

支柱控索に生ずる張力

Theoretical Analysis of Guyline Tensions

南方 康* 酒井秀夫*

Yasushi MINAMIKATA and Hideo SAKAI

I. はじめに

架空線集材作業においては、通常横取距離をのぼし、集材範囲をなるべく広く確保することによって作業能率を向上せしめる努力が払われると共に、これを可能ならしむるための各種索張り方式やこれに必要な器材の開発がこれまでに行なわれてきた。そして横取作業を伴った実際の集材作業では、元柱および先柱には横荷重に抗する相応の控索の設置が不可欠であり、特に人工支柱の場合は、2段8方向への控索が設けられるのが普通である。

労働安全衛生規則によれば、控索の安全率は、控索に生ずる張力の4倍以上と規定されているが、一方では控索そのものが一見簡単な力学系としてとらえ得ることと、付帯的な施設であることから、控索張力の算定については、明確な基準が示されていない。しかし、従来の索張り方式による横取作業においても、また今後林道あるいは作業道の整備された地域において行なわれるであろうタワー付集材車による簡易架線集材作業においても、適切な控索の設置は、作業の安全上欠くべからざる事項である。

控索を、主索方向を境にして左右両側に分けた場合、強固な立木支柱を用いかつ横取りをしないような場合に最低片側1本ずつ、通常は両側で2ないし4本の控索が設置されることが多いが、本稿においては控索を最大片側3ないし4本設置する場合を考え、その場合における控索の本数、索長、水平および垂直方向の設置角度、等に応じた控索張力の算定式を示す。

II. 控索に生ずる張力

1. 単位水平荷重が作用する場合の控索の水平張力

いま XX' を主索方向とし、横荷重の主索軸方向の張力成分は主索並びに作業索が負担すると共に、実際には控索は概ね左右対称に張られる場合が多いので、控索の結合点は主索と直角方

*東京大学農学部林学科

Department of Forestry, Faculty of Agriculture, University of Tokyo.

向に移動するものと仮定すれば、引張り側にある各控索の水平張力は次のようにして求められる。ただし各控索の引張り方向は、図-1に示すとおりであり、すべての諸量は其の水平成分で考慮する。

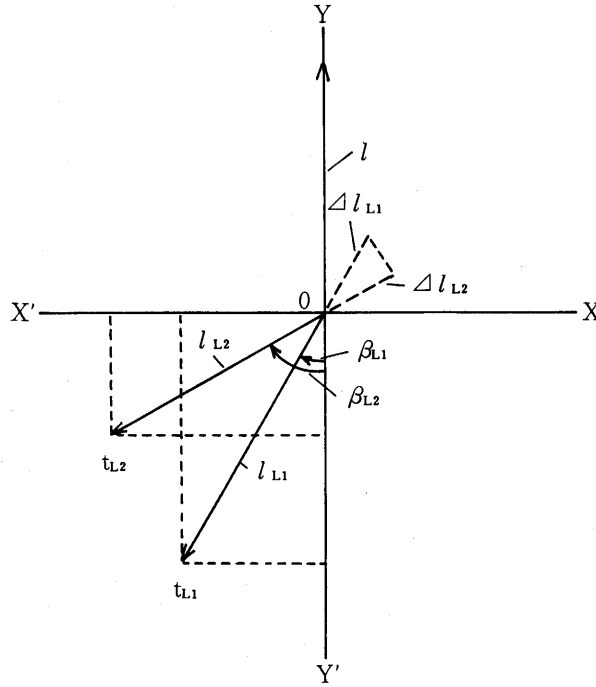


図-1 控索の引張り側の水平張力

まず図-1において、結合点Oに1なる横荷重が作用した場合に、Oにおける力のつり合いと索に生ずる応力とから、次式が得られる。

$$t_{L1} \cos \beta_{L1} + t_{L2} \cos \beta_{L2} + t_{R1} \cos \beta_{R1} + t_{R2} \cos \beta_{R2} = 1 \quad (1)$$

$$t_{L1} \sin \beta_{L1} + t_{L2} \sin \beta_{L2} = t_{R1} \sin \beta_{R1} + t_{R2} \sin \beta_{R2} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_{L1} &= l_{L1} \frac{t_{L1}}{E_{L1} A_{L1}}, & \Delta l_{L2} &= l_{L2} \frac{t_{L2}}{E_{L2} A_{L2}} \\ \Delta l_{R1} &= l_{R1} \frac{t_{R1}}{E_{R1} A_{R1}}, & \Delta l_{R2} &= l_{R2} \frac{t_{R2}}{E_{R2} A_{R2}} \end{aligned} \right\} (3)$$

ただし、 t_{L1} , t_{L2} : 左側の各索張力

t_{R1} , t_{R2} : 右側の各索張力

l_{L1} , l_{L2} : 左側の各索長

l_{R1} , l_{R2} : 右側の各索長

Δl_{L1} , Δl_{L2} , Δl_{R1} , Δl_{R2} : 各索の伸び

$E_{L1}, E_{L2}, E_{R1}, E_{R2}$: 各索の弾性係数

$A_{L1}, A_{L2}, A_{R1}, A_{R2}$: 各索の断面積

β_{L1}, β_{L2} : 左側各控索の YY' 軸からの角度

β_{R1}, β_{R2} : 右側各控索の YY' 軸からの角度

次に単位横荷重が作用した結果、各控索に弾性伸長が起り、結合点 O が YY' 軸上をわずかに移動するものとするれば、各控索の伸びの関係は次のごとく求められる。

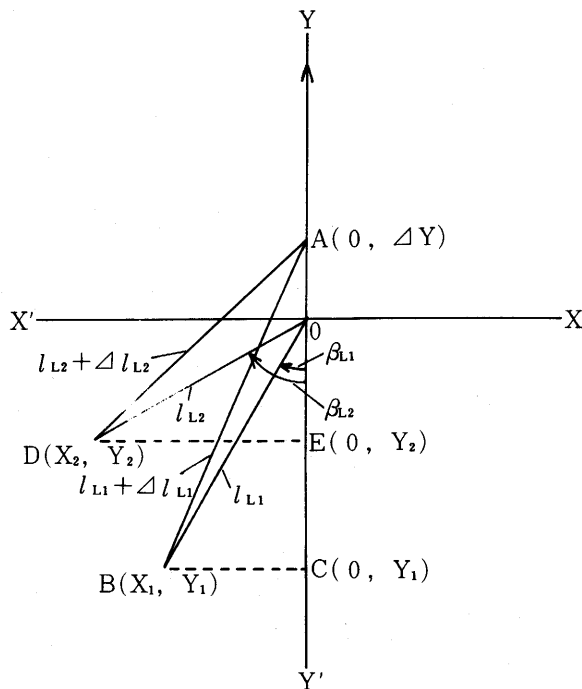


図-2 控索の弾性伸長によるつりあい

すなわち、図-2の $\triangle ABC$ において、

$$X_1^2 + (\Delta Y - Y_1)^2 = (l_{L1} + \Delta l_{L1})^2 \quad (4)$$

また、

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= -l_{L1} \sin \beta_{L1} & Y_1 &= -l_{L1} \cos \beta_{L1} \\ X_2 &= -l_{L2} \sin \beta_{L2} & Y_2 &= -l_{L2} \cos \beta_{L2} \end{aligned} \right\} (5)$$

ただし、

$$\Delta Y > 0 ; X_1, X_2, Y_1, Y_2 < 0 ; 0 < \beta_{L1} < \beta_{L2} < 90^\circ ; l_{L1}, l_{L2}, \Delta l_{L1}, \Delta l_{L2} > 0$$

である。

(4)式を ΔY について解くと、 $\Delta Y > 0$ より、

$$\Delta Y = -l_{L1} \cos \beta_{L1} + \sqrt{l_{L1}^2 \cos^2 \beta_{L1} + 2\Delta l_{L1} \cdot l_{L1} + \Delta l_{L1}^2} \quad (6)$$

同様にして $\triangle ADE$ より,

$$\Delta Y = -l_{L2} \cos \beta_{L2} + \sqrt{l_{L2}^2 \cos^2 \beta_{L2} + 2\Delta l_{L2} \cdot l_{L2} + \Delta l_{L2}^2} \quad (7)$$

しかるに Δl_{L1} , Δl_{L2} は $l_{L1} \cos \beta_{L1}$, $l_{L2} \cos \beta_{L2}$ に比べて微小であるから,

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{l_{L1}^2 \cos^2 \beta_{L1} + 2\Delta l_{L1} \cdot l_{L1} + \Delta l_{L1}^2} &\doteq l_{L1} \cos \beta_{L1} + \frac{\Delta l_{L1}}{\cos \beta_{L1}} \\ \sqrt{l_{L2}^2 \cos^2 \beta_{L2} + 2\Delta l_{L2} \cdot l_{L2} + \Delta l_{L2}^2} &\doteq l_{L2} \cos \beta_{L2} + \frac{\Delta l_{L2}}{\cos \beta_{L2}} \end{aligned} \right\} (8)$$

と表わしうる。したがって(6), (7)式はそれぞれ

$$\Delta Y = \frac{\Delta l_{L1}}{\cos \beta_{L1}} \quad (9)$$

$$\Delta Y = \frac{\Delta l_{L2}}{\cos \beta_{L2}} \quad (10)$$

となり, (9), (10)式より

$$\frac{\Delta l_{L1}}{\cos \beta_{L1}} = \frac{\Delta l_{L2}}{\cos \beta_{L2}} \quad (11)$$

同様にして,

$$\frac{\Delta l_{R1}}{\cos \beta_{R1}} = \frac{\Delta l_{R2}}{\cos \beta_{R2}} \quad (12)$$

したがって(3), (11), (12)式より

$$\left. \begin{aligned} t_{L2} &= \frac{E_{L2} A_{L2} l_{L1} \cos \beta_{L2}}{E_{L1} A_{L1} l_{L2} \cos \beta_{L1}} t_{L1} \\ t_{R2} &= \frac{E_{R2} A_{R2} l_{R1} \cos \beta_{R2}}{E_{R1} A_{R1} l_{R2} \cos \beta_{R1}} t_{R1} \end{aligned} \right\} (13)$$

(1), (2), (13)式を解くと, t_{L1} , t_{R1} , t_{L2} , t_{R2} の値は次式で与えられる。ただし, ここでは各控索の弾性係数, 断面積を等しいものとする。

$$\left. \begin{aligned} t_{L1} &= \frac{l_{L2} \cos \beta_{L1} (l_{R2} \sin \beta_{R1} \cos \beta_{R1} + l_{R1} \sin \beta_{R2} \cos \beta_{R2})}{l_{L1} l_{R1} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R2}) + l_{L2} l_{R2} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R1}) + l_{L1} l_{R2} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R1}) + l_{L2} l_{R1} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R2})} \\ t_{R1} &= \frac{l_{R2} \cos \beta_{R1} (l_{L2} \sin \beta_{L1} \cos \beta_{L1} + l_{L1} \sin \beta_{L2} \cos \beta_{L2})}{l_{L1} l_{R1} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R2}) + l_{L2} l_{R2} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R1}) + l_{L1} l_{R2} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R1}) + l_{L2} l_{R1} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R2})} \\ t_{L2} &= \frac{l_{L1} \cos \beta_{L2} (l_{R2} \sin \beta_{R1} \cos \beta_{R1} + l_{R1} \sin \beta_{R2} \cos \beta_{R2})}{l_{L1} l_{R1} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R2}) + l_{L2} l_{R2} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R1}) + l_{L1} l_{R2} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R1}) + l_{L2} l_{R1} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R2})} \\ t_{R2} &= \frac{l_{R1} \cos \beta_{R2} (l_{L2} \sin \beta_{L1} \cos \beta_{L1} + l_{L1} \sin \beta_{L2} \cos \beta_{L2})}{l_{L1} l_{R1} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R2}) + l_{L2} l_{R2} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R1}) + l_{L1} l_{R2} \cos \beta_{L2} \cos \beta_{R1} \sin(\beta_{L2} + \beta_{R1}) + l_{L2} l_{R1} \cos \beta_{L1} \cos \beta_{R2} \sin(\beta_{L1} + \beta_{R2})} \end{aligned} \right\} (14)$$

また控索は左右対称に設置する場合が多いが、このような時は(14)式で $\beta_{L1}=\beta_{R1}$, $\beta_{L2}=\beta_{R2}$, $l_{L1}=l_{R1}$, $l_{L2}=l_{R2}$ とおいて次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} t_{L1}=t_{R1} &= \frac{l_{L2}\cos\beta_{L1}}{2(l_{L2}\cos^2\beta_{L1}+l_{L1}\cos^2\beta_{L2})} \\ t_{L2}=t_{R2} &= \frac{l_{L1}\cos\beta_{L2}}{2(l_{L2}\cos^2\beta_{L1}+l_{L1}\cos^2\beta_{L2})} \end{aligned} \right\} (15)$$

さらに図-3に示すとおり、L2なる控索を省略して、主索の両側に3本ずつ、計6本の控索を張る場合は、(14)式において $\beta_{L2}=90^\circ$ すなわち $\cos\beta_{L2}=0$ とおくことにより、各控索の張力が得られる。すなわち各控索の張力は次式で与えられる。

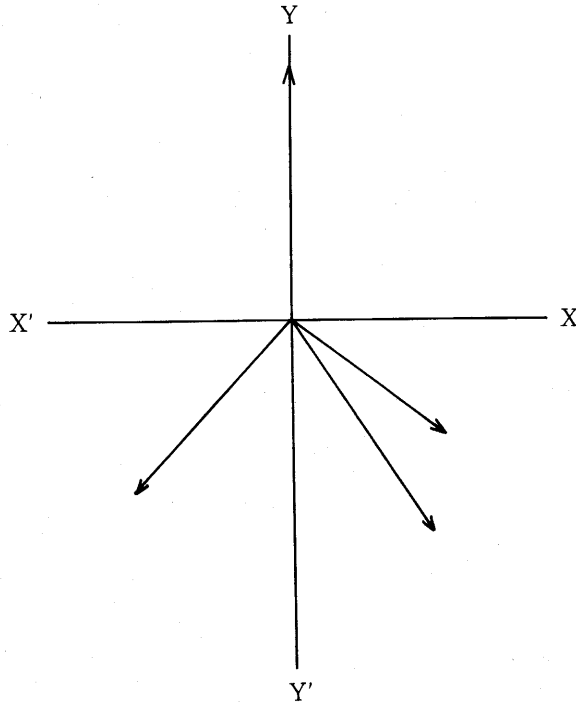


図-3 主索片側3本の控索

$$\left. \begin{aligned} t_{L1} &= \frac{l_{R2}\sin\beta_{R1}\cos\beta_{R1}+l_{R1}\sin\beta_{R2}\cos\beta_{R2}}{l_{R2}\cos\beta_{R1}\sin(\beta_{L1}+\beta_{R1})+l_{R1}\cos\beta_{R2}\sin(\beta_{L1}+\beta_{R2})} \\ t_{R1} &= \frac{l_{R2}\sin\beta_{L1}\cos\beta_{R1}}{l_{R2}\cos\beta_{R1}\sin(\beta_{L1}+\beta_{R1})+l_{R1}\cos\beta_{R2}\sin(\beta_{L1}+\beta_{R2})} \\ t_{R2} &= \frac{l_{R1}\sin\beta_{L1}\cos\beta_{R2}}{l_{R2}\cos\beta_{R1}\sin(\beta_{L1}+\beta_{R1})+l_{R1}\cos\beta_{R2}\sin(\beta_{L1}+\beta_{R2})} \end{aligned} \right\} (16)$$

さらにまた主索の片側に2本ずつの控索を張る場合も同様に(14)式において、 $\cos\beta_{L2}=\cos\beta_{R2}$

= 0 とおくことにより、各控索の張力が得られる。すなわち、

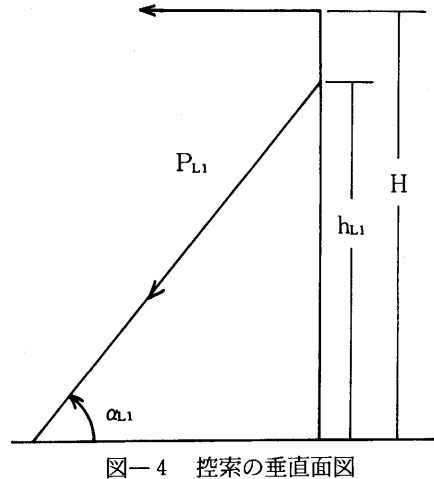
$$\left. \begin{aligned} t_{L1} &= \frac{\sin \beta_{R1}}{\sin(\beta_{L1} + \beta_{R1})} \\ t_{R1} &= \frac{\sin \beta_{L1}}{\sin(\beta_{L1} + \beta_{R1})} \end{aligned} \right\} (17)$$

これはラミーの定理から得られる結果と一致している。

2. 控索に生ずる張力

前項において、単位水平荷重が主索方向と直角方向に作用した場合の各控索に配分される張力 t_{L1} , t_{L2} , t_{R1} , t_{R2} が得られたので、実際の控索に生ずる張力 P_{L1} , P_{L2} , P_{R1} , P_{R2} は次式で与えられる。すなわち、支柱に作用する横荷重を T 、主索の支持点から支柱基部（支点）までの高さを H 、支柱基部より控索の結合点までの高さをそれぞれ h_{L1} , h_{L2} , h_{R1} , h_{R2} 、各控索の水平面に対する垂直角をそれぞれ α_{L1} , α_{L2} , α_{R1} , α_{R2} とすると、

$$\left. \begin{aligned} P_{L1} &= \frac{H t_{L1} T}{h_{L1} \cos \alpha_{L1}} \\ P_{L2} &= \frac{H t_{L2} T}{h_{L2} \cos \alpha_{L2}} \\ P_{R1} &= \frac{H t_{R1} T}{h_{R1} \cos \alpha_{R1}} \\ P_{R2} &= \frac{H t_{R2} T}{h_{R2} \cos \alpha_{R2}} \end{aligned} \right\} (18)$$



3. 基礎張力を与えた場合の控索張力

控索には通常一定の張力 P_0 があらかじめ与えられるが、このような状態で支柱に横荷重が作用した場合に引張側の控索においては、基礎張力 P_0 に(18)式で求めた張力を加算すれば、各控索の張力を算出することができる。すなわち、

$$P_0 + P_{L1}, P_0 + P_{L2}, P_0 + P_{R1}, P_0 + P_{R2} \quad (19)$$

がそれぞれの索張力である。

しかし張力弛緩側の索においては、次のようにこれを求める必要がある。

図-5に示すように張力弛緩側の控索の水平長を l'_{L1} , l'_{L2} , ...等とし、横荷重方向Y軸とのなす角を β'_{L1} , β'_{L2} , ...等とする。引張り側の l_{L1} に $t_{L1} \cdot T$ だけ張力が加わることにより、 l_{L1} が Δl_{L1} だけ伸びたとすると

$$\Delta l_{L1} = \frac{t_{L1} T}{E_{L1} A_{L1}} l_{L1} \quad (20)$$

この伸びにより控索の支点Oが ΔY だけY方向に移動したとすれば、(9)式より、

$$\Delta Y = \frac{\Delta l_{L1}}{\cos \beta_{L1}} \quad (21)$$

この支点のずれによって控索 l'_{L1} に $\Delta t'_{L1}$ の水平張力の変化があったとすると、 l'_{L1} の縮み量を $\Delta l'_{L1}$ とすれば、

$$\Delta t'_{L1} = \frac{E'_{L1} A'_{L1} \Delta l'_{L1}}{l'_{L1}} \quad (22)$$

また、

$$\Delta l'_{L1} = \Delta Y \cos \beta'_{L1} \quad (23)$$

(20), (21), (22)式より、

$$\Delta l'_{L1} = \frac{l_{L1} t_{L1} T \cos \beta'_{L1}}{E_{L1} A_{L1} \cos \beta_{L1}} \quad (24)$$

各控索の弾性係数、断面積が等しいものとする、(22), (24)式より

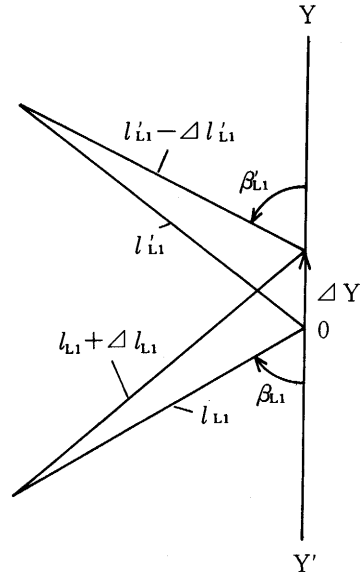
$$\Delta t'_{L1} = \frac{l_{L1} \cos \beta'_{L1}}{l'_{L1} \cos \beta_{L1}} t_{L1} T \quad (25)$$

同様に、

$$\left. \begin{aligned} \Delta t'_{L2} &= \frac{l_{L1} \cos \beta'_{L2}}{l'_{L2} \cos \beta_{L1}} t_{L1} T \\ \Delta t'_{R1} &= \frac{l_{L1} \cos \beta'_{R1}}{l'_{R1} \cos \beta_{L1}} t_{L1} T \\ \Delta t'_{R2} &= \frac{l_{L1} \cos \beta'_{R2}}{l'_{R2} \cos \beta_{L1}} t_{L1} T \end{aligned} \right\} (26)$$

したがって弛緩側張力変化量 P'_{L1} , P'_{L2} , P'_{R1} , P'_{R2} は、次式で示される。ただし、 α'_{L1} , h'_{L1} 等は弛緩側控索の水平面に対する傾斜角、および支柱基部より控索結合点までの高さである。

$$\left. \begin{aligned} P'_{L1} &= -\frac{l_{L1} t_{L1} \cos \beta'_{L1} H T}{h'_{L1} l'_{L1} \cos \alpha'_{L1} \cos \beta_{L1}} \\ P'_{L2} &= -\frac{l_{L1} t_{L1} \cos \beta'_{L2} H T}{h'_{L2} l'_{L2} \cos \alpha'_{L2} \cos \beta_{L1}} \\ P'_{R1} &= -\frac{l_{L1} t_{L1} \cos \beta'_{R1} H T}{h'_{R1} l'_{R1} \cos \alpha'_{R1} \cos \beta_{L1}} \\ P'_{R2} &= -\frac{l_{L1} t_{L1} \cos \beta'_{R2} H T}{h'_{R2} l'_{R2} \cos \alpha'_{R2} \cos \beta_{L1}} \end{aligned} \right\} (27)$$



図—5 控索の弛緩側の水平張力

(27)式を(19)式に代入すれば、弛緩側の索張力を得ることができる。

Ⅲ. お わ り に

以上、集材架線の支柱に水平横荷重が加わる場合に、それぞれの控索に生ずる張力の算定式が得られたのであるが、これによれば、控索と横荷重の方向とのなす角度および控索の控長によって控索に発生する索張力は異なり、横荷重の反対方向に近い控索程、荷重負担が大きいことがわかる。この結果、従来のごとくに負荷時における各控索に発生する張力を等しいと考えて求めた値より、通常10%以上過大な張力が発生することが試算の結果明らかとなった。したがって控索の適正な索径の決定は、上述の方法で求めた控索張力のうち最大の値となるものを対象にして行なわなければならない。

また、本稿においては、横荷重による主索方向の水平分力は主索が負担するものとして式の誘導を行なったが、集材タワー搭載の集材車を用いる場合のように、主索方向の横荷重もすべて控索に負担させる場合も、同一の算定式をこれに適用して各控索の発生張力を算定し、両者を合計すれば、ほぼ正確な控索張力を知ることができる。

要 旨

集材架線の支柱に、主索に対して横荷重が働くときの、各控索に生ずる張力の算定式を、力のつりあいと弾性伸長理論から誘導した。この算定式を用いることにより、各控索に生ずる張力を、控索の索長、断面積、弾性係数、控索と横荷重の方向とのなす角、横荷重、支柱高、支柱基部より控索結合点までの高さ、および控索と水平面とのなす角から正確に求めることができる。

参 考 文 献

- 1) 加藤誠平：林業用索道設計法。223pp, 金原出版, 1959
- 2) 労働省労災対策部監修：集運材架線技士教本。305pp, 林業労働災害防止協会, 1966
- 3) Binkley, Virgil W. & Sessions, John: Chain and board handbook for skyline tension and deflection. 193pp, USDA, 1978
- 4) Studier, Donald D. & Binkley, Virgil W.: Cable logging systems. 211pp, USDA, 1974

(1980年4月17日受理)

Summary

We analyzed guyline tensions which are caused by lateral loads against the skyline. The equations to calculate the guyline tensions are derived from the theory of the equilibrium of forces and the elasticity. It is concluded that each

guyline tension can be given by the guyline length, sectional area, modulus of elasticity, angle of the guyline against the direction of lateral load, strength of lateral load, spar tree height, angle of the guyline against a level surface, and the height of fixing point of the guyline on the spar tree.