
技術展望

Technical Over View

技術展望

PC グラウト充填状況の非破壊探査法

NONDESTRUCTIVE TESTING METHOD FOR GROUTING CONDITION
IN PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES

藤井 学*・宮川 豊章**

By Manabu FUJII and Toyoaki MIYAGAWA

1. はじめに

コンクリート構造物は適切に設計、施工、維持管理された場合きわめて耐久性に富む構造形式であって、なかでもプレストレストコンクリート（以後 PC と略記する）構造物は長期の耐久性を期待されている。その理由としては種々のものを挙げることができるが、ポストテンション方式の PC 構造にあっては、PC 鋼材はシースの中に配置され、緻密なセメントペーストによってグラウトされることにより十二分に防食されているものと考えられる。

しかし、以上のように優れた耐久性をもつ PC 構造物で、近年意外に早く劣化現象が現われていることが報告¹⁾されるようになってきた。この劣化現象については、通常の鉄筋コンクリート（以下 RC と略記する）構造物と同様なものと、PC 構造物特有の劣化現象に分けることができる。すなわち、前者は、除塩不足の海砂の使用あるいは海塩による塩害あるいはアルカリ骨材反応による膨張などによるものであり、後者は PC 鋼材定着部の損傷、グラウト不良に起因する鋼材腐食などである。PC 構造物のなかでも、大型の比較的重要度の高い構造物はポストテンション方式である場合が多いが、ポストテンション方式の場合、シースと PC 鋼材との間をグラウトで充填することが、PC 鋼材の保護のうえから不可欠の作業である。グラウトを必要としないような、アラミド繊維などの非腐食性の新素材の利用も精力的に試

みられてはいるものの²⁾、まだその性状が完全に明確になったとはいがたく検討されるべき点も多い。したがって、グラウトは今後も PC 構造物にとってきわめて重要な部分を占めるものと考えられる。

このようにグラウト作業の重要性は明らかではあるが、PC 構造物の設計、施工からみた場合きわめて地味な作業であるとともに、十分な信頼性をもって完了することが意外に困難な作業であることが明らかとなってきた。たとえば、実橋におけるグラウト充填状況の調査によれば、何らかの非充填箇所（図-1～5）があった例が報告され、なかにはシース内に水が溜っていた例も報告されている。これらの非充填箇所発生の原因としては閉塞、グラウト忘れなど種々のものがある。これらの原因によって生じた非充填部は、PC 鋼材、ひいては PC 構造物の耐久性にとって重大な欠陥となる可能性が高い。したがって、グラウト充填度の確認は、新設構造物における完工検査あるいは既設構造物の耐久性の検討のうえからもきわめて重要な項目である。しかし、その手法については、削孔あるいは光ファイバーを併用した肉眼による検討などが試みられた例もあるものの、非破壊探査手法としてはまだ確立たる方法論がないのが現状である。

本文では、まずコンクリート構造物を対象として用いられる非破壊検査手法について概観し、PC グラウトの非充填部の推定において用いられる方法について説明を加える。次いで、これらの中でも実績の多い超音波・AE 法について若干の検討例を述べ、現在種々の検討成果が発表されつつある X 線法について調査・研究例を紹介し、実績は少ないものの期待されているレーダー法についても触れ、PC グラウト非充填部の非破壊探査法

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科（同上）

Keywords : grouting condition, nondestructive testing method, spectroscopy, X-ray photograph, radar, thermography



図一1 グラウトが十分に充填されている状況



図一2 グラウト中に部分的な空隙がみられる状況



図一3 シース内に大きな空隙がみられる状況



図一4 非充填部のPC鋼材の様子の例



図一5 グラウト非充填による漏水部

の現状を取りまとめることとする。

2. コンクリート構造物における非破壊検査手法

現在までに、コンクリート構造物に対して適用が考えられた非破壊検査手法は多い。たとえば、BS 1881 : Part 201 : 1986³⁾では、コンクリート構造物に対して用いられる非破壊検査手法として表-1 のような種類をあげている。表-1 に示された手法は必ずしもその信頼性あるいは開発の程度が同一ではなく、1枚の表に示すには適切ではない面もあるが、試験を適用する対象として何を想定しているかを知ることには参考となる。また、コンクリート強度については表-2⁴⁾のようにその推定値の信頼性が報告された例があり、測定値を用いるにあたっての目安となろう。しかし、表-1 に示された非破壊検査手法のなかで、比較的実績が多く信頼性を検討できるようなものは、表-2 の例からも明らかなように、コンクリート強度に関するものである。強度以外の試験方法もあるものの、グラウト充填度の確認に用いることができないものが多い。

現在検討中のものも含めて、何らかの形でグラウトの充填度についての情報を得ることができる方法は、次の

2種類に分類することができる。すなわち、①グラウトの非充填部を直接推定するもの、②グラウトの非充填により生じた劣化を推定するもの、の2種類である。前者については、超音波伝播速度、アコースティック・エミッション、X線等によるものがあり、後者については主としてPC鋼材の腐食を対象とした自然電位、分極抵抗等によるもの⁵⁾があり、以下では前者の直接推定する方法の原理と特徴の概要を示す。

(1) 超音波法

超音波法とは、超音波パルスの伝播特性によって種々の情報を得ようとするもので、可聴音域(20 kHz以下

表-2 コンクリートの現場強度推定の信頼性⁴⁾

手 法	強度推定精度 (95%信頼限界)
コア‘太径’(>100mm) ‘細径’	± 6% ± 18%
ブル・アウト	± 10%
ブル・オフ	± 15%
ブレーク・オフ	± 20%
貫入抵抗	± 20%
超音波パルス伝播速度	± 20%
反発硬度	± 25%
内部破壊 直接引張 トルクメータ	± 20% ± 28%

表-1 非破壊試験法の適用性³⁾

方 法	適 用 の 対 象					
	品質管理	施工能 力の標 準化の 研究	脱型、ブ レストレス の導入、 荷重開放 の制御	実構造物 における コンクリート の品質の 比較検討	耐久性 診断の 研究	火災、 凍害、 化学作 用等の 研究
ブル・アウト試験(埋込み)	×		×			
ブル・アウト試験(削孔)	×		×	×		×
内部破壊	×		×	×		×
ブレーク・オフ試験	×		×			
ブル・オフ試験	×		×	×		
貫入抵抗	×		×	×		
表面硬度	×		×	×		×
ひっかき試験	×			×		×
動的応答	×	×		×		
超音波パルス伝播速度測定	×	×	×	×	×	×
アコースティックエミッション		×			×	
電磁かぶり測定	×	×			×	
レーダー		×		×		
放射線透過法		×				×
γ線	×	×		×		
中性子水分測定				×		
中性化深さ				×	×	
初期表面吸水				×	×	
表面透水					×	
電気抵抗測定				×	×	
自然電位測定					×	
ひずみ測定		×	×	×	×	
赤外線映像法					×	
マチュリティーモード			×			
共鳴振動数	×					×

程度)を超える周波数帯の波動を入力するため一般に超音波法と呼ばれている。透過超音波パルスの周波数成分に着目した超音波スペクトロスコピーやが提案されているが、現在最も一般的な手法はその伝播速度による評価であろう。なお、最も速く伝播すると考えられる縦波の速度は、伝播母材が弾性体であれば次式で得られる。

$$V_p = \sqrt{(1-\nu)E/\rho(1+\nu)(1-2\nu)}$$

ここに、 V_p ：速度、 ρ ：密度、 ν ：ポアソン比、 E ：弹性係数

しかし、コンクリート中にひびわれあるいは空洞などの欠陥が存在する場合、コンクリート中を伝播するパルスはその周辺を迂回したりエコーを生じたり等することによって、見掛けの伝播速度など、得られる受信波の特性は異なってくる。これらの情報によって、グラウトの充填度推定が原理的には可能である。なお、手法論的な詳細については参考文献6), 7) 等を参照されたい。

(2) AE 法

アコースティック・エミッション（以後 AE と略記する）とは、固体材料が破壊を生じる際に、系内に蓄えられていたひずみエネルギーが急激に解放され、その一部が過渡的・瞬間的な弾性波となって伝播する現象であるが、広義には、固体材料内部の微少な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象と定義される。AE の計測システムの例を図-6⁸⁾に示す。グラウト充填度についての情報を得ようとする場合には、超音波パルスあるいは打撃などで疑似 AE 現象を生じさせ、これらのコンクリート中の伝播特性から種々の情報を得ることが行われる。したがって、広義の AE の範囲に属する AE であり、本質的には超音波法と異なる。

(3) 放射線透過法

放射線とは放射崩壊によって放出される粒子線(α 線、 β 線、 γ 線)のこと、同程度以上のエネルギーをもつ

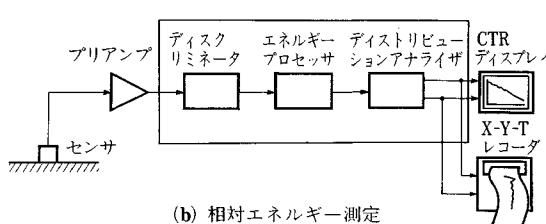
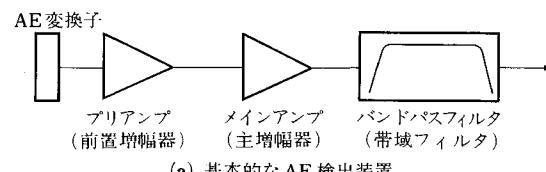


図-6 AE の測定システム例⁸⁾

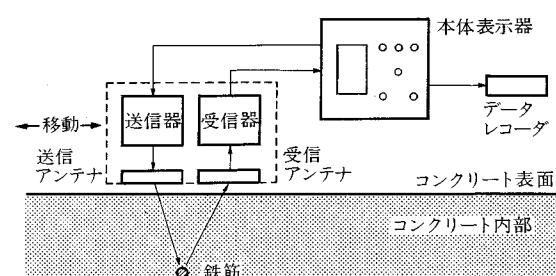
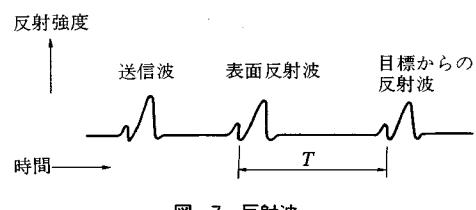
線(X線、宇宙線など)も含まれる。なかでも、X線は、波長が1 Å前後の電磁波であり、数百 Åから10⁻² Åの範囲のものであるが、コンクリート構造物の内部非破壊探査の試みに用いられることが多い。一般には、透過したX線を、X線フィルムなどに定着させることによって、鋼材あるいは空隙のない部分を映像として得ることができる。

(4) レーダー法

パルス幅が1~6 ns程度の短いパルス状の送信波を送信アンテナからコンクリート中に放射し、コンクリートと電気的特性(比誘電率)が異なる物質、たとえば鋼材、空隙などとの界面で反射した波を受信アンテナによって受信することによって、非破壊的にコンクリート内部の性状を知ろうとするものである(図-7, 8参照)。ただし、シース内部の充填度については、シースによる反射が空洞による反射と区別しにくいため、現在の段階では困難であろうと考えられる。

(5) 赤外線映像法

コンクリートの表面温度は、その構成する材料によって比熱、熱電導率などが異なるため、レスポンスが相違し異なる。コンクリート表面の温度特性の異なる領域、すなわちコンクリート表面下に空隙がある部分と健全部は図-9に示すように温度差が生じる。赤外線映像装置は、上記温度差を赤外線センサーによって検知し、映像として表わそうとするものである。コンクリート建築物の外壁の剥離などに主として用いられつつあるが(図-10, 11)、道路床版におけるアスファルトの浮き等にも用いられた例がある。PC グラウトの充填度については、全体のコンクリートのマスに対してグラウト非波法と異なる。



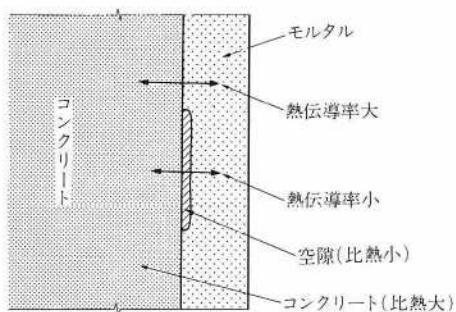


図-9 空隙による熱伝導率の差

充填部の比率が小さいためもあって、まだ検討された例がない。

以上述べたように、グラウトの非充填部の探査に関する検査手法には種々のものがある。しかし、非充填の結果として生じるPC鋼材腐食の測定によって、非充填部を推定することには現在の段階ではまだ限界があり、しかも腐食を生じていない場合には推定が困難であるため、早期の手当、予防保全的な対応が困難である。これに対して、直接的な推定手法は、もちろん限界は有し、その完成度はさまざまではあるものの、予防保全的な対応が可能であり、本報告の主旨に沿うものと考えられる。したがって、以後は直接的推定手法の主要なものについて、現場での適用例を交えながら紹介することとする。

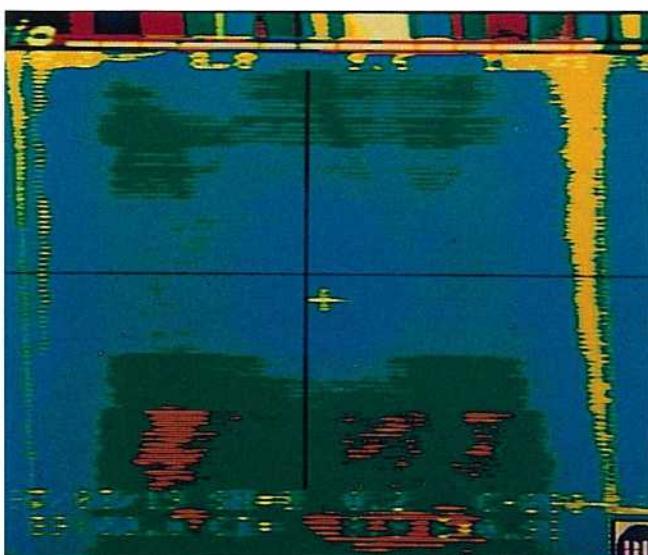


図-10 外壁剥離部の赤外線映像
(プラスマーク付近に剥離を認める)

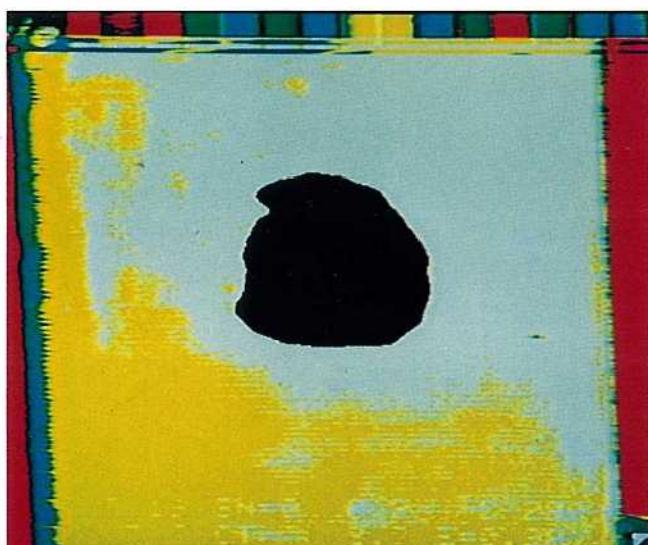


図-11 赤外線映像の画像処理像
(図-10の赤外線映像を
2値化処理し剥離部を抽出した)

3. 超音波/AE 法

超音波法によってシース内のグラウト非充填部などの空隙部を推定しようとした試みは多い。グラウト非充填部は、その周辺にシースが存在しあするものの、一般的な空隙部推定と本質的に変わらないものと考えられるが、ここでは、特にシース内グラウト非充填部について検討された例について紹介する。

(1) 伝播速度による探査

コンクリートは金属材料に比べて伝播速度にあまり差がなく、しかも超音波の減衰が大きいため低い周波数の超音波を用いるため指向性が悪く、反射法よりも透過法が用いられることが多い。たとえば、ポストテンション PC 桁の一部から水漏れが発見され、グラウト非充填部を超音波の透過法により共振周波数 50 kHz の発・受振子を用い図-12 に示す方法で、伝播速度からグラウトの非充填部を推定した例⁶⁾を図-13 に示す。非充填部では明らかに見掛けの伝播速度が低下しており、非充填部の推定が可能であった。調査対象とされた桁は建設後 13 年のもので、降水等による道路表面水が舗装および桁内部の欠陥部を伝わって浸出してきたものと推定された。

(2) スペクトロスコピー等による評価

超音波法であっても、単に伝播速度ではなく、スペクトロスコピーにより得られる他の情報を併せて評価すればより信頼性は高まるものと考えられる。図-14⁹⁾の測

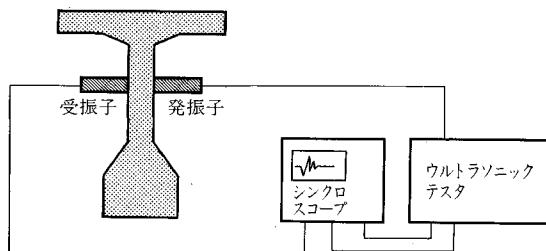


図-12 超音波パルス伝播速度測定法

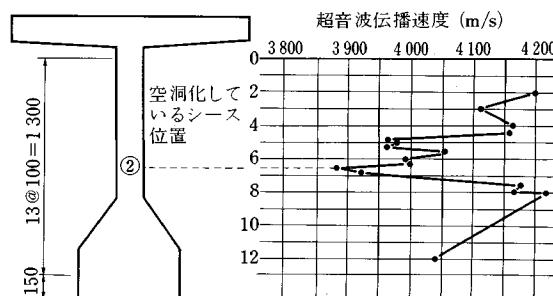


図-13 PC 桁内部の空隙による音速低下⁶⁾

定装置を用い、PC 鋼線 (12-φ 7) を通した 45 mm のシース 3 本を 20 cm 間隔で埋設した供試体について、共振周波数 40.5 kHz の発・受振子を用い、発振子に幅 500 ns、電圧 22 V の矩形インパルスを印加することにより、室内で測定した結果を図-15⁹⁾に示す。グラウトの充填度が低いほど超音波の伝播速度、応答関数の最大エネルギーともに低下している。しかし、全くグラウトしていない場合の伝播速度が 100% 充填している場合の 1% 程度しか低下していないのに対し、エネルギーでは 50% 程度もの低下を示しており、伝播速度のみによる評価よりも充填度の推定を精度よく行うことができるものと考えられる。

グラウトの充填度の検討にあたって用いられている AE 法は本質的には超音波法の一種、特にスペクトロスコピーの一種であると考えてよい。たとえば、図-16 に示す壁面供試体（シース管 5×φ 38.1 mm、PC 鋼棒 5×φ 26 mm）を用いてシース内のグラウト量を変化させて測定を行った例¹⁰⁾を以下に示す。測定としては、AE センサー（共振周波数 150 kHz）を PC 鋼棒上端面あるいはアンカー・プレート上に取り付け、打撃器を用いてシース管を打撃し、その際に伝播される AE エネ

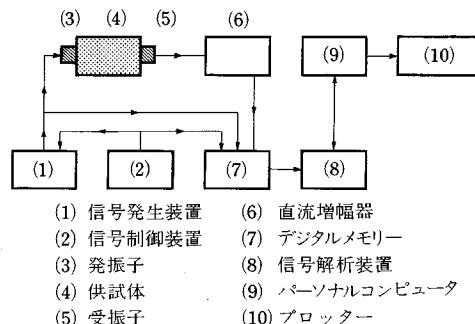


図-14 測定装置のブロックダイヤグラム⁹⁾

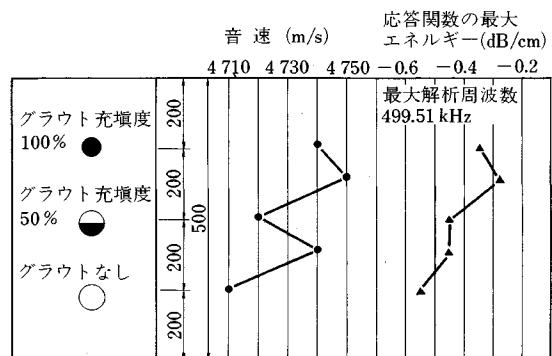
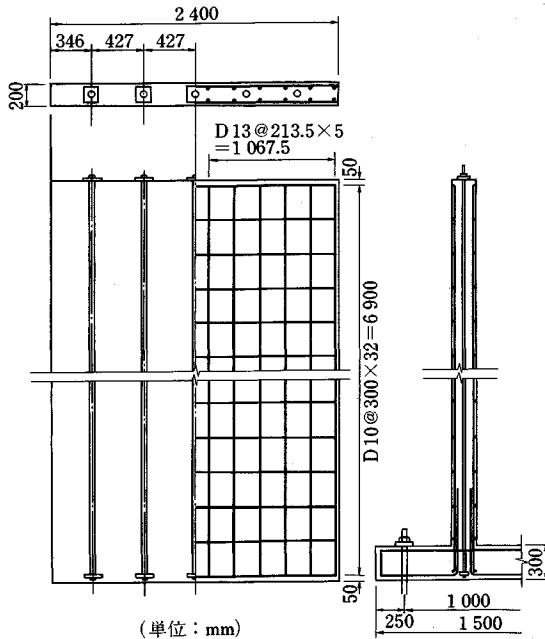


図-15 グラウト充填状況による音速と最大エネルギー変化⁹⁾

図-16 実験用プレストレストコンクリート壁¹⁰⁾

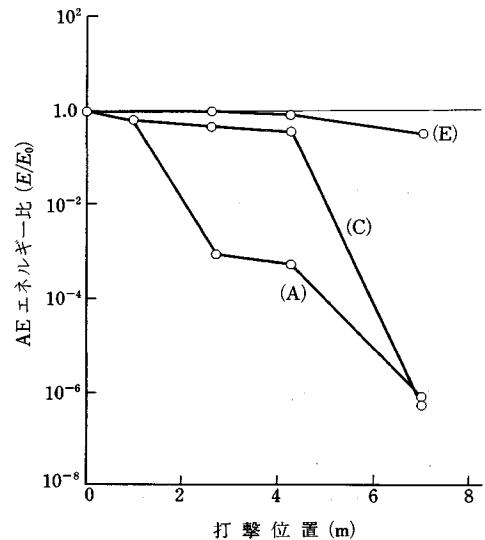
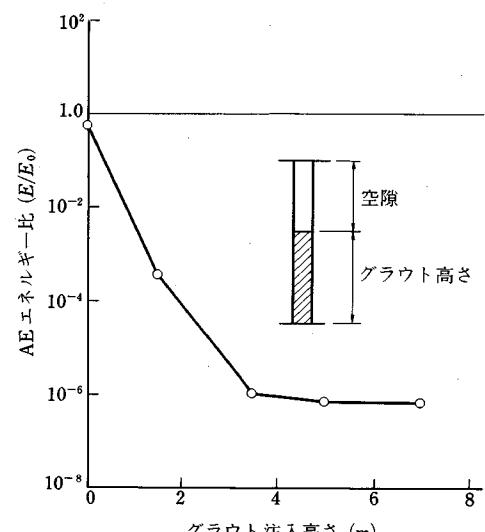
ルギーの測定を行っている。図-17に示すように、打撃点がAEセンサー位置から遠ざかるにつれてAEエネルギー比（打撃位置をセンサー位置に一致させた場合を1.0とし、エネルギーが得られた電圧の3乗に比例するものとして求める）が減少するとともに、グラウト充填部と非充填部との境界で大きな変化を示している。また打撃位置を上端から7mとした場合、図-18に示すように、非充填部の割合の大きなほどAEエネルギー比は大きい。したがって、グラウトの充填度の指標としてAE手法を用いることが可能であると考えられる。

4. X 線 法

グラウトの充填度探査のうえで近年注目を浴びている手法にX線法がある。まだ完全に確立された手法とはいがたい点もあるものの、近年よく試みられている手法である。本節ではX線法についてその特徴を紹介するとともに応用例について紹介する。

(1) X線透過撮影

X線が物質を透過するとき、主として電子との間で相互作用を生じ、測定上種々の問題点を生じる。相互作用としては種々の形態があるが主なものは、①光電効果、②トムソン散乱、③コンプトン散乱、④電子対生成の4種類である¹¹⁾。これらの相互作用によって、透過後のX線の強さは物質の種類と厚さによって変化する。この性質を利用して物質透過後のX線の強弱を像に表わすことをX線透過撮影という。X線の透過撮影法には(1)

図-17 試験体上端からの打撃位置とAEエネルギー比との関係¹⁰⁾図-18 打撃高さ7mにおけるグラウト注入高さとAEエネルギー比との関係¹⁰⁾

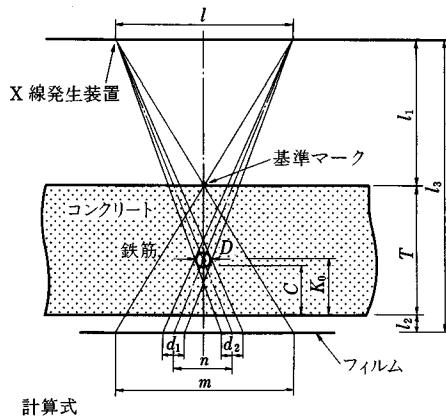
直接撮影法、(2)間接撮影法、(3)透視法の3種類があるが、最も多く用いられるのは直接撮影法である。この方法は、透過したX線を直接写真フィルムにあてて感光させて像をつくり、現像処理を施した後、このフィルムを肉眼で観察する方法である。

X線は通常の光に比べて、写真フィルムに対する感度がきわめて低い。したがって、コストも考慮して、一般にはフィルムの両面に写真乳剤を厚く塗布して、感度を上げた工業用X線フィルムが用いられる。さらに感度を高めるため、その両面に増感紙をあて、サンドイッ

チ状にして感光させる場合が多い。

(2) 画像処理

(1) の手法を単純に適用して得られた像はきわめて不鮮明なものであることが多く、一般には画像処理が施される。現在画像処理といえば一般にコンピュータを処理装置として使用したデジタル画像処理を指すが、これは集積回路技術の発達による高性能でしかも安価なコンピュータの出現により、ここ数年来めざましい発展を遂げた。画像処理とはおおまかに以下の処理をいう。①対象物を画像としてとらえる。②画像を数値化する。③数値化された画像情報をコンピュータに取り込む。④数値化された画像情報に、コンピュータにより、多種多様な



計算式

- ① コンクリートの厚さ (T)

$$T = (l_1 \cdot m / l) - l_2$$
- ② 鉄筋中心からコンクリート表面までの距離 (K_0)

$$K_0 = \{n \cdot (l_1 + T) - l \cdot l_2\} / (l + n)$$
- ③ 鉄筋径 (D)

$$D = \{(d_1 + d_2) / 2\} \cdot [\{l_1 + (T - K_0)\} / l_3]$$
- ④ かぶり (C)

$$C = K_0 - (D / 2)$$

図-19 鉄筋位置、径、コンクリート厚さを求めるための計算
図

演算処理を施す。⑤処理された画像を出力する。

また、画像処理の有用性を簡略に示せば次のようにある。①画像情報を人間にとって見やすい、または見たいものとすることが可能であること。②画像情報の蓄積が可能であること。③画像の濃度、色彩、二次元的広がり(大きさ、位置など)を情報として取り入れることが可能であること。

(3) 鉄筋コンクリートの配筋探査例¹²⁾

PC グラウトの例を述べる前に、その基本として鉄筋を対象とした探査例を述べる。

a) 測定方法

1枚のフィルムに X 線を 2 方向から照射することにより、同じ鉄筋の像が 2 種類得られる。このフィルムから図-19 の鉄筋像の径 (d_1, d_2)、鉄筋の移動距離 (n)、基準マーク像の移動距離 (m) が測定でき、また X 線発生装置の移動距離 (l)、X 線発生装置から入射側コンクリート表面までの距離 (l_1)、フィルムと透過側コンクリート表面までの距離 (l_2)、X 線発生装置からフィルムまでの距離 (l_3) は既知であるから、鉄筋かぶり (C)、鉄筋径 (D)、コンクリート厚さ (T) が求められる(式①～④)。

X 線透過法によって得られたフィルムを映像装置に取り込み、フィルム像の濃淡を数値化し入力する。数値化されたフィルム像に画像処理を施し、自動二値化統計処理により明暗境界を決定する。これにより人為的判断の入らない濃度境界位置を決定し、前記鉄筋径 (d_1, d_2)、鉄筋の移動距離 (n)、基準マーク像の移動距離 (m) を自動測定する。測定した値を式①～④に代入しコンクリート厚さ (T)、鉄筋径 (D) およびかぶり (C) を得る。

b) 測定例

スラブの配筋状況を探査した結果を図-20 に示す。鉄筋径、かぶりの推定が可能であり、上端筋と下端筋と

調査部	N	配筋図 (配筋ピッチ)	コンクリートの厚さ T	No.	鉄筋径		かぶり C		T : 2 枚のフィルムより得られた値が異なる場合、おのおのの平均値を記載している。 A: 異形鉄筋の谷-谷 B: 異形鉄筋のリブ-リブ K_0 : フィルム側コンクリート表面から鉄筋中心までの距離 C_u : 上端筋のかぶり C_d : 下端筋のかぶり
					A	B	K_0	C_u	
4SA	561-7-7		128	1	10.6		85	38	
				2	10.5		20		15
				3		8.9	82	42	
				4	8.0		24		20
				5		8.9	32		27
				6		8.9	73	51	
				7					
				8					
				9					
				10					

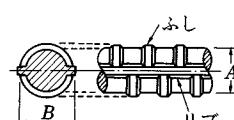
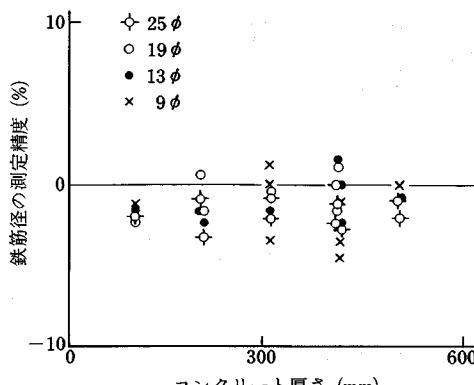
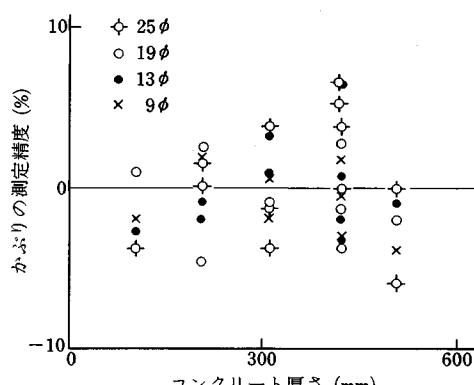
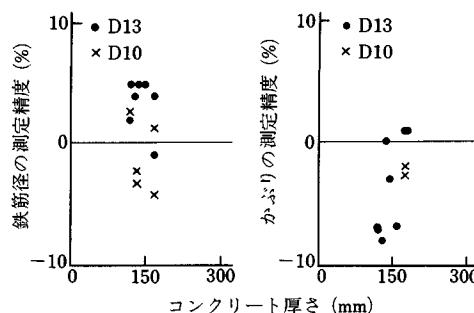


図-20 X 線によるスラブ配筋調査の例 (単位: mm)¹²⁾

の区別も可能であった。図-20 の No.1 および No.5 の鉄筋をはつりだして実測した結果、推定値と実測値との差は 0.2 mm~0.5 mm 程度であった。

さらに、測定精度の検討の目的で、コンクリート厚さの最大を 506 mm かぶりの最大を 360 mm までとした供試体を用いて測定した例によれば、コンクリート厚さ 506 mm でも測定は可能であり、鉄筋径およびかぶりの精度を次式によって算定し図-21, 22 に示す。

$$\text{測定精度} = (\text{実測値} - \text{測定値}) \times 100 / \text{実測値} (\%)$$

図-21 鉄筋径の測定精度¹²⁾図-22 かぶりの測定精度¹²⁾図-23 床スラブ現場調査の精度¹²⁾

鉄筋径の精度は土5% 以内、かぶりでは土7% 以内であった。さらに実構造物で測定した場合の測定精度の例を図-23 に示す。鉄筋径では土5% 以内と供試体によるばらつきと同様であったが、実構造物のコンクリート厚さが上記の供試体よりも小さいにもかかわらず、かぶりについては土10% 以内と土7% よりも大きなばらつきを示している。したがって、かぶりについては10% の誤差は生じるとした方がよいであろう。

(4) PC グラウトの充填度探査例¹²⁾

a) 測定方法

PC 鋼材およびシースをフィルムに撮影し、画像処理を行う。得られた画像、濃度分布、シースおよび鋼材の濃度境界位置からグラウトの充填状況を推定した。

b) 測定例

供試体によって測定した例を図-24, 25 に示す。図の右側には撮影画像、左側には画像中に示した白線に沿

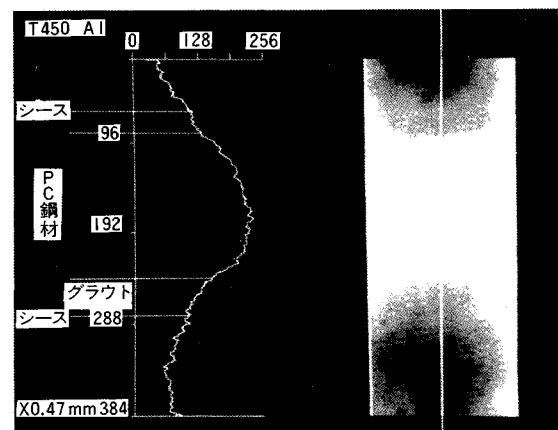


図-24 PC 衍供試体 X 線画像の例-1 (コンクリート厚さ = 450 mm, グラウトあり)

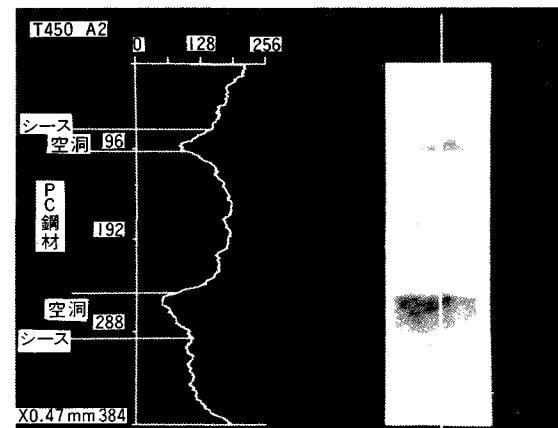


図-25 PC 衍供試体 X 線画像の例-2 (コンクリート厚さ = 450 mm, グラウトなし)

表-3 フィルム上でのシース径およびPC鋼材径計算値と測定値との比較¹²⁾

	TYPE-1		TYPE-2	
	計算値	測定値	計算値	測定値
シース径 C_1	98	100	102	100
PC鋼材径 C_2	69	69	72	72
シース径 D_1	68	66	71	72
PC鋼材径 D_2	39	42	41	43

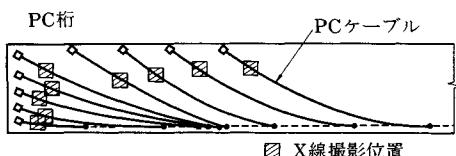


図-26 PC 桁 X 線撮影¹²⁾

う濃度分布（以後プロフィールと呼ぶ）を示している。グラウトのない図-25 の供試体では鋼材の両側に暗部がみられるが、グラウトを施した図-24 ではみられない。さらに、人為的な判断が入らない（画像中シース、PC 鋼材の濃度境界を含む小面積内を自動二値化統計処理する）方法で濃度境界位置を決定した結果を図-24, 25 に併せて示す。ここで求められた 4 つの濃度境界位置の内側 2 つは PC 鋼材の外径位置に対応するものと考えられ、外側はシースに対応しているものと考えられる。これによって読み取った PC 鋼材径およびシース径を、X 線発生装置、PC 鋼材、シース、フィルムの配置から算定されるこれらを換算した計算値と比較して表-3 に示す。表によれば、計算値と測定値はよく一致している。

さらに、実構造物において測定（図-26 参照）した例を図-27, 28 に示す。図-27 ではグラウトが充填されており、図-28 では充填されていないものと推定できる。図-28 に示したシースを削孔して目視した結果、グラウトが充填されていないことが確認された。

しかし、これらの結果は、必ずしもそのまま一般的な手法として汎用性をもつかどうかについてはまだ明らかではなく、今後の検討がさらに必要であるものと考えられる。

5. レーダー法

レーダー法は、PC グラウト充填度探査のうえではまだ検討例が少ないが、鋼材あるいはシースの調査のうえでは期待されるところが多い¹³⁾。したがって、ここで若干の説明を加える。

鉄筋等の存在位置（深さ D ）は、パルス状電波がアンテナから送信されて、再びアンテナで受信されるまで

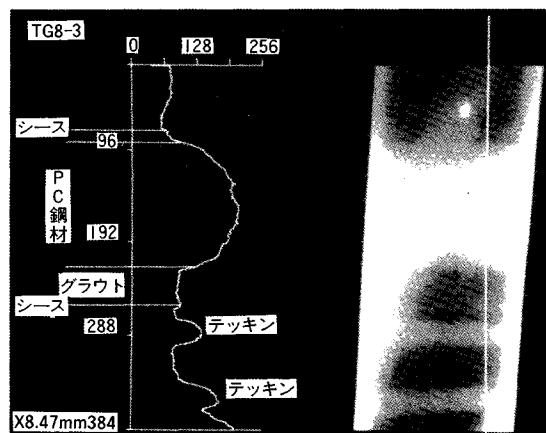


図-27 PC 桁 X 線画像の例-3（コンクリート厚さ = 420 mm, グラウトあり）

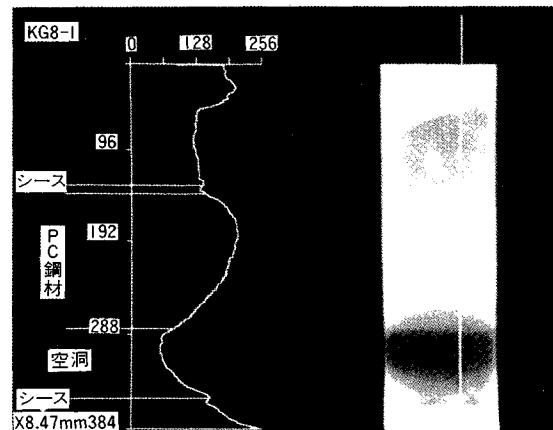


図-28 PC 桁 X 線画像の例-4（コンクリート厚さ = 420 mm, グラウトなし）

の時間 (T) で推定される。コンクリート内でのパルス状電波の速度を V とすると次式で得ることができる。

$$D = VT/2$$

コンクリート中のパルス状電波の速度 (V) は、コンクリートの比誘電率を ϵ_r とすると次式で近似的に表わせる。

$$V = 3 \times 10^8 / \sqrt{\epsilon_r}$$

コンクリート内部の深さ方向に対して直角な表面における位置は図-29 のようにアンテナをコンクリート表面に沿って移動させることによって得られる。鉄筋からの反射波のパターンは図-30 に示すように山形になって現われる。この山形の頂点が鉄筋位置に当たる。

コンクリート内部の鉄筋、また道路床版内の空隙を探査した例を図-31, 32 に示す。図-31 から、コンクリートのかぶり約 50 mm, 配筋ピッチ平均 200 mm を読み取



図-29 レーダーによるコンクリート断面の探査

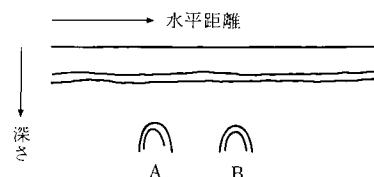


図-30 レーダー画像の例

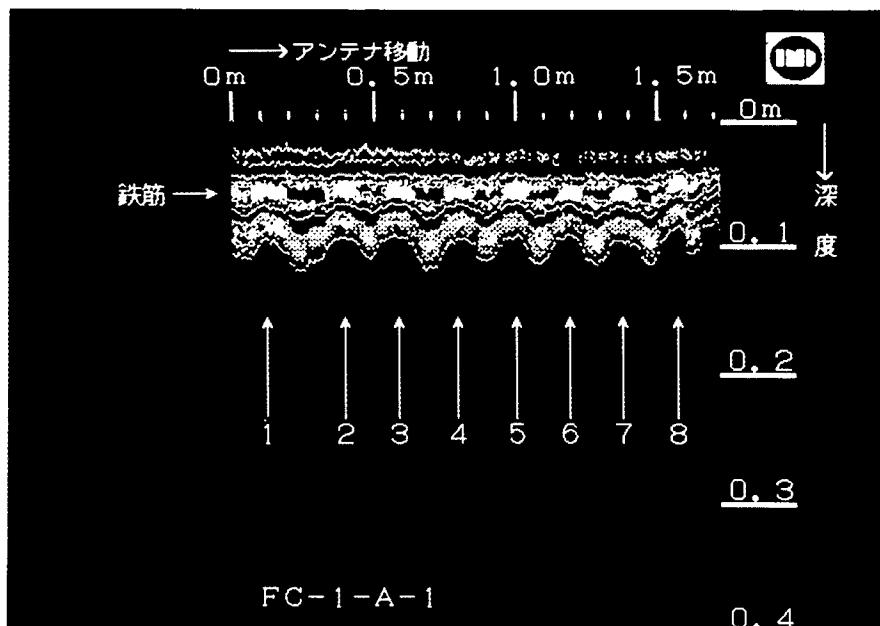


図-31 コンクリート中の鉄筋探査レーダー画像



図-32 床版の空隙調査レーダー画像（レーダー反射波の強い赤色部が剥離している）

ることができる。図-32はアスファルト上から探査したものであるが、表面から80mm付近に長さ300mm程度の空隙の存在が推定できる。これら2例は、一般的レーダー探査機をコンクリートに適用したものであるが、コンクリート専用レーダー探査機も開発されつつある。

現状の装置では、鉄筋コンクリートについていえば、鉄筋のかぶりは最小1cmから最大18cm程度まで測定が可能であるが、その精度は±1cm程度の誤差を有している。配筋ピッチについては最小10cm±1cm程度である。なお、以上の精度からみても、鉄筋径測定については現在の段階ではきわめて困難である。今後、測定精度、分解能についての問題点に加えて、画像の判断に熟練を要する点が問題として残されている。

6. おわりに

以上述べたように、PCグラウトの非充填度探査方法には種々の手法が試みられている。これらによる測定はそれぞれ独特の考え方によっており、それぞれの限界を有している。現在の段階では、どの手法がきわめて優秀であるかを判定することは困難であり、決定的な手法はまだ確立されていないといってよい。今後さらにこの種研究に関する情報が蓄積され、手法論的な確立が期待されるものである。

最後に、本文をまとめるにあたりご協力いただいた(株)構造総合技術研究所の各位に対し深く謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、岩松幸雄：PC構造物の耐久性とメインテナンスについて、プレストレスコンクリート、Vol.25, No.5, pp.10~15, 1983.9.
- 2) たとえば、小林一輔ほか：FRP開発の現状、プレストレスコンクリート、Vol.30, No.30, 1988.9/10.
- 3) BS 1881·Part 201 : Testing concrete, Part 201. Guide to the use of non-destructive methods of test for hardened concrete, 1986.
- 4) Bungey, J. H. : Planning site investigations, Concrete bridge engineering—Performance and advances, pp.1~24, Elsevier Applied Science Publishers, 1986.
- 5) 宮川豊章・井上晋・小林和夫・藤井学：コンクリート中の鋼材腐食の非破壊測定手法と劣化診断について、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, pp.85~90, 1988.5.
- 6) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8, pp.1~22, 1988.2.
- 7) 明石外世樹・尼崎省二：超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの品質評価、セメント・コンクリート、No.489, pp.23~30, 1987.11.
- 8) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版, 1988.
- 9) 鈴木健司・尼崎省二：応答関数によるコンクリートの品質評価について、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.430~431, 1988.10.
- 10) 魚本健人・首藤芳久：AE計測によるプレストレスコンクリートのシース内グラウト充填度判定方法、生産研究、Vol.39, No.4, pp.141~144, 1987.4.
- 11) 日本非破壊検査協会：X線作業主任者用テキスト、pp.7~40, 1973.
- 12) 前田春雄・長谷川敦史・五阿彌雅夫：X線によるコンクリート構造物の非破壊調査、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, pp.109~115, 1988.5.
- 13) 角尾唯明・大久保員良：レーダーによるコンクリートの配筋及びかぶり厚さの調査、日本非破壊検査協会第三分科会資料、pp.38~43, 1988.
- 14) 笠井芳夫・富士岳：コンクリート構造物の非破壊試験、非破壊検査、Vol.37, No.3, pp.206~221, 1988.3.
- 15) 日本技術検査協会：コンクリート構造物に対する非破壊検査技術の適用とその精度・講義と討論、1986.10.
- 16) 日本技術検査協会：コンクリート構造物の劣化診断法、1987.10.

(1989.1.5・受付)