

# コンクリート構造物の設計と耐久性・維持管理

岐阜大学名誉教授

小 柳 洽

## 1 はじめに

ミレニアムをむかえて新しい世紀の胎動が始まろうとしている。20世紀は鉄とコンクリートの時代と言われたように、構造物を構築する基本材料としてコンクリートは無くてはならないものになっている。鉄鋼と共に20世紀の社会資本を形成する基本的な建設材料であるコンクリートは、21世紀においてもその代表的な位置を保ち続けるのであろうか。

ポルトランドセメントの特許が最初にイギリスで取得されてから180年近くなるが、鉄筋コンクリートとして構造物に適用されたのは漸く100年を越す程度であり、また、わが国でコンクリート構造物が大量に建造されるようになったのは、戦後のわずか50年程度のことである。この間、コンクリートの有する各種の性能を積極的に利用する方向もないではなかったが、その多くの利用はむしろ、まず安価であって、さらにその取扱いの良否に関わらず固まるという、いわば許容幅の大きな材料であったからであろう。そのため、本来的に優れた性能を持っているコンクリートが、安易な取扱いによってその耐久性と信頼性に疑問符が付けられた代表例が、今年の「剥落問題」であったと考える。

コンクリートは細・粗骨材をセメントペーストで結合したものである。このため、硬化したコンクリートの示す種々の性質は主としてセメントの水和生成物の性質で定まり、また一部は量的に全体容積の大部分を占める骨材の性質も影響する。セメントの水和物は、C-S-H(珪酸カルシウム)ゲルおよび水酸化カルシウムが基本となっている。強度の発現に関係する組織の形成の概略は判明しているが、セメントの水和反応は化学反応であり、コンクリートとしての各種性能をより詳細に論議する上での、水和組織とその時間的な変化については、今だ十分には解明されたとは言えない段階である。

工学は20世紀のハード重視の世界から、いかに成熟社会における技術としての転換を図ってゆくかが問題であるとされている。そこでは、環境への負荷をいかに低減して地球環境との調和を図ってゆくかが基本的な命題であり、また膨大な社会資本のストックをいかに維持管理してゆくかの技術が要請されている。ここで、コンクリート構造物は、コンクリートという材料に立脚するために生じる種々の側面を有するため、高速道路に関わる上部構造物を念頭において、コンクリート構造物の設計や維持管理についての私見を述べたい。

## 2 コンクリート構造物の設計

構造設計とは、対象とする構造物の目的・用途に応じて、その構造物の建設段階から全使用期間に亘って要求される性能を、要求されるレベルで保持することを満足させるための方策を策定することであると言えよう。構造物に期待され要求される具体的な性能には、構造物の目的に応じた使用性能のほか、安全性と関係する力学性能、時間的な性能低下と関係する耐久性能や施工性能などがあり、さらに構造

物の周辺にもたらす影響としての景観性能や第三者に与える影響度を含めた社会環境性、地球環境問題と関連した解体再利用性などが挙げられている。上記の性能と観点は異なるが、公共的建造物であるために、経済性も重要なポイントであり、上記の各種要求性能とそのレベルを考慮してそれらの最適化が行われる。

設計の基本は、このように総合的な観点から要求される性能を、要求されるレベルで付与する性能設計である。これらの性能の中で、従来から最も検討が進められ定式化されてきたのが、いわゆるハードの力学性能を対象とした設計であり、中でもとくに重視されてきたのが建造物の安全性と結びつく強度設計の分野である。いち早く確立された許容応力度設計では、従来からの知見と経験の蓄積によって、対象とする外力の組み合わせによって許容値を変化させようことから、実績のある一般の鉄筋コンクリート建造物には便利でかつ経済的な設計法といえる。許容応力度設計は、許容応力という一つの限界状態を対象とするものではあるが、線形弾性力学に基づいているために、コンクリートに大きなひび割れを生じたり、鉄筋が降伏した後の非線形が卓越する領域には、現実との対応での適用が困難である。建造物の安全性を荷重の不確定性を考慮せず単に材料安全率のみに負わせていることも問題がある。このため、終局強度設計法や、建造物のたちいたる種々の限界状態に対して検討を行う限界状態設計法が進められてきた。とくに限界状態設計法では、構造体を必ずしも部材要素に分解せず、崩壊機構のように構造体を総体として取り扱うことも可能であり、また従来にない新しい材料（例えば繊維補強コンクリートやレジンコンクリート）を用いた建造物や、新たな構造形式が対象となる場合には、許容応力度設計よりはるかに力学設計の目的に合った結果をもたらすものである。また、力学設計は強度性能を中心に組み立てられてきたが、変形性能やタフネスなど強度以外の力学指標、あるいはそれらを組合わせた総合的な設計手法も考えられる。なお、限界状態設計法は、それが例えば景観設計などの非力学的な性能を対象とする分野にまで拡大して適用できる手法であることが大きな利点である。

示方書・基準類はその策定された時代の高度の技術水準を示すものであるとしても、これに固執すると技術の進歩が阻害される。常に示方書・基準類やマニュアルは時代の最新の知見を取り入れて改定して行くことが肝要である。現行の土木学会標準示方書の限界状態設計法については、安全性のより合理的な検討（対象とする建造物とその状況に応じて、とりあえずの数値が示されている5つの各部分安全係数のより適切な設定など）が必要である。

構造設計は種々のモデル化を基礎として組み立てられている。このモデル化については、現行のままでも差し支えないものも多いが、目的と検討を行う限界状態に応じて、さらに建造物の最終段階に至るまでの実際の破壊挙動（破壊過程）をより正確に把握して、現実の破壊過程に即してモデル化の近似度を上げることが必要になってきているものも多い。そこでは、せん断破壊などの分岐の問題も考慮が必要となる。また、フーチングやスラブなどの三次元的な広がりを持つ部材（構造）では、力学挙動のモデルの近似度をもっと上げることが必要であり、構造の破壊過程の把握と破壊機構の正しい解釈に基づいた配筋の適切化などの検討が当面の課題である。現象の把握のためには、大寸法の実験とその的確な観察が非常に有効であり、そのほか各種の計算機実験が援用される。

レベル2地震動のような極大荷重を対象とする場合には、構造体として破壊過程のどこまでを許容するかを定めることが重要である。人命の被害を最小限にすることを前提として、対象建造物の置かれた状況と外力レベルによっては、建造物の使用性の著しい低下やそれ以上の破壊過程の進行をも許容すべきであろう。すなわち、本来建造物は最終的には壊れるものであり、どのような外力状況のもとでどのような過程でどのように耐力を失なっていくかと言うシナリオを描いておき（シナリオは当然一つとは限らない）、実際に建造物はその予測のように破壊過程をたどることを追跡し検証する方向が必要と考

える。

環境負荷への低減から、材料の高度利用が重要であり、目的に応じてコンクリートの有する種々の性能を有効に利用する方向が進められなければならない。例えば、現場施工でも圧縮強度が 100 MPa を超える高強度コンクリートの利用が可能となっている。このような高強度コンクリートの利用としては、構造部材の自重の軽量化によって構造物の長大化、桁高の減少が可能であるが、これはさらにはコンクリートの本来的に持つ自由な造形性とあいまって、景観性を考慮したより一層の自由な発想に基づく構造形態への発展が可能となろう。また、コンクリートの組織の緻密度を上げることによって、高耐久性のコンクリートが可能である。地球環境問題からも、構造物の長寿命化の効果は非常に大きい。経済性は初期の建設コストでなくライフサイクルコストで考えるべきものであることは当然であるが、とりわけ長寿命の構造物を対象とする場合の寿命設定と維持管理費用の合理的な予測に関する検討と、その検討結果の実設計への導入が重要である。

近時、設計の性能評価型への移行が検討されている。性能評価型の設計に当たっては、構造物のおかれる環境に応じて、使用性・安全性・景観性などの種々の性能を定義して、必要に応じてそれらの性能をどのレベルで設定するかを決めなければならない。それに対応して、設定した性能を付与できたかどうかを判定する方法を確立する必要がある。とくに、構造物を施工した直後に付与した性能とそのレベルが判定できるような、即時性能判定の新しい技術を開発することも重要である。

一方、当該構造物の設計条件、つまりどのような性能をどのレベルで期待したものが公表されることも重要である。一般からの付託を受けての構造物に関わる立場であるならば、一般への設計条件の公表が必要なことは自明であり、先述の極大荷重に対する挙動のシナリオも同様である。また、構造設計はその時点の知見をもとにした最善の設定であるとしても、必ず最適化あるいは不確定要因に対する技術的判断を伴うものである。とくにこの「技術的判断」が次世代に適切に伝わるようにすることが肝要であり、場合によっては免責制度の導入をも考慮すべきであろう。これによって、設計のコンセプトあるいはその部分改訂がより容易になり、技術の進歩に即応することができることになる。

構造体のコンクリートの性質は、その配合ばかりでなく取扱いすなわち施工によって大きく左右される。すなわち、コンクリートの基本として、米開拓局のコンクリートマニュアルに示されているように、良い均質なコンクリートは、適正な材料・配合・取扱いによって得られるものである。上に述べたように、設計において対象とする構造物に要求されたレベルの性能が正しく付与されるように、コンクリートの施工がされなければならない。それと同時に、構造設計においてはとくに配筋間隔など施工が困難とならないような配慮（後述の維持管理についても同様）が重要であることは論をまたない。

耐久性を考慮した性能評価型の方向で、コンクリート標準示方書(施工編)の改定がなされたり、対象とする環境条件の下で目的とする耐久性能を保持するコンクリートの基本は、コンクリートそのものでありまたその施工である。現在では施工されるコンクリートのほとんどが生コンによっている。生コンは JIS 製品であるが、現行の JIS は強度とスランプだけを規定しているのみで、上記のようなコンクリートの各種性能が付与されるとは限らない。そのため、各種性能を持つコンクリートが容易に入手できるようなシステムの再構築が必要となる。また、地球環境問題と関連して、コンクリートのリサイクル材、産業副産物、あるいは焼却灰などのセメントへの混入が必然となっている。少品種大量生産の代表であったセメントあるいはコンクリートが、多様化する将来においては、高性能コンクリートから低品位のものまで、目的に応じたコンクリートの適切な選択と入手ができるように、コンクリートの供給体制の整備が是非とも必要である。それと同時に、その受け入れについては、目的とする所要の性能とそのレベルを持つことの確認が必要であり、そのためにも、新技術としての即時性能判定の確立が重要

である。

### 3 コンクリート構造物の耐久性と維持管理

耐久性とは、時間経過に伴う性能低下に対する抵抗性である。ここで、経過時間と共に、構造物の置かれる環境条件が大きく影響するため、耐久性に関する論議は複雑となる。なお、コンクリート構造の耐久性の論議は、基本的には材料としてのコンクリートの耐久性と、構造物とくに鉄筋コンクリート構造としての耐久性とがあり、両者は必ずしも一致しない。後者の構造物の強度性能の低下は、主として補強材の耐久性が問題となる。

コンクリートの耐久性は、かつては気象作用特に凍結融解作用に対する抵抗性が問題とされたが、AE減水剤の使用が基本となってからは一般的には大きな問題とされなくなった。また、酸や硫酸塩に対する抵抗性の問題は一般的ではない。したがって、鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートのようなコンクリート部材の耐久性と関連するコンクリートの耐久性は、中性化やアルカリ骨材反応、さらには一般的にひびわれが問題とされている。補強鉄筋の発錆と関係するコンクリートの中性化は、従来は水セメント比の大きなコンクリートの問題とされていた。しかしながら、かぶり不十分な場合やかぶりコンクリートの締固めが不十分なために、橋梁スラブ下面や壁体においても中性化が鉄筋位置まで進行して発錆が生じ、かぶりコンクリートの剥落を生じる例が少なくない。ちなみに、土木学会標準示方書(昭和61年版)設計編では、かぶり厚さの最小値をコンクリート強度によって変化させることとしているが、本来的には材料・施工の両者に関係するコンクリートの緻密度に応じた、コンクリート中の透気性あるいはイオン透過性と結び付けるべきであり、緻密度の簡便な計測方法が開発されれば、より現実的な耐久性の論議が可能となる。アルカリ骨材反応については、阪神高速道路管理センターの構造物の耐久性調査委員会から、長年にわたる数多くのレポートがあり、ここでの記述は省略するが、昭和50年代のアル骨材問題発生当時からの知見が増大した状況が変化した現在において、ある程度のひびわれが構造部材としての力学特性を安定化させることも含めて、改めて構造面からの問題点の整理をすると共に、骨材問題を踏まえた新たな対応の検討をすべき時期であろう。ひびわれ一般については、材料とくに骨材に起因するもの、配合とくに単位水量に起因するもの、施工に起因するもの、設計に起因するものなど、原因は多様であり、しかもそのいくつかが重なっているのが通例である。ひびわれの論議は、単にある・ないのレベルにとどまることが多いが、ひびわれの特性として、単にひびわれの長さや幅だけでなく、密度、深さ、形状、パターン、その他種々の特性評価が可能であり、それらを定量化した総合的な論議が必要である。

構造物に直接的な耐力低下をもたらすものは、補強材すなわち鉄筋の腐食である。鉄筋の腐食は、ひびわれの存在による酸素の導入と、さらに腐食を促進させるマクロセルの作用である。特に塩分環境下ではマクロセル腐食が進行するために、海塩粒子の影響の大きな海岸に近い地域では大きな被害を生じているが、スパイクタイヤが禁止されて後の現在では、凍結防止剤として塩カルや塩化ナトリウムが大量に散布されているため、将来的には内陸部で塩害が生じることが予想されており、内陸部においてもこの種の塩害の発生に対する早急な対策が必要な状況にある。

構造物は、所要の耐久性を期待して一定の予測モデルをもとに設計・施工がなされるが、実際の構造物のおかれる環境条件は必ずしも予測されたものと同じではなく、また同一であったとしても当初と不変ではなく環境条件が変化することがある。このように、時間の経過にと共に諸条件が変化することに加えて、コンクリートという材料の経時変化、補強材である鋼材の腐食の進行、疲労その他によるひび

割れの進行によって、構造物の安全性の低下が生じることがある。このため、コンクリート構造物においても、再塗装時に部材の点検が可能な鋼構造物に比べてその間隔は大であるとしても、ある時間間隔での健康診断に相当する点検調査が必要である。さらに、セメントや混和材料の新材料の使用が進んでいる。次世代のために、このような新しい材料が使用されたコンクリートに関する暴露用供試体を作成し、数十年に亘る実時間での耐久性の検証をするシステムが必要である。

コンクリート構造物の維持管理は、とくに昭和 50 年代のコンクリートの早期劣化の問題に端を発し、さらに社会資本である各種構造物の加齢が進むための対策からその重要性が認められ、その手法の定式化が試みられている。維持管理は基本的に、点検による変状・劣化の検出－評価・判定と将来予測－補修・補強の順序で進められる。しかしながら、劣化要因によってある程度の基礎資料が集積されているものの、この定式化は始まったばかりである。ここでは、各種要因による構造物の変状・劣化事例の報告が貴重な資料であり<sup>2)</sup>、さらに数多くの事例の集積が重要である。各々段階での技術の進展に対しては、とりわけ非破壊検査による劣化の検出技術と、劣化予測技術の確立が最重点項目であり、技術開発が要請される分野である。なお、補修・補強で重要なことは、変状・劣化が発見されてその補修・補強に取掛かる前に、まず原因を探求することである。すなわち、原因が判明してはじめて適切な補修・補強ができるものであり、原因が不明で対処療法的な補修を行った場合には失敗することが多い。劣化の原因は複数個であるのが通例であるため、それらの探求には困難が伴うが、施工当時のインタビューは有効なことが多いとされている<sup>3)</sup>。

構造物の変状は、それが発見された時が始まりではなく、もっと以前からその変状が発生・進行していたものがほとんどであり、何時から変状が生じたかがよく問題となる。このためにも、構造物の完工後直ちにその初期値として詳細な点検を行うことが望まれる。特に足場の撤去前にその点検が行われるならば、費用面からも利点は大きい。施工時の詳細な記録は、その後の維持管理とくに長年月後の更新の検討などに対しても大きな意味を持つ。なお、ひびわれによる変状を生じた構造物の補修・補強を行う場合は、必ずしも設計当初の構造系に戻す必要はなく、ひびわれを生じた新たな系としての構造物の安全性を検討して、その見地からの補修・補強を考えることが妥当な場合もある。

#### 4 おわりに

コンクリートは 21 世紀においても鋼とならんで代表的な建設材料の位置を占めるものと考えられる。一方、構造物の性能に対する社会的な要請は高度化した多様化することが予想される。従って、工学の基本とされる設計はより高度になり、力学設計のモデルの近似度を上げるために破壊過程のよりの確かな把握が要請される。また性能評価型設計の導入というシーズは、必然的に性能即時判定法の技術開発というニーズと結びつく。この多様化するコンクリートをいかにうまく使いこなして行くかが要である。さらに、今後は新設構造の重要性もさることながら、既設構造の維持管理が重要である。維持管理の方策は設計よりはるかに選択肢が大であるため、適切な維持管理手法の確立の上で、劣化予測技術と検出技術をはじめとする各種技術開発が要請されている。コンクリートは総合的なものであり、設計においても維持管理においても、材料特性を十分に把握してその特色を生かすことが基本である。したがって、コンクリートの論議は架空のヴァーチャルクリートではなく、現実のリアルクリートでなければならない。

良質の社会資本を次世代に伝えて行くことが土木技術者の使命である。とくに環境負荷低減が主題とされる新しい世紀の始まりにおいて、設計と同時に維持管理が重要であり、これらについての知識と感

性とを兼ね備えることが構造技術者にとって非常に大切であるとする。

## 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書（平成 11 年度版）施工編，土木学会，1999.
- 2) 岡田 清，今井宏典監修：損傷と補修事例に見る道路橋のメンテナンス，阪神高速道路管理技術センター，1996.
- 3) 小柳 洽監修：コンクリート構造物の診断と補修，技報堂出版，1995.