

# コンクリート中におけるプラスチック系繊維の配向状態の評価方法

馬場弘二<sup>1</sup>・伊藤哲男<sup>2</sup>・松本健次<sup>3</sup>・鳥越信一<sup>4</sup>・吉武 勇<sup>5</sup>・中川浩二<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 主任 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

<sup>3</sup>株式会社クラレ 繊維資材カンパニー (〒530-8611 大阪府大阪市北区梅田 1-12-39)

<sup>4</sup>株式会社クラレ 構造解析センター (〒710-8691 岡山県倉敷市酒津 2045-1)

<sup>5</sup>正会員 博(工) 山口大学講師 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>6</sup>フェロー会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

従来、コンクリート中の鋼繊維の配向状態を調べるために、X線透過写真がしばしば用いられてきた。しかしながら、非鋼材のプラスチック系繊維では、同様の手段としてもその配向状態を評価できなかった。本研究では、X線透過写真では適切に評価することのできないプラスチック系繊維を対象に、その配向状態を求める方法について検討した。その結果、ビニロン繊維の場合、ブラックライト照射と画像解析からコンクリート中の繊維の配置状況を識別できた。また、ビニロン繊維以外のプラスチック系繊維では、フェノールフタレインを用いてコンクリートに着色することで、繊維とコンクリートの識別が可能となった。

**Key Words :** plastic fiber, image analysis, orientation factor, black light, concrete lining

## 1. はじめに

山岳道路トンネル(以下、単にトンネル)の覆工コンクリートには、土圧による外的応力や乾燥収縮に代表される内的応力によってひび割れが発生・進展した場合の剥落防止策のひとつとして、しばしば繊維補強コンクリートが採用されている。一般に用いられる(補強)材料として、鋼繊維が挙げられるが、近年の材料開発の進歩に伴って、非鋼製の繊維であるプラスチック系繊維もしばしば採用されるようになってきた。このプラスチック系繊維は、鋼繊維のように発錆作用がなく、また質量が軽く取り扱いが容易という利点を併せ持つ材料である。

一般に無筋コンクリート構造として建設されるトンネルの覆工コンクリートでは、剥落防止の観点から、混入する繊維がランダムに分散していることが望ましい。そのためには、繊維の配置状況を評価する基準が必要となり、これまで繊維の配向係数( $\beta$ )による評価方法が用いられてきた。

繊維の分散性を示す指標となる配向係数( $\beta$ )を求めるには、コンクリート中の繊維の分散性、すなわち繊維の配置方向(配向状態)を知る必要がある。鋼繊維の場合は、X線透過写真を用いることで、鋼繊維とコンクリートの識別が可能となり、ある方向から

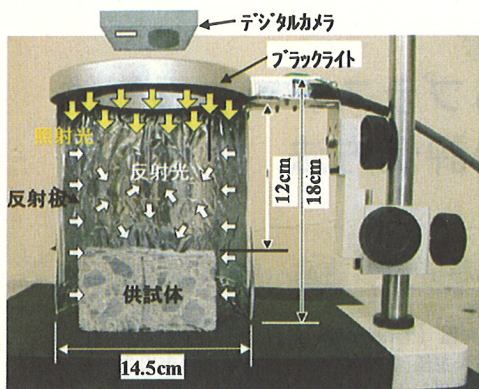
の両者の占める面積比率をもって配向係数( $\beta$ )を評価することができた。しかしながら、プラスチック系繊維の場合は、X線透過写真を用いても繊維とコンクリートの識別が困難であり、配向係数( $\beta$ )を求めることは難しいものと思われる。

本論文では、従来配向係数( $\beta$ )を求めることが困難であったプラスチック系繊維を対象に、新設のコンクリート中における繊維の識別方法ならびに画像解析を提案するものである。さらに、本論文で提案する評価方法を用いてトンネルの覆工を模擬したコンクリート供試体における繊維の配置状況を調べ、その評価方法の妥当性について検討を試みた。

## 2. プラスチック系繊維の配向状態の評価方法

### (1) 従来の繊維識別技術の課題

コンクリート中における繊維の配向状態を求めるには、コンクリートと繊維を正確に識別する必要がある。その評価手段として、従来X線透過撮影を用いた画像解析が行われ、これに基づき配向係数( $\beta$ )等が求められてきた。ここで、配向係数( $\beta$ )とはある一定方向に繊維を投影した場合の投影長の合計と繊維の長さ合計の比で表される<sup>1), 2)</sup>。



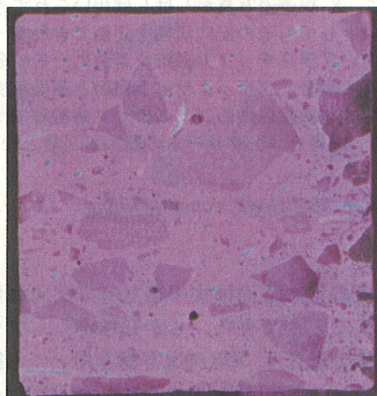
※ 解説のため反射板を半分に切断している

図-1 撮影方法

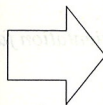
これらの方法は、X線透過撮影により、鋼繊維補強コンクリートなどの繊維がほぼ正確に識別できる場合において有効な手段であった。しかしながら、軽量で施工性に優れた材料として近年実績を伸ばしてきているプラスチック系の繊維となると、X線透過撮影による画像解析では、繊維とコンクリートの識別は困難となり、結果として精度の高い配向係数( $\beta$ )を求めることはできなかった。

## (2) ブラックライトによるビニロン繊維の識別

本研究では、ビニロン(PVA)繊維を含むコンクリート供試体に対し、ブラックライト(10W)を照射し、その撮影画像をもとに繊維を識別する方法を提案する。ここで用いるブラックライト蛍光ランプは、可

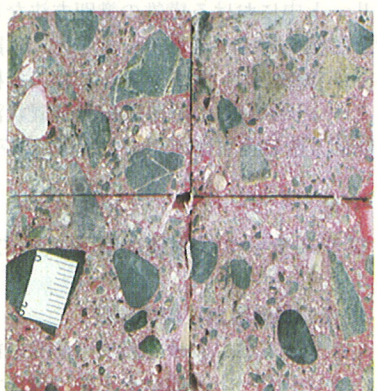


画像処理前  
(ブラックライト照射画像)

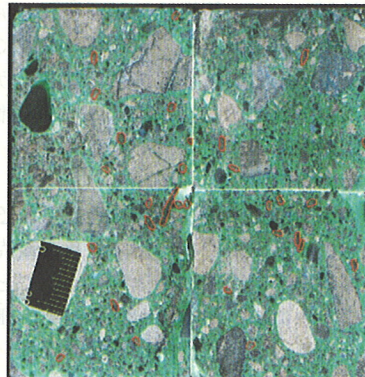
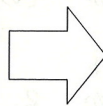


画像処理後  
(黒色部→繊維)

A) ビニロン繊維



画像処理前  
(フェールフタレン散布)



画像処理後  
(赤色部→繊維)

B) ポリプロピレン繊維(ポリエチレン繊維も同様)

図-2 画像処理の一例

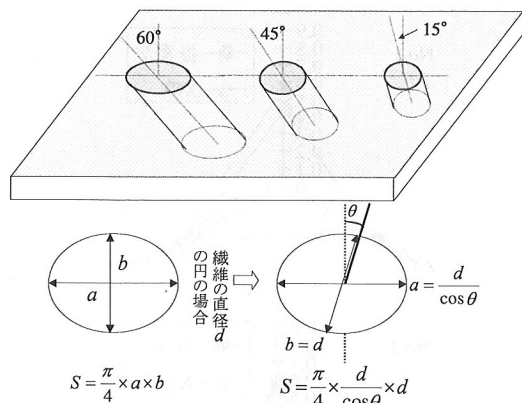


図-3 切断面における繊維の断面積

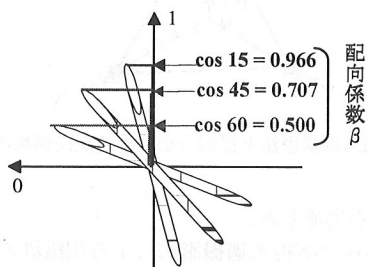


図-4 繊維の傾きと配向係数

視光線をカットする濃青色の特殊フィルターガラスの内壁に、近紫外線放射蛍光体を塗布したものであり、ピーク波長351nm(300～400nm)の近紫外線を放出する特殊ランプである。この方法は、ビニロン繊維におけるポリエン構造が、ブラックライトからの近紫外線(300～400nm)に対して蛍光する特徴を利用したもの<sup>3)</sup>であり、これをデジタル写真として記録し、画像解析することで繊維の識別が可能となる。

なお、本研究で行った撮影方法は、図-1に示すとおりであり、周囲を反射板で囲った中に供試体を設置した。用いたデジタルカメラは、有効画素数334万画素であり、供試体から約150mm上方に設置した。

### (3) フェノールフタレインによる繊維の識別

ビニロン繊維以外のプラスチック系繊維として、ポリプロピレン(PP)繊維やポリエチレン(PE)繊維が挙げられるが、これらはポリエン構造を含まないため、ブラックライトを照射しても蛍光しない。このような繊維の場合には、繊維以外の部位、すなわちコンクリート(マトリクス)を着色し、これを画像解析すれば、同様に繊維の識別が可能と考えられる。本研究では、フェノールフタレイン溶液を散布し、繊維周辺部を着色することで、コンクリート(マトリクス)と繊維の差異を明確にした。得られた画像は、

ビニロン繊維の場合と同様に画像解析することで、繊維の識別が可能となる。

### (4) 繊維配向状況の画像解析

ブラックライトを照射した場合における繊維補強コンクリートの断面画像を図-2 A)の左写真に示す。この画像は、ビニロン繊維を使用した際のものであるが、明瞭ではないものの繊維部は白色に、またコンクリート部は赤紫色に写されていることがわかる。これを画像処理ソフトにより、色調を反転させるとともに、コントラストを調整することで、図-2 A)の右写真に示されるように繊維部は黒色、コンクリート部は白色となり、その識別規準も明瞭となる。

また、ポリプロピレン繊維やポリエチレン繊維の場合では、コンクリートがフェノールフタレインによって着色されるため、図-2 B)の左写真に示されるようにモルタルマトリクス部は赤色に、繊維は白色で撮影される。これをビニロン繊維の場合と同様に画像処理することで、図-2 B)の右写真のように繊維部は濃緑色(画像では赤色マーキング)およびモルタルマトリクス部は緑色として表されるため、繊維の識別が容易となる。なお、この解析において、繊維と粗骨材の識別は処理画像を基にその形状寸法等から判定した。

### (5) 配向係数(β)の求め方

識別が可能となった繊維は、画像解析によりコンクリート切断面における繊維の断面積を求めることができる(図-3参照)。ここで、繊維の断面積を真円形状と仮定すれば、その面積をもって繊維の傾きが計算される。すなわち、切断面が楕円状となる繊維に対して、長径および短径から推定される断面積を、真円形状と仮定した繊維の断面積で評価することで、図-3に示される $\cos \theta$ が計算される。

ここで求める $\cos \theta$ は、図-4および式(1)に示されるように配向係数(β)の定義にほかならない。繊維1本あたりの $\cos \theta$ を累計し、繊維数 $N$ をもって平均化することで配向係数(β)は計算される。

$$\beta = \frac{1}{N} \sum \cos \theta \quad (1)$$

## 3. 繊維の配向状態評価の検証実験

### (1) 供試体の作製

先述の繊維配向状態を評価する手段の妥当性について検討するため、表-1に示す鋼繊維およびプラス

表-1 繊維の物性

| 繊維   | 径<br>mm | 長さ<br>mm | 密度<br>g/cm <sup>3</sup> | ヤング率<br>kN/mm <sup>2</sup> | 引張強さ<br>N/mm <sup>2</sup> |
|------|---------|----------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 鋼    | 0.80    | 60       | 7.9                     | 206                        | 1180                      |
| ビニロン | 0.66    | 40       | 1.3                     | 30                         | 880                       |

表-2 配合条件

| W/C<br>% | s/a<br>% | 単体量 kg/m <sup>3</sup> |     |     |     | Fiber<br>Vol. % |
|----------|----------|-----------------------|-----|-----|-----|-----------------|
|          |          | W                     | C   | S   | G   |                 |
| 50       | 55.7     | 228                   | 455 | 948 | 806 | 0.5             |

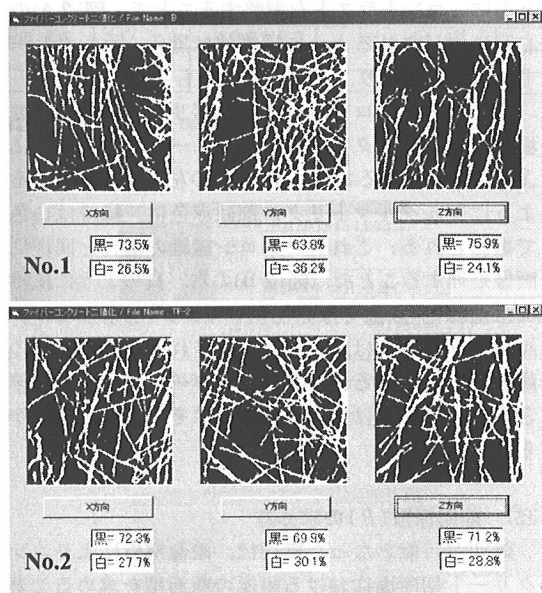


図-5 X線透過撮影による鋼繊維の配向状態

チック系の繊維（ビニロン繊維）を容積比で0.5 (Vol.%) 混入したコンクリートを打設した。なお、打設したコンクリートの配合は、一般にトンネルの覆工コンクリートに用いられる配合を参考に、表-2に示すものとした。

打設したコンクリートは、150×150×530mmの角柱型に成形し、評価試験に際しては、これをダイヤモンドカッターにより50mm角に切り出した。

## (2) X線透過撮影法と提案方法の比較

これまで多くの場合、コンクリート中の繊維の配向状態はX線透過撮影法によって評価されてきた。そこで、鋼繊維補強コンクリートの切り出し供試体に対して、従来のX線透過撮影法および提案方法のうちフェノールフタレインによる繊維識別方法を用いて、配向係数( $\beta$ )を求めた。なお、用いた供試体は一片50mmの立方形状であり、3次元下における鋼繊維の配向状態の評価を行うべく、X-Y-Zの3方面からX線

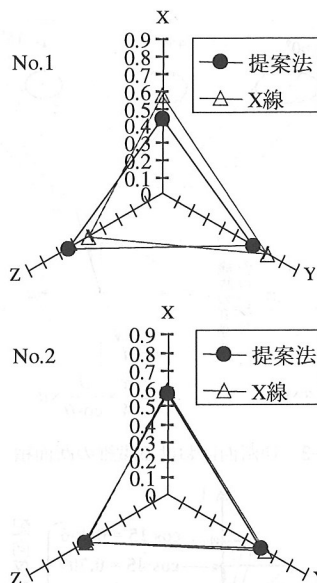


図-6 X線透過撮影法と提案方法による配向係数の比較

透過撮影を実施した。

3方面からのX線透過撮影法による鋼繊維の投影写真を図-5に示す。なお、これらの写真のうち、白色部が鋼繊維、黒色領域がコンクリート(マトリックス)を示している。さらに、この両者の占める面積比率を図-5中の下段に示している。

これに対して、本研究で提案する繊維の識別方法によると、鋼繊維は黒色に、コンクリート(マトリックス)部は白色となり、X線透過撮影法と同様に鋼繊維の識別が可能となる。この方法を用いて鋼繊維の配向係数( $\beta$ )を求めると、図-6に示す結果が得られ、X線透過撮影法から求まる配向係数( $\beta$ )に概ね近似していることが分かる。なお両者間の差異には、繊維の深度差やX線透過撮影法における二値化処理の影響、切断面の状態などの影響が含まれている。しかしながら、従来法に比べ本研究で提案する方法は、ほぼ同程度の配向係数( $\beta$ )を推定でき、両者間の整合性が認められることから、X線透過撮影法の代替方法としても差し支えないものと考えられる。

## (3) プラスチック系繊維の配向状態

ここで、X線透過撮影法では繊維の識別が困難なビニロン繊維補強コンクリートに対して、同様の評価を試みた。打設したコンクリート供試体は、150×150×530mmの角柱型であり、これを図-7に示すように計9つのブロックに区分した一片50mmの立方体に切り出したものである。この切り出し供試体に対し、ブラックライトを照射し、図-8に示すような写真画像を撮影した。さらにその画像解析から、各方向の

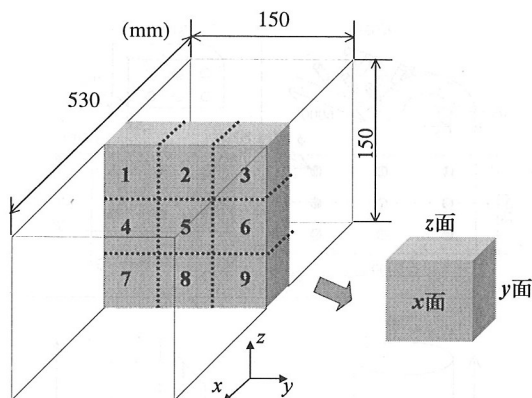


図-7 ピニロン繊維補強コンクリートの切り出し

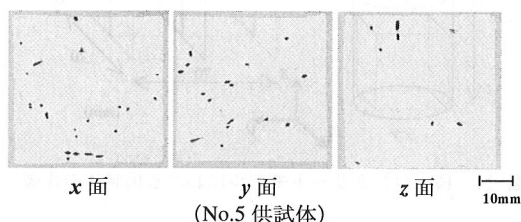


図-8 画像処理によるピニロン繊維の分布状況

表-3 配向係数評価結果

| 供試体          | $\cos \theta$ (配向係数) |       |       |
|--------------|----------------------|-------|-------|
|              | x 面                  | y 面   | z 面   |
| 1            | 0.602                | 0.627 | 0.696 |
| 2            | 0.604                | 0.629 | 0.437 |
| 3            | 0.587                | 0.606 | 0.564 |
| 4            | 0.673                | 0.593 | 0.411 |
| 5            | 0.594                | 0.512 | 0.507 |
| 6            | 0.615                | 0.552 | 0.573 |
| 7            | 0.574                | 0.552 | 0.393 |
| 8            | 0.571                | 0.525 | 0.383 |
| 9            | 0.621                | 0.640 | 0.594 |
| 平均<br>(配向係数) | 0.605                | 0.582 | 0.506 |

配向係数( $\beta$ )を求め、その平均値により打設したコンクリートの全体的な配向係数( $\beta$ )の評価を行った。

表-3に配向係数( $\beta$ )の評価結果を示す。供試体寸法が50mm立方体と比較的小型であり、繊維の配置状態にばらつきがみられ、配向係数( $\beta$ )としては0.4~0.7の範囲にあった。しかしながら、ほとんどの供試体における各方向の配向係数( $\beta$ )は、0.5~0.6程度であり、これらの平均値をもって全体系の配向係数( $\beta$ )の評価を行えるものと判断した。これにより、従来技術では評価が困難であったプラスチック系繊維の配向状態の定量的な評価が、可能になったものと推察される。

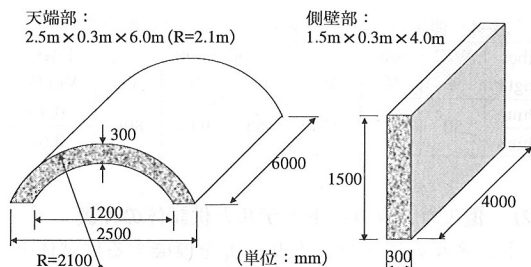


図-9 覆工コンクリートモデル

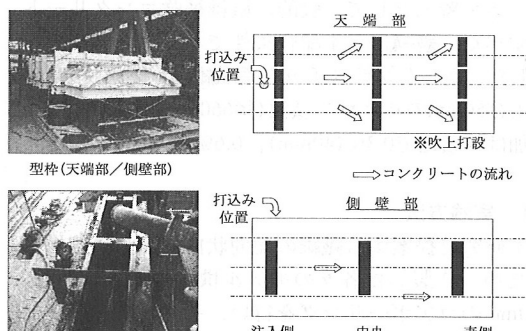


図-10 覆工コンクリートモデルの打設方法

## 4. トンネル覆工コンクリートモデル試験

### (1) 実験目的

トンネルの覆工コンクリートは、厚さ300mm程度と比較的薄いアーチ形状の部材であり、一度におよそ10m長(1スパン)が打設されている。打設は、基本的に下方部から充填されていくものであるが、天端付近ではポンプ圧送によるコンクリートの流動性のみに依存する打込みとなり、空气の排除が重要となる。さらに、比較的薄い枠内に打設するためその充填性が問題となり、コンクリート構造物の打設施工としては比較的困難な条件下にあるといえる。

先述のように、コンクリート片の剥落防止の観点からは、繊維はランダムに配向している方が望ましい。そのためには、覆工コンクリートのような薄アーチ構造内における繊維配向状態、すなわち配向係数( $\beta$ )を定量的に把握しておく必要がある。

本研究では、薄アーチ構造内におけるプラスチック系繊維の配向状態を調べる目的で、トンネルの覆工コンクリートを模擬したコンクリート供試体を作製し、先述の評価方法を用いて配向係数( $\beta$ )を求めた。

表-4 覆工コンクリートモデルにおける配合条件

| Fiber<br>length | W/C<br>% | s/a<br>% | 単位量 kg/m <sup>3</sup> |     |     |     | Fiber<br>Vol. % |
|-----------------|----------|----------|-----------------------|-----|-----|-----|-----------------|
|                 |          |          | W                     | C   | S   | G   |                 |
| 40mm            | 50       | 55.7     | 228                   | 455 | 948 | 806 | 0.3             |
| 50mm            |          |          |                       |     |     |     | 0.6             |

## (2) 覆工コンクリートモデルと供試体の作製

トンネルの覆工コンクリートを模擬する供試体として、本研究では覆工天端モデル供試体ならびに覆工側壁モデル供試体を作製した。両モデル供試体の形状寸法は図-9に示すものであり、実際のトンネル施工を模擬した打設方法とした(図-10参照)。なお、トンネル覆工として一般的な繊維補強コンクリートとすべく、表-4に示す配合条件でコンクリートを打設した。用いたプラスチック系繊維は、繊維長40mmおよび50mmのビニロン繊維(径660 $\mu$ m)であり、その添加は体積比で0.3% (40mm)、0.6% (50mm)とした。

## (3) 実験方法

本研究で提案する繊維の配向状態評価法に適用するため、作製した各々のモデル供試体から $\phi 100 \times 200$ mmのコアボーリングを行い、そのコアから70 $\times$ 70 $\times$ 70mmの矩形ブロックを切り出した(図-11参照)。さらに、形成された矩形ブロック1体につき、ダイヤモンドカッターにより、35mm角の矩形ブロック8体に切断した。これは繊維長よりも小さな範囲で計測面を設けることで、深さ方向の信頼度の向上および計測断面数増加による測定誤差の低減効果を期待したものである。

コンクリート中における繊維の識別は、先述の方法に準拠するものであり、画像処理～画像解析を通じて繊維の配向係数( $\beta$ )を求めた。

## (4) 配向係数( $\beta$ )

図-12には、40mm長の繊維および50mm長の繊維に分けて配向係数の分布状況を示す。この結果では、繊維長40mmの天端部における配向係数が比較的広範囲に分散しており、側壁部における測定方向別の配向係数の変動が大きいものであった。また、本研究で行ったモデル試験の範囲内では、両繊維ともに地山方向<掘削方向<円周方向の順で配向係数の値が大きくなる傾向が概ね認められる。

しかしながら、いずれの部位・方向においても配向係数が0.3を下回るものではなく、最大で配向係数0.9にまでおよぶものもみられるが、全体としては天端部および側壁部における繊維の配向係数は0.6前後に分布していることが分かる。このことは、コンクリート片の剥落防止の観点からみれば、十分な配向係

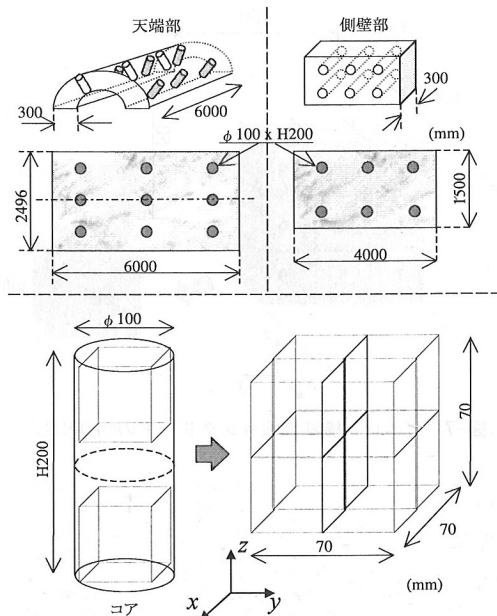


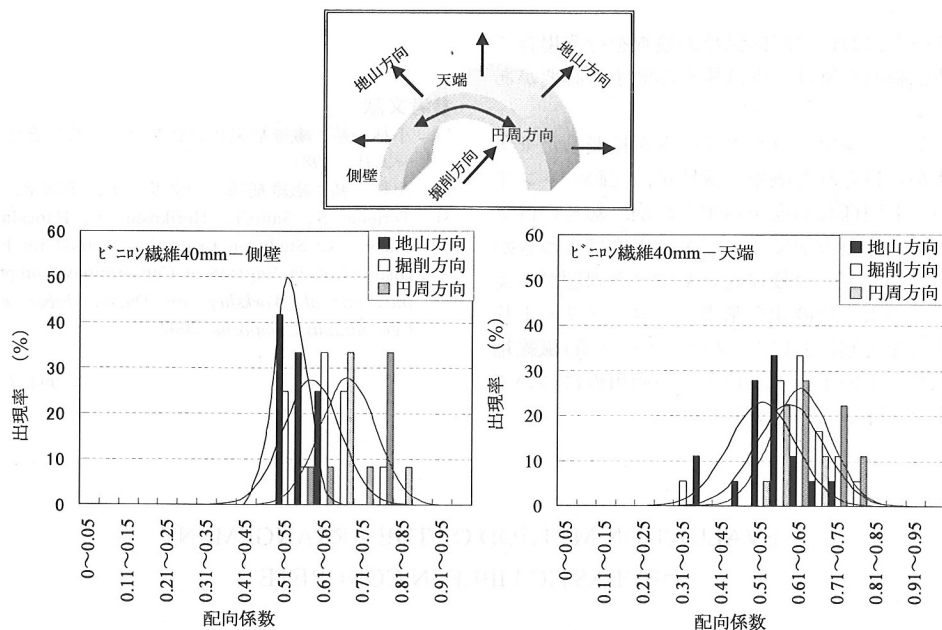
図-11 覆工コンクリートモデルにおける供試体の作製

数と考えられる。

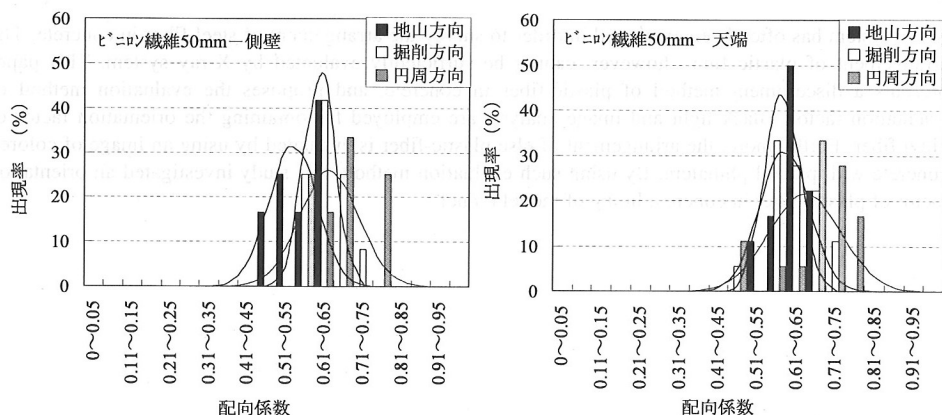
## 5. まとめ

本研究では、これまで繊維の分布状況の評価が困難であったプラスチック系繊維に対し、ブラックライト照射あるいはフェノールフタレインによる着色画像とその画像解析によって繊維の識別が可能となる評価方法を提案した。この評価方法を用いて小型供試体における繊維の配向係数を算定し、その評価の妥当性を調べた。さらに、トンネル覆工コンクリートを模したモデル供試体における繊維の配向係数を求めた。本研究の範囲内で得られた結論を以下に挙げる。

- ① ポリエン構造を有するビニロン繊維を含むコンクリートに対してブラックライトを照射し、画像解析することで、繊維とコンクリートの識別が可能となった。
- ② ポリエン構造を持たないプラスチック系繊維においても、フェノールフタレインを用いてコンクリートを着色させることで同様に繊維の認識が可能となった。
- ③ 繊維の画像面積から算出される傾きをもとに、配向係数を求める方法を示した。
- ④ X線透過撮影法から求める配向係数に対し、提案する方法による配向係数は、概ね近似できたことから、提案方法による評価の妥当性が確認された。



A) ビニロン繊維長 40mm



B) ビニロン繊維長 50mm

図-12 覆工コンクリートモデルにおける配向係数の分布

- ⑤ ビニロン繊維を用いて、小型供試体およびトンネル覆工コンクリートの模擬供試体における配向係数の評価を行った。その結果、ある程度のばらつきはあるものの、いずれの供試体においても概ね0.6程度の配向係数が得られることが分かった。

## 6. あとがき

本研究で示した配向係数の評価方法は、切断面における繊維の断面積を基にするものであり、自ずと

真円形状あるいはそれに類する繊維に対象が限られる。すなわち、扁平形状の繊維を使用する場合は、配向係数に直接関与する繊維の傾きを定量化することは困難であることから、本研究で示した評価方法は適用できないことに注意が必要である。

また本研究は、主に新設コンクリートにおけるプラスチック系繊維の配向係数評価方法を示したものであり、長期材齢のコンクリートを念頭においたものではない。中性化が進行したコンクリートにおいては、フェノールフタレインによる着色ができないため、本評価手法の適用は困難となる。長期材齢の

コンクリートにおいて配向係数の検査を行う場合は、中性化範囲を避けて供試体を作製する必要がある。

なお、トンネル覆工コンクリートを模擬したモデル供試体から得られた繊維分散性が、実際のトンネルにおいても同様な傾向を示すものか、あるいは供試体の寸法・作製方法によってどの程度ばらつきが生じるものかなど、今後検討を要すべき課題が考えられる。このような課題を踏まえ、コンクリート片の剥落防止を主眼においた(プラスチック系)繊維補強コンクリートのトンネル覆工への適用性について、今後も検討を行っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用一，オーム社，1981.
- 2) 小林一輔：繊維補強コンクリート，山海堂，1980.4.
- 3) Torigoe, S., Saito, T., Horikoshi, T., Hamada, T. and Ogawa, A.: Study on Evaluation Method for PVA fiber Distribution in Engineered Cementitious Composite, *JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite*, 2002.

(2003. 7. 31 受付)

## EVALUATION METHOD OF THE ARRANGEMENT OF PLASTIC FIBER IN CONCRETE

Koji BABA, Tetsuo ITO, Kenji MATSUMOTO, Shinichi TORIGOE,  
Isamu YOSHITAKE and Koji NAKAGAWA

X-ray system has often been employed in order to survey the arrangement of steel-fiber in concrete. The arrangement of plastic fiber, however, cannot be sufficiently evaluated by X-ray system. This paper presents a discernment method of plastic-fiber in concrete, and proposes the evaluation method of orientation factor. Black light and image analysis are employed for obtaining the orientation factor of vinyl fiber. Furthermore, the arrangement of else plastic-fiber is evaluated by using an image of colored concrete with phenol phthalein. By using such evaluation method, this study investigated an orientation factor of plastic-fiber in concrete lining of model tunnel.