



HRVATSKO GEOTEHNIČKO DRUŠTVO (HGD)
CROATIAN GEOTECHNICAL SOCIETY (CGS)
SOCIÉTÉ CROATE DE LA GÉOTECHNIQUE

13. Nonveiller Lecture

21.06.2014, Zagreb

**Utjecaj brzine smicanja
na dinamičko i cikličko ponašanje tla
i na parametre za odziv lokalnog tla pri potresu**

Mladen Vučetić

Profesor građevinarstva

Civil and Environmental Engineering Department

University of California, Los Angeles – UCLA

vucetic@ucla.edu

Prikazani rezultati su dobiveni u nizu višegodišnjih istraživanja u kojima su učestvovali :
(po abecednom redu prezimena)

Dr. Macan **Doroudian**
Dr. Chu-Chung **Hsu**
Prof. Giuseppe **Lanzo**
Prof. Leo **Matešić**
Dr. Kentaro **Tabata**

Prva zapažanja i analize su iznesene 1986 u izveštaju:

Vucetic, M. (1986). "The Stress-Strain Behavior of an Offshore Clay under Irregular Cyclic Simple Shear Loading," Report No. CE-86-02, Civil Engineering Department, *Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, New York, 81 p.

Dok je zadnji članak objavljen 2010:

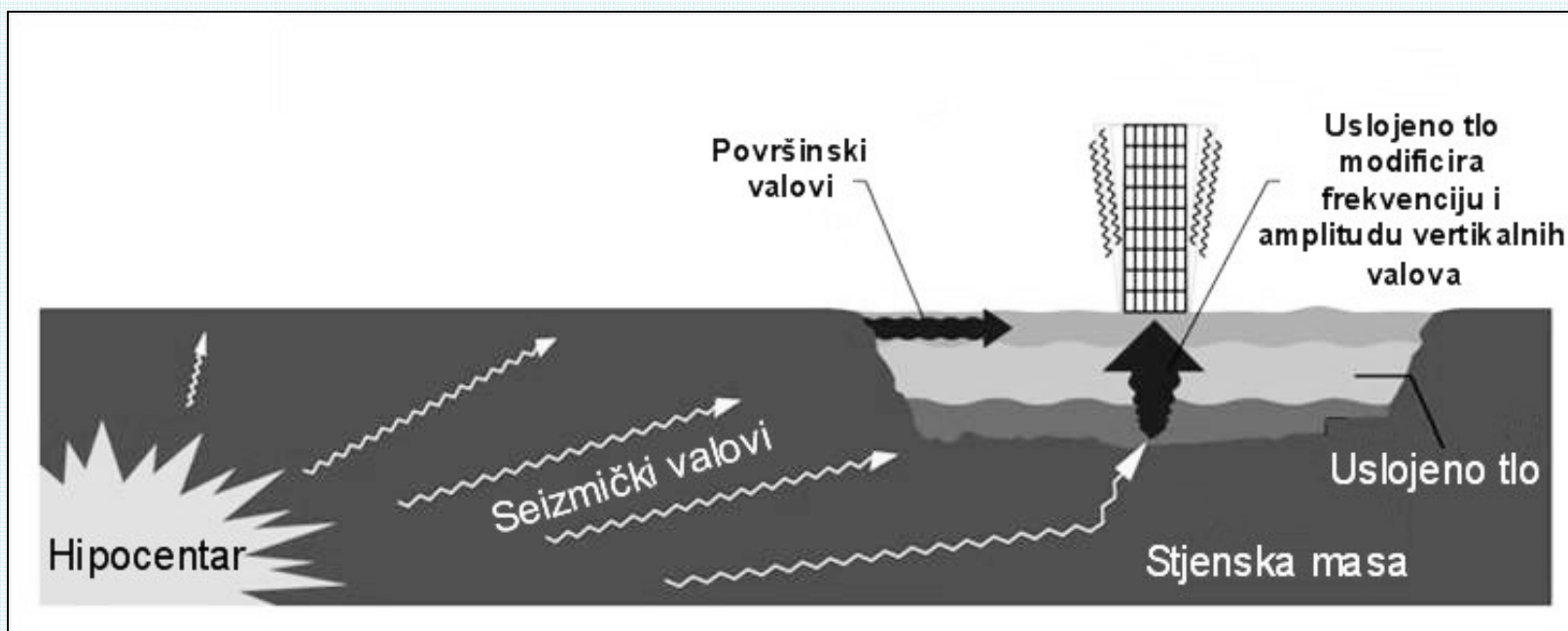
Tabata, K. and Vucetic, M. (2010). "Effect of Frequency on the Equivalent Viscous Damping Ratio of Soils at Small Cyclic Strains", *Proceedings of the 9th US National & 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Toronto, Canada, 25-29 July 2010, Published by the Earthquake Engineering Research Institute, 499 14th Street, Suite 320, Oakland, California, Volume 9. pp. 6834-6843.

Članci i izvještaji koji sadrže rezultate o utjecaju brzine smicanja koji su prikazani u ovom predavanju

- Dobry, R. and Vucetic, M., (1987). "State-of-the-Art Report: Dynamic Properties and Response of Soft Clay Deposits," *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Mexico City, Editors: Mendoza, M.J. and Montanez, L., Publisher: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, Mexico City, August, Vol. 2, pp. 51-87.
- Doroudian, M., and Vucetic, M. (1995), "A direct simple shear device for measuring small-strain behavior", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 18, No. 1, pp. 69-85.
- Doroudian, M. and Vucetic, M., (1997). "Development of 3-D Geotechnical Database and Its Application to the Evaluation of Nonlinear Site Response and Seismic Zonation", *UCLA Research Report*, No. ENG-97-186, Civil and Environmental Engineering Department, University of California, Los Angeles – UCLA, CA, 347 pages, September
- Doroudian, M. and Vucetic, M., (1998), "Small-Strain Testing in an NGI-type Direct Simple Shear Device," *Proceedings of the 11th Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Porec, Croatia, Publisher A.A. Balkema, pp. 687-693.
- Hsu, C-C., and Vucetic, M. (2002): "Dynamic and Cyclic Behavior of Soils Over a Wide Range of Shear Strains in NGI-type Simple Shear Testing Device", *UCLA Research Report* No. ENG-02-228, Civil and Environmental Engineering Department, University of California, Los Angeles, January, 267p.
- Lanzo, G., Doroudian, M. and Vucetic, M. (1999). "Small-Strain Cyclic Behavior of Augusta Clay in Simple Shear", *Proceedings of the Second International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials - IS Torino 99*, Published by A.A. Balkema, Vol. 1, pp. 213- 219, Sept.
- Lanzo, G. and Vucetic, M. (1999): "Effect of Soil Plasticity on Damping Ratio at Small Cyclic Strains", *Soils and Foundations*, Vol 39, No. 4, pp. 131-141.
- Matesic, L. and Vucetic, M. (1998): "Results of geotechnical laboratory tests on soil samples from the UC Riverside Campus", Report for the University of California's Campus - Laboratory Collaboration (CLC) Program Research Project 'Estimation of the Ground Motion Exposure from Large Earthquakes at Four UC Campuses in Southern California', *UCLA Research Report* No. ENG-98-198, Civil and Environmental Engineering Department, University of California, Los Angeles, CA, November, 218 p.
- Matesic, L. & Vucetic, M. (2003), "Strain-Rate Effect on Soil Secant Shear Modulus at Small Cyclic Strains," *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 6, pp. 536-549.
- Tabata, K., and Vucetic, M. (2004): "The Effects of the Rate of Loading and Frequency on the Behavior of Soils at Small Monotonic and Cyclic Shear Strains", *UCLA Research Report* No. ENG-04-251, Civil and Environmental Engineering Department, University of California, Los Angeles, CA, November, 289 p.
- Tabata, K. and Vucetic, M. (2010). "Effect of Frequency on the Equivalent Viscous Damping Ratio of Soils at Small Cyclic Strains", *Proceedings of the 9th US National & 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Toronto, Canada, 25-29 July 2010, Published by the Earthquake Engineering Research Institute, 499 14th Street, Suite 320, Oakland, California, Volume 9. pp. 6834-6843.
- Vucetic, M. (1986). "The Stress-Strain Behavior of an Offshore Clay under Irregular Cyclic Simple Shear Loading," Report No. CE-86-02, Civil Engineering Department, *Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, New York, 81 p.
- Vucetic, M., Lanzo, G., and Doroudian, M. (1998a), "Damping at Small Strains in Cyclic Simple Shear Test", *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol. 124, No.7, pp.585-594.
- Vucetic, M., Lanzo, G., and Doroudian, M. (1998b), "Effect of the Shape of Cyclic Loading on Damping Ratio at Small Strains", *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 1, pp. 111-120.
- Vucetic, M. and Tabata, K. (2003): "Influence of Soil Type on the Effect of Strain Rate on Small-strain Cyclic Shear Modulus", *Soils and Foundation*, Vol. 43, No. 5, pp. 161-173.
- Vucetic, M, Tabata, K. and Matesic, L (2003). "Effect of Average Straining Rate on Shear Modulus at Small Cyclic Strains" *Proceedings, International Conference "Deformation Characteristics of Geomaterials"*, Lyon, 2003", Editors: Di Benedetto et al., Publisher: A.A., Balkema, Lisse, pp. 321-328.

U potresnom građevinarstvu jedan od tipičnih problema je **odziv terena i objekata na seizmičke pomake i sile**, tj. na seizmičke valove koji iz dubine dolaze na površinu terena.

Na ovoj skici se vidi kako su **naslage tla podvrgnute utjecaju raznih seizmičkih valova**, i kako **rezultirajući površinski pomaci uzrokuju vibracije zgrade**.



Karakteristike seizmičkih valova, kao što su amplituda, frekvencija i smjer se mijenjaju sukladno dinamičkim i cikličkim karakteristikama tla. Slojevi tla tako mogu povećati ili smanjiti amplitude i dominantne frekvencije valova, što onda direktno utječe na pomake površine terena i odziv konstrukcija na terenu.

Posljedice povećanja amplituda cikličkih pomaka po dubini i na površini trena, te frekvencije i trajanje valova mogu biti razarajuće:

Veći ciklički pomaci u kombinaciji sa određenom frekvencijom mogu prouzrokovati rušenje zgrada slične rezonantne frekvencije (Mexico City 1985).



Kod relativno velikih horizontalnih cikličkih pomaka u pjeskovitim tlima koja su potpuno saturirana može doći do velikih prirasta pornih pritisaka, smanjenja efektivnih napona, te gubitka krutosti i čvrstoće, i na kraju do likvefakcije.



Zaključak:

**Poznavanje dinamičkih i cikličkih osobina tla
i faktora koji na njih utječu je neophodno
za uspješno projektiranje konstrukcija u potresnim područjima**
kao što su Hrvatska i Kalifornija, te mnogi drugi dijelovi Svijeta.

U skladu sa tim zaključkom ovo predavanje ima slijedeći raspored:

1. Kratak opis modela za proračun odziva terena
2. Opis naprezanja i deformacija u tlu koje su sukladne tim modelima
3. Opis parametara cikličkog ponašanj tla pri takvim naprezanjima i deformacijama
4. Listu faktora koji utječu na cikličke parametre ponašanja tla
- 5. Utjecaj brzine smicanja na dinamičko i cikličko ponašanje tla**

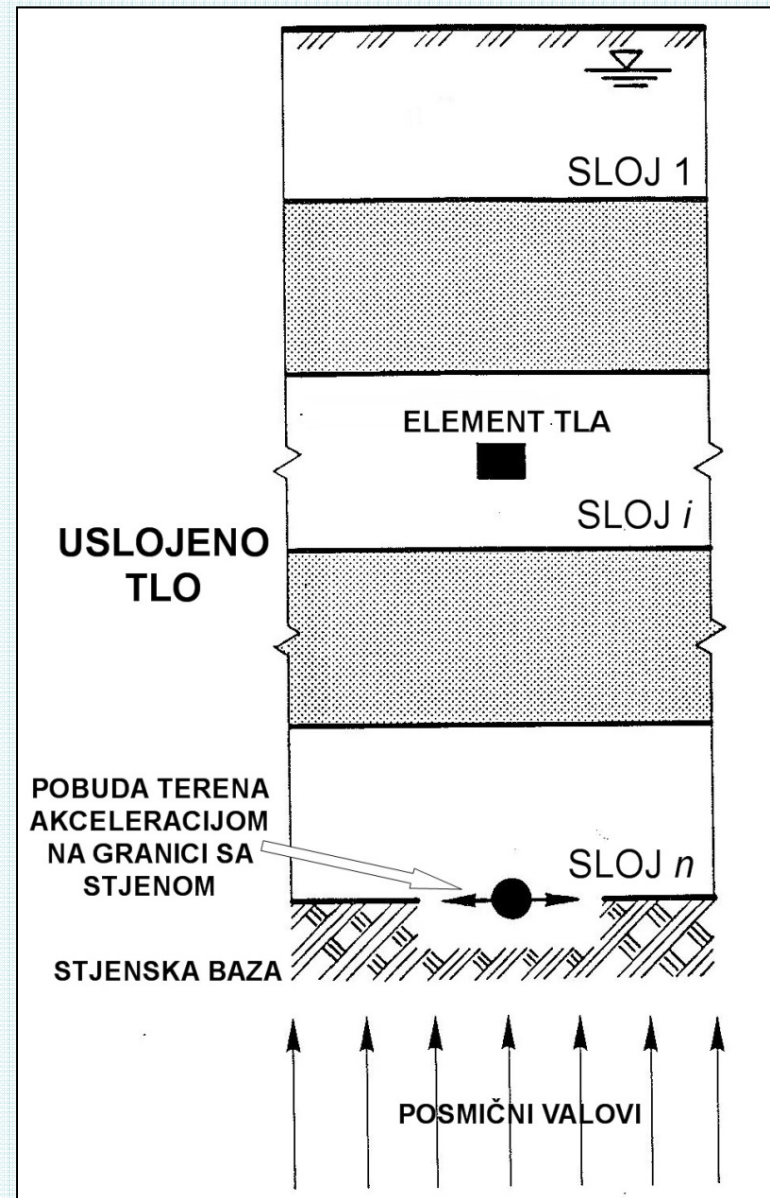
1. Kratak opis modela za proračun odziva terena

Ciklički pomaci čestica tla za vrijeme potresa su u sva tri smjera, a što se tiče amplitude i frkvencije oni su vrlo neravnomjerni.

Mehaničko ili numeričko modeliranje takvog ponašanja tla je zato vrlo komplicirano, gotovo nemoguće, i sigurno je nepraktično i neprihvatljivo za građevinsku i geomehaničku praksu.

Zato se u svrhu analize seizmičkog odziva terena **uslojeno tlo i seizmički valovi idealiziraju** na slijedeće načine:

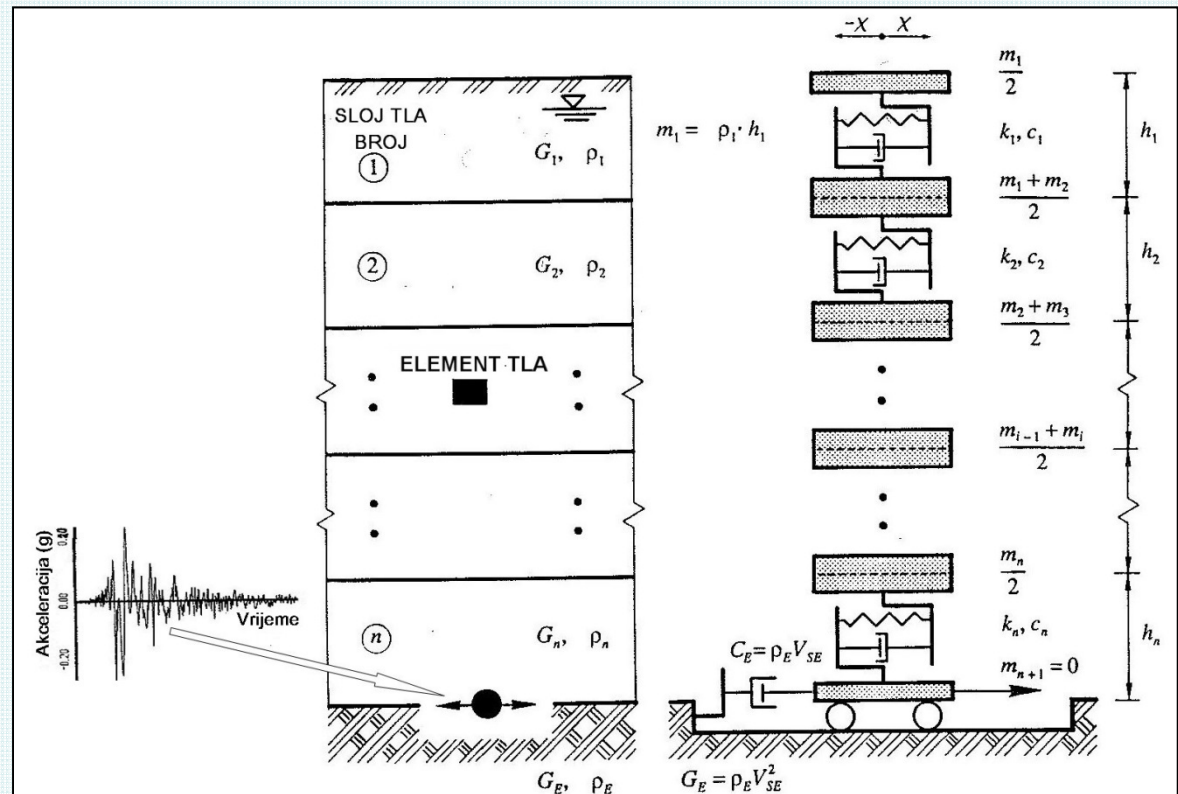
- **tlo je horizontalno uslojeno i beskonačno u horizontalnom smjeru**
- **seizmički valovi su vertikalni posmični jednodimenzionalni ravninski valovi**
- **pobuda se ostvaruje jednosmjernim horizontalnim akceleracijama zadanim na dnu takvog terena**



Postoje uglavnom dvije vrste proračuna kojima se analiziraju takvi idealni tereni:

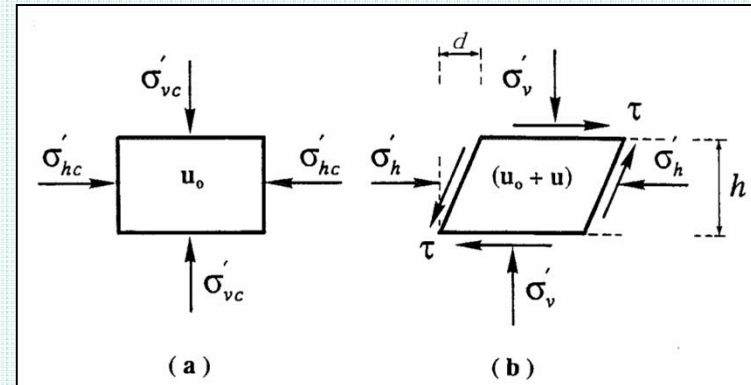
Proračuni koji upotrebljavaju jednadžbu valova i linearne osobine tla u kombinaciji sa izvjesnim viskoznim prigušenjem (npr. kompjuterski program SHAKE od Schnabel P.B., Lysmer J.L., Seed H.B., 1972)

Proračuni koji koriste mehanički vibracioni sustav sa više stupnjeva slobode u kojem se kontinuirani medij nelinearnog uslojenog tla opisuje nizom diskretnih masa spojenih nelinearnim oprugama i prigušivaćima (npr. kompjuterski program DESRA od Lee i Finn, 1978, te kasnije modifikacije tog programa)



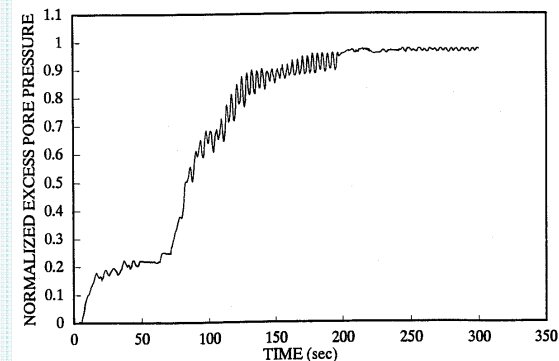
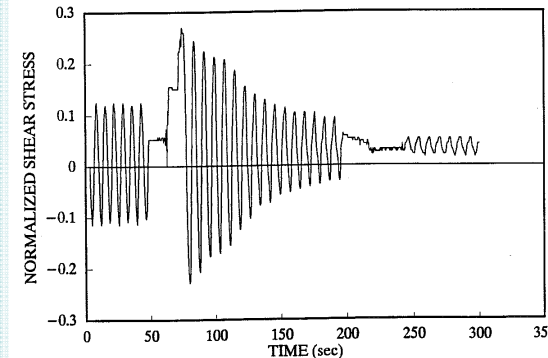
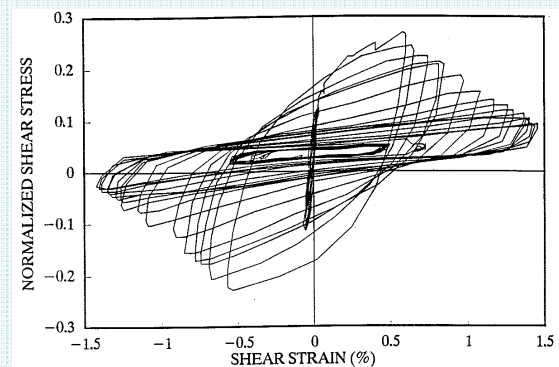
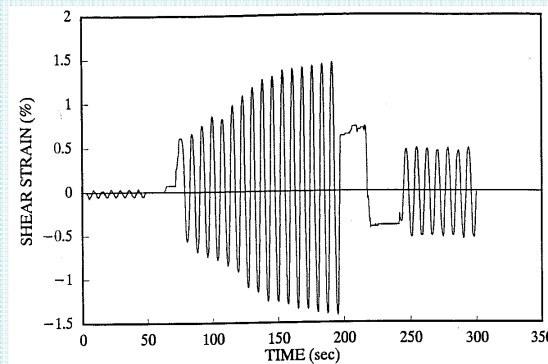
2. Opis naprezanja i deformacija u tlu koje se sukladne gornjim modelima

U gornjim modelima se javljaju naprezanja i deformacije elementa tla prije i za vrijeme potresa kao što je to ovdje prikazano. U toj idealnoj situaciji **potres prouzrokuje samo dodatna ciklička naprezanja čistog smicanja.**



Takva naprezanja čistog smicanja se najbolje mogu za neko tlo ispitati u aparatu za jednostavno smicanje u kojem se dobiva slika cikličkog ponašanja kao što je to ovdje prikazano za jedan pijesak (iz Matasović i Vučetić, 1993).

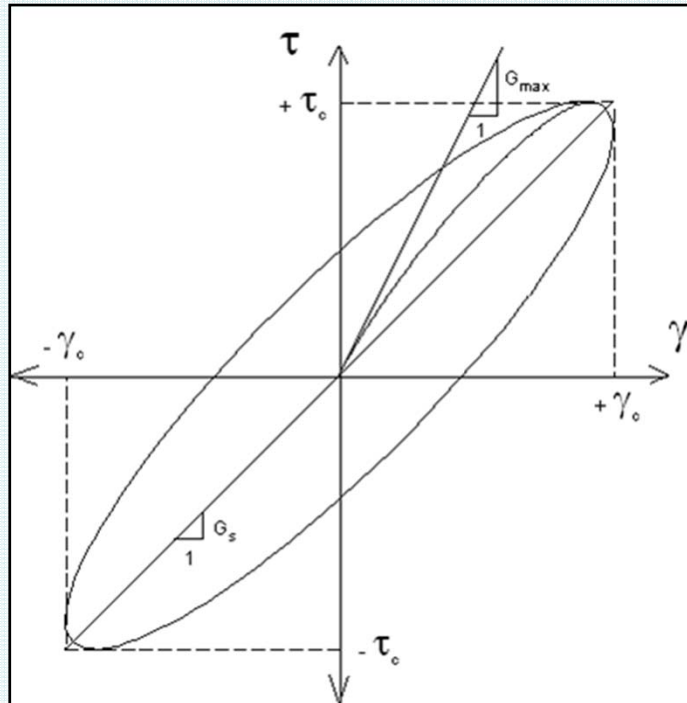
Vidi se da je odnos posmičnog naprezanja i relativne posmične deformacije u jednom ciklusu opisan cikličkom petljom.



3. Parametri za opis cikličkog ponašanj tla pri naprezanjma i deformacijama kod čistog smicanja

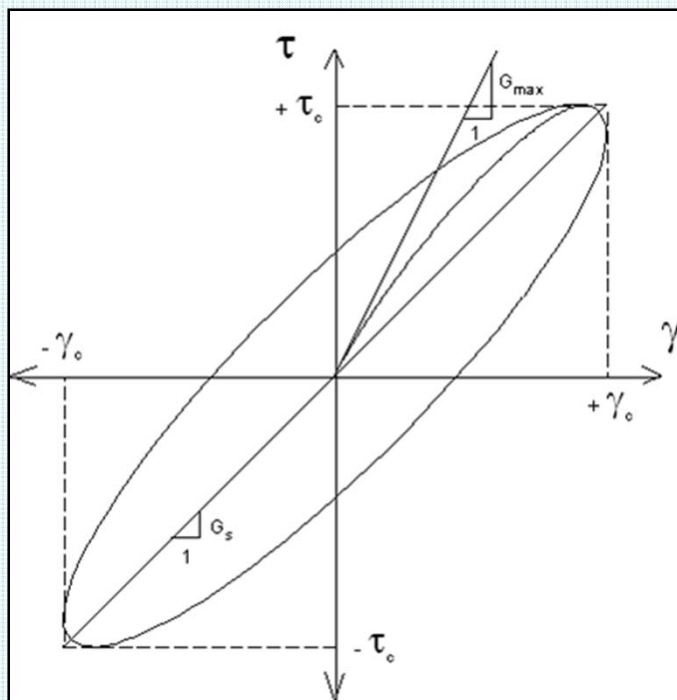
Iako je stvarno ponašanje tla za vrijeme potresa neravnomjerno, tj., opisuje se nizom neravnomjernih petlji raznih veličina, ono se u svrhu određivanja cikličkih osobina tla proučava i ispituje pod slijedećim idealnim uvjetima i pretpostavkama:

- **puna ravnomjerna ciklička petlja je osnovni element ponašanja tla**
- ta petlja je ravnomjerna jer je amplituda relativne posmične defromacije, γ_c , i posmičnog naprezanja, τ_c , jednaka u obadava smjera
- ta petlja je idealna jer je potpuno zatvorena
- cikličke osobine tla se opisuju nagibom takve petlje i njezinom površinom
- promjene osobina tla sa brojem ciklusa se opisuju promjenama petlji (uglavnom promjenama nagiba i površine) u odnosu na osobine početne petlje prvog ciklusa



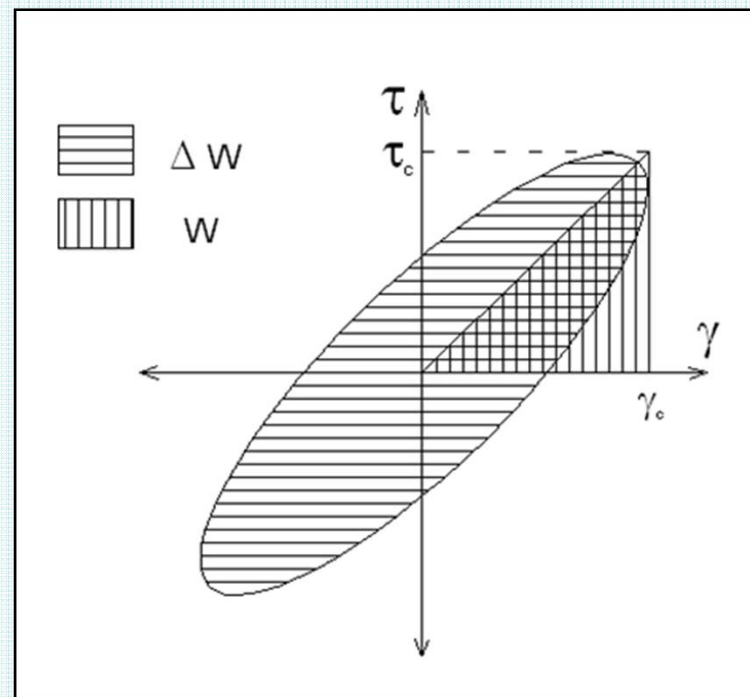
Idealizirana petlja prvog ciklusa je određena sa:

- γ_c = amplitudom relativne posmične defromacije
- τ_c = amplitudom posmičnog naprezanja
- G_{max} = maksimalnim početnim sekantnim modulom kad γ_c teži nuli
- G_s = sekantnim modulom za dani γ_c i τ_c
- Površinom petlje koja je jednaka specifičnoj energiji, ΔW , potrošenoj za vrijeme trajanja petlje



Nagib petlje opisuje prosječnu posmičnu krutost tla u jednom ciklusu a predstavlja sekantni modul $G_s = \tau_c / \gamma_c$

$G_s / G_{\max}$ = relativna krutost za dani γ_c u odnosu na najveću krutost za $\gamma_c \approx 0$



Iz površine petlje, ΔW , dobiva se ekvivalentan kvocijent kritičnog viskoznog prigušenja

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{\gamma_c \tau_c} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$

koji se upotrebljava u praksi dinamike tla.

$G_{\max}$, G_s , $(G_s / G_{\max})$ i λ

su dakle osnovne veličine (parametri) za opisivanje cikličkog ponašanja tla u prvom ciklusu, a isto tako i u kasnijim ciklusima kad se je struktura tla promijenila.

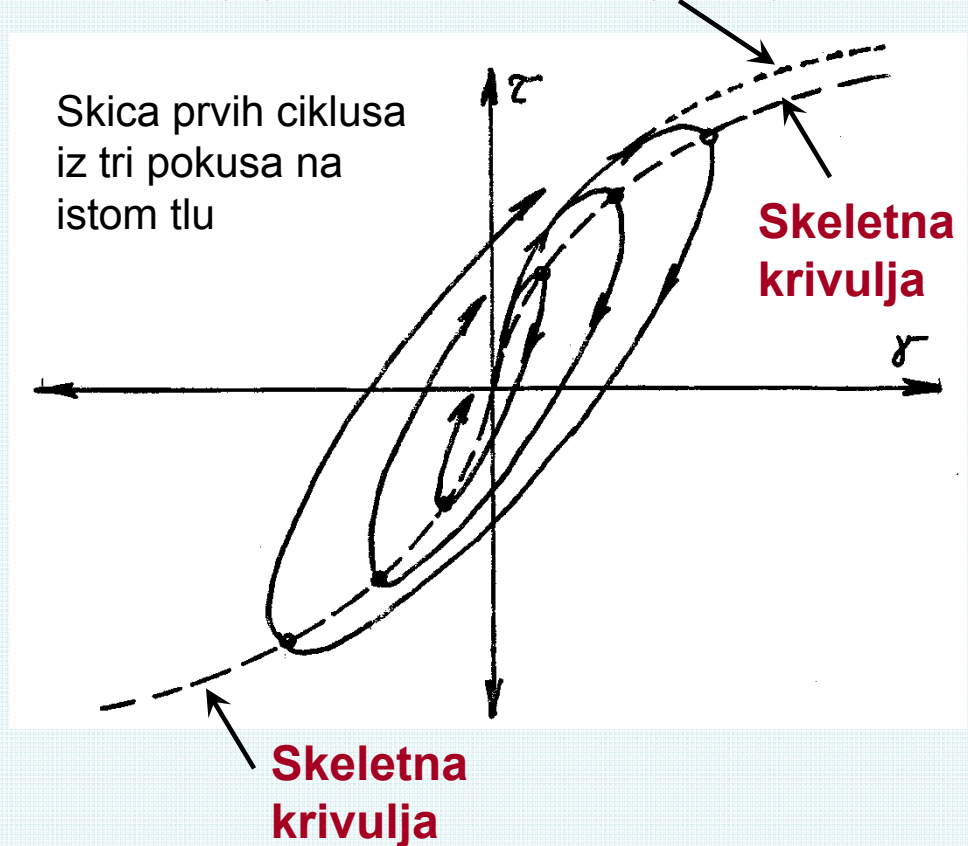
Za vrijeme potresa amplitude γ_c i τ_c variraju od vrlo malih, koje su blizu nuli, do velikih koje se ponekad približavaju slomu tla. Sukladno tim varijacijama **variraju i parametri G_{max} , G_s , (G_s/G_{max}) i λ .**

U dinamici tla te se varijacije parametara izražavaju za određeno tlo sa krivuljama od kojih je najvažnija tzv. skeletna krivulja.

Skeletna krivulja spaja vrhove početnih cikličkih petlji i ima oblik slova S kao kičma skeleta (kostura). Ako se ide po osi γ , nagibi sukcesivnih sekanti skeletne krivulje opisuju prosječne krutosti za sve prve cikluse od $\gamma_c \approx 0$ do najvećeg γ_c koji odgovara slomu.

U pozitivnom kvadrantu dijagrama naprezanja i deformacija skeletna krivulja je vrlo slična krivulji koja povezuje krivulje početnih opterećenja u prvim ciklusima, te tako i krivulji monotonog (statičkog) naprezanja. Zbog toga se **skeletna krivulja približno može dobiti iz krivulje monotonog (statičkog) opterećenja** tla (pogledaj detaljniju analizu u Vučetić, 1986; Dobry i Vučetić, 1987) .

Krivulja monotonog (statičkog) opterećenja koje je vrlo slična skeletnoj krivulji

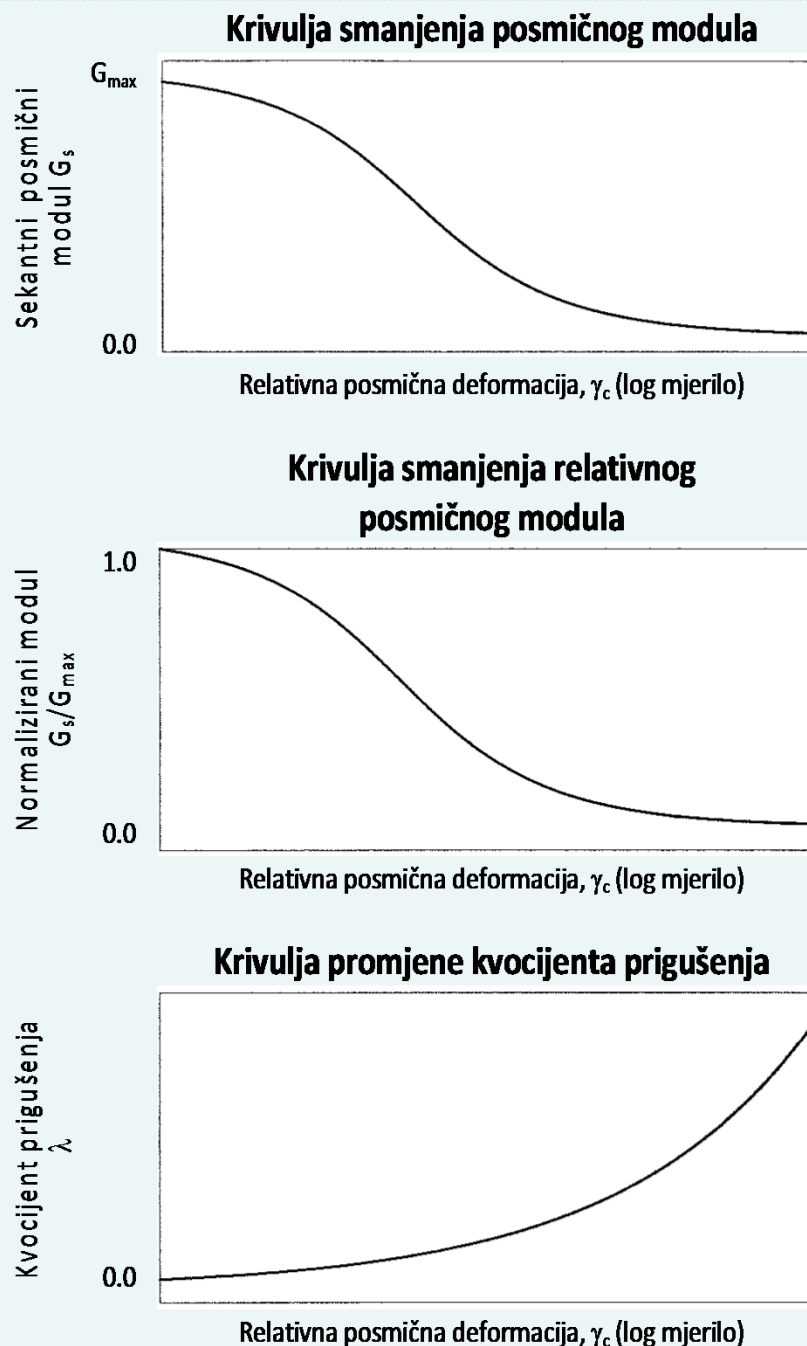


U praksi dinamike tla se pozitivna grana skeletne krivulje tipično prikazuje kao krivulja smanjenja posmičnog modula, G_s , ili normaliziranog posmičnog modula, $G_s/G_{\max}$, sa amplitudom, γ_c .

Kvocijent prigušenja se također prikazuje krivuljom promjene sa amplitudom γ_c .

Sve ove krivulje se tradicionalno prikazuju u polu-logaritamskom formatu kako bi se uvećala slika ponašanja pri malim deformacijama, γ_c , koje su najrelevantnije u dinamici tla.

Krivulje ($G_s/G_{\max}$ - $\log \gamma_c$) i (λ - $\log \gamma_c$), koje se dobivaju laboratorijskim ispitivanjima, su uz $G_{\max}$, koji se tipično dobiva terenskim mjerenjima, najvažniji i često jedini podaci potrebni za analizu seizmičkog odziva terena.



4. Faktori koji utječu na cikličke parametre ponašanja tla

G_{max} , G_s i λ , te tako i na krivulje ($G_s/G_{max} - \log \gamma_c$) i ($\lambda - \log \gamma_c$)

Glavni faktori su: amplituda posmične relativne deformacije, broj ciklusa, indeks plastičnosti, koeficijent pora, početna konsolidaciona normalna efektivna naprezanja, stupanj prekonsolidacije, brzina i promjena brzine posmične deformacije, geološka starost naslage tla, i stupanj cementacije

EFFECT OF INCREASE OF VARIOUS FACTORS ON G_{max} , G/G_{max} AND DAMPING RATIO λ OF NORMALLY CONSOLIDATED AND MODERATELY OVERCONSOLIDATED CLAYS

INCREASING FACTOR	G_{max}	G/G_{max}	λ
Confining Pressure $\bar{\sigma}_0$ (or $\bar{\sigma}_{vc}$)	Increases with $\bar{\sigma}_0$	Stays constant or increases with $\bar{\sigma}_0$	Stays constant or decreases with $\bar{\sigma}_0$
Void Ratio e	Decreases with e	Increases with e	Decreases with e
Geologic Age t	Increases with t	May increase with t	Decreases with t
Cementation c	Increases with c	May increase with c	May decrease with c
Overconsolidation OCR	Increases with OCR	Not affected	Not affected
Plasticity Index I_p	- Increases with I_p if $OCR > 1$ - Stays about constant if $OCR = 1$	Increases with I_p	Decreases with I_p
Cyclic Strain γ_c	—	Decreases with γ_c	Increases with γ_c
Strain Rate $\dot{\gamma}$ (Frequency of cyclic loading)	Increases with $\dot{\gamma}$	G increases with $\dot{\gamma}$ G/G_{max} probably not affected if G and G_{max} are measured at same $\dot{\gamma}$	Stays constant or may increase with $\dot{\gamma}$
Number of Loading Cycles N	Decreases after N cycles of large γ_c but recovers later with time	Decreases after N cycles of large γ_c (G_{max} measured before N cycles)	Not significant for moderate γ_c and N

Tabela iz
Dobry i Vučetić (1986)



A sada, nakon uvoda, kad se znaju svi potrebni pojmovi i veličine,
biti će prikazan:

5. Utjecaj brzine, prosječne brzine i promjene brzine smicanja na dinamičko i cikličko ponašanje tla

Prikazati će se utjecaji tri aspekta brzine smicanja:

Konstantna brzina smicanja

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = konst$$

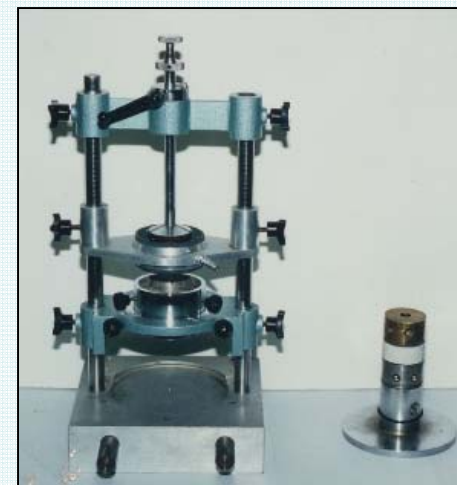
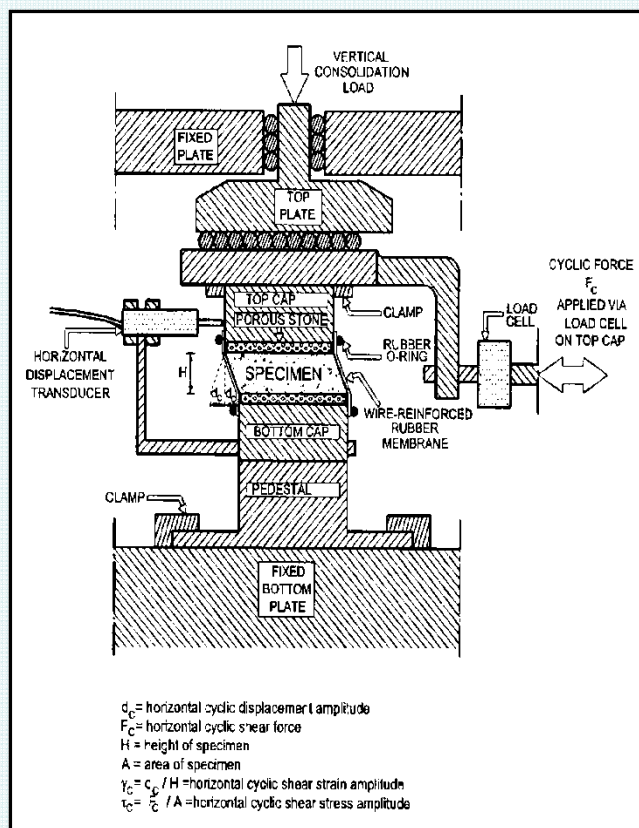
Prosječna brzina smicanja u jednom
pravilnom ciklusu ako je frekvencija $f = 1/T$

$$\dot{\gamma} = \frac{4\gamma_c}{T} = 4f\gamma_c$$

Promjenljiva brzina smicanja

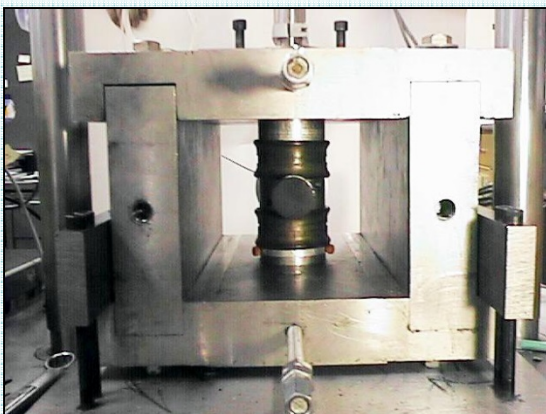
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = promjenljiva$$

Da se odredi utjecaj brzine smicanja, tla su ispitivana na UCLA-u u dvije vrste aparata za jednostavno smicanje



**Standardni aparat za jednostavno smicanje tipa NGI (NGI DSS device)
(Bjerrum and Landva, 1966)**

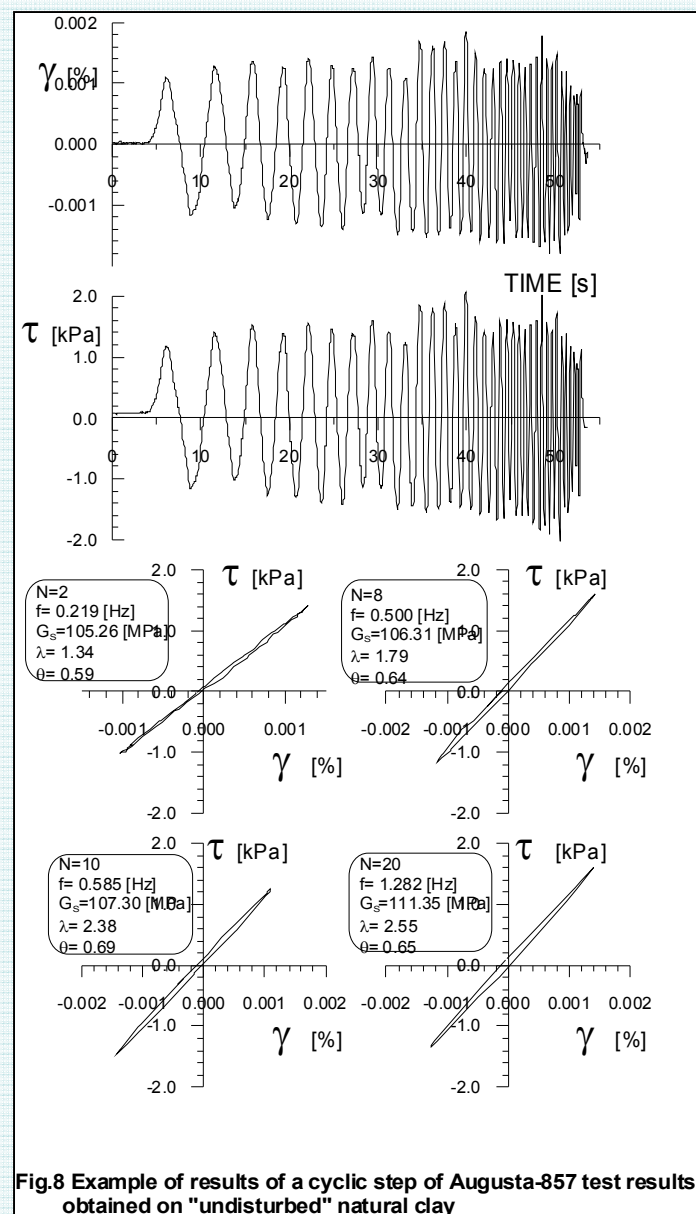
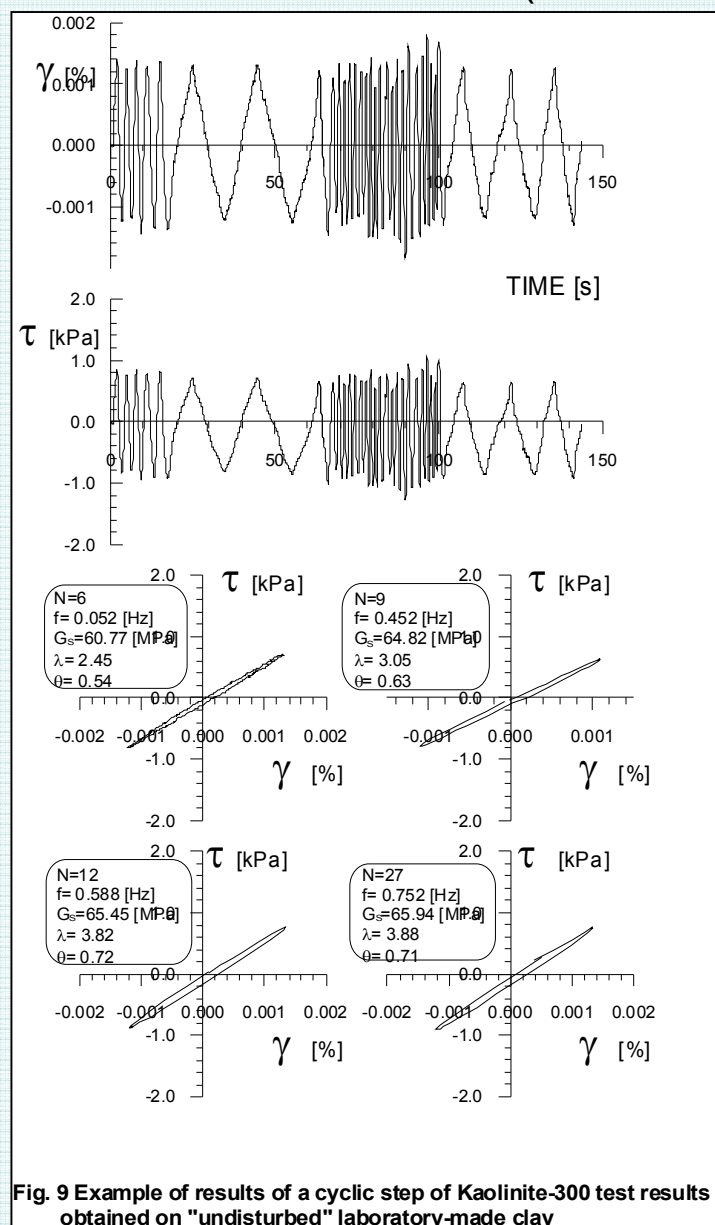
Za smicanje od srednjih do velikih γ i γ_c .



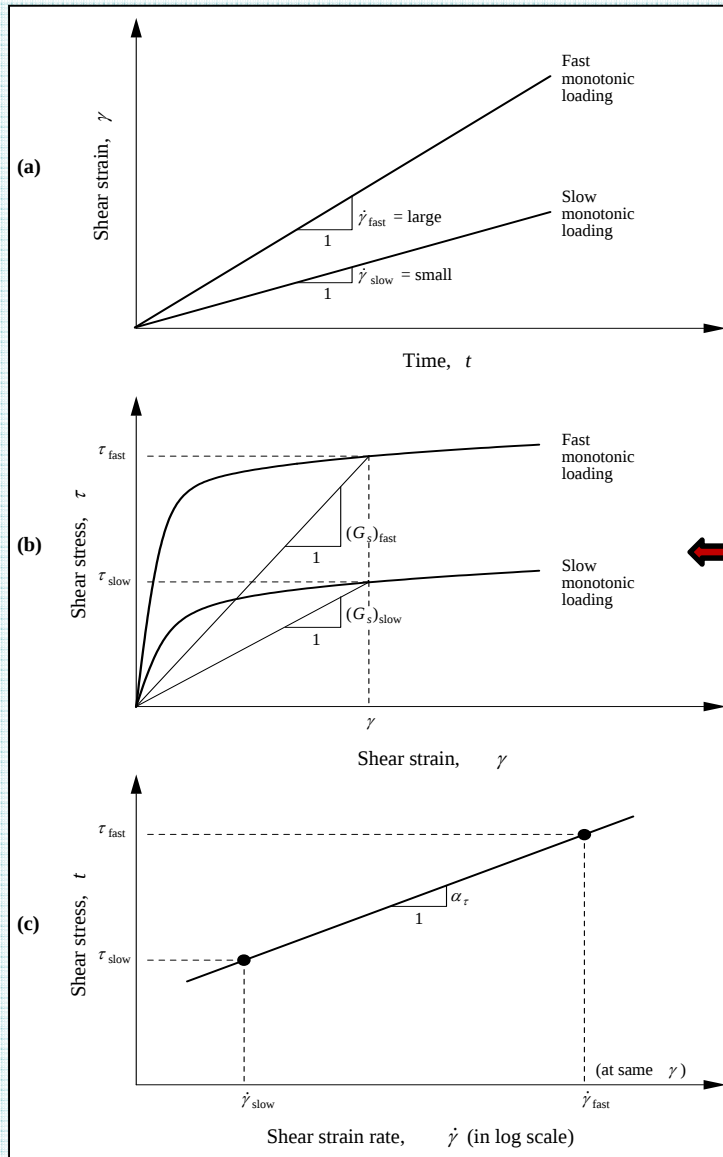
**Aparat za jednostavno smicanje
dva ista paralelna uzorka tipa NGI
(Dual-Specimen NGI DSS device – DSDSS device)
(Doroudian and Vucetic, 1995; 1998).**

Za smicanje od vrlo malih do velikih γ i γ_c .

Primjer testova za ispitivanje utjecaja brzine smicanja pri vrlo malim $\gamma_c \approx 0.001\%$
 na dvije gline u paratu za jednostavno smicanje dva ista uzorka
 (Matešić i Vučetić, 1998; 2003)



Efekti brzine smicanja pri monotonom smicanju

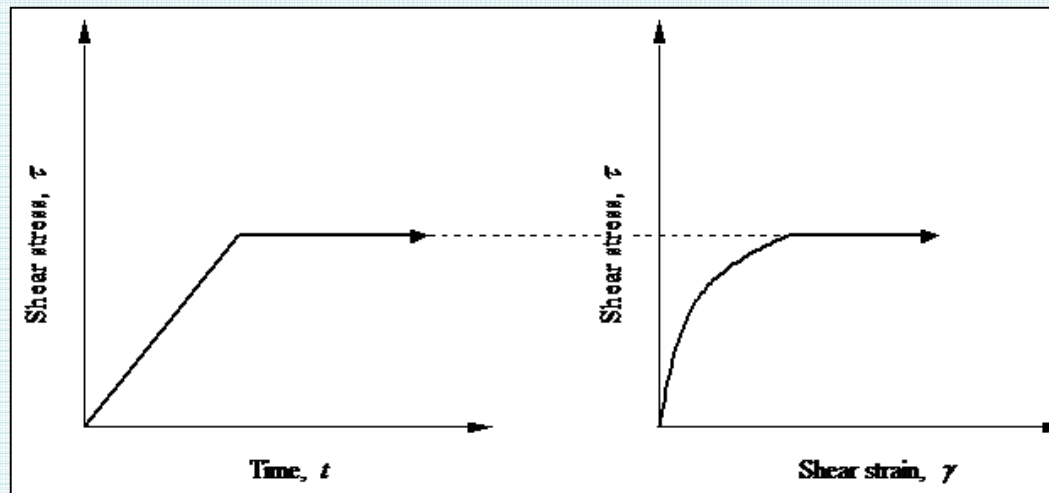


Vrlo poznati efekt brzine monotonog smicanja:

kod bržeg smicanja krutost materijala je veća.

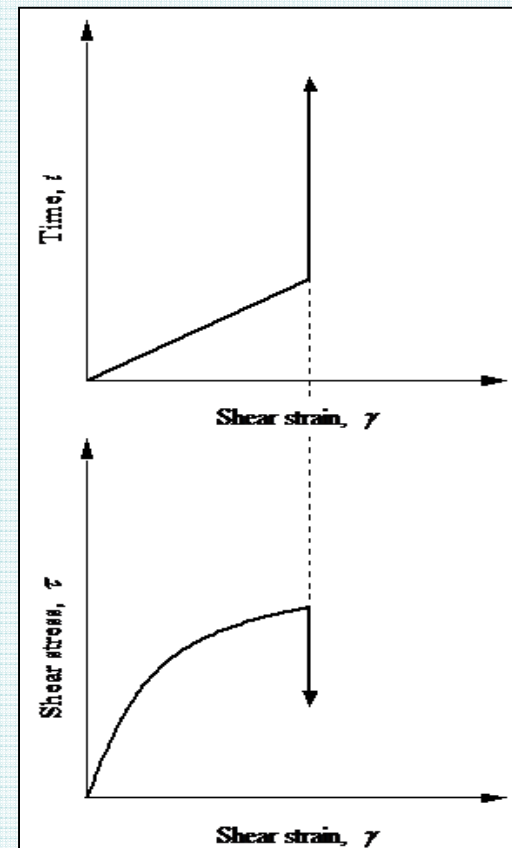
Tako je krivulja bržeg smicanja uvijek iznad krivulje sporijeg smicanja.

Efekti brzine smicanja su posljedica dvije srodne pojave koje se pojavljuju u viskoznim materijalima, tj., materijalima koji pružaju veći otpor pri bržem posmičnom deformiranju i u kojima se pod bilo kojim posmičnim naprezanjima mijenja unutarnja struktura (mikrostruktura).



Pojava puzanja

Povećanje deformacije
pri konstantnom naprezanju
(nakon povećanja naprezanje je blokirano)

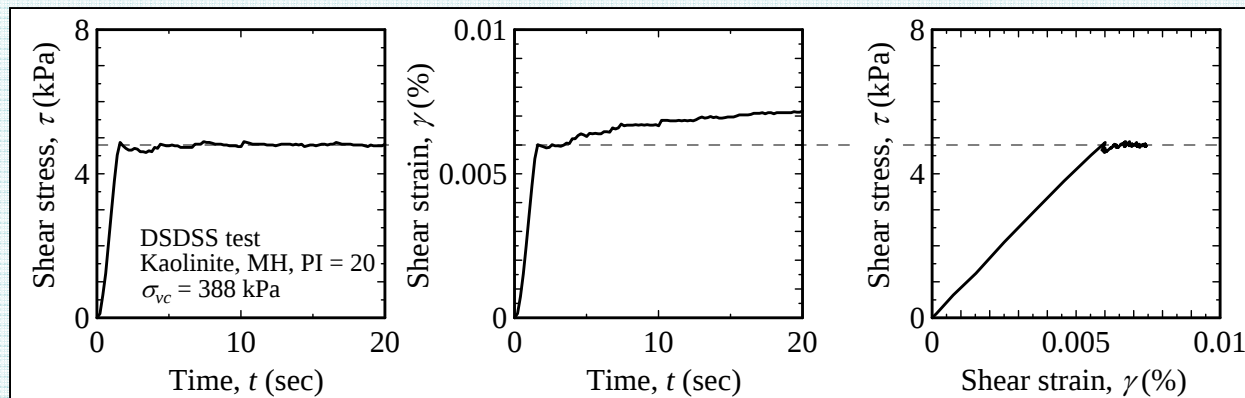


Pojava relaksacije

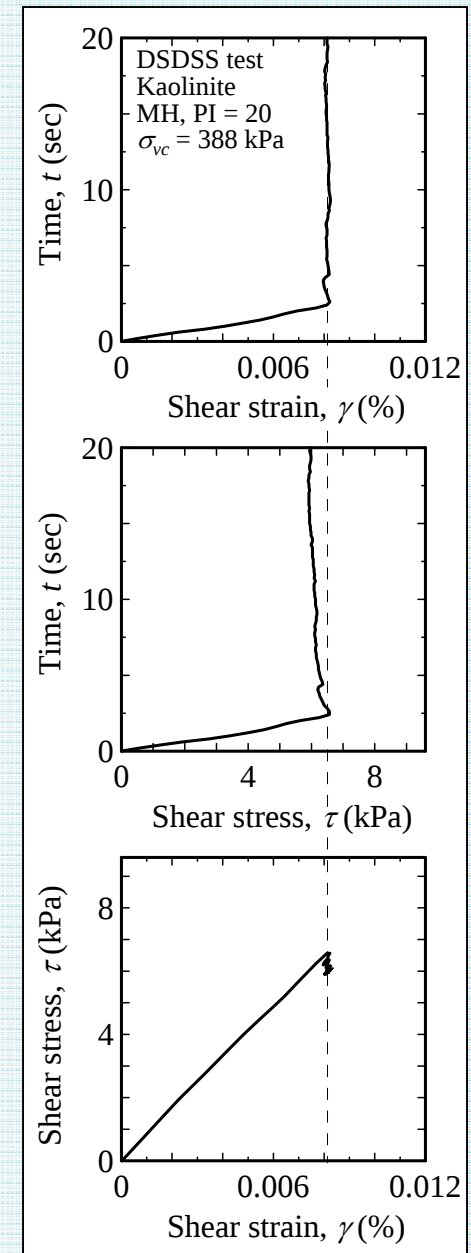
Smanjenje naprezanja
pri konstantnoj deformaciji
(nakon povećanja deformacija je blokirana)

Fenomeni puzanja i relaksacije postoje i pri vrlo malim deformacijama

kao što su ovdje $\gamma = 0.005\%$ i $\gamma = 0.008\%$
(Tabata and Vucetic, 2004)

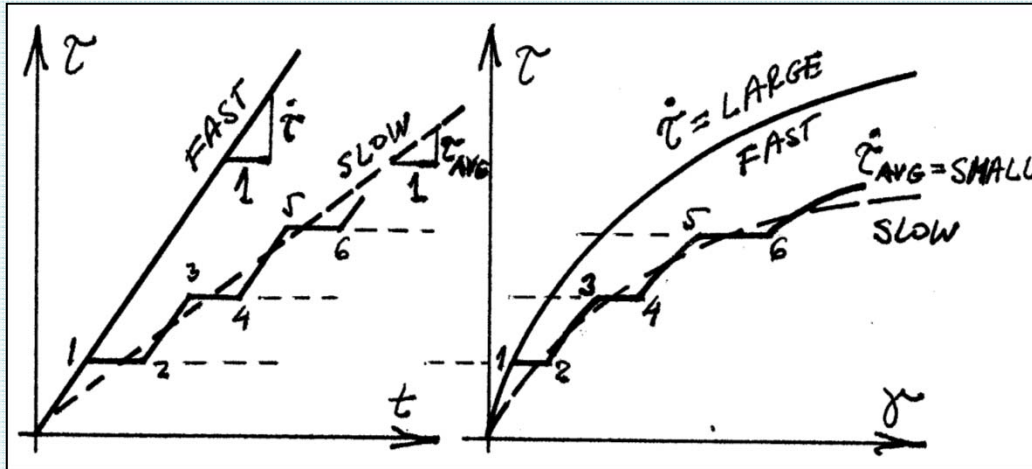


(a) Rezultati testa puzanja



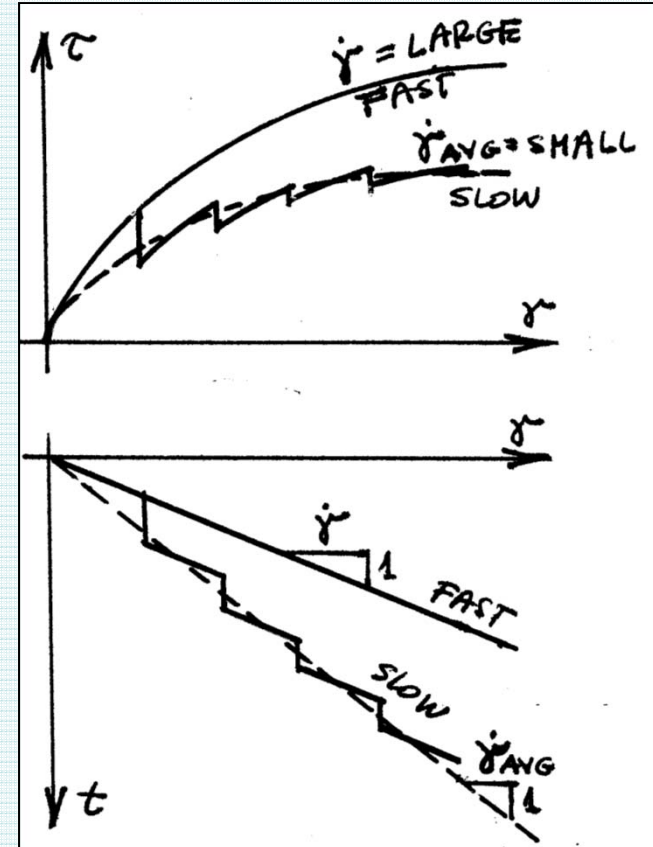
(b) Rezultati testa relaksacije

Objašnjenje zašto je krivulja bržeg micanja uvijek iznad krivulje sporijeg smicanja



Usporedba krivulja naprezanja i deformacija dobivenih

- (a) kontinuiranim monotonim povećanjem naprezanja i
- (b) izmjeničnim koracima povećanja naprezanja i stankama sa puzanjem



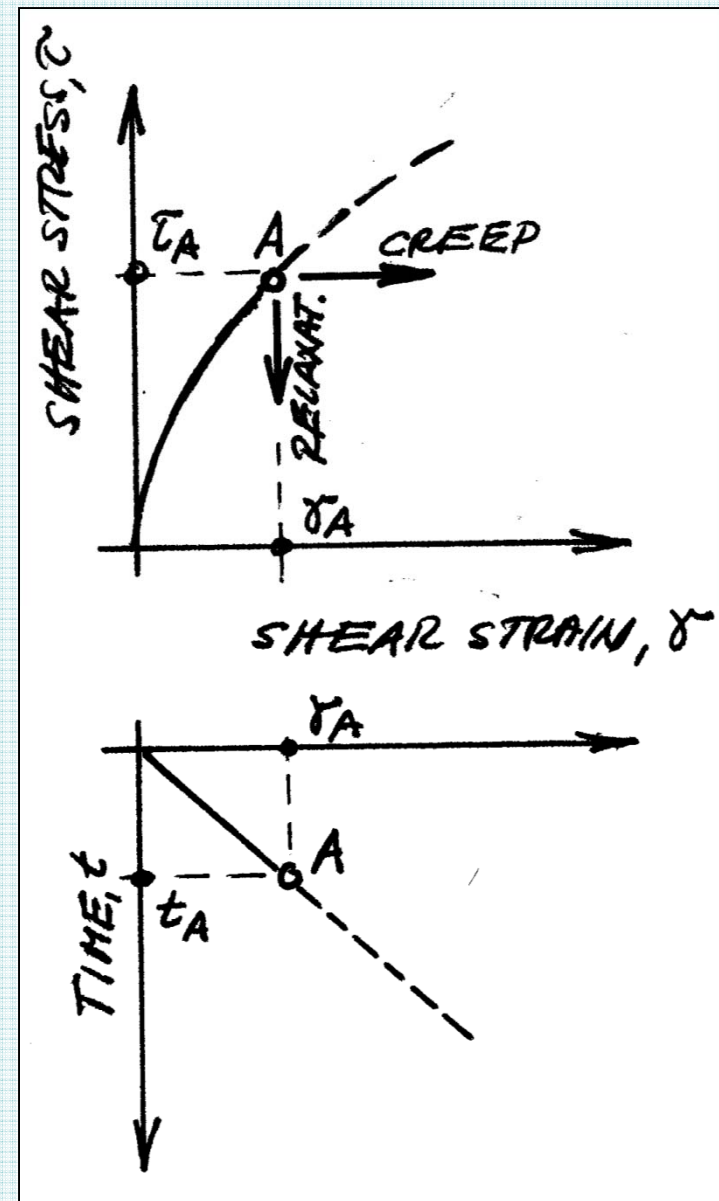
Usporedba krivulja naprezanja i deformacija dobivenih

- (a) kontinuiranim monotonim povećanjem deformacije i
- (b) izmjeničnim koracima povećanja deformacije i stankama sa relaksacijom

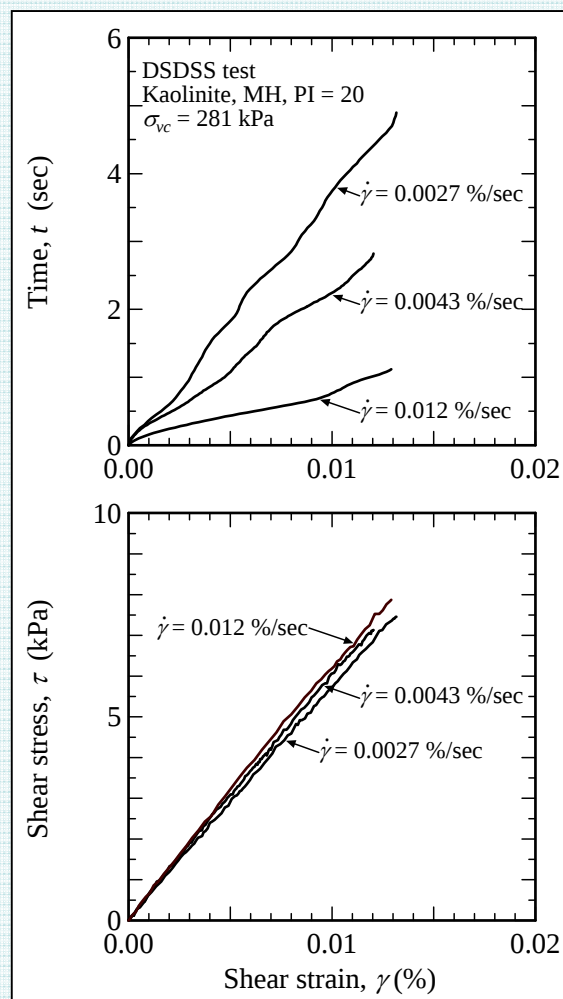
Pojava puzanja i relaksacije objašnjava također nelinearnost krivulje naprezanja i deformacija.

Budući da viskozni efekti puzanja i relaksacije postoje i kod vrlo malih (i najmanjih) deformacija, tlo je očito nelinearno i pri najmanjim deformacijama.

Uostalom, linearnost materijala je samo prikladan i privlačan koncept za praktične analize, ali ne i stvarnost. Ništa na ovom Svijetu nije savršeno linearno, pa tako niti ponašanje realnih materijala u koje spada tlo.



Utjecaj konstantne brzine monotonog smicanja pri vrlo malim deformacijama na (a) krivulje naprezanja i deformacija i (b) rezultirajuće krivulje smanjenja posmičnog modula

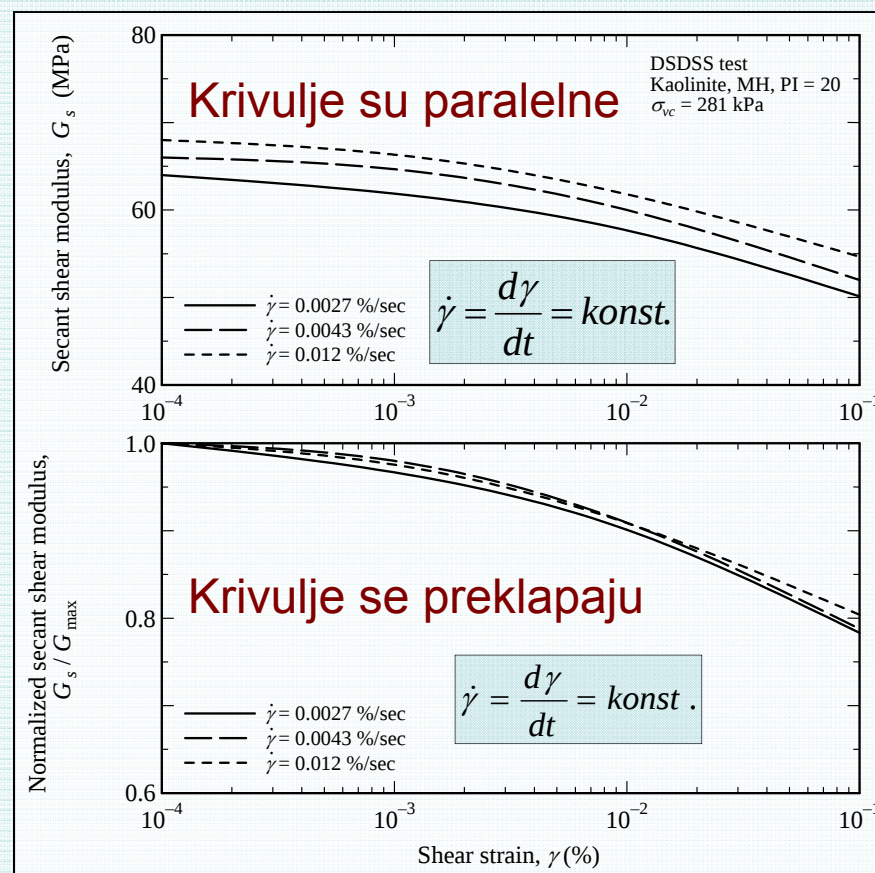


(Tabata i Vučetić, 2004)

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = konst.$$

Krivulje
deformacije sa
vremenom, γ -t

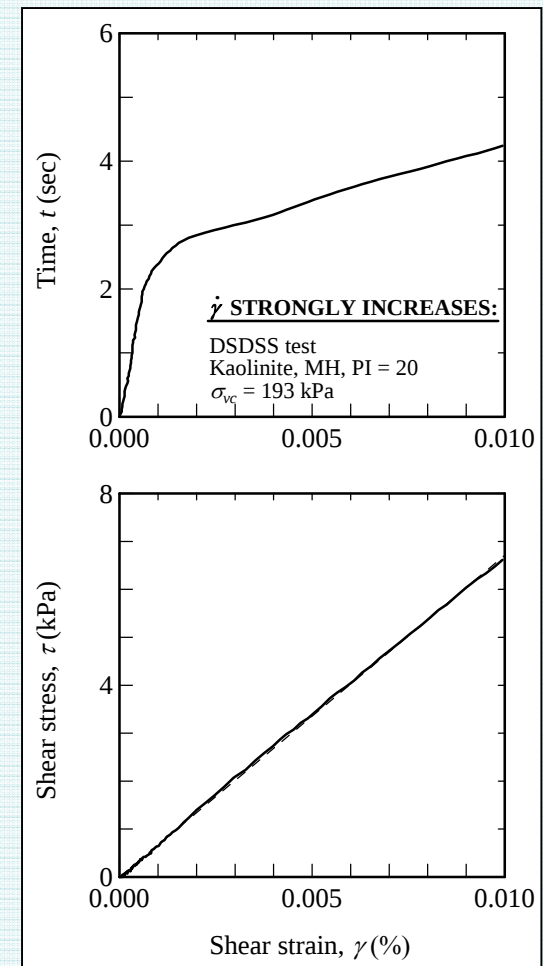
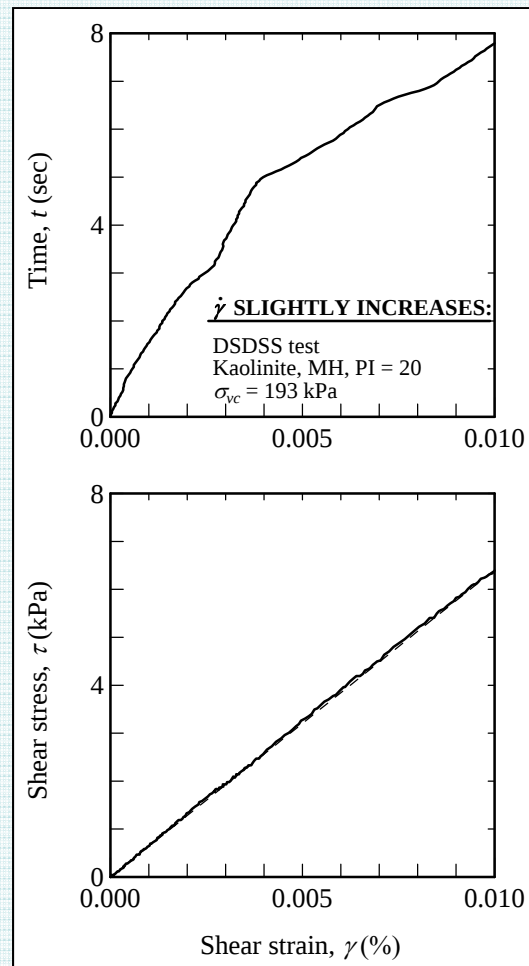
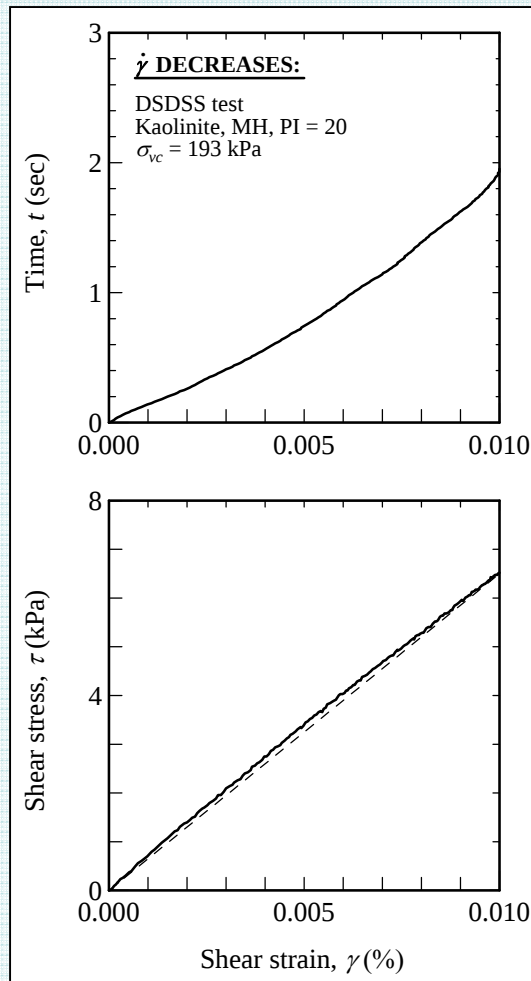
Rezultirajuće
krivulje posmičnih
naprezanja i
deformacija, γ - τ



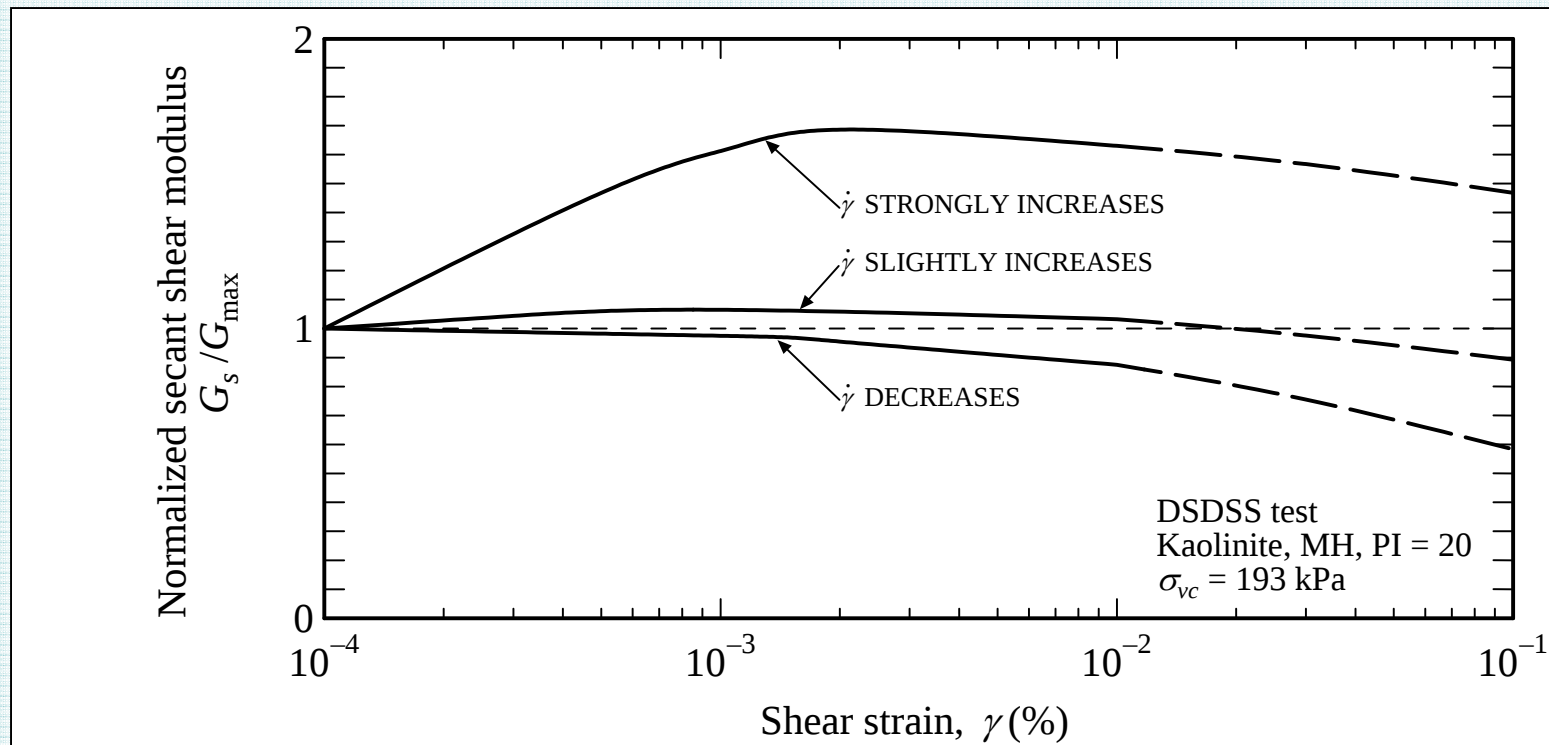
Krivulje smanjenja posmičnog modula
(iz Tabata i Vučetić, 2004 - ranije prikazano
od Isenhower i Stokoe, 1981, i potvrđeno od
Matešić i Vučetić, 2003)

Utjecaj promjenljive brzine monotonog smicanja pri vrlo malim deformacijama na: (a) krivulje naprezanja i deformacija, i (b) krivulje smanjenja posmičnog modula (Tabata i Vucetic, 2004)

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \text{promjenljiva}$$



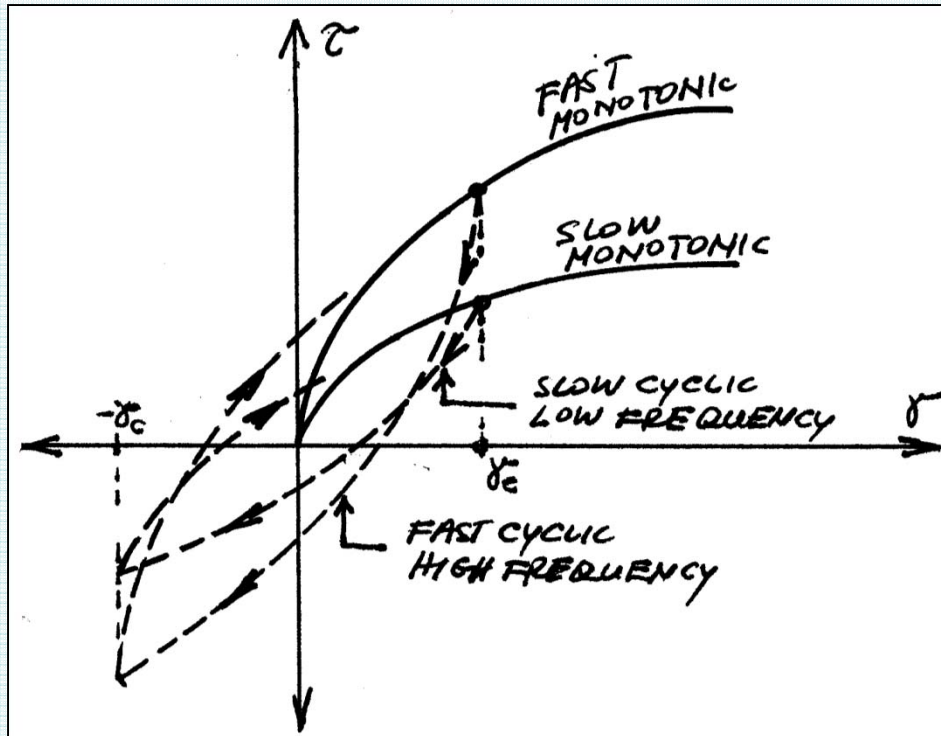
Rezultirajuće normalizirane krivulje smanjenja posmičnog modula (Tabata i Vucetic, 2004)



**Kada se brzina smicanja znatno povećava,
veličina G_s/G_{max} prvo raste i onda pada.**

U početku je efekt brzine smicanja “jači ” od efekta nelinearnosti materijala pa G_s/G_{max} prvo raste. Kasnije, pri većim deformacijama, je nelinearnost materijala izraženija pa tako prevladava preko utjecaja povećanja brzine smicanja.

Efekti brzine smicanja pri cikličkom smicanju

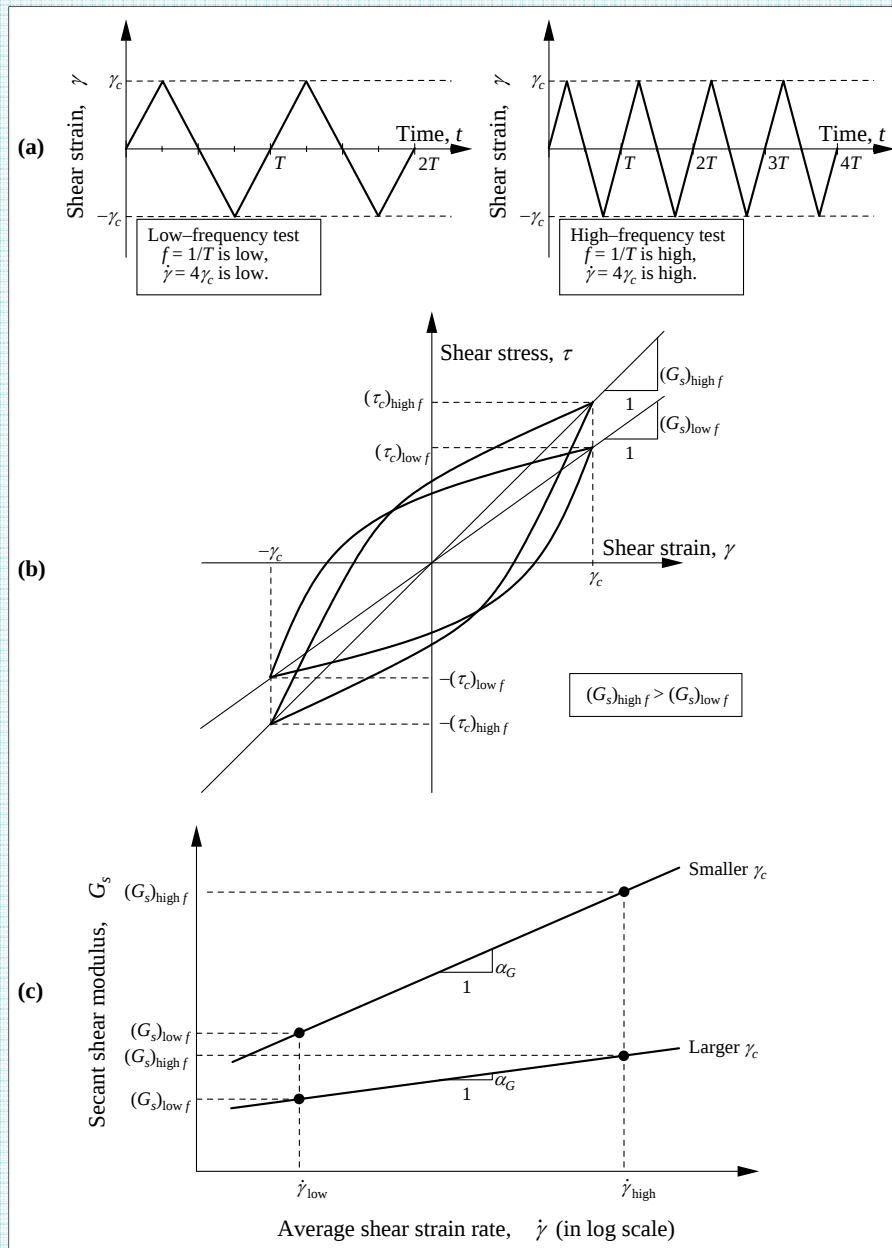


Poznati efekt brzine cikličkog smicanja:

kad je frekvencija veća, prosječna brzina smicanja je veća, pa petlja ima veći nagib, što onda ukazuje na veću prosječnu krutost.

$$\dot{\gamma} = \frac{4\gamma_c}{T} = 4f\gamma_c$$

$$f = \frac{\dot{\gamma}}{4\gamma_c}$$



Pažnja: dijagrami (a) i (b) odgovaraju jednoj konstantnoj amplitudi γ_c , dok su na dijagramu (c) skicirani rezultati za dvije amplitude γ_c .

Utjecaj prosječne brzine smicanja i frekvencije na modul posmika, G_s

$$\dot{\gamma} = \frac{4\gamma_c}{T} = 4f\gamma_c$$

Prosječna brzina smicanja u jednom ciklusu

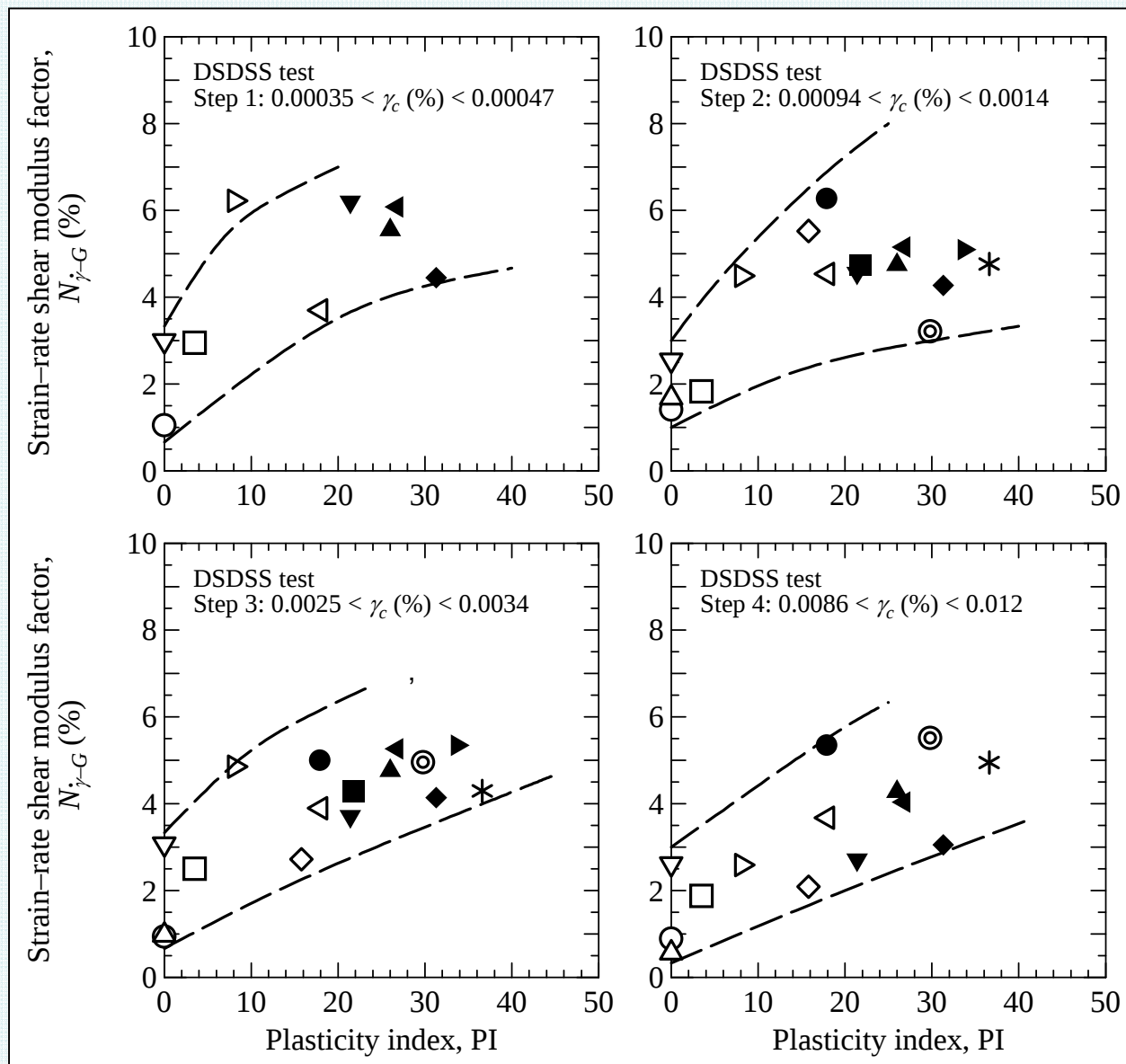
$$\alpha_G = \frac{\Delta G_s}{\Delta \log \dot{\gamma}} = \frac{(G_s)_{high} - (G_s)_{low}}{\log \dot{\gamma}_{high} - \log \dot{\gamma}_{low}} = \frac{(G_s)_{high} - (G_s)_{low}}{\log \frac{\dot{\gamma}_{high}}{\dot{\gamma}_{low}}}$$

Prametar utjecaja brzine smicanj na posmični modul, α_G

$$N_{\dot{\gamma}-G} = \frac{(G_s)_{high} - (G_s)_{low}}{\log \frac{\dot{\gamma}_{high}}{\dot{\gamma}_{low}}} \frac{1}{(G_s)_{ref}} = \frac{\alpha_G}{(G_s)_{ref}}$$

Faktor utjecaja brzine smicanja na posmični modul, $N_{\dot{\gamma}-G}$

koji su uveli Isenhower i Stokoe (1981)

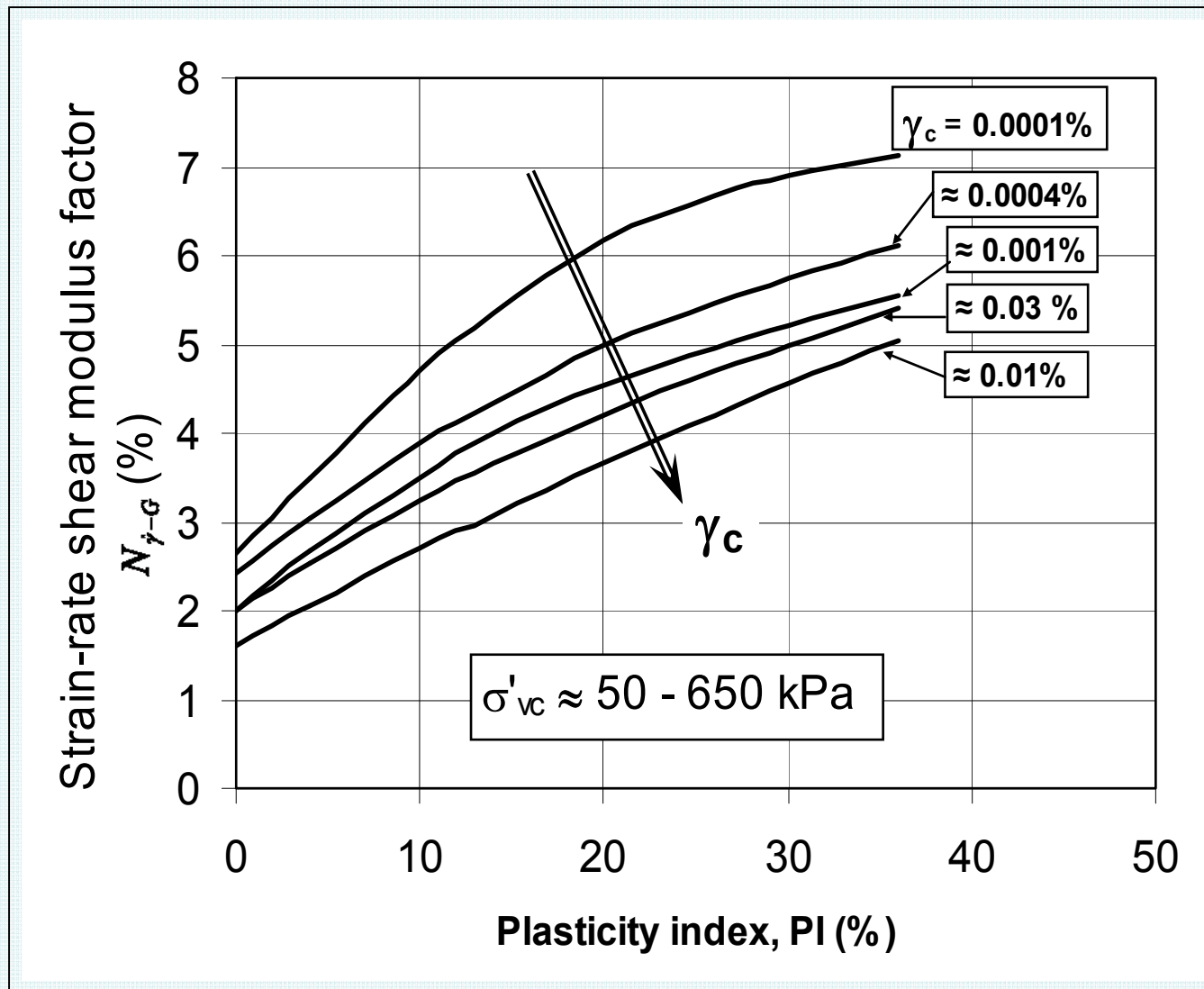


Za PI od 0 do 40,
 $N_{\dot{\gamma}-G}$ ide otprilike
od 2% do 6%.

To znači da ako se za
neki γ_c povećanjem
frekvencije prosječna
brzina smicanja
poveća za 10 puta,
 G_s u pijescima će se
povećati za 2% a u
glinama kojima je
PI=40 za 6%.

Trend faktora utjecaja brzine smicanja sa indeksom plastičnosti, PI za različite nivoe γ_c (pijesci su predstavljeni sa PI=0)

(iz Tabata i Vučetić, 2004 - bazirano na Matešić i Vučetić, 2003; te Vučetić, Tabata, i Matešić, 2003)



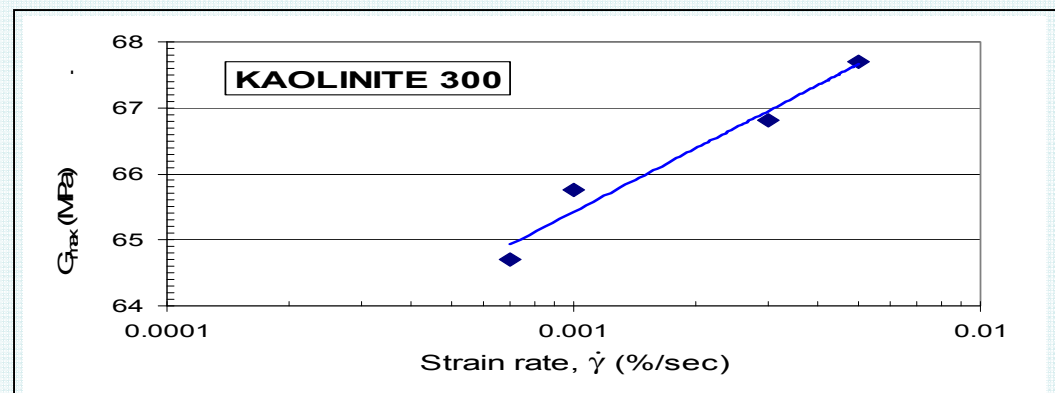
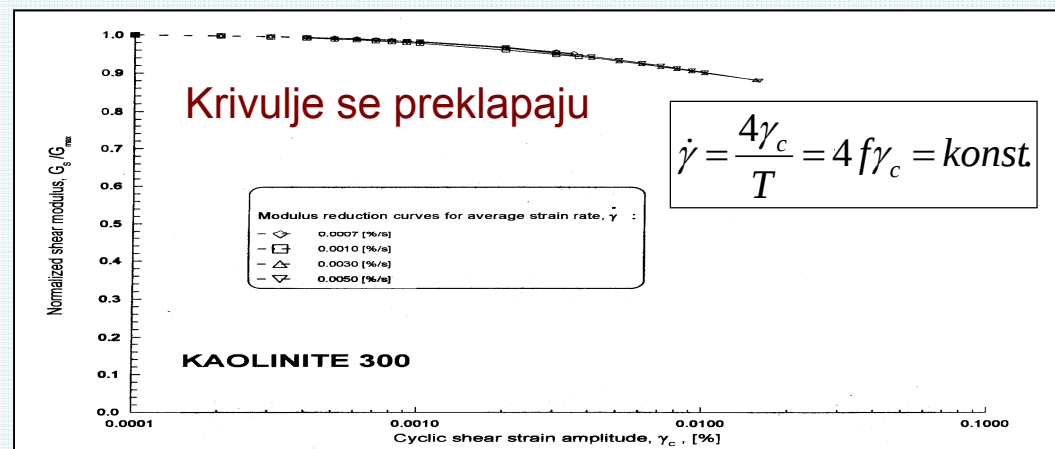
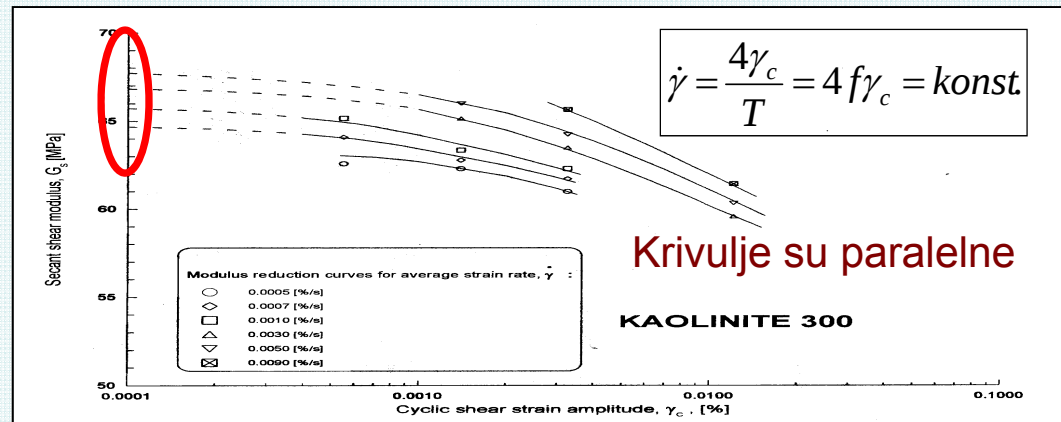
Prosječni odnosi između γ_c , $N_{\dot{\gamma}-G}$ i PI
(Tabata i Vucetic, 2004)

Utjecaj na krivulje smanjenja posmičnog modula

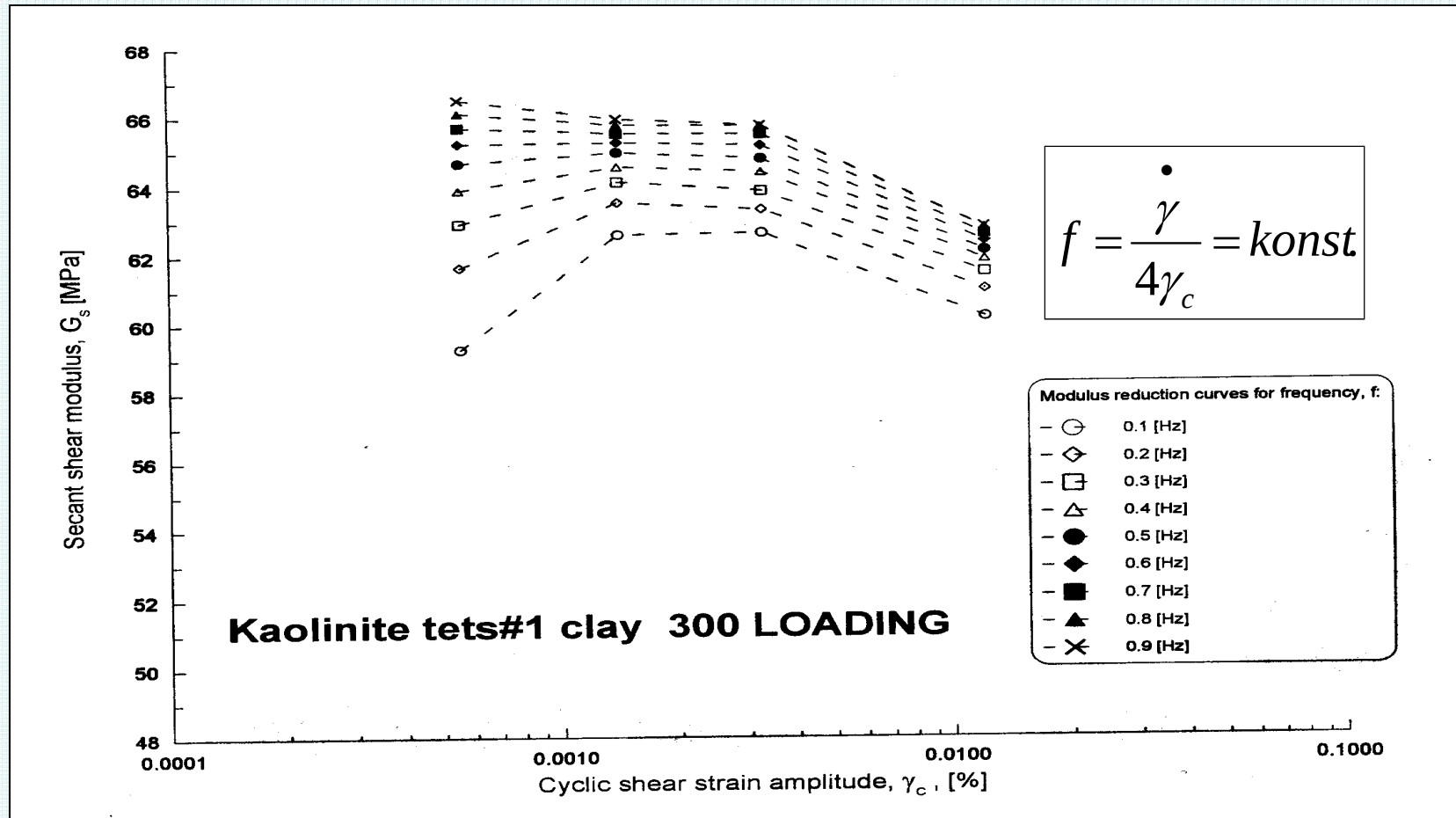
Ako je prosječna brzina cikličkog smicanja konstantna pri raznim γ_c

onda su G_s - $\log \gamma_c$ krivulje manje više paralelne, a $(G_s/G_{\max})$ - $\log \gamma_c$ krivulje se preklapaju (iz Hsu i Vučetić, 2002, i Matešić i Vučetić, 2003)

Utjecaj brzine smicanja na $G_{\max}$ (izvedeno iz Hsu i Vučetić, 2002, i Matešić i Vučetić, 2003)



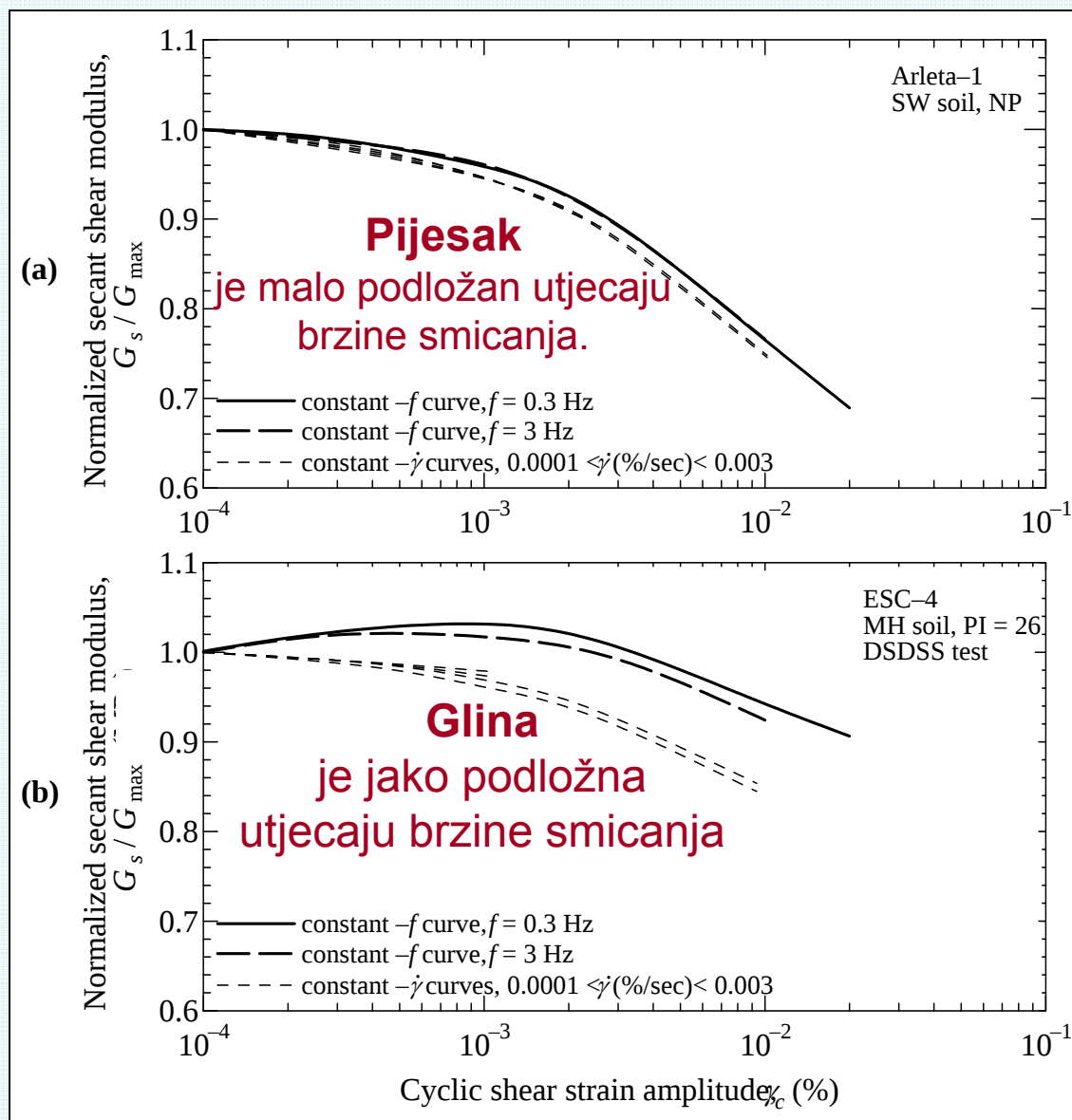
Ako je frekvencija smicanja, f , konstantna pri raznim γ_c ,
što znači da sa povećanjem γ_c prosječna brzina smicanja raste,
 onda G_s - $\log \gamma_c$ krivulje više nisu paralelne, a $(G_s / G_{\max} - \log \gamma_c)$ krivulje se
 ne preklapaju (izvedeno iz Hsu i Vučetić, 2002, i Matešić i Vučetić, 2003)



Ponašanje pijeska i gline pri cikličkom smicanju sa istom frekvencijom

- osobine ($G_s/G_{\max}$ - $\log \gamma_c$) krivulja za pijesak i glinu -

(Tabata i Vučetić, 2004; također analizirali Matešić i Vučetić, 2003)



$$\dot{f} = \frac{\dot{\gamma}}{4\gamma_c} = konst$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4\gamma_c}{T} = 4f\gamma_c$$

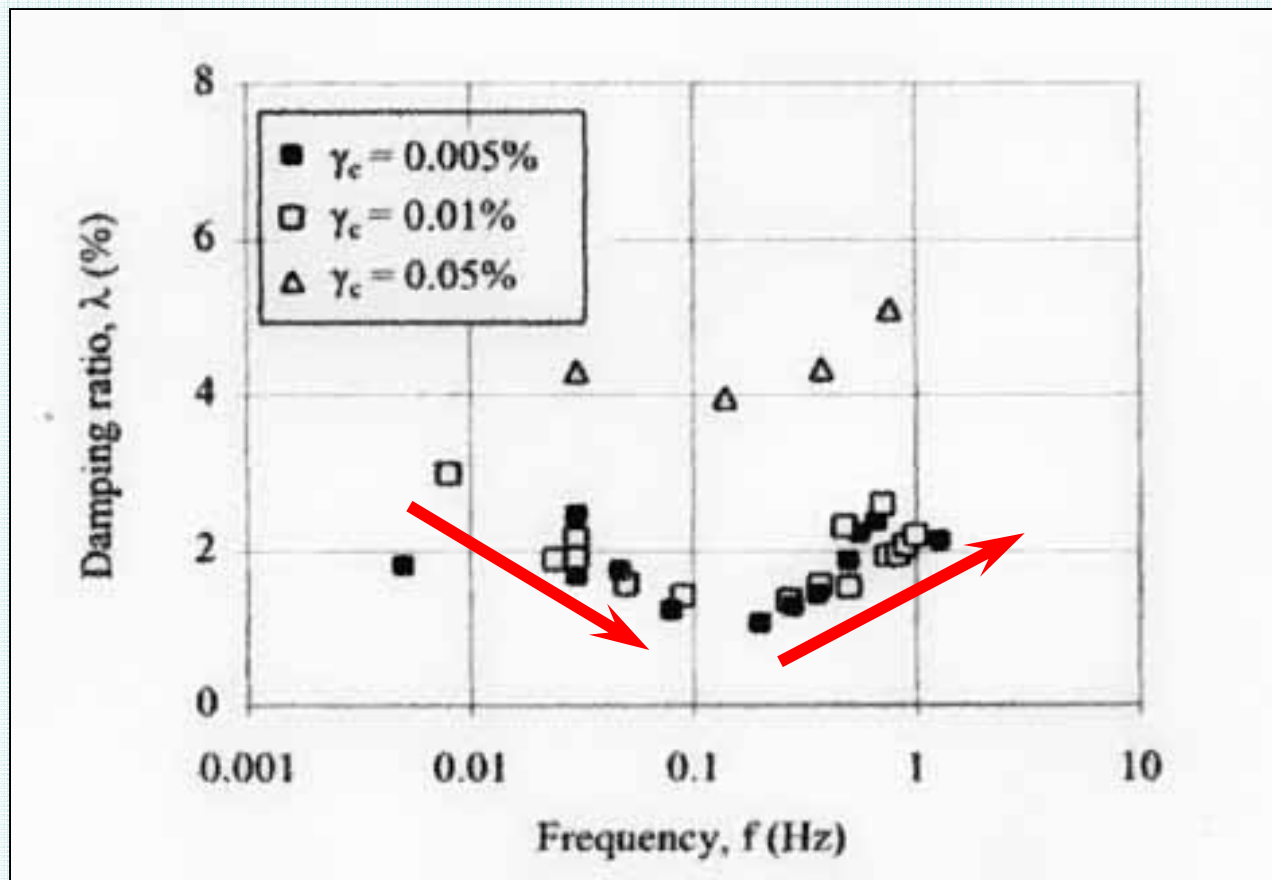
Kad $f=konst.$, sa povećanjem γ_c prosječna brzina smicanja raste. U početku je efekt povećanja brzine smicanja "jači" od efekta nelinearnosti materijala pa $G_s/G_{\max}$ prvo raste sa γ_c i to preko 1.0 !

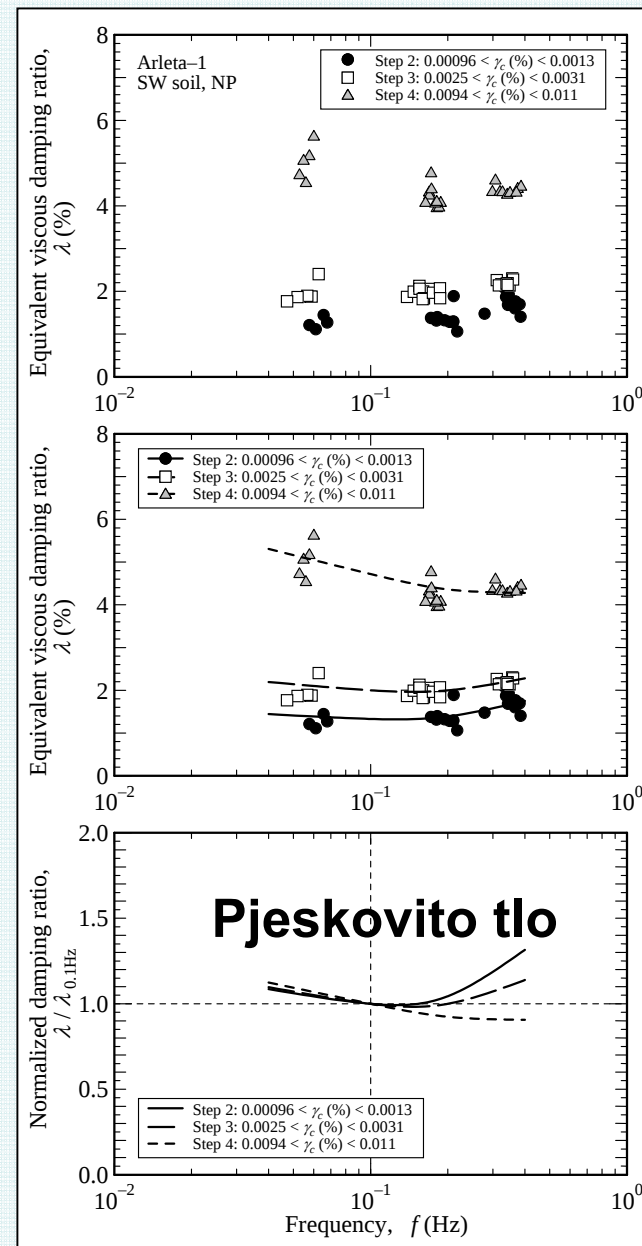
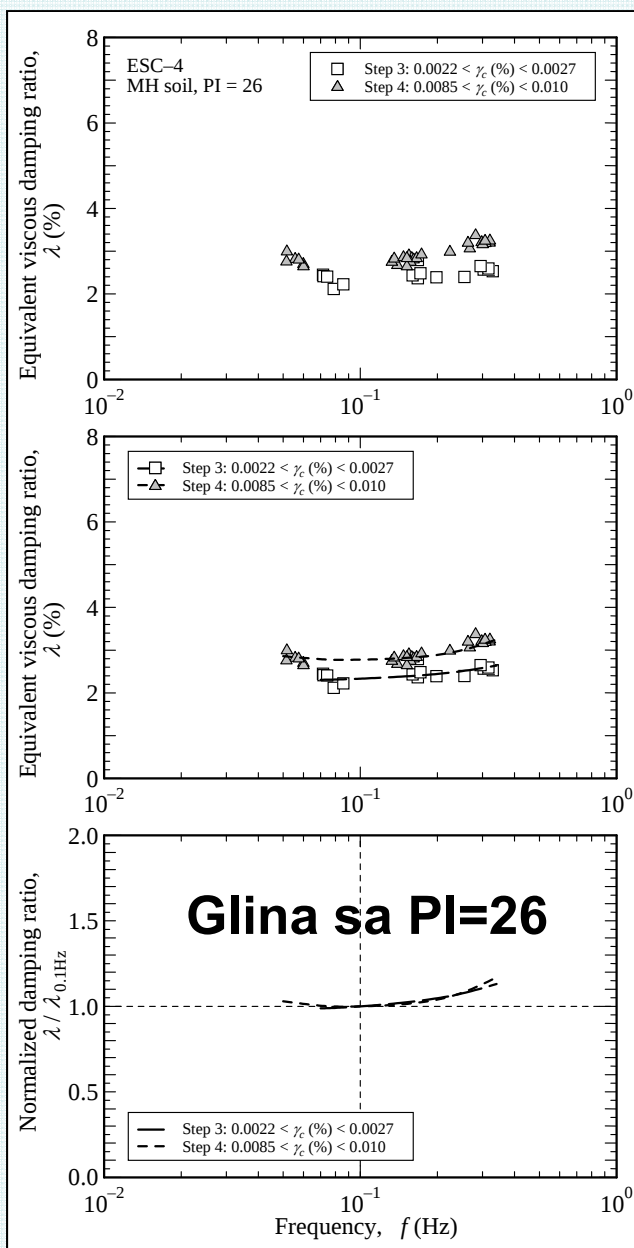
Kasnije, pri većim deformacijama, nelinearnost prevlada utjecaj povećanja brzine smicanja te $G_s/G_{\max}$ padne ispod 1.0 i nastavlja padati sa γ_c .

Utjecaj frekvencije, f , na ekvivalentan kvocijent kritičnog viskoznog prigušenja

Augusta Clay, PI=44 (Lanzo, et al., 1999)

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{\frac{\gamma_c \tau_c}{2}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$



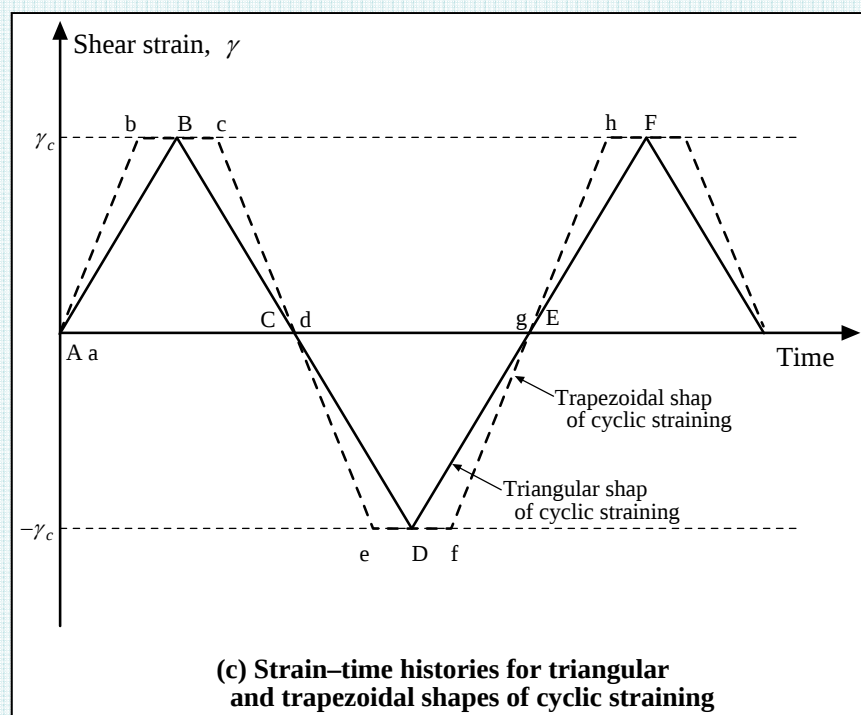


**Pažnja: ovdje je kvocijent prigušenja λ normaliziran sa λ za $f=0.1$ Hz
 (Tabata i Vučetić, 2004)**

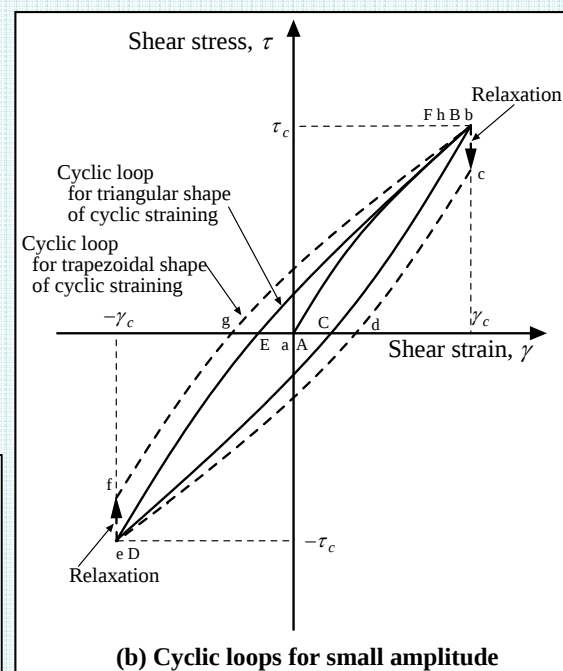
Utjecaj promjene brzine smicanja u jednom ciklusu

- utjecaj oblika smicanja -
(Vucetic et al., 1998b)

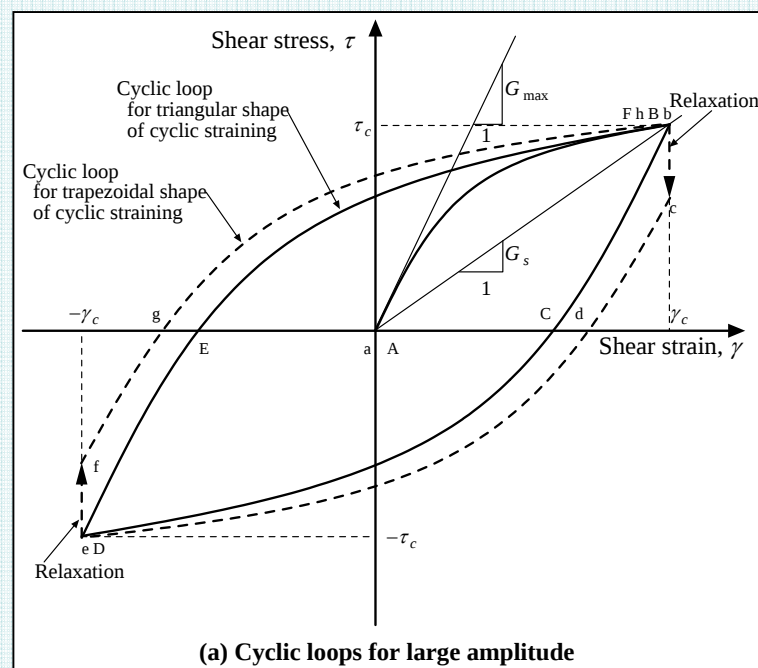
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \text{promjenljiva}$$



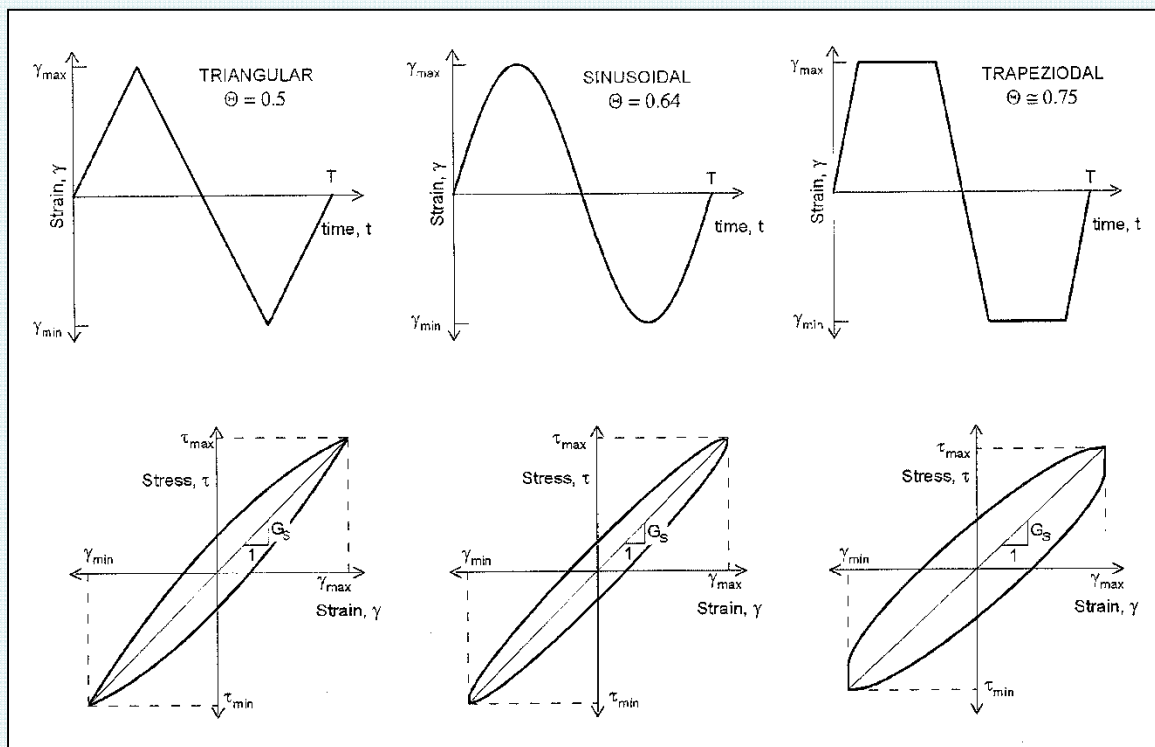
Trokutasta i trapezoidna promjena
relativne deformacije γ
sa vremenom u jednom ciklusu



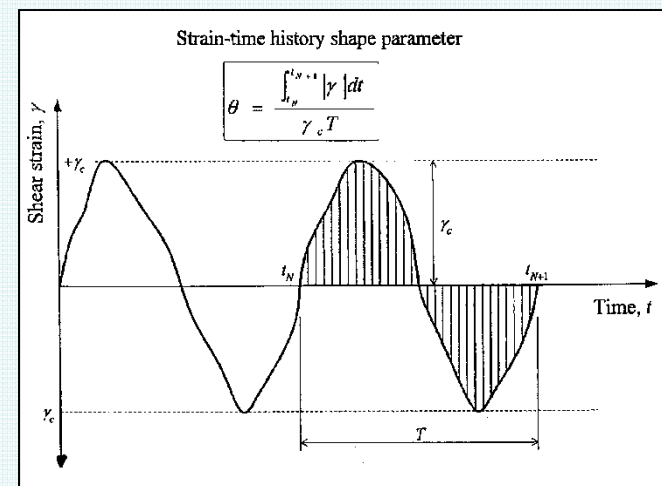
Utjecaj na površinu petlje, te tako na λ , je velik kod malih γ_c , a relativno mali kod velikih γ_c .



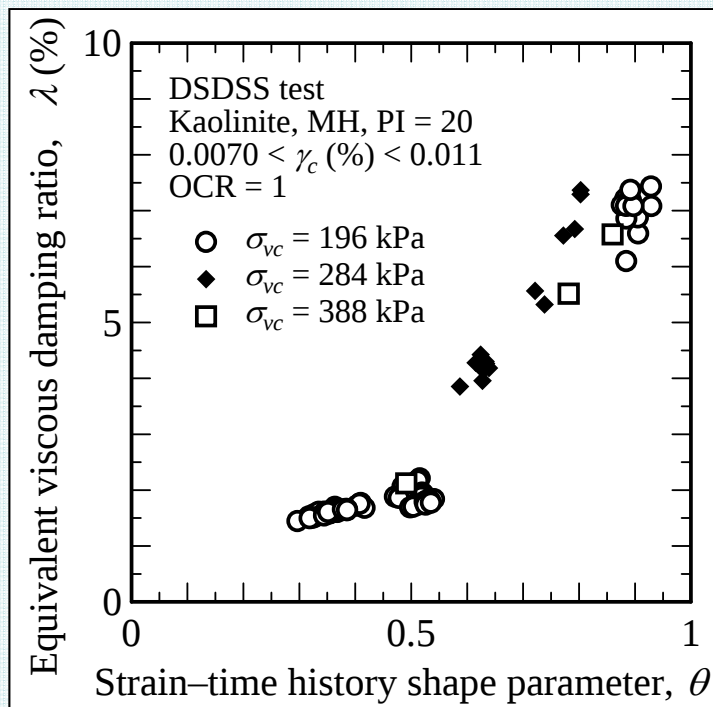
Oblici cikličkih petlji za razne oblike smicanja (Vucetic et al., 1998b)



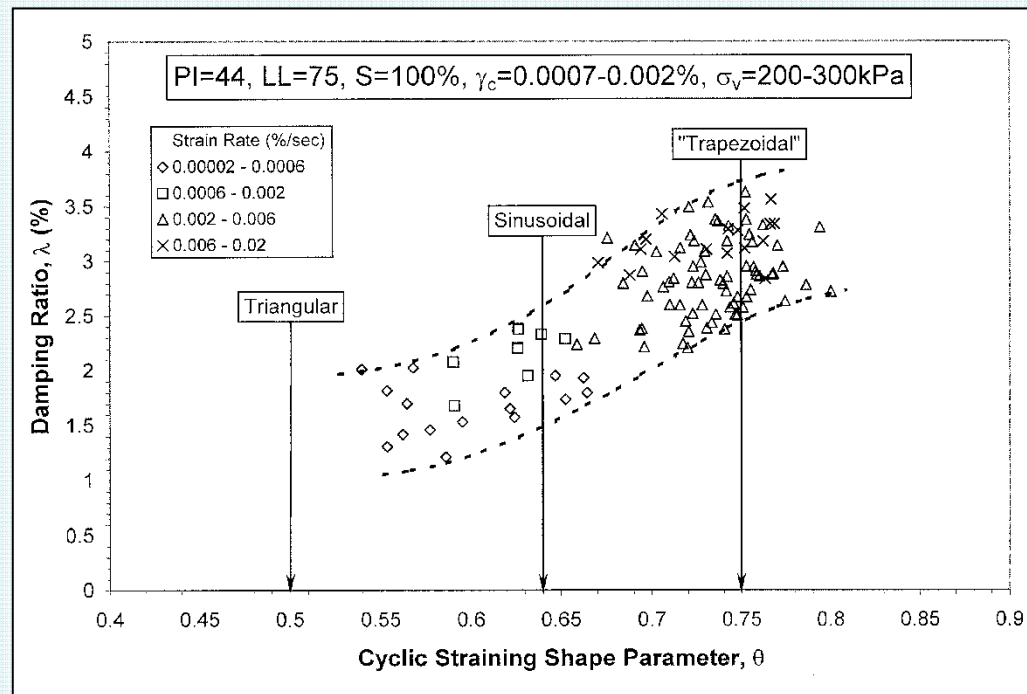
Treba primijetiti da je površina cikličke petlje veća ako je absolutna površina ispod krivulje deformacije sa vremenom veća, tj. ako je tlo duže pod većim deformacijama.



U tom kontekstu je izveden **parametar oblika cikličkog smicanja, θ** , sa kojim se može mjeriti utjecaj oblika smicanja na kvocijent prigušenja, λ (Vučetić et al., 1998b)

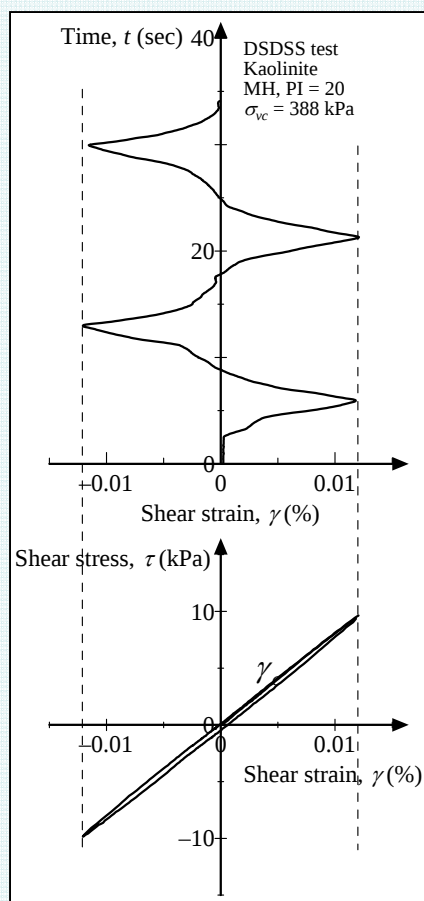


Nisko plastična glina
(Tabata and Vučetić, 2004)

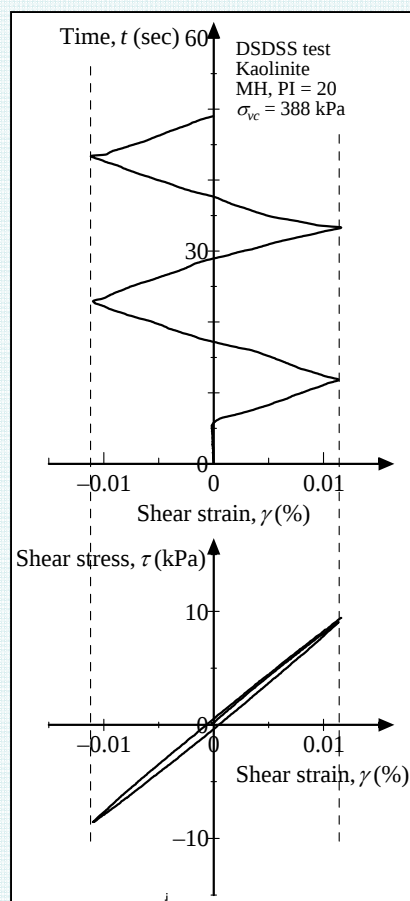


Visoko plastična glina
(Hsu i Vucetic, 2002)

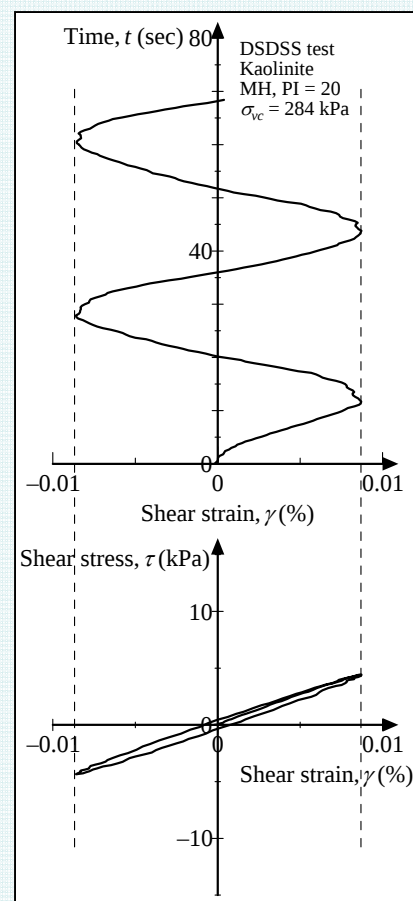
Trend kvocijenta prigušenja, λ , sa parametrom oblika cikličkog smicanja, θ , kod malih deformacija



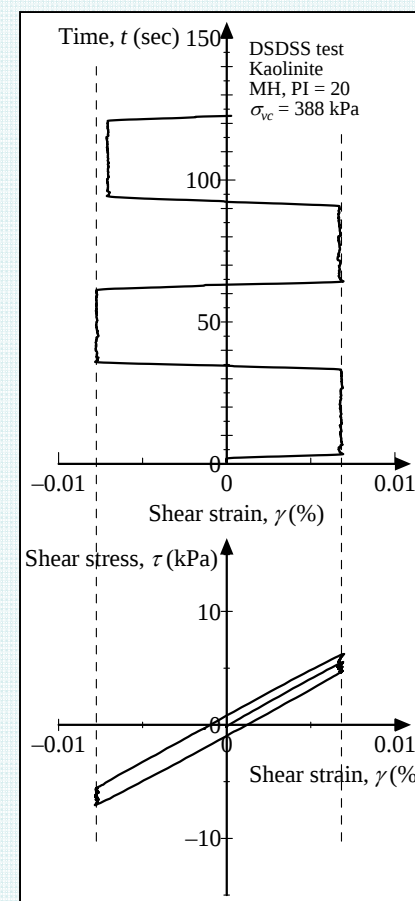
Cyclic straining
between pulse and
triangular



Triangular cyclic
straining



Sinusoidal cyclic
straining



Trapezoidal cyclic
straining

$$\lambda = 1.59 \%, \theta = 0.35$$

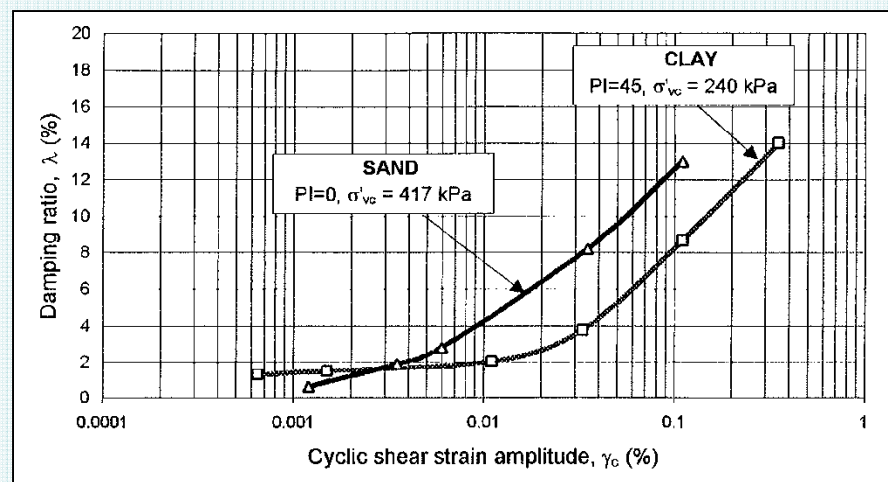
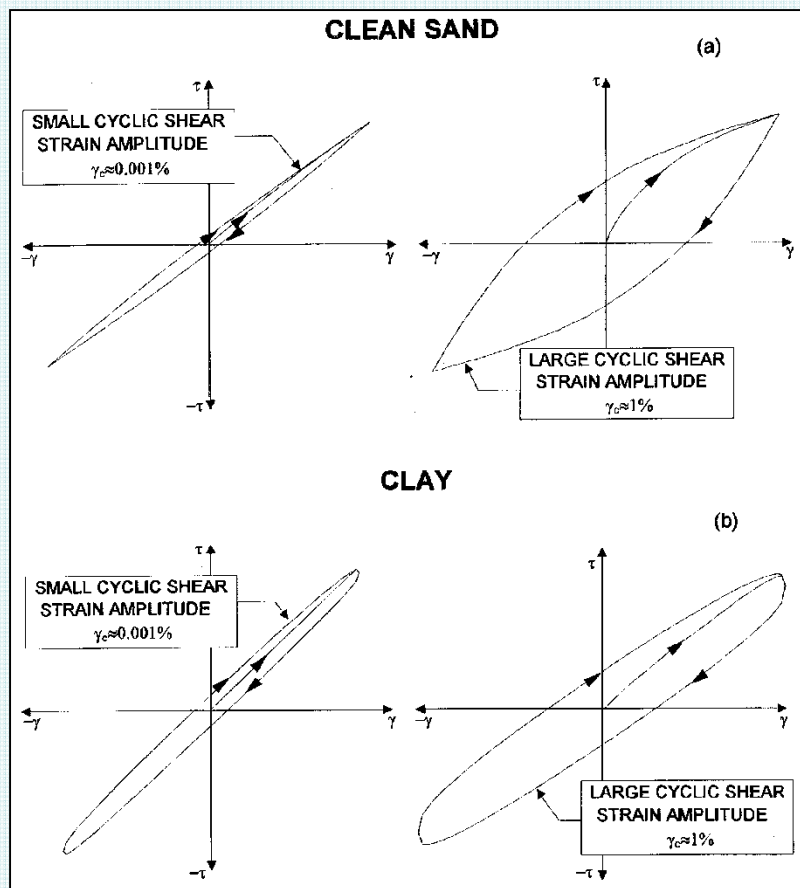
$$\lambda = 2.07 \%, \theta = 0.48$$

$$\lambda = 3.85 \%, \theta = 0.59$$

$$\lambda = 7.08 \%, \theta = 0.93$$

**Oblici cikličkih petlji i kvocijent prigušenja λ
za četiri različita oblika smicanja
dobiveni za kaolinsku glinu pri smicanju sa malim γ_c
(Tabata and Vučetić, 2004)**

Posljedice utjecaja sinusoidalnog oblika smicanja na krivulje povećanja kvocijenta prigušenja, λ , za pijesak i glinu



Skice cikličkih petlji za pijesak i glinu pri malim i velikim amplitudama, γ_c
(Lanzo and Vučetić, 1999)

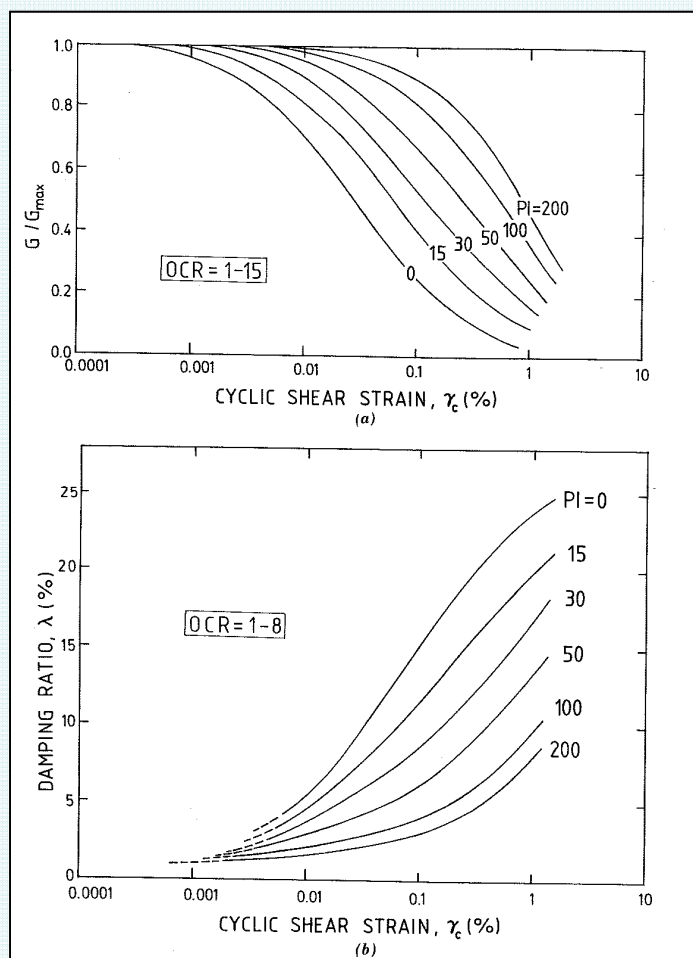
Križanje krivulja povećanja kvocijenta prigušenja, λ , za pijesak i glinu negdje između $\gamma_c = 0.001\%$ i 0.1%

(Lanzo and Vučetić, 1999; Vučetić et al., 1998a; također dobiveno od Stokoe et. al, 1995, 1999)

Neki praktični rezultati istraživanja

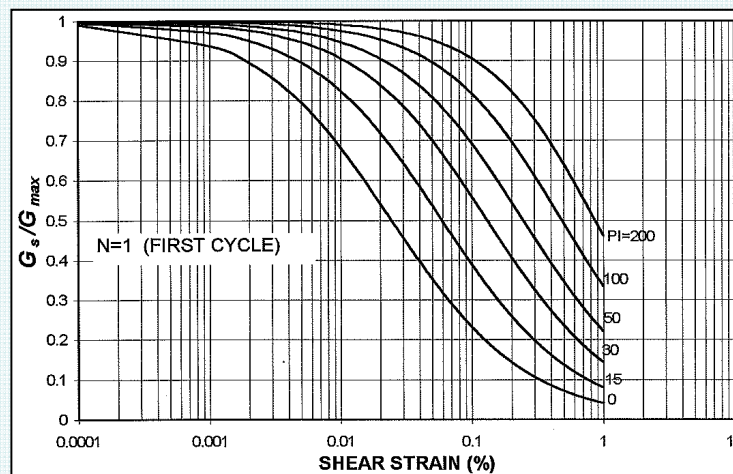
Unaprijeđenje krivulja smanjenja posmičnog modula (G_s/G_{max} - $\log \gamma_c$) i krivulja kvocijenta prigušenja (λ - $\log \gamma_c$)

Starije prosječne krivulje koje se dosta često koriste u praksi

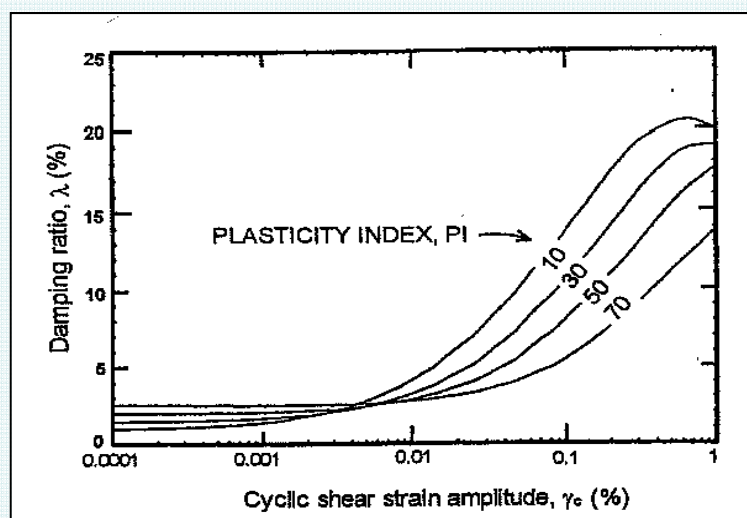


(Vučetić i Dobry, 1991)

Predložene nove prosječne krivulje



Prikazane krivulje su otprilike krivulje konstantne prosječne brzine cikličkog smicanja koje se mogu po potrebi modificirati (Doroudian and Vučetić, 1997)



Prigušenja pri malim γ_c su ispravno prikazana (EPRI report, 1993 – predloženo od Pyke na temelju analize u Vučetić 1986 ; pogledaj Vučetić et al., 1998a)

Zaključak:

- **Brzina smicanja pri monotonom smicanju,**
- **prosječna brzina smicanja i frekvencija pri cikličkom smicanju, i**
- **promjena brzine smicanja za vrijeme monotonog i cikličkog smicanja**

imaju zaista velike i zanimljive utjecaje na dinamičko i cikličko ponašanje tla, te tako i na parametre za analizu odziva terena na sile potresa.

Hvala na pažnji !

Molim, ima li pitanja ??