

わが国応用力学の現況

正員 工学博士 小西一郎*

1. 緒言

応用力学は力学に関する原理を応用して自然界にあらわれる諸種の現象や人工的に形成した各種の構造物、機械、材料等を解析する力学の一部門である。従つてこのように広義に解釈した応用力学には、応用分野の種類に応じて構造力学、材料力学、流体力学、熱力学、振動学、土質力学、気象力学等種々の分科がある。土木工学においては上記各種の応用力学はいずれも基礎的の学問として重要なものであつて、一般に広くとり入れられているところであるが、狭義の応用力学として、通常構造力学、材料力学、振動学等の範囲に解釈されることがある。流体力学、土質力学等については、それぞれこれらを包含した本文以外の他の項目で述べられるはずであるから、本文では主として材料力学、構造力学、振動学等について述べる。

構造物を最も合理的に経済的に設計するためには、使用材料、外力の適正な選択によつて、これに適当した構造及び寸法を与えることが先決問題である。従つて本文で述べる応用力学は、構造物設計の基礎となる学問と解釈することができる。

応用力学の発展の詳細な経過はここには述べないが、歴史的にみて 17 世紀中期以降である。これまでに存在した各種の技術は力学的基礎に立つて整理され、合理化され、また力学の発展は新しい技術を生む結果となつた。このように応用力学の研究と技術は互いに車の両輪として相たすけ、相前後して人類の自然界における位置の向上に力をつくしてきた。

わが国土木工学における応用力学の発達経過については、筆者はこれを特別にとり出して学問的な分析を加えたことがないのでここに述べることはできない。しかしながら断片的表現ではあるが、今日応用力学の教科書に記述されている一般的な事項、また、実地の設計法に用いられている諸公式も、実はかつての応用力学の分野における研究成果として発表され、討議された諸研究の果実であるといつてよいことができる。このことは他の工学におけると同様にわが国土木工学においてもそのままいうことであつて、応用力学に関する研究は各種設計、技術の根本をなしている。

わが国は世界有数の地震国であるので、土木構造物設計における条件は地震の発生程度の少ない世界の他

の国に比して一層困難性を加える。また地震以外に人口過剰、天然資源の不足等に起因する悪条件も構造物設計における経済的設計の要求程度を一層高める結果となる。これらの悪条件は、かえつて応用力学研究に対する強力な刺戟となつていることは争えない事実である。このようなわけでわが国土木工学界における応用力学の研究は、常に土木構造物設計における主導的立場を維持しながら、加えて上記わが国の悪条件と戦いつつ、よくその目的に向つて進んでいるものと思う。次に主として第 2 次世界大戦後における応用力学の研究のあとを土木学会を中心として眺めてみよう。

2. 最近約 10 年間における応用力学の研究の概況

戦争は土木工学、技術において大きな空白時代を生む結果となつた。戦時中の諸研究についてはその内容の詳細をうかがうことはできないが、この約 10 年間において土木工学の進歩、発展が阻害せられ、その受けた打撃はまことに大きいものがある。しかしながら戦後荒廃した国土を復興し、建設するに当つて土木工学のはたした役割のいかに大きいかは、周知のとおりであり、これには応用力学の研究成果の裏づけが大きい力をなしているものと思う。また戦時中外国文献の入手ができなかつたが、戦後諸外国との接触、各種の外国文献資料の輸入が、これがまた応用力学研究の大きな刺戟となつたことも事実である。

最近 10 年間におけるわが国土木工学応用力学の研究内容について概観すると、新しい原理的な研究というものは見当たらないのは、諸外国の研究における内容と同一であろう。大きな成果は構造物の構造法の改善、寸法の拡大化にともない、

- (1) 構造に忠実な解析法の発展
- (2) 構造物の極限強さの追求
- (3) 作用荷重のより妥当な確認
- (4) 実験による複雑な構造物の内部応力及び振動の解析とこれに基づく計算法の改善

の 4 種に大別できると思う。この 4 つは互いに相関連しているものであつて、研究論文別に見れば個々の問題を取扱つたものがあり、またその関連問題としての内容をもつたもの等各種各様である。

(1) 構造に忠実な解析法の発展 構造物の形状は使用材料の特性に応じて力学的概念に基づき、適当な形が考案される。さらに形状、寸法の詳細な決定は応用力学のたすけにより、合理化されるわけである。し

* 京都大学教授、工学部土木工学教室兼工学研究所

かしながら応用力学はあらゆる複雑な問題に対して解を与えるものではなく、また解の求められるものでも、実用設計上応用力学の忠実な解をそのまま取り入れるのは、あまりに複雑となり、実用性の点から困難を生ずる。この困難性を除くために、力学的概念に基づいて構造物の各部を単純化して、計算法を簡略化することが多い。顕著な一例をあげると、構造物は立体的に作用する外力に対して、立体的に構造する必要があるが、立体構造力学の計算は非常に煩雑になるので、構造を分解して平面構造の組合せとみなし、これに平面構造力学を適用して設計を行うときである。橋梁、擁壁、ゲート、貯水槽、地下構造物等においては各種形状の平板、曲板を用いるが、板の計算が複雑であること、また境界条件の不確定等の理由によつて、板を単純化して有効巾、荷重分担領域の仮定等によつて直線梁の理論を応用して簡易化をはかっていた。この単純化には種々の不合理があり、板はそのまま忠実に解析するのがより合理的である。成岡昌夫はこの方面において、矩形、円形、一方向連続、変断面等各種の平板について、板の撓角法を提案し、これに基づいて実用的解法を求めた。また成岡昌夫、米沢博、大村裕等はこの実用解法を展開して、橋梁床板の設計における有効巾概念を一掃した合理的設計の各種資料を提供した。

ラーメンの解法についてはすでに解法的には戦前においてでつくした形であつて解法的な問題を取扱つたものは少ない。ただ山崎徳也はいままでラーメン解法の根本仮定である剛節節点が、構造上不完全であることを特定の構造物について実験的に確かめ、不完全剛結ラーメンを撓角分配法によつて解いた。立体ラーメンについては結城朝恭、吉田俊彌は3次元撓角法を用いて解法を試み、平面ラーメンに分割した解法といちじるしい差のあることを認めている。また村上正は矩形以外の折線材を有する平面ラーメンについて、後藤幸正は鉄筋コンクリートラーメン、固定板の経済的設計について研究を行つた。鉄道軌道についても走行列車による軌道の動力学的な研究が小野一良、八十島義之助、佐藤裕等によつて行われている。

橋梁の上部構造重量を軽減して経済的設計を行うために、種々の構造法が諸外国において研究実施され、わが国においても戦後この方面のいちじるしい進歩がみられる。合成桁については安宅勝、橋善雄、田原保二、池田哲夫等の研究があり、日本橋梁株式会社において行われたスパン 11.5 m の合成桁の実験解析とあいまつて、実際設計上に有力な資料を与えている。また格子桁については戦前福田武雄の広汎な研

究があるが、最近格子桁の実用問題に刺戟されて成岡昌夫、大村裕、伊藤敏一等の研究があり実際橋梁架設の段階に至つている。また箱桁橋については理論的研究は小西一郎、小松定夫によつて行われ、これらは汽車製造株式会社大阪製作所が行つたスパン 24 m の合成単箱桁橋実験、三菱日本重工業株式会社横浜造船所が行つた全長 10 m の箱桁実験等の測定結果の解析の発表とともに、実際橋梁設計上に新しい指針を与えるものと思われる。また鋼床板の実用化のために直交異方性板の解析が新しい問題となつてきたが、直交異方性板の問題は面内荷重、特に座屈に関して航空工学分野においてすでにいちじるしい成果をもたらされているが、直交異方性板の曲げの問題は橋梁構造に関連して実用的解法が要望されている。鋼床板に関しては友永和夫、菊池洋一等の研究があり、両氏等の設計による鋼床板橋の載荷実験が東京鉄骨橋梁製作所において行われ、わが国において最初の鋼床板橋として架設されたことは注目に値する。また主桁並列型式、格子桁型式の橋梁を床板と結合した合成桁は、その解法がきわめて複雑となるが、これを直交異方性板理論により解決しようとする試みが米沢博によつて行われている。格子桁単体の解析は Fritz, Leonhardt によつて実用的な数表が準備されているが、経済的設計を行うには床板を合成することが有利であり、合成格子桁の実用解法はこの点要望されるものである。これらについての模型実験が新三菱重工業株式会社神戸造船所で行われたが、この測定結果は重要な指針を与えるものと思う。これら一連の橋梁に関する経済的構造は従来の線構造より、面構造を応用したものであり、従つて設計計算には薄肉構造力学、立体構造力学の力をかりなければならない。このように橋梁構造に関連して最近特に立体構造力学が大きな問題を提供していることは特に注目する必要がある。

鉄筋コンクリート構造力学によつて鉄筋コンクリート部材、構造の設計はすでに実用的には解決した観があつたが、最近 PC 橋梁の実用化にともなつて、設計計算の面において多くの力学的問題を提供した。特にコンクリートのクリープ、収縮の問題は PC 橋の死命を制する重要問題であるので、PC 橋梁の実用化、スパンの長大化にともなつて各種の研究が行われている。一般的設計問題については仁杉巖、猪股俊司等の研究があり、特にクリープ、収縮に関しては岡田清、久保慶三郎等の研究がある。またコンクリートのクリープ、収縮は死活荷重合成桁において、特にスパン 30 m 以上のものに対して重要であるので、ドイツにおいてはこの方面の研究は非常に活潑であるが、わが

国でも岡田 清等の研究がある。

橋梁上部構造については、その作用荷重が他の構造物に比し明確であるので、構造法の改善にともなつて、その力学的解析が的確な境界条件のもとに行われる。しかし橋梁下部構造については、作用荷重中特に地下の部分は地盤の状況によつて非常に複雑であり、また地震力の作用状況も上部構造と関連して複雑である。しかしながら構造物の下部構造特に地盤の変位によつて上部構造に大きな応力を発生する不静定構造物等では、下部構造の合理的設計が上部構造に比し非常に遅れている。また地震による構造物の破壊が、下部構造の設計不良によると思われるものが相当数見られる。この点にかんがみ後藤尙男は地盤の弾性を考慮した耐震設計に資するため、地盤の反力、振動応力について広汎な研究を行つているが、さらにこの研究は振動破壊現象の解明に進んでおり、これらを総合して橋梁下部構造の耐震設計の資料を提供することであろう。

重力ダムの内部応力に関しては従来三角形断面の平面歪問題として処理されてきたが、堤底の影響を無視した従来の解析には種々の不合理がある。丹羽義次は堤底の弾性の影響を考慮した弾性理論解を示して、ダム設計上特に重要な堤底付近の応力分布に関して従来の解析を批判した。また村 幸雄はアーチ及び重力アーチダムの応力について一般的な理論解を求めている。サージタンク等の貯水槽についてはシェル構造が用いられる。これは一様な内圧を受ける円管と異なり、水平剪断力をともなうので、シェルに関する曲げ理論を適用する必要がある。シェルに関しては土木工学方面では、その研究が建築学方面にみられるほど活潑ではない。岡本舜三、酒井忠明は円筒形屋根構造、サージタンクについてその実用解法、数表を提示している。素掘坑の強さについて岡本舜三は複雑な断面形をもつトンネル周辺部の応力を弾性学によつて解析し、材料の破壊機構の理論によつて亀裂の発生についても説明を試みた。また谷本勉之助は弾性学の基礎的問題について多くの研究があるが、3次元応力函数による弾性問題の解法は注目値する。

構造物の振動の諸問題は動力学的荷重の作用する橋梁に関連して多くの研究がある。また耐震的設計に関しても構造物の自由振動周期を知ることが重要であり、橋梁以外の重要構造物の振動の問題を取り扱つたものがある。橋梁の設計に関しては動荷重により衝撃作用の問題と、振動剛性に関する問題に大別することができる。前者については次項で述べる範囲に属するのでここでは触れない。通常構造物の設計は静力学的に応用した構造力学によるため、その変形量をいかに

制限するかについては明確でない。しかし橋梁等移動荷重の作用をうけるものについては、走行荷重による振動が必ず付随するものであり、橋梁の安全性、通行者の感じをよくする点等から、できるだけ防振構造にすることが望ましい。この点静力学的に最良の設計も、振動的には必ずしも最良のものとは限らない。ここに静力学的強度と、振動に関する剛性の調和をはかる必要があるのであつて、長大スパンの橋梁においては特にこの点が重要な課題となる。活荷重による橋梁振動の実態は、走行荷重による橋梁の強制振動の問題として解かれる。しかしながら走行荷重の質量、バネ特性、橋床面の凹凸、載荷状態等を忠実に解釈することは困難であり、さらに構造による振動減衰の正確な取り扱い方にも種々問題がある。従つていままでに用いられている方法は、(i) 固有振動周期、(ii) 各正規振動の形状、(iii) 減衰力の性質等を算定し、これらの振動性状によつて橋梁の振動に対する性状を総合判断する方法である。(i)、(ii) に関しては単純トラス橋について小西一郎、山田善一、安部清孝、ランガートラス橋については安部清孝、ゲルバー桁橋について小西一郎、小松定夫、安部清孝等、(iii) については岡本舜三、橋本香一、小西一郎、山田善一等の研究がある。さらに (i)、(ii)、(iii) による総合判断の補助として、代表的な固定した周期力、移動する周期力による強制振動の問題がとりあげられ、それぞれの構造に関して、上記各氏による研究があり、また桁、平板の強制振動に関しては喜内 敏の研究がある。

また橋梁以外の構造物の耐震設計に資するため、高層ラーメンの固有振動に関する酒井忠明の研究、突堤、アーチダムに関する固有振動算定のため剪断振動を仮定した畑中元弘の研究がある。

その他橋梁構造に関する設計計算式の合理化、簡易計算法、構造細部設計に関する力学的解析法などの問題が取り扱われてきた。

(2) 構造物の極限強さの追求 弾性理論に立脚した弾性学、構造力学等によつて設計された構造物は、はたしていかなる極限強さをもつかの問題は、構造物の安全性の確認の点からはなはだ重要な問題である。(i) 構造物を構成する部材の材料、結合構造の応力と歪は、いずれも設計荷重以内の間は弾性理論のもとをなすフックの法則に従うが、過荷重時にはフックの法則に従わない。鋼材についての降伏現象、コンクリートについては応力と歪の非直線関係等はいずれも過荷重時の極限強さの確認を困難ならしめる。しかしこの現象を単純化して極限強さを算定し、また極限強度を基準にした設計法を行うことが極限設計法

(Limit Design)である。また(ii) 構造物部材の応力はフックの法則の適用される範囲内にある。すなわち応力と歪はフックの法則に従う荷重範囲内にあつても、荷重と構造物の変形とはフックの法則に従わない状態で極限状態に入る場合もある。この問題は圧縮材、平板、シェル、構造物の座屈安定の問題を包含することはもちろんであるが、根本的な解決には有限変位の理論に立脚した議論が必要であつて、微小変形を仮定した一般構造力学に比し、いちじるしく困難性を加える。しかしながら破壊の現象を取り扱う限り、この有限変位の理論によることが必要であり、この点一般的な構造については解が得られない。ただ座屈問題については変形状態をある程度忠実に計算式に入れることによつて座屈荷重を求めることができる。次に(iii) 繰返し荷重による構造物の疲労の問題がある。橋梁等繰返し荷重の作用する構造物においては、設計荷重よりは小さいが、しかし列車荷重、自動車荷重の通過に起因する繰返し応力の作用をうける。一般に材料そのものについては、疲労の現象のあることが古くから知られ、材料部分の設計許容応力に重要な因子となつては、材料をリベット、ボルト、溶接等によつて結合した構造物では、これらの接合部の切欠きの影響のため疲労の現象は鋭敏にきくことになる。従つて設計荷重の静的載荷で設計された構造物も、疲労に関する考慮が払われていないと、設計荷重以下の荷重の繰返し作用によつて破壊の原因となることがある。さらに(iv) 材料の強さ、構造寸法、作用荷重の大きさに関しては(i)~(iii)においては一定値を仮定して議論したが、これらは一定値ではなく、ある範囲内のばらつきがある。従つて許容応力決定に関する安全率の問題は経済的設計における構造物の重要性、寿命に関係した理論的裏づけを必要とする。これは統計学的取扱によつて解明される問題であつて、荷重の超過確率、材料強さ、構造強さの非超過確率の組合せによる推計学的問題である。

以上述べたように、構造物の極限強さの追求は上記(i)~(iv)の諸問題に分類できると思うが、これらについての最近約10年間の土木工学、応用力学の研究の実情は次のとおりである。(i)については塑性理論を矩形梁に適用した星埜 和の研究、鉄筋コンクリート部材の破壊理論へ適用した山田順治の研究、同氏の鉄筋コンクリート梁の破壊荷重についての実験的研究がある。また金 俊三の木材の曲げ破損法則についての研究もあるが、いずれも直線材に対する1次元の塑性理論の適用であり、2次元的拡がりをもつた平板等に対しては未だ研究をみないようであつて、全般的にこの

方面の研究は今後に期待される。次に(ii)の問題については各種の研究が包含されるが、座屈安定に関し不完全弾性柱の座屈に関する結城朝恭の研究、各種境界条件をもつた平板、補強材つき平板、一方向連続板等の座屈に関する倉田宗章、成岡昌夫の研究がある。倉田の解法は微分方程式から出発したものであるのに反し成岡の解法はさきに誘導した平板の撓角式を用い簡易計算法によつた点に相違がある。また吊橋の空気力学的動安定の問題に関して平井 敏は吊橋の振り振動に対する安定性について理論的研究を行い、限界風速を求め、空気力による動的不安定現象には吊橋補助桁の振れ座屈が重要であることを指摘し、長大スパン吊橋の設計上重要な指針を与えた。剛節トラスの座屈の問題について小西一郎はさきに誘導した剛節トラスの一般解法による基礎式を用いて、トラス節点回転角と荷重との非線型関係を導き、トラス構造全体としての座屈荷重を算定する方法を明らかにした。奥村敏恵は溶接プレートガーダー橋構造に採用される片側スチフナーつき平板の耐力や断面重心と剪断中心とが一致しない圧縮材について曲げ振り座屈の理論ならびに実験的研究を行つたが、これらは溶接橋梁構造に関連して重要な資料を与えるものである。

(iii)の問題について小西一郎は穴あき板、ボルト結合部、ピン結合部について繰返し荷重による時間強度を明らかにし、これらの結合部を含む構造物が、変動繰返し応力をうける場合の構造物の寿命を推算する方法を提案した。また最近の溶接橋梁において溶接継手特に突合せ継手の疲労強度が溶接継手の許容応力決定上最も重要な因子である点に注目し、溶接継手の時間強度を実験的に求め、これによりわが国溶接橋設計における許容応力の決定法について提案を行つた。また猪股俊司はPC 桁の曲げ疲労について実験的研究を行つている。

(iv)の問題について福井武弘は溶接突合せ継手の疲労強度決定について一統計的考察を行つた。また池田哲夫は作用外力、材料の強度の両面を統計的に結合し安全度、危険度の適当な仮定のもとに、許容応力を推計学的に求める方法を提案したが、池田の方法は構造物安全率の統計的決定についての最初の論文を発表した A. Freudenthal の所論の不備な点を合理化した点で注目に値する。

(3) 作用荷重のより妥当な確認 わが国における構造物設計において地震の作用力が特に必要である点は緒言において述べたところである。

畑野 正は重力ダム設計において採用すべき地震の強さ、地震の強さを決定する要素、地震による動水圧

等について広汎な研究を行い、わが国における重力ダム設計上の有力な資料を与えた。松尾春雄、畑中元弘は地震時擦壁に作用する土圧について実験を行い、その分布状態が平時といちじるしく異なり、地表面に近く最大値の表われることを示した。また丹羽義次は重力ダム設計上、重要な揚水圧について、電気相似法による実験と流体力学的な理論解の両方面から研究を行い、止水壁の位置、深さ、地盤の傾斜等の各種条件のもとに揚水圧の分布を明らかにした。トラス橋に対する風力について、多田美朝、大宮克己は風洞実験により研究を行った。また平井 敦は吊橋の空気力学的安定の問題に重要な補剛桁、補剛トラスの各種形状寸法が作用空気力によつてもつ空気力学特性を風洞実験により明らかにして、吊橋設計上の一指針を与えた。橋梁上を通過する移動荷重による振動、衝撃作用は設計荷重の静的な載荷による応力のみでは設計の対象とするには不十分であることを示している。しかしながら複雑な橋梁構造を移動質量、ばね特性のもとに総合的に振動学的に解明し、これを設計に取り入れるにはあまりに煩雑である。ここに工学的な衝撃率の問題が生れてくるわけであつて、この問題の理論的解法は応用力学の古くからの重要問題であつた。最近この方面の理論的考察はあまりみられないが小西一郎、山田善一は橋梁の一定位置に間接的に作用する衝撃力による衝撃の問題を論じ、喜内 敏は梁、平板について、移動荷重による衝撃を一般的に取り扱つた。

(4) 実験による複雑な構造物の内部応力及び振動の解析とこれに基づく計算法の改善 実験の測定に使用した計器によつて分類すれば (i) 電気抵抗線歪計、(ii) 光弾性装置、(iii) 磁歪型歪計、(iv) 機械的歪計及び振動計等がその主要なものである。また実験目的から分類すると (i) 構造物の強度判定、(ii) 構造物各部の応力分布、(iii) 重力構造物の重力による応力、(iv) 衝撃応力等であり、これらの成果をもつて理論解析結果を批評し、また合理的設計計算法をみだす資料が得られる。

戦後電気抵抗線歪計の利用が各方面で非常に盛んであり、これによつて応用力学の適用の困難な複雑な構造物の応力分布が明らかになつたほか、動的作用による応力についても簡単に測定が可能となり、設計上非常に有力な資料を提供することができるようになった。橋梁の強度判定については応力、撓み、振動性状等の測定を行つた橋本香一、伊藤又人、小西一郎、成岡昌夫、大村 裕等の実験があり、これらの歪測定結果によつて橋梁各部の応力分担の状況、振動周期、減衰性状がかなり明確となつた。橋梁各部の応力分担は相当

広い範囲の立体的分布を示し、設計計算に採用している荷重分担とかなり相違していることを知つたが、これは立体的な構造解析によつてある程度説明できるものであつた。重力ダムのように重力による応力が重要な位置を占めるものについては、その模型実験による重力応力の測定は非常に困難である。丹羽義次は高速遠心力光弾性装置を試作し、これによつて重力応力のある程度実験的に測定することに成功している。また畑野 正は寒天模型によつて重力ダム、畑中元弘は突堤、アーチダムの振動性状を測定し、同氏等の理論の合理的なことを示している。列車の高速化にともなつて、軌道各部の動的強度が問題となるが八十島義之助は磁歪型歪計及び電気抵抗線歪計により列車荷重による、主として衝撃振り応力を測定し、また小林 勇、後藤尙男は電車荷重によるレールの衝撃応力を電気抵抗線歪計により実測したがこれらは列車の高速化にともなう、軌道構造の改善に一指針を与えるものであろう。

3. 結 言

以上土木学会において発表された諸論文によつて応用力学の発展経過をある程度分析して通覧したつもりである。しかしながら土木工学の各分野における各種の構造物設計の基礎となる応用力学は、これを分析することに非常に困難性がある。ここに採用したものは筆者の個人の見方であり、また筆者は、将来はとわず、現在までは常にこの見方によつて研究論文を拝見している。従つてここに記述した内容には主観を交えたものがあることは避けられない。また土木学会において発表された諸論文によつて応用力学の発展のあとをたどつたため、土木学会以外の大学、研究所等において発表された研究を見落した点は多々あるであろう。しかしながら最近における応用力学の発展の経過、傾向はおおむね土木学会において発表されたものによつて判断しても大過のないものと思う。従つて本文中に引用させていただいた研究者諸氏以外にも、それぞれの分野において活潑な研究が行われていることを付言したい。

以上要するにわが国土木工学における応用力学の研究は土木学会創立以来の先輩諸氏の努力のあとを引継ぎ、現在まで健全な歩みを続けていることが明らかであつて、この点御同慶の至りである。構造物設計は年とともに実態を忠実に解析することによりますます精緻の度を加えつつある。あくまで将来の見透しのもとに、現実の技術的諸問題に立脚して生きた問題が、応用力学の研究によつて解明せられ、現在までの輝かしい発展を今後とも継承して、土木工学の進歩に大きい力となることを信じ、本文の終りとしたい。