

ZAČETNA NAPETOSTNA IN DEFORMACIJSKA STANJA PRI NUMERIČNIH ANALIZAH PO MKE ZA REOLOŠKI MODEL Z DEFORMACIJSKIMI IZOTAHAMI

THE INITIAL STRESS AND STRAIN STATES FOR THE FEM NUMERICAL ANALYSES WITH THE RHEOLOGICAL MODEL BASED ON STRAIN ISOTACHES

BOJAN MAJES, doc. dr., Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, FAGG

POVZETEK: V diskusijskem prispevku odgovarjamo na vprašanje o računu začetnih napetostnih in deformacijskih stanj pri uporabi Šukljevega reološkega modela, ki temelji na dveh družinah deformacijskih izotah.

SUMMARY: The discussion answers the question on the calculation of the initial stress and strain states by the use of Šuklje's rheological model, based on two families of strain isotaches.

UVOD

Pri numeričnih analizah po MKE ob uporabi nelinearnih materialnih modelov, pri katerih je novo napetostno in deformacijsko stanje odvisno od predhodnega stanja deformacij in napetosti v temeljnih tleh, je potrebno kot vhodni podatek predpisati tudi napetosti in deformacije v posameznih točkah mreže končnih elementov ob začetku računa. Postopek, ki ga za izračun začetnih napetosti in deformacij v tleh uporabljamo za analize s programi VISOIL, MASUKO in OSA in so predstavljeni v 1. knjigi razprav blejskega posvetovanja slovenskih geotehnikov (Majes, 1993), predstavljamo v nadaljevanju prispevka.

ZAČETNO NAPETOSTNO STANJE

Določitev začetnih napetosti v tleh temelji na poznavanju suhe prostorninske teže zemljine γ_s in začetnega količnika por e . Prostorninska teža 100% zasičene zemljine pod vzgonom je tedaj

$$\gamma' = \frac{\gamma_s + \gamma_w e}{1 + e} - \gamma_w \quad (1)$$

Količnik por e se z globino seveda spreminja. Zato računamo začetno vertikalno napetost σ_z v zmernih prirastkih globine, n.pr. $0.5 \text{ m} < \Delta z < 2.0 \text{ m}$. Vertikalno napetost na globini $z_i = z_{i-1} + \Delta z$ izračunamo po enačbi:

$$\sigma_{zz_i} = \sigma_{zz_{i-1}} - \gamma' \Delta z \quad (2)$$

Pri tem se držimo dogovora, da je tlačna napetost negativna. Za horizontalne napetosti predpostavimo, da so v vseh smereh enake, da imamo torej opraviti z osnosimetričnim stanjem napetosti. Sorazmernostni faktor med horizontalnimi in vertikalnimi napetostmi je količnik mirnega zemeljskega pritiska k_0 , ki ga bodisi izračunamo po eni od enačb iz literature, ali pa ga empirično izberemo. (Še vedno velja za najbolj uporabno zelo preprosta enačba Jâkija iz leta 1944: $k_0 = 1 - \sin \varphi$, čeprav so od takrat mnogi avtorji usmerili svoje raziskovalne moči v iskanje drugačnega odnosa med k_0 in strižnim kotom φ . V MKE pogosto uporabimo enačbo $k_0 = \nu/(1 - \nu)$, ki izhaja iz teorije elastičnosti in velja za ravninska deformacijska stanja.) Horizontalne napetosti na globini z_i so torej:

$$\sigma_{xx_i} = \sigma_{yy_i} = k_0 \sigma_{zz_i} \quad (3)$$

Strižne napetosti so nične.

Ker so reološke sovisnosti izražene v odvisnosti od napetostnih invariant σ^o in τ^o (normalna in strižna oktaedrska napetost), moramo izračunati še njune vrednosti po enačbah:

$$\sigma^o = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} = \frac{2\sigma_{xx} + \sigma_{zz}}{3} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tau^o &= \frac{1}{3} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + \right. \\ &+ \left. (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6 (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}} = \quad (5) \\ &= \frac{1}{3} \left[2(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) . \end{aligned}$$

ZAČETNO DEFORMACIJSKO STANJE

Pri izbranem modelu so odnosi med napetostmi in deformacijami ter hitrostmi deformacij podani s t.i. družinama deformacijskih izotah, ki ju simbolično lahko zapišemo z enačbama:

$$\varepsilon^o = [\varepsilon^o(\sigma^{o'})]_{\dot{\varepsilon}^o = konst} \tau^o = konst \quad (6)$$

$$\gamma^o = [\gamma^o(\tau^o)]_{\dot{\gamma}^o = konst} \sigma^o = konst . \quad (7)$$

Enačbi torej povesta vrednost oktaedrskih deformacij pri določenem napetostnem stanju $(\sigma^{o'}, \tau^o)$ in pri ustrezni hitrosti oktaedrskih deformacij. Ta hitrost je za začetna stanja enaka hitrosti deformacij pri predhodni sekundarni konsolidaciji (viskozno lezenje), saj primarna konsolidacija običajno ne poteka (gradimo na konsolidiranih temeljnih tleh). Hitrost predhodne sekundarne konsolidacije je odvisna od geološke starosti sloja zemljine in od morebitne prekonsolidacije tal. Pri geološko starejših in prekonsolidiranih zemljinah je hitrost predhodne sekundarne konsolidacije manjša.

Splošni sovisnosti, podani z enačbama 6 in 7, moramo za potrebe računskih analiz nadomestiti s konkretnimi enačbami. Uporabili smo razcep deformacij na neviskozni in viskozni del po enačbah:

$$\begin{aligned} \varepsilon^o &= \varepsilon_0^o + \varepsilon_K \left[1 - \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right] = \\ &= \varepsilon_0^o + \varepsilon_K \left[1 - \left(\frac{\dot{\varepsilon}^o}{\dot{\varepsilon}_0^o} \right)^{\frac{m}{m-1}} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma^o &= \gamma_0^o + \gamma_K \left[1 - \left(\frac{t}{t_0} \right)^n \right] = \\ &= \gamma_0^o + \gamma_K \left[1 - \left(\frac{\dot{\gamma}^o}{\dot{\gamma}_0^o} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right] , \quad (9) \end{aligned}$$

kjer je prvi člen na desni strani neviskozni del deformacije (imenujemo ga tudi primerjalna vrednost oktaedrske deformacije), drugi pa predstavlja viskozno deformacijo. Viskozna deformacija seveda napreduje s časom, kar nakazuje izraz v oglatem oklepaju (t_0 je primerjalni čas). Izkaže se (Majes, Logar, 1992), da je mogoče odvisnost od časa nadomestiti z odvisnostjo od hitrosti: $\dot{\varepsilon}_0^o$ in $\dot{\gamma}_0^o$ sta primerjalni hitrosti deformacij, $\dot{\varepsilon}^o$ in $\dot{\gamma}^o$ pa hitrosti deformacij zaradi predhodne sekundarne konsolidacije. Asimptotski vrednosti viskoznih deformacij sta ε_K in γ_K in ju definirata enačbi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_K &= -0.4343\beta_0/m = \\ &= -0.4343(a_1 + b_1\sigma^{o'})/m \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_K &= -0.4343\beta_\gamma/n = \\ &= -0.4343(f_1 + g_1\sigma^{o'} + h_1\tau^o/\tau_f^o)/n . \quad (11) \end{aligned}$$

Za natančnejšo razlago glej n.pr. Gradbeni vestnik št. 1-2/1992. m , n , a_1 , b_1 , f_1 , g_1 , h_1 so viskozni parametri. Neviskozni deformaciji ε_0^o in γ_0^o (imenovani tudi primerjalni vrednosti oktaedrskih deformacij) smo v dosedanjih delih na podlagi laboratorijskih rezultatov in izsledkov iz literature izrazili z enačbama:

$$\varepsilon_0^o = \frac{1}{3b} \ln \left[1 + \frac{b}{a} \sigma^{o'} \right] \quad (12)$$

$$\gamma_0^o = \frac{1}{f} \ln \left[\frac{\tau_f^o}{\tau_f^o - \tau^o} \right] , \quad (13)$$

kjer je τ_f^o oktaedrska vrednost strižne trdnosti:

$$\tau_f^o = 2\sqrt{2} \cos \varphi' (c' - \sigma^{o'} \tan \varphi') / (3 - \sin \varphi') . \quad (14)$$

Variantno smo uporabljali za strižno oktaedrsko primerjalno deformacijo tudi izraz:

$$\gamma_0^o = \frac{\tau_f^o - d}{F} \ln \left[\frac{\tau_f^o}{\tau_f^o - \tau^o} \right] . \quad (15)$$

V navedenih enačbah nastopajo naslednji deformacijski parametri: a , b , f , d in F ter strižna parametra φ' in c' . Ko v laboratoriju ali na terenu pridobimo dovolj meritev, da lahko iz vrednotimo navedene deformacijske, strižne in viskozne parametre ter če poznamo hitrost predhodne sekundarne konsolidacije, je mogoče za znano napetostno stanje (enačbe 1 do 5) po enačbah 8 do 15 izračunati še začetno deformacijsko stanje.

Ker je mogoče količnik por preprosto izraziti z volumsko (oktaedrsko) deformacijo $\varepsilon_V = 3\varepsilon^o$ z enačbo

$$e = e_0 + 3\varepsilon^o(1 + e_0) , \quad (16)$$

(pozitivna vrednost oktaedrske deformacije pomeni povečanje volumna) lahko upoštevamo tudi spremembo količnika por z globino zaradi naraščajočih napetosti in deformacij pri računu prostorninske teže γ' (enačba 1).

LITERATURA

- Majes, B., Logar, J. (1992). Uporaba deformacijskih izotah v analizi konsolidacije tal, Gradbeni vestnik, letnik 41, št. 1-2, 55-60, Ljubljana.
Majes, B. (1993). Uporaba metode končnih elementov v geotehnikih, Razprave 1. posvetovanja slovenskih geotehnikov, 1. knjiga, 27-40, Bled.

SANACIJA TEMELJA OSJETLJIVOG NA DEFORMACIJE REPAIR WORKS ON THE FOUNDATION SENSITIVE TO DEFORMATION

Mr. Božica Marić, dipl.ing.građ. CONEX - Zagreb
Dr. Franjo Verić, dipl.ing.građ. Građevinski fakultet Zagreb

SAŽETAK

U članku se obrađuje sanacija temelja stroja koji se sastoji od tri odvojene temeljne trake, a koji po montiranju nije zadovoljio oštre zahtjeve u pogledu dozvoljenih progiba. U poprečnom smjeru temelj se je morao ponašati kao apsolutno kruti što također nije bilo zadovoljeno. Koristeći mjerene podatke o deformacijama tla pod pokretnim opterećenjem, korištena je povratna metoda i traženi su parametri tla koji daju mjerene elastične deformacije. Kao proračunski model korišten je Winklerov model tla.

Temelj je saniran tako da mu je višestruko povećana krutost posebnim konstrukterskim zahvatima - poprečnim povezivanjem i dodavanjem uzdužnih elemenata. Mjerene deformacije temelja pod pokretnim teretom, prije i nakon sanacije su u odnosu 3,7 : 1. Ta činjenica pokazuje da je i ranije postojao izvjestan stupanj prenosa opterećenja sa rubnih traka na središnju, mada temelj nije bio povezan u cjelinu.

SUMMARY

The paper deals with the repair works on the machine foundation which consists of three separate foundation strips. After the assembly of the machinery the foundation did not comply with extremely severe requirements imposed on the value of differential settlement. Moreover the required stiffness in the transversal direction was not achieved. On the basis of measured settlements due to live load, a back analysis was used in order to find out deformation parameters of the subsoil. Winkler model was used in the analysis.

The remedial works resulted in much higher stiffness of the foundation. This effect was achieved by means of new structural elements (transversal coupling and insertion of longitudinal elements). The ratio of measured deformation of the foundation due to live load, prior to and after the repair works, is 3,7 : 1. It may be concluded that certain degree of load transfer from outer strips to the middle strip existed even before the strengthening of the foundation although the strips were not coupled.

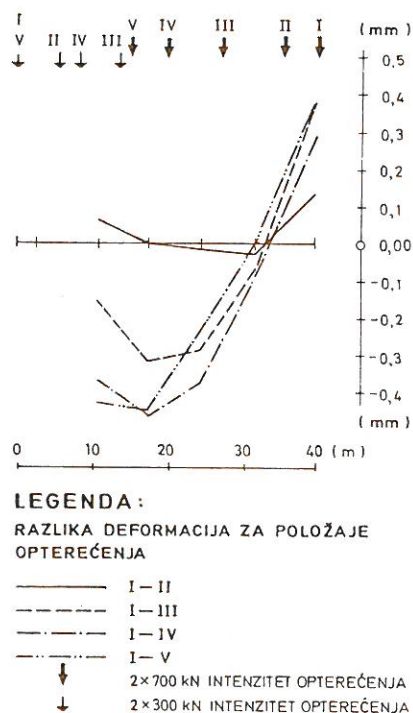
UVOD

Temelj portalne glodalice izveden je kao tri posve odvojene trake dužine 40 m. U rešku između temeljnih traka ugrađeno je pluto debljine 2 cm. Dimenzija rubnih traka je bila cca 3,12/1,8 m, dok je središnja traka 3,4/3,2 m. Po rubnim trakama na osnovom razmaku od 6,5 m, sa malim brzinama kretanja, pomiče se na određenom uzdužnom razmaku korisni teret od dva prostorna okvira. Intenzitet ovog opterećenja iznosi 2000 kN (2x700 + 2x300). Na središnjoj traci nema pokretnog tereta već se samo polaže materijal koji se obrađuje.

Tolerancije, u pogledu dozvoljenih elastičnih deformacija, pri različitim položajima pokretnog opterećenja (na slikama označeni sa I do V) iznose 0,06 mm na segmentu temelja dužine 10 m. Dozvoljena deformacija se može prikazati parabolom

$$w = a \cdot x^2, \text{ gdje je } a = 2,4 \cdot 10^{-9}$$

Ovako stroge zahtjeve nije mogao zadovoljiti izvedeni temelj. Mjerenje deformacija je pokazalo da su iste intenziteta $w_{\max} = 0,85$ mm pod djelujućim opterećenjem što nije moglo zadovoljiti zahtjeve opreme.



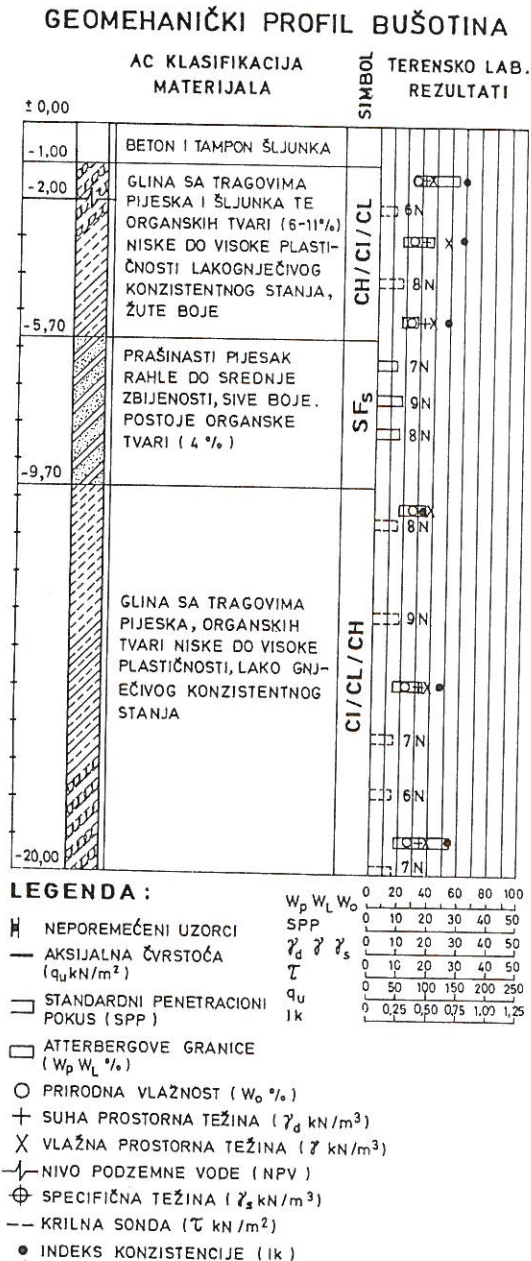
Slika 1. Mjerene deformacije dilatiranih temelja

Mogućnosti intervencije su bile donekle smanjene jer je temelj izveden u hali ograničenih dimenzija.

Svestranom analizom nekoliko varijanti sanacije uz uvažavanje mogućnosti i pouzdanosti izvedbe, odlučeno je da se temelj sanira tako da mu se poveća krutost.

GEOTEHNIČKI PODACI

Naknadno izvedeni geomehnički istražni radovi sastojali su se od izvedbe tri bušotine dubine 20 m. Sastav tla je relativno homogen i vidljiv je na slici 2.



Slika 2. Sondažni profil bušotine

Nivo podzemne vode utvrđen je na koti -2,0 m od poda hale i u direktnoj je ovisnosti o nivou obližnje rijeke.

Iz sastava tla je vidljivo da je temelj izveden u sloju gline pretežno lako do teško gnječive konzistencije. Uzorci tla su obrađeni na standardan geomehnički način.

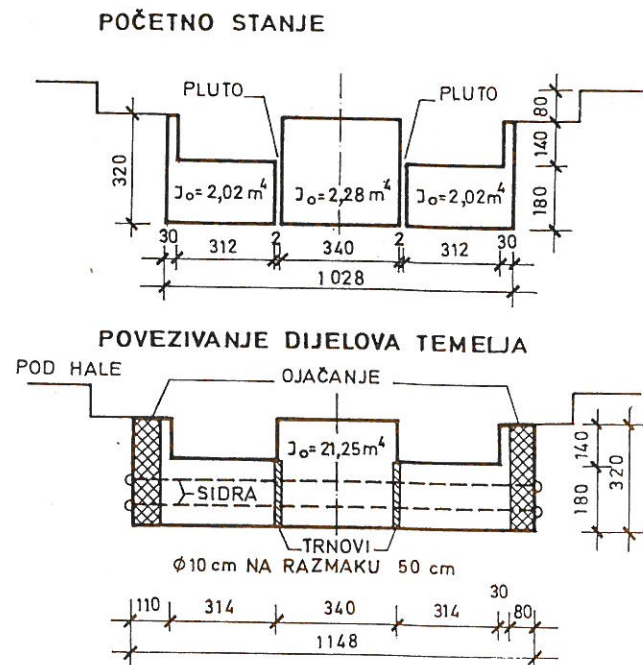
PRINCIP SANACIJE

Radi postojanja podataka o položajima, intenzitetu opterećenja stroja i deformacijama temelja, odlučeno je da se provede povratna analiza te na taj način dobiju karakteristike tla koje se realiziraju u vremenu rada stroja.

Kao model tla korišten je Winklerov model prijenosa opterećenja. Znano nam je da to nije najreprezentativniji i najsuvremeniji model za inženjerske analize, ali isto tako je opće poznato da postoji veliko inženjersko iskustvo u primjeni baš tog modela.

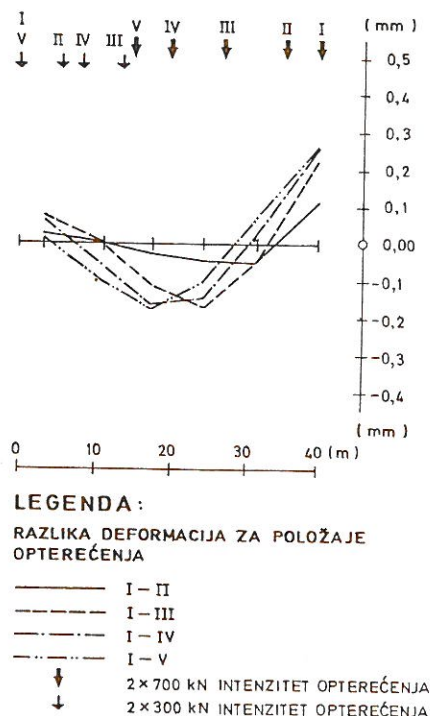
Temelj je promatran kao tri odvojene trake sa pripadajućom krutosti. Prije sanacije, vlastita težina temelja iznosila je 21400 kN što izaziva kontaktno opterećenje od 56,86 kN/m². Pokretno opterećenje povećava taj kontaktni pritisak za u prosjeku $p=4,8$ kN/m².

Poprečno povezivanje provedeno je sidrima. Pluto koje je ugrađeno između traka, nije omogućavalo povezivanje i prijenos sila bez velikih deformacija. To je riješeno ugradnjom vertikalnih trnova-moždanika između temeljnih traka.



Slika 3. Presjek temelja prije i nakon sanacije

Budući da nisu postojala mjerenja deformacija temelja prije postavljanja stroja, kao referentni položaj (nulti položaj) izabran je položaj stroja u krajnim pozicijama. Svi ostali položaji opterećenja sa pripadajućim deformacijama, prikazani su kao razlika od tog nultog položaja.



Slika 4. Proračunske deformacije saniranog temelja

Prostorni model saniranog temelja je analiziran metodom konačnih elemenata uz uvažavanje koeficijenta posteljice dobivenog povratnom analizom na temelju mjerenih podataka. Radi povećanja krutosti sistema izvedene su dvije uzdužne trake i jedna poprečna a temelji su sistemom prednapregnutih sidara u dva nivoa povezani u cjelinu.

Ovako sanirani temelj ima vlastitu težinu od 26500 kN i prosječno kontaktno opterećenje iznosi 60,23 kN/m². Pokretno opterećenje povećava taj kontaktni pritisak za 4,10 kN/m².

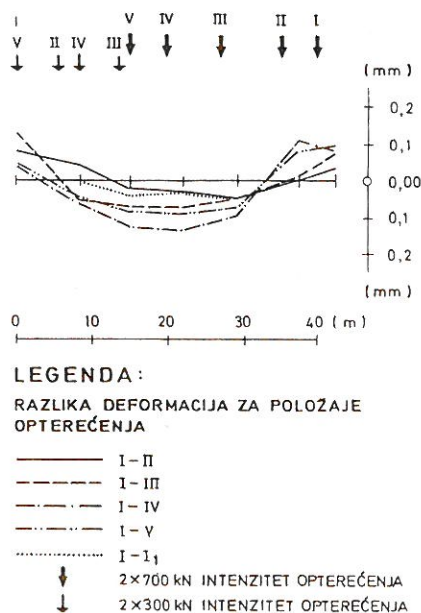
Prema provedenom proračunu deformacije se smanjuju i to na ukupno $w_{max} = 0,48$ mm. Uz takvu proračunsku veličinu maksimalnih deformacija zadovoljeni su i traženi kriteriji za rad stroja.

REZULTATI MJERENJA DEFORMACIJA

Mjerenje pomaka na saniranom temelju izvršeno je metodom geometrijskog nivelmana preciznim nivelirima sa automatskim horizontiranjem i optičkim mikrometrom.

Maksimalna razlika između naniže i najviše deformiranog temelja uz uvažavanje srednje mjerene vrijednosti iznosi $w_{max} = 0,23$ mm.

Za srednju vrijednost mjerenih deformacija temelja, kriterij progiba u uzdužnom smjeru ($f \leq 0,06$ mm/10 m) zadovoljen je za sve slučajeve - položaje opterećenja.



Slika 5. Mjerene elastične deformacije

Potrebno je napomenuti da su mjerenja izvedena u trenutku kad su svi drugi strojevi (preše, kranovi i sl.) mirovali, čime je isključen njihov eventualni negativni utjecaj na ponašanje temelja.

Mjerene vrijednosti deformacija su bolje od onih dobivenih proračunom ili u najmanju ruku jednaki proračunskim vrijednostima, ako se uzme u obzir i srednja pogreška aritmetičke sredine.

Mjerenja su također pokazala da temelj djeluje kao cjelina u poprečnom presjeku i da nema deformacija u tom smjeru.

S obzirom da su se u ovom primjeru promatrale samo elastične deformacije, možda je važno napomenuti da se pri deformacijama nisu uzimala reološka svojstva betona i tla. Ista su se pokazala da postoje jer unutar vremena od cca 1 sat, koliko je trajala serija mjerenja za jedan položaj stroja, postoji razlika u veličini od 0,05 mm u odnosu na referentno početno stanje, mada su tereti bili u istom položaju. (Vidi sliku 5. - slučaj I - I₁).

ZAKLJUČAK

Sanacija temelja koji služi za preciznu obradu metala provedena je povećanjem krutosti temelja. Krutost je povećana za 5,2 puta ($I/I_0 = 21.25/2.02$) a ostvareni kvocijent deformacija je 3,7 (0,85/0,23). To ukazuje na činjenicu da je pluto, obostrano ugrađeno u reške, sudjelovalo u prijenosu i pridonosilo da i srednja traka djelomično sudjeluje u prijenosu opterećenja.

Ta činjenica je bila djelomično i vidljiva iz podataka mjerenja deformacija prije sanacije, no u inženjerskom pristupu to nije bilo moguće uzeti u obzir.

Odnos korisnog i stalnog opterećenja prije sanacije iznosio je 9,3 %, a nakon sanacije 7,5 %.

Mjerene vrijednosti deformacija pokazale su da je temelj saniran na dopušteni intenzitet deformacija.

Smatramo da kao geotehničari moramo upozoriti inženjersku javnost da temeljenju ovakvih osjetljivih strojeva treba posvetiti daleko veću pažnju i geomehaničku obradu koja može zadovoljiti tražene kriterije. Posve je jasno da je temelj stroja, koji dopušta tako malene tolerancije što se tiče deformacija trebalo temeljiti na masivnom bloku na pilotima.

LITERATURA:

Feda, J. 1978. Stress in subsoil and methods of final settlement calculation. Elsevier Scientific Publishing Company.

Marić, B., Verić, F. 1990. Problemi slijegavanja i sanacije plitkih temelja. Kongres građevinskih konstruktera Hrvatske. Društvo građevinskih inženjera i tehničara, Brijuni

Projektna dokumentacija. 1988. arhiva Geotehnike, Institut Geoexpert, Zagreb