

論文 ポリプロピレン短繊維補強セメント材料板の曲げ挙動に関する考察

山田寛次^{*1}・石山 智^{*2}

要旨：ポリプロピレン短繊維のように弾性率の低い短繊維で補強されたセメント系複合材料は、曲げ試験時、初期ひび割れ後にスナップバック挙動を示すことがある。ポリプロピレン短繊維補強量の異なる 4 種類の押出成形セメント材料を用いて、ファイバー要素モデルがスナップバック挙動をどの程度予測できるか検討した。解析によって得られた荷重-変位関係は、曲げ試験結果を概ね説明するものであった。

キーワード：ファイバー要素, 短繊維補強, スナップバック, 曲げ挙動, ポリプロピレン繊維

1. はじめに

ポリプロピレン短繊維のように弾性率の低い短繊維で補強されたセメント系複合材料は、通常の方法で曲げ試験をした時、初期ひび割れ後にピーク荷重から不連続に除荷する現象を起こすことが多い。この原因がスナップバック現象であり、局所化したひび割れによる変形と、除荷による歪みの解放とが同時に起きることにより、試験条件に依存して現れると考えられている。

著者は既往の研究¹⁾により、通常、弧長法²⁾または座標傾斜法³⁾でしかできないと考えられていた挙動解析が、古典的な解析手法であるファイバー要素法⁴⁾を用いることにより、可能であることを示した。

本研究では、より多くの試験片によって、スナップバック現象を含む挙動の解析がファイバー要素法で可能であることを検証した。

2. 解析

2.1 解析手法

ファイバー要素法は一次元ファイバー要素による解析手法である。通常、モデル化する部材の端部から端部まで一本のファイバー要素が、高さ方向に積層したと考えるため、単純な形状を持ち、ファイバー要素の応力-歪み関係など

の物性値、断面内と長さ方向の歪み分布が適切にモデル化できなければ、解析はできない。しかし、逆に、そのような条件が整った場合には、ファイバー要素の物性値を基に部材のマクロな力学挙動が極めて直感的、かつ明快に説明できる。著者はこれまで、補強筋を有しひび割れが分散する梁部材の曲げ挙動⁵⁾、引張材のテンションスティフニング挙動⁶⁾、連続補強筋がない薄板の曲げ挙動⁷⁾の説明に同解析法を用いた。また著者以外でも古くは Craig ら⁸⁾、新しくは中島ら⁹⁾が用いている。ファイバー要素モデルを用いた解析方法については既往の論文⁴⁾を参照されたい。

2.2 ファイバー要素モデル

ファイバー要素にはひび割れによる引張軟化挙動と除荷による歪み解放が同時に生じる結果、応力-歪み関係の履歴は、最終的に **Fig.1(1)** のようにモデル化される¹⁾。ここで A 点は引張強度に対応する。この図をもとに O 点を通る縦軸を中立軸位置と考えて **Fig.1(2)** に示すように、各履歴点(B~E 点)に於ける引張応力分布モデルが決定される¹⁾。

3. 実験

3.1 試験体製作

実験に用いた調合を **Table 1** に示す。G1

*1 秋田県立大学・教授 建築環境システム学科 工博 (正会員)

*2 秋田県立大学・助手 建築環境システム学科 工修 (正会員)

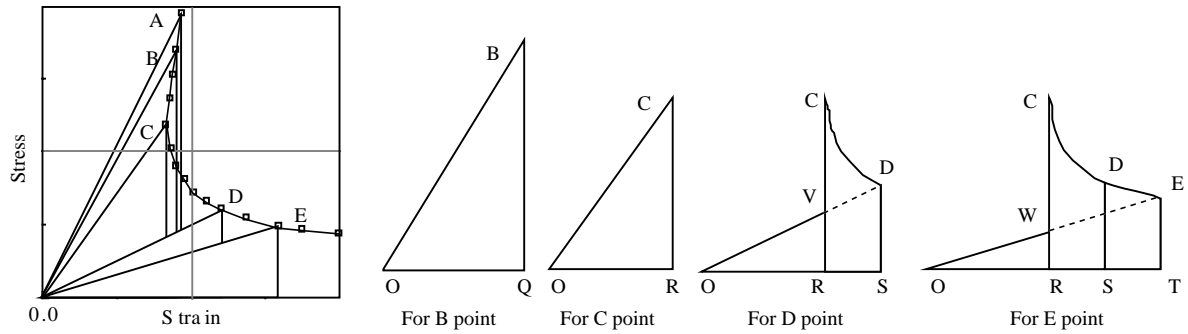


Fig.1(1) Stress-strain relation Fig.1(2) Tensile stress distribution models for A~E point

Table 1 Mix proportions (%: volume fraction)

Mix	Cement (%)	Silica powder (%)	PP fiber (%)	Methyl Cellulose (%)	Water (%)
G1	27.08	30.17	1.80	2.46	38.49
G3	26.38	29.39	3.51	2.40	38.32
G5	25.95	28.91	5.18	2.36	37.61
G7	25.27	28.16	7.56	2.29	36.71

はポリプロピレン繊維を体積比で1.80%, G3 は3.51%, G5 は5.18%, G7 は7.56%含んでいる。既往の論文⁷⁾に準じて混練, 押出成形, オートクレーブ養生した後, 成形体を研磨して幅, 厚さ, 長さをそろえた。さらに試験前に100℃で2日間乾燥させたのち室温に戻し, 試験片とした。

3.2 構成則のモデル化

四辺に歪みゲージを添付した13.5mm角, 長さ27mmの角柱試験体を用いて材料の圧縮, 引張挙動を計測した⁷⁾。計測されたひび割れまでの圧縮, 引張挙動は直線関係であり, そのまま当該区間の構成則とした。

Table 2 にひび割れ時の応力, 歪みを示す。

またひび割れ後の引張応力対歪みの構成則は, ブランク材の引張軟化曲線と, 短繊維補強材料を引抜試験した結果とを合成して求めた⁷⁾。ここで, 引抜試験体は曲げ試験体と同形状であるが, 中央部に予亀裂を入れて, 両

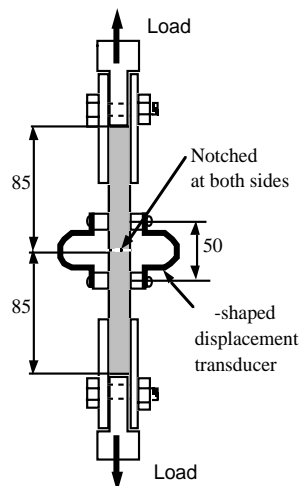


Fig.2(1) Pullout specimens

Table 2 Strength of composites

Mix	Compressive fracture		Tensile fracture	
	MPa	μ strain	MPa	μ strain
G1	133.2	6427	8.63	333
G3	116.5	5780	8.43	346
G5	111.2	5693	8.22	335
G7	118.1	6035	8.32	309

端を引張ることによって求めた。試験体を Fig.2(1)に, またここで得られた引抜曲線を Fig.2(2)に示す。

図から分かるように, 立ち上がり部, 頂上の平坦部, 軟化部からなっているが, 軟化部の初期はひび割れ面に突出する繊維の平均繊維長¹⁰⁾(繊維長の1/4つまり1.5mm)に, 後期は最大

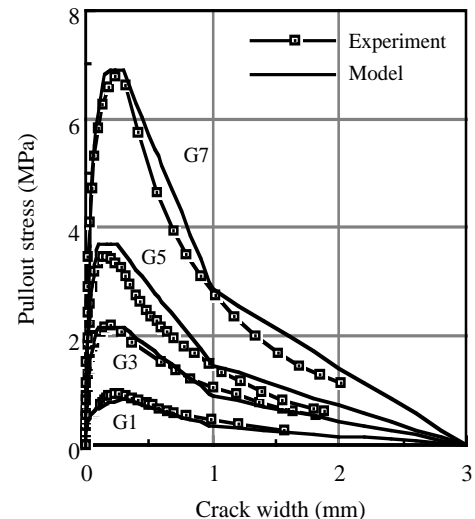


Fig.2(2) Pullout behavior of specimens

Table 3 Modeled tension-softening function

Mix	$\sigma = b + aX$			
	$0 < X \leq 0.02\text{mm}$		$0.054\text{mm} \leq X$	
	b	a	b	a
G1	24.37	-1111	3.415	-63.235
G3	24.52	-1119		
G5	21.93	-989		
G7	19.13	-849		

(σ : Closure stress in MPa, X: COD in mm)

Table 5 Dimensions of specimens for prediction

Mix	Specimen	Width (mm)	Thickness (mm)
G1	107	39.09	13.49
G3	332	39.28	14.56
G5	448	40.40	13.76
G7	781	39.55	13.46

Table 4 Modeled function of pullout behavior

Mix	$0 < X \leq 0.01\text{mm}$	$0.01\text{mm} < X \leq K$		K mm	$K < X \leq 0.3\text{mm}$	$0.3\text{mm} < X \leq 1\text{mm}$		$1\text{mm} < X \leq 3\text{mm}$	
	$\sigma = aX$	$\sigma = b + a \ln(X)$		-	$\sigma = \text{const.}$	$\sigma = b + aX$		$\sigma = b + aX$	
	a	b	a	-	const	b	a	b	a
G1	33.948	1.028	0.147	-	Same function as $X \leq 0.3\text{mm}$	1.063	-0.709	0.532	-0.177
G3	76.642	3.578	0.613	0.100	2.163	2.710	-1.806	1.355	-0.452
G5	119.710	6.215	1.098	0.100	3.688	4.609	-3.073	2.213	-0.738
G7	204.120	10.295	1.802	0.150	6.874	8.593	-5.729	4.298	-1.433

(σ : Pullout stress in MPa, X: COD in mm)

繊維長(繊維長の 1/2 つまり 3mm)に漸近するのが分かる。Table 3 にモデル化したブランク材の引張軟化曲線関数を、Table 4 にモデル化した引抜曲線関数を示す。

3.3 曲げ試験

曲げ試験は、支点間距離 160mm の中央集中荷重(載荷速度 0.5mm/分)で実施し、3 体に関して荷重と載荷点下のたわみを約 3mm まで連続的に計測した。ひび割れ強度が中間の値を示した代表試験片の名称、形状を Table 5 に、得られた荷重-たわみ関係を第 4 章の解析結果と共に Fig.4 に示す。図から分かるように、いずれの場合もひび割れによって荷重は直下まで不連続に低下している。

4. 解析結果と考察

4.1 解析結果の照査

第 2 章で述べたファイバー要素法に従って、第 3 章で述べた構成則を使用し、解析を行った。解析によって得られるファイバー要素のひび割れ以降の応力-歪み関係を Fig.3 に示す。また、それを利用して解析した曲げ試験片の荷重-たわ

み関係を Fig.4 に示す。図から、繊維の含有量がいずれの場合も、提案したモデルは、ひび割れ以降、連続的に、実験による荷重-たわみ関係を表現できることが分かる。

なお、ひび割れ後の最大荷重に若干の違いがあり、また、たわみが大きくなってくると減少傾向に違いが生じる。これらの差は、試験片のひび割れ位置が真ん中からずれることによる誤差と本解析方法の限界を示すものであろうが、ひび割れ前後のマクロな挙動を連続的に表現できると言える。

4.2 エネルギー的考察

例えば、引張軟化曲線を逆解析によって求めるため、緩速載荷による切欠き梁の三点曲げ試験を実施するような場合には、同一材料であってもスナップバック現象は生じない。Fig.5 は G1 調合による切欠き梁の曲げ試験を載荷速度 0.0005mm/sec で実施したときの荷重-たわみ関係である。この試験片は高さ 39.7mm (切欠きを除いたリガメント部高さ 19.9mm)、幅 15.2mm、載荷スパン 300mm となっている。最大荷重 162.5N に対応するポテンシャルエネルギーが

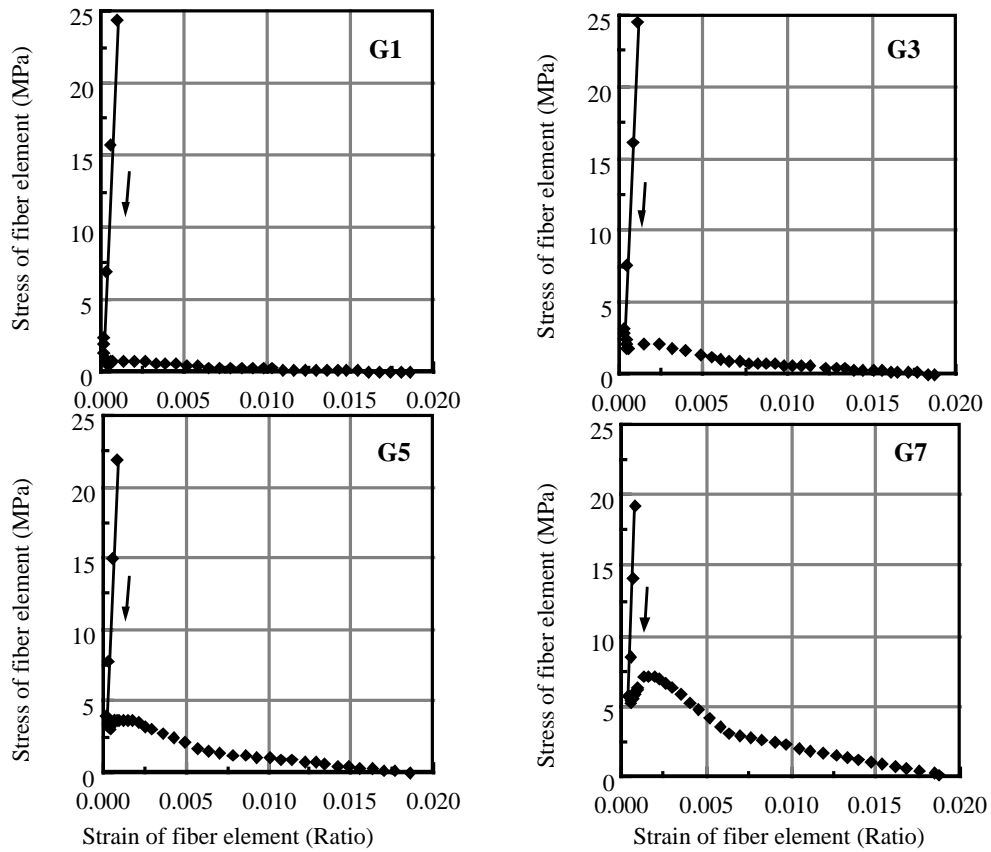


Fig.3 Calculated stress-strain relation of fiber element for prediction

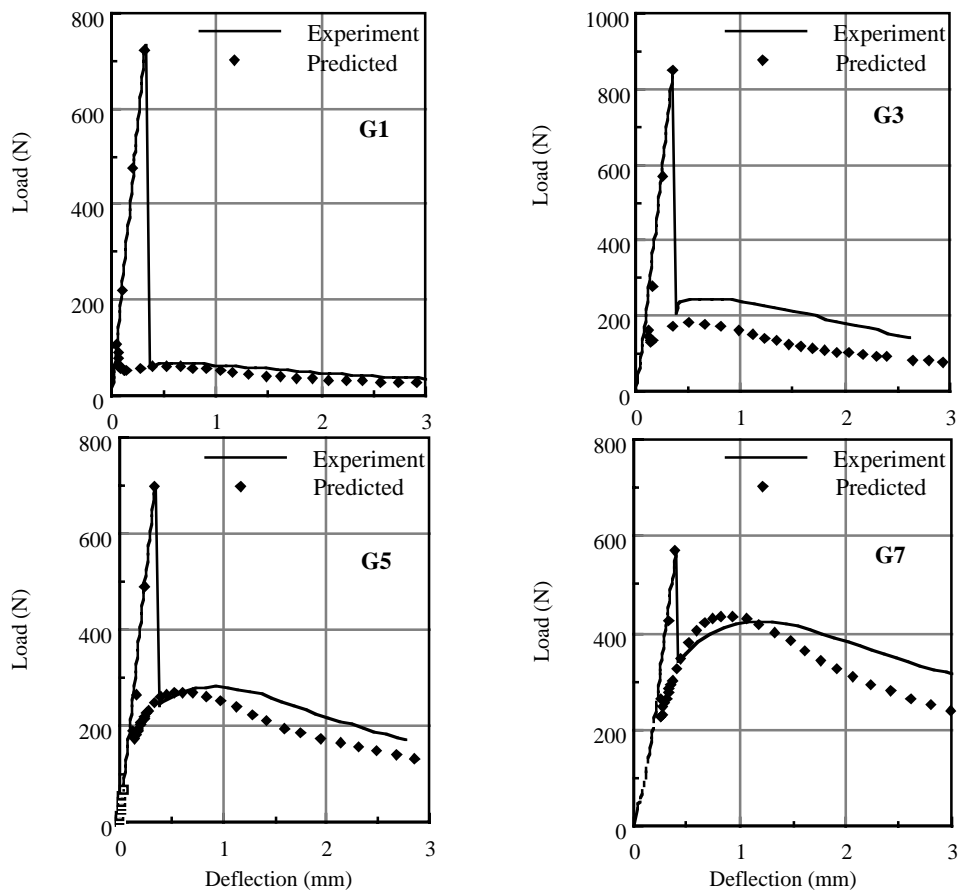


Fig.4 Experimental and calculated bending behavior of specimen listed in Table 4

徐々にひび割れの進展に使用される結果、スナップバック現象は生じていない。

この挙動の違いについてエネルギー面から考察する。スナップバック途中のエネルギー収支は運動エネルギーを考慮する必要があるが、マクロな議論として、実際は運動エネルギーで使われる分もひび割れで吸収されると仮定して論じる。

Fig.6 は曲げ試験の荷重-たわみ関係を示し、ひび割れ前の荷重 P_1 がひび割れして荷重 P_3 になり、ひび割れ進展が終了した状態を示している。その途中の荷重 P_2 のとき、点 b を通るのがスナップバック挙動を示す **Fig.4** のような場合であるのに対し、点 c を通るのが **Fig.5** のような場合とすれば、それぞれ多角形 $oqbt$ 、多角形 $oqcr$ が進展したひび割れによって吸収さ

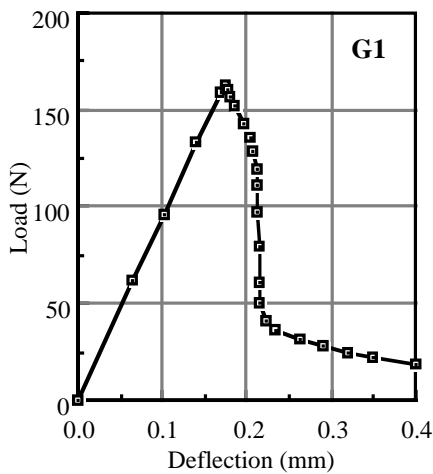


Fig.5 Bending behavior of notched specimen

れたエネルギーを表していると考えられる。つまり、スナップバックを起こす場合、たわみの復元による外部仕事によって、**Fig.7(2)**に斜線で示す部分のポテンシャルエネルギーの減少量は、スナップバックを起こさない **Fig.7(1)**の場合よりも小さくなる¹¹⁾。しかも、実際にはここで無視した運動エネルギー、慣性力、音の発生などで余分のエネルギーが消費され、ひび割れ進展のために供給されるエネルギーは多角形 $oqbt$ より更に小さくなると考えられる。

一方、ポテンシャルエネルギーの減少により供給されるエネルギーは、逸散する部分を除けば、**Fig.7(3)**に示すように引張軟化曲線の斜線部分で吸収される。これを、変位制御で載荷され、スナップバックが生じない場合の点 r の状態とすると、スナップバックを生じる場合は、供給エネルギーが小さい分、やせ細った **Fig.7(4)**のような形状で表される。

さらに引張軟化曲線は、梁のリガメント高さ方向に釣り合い状態で分布する結合応力でもあるから、引張軟化曲線下の面積はその時の梁の耐荷重と関係があると考えられる。従って同一の δw では **Fig.7(4)**の場合、荷重が **Fig.7(3)**よりも小さくなる。つまり、**Fig.6** で qb というルートをとる場合は点 r ではなく点 s に近い点 t を通ると考えられる。

以上から、スナップバックを引き起こすのは、引張軟化曲線の第一勾配が急激な減少を示す場合であり、スナップバック後の荷重はその程度

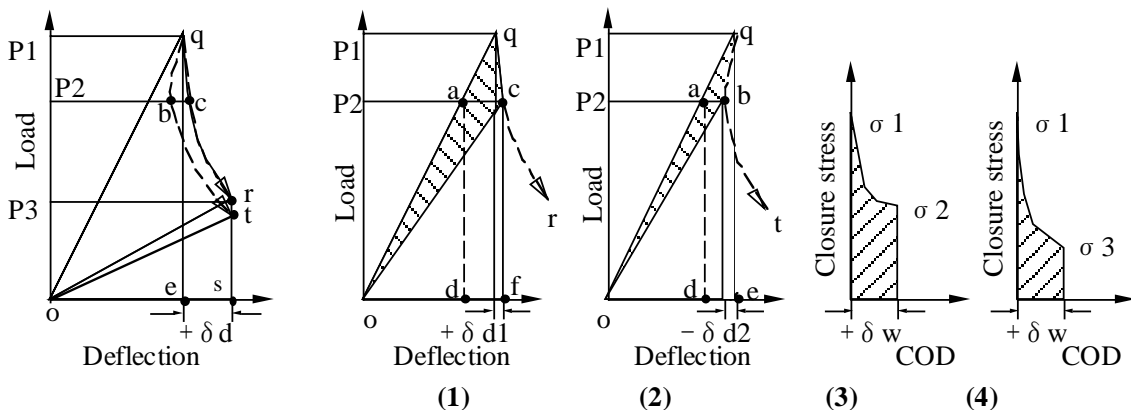


Fig.6 Idealized bending behavior **Fig.7** Idealized bending and tension softening behavior

が強いほど(Fig.7(2))で点 b が点 a に近づくほど低くなると分かる。

5. まとめ

スナップバック挙動を示す材料の曲げ挙動をファイバー要素法によって解析し、実験結果と比較するとともにエネルギー的な考察を行った。その結果、下記の結論を得た

(1)繊維体積比を変えた 4 種類のセメント系複合材料の曲げ挙動は、応力および歪みの減少域を伴う引張挙動モデルを用いたファイバー要素法プログラムによって、ひび割れ直後のスナップバック域からその後の変形増大部分に至るまで連続的に予測できる。

(2) スナップバックを引き起こすのは、引張軟化曲線の第一勾配が急激な減少を示す場合であり、スナップバック後の荷重はその程度が強いほど低くなる。

ひび割れてしまった材料の載荷能力と変形能力は安全上極めて重要であるが、本モデルによって概略予測できることから、本研究の意義は大きい。

なお本論文の一部の実験結果については既発表論文¹⁷⁾から用いた。

参考文献

- 1) 山田寛次, 石山 智: ファイバー要素法による短繊維補強セメント材料のスナップバック挙動予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 193-198, 2001.7
- 2) 例えば, 細野 透: 弧長法による弾性座屈問題の解析, 日本建築学会論文報告集, No. 242, pp. 41-49, 1976.4,
- 3) 吉川弘道, 西岡真帆: ひずみの局所化領域を有するコンクリート単軸部材の変形挙動と安定/不安定条件, コンクリート工学論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 89-101, 1995.1

4) Lim, T.Y., Paramasivam, P. and Lee, S.L. : Analytical Model for Tensile Behavior of Steel-Fiber Concrete, ACI Materials Journal, July-August, pp.286-298, 1987.

5) 山田寛次, 三橋博三: 高強度連続繊維筋で補強された繊維強化セメント系複合材料梁の曲げ靱性向上に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No. 537, pp. 1-6, 2000.11

6) 山田寛次: CFRP 筋材で補強されたセメント系複合材利用のテンションスティフニング挙動予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 403-404, 2000.9

7) 山田寛次, 三橋博三: ポリプロピレン短繊維補強セメント系押出成形材料の高靱性化のメカニズムに関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No. 520, pp.1-8, 1999.6

8) Craig, R.J., Decker, J. and Dombrowsky, L. : Inelastic Behavior of Reinforced Fibrous Concrete, Journal of the Structural Engineering, ASCE, No. 113(ST4), pp.802-817, 1987.

9) 中島望, 石川靖晃, 田辺忠顕: ファイバーモデルにおける横方向拘束効果の定式化と軸方向コンクリートの構成則に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 181-186, 2000.6

10) Bentur, A. and Mindess, S. : Fibre Reinforced Cementitious Composites, London, Elsevier Applied Science, pp.73, 1990.

11) 岡村弘之: 線形破壊力学入門, 培風館, pp.55, 1983.9