

บทคัดย่อ

กระดูกสามารถพิจารณาเป็นวัสดุผสมในระดับมหภาคถึงจุลภาค โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยทางเดียวขนานกับแนวยาวของ collagen fibrils อัตราพลังงานปลดปล่อยในกระดูก cortical ของมนุษย์ส่วน tibia และของวัวหรือควายส่วน femur ได้ถูกทำการศึกษาด้วยวิธีการทางการทดลองและการจำลองแบบคำนวณ การวิเคราะห์ทาง finite element ด้วยวิธีการ explicit ได้ถูกต่อเติมด้วยการคำนวณค่า อัตราพลังงานปลดปล่อยเพื่อใช้หาคุณสมบัติทางกลการแตกหักที่สำคัญนี้ของกระดูก ในกระดูกมนุษย์ภายใต้ภาวะงานแบบสถิต ค่าอัตราพลังงานปลดปล่อย ได้ถูกพบว่ามีค่าประมาณ 820-1150 J/m² เส้น R-curve จากแบบจำลองทาง ระหว่างช่วงการขยายตัวอย่างช้าแสดงความเป็น ductility เล็กน้อยของชั้นกระดูกทดลองซึ่งแสดงความสามารถในการต้านทานการแตกหักของกระดูก การขยายตัวของรอยแตกในกระดูกเนื่องจากการระดับ strain rate ที่มากระทำแตกต่างกันได้มีการศึกษาโดยใช้ชิ้นส่วนทดลองแบบ compact tension อัตราเร็วของ cross-head ในช่วง quasi-static ถึง quasi-dynamic loading ได้ถูกถ่ายทอดให้กับชิ้นส่วนทดลอง ในขณะที่ Orthotropic material ได้ถูกพิจารณา จากการทดสอบได้พบคุณสมบัติ viscoelastic ในส่วนของ effective elastic moduli ในช่วงการให้ภาระงานอย่างช้าๆ ค่าอัตราพลังงานปลดปล่อยมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่มีการขยายตัวของรอยแตก ซึ่งแสดงความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยแตกในกระดูก การเพิ่มขึ้นของ R-curve นี้ได้ถูกพบในการขยายตัวของรอยแตกในกระดูกเนื่องจากภาระงานที่กระทำอย่างรวดเร็วขณะที่เกิดการขยายตัวอย่างสั้น ตามด้วยการลดลงของเส้นโค้งเมื่อมีการแปรสภาพของกระดูกเข้าสู่การเปราะและเกิดการขยายตัวแบบค่อนข้าง unstable ซึ่งเกิดในระหว่างการขยายตัวขนาดใหญ่ ค่าวิกฤติของอัตราพลังงานปลดปล่อย ถูกพบว่ามีประมาณ 350 to 750 J/m² และค่าอัตราพลังงานปลดปล่อยขณะเกิดการเปลี่ยนผันเกิดที่ช่วง 1200 to 1950 J/m² ซึ่งผลดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายกลไกการขยายตัวของรอยแตกได้ว่า ด้วยความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยแตกในภาระงานที่มีความถี่ต่ำ microcracks มีการก่อตัวขึ้นแต่ไม่สามารถขยายตัวลุกลามจนเกิดเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ ในขณะที่การขาดคุณสมบัติในกระดูกที่ถูกภาระงานกระหนาบอย่างรวดเร็วทำให้กระดูกมีการขยายตัวแบบ unstable และเกิดการพังทลายทันทีทันใด อันนำมาซึ่งการบาดเจ็บอย่างร้ายแรง ผลของแบบจำลองทาง finite element สอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากการทดลองโดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 10 % สำหรับค่าอัตราพลังงานปลดปล่อย หลังจากที่ได้มีการปรับเปลี่ยนค่า effective elastic moduli เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้สมมุติฐาน plane stress condition ในการทดลอง และ plane strain condition ที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากวัสดุทดสอบที่ค่อนข้างหนา ค่า R-curves ที่ได้มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น การสันนิษฐานได้ถูกพบขณะที่รอยแตกเริ่มต้นขยายตัวเนื่องจากวิธีการใช้วิธีปลดปล่อย nodes จึงได้มีการนำการหน่วงแบบ mass-proportional มาใช้เพื่อลดสิ่งรบกวน ซึ่งถึงแม้ว่าวิธีนี้จะใช้ได้มีประสิทธิภาพกับการจำลองแบบของการขยายตัวอย่างช้า แต่ทางเลือกอื่นที่สามารถที่จะปลดปล่อย nodes อย่างต่อเนื่องจึงสมควรถูกนำมาพิจารณา วิธีผสมผสานระหว่างการทำทดลองและการจำลองแบบนี้ สามารถนำมาใช้การศึกษาอัตราพลังงานปลดปล่อยอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัสดุที่ไม่สามารถสร้างขึ้นมาให้ใช้กับมาตรฐานการทดลองได้

Abstract

Bones can be considered as composite material in macro to micro-scale level having unidirectional fiber orientating parallel to the longitudinal direction of collagen fibrils. Energy release rates in human tibia and bovine femur cortical bone were experimentally and computationally examined. An explicit finite element analysis was implemented with an energy release rate calculation for evaluating this important fracture property of bones. In human cortical bones under quasi static loading, G_c was found to be approximately 820-1150 J/m². The R -curve resulting from the finite element models during slow crack growth shows slight ductility of the bone specimen that indicates an ability to resist crack propagation. Crack propagations in compact bovine bones subjected to different level of strain rate were investigated using compact tension specimens. A variety of cross-head speeds ranging from quasi-static to quasi-dynamic loading were employed to the specimens. Orthotropic material was considered and viscoelastic property was found on the effective elastic moduli. In slow loading rate, the energy release rates are gradually increasing with the crack extension and thus indicate crack resistance ability in the bones. Rising of the R -curves were also found in bones with rapid loading rate at small crack extension following with declining of the curve as the transformation to brittle and merely unstable crack growth was observed in large crack extension. The critical energy release rates were found to be approximately 350 to 750 J/m² and the energy release rate at the transitions were found at approximately 1200 to 1950 J/m². These results elucidate failure mechanism in bones, as with the implication of crack resistance in low frequency loading, microcracks are formed but can not extend into large speedily crack, while without this ability in impact loading, unstable crack growth can cause catastrophic failure and leads to severe injury. Results from finite element models were consistence with the experimental results with the deviation within 10% for the energy release rate comparison. The effective elastic moduli in the models were adjusted in order to account for the plane stress condition assumed in the experiments and the occurrence of the plane strain condition due to the relatively thick specimens used in the tests, thereby more accurate R -curves were obtained from the models. Oscillations were found at the onset of the crack growth due to the nodal releasing application in the models. In this study light mass-proportional damping was used to suppress the noises. Although this technique was found to be efficient for slow crack growth simulation, other methods to continuously release nodes during rapid crack growth would be recommended. This hybrid method of experimental and finite element modeling techniques can be beneficially applied for energy release rate investigation, especially in material that cannot be made to meet the experimental standard.