

I - A 303 新素材ケーブルを用いた吊橋の経済性に関する試算

(株)長大 正会員 森園 康之 新日本製鐵株式会社 江口 立也
東京都立大学 正会員 前田 研一 東京都立大学 正会員 中村 一史
東京大学 正会員 藤野 陽三

1. はじめに

新素材ケーブルは鋼線に比べて比強度が高いことから、吊橋の主ケーブルに使用した場合に、死荷重の中でケーブルの自重の占める割合が高い長大支間の吊橋ほど有利となることが指摘されている。ここでは中央支間 500m～1,500m の比較的中規模の吊橋を対象に、どのような条件ならば新素材を主ケーブルに用いた吊橋がこれまでの鋼線を用いた吊橋と経済的に競合し得るかについて試算する。また、新素材ケーブルの設計上の留意事項についても言及する。新素材ケーブルとしては炭素繊維強化樹脂 (CFRP) を対象とする。

2. 鋼線と比較した炭素繊維ケーブルの特徴

鋼線と比較した炭素繊維ケーブルの利点を列举すると、①軽量である（単位体積重量で鋼線の約 1/5）。架設機材の能力が小さくて済み、運搬も容易である（経済的）。②耐食性で優れる（防錆対策不要、メンテナンスコスト低減）。③引張・疲労強度は鋼と同等以上である。④弾性係数は鋼に匹敵（ $1.4 \times 10^4 \text{tf/m}^2$ 程度）する。⑤線膨張係数が鋼の約 1/20 であることから、温度収縮による変形量、桁・塔の曲げモーメントが減少する。架設時のケーブルの形状管理が比較的容易となる。⑥非磁性体である。等が挙げられる。

一方、鋼線と比較した際の炭素繊維ケーブルの欠点としては、①高価である。②脆性材料であり、降伏伸びが無く靱性も小さい（ハンドリング要注意）。③剪断強度が低い（ $1,000 \text{kgf/cm}^2$ 程度）。④導電性であることから金属との接触で金属側に電食を生じる（要絶縁）。落雷で破損する懸念がある。⑤耐候性に関してはマトリクス樹脂の吸湿や紫外線による劣化が懸念される。⑥耐熱性・耐火性が低く、 80°C 以下で使用する事が望ましい。⑦軽量であることから振動しやすくなるため、耐風安定性に対する一層の配慮が必要である。⑧実績に乏しい。等が挙げられる。

3. 吊橋のケーブルを対象とした新素材ケーブルと鋼線の経済性比較

吊橋を対象に、中央支間長を 500～1,500m と変化させ、主ケーブルやハンガーに新素材を用いた場合と従来の鋼線を用いた場合との経済性比較を行う。比較対象はケーブルの工事費とする（桁、塔、下部工等は比較対象から除く）。

検討条件は以下の通りである。橋梁形式は 3 径間吊橋。中央支間は 500m～1,500m。側径間比は 0.5。ケーブルサグ比は一般的な 1/10 に加え、1/15, 1/20 と扁平な吊橋とした場合についても比較する（これは航路高や航空制限、道路線形等の制約条件が極めて厳しい場合に該当する）。ケーブル許容応力度は、鋼線： $180/2.5=72 \text{kgf/mm}^2$ 、新素材ケーブル： $250/2.5=100 \text{kgf/mm}^2$ とする。ケーブル単位体積重量は、鋼線： 7.85tf/m^3 、新素材ケーブル： 1.60tf/m^3 とする。鋼線のケーブル工事費単価は 120 万円/tf（材料費 48 万円/tf、設備費 36 万円/tf、人件費 36 万円/tf）とする。新素材ケーブルの重量当たり材料費は、鋼線の 10 倍とした場合及び 20 倍とした場合の 2 ケースを想定する。新素材ケーブルの単位体積当たり設備費及び人件費は鋼線と同等とする。

新素材ケーブルの重量当たり材料費を鋼線の 10 倍（20 倍）とすると、重量当たりの新素材ケーブルの工事費単価は 834(1314)万円/tf（材料費 480(960)万円/tf、設備費 177 万円/tf、人件費 177 万円/tf）となる。これを単位体積当たりで比較した場合は、新素材ケーブルの工事費は鋼線の 1.42 倍（2.23 倍）となる。従って、同じ重量の吊構造部を支えるのに必要な鋼線のケーブル断面積が、新素材ケーブルを用いた場合のケーブル断面積の 1.42 倍（2.23 倍）以上となるならば、鋼線よりも新素材ケーブルの工事費が経済的になると言える。

中央支間を 500m～1,500m と変化させ、主ケーブルに鋼線を用いたケース及び新素材を用いたケースの両ケースで、吊構造部 1tf/m（活荷重を含む）を支えるのに必要な主ケーブルの断面積をそれぞれ試算したものを図-1、図-2 に示す。また両者の断面積比率（鋼線／新素材）を求めたものを図-3 に示す。

吊橋、新素材、炭素繊維

〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-22-6 (tel:0298-55-3333 fax:0298-55-2221)

ケーブル断面積比率（鋼線／新素材）はすべてのケースで 1.42 を上回った。従って、新素材の重量当たり材料費が鋼線の 10 倍以下ならば、中央支間 500m 以上の吊橋は新素材ケーブルを用いた方が鋼線を用いるよりも経済的になると言える。また、新素材の重量当たり材料費が鋼線の 20 倍ならば、サグ比 1/20 でかつ中央支間長が約 1,400m 以上のケースでケーブル断面積比が 2.23 を上回るので新素材ケーブルの方が経済的となるが、それ以外では鋼線の方が経済的である。このように、材料費が鋼線の 10 倍～20 倍の範囲であれば、中央支間 1,500m 以下の吊橋でも新素材ケーブルが鋼線と経済的に十分競合し得ることが分かる。

因みに、上記試算はケーブルの工事費のみの比較であり、主桁、主塔、下部工の工事費は含まれていない。新素材を用いることでケーブル張力が減少すれば、それに伴って主塔や主塔基礎、アンカレイジの設計荷重も小さくなるので、これらを含めた全体工事費では更に有利になるものと考えられる。ケーブル工事費についても、同じ断面積の場合で新素材は鋼線の約 1/5 に重量が軽減されるので架設設備は小型化され、更にコスト節減に繋がるものと考えられる。

4. 設計上の留意事項

新素材ケーブルを用いた場合はケーブルの自重やケーブル張力が鋼線の場合よりも小さくなるので、ケーブルの幾何剛性や極慣性が低下し、フラッター発現風速は低下するものと推察される。従って、鋼線の場合よりも耐風安定化対策に配慮する必要がある。新素材ケーブルは延性がないので架設時のハンドリングには細心の注意が必要となる。新素材のストランドは樹脂で固められることから曲率による二次応力の影響が大きいため、ケーブルサドルやケーブルバンドの設計の際は、曲率やストランドの側圧の制限、ストランドとの接触面に絶縁層を設けるなど鋼線の場合とは異なる配慮が必要となる。新素材ケーブルは剪断強度が低いことから、ハンガー間隔は鋼線の場合よりも短く抑え、本数を多くする必要がある。また、耐候性や落雷に対する配慮からケーブルの防護カバーが必要である。特に架設時の主桁の吊り上げ時などでケーブルに急角度の折れ角が生じないように配慮する必要がある。新素材は熱や衝撃に弱いので、ハンガーにも新素材を使用する際は、車両による衝突・炎上に対して配慮した工夫を凝らすことが望ましい。新素材は実績が乏しいため、長期間の耐久性については今後の検証が必要となる。

5. 結論

以上より、耐風安定性や構造ディテールには鋼線とは異なった配慮が必要となるが、1,500m 以下の吊橋でも重量当たり材料費が鋼線の 10～20 倍程度であれば新素材ケーブルは鋼線と経済的に十分に競合し得ることが分かった。特に、軽量で架設機材が小型化できること、また耐食性に優れメンテナンスコストの大幅な低減を可能にできる点は大きなメリットである。また高強度・軽量である点は長大支間であるほど有利となる。新素材の生産量が大きくなれば量産効果で材料費も低下することと推察される。技術開発と実績を積み重ねることで新素材が多様に利用され、それが将来の架橋技術の可能性を広げていくものと期待される。

〔参考文献〕 1) 実用プラスチック事典 材料編, (株)産業調査会, 1996 2) FRP ケーブル材料の暴露試験, 西崎到, 佐々木蔵, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.5, Sep. 1998

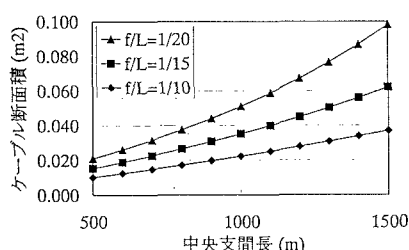


図-1 吊橋造部1t/mを支えるのに必要なケーブル断面積（鋼線）

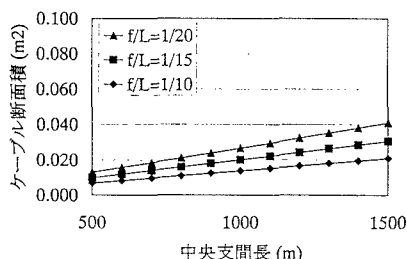


図-2 吊橋造部1t/mを支えるのに必要なケーブル断面積（新素材）

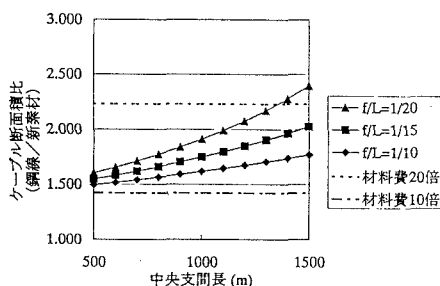


図-3 中央支間長とケーブル断面積比の関係（鋼線／新素材）