

京都大学 正員 小林昭一

1. はじめに

コンクリートとか岩石、あるいはFRPなどのいわゆる多相材料ないし複合材料の破壊に関しては、複合機構を解明し、有効に利用しようという意図の下に、常に大きな関心が払われてきた。多相材料とか複合材料とかは、材料組織的には、異質物質の混合ないし結合体であり、一般には、異質物質相互の境界面には、力学的な弱面ないし不連続面（これらを総称して、以下では初期欠陥と呼ぶことにする）が存在するものが普通である。多相材料の力学特性、特に破壊に関連した特性は、構成物質それぞれの特性ならびに内部構造、特にこれらの初期欠陥の特性に支配されて極めて複雑なものとなる。一般的に言えば、多相材料の破壊過程は、低試体あるいは梁内部ないし表面に潜伏する初期欠陥からの応力集中、ひずみ集中に起因する引張りないしすべり破壊に始り（破壊開始）、複雑な伝ば過程を経て、梁全体の安定性を失う、いわゆる終局破壊、崩壊あるいは破断に至る訳である。このような見地から見ると、多相材料の破壊の研究に於ては、初期欠陥からのき裂の発生条件、ならびにその伝ば過程の研究は、最も基本的であり、最も重要な課題であるということになる。

本研究は、多相材料の破壊過程の最も基礎的なモデル化として、比較的簡単なスリットあるいはインクルージョンシステムを含む簡単なモデルを用いて、圧縮荷重下での破壊開始条件、き裂の発生条件、発生方向、き裂の伝ば過程などに関して、系統的な実験を行ない、これを基に多相材料の破壊過程の特性を検討したものである。

2. 供試体と試験方法

破壊の開始は、応力あるいはひずみの急激な変化あるいは不連続点近傍に生じることが知られている。このような応力ないしひずみ集中源を作り出す目的で、次のようなスリットあるいはインクルージョンシステムを含むようなモデル供試体を作成した。

(i) 単一スリットおよびインクルージョンを含むモデル

(ii) 多数のスリットおよびインクルージョンを含むモデル：(a) 規則的に配列したスリットおよびインクルージョンを含むモデル、(b) 不規則なスリットおよびあるいはインクルージョンを含むモデル
マトリックス材料としては、(i)では、FCP（セメント：水：フライアッシュ＝1.0：0.55：1.0、重量比）およびNCP（セメント：水＝1.0：0.3、重量比）を、また(ii)では、主としてFCPおよびCM（セメント：水：砂＝1.0：0.6：2.0、重量比）を用いた。また、インクルージョンとしては、塩化ビニール、鋼およびCMを用いた。スリットあるいはインクルージョンの寸法は、 $20 \times 10 \text{ mm}$ 、 $20 \times 0.5 \text{ mm}$ あるいは $10 \times 0.5 \text{ mm}$ とした（但し(ii)(b)ではこれら以外のものも用いた）。

実験では、破壊開始、き裂伝ばおよび終局破壊に及ばず、スリットあるいはインクルージョンの幾何学的な配列、形状、および主応力方向からの傾きなどの影響を明らかにすることを意図した。(i)に関しては、応力増加に伴うき裂の成長過程をも詳細に調べた。き裂の検出には、供試体の表面、特にスリットないしインクルージョン周辺を、アセトンを含ませた脱脂綿で拭き、速やかに揮発させる

ことにより生じる明瞭な色調の差を利用した。き裂の発生、成長の記録には、この方法により検出される可視き裂を鉛筆を用いて供試体上にその位置を記録する方法によった。

3. 試験結果と考察

紙面の都合上、ここでは(i)および(ii)(b)について得られた主な結果のみを記述するに止める。

(i)(a)スリットモデルの一軸圧縮試験結果：FCPおよびNCPモデルによる差は認められない。スリットの偏平度の差も、この実験範囲では認められない。き裂発生応力は、スリットの傾角 $\theta=0^\circ$ で最大、 $\theta=70^\circ$ で最小となる。 $\theta=90^\circ$ でもき裂発生応力は殆んど増加しない。この結果は、Griffith理論に基づいたものとは相当異なっている。き裂の発生には、スリット周縁上の最大引張応力のみならず応力勾配あるいは応力域(引張)の大きさなども関係するようである。き裂の発生角は、 $\theta<25^\circ$ では、一般Griffith理論より推定したものより小さく、逆に $\theta>30^\circ$ では大きくなっている。スリット傾角が大きい程低い応力でき裂が発生し、瞬時的に成長するき裂長も、また荷重増加段階に対するき裂長も大となり、逆にスリット傾角が小さくなるとき裂の成長は極めて緩慢となる。

(i)(b)インクルージョンモデルの一軸圧縮試験結果：塩化ビニールインクルージョンの場合には、き裂発生応力は一般Griffith理論から予測されるものに比較的良好に合致する。修正Griffith理論を用いて $\mu=0.1$ とすれば全体的にさらによく合致する。インクルージョンの傾角が小さい範囲、 $\theta<50^\circ$ では、き裂発生以前にインクルージョンの周縁部の大部分がマトリックスから分離し、スリットモデルの場合と大差ない結果が得られる。これに反して、傾角が大きくなるにつれて、インクルージョンのボンド分離はなくなり、引張応力はスリットの場合よりはるかに緩和され、平均的き裂発生応力は高くなる。鋼インクルージョンの場合には、き裂発生応力はインクルージョンの傾角にはあまり左右されない。CMインクルージョンの場合には、き裂発生応力は前二者に比して全般に相当高くなり、 $\theta=30^\circ\sim40^\circ$ で最小値を取るけれども、傾角の影響は鋼インクルージョンの場合より小さい。き裂の発生角は、一般Griffith理論より推定されるものより全体的に小さい。特に、傾角が小さい範囲でその差は著しい。傾角 $30^\circ\leq\theta\leq60^\circ$ では、き裂は発生した瞬間に2~5mm程度成長し、以後は荷重増加と共に若干加速度的に成長する。この範囲では、傾角が大きい程き裂の成長も大である。

(ii) 2.(ii)(b)の試験結果：個々のモデルによって差異があるが、ほぼ共通した特性について述べる。同一寸法のスリットあるいはインクルージョンがランダムに分布している場合には、個々を単一欠陥と考えた場合に最も危険な傾角よりむしろ順次き裂が発生する。き裂の初期段階では、隣接欠陥の影響を余り受けないので、荷重増加と共にき裂の発生数は多くなり、ついには殆んど全ての欠陥からき裂が発生するようになる。この段階までは、単一欠陥の場合と大差はないが、き裂の成長につれて相互干渉が起り、隣接欠陥間のマトリックス部分にもき裂が発生、成長する。荷重が増加するにつれて、次第に局所的な破壊域が形成され、これが終局破壊の形態を支配することになる。寸法、形状の異なるスリットあるいはインクルージョンがランダムに分布している場合には、さらに複雑となる。き裂の発生ならびに伝ばの初期段階では、単一欠陥の場合と殆んど差がないが、荷重増加につれて、発生したき裂が成長するだけでなく、同時に全く新しいき裂が発生し、連結されて次第に局所的な破壊域が形成される。終局破壊の形態は、この破壊域に支配されるようである。