

コンクリート構造物に関する非破壊試験法の現状と動向

PAST TRENDS AND PRESENT STATE OF NONDESTRUCTIVE TEST ON CONCRETE STRUCTURE

太田資郎*・吉田典明**・藤原鉄朗*・松山公年*・金本康宏*

Shiro OTA, Noriaki YOSHIDA, Tetsuro FUJIWARA, Kimitoshi MATSUYAMA and Yasuhiro KANEMOTO

Documentation research working group into non-destructive techniques for testing concrete structures was organized by the Japanese Society for Non-destructive Inspections. The working group researched reviews and trends in non-destructive tests on concrete structures. The past trends and present state were arranged using abstracts of papers by JST. Details on each paper, stage of study, purpose, methods and objects of NDT were reported in this paper.

Key Words : non-destructive techniques, concrete structures, review and trend

1. はじめに

当社中央研究所における非破壊試験に関する研究は、平成4年の中央研究所の開所と同時に、熱赤外線映像法ならびにアコースティック・エミッション法を中心に進めてきた。平成9年に現業部門において開発を進めてきたレーザ計測技術とレーダ計測技術をドッキングして、非破壊試験グループを立ち上げた。写真-1は、東京電力㈱と共同で開発した小断面トンネル用レーザ・レーダ計測システムである。現在、中央研究所が保有するコンクリートおよび土木構造物に関する非破壊試験技術は、表-1に示すように10を超えるようになった。

写真-2～18は、当社がこれまでにに行った各種土木構造物に対する非破壊検査の計測状況を紹介したものである。これらの調査に関する詳細は参考文献⁹⁾に紹介している。当社が進めてきた非破壊試験技術に関する研究は、先端的な技術を中心にしたものであり、今後の展開が期待される。また、非破壊試験の研究を進めると同時に、コンクリート工学、岩盤工学、トンネル工学等の研究を進め、幅広い技術の開発を行ってきた。

一方、新幹線トンネルにおけるコンクリート塊の崩落事故ならびに照査型コンクリート標準示方書の発行以来、土木構造物に関する検査技術の開発要求は高まり、特に非破



写真-1 小断面トンネル用レーザ・レーダ計測システム

壊試験に関する技術開発に対する要求は凄まじくなっている。また、維持管理・構造保全技術は、現在の日本社会が最も必要とする技術の一つになっている。

* 中央研究所 維持管理・リニューアル部

** 首都圏事業部 河川・水工部

表 - 1 日本工営(株)が所有する非破壊試験技術の概要

非破壊試験法	試 験 法 等	試験の目的	調査実績等
レーザ法 (写真-1)	レーザ光をトンネル壁面に照射し、その反射光量の強弱を光検出器でとらえることにより、クラック等の変状情報を検出する。 東京電力(株)と共同開発。	トンネル覆工表面のクラック等の変状を計測	小断面トンネル (1.8m ~ 5.0m) に適用。発電、農業用水路トンネル、地すべり排水トンネル (運用中)
熱赤外線影像法 (写真-2)	物体から放射される赤外線を測定し、物体表面の温度分布を面的に捕える。物体内部の欠陥や異常が表面温度に変化をもたらす。 国土交通省と共同開発。	吹付けのり面の調査・診断	道路・ダム下流のり面調査。建築構造物の壁面劣化調査。(運用中)
斜面を対象としたAE法 (写真-3)	岩盤の大きな変形に先立ち、岩盤の微小変形段階で破壊音を発する。この破壊音を察知することにより岩盤崩壊を予知する。 国土交通省と共同開発。	斜面、岩盤の崩壊予知	シラス崩壊予知実験 (研究中)
コンクリートを対象としたAE法 (写真-4、17)	コンクリートの微小破壊時の破壊音を察知し、破壊の進行状態をリアルタイムで把握。また、破壊音の発生特性からコンクリートの劣化度を判定。 熊本大学と共同研究。	コンクリート劣化度判定	コンクリート劣化度評価、杭の損傷 (運用中)
AEロッド法	特殊な材料を使用したロッド (棒) をボーリング孔に設置し、ロッドの破壊音を察知し、岩盤崩壊や地すべりを予知する。 JR西と共同開発。(開発研究部が担当)	斜面、岩盤、盛土の崩壊、地すべり予知	盛土、岩盤すべり、地すべり、岩盤崩落予知システムとして使用(運用中)
管渠内面展開図化システム	ビデオテープに記録された下水道管渠前方画像から展開画像を作成する。 東京都下水道サービスと共同開発。 (開発研究部が担当)	下水管渠内面展開図作成	下水道管渠 (運用中)
レーダ法 (写真-1、5~8)	レーダアンテナから媒質中に電磁波を送信し、電気的特性が異なる物質の境界面で反射した電磁波を受信アンテナで捕える。	コンクリート強度・厚、空洞高、金属類による地盤汚染。	トンネル覆工厚・背面空洞高、舗装厚・版下空洞厚、コンクリート強度、地盤の金属汚染調査 (運用中)
ボアホールレーダ法 (写真-9)	ボーリング孔にレーダアンテナを挿入し、レーダ波の反射波形から地下構造物の形状を捕える。 国土交通省と共同開発。	構造物基礎の形状調査	橋梁基礎、鉄塔基礎 (運用中)
衝撃反射法 (IT法) (写真-10)	基礎杭等の頭部を軽打し、杭先端あるいは破断面からの反射波を計測して、杭長や損傷を調査する。	杭、鉄塔基礎等の形状 (長さ) や損傷を調査	杭、鉄塔基礎 (運用中)
孔内弾性波探査法 (写真-11)	弾性波の伝搬速度から、杭基礎等の形状や損傷を調査する。	杭、鉄塔基礎の形状や損傷を調査	杭、鉄塔基礎 (運用中)
超音波法 (写真-12~15)	(透過法) 伝搬速度からコンクリートの強度や内部欠陥を調査。 (反射法) 伝搬時間から鉄塔基礎アンカーアングル等の長さを計測。	コンクリート強度・欠陥、鋼材の長さ測定	コンクリート強度・内部欠陥、ロックボルト長、鉄塔基礎アンカーアングル長 (運用中)
反発硬度法 (写真-16)	シュミットハンマー法として知られる。コンクリートの反発度からコンクリートの圧縮強度を推定する。	コンクリート強度	コンクリート強度 (運用中)
自然電位法 (写真-18)	金属が腐食する時、腐食電流を発生する。腐食電流の強度から鉄筋の腐食状況を推定する。	コンクリート中の鉄筋の錆び	コンクリート梁、柱中の鉄筋の錆び (運用中)
磁気探査法	磁場の空間的变化 (磁気傾度) から鉄筋、鋼管等の位置を推定する。	鋼材の位置	基礎杭 (研究中)
打 音 法	ハンマーの打撃音からコンクリートの異常部を抽出する。	コンクリート劣化・欠陥、空洞等	コンクリート劣化・欠陥、空洞 (運用中)
弾性波探査法 電気探査法	浅層地盤探査法。(開発研究部が担当)	構造物の地下形状	構造物の地下形状 (研究中)



写真 - 2 熱赤外線映像法による吹付のり面調査状況



写真 - 3 しらす崩壊実験に使用中のAE計測装置



写真 - 4 AE法による劣化コンクリートの品質評価



写真 - 5 空港舗装版下の空洞探査状況



写真 - 6 レーダによる建築基礎形状・配筋計測状況



写真 - 7 レーダによる金属類地盤汚染調査状況



写真 - 8 レーダによる道路トンネル覆工厚・空洞高計測状況



写真 - 9 ポアホールレーダアンテナの斜めボーリング孔への挿入状況



写真 - 10 衝撃反射法による鉄塔基礎深さの計測状況



写真 - 11 孔内弾性波法による鉄塔基礎コンクリートの形状調査状況



写真 - 12 超音波法によるコンクリート内部欠陥調査状況



写真 - 13 コンクリートの超音波伝播速度計測状況



写真 - 14 超音波法による鉄塔のアンカーアングル長計測状況



写真 - 15 超音波法によるロックボルト長の計測状況



写真 - 16 反発硬度法によるコンクリート強度判定



写真 - 17 AE打撃法によるコンクリート内部欠陥調査状況



写真 - 18 自然電位法による新幹線高架橋の鉄筋発錆調査状況

表 - 2 研究ステージの分類

研究のステージ	説 明
試験装置の開発・適用	新しい装置・システム・解析手法の開発およびその適用性を評価しているもの
適用・検証試験	ある程度出来上がっている非破壊検査法をコンクリート構造物に適用し、その適用性について評価・検証しているもの
調査・検査報告	完成した非破壊試験法を使用して実コンクリート構造物の調査・検査を実施し、その結果を報告しているもの
総 論	非破壊試験の現状・動向等を教科書的に紹介しているもの

表 - 3 非破壊検査法の種類

検 査 方 法	非破壊検査法の分類
目視調査的試験方法	デジタルカメラ法*、レーザ法*、ボアホールカメラ法*
放射線透過試験方法	X線法
サーモグラフィ法	赤外線法
レーダ法	レーダ法
超音波法	超音波法
衝撃弾性波法	衝撃弾性波法、衝撃反射法(IT法)*
AE法	AE法
電磁誘導法	電磁誘導法
圧縮強度推定のための試験方法	反発硬度法(シュミットハンマー法)、超音波伝搬速度法、引かき硬度法、貫入抵抗試験法、ピン引抜き試験法、内部拡張破壊試験、張り破壊試験法、引張破壊試験法、曲げ折り強度試験法、積算温度による強度推定法、複合非破壊試験法(超音波とシュミットハンマー法が一般的)
ひび割れ浮きの検出法	浸透法、打診法(打音法、打検法、音響法)
自然電位測定による鉄筋の試験方法	自然電位法、分極抵抗法、交流インピーダンス法、電位ステップ法
含水率試験方法	削孔中の湿度による方法、張付け湿度試験紙による方法、誘電率による含水率試験、電気抵抗法、埋め込み式含水率計、中性子水分計、マイクロウェーブ法
中性化深さ試験	中性化試験装置による方法 簡易中性化深さ試験
簡易透気性試験	直接加圧法、空気漏洩法、簡易透気性試験
簡易透水性試験	直接加圧法、簡易透水性試験
コンクリートの調合の推定試験法	石灰石骨材を用いたコンクリートの単位セメント量分析方法、単位水量の推定方法、不溶残分量から単位セメント量を計算する方法、酸化溶性SiO ₂ と真空吸水率から調合を計算する方法、小孔・小径コア法
そ の 他	衝撃振動試験法*、共振周波数法*、光ファイバー法* その他

*：「コンクリート構造物の非破壊試験法(日本非破壊検査協会編 1994年発行)」に紹介されていない試験法

このような社会環境において、(社)日本非破壊検査協会が組織する「鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会、文献調査WG(委員長:太田資郎*)」は、科学技術振興事業団(JST)の文献検索を使用して「鉄筋コンクリート構造物の非破壊検査法の現状と動向²⁾」を調査した。検索は1997年～2000年の4カ年について実施した。検索した文献数は859に達し、文献抄録を参考に非破壊試験法の種類や調査対象等について、整理・分析を行った。本報告書はその調査結果と当社中央研究所非破壊試験技術の現状を紹介するものである。

2. 文献調査と分析の方法

科学技術振興事業団の文献検索から「非破壊試験」をキーワードに検索した文献抄録を使用してコンクリート構造物を対象とした非破壊試験法を抽出し、研究のステージ、非破壊試験法の種類、適用した構造物の種類、調査目的について整理した。

検索は1997年～2000年の4カ年について実施した。

(1) 研究ステージの分類

研究ステージは、表 - 2 に示すように非破壊試験装置の開発から実現場における調査・検査報告に至るまでの開発過程に分類した。

(2) 非破壊試験法の種類

非破壊試験法の種類は、図書「コンクリート構造物の非破壊試験法」³⁾を参考に分類した。本図書に紹介されている非破壊検査法は表 - 3 に示すとおりである。

(3) 非破壊試験法を適用した構造物の種類

非破壊試験法が適用された構造物の種類は、文献に紹介されている具体的な構造物名を使用している。構造物の種類は、表 - 4 に示すとおりである。

表 - 4 構造物の種類

具体的に構造物名が記載されているもの	橋、梁、床版、橋脚、杭、吹付コンクリート、舗装、ダム、建築構造物、河川構造物、港湾構造物、煙突、吊橋ケーブル、ボックスカルバート、コンクリート管、トンネル、柱、コンクリートブロック、ALCパネル、コンクリートポール、鳥居、埋設管、鉄塔基礎
具体的に構造物名が記載されていないもの	材料、コンクリート(円柱供試体レベル)、鋼・コンクリート、フレッシュコンクリート、コンクリート構造物一般、プレストレストコンクリート、繊維コンクリート、繊維シート、ポーラスコンクリート、ロックボルト、ボーステンションコンクリート

(4) 調査目的の分類

非破壊試験の調査目的は、表 - 5 に示すように分類した。

表 - 5 非破壊試験の調査目的

配合に関するもの	配合、水セメント比、セメント量、水分量、ブリージング、流動性、アル骨
品質に関するもの	品質評価、ひび割れ、強度、豆板、損傷、空隙、剥離、内部欠陥、凍害、打ち継ぎ、変形、弾性係数、破壊、電気特性、細孔構造、透水性、透気性、付着強度
鉄筋に関するもの	鉄筋位置、腐食、中性化、塩化物量、鉄筋・鋼の破断、鉄筋径
寸法に関するもの	厚さ、長さ、形状
その他	監視、応力

3. データベースの構築

調査結果は、マイクロソフト エクセル上にデータベースとして構築した。データベースは非破壊試験法の種類や研究ステージ等の現状・動向が分析できるように非定型検索機能を持たせた。データベースの項目は以下のとおりである。

論文名、 筆 者 名、 論 文 集 ・ 講 演 集 名 ・ 掲 載 ペ ー ジ、
 発 表 年、 非 破 壊 試 験 法 の 種 類、 研 究 ス テ ー ジ、
 構 造 物 種 類、 調 査 目 的

4. コンクリート構造物の非破壊試験技術の現状

(1) 非破壊試験法の種類に関する現状と動向

1948年にシュミットハンマーが考案されて以来、シュミットハンマーと超音波法の2方法が強度推定分野で著しく発展し、今も実コンクリート構造物の検査等多くの分野で使用されている。その後、レーダ法が構造物の部材の耐久性評価に使用されるようになり、さらにAE法、衝撃弾性波法がコンクリート構造物や杭の内部欠陥検査に使用されるようになった。

最近4カ年のコンクリート構造物の非破壊試験に関する文献数は859論文である。非破壊試験法で分類すると図 - 1、2および表 - 6 に示すように上位から超音波法(21%)、AE法(13%)、衝撃弾性波法・赤外線法(9%)、レーダ法(7%)、反発硬度法(4%)、自然電位法小a・小径コア法、X線法がそれぞれ(3%)となり、これらの試験法の合計は72%に達する。

日本工営(株)はこれらの非破壊試験に関する技術をほぼ網羅している。また、日本工営(株)のオリジナル技術としては、レーザ法、レーダ法、ポアホールレーダ法、AEロッド法がある。

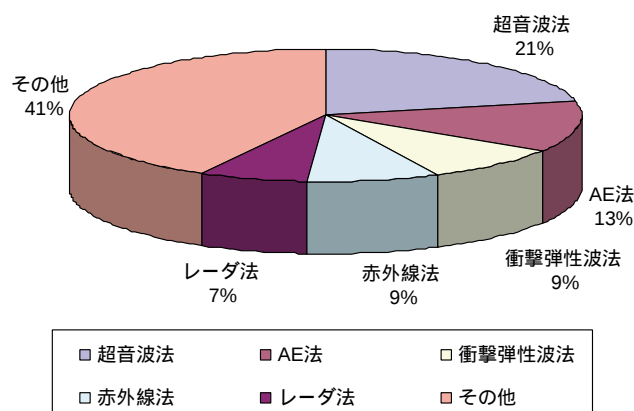


図 - 1 非破壊試験の種類 4カ年合計

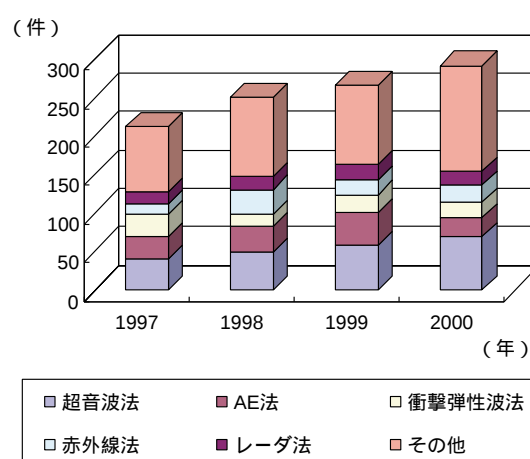


図 - 2 非破壊試験の種類 年別推移

文献数は、98年度は前年度より35件増え、99年度も16件増えており、2000年度は未調査文献を残すが、すでに99年度の論文数を超えている。

なお、非破壊試験の種類は表 - 6 に示すように46種類であった。図書「コンクリート構造物の非破壊試験法」に紹介されていない非破壊試験法としては以下のとおりであり、全て最近開発が進められている非破壊試験技術である。

衝撃反射法(IT法)、 デジタルカメラ法、 レーザ法、
 ポアホールカメラ法、 衝撃振動試験法、 共振周波数法、
 光ファイバー法。

また、文献数が1～2の非破壊試験法は10種類に達し、新しい非破壊試験法の開発が盛んに行われていることを示している。

(2) 研究ステージの現状と動向

研究ステージの現状と動向は図 - 3、4と表 - 7 に示すとおりである。文献総数859のうち、試験装置の開発・適用が20%、適用・検証試験が59%、調査・検査報告が14%、

表 - 6 非破壊試験の種類 (4カ年合計)

非破壊試験法	文献数	%
超音波法	219	21%
AE法	128	13%
衝撃弾性波法	89	9%
赤外線法	87	9%
レーダ法	70	7%
非破壊検査一般	60	6%
反発硬度法	37	4%
自然電位法	30	3%
小孔・小径コア法	28	3%
X線法	26	3%
打診法	25	2%
IT法	22	2%
電磁誘導法	18	2%
分極抵抗法	18	2%
電気抵抗法	14	1%
レーザ法	13	1%
光ファイバー法	12	1%
衝撃振動試験	11	1%
表面波法	10	1%
画像解析法	9	1%
磁気測定法	9	1%
引抜き試験法	8	1%
交流インピーダンス法	7	1%
ボアホールカメラ法	7	1%
引抜き硬度法	6	1%
加熱乾燥法	5	0%
常時微動法	5	0%
簡易透気性試験法	4	0%
迅速塩化物浸透試験法	4	0%
デジタルカメラ法	4	0%
電気伝導度法	4	0%
歪ゲージ法	4	0%
マイクロウェーブ法	4	0%
簡易透水性試験法	3	0%
水中質量法	3	0%
積算温度による強度推定法	3	0%
貫入抵抗試験法	2	0%
共振周波数法	2	0%
蛍光浸透検査法	2	0%
充填感知センサー法	2	0%
セラミックセンサ法	2	0%
比重計法	2	0%
渦流探傷センサ法	1	0%
剛性低下試験法	1	0%
混合指示薬法	1	0%
色彩目視法	1	0%
計	1022	

総論が7%である。日本工営(株)は、自社で非破壊検査技術を開発すると同時に、外部からの委託研究も実施している。また、開発した技術や市販の非破壊検査機器を使用して、実構造物の健全度診断を行っている。したがって、日本工営(株)は全ての研究ステージを担当しており、さらに実構造物の調査・検査および健全度診断を中心に現業化を

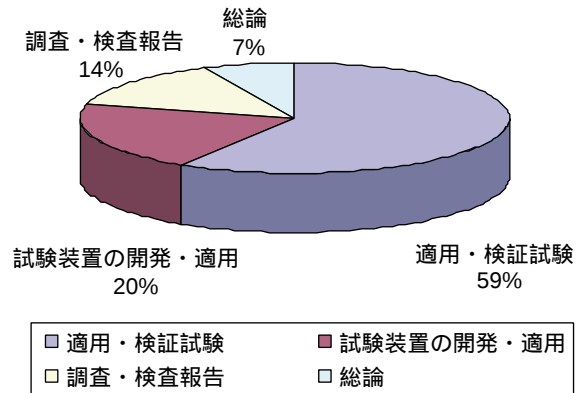


図 - 3 非破壊試験の研究ステージ 4カ年合計

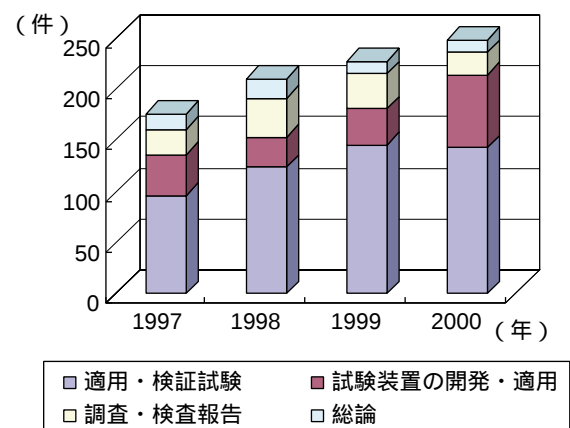


図 - 4 非破壊試験の研究ステージ 年別推移

表 - 7 非破壊試験の研究ステージ (4カ年合計)

研究の種類	文献数	%
適用・検証試験	505	59%
試験装置の開発・適用	175	20%
調査・検査報告	119	14%
総論	60	7%
計	859	

進めている。

なお、実現場で行われている「調査・検査報告」は文献としての発表はほとんど無いと考えられるので、現状および動向に関する解説は困難であるが、非破壊試験法の開発とコンクリート構造物への適用および検証試験が多く、研究者と現場技術者によって進められていることが分かった。新幹線トンネルでの覆工コンクリート剥落事故以降、トンネルに関する非破壊検査技術の開発が進められており、2000年以降は試験装置の開発・適用に関する研究が急増すると予想される。

(3) 対象構造物の種類の実況と動向

対象構造物の種類の実況と動向は図 - 5、6と表 - 8に示すとおりである。コンクリートおよびコンクリート構造物一般で全体の57%に達している。具体的な構造物では杭、床版、トンネル、建築構造物、橋、梁、舗装、港湾構造物の順に多い。1995年に発生した兵庫県南部地震以降、被災した杭の損傷調査等多くの土木構造物について非破壊試験が利用された。具体的な構造物名は22種類に達しており、非破壊試験は広範なコンクリート構造物に適用されていることが明らかになった。今後は、コンクリートおよびコンクリート構造物一般に分類される室内試験の研究レベルを超えた実構造物への適用試験・検証および調査・検査報告に関する研究報告の増加が期待できる。

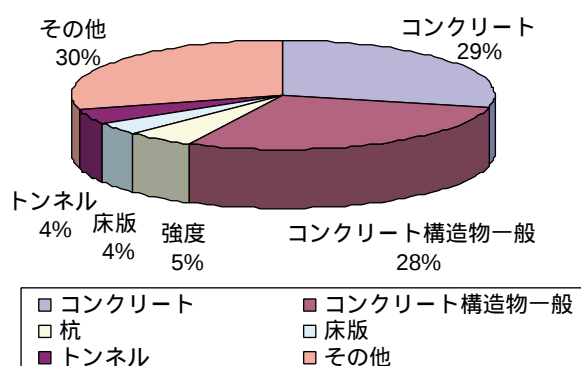


図 - 5 非破壊試験の対象構造物の種類 4カ年合計

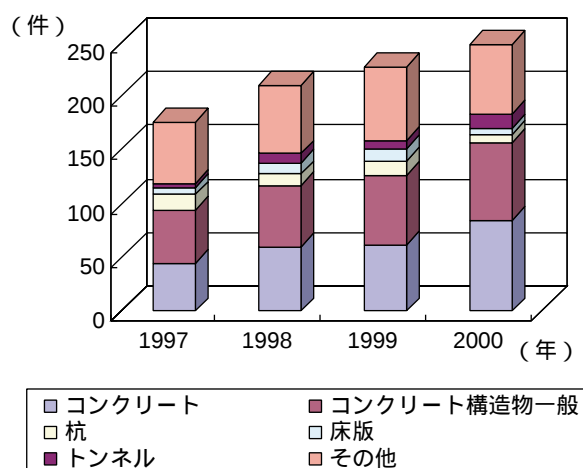


図 - 6 非破壊試験の対象構造物の種類 年別推移

(4) 調査目的の実況と動向

対象構造物の調査目的の実況と動向は図 - 7、8と表 - 9に示すとおりである。品質評価(21%)、ひび割れ(17%)、強度(10%)、内部欠陥(8%)、腐食(7%)、空隙・剥離(6%)

表 - 8 非破壊試験の対象構造物と構造部材の種類 (4カ年合計)

構造物と構造部材の種類	文献数	%
コンクリート	249	29%
コンクリート構造物一般	243	28%
杭	46	5%
床版	34	4%
トンネル	34	4%
建築構造物	32	4%
橋	30	3%
梁	30	3%
プレストレストコンクリート		
鋼・コンクリート	20	2%
フレッシュコンクリート	16	2%
舗装	16	2%
港湾構造物	15	2%
橋脚	13	2%
繊維シート	10	1%
コンクリート管	7	1%
繊維コンクリート	6	1%
ダム	6	1%
柱	5	1%
吹付コンクリート	5	1%
コンクリートブロック	3	0%
鉄塔基礎	3	0%
ロックボルト	3	0%
河川構造物	2	0%
コンクリートボール	2	0%
埋設管	2	0%
煙突	1	0%
吊橋ケーブル	1	0%
鳥居	1	0%
ポストテンションコンクリート	1	0%
ボックスカルバート	1	0%
計	860	

の順に多いが、調査目的の種類は全体で35種類に達しており、広範囲に非破壊試験法が利用されていることが分かった。構造物の種類と調査目的に沿った適切な非破壊検査法の選定および組み合わせることにより、非破壊試験法は有効な調査手段になる。

また、非破壊試験法の長所と限界を理解して、コアボーリング等を利用する破壊試験法との組合せを行って、より効率的で精度の高い調査計画の作成が重要となる。

5 . データベースの活用

作成したデータベースを使用してAE法と赤外線法について研究ステージ、構造物の種類および調査目的について整理した例を図 - 9に示した。

また、実コンクリート構造物のうち、杭とトンネルについて、調査目的、非破壊試験法、研究ステージについて整理した例を図 - 10に示した。

例えば、杭については、その調査対象は損傷、ひび割れ、

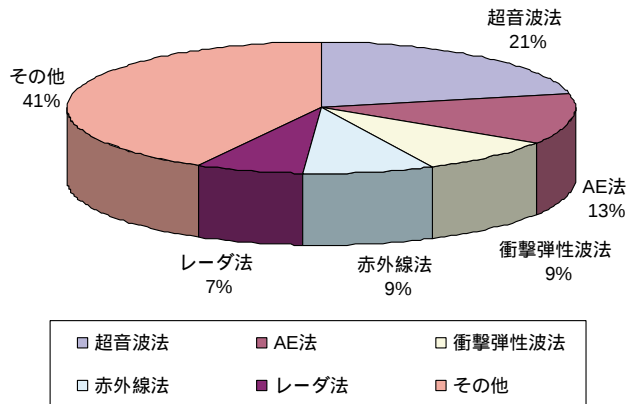


図 - 7 非破壊試験の調査目的 4カ年合計

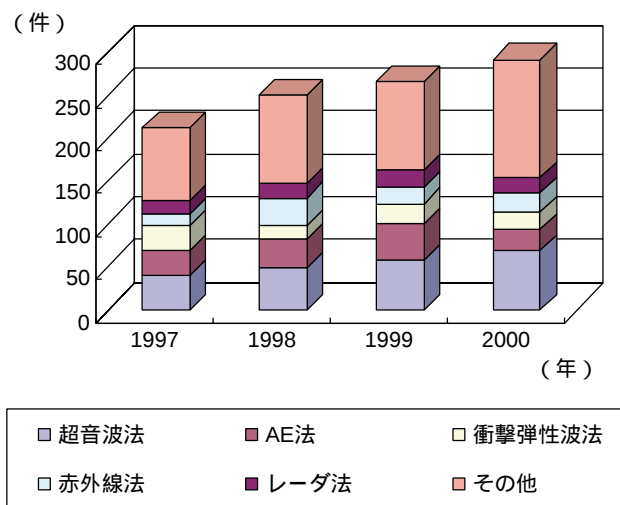


図 - 8 非破壊試験の調査目的 年別推移

品質評価、長さの順に多く、これを調査する非破壊試験法としては、IT法、AE法、超音波法、ボアホールカメラ法の順に多いことがわかる。また、研究の種類としては、適用・検証試験が63%に達している。

6. まとめ

2000年度の建設投資中の維持補修費の比率は30%程度であるが、2020年度には50%を超えると推定されている。土木構造物の延命化を図り、効率的に社会資本の整備を行うことがますます重要になると予想されている。

構造物の延命化を図る上で、最も重要なことは、構造物の劣化状況を精度良く把握して、適切な補修・補強を実施することにある。非破壊検査技術は、経済的で効率的な調査が行える技術として期待されており、新たな非破壊試験機器の開発や既存非破壊試験機器の適用性の拡大を行い、構造物の劣化状況を的確に評価が行えるように更なる研究

表 - 9 非破壊試験法の調査目的 (4カ年合計)

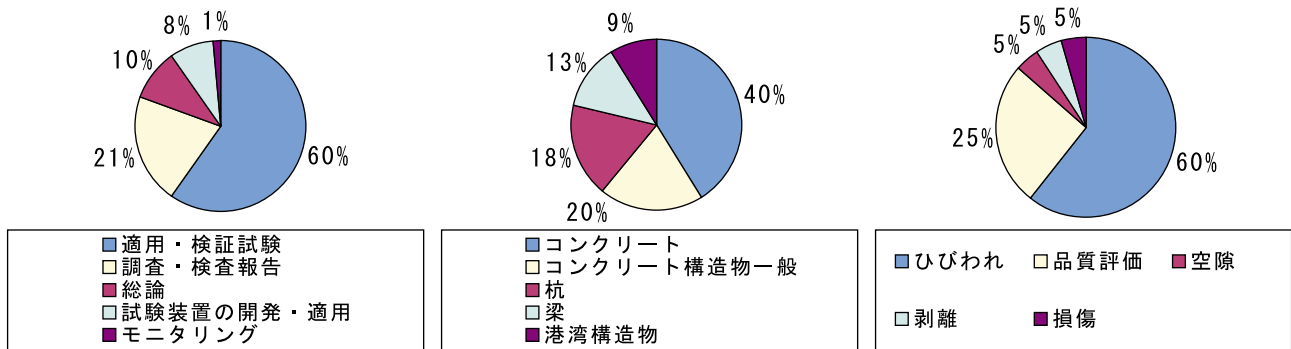
調査対象	文献数	%
品質評価	178	21%
ひびわれ	148	17%
強度	88	10%
内部欠陥	69	8%
腐食	57	7%
空隙	55	6%
剥離	48	6%
損傷	43	5%
厚さ	32	4%
鉄筋位置	27	3%
配合	13	1%
水分量	11	1%
塩化物量	10	1%
凍害	10	1%
変形	9	1%
鉄筋・鋼の破断	8	1%
打ち継ぎ	7	1%
鉄筋径	7	1%
長さ	6	1%
細孔構造	5	1%
アル骨	4	0%
監視	4	0%
豆板	4	0%
応力	3	0%
中性化	3	0%
透水性	3	0%
水セメント比	3	0%
管種	2	0%
形状	2	0%
弾性係数	2	0%
付着強さ	2	0%
セメント量	1	0%
電気特性	1	0%
透気性	1	0%
ブリージング	1	0%
計	867	

を進める必要がある。

参考文献

- 1) 日本工営(株) 中央研究所開発研究部非破壊検査グループ：土木構造物の非破壊試験法に関する論文集、2000.7
- 2) 日本非破壊検査協会 鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会文献調査WG：コンクリート構造物に関する非破壊試験法の現状と動向、2001.6
- 3) 日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の非破壊試験法、養賢堂、1994

(1) AE法について



(2) 赤外線法について

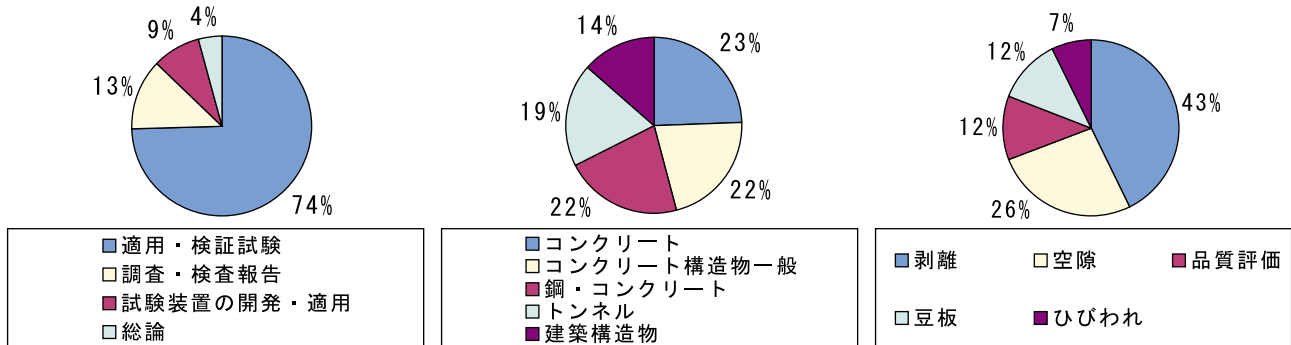
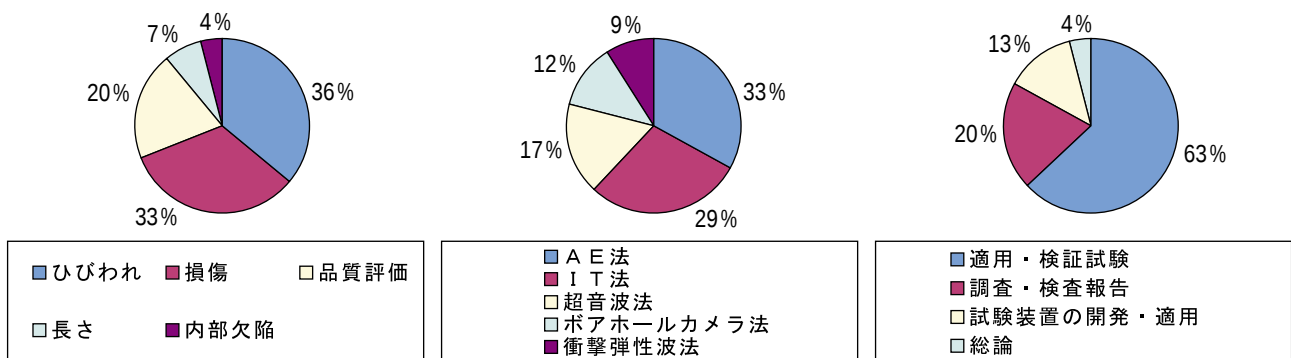


図 - 9 データベースの活用（各非破壊試験法の特徴分析）

(1) 杭



(2) トンネル

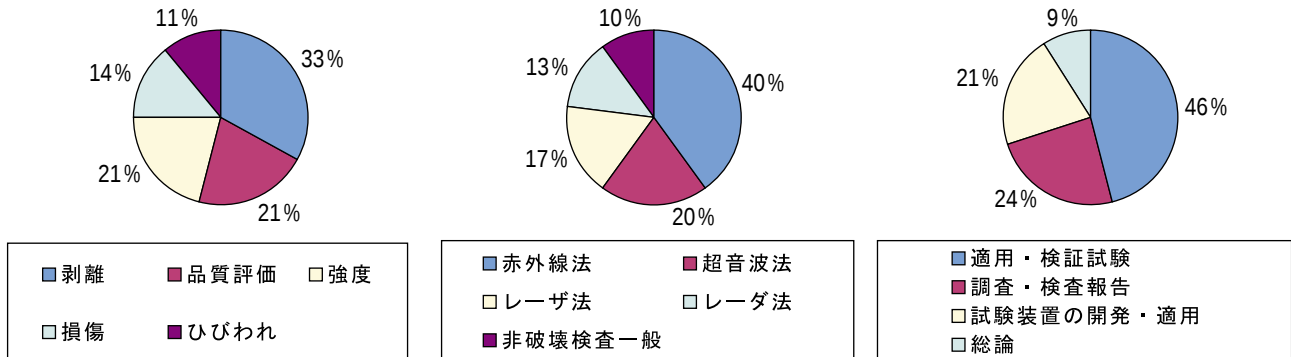


図 - 10 データベースの活用（構造物の種類と非破壊試験法の特徴）