

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

長井正嗣¹・謝旭²・山口宏樹³・野上邦栄⁴・新井田勇二⁵

¹正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

²正会員 博士(学術) 開発コンサルタント(株) (〒175-0005 東京都豊島区南大塚 3-20-6)

³正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

⁴正会員 工博 東京都立大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

⁵正会員 工修 (株) 総合技術コンサルタント (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 3-5-9)

本文ではケーブルの非弾性挙動を考慮した弾塑性有限変位解析を用い、ケーブルの安全率の設定が斜張橋の終局挙動、強度に与える影響を明らかにする。斜張橋では、桁に大きな圧縮軸力が生じていることから、ケーブルの塑性伸びにより終局状態となる。そのため、終局強度はケーブルの塑性化または桁の降伏が生じるいずれか小さい方の荷重倍率で支配される。また、面内耐力の観点からは、ケーブルの降伏点に対する安全率として現行の 2.0 から 1.7 へ低減できる可能性を示す。

Key Words : cable-stayed bridges, ultimate strength, cable plastic elongation, safety factor

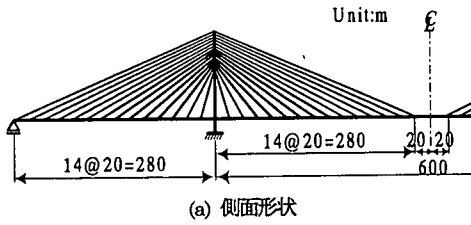
1. まえがき

我が国における斜張橋ケーブルの設計では、安全率として、破断強度に対して 2.5 が設定されている。これは、結果的に降伏点 ($\sigma_{0.2}$: 0.2% オフセット値 = $1.07 \times \sigma_{0.7}$) に対して 2.0 の安全率が確保されることになる。また、曲げ応力を考慮する場合、張力による応力との合計応力が破断に対して安全率 2.0 を有するように設計される。更に、疲労については、DIN の規準を準用した手法を適用するのが一般的である。なお、この方法を用いた疲労照査では、断面を増加させるケースはほとんどないのが実状である。このような我が国の状況に対して、ドイツでは許容応力度として、破断強度の 0.45 倍 (安全率 2.2) または降伏点 (0.2% オフセット値) の 0.67 倍 (安全率 1.5) のうち小さい値が採用され、我が国に比べて低い安全率が用いられている。そして、この数値がヨーロッパや米国の鋼および合成斜張橋の設計では一般的に使用されている。

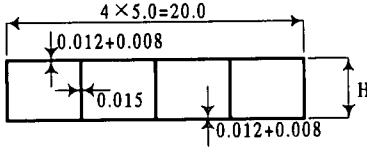
さて、21 世紀に向かい、建設事業費の縮減が大きな課題となる中で、相対的に高価なケーブルの安全率の低減の可能性を検討することは重要と考える。斜張橋では、これまで弾塑性有限変位解析による終局挙動に関する検討そのものが限られていること^{1)~4)}、さらに、ケーブル

安全率が鋼材に比べて高く設定されていることから、ケーブルの塑性化を考慮した解析は文献 5) の 1400m クラス斜張橋を対象とした例を除いてみられないのが実状である。しかしながら、マルチケーブル斜張橋を前提とした場合、主桁の最大応力はスパンに比例して生じることから⁶⁾、スパンと選定する材質によっては、桁応力が、材質に応じてステップ変化する許容応力度の上限值⁷⁾に比べて小さく設計される、すなわち、許容値に対して余裕のある断面設計が行われるケースが生じることになる。この場合、桁が降伏点に達するまでの荷重倍率 (降伏時の荷重と設計荷重の比) は 1.7 以上となり、ケーブルの安全率が降伏点に対して 2.0 と高く設定されていても、2.0 を上回る可能性がある。つまり、ケーブルの塑性化が鋼材の塑性化に先行して生じる可能性がある。

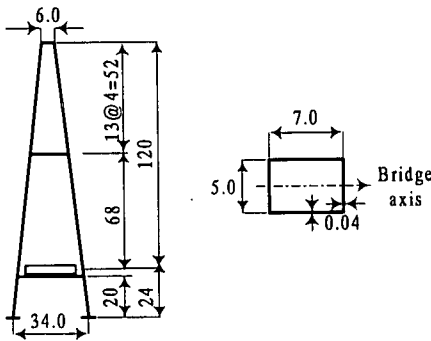
そこで、本文では、著者らの論文⁹⁾で扱われたスパン 600m の斜張橋モデルを対象に、主桁の桁高と材質をパラメータとし、ケーブルの塑性化の影響を考慮した弾塑性有限変位解析から、ケーブル強度 (安全率の設定) が橋全体の終局挙動、強度に及ぼす影響をまず明らかにする。そして、ケーブルの塑性化を考慮した場合の終局強度の推定法について考察を加える。さらに、面内耐力の観点から、安全率の低減の可能性について考察を加える。ケーブル安全率の設定に当って



(a) 側面形状



(b) 桁断面



(c) 塔形状と断面

図-1 斜張橋モデル

は、種々の要因を対象とした検討を行う必要があるが、ここではまず面内耐力に着目した検討を行うこととした。

2. 計算モデル

図-1にスパン 600m モデルの側面形状、主桁断面および塔形状を示す。このモデルは文献 4)で用いたものと同じである。本計算では、材質として SM490Y 材と SM400 材を選び、また桁高として 1.0, 2.0, 3.0m (SM490Y) および 2.0m (SM400) を選んでいる。桁高は斜張橋の耐力に影響を与える。桁高 1.0, 2.0m はこれまでの我が国の実績からいって低い値であるが、著者の文献 4) (但しケーブルは弾性体) より、いずれのモデルも面内耐力に対して安全率 1.7 以上 (死・活荷重の 1.7 倍の荷重倍率まで崩壊は生じない) を確保できることを確認している。なお、図-1(b)中の数値 0.008 は、縦リブを等価板厚に換算 (仮定) した値である。表-1 に断面諸元を示す。また、死荷重の大きさは 196kN/m を仮定している。

表-1 断面諸元

H(m)	A(m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	J(m ⁴)
1.0	0.875	0.206	30.417	0.462
2.0	0.950	0.850	34.167	1.785
3.0	1.025	1.969	37.917	3.888
塔	0.960	4.333	7.187	6.125

*塔は一柱当りの諸元である。

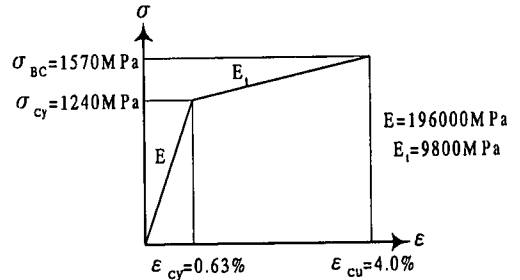


図-2 ケーブルの応力ひずみ曲線

3. 計算方法とケーブルの設定

本文で用いる弾塑性解析手法や初期不整の扱いについては既に文献 3), 4)で詳述されているため参照された。なお、本解析方法では板の局部座屈は考慮していない。

ケーブルについては降伏点に対する安全率 (γ_c) として 1.5, 1.7, 2.0 の 3 ケースを選ぶ。図-2 に仮定したケーブルの応力、ひずみ曲線 (バイリニヤモデル) を示す。破断応力 (σ_{bc})、降伏点 (σ_{cy}) をそれぞれ 1570, 1240MPa とする。安全率 1.5, 1.7, 2.0 は破断に対する安全率として約 1.9, 2.2, 2.5 となる。

各モデルのケーブル断面積は、活荷重を死荷重の 25% と仮定し、また許容応力度として、 σ_{cy}/γ_c を採用し、決定している。

4. 荷重載荷と荷重倍率

荷重の載荷方法は文献 3), 4)と同様で、死荷重を作用させた状態から死荷重の大きさに比例する分布荷重を増加させる。なお、完成時のケーブル張力は、塔の曲げモーメントがゼロ、桁の曲げモーメントがケーブル位置を支点とした連続桁の曲げモーメントとなるように選んでいる。これは、実施設計でも採用される決定法である。荷重倍率 (α , β) は作用荷重の大きさと死荷重の大きさの比で、 α は死荷重が作用した状態からの作用荷重の

大きさを表し、それに1を加えた倍率を β とする。分布荷重が作用したときの桁曲げモーメント分布は同じく文献4)に与えられているが、中央径間中央部で大きな正モーメントが、塔位置近傍で大きな負のモーメントが生じる。桁の圧縮軸力は塔位置で最大となることから、今回の荷重載荷では、塔位置の桁に最大応力が生じることになる。なお、荷重載荷にあたり、ケーブルプレストレスも同時に増加させる方法が用いられる場合がある²⁾。両手法の差異は文献3)に詳述されるが、終局強度に与える影響は小さいことが明らかにされており、本計算ではプレストレスは同時に増加させていない。

5. 計算結果と考察

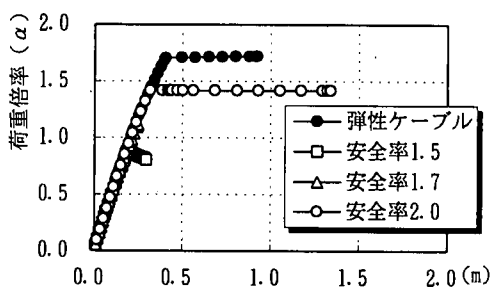
材質と桁高に応じて検討した4モデルについて個別の考察を行い、最後に各モデルの挙動や強度を比較整理する。

(1) 桁高1.0m, 材質SM490Yのケース

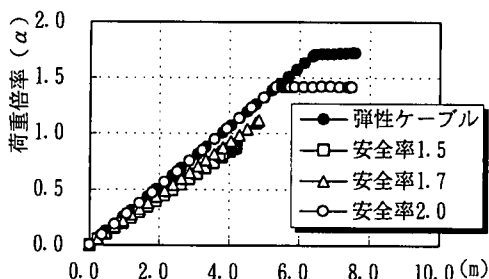
図-3に載荷荷重と桁端の橋軸方向変位、スパン中央の桁鉛直変位及び塔頂の橋軸方向変位の関係を示す。図中、弾性ケーブルの断面積は安全率(γ_c)=2.0として決定している。安全率 $\gamma_c=2.0$ の場合、弾性ケーブル(破断を考慮しないリニアモデルで解析)、非弾性ケーブルともに終局状態で変位の急増が見られるが、 $\gamma_c=1.7, 1.5$ では、急増現象は見られない。 $\gamma_c=1.5, 1.7$ の場合は、図-6に示すように、終局状態において桁の鉛直変位が急増する。また、スパン中央の鉛直変位、塔頂水平変位は安全率の低減に伴い大きくなるものの、終局時まで荷重に比例して増加しており、幾何学的非線形性の影響は小さい。本計算では、荷重が最高荷重に達して変位が急増する。そのため、本文では、この状態を終局状態とする。

図-4に塔位置の桁の軸力、曲げモーメントの相関曲線を示す。縦軸は作用軸力(N)を降伏軸力(N_y)で無次元化した値、横軸は作用曲げモーメント(M)を全塑性曲げモーメント(M_p)で無次元化した値である。 $\gamma_c=2.0$ の場合は桁の初期降伏の後、曲げモーメントの減少(再配分)が生じて、軸力が増加しつつ終局状態になる。一方、 $\gamma_c=1.7$ では桁に初期降伏が生じると同時に、また $\gamma_c=1.5$ の場合は桁に初期降伏が生じる前に終局状態となる。

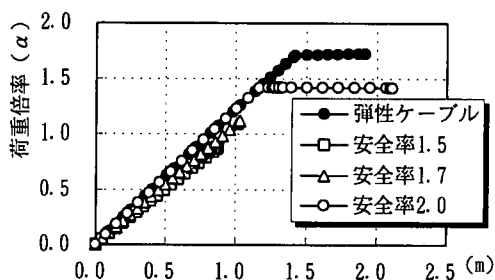
図-5に荷重倍率とケーブル安全率の関係を示す。なお、図中の破線はケーブルの降伏点($\sigma_{0.2}$)と死荷重時ケーブル応力(σ_{all})の比である。死荷重時の応力として、許容応力度($\sigma_{0.2}/\gamma_c$)を1.25(活荷重分として25%を仮定しているため)で割った値を用いている。また、△印(□印と重なっている)はプログラム内でケーブルの初期降伏が最初に生じた荷重倍率である。 $\gamma_c=2.0$ の場合、弾性、非弾性ケーブルともに同程度の荷重倍率で桁に初期降伏が生じる。非弾性ケーブルでは、荷重増加に伴い



(a) 桁端部の軸方向変位



(b) 桁中央点の鉛直変位



(c) 塔頂水平変位

図-3 桁、塔の変位(桁高1.0m, 材質SM490Y)

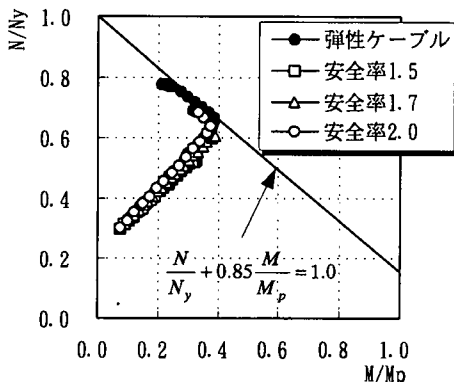


図-4 桁(塔位置)の断面力相関曲線(桁高1.0m, 材質SM490Y)

ケーブルに降伏が生じ、終局状態となる（図中では、△印と□印が重なっている）。このときの荷重倍率（ β ）は約 2.4 である。弾性ケーブルを仮定すると更に高い荷重倍率、約 2.7 で終局状態となる。 $\gamma_c=1.7, 1.5$ の場合はケーブルに初期降伏が生じ、直ちに終局状態となる。すなわち、終局状態がケーブルの初期降伏に支配される。あわせて、破線で示した $(\sigma_{cy}/\sigma_{cd})$ は終局強度に近いことがわかる。

図-6.7 に終局時の変位の増分モードと塑性化したケーブルを示す。 $\gamma_c=2.0$ の場合、弾性ケーブルと非弾性ケーブルで増分モードに差異が生じていることがわかる。弾性ケーブルの場合は塔位置の桁の塑性域が広がり橋軸方向変位と鉛直変位が急増する⁴⁾。非弾性ケーブルの場合、塔位置の下 2, 3 段のケーブルの塑性化とともに側径間内の橋軸方向の変位の急増(図-3 参照)と鉛直変位の急増が生じる。 $\gamma_c=1.7, 1.5$ の場合、塑性化したケーブル位置に対応して、側径間内の桁の鉛直変位が急増している。なお、このケースで、塔基部の軸力、曲げモーメントの相關曲線を調べると、いずれのケーブル安全率でも弾性状態にあり、 $\gamma_c=2.0$ の場合は、塔頂変位の急増に伴い終局時に曲げモーメントの急増が見られた。

(2) 桁高 2.0m, 材質 SM490Y のケース

図-8 に図-3 と同様の荷重、変位曲線を示す。非弾性ケーブルの場合、桁高 1.0m で $\gamma_c=1.7, 1.5$ とした先のモデルに比べると、終局時に変位の多少の増加が見られるが、弾性ケーブルで生じる変位の急増に比べると顕著ではない。

図-9 に塔位置の桁の軸力、曲げモーメントの相關曲線を示す。後程説明するように、 $\gamma_c=2.0$ の場合は、桁の初期降伏が最初に生じ、続いてケーブルが降伏して終局状態となる。このケースにおいては断面力の再配分が生じる。一方、 $\gamma_c=1.7, 1.5$ の場合は桁には初期降伏が生じない。すなわち、桁が弾性状態のままでケーブルの塑性化が生じ、その後には桁の塑性化が生じ曲げモーメントの再配分が生じる。この傾向は桁高さ 1.0m の場合と異なるが、桁高が高くなった影響と考えられる。

図-10 に荷重倍率とケーブル安全率の関係を示す。 $\gamma_c=2.0$ の場合、まず桁に初期降伏が生じ、非弾性ケーブルではケーブルの初期降伏が生じ、わずかに荷重倍率が上昇して終局状態となる。桁高 1.0m の場合と比べると荷重倍率(β)は約 2.6 程度に増加している。また、弾性ケーブルを仮定した場合は桁高 1.0m に比べて高い荷重倍率が得られている。 $\gamma_c=1.7, 1.5$ の場合、ケーブルに初期降伏が生じ、 $\gamma_c=2.0$ の場合と同様、わずかで荷重倍率が上昇して終局状態となる。

図-11.12 に終局時の変位の増分モードと塑性化したケーブルを示す。いずれの安全率でも、弾性ケーブルを仮定した終局状態の変位増分モードとは大きく異なり、終局時にほとんどのケーブルが塑性化し、側径間の鉛直変

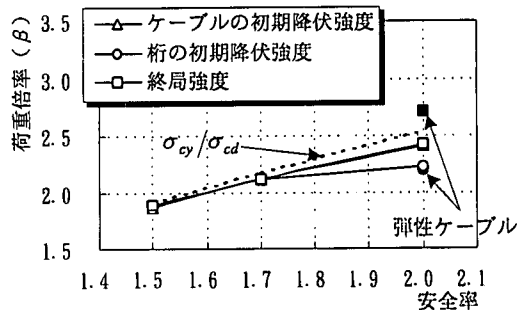


図-5 ケーブルの初期降伏強度と橋の終局強度の比較 (桁高 1.0m, 材質 SM490Y)

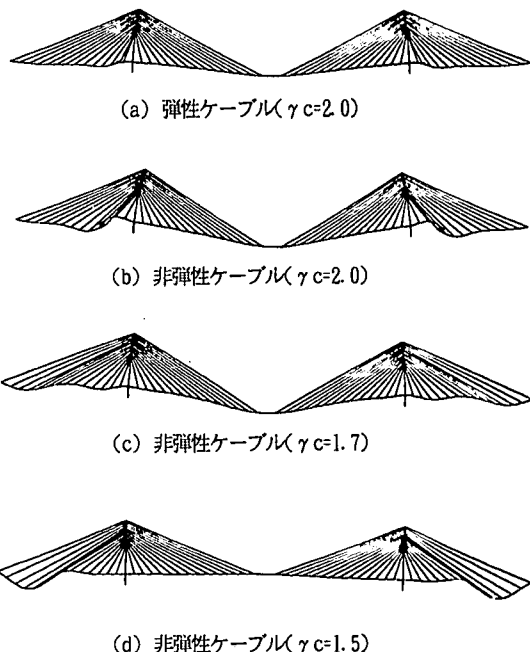


図-6 終局状態での変位増分モード (桁高 1.0m, 材質 SM490Y)

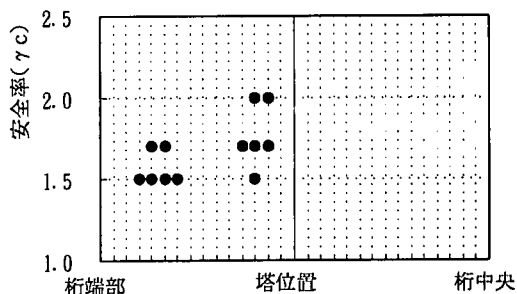
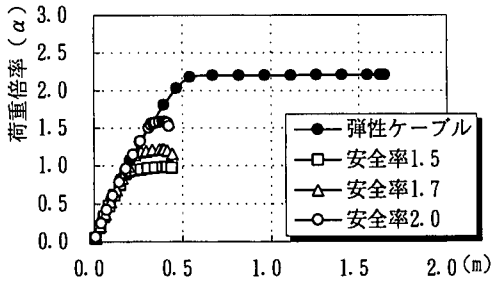
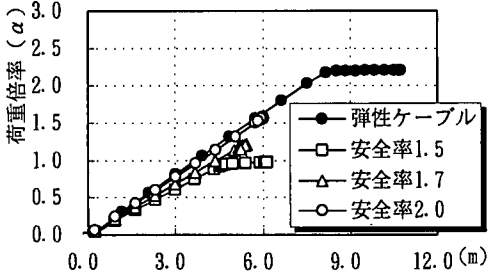


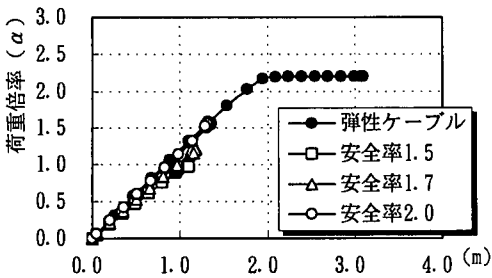
図-7 塑性化したケーブル (桁高 1.0m, 材質 SM490Y)



(a) 桁端部の軸方向変位



(b) 桁中央点の鉛直変位



(c) 塔頂水平変位

図-8 桁、塔の変位 (桁高 2.0m, 材質 SM490Y)

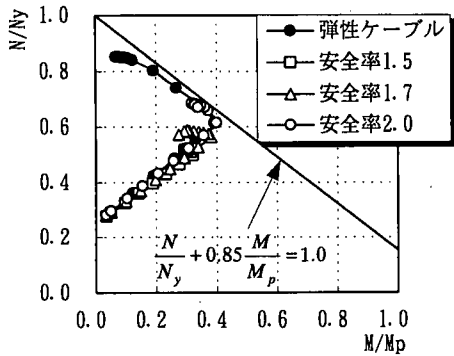


図-9 桁(塔位置)の断面力相関曲線 (桁高 2.0m, 材質 SM490Y)

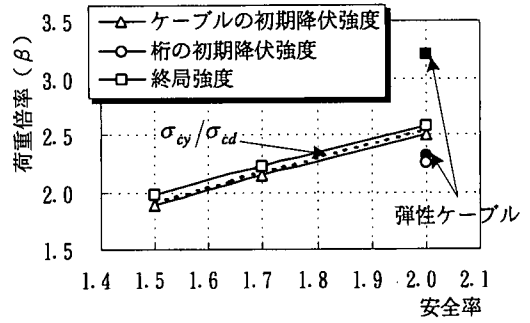


図-10 ケーブルの初期降伏強度と橋の終局強度の比較 (桁高 2.0m, 材質 SM490Y)

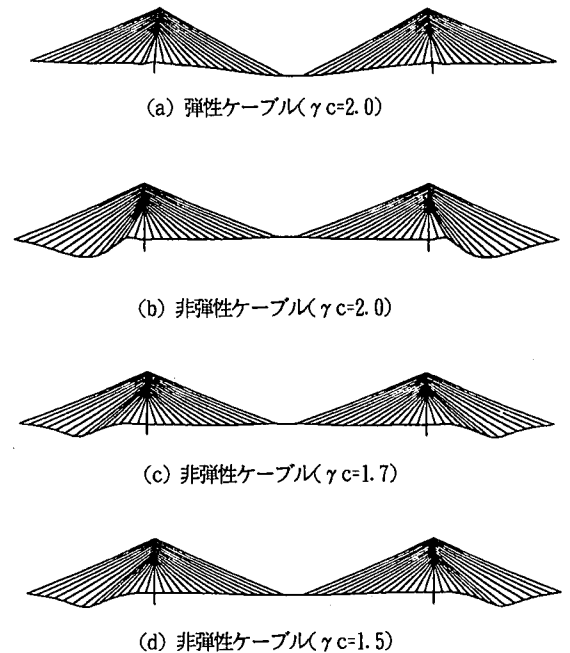


図-11 終局状態での変位増分モード (桁高 2.0m, 材質 SM490Y)

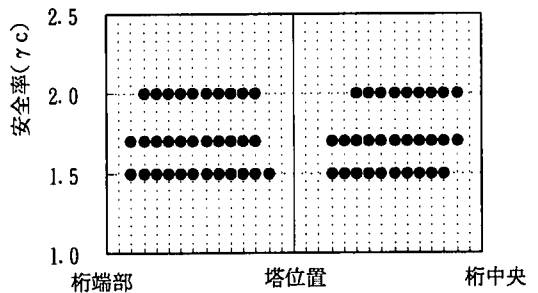


図-12 塑性化したケーブル (桁高 2.0m, 材質 SM490Y)

位が急増する。すなわち、ケーブルの塑性化に伴い圧縮を受ける桁を支持するケーブルの剛性が急激に減少し、側径間の桁全体が大きく鉛直方向に変形したものと考えられる。なお、図-8の荷重、変位曲線において、弾性ケーブルの結果に比べるとわずかではあるが、橋軸方向の桁変位の急増が見られたのは、側径間全体が鉛直方向に変位したことに起因すると考えられる。また、このケースも、塔は弾性状態で終局状態となる。

(3) 桁高 3.0m, 材質 SM490 のケース

(2)で桁高が高くなることによる挙動の差異を説明した。ここでは更に桁高が高くなる場合の特徴的な挙動を中心に説明する。

図-3.8 に荷重、変位曲線を示したが、桁幅 2.0mの図-8に比べると、非弾性ケーブルの終局時の変位の増加が顕著になる。これは、後程説明するように、終局時にほとんどのケーブルが塑性化し、中央径間を含めた桁全体の鉛直方向変位が急増したためと考えられる。

図-13 に本モデルの荷重倍率とケーブル安全率の関係を示す。ここでの特徴は、ケーブルの初期降伏後、終局強度に達するまでの荷重倍率が、桁高 2.0m に比べて更に上昇することである。

図-14, 15 に終局時の変位増分モードと塑性化したケーブルを示す。図-15 より桁高 2.0mの場合と同様、終局時にほとんどのケーブルが塑性化していることがわかる。終局時の変位増分モードを図-11 と比べると、中央径間内でも鉛直変位の増分量が大きくなっていることが分かる。

(4) 桁高 2.0m, 材質 SM400 のケース

材質として SM400 を用いた場合の結果について考察する。

図-16 に荷重、変位曲線を示す。この場合、弾性ケーブルでは終局時に変位の急増が見られるが、非弾性ケーブルではまったく見られない。

図-17 に塔位置の桁の軸力と曲げモーメントの相関曲線を示す。いずれのケースも桁の初期降伏が生じた後、曲げモーメントが減少し、軸力が増加して終局状態となる。

図-18 に荷重倍率と安全率の関係を示す。いずれのケースも、桁材料の降伏点が高いことから、SM490Y 材の場合と異なり、まず桁（塔位置）に初期降伏が生じる。その後の荷重増加に伴い、弾性ケーブル($\gamma_c=2.0$)の場合、桁内の塑性域の広がりによって終局状態になる。これは、図中の破線の荷重倍率（ケーブル降伏点と死荷重時ケーブル応力の比）が終局時の荷重倍率より高いことから理解できる。非弾性ケーブル($\gamma_c=2.0$)では、弾性ケーブルと同様に桁内の塑性域の広がりにより終局状態となるが、その際、ケーブルの塑性化が生じ（図-18 中、△印と□印と重なっている）、鉛直変位が急増する（図-19 参

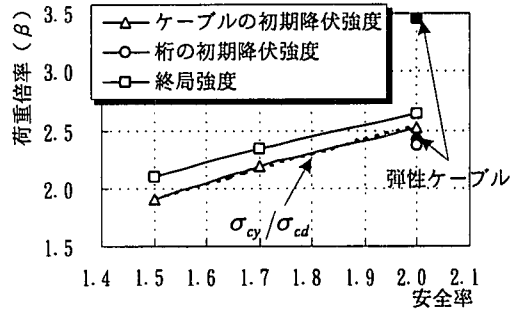


図-13 ケーブルの初期降伏強度と橋の終局強度の比較 (桁高 3.0m, 材質 SM490Y)

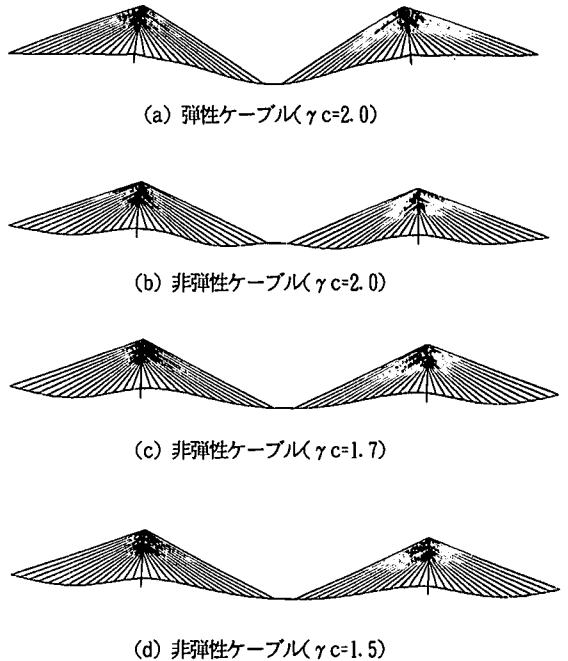


図-14 終局状態での変位増分モード (桁高 3.0m, 材質 SM490Y)

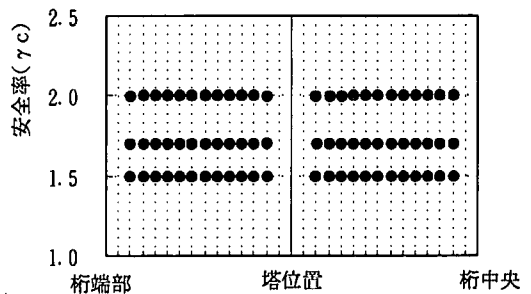
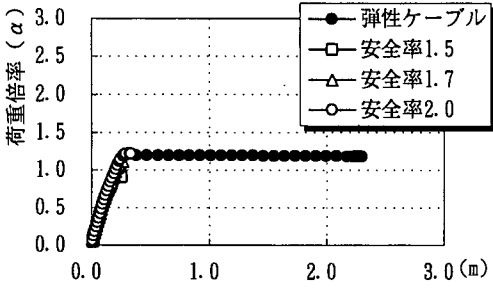
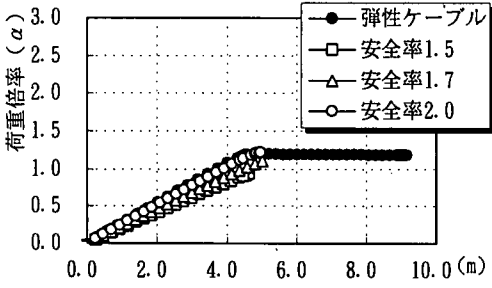


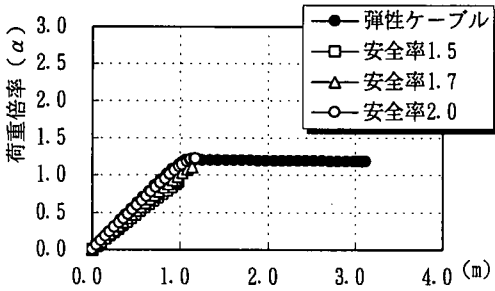
図-15 塑性化したケーブル (桁高 3.0m, 材質 SM490Y)



(a) 桁端部の軸方向変位



(b) 桁中央点の鉛直変位



(c) 塔頂水平変位

図-16 桁、塔の変位 (桁高2.0m, 材質SM400)

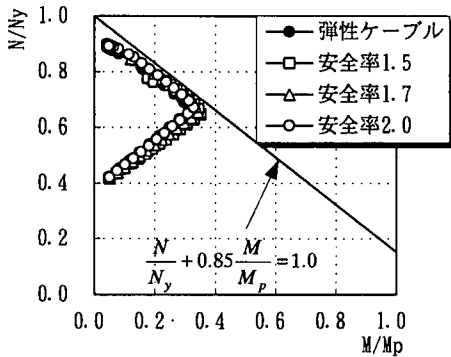


図-17 桁 (塔位置) の断面力相関曲線 (桁高2.0m, 材質SM400)

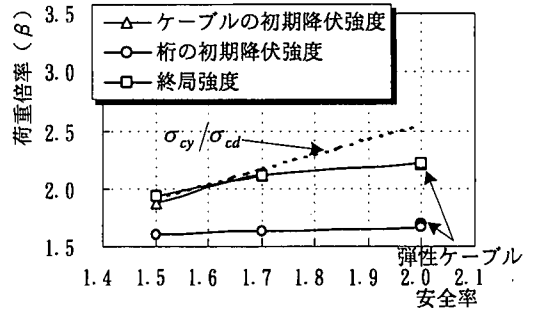


図-18 ケーブルの初期降伏強度と橋の終局強度の比較 (桁高2.0m, 材質SM400)



(a) 弾性ケーブル(γc=2.0)



(b) 非弾性ケーブル(γc=2.0)



(c) 非弾性ケーブル(γc=1.7)



(d) 非弾性ケーブル(γc=1.5)

図-19 終局状態での変位増分モード (桁高2.0m, 材質SM400)

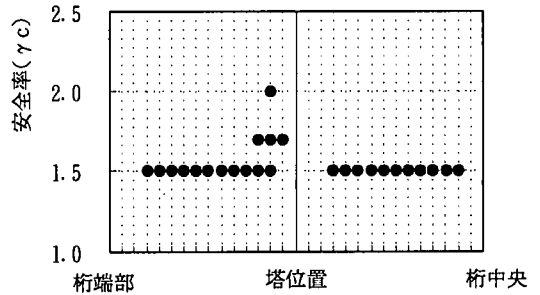


図-20 塑性化したケーブル (桁高2.0m, 材質SM400)

表-2 終局時の荷重倍率(β)

材質		SM490Y			SM400
桁高		1.0m	2.0m	3.0m	2.0m
安全率	2.0(弾性)	2.72 (2.50)	3.20 (2.50)	3.45 (2.50)	2.20 (2.50)
	2.0	2.42 (2.50)	2.58 (2.50)	2.64 (2.50)	2.22 (2.50)
	1.7	2.12 (2.13)	2.22 (2.13)	2.33 (2.13)	2.11 (2.13)
	1.5	1.88 (1.88)	1.98 (1.88)	2.09 (1.88)	1.94 (1.88)

()内は σ_{cy}/σ_{cd}

照)。 $\gamma_c=1.5, 1.7$ の場合、ケーブルの初期降伏と終局強度の荷重倍率が近く、また、桁の材質が低いにも拘わらず、荷重倍率は SM490 材の場合と大差がないことから、ケーブルの塑性化が橋の終局挙動に大きく影響していることがわかる。

図-19, 20 に終局時の変位の増分モードと塑性化したケーブルを示す。 $\gamma_c=2.0$ の場合、弾性ケーブルでは塔位置近傍の橋軸方向変位が急増する。非弾性ケーブルでは、終局時に下 2 段目ケーブルのみが塑性化している。塔位置の桁の塑性域が広がりつつ終局状態となる際、ケーブルが塑性化して塔位置近傍の鉛直方向変位が急増したものと考えられる。そのため、終局時に桁端橋軸方向変位の急増が生じなかったものと考えられる(図-16 参照)。 $\gamma_c=1.7$ の場合、図-20 に示すように、下段のケーブル 3 本が塑性化し、それに対応する桁位置で鉛直変位が急増する。 $\gamma_c=1.5$ の場合は、大部分のケーブルが塑性化し、側径間の鉛直変位が急増する。なお、本モデルの塔は終局状態で弾性状態にある。

(5)終局挙動、強度のまとめ

表-2 に終局時の荷重倍率を示す。表中の括弧内は、ケーブルの応力比 (σ_q/σ_{cd}) である。

まず、SM490Y 材について考察する。桁高の異なる 3 つのモデルともに、ケーブルを弾性体と仮定すると終局強度を高く評価することになり、橋の終局状態にはケーブルの塑性化が大きく関与していることがわかる。 $\gamma_c=2.0$ の場合、塔位置桁に初期降伏が生じ、曲げモーメントの再配分が見られるが、ケーブルの塑性化により終局状態となる。 $\gamma_c=1.7, 1.5$ の場合は、桁が弾性状態でケーブルの塑性化により終局状態となる。終局時の荷重倍率は、桁高を高くするにつれて、ケーブルの初期降伏時の荷重倍率に比べて大きくなる。今回の計算では、桁高 2.0m (スパン/桁高=300) で、ケーブル安全率に応じて 3~5%、桁高 3.0m (スパン/桁高=200) で 5~10% 程度の上昇がみられた。桁高と、ケーブルの初期降伏から終局に至るまでの荷重倍率の上昇の程度との関係を同定するのは興味ある課題と考える。しかし、本計算例でもわかるように極端に大きな上昇は期待できないと考えられるため、特定のための検討は行わなかった。

一方、終局時の変位増分モードや塑性化するケーブルの数には、桁高によって差異が生じていることがわかる。桁高 1.0m の場合、終局時に塑性化したケーブルの数は少なく、いずれか 1 本のケーブルが塑性化した後に、その近傍のケーブルのみが塑性化して終局状態になっている。そして、終局時の変位の増分モードは塑性化するケーブル位置の影響を受ける。桁高が 2.0, 3.0m の場合、終局時に多くのケーブルが塑性化している。これは、桁高、すなわち桁の面内曲げ剛性の影響と考えられる。桁高が高いと、最初に塑性化したケーブルの近傍で生じる桁の崩壊を防ぐことができるためと考えられる。そのため、ケーブルの塑性化の後、終局状態に達するまで荷重倍率がわずかではあるが上昇している。

次に SM400 材 (桁高 2.0m) の結果について説明する。終局時の荷重倍率は表-2 に記載している。このモデルは、SM490 材と異なり、桁の初期降伏時の倍率がケーブルが塑性化する荷重倍率より更に低い場合の挙動を見るために選んだものである (但し、計算上は板の局部座屈は生じないと仮定)。表より、 $\gamma_c=2.0$ の場合、弾性ケーブル、非弾性ケーブルに関係なくほぼ同じ終局時の荷重倍率が得られている。応力比との比較からもわかるように、いずれもケーブルが塑性化する前に桁内に塑性域が広がり、その後終局状態となる。しかし、非弾性ケーブルでは、図-19 に示したように、終局時には下段のケーブル一本が塑性化しており、その位置の鉛直変位が急増する。これは、桁の終局とほぼ同時にケーブルが塑性化したためと推測される。 $\gamma_c=1.7$ の場合、ケーブルの塑性化と同時に終局状態となる。 $\gamma_c=1.5$ の場合も、ケーブルの塑性化によって終局状態となるが、終局時に塑性化するケーブルの数は SM490Y 材(桁高 2.0m)の場合とほぼ同様である。終局時に塑性化したケーブルの数や位置、またそれらに起因する終局時の増分モードが、 $\gamma_c=2.0, 1.7$ と $\gamma_c=1.5$ で差異が見られたのは、終局時の桁の塑性域の広がり(領域)の差異、すなわち桁の剛性の差異に起因するものと考えられる。例えば、 $\gamma_c=1.5$ の場合は、桁の初期降伏とケーブルの塑性化による終局時の荷重倍率の差異が小さく、したがって、ケーブルが塑性化するまでに、桁の降伏域が $\gamma_c=2.0, 1.7$ に比べて少なかったためと考えられる。

6. ケーブルの塑性化を考慮した橋の終局強度推定及び安全率の低減可能性に関する考察

(1)終局強度の推定

ケーブルの塑性化が斜張橋の終局強度に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。これは、当然のことであるが、主桁には大きな圧縮力が生じているため、重力方向の支持機能が低下することで、橋の崩壊につながることになる。これより、斜張橋の終局強度は、桁の全体

座屈が生じない程度の高さを確保していることを前提とすれば⁴⁾、ケーブルの塑性化または桁断面の降伏域の広支配される。

さて、ケーブルの塑性化が生じる荷重倍率は表-2に示したように、桁高が高くなると最大10%程度の差異が生じるものの、安全側の立場で $(\sigma_{cy}/\sigma_{cal})$ で概略予測できる。そのため、実橋ではケーブルの降伏点 (σ_{cy}) と作用最大応力 $(\sigma_{c,max})$ の比率で概略予測できると考える。一方、桁の終局強度(弾性ケーブルを仮定した場合)の算定には、現状、弾塑性有限変位解析を必要とし、実務の計画段階では困難を伴う。そのため、桁については、初期降伏あるいは局部座屈が生じる小さい方の倍率を終局状態の目安と考える。この比率は、斜張橋の幾何学的非線形性の影響が小さいことから、作用最大応力 $(\sigma_{g,max})$ と材料の降伏点の比とみなせる。また、局部座屈強度 (σ_{cal}) は道路橋示方書⁷⁾から推定できる。そして、両者の比較から橋全体の終局強度を推定すればよいと考える。

以上を整理すると、桁の全体座屈が生じないことを前提⁴⁾として、

$$f_1 = \sigma_{cy} / \sigma_{c,max} \quad (1)$$

$$f_2 = \sigma_{cal} / \sigma_{g,max} \quad (2)$$

のうち小さい方の値を、終局時の死・活荷重に対する荷重倍率とみなすことになる。

(2) 安全率の低減

さて、本文の目的の一つである安全率の設定について考察する。今回の計算では、比較的桁高の低いモデルを選んでいるものの、ケーブルの降伏点に対する安全率として1.7を選んでも十分耐力は確保できると考える。本検討で得られた終局時の荷重倍率は死荷重に対するものである。したがって、活荷重の影響を考慮する必要がある。その場合、荷重倍率として2.1程度(活荷重を死荷重の25%程度と仮定し、 1.7×1.25 より約2.1を得る)が確保できていれば、死・活荷重の合計荷重に対して約1.7の安全率が確保できるものと考えられる。表-2の結果を見ればわかる通り、面内耐力の観点からは、ケーブルの降伏点に対する安全率は鋼材の降伏点に対する安全率と同様1.7に低減可能と考える。

7. まとめ

本文では、ケーブルの塑性化を考慮した弾塑性有限変位解析からケーブルの塑性化が斜張橋の終局挙動、強度に与える影響を明らかにした。本検討で得られた結果を要約すると次のようになる。

1)ケーブルの塑性化は斜張橋の終局挙動、強度に大きな影響を与える。そのため、終局挙動や強度を解明する上

がりによる剛性の低下のいずれか小さい方の荷重倍率に

でケーブルの塑性化を考慮した解析が欠かせない。

2)斜張橋の終局強度はケーブルの塑性化または桁断面の塑性域の広がりによる剛性低下のいずれか小さい方で支配される。前者はケーブルの降伏点と発生最大応力の比で荷重倍率を概略推定できる。しかし、後者は弾塑性有限変位解析を必要とする。基本計画では、弾塑性有限変位解析の代用として、桁の全体座屈が生じない程度の剛性が確保されている⁴⁾ことを前提に、初期降伏または板の局部座屈が生じる荷重倍率を使用すればよいと考える。なお、厳密には、連成座屈挙動が扱える弾塑性有限変位解析が必要で、今後の課題としたい。

3)面内耐力の観点からは、ケーブルの降伏点に対する安全率を鋼材と同じ1.7まで低減できる可能性が示せたと考える。

8. あとがき

本論文におけるケーブル安全率は、ケーブルを含む斜張橋全体の終局強度に関する検討に基づき、その低減の可能性を提示している。ケーブル安全率は、腐食、二次応力、材料のばらつき、死・活荷重のばらつき、解析上のばらつき、架設・製作誤差、および構造物の社会的・経済的重要性などの影響を総合的に勘案して決定することになるが、斜張橋を構成する主塔、ケーブルおよび補剛桁の終局強度に対する安全率のバランス化に向けた検討の一環として、現行設計レベルのケーブル安全率を低減できる可能性を明らかにできたものと考えられる。

参考文献

- 1) 崎元達郎, 奈良敬, 小松定夫, 北沢正彦: 曲げが支配的な主塔を有する長径間斜張橋の耐力に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 36A, pp. 111-119, 1990.
- 2) 北田俊行, 野口二郎, 丹羽光則, 狩野正人: 鋼斜張橋の耐力解析におけるプレストレスの取扱いに関する一考察, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, Vol. 18, pp. 371-376, 1996.
- 3) 謝旭, 長井正嗣, 山口宏樹: 長大斜張橋の終局強度解析と挙動に関する一考察, 土木学会論文集, No. 598/I-44, pp. 171-181, 1998.
- 4) 長井正嗣, 謝旭, 山口宏樹, 野上邦栄, 新井田勇二: 斜張橋主桁の終局挙動, 強度特性の解明と安定照査に関する一考察, 土木学会論文集, No. 647/I-51, pp. 253-265, 2000.
- 5) 謝旭, 長井正嗣, 山口宏樹: ケーブルの塑性化を考慮した長大斜張橋の終局挙動に関する考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 44A, pp. 229-236, 1998.
- 6) 長井正嗣, 浅野浩一, 渡邊善治: 斜張橋の主桁耐力評価に着目した E_f 法の適用性と設計法に関する一検討, 構造工

学論文集 土木学会, Vol. 41A, pp. 221-228, 1995.

7) 日本道路協会：鋼道路橋示方書，Ⅱ鋼橋編，丸善，1993.

(1999. 10. 5 受付)

EFFECT OF INELASTIC BEHAVIOR OF CABLES ON ULTIMATE BEHAVIOR AND STRENGTH OF CABLE-STAYED BRIDGES AND THE POSSIBILITY OF REDUCTION OF THE SAFETY FACTOR

Masatsugu NAGAI, Xu XIE, Hiroki YAMAGUCHI, Kuniei NOGAMI and Yuji NIIDA

This paper presents an effect of inelastic behavior of cables on ultimate behavior and strength of cable-stayed bridges based on elasto-plastic finite displacement analysis. It is found, since the girder is subjected to the large compressive axial force, that the plastic elongation of the cables leads to the collapse of the bridge. The load parameter at ultimate state due to cable plastic elongation can be estimated by calculating the ratio of the yield stress to produced maximum stress in the cable. From a viewpoint of in-plane buckling instability, the possibility of the reduction of the safety factor against proof stress from 2.0 to 1.7 is presented.