

特別講演Ⅱ

コンクリート構造物の設計と維持管理について

岐阜大学工学部 教授 小柳 治

1. はじめに

「設計」は工学の中心的課題といわれている。構造物の設計とは、構造物の目的に応じて、その構造物の生産段階から全使用期間に亘って要求されあるいは期待される、各種の性能を満足させるための方策を策定する営為であると言える。すなわち、構造物の力学性能のみならず、耐久性能、景観性能等々諸種の要求性能に立脚した総合的な目的関数が設定できるならば、その最適化を計ることにより、対象構造物の目的に即応した使用材料・構造物の形状や寸法・構造細目・施工方法等を具体的に定めることと定式化されよう。

土木学会のコンクリート標準示方書では、設計の目的として、「構造物はその目的に適合し、安全かつ経済的でなければならない。このためには、構造物または部材が施工中ならびに供用中に作用する荷重に対して適度な安全性を持ち、通常の使用時に十分な機能を発揮するように設計しなければならない。」としている。

一方、設計と照査とは異なるものであり、現行の示方書は主として照査の方法を示しているものであるという認識で、土木学会の将来の示方書では、設計と照査とを分けて、各種の性能の照査システムのマニュアルをつくるという方向の検討がされているようである。

土木構造物の特徴としては、(1)公共工事が基本であり従って社会的制約が大、(2)使用期間が長期に亘ること、(3)大規模性、(4)自然との関わりが大、(5)ほとんどが一品生産的、等の諸点が挙げられている。さらに、取替え・取壊しが困難であることもそのひとつである。これらの特徴のいずれをとっても、上記に述べたような設計に関する目的関数の、単純な定式化を行うことの非常に困難さを示すものである。

構造物の寿命設定も、構造物の設計の中で重要な位置を占める。昭和61年制定のコンクリート標準示方書においては、「構造物に要求された供用期間、環境条件および耐久性能を考慮して設計耐用期間を定める」ということで、「構造物の設計においては設計耐用期間を明確にする」という考え方が明文化された。構造物の耐久性能に基づく耐用期間は、維持管理のあり方によって大きく左右されることが多い。コンクリート構造物の維持管理についての指針(案)が土木学会から平成7年3月に出された。

優れた構造材料であるコンクリートをより高度に利用する、コンクリート構造物のより合理的な設計方法の設定については、なお広い立場からの種々の論議が必要と考える。ここに、とくにコンクリート構造物の性能と維持管理の諸点からの設計についての私見を述べたい。

2. 構造物に要求される性能と設計

ここで、構造物に要求される性能について考える。従来より、構造設計の基本として、「用・強・美」が挙げられてきたが、構造物に要求される社会的ニーズの多様化と材料や技術の高度化によって、要求される性能の幅が広がっている。しかしながら、まず基本的に使用性能を満足することに加えて、土木構造物は自然の力を受けるために、力学的に安全でなければならない。構造物に要求される主要な性能としては、力学性能に加えて、時間の経過に伴う性能低下に対する抵抗性として定義され得る耐久性能、さらにそれに加えて景観性能のほか、遮蔽性能、構造物から外部への影響を表す第三者影響性能、維持管理の容易さの性能、取り替え易さの性能、等々が挙げられる。これらの、いわば完成後の構造物性能とは異なっているが、重要な観点として、施工性能とも言うべき製作上の容易さや作業安全性等と、経済性が挙げられる。経済性についてはとくに、対象とする構造物が一般に公共事業によるという観点からも、常に最重要視されるポイントであるが、経済性の論議の対象は単なるイニシャルコストであるはずはなく、構造物の寿命を考慮した維

持管理の費用を含むライフサイクルのトータルコストで判断されなければならないのは当然のことである。

上に構造物に要求される性能を並列的に列挙したが、対象構造物の目的とそのおかれた環境条件によってこれらの要求性能のレベルは異なり、要求性能のウエイトは自ずから異なってくる。構造設計は種々のモデル化に立脚するものであり、これらの要求性能を経済的な制約条件の基で満足させる解を求めることとなるが、基本となる各種性能のモデル化とその精度あるいは近似度がひとつの論議の対象となる。

構造物の設計においては安全性が最も重要視されるものであることから、従来の構造設計においては、強度性能を代表とする力学性能が中心に考えられ検討がなされてきており、「設計」イコール「強度設計」という考え方もされてきた。このため、各種性能の中では強度性能のモデル化が最も進んでいる。強度設計の基本は、限界状態設計であれ、終局強度設計あるいは許容応力度設計であれ、いずれも外力作用(荷重)に対して構造体(部材)の耐力が一定以上の安全率でもって存在することを確かめることによって定式化される。ここで、外力作用、耐力算定、さらに安全度の検討は、何れも種々のモデル化を基礎に行われる。対象構造物をより一般化するとモデルの近似度は低下し、一方、特定化するとモデル化の精度は向上する。一般的な標準モデルは示方書などに示されているが、土木構造物が本質的に一品生産的であることから、必要に応じて特定化した場合のモデルが認められ、自由に使用できることが今後の重要な方向と考える。なお、力学性能の中では強度性能が最も重要視されてきたが、静的な強度性能に加えて耐疲労性能、耐震性能等が対象になると共に、(縦軸の)強度性能ばかりでなく(横軸の)変位性能、あるいは両者で囲まれる吸収エネルギーあるいはタフネスの立場からの取扱いも重要になってきている。

力学性能とくに強度性能以外の各種性能のモデル化は、必ずしも精度の議論ができるほど十分には確立されていないものが多いが、構造設計が構造物に要求される性能を基本とするものであるため、性能のモデル化を確立しその定量化に基づいた設計は、より合理的な設計にとって不可欠である。多数の性能を同時に満足させるような多機能かつ高性能なコンクリートをハイパフォーマンスコンクリート(HPC)、またそのような性能を持つコンクリート構造物をHPC構造と呼ぶこともできよう。今後とも、優れた多機能の性能を持つHPC構造の開発・研究が必要であり、その基本としての多様な性能の評価方法の確立に向けての努力が進められねばならない。この時に、確立していない性能の定量化を計るときの問題点として、「設計」は総合的なものであり、従来からの経験の積み重ねによって構築されてきた要素も大であることから、論理的なモデル化の構築によって得られる性能の幅が大きく従来からの経験則からはみ出す時には、その論理の正当性を疑われることもある。またとくに、新しい物事の導入に当たっては、現行の不完全さを棚にあげて新しいものに対する完全さを求める事もありがちであるが、とかく現状維持になりがちな一般的趨勢に対し、新しい方向が常に志向されてゆく事が必要である。なおここで、設計の立場から考えれば、解析と異なりモデルは必ずしも現実の現象と一致する必要はなく、目的に応じて将来的に近似度を高める方向の検討がなされれば良いとの考え方もできる。種々の性能を積極的に設計に取り込むためにも、従来の常識にとらわれずまたその精度は将来の検討に任せるとしても、構造物にとって必要と考えられる種々の性能の定量化を計る方向が重要と考える。ここで、限界状態設計法の考え方は、単に強度設計ばかりに対応するものではなく非力学的なものを含むいかなる性能を対象としても差し支えない事が大きな特徴であり、利点である。

なお、時間の経過に伴い将来的に新たな要求性能が付加されることがある。とくに土木構造物は取り替えが困難な事が多いためこの点に対する考慮が問題となる。構造物の建設時において、将来のニーズに対する有る程度の予見とそれに対する対応が必要であるとしても、設計時にその全てを織り込むことは非常に困難であるため、新たな性能の付加に対しては、必要とされた時点での時宜にあった適切な検討・見直しを行うことが原則と考える。

多様な性能を総合的に考慮して設計を行ったものを作り上げる上では、各々の部分の中での最適化が全体の最適化に当たらないことが多くある。設計と施工が分離されている場合において、対象構造物が多様な性能を総合的に評価したものであり、かつ設計の基本となるモデル化が個別になればなるほど、設計の思想

を施工にいかにか明確に反映できうかが問題となつてこよう。例えば、「設計施工一貫」という方向については、現行では一般化は困難であるにせよ、その妥当性を客観的に評価する体制を明確にできるならば、試行的に始めることも必要ではないかと考える。

3. 構造物の設計耐用期間

構造物の設計の上で、構造物の寿命設定が問題となることを既に述べた。土木構造物の特徴は、通常の工業製品に比べて、予定される使用期間が非常に長期に亘ることである。設計の精度をあげてゆくためには、従来漠然と論議がされてきた構造物の設計上の耐用期間を明確に設定する必要がある。コンクリート構造物は従来、永久構造あるいは半永久的とも言われてきた。永久、あるいは半永久の言葉の定義がはっきりしないために世間の誤解を招き、また構造物の寿命に関する議論を混乱させてきた。

構造物の寿命とは法律的、経済的、物理的等種々の観点から論議されてきている。また、Pugsleyによれば、次のような分類も示されている。

- ・記念構造物(monumental) : 200~500年・・・大きな教会、大橋梁、市役所
- ・永久構造物(permanent) : 75~100年・・・一般共同住宅、大学の建物、道路橋や鉄道橋
- ・暫定構造物(temporary) : 25~50年・・・通常の工業的構築物

ここで、永久構造物の「永久」の語について考えると、これは「永遠」の意味ではなく、「長くいつまでも続くこと」の意味であり、しかも「長く」というフエジーな言葉に世間の理解と異なる部分があったことが混乱を引き起こしたものである。寿命あるいは設計耐用期間の議論において、物には寿命があり、絶対的な永久構造物はありません、相対的な長いという言葉と絶対的な年数との関係をどのようにつけるか、「永久とは願望であり、現実との対応では何年程度か?」という議論を詰めて、世間一般の誤解を生じないようにする必要がある。

構造物の寿命を考えるに当たっては、時間軸の増加に従って未来予測が困難となることは当然である。すなわち、設計上の耐用期間の設定に当たっては、時間経過にともなうリスクの増大と構造物の劣化にともなう耐力低下、さらには構造物の持っていたところの目的の変化がありうるということが指摘される。設計耐用期間の設定に当たって、将来予測の可能性からのタイムスパンを考えると、例えば次のような3レベルに分けて考えることができよう。

- ① 25~30年・・・かなりの状況が予見可能であり、またほとんどコントロール可能
- ② 50~80年・・・ある程度の状況は予見可能、ある程度は不可能
- ③ 100年以上・・・社会状況の変化がありうる(基本的に期待のみ?)

予見の可能性に加えて、構造物の重要度やその代替性等を考慮して設計耐用年数を決定することとなるが、基本的には設計耐用期間は希望的予測を基にする長期を設定するのではなく、供用性の保証できる期間すなわち予見の可能な期間に設定し、その期間に立ち至った時点で全面的に機能の検査を行い、改めて耐用期間を設定することが基本であろう。例えば、予定寿命時点において、構造物の全てを取り替える(オーバーホール)ことは非現実的であるが、[取り壊し+再構築]費用の%オーダーをかけた徹底的な点検と、構造物の寿命の再設定を行う方法は現実に有り得よう。

次に、設計耐用期間と直接関連して論議される外力を代表とする不確定性に対するものとして、安全性の問題がある。安全性すなわちリスクをどのレベルまで受け入れることが可能であるか、どこまで安全でなければならないかは、従来確率論を基礎にした取り扱いがされてきた。安全性の論議では、[安全率=(1-破壊確率)]と定義されるが、前提となるべき破壊そのものの定義は必ずしも明確でない場合が多い。破壊は一般に、考えているレベルでの機能の喪失と結び付けて考えられるものであり、しかも破壊はひとつの過程として捉えるものであると考える。基本的に、100%安全なものはないとして、もし破壊が定義されたとすれば、その破壊の定義と共に、定義された破壊に対しての受け入れられ得るリスクについての議論をよ

り進めることが可能となる。外力の推定において、最も不確定な代表が地震である。兵庫県南部地震を受けて土木学会から出されたコンクリート構造物の耐震設計基準によると、構造物のライフサイクルの間に数回生じ得る地震動(レベル1地震動)と、構造物の耐用期間には生じないかもしれない(発生確率の極めて小さい)強い地震動(レベル2地震動)との2段階設定によっている。耐震性能として前者の場合は機能が健全であり補修せずに使用可能であることは当然として、後者の場合の耐震性能としては、塑性ヒンジやモーメントの再分配を認め、地震によって構造物全体系が崩壊しなければよいとする見解を示している。しかしながら、計り知れない外力の極大地震に対しては、重要度と震害後の代替性のレベルによっては、人命の尊重を最大の課題としつつ、むしろ破壊過程制御設計とも言うべきものとして、積極的に構造物全体系の破壊のシナリオすなわち外力レベルと関係つけて構造物の部材を壊してゆく順序を設定し、構造系を変えることによって破壊の進行を制御するとともに、さらに進めて構造物全体系の崩壊迄の時間を十分延ばすことにより人的被害を食い止める方向が検討されて良いと考える。

いずれにせよ、各種構造物について、このような構造物の設計耐用期間や、安全性ならびにリスクをはじめとして、構造設計においては、どのような基本的な考えやモデル化の基に設計が行われ、さらに耐久性についての考え方がどのように設定されているかを、エンドユーザーに対して十分徹底して説明し理解を得ておく努力が重要であろう。

4. 耐久性能と維持管理

構造物の耐久性能は、その設計・施工に加えて維持管理に負うところが多い。コンクリート構造物の耐久性や維持管理が問題となってきたのは、とくに「半永久的」とされていたコンクリート構造物の塩害やアルカリ骨材反応による構造物の劣化が問題とされてきてからである。「塩害」や「アル骨」の問題はそれなりに研究が精力的に進められ、対処の方法も明らかにされてきているが、従来から建設されてきているコンクリート構造物の経年度の増加とともに、現在ならびに今後建造されるであろうコンクリート構造物の増加を考えると、維持管理の問題は今後益々重要度を増し、また補修・補強を含む維持管理にに必要な費用も今後益々増大してゆく事は明かである。

構造物が供用されてからの期間は、一般には計画、設計、施工の期間に比べて非常に長期に亘る。このために、その構造物の目的を達成するために必要とされた諸機能とそれらの経時変化について環境条件を考慮し検討した結果に基づいて(計画)・設計・施工がなされる。しかしながら、当初の計画・設計・施工の間にいかに十分な検討がなされていても、構造物が完工し供用が開始されてからの構造物の諸機能の経時変化は、当初に予定されていたものと必ずしも一致するとは限らず、また、当初全く考慮されていなかった問題さらには新たな社会情勢などの変化によって生じた事態に対しての検討と対処が必要となってくる場合もある。具体的には、構造物の供用後の経時変化に従って、構造物の所期の性能が保持されているかどうか、またその性能の低下があるならばいかなる対処を講じるかと関連する事項が構造物の維持管理である。構造物の特性の経時変化を扱う上では耐久設計と非常に近い部分があるが、供用開始前の設計段階での取扱いを中心とする耐久設計と維持管理とは性能変化の取扱いについて時間軸の上での相違がある。

維持管理のフローは、劣化予測・点検・評価・判定・対策で示され、記録の重要性も指摘されている。基本となる非破壊試験、長寿化、劣化予測技術、評価判定技術、補修・補強管理技術等について、それぞれについてまたそれらの総合化についての今後の精力的な研究開発が必要とされている。まず、劣化予測技術については、土木学会の維持管理指針(案)では、凍害・塩害・アル骨等の劣化要因別に劣化予測のモデル化を行うこととなっているが、それぞれの要因についての性能低下曲線のモデル化については今後のデータの集積ととくに環境との関連での検討が不可欠である。維持管理の具体策の設定においては、限界状態設計の概念が効果的に適用し得ると共に、性能曲線が急激に低下する場合の取扱いにはとくに注意が必要であることに留意すべきである。

点検の重要性は言うまでもないが、従来より点検の困難なところで構造物にとって致命的となる大きなトラブルを生じた例が少なからずあることを銘記すべきであり、点検は対象構造物の損傷劣化の進み方について熟知した経験者の支援を受けて行われることが望まれる。有効なエキスパートシステムの開発も重要である。それにつけても、大・小を問わず従来からの構造物の劣化・損傷の事例がもっとも報告されて良い。そのためにも、貴重なこの種の事例について、興味本位の取扱いや、性急なマスコミ的な責任追求ではなく、共有財産としての純粋な技術論としての取扱いができるようにすることが、構造物の設計ならびに維持管理技術の発展にとって重要かつ緊急に必要とする課題である。

5. おわりに

構造物は計画・設計・施工の段階を経て建設され、供用後の維持管理によって利用者に提供されるものである。構造物を考えるときには設計にしろ維持管理にしろその一つの側面からのみ捉えるばかりでなく、広くかつ総合的な視点が重要である。ASCEの中には新しくinfrastructure systemsの論文集が発刊されており総合的な見地からの検討の重要性を示している。とくに、現在では分業体制が進んでおり、各分野での進展はそれぞれに重要であるが、分業体制の中ではとかく対応の範囲を狭くして部分的にしかものを捉えなくなる危険性がある。構造物が総合的なものであり、また部分的な最適化が全体の最適化とつながらない事が多い事を考えると、構造物に携わるものとしては常に全体を見る目を持つと共に、自分の受け持つ次の段階がどうなっているかに注意を払う必要がある。もしこのような人間の努力に頼るシステムの構築が既に不可能となっているならば、所期の目的に沿った性能を持つ構造物が必ず作り上げられるような、全体を通した新しいシステムの構築が必要である。ISO 4000等もその方向であろうが、現時点では「構造物の具備すべき性能の各々がうまく抽出されていない」恐れも大きい。目標とすべき構造物に要求されるべき多種の性能をもっと明確にすると共に、その性能の必要レベルが達成された事を明らかにする評価方法(早期判定が重要)の確立、さらには責任の所在を含めた品質保証のあり方の各々を、早急に作り上げるように力を結集する事が重要事項と考える。なお、示方書をはじめとして、システムは一度出来上がるとその変更が非常に困難となる事が多い。時代ならびに社会の変化に応じて常にフレキシブルに対応できるシステムが必要であり、また社会の変化に応じてシステムを変えてゆく努力が強く望まれる。

構造物はエンドユーザーのためにつくられるものである事は当然である。ここで、社会資本のこすどが議論の対象となる。基本的には「ものは安いほど良い」という考えがあり、一定の品質が保証された上ではこの考え方が正しいことは論を待たないが、前述のように構造物に付加すべき性能が全て明かとなってはいない段階において、「一定の費用の中で最も性能の優れたものを求める」のではなく、「一定の性能の中で最も経済的なものを求める」として、さらにただ単に初期の建設費が安いことが最重点ととして、耐久性が低く将来のメンテナンスに多額の費用を投じなければならなくなるような愚を犯さないようにしなければならない。そのためにも、構造物の目標とするために構造物が具備すべき性能、ならびにその性能が付与されているかどうかをエンドユーザーに対して十分説明する事が重要である。

次の時代のために、良質の社会資本の蓄積と管理が強く要望されている。一方、時間の経過につれて、世の中の変化があり、技術の進歩や構造物に対する要求性能の変化もあるであろう。いつの時代であっても、ココロをこめたモノづくりが基本であり、エンドユーザーにとって良質のものが適正価格で提供され、維持されてゆくことが重要であろうと考える。今後益々重要になってゆくものとして、地球環境保全の観点からの環境影響度の重要性を考慮にいれて、今後ともに優れた材料であるコンクリートの特性を生かした良質の構造物の適切な建設と維持管理が進められる事を期待する。

