

【参考資料① コンクリート開水路の詳細調査手法について】

コンクリート開水路に係る詳細調査項目（以下の 13 項目）について、その具体の調査方法（概要、原理、試験・測定方法、試験結果の活用、精度・適用限界）を整理する。

1. 鋼材配置・径
2. 鋼材腐食状況
3. 鋼材引張強度
4. 中性化深さ
5. コンクリートの圧縮強度
6. コンクリートの静弾性係数
7. コンクリートの動弾性係数
8. コンクリートの塩化物含有量
9. コンクリートのアルカリ量分析
10. 骨材の反応性
11. コンクリートの促進膨張試験
12. コンクリートの細孔径分布
13. コンクリートの気泡分布
14. 弾性波を利用した内部欠陥調査

1. 鋼材配置・径

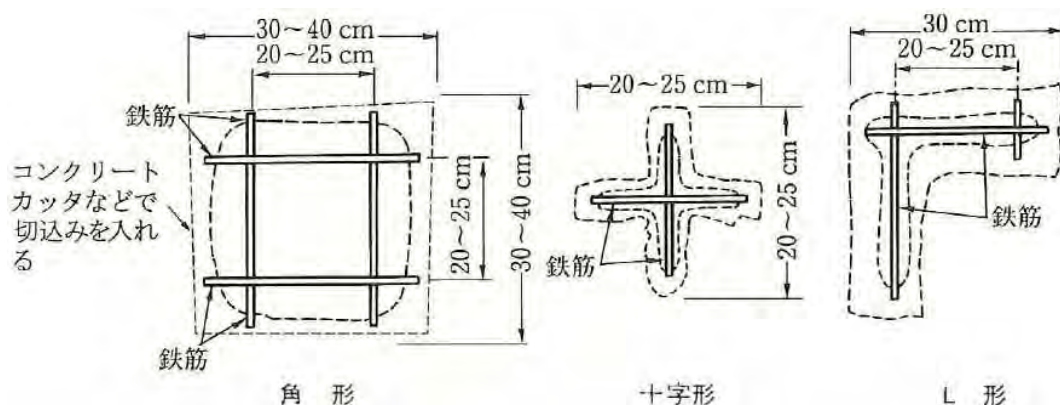
(1) 概要

鉄筋コンクリート開水路における配筋状態・鉄筋径は、かぶりコンクリートをはつり、露出させた鉄筋を直接的に確認する。

(2) 試験・測定方法

調査箇所は、あらかじめはつり出す鉄筋の位置を電磁誘導法や電磁波レーダ法で推定しておくが良い。

調査では、調査箇所のコンクリートを 30cm 角程度の大きさに鉄筋が現れるまではつり取る。なお、これを簡便に行う方法として、 $\phi 10\text{cm}$ 程度のコア削孔で鉄筋に到達するまで削孔し、鉄筋を露出させる方法もある。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p153 参考)

【鉄筋のはつり出し例】



【コア削孔による鉄筋のはつり出し例】

また、調査箇所が構造物の耐久性を低下させないように、はつり調査箇所は確実に補修する。補修材料は一般に無収縮モルタルが用いられる。

(3) 試験結果の活用

試験結果は図面が現存しない構造物の構造照査のほか、中性化や塩害などの劣化因子に対してどれ位の耐久性を維持しているかを評価するために用いる。

かぶりコンクリート厚に対して、別途試験で確認する中性化深さや発錆限界塩化物イオン濃度の範囲を差し引くことで、耐久性の面からの有効かぶりコンクリート厚が明らかとなる。

（４）精度・適用限界

はつり調査で確認される配筋状態や鉄筋径は、はつり調査箇所においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、配筋状態にはバラツキがあることに留意が必要である。この技術的課題に対しては、はつり調査箇所とそのほかの箇所で広範囲に非破壊検査手法（電磁誘導法や電磁波レーダ法）にてかぶりコンクリート厚を推定し、はつり調査箇所の実測値で非破壊検査手法の調査結果を補正（キャリブレーション）することで概ね解決できる。

2. 鋼材腐食状況（詳細調査）

（１）概要

鋼材腐食状況は、1. 鋼材配置・径で解説したはつり調査を行い、露出させた鉄筋を直接的に確認する。

（２）試験・測定方法

鉄筋の腐食状態は、一般に下表に示す腐食度区分で評価する。

【鉄筋の腐食状況に応じた腐食度区分】

腐食度区分	腐食状態
腐食なし又は(0)	腐食を認めず (施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない)
A 又は(I)	点錆程度の表面的な腐食 (部分的に腐食が認められる軽微な腐食)
B 又は(II)	全体に表面的な腐食 (表面の大部分が腐食している 部分的に断面が欠損している)
C 又は(III)	浅い孔食等断面欠損の軽微な腐食 (鉄筋の全周にわたり断面の欠損がある)
D 又は(IV)	断面欠損の明らかな著しい腐食 (鉄筋の断面が当初の 2/3～1/2 位欠損している)

※ 「国土開発技術センター建築物耐久性向上技術普及委員会編による区分」より

※ () 中は「日本コンクリート工学会：海洋コンクリート構造物による防食指針(案)による分類」より



腐食度区分：腐食なし又は 0



腐食度区分：A 又は I



腐食度区分：B 又は II



腐食度区分：C 又は III



腐食度区分：D 又は IV

【鉄筋腐食度の分類】

出典：コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013- (公) 日本コンクリート工学会 P. 35

(3) 試験結果の活用

腐食面積を鉄筋の表面積で除して腐食面積率を求め、その後の進展をモニタリングする基礎資料とする。

$$\text{腐食面積率 (\%)} = \text{鉄筋の腐食面積} \div \text{鉄筋表面積} \times 100$$

断面欠損が生じている場合には、断面欠損状態での鉄筋量より構造照査を行い、不足する鉄筋量を補うための補強対策を検討する。

(4) 精度・適用限界

はつり調査で確認される鉄筋腐食状態は、はつり調査箇所における状態であり、水掛かりや乾湿の状態、かぶりコンクリートの性状、豆板や初期ひび割れの有無等によって異なる可能性がある。しかしながら、はつり調査を広範囲に実施することは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、非破壊検査手法（自然電位法等）や部材表面の変状（ほぼ一定間隔の鉄筋に沿ったひび割れや錆汁有無）による広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが一般的である。

3. 鋼材引張強度

(1) 概要

鉄筋コンクリート構造物において、コンクリートのひび割れ発生以後の引張応力は鉄筋によって受け持たれるため、鉄筋の現況の引張強度を把握することは、既設鉄筋コンクリート構造物の補強対策を検討する上で重要である。

(2) 試験・測定方法

- 1) 50～60cm 長の鉄筋を切り出し、中心付近で破断時の伸びを計測する標点位置を決め、ポンチ穴を打つ。標点間距離 l_0 は、鉄筋の公称直径 D (例えば D16 鉄筋は 15.9 mm) によって決まり、通常は $8D$ とする。そして、中心部にひずみゲージを貼り付ける。
- 2) 準備した鉄筋の試験片を試験機の上下部のチャック装置に固定し、ひずみゲージを配線する。
- 3) 試験機を稼働させ、荷重とひずみの測定が正確に行われる適度な速度で荷重を加える。
- 4) 試験の経過中、荷重が最初に減少する直前の最大荷重 P_s (N) を読み取る。
- 5) 破断するまでに試験片が耐えた最大の荷重を最大引張荷重 P_{max} (N) とする。
- 6) 破断した試験片の両切断片の中心線が一直線上になるように注意して破断面を突き合わせ、伸びた標点間の距離 l (mm) を標点間距離の $\pm 0.5\%$ に相当する精度で測定する。

(3) 試験結果の活用

- 1) 降伏点 σ_s 及び引張強さ σ_b を以下の式によって計算する。

$$\sigma_s = P_s / A_o \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma_b = P_{max} / A_o \quad (\text{N/mm}^2)$$

A_o : 鉄筋の公称断面積 (mm^2) (例えば D16 鉄筋は 198.6mm^2)

- 2) 伸びは以下の式によって計算する。

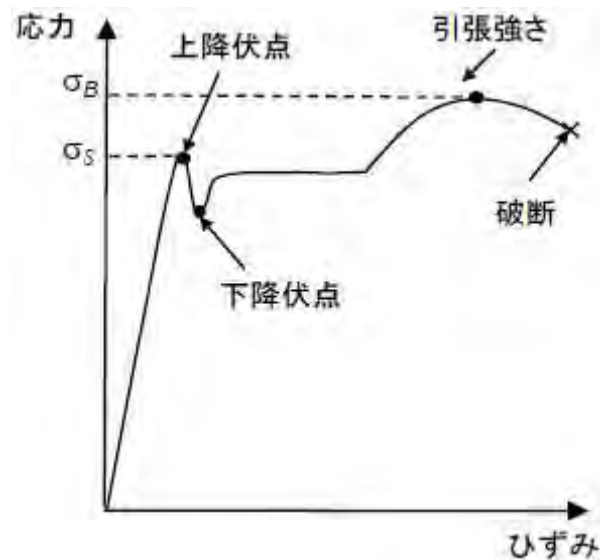
$$\delta = (l - l_0) / l_0 \times 100 \quad (\%)$$

- 3) 引張応力-ひずみ曲線の弾性域における直線部分の傾きを求め、ヤング率を計算する。

$$E_s = (\sigma_{s2} - \sigma_{s1}) / (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1})$$

σ_{s1} 、 σ_{s2} : 弾性域における引張応力 ($\sigma_{s1} < \sigma_{s2}$)

ε_{s1} 、 ε_{s2} : 弾性域におけるひずみ ($\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{s2}$)



【鉄筋の引張応力－ひずみ曲線】

(4) 精度・適用限界

鋼材引張試験で確認される鉄筋の引張強度は、鉄筋を切り出した箇所における値であり、水掛かりや乾湿の状態、かぶりコンクリートの性状、豆板や初期ひび割れの有無等によって異なる可能性がある。しかしながら、鋼材引張試験を広範囲に実施することは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、最も安全側の評価となるように、応力が集中しやすい箇所や、非破壊検査手法やはつり試験で鉄筋腐食の著しい箇所を代表箇所（鉄筋の切出し箇所）として選定するのが良い。ただし、事前に鉄筋を切り出した際の構造的な影響を検討し、必要に応じて鉄筋を復旧するまでの間、仮設材で補強することとなる。

4. 中性化深さ（詳細調査）

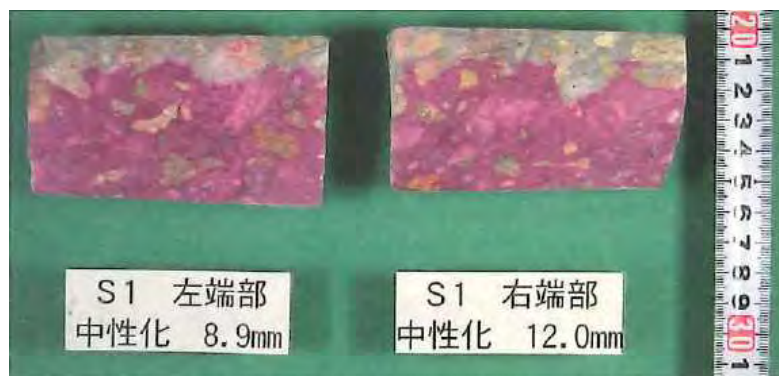
（１）概要

中性化深さの測定は、はつり調査又は採取したコアにより、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて行う。

（２）原理

打設直後のコンクリートは、セメントの水和により生じる水酸化カルシウムの存在により強アルカリ性（pH12～13）を示すが、年月の経過により空気中の二酸化炭素等の作用を受け、炭酸カルシウムに変化する。この反応を中性化と呼ぶ。コンクリートの中性化が進行すると、鉄筋コンクリート構造物の鉄筋が腐食しやすい状態となり、鉄筋が腐食すると、かぶりコンクリートのひび割れ・剥離・剥落といった問題が生じる。

中性化深さは、95%エタノール 90ml にフェノールフタレインの粉末 1g を溶かし、水を加えて 100ml としたフェノールフタレインの 1%エタノール溶液を指示薬として、測定対象面に噴霧し、鮮明な赤紫色に発色（pH10 程度以上のアルカリ性で発色）した部分のコンクリート表面からの距離をコンクリートの中性化深さとする。



（コンクリート診断技術’ 14〔基礎編〕 p152 参考）

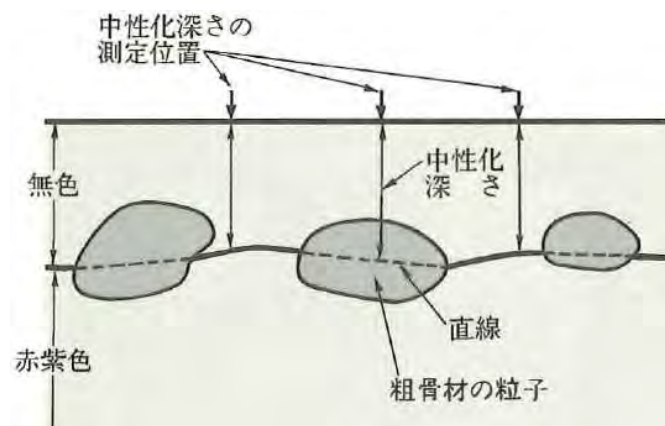
【フェノールフタレイン溶液噴霧による呈色現象例】

（３）試験・測定方法

はつり箇所（φ 10cm 程度のコア削孔穴の側面を対象として行う方法もある）又は採取コアの割裂面や側面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、鮮明な赤紫色に発色した部分のコンクリート表面からの距離をノギス等で測定し、コンクリートの中性化深さとする。

測定箇所は、はつり箇所やコア割裂面では 10～15mm 間隔で 4 箇所以上、コア側面では 5 箇所程度とする。

中性化深さは、0.5mm 単位で測定して測定箇所毎の平均値を算出し、mm 単位とし小数点以下 1 桁の値とする。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p154 参考)

【中性化深さの測定位置】

なお、本試験における留意点は以下の通りである。

- ・測定箇所粗骨材がある場合には、粗骨材位置を外して測定する。
- ・採取コア側面で測定する場合には、測定面の中性化の進行を防止するために、採取コアをラッピングフィルム等で密封する。
- ・削孔粉が付着していると中性化している部分が中性化していないものと判定される恐れがあるため、フェノールフタレイン溶液を噴霧する前には、必ず測定面に付着した削孔粉を洗浄する。

(4) 試験結果の活用

中性化残り^{※1}が10mmとなった時点^{※2}で鉄筋腐食が開始することから、中性化残りは、施設の健全度評価や劣化予測を行う上で重要な指標となる。

※1 前記の鋼材配置・径で確認した鉄筋のかぶりコンクリート厚から、中性化深さ測定値を差し引くことで、中性化残りが求まる。

※2 フェノールフタレイン法による中性化深さの測定では、pH8.2～10以下の未着色部分が中性化部と判定される。一方、鉄筋の腐食はpH11以下で開始する。このため、厳密には、鉄筋の腐食可能性範囲は、中性化部分より若干内部まで存在することになる。腐食開始と中性化の関係は、中性化残りが塩化物を含まないコンクリートで約8mm、塩化物を含むコンクリートで約20mmとされている。

(5) 精度・適用限界

中性化深さ測定で確認される中性化深さは、測定位置においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、部材の湿潤状態やかぶりコンクリートの性状等によって中性化深さが一様ではないことに留意が必要である。また、多点ではつりやコア採取を伴う中性化深さ試験を行うことは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、ドリル法による広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが一般的である。

5. コンクリートの圧縮強度（詳細調査）

（１）概要

コンクリート構造物はコンクリートの強度、特に圧縮強度に基づいて設計され、また、コンクリート構造物の劣化に関連した物理特性の変化は圧縮強度に関連している。使用されたコンクリートの圧縮強度は施工時の品質管理データでも把握できるが、施工状況や環境状況等により実際の構造物の強度はバラツキが生じる。このため、実構造物に対して強度を把握することが重要である。

コア採取及び圧縮強度試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」に準じて行う。

（２）試験・測定方法

１）コア採取

圧縮強度試験のためのコア採取は、薄い部材やひび割れ等の欠陥部やその近傍は避けて、1 調査箇所当たり 3 本採取することを標準とする。

圧縮強度試験に用いるコアのサイズは、標準コア（ $\phi 100\text{mm}$ ）を基本とするが、配筋の状態等により標準コアを抜くことが困難な場合には、小径コアを用いても良い。ただし、原則として適用するコア径は粗骨材の最大寸法の 3 倍以上とし、2 倍以下とはしない。

コア採取は、鉄筋の損傷を防止するために、配筋状態を電磁誘導法や電磁波レーダ法で推定し、鉄筋位置を避けた位置で行う。

コア採取後は、無収縮モルタル等で速やかに補修する。

２）圧縮強度試験

採取したコアは、コンクリートカッターを用いて端部を整形し、載荷面を研磨するか、又はキャッピングする等して、平滑に仕上げる。

強度試験は、JIS A 1108「コンクリート圧縮強度試験方法」に従い行うが、コアの高さが直径の 2 倍より小さい場合には、下表に示す補正係数を乗じて補正する。

【圧縮強度試験における補正係数（JIS A 1107 より）】

高さ と 直径 と の 比 h/d	補正係数	備 考
2.00	1.00	h/d が この表 に 示 す 値 の 中 間 に あ る 場 合 は、補正係数は補間して求める。
1.75	0.98	
1.50	0.96	
1.25	0.93	
1.00	0.87	

（３）試験結果の活用

コアによる圧縮強度試験は、直接的に構造体の強度を評価できる方法である。

本試験で確認された強度値は、設計基準強度値や既往の機能診断時の強度値との比較により、強度低下状況が評価できる。

また、本試験で得られる圧縮強度と、別途静弾性係数試験で得られる静弾性係数の関

係からは、アルカリシリカ反応及び凍害による劣化の可能性を評価することができる。

(4) 精度・適用限界

圧縮強度試験で確認される圧縮強度は、コア採取位置においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、施工時に一様の品質とするのは難しく、骨材や空隙の偏り、微細ひび割れ等の変状によって圧縮強度が一様ではないことに留意が必要である。また、多点でコア採取を行うことは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、リバウンドハンマーを用いた反発度法又は機械イーピーダンス法による強度推定によって広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが一般的である。

6. コンクリートの静弾性係数

(1) 概要

コンクリートの静弾性係数は、構造物の固有周期、柱・梁等の軸方向変形及び曲げ・せん断変形、床のたわみ量等を算出する場合に必要な部材剛性を決定する物性である。

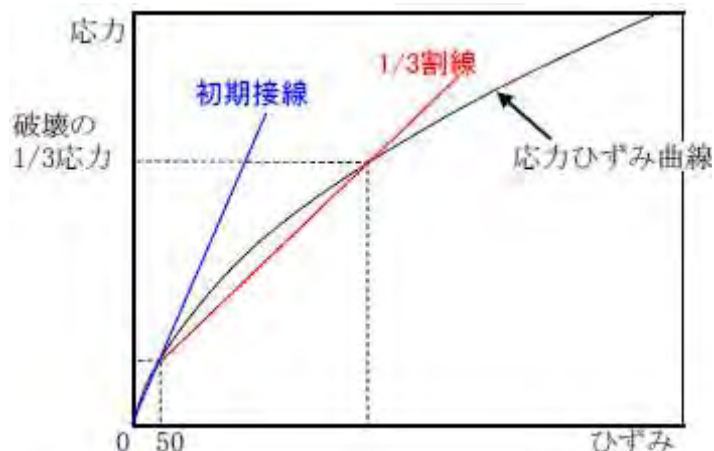
静弾性係数は、コンクリートの強度が高いほど、単位容積質量が大きいほど大きい値を示す傾向があることから、静弾性係数試験は圧縮強度試験と同時に実施すべき試験である。

静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて行う。

(2) 試験・測定方法

JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて、採取コアを対象として圧縮強度試験（JIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」準拠）を行う際に、ひずみゲージを取り付け、圧縮試験時の縦ひずみを測定する。そして、圧縮強度の 1/3 におけるひずみ値を算出し、これを静弾性係数（ヤング係数）※とする。

※ 静弾性係数は、供試体の応力-ひずみ曲線において、最大荷重の 1/3 に相当する応力と供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力とを結ぶ線分の勾配として与えられる割線静弾性係数のこと。



【応力-ひずみ曲線からの静弾性係数の求め方】

1) ひずみ測定器の取付け

ひずみ測定器は、供試体の軸に平行、かつ、対称な二つの線上で、供試体の高さの 1/2 の位置を中心に取り付ける。

2) 載荷方法

- ・ 載荷は、供試体に衝撃を与えないように一様な速度で行う。
- ・ 荷重を加える速度は、圧縮応力度の増加が毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$ になるようにする。
- ・ 供試体の縦ひずみは、最大荷重の 1/2 程度まで測定し、その測定間隔は等間隔とし

て少なくとも 10 点以上記録する。

- ・ 供試体が急激な変形を始めた後は、荷重を加える速度の調整を中止して、荷重を加え続ける。
- ・ 供試体が破壊するまでに試験機が示す最大荷重を有効数字 3 桁まで読む。

3) 試験結果の計算方法

供試体毎に応力-ひずみ曲線を作成する。

各供試体の静弾性係数は、次の式によって算出し、四捨五入して有効数字 3 桁に丸める。

$$E_c = (S_1 - S_2) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c ：各供試体の静弾性係数 (kN/mm^2)

S_1 ：最大荷重の 1/3 に相当する応力 (N/mm^2)

S_2 ：供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力 (N/mm^2)

ε_1 ：応力によって生じる供試体の縦ひずみ

ε_2 ： 50×10^{-6}

圧縮強度に対する静弾性係数の標準値は下表のように整理されていることから、試験結果と標準値との照合を行う。

【静弾性係数の標準値】

コアの圧縮強度 (N/mm^2)	コアの静弾性係数の標準値 (kN/mm^2)
15 以上 21 未満	8.4～17.8
21 以上 27 未満	13.1～21.3
27 以上 35 未満	16.2～25.8
35 以上 45 未満	19.7～29.8
45 以上 55 未満	19.1～34.2

出典：既存コンクリート構造物の実態調査結果-1999 年調査結果- 土木研究所

(3) 試験結果の活用

凍害やアルカリシリカ反応の発生したコンクリート構造物では、劣化の進行に伴い圧縮強度に対する静弾性係数が次第に低下することが報告されており、圧縮強度と静弾性係数を照合することが有効である。

(4) 精度・適用限界

本試験は、実際に載荷した時のひずみ挙動を実測するため、信頼性の高い方法である。ただし、供試体の養生状態（含水状態とする）、ひずみゲージの取付け状態、載荷速度（急激に過大な荷重を与えると初期ひずみが増加する）等の誤差要因があるため、試験時に留意が必要である。

静弾性係数試験で確認される静弾性係数は、コア採取位置においては確実な値である。

しかしながら、構造物においては、施工時に一様の品質とするのは難しく、骨材や空隙の偏り、微細ひび割れ（初期ひび割れのほか、アルカリシリカ反応による膨張ひび割れ）等の変状によって静弾性係数が一様ではないことに留意が必要である。このため、外観上の劣化状態が異なる箇所からコア試料を採取することが望ましい。

7. コンクリートの動弾性係数

(1) 概要

動弾性係数は、コンクリート供試体に縦振動又はたわみ振動を与えて一次共鳴振動数(供試体の固有振動)を測定し、供試体の形状・寸法、質量との関係から算出した弾性係数である。

動弾性係数試験は、JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び試験方法」に準じて行う。

(2) 試験・測定方法

1) 供試体の作成

供試体は JIS A 1107、JIS A 1114 又は JIS A 1132 によって作製したものを用いる。ただし、供試体の寸法及び寸法比は、次の①～③によってもよい。

①たわみ振動の場合、供試体の長さで振動方向の厚さとの比は 3~5 とするとよい。

注記 供試体の長さで振動方向の厚さとの比が非常に大きかったり非常に小さかったりすると、一次共鳴振動数(供試体の固有振動)を正確に求めるのが困難となる。6) に示す式は、この比が 2 以上の場合に適用できる。

②縦振動の場合、供試体の断面寸法は 100mm 以上とし、供試体の長さで断面寸法との比は 2 以上とする。

注記 断面寸法は、円柱供試体の場合は直径、角柱供試体の場合は一辺の長さ(長方形断面の場合はその短辺)を示す。供試体の断面寸法が非常に小さかったり、供試体の長さで断面寸法との比が非常に小さかったりすると、一次共鳴振動数(供試体の固有振動)が求めにくかったり、発振器の振動数の範囲外になったりするため、正確な測定ができない場合がある。

③ねじり振動の場合、①に示すとおりとする。

2) 質量及び寸法の測定

供試体の質量は $\pm 0.5\%$ の精度で量る。長さは $\pm 0.5\%$ の精度で数箇所を測定し、その平均から求める。

また、断面の寸法は $\pm 1\%$ の精度で数箇所を測定し、その平均から求める。

なお、同一の供試体を用いる継続的な試験で、供試体の質量及び断面の寸法が変化する場合には、その都度測定する。

3) たわみ振動の場合の共鳴数の決定

たわみ振動の場合の共鳴数の決定は、次による。

①供試体は、あまり拘束されない両端自由なたわみ振動ができるように、支持台に振動を拘束しないように置く^{*}。駆動力は、供試体にたわみ振動を与える方向に加える。

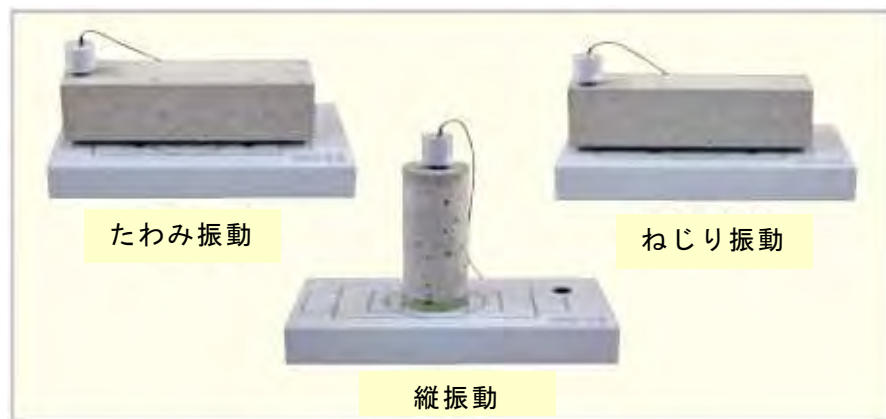
また、駆動力を与える位置は、振動の節から離れた位置（普通、供試体の中央部）とする。

ピックアップは、供試体の振動方向に作動するように供試体の他の端面に接触させる。

※ 振動の節の近くでナイフエッジ、又は厚いスポンジゴム等で供試体を支持する。縦振動の場合には、供試体を水平な支持台の上に置き、供試体端面に駆動端子を接触させても良い。また、支持台の寸法は、その固有振動数が、測定する供試体の振動数の範囲外となるよう定める。

②発振器の振動数を変え、これに応じて供試体が振動するように駆動力を加えながら、増幅されたピックアップの出力電圧を観測する。指示器に明確な最大の振れを生じ、かつ、振動の節を測定した結果一次共鳴たわみ振動であることを確かめたときに、その場合の振動数をたわみ振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)とする。

たわみ振動の一次振動においては、振動の節は供試体の端からその長さの $1/4$ （厳密に言えば 0.224λ ）離れたところにある。したがって、指示器の振れも供試体の両端において最大値を示し、節において最小値を示す。この場合、振動の節及び腹の位置を確かめるには、ピックアップを供試体の長さの方向に移動させて指示器の振れを測定すればよい。節においては、指示器の振れが最小値を示し、腹においては最大値を示す。陰極線オシロスコープを備えた装置であればリサージュの図形が節の前後で位相が変わることを確かめることができる。



【共振測定方法の例】

4) 縦振動の場合の共鳴数の決定

縦振動の場合の共鳴数の決定は、次による。

①供試体は、あまり拘束されない両端自由な縦振動ができるように、支持台に3) -①に示す方法と同様にして置く。駆動力は、供試体の端面で、端面に直角に加える。

ピックアップは、供試体の振動方向に作動するように供試体の反対の端面に接触させる。

②発振器の振動数を変え、これに応じて供試体が振動するように駆動力を加えながら、

増幅されたピックアップの出力電圧を観測し、指示器に明確な最大の振れを生じた振動数を縦振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)とする。

なお、必要に応じて、ピックアップを供試体の長さの方向に移動させて指示器の振れを測定して振動の節を確かめる。

(注) 縦振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)においては、振動の節は中央に一つあるだけであり、供試体の両端で腹になり最大の振幅を示す。

5) ねじり振動の場合の共鳴数の決定

ねじり振動の場合の共鳴数の決定は、次による。

- ①供試体は、あまり拘束されないで両端自由なねじり振動ができるように、支持台に3)-①に示す方法と同様にして置く。駆動力は、供試体の一端の近くにおいてねじり振動を与えるように加える。また、駆動力を与える位置は、振動の節から離れた位置(普通、端部に近い位置)とする。

ピックアップは、供試体の振動方向に作動するように供試体の他の端面に接触させる。

なお、たわみ振動の影響を少なくして測定するには、駆動端子を供試体端部から0.10~0.12L、ピックアップを反対面の端部から0.224Lに設置するとよい。

- ②発振器の振動数を変え、これに応じて供試体が振動するように駆動力を加えながら、増幅されたピックアップの出力電圧を観測する。指示器に明確な最大の振れを生じ、かつ、振動の節を測定した結果一次共鳴ねじり振動であることを確かめたときに、その場合の振動数をねじり振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)とする。

注記 ねじり振動の一次振動においては、振動の節は中央に一つあるだけであり、供試体の両端で腹になり最大の振幅を示す(1)-②参照)。

6) 試験結果の計算方法

動弾性係数は、次の式によって求める。

- ①たわみ振動の場合

$$E_D = 1.61 \times 10^{-3} \frac{L^3 T}{d^4} m f_1^2 \quad (\text{円柱供試体})$$

$$E_D = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{b t^3} m f_1^2 \quad (\text{角柱供試体})$$

ここに、 E_D : 動弾性係数 (N/mm²)

L : 供試体の長さ (mm)

D : 円柱供試体の直径 (mm)

b 、 t : 角柱供試体の断面の各辺の長さ (mm)

t は、振動方向の辺の長さとする。

M : 供試体の質量 (kg)

f_1 : たわみ振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動) (Hz)

T : 修正係数 (次表(修正係数(T)の値)参照)

回転半径 (K) (円柱供試体に対しては $d/4$ 、角柱供試体に対しては $t/3.464$) と長さ (L) 及びポアソン比 (ν_D) によって求める。

②縦振動の場合

$$E_D = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f_2^2$$

ここに、 E_D : 動弾性係数 (N/mm²)

L : 供試体の長さ (mm)

A : 供試体の断面積 (mm²)

M : 供試体の質量 (kg)

f_2 : 縦振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動) (Hz)

【修正係数（T）の値】

K/L	T 注)	K/L	T 注)
0.00	1.00	0.09	1.60
0.01	1.01	0.10	1.73
0.02	1.03	0.12	2.03
0.03	1.07	0.14	2.36
0.04	1.13	0.16	2.73
0.05	1.20	0.18	3.14
0.06	1.28	0.20	3.58
0.07	1.38	0.25	4.78
0.08	1.48	0.30	6.07

注) 動ポアソン比を 1/6 として計算した値である。動ポアソン比が $\nu_D^{※1}$ である場合には、次の式によって求めた'Tを用いる。

$$T' = T \left[\frac{1 + (0.26\nu_D + 3.2226\nu_D^2)K/L}{1 + 0.1328K/L} \right]$$

※¹ 動ポアソン比の算定方法

動ポアソン比は、次の式によって求める。

$$\nu_D = \frac{E_D}{2G_D} - 1$$

ここに、 ν_D ：動ポアソン比

E_D ：動弾性係数（N/mm²）

G_D ：動せん断弾性係数（N/mm²）※²

※² 動せん断弾性係数の算定方法

動せん断弾性係数は、次の式によって求める。

$$G_D = 4.00 \times 10^{-3} \frac{LR}{A} m f_s^2$$

ここに、 G_D ：動せん断弾性係数（N/mm²）

L：供試体の長さ（mm）

R：形状係数

円柱供試体の場合 R=1

正方形断面の角柱供試体の場合 R=1.183

長方形断面（a：短辺、b：長辺）の角柱供試体の場合

$$R = \frac{(a/b) + (b/a)}{4(a/b) - 2.52(a/b)^2 + 0.21(a/b)^6}$$

ただし、 $b > a$

A : 供試体の断面積 (mm^2)

M : 供試体の質量 (kg)

f_3 : ねじり振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動) (Hz)

(3) 試験結果の活用

凍害やアルカリシリカ反応の発生したコンクリート構造物では、劣化の進行に伴い圧縮強度に対する動弾性係数が次第に低下することが報告されており、圧縮強度と動弾性係数を照合することが有効である。

近年は、パソコンで周波数を自動掃引し共振周波数を測定することで、人為的な誤差を低減することができ、パソコン上で各種設定やリサージュ表示する機能を有するシステムも開発・活用されている。



【パソコン画面上でリサージュ表示するシステムの例】

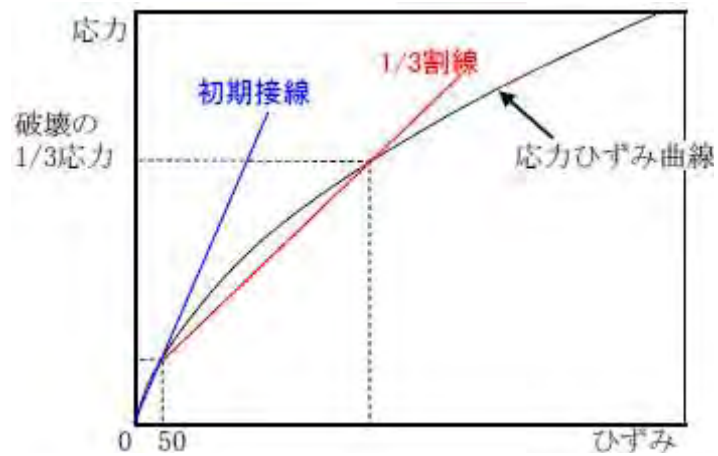
(4) 精度・適用限界

凍害による劣化が進行すると部材内部に層状ひび割れが生じるため部材を弾性体として評価できなくなる。このため、動弾性係数では劣化過程の評価が難しいケースがある。

ここでは、JIS に規定される最も一般的な「供試体にたわみ振動又は縦波振動を与え、供試体が共鳴振動する周波数から動弾性係数を算出する手法」を示した。動弾性係数を求めるその他の手法としては、「供試体に超音波を伝搬させ、その超音波伝播速度から動弾性係数を算出する手法」や「静弾性係数として初期接線で示される接線弾性係数が動弾性係数に近似した値を示すことを利用した動弾性係数の推定手法」がある。

超音波伝播速度による方法は、やや危険側の評価となる事例が報告されているが、コア試料によらず実構造物に直接適用できる可能性のある手法として技術確立が期待され

る。静弾性係数の初期接線による推定方法は、荷重が作用するごく初期の弾性係数を使用するため、測定されるひずみ量が小さく、測定の変動誤差を拾いやすい欠点がある。



※動弾性係数は荷重が作用していない状態での弾性係数であるため、供試体の応力-ひずみ曲線において、初期接線で示される接線弾性係数（ごく初期の弾性係数）を動弾性係数とみなすことができる。

【応力-ひずみ曲線からの動弾性係数の求め方】

8. コンクリートの塩化物含有量

(1) 概要

コンクリートの塩化物含有量試験は、塩害環境下や内在塩分が疑われる鉄筋コンクリート構造物を対象として、鉄筋近傍のコンクリート中にどの程度の量の塩化物イオンが含まれているかを把握するために実施するものである。

塩化物含有量の試験に用いる試料の採取は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」の付属書 1「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン分析用試料の採取方法」に準じて行う。

塩化物イオンの試験は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて行い、これによって、全塩化物イオン量を求める。

(2) 原理

採取した試料の塩化物イオン量を化学分析により測定する方法には、重量法（塩化銀沈殿法）、モール法、電位差滴定法等があるが、ここでは、最も一般的に適用されている電位差滴定法（全塩化物定量）について解説する。

実際には、コンクリートのセメント水和物に固定化された塩化物イオンは鋼材の腐食に影響しないと考えられている。しかし、現状では水和物に固定化されていない塩化物イオンだけを選択的に抽出する手法は確立されていない。このため既往の技術基準類や各種論文では、鋼材の腐食の可能性を論じるには全塩化物イオン量を評価指標としている。

※重量法（塩化銀沈殿法）：硫酸塩溶液中で、塩化物イオンが銀イオンと反応して生じる塩化銀（沈殿物）の重量を測定することにより、塩化物イオン量を算出する方法。

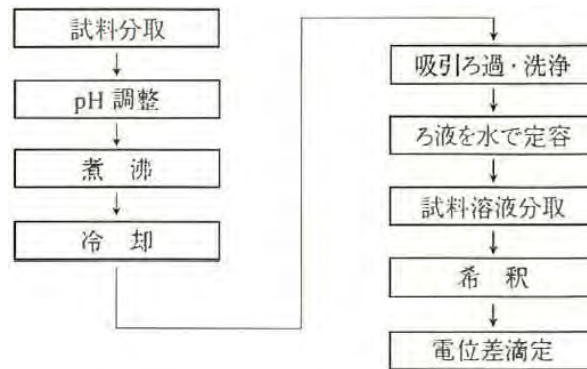
※モール法：指示薬としてクロム酸カリウムを用い、硝酸銀溶液で塩化物イオンを滴定する方法。

※電位差滴定法：重量法と同様であるが硝酸銀溶液を用いる方法。

(3) 試験・測定方法

塩害地域や凍結防止剤が使用される地域で、外部からの塩分の侵入が予想される場合は、塩化物イオンの濃度勾配を把握するために、コンクリート表面から鉄筋位置までのコンクリートを表面から深さ方向に 10～20mm 間隔で切断した厚さ 10～20mm 程度の試料を分析する。なお、少ない試料中に粗骨材が存在すると試験結果に影響するため、試験片をむやみに薄くすることは避ける。

一方、外部からの塩分の侵入が考えにくい場合（建設時からコンクリート中に塩分が含まれていることが疑われる場合）は、原則として鉄筋位置付近から試料を採取する。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p159 参考)

【電位差滴定法の実施フロー】

コアから本試験の試料を加工する際は、塩化物イオンの流出を避けるため、乾式のコンクリートカッターを用いる。そして、切り取ったコンクリート片は、粗骨材を含めて全量を 149 μm ふるい全通程度まで微粉碎し、分析用試料とする。

試料に硝酸溶液 (2N) を加えて溶液の pH を 3 以下とし、加熱煮沸して全塩化物を溶解した後、不溶分をろ過洗浄する。ろ液を分取し、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定装置にセットし、N/200 硝酸銀標準溶液で電位差滴定する。

試験結果の判断は、次表に示す塩化物イオン量に関する基準等と比較する形で行うことが一般的である。

【塩化物イオン量に関する基準】

出 典	塩化物イオン含有量基準等
建設省総合技術開発プロジェクト 「コンクリートの耐久性向上技術 の開発」報告書 (平成元年 5 月)	発錆限界塩化物イオン量として、 $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ を示している。
JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」, (2009)	レディーミクストコンクリートの塩化物含有量は、荷降し地点で、塩化物イオン (Cl^-) 量として、 0.30 kg/m^3 以下とする。ただし、この上限値については、必要に応じて協議することと指定することができる。また購入者の承認を受けた場合には 0.60 kg/m^3 以下とすることができる。
土木学会 「コンクリート標準示方書〔施工 編〕」	練混ぜ時にコンクリート中に含まれる塩化物イオンの総量は原則として 0.30 kg/m^3 以下とする
日本建築学会 「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」, 2009	コンクリートに含まれる塩化物量は、塩化物イオンとして 0.30 kg/m^3 以下とする。 やむを得ずこれを超える場合は、鉄筋防錆上有効な対策を講じるものとし、その方法は特記による。この場合においても、塩化物量は塩化物イオンとして 0.60 kg/m^3 を超えないものとする。

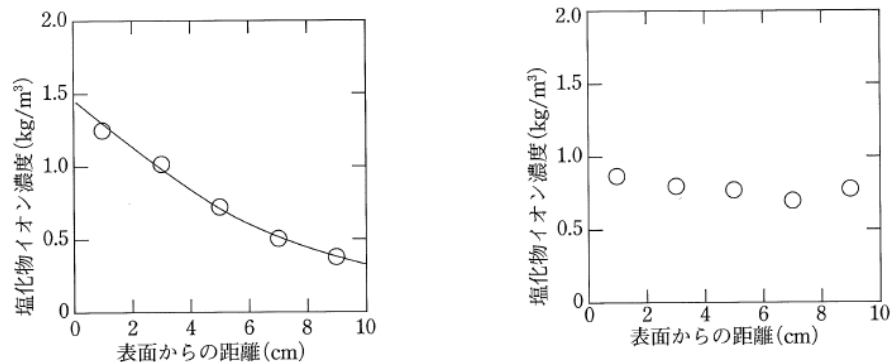
(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p160 参考)

(4) 試験結果の活用

上表に示した発錆限界塩化物イオン量に達する深さが、鉄筋位置に達した時点で鉄筋腐食が開始することから、発錆限界塩化物イオン量に達していないかぶりコンクリート厚^{*}を把握することは、施設の健全度評価や劣化予測を行う上で重要な指標となる。

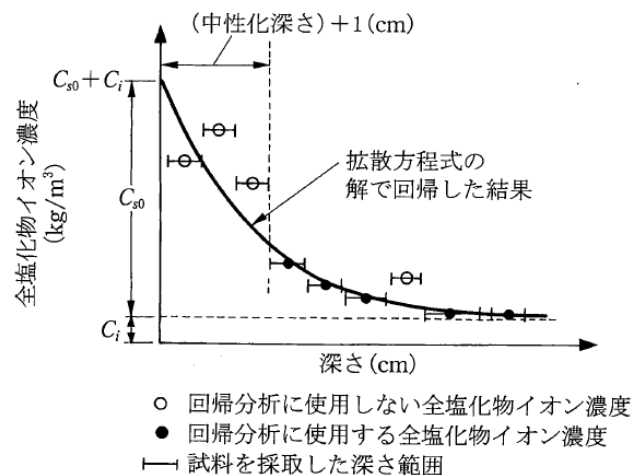
^{*} 前記の鋼材配置・径で確認した鉄筋のかぶりコンクリート厚から、本試験で求まる発錆限界塩化物イオン量に達する深さを差し引くことで、残りのかぶりコンクリート厚が求まる。

塩化物量の測定結果を用いて、塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求める場合には、回帰分析における信頼性の観点から、5箇所以上（少なくとも3箇所以上）の値を用いるのが良い。また、中性化部分では塩化物量が変化するため、表層部の値は用いない。



注) 左図：外部から塩分が侵入している事例、右図：初期から塩分を含んでいた事例

○は、塩化物イオンの試験により得られた結果。曲線は推定ライン。



(上図：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル ((独) 土木研究所著) p108 参考)

(下図：コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p160 参考)

【試料採取深さと全塩化物イオン濃度の関係の評価例】

(5) 精度・適用限界

塩化物含有量試験で確認される塩化物イオン量は、測定位置においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、方角、水掛かり状態やかぶりコンクリートの性状等によって塩化物イオンの部材侵入状況が一樣ではないことに留意が必要である。しかしながら、多点で塩化物含有量試験を行うことは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、施設の供用環境や部材の劣化状況によっては、ドリル削孔粉を用いたフルオレセイン法や簡易塩分測定器法等の簡易試験法*による広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが良い。

* 現場での適用性を重視した簡易試験法としては、(社)日本建築学会では JASS 5T-502「フレッシュコンクリート中の塩化物量の簡易試験方法」が定められており、本来はフレッシュコンクリートを対象とするが、硬化コンクリート中の塩化物イオ

ン量も水溶液にすれば適用可能である。塩化物含有量の簡易測定器としても種々のものが実用化されている。測定原理としては、電量滴定法、イオン電極法、電極電流法、硝酸銀滴定法、銀電極法等がある。

9. コンクリートのアルカリ量分析

(1) 概要

アルカリシリカ反応は、コンクリート細孔溶液中のアルカリ性成分と、その成分に対して溶解反応を示す骨材中の有害鉱物との反応である。したがって、コンクリート中のアルカリ量を測定することによって、アルカリシリカ反応の可能性を予測することができる。

(2) 原理

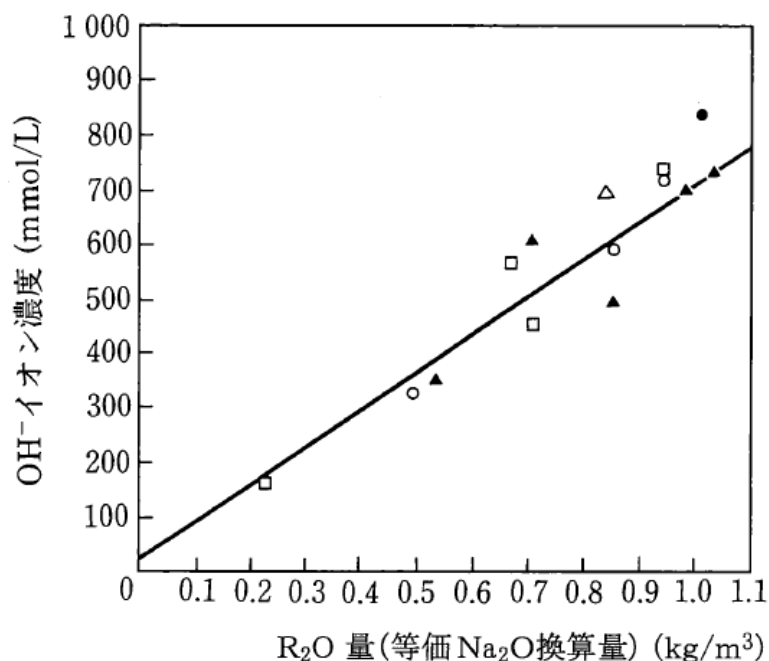
コンクリート細孔溶液の主成分は、 Na^+ と K^+ 並びにそれらの合計とバランスする OH^- である。通常は、硬化コンクリートのアルカリ供給源は、海砂の使用や飛来塩化物の要因を考慮しなければ、セメントに含まれる酸化アルカリである。この酸化アルカリは、 R_2O 量（等価 Na_2O 換算量）で便宜上整理され、以下の式で算定できる。

$$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \times (62/94.2)$$

次図は、使用したセメントの K_2O 量とセメントペースト細孔溶液中の水酸化物イオン（ OH^- ）濃度との関係を実験的に求めたものである。この図から、 R_2O が増加するに従って、細孔溶液中の OH^- 濃度が上昇することが分かる。

硬化コンクリート中のアルカリは、次表の細孔溶液の化学組成をみても分かるように、 Na や K 等のアルカリ金属と水酸化物イオン（ OH^- ）の両面からの分析が可能である。

硬化コンクリートにおいて、アルカリを分析する場合、水溶液試料を調整する必要がある。これを行うためには、粉末試料を調整し、強酸処理や熱水抽出する方法と、コアを用いて高圧で細孔溶液を抽出する方法がある。



（コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p173 参考）

【セメントの R_2O 量と細孔溶液の OH^- 濃度の関係（セメントペースト）】

材齢 (日)	濃 度 (当量/L)				
	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Na ⁺ +K ⁺	OH ⁻
1	0.008	0.13	0.32	0.45	0.43
3	0.008	0.25	0.41	0.65	0.58
7	0.006	0.27	0.45	0.72	0.64
28	0.006	0.27	0.45	0.71	0.64
72	0.004	0.20	0.45	0.66	0.59

(注) セメント：普通ポルトランドセメント

Na₂O 等価百分率：0.78%

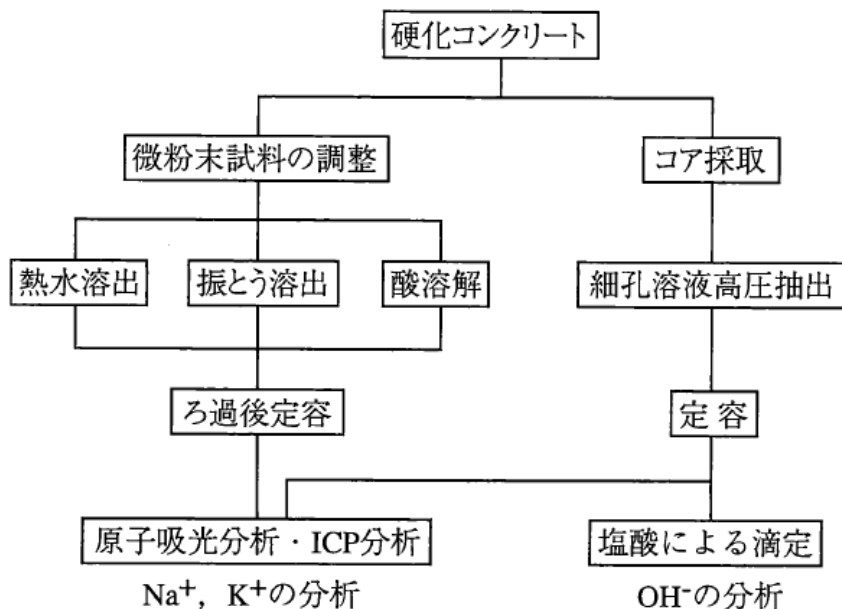
W/C：0.40, 標準砂/セメント：0.75

(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p172 参考)

【細孔溶液の化学組成】

(3) 試験・測定方法

コンクリートのアルカリ量分析は以下の手順で実施する。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p173 参考)

【試験実施フロー】

1) 微粉末試料による分析

まず、微粉末試料を調整する。作業は、コンクリート試料をハンマーで砕き、ジョー・クラッシャーで粗粉砕した後、更にダブル・ロール・クラッシャーで粉砕する方法や、振動ミルを使用して一挙に粉末試料とする方法等がある。そして最終的には、めのう乳鉢を用いて摩砕し、0.15mm ふるい全通サンプルとする。このサンプルを 100℃ 乾燥器内で乾燥させ、デシケーター内にて冷却保存する。

次に、サンプル内のアルカリ分を抽出する。熱水抽出法では、煮沸した時に微粉末試料から溶出するアルカリ金属 (Na、K) の分析を行う。ビーカーに入れた微粉末サンプルを砂浴上で、時計皿をかぶせて煮沸する。放冷後、HCl を入れたメスフラスコに

ろ過して、定容したものが水溶液サンプルとなる。

振とう法では、常温で、振とうした時に微粉末試料から溶出するアルカリ金属 (Na、K) の分析を行う。微粉末試料を共栓付き三角フラスコに秤り取り、蒸留水を加え、振とうした後、吸引ろ過装置でろ過を行い、メスフラスコにて定容したものがサンプルとなる。

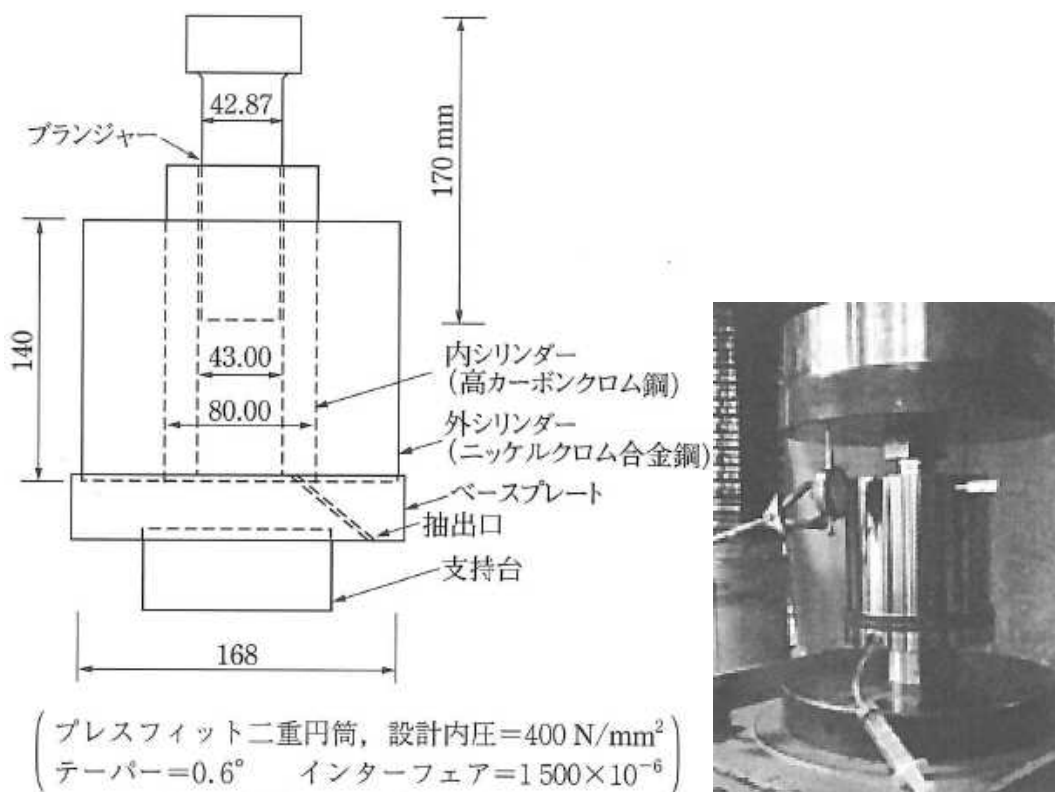
強酸溶解法は、セメントの化学分析法 (JIS R 5202) に準拠して行われるものである。微粉末サンプルをビーカーに秤り取り、過塩素酸を加えて、ガラス棒でかき混ぜて溶解し、砂浴上で加熱し、水分を蒸発させて、過塩素酸の白煙が出始めたらし計皿でふたをして、更に加熱を続ける。ビーカーを放冷した後、時計皿を水で洗って取り除き、塩酸及び温水を加えてかき混ぜ、ゼリー状の物質を溶解する。ろ過後、メスフラスコに洗い移し定容したものが水溶液サンプルとなる。

以上の方法で調整した水溶液サンプルを原子吸光光度計あるいは I C P にかき、Na と K の含有量を計測し、当初採取したサンプル量に対する重量百分率を求める。

2) コア試料による分析

採取した硬化コンクリートコアを密封容器内で加圧し、採取された細孔溶液の化学組織を調べる方法である。

細孔溶液は、下図のような装置を用いて、加圧抽出する。



（コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p174 参考）

【細孔溶液抽出装置】

加圧抽出時には、同心円状二重構造の内部シリンダー内に $\phi 50\text{mm}$ のサンプルを入

れ、500N/mm²程度まで、ゆっくり加圧し、下端の抽出口から注射器を用いて細孔溶液を採取する。シリンダー内には、完全密封するために加圧板とサンプルの間にはテフロンシートを挟み込む。

採取された細孔溶液は、各種分析に供するが、一般的には、Na、K は原子吸光光度計又は I C P 発光分析装置を用いて、OH⁻はフェノールフタレインを指示薬とした塩酸滴定で分析する。

(4) 試験結果の活用

細孔溶液の相対的なアルカリの変化を追跡することによって、アルカリシリカ反応等の解析に有用である。硬化コンクリート中のアルカリ含有量は、サンプルを絶乾状態にした時の自由水量の変化から、アルカリ含有量を求め、分析結果（濃度）をコア全体の含有量に換算して、コア質量に対する百分率を求める。

(5) 精度・適用限界

微粉末試料を分析する場合、骨材を含む硬化コンクリート単位質量当りのアルカリ量を分析することになり、他の化学分析手法と比較して測定精度に劣る。そこで、セメントペースト中あるいは使用したセメントのアルカリ量を推定する場合には、硬化コンクリートの配合推定を行い、換算する必要がある。

細孔溶液抽出法は、セメントペーストやモルタル供試体の分析用として開発されたものであり、硬化コンクリートを対象とした事例は現時点では少ない。誤差要因としては、現場から採取したコンクリートサンプルの場合、大きさ並びに上下端面がシリンダー内にフィットしないこと、粗骨材がセメントモルタル部分の載荷速度を不均一にしまうこと等が考えられる。誤差を最小限にするには、φ50mm×高さ100mmの円柱サンプルを基本とし、サンプルの精度の良いサイズ調整を行うとともに、載荷前に十分な水中養生を行い、サンプルを飽水状態にしておく必要がある。

10. 骨材の反応性

(1) 概要

岩石学的試験は、使用骨材の岩種や骨材に含有される反応性鉱物の種類を調べることで、骨材のアルカリシリカ反応性を間接的に推定するものである。

新設時におけるコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性は、JIS A 1145 に規定される化学法及び JIS A 1146 に規定されるモルタルバー法によって試験することが定められている。

既設構造物に使用された骨材のアルカリシリカ反応性を調べる際には、構造物より採取したコンクリート塊を 5% 程度の希塩酸に浸漬し、骨材に付着したセメントペースト分を完全に溶解させ、骨材のみを取り出して、同様な試験を実施する。

(2) 試験・測定方法

1) 岩石学的試験

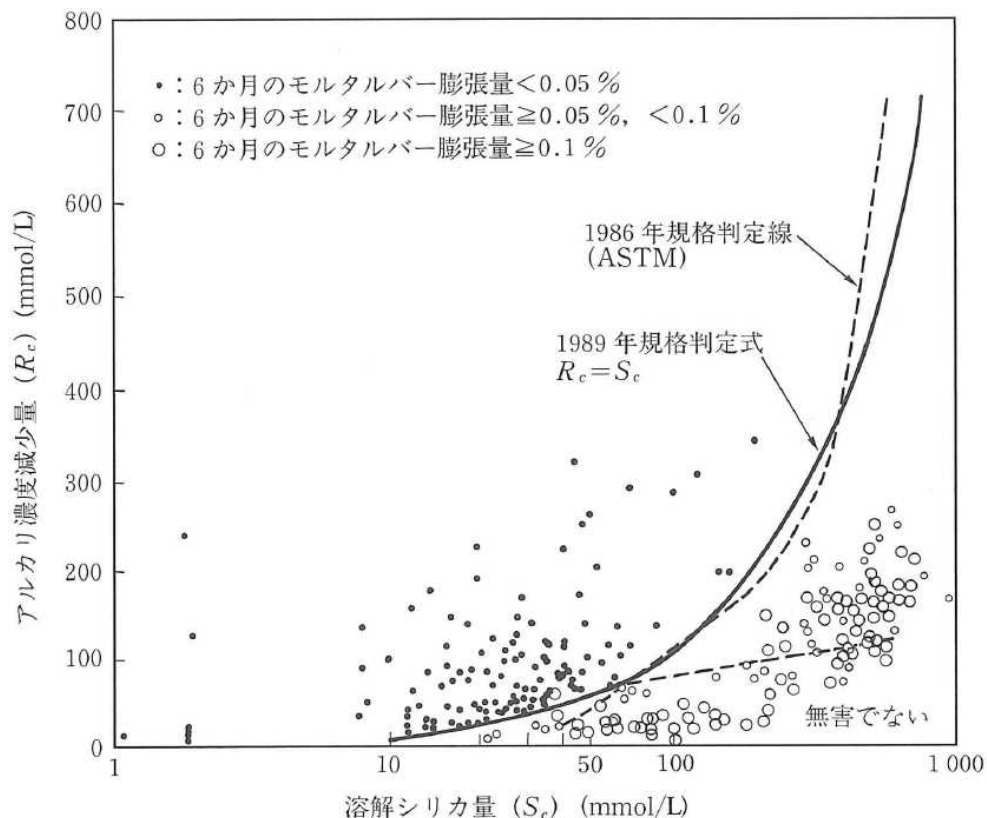
岩石学的試験（偏光顕微鏡観察、粉末X線回折、SEM-EDS（走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型エックス線分光器）、赤外線吸収スペクトル分析等）は、使用骨材の岩種（安山岩、流紋岩、チャート等）や反応性鉱物（クリストバライト、ドリデイト、微晶質又は歪んだ結晶格子をもつ石英、火山ガラス等）の種類とその量を調べる際に実施される。

例えば、偏光顕微鏡観察では、鉱物学学識経験者が、コア中の粗骨材の薄片試料を作成して偏光顕微鏡観察を行い、アルカリシリカ反応性鉱物の有無を判定する。粉末X線回折では、採取コアから粗骨材を取り出し、粉末X線回折法により骨材の構成鉱物を同定し、有害な鉱物の有無を判定する。

2) 化学法

化学法（JIS A 1145）では、粒度 0.15～0.3mm に調整した骨材試料 25 g と 1N の NaOH 溶液 25ml を 80℃ の温度条件を 24 時間保持した時に得られるアルカリ濃度減少量 (Rc) と溶解シリカ量 (Sc) の関係を下図のような判定図にプロットして、「無害」又は「無害でない」と判定する。判定基準は、溶解シリカ量 $\geq 10\text{mmol/l}$ かつアルカリ濃度減少量 $< 700\text{mmol/l}$ で溶解シリカ量 (Sc) / アルカリ濃度減少量 (Rc) ≥ 1 の場合に「無害でない」と判定する。

また、化学法（ASTM C 289）の判定図には、「潜在的有害」の領域（Sc と Rc が共に大きい領域）が存在するが、この領域にプロットされる骨材の多くは高いアルカリシリカ反応性と顕著なペシマム現象を示すことが確認されている。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p176 参考)

【アルカリシリカ反応性試験（化学法）の判定図（JIS A 5308-1989 解説）】

3) モルタルバー法

モルタルバー法 (JIS A 1146) では、セメントの等価アルカリ量 ($\text{Na}_2\text{O eq.}$) が 1.2% になるように、水酸化ナトリウムを添加したモルタル供試体を湿気箱 (40℃、相対湿度 95% 以上) に保存し、所定間隔でモルタルの膨張量を測定する。判定基準は、6 箇月後の膨張率 $\geq 0.100\%$ (若しくは 3 箇月後の膨張率 $\geq 0.050\%$) の場合に「無害でない」と判定する。

なお、化学法で「潜在的有害」 (S_c と R_c が共に大きい領域) と判定された場合は、ペシマム混合率に留意する必要がある。

4) 迅速法

迅速法は、主としてコンクリートの生産工程管理用に適用されるものであり、JIS A 1804 として規格化されている。モルタルバーを高温、高圧下で養生し、超音波伝播速度、動弾性係数、長さ変化を測定することによって迅速に骨材のアルカリシリカ反応性を判定する。

一方、化学法 (ASTM C 289) に代わる手法として、判定結果が迅速に得られる促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) が普及しつつある。本試験法では、温度 80℃ の 1N の NaOH 溶液中に浸漬したモルタル供試体の 14 日間の膨張量で、0.1% 以下を「反応性なし」、0.1~0.2% を「不明」、0.2% 以上を「反応性あり」と判定する。促進モルタルバー法により「反応性あり」と判定された場合には、更にコンクリートプリズム法 (ASTM

C 1293) を実施し、実際のコンクリート供試体での膨張量を測定する方法が提案されている。

(3) 試験結果の活用

骨材のアルカリシリカ反応性が確認された場合、その骨材を使用した構造物はアルカリシリカ反応を生じる可能性があるものと判定する。ただし、構造物へのアルカリシリカ反応の影響については、反応性の骨材の混入程度によることも考慮する必要がある。

(4) 精度・適用限界

岩石学的試験では、各種分析機器の取扱いや岩種及び反応性鉱物の同定に熟練度が要求されるので、実施できる機関が限定される。また、骨材のアルカリシリカ反応性は骨材の粒径やその混合比率（ペシマム混合率）により異なるので、骨材のアルカリ反応性を正確に判定することは困難とされている。

化学法は、短時間に結果が得られる利点があるが、全ての骨材のアルカリシリカ反応性の判定に適しているのではなく、判定できない種類の骨材もあることに留意する必要がある。

モルタルバー法では、判定までに長期間を必要とするとともに、測定期間中に供試体内部より比較的多量の水酸化物イオンが漏出することが問題となる。また、微細な結晶粒や歪んだ結晶格子をもつ石英が反応性鉱物であるチャート等の骨材では、膨張が非常にゆっくりと進行するので、現行の判定基準では適切に評価できないことが課題である。

1 1. コンクリートの促進膨張試験

(1) 概要

使用する骨材にアルカリシリカ反応性があれば、調査時にアルカリシリカ反応の兆候が確認されなくても、長期の供用期間中には構造物に劣化が生じる可能性がある。

構造物を構成するコンクリートが、調査時までアルカリシリカ反応によってどの程度膨張していたか、あるいは今後どのような速度で、最終的にどの程度まで膨張するかについて、構造物から採取したコアを用いて測定する解放膨張量及び残存膨張量がある。

(2) 試験・測定方法

構造物からコアを採取する際には、ひび割れ等が発生している箇所はできるだけ避けて、少なくとも2本以上のコアを構造物より採取する。JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア採取による膨張率の測定方法」では、「コアは原則として直径100mm、長さ約250mmとする」と規定されている。しかし、RC及びPC構造物からのコアの採取において、鋼材の間隔との関係で所定の直径や長さが得られないことが多い。この際には、直径75mm及び直径50mmのコアが採取されるが、コアの長さは直径の2倍以上を確保する。そして、採取したコアは、乾燥や炭酸化の影響を受けないように、現地で直ちに密封する。

なお、構造物の表面部(50mm程度まで)は、ひび割れの発生、中性化、アルカリの溶出・濃縮の影響を受けている可能性があるため、膨張を測定する対象からは除く必要がある。試験対象のコアには、下図に示すようなステンレス製のバンドを取り付け、恒温室内で膨張量を測定する。膨張量の測定は、コアに接着したポイント間の距離をコンタクトゲージを用いて測定する。



(コンクリート診断技術'14〔基礎編〕p178 参考)

【促進養生試験体の概要】

(3) 試験結果の活用

下表は、促進養生条件下でコアの膨張量を測定する方法及び判定基準を示したものである。コアによる残存膨張量の測定では、温度40℃、相対湿度95%以上の湿気箱にて実施する方法(JCI-DD2)がよく用いられる。本方法では、コアの膨張量が0.1%以上の場合に「残存膨張性あり」と判定するが、膨張量の測定期間中にゲルの滲出の影響で途中から収縮傾向を示すことがあり、判定基準値を設定することが難しい場合もある。

【コアの促進養生試験における判定基準】

試験法名称	促進養生の条件	判定基準
JCI-DD2法	温度40℃、湿度95%以上の条件下にて養生	建設省(現 国土交通省)総合プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」では、40℃、100%R.H.の条件下に13週間養生し、0.05%以上の膨張量を示すものを有害又は潜在的有害と判定する。 阪神高速道路公団(現 阪神高速道路株式会社)では、全膨張量が0.1%を超える場合、有害と判定する。
デンマーク法	湿度50℃の飽和NaCl 溶液中に浸漬	試験材齢3箇月での膨張量で以下のように判定する。 0.4%以上：膨張性あり 0.1～0.4%：不明確 0.1%未満：膨張性なし
カナダ法 (NBRI法)	温度80℃の1NのNaOH 溶液中に浸漬	ASTM C 1260-94の判定基準：試験開始後14日間での膨張量で以下のように判定する。 0.1%以下の場合：無害 0.10～0.20%の場合：有害と無害な骨材が含まれる。 (この場合、14 日以降も更に試験を継続する) 0.20%以上の場合：潜在的に有害な膨張率

(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p178 参考)

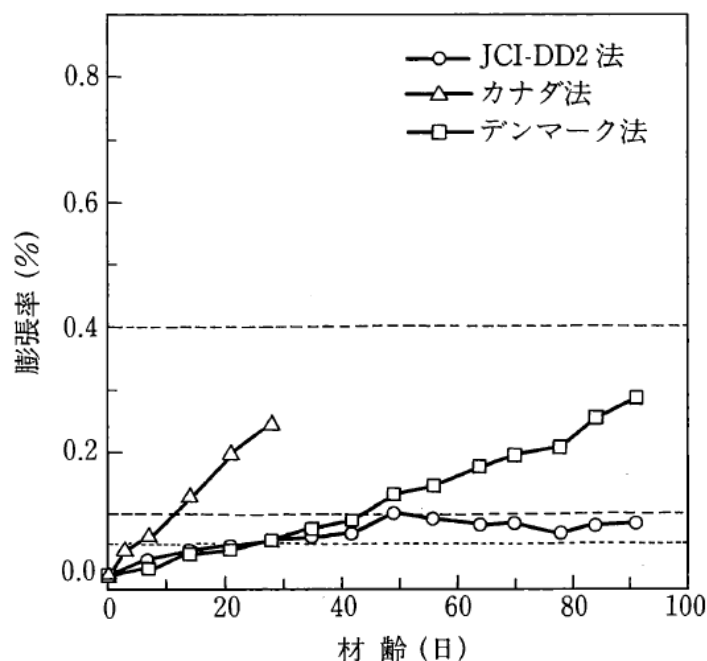
なお、下表に示すように、直径 100mm のコアが示す膨張率に対して、直径 75mm のコアを用いた場合には約 60%、直径 50mm のコアを用いた場合には約 20%程度の値に低下するという報告もあり、安全側の評価とするための参考とすると良い。

【コア径の違いによる膨張率の比の例】

コアの径(mm)	反応性骨材混入率 50 %		反応性骨材混入率 100 %		範囲 (平均)
	拘束なし	拘束あり	拘束なし	拘束あり	
100	1.00	1.00	1.00	1.00	—
75	0.45	0.77	0.61	0.53	0.53 ~ 0.77(0.61)
50	0.11	0.28	0.11	0.33	0.11 ~ 0.23(0.21)

(コンクリート構造物からのコア試料の採取方法 (案)、日本コンクリート工学協会 耐久性診断研究委員会報告書 p1-3 参考)

この方法以外に、温度 80℃の 1N の NaOH 溶液に浸漬する方法 (ASTM C 1260、カナダ法)、温度 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬する方法 (デンマーク法) がある。湿気箱にて実施する方法 (J C I - D D 2) では、特にコアの直径や長さが小さい場合、コアからのアルカリの溶出の影響で、膨張量の測定結果が小さくなり、正しい評価ができなくなる。これに対して、外部から NaOH や NaCl を供給する試験方法では、下図に示すように、膨張量が伸び続ける傾向となるので、残存膨張性の評価が容易となる利点がある。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p179 参考)

【促進養生試験におけるコアの残存膨張量の比較例】

(4) 精度・適用限界

構造物から採取したコアの解放膨張量は、コア採取時の水や応力解放の影響を複雑に受けており、測定値は厳密にはコアの膨張量を示すものではないこと、また残存膨張量はあくまでも促進環境下におけるものであり、実際の環境下における膨張量ではないことに留意する必要がある。

更に、実際の構造物の膨張挙動は、鉄筋による拘束の影響を受けるので、構造物の拘

束鉄筋比との関係から将来における膨張量を予測することが望ましい。

促進膨張試験の判定基準値（表【コアの促進養生試験における判定基準】参照）は、骨材のアルカリシリカ反応性の試験に準拠したものが使用されることが多い。このため、コアの促進膨張試験における残留膨張性の「あり」「なし」を判定する基準値は、現状では実構造物の将来の膨張挙動との対応関係が必ずしも明確ではないことに留意する必要がある。

なお、同一のコンクリートであっても、水分の供給状況等の供用環境によって劣化進行が偏在する場合がある。したがって、コアを採取する箇所は、供用環境や外観上の劣化状態を区分した上で、各々の代表箇所とする等、試験の目的を十分に考慮して選定する必要がある。

また、骨材の種類によっては、アルカリシリカ反応が緩やかに長期にわたって進行するものもある。そこで、所定の試験期間を経ても、膨張傾向が増加傾向であれば、更に試験期間を延長することが望ましい。

12. コンクリートの細孔径分布

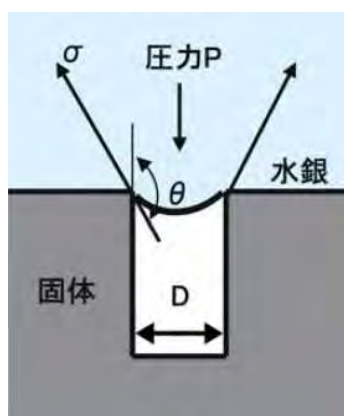
(1) 概要

コンクリートの細孔径分布は、圧縮強度に影響するばかりでなく、コンクリート中の物質透過性に大きな影響を与えるため、コンクリートの耐久性を評価するための指標となる。

コンクリートの細孔径分布試験は、一般に水銀圧入式ポロシメーターを用いて、コンクリートの細孔の大きさ（数 nm～数百 μm ）とその分布状態を測定するものである。

(2) 原理

試料に水銀を高圧で注入し、加えた圧力と注入された水銀の量との関係を基に、細孔径分布を求める。加える圧力 P と水銀が注入される細孔の直径 D の間には式 (1) の関係があり、両者は反比例する。すなわち、圧力を増加させると、それに応じて水銀はより微細な孔に注入される。



$$D = -4\sigma \cos \theta / P \quad (1)$$

D : 細孔の直径、 σ : 水銀の表面張力、 θ : 水銀の接触角、 P : 圧力

力の釣り合いから $-\pi D \sigma \cos \theta = (\pi D^2/4) P$
これより $D = -4\sigma \cos \theta / P$
 θ と σ は定数であるから、 D と P は反比例の関係になる

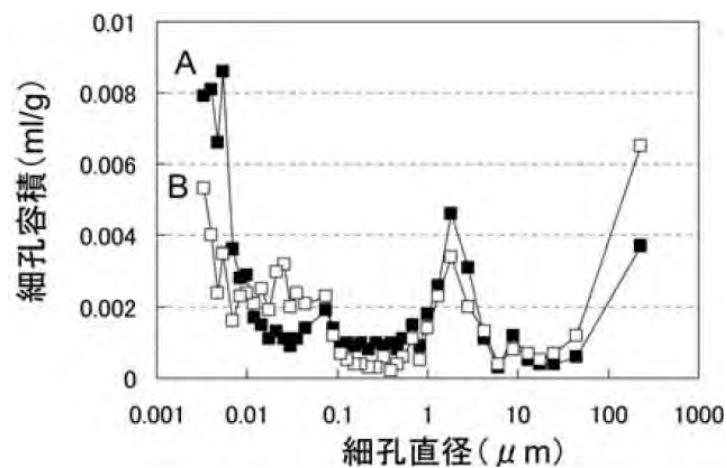
【水銀圧入法による細孔径分布試験の原理】

(3) 試験・測定方法

コアのモルタル部分（1回の測定当たり真空乾燥後の直径 2.5～5mm 程度の粒子）を試料として、水銀圧入式の細孔径分布測定装置を用いて、圧力を段階的に変化させながら水銀の注入量を求め、それをその圧力に相当する大きさの細孔の累積量とする。最終的には、細孔の大きさ毎に存在量が求まる。



【細孔径分布試験用試料と細孔径分布試験装置（水銀圧入式ポロシメーター）の例】



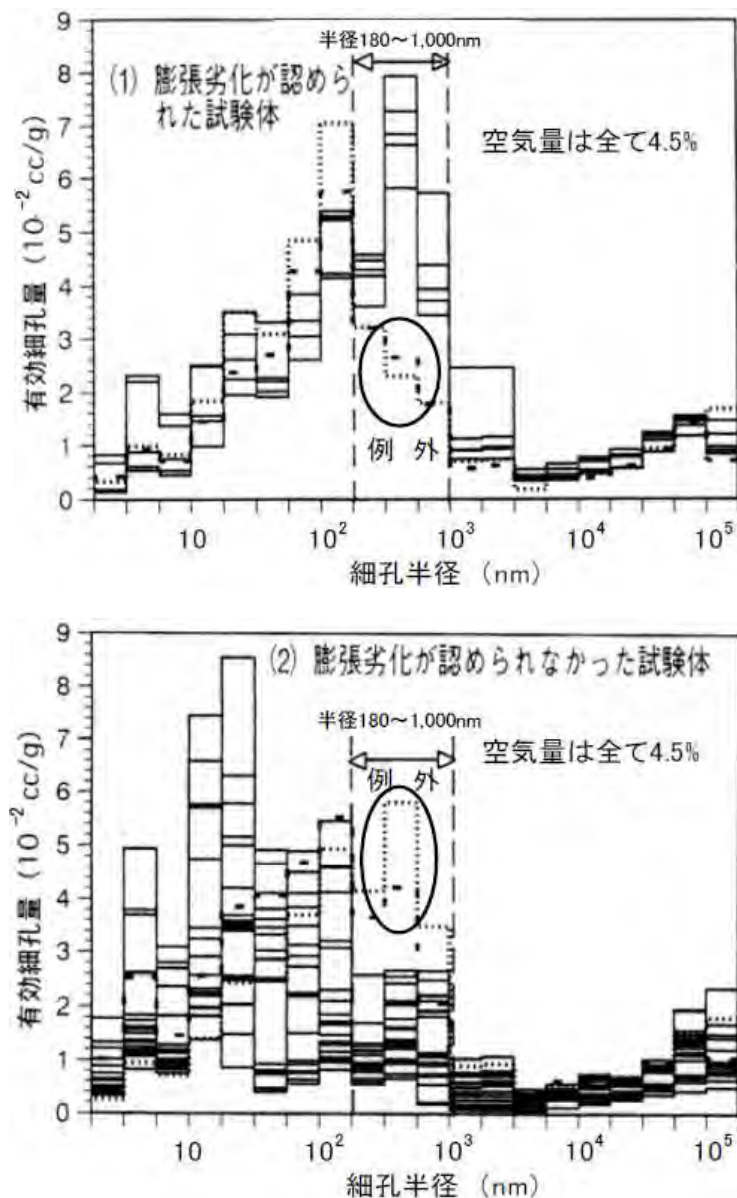
((株) 太平洋コンサルタント、HP 水銀圧入ポロシメーター (MIP) 参考)

【細孔径分布の測定例】

(4) 試験結果の活用

コンクリートの細孔構造を測定することで、凍結融解作用に対する抵抗性を評価することができる。以下に評価例を示す。

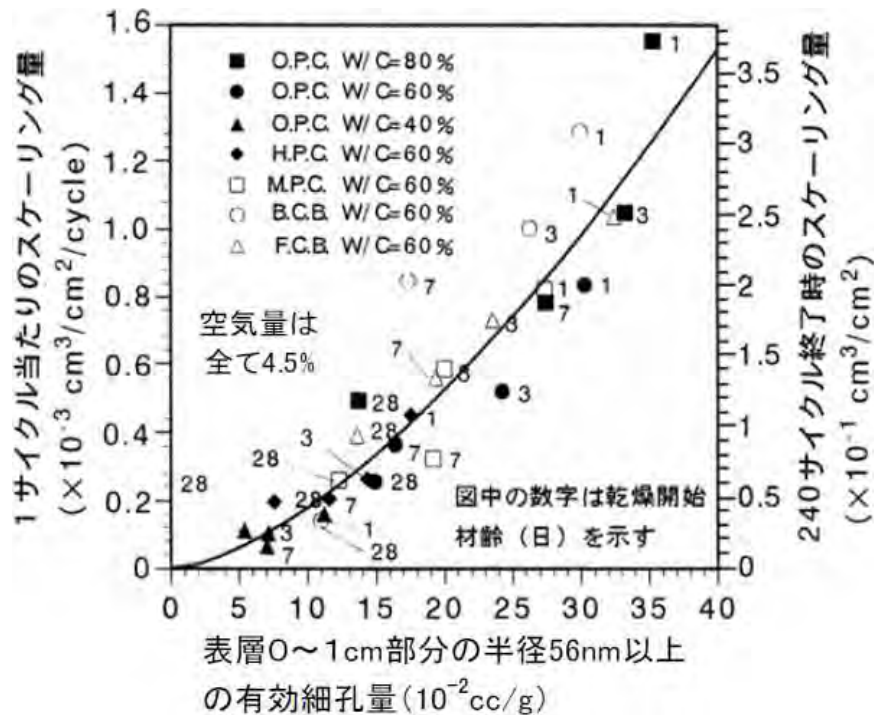
下図は、JIS A 1148 に基づき凍結融解試験を行った結果、図中 (1) に動弾性係数の低下や長さの増加がみられた試験体の細孔径分布を、図中 (2) に動弾性係数に低下がみられず長さも変化しなかった試験体の細孔径分布を示したものである。本図より、凍結融解試験により膨張劣化を生じたコンクリートの細孔径分布 (図中 (1)) は、膨張劣化が生じなかったコンクリートの細孔径分布 (図中 (2)) に比し、半径 180nm~1000nm の細孔量が多いことが分かる。



※図中に例外と示すデータは、コンクリートの材齢初期から乾燥を受けた場合にみられるものである。
 (コンクリートの細孔構造による耐凍結融解性評価、日本大学生産工学部建築工学科建築材料研究室 参考)

【膨張劣化の有無と細孔径分布の例】

下図は、スケーリング量と表層 0~10mm のコンクリートの細孔径分布との関係を示している。本図より、スケーリング量は、有効細孔量 56nm 以上の細孔量と高い相関のあることが分かる。なお、この下限値 56nm は凍結最低温度 (-18°C) の場合の結果であり、凍結最低温度が下がると、更に下限値は小さくなる可能性がある。



(コンクリートの細孔構造による耐凍結融解性評価、日本大学生産工学部建築工学科建築材料研究室 参考)

【半径 56nm 以上の細孔量とスケーリングの関係の例】

(5) 精度・適用限界

細孔径分布試験には、直径 2.5～5mm 程度の非常に小さな試料が用いられる。このことは、少量の試料で試験でき多点のサンプルを得やすいメリットがある反面、練り混ぜ調合等に起因する W/C の僅かな品質のバラツキによる影響を受けやすいデメリットがある。このため、ブリーディング等の影響が出やすいごく表層部からの試料採集は避け、更に複数の試料より試験値を得ることが望ましい。

また、細孔径分布は、セメントの種類（十分には解明されていないが、水和生成物容積等の違い）にも影響を受けることから、異なる材料を横並びで評価することはできない。

水銀圧入法のほかにも、非水銀液体押出法、気体吸着法による測定法がある。水銀圧入法は測定範囲が広いので、大まかな細孔分布特性が未知の場合に有効であり多く用いられている。環境汚染の危険度を考慮すると、水銀を使用しない新しい試験方法の確立が望まれる。非水銀液体押出法の改善により、100nm 前後の細孔分布まで測定できるようになれば気体吸着法の測定結果と合わせることで水銀を使用せず環境に配慮した測定法を確立できる可能性がある。

13. コンクリートの気泡分布

(1) 概要

コンクリートの耐凍害性を確保するためには適切なエントレインドエアの連行が必要であり、一般にはフレッシュコンクリートの空気量を測定することによって品質管理を行っている。しかし、厳密には耐凍害性に重要な気泡特性はその空気の絶対量ではなく、気泡と気泡との間の距離（気泡間隔係数、 $200\sim 250\mu\text{m}$ 以下であれば耐凍害性に優れる）であると言われている。

硬化コンクリート中の気泡組織の測定には、ASTM C 457「顕微鏡によるリニアトラバース法又は修正ポイントカウント法」が従来は用いられてきたが、測定に多大な労力と時間を要する欠点があることから、画像解析技術の発展を背景として昭和 55 年代後半から画像解析装置を用いて自動的に気泡組織を観察する方法が開発され、現在は主流となりつつある。

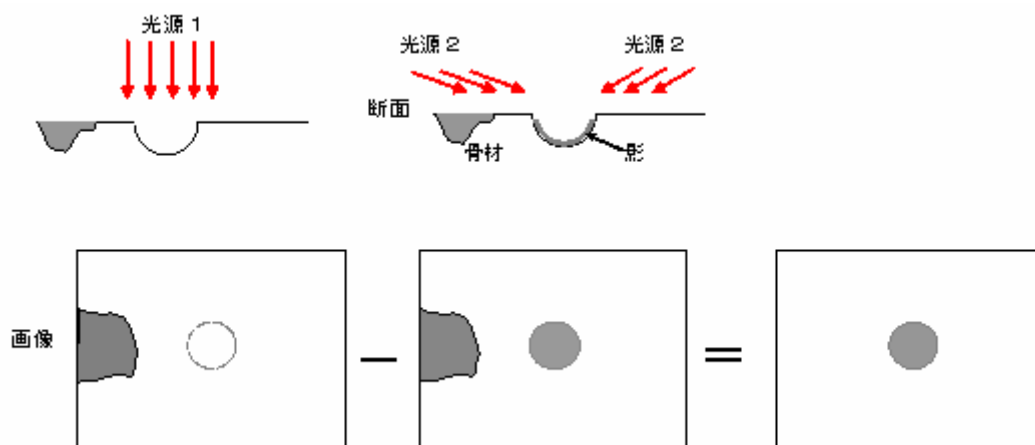
(2) 原理

ASTM C 457 に準拠したリニアトラバース法は、硬化コンクリート中の気泡に対して、空気量、気泡間隔係数等を測定するための方法である。本手法では、供試体を横切る平面上に一定間隔で設定された線上を走査して、各成分の区域を横切り通過した距離の総和を求め、固体の体積組織を決定する。

従来の測定方法は、実体顕微鏡下において肉眼で行い手動ステージを操作しながら硬化コンクリート中の 10μ 程度から数 mm までの気泡の分布を測定するため、気泡部分とセメントペースト部分や骨材部分を分けて計測する必要があった。更に、幅広い測定レンジを詳細に観察するため 1 サンプル数時間という多大な時間と労力を測定作業者に要し、また、測定作業者の熟練度や個人誤差が測定値に大きく影響を与えていた。そこで熟練した測定作業者による肉眼での認識精度と同じレベルでの自動化された手法が求められた。

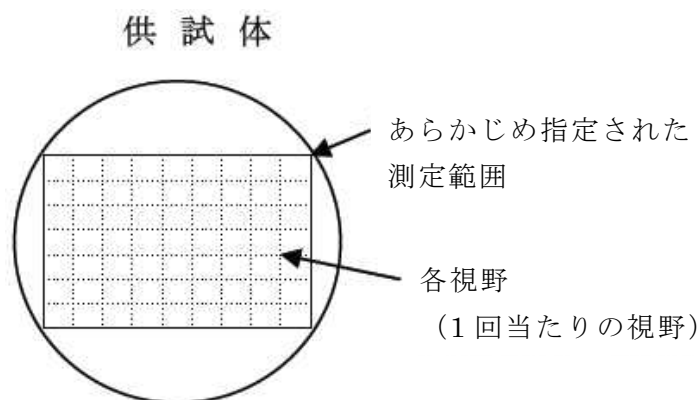
ASTM C 457 に準拠したリニアトラバース法による測定を自動的に短時間で行うことのできる画像処理による硬化コンクリート気泡計測装置を活用した気泡分布測定方法について以下に解説する。

この画像処理による硬化コンクリート気泡計測装置は、測定面への光の当て方により気泡部で生じる陰影の違いを利用して気泡を抽出する。



【画像処理による測定原理】

測定時はあらかじめ指定された範囲内において視野を分割して順次撮像し測定を行う。各視野の測定データは画像処理装置に蓄積され全視野の測定終了後に空気量、気泡間隔係数等の出力値を算出する。測定範囲と各視野との関係を下図に示す。



【測定範囲と各視野との関係】

(3) 試験・測定方法

基本的な測定原理は、デジタル画像上の濃度差分法（図【画像処理による測定原理】参照）により気泡を認識し、2 値化することにより、リニアトラバース法へと展開し測定を行う。しかし、気泡には浅い気泡と深い気泡の2 種類が存在する。浅い気泡とは、薬品等で人為的に硬化コンクリートに発生させた気泡（エントレインドエア）であり微細で形状は球状に近い。一方、深い気泡とは、製造工程上の原因で巻き込まれた気泡（エントラップドエア）であり測定対象面からの深さが穴の入り口の断面の狭い部分の幅より大きく形状は不定形である。浅い気泡に関しては、下図の濃度差分法で抽出する。深い気泡に関しては、濃淡画像のサチュレーション現象（照明の集中による反射強度アップ）により抽出する。

そして、浅い気泡のみを抽出した2 値画像と、深い気泡のみを抽出した2 値画像との画像論理和を行い、気泡測定画像を作成しリニアトラバース法による測定を行う。

リニアトラバース法の測定から、空気量（硬化コンクリートの体積に対する体積百分

率で表したコンクリート中の空気泡の体積比)、気泡間隔係数(気泡の表面からセメントペースト中の点に至る最大距離)といった気泡組織に関するパラメータを算出する。

(4) 試験結果の活用

一般に、気泡間隔係数が $200\sim 250\mu\text{m}$ 以下であれば耐凍害性が確保できるとされ、これと照らした評価を行う。空隙中の水が凍結する過程では、凍結による膨張に伴って空隙の壁に静水圧が作用し、これが引張強度に達したときにひび割れが生じる。この静水圧は、気泡の間隔のほか、最低温度、凍結速度、飽水程度によっても異なってくる。また、コンクリート中の細孔の径が小さいほど氷点が降下する現象が確認されており、更に凍結過程では過冷却現象も加わることから、これに対抗するための耐凍害性は一様ではない。以上に示す様々な条件によって影響を受けることに留意が必要である。

(5) 精度・適用限界

本手法における従来法(目視測定)との相関値は、空気量で 0.96 程度、気泡間隔係数で 0.85 程度としている。また、測定結果の再現性を標準偏差で示すと空気量で 0.16 程度、気泡間隔係数で 0.007 程度としており、一定の精度が確保されているものと判断される。従来法(目視による測定)では測定作業員の違いによる誤差があり、測定時間については従来法で 2~3 時間のところ画像処理で約 2~3 分と短縮されたことを勘案すると、十分に実用的な方法といえる。

1 4 . 弾性波を利用した内部欠陥調査

(1) 概要

コンクリート表面に設置した発振子や衝撃入力装置によって内部に弾性波を発生させ、これをコンクリート表面の受振子で測定し、内部の欠陥の位置や寸法を測定する方法を弾性波法という。弾性波法は、その利用周波数範囲や弾性波の生じ方、受信方法によって、超音波法や衝撃弾性波法等いくつかの手法に分類される。さらには、コンクリートの打撃音を利用する打音法も弾性波を用いた方法と考えることができる。以下に、各手法の概要を示す。

1) 超音波法

使用周波数が 20kHz 以上の超音波域と呼ばれる周波数帯を主に使用し、発振子からコンクリート中に発射された弾性波を受振子で測定する手法である。到達時間、波形、周波数、位相等の変化を測定装置で読み取ることにより欠陥を検出する。これらはセンサの配置方法により表面法、透過法、反射法、斜角法に分類される。

2) 衝撃弾性波法

ハンマー等によりコンクリート表面を打撃して弾性波を発生させ、これを受振子で測定する手法を衝撃弾性波法と呼ぶ。物理的な打撃によるために、一般的には超音波域よりも低い 20kHz 以下の周波数成分の波を使用することになる。受振子で促えた反射エコーや波の周波数、位相等を分析することにより、部材厚さ、内部欠陥や背面空洞の有無、欠陥までの距離等を推定する。

3) 打音法

基本的には衝撃弾性波法とほぼ同様の原理であり、打撃によりコンクリート中に弾性波を発生させ、この弾性波がコンクリート表面から空気中に放射されたものを測定する。打音法では、通常は可聴域と呼ばれる 20Hz～20kHz の周波数域の音（弾性波）を使用する。衝撃弾性波法と比較して、周囲の騒音の影響を受けやすい難点があるが、受振子を用いないためコンクリート表面の性状に影響を受けにくい、測定が簡便等の長所がある。

ただし、上記で述べた 3 つの手法に分類されても、ひび割れ深さや剥離、空洞等、測定対象によって原理が異なる場合があり、弾性波は、他の非破壊検査手法と比べて多様なものとなっている。また、上記以外にコンクリートのひび割れ発生・進展に伴って発生し伝播する弾性波を検出するアコースティック・エミッション法（AE 法）も弾性波を用いた手法に分類される。

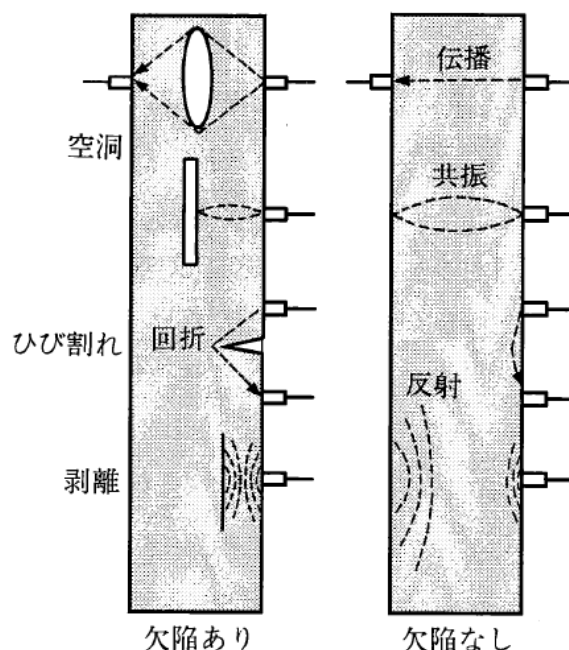
(2) 原理

加振点から発せられた弾性波は、コンクリート中を直進、反射、回折を繰り返しながら散乱、拡散していく。地震波と同じく弾性波には、縦波（P 波）、横波（S 波）、レリー波等の表面波があり、同一物質内でもそれぞれ伝播速度が異なる。コンクリート

における弾性波伝播速度は縦波が最も速く（通常のコンクリートで 4000～4500m/sec 程度）、横波と表面波はほぼ同じ速度（2500～3000m/sec 程度）である。

このような、弾性波を用いてコンクリート中の欠陥を検知する方法は、基本的にはコンクリート中のひび割れ、剥離箇所、空洞等に存在する空気層との境界で弾性波のほとんどが反射してしまうことを利用している。弾性波は、物性の異なる媒質の境界面でそのエネルギーの一部が反射する性質を有している。このときの反射率は、それぞれの媒質の弾性波伝播速度及び密度によって決まり、例えば、コンクリートと空気の間ではエネルギーの 99.98%が反射する。

下図は、弾性波法によるコンクリート中の欠陥の検知状況を概念的に示したものである。



（コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p113 参考）

【コンクリート中の欠陥による弾性波の伝播状態の変化の概念図】

弾性波によって欠陥を検知する原理は、既に述べたとおり細かく分類すれば各種あるが、大まかには下記のように分類される。

1) 透過波や反射波、回折波の伝播時間測定による方法

前図の最上段あるいは3段目のように、内部に空洞がある場合やコンクリート表面に垂直にひび割れがあるような場合、発振子から発せられた弾性波は、空洞やひび割れを迂回せざるを得ず、健全な場合と比較して弾性波の到達時間が遅れることになる。この原理を利用し、伝播時間測定により弾性波の迂回を抽出することで、欠陥を検知する。

2) 共振周波数測定による方法

前図の第2段目のようにコンクリート部材厚さ方向に共振が生じることがある。内部に空洞が存在する場合や、コンクリート表面に水平なひび割れが存在する場合には、

その間で共振が発生するために、共振周波数が変化する。この共振周波数の変化を促えることで空洞等の存在を検知する。

3) 位相変化測定による方法

前図の第3段目のように、コンクリート表面からひび割れが発生している場合に、ひび割れを挟んで弾性波を伝播させると、ひび割れ先端で回折が生じる。このとき回折角度 90° を境に波の性質が変化し、受振点における到達波の位相が変化する。センサの位置を変化させて、回折角度が 90° となるセンサ位置を見つけることで、幾何学的にひび割れ深さを検知する。

4) 振幅等の空間分布の測定による方法

前図の最下段の例のようにコンクリート表面に剥離がある場合には、剥離面での反射によって弾性波が逸散しにくい状態となっているために、その表面を打撃すると大きな振幅の波が得られる。これにより一定エネルギーでコンクリート表面を打撃してその表面振動の振幅分布を測定することで、剥離位置を検知する。

(3) 試験・測定方法

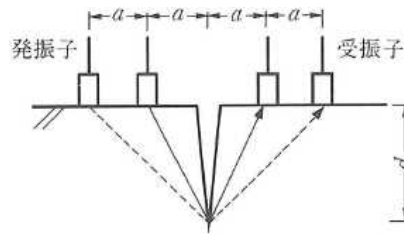
1) 伝播時間測定によるひび割れ深さ測定

弾性波伝播時間は弾性波入力波の立ち上がり時刻と、受振波形の立ち上がり時刻との差から求める。ここで、ひび割れを挟んだ発振子と受振子間の弾性波伝播時間測定により、ひび割れ深さを測定することを考えると、一般的にはひび割れ深さ d と弾性波速度 V_p が未知となる。このとき弾性波速度が既知であればひび割れ深さのみを未知として、①式に示すように幾何学的な計算によってひび割れ深さを求めることができる。もし、弾性波速度も未知であるような場合には、ひび割れのない箇所では弾性波速度をあらかじめ求めてからひび割れ深さを求める方法 (T_c-T_o 法等) や、振動子の間隔 a を変化させることによって伝播距離 L と弾性波速度 V を未知数とした連立方程式を解く方法 (BS法、修正BS法) 等がある。修正BS法における計算式は②式で示される。

$$d = \sqrt{(V \cdot t / 2)^2 - a^2} \quad \dots\dots\dots ①$$

$$d = a \sqrt{(4t_1^2 - t_2^2) / (t_2^2 - t_1^2)} \quad \dots\dots\dots ②$$

ここに、
 d : ひび割れ深さ
 a : ひび割れとセンサの距離 (ただし、修正BS法では $a \leq 100\text{mm}$)
 V : コンクリートの弾性波速度
 t : 発振子から受振子までの弾性波伝播時間
 t_1, t_2 : ひび割れとセンサの距離が a 及び $2a$ の場合の弾性波伝播時間



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p115 参考)

【ひび割れ深さ測定（BS法）の概念図】

弾性波伝播時間測定によるひび割れ深さの測定例及び手順を以下に示す。

- ①測定準備として、受・発振子を接触させる、伝播速度及び長さが既知の基準試験体を受・発振子で挟む等して弾性波伝播速度を測定する。
- ②対象とするひび割れを挟み、コンクリート表面が平滑で他の欠陥の観察されない箇所を選定する。
- ③センサとひび割れの間隔を設定し（本測定では 150mm）、コンクリート表面の付着物等を取り除き、センサ設置位置の表面を平滑にする。
- ④センサ表面に接触媒質を塗布し、コンクリート壁面と密着させる。接触媒質としては超音波測定用のものが市販されているので、これを使用する。
- ⑤測定器を作動し、伝播時間を測定する。なお、このとき対象構造物が鉄筋コンクリートであるような場合、弾性波が鉄筋を通過して受振子に伝播する可能性があるため、ひび割れ方向にセンサを移動させて複数回の測定を行い、同様の結果が得られることを確認する。

2) 周波数測定による水平ひび割れ位置測定

周波数測定は、通常、波を高速フーリエ変換（Fast Fourier Transfer：FFT）して周波数スペクトルを求めることにより行う。周波数スペクトルを用いた測定の代表的なものとしては、共振周波数の測定がある。次図に示すような例では、コンクリート表面から打撃等により弾性波を生じさせると、コンクリート部材の厚さ方向に半波長の整数倍の共振が生じる。これを利用して、③式を用いてコンクリート内部欠陥までの距離や剥離深さを推定することができる。

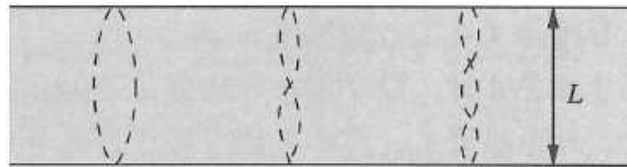
$$L = nV_p / (2f) \quad \dots\dots\dots ③$$

ここに、 L：欠陥深さ

n：共振周波数の次数

V_p ：弾性波伝播速度

f：共振周波数



一次モード 二次モード 三次モード

(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p116 参考)

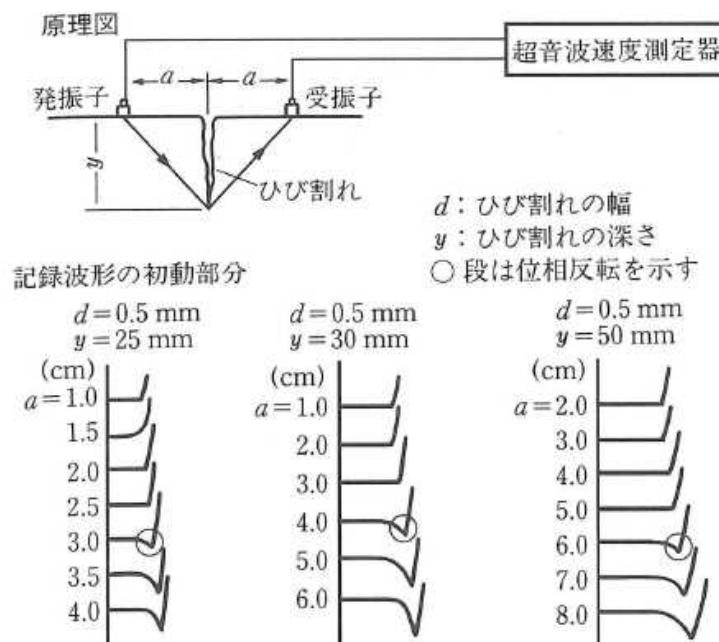
【弾性波の厚さ方向共振の概念図】

弾性波の共振周波数測定による水平ひび割れ位置測定の方法及び手順を以下に示す。

- ①水平ひび割れの可能性のある範囲を選定する。このとき与える衝撃と受振子の位置は同一にはできないが、受振子近傍で衝撃を与えることにより同位置での受・発振とみなす。共振測定ではその位置での深さ方向の共振測定となるので、例えば、200mm 間隔等で測定範囲内に測定点をあらかじめマーキングしておく。
- ②受振子を設置する表面の汚れを取り、必要に応じて表面を平滑にする。
- ③受振子に接触媒質を塗布し、壁面に密着させる。
- ④ハンマーで受振子近傍の壁面を打撃するとともに受信波形を取り込む。インパルスハンマーを用いる場合であれば、インパルスハンマーからの出力をトリガーにして受信波形を取り込むようにする。

3) 受信波の位相変化によるひび割れ深さ測定

ひび割れ深さ測定として位相を利用した場合、次図に示すように、位相が反転する受発振子間隔がひび割れ深さの2倍にほぼ等しいので、受・発振子間隔を変えてこれを求めることによりひび割れ深さを推定する方法である。この手順を以下に示す。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p117 参考)

【位相変化を利用したひび割れ深さ測定例】

- ①表面に見えるひび割れを挟んで、その直角方向の想定されるひび割れ長さ以上に測線を設ける。これにひび割れからの距離が分かるようにマーキングしておく。
- ②側線上のコンクリート表面の付着物を取り除き、表面を平滑にする。
- ③側線上に接触媒質を塗布し、ひび割れを挟んでひび割れ近傍に受振子、発振子を壁面に密着させる。
- ④発振子と受振子の位置をひび割れに対して線対称になるように保ち、ひび割れから遠ざかるように移動しながら受信波形を観察する。
- ⑤受信波形の立ち上がり部が図のように上向きから下向きに変化する点を探し出し、ひび割れからその位置までの距離をひび割れ深さとする。

4) 振幅分布の測定による方法

一定の打撃エネルギーでコンクリート表面を打撃した時に、条件が同一であればほぼ同様な弾性波が発生する。一方、内部に空洞や剥離が存在するような条件の異なる場合では、弾性波の伝播がこれらによって妨げられるために打撃点近傍の受振波の振幅が大きくなる。ここでは、インパルスハンマー（ヘッド質量 200g）及び打撃音を用いて剥離位置の検出を行う方法及び手順について述べる。

- ①剥離が懸念される範囲を選定し、碁盤目状に測定点をマーキングする。測定間隔は求めたい剥離寸法を目安に定める。
- ②打撃点の表面に付着物があればこれを除去する。打撃音で弾性波を取得する場合は、表面の平滑度はあまり問題にならない。
- ③マイクロフォンをマーキング位置のコンクリート表面に近いところに設置する。
- ④インパルスハンマーにてマーキング位置を打撃し、弾性波を発生させるとともに、これをトリガーとしてインパルスハンマー出力値及び打撃音を波形収録機に取り込む。
- ⑤インパルスハンマー出力値で打撃音入力値を除いたものを振幅比として計算し、各測定点の振幅比から等高線図を作成する。振幅比の大きい箇所を剥離位置と判定する。

打撃音測定波形について、④式に示すようにインパルスハンマーによる打撃入力波形の最大値で打撃音振幅最大値（絶対値）を除いたものを振幅比とする。これは、一定エネルギーの打撃を行う代わりに打撃入力値を既知として無次元化を図るためである。

$$R_A = A_m / A_i \quad \dots\dots\dots ④$$

ここに、 R_A ：振幅比

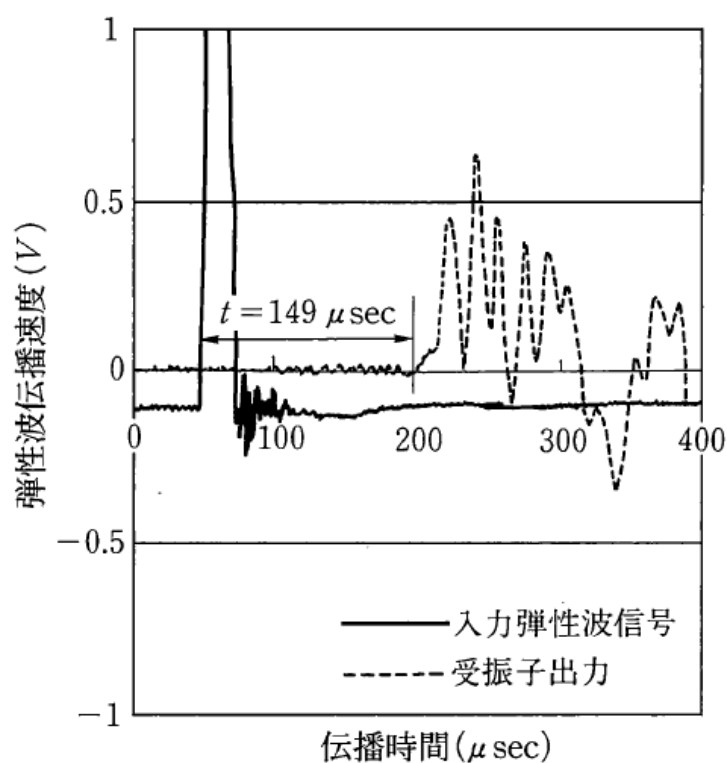
A_m ：打撃音最大振幅

A_i ：インパルスハンマー最大振幅

(4) 試験結果の活用

1) 伝播時間測定によるひび割れ深さ測定

次図は、ひび割れの両側 150mm 間隔でセンサを設置し、パルス波を与えたときの入力波及び受振波を表示した例である。図によれば、弾性波伝播時間 t は $149\mu\text{sec}$ であった。このときのコンクリートの縦波弾性波速度は 4270m/sec であったので、①式よりひび割れ深さは 281mm と計算された。

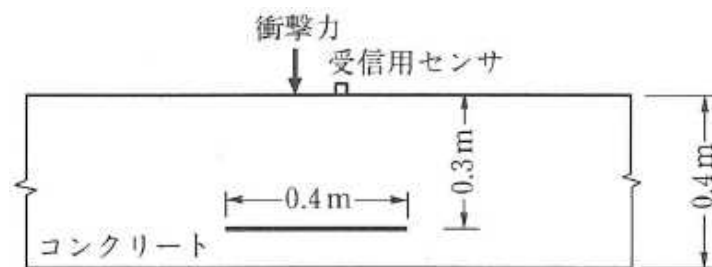


(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p115 参考)

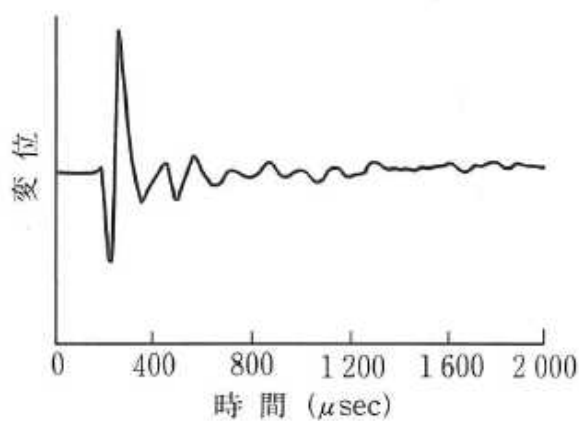
【弾性波伝播時間の測定例】

2) 周波数測定による水平ひび割れ位置測定

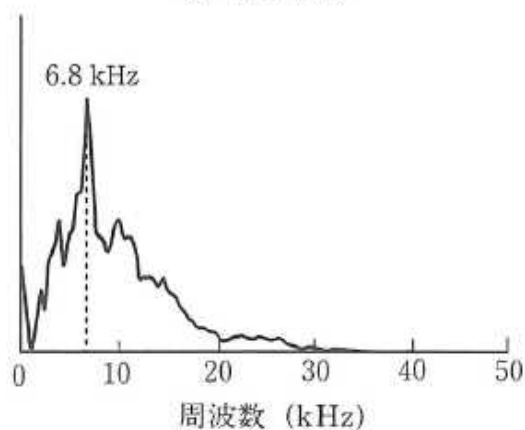
次図は、内部に水平なひび割れを有するコンクリートを衝撃弾性波法によって測定した例を示したものである。測定の結果、 6.8kHz に一次共振周波数と思われる卓越周波数が認められた。縦波弾性波速度 V_p が 3910m/sec であったので、これを③式に代入してひび割れまでの深さは 290mm と計算された。



(a) モデル供試体



(b) 記録波形



(c) スペクトル図

(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p116 参考)

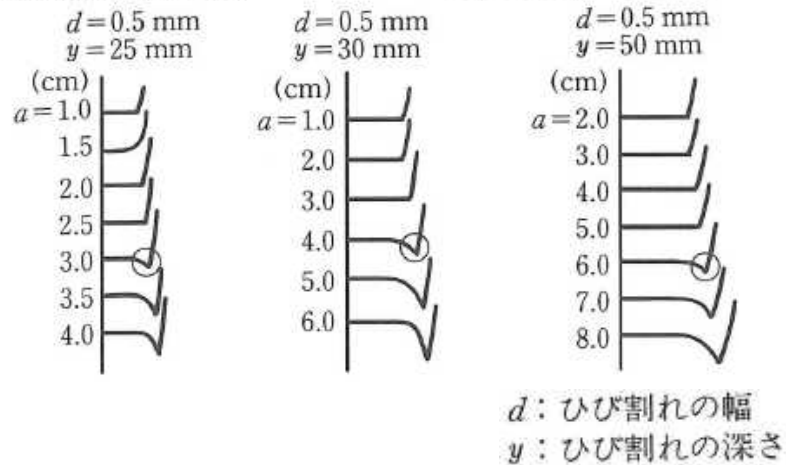
【衝撃弾性波法による共振周波数の測定例】

3) 受信波の位相変化によるひび割れ深さ測定

ひび割れ深さ測定として位相を利用した例を示す。次図の測定例では、ひび割れ深さ 25、30、50mm に対して、位相反転が認められた位置がそれぞれ 30、40、60mm となり、位相が下向きになる直前の距離がひび割れ深さに相当していることが分かる。

記録波形の初動部分

○ 段は位相反転を示す



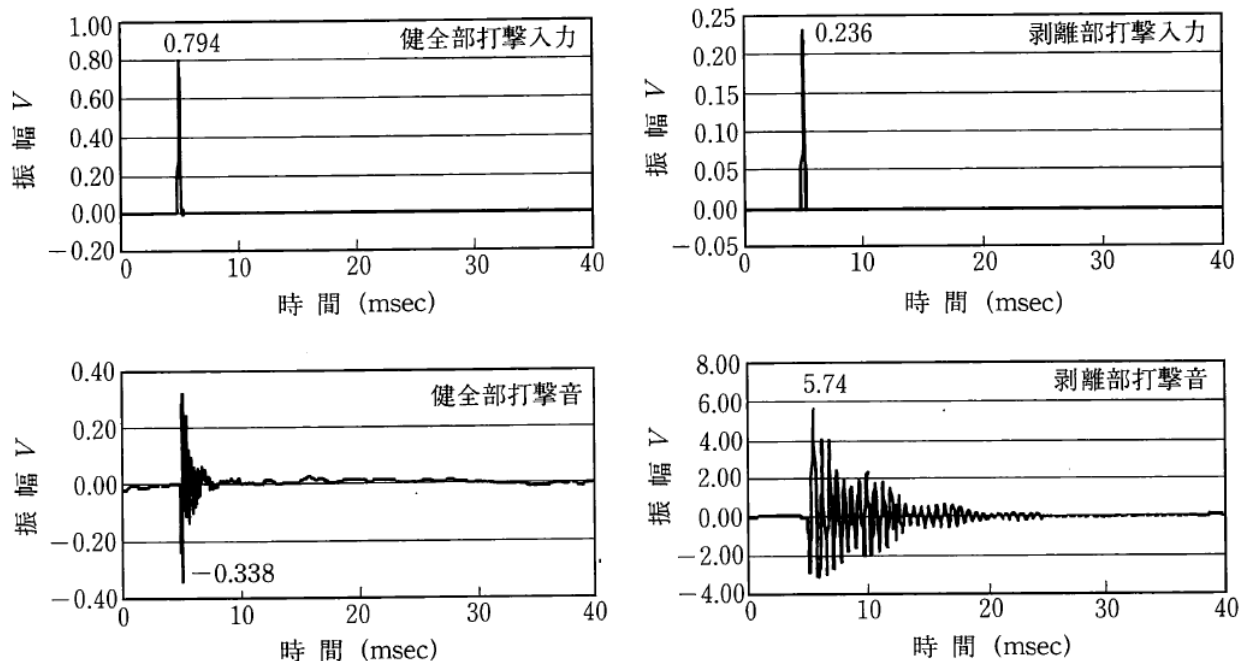
(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p117 参考)

【位相変化を利用したひび割れ深さ測定例】

4) 振幅分布の測定による方法

次図は健全部及び剥離部の打撃音測定波形である（なお、ここでは振幅は特に物理量に変換していない）。この波形について、④式を用いて振幅比を求めた。

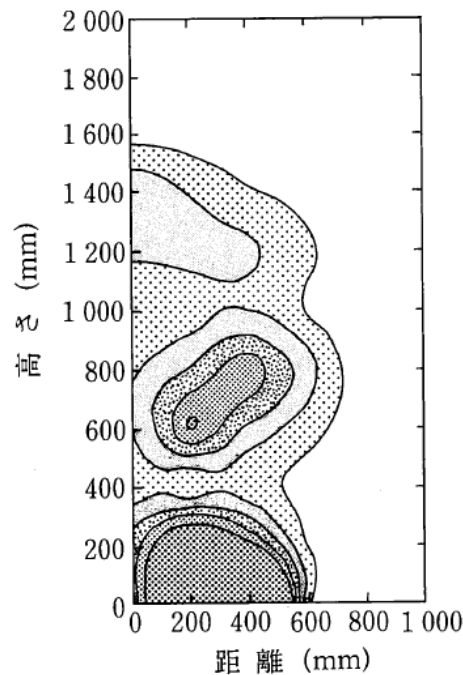
本例では健全部で 0.42、剥離部で 24.3 となり、剥離部で非常に振動しやすい状態となっていることが分かる。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p118 参考)

【健全部と剥離部の打撃入力波形及び打撃音の例】

これらの等高線図を作成したものが下図である。本例では、事後のはつりによって振幅比の大きな箇所に鉄筋腐食による水平ひび割れが観察された。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p118 参考)

【振幅比等高線図の例】

(5) 精度・適用限界

弾性波法は、ひび割れ、剥離、空洞（コンクリート内部及び背面）を有するコンクリート構造物を対象とし、適用範囲が広い。利用する周波数範囲が高いものはコンクリート中での減衰が大きいので、50kHz 程度以上の高周波数を利用する場合は、部材寸法や欠陥深さが 2～3m 程度の範囲が限度となる。逆に数 kHz 程度以下の低周波数を用いる手法では伝播距離を 10m 以上とすることができるが、測定精度は低下し、検出可能な欠陥の寸法は大きくなる。

弾性波の伝播速度を測定する手法では、精度は理論的には、測定機器の時間分解能、及び受信波形の立ち上がり部の読取り精度に影響される。測定距離、伝播弾性波の減衰の程度によって精度は異なってくるが、弾性波速度 4000m/sec で読取り誤差 $2\sim 3\mu\text{sec}$ があり得るとすれば、10mm 前後の測定誤差は生じると思われる。

一方、共振周波数測定においては、理論的には測定機器の周波数分解能に影響される。通常の F F T 処理であれば、分解能は読取り周波数範囲 $1/400\sim 1/1600$ 程度の周波数分解能になるので、周波数範囲を 20kHz として $1/400$ の分解能とすれば、周波数分解能は 50Hz となる。弾性波速度 4000m/sec で深さ 400mm の空洞を検出するとすれば 5000Hz の共振周波数が得られるが、25Hz の誤差がこれに生じるとすれば $\pm 2\text{mm}$ 程度の誤差となる。位相反転、応答振幅に関しては理論的に誤差を論じるのは困難である。

一方、実構造物への適用を考えると、上記の精度は測定条件によって大幅に低下する可能性がある。したがって、測定条件を考慮して必要に応じて削孔等を実施して確認試験を行うことが望ましい。実構造物への適用に当たって、誤差要因となる項目を以下に列挙する。

- ・コンクリートの品質の局部的なばらつき
- ・ひび割れ内のエフロッセンス等の充填物
- ・コンクリート表面の劣化
- ・ひび割れ深さ、空洞形状等が一樣でないこと
- ・コンクリートの含水状態
- ・コンクリート中の鉄筋や鋼材の影響
- ・測定環境における振動や騒音等のノイズの影響

弾性波は全ての固体を伝播するので、理論的にはどのような構造物にも適用可能である。例えば、鋼板巻きによる補強を実施した柱の内部コンクリートの調査も可能である。ただし、現実的な適用限界としては、以下のような項目が考えられる。

①弾性波の減衰による限界

周波数の高い弾性波ほどコンクリートの不均質性の影響を受け減衰が大きい。このため、超音波を用いた手法では伝播距離で2～3mが限界である。これ以上の伝播距離を必要とする測定は困難である。

②周波数による限界

打音法では、測定周波数範囲が20kHzに限定されている。20kHzの波の半波長はおよそ100mmであり、これ以上短い共振が生じる場合には20kHz以上の波を発生、受信しなければならないので、通常のマイクロフォンでは測定不可能である。

③複数の欠陥が重層している場合

コンクリートと空気の間ではそのエネルギーのほとんどを反射してしまうので、更にその背面に欠陥があったとしても、これを検知することは困難である。

④欠陥の寸法に関する限界

振幅分布を測定して欠陥の有無を判断する場合、欠陥が小さいと評価不能になる。一般に欠陥の深さと同等以下の寸法の欠陥の検出は困難とされる。

⑤欠陥の形状による限界

欠陥の形状が複雑なために共振周波数が生じない場合には、明確な卓越周波数が存在せず評価が困難になる。

弾性波を用いた手法の中で比較的早くから研究が行われてきた超音波法では、発振子や受振子を対象に密着させるために表面研磨や接触媒質の塗布等が必要であり調査に時間がかかるという難点があった。しかしながら、最近では、接触媒質を使わず連続的に弾性波を測定する装置や、マイクロフォンやレーザー加速度計を用いて非接触で弾性波を測定する装置の開発が進み、調査の高速化への期待も高まっている。今後、安価で高速な測定手法と、それに対応した分析手法の開発が望まれる。

【参考資料② コンクリート開水路の長寿命化対策検討例】

コンクリート開水路の詳細調査の実施から対策工法の選定までの検討例を作成した。検討例は以下の2例とした。

①通水性の回復

部材表面の粗度改善により通水性の回復を図った例

②耐久性の回復

凍害の進行した部材の断面修復により耐久性の回復を図った例

事例① 通水性の回復のための長寿命化対策検討例

1. 対象施設の諸元

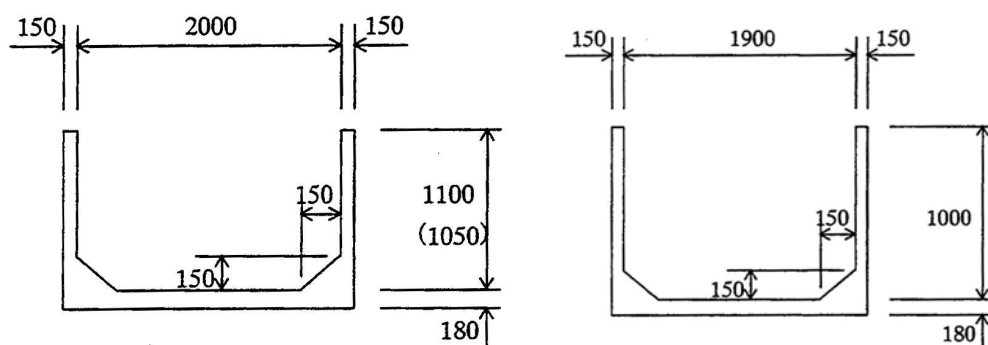
本事例は、昭和 40 年代に施工され供用後 30 年を経過したフリューム(現場打鉄筋コンクリート構造、B 1,900×H 1,000 ほか)の補修検討事例である。対象とするフリュームは、建設後長期間経過し、水面下には流水による摩耗が見られた。

なお、地盤沈下等によるとみられる逆勾配が発生している区間があったが、水理計算の結果、水理的な問題はないことが判明した。

以下に、対象施設の概要と標準断面図を示す。

【補修検討施設の概要】

施 設 名	A 地区 B 幹線水路
当初施工年度	昭和 45 年(1970 年)
機能診断等実施年度	平成 10 年度(1998 年)～平成 16 年度(2004 年)
供 用 年 数	35 年
構 造 形 式	フリューム(現場打鉄筋コンクリート構造)
施 工 延 長	L=2,712m
施 工 断 面	B 2.0m×H 1.1m、B 2.0m×H 1.05m、B 1.9m×H 1.0m
計 画 通 水 量	Q=0.999～0.723m ³ /s
立 地 環 境	幹線水路の周辺は建設当時、田園地帯であったが、都市化の進展とともに家屋が隣接して建設された区間もあり、工事施工の制約となっている。



かぶり厚（設計値）：側壁外側 50mm、側壁内側 100mm、底版 50mm

【補修検討施設の標準断面図】

2. 長寿命化対策検討のための調査

(1) 変状の概要（着目した変状形態）

水面下部分は流水により 5mm 程度の摩耗が見られ、粗骨材が露出する状況であった。また、目地の損傷や不同沈下によると思われるひび割れ、乾燥収縮による微細ひび割れ等も散見された。ただし、目地部のずれ等はなく、漏水の可能性は認められなかった。既設コンクリートの老朽度判定のために、中性化深さの測定と圧縮強度試験等を実施した結果、コンクリートの中性化の進行が確認されたものの当面は中性化に対する耐久性は保持されると評価された。一方、圧縮強度は、大部分が現行の設計基準強度 21N/mm²を上回り、強度上の問題はなく、構造計算上も安全であった。

(2) 調査方法・調査結果

【調査項目と調査結果】

調査項目	調査内容	調査結果	評価指標	評価結果									
①外観 (共通調査)	豆板、コールドジョイント、表面気泡、ひび割れ、浮き、剥離、錆汁・鋼材露出、エフロレッセンス、汚れ、すりへり、たわみ、変形、漏水、目地材の劣化などを把握する。	以下の変状が見られた。()内は箇所数を示す。 ひび割れ(14)、浮き(5) 鉄筋の露出(16) 剥離(10) すりへり(13) 欠損(カドカケ)(12) 沈下(2)、段差(1) 止水板外れ(1)、漏水(2)		局所的な鉄筋露出があるが、特に、摩耗(推測)によるコンクリートの断面欠損が著しい。									
②コアの外観 (共通調査-はつり試験)	ひび割れの深さや方向性、骨材の分布や反応環、ゲルの析出状態等を把握する。	コンクリートの粗骨材の最大寸法は 25mm～30mm である。 コアには微細ひび割れやゲル等の析出は見受けられない。		比較的密実なコンクリートである。									
③かぶり (共通調査-はつり試験)	はつり調査により露出した鉄筋の配筋状態を測定する。	側壁外側 D=50～80mm (平均 μ 62mm、標準偏差 σ 10.1mm) 側壁内側 D=34～70mm (平均 μ 60mm、標準偏差 σ 13.4mm) 底版 D=61～138mm (平均 μ 83mm、標準偏差 σ 28.6mm)	設計値… 側壁外側 50mm 側壁内側 100mm 底版 50mm	設計値より小さい値があり、施工不良の可能性はある。									
④鉄筋腐食 (共通調査-はつり試験)	はつり調査により露出した鉄筋の腐食状態を把握する。	コア削孔の観察からは鉄筋腐食はない。	腐食グレードⅠ(点錆程度)～Ⅳ(断面欠損が著しい)	腐食グレードⅠはつり部では、鉄筋は健全である。									
⑤中性化 (劣化程度把握調査)	採取したコアで中性化深さを把握する。(JIS A 1152) 中性化残りにより鉄筋の腐食の可能性を判断する。	中性化深さ：0.8～36.8mm(平均 12.2mm)である。 中性化残り：21.8mm(最小かぶり 34mm－平均中性化深さ 12.2mm)	中性化残りの許容値は 10mm	中性化残り 10mm に迫る箇所があり、今後、中性化による腐食が懸念される。									
⑥圧縮強度 (要因特定調査)	コンクリートの強度を把握する。(JIS A 1107、1108)	19.8～43.8 N/mm ² (平均 26.5) 設計基準強度比 94～208%(平均 126%)	設計基準強度 21N/mm ²	設計基準強度をほぼ満足している。									
⑦鉄筋引張応力度 (劣化程度調査-耐荷性低下の評価)	構造計算により各部材の応力度を算出する。	<table><tr><td>場所 荷重</td><td>計算値 (N/mm²)</td></tr><tr><td>A 号開渠 群集荷重 T3</td><td>103 (OK)</td></tr><tr><td>B 開渠 群集荷重 T3</td><td>85 (OK)</td></tr></table>	場所 荷重	計算値 (N/mm ²)	A 号開渠 群集荷重 T3	103 (OK)	B 開渠 群集荷重 T3	85 (OK)	<table><tr><td>許容値 (N/mm²)</td></tr><tr><td>157</td></tr><tr><td>157</td></tr></table>	許容値 (N/mm ²)	157	157	許容応力度以下にあり、安全と評価される。
場所 荷重	計算値 (N/mm ²)												
A 号開渠 群集荷重 T3	103 (OK)												
B 開渠 群集荷重 T3	85 (OK)												
許容値 (N/mm ²)													
157													
157													

※「診断内容の基準」、調査時の最新版を適用

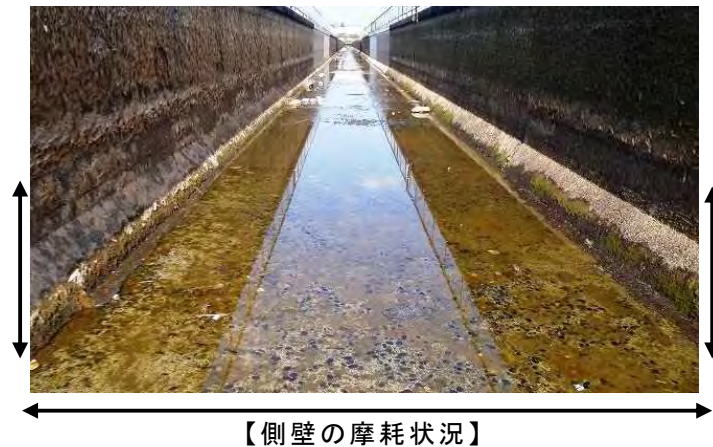
コンクリート防食指針(案)、平成 9 年 6 月、(財)下水道業務管理センター

コンクリート標準示方書、土木学会

コンクリートの診断技術' 04、平成 16 年 1 月、(社)日本コンクリート工学協会

土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」、平成 13 年 2 月、農林水産省農村振興局

側壁下部と底版
部の「摩耗による
粗骨材露出・剥
離」



(3) 調査結果と健全度評価

1) 鉄筋腐食環境

現場水路にはコンクリートのかぶり厚不足や中性化の進行が確認されたことから、現場コンクリートの中性化進行に関する評価を行った。

- a. 側壁の中性化深さ(測定値)は 0.8～36.8mm であり、中性化深さの平均値は 12.2mm であった。一方、主鉄筋の最小かぶりは 50mm、配力筋の最小かぶりは 34mm であった。
- b. ルート t 則と中性化深さの平均値を用いて、現場水路の中性化速度係数 α を求めると、

$$\alpha = \frac{12.2}{\sqrt{30}} = 2.23 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$$

となる。

中性化残りが 10 mm で鉄筋の発生の可能性が生じるとする。これは、中性化深さが 34-10=24mm に達した時である。完成から t 年後に中性化深さが 24mm に達したとすれば、

$$2.23\sqrt{t} = 24$$

この式を解くと、t=116 年と求まる。よって、116-30=86 年から、今後 80 年程度は中性化に対する耐久性は保持されると評価できる。ただし、コンクリートのかぶりは部分的に小さい部分もあり、大きくばらつくと考えられる。今後の継続監視の段階で錆汁やひび割れの発生が確認された場合は、状況に合わせた補修・補強を行う。

2) 粗度係数と必要水路高の試算

本施設では、特に部材表面の平滑さが損なわれているため、区間の運用時における水深と流速（計測値）に基づき Manning 式（水路勾配と断面形状は施設管理図で確認）で求めた概略の現況粗度係数から、水力計算によって水路壁高の過不足を試算した。その結果、現行の粗度では、増水時に水路高が不足する可能性のあることが確認された。

- a. 地盤沈下等により水路底には、凹凸や逆勾配が生じている区間もある。
- b. 各路線・各断面の等流計算と不等流計算を実施した。流量は、設計流量と設計流量の 1.2 倍した流量に対して行った。（水路工 P200(4)流量比率による余裕高）
- c. 現況の粗度係数を下表に示す。

【現況の粗度係数の設定】

区分	現 況		建設当初（想定）
粗度係数	n=0.017		n=0.015

- d. 現況では、5 地点で断面不足が生じている。その不足水路壁高は、0.015～0.092m である。

【水理計算による必要水路高の試算】

区間	構造	設計 流量 Q (m³/s)	設計流量 Q 時		1.2Q 時	
			水深 (m)	水路高－ 水深(m)	水深 (m)	水路高－ 水深(m)
A 区間	フ リ ュ ー ム B2.0m × H1.1m	0.999	0.915	0.185	1.115	－0.015
B 区間	フ リ ュ ー ム B2.0m × H1.1m	0.999	0.932	0.168	1.139	－0.039
C 区間	フ リ ュ ー ム B2.0m × H1.0m	0.723	0.873	0.127	1.043	－0.043
D 区間	フ リ ュ ー ム B1.8m × H1.71m	0.723	1.625	0.085	1.802	－0.092
E 区間	フ リ ュ ー ム B1.8m × H1.0m	0.723	0.902	0.098	1.081	－0.081

3. 回復又は向上すべき施設の性能の設定

(1) 変状要因とその程度の分析

1) 中性化

中性化の将来予測からは、本水路では今後 80 年程度は中性化に対する耐久性は保持されると評価できる。ただし、コンクリートのかぶりは部分的に小さい部分もあり、大きくばらつくと考えられる。今後の継続監視の段階で錆汁やひび割れ等の発生が確認された場合は、状況に合わせた補修・補強が必要である。

2) 摩耗

すりへりは、全区間の底版・側壁水中部に見られ、すりへり厚さ 5mm 程度であり、粗骨材が露出している。流水には土砂を混入しており、土砂のすり磨き作用によるものと考えられる。そして、摩耗により今後もさらに断面のすりへりが進行するものと予測される。

(2) 回復又は向上すべき性能の設定

本施設では、摩耗による粗度係数の上昇により通水性が低下しているものと評価されたことから、水理性能を回復することで通水性を確保することが求められる。

また、将来的には中性化による鉄筋腐食が懸念されたことから、次いで耐久性の確保も考慮すべきである。

4. 補修対策方針の設定

本施設の劣化過程は摩耗－Ⅱ進展期後期～Ⅲ加速期前期(粗度悪化による流量低下あり、

ただし鉄筋腐食による耐荷力低下なし）であり、これに対応する工法を選定する。

本施設における補修工時には、部材表面の粗度係数が改善でき、かつ通水断面の縮小を最小限にでき、水理性能を回復する効果が期待できる工法が求められる。

また、中性化の進行を抑制できる耐久性にも優れた工法とする必要がある。

さらには、本水路は、住宅が密集している場所もあることから、新たに迂回路線を設置する方法や拡幅などによる改修は困難である。よって、非かんがい期間内で施工でき、現行の水路断面を変えることのない対策が求められる。

以上を踏まえて、補修対策に求める性能を以下のように設定した。

- ・粗度係数を建設当時の $n=0.015$ （平滑なコンクリート平面粗度の一般値）以下に改善すること。ただし、 $n=0.010$ を下回ってはいけない（必要水位の確保に支障を来す可能性があるため）。
- ・通水断面の縮小が最小限であること。
- ・摩耗環境下でも一定の耐摩耗性を有すること（水砂噴流摩耗試験（水砂噴流、水圧 M Pa、10 時間）後の「被覆材平均摩耗深さ／標準モルタル供試体平均摩耗深さ」が無機系材料で 1.5 以下）。
- ・密実で中性化因子（空気中の二酸化炭素）が侵入し難いこと（JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験（促進期間 4 週間）によって $\sqrt{t}$ 則で算出した中性化速度係数が $18\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ 以下）。
- ・ひび割れ追従性や耐候性に優れること。
- ・非かんがい期間中で施工できること（施工性に優れること）。

5. 工法・材料の選定

本施設の劣化過程は、図 5.4-6 によれば摩耗Ⅱ進展期後期～Ⅲ加速期前期であり、現時点では大部分で部材表面のモルタル部が欠損している状態であるため※、表面被覆によって機能回復することを基本として具体的な工法選定を行う。また、局所的に鉄筋露出している箇所については、表面被覆の前に断面修復を行う。

※Ⅱ進展期では継続監視による対応がとられるケースが多いが、本施設では粗度悪化による通水機能への影響が大きいと評価されたため、現段階で対策を行う方針とする。

表面被覆工は、無機系被覆工法、有機系被覆工法※、パネル工法※、シート工法※に分類されるが、およそ建設当初の粗度係数が得られ、施工実績が多く品質の安定する無機系被覆工法を選定する。

※有機系被覆工法、パネル工法、シート工法は、効率的に粗度改善を図ることができるが、反面粗度が下がり過ぎて必要水位を維持できなくなることが否定できない（水理検討では水位低下程度が完全には想定しきれない）。また、有機系材料では、母材表面が乾燥していることが施工時の前提となること、太陽光（紫外線）や外気温

の変化などに対する耐候性にも課題がある。

そして、無機系被覆工法の中から、通水性能が回復（被覆材の粗度係数 $n=0.012\sim0.013$ 程度、塗膜厚は約 10mm）でき、耐摩耗性（被覆材の平均摩耗深さ／標準モルタル供試体の平均摩耗深さ=1.0、要求性能は 1.5 以下）と劣化因子を遮断（被覆材の中性化速度係数 5mm/√年、要求性能は 18mm/√年以下）する効果が期待でき、耐候性や施工性にも優れる工法 A（下表参照）を選定する。

【対策工法の比較】

対策工法	通水性能への影響			劣化因子侵入抑制	ひび割れ 追従性 (抵抗性)	耐候性	施工性 (母材湿潤状態への対応等)	施工実績	経済性	総合評価	
	粗度回復	断面縮小	耐摩耗性								
	粗度係数n ○:0.012~0.015 △:~0.012 ×:0.015~	被覆材厚t ○:~20mm △:20~35mm ×:35mm~	被覆材摩耗深さ/標準供試体摩耗深さ ○:~1.5(無機系) ×:1.5(無機系)~	中性化速度係数 ○:~18mm/√年 ×:18mm/√年~							
無機系被覆工法A	○1	○1	○2	○2	△3	○1	○1	○1	△2	○:7個 △:2個	1
無機系被覆工法B	△2	○1	○2	○2	△2	○1	○1	△2	△2	○:5個 △:4個	2
無機系被覆工法C	○1	△2	△3	△3	×4	○1	○1	○1	○1	○:5個 △:3個 ×:1個	4
(参考) 有機系被覆	△2	○1	○1	○1	○1	△2	△2	△2	△2	○:4個 △:5個	3

※ 表中の数字は評価順位を示す。

※ 判定基準を満たす場合でも、評価順位が3番目は△、評価順位が4番目は×とする。

事例② 耐久性の回復のための長寿命化対策検討例

1. 対象施設の諸元

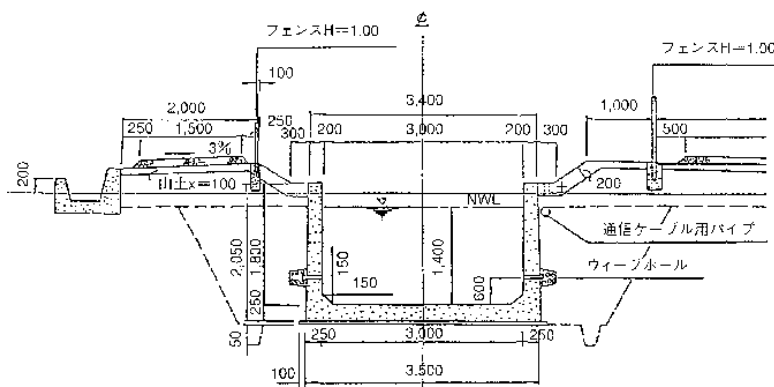
本事例は、昭和 40～50 年代に施工され供用約 20 年を経過したフリューム（現場打鉄筋コンクリート構造、平均 B 2,500×H1,800 ほか）の補修検討事例である。

対象とするフリュームは、寒冷地に立地し、側壁天端部の隅角部に角落ち、ひび割れ、剥離が確認された。これらの状況から、変状の生じた主原因は、凍害と推定された。

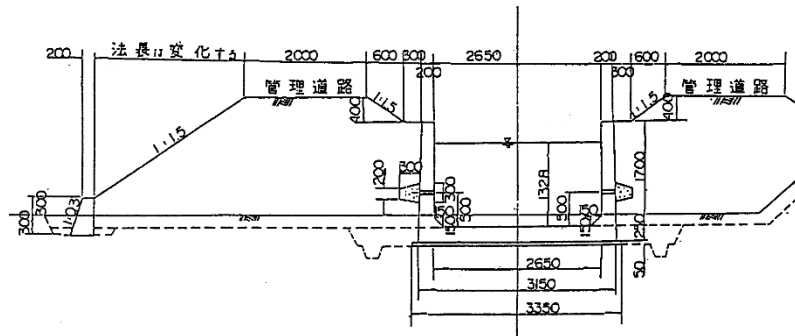
以下に、対象施設の概要と標準断面図を示す。

【補修検討施設の概要】

施設名	B 地区 C・D 幹線水路		
当初施工年度	昭和 43 年度～昭和 55 年度(1968～1980 年)		
機能診断等実施年度	平成 5 年度～平成 8 年度(1993～1996 年)		
供用年数	16～28 年		
構造形式	現場打鉄筋コンクリートフリューム		
施工延長	C 幹線水路 L=3,167m D 幹線水路 L=769m		
施工断面	鉄筋コンクリートフリューム		
	タイプ	内幅(m)	側壁高さ(m)
	開水路タイプ A	2.20	2.10
	開水路タイプ B	3.00	1.80
	開水路タイプ C	2.65	1.70
	開水路タイプ D	2.35	1.45
	開水路タイプ E	2.35	1.85
計画通水量	C 幹線水路 $Q_{\max}=14.3 \text{ m}^3/\text{s}$ D 幹線水路 $Q_{\max}=1.5 \text{ m}^3/\text{s}$		



【補修検討施設－開水路タイプ B の標準断面図】



【補修検討施設－開水路タイプCの標準断面図】

2. 長寿命化対策検討のための調査

(1) 変状の概要（着目した変状形態）

寒冷地に位置し、日射のある面が特に変状が多いこと、スケーリングやポップアウトの特徴を示す粗骨材露出～断面欠損に至る変状が散見され、静弾性係数が低い傾向が確認されたことから、凍害による劣化と推定された。

採取コアの観察からは、材料が脆弱なのは表面近くの部分であり、材料の脆弱性は部材深さ方向に徐々に小さくなることが確認された。局所的に鉄筋腐食は観察されるが、部材の大部分では中性化は鉄筋に到達していないことが確認された。



側壁上部の「凍害によるひび割れとスケーリング」

【側壁のひび割れ等の変状発生状況】

(2) 調査方法・調査結果

【調査項目と調査結果】

調査項目	調査内容	調査結果	評価指標	評価結果
①外観 (共通調査)	部材の隅角部を中心に、断面欠損状況、スケーリング、ポップアウト等の発生状況をスパン毎に把握する。	・日射のある面が特に変状が多い傾向がある。 ・スケーリングやポップアウトの特徴を示す粗骨材露出～断面欠損に至る変状が確認された。 ・かぶり不足により鉄筋が腐食・露出している箇所もある。		側壁天端の隅角部を中心に断面欠損が発生しており、局所的な鉄筋露出も生じている。
②コアの外観 (共通調査・劣化程度調査)	部材内部のひび割れ状況を把握する。 併せてノギス計測により凍害範囲を計測する。	・部材深さ方向に徐々に脆弱部（ひび割れ発生部）が収束する。		表面から徐々に劣化進行、最大で、およそ鉄筋深度まで脆弱化している。
③中性化 (劣化程度把握調査)	中性化深さを把握する。(JIS A 1152) 中性化残りにより鉄筋の腐食の可能性を判断する。	・中性化深さは、水面下の開水路面で平均 25.5 mm。 ・想定したかぶりによる中性化残りは、$t=60-26=34\text{mm}$ となる。	中性化残りの許容値は 10mm	コンクリートは密実ではないため中性化が進んでいるものと評価される。ただし、中性化残りが大きく、(鉄筋露出部を除き)中性化による鉄筋腐食のリスクは小さい。
④静弾性係数試験・圧縮強度試験 (要因特定調査)	静弾性係数が一般値に比して低い傾向があるかを確認する。	・ひび割れの多い部分から採取した試料は静弾性係数の低い傾向が確認された。	静弾性係数の標準値(土木研究所)を参照	部材浅部のひび割れの多い部分(脆弱部)では、凍害が進行している。

※「診断内容の基準」、調査時の最新版を適用

コンクリートのひび割れ調査、補修、補強指針、日本コンクリート工学協会

コンクリートの診断技術' 04、(社)日本コンクリート工学協会

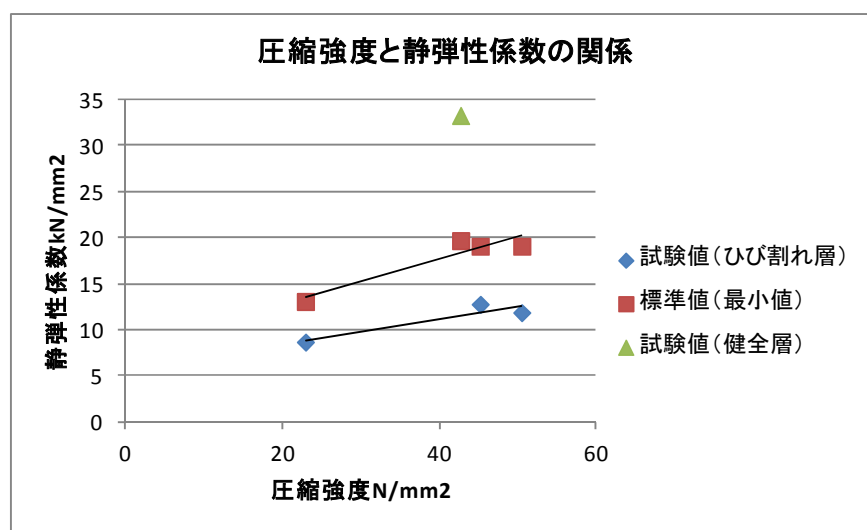
コンクリート標準示方書、土木学会

1) 鉄筋腐食環境

- a. 想定したかぶりによる中性化残り(最小かぶりと平均中性化深さの差)は、 $t=60-26=34\text{mm}$ となり、中性化残りの許容値 10mm を上回る。
- b. かぶり不足により鉄筋が腐食・露出している箇所(すでに腐食環境になっている箇所)も見られた。

2) 弾性係数と圧縮強度の関係にみる凍害の可能性評価

- c. 凍害が発生すると、微細なひび割れが増加することから、弾性係数が低下する。本調査では静弾性係数が標準値よりも低い傾向が確認され、劣化要因が凍害であることが示された。



【一軸圧縮強度試験及び静弾性係数試験の結果】

【静弾性係数の標準値】

コアの圧縮強度 (N/mm^2)	コアの静弾性係数の標準値 (kN/mm^2)
15 以上 21 未満	8.4 ~ 17.8
21 以上 27 未満	13.1 ~ 21.3
27 以上 35 未満	16.2 ~ 25.8
35 以上 45 未満	19.7 ~ 29.8
45 以上 55 未満	19.1 ~ 34.2

出典：土木研究所：既存コンクリート構造物の実態調査結果

3. 回復又は向上すべき施設の性能の設定

(1) 変状要因とその程度の分析

施設の立地環境、変状の特徴、静弾性係数の低い傾向から、凍害による劣化が発生しているものと判断された。

部材深さ方向に徐々に脆弱部が収束していることから、現時点では劣化の途上にあり、今後の凍害の進行によって部材の断面欠損範囲が拡大することが予見された。

また、部材の大部分は鉄筋腐食環境にはないが、局所的には凍害による断面欠損により鉄筋露出もみられ、このまま供用すれば、徐々に鉄筋腐食が生じるものと考えられた。

以上より、本施設の劣化過程は、図 5.4-9 から凍害-Ⅲ加速期（骨材の露出や剥離が生じており、鋼材の腐食により耐荷力低下が一部で始まっている状態。）と判定された。

(2) 回復又は向上すべき性能の設定

本施設では、劣化過程は凍害-Ⅲ加速期にあり、断面欠損により耐荷力の低下が始まっている状態と推定された。このまま放置すれば更なる鉄筋露出・腐食により、構造的な安定性を欠くことが想定される。よって、脆弱化した部分を除去するとともに劣化因子の侵入を抑制することで、耐久性を確保する必要がある。

なお、凍害が進行しているのは、凍結融解が作用する気中部（側壁上部）に限られ、通常の運用水位では水理性能への影響は考慮しなくてよいものと判断された。

4. 補修対策方針の設定

本施設における対策工法は、凍害によってひび割れ等の生じた脆弱化部分を除去するとともに、今後の凍害の再劣化を防止するために、劣化要因となる水の侵入を抑制できる耐久性にも優れた工法が求められる。

また、かんがい期間中は、水路内を空水にできないため、非かんがい期間内で施工できる対策が求められる。

以上を踏まえて、補修対策に求める性能を以下のように設定した。

- ・密実で凍害因子（水分）や中性化因子（空気中の二酸化炭素）が侵入し難いこと。
- ・耐凍害性に優れること（JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法（A法、300 サイクル）による相対動弾性係数が 85%以上）。
- ・ひび割れの生じた脆弱部を除去できること。
- ・母材との一体性とひび割れ抵抗性を有すること。
- ・太陽光（紫外線）や外気温の変化に対する耐候性を有すること。
- ・非かんがい期間中で施工できること（施工性に優れること）。

5. 工法・材料の選定

本施設の劣化過程は凍害-Ⅲ加速期であり、断面欠損が生じているため、断面修復によって機能回復することを基本として具体的な工法選定を行う。

これまでの調査では、ひび割れによる脆弱範囲は鉄筋よりも浅部であることから、鉄筋以浅をはつり取った上で断面修復することを基本とする。はつり取る範囲は、凍害による微細ひび割れ部を確実に取り除くために、目視で確認できる脆弱範囲よりも大きく設定する。

また、施工時に鉄筋以深にまで脆弱部が及ぶ箇所が確認された場合、そのスパンについては、施工中の構造安定性、施工性の観点から、部材打ち換えを行う。部材打ち換えに当たっては、新旧部材の一体性を確保するために、打ち継部に差し筋を配置する。

断面修復工法には、無機系材料として、ポリマーセメントモルタル、セメントモルタル、セメントコンクリート、有機系材料として、ポリマーモルタル等がある。

本施設に適用する断面修復工法は、4. 補修対策方針の設定で挙げた要求性能を概ね満足し、凍害に対する対策工としての施工実績も多い無機系材料A（次表参照）による断面修復を選定する。

【対策工法の比較】

対策工法	劣化因子 浸入抑制	耐凍害性	脆弱部除去	母材との 一体性	ひび割れ 追従性(抵抗性)	耐候性	施工性 (湿潤状態への対応、養生 期間等)	施工実績 (ただし凍害に 特化した実績)	経済性	総合評価	
材料A (無機系材料)	○2	○1	○1	○1	×2	○1	○1	○1	△3	○:7個 △:1個 ×:1個	1
材料B (無機系材料)	△3	△2		○1	×2	○1	○1	△3	○2	○:5個 △:3個 ×:1個	2
材料C (無機系材料)	△3	△2		○1	×2	○1	○2	△3	○1	○:5個 △:3個 ×:1個	2
材料D (有機系材料)	○1	○1		△2	○1	△2	△3	○2	×4	○:5個 △:3個 ×:1個	2

※ 表中の数字は評価順位を示す。

※ 判定基準を満たす場合でも、評価順位が3番目は△、評価順位が4番目は×とする。

※ 鉄筋以深にまで脆弱部が及ぶ場合、そのスパンについては、部材打ち換えを行う。

施工方法としては、局所的には人力はつり、劣化の著しい範囲が広範囲に及ぶところではウォータージェット工法等の適用を検討する。

断面修復工は、対策範囲に応じて、左官～充填（型枠工を伴う）によって行う。

なお、鉄筋露出箇所は、ハツリ作業時に露出箇所周辺までの鉄筋腐食状態を確認した上で、腐食部に防錆材を塗布する。

最終的な施工方法は、試験施工により確定する。