

ANALIZA DEFORMACIJSKE ENERGIJE OBALNE KONSTRUKCIJE TEMELJENE NA PILOTIMA

Kaniški M.¹, Ivandić K.²

¹Varaždin, Hrvatska

²Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin, Hrvatska

Sažetak: U radu je predložen nov način proračuna horizontalno opterećenih obalnih konstrukcija temeljenih na vertikalnim pilotima u homogenom deformabilnom tlu. Piloti su modelirani kao polubeskonačne dužine u Winklerovom poluprostoru. Analizira se amortizacija kinetičke energije broda prilikom njegova pristajanja uz obalnu konstrukciju. U klasičnim rješenjima ukupnu kinetičku energiju preuzima elastičan odbojnik obalne konstrukcije. Uzimajući u obzir pretpostavku da kinetičku energiju udara broda amortiziraju elastični odbojnici, deformirana obalna konstrukcija i tlo na kojem se ona nalazi, pokazuje se da dolazi do značajne promjene u raspodjeli horizontalnih pomaka i unutarnjih sila u konstrukciji.

Ključne riječi: obalna konstrukcija, kinetička energija, ekvivalentna sila, deformacijska energija

Abstract: The paper presents a new way of analyzing horizontally loaded on-shore structures founded on vertical piles in homogeneous deformable soil. The piles are computed as of semi infinite length in the Winkler half-space. The analysis of the kinetic energy depreciation of a ship at its mooring along the shore construction is provided. Within the classical solutions, the total kinetic energy is taken over by an elastic buffer. Taking into account the assumption that the kinetic impact energy of the ship is depreciated along elastic bumpers, deformed coastal structures and the soil in which it is located, it shows that there are significant changes in distribution of the horizontal displacements and internal forces in the structure.

Key words: on-shore structure, kinetic energy, equivalent force, deformation energy

1. UVOD

Za obalne konstrukcije za pristanak brodova dubokog gaza i velike tonaže, temeljene na pilotima velikih promjera, karakteristična su vertikalna i horizontalna opterećenja. Vertikalna opterećenja nastaju od vlastite težine same konstrukcije, od dizalica i vozila, koja se kreću po obalnom platou, te od korisnog tereta. Horizontalna opterećenja nastaju od udara broda,

prilikom njegovog pristajanja, zbog pritiska broda ili vlačne sile na polere pod udarom vjetra na usidreni brod, zbog horizontalnih ubrzanja mase tijekom djelovanja potresa i dr.

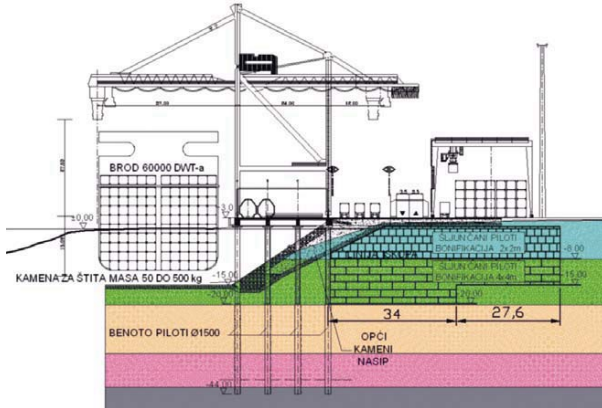
Teren ispod obalnih platoa je nagnut, a njime se savladava visinska razlika između razine terena u zaleđu iza obalne konstrukcije i razine dna mora neposredno ispred obalne konstrukcije. Ta se visinska razlika najčešće kreće od 12 do 20 m. Zbog nagnutog terena mijenja se i slobodna duljina pilota (od izlaska pilota iz tla do ulaska u naglavnu konstrukciju), što je potrebno uzeti u obzir kod proračuna prijenosa vanjskih horizontalnih djelovanja.

U poprečnom smjeru obalne konstrukcije su okviri s dvije, tri ili više vertikalna-pilota, koji najčešće sežu do iste dubine, ali s različitim slobodnim duljinama (slika 1.). Gornja konstrukcija koja vertikalne pilote povezuje u jedinstvenu cjelinu uvjetuje jednaki horizontalni pomak pilota u promatranom poprečnom okviru. Iz tog razloga piloti manje slobodne duljine preuzimaju odgovarajući veći dio horizontalnog opterećenja u odnosu na pilote veće slobodne duljine, a istog poprečnog presjeka.

Kod prijenosa opterećenja u tlo dolazi do kontradiktornih zahtjeva u odnosu na spomenute dvije vrste opterećenja. Vertikalna opterećenja zahtijevaju da središnji piloti poprečnog okvira budu većeg promjera, jer se preko njih i prenose najveća opterećenja. Horizontalno opterećenje traži usklađivanje odnosa promjera pilota i njegove slobodne duljine. Smanjenjem slobodne duljine pilota trebalo bi smanjivati i njihov promjer, kako bi svi piloti bili podjednako iskorišteni. Naime, kod horizontalnog pomaka od desetak centimetara u pilotima velike slobodne duljine aktivira se mali moment upetosti, dok kod pilota male slobodne duljine aktivirani moment savijanja može izazvati pucanje pilota. Naročito treba pripaziti na to da najveća horizontalna i vertikalna opterećenja ne djeluju istodobno.

U radu je analizirano ekvivalentno horizontalno opterećenje prilikom pristajanja broda, kada kinetička energija broda prilikom sruza s obalom mora biti poništena potencijalnom energijom deformiranih

odbojnika, obalne konstrukcije na vertikalnim pilotima, te samog tla u kojem se piloti nalaze.



Slika 1. Obalna konstrukcija na Luci Ploče

2. DJELOVANJE UDARA BRODA NA OBALNU KONSTRUKCIJU

Pri udaru broda na obalnu konstrukciju potrebno je izračunati kinetičku energiju njegova djelovanja. Izraz (1) pokazuje način određivanja vrijednosti kinetičke energije uslijed djelovanja broda na obalnu konstrukciju.

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} \alpha_m \alpha_s \alpha_r \quad (1)$$

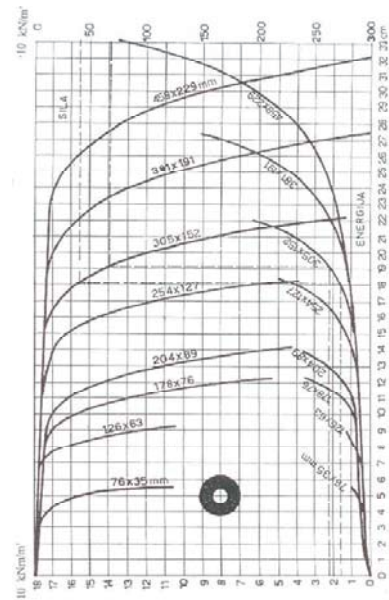
gdje su:

- m - masa broda [kg],
- v - brzina gibanja broda u trenutku udara na obalnu konstrukciju [m/s],
- α_m - koeficijent utjecaja turbulencije vode na kretanje broda,
- α_s - koeficijent utjecaja krutosti odbojnika,
- α_r - koeficijent udaljenosti težišta broda od točke kontakta s odbojnikom.

Za izračunatu vrijednost kinetičke energije broda određuje se ekvivalentna statička sila na koju će se dimenzionirati obalna konstrukcija. Spomenuta sila izračunava se na temelju karakteristika elastičnih odbojnika (dimenzije, materijali od kojih su izrađeni, vrijednosti dobivene ispitivanjima i dr.). Na slici 2. je primjer elastičnog šupljeg gumenog odbojnika.



Slika 2. Primjer primjene elastičnog šupljeg gumenog odbojnika



Slika 3. Dijagram energija-deformacija-ekvivalentna sila elastičnih odbojnika

Ulazni parametar je kinetička energija broda kojom brod djeluje na okvir. Jedan od mogućih načina rješavanja takvog problema je postavljanje elastičnog odbojnika na konstrukciju, koji će svojom deformiranom energijom amortizirati udar broda. Ukupnu kinetičku energiju broda u tom slučaju preuzima samo odbojnik, dok se konstrukcija tretira kao apsolutno kruta. Proizvođači odbojnika daju specifikacije odbojnika, tj. ekvivalentnu silu i deformaciju koji će dati energiju jednaku kinetičkoj. U spomenutoj analizi pretpostavlja se apsolutna krutost ravninske konstrukcije u trenutku udara broda. Energetska ravnoteža postiže se izjednačavanjem kinetičke energije broda i deformirane energije elastičnog odbojnika.

3. ZNAČAJ ENERGIJE DEFORMIRANOG SUSTAVA

Kako bi se omogućilo racionalnije dimenzioniranje obalnih konstrukcija temeljenih na vertikalnim pilotima velikih promjera ($\varnothing > 1.0\text{m}$), potrebno je uzeti u obzir i djelovanje deformirane energije nosivog sklopa. Važnost proračuna energije deformiranog statičkog sustava bit će prikazan na sljedećem primjeru.

Krucijalni parametar prilikom dimenzioniranja spomenutih konstrukcija jest jačina udara broda. U ovisnosti o veličini kinetičke energije broda i o odabranoj vrsti i dimenzijama elastičnog odbojnika, određuje se vrijednost ekvivalentne statičke sile koja je potrebna u daljnjoj statičkoj analizi ponašanja konstrukcije. Na slici 3. prikazan je odnos djelujuće kinetičke energije, deformacije te ekvivalentne sile za kružne elastične odbojnike različitih dimenzija.

Korištenjem dijagrama kao na slici 3. ostvarena je energetska ravnoteža iz koje se dobiva vrijednost ekvivalentne statičke sile. Ako se u obzir uzme i deformacija same konstrukcije, može se postaviti nova jednadžba energetske ravnoteže. Osnovna ideja korištenja deformirane energije sastoji se u pretpostavci

da ukupnu kinetičku energiju broda ne amortizira samo energija elastičnih odbojnika. U izraz za energetska ravnotežu ulazi i deformirana energija obalne konstrukcije i tlo na kojem je ona temeljena. Deformirana energija obalne konstrukcije sastoji se od energije naglavne grede i pilota. Izraz za energetska ravnotežu može se pisati:

$$\begin{aligned} E_{kin} &= E_{pod} + E_{pkon} \\ &= E_{pod} + E_{png} + E_{pk} + E_{pp} + E_{pt} \end{aligned} \quad (2)$$

gdje su (sve u $[kNm]$):

- E_{kin} - kinetička energija broda
- E_{pod} - def. energija odbojnika
- E_{pkon} - def. energija konstrukcije
- E_{png} - def. energija naglavne grede
- E_{pk} - def. energ. pilota iznad razine terena
- E_{pp} - def. energ. pilota ispod razine terena
- E_{pt} - def. energija tla.

Vrijednost ekvivalentne statičke sile se u tom slučaju više ne traži za ukupnu kinetičku energiju, već za razliku kinetičke energije i dijela energije koja je ušla u obalnu konstrukciju i tlo. Na taj način ekvivalentna sila, ujedno i mjerodavna sila za dimenzioniranje konstrukcije, postaje manja, a energetska ravnoteža ostaje sačuvana.

Količina deformirane energije koja će ući u obalnu konstrukciju i tlo ovisi o sposobnosti deformacije statičkog sustava. Za manje krute konstrukcije količina energije će biti veća, no istodobno raste horizontalni pomak konstrukcije kao i mjerodavne rezne sile. Rješenje se vidi u pronalasku dimenzija pilota, koje će za zadano temeljno tlo dati zadovoljavajući pomak. Istodobno će preuzeti određeni, nezanemarivi dio kinetičke energije broda kako bi se smanjila ekvivalentna statička sila.

3.1. Geotehnički uvjeti

Kada su poznate krutosti pilota, naglavne konstrukcije i tla, mogu se izračunati horizontalni pomak i unutarnje sile, te konačno odrediti vrijednosti pojedinih komponenti deformirane energije dijelova nosivog sustava i temeljnog tla.

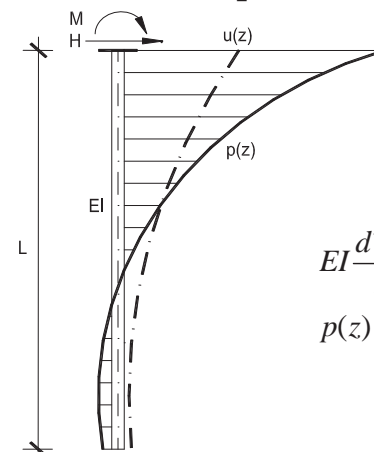
3.2. Deformirana energija pilota ispod razine terena te smog tla

Analizi horizontalno opterećenih obalnih konstrukcija temeljenih na pilotima pristupa se preko rješenja problema horizontalno opterećenih pilota u deformabilnom tlu. U ovisnosti o tlu (linearan, nelinearan model i dr.), o izboru parametara pojedinog modela te o načinu proračuna (analitički, numerički), dobiju se različita rješenja. U radu se dalje prikazuje deformirana energija pojedinih dijelova nosivog sklopa za Winklerov model tla.

Na slici 4. prikazan je vertikalni poprečno opterećeni pilot dužine L [m], krutosti na savijanje EI [kNm^2], opterećen horizontalnom silom H [kN] i momentom M [kNm]. Pilot je cijelom dužinom u tlu koja je iskazana koeficijentom reakcije tla u horizontalnom smjeru k

[kN/m^3]. Diferencijalna jednadžba problema (izraz (4)) povezuje dvije nepoznate funkcije: horizontalni pomak $u(z)$ [m] i reaktivni pritisak $p(z)$ [kN/m^2]. Želi li se prikazani problem riješiti, treba pronaći dodatnu vezu između nepoznatih funkcija pomaka i reaktivnih pritisaka. Dodatna veza između nepoznatih funkcija $u(z)$ i $p(z)$ (izraz (5)) predstavlja određeni model tla. U ovom slučaju veza je linearna preko koeficijenta reakcije tla k [kN/m^3]. Rješenje sustava (4) i (5) za prikazane uvjete je sljedeća funkcija pomaka:

$$u(z) = -\frac{1}{2\lambda^3 EI} e^{-\lambda z} \left[\left(M + \frac{H}{\lambda} \right) \cos \lambda z - M \sin \lambda z \right] \quad (3)$$



Slika 4. Poprečno opterećeni pilot

$$EI \frac{d^4 u(z)}{dz^4} + p(z) = 0 \quad (4)$$

$$p(z) = k \times u(z) \quad (5)$$

Gdje je: $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k \cdot d}{4 \cdot EI}} \left[\frac{1}{m} \right] \quad (7)$

Funkcija momenata savijanja:

$$M(z) = e^{-\lambda z} \left[M_0 \cos \lambda z - \left(2M_0 + \frac{T_0}{\lambda} \right) \sin \lambda z \right] \quad (8)$$

Ukupna deformirana energija pilota ispod razine terena može se dobiti iz izraza:

$$E_{pp} = \int_0^{\infty} \frac{M^2(z)}{2EI} dz \quad (9)$$

Nakon integracije energija pilota je jednaka:

$$E_{pp} = \frac{H^2 + 4MH\lambda + 6M^2 \lambda^2}{16EI\lambda^3} \quad (10)$$

Deformirana energija dobiva se reaktivnim pritiskom na horizontalnim pomacima pilota polubeskonačne duljine.

$$E_{pp} = \int_0^{\infty} \frac{p(z)u(z)}{2} dz \quad (11)$$

Nakon integracije energija deformiranog tla iznosi:

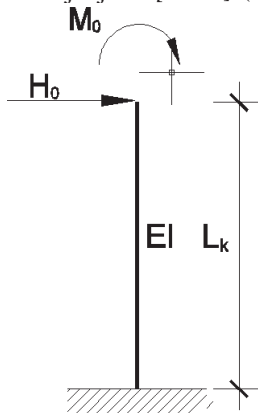
$$E_{pt} = \frac{3H^2 + 4MH\lambda + 2M^2 \lambda^2}{16EI\lambda^3} \quad (12)$$

Tako je ukupna energija pilota u tlu i samog tla:

$$E_p = E_{pp} + E_{pt} = \frac{4H^2 + 8MH\lambda + 8M^2 \lambda^2}{16EI\lambda^3} \quad (13)$$

3.3. Deformirana energija pilota iznad razine terena

Deformirana energija pilota iznad tla računa se za pilot opterećen horizontalnom silom H_0 [kN] i momentom M_0 [kNm] s krutošću savijanja EI [kNm²] (slika 5.).



Slika 5. Poprečno opterećeni pilot iznad razine terena

Funkcija momenta savijanja je

$$M(z) = M_0 - H_0 z \quad (14)$$

Deformirana energija dijela pilota iznad razine terena dobiva se prema izrazu:

$$E_{pk} = \int_0^{L_k} \frac{M^2(z)}{2EI} dz \quad (15)$$

Konačna deformirana energija konzolnog dijela pilota:

$$E_{pk} = \frac{1}{2EI} \left(\frac{1}{3} H_0^2 L_k^3 - H_0 M_0 L_k^2 + M_0^2 L_k \right) \quad (16)$$

4. NOVA ENERGETSKA RAVNOTEŽA

Izraz za ukupnu deformiranu energiju pilota u Winklerovom poluprostoru za polubeskonačni pilot (izrazi (13) i (16)):

$$E_{kin} = E_{pu} = E_p + E_{pk} \quad (17)$$

U izraz je (17) potrebno uvrstiti i deformiranu energiju naglavne konstrukcije u slučaju da se određuje njena deformacija, a ne samo translatorni pomak apsolutno krutog tijela. Princip proračuna je isti kao i kod pilota. Nakon određivanja raspodjele momenata savijanja duž naglavne konstrukcije, provodi se odgovarajuće integriranje sve dok se ne dobije konačni izraz za deformiranu energiju.

Deformirana energija sustava može se općenito iskazati i kao rad sile na pomaku, pa se piše $E=H \times \delta/2$ [kNm]. U izrazu $\delta=H \times K$ [m] je K [kN/m] krutost sustava na djelovanje horizontalne sile. Izraz za energiju postaje $E=P^2/2K$ [kNm]. To je kvadratna funkcija od H s konstantnom krutošću K . Vidi se da raspon vrijednosti deformiranih energija raste s kvadratom vrijednosti vanjske sile. Za apsolutnu krutu podlogu veličina energije je najmanja, dok je količina energije za istu silu najveća kod najmanjeg modula tla. Analize različitih slučajeva obalnih konstrukcija pokazuju široki spektar

vrijednosti aktiviranja deformirane energije konstruktivnog sustava unutar deformabilnog tla. S obzirom na uobičajene dopuštene horizontalne pomake obalnih konstrukcija, vrijednosti deformiranih energija u ukupnoj ravnoteži daju ekvivalentne sile i do 25% manjih vrijednosti od slučaja kada cjelokupnu kinetičku energiju preuzima sam elastični odbojnik.

5. ZAKLJUČAK

Za uobičajene dimenzije pilota i elastičnih odbojnika ekvivalentna statička sila dobivena je iz jednakosti kinetičke energije broda i deformirane energije elastičnog odbojnika. Ona je zajedno s cijelim nosivim sklopom i tlom manja otprilike 25% u odnosu na cjelokupnu kinetičku energiju broda koju preuzima samo elastični odbojnik. Količina ukupne deformirane energije koja ulazi u pilot i tlo ne ovisi toliko o proračunskom modelu tla, ako je kriterij za odabir parametara pojedinog modela tla jednaki horizontalni pomak vrha pilota, odnosno krute naglavne konstrukcije. Raspodjela deformirane energije u pilot ispod razine terena i u tlo značajno ovisi o proračunskom modelu tla, tj. o odnosu krutosti pilota i tla, a time i o raspodjeli momenata savijanja po pilotu.

Uzimanjem u obzir deformabilnost podloge, tj. tlo u kojem je temeljena obalna konstrukcija, može se dobiti korektna raspodjela horizontalnih sila i pomaka na vrhu pilota. To odmah utječe i na veličinu deformirane energije svakog pilota i cijele konstrukcije. Razlike između različitih krutosti podloge mogu biti velike, pa to dovodi do nerealnih analiza i otkazivanja nosivosti pilota uslijed nepoznavanja stvarne raspodjele sila i pomaka u pilotima. Svako projektno rješenje, odnosno određivanje ekvivalentne sile, mora biti unutar dopuštenih granica za vrijednosti horizontalnih pomaka promatrane obalne konstrukcije.

6. Literatura

- Winkler, E. (1867.), *Die Lehre von Elasticität und Festigkeit*, Dominicus, Prague, pp. 182.
- Committee for Waterfront Structures 1986. *Recomndations of the Committee for Waterfront Structures EAU*. Ernst&Sohn.
- Hetenyi, M. 1946. *Beams on elastic foundations*. Ann Arbor: Univesity of Michigan Press.
- Mindlin, R.D. 1936. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. *J. Appl. Physics* 7, No5:195-202.
- Poulos, H.G. & E.H. Davis 1980. *Pile foundation analysis and design*. New York: Wiley.
- Tomlinson, M.J. 1991. *Pile design and construction practice*. E. and FNSPONTehnički propis za betonske konstrukcije, NN 139/09 i NN 14/10

Kontakt:

Manuela KANIŠKI, dipl.ing.geot.

Varaždin

Dr.sc. Krešo Ivandić, dipl.ing.građ.

Geotehnički fakultet u Varaždinu, Sveučilište u Zagrebu

Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin