

## 巻頭言

### 性能設計を支える構造解析技術

早稲田大学理工学部社会環境工学科 依田 照彦

最近、設計規準類の改訂においては性能規定と適合みなし規定を明確に区別することが一般化しつつある。適合みなし規定は従来の実績から妥当と判断される規定であり、多くの技術者が慣れ親しんでいるものである。設計する構造物が従来のもので大きく変化していない場合には、過去の経験が生かされ、効率よく設計ができる。しかしながら、性能規定となると未だ抵抗感があるように思われる。理由は、設計法としての具体的な形が見えにくいからであろう。ここでは、性能設計を支える構造解析技術について、主として橋梁構造の安全性確保の観点から考えてみたい。

構造物の設計法が許容応力度設計法に頼っていた時代は長い。フランス人のナヴィエが許容応力度の考え方を1826年に発表して以来、世界中で多くの構造物が効率よく造られた経緯がある。すべての部材において作用応力度を許容応力度以下にすることにより、安全性を確保する手法は簡便で優れた設計手法であるとの評価は今も変わらない。さらに、コンピュータが誕生し、その進歩とともに構造解析技術が発展し、FEM（有限要素法）解析が使えるような状況になると、線形FEM解析を行い部材内の最大応力や応力の分布形状を求め、応力を比較検討することが、設計業務の一部に採り入れられ始めた。例えば、せん断遅れや有効幅の問題、断面急変部やハンチ部の応力算出等ではFEM解析が大いに力を発揮している。許容応力度設計法が、構造解析技術を発展させたといっても過言でない。

その後、応力だけで部材の終局強度を評価すると、降伏応力を超えた領域での性能が正しく評価できていないとの判断のもとに、限界状態設計法が欧州から提案され、他の国々もこれに追随した。その結果、安全性の照査式は部材の終局限界状態を明確に表現できる断面力表示（モーメント、軸力、せん断力）に変更され、降伏モーメントから全塑性モーメントまで断面性能の利用範囲が拡大した。とは言うものの、構造物の荷重効果を求める構造解析としては依然として弾性線形解析が主流である。線形構造解析では構造物や部材の真の耐荷力（終局限界状態）を決められないことは十分承知した上での配慮がなされている。つまり、部材の抵抗値と荷重に対する線形応答値とを比較して安全性の照査を行うために、すべての非線形性を抵抗値側で評価する必要性があった。最近では、部材強度の下限值相当として抵抗値を評価し、線形構造解析を用いて設計する方法だけでは、構造物の真の性能を照査したことにはならないとの考え方が大勢を占めるようになってきた。

性能設計が実現化した背景には、コンピュータを利用した非線形構造解析技術の進歩があるように思う。従来の許容応力度設計法では、線形構造解析により荷重の応答値を求め、抵抗値側に非線形性を持たせていた。しかしながら、構造物の真の耐荷性能は、非線形構造解析により構造物全体の応答を求め、構造物全体の安全性をもとに評価すべきものである。安全性に対する性能の照査としては、荷重レベルでの照査、断面力レベルでの照査、応力レベルでの照査があり、どのレベルの照査においても非線形構造解析を利用することが望ましいが、実際には、荷重レベルでの照査を除いて、線形構造解析が使われることが多い。また、性能によっては、変位や振動数など力とは違う物理量で性能を評価する必要もある。

いち早く性能照査型設計法を採り入れた耐震設計では、地震時の安全性の確保のための動的応答解析において荷重レベルの照査が行われている。部材の設計だけでは構造物全体の耐震性を論じられないことがその一因である。耐震設計の中でも例示されているが、荷重レベルの照査である動的応答解析は、複雑な構造系や新しい構造形式を導入したときに利用することを推奨している。

従来の経験やデータが多く蓄積されている構造物の設計については、従来の設計法に従って設計すれば安全性は確保できていると考えられるが、新しい構造形式や新しい材料を導入する場合には、適切な非線形構造解析を行って、性能を適切に評価する必要がある。設計された構造物が要求性能を満たしてさえいれば、照査するレベルは、荷重レベルでも、断面力レベルでも、応力レベルでもよく、設計法としては、信頼性設計法、限界状態設計法、許容応力度設計法のいずれも利用できることになる。まさに適材適所の世界である。

新しい設計法を導入する際、従来の設計法で暗に含まれていた安全性が担保できるかどうか気がなることである。新しく設計される構造物に対して代表的な荷重状態のみで構造物の安全性を照査するだけでは、未だ不安が残るという向きも多いと思う。静定構造を不静定構造にすれば良いというわけには行かない。完成した実構造物として静定構造物はないと見るのが正しいので、常に力と変形を同時に考えるのが自然である。このため、構造物全体の健全性、余裕度、じん性等を考えるための構造解析手法が必要ではないかとの指摘がある。例えば、外国の規準では、鉛直荷重の2.5%を水平方向に作用させて構造物の強靱性（ロバスト性）を評価している例がある。この種の計算は、従来の規準類で見られる設計荷重による応答計算ではなく、新しい照査荷重による照査とも呼べるたぐいのものである。線形構造解析を用いた従来の設計法では、数多くの実験結果をもとに強度の下限值相当を決定し、安全性と信頼性を調和させていた。非線形構造解析を用いて構造物全体の性能を照査する場合にも、これに相当するものが必要ではないかと思う。「石橋を叩いて渡る」というようなことが、構造解析でもできないかという話である。

本稿では安全性に関する性能に限定しているが、性能設計の利点は、機能を保持するために必要な性能はすべて考慮できる点にある。そこでは、安全性や使用性ばかりでなく、環境適合性・経済的合理性なども必要に応じて考慮することになる。例えば、耐久性の問題は、安全性の中にも含まれて議論されている問題であるが、要求性能の一つとして独立させることも可能である。この耐久性こそ、線形解析で追跡できる範疇にはなく、線形解析でないという意味での非線形解析が不可欠な要求性能である。我が国の設計規準が世界をリードする時代が来るとすれば、耐久性の照査が具体的に解析技術を駆使して行えるようになったときであろうと考えている。既存構造物の維持・管理・補修・改築、これらはすべて数値解析シミュレーションによって性能を評価しなければならないものである。技術的に100年の耐久性が検討できないのであれば、時間軸としては設計寿命より短い定期点検期間程度でもよいから性能照査をできるようにすることが期待される。スクラップアンドビルドは文明の問題で、メンテナンスは文化の問題であるとの意見を耳にすることがある。文化であると定量化は難しいと思われるが、定量化しなければ性能照査ができないことも事実である。

このように考えてみると、諸外国で許容応力度設計法と限界状態設計法がしばらくの間共存したように、適合みなし規定と性能規定も共存し、線形解析と非線形解析も共存すると考えるのが一般的であろう。技術者としては、いかなる要求性能にも対応できる技術力を持ち、線形解析と非線形解析を適宜適切な形で使い分けて保有性能を評価し、構造物を設計することが望まれる。非線形解析としては必ずしもコンピュータによらなくてもよいように思う。保有性能の限界は多くの場合非線形現象になることを理解し、非線形的な見方を常にすることが肝心である。現象を非線形的に見れるかどうかは、性能の見極めに重要であり、線形解析のみのトレンド思考に頼りっきりで、進歩・発展がないように思う。ヴァーチャルリアリティ（仮想現実）からリアリティ（現実）への橋渡しが設計の醍醐味であるはずである。現時点では、FEM解析を用いた設計は難しいとの意見も聞く。線形のFEM解析でも十分でないのに、非線形のFEM解析などは背伸びしすぎであるとのそしりを受けるかもしれない。私自身も非線形構造解析については分からないことがたくさんあると思っている。それだからこそ、若い人に夢と希望を与えるテーマであるような気がする。背伸びをすれば、背も伸びるといふ。大いに背伸びをしようではありませんか。