

これからの構造解析技術

丸山 久一*

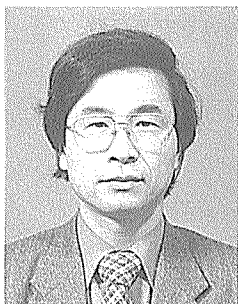
1. はじめに

平成12年9月26日～29日に、ISOのコンクリート構造に関する委員会（TC71）の総会および各部会（SC）が東京で開催された。部会は、今回新たに発足したSC6（鉄筋以外の補強材）を含めて6部会となっており、その中のSC4は、コンクリート構造の設計法を検討するものである。設計法の統一的基準を作るのは容易なことではないが、全体の枠組みとしては、構造物の性能を規定し、それを満たしているか否かを照査するという性能照査型設計法（あるいは性能規定型設計法）を基本とすることは合意をみている。

許容応力度設計法、終局強度設計法、限界状態設計法と、コンクリート構造物の挙動への理解が深まるにつれ、また、挙動を解析する技術が進歩するにつれて種々の設計法が開発されてきたが、それらを総合し、全体を包み込むアンブレラコードとしての思想は、性能を規定し、それを照査するというものである。

ところで、「技術」が「科学」と違う点は、必ずしも原理や理論が明らかにされなくても、われわれの生活に必要な「もの」を造るということにある。したがって、技術が開発される時、あるいは新たなものが生み出される時は、原理や理論の追求の結果としてより、技術者のそれまでの試行錯誤の経験とある種のひらめきが融合した結果によることが多い。

コンクリート構造物を造るということも、この延長上にある。コンクリート材料の開発は言うに及ばず、コンクリート構造物の建造方法も、多くの経験の積重ねで今日に至っている。その過程で、理論的・技術的に明らかにできることを少しずつ解明し、整理してまとめたもの、とくに、構造・部材形状、断面寸法、配筋方法などに関するものが設計法として伝えられている。したがって、設計法も、構造技術あるいは解析技術の進歩とともに、理論的および解析的に整理される部分が多くなっている。しかし、それでもまだ経験の累積として示されている事項も残っている。



* Kyuichi MARUYAMA
長岡技術科学大学 教授

本論では、このような設計法と構造解析技術の関わりを振り返りながら、今後の進むべき方向を考えることとする。

2. 設計法と構造解析技術

設計法は、一般に、作用する荷重と、構造物の応答との関係から定められる。近現代の設計法としては、許容応力度設計法、終局強度設計法、限界状態設計法、さらには性能照査型設計法などの名称を有するものが挙げられるが¹⁾、技術としての構造物の設計は、太古から存在する。日本においても、神社仏閣の建造を主とした宮大工や帆船の建造に携わった船大工たちがその技術を開発してきた。

2.1 近代以前

近現代のコンクリート構造物は、19世紀初頭のポルトランドセメントの開発や19世紀後半の鉄筋コンクリートの開発によって社会に登場するが、その設計方法は、17世紀以降の力学、応用力学の助けを借りているが、それ以前の、主として経験によって伝えられた技術にも大きく依存していた。

近代以前の設計は、主として絵図面である。現在のような応力計算、耐力計算は行っていないが、名人・上手の手になる図面として、それまでに伝承された経験および当事者の経験が伝えられている。現在では、木造建築と言えども、それなりの設計計算が行われているが、大工の棟梁によっては、図面だけで家を造る人もいる。

すなわち、近代以前においては、設計とは、主として、構造詳細あるいは構造細目を示すことであったと言える。作用荷重は、具体的な数値としては記述されていないが、ある限定された構造物においては、構造詳細を満たすことで、経験的に安全性が確保されている。もちろん、経験にないような外力が作用したり、想定とは異なる使い方をして安全性が保たれない場合もしばしばあったと思われるし、そのつど、構造詳細が変更されてきたと推定される。

2.2 許容応力度設計法

鉄筋コンクリート構造が開発された19世紀には、力学および応用力学は、弾性論の範囲では十分発達していた。その力学を用いた鉄筋コンクリート部材の曲げ性状やせん断耐力の算定法は、19世紀末から20世紀初頭に、すでに開発されている。コンクリートが引張りに弱い材料であることは理解されていて、引張りを受ける部分のコンクリートの抵抗力はないものとして扱われている。また、外的に作用する荷重もある程度算定されていた。

このような弾性論に基づいて、想定外力のもとで、コンクリート構造の部材各断面に生じる応力を計算し、その値が許容値内にあることで性能を確認するのが許容応力度設

計法である(図-1)。ただし、最初に構造形態や部材形状・寸法あるいは配筋などを決定するのは、試行錯誤によらざるを得ない。もちろん、経験豊富な設計技術者であれば、最初からほぼ許容値に入るものを設定することができる。

構造解析技術という観点から言えば、ここで用いられているのは、弾性論である。もちろん、全体構造を簡略化したモデルを用いる必要がある。骨組構造のように、線材を連結するモデルで扱える場合には、適用範囲は広いが、版構造は、当初は理論解が限られていて、適用範囲の制限も大きかった。近年のように、数値計算技術(ハードおよびソフトとも)が進歩するにつれて、弾性域の近似解法は、その適用範囲を拡大している。

弾性論による構造解析の長所は、適切なモデル化がなされれば、構造物に作用する外的要因と各部材に発生する応力が一対一に対応して求められる点にある。モデル化は単純になされる場合がほとんどで、実際の構造とはかなり違う場合もあり、それらを経験的に考慮するために、構造細目という経験則が用意されている。

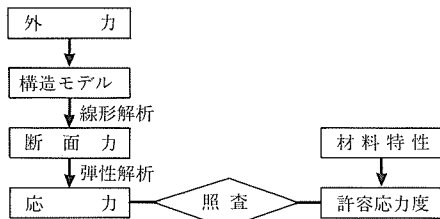


図-1 許容応力度設計法における応力解析

2.3 終局強度設計法

許容応力度設計法は、その体系の簡潔さから、長い期間用いられてきた。しかし、地震や衝突などのように、想定を遥かに上回る力に対しての安全性については確かでないことも明らかであった。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も含め)の耐荷性能に関する研究が進むにつれて、弾性論では最大耐力は求められないことも分かってきた。終局時には、鉄筋などの鋼材は塑性領域に入るし、コンクリートも塑性的な挙動をするようになる。さらに、鉄筋とコンクリートとの共同作用も、弾性域とは異なってくる。したがって、鉄筋やコンクリートの材料に許容応力度を定めても、終局時までの余裕は許容応力度からは判断できない。

このような背景と、塑性論の発展とが相まって出てきたのが終局強度設計法である。鉄筋コンクリート部材に関して言えば、曲げが卓越する場合については、鉄筋が降伏した状態について力の釣合いから断面耐力を簡単に求めることが可能であり、スラブなどについても、降伏線理論により、耐荷力が算定できるのである。

終局強度設計法の長所は、材料の各強度から、部材の最大耐力がかなり確実に求められることである。すなわち、部材破壊の安全性についての保証が可能となる点にある。しかし、部材の変形については触れないので、構造物に作用する外力から部材に作用する断面力を求める際には、線形解析によるしかない(図-2)。なお、構造物は、一般に

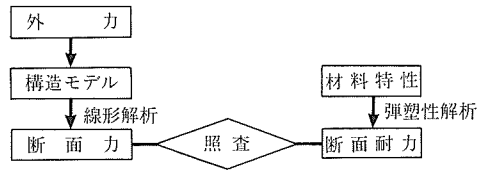


図-2 終局強度設計法における断面解析

は安全性が確保されていればよいということから、使用荷重における挙動は、主として構造細目により不都合が生じないように配慮されている。

この設計法においても、当然のことながら、構造形態、部材の形状・寸法・配筋などは試行錯誤で設定しなければならない。これは、設計法すべてに言えることである。

2.4 限界状態設計法

構造物の挙動に不都合が生じる限界の状態を想定し、種々の安全係数を合理的に用いて構造物を設計しようとするのが限界状態設計法である²⁾(図-3)。各限界状態については、その挙動がより確かに推定できる算定方法を用いる。構造解析的な面では、終局限界状態については、終局強度設計法で開発された方法を、また、使用限界状態については、許容応力度設計法で用いられた手法を取り入れているので、それらの設計法を包含し、さらにより広い発展ができるような体系になっている。

土木学会では、昭和61年(1986)に、コンクリート構造物の設計に対して限界状態設計法を採用することとした。それ以前の許容応力度設計法の場合、設計に関する項目はA5判で30ページに満たないものであったが³⁾、昭和61年版では設計編が独立し、B5判で200ページになっている⁴⁾。ちなみに、平成8年版では、設計編と耐震設計編を合わせると、B5判で300ページを超える⁵⁾。ページ数が増大した最も大きな理由は、鉄筋コンクリート部材の性能算定方法を、各限界状態についてより詳細に記述しているためである。表-1にその概要を示す。

終局限界状態の検討においては、基本的には、安全係数を除けば、終局強度設計法とほぼ同じ手法で断面力、断面耐力を評価する。断面耐力は、原則的には、耐力のみを評価する。ただし、曲げ耐力に関しては、解析方法を2通り

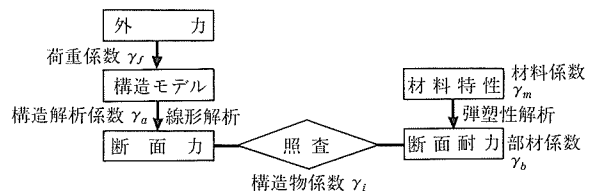


図-3 限界状態設計法における安全係数

表-1 限界状態と検討項目

限界状態	検討項目
終局限界状態	曲げ耐力 せん断耐力 ねじり耐力
使用限界状態	曲げひび割れ幅 変形
疲労限界状態	曲げ疲労耐力 せん断疲労耐力

許容している。すなわち、コンクリートの応力ひずみ関係と補強鋼材の応力ひずみ関係から求める方法と等価応力ブロックを用いて耐力を求める方法である。後者は、耐力のみしか求まらないが、前者は、モーメントと曲率が連続的に求まることから、荷重と変位の関係も連続的に求めることが可能である。

せん断性状に関しては、せん断力とせん断変形の間を連続的に求める解析手法も開発されているが、「コンクリート標準示方書」では、せん断耐力のみを算定するだけで十分としている。一般に、コンクリート構造物、とくに棒状の構造物は、基本的に曲げ性状が卓越するように設計するので、せん断破壊が生じないことが確認できればよい。ただし、壁構造や貯液構造であるシェル構造では、せん断力とせん断変形が卓越することから、耐力を評価するだけでは、必ずしも十分でない場合もある。

ねじり耐力は、現状ではその挙動が十分に明らかにされておらず、基本的には、せん断と同じように耐力のみを評価する手法が提示されている。

使用限界状態では、安全係数をすべて1としているので、従来の許容応力度設計法で用いられていた解析技術も使用できる。ただし、検討項目は、より詳細になっていて、曲げモーメントによる曲げひび割れ幅の検討および変形の検討も行えるようになってきている。これは、部材性状としての曲げひび割れの挙動および変形挙動がかなり解明されたことによる。

部材の性状を解析する技術として、「コンクリート標準示方書」で述べられているものを図示すると図-4のようになる。図は、主として曲げ性状を示している。実際の荷重変形挙動と比較して、使用限界状態で用いる弾性解析では、荷重の低い状態についての応力状態および変形状を求めているが、終局限界状態での解析技術は、主として耐力のみの算定であって、変形については必ずしも定めていない。

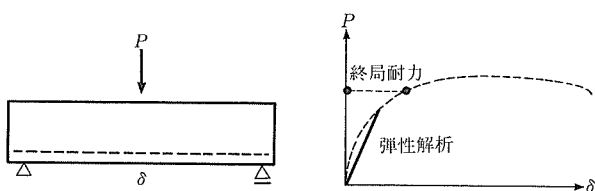


図-4 部材の性状と解析で得られる事項

2.5 性能照査型設計法

現在、各方面で性能照査型設計法が喧伝されているが、その実態は必ずしも明確になっていないように思われる。以下に、若干の私見を構造解析技術の進歩との関係について述べる。

本論の最初にも述べたように、設計法とは、所与の荷重、作用に対して抵抗できるような構造物を建造するルールである。したがって、構造物の挙動を解明する構造解析技術が十分発達していないときでも、非常に多くが経験によるものだとしても、設計法はあったと言える。17世紀以降、力学が発達し、構造物の挙動も徐々に解明されるにつ

れて、経験に置き換わる部分が増えてくる。とくに近年では、実験手法の発展、実験機器の長足の進歩、さらには、コンピュータの驚異的な発展とそれを駆使した解析技術の高度化で、構造物の挙動が明らかになり、経験に頼る部分を少なくできるようになっている。

経験に頼っていた時代でも、一応、安全という性能を目指していた。また、たとえその照査が名人・上手の勘であっても、名人・上手は照査していたはずである。許容応力度設計法の盛んな時代であっても、応力度という尺度において、安全性や使用性を間接的ではあっても照査していたと考えられる。

昭和61年(1986)以降、限界状態設計法を採用した土木学会「コンクリート標準示方書 設計編」では、コンクリート構造物の安全性(主として、最大耐力が関係する)および使用性(変形、ひび割れ幅など)は、部材レベルではある程度照査できるようになっている。したがって、設計法が限界状態設計法から性能照査型設計法に移行したとしても、示方書の枠組みにはあまり問題が生じない。要は、照査する性能を最初に具体的に規定するか否かであり、規定する性能の内容である。ただし、照査技術がそのレベルに達していなければ、所要の性能を、間接的に照査する(見なし規定)しかない。性能照査型設計法というのは、性能を照査する技術(構造解析技術)が高くなって初めて可能な設計法といえることができる。

土木学会コンクリート委員会で現在議論している内容を若干紹介すると、構造物の性能として挙げているのは、主に、安全性、使用性、復旧性(修復性)などである^{6),7)}。耐久性については、性能の時間変化として捉えるべきであるが、その照査技術が不十分なため、性能の時間変化を考慮しなくてよい限界という考え方が有力である。施工や維持管理についても、要求性能を検討している⁸⁾。なお、平成8年に設計編から独立して出版された耐震設計編は、耐震性能を規定し、その照査方法を示したものであって、日本で最初の性能照査型設計法による示方書である⁹⁾。この背景には、阪神大震災の後、コンクリート構造物の動的な挙動を明らかにする研究が精力的になされ、それとともに有限要素法を用いた非線形動的応答解析技術がかなり進歩したことが挙げられる。

3. これからの構造解析技術

これまで、設計法との関係で構造解析技術について述べてきたが、構造解析技術とモデル化について整理すると図-5のようになる。ケース(1)は、一般的には、骨組構造の線形解析である。部材を線材とし、線材の物性は弾性として軸剛性、曲げ剛性を与えて構造物の挙動を解析する。また、骨組構造の動的応答解析(耐震解析)も同様で、部材の履歴モデルを与えておいて、構造物全体の応答解析を行う。ケース(2)は、たとえば、棒部材の曲げ性状を、コンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ関係から部材断面のモーメント曲率関係として求め、さらに曲率を材軸方向に積分して材端における荷重変位関係を求めて部材の特性とし、全体構造の解析を行う場合などである。ケース(3)は、有限要素解

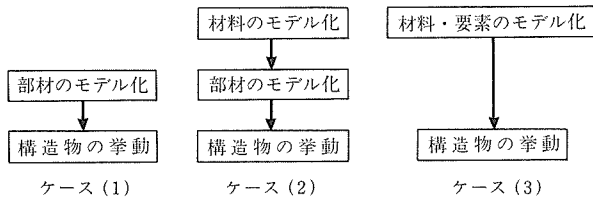


図-5 構造解析とモデル化

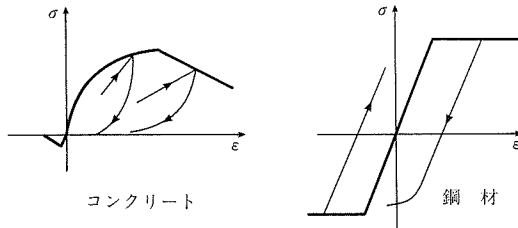


図-6 材料の履歴モデル

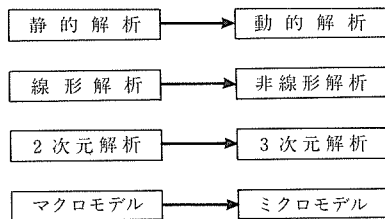


図-7 解析技術の進む方向

析などである。各要素を材料特性に基づいてモデル化し、全体構造を要素の集合として扱うことで、外的作用のもとでの全体構造の挙動を求めるものである。もちろん、要素の応力状態、ひずみ状態も同時に得られる。

多様な要求性能を照査するためには、構造物の一般的挙動が評価できなければならず、そのためには、材料特性をもととして、構造物の挙動が直接表せる解析技術が望ましい。たとえば、図-6に示すように、材料の履歴特性に基づく構成則を有する解析手法である。より汎用性を高め、かつ精度を高めるためには、図-7に示すような方向で構造解析技術が発展する必要がある。

鉄筋コンクリートを扱う有限要素解析技術¹⁰⁾は、現在、かなり汎用性が高く、精度もよくなってきているが、最大耐力以降の挙動や破壊モードを適切に表すことについては、まだ、開発の余地が大いにある。これは、ひび割れたコンクリート要素をどのように扱うかということと、ひび割れがどのように進展するかの予測方法に、まだ問題が残っているためである。この方面の研究を進めることで、コンクリート構造物、部材のじん性能が明らかにされ、耐震性能の照査に大きく寄与すると期待される。

コンクリート構造物の性能、とくに安全性や使用性が時間とともにどのように変化していくのかということは、構造解析技術としても、大いに注目していく必要がある。現在、コンクリートの微細構造に着目し、コンクリート内部の物質移動を解明するとともに、コンクリート構造物の劣化機構を明らかにする研究が進められている¹¹⁾。この種の研究成果を構造解析技術に取り込むことで、耐用年数を考慮したコンクリート構造物の性能照査

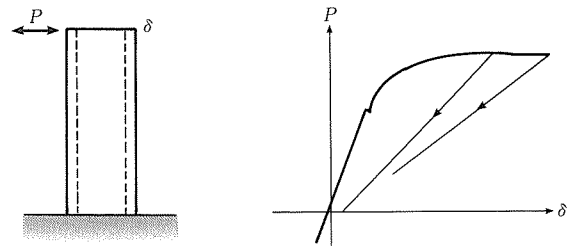


図-8 PC部材の履歴特性

が可能となる。

4. プレストレストコンクリート構造の解析上の課題

コンクリート構造物でも、ひび割れが発生しなければ、ほぼ弾性的な挙動を許すとしてよい。プレストレストコンクリート構造は、一般の鉄筋コンクリート構造に比べて、ひび割れ発生荷重は相当大きい。使用荷重状態で、ひび割れの発生を許さない構造も可能である。その場合には、線形解析で十分構造物の性能を照査することができる。しかし、より大きな荷重を受ける場合、あるいは、地震作用のもとでの性能を評価するためには、やはり非線形領域の解析が必要となる。

プレストレストコンクリート構造の挙動が鉄筋コンクリート構造の挙動とさらに大きく異なる点は、大変形後の履歴挙動である。図-8に示すように、大きな荷重を受けて、部材が塑性変形領域に入っても、荷重が除かれると、変位は原点に戻るような挙動を示し、残留変位が小さい¹²⁾。これは、地震後でも直ちに使用できるという点では、プレストレストコンクリート構造の大きな利点である。しかし、この挙動は、解析的に十分明らかにされているとは言い難い。大変形を生じているときのプレストレストコンクリート鋼材の挙動、附着性状、プレストレスト状態などを解明しないと、プレストレストコンクリート構造の性能を十分評価できない。

また、現在の耐震設計の考え方において、とくにエネルギー一定則という考えを用いるとき、このような特性を有するプレストレストコンクリート構造は、大きな地震荷重には、抵抗できにくいという結果になる。しかし、そのことは、まだ十分証明されたわけではない。このような履歴特性を有する構造の応答解析を広範囲に行い、プレストレストコンクリート構造の耐震性能を明らかにしておくことが急務である。

プレストレストコンクリート構造の新しい形式として、PCケーブルをコンクリートの外側に配して、設計施工の自由度を増す試みが種々になされている。たとえば、プレキャストコンクリートブロックを用いた構造、鋼ウェブとコンクリート床版との複合構造、エクストラドロード橋など¹³⁾である。模型実験を行いながら性能を確認して、実施に供しているが、その成果をより一般に供するためには、ケーブルの定着部、偏向部、ブロックの接合部などの挙動をさらに精度よく求める必要がある、その解析技術の開発が重要な課題である。

5. おわりに

構造解析技術は、構造物の設計と不可分のものであって、構造解析技術が発展、発達することで、構造物の設計法も変化してきた。もちろん、構造解析技術の発展のもとには、構造物の挙動を解明する数多くの実験があり、経験があり、さらに、それらを体系化する数学的手法が寄与してきたのは言うまでもない。ハードおよびソフトの両面でのコンピュータの高速な進歩は、数値解析をもととする構造解析技術の開発を大いに助長してきており、これは今後も継続されると思われる。コンクリート構造物の設計法は、性能照査型に移行しつつある。この設計法を支えるためには、より広範囲な分野で構造解析技術の開発と高度化、精密化が求められる。

ところで、構造解析技術は、あくまで与えられた構造の性能を確認する技術である。すなわち、性能照査のための技術である。構造物の形状を考え、部材の形状、寸法あるいは配筋などを決める作業、すなわち、構造物を設計することは、自由で飛躍する想像力と経験が必要である。構造解析技術だ

けでは、良い構造物は設計できないのである。

参 考 文 献

- 1) 角田：設計技術の過去・現在・未来，土木学会誌，Vol.85，pp.15～17，2000.4
- 2) 岡村：コンクリート構造物の限界状態設計法，共立出版，1984
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編（昭和55年版）
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編（昭和61年制定）
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編（平成8年版）
- 6) 前川：改訂の動向・経緯，土木学会誌，Vol.85，pp.30～31，2000.4
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書改訂に関する中長期ビジョン，コンクリート技術シリーズ32号，土木学会，1999.9
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編—耐久性照査型—（平成11年版）
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編（平成8年版）
- 10) 岡村，前川：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990
- 11) Maekawa, Chaube, Kishi：Modelling of Concrete Performance，E & FN Spon，1999
- 12) 池田ほか：PC橋脚の耐震性能と設計，PC技術の新しい動向と国際化，第28回PC技術講習会，(社)プレストレストコンクリート技術協会，pp.117～146，2000.2
- 13) 小川ほか：PC橋への複合構造の適用性について，PC技術の新しい動向と国際化，第28回PC技術講習会，(社)プレストレストコンクリート技術協会，pp.83～116，2000.2

【2000年10月23日受付】



刊行物案内

第 10 回 プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム 論 文 集

（平成12年10月）

本書は、平成12年10月に淡路島で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

頒布価格：10 000円（送料600円）

体 裁：B5判，箱入り

内 容：特別講演2編（15頁），講演論文集173編（924頁）