

עלון

אישה"מ

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 23

אפריל 2010

עורך: דן גבעולי, הפקולטה להנדסת אוירונאוטיקה וחלל, טכניון, חיפה 32000, טל. 8293814 (04), פקס 8292030 (04), דואר אלקטרוני: givolid@aerodyne.technion.ac.il
חברי ועד אישח"מ: עמנואל אור, מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי (נשיא), יצחק הררי, עמיאל הרשגה (מזכיר-גזבר), יונתן טל (אחראי האתר), זהר יוסיבאש
איש-קשר עם ECCOMAS: מישל ברקובייר
ועדת ביקורת: משה איזנברגר ושמואל קידר
אתר אישח"מ (IACMM) באינטרנט: <http://www.iacmm.org.il>
רישום לחברות באגוד ופרטים נוספים: באתר האגוד הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר, ד"ר עמיאל הרשגה, טל. 8183709 (04), פקס 8183723 (04), דואר אלקטרוני: amiel@iec.co.il

הערות העורך:

נא שלחו לכתובת המערכת (בדואר אלקטרוני או רגיל) חומר לפרסום בעלון. ניתן ורצוי לצרף ציורים ותמונות. לידיעת חברות: ניתן גם לפרסם חומר מסחרי- פרסומי בתשלום. לפרטים נא לפנות למערכת.

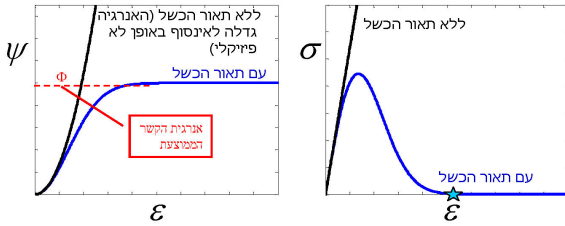
אנא בקרו באתר האגוד <http://www.iacmm.org.il>, ותמצאו מידע רב על האיגוד ועל מכניקה חישובית בארץ ובעולם. באתר תוכלו לצרף עצמכם (ללא תשלום) לרשימת התפוצה האלקטרונית. באתר תוכלו גם להרשם כחברים באגוד או לחדש את חברותכם. טופס רישום עם פרטים מלאים ניתן למצוא ב- <http://www.iacmm.org.il/member>

ISCM-27

יום העיון ה-27 התקיים ב-15 באוקטובר, 2009, באוניברסיטת תל-אביב והיה מוצלח מאד. המארגנים המקומיים היו ראמי חזי-עלי וסלבה קרילוב. התמונות משמאל צולמו במהלך יום העיון. מלמעלה למטה ומימין לשמאל: ערן גרוסו מקבל תעודת פרס על תיזה חישובית מצטיינת; ניר טרבלסי מקבל תעודת פרס על מקום ראשון בתחרות ההרצאות של אישח"מ; רולנד גלווינסקי נותן את הרצאת הפתיחה; דליה פישלוב מרצה. בעמוד הבא, מימין לשמאל: מחמוד ג'בארין וארו גל בהרצאה.

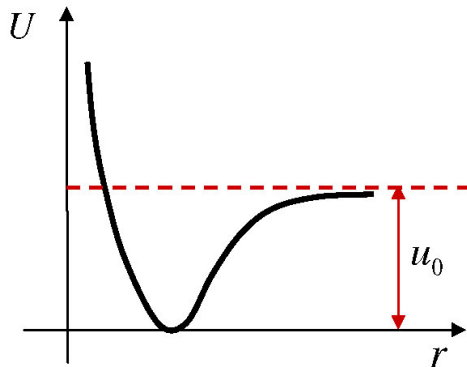


להתרככות החומר (איור 1) ומשלב באופן אוטומטי את תאור הכשל של החומר בתוך משוואות הקונסטיטויטיות של מכניקת הרצף.



איור 1. הרעיון המרכזי של SH: בגרף השמאלי אנרגיה כפונקציה של עיבור ובגרף ימני מאמץ כפונקציה של עיבור.

שיטת SH מבוססת על אנרגיית הקשר הממוצעת שבין חלקיקי החומר. אנרגיית הקשר מגדירה את האנרגיה הדרושה כדי להפריד בין שני חלקיקים הנמשכים זה לזה (איור 2). במקרה שגוף מוצק מורכב מהרבה חלקיקים קיים ערך של אנרגיית קשר ממוצעת שהיא גם אנרגיית הכשל הדרושה להפריד בין החלקיקים בנפח חומר אינפיניטסימלי. אנרגיית הקשר הממוצעת ניתנת לחישוב במידה וההתפלגות הסטטיסטית של צפיפות הקשרים ידועה עבור החומר הספציפי. לחילופין, ניתן לקבוע את אנרגיית הקשר הממוצעת מניסויים מקרוסקופיים, כאשר משלבים גורם שתפקידו להגביל את האנרגיה בחוק הקונסטיטויטיבי של החומר (איור 1). מודלים קונסטיטויטיביים היפראלסטיים מקובלים אינם משלבים בתוכם את אותו הגורם, וכתוצאה מכך מאפשרים הצטברות בלתי מוגבלת של האנרגיה עם גידול העיבורים (איור 1). דבר זה כמובן לא פיזיקלי מפני שלא קיים שום חומר אמיתי שיכול לטפוג עיבורים גדולים מספיק ללא כשל. אנרגיית הקשר הממוצעת היא אותו גורם המגביל את האנרגיה הנצברת בדפורמציה ושולט על התרככות החומר (הקטנת יכולת החומר להתנגד לעיבורים).



איור 2. פוטנציאל של לנארד-ג'ונס: אנרגיית הקשר u_0 מגדירה את האנרגיה הדרושה כדי להפריד בין שני חלקיקים הנמשכים זה לזה.

התרככות מצביעה על הכשל. הכשל מתחיל בנקודת סף ומושלם בנקודה עם כוכבית (איור 1) בה קריטריון להוצאת אלמנט סופי הנכשל מופגש. הוצאת האלמנטים הנכשלים זה הליך הכרחי במטרה למנוע את הבראת החומר עקב גל דפורמציות החוזר. תהליך "ההריגה" או הוצאה של האלמנטים הנכשלים היא חלק האינטגרלי של תוכנות אלמנטים סופיים הזמינות. בדרך כלל, אלמנטים מוצאים בכח כאשר קריטריון להוצאת האלמנט מופגש. במקרה שלנו, בניגוד לגישה הרחבה המקובלת של טכנולוגיות אלמנטים הסופיים אין צורך להרוג את האלמנטים – הם מתים בעצמם – ורק צריך להוציא אותם החוצה. הצורה האופטימלית של פונקציית האנרגיה תלויה בחומר



ISCM-28

יום העיון ה-28 יתקיים ב-29 באפריל, 2010, באוניברסיטה העברית בירושלים, ויהיה בעל אופי מיוחד. פרטים – ראו באתר האגוד ובהודעות לתפוצה.

יישום נומרי של אלסטיות עם מגבילי האנרגיה לאנליזת כשל חומרים

פבל טרפר

הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, טכניון, חיפה

trapper@technion.ac.il

מבוא

היווצרות כשל בחומרים ובמבנים נושאי עומסים היא נושא עתיק וחשוב. קיימים יישומים טכנולוגיים, פיזיקליים ורפואיים בהם לא רק היווצרות הכשל אלא גם התקדמותו הדינמית היא בעלת חשיבות רבה. היישומים האלה כוללים הגנת ביניינים, כלי טייס, כלי שיריון ובני אדם מפני פיצוץ, חדירת קליעים ורסיסים וכו'.

למרות ההתקדמות העצומה במכניקת החומרים החישובית בעשורים האחרונים, סימולציה ממוחשבת של הכשל הדינמי היא עדיין תחום מתפתח. השיטות הקיימות מוגבלות מדי ומורכבות מבחינה חישובית ולכן אינן יכולות להתקבל כגישות אופטימליות למידול הכשל. גישת הדינמיקה המולקולרית למשל, מוגבלת מבחינת סקלות האורכים והזמן עד לרמה כזאת ששום מבנה או חומר מקרוסקופי אמיתי לא יכול להיות מנותח באמצעותה באופן מעשי. מצד שני, גישות הרצף כגון מכניקת הכשל הקלאסית ומודלים של האזורים הקוהזיביים שיודעות לטפל באורכים וזמנים מקרוסקופיים, מורכבות מבחינה מתמטית וגם מבחינה חישובית והכיל שלהן רחוק מלהיות סריוויאלי. נדרשות גישות חדשות למידול הכשל שיהיו אטרקטיביות מבחינה פיזיקלית ופשוטות מבחינה חישובית.

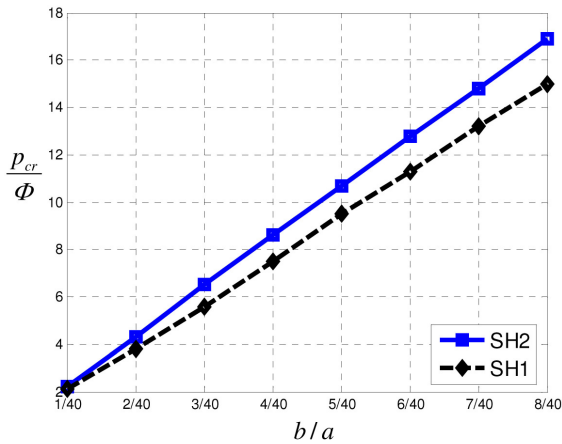
שיטת SH

במטרה לעקוף את הסיבוכיות החישובית של האנליזה האוטומית, ובאותו זמן לשמור על ביסוסה הפיזיקלי, הוצעה גישה חדשה ע"י פרופ' קוסטה וולוך ונקראת אלסטיות עם מגבילי האנרגיה או היפראלסטיות עם התרככות (SH - Softening Hyperelasticity). שיטה זו מתאימה בעיקר לחומרים בהם הכשל כרוך בקריעת הקשרים הבין מולקולריים כגון חומרים פריכים ודמויי פריכים (קראמיקה, בטון, זכוכית) [1] וחומרים רכים (אלסטומרים, רקמות ביולוגיות) [2]. הרעיון הבסיסי של SH הוא לנסח ביטוי לאנרגיה האלסטית המקרוסקופית האגורה בתוך חומר, שמשלב בתוכו את הגורם שמגביל את האנרגיה, כאשר העיבור גדל עד לאינסוף. ביטוי זה גורם

הספציפי אבל חשוב שבכל צורה כזאת האנרגיה תהיה מוגבלת.

אנליזת כשל

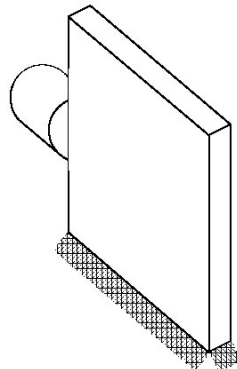
המחקר הנוכחי עוסק בכשל הסטטי והדינמי של חומרים מוצקים כאשר הרעיון הבסיסי של המחקר הוא להשתמש בחוקים הקונסטיטטיביים ההיפראלסטיים של SH. היישום הראשון של SH הוא ניתוח עומס הקריטי שגורם להתקדמות הסדק הקיים בפלטות דקות [3] (איור 3).



איור 5. מאמץ קריטי כתלות בחדות קצה הסדק.

[6] (איור 6). גם כאן הוכנסה תוכנת החוק הקונסטיטטיבי עם תאור הכשל לפי SH לתוך תוכנת ABAQUS ובאורים 7 ו-8. א מובאות תוצאות (האופייניות) של הסימולציה התלת מימדית של נגיפה וחדירה של הקליע הגלילי אל תוך הפאה של פלטה הרתומה בבסיסה. היעד הוא לנתח את עומק החדירה של הקליע ולקבוע את קבועי החומר, כולל אנרגיית הקשר הממוצעת, בהתאם לתוצאות ניסויי הנגיפה והחדירה הקיימים.

איור 6. פגיעת קליע גלילי בפאה של פלטה הרתומה בבסיסה.

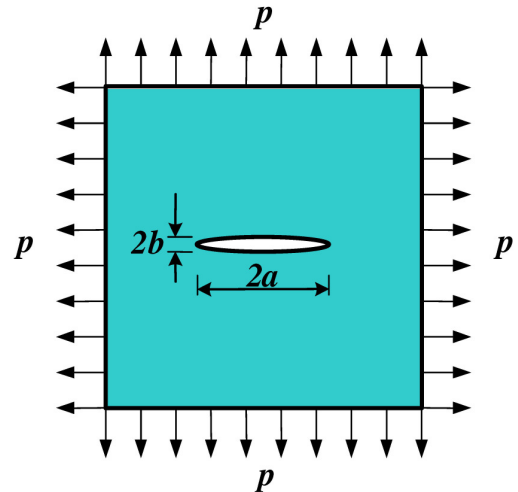


שני מודלים של מוצקים ההוקיאניים האיזוטרופיים הוצגו ונבחנו בהדמיות. בין שאר התוצאות הסימולציות ראוי לציין שעומק חדירה של קליע לא רגיש לגודל הרשת עבור רשתות עדינות אפילו ללא הליך מיוחד של

רגולריזציה (איורים 7 ב ו-8). זו היא עבודה ראשונה בה שיטות של אלסטיות עם מגבילי אנרגיה משמשות לאנליזה דינמית של כשל. סימולציות אלה נועדו בעיקר לתחום המיגון באמצעות קראמיקה שקופה (חלונות משוריינים עבור כלי טייס וכלי רכב), שכפ"ץ קראמי או מבני בטון, כאשר SH צפוי להיות כלי חזק לחישוב. סימולציות דומות התבצעו גם עבור חומרים אלסטומרים [7].

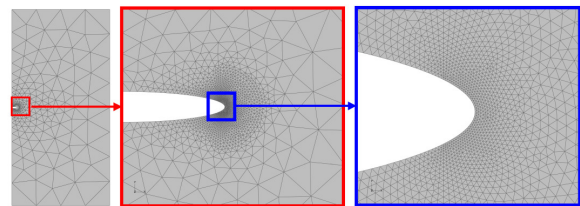
במציאות, המסגרת התיאורטית המקורית של SH לא התאימה במלואה לכל אנליזה דינמית של התקדמות הכשל, מפני שריסון החומר אינו היה עדיין חלק של מסגרת תיאורטית וחשובית. היעד המרכזי של המשך המחקר הוא להרחיב את גישת SH עם מודלים קונסטיטטיביים ההיפר-ויסקואלסטיים כדי שתתאים לכל הבעיות הדינמיות בהן לריסון החומר עקב תלות בקצב של הדפורמציה יש השפעה נכבדת.

הסימולציה המוצלחת של בעיות דינמיות במסגרת של SH יכולה לפשט את מידול הכשל הדינמי בצורה משמעותית ולפתוח דרכים חדשות לטיפול בבעיות מסובכות תלת מימדיות של כשל חומרים ומבנים.



איור 3. סדק אליפטי.

מטרתה של העבודה הייתה לבחון מחדש את התיאוריה של גריפית' ואת התיאוריות הקלאסיות (LEFM) עבור סדקים קטנים, לאור העובדה שהן מתעלמות מחדות קצה הסדק בחיזוי העומס הקריטי. תוצאות הניסויים האחרונים מראות שעומס קריטי שגורם להתקדמות הסדק בפלטה מקראמיקה, כן תלוי בחדות קצה הסדק. ככל שהסדק יותר חד, העומס הקריטי עולה, דבר שגורם לקשיים בכיול מקדם חסינות השבר עבור התיאוריות הקלאסיות. כדי להסביר את תוצאות הניסויים, נכתבה תת-תוכנה שמתארת את החוק הקונסטיטטיבי עם תאור הכשל לפי SH. תת-התוכנה שולבה בתוך תוכנת ABAQUS. הרשת בקצה הסדק מתוארת באיור 4.



איור 4. רשת בקצה הסדק.

נבחנו שני מודלים עבור חומרים פריכים, וההרצות הראו שאכן העומס הקריטי מושפע מחדות הסדק – כפי שהראו הניסויים (איור 5). תוצאות דומות התקבלו גם עבור העמסה במוד II [5] ועבור סדקים באלסטומרים [4].

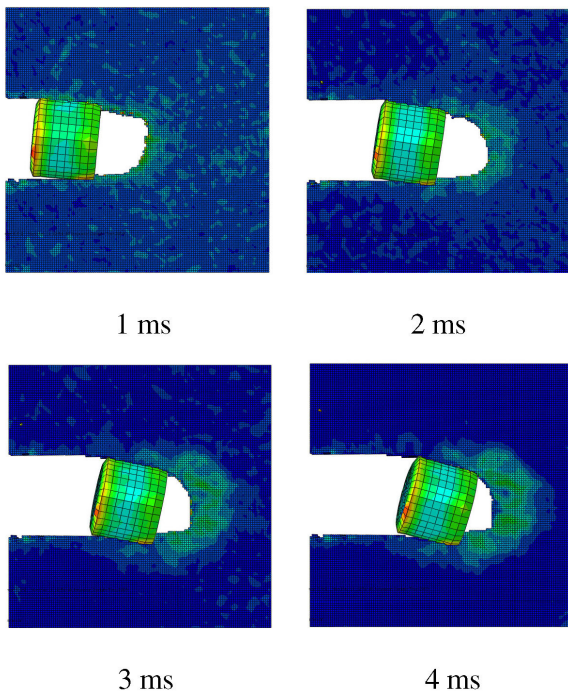
גישת SH הוכיחה את עצמה במגוון שימושים המשתנה מאנליזת חסינות השבר של חומרים פריכים עד לקריעת רקמות ביולוגיות רכות. בבעיות האלה כל הדיונים הוגבלו להיווצרות הכשל בלבד. שלב המתקדם של המחקר הוא אנליזה דינמית של התקדמות הכשל. בשלב הזה התבצעו אנליזות הנגיפה והחדירה של הקליע לתוך מטרה קראמית

[4] Trapper P, Volokh KY (2008) Cracks in rubber. International Journal of Solids and Structures 45: 6034–6044

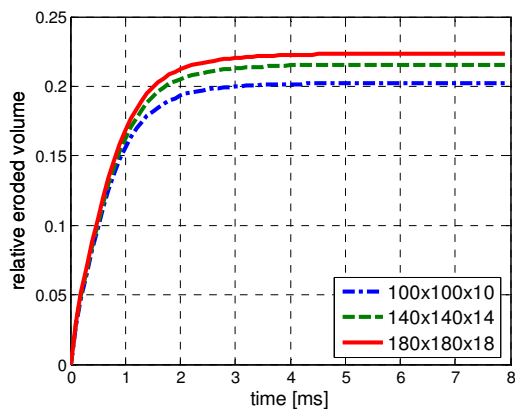
[5] Trapper P, Volokh KY (2009) On fracture toughness and crack sharpness for Mode II cracks. Engineering Fracture Mechanics 76(9): 1255-1267

[6] Trapper, P., Volokh, K.Y., (2010) Elasticity with energy limiters for modeling dynamic failure propagation. Submitted (available on <http://imechanica.org/node/6707>)

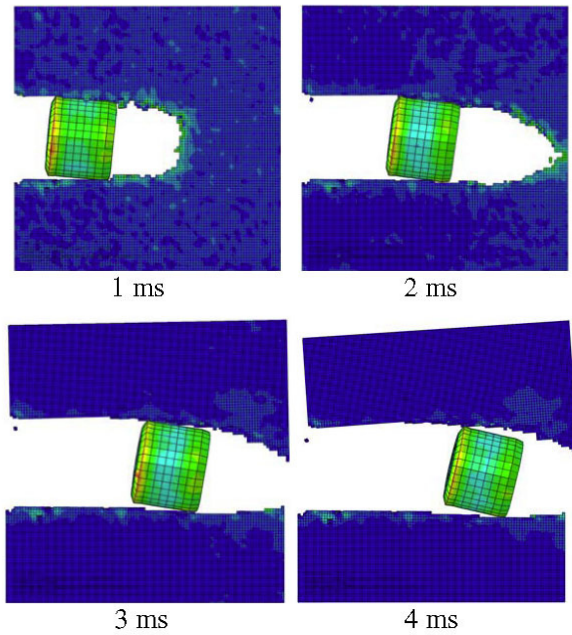
[7] Trapper P, Volokh KY (2010) Modeling dynamic failure in rubber. International Journal of Fracture, accepted.



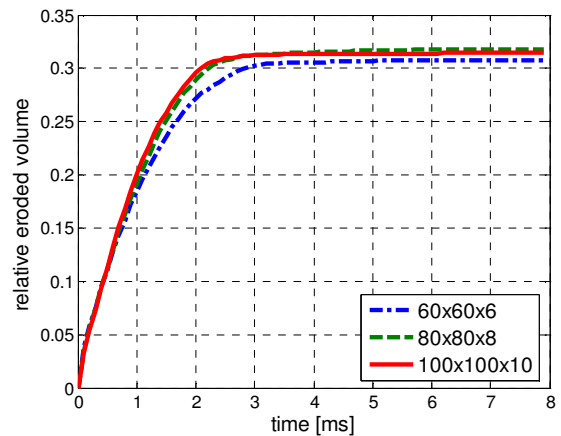
איור 8. חדירה של קליע גלילי אל תוך פאה של פלטה הרתומה בבסיסה בזמנים שונים כאשר קליע נעצר בתוך הפלטה.



איור 28. חדירת הקליע: נפח הנשחק היחסי (אנרגיה המבוזזת) עבור רשתות שונות של אלמנטים סופיים.



איור 7. חדירה של קליע גלילי אל תוך פאה של פלטה הרתומה בבסיסה בזמנים שונים כאשר קליע עובר את הפלטה. האזור הלבן מתאר את הכשל.



איור 27. חדירת הקליע: נפח הנשחק היחסי (אנרגיה המבוזזת) עבור רשתות שונות של אלמנטים סופיים.

מקורות:

[1] Volokh, K.Y., 2004. Nonlinear elasticity for modeling fracture of isotropic brittle solids. J. Appl. Mech. 71, 141-143.

[2] Volokh, K.Y., 2007. Hyperelasticity with softening for modeling materials failure. J. Mech. Phys. Solids 55, 2237-2264.

[3] Volokh KY, Trapper P (2008) Fracture toughness from the standpoint of softening hyperelasticity. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 56: 2459–2472