

1. はじめに

コンクリート、岩石、岩盤などは、少し微視的に見れば、幾何学的には複雑な形状と分布を示し、かつ力学的にも特性の異なる異質物質が結合した固体、すなわち多相複合材料であることが分る。このような多相複合材料の力学挙動は、構成(相)材料の力学特性と幾何学的な構造(相)特性の両者に支配されることになる。破壊現象などの局所的ないし全体的な不安定現象に関しては、さらに複合特性の変化—相構造変化—が大きな要因として付け加えられる。また、多相複合材料の挙動を取り扱う場合には、均質連続体材料の取り扱いと異なり、常に対象とする物体(系)の大きさや相材料との幾何学的な関係、特に寸法比の関係が重要となることに留意しなければならない。破壊を対象とした場合には、局所条件に大きく左右されるので、この関係は一層厳しいものとなるであろう。

本報告は、多相複合材料の力学挙動、特に時々刻々変化する相構造とこれに伴う複合機構ならびに破壊機構を説明することを意図して、目下遂行中の研究を概説したものである。

2. 多相複合材料の粘弾塑性の特性

複合材料の粘弾塑性の特性は、一般的に相構造に敏感である。したがって、多相構造を平均化した均質連続体(統計的均質材料)としての取り扱いが可能である。対象とする系に比して、相構造の寸法が大きければ、非均質構造体としての取り扱いが要求されるのは当然であるが、一般に我々が複合材料と称し、使用している範囲では、系の応力集中部分などの特殊な部分を除けば、統計的均質材料と考えることができる。

統計的均質材料の粘弾塑性特性(等価粘弾塑性特性)は、対象とする多相複合材料内にたくわえられるひずみエネルギーと統計的均質材料内にたくわえられるそれとが等しいということから求められる。したがって、相構造特性によって等価粘弾塑性特性が異なってくることになるが、上述のように後者は相構造に比較的敏感であるので、簡単な相構造モデルを用いても推定される。もう一つの有力な手法は、ひずみエネルギーおよびその補正エネルギーの極値定理を用いて、等価粘弾塑性特性の上限、下限を求める手法である。この手法では、相構造を考える必要はなく、一般に統計的にランダムと見做される。最近になって、確率密度関数を用いて相構造特性を表わし、確率の挙動として等価粘弾塑性特性を求める手法も試みられている。さらに、最も直接的な手法としては、数値解析モデルとして非均質な試体を考え、一軸とか三軸試験のシミュレーションを行なって、平均ひずみと平均応力との関係から直接に等価粘弾塑性特性を求めることも可能であり、FEMなどによれば容易でもある。

3. 破壊規準

破壊規準に関連して得られた結果を要約する。まず、多相複合材料の相構造変化過程としての破壊の基本概念を検討し、それに基づいて、脆性破壊の一般的な破壊規準を巨視的な立場から検討を加え、破壊曲面の概念を導入することにより、一般的な破壊規準を一般化した応力およびひずみ空間内の曲面として表示する方法を示した。

次いで、Griffithの概念に基づいた準微視的破壊規準を一般化し、その物理的意味を考察することにより、準微視的破壊規準と巨視的破壊規準との対応を明らかにし、後者に含まれる材料定数に新しい物理的意味として、破壊過程時刻の状態に対応して変化する状態(相)パラメータを解釈することにより、両破壊規準の等価性に新しい解釈を加えた。

さらに、二変数表示による破壊規準を一般的な三変数力表示、すなわち、応力空間内の曲面として表示する方法ならびに基本概念を検討し、同時に種々の表示法の対応関係を明らかにした。

破壊曲面の特性としては、巨視的に等方向性材料であれば、静水圧線と三軸対称軸とをなすような凸曲面であり、その曲面は滑らかに連続した次の二種類の曲面、すなわち、その一つは3組の平面から成り、等圧面による切口の形状が正三角形状であり、他一つは、静水圧の増加につれて、ほぼ等方向に膨張するような3組の曲面から成り、等圧面による切口は正三角形よりやや膨らんだもの、より成ることが明らかとなった。

巨視的に均質異方向性材料に対しては、一般的破壊理率は、三次元主応力空間内の凸曲面として表わせば、対象とする材料の構造要素の有する最大強度に対応する仮想の等方向性材料の破壊曲面と、最弱要素の方向特性も含めた特性を表わす曲面との合成曲面のうち、共通領域を含む曲面、すなわち、一定の入面体直応力に対して入面体せん断応力が最小となるような合成曲面で表わされることを推論した。

上述のように推論された破壊理率の妥当性は、コンクリート、岩石、岩盤モデルなどの三軸破壊試験により検証された。一般的な傾向としては、脆性度の高い材料程、静水圧増加に伴う破壊曲面の半径が大きくなり、また構造組織の複雑な一方向性材料の弱層、曲面の凹凸は小さくなることと明らかとなり、また異方向性強度は一般に弱い弱層(弱要素)の方向が最大圧縮力方向から $30^\circ \sim 40^\circ$ 傾いているときに最小となり、拘束圧が増加してもこの傾向は強くと変わらないことが明らかとなった。

4. 破壊機構 — 破壊開始ならびに破壊の伝播

次のような簡単なモデルを基に、破壊開始ならびに破壊伝播の機構を実験的に追跡した。すなわち、単一スリットを含むPMMA板、フライアッシュ・セメント・ペースト、セメント・ペーストより成るモデル、同上マトリックスにストリックスと同程度あるいは硬軟のインクルージョンを含むモデル、多数のスリット、インクルージョンを規則的にあるいはランダムに含むモデル、粗骨環をエポキシ樹脂で固結したモデル、粗骨環のみコンクリートモデルなどを用いて、初期欠陥周辺の応力状態、割裂の発生ならびに伝播、成長過程を追跡し、破壊機構 — 相変化に基づく不安定現象 — について系統的な実験を行ない、その特性を検討した。結果を以下に要約する。

多相複合材料の破壊は、或る載荷経路に沿って荷重を加えると、結晶境界とかインクルージョン境界とかに沿って分布した潜在欠陥のうち最も弱い固相応力あるいは許容材料固有の強度に達して、割裂の発生を促すことにより開始される。この割裂の発生条件は、近似的には一般Griffithの理準、あるいはMohrの $\sigma - \tau$ Coulomb 理準で与えられると考へてよい。荷重が増加すると、いつか発生した割裂は成長し、その間にあるいは成長が止つてから、次に危険な欠陥周辺から割裂が発生し、次に多数の割裂が発生し、成長伝播して、これらが相互干渉を生じて、局所的な破壊域が形成される。この局所的な破壊域は、次に発生し、あるいは他の隣接破壊域と併合して、系全体としての不安定状態、結局破壊に至ることが確かめられた。破壊伝播は、系内の欠陥の分布だけでなく、いつか発生した割裂の成長と分布、同時に局所的な安定性にも支配される。特に、結局破壊直前では、系内に局所的な不安定域は多数生じており、系全体としても不安定に近いで、結局破壊の条件には、試験機特性も含めた、試験機-供試体系としての体系的な特性を考慮することは必要である。

5. 供試体内の応力分布

供試体内の応力分布は、試験法ならびに試験条件だけでなく、供試体自身の材料特性、すなわち、弾性係数、ポアソン比ならびに材料の構造特性にも支配される。構造特性を導入した最も簡単な材料モデルとして、線形カンプルストレス理論に従うものを想定し、応力分布の解析を試みた。結果を以下に要約する。

いわゆる直接試験法(圧縮試験とか引張試験)では、応力分布に及ぼす材料の内部構造の影響は、それ程顕著ではないが、間接的な試験法(割裂試験、インデンテーション試験とかリング試験)では、その影響が著しいことが明らかとなった。異方向性の場合には、応力分布は等方向の場合から曲り、対称性が失われる。また、材料の構成粒子が大きい程、カンプルストレスの影響が大きくなり、応力分布はより一様化されることと判明した。これらの結果に基づいて、試験結果の解釈上留意すべき点を検討した。

なお、具体的な例ならびに結果の詳細とは併記については、後日言及する。