

岩石加熱試験と比較した静的破碎剤の熱応力による破碎効果

EFFECT OF THERMAL STRESS IN THE FRACTURING OF EXPANSIVE CEMENT AGENT IN COMPARISON WITH HEATER TEST OF ROCK

末宗克浩*・石田 毅**・木下直人***・福井久明****

Katsuhiro SUEMUNE, Tsuyoshi ISHIDA, Naoto KINOSHITA and Hisaaki FUKUI

Calcium oxide (CaO)-based expansive cement has been believed to make fracture in rocks and concretes by its expansive pressure, since a volume of CaO becomes twice larger with the chemical reaction shown in the equation, $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$. However, the authors found that the fracture is mainly caused by thermal stresses due to heat accompanied with the chemical reaction, at the least in specimens bounded by free surfaces. In this paper, we discuss the fracturing mechanism based on AE source distributions, in comparison with them in a heater test of a rock specimen.

Key Words: expansive cement, thermal stress, fracturing, acoustic emission, rock

1. はじめに

従来、コンクリート構造物の破碎には火薬類、重機械が用いられてきたが、これらによる工事では騒音・粉塵・振動等を伴うため、これらの問題が生じない静的破碎剤を用いた破碎が頻繁に用いられるようになってきている。静的破碎剤の主成分である生石灰は水との水和反応の進行とともに急激な発熱を伴い、次の式で表される化学反応によって最終生成物である Ca(OH)_2 に変化する。



この間、 Ca(OH)_2 の体積は CaO の約 2 倍に膨張するため、従来はこの水和反応の体積膨張により脆性材料を破壊することができると考えられてきた。体積膨張による破壊であれば、破壊は破碎孔付近から発生する。しかし、立方体供試体を用いた我々の過去の静的破碎剤による破碎実験^{1), 2)}では、どちらかという供試体側面から亀裂が発生する傾向が見られた。これは膨張圧だけではなく、水和反応による発熱から生じる熱応力が亀裂の発生に大きく関与しているからではないかと思われた。そこで、過去に行ったほぼ同じ形状の花崗岩の加熱実験³⁾の結果と比較し、熱応力の作用下でどのような亀裂進展が見られるかを確認することにより、静的破碎剤の破碎における熱応力の影響を検討することにした。

2. 静的破碎剤実験

2.1. 実験方法

(1) 供試体と破碎方法

実験に用いた供試体は、一辺 300 mm のモルタル立方体であり、図-1 のように座標系を定めた。供試体には直径 50 mm、深さ 260 mm の孔を設けこれを破碎孔とした。破碎孔には図-2 に示すように、まず圧力計と熱電対を挿入し、隙間に静的破碎剤を充填した後、水を注入した。

* 学生会員 山口大学大学院 理工学研究科

** 正会員 山口大学 工学部 社会建設工学科

*** 正会員 (株)地層科学研究所

**** 正会員 (株)ロックス・ジャパン 代表取締役

(2) 測定方法

本実験では供試体の挙動を把握するため、温度・膨張圧・AE の測定を行った。温度は破砕孔内で T 熱電対を用いて図-2 に示す 3 点において測定した。

膨張圧は外径 12.5 mm、長さ 150 mm の鉄製円筒の圧力計 KPJ-60MPS((株)東京測器研究所)で測定した。実験では破砕孔内温度が 100℃ を超えることから、温度が圧力計に与える影響を考慮しなければならない。そこで、圧力測定を温度のみを変化させる条件下で行い、各温度での圧力誤差を求める補正試験を行い、温度による影響を考慮した。

AE は図-1 に示すように供試体表面各面に 2 個ずつ計 12 個の AE センサーを貼付し測定した。AE 発生頻度は、しきい値を 250mV に設定して 0.1 秒毎にリングダウン計数法でチャンネル毎に計数して記録した。また震源決定のため AE 波形をサンプリングタイム 0.2 μ s、記録長 2kword で A/D 変換し、Dead Time 4.4ms で波形記録装置に記録した。

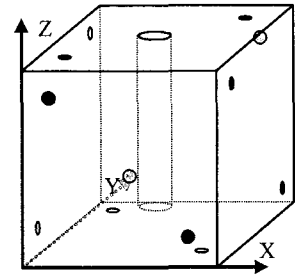
2.2. 実験結果

(1) 膨張圧・温度・AE 発生頻度の経時変化

図-3 は横軸に経過時間を、縦軸に膨張圧と温度、AE 発生頻度を示す。膨張圧を見ると経過時間 742 秒で最大値 22.2MPa を示し、その後急激に低下した。一方温度は熱電対 TC2 が経過時間 743 秒で 120℃ を記録し、AE 発生数は経過時間 742.5 秒からの 0.1 秒間に最大 11309 個を記録した。図-4 に実験後供試体表面で観察した亀裂のスケッチを供試体表面の展開図上に示す。

(2) AE 震源の空間分布

AE 震源は収録した合計 4157 個の AE イベント波形の P 波初動到達時間から求めた。推定誤差数 mm 以内の精度で決定された AE 震源 375 個を、4 つの時間帯に分類し、XY 平面上にプロットしたものを図-5(a)~(d)に示す。ここで時間区分は I 期：実験開始から経過時間 710.0 秒、II 期：710.0~731.5 秒、III 期：731.5~735.0 秒、IV 期：735.0~742.0 秒とした。図-5(a)の I 期を見ると、AE 震源は破砕孔周辺、破砕孔と端面を結ぶ最短距離の 4 方向にまばらに分布している。これは図-4 に示した巨視的亀裂の位置と一致しない箇所もあることから、最終的な巨視的亀裂の造成には結びつかなかった AE の発生と考えられる。II 期において AE 震源は Y 座標 190~275 mm の間に密に分布している。次に III 期ではその分布が供試体外壁付近に向けて広がっていく。最後の IV 期になると新たに破砕孔から Y 座標 0 mm の側面に向けて Y 座標 50 mm 付近まで巨視的亀裂の発生位置に沿うように AE 震源の分布がみられる。以上のことから、巨視的



● AEセンサー
図-1 供試体とAEセンサー位置
(静的破砕剤による破壊試験)

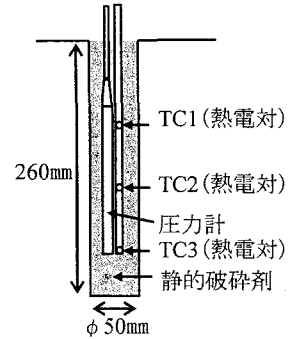


図-2 破砕孔内図

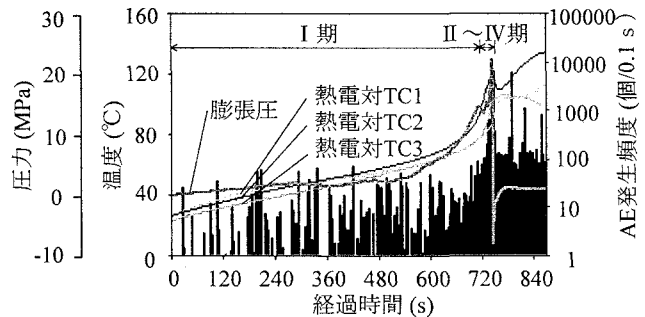


図-3 膨張圧・温度・AE発生頻度の経時変化

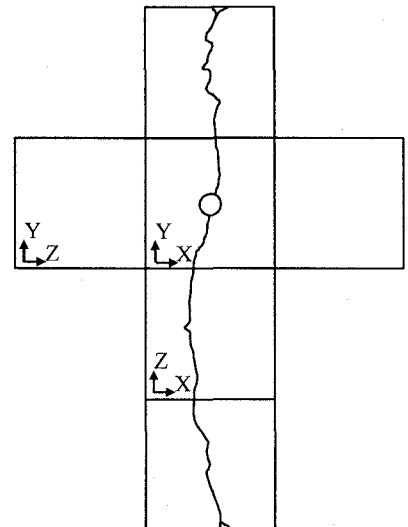


図-4 亀裂のスケッチ

亀裂は温度と圧力が上昇した、II期の710.0～735.0秒の間に、Y座標190～275mmの破砕孔と供試体側面の中間部から発生し、III期の震源分布からわかるように先に側面に亀裂が達した後、IV期になってから破砕孔

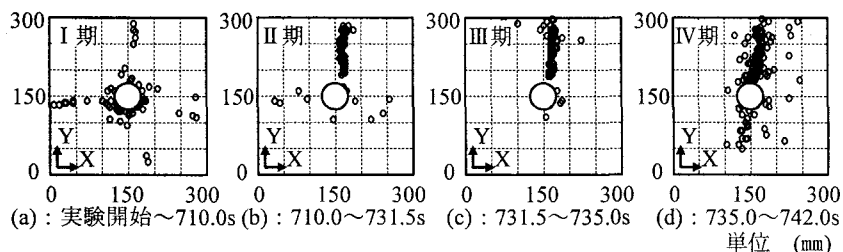


図-5 経過時間別AE震源空間分布図

に達したといえる。そしてその後、すでにY座標150～300mmの間に造成された亀裂の開口に伴う供試体の曲げ変形により、破砕孔からY座標の0mmの側面に向けた新たな亀裂が発生したのではないと思われる。

3. 岩石加熱試験

静的破砕剤による破壊試験では、破砕孔と供試体側面の中間部から巨視的亀裂が発生し、先に側面に亀裂が達した後、逆方向に進展し破砕孔に達する傾向がみられた。このような亀裂の進展は、静的破砕剤の破砕効果として従来考えられていた膨張圧だけでは説明できず、熱応力の大きな関与が考えられる。そこで、過去に行ったほぼ同じ形状の花崗岩の加熱実験の結果を整理し、熱応力の作用下でどのような亀裂進展が見られるかを確認する。

3.1. 実験方法

(1) 供試体と熱破壊の方法

実験に用いた供試体は、一辺300mmの茨城県産の稲田花崗岩であり、図-6のように座標系を定めた。供試体には直径28mmの孔を上下方向に設けこれにヒーターを挿入した。ヒーターは直径22mm、長さ300mmであり、ヒーターと孔壁との隙間に豊浦標準砂を充填し、供試体の上下面は断熱材で覆った。また、供試体の側面は、温度ができるだけ変化しないように、ビニール製ホースを密に巻き付け、実験中ホース内に水道水を流して冷却した。整形後1週間以上室内に保存して自然乾燥させた供試体を用いて、ヒーター表面の昇温速度200℃/hで約2時間30分かけて500℃まで加熱した後30分間一定温度を保持した際の供試体の挙動を調べた。

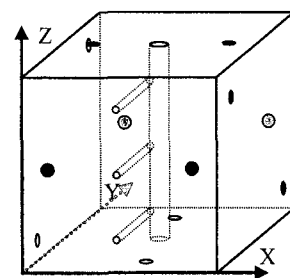


図-6 供試体とAEセンサー位置 (加熱試験)

(2) 測定方法

加熱時の供試体の挙動を把握するため、温度、AE、および導電ペイントによる亀裂進展状況測定のための3つの測定方法を用いた。これらの測定位置を図-7に示す。

温度は、供試体側面の中央Mとその上下100mmの位置U、Dから、直径8mmの細孔を中心に向けて平行に穿孔し、各孔に図-8に示すように10本ずつ熱電対を埋設して、測定した。

AEは図-6および図-7に示すように供試体表面各面に2個ずつ計12個のAEセンサーを貼付し、測定条件は静的破砕剤実験と同じ条件で行った。

導電ペイントは亀裂の進展状況を把握するため、図-7に示す位置に塗布した。導電ペイント線の幅は約1.5mmとし、亀裂のわずかな開口でも導電ペイントが切断されるように、できるだけ薄

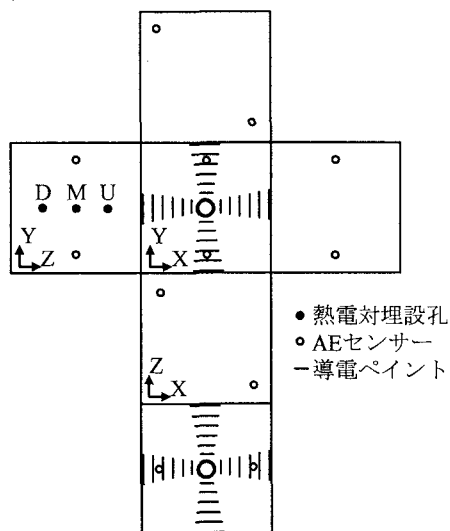


図-7 熱電対、AEセンサー、導電ペイント設置位置

く塗布した。実験中は、これらの導電ペイント線に電流を流しておき、断線した時刻を測定した。

3.2 実験結果

(1) 温度の経時変化

図-9に供試体中央部のM孔で測定した、供試体内部の温度の経時変化を示す。供試体内部の温度変化をみると、当然のことながら、常にヒーターに近い測定位置から順に高温を示し、温度勾配もヒーターに近いほど大きくなっている。特にヒーター表面と供試体の孔壁面との間の温度差は非常に大きく、両者の間にはわずかに厚さ3mmの充填材が存在するだけであるが、実験終了時のヒーター表面の温度は500℃であるのに対して、孔壁面の温度は約320℃であり、両者の間には約180℃の温度差がみられる。

供試体内部の、各測定点の温度変化に着目すると、ヒーター孔に近いNo.0点（ヒーター孔壁面）とNo.1点（ヒーター孔壁面から6mm）以外では、100℃に達すると、いったん温度上昇が止まり、その後しばらくしてから再び温度上昇が始まっている。これは供試体内に残留していた水分の蒸発時の潜熱の影響と思われる。

(2) 導電ペイントによる亀裂進展状況

図-10に実験後供試体表面で観察した亀裂のスケッチを供試体表面の展開図上に示す。また、供試体上面において、導電ペイントが切断された時間を図-11に示す。図-11を見ると亀裂は加熱開始94分後に外側から発生している。この亀裂は、その後1分以内の間に、側面から約80mmのところまで進展したと考えられる。その後の亀裂の進展は比較的ゆっくりしていたと考えられ、ヒーター孔中心から50mmおよび30mmの導電ペイントが切断されたのは、それぞれ、亀裂が発生してから31分後および37分後であり、30～40分経過してヒーター孔壁面に達したと考えられる。

ヒーター孔から側面2の方向の、3番目および4番目の導電ペイントの切断状況から、実験開始約150分後の、ヒーター温度を一定に保ち始めた頃から、新たな亀裂がヒーター孔から側面2の方向に向かって進展したことがわかる。この亀裂は、実験終了後の目視観察により、ヒーター孔から約110mmの位置まで達していることが確認された。それ以外に、導電ペイントの塗布位置からずれているために、亀裂の発生した時期は不明であるが、ヒーター孔から側面1の方向に伸びている亀裂および側面4のほぼ中央部から水平方向に伸びている亀裂が観察されている。

(3) AE震源の空間分布

推定誤差数mm以内の精度で決定されたAE震源94個を、4つの時間帯に分類し、XY平面上にプロットしたものを図-12(a)～(d)に示

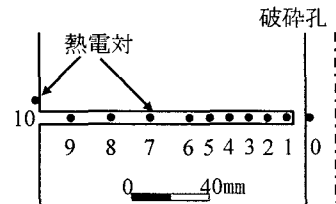


図-8 供試体内の温度測定点

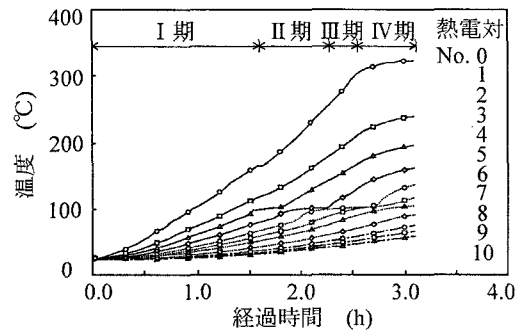


図-9 供試体内温度の経時変化

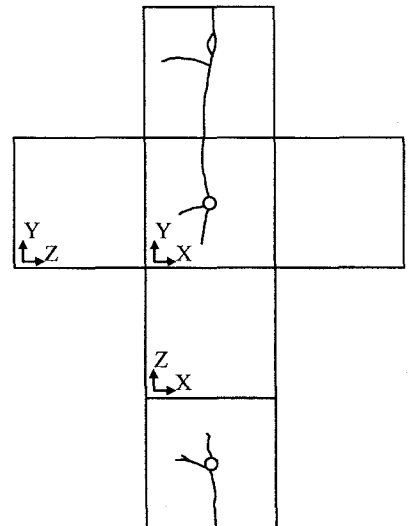


図-10 亀裂のスケッチ

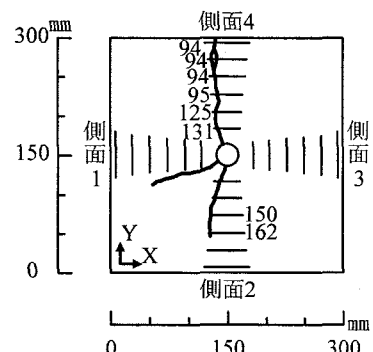


図-11 亀裂の進展状況

す。ここで時間区分はⅠ期：実験開始～94分，Ⅱ期：94～134分，Ⅲ期：134～150分，Ⅳ期：150分～実験終了までとした。

図のⅠ期からⅡ期の間に発生した AE の位置は、

いずれも、主として、Y

座標 150～300 mm の限られた領域内に分布しており、図-10、11 に示す最初に亀裂が発生、進展した位置に対応している。一方、Ⅲ期からⅣ期の間に発生した AE は、必ずしもそれに限定されない位置に分布している。なお、実験終了後の観察により、ヒーター孔から側面 1 の方向に伸びている亀裂および側面 4 のほぼ中央部から水平方向に伸びている亀裂の存在が確認されているのにもかかわらず、それに対応する位置では、いずれの時期においても AE は発生していない。このことから、これらの亀裂は、AE 計測終了後の供試体冷却時に発生したものであると推測される。

側面から亀裂が発生し始めてから、亀裂が孔壁面に到達するまでの約 40 分間について、AE 発生位置の移動と、導電ペイントの切断から推定される亀裂の進展状況とを比較してみた。亀裂の周辺で発生した AE だけに限定して、この 40 分間における AE の発生位置の経時変化を求めた結果を図-13 に示す。図には、導電ペイントの切断からみた亀裂の先端位置の経時変化を◆印で示してある。亀裂発生直後の AE は、側面から約 80mm（ヒーター孔中心から約 70mm）までの範囲で発生しており、それより内側（ヒーター孔側）では発生していない。その後 AE の発生位置は、時間の経過とともに徐々に内側の方向に広がっている。AE は、亀裂の先端またはそのやや前方に相当すると思われる位置において発生頻度が高くなっている。このように、AE の発生位置の経時変化を導電ペイントの切断状況と対比することにより、AE の発生に少し遅れて巨視的亀裂が徐々に進展していることがわかる。

図-13 からわかるように、AE は亀裂の先端付近だけでなく、その後方の既に亀裂が形成されている位置においても発生している。これは、熱応力による亀裂の発生、進展がみられる状態では、その後方の既存の亀裂の部分でもすべりが生じ、それに伴って AE が発生していると考えられる。

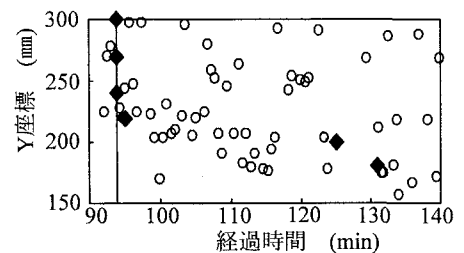


図-13 亀裂発生後のAE発生位置の経時変化

3.3 熱応力解析

(1) 解析方法

本実験結果を対象にして、弾性熱応力解析を実施した。供試体側面に亀裂が発生した、実験開始 94 分における半径方向の温度分布 T を U 孔での測定結果に基づいて 図-14 の曲線で示される半径 r の関数

$$T = A_1 + A_2 / \ln r + A_3 \ln r + A_4 (\ln r)^2 \cdots \cdots (1)$$

で表されると仮定する⁴⁾。そして、軸対称の温度分布をもつ内径 a 、外径 b の円板の応力分布に式⁵⁾、

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{r^2} \left[\frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr + \int_a^r T r dr - T r^2 \right] \cdots \cdots (2)$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{r^2} \left[\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr - \int_a^r T r dr \right] \cdots \cdots (3)$$

を用いて、数値計算を行うと図-14に示す熱応力分布が得られる。式(1)は円筒の定常熱伝導の解を参考として仮定したものであり、 $A_1 \sim A_4$ は定数を、 $\ln$ は自然対数を示す。また、式(2)と式(3)の計算において、内外径には $a=14\text{ mm}$ 、 $b=150\text{ mm}$ の値を、ヤング率 E 、線膨張係数 α には別途行ったコア試験から得た $\alpha=8.5 \times 10^{-6}$ 、 $E=47\text{ GPa}$ の値を用い、引張応力を正とした。また図には、この実験に用いた稲田花崗岩の圧裂引張強度の値も示してある。

(2) 熱応力解析結果と実験結果との比較

図-14の接線方向力 σ_θ についてみると、円孔中心から約50 mmを境にして、それより内側では

圧縮応力が、それより外側では引張応力が作用している。供試体側面での引張応力の計算値は約6.9 MPaに達しており、これは圧裂引張強度とほぼ等しい値を示している。一方ヒーター孔壁面での接線方向力 σ_θ 約41 MPaという値は、供試体の一軸圧縮強度(200℃で約150 MPa)と比較するとかなり小さい。従って、熱応力解析結果は、供試体の破壊が、ヒーター孔壁面からでなく、側面から引張応力により発生するというを示しており、実験結果と対応している。

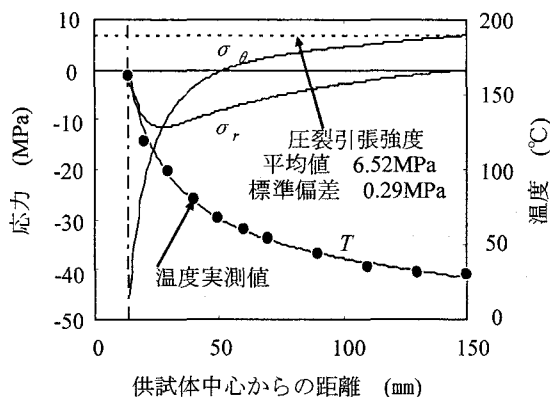


図-14 供試体破壊時における熱応力解析結果

4. 考察

静的破碎実験において、AE震源の分布は破碎孔と供試体外壁の中央部から発生し始めた。静的破碎剤の水和反応による体積膨張のみによって破壊が引き起こされるのであれば、AE震源は破碎孔付近から発生し始めるはずである。岩石加熱試験の結果ではAEの発生位置の経時変化を導電ペイントの切断状況と対比することにより供試体の亀裂は供試体外壁から発生し、ヒーター孔に向かって進展していることが明らかとなった。熱応力解析結果においても、供試体外壁付近での引張応力は圧裂引張強度を上回っている。

以上のことから、静的破碎剤による破碎では体積膨張による膨張圧だけでなく、発熱による熱応力が大きく影響していると考えられる。今後、AEのメカニズム解析などを用いて破壊メカニズムをさらに追求するとともに、膨張圧と熱応力が相互にどの程度影響しあっているか定量的な評価を試み、静的破碎剤の破碎設計に寄与できる成果を得たいと考えている。

参考文献

- 1) 末宗克浩・田口雅輝・石田毅・大坂直哉・福井久明・水田義明：静的破碎剤によるモルタル破壊のAE測定と熱応力解析，土木学会中国支部平成14年度研究発表会発表概要集(岡山)，pp.365-366，2002年5月
- 2) Ishida, T., Taguchi, M., Suemune, K., Fukui, H. and Mizuta, Y.: Fracturing mechanism by expansive cement agent deduced from acoustic emission monitoring, Proc. of 2002 ISRM Regional Symposium (3rd Korea-Japan Joint Symposium) on Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, pp.841-846, Seoul, Korea, July 2002.
- 3) 木下直人・若林成樹・石田毅・中川浩二：高温下における岩石ブロックの熱応力による破壊挙動，土木学会論文集，第624号/III-47，pp.101-112，1996年6月
- 4) 石田毅・北野晃一・木下直人・若林成樹：AEと弾性波速度測定による花崗岩ブロックの熱破壊挙動の観測，土木学会論文集，第418号/III-13，pp.153-161，1990年6月
- 5) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N.: Theory of elasticity (Third Edition), McGRAW-HILL KOGAKUSHI, 1970.