論文 X線透過撮影による鋼繊維の配向係数の評価方法

馬場 弘二*1・伊藤 哲男*2・吉武 勇*3・中川 浩二*4

要旨:本研究では,これまで X 線透過撮影により薄板状の試験片を中心に行われてきた鋼繊 維の配向状態の評価方法に対し,立方体形状の試験片中で多方向に分散する鋼繊維の配向状 態を求めるための評価方法およびその幾何学的補正方法の提案を行った。また,その評価方 法・補正方法モデル試験の妥当性を検証するため,モデル供試体を用いて推定精度を確認し た。その結果,X線透過撮影による誤差や画像処理上の変動を理論的に修正し,比較的簡便 に且つ精度よく配向係数を求める方法を示した。

キーワード:鋼繊維,配向係数,X線透過撮影,覆エコンクリート

1. はじめに

一般に無筋構造として建設されるトンネル覆 エにおいて、鋼繊維補強コンクリートの採用は、 コンクリート片の剥離・剥落の防止に有効な手 段となりうる。地山からの外力や拘束による内 力が不確定となるトンネル覆工には、鋼繊維が コンクリート中に均一に分散されているととも に、鋼繊維が片寄りなくランダムに配置されて いる必要がある。ここで、鋼繊維の混入状態を 簡易的且つ高精度に測定することができれば、 要求性能に応じた繊維種別や繊維混入率が効率 的に選択でき、品質管理試験や施工状況の評価 にも有用な手段になりえるものと考えられる。

本研究では、X線透過撮影による画像を基に、 コンクリート中の鋼繊維の配向状態を評価する 方法について検討を試みる。特に、これまでは 薄板状の試験片から調べていたため、配向係数 の評価方向が一次元に限定されていたのに対し、 立方体状の試験片から求まるデータに数値処理 による補正を施すことで、多方向にある鋼繊維 の配向係数の評価方法を提案する。この手法は、 トンネル覆工のような剥離・剥落が問題となる コンクリート構造物において、その抑止策とし ての鋼繊維の分散性, すなわち鋼繊維の配向状 態の傾向を評価する手段として寄与することを 目的とするものである。

2. 配向係数評価の課題

2.1 配向係数βの定義

コンクリート中における繊維の配向度を定量 的に表す方法として、一般に配向係数が用いら れている¹⁾。配向係数は、繊維が様々な方向に傾 いて分散している場合、ある一定方向に対して、 全繊維の投影長さの合計と全繊維の長さとの比 によって表される(図-1参照)。例えば、図-1 左のように、ある一定軸に対して、1本の繊維が 平行に存在した場合、その軸方向の配向係数は



図-1 繊維の配向係数βの概念図

*1日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 博(工) (正会員) *2日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 主任 博(工) *3山口大学 工学部社会建設工学科 助教授 博(工) (正会員) *4 NPO 法人臨床トンネル工学研究所 理事長 工博

-259-

"1.0"となり,他の直交する軸においては配向係数"0"となる。これは,ある任意の軸に対して, 配向係数が1.0に近いほど,その軸方向に生じる 応力への寄与度が高くなることを表している。

2.2 鋼繊維の配向係数測定の現状

コンクリート中の鋼繊維配向状態の評価では, 切断面の繊維本数・面積を計上する方法²⁾,ある いはX線透過撮影による鋼繊維投影面積を算定 する方法³⁾の2種類に大別される。前者は,コン クリート切断面における鋼繊維本数から繊維密 度を定め,切断面に直交方向の配向係数を求め るものである。この方法は,いずれの断面にお いても繊維密度が一定という仮定に基づいてお り,現実と大きく異なる場合もある¹⁾。

後者の方法は、コンクリートから厚さ 1cm 以 下の試験片を切り出し、X 線透過撮影により得 られた全繊維の投影面積と試験片に含まれる繊 維本数より配向係数を求めるものである。この 方法は、コンクリート中における鋼繊維の三次 元的な配向状態を得るために、様々な方向から の X 線透過撮影を行う必要があり、且つ多くの 試験片を要することから、試験およびその評価 が繁雑という課題を有するものである。

3. 配向係数の評価方法と実験的検証

3.1 繊維混入率と投影面積率の推定方法

本研究では,次の手順によって鋼繊維の投影 面積率(以下,面積率)および繊維混入率を求め ることとした。

- コンクリート供試体から、7×7×7cmの立方 体状の試験片(質量・寸法測定、打設・採取 方向の明記)をコンクリートカッターにより 切り出した。
- 一試験片あたり3面から表-1の仕様により X線透過撮影し、その写真の色調調整・画像 解析を行い(写真-1参照)、各方向の面積率 (繊維面積/試験片面積)を求めた。
- ③ 試験後の試験片は、ジョークラッシャおよび 鉄乳鉢を用いて粉砕後、磁石により鋼繊維を 回収し、その質量を計測した。

表-1 X線透過撮影仕様

項目	仕様					
使用装置	デジタル放射線装置					
焦点寸法	2mm×2mm					
露出時間	0.3min					
感電圧	100kV					
フィルム	イメージングプレート					
増感紙	Pb0.1 もしくは Pb0.03 (鉛箔の厚さ)					
撮影距離	800mm					



処理後

A) デジタル放射線検査による画像処理 (画像強調・色調調整)



|←−7cm→→| |←5cm→| B) パソコンによる二値化画像処理

写真-1 データの処理画像

④ 次式に基づいて繊維混入率 P を求めた。

$$P = \frac{W_{sf} / \rho_{sf}}{V_{sp} - W_{sf} / \rho_{sf}} \times 100 \quad (\%) \tag{1}$$

ここに W: 質量(g), V: 容積(cm³), ρ: 密度(g/ cm³) を意味し, 添字 *sf* および *sp* はそれぞれ鋼繊維, 試 験片を表す。

3.2 X線透過撮影による鋼繊維投影面積の基礎実験

X 線透過撮影による鋼繊維の投影面積は,X 線源から試験片までの距離,試験片厚,試験片 中の鋼繊維からフィルムまでの距離に影響を受 ける。特に厚みのある試験片の場合,コンクリ ート中の鋼繊維は立体的にランダム配置してい るため,鋼繊維の平面的な重なりや,図-2に示 すように試験片の中心部と端部の距離の差異に よって大きく影響を受けるものと考えられる。

また,X線透過写真の画像処理段階において も,写真の解像度,骨材と鋼繊維の識別におけ るしきい値設定など,様々な誤差要因も考えら れる。特に,骨材と鋼繊維間のしきい値設定に おいては,骨材の X 線透過率がその形状寸法や 組成により異なるため,二値化処理における人 為的誤差も含まれることとなる。

本研究では、上記のような誤差の総括的な影響を把握するため、モデル試験片を用いて、X線透過撮影による実測面積率と理論面積率の比較を行った。使用した試験片は、図-3に示すように上面から1,2,3cm位置に「川」および「井」 字状に繊維配置を行ったものである。また使用した鋼繊維は、 (0.8mm、長さ60mmの両端フック型であり、粗骨材による投影面積への影響を除外するため鋼繊維モルタルの試験片とした。

ここで X 線照射を行う際,照射源が試験片の 730mm 上方にあり,照射角度の差異により隅角 部の X 線透過度は,中央部分と異なってくる。 そこで本研究では,以降の評価実験において, 照射断面の周囲 1cm 枠を除いた 5×5cm 断面(評 価断面 *A_i*)を解析対象とした。

表-2に「川」および「井」字状に繊維配置し たモデル試験片の実測繊維面積率を示す。また, 同表には繊維の識別本数,理論繊維面積率,お よび実測値/理論値の比を併せて示す。

表-2に示す結果より,実測面積率と理論面積率の比は63~98%の範囲にあり,全平均で75.7%であった。また,フィルムのような平面上に写し出した時の鋼繊維重複の影響(「川」と「井」字配置の差異)や,繊維の埋設深さの影響は明確な傾向が得られなかった。このモデル試験の成果を踏まえ,本研究のX線透過撮影法における実測面積率は,理論面積率に対して75%程度小さく評価するものと考え,以降0.75(75%)を補正係数として用いることとした。

3.3 繊維投影面積比αの求め方

本研究で提案する方法では,配向係数 β を求 めるに先立ち,繊維投影面積比 α を定める必要 がある。この繊維投影面積比 α は,粉砕した試 験片から取り出した鋼繊維の径 ϕ_{sf} ・長さ L_{sf} ・本 数 N から計算される面積率に対して,X 線透過 写真から得られる鋼繊維の投影面積率の比とし







図-3 川および井字状に繊維配置したモデル試験片

表-2 モデル試験による面積率比較

[]][ر]	深さ	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm	60mm
	識別本数※1	4.0本	4.2 本	4.0本	4.0本	4.2 本	5.0本
	実測值 ^{**2}	5.3%	4.7%	4.8%	5.0%	4.2%	7.8%
	理論值※3	6.4%	6.7%	6.4%	6.4%	6.7%	8.0%
	実/理	83%	70%	75%	80%	63%	98%
「井」	深さ	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm	60mm
	識別本数※1	10.0本	9.1本	8.0本	9.9本	9.5本	10.0本
	実測值**2	11.9%	10.9%	10.1%	10.8%	10.1%	12.7%
	理論值※3	16.0%	14.6%	12.8%	15.8%	15.2%	16.0%
	実/理	74%	75%	79%	68%	66%	79%
※1:評価断面 A _i の範囲に存在する合計繊維長さより本数を換算							
※2:X線透過撮影により得られる評価断面4.範囲の繊維面積率							

※3: 繊維の識別本数に X 線透過写真の画像処理段階での解像度 を加味して求められる評価断面 A_i範囲内の繊維面積率

て定義する。ここで、鋼繊維がコンクリート中 に一様に分散するものと仮定した場合、評価の 対象とする試験片の内部容積中の鋼繊維容積 V'_{sf} は、式(2)によって求められる。なお、内部容 積とは、評価断面 $Ai = 5 \times 5$ cm と X 線照射方向の 試験片高さ $H_x = 7$ cm の積を意味するものである。

$$V'_{sf} = \frac{W_{sf}}{\rho_{sf}} \times \frac{Ai \cdot H_x}{V_{sp}}$$
(2)

Wsf:試験片中の鋼繊維総質量

V_{sp}:試験片容積の意

ここで、全ての鋼繊維が X 線照射方向に対し

て直交する平面と平行に存在した場合の面積率 を *S*_{sf}とおく。この面積率 *S*_{sf}(%)は,式(3),(4)に 示す内部容積中の鋼繊維の換算本数 *N*'および鋼 繊維形状から推定できるものとする。

$$N' = \frac{V'_{sf}}{\pi \cdot \phi_{sf}^2 \cdot L_{sf} / 4} \tag{3}$$

$$S_{sf} = \frac{N' \cdot \phi_{sf} \cdot L_{sf}}{A_i} \times 100 \tag{4}$$

また、X 線照射を用いた本手法による実測面積 率は、先の結果より理論値の 75%程度になるた め、先の補正係数 0.75 を乗じた(補正)面積率 S'_{sf} (=0.75 S_{sf})を考える。ここで、X 線透過写真 撮影から X 線照射方向における鋼繊維の面積率 S_x が得られたとき、繊維投影面積比 aは式(5)か ら求めることができる。

$$\alpha = S_x / S'_{sf} \tag{5}$$

3.4 配向係数βの求め方とモデル試験による検証

本研究で用いた鋼繊維は,真円形状に近く繊 維径が一定であることから,繊維投影面積比*a* は,総繊維長と投影長の合計からほぼ推定でき るものと考えられる。

鋼繊維1本あたりで考えると、繊維長 L_{sf} およ び撮影長さ L_x には $\mathbf{20-4}$ に示す関係にあるため、 三角関数を用いることで X 線照射方向にある繊 維長 L_y およびその方向における配向係数 β を求 めることができる。

(1) x-y 軸における投影繊維長の補正方法

本研究で示す鋼繊維の配向係数評価方法は, x-y-z の三次元で分散する鋼繊維の配向度を求め るものであるが,先ずその基礎資料として,図 -5 左のような二次元軸上に鋼繊維がある場合 を考え,X 線透過撮影法による配向係数評価に おける誤差配分について検討する。

二次元軸(*x-y* 軸)上に投影された鋼繊維の各長 さ成分(*x-y*)に対して,総繊維長*L*で正規化した 投影長さ比*L_x*, *L_y*は次式のような関係にある。

仮定:
$$L_x^2 + L_y^2 = 1$$
 (6)



しかしながら,実測される投影長さ比(L'x,L'y) は,前述のような誤差要因を含むため,必ずし も式(6)のような関係は得られない(式(7))。本研 究で提案する配向係数評価方法では,上記の仮 定が成立することに強く依存しているため,実 測から得られる投影長さ比の誤差配分が必要と される。本研究では,立方体形状の試験片を用 いるなど,試験の等方性が成立するものと考え, 実測長の誤差を各軸の実測投影長さ比に応じて 配分する方法を採用した。

補正値:
$$s_i = \frac{\left(1 - {L'_x}^2 - {L'_y}^2\right) \cdot L'_i}{L'_x + L'_y}$$
 (8)

補正後:
$$\overline{L}_i = \sqrt{L_i^2 + s_i}$$
 (9)

ここに, *s*は補正量, 添字*i*は*x*, *y*成分の意である。 式(9)を基に, *x*, *y*方向における配向係数βは 次式により求めることができる。

$$\beta_i = \sqrt{1 - \overline{L}_i^2} \tag{10}$$

(2) *x-y*軸で繊維長を補正した配向係数の検証実験 提案する配向係数推定方法の妥当性を検証す るため,図-6に示すような人為的に鋼繊維を配 置したモデル供試体を作製し,X線透過撮影によ り配向係数の算出を行った。試験に用いた鋼繊

維は、φ0.6mm、長さ30mmのインデント型であり、一試験片につき9本埋設した。

X線透過撮影により求めたx,y方向における 鋼繊維の配向係数評価結果と理論値の比較を表 -3に示す。これによると、理論値から定まる配 向係数に対して、上記の方法で求まる配向係数 では、誤差が-5.9%~+12.3%となり、本評価方法 の推定精度の高さが窺える。

(3) x-y-z軸における投影繊維長の補正方法

コンクリート中の鋼繊維が,*x-y-z*の三次元下 において分散する場合の補正方法として,先述 の二次元下における補正方法の拡張を試みる。

図-5に示すように、総繊維長Lで正規化した 投影長さ比 L_x , L_y , L_z には、式(11)の関係がある。 しかし実際には、前述のような試験誤差の影響 を多分に含むため、式(11)の関係は得られない (式(12))。

仮定:
$$L_x^2 + L_y^2 + L_z^2 = 2$$
 (11)

実際:
$$L'_{x}^{2} + L'_{y}^{2} + L'_{z}^{2} \neq 2$$
 (12)

そこで,本研究では先の二次元下の補正方法で 示したように,各軸の実測投影長さ比に応じて 誤差配分を行うべく,式(13)に示すような補正値 を求めた。

補正値:
$$s_i = \frac{\left(2 - {L'_x}^2 - {L'_y}^2 - {L'_z}^2\right) \cdot L'_i}{L'_x + L'_y + L'_z}$$
 (13)

この補正値が定まれば,式(9)(10)を基に,*x-y-z*の各成分方向における配向係数を求めることができるものと考えた。なお,式(11)の仮定と実際の値に大きな隔たりが発生する場合には,この補正方法で充分な評価結果が得られない可能性があることも認識しておく必要がある。

ここで、図-6に示すモデル供試体を用い、上 記の投影繊維長を補正した配向係数評価結果を 表-4に示す。この結果によると、式(11)の仮定 と実験値には大きな隔たりがみられ、整合性は 充分ではなく、特にz軸方向で"0"の理論配向 係数に対して、得られた配向係数は、0.8~0.9 程 度と大きな差異がみられた。これは、本研究で



図-6 配向係数評価用モデル供試体(7cm 立方体)

の二さ	火元)
	100_2

	方向	α	Lx^2+Ly^2	Si	L _i	β	β_{μ}
Casel	x	0.905	0.823	0.165	0.992	0.123	0.000
	у	0.062		0.011	0.123	0.992	1.000
Case2	x	0.700	0.870	0.069	0.747	0.665	0.707
	У	0.617		0.061	0.665	0.747	0.707
Case3	x	1.029	1.062	-0.059	1.000	0.017	0.000
	У	0.062		-0.004	0.017	1.000	1.000
Case4	x	0.679	0.817	0.097	0.747	0.665	0.707
	у	0.597		0.086	0.665	0.747	0.707

表一4	配 同 係 数 評 価 結 果 ((<i>x-y-z</i> ====================================
-----	-------------------	---

	方向	α	ΣLi^2	Si	L _i	β	$eta_{ ext{ } ext{ $
Case1	x	0.905	0.851	0.920	0.995	0.100	0.000
	у	0.062		0.063	0.258	0.966	1.000
	Ζ	0.165		0.167	0.441	0.898	0.000
	x	0.700		0.500	0.994	0.105	0.707
Case2	у	0.617	0.913	0.441	0.907	0.422	0.707
	Ζ	0.206		0.147	0.435	0.900	0.000
Case3	x	1.209	1.171	0.601	0.995	0.100	0.000
	у	0.062		0.036	0.200	0.980	1.000
	Ζ	0.329		0.192	0.548	0.836	0.000
Case4	x	0.679	0.939	0.443	0.951	0.310	0.707
	у	0.597		0.389	0.863	0.505	0.707
	Z	0.350		0.228	0.592	0.806	0.000

示す配向係数評価方法が,X 線透過撮影による 鋼繊維の投影面積から求まるため,図-7の模式 図に示すようにX線照射方向に交差する鋼繊維 の断面積等の影響も含まれることが要因のひと つとして考えられる。また,Case2,4のxおよ びy方向の配向係数についても,z方向の配向係 数の乖離のため,均等に誤差配分を行なった結 果,両者の乖離が大きくなっている。このよう な傾向は,一定方向に鋼繊維を配置した場合に おいて,特に顕著な差異として現れるものであ り,実際のコンクリート中においては,鋼繊維 はランダム配置することから,上記のような影 響は小さくなるものと推察される。

4. トンネル覆エにおける鋼繊維の配向係数調査

本研究の配向係数評価方法を用いて、異なる 鋼繊維混入率(0.3~0.5Vol.%)で施工された道路 トンネル覆工からφ10cm×20cm のコアを採取 し, 鋼繊維の配向係数を求めた。一例として, 採取したコアのx-v-z各方向におけるX線透過撮 影写真を写真-2 に, x-y-z 全方向の配向係数を 用いて作成したヒストグラムを図-8に示す。こ の調査結果から,実トンネル覆工においては, コンクリート性状の違いやトンネル特有の施工 の困難さなどにより配向係数値が広範囲におよ び、局所的な配向は必ずしも一定ではないこと が分かる。これらの平均値は0.55程度であった。 既往の文献に基づけば、配向係数が0.5 あるいは 0.41 の時,最もランダムな配向状態を示すもの である¹⁾が、上記の調査結果より、実トンネル覆 工において鋼繊維は概ねランダム配向している ものと判断できた。

5. まとめ

本研究では、これまで X 線透過撮影により薄 板状の試験片を中心に行われてきた鋼繊維の配 向状態の評価方法について、立体的な試験片中 の鋼繊維配向状態を求めるための評価方法を示 した。特に、従来用いられている評価指標の配 向係数に着目し、X 線透過撮影から得られる写 真の画像解析から、二~三次元下で分散する鋼 繊維の配向係数評価方法を示した。

その結果,本手法によれば,二次元下では撮 影誤差や画像処理上の変動を理論的に修正でき, 比較的簡便に且つ精度よく配向係数を求めるこ とができた。また,三次元下では一部実験値と 理論値に差異がみられたが,同様の手法を用い ることにより,画一的な評価が可能と考えられ, 実トンネルにおける調査結果からは,特に有意









図-8 実トンネル覆工における配向係数調査結果

な特性は示さず,画一的な評価が可能となり本 手法の適用の妥当性が窺えた。

本手法を用いることで,これまで数多くの試 験が必要とされた薄板状試験片による評価に比 べ,簡便に多方向の鋼繊維配向状態を確認する ことができ,実際のコンクリート構造物の品質 管理においての一手段になるものと考えられる。

参考文献

- 小林一輔:繊維補強コンクリートー特性と応 用ー,オーム社,1981
- 山王博之,小林一輔:鋼繊維コンクリートの 引張強度に及ぼす繊維の分散と配向の影響, 生産研究, Vol.28, No.9, pp.13~16, 1976.9
- 3) 和泉意登志,山根 昭:鋼繊維補強モルタル の各種強度と繊維の方向性および分布につ いて、日本建築学会大会学術講演概要集, pp.293~294, 1975