

斜張橋主桁の非線形曲げモーメントの算定図

A SCHEMATIC EXPRESSION TO ESTIMATE GEOMETRICAL NON-LINEAR
BENDING MOMENT IN MAIN GIRDERS OF CABLE-STAYED BRIDGES

長井 正嗣* 佐野信一郎** 奥井義昭*** 大垣賀津雄****

By Masatsugu NAGAI, Shin-ichiro SANO, Yoshiaki OKUI and Katsuo OHGAKI

A geometrical non-linear bending moment induced in main girders of cable-stayed bridges is presented by schematic expression. Furthermore, important design parameters which dominates the non-linear behaviour, among many parameters, are made clear. They are center span length, dead load intensity and flexural rigidity of the girder. The proposed figures are based on our previous paper, in which formulae with sufficient accuracy to estimate non-linear bending moment was presented. Under conditions that the cable-stayed bridges are increasing their span length and economical alternatives are being proposed, an easy evaluation without consuming much time is very useful. The proposed figures are especially useful for the purpose at preliminary design stage.

1. まえがき

著者らは、近年用いられることが多く、また長支間化の著しいファンタイプマルチケーブル斜張橋の主桁に発生する幾何学的非線形曲げモーメント（線形の設計曲げモーメントに対する）について、その設計上の取り扱いを説明するとともに簡易算定式を提案した¹⁾。そこでは、斜張橋を弾性床土のはりモデルに置換し、ケーブルのサグ及び圧縮部材の曲げ変形を非線形の要因と考え、非線形曲げモーメントの算定式を提案した。もとより、有限変位理論に基づくプログラムを用いれば、この種の解析そのものは可能である。しかしながら、経済性に立脚した斜張橋の設計過程において曲げ剛性の小さい主桁が提案される状況のなかで、どの程度の非線形性が予想されるかを事前に精度よく把握できること、また、支間が長大化する状況の中で、長大化に伴う非線形挙動を事前に予測できることが重要になると考える。特に、支間の長大化の過程で主桁の

*	工博	長岡技術科学大学	助教授	建設系	(〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)
**		川崎重工業(株)	橋梁設計部	部長	(〒136 江東区南砂2-4-25)
***	工修	埼玉大学	助手	建設基礎工学科	(〒338 浦和市下大久保225)
****	工修	川崎重工業(株)	橋梁設計部		(〒136 江東区南砂2-4-25)

安定問題が一層重要な検討課題になることから²⁾、事前に非線形性状に対する認識を持つておくことが設計者にとって、特に計画に従事する設計者にとって重要であるとする。

算定式¹⁾によれば、非線形性状に対して支配的なパラメータが多くのパラメータの中から明らかになるとともに、パラメータの変化に伴う性状の定量的変化を事前に予測することが容易となる。

本文では、以上のような立場から、提案した算定式に基づき支配的パラメータを明かにするとともに、非線形の程度を推測する図を作成する。これより、斜張橋の設計過程における有限変位解析の取り扱いが明かにできる。

なお、本算定式の精度については、有限変位解析³⁾結果との比較検討から計画段階での使用上十分な精度を有することが確認されている。また、本文で用いる記号を図-1に定義する。

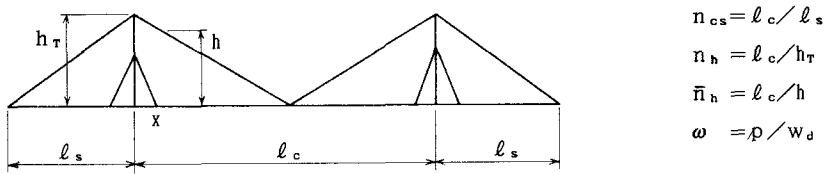


図-1 記号

2. 算定式の概要と数値計算

中央径間 1/4 点に着目した非線形曲げモーメントの算定式誘導の詳細は文献1)に詳述されているため、ここでは算定の基本的考え方および算定式の概要を簡単に紹介するとともに、考慮した2種類の要因について若干の考察を加える。

斜張橋主桁の非線形曲げモーメントの発生要因として、①ケーブルのサグ、②圧縮部材の曲げ変形、③形状の変化に伴う作用力の方向変化、等が挙げられる。文献1)では、①、②を対象として両者の非線形挙動に起因する曲げモーメント（非線形曲げモーメント）の近似算定式を提案した。

まず、斜張橋を弾性床上のはりモデルに置換し、ケーブルのヤング係数として素線そのもののヤング係数と接線弾性係数¹⁾を用い設計曲げモーメント（影響線の正領域に活荷重を載荷）を求める。そして、両者の曲げモーメントを比較し、その差をサグに起因する非線形曲げモーメントとする。次に、圧縮部材の曲げ変形については、付加荷重

$$q = \frac{N_c M}{E_g I_g} \quad (1)$$

を載荷し、繰返し収束計算を行って非線形曲げモーメントを求める。ここに、Mは前述の設計曲げモーメントで、繰返し計算の過程では付加荷重によって新たに生じる曲げモーメントを用いる。また、 N_c は死荷重および活荷重による中央径間1/4点の主桁軸力、 $E_g I_g$ は主桁の曲げ剛性である。なお、中央径間1/4点に着目したのは、付加荷重 q の値が1/4点で比較的大きいと考えたためである。

1) サグに起因する非線形

弾性床上のはりモデルについて、線形の設計曲げモーメント M_L は十分な精度で、

$$M_L = \frac{P \pi}{16 \beta^2} + \frac{P}{4 \beta} \quad (2)$$

と定義できる⁴⁾。ここに、 β はケーブルと桁の剛比を表わすパラメータで、

$$\beta = \sqrt[4]{k/4E_G I_G} \quad (3)$$

と定義される。また、 k はケーブルの伸び剛性に関する分布バネ定数で、ケーブル素線のヤング係数を用いて算定される値¹⁾、 p は分布活荷重強度、 P は集中活荷重強度である。

さて、ケーブルのヤング係数として接線弾性係数を用いた分布バネ定数 k_c を求め、

$$\beta_c = \sqrt[4]{k_c/4E_G I_G} \quad (4)$$

と定義する。式(2)の β に、式(3)、(4)で定義される β 、 β_c を代入し、両者の比をとると、サグに起因して生じる非線形曲げモーメント(線形的设计曲げモーメント M_L に対して) ΔM_c は、

$$\frac{\Delta M_c}{M_L} = \left(\frac{\beta}{\beta_c}\right)^2 \frac{1 + 21\beta_c}{1 + 21\beta} \quad (5)$$

と与えられる。上式の誘導にあたり、 $p=300\text{kgf/m}$ 、 $P=5\text{tf/m}$ を仮定している。

2) 圧縮部材の曲げ変形による非線形

この場合の非線形曲げモーメント ΔM_0 は、

$$\frac{\Delta M_0}{M_L} = F_1 \left(1 + \sum_{i=2}^{\infty} F_2^{i-1} \right) \quad (6)$$

$$F_1 = \frac{N_c}{E_G I_G} - \frac{5\pi}{87\beta^2} \frac{1 + 16\beta}{1 + 21\beta} \quad (7)$$

$$F_2 = \frac{N_c}{E_G I_G} - \frac{\pi}{16\beta^2} \quad (8)$$

$$N_c = \frac{3}{4} N_d + \frac{P}{2h} \frac{\pi}{\beta} \frac{l_c}{4} + \frac{P}{h} \frac{l_c}{4} \quad (9)$$

と与えられる。

ここに、 N_d は死荷重による塔位置最大軸力¹⁾、 l_c は中央径間長、 h は桁上から塔のケーブル定着区間の中点までの高さである。式(9)の右辺第2、3項は中央径間1/4点の正的设计曲げモーメントを求めるために載荷される活荷重によって生じる軸力を意味する。

式(5)及び式(6)の合計モーメントが非線形曲げモーメント ΔM_N となる。

3) 2種類の要因に関する考察

文献1)では、支間400、600、800mの斜張橋で、主桁断面2次モーメントを変化(4ケース)させたモデルについて有限変位解析³⁾結果との比較を行い本算定式の適用性を検討した。ここでは、そのうち、支間長600、800mで主桁断面2次モーメント1.2m⁴(半橋分)のモデルについて、橋軸方向の非線形の程度の変化を、2つの要因が占める割合を中心に検討する。

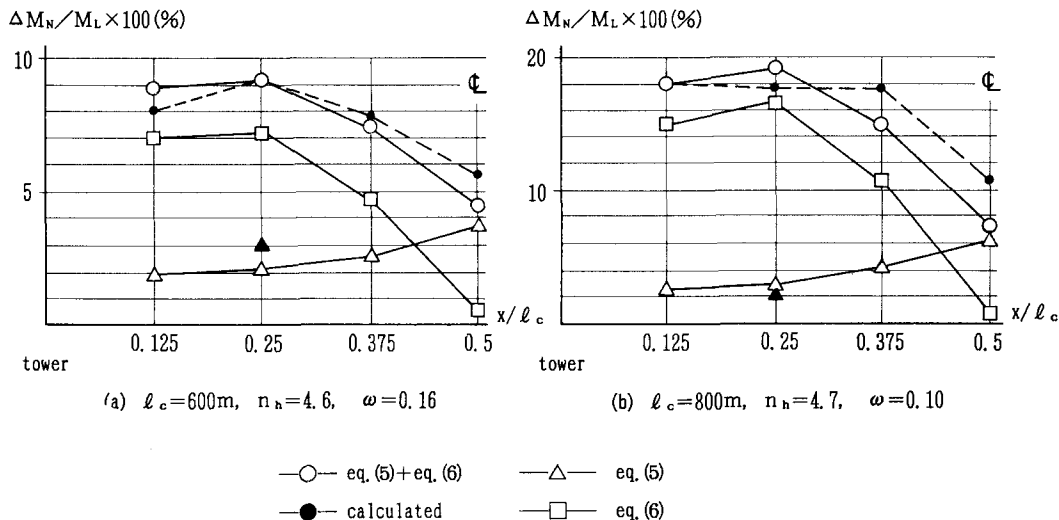


図-2 非線形曲げモーメントの橋軸方向変化

図-2 (a) は支間 600m、(b) は支間 800m のモデルに対する結果で、図中、横軸が橋軸方向位置を、縦軸が非線形曲げモーメントと設計曲げモーメントの比を表わす。△印は式 (5)、□印は式 (6) の結果、○印は両者の合計を表わす。また、●印は有限変位解析の結果、▲印は線形の骨組解析結果であるがケーブルのヤング係数として接線弾性係数を用いており、△印と対比させるためである。

□印は、当然軸力の変化に対応しており、△印はケーブル長が長くなる程大きくなっている。両者の合計○印の橋軸方向の分布は□印と同様となるが、支間中央ではサグの影響により大きくなる。これらの傾向は有限変位解析結果とほぼ同様である。文献 1) で記述した結果と一部重複するが、非線形の程度を中央径間 1/4 点で評価しておけばよいこと、また、長大橋ほどケーブルサグのみを考慮する解析に問題が生じることがわかる。3. で行う 1/4 点に着目したパラメータ解析の過程でも同様のことがいえた。したがって、長大橋のサグに対する注意⁵⁾は主に変位に関するものと理解できる。

3. 非線形曲げモーメントの算定図

非線形曲げモーメントについて、中央径間長、死荷重強度及び主桁断面 2 次モーメントを支配的パラメータとした算定図を図-3~7 に示す。

図の作成に当り以下の仮定を設けているが、あわせてその他のパラメータについて検討を加える。

- ④ 分布及び集中活荷重の比を求める場合、 $p=300\text{kgf/cm}^2$ 、 $P=5\text{tf/m}$ ($l_c > 130\text{m}$) としている。したがって、集中荷重が大きい場合 (TT-43 荷重) 別途計算が必要となるが、死荷重による軸力が支配的なため、変動は小さい。
- ⑤ 死荷重はすべてケーブルで受けもつものとする。この場合、塔位置の主桁最大軸力は、死荷重強度を W_d として、

$$N_d = -\frac{W_d}{8} \frac{l_c^2}{h} = -\frac{W_d}{8} \bar{n}_h l_c \quad (10)$$

と定義できる⁴⁾。さらに、中央径間 1/4 点の軸力はその75%と仮定している。実橋において塔位置の最大軸力が式 (10) より小さい場合は算定図は安全側となる。この差は、実橋における完成時ケーブル張力の決定（いわゆるプレストレス量の決定）方針と関係しており、各橋梁でその方針がまちまちであることから、安全側の本算定図を利用してよい。

- ㉔ $n_b (=l_c/h_r) = 5.0$ 、また $h = 0.75h_r$ として誘導する。したがって、実橋の桁上から塔ケーブル定着区間の中点までの高さ h_a が与えられる場合は算定図の値を h/h_a 倍すればよい。
- ㉕ 斜張橋のその他のパラメータとして、支間比 ($n_{cs} = l_c/l_s$)、死活荷重強度 ($\omega = p/w_d$) が挙げられ、これらは式 (5)、(6) 中の β 値に関係する。 n_{cs} (2.1~2.5)、 ω (0.1~0.3) について計算を行ったところ、結果の差は小さい（数%）ため安全側の値がプロットされている。また、㉔において、 n_b の変化に伴い β も変化するものの、その変動は小さく㉔で示した考え方で対応できる。
- なお、図中の○印は有限変位解析結果³⁾で、●印は本算定図より推定した値である。

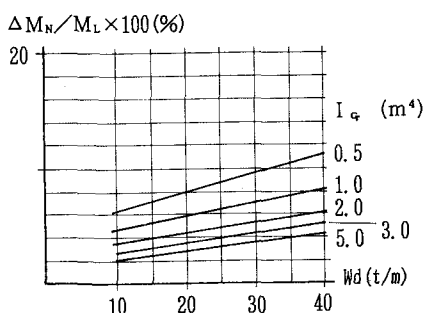


図-3 非線形曲げモーメント
($l_c = 300\text{m}$)

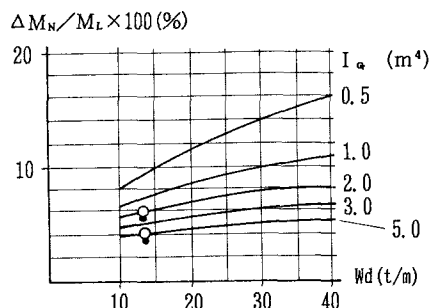


図-4 非線形曲げモーメント
($l_c = 400\text{m}$)

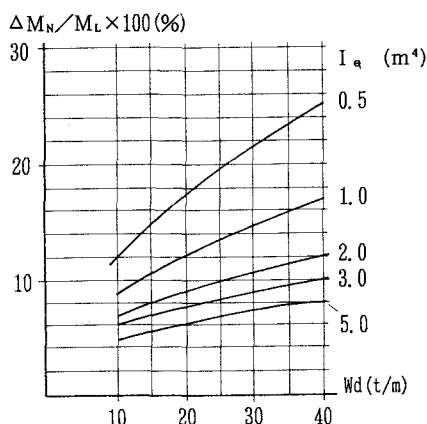


図-5 非線形曲げモーメント ($l_c = 500\text{m}$)

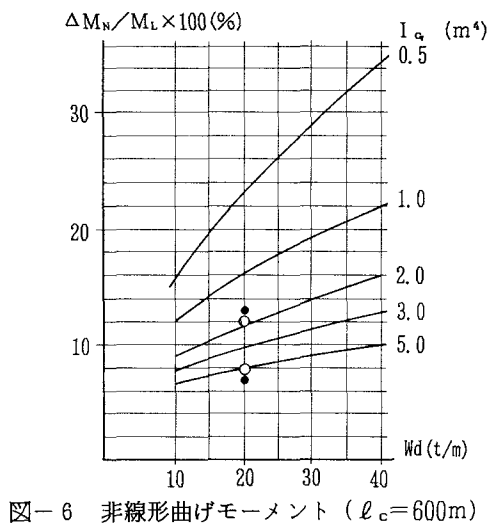


図-6 非線形曲げモーメント ($\ell_c=600\text{m}$)

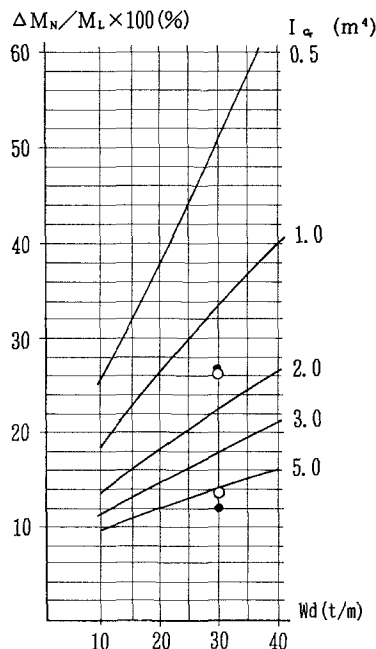


図-7 非線形曲げモーメント
($\ell_c=800\text{m}$)

4. まとめ

文献 1) で提案した主桁非線形曲げモーメントの算定式を用いて、推定用の図を作成した。あわせて非線形曲げモーメントの変化に対する支配的パラメータを抽出した。これより、支間長の変化に伴う非線形性状が簡単に予測できる。また、計画段階では、支間長、死荷重をある程度特定できるため、主に主桁断面2次モーメントの変化に対する性状変化の予測を行う上で有益と考える。

参考文献

- 1) 長井正嗣、赤尾宏、佐野信一郎、奥井義昭：斜張橋主桁に発生する非線形曲げモーメントの簡易算定法の提案、土木学会論文集、No.392/I-9, 1988-4
- 2) 長井正嗣、佐野信一郎、遠藤秋主、奥井義昭：長大斜張橋に発生する垂直応力の予測と適用支間に関する検討、構造工学論文集、Vol.35A, 1989-4
- 3) 森翠、佐野信一郎、森本千秋、長井正嗣、遠藤秋主、大南亮一、谷沢正：ケーブル部材を含む骨組構造の立体非線形解析—斜張橋への適用—、川崎重工技報、No.88, 1985-4
- 4) 長井正嗣、赤尾宏、佐野信一郎、井澤衛：3径間連続マルチケーブル斜張橋の部材断面力算定法の提案、土木学会論文集、No.362/I-4, 1985-10
- 5) Leonhardt, F. und Zellner, W. (成井信 訳)：斜張橋—近年の発達について—、(その1,2), 土木施工, 第21巻, 11, 12号, 1980-10, 11

(1989年10月2日受付)