

G L A V A V.

PRORAČUN DUBOKIH TEMELJA

Duboki temelji se primenjuju u slučajevima kada su površinski slojevi zemljišta male otpornosti, a opterećenje je takvo da se povećanjem dimenzija osnove temelja ne može obezbediti njegova stabilnost, ili je ekonomski povoljnije ako se obezbedjenje stabilnosti postiže povećanjem dubine fundiranja. Pri tome temelj može ostati u istom sloju zemljišta, samo sa oslanjanjem na većoj dubini gde je i otpornost zemljišta veća. Isto tako dubina fundiranja se može povećati i radi oslanjanja temelja na slojeve zemljišta veće otpornosti.

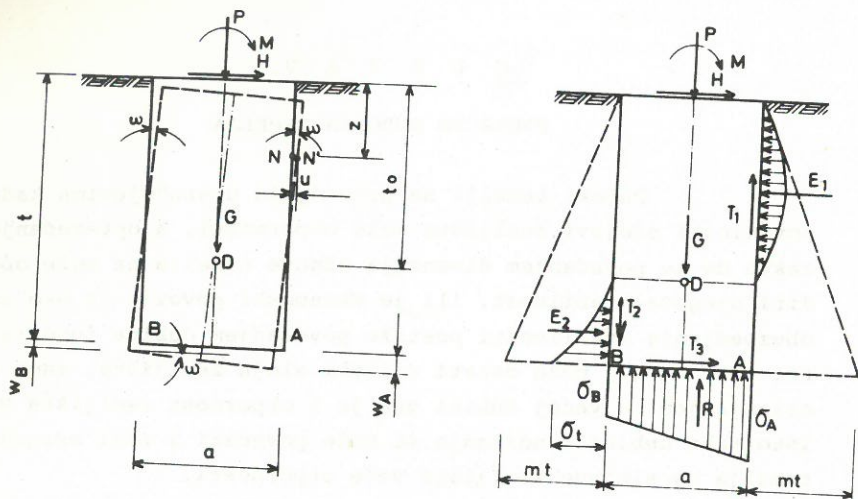
Uobičajeno je da se pod dubokim temeljima podrazumevaju temelji čija je širina osnove najmanje dva puta manja od visine temelja. Karakteristično za ovakve temelje je što se pri ispitivanju njihove stabilnosti, u izvesnim slučajevima, može računati i sa otporima zemljišta na njihovim bočnim površima.

Ako na temelj deluje horizontalna sila H , vertikalna sila P i momenat M , onda temelj teži da se pomeri iz svog prvobitnog položaja. Ovom pomeranju suprotstavljaju se otpori zemljišta na bočnim površima i u osnovi temelja (sl. V.1). Pomeranja temelja i naponsko stanje u zemljištu oko temelja zavise od veličine spoljnih uticaja, dimenzija temelja i osobina zemljišta u kome se nalazi temelj. Otpori zemljišta se mogu odrediti prema jednom od sledećih mogućih stanja ravnoteže:

1. Zemljište se nalazi u stanju elastične ravnoteže
2. Zemljište se nalazi u stanju granične ravnoteže

Proračun dubokih temelja prema stanju elastične ravnoteže u zemljištu omogućava određivanje karakterističnih pomeranja temelja pod uticajem eksploatacionog opterećenja. Zemljište se, u ovom slučaju, tretira kao elastično deformabilna sredina. Deformacijske karakteristike zemljišta se definišu koeficijentima krutosti zemljišta.

Proračun dubokih temelja prema stanju granične ravnoteže u zemljištu zasniva se na potpunom iskorišćenju otpornosti zemljišta. Dopušteno eksploataciono opterećenje se, u ovom



Sl. V.1

slučaju, određuje kao deo opterećenja koje dovodi do sloma u zemljištu.

U ovoj analizi zadržaćemo se samo na prvom slučaju, tj. na slučaju kada se zemljište nalazi u stanju elastične ravnoteže.

1. Analiza postojećih metoda proračuna

Postoji više razradjenih metoda za proračun dubokih temelja prema stanju elastične ravnoteže zemljišta. Navešćemo samo neke od autora tih metoda: Kleinogel, Fröhlich, Sulzberger, Dörr, Prokofjev, Belzecki i dr. Sve postojeće metode zasnovane su na sličnim pretpostavkama, kako u pogledu pomeranja temelja tako i u pogledu otpora zemljišta.

Osnovne pretpostavke postojećih metoda su:

1. Rotacija temelja pod uticajem spoljnih sila vrši se oko tačke D , koja se nalazi na vertikalnoj osi temelja (sl. V.1).

2. Između vertikalnog napona i sleganja postoji odnos:

$$\bar{\sigma}_z = K \cdot w \quad (V.1)$$

gde je K - koeficijent krutosti zemljišta u vertikalnom pravcu.

3. Izmedju koeficijenata krutosti zemljišta u horizontalnom i vertikalnom pravcu postoji odnos:

$$C = \beta K \quad (V.2)$$

gde je β - konstanta.

Veličina koeficijenta krutosti zemljišta K , pa prema tome i koeficijenta C , nije konstantna: u nivou površi terena koeficijent krutosti zemljišta jednak je nuli, a na dubini fundiranja jednak je K . Promena koeficijenta K sa dubinom je linearna. Na dubini z ispod površine terena koeficijent krutosti zemljišta jednak je:

$$K_z = \frac{z}{t} \cdot K \quad (V.3)$$

Prema tome, velična koeficijenta krutosti zemljišta u horizontalnom pravcu, na dubini z ispod površi terena, je:

$$C_z = \frac{z}{t} \beta K \quad (V.4)$$

4. Raspodela pritisaka ispod temelja je pravolinijska.

5. Krutost temelja je daleko veća od krutosti okolnog zemljišta, pa se deformacije temelja u poredjenju sa deformacijama zemljišta mogu zanemariti. To znači da pri rotaciji temelja oko tačke D (sl.V.1) bočne strane i osnova temelja rotiraju za isti ugao ω .

U svim, do sada, poznatim postupcima za proračun dubokih temelja problem odredjivanja veličine trenja u dodirnim površima izmedju temelja i zemljišta nije rešen. Razni autori ovaj problem rešavaju na različite načine, uvodeći određene pretpostavke u pogledu realizacije trenja izmedju temelja i zemljišta. Neki autori uvode u proračun trenje kako na bočnim

površima tako i u osnovi temelja, dok drugi autori uzimaju u obzir trenje ili samo u osnovi temelja ili samo na njegovim bočnim površima.

Većina autora zanemaruju trenje na dodirnim površima izmedju temelja i zemljišta, jer u osnovnim pretpostavkama za proračun dubokih temelja polaze od toga da se zemljište nalazi u stanju elastične ravnoteže. Prema tome, veličina sile trenja u dodirnim površima zavisi od veličine pomeranja usled elastičnog klizanja, i može se izraziti sledećom zavisnošću:

$$T = \mu \delta \quad (V.5)$$

gde je μ - koeficijent krutosti zemljišta na klizanje
 δ - pomeranje usled klizanja za stanje elastične ravnoteže u zemljištu.

Veličina koeficijenta μ nije do sada dovoljno proučena, a to nas lišava mogućnosti da sagledamo udeo trenja u obezbedjenju stabilnosti dubokih temelja, radi čega mnogi autori i izostavljaju uticaj trenja iz proračuna.

Prof. Prokofjev je, razmatrajući ovaj problem, uveo u proračun dubokih temelja i silu trenja koja se javlja u osnovi temelja. Polazeći od toga da trenje izmedju temelja i zemljišta odgovara stanju elastične ravnoteže uveo je i jedan dopunski uslov: veličina sile trenja ne može biti veća od graničnog otpora na klizanje. U kratkim crtama prikazaćemo modifikovanu metodu prof. Prokofjeva.

Na osnovu ranije navedenih pretpostavki možemo za ugao rotacije temelja napisati sledeći izraz (sl.V.1):

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{W_A - W_B}{a} \quad (V.6)$$

Ako vertikalna pomeranja W_A i W_B u gornjem izrazu, koristeći se odnosom (V.1), zamenimo sa:

$$W_A = \frac{G_A}{K}$$

$$W_B = \frac{G}{K}$$

imaćemo:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\sigma_A - \sigma_B}{\alpha K} \quad (\text{V.7})$$

Otpore na bočnim površima temelja možemo izraziti, koristeći odnos (V.4), u sledećem obliku:

$$\sigma_x = \frac{\beta K z u}{t} \quad (\text{V.8})$$

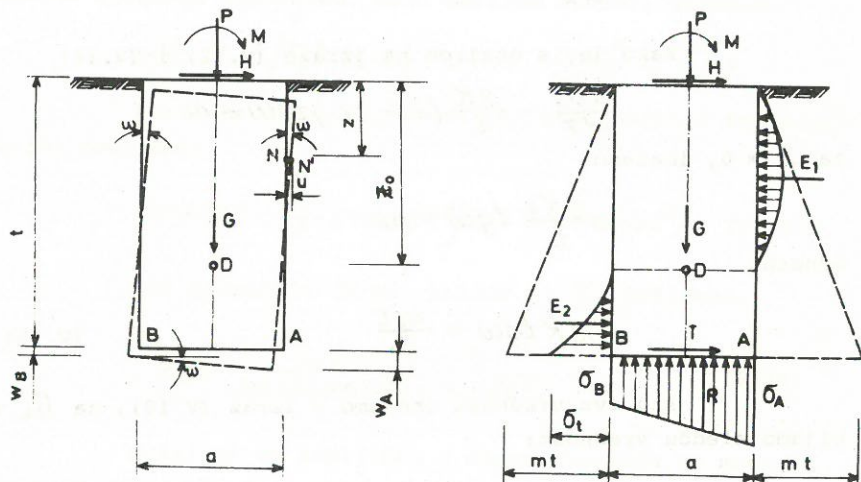
Horizontalno pomeranje temelja na dubini z ispod površine terena, usled rotacije temelja za ugao ω (sl.V.2), biće:

$$u = (z_0 - z) \operatorname{tg} \omega \quad (\text{V.9})$$

Ako u izrazu (V.8) zamenimo odnos om (V.9), imaćemo:

$$\sigma_x = \frac{\beta K z}{t} (z_0 - z) \operatorname{tg} \omega \quad (\text{V.10})$$

S obzirom na pretpostavku da se zemljište nalazi u



Sl. V.2

stanju elastične ravnoteže, mora biti ispunjen uslov da ni u jednoj tački u zemljištu oko temelja ne dodje do plastičnog tečenja, a taj uslov će biti ispunjen ako je:

$$\bar{\sigma}_x \leq \gamma z \left[\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\bar{\alpha}}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{\bar{\alpha}}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (\text{V.11})$$

gde je γ - zapreminska težina zemljišta oko temelja
 φ - ugao unutrašnjeg trenja zemljišta.

Ako uvedemo oznaku

$$m = \gamma \left[\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\bar{\alpha}}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\bar{\alpha}}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (\text{V.12})$$

uslov (V.1) možemo napisati u sledećem obliku:

$$\bar{\sigma}_x \leq m z \quad (\text{V.13})$$

Ovaj uslov će biti ispunjen ako tangenta u tački $z=0$, na dijagram graničnih vrednosti otpora zemljišta, bude zaklapala ugao manji ili jednak uglu koga prava $\bar{\sigma}_x = m z$ zaklapa sa vertikalom, tj.

$$\frac{d\bar{\sigma}_x}{dz} \leq m \quad (\text{V.14})$$

Kako je, s obzirom na izraze (V.12) i (V.14),

$$\frac{d\bar{\sigma}_x}{dz} = \frac{\beta K}{t} (z_0 - 2z) \operatorname{tg} \omega \leq m$$

za $z = 0$, imaćemo:

$$\frac{\beta K z_0}{t} \operatorname{tg} \omega = m$$

odnosno

$$\beta K \operatorname{tg} \omega = \frac{m t}{z_0} \quad (\text{V.15})$$

Ako ovu vrednost unesemo u izraz (V.10), za $\bar{\sigma}_x$ dobijamo sledeću vrednost:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{m z (z_0 - z)}{z_0} \quad (\text{V.16})$$

Položaj centra rotacije z_0 možemo odrediti iz uslova da je suma momenata u odnosu na težište osnove temelja jed-

naka nuli.

S obzirom na uticaje koji deluju na temelj (sl.V.1), ovaj uslov možemo napisati u sledećem obliku:

$$Ht + M - b \int_0^t \hat{\sigma}_x(t-z) dz - \frac{\hat{\sigma}_A - \hat{\sigma}_B}{12} \alpha^2 b = 0 \quad (V.17)$$

gde je α - dužina posmatranog temelja
 b - širina posmatranog temelja

Kako je, s obzirom na izraz (V.7),

$$\hat{\sigma}_A - \hat{\sigma}_B = \alpha K t g \omega$$

a, s obzirom na izraz (V.15),

$$K t g \omega = \frac{m t}{\beta z_0}$$

biće:

$$\hat{\sigma}_A - \hat{\sigma}_B = \frac{m \alpha t}{\beta z_0} \quad (V.18)$$

Ako izraz (V.18) unesemo u jednačinu (V.17) i $\hat{\sigma}_x$ zamenimo njegovom vrednošću, datu izrazom (V.16), imaćemo:

$$Ht + M - b \int_0^t \frac{m t}{\beta z_0} (z_0 - z)(t-z) dz - \frac{m \alpha t}{12 \beta z_0} \alpha^2 b = 0$$

Posle izvršene integracije i elementarnih transformacija, dobijamo:

$$[12\beta(Ht + M) - 2m\beta b t^3] / z_0 = m b t (\alpha^3 / \beta t^3) \quad (V.19)$$

Ako jednačinu (V.19) rešimo po z_0 dobićemo:

$$z_0 = \frac{m b t (\alpha^3 - \beta t^3)}{2\beta [6(Ht + M) - m \cdot b t^3]} \quad (V.20)$$

Pritisci na zemljište u osnovi temelja se mogu odrediti iz uslova da je suma projekcija svih sila na vertikalnu osu jednaka nuli:

$$G + P - \frac{1}{2} (\hat{\sigma}_A + \hat{\sigma}_B) \alpha \cdot b = 0 \quad (V.21)$$

gde je G - težina temelja.

Jednačinu (V.21) možemo napisati u obliku:

$$\bar{\sigma}_A + \bar{\sigma}_B = \frac{2(G+P)}{ab} \quad (V.22)$$

Odnosi između pritisaka $\bar{\sigma}_A$ i $\bar{\sigma}_B$ dati su i jednačinom (V.18). Rešenjem jednačina (V.18) i (V.22) dobijamo:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_A &= \frac{P+G}{ab} + \frac{mat}{2\beta z_0} \\ \bar{\sigma}_B &= \frac{P+G}{ab} - \frac{mat}{2\beta z_0} \end{aligned} \quad (V.23)$$

Maksimalni pritisak na zemljište u osnovi temelja ne može biti veći od dozvoljenog pritiska za odgovarajuću vrstu zemljišta, a minimalni pritisak ne može biti manji od nule.

Veličinu sile trenja u osnovi temelja možemo odrediti iz uslova da je zbir projekcija na X - osu svih sila, koje deluju na temelj, jednak nuli:

$$\sum X = 0$$

S obzirom na sile koje deluju na posmatrani temelj (sl. V.2), ovaj uslov možemo napisati u obliku:

$$H+T \cdot b \int_0^t \bar{\sigma}_x dz = 0 \quad (V.24)$$

Ako u jednačinu (V.24) umesto $\bar{\sigma}_x$ unesemo njegovu vrednost, datu izrazom (V.16), imaćemo:

$$H+T \cdot b \int_0^t \frac{mz}{z_0} (z_0 - z) dz = 0$$

odnosno

$$H+T \cdot \frac{mbt^2}{6z_0} (3z_0 - 2t) = 0 \quad (V.25)$$

Rešavajući jednačinu (V.25) po T , dobijamo:

$$T = \frac{mbt^2}{6} (3 - 2 \frac{t}{z_0}) - H \quad (V.26)$$

Ovako određena sila T treba da ispuni uslov:

$$0 \leq T \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot a b t g \varphi \quad (V.27)$$

gde je φ - ugao unutrašnjeg trenja zemljišta.

Iz ovog kratkog prikaza modifikovane metode prof. Prokofjeva se vidi da se, pri proračunu dubokih temelja, zemljište tretira kao elastično deformabilna sredina, a da se kao osnovna deformacijska karakteristika uzima koeficijent krutosti zemljišta. Tretiranje zemljišta kao elastičnog, homogenog i izotropnog poluprostora još nije našlo primenu usled velikih teškoća matematičke prirode, na koje se nailazi pri primeni metoda Teorije elastičnosti.

Jedan od veoma važnih parametara, koji se javlja pri proračunu dubokih temelja, je položaj centra rotacije. Centar rotacije predstavlja zamišljenu nepokretnu tačku oko koje temelj rotira iz početnog položaja u položaj koji odgovara pomeranjima, usled delovanja spoljnih sila. Položaj centra rotacije određuje polaznu računsku shemu.

Treba naglasiti da od pretpostavljene polazne računске sheme zavise i rezultati proračuna. Ako se u polaznoj računskoj shemi pretpostavi da se centar rotacije nalazi u nivou osnove temelja time je predodređeno odsustvo horizontalnih pomeranja osnove temelja. Ako se, pak, pretpostavi da se centar rotacije nalazi isnad osnove temelja horizontalna pomeranja osnove temelja imaju samo jedan potpuno određen smer.

Isto tako veoma važan parametar je i koeficijent krutosti zemljišta. U postojećim metodama za proračun dubokih temelja se uzima da je, za određenu vrstu zemljišta, ovaj koeficijent konstantan i da ne zavisi od dimenzija temelja, što ne odgovara stvarnosti. Na promenu ovog koeficijenta mnogo više utiču dimenzije temelja nego dubina, za istu vrstu zemljišta.

Radi izbora najcelishodnije metode za proračun dubokih temelja izvršeni su mnogobrojni opiti na dubokim temeljima. Izvršena ispitivanja su pokazala da:

1. Između horizontalne sile koja deluje na temelj i horizontalnog pomeranja temelja postoji parabolična zavisnost. Parabolična kriva polazi iz koordinantnog početka i prelazi u

pravu.

2. Položaj centra rotacije nije nepokretna tačka. U početku nanošenja horizontalnog opterećenja centar rotacije se nalazi ispod osnove temelja a sa povećanjem opterećenja približava se osnovi temelja.

3. Izmerene veličine reaktivnih pritisaka na bočnim stranama temelja omogućavaju da se konstruišu dijagrami, koji se kvalitativno slažu sa dijagramima dobijenim metodama proračuna, zasnovanim na ranije navedenim pretpostavkama.

Medjutim, treba napomenuti da izvršeni eksperimenti, mada ne daju potpun materijal za precizne zaključke u pogledu stabilnosti dubokih temelja, pružaju dragocene podatke. Najveća njihova vrednost je u tome što omogućavaju dobijanje jasne predstave o položaju centra rotacije i karakteru reaktivnih pritisaka zemljišta na bočnim površima temelja. Jedan od osnovnih zaključaka ovih opita je konstatacija o promjenljivosti položaja centra rotacije u zavisnosti od dimenzija temelja, položaja i veličine opterećenja. Iz toga možemo zaključiti da metode proračuna zasnovane na pretpostavci o nepromjenljivosti položaja centra rotacije i, prema tome, karakteru reaktivnih pritisaka na bočnim površima temelja nisu potvrđene opitima. Izvršeni eksperimenti daju prednost onim metodama proračuna dubokih temelja prema kojima karakter reaktivnih pritisaka i položaj centra rotacije zavise od dimenzija temelja, osobina zemljišta i prirode opterećenja.

Nedostatak metoda za proračun dubokih temelja, zasnovanih na pretpostavci o promjenljivosti položaja centra rotacije, je u tome što se položaj centra mora pretpostaviti jer od toga da li se centar rotacije nalazi iznad ili ispod osnove temelja zavisi i polazna računska shema. Zato se ovom problemu mora prići sa aspekta koji bi omogućio da se pretpostavka o položaju centra rotacije izbegne, čime bi tretiranje ovoga problema dobilo opštiji karakter.

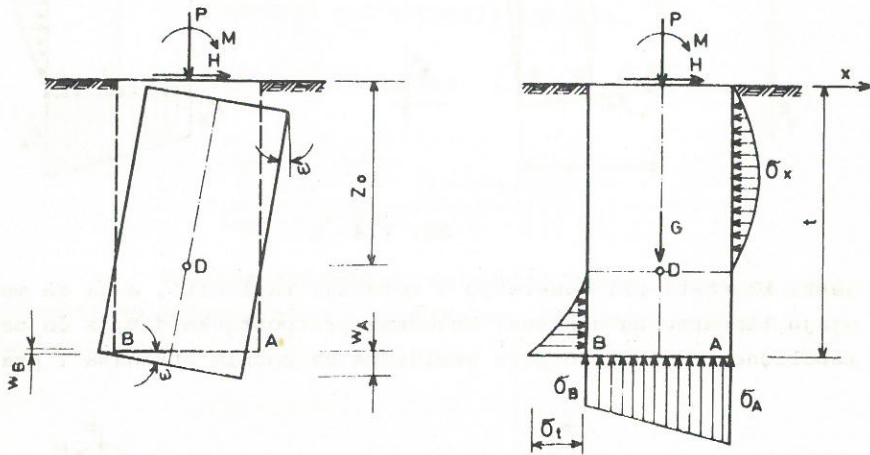
2. Proračun dubokih temelja

Iz ranije navedenih pretpostavki proističe da će, ako temelj izvrši neku malu rotaciju, i njegove bočne strane rotirati za isti ugao kao i osnova temelja. Pomeranje temelja

iz početnog u novi položaj posmatračemo kao rotaciju temelja oko neke tačke koju ćemo zvati centar rotacije.

Analizirajući pomeranja temelja u zemljištu i moguće položaje centra rotacije može se zaključiti da postoje tri moguća slučaja:

1. Centar rotacije se nalazi iznad osnove temelja. Osnova temelja se pomera u suprotnom smeru od smera delovanja horizontalne sile. Shema pomeranja i reaktivnih pritisaka zemljišta na temelj prikazani su na sl. V.3.



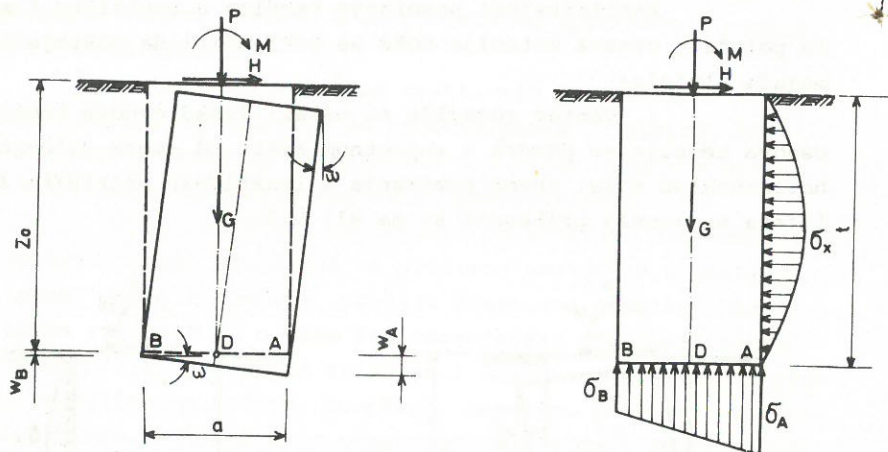
Sl. V.3

2. Centar rotacije se nalazi u nivou osnove temelja. Shema pomeranja i reaktivnih pritisaka zemljišta na temelj dati su na sl. V.4.

3. Centar rotacije se nalazi ispod osnove temelja. Osnova temelja se pomera u smeru dejstva horizontalne sile. Shema pomeranja i reaktivnih pritisaka zemljišta na temelj dati su na sl. V.5.

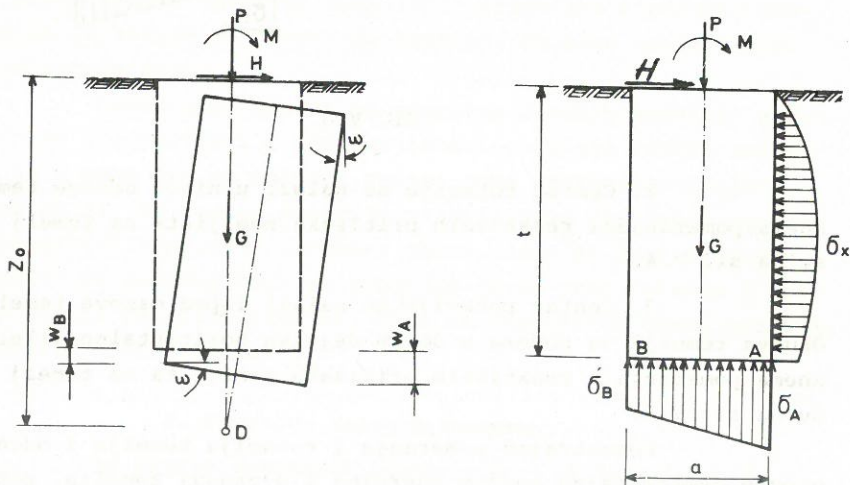
Posmatrajmo ^(moguća) pomeranja i rotaciju temelja i odredimo otpore zemljišta na bočnim površima i u osnovi temelja, posebno za svako od tih pomeranja. Za određivanje otpora zemljišta, kako u osnovi temelja tako i na njegovim bočnim površima, ko-

rističemo se linearnom zavisnošću izmedju pomeranja i pritiska temelja na zemljište. Dalje, pretpostavićemo da su koefici-



S1. V.4

jenti krutosti pri pomeranju i rotaciji različiti, a da se menjaju linearno sa dubinom. Navedene pretpostavke dovode do parabolične raspodele otpora zemljišta na bočnim stranama i pra-



S1. V.5

volinijske raspodele u osnovi temelja.

S obzirom na rečeno o koeficijentima krutosti zemljišta uvešćemo sledeće oznake:

- K_v - koeficijent krutosti zemljišta za vertikalna pomeranja
- C_v - koeficijent krutosti zemljišta za horizontalna pomeranja
- K_w - koeficijent krutosti zemljišta za vertikalna pomeranja pri rotaciji temelja
- C_w - koeficijent krutosti zemljišta za horizontalna pomeranja pri rotaciji temelja.

Promena koeficijenata C_v i C_w po dubini je linearna:

$$C_{v,z} = \frac{z}{t} C_v$$

$$C_{w,z} = \frac{z}{t} C_w$$

Pretpostavljamo da su odnosi izmedju koeficijenata krutosti za horizontalna i vertikalna pomeranja dati sledećim zavisnostima:

$$\left. \begin{aligned} C_v &= \beta K_v \\ C_w &= \beta K_w \end{aligned} \right\} \quad (V.28)$$

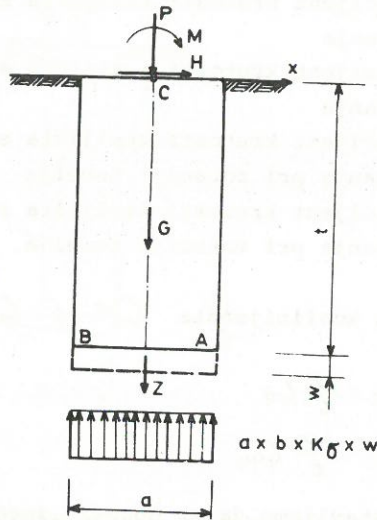
odnosno

$$\left. \begin{aligned} C_{v,z} &= \frac{\beta z}{t} K_v \\ C_{w,z} &= \frac{\beta z}{t} K_w \end{aligned} \right\} \quad (V.29)$$

Usled vertikalnog pomeranja temelja za veličinu w , u podlozi ispod temelja se javlja ravnomerno podeljeno reaktivno opterećenje $K_v \cdot w$ (sl.V.6), Rezultanta ovog opterećenja je:

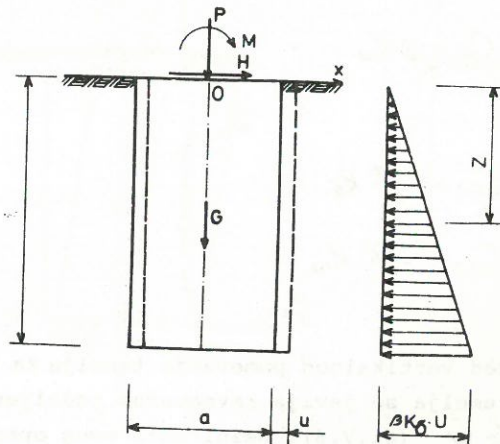
$$R = a b k_0 w$$

(V.30)



Sl. V.6

Usled horizontalnog pomeranja temelja za veličinu u



Sl. V.7

na bočnoj površi se javlja otpor zemljišta, čiji se intenzitet menja linearno sa dubinom (sl.V.7). Reaktivno opterećenje na dubini z , s obzirom na uvedene zavisnosti (V.29), je:

$$\sigma_{xz} = \beta \frac{z}{t} K_0 \cdot u \quad (V.31)$$

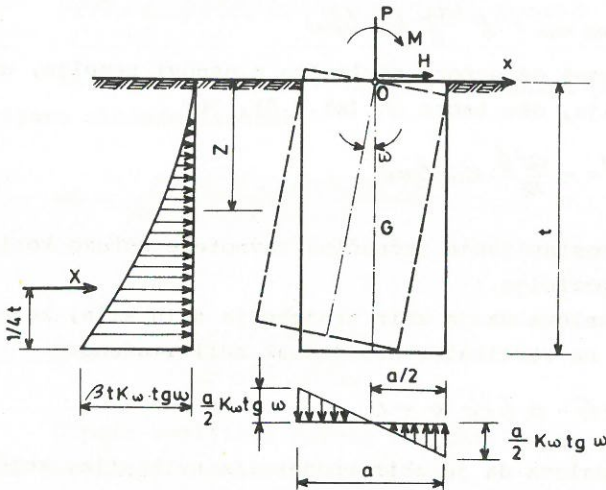
Rezultanta bočnog otpora je:

$$X = \beta \frac{b t^2}{2} K_0 \cdot u \quad (V.32)$$

Momenat ove rezultante u odnosu na tačku O (sl.V.7) jednak je:

$$M = \beta \frac{b t^3}{3} K_0 \cdot u \quad (V.33)$$

Usled rotacije temelja oko tačke O (sl. V.8) na



Sl. V.8

bočnoj strani temelja se javlja otpor zemljišta koji se menja po zakonu parabole, tj.

$$\sigma_{xz} = \frac{\beta z^2}{t} K_w \cdot \operatorname{tg} \omega \quad (\text{V.34})$$

Rezultanta bočnog otpora zemljišta u ovom slučaju je:

$$X = b \int_0^t \frac{\beta z^2}{t} K_w \cdot \operatorname{tg} \omega \, dz = \frac{\beta b t^2}{3} K_w \operatorname{tg} \omega \quad (\text{V.35})$$

a momenat u odnosu na tačku O :

$$M = - \frac{3 b t^3}{4} K_w \operatorname{tg} \omega \quad (\text{V.36})$$

Dijagram otpora zemljišta u osnovi temelja, usled rotacije temelja oko tačke O , sastavljen je od dva trougla sa maksimalnim ordinatama (sl.V.8):

$$\sigma_{\max/\min} = \pm \frac{a}{2} K_w \operatorname{tg} \omega \quad (\text{V.37})$$

Momenat od otpora zemljišta u osnovi temelja, usled rotacije temelja, oko tačke O (sl.V.8), je:

$$M = - \frac{a^3 b}{12} K_w \operatorname{tg} \omega \quad (\text{V.38})$$

Za postavljanje jednačina ravnoteže možemo koristiti princip superpozicije.

Iz uslova da je zbir projekcija svih sila, koje deluju na temelj, na vertikalnu osu jednak nuli imaćemo:

$$P + G - a b K_w \omega = 0 \quad (\text{V.39})$$

Iz uslova da je zbir projekcija svih sila, koje deluju na temelj, na horizontalnu osu jednak nuli, imamo:

$$H - \frac{\beta b t}{2} K_w u + \frac{3 b t^2}{3} K_w \operatorname{tg} \omega = 0 \quad (\text{V.40})$$

Za treći uslov ravnoteže iskoristićemo uslov da je zbir momenata svih sila, koje deluju na temelj, u odnosu na neku tačku u ravni jednak nuli. Ako za momentnu tačku usvojimo tačku O , treći uslov ravnoteže možemo napisati u sledećem obliku:

$$M + \frac{3bt^2}{3} K_6 u - \left(-\frac{3bt^3}{4} + \frac{a^3 b}{12} \right) K_w \operatorname{tg} \omega = 0 \quad (\text{V.41})$$

Rešenjem sistema jednačina (V.39), (V.40) i (V.41) dobićemo nepoznata pomeranja u , w i ω .

Rešenjem jednačine (V.39) dobijamo:

$$w = \frac{p+G}{a b K_6} \quad (\text{V.42})$$

Jednačine (V.40) i (V.41) čine sistem od dve simultane jednačine sa dve nepoznate: horizontalno pomeranje u i rotacija temelja ω . Jednačine (V.40) i (V.41) možemo, posle elementalnih transformacija, napisati u sledećem obliku:

$$\left. \begin{aligned} 6H - 3\beta b t K_6 u + 2\beta b t^2 K_w \operatorname{tg} \omega &= 0 \\ 12M + 4\beta b t^2 K_6 u - (a^3 + 3\beta t^3) b K_w \operatorname{tg} \omega &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.43})$$

Rešenjem sistema (V.43), za nepoznata pomeranja u i ω dobijamo sledeće izraze:

$$u = \frac{24\beta t^2 M + 6(a^3 + 3\beta t^3) H}{\beta (3a^3 + \beta t^3) b K_6 t} \quad (\text{V.44})$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{12(3M + 2Ht)}{(3a^3 + \beta t^3) b K_w} \quad (\text{V.45})$$

Otpore zemljišta možemo odrediti koristeći dobijene izraze za pomeranja i rotaciju temelja.

Naponi na ivicama temelja u osnovi, s obzirom na izraze (V.30), (V.37), (V.42) i (V.45), biće:

$$\sigma_z = \frac{p+G}{a b} \pm \frac{6(3M + 2Ht)a}{(3a^3 + \beta t^3) b} \quad (\text{V.46})$$

Otpor zemljišta na bočnim površima temelja, s obzirom na izraze (V.34) i (V.31), možemo izraziti u sledećem obliku:

$$\sigma_{x,z} = -\frac{\beta z}{t}(K_0 u - z K_w \operatorname{tg} \omega) \quad (\text{V.47})$$

Položaj centra rotacije možemo odrediti iz izraza (V.47), ako uzmemo da je $\sigma_{x,z} = 0$

Ako sa z_0 obeležimo odstojanje položaja centra rotacije od površi terena, imaćemo:

$$z_0 = \frac{K_0 u}{K_w \operatorname{tg} \omega} \quad (\text{V.48})$$

Ako u izraz (V.48) unesemo vrednosti za u i $\operatorname{tg} \omega$, date izrazima (V.44) i (V.45), imaćemo:

$$z_0 = \frac{4\beta t^2 M + (\alpha^3 + 3\beta t^3) H}{2(3M + 2Ht)\beta t} \quad (\text{V.49})$$

Stabilnost dubokih temelja je obezbedejna ako su ispunjeni sledeći uslovi:

1. Vertikalni pritisci u osnovi na ivicama temelja

$$\max \sigma_z \leq \sigma_{\text{dovr}}$$

$$\min \sigma_z \geq 0$$

2. Horizontalni pritisci na polovini odstojanja centra rotacije od površine terena

$$\sigma_x(z = z_0/2) \leq \frac{m z_0}{2}$$

$$\sigma_x(z = t) \leq m t$$

gde je

$$m = \gamma \left[\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\alpha}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (\text{V.50})$$

3. Odredjivanje koeficijenata krutosti zemljišta

Već je napomenuto da je jedan od glavnih nedostataka postojećih metoda za proračun dubokih temelja nepravilno usvojen koeficijent krutosti zemljišta. Koeficijent krutosti zemljišta nije konstanta i ne zavisi samo od elastičnih osobina zemljišta, već isto tako i od drugih faktora: dimenzija i oblika

osnove temelja, karaktera slojevitosti zemljišta i dr. Između ostalog, koeficijent krutosti zemljišta, pri vertikalnim pomeranjima i pri obrtanju temelja u vertikalnoj ravni, ne može se okarakterisati samo jednom veličinom. Za određivanje koeficijenta krutosti dosta dugo je upotrebljavana metoda, zasnovana na Vinklerovoj hipotezi, prema kojoj je pritisak u nekoj tački upravo proporcionalan sleganju te tačke, tj.

$$p = K \cdot w \quad (V.51)$$

gde je K - koeficijent krutosti.

Iz napred rečenog je očigledno da tačnost proračuna dubokih temelja, zasnovanih na ispravnim teorijskim postavkama, zavisi od toga sa kojom tačnošću su određene veličine odgovarajućih koeficijenata krutosti. Pošto koeficijenti krutosti ne zavise samo od elastičnih osobina zemljišta, moramo ih posmatrati kao zajedničke opšte karakteristike temelja i zemljišta. Radi toga, potrebno je odabrati metodu za određivanje tih karakteristika, koja bi obuhvatila najvažnije faktore i sadržala pouzdane pokazatelje deformacijskih karakteristika zemljišta. Radi rešenja ovog problema poći ćemo od postavke da podlogu temelja čini elastičan, homogen i izotropan poluprostor. Ovakva postavka omogućava određivanje koeficijenta krutosti sa tačnošću dovoljnom za praksu.

Koeficijente krutosti ćemo odrediti polazeći od postojećih izraza za veličine sleganja i rotacije krutih temelja oslonjenih na elastičan, homogen i izotropan poluprostor.

M.J. Gorbunov-Posadov je, za krute temelje pravougaone osnove, predložio sledeće izraze:

a) za sleganje temelja

$$w = \frac{(1-\nu^2)P}{E_0 \sqrt{F}} \alpha_1 \quad (V.52)$$

b) za rotaciju temelja

$$\text{tg} \omega = \frac{8(1-\nu^2)M}{E_0 a^3} \alpha_2 \quad (V.53)$$

- gde je F - površina osnove temelja
 P - ukupno vertikalno opterećenje koje se preko osnove temelja prenosi na zemljište
 M - ukupan momenat koji se preko osnove temelja prenosi na zemljište
 a - dužina temelja
 b - širina temelja
 E_0 - moduo deformacija zemljišta
 ν_0 - Poisson-ov koeficijent zemljišta.

Koeficijenti α_1 i α_2 su bez dimenzija, koji zavise od odnosa b/a . Numeričke vrednosti ovih koeficijenata, za različite odnose b/a , date su u tabeli V.1.

Tabela V.1.

$\frac{b}{a}$	α_1	α_2	$\frac{b}{a}$	α_1	α_2
0,20	0,77	1,45	1,00	1,00	0,50
0,25	0,80	1,30	2,00	0,86	0,30
0,33	0,83	1,10	3,00	0,83	0,21
0,50	0,86	0,87	4,00	0,80	1,15
1,00	1,00	0,50	5,00	0,77	0,12

Radi odredjivanja koeficijenata krutosti, koji se javljaju pri proračunu dubokih temelja, izrazićemo sleganje i rotaciju preko tih koeficijenata.

Sleganje temelja možemo odrediti korišćenjem izraza (V.30).

$$W = \frac{P}{abK_0} \quad (V.54)$$

Rotaciju temelja ćemo odrediti korišćenjem izraza (V.38)

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{12M}{\alpha^3 b K_0} \quad (\text{V.55})$$

Upoređenjem izraza (V.52) i (V.54) za koeficijent krutosti zemljišta pri vertikalnom pomeranju K_0 dobijamo sledeću vrednost:

$$K_0 = \frac{E_0}{(1-\nu_0^2)\alpha_1 \sqrt{F}} \quad (\text{V.56})$$

Upoređenjem izraza (V.53) i (V.55) za koeficijent krutosti zemljišta pri rotaciji temelja K_w dobijamo sledeću vrednost:

$$K_w = \frac{3E_0}{2(1-\nu_0^2)\beta \alpha_2} \quad (\text{V.57})$$

Kao orijentacione veličine Poisson-ovog koeficijenta za različite vrste zemljišta, mogu se uzeti sledeće vrednosti:

šljunak	ν_0	= 0,25
pesak	ν_0	= 0,30
prašina	ν_0	= 0,35
glina	ν_0	= 0,40

Pored koeficijenata krutosti K_0 i K_w u izrazima za reaktivne pritiske, pomeranja i rotaciju temelja figuriše i koeficijent β , kao odnos između koeficijenata krutosti pri horizontalnim i vertikalnim pomeranjima. Za praktične proračune može se usvojiti da je $\beta = 0,5$.

Moduo deformacije E_0 se može odrediti probnim opterećenjem ili laboratorijskim ispitivanjima. Međutim, treba napomenuti da je zemljište najčešće sastavljeno od više slojeva različitih osobina, a laboratorijskim ispitivanjima mogu da se odrede deformacijske karakteristike samo pojedinačnih slojeva. Zajedničku deformacijsku karakteristiku svih slojeva ispod temelja nije moguće odrediti laboratorijskim putem. U takvim slučajevima se mogu odrediti ekvivalentne deformacijske karakteristike ako se, po metodama Mehanike tla, sračuna sleganje temelja i prema veličini dobijenog sleganja odredi ekvivalentni moduo deformacije.

Ako jednačinu koja daje vezu između sleganja krutih temelja i modula deformacija rešimo po modulu deformacija, i u tako dobijeni izraz unesemo vrednost sračunatog sleganja, dobićemo ekvivalentni moduo deformacija. Ako je, na primer, temelj pravougaone osnove i ako iskoristimo rešenje Gorbunova-Posadova dato izrazom (V.52), ekvivalentni moduo deformacija je:

$$E_0 = \frac{(1-\nu^2)P}{\Delta VF} \cdot \alpha, \quad (V.58)$$

gde je Δ - veličina sračunatog sleganja.

Na kraju da napomenemo da se sa otporima zemljišta na bočnim površima temelja ne može uvek računati. Uzimanju u obzir bočnih otpora zemljišta treba pristupiti obazrivo. Ako se temelj nalazi u zemljištu sa izraženim viskoznom osobinama, kao što su glinovita, prašinsta i prašinasto-glinovita zemljišta, sa bočnim otporima se može računati samo za promenljivo opterećenje koje nema karakter stalnog.