

論文

境界要素法を用いた結合力モデルの非線形解析

村上 聖*

Non-linear analysis of cohesive force model by means
of boundary element method

Kiyoshi MURAKAMI

1. はじめに

コンクリートの引張破壊過程は、ひびわれの進展に先行して形成される破壊進行域(fracture process zone, 以下FPZと略記する)の存在に特徴づけられる。FPZとは、マイクロクラックの累進的発生・成長・合体に起因する破壊過程が進行する領域と定義され、コンクリートの場合にはその非均質性により、一般に無視できない程の大きさに発達することが知られている。ただし、FPZの拡大は、コンクリートの引張軟化特性により、ひびわれ先端前方の幅の狭い領域に局所化される。そこで、FPZを仮想のひびわれに置き換えて、その領域内部で起こっている破壊の物理的現象を仮想ひびわれ面にその開口に抵抗する力(結合応力と呼ばれる)が作用する力学モデルで近似した結合力モデル(cohesive force model, 以下CFMと略記する)のコンクリートへの適用性が注目されており、これまでにその適用妥当性を示唆する研究報告が多数なされている^{1)~9)}。

CFM解析には、一般に仮想ひびわれの開口変位(crack opening displacement, 以下CODと略記する)の関数として結合応力(以下、 σ と略記する)が与えられるので、一種の移動境界値問題として非線形解析が要求される。その際に、 σ -COD関係は区分的線形(折れ線)近似され、特にリニアあるいはバイリ

ニアの構成関数が利用される場合が多い。

本研究では、特に境界値問題に対してその有効性が最大限に発揮される数値解法である境界要素法(boundary element method, 以下BEMと略記する)を用いた結合力モデルの非線形解析手法の定式について述べ、いくつかの解析例を示す。

2. 解析の概要

ここで利用したBEMは、基本解の重ね合わせの原理に基づく間接BEMであり、基本プログラムは平居により開発されたものを用いた⁹⁾。基本解として、無限板及び、半無限板の無限縁の一部に線形分布荷重が作用するときの2種類の応力・変位場を用い、問題の境界条件の再現性にすぐれた基本解を適宜使い分けることによって、高精度の解析を可能にしている。また、この解法は西谷による体積法と原理的には同系列のものであり、特にひびわれ先端の応力特異場の解析に対して有効であることが知られている⁷⁾。

CFMの基礎概念を図-1に示す。このモデルの解析の要点は、次の2点に集約される: 1) 仮想ひびわれ面にその開口変位に依存した σ が作用すること(ただし、開口変位によらず一定の σ が作用するモデルを特にDugdaleモデルと呼び、この場合には線形弾性解析で扱える)、2) 仮想ひびわれ先端で応力の連続条件が満足されること。

要件1)について、ここでは、仮想ひびわれ面上の境界要素(以下、仮想ひびわれ要素と呼ぶ)に、その中央点のCODに対応する σ が等分布で作用するもの

平成4年7月13日受付

* 助教授 工博 建築学教室

とする(図-2参照)。この近似の利点は、後述するよ
うに、通常の反復による収束計算を行わなくても、一
度のマトリックス計算により解が求められる点にあり、
また要素分割をある程度細かくすることにより、近似
性を向上させることが出来る。なお、一定要素を用い
る場合には、この近似は必然的なものになる。

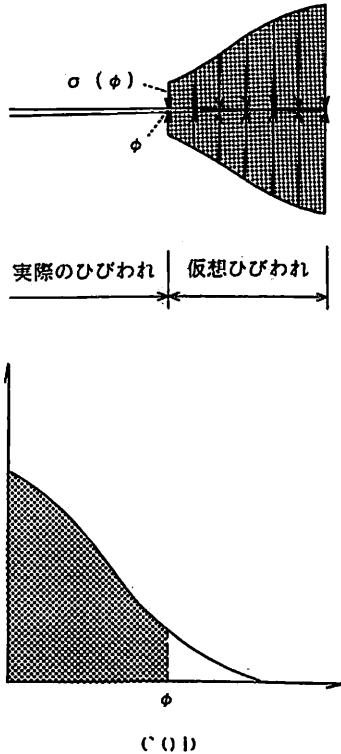


図-1 結合力モデルの基礎概念

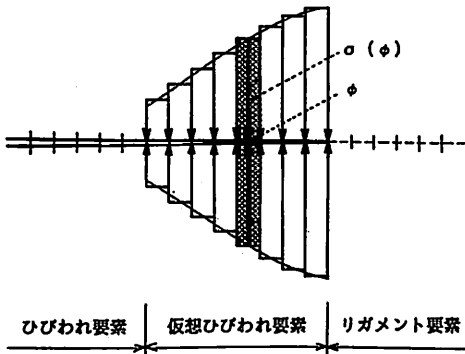


図-2 仮想ひびわれ要素に作用する結合応力分布の近似

要件2) について、既報の解析では、仮想ひびわれ
先端近傍の応力(その際、応力を求める点の選定は、
解析者の主観的判断による場合が多い)が COD が 0
のときの σ (通常、コンクリートの引張強度が採用され
る)に一致するという条件により、間接的に満足させ
ている。この場合には、仮想ひびわれ先端近傍の要素
分割や応力を求める点の選定に解析結果が少なからず
影響されることが認められている。厳密には、仮想ひ
びわれ先端で応力の特異性を生じない条件、即ちその
先端の応力拡大係数が 0 になるという条件により満足
されるべきものであり、それにより上記の問題点が解
決される。本解析では、厳密な方法を採用した。

3. 解析方法

以下では、図-3 に示す片側にひびわれをもつはり
の 3 点曲げ(スパン・高さ比=3)を一例に、非線形
解析の定式について述べる。

1) 仮想ひびわれ先端での応力の連続条件により、

$$K_{IP} = \sum_{j=1}^n K_{Uj} \tag{1}$$

ただし、

$$K_{IP} = \sigma_b \sqrt{a + \omega} Y_{IP} \tag{2}$$

$$K_{Uj} = \sigma_j \sqrt{a + \omega} Y_{Uj} \tag{3}$$

ここに、 K_{IP} : 荷重 P が作用するときの仮想ひびわれ
先端の応力拡大係数、 σ_b : 公称曲げ応力 [$= 3PL / 2BW^2$],
 B : はり幅、 W : はりせい、 L : スパン長
さ、 a : 実際のひびわれ長さ、 ω : 仮想ひびわれ長さ、
 Y_{IP} : K_{IP} に関する形状関数、 σ_j : 仮想ひびわれ要素 j
($j = 1 \sim n$, n : 仮想ひびわれ要素総数)に作用する結
合応力、 K_{Uj} : 仮想ひびわれ要素 j に σ_j と同値の等分布
応力がひびわれの開口方向に作用するときの仮想ひび
われ先端の応力拡大係数、 Y_{Uj} : K_{Uj} に関する形状関
数。

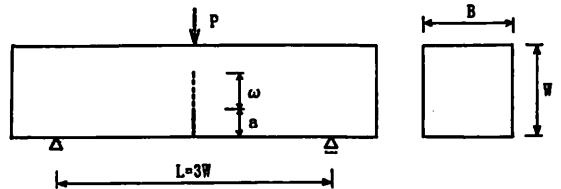


図-3 片側にひびわれをもつはりの 3 点曲げ
(スパン・高さ比=3)

$$\therefore \sigma_b \sqrt{a+\omega} Y_{IP} = \sum_{j=1}^n \sigma_j \sqrt{a+\omega} Y_{Uj}$$

$$\therefore \sigma_b = \sum_{j=1}^n (Y_{Uj}/Y_{IP}) \sigma_j$$

$$= \sum_{j=1}^n K_j \sigma_j$$

ただし、 $k_j = Y_{Uj}/Y_{IP}$ とおく。

上式に、 $\sigma_b = 3PL/2BW^2$ を代入して

$$P/B = (2W^2/3L) \sum_{j=1}^n k_j \sigma_j \tag{4}$$

ここで、上記の k_j は、応力拡大係数に関する一種の影響係数とみなせるものであり、表-1にBEMによる解析結果を示す。ただし、応力拡大係数の解析には直接変位法を用いた。また、仮想ひびわれ要素長さはすべて $0.05W$ 一定として、要素番号は実際のひびわれ先端から数えるものとする。

2) 仮想ひびわれ要素 i の中央点での開口変位 ϕ_i は、次式で与えられる。

$$(E/W)\phi_i = \sum_{j=1}^n (-\phi_{Uj}\sigma_j) + \phi_{IP}(P/B) \tag{5}$$

ここに、 E :ヤング係数、 ϕ_{Uj} :要素 j に単位の対の等分布応力がひびわれの開口方向に作用するときの要素 i の中央点での開口変位(ただし、 $E=1, W=1$ とする)、 ϕ_{IP} :単位の荷重が作用するときの要素 i の中央点での開口変位(ただし、 $E=1, W=1$ とする)。

ここで、上記の ϕ_{Uj}, ϕ_{IP} は、CODに関する一種の影響係数とみなせるものであり、表-1にBEMによる解析結果を併記している。

3) ここで、(5)式に(4)式を代入して、

$$\sum_{j=1}^n (-\phi_{Uj} + \phi_{IP}(2W^2/3L)k_j)\sigma_j = (E/W)\phi_i \tag{6}$$

いま、簡単のため、図-4に示すように、リニア-の構成関数を仮定し、その軟化勾配を α とすると、

$$\phi_i = (f_i - \sigma_i)/\alpha$$

また、

$$\alpha = f_i^2/2G_f$$

ここに、 f_i :引張強度、 G_f :破壊エネルギーあるいは限界 J 積分(σ -COD曲線下の全面積)。

従って、

$$(E/W)\phi_i = (2EG_f/Wf_i^2)(f_i - \sigma_i) \tag{7}$$

ここで、(7)式を(6)式に代入して

$$\sum_{j=1}^n \{-\phi_{Uj} + \phi_{IP}(2BW^2/3L)k_j +$$

$$(2EG_f/Wf_i^2)\delta_{ij}\}\sigma_j = 2EG_f/Wf_i \tag{8}$$

ここに、 δ_{ij} :クロネッカーのデルタ関数。

4) 従って、(8)式の左辺の σ_j に付く係数を A_{ij} 、右辺の定数を B_i と表示すれば、次式に示すマトリックスが得られ、その解を求めることにより、 σ 分布が得られる。

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{Bmatrix} \tag{9}$$

ただし、 $B_1 = \dots = B_n = 2EG_f/Wf_i$ 。

また、荷重 P 、要素 i の開口変位 ϕ_i 及び求めたい点の変位 u は、それぞれ次式により求められる。

$$P = (2BW^2/3L) \sum_{j=1}^n k_j \sigma_j$$

$$\phi_i = (W/E) \left\{ \sum_{j=1}^n (-\phi_{Uj}\sigma_j) + \phi_{IP}(P/B) \right\}$$

$$u = (W/E) \left\{ \sum_{j=1}^n (-u_j\sigma_j) + u_P(P/B) \right\} \tag{10}$$

ここに、 u_j :要素 j に単位の対の等分布応力がひびわれの開口方向に作用するときの求めたい点の変位(ただし、 $E=1, W=1$ とする)、 u_P :単位の荷重が作用するときの求めたい点の変位(ただし、 $E=1, W=1$ とする)。

ここでは、変位としてひびわれ肩口開口変位(crack mouth displacement, 以下CMDと略記する)について、 u_j 及び u_P を求めた。

ところで、要素 k の開口変位 ϕ_k が限界COD(ϕ_c)を超える場合、即ち $\phi_k > \phi_c (=2G_f/f_i)$ のときには、 $\sigma_1 = \dots = \sigma_k = 0$ だから、要素 $k+1 \sim n$ に作用する結合応力 $\sigma_{k+1} \sim \sigma_n$ は、次のマトリックスの解により求められる。

$$\begin{bmatrix} A_{k+1,k+1} & \dots & A_{k+1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n,k+1} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{k+1} \\ \vdots \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_{k+1} \\ \vdots \\ B_n \end{Bmatrix} \tag{11}$$

ただし、 $B_{k+1} = \dots = B_n = 2EG_f/Wf_i$ 。

また、そのときの荷重 P 、要素 i の開口変位 ϕ_i 及び求めたい点の変位 u は、(10)式において $j = k+1 \sim n$ について総和をとればよい。

以上の解析手順は、 σ -COD関係が任意の区分的線形関数で与えられる場合も同様であるが、ここでは、図-5に示すリニア-及びバイリニア-の構成関数に

表-1 BEMによる影響係数の解析結果

<u>$\omega/W=0.05$</u>				
k1=0.3858704	$\phi 1P=0.263764$	$\phi 1,1=0.1739984$		
<u>$\omega/W=0.10$</u>				
k1=0.1796225	$\phi 1P=0.537826$	$\phi 1,1=0.311586$	$\phi 1,2=0.1321624$	
k2=0.3404235	$\phi 2P=0.30227$	$\phi 2,1=0.139304$	$\phi 2,2=0.1758$	
<u>$\omega/W=0.15$</u>				
k1=0.1699321	$\phi 1P=0.839524$	$\phi 1,1=0.432996$	$\phi 1,2=0.267074$	$\phi 1,3=0.1277732$
k2=0.1619273	$\phi 2P=0.624584$	$\phi 2,1=0.269034$	$\phi 2,2=0.320048$	$\phi 2,3=0.1361916$
k3=0.2984703	$\phi 3P=0.349072$	$\phi 3,1=0.1382034$	$\phi 3,2=0.1439498$	$\phi 3,3=0.1780126$
<u>$\omega/W=0.20$</u>				
k1=0.1686207	$\phi 1P=1.224216$	$\phi 1,1=0.57967$	$\phi 1,2=0.407208$	$\phi 1,3=0.280866$
k2=0.1547777	$\phi 2P=0.990896$	$\phi 2,1=0.408678$	$\phi 2,2=0.453422$	$\phi 2,3=0.281622$
k3=0.1453698	$\phi 3P=0.7334$	$\phi 3,1=0.284716$	$\phi 3,2=0.283888$	$\phi 3,3=0.33062$
k4=0.2593937	$\phi 4P=0.40751$	$\phi 4,1=0.1456048$	$\phi 4,2=0.1462514$	$\phi 4,3=0.1496762$
	$\phi 1,4=0.1403454$			
	$\phi 2,4=0.1346086$			
	$\phi 3,4=0.141163$			
	$\phi 4,4=0.180709$			
<u>$\omega/W=0.25$</u>				
k1=0.1691874	$\phi 1P=1.746494$	$\phi 1,1=0.77646$	$\phi 1,2=0.589222$	$\phi 1,3=0.452458$
k2=0.1547874	$\phi 2P=1.473694$	$\phi 2,1=0.590592$	$\phi 2,2=0.62166$	$\phi 2,3=0.440184$
k3=0.410517	$\phi 3P=1.187068$	$\phi 3,1=0.455656$	$\phi 3,2=0.441958$	$\phi 3,3=0.479546$
k4=0.1298191	$\phi 4P=0.873678$	$\phi 4,1=0.330252$	$\phi 4,2=0.308672$	$\phi 4,3=0.30269$
k5=0.2230148	$\phi 5P=0.482226$	$\phi 5,1=0.1816448$	$\phi 5,2=0.167441$	$\phi 5,3=0.1563294$
	$\phi 1,4=0.324092$	$\phi 1,5=0.162342$		
	$\phi 2,4=0.30412$	$\phi 2,5=0.1510636$		
	$\phi 3,4=0.300044$	$\phi 3,5=0.1431102$		
	$\phi 4,4=0.343884$	$\phi 4,5=0.1472946$		
	$\phi 5,4=0.1567904$	$\phi 5,5=0.1840046$		

*連続

$\omega/W=0.30$

k1=0.1714227	$\phi 1P=2.49006$	$\phi 1,1=1.058312$	$\phi 1,2=0.847164$	$\phi 1,3=0.688456$
k2=0.156333	$\phi 2P=2.15438$	$\phi 2,1=0.848626$	$\phi 2,2=0.857796$	$\phi 2,3=0.656218$
k3=0.1416531	$\phi 3P=1.809652$	$\phi 3,1=0.691678$	$\phi 3,2=0.657944$	$\phi 3,3=0.677126$
k4=0.1270028	$\phi 4P=1.449956$	$\phi 4,1=0.548742$	$\phi 4,2=0.508606$	$\phi 4,3=0.485566$
k5=0.1151415	$\phi 5P=1.060344$	$\phi 5,1=0.400844$	$\phi 5,2=0.368018$	$\phi 5,3=0.339784$
k6=0.189162	$\phi 6P=0.58061$	$\phi 6,1=0.220584$	$\phi 6,2=0.20164$	$\phi 6,3=0.1839226$
$\phi 1,4=0.54321$	$\phi 1,5=0.391474$	$\phi 1,6=0.194282$		
$\phi 2,4=0.50466$	$\phi 2,5=0.360494$	$\phi 2,6=0.1788398$		
$\phi 3,4=0.483406$	$\phi 3,5=0.33427$	$\phi 3,6=0.1647488$		
$\phi 4,4=0.513538$	$\phi 4,5=0.32377$	$\phi 4,6=0.1538992$		
$\phi 5,4=0.326956$	$\phi 5,5=0.360836$	$\phi 5,6=0.1550208$		
$\phi 6,4=0.169195$	$\phi 6,5=0.16579$	$\phi 6,6=0.188119$		

 $\omega/W=0.35$

k1=0.1745381	$\phi 1P=3.59944$	$\phi 1,1=1.484998$	$\phi 1,2=1.236476$	$\phi 1,3=1.041508$
k2=0.1591336	$\phi 2P=3.16722$	$\phi 2,1=1.238216$	$\phi 2,2=1.213262$	$\phi 2,3=0.978568$
k3=0.1439291	$\phi 3P=2.72868$	$\phi 3,1=1.045214$	$\phi 3,2=0.980512$	$\phi 3,3=0.96964$
k4=0.1290218	$\phi 4P=2.2806$	$\phi 4,1=0.86832$	$\phi 4,2=0.80019$	$\phi 4,3=0.749974$
k5=0.1140548	$\phi 5P=1.816264$	$\phi 5,1=0.691718$	$\phi 5,2=0.633412$	$\phi 5,3=0.580434$
k6=0.1011954	$\phi 6P=1.318226$	$\phi 6,1=0.504444$	$\phi 6,2=0.460636$	$\phi 6,3=0.418766$
k7=0.1576275	$\phi 7P=0.715046$	$\phi 7,1=0.276022$	$\phi 7,2=0.251798$	$\phi 7,3=0.228152$
$\phi 1,4=0.862322$	$\phi 1,5=0.682626$	$\phi 1,6=0.490296$	$\phi 1,7=0.239472$	
$\phi 2,4=0.796008$	$\phi 2,5=0.626274$	$\phi 2,6=0.4487778$	$\phi 2,7=0.219636$	
$\phi 3,4=0.74777$	$\phi 3,5=0.575388$	$\phi 3,6=0.409316$	$\phi 3,7=0.200468$	
$\phi 4,4=0.752482$	$\phi 4,5=0.54165$	$\phi 4,6=0.374506$	$\phi 4,7=0.182605$	
$\phi 5,4=0.544408$	$\phi 5,5=0.559048$	$\phi 5,6=0.35524$	$\phi 5,7=0.1678972$	
$\phi 6,4=0.381382$	$\phi 6,5=0.359158$	$\phi 6,6=0.383134$	$\phi 6,7=0.1649672$	
$\phi 7,4=0.205674$	$\phi 7,5=0.1860524$	$\phi 7,6=0.1774828$	$\phi 7,7=0.1933524$	

* 連続

$\omega/W=0.40$

k1=0.1782762	ϕ 1P=5.34622	ϕ 1,1=2.1698	ϕ 1,2=1.861392	ϕ 1,3=1.607238
k2=0.1627603	ϕ 2P=4.76254	ϕ 2,1=1.863666	ϕ 2,2=1.784026	ϕ 2,3=1.495274
k3=0.1473276	ϕ 3P=4.1742	ϕ 3,1=1.611994	ϕ 3,2=1.497738	ϕ 3,3=1.437878
k4=0.1320351	ϕ 4P=3.57944	ϕ 4,1=1.377644	ϕ 4,2=1.264984	ϕ 4,3=1.170752
k5=0.1169374	ϕ 5P=2.97472	ϕ 5,1=1.146064	ϕ 5,2=1.04804	ϕ 5,3=0.955798
k6=0.1017268	ϕ 6P=2.35228	ϕ 6,1=0.91009	ϕ 6,2=0.830822	ϕ 6,3=0.753898
k7=0.0880141	ϕ 7P=1.691874	ϕ 7,1=0.659294	ϕ 7,2=0.601576	ϕ 7,3=0.544806
k8=0.1285117	ϕ 8P=0.906698	ϕ 8,1=0.357094	ϕ 8,2=0.32595	ϕ 8,3=0.295096
ϕ 1,4=1.370188	ϕ 1,5=1.135374	ϕ 1,6=0.895186	ϕ 1,7=0.637436	ϕ 1,8=0.304634
ϕ 2,4=1.259862	ϕ 2,5=1.039776	ϕ 2,6=0.818532	ϕ 2,7=0.582778	ϕ 2,8=0.279282
ϕ 3,4=1.16811	ϕ 3,5=0.950088	ϕ 3,6=0.744326	ϕ 3,7=0.529162	ϕ 3,8=0.254288
ϕ 4,4=1.130214	ϕ 4,5=0.878346	ϕ 4,6=0.675486	ϕ 4,7=0.477526	ϕ 4,8=0.229926
ϕ 5,4=0.881366	ϕ 5,5=0.859382	ϕ 5,6=0.623652	ϕ 5,7=0.43044	ϕ 5,8=0.206814
ϕ 6,4=0.68222	ϕ 6,5=0.627276	ϕ 6,6=0.622672	ϕ 6,7=0.398694	ϕ 6,8=0.1867578
ϕ 7,4=0.489922	ϕ 7,5=0.439364	ϕ 7,6=0.403728	ϕ 7,7=0.413622	ϕ 7,8=0.1782458
ϕ 8,4=0.264786	ϕ 8,5=0.23556	ϕ 8,6=0.20906	ϕ 8,7=0.1932566	ϕ 8,8=0.200254

*連続

$\omega/W=0.45$

k1=0.1822329	$\phi 1P=8.2898$	$\phi 1,1=3.34834$	$\phi 1,2=2.93856$	$\phi 1,3=2.58348$
k2=0.1667221	$\phi 2P=7.45528$	$\phi 2,1=2.94186$	$\phi 2,2=2.76948$	$\phi 2,3=2.3884$
k3=0.1512427	$\phi 3P=6.6173$	$\phi 3,1=2.5903$	$\phi 3,2=2.3919$	$\phi 3,3=2.24828$
k4=0.1358211	$\phi 4P=5.77482$	$\phi 4,1=2.25684$	$\phi 4,2=2.06856$	$\phi 4,3=1.899066$
k5=0.1204825	$\phi 5P=4.926$	$\phi 5,1=1.927606$	$\phi 5,2=1.262378$	$\phi 5,3=1.603236$
k6=0.1052645	$\phi 6P=4.06686$	$\phi 6,1=1.596952$	$\phi 6,2=1.458632$	$\phi 6,3=1.322922$
k7=0.0898898	$\phi 7P=3.18876$	$\phi 7,1=1.259102$	$\phi 7,2=1.149828$	$\phi 7,3=1.041736$
k8=0.0755025	$\phi 8P=2.26764$	$\phi 8,1=0.90259$	$\phi 8,2=0.824574$	$\phi 8,3=0.747052$
k9=0.1017489	$\phi 9P=1.19649$	$\phi 9,1=0.481496$	$\phi 9,2=0.440284$	$\phi 9,3=0.39922$

$\phi 1,4=2.24638$	$\phi 1,5=1.913044$	$\phi 1,6=1.577708$	$\phi 1,7=1.233732$	$\phi 1,8=0.867234$
$\phi 2,4=2.06146$	$\phi 2,5=1.751238$	$\phi 2,6=1.442938$	$\phi 2,7=1.128264$	$\phi 2,8=0.793634$
$\phi 3,4=1.895462$	$\phi 3,5=1.595652$	$\phi 3,6=1.310888$	$\phi 3,7=1.02407$	$\phi 3,8=0.720606$
$\phi 4,4=1.783898$	$\phi 4,5=1.458528$	$\phi 4,6=1.184656$	$\phi 4,7=0.92225$	$\phi 4,8=0.648558$
$\phi 5,4=1.462464$	$\phi 5,5=1.37514$	$\phi 5,6=1.07627$	$\phi 5,7=0.825712$	$\phi 5,8=0.57843$
$\phi 6,4=1.192948$	$\phi 6,5=1.080574$	$\phi 6,6=1.020462$	$\phi 6,7=0.746014$	$\phi 6,8=0.512726$
$\phi 7,4=0.935948$	$\phi 7,5=0.835238$	$\phi 7,6=0.751102$	$\phi 7,7=0.716836$	$\phi 7,8=0.462114$
$\phi 8,4=0.670456$	$\phi 8,5=0.595616$	$\phi 8,6=0.524986$	$\phi 8,7=0.46893$	$\phi 8,8=0.457624$
$\phi 9,4=0.358432$	$\phi 9,5=0.318122$	$\phi 9,6=0.278826$	$\phi 9,7=0.24207$	$\phi 9,8=0.215594$

$\phi 1,9=0.4026$
$\phi 2,9=0.369496$
$\phi 3,9=0.336596$
$\phi 4,9=0.304024$
$\phi 5,9=0.272048$
$\phi 6,9=0.241256$
$\phi 7,9=0.21339$
$\phi 8,9=0.1968064$
$\phi 9,9=0.20973$

*連続

$\omega/W=0.50$

k1=0.1863556	$\phi 1P=13.7238$	$\phi 1,1=5.57212$	$\phi 1,2=4.97548$	$\phi 1,3=4.43386$
k2=0.1709109	$\phi 2P=12.43758$	$\phi 2,1=4.98088$	$\phi 2,2=4.63718$	$\phi 2,3=4.08506$
k3=0.1554746	$\phi 3P=11.1487$	$\phi 3,1=4.44492$	$\phi 3,2=4.0907$	$\phi 3,3=3.79152$
k4=0.140058	$\phi 4P=9.8566$	$\phi 4,1=3.92758$	$\phi 4,2=3.59896$	$\phi 4,3=3.28934$
k5=0.1246675	$\phi 5P=8.56048$	$\phi 5,1=3.41542$	$\phi 5,2=3.12522$	$\phi 5,3=2.84132$
k6=0.1093266	$\phi 6P=7.25826$	$\phi 6,1=2.90358$	$\phi 6,2=2.65554$	$\phi 6,3=2.41026$
k7=0.0940387	$\phi 7P=5.94588$	$\phi 7,1=2.38816$	$\phi 7,2=2.18408$	$\phi 7,3=1.981334$
k8=0.0785811	$\phi 8P=4.61366$	$\phi 8,1=1.863576$	$\phi 8,2=1.704904$	$\phi 8,3=1.546848$
k9=0.06369	$\phi 9P=3.2334$	$\phi 9,1=1.316204$	$\phi 9,2=1.204968$	$\phi 9,3=1.093984$
k10=0.0774782	$\phi 10P=1.66956$	$\phi 10,1=0.687012$	$\phi 10,2=0.62966$	$\phi 10,3=0.572376$
$\phi 1,4=3.9108$	$\phi 1,5=3.39246$	$\phi 1,6=2.87406$	$\phi 1,7=2.35112$	$\phi 1,8=1.817002$
$\phi 2,4=3.58762$	$\phi 2,5=3.10778$	$\phi 2,6=2.63164$	$\phi 2,7=2.15286$	$\phi 2,8=1.66449$
$\phi 3,4=3.28364$	$\phi 3,5=2.82956$	$\phi 3,6=2.39212$	$\phi 3,7=1.956042$	$\phi 3,8=1.512694$
$\phi 4,4=3.03448$	$\phi 4,5=2.57014$	$\phi 4,6=2.15874$	$\phi 4,7=1.761864$	$\phi 4,8=1.36211$
$\phi 5,4=2.57616$	$\phi 5,5=2.3651$	$\phi 5,6=1.943764$	$\phi 5,7=1.573444$	$\phi 5,8=1.213846$
$\phi 6,4=2.17108$	$\phi 6,5=1.950038$	$\phi 6,6=1.78238$	$\phi 6,7=1.402742$	$\phi 6,8=1.070748$
$\phi 7,4=1.7812$	$\phi 7,5=1.586614$	$\phi 7,6=1.409552$	$\phi 7,7=1.284376$	$\phi 7,8=0.944284$
$\phi 8,4=1.38997$	$\phi 8,5=1.235246$	$\phi 8,6=1.085528$	$\phi 8,7=0.952074$	$\phi 8,8=0.868004$
$\phi 9,4=0.98349$	$\phi 9,5=0.873812$	$\phi 9,6=0.765832$	$\phi 9,7=0.661824$	$\phi 9,8=0.572028$
$\phi 10,4=0.515232$	$\phi 10,5=0.458306$	$\phi 10,6=0.401822$	$\phi 10,7=0.346226$	$\phi 10,8=0.29297$
$\phi 1,9=1.254484$	$\phi 1,10=0.559558$			
$\phi 2,9=1.150258$	$\phi 2,10=0.514488$			
$\phi 3,9=1.046358$	$\phi 3,10=0.46954$			
$\phi 4,9=0.94298$	$\phi 4,10=0.424768$			
$\phi 5,9=0.840452$	$\phi 5,10=0.380298$			
$\phi 6,9=0.73993$	$\phi 6,10=0.33637$			
$\phi 7,9=0.64358$	$\phi 7,10=0.29354$			
$\phi 8,9=0.562066$	$\phi 8,10=0.253494$			
$\phi 9,9=0.52596$	$\phi 9,10=0.224378$			
$\phi 10,9=0.249448$	$\phi 10,10=0.223498$			

*連続

$\omega/W=0.55$

k1=0.1905448	$\phi 1P=25.1666$	$\phi 1,1=10.35864$	$\phi 1,2=9.37044$	$\phi 1,3=8.4374$
k2=0.1751961	$\phi 2P=22.9558$	$\phi 2,1=9.38088$	$\phi 2,2=8.67724$	$\phi 2,3=7.76534$
k3=0.15985	$\phi 3P=20.7428$	$\phi 3,1=8.45862$	$\phi 3,2=7.7761$	$\phi 3,3=7.14874$
k4=0.144509	$\phi 4P=18.5277$	$\phi 4,1=7.55536$	$\phi 4,2=6.93002$	$\phi 4,3=6.3238$
k5=0.129171	$\phi 5P=16.31002$	$\phi 5,1=6.65792$	$\phi 5,2=6.10256$	$\phi 5,3=5.55358$
k6=0.1138474	$\phi 6P=14.0889$	$\phi 6,1=5.76192$	$\phi 6,2=5.28016$	$\phi 6,3=4.80126$
k7=0.098538413	$\phi 7P=11.84246$	$\phi 7,1=4.86438$	$\phi 7,2=4.45788$	$\phi 7,3=4.05278$
k8=0.083241429	$\phi 8P=9.627$	$\phi 8,1=3.96224$	$\phi 8,2=3.63204$	$\phi 8,3=3.30254$
k9=0.073151192	$\phi 9P=7.37226$	$\phi 9,1=3.04938$	$\phi 9,2=2.79652$	$\phi 9,3=2.544$
k10=0.052565875	$\phi 10P=5.06584$	$\phi 10,1=2.10996$	$\phi 10,2=1.936448$	$\phi 10,3=1.763036$
k11=0.055833881	$\phi 11P=2.5336$	$\phi 11,1=1.066058$	$\phi 11,2=0.979502$	$\phi 11,3=0.892974$

$\phi 1,4=7.52338$	$\phi 1,5=6.61466$	$\phi 1,6=5.70716$	$\phi 1,7=4.79736$	$\phi 1,8=3.88164$
$\phi 2,4=6.90854$	$\phi 2,5=6.06986$	$\phi 2,6=5.23604$	$\phi 2,7=4.40166$	$\phi 2,8=3.5625$
$\phi 3,4=6.31308$	$\phi 3,5=5.53168$	$\phi 3,6=4.76798$	$\phi 3,7=4.00754$	$\phi 3,8=3.2442$
$\phi 4,4=5.7727$	$\phi 4,5=5.01254$	$\phi 4,6=4.30628$	$\phi 4,7=3.61624$	$\phi 4,8=2.92726$
$\phi 5,4=5.02368$	$\phi 5,5=4.54822$	$\phi 5,6=3.86336$	$\phi 5,7=3.23104$	$\phi 5,8=2.61292$
$\phi 6,4=4.32872$	$\phi 6,5=3.874668$	$\phi 6,6=3.47472$	$\phi 6,7=2.86412$	$\phi 6,8=2.30424$
$\phi 7,4=3.65052$	$\phi 7,5=3.25408$	$\phi 7,6=2.87584$	$\phi 7,7=2.5506$	$\phi 7,8=2.01308$
$\phi 8,4=2.9744$	$\phi 8,5=2.64866$	$\phi 8,6=2.32846$	$\phi 8,7=2.02548$	$\phi 8,8=1.774078$
$\phi 9,4=2.29214$	$\phi 9,5=2.04128$	$\phi 9,6=1.792558$	$\phi 9,7=1.548582$	$\phi 9,8=1.320604$
$\phi 10,4=1.589896$	$\phi 10,5=1.417128$	$\phi 10,6=1.24515$	$\phi 10,7=1.074676$	$\phi 10,8=0.907966$
$\phi 11,4=0.806516$	$\phi 11,5=0.72014$	$\phi 11,6=0.633966$	$\phi 11,7=0.548132$	$\phi 11,8=0.463064$

$\phi 1,9=2.9523$	$\phi 1,10=1.98762$	$\phi 1,11=0.836284$
$\phi 2,9=2.71102$	$\phi 2,10=1.82689$	$\phi 2,11=0.77602$
$\phi 3,9=2.47018$	$\phi 3,10=1.666354$	$\phi 3,11=0.705026$
$\phi 4,9=2.23$	$\phi 4,10=1.506096$	$\phi 4,11=0.639528$
$\phi 5,9=1.990968$	$\phi 5,10=1.34633$	$\phi 5,11=0.574186$
$\phi 6,9=1.754172$	$\phi 6,10=1.187424$	$\phi 6,11=0.509102$
$\phi 7,9=1.522368$	$\phi 7,10=1.030208$	$\phi 7,11=0.44448$
$\phi 8,9=1.307014$	$\phi 8,10=0.877094$	$\phi 8,11=0.380856$
$\phi 9,9=1.141364$	$\phi 9,10=0.738428$	$\phi 9,11=0.319798$
$\phi 10,9=0.754968$	$\phi 10,10=0.644354$	$\phi 10,11=0.269236$
$\phi 11,9=0.380064$	$\phi 11,10=0.30608$	$\phi 11,11=0.245208$

*連続

$\omega/W=0.60$

k1=0.1947436	$\phi 1P=54.9152$	$\phi 1,1=23.0274$	$\phi 1,2=21.0728$	$\phi 1,3=19.1283$
k2=0.1795107	$\phi 2P=50.3724$	$\phi 2,1=21.0984$	$\phi 2,2=19.46272$	$\phi 2,3=17.61866$
k3=0.1642716	$\phi 3P=45.828$	$\phi 3,1=19.18018$	$\phi 3,2=17.64488$	$\phi 3,3=16.16464$
k4=0.1490392	$\phi 4P=41.2816$	$\phi 4,1=17.28118$	$\phi 4,2=15.8823$	$\phi 4,3=14.50248$
k5=0.1338015	$\phi 5P=36.734$	$\phi 5,1=15.38846$	$\phi 5,2=14.1388$	$\phi 5,3=12.89546$
k6=0.1185697	$\phi 6P=32.1846$	$\phi 6,1=13.49794$	$\phi 6,2=12.40104$	$\phi 6,3=11.30964$
k7=0.1033353	$\phi 7P=27.6326$	$\phi 7,1=11.60698$	$\phi 7,2=10.66444$	$\phi 7,3=9.72324$
k8=0.0880998	$\phi 8P=23.0776$	$\phi 8,1=9.71404$	$\phi 8,2=8.92666$	$\phi 8,3=8.13994$
k9=0.0728516	$\phi 9P=18.5155$	$\phi 9,1=7.81568$	$\phi 9,2=7.18412$	$\phi 9,3=6.55184$
k10=0.0574632	$\phi 10P=13.93858$	$\phi 10,1=5.90656$	$\phi 10,2=5.4315$	$\phi 10,3=4.95656$
k11=0.0421153	$\phi 11P=9.31412$	$\phi 11,1=3.96934$	$\phi 11,2=3.65242$	$\phi 11,3=3.33552$
k12=0.0370018	$\phi 12P=4.42228$	$\phi 12,1=1.901972$	$\phi 12,2=1.75196$	$\phi 12,3=1.601916$
$\phi 1,4=17.20336$	$\phi 1,5=15.28384$	$\phi 1,6=13.36652$	$\phi 1,7=11.44812$	$\phi 1,8=9.5266$
$\phi 2,4=15.8302$	$\phi 2,5=14.05996$	$\phi 2,6=12.2955$	$\phi 2,7=10.53156$	$\phi 2,8=8.7655$
$\phi 3,4=14.47656$	$\phi 3,5=12.84284$	$\phi 3,6=11.22768$	$\phi 3,7=9.61674$	$\phi 3,8=8.0053$
$\phi 4,4=13.1782$	$\phi 4,5=11.64494$	$\phi 4,6=10.16634$	$\phi 4,7=8.70484$	$\phi 4,8=7.24656$
$\phi 5,4=11.65158$	$\phi 5,5=10.51208$	$\phi 5,6=9.12408$	$\phi 5,7=7.7993$	$\phi 5,8=6.49068$
$\phi 6,4=10.21954$	$\phi 6,5=9.15068$	$\phi 6,6=8.13654$	$\phi 6,7=6.91244$	$\phi 6,8=5.74076$
$\phi 7,4=8.78516$	$\phi 7,5=7.85294$	$\phi 7,6=6.93944$	$\phi 7,7=6.07956$	$\phi 7,8=5.00888$
$\phi 8,4=7.3548$	$\phi 8,5=6.57212$	$\phi 8,6=5.79542$	$\phi 8,7=5.03644$	$\phi 8,8=4.33032$
$\phi 9,4=5.9224$	$\phi 9,5=5.29302$	$\phi 9,6=4.66612$	$\phi 9,7=4.04438$	$\phi 9,8=3.43966$
$\phi 10,4=4.48202$	$\phi 10,5=4.00788$	$\phi 10,6=3.53482$	$\phi 10,7=3.06358$	$\phi 10,8=2.5969$
$\phi 11,4=3.01878$	$\phi 11,5=2.70216$	$\phi 11,6=2.38594$	$\phi 11,7=2.07028$	$\phi 11,8=1.755982$
$\phi 12,4=1.451942$	$\phi 12,5=1.30196$	$\phi 12,6=1.15209$	$\phi 12,7=1.002312$	$\phi 12,8=0.85279$
$\phi 1,9=7.59826$	$\phi 1,10=5.65454$	$\phi 1,11=3.66916$	$\phi 1,12=1.406942$	
$\phi 2,9=6.9933$	$\phi 2,10=5.20682$	$\phi 2,11=3.38134$	$\phi 2,12=1.299528$	
$\phi 3,9=6.38886$	$\phi 3,10=4.75936$	$\phi 3,11=3.09366$	$\phi 3,12=1.192166$	
$\phi 4,9=5.78514$	$\phi 4,10=4.31224$	$\phi 4,11=2.8061$	$\phi 4,12=1.084848$	
$\phi 5,9=5.18278$	$\phi 5,10=3.86576$	$\phi 5,11=2.51882$	$\phi 5,12=0.977618$	
$\phi 6,9=4.58294$	$\phi 6,10=3.42034$	$\phi 6,11=2.23194$	$\phi 6,12=0.870502$	
$\phi 7,9=3.98848$	$\phi 7,10=2.97696$	$\phi 7,11=1.945786$	$\phi 7,12=0.763566$	
$\phi 8,9=3.41144$	$\phi 8,10=2.53842$	$\phi 8,11=1.661194$	$\phi 8,12=0.657016$	
$\phi 9,9=2.88608$	$\phi 9,10=2.1159$	$\phi 9,11=1.380352$	$\phi 9,12=0.551258$	
$\phi 10,9=2.1458$	$\phi 10,10=1.742578$	$\phi 10,11=1.113474$	$\phi 10,12=0.447758$	
$\phi 11,9=1.445106$	$\phi 11,10=1.147258$	$\phi 11,11=0.89008$	$\phi 11,12=0.354062$	
$\phi 12,9=0.703852$	$\phi 12,10=0.556602$	$\phi 12,11=0.417416$	$\phi 12,12=0.284376$	

*連続

$\omega/W=0.65$

k1=0.199019555	$\phi 1P=161.8462$	$\phi 1,1=69.6904$	$\phi 1,2=64.0818$	$\phi 1,3=58.5278$
k2=0.183914665	$\phi 2P=149.1838$	$\phi 2,1=64.1784$	$\phi 2,2=59.2076$	$\phi 2,3=54.0282$
k3=0.168805181	$\phi 3P=136.521$	$\phi 3,1=58.7224$	$\phi 3,2=54.1262$	$\phi 3,3=49.5846$
k4=0.153700357	$\phi 4P=123.8566$	$\phi 4,1=53.2858$	$\phi 4,2=49.1$	$\phi 4,3=44.933$
k5=0.138592337	$\phi 5P=111.192$	$\phi 5,1=47.8562$	$\phi 5,2=44.0936$	$\phi 5,3=40.337$
k6=0.12348831	$\phi 6P=98.5272$	$\phi 6,1=42.4292$	$\phi 6,2=39.0934$	$\phi 6,3=35.76$
k7=0.108377754	$\phi 7P=85.8606$	$\phi 7,1=37.0022$	$\phi 7,2=34.0946$	$\phi 7,3=31.1882$
k8=0.0932649	$\phi 8P=73.1948$	$\phi 8,1=31.575$	$\phi 8,2=29.0964$	$\phi 8,3=26.6182$
k9=0.078144013	$\phi 9P=60.5264$	$\phi 9,1=26.1442$	$\phi 9,2=24.0952$	$\phi 9,3=22.046$
k10=0.063002227	$\phi 10P=47.8566$	$\phi 10,1=20.7088$	$\phi 10,2=19.0893$	$\phi 10,3=17.46984$
k11=0.047754247	$\phi 11P=35.1822$	$\phi 11,1=15.2639$	$\phi 11,2=14.07436$	$\phi 11,3=12.8847$
k12=0.032420432	$\phi 12P=22.4858$	$\phi 12,1=9.7964$	$\phi 12,2=9.03728$	$\phi 12,3=8.27802$
k13=0.021733953	$\phi 13P=9.52328$	$\phi 13,1=4.18328$	$\phi 13,2=3.86278$	$\phi 13,3=3.5422$

$\phi 1,4=52.994$	$\phi 1,5=47.465$	$\phi 1,6=41.9396$	$\phi 1,7=36.4128$	$\phi 1,8=30.8846$
$\phi 2,4=48.905$	$\phi 2,5=43.7994$	$\phi 2,6=38.7008$	$\phi 2,7=33.6026$	$\phi 2,8=28.5036$
$\phi 3,4=44.8358$	$\phi 3,5=40.1408$	$\phi 3,6=35.4656$	$\phi 3,7=30.7944$	$\phi 3,8=26.1238$
$\phi 4,4=40.822$	$\phi 4,5=36.5016$	$\phi 4,6=32.2368$	$\phi 4,7=27.989$	$\phi 4,8=23.7456$
$\phi 5,4=36.6004$	$\phi 5,5=32.198$	$\phi 5,6=29.0276$	$\phi 5,7=25.1904$	$\phi 5,8=21.3704$
$\phi 6,4=32.434$	$\phi 6,5=29.1258$	$\phi 6,6=25.8734$	$\phi 6,7=22.4108$	$\phi 6,8=19.00162$
$\phi 7,4=28.2852$	$\phi 7,5=25.3874$	$\phi 7,6=22.5098$	$\phi 7,7=19.6845$	$\phi 7,8=16.65098$
$\phi 8,4=24.142$	$\phi 8,5=21.668$	$\phi 8,6=19.20048$	$\phi 8,7=16.75066$	$\phi 8,8=14.35438$
$\phi 9,4=19.99824$	$\phi 9,5=17.95114$	$\phi 9,6=15.90702$	$\phi 9,7=13.86804$	$\phi 9,8=11.84664$
$\phi 10,4=15.85106$	$\phi 10,5=14.23242$	$\phi 10,6=12.6153$	$\phi 10,7=10.99994$	$\phi 10,8=9.38956$
$\phi 11,4=11.69546$	$\phi 11,5=10.50614$	$\phi 11,6=9.3175$	$\phi 11,7=8.12944$	$\phi 11,8=6.94304$
$\phi 12,4=7.519$	$\phi 12,5=6.75986$	$\phi 12,6=6.001$	$\phi 12,7=5.24222$	$\phi 12,8=4.4839$
$\phi 13,4=3.22172$	$\phi 13,5=2.90118$	$\phi 13,6=2.58074$	$\phi 13,7=2.26024$	$\phi 13,8=1.939802$

$\phi 1,9=25.3522$	$\phi 1,10=19.812$	$\phi 1,11=14.25716$	$\phi 1,12=8.6573$	$\phi 1,13=2.70236$
$\phi 2,9=23.4012$	$\phi 2,10=18.29128$	$\phi 2,11=13.16734$	$\phi 2,12=8.0006$	$\phi 2,13=2.50278$
$\phi 3,9=21.4508$	$\phi 3,10=16.77098$	$\phi 3,11=12.07776$	$\phi 3,12=7.34402$	$\phi 3,13=2.30326$
$\phi 4,9=19.50124$	$\phi 4,10=15.25102$	$\phi 4,11=10.98832$	$\phi 4,12=6.6875$	$\phi 4,13=2.10376$
$\phi 5,9=17.55326$	$\phi 5,10=13.73192$	$\phi 5,11=9.89132$	$\phi 5,12=6.03116$	$\phi 5,13=1.904316$
$\phi 6,9=15.60798$	$\phi 6,10=12.21408$	$\phi 6,11=8.81084$	$\phi 6,12=5.37504$	$\phi 6,13=1.704932$
$\phi 7,9=13.66826$	$\phi 7,10=10.69838$	$\phi 7,11=7.72322$	$\phi 7,12=4.71918$	$\phi 7,13=1.505596$
$\phi 8,9=11.74662$	$\phi 8,10=9.18806$	$\phi 8,11=6.63752$	$\phi 8,12=4.06394$	$\phi 8,13=1.306402$
$\phi 9,9=9.87742$	$\phi 9,10=7.69436$	$\phi 9,11=5.55604$	$\phi 9,12=3.40984$	$\phi 9,13=1.107388$
$\phi 10,9=7.7956$	$\phi 10,10=6.2517$	$\phi 10,11=4.48994$	$\phi 10,12=2.75894$	$\phi 10,13=0.908882$
$\phi 11,9=5.76066$	$\phi 11,10=4.59292$	$\phi 11,11=3.47172$	$\phi 11,12=2.12086$	$\phi 11,13=0.711952$
$\phi 12,9=3.72654$	$\phi 12,10=2.97192$	$\phi 12,11=2.2292$	$\phi 12,12=1.523846$	$\phi 12,13=0.523132$
$\phi 13,9=1.619456$	$\phi 13,10=1.299396$	$\phi 13,11=0.9804$	$\phi 13,12=0.667604$	$\phi 13,13=0.351626$

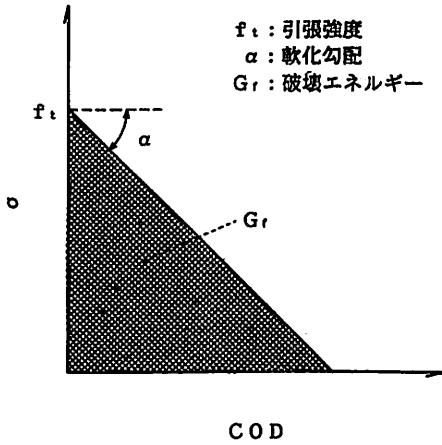


図-4 リニア引張軟化関数

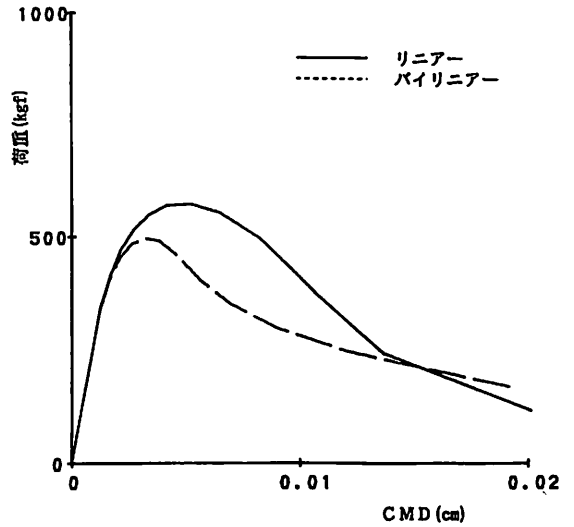


図-6(a) リニア及びバイリニア引張軟化関数による荷重-COD関係の計算例

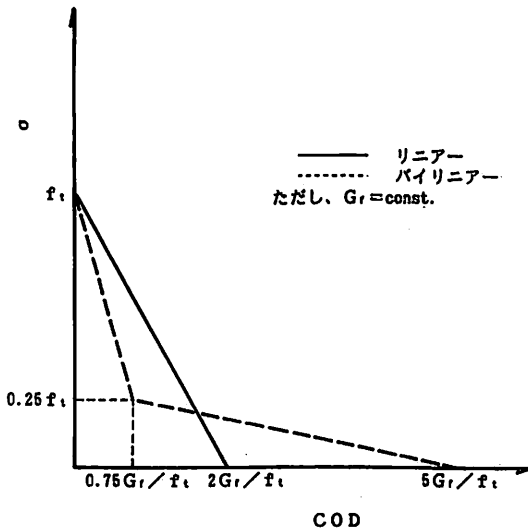


図-5 解析に用いた引張軟化関数

ついて解析プログラムを作成した。なお、高次リニア-の場合には、(8)式における δ_{ij} に付く係数と右辺の定数項が仮想ひびわれの COD に応じて変化するだけである。

4. 解析例

例題1)

$B = W = 10\text{cm}$, $L = 30\text{cm}$, $a = 3\text{cm}$ のはりの3点曲げについて、 $E = 3 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, $f_t = 30 \text{kgf/cm}^2$, $G_r = 0.1 \text{kgf/cm}$ としてリニア-及びバイリニ-

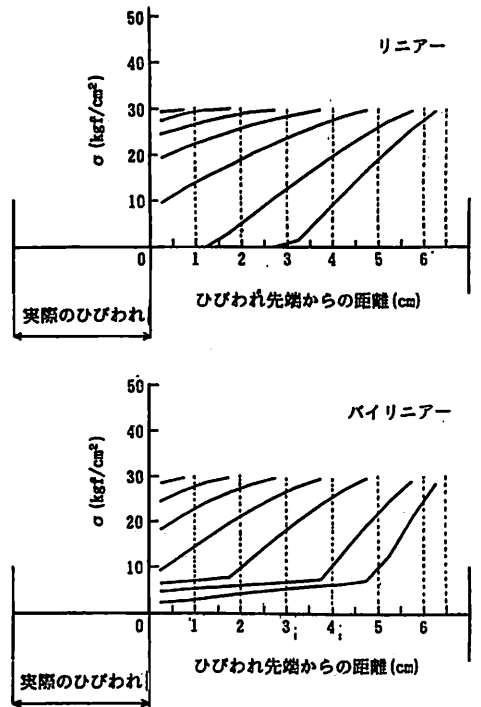


図-6(b) 仮想ひびわれ面上の結合応力分布の計算例

アの構成関数に対して計算された荷重-COD関係及び σ 分布を図-6に示す。この図から、バイリニア-の場合、構成関数の第1軟化勾配が大きいために、

リニアの場合に比べて最大荷重は小さく、その近傍の荷重-CMD 関係は尖頭的になる一方、荷重-CMD 関係の裾野の勾配は、仮想ひびわれ要素の一部が第2軟化勾配域に入るために緩やかになる傾向がみられる。また、仮想ひびわれ面上の σ 分布は、曲げ圧縮域の存在により、ひびわれの進展に伴い、前方に圧縮された形に移行する様子がわかる。

例題2)

はり寸法については例題1と同一で、 $E = 3 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, $f_t = 30 \text{kgf/cm}^2$ 一定とし、 G_f を0.01~1.0kgf/cmの範囲で変えた場合の、リニア及びバイリニアの構成関数に対して計算された荷重-CMD 関係を図-7に示す。この図から、 G_f が小さくなるほど、また G_f が同一でもバイリニアの方が最大荷重は小さく、その近傍の荷重-CMD 関係は尖頭的になり、引張強度が同一でも曲げ最大荷重は G_f 値や構成関数に依存して異なることがわかる。また、この場合 G_f が0.5kgf/cm以上では、仮想ひびわれ長さがリガメント長さの約93%に達した時点 ($w/W = 0.65$)でもひびわれの進展はみられず、バイリニアの場合には第2軟化勾配域にも達しておらず、そのためにリニアの場合に比べて最大荷重以降の下降域の勾配が急になっている。

例題3)

はり寸法については例題1と同一で、 $E = 3 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, $G_f = 0.1 \text{kgf/cm}$ 一定として、 f_t を10~

100kgf/cm²の範囲で変えた場合の、リニア及びバイリニアの構成関数に対して計算された荷重-CMD 関係を図-8に示す。この図から、 G_f が同一の場合、 f_t の小さい範囲で f_t の増加による曲げ最大荷重の増加が顕著であるのに対して、 f_t の大きい範囲では曲げ最大荷重の増加は頭打ちになる傾向がみられ、このことから、 f_t の増加に見合う G_f の増加が曲げ強さの改善に有効であることが予想される。

5. ま と め

本研究では、間接 BEM を用いた結合力モデルの非線形解析手法の定式について述べ、いくつかの解析例を示した。本解析では、与えられた問題に対して応力拡大係数、仮想ひびわれ要素の COD 及び求めたい点の変位に関する影響係数を BEM を用いて求めることにより、その後の解析は、仮想ひびわれ面にその開口変位に依存した結合応力が作用する条件と仮想ひびわれ先端で応力の特異性を生じない条件から誘導されるマトリックスの解を求める問題に帰着される。従って、与えられた問題に対して影響係数を求めるための準備計算には時間と手間を要するが、後は、任意の構成関数(ここでは、リニア及びバイリニアについての

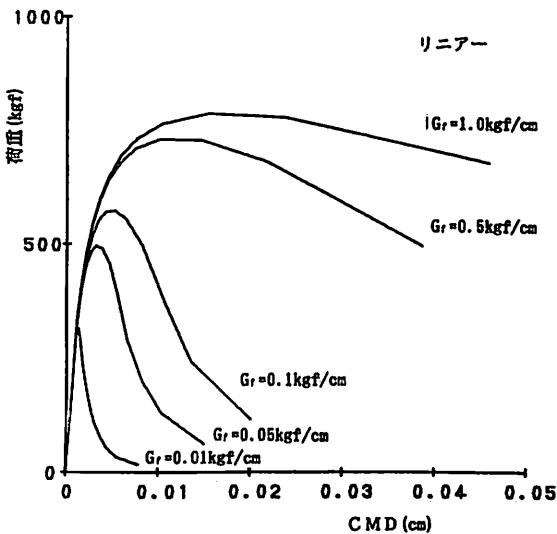


図-7(a) G_f の違いによる荷重-CMD 関係の計算例(リニア引張軟化関数)

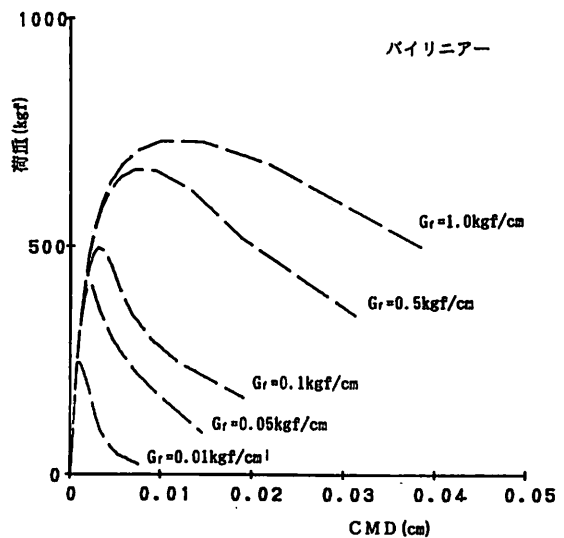


図-7(b) G_f の違いによる荷重-CMD 関係の計算例(バイリニア引張軟化関数)

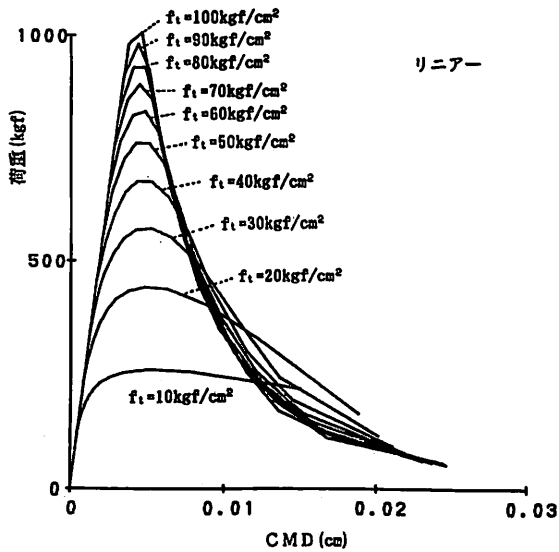


図-8(a) f_t の違いによる荷重-CMD関係の計算例 (リニア引張軟化関数)

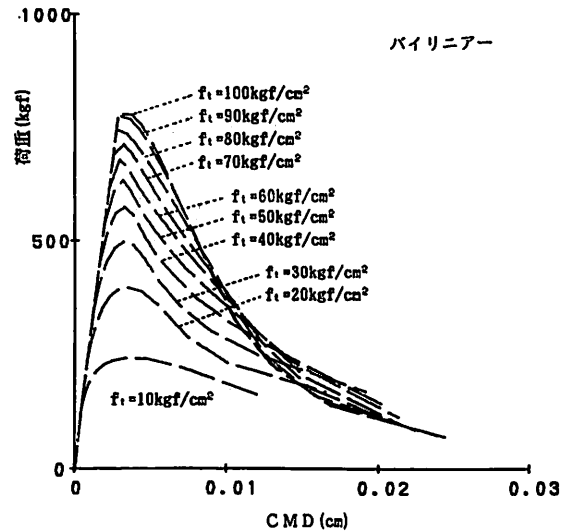


図-8(b) f_t の違いによる荷重-CMD関係の計算例 (バイリニア引張軟化関数)

み検討したが、高次リニアへの拡張は至って簡単である) に対して簡便かつ短時間に結合力モデルの非線形解析を行うことができる。

参考文献

- 1) A. Hillerborg et al.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research, Vol. 6, No. 6, pp. 773-782, 1976
- 2) J. G. Rots et al.: Smearred crack approach and fracture localization in concrete, HERON, Vol. 30, No. 1, 1985
- 3) 野村希晶ほか3名: 非線形破壊力学手法に基づく高強度コン

クリートの脆性化機構の考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp. 9-16, 1990

- 4) 大塚恵哲ほか3名: コンクリートの曲げ強度の推定に関する破壊力学的検討, コンクリート工学論文集, Vol. 3, No. 1, pp. 57-62, 1992
- 5) 日本コンクリート工学協会, コンクリートの破壊力学研究委員会, コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム論文集, 1990
- 6) 平居孝之著: 弾性解析プログラムとその使い方-境界要素法ソフト-, 理工図書, 1986
- 7) 村上 聖ほか2名: 境界要素法の破壊力学問題への適用-J積分法による応力拡大係数の解析-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第404号, pp. 25-31, 1989