

## § 1. はじめに

材料の破壊解析に関する研究は、ガリレオの著作である新科学対話にも登場するように、古くから現代にまで続いている研究テーマといえる。17世紀刊行された、新科学対話の2日目において、ガリレオは、かた持梁の破壊解析を行っているのだが、その解析手法として、ギリシャ時代の産物といわれているユークリッド幾何学と槌子の原理を用いている<sup>1)</sup>。このガリレオの対話での例のように、論証科学的手法によりある未知現象を説明する場合、先人の業績により確立された論法・法則・原理が解析手法として採用される傾向にある。熱素説の否定に始まるとも言われている17世紀以後の科学革命は、ニュートン以後の多くの科学者に、多くの努力と厳しい犠牲を強いた。この革命の結果は、20世紀の今日、3つの法則より構成される熱力学の確立として現れた。熱力学確立後の現在の視点からすると、熱力学第二法則は、エネルギーの変化特性を主張するものであり、ニュートン力学には存在しない法則であることが判明して久しい。そこで、力学で解析されていた非線形破壊現象に、熱力学を適用し解析したならば、力学による解析では得られない新しい知見の得られることは当然予測される<sup>2), 3), 4), 5), 6), 7)</sup>。このような予測に基づき、本報告では、近年、コンクリート分野でも注目されている<sup>8)</sup>、非線形破壊の破壊過程域の微視的な力の挙動を、熱力学で解析し、有限の速度で進む破壊過程域の力の微視的な挙動は、力学が仮定するような連続現象ではなく、不連続な現象であることを述べる<sup>9)</sup>。

## § 2. 熱力学を構成する法則の主張

2.1 ニュートン力学 運動の第三法則： $F_i + F_{ij} = 0$  ----- (1)

2.2 熱力学 本考察に使用する法則は次の二法則である。熱力学第一法則：可逆過程（力の変化が常に釣合ながら状態が変化する過程）においては(2)式が成り立つ。  $dS = dQ/T$ 、  $dG = 0$  ----- (2) 熱力学第二法則：不可逆過程（一定の方向性を有して状態が変化する過程）においては(3)式がなりたつ。

$$dS > dQ/T \quad dG < 0 \quad \text{----- (3)}$$

## 2.3 運動の第三法則の熱力学的考察

(1)式は運動の第三法則の主張を示す。(1)式の主張は、変位 $\delta r$ を仮想すると(4)式と等価となる。

(4)式は、熱力学的安定状態（力の釣合状態）において、作用力と反作用力の所有する仮想仕事量の等価性を主張することから、(1)式で表現される運動の第三法則は、熱力学第一法則に属することになる。

$$(F_i + F_{ij}) \cdot \delta r = dG = 0 \quad \text{----- (4)}$$

## § 3. 破壊過程域の解析

3.1 解析対象 解析対象は、現在、コンクリート工学の分野においても注目されている、非線形破壊材料の引張破壊現象であり、破壊過程域での結合力・エネルギー・結合力間変位の関係を図-1に示す。一連の熱力学解析の考察に使用した供試体を図-2に示す<sup>9)</sup>。

## 3.2 熱力学での解析

現実の破壊実験時、その破壊過程は、如何なる装置を用いても、有限の速度で進展する。破壊過程域I：最大応力度での釣合状態（破壊開始直前：図-3）モルタル部分内のエネルギー変化特性はあくまでも(5)式の特徴を持ち、(6)式・(7)式のいずれをも示さない。従って、次の①・②・③の現象が生じることが主張される。

$$\delta g_c = 0 \quad \text{--- (5)} \quad \delta g_c < 0 \quad \text{--- (6)} \quad \delta g_c > 0 \quad \text{--- (7)}$$

①：破壊は、最大応力度から非線形域が生成（ $\delta w_c > 0$ ）する方向に進む。非線形域生成は、破壊系外（鋼材）のエネルギーにより行われる。

②：この状態では、モルタル内のエネルギーは、あくまで $\delta g_c = 0$ であるため、 $\delta w_c > 0$ と同時に線形域の可逆的戻り（ $\delta g_c < 0$ ）の現象は生じない。

③：釣合条件が崩壊する（ $\delta w_c > 0$ ）ことが、破壊系（モルタル）内のエネルギーが減少を始める（ $\delta g_c < 0$ の

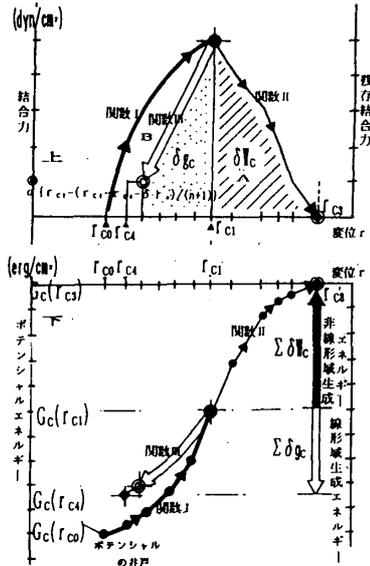


図-1 非線形破壊現象を示す結合力関数とエネルギー関数

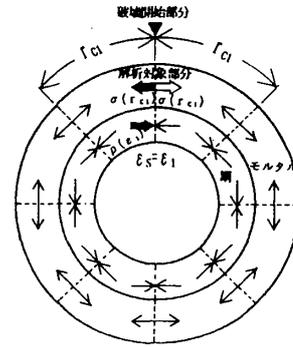


図-2 解析対象とした供試体例

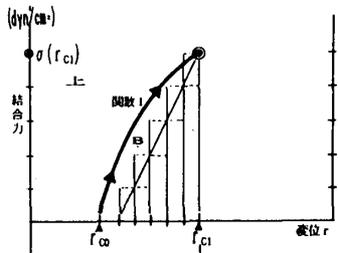


図-3 破壊過程域 I

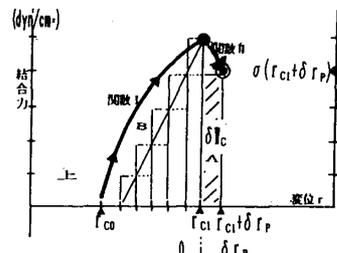


図-4 破壊過程域 II

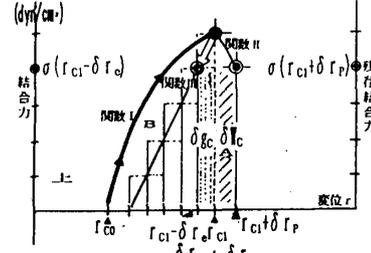


図-5 破壊過程域 III

現象が生じる)条件である。

破壊過程域 II: 釣合崩壊状態 (I と III の中間: 図-4) 破壊系外 (鋼材) のエネルギーによる非線形域 (図-1 の斜線部分) 生成開始は、破壊部分以外との釣合状態崩壊を意味する。この状態では、次の④・⑤の現象が生じることが主張される。④破壊系内 (モルタル) のエネルギーはあくまで (6) 式の変化特性 ( $\delta g_c < 0$ ) を所有し、非線形域生成に必要なエネルギーの変化特性 ( $\delta w_c > 0$ ) は所有しない。⑤この状態では、釣り合うまで小さくなり、内部応力をさらに小さくはしない。⑥⑤の主張は、破壊過程域 II の状態が、次の釣合状態である破壊過程域 III の状態に進むことを主張することである。

破壊過程域 III: 次の釣合状態となる。破壊過程域 I の解析結果である①・②・③と同じ。

§ 4. 不連続性について

有限の速度で亀裂が進展する破壊過程域においては、ニュートン力学が仮定するような準静的過程とは異なることは日常体験するところである。これは、破壊現象が準静的な連続現象ではなく不連続現象であることを主張するものである。

§ 5. 結論

① 破壊部分の残存結合力と破壊部分以外の内部応力は、破壊進展時、同時に減少する現象は生じない。② 破壊系外の力により破壊部分の残存結合力が小さくなり、破壊系の熱力学的安定状態が崩壊しない限り、破壊系内のエネルギーは減少しない。③ ①・②に得られる結論のように、破壊過程域の力の微視的挙動は、ニュートン力学の前提条件のような準静的な連続性を所有する現象ではなく、不連続性を所有する現象である。

参考文献 1) ガリレオ・ガリレイ: 新科学対話, 今野武雄訳, 岩波書店, 昭和50年11月 2) 佐々木深ほか3名: 理工学工学基礎物理学, 開成出版, 1974.3 3) 守屋高次郎, 賢津久一郎: 力学概論, 培風館, 1982.11 4) 吉岡甲子郎: 物理化学大要, 養賢堂, 昭和44年11月 5) W. J. Moore: 物理化学 (上), 藤代亮一訳, 東京化学同人, 1982.6 6) 中谷宇吉郎: 科学の方法, 岩波新書, 1984.6 7) トーマス・クーン: 科学革命の構造, 中山 茂訳, みすず書房, 1982.9 8) 野村希品, 三橋博三, 加藤敏史, 和泉正哲: コンクリートの内部構造と引張軟化特性, 材料, 第40巻, 第456号, PP. 15~21, 1991 9) 鈴木 要: 拘束されたセメント硬化物の破壊に関する熱力学的研究 その2. 熱力学的解析結果から導かれる力の挙動, 日本建築学会構造系論文報告集, 第421号, PP. 11~19, 1991