筑波大学
University of Tsukuba

繊維の配向性を考慮した 架橋則の計算

Calculation of the bridging law considering fiber orientation

筑波大学　金久保利之

Toshiyuki Kanakubo,
University of Tsukuba

出典　1)　Kanakubo, T., Miyaguchi, M., Asano, K., Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Materials Journal, American Concrete Institute, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016.3

2)　Y. Ozu, M. Miyaguchi, T. Kanakubo, Modeling of Bridging Law for PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composite Considering Fiber Orientation, Journal of Civil Engineering and Architecture, Volume 12, Number 9, pp.651-661, 2018.9

https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/page7.htm

当研究室で使用しているデータ整理用プログラム・解析用プログラム・計測用プログラムです。 ご自由にダウンロードしてお使いください。
これらのプログラムの使用によって不具合、損害が生じても、何ら責任は負いません。
バグ等には基本的には対処しませんが、連絡をいただければ、ご返事はできます。
kanakubo@kz.tsukuba.ac.jp

This page presents programs which are used in Kanakubo Lab. You can download and use them freely without any permission. These programs and accompanying files should be used as is and without warranties as to performance or any other warranties whether expressed or implied.

データ整理用プログラム / Data analyser

用途 / Use	機器等 / Requirements	仕様 / Specifications	ファイル / File
材料実験整理 for Concrete and steel test	Visual Basic ver.6 runtime library	Elastic modulus (Tangent/Secant Modulus) Yield strength / offset strength screen shot	emod.zip
包絡線作成 Skeleton curve creator	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file screen shot	skel1.zip
吸収エネルギー Absorbed Energy	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file screen shot	heq1.zip
履歴ループ Hysteresis Loop	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file screen shot	loop1.zip
平均化曲線 （差分も可） Averaged curve creator	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file, up to 10 files screen shot	average2.zip

解析用プログラム / Analysis program

用途 / Use	機器等 / Requirements	仕様 / Specifications	ファイル / File
架橋則（トリリニアモデル） Bridging law for FRCC (Tri-linear model)	Visual Basic ver.6 runtime library	Reference Instruction	bridging3.zip
架橋則（バイリニアモデル） Bridging law for FRCC (Bi-linear model)	Visual Basic ver.6 runtime library	Reference1 Reference2	bridging2b3.zip

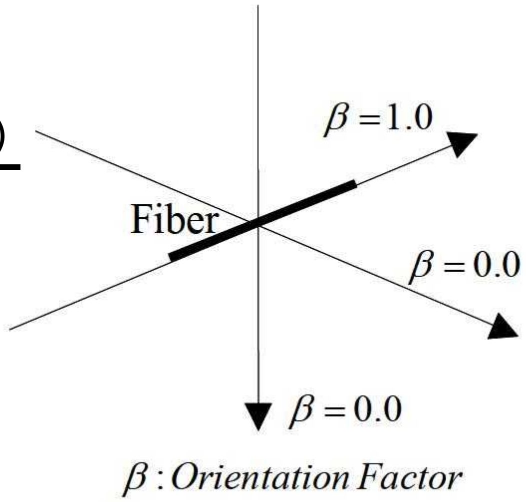
筑波大学
University of Tsukuba

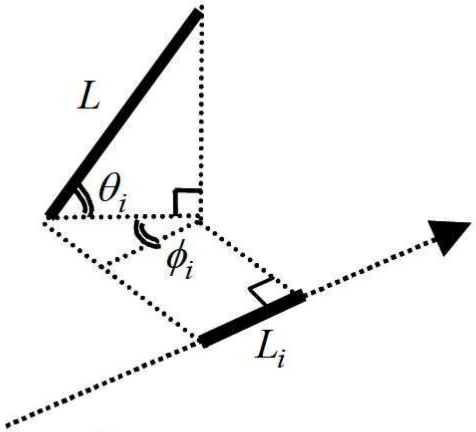
計算の方法 Methodology

Orientation factor
配向係数

$$\frac{\text{繊維の投影長さ(Projection length)}}{\text{繊維の長さ(Fiber length)}}$$

＝繊維が、ある平面を跨ぐ確率
(Probability of bridging a crack)
3次元ランダムのとき、0.41
(3D random = 0.41)

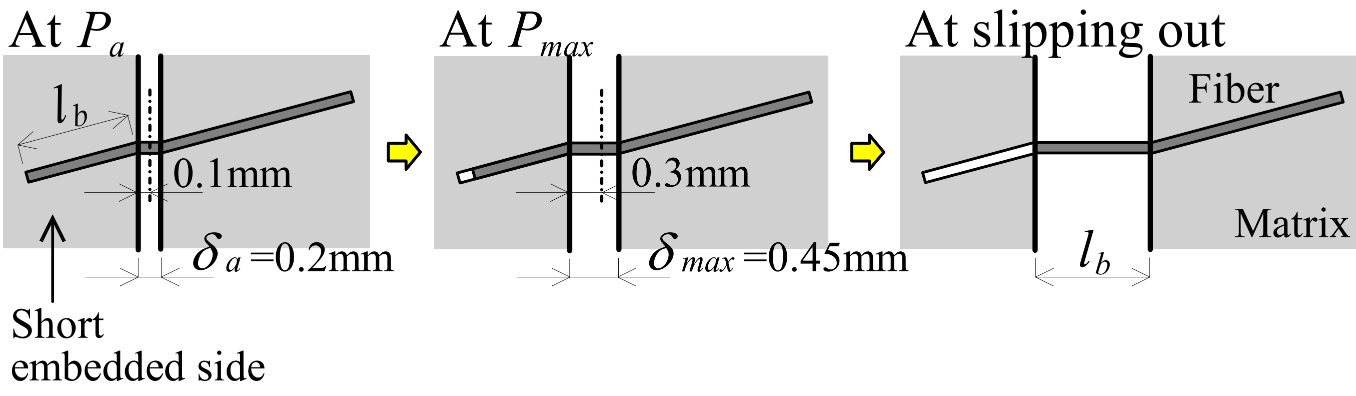




$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{n} L \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\phi_i}{n \cdot L}$$

Bridging force
架橋力

ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力
(Tensile force
bridging a crack)

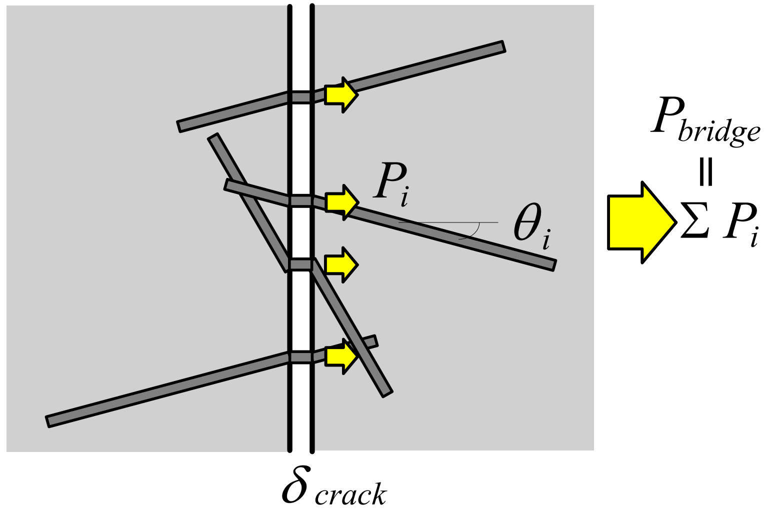


l_b: Embedded length

計算の方法　Methodology

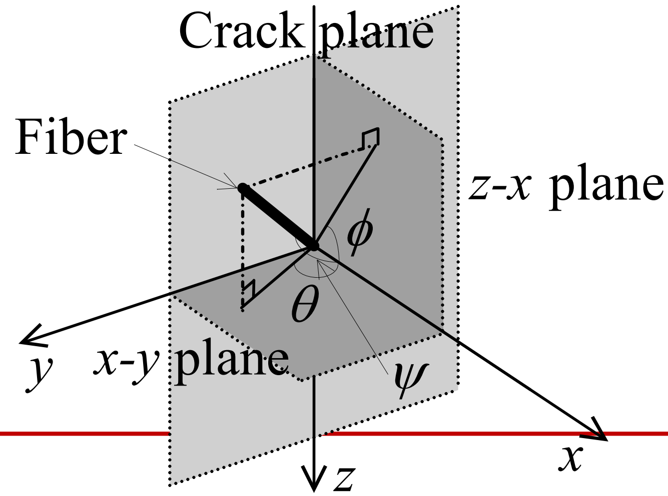
Bridging force
架橋力

ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計
(Summation of bridging tensile force)



→　3次元に対して、(For 3D,)

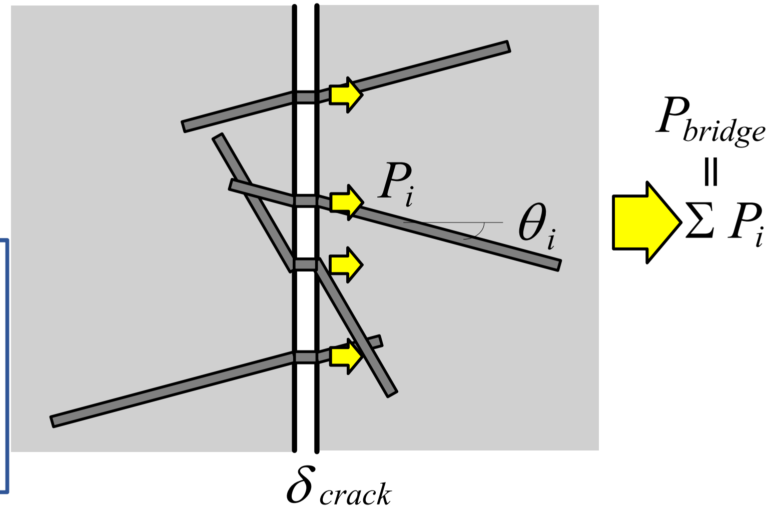
$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z)$$



計算の方法 Methodology

Bridging force
架橋力

ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計



→ 3次元に対して、

繊維1本の
引張力
Tensile force of
single fiber

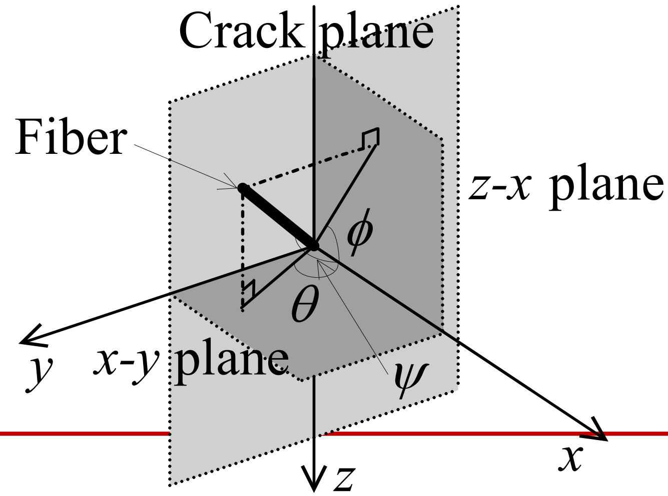
$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi)\cdot p_{xy}(\theta_i)\cdot p_{zx}(\phi_j)\cdot p_x(y_h,z_h)\cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z)$$

ひび割れ幅
Crack width

ひび割れ面
法線に対する角度
Angle to normal direction

x-y平面に
対する角度
Angle to x-y plane

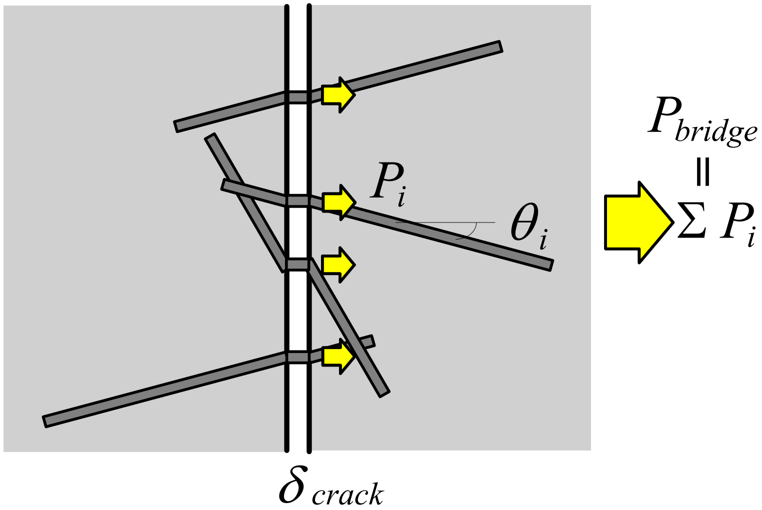
z-x平面に
対する角度
Angle to z-x plane



計算の方法　Methodology

Bridging force
架橋力

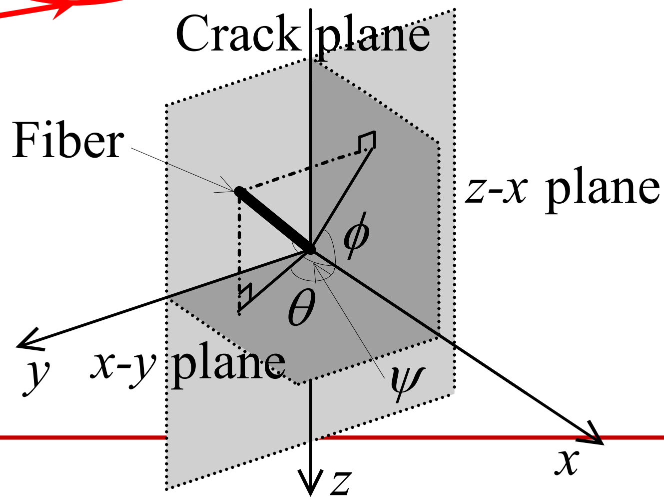
ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計



→　3次元に対して、

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z)$$

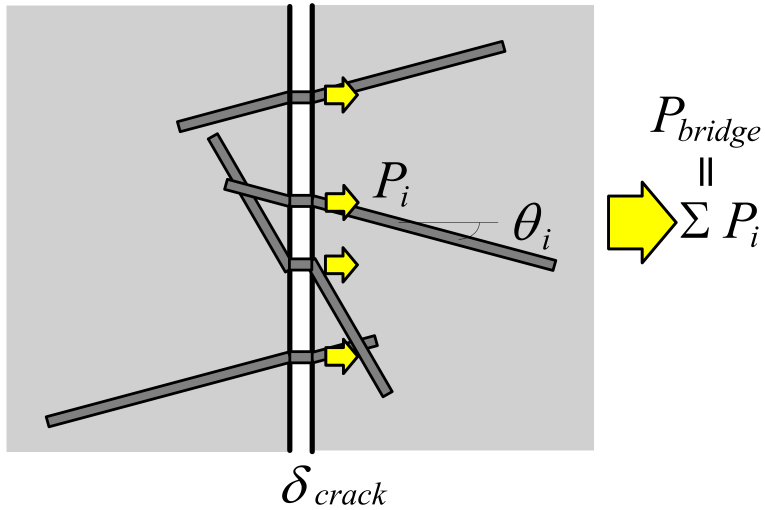
繊維の配向性や分散性を示す
確率密度関数
Probability density function (PDF)
to express fiber orientation and dispersion



計算の方法　Methodology

Bridging force
架橋力

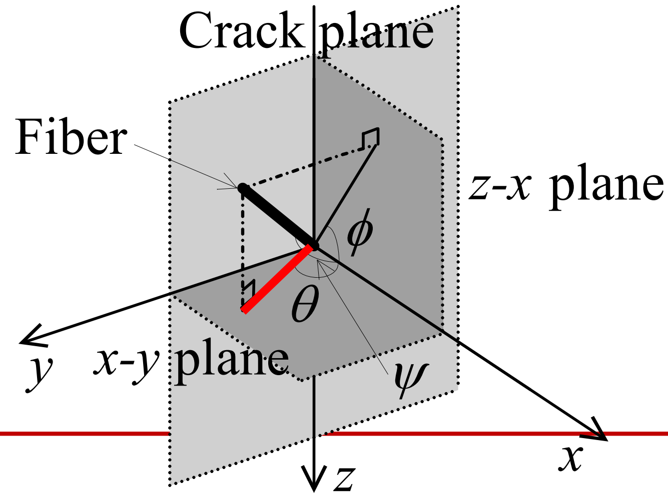
ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計



→　3次元に対して、

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi)\cdot p_{xy}(\theta_i)\cdot p_{zx}(\phi_j)\cdot p_x(y_h,z_h)\cdot \Delta\theta\cdot\Delta\phi\cdot(\Delta y\cdot\Delta z)$$

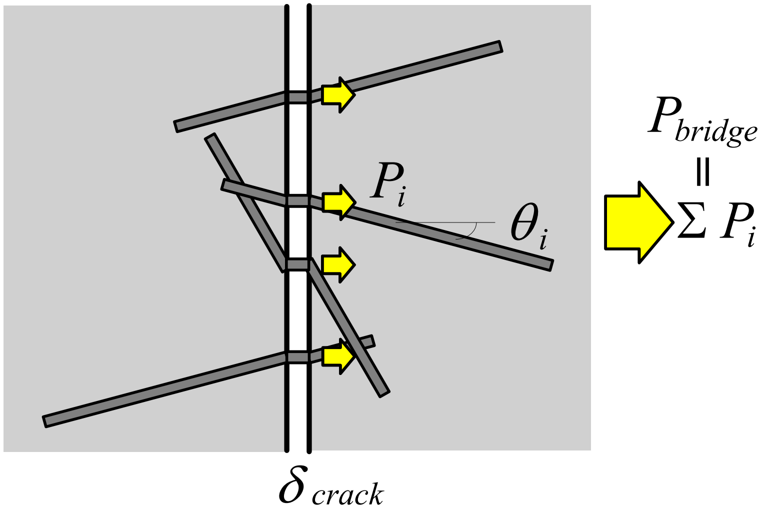
x-y平面に対する
配向角分布を表現する
確率密度関数
PDF for orientation
to x-y plane



計算の方法　Methodology

Bridging force
架橋力

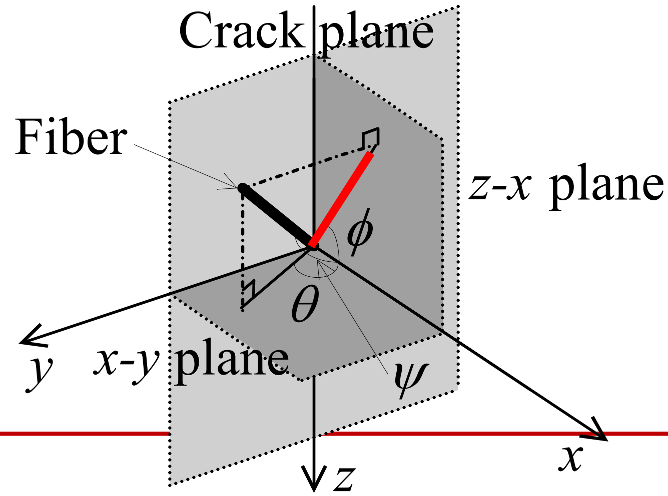
ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計



→　3次元に対して、

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z)$$

z-x平面に対する
配向角分布を表現する
確率密度関数
PDF for orientation
to z-x plane

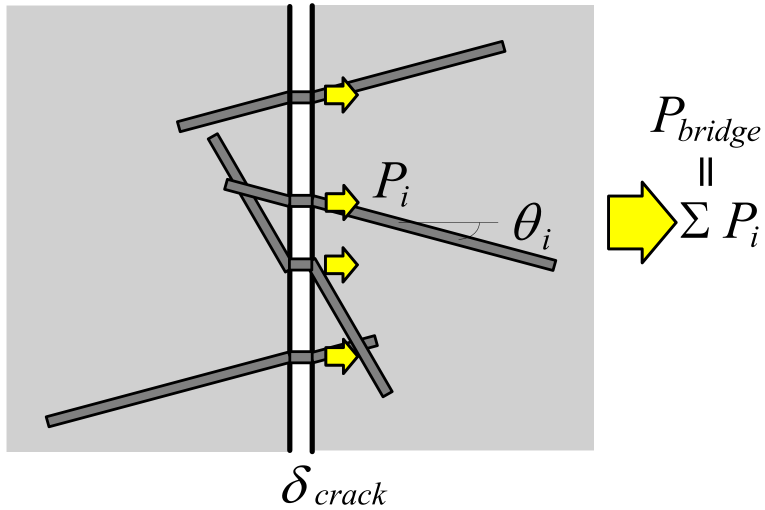


筑波大学
University of Tsukuba

計算の方法 Methodology

Bridging force
架橋力

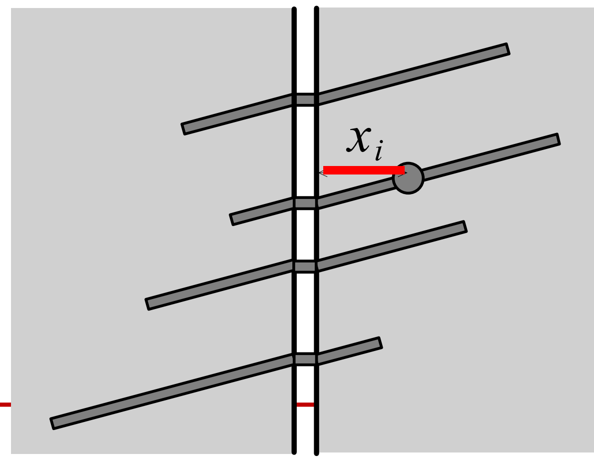
ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計



→ 3次元に対して、

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z)$$

x方向に繊維が存在する
分布を表現する
確率密度関数
PDF for x-axis

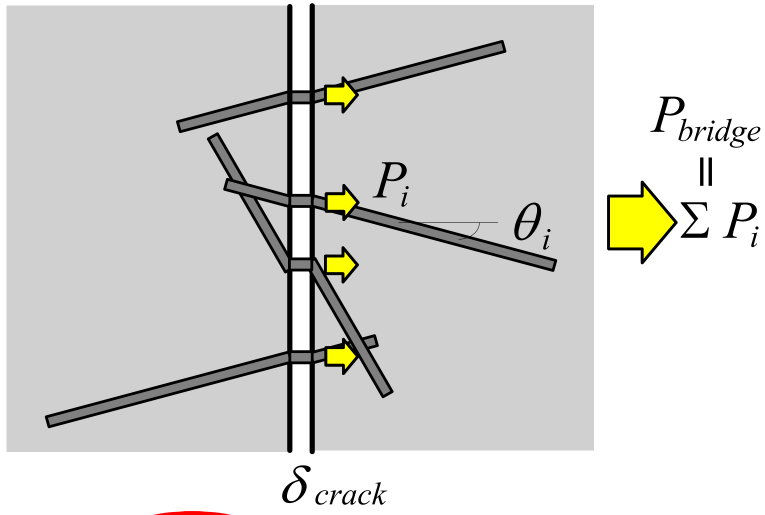


筑波大学
University of Tsukuba

計算の方法　Methodology

Bridging force
架橋力

ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計



→　3次元に対して、

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z)$$

3つの確率を
掛け合わせる
Multiplying 3 PDFs

独立であることが前提
Assumed to be independent

PDF (Probability Density Function)
確率密度関数

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_{xy}(\theta)\, d\theta = 1, \quad \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_{zx}(\phi)\, d\phi = 1$$

$$\int_{-l_f/2}^{l_f/2} p_x(y,\, z)\, dx = 1$$

l_f: 繊維長
Fiber length

筑波大学
University of Tsukuba

楕円関数による確率密度関数　PDF

Elliptic function
楕円関数

Enomae, T., Han, Y. H., and Isogai, A., "Fiber orientation distribution of paper surface calculated by image analysis", Proceedings of International Papermaking and Environment Conference, Tianjin, P.R. China (May 12-15), Book 2, pp.355-368, 2004.

もともとは、「和紙」の繊維の配向性を表現するためにあったものを、
ウドくんが見つけてきた。

変数
Variable

$$p(\theta) = \frac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \frac{C}{\cos^2\theta + A\sin\theta\cos\theta + B\sin^2\theta}$$

$$A = \frac{(1-k)\sin 2\theta_r}{1+(k-1)\sin^2\theta_r} \qquad B = \frac{k-(k-1)\sin^2\theta_r}{1+(k-1)\sin^2\theta_r} \qquad C = \frac{1}{1+(k-1)\sin^2\theta_r}$$

パラメーター
Parameter (constant)

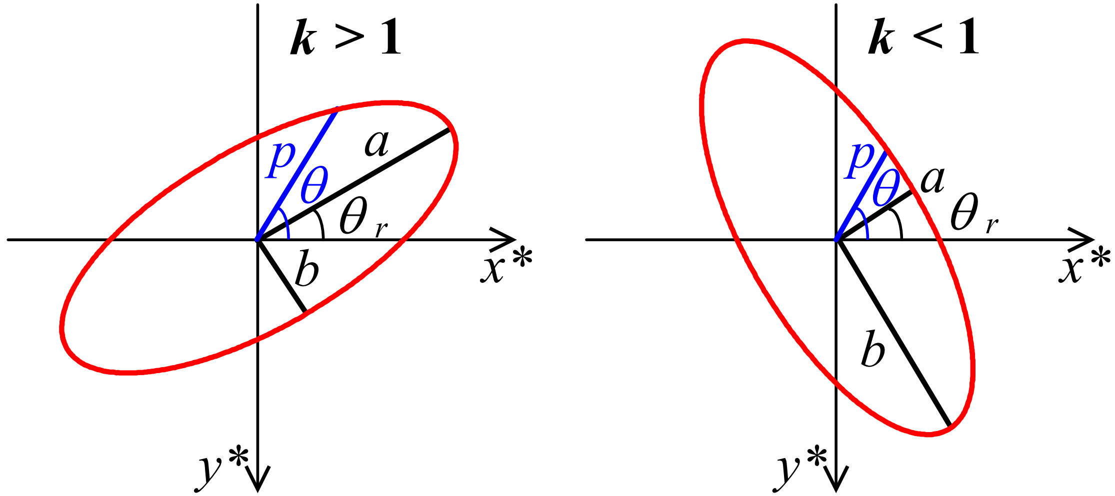
$$\theta_r = 0 \text{ のとき，} \quad p(\theta) = \frac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \frac{1}{\cos^2\theta + k\cdot\sin^2\theta}$$

楕円関数による確率密度関数 PDF

Elliptic function

楕円関数

$$k = \frac{a}{b}$$



$$p(\theta) = \frac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \frac{C}{\cos^2\theta + A\sin\theta\cos\theta + B\sin^2\theta}$$

$$A = \frac{(1-k)\sin 2\theta_r}{1+(k-1)\sin^2\theta_r} \qquad B = \frac{k-(k-1)\sin^2\theta_r}{1+(k-1)\sin^2\theta_r} \qquad C = \frac{1}{1+(k-1)\sin^2\theta_r}$$

$\theta_r = 0$ のとき， $p(\theta) = \dfrac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \dfrac{1}{\cos^2\theta + k\cdot\sin^2\theta}$

楕円関数による確率密度関数　PDF

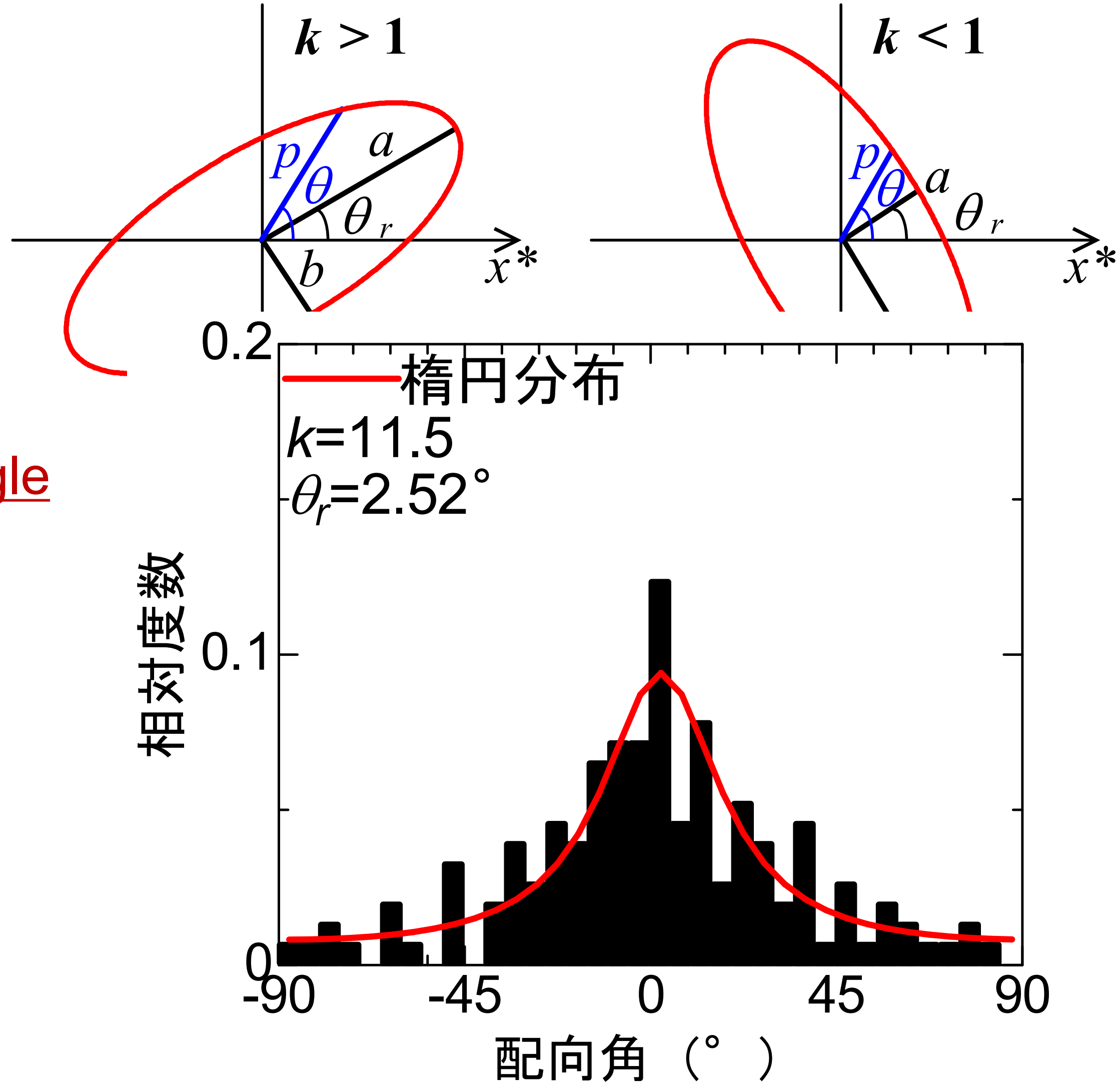
Elliptic function
楕円関数

$k = \dfrac{a}{b}$　　Orientation intensity
配向強度

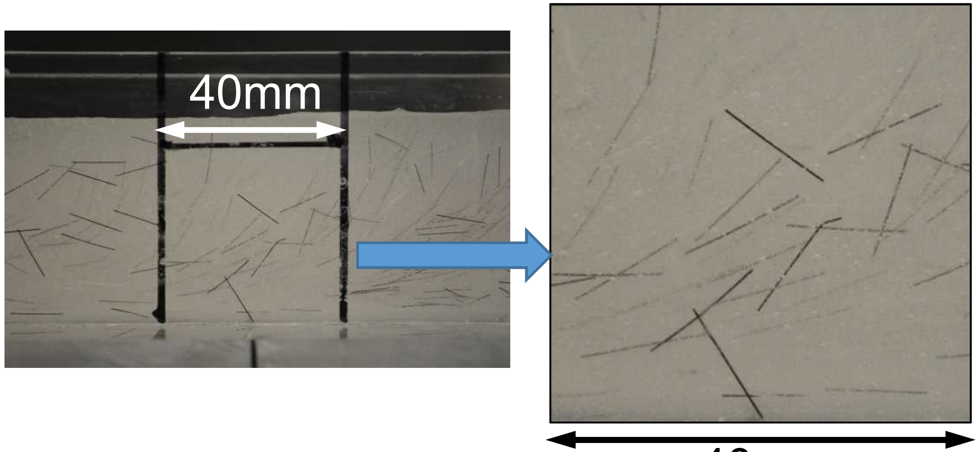
θ_r　　Principal orientation angle
主配向角

と、呼ぶことにする。

配向角相対度数
分布に戻すと　→
Relative frequency
distribution

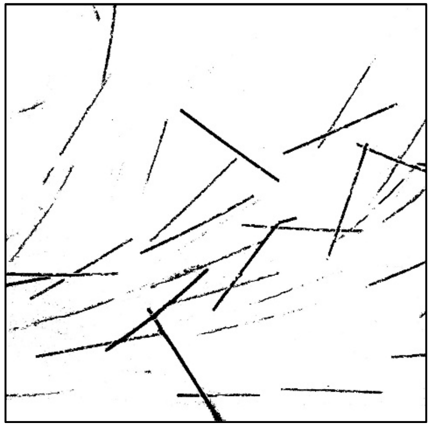


楕円関数の求め方　Elliptic function

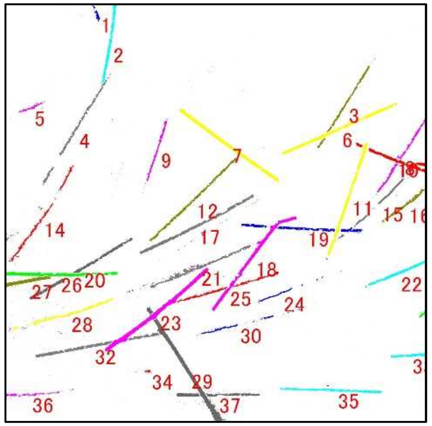


40mm

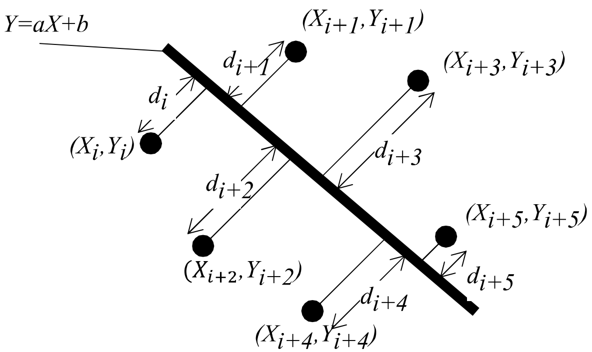
①画像のトリミング
Cropping

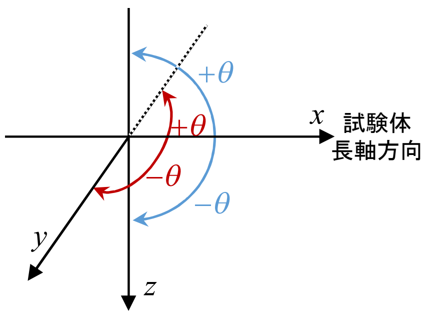


②画像の二値化
Binarization

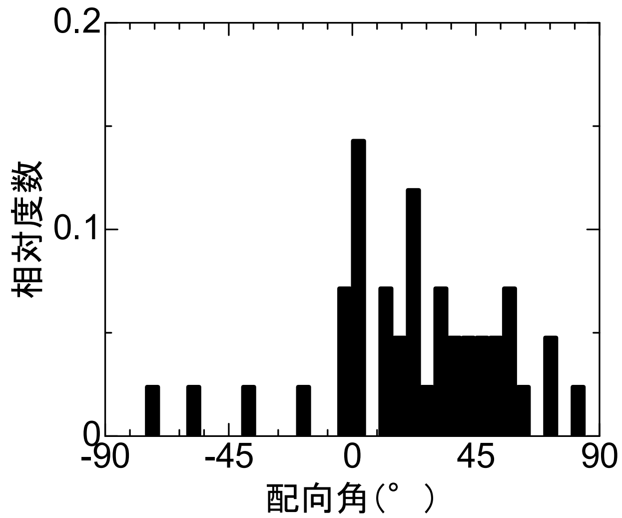


③ラベリング
Labeling





④繊維1本ごとの配向角の算出
Calculation of orientation angle



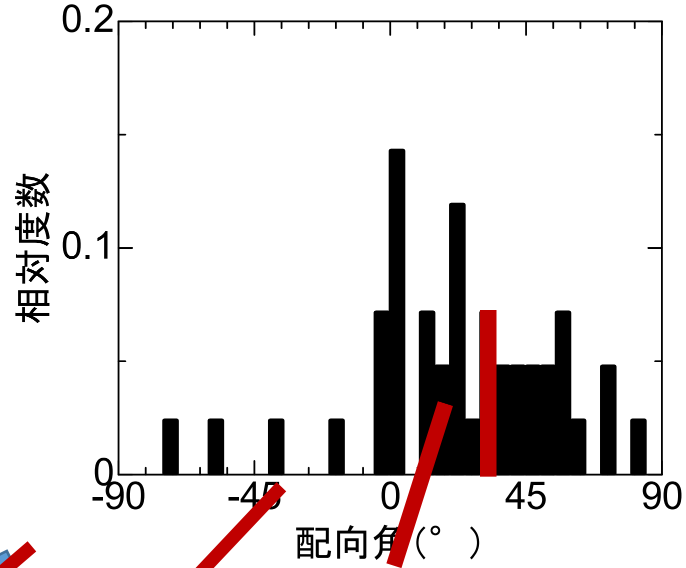
⑤繊維配向角分布の作成
Relative frequency distribution

筑波大学
University of Tsukuba

楕円関数の求め方 Elliptic function

対応する元の画像

平面座標
に変換

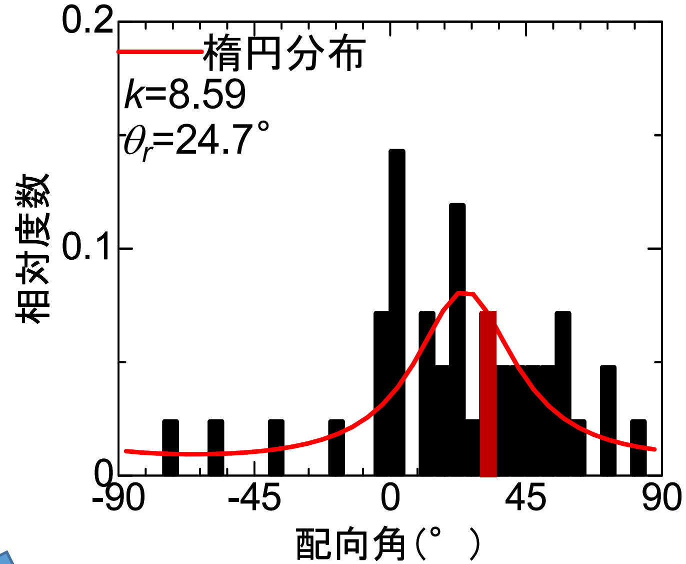


繊維配向角分布

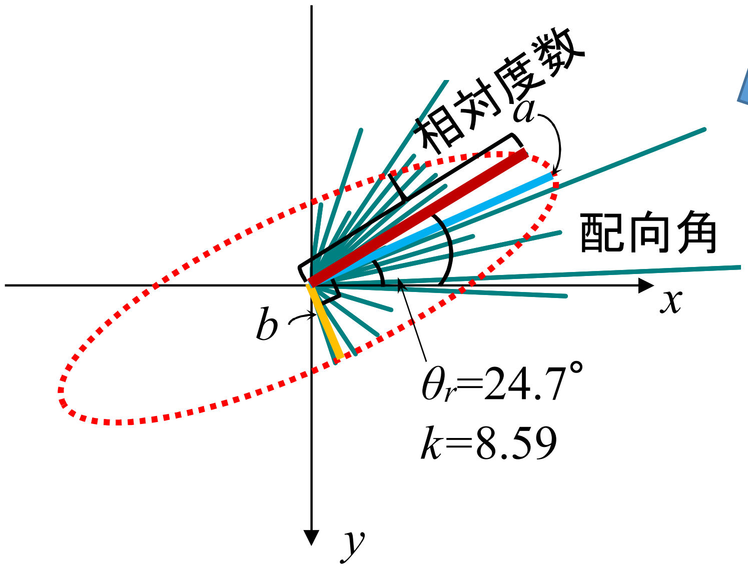
楕円関数の求め方　Elliptic function

対応する元の画像

平面座標
に変換



繊維配向角分布
（楕円近似）



楕円による近似

$k=\frac{a}{b}$:**配向強度**

θ_r: **主配向角**　(-45°

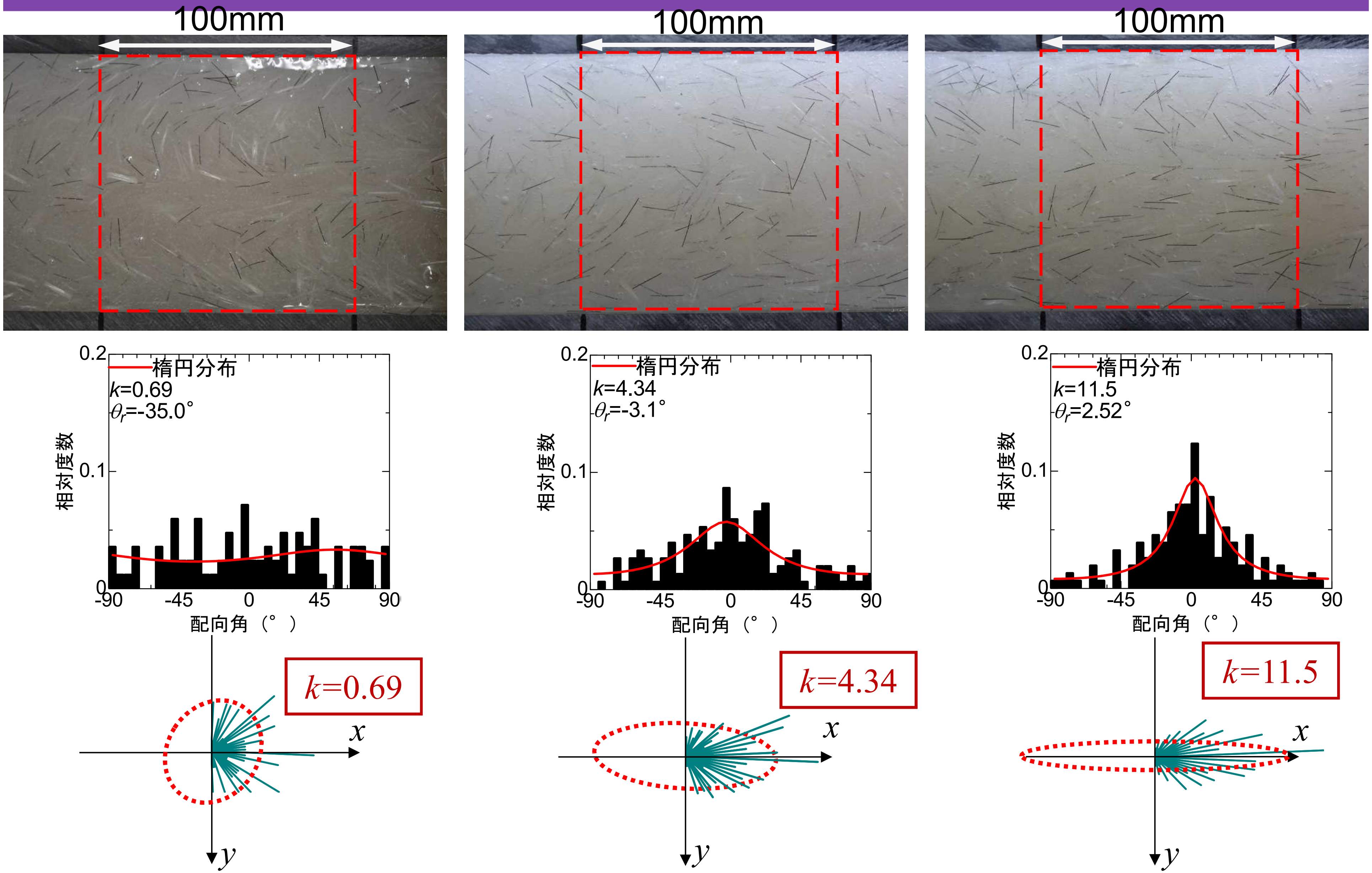
a: θ_rを偏角とする楕

b: θ_rに直交する楕円

主配向角の方向への**配向の強さ**を示す指標

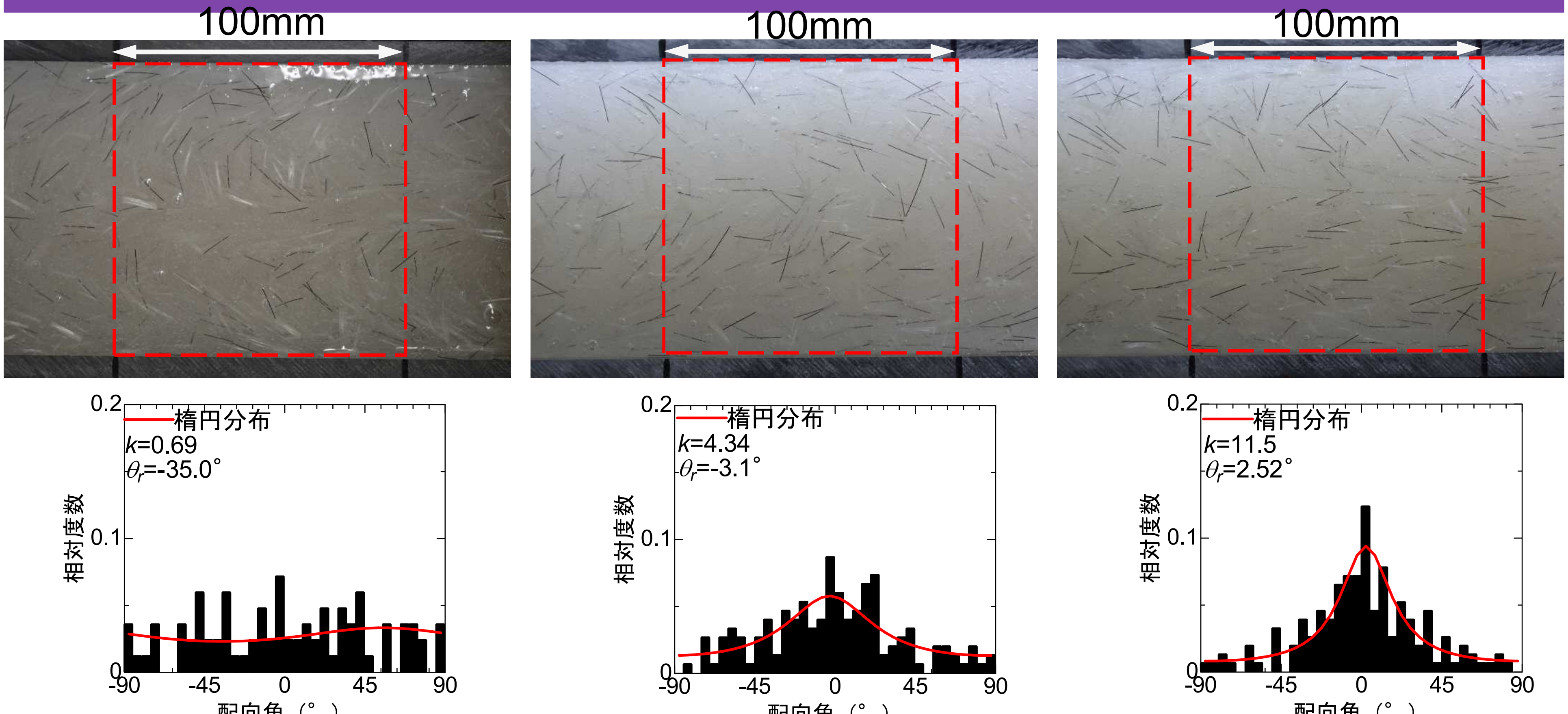
An index expressing fiber orientation toward the principal orientation angle

楕円関数の求め方　Elliptic function



楕円近似による配向強度の算出

楕円関数の求め方　Elliptic function



k ＜1： x軸と直交方向に配向
Fibers tend to orient toward the perpendicular to x-axis

k ＝1： ランダム配向
Random

k ＞1： x軸方向に配向
Fibers tend to orient toward x-axis

筑波大学
University of Tsukuba

PVA繊維の引抜モデル　Pullout model

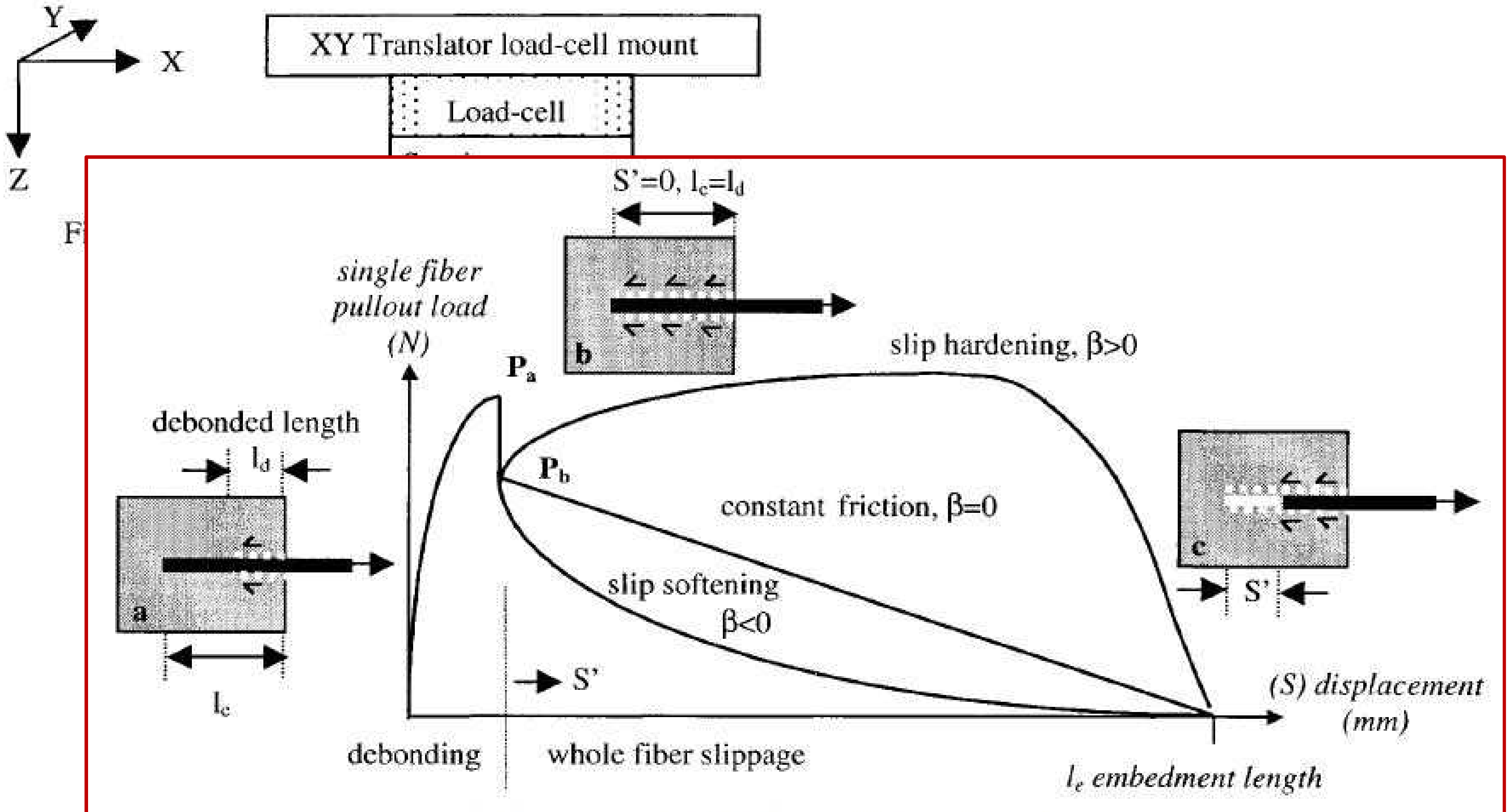


FIG. 3. General Profile of a Single Fiber Pullout Curve

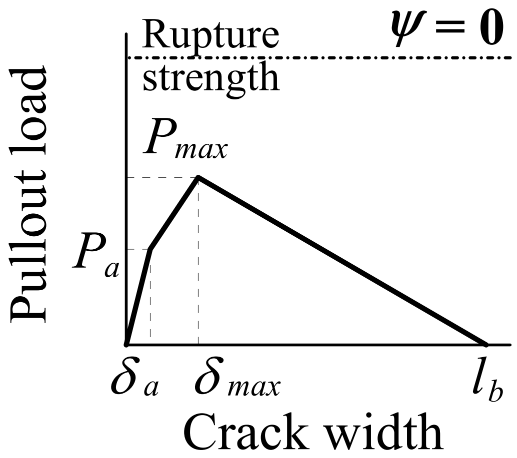
Redon, C., Li, V. C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., and Ogawa, A., “Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix”, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.13, No.6, pp.399-406, 2001

PVA繊維の引抜モデル　Pullout model

Trilinear model

トリリニアモデル

PVA繊維の化学的固着力と抜出しをモデル化

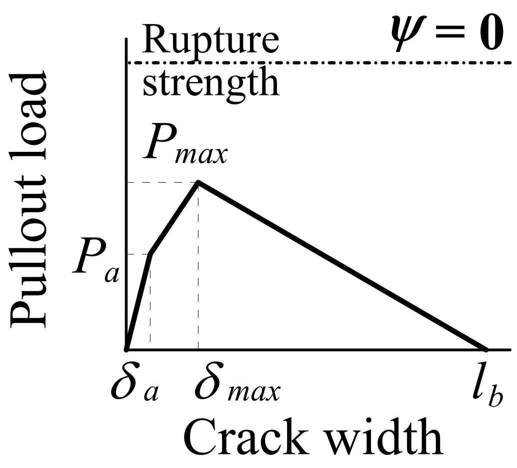


PVA繊維の引抜モデル　Pullout model

Trilinear model

トリリニアモデル

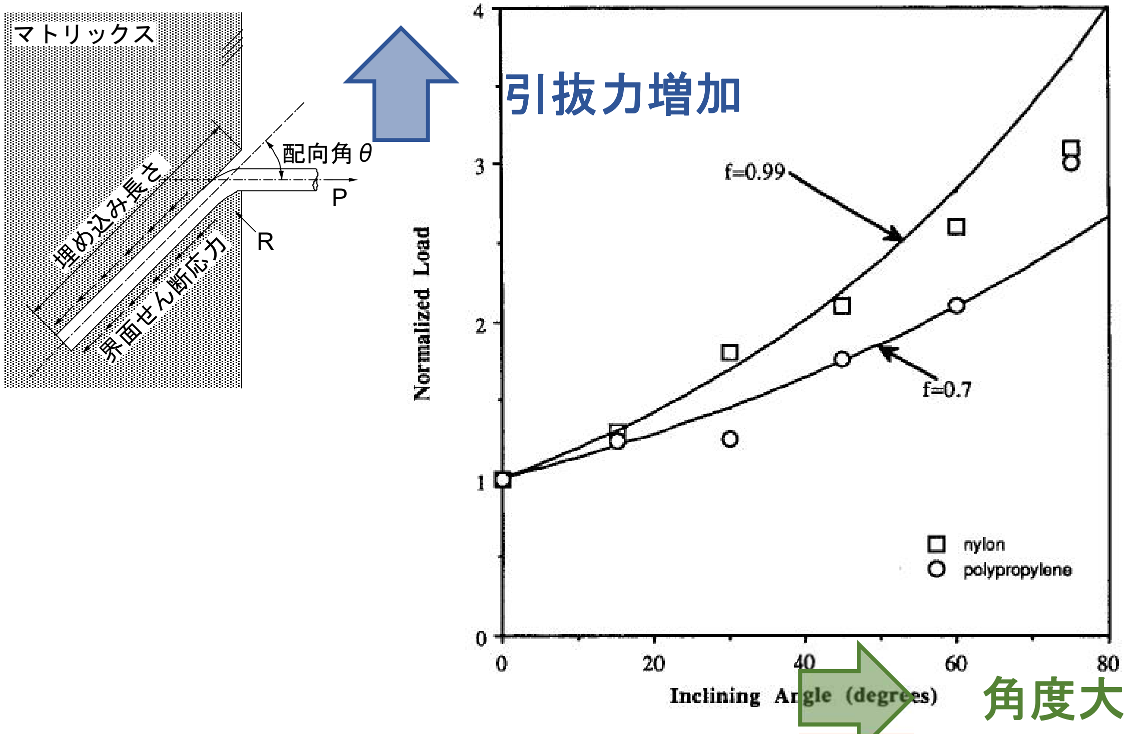
PVA繊維の化学的固着力と抜出しをモデル化



Snubbing effect

スナビング効果

角度がつくと、抵抗力が増大

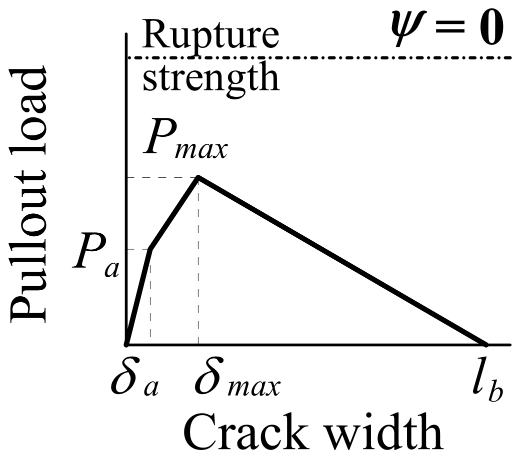


e.g., Li, V. C., Wang, Y., and Backer, S., “A Micromechanical Model of Tension-Softening and Bridging Toughening of Short Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites”, J. Mech. Phys. Solids, Vol.39, No.5, pp.607-625, 1991

PVA繊維の引抜モデル　Pullout model

Trilinear model
トリリニアモデル

PVA繊維の化学的固着力をモデル化



Fiber strength degradation
強度低下

角度がつくと、
破断強度が低下

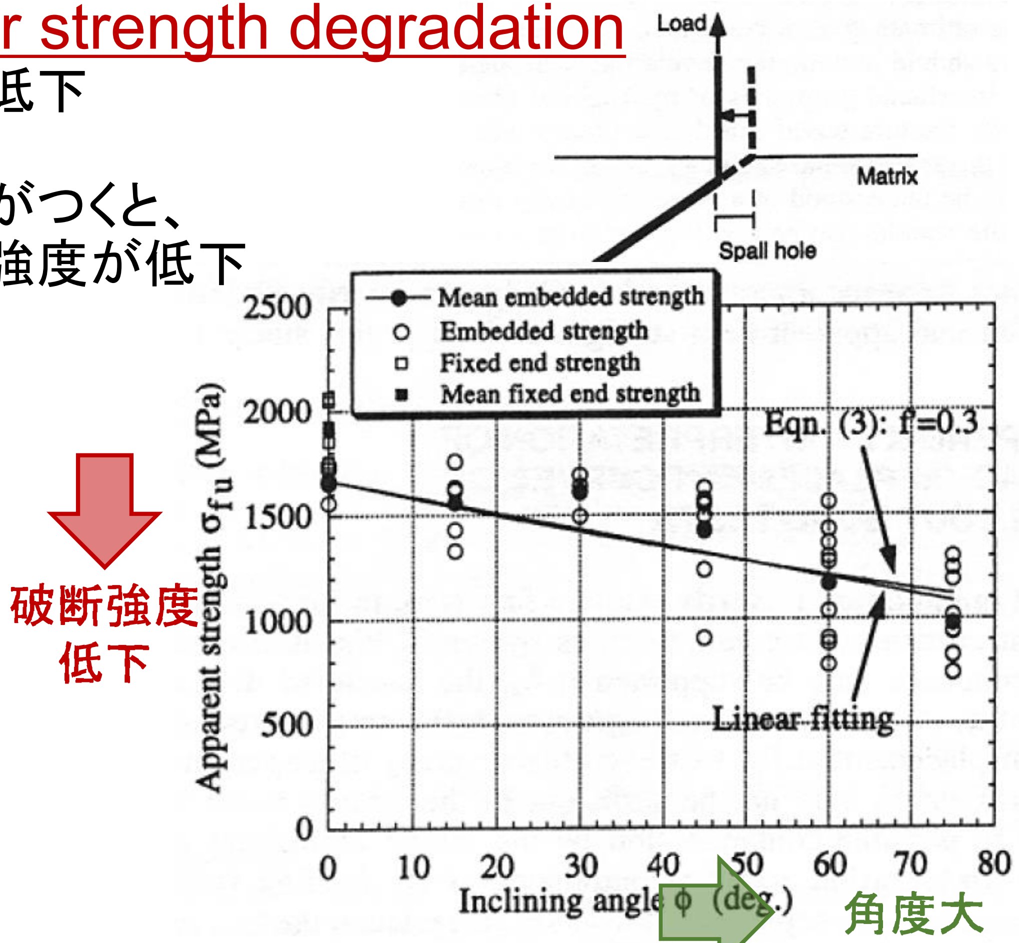


FIG. 15. Inclining Effect on Apparent Fiber Strength

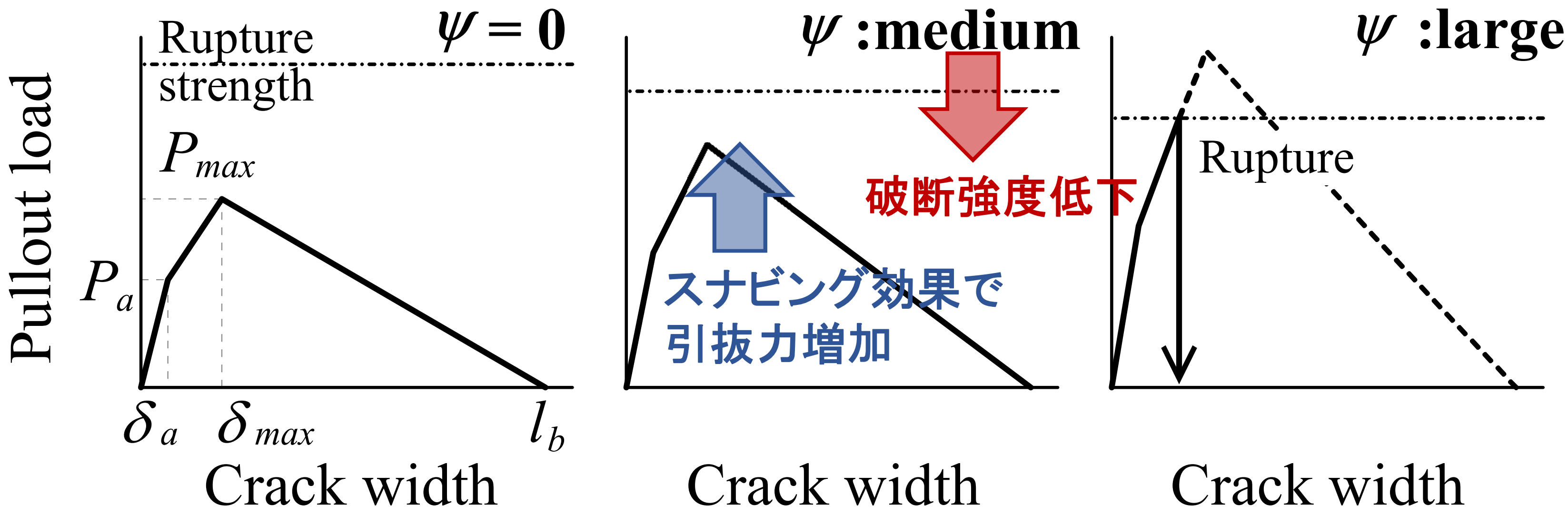
e.g., Kanda, T., and Li, V. C., “Interface Property and Apparent Strength of High-Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix”, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.1, pp.5-13, 1998

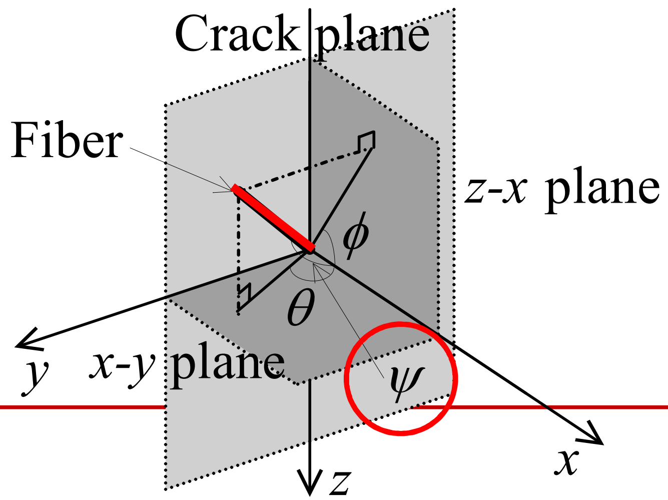
PVA繊維の引抜モデル　Pullout model

Trilinear model

トリリニアモデル

角度大

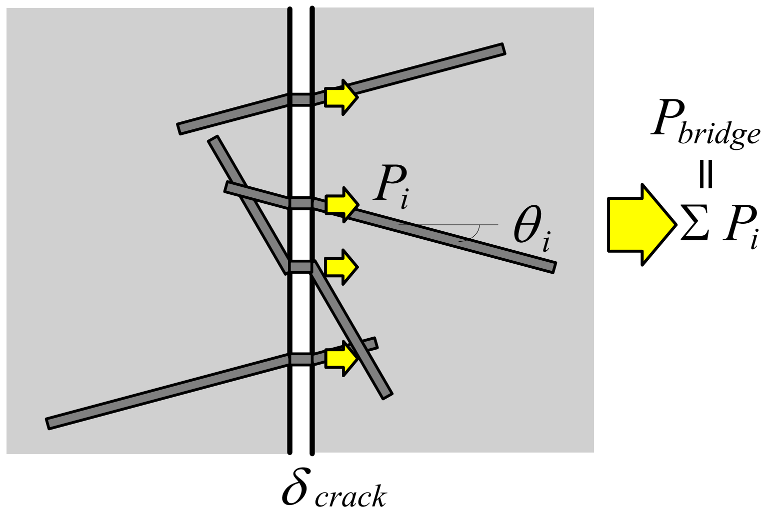




架橋則の計算　Calculation

<u>Bridging force</u>
架橋力

ひび割れを跨ぐ
繊維の引張力の合計



→　3次元に対して、

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta,\psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z)$$

$$\left.\begin{array}{l} -90^\circ \le \theta_i \le 90^\circ \\ -90^\circ \le \phi_j \le 90^\circ \\ p_x(y_h, z_h) = const \end{array}\right\}$$

$$(0 \le x_g \le l_b / 2)$$

の範囲で、
力業で数値計算

必要なDimension（例）
＝ 180度×180度×6mm
×計算するステップ（100）
（＝19,440,000）

$p_{xy}(\theta_i)$, $p_{zx}(\phi_j)$ は、

k ：配向強度

θ_r ：主配向角

で、与える。

https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/page7.htm

当研究室で使用しているデータ整理用プログラム・解析用プログラム・計測用プログラムです。 ご自由にダウンロードしてお使いください。
これらのプログラムの使用によって不具合、損害が生じても、何ら責任は負いません。
バグ等には基本的には対処しませんが、連絡をいただければ、ご返事はできます。
kanakubo@kz.tsukuba.ac.jp

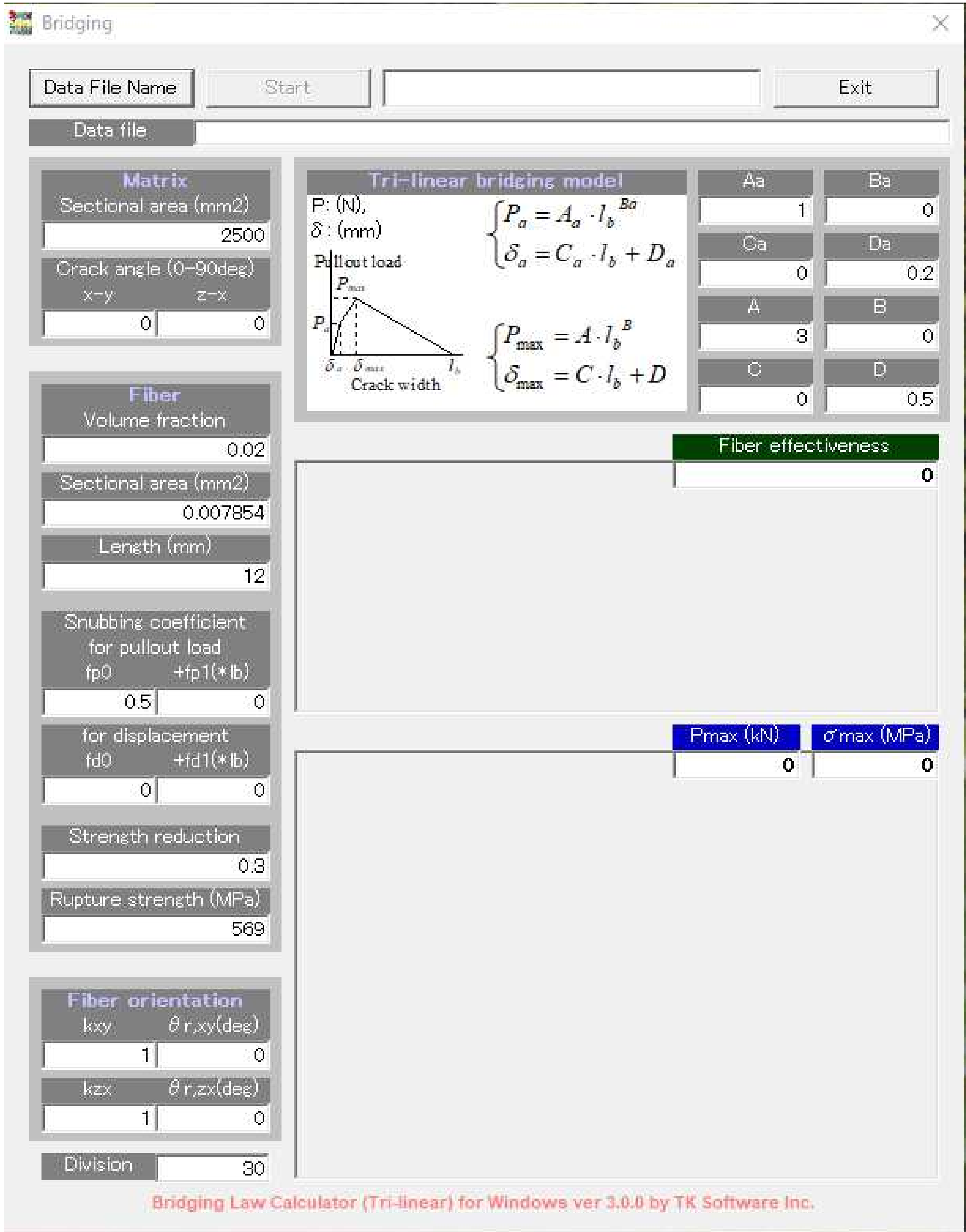
This page presents programs which are used in Kanakubo Lab. You can download and use them freely without any permission. These programs and accompanying files should be used as is and without warranties as to performance or any other warranties whether expressed or implied.

データ整理用プログラム / Data analyser

用途 / Use	機器等 / Requirements	仕様 / Specifications	ファイル / File
材料実験整理 for Concrete and steel test	Visual Basic ver.6 runtime library	Elastic modulus (Tangent/Secant Modulus) Yield strength / offset strength screen shot	emod.zip
包絡線作成 Skeleton curve creator	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file screen shot	skel1.zip
吸収エネルギー Absorbed Energy	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file screen shot	heq1.zip
履歴ループ Hysteresis Loop	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file screen shot	loop1.zip
平均化曲線 （差分も可） Averaged curve creator	Visual Basic ver.6 runtime library	Text data file, up to 10 files screen shot	average2.zip

解析用プログラム / Analysis program

用途 / Use	機器等 / Requirements	仕様 / Specifications	ファイル / File
架橋則（トリリニアモデル） Bridging law for FRCC (Tri-linear model)	Visual Basic ver.6 runtime library	Reference Instruction	bridging3.zip
架橋則（バイリニアモデル） Bridging law for FRCC (Bi-linear model)	Visual Basic ver.6 runtime library	Reference1 Reference2	bridging2b3.zip



kanakubo/page7.htm

測用プログラムです。 ご自由にダウンロードしてお使いください。
負いません。
きます。

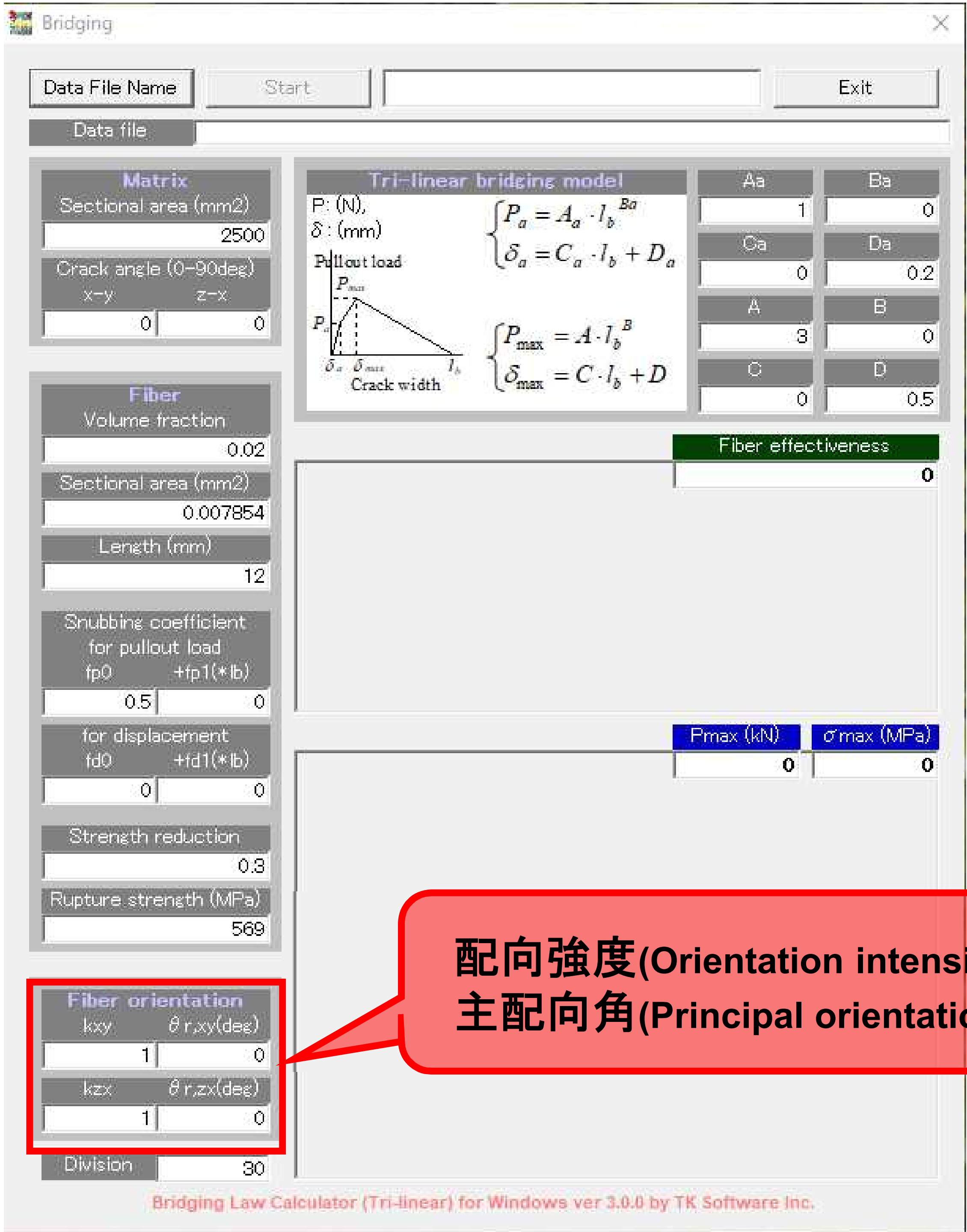
can download and use them freely without any permission.
without warranties as to performance or any other warranties

ム / Data analyser

仕様 / Specifications	ファイル / File
Elastic modulus (Tangent/Secant Modulus) Yield strength / offset strength screen shot	emod.zip
Text data file screen shot	skel1.zip
Text data file screen shot	heq1.zip
Text data file screen shot	loop1.zip
Text data file, up to 10 files screen shot	average2.zip

nalysis program

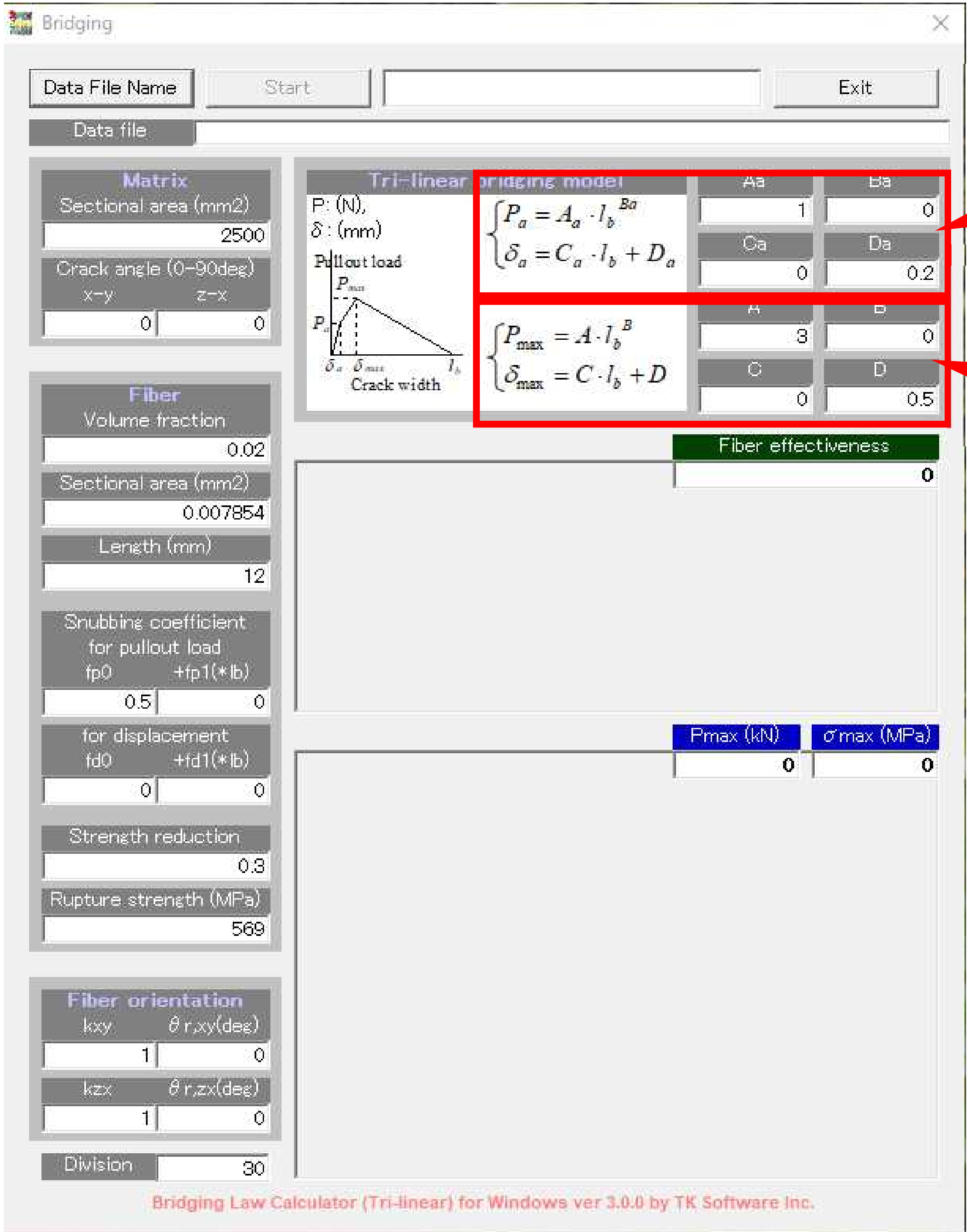
ments	仕様 / Specifications	ファイル / File
6 runtime library	Reference Instruction	bridging3.zip
6 runtime library	Reference1 Reference2	bridging2b3.zip



$$\begin{cases} P_a = A_a \cdot l_b^{\,Ba} \\ \delta_a = C_a \cdot l_b + D_a \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{max} = A \cdot l_b^{\,B} \\ \delta_{max} = C \cdot l_b + D \end{cases}$$

配向強度(Orientation intensity)
主配向角(Principal orientation angle)



$$\begin{cases} P_a = A_a \cdot l_b^{B_a} \\ \delta_a = C_a \cdot l_b + D_a \end{cases}$$

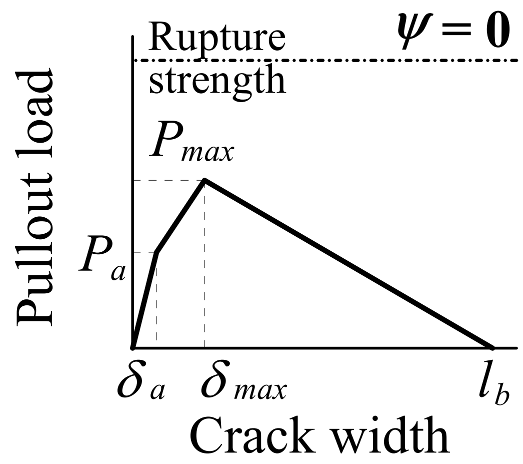
$$\begin{cases} P_{max} = A \cdot l_b^{B} \\ \delta_{max} = C \cdot l_b + D \end{cases}$$

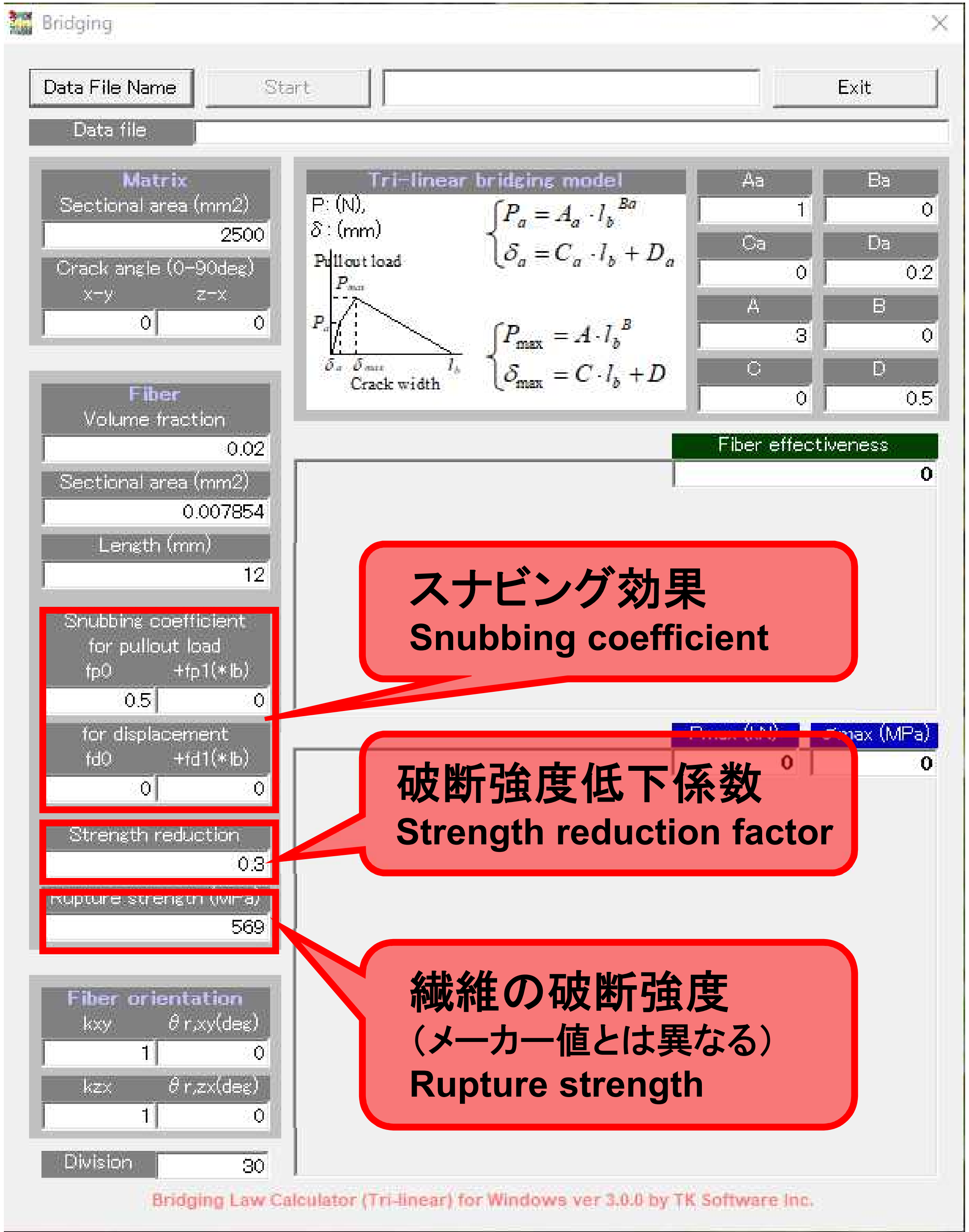
トリリニアモデルの第一折れ点(“a” point)

トリリニアモデルの最大点(max. point)

Trilinear model

トリリニアモデル





$$P = P_{pull} \cdot e^{f \cdot \psi} < P_{rup} \cdot e^{-f' \cdot \psi}$$

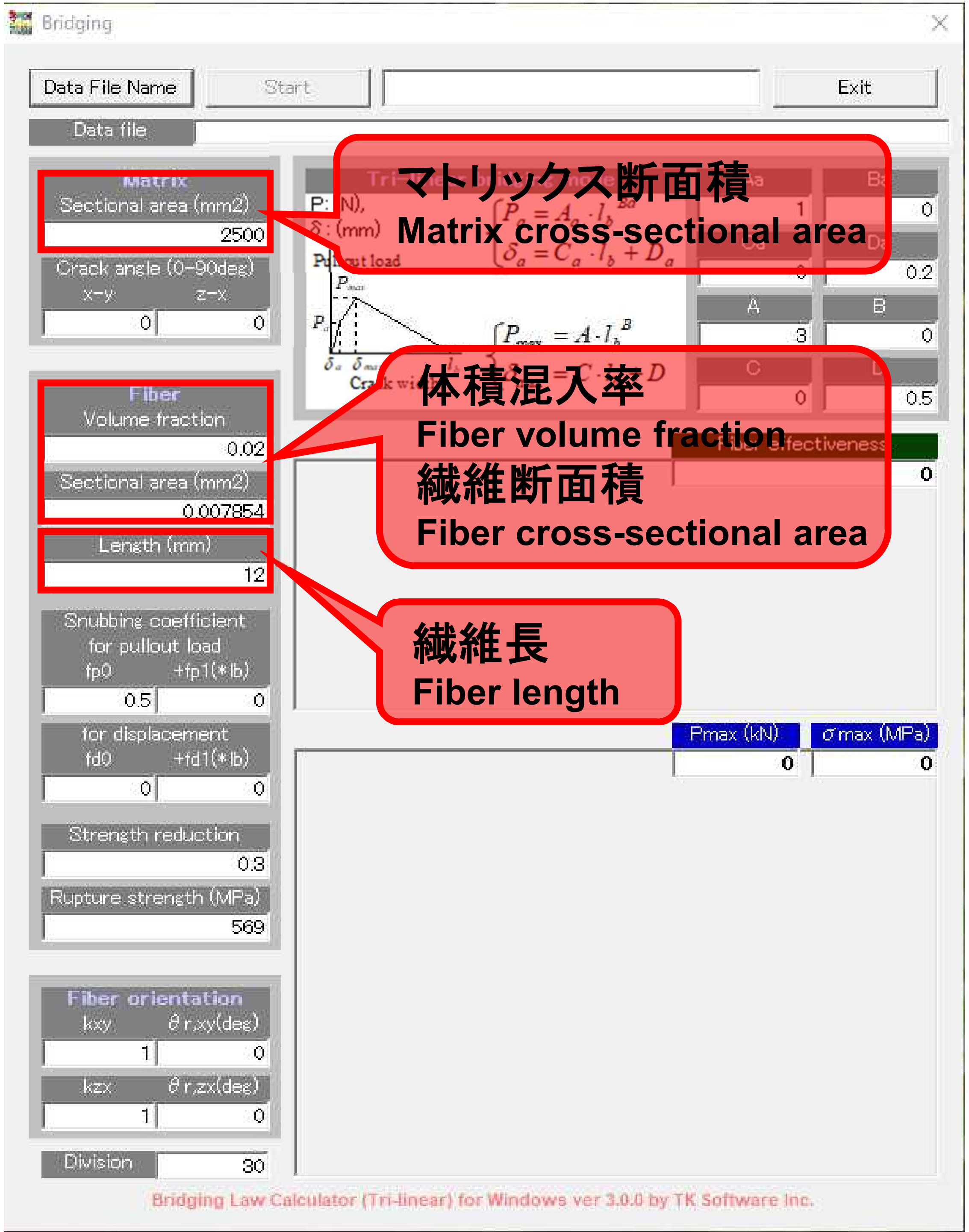
P = pullout load of a single fiber

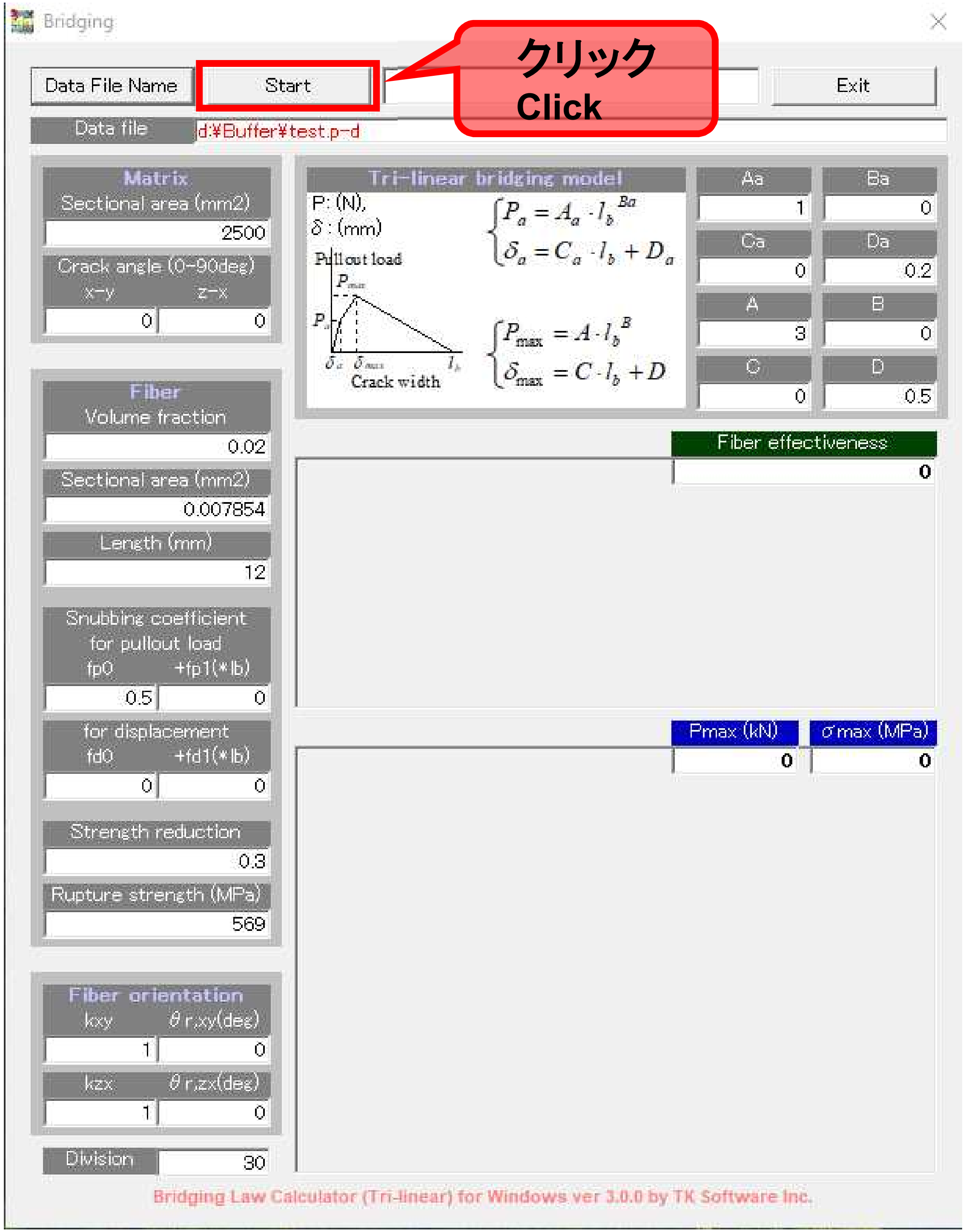
P_{pull} = pullout load of a single fiber at a zero fiber angle

P_{rup} = pullout load of a single fiber at rupture at a zero fiber angle

f = snubbing coefficient

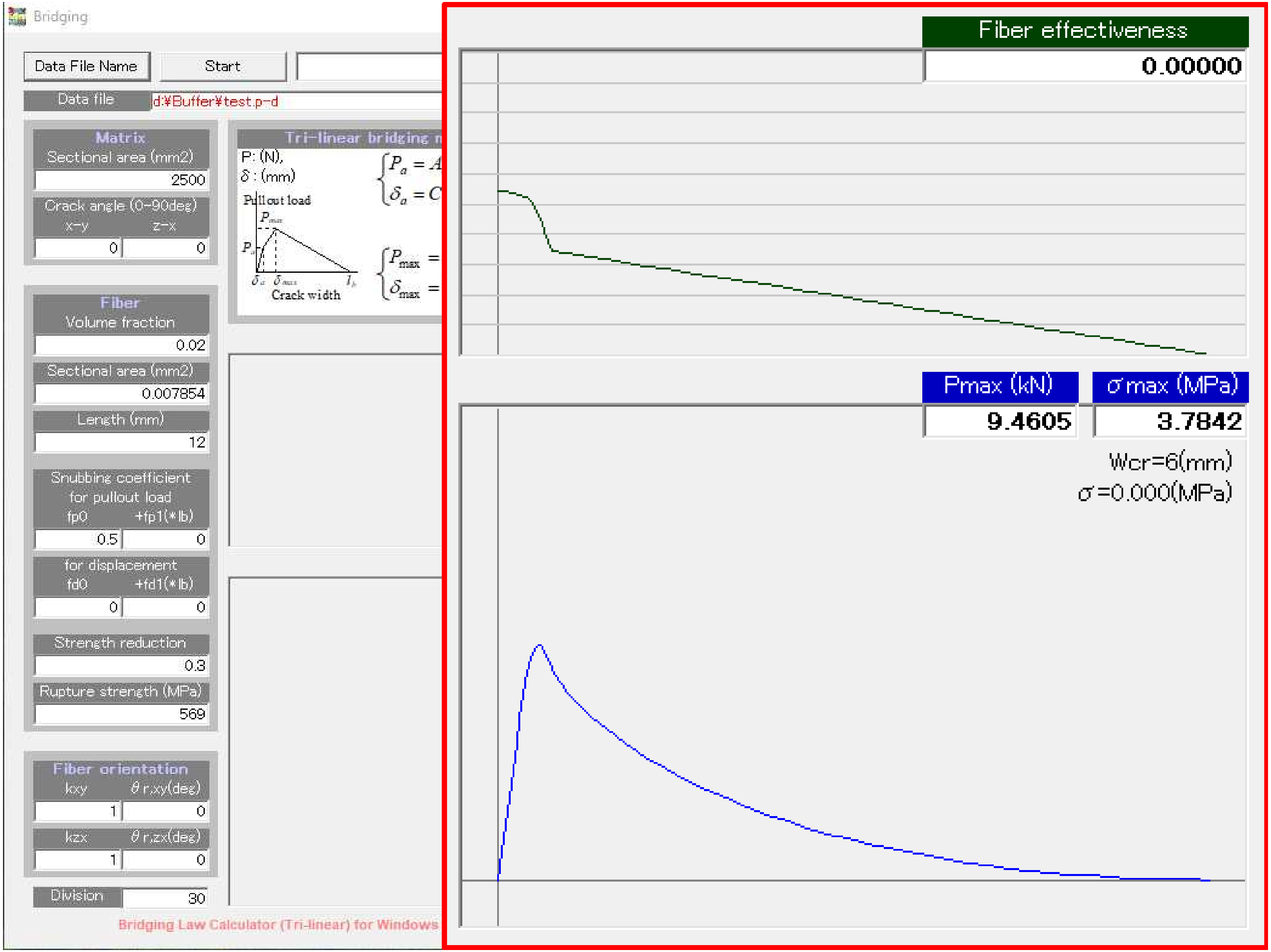
f' = fiber strength reduction factor

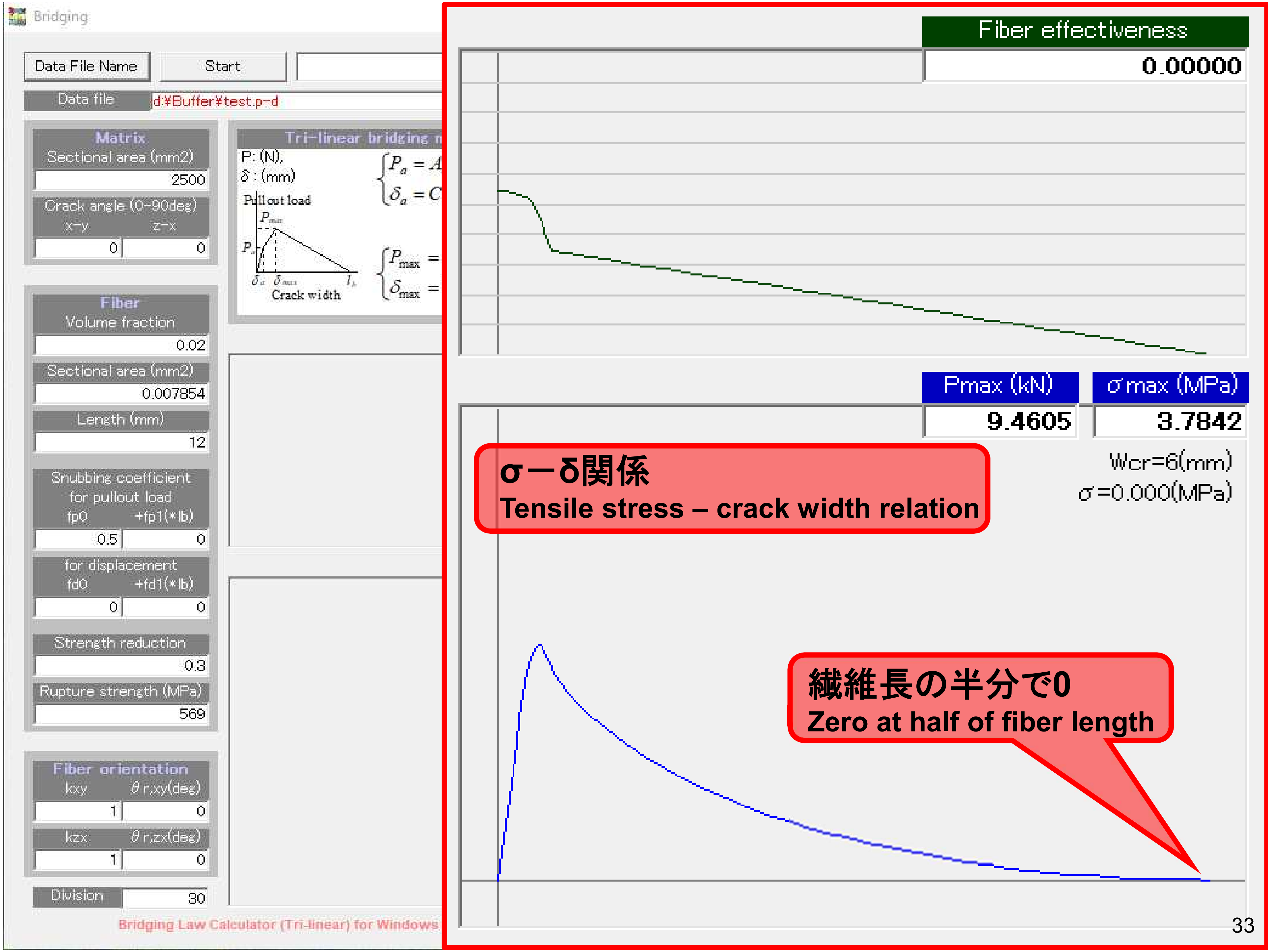

Bridging
Data File Name
Start
Exit
Data file
Matrix
Sectional area (mm2)
2500
Crack angle (0-90deg)
x-y
z-x
0
0
マトリックス断面積
Matrix cross-sectional area
Fiber
Volume fraction
0.02
Sectional area (mm2)
0.007854
体積混入率
Fiber volume fraction
繊維断面積
Fiber cross-sectional area
Length (mm)
12
繊維長
Fiber length
Snubbing coefficient
for pullout load
fp0
+fp1(*lb)
0.5
0
for displacement
fd0
+fd1(*lb)
0
0
Strength reduction
0.3
Rupture strength (MPa)
569
Fiber orientation
kxy
θr,xy(deg)
1
0
kzx
θr,zx(deg)
1
0
Division
30
A
B
3
0
C
0
0.5
0.2
1
0
Pmax (kN)
σmax (MPa)
0
0
Bridging Law Calculator (Tri-linear) for Windows ver 3.0.0 by TK Software Inc.

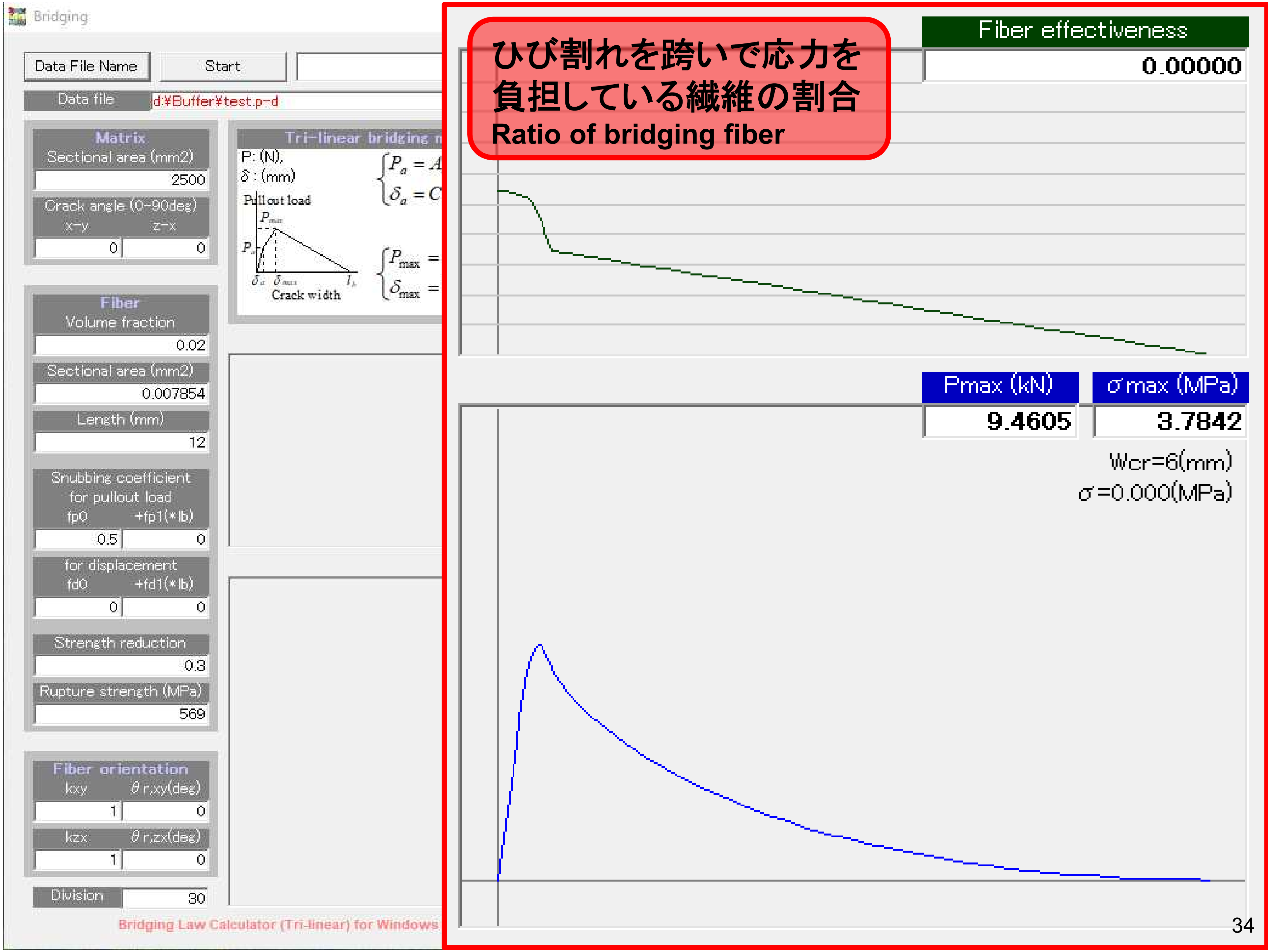


$$\begin{cases} P_a = A_a \cdot l_b^{Ba} \\ \delta_a = C_a \cdot l_b + D_a \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{max} = A \cdot l_b^{B} \\ \delta_{max} = C \cdot l_b + D \end{cases}$$


Bridging
Data File Name
Start
Data file
d:¥Buffer¥test.p-d
Matrix
Sectional area (mm2)
2500
Crack angle (0-90deg)
x-y
z-x
0
0
Tri-linear bridging
P: (N),
δ : (mm)
Pullout load
Crack width
Fiber
Volume fraction
0.02
Sectional area (mm2)
0.007854
Length (mm)
12
Snubbing coefficient
for pullout load
fp0
+fp1(*lb)
0.5
0
for displacement
fd0
+fd1(*lb)
0
0
Strength reduction
0.3
Rupture strength (MPa)
569
Fiber orientation
kxy
θr,xy(deg)
1
0
kzx
θr,zx(deg)
1
0
Division
30
Bridging Law Calculator (Tri-linear) for Windows
Fiber effectiveness
0.00000
Pmax (kN)
σmax (MPa)
9.4605
3.7842
Wcr=6(mm)
σ=0.000(MPa)


Bridging
Data File Name
Start
Data file
d:¥Buffer¥test.p-d
Matrix
Sectional area (mm2)
2500
Crack angle (0-90deg)
x-y
z-x
0
0
Fiber
Volume fraction
0.02
Sectional area (mm2)
0.007854
Length (mm)
12
Snubbing coefficient
for pullout load
fp0
+fp1(*lb)
0.5
0
for displacement
fd0
+fd1(*lb)
0
0
Strength reduction
0.3
Rupture strength (MPa)
569
Fiber orientation
kxy
θr,xy(deg)
1
0
kzx
θr,zx(deg)
1
0
Division
30
Tri-linear bridging
P: (N),
δ: (mm)
Pullout load
Crack width
Bridging Law Calculator (Tri-linear) for Windows
Fiber effectiveness
0.00000
Pmax (kN)
9.4605
σmax (MPa)
3.7842
Wcr=6(mm)
σ=0.000(MPa)
σ−δ関係
Tensile stress – crack width relation
繊維長の半分で0
Zero at half of fiber length


Bridging
Data File Name
Start
Data file
d:¥Buffer¥test.p-d
Matrix
Sectional area (mm2)
2500
Crack angle (0-90deg)
x-y
z-x
0
0
Tri-linear bridging m
P: (N),
δ : (mm)
Pullout load
Crack width
Fiber
Volume fraction
0.02
Sectional area (mm2)
0.007854
Length (mm)
12
Snubbing coefficient
for pullout load
fp0
+fp1(*lb)
0.5
0
for displacement
fd0
+fd1(*lb)
0
0
Strength reduction
0.3
Rupture strength (MPa)
569
Fiber orientation
kxy
θr,xy(deg)
1
0
kzx
θr,zx(deg)
1
0
Division
30
Bridging Law Calculator (Tri-linear) for Windows
ひび割れを跨いで応力を
負担している繊維の割合
Ratio of bridging fiber
Fiber effectiveness
0.00000
Pmax (kN)
σmax (MPa)
9.4605
3.7842
Wcr=6(mm)
σ=0.000(MPa)

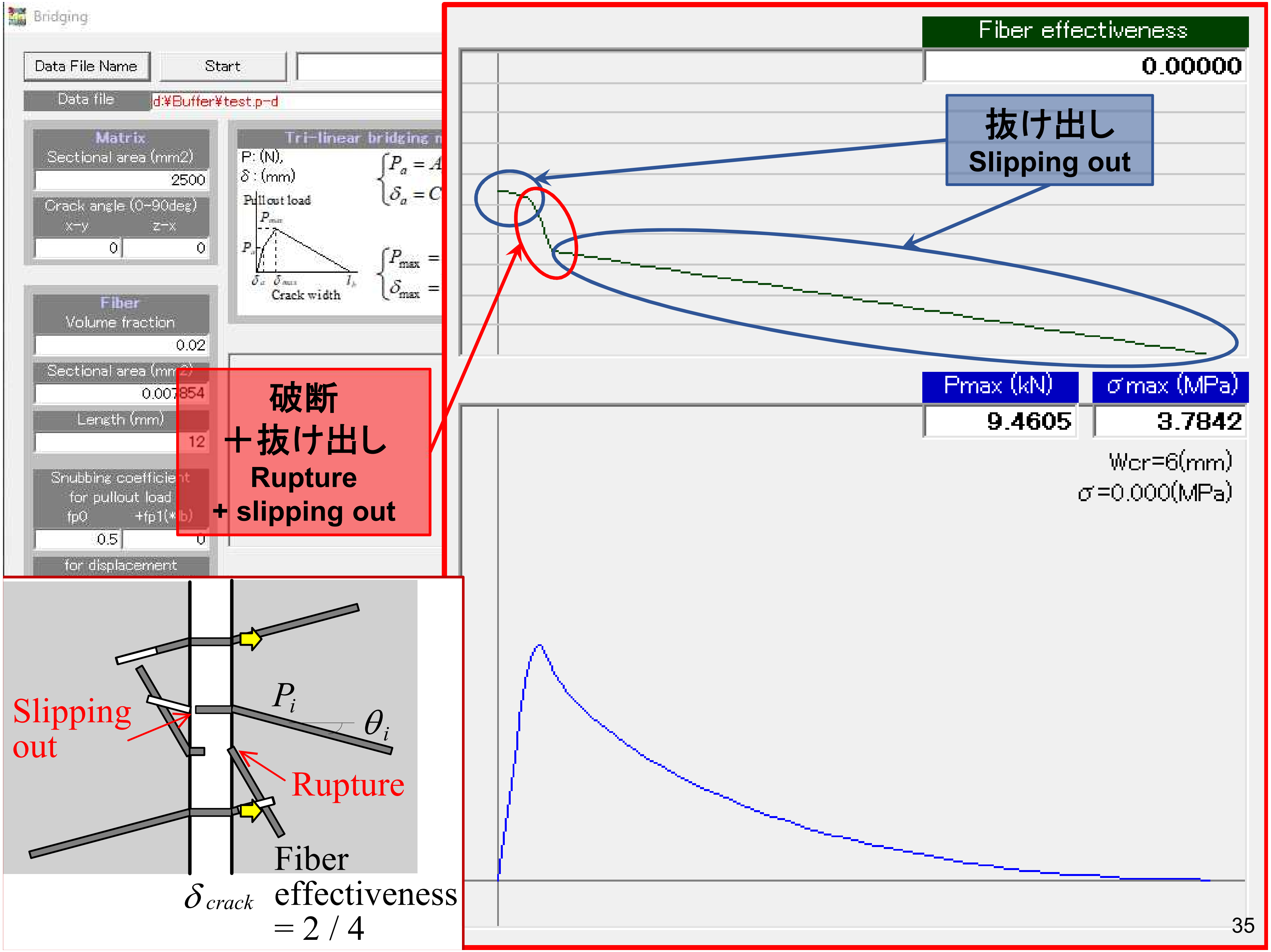

Bridging
Data File Name
Start
Data file
d:¥Buffer¥test.p-d
Matrix
Sectional area (mm2)
2500
Crack angle (0-90deg)
x-y
z-x
0
0
Fiber
Volume fraction
0.02
Sectional area (mm2)
0.007854
Length (mm)
12
Snubbing coefficient
for pullout load
fp0
+fp1(*b)
0.5
0
for displacement
Tri-linear bridging
P: (N),
δ: (mm)
Pullout load
Crack width
Fiber effectiveness
0.00000
抜け出し
Slipping out
破断
＋抜け出し
Rupture
+ slipping out
Pmax (kN)
9.4605
σmax (MPa)
3.7842
Wcr=6(mm)
σ=0.000(MPa)
Slipping
out
Rupture
Fiber
effectiveness
= 2 / 4

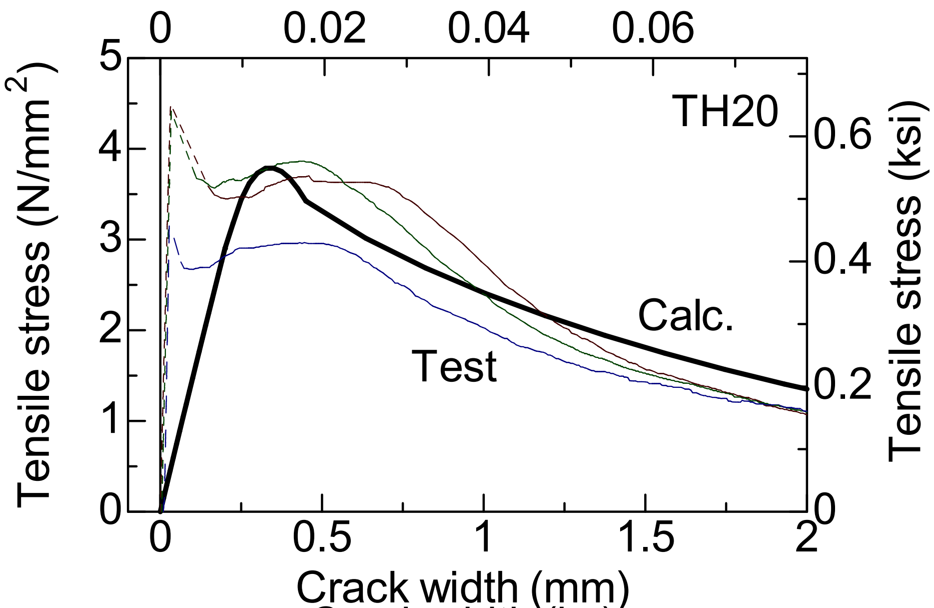
Table 5 Parameters for bridging law

Parameter			Input value	Remarks
First peak load, P_a, N (lbf)			1.5 (0.34)	*1
Crack width at P_a, δ_a, mm (in.)			0.2 (7.8×10^{-3})	0.1 mm (3.9×10^{-3} in.)*1 × 2
Maximum load, P_{max}, N (lbf)			3.0 (0.67)	*1
Crack width at P_{max}, δ_{max}, mm (in.)			0.45 (18×10^{-3})	0.3 mm (12×10^{-3} in.)*1 × 1.5
Fiber strength, σ_{fu}, N/mm^2 (ksi)			774 (112)	1200 N/mm^2 (174 ksi) × 0.645 *2
Snubbing coeffient, f			0.5	*2
Fiber strength reduction factor, f'			0.3	*2
x-y plane	Orientation intensity, k_{xy}	Horizontal casting	1.5	Value near to V_f 1.5 % and 2.0% visualizations
		Vertical casting	0.5	
	Principal orientation angle, $\theta_{r,xy}$		0	For calculation simplification *3
z-x plane	Orientation intensity, k_{zx}	Horizontal casting	6	Value near to V_f 1.5 % and 2.0% visualizations
		Vertical casting	0.5	
	Principal orientation angle, $\theta_{r,zx}$		0	For calculation simplification *3

PVA fiber: 0.10 mm (3.9×10^{-3} in.) diameter, 12 mm (0.47 in.) length.
*1: Assumed value based on Kiyota et al. (2001) [22] and Yang et al. (2008) [23]
*2: Assumed value for PVA fiber by Kanda et al. (1999) [5]
*3: Approximately average value of all V_f visualizations

Kanakubo, T., et al., Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, ACI Materials Journal, 113(2), pp.131-141, 2016

横打ちHC



縦打ちVC