

地球温暖化時代のコンクリート技術 荒廃する日本とならないために

岡山大学大学院環境学研究科 教授 阪 田 憲 次

1、地球温暖化

2007 年 11 月、スペインのバレンシアで開催された国連の「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の総会において承認された統合報告書¹⁾によれば、地球温暖化は、きわめて深刻な状況にあることがうかがわれる。その科学的根拠として、地上気温が、1906～2005 年の 100 年間で 0.74℃ 上昇していること、海面水位上昇が気温上昇と同じ傾向にあり、1961 年以降で毎年 1.8 mm、1993 年以降で毎年 3.14 mm 上昇していること、北極の年平均海氷面積が 10 年当たり 2.7% 縮小していることを示している。また、温室効果ガス排出シナリオに基づく、2100 年における世界平均地上気温の昇温予測を示している。それによれば、地域の独自性が強く、人口は急増し、経済成長や技術の進歩は遅く、環境への関心も低い多元化社会シナリオにおいては 3.4℃、高い経済成長と技術開発が進み、エネルギーのバランスを重視する調和型高成長社会シナリオにおいては 2.8℃、ならびに経済、社会および環境の持続可能性を確保するための地域的対策に重点が置かれる社会、物質志向は減少し、クリーンな省資源技術が導入され、経済発展も続く、言わば理想の持続発展型社会シナリオでは 1.8℃ 上昇すると予測している。なお、2000 年の濃度で一定としても、0.6℃ 上昇する。

このように予想される地球温暖化に対する緩和策および適応策のどちらも、その一方だけでは全ての温暖化の影響を防ぐことはできず、両者が補完しあうことによって温暖化のリスクを大きく低減する。緩和策を講じることにより、温暖化の影響を減少、遅延、回避することができるが、今後 20～30 年間の緩和努力とそれに向けた投資が、リスク回避のため、きわめて重要である。さらに、適応能力については、社会や経済の発展と密接に関係するため、先進国と途上国とは異なったものになる。地球温暖化問題解決のためのさまざまな課題は、土木学会およびその会員の営為と深く係わり合いがあり、緩和対策および適応策の両面において、貢献できる力を有していると思われる。

2、コンクリート

コンクリートは、その優れた特性と経済性から、鋼とともに主要な建設材料として用いられてきた。道路、鉄道、港湾、橋梁、ダム、建築物等のコンクリート構造物は、社会基

盤として、わが国の活発な経済活動を支える役割を果たしている。このような状況は今後も変わることがないと予想される。しかし、地球温暖化という側面からコンクリートを見ると、様々な問題がある。地球温暖化に対する緩和策および適応策の両面からコンクリート技術のあるべき姿を論じる。

1880 年、すなわち今から約 130 年前の世界のセメント生産量は 200 万トンであったと言われている。それが、現在では約 21 億トン（1000 倍）に達し、とくに、中国、インドの伸びが著しい。現在、世界のセメント生産量は増加し続けており、それがすべてコンクリートになるとして概算すると、全世界の人口一人当たり約 1m^3 のコンクリートを、毎年生産することになる。中国、インド等の国々の工業化、経済成長の加速と先進諸国の経済活動の継続を考えると、この傾向は当分の間継続するものと思われる。

一方、原始初期において、大気の組成は主として CO_2 と窒素とからなっていた。その頃の大気中の CO_2 濃度は 89% 程度であったと言われている。この CO_2 は、海水中のカルシウムイオンと結合し、炭酸カルシウム（石灰石）となり、大気から除去された。現在、大気中の CO_2 濃度は、0.03% 程度である。このようにして地表に長期にわたって堆積された石灰石に熱を加え、酸化カルシウムと CO_2 とに分解しているのがセメント産業である。また、酸化鉄と炭素を金属鉄と CO_2 に変えているのが製鉄産業である。すなわち、主要建設材料であるセメントおよび鋼材が、 CO_2 排出の大きな原因になっているのである。

骨材は、コンクリート容積の約 70% を占め、その性質はコンクリートの品質に大きな影響を与える。川砂、川砂利等の良質の骨材の枯渇は深刻で、最近では、環境保全という観点から海砂の採取も制限されている。それに代わる骨材も種々あるが、それらも質、量、価格および流通等の問題を抱えている。骨材の低品質化は、コンクリートの耐久性や乾燥収縮に大きな影響をおよぼす。低品質骨材に起因するコンクリートの早期劣化が、社会的な問題となったことは、記憶に新しいところである。

3、ホリスティック・アプローチ

最近、主に欧米の研究者の間で、様々な分野において、「Holistic Approach」という言葉がしばしば使われる。これに対する適切な日本語は見つからないが、総合的かつ融合的アプローチと解釈できる。コンクリート工学の世界的権威である Mehta 教授は、ある論文の中で、以下のように述べている。

Holistic Approach とは、部分の以前に全体があるという考え方にその根本がある。換言すれば、全体は部分の集合以上のものであるという意味である。また、この社会を全体として捉え、コンクリート工業を全体の一部と考えるべきである。したがって、コンクリート工業は、コンクリートという低廉な建設材料を世の中に提供するだけでなく、他の社

会的なニーズに対しても責任を負わなければならない。その社会的なニーズとは、例えば、地球上の天然資源の保全であり、他産業から排出される有害廃棄物の安全な処理等である。この提言は、20 世紀の反省にたった、21 世紀のコンクリート技術のあるべき姿を示唆するものであると思われる。すなわち、コンクリート構造物のライフサイクル全体に視点をあわせ、そこから部分を考えるとことを示唆している。

4、コンクリート構造のライフサイクルと環境設計

コンクリート構造物のライフサイクルとは、設計、計画、施工、供用と続く、いわばコンクリート構造物の動脈部分と、その構造物を維持管理し、やがて役目を終えて解体され、再び骨材としてリサイクルされるものと廃棄処分されるものに分けられる、いわば静脈部分とからなる物質循環のことである。従前は、高い経済成長の下でそれを支える社会基盤としてのコンクリート構造物の建設が行われてきたが、その際には、動脈部分に対する配慮のみが行われてきたように思われる。21 世紀における人類最大の課題である、環境、エネルギーおよび廃棄物問題解決のためには、コンクリート構造物の静脈部分をも含めたライフサイクル全体に視点を合わせることが望まれる。すなわち、ライフサイクル全体における環境負荷とエネルギー消費について検討しなければならない。

コンクリート構造物の設計においては、従来、設計耐用期間を通じて、構造物の安全性、使用性および耐久性に関する要求を満足することとされてきた。それに加え、環境性に対する要求をも満足させなければならない。ここに、環境性 (Environmental ity) という言葉を使っているが、それは、コンクリート構造物の建設から廃棄まで、すなわち、ライフサイクル全体における様々な行為が環境におよぼす影響を意味するものである。

コンクリート構造物の力学的性能および耐久性能の照査については、すでに示方書あるいは設計基準等で確立されており、ここでは、コンクリート構造物の設計における環境性能の照査、すなわち環境設計について、その考え方を示す。

環境設計の対象となる項目は、その規模、範囲によって、地球環境に関係するもの、地域環境に関係するもの、および作業環境に関係するものに分類される。地球環境に関係するものは、温室効果ガスの放出、資源・エネルギーの消費、および廃棄物の排出等である。地域環境に関係するものは、大気、土壌、水質汚染、および廃棄物の排出である。作業環境に関するものは、騒音および振動である。

環境性能の評価方法としては、次の 3 つが考えられる。

ライフサイクルアセスメント法が、温室効果ガスの放出、資源およびエネルギーの消費、水質および大気汚染物質の排出の評価に用いられる。水質および土壌汚染の原因となる物質の特定評価には、適当な実験や計測が用いられる。騒音や振動の評価には、それらを直

接測定することや、信頼できる予測手法、あるいはそれらの組み合わせが用いられる。

5、廃棄物およびリサイクル

多種多様な廃棄物をどうマネジメントするか、どうリサイクルするかということは、人類に課せられた重要な課題であるが、コンクリート建造物のライフサイクルアセスメントにおいても看過できない問題である。

先に、セメントの製造は、CO₂ 排出の原因であり、大量のエネルギー消費を伴うと述べたが、このセメント生産における消費エネルギーの 20～30%を、廃タイヤ、廃油、廃プラスチックおよび都市ごみの利用によってまかなわれている。廃棄物を燃料の一部として利用しているのである。セメントの焼成温度が 1450 という高温のため、廃棄物を安全に焼却しそれをエネルギーとして利用しているのである。すなわち、セメント産業は、静脈産業として、廃棄物の減量に貢献している。

コンクリート建造物の解体によって発生するコンクリート塊は、建設廃棄物 8,500 万トンの 42%を占めるが、そのほぼ 100%がリサイクルされている。その多くが路盤材としての利用であり、真のリサイクルではないとの意見もあるが、少なくとも廃棄されているわけではなく、リサイクルとみなすことができる。いずれにしろ、コンクリート建造物のライフサイクルにおける静脈部分の流れは、他に比べ良好であると言える。

6、コンクリート構造の持続可能性

コンクリートはその優れた特性のため、将来ともに主要な建設材料であると思われるが、このような材料を用いたコンクリート建造物の持続可能性を確保するためには、コンクリート材料の保全、産業廃棄物および副産物の利用、およびコンクリート建造物の耐久性改善ならびにコンクリート建造物の維持管理が重要である。

コンクリート建造物の持続可能性を確保するためには、第一にコンクリート材料の保全を図る必要がある。とくに、良質の骨材の枯渇は深刻で、最近では環境保全という観点から瀬戸内海における海砂の採取が禁止され、それに代わる骨材の開発が望まれている。代替骨材としては、再生骨材、高炉スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材、石炭灰、下水汚泥およびガラスカレット等が考えられているが、それらも質、量、価格および流通等、それぞれ問題を抱えている。このような現状においては、技術開発によって、低品質骨材を用いることができるようにするとともに、それを用いたコンクリートへの影響、とくに耐久性について検討することが急務である。限りある資源を有効に利用するという観点から、種々の骨材を、建造物の種類、環境条件、重要度等に応じて使い分けることも必要である。

資源の保全という観点から、単位セメント量を少なくし、高炉スラグおよびフライアッシュ等の産業副産物を用いることが望まれる。また、単位セメント量の低減は、原料となる天然資源の保全、CO₂ 排出の低減、エネルギー消費の低減効果のみならず、乾燥収縮および水和熱の低減によって、コンクリートのひび割れを防止し、物性改善にもつながるものである。

コンクリートの単位セメント量を低減する方法としては、フライアッシュ、高炉スラグおよびシリカフェーム等の水硬性を有する混和材の使用が考えられる。また、高性能 AE 減水剤の混和によって単位水量を低減し、水セメント比が同一とすると、単位セメント量を低減することになる。

コンクリート構造物の耐久性向上とは、鉄筋の腐食、凍結融解作用、アルカリシリカ反応、硫酸塩によるコンクリートの膨張、剥離等の劣化現象に対する性質の向上である。これらの劣化現象は、主として、有害な物質がコンクリート内部へ侵入することに起因する。従って、それを防止するためには、水密性の優れた緻密なコンクリートにすることが大切である。そのため、高性能 AE 減水剤による単位水量の低減、ならびに、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの添加による水和生成物の増加、シリカフェームのフィラー効果等によって硬化体組織が緻密化し、高強度コンクリートを得ることができる。また、それは水密性の向上、ひび割れの防止も耐久性向上につながる。耐久性が向上し、構造物の供用期間が長くなれば、コンクリートの材料となる天然資源が保全されることになる。

以上のような材料としてのコンクリートの性質改善だけでなく、設計の段階でコンクリート構造物の耐久性を保証する、性能照査型の設計手法の導入は、耐久性向上を図るものである。

わが国の土木学会は、2002 年に世界で初めて、性能照査型コンクリート標準示方書を発刊し、その中で、コンクリート構造物の耐久性の照査の方法を示した。この手法では、設計の段階において、コンクリート構造物の耐久性を照査し、保証するものである。すなわち、供用年限における劣化の予測値（設計値）が、許容される限界値（制限値）を上回らないことを確かめることによって、コンクリート構造物の耐久性を保証するものである。この劣化の予測値は、コンクリートの配合や環境条件等によって決められるものであり、劣化の限界値は、実験等から決定される。

1980 年代、米国において、「荒廃するアメリカ」と題する本により、米国の社会資本、とりわけ繁栄の象徴であった高速道路の予想以上の早期劣化状況が報告された。その原因として、公共基盤施設への投資が減少し、維持管理に必要な費用を下回った結果であると指摘された。すなわち、1930 年代のニューディール政策によって大量に建設された道路構造物が、1980 年代になり高齢化し、その維持修繕および改築に要する費用が膨大なものに

なったにもかかわらず、連邦道路予算がわずかしが割り当てられなかったことによる。

時の連邦政府は、直ちに、徹底した調査の上に立った、社会資本充実に向けての大胆な政策の提言を行なった。それは、全米橋梁点検基準の策定、点検員の資格および点検員養成の制度化、ガソリン税の税率引き上げによる道路財源の確保、および 21 世紀交通最適化法による道路整備財源の確保である。

国土交通省の「社会資本整備重点計画」中間報告²⁾において、高度成長期に大量に建設された道路や橋などのインフラが、耐用年数を迎えるが、現在の公共事業削減ペースが続くと、近い将来、維持管理を公共事業費で賄うことができなくなると述べている。

社会基盤の長寿命化、長期効用が望まれるわが国においては、コンクリート構造物は、維持管理の時代になったと考えられる。そのような時代においては、維持管理システムの構築、専門技術者の資格認定・確保、補修・補強技術の開発および財源の確保が急務である。

おわりに

コンクリートは、今後も、鋼とともに主要な建設材料である。地球温暖化に対する緩和策および適応策として、社会基盤の長期効用が叫ばれている昨今、コンクリート構造物の持続可能性を支えるため、コンクリート材料の保全およびコンクリートの耐久性の向上を図る必要がある。また、維持管理システムの構築、専門技術者の資格認定と確保、補修・補強技術の開発が望まれる。コンクリート構造物と環境負荷についても、そのライフサイクル全体にわたり、検討しなければならない。「荒廃する日本」とならないよう願うものである。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change, Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report, Nov. 16th 2007
- 2) 国土交通省社会資本整備審議会・交通政策審議会合同会議、社会資本整備重点計画中間報告、2007 年 7 月 12 日