

自然現象における生物力学の対比よりみた橋梁の

進歩傾向に関する理論的一考察

正 員 中 村 作太郎 *

1. 緒 言

橋梁が古来、人類の文化発達史と共にどのように進歩して来ているかを深く観察すると、実に興味津々たるものがある。自然自然の岩石の築造が、石造アーチ橋の造成に利用されて来たことは周知の事実であるが、吊橋の原型が藤蔓や蔦蔓の植物の張力にたっており、また、桁橋の原型が樹木の暴風時における小川への自然横架に暗示を得たものであるといわれている。

また、竹の張力に強い性質を利用して、古代民族の架けた竹の橋¹⁾も現存しているし、英国人の想像図として歴史的に著名なモンキーブリッジ²⁾もまた吊橋の原型と考えられるのである。

原始時代の人類は、直感的にある形状のアーチ構造は圧縮力のみ受け、非常に大きな耐圧力を有していることに気付いたし、また吊橋構造は引張力にさえ耐えることが出来れば安全であるという至極簡単な考えに逸速く感

殆んどみられないことから明らかであろう。桁橋の初期は主として木桁橋にのみ発達したのは、コンクリートや鉄材の出現が遙かに遅く、石材の詰合せで水平な桁橋の架設が甚だしく危険なことを古代人はよく知っていたからであろう。

橋梁及びその構造法に関する研究は、その後歴史の変遷を経て、最近特に独自の進歩を遂げつつあるが、その一方破壊事故なども相当数見られるので、その発達方向が果して適切であるかどうか、自然環境に適合しているかどうか再検討を要する時機に立到って来ているように思う。

この意味において、著者は自然界における生物の体構造とその力学的特性が、自然の諸力に対しどのように対応しつつあるかを科学的に観察・究明することにより、自然現象に適合した橋梁構造体及びその構造法の理論について考察を加え、橋梁の進歩傾向に対する批判と見解について論述する。

2. 樹木と高層橋脚、吊橋の塔などの対比

最近、高層橋脚や吊橋の塔などの振動は、計測器及び計測技術の進歩によりよく取調べられているが、樹木の振動は案外等閑に付されているようである。しかし古い大樹は地震や風によって伸々倒壊することが少なく、自然現象に適合した柔構造としての特性を十二分に発揮しているようである。それは長年月に渡る自然の摂理により、根は充分に四方に広く張り、その深さも樹の高さに比例して増し、地震や大風に対し充分抵抗出来るように生育して行く、生物力学の理論に適った植物特有の本能によるものである。

いま、大樹における大風の際の樹枝の運動³⁾を観察すると、風によって大枝・小枝の動揺は、各々その振動数を異にすると共に振動の位相も違うから、A枝が右に動けばB枝は左に動くというようになるので、大樹は無数の枝の運動により全体として一方向にだけ曲げられることなく、非常に倒れ難いという興味ある自然の摂理に気が付くのである。

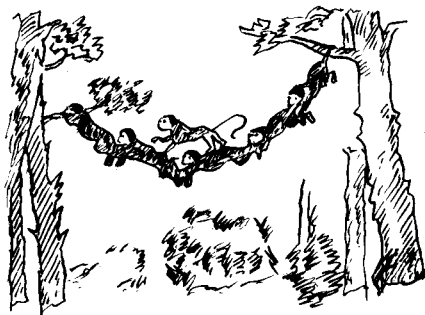


図-1 モンキーブリッジ(想像図)

付いたものと思われる。しかし水平な桁橋構造の曲げ現象の不可解さについてはかなり疑問を持っていたものと考えられる。

それは、水平な桁橋構造の技術的発達が比較的遅れていることと、原始時代及び古代に造られた著名な桁橋が

* 室蘭工業大学教授



図-2 樹木の形態

我国古来の五重塔が⁴⁾が耐震的な柔構造物の代表的な建物として高く評価されている理由としては、1) 塔の自己振動周期が他の一般の構造物に比較して長いこと、2) 塔は決して弱い建物ではなく、相当の水平力に抵抗出来ること、3) 塔はその安定を失うまでの変形の限界が大きいものであること、4) 相当な減衰の性質を有していること、などを挙げる事が出来ると思う。

丁度大樹が大きな揺れに耐え、破壊力を減殺出来る柔構造体のよい見本であるのと対比出来、頗る興味を唆るところである。

高層橋脚や吊橋の塔の水平変位の解析については、最近盛んに研究されつつあるが、従来より用いられている弾性解析が多く、今後は特に柔構造体としての有限変形または大変形理論による究明が極めて重要であると思う。

また、大樹の揺れと対比し、破壊力を減殺出来る柔構造体としての風や地震力による動力学的研究が必至なものとなって来るのである。勿論、この場合基礎の堅固なることが当然条件であり、軟弱地盤の場合にはそれ相当の本格的基礎工事が必要であり、充分な深さを要する。

3. 麦稈、竹稈などの中空及び節の力学的意識と橋梁における中空閉断面構造体及び隔板の効果との対比

種々の植物³⁾を見ると、枝・幹・茎に中空のものが多く、その断面の多くは円形や四角形・三角形・五角形などの閉合断面よりなっていることに気付くと思う。

竹・麦のほか、大根・菜種・蚕豆など中空でないものでも、中は高低軟らかな髓で充たされている。動物の骨なども内部は流動体よりなっている。

植物の幹茎の断面形は多く円形であるが、蚕豆は四角形、紙草は三角形、糸瓜は五角形である。

自重及び風雪荷重に耐えるためには、どのような断面形が最適であるか、極めて興味ある問題である。

図-3は断面積等しく同材料にて作った4種類すなわち、円形充実断面、正方形充実断面、円形中空断面、正方形中空断面の片持梁の自由端に集中荷重を載荷した場合の自由端のたわみ傾向の比較図³⁾であり、正方形中

空断面・円形中空断面の有利なことも示している。

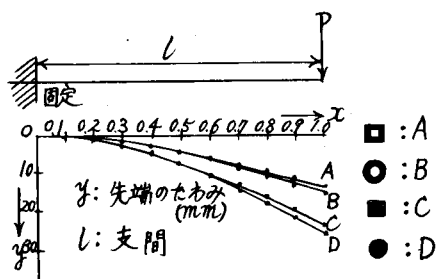


図-3 断面形の異なる片持ばりのたわみ

また、竹の節のところには横隔壁が設けられていて風による曲げモーメントに抵抗できるようになっており、根本に近いほど太く、節は密になっている。

これは曲げモーメントが下方ほど大きくなるので、それに耐えるよう自然の摂理により生育するもので、全く力学の理論に合致している。

最近、橋梁における鋼鉄及び鉄筋コンクリート構造体に箱形断面、円管断面が盛んに用いられるようになったこととそれに付随した隔板の効果⁶⁾が力学的に論じられるようになったことは当然のことであり、天然自然の動植物の体構造においてはすでに地球上の生物の歴史と共に各所に見られるところである。

4. 放散虫類の骨格と立体トラス構造の対比

自然現象における構造体の組成をトラスユニットによって分割して行くという考え方は、古代よりあったもので現在でもこの問題は素粒子に関する物理学の分野において盛んに追求されている。

このことを立体トラス構造^{7), 8)}に応用すれば、それを形造る三角形のトラスユニットは物質を構成する原子と同じようにみなしてよい筈である。

いま、等しい正多角形で平面を隙間なく覆うことの出来るものを挙げて見れば、正三角形・正方形・正六角形である。この中で正三角形は図形の原子ともいわれるものであるが、数を数えるのには正方形が最も便利である。これらが線材の梁によって構成されれば三角格子・四角格子・六角格子となる。これを平面トラスで組合わせれば一種の立体トラスが出来上がる。

また、最初から格子点を立体的に埋めるようなトラスを考えることにより立体トラス構造を造り上げて見る。この考え方は結晶学的であり、物質構造の構成を追求す

る場合に類似している。この場合、三角格子を立体とした立体トラスと四角格子を基本とした立体トラスが出来る。

これらは何れも空間を等しい球で埋めることにより出来る立体格子の配列法であり、この場合最も稠密度の高い球配列を採用するものとする。

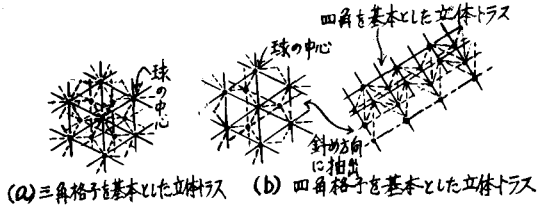


図-4 空間を等しい球で埋めることによって出来る立体格子トラス

図-4は三角格子を立体とした立体トラスと四角格子を基本とした立体トラスの配列を示したものである。

更にこれらの配列を拡張すれば任意の立体曲面の構成も可能であり、また自然現象における生物の体構造の組織にも科学を超越した創造の世界が見られる。

平面的なものとしては、プランクトンの一種である珪藻を顕微鏡で覗いて見ると、それは円に近いもので埋めつくされた美しい模様を呈している。

立体的なものとしては、図-5に示したように、ドイツのヘッケル氏(1834~1919)が放散虫類の骨格^{7),8)}を描いたものの中に、正多面体に近い規則正しい図形が見られ非常に驚異的である。立体的な構成には、五角形

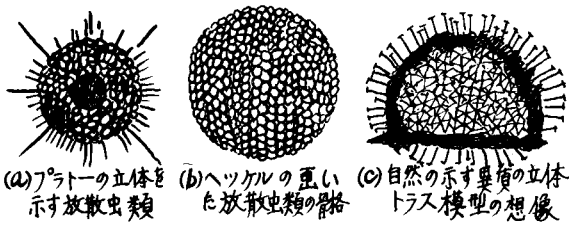


図-5 放散虫類の形態と立体トラス模型への構想

ユニットが必要であり、平面構造では、六角形ユニットが主体をなしていることが、五角形ユニットを有するアイリスの花や六角形ユニットを有する結晶からも観察されるところであり、非常に興味深いものを感じる。

このように、立体トラスの理想的構成は、放散虫類の骨格の組織図形に見られるような自然の摂理により、現代科学を超越した暗示を与えられている。

自然現象における生物の体構造と対比し、今後の新し

い橋梁形式には当然立体トラスの科学的構成法の研究が期待されるところである。その意味において、現在甲いられているトラス橋の構成は果して万全であろうか、研究の余地があるものと思う。

5. 蜘蛛の巣の伸張とトラス系橋梁の有限変形理論との対比

蜘蛛の巣にかかった蜂・あぶなどの昆虫類が網を破ろうと騒いでも仲々網は破れないのをよく見受けるところである。動荷重を受けた蜘蛛の巣の網は振動し、大きな変形を生ずるが、仲々壊れないのはなぜであろうか、極めて興味ある問題である。これを解明するには、変形をともし柔構造トラスに関する理論的ならびに実験的研究が是非必要である。

L・Koch 氏の報告³⁾によれば、鬼蜘蛛の尻より1本の糸を新しく引張り出し、10.71cmの長さだけ切り取り、これを垂直にぶら下げ、これに1.6gの錘りをつけて引き伸ばすと、糸は非常によく伸び23.97cmにもなったと述べられている。これによれば、2倍以上の長さになったわけであるが、1.6gの錘りを取り外すと、蜘蛛の糸は元の長さには縮まらないで、17.99cmとなり、時間の経過と共に除々に縮みを増し、17.61cmにて縮みは停止してしまった。すなわち、弾性餘効の現象を呈したわけである。これを更に前と同一の重さ1.6gで引張ると、24.03cmにまで伸び、そのまま捨ておくと、24.11cmまで伸び、更に荷重を取り去ると、長さは18.59cmまで縮んだと報告されている。

このように、変形量の大きな網目構造の解析理論は、従来の微小変形による弾性理論では勿論不充分であり、大変形理論または有限変形理論⁹⁾によらなければならない。

例えば、長径間のトラス系橋梁や吊橋のように変形量の大きな構造体には、有限変形理論または大変形理論を採用すべきであり、蜘蛛の巣の自然現象における暗示よりしても、それが正当なる考え方であると思う。

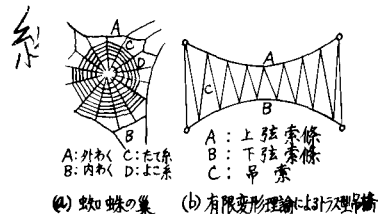


図-6 蜘蛛の巣の形態と有限変形のトラス型吊橋

長径間の吊橋の解析理論に、有限変形理論または大変形理論を採用するとして考察した場合、従来の慣習から脱却し、補剛構桁形式を取止めて、図一六に示すような上・下弦材共索条よりなり、吊材には斜めの索を用いたトラス形式の新型吊橋を採用することも頗る有望であると思う。

勿論、このような新型橋梁を採用するためには、数多くの理論的ならびに実験的研究が不可欠であり、今後における研究課題の一つと考える。

6. 昆虫の羽根の繊維と斜張橋の吊索群の対比

最近、世界各国、特に西ドイツに斜張橋¹⁰⁾が次々に架設せられ、その独特の構造形態、風貌から、橋梁に関心をもつ者の注意をひいている。現在甲いられている斜張橋の形態が出現したのは、勿論そう古くはないけれども、歴史的に考えてみると、その原型の構想は普通の吊橋と並んで非常に古くから存在していたらしい。

その原理は非常に単純明快であり、長い支間を越すのに桁だけの曲げ剛性では足りないので、途中にて索で吊ってこれを助けたというだけのものである。

1950年以降になって、全世界に渡り斜張橋の架設が著しく増加し、しかも大型化しつつある。これはロックドコイルや平行素線索など引張材の材料学的進歩、電子計算機の駆使による精密解析の可能になったこと及び大径間橋梁に適合しその美観が近代感覚を満足出来ることなどの要因によるものと思う。

いま、その素晴らしい美観を感じる吊索群の配列について、自然界における昆虫の羽根の繊維配列¹¹⁾と比較し、その相似性について考えて見る。

昆虫の中、直翅目・とんぼ目・かげろう目・脈翅目・長翅目・毛翅目・半翅目・鱗翅目・半翅目・かわげら目・革

翅目・膜翅目・双翅目に属するものの羽根には、繊維が張りめぐらされており、その配列は多種多様であるが、大きく分けると樹枝状のものと網目状のものになるようである。

どちらも、粗・細の模様型及び直線・曲線型のものに区別出来る。

蟬の羽根の繊維は¹¹⁾は、粗網樹枝状を呈し、割合に太目のものよりなっている。最小のちつちぜみ(翅端までの長さ28mm)より最大のパルネオのまぜみ(翅端までの長さ100mm余)に至るまで、その羽根の繊維の配列はほぼ似かよっており、繊維が羽根の膜に比べくっきりしている。

とんぼ類の羽根の繊維は、殆んど曲線細網状の配列をしているが、くろすじへびとんぼの場合は例外で、粗網樹枝状を呈している。

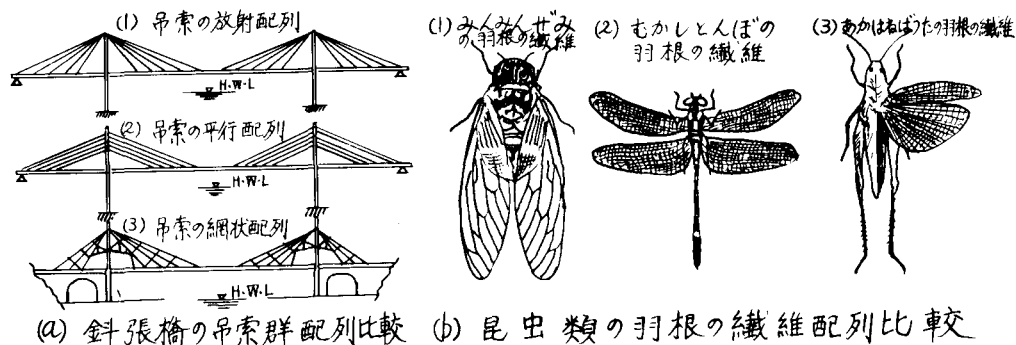
また、かわげら、べっこうびわはごろも・したべにはごろもなどの羽根の繊維は、曲線細網状を呈し、美しい色彩をしているものが多い。

直翅目のつだななふし、とびななふし、たいわんおおばった・かわらばった・あかねばった・おおかまきり・ひめかまきり・はらびろかまきりなどの羽根の繊維は、直線細網状を呈し、非常に美しいものが多い。

そこから、はち類の羽根の繊維は、粗網樹枝状を呈しているが、体長も小さいので余り目立たない存在である。

斜張橋の吊索群の配列には、現在余り多くの種類のものが用いられていないが、上述の昆虫類の羽根の繊維の配列に暗示を得、今後色々の配列について研究して見るのも興味ある問題であると思う。

図一七は、昆虫の羽根の繊維と斜張橋の吊索群の配列の比較の例を2、3示したものである。



図一七 斜張橋の吊索群と昆虫類の羽根の繊維との配列比較

7. 巨大な獣類・鳥類と大型剛節橋梁との対比

前世界に居住していたといわれている巨大な獣類及び鳥類、すなわち、白亜紀の恐竜・ジュラ紀の翼竜の体構造¹¹⁾は、想像図から判断すると、力学的安定性が非常によいほか、剛度も極めて高く、外力に対しては非常に大きな耐力¹²⁾を保有していたものと思う。

これらの体構造から暗示を得、図-8及び図-9に示すような、長大径間橋梁としての剛節構造よりなる突行式撃拱橋及びバランスド拱橋を選び、それぞれ、恐竜及び翼竜と対比・考察してみることにする。

剛節構造よりなる突行式撃拱橋・バランスド拱橋共、恐竜・翼竜に類似し、力学的安定性・剛度・耐力共非常に優れていると思う。図-8、図-9におけるそれぞれの対比は、大変興味深く、形状・力の分布などの点で似かよったところがあるものと判断出来る。

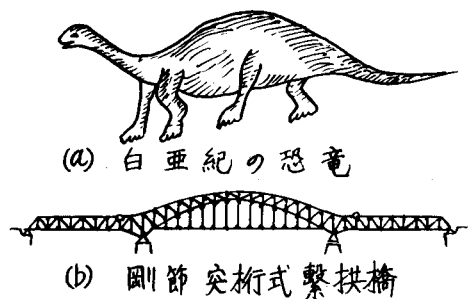


図-8 白亜紀の恐竜と剛節突行式撃拱橋の比較

問題点は、温度変化の影響による応力と変形についてであろう。

中世代に1億6千7百万年に渡って動物の世界に君臨した恐竜が白亜紀の終りに突然全滅したのはなぜか、そ

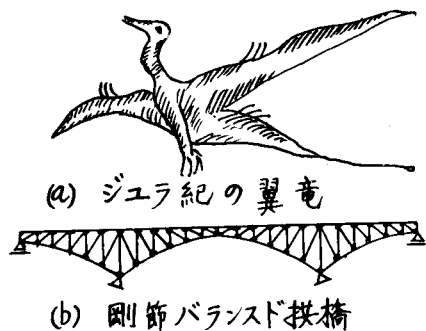


図-9 ジュラ紀の翼竜と剛節バランスド拱橋の比較

の原因について、ハーバード大学のロバート・バッカー氏が科学誌ネイチャーに新学説として発表した。それによると恐竜は他の爬虫類と違って体温を一定に保つため、自分で体温調節機能を有していたけれども、他の一般の爬虫類より進化していて、体も巨大であり、食物も哺乳類の場合に類似していたため、かえって、白亜紀末期に突然気温が下がった時、その体の巨大さ、体毛のないことなどの要因が重なって絶滅したのだと指摘している。

橋梁構造としての耐久年限は恐竜などと異なりそう長いものではないとしても、巨大構造・剛節構造である以上、やはり温度の影響について、充分なる研究を行なう必要があるものと思う。恐竜の絶滅した原因は、非常に興味深く橋梁への対比として参考となろう。

8. 結 言

現在の橋梁構造が生み出されるまでには、数重なる歴史の変遷を経て来ている。特に20世紀に入ってから橋梁構造は、構造力学の発達・高張力鋼の進歩・電子計算機の発達・プレストレスその他の各種工法及び溶接技術の進歩などにより、目まぐるしい発達を遂げている。

電子計算機の利用による構造解析の発達は益々拡張されると思うが、高張力鋼の強度増進もまだまだ伸びると判断されるので、断面の小さな橋梁時代が到来するものと推定される。しかるに、弾性係数を高めることは、金属工学の分野では、非常に困難とされているので、長大径間橋梁の要望と相俟って、益々変形量の大きな橋梁が架設されるようになるであろう。

自然界における生物力学の対比より考えても、すでに論述した通り、有限変形理論または大変形理論の解析⁹⁾が必至のものとなるであろう。

また、自然界における生物の体構造と、橋梁構造を比較する際に、特に注意しなければならない点¹²⁾を挙げて見る。

- 1) 自然界における生物の体構造と人工による橋梁構造との生物・無生物の差異から来る相違点の究明。
- 2) 自然現象を共に受ける生物の体構造と橋梁構造との共通点及び相似点の究明。

最近における橋梁の進歩傾向を静かに観察するに、電子計算機の急速なる発達・構造力学の解析学的進歩により、各種の橋梁についての精密解析や従来不可能とされていた複雑極まりない構造計算を可能ならしめることが出来た。

しかし、真の発達は今後課せられており、自然現象に合致した新しい橋梁構造の画期的発明が、卓越した創造力と工夫によって造り上げられなければならない。自

然界における生物力学の対比の必要性はここに生ずるわけであり、温度変化を考えた柔・剛構造の比較研究なども必至と思う。

参 考 文 献

- 1) 成瀬勝武：橋、河出書房、1941
- 2) J. A. L. Waddell : *Bridge Engineering*
Vol. 1, John Wiley & Sons, 1916
- 3) 鈴木清太郎：農業物理学、養賢堂、1949
- 4) 武藤清：カラムNo 10、八幡製鉄、1964
- 5) 近藤泰夫他委員：防災ハンドブック、技報堂、1964
- 6) 奥村敏恵：坂井藤一：土木学会論文報告集No 190、
1971
- 7) 坪井善勝・斉藤公男：カラムNo 2、八幡製鉄、1962
- 8) 北村弘：カラムNo 18、八幡製鉄、1966
- 9) 川田忠樹：長径間吊橋の理論と計算、橋梁編纂会、
1969
- 10) 成瀬輝男他2名：カラムNo 35、八幡製鉄、1970
- 11) 下中邦彦：国民百科事典 3、4、5、平凡社、1967
- 12) 中村作太郎：農業土木学会北海道支部講演会要旨
1972