

RAPPORT FRÅN RESA I USA 6-17.7.1972

Finn Ouchterlony

DS 1972:13

14.9.1972

Sammanfattning

Resan var värdefull och gav personliga kontakter för vidare informationsutbyte. Jag blev vänligt och öppet bemött och höll själv ett par seminarier om "Brottmekanik och Pallsprängning" samt talade om Stiftelsens verksamhet. Detta stimulerade till givande diskussioner.

Inledning

Undertecknad gjorde en studie-resa i USA under tiden 6-17 juli 1972 och besökte därvid några olika forskningsinstitut och en konferens. Ämnesområdet avsåg brottmekanik, bergmekanik, bergsprängning och bergdestruktion. Jerry J. Daly, Atlas Copcos tekniske representant i USA, var till stor hjälp med ordnande av kontakter och resruttt.

Rapporten innehåller en kort sammanställning, och en mer detaljerad beskrivning av besöken och kommentarer till dessa finns i appendix.

Där finns också listor över personliga kontakter, artiklar som dessa personer nyligen publicerat och ett antal referenser som arkiverats.

Sammanställning

Datum	Besök	Syfte-Ämnesområde	Referenser-beskr.
6.7	Atlas Copco USA J. Daly	Allm. information	-
7.7	MIT-Cambridge Prof McGarry	Bergdestruktion Bergmekanik	separat beskrv. och referenser
10-12.7	Lehigh Univ.-Penna konferens	Sprickutbredning Brottmekanik	separat beskr. och abstracts
13-14.7	USBM-Minneapolis Dr Peng Dr Condon Dr Ricketts	Bergmekanik Bergsprängning	separat beskr. , referenser och artiklar
14-16.7	Univ.Minn.-Minneap. Prof Fairhurst Dr Hardy	Bergmekanik (Bergsprängning)	separat beskr. referenser och artiklar
17.7	Univ MO.-Rolla Prof Summers	Brottmekanik Bergdestruktion	separat beskr. ref. och artiklar

Appendix

- I. Ouchterlony, F Studieresa i USA - kommentarer kring
en konferens och några studiebesök. -
Stiftelsen Svensk Detonikforskning (1972).

APPENDIX: STUDIERESA I USA - KOMMENTARER
KRING EN KONFERENS OCH NÅGRA STUDIEBESÖK

Innehåll

1. Besök hos prof. Fred McGarry på MIT
2. International Conference on Dynamic Crack Propagation-
konferens på Lehigh Univ.
3. Besök på USBM - Minneapolis
4. Besök hos prof. Charles Fairhurst på Univ. Minn.
5. Besök hos prof. David Summers på Univ. Mo.
6. Lista på medtagen litteratur

Absnitt 1, 3, 4 och 5 innehåller förutom en beskrivning av besöken
listor över de personer jag träffat och artiklar dessa nyligen
publicerat.

BESÖK HOS PROF FRED McGARRY MIT DEN 7:e JULI

dept. Civil Engineering
Massachusetts Institute of Technology (MIT)
Cambridge, Mass. 02139

De båda institutionerna för Civil Engineering och Mechanical Engineering kommer snart att slås samman.

Institutionen arbetar huvudsakligen på datormodeller för tunneldrivning vilka inkluderar alla stadier av processen. Man har en IBM 1130 med 16K kärnminne som också används som terminalmaskin. 3 huvudmotiv för arbetet gavs:

1. Kostnadsuppskattningar av processen
2. Ta reda på flaskhalsarna och försöka uppskatta vad avlägsnandet av den skulle betyda
3. Kostnads- resultat analys av forskningsinsatser

Det tar ytterligare 1-2 år innan programmen är klara och därefter ytterligare något innan de testats i praktiken. Detta arbete tar f.n. 95% av institutionens insats.

Man håller också på med betong förstärkt med "chopped wire mesh" dvs hackat ståltrådsnät.

Förut har man arbetat med termo-influerad sönderbrytning av berg såsom laserbestrålning men det gör man inte längre. Projekten har lämnat grund-forskningsstadiet och övertagits av bl.a. UAC (United Aircraft Corp.) och AVCO (Forskningslab. i Everett Mass) för utveckling av prototyper. Ett antal rapporter har skrivits, se app. 1, de är tillgängliga hos CFSTI.

Förr höll man också på med ytspänningsnedsättande medel "surfactants" och uppnådde bra resultat. Ytenergin minskade t.ex. 50% för granit som utsattes för en 1% AlCl_3 lösning vid 90°C . Man gjorde provborrningar.

Prof. McGarry nämnde att de var intresserade av att fortsätta arbetet men att ingen höll på med det nu.

I detta sammanhang nämndes bestämning av den sanna ytenergin och verkliga brottytan. Enl. prof McGarry skulle den sanna ytenergin vara av samma storlek som den man mäter med Gilmans metod och anledningen till att man t.ex. vid brottseghetsmätningar mäter c:a 1000 ggr mer bero på brottytan.

Som någon form av allmän motivering till att dessa arbeten var relevanta nämnde han att 7-8% av USA:s energiförbrukning gick åt till att skapa nya ytor.

Artiklar av intresse

- | | |
|--|--|
| 1. Parviz F. Rad,
Frederick J. McGarry | Thermally Assisted Cutting of Granite.-
Dynamic Rock Mechanics, Proc. 12th
Symp. Rock Mech. SME N.Y. Kap 37
s 721-757 (1971). |
| 2. Frederick I. McGarry,
Fred Moavenzadeh | Laser Heating Effects on Rock Samples.-
som ovan kap 38 s 759-796. |

Copies of these reports may be purchased at a cost of \$3.00 each from National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22151; order by Clearinghouse Number.

ROCK FRACTURE REPORTS

(Prepared for the U.S. Department of Commerce
under Contract No. C-85-65)

- ✓ 1. "Rock Fracture Research", F. Moavenzadeh, R. B. Williamson and A.E.Z. Wissa, Dept. of Civil Eng., R66-56, November 1966 (Clearinghouse No. PB-173 368).
2. "Laser Assisted Rock Fracture", F. Moavenzadeh, R. B. Williamson and F. J. McGarry, Dept. of Civil Eng., R67-3, January 1967 (Clearinghouse No. PB-174 245).
3. "Thin Disk Technique for Analyzing Rock Fractures Induced by Laser Irradiation", F. Moavenzadeh, R.B. Williamson and F. J. McGarry, Dept. of Civil Eng., R68-21, May 1968 (Clearinghouse No. PB-179 205).
- ✓ 4. "Crack Initiation and Propagation in Rock", P. Forootan-Rad and F. Moavenzadeh, Dept. of Civil Eng., R68-29, May 1968 (Clearinghouse No. PB-178 987).
5. "Some Relationships between Power Level, Exposure Time, Sample Size and Weakening in Laser-Assisted Rock Fracture", R. B. Williamson, F. Moavenzadeh and F. J. McGarry, Dept. of Civil Eng., R68-30, August 1968.
6. "Experimental Observations of Rock Failure due to Laser Radiation", G. Farra, C. R. Nelson, and F. Moavenzadeh, Dept. of Civil Eng., R69-16 , April 1969. (Clearinghouse No. PB-187 274)

KONFERENS PÅ LEHIGH UNIVERSITY 10-12:e JULI

International Conference on Dynamic Crack Propagation
Lehigh Univ. Bethlehem. Penna. 18015.

Konferensen var indelad i 6 underavdelningar, detaljer se app.

Måndag 10:e juli

session 1 - Brott på mikronivå (Microfracture)

session 2 - Dynamiska sprickmodeller (Dynamic Crack Models)

Tisdag 11:e juli

session 3 - Kontinuumexperiment (Continuum Experiments)

session 4A- Spröda mtrl. och glas (Brittle Materials and Glass)

Onsdag 12:e juli

session 5A - Plastiska Material (Ductile Materials)

session 6A - Analytiska sprickproblem (Analytical Crack Problems)

Kommentarer

session 1. - Kerkhof

Kerkhof presenterade inga direkt nya saker och även om metoden att modulera brottytan med vågor är elegant kan den inte användas på material som berg. Intressanta var försöken att studera hur en sprickas utbredningsriktning **påverkas** av en infallande stötvåg, Kerkhof citerade ett antal förf. som med utgångspunkt från olika kriterier försökt bestämma utbredningsriktningen. Det har intresse både för "branching problem" och vinkelsprickan.

Stevens

Underrätta Åke Persson FOA 2

Dvorak

Hans artikel statistiska brottkriterier i b.c.c. kristaller borde kunna tillämpas på berg, undersök detta.

Smith - ingen kommentar

session 2 - van Elst

Utgångspunkten tycktes vara Charpy och Robertson prov. Den experimentella tekniken var väl utvecklad, höghastighetsfotografering användes genomgående.

Lehnigk

Steveding

Deras bidrag mötte mycket opposition och kritik, inte många ansåg dem värda särskilt mycket. Kritiken kretsade kring det faktum att alla sprickors deformation tagits från balkteorin (mer eller mindre) vilket implicit medför oändliga vågutbredningshastigheter och att man härur härlett gränshastigheter för sprickutbredning. Denna ansats som använts bl.a. av Mott, Berry m.fl. är inte särskilt bra se bl.a. DS 72:4 men resultatet $\dot{a}_{\max} \approx 0.5C_2$ dök upp som kategoriska påståenden vid flera tillfällen.

Ida - nästan oförståelig

Burns

Klyvning av balkar igen men med Bernoulli-Euler balkteori (plana tvärsnitt förblir plana) som tar hänsyn till vågutbredning men denna teori ger ingen gränshastighet för sprickutbredningen. Som svar på frågan varför Steveding + Lehnigk erhöll en sådan när han inte gjorde det ryckte Burns på axlarna.

Andersson

Snöre-fjäder modell som visar att materialet kan gå sönder framför sprickspetsen.

session 3 - Kolsky

Mestadels gammalt material redan redovisat i "Stress Waves in Solids". Hans nyaste exp. där han studerade vågutbredningen från en spricka som går tvärs genom en balk i böjning (avlastningsvåg) och kunde korrelera exp. med en enkel teori var intressanta.

Paxson

Experiment som liknande F. Nilssons och J. Carlssons men med diskret hastighetsmätning (velocity gauges) direkt elektronisk mätning av tiden mellan två brutna linjer. Paxson tycktes inte direkt medveten om att G var hastighetsoberoende. G_{IC} ökade med hastigheten och $\dot{a}(a)$ hade det

vanliga utseendet.

Congleton

Presenterade ett kriterium för "branching" som baserades på det statiska spänningsfältet framför sprickan och dess möjlighet att initiera en existerande mikrospricka innan den stora sprickan hann ikapp.

Congleton

Igen, accelerationsmätningar på plexiglasskivor (se Paxson) med en viss initialspricka, både skarpa och avrundade eller ingen alls med slaginitiering av tillväxten. Mätningar med motståndstrådar på ytan. Resultatet visade enl. Congleton god överensstämmelse med Berry's kvasistatiska kurvor utom under accelerationsfasen. (Se kommentar till Steverding och Lehnig) värden på K_{Ic}



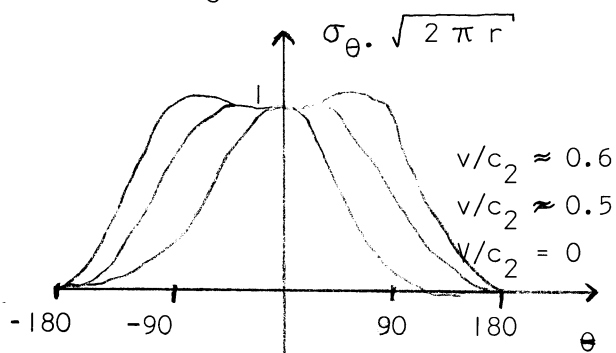
$$K_{Ic} = 2.79 - 3.30 \text{ MN/m}^{3/2}$$



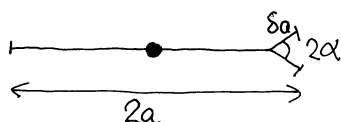
$$K_{Ic} = 2.51 - 3.05 \text{ MN/m}^{3/2}$$

Kalthoff

Hans diskussion om en förgrenad spricka i kanten på en plåt var mycket gedigen, både teoretiska räkningar och fotoelastiska experiment hade genomförts. Genom att använda dragspänningskriteriet för den troliga utbredningsriktningen kunde han visa att för en sprickvinkel på $\approx 28^\circ$ sammanföll den med sprickspetsplanen och att den var stabil. Energikriteriet (se artikel av W.G. Knauss + K. Palaniswamy i Int. J. Frac. Mech) bör ge samma resultat. Förgrening diskuterades också av ett flertal andra personer. Kalthoffs diskussion visar utbredningsriktningen om förgrening har inträffat däremot säger den inget om villkoren för att så skall ske. Troligen kan man uttala sig om detta om man använder energibetraktelser på ett dynamiskt spänningsfält. Kolsky citerade Yoffe's lösning för en plan spricka och spänningsfördelningen framför sprickspetsen som anledning till att förgrening inträffar vid $v = 0.5 \cdot c_2$. Jfr. Erdogan's artikel i Fracture vol II. Det är inte troligt att förgreningen för en plan spricka under inre övertryck bildar samma sprickvinkel 2α , det kan möjligen studeras med Muskhelishvili's metod för det statiska fallet för vilken



greningen för en plan spricka under inre övertryck bildar samma sprickvinkel 2α , det kan möjligen studeras med Muskhelishvili's metod för det statiska fallet för vilken



vinkel geometrisk stabilitet inträffar. Stjärnsprickan är stabil varför den torde vara gränsgeometri när $\delta \rightarrow 1$.

session 4A - Fearnough

Fearnough uppehöll sig kring de faktorer som skiljer ett provstycke från den verkliga konstruktionen vad beträffar materialets uppträdande när en spricka propagerar. Han menade att i den mån man kan korrelera uppträdandet mellan provstycke och konstruktion beror det på om följande faktorer kan kontrolleras.

1. Tjocklekens inverkan på inspänningen vid sprickspetsen
2. Provstorlekens inverkan på den plastiska zonens storlek
3. Skillnad i belastningshastighet
4. Skillnad i styvhet

Föredraget gällde dynamiska prov såsom Charpy provet, Robertson - provet och dubbelbalken. Vid provspecifikationerna för LEFM prov för sprickinitiering ställer man sådana krav att inverkan av punkt 1 och 2 kan försummas, medan punkt 4 bestämmer växelverkan mellan provningsmaskinen och provstycket. Om denna skall kunna försummas måste maskinen vara styv relativt provstycket vilket alltså också bör vara ett krav. Skillnaden i belastningshastighet-tröghetseffekter är svårare att komma åt då sprickan oavsett provstorlek åtminstone vid spröda prov uppnår gränshastigheten och inte skalar som den borde. Vad detta innebär för sprickans uppträdande under accelerations och avstannande-fasen av utbredningen finns troligen ingen möjlighet att uppskatta på teoretisk väg medan styvheten behandlas t.ex. av Clausen.

Wiederhorn

Behandlade sprickutbredning i glas under vakuum. Arbetet är en fortsättning av studiet av de olika utbredningsfaserna i glas. Se bl.a. 1st conf. on Fracture i Kiruna 1967.

K_{IC} - värdet för glas uppmättes till $= 0.75 \text{ MN/m}^{3/2}$. Wiederhorn sa att sprickutbredning i glas inte är en sprödbrottsmekanism i den meningen att den är dissipativ. K_{IC} -värdet tyder på det men påståendet saknar praktisk betydelse då den dissipativa (plastiska) zonen är liten.

Bombolalkis

En presentation av hur en spricka under tryckbelastning påverkas av närvaron av andra sprickor i fotoelastiska modeller ledde fram till en förklaring av hur en provbit under tryckbelastning steg för steg går sönder. Denna stegvisa process har skildrats bl.a. av Hoek, Bieniawski, Paul och Gangal samt Brace och Walsh. Den är inte ny. Han avslutade med att visa hur en grovkornig pegmatit gick sönder. De första sprickorna som initierades var existerande intragranulära sådana i fältspatskornen och de slutade alltid i samma korn. Denna fas startade vid ungefär halva brottlasten. Inte förrän brottlasten nästan uppnåtts aktiverades korngränserna med avskjuvning av ojämnheter och tillväxt längs potentiella skjuvbrottzoner. Bombolalkis menade att friktionen mellan sprickväggarna spelar en avgörande roll för hållfastheten - brottlastens värde. (Är inte detta redan vad McClintock-Anderssons utvidgning av Griffiths teori utsäger). Både Mike Hardy och Syd Peng opponerade sig kraftigt mot Bombolalkis påstående och aktiveringen av korngränserna först vid brottlast då det var baserat på ett studium av provytan och inte provbitens inre.

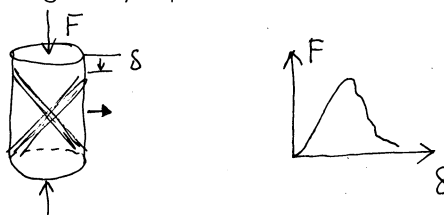
Peng

Redovisade en mycket utförlig experimentell undersökning av hur ett parallelepipediskt provstycke (1x2x4 cm) av marmor gick sönder under enaxlig tryckbelastning. Den stegvisa, progressiva karaktären på mikronivå framgick tydligt. Experimenten utfördes i en servostyrd MTS maskin. Alla sprickor identifierades som korngränssprickor, jfr Bombolalkis, vilket torde vara ganska naturligt mht. skillnaderna mellan materialen. Sprickorna aktiverades i detta fall vid c:a 75% av brottlasten.

Hardy

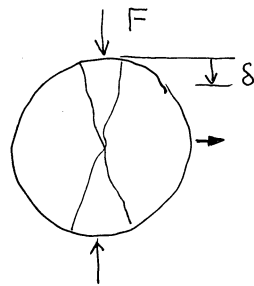
Visade några typer av prov vilka kan styras med en servokontrollerad provmaskin. Med rätt val av återkopplingssignal ansåg han att metoden var användbar i vilken provsituation som helst då till att börja med sprickutbredningen alltid är långsam och maskinen har en reaktionstid på 5 ms. Syd Peng har visat att det snarare rör sig om 30-40 ms. Den skulle t.o.m. kunna användas på ett enaxligt dragprov. Ex på provsituation. -

1/ Enaxligt tryckprov



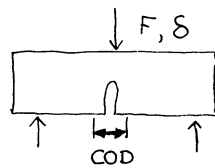
återkopplingssignal - tvärdeformationen

2/ Brasieranskt prov och ringprov



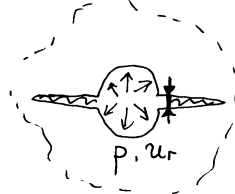
återkopplingssignal - tvärdef.

3/ Balkböjning



återkopplingssignal - COD

4/ Hydraulisk spräckning



återkopplingssignal - COD

Den kontrollerade brottsprocessen i stället för en katastrofal medger studium av den vilket är väsentligt för förståelsen av mekanismen bakom den.

Wnuk

En teoretisk överläggning om en accelererande spricka i ett visko-elastiskt material utsatt för underkritisk belastning.

session 5B - Kanazawa

Demonstrerade japanernas stora experimentella resurser för studium av sprickor i skeppsplåtar. F.E.M. program gav teoretiska K_I -värden för geometrier med "sprickstoppare" vilket korrelerades till mätningar. För sprickor kortare än 20 cm i stål stannar sprickan när $K_I \leq K_{IC}$.

session 5A - J. Carlsson

se appendix för kopia av föredraget

Fearneough

Analyserade plastisk sprickutbredning i gasledningar med en kvasistatisk metod som i princip liknar Steverding och Lehnigks tvivelaktiga ansatser och lyckades också erhålla en spricka som utbreder sig med konstant hastighet vilket någotsånär bekräftades av försök.

Wilsdorf

Scanningelektronmikroskopiska studier av dragbrott i tunna folier av rostfritt stål.

session 6A - Broberg

Redogjorde för en matematisk modell för en spricka i rörelse där sprickan rör sig i ett tunt skikt med lägre E-modul än omgivande material. När sprickan rör sig snabbare än ljudhastigheten i skiktet finner man att det inte existerar någon singularitet i spetsen som då trubbas av. Vid höga hastigheter påverkar den låga ljudhastigheten i skiktet förhållandena redan för tunna skikt eller små plastiska zoner. Avsaknaden av singulariteter vid spetsen ökar tendensen till oregelbunden utbredning och så sprickyta

Niazy + Loeber

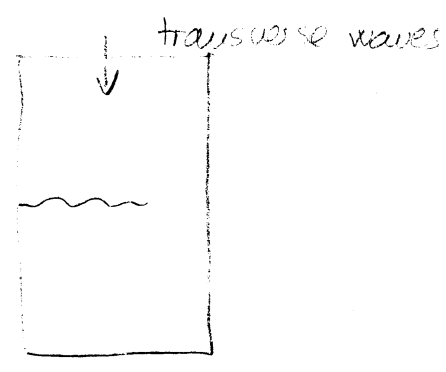
Ganska oförståeliga, sedan for jag.

Freund

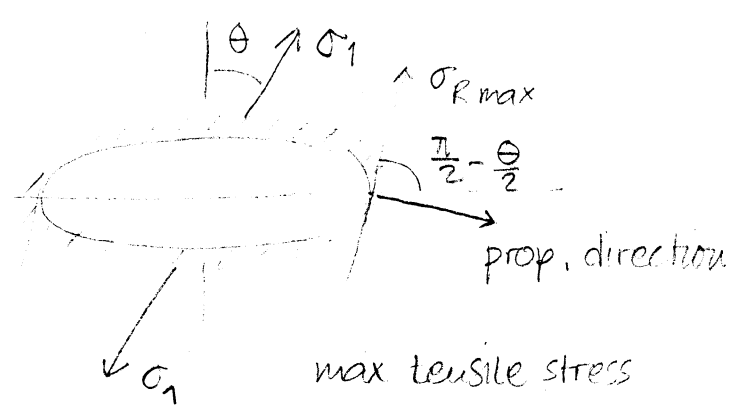
Hans "abstract" är intressant m.h.t. till DS 72:4 och antagandet att energibalansen i en sprickspets är oberoende av accelerationen så länge som spetsen inte interfererar med något annat, en annan spets t.ex.

Session 1 - Kerkhof

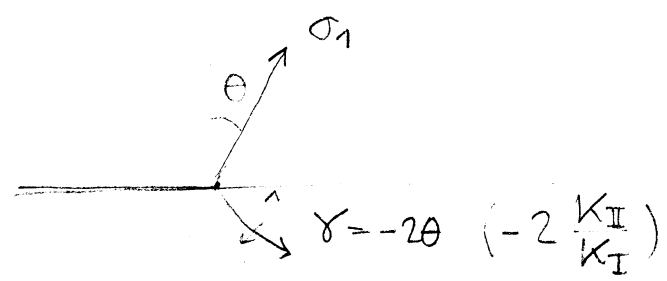
App. 1 - Lehigh



the crack propagation direction

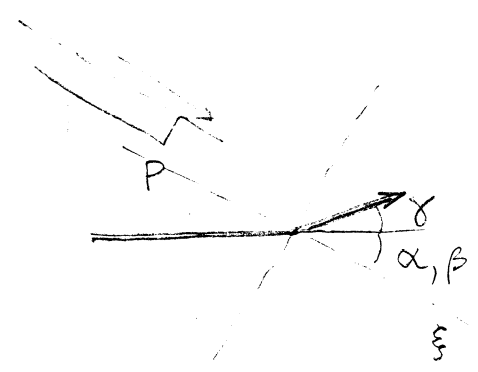


McClintock + Andersson



Orowan + Sih

max strain energy density



$\sigma_{\xi} = -p$ gives

$$\gamma \approx -\frac{1-2\nu}{1-\nu} \sin 2\alpha C_{II} \frac{p}{\sigma_0}$$

sinusoidal waves gives

$$\gamma_L = 2C_{II,L} \frac{\sigma_L}{\sigma_0} \frac{\sin 2\alpha}{k_b - k_L \cos \alpha} \cos(k_b - k_L \cos \alpha)$$

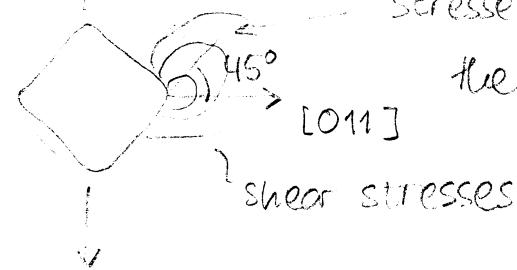
$$\gamma_t = 2C_{II,t} \frac{\sigma_t}{\sigma_0} \frac{\cos 2\beta}{k_L - k_b \cos \beta} \cos(k_b - k_L \cos \beta)$$

$$V_b = \frac{2\pi n}{\sigma_b}$$

$$V_{b,max} = 2 \sqrt{\frac{\alpha_s}{\rho_0 v_0}}$$

elastic analysis $\uparrow 100\%$

octahedral
voids



stresses calculated by
the Muskhelishvili technique
on 45° planes where
dislocations move.
They move into the

void only near the equatorial plane. Plastic analysis leads to
the same result.

Dvorak

Simple tension

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_0 (1+S) \text{ for } 0 \leq S \leq 0.6$$

Hydrostatic tension

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_0 (1+0.25S) \text{ for } 0 \leq S \leq 0.8$$

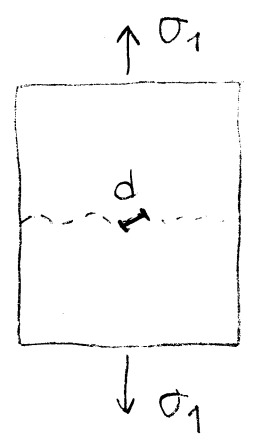
$\bar{\sigma}_1$ Plane strain

$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$ $\bar{\sigma}_1 = 0.4 \sigma_0 \text{ for } S = 0.33$

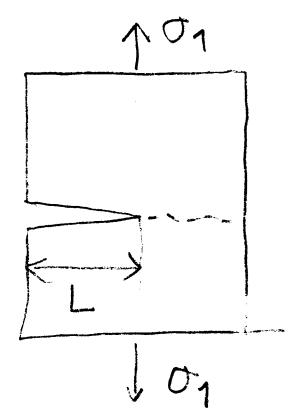
Plane stress

$$\bar{\sigma}_1 = 0.8 \sigma_0 \text{ for } S = 0.33$$

prop. of small and large cracks in polycrystals



$$\Gamma_{eff} \approx 10\Gamma$$



$$\Gamma_{eff} \approx 1000\Gamma$$

$$K_{Ic} \sqrt{\frac{E \Gamma_{eff}}{1-\nu^2}}$$

Dvorak article interesting for reason 1

✓ Smith confirms Dvorak's view that part of the crack-propagation is due to grain cleavage cracking the rest being ductile.

10.7.72

Fou 5

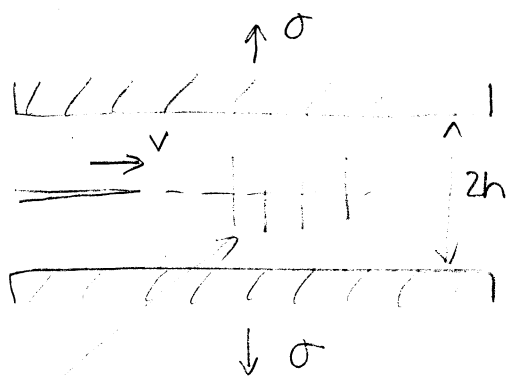
Session 2 - van Elst

Lehnigk

Steverding

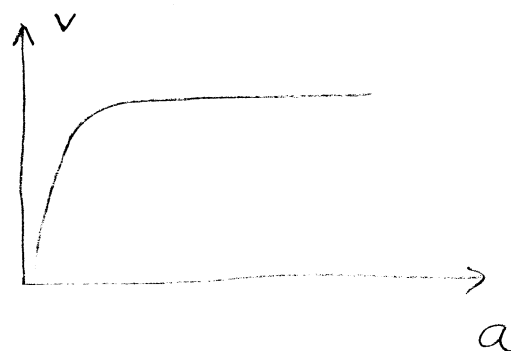
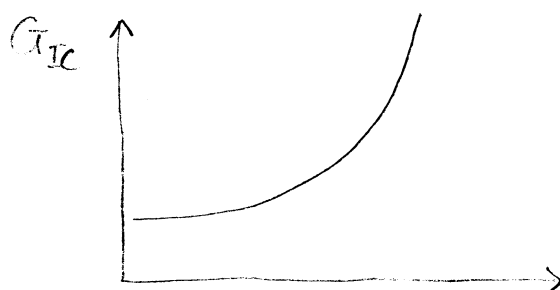
} Kommentera till Åke Persson!

Paxson



$$G = \frac{\sigma^2 h}{2E} \text{ depending on } v$$

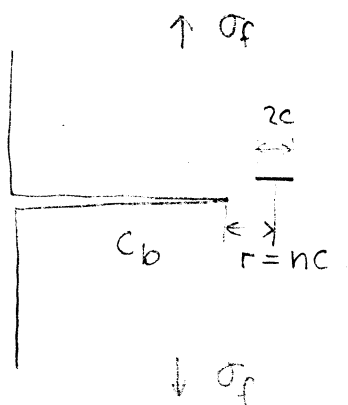
conductive paint - electronic time measurement of times between breakage



fracture surface: smooth $\longleftrightarrow$ rough v

congleton

crack branching condition



$$\sigma_f \sqrt{\frac{\pi c_b}{2\pi r}} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}}$$

$$r = nc \downarrow$$

$$\sigma_f \sqrt{\pi c_b} = \sqrt{2E\gamma} \times \sqrt{2n}$$

$$K_B = \sqrt{2n} \times K_{IC}$$

One condition would be that $n \geq 1 \Rightarrow K_B \geq 1.4 K_{IC} = K_B^*$

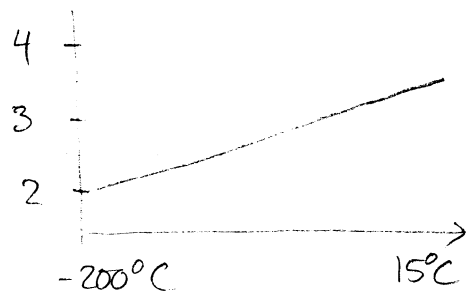
for a penny shaped crack though $K_B \geq 2.3 K_{IC} = K_B^*$

K_B^* is when branching would first occur

K_B is appr. constant for tool steel.

~~As~~ For Al, Mg $K_B/K_{IC} \approx 3.8 - 2.5$ resp, for glas

11.7.72
For 5



explanation of why few cracks propagate in rock blasting where K_I is steadily decreasing so that branching is less and less probable

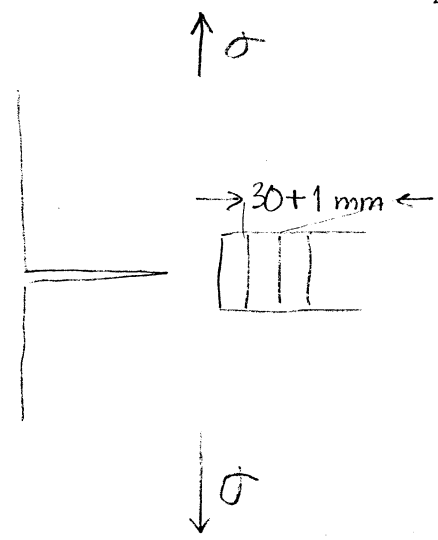
Dvorak says that inertia effects dominate using his statistical criterion and the dynamic redistribution of stresses this explains the situation.

"In glass you can have branching during the acceleration phase but not in steel"

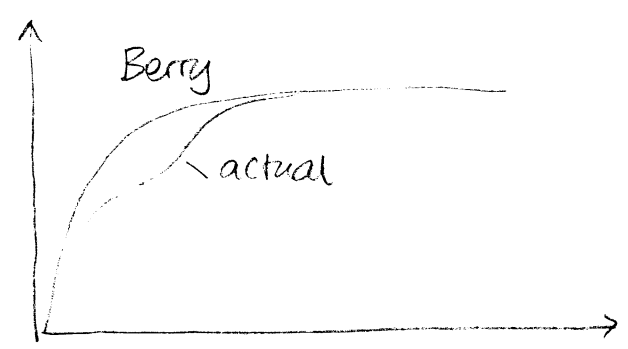
Congleton

crack acceleration

for perspex $K_{IC} \approx 2.51 - 3.05 \text{ MN/m}^{3/2}$ blunt notch
 $2.79 - 3.30$ - " - sharp notch



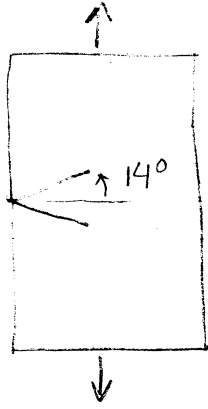
good agreement with Berry's velocity curves except for an acceleration deviation



*Kalthoff - see article in Int J. Frac. Mech.

11.7.72

Frab



Kobayashi has done FEM calculations on



1. Wrong thickness - wrong constraint
2. Yielding problems
3. Strain rate differs
4. Compliance different

These are problems of the small scale test.

Wiederhorn

$$\text{Gross } K_{IC} \approx 0.75 \text{ MN/m}^{3/2}$$

Brittle fracture is not a brittle process - whatever that means
Boribolakis formulated it as the nonexistence of dissipative processes.

Boribolakis

If you incorporate the total crack surface area in crack surface energy det. you will get $\sigma_{true} \approx \sigma_{const.}$ (quartz + feldspar)

Peug

Hardy

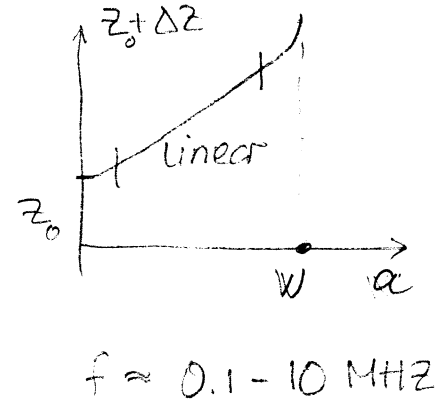
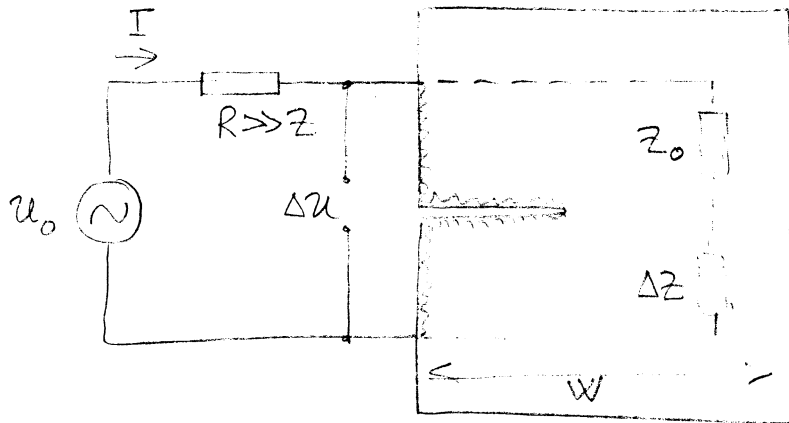
Wnuk - instead of Chernoparov

Session 5B - Kanazawa

2.7.72

The crack is arrested when $K_I \leq K_{Ic}$ and this is confirmed by many tests in steel on ship structures with cracks shorter than 0.2m. For longer cracks the knowledge is as yet insufficient

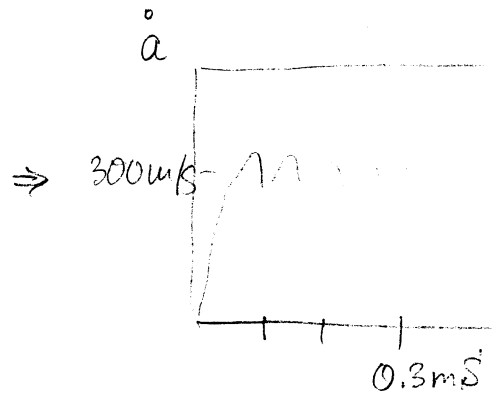
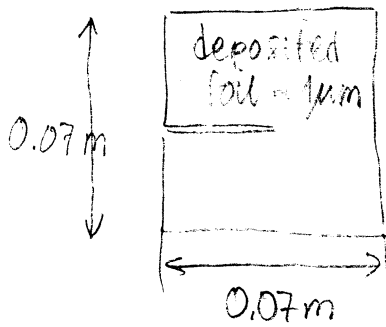
Session 5A - Carlsson



$$\Delta u \sim a$$

$$\dot{\Delta u} \sim \dot{a}, \quad I \sim 0.1 \text{ A} \Rightarrow \Delta u_{\max} \approx 1 \text{ V}$$

polymer specimens



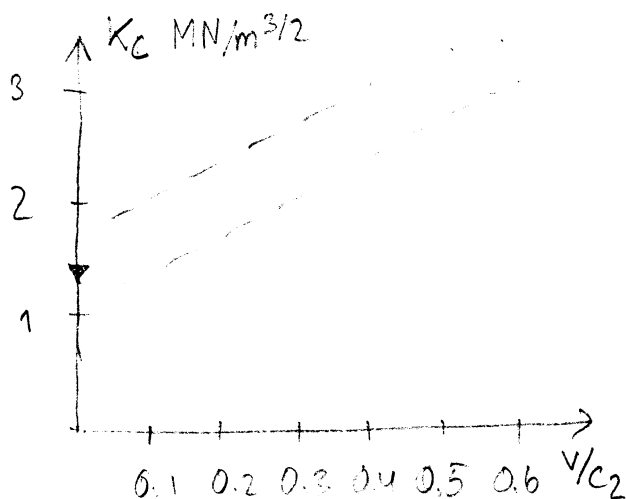
measurements on

- A. Acc. cracks
- B. Ret. cracks
- C.

$$V_{\max} \approx 0.72 C_2$$

$$\frac{K_{Ic \text{ arrest}}}{K_{Ic \text{ init.}}} \approx 0.55 - 0.66$$

branching above 0.41 C₂



LIST OF ATTENDEESDYNAMIC CRACK PROPAGATION CONFERENCE
Lehigh University
June 10-12, 1972

Achenbach, J. D.
Northwestern University
Evanston, Illinois 60201

Badalian, Robert
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Ball, A.
University of Witwatersrand
Johannesburg, South Africa

Basdekas, N. L.
Office of Naval Research
Washington, D.C. 20360

Bench, Dennis M.
Armco Steel Corporation
Middletown, Ohio 45042

Bergkvist, H. R.
Lund Institute of Technology
Lund, Sweden

Beshers, D. N.
Columbia University
New York, New York 10027

Blatz, P. J.
Shock Hydrodynamics
Sherman Oaks, California 91403

Blue, Steven
Union Carbide
Paducah, Kentucky 42001

Bluhm, J. I.
Army Materials and Mechanics Center
Watertown, Massachusetts 02172

Bombolakis, E. G.
Boston College
Franklin, Massachusetts 02038

Bornemann, Alfred
Stevens Institute of Technology
Hoboken, New Jersey 07030

Anderson, J. M.
1000 Six Flags Drive
Austell, Georgia 30001

Brethauer, George E.
U.S. Geological Survey
Golden, Colorado 80401

Broberg, Bertram
Lund Institute of Technology
Lund, Sweden

Brock, Louis M.
University of Kentucky
Lexington, Kentucky 40506

Broutman, L. J.
Illinois Institute of Technology
Chicago, Illinois 60616

Bucci, Robert
Del Research Corporation
Hellertown, Pennsylvania 18055

Burns, Stephen J.
Brown University
Providence, Rhode Island 02912

Butkovich, T. R.
Lawrence Livermore Laboratory
Livermore, California 94550

Carlsson, J.
Royal Institute of Technology
Stockholm, Sweden

Carman, Carl
Frankford Arsenal
Philadelphia, Pennsylvania 19137

Chawla, M. S.
Systems, Science and Software
LaJolla, California 92037

Chen, E. P.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Chou, Y. T.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Congleton, J. University of Newcastle Upon Tyne England	Francois, D. Commissariat a L'Energie Atomique Paris, France
Cook, T. S. Pratt and Whitney Aircraft Middletown, Connecticut 06457	Franz, R. E. U.S. Army Perry Hall, Maryland 21128
Cooke, R. F. Virginia Polytechnic Blacksburg, Virginia 24060	Freund, L. B. Brown University Providence, Rhode Island 02912
Cooper, G. A. Institute Cerac Switzerland	Gent, A. N. University of Akron Akron, Ohio 44325
Corten, H. T. University of Illinois Urbana, Illinois 61801	Girifalco, L. A. University of Pennsylvania Philadelphia, Pennsylvania 19104
Curran, D. 993 Los Robles Palo Alto, California	Hahn, G. T. Battelle, Columbus Laboratories Columbus, Ohio 43201
Davis, A. H. Los Alamos Scientific Laboratory Los Alamos, New Mexico	Hardy, George Celanese Research Company Summit, New Jersey 07901
de Rosset, William Ballistic Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, Md.	Hardy, Mike University of Minnesota Minneapolis, Minnesota 55455
Dietrich, A. M. USA-BRL Aberdeen Proving Ground, Maryland 21005	Hartranft, R. J. Lehigh University Bethlehem, Pennsylvania 18015
Erdogan, F. Lehigh University Bethlehem, Pennsylvania 18015	Healy, M. S. Bethlehem Steel Corporation Bethlehem, Pennsylvania 18016
Farrer, Hn. W. Carpenter Technology Reading, Pennsylvania 19603	Hertzberg, R. W. Lehigh University Bethlehem, Pennsylvania 18015
Fearnehough, G. D. Gas Council Newcastle Upon Tyne, England	Hill, Morse Republic Steel Center Berea, Ohio 44017
Fichter, W. B. NASA - Langley Research Center Hampton, Virginia 23365	Hilton, Peter Lehigh University Bethlehem, Pennsylvania 18015

Ho, C. L.
North American Rockwell Science
Center
Thousand Oaks, California 91360

Hood, J. E.
Steel Company of Canada
Burlington, Ontario, Canada

Hoover, W. R.
Sandia Laboratory
Albuquerque, New Mexico 87111

Huang, S. L.
Naval Air Development Center
Warminster, Pennsylvania 18974

Ida, Y.
Massachusetts Institute of
Technology
Cambridge, Massachusetts 02139

Irwin, G. R.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Jones, E. R.
Hercules, Inc.
Cumberland, Maryland 21502

Jones, H.
Southern Railway Company
Alexandria, Virginia 20313

Kaldjian, M. J.
University of Michigan
Ann Arbor, Michigan 48104

Kalthoff, J. F.
Institut fur Festkorpermechanik
Freiburg, Germany

Kanazawa, T.
University of Tokyo
Tokyo, Japan

Kanninen, M. F.
Battelle Columbus Laboratories
Columbus, Ohio 43206

Kassir, M. K.
The City College
New York, New York 10031

Kerkhof, F.
Institut fur Festkorpermechanik
Freiburg, Germany

King, W. W.
Georgia Institute of Technology
Atlanta, Georgia 30332

Kipp, M.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Klein, K.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Kobayashi, A. S.
University of Washington
Seattle, Washington 98195

Kobayashi, T.
Illinois Institute of Technology
Chicago, Illinois 60616

Keller, C.
3293 A Walnut
Los Alamos, New Mexico

Kinra, V. K.
Brown University
Providence, Rhode Island 02912

Knauss, W. G.
California Institute of Technology
Pasadena, California 90032

Krafft, J. M.
U.S. Naval Research Laboratory
Washington, D.C. 20390

Lehnhoff, T. F.
University of Missouri
Rolla, Missouri 65401

Lehnigk, S. H.
U.S. Army Missile Command
Redstone Arsenal, Alabama 35809

Leigh, J. M.
7015 Olive Boulevard
University City, Missouri 63130

Lemmon, D. C.
Western New England College
Springfield, Massachusetts 01119

Liebowitz, H.
George Washington University
Washington, D.C. 20006

Liu, H. W.
Syracuse University
Syracuse, New York 13210

Loeber, J. F.
Knolls Atomic Power Laboratory
Schenectady, New York 12301

Macdonald, B.
Bethlehem Steel Corporation
Bethlehem, Pennsylvania 18016

McArdle, K. T.
Eglin Air Force Base
Florida 32542

McEvily, A. J.
University of Connecticut
Storrs, Connecticut 06268

McMahon, C. J., Jr.
University of Pennsylvania
Philadelphia, Pennsylvania 19104

Menkes, S. B.
City College of New York
New York, New York 10031

Mirabile, M.
Centro Sperimentale Metallurgico
Rome, Italy

Moon, D. W.
Lawrence Livermore Laboratory
Livermore, California 94551

Moore, L. I.
University of Connecticut
Storrs, Connecticut 06268

Moss, G. L.
Ballistic Research Laboratories
Aberdeen, Maryland 21001

Netherwood, P. H., Jr.
U.S. Department of Army
Maryland 21085

Niazy, A.
Massachusetts Institute of
Technology
Cambridge, Massachusetts 02139

Nilsson, F.
The Royal Institute of
Technology
Stockholm, Sweden

Nur, A.
Stanford University
Stanford, California 94305

Oh, H.
General Motors Research Labs.
Dearborn, Michigan 48090

Ouchterlony, F.
Swedish Detonic Research
Stockholm, Sweden

Palmer, E. W.
Naval Ship Research Development
Center
Falls Church, Virginia 22042

Paxson, T.
Star Route
Parkesburg, Pennsylvania 19365

Peng, P.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Peng, S. S.
U.S. Bureau of Mines
Twin Cities, Minnesota 55108

Poncelet, E. F.
1560 Mariposa Avenue
Palo Alto, California 94306

Prasad, S. N.
University of Mississippi
University, Mississippi 38677

Predebon, W. W.
U.S.A. Ballistic Research Labs.
Havre de Grace, Maryland 21078

Radon, J. C.
Imperial College
London, England

Roberts, R.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Rosenfield, A. R.
Battelle Columbus Labs.
Columbus, Ohio 43201

Scott, J.
Bethlehem Steel Corporation
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Seaman, L.
Stanford Research Institute
Menlo Park, California 94025

Sedgwick, R. T.
Systems, Science and Software
LaJolla, California 92037

Sendeckyj, G. P.
Wright-Patterson AFB
Ohio 45433

Sharp, R. R., Jr.
LASL
Los Alamos, New Mexico 87544

Shockey, D.
Stanford Research Institute
Menlo Park, California 94025

Shoemaker, A. K.
U.S. Steel Corporation
Monroeville, Pennsylvania 15146

Smith, E.
University of Manchester
England

Smith, G. F.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Smith, J. E.
Phillips Petroleum Company
Bartlesville, Oklahoma 74004

Smith, H. L.
U.S. Naval Research Laboratory
Washington, D.C. 20390

Stevens, A. L.
Sandia Laboratories
Albuquerque, New Mexico 87115

Steverding, B.
U.S. Army Missile Command
Redstone Arsenal, Alabama 35809

Sutherland, H. J.
Sandia Laboratories
Albuquerque, New Mexico 87115

Toor, P. M.
Lockheed Georgia Company
Marietta, Georgia 30060

Trantina, G.
Argonne National Laboratory
Argonne, Illinois 60439

Valentine, M. B.
Eglin Air Force Base
Florida 32542

Van Elst, H. C.
Metaalinstitut TNO
Delft, Holland

Varatharajulu, V. K.
Northwestern University
Evanston, Illinois 60201

Venzi, S.
Centro Sperimentale Metallurgico
Rome, Italy

Wei, R. P.
Lehigh University
Bethlehem, Pennsylvania 18015

Weimer, R. J.
Frankford Arsenal
Philadelphia, Pennsylvania 19137

Wetterfall, S. E.
KYD, ASEA
Sweden

Whitehouse, G. D.
Louisiana State University
Baton Rouge, Louisiana 70803

Wiederhorn, S.
National Bureau of Standards
Washington, D.C. 20234

Wilhem, D. P.
Northrop Corporation
Hawthorne, California 90250

Williams, J. G.
Imperial College
London, England

Wilson, Leo
Eglin Air Force Base
Florida 32542

Wilson, W. K.
Westinghouse Research and Development
Pittsburgh, Pennsylvania 15235

Winkler, S. R.
Institut fur Festkorpermechanik
Freiburg, Germany

Wnuk, M. P.
South Dakota State University
Brookings, South Dakota 57006

Wullaert, R. A.
Materials Engineering -- Effects
Technology
Santa Barbara, California

Zena, A. A.
Northwestern University
Evanston, Illinois 60201

BESÖK PÅ US BUREAU OF MINES 13-14:e JULI

U.S. Bureau of Mines Mining Research Center
P.O. Box 1660
Twin Cities, Minn 55111

Besöket inleddes med att forskningsdir. T. Atchison redogjorde för organisationens uppbyggnad tillsammans med E. Podniecks som är chef för bergdestruktionsavdelningen. Totalt har man i Minneapolis c:a 85 heltidsanställda och inräknat praktikanter, doktorander och kontaktsbundna forskare på andra platser 120-125 personer. USBM sorterar under inrikesdepartementet och gruvforskningsdelen i Minneapolis Minn. har motsvarigheter för sprängämnen och säkerhetsfrågor i Pittsburgh Penn., brytningsmetoder i Denver Col, och förstärkningsproblem i Spokane Wash. Organisationen för Minneapolisdelen finns i appendix 1.

Större delen av torsdagen tillbringades på bergdestruktionsavdelningen, först på bergfysiksektionen hos S Peng som jag träffat redan på sprickkonferensen i Bethlehem. Deras nuvarande forskningsprogram finns i appendix 2. De experimentella resurserna är förnämliga. Bl.a. finns inom bergdestruktionsavdelningen tre st. servostyrda provmaskiner av märket MTS, den största avsedd för belastningar upp till 2500 kN. Syd Peng har använt sådana provsystem för sina arbeten, se artiklar i Int. J. Rock Mech. Min. Sci. och Int. Conf. Dyn. Crack Prop. och det mesta av hans **arbete** går ut på att på ett grundläggande plan ställa upp modeller för och tolka experiment rörande brott i berg under tryckbelastning som artiklarna visar. I sitt arbete har sektionen stöd av sektionen för petrografisk och textur analys som bl.a. har ett svepelektronmikroskop och sektionen för provberedning och mätning av fysikaliska egenskaper.

För de akustiska mätningarna enl. 1a. bestod apparaturen av en resonansgenerator med frekvensen 10kHz som via en cylindrisk stålstång matade en ansluten bergcylinder. För punkt 2 har Syd Peng använt servostyrda provmaskiner och han har just börjat med polyaxiella prov på parallelepipediska bergprovstycken. Provproceduren kan automatiseras liksom datainsamlingen med en bordskalkylator HP 9100 om man använder en digitalvoltmeter för registrering och specialkabel för överföring till kalkylatorn.

För brottseghetsbestämning är punkt 3b intressant och man använde dels 3-punktsböjprovstavar dels balkar med förtillverkade slitsar för proven. Böjprovstavarna hade ungefärliga dimensioner av 1x2x10 cm och klyvbalkarna 2.5x5x15 cm.

Den cykliska belastningen av tunna bergskivor till brott under punkt 6 gjordes på en resonansböjmaskin och uppkomna sprickor fotograferades då och då under provningen.

Peter Chamberlain som är chef för prov och mätsektionen visade maskinutrustning och standardprov för internt bruk som man utförde på olika bergarter man använde. De hade bl.a. enaxliga dragprov, tryckprov och yridprov på cylindrar med diametern $1\frac{1}{4}$ " och höjd $2\frac{1}{2}$ ". Däremot hade man intet standardprov för bestämning av ytenergi. Han visade intresse för rapporter om K_{IC} -mätningar och ändeffekter.

På eftermiddagen höll jag ett seminarium med titeln "Fracture Mechanics Approach to Slab Blasting" och en kort introduktion om Stiftelsens verksamhet. Diskussionen efteråt blev mycket livlig. T. Atchison visade sig ha en helt annan bild av ett sprängningsförlopp än den som vuxit fram på Stiftelsen varför diskussionen tyvärr till slut råkade i ett dödläge.

Vid lunchen mötte jag dr Morris Reich från Brookhaven Ntnl. Labs. som höll på med räkningar på kärnsprängningar i berg och behövde brottkriterier för materialet vilket USBM skulle förse honom med.

En del av verksamheten vid USBM består av administration och ledning av forskningsprojekt genom ARPA (= Advanced Research Project Agency) där intressant arbete utanför USBM stöds. Forskare lämnar in förslag på arbeten, se appendix 4.

På fredagen besökte jag den avdelning som sysslar med förbättring av befintliga brytningsmetoder och där sektionen för sprängmetoder. Sektionens forskningsprogram finns i appendix 5. Joseph Condon och Tom Ricketts visade mig runt. Condon har arbetat med modellsprängning i bergmaterial, projekt 3.2, vilket nu är nedlagt. Se rapport RI 7613 bl.a. Han har också arbetat med projekt 3.4 som gäller bestämning hur olika parametrar påverkar detonationshastigheten hos AN i fältförsök. Ricketts höll på med att mäta hur anisotropi och belastningshastighet påverkar deformationsprocessen, projekt 3.3, genom att bl.a. mäta hur ytvågornas utbredning beror av riktningen i ett utpräglat anisotropiskt material som Barregranit. Provstenen var $\approx 1\text{ m}^3$ och vågorna från en kula som släpptes mättes med två accelerometrar på stenens yta. Han hoppades också kunna studera hur krossning av bergmaterialet vid anslagspunkten påverkade vågornas utseende. Projektet är delvis en uppföljning av hans doktorsarbete där han tagit fram analytiska lösningar till problemet.

Genom Condon och Ricketts fick jag också information om människor som sysslade med dynamiska fotoelastiska undersökningar av våg och brottfenomen i berg.

- a. "Studies of Wave and Fracture Propagation in Rock Media"
Research Proposal 71-550D
I.M. Daniel
Stress Analysis section
IIT Research Inst.
- b. "Dynamic Photoelastic Study of Point Charges in Two Dimensional
Bench Geometry
Dally
Univ. Maryland

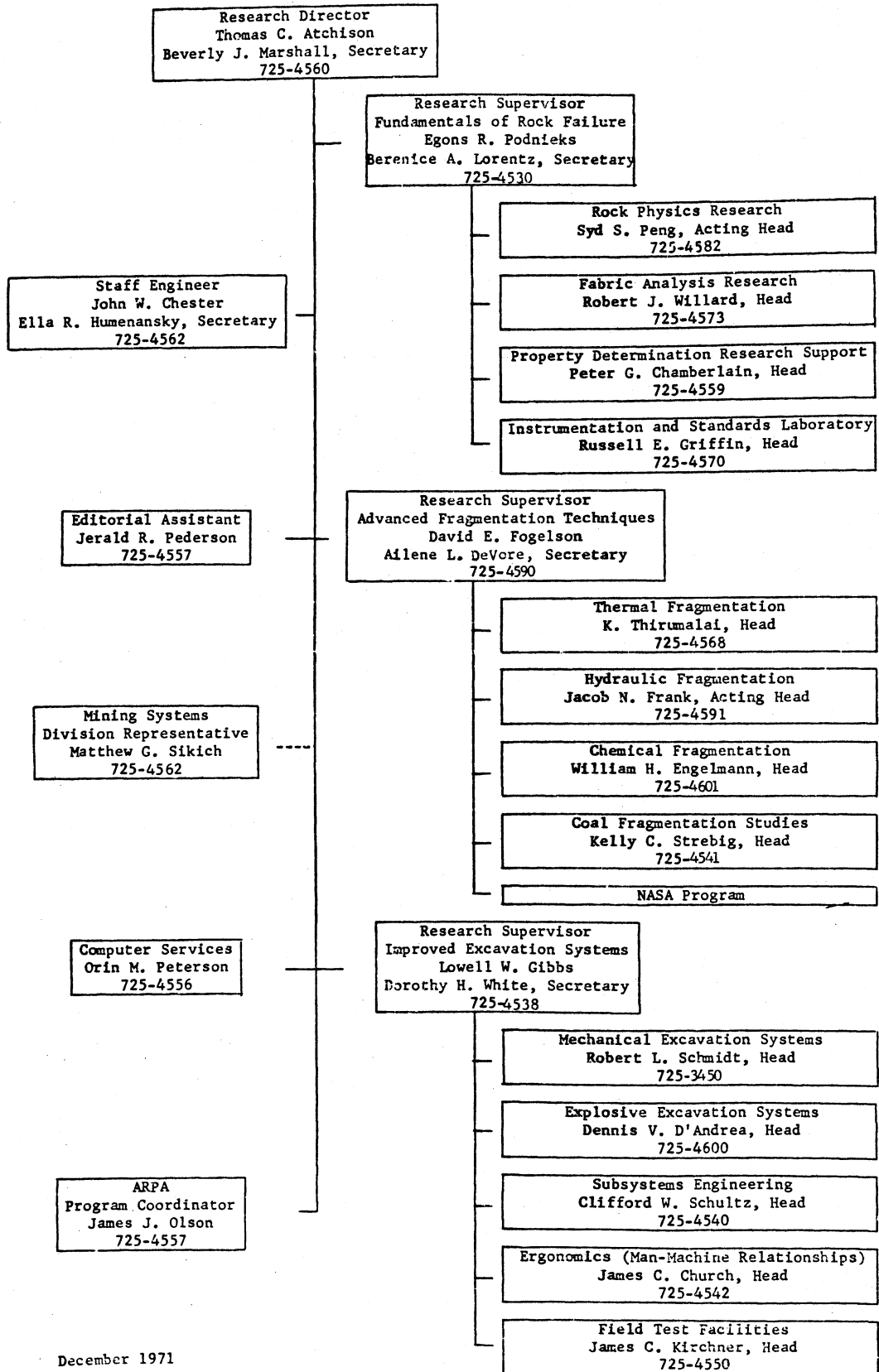
I appendix 6 finns en lista över de personer jag träffat personligen på USBM.

Namn på personer vid USBM

Thomas C. Atchison	Research Director
Egon R. Podniecks	Research Supervisor, Fundamentals of Rock Failure
Syd S. Peng	Head, Rock Physics Research
Peter G. Chamberlain	Head, Property Determination Research Support
Joseph L. Condon	Geophysicist, Explosives Excava- tion Research
Thomas E. Ricketts	Physical Scientist, Expl. Exc. Research
Peter Cain	Post Graduate Student, Rock Physics Research

Artiklar av intresse

1. Dennis V. D'Andrea,
Joseph L. Condon
Dye Penetrant Studies of Fractures
Produced in Laboratory Cratering. -
Dynamic Rock Mechanics, Proc. 12th
Symp. Rock Mechanics, SME N.Y., kap. 24
s 479-495 (1971)
2. Syd S. Peng
Crack Growth and Faulting in Cylindrical
Specimens of Chelmsford Granite. -
Int. J. Rock Mech. Min. Sci. v 9 (1972)
3. Syd S. Peng
Failure and Fracture of Chelmsford
Granite. - PhD Thesis Stanford Univ.
(1970)
4. Syd S. Peng,
C.A. Ortiz
Crack Propagation and Fracture of
Rock Specimen Loaded in Compression. -
Int. Conf. Dyn. Crack Prop. Lehigh
Univ. (1972)



December 1971

TWIN CITIES MINING RESEARCH CENTER

RESEARCH DIRECTOR
T. C. Atchison Physical Science Administrator
B. J. Marshall Secretary
T. L. Corens Clerk-Typist

STAFF ENGINEER
J. W. Chester Mining Engineer
E. R. Humenansky Secretary

EDITORIAL ASSISTANT
J. R. Pederson Editorial Clerk

DMSE REPRESENTATIVE
M. G. Sikich Industrial Specialist

ARPA PROGRAM COORDINATOR
J. J. Olson Mining Engineer
K. S. Olson Program Analyst
P. A. LaTour Clerk-Typist

IN-HOUSE COMPUTER
O. M. Peterson Mathematician

FUNDAMENTALS OF ROCK FAILURE
Research Supervisor
E. R. Podnieks Mechanical Engineer
B. A. Lorentz Secretary

ROCK PHYSICS RESEARCH
Head, S. S. Peng Mining Engineer
S. Tondanand Mining Engineer
T. R. Bur Geophysicist
R. E. Thill Geophysicist
J. O. Atkins Physicist
R. C. Rosenquist Engineering Technician

FABRIC ANALYSIS RESEARCH
Head, R. J. Willard Geologist
J. M. Pugliese Geophysicist
R. C. Steckley Geologist
G. R. Vandenbos Electronics Technician
F. L. Krech Physical Science Technician

PROPERTY DETERMINATION RESEARCH SUPPORT
Head, P. G. Chamberlain Geophysicist
W. W. Krech Mining Engineer
K. E. Hjelmslad Geophysicist
F. A. Henderson Geophysicist
B. L. Vickers Engineering Technician
H. L. Kuhlman Physical Science Technician
R. J. Bishop Statistical Assistant
S. W. Krepsa Engineering Technician
D. N. West Physical Science Aid

INSTRUMENTATION AND STANDARDS LABORATORY
Head, R. E. Griffin Electronics Engineer
V. W. Delloriano Principal Instrumentation Specialist
K. G. Pung Physical Science Technician

ADVANCED FRAGMENTATION TECHNIQUES
Research Supervisor
D. E. Fogelson Geophysicist
A. L. DeVore Secretary
L. J. Hambroff Clerk-Typist

THERMAL FRAGMENTATION
Head, K. Thirumalai Mining Engineer
R. L. Fischer Research Physicist
D. O. McElroy Mechanical Engineer
J. B. Chaffin Mechanical Engineer
D. P. Lindroth Research Physicist
C. F. Windquist Physicist
S. G. Denou Physicist
W. G. Kravitz Engineering Technician
R. A. Lund Physical Science Technician
J. R. Blair Physical Science Technician
R. A. Bestler Physical Science Technician

HYDRAULIC FRAGMENTATION
Head, J. N. Flank Geophysicist
P. O. Lohn Mechanical Engineer

CHEMICAL FRAGMENTATION
Head, W. H. Engemann Research Chemist
G. A. Savanich Research Physicist
C. H. vonHesser Geologist
R. W. Cabaniss Chemist
D. I. Johnson Physicist
W. W. Roepke Principal Vacuum Specialist
E. Bukotzer Physical Science Technician

COAL FRAGMENTATION STUDIES
Head, K. C. Sirebig Mining Engineer
H. W. Zeller Physical Scientist
B. S. Snowden Physicist
B. V. Johnson Physical Science Technician

NASA PROGRAM
D. E. Fogelson Program Manager

IMPROVED EXCAVATION SYSTEMS
Research Supervisor
L. W. Gibbs Mining Engineer
D. H. White Secretary
S. B. Hirsch Clerk-Typist

MECHANICAL EXCAVATION SYSTEMS
Head, R. L. Schmidt Mining Engineer
H. F. Unger Mining Engineer
R. J. Morrell Mining Engineer
P. F. Rad Civil Engineer
D. H. Irby Mining Engineer
R. R. Fumanti Engineering Technician
R. J. Olson Engineering Technician
R. C. Olson Engineering Technician

EXPLOSIVE EXCAVATION SYSTEMS
Head, D. V. D'Andrea Geophysicist
R. A. Dick Mining Engineer
T. E. Rickells Physical Scientist
J. L. Condon Geophysicist
D. E. Siskind Geophysicist
J. J. Snodgrass Geophysicist
L. R. Fletcher Engineering Technician

SUBSYSTEMS ENGINEERING
Head, C. W. Schultz Metallurgist
A. A. Selim Industrial Engineer
D. I. Kurth Mathematician
G. A. Johnson Mining Engineer
T. A. Myren Statistical Assistant

ERGONOMICS
Head, J. C. Church General Engineer

FIELD TEST FACILITIES
Head, J. C. Kirchner Mining Engineer

App. 1-USBM
Research full time 85
Total 120-125

USBM-MINING RESEARCH CENTER APPENDIX 2

Rock Physics Research dept. research projects for 1972

1. Acoustic Determination of Deformational Properties of Rock (R. Thill)
 - a. Study of Cyclic Loading by Sonic Power Source
 - b. Development of BVM systems
2. Study of Time Dependant Rock Behaviour (Syd Peng)
 - a. Study of Cyclic Loading by MTS System
 - b. Role of Grain Boundary in Rock Deformation
 - c. Interaction between Machine and Fracture in Rocks
3. Mechanisms of Deformation and Failure of Rocks (S. Tandanand)
 - a. Rock Deformation under Concentrated Loads
 - b. Spec. Energy Determination for Rock Fragmentation
4. Application of Rock Anisotropy (T. Bur)
 - a. Determination of Anisotropic Properties of Barre Granite
 - b. Assistance in Effective Utilization of Anisotropy in Various Research in Twin Cities Rock Mechanics Centre
5. A Study of Propagation in Simulated Lunar Environment (I. Atkins)
6. Study of Fatigue Damage in Rocks (P. Cain)
 - a. Investigation of the Mechanics of Crack Initiation and Propagation Under Cyclic Bending Load

S E M I N A R

by

DR. FINN OUCHTERLONY

Swedish Detonic Research Foundation

on

FRACTURE MECHANICS APPROACH TO SLAB BLASTING

and

An Introduction to the Research of
Swedish Detonic Research Foundation

Time: 3:00 p.m., Thursday, July 13

Place: Bureau of Mines Conference Room

RESEARCH PROPOSAL

App.4-USBM

Type or Print
in Dark Ink

Prepare in triplicate. Submit one copy to the proposed scientific adviser, one copy with the Application, and retain one copy.

Name Winfred L. Morris, Jr.
Field Materials Science 6476
Scientific Adviser Egons R. Podnieks
Date January 14, 1972

FRACTURE TOUGHNESS OF ROCK OBTAINED FROM SPECIMENS CONTAINING BLUNT TIPPED CRACKS I INTRODUCTION

An important consideration in the analysis of energy partition in the comminution of rock materials is the process of crack formation in rock and the associated surface energy values for the fracture surface. One facet of research in this area is based upon fracture toughness measurements made on rock, from which surface energy values can be obtained. An extension, made by the applicant et.al.,* of the standard technique of making such measurements using rock specimens containing sharp cracks to include tests using specimens of several rock types containing blunt tipped cracks has shown that the large scatter in fracture toughness data characteristic of blunt crack testing is due to variations in the initial angle of extension of the blunt crack with respect to the load direction. A simple correction for this fracture angle puts fracture toughness data from easily prepared blunt cracked specimens on a par with the standard test. In addition, blunt crack techniques permit the conditions for fracture based upon failure stress and available strain energy (Griffith) criteria to be adjusted independently to achieve fracture conditions unobtainable with standard techniques.

The goals of the proposed research are threefold: to establish the limitations, if any, of blunt crack testing as applied to a variety of rock types; to utilize blunt crack techniques to determine the effect of stress state at the point of fracture initiation on the surface morphology of the ensuing rock and its concomitant surface energy; to establish which testing approach, i.e. blunt or sharp crack testing, yields more representative surface energy values for selected rock comminution processes and rock types by comparing the surface morphologies of rock subjected to comminution to that generated by sharp and blunt crack testing.

* To be published.

RESEARCH PROPOSAL

Type or Print
in Dark Ink

Prepare in triplicate. Submit one copy to the proposed scientific adviser, one copy with the Application, and retain one copy.

Name Winfred L. Morris, Jr.
Field Materials Science 6476
Scientific Adviser Egonas R. Podnieks
Date January 14, 1972

II TECHNICAL

Features of the fracture process for sharp and blunt crack testing such as applied to single-edge-cracked specimens loaded in bending are compared. The shaded zones (Fig. 11) are regions in which the high crack tip stress has altered the rock properties by plastic deformation, microcracking, etc. For sharp cracks (Fig. 1-A) the path of fracture is invariably through the altered zone. Interpretation of results from the sharp crack test can be difficult if the crack at the point of initial fracture is not necessarily parallel to the load direction. For blunt cracks the fracture path is in part determined by the crack tip structure. In the case illustrated in Fig. 1-B fracture may occur either through or along the boundary of the altered zone depending upon the relative fracture toughness of the paths. In case Fig. 1-C fracture along the altered zone boundary is more likely.

Initial results from blunt crack tests indicate that, properly interpreted, data from blunt measurements are as regular as sharp crack measurements. Popin is more violent, of course, because the stress intensification factor is different for the blunt crack case, but results only become sensitive to the shape of the crack tip if the crack root radius is smaller thanⁿ about .02in. For purposes of achieving fracture along the altered zone boundary a large crack root must be used to bring the angle that the zone at the crack tip makes with the load direction to a small enough value so that fracture is energetically possible.

In blunt crack testing a correction to the apparent fracture toughness data must be made for the angle in which fracture initiates with respect to the applied load direction. Typically fracture does not occur along the crack tip (points a to b in Fig. 2) at a constant angle relative to the direction in which the load was applied. The maximum fracture angle θ , the maximum angle between load and fracture direction, has been found to be the important parameter in calculating fracture toughness K_{Ic} from the apparent fracture

RESEARCH PROPOSAL

Type or Print
in Dark Ink

Prepare in triplicate. Submit one copy to the proposed scientific adviser, one copy with the Application, and retain one copy.

Name Minfred L. Morris, Jr.....
Field Materials Science 6476.....
Scientific Adviser Egons R. Podnieks.....
Date January 14, 1972.....

toughness value $K_a(\theta)$ obtained from a blunt crack test.

$$K_{Ic} = .7 K_a(\theta) \cos \theta^{-3/2} \quad (1)$$

The fracture angle θ must be measured exactly at the crack tip and is best done in reflected light with an optical microscope (Fig. 2). The lead coefficient (.7) is a tentative experimental correction based on a ratio of blunt and sharp stress intensification factors. It is certain that this coefficient is sensitive to crack tip structure if the tip radius is too small. It is also somewhat smaller if the largest fracture angle occurs at the specimen boundary (as point a Fig. 2).

It is expected that the surface morphology and corresponding surface energy for fracture along and through the stress altered zone at a blunt crack tip will in general differ. It remains to be established to what depth this difference is carried into the rock as the initial blunt crack develops into a moving sharp crack front, as this may depend upon such factors as initial branch crack density along the two paths, etc.

III PROPOSED RESEARCH

The intent is to allow the direction of the research to develop naturally through the three research phases described below as interesting features and correlations are observed. Measurements would be begun on a small selection of rock types. Selection of additional materials for study and the emphasis placed on each phase, consistent with the stated research goals, would be determined as results and their analysis accumulated.

1. Initial Material Evaluation

A program would be initiated to simultaneously test the validity of the proposed blunt crack Equation 1 for a variety of rock types and to identify those rock types for which the initial stress condition has a significant effect on fracture surface energy.

Stress Sensitivity Test

A set of blunt cracked (S-E-C, bending) specimens containing crack tips shaped to

RESEARCH PROPOSAL

Type or Print
in Dark Ink

Prepare in triplicate. Submit one copy to the proposed scientific adviser, one copy with the Application, and retain one copy.

Name Winfred L. Morris, Jr.
Field Materials Science 6476
Scientific Adviser Egonas B. Podnieks
Date January 14, 1972

achieve a range of possible fracture angles are prepared from a given rock specimen. The load at fracture is used to calculate an apparent fracture toughness K_a for each and the fracture angle (θ) is measured. The ensuing $K_a(\theta)$ -vs θ plot should fall into one of three groups indicative of the influence of crack tip stress on fracture toughness:

Fig. 3-A No significant stress dependence;

Fig. 3-B Stress altered region toughest-fracture for θ values near zero is precluded.

Fig. 3-C Stress altered region weakest- two fracture toughness series obtainable.

Test of Blunt Crack Equation

The above data and data from parallel measurements using sharp cracked specimens will be used to test Eq. 1. The research will test the tentative result that the maximum fracture angle is the parameter of importance in correcting the apparent fracture toughness values obtained from the blunt crack measurements, and the effect of rock grain structure, weakness planes, etc. on determination of fracture angle will be studied.

2. Evaluation of Rock Which Shows Stress- Fracture Sensitivity

This phase is divisible into into two parts: to establish the role of plastic deformation in producing a dependence of fracture surface energy on initial stress state; to examine surface morphology changes with initial fracture condition.

Plastic Deformation

Rock showing sensitivity of fracture toughness to stress state in phase I measurement will be retested as per phase I, but at liquid nitrogen temperature. Results will require careful interpretation as such cooling may alter rock competence, but a change in $K_a(\theta)$ dependence group would indicate the activity of plastic deformation for the room temperature measurements. For purposes of comparison to thermal comminution (phase III) similar measurements will also be made on heated rock specimens.

Research Proposal

Field

Materials Science 6476

Scientific Advisor Egons R. Podnieks

Date

January 14, 1972

Surface Morphology

The surface morphology (roughness, branch cracking, etc.) for blunt and sharp crack initiated fractures will be compared, optically and using electron microscopy, as a function of distance from point of initiation for those rock types which show a fracture toughness-stress state sensitivity.

III: COMPARISON TO COMMINATION

Rock which shows a sensitivity of surface energy to initial stress at point of fracture will be subjected to several forms of comminution (mechanical, thermal, etc.) and the resulting fracture surfaces compared to those generated in blunt and sharp crack fracture toughness tests to establish which is most representative.

IV MATERIALS AND EQUIPMENT

In addition to the usual rock physics facility equipment and expendables the following expendables would be required for the research as proposed.

Rock specimens: \$400 if all obtained commercially

Liquid nitrogen: \$75 -estimated 300 liters

Film: \$300

Specimen containers and other odd and ends : \$100

A test stand to measure fracture angle would need to be built. This would require a day of shop time and the use of a low power optical microscope. A device to load specimens in three point bending would also be required. For the blunt crack tests load measurement only is sufficient due to the large popin at fracture.

Figure 1 A comparison of fracture of sharp and blunt cracks. Dotted line is probable fracture path

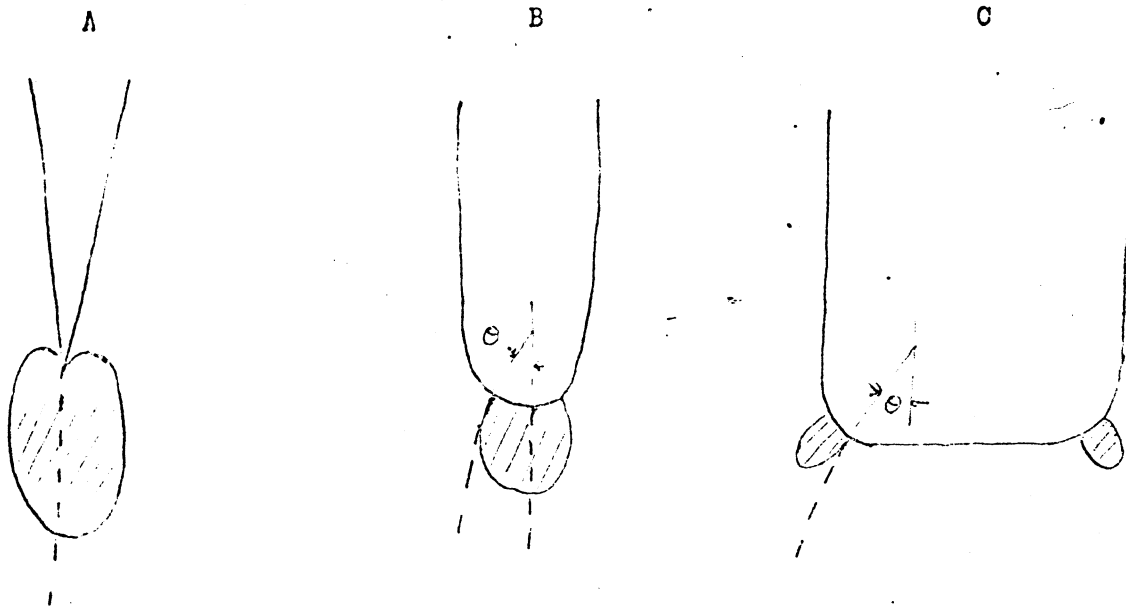


Figure 2 Measurement of fracture angle using reflected light

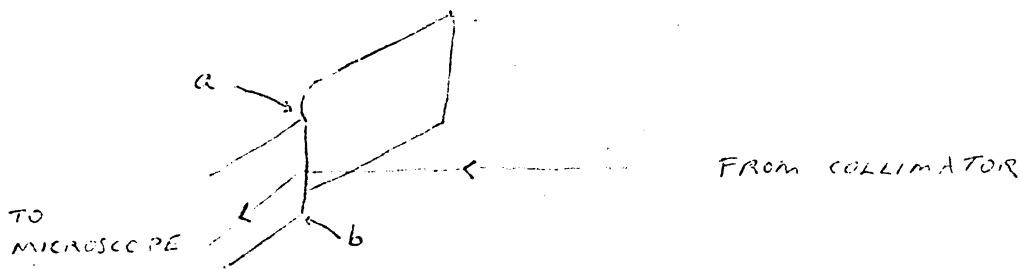
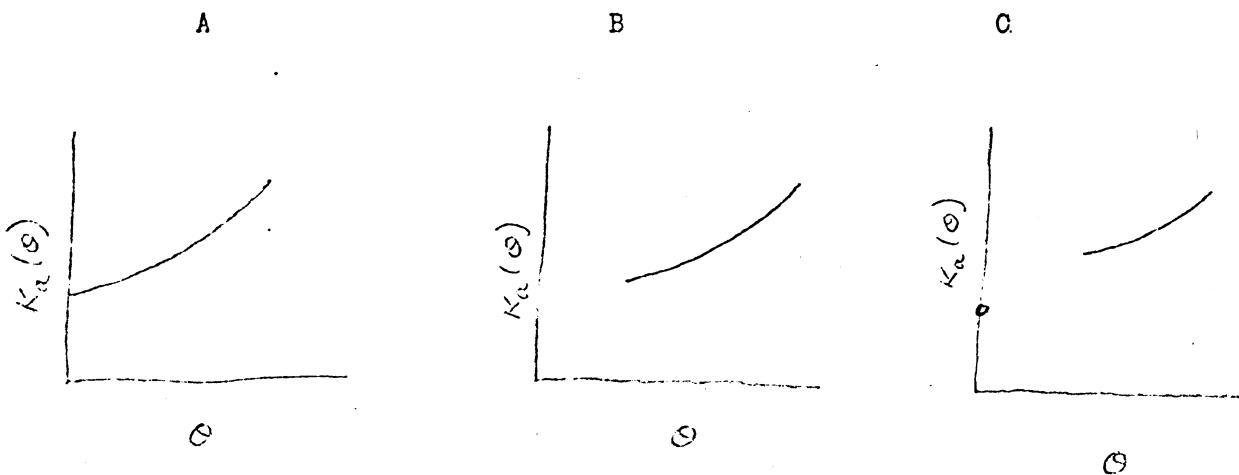


Figure 3 Possible forms for $K_a(\theta)$ data



Project: 3.1 Blast vibrations and their
relation to surface and subsurface damage:
underground mines

4-72
App. 5-USBM

Objective: Determine relationships between blasting and resultant damage from air and ground vibrations in an underground environment and provide the knowledge to control the damage.

Project: 3.2 Studies of failure phenomena in
blasting: laboratory cratering with
cylindrical charges

J. Coudou (cancelled)

Objective: Determine the failure mechanism for cratering with cylindrical charges in laboratory blasting tests.

Project: 3.3 The influence of high loading
rates and anisotropy on rock
deformation and fracture

T. Ricketts

Objective: Examine the effects of anisotropy and high rates of loading (strain rates of 10^2 - 10^3 /sec.) on rock joint defects and rock deformation and fracture processes.

Project: 3.4 Field performance of ammonium
nitrate blasting agents

Objective: Determine the effect of pertinent charge parameters on the detonation velocity of ammonium nitrate blasting agents in large (9- to 15-in) diameter boreholes, using continuous rate methods.

Project: 6.3 Evaluation of blasting techniques;
marginal resource deposits

Objective: At suitable sites, conduct factorially designed experiments and determine, through analysis of the experimental results, the effect of certain blast design parameters on blast efficiency.

Project: 6.4 Changes in rock properties
produced around blastholes

Objective: Determine changes in rock strength and elastic properties produced by shock and high-intensity stress waves generated by explosives in the zone around a blasthole.

Project: 6.5 The use of chemical explosives to
fragment deep, low-grade porphyry
copper deposits in preparation for in situ leaching

Objective: Determine whether chemical explosives can effectively fragment rocks at great depths and economically prepare large volumes of low-grade copper ore for in situ leaching.

BESÖK HOS PROF. CHARLES FAIRHURST DEN 14:e JULI

dept. Civil and Mineral Engineering
Univ. of Minnesota
Minneapolis, Minn. 55455

John Hudson visade mig runt på Institutionen vars experimentella utrustning är god, man har en MTS provmaskin där man själv byggt på elektroniken så att den nu är servostyrd. Man har gjort mycket arbete på den och i nästan alla arbetsuppgifter jag hörde talas om ingick användning av den. Ett flertal rapporter från detta arbete föreligger, se listan. Uppbyggnaden har gjorts under ledning av John Hudson. Den servostyrda provmaskinen har mest använts för studier av brott under kontrollerade förhållanden, ex är

- a. Kompletta last- deformationskurvor för olika bergarter under enaxlig tryckbelastning (C. Fairhurst)
- b. Brasilianska och ringprov (J.A. Hudson)
- c. Hydraulisk spräckning (J.C. Rogiers)
- d. Trepunktsböjprov på balkar (M.P Hardy)
- e. Enaxliga tryckprov under varierande portryck (F. Cornet)
- f. Blockmodeller under enaxlig tryckbelastning

Svårigheten är att välja rätt återkopplingsstorhet för att styra förloppet. Väljer man t.ex. lateraltöjningen mitt på provet vid enaxlig tryckbelastning kan man t.o.m. få en positiv lutning på svansen i kurvan över last-axielldeformation. Om man använder en servostyrd provmaskin för de böjprovstavar som N. Lundborg mätt brottsegheten hos berg på skulle man möjligen få ända till 20 mätpunkter per prov genom att processen är kontrollerad. En viss försiktighet vid folkningen av värdena bör nog iakttas då K_{IC} definierats som värdet då den instabila tillväxten börjar. Flera personer verkade vara inne på linjen med energibetraktelser och ytenergi som begrepp är känt medan kopplingen till brottmekanikens begrepp kritisk spänningsintensitetsfaktor och brottseghet inte var det vilket verkar något förvånande mot t.ex. trepunktsböjproven.

Institutionen har åtminstone förut bedrivit arbete inom sprängnings- och borrhningsområdet, se artikellista, men det jag hörde talas om var att Charles Nelson höll på med några inträngningsförsök i mycket finkornig marmor där han vid någon punkt under förloppet avbröt, dränkte kontaktområdet i expoxiplast som penetrerade den porösa kalkstenen för att

sedan snitta provbitarna för vidare studier. Han hade några teorier om materialtransport upp mot den fria ytan längs verktygseggen som påverkar friktionskraftkomponentens riktning. Nelson höll också på med studier av bultade fogars friktionsegenskaper och visade intresse för Sten Bjurströms arbeten.

Ett stort projekt som institutionen länge arbetat med är en analogi-maskinmodell för bestämning av spänningar och deformationer i pelare och brytningsfronter i kolgruvor. Den mekaniska modellen är uppbyggd av två elastiska halvrymder med mellanliggande material, kolflötsen, som inte nödvändigtvis var linjärt elastiskt. Brytningsrummets utformning varierades på en stor tavla vid analogimaskin med sladdar som kopplade in resistansnät mellan olika punkter för att representera kolmaterialet. Analogimaskinen var av hybridtyp. Eftersom spänningar och deformationer på halvrymdernas ytor är harmoniska behöver man inte bestämma tillståndet i det inre där de är biharmoniska något som underlättar räkningarna avsevärt. Mike Hardy redogjorde för detta.

Mitt besök avslutades med att jag höll samma seminarium som på USBM dagen innan men diskussion som följde var inte lika livlig som dagen innan. Under helgen 15-16 juli fick jag tillfälle att träffa prof. Fairhurst och flera av de andra människorna på hans institution. Denna verkade genomsyras av en anda av kamratskap och stämningen var mycket fin

Artiklar av intresse

Hudson, J.A.,
Brown, E.T.,
Fairhurst, C.

Optimizing the Control of Rock Failure
in Servo-Controlled Laboratory Tests.-
Rock Mechanics vol 3 no 4, s 217-224
(1971).

Hudson, J.A.,
Brown, E.T.,
Rummel, F.

The Controlled Failure of Rock Discs and
Rings Loaded in Diametral Compression. -
Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol 9 no 2,
s 241-248 (1972).

Hudson, J.A.,
Brown, E.T.

Studying the Time Dependant Behaviour of
Rock. - 14th Symp. Rock Mech., Univ.
Park Penna. (1972).

Hudson, J.A.,
Hardy, M.P.

Controlling Crack Growth in Rock and
Other Materials. - Int. Conf. Dyn. Crack.
Prop., Lehigh Univ. (1972).

da Gama, C.D.,
Nelson, C.R.

The Formation of Radial Cracks in Rock
Blasting Analyzed in Terms of the Modified
Griffith's Theory. - Dynamic Rock. Mech.
Proc. 12th Sym. Rock Mech., SME N.Y.
kap 26 s. 517-528 (1971).

Porter, D.D.,
Fairhurst, C.

A Study of Crack Propagation Produced
by the Sustained Borehole Pressure in
Blasting. - som ovan kap 25 s 497-515.

Haimson, B.C.,
Fairhurst, C.

Some Bit Penetration Characteristics in
Pink Tennessee Marble. - som ovan kap 38
s 547-559.

Hustrulid, W.A.,
Fairhurst, C.

A Theoretical and Experimental Study of
the Percussive Drilling of Rock. Parts 1-4.
Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. vol 8-9
(1971-1972).

NAMN PÅ PERSONER VID UNIV. MINN. DEPT. OF CIVIL AND MINERAL ENGINEERING.

Charles Fairhurst	-	Professor
Charles R. Nelson	-	Assistant professor
John A. Hudson	-	
Mike P. Hardy	-	Research Fellow
Jean Claude Rogiers	-	-"-
Francois Cornet	-	-"-
Jaak J.K. Daemen	-	



DEPARTMENT OF CIVIL AND MINERAL ENGINEERING

2nd Floor



SEMINAR

FINN OUCHTERLONY

SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION
STOCKHOLM, SWEDEN

3:15 pm

FRIDAY, JULY 14th, 1972

210 MINES & METALLURGY

FRACTURE MECHANICS APPROACH
TO SLAB BLASTING

17

BESÖK HOS PROF. DAVID SUMMERS DEN 17:e JULI

Rock Mechanics and Explosives Research Center
 dept. Mining Engineering
 Univ. of Missouri
 Rolla, Mo. 65401

Institutionens huvudsakliga ansträngning ligger på "Rapid Excavation"

Formade laddningar G.B. Clark + R.R. Rollins

Termometoder - Upphettning med
 värmelement, plasma
 jet, flame-torch C.J. Haas

Vattenstrålar D.A. Summers (65%)

Övriga arbetsområden är

Bergbultar R.N. Nitzsche (50%)

Brottmekanik, ytenergibestämning R.N. Nitzsche (25%)
 D.A. Summers (10%)
 R.E. Moore (intresserad)

Vågutbredning i stavar C.J. Haas

Den har en 3-våningstegelbyggnad i stan med exp.lokalerna i källaren, provberedning, brottseghetsbestämning, dämpnings- och dispersionsförsök i stavar och vattenstråleförsök. Utanför stan finns delar av en ny byggnad dit vattenstråleförsöken skall flytta och en utomhusprovplats där försöken med formade laddningar, termometoder och vattenstråleförsök i stor skala bedrivs.

David Summers huvudintresse är vattenstrålar, han gjorde tydligen sin PhD-handling i England för fyra år sen och åkte till Rolla för att få fortsätta med detta. Försöken kom visserligen inte igång med en gång men han har nu två uppsättningar igång, en driven av en kontinuerlig pump som ger 30 kpsi och 18 kpsi. Provbitarna, antingen kuber med ≈ 15 cm sida eller cylindrar med $\varnothing = h \approx 7$ cm monterade i aluminiumhållare monteras i en svarv. Exponeringstiden är ≈ 0.1 sek. I löst cementerade sedimentära bergarter som sandsten verkar strålen rent eroderande medan den i en polykristallin bergart som granit ger ett hål till ett visst djup med efterföljande konformat dragbrott. De nuvarande försöken avsåg att studera hur konvinkeln beror på de tre existerande svaghetsplanen i Barre-granit. Försök att numeriskt korrelera resultaten med olika materialegenskaper genom stegvis regression resulterade i att de mest relevanta variablerna var

a/ tryckhållfastheten

b/ impact-hardness (Berrys metod, se XII symp. on Rock Mechanics)

medan konstigt nog brottsegheten befanns vara beroende av någon annan och slopades av programmet, vilken variabel K_{IC} relaterades till angavs inte.

Han trodde inte att vattenstrålen kunde användas kommersiellt vid tunneldrivning än, bara i samband med mekaniska metoder. Han nämnde att han trodde att man kunde utrusta en tri-cone bit FF-maskin med högtrycksutrustning för skärning av randen för $\approx 60.000 \$$ och därmed öka drivhastigheten $\approx 50\%$.

Den stora vattenstrålekanonen på utomhusprovplatsen drevs av svartkrut och nådde strömningshast. på 3-600 m/s.

Hans arbete i brottmekanik har visats i XII symp. on Rock Mech. provbitarna var $= 50 \times 15 \times 2$ mm och provades i 3-punktsböjmaskiner med avsikt att studera de olika mineralernas egenskaper vid initiering. Han kan nu korrigera för initieringspunkten på spetsradien ($\rho \approx 0.5 - 1.0$ mm). Fortsatta prov avser lågtemp.området (-196°C). Summers + Winfred Morris har skrivit en artikel. Det fortsatta arbetet kommer att drivas av Ray Nitzsche. Denne sysslar annars med analys av bergbultar och deras förankring, just nu genom analys med F.E.M. metoder.- programmet gjort av R.E. Goodman men modifierat för att ta hänsyn till bultar genom punktlaster i elementen.

Vågutbredningsfenomenen studerades i konstgjorda mtrl. med Hopkinson stavar. Genom spektralanalys av en infallande puls och resultatet efter en viss sträcka genom stången kan dämpning och dispersion för olika frekvenser bestämmas som funktion av materialets konstorlek. Materialet bestod av glaskulor ingjutna i cement. Bindningen mellan materialen i gränsytan påstods vara ett problem. I den dubbla Hopkinsonstaven mättes dynamiska spänningstöjningskurvor men de utvärderades manuellt för vidare digital behandling i dator i stället för elektroniskt som i SWAU. Precis som Hakalehto påstod Haas att det finns en övre gräns för energitransmission genom provet.

På utomhusarbetsplatsen visades stenar ($\approx 1 \text{ m}^3$) som spräckts genom resistiv upphettning och ett ortpåslag som borrats och sprängts med sprängämnen.

NAMN PÅ PERSONER VID UMR-ROCK MECHANICS AND EXPLOSIVES RESEARCH CENTER.

Georg B. Clark	Research Director
David A. Summers	Asst. Prof. Mining Engineering
(Ronald R. Rollins)	Assoc. Prof --"
Charles J. Haas	--" Engineering Mechanics
Richard E. Moore	Dept. Ceramic Engineering
Ray N. Nitzsche	Asst. Prof. Mechanical Engineering

Artiklar av intresse

1. David A. Summers, et.al. A Comparison of Methods for the Determination of Surface Energy. - Dynamic Rock Mechanics, Proc. 12th Symp. Rock Mech., SME N.Y. kap. 12 s 241-260 (1971).
2. George B. Clark,
Ronald R. Rollins et.al. Rock Penetration by Jets From Shaped Charges. - som ovan kap. 32 s 621 - 651.
3. David A. Summers A Correlation of Continuous Water Jet Performance with some Jet and Rock Properties. - 14th Symp. Rock Mech. Univ. Park Penna. (1972).

LITTERATURFÖRTECKNING

Carlsson, J., Dahlberg, L., and
Nilsson, F.

Experimental Studies of the Unstable
Phase of Crack Propagations in Metals
and Polymers. 27 s.
The Royal Inst. of Technology Stockholm
(KTH) preprint från International
Conference on Dynamic Crack Propagation
Bethlehem, Penna. 10-12 juli 1972

Condon, Joseph L. and
Dennis V. D'Andrea.

High-Speed Photography Studies of
Laboratory Cratering in Tennessee
Marble Plates.
US Bureau of Mines Report of Investi-
gations nr 7613 1972.

Abstracts från International Conference
on Dynamic Crack Propagation.
Lehigh University, Bethlehem, Penna.
10-12 juli 1972.

Rollins, R.R., Clark, G.B.,
and Kalia, H.N.

Penetration in Granite by Shaped
Charge Liners of Various Metals.
Forskningsrapport RMERC-TR-70-13.
Rock Mechanics & Explosives Research
Center, University of Missouri - Rolla.
april 1971.

McGarry, Frederick J., and
Moavenzadeh, Fred.

Laser Heating Effect on Rock Samples.
Proc. 12th Symp. Rock Mech. SME N.Y.
s 759-796 1970.

McGarry, Frederick J.

Fracture Mechanisms in Natural Rock.
Preprint från International Conference
on Structure, Solid Mechanics and
Engineering Design in Civil Engineering
Materials.
University of Southampton, Southampton,
Eng. 21-25 april 1969.

Morris, Winfred L., Jr.

Fracture Toughness of Rock Obtained
from Specimens Containing Blunt Tipped
Cracks.
ARPA Research Proposal nr 6476.
US Bureau of Mines 14 januari 1972.

Naaman, Antoine E.,
McGarry, Frederick J.,
Sultan, Jacques N.

Developments in Fiber-Reinforcement
for Concrete.
Forskningsrapport R 72-28 School of
Engineering Massachusetts Institute
of Technology, Cambridge,
Massachusetts maj 1972.

Peng, S.S.

Time-Dependent Aspects of Rock Behavior
as Measured by a Servocontrolled
Hydraulic Testing Machine.
Preprint från International Journal of
Rock Mechanics and Mining Sciences
maj 1972.

Peng, Syd, S., and
Podnieks, Egons R.

Relaxation and the Behavior of Failed
Rock.
Preprint från International Journal of
Rock Mechanics and Mining Science 1971.