

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 正 員 坂田 力 学生員 庄村 典生

1. まえがき: 現行の道路橋示方書(以下、道示と略す。)のアーチ系橋梁の面外座屈に対する照査規定は、アーチと柱の類似性に着目して、直柱の基準強度式を利用するものである。しかし、実橋に近い数値モデルについて、道示の方法に従って求めた強度と有限変位弾塑性解析によって求めた強度を比較した場合、特に橋門開口部を有する下路・中路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らかとなった。そこで実橋に近いアーチ橋の数値モデルについて構造系全体の弾性座屈に対する固有値解を求めて道示と同じ有効長さ手法を適用し、別途計算された有限変位弾塑性解析結果と比較したところ、良好な強度評価を与えることが明らかとなった¹⁾。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、ライズー支間比 f/l を変化させた場合、アーチ部材の鋼種を部分的に変化させた場合について下路式ランガー橋、下路式2ヒンジリブアーチを対象に検討した。

2. 面外座屈強度の算定法: マトリクス構造解析により分岐座屈問題を考える場合、その固有方程式は微小変位の剛性マトリクスを K_0 、有限変位の影響を考慮する初期応力マトリクスを K_σ とすると、

$$|K_0 + \alpha K_\sigma| = 0 \quad (1)$$

で与えられる。ここで $| \cdot |$ は行列式、 α は固有値を示す。

構造物に基準荷重 P_0 を作用させた時の代表部材の軸力を N_0 とし、分岐座屈までの挙動を線形と仮定すると、弾性座屈時の部材軸力 N_{cr} は次式により求められる。

$$N_{cr} = \alpha N_0 \quad (2)$$

一方、対象構造物の代表部材と同一の断面を有する長さ ℓ_e の両端ヒンジ柱の座屈軸力 N_{cre} は、

$$N_{cre} = \pi^2 EI / \ell_e^2 \quad (3)$$

となる。ここで、 EI は代表部材の曲げ剛性である。

そこで、式(2)と式(3)を等置して ℓ_e を求めると、アーチ橋を両端ヒンジ柱に置き換えたと考えた場合の等価な柱の長さ(=有効長さ)が次式により求められる。

$$\ell_e = \pi \sqrt{EI / \alpha N_0} \quad (4)$$

さらに、細長比パラメータ λ_y は、

$$\lambda_y = (\ell_e / \pi r_y) \sqrt{\sigma_y / E} = \sqrt{A \sigma_y / \alpha N_0} \quad (5)$$

となる。上式で、 σ_y は鋼材の降伏応力度、 r_y 及び A は代表部材断面の断面2次半径及び断面積である。ここで、基準軸力 N_0 を支点での降伏軸力 $N_y (= A \sigma_y)$ とすれば、

$$\lambda_y = \sqrt{1 / \alpha} \quad (6)$$

となる。この λ_y を道示で規定される直柱の基準強度式に代入することにより、終局応力度 $\bar{\sigma} = \sigma_u / \sigma_y$ が求められる。この基準強度式は溶接残留応力及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強度の近似値であると考えられる。

3. 解析モデル: 数値解析モデルは図-1に示すような現実の下路式アーチ橋に近いものを想定した。ライズー支間比 f/l を変化させた場合、形式をランガー橋とし、支間長 l 、アーチリブ間隔 a 、アーチ断面積

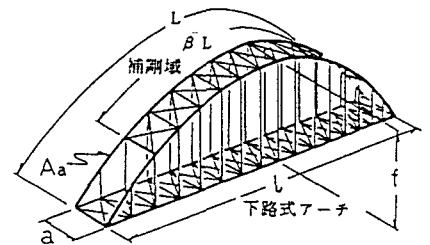


図-1 解析モデル

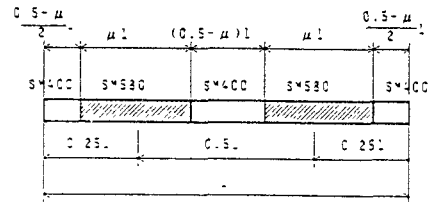


図-2.1 両端ヒンジのアーチリブ

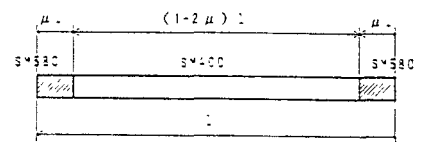


図-2.2 両端固定のアーチリブ

A_s 、補剛率 β 、アーチと道路桁の面外曲げ剛性比 $\bar{I}$ を一定とした。さらに、ライズ f が変化するとともに、吊材の面外曲げ剛性の影響をみるために、吊材の上下端をアーチ面外の回転に対して固定した場合の検討も行った。また、アーチ部材の鋼種を部分的に変化させた場合では、図-2に示す様に、2ヒンジアーチでは、 $\ell/4$ 点付近に高張力鋼を用いる場合を想定して $\mu = 0.25$ とし、 f/ℓ 、 a 、 A_s 、 β 、を一定とし、 $\bar{I}$ を変化させた。ランガー橋の場合は、アーチ支点部に高張力鋼を用いる場合を想定して $\mu = 0.125$ とした。荷重条件は、道示に定められた等分布満載荷重とし、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は、初期たわみと溶接残留応力を考慮した。

4. 結果と考察： 図-3は、ライズ-支間比 f/ℓ を変化させた場合のランガー橋の解析モデルに対して、細長比パラメータ λ_y を道示の方法により求め、その λ_y に対して解析終局強度をプロットすることにより、道示による λ_y を評価したものである。この図より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わかる。図-4は同じ解析モデルの λ_y を弾性固有値解により求め、有限変位弾塑性解析による終局強度をプロットしたものである。この図より、弾性固有値解析によればライズ-支間比が変化しても強度算定を精度良く安全側に評価できることがわかる。これは、道示が座屈長の基準を支間長にとり、代表力を水平反力で計算するのに対し、本解析では座屈長の基準をアーチ軸線長にとり、代表力を支点軸力で計算するため、ライズ-支間比が変化しても一般性を失わないからであると考えられる。さらに吊材の面外曲げを拘束した場合を見ると、その強度増加が忠実に評価されることがわかるが、 $f/\ell = 0.1$ 、 0.15 に比べて、 $f/\ell = 0.25$ では吊材の曲げ剛性の影響が小さくなっているのがわかる。図-5、6はアーチの鋼種を部分的に変化させたモデルの解析結果である。2ヒンジアーチ（両端ヒンジのアーチリブ）ではあまり大きな変化はみられないが、いずれも安全側の良い精度で評価できる。ランガー橋（両端固定のアーチリブ）では、全域SM580の場合が多少安全側過ぎるのに対し、SM580+SM400の場合良い精度で強度評価できる。なお、基準荷重にアーチ支点部断面が全塑性化するときの荷重を採用したため、固有値解析による λ_y が同じ値となっている。

5. まとめ： 実橋に近い骨組モデルに対して計算した弾性固有値を用いれば、ライズ-支間比が変化した場合、鋼種が材軸方向に変化した場合についても、道示の有効長さ手法が適用できることが明かとなった。

参考文献： 1) 崎元, 坂田, 小堀「弾性固有値解を用いた有効長さ手法による・・・」

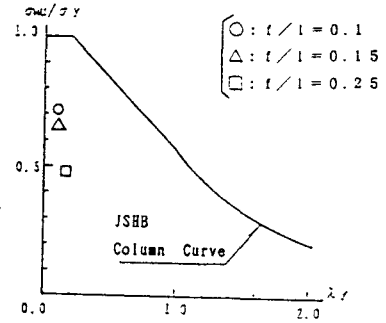


図-3 道路橋示方書による整理

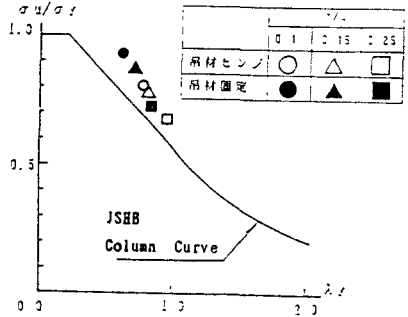


図-4 弾性固有値解による整理

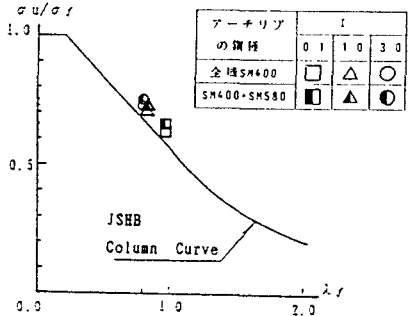


図-5 弾性固有値解による整理（両端ヒンジ）

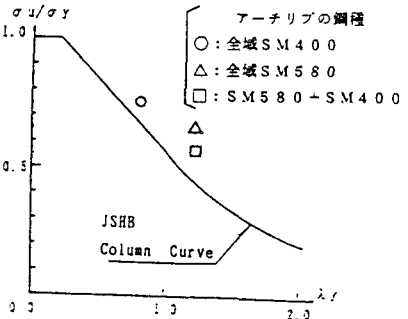


図-6 弾性固有値解による整理（両端固定）