

繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強 コンクリート部材の強度と変形

INFLUENCE OF FIBER ORIENTATION AND DISTRIBUTION ON LOAD-DEFORMATION CHARACTERISTICS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE MEMBERS

小林 一 輔*・陸 好 宏 史**

By Kazusuke KOBAYASHI and Hiroshi MUTSUYOSHI

1. はし が き

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) は、ひびわれ拘束性能、引張および曲げ強度、靱性などが普通コンクリートに比べて格段に優れているので、最近では舗装やトンネルのライニングなどへの試験的な適用例も次第に増加している。特に掘削直後に地山が膨張するようなトンネルのライニングや地震力によって大きい変形を受けることが予測されるコンクリート構造物では、曲げ強度やせん断強度が高いことの他に変形能が大きいことが要求されるが、SFRC はこれらの特性を有しているといえる。しかし、SFRC をこれらの構造物に対して本格的に適用するためには、さらに検討を要する問題点がいくつか存在する。この中で特に重要な問題点——これは複合材料に共通の欠点でもあるが——は、SFRC の強度のばらつきが普通コンクリートに比べて大きくなることである。したがって、SFRC を用いて構造物を設計する場合には、そのばらつきを考慮する必要がある、このためにはばらつきの実体が把握されなければならない。

一般に、SFRC のように短繊維の混入によって補強された複合材料では、部材断面における繊維の分散と配向性状が部材の力学的挙動にかなり大きい影響を及ぼす。

このことは、SFRC における繊維の分散および配向性状と、これに影響を及ぼす諸要因との関係を明確にすることが、上記のばらつきを解明するうえできわめて重要であることを示している。また、SFRC を上記のような構造物に適用するためには、その材料力学的特性としての応力-変形関係を明確に把握しておく必要がある。

本研究は、SFRC における鋼繊維の分散と配向を考慮

して SFRC 部材を設計するための手法を確立することを目的として実施したものである。本研究では、まず SFRC における繊維の分散特性を明らかにした。続いて繊維の配向の定量化を行い、配向に影響を及ぼす諸要因との関係を明らかにした。次に SFRC を用いた構造部材の基本的な力学的特性を明らかにするために、はじめに繊維の分散と配向の影響を考慮して引張を受ける SFRC の応力-ひずみ曲線を解析的に求めた。続いて、このようにして求めた応力-ひずみ曲線を用いて曲げを受ける SFRC 部材の荷重-変形曲線を解析的に求め、これを実験的に求めた曲線と対比した結果、両者が比較的良好に一致することが確かめられた。すなわち、曲げを受ける SFRC 部材を設計するための一方法を示したものである。

2. 鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の分散

(1) 概 要

図-1 は曲げを受ける SFRC ばりの断面における繊維

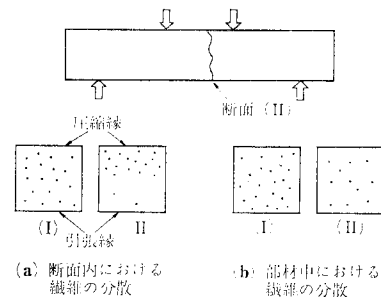


図-1 コンクリート中における繊維の分散

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 工修 埼玉大学助手 工学部建設工学科

繊維の分散状態を模式的に示したものである。(a)は断面内の繊維本数は一定であるが断面内における分散状態が異なる場合を示したものであり、(b)は断面内における繊維の分散状態は一樣であるが、断面内の繊維数が異なる場合を示したものである。このように繊維の分散状態は SFRC の力学的性状に著しい影響を及ぼすことがわかる。

さてSFRCにおける繊維の分散状態を取り扱った研究は以下に述べる山王らによるものを除けば皆無に近い。山王らは繊維の分散度を評価するために分散係数を提案し、これを用いて練り混ぜ方法、締固め方法、繊維の形状寸法および混入率などが繊維の分散度に及ぼす影響を定量的に評価している¹⁾。

本章では硬化した SFRC の曲げ供試体における任意断面および破壊面における繊維本数の分布を調べて、SFRC における鋼繊維の分散特性を明らかにしたものである。

(2) 実験の概要

本実験では曲げ強度試験に用いた数多くの曲げ供試体(10×10×40 cm)について、その破壊面から離れた任意箇所から、供試体軸に直角に厚さ 10 mm 程度の試験片を切り出した。これらの供試体に用いたコンクリートの配合は鋼繊維混入率が1%のものと2%のもの2種類で、いずれの場合も粗骨材の最大寸法を 10 mm、水セメント比を 50%、細骨材率を 60%、スランプを 10 cm とした。なお、単位セメント量は前者の場合で 440 kg/m³、後者の場合で 490 kg/m³ である。鋼繊維はすべて 0.5×0.5×30 mm のせん断ファイバーを使用した。次にこの断面を図-2のように要素に分割して各要素の繊維本数を測定した。また破壊面も同様に要素に分割し、両破面の本数を加えることによって、破壊面における各要素の繊維本数とした。要素は分割する場合、要素の大きさは粗骨材の最大寸法(10 mm)と有効繊維間隔(Romualdi はこの値を 0.5 インチとしている)を考慮して決定した。

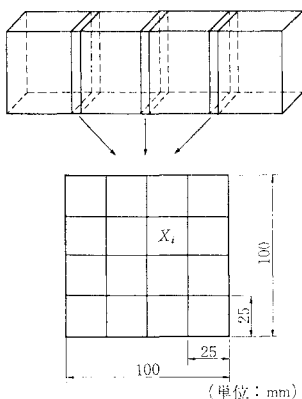


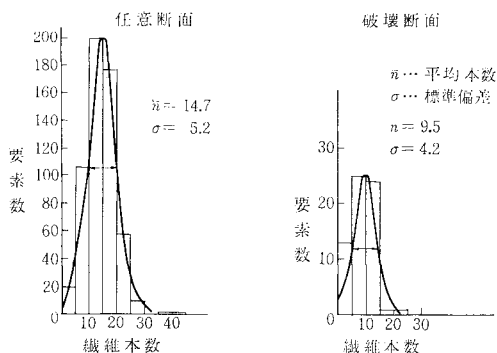
図-2 サンプルの採取位置および要素分割

(3) コンクリート中における繊維の分散特性

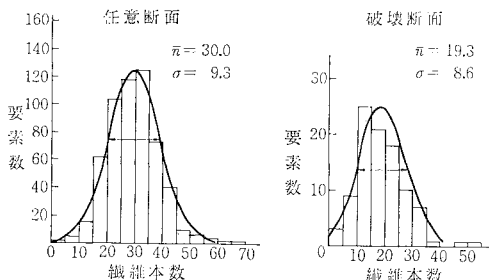
図-3は任意断面および破壊面における各要素の繊維本数の分布を示したヒストグラムの一例である。任意断面における繊維の分布は正規分布曲線にほとんど一致しており、平均本数も繊維混入率から理論的に求めた値とだいたい同じである。しかし破壊面における繊維分布を任意断面における繊維分布と比較すると、前者の平均本数は後者の 2/3 程度にとどまる。

SFRC の破壊面を観察すると、写真-1 に示すように普通コンクリートに比べてかなり大きな凹凸がみられる。一般にコンクリートのような複合材料の破壊はその最も弱い欠陥から生ずるが、SFRC では繊維が crack arrester となるために繊維の存在する部分では主たる破壊は起こらず、繊維のない部分に破壊が生じ、それらが連結して破壊面を形成する。すなわち、SFRC の強度は実際に混入した繊維量によって決まるのではなく、それよりも少ない量によって決まる。図-3 より明らかなように、強度を支配する繊維混入率は実際に混入した平均混入率から任意断面におけるばらつき量である標準偏差に相当する量を差し引いた値にほぼ等しくなる。

図-4 は横軸に繊維混入率、縦軸に繊維長および繊維混入率によるばらつきを考慮した実際にとり得る繊維量の範囲を示している。すなわち下側の直線が強度を決定する真の繊維混入率となる。

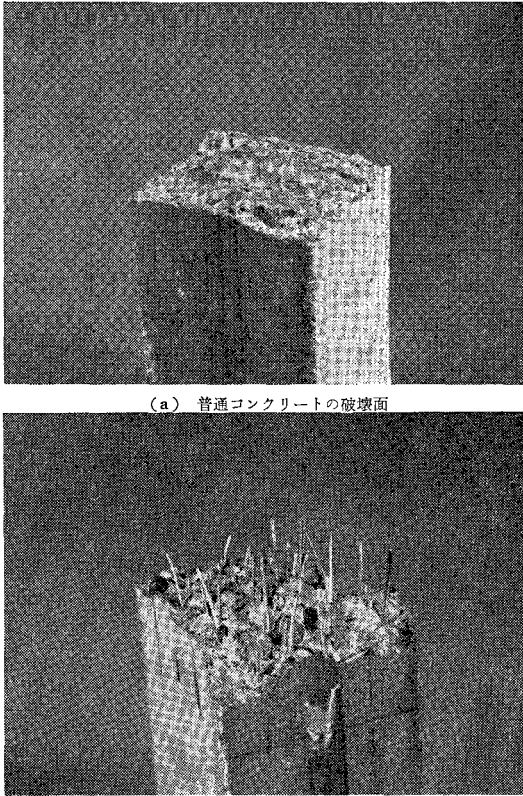


(a) $V_f=1\%$



(b) $V_f=2\%$

図-3 繊維本数の分布



(a) 普通コンクリートの破壊面
(b) 鋼繊維補強コンクリートの破壊面
写真—1 普通コンクリートと鋼繊維補強コンクリートの破壊面の比較

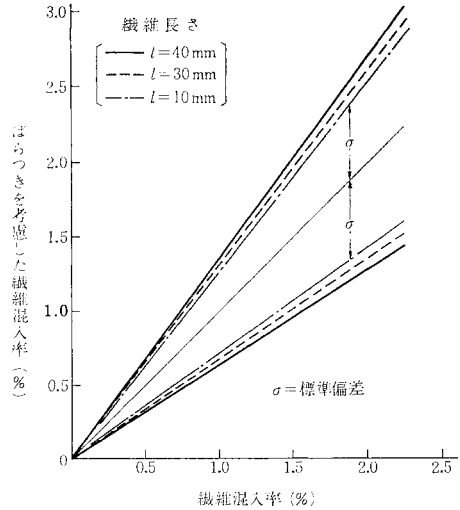
3. 鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向とその定式化

(1) 概要

SFRC における鋼繊維の配向度は分散度と同様にその力学的性質に著しい影響を及ぼす。たとえば鋼繊維がすべて特定の方向に配向している場合とランダム配向している場合とでは、1つの方向に作用する引張応力に対して補強効果はまったく異なってくる²⁾。したがって、SFRC を用いた構造部材の設計、またはすでに作られた部材の強度の推定を行う場合には、鋼繊維の配向度を定量的に把握しておく必要がある。

コンクリート中における鋼繊維の真の配向度を実験的に直接求める方法としては、SFRC 試料の X 線画像による多次元画像情報処理を用いる方法がある¹⁾。

本研究でもこの方法を用いて、鋼繊維の配向度とそれに影響を及ぼす要因との関係を明らかにした。配向度に影響を及ぼす要因として、供試体の寸法、鋼繊維の長さおよび型枠の拘束効果による断面内の配向度の分布を取



図—4 ばらつきを考慮した繊維混入率

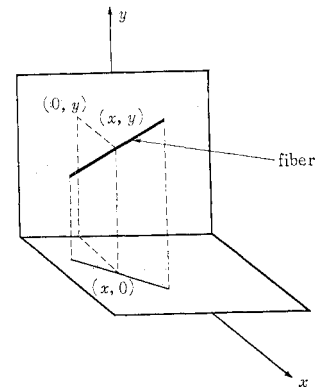
り上げ、SFRC を構造物に適用する場合において繊維の配向度を定量的に取り扱う方法を示した。

(2) 配向係数の定義および求め方

配向係数は一軸方向に対する有効率として、ある方向に繊維を投影したときの長さ、もとの繊維の長さとの比として定義した。

a) 理論的配向係数

従来配向係数を求める方法として、繊維が3次元のランダム配向していると仮定して、0.41 あるいは 0.5 などの値が理論的^{3),4)}に求められていた。しかしこれらの値は繊維が3次元ランダム配向状態である場合に限り、供試体の断面寸法および繊維長などの幾何学的影響をまったく考慮していない。図—5 に示すように繊維長 l 、繊維の中心がとる座標を (x, y) とすると、 $x, y < l/2$ のとき、繊維は型枠の拘束により幾何学的影響を受ける。これらを考慮すると、繊維の位置 (x, y) が決まるとその繊維が任意にとり得る理論的平均配向係数は x, y, l の関数となる。たとえば繊維長 40 mm の繊維を混入した SFRC を用いて 10×10 cm 断面の曲げ供試体を作った場合、繊維の軸方向に対する理論的平均配向係数は 図—6 に示すように断面内部においてかなり異なることがわかる。



図—5 繊維の配向と型枠の拘束

この場合の理論的

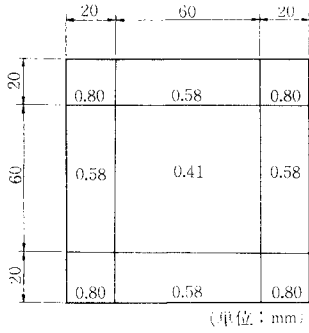


図-6 理論的配向係数の分布 (繊維長：40 mm)

平均配向係数は次のようにして求めたものである。すなわち、繊維の中心がとる座標を (x, y) とすると、長さ l の繊維が型枠面によって拘束される条件は、(a) $x < l/2$ かつ $y < l/2$ 、(b) $x < l/2$ あるいは $y < l/2$ および (c) $x \geq l/2$ かつ $y \geq l/2$ の 3 つになる。以上のうち、(a) の場合には繊維は型枠によって 3 次元的に拘束された配向状態となり、(b) の場合には繊維は型枠により 2 次元的に拘束された配向状態となるが、(c) の場合には繊維はまったく拘束されず、3 次元ランダム配向状態となる。これらのおおのこの場合の理論的平均配向係数 β は次式によって求めることができる。

$$\beta = \frac{\int_0^{\theta} \int_0^{\varphi} \cos \theta \cdot \cos \varphi \, d\theta d\varphi}{\theta \cdot \varphi}$$

ここに、

θ, φ : 繊維が型枠による拘束条件下で取り得る回転角でそれぞれ次式で表される。

$$\theta = f(x, y, l)$$

$$\varphi = g(x, y, l)$$

b) X 線写真から求める方法

SFRC から約 10 mm 程度の厚さの試験片を切り出し、その中に含まれる繊維の本数を求め、試験片の X 線写真を撮ると試験片に含まれている全繊維の投影像が求まる。この像から電子計算機による多次元画像情報処理システムを用いて、試験片に含まれる全繊維の投影面積が求められ、これから繊維の平均配向係数を求めることができる。この方法はコンクリート中に存在する繊維の真の配向度を直接求めることができ、また繊維の分散状態にかかわらず断面内の配向度の分布も容易に求めることができる。

(3) 実験方法

a) 使用材料、配合および供試体の製作

本実験では骨材として標準砂を用いた。その理由は供試体断面の寸法を 10×10 cm から 2×2 cm まで変化させるので、断面内における繊維の配向度が骨材によって

影響されることを避けるためである。鋼繊維は直径が一定 (0.5 mm) でアスペクト比が 40, 60 および 80 の 3 種類のカットワイヤーを用いた。配合は繊維混入率が 1% と 2% の 2 種類とし、いずれの場合も、水、セメントおよび砂の重量配合比を 1:2:2.9 とした。供試体は断面が 10×10, 4×4, 2×2 cm の 3 種類を用いた。供試体の製作方法は、試料を 2 層に分けて充填し、締めめはいずれの場合も木づちによる型枠外部からの打撃のみにより行った。

b) 配向係数の測定

① 概要

配向係数 β は 図-7 に示すように、繊維は試験片の両断面を貫くと仮定し、一軸方向に対する有効率 ($\beta = \cos \theta \cdot \cos \varphi$) として定義した。硬化した供試体から厚さ 5 ± 1 mm 程度の試験片を切り出し、試験片の厚さ (l)、図-8 のように分割された各要素の繊維本数 (n) を測定した。配向係数は各要素の平均配向係数としてこれを求めた。配向係数を求めるために、上述した試験片の厚さ (l)、繊維の直径 (d)、各要素中の繊維本数 (n) のほかに試験片中の繊維の投影長を求める必要があり、このためには繊維の投影面積を測定する必要がある。この測定のために、切り出した試験片を軸方向から X 線撮影を行い、その X 線画像から電子計算機による多次元画像情報処理を行った。

② X 線画像の多次元画像情報処理による配向係数の決定

X 線画像における繊維の投影面積を求めするために用いた多次元画像情報処理システムについて、その過程を

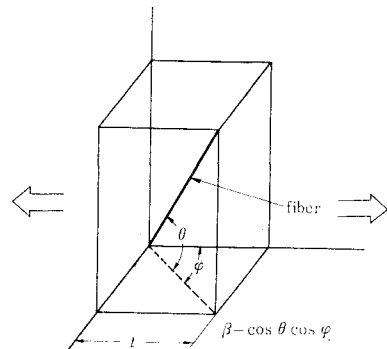


図-7 繊維の配向係数

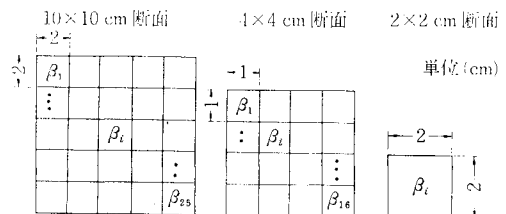


図-8 断面寸法と要素分割

図-9 に示す。まず、X線画像を簡易入力装置にセットして、写真を光源で照らし、その反射光を光電管で検出して画像の読み込みを行わせ、さらにこれをA/D変換する。画像の読み込みを行う場合、2×2cm要素に

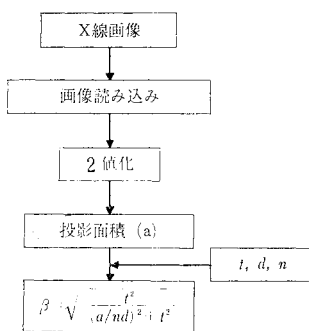


図-9 画像処理過程

についてはデータサイズで128×128、画素数で6.4個/mm、1×1cm要素ではデータサイズは同じであるが、画素数で12.8個/mmとした。入力されたデータはすべてDISC内に格納され、繊維部分と他の部分とに分けるために2値化を行う必要がある。ここで2値化とは画像上においてコンクリート部分(黒)と繊維部分(白)に2分することを意味する。2値化を行う場合、写真によって濃度レベルがすべて異なり、また繊維部分の重なりなどを考慮して、実際の繊維部分の面積を求めることが必要である。このために本実験では2値化した画像を1枚1枚X線写真と比較して最適な2値化レベルを決定した。2値化レベルが決定することによって、各要素の繊維部分の占める投影面積が求まり、先に求めた各要素ごとの繊維本数(n)、試験片の厚さ(l)、および繊維の直径(d)から各要素の平均配向係数を求めることができる。写真-2にX線写真および断面全体の平均配向係数を示し、写真-3に一要素を2値化した写真を示す。

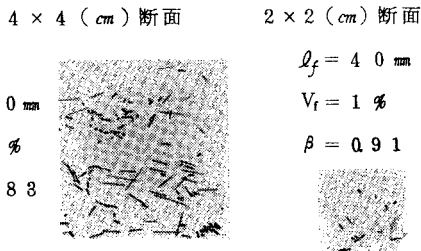


写真-2 X線写真の一例

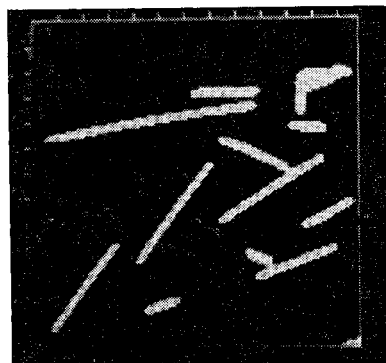
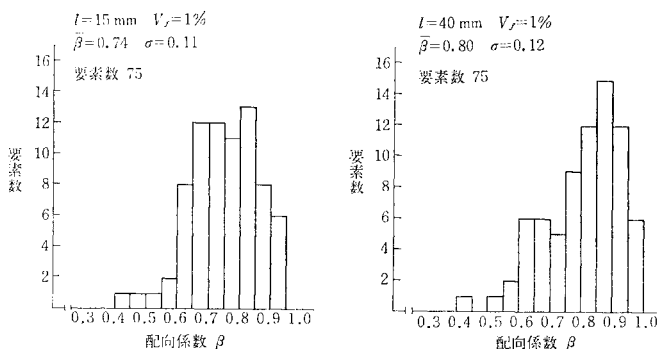


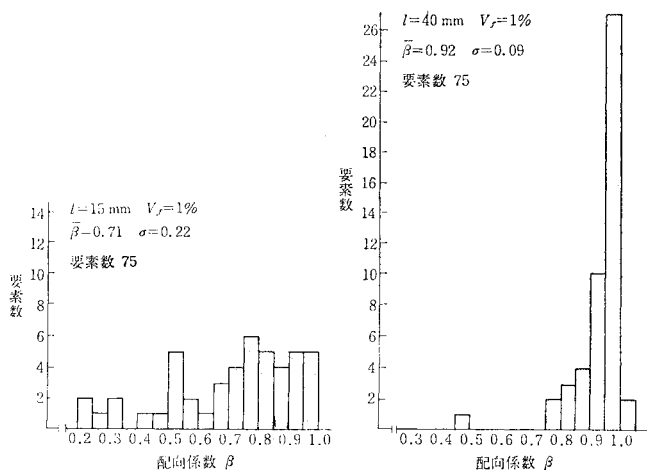
写真-3 2値化写真



(a) 10×10 cm 断面

(4) 配向係数に影響を及ぼす諸要因

図-10 は各断面の各要素における配向係数と供試体断面における要素の度数を表わしたヒストグラムの一例である。一般に繊維の長さが短くなると配向係数の分布は広い範囲にわたって同程度の度数で分布するが、逆に長くなるとある配向係数の値に集中した分布になる傾向がある。この傾向は断面が小さくなるほど顕著であって、たとえば10×10cm断面では配向係数の値の上限値と下限値はだいたい同じような値をとり、ばらつきも同程度であるが、4×4cm断面では繊維が短くなるほど配向係数の上限値と下限値の値は広がり、ばらつきも大きくなる。



(b) 4×4 cm 断面

図-10 配向係数の分布

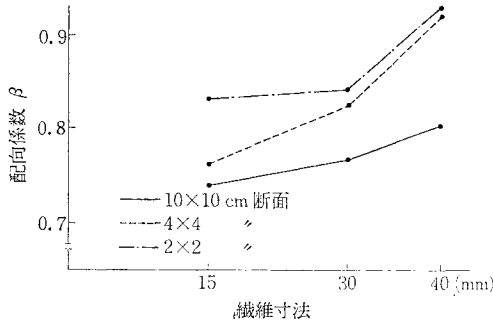


図-11 平均配向係数の実測値と繊維長さとの関係

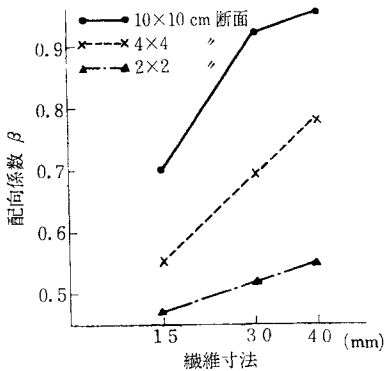


図-12 理論的配向係数と繊維長さとの関係

図-11 は各供試体断面の平均配向係数と断面寸法、および繊維長との関係をそれぞれ示したものである。供試体の断面寸法が一定のとき、繊維長が長くなるほど、また繊維長が一定のとき、断面寸法が小さくなるほど配向係数は大きくなる。これは明らかに、供試体断面の寸法と繊維による影響がかなり大きいことを示している。一般に断面寸法が与えられ、繊維の位置が決まるとその繊維が任意にとり得る理論的配向係数は繊維長と供試体断面の寸法との関数になることはすでに述べたが、これを示したのが図-12である。実際に求めた配向係数もこれと同じ関係を示している。

次に、断面内における配向係数の分布は、型枠の拘束による影響のために断面内部より断面外部の値の方が大きくなる。図-13は断面内における配向係数の分布を画像処理によって求めた値の一例を示したものである。断面内部では繊維は3次元ランダムな配向状態をとり得るが、外部では型枠の拘束により明らかに強制的に配向された状態となる。これを比

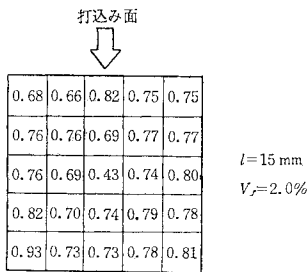


図-13 断面内における配向係数の分布の一例

表-1 断面内部と外部の平均配向係数の比較

V _f = 1.0%		(mm)		
		l = 15	l = 30	l = 40
内	部	0.72	0.72	0.83
外	部	0.76	0.78	0.82
V _f = 2.0%		(mm)		
		l = 15	l = 30	l = 40
内	部	0.70	0.68	0.72
外	部	0.78	0.77	0.77

較するために、10×10 cm 断面の内部の要素と外部の要素の配向係数をそれぞれ平均すると表-1 のようになる。4×4 cm 断面では配向係数の分布は10×10 cm 断面と同じ範囲で分布するが、上で述べたように断面内部と外部における明確な違いはみられなかった。

(5) 配向係数の定式化

以上で述べてきたように、配向係数に影響を及ぼす要因の中で、供試体の断面寸法および繊維長による影響が大きいことが明らかとなった。SFRC を実際の構造物に適用する場合、部材断面が比較的大きい場合には繊維は3次元ランダムな配向状態であると考えてよいが、小さい場合、あるいは曲げを受ける部材では繊維の特定方向への配向による影響が大きいと考えられる。したがってSFRC 部材の強度、変形を推定する場合、これらの影響を加味した設計方法が用いられることが望ましい。

著者らは供試体断面の影響を考慮した繊維の断面全体の平均配向係数を以下のようにして求めることにした。すなわち、型枠面による繊維の拘束とその長さの影響を考慮した平均配向係数に関しては、本章中の(2)「配向係数の定義および求め方」に示したような方法で、図-14における a, b および c の領域を決定し、各領域における平均配向係数 β_a, β_b および β_c を上記の方法による理論値と実験値の両方から評価してそれぞれ 0.8, 0.6 および 0.4 のごとく求め、これを用いて断面全体の平均配向係数 β̄ を以下の式によって求めた。

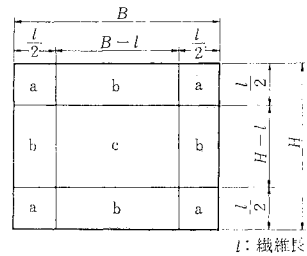


図-14 型枠による拘束域

i) B, H ≥ l の場合

$$\bar{\beta} = \frac{K_1 l^2 + K_2 l (B + H - 2l) + K_3 (H - l) (B - l)}{BH}$$

ii) B ≫ H, H > l の場合 (平板の場合)

$$\bar{\beta} = \frac{K_2 l + K_3 (H - l)}{H}$$

ここに、

$$K_1 = \beta_a = 0.8$$

$$K_2 = \beta_b = 0.6$$

$$K_3 = \beta_c = 0.4$$

4. 引張を受ける鋼繊維補強コンクリートの応力-ひずみ関係

(1) 概要

引張荷重下における鋼繊維補強コンクリートの応力-ひずみ曲線を、繊維の分散と配向の影響を考慮して、解析的に求める方法を示したものである。この方法は、まず引張を受ける断面をある等しい大きさの要素に分割し、これら各要素について繊維の分散と配向度のパラメーターを導入してそれぞれ応力-ひずみ関係を求める。次に引張荷重下における断面各部の等ひずみを仮定して各要素の応力を求め、これを平均したものをその断面の平均応力とすることによって、みかけの応力-ひずみ曲線を求めるものである。

以上の解析においては次のような仮定を設けている。

- ① 引張断面は平面応力状態にある
- ② ひびわれを生じるまでの引張断面における繊維とマトリックスのひずみは等しい。

(2) 繊維の分散と配向の影響を考慮した SFRC の応力-ひずみ挙動の解析

繊維の分散度と配向度は、次式で与えられるような平均繊維間隔 S_E によって統一的に表現することができるので、各要素における繊維の分散度と配向度の影響はこの S_E によって導入することにした。

$$S_E = \sqrt{\frac{a^2}{n}} / \beta$$

ここに、

- a : 要素の一辺の長さ
- n : 各要素の繊維本数
- β : 各要素の繊維の配向係数

この平均繊維間隔 S_E は、一般に繊維量を p 、繊維の直径を d 、繊維の3次元ランダム配向状態のときの配向係数を β' としたときに、 $S = 5\sqrt{\frac{\pi}{\beta'} \cdot \frac{1}{p}}$ によって求められる断面全体の平均繊維間隔とは次の点で異なる。すなわち、ここでは破壊断面内の一要素における繊維本数の実測値 n に基づいて、まず全繊維が断面に直角方向に配向しているとしたときの平均繊維間隔をまったく幾何学的に $S = \sqrt{\frac{a^2}{n}}$ として求め、これに対して繊維の配向度が複合体の強度および変形に及ぼす影響を考慮した一種の有効係数として型枠の拘束による影響等を考慮した

各要素の配向係数 β を導入し、 $S_E = S/\beta$ をもって SFRC 部材の設計に用いる平均繊維間隔としたものである。したがって、 S によって与えられる平均繊維間隔は、繊維補強コンクリートの補強効果に関する平均的な目安を与えるが、 S_E は断面内における局所的な補強効果を表すために導入した設計上のパラメーターといえる。

各要素の応力-ひずみ関係は次のようにして求めた。

① 各要素の応力-ひずみ関係を、降伏するまでと、降伏に達してから後の2つに分けて考え、bi-linear と仮定した。

② SFRC が粒子強化系複合材料と類似の強化機構を有すると仮定して、著者の1人が提案した引張強度推定式を各要素に適用して、要素ごとに引張強度 σ_t を求めた^{5),6)}。

$$\sigma_t = C_1 \left(\frac{1}{\sqrt{S_E}} - \frac{1}{\sqrt{S_C}} \right) + \sigma_m$$

ここに、

- σ_t : 一要素における SFRC の引張強度 (kg/cm²)
- S_E : 一要素における平均繊維間隔 (cm) で、前述のように、 $S_E = \sqrt{a^2/n}/\beta$ として表される
- S_C : 鋼繊維が補強効果を生ずる S の上限値、ここでは 2.7 となる
- σ_m : マトリックスコンクリートの引張強度 (kg/cm²)
- C_1 : おもに鋼繊維とコンクリートの付着強度によってきまる定数、ここでは 50 とした

③ SFRC の降伏ひずみに関してはこれを定量的に取り扱った研究はみあたらないので、ここでは SFRC の変形能に関しても強度と同様な関係が成立すると仮定して、その降伏ひずみを次式のように表した。

$$\epsilon_u = C_2 \left(\frac{1}{\sqrt{S_E}} - \frac{1}{\sqrt{S_C}} \right) + \epsilon_m$$

ここに、

- ϵ_u : 一要素における SFRC の引張降伏ひずみ
- S_E, S_C : 強度推定式で用いたものと同様である
- ϵ_m : マトリックスコンクリートの引張降伏ひずみ
- C_2 : 定数、ここでは 150 とした

④ 各要素の応力-ひずみ挙動は降伏ひずみに達する前と、達した後の2つの場合に分けて考え、降伏ひずみに達した後の挙動に関しては、① 各要素の平均繊維間隔から求められる負の勾配に従って、ひずみの増加とともに応力は減少する。② 強度 (σ_t) に対する減少した応力 (σ') の比 (σ'/σ_t) と繊維の付着力 ($\pi dl \cdot n\tau/4$) の積が、この応力に加わるという2つの仮定を設けた。

前者の仮定は、SFRC のひびわれ強度や引張強度が平均繊維間隔の平方根の逆数に比例することが一般的に確

かめられているので、これを下降域にまで拡張したものであり、一方後者の仮定は次のような根拠に基づいたものである。すなわち、降伏ひずみ (ϵ_u) に達した後、マトリックスは部分的にひびわれを生じているので、応力は負の勾配に従ってひずみの増加とともに減少するが、このときひびわれが生じた量を強度 (σ_t) に対する減少した応力 (σ') に相当する量 (σ'/σ_t) と仮定し、これに繊維の付着力 ($\pi dl n \tau / 4$) を乗じたものが下降域における応力の一部に加えられるものとしたのである。このことはマトリックスにひびわれが生じた部分の耐力を繊維とマトリックスとの付着力によって置き換えたことになる。換言すればこの領域では各要素の耐力は複合体として一体化している部分の耐力と繊維とマトリックス間の付着力の一部に依存していることになる。

図-15 はこれまでに論じてきた一要素の応力-ひずみ関係を示したもので、あるひずみが与えられた場合の応力は以下のようにして求めることができる。

$\epsilon < \epsilon_u$ の場合

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{\epsilon_u} \cdot \epsilon$$

$\epsilon \geq \epsilon_u$ の場合

$$\sigma = \frac{C_3}{\sqrt{S_E}} \times (\epsilon_u - \epsilon) + \sigma_t + \frac{\pi dl}{4} \tau n \times \frac{\sigma'}{\sigma_t}$$

$$\sigma' = \frac{C_3}{\sqrt{S_E}} (\epsilon_u - \epsilon)$$

ここに、

σ_t, ϵ : 一要素における SFRC の引張応力およびひずみ

σ, ϵ_u : 一要素における SFRC の引張強度および降伏ひずみ

S_E : 一要素における平均繊維間隔

d, l : 鋼繊維の直径および長さ

注 1) τ の値をここでは次のようにして推定した。すなわち、直接引張試験を行うとクロスヘッドの変位と荷重との関係は図-16 のようになる。A 点でコンクリートは破壊し、耐力は B 点まで下がる。B 点ではひびわれは断面全体を貫通し、繊維の付着力のみによって荷重を受けもっている状態となる。そのときの荷重を全繊維が受けもつ付着力とした。この場合、繊維はランダム配向状態にあると考えられるので、ひびわれ面を横切っている繊維はそれぞれ引張力の作用方向に対してある傾きを有しており、必ずしも引張応力方向に配向しているとは限らない。しかし、既往の研究は繊維の傾きが付着強度に及ぼす影響はほとんどないことを示している⁹⁾、ここではこの影響を考慮しないことにした。試験終了後、破壊面における繊維の引抜け長さを測定し、以下の式によって付着強度を求めた。

$$\tau = \frac{P}{\pi d L}$$

ここに、

P : 鋼繊維の引抜け時における荷重

d : 鋼繊維の直径

L : 引抜けた鋼繊維の全長

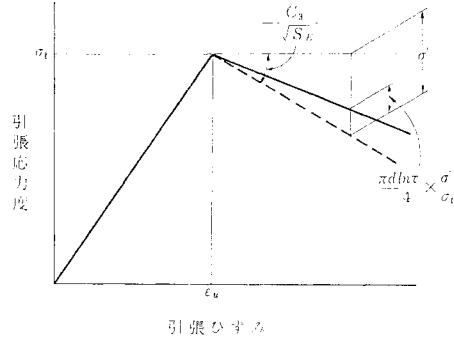


図-15 一要素における応力-ひずみ関係

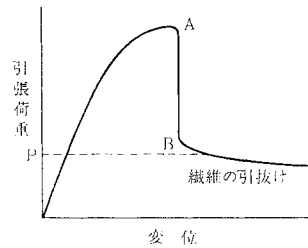


図-16 引張を受ける SFRC の荷重-変位関係のモデル

τ : 鋼繊維の付着強度 (kg/cm²), ここでは 69 kg/cm²(注1)とした

n : 一要素における繊維の本数

C_3 : 定数, ここでは 10^{-2} とした

⑤ 以上により、繊維の分散および配向の影響を考慮した各要素の応力-ひずみ関係が求められたことになる。次に引張荷重の作用下における断面の等ひずみの仮定より各要素の応力が求まり、これを平均したものをその断面の平均応力とすることによって、系全体のみかけの応力-ひずみ曲線が計算によって求まることになる。

(3) 引張りを受ける鋼繊維補強コンクリートの応力-ひずみ曲線

図-17 は、普通コンクリートおよび SFRC の応力-ひずみ曲線を図-18 に示すような供試体を用い、直接引張試験によって実験的に求めた一例を示したものである。この場合、鋼繊維は $0.5 \times 0.5 \times 30$ mm のせん断ファイバーを用い、配合は粗骨材の最大寸法が 7 mm で表-2 に示す配合のプレーンコンクリートおよび SFRC を用いた。

図-19 は繊維の分散と配向を考慮して解析的に求めた応力-ひずみ曲線を示したものである。この場合、平均繊維間隔 S_E を計算するために必要な各要素の繊維本数 n は、破断面を $4 \times 4 = 16$ 個の要素に分割して求め、また各要素の配向係数 β は 3. で求めた理論値を用いた。なお、この図では配向係数の分布が等しいが繊維本数の分布が異なる (A) および (B) の 2 つの断面 (図-20

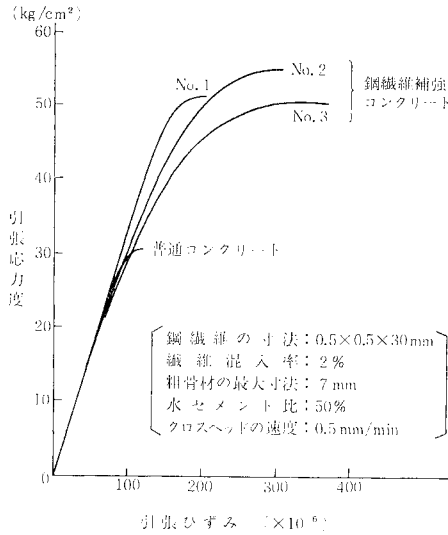


図-17 実験的に求めた SFRC の引張応力-ひずみ曲線

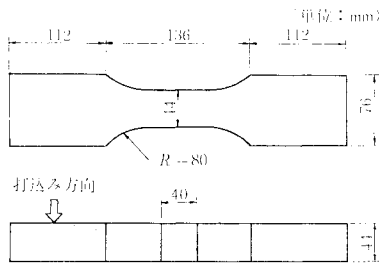


図-18 直接引張試験用供試体の形状寸法

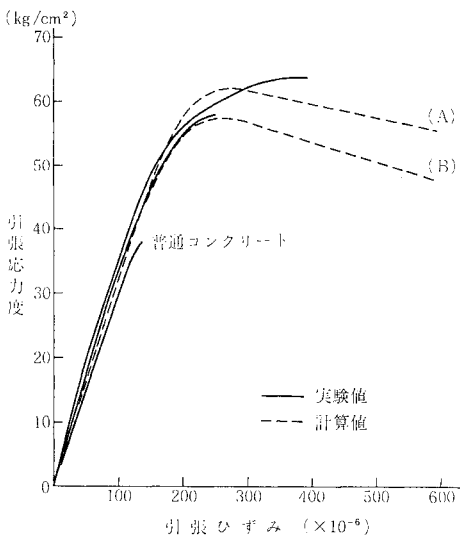


図-19 解析的に求めた SFRC の引張応力-ひずみ曲線

参照)に基づいて求めた曲線を示した。

実験では最大荷重に達してからの挙動は試験機の構造などにより正確に求めることは難しいが、計算では最大

表-2 配合表

種別	鋼繊維混入率 (%)	水セメント比 (%)	細骨率 (%)	単位量 (kg/m³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤
プレーンコンクリート	0	50	60	217	434	1014	699	0.87
SFRC	20	50	60	245	490	941	650	0.98

注) 粗骨材の最大寸法は、引張試験には 7 mm、曲げおよび圧縮試験には 10 mm の骨材を用いた。スラブはすべての配合を通じて 10~13 cm とした。

(断面 A)

1	4	8	10
3	2	1	2
1	4	5	5
5	5	6	2

繊維本数

0.92	0.67	0.67	0.92
0.67	0.48	0.48	0.67
0.67	0.48	0.48	0.67
0.92	0.67	0.67	0.92

配向係数

(断面 B)

5	2	6	4
3	3	2	5
1	2	1	2
1	1	1	6

繊維本数

0.92	0.67	0.67	0.92
0.67	0.48	0.48	0.67
0.67	0.48	0.48	0.67
0.92	0.67	0.67	0.92

配向係数

図-20 計算に用いた繊維本数および配向係数

荷重に達してからの下降域の応力-ひずみ挙動が求められた。

5. 曲げを受ける鋼繊維補強コンクリート部材の荷重と変形

(1) 概要

曲げを受ける鋼繊維補強コンクリート部材の荷重-変形関係を解析的に求める方法を示したものであって、繊維の分散と配向の影響を考慮した解析を行うことにより、ばらつきの大きいといわれていた SFRC 部材の荷重-変形挙動を比較的よい精度で求め得ることを確めた。

この方法はまず曲げを受ける断面をある等しい大きさの要素に分割し、これら各要素における応力-ひずみ関係を求めた。この場合、引張域における応力-ひずみ関係は 4. で述べた手法を適用して求め、圧縮応力-ひずみ曲線は繊維の分散および配向のいかんにかかわらず断面内で一様であるとみなして求めた。次に断面を水平に n 等分要素 (discrete element) に分割し、圧縮縁ひずみを与えて中立軸の計算を行い、これを繰り返すことによって荷重-変形曲線が求められる。なお、本章ではこの方法をチェックするための曲げ試験も行った。

以上の解析では断面における平面保持を仮定した。すなわち、繊維とマトリックスは一体となって、変形すると考えた。また、鉄筋の応力-ひずみ関係は弾塑性とし、ヤング率を $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、降伏ひずみを 2200×10^{-6} とした。

(2) 曲げを受ける鋼繊維補強コンクリート部材の解析

a) 解析の手順

要素分割法 (discrete element method) によって以下の手順に従い、解析的に SFRC の荷重-変形曲線を求めた。

すなわち、図-21 に示すように断面を 24 個の要素に分割し、各要素において、実験に用いた供試体の破壊面から得られる繊維本数 (n_i) および 3. で求められる理論的配向係数 (β_i) を適用した。

さらに、これを水平に n 等分要素 (discrete elements) に分割した (図-22)。

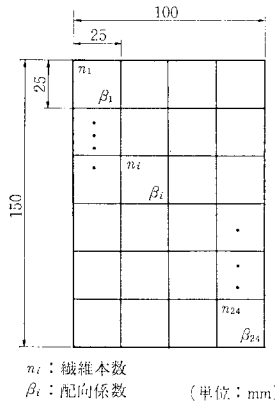


図-21 曲げ供試体の要素分割

次に圧縮縁にある大きさのひずみを与え、断面内に中立軸の位置を仮定すると、平面保持の仮定から各要素のひずみが求まる。引張域の応力-ひずみ関係は各要素ごとに繊維の分散と配向を考慮して先に求められているので、各要素の応力を計算することができる。次に各要素に生じる応力を合計し内力のつり合い条件を満足しているかどうかチェックして満足するまで中立軸の位置を修正しつつ計算を行う。これを、圧縮縁のひずみを段階的に増加させつつ繰り返し計算を行うことによって、荷重-変形曲線が求められる。以上の解析過程を 図-23 に示す。

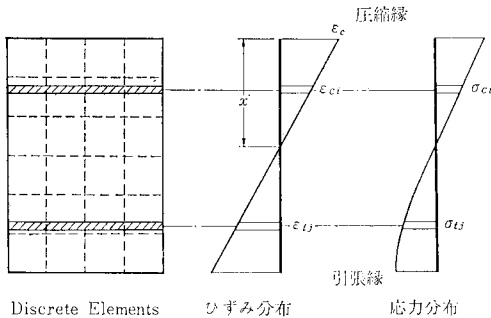


図-22 要素分割法

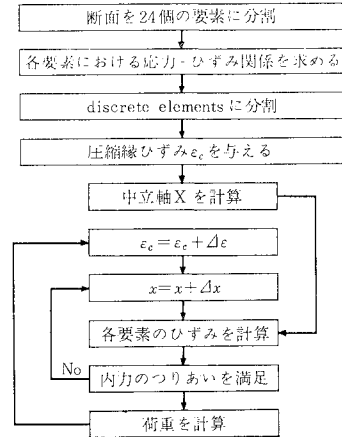


図-23 曲げ解析の過程

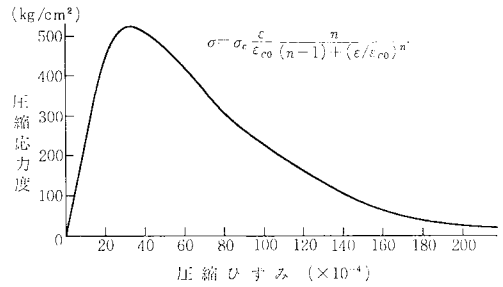


図-24 圧縮を受ける SFRC の応力-ひずみ関係

b) 圧縮域の応力-ひずみ関係について

まず SFRC (鋼繊維: $0.5 \times 0.5 \times 30 \text{ mm}$, $V_f = 2.0\%$, 配合は表-3 に示す) の圧縮載荷試験によって圧縮応力-ひずみ曲線を求めたが、各供試体におけるばらつきがほとんど認められなかったので、圧縮域における応力-ひずみ関係は繊維の分散と配向の影響を受けず、系全体で一様であると仮定した。図-24 は実験的に求めた SFRC の応力-ひずみ曲線の一例である。本文ではこのような曲線を以下のように関数表示して、圧縮域の応力-ひずみ関係を求めた。

$$\sigma = \sigma_c \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_{c0}} \cdot \frac{n}{(n-1) + (\epsilon/\epsilon_{c0})^n}$$

ここに、

- σ_c : SFRC の圧縮強度 (kg/cm²)
- ϵ_{c0} : SFRC の降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)
- n : 定数、ここでは 2.5 とした

(3) 曲げを受ける鋼繊維補強コンクリート部材の荷重-変形挙動

上記の解析方法の適用性をチェックするために、図-25 に示すような形状寸法のはりを製作した。この図より明らかなように、はりには鉄筋を配置したものと SFRC

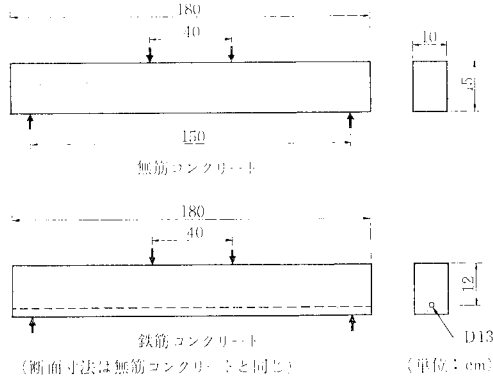


図-25 曲げ供試体の形状寸法

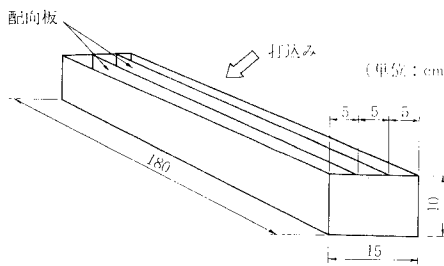


図-26 繊維を強制配向させるための装置

表-3 曲げ試験結果

種別	ひびわれ荷重 (kg)	終局耐力 (kg)
普通コンクリートを用いた鉄筋配置ばり	250	2100
SFRCを用いた鉄筋配置ばり	600	2850
SFRC ばり (ランダム配向)	No. 1	400
	No. 2	400
SFRC ばり (強制配向)	No. 1	400
	No. 2	500

のみのものの2種類とした。鉄筋を配置したものは、さらに普通コンクリートを用いたものとSFRCを用いたものがあり、SFRCのみのものは、そのままコンクリートを打設して製作したもの（本文ではランダム配向供試体とよぶ）と、次に述べるような方法で繊維を強制配向させたものがある。強制配向は図-26に示すような方法、すなわち、型枠にあらかじめ配向板を50mm間隔でセットしておき、コンクリートを打込んだ後、これを取り除いて一体とする方法によって行った。

鉄筋は異形鉄筋D13を1本配置したので鉄筋比は、0.8%となる。また、配合は表-2と同様で粗骨材の最大寸法10mmのものを用い、鋼繊維は、寸法が0.5×0.5×30mmのせん断ファイバーを使用した。載荷試験は図-25に示すように、スパン150cm、載荷点間隔40cmの2点曲げ載荷により行った。

表-3は初期ひびわれ荷重および終局耐力の結果を示したものである。この結果は、SFRCを用いた鉄筋配置

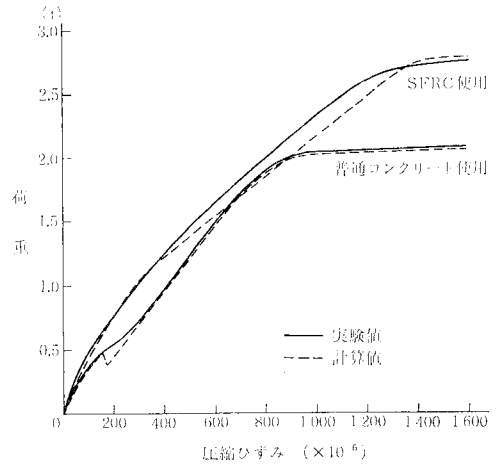


図-27 鉄筋配置ばりの曲げ荷重-変形曲線

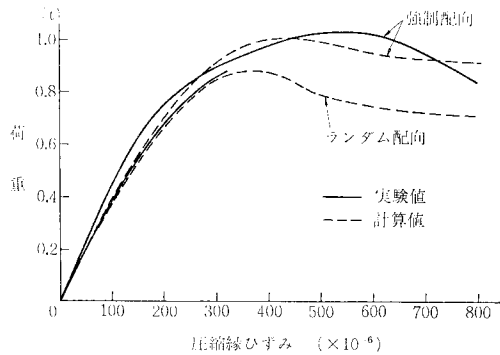


図-28 SFRC ばりの曲げ-荷重変形曲線

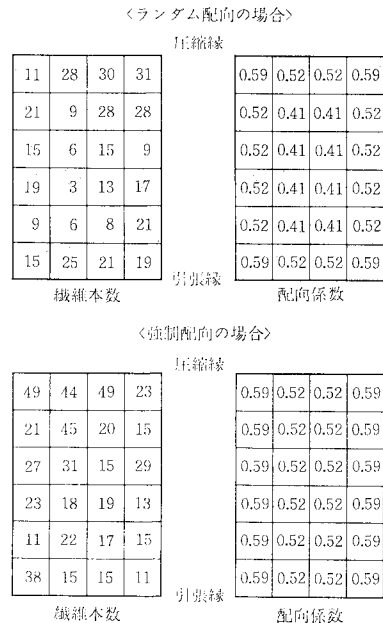


図-29 計算に用いた繊維本数および配向係数の一例

ばりが、普通コンクリートを用いた鉄筋配置ばりに比べて初期ひびわれ荷重、終局耐力のいずれも顕著に増大していることを示しており、また鉄筋を配置していないはりでは繊維を強制配向させたものの終局耐力がランダム配向の場合よりも大きいことを示している。

以上の実験によって得られた荷重-変形曲線と、破壊面における繊維の分散と配向の影響を考慮して解析的に求めた荷重-変形曲線を比較して示したものが図-27 および図-28 である。この場合、計算に用いた断面の繊維本数および配向係数を図-29 に示す。

図-27 および図-28 は計算によって求めた荷重-変形曲線が実験値とよく一致しており、このような手法がSFRC 部材の強度と変形を求めるうえで有効であることを示している。

6. ま と め

本研究は、鋼繊維補強コンクリートを用いて構造物の設計を行う場合に、避けて通ることのできない繊維の分散と配向の問題を取り上げ、これを考慮して部材を設計するための一方法を示したものである。本研究によって得られた結論を取りまとめると以下ようになる。

(1) 鋼繊維補強コンクリートの強度は、実際に混入した繊維量よりも少ない繊維量によって支配される。すなわち、実際に混入した繊維量から、繊維分布におけるばらつき量である標準偏差に相当する量を差引いた量が、強度を支配する繊維量となる。

(2) 鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向は、基本的には供試体の断面寸法および繊維長さによって支配される。

同一断面内においても断面中央部と型枠に近い部分では繊維の配向状態が異なる。

(3) 曲げを受ける鋼繊維補強コンクリート部材の荷重-変形挙動は、引張側の繊維の配向の影響を顕著に受ける。

(4) 鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形は、

部材中における繊維の局所的な分散と配向の影響を考慮することによって精度よく把握することが可能であることを確かめ、鋼繊維補強コンクリートを用いた構造部材を設計するうえでの一手法を示した。

7. あとがき

本論文は著者の1人が東京大学大学院に在学中に修士論文として取りまとめたものである。

最後に本研究を実施するにあたり、実験にご協力をいただいた(株)サンゴの方々、また画像処理を行うにあたって多大のご指導、ご協力を賜った東京大学生産技術研究所高木研究室の方々に深謝します。

また材料試験機に関して同研究所の田村研究室のご厄介になった。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山王博之・小林一輔・富田 強：鋼繊維補強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，28，7，1976。
- 2) 小林一輔，和泉登志・趙 力采：鋼繊維補強コンクリート—一般的性質・強化機構・繊維の配向と分散—，コンクリート工学，15，3，1977。
- 3) Romualdi, J.P. and J.A. Mandel: Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Length of Wire Reinforcement. ACI Journal, Proc. Vol. 61, No. 6, 1964.
- 4) Parimi, S.R. and J.K.S. Rao: Effectiveness of Random Fibers in Fiber-Reinforced Concrete, Proc. of the Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, JSME, pp. 176~186, 1972.
- 5) 小林一輔・趙 力采：短い鋼繊維によるコンクリートの強化機構生産研究，Vol. 28, No. 7, 1976。
- 6) 小林一輔・趙 力采：単軸引張を受ける鋼繊維補強コンクリートの強度と変形，土木学会論文報告集，No. 257, 1977。
- 7) Naaman, A.E. and S.P. Shah: Bond Studies on Oriented and Aligned Steel Fibers, Proc. of the RILEM Symposium 1975: Fiber Reinforced Cement and Concrete, pp. 171~178, The Construction Press Ltd, 1975.

(1979.2.21・受付)