**15.　脆性材料の強度・破壊靱性測定**

１．実験の目的　材料の破壊は避けて通れない課題である。いかに機能にすぐれた材料であっても、実際の使用に際して容易に破壊してしまうならば材料としては使うことができない。セラミックスを機械や構造物の材料として使用する場合、材料力学や破壊力学の手法を用いて、各材料の機械的性質を測定、評価する必要がある。この測定は、構造物を設計するための基礎的データとして、また新材料の開発を行う上でも重要である。　本実験では、試験用サンプルとして作成が比較的容易で、かつ表面の均一化研磨を必要としないセッコウ硬化体を用いる。測定する機械的性質として、最も一般的に行われている破壊強度および破壊靱性を対象とする。材料の破壊強度は、バラツキを持っていて、このバラツキの評価も設計上極めて重要である。そこで統計的手法により強度分布の解析を試み、バラツキもつ材料の評価法の習得を目的とする。

　破壊靱性とはき裂伝播に対する抵抗値を表す。強度が材料内に存在する欠陥の大きさに依存する値であるのに対して、破壊靱性は欠陥の大きさに依存しないより本質的な材料物性となる。一般的には、強度は欠陥と破壊靱性の大きさの両者に依存し、欠陥の小さいものや破壊靱性の大きなものほど強度は大きくなる。また、材料の破壊がき裂の伝播によって起きることから、破壊靱性という概念は材料強度を考える上で重要となる。

　破壊靱性は応力拡大係数の臨界値として表される。応力拡大係数はき裂先端の応力場をそれ一つで決めることができる。従って、どのような試験片形状であっても応力拡大係数が同じであれば、き裂先端近傍の応力場は同じとなる。
　ここでは、最も一般的に使われているSENB (single-edge notched beam)　法とよばれる、ノッチのついた曲げ試験片の三点曲げ試験による破壊靱性試験法を用いる。

２．実験方法

２－１.直方体試験片の作製

試験片は、セッコウを硬化させて10×10×100mmの直方体を２０本以上作製する。

図１．セッコウ直方体試験片作製用金型

1. ガラス板面に潤滑用の石鹸水を筆で薄く塗る。
2. 図１のようにセッコウを流し込む金型（１セット２本分）をガラス板上に置いて組み立てる。

金型とガラス板の間に隙間ができないように、金型がガラス板と密着した状態でボルトを締めるようにする。（空中で組み立てないこと）

1. セッコウ30gに蒸留水20mlを加えカップの中で均一になるまで攪拌する。
2. 石膏を型から少し盛り上がるまで流し込む。
3. 数分後、柔らかい状態で、盛り上がった部分をカッターの刃で削ぎ落とし平らにする。
4. １５～２０分後、表面を乾燥させて型から外す。
5. マイクロメーターで幅（型に接している面間）、厚さ（ガラスと接している面と切削面間）の寸法をサンプルの両端と中央の３点で測定して、平均値を算出する。

２－２.破壊靱性試験片の予き裂加工

２－１で作製した直方体のうち８本に予き裂加工を以下の手順で施す。

1. 所定の予き裂導入装置に試験片をセットして、ガラスに接していた面の中心に予き裂を加工する。
2. 予き裂長さを1mm，2mm，3mm，4mmと変えて各２本ずつ作製する。

２－３．３点曲げ破壊試験

図２．試験片のセッティング方法

破壊強度試験および破壊靱性試験は以下の手順で行う。

1. 試験片を図３の位置にセットする（ガラスに接していた面または予き裂の入った面を下向きにする）
2. 材料試験機にてクロスヘッドスピード0.5mm/minで３点曲げ試験を行い破壊させる。
3. パネルに表示された破壊荷重を記録する。
4. 破壊後の試験片の破壊面を観察し、状態を記録する。破壊靱性試験片は予き裂長さをノギスで測定する。

２－４．後片づけ

実験が終了したらバケツに水を汲み、使用した金型、筆をバケツの中で洗う。

決して流しに流さないこと。（水道管が詰まるため）

床、実験台等汚れたところを水拭きする。

全て終了したら担当者に報告し、レポート作成の説明を受ける。

３．データの整理

３－１．３点曲げ破壊強度の算出**（以下は予き裂を導入していない試験片のみで行うこと）**

本試験方法でサンプルに加わる最大引っ張り応力は、荷重点③のサンプル中心の底面に発生し、その応力は、次式で与えられる。

  （１）

記号　　******: 最大引っ張り応力　　［Pa］ *b*: 試験片の幅　　［m］

　　　　*P*: 破壊荷重 　　　　［N］ *w*: 試験片の厚さ　［m］

　　　　*L*: 下部支点間距離　　　［m］

　この（１）式を用いて、全試験片の破壊強度を算出する。

３－２．破壊強度のワイブル統計解析

課題　計算した破壊強度を強度の小さい方から順番に並べ、表１を作成し順序統計量として整理する。

各順位番号に対応する累積破壊確率*F*を次式により求める。

  （２）

　　記号　　*n* : サンプル総数

この累積破壊確率は、*i*番目の強度に相当する応力まで材料に応力が加わった場合に全体の何％が破壊するかを表している。

累積破壊確率は、次式で与えられる二母数ワイブル分布により表現される。

  （３）

　　記号　　*c* : 破壊確率63.2％の破壊強度（特性強度と呼ばれる） ［Pa］

　　　　　　*m* : 分布のバラツキを表わす定数（ワイブル係数とよばれる）［－］

表１．強度の順序統計量としての整理

課題　表２に示すように、破壊順位の順番にデータを整理する。

表２．実験データの整理

最小二乗法を用いて次式よりワイブル分布の二つの係数を求めることができる。

  （４）

  （５）

　　記号　　



図３．ワイブルプロットの一例

課題　図３に示すように、ワイブル確率紙を用いて、強度*i*と破壊確率i / (n+1)の関係をプロットし、直線関係が得られるかを検討せよ。

課題　（４,５）式より２つの係数*m*，*c*値を求める。

課題　（３）式に求めた係数*m*，*c*を代入し、関数を求める。先に*i* ，i / (n+1)をプロットした図に求めた関数を赤線で描き、求めた*m*，*c*値が良好に実測値を近似しているか検討せよ。

課題　ワイブル係数について文献調査し、説明せよ。

さらに今回の強度試験結果について、ワイブル係数値、破面観察の結果から評価、考察せよ。

３－３．破壊靱性の算出**（以下は予き裂を導入した試験片のみで行うこと）**

応力拡大係数は一般に次式で表される．

　　　　　 （６）

*KI*　: 応力拡大係数 ［MPam0.5］

*Y1*　: 試験片の形によって決まる形状係数　　［－］

***a*** : 予き裂長さ ［m］

（無限板中に長さ*2a*のき裂があるときには，*Y1* = √πとなる）

予き裂のついた試験片の３点曲げ試験の場合には，スパン長さを*L* ，試験片の高さを*w*，幅を*b*とすると，応力拡大係数は次のように表される．

　　　　　 （７）

ここで，*l/w* = 5の場合，*Y1*は次のように表される（若井ほか，窯業協会誌, 93,479-481,1985）．

　　　　　 （８）

課題　（６,７,８,９）式より、実験を行ったセッコウの破壊靱性を計算せよ。

課題　これら実験データを整理して表３のようにまとめる。

表３．実験データの整理

課題　計算した破壊靱性と切り欠きの長さの関係をグラフ用紙上にプロットせよ。

破壊靱性は材料の物性値に準ずるものであるから、切り欠きの長さによらず一定であるが、切り欠きの長さに対する依存性が現れた場合には、その原因を破面の観察結果などから考察せよ。

課題　（９）式の*Y1*の値を、第一項の定数項のみにした場合、切り欠き長さと破壊靱性の関係がどのようになるかを比較し（a/w）の計算結果に及ぼす影響を考察せよ。

４．参考文献

１）セラミックス材料強度学 淡路英夫 コロナ社

２）セラミックスの力学的特性評価 西田俊彦他 日刊工業新聞社

３）セラミックスの機械的性質 窯業協会編 窯業協会