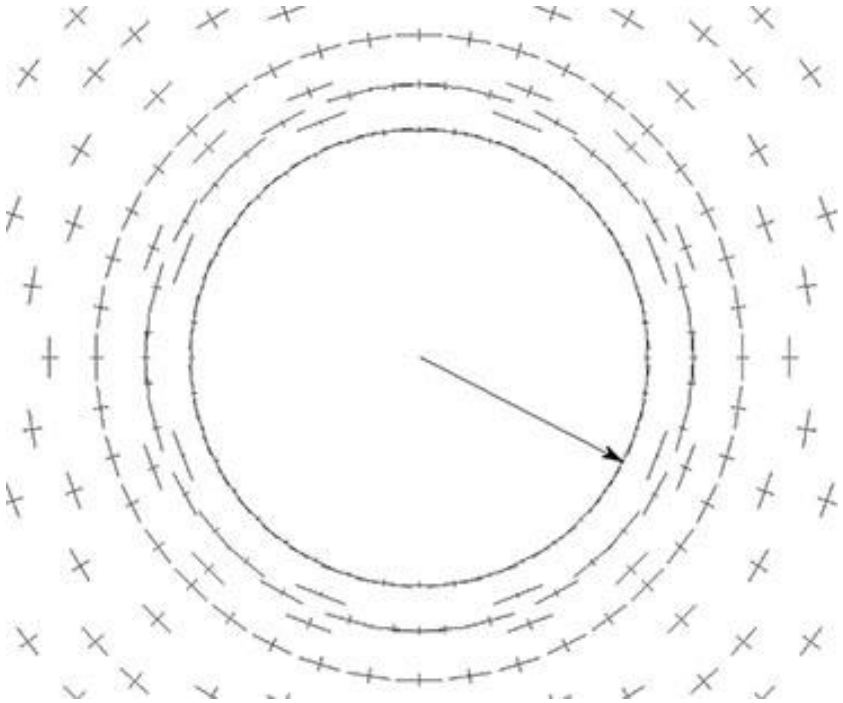
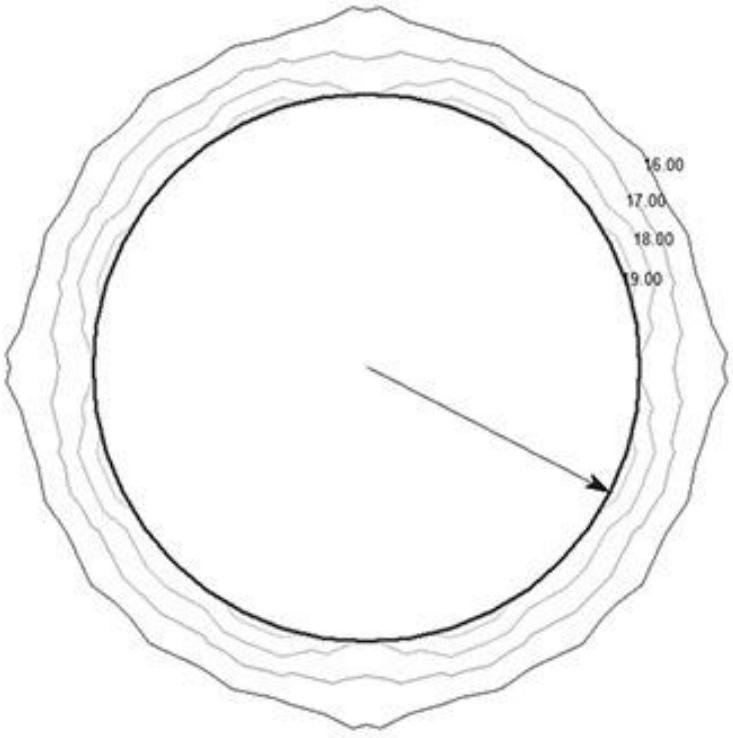
Анализа стабилности подземне просторије

Земљина кора је напрегнута и може се описати као динамичко поље напона. Део напона је генерисан током настајања планете Земље, а део се генерише услед гравитационе интеракције, доминантно земље и месеца, али и других планета. Напрегнутост земљине коре се дефинише са три компоненте напона: Вертикални напони (σ_v); Максимални хоризонтални напони (σ_H); Минимални хоризонтални напони (σ_h). Ово стање се описује као почетно стање напона, непоремећено стање напона или као девичанско стање напона. Израдом подземне просторије у таквој стени (стенском масиву) формира се другачија напонска слика и такво стање се описује као индуковано стање напона. Највећи број подземних конструкција се може свести на модел равног стања напона код кога су сви попречни пресеци, управни на осу издужене просторије, истоветни. У овом случају напонско стање се описује са: Максималним главним напонима (σ_1); Минималним главним напонима (σ_3), који се налазе у равни попречног пресека и Напони управни на раван попречног пресека (σ_2).

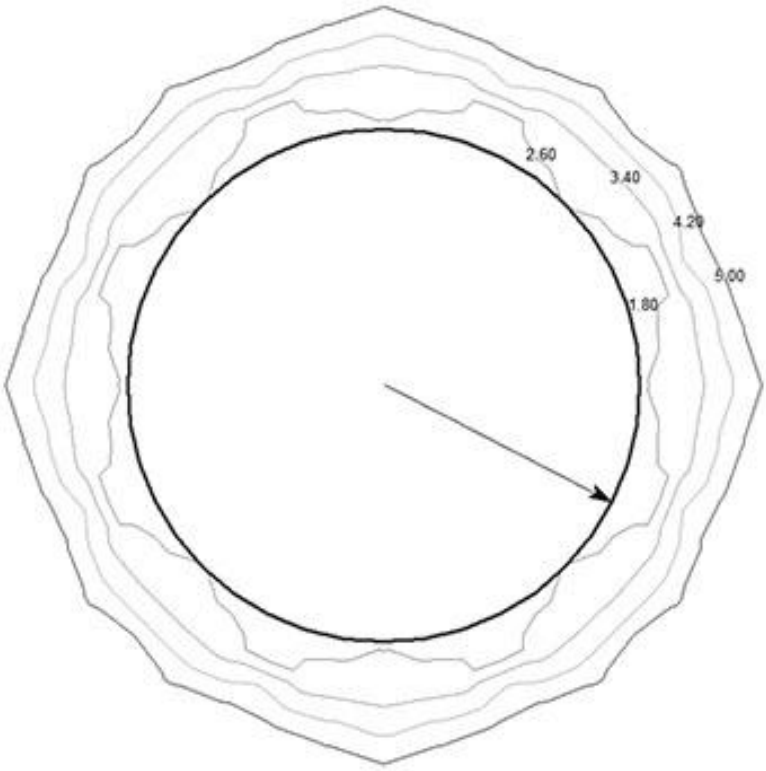
Термин „Индуковани напони" већину колега наводи на закључак, да су то напони настали израдом просторије. Напон стене (стенског масива) је потенцијална енергија еластично деформисане стене. Уклањањем дела стене, честице на ободу просторије, изгубивши потпору, крећу се ка празном простору. Кретању се супротставља затезна чврстоћа стене (кохезија), отпор унутрашњег трења и отпор конструкције. Као последицу овог поремећаја имамо нову слику напонског стања. За процену стабилности просторије нису битни напони него деформације, односно дилатација. Када дилатација пређе граничну вредност настаје лом на затезање, формира се пукотина, и ломом захваћени део стене мења структуру. Настала промена може изазвати прогресивни лом, а не мора. Укупни напони нису већи него су исти. Заправо, нису исти него су мањи јер је део деформационаог рада ентропија, конвертован је у топлоту. Али како нас занима дилатација, посматрамо укупан деформациони рад. На редистрибуцију напона утиче облик подземне просторије. Утицај облика подземне просторије најлакше је утврдити коришћењем 2Д анализе, методом коначних елемената, на пример. Утицај облика се испољава правцима главних напона и њиховим интензитетом.



Слика 1. Правци главних напона



Слика 2. Интензитет максималних главних напона



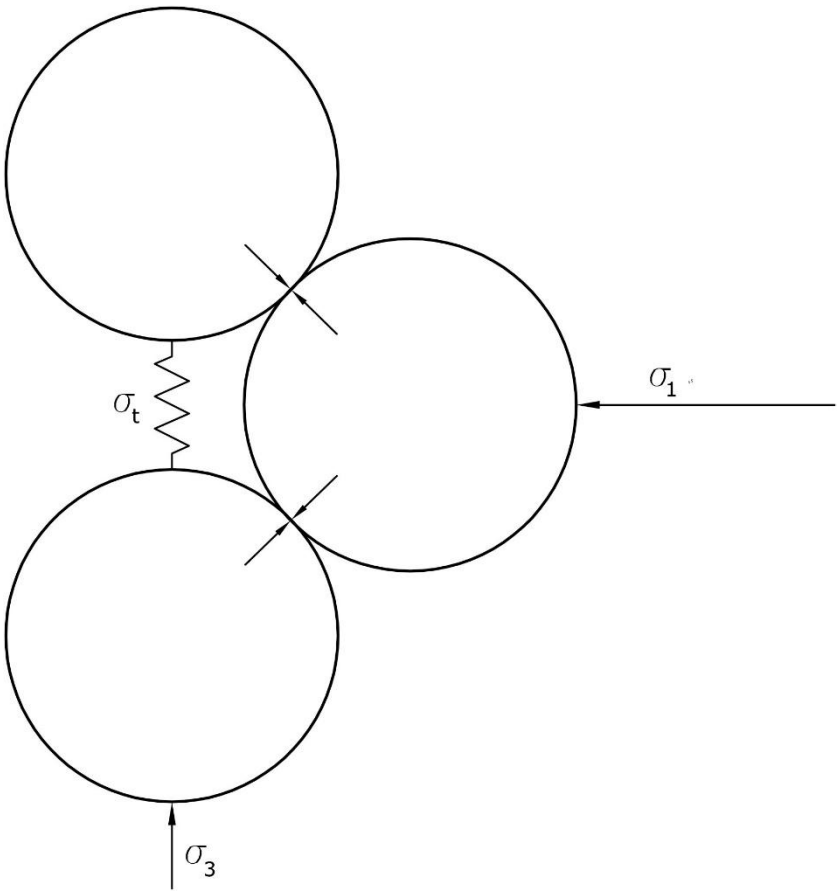
Слика 3. Интензитет минималних главних напона

Па тако за подземну просторију кружног попречног пресека израђену у стенском масиву чије је почетно напонско стање ($\sigma_1 = 10MPa,\ \sigma_2 = 10MPa, \sigma_3 = 10MPa$) дистрибуција главних напона изгледа као на слици 1, на којој су показани правци главних напона. На сликама 2 и 3 показани су интензитети главних напона.

Како је раније наведено, односи компоненти напонског стања су показани на слици 4 и описани су релацијом:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_t}{\nu}(1 + tg\varphi) + \sigma_3$$

У равни лома на затезање лежи трајекторија максималног главног напона и она је управна на правац минималних главних напона.



Слика 4. Односи компоненти напона

Ову релацију можемо написати у облику:

$$\sigma_t = \frac{\nu}{1 + tg\varphi} \cdot \sigma_1 - \sigma_3$$

Да би подземна просторија била стабилна напони на затезање не би требали бити већи од затезне чврстоће стене.

У претходној релацији члан:

$$\frac{\nu}{1 + tg\varphi}$$

је карактеристика материјала и он је показатељ чврстоће стене па се може писати да је:

$$\sigma_t = st \cdot \sigma_1 - \sigma_3$$

Па ће бити:

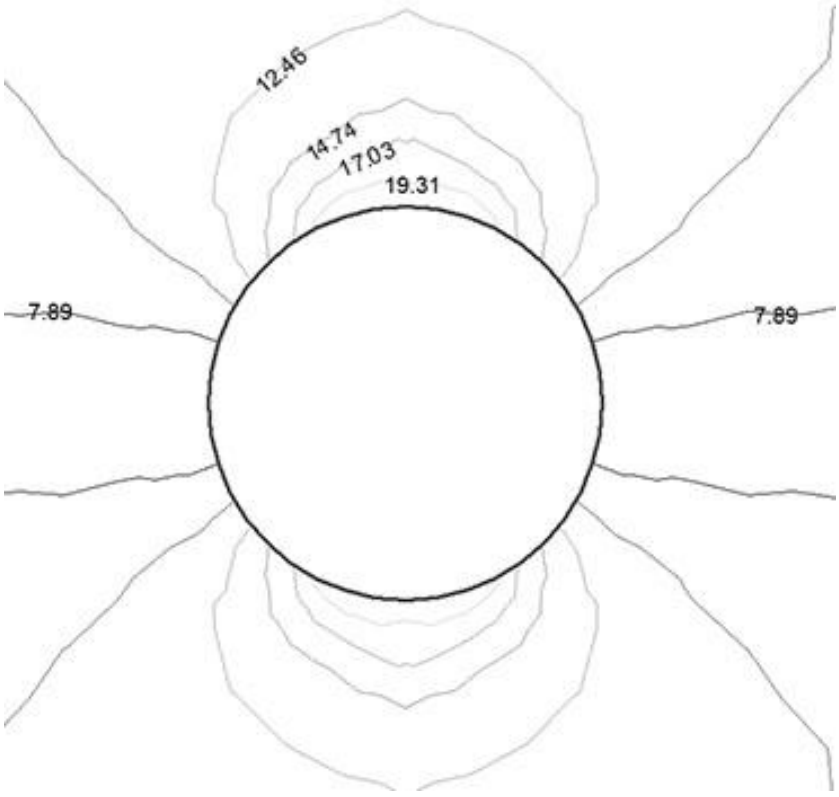
$$st = \frac{0{,}25}{1 + tg40^{\circ}} = 0.14$$

Па ће вредност затезног напрезања:

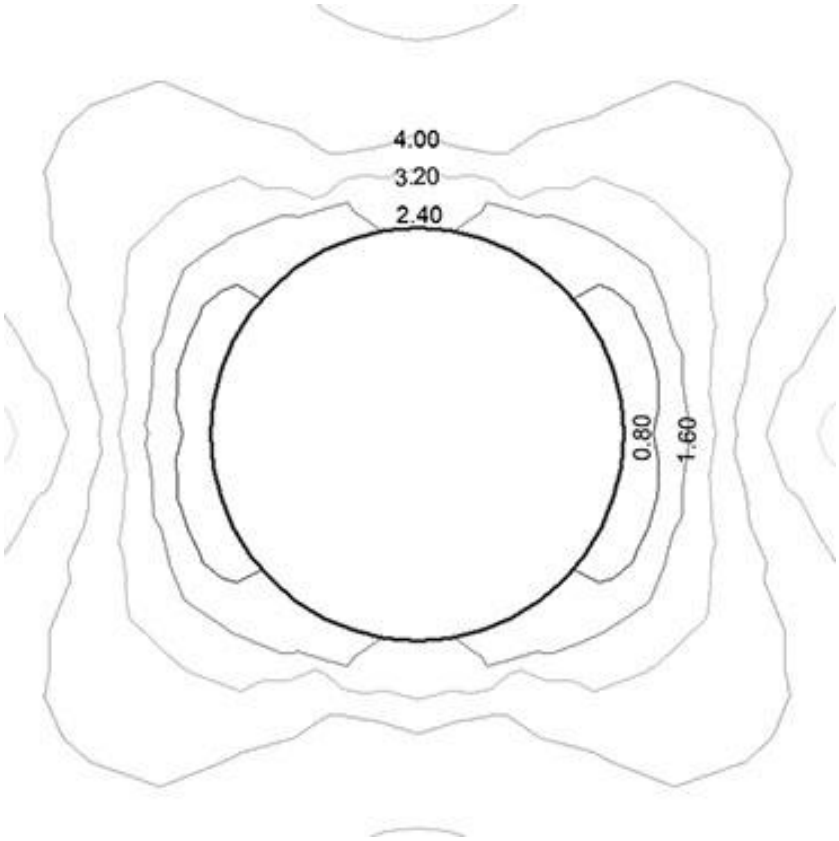
$$\sigma_t = 0{,}14 \cdot 19 - 1{,}8 = 0{,}78MPa$$

У овом примеру анализиран је кружни профил просторије, који се користи код израде вертикалних окана и код хоризонталних и нагнутих просторија које се раде ТБМ поступком. У већини случајева израђују се засвођене просторије, са различитим обликом свода, а понекад и правоугаоног попречног пресека. У овом случају рађена је анализа за хипотетичко напонско стање када су све три компоненте напона исте. Такве ситуације се у стварности не догађају. Ово стање је рађено да буде референтно за наредна реална стања напона.

У следећем примеру иста подземна просторија у истој стени је моделирана за случај када су максимални главни напони, чија је трајекторија хоризонтална, ($\sigma_1 = 10MPa$, $\sigma_2 = 5MPa, \sigma_3 = 5MPa$)



Слика 5. Интензитет максималних главних напона



Слика 6. Интензитет минималнихглавних напона

На овим сликама можемо уочити да су веће вредности индукованих главних напона у поду и стропу, па је логично закључити да ће на тим местима бити већи и напони затезања. Међутим:

Индуковани напони затезања у стропу просторије су:

$$\sigma_t = 0{,}14 \cdot 19{,}31 - 2{,}4 = 0.3MPa$$

Индуковани напони затезања у боку просторије су:

$$\sigma_t = 0{,}14 \cdot 7{,}89 - 0{,}8 = 0.3MPa$$

Напони затезања који изазивају лом и нестабилност просторије су исти, као и у претходном случају када су све компоненте главних иницијалних напона биле исте. Кључни је значај облика подземне просторије. Истина вредност напона затезања је мања јер је укупан интензитет свих компоненти напона мањи. Наравно ово важи за случај да је стена изотропна и да има исте вредности Поасоновог коефицијента и угла

унутрашњег трења у свим правцима, што често није случај, а чему се у пракси поклања мало пажње.

Следећи пример је просторија квадратног попречног пресека. И овај пут ћемо дати приказ минималних и максималних главних напона, слике 7 и 8. Ради се о истим параметрима чврстоће стене и о истом иницијалном напонском стању ($\sigma_1 = 10MPa,\ \sigma_2 = 5MPa, \sigma_3 = 5MPa$).

Овај пут уочавамо исте вредности минималних и различите вредности максималних главних напона и у боковима и у стропу и поду.

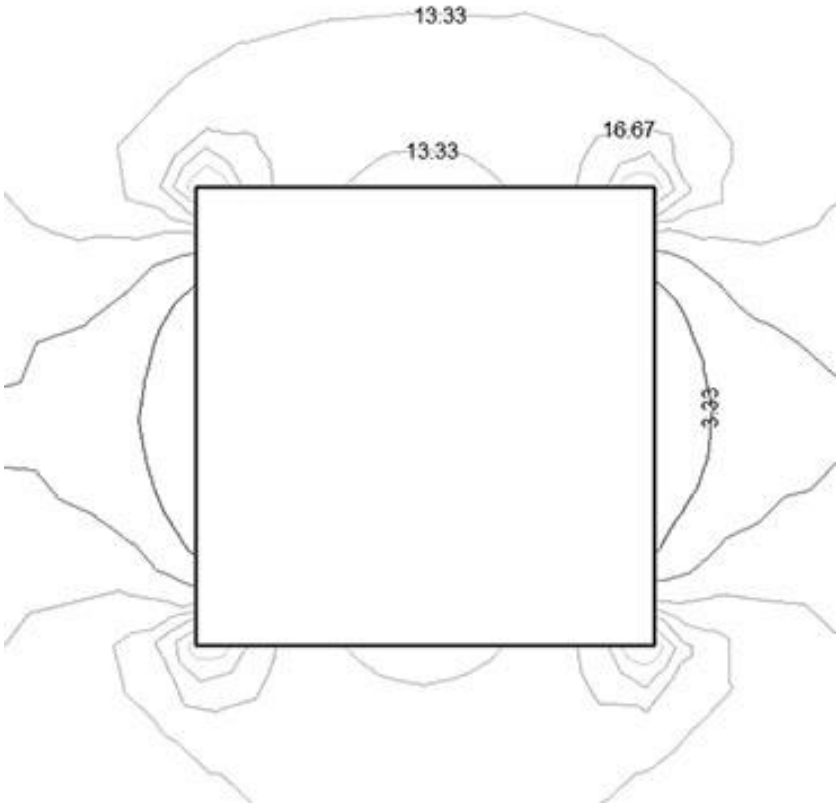
Па ће бити:

Индуковани напони затезања у стропу просторије су:

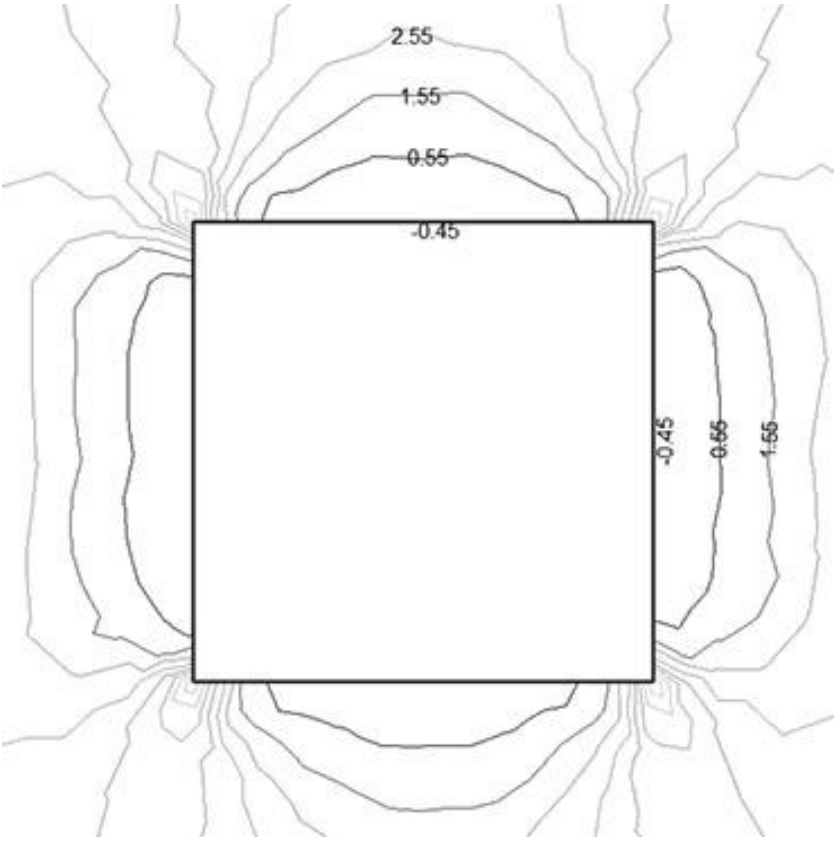
$$\sigma_t = 0{,}14 \cdot 13{,}33 - (-0{,}45) = 2{,}32MPa$$

Индуковани напони затезања у боку просторије су:

$$\sigma_t = 0{,}14 \cdot 3{,}33 - (-0{,}45) = 0.92MPa$$



Слика 7. Интензитет максималних главних напона



Слика 8. Интензитет минималних главних напона

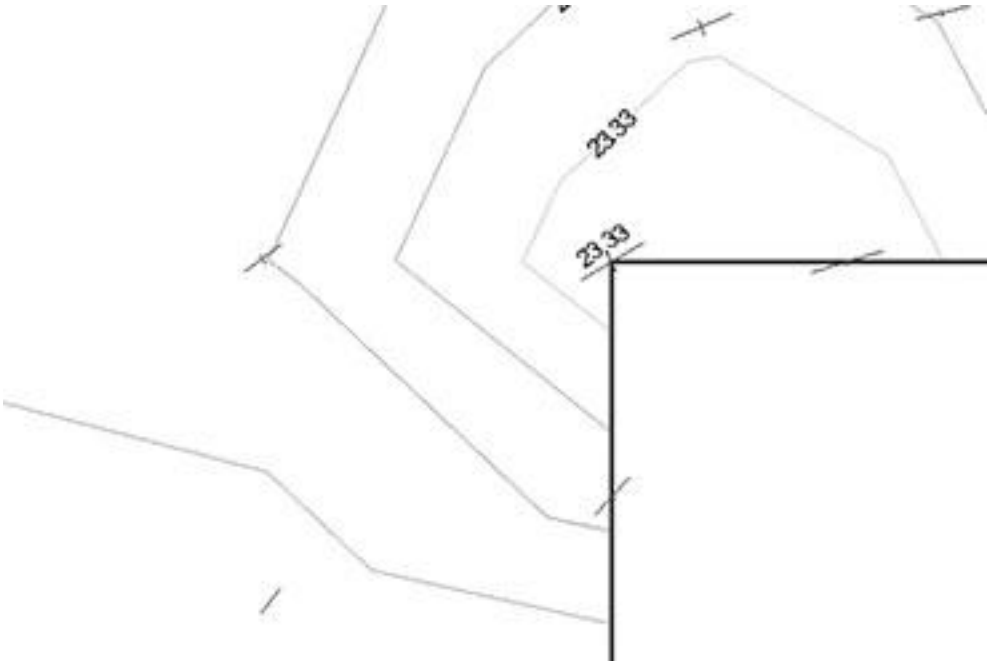
Уочавамо да се већи напони затезања индукују у стропу и поду просторије.

Имамо битно различиту ситуацију у угловима просторија. Па на сликама 9 и 10 на којима су приказане вредности минималних и максималних главних напона са њиховим правцима, уочавамо знатно више вредности напона. Ситуација је истоветна у сва четири ћошка.

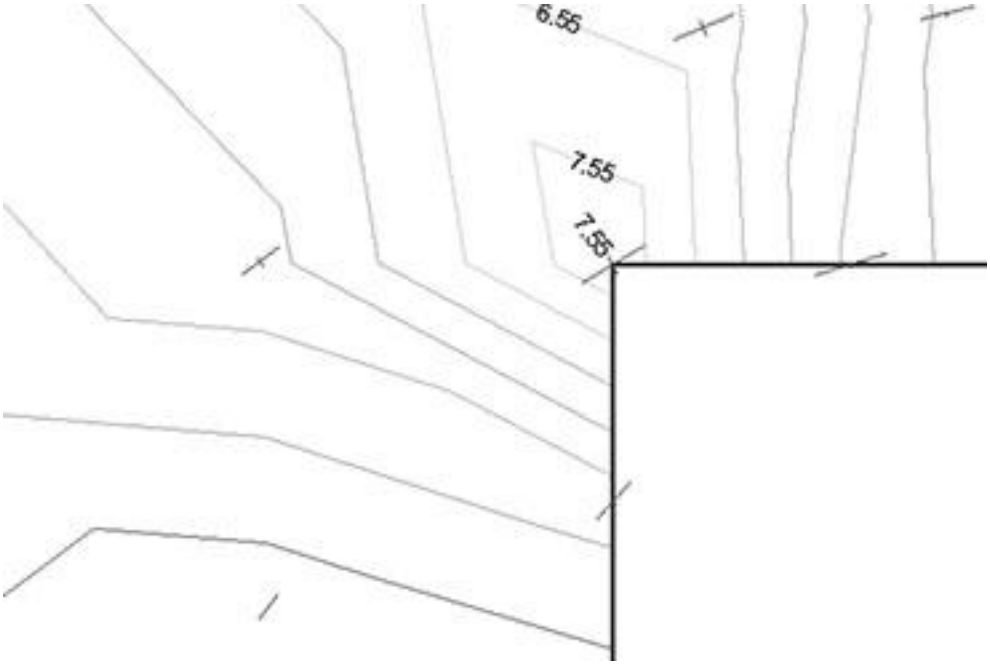
Па ће индуковани напон затезања у угловима просторије бити:

$$\sigma_t = 0{,}14 \cdot 23{,}33 - 7{,}55 = -6{,}96MPa$$

Минус у резултату указује да се ради о негативној тензији, односно о притиску.

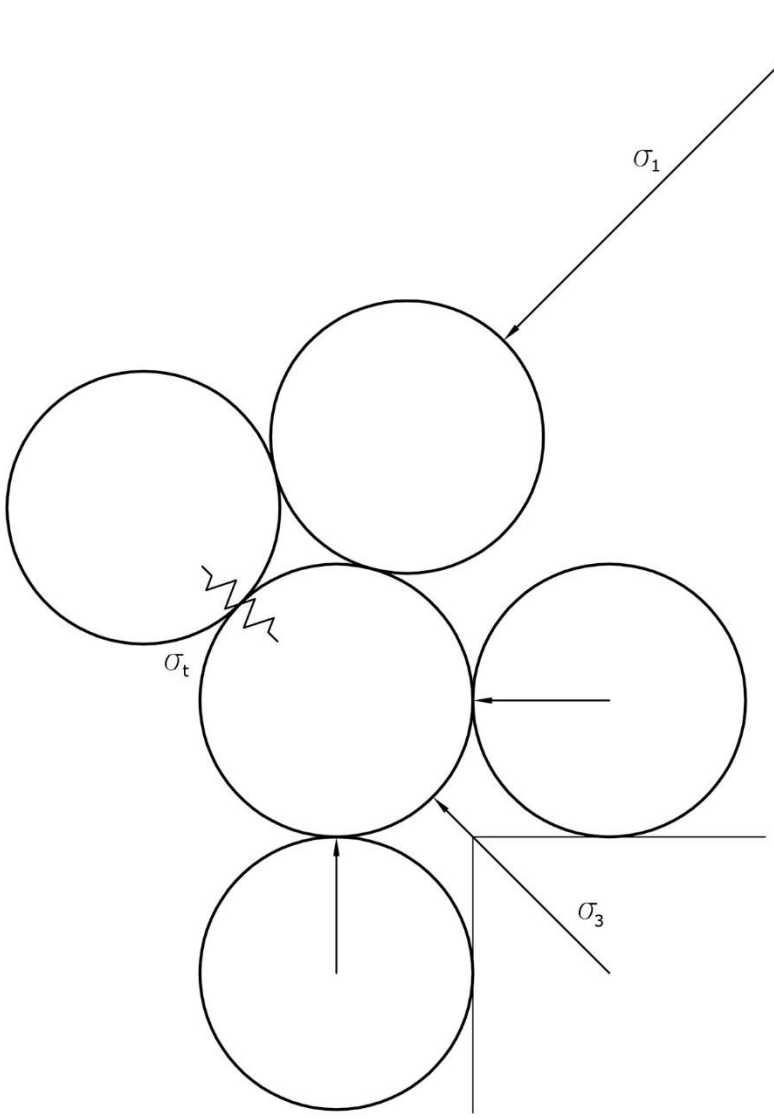


Слика 9. Интензитет максималних главних напона



Слика 10. Интензитет минималнихглавних напона

Шта се дешава у углу подземне просторије објаснићемо приказивањем честица кружићима као и раније, слика 11. Као што се види на сликама 9 и 10 у углу просторије минимални главни напони имају правац симетрале угла, а максимални главни напони су наравно управни на њих. Положај честица које формирају угао дефинише интензитет минималних и максималних напона напона. Релација ($\sigma_t = st \cdot \sigma_1 - \sigma_3$) има два члана ($st \cdot \sigma_1$) који тежи да индукује затезно напрезање и лом и члан (σ_3) који се томе супроставља.



Слика 11. Утицај угла просторије на индуковане главне напоне

У наведеном примеру:

$$\sigma_t = 0{,}14 \cdot 23{,}33 - 7{,}55 = -6{,}96MPa$$

$$\sigma_t = 3{,}26 - 7{,}55 = -6{,}96MPa$$

Компонента која спречава затезање је већа од компоненте која га изазива и неће бити затезног напрезања у углу просторије. У анализираној просторији лом неће настати у угловима, без обзира на високе вредности напона, него ће се догодити у средини крова просторије, наравно ако стена у којој је урађена има затезну чврстоћу мању од $2{,}32MPa$.

Проблем нису углови, проблематичне су праве деонице зида просторије. Што је права деоница дужа то је нестабилнија.

Подземна просторија често има квадратни (правоугаони) попречни пресек. Ако просторију изводимо као многоугао, за исту ширину (пречник) просторије смањиваће се дужина правих деоница и повећаваће се вредност угла ћошкова и њена стабилност ће бити уједначенија у угловима и правим деоницама. Наравно најповољнији је случај када просторија у попречном пресеку има многоугао близак кругу.

DOI: 10.13140/RG.2.2.10951.15527