

[2027] 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

正会員 大塚 浩司 (東北学院大学工学部)

1. まえがき

引っ張りを受ける異形鉄筋の近傍のコンクリートには、鉄筋応力度がある程度高くなると、鉄筋のふし部より微細なひびわれ、いわゆる内部ひびわれが発生する。この内部ひびわれの数、角度、長さ等の発生状況は鉄筋からコンクリートへの力の流れを知るのに極めて役立つものである。

従来、この内部ひびわれを検出する方法として、予め鉄筋と平行にコンクリート中に設けた細かい孔に赤インクを注入しておき、内部ひびわれ発生時の負圧を利用してひびわれ内にインクを注入し、後で鉄筋軸を含む面でコンクリートを縦割りにして中を調べる、いわゆる「赤インク注入法」を用いていた。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、鉄筋応力度の増加によって変化する、ひびわれの発生・成長状況を同一の供試体で連続的、立体的に検出することができないという欠点があった。

鉄筋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X線透過撮影は従来より用いられている。しかし、普通のX線透過撮影ではコンクリート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、この研究は、上述の赤インクの代わりに造影剤をコンクリート中に注入し、X線透過撮影を行えば鉄筋の周りにおける内部ひびわれの発生・成長状況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。

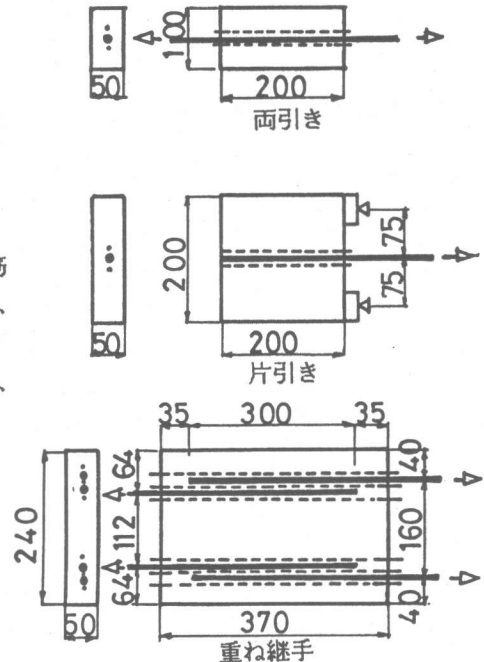
2. 実験材料および実験方法

2.1 供試体

供試体は、早強ポルトランドセメントと河川産砂を用いたモルタルによって作成した。モルタルのW/Cは50%とし、セメントと砂との割合は1:2とした。モルタルの荷重時圧縮強度は大略280 kg/cm<sup>2</sup>であった。鉄筋は市販の横ふし異形鉄筋D16 (SD35)を用いた。供試体の形状寸法は、図-1に示すような、両引供試体、片引供試体および重ね継手供試体である。供試体の厚さ50mmは、X線の透過効果についての予備試験の結果定めた値である。

2.2 造影剤

造影剤とは、一般に医学の分野で用いられているもので、検査する臓器と周囲組織の間にX線による透過率の差を生じさせる物質のことである。造影剤には、X線吸収率が周囲組織より大きく、造影剤の含まれる部分が白い陰影としてフィルム上に示され



る陽性造影剤と、逆に、X線吸収率が周囲組織より小さく、フィルム上に黒く示される陰性造影剤とがある。本実験に使用する造影剤の条件として次のようなことが考えられた。

- 1) ひびわれ部と周囲のコンクリート部との間にできるだけ大きなX線透過率の差を生じさせ、鮮明な像をつくるものであること。
- 2) 注入に適するような液体あるいは液状であること。
- 3) 化学的に安定な物質で、毒性がなく安全に取り扱えるものであること。
- 4) 一時的に比較的大量を使用するので、できるだけ安価であること。

以上の条件のもとで、種々の造影剤について検討した結果、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種と有機ヨード化合物系3種を選定し、比較試験に用いた。

### 2.3 X線透過撮影装置

X線撮影には、写真-1に示すような、工業用X線装置を用い、管電圧60KV~120KV、管電流2mA、距離60cm、撮影時間2分~5分で行った。フィルムは工業用X線フィルム#80および#100を用いた。

### 3. 造影剤の比較試験結果

造影剤の効果を比較するために、まず断面50×100mm、長さ200mmの中心軸に一本のD16異形鉄筋を埋め込んだ両引供試体を用いて、各種造影剤を注入し、X線撮影を行った。その結果、硫酸バリウム系の造影剤4種を注入した場合には、比較的太い（直径約2mm）注入孔の形状については、何れも、有機ヨード系の造影剤を注入した場合に比べて、より濃密で、明瞭に撮影できたが、異形鉄筋の周りの微細な内部ひびわれは殆ど撮影できなかった。これは、バリウム系のものは粘性がかなりあるために、注入孔には圧入されても微細な内部ひびわれ（普通、その幅は0.01mm以下）には、負圧を利用しても注入できないためと考えられる。それに比べて、ヨード系の造影剤を注入した場合には、太い注入孔の写り具合で比較すればやや劣るけれども、粘性が小さいので、微細な内部ひびわれにも注入でき、それらをX線撮影できることが分かった。ヨード系造影剤3種の中でも、血管造影剤として市販されているもので、ヨード含有量440mg/mlのもの（表-1のG）が最も本実験の目的に適すると考えられたので、以後の実験にはこの造影剤を使用した。

### 4. 微細ひびわれの検出結果

#### 4.1 両引供試体

断面50×100mm、長さ200mm、使用鉄筋D16の供試体を用いて、両引載荷荷重を段階的（鉄筋引張応力度 $\sigma_s = 250 \text{ kg/cm}^2$ 毎）に増加させ、それぞれの荷重段階でX線造

表-1 使用した造影剤の種類

	系	用途	一般名	ヨード含有量
A	硫酸バリウム	消化造影	硫酸バリウム	—
B				—
C				—
D				—
E	有機ヨード	血管造影	イオタムラ酸	282mg/ml
F			イオタムラ酸	141mg/ml
G			メトリゾ酸	440mg/ml

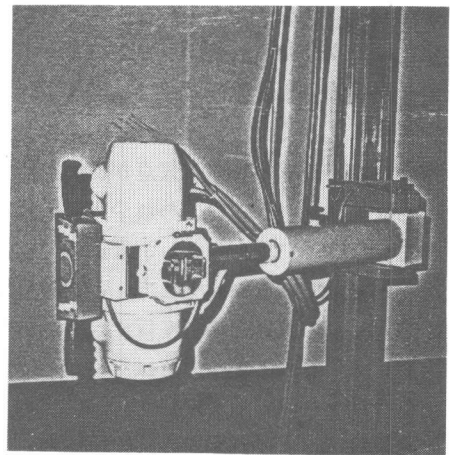


写真-1 X線透過撮影装置

影撮影を行った。供試体の厚さが50mmと薄いので、縦ひびわれによる早期の割裂を避けるために、写真-2に示すように、2個のロードセルを介して30kg/cm<sup>2</sup>の側圧をかけた。

写真-3は、鉄筋応力度 $\sigma_s=3000\text{kg/cm}^2$ まで両引载荷した時に得られたX線造影写真の一部を示したものである。X線写真は、フィルムを読影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、フィルムを印画紙に焼付けると、その判別が困難となる。

そこで、図-2に、フィルム読影器に写っている写真-3の場合の供試体全体のひびわれをトレースした結果を示す。この図から分かるように、数多くの内部ひびわれが異形鉄筋のふし部より発生しているのが検出されている。その発生状況を従来の赤インク注入法により明かにされていたものと比べると、ひびわれの傾きはほぼ同じであるが、次の点で少し異なっている。

- 1) X線造影撮影では、赤インク注入法で見られるようなほとんど全てのふしからの内部ひびわれは観察されない。
- 2) X線造影撮影で見られるひびわれは、赤インク注入法で見られるような単線ではなく複雑な複線となって写っている。

これらの相違点について検討した結果は次のようである。まず、1)について検討するために、造影剤に薄く赤インクで着色して造影撮影後、供試体を鉄筋軸を含む面で縦割りにして内部を観察し、X線写真と比較した結果、造影剤は微細な内部ひびわれに注入されているが、X線写真には明瞭には写っていないものがあることが分かった。これは、造影剤の品質、フィルムの品質、読影の方法などについてさらに検討する必要があることを示している。

また、2)については、鉄筋軸を含む一断面で見れば単線の内部ひびわれも、鉄筋の縦リブをはさんで横ふしの位置がずれていること、骨材が存在することなどのために立体的に見てきれいなコーン状となっておらず、花びら状となっているの

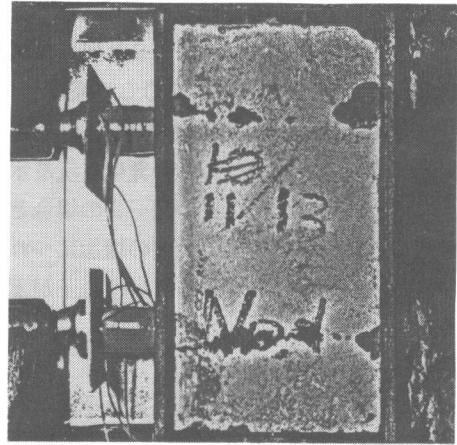


写真-2 側圧の载荷状況

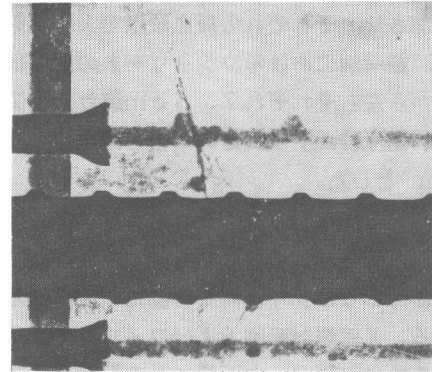


写真-3 X線写真  
(両引きで $\sigma_s=3000\text{kg/cm}^2$ )

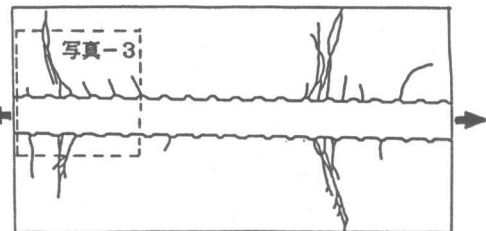


図-2 ひびわれ発生状況  
(両引きで $\sigma_s=3000\text{kg/cm}^2$ )

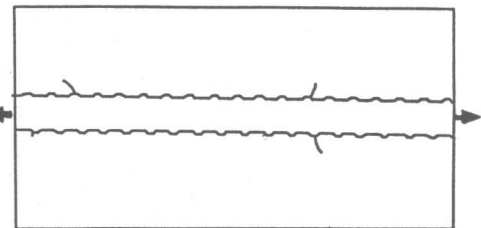


図-3 ひびわれ発生状況  
(両引きで $\sigma_s=1750\text{kg/cm}^2$ )

で、X線写真では複線となると考えられる。

図-3、4および5は、図-2と同じ供試体の、鉄筋応力度 $\sigma_s = 1750$ 、 $2000$ 及び $2750$   $\text{kg/cm}^2$ におけるX線造影撮影フィルムを読影器にかけて得られたひびわれの発生状況を示す。 $\sigma_s = 3000$   $\text{kg/cm}^2$ の図-2の場合とあわせて見ると、鉄筋の引張応力度の増加につれて内部ひびわれが発生し、成長していく様子がよく分かる。

#### 4.2 片引供試体

断面 $50 \times 200$ mm、長さ $200$ mm、使用鉄筋D16の供試体を用いて、片引载荷荷重を段階的（鉄筋引張応力度 $\sigma_s = 250$   $\text{kg/cm}^2$ 毎）に増加させ、それぞれの荷重段階でX線撮影を行った。载荷端におけるコンクリートの反力は鉄筋中心から左右それぞれ $7.5$ cm離れた位置にとった。側圧は両引供試体の場合と同様に $30$   $\text{kg/cm}^2$ とした。

写真-4および5は、それぞれ鉄筋応力度 $\sigma_s = 2500$ および $3250$   $\text{kg/cm}^2$ においてX線造影撮影したフィルムを印画紙に焼付けた写真である。X線照射範囲およびフィルムの寸法の制約のために鉄筋から上下 $5$ cmの範囲しか写っていない。

図-6、および8は、それぞれ写真-4および5のフィルムからトレースしたものであり、図-7はその途中の鉄筋応力度 $\sigma_s = 2750$   $\text{kg/cm}^2$ のものである。

これらの写真および図から分かるように、鉄筋の载荷端付近のふしから内部ひびわれが斜め方向に発生し、鉄筋応力度の増加に伴って、その数と長さが増加している。

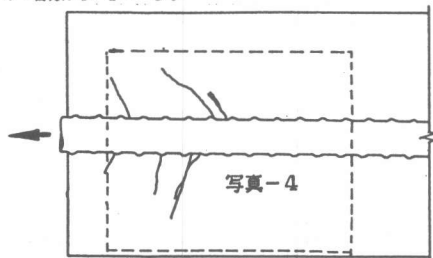


図-6 ひびわれ発生状況  
(片引きで $\sigma_s = 2500$   $\text{kg/cm}^2$ )

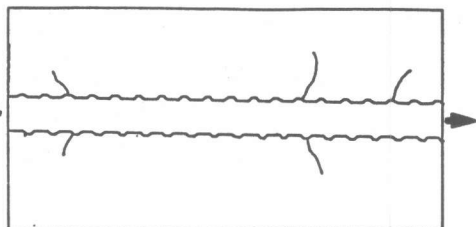


図-4 ひびわれ発生状況  
(両引きで $\sigma_s = 2000$   $\text{kg/cm}^2$ )

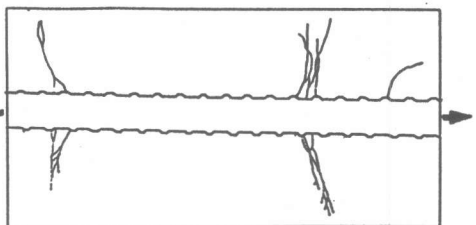


図-5 ひびわれ発生状況  
(両引きで $\sigma_s = 2750$   $\text{kg/cm}^2$ )

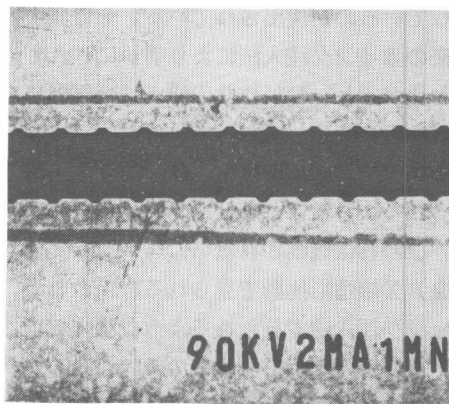


写真-4 X線写真  
(片引きで $\sigma_s = 2500$   $\text{kg/cm}^2$ )

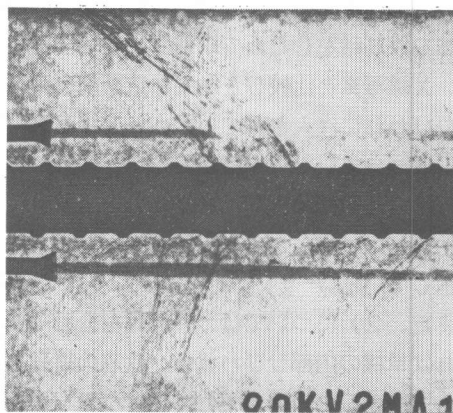


写真-5 X線写真  
(片引きで $\sigma_s = 3250$   $\text{kg/cm}^2$ )

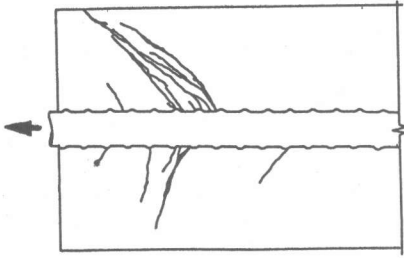


図-7 ひびわれ発生状況  
(片引きで $\sigma_s=2750 \text{ kg/cm}^2$ )

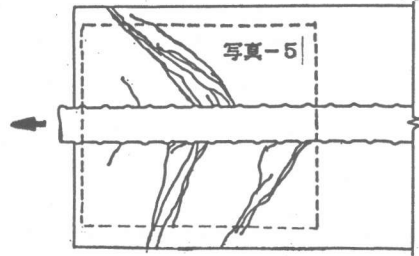


図-8 ひびわれ発生状況  
(片引きで $\sigma_s=3250 \text{ kg/cm}^2$ )

なお、これらの内部ひびわれの発生状況を従来の赤インク注入法によって得られた結果と比べると、両引供試体の場合と同様に、ひびわれの傾きはほぼ同じであるが、載荷端近くのふしの中にもひびわれの発生が見られないものがあり、また一つのふしから複数のひびわれが見られる点が異なっている。

#### 4.3 重ね継手供試体

断面 $50 \times 240 \text{ mm}$ 、長さ $370 \text{ mm}$ 、D16鉄筋を純間隔約 $8 \text{ mm}$ 離して $30 \text{ cm}$ 重ね合わせた重ね継手を2組並列した供試体を、2組の継手と同じ荷重で載荷されるように工夫した鉄筋つかみ装置を用いて荷重を段階的(鉄筋引張応力度 $\sigma_s=125 \text{ kg/cm}^2$ 毎)に増加させながら両引載荷し、各荷重段階でX線造影撮影を行った。側圧は両引および片引供試体の場合と同様にかけた。

写真-6は、継手破壊直前の状態(鉄筋応力度 $\sigma_s=2375 \text{ kg/cm}^2$ )で載荷を中止し、X線造影撮影したフィルムを印画紙に焼き付けた、継手端部付近の写真である。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ひびわれが発生しているように見える。

図-9、10及び11は、写真-6と同じ供試体の鉄筋応力度がそれぞれ $\sigma_s=1375$ 、 $1750$ および $2375 \text{ kg/cm}^2$ における撮影フィルムを読影器でトレースしたひびわれ発生状況である。これらの図から分かるように、引張荷重の増加に伴って、ひびわれは、まず一次横ひびわれの源となる内部ひびわれが鉄筋軸とほぼ直角に発生し、それがコンクリート側面に達して一次横ひびわれとなり、次にその付近から斜め方向の内部ひびわれが発生し、次第

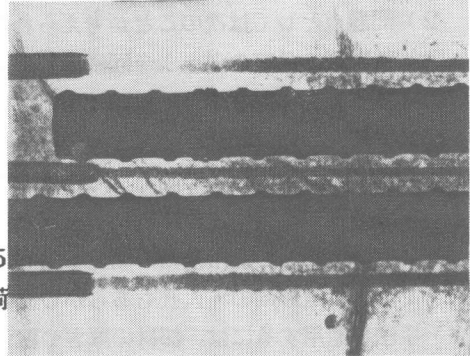


写真-6 X線写真  
(重ね継手で $\sigma_s=2375 \text{ kg/cm}^2$ )

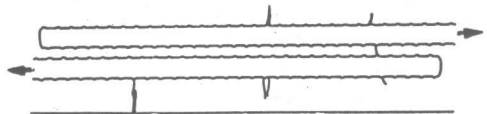


図-9 ひびわれ発生状況  
(重ね継手で $\sigma_s=1375 \text{ kg/cm}^2$ )

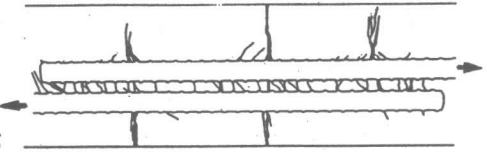


図-10 ひびわれ発生状況  
(重ね継手で $\sigma_s=1750 \text{ kg/cm}^2$ )

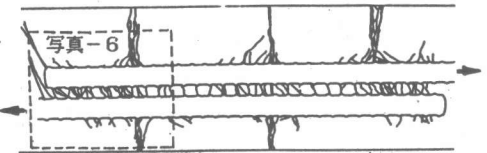


図-11 ひびわれ発生状況  
(重ね継手で $\sigma_s=2375 \text{ kg/cm}^2$ )

にその数を増している。

なお、継手端には、荷重の初期の段階で、供試体表面に一次横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かった。これは、造影剤注入の際、写真-6からも分かるように、注入用銅パイプを継手端部よりも少し内側まで入れたために、一次横びわれに造影剤が注入されなかったためと考えられる。

#### 5. まとめ

造影剤を注入してX線透過撮影を行い、鉄筋コンクリートの内部に発生している微細なびわれを非破壊的に検出する手法を開発するための基礎的ないくつかの実験を行った結果、次のような知見を得た。

- 1) 解決しなければならない幾つかの問題点があるが、これまでの実験である程度の成果が得られていることからいって、X線造影撮影法は鉄筋コンクリート内の微細なびわれを非破壊的、連続的、立体的に検出する手段として使用できると考えられる。
- 2) 問題点としては次のことが考えられる。
  - a) 造影剤の品質の向上：今回使用した造影剤は市販の医学用血管造影剤であるが、医学用は人体への副作用を少なくするために、薬品の濃度が制限されている。本実験のような用途に適する造影剤の開発が必要と考えられる。
  - b) フィルム読影技術の向上：今回は読影器を用いて肉眼により観察したが、コンピューターによる画像処理により解析精度を向上させる必要がある。
  - c) 実構造物への適用技術の開発：今回は、基礎的な研究として、比較的薄いモルタル供試体を用い、造影剤の注入孔もあらかじめ設けていたが、実際の鉄筋コンクリート構造物にこの手法を適用するには、部材の厚さや粗骨材の影響について、また、造影剤の注入方法などについての研究が必要である。

#### 6. あとがき

本論文は、X線造影撮影により鉄筋コンクリートの微細なびわれを検出する手法の開発に主眼をおいてまとめたものである。本実験で得られた、鉄筋の引張応力度の増加につれて変化する、内部びわれの数、角度、長さ等についての情報は、鉄筋からコンクリートへの力の流れの状況を解明するのに役立つと考えられるが、その問題については、さらに多くの実験を行った後にまとめたいと考えている。

本研究は、筆者が1984年8月から1年間西ドイツのダルムシュタット工業大学のケーニツヒ教授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チュデイ教授の御好意で同教授の実験室で、片引供試体を用いてX線造影撮影実験を行った。その時は、造影剤として硫酸鉛を使用した。内部びわれを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。研究の発端を援助して下さった両教授に対しここに深く感謝する。

#### 参考文献

- 1) 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、1987年3月
- 2) 阿部 孝、大塚浩司、阿部義憲：X線造影撮影による鉄筋コンクリートの微細な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、1988年3月