NY VITENSKAP OM BRUDDMEKANISMER VIA BERGMEKANIKK

av Nick Barton (NB&A, Høvik) og Baotang Shen (CSIRO, Brisbane)

Det er ikke mange som vil trekke 'likhetstegn' mellom bergbrudd i tunneller dvs. den lydgivende og noen ganger livsfarlig 'bergslag', og de alltid begrenset høyder av sjøkystens klipper og fjellsiders vertikale vegger. Høydevariasjon her kan være så lite som 10-15m i svak fjell f. eks. sandstein eller vulkanske tuff, til de sjelden 1,000-1,200m høy og nesten vertikale fjellvegger i, som oftest, granitt. Det er disse store fjellvegger som er elsket av verdens fremste fjellklatrer. Disse tilsynelatende ulike fenomener var nylig knyttet sammen av Barton og Shen (2017) i et foredrag i USA's internasjonal konferanse i bergmekanikk, som gikk av stabelen i San Francisco tidligere i sommer.

Figur 1 illustrerer disse ulik fenomen, i form av brudd (til venstre) i en overførings tunnel i et vannkraftverk i Brazil, og (i midten) ca. 15m høy klipper som har kommet til brudd i Cappadocia sin vulkansk tuff. Til høyre er en majestetisk 1,200m høy nærvertikal fjellvegg fra Baffin Island, i nordøst Canada.

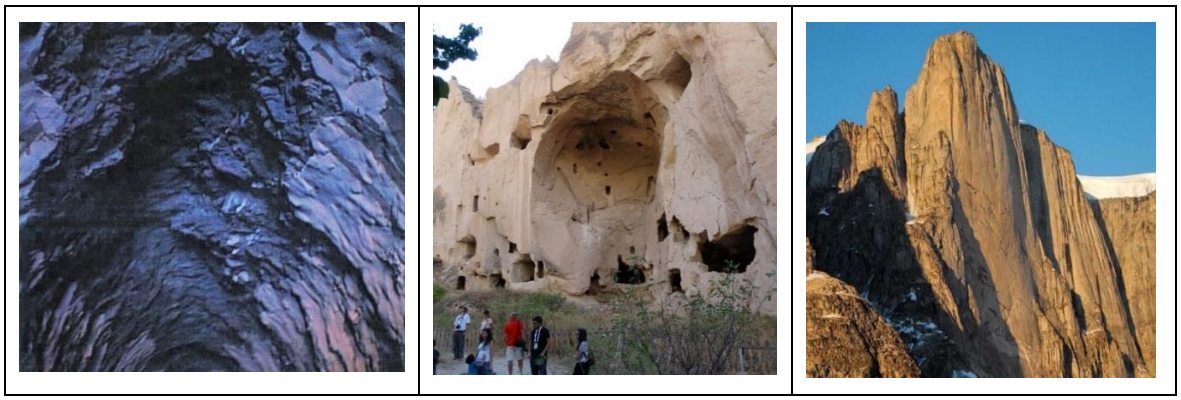


Figure 1. Brudd av fjell i forskjellige målestokk: a) 14m x 16m overføringstunnel i Ita vannkraftprosjekt i Brasil. (Bergarten er basalt med enaksialtrykkfasthet σ_c = 200 MPa), b) 15m høy klipper-brudd (og eksponering av kirke) i Cappadocia (bergarten er tuff med σ_c = 1 MPa), c) Den 1,200m høy 'Mirror Wall' i Baffin Island (antatt granitt med σ_c ≈150 MPa). σ_c er symbol for enaksialtrykkfastehet ('unconfined compressive strength') målt på en sylindrisk bergartsprøve i laboratoriemålestokk. Resultatet er ofte angitt som 'UCS' og de styrke-enheter (MPa) er ekvivalent til 100 tonn/m^2. Bergarter er som oftest meget sterk som kjent.

Brudd i tunneler på grunn av ekstrem dybde

Det er faktisk strekkfasthet (dvs. styrke under tensjonspenning) og ikke trykkfasthet (styrke under kompresjon) som er viktigste for tidlig brudd i tunneler, men dette må være i samvirke med bergartens utvidelses koeffisient, som alle reservoar og geofysikkinteressert fagfolk kjenner som Poisson's tall, dvs. hvor mye en prøvesylinder utvider seg lateralt, i forhold til forkortening i aksial retning, når prøvestykket er belastet i f. eks. en 100 tonn hydraulisk press.

Forholdet $\sigma_{krit} = \sigma_t / v$ (kritisk spenningsnivået = strekkfasthet/Poisson's tall) faktisk bestemmer hvor stor maksimal spenning bergarten tåler, før man opplever begynnende 'sprakefjell' i en dyp tunnel. Forholdet σ_t / v er utledet fra en klassisk formel i elastisitet, av medforfatter Shen. Det var faktisk mye sprakefjell i verdens (og

Norges) nåværende lengste veitunnel (Lærdal Tunnel: som har lengde 24.5 km, og maksimal dybde opp til 1.4km).

Planleggere av våre nyere veitunneler har anvendt Q-systemet for bestemmelse av bergkvalitet og sikringsbehov. Her må det anvendes akselererende verdier for et spennings-reduserende faktor SRF, i vurdering av økt sikringsbehov, hvis maksimal spenning rundt tunnelen antas å være så høy som, eller mer enn, 0.4 x σ_c. Dette var tilfelle under planlegging av Lærdalstunnel. (Q-systemet er en bergkvalitets- og tunnelsikring- system utviklet av Barton m. fl. i 1974). Hvorfor det er 0.4 x σ_c og ikke 1.0 x σ_c som er mer logisk er nå klar, for første gang. Brudd av fjellet rundt tunnelen begynner som ekstensjonsbrudd (sprakefjell) pga. forhold σ_t /v, men kan utvikle seg til langt mer farlig, og ustabil, skjærbrudd, eller bergslag, hvis tunnel dybden er 'for stor'.

Bartons medforfatter Shen, nylig oppdaget at fordi forholdet mellom trykk-og-strekk fasthet (σ_c/σ_t) er ofte ca. 10, og Poisson's tall ofte ca. 0.25, er brudd criterium $\sigma_{krit} = \sigma_t$ /v ekvivalent til den mer kjent brudd forhold σ_{krit} = 0.4 x σ_c .(Dette er fordi σ_t /v ≈ σ_c /(10x0.25 = 0.4 x σ_c). Man faktisk også opplever at akkustisk signaler (AE) også begynner i laboratorieforsøk på omtrent samme kritiske spenningsnivået (dvs. når aksialspenning på prøvestykket nærmere seg 0.4 x σ_c. Men mye mer logisk nå, er det fordi man har begynt å utvikle mikrosprekker, fordi spenningen har nådd σ_t /v. Eksempelvis kunne disse parameter være 10/0.25 = 40 MPa (istedenfor 0.4 x 100MPa som i 'gamledager').

I realitet er det ekstensjonsbrudd criterium $\sigma_{krit} = \sigma_t$ /v (med spenningsenheter MPa) som er bestemmende for begynnende ekstensjonsbrudd, som kan utvikle seg *selv om alle tre hovedspenninger er i kompresjon*. Men det er nødvendig å være i nærheten av en avlastnings flate (f.eks. en tunnel vegg) for ekstensjonsbruddteorien til å virke.

La oss illustrerer mulig tunnel brudd med tall. Prøv å visualiserer en av strekningene langs Lærdal Tunnel hvor fjell overdekning eller dybde er 1km. Med fjellets egenvekt (γ) ca. 2.8 tonn/m^3 (typisk for granitt) og med typisk bue-spenning ('arching' eller tangentiale spenning) ca. 2 ganger den vertikal eller gravitasjons spenning, opplever fjellet rundt tunnelen en maksimal spenning som er ca. 2x(γH/100) eller ca. 2 x 2.8 x 1000/100 = 56MPa (eller en betydelig 5,600tonn/m^2.) Det må nevnes at tallet '1/100' er på grunn av enheter som er valgt). Det er naturlig å tenke at det er en mulighet for sprakefjell når spenningsnivået er så høy: og verre til: bergslag hvis spenningen er enda høyere. Bergslag er en farlig fenomen som dessverre har drept mange gruvearbeidere i verden opp gjennom årene, spesielt i de ultradype gruver i Syd Afrika. Dette har også skjedd i enkelte dyp vannkraft prosjekter. I Kinas Jinping II vannkraft overføringstunneler, med overdekning opp mot 2 og 2.5km, og med marmorfjell som ikke var sterk nok, var mange tunnelarbeidere plutselig drept i en ulykke i November 2009, og tunnelboremaskin ('TBM-en') var også knust fullstendig.

Tradisjonelt, i 'gamledager' både i tunnel og gruve planlegging, vil man ha vurdert om f.eks. våre 56MPa i et strekning langs Lærdal Tunnel er i nærheten av, eller større enn 0.4 x σ_c. Fordi 140 x 0.4 = 56MPa, er det dette tall (140 MPa) som viser omtrent hvor sterk bergarten må være for å unngå bergslag i dette tilfelle. Ofte var fjellet faktisk ikke sterk nok i Lærdal Tunnel, og det oppsto skader og deformasjon i

midlertidig tunnel sikring (stål bolter og fiberarmert sprøytebetong). Men etter enda mer (permanent) sikring, ble fjellet rundt tunnelen stabilt, som man opplever fortsatt i dag, mange år etter ferdigstillelse.

Begrenset høyde av klipper og 'vertikale' fjellsider

Når det gjelder disse nærvertikale strukturer, har Barton og Shen, 2017 satt en likhetstegn mellom *antatt vertikal spenning* rett bak en klippe eller fjellvegg og forholdet σ_t /v, og kommet frem til en uhyre enkelt formel for kritisk høyder på klipper eller fjellvegg (i meter): $H_{krit} \approx \sigma_t$ /v.γ (strekkfasthet/Poisson's tall x egenvekt). Når man beregner med enheter MPa for strekkfasthet, og tonn/m^3 for egenvekt, må man anvende formelen $H_{krit} \approx 100\sigma_t$ /v.γ. (Poisson's tall er uten dimensjoner).

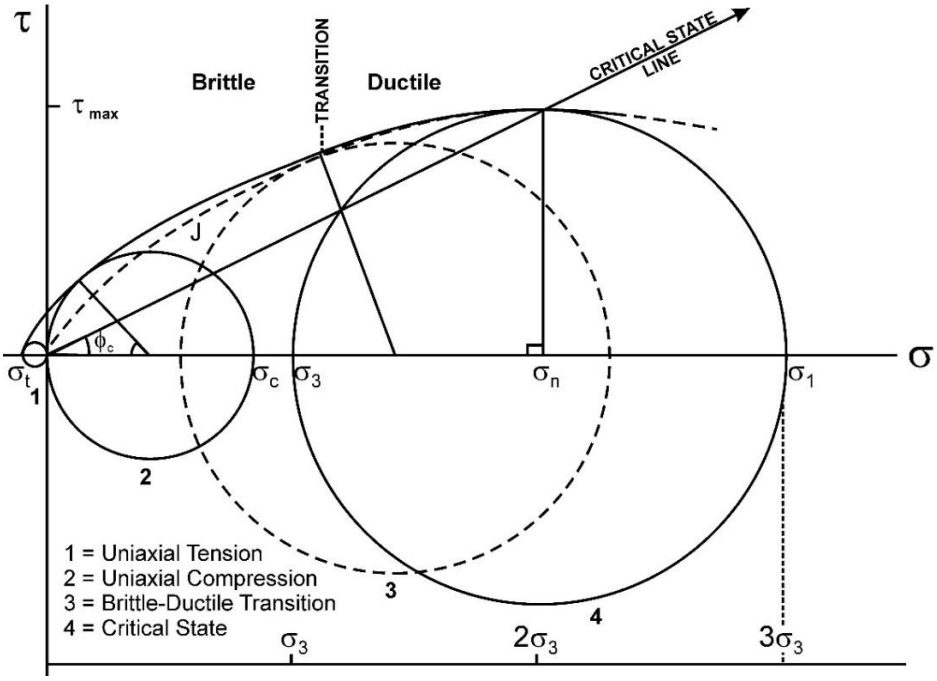
La oss illustrerer med tall igjen: prøv å visualisere disse svake klipper i Cappadocia tuff (Figur 1, midten) med strekkfasthet (σ_t) så lav som 0.05MPa (σ_c er ca. 1 MPa, eller ca. 20 ganger høyere enn strekkfasthet, spesielt pga forvitring og resultat av de utallige temperatursvingninger gjennom dager, år, og millennia). Hvis Poisson's tall er 0.2 og egenvekt bare 2.0 for porøs tuff, er $H_{krit} \approx$ 100x0.05/(0.2x2) = 12.5m. Dette er svært realistisk.

En stor fjellvegg i granitt, med bergartstrekkfasthet lik 7.5MPa (etter antatt forvitring og de utallige temperatursvingninger gjennom dager, år, og millennia) vil sannsynligvis har følgende omtrentlig maksimal høyde: $H_{krit} \approx$ 100x7.5/(0.25x2.8) = 1,070m. Dette ligner faktisk på Trollveggens høyde i Romsdalen, som synes å ha en nærvertikal vegg (merket med 'exit' på toppen), som er ikke knyttet til åpning av tektoniske sprekker, som kombinerer seg i mer vanlig bruddmekanismer i veiskråninger og i mindre massive fjellsider (som for eksempel i tilfelle Mannen).

Begrenset høyde av verdens høyeste fjell

Figur 2 viser verdens høyeste fjell: Mount Everest. Dette vakkert fjell er høyeste av til sammen 14 fjelltopper mellom 8,000 og 9,000m. Hvorfor kan ikke disse være enda høyere? Det er et problem som er fascinerende, fordi mange har hevdet at man kan, som med Terzaghi, 1962 formelen for bratt skråninger, sette likhetstegn mellom H_{krit} og 100x σ_c /γ (med enheter som vi har brukt før). Folk på internet 'popular science sites' har argumentert at med f.eks. granitt med trykkfasthet så høy som 250 MPa, vil H_{krit} = 100x250/2.8 = 8,929m (dvs. omtrent 'perfekt'!). Problemet er at fysikken, eller rettere sagt bergmekanikk, er totalt feil! I så stor dybde ved 'bunnen' av Everest, med en mulig komprimerings ('all-round') bergtrykk i størrelsesorden (9,000 x 2.8)/100 = 250MPa, vil den komprimert trykkfasthet av granitt være minst tre ganger høyere enn 250MPa, dvs. kanskje 750MPa. Vi vet at Everest kan aldri være 26,000-27,000m høy, som er tallet man kommer frem til ved bruk av 750MPa i formelen for H_{krit}.

Figur 2. Mt. Everest: 8,848m. (Ekstrakt fra Wikipedia fotograf). På fjellet som vi se rett foran fjelltoppen er det tegn på flere bratte, kilometerlang skjærbrudd, som muligens har sin opprinnelse når fjellet var mer 'plastisk' under ekstreme trykk (se 'ductile' området i Figur 3, som illustrasjon av konseptet).



Figur 3. Mt. Everest sin 8,848m høyde kan ikke estimeres fra formelen $H_{krit} = 100x\ \sigma_c / \gamma$ fordi fjellet er ikke enaksialbelastet i 9 til 10km dybde. Det er i motsetning, ekstremt komprimert, og har styrke ekvivalent til σ_1 (lengst til høyre i diagrammet ovenfor). Sannheten, eller i hvert fall noe som er mye nærmere sannhet, er at den maksimal skjærfasthet (τ_{maks}) er sannsynligvis bestemmende for 'maks-mulig' fjellhøyder. Under høy spenning er skjærfasthet den svakeste ledd, mens under relativ lav spenning er strekkfasthet (σ_t) den svakeste ledd (se Mohr sirkel med minste diameter, lengst til venstre i Figur 3.). 'Critical state line' for fjell er fra Barton, 1976. Det kan ellers bemerkes at den kritisk komprimeringstrykk (σ_3) på venstre siden av Mohr-sirkelen med maksimal diameter er av omtrent samme verdi (i MPa) som σ_c. Dette er konklusjonen av en stor literatur/labforsøk studie av Singh et al. 2011.

Konklusjoner

Det viser seg, som antydet i Barton og Shen, 2017 at strekkfasthet (σ_t) gjelder i brudd kriterier for tunneler og i geomorfologi (og i utvikling av avlastningssprekker parallelt med fjelloverflater), mens skjærfasthet gjelder i de virkelig høytrykk struktur-geologisk prosesser. (Komprimert) trykkfasthet (σ_1) er alt for høy til å være 'svakeste ledd' i geologi, og er utlukket i geomorfologi hvor spenninger er så mye lavere.

Referanser

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics. 6: 4: 189-236.

Barton, N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 13, No. 9: 255-279.

Barton, N. and Shen, B. (2017). Extension failure mechanisms explain failure initiation in deep tunnels *and* critical heights of cliff faces and near-vertical mountain walls. US Rock Mech. Symp. San Fransisco, ARMA17-686, 20p.

Singh, M., Raj, A. and B. Singh. (2011). Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of intact rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 48(4), 546-555.

Terzaghi, K. (1962). Stability of steep slopes on hard unweathered rock. Geotechnique 12:251-263.