

MODELI TLA U ANALIZI INTERAKCIJE I ODREĐJIVANJE
WINKLER-ovog MODULA REAKCIJE TLA

Miroslav Samardaković

Posle pregleda i grupisanja uticaja na interakciju temelj-tlo, računskih metoda njene analize i modela tla, u radu su izložene mogućnosti i postupci za određivanje Winkler-ovog modula reakcije tla (k_s). Kod fleksibilnog temelja na datom tlu, veličina ovog modula i površina efektivnog dejstva opterećenja su međusobno zavisni. Za potrebe dimenzionisanja fleksibilnih temelja sa različitim rasporedima opterećenja, predložen je iterativni postupak za određivanje k_s na bazi modula (k_p) izmerenog opitom probnog opterećenja, čije su orijentacione vrednosti za razne vrste tla priložene. Sažeto su dati i uslovi (još uvek) opravdane primene Winkler-ovog modela.

1. UTICAJI NA INTERAKCIJU I MODELI TLA

Kompletna analiza problema interakcije podrazumeva određivanje napona i deformacija u telima koja su u kontaktu, uzimajući u obzir raspodelu pomeranja i pritiska duž kontakta.

Smatrajući deformabilna tela (sredine) elastičnim, analiza interakcije razvijena je u tri pravca: a) interakcija elastičnih tela, b) interakcija elastične sredine i krutog tela (gde je, za razliku od prethodnog slučaja, kontaktna površina po veličini i obliku unapred poznata) i c) interakcija između elastičnih tela i elementa konstrukcije.

U trećem je sadržan i specijalan slučaj opšteg problema interakcije elastičnih tela, kada je mehaničko ponašanje jedne sredine (tla) zavisno od ponašanja elementa konstrukcije (temeljna greda, ploča ili ljuska).

Ovaj problem teorijski se rešava prethodnim uvođenjem pretpostavki i modela idealizovanog ponašanja tla, ponašanja temelja (npr. po Bernoulli-Euler-ovoj teoriji grede, teoriji tanke ili debele ploče i dr.) i ponašanja kontaktne zone (uticaj trenja i adhezije), kao i izborom i primenom tehnike proračuna. Od svega toga zavisi i tačnost i realnost rezultata.

Analiza interakcije temelj-tlo u osnovi se redukuje na određivanje raspodele kontaktnih pritisaka, što se - uz zanemarivanje kontaktnog trenja i adhezije - svodi na određivanje normalnih komponenti pritisaka. Kada se one znaju, mogu se sračunati ugibi i presečne sile u temelju i naponi i pomeranja (sleganja) u idealizovanom tlu.

Očekivana raspodela kontaktnog pritiska može se odrediti sledećim razradjenim računskim metodama: a) analitičkim, b) metodama superpozicije, c) približnim analitičkim, d) varijacionim i e) numeričkim.

Kako je poznato, proračun raspodele i veličine kontaktnih pritisaka po bilo kojoj metodi je složen jer raspodela zavisi od deformacija tla odnosno temelja pa je, kao takva, funkcija osobina tla i temelja sa objektom. Pod ovim osobinama podrazumevaju se, pre svega, deformabilnost tla (u datim uslovima) i relativna krutost temelja sa objektom a zatim oblik, dimenzije i dubina temeljne stope i vrsta, veličina i raspodela opterećenja.

Uz navedene uticaje na interakciju, čije uvođenje u proračun je razradjeno ali nedovoljno primenjivano (već se, na primer, računске osobine tla uvode samo na bazi procenjene stišljivosti, a ne i ostalih uticaja), interakcija i raspodela kontaktnog pritiska zavise i od sledećeg:

1. Drugi uticaji iz tla: a) slojevitost i nagib slojeva, b) nelinarno deformisanje zbog prekonsolidacije, c) računski negativni pritisci, d) plastične deformacije, e) pritisci podzemne vode, f) konsolidacija, g) dejstvo susednih objekata na tlo.

2. Drugi uticaji od objekta: a) konačna krutost izvedenog objekta, b) spojnice i zglobovi u objektu, c) stvaran odnos i uticaj stalnog i promenljivog dela opterećenja, d) temperaturni uticaji, e) horizontalno opterećenje i kontaktno trenje, f) puženje i prsline u betonu, g) dinamička opterećenja.

Sa ovoliko uticaja, koji svi niti mogu niti treba da udju u analizu, statički i deformacijski beskonačno puta neodređeni sistem interakcije analizira se inženjerski racionalno, pri čemu je izbor modela tla i parametara tog modela, uvek iznova za svaki poseban slučaj, prvi korak. Njihov izbor je jedan od dobrih primera potrebe da inženjer razvija sposobnost zaključivanja na osnovu znanja, iskustva i intuicije, relativno čestih u oblasti geotehnike.

Za temelje čije su dimenzije u osnovi do 4,00 m, može se usvojiti linearna raspodela kontaktnih pritisaka, sračunatih kao da su temelj i tlo kruta tela.

Za praktičnu računsku analizu interakcije u cilju dimenzionisanja plitkih temelja većih dimenzija, uz pojedine računске metode za sada mogu biti izabrani sledeći modeli tla:

1. Elastični modeli: a) Winkler-ov model, b) modeli elastičnog kontinuuma (izotropan, anizotropni, nehomogeni, slojeviti, kombinovani sa Winkler-ovim) i c) dvoparametarski modeli (npr. Vlasova i Leontijeva, 1966, za koje se može reći da daju teorijsko obrazloženje modela Winkler-a, inače kreiranog na bazi intuicije).

2. Elastično-plastični modeli

3. Modeli sa ponašanjem zavisnim od vremena (kojima je uvedena i koneolidacija tla pod opterećenjem).

Posebno pominjani modeli stišljivog tla sadrže pokazatelje stišljivosti tla kao konstante u očekivanom području radnih napona, pa se mogu svrstati u elastične modele.

Pošto ni jedan model tla svojim parametrima ne može da reprezentuje sve navedene uticaje na interakciju, svi modeli imaju značajne nedostatke. Jedni su nedovoljno realni pa se samim tim njihovi parametri teško odredjuju, dok su proračuni relativno jednostavniji (Winkler-ov model). Drugi su realniji i parametri se mogu dovoljno dobro odrediti (mada se, zbog složenijeg ispitivanja i odsustva opreme u našim uslovima, odgovarajući opiti za njihovo odredjivanje retko izvode) ali su zato proračuni znatno komplikovaniji (modeli elastičnog kontinuuma i drugi).

Literatura u kojoj se izlažu postupci proračuna greda i ploča na deformabilnoj podlozi je dosta obimna i sadrži mnoštvo tabela za praktične proračune, obimna i sadrži mnoštvo tabela za praktične proračune, koji su sve više omogućeni i kompjuterskim softverom. Iz nje se, prema uvidu autora, mogu izdvojiti Nonveiller (1979), Winterkorn i Fang (1975), Selvadurai (1979), Grasshoff i Kany (1982), Gorbunov-Posadov i dr. (1984), koji opisuju i upoređuju različite modele tla i daju primere i upoređenja računskih metoda. Detaljna uputstva i upoređenja modela data su i u DIN 4018(1974) i Beiblatt 1 zu DIN 4018(1981).

Iz izloženih radova sagledava se da je za potrebe projektovanja, za sada, izbor između Winkler-ovog i modela elastičnog kontinuuma.

Kod modela elastičnog kontinuuma, parametri tla (ekvivalentni E i ν) zavise od osobina tla (ne i temelja) ali se moraju odrediti preko drugih pokazatelja, dobijenih terenskim ili laboratorijskim opitima, uzevši u obzir uslove ispod temelja. Ovi parametri trebalo bi da se menjaju sa dubinom (bar linearno) ili da se linealizacijom problema usvoji E koje zavisi od konačnog stanja napona u svakoj tački. Proračuni za elastičan kontinuum su dugi a za slojevitu sredinu i čisto formalne prirode. Kod nas, postupke proračuna sa tabelama i kompjuterskim programima razvijaju i analiziraju ŠUKLJE (1979), Nonveiller (1979), Stevanović (1982) i dr.

Zbog veće istraženosti i jednostavnijeg (ali još uvek složenog) proračuna, model Winkler-a je postao konvekcionalan. U postojećim uslovima i mogućnosti adaptacije dosta poznatoj interakciji uobičajenih sistema temelj-tlo, sa promenom parametra tla duž kontakta, po dubini i sl., ovaj model će i dalje biti aktuelan. Osnovni problem je izbor jednog parametra ovog modela, čiji je najširi naziv modul reakcije (k_s) tla.

Kao koeficijent linearne zavisnosti kontaktnog pritiska (p) u okolini jedne tačke kontaktne površine od vertikalnog pomeranja (S) tla u toj tački, modul reakcije $k_s = p/S$ (kN/m^3) ne zavisi samo od vrste i stanja tla tj. od njegove deformabilnosti (kako se često u praksi odabira), već i od svih drugih uticaja od kojih zavise sleganje i interakcija, navedenih napred. Pored deformabilnosti homogenog tla, koja zavisi od sastava (nekoherentno, koherentno) i stanja tla (pre svega zbijenost i oblik zrna za nekoherentno tj. vlažnost ili stanje konsistencije za koherentno) i koja se može odrediti terenskim ili laboratorijskim opitima, pri izboru veličine modula reakcije moraju se (i mogu lako) uzeti u obzir: veličina i oblik kontaktne površine ili površine efektivnog dejstva opterećenja, dubina kontaktne površine a na koherentnom tlu i uticaj vremena - konsolidacije.

Dakle, modul reakcije za datu vrstu i stanje tla nije konstanta pa u račun ugiba i momenata savijanja grede ili ploče na tlu ne bi trebalo ići direktno sa veličinama k_s koje su date u raznim tablicama, iako se greška zbog njegove pogrešne veličine znatno redukuje činjenicom da rešenja diferencijalnih jednačina grede i ploče sadrže četvrti koren i trigonometrijske i hiperbolične funkcije ovog modula.

2. RAZVOJ WINKLER-ovog MODELA, OPIT PROBNOG OPTEREĆENJA I POSTUPCI ZA ODREĐIVANJE MODULA REAKCIJE TLA

"Winkler-ov model opruge" prvi je predložio Euler (-1783) a koristio njegov saradnik Füss (1801). Pošto je model obradio Winkler (1867)*, široko ga je primenio Zimmermann (1888) a za grede i ploče na ovakvoj podlozi Hayashi (1921), Hetenyi (1946) a zatim i mnogi drugi.

Osobine i nedostaci modela, kao sistema nezavisnih vertikalnih opruga, poznati su i opisani u udžbeničkoj literaturi pa ovde neće biti komentarisani.

Modul reakcije $k_s = p/s$ za dati temelj, kao i druge pokazatelje tla, najbolje je odrediti opitom, in situ u što krupnijoj razmeri, kako bi bili obuhvaćeni uticaji koji će se javiti kod realnog temelja. U ovom slučaju to je opit probnog opterećenja krutom pločom, koja bi pod jednakim računskim kon-

* Winkler, E. (1867): *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit*. Verlag H. Dominicus, Prag.

taktnim pritiskom (p) ostvarila sleganje (S_p) koje odgovara njenom obliku, dimenzijama i dubini, a za glinu i vremenu dejstva opterećenja, pa bi za ploču bio izmeren modul $k_p = p/S_p$.

Kako navodi Selvadurai (1979), Weissman i White (1961) predlažu sledeće opšte uslove izvodjenja ovog opita:

- a) Površina ploče trebalo bi da bude 10-15% od površine oslanjanja temelja i sličnog oblika, ako je ta površina centričnosimetrična; za temelj drugačijeg oblika, odnosi površina i oblika trebalo bi da se odrede teorijskom analizom krute ploče na elastičnom kontinuumu;
- b) Ploča treba da bude na lokaciji i dubini temelja;
- c) Prosečan kontaktni pritisak između ploče i tla treba da bude jednak najvećem očekivanom kontaktnom pritisku ispod temelja, sračunatom za pretpostavku linearne raspodele; opterećenje ploče treba zadržati dok primarna konsolidacija i sekundarno sleganje ne budu praktično završeni;
- d) Modul reakcije za ploču trebalo bi, po mogućstvu, odrediti za priraštaj pritiska iznad onoga koji odgovara prosečnom kontaktnom pritisku ispod temelja.

Najveći nedostatak opita je što se, zbog malih dimenzija ploče i znatno većih dimenzija temelja, dubine njihovog efektivnog dejstva bitno razlikuju, tako da slojevitost i druge promene u tlu ispod ploče ne mogu biti zahvaćene kao ispod temelja.

Uz napred navedene uslove opita, u homogenom tlu biće

$$k_s = p/s = k_p (s_p/s) \quad (1)$$

Iz prve i druge jednačine (1) sagledavaju se mogući postupci za odredjivanje modula reakcije (k_s) za temelj datih dimenzija (L i B , $L > B$) na glavnim grupama tla (prekonsolidovanja glina, normalno konsolidovana glina, nekoherentno tlo). Svi oni su zasnovani na analizi sleganja ploče i temelja i njihovom uporedjenju i mogu se svrstati u dve grupe:

- a) Odredjivanje k_s na bazi rezultata opita probnog opterećenja (k_p) i ranije teorijski-eksperimentalno određenog i poznatog odnosa (S_p/S) za odgovarajuće oblike, dimenzije i dubine ploče i temelja (druga j-na);
- b) Odredjivanje k_s na bazi prosečnog očekivanog sleganja (S) datog temelja, određenog za linearnu raspodelu računskog kontaktnog pritiska (p) (prva j-na).

Prema postupku a), veličina k_p određuje se opitom probnog opterećenja (prema nekoj od standardizovanih procedura, u skladu sa napred navedenim uslovima) ili, orijentaciono, iz tabela u literaturi sa sistemati-zovanim vrednostima ranije izvršenih opita. Odnos sleganja ploče i temelja (S_p/S) treba odrediti za datu ploču i temelj sa jednakim p . On je funkcija njihovih dimenzija, oblika i dubina (za slojevito tlo i debljina slojeva)

i za karakteristične slučajeve određen na bazi teorijskih rešenja za proračun sleganja S_p i S , eksperimentalno proveren i korigovan i dat u vidu jednostavnih izraza. Ovi izrazi i orijentacione veličine K_p , pogodni za praksu, navode se u narednom poglavlju. Ovde se mora naglasiti da za potrebe dimenzionisanja fleksibilnih temelja u navedene izraze umesto B i L ploče treba uvesti dimenzije "površine efektivnog dejstva" opterećenja (preko tzv. karakteristične dužine ili poluprečnika krutosti ploče). Pošto one zavise od k_s , to se k_s određuje sukcesivnom aproksimacijom, kako je izloženo u narednom poglavlju.

Prema postupku b), modul k_s može da se odredi direktno preko sleganja sračunatog metodom integracije pomeranja (preko E i v tla), metodom integracije napona u dubini (preko pokazatelja stišljivosti) ili na drugi način. Ako se izraz za sleganje unese u j-nu $k=p/s$, dobija se korelacija k (za ploču ili temelj) i ekvivalentnih elastičnih konstanti tla ili pokazatelja stišljivosti ili drugih pokazatelja tla. Tako se po postupku b) k_s može odrediti na osnovu ranije ili za dati temelj određenih korelacija. Ovaj postupak, kao i primena korelacija datih u literaturi, zahtevaju užu specijalnost pa bi ih, prema mišljenju autora, trebalo prepustiti geomehničarima. Uz to, ako su već posebnim triaksijalnim ispitivanjem određeni pokazatelji E, v tla kao kontinuum, opravdanije je primeniti proračun sa modelom kontinuum nego se vraćati na model Winkler-a.

3. ODREĐJIVANJE MODULA REAKCIJE (k_s) NA BAZI REZULTATA PROBNOG OPTEREĆENJA TLA

U ovom poglavlju daju se sažeto podaci i izrazi za određivanje modula k_s za temeljnu gredu ($L/B > 2$) ili ploču ($L/B \leq 2$), prema postupku a) uz prethodnog poglavlja, za poznatu osnovu temelja.

3.1. Orijentacione veličine modula (k_p) određene optima probnog opterećenja

Određjene su brojnim ispitivanjima i daju se za krutu kvadratnu ploču ivice $B_p = 0,30$ m.

a) Pregled prema Terzaghi-ju (1955)

Tabela 1. Veličine k_p (MN/m^3)

Pesak		Rastresit	Sred.zbijen	Zbijen
Suv ili vlažan	Granice	6-19	19-94	94-312
	Predloženo	13	41	156
Potopljen		8	25	97
Glina		Konsistencija		
		Kruta	Vrlo kruta	Čvrsta
q_u (kN/m^2)*		100-200	200-400	400
Granične vrednosti		16-31	31-62	62
Predložene vrednosti		23	47	94

Prema Scott-u (1981), Meyerhof (1965) je pokazao da su stvarna sleganja peska oko 2/3 sračunatih prema Tabeli 1. pa bi ove veličine k_p za pesak trebalo uvećati za oko 50%.

Veličine ovih modula mogu se primeniti, kao i druge relacije u ovom poglavlju, za približno linearnu vezu p-s tj. za prosečni kontakti pritisak do 1/2 nosivosti (q_f) -opterećenja loma koherentnog tla ispod ploče.

Za vrlo meke do tvrde gline ($q_u < 100 \text{ kN/m}^2$), Terzaghi navodi vrednosti $k_p = 1,6-7,8 \text{ MN/m}^3$. Za ovakve, normalno konsolidovane gline, ove inače male veličine modula osetljive su na trajanje opita, zbog konsolidacije koja se pod pločom obično ne sačeka. Skempton i Bjerrum (1957) su pokazali (Scott, 1981) da je za ove gline ukupno sleganje oko 3-6 puta veće od inicijalnog sleganja, koje se ostvaruje brzo po nanošenju opterećenja odnosno za kratak opit. Zbog toga, bi za analizu pod uslovima trajnog opterećenja ovakvog tla trebalo usvojiti 1/3-1/6 početne vrednosti k_p .

Za krute i čvrste gline, kao u Tabeli 1., za analizu interakcije pod trajnjim opterećenjem trebalo bi usvojiti 1/2-1/4 od početne vrednosti k_p .

b) Pregled Miner, Seastone (1955), prema Selvadurai (1979)

Tabela 2. Veličine k_p (MN/m^3)

VRSTA TLA	Graduiranost	
	Dobra	Slaba
Šljunak, mešavina šljunjak-pesak; sa malo ili bez veziya	135-190	80-135
Mešavina šljunak-pesak-glina; vrlo dobro vezana	110-190	-

*) q_u označava jednoaksijalnu čvrstoću (opterećenje loma pri opitu jednoaksijalne kompresije sa slobodnim bočnim širenjem)

(Tabela 2.nastavak)

Šljunak sa vezivom, šljunak vrlo prašinovit ili glinovit, mešavina šljunak-pesak-glina slabo gradirana	70-135	
Pesak, šljunkoviti pesak; sa malo ili bez veziva	70-155	55-90
Mešavina pesak-glina; vrlo dobro vezana	70-155	-
Pesak sa vezivom, pesak vrlo prašinovit ili glinovit, mešavina pesak-glina slabo gradirana	50-90	
Prašina (neorganska), pesak vrlo sitan, kameno brašno, prašinovit ili glinovit pesak niske plastičnosti	40-80	
Glina (neorganska) niske do srednje plastičnosti, glina peskovita, prašinovita ili posna	30-60	
Organska prašina, organska prašina-glina niske plastičnosti	25-50	
Muljeviti sitan pesak i prašina, elastična prašina	10-50	
Glina (neorganska) visoke plastičnosti, masna glina	10-40	
Organska glina srednje do visoke plastičnosti	10-30	

3.2. Određjivanje modula reakcije tla (k_s) za temelj sa poznatim dimenzijama površine efektivnog dejstva, na bazi modula k_p

Za krut temelj, dimenzije površine efektivnog dejstva opterećenja su apsolutna širina (B) i dužina (L) stope.

Kod relativno krutog (relativno fleksibilnog) temelja, pod svakim od dovoljno razmaknutih koncentrisanih opterećenja doći će do većeg ugiba temeljne ploče-grede. Tada će dimenzije efektivnog dejstva temelja biti manje od B i L pa njih treba uvesti u odnos sleganja ploče i temelja (S_p/S), preko koga se, iz j-ne (1), može odrediti k_s . Procena ovih dimenzija i k_s , kao međusobno zavisnih, sažeto se izlaže u narednoj tački ovog poglavlja.

Za poznate apsolutne (fizičke) i za efektivne dimenzije, eksperimentima i teorijskim analizama pokazano je da veličina modula k_s opada: a) sa porastom širine temelja (skoro linearno za koherentno i "linearno i "sporije" za nekoherentno tlo); b) sa porastom dužine temelja (samo na koherentnom tlu) i c) sa smanjenom dubine (D) temelja (samo na nekoherentnom tlu).

Ako uvedemo koeficijente uticaja širine (b) oblika tj. dužine (l) i dubine (d) temelja, određjivanje modula k_s moglo bi se vršiti iz izraza:

$$k_s = k_p b l d \quad (2)$$

Terzaghi (1955), Terzaghi i Peck (1967) na osnovu teorijskih razmatranja Kögler-a (1933) (Scott, 1981) ustanovljavaju a veći broj autora kasnije analizira i u najvećem delu potvrđuje opravdanost primene izraza za određivanje odnosa (S_p/S) tj. koeficijenata b, l, d kao u Tabeli 3.

Tabela 3. Određjivanje b, l, d u izrazu $k_s = k_p b l d$

Vrsta tla	b (f _B)	l (f _L)	d (f _D)
Nekoherentno	$((B+B_p)/2B)^2$	1	$(1+2D/B) \leq 2$
Koherentno	B_p/B	$(2/3)(1+B/2L)$	$(2+B/L)/3$ 1

Napomena: Za k_p iz Tabele 1 i 2. $B_p = 0,30$ m. Veze važe za $B \geq B_p$.

Bond (1961) (prema Winterkorn, Fang, 1975) i drugi ukazuju da izraz b za nekoherentno tlo može da važi za slabiju zbijenost sa $I_D < 0,4$ i da on za uobičajene širine $B=1,5-3$ m može da da upola manju vrednost k_s s obzirom na stvarna sleganja.

3.3 Postupak određivanja k_s za potrebe dimenzionisanja fleksibilnog temelja

Prema rešenju Westergaard-a (1938) (Selvadurai, 1979), neograničenu tanku ploču date debljine (h) i karakteristika materijala (E, ν), na elastičnoj podlozi poznate krutosti (k_s), karakteriše poluprečnik efektivne krutosti (efektivna dužina):

$$r_0 = 1/\lambda = \sqrt[4]{Eh^3/[12(1-\nu^2)k_s]} \quad (3)$$

Usled dejstva koncentrisane sile, efektivna sleganja tla (jednaka ugibu ploče) ostvaruju se ispod kružne površine prečnika $2R=5r_0$ ili, prema Terzaghi-ju (1955), ispod ekvivalentne kvadratne površine ivice $B=\sqrt{R^2\pi}=1,77R$. Preko izraza za jednaka sleganja ovih površina i prethodne veze, može se usvojiti $B \approx 2R = 10r_0$.

Vesić (1973) nalazi da je za homogeno tlo, sa konstantnim modulom deformacije do dubine $10r_0$, prečnik efektivnog dejstva u pola manji nego prema Terzaghi-ju. Za tlo u kome modul linearno raste ili se neskakovito menja sa dubinom, on predlaže da se k_s odredi preko modula sa dubine $2,5r_0$ (Scott, 1981).

Ako se usvoji da su ekvivalentna širina (B) i modul reakcije (k_s)

^{*}) American Concrete Institute (ACI) Committee, 436 Report (1966), predlaže pri ližno $R=4r_0$ (Winterkorn, Fang, 1975, str. 531)

$$B = 1,77R = 1,77 \cdot 4r_0 = 7,1r_0$$

medjusobno zavisni preko relacije

$$E_b = 21000 \text{ MN/m}^2$$

$$\nu_b = 1/6$$

$$B = 5/\lambda = 5 \sqrt{Eh^3 / [12(1-\nu^2)k_s]} \quad (4)$$

Scott (1981) predlaže postupak odredjivanja modula reakcije (k_s) za fleksibilnu ploču, koji se može sažeti ovako:

- Za pretpostavljenu debljinu ploče (h) usvojiti približnu ekvivalentnu širinu $B' = 15h$, koliko se može očekivati za uobičajenu betonsku ploču uobičajene debljine (0,20 m).
- Za ovakvu širinu kvadratne površine dejstva i orijentacionu veličinu k_p iz Tabela 1 i 2. sračunati k_s preko j-ne (2) i Tabele 3.
- Za sračunato k_s odrediti B iz j-ne (4).
- Ako odnos B' i B nije veći od 2, tj. za $0,5 \leq B/B' \leq 2$, veličine k_s i B su određene. Ako to nije slučaj, iz j-ne (4) sračunati potrebnu debljinu ploče (h') pa ako se ona mnogo razlikuje od pretpostavljene (h), postupak ponoviti za realnije pretpostavljenu debljinu. Umesto ovoga, k_s i B se mogu odrediti iterativnim postupkom, počevši od B (korak a) i unošenjem novodobijenih vrednosti u j-ne (2) i (4) (koraci b i c) naizmenično.

Izloženim postupkom odredjuju se širina ekvivalentne kvadratne efektivne površine i odgovarajući modul relacije tla za dejstvo koncentrisanih sila čiji je medjusobni razmak veći od $5r_0$.

Za linijska opterećenja sa medjusobnim odstojanjem $B_1 \geq 5r_0$ k_s se odredjuje za traku širine $5r_0$ a sa $B_1 < 5r_0$ za traku širine B_1 .

Za "tačkasta" opterećenja, od stubova u više redova i kolona, sa reasterom $B_1 \times B_2$ gde je $5r_0 > B_1 \geq B_2$, za momente savijanja u ravni u pravcu većeg razmaka (B_1) površina efektivnog dejstva biće traka-pravougaonik širine B_1 i dužine jednake dimenziji ploče u pravcu B_2 . Za momente savijanja u ravni u pravcu manjeg razmaka (B_2), ova površina biće pravougaonik $B_1 \times B_2$. U slučaju $B_1 \geq 5r_0 > B_2$, površine se odredjuju na isti način s tim što se za B_1 uzima $5r_0$. Za ovakve površine treba odrediti odgovarajuće module reakcije.

Prema citiranom ACI Committee 436(1966), ploča se može smatrati krutom a raspodela kontaktnog pritiska usvojiti kao linearna, ako je gustina stubova ujednačena, opterećenja od susednih nisu veća za više od 20% i ako je razmak izmedju stubova $B < 1,75/\lambda$. Ovde je, kao za gredu širine B , odnos krutosti grede (EI) i krutosti podloge ($K_B = K_s B$) dat kao karakteristična dužina:

$$1/\lambda = \sqrt[4]{EI/K_s B} \quad (5)$$

Kod temeljnih nosača-greda, širina stope je po pravilu jednaka širini površine efektivnog dejstva pa se modul reakcije određuje za fizičku širinu grede. Za fizičku dužinu grede L i za λ iz j-ne(5), greda se može smatrati krutom za $\lambda L < 0,8$ a dugom gredom za $\lambda L > 2,25$.

4. OPRAVDANOST PRIMENE WINKLER-ovog MODELA

Uz napomene o opravdanosti primene ovog modela u današnje vreme, date u poglavljima 1 i 2., ovde se može dodati sledeće:

Prema DIN 4018(1974) Winkler-ov model pruža dovoljno tačne rezultate kod dugih fleksibilnih temeljnih greda i širokih fleksibilnih ploča sa mestimičnim koncentrisanim opterećenjima, kad one leže na raznorodnom tlu, kad modul deformacije tla raste sa dubinom ili kad osnovu čini tanji meki sloj na čvrstoj podlozi.

Prema detaljnoj analizi na bazi relativno malobrojnih merenja kontaktnih pritisaka, koja ukazuju da računске i izmerene veličine mogu biti dosta saglasne, Selvadurai (1979) procenjuje da je primena Winkler-ovog modela opravdana za određivanje ugiba fleksibilnih temelja sa lokalnim opterećenjima na nekoherentnom tlu (gde za promenljiv k_s duž nosača, sa najvećom vrednosti ispod centra, zadovoljavajuće reprezentuje prirodnu sredinu – na nivou kao znatno složeniji elasto-plastičan model). Na koherentnom tlu, koje je u principu bolje tretirati kao elastičan kontinuum, model Winkler-a je, za lokalna i opterećenja u centru relativno fleksibilnog temelja, ravnopravan sa dvo-parametarskim modelima, koji daju bolje rezultate za opterećenja bliža ivici nosača-ploče i jednako-podeljena kontinualna opterećenja.

Može se zaključiti da je opravdanost primene Winkler-ovog modela generalno veća za fleksibilnije temelje sa konstrukcijom i za nekoherentnija i heterogenija tla.

5. BIBLIOGRAFIJA

- *** DIN 4018(1974), Beilblatt zu DIN 4018(1981), u DIN Taschenbuch 36.
Beuth Verlag, Berlin, 1983.
- GRASSHOFF, H., KANY, M. (1982): Berechnung von Flächengründungen, Poglavlje 2.2. u
Grundbau Taschenbuch, Teil 2 (Smolczyk, U, Hrg.), W. Ernst
und Sohn, Berlin.
- GORBUNOV-POSADOV, M. I. i dr. (1984): Proračun konstrukcija na elastičnoj podlozi
(na ruskom). Moskva, Straiizdat.
- NONVEILLER, E. (1979): Mehanika tla i temeljenje gradevina. Školska knjiga,
Zagreb
- SCOTT, R. F. (1981): Foundation Analysis. Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA.
- SELVADURAI, A. P. S. (1979): Elastic analysis of soil-foundation interaction.
Elsevier, Amsterdam.
- STEVANOVIĆ, S. (1982): Fundiranje I. Naučna knjiga, Beograd.
- ŠUKLJE, L. (1979): Otkrivanje pravilnika o tehničkim normativima za projekto-
vanje i izvodjenje radova kod temeljenja gradjevinskih
objekata. Izgradnja, Beograd.
- TERZAGHI, K. (1955): "Evaluation of coefficients of subgrade reaction",
Geotechnique, Vol. 5, No. 4, London, str. 297-326.
- TERZAGHI, K., PECK, R. B. (1967): Soil Mechanics in Engineering Practice. John
Wiley, New York.
- WINTERKORN, H. F., FANG, H.-Y. (1975) (editors): Foundation Engineering Handbook.
Van Nostrand Reinold, New York.

SOIL MODELS IN INTERACTION ANALYSIS AND
WINKLER'S MODULUS OF SUBGRADE REACTION
DETERMINATION

Miroljub Samardaković

S u m m a r y

Having reviewed and classified the factors which influence the interaction foundation-soil, the calculation methods of its analysis and soil models, the author presents the possibilities for Winkler's modulus of subgrade reaction determination (k_s). The dimension of the modulus and the area of effectual output of the loading are mutually dependant. For the needs of sizing the flexible foundations with different load allocations, the author proposes the iterative procedure for k_s determination on the basis of the modulus (k_p) measured by the experiment of test loading whose approximate values for different types of soil are enclosed. The conditions for (still) justifiable application of Winkler's modulus are briefly presented too.