

公共試験場を利用して

老朽化に伴い更新の可能性出ています。

お問い合わせセリンク
<https://terakoya2018.com/question>

自力で ゴムの解析用ひずみエネルギーを構築しませんか。

- 候補日をいただければ調整します。1社4名様くらいまで -

委託測定 & 定義 298千円/材料～ **自力なら 8 材料** (40万円) 程度安価で定義できます。

1. 富山県でご希望の日程で、6時間程度で修得できます。

操作は簡単で、ひな型を使って回帰も簡単です。

※ひな型販売もしています。

2. 公共試験場ですので、安価に、(修得すれば) いつでも

ご利用いただけます。

アフターフォローも万全です、問い合わせに回答します。



寺子屋/CAE解援隊
 URL <https://terakoya2018.com>

連絡先 hagi@terakoya2018.com
 080-2230-8785

- プログラム (案) -

お客様ごとに設定

1. 単軸試験実習及び二軸試験実習

- 回帰及び測定手順書事前配布 -

1-1 単軸試験：二軸試験をより正確に定義するため、補正用に使います。・・・ 10:00～10:45

同じ材料は、見方や定義方法は異なっても剛性(真のヤング率)は1つです。

ヤング率 $E = 6(C_{10} + C_{01}) = (3/2) \sum \alpha_i \mu_i$ の関係があります。

※ C_{10} 、 C_{01} : Mooney定義係数、 α_i 、 μ_i : Ogden定義係数

1-2 二軸試験：一軸拘束二軸伸張試験、均等二軸は不要ですので実施しません。・・・ 11:00～12:00 材料2種類まで

(↑) P*に説明資料

2. 座学

・・・休憩と10分程度説明

2-1. 短冊、ダンベルでの単軸伸張試験の注意点

2-2. 見かけ上のヤング率についてと単軸試験から二軸係数の補正について

2-3. 二軸理論と製品適用範囲

均等二軸試験の必要性とエネルギー関数定義の適用範囲と勘違いについて

※ご希望で、ゴム製造メーカーへ様の上手な問い合わせ方法も提案します。

3. 単軸及び二軸試験のまとめ

・・・ 12:15～13:30

昼食休憩

4. 引き続き、測定可(3材料目～測定再開)

この時点で、寺子屋 撤収します。

費用：1名30万円、1名追加+5万円、1材料+3万円/税別 お弁当をご用意or近くの美味しいラーメン屋ご案内。

2材料なら13時ころ
終了、昼食

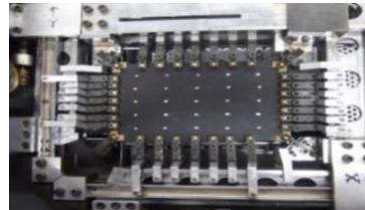
現地の二軸試験機

老朽化に伴い更新の可能性あり。



$$\text{Mooney式: } W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

※適用の構成則は、元のデータが同じならば
Ogden、Mooney、どれを選んでも同じ精度です。



動画Youtube:
一軸拘束二軸伸張

<https://youtu.be/k4d9Rw9KEv0>

動画Youtube:
均等二軸伸張

<https://youtu.be/NKkxhFv2-k>

従来の試験機は、横置き型・大型 非常に高価 旧型、富山工業試験場、昭和生まれですがまだまだ現役です。

老朽化に伴い更新の可能性あり。

3

どれも数学的表現

ひずみエネルギー密度関数 様々な表現式

5) Mooney高次式

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

今回この係数を求める

6) Ogden

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

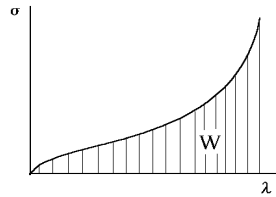
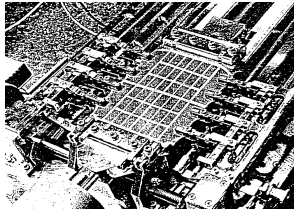
7) Arruda-Boyce

$$W = nk\theta \left[\frac{1}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{20N} \left(I_1^2 - 9 \right) + \frac{11}{1050N^2} \left(I_1^3 - 27 \right) + \frac{19}{7000N^3} \left(I_1^4 - 81 \right) + \frac{519}{673750N^4} \left(I_1^5 - 243 \right) \right]$$

ひずみエネルギー密度関数

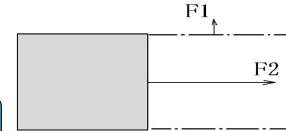
基本式 $W = W(I_1, I_2, I_3)$

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 & [\text{対角線効果}] \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 & [\text{面積効果}] \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 & [\text{体積効果}] \end{aligned}$$

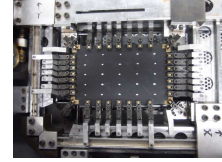
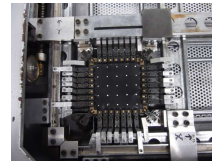


一軸拘二軸伸張試験

基本的にこの変形形態が解析の
予測精度アップに有効です。
※理由について説明します。

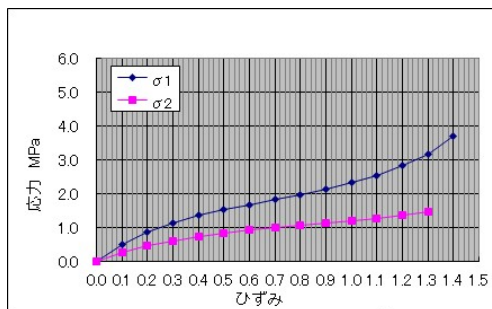


動画Youtube:
一軸拘束二軸伸張



ひずみエネルギー密度関数の回帰

測定した荷重vs変位
⇒ 応力vs ひずみ換算



※共に有効断面がポイントで、
どちらも同じ結果

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$$

$$\sigma_2 = \frac{2}{\lambda_2} \left(\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$$

$$\sigma_3 = 0$$



$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right]$$

$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left[\frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right]$$



重回帰から係数を求める。

Mooney式: $W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{01}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$

Excelのひな型で簡単に回帰できます。

1) 試験情報入力

試験装置 富山工業技術センター、生活工学研究所
 試験方法 2軸引張試験機につかみ具にゴムシートを固定し、引張る
 試験内容 2軸引張試験、1軸固定1軸引張試験 (Y軸固定し、X軸を引張った)
 引張速度 1.0mm/s
 予備引張 ①1回目 事前の予備引張等は行わず、組み付け後、即測定
 ②1回目、2回目と同じ伸張量で3回目の身長測定を行った。
 試験結果 引張試験結果シートに記載
 距離[mm]はクロス間ヘッド距離の増加分を示す。
 荷重は引張荷重[kg]
 その他 装置引張限界は200mm。

2) このシートの色に入力すると他は自動計算される

3) 応力計算を行うためシート厚みを入力する

4) 試験結果をコピーして値のみ張り付ける。

X補正変位とX荷重、Y荷重のデータをコピーして回帰シートへ数値貼り付け

ひな型を使うことで理論通りに順番に回帰分析できます。

試験No.	厚さ[mm]	ヤング率	1.102235	N/mm ²
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0000	1.0000	0.5000	1.0000	0.0000
2.0000	2.0000	1.0000	2.0000	0.0000
3.0000	3.0000	1.5000	3.0000	0.0000
4.0000	4.0000	2.0000	4.0000	0.0000
5.0000	5.0000	2.5000	5.0000	0.0000
6.0000	6.0000	3.0000	6.0000	0.0000
7.0000	7.0000	3.5000	7.0000	0.0000
8.0000	8.0000	4.0000	8.0000	0.0000
9.0000	9.0000	4.5000	9.0000	0.0000
10.0000	10.0000	5.0000	10.0000	0.0000
11.0000	11.0000	5.5000	11.0000	0.0000
12.0000	12.0000	6.0000	12.0000	0.0000
13.0000	13.0000	6.5000	13.0000	0.0000
14.0000	14.0000	7.0000	14.0000	0.0000
15.0000	15.0000	7.5000	15.0000	0.0000
16.0000	16.0000	8.0000	16.0000	0.0000
17.0000	17.0000	8.5000	17.0000	0.0000
18.0000	18.0000	9.0000	18.0000	0.0000
19.0000	19.0000	9.5000	19.0000	0.0000
20.0000	20.0000	10.0000	20.0000	0.0000

λ 1	σ x [N/mm ²]	σ y [N/mm ²]
1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0.1307	0.0653
1.0000	0.2613	0.1307
1.0000	0.3919	0.1960
1.0000	0.5227	0.2613
1.0000	0.6533	0.3267
1.0000	0.7840	0.3919
1.0000	0.8493	0.4572
1.0000	0.9146	0.5227
1.0000	0.9799	0.5880
1.0000	1.0453	0.6533
1.0000	1.1106	0.7187
1.0000	1.1760	0.7840
1.0000	1.2413	0.8493
1.0000	1.3067	0.9146
1.0000	1.3720	0.9799
1.0000	1.4373	1.0453
1.0000	1.5027	1.1106
1.0000	1.5680	1.1760
1.0000	1.6333	1.2413
1.0000	1.6987	1.3067
1.0000	1.7640	1.3720
1.0000	1.8293	1.4373
1.0000	1.8946	1.5027
1.0000	1.9599	1.5680
1.0000	2.0252	1.6333
1.0000	2.0905	1.6987
1.0000	2.1558	1.7640
1.0000	2.2211	1.8293
1.0000	2.2864	1.8946
1.0000	2.3517	1.9599
1.0000	2.4170	2.0252
1.0000	2.4823	2.0905
1.0000	2.5476	2.1558
1.0000	2.6129	2.2211
1.0000	2.6782	2.2864
1.0000	2.7435	2.3517
1.0000	2.8088	2.4170
1.0000	2.8741	2.4823
1.0000	2.9394	2.5476
1.0000	3.0047	2.6129
1.0000	3.0700	2.6782
1.0000	3.1353	2.7435
1.0000	3.2006	2.8088
1.0000	3.2659	2.8741
1.0000	3.3312	2.9394
1.0000	3.3965	3.0047
1.0000	3.4618	3.0700
1.0000	3.5271	3.1353
1.0000	3.5924	3.2006
1.0000	3.6577	3.2659
1.0000	3.7230	3.3312
1.0000	3.7883	3.3965
1.0000	3.8536	3.4618
1.0000	3.9189	3.5271
1.0000	3.9842	3.5924
1.0000	4.0495	3.6577
1.0000	4.1148	3.7230
1.0000	4.1801	3.7883
1.0000	4.2454	3.8536
1.0000	4.3107	3.9189
1.0000	4.3760	3.9842
1.0000	4.4413	4.0495
1.0000	4.5066	4.1148
1.0000	4.5719	4.1801
1.0000	4.6372	4.2454
1.0000	4.7025	4.3107
1.0000	4.7678	4.3760
1.0000	4.8331	4.4413
1.0000	4.8984	4.5066
1.0000	4.9637	4.5719
1.0000	5.0290	4.6372
1.0000	5.0943	4.7025
1.0000	5.1596	4.7678
1.0000	5.2249	4.8331
1.0000	5.2902	4.8984
1.0000	5.3555	4.9637
1.0000	5.4208	5.0290
1.0000	5.4861	5.0943
1.0000	5.5514	5.1596
1.0000	5.6167	5.2249
1.0000	5.6820	5.2902
1.0000	5.7473	5.3555
1.0000	5.8126	5.4208
1.0000	5.8779	5.4861
1.0000	5.9432	5.5514
1.0000	6.0085	5.6167
1.0000	6.0738	5.6820
1.0000	6.1391	5.7473
1.0000	6.2044	5.8126
1.0000	6.2697	5.8779
1.0000	6.3350	5.9432
1.0000	6.4003	6.0085
1.0000	6.4656	6.0738
1.0000	6.5309	6.1391
1.0000	6.5962	6.2044
1.0000	6.6615	6.2697
1.0000	6.7268	6.3350
1.0000	6.7921	6.4003
1.0000	6.8574	6.4656
1.0000	6.9227	6.5309
1.0000	6.9880	6.5962
1.0000	7.0533	6.6615
1.0000	7.1186	6.7268
1.0000	7.1839	6.7921
1.0000	7.2492	6.8574
1.0000	7.3145	6.9227
1.0000	7.3798	6.9880
1.0000	7.4451	7.0533
1.0000	7.5104	7.1186
1.0000	7.5757	7.1839
1.0000	7.6410	7.2492
1.0000	7.7063	7.3145
1.0000	7.7716	7.3798
1.0000	7.8369	7.4451
1.0000	7.9022	7.5104
1.0000	7.9675	7.5757
1.0000	8.0328	7.6410
1.0000	8.0981	7.7063
1.0000	8.1634	7.7716
1.0000	8.2287	7.8369
1.0000	8.2940	7.9022
1.0000	8.3593	7.9675
1.0000	8.4246	8.0328
1.0000	8.4899	8.0981
1.0000	8.5552	8.1634
1.0000	8.6205	8.2287
1.0000	8.6858	8.2940
1.0000	8.7511	8.3593
1.0000	8.8164	8.4246
1.0000	8.8817	8.4899
1.0000	8.9470	8.5552
1.0000	9.0123	8.6205
1.0000	9.0776	8.6858
1.0000	9.1429	8.7511
1.0000	9.2082	8.8164
1.0000	9.2735	8.8817
1.0000	9.3388	8.9470
1.0000	9.4041	9.0123
1.0000	9.4694	9.0776
1.0000	9.5347	9.1429
1.0000	9.6000	9.2082
1.0000	9.6653	9.2735
1.0000	9.7306	9.3388
1.0000	9.7959	9.4041
1.0000	9.8612	9.4694
1.0000	9.9265	9.5347
1.0000	9.9918	9.6000
1.0000	10.0571	9.6653
1.0000	10.1224	9.7306
1.0000	10.1877	9.7959
1.0000	10.2530	9.8612
1.0000	10.3183	9.9265
1.0000	10.3836	9.9918
1.0000	10.4489	10.0571
1.0000	10.5142	10.1224
1.0000	10.5795	10.1877
1.0000	10.6448	10.2530
1.0000	10.7101	10.3183
1.0000	10.7754	10.3836
1.0000	10.8407	10.4489
1.0000	10.9060	10.5142
1.0000	10.9713	10.5795
1.0000	11.0366	10.6448
1.0000	11.1019	10.7101
1.0000	11.1672	10.7754
1.0000	11.2325	10.8407
1.0000	11.2978	10.9060
1.0000	11.3631	10.9713
1.0000	11.4284	11.0366
1.0000	11.4937	11.1019
1.0000	11.5590	11.1672
1.0000	11.6243	11.2325
1.0000	11.6896	11.2978
1.0000	11.7549	11.3631
1.0000	11.8202	11.4284
1.0000	11.8855	11.4937
1.0000	11.9508	11.5590
1.0000	12.0161	11.6243
1.0000	12.0814	11.6896
1.0000	12.1467	11.7549
1.0000	12.2120	11.8202
1.0000	12.2773	11.8855
1.0000	12.3426	11.9508
1.0000	12.4079	12.0161
1.0000	12.4732	12.0814
1.0000	12.5385	12.1467
1.0000	12.6038	12.2120
1.0000	12.6691	12.2773
1.0000	12.7344	12.3426
1.0000	12.7997	12.4079
1.0000	12.8650	12.4732
1.0000	12.9303	12.5385
1.0000	12.9956	12.6038
1.0000	13.0609	12.6691
1.0000	13.1262	12.7344
1.0000	13.1915	12.7997
1.0000	13.2568	12.8650
1.0000	13.3221	12.9303
1.0000	13.3874	12.9956
1.0000	13.4527	13.0609
1.0000	13.5180	13.1262
1.0000	13.5833	13.1915
1.0000	13.6486	13.2568
1.0000	13.7139	13.3221
1.0000	13.7792	13.3874
1.0000	13.8445	13.4527
1.0000	13.9098	13.5180
1.0000	13.9751	13.5833
1.0000	14.0404	13.6486
1.0000	14.1057	13.7139
1.0000	14.1710	13.7792
1.0000	14.2363	13.8445
1.0000	14.3016	13.9098
1.0000	14.3669	13.9751
1.0000	14.4322	14.0404
1.0000	14.4975	14.1057
1.0000	14.5628	14.1710
1.0000	14.6281	14.2363
1.0000	14.6934	14.3016
1.0000	14.7587	14.3669
1.0000	14.8240	14.4322
1.0000	14.8893	14.4975
1.0000	14.9546	14.5628
1.0000	15.0199	14.6281
1.0000	15.0852	14.6934
1.0000	15.1505	14.7587
1.0000	15.2158	14.8240
1.0000	15.2811	14.8893
1.0000	15.3464	14.9546
1.0000	15.4117	15.0199
1.0000	15.4770	15.0852
1.0000	15.5423	15.1505
1.0000	15.6076	15.2158
1.0000	15.6729	15.2811
1.0000	15.7382	15.3464
1.0000	15.8035	15.4117
1.0000		

エネルギー関数導出の落とし穴

一軸拘束二軸伸張試験機が有効な理由

/全てのデータを入力すると解析が精度アップというのは間違いです。

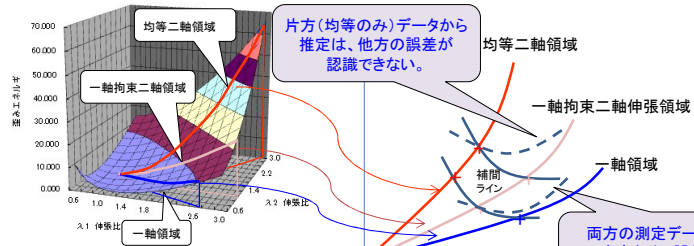
良く、単軸、一軸拘束二軸伸張（純せん断）、均等二軸すべてのデータを入力すると精度が上がるといいますが、間違いではありませんがこれらの式ですべての面をすべて精度よく表現できるでしょうか。難しいです、1つの領域でも表現できないのに・・・。

1) Mooney高次モデル

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

2) Ogdenデル

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$



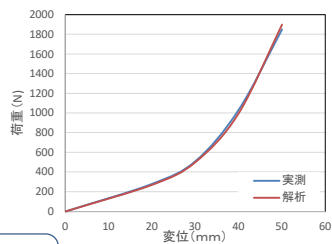
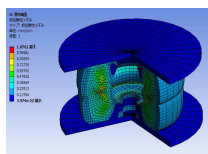
一つの領域から求めたエネルギーは、他方の誤差核拡大の可能性あり。
双方の領域から得られたデータは、式が不完全なため双方の誤差拡大。
 → 製品のターゲットに合せたエネルギーデータ収集

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

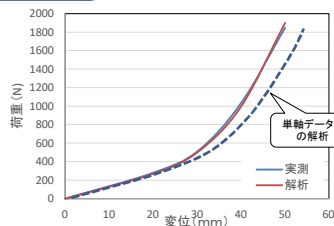
9

エネルギー関数導出の落とし穴

クッションラバーの変形解析

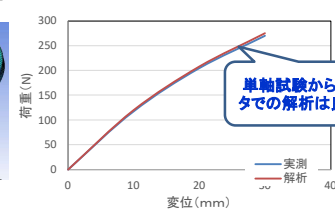
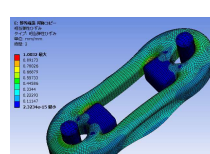


純せん断データが有効
 (均等二軸伸張ではありません)



単軸データでの解析

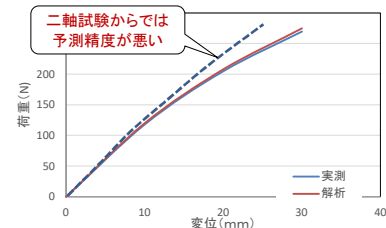
マフラーマウントの変形解析



単軸試験からのデータでの解析は良く一致

輪ゴムの変形に近く
 単軸試験データが有効

一軸拘束二軸伸張領域のデータで解析



二軸試験からでは予測精度が悪い

© 2022 Terakoya All Rights Reserved.

10

ひずみエネルギー密度関数の回帰方法

Mooney高次モデルの定義

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

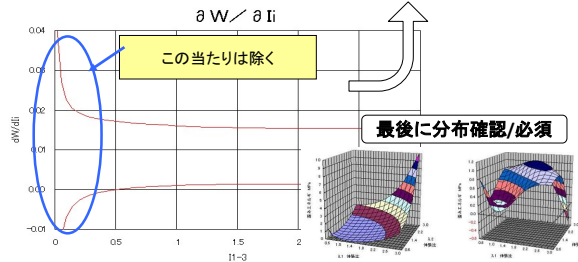
$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right] \Rightarrow = C_{10} + C_{11}(I_2 - 3) + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2$$

$$\frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left[\frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right] \Rightarrow = C_{01} + C_{11}(I_1 - 3)$$

EXCELの回帰機能で係数をもとめられる。

実測からプロット
(赤線)

二軸試験機の実習から回帰のご指導承ります。



全ての係数を特定するには2方向のデータ(伸張側と拘束側)が必須ですが、ソフトの回帰機能は(伸張側の)1方向データで回帰可能、何らかの前提を取り入れるか？ 優秀な機能かもしれません。

11

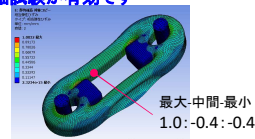
エネルギー関数導出の落とし穴

二軸均等伸張データで予測できるのは、風船のような製品

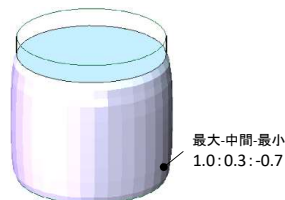
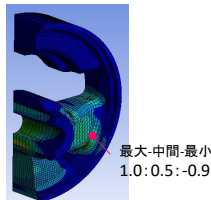
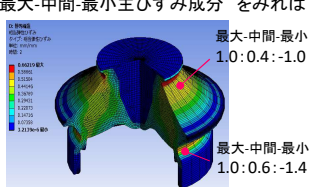


2方向に均等に伸張する製品は
ゴム製品でも少ない
⇒ 均等二軸伸張の領域データは不要

単軸試験が有効です



二軸試験で一軸拘束二軸伸張試験が有効な理由
最大-中間-最小主ひずみ成分をみれば

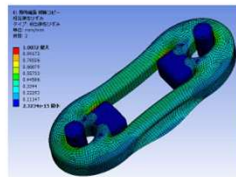
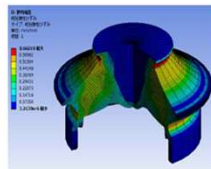


いずれもひずみを確認すればわかるように
均等二軸とより純せん断(一軸拘束二軸伸張)、単軸試験が有効です。

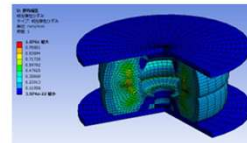
12

兵庫県 工業技術センターでMARC習得しませんか

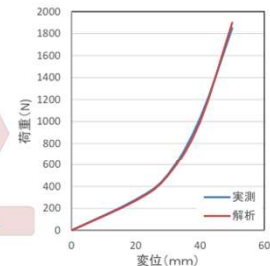
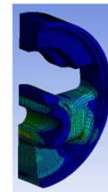
1日で基本修得でき、その後電話サポートなど。試験場使用料込み20万円～



クッションラバーの変形解析



二軸を修得すれば無敵です。



自動化、CAD機能の自動描画も可能です。

1日でFEM/MARC-ゴム製品の解析を修得 -タイムスケジュール

週末を利用して、神戸・秋田でMARCを1日で修得しませんか。講習後は、バックアップ万全です。

開発・設計業務にゴムのCAEを効果的に活用するため基礎理論とFEM解析技術を展開

理論、実習面

1. 解析の基礎 理論及び実習

- 1) メッシュの作成からモデル化：平面ひずみ、平面応力、軸対称要素の説明と解析
- 2) メッシングの基本実践と理論：ご要望により調整、解析モデル持ち込み可
メッシュ作成の基本から解析まで簡単なモデル、若しくはお持ち込みモデルでの解析
- 3) 解析結果の見方：ひずみ、応力、荷重たわみ特性、面圧、その他
ゴムの基本として応力評価してはいけない/理論説明含めて

2. 解析応用 2D～3次元への展開

- 1) モデリング手法/拡張
- 2) 解析条件設定
- 3) 結果の見方と結果を簡単に出力する仕組み
- 2) 解析の自動化～CAD自動化への展開
- 3) 熱膨張及び収縮解析

ここまでAM/実習中心・理論は補助

3. 解析の便利機能

- 1) スムージング解析（回転体など）
- 2) ブーミング解析：局所の詳細解析への展開
- 3) 線形解析でも陥りやすいポイント、改善方法

※理論：ゴムのFE解析[書籍]プレゼント、詳細の説明あり。また、オペレーションのみではなく、順次、解析の基礎及び注意すべきポイント、ゴムの解析用材料データの構築について説明。

導入検討・即開発適用、25万円+税ですぐに2次元（平面、軸対称）から3次元展開まで使えるようになります。

