

I-52 弾性固有値解を用いた有効長さ手法 によるアーチ系橋梁の面外座屈強度の算定

熊本大学 正員 嶋元 達郎 SCS(株) 正員 小堀 俊之
熊本大学 正員 坂田 力

1. まえがき： 現行道路橋示方書のアーチ橋に対する面外座屈照査規定は、単材アーチリブのみを考慮した弾性固有値解により有効座屈長さを定め、さらにアーチの形式（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ザー支間比の影響を考慮し、補正して得られる有効座屈長さを直柱の基準強度式に代入する。その結果、得られる許容応力度を利用して、アーチの面外座屈照査を実施している。著者らの研究¹⁾によると、実橋に近い数値モデルに対しては、示方書の照査式は、かなり危険側になる場合がある。ここでは、実橋に近いアーチ橋モデルの弾性固有値解を求めて、道路橋示方書の手法の妥当性について検討した。

2. 面外座屈強度の算定方法： マトリックス構造解析により分岐座屈問題を考える場合、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 をかけた時の軸力を 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より求まる。

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

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座屈軸力は次のオイラーの式より求まる。

$$N_{cr} \cdot E = \pi^2 EI / l_0^2 \quad (2)$$

ここで、 EI は曲げ剛性、 l_0 は両端ヒンジ柱の長さである。そこで、式(1)と式(2)を等置すると、構造物の有効長さ l_0 は次式より求まる。

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

式(3)を用いて細長比パラメーター λ_y を次式より求める。

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

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 $\lambda_y = \sqrt{1 / \alpha}$ 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²⁾に代入することにより

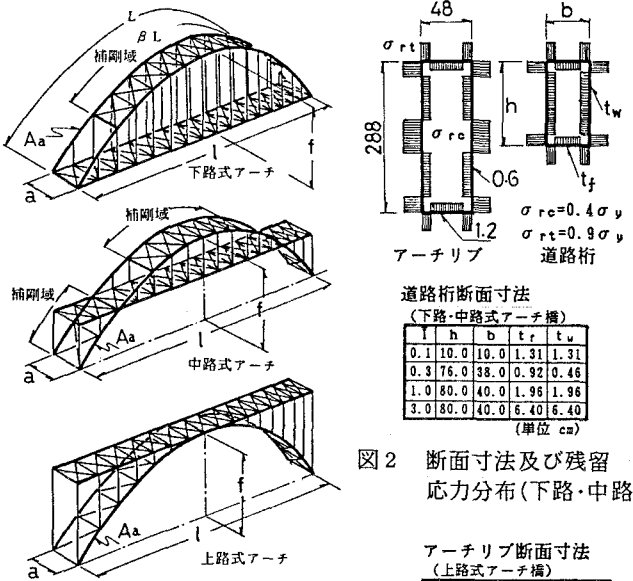


図2 断面寸法及び残留応力分布(下路・中路)

図1 解析モデル

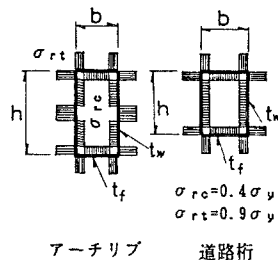


図3 断面寸法及び残留応力分布(上路)

道路桁断面寸法
(下路・中路式アーチ橋)

h	b	t _r	t _w
0.1	10.0	1.31	1.31
0.3	76.0	0.92	0.46
1.0	80.0	1.96	1.96
3.0	80.0	6.40	6.40

(単位 cm)

アーチリブ断面寸法
(上路式アーチ橋)

h (m)	h	b	t _r	t _w
100	120.0	40.0	1.0	1.0
200	168.0	56.0	1.4	1.4
300	204.0	68.0	1.7	1.7

(単位 cm)

道路桁断面寸法
(上路式アーチ橋)

h	b	t _r	t _w
100	29.6	14.8	0.37
200	41.6	20.8	0.52
300	50.4	25.2	0.63
100	51.2	25.6	0.64
200	71.2	35.6	0.89
300	86.4	43.2	1.08
100	65.6	32.8	0.82
200	92.0	46.0	1.15
300	111.4	55.7	1.39
100	92.8	46.4	1.16
200	129.8	64.9	1.62
300	157.6	78.8	1.97

(単位 cm)

表1 アーチ橋モデルの構造諸元

	下路式	中路式	上路式
支間長 l (m)	150	150	100, 200, 300
ライズ f (m)	22.5	22.5	20, 40, 60
f/l	0.15	0.25	0.20
主橋間隔 a (m)	20, 10, 5	20, 10, 5	5.2
剛性比 I	0.1~3.0	0.1~3.0	0.1~1.0
補剛率 β	0.48~0.86	0.64~0.88	1.0
断面積 Aa (m ²)	448	448	298.5~903.1

終局時の構造物の代表軸力 $N_u = A \sigma_u$ が求められる。ここで、この直柱の基準強度式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、こ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軸力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1～3および表1に示すような下路式、中路式、上路式アーチ橋で、下路および中路式モデルはそれぞれ支間長 l 、ライズ-支間比 f/l 、アーチリブ断面積 A_a を一定とし、アーチリブ間隔 a 、面外曲げ剛性比 $\bar{I}$ および補剛率 β を変化させた。ここで、 $\bar{I}$ は2本のアーチリブを一体と考えたときの面外曲げ剛性 $E I_{ay}$ に対する道路桁全体の面外曲げ剛性 $E I_{gy}$ の比 (I_{gy}/I_{ay}) であり、補剛率 β はアーチリブ全長 L に対する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。上路式アーチ橋モデルは、アーチリブと道路桁をクラウン部で剛結したモデルで、アーチリブ間隔 a およびライズ-支間比 f/l を一定とし、支間長 l および面外曲げ剛性比 $\bar{I}$ を変化させた。各解析モデルの構造諸元は表1に示すとおりである。荷重条件は、橋面に等分布荷重が満載する場合を考え、解析ではそれと等価な節点集中荷重として道路桁に作用させた。また、使用鋼材はすべてSS41と仮定した。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, 3)を考慮した。

4. 結果と考察： 図4～図6は弾性固有値解より求めた下路式、中路式、上路式アーチ橋それぞれの細長比パラメータ λ_y に対して、有限変位弾塑性解析により得られた面外座屈強度 σ_u を降伏応力 σ_y で無次元化した値をプロットしたものであり、図中実線は直柱の基準強度曲線である。図4は下路式アーチ橋において補剛率 β および面外曲げ剛性比 $\bar{I}$ を変化させたときの結果を示したものである。この図より、補剛率が小さく、かつ面外曲げ剛性比が小さいほど有限変位弾塑性解析による強度は基準強度曲線を下回っており、弾性固有値解による算定強度が危険側を示していることがわかる。しかし、実橋では補剛率が $\beta=0.48$ となることはほとんど考えられないので、下路式アーチ橋に対しては本手法は有効であると考えられる。図5は中路式アーチ橋の結果を示したものである。この図より中路式アーチ橋は下路式の場合と比較して、補剛率 β および面外曲げ剛性比 $\bar{I}$ の変化による座屈強度への影響を十分に評価できないものと考えられる。そのため、 β および $\bar{I}$ の大きいモデルについてはかなり安全側の評価を示し、 β および $\bar{I}$ の小さいモデルについては若干危険側の評価を示している。図6は上路式アーチ橋の支間長 l と $\bar{I}$ を変化させたときの結果を示した。上路式アーチ橋の場合は全般的に強度曲線と一致し、安全側の評価を示している。すなわち上路式アーチ橋の場合は下路、中路式に比べて $\bar{I}$ の座屈強度への影響を比較的うまく評価できるものと考えられる。以上の結果より、実橋に近いモデルの弾性固有値解を用いれば、有効長さ手法によるアーチ系橋梁の面外座屈強度の算定は、他に方法のない場合は実用的に有効な手法となる可能性を有していると考えられる。

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) (社)日本道路協会「道路橋示方書・同解説」昭和55年2月

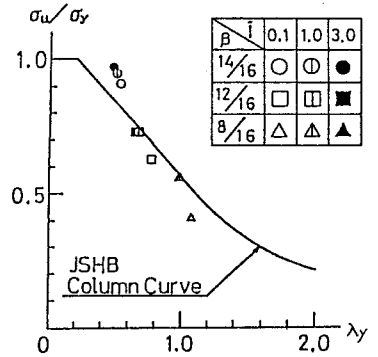


図4 面外座屈強度(下路式アーチ橋)

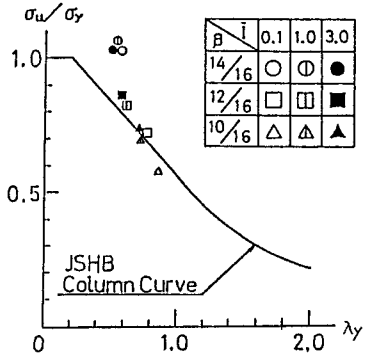


図5 面外座屈強度(中路式アーチ橋)

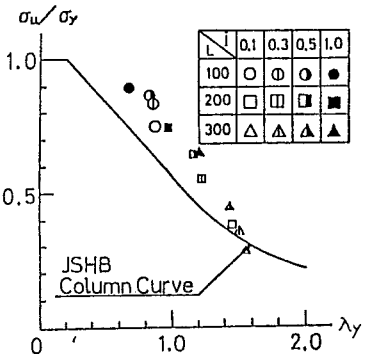


図6 面外座屈強度(上路式アーチ橋)