

研究解説

コンクリートの劣化診断

Practical and Numerical Evaluation of Existing Concrete Structures

魚本 健人*

Taketo UOMOTO

1. はし が き

1999年に発生した山陽新幹線のトンネルライニングからのコンクリート塊剥落事故や高架橋からのコンクリート剥落、補修後の構造物での劣化の進行と再補修などは維持管理の大切さ、診断業務の難しさを如実に示したものである。これらの構造物では日常点検等でコンクリートに種々のひび割れが認められていたが、検査員および管理者はこの時期にコンクリートが「剥落」と予想できず、特別な対策を講じていなかったことから理解できよう。しかし、現在世界の人口の大半が居住する「都市」では「安全」が最も重要であるといっても過言ではない。少しでもより安全な都市基盤を構築し、維持管理することは急務であるといえよう。

このような背景をもとに、我が国のみならず世界の都市基盤の安全を確保するための技術開発等を実施するセンターとして、本年4月に都市基盤安全工学国際研究センター(ICUS/INCEDE)は生産技術研究所に設置された。本文ではこのセンターの目的の一つでもあるコンクリートおよびコンクリート構造物の劣化診断の現状を説明するとともに今後の展望について解説する。

2. 劣化問題に関する我が国の現状と将来予測

2.1 現在までの建設の状況と今後

現在までに我が国は大量のコンクリート構造物を建設した。我が国から外国に輸出しているセメント量は相対的に少ないため、図1に示した我が国のセメント生産量の変遷を見ても推定することができる。1974年まではほぼニアにセメント製造量が増大していることや、その後多少の変動はあるもののその伸びは緩やかになり最近ではどちらかというあまり増大していないことなどを見て取ることができる。このセメント生産量を基にして 1m^3 あたり

300 kgのセメントが使用されたと仮定して製造されたコンクリート量を推定すると、図2に示すように高度成長期であった昭和40年(1965年)までに生産されたコンクリートは、1998年までのおよそ1/3程度にしかない。即ち現存しているコンクリート構造物の2/3は昭和40年以降に建設されたものであるといえることができる。

今後の状況を予測すると、図3に示したように建設後50年を経過した橋梁の数と橋梁全体の数は2000年以降も

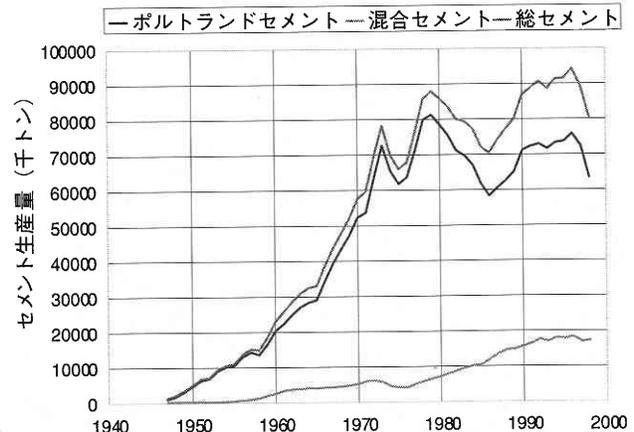


図1 我が国のセメント生産量の変遷(セメント協会)

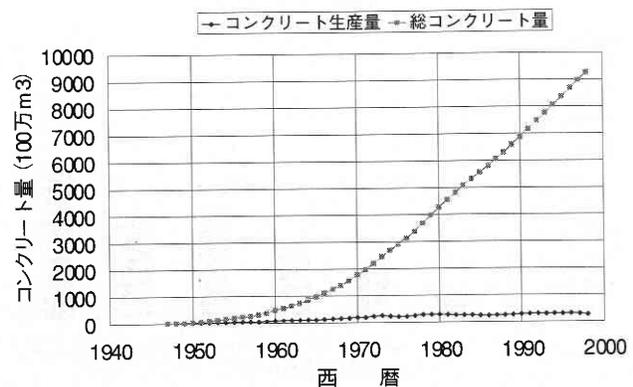


図2 我が国のセメント生産量の推定値(単年度および総生産量)

*東京大学生産技術研究所
都市基盤安全工学国際研究センター センター長

増大すると予想されている。特に2020年以降では、今後の新規建設の伸びにもよるが現在までと同程度の伸びであると仮定すると、建設後50年を経過する橋梁の割合が50%を超える可能性がある。もし建設の伸びが減少する場合には、より大きな割合になることはいうまでもない。

一方、建設省、運輸省、農水省等で組織された「耐久性検討委員会」で発表された資料によると、図4に示すように建設後年数が経過すると補修されている橋梁数の割合はほぼ直線的に増大し、50年で約40%の橋梁が補修されていることがわかる。これらのことから明らかなように、今後は多くの構造物を維持管理しなければならないが、補修を要する構造物の数も急激に増大していくということができよう。

一方、我が国の年齢分布を見ると、図5に示したように第2次世界大戦後大きく変化していることが理解できる。即ち、0歳から14歳までの人口が著しく減少しており、逆に65歳以上の人口が増大している。現在では65歳以上の人口のほうが14歳以下の人口割合を上回っており、14歳以下の人口は1940年頃のほぼ半数になっている。このことから、今後の我が国は少子高齢化が更に進み、建設分野等の技術者も減少していくものと予想される。なお、2001年では既に若年層の人口割合が65歳以上の人口割合を下回っていることが報道されている。

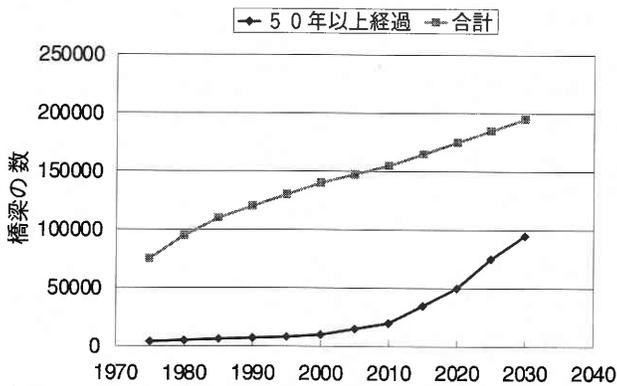


図3 全橋梁数と50年以上経過した橋梁数の予測

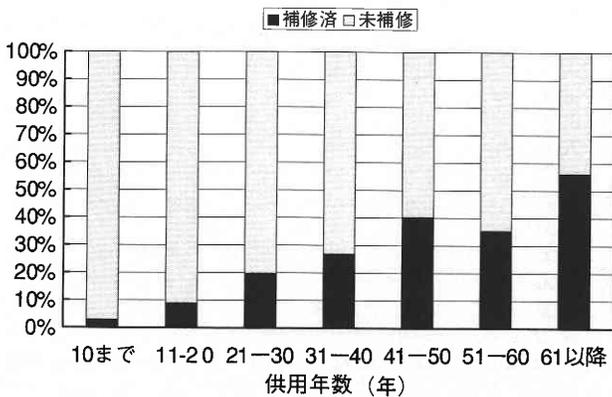


図4 補修した橋梁数割合と共用年数との関係

以上のことから、今後は現在より多くのコンクリート構造物を、より少ない技術者で、あまり費用をかけずに維持管理することが重要となり、適切な診断ならびに適切な対処が不可欠になると考えられる。このため、21世紀は新規に建設すること以上に既存のコンクリート構造物を維持管理することが重要な仕事になるが、特に各種検査（一次検査、二次検査など）を客観的に実施するとともに、各種検査結果に基づいた劣化診断が技術者にとって非常に重要な仕事となる。

2.2 コンクリート構造物の維持管理と検査・診断

現在実施されているコンクリート構造物の維持管理システムは、管理者等によって異なっているが、一般には図6に示したような方法が採用されている。即ち、定期的に目視調査等の一次検査が行われ、その結果に基づき更に詳細な二次検査を行うか否かを定める。二次検査では打音検査等も含めた非破壊検査なども併用されるが、その結果補修や補強を施すほうが良いかどうかを判定しなければならない。更に、補修・補強を施すのであればどのような補修・補強とすべきかを選定することが求められる。これらのことからわかるように、判断が必要なのは一次検査および

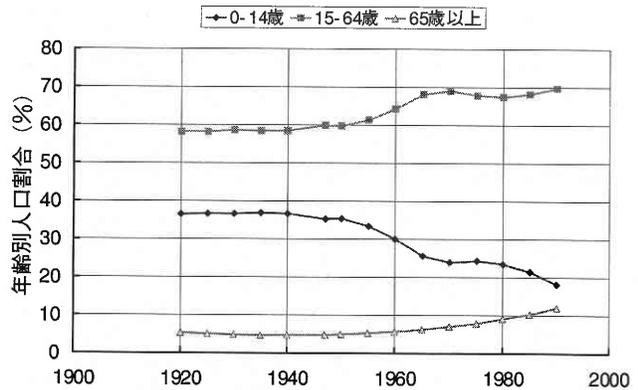


図5 我が国の年齢別人口割合の変遷

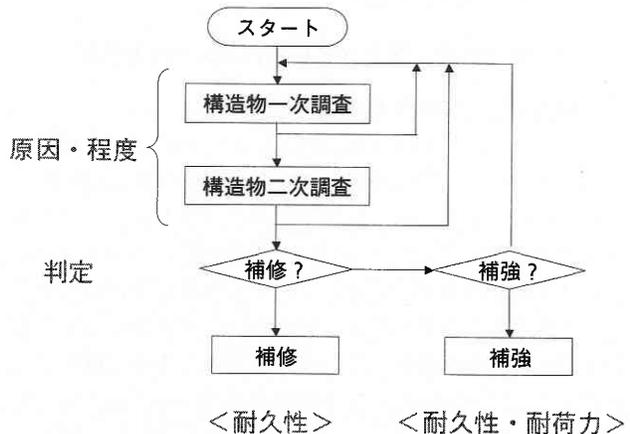


図6 一般的なコンクリート構造物の維持管理システム

二次検査後、その構造物に対してどのような措置をとるかを決めることである。

「診断」という言葉は広辞苑によると「医師が患者を診察して病状を判断すること。転じて、物事の欠陥の有無を調べて判断すること。」と記述されている。即ち、上記の維持管理システムの中で「コンクリートの各種検査に基づき欠陥の有無を調べて、どうするべきかを判断する」ことは「コンクリートを診断する」と等しい。この判断はかなり重要で、医師の場合と同様に、検査の方法やその限界を熟知し、構造物の有している欠陥・劣化状況などを勘案して決めることになるが、この判断が誤っているとさらなる劣化を引き起こし、「第三者障害」や「事故」を起こすことになる。しかし、この診断を行う技術者は、「医師」とは異なり従来特別な資格を有しているとはみなされず、各検査員がそれぞれの機関が有しているマニュアル（表1に示した例のように主に目視検査の結果で判断する手法が多い）で対処してきたのが現状である。このため、大きな事故などが発生した場合を除き、現場で行われた検査結果をより専門的な角度から検討されることはまれで、検査結果を見過ごすことも多いと考えられる。

このような現状を考慮して、今年から日本コンクリート工学協会ではじめた「コンクリート診断士」の資格制度は、ある意味では時代にマッチした制度である。これからはこの種の資格試験で維持管理技術者の技術レベルのアップと社会的な地位の向上をはかることが重要であろう。

今まで述べたことから明らかなように、21世紀には今までのような設備投資は期待できないので、劣化した既存構造物を撤去して新規構造物を建設する可能性は少な

い。このため、これからの構造物のメンテナンスは次のことを考慮する必要がある。

- ① 新規構造物はもとより、既存構造物の場合もその使用を中止せずにより長期間（例えば建設後100年以上）使用できるようにメンテナンスしなくてはならない。
- ② メンテナンスに要するコンクリート技術者の養成が重要であるが、少子高齢化の時代を考えると、少数の技術者でも対応可能な効率の良い機械化・システム化が必要となる。
- ③ 公共投資などの予算が限られていることから、コンクリート技術者以外に対するメンテナンスの重要性を認識してもらうとともに、経済性を重視した劣化度の評価・判定および補修・補強工法の選定を行う手法の研究・開発が急務である。

これらの問題はいずれも一朝一夕には解決できないが、①に関してはメンテナンスのための計画、設計、施工技術の完備が重要である。今までにも既に種々の研究等が実施されているが、土木学会が2001年に発刊した「コンクリート標準示方書（維持管理編）」²⁾に見られるような構造物のメンテナンス方法も一つの方法であろう。②に関しては、機械化の図れるものについては早急に機械化を進め、効率の良いデータの収集・整理とより少ない技術者で実施可能な設計・施工技術を開発することが重要である。特に、図6で述べた「一次調査」や「二次調査」に関して非破壊検査を効率よく利用する方法を開発することが急務であろう。③に関しては、従来少ない経験から構造物管理者が個別に定めてきた「劣化度の評価・判定」や「補修・補強工法の選定方法」ではなく評価・判定および選定した結果、実際に適用した場合にどうであったかをデータベース化して、より経済的で効果のある手法を明らかにしていくことが第一歩であろう。

4. 非破壊検査の自動化

当面の問題として、②に関する検討課題のうち非破壊検査を自動化することが急務である。これが行えればかなり客観的にかつ自動的に検査することが可能となる。そこで、以下にその可能性について説明する。

土木構造物を対象として考える場合、一般に構造物は大きく（例えば、ダム、トンネル、橋梁など）、非破壊検査を実施する場合にも構造物に接触して行うには種々の大掛かりな設備を必要とする。このため、非破壊検査の自動化を図るためには計測するたびにセンサーを一回づつ取り付けなければならないという手法は扱いにくい。そこで、自動化の第一歩として、詳細な検査を行う二次調査ではなく広範囲に実施する一次調査について、非接触でコンクリート構造物の自動計測を行うことができる幾つかの手法につ

表1 劣化度判定の例

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆が見られる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れがみられる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し ひび割れの幅数mm以上のひび割れ含む	ひび割れ幅数mm以上のひび割れ多数	—
かぶりコンクリートの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい
点検に寄る調査の要否判定	調査の要なし(点検継続)			要調査		

補修の要否の判定

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
補修の要否判定	補修の要なし		補修の要なし(都合により補修)	要補修		要補修(都合により補強)

いて概説する。なお、一般に行われているコンクリート構造物の非破壊検査は表2に示す通りである¹⁾。

(1) デジタルカメラなど

デジタルカメラは普通のカメラと同様に対象物の外観を調べることができる。デジタルカメラでの撮影は、①最近のカメラはカラーでも画素数が多くなり精度がよくなったこと、②撮影後、直ぐにその画像で良いかどうかの判定が行えること、③コンピュータを利用して画像端部の歪みを修正しやすいこと、④いくつかの画像を重ね合わせることができること、⑤記録として残すにはフィルムよりも扱いやすいことなどの利点があげられる。また、画像処理を行えばコンクリート表面のジャンカ等ばかりでなく0.2mm以上の幅のひび割れであればその位置を正確に出すことができる(図7参照)。なお、この手法は表面の情報しか入手することができない。

この方法は連続的な撮影を行うことはできないが、一定間隔で計測ができる。また、移動しながら連続的に撮影するのであればハイビジョンカメラなども考えることができる。

(2) レーザー法

レーザー法は指向性の高いレーザー光を照射し、その反射波を検知することで物体表面にあるひび割れ等の情報を検出することができる。その利点として、①連続的に細かいピッチでスキャンさせて計測することによりコンクリート表面のひび割れ分布や各種欠陥を調べることができること、②デジタルカメラで必要とされるような光源やサーモグラフィーで必要とされる加熱装置などがなくても測定で

きることなどが上げられる。しかし、表面の汚れ等の影響を受けるとともに色の变化などはわからない。

この方法は計測速度にあわせて連続的な画像を得ることができ、計測条件の影響を受けにくいという利点を買われ、日照の当たらないコンクリート床版(図8参照)やトンネルライニングのひび割れ分布計測等にも利用されている。

(3) サーモグラフィー

赤外線センサーは物体から放出される赤外線をとらえることで、その物体の温度を知ることができるため、対象物の温度分布を求めることができる⁴⁾。その利点としては①デジタルカメラやレーザー法は表面の情報だけであるが、やや内部の情報まで入手することができること、②剥離等が生じているコンクリートの場合、剥離部では太陽光線等が内部まで到達せず蓄積されるため著しく温度が高まるため、剥離箇所を二次元的に求めることができること(図9参照)、③デジタルカメラやレーザー法で得られた結果と重ね合わせが行えることなどが上げられる³⁾(図10参照)。しかし、表面の汚れや計測時の日照条件などによる影響を加味する必要があり、そうでない場合にはコンクリート表面を加熱する等の方法を併用することが必要になる。

この方法は静止画像ばかりでなく連続的な画像をも得る

表2 コンクリート工事等における非破壊検査の適用

時期	検査項目	必要な測定	検査方法	備考
経年時	異常箇所	異常箇所(可視)	デジタルカメラ、赤外線、レーザー	ひび割れ、ジャンカ、コールドジョイント等
		異常箇所(非可視部)	打音、赤外線、レーダ、超音波、X線、打音	表面からは見えない箇所(内部、背面空洞等含む)
	応力・変形	全体変形	メジャー、トランシット等	
		局部変形	ダイヤルゲージ、ひびみ計	
		振動	加速度計、変位計など	
	強度・剛性	弾力	モルタージ、光センサー	
		コンクリート強度	コア試験 ブルアウト、シュミット法等	最も一般的 信頼性の問題
		弾性係数	コア試験	最も一般的
		ひび割れ・剥離	分布(可視部)	デジタルカメラ、赤外線
	その他	ひび割れ(可視)	深さ	デジタルカメラ、赤外線
発生			超音波	疲労等、常時計測
有害物質		中性化深さ	コア試験	
		塩化物イオン深さ	コア試験	いずれもコアで分析
透水・透気性		酸等の深さ	コア試験	
		有害イオン分布	マルチスペクトル法	コンクリート表面のみ
鉄筋腐食		透水性	簡易透気係数測定	
		腐食箇所	自然電位	測定時の腐食箇所
		腐食程度	自然電位、電流量解析	定期的測定が必要

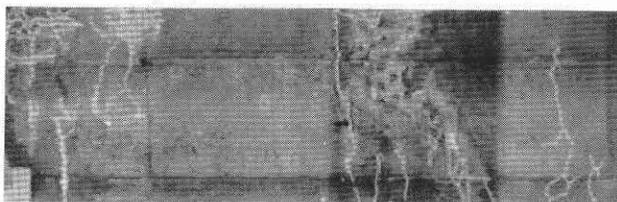


図7 デジタルカメラによる画像とひび割れ分布³⁾

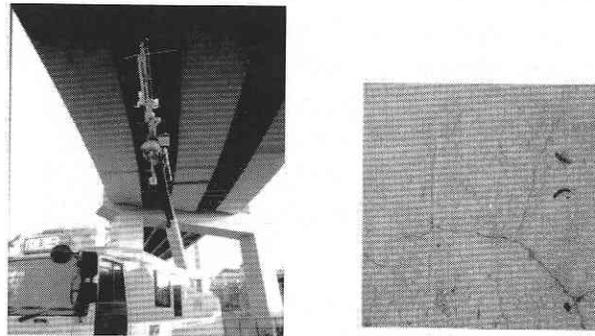


図8 レーザーを利用したコンクリート表面計測 (財首都高速道路技術センター提供)

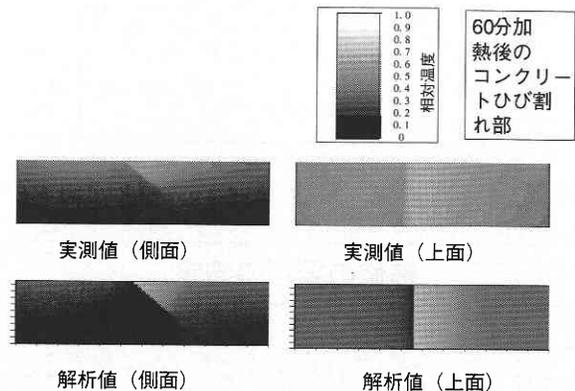


図9 コンクリート表面ひび割れ部の赤外線計測結果⁸⁾

ことができるが、精度を上げるためにはより高い画素数の機器を必要とする。既にこの手法は建物の表層部モルタルの剥離やタイルの剥離等の検出等に利用されている。

(4) レーダ法

レーダ法はマイクロ波を利用した計測方法で、電磁波を測定対象物に照射し、その反射波を検出することで内部に存在する物体、空隙等を検出する。その利点は①上記 (1) から (3) まではコンクリート表面の情報に限定されるが、この方法はコンクリート内部の情報を得ることができること、②使用する周波数にもよるがトンネルライニング背面の空洞なども知ることができることなどが上げられる。しかし、コンクリートの誘電率等によって影響を受けることや、より深い地点の情報を得ようとすると周波数を下げる必要があるため測定精度が低下することなどが問題となる。また、電波法による問題も存在する。

この方法は連続的な計測をすることができるが、現在市販されている機器ではコンクリート表面からあまり離すと誤差が大きくなるなどの問題と、計測結果の表示が一般の土木技術者にはわかりにくいという問題がある。朴らが開発したような⁵⁾ 計測結果の復元化手法などが広く使用されるようになると一般の建設技術者にも理解されやすくなる。なお、この手法は、既に一部ではトンネルライニングの厚さおよび背面空洞の検出等 (図 11 参照) の自動化に利用されている。

(5) 打音法

打音法は、昔から多くの分野で利用されてきた方法で、原理はハンマー等で叩いた応答音 (マイクロホン等で採取) から内部に存在する空隙等を検出する方法である。この方法は全く非接触で計測するわけではないが、その利点は①一定の打撃力による打撃を行うことができれば応答音の振

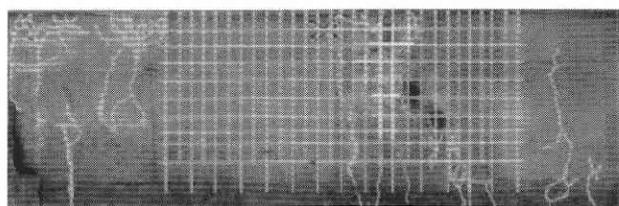


図 10 デジタルカメラ、レーザー、赤外線のリレー複合計測結果³⁾

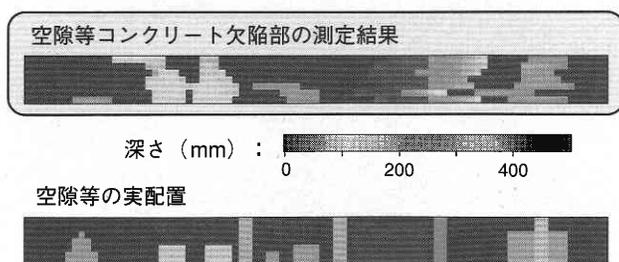


図 11 レーダーによるコンクリート版中の空隙・欠陥検査結果⁹⁾

幅の変化等で空隙の有無、劣化の程度等を調べることができること、②周波数の変化を調べることにより共振周波数が求められるため、経年による変化を知ることができることなどが上げられる⁶⁾。しかし、ハンマーで叩く力を一定にすることが難しいことや、全面をくまなく計測するのではなく何 cm か離れた一定のピッチで計測せざるを得ないことが問題点として挙げられる。

この方法は、既に建物のタイル剥離箇所の検査等にも利用され、検査用ロボットによる自動化も行われている。コンクリートの浮き、剥離等の検出にも自動化の試みが行われている。

以上述べたように、既に自動的に非破壊検査を行うことのできる手法は種々あるが、今までなかなか利用されてこなかったのが現状である。21 世紀にはこのような技術開発を強力に進めることができれば、構造物のメンテナンスの問題も容易に対処できるようになると考えられる。

5. あとがき

本文では、建設分野における動向と 21 世紀における構造物のメンテナンスの重要性について説明したが、非破壊検査の例を見るまでもなく今後の技術開発が大きな役割を担っていることが理解できよう。この問題について、今年新たに設置した都市基盤安全工学国際研究センター (ICUS/INCEDE) では鋭意努力する予定であり、今後の活動に期待されたい。

(2001 年 9 月 20 日受理)

参考文献

- 1) 魚本, 加藤, 広野: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 (2001 年制定) 「維持管理編」, 土木学会, 2001.
- 3) 友清, 魚本: 実橋床版における各種非破壊試験の適用性に関する研究, 生産研究, 1999.
- 4) 魚本: 赤外線センサーのコンクリート工事・構造物への適用, 生産研究, 44 巻 11 号, 1992. 11.
- 5) 朴, 魚本: 多重偏波方式のレーダによるコンクリート背面空隙の体積推定, 土木学会論文集 No. 592/V-39, pp. 13-24, 1998. 5.
- 6) 伊東, 魚本: ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁の打撃音, 土木学会論文集, No. 564/V-35, pp. 169-176, 1997. 5.
- 7) 魚本: コンクリート剥落とメンテナンス, 生産研究, 7・8 号 (2001.7)
- 8) 高羅, 魚本: 温度解析に基づいたサーモグラフィ法によるコンクリート中のひび割れ検査方法に関する基礎的研究, 生産研究生産研究, 11・12 号 (2001.11)
- 9) 宮本, 魚本: ホーン型レーダーによるコンクリート構造物の欠陥探査方法に関する基礎研究, 生産研究, 11・12 号 (2001.11)