

中路式アーチ橋の面外座屈に対する一考察

○（株）横河ブリッジ 正会員 佐野 泰如
（株）横河ブリッジ 正会員 尾下 里治

1. まえがき 筆者らは以前下路式，上路式アーチ橋の面外座屈について検討を行い，中路式アーチ橋の検討を今後の課題とした^{1),2)}．一般に中路式アーチ橋のアーチリブ構面は補剛桁より下方に位置する部分には横構が配置され，上方に位置する部分には横構を省略したラーメン形式が多い．このような構造においては特に補剛桁の上方に位置するアーチリブに関して下路式と同様にせん断変形の影響により，せん断変形を考慮しない場合と比較して座屈軸力が低下する．しかも通常橋門構や横支材は風荷重，地震荷重等水平方向力に対して設計され，アーチリブの面外座屈を考慮して設計されていない．

そこで他の形式と同様に中路式に対しても，各構成部材の剛性と面外座屈との関係が把握できていれば部材設計に便利であり，後で座屈解析を行っても手戻りの少ない設計を行うことができる．

本文では，横構の有無，L/Bの大小等構造的特徴に着目して実橋を3橋選んで弾性座屈解析を行い，以前提案したアーチリブに対しての面外座屈簡易算定式を適用する．そして，提案式の妥当性，実橋の面外座屈に対する強度および弱点となる部位を明らかにする．

2. ラーメン形式組立柱の面外座屈簡易算定式 文献1)にて提案している門型ラーメンのせん断抵抗断面積 A_w を次式(1)に示す．ここで E :ヤング率， G :せん断弾性係数， a_1 :座屈時に生じる単パネルの仮想ヒンジ位置 I_0 :片側アーチリブの鉛直軸まわりの断面二次モーメント， A_0 :片側アーチリブの断面積 I_b :横支材の鉛直軸まわり断面二次モーメントの1/2である．

$$A_w = \frac{12E}{G \left(\frac{a_1 B}{I_b} + \frac{2a_1^2}{I_0} \right)} \quad (1)$$

$$Pcr = Pcr_0 \frac{1}{1 + \frac{Pcr_0}{G A_w}} \quad (2) \quad Pcr_0 = \frac{\pi^2 E I_g}{(L/2)^2} \quad (3) \quad I_g = 2 I_0 + \frac{A_0 B^2}{2} \quad (4)$$

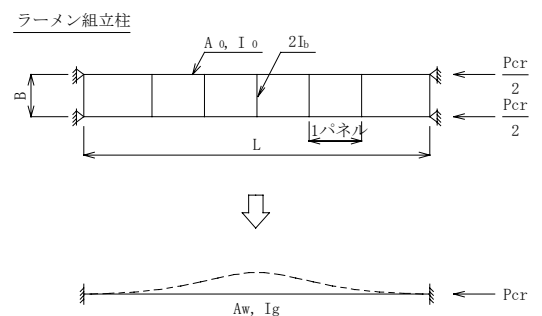


図1 ラーメン組立柱の座屈荷重の考え方

このように表すとラーメン組立柱は断面2次モーメント： I_g ，せん断断面積： A_w を持つ梁と等価（図1）となり，式(2)により座屈荷重が算出可能である．(2)式はせん断変形を考慮した座屈荷重を与えているが，ラーメン形式の組立柱ではせん断剛性が小さいため $G A_w \ll Pcr_0$ なので， $Pcr \approx G A_w$ とする事ができる．本検討ではこの式を適用し，妥当性を検討する．

3. 実橋解析結果 実橋の弾性固有値解析は全橋をモデル化した立体骨組モデルと，アーチリブ構面全体をモデル化した平面骨組モデル①，補剛桁より上方のアーチリブ構面をモデル化した平面骨組モデル②について行った．解析の対象とした実橋モデル及び立体骨組モデルの面外座屈モードを図2に示す．また各橋のせん断断面積，座屈軸力，面外有効座屈長を表1に示す．解析対象としたA橋はアーチリブ構面が寸胴の形式(L/B小)，B橋は細長い形式(L/B大)，C橋は上横構がある形式である．結果はモード形からも明らかだが，A橋は全体座屈（組立柱としての座屈），B，C橋は橋門構部座屈となっている．しかしA橋は全体的に座屈する形状を示すが，結局せん断変形の影響は橋門構部が最も大きくなるので，ここが弱点となることは変わらない．提案式(2)と解析結果を比較すると平面骨組モデル②については精度良く評価できるが，平面骨組モデル①については評価できていない．これは提案式は支点条件を完全固定としているが，実構造は補剛桁の下方のアーチリブにより弾性的に支持されているためと考えられる．有効座屈長の比較からは，3橋とも設計で考慮している有効座屈長（Le1）よりも立体弾性座屈解析から算出した有効座屈長 Le2 の方が短くなっており安

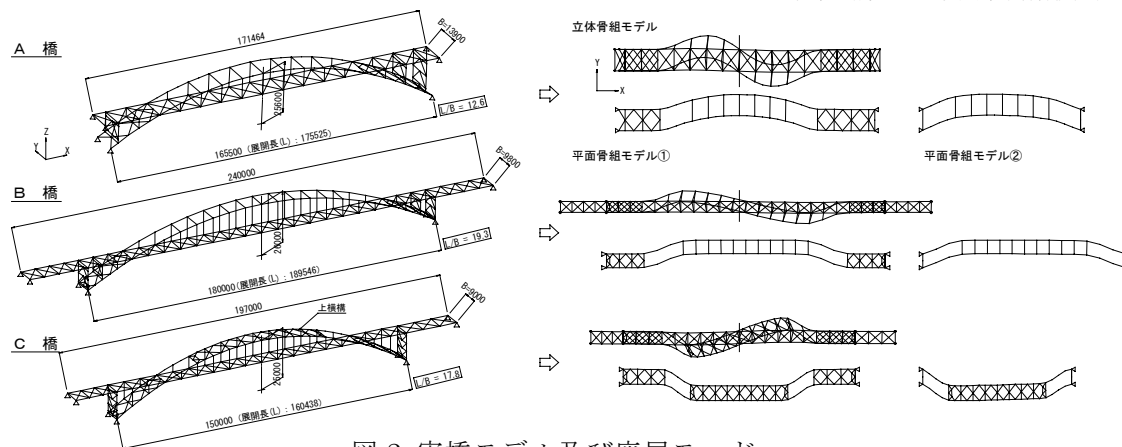


図2 実橋モデル及び座屈モード

表1 実橋の解析結果

		A 橋	B 橋	C 橋
せん断断面積 $A_w(m^2)$	橋門構部	0.00053	0.00026	0.00048
座屈軸力 $P_{cr}(tf)$	立体骨組モデル	17662	6800	9720
	平面骨組モデル①	9050	3225	4021
	平面骨組モデル②	5790	2309	3853
	式(2)	4337	2115	3915
面外有効 座屈長 $Le(m)$	局部座屈	17509	3973	6475
	設計値(Le_1)	22.403	26.724	17.693
	解析値(Le_2)	22.306	20.427	14.441
	Le_2/Le_1	0.996	0.764	0.816

全側の設計がされている。これはせん断変形によるパネルの面外座屈よりも、アーチリブ単材の座屈が先行することを示している。通常道路橋示方書では、中路式アーチ橋の場合アーチリブ全体の座屈安定性照査に用いる有効座屈長に補剛桁の影響を考慮して $\phi=1.0$ を乗じて座屈軸力を算出している。これは補剛桁の影響を考慮しないことを意味する。一方本解析結果では、立体骨組モデル（補剛桁有）と平面骨組モデル①（補剛桁無）との座屈軸力は立体解析結果の方が2倍程度大きくなった。これは下路式アーチ橋で特有の補剛桁による引き戻し効果が中路式においても生じている影響と考えられる。図2の座屈モードからも平面骨組モデルでは全体的に面外方向に座屈しているのに対し、立体解析モデルでは中央で拘束されたモードとなることから理解できる。よって道路橋示方書の規定は2程度の安全率を持つ規定となっているといえる。

4. **L/B の影響** 上路式アーチ橋において主構長（L）、主構間隔（B）比の大小によって全体座屈と局部座屈に座屈モードが変化した²⁾。本検討においてもA橋とB橋でこの影響について比較を試みたが結果的には座屈形態に大きな相違は見られなかった。これは①上路式アーチのようにL/Bが20を越えるような橋梁が少ない、②補剛桁より上部のアーチリブに着目するとB橋でL/Bは14程度である、③下路式アーチと同様に橋門構を有する等の理由によると考えられる。よって中路式アーチ橋はL/Bが座屈形態に与える影響は小さく、下路式アーチ橋と同様の座屈形態を示すといえる。

5. **横構の影響** A橋とC橋を比較すると、C橋は横構で補剛されている部分のアーチリブの面外変形は抑えられている。しかし全体として橋門構部で大きなせん断変形を生じ面外座屈している点で両者に差異は無い。よって橋門構の剛性を上げ、この部分の矩形ラーメン構造のせん断剛性を確保することが全体系の面外座屈荷重向上に大きく寄与するため、設計上重要といえる。

6. **まとめ** 本研究において得られた知見を以下に挙げる。

- ・ せん断変形を考慮した面外座屈簡易算定式(2)により、補剛桁上方のアーチリブ構面のみの面外座屈軸力は良い精度で把握できる。
- ・ 中路式アーチ橋のアーチリブの設計において、横支材（橋門構）の剛性が確保されていれば面外有効座屈長はL/B大小に関わらず支材間隔でよい。
- ・ 上路、中路、下路式アーチ橋の面外座屈形態は上路式と中路下路式に分類できる。
- ・ 道路橋示方書の中路式アーチ橋の全体面外座屈に関する規定は安全側の規定である。
- ・ 検討を行った全ての橋梁について橋門構部が弱点となるので、橋門構は十分な剛性を有する必要がある。

【参考文献】1) 佐野泰如，北村明彦，尾下里治：下路式アーチ橋の面外座屈に対する設計法の一提案，構造工学論文集，Vol. 46A, 2000. 3 2) 佐野泰如，尾下里治：上路式アーチ橋の面外座屈に対する設計法，横河ブリッジ技報，30号，2001。