## 論文 X 線画像に基づき定量化された鋼繊維分布と配向のばらつきを考慮 した SFRC はりの曲げ挙動解析

掛川 達矢\*1 · 秋山 充良\*2 · Lim Sopokhem\*3 · Raju Ramiz Ahmed\*4

要旨:鋼繊維補強コンクリート(SFRC)は、鋼繊維分布が一様にならない分散性と配向性の問題がある。限 定された数の切欠き供試体を用いた材料試験により同定された引張軟化曲線では、SFRC はりの曲げ挙動を 正しく評価できない。本研究では、X線画像に基づき、鋼繊維分布・配向と引張軟化曲線の関係、およびその ばらつきに関する統計量を得ることで、Monte Carlo 計算により同じ鋼繊維量のもとで生じ得る SFRC はりの 荷重一変位関係の変動幅を解析的に評価できるようにした。また、材料試験に用いる切欠き供試体の数が多 いほど、SFRC はりの荷重一変位関係の予測の信頼性が高まり、部分係数を小さくできることを示した。 キーワード:鋼繊維補強コンクリート、X線画像、引張軟化曲線、Monte Carlo シミュレーション、部分係数

### 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) は、コンクリートに 混入される鋼繊維の架橋効果によって、コンクリートの ひび割れ発生後の引張挙動の改善が期待される 1), 2)。引 張軟化曲線の設定は、SFRC 部材の挙動を正しく予測す る上で極めて重要であるが、ひび割れ位置にある鋼繊維 の数と配向の影響を受け、結果として、同じ鋼繊維量を 持つ SFRC はりでも, その曲げ挙動は大きく異なる<sup>3),4)</sup>。 fib Model Code 2010<sup>5)</sup>では、6体の切欠き供試体を用いた 材料試験を行い、6体の平均値を部分係数で除すことで、 安全側の引張軟化曲線を定め, SFRC 部材の曲げ挙動を 予測させている。ただし、6 体の供試体数が必要な理由 は明確ではない。また、鋼繊維の配向の違いを考慮する ため, 配向係数 K の使用も提案されているが, その具体 的な算定方法は研究途上にある。既存研究では、鋼繊維 の分散性と配向性、およびそれらが部材の構造性能に及 ぼす影響に関して、実験的・解析的研究が実践されてき た。例えば,X線技術を用いて鋼繊維分布を可視化し, SFRC 部材の曲げ耐力の算定に活用するものやり, Monte Carlo シミュレーション (MCS) を用いて疑似的に繊維の 分布を計算機上で再現し,架橋強度のばらつきを解析的 に評価するものがある <sup>7)</sup>。しかし、鋼繊維の分布や配向 と部材の力学性能の関係,特に,同じ鋼繊維量の部材か ら生じ得る荷重-変位関係の変動幅や、それを安全側に 評価するために用いる引張軟化特性や部分係数の定め方 などは、定量的な評価には至っていない。

本研究では、SFRC はりの曲げ挙動に着目し、2 次元 X 線画像から得られる鋼繊維分布と配向のばらつきを定量 化するための統計量を入手し、あわせて、X 線画像の情

表-1 供試体一覧<sup>8)</sup>

	供試体	鋼繊維量(vol%)	供試体数	COV_area(%)
切欠き	P25	0.25	6	17.3
供試体	P50	0.50	5*	13.1
はり	B25	0.25	2	
供試体	B50	0.50	2	

\*適切に CMOD を測定できた 5 体

報から引張軟化曲線を定める方法を提案する。次に,鋼 繊維量が同じ条件下で,その分布と配向が様々に異なる SFRCはりをMCSにより疑似的に作成することで,SFRC はりの荷重-変位関係の変動幅を解析的に評価する。最 終的に,SFRC はりの荷重-変位関係の予測に用いる引 張軟化曲線を定めるための材料試験に関し,それに用い るべき切欠き供試体の数や部分係数の大きさを議論し, fb Model Code 2010 の規定の妥当性などを検証する。

#### 2. 実験概要

使用する供試体は,Lim ら <sup>8</sup>による切欠き供試体およ びはり供試体である。その一覧を表-1 に示す。供試体 の鋼繊維量は 0.25 vol%および 0.50 vol%であり,それぞ れ切欠き供試体が 6 体,はり供試体が 2 体ある。鋼繊維 には,長さ  $L_f=60$  mm,直径  $D_f=0.9$  mmの両端フック形 状が使用された。それぞれの供試体の打設は RILEM<sup>9</sup>に 従い,型枠の外側から振動を与えることで締め固められ ている。はり供試体は,部材軸方向に長いため,中央か ら両端にかけて数回に分けて SFRC を流し込んでいる。

供試体の寸法および載荷方法を図-1 に示す。切欠き 供試体では3点曲げ試験を行い、切欠き下端に取り付け

\*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)
\*2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学) (正会員)
\*3 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科講師 博士(工学) (正会員)
\*4 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

たクリップゲージによりひび割れ開口変位(CMOD)を 測定することで、荷重-CMOD 関係を得ている。なお、 P50 供試体のうち1 体は曲げひび割れが切欠きから発生 せず、適切な CMOD が取得できなかったため、本解析の 対象から除外した(結果として P50 の供試体数は 5)。こ こで、CMOD < 3 mm 範囲での履歴面積を求め、それぞ れの鋼繊維量について求めた変動係数 COV\_area を表-1 に示す。はり供試体では4点曲げ試験を行い、供試体中 央に取り付けた変位計の値から荷重-変位関係を得た。

コンクリート内部の鋼繊維分布を把握するため, 図-1中の赤色の線で囲われた範囲に対してX線撮影を 行った。X線装置およびX線画像の一例を図-2に示す。

## 3. 鋼繊維分布に基づく引張軟化曲線の同定

### 3.1 RNF を用いた鋼繊維分布の定量化

本研究では、SFRC の引張軟化曲線を図-3 に示すト リリニア曲線でモデル化することで、鋼繊維の架橋効果 による引張応力の増加を表現する<sup>8</sup>。 $a_1$ 、および $a_2$ は、 それぞれひび割れ幅 $w_1 = 0.1$  mm、および $w_2 = 1.5$  mmの 際の引張応力( $\sigma_1$ および $\sigma_2$ )を引張強度ftで正規化した 値であり、 $w_u = 15$  mm( $= L_f/4$ :鋼繊維の平均埋込長さ) 以上では鋼繊維が機能しないものとした<sup>8</sup>。

図-3に示されるように、切欠き位置の直上に長さ $h_{cr}$ の仮想のひび割れ線を設け、それを跨ぐ鋼繊維をX線撮影により可視化した。 $h_{cr}$ とは、次節で示す、非線形ひび割れヒンジモデル (nonlinear cracked hinge model)<sup>10</sup>により決まる長さであり、この区間にある鋼繊維が SFRC 部材の曲げ挙動の改善に寄与する(図-3の赤色の鋼繊維)。なお、 $h_{cr}$ は、引張応力 $\sigma_1$ と $\sigma_2$ で異なる値が適用され、 $\sigma_2$ のときの方が $h_{cr}$ は大きくなる。SFRC 部材の引張軟化特性は鋼繊維の引抜き挙動に起因するため、ひび割れ線を跨ぐ鋼繊維の埋込長さ $Le_i$ や角度 $\alpha_i$ がそれに関係する。また、X線画像は2次元であるため、図-4 に示すように、式(1)および式(2)を用いて3次元空間での埋込長さ $Le_i$ と角度 $\alpha_i$ にそれぞれ補正する<sup>11</sup>)。

$$Le'_{i} = Le_{i} \left( L_{f} / L_{i} \right) \tag{1}$$

$$\alpha'_{i} = \cos^{-1}\left(|\vec{x}| / \sqrt{|\vec{x}|^{2} + |\vec{y}|^{2} + |\vec{z}|^{2}}\right)$$
(2)

仮想ひび割れ線を跨ぐ鋼繊維が引張軟化特性に及ぼす 影響は、Lim ら<sup>8</sup>によって提案された RNF を用いて定量 化した。RNF は仮想ひび割れ線を跨ぐ鋼繊維の位置、埋 込長さ、および角度を用いて、式(3)により求められるも ので、この値が大きいほど鋼繊維は曲げ引張力に抵抗で きる(図-3の $a_1$ や $a_2$ が大きくなる)。

$$RNF = \sum_{i=1}^{n_f} RNF_i$$
ここに、 $RNF_i = SLe'_i \times S\alpha'_i, i = 1, 2, \dots, n_f$  (n\_f: 仮想ひ)

び割れ線(長さhcr)を跨ぐ全鋼繊維数), SLe'i: 埋込長

25 250 250 25 I**▲** 3.5 切欠き 150 IJ CMOD ~~ X線撮影範囲 (60×150) 切欠き供試体 (mm) (a) 200 390 280 390 200 80 X線撮影範囲  $(420 \times 140)$ (b) はり供試体 (mm) 図-1 供試体概要



図-2 X線装置とX線画像







さ $Le'_i$ が鋼繊維のフック長 10 mm 以上のとき 1.0, 10 mm 未満のとき 0.25,  $Sa'_i = \cos(a'_i), a'_i$ : 部材軸方向と鋼繊維 のなす角度(-90°≤ $a'_i$ <90°)である <sup>12</sup>)。

前記したように, a2 のときの方が hcr が大きくなることで, ひび割れ幅が大きくなるほど, 断面内のより多くの鋼繊維が曲げ引張に抵抗するようになる。

### 3.2 逆解析による引張軟化曲線の同定

本研究では、切欠き供試体の3点曲げ試験により得ら れた荷重-CMOD 関係から非線形ひび割れヒンジモデ ル<sup>10)</sup>を用いて逆解析を行うことで引張軟化曲線を同定 した。非線形ひび割れヒンジモデルとは、Olsen によって 提案されたものであり、繊維補強コンクリートを対象と して、曲げひび割れの発生後、その両端に位置する部材 を剛体と見なし、剛体間に設置するバネの引張応カー CMOD 関係を適切に定めることで、部材の全体挙動を予 測するものである。逆解析では、図-3に示すft、a1およ び a2を変化させ、実験結果に一致する値を求めた。その 際、図-5における初期ピーク点Aの荷重、荷重残留点 Bの荷重、および CMOD < 3 mm における履歴面積に着 目し、実験値と解析値の相対誤差(絶対値)が何れも3% 未満となるように繰り返し計算を行っている。

実験結果と、逆解析により同定された ft, a1 および a2 を用いて得られた非線形ひび割れヒンジモデルによる荷 重-CMOD 関係の比較の一例を図-5 に示す。そして、 同定された a1 および a2 と、各供試体の X 線画像から得 られた RNF のそれぞれの関係式を図-6 に示す。これに より、鋼繊維分布の情報が与えられることで RNF を介し て引張軟化曲線が決定される。



図-8 はり供試体における RNF の算出

# 4. 鋼繊維分布のばらつきを考慮した曲げ挙動評価 4.1 RNF の補正

はり供試体の RNF は、切欠き供試体と同様に求めるこ とは困難である。これは、切欠き供試体では切欠きから 鉛直上向きにひび割れが進展するのに対し、はり供試体 では純曲げ区間内のどの位置からも曲げひび割れが発生 する可能性があり、さらに、曲げひび割れは、骨材等の 影響を受けるため、完全な鉛直上向きに進展するとは限 らない。したがって、曲げひび割れの発生位置、および 曲げひび割れの進展方向の切欠き供試体との差異を考慮 する必要がある。本研究では,前者の問題に対しては, RNF を純曲げ区間内において軸方向に1mm 間隔で算出 し、その最小値 RNFmin を用いることにした。最小値を得 られた位置が、鋼繊維による曲げ引張に対する抵抗が最 も小さい位置であり、解析上、曲げひび割れの発生が予 想される位置となる。後者の問題に対しては、RNFminを 補正することで対処する。具体的には, 3.2 と同様に, は り供試体の荷重-変位関係について逆解析を行うことで RNF<sub>inv</sub>を求め、補正値 C (= RNF<sub>inv</sub> / RNF<sub>min</sub>)を算出した。 この補正値 Cを用いて、式(4)より、はり供試体の鋼繊維 分布から得られる RNF bを RNF'に変換する。

RNF'= RNF\_b×C (4) 以降では、図-6の RNF-a 関係において、x = RNF'と して代入することで、a1、および a2を求めて引張軟化曲

## 線を同定し、非線形ひび割れヒンジモデルに適用する。

## 4.2 Monte Carlo シミュレーション

### (1) 鋼繊維分布の統計情報

SFRC はりの曲げ挙動に及ぼす鋼繊維分布と配向のば らつきの影響を評価するため,図-2に示す供試体のX



線画像から鋼繊維の疑似分布を作成するための統計量を 入手する。そして, MCS により同じ鋼繊維量を持ちなが ら分布と配向が異なる多数のはり供試体を作成し,荷重 一変位関係の変動幅を MCS により推定する。まず,各 供試体に含まれる総鋼繊維本数 N は,式(5)で求める。

 $N = \mu V_s V_f N_w / 100$  (5) ここに、 $\mu$ :鋼繊維の単位体積重量(=7850 kg/m<sup>3</sup>)、 $V_s$ :供 試体体積(m<sup>3</sup>)、 $V_f$ :鋼繊維量(vol%)、 $N_w$ :単位重量当たり の鋼繊維本数(3200 本/kg)である。

次に、鋼繊維の位置について検討する。軸方向の鋼繊 維分布は、位置による特定の傾向が X 線画像から確認さ れなかったため、一様な分布と仮定した。一方、断面高さ 方向の鋼繊維の分布状況を示す図-9 から、断面の圧縮 縁側で鋼繊維量が少ない傾向にあることが分かる。ただ し、図-3 に示すように、圧縮縁近くの鋼繊維は RNF に 寄与しないため、これをモデル化する意義は小さく、後述 の MCS では図-9 の分布を用いることにした。なお、断 面幅方向の鋼繊維分布は、X 線撮影では確認できないもの の、正曲げのみを考える本解析結果にそれは影響しない。

供試体の部材軸に対する鋼繊維の角度の頻度分布を 図-10に示す。なお、0°が部材軸方向を示す。図-10か ら、鋼繊維は部材軸方向に向いており、その分布は正規 分布に従うことが確認される。これは、打設時に型枠に 沿ってコンクリートが流れる壁面効果によるものと思われる<sup>13)</sup>。すべてのはり供試体で同じ傾向が確認されたた め、同じ上下限付き正規分布を使用した。なお、正規分



図-10 鋼繊維の角度





布の平均値,および標準偏差は,それぞれ-0.3°,および 40.8°である。また,下限値,および上限値は,それぞれ -90°,および89°とし,確率密度分布の面積が1となる ように確率密度の値を調整している。

X線画像における鋼繊維の投影長さと鋼繊維量の割合の関係を図-11に示す。図-11より,壁面効果によって 鋼繊維長 60 mm に近いほど鋼繊維量の割合が大きく,供 試体の断面幅方向に配向される鋼繊維は少ないことがわ かる。また,図-11より,鋼繊維の投影長さの分布は指 数分布に従うことが確認された。すべての供試体につい て同じ傾向が確認されたため,同じ指数分布を使用する。 なお,指数分布の期待値は45 mm である。下限値および 上限値は,それぞれ1 mm および60 mm とし,確率密度 分布の面積が1となるように確率密度の値を調整した。

### (2) SFRC はりの曲げ挙動解析

以上の鋼繊維分布情報に基づき, MCS により作成した 鋼繊維の疑似分布の一例を図-12 に示す。作成したはり 供試体に対し, RNF'を算出することで引張軟化曲線を同 定し, 非線形ひび割れヒンジモデルを用いて荷重-変位 関係を得た。ft については, 表-1 に示す 11 体の切欠き





供試体から得られた平均値を用いた。各鋼繊維量について,試行結果ごとのばらつきを抑えるために300サンプルのはり供試体を作成し,その解析結果を図-13に示す。

図-13 から,300 サンプルの幅の中に実験値が概ね含 まれていることがわかる。しかし,B25-1 は,変位が 1 mm から 4.5 mm の範囲で実験結果が大幅に上回ってお り,また,4.5 mm 時点での荷重低下を表現できていない。 これは,逆解析時に履歴面積を判定基準としていること, および,引張軟化曲線をトリリニアでモデル化している ことにより,ポストピーク領域での荷重の急激な変化を 表現できないためである。また,図-13 より 0.50 vol% の供試体は 0.25 vol%の供試体よりも 300 サンプルの解 析結果の幅が小さく,鋼繊維量が大きいほど曲げ挙動の ばらつきが小さくなることが確認された。

MCS の結果について, EUROCODE 7<sup>14</sup>)に従い*ft, a*1お よび *a*2 の 95 %下限値を算出することで, 鋼繊維分布の ばらつきを考慮した曲げ挙動評価を行う。95 %下限値 *X*<sup>95%</sup>は,式(6)および式(7)により算出される。

$$X_{inf}^{95\%} = m_x - k_n s_x \tag{6}$$

$$k_n = t_{n-1}^{95\%} \sqrt{(1/n) + 1} \tag{7}$$

ここに, $m_x$ :サンプルの平均値, $k_n$ :統計係数, $s_x$ :サン プルの不偏標準偏差,n:サンプルサイズである。

95%下限値を用いた解析結果を図-13に併記している。図-13より, *ft, a*1, および *a*2のそれぞれについて 95%下限値を求めることで, その曲線を下回るサンプル

表-2 部分係数  $\gamma$ 

鋼繊維量	切欠き供試体数									
(vol%)	1	2	3	4	5	6	7	8		
0.25	6.7	5.6	5.8	5.5	5.2	5.2	5.1	5.0		
0.50	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9		

が5%以下となっており、実験結果を安全側に評価できることが確認される。

### 4.3 SFRC はりの曲げ挙動評価に必要な切欠き供試体数 と部分係数

SFRC 部材は、部材毎に鋼繊維分布が異なり、これに より曲げ挙動にばらつきが生じる。要素試験で得られる 強度を部分係数で除し,その値を用いた構造性能評価を 行うことで SFRC 部材の曲げ挙動を安全側に評価する必 要がある。そこで、4.2 で示した手順に従い切欠き供試体 を数体作成し、その平均値をある部分係数で除した値か ら引張軟化曲線を定め、これを用いた非線形ひび割れヒ ンジモデルによる荷重-変位関係が図-13 に示す 95 % 下限値を下回るように部分係数の値を調整する。当然, 切欠き供試体数が多くなるほど、安定した平均値を得ら れる可能性が高まり,部分係数を小さくでき,一方で, 切欠き供試体数が少ないと, その平均値の変動は大きく なることから,大きな部分係数が必要となる。また, 表-1に示す COV area より、鋼繊維量が大きいほど履歴 面積のばらつきが小さくなることから,結果として部分 係数を小さくできると予想される。

まず, MCS により切欠き供試体を作成する。3 章では 6 体の切欠き供試体を使用したが、ここでは供試体数と 解析結果のばらつきの関係について検討するため, N<sub>p</sub> (= 1, 2, …, 8) 体の切欠き供試体を作成し, 解析を行った。 各供試体の ft は, 表-1 に示す 11 体の切欠き供試体から 得られた平均値と変動係数を持つ t 分布に従うものとし、 供試体ごとにばらつきを与えた。次に, MCS により作成 した切欠き供試体から RNF'を求め,図-6より a1と a2 を決定する。これを Np体の切欠き供試体に対して行い, ft, a1 および a2 のそれぞれの平均値を部分係数で除すこ とで引張軟化曲線を同定する。ft に用いる部分係数は, fib Model Code 2010<sup>5)</sup>より 1.2 で固定し, a1 と a2 に用いる 部分係数ッを変動させることで95%下限値を満足させる ようにする。具体的には、部分係数 y の値を仮定して引 張軟化曲線を定め, SFRC はりの非線形ひび割れヒンジ モデルから荷重-変位関係を得る。SFRC 部材の特徴で ある優れたポストピーク挙動について評価するため、部 分係数yを用いて得られる荷重-変位関係が図-13に示 す「95%下限値」の変位 7.5 mm までの履歴面積以下とな る γ を同定する。ここでもサンプル数は 300 に固定し,

全てのサンプルで下限値95%を満足できるようにした。 切欠き供試体数と部分係数の関係を表-2に示す。 表-2から以下の内容が確認できる。

- ・切欠き供試体の数を増やすほど、得られる平均値の変 動が小さくなるため、小さい部分係数を適用できる。
- ・鋼繊維量が大きいほど鋼繊維分布と配向のばらつきが 小さくなる結果として、小さい部分係数を適用できる。
- ・鋼繊維量が 0.25 vol%,および 0.50 vol%のとき,切欠
   き供試体数がそれぞれ 5 体,および 3 体以上となると
   部分係数の値はほぼ収束する。

本解析から,鋼繊維量が0.25 vol%と小さい場合には, fib Model Code 2010<sup>5)</sup>で提案されているように6体程度の 切欠き供試体を使用することが有効である。一方,鋼繊 維量が0.50 vol%と大きい場合には,SFRCはりの曲げ挙 動のばらつきが比較的小さいことから,切欠き供試体数 は3体程度でも安定した曲げ挙動の予測が可能である。

得られた部分係数は,打設方法,部材寸法,コンクリート配合や鉄筋量など,多くのパラメータにより変化することが予想される。X線撮影による鋼繊維の可視化と部材内の鋼繊維分布のばらつきに関する統計量の入手,そして MCS による部分係数の同定手順は,一般に適用可能なものである。今後は,他の条件で製作された SFRC 部材を対象とした検討が必要である。

### 5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- SFRCはりのX線画像から鋼繊維分布情報を抽出し、 曲げ載荷試験の結果との比較から、X線画像に基づ き引張軟化曲線を定めるための手順および回帰式 を提示した。
- 2) SFRC はりの X 線画像から得られた鋼繊維分布と配向の統計量を用いて Monte Carlo シミュレーション を行い、同じ鋼繊維量の条件下で取り得る SFRC はりの荷重-変位関係の変動幅を示した。
- 3) 引張軟化特性を定めるために必要な切欠き供試体の数および部分係数を解析的に検討した。fib Model Code 2010 は、6 体の切欠き供試体の使用を推奨しているが、本研究でも、鋼繊維量が少ない(0.25 vol%)ときには、この程度の供試体数が必要であること、 一方で、鋼繊維量が多い(0.50 vol%)ときには、切欠き供試体数を少なく、また部分係数を小さくできる可能性があることを示した。

### 参考文献

 松本高志:繊維補強コンクリートの材料特性とその 利用分野,コンクリート工学, Vol.50, No.5, pp.429-432, 2012

- 2) 越智恒男,大久保誠介,福井勝則:鋼繊維補強コン クリートの特徴と発展経緯,資源と素材, Vol.121, No.12, pp.555-563, 2005
- 小林一輔,睦好宏史: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,土木学 会論文報告集,No.299, pp.101-112, 1980.7
- Raju, R. A., Lim, S., Akiyama, M. and Kageyama, T.: Effects of concrete flow on the distribution and orientation of fibers and flexural behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete beams, Construction and Building Materials, Vol.262, 119963, Jul.2020
- di Prisco, M., Colombo, M. and Dozio, D.: Fibrereinforced concrete in fib Model code 2010: principles, models and test validation, Structural Concrete, Vol.14, No.4, pp.342-361, Dec.2013
- 6) Jones, P. A., Austin, S. A. and Robins, P. J.: Predicting the flexural load-deflection response of steel fibre reinforced concrete from strain, crack-width, fibre pull-out and distribution data, Materials and Structures, Vol.41, No.3, pp.449-463, Jan.2008
- 7) 渡邉啓介,大園友梨子,金久保利之:DFRCCにおける繊維の分散性評価と架橋強度のばらつきの検討, コンクリート工学論文集,Vol.28, pp.123-131,2017
- 8) Lim, S., Raju, R. A., Matsuda, M., Okamoto, T. and Akiyama, M.: Structural behavior prediction of SFRC beams by a novel integrated approach of X-ray imaging and finite element method, Construction and Building Materials, Vol.170, pp.347-365, May.2018
- 9) RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - σ-ε-design method - Final Recommendation, Material and Structures, Vol.36, pp.560-567, 2003
- Olsen, J. F.: Fictitious Crack Propagation in Fiber-Reinforced Concrete Beams, Journal of Engineering Mechanics, Vol.127, No.3, pp.272-280, Mar.2001
- Robins, P. J., Austin, S. A. and Jones, P. A.: Spatial distribution of steel fibers in sprayed and cast concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.55, No.3, pp.225-235, Jan.2003
- Markovic, I.: High-Performance Hybrid-Fibre Concrete: Development and Utilisation, Delft University Press, pp.218, Jan.2006
- Edgington, J. and Hannant, D. J.: Steel fibre reinforced concrete. The effect on fibre orientation of compaction by vibration, Materials and Structures, Vol.5, pp.41-44, 1972
- Bond, A. and Harris, A.: Decoding Eurocode 7, Taylor & Francis Group, 2008