

室蘭工業大学 正會員 中村作太郎

両端が単純支持或は鉸の状態を支えられている桁や梁の撓み公式には種々あるが厳密な物理実験の結果とそれらの計算値との間には、撓み理論を吟味する上に於ては無視出来ない程の差異がある事は、既に第2回應用力学聯合學術講演會「桁梁の彈性的撓みに関する研究」1952、Proceeding of the 3rd Japan National Congress for Applied Mechanics May 1954「The Theoretical Studies on Elastic Deflection of Beam」第10回土木学会學術講演會「板状梁の撓みに関する研究」1954等に於て数回発表せるところであり、その後、軸力、 Δ が梁の底部に作用するときの理論的解析と計算については、第3回及び第5回應用力学連合學術講演會に於て、その一部づつ発表したところであるが、梁の軸力が作用線の位置によつて、正になったり負になったりする傾向のある事など、梁の全体的理論から見て未解決な問題が多々残されていたりで、最初に立戻り、梁の基本微分方程式より再び出發して全体として平衡がとれ、而も厳密な理論の成立する如き梁の解析を試みた。即ち、本論文は、桁梁に於ける軸力の正、負とその大きさが撓みに対し頗る大きな影響を與える事に着目し、(1)、軸力、(軸張力或は軸圧縮力)が梁の任意の高さに作用する事、(2)、桁梁の高さの影響をも考慮する事、(3)、撓曲線の位置の変化と支點の水平微小変位を考慮する事、と云う三つの条件を基本微分方程式に同時に導入し、超越函数によつて表示せられる厳密理論によつてこれを解いた。

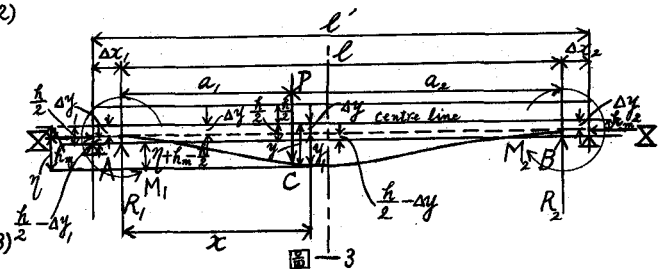
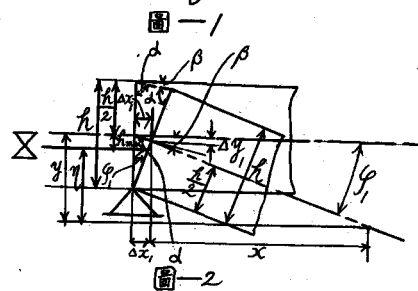
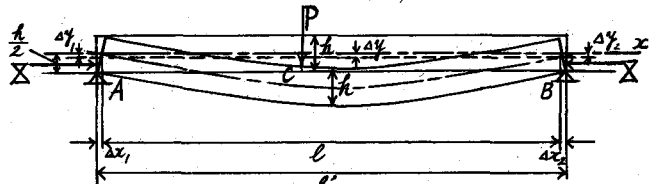
圖-1, 圖-2, 圖-3に於て

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_1 &= \frac{h}{2} \sin \varphi_1 \\ \Delta x_2 &= \frac{h}{2} \sin \varphi_2 \\ \Delta y_1 &= \frac{h}{2} (1 - \cos \varphi_1) \\ \Delta y_2 &= \frac{h}{2} (1 - \cos \varphi_2) \\ \alpha &= \frac{\pi - \varphi_1}{2} \\ \beta &= \frac{\varphi_1}{2} \end{aligned} \right\} \text{---(1)}$$

$$\left. \begin{aligned} l' &= l + (\Delta x_1 + \Delta x_2) \\ l &= l' - \frac{h}{2} (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) \\ \Delta y &= \frac{h}{2} \left\{ 1 - \cos \varphi_1 \left(1 - \frac{x}{l} \right) - \cos \varphi_2 \left(\frac{x}{l} \right) \right\} \\ y &= y_1 + \Delta y \\ \eta &= y \mp h_m = y_1 + \Delta y \mp h_m \end{aligned} \right\} \text{---(2)}$$

梁の基本微分方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} &= -\frac{M}{KI} \\ K &= E + \frac{\Delta}{\delta} = E \left(1 + \frac{\Delta}{EA} \right) \end{aligned} \right\} \text{---(3)}$$



今、支間 l 弾性係数 E 桁梁の幅 b 、桁梁の高さ h 、断面積 A 、慣性モーメント I は一定の単桁 AB の支点より距離 a_1 に集中荷重 P が載るものとする。

$$0 \leq x \leq a_1 \text{ に於て } M = R_1 x - M_1 - \Sigma \left(y_1 + \Delta y + h_m \right) = R_1 x - M_1 - \Sigma \left\{ y_1 + \frac{h}{2} (1 - \cos \varphi_2) + \frac{h}{2} (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \frac{l-x}{l} + h_m \right\} \quad (4)$$

(3) 式に相当する式を作ると $\frac{d^2 y_1}{dx^2} - \frac{\Sigma}{KI} y_1 + \frac{1}{KI} \{ R_1 x - M_1 - \Sigma (\Delta y + h_m) \} = 0$
 $\therefore \frac{d^2 y_1}{dx^2} - \frac{\Sigma}{KI} y_1 + \frac{1}{KI} \left\{ R_1 x - M_1 - \Sigma \left\{ \frac{h}{2} (1 - \cos \varphi_2) + \frac{h}{2} (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \frac{l-x}{l} + h_m \right\} \right\} = 0 \quad (5)$

$$a_1 < x < l \text{ に於ては、 } M = R_2 (l-x) - M_2 - \Sigma (y_1 + \Delta y + h_m) = R_2 (l-x) - M_2 - \Sigma \left\{ y_1 + \frac{h}{2} (1 - \cos \varphi_2) + \frac{h}{2} (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \frac{l-x}{l} + h_m \right\} \quad (6)$$

(3) 式に相当する式を作ると $\frac{d^2 y_1}{dx^2} - \frac{\Sigma}{KI} y_1 + \frac{1}{KI} \{ R_2 (l-x) - M_2 - \Sigma (\Delta y + h_m) \} = 0$
 $\therefore \frac{d^2 y_1}{dx^2} - \frac{\Sigma}{KI} y_1 + \frac{1}{KI} \left\{ R_2 (l-x) - M_2 - \Sigma \left\{ \frac{h}{2} (1 - \cos \varphi_2) + \frac{h}{2} (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \frac{l-x}{l} + h_m \right\} \right\} = 0 \quad (7)$

弯曲が微量であるとし、 Σ は x に関係なく一定であると仮定すると K は x に無関係となる。

そこで、微分方程式 (5)、(7) を解き y_1 を得る事が出来るから、 y は次式の如くなる。

$$y = y_1 + \Delta y = \frac{\cosh \xi x + \sinh \xi x}{2} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_1 - \frac{R_1}{\xi} \right) - \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_1 - \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_2 + \frac{g_1}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{\cosh \xi x - \sinh \xi x}{2} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_1 + \frac{R_1}{\xi} \right) - \frac{h}{2} \left(1 + \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_1 + \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_2 - \frac{g_1}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{R_1 x}{\xi} - \frac{M_1}{\xi} + h_m \quad 0 \leq x \leq a_1 \quad (8)$$

$$y = y_1 + \Delta y = \frac{\cosh \xi x + \sinh \xi x}{2(\cosh \xi l + \sinh \xi l)} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_2 + \frac{R_2}{\xi} \right) + \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_1 - \frac{h}{2} \left(1 + \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_2 - \frac{g_2}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{\cosh \xi x - \sinh \xi x}{2(\cosh \xi l - \sinh \xi l)} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_2 - \frac{R_2}{\xi} \right) - \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_1 - \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_2 + \frac{g_2}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{R_2 (l-x)}{\xi} - \frac{M_2}{\xi} + h_m \quad a_1 \leq x \leq l \quad (9)$$

茲に、 $\xi = \sqrt{\frac{\Sigma}{\mu KI}}$ 或は $\Sigma = \mu \xi^2 KI$
 μ : 支点に水平微小変位を生ずるとき桁梁の材料によって一定せる軸力

に関する係数

$$M_x = R_1 x - M_1 - \Sigma \left\{ \frac{\cosh \xi x + \sinh \xi x}{2} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_1 - \frac{R_1}{\xi} \right) - \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_1 - \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_2 + \frac{g_1}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{\cosh \xi x - \sinh \xi x}{2} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_1 + \frac{R_1}{\xi} \right) - \frac{h}{2} \left(1 + \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_1 + \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_2 - \frac{g_1}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{R_1 x}{\xi} - \frac{M_1}{\xi} \right\} \quad 0 \leq x \leq a_1 \quad (10)$$

$$M_x = R_2 (l-x) - M_2 - \Sigma \left\{ \frac{\cosh \xi x + \sinh \xi x}{2(\cosh \xi l + \sinh \xi l)} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_2 + \frac{R_2}{\xi} \right) + \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_1 - \frac{h}{2} \left(1 + \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_2 - \frac{g_2}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{\cosh \xi x - \sinh \xi x}{2(\cosh \xi l - \sinh \xi l)} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(M_2 - \frac{R_2}{\xi} \right) - \frac{h}{2 \xi l} \cos \varphi_1 - \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\xi l} \right) \cos \varphi_2 + \frac{g_2}{\xi} + \frac{h}{2} + h_m \right\} + \frac{R_2 (l-x)}{\xi} - \frac{M_2}{\xi} \right\} \quad a_1 \leq x \leq l \quad (12)$$

次に、反力とモーメントの釣合条件と荷重の載荷点 C に於ける撓再並に撓みは、 AC 、 CB 両側について求めた式が相等しいという条件より、 M_1 、 M_2 、 R_1 、 R_2 を求めると次の如くなる。

$$M_1 = \frac{(g_1 g_5 + g_2 g_4)}{(g_1 g_5 + g_2 g_4)} \left\{ (g_3 g_5 + g_2 g_4) P + (\alpha F_1 + \beta F_2 + \frac{\alpha}{\gamma} F_3 - \frac{\beta}{\delta} F_4) (g_5 + g_2) l \right\} \quad (13)$$

$$M_2 = \frac{1}{g_2} \left\{ g_3 P + (\alpha F_1 + \beta F_2 + \frac{\alpha}{\gamma} F_3 - \frac{\beta}{\delta} F_4) l \right\} - \frac{g_1}{g_2 (g_1 g_5 + g_2 g_4)} \left\{ (g_3 g_5 + g_2 g_4) P + (\alpha F_1 + \beta F_2 + \frac{\alpha}{\gamma} F_3 - \frac{\beta}{\delta} F_4) (g_5 + g_2) l \right\} \quad (14)$$

$$R_1 = \frac{1}{l} \left\{ \frac{(g_1 g_5 + g_2 g_4)}{(g_1 g_5 + g_2 g_4)} \left\{ (g_3 g_5 + g_2 g_4) P + (\alpha F_1 + \beta F_2 + \frac{\alpha}{\gamma} F_3 - \frac{\beta}{\delta} F_4) (g_5 + g_2) l \right\} \left(1 + \frac{g_1}{g_2} \right) - \frac{1}{g_2} \left\{ g_3 P + (\alpha F_1 + \beta F_2 + \frac{\alpha}{\gamma} F_3 - \frac{\beta}{\delta} F_4) l \right\} + P(l - a_1) \right\} \quad (15)$$

$$R_2 = P - \frac{1}{l} \left\{ \frac{(g_1 g_5 + g_2 g_4)}{(g_1 g_5 + g_2 g_4)} \left\{ (g_3 g_5 + g_2 g_4) P + (\alpha F_1 + \beta F_2 + \frac{\alpha}{\gamma} F_3 - \frac{\beta}{\delta} F_4) (g_5 + g_2) l \right\} \left(1 + \frac{g_1}{g_2} \right) - \frac{1}{g_2} \left\{ g_3 P + (\alpha F_1 + \beta F_2 + \frac{\alpha}{\gamma} F_3 - \frac{\beta}{\delta} F_4) l \right\} + P(l - a_1) \right\} \quad (16)$$

茲に $\alpha = \cosh \xi a_1 + \sinh \xi a_1$, $\beta = \cosh \xi a_1 - \sinh \xi a_1$, $\gamma = \cosh \xi l + \sinh \xi l$, $\delta = \cosh \xi l - \sinh \xi l$ (17)

$$\begin{aligned}
F_1 &= \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\cosh \xi l} \right) \cos \varphi_1 + \frac{h}{2 \cosh \xi l} \cos \varphi_2 - \frac{q}{\xi} - \frac{h}{2} \pm h_m \\
F_2 &= \frac{h}{2} \left(1 + \frac{1}{\cosh \xi l} \right) \cos \varphi_1 - \frac{h}{2 \cosh \xi l} \cos \varphi_2 + \frac{q}{\xi} - \frac{h}{2} \pm h_m \\
F_3 &= \frac{h}{2 \cosh \xi l} \cos \varphi_1 - \frac{h}{2} \left(1 + \frac{1}{\cosh \xi l} \right) \cos \varphi_2 - \frac{q}{\xi} + \frac{h}{2} \mp h_m \\
F_4 &= \frac{h}{2 \cosh \xi l} \cos \varphi_1 + \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\cosh \xi l} \right) \cos \varphi_2 - \frac{q}{\xi} - \frac{h}{2} \pm h_m \\
G_1 &= (\alpha + \beta) l - \left\{ (\alpha - \beta) - \left(\frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) \right\} \frac{1}{\xi} \\
G_2 &= \left\{ (\alpha - \beta) - \left(\frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) \right\} \frac{1}{\xi} - \left(\frac{\alpha}{\gamma} + \frac{\beta}{\delta} \right) l \\
G_3 &= \left\{ (\alpha - \beta)(l - a_1) + \left(\frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) a_1 - 2l \right\} \frac{1}{\xi} \\
G_4 &= 2a_1 - \frac{1}{\xi} (\alpha + \beta) + \frac{1}{\xi} \left(\frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) + 2(l - a_1) + (\alpha + \beta - 2)l \\
G_5 &= 2a_1 - \frac{1}{\xi} (\alpha + \beta) + \frac{1}{\xi} \left(\frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) + 2(l - a_1) - \left(2 - \frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) l \\
G_6 &= \left\{ \frac{1}{\xi} \left(\frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) + 2(l - a_1) \right\} l - (l - a_1) \left\{ 2a_1 - \frac{1}{\xi} (\alpha + \beta) + \frac{1}{\xi} \left(\frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta} \right) + 2(l - a_1) \right\}
\end{aligned}
\tag{18}$$

$$\begin{aligned}
L_2 &= \frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\beta}{\delta}, \quad L_3 = \alpha - \beta \\
L_7 &= (\alpha + \beta) - \left(\frac{\alpha}{\gamma} + \frac{\beta}{\delta} \right) \\
L_{10} &= (\alpha + \beta) - \frac{1}{\xi l} (L_3 - L_2) \\
L_{11} &= \left\{ \frac{1}{\xi l} (L_3 - L_2) - \left(\frac{\alpha}{\gamma} + \frac{\beta}{\delta} \right) \right\} \\
K_1 &= \frac{G_2 G_5 + G_2 G_6}{G_5 + G_2} \\
K_2 &= \frac{G_1 (G_3 G_5 + G_2 G_6)}{G_2 (G_1 G_5 + G_2 G_4)}
\end{aligned}
\tag{19}$$

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{G_2 G_5 + G_2 G_6}{G_5 + G_2} \\
K_2 &= \frac{G_1 (G_3 G_5 + G_2 G_6)}{G_2 (G_1 G_5 + G_2 G_4)}
\end{aligned}
\tag{20}$$

撓み式及び上述の式の中に含まれる軸力 X は、次式に依つて求める事が出来る。

$$\begin{aligned}
X &= \frac{A}{I l} \int_0^l \frac{M_x}{2} dx = \frac{A}{I l} \left\{ \int_0^{a_1} \frac{M_x}{2} dx + \int_{a_1}^l \frac{M_x}{2} dx \right\} = \frac{A}{I l} \left\{ \frac{1}{16} \left(\frac{1}{\xi} \sinh \xi a_1 \cosh \xi a_1 - a_1 \right) \left(\frac{2R_1}{\xi} \right. \right. \\
&+ F_1 - F_2 \Big)^2 X - \frac{1}{16} \left(\frac{1}{\xi} \cosh \xi a_1 \sinh \xi a_1 + a_1 \right) \left(\frac{2M_1}{\xi} - F_1 - F_2 \right)^2 X + \frac{1}{16 \xi} (\cosh 2\xi a_1 - 1) \left(\frac{2M_1}{\xi} - F_1 - F_2 \right) \\
&\left(\frac{2R_1}{\xi} + F_1 - F_2 \right) + \frac{1}{4 \xi} (a_1 \cosh \xi a_1 - \frac{1}{\xi} \sinh \xi a_1) \left(\frac{2R_1}{\xi} + F_1 - F_2 \right) R_1 - \frac{1}{2 \xi} (\cosh \xi a_1 - 1) \left(\frac{2R_1}{\xi} + F_1 - F_2 \right) \\
&\left(\frac{M_1}{2} \mp \frac{h_m}{2} X \right) - \frac{1}{4 \xi} (a_1 \sinh \xi a_1 - \frac{1}{\xi} \cosh \xi a_1 + \frac{1}{\xi}) \left(\frac{2M_1}{\xi} - F_1 - F_2 \right) R_1 + \frac{1}{2 \xi} \sinh \xi a_1 \left(\frac{2M_1}{\xi} \right. \\
&- F_1 - F_2 \Big) \left(\frac{M_1}{2} \mp \frac{h_m}{2} X \right) - \frac{1}{16 \xi} (\cosh \xi l \sinh \xi l - \cosh \xi a_1 \sinh \xi a_1) + \frac{1}{2} (l - a_1) \left\{ \cosh \xi l + \sinh \xi l \left(\frac{M_2}{\xi} \right. \right. \\
&+ \frac{R_2}{\xi} + F_3 \Big) + \frac{1}{\cosh \xi l - \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} - F_4 \right)^2 X - \left\{ \frac{1}{16 \xi} (\sinh \xi l \cosh \xi l - \sinh \xi a_1 \cosh \xi a_1) - \right. \\
&\left. \frac{1}{16} (l - a_1) \right\} \left\{ \cosh \xi l - \sinh \xi l \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} + F_3 \right) - \frac{1}{\cosh \xi l - \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} - F_4 \right)^2 X - \frac{1}{16 \xi} (\cosh 2\xi l - \cosh 2\xi a_1) \right\} \\
&\left\{ \cosh \xi l + \sinh \xi l \left(\frac{M_2}{\xi} + \frac{R_2}{\xi} + F_3 \right) - \frac{1}{\cosh \xi l - \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} - F_4 \right)^2 X + \frac{1}{4 \xi} (l \sinh \xi l - \frac{1}{\xi} \cosh \xi l - a_1 \sinh \xi a_1 + \frac{1}{\xi} \cosh \xi a_1) \right\} \\
&\left\{ \cosh \xi l + \sinh \xi l \left(\frac{M_2}{\xi} + \frac{R_2}{\xi} + F_3 \right) + \frac{1}{\cosh \xi l - \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} - F_4 \right)^2 X + \frac{1}{4 \xi} (l \cosh \xi l - \frac{1}{\xi} \sinh \xi l - a_1 \cosh \xi a_1 + \frac{1}{\xi} \sinh \xi a_1) \right\} \\
&\left\{ \cosh \xi l + \sinh \xi l \left(\frac{M_2}{\xi} + \frac{R_2}{\xi} + F_3 \right) - \frac{1}{\cosh \xi l - \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} - F_4 \right)^2 X - \frac{1}{2 \xi} (\sinh \xi l - \sinh \xi a_1) \right\} \\
&\left\{ \cosh \xi l + \sinh \xi l \left(\frac{M_2}{\xi} + \frac{R_2}{\xi} + F_3 \right) + \frac{1}{\cosh \xi l - \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} - F_4 \right)^2 X \right\} \left(\frac{R_2 l}{2} - \frac{M_2}{2} \pm \frac{h_m}{2} X \right) - \frac{1}{2 \xi} (\cosh \xi l - \cosh \xi a_1) \left\{ \frac{1}{\cosh \xi l + \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} \right. \right. \\
&\left. \left. + \frac{R_2}{\xi} + F_3 \right) - \frac{1}{\cosh \xi l - \sinh \xi l} \left(\frac{M_2}{\xi} - \frac{R_2}{\xi} - F_4 \right) \right\} \left(\frac{R_2 l}{2} - \frac{M_2}{2} \pm \frac{h_m}{2} X \right) \Big\} \tag{21}
\end{aligned}$$

$$\text{両端に於て、} M_1 = 0, M_2 = 0, R_1 = P(1 - \varepsilon)l = \frac{P(l - a_1)}{l}, R_2 = P \cdot \varepsilon l = \frac{P a_1}{l} \tag{22}$$

とすれば、上述の式によつて、撓み y 、曲げモーメント M_x 、軸力 X が、更に簡単な形になる。又、その時の φ_1, φ_2 を誘導すれば次の如くなる。

$$\varphi_1 = K \frac{P}{L_3 l \xi} \pm \frac{L_3}{L_3} h_m \tag{23}$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{\frac{1}{L_3} L_{10} + \frac{1}{L_3} L_{11}} \left\{ - \left\{ \frac{L_4}{\xi} - \frac{L_2}{L_3} \frac{1}{\xi} - \frac{\xi h_m}{2 L_3} L_{10} (K_1 \frac{P}{\xi} \pm L_7 h_m) \right\} \pm \sqrt{\left\{ \frac{L_4}{\xi} - \frac{L_2}{L_3} \frac{1}{\xi} - \frac{\xi h_m}{2 L_3} L_{10} (K_1 \frac{P}{\xi} \pm L_7 h_m) \right\}^2 - \left(\frac{L_2}{L_3} L_{10} + h_m L_{11} \right)} \right\} \tag{24}$$

但し、(23)、(24)式の記號は、(19)、(20)式参照。これらの理論式により、既に発表せる三種の材料、鋼鉄、白樺、孟宗竹の梁（支間 $l = 40\text{cm}$ 、断面夫々、幅 $1.60\text{cm} \times$ 高さ 0.458cm 、幅 $1.58\text{cm} \times$ 高さ 0.439cm 、幅 $1.34\text{cm} \times$ 高さ 0.438cm ）に対し、楔形實驗同様 $P = 0.20\text{kg}$ の集中荷重が任意の点に載る場合について、撓角 φ_1, φ_2 、軸力 X （軸張力或は軸圧縮力）並に、撓み y を、(1)、軸力が最上部の線に作用する場合（ $h_m = -0.225\text{cm}$ ）(2)、軸力が中心線より上方 0.1125cm の線に作用する場合（ $h_m = -0.1125\text{cm}$ ）(3)、軸力の作用位置が中心線と一致する場合（ $h_m = 0$ ）(4)、軸力が中心線より下方 0.1125cm の線に作用する場合（ $h_m = 0.1125\text{cm}$ ）(5)、軸力が最低部の線に作用する場合（ $h_m = 0.225\text{cm}$ ）の各々について嚴密計算を行い、桁梁の理論的性質を明かならしめた。