

(例) 横河橋梁・設計部 正員 大森 邦雄

1. まえがき

道路示方書では、鋼アーチ橋は2次理論（タワミ理論、有限変形理論）によって設計することが規定されており、これに関する論文も多数発表されているが、ほとんどは橋の完成系での力学的な性状について述べたものであって、アーチの架設時に於ける非線形性について言及したものはあまり見かけない。これは、アーチでは一般に死荷重のような対称分布する荷重のもとでは、非線形性がほとんど現われないことによると考えられるが、長大なアーチ橋では架設時と完成時とは構造系が異なり、しかも架設時のそれは架設が進むにつれて数段階のステップを踏むのが一般である。したがって、特に路面の大きな縦断勾配のために、アーチの骨組線の形状が非対称であるような場合には、かなりの程度で非線形性が現われることが予想される。本文は、そのような場合に対処し、適正な製作キャンバーを得るための1資料とするため、実橋の諸元をもとにして架設時の変形量を2次理論によって計算した例題の報告である。

2. 計算方法と計算仮定

計算の対象としたアーチの構造諸元、荷重強度は実際に架設されたものを参考にして決めた。アーチの軸線は放物線であるが、左右のスプリング・ヒンジを結ぶ線が10パーセント傾斜している非対称な形状のものと、そうでないものの2種類とし、前者をケース・1、後者をケース・2とする。架設方法・順序はかなり一般的に行なわれている1点吊りによる斜吊り工法を想定したが、この場合、架設順序の節となる段階はアーチリブの閉合まで（斜吊りの最終状態）、斜吊り索の解放、補剛桁や床組み等の架設、完成系に床版や舗装を打設した状態であり、これらに番号を付してそれぞれステップ・1, 2, 3, 4とする。アーチの構造系としては、アーチリブは両端でヒンジ固定、補剛桁は両端で単純支持（両端可動）された上路式補剛アーチであって、最も基本的な構造形式を設定した。死荷重は全て等分布荷重として扱う。

上記のような補剛アーチに、逐次架設の各段階を追いながら1次理論（弾性理論、微小変形理論）および2次理論の両理論を適用して変形を計算し、比較検討した。計算には当社所有の任意形平面骨組構造解析、任意形平面骨組の有限変形解析のプログラムを使用した。なお、ステップ・4は完成系、すなわち補剛アーチであるが、補剛桁が単純支持形式の場合には弾性挙動は曲げ剛性がアーチリブと補剛桁のものの和であるような2・ヒンジアーチで近似できるので、ここでは非線形性に関して傾向を知るのが目的であることから、計算を簡略にするためステップ・4以降はそのような置換系で計算した。

3. 計算結果と考察

計算結果のデータから目につくことを箇条書きにまとめる。

その前に、ステップ・1（アーチリブの閉合まで）に於ける変形状について言及すると、斜吊りの最終状態に対してロープの伸び、エレクトリオンタワーのロッキングの影響も含めた全体系について変形を計算すると、それらの影響でアーチリブの節点変位は非常に大きくなるにもかかわらず、この段階での非線形性の現われ方は微小であった。これは、この状態では設計されたアーチリブの断面の大きさに比較して、まだ荷重が小さい段階にあることによると考えられる。また、製作キャンバーとしてはロープの伸びやタワーのロッキングによる分は見込む必要が無く、アーチリブ自身のもとの形状からの変形分を見込めばよく、これは全体系としての変位量に比べれば非常に小さい。したがって、ステップ・1までのキャンバー量は1次理論

で求めればよいものと考えられ、本文ではステップ・1については1次理論を適用して変形と断面力を計算することにし、以後の変形の比較検討ではアーチリブの閉合直後の状態から測った変形量によることとした。

イ. アーチの軸線形が非対称な場合と対称な場合とでは明きらかにタワミ形が異なり、前者では水平方向には全体として左方に移動し、鉛直変位は逆対称的な分布を呈する。これは、明きらかに左右の斜吊りローブの張力が異なることによる。

ロ. 軸線が対称形の場合には、1次、2次理論による計算結果の差異はほとんど現われないが、非対称な場合には両理論間の差異は相当大きく、特に水平変位と回転角変形に顕著である。各々の成分の変位の絶対量もさることながら、それらを合成して考えると全体的なタワミ形がかなり異なることがうかがえる。また、これらの差異はステップが進むにつれて逐次広がる傾向にある。

1次および2次両理論間の差異について考察するため、変位と回転角について各ステップ間の差（増分）を調べてみた。これらの増分は、1次理論について言えば重ね合せの原理によつて、単に次のステップに移るときに付加される死荷重による変形量そのものであるが、2次理論では幾何学的非線形性によつて、単に付加荷重のみならず必ず先行荷重による内部応力状態とそれによる変形後の骨組形状に影響される。

それによると、

イ. 1次理論では各ステップ間の各々の増分は、水平変位および回転角についてはほぼ逆対称分布、鉛直変位はほぼ対称分布というように、理論上当然の結果が得られたが、2次理論に於けるそれら増分の分布のしかたは1次理論の場合とは大きく異なり、また増分の絶対量について見てもステップを追うごとに2次理論の方が大きくなるという結果が得られ、前述の幾何学的非線形性の特徴を示している。

ロ. 軸線が非対称形の場合について、架設中に段階的に作用する死荷重の合計を等分布荷重として、完成系のアーチに一挙に載荷してみると、アーチの軸線は非対称であつても（極端な不整形ではない）、非対称分布する初期応力が入っていなければ、荷重が死荷重のように対称でほぼ等分布に近いようなものであれば、両理論による結果にほとんど差は現われず、また変形や断面力の分布のしかたも対称形アーチのそれと実質的な差は無いことが知れる。一方、軸線が非対称な場合の計算で非対称な荷重はステップ・2のローブの解放荷重のみである（右側が大きい）。したがつて、この場合の1連の計算を通じて、この荷重の非対称性が非線形性に対する最も支配的な要因であると言える。

ハ. 斜吊りローブの張力が非対称であることは、アーチリブが閉合した状態での内部応力の分布も非対称であることを意味するので、アーチにとっては非対称性が2重に作用することになる。

ニ. ローブ解放荷重のアンバランスが支配的であることは、ステップ・3以降の荷重が全て対称分布しているにもかかわらず、2次理論では水平変位の増分は常にアーチを左方へ移動させようとする方向に現われることから、最も直観的に理解される。また、非対称性の影響は後続荷重が順次付加されるにしたがつて、増幅されて現われる傾向にあり、最も大きな荷重が付加されるステップ・3から4へ移る段階で両理論間の差異が特に大きい。

軸線が非対称な場合を例にとつて、等分布活荷重をスパンの半分まで偏載した状態の曲げモーメントを計算してみた。このとき、先行状態となる死荷重による内部応力状態のインプットをいくつか変えてみた。すなわち、1つは実際の架設順序にしたがつてははじめから2次理論で計算を積み上げたものであり、1つは架設時の計算は1次理論で行なつて、その結果を初期状態として活荷重を付加して2次理論を適用したものであり、残りは初期応力が無い最終系に全死荷重と活荷重を一挙に載荷したものである。その結果、最終の合計曲げモーメントとしては、はじめの死荷重状態での曲げモーメントの分程度の差しかなく、したがつて活荷重を載せたことによる増分について見るとほとんど差が現われてこない。これは、アーチでは活荷重による曲げモーメントが卓越するので、死荷重による先行状態があまり影響しないためと考えられる。

一般に、アーチの死荷重による曲げモーメントは小さいことを考えると、ただ1つの計算例でしかも特定の1つの載荷状態での結果であるため速断はできないが、この結果は断面設計に対する2次理論の適用のしかたについて、示唆的である。

4. 結 論

ある特定の構造物に対する1計算例であるため十分とは言えないが、上記考察結果から定性的な傾向としては下記のようなことが言えると考えられる。

イ. 軸線の形状が非対称なアーチ橋に斜吊り工法を適用する場合、左右の斜吊りロープの張力と角度を同じに保つことは一般に不可能である。また、対称な形のアーチ橋であつても架設地点の地形によつては、ロープの張り方が左右非対称になることもある。このような場合には、ロープの解放荷重のアンバランスによつて、架設時の変形はかなり不整形なものとなる。したがつて、製作キャンパーとしては水平変位についても考慮する必要がある。

ロ. 上記の場合、初期応力とロープ解放荷重の非対称性によつて、かなりの程度で非線形性が現われることがあり、1次理論で架設時の変形を計算したのでは不十分な場合があるので注意すべきである。

ハ. 非線形性の現われ方は、構造形式、剛性、荷重などによつて支配されるので一概には言えないが、一般にスパンが長大化すれば相対的に撓みやすくなる傾向にあることは事実であるので、スパンの大きさ、架設中の構造系（特に非対称性要素）、架設工法を目安として架設中の変形の計算方法を決める必要がある。

ニ. 特に高張力鋼を使用する場合には、架設中の非線形性について留意すべきである。何故ならば、道示では応力照査は2次理論によらなければならないが、タワミの照査は1次理論によつてよいからである。

ホ. 架設中重要なことは回転角であつて、回転角のごくわずかな誤差は架設が進むにつれて逐次厳しく効いて来る。架設中これに関して頼りになるのは現場継手のボルト孔だけである。したがつて、キャンパーと言へば鉛直タワミの絶対量のみを第1義的に考えがちであるが、アーチ橋の場合には全体としてのタワミ形にも留意する必要があると考えられる。前節の計算結果で、回転角と水平変位に両理論間の差異が大きくなったことは重要である。

以上が製作キャンパーを計算する場合の注意事項かと考えられるが、架設計画に当つては十分設計側と連絡を持つて、計算仮定と実際の架設々備の配置や作業手順との間に食い違いが無いようにすべきである。また、前節の計算結果から最も重要なのはロープの張力であり、したがつて架設に当つてはロープの張力管理とアーチリブの節点の動きの管理は慎重であるべきである。

ステップ・3およびステップ4に移る時に付加される等分布死荷重が、スパン中央を境にして左右で5パーセントだけ差がある場合（合計は対称分布の場合と同じ）について、2次理論によつて変形を計算してみた。その結果、わずかの非対称性によつて変形のようにすがかなり大きく変わることが知られ、各段階でのわずかな撓乱要因が非線形性によつて、予想以上の結果をもたらすことがあることが予想できる。また、ステップ・4の付加荷重は主として床版・舗装であるから、床版の打設順序の重要性を示唆している。架設時に段階的に構造系が変化する場合には、構造系が変わるごとに架設誤差の生じる機会があり、非線形性が顕著である場合には、誤差は相乗的に増加する傾向にあることは、前節の1連の計算結果から予想できる。

5. あとがき

アーチ橋の架設時の変形性状を1つの例題によって追跡し、主として架設中の非線形性についてその傾向をつかむことができた。また、特に斜吊りロープの張力の重要性も指摘することができた。

しかし、本文の報告は1計算例としての結果にすぎず、また架設計算はケースバイケースで行なうべき性質のものであるから、この結果は直ちに他の橋に当てはまるものではない。したがって、本文が今後そのような計算を行なう場合の1つの参考資料となれば、筆者望外の幸わせである。

なお、計算に当ってはプログラムの作成者である当社開発室・主任開発員・原田康夫氏に何かとお世話になった。末筆ながら深謝する次第である。

参考文献

1. 榊原、小山、御牧、下石坂、荒井、「前川渡大橋上部工の概要」土木学会誌、1970年4月号
2. 額川、妹尾、「第1岩戸川橋の設計」横河橋梁技報第2号、1972年11月
3. 前田、林、伊奈、神谷、「アーチ橋の大変形挙動に関する一考察」第20回橋梁・構造工学研究発表会、1973年11月