路アーチ橋であり, 中央付近のハンガーが破断した後, 主桁およびアーチリブが崩落した. 同橋の管理責任者により原因の究明が行われているが, 完全な解明には至っていない. しかし, ハンガーロープが腐食していることが確認され, それが崩壊要因の一つであると考えられる. ケーブルは腐食すると断面積が減少するだけでなくじん性, 耐力, 疲労強度は低下する. したがって, ケーブルが腐食し, 車両通行による繰り返し応力により疲労破断を引き起こしたと推定される.

本研究では, 斜張橋を対象とし, 腐食ケーブルが橋全体の終局強度に及ぼす影響を検討する. 斜張橋は極めて多様性に富み, 種々のスパン長, 主桁や主塔の形状および材料, ケーブル本数および張り方などが存在する. こ

れらを統一的に検討するために, スパン長の異なる 3 つの鋼製斜張橋を想定したパラメトリック・スタディーを実施した.

最初に, 想定した斜張橋モデルに常時設計荷重を作用させ, 部材の応力照査を行い, その妥当性を確認する. そして, 3 つの斜張橋モデルが終局に至るまで荷重を漸増載荷し, 終局強度および崩壊過程を明らかにする. 次に, ケーブルが腐食すれば鋼断面積は減少する. そこで, ケーブル断面積が減少したモデルの終局強度を求め, 腐食による断面減少が橋全体の終局強度に及ぼす影響を明らかにする. また, 腐食により伸びも低減するため, その影響についても検討する.

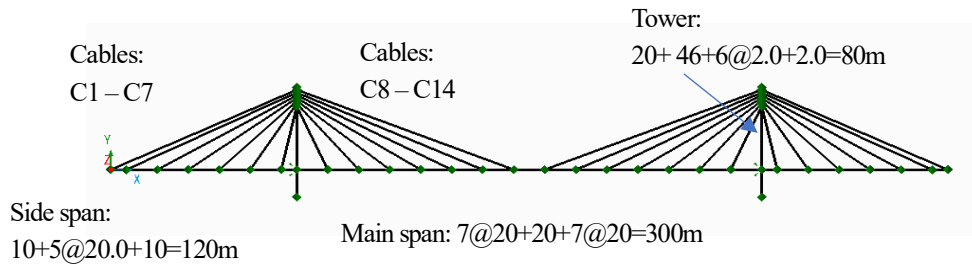
さらに, ケーブルが腐食すれば疲労強度も低下する. その影響はスパン長やケーブルの位置によって異なると考えられる. そこで, 想定した 3 つの斜張橋モデルに重量車両を繰り返し載荷し, ケーブル疲労寿命を求め, 異なるスパン長およびケーブル位置への影響を検討する.

2. モデル橋の諸元および部材断面照査

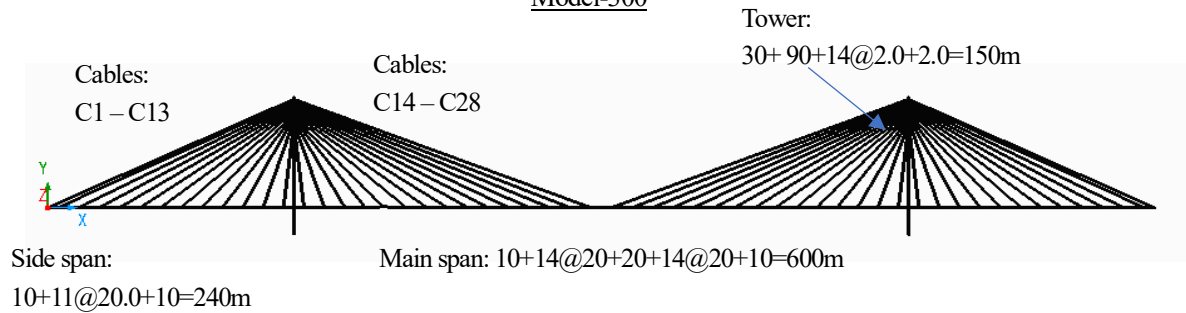
ここでは, 本研究で想定したスパン長の異なる 3 つの斜張橋の構造諸元および常時設計荷重を示す. さらに, 構造解析により断面力を求め, 部材断面を応力照査して

[†] 連絡著者 / Corresponding author

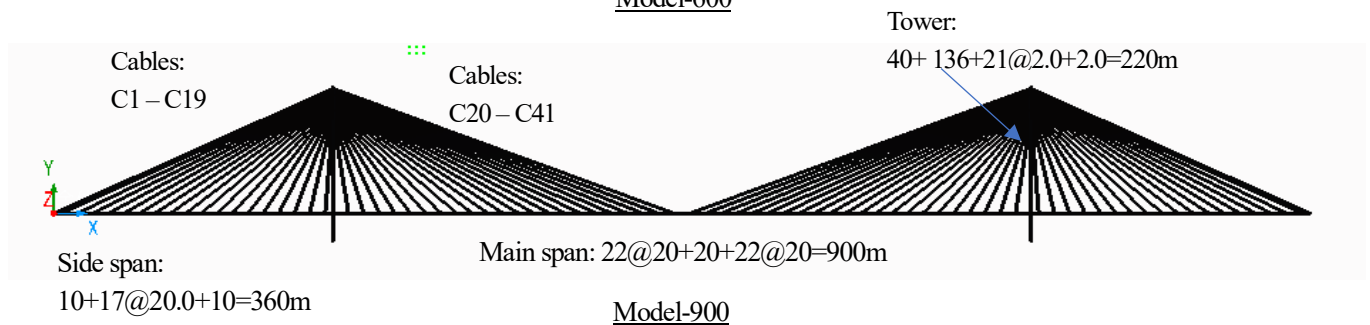
E-mail: snakamu@tsc.u-tokai.ac.jp



Model-300



Model-600



Model-900

図-1 モデル橋のレイアウト

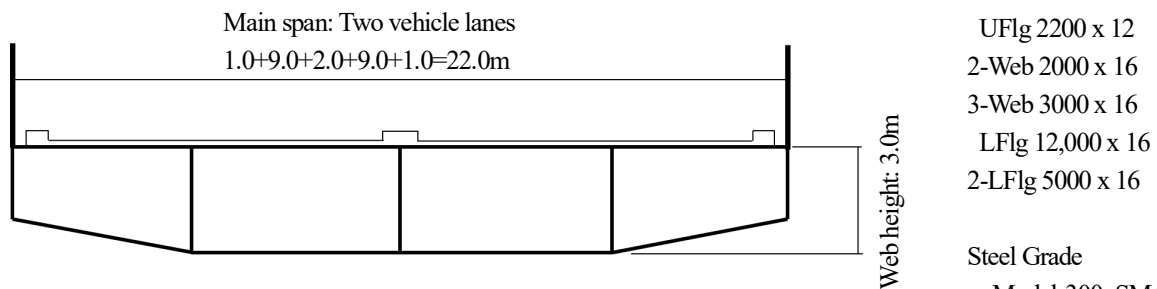


図-2 主桁断面

モデル橋および部材断面の妥当性を確認する。

2.1 モデル橋の諸元

想定した 3 つの斜張橋は、主スパン長 300m, 600m および 900m の鋼斜張橋 (Model-1, Model-600, Model-900, 図-1) である。

主桁断面は 3 つのモデルで共通とし、鋼製箱断面とした (図-2)。総幅員は 22.0m, 上下各 2 車線の道路橋、ウェブ高さは 3.0m, 床版は鋼床版を想定した。鋼板材質

は、Model-300 は SM400 (降伏応力 235 MPa), Model-600 は SM490 (降伏応力 315 MPa), Model-900 は SM570 (降伏応力 450 MPa) である。

主塔は 2 本柱で構成され、その断面は長方形とした (図-3, 図-4)。塔高さおよび断面寸法および鋼板厚は 3 つのモデル橋で異なる。鋼板材質は、Model-300 および Model-600 は SM490Y (降伏応力 355 MPa), Model-900 は SM570 (降伏応力 450 MPa) である。

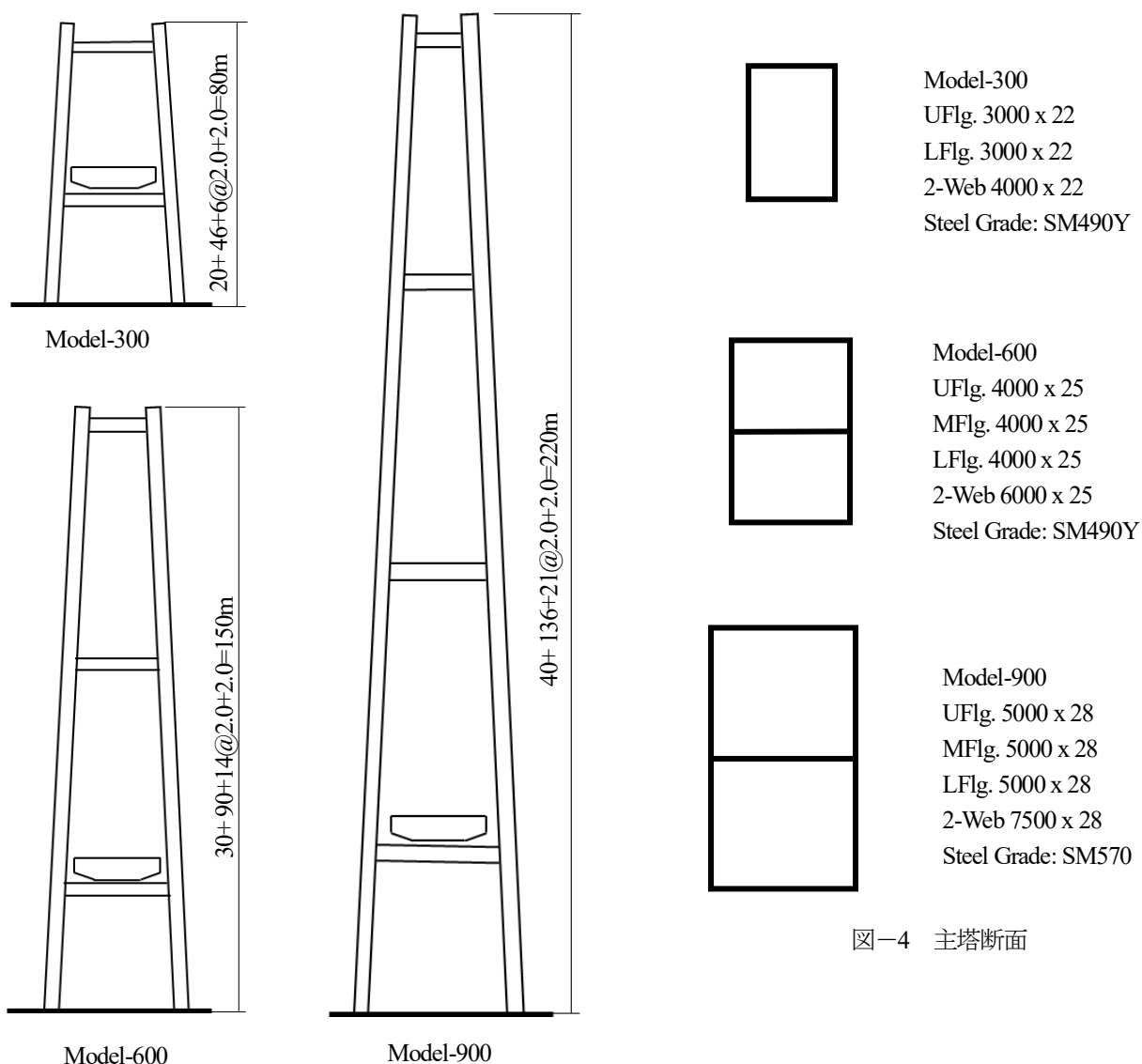


図-3 主塔側面

図-4 主塔断面

表-1 ケーブルの断面積

Model-300		Model-600		Model-900	
Cable	A(mm ²)	Cable	A(mm ²)	Cable	A(mm ²)
C1	6,362	C1-C2	8,171	C1-C3	9,852
C2-C6	5,027	C3-C11	6,362	C4-C16	6,643
C7-C8	2,827	C12-C15	2,827	C17-C22	2,827
C9-C11	5,027	C16-C24	6,362	C23-C36	6,643
C12-C14	5,675	C25-C28	7,238	C37-C41	7,543

ケーブルを構成する鋼線の引張強度は 1570 MPa とした。Model-300 では、側径間に 7 本のケーブル (C1-C7)、主径間の左半分に 7 本のケーブル (C8-C14) のケーブルを配置した (図-1)。主径間の右半分および右側径間は左右対称のケーブルを配置した。Model-600 では、側径間に 13 本のケーブル (C1-C13)、主径間の左半分に 15 本

のケーブル (C14-C28) のケーブルを配置した (図-1)。Model-900 では、側径間に 19 本のケーブル (C1-C19)、主径間の左半分に 22 本のケーブル (C20-C41) のケーブルを配置した (図-1)。3 つのモデル橋のケーブル断面積を表-1 に示す。

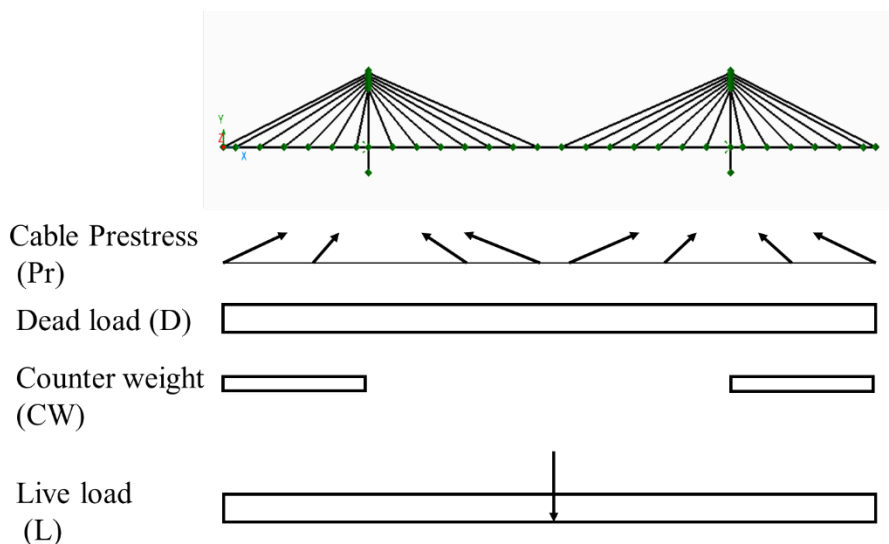


図-5 常時設計荷重

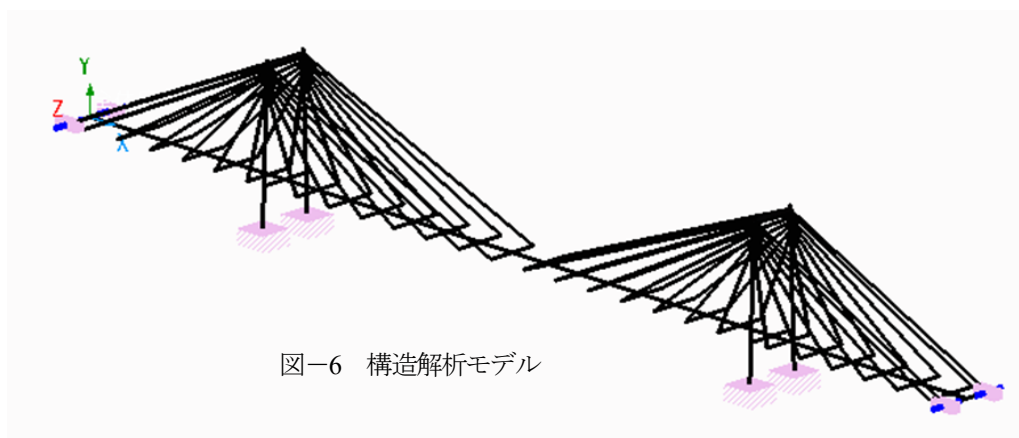


図-6 構造解析モデル

2.2 常時設計荷重

常時設計荷重を図-5に示す。橋軸方向単位長さあたりの死荷重 (D) は、鋼桁重量 (69.7 kN/m)、地覆・高欄 (24.5 kN/m)、アスファルト舗装 (28.4 kN/m) である。また、端支点の負反力を抑制するため、側径間にはカウンターウエイト (CW , 60 kN/m) を載荷した。

死荷重作用時に主桁および主塔の曲げモーメントが平滑化かつ最小になるようにケーブル・プレストレス (Pr) を導入した。

活荷重 (L) は道路橋示方書⁹⁾の B 活荷重とした。すなわち、集中荷重 $p1$ (10 kN/m²) を 10m 長さおよび幅員 5.5m に作用させる。ただし、その他の部分は 5.0 kN/m² とする。さらに、分布荷重 $p2$ (3.5 kN/m²) を幅員 5.5m に作用させる。ただし、その他の部分は 5.0 kN/m² とする。なお、集中荷重はスパン中央に、等分布荷重は全径間に載荷した。

2.3 常時荷重による構造解析および部材の応力照査

3 次元の骨組構造モデルを作成し、常時設計荷重により生ずる変位および断面力を構造解析により求めた。Model-300 の構造モデルを図-6に示す。主桁はフィッ

ュボーンモデルとし、中央に 1 本のはり要素を通し、ケーブル定着部と剛なダミー要素で結合した。主桁は両端および主塔横梁部で鉛直方向に支持されるが、橋軸方向にはオールフリーとした。主塔の 2 本柱は、下端で固定支持した。なお、解析手法の詳細は 3 章に示す。

常時設計荷重 ($Pr+D+CW+L$) による変形を図-7に示す。3 つのモデル橋ともに鉛直変位は中央径間で大きく、側径間では小さい。主塔は、中央径間側に倒れている。これらの変形状態は一般的な斜張橋に共通してみられるものであり、想定したモデルの妥当性を示している。なお、橋軸方向の支点条件をオールフリーとしているため、変形は左右対称である。

主要な断面力、発生応力、部材照査値を、表-2に示す。主桁の主塔部は中間支点であり、負の曲げモーメントおよび圧縮軸力が発生する。主桁のスパン中央は正の曲げモーメントが支配的である。主塔の基部においては圧縮軸力と曲げモーメントが発生する。これに伴う曲げ応力と軸圧縮応力をそれぞれの許容応力で除した値を足し合わせた照査値が 1.0 以下となることを確認した⁹⁾。なお、主塔の許容応力算出に際しては、主塔高さの 0.7 倍を有効座屈長とした。

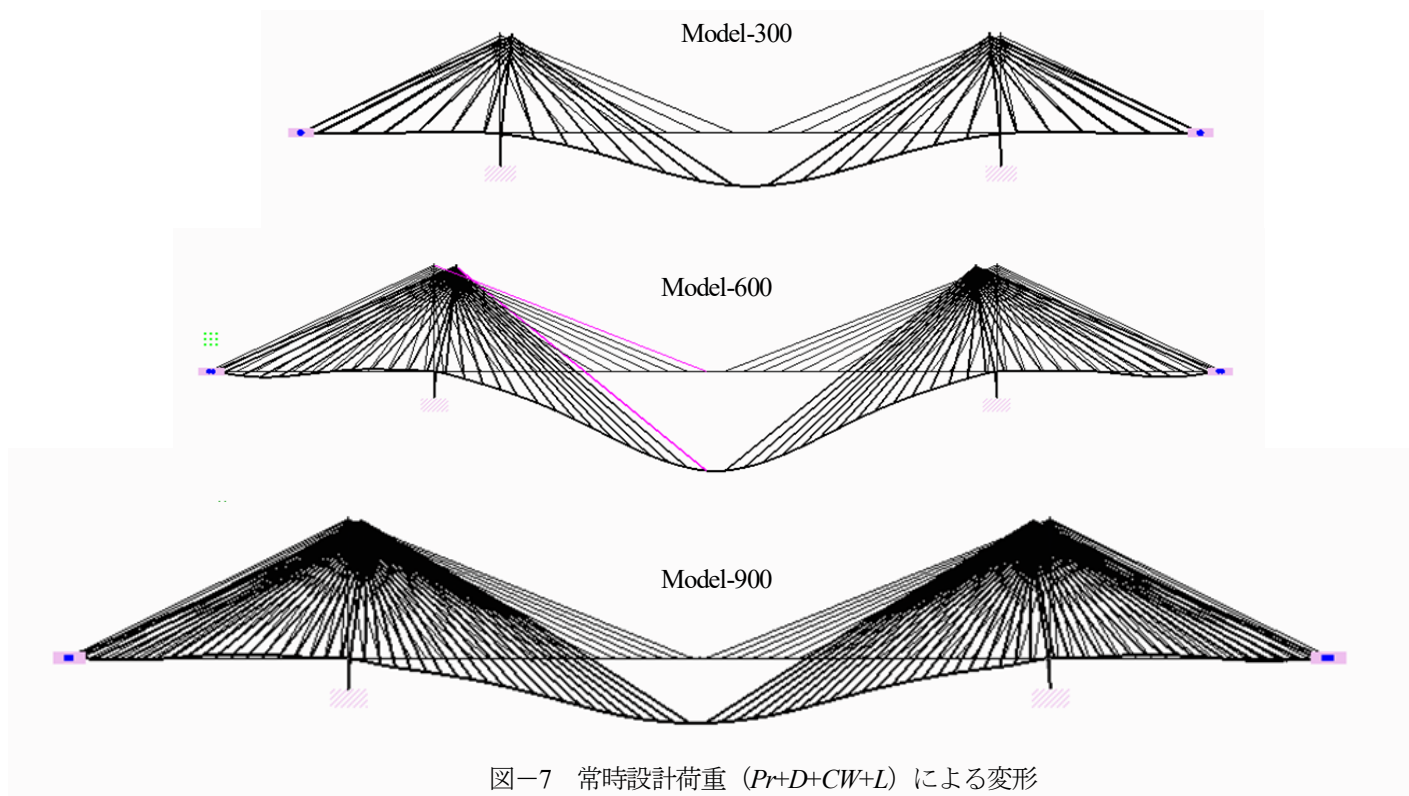


図-7 常時設計荷重 ($Pr+D+CW+L$) による変形

表-2 主要な断面力および応力

Model		Model-300					Model-600					Model-900				
Position		N	M	σ_n	σ_b	γ	N	M	σ_n	σ_b	γ	N	M	σ_n	σ_b	γ
Girder	Tower	-30.3	-89	-37	-102	0.99	-63.7	-71	-77	-82	0.86	-95	-118	-115	-136	0.98
	Center	0.9	111	1.1	127	0.90	1.8	95	2	109	0.60	2.8	94	3	108	0.44
Tower	Base	-25.9	-29	-84	-77	0.83	-51.8	-88	-86	-98	1.00	-77.6	-163	-92	-104	0.95
Cable	Anchor	3.75	0	589	0	0.93	4.72	0	578	0	0.92	5.50	0	559	0	0.89
	Center	3.57	0	628	0	1.00	3.99	0	552	0	0.88	4.10	0	545	0	0.87

注) N: 軸力 (MN)、M: 曲げモーメント (MN.m)、 σ_n : 軸応力 (MPa)、 σ_b : 曲げ応力 (MPa)、 γ : 照査値

ケーブルに関しては、アンカーケーブル (C1) とスパン中央のケーブルに発生する張力を示した。ケーブルの許容応力は、引張強度を安全率 2.5 で除した 628 MPa (=1570/2.5) とした⁹⁾。想定したケーブルは許容応力以内であることを確認した。

3. 終局強度

本章では 3 つのモデル橋の終局強度を弾塑性解析により求める。

3.1 解析方法

解析モデルは 3 次元骨組構造とし、主桁および主塔のケーブル定着点、主桁中央、主塔上下端に節点を設けた。

主桁、主塔はファイバー要素に分割した。鋼板は板厚方向に 2 分割、幅方向に 10 分割した。なお、鋼板を板厚方向に 5 分割にした解析も実施したが、2 分割にした場合と同一の終局強度結果であったため、解析時間が短縮できる 2 分割を採用した。

実際のケーブルでは多数の鋼線を平行に束ねるあるいはより合わせているが、解析上は円形断面の鋼棒でモデル化した。その際、ケーブルを構成する鋼線の断面積と鋼棒モデルの断面積は一致させた。ケーブル断面も円周方向に 10 分割、直径方向に 10 分割のファイバー要素に分割した。

材料の構成則は、図-8 に示すように、鋼板はバイリニア、ケーブルは引張側のみを有効とするトリリニアとした。想定した降伏応力、ヤング係数、伸びなどは同図

に示した。なお、本研究ではケーブルの自重によるサグの影響および幾何学的な非線形性は考慮せず、今後の課題とした。また、ケーブルは主桁および主塔と剛結したが、曲げ剛性が低いため全体挙動への影響は少ない。

最初にケーブルプレストレス (P_r) を載荷し、死荷重および活荷重 ($D+L$) を漸増させた。すなわち、

$$P = P_r + k(D + L) \quad (1)$$

である。 k は荷重増加係数であり、0.01 ずつモデル橋が崩壊するまで増加させた。終局時の k を終局荷重係数 k_u とする。解析プログラムは、Engineering Studio (Forum 8) である。

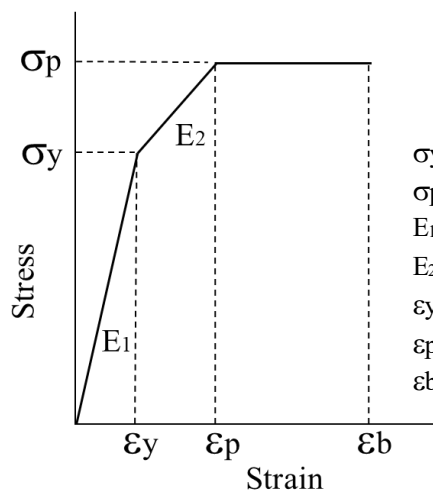
3.2 解析結果

Model-300 の終局時の変形を図-9 に示すが、主桁がスパン中央で大きく変形している。その地点の曲率をみると (図-10)、 $k=1.8$ 付近で降伏に達し、それ以降急激に増加し、 $k=2.52$ に達した時に曲率が発散し終局を迎えた。その時点で、主桁断面は全塑性化しており塑性ヒンジが生じたと理解できる。この荷重ステップ以降で変位が発散し収束しなくなり解析を終了した。アンカーケーブル (C1) の応力とひずみの関係を図-11 に示すが、降伏点 (σ_y) には達してはいるが、塑性点 (σ_p) には至っていない。スパン中央部のケーブルも同様であった。また、

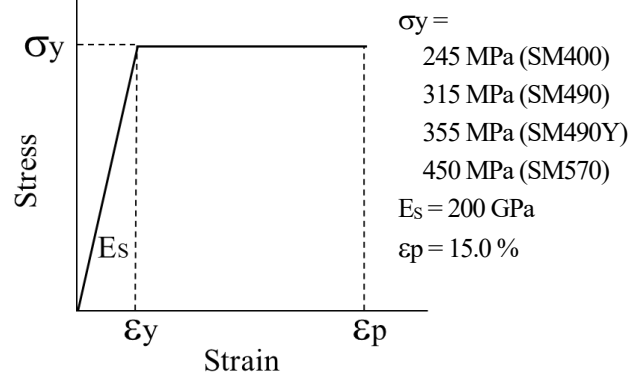
主塔基部は部分塑性化していた。

Model-600 の終局時の変形を図-12 に示すが、主桁がスパン中央で大きく変形している。その地点の曲率をみると (図-13)、 $k=2.4$ 付近で降伏に達し、それ以降急激に増加し、 $k=2.77$ に達した時に曲率が発散し終局を迎えた。その時点で、主桁断面は全塑性化しており塑性ヒンジが生じたと理解できる。この荷重ステップ以降で変位が発散し収束しなくなり解析を終了した。アンカーケーブルの応力とひずみの関係を図-14 に示すが、降伏点 (σ_y) を超し塑性点 (σ_p) に達しているが、破断ひずみには達していない。スパン中央部のケーブルも同様であった。また、主塔基部は部分塑性化していた。

Model-900 の終局時の変形を図-15 に示すが、主桁がスパン中央で大きく変形している。その地点の曲率をみると (図-16)、 $k=2.5$ 付近で降伏に達し、それ以降急激に増加し、 $k=2.82$ に達した時に曲率が発散し終局を迎えた。その時点で、主桁断面は全塑性化しており塑性ヒンジが生じたと理解できる。この荷重ステップ以降で変位が発散し収束しなくなり解析を終了した。アンカーケーブルの応力とひずみの関係を図-17 に示すが、降伏点 (σ_y) を超し塑性点 (σ_p) に達しているが、破断ひずみには達していない。スパン中央部のケーブルも同様であった。また、主塔基部は部分塑性化していた。



(a) ケーブル



(b) 鋼板

図-8 鋼材の構成則

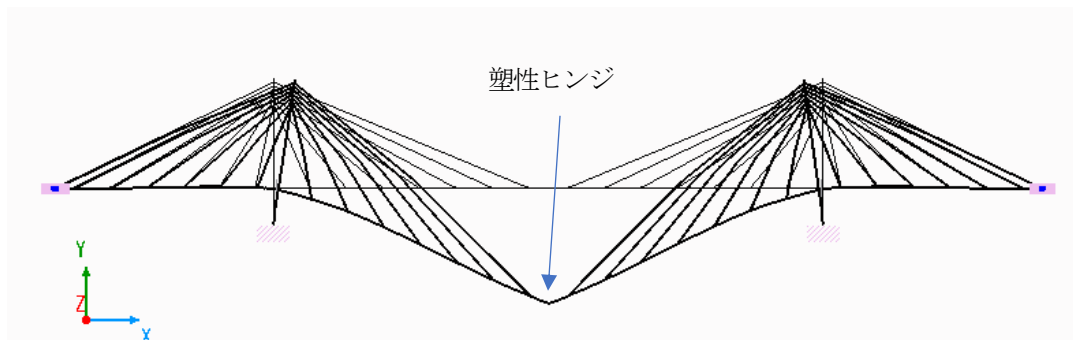


図-9 終局時の変形 (Model-300)

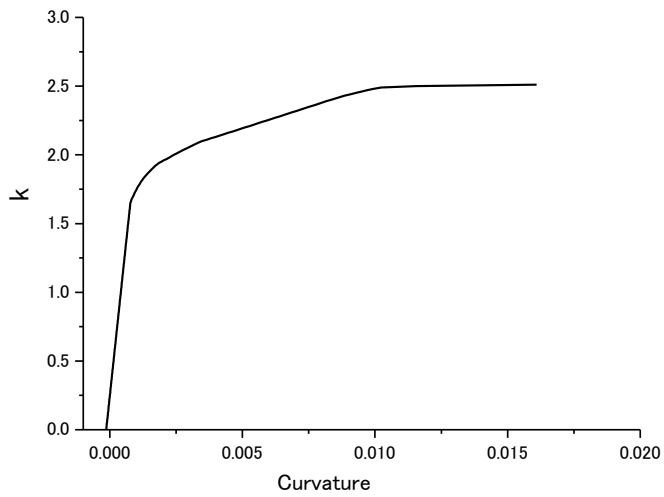


図-10 主桁の曲率と k の関係 (スパン中央)

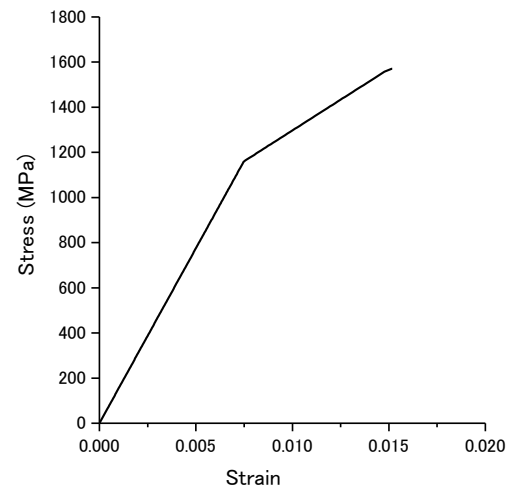


図-11 ケーブル C1 の応力とひずみの関係

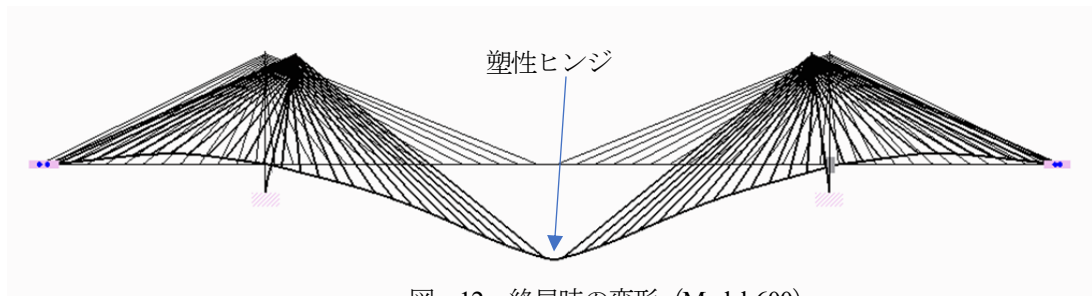


図-12 終局時の変形 (Model-600)

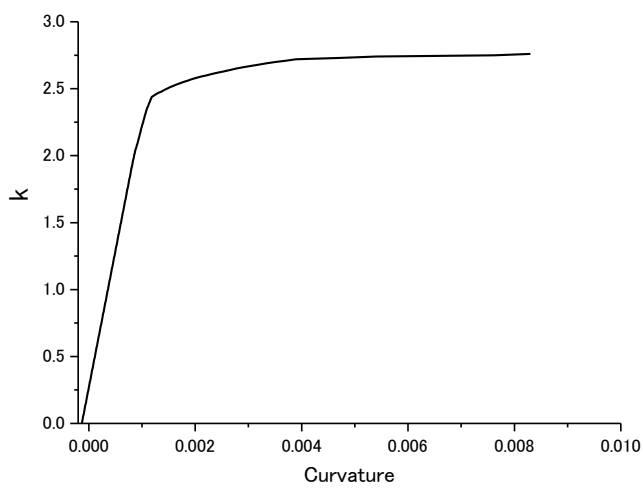


図-13 主桁の曲率と k の関係 (スパン中央)

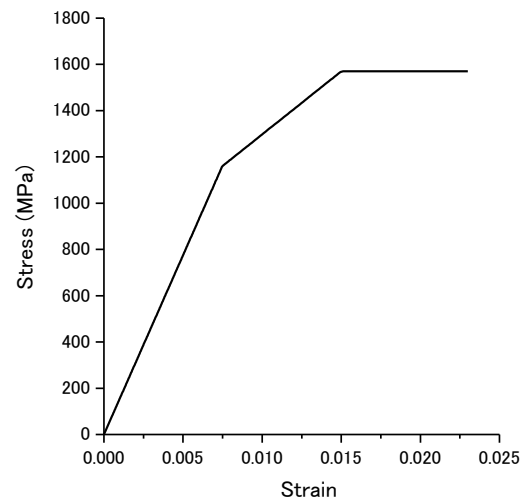


図-14 ケーブル C1 の応力とひずみの関係

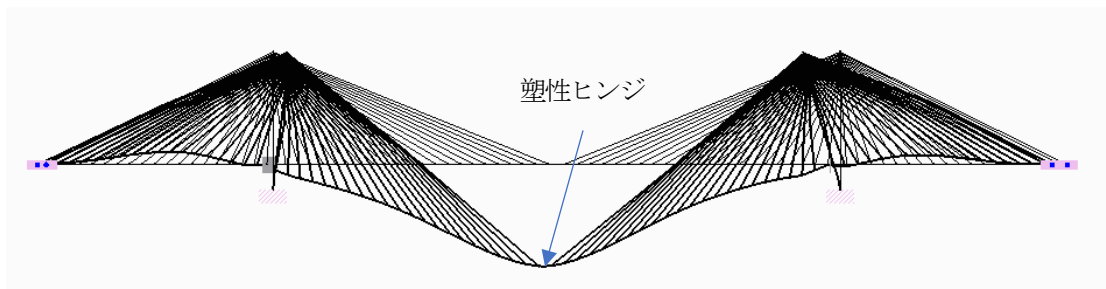


図-15 終局時の変形 (Model-900)

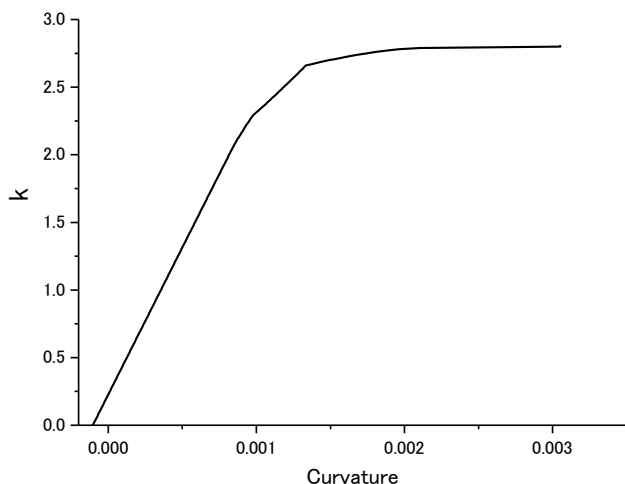


図-16 主桁の曲率と k の関係 (主塔部)

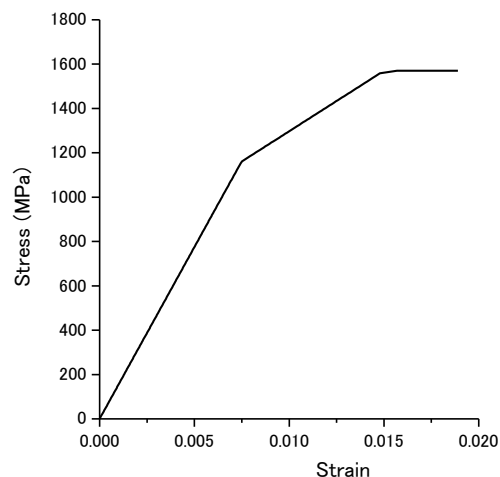


図-17 ケーブル C1 の応力とひずみの関係

表-3 終局荷重係数 k_u

	荷重	k_u
Model-300	$Pr + k(D+L)$	2.52
Model-600	$Pr + k(D+L)$	2.77
Model-900	$Pr + k(D+L)$	2.82

3.3 終局強度のまとめ

表-3 に 3 つのモデル橋の終局荷重係数 k_u を示す。道路橋示方書⁹⁾によれば、構造物の終局強度は常時設計荷重の 1.7 倍を満たすことと規定されている。したがって、想定したモデル橋はこれを満足していると見なされる。

3 つのモデル橋の崩壊過程は近似しており、一般的な方法で設計された斜張橋の終局強度および崩壊過程はこれと同様な傾向を示すと推定される。なお、 k_u が 2.52 から 2.82 と異なる理由は、設計した部材の応力余裕度に差異があったためであると考えられる。

4. ケーブル腐食が終局強度に及ぼす影響

ケーブルが腐食すると鋼断面積が減少し、それに伴って橋全体の耐力も低下することが懸念される。そこで、ケーブル断面積が減少する割合 γ を 5%, 10%, 15%, 20% の場合について、弾塑性解析により終局強度の低下度を把握する。

また、ケーブルを構成する健全な鋼線の伸びは 4.0% を有するが、腐食により鋼線の伸びも低下することが知られている。中村ら^{7,8)}によれば、腐食した亜鉛めっき鋼線の伸びは健全鋼線の半分程度まで低下する。さらに、鋼線を束ねたケーブルでは鋼線間の接触や両端のソケット部の影響のため、腐食ケーブルの伸びはさらに低下する。三田村ら⁹⁾は、腐食した平行線ストランドの引張試

験を実施し、伸びが健全ケーブルの 1/4 にまで低下したことを見出している。これらを考慮し、疲労鋼線の伸びが 3.0%, 2.0%, 1.0% の場合についてもモデル橋の終局強度を求めた。

解析手法は 3 章と同じく、最初にケーブルプレストレス (Pr) を載荷し、死荷重および活荷重 ($D+L$) を漸増させた。

腐食によるケーブルの断面積の減少割合 (5%, 10%, 15%, 20%) および伸びの低下 (3.0%, 2.0%, 1.0%) を考慮して橋全体の終局強度を求めた。この際、解析モデルではケーブルを円形の鋼棒としているため、減少した断面積に等しくなるように鋼棒の半径を設定した。なお、健全鋼線あるいはめっき層のみ腐食した鋼線は断面減少がなく $\gamma=0\%$ になるが、低品質あるいは劣化など腐食以外の原因により伸びが低下する場合もあるため、参考として伸びの低下を考慮した解析を行った。これらの解析結果を、表-4 および図-18 に示す。

Model-300 で、伸び ϵ_u が健全な 4.0% の場合を見ると、腐食による断面減少 γ が大きくなるに伴い、終局荷重係数 k_u は低下する。この傾向は伸びが 4.0% から 1.0% のいずれの場合も同一である。

一方、断面減少がない場合 ($\gamma=0\%$) に着目する、健全ケーブルの伸び 4% が 3% および 2% まで低下しても終局強度の低下は小さい。しかし、1% まで低下すると、終局強度は急激に低下する。この傾向は断面減少率が 10% から 30% のいずれの場合も同一である。

断面および伸びが健全な場合と、断面が 30% 低下し伸びが 1.0% になった場合を比べると、 k_u は $1.46/2.52=0.57$ まで低下することがわかる。

Model-600 および Model-900 に関しても、断面積の減少割合に比例して終局強度は低下する、ケーブルの伸びが 1% まで低下すると終局強度も低下する、と Model-300 と同一の傾向がある。以上より、ケーブル腐食は斜張橋全体の終局強度に大きく影響することを見出した。

表-4 腐食を考慮した終局荷重係数 ku

(a) Model-300

腐食による 断面減少率 $\gamma(\%)$	伸び $\varepsilon_u(\%)$			
	4.0	3.0	2.0	1.0
0	2.52	2.51	2.49	1.94
10	2.30	2.30	2.28	1.78
20	2.09	2.09	2.08	1.62
30	1.87	1.87	1.87	1.46

(b) Model-600

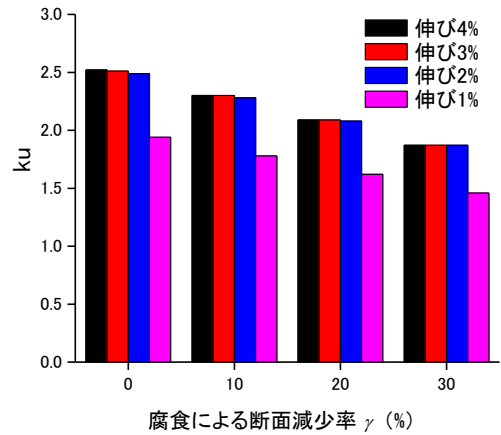
腐食による 断面減少率 $\gamma(\%)$	伸び $\varepsilon_u(\%)$			
	4.0	3.0	2.0	1.0
0	2.77	2.77	2.74	2.07
10	2.53	2.53	2.49	1.89
20	2.26	2.26	2.24	1.67
30	2.01	2.01	2.00	1.48

(c) Model-900

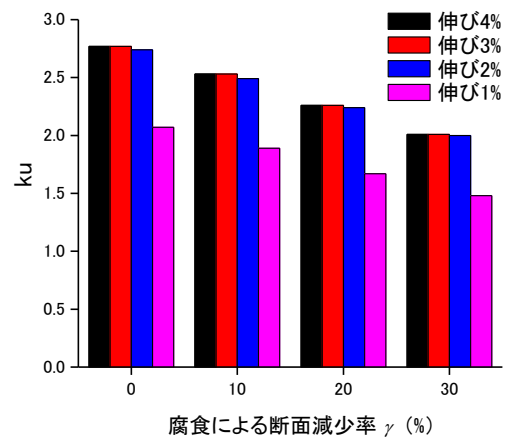
腐食による 断面減少率 $\gamma(\%)$	伸び $\varepsilon_u(\%)$			
	4.0	3.0	2.0	1.0
0	2.82	2.82	2.80	2.14
10	2.56	2.56	2.54	1.93
20	2.31	2.31	2.31	1.72
30	2.06	2.04	2.02	1.52

5. ケーブル疲労寿命の検討

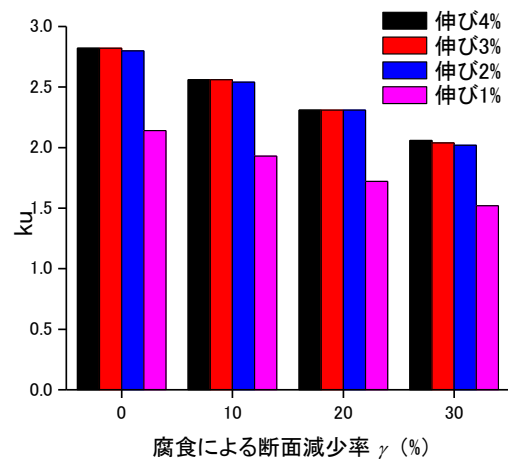
車両の通行によりケーブルには繰り返し荷重が作用するため、ケーブルの疲労強度が橋の寿命に影響する。さらに、ケーブルを構成する亜鉛めっき鋼線が腐食すると疲労強度が低下するため、橋全体の強度を低下させ寿命を短くさせる。本章では、3つの橋梁モデルに代表的な車両($W=500\text{ kN}$)を移動載荷させ、ケーブルが破断するまでの繰り返し回数、すなわち疲労寿命を求める。斜張橋は複雑で多様性に富む構造であるため、疲労寿命はケーブルの位置、橋のスパン長、亜鉛めっき鋼線の腐食度などに依存する。本章では、これらの要素がどのようにケーブルの疲労寿命に影響するかをパラメトリック・スタディーする。



(a) Model-300



(b) Model-600



(c) Model-900

図-18 腐食を考慮した終局荷重係数 ku

5.1 応力範囲の算出

ケーブルの疲労寿命の算出にあたり、代表的な車両として重量 500kN の大型車を想定する。標準的な桁橋を想定する場合の疲労設計荷重は T 荷重の 3 倍程度が用いられるが、長スパンの斜張橋に対する疲労設計荷重の規定値はない。これらは対象とする斜張橋のスパン長や走行車両状況などに依存するが、本研究ではスパン長の異なる 3 つの斜張橋モデルのケーブル腐食の影響による比較検討を主目的としているため、一律に標準的な桁橋よりやや小さい 500kN と設定した。

まず、単位荷重 ($P=1\text{kN}$) をスパン全長に移動させてケーブル張力の影響線を求める。そして、この代表車両によりケーブルに発生する応力範囲を求める。

3 つのモデル橋における 4 つの代表的なケーブル、アンカーケーブル (C1)、側径間中間点のケーブル、主径間中間点のケーブル、主径間中央ケーブル、の影響線載荷によるケーブル張力の変動を図-19 に示す。ケーブルの位置は図-1 に示す。

Model-300 の影響線を見ると、アンカーケーブル (C1) は、側径間に負のピークがあり、主径間では正のピークがある。側径間中間点のケーブルでは、側径間に正のピークがあり、主径間にも正の小さいピークがある。主径間中間点のケーブルでは、主径間に正のピークがある。主径間中央ケーブルでは、主径間に正のピークと小さい負のピークがあり、側径間にも小さな正のピークがある。これらの傾向は、Model-600 および Model-900 でもほぼ同様である。これらの影響線図より、アンカーケーブルの応力範囲が他に比べて大きくなることが理解できる。

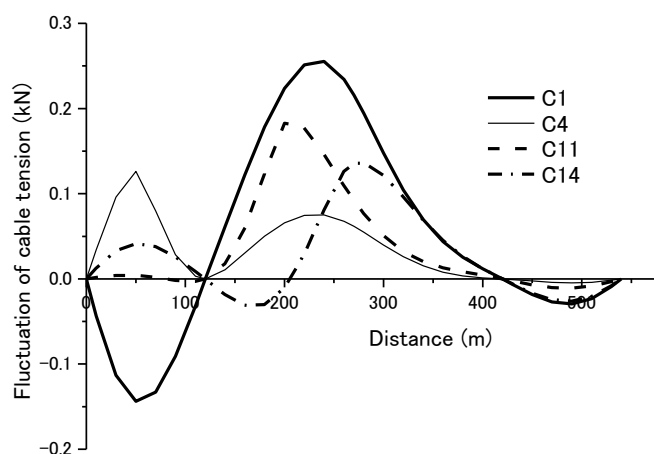
5.2 亜鉛めっき鋼線の腐食

ここでは、ケーブルを構成する亜鉛めっき鋼線の腐食に関する中村ら^{5), 7), 8), 10), 11)}の研究を紹介する。亜鉛めっき鋼線の腐食は 3 つのレベルに分類される (表-5)。腐食レベル 1 は亜鉛めっき層のみ腐食しており、地鉄部は腐食しておらず強度は健全鋼線と同等である。腐食レベル 2 は、亜鉛めっき層の下地鉄部の一部が腐食している状態である。腐食レベル 3 は、地鉄部の腐食がさらに広く深く進行した状態である。これらの 3 つの腐食レベルにある亜鉛めっき鋼線および健全亜鉛めっき鋼線の疲労試験を実施し、得られた S-N 関係を図-20 に示す。これより、疲労強度は健全・腐食レベル 1、腐食レベル 2、腐食レベル 3 の順に低下することが理解できる。同表には、疲労設計用に提案された S-N 関係式が示されている⁵⁾。

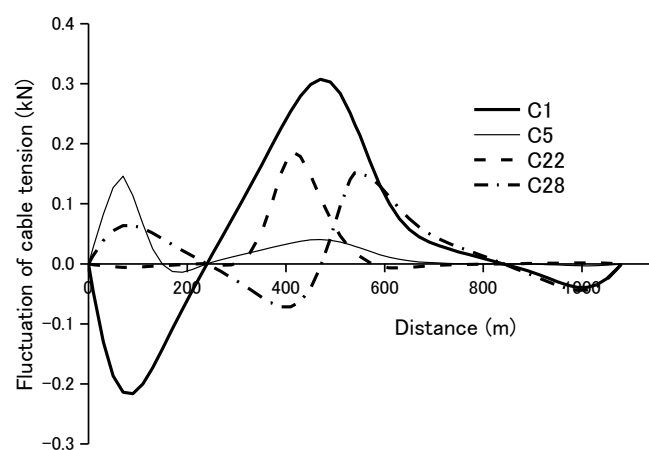
5.3 疲労寿命

代表車両 ($P=500\text{kN}$) によりケーブルが破断するまでの繰り返し回数、すなわち疲労寿命を表-6 に示す。応力範囲は、図-19 に示したケーブル張力変動の最大・最小のピーク間の張力差を断面積で除して求めた。そして、1 台の代表荷重が橋を通過する際にこの最大応力範

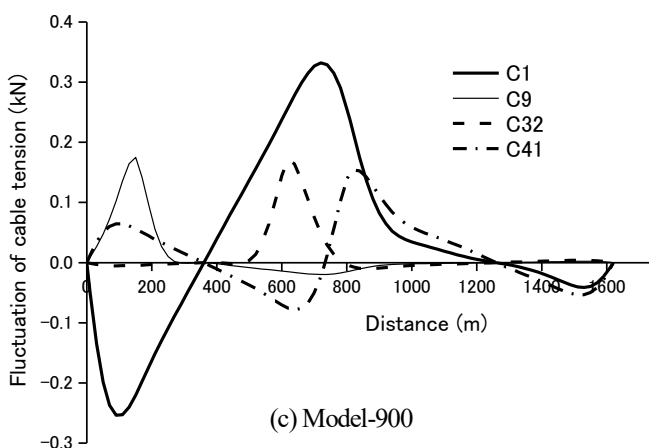
囲が 1 回生ずる、すなわち頻度は 1 サイクルとカウントした。破断までの回数は腐食レベルに応じて図-20 に示す S-N 関係式を用いて計算した。この際、ケーブル断面積は腐食による減面を考慮せず、健全ケーブルの断面積を用いた。



(a) Model-300



(b) Model-600

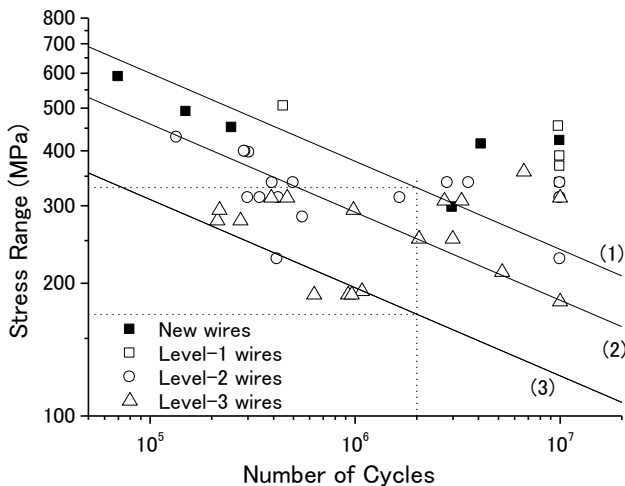


(c) Model-900

図-19 影響線載荷によるケーブル張力の変動

表ー5 亜鉛めっき鋼線の腐食レベル

Corrosion Level	Appearance
Healthy wire	
1	
2	
3	



Healthy and Corrosion Level-1: $SN^{1/5}=6,000$ (1)

Corrosion Level-2: $SN^{1/5}=4,600$ (2)

Corrosion Level-3: $SN^{1/5}=3,100$ (3)

図ー20 腐食亜鉛めっき鋼線の S-N 曲線

Model-300 のアンカーケーブル (C1) に着目すると、腐食レベルが上がると疲労寿命は大きく低下する。表ー6 では、アンカーケーブル (C1) の腐食レベル 1 を 1.0 として他の腐食レベルおよび他のケーブルとの対比

(Rate) を示す。これより、腐食レベル 3 は健全・腐食レベル 1 の 3.7% しかない。また、他のケーブル (C4, C10, C14) でも腐食レベルが上がると疲労寿命は大きく低下する同様の傾向が見られる。しかし、C4, C10, C14 の腐食レベル 1 の疲労寿命は、それぞれ C1 の 80.7, 12.0, 18.6 倍と大きいことがわかる。これは、主に張力の影響線の形状の違いによる。

表ー6 に示す Model-600 および Model-900 についても、Model-300 と同様の傾向、すなわちアンカーケーブルに生ずる応力振幅が他のケーブルより極めて大きく破断回数は他のケーブルより小さいこと、腐食が進行するとともに急激に疲労寿命が小さくなること、が理解できる。

ケーブルは、多数の亜鉛めっき鋼線を平行あるいは縫り合わせて束ねられる。図ー19 に示したケーブル張力の影響線値はケーブルを 1 本の部材として求めたものであり、いわば平均応力である。一方、図ー20 に示す S-N 関係式は 1 本の亜鉛めっき鋼線のものである。亜鉛めっき鋼線を平行に束ねた平行線ケーブルでは、亜鉛めっき鋼線の疲労強度とケーブルの疲労強度はほぼ等しいと考えられる。一方、亜鉛めっき鋼線を縫り合わせて束ねられるスパイラル・ロープやロックドコイル・ロープでは、亜鉛めっき鋼線間の摩擦などの影響により、ケーブルの疲労強度は亜鉛めっき鋼線の疲労強度より低くなる。したがって、スパイラル・ロープやロックドコイル・ロープの疲労寿命を求めるためには、ロープそのものの S-N 関係式を求める必要がある。また、本検討ではケーブルを構成する全ての亜鉛めっき鋼線が一樣に腐食すると仮定している。しかし、ケーブルの部位によって亜鉛めっき鋼線の腐食度が異なる場合があるが、これは今後の課題とした。

5.4 腐食による断面減少の影響

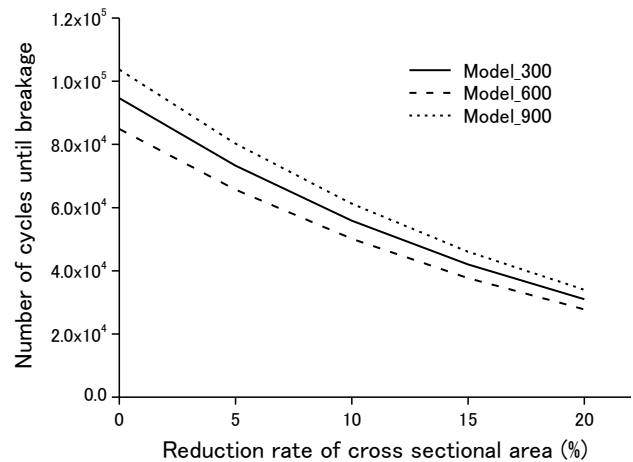
前節においては腐食による断面減少は考慮せずケーブルの疲労寿命を考察した。これは、局所的な孔食が鋼線の疲労強度を低下させる主要原因と考えたためである。しかし、実際には腐食が進むと孔食のみならず、広範囲にわたり鋼は腐食し、鋼断面積も減少する。そこで、腐食レベル 3 に着目し、鋼断面が 0~20% 減少する場合について、ケーブルの破断回数を求めた。

表ー7 および図ー21 に 3 つのモデルのアンカーケーブルの結果を示す。これらより、断面積の減少により疲労寿命が著しく低下することがわかる。断面積が 10% 減少すると破断回数は 0.59 倍、20% 減少すると破断回数は 0.32 倍にまで低下する。すなわち、腐食が進むと孔食により応力集中が増大し、さらに広い範囲で鋼断面が消耗されると疲労寿命を著しく低下させることが理解できる。

表－6 腐食ケーブルの疲労寿命

Model	Cable	CL	Stress range (Mpa)	Number of cycles until breakage	Rate
Model-300	C1	1	313.4	2,570,596	1.000
		2	313.4	680,874	0.265
		3	313.4	94,642	0.037
	C4	1	130.2	207,494,516	80.7
		2	130.2	54,959,089	
		3	130.2	7,639,393	
	C10	1	190.7	30,858,525	12.0
		2	190.7	8,173,500	
		3	190.7	1,136,128	
	C14	1	174.7	47,723,411	18.6
		2	174.7	12,640,504	
		3	174.7	1,757,048	
Model-600	C1	1	320.3	2,306,090	1.000
		2	320.3	610,814	0.265
		3	320.3	84,904	0.037
	C5	1	125.9	245,838,237	106.6
		2	125.9	65,115,194	
		3	125.9	9,051,106	
	C22	1	152.5	94,136,086	40.8
		2	152.5	24,933,833	
		3	152.5	3,465,839	
	C28	1	174.4	48,203,134	20.9
		2	174.4	12,767,568	
		3	174.4	1,774,710	
Model-900	C1	1	307.8	2,816,544	1.000
		2	307.8	746,018	0.265
		3	307.8	103,698	0.037
	C9	1	144.8	121,980,322	43.3
		2	144.8	32,308,938	
		3	144.8	4,490,989	
	C32	1	143.5	127,748,267	45.4
		2	143.5	33,836,694	
		3	143.5	4,703,349	
	C41	1	182.4	38,558,011	13.7
		2	182.4	10,212,864	
		3	182.4	1,419,603	

注) CL: Corrosion Level



図－21 腐食減面を考慮した疲労寿命

6. まとめ

ケーブルが腐食すると、鋼断面は減少し、伸びおよび疲労強度も低下し、その結果斜張橋の終局強度を低下させる。その影響度をスパン長や腐食度をパラメーターとして研究した。

腐食による影響度を把握する前に、主スパン長 300m, 600m および 900m の 3 つの斜張橋モデルを設計した。部材は、常時設計荷重 (Pr+D+L) に対して設計応力が許容応力度以内になるように寸法、鋼材種類を決定した。そして、弾塑性解析により 3 つの斜張橋モデルの崩壊過程および終局強度を求めた。以下を確認した。

- 1) いずれのモデルにおいても主桁がスパン中央に塑性ヒンジが生じて崩壊した。
- 2) ケーブルは降伏点には達したが塑性点には至らず、主塔基部は部分塑性した。
- 3) 許容応力度を降伏応力度の 1.7 として部材設計し、終局荷重係数 k_u は 2.41～2.82 になった。

そして、この 3 つの斜張橋モデルに対して腐食によるケーブルの断面積の減少割合 (5%, 10%, 15%, 20%) および伸びの低下 (3.0%, 2.0%, 1.0%) を考慮して橋全体の終局強度を求めた。その結果、以下を見出した。

- 4) 断面積の減少割合に比例して終局強度は低下する。
- 5) 健全ケーブルの伸び 4% が 3% および 2% まで低下しても終局強度の低下は小さいが 1% まで低下すると終局強度は最大 30% 程度小さくなる。

さらに、3 つの橋梁モデルに代表的な車両 ($W=500$ kN) を移動載荷させ、ケーブルが破断するまでの疲労寿命を求めた。その結果、以下を見出した。

表一7 腐食減面を考慮した疲労寿命

Model	Corro-sion Level	Reduction of cross section (%)	Stress range due to P=5000kN (Mpa)	Number of cycles until breakage	Rate
Model-300	3	0	313.4	94,642	1
		5	329.9	73,233	0.774
		10	348.3	55,885	0.590
		15	368.7	41,993	0.444
		20	391.8	31,012	0.328
Model-600	3	0	320.3	84,904	1
		5	337.2	65,697	0.774
		10	355.9	50,135	0.590
		15	376.8	37,672	0.444
		20	400.4	27,821	0.328
Model-900	3	0	307.8	103,698	1
		5	324.0	80,239	0.774
		10	342.0	61,232	0.590
		15	362.1	46,011	0.444
		20	384.7	33,980	0.328

- 6) いずれのケーブルにおいても腐食が進行するとともに急激に疲労寿命が小さくなる。
- 7) とくに、アンカーケーブルに生ずる応力振幅は他のケーブルより極めて大きいため疲労寿命が小さくなる。
- 8) さらに、断面積の減少を考慮すると、疲労寿命が著しく低下する。

本研究で得られた成果は、今後増加すると予想される老朽化した吊り形式橋梁の維持・補修・長寿命化に貢献すると思われる。

参考文献

- 1) 日経 XTECH：台湾で 140m のアーチ橋が突如崩壊，<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00142/00552> (2020 年 9 月 8 日閲覧)
- 2) Taiwan News: Snapped cables at center of investigation into bridge collapse in Yilan, Taiwan, <https://www.taiwannews.com.tw/en/news/3788140/> (2020 年 9 月 8 日閲覧)
- 3) Invernizzi, S., Montagnoli, F. and Carpinteri, A. : Fatigue assessment of the collapsed XXth Century cable-stayed Polcevera Bridge in Genos, *Journal of Procedia Structural Integrity*, Vol. 18, pp. 237-244, 2019.
- 4) BBC NEWS: France bridge collapse 50-tonne lorry ‘probably caused accident’, <https://www.bbc.com/news/world-europe-50479476> (2020 年 4 月 8 日閲覧)
- 5) Shunichi Nakamura, Kazuhiro Miyachi: Ultimate Strength and Chain-Reaction Failure of Hangers in Tied-Arch Bridges, *SEI, LABSE, DOI: 10.1080/10168664.2020.1775537*, 2020.
- 6) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 2014.
- 7) 鈴村恵太, 中村俊一, 樽井敏三: 腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労特性, 土木学会論文集, pp.614-622, 2006.
- 8) Shuichi Nakamura, and Keita Suzumura: Hydrogen Embrittlement and Corrosion Fatigue of Corroded Bridge Wires. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp.269-277, 2009.
- 9) 三田村武, 中井博, 渡邊英 一, 杉井謙一: 橋梁用ケーブルの最近 の話題 と展望, 土木学会論文集, No.444, VI-16, pp. 97-106, 1992.
- 10) 岡本裕, 中村俊一, 鈴村恵太: 橋梁用亜鉛めっき鋼線の腐食粗度計測および人工ピット付き鋼線の疲労強度, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.691-699, 2010.
- 11) Kazuhiro Miyachi and Shunichi Nakamura: Prediction of breakage position and remaining fatigue life of corroded bridge wires using 3D scanner, *Proceedings of 40th LABSE Symposium Nantes 2018*, pp. S24-27~S24-34, 2018.

(2020 年 9 月 15 日受付)

(2021 年 2 月 1 日受理)