

# 新しい世紀に向かっての土木技術

京都大学名誉教授 岡 田 清

## 1. ま え が き

基本的には先進国に遅れをとっていると嘆かれていたわが国の土木建設技術は、過去30数年の間に飛躍的な発展をとげた。これは高度な経済成長のもとに新幹線や高速道路、大規模ダム、青函トンネル、本州四国連絡橋を始めとする各種プロジェクトの完成のために、さらに人口の都市集中にともない地下鉄や道路網、下水道などの多くの建設要求に早急に応ずる必要があったためである。そして今なお本州四国連絡橋関係、関西新国際空港、東京湾横断道路等々の大プロジェクトが遂行されつつあり、また今後10年間に総額430兆円の公共投資を行うことも日米構造協議で約束されていて、土木をとりまく環境は空前の活況を呈している。そして技術開発やその発展のために、わが国の自然条件下において社会環境や労働環境の変化に適応しつつ、設計・施工の最適化を模索し国内外の諸技術の導入や開発・研究に各分野にわたり多大の努力が払われてきた。今後は新しい21世紀に向けて、わが国社会資本のより一層の整備・高度化の要求を満たすと同時に、地球環境問題や変貌する国際社会でのわが国土木建設界の貢献を真剣に考えるべき時機にもある。ここで広範囲かつ総合的な土木工学の全分野について、その最近技術の詳細な動向を述べる資格を筆者は持つものではない。

以下、技術開発を全般的に概観し、材料関係に主眼をおき最近の技術動向について触れることにする。

## 2. 技術開発分野のいろいろ

土木建設での技術開発を考えると、幾つかの技術分野に分けられよう。まずその第一は今後とも建設技術の基礎となる分野におけるもので、これには構造物の耐震や耐風設計施工技術、新素材・新材料の利用技術、高耐久性構造物の設計施工技術、劣化診断・維持補修技術等が含まれる。つぎは構造物生産に伴う技術で、建設機械・工法等の建設技術の高度化や施工計画・実施の合理化・高度化に関するものである。これには、労働力不足や大規模プロジェクトに対応して現場作業の省力化やロボット化技術、また情報化施工システム、自動計測・制御システム等ソフト技術の進展もこの範ちゅうの中に入る。

その他研究課題としても特に注目されつつあるのは、未開発の空間を有効に利用とするニュー・フロンティアの開発、すなわち地下、海洋および宇宙空間の開発に関する技術、また環境問題として産業廃棄物問題、河川・湖沼等の浄化、地球的規模でのCO<sub>2</sub>問題、砂漠化防止などの地球環境の保全に関する技術の開発であり、これには土木技術が密接に関係するものとして取扱われることになる。

以上、各分野の技術は実際には互に複雑に交錯していて、個々について取り上げることは困難であるし、半ば構想的なもの、また、具体性をもたず努力目標として設定されたものもある。したがって以下では先述のごとくコンクリートを主体として材料・施工における技術開発についてのべる。

### 3. 新素材、新材料の利用について

現在、土木構造物では、その主要材料はコンクリートと鋼材およびその組合せによって構成されている。これら材料がいずれも良好な工学的性質をもち、かつ比較的安価で容易に入手できるからである。しかしコンクリートでは低い引張強度、乾燥収縮、鋼材では錆の発生という欠点もあるし、これら材料が将来にわたって無限にあるという保証はない。とはいえ、現状においてこれら材料を中心とする材料関係の技術開発を概観する。

#### 3. 1. 新しいセメント

##### 3. 1. 1. 超高強度セメント

シリカヒューム等の超微粉子を含む特殊セメントを用い、セメント分散剤を併用し水セメント比を極端に少なくし、骨材と混合しかつ硬化体の内部空隙の完全充填等により、従来コンクリートとは全く異なったセメント硬化体をつくり、圧縮強度は1,000~1,500kgf/cm<sup>2</sup>、曲げ強度は120~150kgf/cm<sup>2</sup>等の高強度を得たり<sup>1)</sup>、特殊セメントを用い固めた硬化体内部の空隙を徹底的に除去することにより上記以上の高強度をうる方法<sup>2)</sup>等が欧州より技術導入されている。これらは工場生産品として建材分野での応用が展開されるべきものであるが、現在なお製品として普遍化されているものはない。この外、米国では焼結によらず低温で焼成する化学結合セラミックスの可能性が追求され、その水硬性材料も検討されていて、今後の発展も期待される。

##### 3. 1. 2. 低発熱セメント

長大橋の橋脚・橋台、LNGの地下貯槽の底版・側壁、断面の大きな地中連続壁や沈埋函等のマッシュな鉄筋コンクリート構造では、強度上必要な単位セメント量もかなり多いし、セメント水和熱に起因する温度ひびわれが生じやすい。温

度ひびわれ防止対策としては、材料のプレクーリングや氷の使用、パイプクーリング等々の種々な対策があるが、低発熱型セメント使用によりコンクリートの温度上昇を少なくすることは経済上きわめて有利なことが多い。また最近、より合理的なコンクリートダムの施工法としてRCD（ローラ転圧ダムコンクリート）工法によるダム建設が各所で行なわれており、また通常のコンクリート舗装より単位水量が30～40kg/m<sup>3</sup>程度少ない超硬練りのコンクリートをアスファルト・フィニッシャで敷きならし振動ローラ、あるいはタイヤローラで転圧、締固めを行うRCCP（転圧コンクリート舗装）も各所で試験施工されつつある。RCD工法で使用されるコンクリートは単位セメント量が120kg/m<sup>3</sup>程度で、良好な締固め性状とともに低発熱性および所要の強度をもつことが要求される。またRCCPでは低収縮性で、早期交通開放の必要上、初期強度は普通ポルトランドセメントと同等以上のものが要求されている。このような新工法に対応して新しい型のセメントが開発されつつある。

マッシュな鉄筋コンクリート構造用の低発熱セメントとしては、例えば明石海峡大橋の工事で対象としたものではポルトランドセメントをベースに高炉スラグ微粉末を加えた二成分系と、さらにこれにフライアッシュを加えた三成分系について検討が行なわれ、セメントの水和熱は材令28日で52～72cal/gと中庸熱セメントの規格値83cal/gを大きく下廻るものをえている<sup>3)</sup>

表-1、表-2に中庸熱セメントをベースにした三成分系の超低発熱セメント

表-1 超低発熱セメントの性質

セメントの種類	比重	比面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			安定性	モルタルの圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				水和熱(cal/g)		
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
超低発熱	2.77	5470	33.0	5-44	8-24	良	84	163	293	390	41.0	49.5	51.4
中庸熱	3.22	3250	26.8	3-29	4-31	良	113	166	332	503	63.1	73.3	83.1

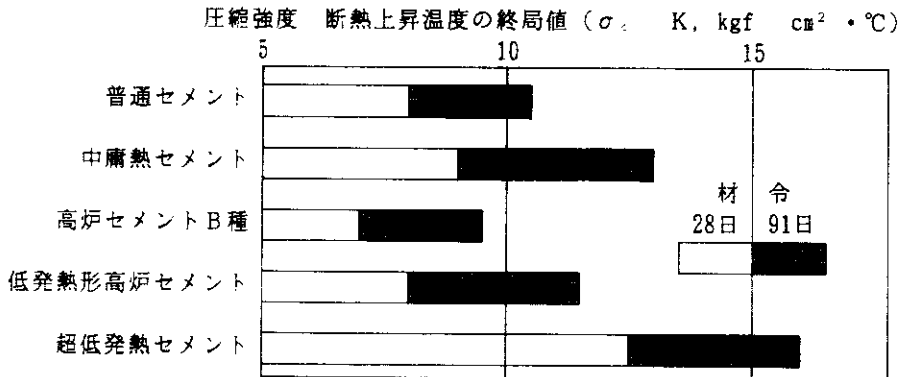
表-2 低発熱形高炉セメントの性質

セメントの種類	比重	比面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			安定性	モルタルの圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				水和熱(cal/g)		
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
低発熱形高炉	2.96	3700	31.0	3-37	5-37	良	91	175	398	551	56.9	69.9	75.6
中庸熱	3.02	3830	30.1	3-16	4-38	良	121	196	413	553	66.9	81.2	85.5

の性質、および高炉セメントB種のJIS規格を満足する二成分系の低発熱型高炉セメントの性質を、それぞれ中庸熱セメント、高炉セメントB種と対比して示

してある。また図-1はこれらセメントを用いたコンクリート（ $C=300\text{kg}/\text{m}^3$ 、

図-1 低発熱形セメントコンクリートの断熱温度上昇と圧縮強度



スランブ12cm、空気量4%、成型温度20°C)の圧縮強度( $\sigma_c$ )と断熱温度上昇最終値(K°C)の比を比較して示してある<sup>4)</sup>。各種セメントの温度ひびわれ抵抗性を判断する上で興味ある資料である。

一方、RCD工法用の低熱セメントについては、通常、中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュを20~30%添加したセメントが用いられているが、なお一層の低発熱型セメントを求めて研究が行なわれつつあり、混合材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、フライアッシュを石灰石粉末で10%~20%置換したもの等を用い、コンクリートの示方配合(骨材の最大寸法は150mm、VC値20±10秒、 $C=130\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $W/C=65.4\%$ 、空気量1.5%)に対し試験を行った結果混合材が60%以上の混合セメントが、前述と同様に温度ひびわれ抵抗性を示す。(中庸熱ポルトランドセメント70%+フライアッシュ30%)を用いたときの値0.08にくらべ良好な成績を示している<sup>5)</sup>。

### 3. 1. 3. その他特殊セメントの開発

使用者の要望に応じ将来コンクリートの流動性をより改良するために、例えばセメント微粒子を球状にしたようなセメントとか、無機質接着用セメント等が開発されるかもしれない。

### 3. 2. 特殊性能を与える混和剤

#### 3. 2. 1. 高性能AE減水剤

従来のAE剤やAE減水剤と同様にプラントでの材料の同時添加方式によって、この剤を用いないプレーンコンクリートに対して、減水率を18~20%程度の高減水性を与えるとともに、スランブの経時低下を例えば60分後4.0cm以下に留めうるような高性能のAE減水剤が開発され、市販されている。しかしその品質標準の

J I S化は未だ行われていない。この剤はとくに建築用コンクリートにおいてJ A S S 5における単位水量上限値制限への対応、流動化コンクリートの代替等としてよく用いられている。土木用としては施工性の改善、耐久性向上（単位水量の減少）、マスコン対策等として用いられている。いずれにしても近く土木・建築両学会で共通のものとして品質規準はJ I S化されるものと思われる。

### 3. 2. 2. 水中不分離性混和剤

海に関係した巨大プロジェクトが続出し、マッシブな構造物を水中で施工する工事が多くなった。水中コンクリートの施工方法には、プレパックドコンクリートや袋詰め工法、トレミー工法など種々な方法があるが、最近では水中不分離性混和剤を添加し、コンクリートに粘稠性を与え水中での分離抵抗性を付与したコンクリートを打ち込む方法が一般的なものとして定着してきた。この混和剤は成分的にはセルローズ系とアクリル系の2種類がある。土木学会でもこの剤の品質規格を設計・施工指針を含め近く制定する予定である。明石海峡大橋の工事では前述のように低発熱形セメントとして、セメントクリンカー16～25%、高炉スラグ微粉末54～35%、フライアッシュ30%、単位結合材量320kg/m<sup>3</sup>のものを、配合強度216kgf/cm<sup>2</sup>（91日設計基準強度180kgf/cm<sup>2</sup>の1.2倍）に対し水中不分離性混和剤を2.3kg/m<sup>3</sup>添加表-3に示す品質基準を満足するコンクリートをえたと報

表-3 特殊水中コンクリートの主な品質基準

設計基準強度（91日）	180kgf/cm <sup>2</sup>
水中・気中供試体強度比	0.8以上
スランブフロー	52.5±2.5cm
スランブフロー保持時間	8時間以上
凝結始発時間	30時間程度以内
断熱上昇温度	30℃以下

告されている<sup>6)</sup>。この種混和剤は使用セメント、併用する流動化剤やA E剤との相性や配合によってその効果は影響をうけるので、使用にあたっては慎重な予備試験が必要である。

### 3. 3. 無機・有機の各種の繊維

乾燥収縮によるひびわれ発生の抑止や引張、曲げ強度の増大をはかるために各種繊維を混入した繊維補強コンクリートは、その効果を考えると経済的にはやや割高感はあるが、土木では吹付け、道路舗装、建築では壁材、床材などにかんがりの用途開発が行われている。実用化としては鋼繊維を始めとしてガラス繊維、炭

素繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維と続々と新素材が開発されてきた。一方では、従来の短繊維だけではなく棒状、ストランド状、あるいは網状したものも開発され、研究とともに実用化への試みも盛んに行なわれ始めた。これら無機・有機の各種の繊維の個々の状況について述べる余裕はないので、とくに最近注目をあびている2、3について触れる。

炭素繊維にはパン系（高強度だが高価である）とピッチ系（パン系に近い高強度タイプと強度はやや低いが高価な汎用タイプとがある）がある。コンクリート補強材として炭素繊維を使用するときは現在では安いピッチ系の短繊維を壁材等の構造二次部材に使用するのが一般的である。パン系の連続繊維を用いて構造一次部材に適用する研究も進んでいる。炭素繊維強化樹脂（CFRP）ケーブルのPC橋への応用も試みられている。CFRPケーブルにはロッドタイプとストランドタイプがあり、ロッドタイプにはピッチ系の高強度炭素繊維、ストランドタイプにはパン系炭素繊維が用いられ、塩害対策として錆びないCFRPを用いたPC橋がまだ規模は小さいが建設されている。すなわち石川県（新宮橋、プレテンション桁橋、ストランドタイプ長さ6.1m）、千葉県（船橋市長津川人道橋、プレキャスト、プレテンション一体構造、ストランドタイプ長さ8.0m）北九州市（三菱化成黒崎工場内、ポストテンション桁橋ロッドタイプ長さ約18m）等が施工されている。同様な試みがアラミド繊維強化樹脂（AFRP）緊張材についても行われている。直径14mm、引張強度19.2tの緊張材を用いプレテンション桁（長さ12m）が三井建設らによって施工されており<sup>7)</sup>また鹿島建設らにより幅19.5mm、厚さ4.86mmの板状の緊張材を用い橋長54.5m（支間46.5m）の吊り床版タイプの歩道橋も施工されている<sup>8)</sup>。アラミド繊維は軽量、高強度、錆びない、コンクリートとの付着もよいという特徴の外に、炭素繊維のような電導性がないという特色もあり、これを活用できる場所もありそうである（例えばリニヤモーターカーのガイドウエー等）。値段的にはアラミド繊維は同じ強度をもつPC鋼線に比べ素材単価は5～10倍であり、将来大量生産によるコスト低下が望まれる。

#### 3. 4. 極太径、高強度・鉄筋など

鉄筋の錆びやすいという欠点を償うための手法としては組成としてクローム（Cr）やニッケル（Ni）やタングスラン（W）等の微量を加えることにより不錆化をはかる方法やエポキシ塗装鉄筋があることは周知の通りである。また現在よりも高強度の鉄筋（SD50以上）太径鉄筋（直径51mm、64mm）による施工の簡易化、またねじふし加工による接続の簡易化、確実化、付着性の向上等の要求もあり、今後新製品の開発・研究も一段と多くなることと思われる。

#### 4. 構造物の劣化診断・維持補修技術の確立へ

近年における土木構造物の量的増大や供用性の向上とともに、経年の新旧にかかわらず構造物の健全度の診断を、また損傷劣化構造物に対しては適切なその維持補修を行う必要のある場合が多くなった。損傷は幾つかの要因の1つ、あるいは複合によって生じるが、要因は大きく分けて(1)計画・設計等の技術(工学)上の問題、(2)施工上の問題(人為的なミスも含めて)、(3)供用上の問題(計画時とは異なった供用や環境、荷重の変化等)となるが、スイスでの分析では上記割合は40:40:20程度であるという。構造物の健全度の診断を行なうとはいい乍ら、変状の原因究明や将来にわたる健全度評価はなしえずに、現状調査と一時的な対応補修といっただけに終ることもあると思われる。また維持管理を問題とするときには土木構造物の寿命(物理的、経済的、機能的、社会的な各寿命)を考慮する必要がある、耐久性設計の基本的な考え方、補修技術の向上について今後知識の一層の体系化が望まれる。

#### 5. 技術革新と国際化

従来、われわれが新技術や新プロジェクトを考えると基本的には常により迅速に、より強く、あるいはより大きくとかを最重視して来たし、`物を造る`という論理に余りにも忠実に執着してきたといえよう。とくにわが国の土木界においては諸先輩の飽くなき向上心と献身的努力の~~蓄積~~によって幾つかの面でその技術は現在世界の最先端に立ち、高密度な国土開発を成し遂げた。しかし最近の社会や経済の大きな変貌は生産、消費、文化、人間の人生観などにも大きな変化を与え土木界にも従来経験しなかった価値の多様化、情報化、ハイテク化、国際化の大波がよせている。技術のみをとりあげても基礎と応用、理論と実用の間隔は非常にせまくなったし、結合・複合・融合・総合といった性格の技術が尊重されるようになった。そして現在までにわれわれが獲得してきた先進的な土木技術は国際的な場で有効に活用され、またこの試みを通し、互に国際競争力を高めつつ、国際協力できるよう努力する必要がある、その覚悟が必要である。

#### 6. おわりに

わが国の土木を中心にその技術動向の一端にふれたが、これはまた国際的なそれと一致するものである。土木技術にたづさわる者は、建築、機械、電気、化学などの他分野技術者と異なり、自然環境との調和、他分野の技術者との調整を図りながら全般的なコーディネーターとしての役目を果たすことが期待される。21

世紀に向けての新しい土木技術の発展を心から願って止まない次第である。

### 参 考 文 献

- 1) DENSIT : 電気化学工業がデンマークのデンジット社より1984年に導入
- 2) NIMS : 宇部興産が英国ICI社より1988年に導入
- 3) 金沢克義、他 3 名 : 超低発熱セメントの橋梁マスコンクリート構造物への適用性、コンクリート工学 Vol, 27, No5, 1989年5月, P31~37
- 4) 長滝重義、他 2 名 : 低発熱型セメントを使用したコンクリートの特性と大型モデル実験、セメント・コンクリート No, 522, 1990年8月, P32~42
- 5) セメント協会材料開発専門委員会 : R C D工法用低熱セメントの開発、セメント・コンクリート No, 526, 1990年12月, P54~63
- 6) 加島聰、他 3 名 : 明石海峡大橋主塔基礎の設計・施工、橋梁 Vol, , 26, No11, 1990年11月, P18~26  
加島聰、他 3 名 : 水中不分離性コンクリートによる橋梁基礎の合理的施工  
セメント・コンクリート No, 523, 1990年9月, P98~107
- 7) 日経コンストラクション 1990年7月27日号, P26
- 8) 日経コンストラクション 1990年12月14日号, P12