

I-21 構造力学の発達動向と土木構造物への応用について

専修大学北海道短期大学 正員 中村作太郎

1. まえがき

土木構造物の築造された歴史は古く、古代・原始時代にさかのぼるが、構造力学が学問として大系づけられたのは18世紀以後であつてきわめて新しい。しかし最近著しい発達を遂げつつあり、構造物への応用面においても素晴らしいものがある。応力解析方法として電子計算機が利用されるようになったことと、それに相応した数学的手法の登場して来たことであろう。もちろん構造物の設計・施工の実際面と理論解析面とのくい違いや仮定の不十分さ、構造法の不完備さによる色々な問題点が存在するので、これらを克服して行くように努力しなければならない。

そこで著者は構造力学の史的変遷とその発達の動向を論述し、各種の土木構造物への応用について常々考えつつあることの一端を述べ、自然の力にさからわぬ手法を考えながら構造力学の応用を展開して見ようと試みる。

2. 構造力学の史的変遷とその発達動向^{1)~4)}

構造力学の本格的な発達は1500年ころからであり、学問的大系が樹立されるようになったのは18世紀以後である。しかし構造力学の基本をなす最初の数学と最古の力学を考えたのはエジプト人であり、いまから約5200年前のことである。この時代における力学的発達を探る資料はきわめて少なく、三角法や数学に関する発達の状況が記録に残されているに過ぎない。この時代を構造力学の創始時代と呼んでいるが、構造力学が如何に数学と関連の深いものであるかを知るためには非常に重要な記録といえよう。ナイル川の右岸カイロから西方の沙はく地帯に沢山のピラミッドが現存しており、四辺形基底、三角形側面の五面角錐の石造建造物が紀元前3000年にほとんど狂いなく完成された事実と天文学および数学の知識が用いられていることには驚嘆するよりない。

その後、アルキメデス(287~212 B.C)よりガリレオ・ガリライ(1564~1642)までの時代には、レオナルド・ダ・ビンチ、シモン・ステパンのほか沢山の学者が輩出し、梁に関する色々な問題を取扱っている。アルキメデスはいまから2230年位昔において、「2点で支えた単純梁の反力を見出す方法」の法則を与えているし、レオナルド・ダ・ビンチ(1452~1519)は梁の張力や圧力についての実験をし、物体の破壊荷重を決める方法を発表したほか、力のモーメントに関する釣合いの条件を定めている。ガリレオ・ガリライは「安定問題」を主体として物体の弾性変形等に数々の業績を残している。次に、ロバート・フック(1635~1703)よりミユツシエンブレック(1692~1761)の時代における構造力学に関する研究を行なつた学者は非常に多く輩出している。ロバート・フックは弾性力学の基礎を築いた学者であり、フランスのマリオットは木材やガラスによる数多くの実験を1680年に行なっている。そのほか、バリニオン(1654~1722)、ポーバン(1644~1706)、ベルヌーリ(1654~1705)、ペリドール(1697~1761)、レオムール(1683~1757)等の数多くの学者により材料強弱学の実験が行なわれた。ミユツシエンブレックは1729年に材料の抵抗に関する論文をラテン語で発表したことで有名である。次に、オイラー(1707~1783)からクーロン(1736~1806)の間の時代には、振動計算、弾性曲線、柱の力学等に関する論文が、オイラーを初めとしてラグランジ(1736~1813)、ジョーン・ベルヌーリ、ダニエル・ベルヌーリ、ジョーンの孫のジェームス・ベルヌーリ等により弾性力学として研究発表されているが、特別にベルヌーリ一家の弾性学研究は著名である

。クーロンは土圧力学で有名であるが、材料力学に関する研究も数多く行なっており、各種の論文を発表している。次の時代としては、トーマス・ヤング（1773～1829）よりポアソン（1781～1840）およびナビール（1785～1836）の期間を挙げることが出来ると思う。

トーマス・ヤングは弾性係数の研究者として著名であるが、ソフィー・ジェルメイン（1776～1831）、トレツドゴールド（1788～1829）、サバー（1791～1841）、コーシー（1789～1857）、ホジキンソン（1789～1861）、ラメー（1795～1870）、クラペロン（1799～1864）、ゲルトナー（1756～1832）、ピカー（1786～1861）、ノイマン（1798～1895）、モラン（1795～1880）、ジュアーメル（1797～1872）、グリーン（1793～1841）等の研究者・学者が輩出し、弾性力学・材料強弱学の研究を行なつた。

ポアソンは弾性力学に関する沢山の研究論文を発表しているし、ナビールは近世における弾性体理論の創始者であり、やはり数多くの弾性力学問題を取扱っている。その中でも著名なものは、「弾性体の釣合いならびに運動に関する法則について」であり、/827年に発表している。その後、サン・ブナン（1797～1886）とランキン（1820～1872）の時代と呼ぶことが出来る構造力学の弾性学的にらんとした時代である。サン・ブナンは「Torsion に関する種々の研究結果」と題する論文を/853年に発表し、また「弾性の分布とわん曲その他」と題し、/854～/863年に紀要に発表している。そのほかにも「Impuls およびPlasticity に関する研究」を/864～/882年間に業績として残している。また、ウエルトハイム（1815～1861）、マクスウエル（1831～1879）、ポンセレー（1788～1867）、ブシネスク（1842～1929）等が輩出し、金属の弾性に関する研究および光弾性学の研究と弾性固体の釣合いに関する研究、伸長・圧縮と破壊に対するPrism の抵抗に関する原則と注意についての研究、衝撃に関する理論的研究等をそれぞれ行ない、研究発表も試みている。そのほか数え切れないほど多数の研究者が輩出している。

次に、カステリア（1847～1884）、モール（1835～1918）、ミューレル・プレスロー（1851～1925）、ロード・レーレー（1842～1919）、フェツプル（1854～1924）、テツトメヤー（1850～1965）、ウエーレル（1819～1914）、ラブ（1863～1940）等の活躍した近世における構造力学の発達・進展には目覚ましいものがある。すなわち、近世においては物理学で取扱っていた弾性論が工学的方向へと転換され、各種の構造工学的問題まで取扱うようになって来た。例えば、座屈問題・振動工学問題・安定と不安定に関する釣合い問題・回転円板の問題・疲労現象の問題・回転体のねじり問題・剛結理論問題等が広く展開されるようになったし、また原理・法則等が次々に提案されて定理の大系化の基礎が確立された。

上述の進歩・発展が基本となり、近代および現代における構造力学の発達振りには驚くべきものがある。その傾向としては、電子計算機の発達により近代構造解析の方法に一大変転があり、構造力学の内容も著しく豊富になりつつある。/862年にクレブツシュはデイスプレーシメント法を創設し、/864年にマックスウエルはデイスプレーシメント法と双壁をなすフオース法を提案した。また/874年にモールは、梁のたわみを求めるのにマックスウエル法を用いたほか、クレブツシュの方法をトラスの二次応力解析に応用した。/886年にミューレル・プレスローはフオース法を技術的問題に応用し、/94年にベンディクセンはデイスプレーシメント法をも技術的な問題へ応用し、/926年にはオステンフェルドがフオース法とデイスプレーシメント法とは同一の基本原理に基づいていることを、コンプレメンタリー・エネルギー法によつて説明した。

上述せる理論解析はほとんどドイツ系の研究者によつて発展させられたもので、英国系の技術者は理論的解析の応用については無関心で、主として近似解析法に熱中した。その結果、/932年にハーデイ・クロツスは骨組構造解析に関するクロツス法を創設した。この計算方法はデイスプレーシメント法

を基礎として応用されたものである。1935年にサウシウエルはクロツス法を一般化したリラクゼーション法を創始し、1940年にエフセンはオステンフェルドの考え方を拡張し、フオース法とデイスプレーシメント法をミックスした方法を考案した。

電子計算機利用の効果を高めたものに、マトリックス法の登場があり、1934年にデユンカンが飛行機のフラッター現象をマトリックスを使つて解析し、1937年にはフレーザーとデユンカンが力学問題にマトリックスを用いて解析し、1944年にクロンは電気回路理論におけるマトリックスとテンソルのテクニクを骨組の構造解析に応用し、1947年にジエンキンスはマトリックス解析法に本格的に取り組んだ最初の人で、シエル構造の解析にマトリックスを応用したことで有名である。また1954年にアルギリスとケルセイはマトリックスの更に一般的応用研究を行なつたし、1955年にヘンデルソンとピックレイはマトリックスの利用により理論解析へのチェック手段にしようと試みた。そのほか1959年にモリスは骨組解析のフオース法に対しマトリックス法を応用し、ピン結合トラスの解析計算に試みようと考えたし、1954年にリベスレイはステイフネス法による一般骨組構造の解析に対し、実用的なコンピュータープログラムを開発し、アルギリスは1958年に弾性構造物解析の発表史を書いた。1960年に入ると、マトリックス解析法とコンピューターの利用は標準的方法になり、1958・1960・1963年のA S C E 会議、1962年のL N E C の会議において、構造解析へのコンピューター利用の一般化の提案・研究が発表された。1958年にトツテンハムはエフセンによつて考案されたフオース法とデイスプレーシメント法のミックスする解法を応用し、マトリックス・プログレシヨン法としてマトリックス表示を行なつた。これは静的問題特にシエル構造の解析に考案されたものである。1960年にマルゲレイはトツテンハムとは別に、トランスファー・マトリックス法をあみ出し振動問題に応用されたが、その原理はトツテンハムの行なつたものと同一である。1963年にペステル、レツキーがマルゲレイの方法を更に進展させ、1964年のレビスレイの著書のきわめて傑出していることが専門家の間で高く評価されている。1964年には、ジエンキンスがトツテンハムの方法を一般的弾性解析問題へと拡大展開した。

次に、有限要素法の出現と進展が構造解析法として盛んに用いられるようになったので、その経過について述べる。1956年にトコルナー、クローは有限要素法(FEM)の考え方を初めて力学界に紹介し、1961年にメロツシユはFEMを板の曲げ問題、三次元剛構造の解析へ応用し、1967年にツインキー・ウィッチが構造解析におけるFEMの地位を更に確固たるものとした。また最近脚光を浴びつつあるD.R.法(ダイナミック・リラクゼーション法)は、一種のオルターネーティブ法であり、構造解析法としての改良法ともいえる。また1964年にオツターは、デーイによつて提唱されたD.R.法(ダイナミック・リラクゼーション法)を更に拡張発展させた。

なお、構造力学の進歩・発達とは構造工学の研究開発に直接、間接的に応用されるようになり、解析法、設計法、施工法、電子計算機の応用、RC構造物・金属構造物・プラスチック構造物・木構造物・埋設構造物・海洋構造物・宇宙構造物等の開発、新構造材料の開発等に広く利用されつつあり、今後に課せられる研究の成果に対する期待は大きい。

3. 各種構造物の設計・施工への応用^{5)~8)}

(1) 概 説

構造力学の基本は弾性領域の範囲内における微小変形理論であり、その設計への応用も弾性設計法が主体となつて発達して来た。しかし最近では材料の破壊力学の発達、構造物の経済設計の観念とが関連し合い、塑性設計法の進展が実用に供されるようになりつつある。構造力学においても、微小変形理論の延長として有限変形理論が弾性領域の法則に準じて展開されるようになったし、また塑性理論を取り入れた弾塑性理論の難しい理論展開も行なわれつつある。しかし設計への完全利用の段階にはまだまだ数

多くの問題が残されており、今後の研究進展に期待されるところがきわめて大きいと思う。種々問題はあっても、近似理論計算による塑性設計方法は、構造物の種類によつてはすでに実施されている。

また従来は設計が出来上つた後に施工方法が検討されて構造物の築造が開始されたものであつたが、最近では施工方法を考慮に入れた設計が研究されるようになり、設計・施工の一元化の時代へと変転しつつある。従つて施工中における構造物の一時的な応力現象や安定性状についても構造力学と電子計算機を酷使してその安全性を確認しなければならないのである。そのほか、地球上における自然現象に適合した土木構造物を築造出来るような優れた構造法を開発して行ためには、自然の摂理に超長年月の間対応して来た天然構造物・各種生物等の力学的特性を静かに観察・究明することが必要であろう。人工の土木構造物の強度・剛性・耐久性については、その構造法の適・不適によつて優劣の度合いが決められるので、最適の構造法を選定し、それに適合した構造解析法を開発して行かなければならない。理論解析を考案し、それに適合した構造法に限定することは本末てん倒のきらいがあり、構造物崩壊の原因となることが多い。また、自然の諸力についての現象的研究の重要なことは、各種の土木構造物の破壊記録より明らかなところである。

(2) 橋 梁

土木系構造物の中で第一に挙げなければならないのは、何んといつても橋梁であろう。橋梁には、木橋・石橋・コンクリート橋・鉄筋コンクリート橋・プレストレストコンクリート橋・プレストレスト鉄筋コンクリート橋・鋼鉄橋・アルミニウム合金橋・竹橋・竹筋コンクリート橋・竹~~綱~~筋コンクリート橋・木骨コンクリート橋等種々あるが、重荷重を受ける永久構造物の橋梁としては、鋼鉄橋・鉄筋コンクリート橋・プレストレストコンクリート橋・プレストレスト鉄筋コンクリート橋のほか、圧縮力を受けるメーソンリーアーチとしての無筋コンクリート橋・石橋等を挙げる事が出来る。アルミニウム合金橋はスパンの小さな軽荷重橋梁としては自重が小さくて有利であるが、重荷重を受けるスパンの大きな橋梁には変形も大きく色々と問題があるから用いない方がよい。その他の橋梁は、小スパンの軽荷重橋梁または仮橋・半永久橋として用いられる程度である。しかし、いずれの橋梁も構造力学を応用して設計計算するわけであるから、それぞれの橋梁に適合した構造解析法を開発して行かなければならない。

(3) ダ ム

ダムには、コンクリートダム・鉄筋コンクリートダム・ロックフィラーダム・アースダム等があるが、その大きさの規模には色々あり、規模の大きなものほどその設計・施工方法も難しくなつて来る。また形式についても重力式ダム・アーチダム等のほか、半重力式ダムとして色々新しい形式が考案されている。いずれにしても、ダムの基礎地盤は良質の岩盤を最上とし、土質力学的配慮と構造力学の組み合わせによつて設計・施工の方法を研究する必要がある。地質・地盤の調査が重要であり、その調査事項を基本として力学的検討を行なわなければならない。

(4) トンネルおよび地下鉄

トンネルには、山岳トンネル・海底トンネル・水底トンネル・都市トンネル等があるが、都市トンネルの主流となるものは地下鉄である。トンネルも地下鉄もその設計・施工が地層・地盤の状況により違つて来るから、トンネルや地下鉄の構造物に作用する土圧分布について研究しなければならないので、土質および地質調査が如何に重要であるかがわかつて来る。良質の岩盤にトンネルを掘る場合と軟弱地盤中にトンネルを築造する場合では、施工の方法も異なるけれど構造力学上の考え方も当然違つて来るのである。海底に水底トンネルを築造する場合には、よく知られている沈埋工法が用いられるし、土質の悪い場所に築造される地下鉄工事では、すでに実績の多いオープンカット工法の用いられるのが常識となつてゐる。

(5) 交通付帯構造物

交通構造物で、橋梁・トンネル・地下鉄を除いたその他の付帯構造物としては、道路および鉄道の路

床構造、道路・鉄道の路盤の安定を保持するための擁壁、落石防止構造物、盛土路床の安定工法等があり、ソフトな面における構造力学と土質力学の併用と構造物に関する広い知識が必要となつて来るから、経験工学的実績の重要なことが痛感させられる。

(6) 河海構造物

河川および海岸・港湾の構造物としては、河川堤防を始め山村堤・~~農~~堤・越流堤・導流堤・閘門・山腹および溪流の砂防工等の河川構造物と海岸砂防工・海岸防護工・海岸堤防および港湾施設の防波堤・埠頭・~~繫~~船施設等の海岸・港湾構造物に分けることが出来る。

構造力学の分野より分けると、重荷重構造物と軽荷重構造物または、ハードな構造物とソフトな構造物となる。ハードな構造物は施工を考慮に入れた力学的設計が主体となり、ソフトな構造物では施工を主体とした設計法を自然環境力学の面から検討しなければならない。

(7) 上下水道構造物

上水道の浄水場、配水池、送配水・給水用のパイプおよび下水道の処理場と下水用のパイプの設計・施工において、構造力学的配慮の必要なことは当然であるが、基礎地盤と土質に関する力学のきわめて重要なことが防災上の実績から明らかとされている。特に最近では、軟弱地盤に埋設されるパイプラインの設計・施工に各種の力学的問題が指摘されている現状にある。また、浄水場・配水池・下水処理場等の鉄筋コンクリート構造物の温度差応力によるひびわれに対する対策とその力学的解明が今後に課せられる研究問題であろう。

(8) 空港施設

空港施設としては、航空機の発着に必要な離着陸帯の施設、航空機の整備に対する施設・燃料等の補給施設、航空機の運行の安全性・定期性の確保のための気象観測とレーダーおよび照明等の施設であり、特にその安全性の高いことが要望されている。着陸帯は航空機が安全に離着陸出来るように造られた適当な長さを持つた広場で、その中に舗装された強度の高い滑走路を築造し、着陸時の衝撃的集中力に耐える構造としなければならない。応力集中問題については力学的研究の余地があり、理論解析のみならず実験による現象の追求も行なう必要がある。

(9) 鉱山土木構造物

鉱山土木構造物の第一は、立坑開さくと坑道掘さくおよび斜坑掘進による地下トンネル構造物の力学的安全性を保持すること、坑内~~湧~~水などによる被害をなくするため防水ダムを築造することによりその安全性を高めること、立坑・水平坑道・斜坑の連絡と連結部の曲面構造物の設計・施工が力学的に安定・安全であることなどであろう。道路・鉄道のトンネルと異なりその深度が著しく大きいので、土圧・地質その他の地下環境に慎重な留意を払わなければならない。同上構造物の第二は、鉱山道路・鉱山鉄道およびそれに付帯した建造物が挙げられるが、これらは一般の道路・鉄道の敷設と建設に準じて設計・施工すればよいと考えられる。もち論その傾斜~~勾配~~・構造形式については目的に応じて取り決めなければならないが、その安全性については充分な検討を要する。そのほか、鉱山土木構造物としては各種の施設・設備が考えられるが、一般土木構造物の永久性に比べ短期間の安全性を確保出来る範囲を検討しなければならぬ。

(10) 農林土木構造物

農業土木および林業土木に関する構造物の設計・施工と力学的安全性について述べてみる。農業土木の構造物は、耕地整理・土地改良・~~灌漑~~排水に付帯した各種の土木構造物であり、一般の土木構造物との差別はほとんどないがその規模としては小型のものが多く、ただし、~~灌漑~~用のダム・干拓工事に用いられる堤防等は大規模のものまで及んでいる。次に林業土木の構造物は、林業用に使用される道路・鉄道・橋梁など挙げられるが、そのほか砂防ダム、防水・防風林に付帯した建造物など数多くあり、一般土木構造物の規準に従つて設計・施工すれば充分である。しかし、農林土木構造物を二つに大別すれば、ハードな

構造物とソフトな構造物になり、その設計・施工と力学的考え方においても違いがある。ハードな構造物においては、構造物自体を主にして考えるが、ソフトな構造物においては、各種の周辺環境に相応しい設計・施工法を工夫しなければならない。

(11) その他の構造物

そのほか、塔状構造物として吊橋のタワー・テレビ塔・各種の鉄骨タワー等あり、塊状構造物としては、古来よりあるピラミッドや城を挙げることが出来ると思う。ピラミッドや城は、非常に安定性のよい石積構造により築造されているが、鉄骨のタワー等の塔状構造物は、立体トラス構造で耐風・耐震の点でも力学的検討が必要である。また、水力・火力・原子力発電所に関連した構造物の設計・施工の面では、特に新しい力学的研究問題が取りあげられている。

4. 構造力学の解析と構造法，構造材料，荷重条件などとの関連^{3)～5)}

構造物の種類は千差万別で、その構造法・構造材料・荷重条件などによつてそれぞれ異なつた変形・応力現象を呈するから、その現象に適合した解析法を用いなければならない。構造法においては、圧縮力・引張力・曲げモーメントのそれぞれを主体とするもの、それらの組合わせ力を同時に受けるもの等により、その構造法が自ら異なつて来るから、それぞれの構造法に適合した応力解析法を用いなければならないし、適切な解析法がない場合には新しく開発しなければならない。また構造材料にしても、石積構造・コンクリート構造・鉄筋コンクリート構造・プレストレストコンクリート構造・プレストレスト鉄筋コンクリート構造等では微小変形理論の解析法をそのまま適用してもよいが、木構造・植物のつるや竹を用いた構造・鋼鉄構造・軽金属構造・プラスチック構造等では、各種の条件により有限変形理論を用いなければならない場合もあるから、その解析法の選定には充分な検討が必要である。次に荷重条件については、橋梁では自重などの等分布に近い荷重状態、群集荷重といわれる完全な等分布荷重、活荷重といわれる自動車荷重および鉄道の輪荷重とこれらに付帯した衝撃荷重、温度変化にともなう温度差荷重等を挙げることが出来るほか、水中構造物では各種構造物に作用する水圧や波浪による荷重、土中構造物では土圧荷重のほか基礎の不等沈下による変位荷重等あり、それぞれの荷重条件に適合した理論による応力解析を行なわなければならない。すなわち、構造法，構造材料，荷重条件などによつて生ずる変形・応力現象を適確には握し、最適の応力解析法を採用または創造して行かなければならないと考える。

5. あとがき

構造力学の今後の発達は、各種の土木構造物に適合した構造解析理論の追求とその応用法にあると思うが、その構造法，構造材料，荷重条件による現象を探研する際、地球上における天然の構造物や各種の動・植物の科学的摂理と力学的特性を吟味・検討し、耐荷力・剛性・耐久性に富み、力学的経済性と美観を有する構造物を創造し、その構造解析法を追求・開発して行くことにあつてと思う。

参 考 文 献

- 1) S・P・テイモシエンコ著，最上武雄監訳，川口昌宏訳 材料力学史，鹿島出版会（1972）。
- 2) 鷹部屋福平 構造力学 I，彰国社（1955）。
- 3) 成岡昌夫 構造力学要論，丸善K.K.（1974）。
- 4) 中村作太郎 橋梁の歴史的変遷とその発達動向，蘭岳会（1979）。
- 5) 中村作太郎 土木構造物の耐久性とその環境問題，環境情報科学 3-2（1974）。
- 6) 青木楠男・江崎義人 最新土木工学概論，森北出版（1974）。
- 7) 飯吉精一 土木施工学，技報堂（1980）。
- 8) 種田行男 農業土木学，理工図書（1983）。