

第1章 序 論

1.1 座屈問題の重要性

構造物に外力が加えられると、外力に応じて、構造物内に内力が発生する。この内力を外力に応じて生じる力という意味で一般に応力とも呼んでいる。応力を①単位面積当りに働く力、②一つの次元が他の2つの次元に比べてはるかに大きな棒状の部材に代表される一次元部材の場合には、断面全体に働く力、あるいは2つの次元が第3の次元に比べてはるかに大きな、板や殻に代表される2次元部材の場合には、その大きな2つの次元のうち1つの単位長さ当りに働く力、の2つに区別して、定義するのが普通である。最近では前者を応力、後者を英語の stress resultant に対応して合応力、あるいは断面に働く力という意味で断面力と呼ぶことが多い。

構造物に作用する外力によって生じる応力は引張応力、圧縮応力、およびせん断応力に分かれる。断面内に働く応力がすべて圧縮応力、あるいは引張応力の場合もあれば、曲げモーメントに代表される合応力の場合のように圧縮応力と引張応力が混在する場合もある。断面内に働く応力がすべて引張応力の場合には、延性や脆性の破断、あるいはくり返し応力の作用による疲労破断の形で崩壊する。これに反して、圧縮応力が作用する場合には、断面形状の影響で圧壊による崩壊はまれにしか生じず、一般にはつり合い状態に材料の降伏現象が加わって生じる不安定現象によって崩壊する。引張応力と曲げ応力が混在するはりや板殻のような構造要素では両者の崩壊の可能性がある。

引張応力による破壊は主として、材料の特性および局所的な応力状態によって決まるのに対し、圧縮応力による不安定現象による崩壊は、材料の特性のみならず、外力の作用状態と、構造物とその構成要素の幾何学的な形態に影響される。圧縮応力による崩壊は、それを解析的に評価する場合には、微小変位理論では適切な評価ができず、本質的には有限な変位を考慮する有限変位理論によって評価しなければならない。このため、引張応力による崩壊を材料の性質および局所的な応力状態を中心課題とする問題と割り切ると、圧縮応力による崩壊は有限変位を中心とする構造解析を中心課題とする問題ということもできる。構造力学、構造解析のなかで安定問題が重要視される理由である。安定問題のなかで、容易に解が求まるという理由と、実用上大きな意味を持つという2つの理由で、歴史的に重要視されてきたのが、つり合いの解が分岐する現象や、外力の増大にともなって、変位が増大するというつり合いの解のなかで、荷重が極値をとる現象である。これらの特異な現象を総称して広義に座屈と呼んでいる。ただし、狭義には、前者のみを座屈と呼ぶ。本書の題名もこの座屈という呼び方をもとにしている。構造力学の進歩と共に、特異点の分類も進み、その性格に応じて、異なった名称が用いられているが、未だ設計に用いられる段階にはいたっておらず、本書で座屈を一般的な用語として採用した理由の一つである。

座屈問題を最初に取り扱ったのは、柱の曲げによる座屈であり、オイラーが1759年に論文の形で発表している^{1,1)}。1770年にはラグランジュがオイラーの得た結論の再確認を行い拡張した理論を発表している^{1,2)}。柱についての理論が発表されており、実験的な検証もされているにもかかわらず、1907年には、多少原因は異なるものの組立柱のレーシングパーの不適切さが引き金となって柱全体が座屈現象を引き起こし、張り出し工法で架設中の完成間近のケバック橋が落橋した。座屈現象による事故としては、現在にいたるまでのすべての鋼構造に生じた事故のなかで、最大の事故の一つであろう^{1,3)}。近年になってもオーストラリア、ドイツ等で板の座屈現象

が引き金になって、箱断面の大支間橋が架設中に落橋する事故を起こしている。示方書や設計基準が整備されているため、余程の過誤を起こさない限り、完成した鋼構造物が座屈現象によって、崩壊する事故は少なくなっているが、架設中の座屈現象による事故は、数は少ないものの引き続いて生じている。

架設中に事故の生じる大きな理由は、架設中の本体構造物について、あるいは本体構造物を一時的に支える仮設構造物について、きちっとした解析をしないこと、あるいは解析したにしても、境界条件として解析に用いた条件と現実の条件との間に大きな差があること等にある。場合によっては、座屈現象を全く考慮せず、単に微小変位理論を用いて求まる応力が、材料固有の耐荷能力により十分下回るということで、安心して仮設構造物を用いて事故を起こすこともある。

つり合いの分岐といわれる形の座屈現象の代表的な例はオイラー座屈であり、両端単純支持の柱の座屈強度 P_E は

$$P_E = \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad (1.1)$$

と表わされる。ここに、 EI は曲げ剛性、 L は柱の長さである。式から明らかなように、オイラー座屈強度そのものは降伏応力や圧壊応力に代表される材料固有の強度に全く無関係であり、曲げ剛性 EI と長さ L のみの関数となっている。構造用の炭素鋼で作られた柱であっても、それより数倍の強度を持つ高張力鋼であっても、弾性域で座屈するときには、ほぼ同じ荷重下で崩壊することになる。現実の柱は真つすぐではなく、初期曲がり避けられず、また内部に残留応力が存在したりするため、オイラー座屈荷重と崩壊荷重が一致するわけではないが、座屈問題では材料固有の強度よりも、剛性や支持条件、あるいは構造物の形状が崩壊の大きな要因となることに注意する必要がある。

1.2 終局限界状態と座屈設計

構造物の機能あるいは安全性を支配する各種の限界状態に対して所定の信頼性レベルを確保するように意図した限界状態設計法が多くの国の設計示方書に反映されつつある。この限界状態のうち、終局限界状態とは、作用荷重がそれ以上に増加しても構造物は抵抗できない状態あるいは構造物の安定性が失われる状態であり、構造物を構成する構造システム、部材、板要素が崩壊するまでの実際の荷重・変位挙動をより忠実に求めることによってその実体が明らかになる。

鋼構造物では、前節で述べたように圧縮力、圧縮応力の作用のもとでは座屈崩壊によって終局強度が決まる場合が一般的であり、材料の高性能化、作用応力の増大、薄肉断面の採用によって、この傾向はますます強くなってきている^{1,4)}。

座屈現象による構造物の終局強度は使用材料の非線形性、降伏現象、幾何学的非線形性、構造物のもつ初期不整（残留応力や初期変形など）、荷重の偏心作用などにより、座屈理論で扱う狭義の意味の線形固有値問題として得られる座屈強度のみによっては精度よく評価することに無理が生じ、しばしば複合非線形問題としてとらえ、崩壊メカニズムを対象にした最大強度、耐荷力、後座屈強度を含めた座屈耐荷力として広くとらえることになる。

実際の構造物では、解析上の幾多の仮定はもとより、初期不整量の大きさのばらつきが影響し、理論値そのものの精度に一定の限界があり、さらに理論に基づく耐荷力評価式が得られたとしても、一般にその表現は精度を高めれば高めるだけ複雑となり、実用のための基準強度算定式としては不都合の場合が多い。一方、実験データベースから耐荷力の統計的性質を明らかにするため、耐荷力データの収集、編集、蓄積、分析を行い、耐荷力を推定するのに信頼に足る情報を提供し、また提案された個々の基準強度式との比較から抵抗強度の変動性を確率

論的に評価することが行われている。また、理論解の入力値となるべき、材料特性、幾何学的特性、初期不整にランダムな実験データを用い、それに基づいて理論解を得る一種のシミュレーション手法がある。

座屈設計のための耐荷力の評価式は、理論解、実験データの変動性を参考にして強度の平均値、下限値、強度の信頼性を表わす度合による強度特性値（例えば特性値より小さい値が得られる確率が5%）などによって決められるが、現在、各種示方書に採用されている一般的な表示方式は、弾性座屈強度と材料の降伏点強度、断面の塑性強度を主な変数とし、これに、構造物の幾何学的特性、初期不整量の大きさに関係した変数を加えた関数関係として扱っている。

1.3 構造物の安定照査

一般に構造物の設計過程において、座屈照査、すなわち座屈現象によって構造物が崩壊するのを防ぐための照査は、対象とする構造物に対して規定されている設計基準の座屈関連条項を用いて行われる。このため、当然のことながら座屈照査のための基本式の適用範囲、前提条件、式の精度を勘案し、さらに実際の荷重状態、境界条件を正確に把握し、照査することが必要である。本書は、対象となる構造物に生じるであろう座屈現象を明確にし、座屈設計のための指針を示すことを主目的としている。

座屈照査に関連して、剛性の検討を行うことが必要なことも多い。薄板で構成された柱を考えたとき、薄板そのものは耐荷力を十分に持っていても、圧縮応力の作用によって板としての圧縮剛性が低下すれば、柱全体の曲げ剛性が低下し、式(1.1)から明らかなように柱の全体崩壊につながりかねない。一方、ボックス・ガーダーの圧縮フランジのように、主として板そのものの強度が問題となる構造物もある。したがって同じ板の座屈に対する照査といっても、対象とする構造物によって、照査の方法も目的も大きく異なることに注意する必要がある。

鋼構造物を、構成する要素に分けると、最小要素として、平板あるいは曲面板が存在し、それらを接合して、直ちに全体構造物となる場合がある。水や油を貯める容器や殻構造物の大部分がこの範ちゅうに入ろう。一方、骨組構造物といわれる構造では、平板や曲面板を接合して、骨組部材を組み立て、さらにこの骨組部材を組み合わせて構造物が作られる。このような骨組構造物では、骨組部材や骨組部材を構成する薄板要素が健全であっても、構造物として座屈崩壊する場合がある。このような崩壊を構造物の全体座屈と呼ぶ。これに対して、構造物を構成する部材がまず座屈することもある。部材の座屈と呼んでよいであろう。部材が座屈したとき、もともとその部材がなくても構造物が荷重に対して十分な耐荷力を有しているときは、構造物の全体崩壊につながらないが、一般には部材が座屈すると、構造物全体が崩壊の危険にさらされる場合が多いと考えてよい。同様に骨組部材を構成する板要素が座屈することもある。このような形での板要素の座屈を板の局部座屈と呼んでいる。板の局部座屈の場合にも、事情は骨組部材の座屈と同じと考えてよく、骨組部材の崩壊、ひいては骨組構造物の全体崩壊につながる恐れもある。

局部座屈、部材の座屈、全体座屈と分類したが、実際の構造物においては、これらのいくつかが連成して生じる場合がある。その際、実際の設計においては、要素の寸法、すなわち、板の幅厚比や細長比、あるいは、この両者と同じく座屈に直接関係する量全てを含めた座屈パラメーターと呼ばれる無次元量を構造形態に応じて適当に選べば、この連成の影響を小さくすることができ、それぞれを個別に照査して、座屈に対する安全を確保することができる。歴史的にはこのような設計法が採用され、座屈照査が行われてきたが、当然予測されるように、安全側の近似を多く採用するうえ、材料の最適配分からは離れた設計となることが多く、不経済な設計となることはやむを得ない。一つの例をあげれば、骨組部材に対しては、プレート・ガーダーのような要素も含めて、局部座屈をしないように板の幅厚比を制限する、あるいは十分な剛性を有する補剛材で補強する形の設計が行われ

てきた。したがって、座屈崩壊に対する安全性を確保するための座屈照査は、骨組を構成する部材および全体構造に対してのみ行われるのが普通である。計算機を使えば、全体構造に対して座屈照査することは不可能ではないものの、かなり面倒になることは避けられない。このため、計算機が発展する以前にはほぼでき上り、現在でもその内容は本質的には変化していない現行の設計基準で、全体構造に対して座屈照査を規定しているのはアーチ橋のような特殊な構造に限られている。ただし、幅員が非常にせまく支間が長いトラス橋や2主桁のプレート・ガーダー橋などのスレンダーな構造物では、全体座屈として座屈照査を行うことが必要である。この意味では、現行の骨組構造物に対する設計基準は基本的には個々の部材について座屈照査を行い、これによって、全体の座屈に対する安全性を確保する考えにもとづいているといえる。

1.4 座屈設計指針の各国の現状

1969年末から1971年にかけて世界各国において大小いくつかの箱桁橋の架設時の事故が発生し、51名にものぼる人命を失ったが、中でも重要な建設事故は、(1)1969年11月のオーストリアのウイーン市にある第4ダニューブ河橋、(2)1970年6月の英国のミルフォード・ヘブン橋、(3)1970年10月のオーストラリアのメルボルン市のウエストゲート橋、(4)1971年11月の西ドイツのコブレンツ市に架るライン橋の4つである。

これらの事故原因の究明と再発防止のため、主に箱桁橋のフランジと腹板に注目した補剛板の圧縮強度、曲げ強度、せん断強度、支点上ダイヤフラムの強度などの評価の研究が大学などの研究機関において精力的に行われ優れた研究成果が続々と発表された。これらの事故調査を通して、それまで使用されてきた構造設計基準と構造解析法の見直しと新たに限界状態設計法の導入が加速された。

英国では、1970年にメリソン委員会を組織し、大型鋼箱桁橋の設計と架設に関する調査を行い、1973年に箱桁橋暫定設計製作基準(IDR)をまとめ^{1.5)}、さらに1978年道路橋設計指針BS 5400の新たな制定を行い、限界状態の原理に立った構造物の安全照査式を定め、その第3部「鋼橋の設計指針」^{1.6)}に座屈関連規定の大幅な見直しが行われた。

西ドイツでは、鋼構造の座屈安定計算規準DIN 4114(1952年^{1.7)})がわが国始め各国の座屈関連規定に大きな影響を及ぼしてきたが、その後の鋼構造の設計、製作の進歩のもとでは適用範囲の狭さをはじめ不備な点が多く、また前述の箱桁橋の落橋事故を契機として、同規定の再検討、改訂作業が進められた。鋼板の座屈安定規定についてはドイツ鋼構造委員会がまとめたDASt指針012「板の座屈安定度の照査」(1978^{1.8)})によってまとめており、シエルの座屈に関する規定もDASt指針013(1980年)として発行されている。これらの成果を含んだ形でDIN 18800第1部「鋼構造の設計計算と構造」(1986年)、第2部「鋼構造の安定基準—部材および骨組構造」(1980年案)、第3部「鋼構造の安定基準—板の座屈」、図第4部「鋼構造の安定基準—シエルの座屈」^{1.9)}と逐次成文の形で発行されようとしている。

ECCS(欧州鋼構造連合)では、かねてからEC加盟国内での構造設計基準の統一化をはかるための委員会活動を続け、ECCS Recommendations(1975年版、1978年^{1.10)}版)を作成し、そしてその一部として鋼構造の座屈安定に関する規準を含んだ「ECCS Manual」^{1.11)}(1976年)を完成させた。このECCS Recommendationsをさらに手直しして、Eurocode 3の原案(1983年^{1.12)})を作成し、加盟各国での討議を経た上で、1990年頃に法律化しようとしている。また、ECCSの構造安定委員会の板構造に関する小委員会では、最近15年間の板構造の極限強度に関する調査研究を行い、座屈設計への提案も含めてその成果をまとめている^{1.13)}。

北米では、SSRC(米国構造安定研究会議、本部リーハイ大学)のもとに、ジョンソン教授を編者とする「鋼構造の安定設計基準へのガイド」(3版1976年^{1.14)})を出版し、鋼構造研究者、構造設計技術者に広く利用され

てきたが、その後の10年間の研究成果をもとにガランボス教授を編者に4版を1988年1月出版に向けて作業を進めている。また、SSRCが中心となって各国の構造安定研究者の分担による各国示方書の構造設計のアプローチの比較、座屈関連規定の対比、相違点の背景、問題点の共同研究の可能性などについて、わが国、北米、西欧、東欧、中国、豪州の地域別研究調査が進められており、その成果は *Stability of Metal Structures, A World View*, 2版、として1989年に刊行の予定である。

日本建築学会では、座屈に関連した事項が多く含まれている「鋼構造設計規準」1970年を誤りなく運用するために、規定された数値や設計式の根拠を明らかにするための「鋼構造座屈設計指針^{1.15)}」1980年を刊行している。

1.5 本書の構成

座屈現象を正しく理解し、終局限界状態として構造物の座屈を伴う崩壊を正しく評価することができるように、構造物の座屈設計に向けてのガイドラインとして本書が作成された。

本書は14章からなっている。第1章 序論では座屈問題、座屈設計の重要性、座屈設計指針の現状などについて述べている。第2章では本書に出てくる記号、用語の定義をまとめている。第3章では構造物の安定・不安定現象、安定・不安定の判別、座屈解析法を述べている。第4章では基本となる構造物の材料強度および初期変形、残留応力など構造物に避けられない初期不整について詳しく述べ、第5章以下に共通した事項としてまとめている。第5章～14章までは柱、はり、板などの構造各論の座屈強度、耐荷力に関する最近の研究成果を正しく理解しやすいようにまとめ、さらに各種構造設計示方書に含まれる座屈関連規定の根拠を明らかにするとともに設計基本式の適用を誤まることなく、正しく座屈照査が行えるように心がけられている。そして、各章の終りには今後の展望と題して、解決すべき重要な問題点、残された課題などを指摘し、構造設計技術者のみならず構造研究者にとっても今後の研究の指針になる有用な情報が得られるようにされている。

参 考 文 献

- 1.1) Euler, L. : Sur la Force de Colonnes, Mémoire de l'Académie de Berlin, 1759.
- 1.2) Bleich, F. : Buckling of Metal Structures, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1952.
- 1.3) Steinman, D. V. and Watson, S. R. : Bridges and their Builders, Dover Publication Inc., New York, 1957.
- 1.4) 福本啓士 : 座屈設計研究に関する現状と課題, 研究展望, 土木学会論文集 No. 380/I-7, 1987年4月.
- 1.5) Inquiry into the Basis of Design and Method of Erection of Steel Box Girder Bridges, Report of the Committee, Apperdx I : Interim Design and Workmanship Rules, Parts I to IV, Her Majestys Stationary Office, London, 1973.
- 1.6) BS 5400, part 3 : Code of Practice for Design of Steel Bridges, British Standard Institution, 1982.
- 1.7) DIN 4114, Blatt 1, 2 : Stahlbau, Stabilitätsfälle (Knickung, Kippngg, Beulung) Berechnungsgrundlagen, Vorschriften and Richtlinien, 1952, 1953.
- 1.8) Deutscher Ausschuss für Stahlbau : DASt Richtlinie 012 Beulsicherheitnachweise für Platten, 1978.
- 1.9) Entwurf DIN 18800 Teil 1-4, Deutsches Institut für Normung.
- 1.10) ECSS : European Recommendations for Steel Construction, 1978.
- 1.11) ECCS : Manual on Stability of Steel Structures, 1976.
- 1.12) Eurocode 3 : Common Unified Code of Practice for Steel Structures, draft, 1983.
- 1.13) Dubas, P. and Gehri, E., ed. : Behaviour and Design of Steel Plated Structures, ECCS, Zürich, 1986.
- 1.14) Johnston, B. G., ed. : Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 3rd ed., SSRC, John Wiley & Sons, 1976.
- 1.15) 日本建築学会 : 鋼構造座屈設計指針, 1980.