

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

大塚浩司*

本研究では、コンクリートの新しい非破壊試験方法として、X線造影撮影法の開発を行った。また、得られた手法および選定された造影剤を用いて、両引供試体、重ね継手供試体およびはり供試体内部の鉄筋周辺に発生・成長する微細ひびわれを検出し、更に、それらの形状を従来の「赤インク注入法」によって得られているものと比較検討するとともに、微細ひびわれの立体形状や骨材寸法の影響などについて考察した。

Keywords: non-destructive test, X-ray inspection technique, contrast media, internal fine cracks

1. まえがき

鉄筋コンクリートは、複合材料であるコンクリートに更に鉄筋を結合させた幾重もの複合構造を有しており、荷重条件や環境条件によって、その力学的挙動は極めて複雑に変化する。特に、その挙動に影響を及ぼすものはコンクリートに発生するひびわれである。部材表面に見えるものばかりでなく、内部にも微細なひびわれが多数発生し、その発生、累積、連結、成長がコンクリートの非線形挙動の起因となっている。また、異形鉄筋の周りのコンクリートに発生する内部のひびわれの方向や数などの性状は、鉄筋からコンクリートへの力の伝達機構に密接な関係を持っている。従って、鉄筋コンクリートの力学的挙動を、その現象が生起される機構を踏まえて、より合理的に表現するためには、まず、これらのコンクリート内部に発生する微細なひびわれの性状を知る必要がある。

コンクリート表面の微細なひびわれの観測は、光学顕微鏡や電子顕微鏡、フォログラフィックモアレ、レーザー分光など種々の方法でなされている。しかし、コンクリートの表面と内部とでは応力状態が異なっている場合があり、特に内部の異形鉄筋の周りのコンクリートに発生する微細なひびわれなどは表面では観測することができない。従って、コンクリート内部に実際に発生しているひびわれを観測する必要があるが、その方法はあまり多くない。

従来より、筆者は、このコンクリートの内部ひびわれを観察する手法として、後藤ら^{1),2)}によって開発された、あらかじめコンクリート中に設けた細い孔に赤インクを注入しておき、内部ひびわれが発生し、この孔を横切る際に、その負圧を利用してインクを注入し、後でコンク

リートを縦割りにして中を観察する、いわゆる「赤インク注入法」を用いてきた。この方法は、内部ひびわれを肉眼で直接確認できる利点はあるが、鉄筋応力の増加につれて変化する、ひびわれの発生・成長の状況を同一の供試体では観察することができないという欠点があった。

コンクリートのひびわれや内部欠陥を非破壊的に検査する方法としてのX線透過撮影は従来より用いられている。しかし、通常のX線透過撮影ではコンクリートの内部の微細なひびわれを検出することはできない。

そこで、本研究は、上述の赤インクの代わりに造影剤をコンクリート中に設けた細い孔に注入し、X線透過撮影を行えば、微細なひびわれの発生、成長を連続的に検出することができるのではないかという発想のもとで、その手法を開発するための基礎的な実験を行ったものである。X線造影撮影は現在、主として、医学の分野で広く用いられているものであるが、それをコンクリートに応用した例は他になく、本研究が最初のものと考えられる。

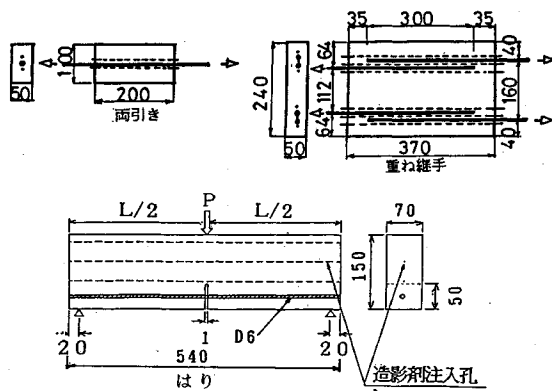
研究においては、まず、本研究の目的に適するX線造影剤を選定するための性能比較実験を行い、次に、選定された造影剤を用いて、両引供試体、重ね継手供試体およびはり供試体における微細ひびわれの検出実験を行った。更にX線造影撮影法で検出した微細ひびわれの性状を、赤インク注入法で得られているひびわれの性状と比較検討するとともに、コンクリート内部のひびわれの立体形状や粗骨材の最大寸法の影響などについても検討した。

2. 実験材料および実験方法

(1) 供試体および載荷方法

実験には早強ポルトランドセメントを用いたモルタルおよびコンクリートを使用した。骨材は、細粗とも河川産のものを使用し、最大寸法は5mm(モルタル)、10

* 正会員 工博 東北学院大学教授 工学部土木工学科
(〒985 多賀城市中央 1-13-1)



図—1 供試体の形状・寸法

mm および 15 mm (コンクリート) である。配合は、全て水セメント比 50% とし、細粗骨材の重量比を 1:1 とした。

供試体は、図—1 に示すような形状寸法をもつ、鉄筋コンクリートの両引供試体 (D16 鉄筋使用)、重ね継手供試体 (D16 鉄筋使用) およびはり供試体 (D6 鉄筋使用) の 4 種類である。供試体は、X 線装置の撮影範囲およびフィルムの寸法から比較的小型のものを使用した。また、供試体の厚さは、X 線の透過効果についての予備試験の結果から 50 mm および 70 mm と定めた。供試体コンクリート中には、造影剤を注入するために、あらかじめ鉄筋と平行に数本の細孔 (内径 2 mm) が設けられている。

両引供試体および重ね継手供試体の場合の载荷には万能試験機を用い、荷重を段階的に増加させ (両引供試体の場合は鉄筋引張応力度 250 kgf/cm² (24.5 MPa) 毎、重ね継手供試体の場合は同 125 kgf/cm² (12.3 MPa) 毎)、それぞれの段階で X 線造影撮影を行った。両引供試体は、早い段階での縦ひびわれの発生を防ぐために、あらかじめ、鉄筋軸と直角方向断面の長軸方向にロードセルを介して 30 kgf/cm² (2.9 MPa) の側圧をかけた状態で载荷した。

はり供試体の場合の载荷は、万能試験機に曲げ試験用の装置を取り付け、中央一点载荷で行った。荷重を徐々に増加させ、ロードセルで測定した荷重と、スパン中央引張部に設けたノッチを跨いで取り付けられた変位計で測定した開口変位とを X-Y レコーダによってモニターし、最大荷重前後およびひびずみ軟化域において、数段階で X 線造影撮影を行った。

(2) 造影剤

造影剤とは、一般に、医学の分野で多く用いられているもので、検査する臓器と周囲組織との間に X 線の透過率の差を生じさせる物質である。造影剤には、X 線吸収率が周囲組織より大きく、造影剤に含まれる部分が白

表—1 性能比較実験に用いた市販造影剤

記号	成分	総塩濃度 w/v %
A	硫酸バリウム	140.0
B	硫酸バリウム	75.0
C	硫酸バリウム	100.0
D	硫酸バリウム	120.0
E	有機ヨード化合物	60.0
F	有機ヨード化合物	30.0
G	有機ヨード化合物	82.3

注) A は粉末 300 g を 135 cc の水に溶かしたもの

い陰影として撮影されたフィルム上に示される陽性造影剤と、逆に、X 線吸収率が周辺組織より小さくフィルム上に黒く示される陰性造影剤とがある。また、使用されている造影剤の成分や濃度、粘性などには、非常に多くの相違がある。そこで、本実験の目的に合致する造影剤を選定する必要がある。その選定に当たって、次のような条件を考えた。

- (1) ひびわれ部と周囲のコンクリート部との間に十分な X 線透過率の差を生じさせ、鮮明なひびわれ像が得られる。
- (2) 微細なひびわれに注入可能である。
- (3) 化学的に安定な物質で、毒性がなく、取扱い上安全である。
- (4) 比較的安価である。

以上の条件のうち (1) と (2) とは実際に実験をする必要があるが、その成分や濃度と (3) と (4) の条件とから種々の造影剤の中から表—1 に示すような、市販の陽性造影剤で、硫酸バリウム系 4 種と有機ヨード系 3 種とを選定した。そして、これらを X 線造影効果やひびわれ浸透性についての比較実験に供した。

造影剤の性能比較実験は、まず、画像消滅電圧測定と動粘性率測定とを行った。次に、性能比較用コンクリート供試体による X 線造影撮影を行い、性能の確認実験を行った。

造影剤の成分元素の種類および量がすべて確認できる場合には、その質量吸収係数を算定することにより容易にその造影性能を比較できる。しかし、医学用造影剤には、人体への副作用を防ぐために種々の薬品が混合されており、それらの成分および量が明示されていないものが多い。画像消滅電圧測定法は、そのような成分元素が確定できない市販の造影剤の性能比較のために考案したものである。画像消滅電圧測定は、プラスチックパイプ (内径 3 mm) の中に液体状の造影剤を注入し、それに X 線を照射し、TV モードで観察すると画面には造影剤が X 線を吸収するため黒い直線が現れる。X 線管電圧を徐々に上昇させると次第に黒い直線が薄れ、やがて消滅する。このときの電圧をここでは画像消滅電圧と呼ぶ。造影性能の高い造影剤ほど画像消滅電圧が高くなることを利用して性能を比較した。

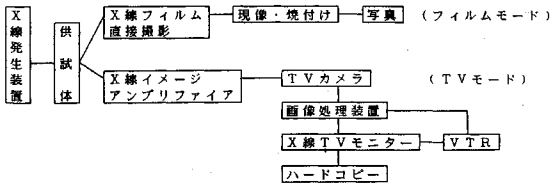


図-2 ひびわれ検出システム

動粘性率測定は、液体状造影剤のひびわれ内への浸透性能を比較するためのものである。流体が運動するときにかかる内部摩擦を粘性と言うが、粘性率 μ を流体の密度 ρ で割ったもの、 $\nu = \mu/\rho$ を動粘性率という。測定は、キャノンフェンスケ粘度計を用いる方法で行った。

各造影剤の実際にコンクリートに発生したひびわれに対する注入性能および造影性能を確認するための実験は、断面 50×100 mm、長さ200 mmの中心軸に1本のD16鉄筋を埋め込み、その鉄筋からわずかに離れた位置に、鉄筋と平行に2本の直径約2 mmの注入孔を設けた両引供試体を用いて、各種比較用造影剤をこの孔の中に注入し、X線造影撮影を行うことによって行った。

(3) X線造影撮影法とひびわれ検出システム

X線造影撮影法は、載荷前に供試体の注入孔に造影剤を圧入しておき、載荷中、連続的あるいは荷重のある段階毎にX線透過撮影を行うものである。撮影されたひびわれを検出するシステムは、図-2に示すような、直接X線フィルムで行う「フィルムモード」と、X線イメージアンプリファイアで受けて行う「TVモード」との2種類で行った。

フィルムモードでは、供試体とX線発生装置との距離を60 cmとし、フィルムは供試体に密着させ、管電圧100~120 kV、電流2 mA、照射時間3分とした。使用したフィルムは、工業用X線フィルム #80 および #100である。フィルムモードは、フィルムの寸法を供試体寸法に合わせれば、同時に供試体全体のひびわれ発生状況を検出できること、解像度が良く、現像したフィルムをシャーカステン（フィルム読影装置）で拡大して見ればかなり微細なひびわれも検出できることなどの利点がある。しかし、フィルム撮影に約3分程度の照射時間が必要で、その間、荷重を一定に持続する必要がある、載荷を連続的に増加できないなどの欠点がある。

TVモードでは、X線発生装置と供試体との距離を90 cm程度とし、供試体とイメージアンプリファイアとの距離を25 cm程度とし、管電圧は50~60 kV、電流は2 mAとした。載荷中連続的にリアルタイムで画像処理した映像をTVモニターで観察すると同時にVTRで録画しておき、必要な箇所は後でより高度の画像処理をしてハードコピーを得た。TVモードは、リアルタイムでひびわれを検出できること、VTRを使用すれば急速な

表-2 造影剤の性能比較実験結果

記号	成分	画像消滅電圧 ekv	動粘性率 cm ² /s
A	硫酸バリウム	4 3. 0	1 0. 5
B	硫酸バリウム	4 1. 0	7 2. 7
C	硫酸バリウム	4 2. 0	6 9. 2
D	硫酸バリウム	4 3. 0	1 9. 5
E	有機ヨード化合物	3 8. 5	5. 4
F	有機ヨード化合物	3 7. 5	2. 1
G	有機ヨード化合物	4 2. 0	1 2. 8

注) Aは粉末300gを135ccの水に溶かしたもの

破壊も後で1コマずつ分解して観察できることなどの利点はあるが、得られた画像が、高度な画像処理をしてもフィルムモードよりもやや画質が劣ること、受像領域(直径180 mmの円)が限られていることなどの欠点がある。

3. 造影剤の性能比較実験の結果

(1) 画像消滅電圧

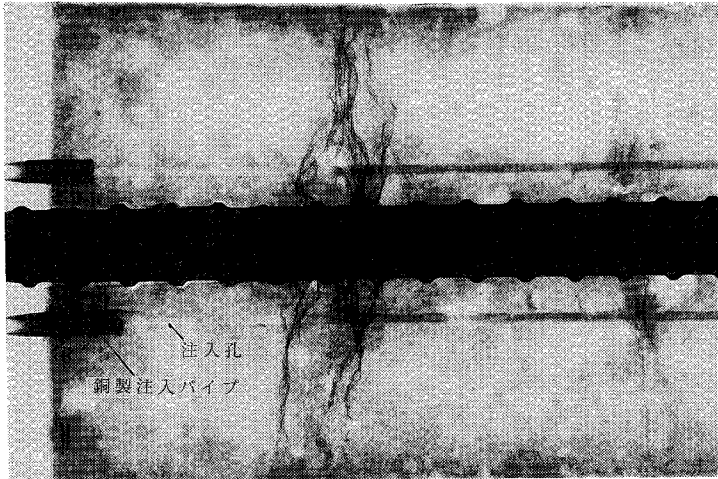
画像消滅電圧の測定結果を表-2に示す。この表から分かるように硫酸バリウム系造影剤AとDが最も高く、その次が硫酸バリウム系のCと有機ヨード系のGである。これらの画像消滅電圧にそれ程大きな差が見られないのは、何れも医学用として実用されている造影剤を比較したためである。しかし、これらの値は、それぞれの成分の総塩濃度に対応していることから、その造影性能を比較するのに使用できると考えられる。

(2) 動粘性率

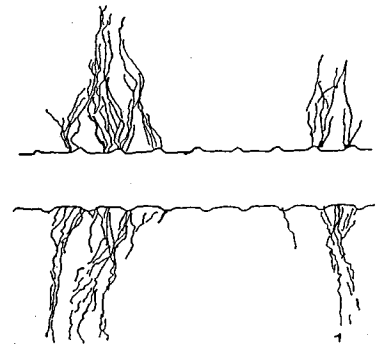
動粘性率の測定結果を表-2の右端に示す。この表から分かるように、Aを除いて、一般的に硫酸バリウム系の方が有機ヨード系よりも動粘性率が大きい。最も小さいものはFであり、Gは有機ヨード系では最も大きい硫酸バリウム系のB、C、Dよりもかなり小さい。

(3) コンクリート中の性能確認

造影剤のコンクリート中での性能比較用供試体実際に各種造影剤を注入し、ひびわれに対する注入性能および造影性能を比較した結果は次のようである。硫酸バリウム系の造影剤4種は、比較的太い注入孔内には十分注入され、X線写真にもその孔の影が明瞭に撮影できた。しかし、異形鉄筋の周辺に発生した微細な内部ひびわれはほとんど撮影できなかった。これは、3.(2)で示した動粘性率測定結果から分かるように、硫酸バリウム系の造影剤は、一般に、粘性が大きく、内部ひびわれ発生時の負圧を利用して微細なひびわれ(普通、その幅は0.01 mm以下)には注入出来なかったためと考えられる。造影剤Aは動粘性率が比較的小さいが、これは粉末を水に懸濁させたもので、分離しやすく、微細なひびわれには水だけが注入されたものと考えられる。有機ヨード系の造影剤3種は、太い注入孔の写り具合で比較すれば、硫酸バリウム系にやや劣るが、微細な内部ひびわれにも注入でき、それをX線撮影で確認することができた。



写真—1 X線造影撮影による微細ひびわれ検出結果：両引供試体⁶⁾
(鉄筋：D16，鉄筋応力度：3 720 kgf/cm² (365 MPa)，骨材
最大寸法10 mm)



図—3 X線フィルム(写真—1)からの
トレース図⁶⁾

ヨード系3種の中では、ヨード含有量が一番多い(440 mg/ml)造影剤Gが最も造影性能が優れていることが確認できた。

以上の実験結果から、造影剤Gは、粘性はやや高いが、微細ひびわれに注入可能で、しかも造影効果が高いことが確認され、本実験の目的に最も適すと考えられたので、以後の実験にはこの造影剤Gを選定、使用した。

4. 微細ひびわれ検出実験の結果

(1) 両引供試体

写真—1は、両引供試体(コンクリート断面50×100 mm，長さ200 mm，1本のD16鉄筋を中心軸に配置したもの)の場合のX線造影撮影による微細ひびわれ検出結果の一例として、鉄筋応力度3 720 kgf/cm²(365 MPa)時のX線写真の一部を示したものである。異形鉄筋のふし付近から多数の複雑な形状をした微細なひびわれが発生し、絡みあいながら成長している様子が検出されている。又、端部付近では、鉄筋とコンクリートとの剝離の状況が明瞭に分かる。造影撮影後のX線フィルムをシャーカステン(読器)を用いて直接観察すれば、かなり微細なひびわれもその陰影の濃淡の差で判別できるが、印画紙に焼き付けると、微細なひびわれの判別が困難となる傾向がある。

そこで、写真—1の場合のシャーカステンに写っているひびわれを直接トレースしたものを図—3に示す。これらの写真および図から分かるように、コンクリート内部には異形鉄筋のふし部より多数の微細なひびわれが発生している。

図—4に写真—1とは同じ条件であるが異なる供試体について、その微細ひびわれが最初に検出された時から



写真—2 インク注入法により得られた内部ひびわれ発生状況
(鉄筋：D51，鉄筋応力度：3 000 kgf/cm² (294 MPa)，
骨材最大寸法：25 mm)

鉄筋降伏後までの5段階における、微細ひびわれの発生状況の検出結果を示す。これらの写真および図から、内部ひびわれは、まず供試体端部近くの鉄筋のふし部に発生し、次に供試体中央部近くに発生すること、そして鉄筋応力度の増加につれて、次第にその数と範囲とを広げていくことなどが分かる。また、供試体端部付近に発生したひびわれの進展方向が、一般に、端部の方に傾斜する傾向が見られるのに、供試体中央部に発生したひびわれは鉄筋軸と直角方向に進展しており、複雑に絡み合いながら次第にその数と領域の幅を広げ、ついには供試体側面に到達している。

これらのX線造影撮影によって検出されたひびわれの状況と、従来の赤インク注入法によって直接観察されたひびわれの状況とを比較するために、赤インク注入法の一例として両引供試体の場合を写真—2に示す。この写真から分かるように、X線造影撮影で検出れたひびわれは、その発生位置や傾きなどの一般的形状は、赤インク

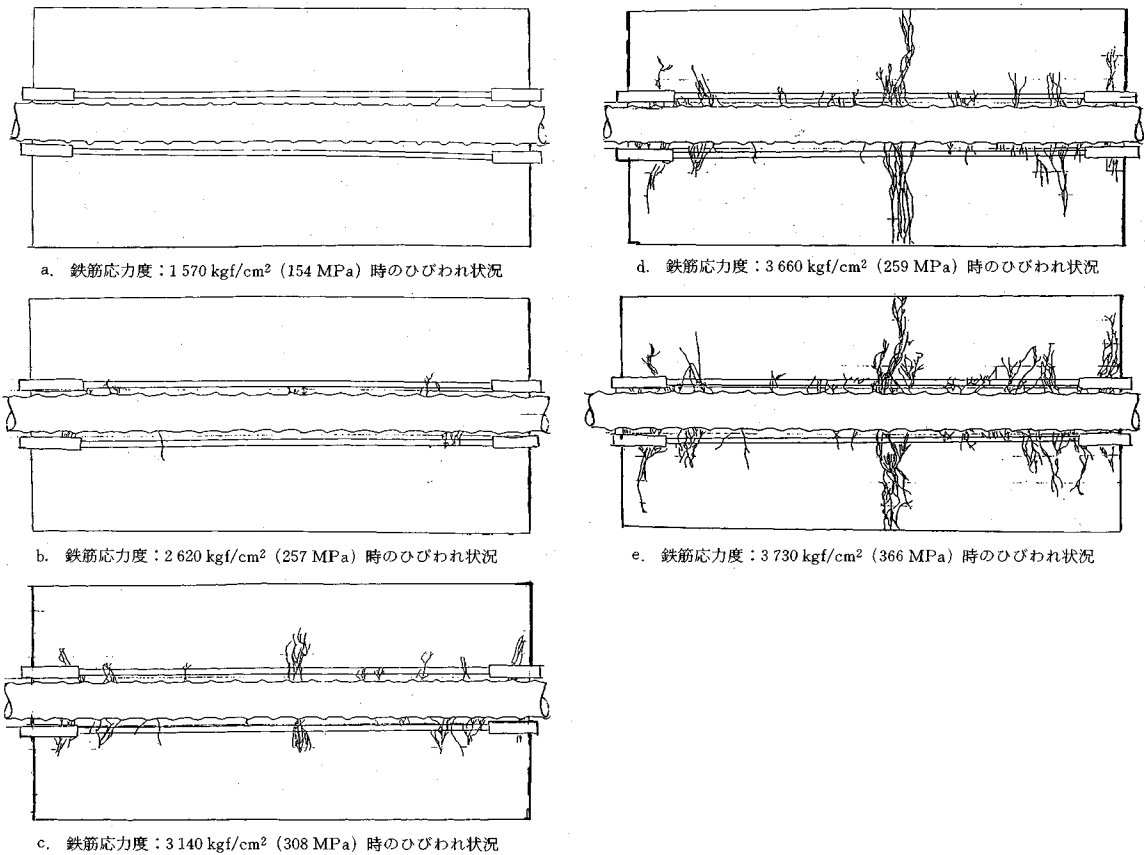


図-4 両引供試体におけるひびわれ進展状況
(X線造影撮影フィルムよりのトレース図, 鉄筋: D16, 骨材最大寸法: 15 mm)

注入法で得られたものと似ているが、かなり相違している面もある。その相違点の主なものは次のようである。

(1) X線造影法では、1500 kgf/cm² (147 MPa)程度で初めてコンクリートに微細ひびわれの発生が検出されているが、赤インク注入法では鉄筋応力度が1000 kgf/cm² (98 MPa)程度以下でもその発生が検出されている。

(2) X線造影法では、鉄筋応力度が高くなっても、ひびわれが検出されていないふしが残存するが、赤インク注入法では、ほぼすべてのふしからひびわれが発生しているのが検出されている。

(3) X線造影撮影では、鉄筋の1個のふしから多数の複雑な形状の微細ひびわれが検出されているが、赤インク注入法では、1個のふし部からほとんどの場合1本の比較的単純な形状のひびわれが検出されている。

これらの相違の内、(1)および(2)が生じる原因としては次のことが考えられる。コンクリート内部をX線で透過撮影する手法は、たとえ造影剤を用いてもその対象が微細なひびわれであれば、割裂して直接内部を観察するインク注入法に較べて検出能力に限界があるため

ではないか。また、相違点(3)が生じる原因としては次のことが考えられる。X線造影撮影では、発生しているひびわれをコンクリート供試体の厚さ方向に集積し、投影したものがフィルムに写っている。従って、1本のひびわれでもその立体形状が複雑であれば、フィルム上には多数本のひびわれとなって検出されるのではない。なお、この(3)については実験的に検討した。その結果は、4.(4)に述べている。

(2) 重ね継手供試体

写真-3は、重ね継手供試体(コンクリート断面50×240 mm, 長さ370 mm, D16鉄筋を純間隔約8 mm離して30 cm重ね合わせた重ね継手を2組並列に配置したもの)の場合のX線造影撮影による微細ひびわれの検出結果の一例として、鉄筋応力度2400 kgf/cm² (235 MPa)時のX線写真を示すものである。この写真から分かるように、重ね合わされた2本の鉄筋の一方から他方へと連結するような内部ひびわれが多数発生している。内部ひびわれの鉄筋軸となす角度は約30度から60度とばらついており、鉄筋の一つのふしから複数本の微細なひびわれが検出されている。

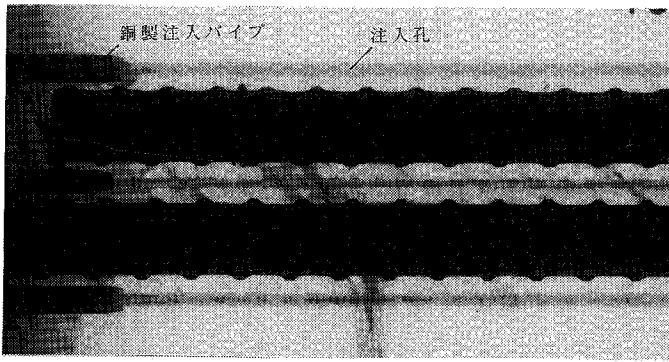


写真-3 X線造影撮影による微細ひびわれ検出結果：重ね継手供試体（鉄筋：D16，鉄筋応力度：2 400 kgf/cm² (235 MPa)，骨材最大寸法：5 mm)

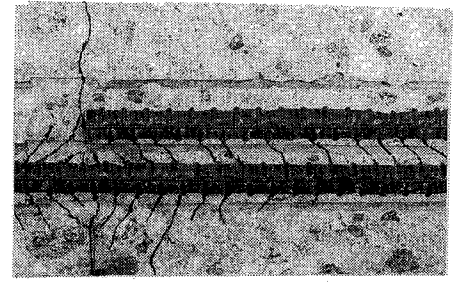


写真-4 インク注入法により得られた重ね継手のひびわれ発生状況（鉄筋：D16，重ね合わせ長さ：25 cm，鉄筋応力度：2 500 kgf/cm² (245 MPa)，骨材最大寸法：25 mm)

なお、継手端部には、荷重の比較的低い段階で、供試体表面に鉄筋軸と直角方向に横ひびわれ（一次横ひびわれ）が発生したが、フィルムにはそれが明瞭には写っていない。これは、造影剤注入の際、写真からも分かるように、銅製の注入パイプがコンクリートに十分固定するために継手端よりも少し内側にまで挿入されており、そのために継手端の一次横ひびわれには造影剤が注入されにくかったと考えられる。

図-5は、X線フィルムから直接トレースした微細ひびわれの発生状況で、最初にひびわれが検出された時から継手破壊直前の鉄筋応力度時までの4段階におけるものである。これらの図から分かるように、鉄筋の引張応力度の増加に伴って、まず、一次横ひびわれの源となる微細な内部ひびわれが、鉄筋軸とほぼ直角方向にいくつか発生し、それらが成長して供試体側面に達する、次にその付近の鉄筋表面位置から鉄筋軸と斜め方向の微細ひびわれが発生し始め、次第にその数を増していく。

写真-4は、比較のために赤インク注入法で得られた重ね継手供試体の場合の内部ひびわれ発生状況を示すものである。写真-3および図-5とこの写真-4とにおける微細ひびわれの発生状況を比較すると、ひびわれの発生位置や一般的な傾きなどの状況は似ていると考えられる。しかし、鉄筋の1個のふし部から発生しているひびわれの数は、写真-3および図-5の方が、特に、2本の継手鉄筋の間の部分において相当多い。

(3) はり供試体

写真-5は、はり供試体（断面70 mm×150 mm，スパン500 mm，D6鉄筋1本配置）の場合のX線造影撮影による微細ひびわれ検出結果を示すものである。この場合、ひびわれ位置を特定するために引張側スパン中央に長さ50 mmの切欠きが設けられている。また、切欠部が画面で黒くなっているのはハレーションを防ぐために予め鉛が挿入されているためである。なお、このはり供試体には、D6鉄筋が1本引張側に入れてあるため、

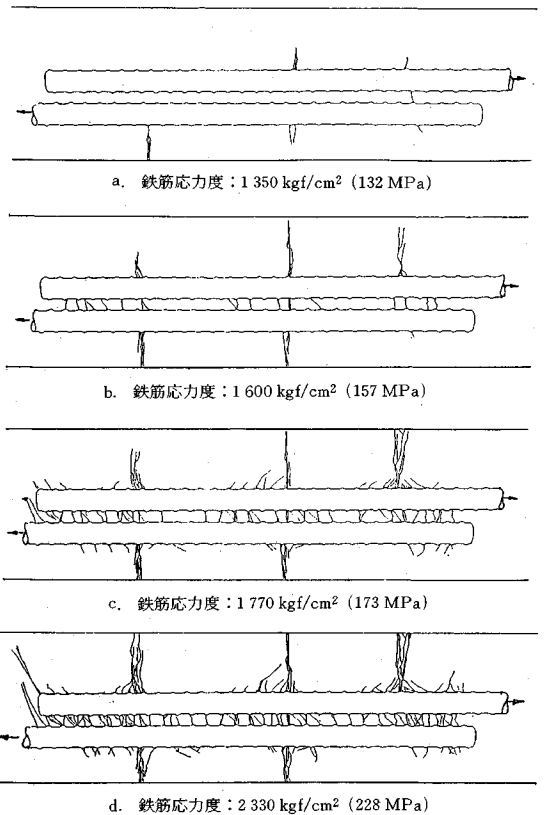


図-5 重ね継手供試体におけるひびわれ進展状況⁵⁾（X線造影撮影フィルムよりのトレース図，鉄筋：D16，骨材最大寸法：5 mm）

はりの急激な破壊を防ぐことができ、ひびわれの進展状況をフィルムモードでX線撮影することができた。

写真-5のa.は、荷重565 kgf (5.54 kN)，開口変位（切欠き入口位置でのひびわれ幅）0.4 mm時のもので、切欠き先端に微細ひびわれが発生した直後の状況であり、この時のひびわれ発生領域の水平方向最大幅は約6 mm，最大長さは25 mmであった。写真の右の図はフィ

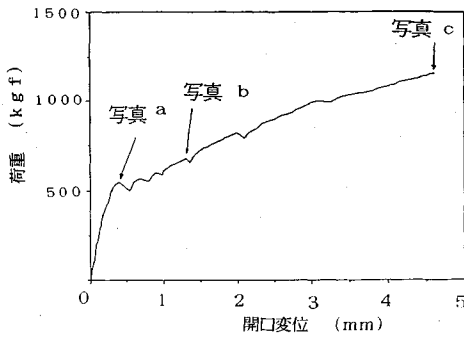


図-6 はり供試体の荷重-開口変位曲線

ルムから直接トレースしたひびわれ状況である。

写真-5の b. は、荷重 680 kgf (6.66 kN), 開口変位 1.3 mm 時のもので、この時のひびわれ発生領域の水平方向最大幅は約 9 mm, 長さは 56 mm であった。微細ひびわれの数および長さがかなり成長していることが分かる。

写真-5の c. は、荷重 1155 kgf (11.32 kN) 時のもので、この時のひびわれ発生領域の水平方向最大幅は約 14 mm, 最大長さは 95 mm であった。

これらの写真から分かるように、微細ひびわれは切欠きの先端から数多く発生し、ある幅をもつ発生領域を形成している。そして、荷重の増加につれて、その領域の幅と長さが次第に増加している。

図-6 は、上記のはり供試体の X線造影撮影と同時に測定した荷重-開口変位関係を示すものである。図中に写真-5の撮影時点が記入されている。なお、曲線に一時的な変位が見られるのは、X線フィルム撮影のため 3 分間荷重の増加を停止した際の乱れである。

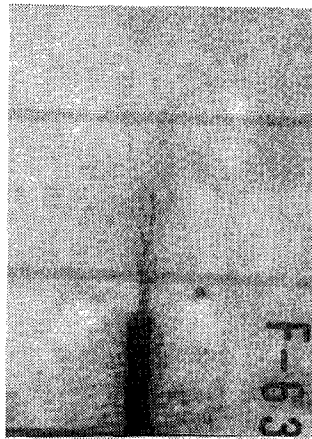
(4) 微細ひびわれの立体的形状

前節で述べたように、X線造影撮影法で検出した微細ひびわれ性状と赤インク注入法で観察したそれとを比較すると、鉄筋の1個のふし付近から派生しているひびわれの数の点で相違することが明かとなった。この原因を解明するには、まず、ひびわれが本来1本であるのにそれが蛇行しているために、X線撮影では集積されて複数本と見えるのか、またはひびわれは本来複数本で発生しているもの、なのかを検討することが必要と考えられる。そのためには、微細ひびわれの立体的形状を調べればよいことになる。

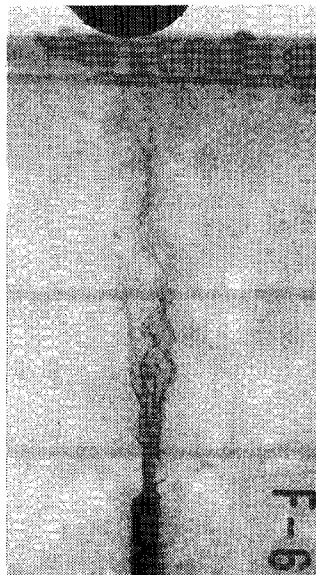
コンクリート内部の鉄筋等の比較的寸法の大きい埋設物や欠陥の位置を、X線を2方向から照射し、得られた2枚のフィルムを解析することによって、それらの立体形状や位置等を求めることは既に実用されている。しかし、種々検討したが、この方法では、造影剤を用いても、本研究で対象としている微細で複雑に絡み合ったひびわれの立体形状を検出するのは困難であることが分



a. 荷重: 565 kgf (5.54 kN) 開口変位: 0.4 mm



b. 荷重: 680 kgf (6.66 kN) 開口変位: 1.3 mm



c. 荷重: 1155 kgf (11.32 kN) 開口変位: 4.6 mm

写真-5 X線造影撮影による微細ひびわれ検出結果: はり供試体 (骨材最大寸法: 15 mm, 写真の右は X線フィルムよりのトレース図: 縮小率 80%)

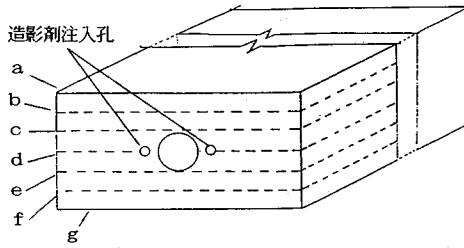


図-7 供試体の切断方向

かった。また、主として医学の分野では、CT スキャンにより人体の断面状況を検出している。また、最近、工業分野でも CT スキャンが使用されて来ているが、本研究のような供試体に载荷した状態でスキャンできるような装置の入手は容易ではない。

そこで、両引供試体 [4.(1) で述べたものと同じ形状寸法] を用いて、造影剤に少量の赤インクを入れて着色し、X線造影撮影を行った後、供試体を図-7のように鉄筋軸と平行に6枚の薄片状に切断し、個々の面において着色されているひびわれを観察し、さらに、これらの面を再び重ね合わせて微細ひびわれの立体形状を検討した。

図-8は、上記の薄片の内、中心線を含む面(面d)で切断した薄片上に観察された、薄赤に着色されたひびわれの状況である。又、図-9は、鉄筋表面から少し離れた面(面c)におけるひびわれの状況である。これらの図から分かるように、一切断面上におけるひびわれは単数ではなく、複数である。そして、骨材を避けるようにまたは巻くように発生している。しかしひびわれの数はあまり多くない。これは、除荷時に微細ひびわれが閉じ赤インクの一部が排出され、観察が困難となったことも考えられるが、この点についてはさらに検討が必要と考えられる。

図-10は、切断面に観察されたひびわれを再び重ね合わせて一枚の図に合成したものである。この図と同じ供試体を载荷中に撮影したX線フィルムをトレースした図-11とを比べると、全体的には似ていると言えるが、中央部に発生した複雑な形状の横ひびわれ群の領域はX線造影撮影の方がやや広い。さらに、X線フィルムには、ひびわれと明瞭には判定できない雲状の影が微細ひびわれ領域の周りに存在している。この領域は更に微細なひびわれの発生領域とも考えられるが、確認できない。このような载荷時におけるX線写真で見られる微細ひびわれ領域と考えられるものは、除荷後におけるコンクリート切断面では見られなかった。

図-12は、ひびわれの立体形状を推定するために、切断面に観察されたひびわれを、左右上下に5mmずつずらして画いたものである。この図からも、ひびわれ面

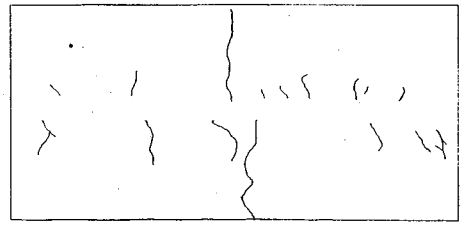


図-8 切断面dにおけるひびわれ状況

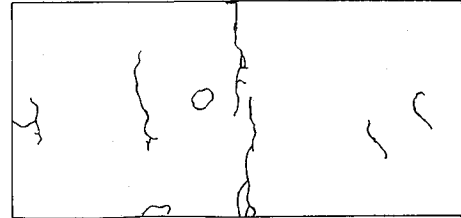


図-9 切断面cにおけるひびわれ状況

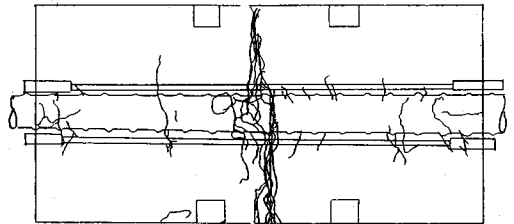


図-10 各切断面のひびわれ状況を重ね合わせた図

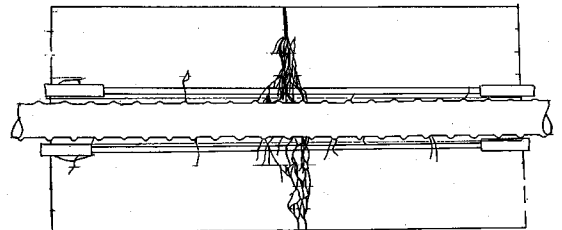


図-11 同じ供試体のX線造影撮影フィルムのトレース図

は単純な面ではなくかなり複雑な凹凸および層をなしていることが分かる。

(5) 微細ひびわれ性状に及ぼす骨材寸法の影響

ひびわれは、4.(4)で述べたように、成長する過程でコンクリート中の骨材の存在のために蛇行する傾向がある。従って、骨材の寸法が微細ひびわれの形状に影響を及ぼしていると考えられる。

そこで、骨材寸法の影響を調べるための実験を行った。その結果の一例として、はり供試体の場合を写真-6(a. :骨材の最大寸法 G_{max} 5 mm, b. : G_{max} 10 mm および c. : G_{max} 15 mm) に示す。これらの写真は、はりの引張側スパン中央に設けた切欠き部から発生したひびわれが成長して一点载荷の载荷点近くに達した時のX線造影

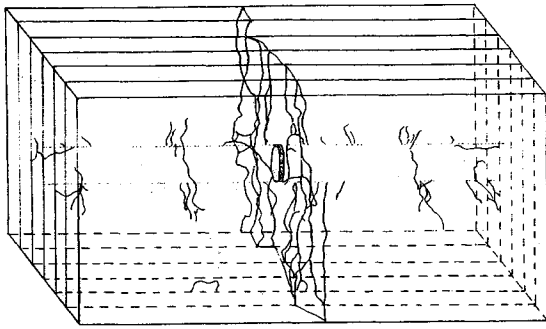


図-12 ひびわれの立体形状

写真である。これらの写真から分かるようにひびわれの発生領域の幅は G_{max} の大きさによって異なる。これらの場合のひびわれ領域の水平方向最大幅は G_{max} 5 mm の時 4 mm, G_{max} 10 mm の時 8 mm, G_{max} 15 mm の時 13 mm である。その他の実験結果を見ても実験値にはかなりばらつきがあるが、骨材の最大寸法が大きい場合には、微細ひびわれの発生領域の幅が大きくなる傾向が見られる。

5. 結 論

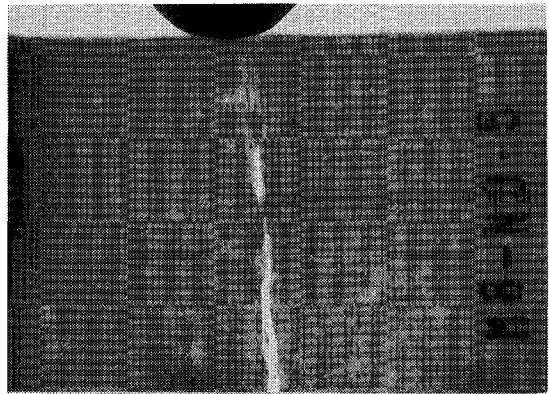
一般に、医学の分野で用いられる X 線造影撮影法を応用して、鉄筋周辺のコンクリートに発生している微細なひびわれを検出する手法を開発するための研究を行い、得られた手法を用いて、両引供試体、重ね継手供試体およびはり供試体の鉄筋周辺における微細ひびわれの性状を調べた結果、実験の範囲内で次のことが言える。

(1) 本研究で開発したコンクリートのための X 線造影撮影法は鉄筋コンクリート内部の微細なひびわれを非破壊的、連続的に検出する手段として有効に使用できると考えられる。ただし、この手法を現場の実構造物に適用するためには、造影剤の種類や注入方法などについてさらに検討する必要があると考えられる。

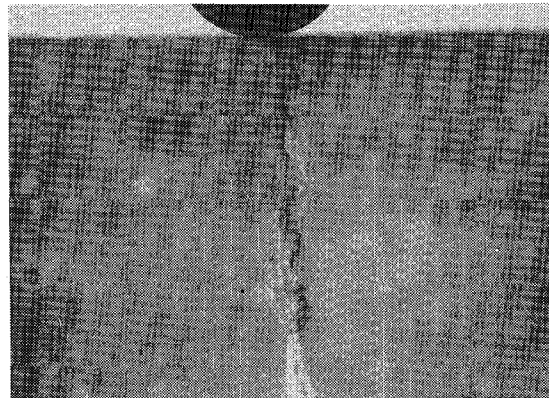
(2) コンクリートに注入する X 線造影剤としては、市販の医学用造影剤で、ヨード系のヨード含有量 440 mg/l のものが最も適している。

(3) 両引供試体を用いた実験によって、異形鉄筋のふし部から多数の微細なひびわれが発生し、鉄筋応力度の増加につれて、複雑に絡み合いながら成長していく状況が検出できた。これらの微細ひびわれは、赤インク注入法で観察されているものと比べると、全般的なひびわれの方向はほぼ似ているが、1 個のふしから発生する数が多く、また形状もより複雑である。

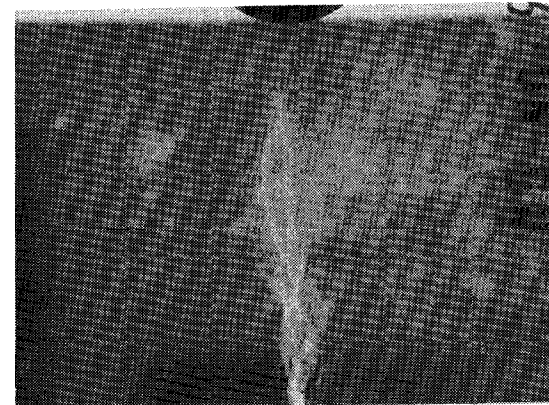
(4) 重ね継手供試体を用いた実験によって、継手部の両鉄筋に挟まれた部分では、一方の鉄筋から他方の鉄筋へと斜め方向に連結するひびわれが発生し、鉄筋応力度の増加につれて、その数が多くなりほぼ継手全長にわ



a. 骨材最大寸法：5 mm, 微細ひびわれ領域水平最大幅：4 mm



b. 骨材最大寸法：10 mm, 微細ひびわれ領域水平最大幅：8 mm



c. 骨材最大寸法：15 mm, 微細ひびわれ領域水平最大幅：13 mm

写真-6 骨材寸法の影響を検討するために行った X 線造影撮影による微細ひびわれ検出結果：はり供試体 (150×50×540 mm)

たり発生する状況が検出できた。これらの微細ひびわれは、赤インク注入法で観察されているものと比べると、発生方向はほぼ同様であるが、発生数がかかなり多い。

(5) はり供試体を用いた実験によって、スパン中央の引張側に設けた切欠き部先端から発生する微細ひびわれの、発生開始直後の状況と鉄筋応力度の増加につれて

数を増し、複雑にその発生領域を拡大しながら成長して行く状況が検出できた。

(6) 一群の微細のひびわれの発生領域の幅に及ぼす骨材の最大寸法の影響を調べた結果、骨材の最大寸法が大きいかほど微細ひびわれ領域の幅が大きくなることが分かった。これは微細ひびわれが骨材を避けて蛇行する傾向があるためと考えられる。

(7) 着色した造影剤を注入した両引供試体を載荷し、X線撮影後、ダイヤモンドソーで多数の薄片状に切断し、各切断面に見られるひびわれ状況を観察した結果、各切断面に見られるひびわれは単数ではなく、骨材の付近ではそれを巻くように枝分かれしているものもあり、全体的に蛇行していることが分かった。また、各切断面のひびわれを再び重ね合わせるにより、微細ひびわれの複雑な立体形状を推定することができた。

6. あとがき

本研究で用いたX線造影剤はすべて市販の医学用であったが、これらは、人体への副作用を少なくするために、種々の薬品が混入されていたり、造影効果のある薬品も、その種類や濃度などが制限されていたりしており、今回選定したものがその造影性能やひびわれ注入性能などの面から本研究に最も適する造影剤であったとは限らない。従って、本研究のような用途に適する高性能な工業用造影剤を開発できれば、この手法によるひびわれ検出性能がさらに向上するものと考えられる。また、本研究は、基礎的な研究であるが、今後研究を進めれば、コンクリートの新しい非破壊試験法の一つとして実用化が可能と考えられる。

本研究は、筆者が1984年8月より1年間当時西ドイツのTechnische Hochschule DarmstadtのProf. Gert Königの研究室に留学した際に、発案、計画したもので、同大学の物理学科のProf. Theo Tschudiのご好意で同教授の実験室で、Dr. Otto Kroggelの協力を得て、小型の片引き供試体で最初のX線造影撮影実験を始めた。その時は、造影剤として硫酸鉛を使用した。コンクリー

ト内部のひびわれは全く検出することができなかった。帰国後、実験装置を設備し、1986年に本実験を再開した。本論文は実験再開後1990年度までに得られた結果^{3)~7)}をまとめたものである。本研究の開始に際しお世話になったProf. Gert König, Prof. Theo TschudiおよびDr. Otto Kroggelに深く感謝する。また、本研究は、赤インク注入法により鉄筋周辺のコンクリートの内部ひびわれを発見した後藤幸正博士(当時東北大学教授、現東北学院大学教授)の研究を基礎としており、引き続き長年のご指導に心より感謝を申し上げる。さらに、本研究の実施にあたり熱心に実験に当たってくれた各年代の卒業研究生に深く感謝する。

参考文献

- 1) Goto, Y. : Cracks formed in concrete around deformed tension bars, *Jour. of ACI*, Vol.68, pp.244~251, April 1971.
- 2) 後藤幸正・大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する研究, 土木学会論文報告集, 第294号, pp.85~100, 1980.
- 3) 大塚浩司・諸橋克敏・成瀬豊: X線透過撮影によるコンクリートのひびわれ見出し, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, 第5部, 1987.
- 4) 阿部孝・大塚浩司・阿部義憲: X線造影撮影によるコンクリートの微細ひびわれ検出について, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, 第5部, 1988.
- 5) 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*, Vol.10-3, pp.145~150, 1988.
- 6) Otsuka, K. : *X-ray technique with contrast medium to detect fine cracks in reinforced concrete*, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, Rotterdam, 1989.
- 7) 大塚浩司・庄司芳之: X線造影撮影によるコンクリートの破壊プロセスゾーンの検出, 日本コンクリート工学協会「コンクリートの破壊力学に関するコロキウム」論文集II, pp.1~4, 1990.

(1991.9.14受付)

DETECTION OF FINE CRACKS IN REINFORCED CONCRETE THROUGH X-RAY TECHNIQUES USING CONTRAST MEDIA

Koji OTSUKA

Experiments were carried out to develop a new x-ray non-destructive inspection technique for concrete using contrast media and sufficient results were obtained. A contrast medium that was in accord with the purpose of the investigation was selected by comparison tests among many contrast media in the medical field. Using the technique, patterns of fine cracks were detected forming in concrete around deformed bars of axially tensile specimens, lapped splice specimens and beam specimens. The patterns of cracks on x-ray films were compared with those obtained by red ink injection method. Three dimensional figures of cracks in concrete and influences of aggregate size on crack's pattern were also examined.