

コンクリート構造に対する新材料利用の現状と今後の展望

池田尚治 Shoji Ikeda

横浜国立大学 工学部建設学科 教授

略歴：1960年東京大学工学部土木工学科卒業、1962年同大学大
学院修士課程修了。工学博士（東京大学）、日本コンクリー
ト工学会理事（元副会長）、プレストレスコンクリート
技術協会理事（元会長）、土木学会（元理事、元関東支部長）

専門：コンクリート構造、耐震工学

受賞歴：土木学会賞、プレストレスコンクリート技術協会賞、日本コンクリート工學
協会賞、ノルウェイコンクリート協会賞、FIPメダル
著書：『鋼コンクリート合成構造の設計ガイドライン』；『鉄筋コンクリートの力学』
『Concrete Shear in Earthquake』

コンクリートは種々の混和材料との複合により大幅にその性能の改質がなされる。一方、鉄筋、PC鋼材、鋼板との複合によって高性能な構造要素になり得るものである。性能の改善に対し、炭素繊維をはじめとする新材料が登場してきた。コンクリートの経年劣化や施工時に生じる欠陥に対する有効な対応が求められており、コンクリート中の鋼材の腐食や疲労に関する問題の解決も必須である。コンクリート技術の中に環境問題が大きなテーマとして取り組まれるものと思われる。

1. はじめに

未来材料という言葉から受ける革新的な技術開発の印象を今後のコンクリート構造の発展に結び付けて考えることは、日頃の発想とは異なった視点が与えられるように思われる。コンクリート構造は社会基盤構造として世界的に最も多量に用いられている材料であり、この技術的な発展は今後の文明の発展を根底から支えることとなる。ここでは、コンクリート構造に対する新材料の利用の現状と今後の展望について述べるものであって、まず、新材料の対象としてのコンクリートの特質について述べ、次に新材料の利用の現状について例を挙げながら紹介することとする。そのうえで、今後に求められる新材料について、コンクリート構造からの要求と期待とを含めて考究することとする。

2. 新材料の対象としてのコンクリート

2.1 コンクリートの特徴

コンクリートは構造材料として最も大量に用いられているものである。これは、その性能に比して安価、かつ、取扱いが容易だからである。ポルトランドセメントと砂

および砂利で基本要素が構成されるコンクリートは、原材料が豊富であって、社会基盤を構成する材料として、今後ともこれに代わるものは出現しないものと思われる。コンクリートはローマ時代から存在するが、その技術的内容は大きく進化しており、近年は各種の混和材料の開発と適用によって、技術的進化はとくに著しいものがある。

コンクリートは、鉄筋と複合することによって鉄筋コンクリートというきわめて合理的な構造形態として用いられていることはよく知られているが、高張力鋼材の緊張定着によって、コンクリートの持つ引張強度の不足の問題を解決し、今や長大支間の構造物にまで適用されるようになってきた。コンクリートとしての硬化後の力学的性能のもとは、セメントと水の水和反応による固化体の生成である。この固化体を形成する結合は金属結合のような強固なものではなく、また、この固化体の付着によって結合される骨材（砂および砂利）とセメント粒子との結合体は、セメント固化体の結合よりも一層緩い接着機構によって形成されている。したがって、コンクリート自身の引張強度はきわめて低く、一般に構造上からはコンクリートの引張強度はほとんど期待されていない。このような緩い結合機構を持つコンクリートがなぜ構造物に大量に用いられているのかといえば、この弱い

結合能力が鋼材との複合によって補われているからである。すなわち、引張力に強い鋼材との複合によって、コンクリートは構造素材になり得ているのである。

ところで、セメントと水による硬化体（セメントペースト硬化体）のみで構造材料となり得るであろうか。答えは一般に否である。なぜなら、硬化後の乾燥収縮によってセメントペースト硬化体にはひび割れが発生し、きわめて脆い物性を示す。骨材をセメントペーストに混入することにより、この乾燥収縮の影響は軽減し、初めて構造体として機能することができるのである。これがコンクリートであり、コンクリートはある意味では粒子分散強化型の複合材料なのである。この複合材料に、鉄筋やPC鋼材を複合させたものが鉄筋コンクリートである。

表1 セメント化学における記号の使い方

記号	化学式	名前
C	CaO	酸化カルシウム
S	SiO ₂	二酸化ケイ素
A	Al ₂ O ₃	酸化アルミニウム
F	Fe ₂ O ₃	酸化第二鉄
C ₂ S	2CaO · SiO ₂	ビーライト
C ₃ S	3CaO · SiO ₂	エイライト
C ₄ A	3CaO · Al ₂ O ₃	カルシウムアルミネート
C ₄ AF	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	カルシウムフェライト

いはプレストレストコンクリートであって、これは纖維強化型の複合材料ということができる。また、セメントはアルカリ性であるために、コンクリート内部の鋼材の発錆を生じさせないことも複合体としての鉄筋コンクリートの大きな特徴である。

一方、セメントがアルカリ性のため、骨材の種類によってはアルカリ骨材反応が生じて、長年月後にコンクリートを膨張させひび割れを発生させる場合がある。また、コンクリートの表面は空気中の炭酸ガスによって中性化され、これが長年月後に内部にまで進展すると内部の鋼材を発錆させて耐久性を損なうこととなる。塩害と呼ばれる海水の影響や含有塩分を持つ海砂の利用の場合には、コンクリートがアルカリ性でも中の鋼材は腐食することがある。

コンクリート構造は、現代の社会基盤を形成するきわめて優れた構造形式であるが、以上に述べたような本質的な特質を内在していることを念頭に置くことが必要と思われる。

なお、セメント化学の分野では表1に示すように、記号CはCaO、記号SはSiO₂、などのように簡略化した表現方法を用いるので、論文を参照するときに注意が必要である。普通ポルトランドセメントの成分は、およそ

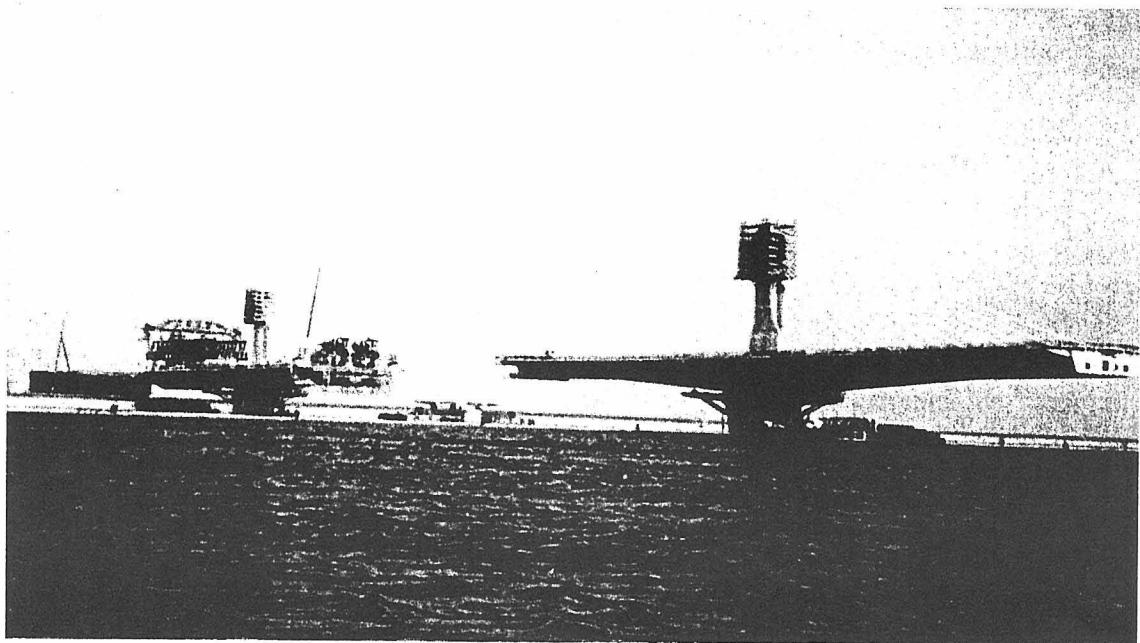


図1 工事中の木曾三川橋梁

C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF がそれぞれ50、30、10および10%で構成されており、塩基性物質であることが分かる。

2.2 コンクリート構造の最近の特徴

コンクリート技術は、種々の技術開発によって世界中で多用されており、建物、橋梁、貯槽用タンク、海洋構造物などに用いられている。とくに、橋梁に関してはプレストレスや鋼要素との複合あるいは混合によって、その適用範囲が大きく拡大している。コンクリート自身も高強度化・高耐久化などの高性能化が図られている。

図1に、最近の橋梁建設の一例として、現在工事中の木曽川橋梁および揖斐川橋梁の例を示す。この橋梁は、日本道路公団の第二名神高速道路の一部をなすものであって、橋長はそれぞれ1,145mおよび1,397mで、中央支間長はいずれも270mを超える長大橋梁である。ここでは世界で初めての、鋼・コンクリート複合連続エクストラドーズド橋で世界最大級の大型プレキャストセグメント工法が採用された。すなわち、支間中央部分の約100mは2,000tの鋼箱桁であり、その他の部分はプレキャストセグメントによって架設が進められた。エクストラドーズドとは、PCケーブルを支点上で低塔を用いて露出させて斜材状とし、合理的な構造としたものである。

プレストレスコンクリートの分野では、ウェブに波形鋼板を用いた複合PC橋の発展、およびPCケーブルの維持管理の可能な外ケーブルの採用などが最近の大きな

表2 特色あるコンクリート用材料の例

名前	用途
人工軽量骨材	自重の軽減
シリカフューム	高性能コンクリート
高炉スラグ微粉末	アルカリ骨材反応抑制、省資源
フライアッシュ	流動化、省資源
高性能減水剤	高強度コンクリート、高流動コンクリート
増粘剤	水中不分離コンクリート
膨張剤	ひび割れ制御
収縮低減剤	ひび割れ制御
炭素繊維	引張材、補修・補強
アラミド繊維	引張材、補修・補強
鋼繊維	引張材
ポリプロピレン繊維	ひび割れ防止
ビニロン繊維	ひび割れ防止
含浸用ポリマー	高性能、高耐久化
エボキシ樹脂	プレキャストセグメントの接合
エボキシ樹脂被覆鋼材	高耐久性
硬化抑制エボキシ樹脂	プレグラウト用
ポリエチレン	PC鋼材被覆用
高強度筋筋	高性能化

特徴と言える。また、鉄筋コンクリート橋脚の耐震性の大幅な向上を図る目的で、プレストレスを橋脚の鉛直方向に導入する研究開発も行われ、一応の成果を得ている。

一方、JR山陽新幹線のトンネル内コンクリート塊落下損傷事故に見られるように、コンクリートの劣化や維持管理の問題がクローズアップされている。世界的にもPC鋼材腐食によるPC橋の損傷事例が報告されており、コンクリート構造の耐久性の問題が緊急の課題として認識されている。これらの問題を解決するには、新材料の開発を含めた実りある技術開発が必要となるのである。

3. 新材料の利用の現状

コンクリート構造に用いられている材料のうち、ポルトランドセメント、水、砂、砂利、AE剤、減水剤、鉄筋、PC鋼材は従来より一般に用いられているので、これらを除いたコンクリート材料のうち、現在用いられている比較的特徴のあるものについて表2に示す。これらの材料は比較的広く用いられており、きわめて有用なものであるがその適用方法については今後とも大いに発展する余地が大きい。また、これらの材料はそれぞれ今後大いに進歩することが期待される。

これらの内で、若干のコメントが必要なものについて以下に述べたい。

人工軽量骨材は北欧でよく用いられており、その活用内容について大いに参考にするのがよいと思われる。長大支間を持つ構造物では、自重がそのまま工事費に比例することとなるので、軽量骨材自身の単価は全体の工事費には影響が少ないものと思われる。全体工事費を考えた経済性の追求を行えば、軽量骨材の発展普及は今後進むものと考えられる。

高性能減水剤は施工時のコンクリートに流動性を与え、高品質のコンクリートの実現を可能とした真に画期的な材料である。その流動性の威力は常識では考えられないものがある。増粘剤についても同様で、従来には想像もできなかった性質をコンクリートに与えることができた。すなわち、増粘剤を混入したコンクリートは、水中でも素材が分離せず一体となって存在できるのであって、従来の常識を大きく変えたものである。

炭素繊維は鉄筋よりも10倍程度強度が高く、炭素繊維

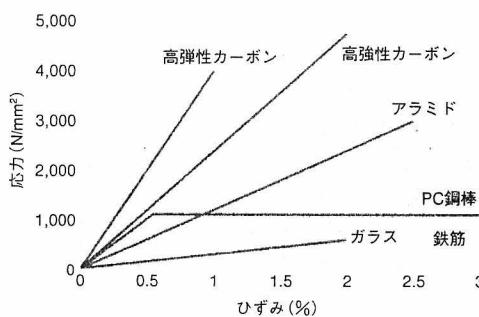


図2 各種連続繊維の力学的特性
[日鉄コンポジット㈱資料より]

シートとしてコンクリート表面にエポキシ樹脂によって接着することにより、既存コンクリートの補修や補強に適用することができる。炭素繊維の伸び能力は2%程度以下であり塑性域を持たないが、コンクリート表面で炭素繊維シートが付着したままコンクリート自身がはく離するので、コンクリートのひび割れの開口によって局部的に大きなひずみが炭素繊維シートに発生しないことにより、コンクリートひび割れ部での炭素繊維の破断は一般に生じない。図2に各種連続繊維の力学的特性の概要を示す。

ポリプロピレン繊維をコンクリート中に体積で0.2%程度混入すると、コンクリート硬化時に生じる微細なひび割れの発生を抑制し、コンクリート硬化後のひび割れ発生を抑え耐久性を大幅に改善することができる。また、コンクリートのはく落防止にも有効である。ただし、コンクリートの力学的な強度の改善を図ることはできない。

エポキシ樹脂については現在コンクリート構造物に多く用されており、きわめて重要な役割を担っているといえる。しかしながら、その特性について建設技術者はきわめて無知である。そのため、今後はコンクリートに対するのと同じ程度の関心を持って、その技術的内容を把握することが緊急に重要と思われる。

高強度鉄筋については、降伏点が現在用いられているものの2倍程度のものが用いられるはじめた。通常の鉄筋コンクリートの場合、ひび割れ幅の制約条件から高強度鉄筋の性能をそのまま引張材として活用することは困難である。そこで、高強度の特性を發揮させる方法として、プレストレスコンクリートにおけるPPC構造（パーシャ

ルプレストレスコンクリート）への適用が考えられ、現在検討が進められている。また、フープ筋として剪断補強に用いることも適当なのではないかと考えられる。

4. 今後に求められる新材料

コンクリートにとっての最大の夢は、引張強度と伸び能力の大きいコンクリートを開発することである。現在のところは、鉄筋やPC鋼材あるいは各種繊維の助けによって、一応の構造材料としての性能は付与されている。これに加えて、クリープしないコンクリート、収縮しないコンクリート、環境低負荷コンクリート、リサイクルコンクリートなどが望まれるコンクリートの技術ターゲットである。

一方、現在はコンクリートに対して高性能化・高耐久化が当然のように求められている。しかしながら、前項までに述べたようにコンクリート自身が緩い結合によって構成されているものなので、発想を大きく変えない限り経済性の観点から飛躍的な性能の向上は相当に困難なものと思われる。一方、種々のトラブルの原因となっているコンクリートの早期劣化は何としても解決しなければならない。

さて、2400年以上前に建てられたギリシャのパルテノン神殿は現在修復工事が続けられているが、過去に鉄筋コンクリートで修復した部分や鋼材を埋め込んで接合した部分はすべて撤去して、本格的に耐久性のある材料を用いて修復が進められている。この場合の耐用年数はおそらく1000年以上である。パルテノン神殿をはじめ多くのギリシャ時代の石造構造物の石材のつなぎ目には、鉄材の周りを鉛でカバーする方式が用いられている。それゆえに、古代の石造構造物は今でも現存しているのである。現在の修復工事では鋼材を用いずチタンが用いられている。これらの事実を含めて現代のコンクリート構造を考えるとき、必ずしもすべての構造物がパルテノン神殿のような耐久性を持つ必要はないものと思われる。そこで、構造物ごとにその重要度や構造物の目的に応じて適切な耐用期間を定め、これに見合う耐久性能を与えるようにすればよいものと思われる。環境問題を考えるとき、経年によって朽ちる材料はむしろ好ましい場合もある。

コンクリート構造は、50年、100年、200年、500年、1000年をターゲットとして、今後それぞれに適した新材料を開発すればよいと思われる。「次のミレニアムに残すコンクリート構造」の研究は重要かもしれないが、すべての構造物がこの対象となるわけではなく、一般には時代による腐食化やリサイクル性を考え、50年あるいは100年の耐用期間を考えた合理的な材料の開発が必要であろう。

5. 未来に向けて

今やコンクリート構造は人間社会の基盤であり、社会資本の中心的な構造であって、その重要性は未来社会の発展の鍵を握っているといつても過言ではないと思われる。未来材料をコンクリートに活用することで、コンクリート構造の一層の発展が図られるものと考えられる。今後の新材料に期待される性能について改めて次にまとめてみたい。

- 1) 高強度・高韌性を持ち、かつ、腐食環境に対して所要の耐久性と安定性を有する補強材の開発を期待したい。
- 2) コンクリートの軽量化は、構造全体の経済性にとつてきわめて重要である。良質の天然骨材の入手が困

難になりつつある現在、一層の高性能な人工軽量骨材の開発と供給を期待したい。

- 3) コンクリートの高性能化は一層発展させることが必要である。高流動化剤などの混和材料のますますの進化を望みたい。
- 4) コンクリートには複合材料として新素材との複合によって、新しい性能を持たせることが可能と思われる。
- 5) リサイクル、環境問題、構造物の美観、老朽化の低減などを対象とした新材料の開発に期待したい。
- 6) 新材料および新技術によって、コンクリートの耐久性や安全性を定量的に計測できるモニタリングシステムの確立を望みたい。

なお、著者は最近コンクリート構造の展望について若干の記述をしたので、合わせてご覧いただければ幸いであります^{1)~3)}。

引用・参考文献)

- 1) 池田尚治：21世紀におけるプレストレス技術の役割と期待、プレストレスコンクリート、プレストレスコンクリート技術協会、43(1) 2001.
- 2) 池田尚治：次世代のPC技術について、プレストレスコンクリート、プレストレスコンクリート技術協会、41(6) 1999.
- 3) 池田尚治：21世紀におけるコンクリート技術、土木技術、土木技術社、55(11) 2000. (特集：21世紀のコンクリート技術).

用語解説

【ポルトランドセメント】最も一般に広く使用されているセメントで、1824年にイギリス人アスプデンが、粘土と石灰石を主原料として焼成し粉碎して製造したものに始まる。硬化体がポルトランド島の岩石に似ていることから命名された。

【プレキャストセメント】コンクリート構造物を建設するに際し、その部材を分割した状態であらかじめ製作したもの。現場にて、これらをプレストレスや接着剤を用いて接合して部材とする。

【AE剤】air entraining agentの略称で、コンクリートの練混ぜ時に混入し、コンクリート中に微小な気泡を発生させる界面活性剤のこと。

【PPC構造】partially prestressed concrete構造の略称で、供用状態でコンクリートにひび割れの発生を許すプレストレスコンクリート構造の概念の一種。

【コンクリートのクリープ】コンクリートのクリープひずみは、弾性ひずみの3倍程度に達することもあるので、弾性変形の大きな構造物では設計時にその妥当な予測をすることが重要となる。