

弾性固有値解を用いた有効長さ手法による 鋼アーチ系橋梁の面外座屈強度の算定

熊本大学 正 員 崎元達郎 熊本大学 正 員 坂田 力
熊本大学 学生員 リー・チン・ホン

1. はじめに： 現行の道路橋示方書(以下、道示と略す。)のアーチ橋に対する面外座屈照査規定は、単材アーチに対する固有値解を基本に有効座屈長さを求め、アーチ形式(上路、中路、下路形式)の違いによる荷重方向の影響およびライズ・支間比の影響を考慮した補正係数を乗じることにより、アーチ橋の有効座屈長さを求めている。その有効座屈長さから細長比を求め、それを直柱の基準強度式に代入して得られる許容軸方向圧縮応力度を利用して、アーチ橋の面外座屈に関する照査を行っている。しかし、実橋に近い数値モデルについて、上述の道示の方法に従って求めた強度と有限変位弾塑性解析法によって求めた強度を比較した結果、橋門開口部を有する下路・中路上式アーチ橋に対して、道示の方法ではかなり危険側の強度算定を与えることが明かとなった¹⁾。そこで、道示の有効長さ手法において、単材アーチに対する固有値解によらず、アーチ橋の構造系全体の弾性座屈に対する固有値解を求め、それを有効長さ手法に適用したところ、比較的良好な強度評価を与えることが明かとなった²⁾。そこで、本研究では、この弾性固有値解を用いた有効長さ手法の適用範囲を検討するために、アーチの橋門構部分の断面が補強された場合などについて下路式ローゼ橋を対象にその適用性を検討した。

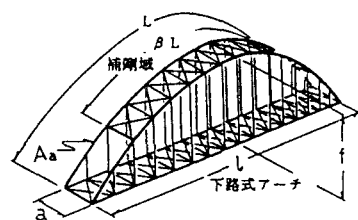


図-1 解析モデル

表-1 アーチ橋モデルの構造諸元

形式	支間長	ライズ	t/l	a	β
ローゼ	150(m)	22.5(m)	0.15	5~20(m)	0.48~0.86

2. 面外座屈強度の算定法： マトリックス構造解析により有限変位問題を考える場合、その固有方程式は、 $|K_0 + \alpha K_{g0}| = 0$ となる。ここで、 K_0 は微小変位剛性マトリックス、 K_{g0} は幾何学的剛性マトリックス、 α は固有値である。構造物に基準荷重 P_0 を作用させたときの軸力を N_0 とし、分岐座屈までの挙動を線形と仮定すると、弾性座屈時の軸力は次式により求められる。

$$N_{cr} = \alpha N_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、対象構造物の代表断面と同一の断面を有する両端ヒンジ柱の弾性座屈荷重 N_{crE} は Euler の式より次のように求められる。

$$N_{crE} = \pi^2 EI / (l_0)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

EI ：曲げ剛性、 l_0 ：両端ヒンジ柱の長さ
そこで、式(1)と式(2)を等置すると構造物の有効長さ l_0 は次式より得られる。

$$l_0 = \pi \sqrt{EI / \alpha N_0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)を用いて細長比パラメータ λ_y を次式より求める。

$$\lambda_y = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{l_0}{r_y} \\ = \sqrt{A \sigma_y / \alpha N_0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、基準軸力 N_0 を降伏軸力 $N_y (= A \sigma_y)$ とすれば、有効細長比パラメータ λ_y は、 $\lambda_y = \sqrt{1 / \alpha}$

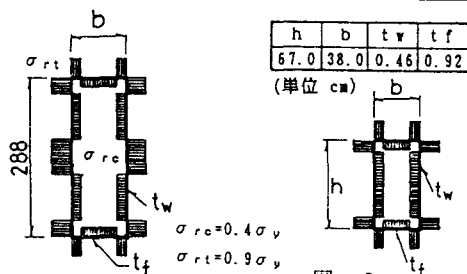


図-2 アーチリブ断面

図-3 道路桁断面寸法

表-2 橋門部アーチリブ断面寸法 (A_a ：一定)

	橋門部 I_a	h	b	t_w	t_f	橋門部 A_a
等断面	1 I_a	288.0	48.0	0.60	1.20	A_a
変断面	2 I_a	288.0	70.0	0.60	0.80	"
"	3 I_a	288.0	85.0	0.60	0.67	"
"	4 I_a	288.0	100.0	0.60	0.57	"

* I_a ：補剛域部分のアーチリブ断面二次モーメント

** A_a ：補剛域部分のアーチリブ断面積 (単位 cm^2)

表-3 橋門部アーチリブ断面寸法 (I_a ：一定)

	橋門部 A_a	h	b	t_w	t_f	橋門部 I_a
等断面	A_a	288.0	48.0	0.60	1.20	I_a
変断面	2 A_a	288.0	35.0	1.20	3.20	"
"	3 A_a	288.0	29.0	1.80	6.70	"
"	4 A_a	288.0	25.5	2.40	11.3	"

(単位 cm)

と表すことができる。この λ_y を道路橋示方書で規定される直柱の基準強度式³⁾に代入することにより終局時の構造物の代表軸力 $N_u = A\sigma_u$ が求められる。なお、この基準強度曲線は溶接残留応力および初期たわみを有する両端ヒンジ柱の弾塑性座屈を考慮しているため、上述のようにして得られた算定強度は結果的に弾塑性座屈挙動を考慮した構造物の終局強度の近似値を算定しているといえる。

3. 解析モデル： 解析モデルは図-1に示すような下路式ローゼ橋で、支間長 l 、ライズー支間比 f/l およびアーチリブの断面積 Aa を一定とし、アーチリブ間隔 a および補剛率 β を変化させた(表-1参照)。ここで、補剛率 β はアーチリブ全長 L と横構によって補剛されたアーチリブ部分の長さ L_1 の比(L_1/L)である。また、アーチの橋門構部分のみ、その断面を変化させた場合の強度への影響を固有値解によって評価できるかを検討するため、橋門構部分の面外曲げ剛性(表-2)と断面積(表-3)を変化させた。荷重条件はアーチ橋の面外座屈に最も厳しいと考えられる等分布荷重満載とし、解析ではそれと等価な節点集中荷重を道路桁に作用させた。なお、有限変位弾塑性解析にあたっては初期面外たわみと溶接残留応力(図-2、図-3)を考慮した。

4. 結果と考察： 図-4は弾性固有値解析による面外座屈モードと有限変位弾塑性解析による結果を比較したもので、両者とも非常によく対応していることがわかる。図-5～6は横軸に弾性固有値解より求めた細長比パラメータ λ_y をとり、縦軸に有限変位弾塑性解析による面外座屈強度 σ_u を降伏応力 σ_y で無次元化した値をとって、数値モデルの強度を評価したものである。図中の実線は直柱の基準強度曲線である。図-5は等断面アーチリブの下路式ローゼ橋の、補剛率 β を0.48～0.86まで変化させ、さらにアーチリブ間隔 a を5m～20mまで変化させたときの結果を示したものである。図-6は $\beta=0.733$ で $a=5$ mおよび10mのモデルと $\beta=0.48$ で $a=5$ mのモデルについて、橋門部のアーチリブ断面積を一定とし、面外曲げ剛性のみを補剛域部分の2～4倍としたときの結果を示した。また $\beta=0.733$ で $a=10$ mのモデルについて橋門部のアーチリブ面外曲げ剛性を一定とし、断面積のみを補剛域部分の2～4倍とした場合の結果についても図中×印で示した。ここで、基準荷重はアーチ支点部断面(橋門部のアーチリブ断面)が全塑性化するときの荷重を採用した。以上の結果より、等断面アーチリブを有する下路式ローゼ橋、およびアーチの橋門構部分の断面が補強されるようなアーチ橋に対して、アーチ構造全体の弾性固有値解を用いる有効長さ手法によって良好な強度評価が可能であることが明かとなった。

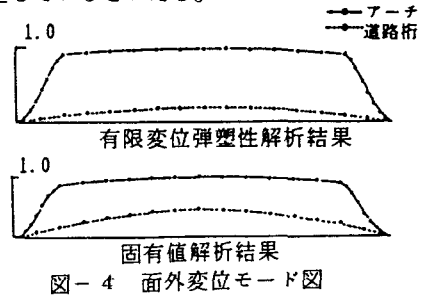


図-4 面外変位モード図

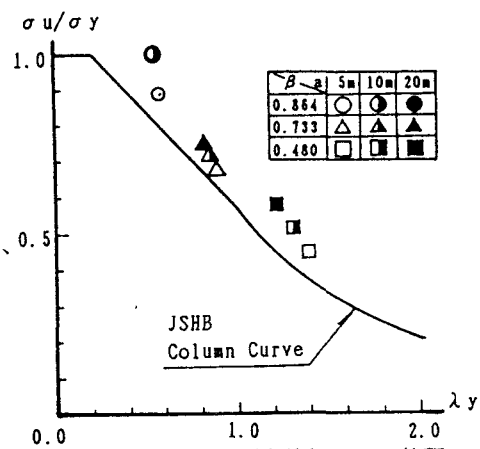


図-5 弾性固有値解による整理 (等断面アーチリブモデル)

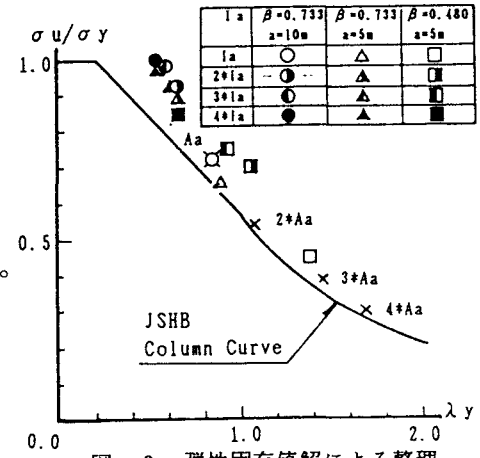


図-6 弾性固有値解による整理 (変断面アーチリブモデル)

参考文献： 1) 崎元達郎他「下路および中路式アーチ橋の弾塑性面外座屈強度」構造工学論文集 1988.3
 2) 崎元達郎他「弾性固有値解を用いた有効長さ手法による……」構造工学論文集 1991.4
 3) (社)日本道路協会「道路橋示方書・同解説」昭和55年2月。