

X線造影撮影によるコンクリート構造物内部の ひび割れ検出技術の開発に関する研究

大塚浩司¹・武田三弘²

¹フェロー会員 工博 東北学院大学教授 工学部環境土木工学科 (〒985-8537 多賀城市中央 1-13-1)

²正会員 工修 東北学院大学講師 工学部環境土木工学科 (〒985-8537 多賀城市中央 1-13-1)

本研究は、X線造影撮影によりコンクリート構造物内部に発生している複雑で微細なひび割れの発生状況を精度良く非破壊的に検出する方法の開発を目指して行ったものである。コンクリート構造物をX線撮影するための条件として、コンクリート厚さと撮影時間との関係や、コンクリート構造物を透過したX線透過線量がX線フィルムに適度な濃度の像を写し出すための条件などを求めるための基礎的な実験を行った。また、コンクリート構造物内のひび割れを検出するためのフィルムと増感紙との最適な組み合わせ方や、ひび割れの検出条件についても検討を行った。さらに、鉄筋コンクリート供試体に曲げひび割れを発生させ、造影剤を注入し、X線造影撮影を用いてひび割れ先端位置の検出や、コンクリート供試体に発生したひび割れの内部形状を求める実験を行い、本技術の実構造物に対する適用性を確認した。

Key Words : X-ray inspection technique, contrast medium, crack identification

1. まえがき

近年、既存のコンクリート構造物からその一部が落下するなどの劣化の事例が多発している。しかし、コンクリート構造物の一部が落下・欠損する様な事態が生じてから補修するより、もっと早い段階で補修すれば、補修費を低くでき構造物に要するライフサイクルコストが低くなることは明白である。そのためには、コンクリート構造物に対する精度の高い調査・診断が重要である。

コンクリート構造物の劣化やひび割れ等を調べるための方法としては、非破壊検査が多く用いられている。従来の非破壊検査では、打撃法、振動法、引抜き法のような主としてコンクリートの強度推定を目的としたものが多かった。一方、最近では、超音波法、アコースティック・エミッション法、電磁気法、X線透過撮影法、電磁波レーダー法、電磁誘導法、自然電極電位法、赤外線法など内部探査や劣化度診断を目的としたものが多くなってきた。

しかし、現在用いられているこれらの方法では検査できない劣化・損傷もある。例えば、鉄筋コンクリート構造物内部に発生している微細で複雑なひび割れの

存在である。その発生状況を精度良く計測できる非破壊検査方法は現在のところ開発されていないと言える。従って、コンクリート構造物内部のひび割れを非破壊的に検査する技術開発が今後の重要な課題の一つとなっている。

これまで著者等は、異形鉄筋周辺に発生する内部ひび割れ^{1), 2)}やコンクリートの引張破壊進行領域などを検出するためにX線造影撮影法を用いる研究^{3), 4)}を進めてきた。本研究は、X線造影撮影法を用いてコンクリート実構造物内部の微細なひび割れを非破壊的に検出する方法の開発を目指して行ったものである。

なお、X線造影撮影は、コンクリート構造物内の鉄筋位置探査やシース内のモルタル充填状況等の確認のために従来用いられてきたX線透過法と同様の装置とX線遮へい方法によって行うことができる。

2. コンクリートをX線透過撮影するための条件

一般に、X線透過撮影によってコンクリート構造物の非破壊検査を行う場合には、使用するX線発生装置の定格出力(管電圧)に応じて検出可能な特定材料(鉄

板等)の厚さが示されており、それを参考にして実際に検査する材料を撮影する場合の出力と撮影時間を定める場合が多い。しかし、使用するX線発生装置の定格出力が同じ場合でも、機種によって実際に照射されるX線量は正確には同じではない。また、X線フィルムの現像を行う場合においても、現像液や定着液の種類、温度、濃度、現像時間や定着時間によって得られる画像濃度は異なる。さらに現場におけるX線撮影では、検査体であるコンクリート構造物の部材厚が測定できない場合や、部材厚は既知でもその部材に外的作用によってひび割れ、剥離などの劣化が生じている場合がある。そのため、同じフィルム濃度の画像を得るための撮影条件は撮影箇所ごとに異なることが多い。従って最適な画像濃度を得るためには、事前に何度も試し撮りを行い、それらの撮影条件が現像したX線のフィルムの濃度に与える影響の度合いを、求めておく必要がある。しかし、現場調査においては、十分な時間がとれない場合が多く、事前の試し撮り作業を無くすか、または簡略化することが望まれている。

筆者等はX線法がより広く用いられるためには、この簡略化が重要であり、その為にはX線透過撮影法の基礎理論を検討・整理し、検査体を透過したX線がフィルムを感光させ、人間の視覚で識別するのに最適な濃度を生じさせるための条件を明らかにすることが必要であると考え次のような検討を行った。

(1) 撮影時間とコンクリート厚さとの関係

図-1に示すような、X線発生装置を用いてX線をコンクリート試験体に照射した場合、試験体裏面に貼り付けたX線フィルムに人間の視覚で識別するのに最適な濃度を与えるX線エネルギーEは、フィルムを現像・定着するときの液種、温度、濃度、現像時間や定着時間を一定と仮定した場合、大きく分けるとX線発生装置、照射体(コンクリート)、受光体(X線フィルム、増感紙、グリッド)の3種類の性能に関係しており、近似的に式(1)⁵⁾のように表される。

$$E = \frac{V^n i t S f Z}{r^2 B D_a} e^{-\mu_1 d} \quad (1)$$

但し、

E : X線エネルギー

V : 管電圧 [Kv]

n : 管電圧、増感紙の有無、コンクリートの吸収の程度によって変化する係数

i : 管電流 [mA]

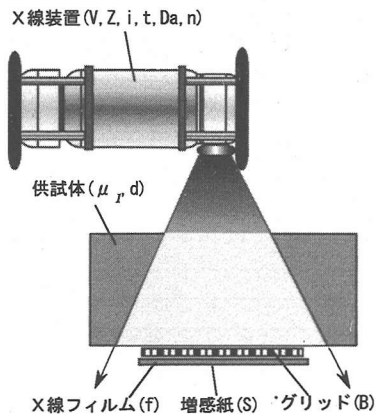


図-1 撮影状況

t : 撮影時間 [sec]

S : 増感紙使用時の増感率

f : フィルム感度

Z : X線発生装置の焦点物質の原子番号

r : 撮影距離 [cm]

B : X線グリッド使用時のブッキー係数 (露出倍数)

Da : 照射野の面積 [cm²]

μ₁ : コンクリートの吸収係数 [cm⁻¹]

d : コンクリートの厚さ

ここで、V, n, i, S, f, Z, r, B, Da は、撮影条件を一定とした場合、それをまとめて一つの係数kと置き換えることができるので式(1)は、式(2a)となる。

$$E = kt \exp(-\mu_1 d) \quad (2a)$$

$$\text{但し、} \quad k = \frac{V^n i S f Z}{r^2 B D_a} \quad (2b)$$

式(2a)の両辺の対数を取り、撮影時間(t)と吸収係数(μ₁)、構造物の厚さ(d)についてまとめると式(3a)となる。

$$\log_e t = \mu_1 d + k \quad (3a)$$

$$\text{但し、} \quad k_1 = \log_e E / k \quad (3b)$$

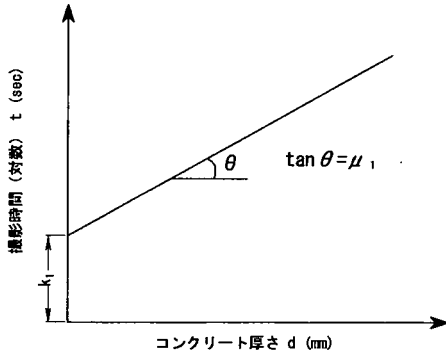


図-2 撮影時間とコンクリート厚さとの関係

式(3a)から、半対数座標軸上で縦軸（対数目盛）に撮影時間 t 、横軸（普通目盛り）にコンクリート厚さ d をとった場合、傾きが μ_1 、切片が k_1 の直線の関係が成り立ち、図に示すような露出線図が描ける（図-2 参照）。

この露出線図は与えられた条件下でフィルムにある濃度を生じさせるために必要な撮影時間とコンクリート厚さとの関係を示すものである。従って、実際にX線撮影に使う露出線図を作成するためには、まず、最適なフィルム濃度を定めなければならない。入射X線強度を I_0 、透過X線強度を I_t とした場合、フィルム濃度 D は、

$$D = \log_{10} (I_0 / I_t) \quad (4)$$

で定義することができる。ここで一般に、X線フィルム濃度 D は、JIS Z3104 では、欠陥以外の部分について、X線フィルム濃度範囲は 2.0~3.5（材厚が 100mm をこえる場合）と規定されている。また、日本非破壊検査協会規格（NDIS 1401-1992）のコンクリート構造物の放射線透過試験方法では、コンクリートのような複合材料の場合、透過写真には鉄筋、骨材、空隙などによる様々なむらが存在しているため、X線フィルムの濃度を測定するときには、X線フィルム上のコンクリート部に対して複数箇所の高濃度部と低濃度部の測定を行い、それらフィルム濃度の平均を 1.0 以上 3.0 以下とするように定められている。本研究では、予備実験により最適フィルム濃度を 2.0 と定め、実際の露出線図を求める実験を行った。

コンクリートに対する露出線図を作成するにあつ

表-1 撮影条件

X線発生装置	管電圧 (V)	300kV
	管電流 (i)	5mA
	焦点距離 (r)	650mm
	焦点寸法	2.5×2.5mm(タングステン)
コンクリート	吸収係数 (μ)	平均 0.260cm ⁻¹
フィルム	工業用X線 (f)	富士フィルム
		#50, 100, 150, 400
グリッド	グリッド密度(B)	40本/cm
	グリッド比	16:1
増感紙	増感紙 (S)	鉛箔増感紙
	(富士フィルム)	蛍光増感紙 HR-16

表-2 配合表

Gmax (mm)	スラブ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(Kg / m ³)			
					w	C	S	G
20	8	55	2	45	185	336	786	1025

て、表-1に示した条件で撮影を行った。また、この時使用したコンクリート供試体の配合を表-2に示す。

図-3は、表-1に示した撮影条件で実験を行い、フィルム濃度 2.0 において得られた露出線図である。縦軸は撮影時間 t (sec)、横軸はコンクリート厚さ d (mm)である。ここで、X線フィルムと増感紙の組み合わせは、#100 または#400 のX線フィルムは金属箔蛍光増感紙 (HR-16) 併用となっており、他のX線フィルムは鉛箔増感紙併用となっているため、図-3に示す4通りとなった。

この図から、厚さ 200mm のコンクリートにX線を透過させてフィルム濃度 2.0 を得るためには、X線フィ

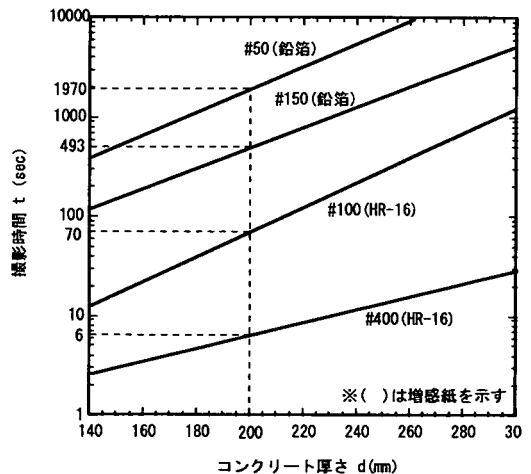


図-3 露出線図

ルム#50と鉛箔増感紙を使用する場合には約1970秒、X線フィルム#150と鉛箔増感紙を使用する場合には約493秒、X線フィルム#100とHR-16増感紙を使用する場合には約70秒、X線フィルム#400とHR-16増感紙を使用する場合には約6秒必要となることが分かる。

このように、同じ厚さのコンクリートを透過するX線で同じフィルム濃度2.0を与えるための撮影時間は、フィルムと増感紙の組み合わせによって大きく変わることが分かる。しかし、フィルム粒子が小さいほど撮影時間がかかるが、情報量が多くなり、微細なものへの検出に有効である。一方、フィルム粒子が大きいほど、撮影時間が短くなるが、情報量が少なくなる。撮影結果を比較検討した結果、本研究で対象とする厚さ200～300mm程度の実コンクリート構造物内に発生した微細ひび割れを検出するためには、粒子が比較的小さい#100フィルムと撮影時間が短くなるHR-16の組み合わせを用いた場合が、最適であると判断した。なお、本実験で用いたコンクリートは一般的な配合のものであるが、コンクリートの特性が大きく異なる場合には、上記の最適なフィルムと増感紙のとの組み合わせも変わるものと考えられる。

(2) 透過X線量とフィルム濃度との関係

使用期間が長い構造物ほど、ひび割れ、剥離等の劣化が進行している場合が多く、健全なコンクリート部材よりもX線が透過しやすくなる傾向がある。そのため劣化部に対してX線透過撮影を用いる場合、図-3に示したような予め健全なコンクリートを用いて求めた露出線図では、最適な濃度のX線フィルム像を撮影することは一般にできない。また、構造物によっては、鋼板が巻かれていたり、アスファルトが敷かれているものもあり、撮影条件の推定は更に困難なものとなる。一般に、現場においては事前に何度も試し撮りを行うから本撮影に入らねばならず手間と時間がかかる。

そこで本研究では、透過線量（構造物を透過したX線量：単位 μSv ）とフィルム濃度との関係に着目した。透過線量とフィルム濃度との関係を求めておけば、現場において透過線量をポケット線量計などの簡易な装置で測定すれば、最適なフィルム濃度を得るための撮影時間を容易に求めることができるからである。この方法を行えば、試し撮りを行う必要がなくなるため現場での作業を簡素化することができる。

線量を β (μSv)、フィルム濃度を D とした場合、両者の関係は、本実験の範囲内では、直線関係と仮定できることから、

$$D = \alpha\beta \quad (5a)$$

とした。 α は、X線フィルム感度、増感紙、グリッドの有無によって変わる係数である。

図-4は、実験から求めたX線フィルム濃度と透過線量との関係を示す。X線フィルムは、表-1に示した条件より撮影を行った。透過線量の測定方法はポケット線量計を、直径10mm ϕ の孔をあけた厚さ10mmの鉛の箱（50 \times 40 \times 150mm）の中に設置し、孔のあけた面を供試体照射裏面に密着させ、透過X線量を測定した。

この図から、HR-16増感紙を用いた方が（図-4(a）鉛箔増感紙を用いた場合（図-4(b）よりも β 座標のレンジが小さいことから、同じフィルム濃度を得るための透過線量が明らかに少なくすむことが分かる。濃度 D を2.0とした場合、X線フィルム#100を使用し、増感紙としてHR-16を使用すると、透過線量 β は図-4(a)より23.3(μSv)となる。式(5a)にそれらを代入し、 α を求めると、 $\alpha=0.086$ となる。従って式(5a)は、

$$D = 0.086\beta \quad (5b)$$

となる。得られた式(5b)に、対象となる構造物の透過線量 β の測定値を代入することによって、そのフィルムの濃度を求めることができる。

これらの結果を検証するため、同じ厚さのコンクリート供試体（寸法200 \times 400 \times 500mm）を数体作製し、载荷を受けていない健全な鉄筋コンクリート供試体と線

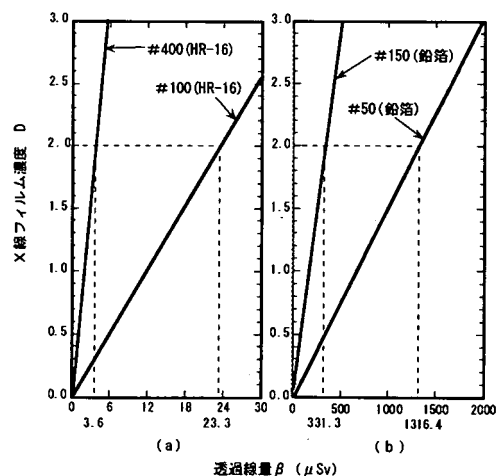
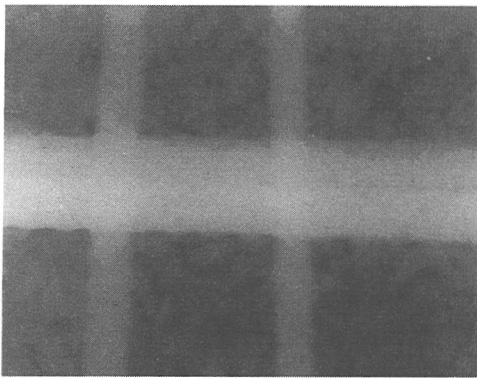


図-4 フィルム濃度と透過線量との関係

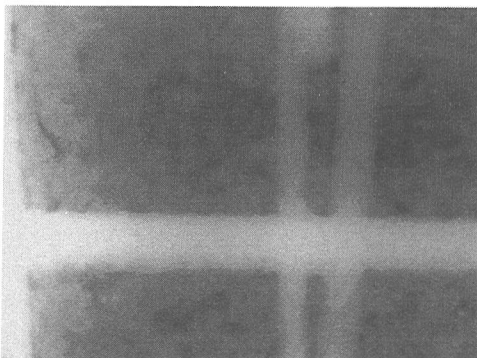
り返し載荷によってひび割れを多数発生させた劣化した鉄筋コンクリート供試体について、透過線量が $23(\mu\text{Sv})$ 程度となる条件においてX線撮影を行った。

写真-1は、表-1に示した撮影条件(#100, HR-16 使用)により撮影した、健全な鉄筋コンクリート供試体(撮影時間 36 秒, 透過線量 $23\mu\text{Sv}$)と劣化した鉄筋コンクリート供試体(撮影時間 30 秒, 透過線量 $24\mu\text{Sv}$)のX線フィルム画像である。劣化した鉄筋コンクリート供試体は健全な鉄筋コンクリート供試体に比べ、撮影時間は短くなる傾向がみられたが、透過線量がほぼ同じ値ならば、フィルム濃度も同等のものを得ることができるとわかった。

以上のように現場において透過線量を測定すれば、予め求めてある透過線量とフィルム濃度の関係図から試し撮りを行うことなく、能率的に最適なフィルム濃度となるための撮影条件を求めることができる。



(健全な鉄筋コンクリート供試体：濃度 2.1)



(劣化した鉄筋コンクリート供試体：濃度 1.9)

写真-1 同じ透過線量となる条件で撮影したX線フィルム(健全部と劣化部)

3. コンクリート内部ひび割れをX線造影撮影するための条件

前章で述べた方法により、劣化したコンクリート構造物にも最適な濃度でコンクリート内部のX線透過撮影ができることがわかった。しかし、ひび割れが発生したコンクリート構造物に対してX線透過撮影を行った場合、幅数mm程度以上の大きいひび割れであれば、一部検出することは可能であるが、それ以下の微細なひび割れについては検出することが困難である。そこで本研究では、造影効果を持った注入剤をコンクリート構造物内部の検出したい微細ひび割れに注入し、X線撮影するというX線造影撮影法を用いるための検討をした。

X線造影撮影法で検出可能なひび割れの幅は、撮影条件、被写体条件、造影剤条件などによって変わってくるためそれぞれの条件下での確認試験を行う必要がある。本研究では、確認試験に用いた撮影条件は表-1の通りである。コンクリートの配合は表-2によった。造影剤は著者等が開発⁶⁾したセシウム系で質量吸収係数 0.43cm^{-1} のものを用いた。フィルムの最適濃度を得るための撮影条件は、前章で述べた透過線量とフィルム濃度との関係から求めた。フィルム上でひび割れ検出が可能かどうかの判定には、ひび割れ部とその周囲とのコントラストを用いた。コントラストを求めるためのX線の強さとしては、透過する前の照射線量を用いた。

(1) ひび割れ厚さとコントラストとの関係

コンクリートに発生したひび割れに造影剤を注入しX線造影撮影法を行った場合、撮影されたフィルム上のひび割れの検出には、ひび割れ幅ではなくX線方向に平行な部分の厚さが大きく関係する。また、検出されるためには、そのひび割れと隣り合う領域との濃度の差(コントラスト)が視覚で識別可能な条件以上でなければならない。

図-5(a)において、コンクリートにX線強度 I_1 を照射した場合、コンクリートA-A'断面を透過したX線強度を I_1 とし、コンクリート及び造影剤を注入したひび割れB-B'断面を透過したX線強度を I_2 とした場合、ひび割れを検出するためには I_1 と I_2 によって得られた画像のコントラストが視覚で識別可能な条件以上であれば良いことになる。従って、図-5(a)のX線照射条件は、ひび割れに造影剤が充填されたとした場合、X線透過断面B-B'とひび割れが重なり合っている長さを造影剤の厚さと考え、図-5(b)

のようなモデルで表すことができる。図中において、A-A'断面のコンクリートの厚さを d 、B-B'断面のコンクリートの厚さを d_1 、造影剤の厚さを d_2 とし、コンクリートの吸収係数を μ_1 、造影剤の吸収係数を μ_2 とする。X線を I_0 の強度で照射したとき、各物質を透過したX線強度がそれぞれ I_1, I_2 になったとすれば、これらの間に、

$$I_1 = I_0 e^{-\mu_1 d} \quad (6)$$

$$I_2 = I_0 e^{-(\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2)} \quad (7)$$

の関係式が成立する。ここで、一般的に、X線強度 I によってX線フィルム濃度が D となった場合、

$$D = \gamma \log_{10} I \quad (8a)$$

で表される。ここで、図-5 (b)のように、 I_1 によ

ってX線フィルム濃度が D_1, D_2 によってX線フィルム濃度が D_2 となった場合、濃度差 D' は、

$$D' = D_1 - D_2 = \gamma(\log_{10} I_1 - \log_{10} I_2) \quad (8b)$$

で表される。これが視覚で識別可能な条件以上であれば造影剤は検出可能となる。ここで I は、管電圧 (KeV)、管電流 (mA)、撮影時間 (sec) の積と考えることができる。 γ は、フィルムコントラストと呼ばれる係数であり、X線強度、フィルム感度、増感紙の有無等によりその値が変わるものである。そのため γ は、それぞれの場合ごとに実験から求める必要がある。

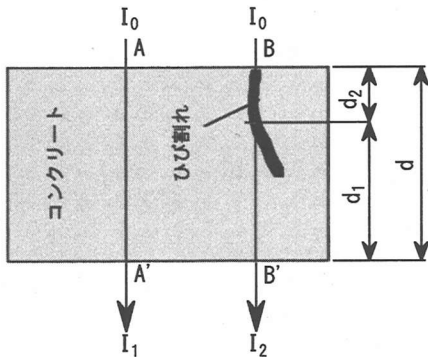
図-6は、実験から求めた式(8a)の関係を示す。撮影は、表-1に示した条件で行った。この図の中から、X線フィルム#100とHR-16増感紙を使用する場合のフィルム濃度2.0付近の傾き ($\Delta D' / \Delta \log_{10} I$) は、2.04となった。従って、フィルムコントラスト係数 γ は、フィルム濃度 $D=2.0$ を得る場合、

$$\gamma = \frac{\Delta D'}{\Delta \log_{10} I} = 2.04 \quad (9)$$

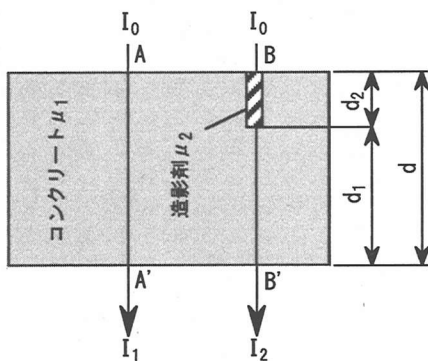
となる。

次に、本実験で識別できる最小の造影剤厚さを求めるため、図-7に示す実験装置を用いた。

この実験装置は、コンクリート厚と造影剤の厚さだけを変化させ、コンクリート厚さに対して検出可能な最小の造影剤厚を求めるものであり、この時のコント



(a) コンクリート中のひび割れ



(b) ひび割れモデル

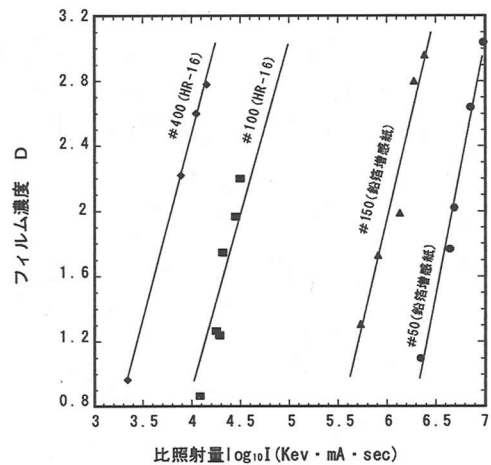


図-6 X線フィルム濃度と比照射率との関係

図-5 X線画像のコントラスト

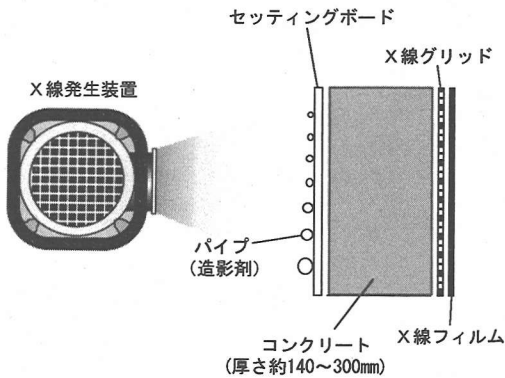


図-7 実験方法

ラストを本実験で識別できる最低のコントラストとした。撮影は、表-1に示した条件とし、X線フィルムには#100とHR-16増感紙を用いた。また、コンクリート供試体(厚さ約140mm~300mm)照射面には、ひび割れを想定した塩化ビニル製の造影剤充填パイプ(φ0.3, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0mm)をセッティングボードに取り付けてある。

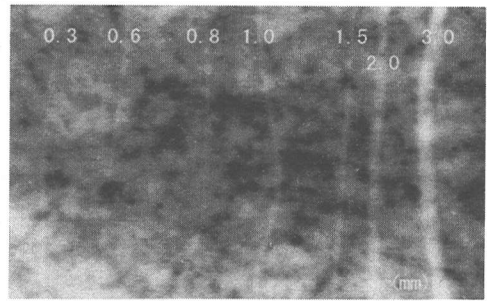
写真-2に図-7に示した方法によって得られたX線フィルムを示す。上の写真は、コンクリート厚143mm、下の写真は225mmの時のものである。写真-2より、コンクリート厚143mmの供試体の場合は、造影剤を注入した全てのパイプが検出されているが、コンクリート厚225mmの供試体では造影剤厚さ0.6mm以上が検出可能であり、造影剤厚さ0.3mm以下では検出不能となった。

図-8は、図-7の実験から求めた各コンクリートの厚さごとの検出可能な造影剤厚さの関係をプロットしたものであり、図中の曲線は、検出可能な限界を求めたものである。この図から、コンクリート厚さが大きくなると検出可能な造影剤厚さも大きくなることが分かった。

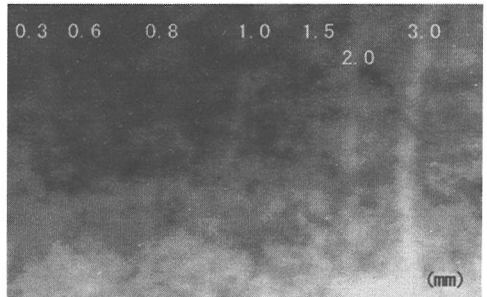
ここで、図-7のように表面に造影剤が充填したパイプを配置した撮影条件にすることによって図-5中の d_1 は d となることからひび割れを透過したX線強度 I_2 は、式(10)のようになる。

$$I_2 = I_0 e^{-(\mu_1 d + \mu_2 d_2)} \quad (10)$$

この様な結果をもとに、各コンクリート厚さごとに検出可能であった造影剤厚さから、検出可能なコント



(コンクリート厚さ143mm, フィルム感度#100)



(コンクリート厚さ225mm, フィルム感度#100)

写真-2 造影剤充填パイプの検出フィルム

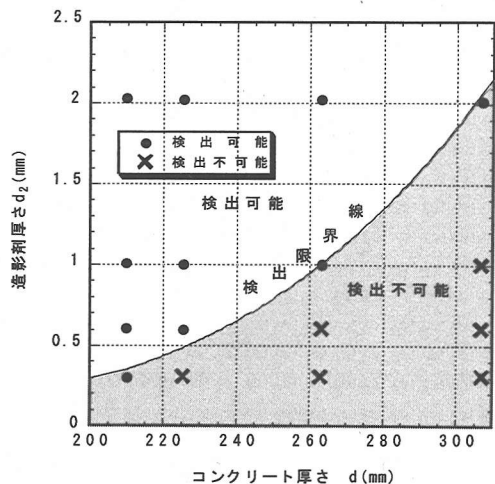


図-8 検出可能なひび割れ厚さとコンクリート厚さとの関係

ラスト C を求める。式(8b)より、濃度差 D' はコントラスト C であるから、式(8b)に式(6)、(10)を代入してまとめると、

$$C = \gamma \mu_2 d_2 \log_{10} e \quad (11)$$

となる。この式は、X線フィルム上の造影剤部分のコントラストを求める式である。検出可能であった最小の造影剤厚さの条件をこの式に代入すると、次のようになる。

コンクリート厚さ 143 および 210mm の場合

$$C \approx 0.01 \quad (\gamma = 2.04, \mu_2 = 0.43/\text{cm}, d_2 = 0.03\text{cm})$$

コンクリート厚さ 225mm の場合

$$C \approx 0.02 \quad (\gamma = 2.04, \mu_2 = 0.43/\text{cm}, d_2 = 0.06\text{cm})$$

コンクリート厚さ 263mm の場合

$$C \approx 0.04 \quad (\gamma = 2.04, \mu_2 = 0.43/\text{cm}, d_2 = 0.10\text{cm})$$

コンクリート厚さ 307mm の場合

$$C \approx 0.08 \quad (\gamma = 2.04, \mu_2 = 0.43/\text{cm}, d_2 = 0.20\text{cm})$$

ここで、一般的に人間の目で識別できる最小のコントラストは 0.01⁵⁾ と言われている。本実験において、供試体厚さ 210mm 以下の場合、コントラスト $C \approx 0.01$ が求められていることから、式(11)が適用可能であると考えられる。しかし、コンクリート厚さが 225mm 以上では、式(11)で算出した検出可能コントラスト C が 0.01 を超えている。その理由としては、散乱X線の影響が想定以上に増大したことが考えられる。

一般にX線は、コンクリートを透過する際、吸収と散乱によって減弱する。ここで、式(11)中の μ_2 は光電効果(吸収)による係数 τ とコンプトン効果(散乱)による係数 σ の和で表される。X線の出力が小さい場合は、光電効果が支配的であるが、X線の出力が 300kV と本実験の条件のように大きい場合には、コンプトン効果が支配的となる。コンクリート厚さが大きくなることによって、撮影時間が長くなると、コンプトン効果による散乱X線も多く発生することになる。

このように式(11)には、散乱X線の影響も考慮されているが、コンクリート厚さが 225mm より大きくなった場合の式(11)における散乱X線による影響については、さらに検討する必要があると考えられる。この問題は、今後の検討課題としたい。

(2) コンクリート内部でのひび割れ位置とコントラストとの関係

前述の(1)検出可能な造影剤の厚さを求める実験では、コンクリート表面に貼り付けた、ひび割れを想定した造影剤充填パイプをX線透過撮影によって検出する実験を行った。しかし、実際のコンクリート構造物では、ひび割れは内部に存在するものである。そこで、ひび割れを想定した造影剤充填パイプをコンクリート供試体表面部より、様々な深さ方向に埋め込み、パイ

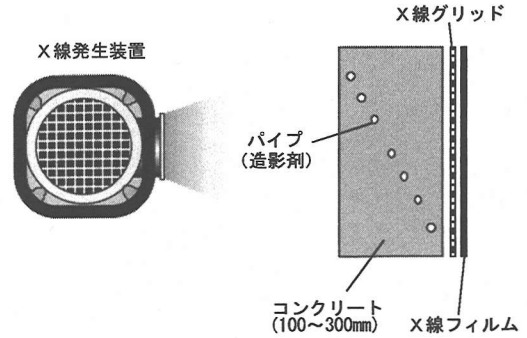


図-9 実験装置

プの検出を行い、深さごとの検出状況の確認を行った。

図-9に示す実験装置を用いて造影剤を充填したパイプの検出実験を行った。撮影は、表-1に示した条件とし、X線フィルム#100とHR-16増感紙を用いた。コンクリート供試体には、X線照射面から10mm間隔で造影剤を充填した直径0.3mmのパイプが配置されたものを用いた。また、供試体厚は、造影剤を充填したパイプが検出困難になるまで実験を行った。

写真-3は、造影剤を充填した直径0.3mmのパイプを配置した供試体において、コンクリート厚が180mmのときのX線撮影によって得られたX線フィルムを示す。図中の数字は、X線照射面のコンクリート表面からパイプまでの距離(mm)を示す。X線フィルムからは、ひび割れを想定した造影剤充填パイプの位置がどの位置にあっても、コントラストは0.01以上であり検出状態にはほとんど差はなかった。しかし、コンクリート厚を225mmより大きくした場合、コントラストは0となり、全ての造影剤充填パイプは、同時に検出不可能となった。

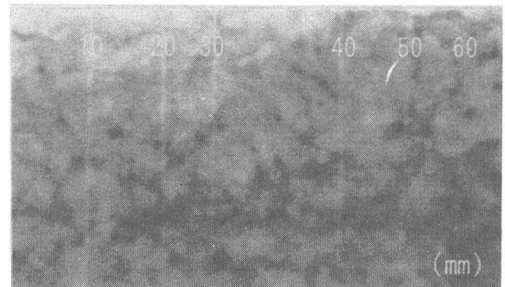


写真-3 造影剤の配置別による検出結果(φ0.3mm)

また、同様の実験を、パイプ径 1.0mm に置き換えて行った場合においても、供試体厚が 265mm よりも大きくした場合、コントラストは 0 となり、これまで検出可能であった全てのパイプは、同時に検出不可能となった。

従って、この実験結果より、同じ供試体内にある造影剤充填パイプは、深さ方向の配置位置に関係なく、その X 線フィルム上のコントラストは、ほぼ同じであることが分かった。

4. コンクリート供試体を用いたひび割れ検出

これまでに得られた結果が実際のコンクリート構造物に適用できるかどうかを確認するため、造影剤を鉄筋コンクリート供試体に発生した曲げひび割れに注入し、X 線造影撮影を行った。

(1) 実験方法

図-10 は、実験に使用した供試体を示したものである。供試体寸法は 200×200×550mm、200×250×550mm の 2 種類を 5 体ずつ、計 10 体用いた。供試体には異形鉄筋 D13 を 1 本配置し、3 点曲げ載荷により非貫通の曲げひび割れを発生させた。

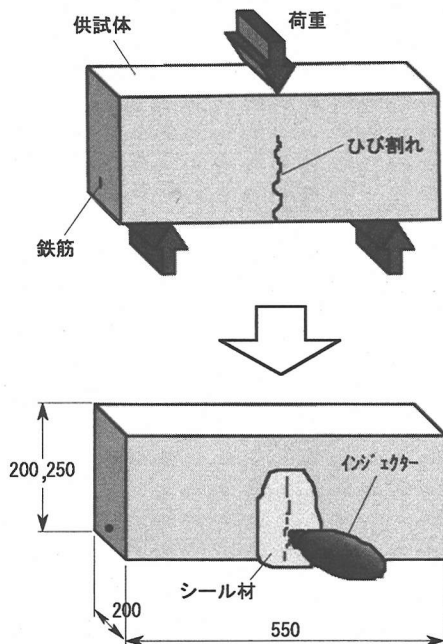


図-10 実験供試体作製方法

供試体厚 200mm および 250mm の場合、それぞれひび割れ開口幅は 0.2mm および 0.7mm であった。

ひび割れ発生後、表面のひび割れに造影剤注入器具（インジェクター）の取り付けパイプを接着し、パイプ下部を表面ひび割れと一緒に非浸透性のコーティング材でシールした。コーティング材が硬化後、造影剤注入前の撮影を行った。その後造影剤をインジェクターにより内圧 0.3N/mm² で圧入し、供試体底面（ひび割れ開口側）方向から X 線を照射し、造影撮影を行った。

X 線造影撮影の撮影時間を決めるために、ポケット線量計を用いて透過線量の測定を行った。撮影条件は、表-1 によった。X 線フィルム #100 と HR-16 を使用する場合の最適透過線量は、図-4 から求め 23 (μSv) とした。そこで線量計の値が 23 (μSv) となるような撮影時間を求めた結果、供試体厚 200mm および 250mm の場合、それぞれ 70 秒および 289 秒となった。

(2) 実験結果

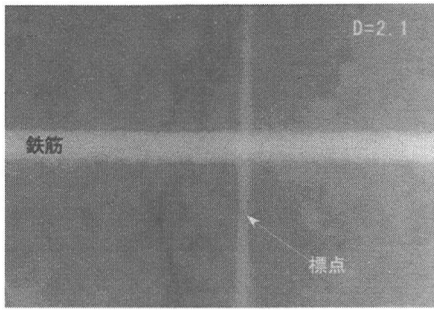
写真-4 は、厚さ 200mm の供試体における結果の一例を示すものである。写真には、造影剤を注入する前に撮影した X 線フィルム (a) と造影剤注入後の X 線フィルム (b) とが示されている。また、いずれの写真においても、フィルム濃度は写真中に書かれているように、2.1 および 1.9 と 2.0 に近い値となった。

ここで、X 線フィルム上で水平方向の太い線が異形鉄筋、鉛直方向の細い白線が鉛の標点棒である。フィルム (a) における鉛直方向の蛇行する黒い影およびフィルム (b) における鉛直方向の蛇行する白い束線が検出されたひび割れである。

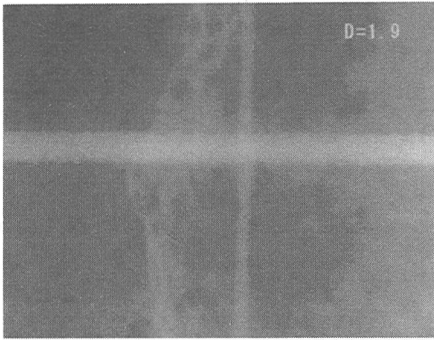
これらの X 線フィルムより、造影剤注入前では一部のひび割れが黒く検出できたが、鮮明ではなかった。造影剤注入後には鮮明なひび割れ群を検出することが出来た。

また、厚さ 250mm の供試体における結果では、写真-4 の場合と同様に、造影剤注入前では不鮮明な一部のひび割れが黒く検出できたが、造影剤注入後にはかなり鮮明なひび割れを検出することが出来た。ただし、供試体厚 200mm と比較すると、検出できるひび割れの鮮明度は低下していた。

これらの実験結果より、一般に X 線造影撮影を行ったフィルム上で検出されるひび割れは、白くはっきりとみえる曲がりくねった線群と白くぼんやりとした灰色の領域に分けられる。特に白く明瞭にみえる複数の曲がりくねった線は、主ひび割れが作り出す凹凸のうち、X 線方向と平行または平行に近い部分であると考



(a) 造影剤注入前



(b) 造影剤注入後

写真-4 X線フィルム(供試体厚 200mm)

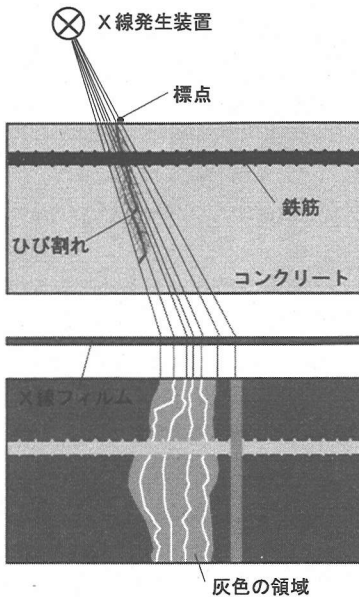


図-11 X線フィルムに投影される像

えられる。灰色の領域は、X線方向と直角または直角に近い部分および主ひび割れから枝分かれした微細ひび割れに造影剤が浸透している領域であると考えられる。これを模式的に表すと図-11 のようになる。このX線照射方向に平行または平行に近い部分の長さが、図-8 に示した検出可能な造影剤厚さ以上であれば、ひび割れの検出が可能であるといえる。

5. ひび割れの先端位置測定

コンクリート構造物に非貫通のひび割れが発生した場合、このひび割れの深さ、すなわち先端位置がどこまで達しているのかを調べることは、そのひび割れが構造物に及ぼす影響を判断する上で重要なことである。X線造影撮影法を用いれば、コンクリート構造物中に発生したひび割れの先端位置を求めることが可能であると考えられる。そこで、確認実験として、実構造物を想定した鉄筋コンクリート供試体に非貫通ひび割れを発生させ、そのひび割れの先端位置の測定^{7)~10)}を行った。

(1) 実験方法

コンクリート構造物中に非貫通のひび割れが存在した場合、このひび割れの先端位置を測定するためには、対象とするひび割れの開口位置から少し離れた異なる2地点以上においてX線源を移動してX線造影撮影法を行えばよい。図-12 はひび割れ先端位置測定方法を示したものである。図中A点およびB点にお

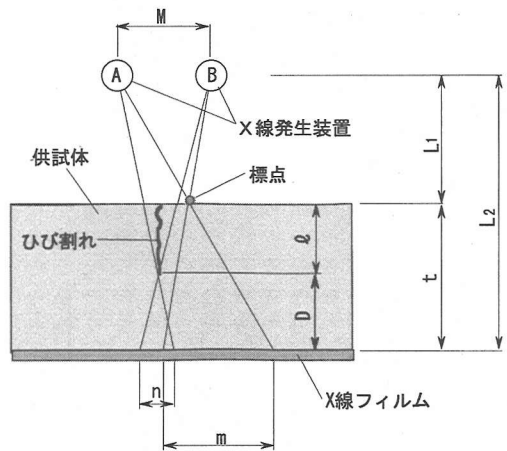


図-12 ひび割れ先端位置測定方法

ける撮影によって得られたX線フィルム上のひび割れ先端部の移動距離を n 、標点の移動距離を m 、X線源から構造物表面までの距離を L_1 、X線源の移動距離を M とする。構造物の厚さ t は、式(12)となり、

$$t = m \frac{L_1}{M} \quad (12)$$

非貫通部分の長さ D は式(13)となる。

$$D = \frac{n(L_1 + t)}{M + n} \quad (13)$$

よって、求める表面からひび割れ先端位置までの長さ l は、式(14) で求めることができる。

$$l = t - D \quad (14)$$

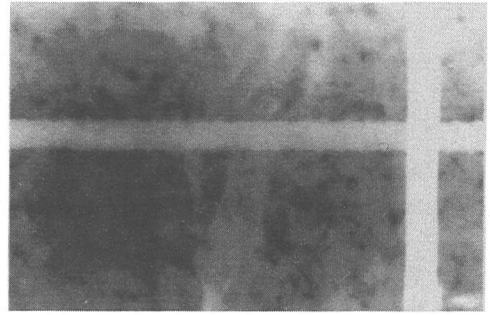
実験には図-11 に示したものと同一形状で寸法 180 × 250 × 500mm の供試体 5 体を使用した。供試体に発生させた曲げひび割れ（開口幅 0.2~0.5mm 程度）に造影剤を注入後、X線源を移動して複数回撮影を行いひび割れ先端位置の測定を行った。

(2) 実験結果

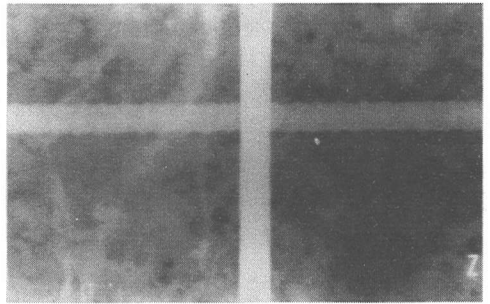
写真-5 は、供試体に造影剤を注入後、ひび割れに対して異なるA地点およびB地点にX線源をおいて撮影したX線フィルムを示したものである。X線源の移動によって撮影されたひび割れや標点棒の位置が移動しているのが写真から分かる。

図-13 にこれらのX線フィルムから、式(12)、(13) および (14) を用いて求められたひび割れ先端位置の一例を示す。この図は、ひび割れの入った断面を正面から見た図であり、縦軸が供試体高さ、横軸が供試体幅となる。図中の○印は、3点曲げ载荷によって供試体に非貫通のひび割れ（ひび割れ開口幅 0.413mm）を入れたときに供試体の両側面において目視により確認できたひび割れの先端位置である。網掛けされた部分は、実験終了後、供試体を割裂して調べた、造影剤が浸透していた領域を示している。造影剤には注入されていた領域が分かるように予め赤インクで色づけを施しておいた。図中の▲印は、X線造影撮影によって得られたX線フィルムに対して、上記の方法より求めたひび割れ先端位置である。

この図から、造影剤注入領域の先端位置と、X線フィルムの解析から求めたひび割れ先端位置との誤差は、



(a) A点より撮影



(b) B点より撮影

写真-5 X線フィルム

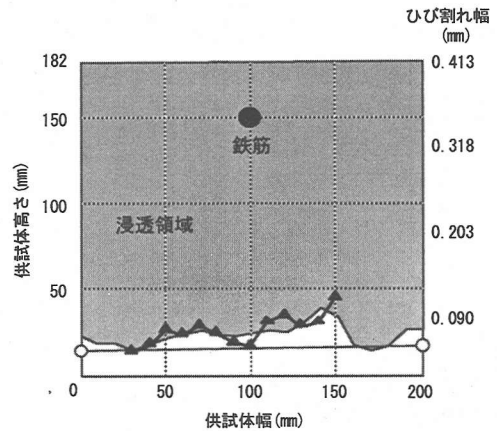


図-13 ひび割れ先端位置

約 5mm 程度であり、かなりの精度で一致していた。また、ひび割れ先端位置におけるひび割れ幅は、0.02~0.09mm 程度であり、この幅のひび割れまで造影剤が充填され、検出が可能であった。

6. ひび割れの内部形状検出

コンクリート構造物に発生したひび割れの開口部から先端までの内部形状を調べることが出来れば、構造物がどのような方向から力を受け、どのように変形したかなどを知ることができる。また、どの方向にひび割れが進んでいくのかも推定することができ、構造物の耐久性診断や補強を行う上で重要なデータになるものと思われる。X線造影撮影法を用いれば、コンクリート構造物中に発生したひび割れの先端位置を求めるのと同様に、ひび割れの内部形状を求めることが可能となると考えられる。そこで、その基礎実験として、厚さ 100～150mm の供試体に、貫通ひび割れを発生させ、そのひび割れの内部形状検出を行った¹⁾。

(1) 実験方法

a) ひび割れ形状測定方法

図-14 にひび割れ形状検出原理を示す。ひび割れの形状を測定するためには、目標とするひび割れに対して、片側の2点(図中A点、B点)においてX線造影撮影法を行えば良い。A点の位置は、前標点に対して垂直の位置で撮影を行わなければならない。計算方法は、ひび割れ先端位置の測定同様、A点からB点へのX線源の移動によるX線フィルム上での標点とひび割れ変曲部の移動距離から、(12)～(14)に示す式によって、各ひび割れ変曲部の鉛直方向の距離(l)を求める事ができる。そして、後標点からひび割れ変曲部ま

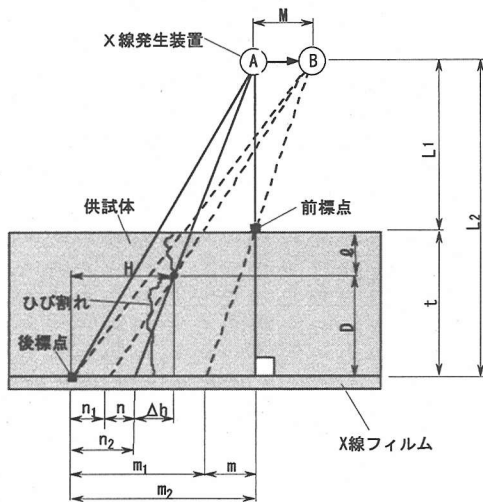


図-14 ひび割れ形状検出原理

での水平方向の距離(H)は、式(15)によって求めることができる。

$$H = n_2 + \frac{n(m_2 - n_2)}{M + n} \quad (15)$$

b) 実験供試体および撮影方法

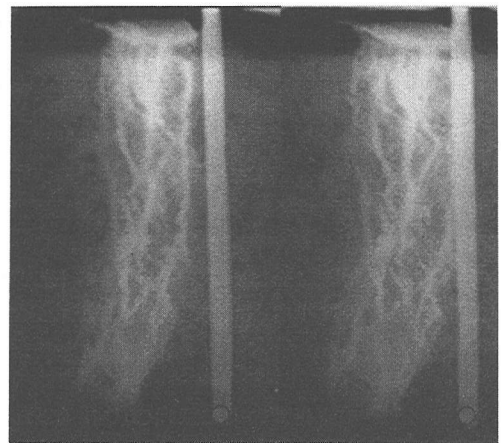
実験には、100×100×400mm および 100×150×400mm のコンクリート角柱を供試体として用いた。配合は表-2に示す値を用いた。内部形状検出に用いるひび割れは、この供試体を、3点曲げ荷重によって曲げ破断した断面を使用することとした。そのため、供試体を破断した後、再び破断面を密着させ、シーラ剤で上面を除いた側面部分をコーティングした。次に、X線フィルム上で計測するのに必要な鉛製の標点を供試体表面に接着した。

撮影は、表-1に示した条件とし、X線フィルム#50と鉛箔増感紙を用いて行った。

(2) 実験結果

写真-6に、X線造影撮影法によって撮影した供試体内部のひび割れ(A地点)と、この撮影位置より46mm移動して撮影した供試体内部のひび割れ(B地点)の一例を示す。

これら2枚のX線フィルムから、肉眼実体視によって、また鏡式実体鏡を用いることによって3次的にひび割れを見ることが出来た。その結果、フィルム上に写っている複数の筋は、ひび割れの変曲点が写って



左撮影

右撮影

写真-6 X線フィルム

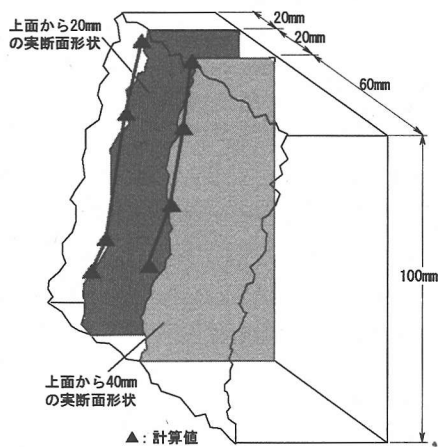


図-15 ひび割れ形状測定結果

いるものだということが確認された。そこで、その変曲点の位置を、図中の二枚のX線フィルムのひび割れの移動距離から算出した。

図-15は、X線フィルムより算出したひび割れの形状と、破断面の実測により求めたひび割れの形状を比較したものである。図中の三角印は、供試体上面から20mm、40mmの位置の断面で算出したひび割れ形状である。また、図中の断面は、実験終了後、供試体を割裂し、それぞれの断面のひび割れの形状を実測したものである。これらの結果から、X線フィルムから算出したひび割れ形状と、供試体を再度割裂して測定したひび割れ形状とが良く一致しているのが分かる。

7. まとめ

本研究は、X線造影撮影法を用いて、コンクリート構造物内部のひび割れを非破壊的に検出する技術を開発することを目的としたものである。本実験の範囲内において、以下のことが言える。

(1) コンクリート試験体にX線を照射した場合に、試験体裏面に貼り付けたX線フィルムに最適な濃度を与えるX線エネルギーについて理論的に検討し、これまでほとんど明らかにされていない種々のフィルムと増感紙との組み合わせを用いた場合におけるコンクリート厚さと最適X線照射時間との関係図(露出線図)を求めた。

(2) コンクリート内部のひび割れを検出するためには、粒子が比較的小さい#100フィルムと撮影時間が短

くなるHR-16の組み合わせを用いた場合が、最適であることが分かった。

(3) 現場において透過線量を測定すれば、予め求めてある透過線量とフィルム濃度との関係図から試し撮りを行うことなく、能率的に最適なフィルム濃度となるための撮影条件を求めることができることを明らかにした。

(4) コンクリート試験体表面に、内径0.3mm~2.0mmの造影剤充填パイプを配置し、X線撮影によってパイプの検出実験を行った結果、検出可能となる造影剤厚さ(パイプ内径)とコンクリート厚さとの関係を求めることが出来た。また、散乱X線の影響により、コンクリートの厚さが大きくなるほど検出効果が薄まることが分かった。

(5) 同じコンクリート試験体の表面から深さを変えて造影剤充填パイプ(φ0.3mm)を配置し、X線撮影による造影剤の検出実験を行った結果、造影剤検出精度は、深さ方向の配置位置に関係無いことが分かった。

(6) コンクリート内に発生したひび割れに造影剤を注入し、X線造影撮影法を用いてひび割れの検出を行った結果、X線フィルムに白く明瞭に見える複数の曲がりくねった線と灰色に見える領域が検出された。特に白く明瞭に見える複数の曲がりくねった線は、主ひび割れが作り出す凹凸のうち、X線方向と平行または平行に近い部分であり、灰色の領域は、X線方向と直角または直角に近い部分および主ひび割れから枝分かれした微細ひび割れに造影剤が浸透している領域であると考えられる。

(7) コンクリート構造物内部に発生した非貫通ひび割れの先端位置を測定するためには、対象となるひび割れの開口位置から少し離れた異なる2点においてX線造影撮影を行い、2枚のフィルムを解析することにより求められることを明らかにした。また、実際のコンクリート構造物を想定した供試体(厚さ180mm)を用いてひび割れ先端位置を測定した結果、実際のひび割れ先端位置と5mm程度の誤差で測定することが出来た。

(8) コンクリート構造物に発生したひび割れの内部形状を求めるためには、対象となるひび割れの開口位置から少し離れた位置の標点に対して垂直の位置と、そこから少し離れた点においてX線造影撮影を行い、2枚のフィルムを解析することにより求められることを明らかにした。また、実際の供試体(厚さ100および150mm)を用いてひび割れの内部形状を測定した結果、実際のひび割れ形状と測定したひび割れ形状とが良く一致しているのが分かった。

参考文献

- 1) 大塚浩司：X線造影撮影による鉄筋コンクリートの微細ひびわれ検出，コンクリート工学年次論文報告集，第10巻第3号，pp. 145-150, 1988. 10.
- 2) 大塚浩司：X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究，土木学会論文集，No. 451/V-17, pp. 169-178, 1992. 8.
- 3) Otsuka, K. : X-Ray Technique with Contrast Medium to Detect Fine Cracks in Reinforced Concrete, International Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy (Sendai, Tohoku Uni.), 1988. 10.
- 4) Otsuka, K. : Detection of Fracture Process Zone in Concrete by Means of X-Ray with Contrast Medium, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Elsevier Applied Science, pp.485-490, 1992.6.
- 5) 内田 勝, 山下一也, 稲津 博：放射線技術者のための画像工学，通商産業研究社，1978. 7.
- 6) 特許第 2113200 号：コンクリートのひび割れ検出方法に用いるX線造影剤及びコンクリートのひび割れ検出方法，1996. 11.
- 7) 武田三弘，大塚浩司，佐野 正：X線造影撮影法によるコンクリート実構造物のひび割れ検査技術の開発，土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp. 664-665, 愛媛大学城北地区，1995. 9.
- 8) 武田三弘，大塚浩司，佐野 正，長内賢造：コンクリート構造物に発生した非貫通ひび割れの先端位置測定に関する研究，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部（平成 8 年 9 月），pp. 1168-1169, 1996. 9.
- 9) Otsuka, K. and Takeda, M.: Detection and Simultaneous Repairing of Cracks in Reinforced Concrete Structures, 1997 International Conference on Engineering Materials, Volume II, pp.89-98, 1997.6.
- 10) Otsuka, K. and Takeda, M.: Injection Material for Cracks with Combining Function of Repair and X-Ray Contrast, 25th Anniversary Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, pp.507-514, 2000.8.
- 11) 武田三弘，大塚浩司，佐野 正：コンクリート構造物に発生したひび割れの内部形状検出に関する研究，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部（平成 9 年 9 月），pp. 692-693, 1997. 9. 10.

(2002. 4. 17 受付)

DETECTION OF FINE CRACKS BY X-RAY TECHNIQUE WITH CONTRAST MEDIUM IN CONCRETE

Koji OTSUKA and Mitsuhiro TAKEDA

The purpose of this study is to develop a method for non-destructively detecting shape and distribution of fine cracks in concrete using X-ray radiography with contrast medium. Firstly, the conditions under which a radioparency dosage penetrates into the concrete structure, and makes a shadow of moderate concentration on X-ray film, were obtained. Next, experiments on an optimum combination between film and intensifying screen and detection condition of the crack were carried out in order to detect the crack in the concrete structure. In order to be applicable for existing structures, the contrast medium was injected into a reinforced concrete specimen in which bending cracks were generated, and the inside crack location was detected using the X-ray technique.