

九州大学 正員 今井富士夫

九州大学 正員 太田俊昭

1. まえがき わが国では、長大吊橋の主塔として安全性および施工性の観点からスチールタワーが優れていると見なされ実施例・計画例も多いが、最近、経済性の面で(鉄骨鉄筋)コンクリートタワーの有利性が見直され始めており、このため、その施工性や安全性に関する検討が重要視されてきた。

本研究は、コンクリートタワーの安全性に関する基礎的資料とするため、その問題点の一つであるクラック発生による断面剛性の低下とそれに伴う耐力の低減効果を明らかにすることとを目的としたものである。すなわち、コンクリートの曲げクラック発生の影響を考慮した弾塑性解析理論に基づき、本四架橋を想定してスパン全長1200m級の長大吊橋主塔モデルの数値解析を行い、結果の一部を報告するものである。

なお、本解析において、次のような仮定を用いた。

1) 断面では、平面保持の法則が成立する。
2) 鉄筋は、各々の鉄骨とその鉄骨重心位置に集約する。(以下、鉄骨は鉄筋を含んだものとする。) また、降伏・破断値は、鉄骨(SM50)の値を用いる。

3) 鉄骨とコンクリートの付着は完全である。

4) コンクリートおよび鉄骨の応力-ひずみ特性は、図-1に示すような双一次曲線で理想化する。

5) 断面の極限状態は、(i)、コンクリート応力がコンクリートの圧縮強度に達したとき、あるいは、(ii)、鉄骨応力が鉄骨の破断強度に達したときのいずれかで規定する。

2. 解析理論

軸力と曲げモーメントを受ける主塔の任意断面に着目すると、図-2のような主塔の任意断面について力のつり合い式を考えれば、次式をえる。

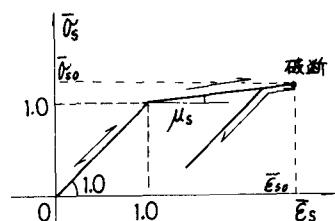
$$\left. \begin{aligned} \bar{N} &= K_1 \int_A \bar{\sigma}_c d\bar{A} + K_2 \sum \bar{\sigma}_s \bar{A}_s \\ \bar{M} - K_3 \bar{N} &= - \left[K_4 \int_A \bar{\sigma}_c \bar{y}_c d\bar{A} + K_5 \sum \bar{\sigma}_s \bar{y}_s \bar{A}_s \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{---- (1)}$$

ここに、 $\bar{N} = N/N_Y$ 、 $\bar{M} = M/M_Y$ 、 N : 軸力、 M : 曲げモーメント、 $N_Y = \sigma_{cy} A_0$ 、 $M_Y = \sigma_{cy} W_0$ 、 σ_{cy} : コンクリートの降伏応力、 A_0 : 換算断面積、 W_0 : 換算断面係数、 $\bar{h} = h/H$ 、 h : 断面下縁よりのクラック高さ、 H : 断面高さ、 $\bar{\sigma}_c = \sigma_c/\sigma_{co}$ 、 σ_c : コンクリート応力、 σ_{co} : コンクリート圧縮強度、 $\bar{\sigma}_s = \sigma_s/\sigma_{sy}$ 、 σ_s : 鉄骨応力、 σ_{sy} : 鉄骨降伏応力、 $\bar{A}_s = A_s/A_0$ 、 A_s : 鉄骨断面積、 $K_1 = BH/A_0$ 、 $K_2 = \sigma_{sy}/\sigma_{co}$ 、 $K_3 = HA_0/2W_0$ 、 $K_4 = BH^2/\sigma_{co}$ 、 $K_5 = \sigma_{sy}HA_0/\sigma_{co}W_0$ 。

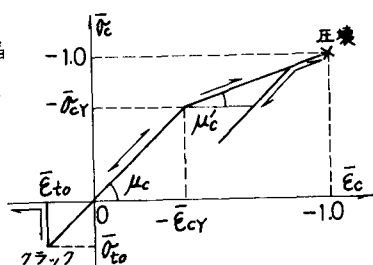
また、コンクリートおよび鉄骨の応力とひずみ関係は、弾性・弾塑性に問わず、一般に次のように表わされる。

$$\bar{\sigma}_c = \nu_c (\bar{\epsilon}_c - \bar{\epsilon}_c^*), \quad \bar{\sigma}_s = \nu_s (\bar{\epsilon}_s - \bar{\epsilon}_s^*)$$

ここに、 $\bar{\epsilon}_c = \epsilon_c/\epsilon_{co}$ 、 ϵ_c : コンクリートのひずみ、 ϵ_{co} : コンクリートの圧壊ひずみ、 $\bar{\epsilon}_c^* = \epsilon_{co}^*/\epsilon_{co}$ 、 $\bar{\epsilon}_s = \epsilon_s/\epsilon_{sy}$ 、 ϵ_s : 鉄骨ひずみ、 ϵ_{sy} : 鉄骨の降伏ひずみ、 $\bar{\epsilon}_s^* = \epsilon_{sy}^*/\epsilon_{sy}$ 、 $\bar{\epsilon}^*$ とは、応力の条件によって決定される定数であり、 ν は図-1で明らかなように応力勾配比 μ で一般表示したものである。



a) 鉄骨の応力-ひずみ曲線



b) コンクリートの応力-ひずみ曲線

図 - 1

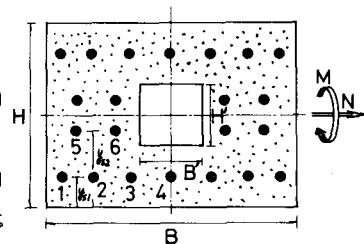


図 - 2

---- (2)

さらに、任意高さにおけるコンクリートおよび鉄骨のひずみは、断面上縁、下縁のひずみ $\bar{\epsilon}_u, \bar{\epsilon}_l$ を用いて、

$$\bar{\epsilon}_c = (1 - \bar{y}_c) \bar{\epsilon}_l + \bar{y}_c \bar{\epsilon}_u, \quad \bar{\epsilon}_s = \alpha \{ (1 - \bar{y}_s) \bar{\epsilon}_l + \bar{y}_s \bar{\epsilon}_u \} \quad \text{---- (3)}$$

こゝに、 $\bar{\epsilon}_l = \epsilon_l / \epsilon_{co}, \bar{\epsilon}_u = \epsilon_u / \epsilon_{co}, \alpha = \epsilon_{co} / \epsilon_{sy}$

式(2)、式(3)より、コンクリートおよび鉄骨の応力は、次のように書き改められる。

$$\bar{\sigma}_c = \nu_c \{ (1 - \bar{y}_c) \bar{\epsilon}_l + \bar{y}_c \bar{\epsilon}_u - \bar{\epsilon}_c^* \}, \quad \bar{\sigma}_s = \nu_s \{ \alpha (1 - \bar{y}_s) \bar{\epsilon}_l + \alpha \bar{y}_s \bar{\epsilon}_u - \bar{\epsilon}_s^* \} \quad \text{---- (4)}$$

式(1)に式(4)を代入して整理すれば、

$$\bar{N} = a_1 \bar{\epsilon}_l + a_2 \bar{\epsilon}_u - a_3, \quad \bar{M} - K_3 \bar{N} = b_1 \bar{\epsilon}_l + b_2 \bar{\epsilon}_u - b_3 \quad \text{---- (5)}$$

こゝに、 $a_1 = K_1 \int_k \nu_c (1 - \bar{y}_c) d\bar{A} + K_2 \alpha \sum \nu_s (1 - \bar{y}_s) \bar{A}_s, a_2 = K_1 \int_k \nu_c \bar{y}_c d\bar{A} + K_2 \alpha \sum \nu_s \bar{y}_s \bar{A}_s,$

$a_3 = K_1 \int_k \nu_c \bar{\epsilon}_c^* d\bar{A} + K_2 \alpha \sum \nu_s \bar{\epsilon}_s^* \bar{A}_s, b_1 = K_4 \int_k \nu_c (1 - \bar{y}_c) \bar{y}_c d\bar{A} + K_5 \alpha \sum \nu_s (1 - \bar{y}_s) \bar{y}_s \bar{A}_s,$

$b_2 = K_4 \int_k \nu_c \bar{y}_c^2 d\bar{A} + K_5 \alpha \sum \nu_s \bar{y}_s^2 \bar{A}_s, b_3 = K_4 \int_k \nu_c \bar{\epsilon}_c^* \bar{y}_c d\bar{A} + K_5 \alpha \sum \nu_s \bar{\epsilon}_s^* \bar{y}_s \bar{A}_s.$

式(5)を $\bar{\epsilon}_u, \bar{\epsilon}_l$ について解けば、次式となる。

$$\bar{\epsilon}_l = -f_1 \bar{M} + f_2 \bar{N} - f_3, \quad \bar{\epsilon}_u = g_1 \bar{M} - g_2 \bar{N} + g_3 \quad \text{---- (6)}$$

こゝに、 $G = a_1 b_2 - b_1 a_2, f_1 = a_2 / G, f_2 = (K_3 a_2 + b_2) / G, f_3 = (a_2 b_3 - b_2 a_3) / G, g_1 = a_1 / G$

$g_2 = (K_3 a_1 + b_1) / G, g_3 = (a_1 b_3 - b_1 a_3) / G$

また、断面の曲率は、平面保持の法則より次の式で与えられる。

$$\bar{\phi} = \epsilon_{co} / \epsilon_{cy} \cdot (\bar{\epsilon}_l - \bar{\epsilon}_u) / Z \quad \text{---- (7)}$$

式(7)に式(6)を代入すれば、結局、曲率 $\bar{\phi}$ が次の式で決定される。

$$\bar{\phi} = \epsilon_{co} / \epsilon_{cy} \cdot \{ -(f_1 + g_1) \bar{M} + (f_2 + g_2) \bar{N} - (f_3 + g_3) \} / Z \quad \text{---- (8)}$$

以上の式を用いて、図-2に示すような中空鉄骨コンクリート断面について、一定軸圧縮力下において、曲げモーメントを漸増させた場合の曲率の挙動を追跡した。

3. 解析結果

解析に用いた諸元は、表-1に示している。

なお、鉄骨の断面積および重心位置については

断面の対称性を利用して、図-2に示すように、

A_s は No.1 ~ No.6, y_{s1} は No.1 ~ No.2 のみで付記した。

さて、解析例として図-3に示すように、一定

軸圧縮力 $\bar{N} = 0.0 \sim -0.8$ に変化させたときの漸増曲げモーメントに対する曲率を追跡してみた。

その結果、いずれもフラックの発生に伴い、曲率は著しく増大しているが、軸圧縮力の増大により、フラックの発生は遅れ、その影響も小さくなっている。さらに、断面の極限応力状態についていえば、 $\bar{N} = 0.0, -0.2$ では図面の都合上表われないが、いずれの場合もコンクリートの圧壊であり、軸圧縮力の増大に伴って抵抗モーメント値は上昇する傾向にあるが、それも $\bar{N} = -0.6$ までであり、 $\bar{N} = -0.8$ では、圧縮力が大きすぎるため、低下していることが判る。なお、式(8)を用いれば、塔全体の安定限界荷重が推定できることになるが、この点については断面の都合上省略する。

表 - 1

B (m)	H (m)	B' (m)	H' (m)	$E_c (\text{t/m}^2)$	$E_s (\text{t/m}^2)$	$\nu_{co} (\text{t/m}^2)$
9.5	7.0	2.0	2.0	3.0×10^4	2.1×10^7	3.0×10^3
$\nu_{cy} (\text{t/m}^2)$	$\nu_{sy} (\text{t/m}^2)$	$\nu_{so} (\text{t/m}^2)$	M_s	M_c	M'_c	$y_{s1} (\text{m})$
1.8×10^3	3.0×10^4	5.0×10^4	0.1	1.94	0.581	0.75
$y_{s2} (\text{m})$	$A_{s1} (\text{m}^2)$	$A_{s2} (\text{m}^2)$	$A_{s3} (\text{m}^2)$	$A_{s4} (\text{m}^2)$	$A_{s5} (\text{m}^2)$	$A_{s6} (\text{m}^2)$
2.75	0.0134	0.0325	0.0689	0.0631	0.0746	0.0459

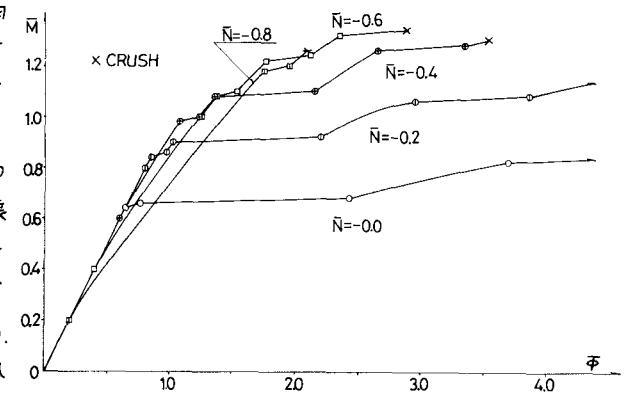


図 - 3