



VISUALISASI RESPON MASSA BATUAN TERKEKARKAN TERHADAP DAMPAK PEMBEBANAN

Mohammad Suriyaidulman Rianse^[1], Singgih Saptono^[1], dan Sayahdin Alfat^[2]

^[1]Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta
Jl. SWK No. 104, Condongcatur, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta
^[2] Universitas Halu Oleo
Kampus Hijau Bumi Tridharma, Anduonohu, Kambu, Kendari, Sulawesi Tenggara

e-mail : idoel.geospurs@gmail.com

ABSTRAK

Massa batuan dilihat dari sisi makro dan mikro merupakan material heterogen dan media diskontinu. Bila diberi tekanan, massa batuan terkekarkan akan memberi respon berupa penjalaran retakan (*crack propagation*). Penjalaran retakan dapat diamati melalui eksperimen uji kuat tekan batuan dan hasil eksperimen dapat dimodelkan melalui simulasi dengan metode numerik. Tujuan penelitian ini adalah memvisualisasikan penjalaran retakan pada massa batuan terkekarkan dengan investigasi pemodelan numerik. Berdasarkan investigasi melalui pemodelan numerik diketahui bahwa ketika intensitas kekar massa batuan meningkat, pola retakan dan kerusakan yang ditimbulkan pada massa batuan menjadi lebih luas dan lebih dalam. Perambatan retakan akan berhenti ketika mencapai permukaan kekar yang sudah ada sebelumnya (retakan awal).

Kata kunci: batuan terkekarkan, pemodelan numerik, penjalaran retakan

ABSTRACT

The rock mass viewed from the macro and micro sides is heterogeneous material and discontinuous media. When under pressure, the mass of the rock that is dispersed will respond in the form of crack. Crack propagation can be observed through rock compressive strength test experiments and the results of experiments can be modeled through simulations with numerical methods. The purpose of this study is to visualize the crack propagation in excised rock masses by numerical modeling investigations. Based on investigations through experimental and numerical modeling, it is known that when the mass density of rock masses increases, crack patterns and damage caused to rock masses become wider and deeper. Cracks propagation will stop when they reach a pre-existing muscular surface (initial crack).

Keywords: joint rocks, numerical modelling, crack propagation

PENDAHULUAN

Batuan adalah material geo yang umumnya heterogen, dengan banyak rekahan yang ada sebelumnya dan bervariasi dari retakan mikroskopis hingga kekar makroskopik dan bahkan hingga patahan kontinental. Ketika massa batuan mengalami berbagai jenis pembebanan, rekahan dapat terjadi dan merambat dari celah atau pori yang sudah ada sebelumnya, dan kemudian bergabung menjadi kerusakan makro dari batuan. Biasanya, dalam kompresi uniaksial, tiga jenis dasar mode kerusakan batuan dapat diamati, yaitu kerusakan, splitting, spalling, and oblique (Germanovich et al., 1994). Splitting dan spalling sebenarnya berupa kerusakan tarik, sedangkan kerusakan oblique tampak seperti kerusakan geser. Tentu saja, semua mode kerusakan ini dapat diamati pada skala makro. Namun, pada skala mikro, tiga mode kerusakan makro adalah hasil interaksi antara celah-celah mikro (Grif, 1924). Retak mikro dapat berupa retak tarik atau retak

geser, tergantung pada distribusi tegangan lokal dalam spesimen batuan. Selain itu, untuk pembebanan biaksial, tekanan yang terbatas dapat menghambat pertumbuhan retakan dan dengan demikian menyebabkan pertumbuhan retakan yang sudah ada sebelumnya lebih kecil dan lebih padat. Hal ini dapat mengakibatkan lokalisasi dan fraktur geser dalam rezim getas. Banyak peneliti telah mempelajari mekanisme evolusi fraktur dua dimensi dari kesalahan yang sudah ada sebelumnya (Brace dan Bombolakis, 1963; Hoek dan Bieniawski, 1965; Horii dan Nemat-Nasser, 1985, 1986; Ashby dan Hallam, 1986; Bobet, 1997, 2000; Bobet dan Einstein, 1998; Zhu dkk., 1998; Wong dan Chau, 1998; Vasarhelyi dan Bobet, 2000). Pada dasarnya, dua retakan sekunder dimulai dari kedua ujung tahanan miring, dan merambat secara stabil ke arah sumbu kompresi utama. Wong dkk. (2001) mempelajari mekanisme interaksi retakan pada spesimen dengan tiga cacat paralel, dan hasilnya menunjukkan bahwa susunan celah memainkan peran penting dalam penggabungan



retakan. Namun, sebagian besar studi tentang mekanisme fraktur batuan getas dalam kompresi telah terbatas pada retakan dalam dua dimensi. Untuk spesimen tiga dimensi, retakan retakan atau retakan geser terjadi pada permukaan 3-D, membuat mekanisme evolusi jauh lebih rumit (Yang dkk., 2012a, b).

PENGUJIAN LABORATORIUM (STATIS DAN DINAMIS)

Untuk mendapatkan nilai-nilai mekanik statis dan dinamis, sampel batuan harus menjalani serangkaian uji statis dan dinamis, termasuk kompresi uniaksial, triaxial, Brazilian statis, dan uji jatuhnya dinamis (Gambar 1). Sifat-sifat mekanik statis (kekuatan tekan uniaksial (UCS), modulus elastis, nisbah Poisson, dan kekuatan tarik tidak langsung) dan sifat dinamis (kekuatan tarik dinamis) dari batuan utuh. (Aziznejad, 2017).

a) Uji Kuat Tekan Uniaksial

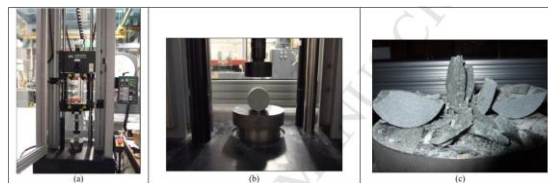
Uji kuat tekan uniaksial dilakukan pada sampel dengan dimensi tinggi 12 cm dan diameter 5 cm, menggunakan kerangka beban MTS 815 untuk uji quasi-statis. Selama pengujian ini, beban aksial dan deformasi sampel dicatat. Sifat elastis (modulus Young dan rasio Poisson) dihitung dari bagian linier kurva tegangan-regangan, pada kisaran 30% hingga 70% dari kuat tekan ultimate sampel. (ASTM D4543-08, 2008 dan ASTM D7012-14, 2014).

b) Uji Brazilian

Tes Brasil umumnya digunakan sebagai metode tidak langsung untuk menentukan kekuatan tarik batuan utuh di laboratorium. Pengujian dilakukan dengan menggunakan kerangka beban MTS 815 pada sampel dengan dimensi diameter 5 cm dan tebal 3 cm. (ASTM D3967-08, 2008).

c) Uji Jatuhan (Drop Test)

Untuk menentukan kekuatan tarik dinamis sampel batuan, uji drop dinamis dilakukan menggunakan bingkai beban dampak vertikal Dynatup Model 9210 seperti yang dilakukan oleh Aziznejad (2017) untuk mereplikasi kondisi yang diamati selama pemuatan dampak batuan. Pengujian dilakukan dengan massa tumbukan 19,35 kg, tinggi jatuh 46 cm, dengan total energi potensial 87 J dalam sistem, dan kecepatan tumbukan 3 m/s. Kekuatan tarik dinamis sampel batuan lebih tinggi daripada kekuatan tarik statis batuan. Defleksi dalam uji jatuhnya adalah perpindahan total sampel pada beban dinamis maksimum sebelum rusak. Ini diukur dengan strain gage dan kamera kecepatan tinggi.

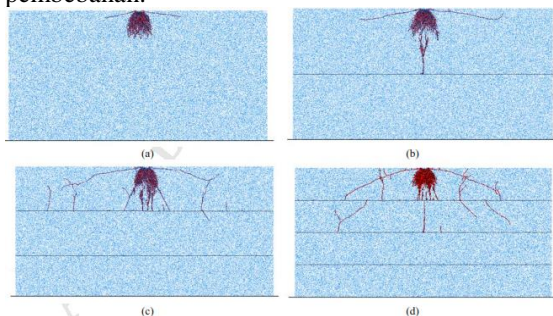


Gambar 1: (a) Bingkai beban Dynatup 9210 untuk pengujian dampak dinamis, (b) Pengaturan sampel siap untuk pengujian dinamis, dan (c) Sampel gagal setelah pengujian dinamis. (Aziznejad, 2017)

PEMODELAN NUMERIK

Tujuan pemodelan numerik adalah untuk mereplikasi hasil tes laboratorium. Model numerik dapat digunakan untuk menentukan distribusi tegangan dari spesimen laboratorium, dan karenanya sehingga evolusi retakan dapat diprediksi dan disimulasikan. Telah banyak ilmuwan yang melakukan analisis seperti itu. Berdasarkan uji creep eksperimental, model fenomenologis disajikan oleh Kaiser dan Morgenstern (1981) untuk menyelidiki deformasi tergantung waktu dan mekanisme keruntuhan massa batuan. Schlangen dan Van Mier (1992) adalah yang pertama menerapkan model kisi untuk mensimulasikan keruntuhan progresif dalam beton. Place dan Mora (1999) mengembangkan model kisi berbasis partikel untuk mempelajari fisika batuan dan dinamika gempa nonlinier. Shen dan Stephansson (1993) mengembangkan metode diskontinuitas perpindahan, menggunakan kriteria G yang dimodifikasi, untuk secara numerik mensimulasikan perambatan retak dan penggabungan antara dua celah makroskopik terbuka / tertutup yang sudah ada sebelumnya. Fanella dan Krajcinovic (1988) mengusulkan model kerusakan mikromekanis untuk subjek beton yang akan dikompresi. Respons non-linear keseluruhan dari bahan tersebut semata-mata disebabkan oleh pertumbuhan microcracks yang berorientasi acak yang terletak pada antarmuka pasta semen-agregat. Blair dan Cook (1998) mengembangkan model statistik, yang disebut model berbasis aturan non-linear, dan ditambah dengan metode elemen batas. Efek heterogenitas mikro pada deformasi makroskopis diteliti menggunakan model. Vasarhelyi dan Bobet (2000) melaporkan metode diskontinuitas perpindahan, FROCK, dan secara numerik mensimulasikan inisiasi, propagasi dan perpaduan celah antara dua celah makroskopik yang sebelumnya ada dengan kompresi uniaksial. Model numerik mereka sesuai dengan hasil eksperimen yang mereka lakukan. Ada beberapa jenis model yang dapat digunakan untuk memodelkan perjalanan retakan. Salah satunya adalah bonded particle model (BPM) yang digunakan oleh Aziznejad (2017). Aziznejad

memodelkan pertumbuhan microcrack akibat dari pembebanan.

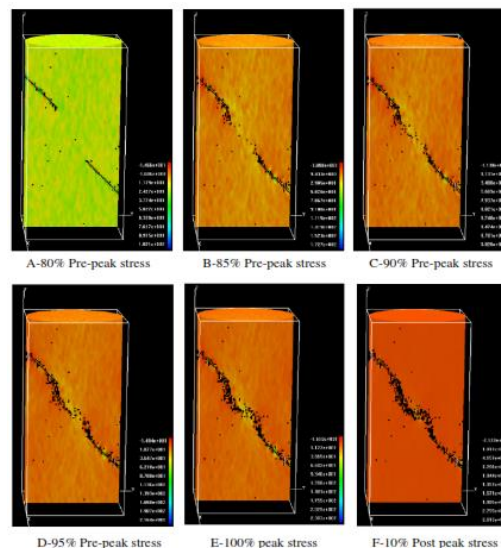


Gambar 2: Kerusakan yang disebabkan dampak dalam sampel massa batuan dengan intensitas sambungan yang berbeda: (a) $P_{21} = 0 \text{ m-1}$, (b) $P_{21} = 1 \text{ m-1}$, (c) $P_{21} = 2 \text{ m-1}$, (d) $P_{21} = 3 \text{ m-1}$. Tegangan dan retakan geser diindikasikan masing-masing dalam warna merah dan hitam.

Gambar 2 mengilustrasikan ketergantungan pola microcrack pada intensitas kekar massa batuan. Ketika intensitas kekar massa batuan meningkat, pola retakan dan akibatnya kerusakan yang ditimbulkan oleh dampak yang ditimbulkan pada massa batuan menjadi lebih luas dan lebih dalam. Lebih jauh, dengan meningkatnya intensitas kekar, retakan radial dan samping merambat lebih lama dan lebih dalam di dalam sampel massa batuan. Untuk sampel massa batuan dengan intensitas sambungan rendah, $P_{21} = 1 \text{ m-1}$, microcracks merambat dari zona hancur menuju permukaan kekar dan perambatan retak berhenti ketika mencapai permukaan kekar yang sudah ada sebelumnya. Untuk dua sampel SRM, dengan intensitas sambungan yang lebih tinggi dari $P_{21} = 2 \text{ m-1}$ dan 3 m-1 , microcrack memulai dan merambat dari zona hancur ke bawah bidang kekar. Dapat diamati juga bahwa beberapa microcracks dapat memulai dari bidang kekar dan menyebar ke atas. Microcracks ini menyebar hampir tegak lurus ke permukaan kekar yang sudah ada sebelumnya.

Jenis pemodelan numerik lain yang digunakan untuk memodelkan penjalaran retakan adalah RFPA3D yang digunakan oleh Wang (2013). Wang melakukan pemodelan untuk beberapa tipe sampel yang memiliki kondisi retakan awal yang berbeda (tipe yang berbeda). Gambar 3 menunjukkan evolusi simulasi numerik dari retakan internal pada potongan tengah spesimen. Dari Gambar ini, dengan peningkatan pembebanan uniaksial yang diterapkan, tegangan meningkat hampir secara linier dengan regangan aksial sebelum mencapai tegangan puncak pada titik E. Secara bersamaan, jumlah AE meningkat secara bertahap hingga titik puncak stres, di mana tegangan drop berbeda terjadi dan ada lonjakan mendadak dalam hitungan AE. Dari Gambar 3, terbukti bahwa retakan internal pada irisan tengah spesimen pertama-tama tumbuh di sepanjang sumbu tekanan kompresi vertikal, dari Titik A ke Titik B. Ketika tingkat

tegangan mencapai 90% dari nilai puncak (Titik C), retakan geser mulai tumbuh dan merusak rock bridge (Wong dan Chau, 1998) pada tahap D dan E. Pada tahap F, retakan menyatu.



Gambar 3. Evolusi fraktur yang disimulasikan secara numerik pada irisan vertikal tengah pada salah satu spesimen (Tipe C).

KESIMPULAN

Sejumlah tes laboratorium dilakukan untuk menentukan sifat statis dan dinamis dari batuan utuh. Ini memberikan latar belakang eksperimental untuk melakukan pengembangan serangkaian investigasi numerik. BPM dan RFPA3D berhasil digunakan untuk mensimulasikan sifat statis dan dinamis dari batuan utuh yang diuji di laboratorium. Hasil simulasi mendukung kesimpulan bahwa kehadiran cacat struktural dalam massa batuan memainkan peran yang sangat penting dalam kerusakan dari massa batuan. Kekar yang sudah ada sebelumnya mempengaruhi perambatan gelombang tegangan dalam sampel massa batuan dan mengakibatkan hilangnya energi dalam sampel massa batuan terkekarkan. Gelombang tegangan yang diinduksi dapat dicerminkan dari permukaan kekar dan memodifikasi pola retak dalam massa batuan. Hasil numerik menunjukkan bahwa retakan radial umumnya berhenti ketika mencapai kekar yang sudah ada sebelumnya dan hampir tegak lurus terhadap permukaan kekar. Diakui bahwa intensitas kekar yang lebih tinggi dalam massa batuan menghasilkan kerusakan massa batuan yang besar. Akhirnya, penelitian ini membantu untuk memahami mekanisme kerusakan yang diakibatkan oleh pembebanan pada massa batuan terkekarkan. Hasil investigasi ini memiliki implikasi yang



signifikan dalam fragmentasi dan transfer material selama penggalian bawah tanah di batuan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D3967-08, (2008), “Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens”, West Conshohocken, PA, USA: *ASTM International*, p. 4.
- ASTM D4543-08. (2008), “Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances”, West Conshohocken, PA, USA: *ASTM International*, p. 9.
- ASTM D7012-14, (2014), “Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures”, West Conshohocken, PA, USA: *ASTM International*, p. 9.
- Aziznejad, S. dkk, (2017), “Responses of jointed rock masses subjected to impact loading”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Germanovich, L.N., Salganik, R.L., Dyskin, A.V., Lee, K.K., (1994), “Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression”, *Pageoph* 143 (1/2/3), 117–149.
- Griffith, A.A., (1924), “The theory of rupture”, *In: Proc. 1st Int. Congr. on Applied Mech., Delft*, pp. 55–63.
- Wang, S.Y. dkk, (2013), “Numerical Study of Failure Behaviour of Pre-Cracked Rock Specimens Under Conventional Triaxial Compression”, *International Journal of Solids and Structures* 51, 1132-1148.
- Wong, R.H.C., Chau, K.T., (1998), “Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35, 147–164.
- Wong, R.H.C., Chau, K.T., Tang, C.A., Lin, P., (2001), “Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part I: experimental approach”, *Int. J. Rock Mech Min. Sci.* 38, 909–924.
- Yang, S.Q., Jing, H.W., Wang, S.Y., (2012), “Experimental study on the strength, deformability, failure behaviour and spatial acoustic emission distribution of red sandstone under triaxial compression”, *Rock Mech. Rock Eng.* 45, 583–606