

بررسی دیسک ترکدار با سوراخ مرکزی جهت آزمایش شکست مواد سنگی

محمد رضا محمدعلیها*؛ مجید رضا آیت‌اللهی**

چکیده

در این تحقیق، نمونه آزمایشگاهی دیسک ترکدار با سوراخ مرکزی به عنوان یک قطعه مناسب برای انجام تستهای چقرمگی شکست مود ترکیبی در سنگها معرفی می شود. این نمونه توانایی ایجاد حالت‌های مختلفی از مود I (بارگذاری کششی) و مود II (بارگذاری برشی) را دارد. در این قطعه با اعمال بار فشاری قطری در راستایی مناسب نسبت به امتداد ترک، ترکیبهای مختلفی از کشش و برش بدست می آید. جهت بدست آوردن ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} برای این قطعه از روش اجزاء محدود استفاده شده است. در تحلیلهای انجام شده تاثیر پارامترهایی چون طول ترک، زاویه ترک و شعاع سوراخ داخلی بر روی ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج تحلیلهای نشان می دهد که به طور کلی مقادیر ضرایب شدت تنش با افزایش طول ترک و افزایش قطر سوراخ داخلی دیسک، افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: دیسک سوراخدار، مود ترکیبی، ضریب شدت تنش، روش اجزاء محدود

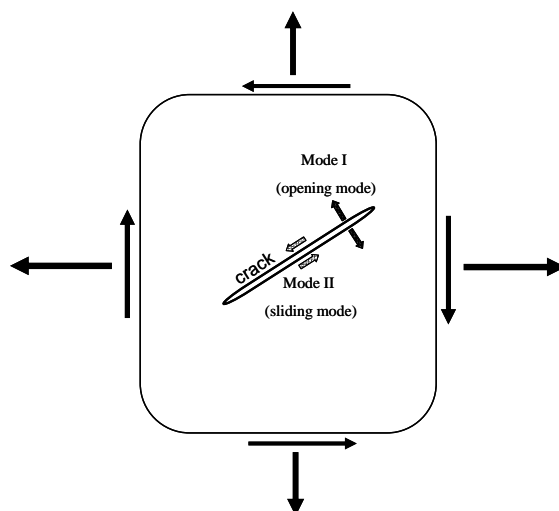
۱- مقدمه

در بسیاری از سازه ها و توده های سنگی تعداد زیادی صفحه جدایش، ترک، درزه و شکستگی وجود دارد. در نتیجه هنگامی که این توده ها در معرض بارهای مکانیکی یا عوامل محیطی دیگر قرار بگیرند احتمال وقوع شکست و رشد ترک از محل همین ناپیوستگی ها وجود دارد. بررسی استحکام شکست توده های سنگی ترکدار برای طراحان سازه هایی نظیر تونلها، معادن زیرزمینی و چاهها مهم است. برای تخمین استحکام شکست قطعات و سازه های ترکدار لازم است که چقرمگی شکست ماده مورد نظر در دسترس باشد. چقرمگی شکست پارامتری است که میزان مقاومت ماده ترکدار را در برابر رشد و گسترش شکست مشخص می کند و به عواملی چون طول ترک، هندسه قطعه ترکدار، جهت و محل قرارگیری درزه و ترک و بار اعمالی بستگی دارد. چقرمگی شکست مواد صرفا با انجام آزمایش و با استفاده از قطعات مناسب قابل تعیین است. معمولا در اکثر کاربردهای عملی، سازه ها و توده های سنگی ترکدار در معرض بارهای پیچیده قرار داشته و شکست سازه به واسطه مشارکت همزمان بارهای کششی و برشی (شکست مود ترکیبی I/II) بوقوع می پیوندد. شکل ۱ بارگذاری مود ترکیبی I/II را در یک قطعه ترکدار نشان می دهد. بنابراین برای تخمین استحکام شکست چنین سازه هایی

* دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت ایران؛ دانشکده مهندسی مکانیک: mrm.aliha@iust.ac.ir

** دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران؛ دانشکده مهندسی مکانیک: m.ayat@iust.ac.ir

دانستن میزان چقرمگی شکست مود ترکیبی I/II الزامی است. در گذشته قطعات آزمایشگاهی مختلفی برای تعیین چقرمگی شکست مود ترکیبی سنگها مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۶]. یک قطعه مناسب بایستی شکل ساده ای داشته و تهیه و آماده سازی آن آسان باشد. ضمناً بارگذاری و تست آن با دستگاهها و فیکسچرهای معمولی امکان پذیر باشد. علاوه بر این باید بتواند محدوده کامل بین مود I خالص بارگذاری (مود کششی و باز شدگی لبه های ترک) تا مود II خالص (مود برشی و لغزش داخل صفحه لبه های ترک) را فراهم نماید. همچنین برای مواد سنگی اعمال بارگذاری فشاری به جای بارگذاری کششی مناسبتر می باشد.



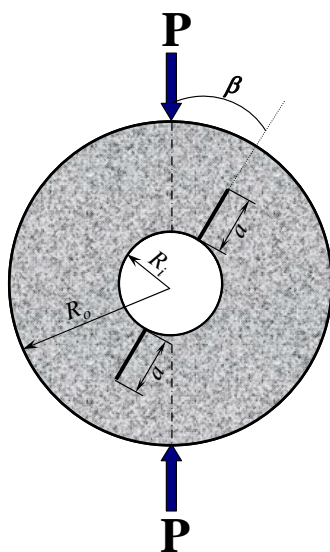
شکل (۱): بارگذاری مود ترکیبی I/II در یک قطعه ترکدار.

در این مقاله یک قطعه آزمایشگاهی برای انجام تستهای شکست مود ترکیبی I/II در مواد سنگی معرفی شده و قابلیتها و مزایای آن مورد بررسی قرار می گیرد. قطعه مذکور دیسک ترکدار با سوراخ مرکزی و تحت بارگذاری فشاری قطری می باشد. در ادامه پس از معرفی قطعه، پارامترهای شکست آن (ضرایب شدت تنش مود I و مود II) توسط روش اجزاء محدود محاسبه شده و به صورت نمودارهایی ارائه می گردد.

۲- قطعه دیسک ترکدار با سوراخ مرکزی

نمایش شماتیکی از هندسه و بارگذاری قطعه مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است. این قطعه یک دیسک دایره ای به شعاع R_o می باشد که در مرکز آن یک سوراخ به شعاع R_i ایجاد شده است. دو ترک هم امتداد هر یک به طول a از لبه دایره داخلی ایجاد شده است. وقتی که این قطعه توسط بار فشاری قطری P بارگذاری شود، بسته به زاویه قرارگیری ترک نسبت به راستای بارگذاری اعمالی (β) حالتها و ترکیبهای مختلفی از مود I و مود II در قطعه ایجاد می گردد. وقتی که زاویه β برابر صفر است قطعه در حالت مود I خالص قرار داشته و لبه های ترک در اثر بارگذاری از هم باز می شوند.

محققانی چون شیرایف و کتکیس [۷] و نیز مقاله دانل [۸] از حالت مود I این قطعه برای تخمین مقدار چقرمگی شکست مود I (K_{Ic}) سنگها استفاده کرده اند. با افزایش β علاوه بر مود I تاثیر مود II بارگذاری ویا لغزش لبه های ترک نیز در تغییر فرم ترک مشاهده می شود. با افزایش زاویه β از صفر، اثر مود I کاسته شده و تاثیر مود II افزایش می یابد. در یک زاویه مشخص β تاثیر مود I از بین رفته و قطعه در شرایط مود II خالص قرار می گیرد که در آن لبه های ترک فقط روی هم می لغزند. این زاویه بستگی به طول ترک و نیز شعاع سوراخ داخلی دارد.



شکل (۲): شکل شماتیکی از هندسه و بارگذاری قطعه دیسک ترکدار با سوراخ مرکزی.

برای تعیین تاثیر هر کدام از مودهای بارگذاری در تنشهای اطراف نوک ترک و در فرآیند شکست، بایستی مقادیر ضریب شدت تنش مود I و مود II در اطراف نوک ترک در این قطعه محاسبه گردد. عوامل موثر بر توزیع تنش اطراف نوک ترک در این قطعه عبارتند از طول ترک (a)، شعاع های داخلی و خارجی دیسک (R_o, R_i)، مقدار نیروی اعمالی P و زاویه قرارگیری ترک (β). ضرایب شدت تنش دو مود بارگذاری (K_I, K_{II}) در این قطعه به صورت کلی زیر نوشته می شود:

$$K_I = \frac{P}{(R_o - R_i)t} \sqrt{\pi a} Y_I \left(\frac{R_i}{R_o}, \frac{a}{R_o - R_i}, \beta \right) \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P}{(R_o - R_i)t} \sqrt{\pi a} Y_{II} \left(\frac{R_i}{R_o}, \frac{a}{R_o - R_i}, \beta \right) \quad (2)$$

که در آن t ضخامت قطعه و Y_I, Y_{II} ضرایب بدون بعد هندسی مودهای I و II بارگذاری می باشند. این ضرایب در بخش بعدی با استفاده از روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم افزار ABAQUS برای حالت های مختلف محاسبه می گردد.

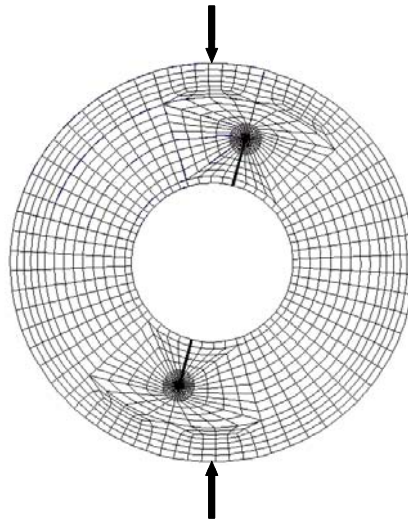
۳- تحلیل‌های اجزاء محدود

برای انجام تحلیل‌های اجزاء محدود، دیسکهایی با قطر خارجی ۱۰۰mm و ضخامت ۲۰ mm و طول ترک‌های مختلف ایجاد گردید. نمونه ای از مدل المان محدود این قطعه در شکل ۳ نمایش داده شده است. تعداد تقریبی ۱۶۵۰ المان صفحه ای ۸ گرهی برای ساخت این مدل استفاده شده است. در مدلسازی اطراف نوک ترک از المانهای ریزتر و بیشتری استفاده شده است. ضمناً برای در نظر گرفتن اثرات سینگولاریتی تنش، در نوک ترک المانهای سینگولار به کار گرفته شده است. در این المانها گره های میانی هر المان به فاصله $\frac{1}{4}$ از نوک ترک منتقل می شوند. پس از ساختن مدل اجزاء محدود و اعمال بارگذاری مربوطه، مدل تحلیل الاستیک شده و از نتایج جابجایی های لبه های بالا و پایین ترک مقادیر K_I و K_{II} از طریق روابط زیر محاسبه و استخراج می گردد [۹]:

$$K_I = \frac{E u_y}{5 + \nu} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \quad (3)$$

$$K_{II} = \frac{E u_x}{8} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \quad (4)$$

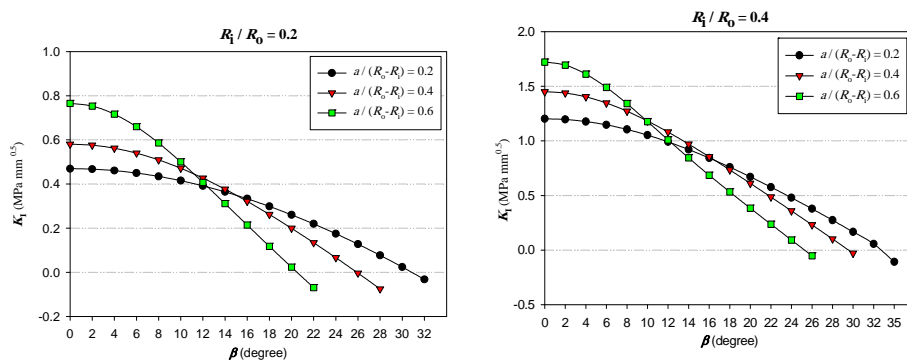
که در آن E و ν به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بوده و r فاصله از نوک ترک می باشد. در تحلیل‌های انجام شده مقایسه E و ν مربوط به یک سنگ نمونه ($E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0.28$) در نظر گرفته شده است. در این معادلات u_x و u_y جابجایی های گره های واقع در لبه های بالا و پایین ترک و به ترتیب در امتداد موازی و عمود بر ترک می باشند. مقدار این جابجاییها با قرار دادن یک سیستم مختصات کارتزین در نوک ترک، محاسبه و اندازه گیری می شود.



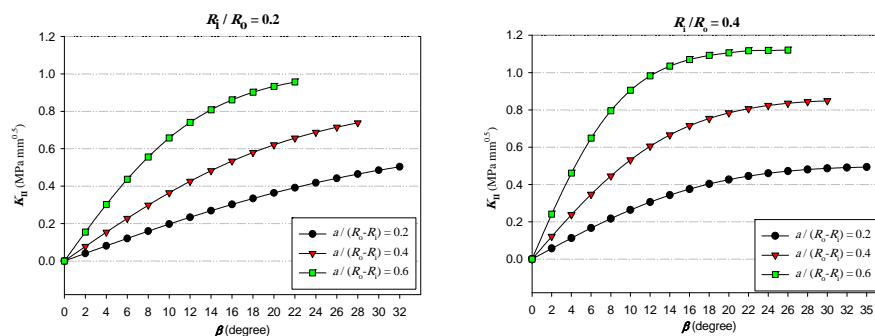
شکل(۳): مدل اجزاء محدود قطعه دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی.

۴- نتایج

نتایج حاصل از تحلیلهای انجام شده برای چند حالت مختلف در شکلهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. در این شکلهای ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} برای نسبتهای $\frac{R_i}{R_o} = 0.2, 0.4$ و $\frac{a}{R_o - R_i} = 0.2, 0.4, 0.6$ و زاویه های مختلف β به صورت نمودارهایی ارائه شده است.



شکل (۴): تغییرات ضریب شدت تنش مود I (K_I) بر حسب زاویه ترک β .



شکل (۵): تغییرات ضریب شدت تنش مود II (K_{II}) بر حسب زاویه ترک β .

همچنانکه از شکل ۴ مشخص است با افزایش زاویه β مقدار K_I کم شده و برای هر طول ترکی در یک زاویه مشخص مقدار آن برابر صفر می شود. این زاویه متناظر با شرایط مود II خالص می باشد و برای شرایط مختلف بین محدوده $(20^\circ \sim 35^\circ)$ β تغییر می کند. از شکل ۵ هم چنین نتیجه می شود که با افزایش زاویه β از صفر ضریب شدت تنش مود II که در ابتدا صفر است به تدریج افزایش می یابد و در شرایط مود II خالص به بیشترین مقدار خود می رسد. ضمناً تاثیر ترم K_{II} برای قطعاتی که طول ترک بزرگتری دارند بیشتر است.

۵- نتیجه

قطعه دیسک ترکدار با سوراخ مرکزی که در این مقاله معرفی شد، قطعه مناسبی برای انجام تستهای شکست مود ترکیبی I/II در سنگها می باشد. فرم دایره ای شکل این قطعه امکان تهیه آسان آن را از مغزه های موجود و بدون کمترین عملیات ماشین کاری فراهم می نماید. ضمناً ایجاد ترک از لبه های دایره داخلی به سهولت و با استفاده از یک تیغه اره نازک امکان پذیر است. در حالی که در گذشته از این قطعه برای تست چقرمگی شکست مود I سنگها استفاده شده است [۷و۸] می توان به راحتی و با چرخش زاویه ترک نسبت به راستای بار اعمالی ترکیبهای مختلفی از مود I و مود II بارگذاری و حتی حالت مود II خالص را ایجاد نمود. برای تعیین ضرایب شدت تنش مود I و مود II (K_I , K_{II}) در این قطعه تعداد زیادی تحلیل اجزاء محدود برای شعاعهای داخلی مختلف، طول ترکها و زوایای مختلف انجام شد. نتایج تحلیلها نشان داد که به طور کلی مقدار ضرایب شدت تنش با افزایش طول ترک و افزایش شعاع سوراخ داخلی دیسک (R_I)، افزایش می یابد. از منحنی های ارایه شده در این مقاله می توان برای بررسی رفتار چقرمگی شکست مود ترکیبی سنگها با انجام تستهای شکست بر روی این نمونه استفاده کرد.

۶- مراجع

- [1] Khan, K., Al-Shayea, N.A., "Effect of specimen geometry and testing method on mixed I-II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia". Rock Mech. and Rock Engng. Vol. 33 (3), 179-206, 2000.
- [2] Chang, S.H., Lee, C.I., Jeon, S., "Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens". Engng. Geol. Vol. 66, 79-97, 2002.
- [3] Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K., Boland, J.N., "Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending. Part 2 -mixed mode". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 31(3), 199-212, 1994.
- [4] Zipf, R.K., Bieniawski, Z.T., "Mixed-mode fracture toughness testing of coal" Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 27(6), 479-493, 1990.
- [5] Huang, J., Wang, S., "An experimental investigation concerning the comprehensive fracture toughness of some brittle rocks". Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22(2), 99-104, 1985.
- [6] Ingraffea, A.R. "Mixed mode fracture initiation in Indiana limestone and Westerly granite", 22nd US Symp. on Rock Mech. Cambridge, M.A., 186-191, 1981.
- [7] Shiryayev, A.M., Kotkis, A.M., "Methods for determining fracture toughness of brittle porous materials", Industrial Laboratory, Vol. 48(9), 917-918, 1982.
- [8] Danell, R., Karihaloo, B.L., Leung, L., Lewis, J.A. "Fracture toughness testing of geological materials". SEM/RILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock, Houston, Texas, S.P. Shah & S.E. Swartz, (Eds.), 433-443, 1978.
- [9] Anderson, T.L., "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications" 1995. CRC Press.