

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-674 R1
提出年月日	平成30年8月27日

## V-5-42 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC MARC

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
3. 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	4
3.1 応力解析の検証及び妥当性確認	4
3.2 時刻歴応答解析の検証及び妥当性確認	10
3.3 接触解析の検証及び妥当性確認	12
3.4 超弾性体（ゴム）解析の検証及び妥当性確認	14

## 1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MSC MARCについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 2014. 2. 0

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 MSC MARC
使用目的	3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力解析
開発機関	MSC Software Corporaton
開発時期	1960年代後半
使用したバージョン	Ver. 2014. 2. 0
コードの概要	<p>有限要素法を用いたMSC MARCは、ロンドン大学とブラウン大学で12年以上にわたって研究教育機関に携わったペドロ・V・マーサル博士によって開発され、現在はMSC Softwareによって保守されている有限要素法による構造解析用汎用計算コードである。</p> <p>MSC MARCは応力解析，熱応力解析，伝熱解析，動的解析などを行うことができ，特に非線形解析，非定常解析が容易に行えることが特徴であり，多くの民間・国立研究所，大学及び産業界で利用されている実績を持つ。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	<p>MSC MARC Ver. 2014. 2. 0は、3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力解析に使用している。</p> <p><b>【検証（Verification）】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 応力解析と時刻歴応答解析については、一般的な知見により理論解を求めることができる簡素な体系において、理論モデルによる理論解と解析解の一致を確認することで、解析機能の妥当性を確認している。</li> <li>・ 接触解析とゴムの解析については、同様な解析を行える別の解析コード（Abaqus）での解析例と同じ条件での解析を本解析コードで実施し、両者の結果の一致を確認することで、本解析コードの解析機能の妥当性を確認している。</li> <li>・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本解析コードは航空宇宙，自動車，電機電子，建築，医療関係などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。</li> </ul>

### 3. 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

#### 3.1 応力解析の検証及び妥当性確認

一端固定、一端自由の梁をモデル化し、その自由端に軸荷重および曲げ荷重を与えたときの応力分布をそれぞれ求めて理論解と比較した。

図3-1にモデルを示す。断面15 mm×15 mm、長さ200 mmの梁モデルである。縦弾性係数は200000 N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は0.3とした。基部を固定し、先端に2.5 N/mm<sup>2</sup> (計562.5N)の荷重F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>をそれぞれの方向に負荷した。解析結果を図3-2及び図3-3に示す。

応力の理論値Sは、軸方向の場合断面積をAとして軸応力 $S=F_1/A$ 、曲げの場合は荷重点からの距離をLとし、梁の断面係数をZとして、 $S=F_2L/Z$ で求まる。

表3-1～表3-2に解析値と理論値を比較して示すが、両者はよく一致しており、解析の妥当性が検証できた。

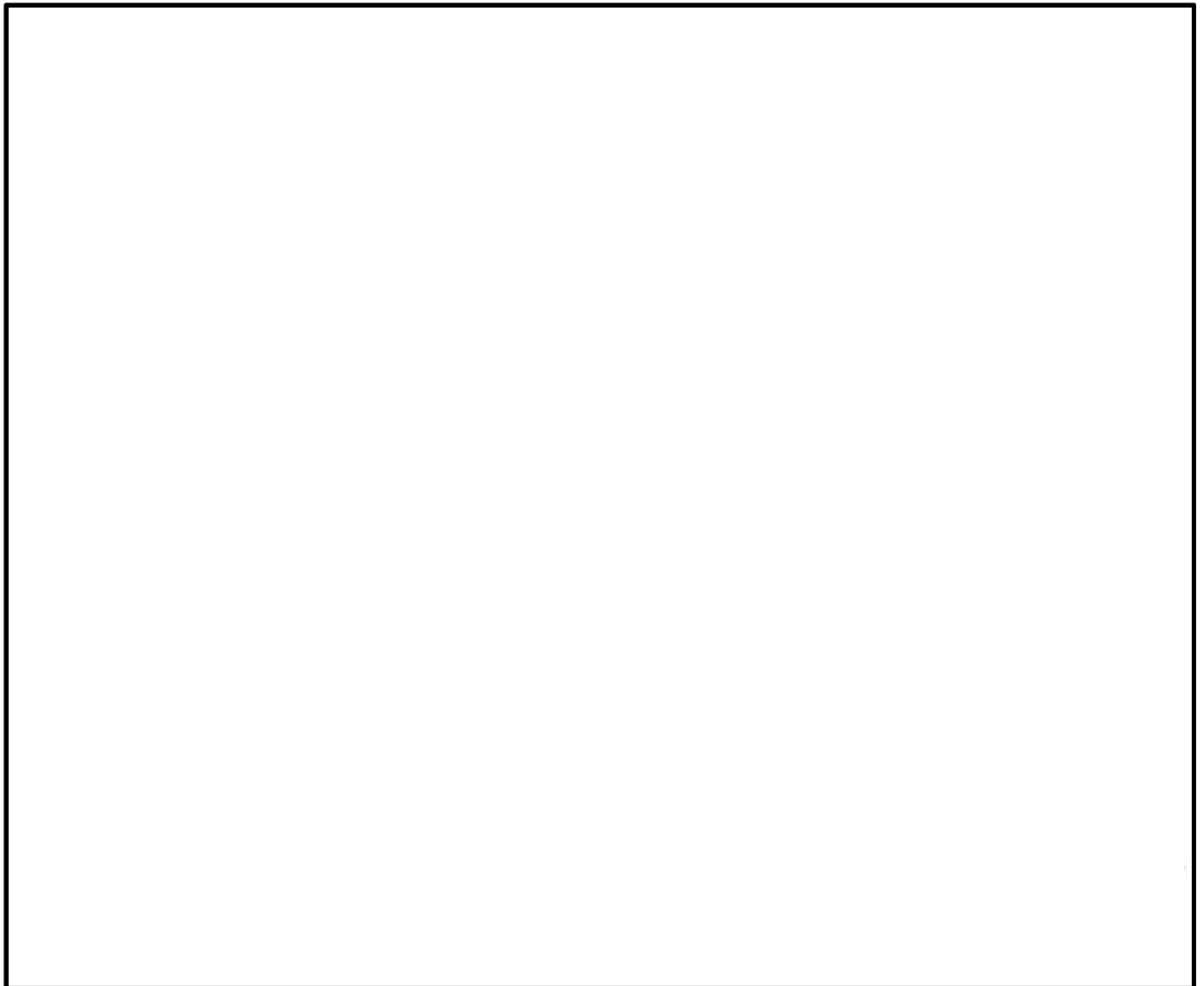


図3-1 応力解析モデル図

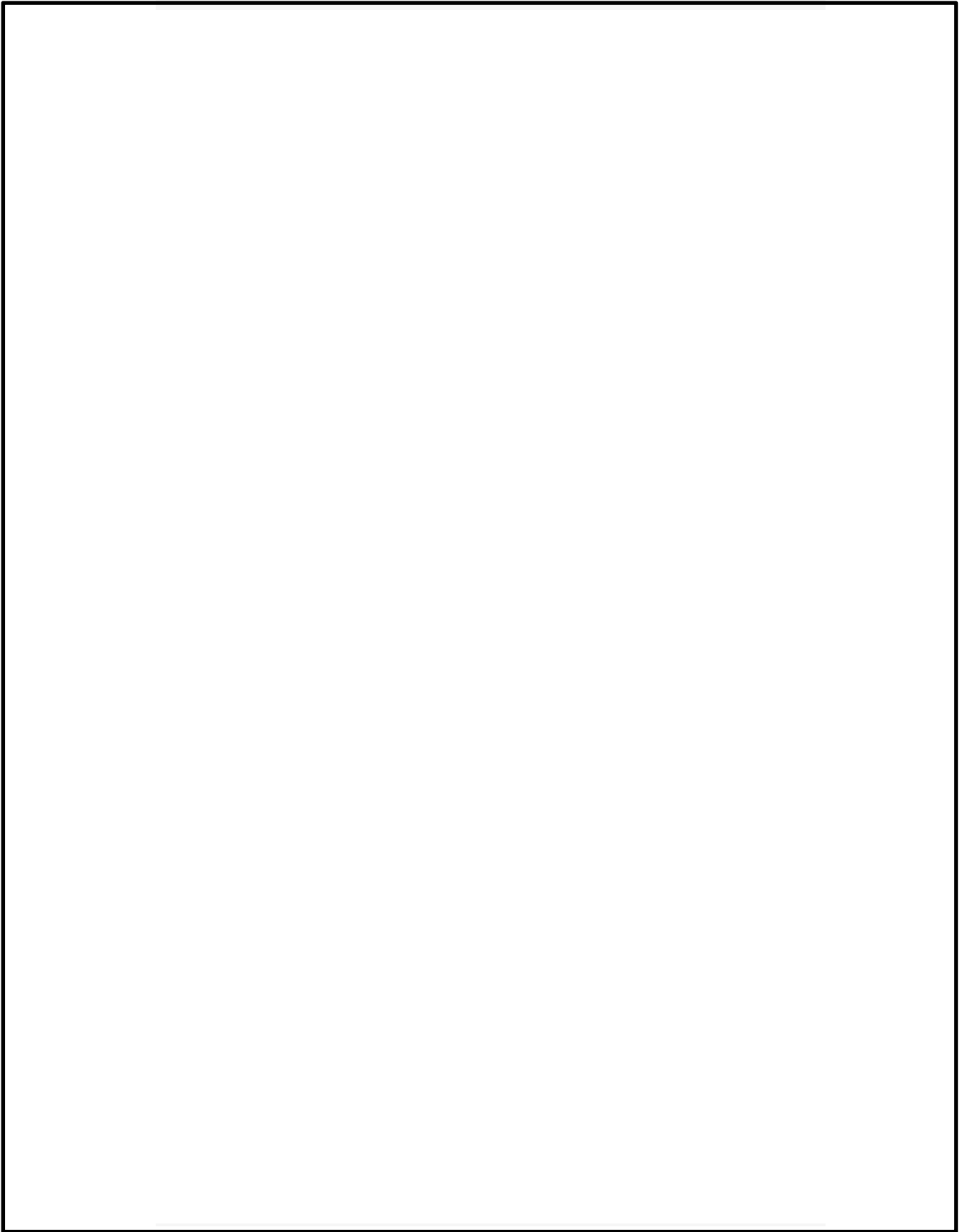


図 3-3 曲げ荷重時の変形とミーゼス応力分布

表3-1 軸力荷重時応力の比較 (1/2)

距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)	距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)
0.00	2.500	2.500	100.0	50.00	2.500	2.500	100.0
1.25	2.500	2.500	100.0	51.25	2.500	2.500	100.0
2.50	2.500	2.500	100.0	52.50	2.500	2.500	100.0
3.75	2.500	2.500	100.0	53.75	2.500	2.500	100.0
5.00	2.500	2.500	100.0	55.00	2.500	2.500	100.0
6.25	2.500	2.500	100.0	56.25	2.500	2.500	100.0
7.50	2.500	2.500	100.0	57.50	2.500	2.500	100.0
8.75	2.500	2.500	100.0	58.75	2.500	2.500	100.0
10.00	2.500	2.500	100.0	60.00	2.500	2.500	100.0
11.25	2.500	2.500	100.0	61.25	2.500	2.500	100.0
12.50	2.500	2.500	100.0	62.50	2.500	2.500	100.0
13.75	2.500	2.500	100.0	63.75	2.500	2.500	100.0
15.00	2.500	2.500	100.0	65.00	2.500	2.500	100.0
16.25	2.500	2.500	100.0	66.25	2.500	2.500	100.0
17.50	2.500	2.500	100.0	67.50	2.500	2.500	100.0
18.75	2.500	2.500	100.0	68.75	2.500	2.500	100.0
20.00	2.500	2.500	100.0	70.00	2.500	2.500	100.0
21.25	2.500	2.500	100.0	71.25	2.500	2.500	100.0
22.50	2.500	2.500	100.0	72.50	2.500	2.500	100.0
23.75	2.500	2.500	100.0	73.75	2.500	2.500	100.0
25.00	2.500	2.500	100.0	75.00	2.500	2.500	100.0
26.25	2.500	2.500	100.0	76.25	2.500	2.500	100.0
27.50	2.500	2.500	100.0	77.50	2.500	2.500	100.0
28.75	2.500	2.500	100.0	78.75	2.500	2.500	100.0
30.00	2.500	2.500	100.0	80.00	2.500	2.500	100.0
31.25	2.500	2.500	100.0	81.25	2.500	2.500	100.0
32.50	2.500	2.500	100.0	82.50	2.500	2.500	100.0
33.75	2.500	2.500	100.0	83.75	2.500	2.500	100.0
35.00	2.500	2.500	100.0	85.00	2.500	2.500	100.0
36.25	2.500	2.500	100.0	86.25	2.500	2.500	100.0
37.50	2.500	2.500	100.0	87.50	2.500	2.500	100.0
38.75	2.500	2.500	100.0	88.75	2.500	2.500	100.0
40.00	2.500	2.500	100.0	90.00	2.500	2.500	100.0
41.25	2.500	2.500	100.0	91.25	2.500	2.500	100.0
42.50	2.500	2.500	100.0	92.50	2.500	2.500	100.0
43.75	2.500	2.500	100.0	93.75	2.500	2.500	100.0
45.00	2.500	2.500	100.0	95.00	2.500	2.500	100.0
46.25	2.500	2.500	100.0	96.25	2.500	2.500	100.0
47.50	2.500	2.500	100.0	97.50	2.500	2.500	100.0
48.75	2.500	2.500	100.0	98.75	2.500	2.500	100.0
50.00	2.500	2.500	100.0	100.00	2.500	2.500	100.0



表3-1 軸力荷重時応力の比較 (2/2)

距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)	距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)
100.00	2.500	2.500	100.0	150.00	2.500	2.500	100.0
101.25	2.500	2.500	100.0	151.25	2.500	2.500	100.0
102.50	2.500	2.500	100.0	152.50	2.500	2.500	100.0
103.75	2.500	2.500	100.0	153.75	2.500	2.500	100.0
105.00	2.500	2.500	100.0	155.00	2.500	2.500	100.0
106.25	2.500	2.500	100.0	156.25	2.500	2.500	100.0
107.50	2.500	2.500	100.0	157.50	2.500	2.500	100.0
108.75	2.500	2.500	100.0	158.75	2.500	2.500	100.0
110.00	2.500	2.500	100.0	160.00	2.500	2.500	100.0
111.25	2.500	2.500	100.0	161.25	2.500	2.500	100.0
112.50	2.500	2.500	100.0	162.50	2.500	2.500	100.0
113.75	2.500	2.500	100.0	163.75	2.500	2.500	100.0
115.00	2.500	2.500	100.0	165.00	2.500	2.500	100.0
116.25	2.500	2.500	100.0	166.25	2.500	2.500	100.0
117.50	2.500	2.500	100.0	167.50	2.500	2.500	100.0
118.75	2.500	2.500	100.0	168.75	2.500	2.500	100.0
120.00	2.500	2.500	100.0	170.00	2.500	2.500	100.0
121.25	2.500	2.500	100.0	171.25	2.500	2.500	100.0
122.50	2.500	2.500	100.0	172.50	2.500	2.500	100.0
123.75	2.500	2.500	100.0	173.75	2.500	2.500	100.0
125.00	2.500	2.500	100.0	175.00	2.501	2.500	100.0
126.25	2.500	2.500	100.0	176.25	2.501	2.500	100.0
127.50	2.500	2.500	100.0	177.50	2.501	2.500	100.0
128.75	2.500	2.500	100.0	178.75	2.502	2.500	100.1
130.00	2.500	2.500	100.0	180.00	2.503	2.500	100.1
131.25	2.500	2.500	100.0	181.25	2.504	2.500	100.2
132.50	2.500	2.500	100.0	182.50	2.505	2.500	100.2
133.75	2.500	2.500	100.0	183.75	2.506	2.500	100.2
135.00	2.500	2.500	100.0	185.00	2.507	2.500	100.3
136.25	2.500	2.500	100.0	186.25	2.507	2.500	100.3
137.50	2.500	2.500	100.0	187.50	2.506	2.500	100.2
138.75	2.500	2.500	100.0	188.75	2.501	2.500	100.0
140.00	2.500	2.500	100.0	190.00	2.490	2.500	99.6
141.25	2.500	2.500	100.0	191.25	2.470	2.500	98.8
142.50	2.500	2.500	100.0	192.50	2.434	2.500	97.4
143.75	2.500	2.500	100.0	193.75	2.379	2.500	95.2
145.00	2.500	2.500	100.0	195.00	2.294	2.500	91.8
146.25	2.500	2.500	100.0	196.25	2.204	2.500	88.2
147.50	2.500	2.500	100.0	197.50	2.088	2.500	83.5
148.75	2.500	2.500	100.0	198.75	2.519	2.500	100.8
150.00	2.500	2.500	100.0	200.00	2.737	2.500	109.5

表3-2 軸力荷重時応力の比較 (1/2)

距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)	距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)
0.00	3.22	0.00	-	50.00	49.52	50.00	99.0
1.25	3.00	1.25	240.0	51.25	50.75	51.25	99.0
2.50	3.91	2.50	156.4	52.50	51.99	52.50	99.0
3.75	4.59	3.75	122.4	53.75	53.20	53.75	99.0
5.00	5.49	5.00	109.8	55.00	54.47	55.00	99.0
6.25	6.52	6.25	104.3	56.25	55.70	56.25	99.0
7.50	7.63	7.50	101.7	57.50	56.94	57.50	99.0
8.75	8.79	8.75	100.5	58.75	58.19	58.75	99.0
10.00	9.98	10.00	99.8	60.00	59.42	60.00	99.0
11.25	11.19	11.25	99.5	61.25	60.65	61.25	99.0
12.50	12.41	12.50	99.3	62.50	61.89	62.50	99.0
13.75	13.64	13.75	99.2	63.75	63.13	63.75	99.0
15.00	14.87	15.00	99.1	65.00	64.37	65.00	99.0
16.25	16.11	16.25	99.1	66.25	65.61	66.25	99.0
17.50	17.34	17.50	99.1	67.50	66.84	67.50	99.0
18.75	18.58	18.75	99.1	68.75	68.08	68.75	99.0
20.00	19.81	20.00	99.1	70.00	69.32	70.00	99.0
21.25	21.05	21.25	99.1	71.25	70.56	71.25	99.0
22.50	22.29	22.50	99.1	72.50	71.79	72.50	99.0
23.75	23.53	23.75	99.1	73.75	73.03	73.75	99.0
25.00	24.76	25.00	99.0	75.00	74.27	75.00	99.0
26.25	26.00	26.25	99.0	76.25	75.51	76.25	99.0
27.50	27.24	27.50	99.1	77.50	76.75	77.50	99.0
28.75	28.48	28.75	99.1	78.75	77.98	78.75	99.0
30.00	29.71	30.00	99.0	80.00	79.22	80.00	99.0
31.25	30.95	31.25	99.0	81.25	80.46	81.25	99.0
32.50	32.19	32.50	99.0	82.50	81.70	82.50	99.0
33.75	33.43	33.75	99.1	83.75	82.93	83.75	99.0
35.00	34.66	35.00	99.0	85.00	84.17	85.00	99.0
36.25	35.90	36.25	99.0	86.25	85.41	86.25	99.0
37.50	37.14	37.50	99.0	87.50	86.65	87.50	99.0
38.75	38.38	38.75	99.0	88.75	87.89	88.75	99.0
40.00	39.61	40.00	99.0	90.00	89.12	90.00	99.0
41.25	40.85	41.25	99.0	91.25	90.36	91.25	99.0
42.50	42.09	42.50	99.0	92.50	91.60	92.50	99.0
43.75	43.33	43.75	99.0	93.75	92.84	93.75	99.0
45.00	44.56	45.00	99.0	95.00	94.07	95.00	99.0
46.25	45.80	46.25	99.0	96.25	95.31	96.25	99.0
47.50	47.04	47.50	99.0	97.50	96.55	97.50	99.0
48.75	48.28	48.75	99.0	98.75	97.79	98.75	99.0
50.00	49.52	50.00	99.0	100.00	99.03	100.00	99.0

表3-2 軸力荷重時応力の比較 (2/2)

距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)	距離L (m)	解析値A (N/mm <sup>2</sup> )	理論値B (N/mm <sup>3</sup> )	A/B (%)
100.00	99.03	100.00	99.0	150.00	148.54	150.00	99.0
101.25	100.26	101.25	99.0	151.25	149.77	151.25	99.0
102.50	101.50	102.50	99.0	152.50	151.01	152.50	99.0
103.75	102.74	103.75	99.0	153.75	152.25	153.75	99.0
105.00	103.98	105.00	99.0	155.00	153.49	155.00	99.0
106.25	105.21	106.25	99.0	156.25	154.73	156.25	99.0
107.50	106.45	107.50	99.0	157.50	155.96	157.50	99.0
108.75	107.69	108.75	99.0	158.75	157.20	158.75	99.0
110.00	108.93	110.00	99.0	160.00	158.44	160.00	99.0
111.25	110.17	111.25	99.0	161.25	159.68	161.25	99.0
112.50	111.40	112.50	99.0	162.50	160.91	162.50	99.0
113.75	112.64	113.75	99.0	163.75	162.15	163.75	99.0
115.00	113.88	115.00	99.0	165.00	163.39	165.00	99.0
116.25	115.12	116.25	99.0	166.25	164.63	166.25	99.0
117.50	116.35	117.50	99.0	167.50	165.87	167.50	99.0
118.75	117.59	118.75	99.0	168.75	164.10	168.75	97.2
120.00	118.83	120.00	99.0	170.00	168.34	170.00	99.0
121.25	120.07	121.25	99.0	171.25	169.58	171.25	99.0
122.50	121.31	122.50	99.0	172.50	170.82	172.50	99.0
123.75	122.54	123.75	99.0	173.75	172.06	173.75	99.0
125.00	123.78	125.00	99.0	175.00	173.31	175.00	99.0
126.25	125.02	126.25	99.0	176.25	174.55	176.25	99.0
127.50	126.26	127.50	99.0	177.50	175.81	177.50	99.0
128.75	127.49	128.75	99.0	178.75	177.07	178.75	99.1
130.00	128.73	130.00	99.0	180.00	178.34	180.00	99.1
131.25	129.97	131.25	99.0	181.25	179.63	181.25	99.1
132.50	131.21	132.50	99.0	182.50	180.93	182.50	99.1
133.75	132.45	133.75	99.0	183.75	182.26	183.75	99.2
135.00	133.68	135.00	99.0	185.00	183.60	185.00	99.2
136.25	134.92	136.25	99.0	186.25	184.96	186.25	99.3
137.50	136.16	137.50	99.0	187.50	186.30	187.50	99.4
138.75	137.40	138.75	99.0	188.75	187.56	188.75	99.4
140.00	138.63	140.00	99.0	190.00	188.63	190.00	99.3
141.25	139.87	141.25	99.0	191.25	189.30	191.25	99.0
142.50	141.11	142.50	99.0	192.50	189.19	192.50	98.3
143.75	142.35	143.75	99.0	193.75	187.88	193.75	97.0
145.00	143.59	145.00	99.0	195.00	184.40	195.00	94.6
146.25	144.82	146.25	99.0	196.25	179.47	196.25	91.4
147.50	146.06	147.50	99.0	197.50	169.18	197.50	85.7
148.75	147.30	148.75	99.0	198.75	186.11	198.75	93.6
150.00	148.54	150.00	99.0	200.00	182.44	200.00	91.2

### 3.2 時刻歴応答解析の検証及び妥当性確認

一端固定、一端自由の梁の自由端に集中質量Mを置き、自由端に余弦波の加速度を与えて過渡的応答を求め理論解と比較した。

図3-4にモデルを示す。断面15 mm x 15 mm、長さ200 mmの梁モデルである。縦弾性係数は200000 N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は0.3とした。基部を固定して先端に8015kgの集中質量Mをセットする。梁の質量は無視した。

この時、梁の断面二次モーメントをI、縦弾性係数をE、梁の長さをLとすると梁の等価水平バネKおよびこの1質点系の周期Tは次式で求まる。

$$K = \frac{3EI}{L^3} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 1.0 \text{ sec}$$

先端の集中質量部に以下の加速度Aを与える。

$$A = 500 \sin(2\pi t) \cdots \cdots (1)$$

この時の集中質量部の速度Vおよび変位Dは上記の1質点系の仕様(KおよびT)とは関係なく(1)式を積分して次式で与えられる。Cは積分定数である。

$$V = \frac{500}{2\pi} [\cos(2\pi t) + C] \cdots \cdots (2)$$

$$D = -\frac{500}{(2\pi)^2} [\sin(2\pi t) + Ct] \cdots \cdots (3)$$

時間t=0の時にV=-500/2πとすると、C=-2となる。

図3-5に解析値と理論値の頂部変位を比較して示すが、両者はよく一致しており、解析の妥当性が検証できた。

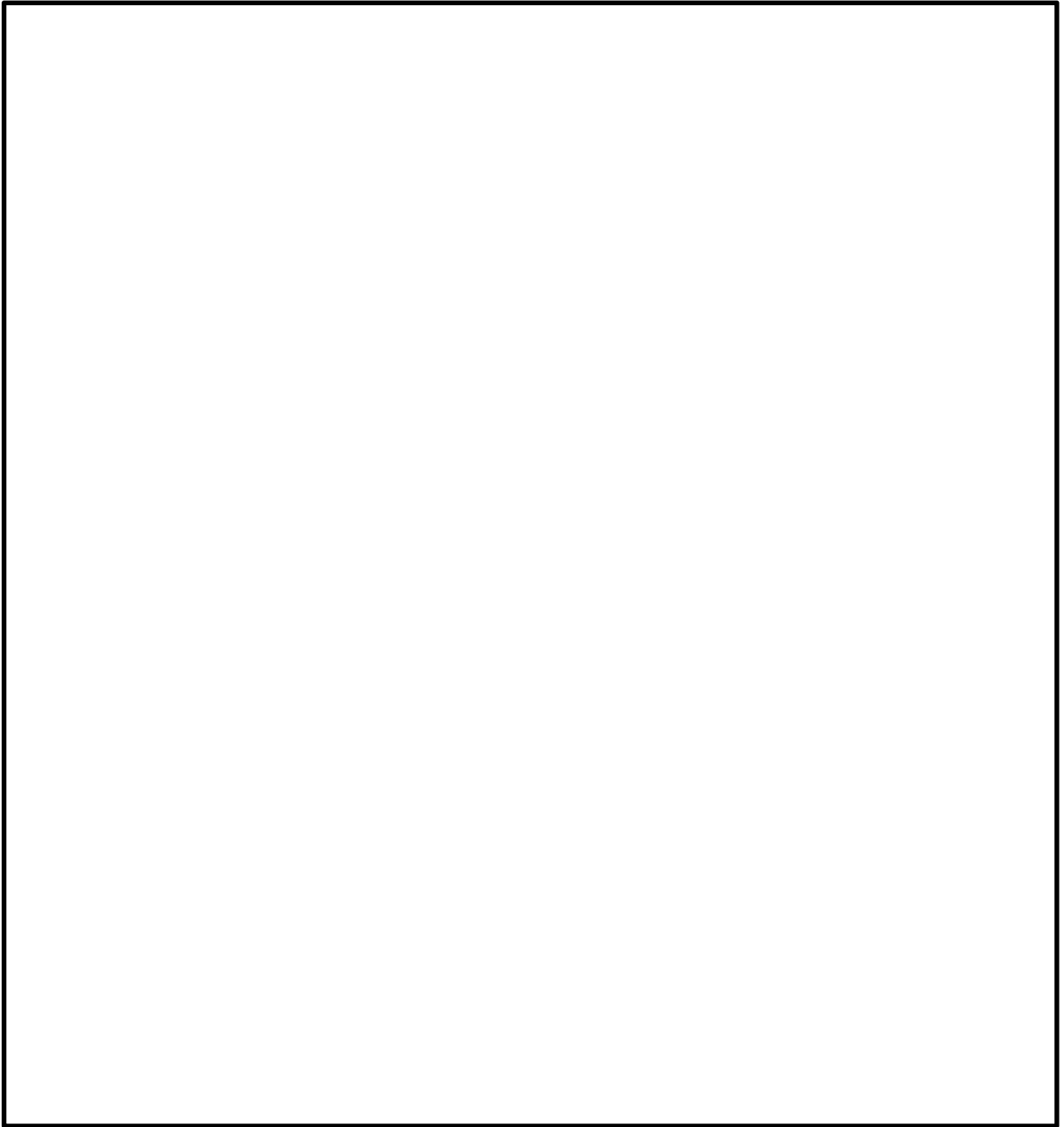


図 3-5 梁の頂部時刻歴応答

### 3.3 接触解析の検証及び妥当性確認

非線形解析において「MARC」とともに最もよく利用されている非線形解析コード「Abaqus」を用いて接触解析を実施した文献（Abaqus のBenchmarks Manualの一例：1.1-11 The Hertz contact problem）に基づき、同じ条件での解析を本解析コード（MARC）で実施し、両者の結果が良い一致を示すことを確認した。図3-6に示すモデルはMARC用に作った半径10in、厚み1inの円板の1/4モデルである。上端に強制変位0.4inを強制変位として与え、下端に位置する剛平面との接触解析を実施した。厚み（z軸方向）方向両面および中心面（x軸方向）は対称条件を与えている。縦弾性係数は30 lb/in<sup>2</sup>である。結果をAbaqusの結果と比較して図3-2に示す。本解析結果（赤マルで示す）は理論値およびAbaqusの結果とよく一致しており、妥当な解析コードであることが検証できた。

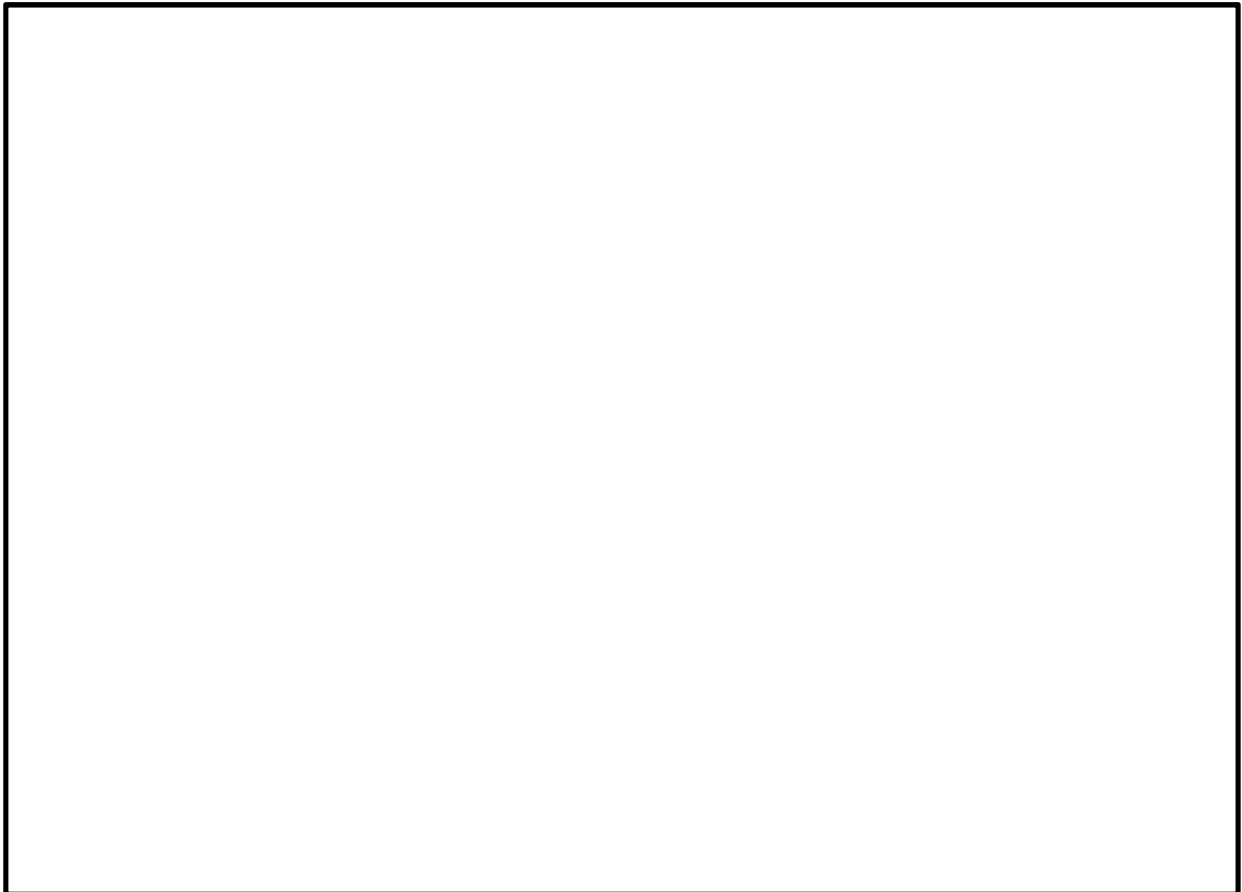


図 3-6 接触解析モデル図

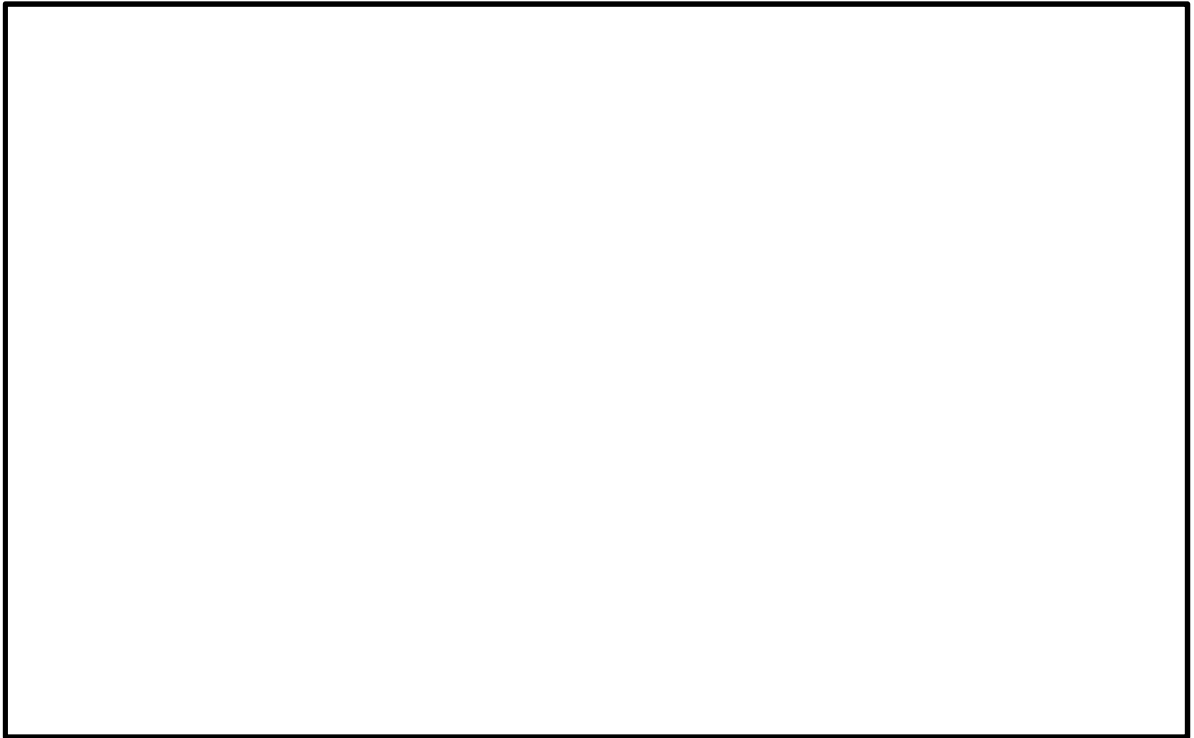


図3-7 強制変位0.4in時の接触圧分布の比較  
( ● が追記したMARCの解析結果)

### 3.4 超弾性体（ゴム）解析の検証及び妥当性確認

非線形解析において「MARC」とともに最もよく利用されている非線形解析コード「Abaqus」を用いてゴムの解析を実施した文献（Abaqus のBenchmarks Manualの一例：3.1.6 Rubber under uniaxial tension）に基づき、同条件での解析を本解析コード（MARC）で実施し、両者の結果が良い一致を示すことを確認した。

図3-8に解析の方法を模式的に示すが、本解析は単一（1つ）の6面体要素を用いて超弾性体としてのゴムの解析の妥当性を検証するものである。図3-9にMARCで用いた解析モデルを示す。モデルの1辺は1mmである。図3-10にモデルの頭部を6mm引上げた時のMARCでの解析結果（変形図）を示す。材料特性の入力データはAbaqusもMARCもゴムの引張試験結果（図3-11参照）のみである。引張試験データを用いてOgden等のエネルギー関数を解析コード内で同定して解析を行っている。

MARCの解析結果（Ogden使用）をAbaqusの結果と比較して図3-12に示す。本解析結果（赤マルで示す）はAbaqusのOgdenの結果およびTreloarの実験結果とよく一致しており、妥当な解析コードであることが検証できた。

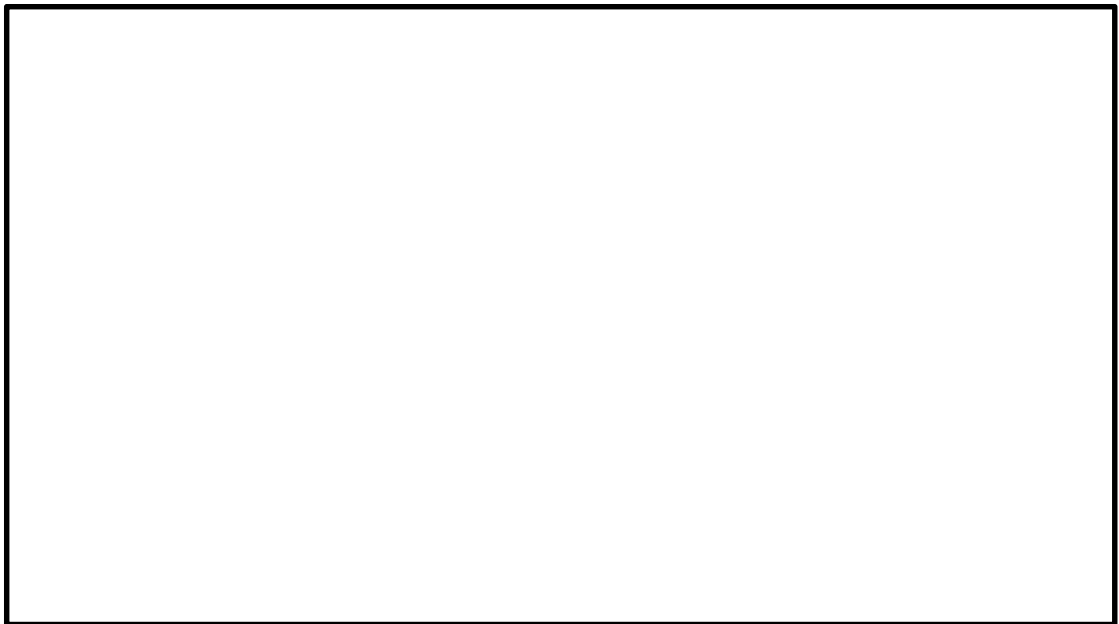


図3-8 初期要素形状と変形後の要素形状



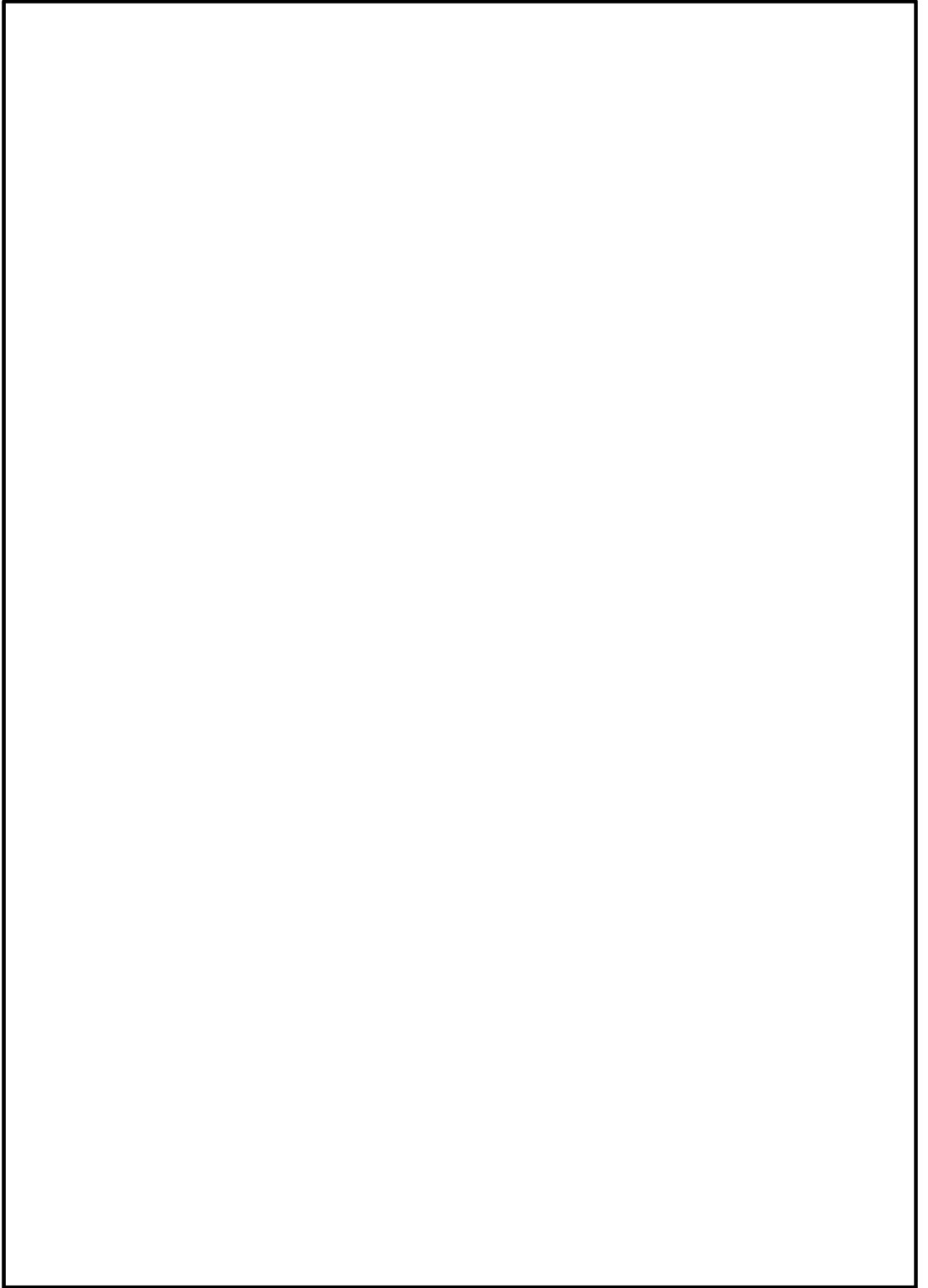


図3-10 超弾性体（ゴム）解析解析結果（変形図、6mm引上げ時）

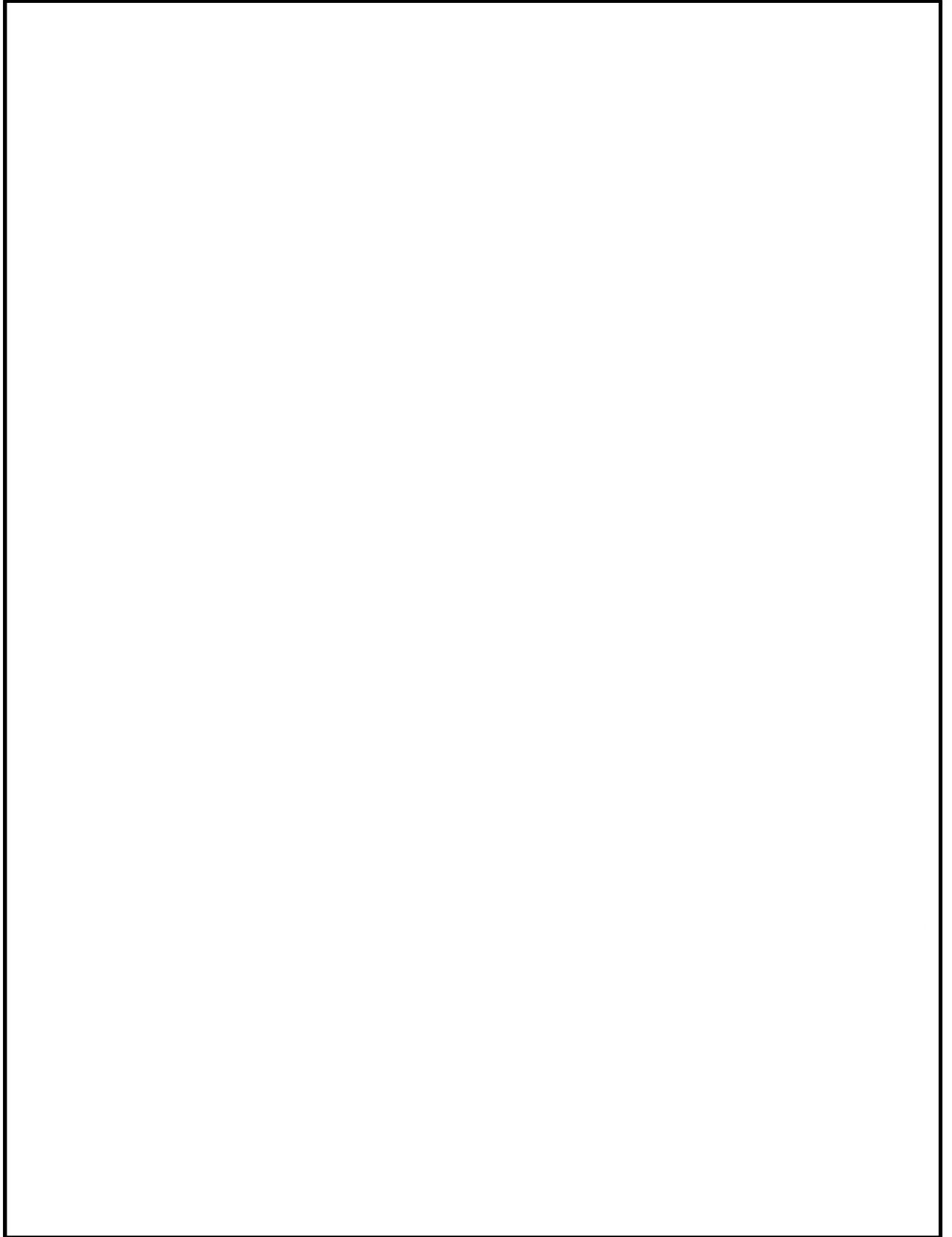


図3-12 解析結果の比較  
(● が追記したMARCの解析結果)