

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

Elasto-plastic finite displacement analysis of long-span cable-stayed bridges
including inelastic behavior of cables

謝 旭*・長井正嗣**・山口宏樹***

Xu XIE, Masatsugu NAGAI and Hiroki YAMAGUCHI

*博士(学術) 埼玉大学助手 工学部 建設工学科(〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

**工博 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

***工博 埼玉大学教授 工学部 建設工学科(〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

ABSTRACT: This paper presents elasto-plastic finite displacement analysis of long span cable-stayed bridges, in which inelastic behavior of cables is taken into account. Based on this analysis, inelastic behaviors of all main members such as the girder, towers and cables are taken into account simultaneously. In this analysis, 4-node isoparametric elasto-plastic cable element is proposed. The inelastic behavior of an inclined cable obtained by using the proposed element is compared with that by using truss elements. A 1400-meter cable-stayed bridge model is employed and the effect of the factor of safety of the cables on the elasto-plastic behavior and ultimate strength of the bridge are studied. When the factor of safety of the cable is relatively low, due to plastic behavior of the cables, the bending moment of the girder increases and it affects the ultimate strength of the girder. On the contrary, when the factor of safety of the cable is higher, the buckling of the girder is observed.

Key Words : cable-stayed bridges, elasto-plastic finite displacement analysis, ultimate strength, safety factor of cable

1. まえがき

周知のように、自定式斜張橋は支間の長大化に伴い桁と塔部材に生じる圧縮力が増加し、軸力による部材の座屈強度に対する配慮が設計上の重要な課題となる。さて、長大斜張橋はケーブルの拘束によって、比較的大きな面内剛性を有し、幾何学的非線形の影響はそれ程小さくなく、部材断面の塑性化により終局状態に至るものと考えられる。したがって、長大斜張橋の終局挙動を正確に評価する上では、桁及び塔部材の塑性化の影響を考慮することが不可欠となる。そのため、弾塑性有限変位解析^{1),2),3)}や弾塑性座屈解析⁴⁾を用いた終局強度評価に関する報告が幾つかみられる。一方、現在の設計法ではケーブルの安全率が他の部材より高いため、提案されている手法のほとんどが桁と塔部材の終局強度に着目したものであり、ケーブルが弾性部材として取り扱われている。

ケーブルの安全率は他の部材より高く設定されている

ものの、終局状態に至る過程で、特に、桁の合理的な安定性照査法のない現状では、桁の強度がケーブルの強度を上回る設計が行われている可能性がある。その場合、部分的にケーブルが塑性化する可能があり、ケーブル部材の強度が長大斜張橋の終局強度に影響を及ぼすものと考えられる。また、近年、長大吊形式橋梁の経済性を追求する上で、高価なケーブルの安全率の見直し、すなわち低下の可能性が検討されており、長大斜張橋においても同様の検討が行われるものと考ええる。そのため、ケーブルの塑性化も考慮した長大斜張橋解析の耐荷力特性を明確することは重要と考える。

以上のような背景から、本研究では文献2), 3)に示した長大斜張橋の三次元弾塑性有限変位解析法においてケーブルの塑性化の影響も考慮し、すべての部材の弾塑性挙動を扱える斜張橋の解析法及び計算プログラムを開発した。その上で、1400m支間を有する斜張橋のモデルを例

にして、終局強度解析を行い、ケーブルの塑性域の広がりや長大斜張橋の終局挙動に与える影響や、ケーブルの安全率の設定について若干の考察を行った。

なお、桁と塔部材の弾塑性有限変位解析の定式化や斜張橋の解析フローチャート等はすでに文献2),3)に紹介しており、ここでは省略することにする。

2. 柔ケーブルの弾塑性有限変位解析

柔ケーブルの弾性有限変位解析法は既に著者らにより定式化している^{5),6)}。この手法は汎用性の高い有限要素法に基づいたものであり、要素内のGuass積分点で塑性化の判定を行い、ヤング係数を使い分ければ、容易に弾塑性有限変位解析に拡張できる。ケーブルの非線形解析の増分方程式については文献5)または6)に詳述しているが、本文では、その増分方程式を用いて、弾塑性有限変位解析に拡張した。本要素の妥当性を確認するために、単一ケーブルを用いて計算した結果の比較を示す。

図-1(a)に無応力状態において直線状に張られている単一ケーブル⁷⁾を示す。傾斜角 θ は 60° であり、水平投影線に沿って分布荷重 q が作用する。ケーブルのヤング係数 $E=2.0\times10^6\text{kg/cm}^2$ 、降伏後の接線係数 $E_t=1.55\times10^6\text{kg/cm}^2$ 、降伏応力 $\sigma_y=1.0620\times10^4\text{kg/cm}^2$ である。また、ケーブルの応力-ひずみ曲線は図-1(b)に示すようなバイリニア曲線とする。

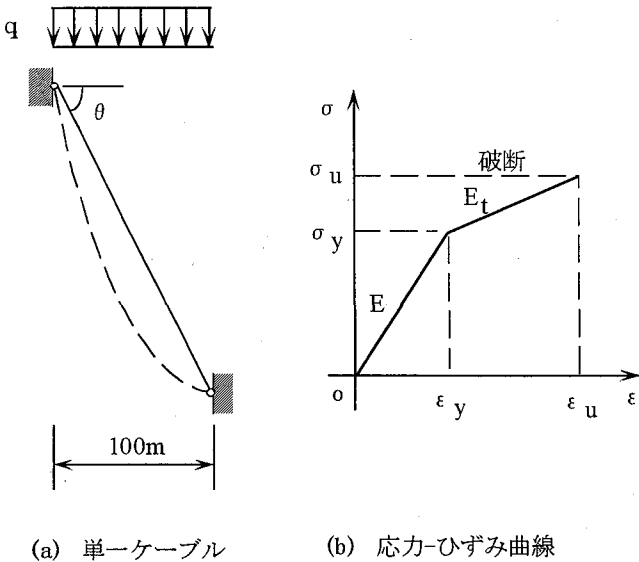
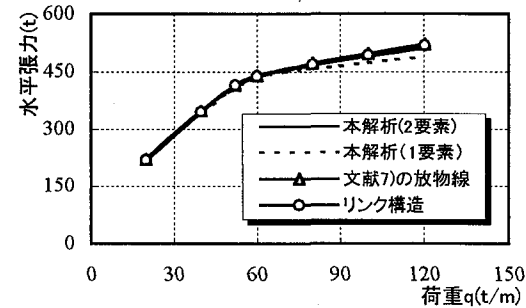


図-1 分布荷重を受ける単一ケーブル及び材料特性

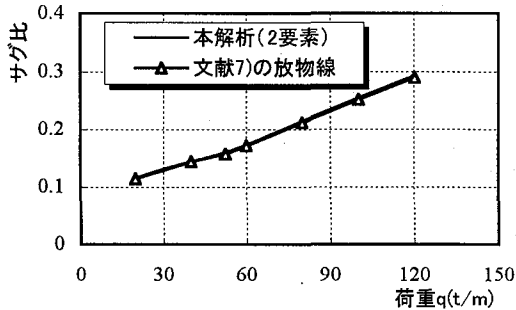
本例題は図-1に示すような水平方向に等分布荷重を載荷する放物線形状の単一ケーブル構造であるため、荷重の取り扱い方については著者らが提案した要素軸方向荷重載荷と多少の差異がある。載荷方式の影響をできるだ

け避けるために、ここでは総荷重の大きさが一致するように荷重をケーブル軸に沿って作用させる。なお、解析にあたっては、この単一ケーブル構造をそれぞれ1要素(中間に2節点を有する4節点アイソパラメトリック要素)と2要素(7節点)でモデル化する。

図-2に解析結果の比較を示すが、1要素で計算する場合、要素内に設けた節点(投影方向に等分割)がケーブルの midpoint に位置しないため、図-2(b)に示すサグの比較を行っていない。2要素を用いる場合、本手法の結果は文献7)の放物線ケーブル要素及び20要素のトラス要素でモデル化したリンク構造から得られた結果とほぼ一致している。1要素での結果は荷重の増加に従って差異が生じているが、わずかな差異といえる。この差異が生ずる一つの原因として、1要素で計算する場合、ケーブルの変形とともに、本モデルの荷重条件と文献7)の荷重条件との差が大きくなるためと考える。



(a) 水平張力の比較



(b) サグ比の比較

図-2 ケーブル要素の精度

スパン 1500m クラスの斜張橋でもケーブルの最大サグ比は 4%以内であり、本例の 20-30%に比べてかなり小さい。そのため、提案したケーブル要素を長大斜張橋の弾塑性有限変位解析に用いても高い精度が確保できると考える。なお、以下の長大斜張橋の解析では全てのケーブルを 1 要素でモデル化し、また応力-ひずみ関係は図-1(b)に示すバイリニア曲線を用いている。

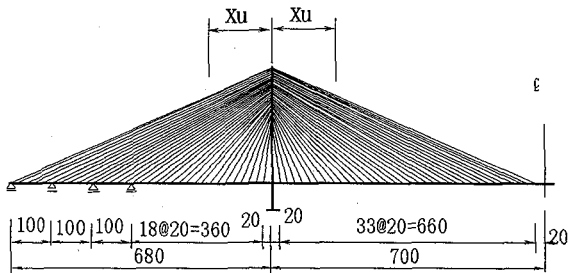
3. ケーブルの塑性化を考慮した長大斜張橋の終局挙動

本研究では支間 1400m の斜張橋モデルを例に、ケーブルの塑性化が長大斜張橋の弾塑性挙動および終局強度に与える影響について検討を行い、ケーブル安全率の設定法に関する考察を加えた。

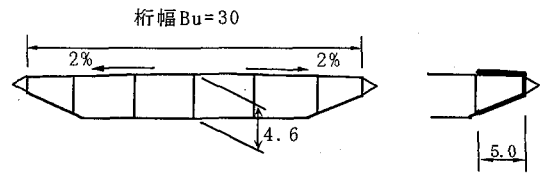
(1) 長大斜張橋のモデルおよび解析条件

図-3に示す支間1400mの長大斜張橋モデルについては、別途説明を行っているが^{(2),(3),(8)}、ここでその設計概要を述べる。

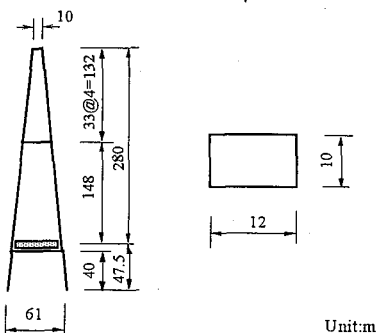
本モデルの側径間長は中央径間長のほぼ半分としたが、桁端部から100mの間隔で三つの中間橋脚を設け、面内剛性を高めている。桁断面の幅(Bu)は30mで、桁高さは4.6mである。板厚はデッキ、下フランジともに12mmとし、縦方向リブを考慮して軸力に抵抗できる等価板厚として20mmを仮定した。また、腹板の板厚は15mmとした。この断面は、文献 8)の手法に基づき、材料の降伏点や修正 E_p 法に基づく座屈安定条件に対して所要の安全率が確保



(a) 側面形状



(b) 桁基本断面及び板厚の増厚



(c) 塔形状と断面

図-3 斜張橋解析モデル

表-1 桁および塔の断面諸元 (単位: m^2 or m^4)

断面	断面積	面内 I_x	面外 I_y	ねじり定数 [※]
桁(基本)	1.647	5.759	131.575	11.145
桁(増厚)	2.299	7.182	240.355	14.489
塔/本	1.760	30.667	40.320	39.273

※リブを無視した

できるように、死、活荷重と風荷重による応力照査を行って決定したものである。図中の塔両側の区間 ($X_u=140m$)は、図-3(b)に示すように桁断面の両端部を増厚した区間である。これは、死荷重と風荷重を組合せた状態で発生した応力を許容応力以下とするためであり、今回のモデルでは増厚量は 36mm である。塔の高さは桁上 280m とし、中央径間長との比を 0.2 として既往斜張橋の標準値 0.17~0.2 の上限とした。塔断面の板厚は 30mm で、縦リブの等価板厚は 10mm である。また、本モデルでは塔の横梁と桁間に棒部材を設けて橋軸方向に拘束している。棒部材の橋軸方向の剛性はばね係数 15 000KN/m 相当とし、他の方向は剛体として入力した。なお、表-1 に主桁および塔の断面諸元を示す。

主桁と塔の材質は SM570 で、単軸引張り降伏応力は 451 100 KN/ m^2 材である。

一方、分布活荷重強度を約40KN/mと仮定すれば、集中活荷重の影響を考慮して、活荷重による張力を死荷重時張力の20%前後となる。ケーブルの断面積は、許容応力 σ_s を σ_s/ν_c として設計した。本研究ではケーブルの安全率 ν_c をパラメータとして1.7-2.5と変化させた。ケーブル(亜鉛めっき鋼線)材料の降伏応力 σ_y は1156 400KN/ m^2 、破断応力 σ_u は1568 000KN/ m^2 である。ちなみに、 $\nu_c=2$ の場合、ケーブルの設計許容応力 σ_s は現状の許容応力627 600KN/ m^2 の約95%に対応する。なお、初期張力決定に必要な桁死荷重強度は次の式で与える。

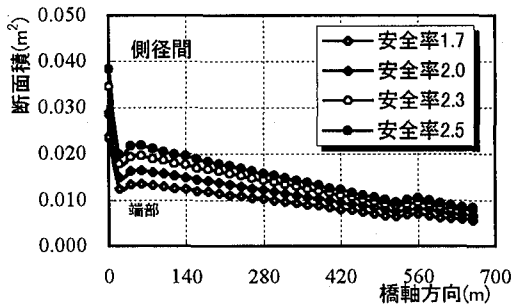
$$W_G = (1.4A_s + A'_s) \times \gamma_s + 70.0 \quad (1)$$

ここで、 A_s は軸力に抵抗できる基本断面の鋼断面積(m^2)、1.4は横方向補剛材などを考慮する係数、 A'_s は増厚部分の断面積、 γ_s は鋼材の単位体積重量(77.0KN/ m^3)、70.0は仮定した後死荷重(KN/m)である。なお、初期状態作成のための手法は文献9)に示している。

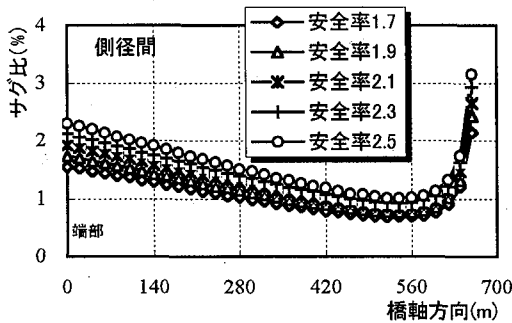
図-4に上述の方法により設計された各ケーブルの断面積およびサグ比を示す。図の横軸は橋軸方向である。また、対称のため、側径間片面の結果のみを示す。結果よりわかるように、ケーブルの水平投影長の増加とともに、安全率 ν_c が断面積に与える影響が大きくなる。つまり、スパンの長大化とともに、ケーブル安全率の設定が経済性に大きな影響を与えることがわかる。ちなみに、本論文ではケーブル鋼重の比較も行い、その結果を図-5に示

す。図-5のケーブル鋼重とケーブル安全率 νc との関係から、ケーブル安全率 νc が0.1の差で約700tの鋼重の差異が生じることが分かる。

一方、図-4(b)に示すケーブルのサグ比から、スパン1400mの長大斜張橋モデルに対して、ケーブルのサグ比は4%以内となっていることがわかる。



(a) 側径間片面のケーブル断面積



(b) 側径間片面のケーブルサグ比

図4 ケーブル断面積及びサグ比

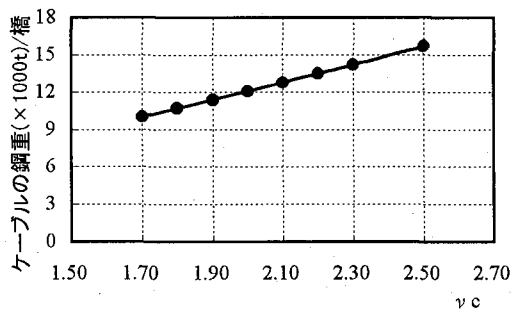


図-5 ケーブルの総鋼重

なお、本研究では、荷重載荷方法として、ケーブルプレストレスと死荷重が作用する初期状態から図-6に示すように桁死荷重 W_G の倍率 α を荷重パラメータとして増加させて、斜張橋の終局強度を検討する。別途、プレストレスも同時に増加させる載荷方法¹⁰⁾での計算を行ったが、その場合の終局耐力(ケーブルを弾性部材とするケース)は、曲げモーメントが小さくなることに起因して、今回

の荷重載荷に比べて3-4%高くなる程度で、大きな終局強度の差異はみられない。本モデルのように軸力が卓越する長大橋モデルではプレストレスの取扱いが終局耐力に与える影響は小さいといえる。

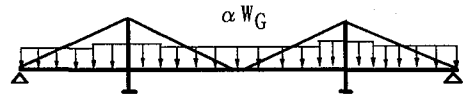


図-6 荷重の載荷方法

(2) 終局強度及び変形挙動と考察

図-7は桁端部の橋軸方向変位に着目した荷重-変位曲線である。ケーブルの塑性化が終局強度に与える影響を考察するために、図中にはケーブルを弾性要素($\nu c=2.0$ の場合)とした結果も併記している。これより、終局状態の桁端部の軸方向変位はケーブルの安全率 νc の増加に従って大きくなるが、安全率 νc の差異は橋軸方向の圧縮剛性に対して影響が小さいことがわかる。また、荷重パラメータで表示した終局状態に与えるケーブルの安全率の影響は設定範囲により異なる。図-8に示すように、 $\nu c=1.7\sim 2.2$ の範囲で顕著であるが、それ以上では差異が見られなかった。これはケーブルの安全率 νc が小さい場合、橋の崩壊はケーブルの塑性域の広がりにより生じたが、安全率 νc の増加に伴い、全体の崩壊が桁の座屈に移行したためと考える。これより、長大斜張橋の経済的な設計を行う上で、桁、塔及びケーブル要素の安全率を考慮したシステムとしての検討を行う必要があるといえる。

さらに、図-8の結果から明らかなような、ケーブル部材の塑性域を無視した手法では、その終局強度を過大に評価する結果が得られる。すなわち、ケーブル材の安全率が高いものの、弾性材として評価した場合の終局強度は危険側となる可能性がある。

著者らの先の研究結果⁹⁾により明らかなような、ケーブルを通常の方法で設計した場合(すなわち、本論文の $\nu c=2.0$ の弾性ケーブルモデルの結果)、側径間の断面変

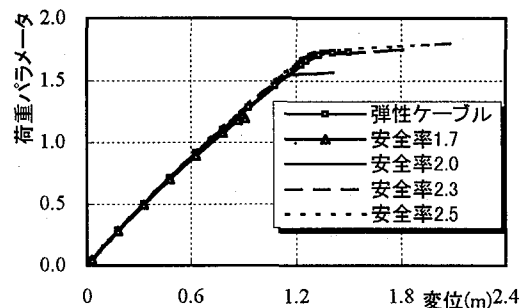


図-7 桁端部の軸方向変位

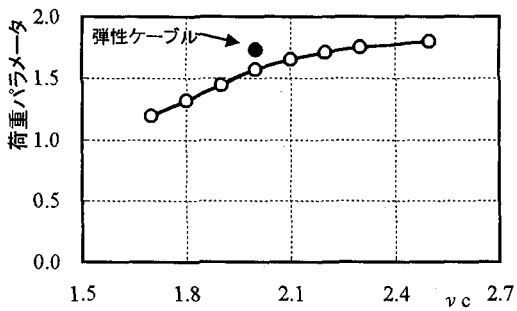
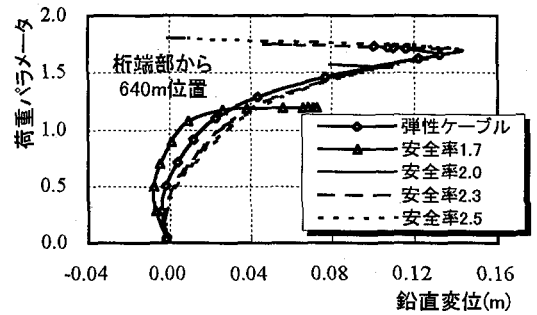


図-8 終局状態の荷重強度と ν_c との関係

化位置近傍の桁断面が弱点となっている。具体的には、この部位で塑性域が進展し、降伏軸力に近い軸力で圧縮変形が急増すると同時に、鉛直変位も急増して終局状態となっている。そこで、ここでは断面変化位置(図-3(a)中の Xu 位置)を基準として、その両側それぞれ 100m の合計 200m の範囲での桁の終局挙動について考察を行うことにした。図-9 は3つの着目断面のたわみ挙動である。ケーブル安全率 ν_c が小さい場合、ケーブル塑性域の広がりによって、橋面内の剛性が小さくなり、終局状態で鉛直変位が急速に増加する。一方、ケーブル安全率 ν_c を増加させると、桁の座屈現象が生じた。

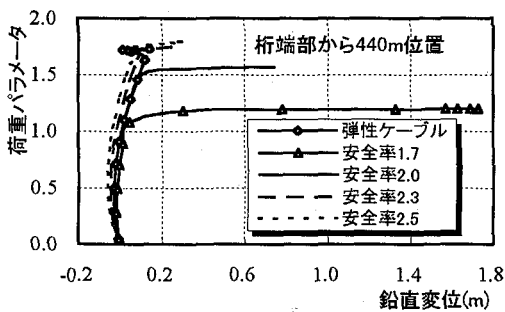
図-10 に上述の 200m 区間を対象とした場合の桁の軸方向の圧縮変形率(圧縮変形量と長さとの比)を示す。図に示すように、ケーブルの安全率 ν_c が 1.7 の場合、大きな



(c) 塔部から Xu-100m(側径間)の鉛直変位

図-9 側径間断面変化位置及び近傍の鉛直たわみ

鉛直変位を生じたにも関わらず(図-9)、圧縮変形率の急増は見られなかった。これに対して、他のケースでは終局状態の圧縮変形率がある荷重強度で急増しており、ケーブルの安全率の変動により斜張橋の崩壊挙動が変化することがわかる。すなわち、本モデルに対して、ケーブル安全率 ν_c を上述の範囲で変動させると、終局状態がケーブルの塑性化から桁の座屈に移行することが分かる。また、 ν_c を 2.0 程度とした設計の場合、両者が近い終局強度を有することが明らかとなった。しかしながら、図-6 の載荷条件を前提とした弾塑性有限変位解析の結果は大きな耐荷力を示しており、そのため、今後、合理的な桁断面の設計法を含めて再検討の必要があると考える。



(a) 塔部から Xu+100m(側径間)の鉛直変位

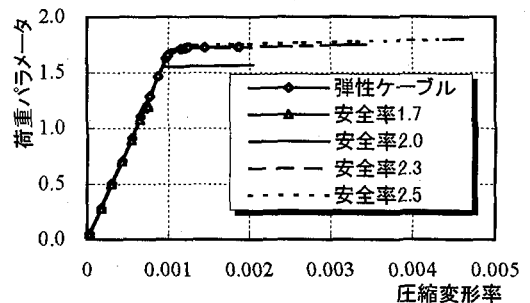
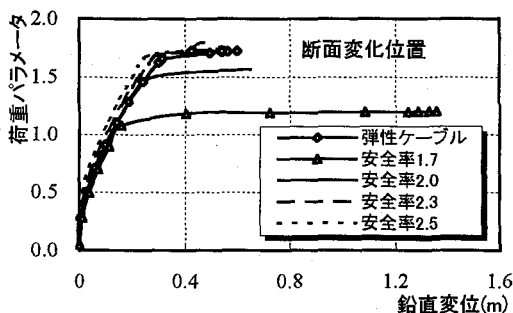


図-10 側径間断面変化位置近傍の圧縮変形率



(b) 塔部から Xu(側径間)の鉛直変位

ケーブルの安全率 ν_c の変動は橋の鉛直剛性にも関わり、従来設計に比べて小さいケーブルの断面を用いる場合、橋の面内剛性の低下や幾何学的な非線形性の影響が顕著となることが懸念される。しかしながら、図-9 に示したように、側径間内で中間橋脚を設置しているモデルでは終局状態の直前までの鉛直変位がいずれも小さく、特に問題にならないことがわかる。このことは、図-11 の中央径間の中央点に着目した結果からも確認できる。同図に示すように、ケーブルの安全率がある程度鉛直剛性

に影響を与えるものの、終局状態の直前まで非線形の影響は小さい。

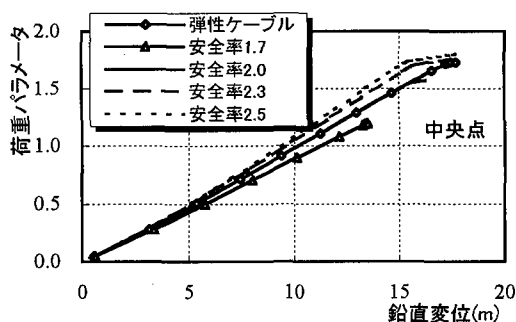


図-11 中央径間の中央点の鉛直変位

(3) 断面力とその挙動に関する考察

本モデルではケーブルの安全率に関係なく、いずれのケースも塔位置の桁断面に初期降伏が発生した。その後、載荷荷重の増加に伴い、断面変化位置付近の桁断面の降伏を進んだ。ケーブルの安全率 ν_c が2.0より小さいケースは、塔に塑性域が見られなかったが、他のケースは塔基部断面の降伏を伴い、終局状態となった。図-12は降伏が発生した時の荷重強度とケーブルの安全率 ν_c と関係である。図より、塔位置の桁断面の初期降伏強度はケーブルの安全率 ν_c の変動に関わらず、ほぼ一定であるが、桁断面変化部(またその付近)の降伏強度はケーブルの安全率 ν_c の増加に従って高くなることから明らかとなった。これを図-8に示した終局強度と比較すれば分かるように、断面変化位置付近の桁断面の初期降伏強度が終局強度と近いものとなっている。このように、ケーブルの安全率が小さい場合、曲げモーメントが終局強度に与える影響が著しく、後述するように、正確に曲げモーメントの影響を考慮する必要がある。

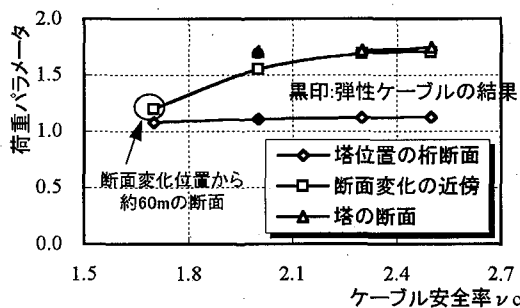
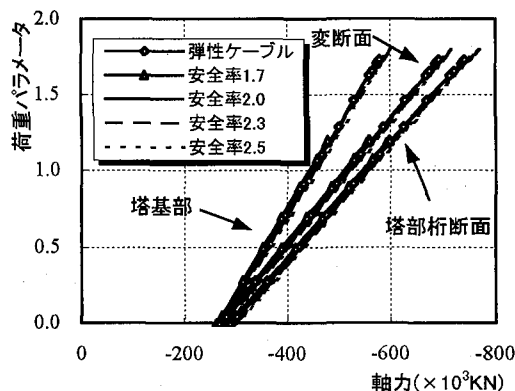


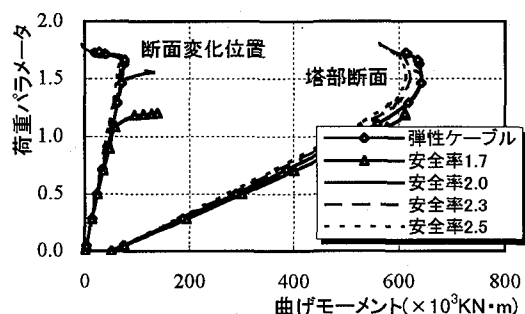
図-12 降伏時の荷重強度とケーブル安全率の関係

図-13に、桁および塔の断面に生ずる軸力と曲げモーメントを示す。これより、各着目点の軸力はケーブルの安全率とほとんど関係なくほぼ荷重に比例して増加しているが、曲げモーメントはケーブルの安全率 ν_c の低下により増加する傾向が見られる。

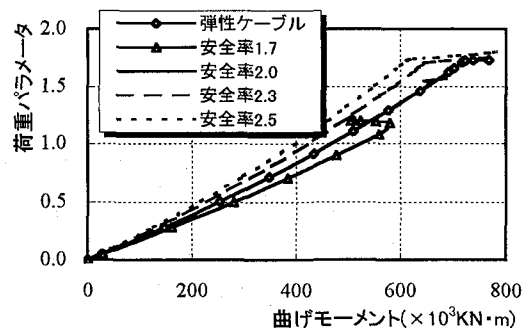
これより、ケーブルの安全率設定の見直しを行う場合には、曲げモーメントの影響に十分に注意する必要がある。



(a) 断面の軸力



(b) 桁断面曲げモーメント

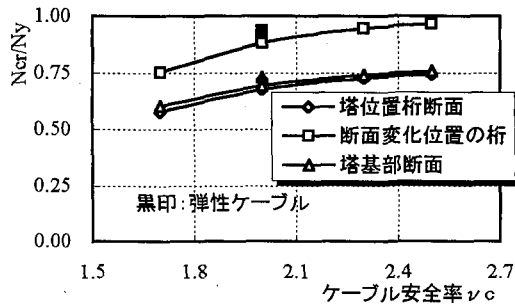


(c) 塔基部断面の曲げモーメント

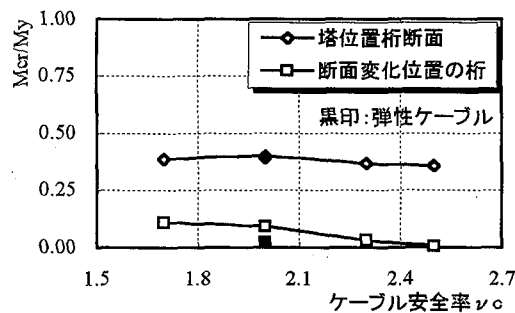
図-13 着目断面の断面力

さらに、塔位置と断面変化位置の桁断面および塔基部の塔断面の終局状態の軸力(N_{α})とそれぞれの断面の降伏軸力(N_y)の比 N_{α}/N_y について考察する。図-14(a)に結果を示すが、安全率 ν_c が高い場合、断面変化位置の桁の軸力が降伏軸力に近い状態となっている。一方、低い場合には、 N_{α}/N_y が小さな値、すなわち、図-14(b)に示すように、径間中央部の断面(断面変化位置)が曲げモーメントの影響を受けていることがわかる。図中、 M_{α} は桁断面の終局状態の曲げモーメント、 M_y は全断面の降伏曲げ

モーメントである。



(a) 着目断面の N_{CR}/N_y



(b) 着目断面の M_{CR}/M_y

図-14 着目断面の終局状態

(4) ケーブルの終局挙動と考察

上述の結果より分かるような、ケーブル安全率が低い場合の崩壊は、ケーブルの塑性化による橋の鉛直剛性の低下に起因している。以下に、各ケースのケーブルの挙動についての考察を行う。

図-15 に終局状態で塑性域状態となっているケーブル(半橋)の分布を示す。横軸は橋軸方向である。これより、ケーブルの塑性化はほとんど側径間の下段側に発生していることが分かる。また、中間橋脚を設置している範囲では、ケーブルの安全率に関係なく、いずれも塑性域が発生しなかった。一方、中央径間の桁のたわみが大きいものの、塑性状態となるケーブルは多くなく、特に、ケーブル安全率の高いケースでは、中央径間側のケーブルの塑性化が見られなかった。

一方、ケーブルの塑性化した範囲は桁の崩壊の範囲に近いことから、ケーブルの挙動は桁の終局挙動に大きな影響を与えたことも伺える。

次に、ケーブルの初期降伏強度が橋の終局強度に対して与える影響を考察する。図-16 はケーブルの初期降伏強度と橋の終局強度の比較である。参考のため、図に桁の初期降伏も併記している。図には示すように、ケーブルの初期降伏は橋の終局強度とほぼ同様である。ケーブルの剛性は桁の座屈強度に対して極めて重要であることが

分かる。すなわち、ケーブルの降伏に伴い、桁の鉛直剛性が低下し、鉛直たわみの急増が生じて崩壊に至る。

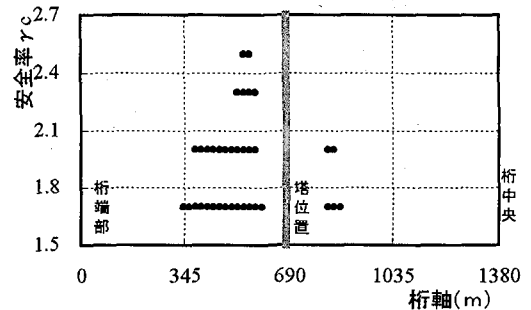


図-15 塑性化したケーブルの分布(半橋)

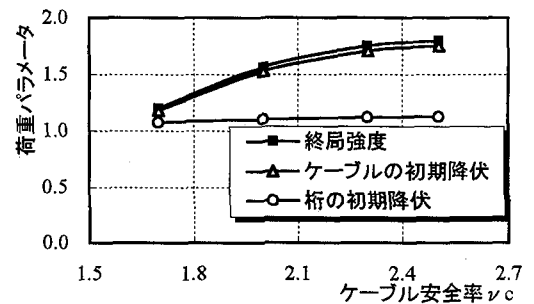


図-16 ケーブルの初期降伏強度と橋の終局強度との比較

4. まとめ

本研究では、著者らにより開発した長大斜張橋の三次元弾塑性有限変位解析手法を、ケーブルの塑性化も考慮できるように拡張して、全ての要素の材料及び幾何学的非線形性を考慮した解析プログラムを開発した。大きなサグ比を有する単一のケーブル構造の弾塑性有限変位解析の例を通じて、その精度を確認した。その上で、開発したプログラムを用いて、ケーブルの安全率をパラメータとして、支間 1400m 斜張橋の終局強度解析を行い、ケーブルの弾塑性挙動が長大斜張橋の終局挙動に与える影響などについて幾つかの考察を行った。その結果を要約すると次のとおりである。

(1) 本橋のような長大橋では、ケーブル安全率 ν_c を 0.1 変化させると、ケーブル鋼重に約 700t の差異が生じる。そのため、ケーブルの安全率を合理的に設定することが長大斜張橋の経済性を達成する上で重要な課題になるといえる。

(2) 弾塑性有限変位解析の結果より、今回の長大斜張橋のモデルに対して、ケーブル部材を弾性要素として取り扱った場合、終局強度が高く評価されていることが明らかになった。これより、終局強度の評価に当たり、ケーブルの塑性化の影響を考慮する必要があるといえる。

(3) ケーブルの安全率の変動が長大斜張橋の終局強度に与える影響は桁とケーブル両者の相対強度により異なり、桁の終局強度がケーブルの降伏強度に比べて大きい場合、橋の全体終局強度はケーブルの降伏強度に支配される。本モデルでは $\nu_c=2.0$ 前後で、両者の強度が近いことが分かる。また、ケーブルの安全率がこの値を超えたケースでは、 ν_c 値の変化が終局強度に与える影響はそれ程顕著でなかった。

(4) ケーブルの安全率の低下とともに、ケーブルの早期の塑性化に起因して橋全体の終局状態に至る。これは、ケーブルの塑性化によって桁の鉛直方向の剛性が低下したためである。この場合、桁曲げモーメントも大きくなり、曲げモーメントが終局挙動に与える影響が顕著となる。

(5) ケーブルの塑性化は下段側、特に側径間の下段側に発生した。これは桁が崩壊した範囲であり、桁とケーブルの強度が影響しあうことが考えられる。

今回の弾塑性有限変位解析結果からは、本モデルは高い安全率を示したこと、またケーブルの安全率のみをパラメータとしたため、今後、桁断面の合理化も含めて、両者の相関強度特性についてさらに検討する予定である。

参考文献:

- 1) 北田俊行, 大南亮一, 丹生光則, 田中克弘: ケーブルを用いた鋼橋の耐荷力解析用の汎用プログラム開発, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, Vol.13, pp.89-94, 1989.7.
- 2) 謝 旭, 山口宏樹, 長井正嗣: 長大斜張橋の静的安定性に及ぼす桁幅の影響, 土木学会構造工学論文集, Vol.43A, pp.1221-1228, 1997.3.
- 3) 謝 旭, 長井正嗣, 山口宏樹: 長大斜張橋の終局強度解析, 土木学会論文集(投稿中)
- 4) 長井正嗣, 謝 旭, 山口宏樹: 長大斜張橋の主桁耐荷力評価に着目した有効接線弾性係数法の適用性, 鋼構造年次論文報告集, 第五巻, pp. 23-30, 1997.11.
- 5) 謝 旭, 伊藤 学, 山口宏樹: Updated Lagrangian手法による柔ケーブルの非線形解析, 土木学会構造工学論文集, Vol.41A, pp.427-434, 1995.3.
- 6) 謝 旭, 山口宏樹, 伊藤 学: 長大斜張橋の静的挙動に関する考察, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.205-215, 1996.4.
- 7) 林 正: 骨組構造の非線形解析と数値計算法に関する研究, 大阪大学博士学位論文, 1984.12.
- 8) 長井正嗣, 浅野浩一, 岸本節二, 水上義彦: 長大斜張橋の主桁断面選定に関する検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.39A, pp.1075-1088, 1993.3.
- 9) 謝 旭, 長井正嗣, 山口宏樹: 自定, 一部他定式長大

斜張橋の静的対風挙動, 土木学会構造工学論文集, Vol.42A, pp.1005-1012, 1996.3.

10) 北田俊行, 野口二郎, 丹生光則, 狩野正人: 鋼斜張橋の耐荷力解析におけるプレストレスの取り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, 1996.7.

(1997.9.26.受付)