

ゴム製緩衝材の衝撃緩衝効果に関する解析的考察

FUNDAMENTAL STUDY ON THE MITIGATING EFFECT OF THE RUBBER ABSORBER

園田佳巨*・西本安志**・彦坂熙***

Yoshimi SONODA, Yasushi NISHIMOTO, Hiroshi HIKOSAKA

* 九州大学大学院助教授 工学研究院 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 九州大学大学院 工学研究院 博士課程学生 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 九州大学大学院教授 工学研究院 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

キーワード：ゴム緩衝材，衝撃緩衝効果，落橋防止システム

1. 緒言

ゴムは、鋼やコンクリート等の一般的な土木材料と比べて剛性が非常に小さく、可逆的な大変形が可能であるため、防眩材等の衝撃緩衝材として利用されてきたが、兵庫県南部地震以降に落橋防止壁用緩衝材や橋梁の桁間衝突用の緩衝材としての利用についても活発な検討が行われている^{1), 2), 3), 4)}。しかし、衝撃緩衝材としてのゴムの汎用的な性能評価法は未だ確立されておらず、実験データを踏まえた工学的判断をもとに、使用するゴムの材質や寸法を決定しているのが実状である。そこで、本研究では最初にゴム製緩衝材の重錘落下衝撃実験を行い、その緩衝効果について実験的に検討した。次に、重錘落下実験より得られた衝撃荷重を、ゴムの静的圧縮変形特性を非線形バネに置換した簡易な衝撃応答解析により実用レベルで推定できるか検証を試みた。その結果、本研究で行った手順を用いれば、使用するゴムの単軸引張試験のみで衝撃緩衝用ゴムの性能評価を行うことが可能であることが認められた。

2. ゴム緩衝材に対する重錘落下実験

(1) 重錘落下衝撃実験の概要

ゴム緩衝材の緩衝効果を調べるために、重錘落下実験を行った。重錘重量は4.0kN(=408kgf)とし、5通りの所定の高さから重錘を自由落下させ、衝

撃的な外力を与えた。重錘落下実験の概要を写真-1に示す。本実験での計測項目は、レーザー式変位計による重錘の変位とロードセルによる供試体底面に発生した伝達荷重の2つである。レーザー式変位計は、(株)キーエンス社製のLB-300(測定範囲20~40cm, 分解能50 μ m, 応答性915Hz)を用い、ロードセルには共和電業(株)製のLC-200TEを用いた。

(2) 実験供試体および載荷条件

使用したゴム緩衝材の形状は、縦150mm×横150mm×厚さ50mmの矩形ブロック状のものである。ゴムの材質は、落橋防止壁用緩衝材の規格値(硬度55 $\pm$ 5度程度)を参考に、単軸引張実験における初期剛性(200%伸張時の引張応力から算出したもの)が、約1.8MPa(硬度50のゴムに相当)、約3.1MPa(硬度60のゴムに相当)の2種類を用いた。用いたゴムの諸元を表-1に示す。次に、これら2種類のゴム緩衝材に対して圧縮速度5mm/minで行った静的圧縮実験結果を図-1に示す。この図より、約20mmの変位(圧縮歪み40%)以降に、2種類ともに圧縮剛性が急激に増加する強度の非線形性を有することが認められる。ゴムが緩衝材としての効果を発揮するには、適度な撓み性を持つことが必要であることから、本試験体の場合には約60~70%の歪み領域を適用範囲とみなすことが望ましいと考えられる。なお、今

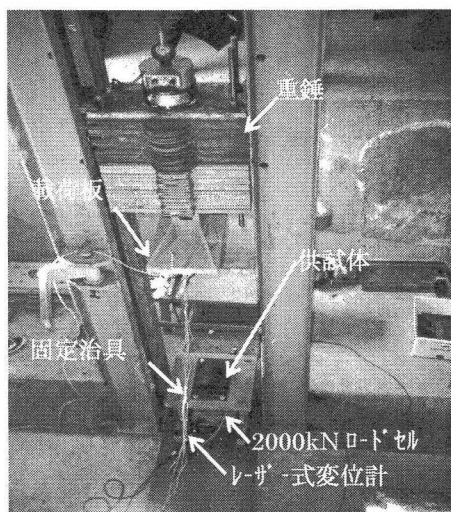


写真-1 落錘式衝撃実験の概要

回の実験における重錘落下高さは、衝突時の運動エネルギーが1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 kN・mとなるように決定した。

(3) 実験結果および考察

図-2 (a), (b)は、硬度50, 60の2種類のゴム緩衝材に、5.0, 10.0 kN・mの2通りの重錘の衝突エネルギーが作用したときの衝撃荷重～時間関係を示したものである。一般的に衝撃力波形は正弦半波に近く、2種類のゴムで殆ど差が無いことがわかる。したがって、この2種類のゴムを緩衝材として見た場合、性能に殆ど差はなく、適用範囲を概ね寸法によって把握できるものと考えられる。今回の衝撃実験全ケースについて、最大荷重と衝突エネルギーの関係を整理すると、図-3のようにほぼ線形関係にあることが認められた。窪田ら¹⁾の研究においても、ゴム緩衝材の場合には、衝突物の運動エネルギーと静的圧縮実験の荷重～変位関係の面積を等価におけば、最大衝撃荷重を推定できることが指摘されている。図-3には、窪田らと著者らの2つの規模が異なる衝撃実験データをもとにした検討を行っているが、静的荷重～変位関係を用いた推定値と衝突実験における最大荷重には、約10～20%の相違が見られる程度であり、静的荷重～変位関係による予測が、衝撃荷重の第一近似として有効であることがわかる。

表-1 ゴムの材料物性

ゴムの硬度	硬度50	硬度60
ゴムの種類	天然ゴム	
引張強度 (MPa)	17.4	14.3
破断時の伸び (%)	540	410
初期剛性 (MPa)	1.8	3.1

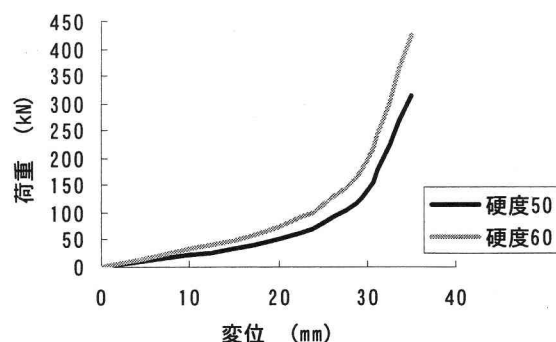


図-1 ゴムの静的圧縮変形特性

3. ゴム緩衝材の性能評価法

衝撃緩衝用ゴムの性能評価を簡易に行う手段として、静的圧縮変形特性を用いた衝撃荷重の予測が有効であることを確認した。そこで、本実験の供試体の静的な圧縮荷重～変位関係を3次元有限要素解析により求め、得られた荷重～変位関係の勾配を非線形バネ係数としたバネ-質点系モデルの応答解析により、衝撃荷重を実用レベルで推定可能な手法を提案する。

(1) ゴムの大変形解析手法

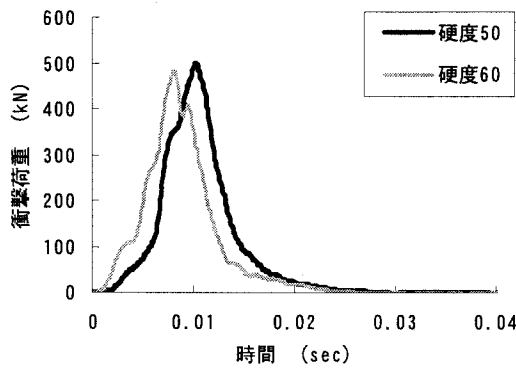
ゴムは、可逆的な大変形が可能な非線形弾性体であることから、その挙動を大歪み領域まで予測するには他の材料と異なる解析手法を用いる必要がある。本研究では、衝撃緩衝用ゴムの圧縮変形特性を約60～70%程度のひずみ領域まで再現するために、超弾性体の構成式を用いた3次元大変形解析プログラムを作成した。

a) ゴムの構成方程式

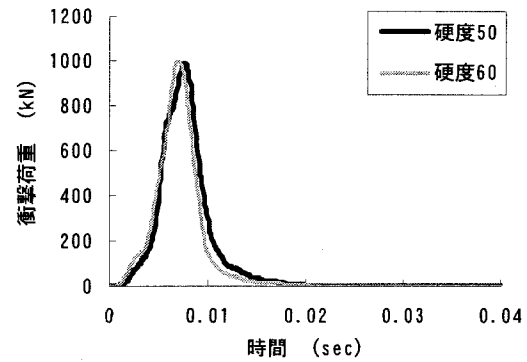
ゴムは一般に超弾性体⁸⁾として、単位体積当りの歪みエネルギー密度関数 W を用いて構成式は以下のように定義される。

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (1)$$

ただし、 S_{ij} : 第2 Piola - Kirchhoff応力、 E_{ij} : Green - Lagrange歪み、 W : 歪みエネルギー密度関数
式(1)に用いる歪みエネルギー密度関数には、単軸



(a) 5.0kN·mのケース



(b) 10.0kN·mのケース

図-2 落錘式衝撃実験による荷重～時間関係

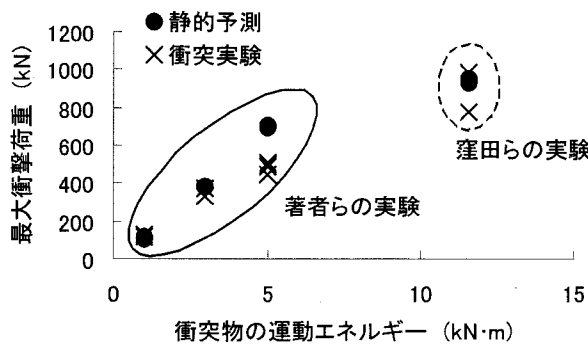


図-3 静的実験データを用いた最大衝撃荷重の予測

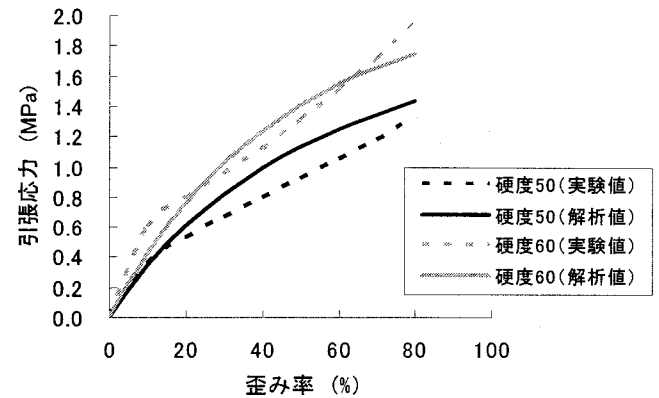


図-4 ゴムの引張変形特性の同定解析

引張もしくは二軸伸張試験のデータを用いて、必要な歪み領域の挙動をうまく再現できる式の選択とパラメータの同定を行うことが多い。そこで、本研究では式(2)に示す3パラメータMooney-Rivlin式を採用した。

$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)$ (2)
ただし、 c_{10}, c_{01}, c_{11} ：材料試験により得られるMooney-Rivlin定数 (Mpa)， I_1, I_2, I_3 ：右Cauchy-Green変形テンソルの3不変量。

なお、ゴムの非圧縮性を考慮するために、ここでは以下の式(3)を用いたペナルティ関数法を用いて数値的に考慮することにした。

$$\phi(I_3) = \frac{\lambda}{2}(I_3 - 1)^2 \quad (3)$$

ただし、 λ ：体積変化 ($I_3 - 1$) にかかるペナルティ係数。

式(2)に式(3)を加え、式(1)に代入することにより、本研究で用いたゴムの構成式は以下のように表される。

$$S_{ij} = 2[c_{10} + c_{01}I_1 + c_{11}\{(I_2 - 3) + I_1(I_1 - 3)\}]\delta_{ij} -$$

$2\{c_{01} + c_{11}(I_1 - 3)\}C_{ij} + \lambda(I_3 - 1)(I_2\delta_{ij} - I_1C_{ij} + C_{ik}C_{kj})$ (4)
ただし、 C_{ij} ：右Cauchy-Green変形テンソル，
 δ_{ij} ：クロネッカーのデルタ。

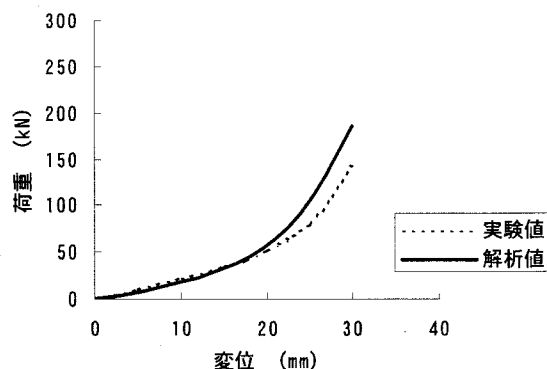
b) ゴムの大変形解析手法

ゴムの大変形域解析には、幾何学的な非線形性の考慮も不可欠である。そこで、解析は更新ラグランジュ法^{11), 12)}に基づく増分形式で行い、増分剛性は以下の式で与えることにした。

$$[k] = \int_{V_{n-1}} [B]^T [D] [B] dv + \int_{V_{n-1}} [G]^T [S] [G] dv \quad (5)$$

ただし、 $[B]$ ：2次の変位増分まで考慮した歪み-節点変位マトリックス， $[D]$ ：式(4)をGreenの歪み E_{ij} で再度偏微分して得られる応力-歪みマトリックス， $[G]$ ：変位勾配マトリックス， $[S]$ ：初期応力マトリックス。

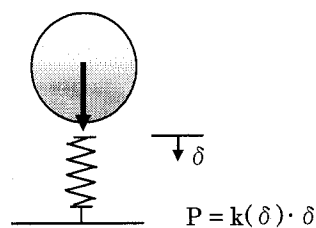
式(5)の剛性マトリックスは、式(2)から得られる超弾性体としての剛性項と、式(3)の非圧縮性由来するペナルティ項の和で与えられ、非圧縮性による過拘束が生じないようにペナルティ項は要素中心における1点積分を、剛性項については8点積分を行う選択低減積分法によりゴム緩衝材の剛性を評価した。



図－5 静的圧縮試験のシミュレーション
(硬度50のゴム試験体)

表－2 同定計算で得られたゴムの材料定数 (MPa)

ゴムの種類	c_{01}	c_{10}	c_{11}	λ
硬度50のゴム	-0.049	0.490	0.196	1.470
硬度60のゴム	-0.098	0.490	0.294	1.960



$k(\delta)$: 非線形換算バネ係数

図－6 1 質点系バネモデル

c) ゴムの材料定数の評価

ゴムの材料定数の評価には、同じ材質のゴムを用いたJIS K 6301に基づく単軸引張実験結果を利用した。図－4は、2種類のゴムに対して80%の引張歪みまで単軸引張試験の同定を行った結果である。図－4のように80%の引張歪みまでの挙動を再現可能なゴムの材料定数として、表－2に示す値が求められた。

次に、静的圧縮試験のシミュレーションを行い、引張試験で求めた材料定数の圧縮応力場における妥当性を検証した。図－5に硬度50のゴムの圧縮試験をシミュレートした結果を示す。この図より、変位20mm以降の圧縮剛性を過大評価する傾向があるが、本手法を用いて衝撃緩衝用ゴムの静的圧縮変形特性を実用レベルで評価可能であることが認められた。

(2) ゴムの緩衝効果のシミュレーション

以上の考察により、ゴムの静的圧縮変形特性を解析的に評価できることが検証された。次に、数値解析で求めた圧縮特性を利用した応答解析により、衝撃緩衝効果を評価可能であるか検討した。

a) バネ－質点系モデルによる緩衝効果の評価

衝撃緩衝用ゴムの性能評価を簡易に行う手法として、静的圧縮荷重～変位関係の勾配を非線形バネとして与えたバネ－質点系モデル（図－6参照）による簡易応答解析を試みる。ここでは、2種類の硬度の異なるゴムの非線形バネとして、それぞれ変形量 δ の2次関数式で与えた。

硬度50: $k(\delta) = 0.0621\delta^2 - 1.388\delta + 7.601$ (5a)

硬度60: $k(\delta) = 0.0813\delta^2 - 1.814\delta + 10.19$ (5b)

ただし、 δ : 変形量(mm)。

図－7および図－8は、それぞれ衝撃実験のシミュレーションとして、3通りの異なる重錘条件に対する2種類のゴムを用いたときの衝撃力～時間関係をバネ－質点系解析で推定したものである。これらの図より、全般的にバネ－質点系モデルによる衝撃力は、実験結果を精度良く評価していることがわかる。したがって、予めゴム緩衝材の静的圧縮荷重～変位関係を数値解析により精度良く把握することで、衝撃緩衝効果を簡易な応答計算で推定できることが確認された。

b) 衝撃緩衝効果の簡易評価法

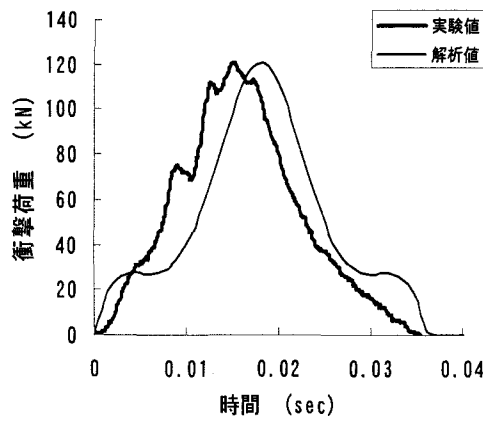
これまでの考察により、以下に示す手順で衝撃緩衝用ゴムの性能を評価することが可能であると思われる。

1. 材料試験（静的単軸引張試験）の実施
2. 同定計算によるゴムの材料定数の決定
3. ゴム緩衝材の静的圧縮変形特性の評価
4. バネ－質点系モデルを用いた衝撃応答解析による衝撃荷重の評価

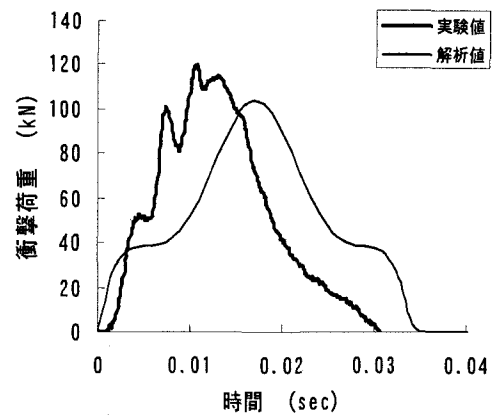
本法により、今回の供試体のような薄板状のゴムの衝撃緩衝効果については、材料試験と数値計算の併用により評価できると考えられる。今後、本法の適用可能な条件の定量的な検討を行う必要がある。

4. 結論

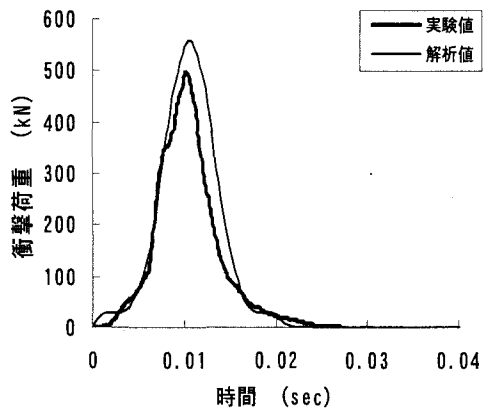
本研究で得られた成果を要約すると、以下のよ



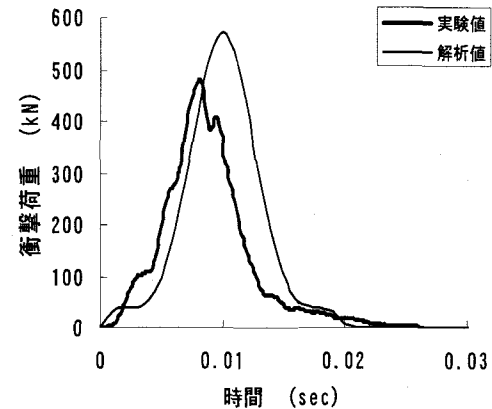
(a) 1.0kN·m のケース



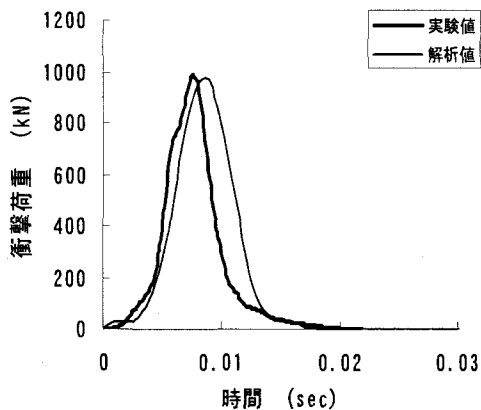
(a) 1.0kN·m のケース



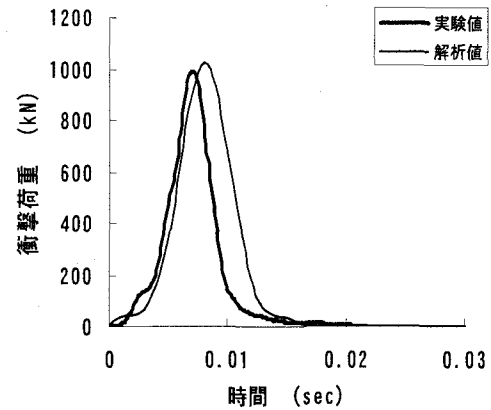
(b) 5.0kN·m のケース



(b) 5.0kN·m のケース



(c) 10.0kN·m のケース



(c) 10.0kN·m のケース

図-7 衝撃荷重～時間関係のシミュレーション
(硬度 50 のゴム試験体)

図-8 衝撃荷重～時間関係のシミュレーション
(硬度 60 のゴム試験体)

うになる。

- 1) ゴム緩衝材の静的圧縮変形特性は、引張試験より求めた材料定数を超弾性体の構成式に適用し、3次元有限要素法を用いれば精度良く評価できることが認められた。
- 2) ゴム緩衝材の静的圧縮試験のシミュレーションにより求めた換算バネ係数を用いた簡易なバネ-質点系衝撃応答解析により、ゴムの衝撃緩衝効

果を把握できることが認められた。

参考文献

- 1) 窪田賢司, 菅野匡, 上東泰, 石田博: 緩衝効果を有する落橋防止装置の衝突実験および地震時応答解析, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.34, pp.98-104, 1997.11.
- 2) 川島一彦, 庄司学: 衝突緩衝用落橋防止システ

- ムによる桁間衝突の影響の低減効果, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.129-142, 1999.01.
- 3) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 濱田譲, 吉野伸: ゴム竿圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.71-78, 1997.04.
 - 4) 庄司学, 川島一彦, 宇根寛, 剣持安伸, 長谷川恵一, 島ノ江哲: 高ひずみ/高面圧下におけるゴム製緩衝装置の応力度-ひずみ関係, 構造工学論文集Vol46A, pp.917-928, 2000.03.
 - 5) 潤田久也, 川島一彦, 庄司学, 須藤千秋: 高面圧を受ける直方体ゴム製緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究, 土木学会論文集, No.661/I-53, pp.71-83, 2000.10.
 - 6) 日本道路協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), pp.III-41, 1995.6.
 - 7) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆, 西川信二郎: 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する基礎的考察, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.107-112, 2000.06.
 - 8) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995.
 - 9) R.W.Ogden: Non-Linear Elastic Deformation, Dover, 1997
 - 10) 河村幸伸, 裏山健治, キ|谷信三, 深堀美英: エラストマーのひずみエネルギー密度関数の解析, 日本ゴム協会誌 Vol.73, pp.6-13, 2000.01.
 - 11) 日本機械学会: 計算力学ハンドブック(I 有限要素法 構造編), 1998.
 - 12) J.T.Oden: The finite elements of nonlinear continua, McGrawHill, 1972.