

土木材料の現状と将来の方向性 —次世代の土木材料に向けて—

西崎 到*

1. はじめに

多くの主要な土木構造物は、主に土や石、そしてコンクリートや鋼材などの、従来から用いられている土木材料により構築されている。しかし、これらの土木材料には様々な新しい技術開発の可能性があり、次世代に向けた土木材料の革新への取り組みが現在も進められつつある。ここではこれらの現状と将来の方向性について、土木研究所の研究内容を交えながら紹介する。

土木材料の技術開発の基本的な方向性のひとつは、現在の土木材料の欠点を補い、利点を活かす(のばす)方向での材料の改良であろう。これには従来材料の改良だけでなく、他の新しい材料との複合的な利用、さらには代替利用などの方法も含まれる。またもうひとつの方向性としては、新しい材料の採用による、これまでに無かった全く新しい機能の実現をあげることができよう。

いずれの場合も、コスト(特に普及段階におけるトータルコスト)をより意識する必要がある他、それだけでなく、安全性(環境安全性なども含む)や環境負荷などもより考慮しなくてはならなくなっている。

2. 土木材料の進展

ここでははじめに、現在のもっとも重要な基本的土木材料である鋼材とコンクリートについて、近年進められつつある技術開発について紹介する。また、新しい土木材料として注目されているFRP(Fiber Reinforced Polymer)についても、近年の様々な改良について紹介する。

2.1 鉄鋼材料

土木用の比較的新しい鉄鋼系材料として、耐候性鋼材があげられる。日本でも既に広く普及しているが、塩分の影響を予想外に受ける環境や、結露や水が溜まりやすいなどの部分がある構造物では、局所的な腐食が進むことがあり、課題となっ

ている。特に予想外に腐食が進行してしまった場合の対処法が確立されておらず、土木研究所でもこの検討に取り組んでいるところである。塩分の影響をより受けにくくする鋼種の開発も進められているが、まだ十分な性能であるとは言い難く、実用化には至っていない。

結晶構造をより緻密にし、より高強度な鋼材とした、新しい鉄鋼材料(スーパーメタル)も開発が進められている。まだ大型部材を作成する段階には至っていないが、結晶構造を緻密にすることで、耐食性や耐疲労性など、強度以外へのメリットも得られるのではないかと期待が寄せられており、土木研究所でも10cm角程度の小さな供試体による基礎的な性状に関するデータを得るための屋外暴露試験が進められている(写真-1)。

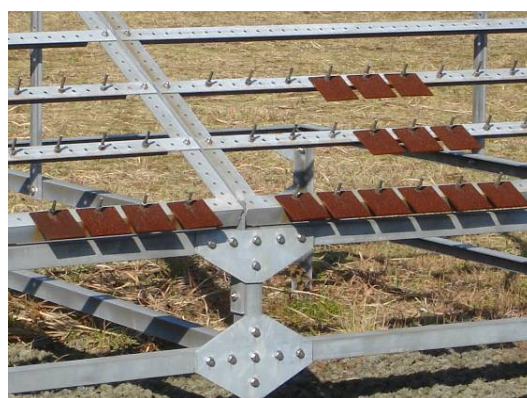


写真-1 スーパーメタルの屋外暴露試験

また、形状記憶合金の一部には鉄鋼系のものがあり、自己修復あるいは災害時修復を容易にする技術などとして、以前より土木での適用可能性が検討されている。

ステンレス鋼も鉄鋼材料の一つである。構造材料としては土木では限定的にしか使われていないのが現状である。いくつかの利用上の留意事項(腐食形態が普通鋼と相当に異なる。苛酷な腐食環境、あるいは特殊条件下では腐食もありうるなど)があるが、適切に用いれば大きなメリットが得られる材料であるので、もっと使われても良い材料の一つと考えられる。また、新しい、より土木用途に適した合金種の開発も望まれる。

2.2 コンクリート

超高強度繊維補強コンクリート¹⁾は150MPa以上の圧縮強度を有しているが、そこまでの圧縮強度がなくても、普通のコンクリートと比較して、大きな圧縮強度を有するコンクリートが近年複数種類開発され、適用が進みつつある。土木構造物の断面のスリム化などに貢献している（写真-2）。



写真-2 超高強度繊維補強コンクリートを用いた歩道橋

また、コンクリートに自己修復機能を持たせる研究も多く行われている。混和剤による水和反応の計画的な制御によるものや、補修剤を骨材やパイプに封入する方法、形状記憶合金を用いる方法など、手法としては様々なものがあるが、いずれも多少のひび割れを自動的に修復する機能を持たせ、コンクリート構造物の長寿命化を図ろうとするものであり、将来の実用化が期待される。

コンクリート系材料のもう一つの方向性は、再生材料の受け入れである。すでに普通ポルトランドセメントの製造段階において、多くの再生材料の受け入れが進められているが、より積極的に再生材料を受け入れたエコセメントなどの技術も確立しており、用途に応じて適切な利用が進められるべきであろう。

2.3 FRP

炭素繊維を中心としたシート状補強材によるコンクリート構造物の補強技術は、すでに一般的な技術として定着しているが、補強材も工場で作られたFRP製品として板状に成形されたものや、アラミド繊維など、炭素以外の繊維も適用されるなど、バリエーションが増えている。このような材料開発により、用途に応じてより適切な材料が選定できるようになりつつある。また、炭素繊維自体もより高強度のものが標準的になるなど進化しつつある。鋼構造物の補強にも適用が広がりつつある。

FRP歩道橋をはじめとするFRPを主構造材料とした構造物も、その高耐食性や軽量性によるメリットが評価されて近年増加しつつあり、国内では既に、沖縄県、埼玉県、石川県などに、5つの歩道橋が実現する（写真-3）とともに、橋梁点検路や港湾用歩道橋、横断歩道橋の階段部分などにも本格的な適用が検討されつつある。



写真-3 FRP桁歩道橋の例（石川県）

FRPはもともと繊維を内部に含んでいるので、光ファイバなどを応用する材料モニタリング技術と非常に相性が良い。FRP内部に検知用の繊維を埋め込むなどしたり、修復材をパイプやカプセル内に封入して破損したときの自己修復機能を持たせた材料などの研究が進められている。

2.4 その他の材料（鉄に代わる材料の例）

鉄鋼材料の改良については2.1で触れたが、鉄鉱石の埋蔵量にも限りがあり（約100兆トン）、年間生産量が5300億トンであることから、188年で枯渇するとの試算もある²⁾。このように考えると、鋼以外の金属（材料）の適用可能性の検討も必要と考えられる。2.1から2.3以外の土木材料も実に様々であるが、ここでは、鉄に変わる材料の可能性について、存在量の観点から考察してみた。

元素の地球上での存在割合はクラーク数³⁾によって表されるが、クラーク数がある程度高くないと建設分野での利用可能性は低くなると考えられる。クラーク数0.01（25位）以上の非鉄金属は15種類あるが、このうち大気中では不安定なものを除くと、アルミニウム、マグネシウム、チタン、マンガン、ジルコニウム、クロム、バナジウム、ニッケル、銅が残る。

アルミニウムのクラーク数は鉄よりも多い。

ボーキサイトから金属アルミニウムを得るのに、多くの電力を必要とする（アルミニウム1tあたり、13,000kWh）。しかし、リサイクルしやすく、その場合は、ボーキサイトからの3%のエネルギーで済むとされる²⁾。耐食性および力学特性の優れた合金が存在することから、土木材料としてもっと利用されてよい素材と考えられる。写真-4にアルミニウム合金の水門扉への適用事例を示す。



写真-4 アルミニウム合金製水門

マグネシウムのクラック数は第8位である。海水中にも多く存在する。密度1.74で軽量であり比強度は全金属最高値であり、自動車エンジンなどに使われつつある。土木では防食材料に使われるが、耐食性はアルミニウム合金やチタンに劣る。

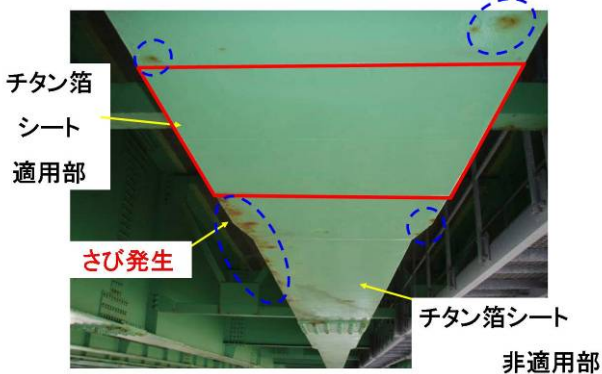


写真-5 チタン箔による防食技術（試験施工6年目）

チタンのクラック数は第9位である。二酸化チタンとして、地上の比較的広い範囲に存在する。埋蔵量も数十億トンと比較的多い。高価な金属のイメージがあるが、比較的効率的な抽出技術が開発されており、耐食性が極めて高く、弾性率は鉄の半分であるがアルミニウムよりは高いなど、土木構造用として優れているといえる。今後、より多く使われて良い素材の一つと考えられる。土木研究所で開発したチタンの適用方法の例としては、

重防食塗膜の中に防食被覆材として埋め込む適用事例があげられる。写真-5は試験施工後6年目の事例である。チタン箔シート適用部（写真-5の赤枠内）が他の部分に比べて錆の発生が無く、優れた防食効果が得られていることが分かる。

3. 土木材料の技術開発の方向性

前章では近年進められつつある土木材料の改良・開発について紹介したが、ここでは次世代に向けた土木材料改良・開発の方向性を考察する。

3.1 材料の複合化

鉄筋コンクリートは、コンクリートの特性と鉄の特性をうまく組み合わせ、それぞれの利点を生かし、欠点を補った、巧妙な材料であるのはよく知られている。しかし土木でこのような利用方法が可能なのは、鉄筋コンクリートだけではないはずである。鉄とコンクリート以外の材料にも手を広げた新しい複合構造は今後ますます重要になるものと考えられる。

前章で紹介した様に新しい素材に関する様々な検討が行われつつある。またこれ以外にも多くの材料が土木用として開発されつつある。将来はこれらの応用が期待されるが、単独での利用はやはり限界がある。今後はより多種の材料を高度に使いこなす、複合的な利用技術の検討が進められるものと予想され、また、そのような検討が既に始まっている。

3.2 土木材料のコストと環境負荷

土木事業の規模の大きさを考慮すれば、その構成材料の選定にあたって、今後、環境への負荷をより考慮すべきであろう。それぞれの土木材料の製造にかかる二酸化炭素排出量などの原単位を整備するとともに、これらを使って工事を行う際の環境負荷、さらには用途廃止となった時の構造物の材料処理方法やその際の環境負荷なども考慮していく必要がある。材料の環境負荷評価手法としてはLCA(Life Cycle Assessment)が有効と考えられる。今後は、新しい土木材料の採用やリサイクルにおけるLCAによる評価が重要になると考える。前章でアルミニウムやチタンの可能性を提示したが、懐疑的な意見もあるのではないだろうか。しかし、リサイクルがより効果的に行われるなど、LCAで高評価が得られれば、可能性としては十分にありうるものと思う。もっとも、

LCAで評価が良ければなんでも良いというわけではない。LCAの算出方法確立は土木ではまだこれからであり、精度にもまだ改善の余地がある様である。とはいえ、現在の初期コストのみによる材料選定は、今後、少なくともライフサイクルコストを見越したものとなっていくべきものと考えられる。

再生材料の土木材料としての利用も、環境負荷低減を考えながら進めていくべきである。土木事業から発生した再生材料については、当然適切なリサイクルの方法を考えるべきであるが、多くの他産業からの発生材も土木材料としての利用を要請されることが増える可能性がある。その際の判断の指標としては、実際にその再生材料と使うことができるか（安全性の観点を含めて）ということとともに、その再生材料を土木で受け入れることで、環境負荷の低減につながるかといえるかということも評価するべきであろう。

現在の土木材料製造方法や材料自体も、より環境負荷を低減するものに転換されていくべきである。セメントの二酸化炭素排出量の少ないものの検討やアスファルトに代わるバインダ材料なども、今後より検討を進めるべき分野と考えられる。

3.3 新しい機能を生む土木材料

前節まででは、主に従来材料の改良について記述したが、新しい材料の採用による、これまでになかった新機能の実現についても少し紹介したい。



写真-6 塗装剥離剤「インバイロワン」による剥離試験

「インバイロワン」は土木研究所が山一化学(株)との共同研究により開発した、鋼構造物塗装に適用できる塗装剥離剤である。鋼構造物の防食性を向上させるためには適切な重防食塗装の実施が重要であるが、そのためには古い塗装を一度完全に除去することが必要であった。この作業は従

来はブラストなどによるしかなく、粉塵飛散や大量の旧塗膜を含む廃棄物が発生するなど課題も多かった。開発した塗装剥離剤は、これらの課題を解決するものであるが、今後低温環境での適用性拡大のためにさらなる改良作業が進められているところである。

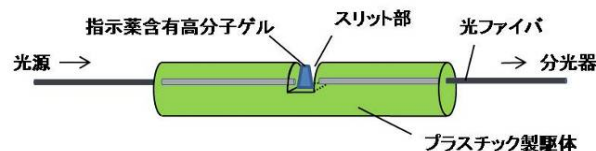


図-1 光ファイバを利用した埋め込み型センサ

土木構造物の維持管理を適切に進めるために、構造物の状態の適切な評価が重要である。これにより簡易に実現することが可能となりそうな、様々な機能性材料が検討されつつある。土木研究所で開発を進めている事例としては、光ファイバと高分子ゲル、指示試薬を組み合わせた埋め込み型のセンサの例がある（図-1）。光ファイバに光を入れてやり、もう片方のファイバからの光の色を調べることで、センサ埋め込み部分の指示試薬の発色を外部から検知することができる技術である。コンクリート内部の中性化検知などに応用が可能にすることを目指して研究を進めている。

4. まとめ

土木材料の改良・開発の動向を紹介した。土木の抱えている様々な課題のいくつかは、材料の改良・革新によって改善されるものと期待できよう。

参考文献

- 1) コンクリートライブラリー113、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)、土木学会、2004.
- 2) 増本 健：金属なんでも小事典、講談社、1997
- 3) 長倉三郎他編集：理化学辞典、岩波書店、1988

西崎 到*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地盤研究グループ新材料チーム 上席研究員、博士(工学)
Dr. Itaru NISHIZAKI