

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

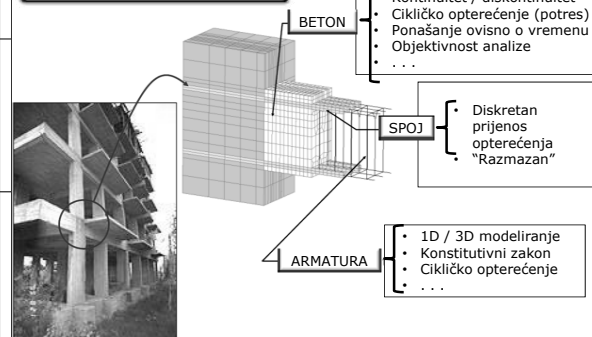
-7-

KOMPJUTERSKO MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA

LINEARNA I NELINEARNA ANALIZA,
OSNOVE MEHANIKE LOMA,
MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA

Model detalja konstrukcije



UVOD

Proračun AB konstrukcije (elemenata) – što vjernije fizikalnoj stvarnosti

- Veća sigurnost
- Veća racionalnost

Razvoj inženjerskih proračuna:

1. **Predkompjutorsko razdoblje**
 - Jednostavni modeli s homogenim, linearnim materijalom
2. **Početak kompjutorskog razdoblja**
 - Složeniji modeli, ali još uvijek linearno promatranje materijala
3. **Razdoblje graničnih stanja**
 - Vrlo složeni modeli, globalno ponašanje konstrukcije: linearno; kod dimenzioniranja: nelinearno ponašanje materijala
4. **Suvremeni složeni proračuni**
 - Nelinearno ponašanje konstrukcije: geometrija i materijal

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELIRANJE KONSTRUKCIJA

Zadatak inženjera – projektanta:

Izbor optimalnog proračunskog modela

- Što točnije opisati stvarno ponašanje konstrukcije pod propisanim opterećenjem
- Uz optimalnu složenost modela (mogućnosti proračuna + isplativost)

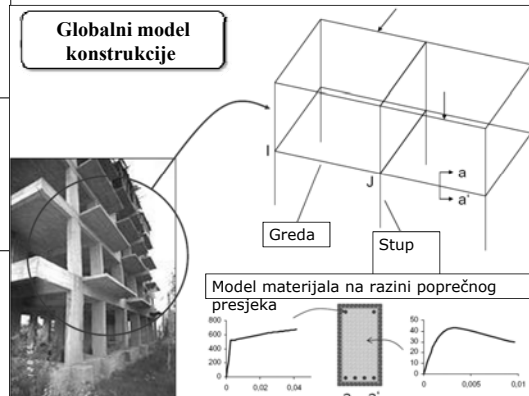
Potrebno:

- Poznavati različite metode proračuna
- Upoznati mogućnosti pojedinog softverskog paketa
- Predvidjeti moguće probleme prilikom modeliranja - odrediti prioritete
- Kontrola rezultata !!!!

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA

Globalni model konstrukcije



PRORAČUN KONSTRUKCIJE PO TEORIJI 1. REDA – LINEARNI PRORAČUN

PRETPOSTAVKE:

1. **Pomaci konstrukcije dovoljno su mali**
 - Uvjeti ravnoteže definirani na nedeformiranoj konstrukciji
 - Izvedba bez početnih deformacija i naprezanja
2. **Linearno-elastično ponašanje materijala**
 - Hookov zakon
 - Homogen, izotropan, linearno elastičan materijal
3. **Poprečni presjeci elemenata ostaju u ravni (okomito na deformiranu težišnu os) i nakon nanošenja opterećenja**
 - Štapni nosači: $b, h \leq 0, 2L$

VRIJEDI ZA VEĆINU KONSTRUKCIJA!!!

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

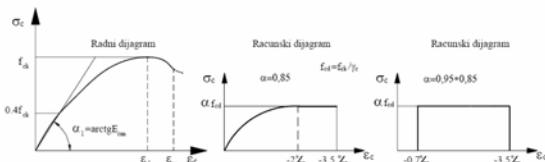
PRORAČUN KONSTRUKCIJE PO TEORIJI 2. REDA – NELINEARNI PRORAČUN

1. Pomaci konstrukcije NISU mali – GEOMETRIJSKA NELINEARNOST

- Uvjeti ravnoteže na deformiranoj konstrukciji

2. Ponašanje materijala NIJE linearno-elastično – NELINEARNO PONAŠANJE MATERIJALA

- Potrebno ustanoviti ponašanje materijala – eksperimentima - konstitutivni zakon



MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA

- Betonske konstrukcije – pune defekata, mikropukotina i oštećenja
 - I prije nanošenja opterećenja: posljedica temperaturnih djelovanja, skupljanja itd.
- Defekti u betonu mogu višestruko smanjiti čvrstoću
 - RAZLOG: Koncentracija naprezanja u okolini defekata – i s time povezano oslobađanje energije prilikom porasta oštećenja (širenju pukotina)
- Kad veličina pukotine prijeđe kritičnu vrijednost, za nosivost konstrukcije postane mjerodavna energija sloma materijala, a ne njegova čvrstoća
 - Ako materijal nije u stanju preuzeti energiju oslobođenu prilikom širenja pukotine – dolazi do KRTOG LOMA

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

STVARNO (NELINEARNO) PONAŠANJE BETONA

- Nelinearni višeosni odnos naprezanja–deformacija
 - Ovisno o statičkom/dinamičkom opterećenju
- Otvaranje pukotina pri vlačnom naprezanju
- Drobljenje betona pri visokom tlačnom naprezanju
- Plastično popuštanje armature
- Prionjivost betona i armature
- Puzanje i skupljanje betona – ovisno o temperaturi i vremenu



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

PONAŠANJE MATERIJALA

ELASTO- PLASTIČNO

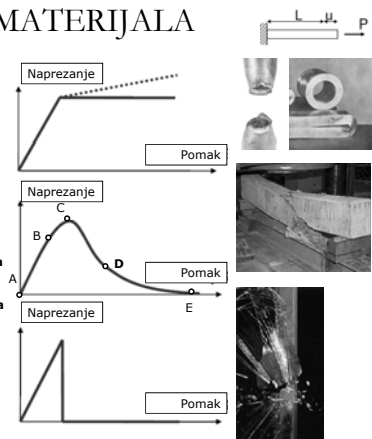
- Čelik, aluminij
- Velike deformacije prije sloma

KVAZI KRTO

- **BETON**
 - A-B= gotovo linearno ponašanje
 - B-C= nelinearno ponašanje, pojava mikropukotina, područje očvršćenja materijala
 - C-D-E= lokalizacija oštećenja, otvaranje pukotina, područje omekšavanja materijala
- Odgovor konstrukcije ovisi o veličini (male konstrukcije – elasto-plastično ponašanje)

KRTO

- Staklo, željezo
- Slom bez prethodnih deformacija



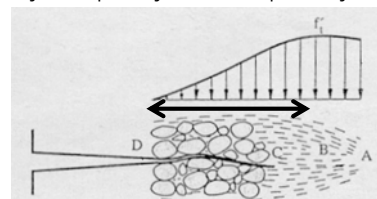
KADA U PRORAČUNIMA AB KONSTRUKCIJA TEŽITI SIMULACIJI STVARNOG PONAŠANJA BETONA?

- Granično stanje nosivosti, duktilnost, preraspodjela sila, itd.
- Bolje razumijevanje ponašanja konstrukcija i detalja
 - prilikom eksperimenta ne vidimo što se događa unutar presjeka
- Pravila/preporuke u projektiranju - razjašnjena
- Optimizacija
 - Predgotovljeni elementi – masovna proizvodnja
- Izvanredna opterećenja
- Trajnost konstrukcije
- Sanacije i ojačanja konstrukcija
- Raspucavanje betona – stabilno ili nestabilno stanje
- Utjecaj veličine (povećanjem geometrije – niža čvrstoća)
- Podrška ili potpuna zamjena za eksperiment

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Zona raspucavanja

- Zona raspucavanja – područje u kojem se materijal odupire raspucavanje
 - Naprezanje u otvorenoj pukotini = 0
 - Naprezanje u mikropukotinama = max
 - Prijelazno područje = zona raspucavanja

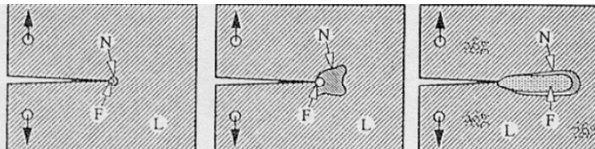


TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

PONAŠANJE MATERIJALA

- Zona rascupavanja (Fracture progress zone) = područje u kojem se troši deformacijska energija koje se oslobađa pri rastu pukotine

F = zona rascupavanja
L = linearno područje
N = nelinearno područje



LINEARNO ELASTIČNO

- Zona rascupavanja beskonačno mala
- Staklo (10^{-6} mm)

NELINEARNO PLASTIČNO

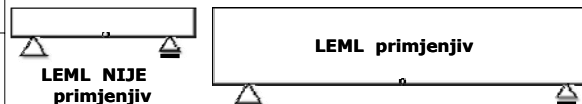
- Zona rascupavanja << nelinearno područje
- Čelik

NELINEARNO KVAZI KRTO

- Zona rascupavanja pokriva gotovo cijelo nelinearno područje
- Beton (200-500 mm)

BETON

- KVAZI KRTO MATERIJAL



- Linearna elastična mehanika loma (LEML) je primjenjiva samo ako je veličina **zone rascupavanja** puno manja od karakterističnih dimenzija elastičnog tijela uključujući i duljinu pukotina
- Za kod betonskih konstrukcija samo za ekstremno velike dimenzije konstrukcije

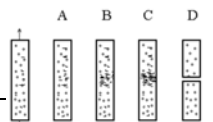
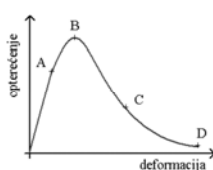
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

BETON

- KVAZI KRTO MATERIJAL

- 0 – A: linearno elastično
 - 70-80% vlačne čvrstoće
- A – B: područje očvršćenja materijala - nelinearno
 - Razvoj mikro pukotina u području gdje je beton najslabiji
- B: dostizanje nosivosti
- B-C-D: područje omekšenja materijala
 - Formiranje otvorene pukotine

TIPIČAN RADNI DIJAGRAM BETONA PRI VLAČNOM NAPREZANJU



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MEHANIKA LOMA KVAZIKRTIH MATERIJALA (MLKM)

- Linearna mehanika loma – 1920-ih, Griffith
- MLKM – počela se razvijati 1980-ih
- Mehaniku loma potrebno uključiti u norme i propise za projektiranje AB konstrukcija
 - Izjednačavanje sigurnosti konstrukcije - veća pouzdanost i ekonomičnost
 - Argument: Učinak veličine = utjecaj veličine konstrukcije na njenu nosivost i duktilnost

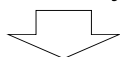
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

BETON

- KVAZI KRTO MATERIJAL

Za materijale koje karakterizira slijedeći slijed ponašanja:

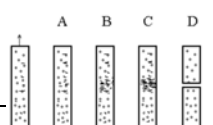
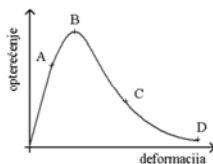
1. područje očvršćenja materijala
2. dostizanje nosivosti
3. područje omekšenja materijala



KVAZI KRTO MATERIJAL

- Zona rascupavanja je konstantna za beton=200-500 mm

TIPIČAN RADNI DIJAGRAM BETONA PRI VLAČNOM NAPREZANJU



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

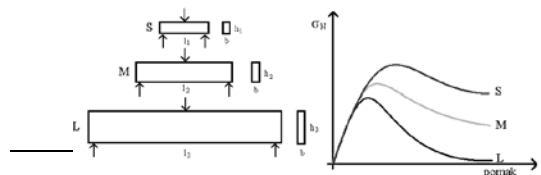
UČINAK VELIČINE

- 3 grede konstatne širine (b), različitih duljina l i visina h, ali konstatnog l/h omjera - opterećene na savijanje
- Grede većeg raspona i visine imaju manju duktilnost i manju nominalnu nosivost:

$$\sigma = F_u / b \cdot h$$

F_u = sila sloma

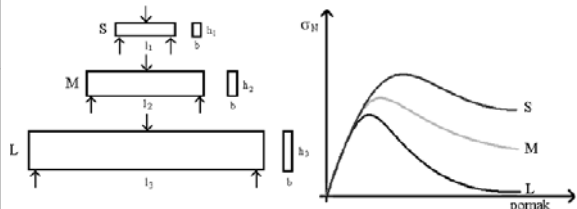
$b \cdot h$ = površina poprečnog presjeka



UČINAK VELIČINE

□ Pri razvoju pukotine

- Kod velike grede oslobađa se relativno velika deformacijska energija koju beton ne može preuzeti – nestabilan razvoj pukotine – KRTI LOM
- Kod male grede – beton može prihvatiti oslobođenu deformacijsku energiju – stabilan razvoj pukotine – DUKTILNI SLOM



UČINAK VELIČINE

□ OBJAŠNJENJE

1. DETERMINISTIČKI ASPEKT

- Nominalna nosivost ovisi o deformacijskoj energiji koja se oslobađa prilikom pojave pukotine

a) NESTABILNA PUKOTINA: pojava pukotine pri maksimalnom opterećenju

- Učinak veličine zanemariv

□ Betonske konstrukcije

- Zona raspucavanja konstantna
- Mala brzina oslobađanja deformacijske energije

STABILAN RAZVOJ PUKOTINE - NLML

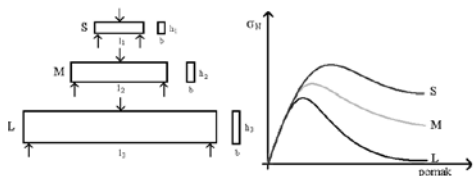
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UČINAK VELIČINE

□ OBJAŠNJENJE

1. STATISTIČKI ASPEKT

- Kod veće konstrukcije je veća vjerojatnost za postojanje defekata
 - Veća konstrukcija ima manju nominalnu nosivost



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Energija sloma

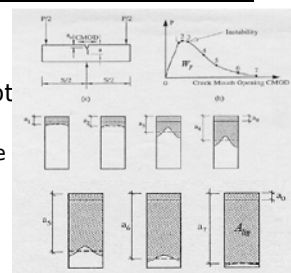
$$G_F = W_F / A_{lig}$$

- Ukupan rad koji se utroši na širenju pukot

- W_F – utrošeni rad
- A_{lig} – površina pukotine pri radu W_F

- Za beton
 $G_F = 0.075 \text{ N/mm}^2$

- 10x veća od energije krtoq sloma



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UČINAK VELIČINE

□ OBJAŠNJENJE

1. DETERMINISTIČKI ASPEKT

- Nominalna nosivost ovisi o deformacijskoj energiji koja se oslobađa prilikom pojave pukotine

a) STABILNA PUKOTINA: prije dostizanja kritične duljine pukotine uz porast pukotine moguć porast opterećenja

- Učinak veličine je značajan

- Primjeri:

- Proboj stupa i ploče
- Slom na posmik kod vitkih greda
- Čupanje sidra iz betonskog bloka

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

METODE MODELIRANJA PUKOTINA U AB KONSTRUKCIJAMA

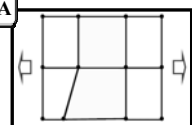
KONCEPT DISKRETNH PUKOTINA

- Strogi diskontinuitet
- Bolje aproksimira stvarno stanje
- Izuzetno zahtjevno i složeno modeliranje (pukotinom nastaju 2 nove slobodne površine na kojima je potrebno naknadno definirati rubne uvjete)



KONCEPT "RAZMAZANIH" PUKOTINA

- Slabi diskontinuitet
- Oštećenja su distribuirana u jednoj "traci" konačnih elemenata
- Objektivnost rezultata proračuna ovisi o veličini konačnih elemenata

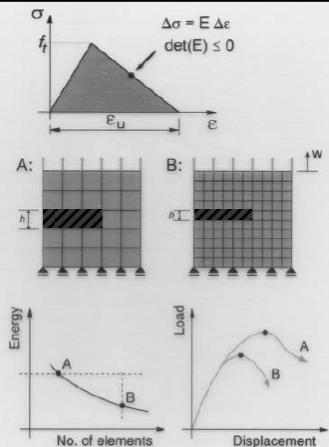


TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

CRACK BAND METODA

- Osigurava objektivnost rezultata kod korištenja koncepta razmazanih pukotina
- Pukotine lokalizirane u 1 traci konačnih elemenata prosječne širine H
- U tom području se i oslobađa deformacijska energija konstrukcije
- Potrebno je osigurati konstantnu disipaciju energije – neovisna o veličini konačnog elementa
- Energija sloma = površina ispod radnog dijagrama A_f x prosječna širina konačnog elementa H

$$G = A_f \cdot H = konst$$



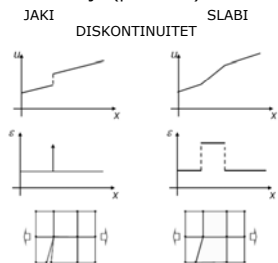
MODELIRANJE KVAZIKRTIH MATERIJALA

KLASIFIKACIJA

- Prema kinematičkom opisu oštećenja (pukotina)

- Kontinuum
- **Diskontinuum**

- Jaki diskontinuitet
- **Slabi diskontinuitet**



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

CRACK BAND METODA

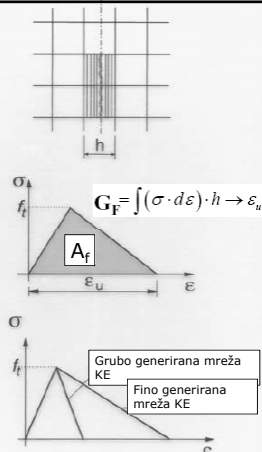
- Radni dijagram betona veže se za veličinu konačnog elementa
- Energija sloma betona:

$$G_F = A_f \cdot H = konst.$$

- Tlačna energija sloma betona:

$$G_c = A_{fc} \cdot H = konst.$$

- Pretpostavka: $G_c = 100 \times G_F$
- Samo grana omekšanja radnog dijagrama mora biti prilagođena (točke C-E)



MODELIRANJE KVAZIKRTIH MATERIJALA

KLASIFIKACIJA

- Prema konstitutivnom zakonu (radni dijagram)

- Kontinuum

- Teorija elastičnosti
- **Mehanika loma**
 - Linearna
 - **Ne-linearna**
 - Koncept diskretnih pukotina
 - **Koncept razmazanih pukotina**

- Teorija plastičnosti
- Mehanika oštećenja
- Model "razmazanih pukotina"
- **Mikro-ravninski model**

- Diskontinuum

- Kohezivni model pukotina, naprezanje – pomaci: diskretni pristup

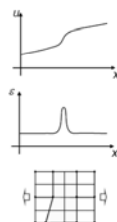
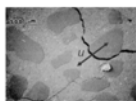
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELIRANJE KVAZIKRTIH MATERIJALA

KLASIFIKACIJA

- Prema kinematičkom opisu oštećenja (pukotina)

- Kontinuum – pukotina distribuirana u nekoliko "traka" elemenata



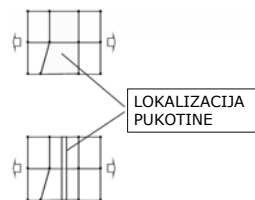
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELIRANJE KVAZIKRTIH MATERIJALA

KLASIFIKACIJA

- Prema metoda diskretizacije konačnih elemenata

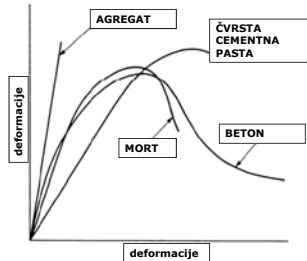
- **Standardni elementi** (oštećenja raspoređena unutar cijelog KE)
- Nestandardni elementi (Oštećenja lokalizirana izvan KE)



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELI PONAŠANJA BETONA

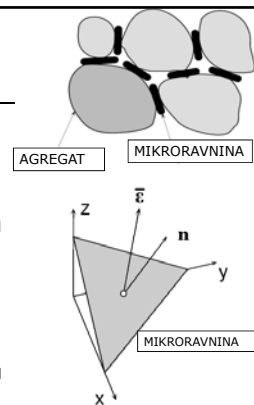
- Beton – nije homogen, izotropan, linearno-elastičan
 - Agregat, čvrsta cementna pasta
 - Ponašanje pod tlakom
 - Ponašanje pod vlakom



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

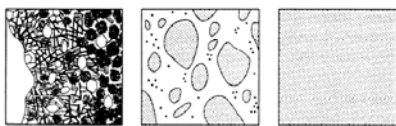
- FIZIKALNO MOTRIŠTE:
 - Mikroravnine = smjerovi mogućih oštećenja ili osjetljiva mjesta u betonu (kontaktna ravnina između zrna agregata i cementne paste)
- Svaka mikroravnina definirana je jediničnim vektorom normale na vanjsku plohu



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELI PONAŠANJA BETONA

- 3 razine pristupa modeliranju i promatranju betona
 - Mikro razina
 - Mezo razina
 - **Makro razina**

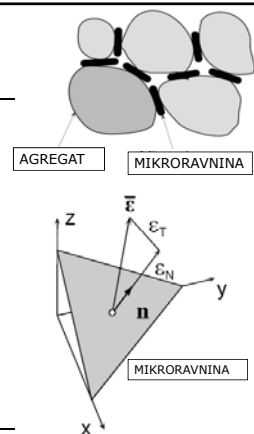


- Reprezentativni volumen elemenata
 - Dovoljno mali da se izbjegnu greške kod velikih aproksimacije gradijenata
 - Dovoljno veliki da predstavlja reprezentativni uzorak materijala

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

- Mikroravninski vektor deformacije rastavlja se na komponente:
 - Normalna
 - Volumenska
 - Devijatorska
 - Posmična
 - 2 međusobne okomite posmične komponente



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELI PONAŠANJA BETONA

FENOMENOLOŠKI MODELI

Što bolje opisati makroskopsko ponašanje betona, a da ne bude previše matematički složen

- Dvoparametarski model (Chen, Kojic, Chatterman)
- Trioparametarski model (Reiman, Argyris)
- Četveroparametarski model (Ottosen)
- Peteroparametarski model (William)
- Hipoelastični model (Bangash)
- Model posmičnog modula (Phillips i dr.)

STRUKTURNI MODELI

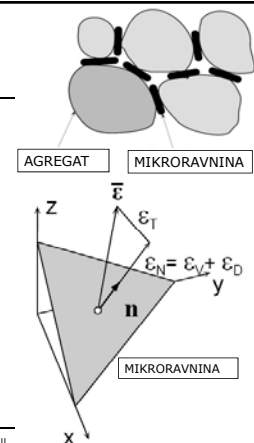
Opisana temeljna svojstva materijala na razini čestica (mikroskopski)
Presloženi za praksu, koriste se u istraživačkim radovima

- Mikroravninski modeli (Bažant i dr.)
- Modeli temeljeni na diskretnim elementima

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

- Mikroravninski vektor deformacije rastavlja se na komponente:
 - Normalna
 - Volumenska
 - Devijatorska
 - Posmična
 - 2 međusobne okomite posmične komponente



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

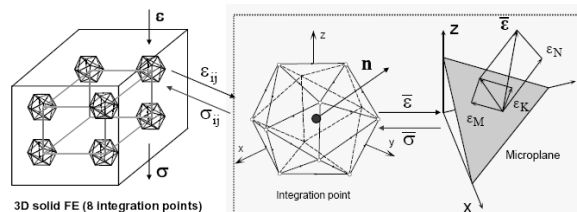
- Na svakoj mikroravnini je unaprijed definiran jednoosni zakon ponašanja materijala za sve 3 komponente mikroravninske deformacije
- Kinematički uvjeti (V+D+T)



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

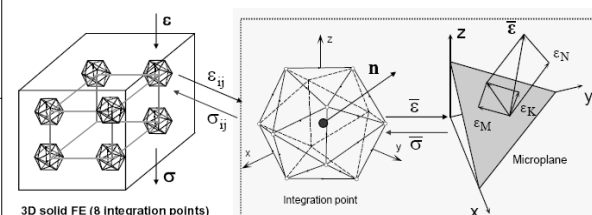
- Kada su poznata naprezanja u mikro-ravnini – računa se **makroskopski tenzor naprezanja**
 - Izračuna se iz uvjeta jednakosti virtualnog rada unutar kugle jediničnog radijusa i virtualnog rada po površini te kugle



Pretpostavka: male deformacije i mali pomaci

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

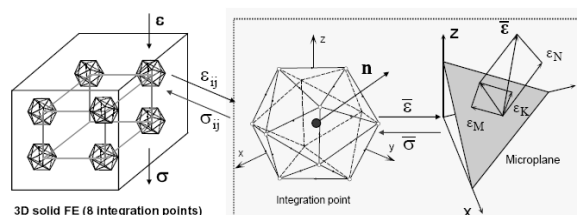
- 1 trodimenzionalni konačni element podijeljen je na 8 integracijskih točaka**
- Svaka integracijska točka ima nekoliko mikro-ravnina**
 - Minimalno 10, optimalno 21 mikro-ravnina za 1 integracijsku točku



Pretpostavka: male deformacije i mali pomaci

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

- Iz makroskopskog tenzora naprezanja
 - Izračuna se **makroskopski tenzor deformacija naprezanja** korištenjem kinematskih uvjeta (definirani odnos naprezanje – deformacije)



Pretpostavka: male deformacije i mali pomaci

MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

- Iz poznatih komponenti deformacija na mikroravnini moguće je izračunati komponente naprezanja u mikroravnini



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

IMPLEMENTACIJA MODELA

- MASA + (Microplane Analysis Program)
- 3D nelinearni proračun kvazikrhhkih materijala (betonskih, AB, PB ...)
- Temelji se na metodi konačnih elemenata
- Upotrijebljeni klasični konačni elementi (solid, bar, ...) formirani u okviru mehanike lokalnog kontinuuma
- Oštećenja (pukotine) tretirana u okviru koncepta "razmazanih pukotina" – pri čemu je objektivnost rezultata postignuta "crack band" metoda
- Konstitutivni zakon ponašanja materijala: primjenjen mikroravninski model betona (microplane model)

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

-8-

**NUMERIČKO MODELIRANJE
DJELOVANJA KOROZIJE U
ARMIRANOBETONSKIM
KONSTRUKCIJAMA**