

神戸製鋼所 正員 ○中村寛市

" " 広中邦弘

" " 新家 徹

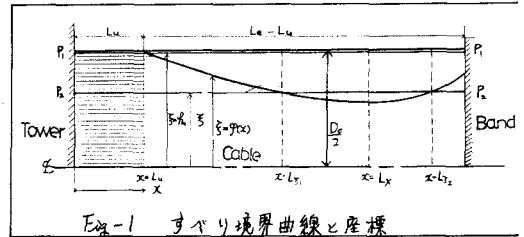
1. まえがき 吊橋供用時における主ケーブルは、バンドとラッピングワイヤで締付けられており、素線相互の自由な滑動が拘束された状態にある。したがって、ケーブル系の変形により、ケーブル断面には不均一応力(2次応力)が発生する。筆者等は、これまで、バンドのみあるいはラッピングワイヤのみで締付けられた平行線ケーブルの2次応力の発生機構およびその特性を明らかにして¹⁾²⁾きた。吊橋供用時を対象とした後者によると、大径のケーブルでは、主ケーブル内部に生じる素線間すべりの領域は非常に長く、通常、バンド締付部に達しているものと考えられる。ここでは、ラッピングワイヤで締付けられた平行線ケーブルの2次応力解析理論を基礎として、更にバンドで締付けられている場合の2次応力解析を行ない、その結果をバンドを無視した場合の結果と比較して、バンドが2次応力に与える影響の一端を明らかにした。

2. 理論の概要 バンド締付部のケーブルは非常に強く締付けられているため、この部分では素線間のすべりはほぼ完全に拘束されているものと考えられる。したがって、バンド締付部分は、解析上、軸方向直交条件に対する境界条件を与えるものと考えられる。また、素線間のすべりがバンド部で完全に拘束される場合にはすべりによって生じた各層断面の軸力によりバンド締付部分が回転させられ、あたかも、ケーブルパネルの両端断面を強制的に回転させたかのような現象を呈する。(バンドだけで締付けられた補剛桁架設段階のケーブルにおいてこの現象は顕著である。)したがって、すべり境界曲線図は、ラッピングワイヤだけで締付けられた場合とは異なり、Fig-1に示すように、すべりが両端面から発生を来したかのような様相を呈する場合も考えられる。ここでは、Fig-1に示すような素線間すべりの状態に対して誘導した解析基礎式を示す。記号の意味は文献6)参照。また、数個のバンドを含む数パネルにわたるケーブルの2次応力解析手順について説明する。この際、吊橋全体系の変形は従来の慣用設計法で算定されるものとし、塔頂に隣接した数パネルのケーブルより構成される部分系に剛体回転を取り除いた変形を与えているが、本計算の前後でバンドとハンガーケーブルの交点の座標は変化しないものとする。

2-1. 仮定 バンドの取扱いと関する仮定を挙げる。

- i) バンド締付部はバンドと一体であり、変形の前後で断面の平面保持則を満足する。
- ii) バンドとハンガーケーブルの結合はヒンジ結合である。

2-2. すべり解析基礎式 仮定i)の追加により、Fig-1



に示したすべり境界曲線 $g(x)$ に關して次の基礎式が得られる。但し、 $a: Lu < x \leq Lx$, $b: Lx < x < Le$

$$a. \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{x^2} \right) (a_0(x, y) - a_0(x, y_0)) = g_0''(x, y) + E g_0''(y - y_0) + F(y) + [E g_0' - E x (y' - \theta_0) + \frac{x^2}{2} F''(y)] \frac{dy}{dx} = 0. \quad \text{但し, } F(y) = S b_0 \frac{d}{dy} [g_0(x, y)]_{y=y_0}$$

$$b. \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{x^2} \right) (a_0(x, y) - a_0(x, y_0)) = g_0''(x, y) + E g_0''(y - y_0) + F(y) + [E g_0' - E (x - Le) (y' - \theta_0) + \frac{1}{2} (x - Le)^2 F''(y)] \frac{dy}{dx} = 0$$

2-3. 2次応力式 無すべり層応力 $a_0(x, y)$ に対する式は文献6)と変へないので省略する。

a. Fig-1において、ケーブルの中心から与えられた P_2 - P_1 上のすべり層の応力 $a_0(x, y)$ は次の様に表わされる。

- a-1. $a_0(x, y) = \frac{1}{L_1} \left[L_1 a_0(x, y_0) + \int_{L_1}^{L_2} a_0(x, y) dx - E (y(L_1) - \theta_0) (L_1 - y) + \frac{1}{2} (L_1 - L_2)^2 F(y) \right] - (x - L_1) F(y), \quad \text{for } Lu < x \leq L_1 \leq Lx$
- a-2. $a_0(x, y) = (Le - L_2) \left[-L_1 a_0(x, y_0) + E (y(L_2) - \theta_0) L_1 + (y(L_2) - \theta_0) L_2 - \int_{L_2}^{Lx} a_0(x, y) dx - \frac{1}{2} (L_2 - Le)^2 F(y) \right] - (x - Le) F(y), \quad \text{for } Lx < L_2 \leq x < Le$
- b. Fig-1において、パネル全域に亘ってすべっているすべり層、すなわち $0 < x < g(Lx)$ における応力は、

$$\alpha \sqrt{s}(X, z) = E I_c (\theta_c - \theta_b) \bar{s} + \frac{(L_c - L_b)^2}{2 L_c} F(\bar{s}) - (X - L_b) F(\bar{s}), \text{ for } L_b < X < L_c$$

と表わされる。右辺第1項は両端断面の回転角差によって生じる応力であり、補剛桁架設時のバンドのみで補付けられたケーブルのパネルモーメントを構成する応力成分と一致する。右辺第2項は素線間のすべりせん断抵抗による応力である。

2-3. 繰り解析基礎式 文献b)と同一の式が成立する。

2-4. バンドを有するケーブルの2次応力解析手順 文献

b)の単パネルのケーブルに關する2次応力解析手法を応用したバンドとラッピングワイヤで補付けられたケーブルの2次応力解析手順について述べる。Fig-2は、その手順を明示したものである。図中、Modelとは、塔頂近傍のケーブルとバンドおよびインガケーブルからなる部分系を仮定ii)に基づいてモデル化したものである。この解析手順の目的は、このModelに左端断面に、第1パネルと塔頂支持断面との成す角の変化量 θ_b を強制回転角として与えた場合に生じる第1パネルの2次応力解析である。この場合、第2パネル以後のケーブルは第1バンドの右端に取り付けられた非線型回転バネと考えることが出来る。

Fig-2において、Step-1は素線間すべりを生じていないケーブルパネル全体の換算回転バネの剛性を求める操作、Step-2はすべりの生じたパネルも含む第2パネル以後のケーブルの換算回転バネ剛性を求める操作である。Step-3は、Step-2で最終的に求められた換算回転バネに支持された第1パネルの2次応力を求める操作である。このとき、第1バンドの回転角 θ_b も同時に求めるので、必要があれば第2パネルの2次応力、更には第3パネル以後の2パネルの2次応力も求めることが出来る。Fig-2中、 α は第1パネルの2次応力を精度良く解析するために必要なパネル数、 n はすべり領域の先端のあるパネルの番号である。通常の長大吊橋では、すべりの生じるパネルは第3パネルまでと考えて良く、 $n=5, n=3$ で充分である。

3. 計算例

上記の手法を用いて、バンドとラッピングワイヤで補付けられたケーブルの2次応力解析を行ない、バンドの取付け位置が2次応力に与える影響を調べた。結果をFig-3に示す。図中には比較のため、バンドが無い場合とアンラップト区間を除いて素線間にすべりが生じないとした場合の計算結果も併記した。Fig-3は、変形が大きくなるに連れ、またバンドの取付け位置が塔頂断面に近づくに連れ、バンドの2次応力に与える影響が急速に増加することを示している。Fig-4はFig-3のケーブルの第2パネル以後のケーブルの換算回転バネの剛性を求めたものであり、Fig-3のStep3の中の $M_1 = f(\theta_b)$ に相当する。本計算で実際に使用した θ_b の範囲は高々 $\frac{5}{1000}$ radであり、この範囲では3者共ほぼ線形性の相違は見られな。したがって、第2バンド以後のバンドは、第1パネルの2次応力にほぼ無影響を与えない。

- 参考文献
 1) 土木学会編、鋼橋設計、第20巻、第1分冊、1989年
 2) 土木学会編、鋼橋設計、第21巻、第1分冊、1989年
 3) 同左、第27巻、第1分冊、1991年
 4) 同左、第30巻、第1分冊、1992年
 5) 同左、第31巻、第1分冊、1993年
 6) 同左、第32巻、第1分冊、1994年
 7) 同左、第33巻、第1分冊、1995年

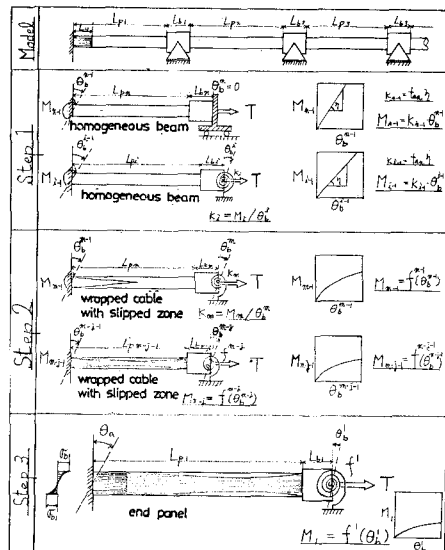


Fig.2 バンドを考慮した2次応力解析手順

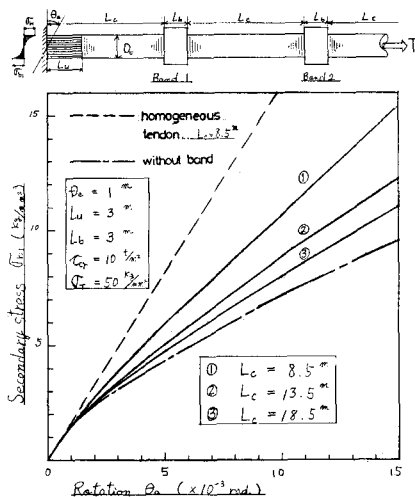


Fig.3 バンドの位置と2次応力の関係

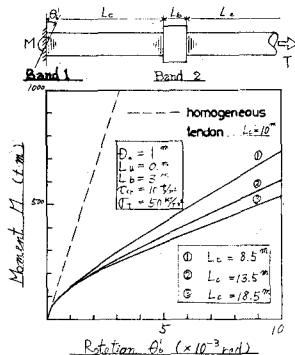


Fig.4 Band1右端の回転バネ剛性