

論文 散乱X線法によるコンクリート内部欠陥探査の可能性

吉田 幸司^{*1}・鳥取 誠一^{*2}・手島 和範^{*3}

要旨: フィルム等を用いた従来の透過X線法ではなく、後方散乱X線を測定する手法（以下、散乱X線法という。）により、コンクリート表面から内部欠陥を非破壊で探査する手法の実験的検討を行い、その適用可能性を検討した。模擬空隙の深さ方向の位置や空隙厚などをパラメータとして作製した模擬空隙を有する供試体を用い、一定の探査条件の基での空隙深さや空隙厚などの内部欠陥の検出性能を把握した。また、図化处理による内部欠陥の可視化を試み、3次元的に内部欠陥を捉えて、明瞭かつ定量的に把握できる可能性を示した。

キーワード: X線法、非破壊検査、内部欠陥

1. はじめに

一連のコンクリート剥落事故は、土木構造物に期待される安全性を再認識するとともに、維持管理の在り方等について再考する契機となった。これまで、コンクリート構造物の検査は一般に目視を中心になされてきたが、劣化の進行した構造物の検査においては、必ずしも目視検査のみでは十分でなく、コンクリートの浮き等の内部欠陥を検出する必要性も示唆され、そのための効率的かつ適切な非破壊診断技術が必要とされている。

コンクリートの内部欠陥（剥離、空洞など）を非破壊検査する手法としては、打音法、衝撃弾性波法、AE法、赤外線法、放射線法など種々の方法が提案されている^{1) 2) 3) 4) 5)}。しかし、検査の精度、難易度、作業性など検査の目的に応じて使い分けるとともに、さらなる研究を要する部分も多い。

本研究では、セキュリティ分野で用いられているコンプトン散乱X線を利用した散乱X線イメージング⁶⁾に着目し、後方散乱X線の検出によるコンクリートの内部欠陥探査（散乱X線法）の適用可能性について実験的に検討した。

2. 散乱X線法の原理

X線法は物質の性質や欠陥等の条件で変化する透過X線強度を撮影する方法である^{7) 8)}。

検査対象とするコンクリートにX線を照射すると、入射したX線は、コンクリート中を直進し透過していく。この過程でX線の道筋に添って原子との衝突によりX線が散乱し、主たる直接透過X線と、二次的な散乱X線とに分かれる。このとき、内部に空隙等があれば、空隙部での散乱が生じないため、その結果、コンクリートを透過するX線の強度に差異が生じる。この透過X線の強弱をX線フィルム等で検出する方法が既往のX線法である。

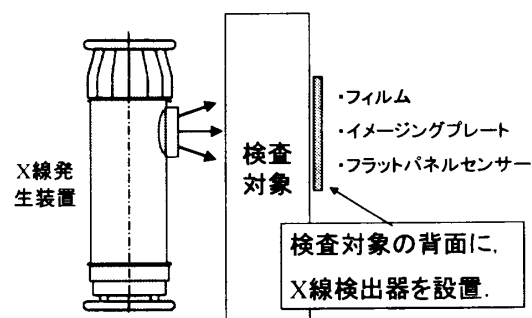


図-1 既往のX線法の測定概要

*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 工修 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 工修 (正会員)

*3 三菱重工業(株) 広島研究所 実験課 工修

しかし、図-1に示すように、既往のX線法では、測定対象の背面にX線フィルム等の検出器を設置する必要があるため、トンネル覆工の検査に適用することはできない。

そこで、検査対象の表面から欠陥探査をすることを前提として、コンクリート中の欠陥部ではX線が散乱しない性質を利用し、後方への散乱X線を検出することで、内部欠陥を把握する手法を試みた。

図-2に散乱X線法の概念図を示す。散乱X線法は、検査対象にX線を入射し、表面へ散乱していく散乱X線を検出する方法である。図-2に示すように、散乱X線強度の検出にあたっては、X線検出部を検査対象に対して平行移動させながら、深さ方向のX線散乱量を測定する。そして、検出した散乱X線量の谷となる部分を内部欠陥と判定する方法である。

また、一般に、散乱X線はあらゆる方向から表面へ到達するため、予め一定方向に散乱してくるX線を検出するよう鉛の遮蔽材料にスリット状の開口を設けたものをX線検出部に設置し指向性を持たせることとした。

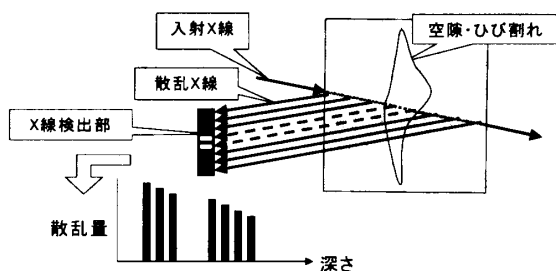


図-2 散乱X線法の概念図

3. 実験概要と結果

3. 1 散乱X線の特性試験

散乱X線法は、一般的X線法で測定している透過X線ではなく、二次的な散乱X線を測定して、コンクリートの内部欠陥を測定しようとする手法である。そのため、従来の手法では、透過X線を測定する上でのノイズとして考えられ

ていた散乱X線成分を検出することから、微弱であること、原理的には可能であっても欠陥が把握できるほどのX線強度が得られるかを確認する必要がある。

そこで、コンクリートの内部欠陥検出に散乱X線法を用いるために、その基本的諸元として、入射X線の強度特性(X線源の管電圧)と検出される散乱X線量の関係を把握することとし、散乱X線の特性試験を実施した。

図-3に特性試験の概要図を示す。試験は、コンクリート供試体(厚さ:5~150mm)に対して、X線源の管電圧を変えて照射し、照射側である後方に散乱してくるX線の深さ方向の積算強度をX線器検出部で測定した。ここで、X線源の管電圧については、低エネルギーレベル(400kV程度以下)のX線発生装置:YXLON International社製MG325を用いて、管電圧:110~320kVの範囲で検討した。なお、特性試験に

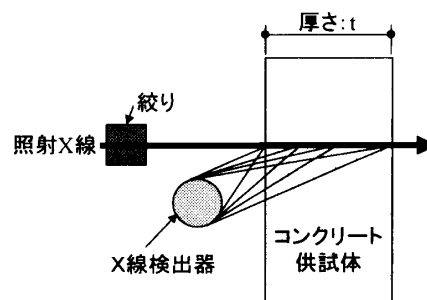


図-3 特性試験の概要図

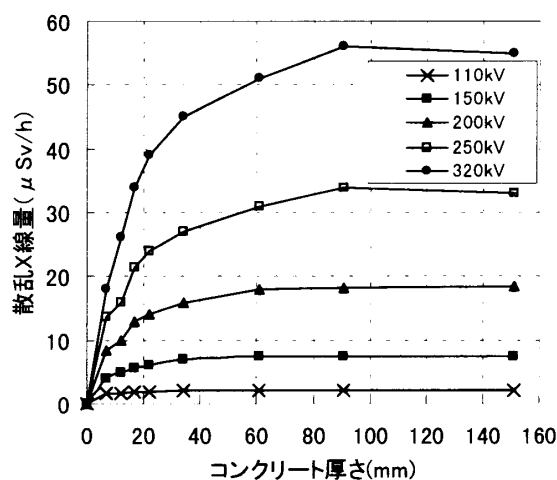


図-4 コンクリート厚さ～散乱X線量

用いたコンクリート供試体に内部欠陥は設けていない。

図-4にX線管電圧: 110, 150, 200, 250, 320kVの5種類についてのコンクリート厚さに対する散乱X線量の測定結果を示す。

予測どおり、X線管電圧が高いほど、検出される散乱X線量は大きくなっている。また、検出される散乱X線量は深さ方向の積算強度であるから、コンクリート厚さが増すにつれて検出される散乱X線量は増加している。しかし、徐々に強度の増加傾向が鈍化し、飽和傾向を示す結果となった。これは、コンクリートに入射したX線と同様に、散乱して出射しようとするX線に対してもコンクリート自身の遮蔽作用が働くためと考えられる。このことから、ある深さ以上の位置からは散乱X線がコンクリート表面へと到達せず、管電圧に応じた探査可能なコンクリート深度の限界があることが分かる。

次に、図-4に示した散乱X線積算強度を深さ方向に微分し、各深度から得られる散乱X線強度を把握した。図-5に深さ毎の散乱X線強度を示す。なお、X線管電圧: 110, 150, 200, 250, 320kVの5種類について図示している。

各管電圧において、グラフは全て右下がりであり、より深部から検出される散乱X線量は小さくなる。そのため、X線検出器の最小検出感度（最小散乱X線強度）に応じて、自ずと測定可能なコンクリート深さが限られことが分かる。

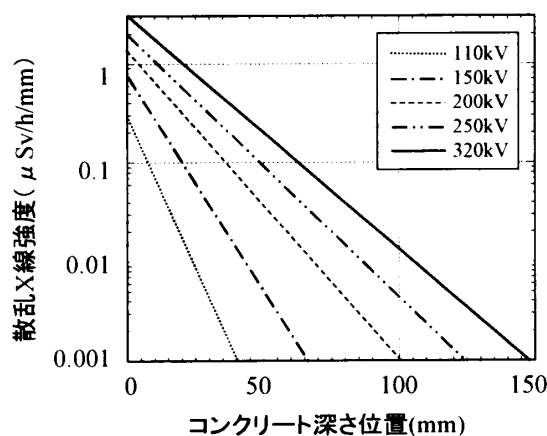


図-5 コンクリート深さ～散乱X線強度

また、今回用いたX線検出器の最小検出感度は $0.4 \mu\text{Sv/h}$ 程度であることから、X線管電圧が320kVの場合で検出限界は深さ30～40mm程度と推定される。このことから、現場での使用を考慮した低エネルギーレベルのX線発生装置（400kV程度以下）を用いた場合、200～400kV程度の管電圧でなければ、内部欠陥の計測に適用できないと判断される。

3. 2 模擬空隙供試体による室内試験

次に、模擬空隙を設定した供試体を用いて、本手法による内部欠陥の検出性能を確認した。

供試体は、図-6に示すように、コンクリートと物性の異なる発泡スチロール製の薄板を空隙に見立て、供試体内に埋設することで内部欠陥を模擬した。また、空隙深さおよび空隙厚をパラメータとして、表-1に示す7体を作製した。

試験は、X線照射条件を絞り $\phi 2\text{mm}$ 、管電圧を200, 250, 320kVの3パターン、電流10mA一定とした。図-7に模擬空隙供試体を用いた試験概要図を示す。供試体表面に対して直角に入射X線を照射し、X線検出部をガイドに沿って

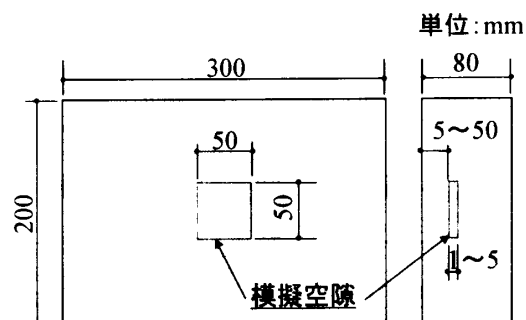


図-6 模擬空隙供試体の概要図

表-1 模擬空隙供試体諸元

単位: mm		
供試体寸法	空隙寸法	空隙深さ
300 × 200 × 80	50 × 50 × 1	5
		10
		20
	50 × 50 × 3	20
		20
	50 × 50 × 5	30
		50

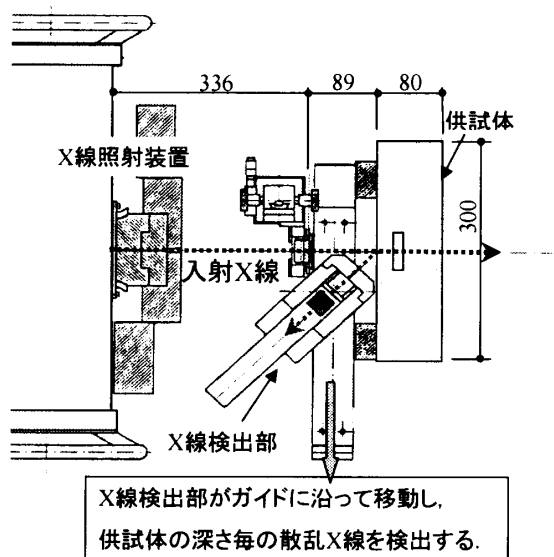


図-7 模擬空隙供試体での試験概要図

平行移動させて散乱X線を深さ方向に測定した。

図-8～図-11 に内部欠陥検出の試験結果例を示す。図-8, 図-9 は空隙深さを一定 (20mm) とし、内部空隙の厚さがそれぞれ 3mm, 1mm の測定結果である。また、図-10, 図-11 は空隙厚さを一定 (5mm) とし、空隙深さがそれぞれ 30mm, 50mm の測定結果である。図中の網掛け部分は、設計上の模擬空隙の位置である。

これら一連の試験結果は、特性試験の結果から述べたように、コンクリートが深くなるほど、ある深さにおける散乱X線強度が減少する傾向を示している。

模擬空隙を設置した供試体に対して、本手法による内部探査を実施した結果、欠陥位置付近で散乱X線強度の谷が観察され、模擬空隙の位

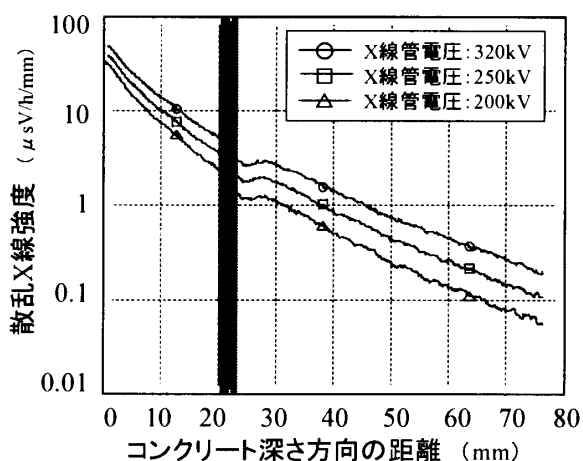


図-8 深さ 20mm, 空隙厚 3mm の結果

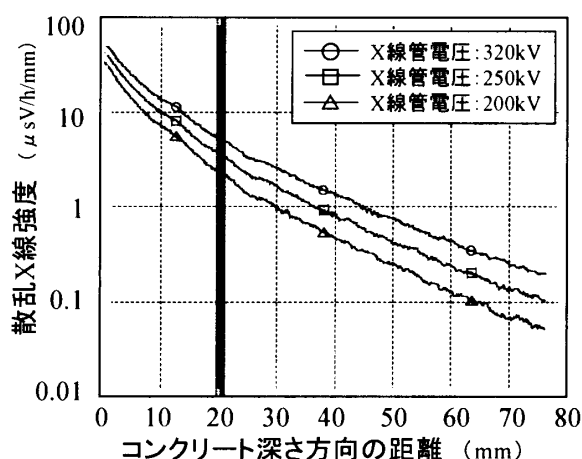


図-9 深さ 20mm, 空隙厚 1mm の結果

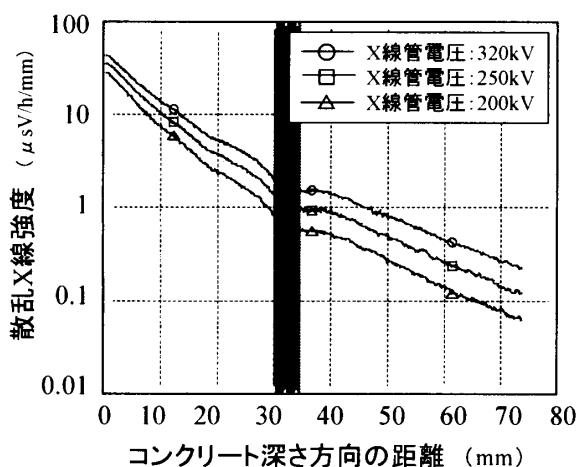


図-10 深さ 30mm, 空隙厚 5mm の結果

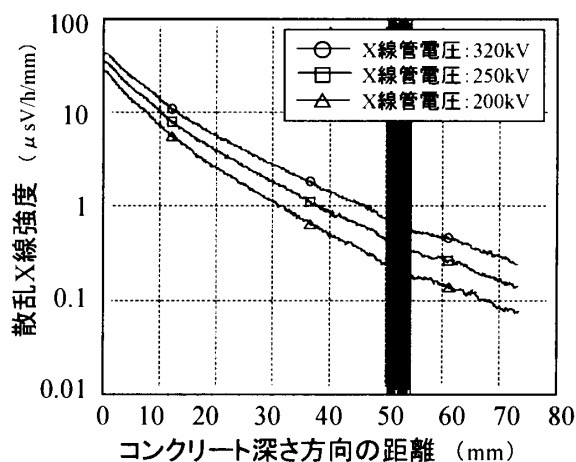


図-11 深さ 50mm, 空隙厚 5mm の結果

置が探査できている（図-8、10 参照）。また、空隙の厚さの違いにより、谷の幅も変わっており、本手法により、空隙の深さ及び空隙厚さを把握しうる可能性があることが確認された。なお、図-8 の網掛け部分と散乱 X 線強度の谷部分に不一致があるため、供試体の模擬空隙位置を部分はずり等により確認した。その結果、模擬空隙が供試体表面に平行でなく深部側へやや傾斜しており、深部側に 2mm 程度の設置誤差が認められた。

一方、同一の空隙深さで空隙厚の小さい場合や、同一の空隙厚で空隙深さが大きくなる場合には、明瞭な散乱 X 線強度の谷が現れておらず、内部欠陥の検出に限界があると思われる（図-9、11 参照）。

これは、空隙厚が小さくなれば、空隙部と健全部とで X 線の散乱量の差が小さくなること。また、空隙深さが大きくなれば、表面で検出できる散乱 X 線量が小さくなることから、相対的に空隙部と健全部との差も小さくなることによる。いずれも X 線検出器の最小検出性能に依存するところが大きい。

また、X 線照射条件の一つである X 線発生装置の絞り穴径についても検討を加えることとし、当初の $\phi 2\text{mm}$ から $\phi 0.5 \sim \phi 3\text{mm}$ と変化させ、試験を実施した。

X 線発生装置の絞り穴径が小さいほど、入射する X 線の線量が少なくなる。そのため、X 線検出器方向へ散乱してくる線量も少なくなり、空隙で散乱しない領域が明瞭となる可能性がある。その反面、入射する X 線の線量が少なくなるため、X 線検出部の検出感度の限界に近づいていくことも予想される。

一方、絞り穴径を広げると X 線量は増加し、X 線は検出しやすくなるが、散乱する X 線も同様に増加してしまい、散乱 X 線強度の谷間の検出が不明瞭になる可能性も考えられる。

試験の結果、絞り穴径を変化させたことによる効果はほとんどみられなかった。

模擬空隙供試体を用いた一連の試験結果を整理すると、表-2 のようになる。今回の試験条件（X 線管電圧 300kV 程度、電流 10mA、X 線絞り穴径 $\phi 2\text{mm}$ ）で探査可能な内部欠陥は、空隙厚 5mm では空隙深さ 50mm 未満、空隙深さ 20mm 範囲で、空隙厚 3mm 以上が探査可能といえる。また、比較したレベルの管電圧の範囲では、欠陥検出性能に与える顕著な効果はみられなかった。そのため、さらに探査性能を向上させるには、より高出力の X 線発生装置を使用することや、X 線検出器の高 S/N 比化と最小検知性能の向上が必要であると考えられる。

表-2 模擬空隙供試体の欠陥探査結果

空隙厚(mm)	空隙深さ(mm)	探査結果
1	5	○
	10	○
	20	×
3	20	○
5	20	○
	30	○
	50	△

凡例) ○:可能, △:やや困難, ×:不可

4. 内部欠陥の可視化

前述してきた供試体試験での測定結果（例えば、図-8 など）は、表面から深さ方向へ探査した 1 点の検出結果である。そのため、内部欠陥の全体像を把握するためには、同測定を繰返し、その結果を統合して、内部を可視化することが必要である。

図-12 に散乱 X 線法による模擬空隙供試体の内部欠陥検出の図化処理例を示す。これは、散乱 X 線強度の谷間（すなわち、空隙）検出を供試体の表面から 2 次元的に繰返し実施して、得られた空隙深さと空隙厚から、3 次元の画像処理を行ったものである。

なお、図化処理にあたっての散乱 X 線法の試験条件は、管電圧 320kV で行い、走査ピッチ 2.5mm で面的に測定している。また、用いた供試体は、内部空隙深さ 10mm、空隙サイズが $50 \times 50 \times 1\text{mm}$ である。

画像処理により、内部欠陥として設置した発泡スチロール製の模擬空隙の状態が明瞭に確認できており、本手法により、内部欠陥の状況が明瞭かつ定量的に把握できることを確認した。

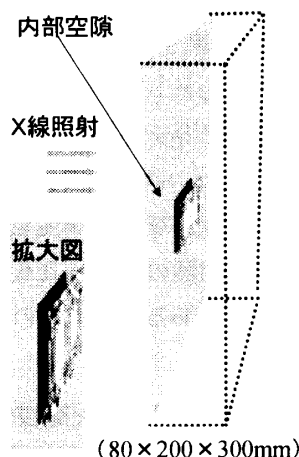


図-12 内部欠陥検出の図化処理例

5. まとめ

散乱X線法によるコンクリート非破壊検査に関する試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 散乱X線の特性試験より、X線発生装置の管電圧が上昇するにしたがい、検出される散乱X線量が増加するが、コンクリートが厚くなるにつれて、散乱X線もまたコンクリートの遮蔽作用により深部から表面へ到達しにくくなり、やがて飽和傾向を示す。このことから、管電圧に応じた探査深度の限界値が存在し、少なくとも検査には200kV以上の管電圧が必要と考えられる。
- (2) 模擬空隙供試体を用いた散乱X線による内部欠陥探査の結果、コンクリート内部欠陥の空隙深さやその空隙厚を表面から検出する可能性が見出された。しかしながら、一連の試験から、空隙深さや空隙厚にはそれぞれ探査可能な限界も存在し、今回の試験条件(X線管電圧300kV程度、電流10mA、X線絞り穴径φ2mm)で探査可能な内部欠陥は、空隙厚5mmでは空隙深さ50mm未満、空隙深さ20mm範囲で、空隙厚3mm以上で

ある。

- (3) 2次的に内部欠陥のスキャンを実施し、画像処理することにより、内部の模擬空隙の形状が3次的に把握できることを確認できた。

本法はX線照射側から測定を行うため、トンネル覆工のように片面が地山に接している場合にも適用可能なこと、画像処理により内部欠陥を定量的に捉えられる等の特徴がある。また、実用化に向けては、更なる検討を要する課題もあるが、コンクリート構造物の内部欠陥探査として可能性のある手法と考えられる。

なお、本研究は、運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の一部として実施したものであり、関係各位の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（維持管理編），pp.41-44，2001.1
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー104「2001年制定コンクリート標準示方書（維持管理編）制定資料」，pp.108-122，2001.1
- 3) 鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説（コンクリート構造），pp.102-114，1987.9
- 4) 魚本健人：コンクリートの劣化と試験・分析方法，非破壊検査，pp.620-623，1998.9
- 5) 魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，1990
- 6) 藤井正司：産業用CTの進歩とリバースエンジニアリング，非破壊検査，pp.566-573，2000.9
- 7) 日本非破壊検査協会：非破壊試験概論，1993
- 8) 加藤潔：放射線透過試験技術の保守検査への適用例，非破壊検査，pp.152-158，2000.3