

委員会報告

「コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告」

委員長 谷川 恭雄 (名古屋大学建築学科)

1. 委員会設置の背景と目的

コンクリートの非破壊試験法は、従来老朽構造物や被災構造物の耐力判定のための補助的手段として用いられることが多かったが、最近になってコンクリートの品質管理の手段としても活用されるようになってきた。たとえば、構造体コンクリートの強度管理、型枠の脱型時期やプレストレスの導入時期の判定など、比較的早期材令下での強度推定法としての利用である。いずれにしても、これらの応用分野は、強度を推定することが主目的であり、コンクリートの非破壊試験法の主要な役割は、依然としてこの点にある。

一方、各種測定機器の開発や解析技術の急速な進展によって、サーモグラフィー法（赤外線映像解析法）、電磁波レーダ法、超音波スペクトロスコピー法、アコースティック・エミッション（AE）法などのように、コンクリートの内部状態を非破壊的に探査するための各種の方法が提案され、既に一部実用に供されている。しかし、これらの方法は、まだ研究途上にあり、結果の判定については測定技術者の個人的経験に委ねられる場合が多く、非破壊試験法に対する信頼性の低下を招くような事態も発生している。また、最近、コンクリートの耐久性劣化が大きな社会問題となり、劣化度診断を要するコンクリート系構造物が急増している。

「コンクリートの非破壊試験法研究委員会」は、上記のような状況を踏まえて、各種非破壊試験法に関する資料の収集を行って問題点を明らかにするとともに、標準的な試験方法（試案）を提案することを目的として1989年に発足し、「強度推定法」、「弾性波法」および「電磁波法」の3つのワーキンググループ（WG）を設けて、活発な調査・研究活動を行ってきた。1992年3月までに、14回の本委員会と45回のWGを開催してきたが、以下に本委員会の活動状況と本委員会で作成した各種試験方法（試案）の概要を示す。

2. 委員会の構成

- |        |                   |                   |
|--------|-------------------|-------------------|
| 〈委員長〉  | 谷川 恭雄 (名古屋大学)     |                   |
| 〈幹事〉   | 魚本 健人 (東京大学)      | 野崎 喜嗣 (武蔵工業大学)    |
| 〈委員〉   | 阿部 保彦 (鹿島建設)      | 秋鹿 為之 (戸塚電子計測研究所) |
|        | 新井 洋一 (リコー)       | 尼崎 省二 (立命館大学)     |
|        | 石田 博彰 (電力中央研究所)   | 大津 政康 (熊本大学)      |
|        | 近藤 吾郎 (京都大学)      | 鈴木 務 (電気通信大学)     |
|        | 棚野 博之 (建設省建築研究所)  | 福川 義明 (クレオ)       |
|        | 増谷 光正 (防衛庁技術研究本部) | 山田 和夫 (愛知工業大学)    |
|        | 山中 勘詞郎 (富士物産)     | 六郷 恵哲 (岐阜大学)      |
| 〈WG委員〉 | 石渡 文治 (アイテック)     | 稲葉 茂 (ビルドック)      |
|        | 梅川 記生 (日本電気三栄)    | 北田 勝紀 (中日本航空)     |
|        | 木村 幸則 (日本アビオニクス)  | 野田 良平 (コンステック)    |
|        | 福島 札規 (日本建築総合試験所) |                   |

### 3. 委員会活動の概要

#### 3.1 シンポジウム・コンファレンスの開催

##### (1) シンポジウムの開催

本委員会活動の一環として、「コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム」を1991年4月12日に日本大学会館において開催した。当日の参加者は約380名であり、本委員会の審査を経て、採択された22編の論文（強度推定法：5編、ひび割れ判定方法：6編、内部探査法：6編、鉄筋腐食・劣化度診断方法：5編）が発表された。いずれも、コンクリートの非破壊試験法の進展に寄与しうる質の高い論文であり、活発な質疑応答が展開された。また、当日は会場ロビーにおいて非破壊試験用機器の展示が行われ、多くの関心が寄せられた。

本シンポジウムの概況については、1991年9月号のコンクリート工学誌に掲載されているので参照されたい。

##### (2) コンファレンスの開催

最近、サーモグラフィー法が有力な非破壊試験技術としてコンクリート分野でも広範囲に利用されつつある。この方法は、打音法や超音波法とは異なり、仕上げ材の剥離やコンクリート内部の欠陥が非接触で面的に測定でき、かつ視覚的に判断できるという優れた特徴を持つが、基礎的な研究成果の蓄積がないまま、実用化が先行したために、実際の調査に際して混乱を招いている。

本委員会では、サーモグラフィー法の長所を有効に活用し、その健全な発展を促進することを意図して、特にサーモグラフィー法のみに限定したコンファレンスを1992年4月28日に日本都市センターにおいて開催した。当日は、本方法のコンクリート構造物への適用に関する10編の論文が発表され、また、サーモグラフィー法に関するわが国の先導的な研究者である防衛庁技術研究本部の増谷光正氏による「防衛技術における赤外線装置の利用」と題する特別講演が行われた。

#### 3.2 技術の現状のとりまとめ

コンクリートの非破壊試験法に関する技術の現状のとりまとめを行い、「委員会報告書」として刊行した。その内容は、1.総論、2.強度推定法、3.弾性波法、4.電磁波法、5.あとがき、および付録（総頁数243頁）からなり、内外の数多くの文献を整理・分類して技術の現状と問題点を明らかにした。

#### 3.3 各種試験方法（試案）の作成

わが国では、コンクリートの各種非破壊試験方法に関する規準化が遅れているが、本委員会では、現段階で規準化の要求が強い7つの試験方法（そのうち1つは、試験装置に関するもの）について試案を作成した（それらの概要については、次章参照）。

試案の作成に際しては、内外の数多くの実験例を参考にするとともに、確認実験を実施した。今後さらに実験データを蓄積し、また、幅広い立場からの意見をいただいた上で、JCI規準として成案化したいと考えている。

#### 3.4 講習会の開催

上記の「技術の現状」および「各種試験方法（試案）」に関する講習会を1992年4月27日に日本都市センターで開催した。募集人数をはるかに超える参加申込者があり、盛況のうちに終了した。

#### 4. 各種試験方法（試案）の概要

本委員会で作成した試案は、本文および解説からなり、参考データなども含めて適用の便を図っているが、ここでは紙数の都合上、その概要のみを示すに留める。詳細については、「委員会報告書」を参照されたい。

##### 4. 1 硬化コンクリートの引抜き試験方法（試案）

###### (1) 試案作成の背景と目的

引抜き試験は、コンクリートの強度推定を目的とした局部破壊試験であり、構造体コンクリートの強度管理への応用が可能である。既にアメリカでは標準化が行われている（ASTM C900）。

###### (2) 試案の目次

- |            |                     |
|------------|---------------------|
| 1. 適用範囲    | 4. 試験方法             |
| 2. 試験装置    | 5. 記録               |
| 3. 試験位置の選定 | 付録：強度推定式を求めるための較正試験 |

###### (3) 試案の概要

###### (a) 適用範囲

本試案は、引抜き耐力の測定方法について規定するもので、圧縮強度の絶対値を推定する方法について規定するものではない。強度推定には、付録に示す較正試験を別途行い強度推定式を求めることを原則とする。なお、後施工アンカーボルトによる引抜き試験については、本試案の対象から除外した。

###### (b) 試験装置

試験装置は、埋込み具、載荷装置および荷重計測装置からなり、各々の寸法は、図-1に示すようにASTM規格に準じている。ただし、加力プレートの直径は粗骨材最大寸法に応じて制限を加え、また、反力リングの内径や埋込み深さの標準値を与えて、装置寸法の共通化を図った。

###### (c) 試験位置の選定

引抜き試験は、コンクリート端面のへりあきや鉄筋の影響のない位置で、可能な限り隣接した箇所で行う。試験回数は、コアシリンダーの圧縮試験と同等の変動となるよう4回以上とする。

###### (d) 試験方法

載荷は、所定の速度で最大耐力まで連続的に行うが、埋込み具の回収を要しなければ、コンクリートコーンを抜き出す必要はなく、最大耐力を確認後試験を終了してよい。

###### (e) 記録

試験位置、試験したコンクリート表面の状態、埋込み具の寸法、引抜き耐力、試験時の異常、コンクリートの養生条件や乾湿状態、および特記すべき事項を記録する。

###### (f) 付録：強度推定式を求めるための較正試験

較正試験には梁状試験体を用い、圧縮強度が適当な間隔になるような材令において引抜き試験とコアシリンダー圧縮試験を行う。これらの結果の回帰分析から、次式の強度推定式を求める。

$$F_{cp} = e^{B_0} \cdot P^{B_1}$$

ここに、 $F_{cp}$ ：推定圧縮強度、 $P$ ：引抜き耐力

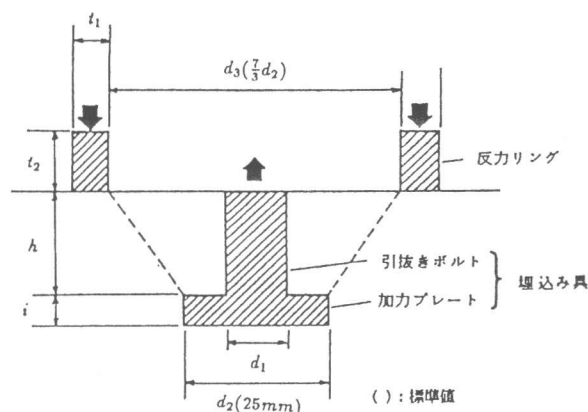


図-1 引抜き試験装置

## 4. 2 超音波パルス伝播速度の標準測定方法（試案）

### (1) 試案作成の背景と目的

超音波法は、反発硬度法と並んで最も一般的な非破壊試験法として多用されているにもかかわらず、わが国では、この方法に関する規格が制定されていない。そのため、本委員会では、コンクリートの品質、品質のばらつき、内部欠陥、ひび割れ深さなどを評価する際に必要となる超音波パルスの伝播速度の標準的な測定方法に関する試案を作成することとした。

### (2) 試案の目次

- |         |                |            |
|---------|----------------|------------|
| 1. 適用範囲 | 4. 伝播速度測定面の手入れ | 7. 伝播速度の計算 |
| 2. 用語   | 5. 接触媒体        | 8. 適用の限界   |
| 3. 装置   | 6. 測定          | 9. 記録      |

### (3) 試案の概要

#### (a) 適用範囲

本試案は、コンクリート中の縦波パルスの伝播速度を測定する場合に適用する。

#### (b) 装置

本試案に従って伝播速度を測定する場合、超音波パルスの放射装置、伝播時間を計測する装置ならびに伝播時間を較正する装置、の3点が必要となる。なお、伝播時間計測装置は $0.1\mu\text{s}$ の分解能を有するもの、超音波パルス放射装置は印加電圧 $500\text{V}$ 以上、スイッチ回路作動時間 $3\mu\text{s}$ 以下のものが望ましい。

#### (c) 伝播速度測定面の手入れ

測定面は研磨するか、またはモルタルなどを用いて平滑にしなければならない。

#### (d) 接触媒体

振動子と測定面の間に空隙が生じないように、グリースなどを用いて十分密着させる。

#### (e) 測定

測定は以下の手順で行う。

1. 較正棒などを用いて伝播速度の較正を行う。
2. 振動子を配置する。配置方法は、場所や目的を考慮し、図-2に示すように、対称法、斜角法、表面法のいずれかとする。
3. 伝播時間を数回測定し、その最小時間を伝播時間 $T$ （有効数字3桁以上）とする。
4. 振動子の中心距離 $L$ を $\pm 0.5\%$ 以下の精度で測定する。

#### (f) 伝播速度の計算

伝播速度は、 $V=L/T$ によって有効数字3桁まで求める。

#### (g) 適用の限界

特性の異なる装置で測定した場合や、形状・寸法などが異なる対象物を測定した場合の伝播速度の相互比較には適用できない。

#### (h) 記録

測定の日時・場所、コンクリートの配（調）合・材令、振動子の配置方法、装置の特性、振動子中心間距離、伝播時間、伝播速度などを記録する。

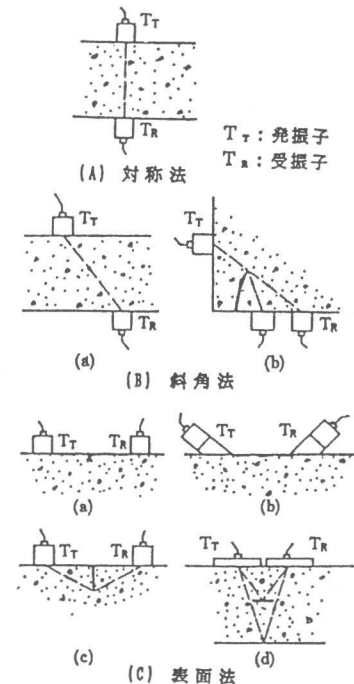


図-2 振動子の配置方法

#### 4. 3 超音波法によるコンクリートの表面ひび割れ深さ測定方法（試案）

##### (1) 試案作成の背景と目的

超音波法によってコンクリートのひび割れ深さを測定する方法については、既にBS、RILEMなどで規格が策定されている。本委員会では、人工ひび割れを持つ供試体に関する実験結果に基づいて、20cm程度までの表面ひび割れ深さの測定方法に関する試案を作成した。

##### (2) 試案の目次

- |                   |               |          |
|-------------------|---------------|----------|
| 1. 適用範囲           | 4. ひび割れ深さの測定  | 6. 適用の限界 |
| 2. 装置             | 5. ひび割れの傾斜の確認 | 7. 記録    |
| 3. 測定面の手入れおよび接触媒体 |               |          |

##### (3) 試案の概要

###### (a) 適用範囲

本試案は、超音波法によりコンクリート表面に直角なひび割れ深さを測定する場合に適用する。

###### (b) 装置

伝播速度の計測には、受信波観察方式の計測装置を用いる。

###### (c) 測定面の手入れおよび接触媒体

測定面を平滑にする際、研磨材や接触媒体などでひび割れを閉塞させてはならない。

###### (d) ひび割れ深さの測定

測定は、以下の手順で行う。

1. 発信子と受信子を図-3に示すように、ひび割れから等距離の位置 $a_1$ および $a_2(=2a_1)$ に配置する。
2. 同一位置で伝播時間を数回測定する。なお、伝播時間の再現精度は1%以下とする。
3. 振動子中心からひび割れまでの距離 $a_1$ 、 $a_2$ を±1mm以下の精度で測定する。
4. ひび割れ深さ $y$ は、距離 $a_1$ 、 $a_2$ での伝播時間 $T_1$ 、 $T_2$ を基に下式により求める。

$$y = a_1 \times \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}$$

###### (e) ひび割れの傾斜の確認

ひび割れが表面に対して傾斜しているか否かを確認する。傾斜している場合は、本試案は適用できない。

###### (f) 適用の限界

本試案によって得られたひび割れ深さは、測定位置近傍での最小深さである。

###### (g) 記録

測定の日時・場所、コンクリートの配（調）合・材令、振動子の配置方法、装置の特性、ひび割れから振動子中心までの距離、伝播時間、ひび割れ深さなどを記録する。

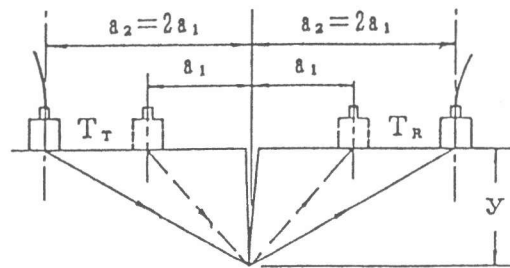


図-3 振動子の配置方法

#### 4. 4 超音波法によるコンクリート内部の空隙および鉄筋位置測定方法（試案）

##### （1）試案作成の背景と目的

近年、超音波計測技術およびデータ処理方法の向上にともなって、コンクリート内部の介在物からの反射エコーの抽出精度も徐々に向上しつつある。そのため、超音波法によってコンクリート内部の空隙および鉄筋位置を探索するための試験手順に関する試案を作成することとした。

##### （2）試案の目次

1. 適用範囲	4. 測定面の手入れ	7. 適用の限界
2. 原理	5. 接触媒体	8. 記録
3. 装置	6. 測定	

##### （3）試案の概要

###### （a）適用範囲

本試案は、超音波測定技法のうち、反射法と共振法とを複合させた方法を用いてコンクリート内部に存在する介在物の位置を測定する場合に適用する。

###### （b）原理

本測定方法は、各種の複合反射波を含む計測データから、対象とする介在物からの反射波のみを抽出しやすいように工夫して、その到達時間を求めようとするもので、反射波の到達時間 $t$ と1次共振周波数 $f_1$ との間に、 $t=1/f_1$ の関係があることを利用して算定する方法である。したがって、測定面から介在物までの距離 $d$ は、超音波縦波伝播速度を $V_1$ とすると、 $d=t \cdot V_1/2$ なる式を用いることによって求まる。

###### （c）装置

計測システムは、基本的には1.超音波パルス発生装置、2.超音波エコー受信装置、3.周波数解析装置とから構成されているものとする。

###### （d）測定面の手入れ

測定面が平滑でない場合には、測定面を研磨するか、石膏、急結セメント、速硬性エポキシモルタルなどの充填材を用いて平滑にする。ただし、充填材の厚さは、できるだけ薄くする。

###### （e）接触媒体

振動子と測定面との間に空隙が生じないように、水、油、グリースなどの粘性材料あるいは両面テープを用いて、振動子を測定面に密着させる。

###### （f）測定

コンクリート内部に存在する介在物の位置を探索するために、対象コンクリートの超音波縦波伝播速度 $V_1$ と介在物からの反射波の到達時間に対応した1次共振周波数 $f_1$ を測定する。なお、1次共振周波数 $f_1$ の測定には、受信波形のフーリエスペクトルから求める方法を採用する。

###### （g）適用の限界

本試案による介在物位置の推定精度は、介在物の大きさ、測定対象物の形状、介在物の種類、使用した振動子の特性などの影響を受けるため、結果の評価に際しては、これらの影響について十分に検討する必要がある。

###### （h）記録

測定の日時・場所、測定対象物の状況、測定面の状況、使用装置、測定結果などを記録する。

#### 4.5 コンクリートにおけるAE試験方法（試案）

##### （1）試案作成の背景と目的

AE計測法は、材料内部の欠陥検出法として広く利用されつつあるが、コンクリート工学の分野では、その計測手順に関しても標準化されていない。そのため、本委員会では、試験結果の比較などを容易にすることを目的として、ひび割れの発生時に生じる弾性波をAE波と定義し、外力下でのひび割れ進展を検出するための計測方法として、AEの標準的な測定方法（試案）を作成することとした。

##### （2）試案の目次

- |               |                      |
|---------------|----------------------|
| 1. 適用範囲       | 6. 試験時のAE変換子の配置と感度設定 |
| 2. 用語         | 7. AEパラメータとその表示      |
| 3. AE計測装置     | 8. 適用の限界             |
| 4. AE変換子の感度較正 | 9. 記録                |
| 5. AE変換子の取付け  | 付録：AE関連用語とその意味       |

##### （3）試案の概要

###### （a）適用範囲

本試案は、コンクリート内部のひび割れ発生を検出を目的として、AE現象を測定する場合に適用する。

###### （b）AE計測装置

AE計測装置には、AE変換子（センサー）、前置増幅器（プリアンプ）、主増幅器（メインアンプ）および濾過器（フィルター）が含まれているものとする。

###### （c）AE変換子の感度較正、取付けおよび配置

AE変換子自身およびシステムとして構成した場合の感度の較正方法（図-4参照）と取付け・配置方法について規定した。また、距離減衰を考慮した変換子の配置方法についても解説した。

###### （d）AEパラメータ

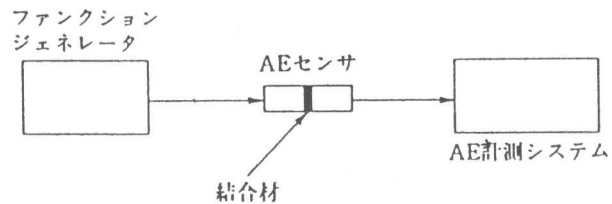
計測時の一般的なAEパラメータとして、AEの発生頻度、最大振幅分布、波形スペクトル、エネルギーなどを取り上げ、それらの表示方法を例示した。

###### （e）適用の限界

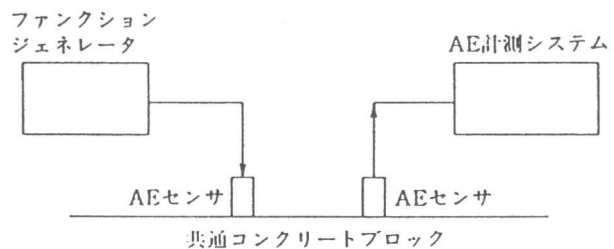
本試案は、コンクリートのAE計測方法についてのみ規定したものであり、劣化診断などにAE法を適用する場合について定めたものではない。

###### （f）記録

測定の日時・場所、測定対象物の状況、AE変換子の配置図、計測装置の全体図および使用装置、AE発生要因、検出パラメータ、計測結果などを記録する。



(a) Face to Face方法



(b) 相対的計測方法

図-4 AE変換子の感度較正試験方法

#### 4. 6 建物外壁調査用赤外線映像装置に関する規準（試案）

##### （1）試案作成の背景と目的

赤外線映像装置による建物外壁調査の適用限界は、映像装置そのものの性能・構成により大きく左右される。そのため、4. 7で述べるサーモグラフィー法による建物外壁調査方法（試案）の信頼性を高めることを目的として、赤外線映像装置の性能、構成などに関する試案を作成することとした。

##### （2）試案の目次

- |         |       |
|---------|-------|
| 1. 適用範囲 | 3. 性能 |
| 2. 用語   | 4. 構成 |

##### （3）試案の概要

###### （a）適用範囲

本試案は、建物仕上げ面の表面温度を測定することによって、剥離部を検出するための赤外線映像装置について規定したものである。

###### （b）用語

本試案において疑義を生じないための必要最小限の用語（熱画像、最小検知温度差、瞬時視野、水平解像度、温度幅、走査線数、フレームタイムなど）について定義した。

###### （c）性能

赤外線映像装置の性能としては、以下の範囲を標準とする。

- |                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| 1. 最小検知温度差：0.1℃以下 | 4. 視野：7度以上      |
| 2. 瞬時視野：2.5mrad以下 | 5. 温度幅：20℃以下    |
| 3. 走査線数：100本以上    | 6. 階調または色相：10以上 |

###### （d）構成

赤外線映像装置の基本的な構成要素を図-5に示す。

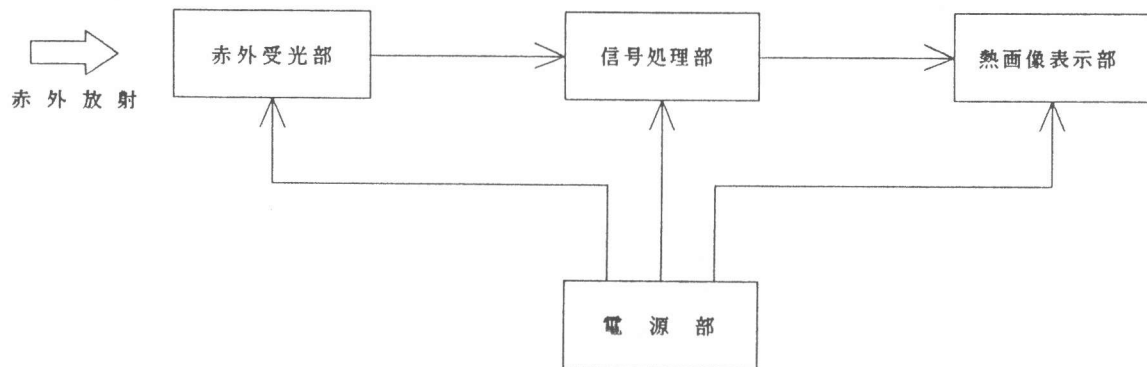


図-5 赤外線映像装置の基本構成



#### 4.7 サーモグラフィー法による建物外壁調査方法（試案）

##### （1）試案作成の背景と目的

最近、サーモグラフィー法が建物の外壁調査方法として広く利用されているが、この方法に関する正式な手引書もなく、適用の方法、調査の方法、結果の判定などは、調査者によってまちまちであって、調査診断の信頼性が各方面から問題視されていた。本委員会では、このような背景を踏まえて、サーモグラフィー法による建物外壁調査方法に関する試案を作成することとした。

##### （2）試案の目次

- |         |           |          |
|---------|-----------|----------|
| 1. 適用範囲 | 4. 装置     | 7. 適用の限界 |
| 2. 用語   | 5. 調査方法   | 8. 記録    |
| 3. 原理   | 6. 画像処理方法 |          |

##### （3）試案の概要

###### （a）適用範囲

本試案は、建物の外壁モルタル、タイル仕上げなどの浮き（剥離）をサーモグラフィー法によって調査する方法について規定したものであり、躯体コンクリートの表面劣化などの調査にも準用できる。

###### （b）試験方法

サーモグラフィー法による建物外壁の調査・診断手順のフローチャートを図-6に示す。調査方法は、現地調査作業と画像処理作業に分けられ、赤外線センサーと画像化するための装置で構成される赤外線映像装置を用いて調査を行う。本調査に先立ち、サーモグラフィー法の適用性を確認することを目的として、予備調査を実施し、綿密な調査計画を立てる。サーモグラフィー法の現地調査は、天候に左右され、また、分割して撮影することが多いので、十分な調査計画に基

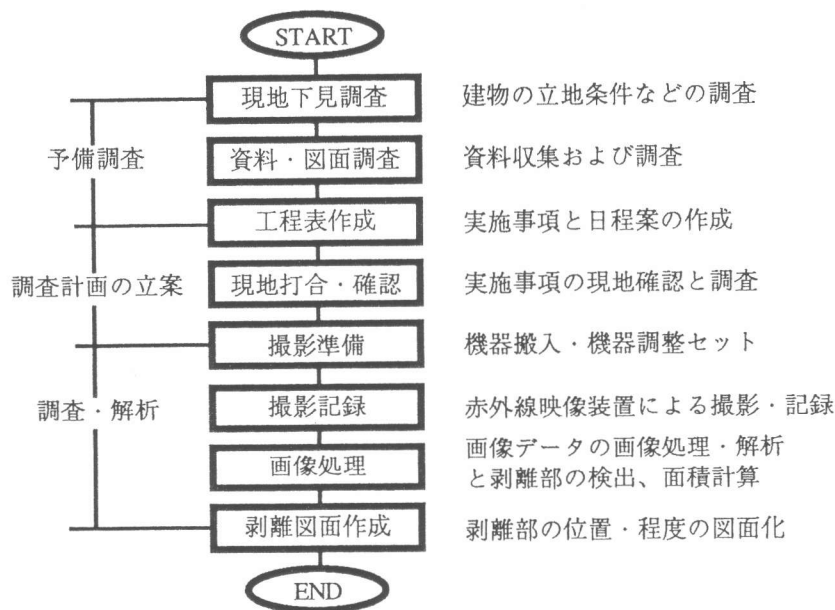


図-6 サーモグラフィー法による外壁調査のフローチャート

づき、的確に効率よく進める。壁体に入射する太陽エネルギーは、季節、天候、時刻、壁面方位などによって変化するため、対象の壁体の測定時間をあらかじめ計画しておく。同じ壁面においても気象の変化や時間の経過により壁面の受けている条件が相違するため、その都度部分打診を行い、調査基準点温度を把握しておく必要がある。

(c) 画像処理・解析

浮き（剥離）部分の抽出、2値化および剥離図の作成を目的として、まず、画像の形状ひずみ補正、位置合わせ、合成などの幾何的補正を行う。次に、部分打診法によって確認した壁面の健全部における表面温度と熱画像などから画像の特徴領域の抽出を行い、背景除去、2～3値化などの過程を経て、浮き（剥離）部分、特定領域の面積および推定剥離図面を出力する。

(d) 適用の限界

サーモグラフィ法による調査の精度は、多くの要因によって左右されるため、次のような事項に十分留意する必要がある。

1. 季節、天候、時間、気温、赤外線カメラの位置、仕上げ材の種類および色調、建物の暖冷房機器の発熱などの影響を受けること。
2. 隣接建物との距離、形態、壁面の方位、最高高さに適用限界があること。
3. 雨、風の強い日は測定が困難であること。
4. 壁面と赤外線カメラとの間に樹木、添架物などの障害物があると測定できないこと。
5. ベランダ、袖壁、庇などの突起物がある場合は測定が困難なこと。

(e) 記録

調査建物の概要、外壁仕上げ材の種類、調査日時・場所、天候、調査方法、使用装置、調査結果、判定結果などを記録する。

5. あとがき

上記のように、本研究委員会ではコンクリートの非破壊試験法に関する技術の現状の把握と問題点の抽出、各種試験方法の標準化などに取り組んできたが、この種の試験方法を信頼できる技術として位置づけるためには、さらに検討すべき事項も多い。例えば、各非破壊試験方法の精度向上、高性能検査機器の開発、一連の構造物調査・診断システムにおける非破壊試験法の位置づけの明確化、エキスパートシステムを適用した評価・診断方法の確立などである。これらの点については、今後の研究の進展に期待したい。

本委員会の終了に当たり、終始熱心なご協力をいただいた委員各位に深甚の謝意を表す。