

## 帯広式集材架線に関する静力学的研究

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	堀, 高夫 伊藤, 雅紀
巻/号	56巻8号
掲載ページ	p. 297-302
発行年月	1974年8月

帯広式集材架線に関する静力学的研究\*

堀 高夫\*\*・伊藤雅紀\*\*

1. 緒 言

帯広式集材架線<sup>1)</sup>というのは、軌索を用いず、引寄せ索と引戻し索をエンドレスとし、その上下2線で荷重を支持するという簡易な方式の架線で、支間長や荷重の大きさに制限はあるが、最近特に択伐材や間伐材などの搬出用として注目されている。この架線の原形は 図-1 のように、自由端で荷りをする様式の荷上げ索を用いるものであるが、帯広式にはこのほか、荷上げ索の様式、横取り索の有無、エンドレス索の引締め索の有無などによって、変形様式がいくつか考えられている。変形様式のうちで、ここでは、搬器走行時に荷重を搬器本体に繋留するものを帯広固定様式、また 図-2 のようにタイラー式と同じ様式の荷上げ索を用いるものを帯広タイラー様式などと仮称する。帯広式は、引戻し索・引寄せ索で荷重を支持する点では、米国におけるランニング・スカイライン方式<sup>2)</sup>と同じであるが、ランニング・スカイラインとしてエンドレス索を用いることを特徴とする。

本報告では、原形様式および前記の2変形様式における、エンドレス索の張力について静力学的な検討を行い、またこの種の架線の設計のための実用算定法を与えた。なお、ここでは理論式の誘導に際して、索が描く曲線を放物線として扱った。

2. 精密算定法

ここで用いる諸量の記号は 図-1, 2 に示す通りであ

る。ただし支間傾斜角  $\alpha$  および高低差  $h$  は、図のように下げ荷集材の場合に正とし、上げ荷集材の場合には負とする。またエンドレス索の単位長重量を  $k$ 、荷上げ索の単位長重量を  $p'$  とし、 $p'/p=r$  とする。

ここでは図に示すように、荷上げ索によって荷重  $P$  が空中に保持された状態における荷重点垂下量  $Y$ 、エンドレス索の先柱滑車  $B$  における張力  $T_0$ 、元柱滑車  $A_1$  における引戻し索の張力  $T_1$ 、滑車  $A_2$  における引寄せ索の張力  $T_2$  などに関する問題を、以下のように単純化したモデル架線について考える。すなわち、

- 1) 走行滑車および索の誘導滑車の摩擦はないものとする。
- 2) 搬器に付属した滑車および  $C_2, C_3$  より下方の荷上げ索重量を含めた、空搬器の重量はないものとする。
- 3) エンドレス索を支える滑車  $A_1, A_2, B, B_3$  等は変位しないものとする。
- 4) 索はたわみ易く、曲げに対して抵抗しないものとする。
- 5) 3点  $A_1, A_2, A_3$ , 4点  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , 3点  $B_1, B_2, B_3$  等の位置がそれぞれ一致しているものとみなす。

以上により、まず引戻し索  $\widehat{C_1B_1}$  と  $\widehat{C_2B_2}$  は力学上全く相等しいものとなる。また点  $C$  における荷上げ索の張力は、原形様式では  $P$  に等しく、タイラー様式では  $P/2$  に等しくなる。

[原形様式における計算手順]

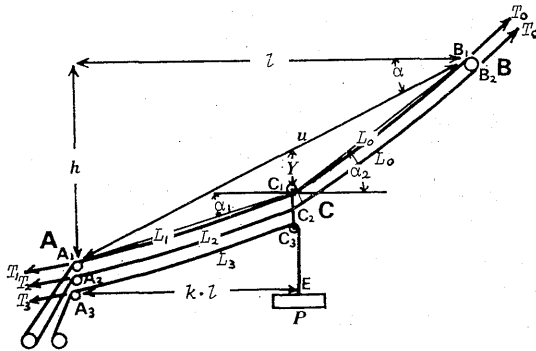


図-1. 帯広式集材架線 (原形様式)

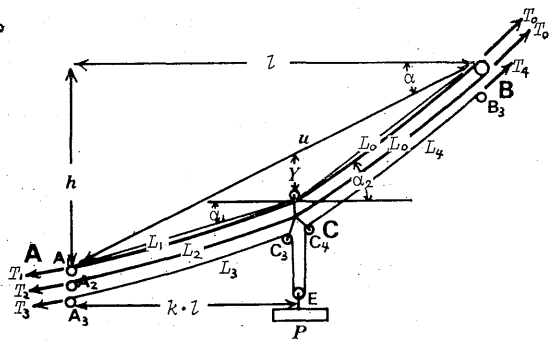


図-2. 帯広式集材架線 (タイラー様式)

\* Takao HORI and Masanori ITŌ: Static study on the Obihiro logging skylines

\*\* 名古屋大学農学部 Fac. of Agr., Nagoya Univ., Nagoya

まず、所与の  $(T_0, k, P)$  に対して、力のつりあい条件を満たす  $(Y, T_2, L_0, L_1, L_2)$  を定める計算手順は次の通りである。

1) 近似値の設定

$$L_0 \doteq (1-k)u, L_1 \doteq L_2 \doteq L_3 \doteq ku, Y \doteq 0$$

2)  $L_0, L_1, L_2, L_3$  等の近似値を用い、まず索線  $\widehat{C_1B_1}$  (又は  $\widehat{C_2B_2}$ ) の張力の水平分力

$$H_0 = \cos \alpha \{ \sqrt{T_0^2 - (M_0 \cos \alpha/2)^2} - M_0 \sin \alpha/2 \} \quad (1)$$

ただし 
$$\begin{cases} M_0 = k p (L_1 + L_2 + L_3)/2 + (1+k) p L_0 \\ \quad + k (L_3 p'/2 + P) \end{cases}$$

を定め、ついで

$$Y = (1-k)l(M_0 - L_0 p)/2H_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

より  $Y$  を定め、また

$$\left. \begin{aligned} \tan \alpha_1 &= \tan \alpha - Y/kl \\ \tan \alpha_2 &= \tan \alpha + Y/(1-k)l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

より  $\alpha_1, \alpha_2$  を定め、索  $\widehat{C_1A_1}$  および索  $\widehat{A_3C_3}$  の張力の水平分力  $H_1, H_3$  を

$$H_i = \cos \alpha_i \{ \sqrt{T_{ci}^2 - (W_i \cos \alpha_i/2)^2} - W_i \sin \alpha_i/2 \} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし 
$$\begin{cases} W_i: \text{各索線の重量} \\ T_{c1} = T_0 - p \{ (1-k)h + Yl \}, T_{c3} = P \end{cases}$$

より定め、また索線  $\widehat{A_2C_2}$  の張力の水平分力を

$$H_2 = 2H_0 - H_1 - H_3 \quad \dots\dots\dots(5)$$

より定める。

3) 各索線の索長  $L_i (i=0 \sim 3)$  を

$$L_i = l_j \sec \alpha_j \{ 1 + (\cos^4 \alpha_j / 24) (W_i / H_i)^2 \} \quad \dots(6)$$

ただし 
$$\begin{cases} i=1 \sim 3 \text{ のとき } j=1, i=0 \text{ のとき } j=2 \\ \text{とし, } l_1 = kl, l_2 = (1-k)l \end{cases}$$

より算出する。

4) 精度判定:  $L_0, L_1, L_2, L_3$  および  $Y$  等の算出値と設定値との差が所定の微量量よりも小さければ次のステップへ進む。しからざるときは、以上で得た索長、荷重点垂下量等の算出値を新たな近似値として設定して、ステップ 2) に戻る。

5) 最終的に得た諸量から所要の  $(Y, T_2, L_0, L_1, L_2)$  が定まる。また弾性伸長量を除いたエンドレス索の原索長は次式より定まる。

$$L_T = 2L_0(1 - \lambda T_{m0}) + L_1(1 - \lambda T_{m1}) + L_2(1 - \lambda T_{m2}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $\lambda$ : 索の単位張力当たり弾性伸長率

$$T_{mi} = H_i \sec \alpha_j: \text{各索線の平均張力}$$

以上の計算を適用することにより、所与の(原索垂下比  $s$  または  $L_T, k, P$ ) に対して  $(Y, T_0, T_2)$  を定める計算、あるいは所与の  $(s$  または  $L_T, T_0, k$ ) に対して  $(P, Y, T_2)$  を求める計算など、定索長条件を満たす諸量の計算を試算的に行うことができる。

タイラー様式および固定様式では、使用する公式が多変化するが、同様の計算手順により諸量を求めることができる。

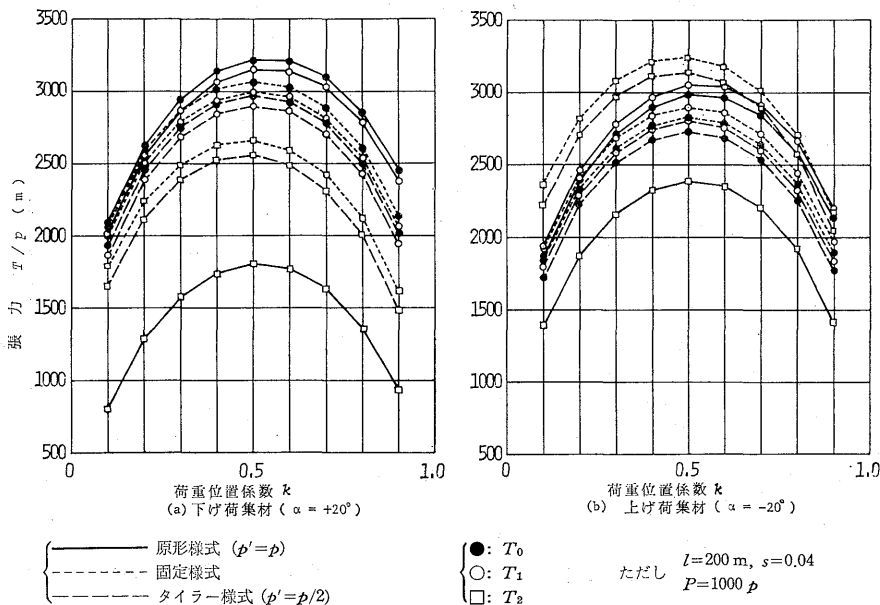


図-3. 帯広式集材架線の諸様式におけるエンドレス索の張力変動状況

3. エンドレス索張力の諸傾向

精密算定結果より、まず張力  $T_0, T_1, T_2$  の荷重位置による変化状況を示したのが 図-3 であり、また支間傾斜角によって張力差  $\Delta T_{12} \equiv T_1 - T_2$  および張力比  $\tau_{12} \equiv T_1/T_2$  が変化する状況およびその架線様式による違いを示したのが 表-1 である。これらは計算結果の 1 例であるが、支間・索張り条件が異なる場合にも全く同じ傾向を示す。また原形様式において最大張力  $T_{max} = 3775p$  に対する許容荷重  $P_a$  および、この荷重が  $k = 0.1 \sim 0.9$  の範囲を動く場合の  $\tau_{12}$  の最大値を 図-4 に示した。これらの計算において、 $\lambda \cdot p = 0.65 \times 10^{-6} (1/m)$  とした。このような計算から、エンドレス索張力に関する次のような諸傾向が明らかとなった。

1) 荷重位置による諸張力の変化状況：どの様式においてもほぼ類似した傾向を示し、張力はいずれも、荷重がほぼ支間中央にあるとき最大となり、荷重が支点に近づくに従って急激に減少する。ここでは  $k = 0.5$  の張力を最大張力とみなすことにした。

2)  $\Delta T_{12}$ ：荷重  $P$  が同じ場合には、固定様式とタイラー様式ではほぼ一致した値をとり、原形様式では、変形様式の  $\Delta T_{12}$  に  $P$  を加えたものとはほぼ一致する。変形様式の  $\Delta T_{12}$  は、荷重の走行方向の分力とつりあうべきものであり、荷重軌跡が下りの個所では正の値をとり、上りの個所では負の値をとる。これに対して原形様式の  $\Delta T_{12}$  は常に正の値をとり、特に急傾斜の下げ荷集材のとき著しく過大となる。

3)  $\tau_{12}$ ：原形様式の  $\tau_{12}$  は、 $\alpha$  が大なるときに著しく

過大な値をとり得るものである(図-4 参照) この場合に荷重が両支点に近づくに従って急激に増加する。これに対して変形様式では  $\tau_{12}$  が過大となることはなく、また荷重位置による変化も少ない(表-1 参照)。

4) エンドレス索の最大張力  $T_{max}$ ：下げ荷であるか上げ荷であるかにより、原形様式では  $T_0$  または  $T_1$  が最大となり、変形様式では  $T_0$  または  $T_2$  が最大となる。

5) 許容荷重  $P_a$ ：表-1 では  $P_a$  は、傾斜角が  $-15^\circ$  以上のとき原形様式が最小、タイラー様式が最大、また  $-15^\circ$  以下の上げ荷集材では原形様式が最大となっている。この関係は索張りが違う場合にも成り立つものである。

以上により運転諸元・許容荷重等の点から、原形様式は上げ荷集材に適合した様式であり、またタイラー様式は荷重が大なる場合に特に有利な様式であると言える。

4. 実用算定法

ここではエンドレス索の諸張力および荷重点垂下量を簡便に得るための実用算定法として、エンドレス索の 2 線ないし荷上げ索が一体となった仮定の索が鉛直荷重  $P$  を支えるという近似モデルを想定し、単荷重索に関する放物線索理論の公式を適用する方法を試みた。

まず原形様式については、荷上げ索の作用の考慮の仕方によって、図-5 (a)~(c) に示した 3 種の近似モデルを採り上げた。

モデル 1: 荷重点に作用する荷上げ索張力 ( $P$ ) と鉛

表-1.  $\Delta T_{12}$  および  $\tau_{12}$  の比較

様式	$\alpha$ (度)	$\Delta T_{12}/p$ (m)			$\tau_{12}$			$P/p$ (m)
		$k$			$k$			
		0.1	0.5	0.9	0.1	0.5	0.9	
原形	40	1643	1735	1807	3.06	1.93	2.62	1056
	20	1528	1702	1849	2.80	1.85	2.94	1267
	0	1191	1404	1608	2.01	1.59	2.43	1400
	-20	744	916	1101	1.45	1.32	1.69	1382
	-40	360	454	563	1.17	1.14	1.25	1255
固定	40	638	740	823	1.34	1.26	1.45	1154
	20	275	459	625	1.13	1.14	1.32	1349
	0	-224	0	224	0.92	1.00	1.10	1482
	-20	-575	-423	-254	0.79	0.89	0.90	1243
	-40	-708	-637	-551	0.76	0.83	0.80	994
タイラー	40	666	773	861	1.37	1.27	1.49	1207
	20	294	493	671	1.14	1.15	1.37	1448
	0	-244	0	244	0.90	1.00	1.11	1612
	-20	-612	-449	-269	0.77	0.88	0.89	1320
	-40	-728	-654	-566	0.75	0.83	0.79	1021

注  $s=0.04, l=200m, p'=p$  (原形様式),  $p'=p/2$  (タイラー様式)  
 P: 使用荷重。最大張力  $T_{max}=3775p$  (m) に対する許容荷重を用いた。

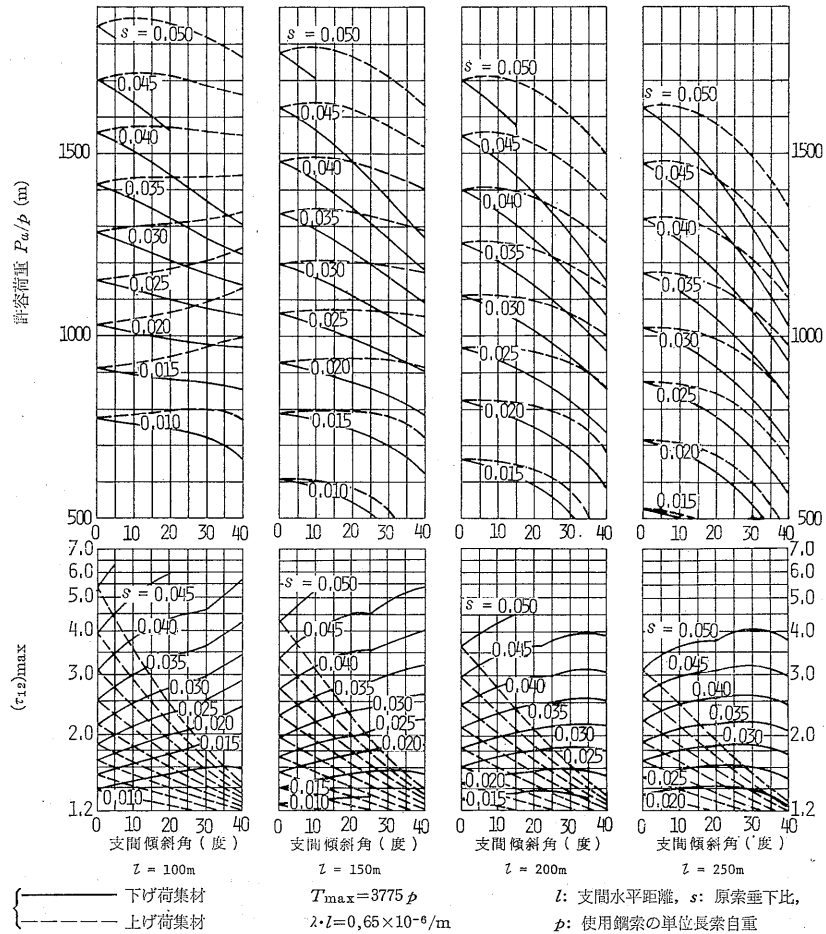


図-4. 原形様式における許容荷重  $P_a$  および引戻し索・引寄せ索張力比  $\tau_{12}$  の最大値

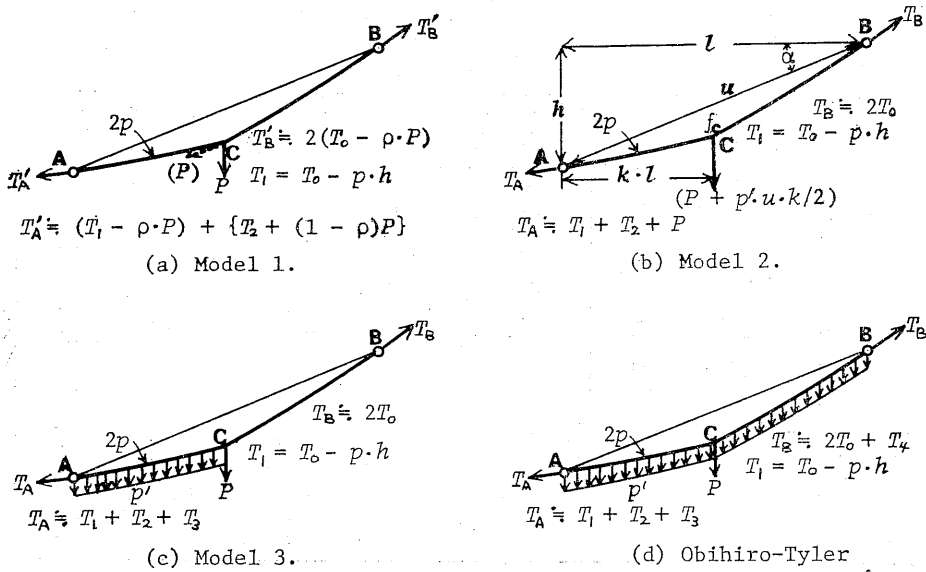


図-5. 近似モデル

直荷重  $P$  の影響を分けて考え、両者の影響を加えたものとして諸張力を定めるものである。まず前者の ( $P$ ) とつりあいを保つために引戻し索の張力は増加し引寄せ索の張力は減少するが、荷重点における力のつりあいを大まかに考えれば、引戻し索張力の増加量を  $\rho \cdot P$  とすれば、引寄せ索張力の減少量は近似的に  $(1-\rho)P$  となる。そこで荷上げ索がなく鉛直荷重  $P$  だけを支える仮想索の支点張力を  $T_{B',A}$  とすれば、図-5 (a) に示した諸関係を適用することにより次の近似式を得る。

$$\left. \begin{aligned} T_0 &\doteq T_{B'}/2 + \rho \cdot P \\ T_1 &\doteq T_{B'}/2 - p \cdot h + \rho \cdot P \\ T_2 &\doteq T_{A'} - T_{B'}/2 + p \cdot h - (1-\rho)P \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

この近似式から張力差  $T_1 - T_2$  を求めれば、

$$\Delta T_{12} \doteq T_{B'} - T_{A'} - 2p \cdot h + P \dots\dots\dots (9)$$

となり、 $\Delta T_{12}$  は  $\rho$  と関係なく定まる。(9) 式の精度は他の近似モデルのものよりも良好であったが、(8) 式中の  $\rho$  の値は諸条件によって複雑に変化することがわかり、この算出法は不適當であると考えざるを得なくなった。

モデル 2: 荷上げ索の重量の半分が荷重点において鉛直荷重として作用するものとする (図-5 (b))。

モデル 3: 荷上げ索とエンドレス索とが一体となった仮想索により鉛直荷重  $P$  が支えられるものとする (図-5 (c))。

この2種のモデルにおいて、それぞれの仮想索の支点張力を  $T_{B,A}$ 、荷重点垂下量を  $f_c$  とすれば、図の中に記した諸関係を適用することにより次の近似式を得る。

$$\left. \begin{aligned} T_0 &\doteq T_B/2, \quad T_1 \doteq T_B/2 - p \cdot h \\ T_2 &\doteq T_A - T_B/2 + p \cdot h - \{P - (k \cdot h - f_c) p'\} \\ Y &\doteq f_c \end{aligned} \right\} (10)$$

ただし、モデル 2 では  $T_2$  中の  $p'$  を含む項を削除する。またこのモデルにおいて  $T_A$  に関する近似関係は便宜的に導入したものである。

$T_B, T_A, f_c$  の算定式は次の通りである (添記号 2, 3 はそれぞれモデル 2, 3 についてのものであることを示し、 $j$  は 2 または 3 とする)。

$$(T_{B,A})_j = \frac{L_T p G_j}{8s'} \sqrt{1 + (\tan \theta_{B,A})_j^2} \dots\dots (11)$$

$$(f_c)_j = 4(1 + 2n_2)k(1-k)ls'/G_j \dots\dots\dots (12)$$

ただし、

$$L_T = 2u \{1 + (8/3)s^2 \cos^4 \alpha\} \dots\dots\dots (13)$$

$$n_3 = P/L_T p, \quad n_2 = n_3 + k \cdot r/4 \dots\dots\dots (14)$$

$$s' = s \cdot \varepsilon: \text{補正垂下比} \dots\dots\dots (15)$$

$$\left. \begin{aligned} G_2 &= [1 + 12(n_2 + n_2^2)k(1-k)]^{1/2} \\ G_3 &= [1 + (k^2 r/2) \{6 - 4k + (kr/2) \\ &\quad \times (4-3k)\} + 12k(1-k) \\ &\quad \times \{n_3(1+rk/2) + n_3^2\}]^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$$\left. \begin{aligned} (\tan \theta_B)_j &= \tan \alpha + 4s' \{1 + 2n_2 k\} / G_j \\ (\tan \theta_A)_2 &= \tan \alpha - 4s' \{1 + 2n_2(1-k)\} / G_2 \\ (\tan \theta_A)_3 &= \tan \alpha - 4s' \{1 + 2n_3 \\ &\quad \times (1-k) + (2-k)kr/2\} / G_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots (17)$$

垂下比補正係数  $\varepsilon$  は次式より定まる<sup>3)</sup>。

表-2. 実用算定値の精度

近似モデル	$\alpha$ (度)	$k=0.5$		$k=0.1$ または $0.9$	
		$T_0$ の誤差率 %	$Y$ の誤差率 %	$T_0$ の誤差率 %	$\Delta T_{12}$ の誤差率 %
Model 2*	40	-(1.6~1.7)	1.9~2.0	-(1.9~6.3)	-0.3~8.3
	20	-(1.1~1.7)	1.3~1.7	-(1.7~7.7)	-0.6~3.7
	0	-(1.1~1.6)	1.1~1.6	-6.6~1.1	-0.2~1.2
	-20	-(1.6~2.0)	1.4~1.8	-8.8~5.3	-3.8~0.0
	-40	-(2.6~2.9)	2.2~2.4	-13.8~6.6	-23.2~-0.7
Model 2	40	0.2~0.3	-(0.0~0.1)	-5.5~0.9	-0.3~8.1
	20	0.2~0.3	-0.2	-3.2~0.2	-0.5~0.3
	0	0.1~0.3	-(0.1~0.4)	-4.2~1.5	-0.2~0.1
	-20	0.0~0.1	-(0.1~0.2)	-5.6~5.7	-4.4~0.7
	-40	-0.4	0.2	-8.4~7.2	-24.1~-0.6
Model 3	40	0.4~0.7	-(0.3~0.5)	-5.4~4.8	-0.5~0.3
	20	0.4~0.5	-0.4	-3.2~3.6	-0.5~0.0
	0	0.4	-0.4	-2.9~2.3	0.0~0.6
	-20	0.2	-0.3	-4.1~5.7	0.4~1.6
	-40	-0.3~0.0	-(0.1~0.3)	-6.0~7.2	1.4~3.0

注 \*: (20) 式の第 3 項を無視した場合、 $l=200\text{m}$ ,  $s=0.02\sim 0.05$ ,  $p'=p$ ,  $P$  は最大張力  $T_{\text{max}}=3775p$  に対する許容荷重

$$e^3 + b_e - a = 0 \dots\dots\dots(18)$$

$$a = G_j / M \dots\dots\dots(19)$$

$$b = 1/M - 1 + (3/8)(\lambda k P / 2) / (s \cos^2 \alpha)^2 \dots\dots(20)$$

$$M = (64/3)(s \cos^2 \alpha)^3 / (\lambda p l) \dots\dots\dots(21)$$

(20) 式の第3項は、仮想索における AC 間の張力のうち、ほぼ P に等しい張力を荷上げ索が負担することによる、エンドレス索の弾性伸長率の減少量を考慮したためのもので、この項を無視すれば過補正となる(表-2 参照)。

表-2 はモデル2および3に基づく実用算定値の誤差率の範囲を示したものである。この結果から、実用算定法はいずれも、最大張力や最大垂下量の算出法として十分であり、また  $k=0.1\sim 0.9$  における運転諸元を検討するためにも、モデル2の  $\alpha \leq -20^\circ$  を除き、ほぼ満足すべきものと言ってよいであろう。なおタイラー様式に関する 図-5 (d) の近似モデルによる実用算定法について検討した結果、モデル3と同程度の精度であることがわかった。

なお、 $k=0.5$  なる場合の (11), (12) 式より  $s'/G_j$  を消去すれば、エンドレス索の最大張力  $T_{max}$ , 荷重  $P_a$ , 荷重点垂下量  $Y_0$  の間の近似式として

$$T_{max} \doteq p u \left( \frac{1}{8\eta} + \left| \frac{\sin \alpha}{2} \right| + \eta \cos^2 \alpha \right) + \left( P_a + \frac{p'u}{4} \right) \left( \frac{1}{8\eta} + \frac{\sin \alpha + \eta}{4} \right) \dots\dots(22)$$

ただし、 $\eta = Y_0 / u$  を得る。タイラー様式では

$$T_{max} \doteq \left( p + \frac{p'}{2} \right) u \left( \frac{1}{8\eta} + \left| \frac{\sin \alpha}{2} \right| + \eta \cos^2 \alpha \right)$$

$$-p'u \left( \frac{\eta}{2} + \left| \frac{\sin \alpha}{4} \right| \right) + P_a \times \left( \frac{1}{8\eta} - \frac{1 - \sin \alpha - \eta}{4} - [\sin \alpha] \right) \dots\dots(23)$$

ただし、 $-\sin \alpha$  は上げ荷の場合にのみ必要な項となる。これらの式は  $T_{max}$ ,  $P_a$ ,  $Y_0$  のいずれか1つが未知量であるとき、その算定に便利な公式である。これらの式の  $T_{max}$  に関する誤差率は、 $s=0.02\sim 0.05$  でその他の条件が表-1と同じ場合に、(22) 式では  $\pm 0.4\%$ 、(23) 式では  $(-0.6\sim 0.3)\%$  以下であった。

### 5. む す び

この研究は文献1)の記述に興味を持って始めたものであるが、最大張力に関する限り予期に反し、従来の算出法を大幅に変更する必要がないという結論となった。なお2項に与えた精密算定法は、文献4)に示された方法と同じ原理に基づくものである。

この研究において、数値計算は名古屋大学大型計算センターの FACOM 230-60 で行った。計算の実施にあたり御協力を頂いた、研究室の青島なな子事務官に対し、ここに謝意を表する次第である。

### 引用文献

- 1) 阿部英雄：帯広エンドレス方式による低位利用材の簡易搬出法に関する試験。新潟県林試研報 16: 71~93, 1973
- 2) MANN, C.N.: Mechanics of Running Skylines. USDA Forest Serv. Res. Pap. PNW-75, 1969
- 3) 堀 高夫：放物線索理論の一般的展開とその林業用索道軌索の設計計算への実用的応用。東教大農学部紀要 13: 1~64, 1967
- 4) CARSON, W.W. and MANN, C.N.: A Technique for the Solution of Skyline Catenary Equations. USDA Forest Serv. Res. Pap. PNW-110, 1970

(1974年3月30日受理)