

平居孝之……大分大学教授

このたび、1991年日本建築学会賞をいただき、身に余る光栄と深く感謝しております。

新素材の開発に関する最近の技術の進展はめざましく、従来にはない高性能をもつ材料が製造され、建築の分野でも広く使われようとしています。本研究は、これらの材料を適用したコンクリートの物性に関連する次の5つのテーマを対象にしたものであります。

- 石膏を用いたコンクリート
- 鉄筋コンクリートの塩害防止
- 繊維で補強されたコンクリート
- コンクリートの破壊機構
- 複合材料の強度特性の解析方法

これらの研究はいずれも私一人で実施したものではなく、多くの方々と共同で行ったものであり、ご協力をいただいた皆様に謹んでお礼を申し上げます。

東京大学名誉教授・日本大学教授岸谷孝一博士からご指導を賜り、熊本大学助教授村上聖博士と多くの共同研究を行いました。結果がどう出るか好奇心に満ちた期待を持ちながら研究を実施した思い出があります。日本建築学会賞を受賞するような研究になりましたのは、お二人の先を見通す洞察力と研究熱意によるところが大きく、心から感謝しております。

一連の研究について、その概要を以下に述べさせていただきます。

\*

産業副産物である二水石膏を焼成する技術が開発され、ポルトランドセメントに近いような高強度を出す石膏が製造されるようになりました。これを結合材に用いたコンクリートを建築に利用しようとして、複合材料のマトリックス相として見た石膏の性質を調べた結果、石膏コンクリートは従来のセメントコンクリートに似た使い方が可能であるとの見込みが得られました。

石膏コンクリートは、不燃で有毒ガスを発生せず吸収する熱量が大きいので火災時に温度の上昇が遅く、気温が低い時に打設しても強度を早期に発現するというような長所がありますが、気温が高い時に打設すると強度が低く出ることが多く、また長期間の耐水性を得ることが困難であるなどの短所もあります。混練打設時の温度に対して凝結硬化性が敏感に変化することも欠点の一つであり、石膏コンクリートを利用するうえでの大きな問題点になります。

石膏は水和反応により短時間内で発熱しますので、温度変化に対して安定して石膏コンクリートの凝結硬化を調節できる混和剤が必要になります。石膏の凝結時間に影響を与える薬剤の多くは、温度が上がるにつれ凝結調節の効き目が低下し、十分な調節効果を得るために添加量を多くすると硬化後の物性に悪影響を与えます。温度の変化につれて凝結時間を短くするような材料と反対に長くするような材料を、種々の薬剤の中から探し出し、両者の最適な混合

割合を調べて、石膏コンクリートを打設したときに、温度が変化しても安定して凝結調節を行える方法を見出しました。

\*

コンクリートに含まれる塩分の作用で補強鉄筋の腐食が進行しつつある場合に、防錆剤をコンクリートの表面に塗布し内部に浸透させて鉄筋の腐食を抑制する方法があります。この方法を塩分を含んでいる既存の鉄筋コンクリート構造物に適用して有効かどうかを調べるために、実構造物を使って実際に施工して経年変化を測定して確認を行いました。

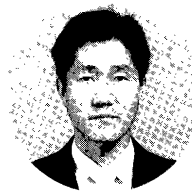
竣工後年月を経た鉄筋コンクリート構造物において、コンクリートの表面に塗布した防錆剤が腐食を生じている鉄筋の位置まですみやかに浸透すること、および浸透した防錆剤が長年月にわたって鉄筋の腐食抑制に有効な濃度を保つことが必要になります。この2つの要求は、コンクリート中で浸透しやすいことと散逸しにくいことという相反する性質のように見えますが、実際に試験を行いますとコンクリートの表面に塗布された防錆剤はすみやかに浸透し、長年月にわたって高い濃度を保つことが明らかになりました。5年目までの測定が終わっておりまして、かぶりコンクリートの奥の鉄筋の存在する位置のコンクリート中の防錆剤の濃度は、高い濃度の塩分を含有するコンクリート中で鉄筋の腐食を抑制するのに必要な値よりかなり高く、時間が経過してもその濃度を保持する傾向を示しています。

このようにすぐれた浸透性と濃度保持性は、防錆剤を適当な仕様でコンクリートの表面に塗布することにより得られるわけではありますが、防錆剤が水溶性であることからコンクリート中を移動する水分につれて防錆剤の浸透が起り、蒸発で水分が散逸しても防錆剤は残留することがその理由と考えられます。コンクリート中の塩分濃度の分布と防錆剤の濃度の分布は同じ傾向を示しますので、防錆剤のコンクリート中の移動の様子は、コンクリート中の塩分が水分につれて移動するのと類似していると考えられます。

\*

コンクリートに短い繊維状材料を分散して入れると、引張強度や靱性をはじめ耐きれつ性などの諸物性が著しく向上します。また連続した繊維状材料を用いてコンクリートを補強する方法は、炭素、アラミド、ガラス、ピニロン、アクリルなどの繊維素材の持つ軽量性、耐腐食性、加工性などの有利な性質から、その将来性が大いに期待されています。

短い繊維を分散して入れる繊維補強コンクリートでは、きれつの成長を繊維が拘束するためコンクリートそのもののきれつ成長強度が大きくなるという考えがありますが、これを実験的に測定して裏付けるのは容易ではありません。きれつを横切る繊維の引き抜け抵抗により繊維コンクリートの強度が大きくなり靱性が著しく向上すると考えるのが



ひらい たかゆき  
1947年大阪府生まれ／東京工業大学卒業／東  
京大学大学院博士課程修了／建築材料工学／  
工学博士／1986年度セメント協会論文賞受賞  
／著書に「有限要素法と境界要素法」「弾性  
解析プログラムとその使い方」

妥当で、その評価をどのように行うかが重要になります。破壊靱性を評価する指標として応力拡大係数ではなく、非線形性を強く示す繊維補強コンクリートの評価に使える指標としてJ積分を用い、繊維の性質や混入率とその補強効果の関係を明らかにしました。

連続した繊維で補強する方法では、酢酸ビニル樹脂でガラス繊維を固めて作成したメッシュを組み込んだ型枠に石膏コンクリートを打ち込んでパネルを成形しますと、いったん硬化した樹脂が石膏コンクリートの混練物中の水分の作用で軟化し、石膏コンクリートの硬化後に乾燥するにつれて再び硬化して高い付着強度を発現し、付着破壊が生じない場合の曲げ耐力算定式で導かれるパネルの強度が出るという試験結果を得ていましたので、セメントコンクリートについて、連続ガラス繊維および連続炭素繊維を酢酸ビニル樹脂で固めたメッシュを作製して試験いたしました。いずれの場合も繊維の引き抜けが起こりとても満足できる強度にはなりません。硬化したセメントコンクリートを乾燥させて水分を除去したり、低アルカリ性のセメントを用いたりしましたが、うまくいきませんでした。

種々の方法を試みた結果、連続繊維をエポキシ樹脂で固め、表面に細かい砂を付着させるなどして機械的な投錨効果によりコンクリートとの間に高い付着強度を得る方法と、連続繊維の表面に未硬化のエポキシ樹脂を塗布した状態でコンクリートを打設してエポキシ樹脂の硬化によりコンクリートと付着させる方法が有効であることが分かりました。このような方法でコンクリートとの付着を強固にして連続繊維で補強すると、繊維素材のきわめて高い強度を十分有効に使えることが確かめられました。

\*

コンクリートの破壊機構に関する研究は、コンクリートの割裂引張で測定した強度に比べて曲げで測定した強度がずいぶん大きいということが発端でした。破壊係数の影響を調べるため、試験時に試験体に作用する応力と変形を精密に解析しましたが、断面の平面保持の仮定における曲げ破壊係数に比べて、弾性論での曲げ破壊係数は数%程度小さいだけで、曲が強度が大きいことの説明になりませんでした。

コンクリートの引張領域における非線形挙動の解明が大切であり、コンクリートに潜在する微小欠陥に起因する局所的な破壊を調べるのが重要と考えました。研究対象はコンクリートの強度から破壊機構に移っていき、J積分評価を適用した破壊靱性の研究から、破壊エネルギーの評価がコンクリートの破壊靱性の評価に有効であると考えられました。

\*

複合材料の強度特性の解析方法では、有限要素法が一般に知られるようになったころに有限要素法のプログラムを組んで解析を試みていました。しかし計算機に膨大な記憶

と演算の容量を必要とする割には、きれつの先端近傍や載荷棒の接触部付近の変位と応力の解析に十分な精度が得られないので、今では境界要素法と呼ばれるようになった解析方法を試みました。

領域の内部の値を変数として計算する領域型の有限要素法は、領域内で材料特性値が種々変化する場合や、複雑な形状をした場合の解析にすぐれているのに対して、コンクリートを均一な材料と仮定したうえでその材料試験の解析をする場合のように、領域内では材料特性値が変化せずまた形状も比較的簡単である場合は、領域の内部は領域の境界の値で決まるとして計算する境界型の方法で効率的な解析が行えます。

材料に生じる変形と応力を計算するための境界型の解法には、積分方程式によるものと重ね合わせによるものがあり、両方についてプログラムを作成し計算を試みましたが、無限大に発散する応力分布など特異性のある場合は積分方程式による計算結果の精度が不十分でした。重ね合わせによる方法では、応力場と変位場の理論式を種々導き、特異性のある部分では細かく変数を設定してそれらで決まる応力場と変位場を重ね合わせることで、大変精度のよい計算結果を得られるプログラムを作成することができました。

この数値計算方法は、単一の材質の問題ばかりでなく、異種材料を接合した界面において、接合母材の物理的性質と機械的性質の相違により発生する残留応力を弾塑性的に解析する研究に利用して、その精度と有用性について検証を行っています。

研究の中で行った数値計算は、第三者により信頼性の確認の追試が行えるようにすることも重要であります。そのためには研究手段として使った数値計算方法を公開して批判を受けることが望ましいと考えます。数値計算方法が優秀であるか稚拙であるかは、研究成果に大きな影響を与えますので、信頼性と汎用性のある数値計算方法が提供されて、必要なときは誰でも使えるようになることは大切なことと思います。