ԳԵՈՄԵԽԱՆԻԿԱՅԻ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐ, ԵՐԵՎԱՆ
ПРОБЛЕМЫ ГЕОМЕХАНИКИ, ЕРЕВАН
PROBLEMS OF GEOMECHANICS, YEREVAN

1967, 1 : 69—90

УДК 624.131.4

ԳՐՈՒՆՏՆԵՐՈՒՄ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՌԵԼԱՔՍԱՑԻԱՅԻ ՄԱՍԻՆ

Տեխն. գիտ. թեկնածու ԶԱՎԵՆ ՏԵՐ-ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ*

Ռ ե ֆ ե ր ա տ: *Հոդվածում դիտարկված են մի շարք խնդիրներ, որոնք հանդիպում են ինժեներական և հետազոտական պրակտիկայում և որոնք ունեն տեսական և կիրառական նշանակություն գրունտների ռեոլոգիայում։*

Տրված են ցցերի շրջակայքում գտնվող գրունտի զանգվածում ավելցուկային լարումների մարման (հարթ խնդիր) և կոմպրեսիոն պայմաններում գտնվող գրունտի նմուշում (միաչափ խնդիր), լարումների մարման խնդիրների տեսական լուծումները, երբ գրունտի նախնական դեֆորմացիաների պահման ծայրային պայմանները (ցից, ուժաչափ) ունեն որոշակի կոշտություն։

Ցցերի շրջակայքում գրունտի զանգվածում լարումների մարման խնդրի լուծումը տրվում է հաշվի առնելով ցցի նյութի առաձգականությունը, գրունտի ակնթարթային դեֆորմացիայի գործակցի փոփոխումը, սողքը և ծերացումը։ Այս լուծումը կարող է կիրառվել գնահատելու համար ցցերի շրջակայքում գրունտի զանգվածի լարվածային վիճակը, որը անհրաժեշտ է ցցերի նստվածքի և երկարատև կայունության հաշվարկի համար։

Կոմպրեսիոն պայմաններում գտնվող գրունտի նմուշում լարումների մարման խնդիրը տրվում է հաշվի առնելով գրունտի ակնթարթային խտացման գործակցի փոփոխումը, սողքը և ծերացումը, ինչպես նաև նախնական դեֆորմացիան պահող ուժաչափի կոշտությունը։

Բերված խնդիրների հիման վրա առաջարկվում են գրունտների փորձարկման նոր սխեմաներ և մեթոդներ նրանց ռեոլոգիական պարամետրերը որոշելու համար։ Մասնավորապես առաջարկվում է ռելաքսացիոն-կոմպրեսիոն սարքի նոր սխեմա, ցանկացած առաձգականություն ունեցող ուժաչափերի կիրառմամբ, որը շատ է պարզեցնում ռելաքսացիոն սարքերի կոնստրուկցիան։

Ինժեներական և հետազոտական պրակտիկայում հաճախ են ստեղծվում այնպիսի պայմաններ, որոնք բերում են գրունտներում ներքին ավելցուկային լարումների մարման (ռելաքսացիա)։ Այսպես, օրինակ, ցցերը վարսելուց հետո նրանց շրջակայքում առաջանում են ավելցուկային լարումներ, որոնք սեղմում են ցիցը և գրունտը, և որոնք աստիճանաբար մարվում են։ Այս երևույթը հատկապես ինտենսիվ է ընթանում ավազային, ջրով չհագեցված կավային և սառած գրունտներում։ Ջրհագեցած կավային գրունտներում այս երևույթը ընթանում է միաժամանակ ծակոտկենային ճնշման ցրման պրոցեսի հետ և մաքուր ձևով ի հայտ չի գալիս, քանի որ վերջինս մեծ մասամբ գերակշռող դեր է խաղում։

Գրունտներում ռելաքսացիոն պրոցեսի ինտենսիվ ընթացքը լայն կիրառում է գտնում հետազոտական պրակտիկայում՝ կարճ ժամանակի ընթացքում նրանց ռեոլոգիական պարամետրերը որոշելու համար։ Հետազոտական պրակտիկայում ամենատարածված ռելաքսացիոն սարքերն են՝ ռելաքսացիոն-կոմպ-

---

* ՀՍՍՀ ԳԱ Երկրաբանական ինստիտուտի գեոմեխանիկայի բաժնի ավագ գիտական աշխատող։

րեսիոն և ռելաքսացիոն միառանցք սարքերը։ Այս սարքերում ռելաքսացիայի պայմանները ապահովելու համար օգտագործվում են մեծ կոշտության և զգայունության ուժաչափեր, որը բարդացնում է ռելաքսացիոն սարքերի կոնստրուկցիան, և որը պահանջում է էլեկտրոնիկայի կիրառում (Абелев, Тер-Мартиросян, 1965)։

Հոդվածում դիտարկվում են ինժեներական և հետազոտական պրակտիկայում հանդիպող մի շարք խնդիրներ, որոնք ունեն կիրառական նշանակություն գրունտների ռեոլոգիայում։

Մասնավորապես դիտարկվում է ցցերի շրջակայքում գրունտի զանգվածում ավելցուկային լարումների մարման խնդիրը (հարթ խնդիր) և կոմպրեսիոն պայմաններում գտնվող գրունտի նմուշում լարումների մարման խնդիրը (միաչափ խնդիր) ամենաընդհանուր դեպքում, երբ նախնական դեֆորմացիաների պահպանման ծայրային պայմանները ունեն որոշակի կոշտություն (ցից, ուժաչափ)։

Ցցերի շրջակայքում գրունտի զանգվածում լարումների մարման խնդրի լուծումը հնարավորություն է տալիս նախ՝ գնահատել ցցերի շրջակայքում լարվածային վիճակը, որը անհրաժեշտ է որոշելու նրանց նստվածքը և երկարատև բեռնունակությունը, երկրորդ՝ ցցերի շրջակայքում լարումների մարման արագության դաշտային պայմաններում չափման արդյունքներով որոշել չխախտված կառուցվածքով գրունտների ռեոլոգիական պարամետրերը։

Վերջին հանգամանքը մտահղացրեց ստեղծել դաշտային ռեոլոգիական նոր տիպի սարք՝ ռելաքսոմետր, որը հնարավորություն կտա կարճ ժամանակում, դաշտային պայմաններում որոշել գրունտների ռեոլոգիական պարամետրերը։

Միաչափ ռելաքսացիոն խնդրի լուծումը հնարավորություն է տալիս ռելաքսացիոն-կոմպրեսիոն փորձարկումների արդյունքների հիման վրա որոշել ռեոլոգիական պարամետրերը ուժաչափի կոշտության հաշվառմամբ։ Վերջին հանգամանքը թույլատրում է ռելաքսացիոն-կոմպրեսիոն սարքերում օգտագործել ցանկացած կոշտության ուժաչափեր, որը բավականին պարզեցնում է ռելաքսացիոն սարքերի կառուցվածքը։

Վերոհիշյալ խնդիրների լուծման համար ընդունում ենք, որ գրունտի կմախքը ենթարկվում է Մասլով—Հարությունյանի ժառանգական սողքի տեսությանը (Арутюнян, 1952), որը միառանցք սեղմման դեպքում գրանցվում է հետևյալ տեսքով

$$\varepsilon_x(t) = \frac{\sigma_x(t)}{E(t)} = \int_{\tau_1}^{t} \sigma_x(t) \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \delta(t,\tau) \cdot d\tau, \tag{1}$$

իսկ կոմպրեսսիոն պայմանի համար [4] այս տեսքով

$$e(\tau_1) - e(t) = a(t,\tau) \cdot \sigma(t) - \int_{\tau_1}^{t} \sigma(t) \frac{\partial}{\partial \tau} a(t,\tau) \cdot d\tau \tag{2}$$

որտեղ, այդ հավասարումներում աջակողմյան առաջին անդամները ներկայացնում են ակնթարթային դեֆորմացիաները, իսկ երկրորդները՝ ժամանակի ընթացքում զարգացող սողքի դեֆորմացիաները փոփոխական լարումների ազդեցության տակ։

Այդ հավասարումներում բերված տառերն ունեն հետևյալ նշանակությունը՝

$\varepsilon_x(t)$ — *ժամանակի ընթացքում փոփոխվող գումարային հարաբերական դեֆորմացիա, միառանցք սեղմման դեպքում,*

$\sigma_x(t)$ — *ժամանակի ընթացքում փոփոխվող լարում,*

$\delta(t,\tau)$ — *լրիվ հարաբերական դեֆորմացիան է ժամանակի* t *մոմենտին միառանցք սեղմման դեպքում, որը հաշվվում է հետևյալ կախվածությամբ*

$$\delta(t,\tau)=\frac{1}{E(t)}+C(t,\tau) \tag{3}$$

որտեղ $\frac{1}{E(\tau)}$ *առաձգական-ակնթարթային դեֆորմացիան է, իսկ* $C(t,\tau)$-*ը սողքի դեֆորմացիան է ժամանակի* t *մոմենտին, որը կոչվում է սողքի չափանիշ,* $e(t)$-*ը ժամանակի ընթացքում փոփոխվող ծակոտկենային գործակիցն է.* $e(\tau_1)$-*ը նախնական ծակոտկենության գործակիցն է.*

$a(t,\tau)$—*ծակոտկենային գործակցի փոփոխումն է ժամանակի* t *մոմենտում միավոր բեռի ազդեցության տակ, որը կիրառված է ժամանակի* τ_1 *մոմենտում կոմպրեսիոն պայմաններում և որը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ*

$$a(t,\tau)=a_m(\tau)+a_1(t,\tau) \tag{4}$$

որտեղ, $a_m(\tau)$ *ժամանակի ընթացքում փոփոխվող ակնթարթային խտացման գործակիցն է.*

$a_1(t,\tau)$—*ժամանակի ընթացքում փոփոխվող երկարատև խտացման գործակիցն է։*

Հայտնի է (Флорин, 1962)*, որ նշված պարամետրերի միջև՝ միառանցք սեղմման* (E, C, δ) *և կոմպրեսիոն* (a, β, ν) *պայմաններում գոյություն ունի հետևյալ կապը*

$$a(t,\tau)=\beta\cdot[1+e(\tau_1)]\cdot\delta(t,\tau), \tag{5}$$

որտեղ

$$\beta=1-\frac{2\cdot\nu^2}{1-\nu}$$

Սողքի չափանիշի $C(t,\tau)$ *և փոփոխական ակնթարթային դեֆորմացիայի գործակցի* $E(\tau)$ *համար Ն. Խ. Հարությունյանի* (Арутюнян, 1952) *կողմից առաջարկված են հետևյալ արտահայտությունները*

$$C(t,\tau)=\varphi(\tau)\cdot[1-e^{-\gamma_1(t-\tau)}] \tag{6}$$

$$E(\tau)=E_0(1-\beta\cdot e^{-\alpha\cdot\tau}) \tag{7}$$

որտեղ, $\varphi(\tau)$-*ն—ծերացման ֆունկցիան է, որը ամենապարզ դեպքում որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ*

$$\varphi(\tau)=C_0+\frac{A_1}{1+\tau} \tag{8}$$

Նման արտահայտություններ կարելի է գրել կոմպրեսիոն պայմանների համար՝, $a_m(\tau)$*,* $a_1(t,\tau)$ *և* $\varphi(\tau)$

$$a_1(t,\tau)=\varphi(\tau)\cdot[1-e^{-\gamma_1(t-\tau)}] \tag{6'}$$

$$a_m(\tau) = a_m[1 - \beta \cdot e^{-\alpha \cdot \tau}] \tag{7'}$$

$$\varphi(\tau) = a_1 + \frac{A_1}{1 + \tau} \tag{8'}$$

Այսպիսով, գրունտի ռեոլոգիական հատկությունները պետք է ընտրվեն հետևյալ պայմաններով. ակնթարթային դեֆորմացիայի գործակցով $C(t,\tau)$ $E(\tau)$ *կամ* $a_m(\tau)$, *կողային սեղմման գործակցով* ν *և սողքի չափանիշով* $C(t,\tau)$ *կամ* $a_1(t,\tau)$:

Դիտարկենք ցցերի շրջակայքում գրունտներում լարվածային-դեֆորմացիոն վիճակը հարթ խնդրի պայմաններում, երբ գրունտին հատուկ է սողքը, իսկ ցցի նյութին առաձգականություն: Տակտկենային ճնշման նախնական մեծությունը համարում ենք բավականին փոքր, որի պատճառով ֆիլտրացիոն երևույթները անտեսվում են:

Ցիցը խփելուց հետո նրա շրջակայքի գրունտի մեջ առաջացած լարումները դիտարկվում են հարթ խնդրի պայմաններում: Ավելցուկային լարումների մարման ընթացքում ցցի և գրունտի շփման մակերևույթում պահպանվում է լարումների և տեղափոխությունների հավասարության պայմանը, բացի այդ, ենթադրվում է, որ գրունտում գոյություն ունի r_0 *նախնական շառավիղով անցք և բավականին երկար, որի հետևանքով կողային ազդեցությունները անտեսվում են:*

Հաշվարկային սխեման բերվում է նկ. 1-ում:

Գրունտի զանգվածում անցքի մեջ ցցի սեղմումից հետո առաջանում են հպման լարումներ $q(t)$, *որոնք սեղմում են ցիցը և նրան շրջապատող գրունտային զանգվածը: Ըստ որում, սիմետրիկության պատճառով շոշափող լարումները բացակայում են:*

Դիտարկենք նախ ցցի և գրունտային անցքի շառավիղային դեֆորմացիաները հպման լարումների ազդեցության տակ, որոնք փոփոխվում են ժամանակի ընթացքում: Գրունտի կշռից առաջացած լարումները չեն դիտարկվում, քանի որ նրանք չեն կարող ռելաքսացիայի ենթարկվել:

Ցցի շրջակայքում գտնվող մասսիվում լարումների կոմպոնենտները գտնում ենք առաձգականության տեսության հանրահայտ (Безухов, 1961) *բանաձևերով*

$$\left.\begin{matrix} \sigma(r,t) \\ \sigma(\Theta,t) \end{matrix}\right\} = \pm\, q(t)\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \tag{9}$$

որտեղ $\sigma(r,t)$ *և* $\sigma(\Theta,t)$*—նորմալ և տանգենցիալ լարումներն են գրունտում* r *հեռավորության վրա,* r_0 *նախնական անցքի շառավիղն է գրունտի մասսիվում,* $q(t)$*—հպման նորմալ լարումն է:*

Այս դեպքում շառավղային դեֆորմացիաները կարելի է ստանալ հայտնի (Арутюнян, 1952) *բանաձևով՝*

$$\varepsilon(r,t) = \frac{\sigma(\Theta,t) - \nu \cdot \sigma(r,t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^{t} [\sigma(\Theta,\tau) - \nu \cdot \sigma(r,\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau}\left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t,\tau)\right] \cdot d\tau \tag{10}$$

Հաշվի առնելով (9) արտահայտությունը և նկատի ունենալով հայտնի (Безухов, 1961) *բանաձևը հարաբերական դեֆորմացիայի և տեղափոխման միջև*

$$e(r,t)=\frac{\partial}{\partial r}u(r,t) \tag{11}$$

ստանանք գրունտի անցքի ներքին մակերևույթի տեղափոխության համար հետևյալ արտահայտությունը՝

$$u(t)=q(t)\frac{1+\nu}{E(t)}\cdot r_0-\int_{\tau_1}^{t}(1+\nu)r_0\cdot q(\tau)\frac{\partial}{\partial\tau}\delta(t,\tau)d\tau \tag{12}$$

Ցցի արտաքին մակերևույթի շառավղային տեղափոխումները հպման լարումների ազդեցության տակ կորոշվի հետևյալ արտահայտությամբ.

$$u_p(t)=q(t)\frac{1+\nu_p}{E_p}\cdot R_p \tag{13}$$

որտեղ, E_p, ν_p — *Յունգի և Պուասոնի մոդուլներն են ցցի նյութի համար,* R_p — *ցցի շառավիղն է։*

Այժմ անցնենք ցցի շրջակայքում գտնվող գրունտի զանգվածում նախնական լարումների մարման օրինաչափության որոշմանը ցցի առաձգականության, գրունտի ակնթարթային դեֆորմացիայի գործակցի փոփոխման, սողքի և ծերացման ազդեցության տակ։

Համատեղության պայմանը ցցի և գրունտի հպման մակերևույթում կգրվի հետևյալ տեսքով՝

$$u(t)=u_p(\tau_1)-u(\tau_1)+u_p(t) \tag{14}$$

Տեղադրելով $u(t)$ *և* $u_p(t)$ *արժեքները (14) հավասարման մեջ վերջնականապես կստանանք*

$$q(t)\cdot\left[\frac{R_p(1+\nu_p)}{E_p}+\frac{r_0(1+\nu)}{E(t)}\right]=U_p(\tau_1)+U(\tau_1)+\int_{\tau_1}^{t}r_0(1+\nu)q(\tau)\frac{\partial}{\partial\tau}\delta(t,\tau)\,d\tau \tag{15}$$

Մի քանի ձևափոխություններից հետո կստանանք հետևյալ ինտեգրալ հավասարումը.

$$q(t)=\frac{E_p\cdot\Delta}{R_p(1+\nu_p)[1+\omega\cdot n(t)]}+\frac{\omega\cdot E_p}{1+\omega\cdot n(t)}\text{x}\int_{\tau_1}^{t}q(t)\frac{\partial}{\partial\tau}\delta(t,\tau)d\tau \tag{16}$$

որտեղ՝

$$\begin{cases}\omega=\dfrac{r_0}{P_p}\cdot\dfrac{1+\nu}{1+\nu_p}\\ n(t)=\dfrac{E_p}{E(t)}\\ \Delta=U_p(\tau_1)-U(\tau_1)\end{cases} \tag{17}$$

Այսպիսով, հպման մակերևույթում լարումների որոշման խնդիրը հանգում է (16) ինտեգրալ հավասարման լուծմանը հետևյալ միջուկով,

$$K(t,\tau)=\frac{1}{1+\omega\cdot n(t)}\frac{\partial}{\partial\tau}\left|\frac{1}{E(\tau)}+C(t,\tau)\right|,$$

ազատ անդամով, $$f(t)=\frac{E_p\cdot\Delta}{R_p(1+\nu_p)[1+\omega\cdot n(t)]},$$

և պարամետրով

$$\lambda_0=\omega\cdot E_p$$

Ինտեգրալ հավասարումը մի քանի ձևափոխություններից հետո կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով.

$$q''(t)+q'(t)\cdot\left\{\gamma_1\left[1+\frac{\omega\cdot\varphi(t)\cdot E_p}{1+\omega\cdot n(t)}\right]+\frac{\omega\cdot n'(t)}{1+\omega\cdot n(t)}\right\}=0 \tag{18}$$

Այսպիսով, (16) ինտեգրալ հավասարման լուծումը հանգում է գծային դիֆերենցիալ երկրորդ կարգի հավասարման (18) լուծմանը, որն ունի փոփոխական գործակից և հետևյալ նախնական պայմանները.

$$\begin{cases} q(\tau_1)=\dfrac{E_p\cdot\Delta}{R_p(1+\nu_p)[1+\omega\cdot n(t)]} \\ q'(\tau)=\dfrac{-q(\tau_1)\gamma_1\cdot\omega\cdot\varphi(\tau_1)}{1+\omega\cdot n(\tau_1)} \end{cases} \tag{19}$$

Դիֆերենցիալ հավասարման ընդհանուր լուծումը կարելի է ներկայացնել հետևյալ ձևով.

$$q(t)=q(\tau_1)\cdot\left(1-\frac{\gamma_1-\omega\cdot E_p\cdot\varphi(\tau_1)}{1+\omega\cdot n(\tau_1)}\cdot\int_{\tau_1}^{t}e^{-\int_{\tau_1}^{t}\left\{\gamma_1\left[1+\frac{\omega\cdot E_p\cdot\varphi(x)}{1+\omega\cdot n(x)}\right]+\frac{\omega\cdot n'(x)}{1+\omega\cdot n(x)}\right\}dx}d\tau\right) \tag{20}$$

Այս արտահայտությունը որոշում է գրունտ-ցից հպման մակերևույթում լարումների փոփոխման օրինաչափությունը ժամանակի ընթացքում ցցի առաձգականության, գրունտի ակնթարթային դեֆորմացիայի փոփոխվող գործակցի, սողքի և ծերացման հաշվառման դեպքում։

Ցցի շրջակայքում գտնվող գրունտի զանգվածում լարումների բաղադրիչների արժեքները կարելի է որոշել վերոհիշյալ (3) արտահայտություններով։

Պարզության համար ենթադրենք, որ ակնթարթային դեֆորմացիայի գործակիցը հաստատուն է $E(\tau)=E=\mathrm{const}$ *և ծերացում չկա, այսինքն* $\varphi(\tau)=$ $=C_0=\mathrm{const}$։

Այս դեպքում (20) արտահայտությունը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

$$q(t)=q(\tau_1)\cdot\left(1-\frac{\omega\cdot E_p\cdot C_0}{1+\omega\cdot n+E_p\cdot C_0}\left\{1-e^{-\gamma_1\left[1+\frac{\omega\cdot E_0\cdot C_0}{1+\omega\cdot n}\right](t-\tau_1)}\right\}\right) \tag{20'}$$

Իսկ եթե ցցի նյութը բավականին կոշտ է գրունտի նկատմամբ, որը սովորաբար տեղի ունի պրակտիկայում $n=\dfrac{E_p}{E}\to\infty$ *կստանանք մաքուր ռելաքսացիայի պայմանը գրունտի զանգվածում*

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot \left\{1 - \frac{E \cdot C_0}{1+E \cdot C_0}\left[1 - e^{-\gamma(1+E \cdot C_0)(t-\tau_1)}\right]\right\} \qquad (20'')$$

Ըստ որում, լարումների անկման արագությունը այս դեպքում ավելանում է, իսկ մնացորդային լարումները կլինեն հավասար հետևյալին՝

$$q_\infty = q(\tau_1)\,\frac{1}{1+E \cdot C_0} \qquad (21)$$

Եթե ընդունենք, օրինակ, որ $E = 2 \cdot 10$ *կգ/սմ²* *և* $C_0 = 2 \cdot 10^2$ *սմ²/կգ, ապա կստանանք, որ* $q_\infty = 0{,}2 \cdot q(\tau_1)$*, այսինքն նախնական լարումները գրունտ-ներից հպման մակերևույթում նվազում են հինգ անգամ։*

Ստացված լուծումների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ երբ $r_0 = 0$*, ապա ըստ (20′)* $q(\tau_1) \to \frac{E_p}{1+\nu_p}$ *և ըստ (20″)* $q(\tau_1) \to \infty$*։*

Այս հանգամանքը որոշակիորեն դժվարացնում է ստացված լուծումների արդյունքները գրունտի զանգվածում լարումների մարման հաշվարկը կատա-րելուն։

Բանաձև (20) իրավացի է այն դեպքում, երբ

$$r^0 \gg \frac{R_p}{2}$$

Սա ապահովում է ելքային պայմանը այն մասին, որ գրունտի մասնիկում հարաբերական դեֆորմացիայի մեծությունը փոքր է մեկից։

Սակայն հայտնի է, որ սառած գրունտներում ցցի խփման տեխնոլոգիան նախատեսում է գրունտում հորատել որոշ տրամագծով անցք։ Ըստ որում, ցցի խփման պրոցեսում սառած գրունտի մեջ զգալիորեն նկատվում է նախնական լարումների անկում։

Ստացված արդյունքները կարող են օգտագործվել հորատանցքի օպտիմալ պարամետրերը որոշելու համար ցցերի խփման ժամանակ, ինչպես նաև կարգավորել արտադրության տեխնոլոգիան։

Ինչպես վերևում նշեցինք, կոշտ ցցերի շրջակայքում լարումների ռելաքսացիայի խնդիրը հնարավորություն է տալիս այն օգտագործել դաշտային պայմաններում գրունտների ռեոլոգիական պարամետրերը որոշելու համար, ռելաքսոմետրի օգնությամբ։

Եթե հայտնի է ռելաքսոմետրի կոշտությունը

$$C_r = \frac{R_r \cdot q}{u_r} \qquad (22)$$

որտեղ q *—լարումն է, որն ազդում է ռելաքսոմետրի շրջագծով,*

u_r *—ռելաքսոմետրի մակերևույթի շառավղային տեղափոխությունն է,*

R_r *—ռելաքսոմետրի շառավիղն է, ապա (17), (19), (20) և (20′) բանաձևերի հիման վրա կարող ենք գրել ռելաքսոմետրի հպման մակերևույթի վրա ազդող լարումների փոփոխման բանաձևը՝*

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot \left(1 - \frac{\omega_1 \cdot C_r \cdot C_0}{1+\omega_1 \cdot n_1 + \omega_1 \cdot C_r \cdot C_0}\left\{1 - e^{-\gamma\left[1+\frac{\omega_1 \cdot C_r \cdot C_0}{1+\omega_1 \cdot n_1}\right](t-\tau_1)}\right\}\right) \qquad (23)$$

որտեղ՝ $n_1 = \dfrac{C_r}{E}$; $\omega_1 = \dfrac{r_0(1+\nu)}{R_r}$; $\Delta_1 = U_r(\tau_1) + U(\tau_1)$ (24)

$$q(\tau_1) = \frac{C_r \cdot \Delta_1}{R_r(1+\omega_1 \cdot n_1)} \tag{25}$$

Այսպիսով, գրունտների ռեոլոգիական պարամետրերը դաշտային պայմաններում որոշելու հարցը տեսականորեն կարելի է համարել որոշակիորեն լուծված:

Այժմ անցնենք ռելաքսացիայի միաչափ խնդրի դիտարկմանը:

Դիտարկենք գրունտ-զսպանակ սիստեմում նախնական լարումների մարման խնդիրը, որը գտնվում է երկու անշարժ կոշտ պատերի միջև (նկ. 2):

Թող գրունտի h հաստություն ունեցող շերտին կիրառված լինի արտաքին բեռ $q(\tau_1)$ ինտենսիվությամբ, որը գրունտում առաջացրել է նախնական $S(\tau_1)$ տեղափոխություն: Այնուհետև առաջացող լարումները աստիճանաբար կմարվեն գրունտի սողքի և զսպանակի առաձգականության պատճառով: Նախնական լարումների մարման ընթացքում ակներև է, որ պիտի պահպանվի լարումների և տեղափոխությունների հավասարության պայմանը գրունտ—զսպանակ հպման սահմանում:

Գրունտի վերտիկալ տեղափոխությունը հպման սահմանում կարելի է որոշել հայտնի (Цытович, 1963) բանաձևով՝

$$S(t) = \frac{e(\tau_1) - e(t)}{1 + e(\tau_1)} \cdot h \tag{26}$$

Զսպանակի վերտիկալ տեղափոխությունը գրունտի հետ հպման սահմանում կորոշվի ըստ նրա կոշտության:

$$l(t) = q(t) \cdot a_s \tag{27}$$

Լարումների մարման ընթացքում գրունտ-զսպանակ հպման սահմանում միատեսակ տեղափոխման պայմանը կգրվի հետևյալ տեսքով՝

$$S(t) - S(\tau_1) = -l(t) + l(\tau_1) \tag{28}$$

որտեղ՝ $S(\tau_1)$ և $l(\tau_1)$ համապատասխանաբար գրունտի և զսպանակի նախնական տեղափոխումներն են: Տեղադրելով $S(t)$ և $l(t)$ արժեքները (26), (27) և (28) հավասարումներից և հաշվի առնելով (21), (4), (5), (6), (7), (8) հավասարումները կստանանք

$$\frac{h}{1+e(\tau_1)} \cdot \left\{ a(t,\tau) \cdot \sigma(t) - \int_{\tau_1}^{t} \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} a(t,\tau) \cdot d\tau \right\} - S(\tau_1) = -q(t) \cdot a_s + l(\tau_1) \tag{29}$$

Հաշվի առնելով, որ $q(t) = \sigma(t)$ ավելցուկային լարումների մարման խնդիրը գրունտի և զսպանակի մեջ, որոնք սեղմված են երկու անշարժ և կոշտ պատերի միջև, բերվում է հետևյալ ինտեգրալ հավասարման լուծմանը՝

$$q(t) = \frac{\Delta(\tau_1)}{a_s[1+\chi \cdot m(t)]} + \frac{\chi}{a_s} \chi \int_{\tau_1}^{t} q(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{a(t,\tau)}{1+\chi \cdot m(t)} \cdot d\tau$$

$$K(t,\tau) = \frac{1}{1+\chi \cdot m(t)} \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ a_m(\tau) + \varphi(t)\left[1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)}\right] \right\} \tag{30}$$

…ով,

$$f(t)=\frac{\Delta(\tau_1)}{a_s[1+\chi\cdot m(t)]}$$ *ապա անդամով և*

$$\lambda_0=\frac{\chi}{a_s}$$

պարամետրով, որտեղ ընդունված են հետևյալ նշանակումները՝

$$\begin{cases}\chi=\dfrac{h}{1+e(\tau_1)}\\ m(t)=\dfrac{a_m(t)}{a_s}\\ \Delta(\tau_1)=S(\tau_1)+I(\tau_1)\end{cases}\qquad(31)$$

Վերը բերված լուծման նման, այս (30) ինտեգրալ հավասարումը կարող ենք բերել հետևյալ դիֆերենցիալ հավասարմանը՝

$$q''(t)+q'(t)\cdot\left(\eta\left\{1+\frac{\chi\cdot\varphi(t)}{a_s[1+\chi\cdot m(t)]}\right\}+\frac{\chi\cdot m'(t)}{1+\chi\cdot m(t)}\right)\qquad(32)$$

որն ունի հետևյալ նախնական պայմանները

$$\begin{cases}q(\tau_1)=\dfrac{\Delta(\tau_1)}{a_s[1+\chi\cdot m(\tau_1)]}\\ q'(\tau_1)=\dfrac{-q(\tau_1)\cdot\chi\cdot\eta\cdot\varphi(\tau_1)}{a_s[1+\chi\cdot m(\tau_1)]}\end{cases}\qquad(33)$$

Այս դիֆերենցիալ հավասարման ընդհանուր լուծումն ունի հետևյալ տեսքը՝

$$q(t)=q(\tau_1)\cdot\left(1-\frac{\eta\cdot\chi\cdot\varphi(\tau_1)}{a_s[1+\chi\cdot m(\tau_1)]}\cdot\int_{\tau_1}^{t}e^{-\int_{\tau_1}^{\tau}\left(\eta\left\{1+\frac{\chi\cdot m'(x)}{a_s[1+\chi\cdot m(x)]}\right\}+\frac{\chi\cdot m'(x)}{1+\chi\cdot m(x)}\right)dx}\,d\tau\right)\qquad(34)$$

(34) արտահայտությունը որոշում է գրունտ-զսպանակ սիստեմում լարումների մարման օրինաչափությունը, հաշվի առած գրունտի կմախքի ակընթարթային խտացման գործակցի փոփոխությունը, սողքը և ծերացումը։

Եթե ակնթարթային խտացման գործակիցը ժամանակի ընթացքում փոփոխվում է աննշան չափով $a_m(\tau)=a_m=\text{const}$ *և այն կարելի է համարել հաստատուն, իսկ ծերացումը աննշան է, այսինքն՝* $\varphi(\tau)=a_1=\text{const}$, *ապա (34) արտահայտությունը կգրանցվի այսպես՝*

$$q(t)=q(\tau_1)\cdot\left(1-\frac{\chi\cdot a_1}{a_s(1+\chi\cdot m)+\chi\cdot a_1}\cdot\left\{1-e^{-\eta\left[1+\frac{\chi\cdot a_1}{a_s(1+\chi\cdot m)}\right]\cdot(t-\tau_1)}\right\}\right)\qquad(34')$$

Իսկ զսպանակի մեծ կոշտության դեպքում գրունտի նկատմամբ, այսինքն $m = \frac{a_m}{a_s} \to \infty$ մենք կստանանք ավելի պարզեցված արտահայտություն

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot \left\{1 - \frac{a_1}{a_m + a_1}\left[1 - e^{-\gamma_1\left(1+\frac{a_1}{a_m}\right)(t-\tau_1)}\right]\right\} \qquad (34'')$$

Վերջին դեպքը համապատասխանում է մաքուր ռելաքսացիայի պայմաններին, որը հնարավոր չէ ստեղծել լաբորատոր պայմաններում։

Որպեսզի համոզվենք ռելաքսային սարքերում ուժաչափերի կոշտության հաշվառման անհրաժեշտությանը, բերենք մի օրինակ։

Թող 1 սմ *բարձրություն ունեցող գրունտի նմուշին, որի սկզբնական ծակոտկենության գործակիցը* $e(\tau_1) = 1$ *զսպանակի միջոցով ժամանակի* $\tau_1 = 0$ *մոմենտին կիրառված է վերտիկալ բեռ* $q(\tau_1) = 1$ կգ/սմ^2։

Պահանջվում է հաշվել նախնական լարումների մարման ժամանակամիջոցը զսպանակի կոշտության հաշվառմամբ և առանց դրա, երբ գրունտն ու զսպանակն ունեն հետևյալ բնութագրերը.

$a_m = 0.001$ սմ^3/կգ, $a_1 = 0,01$ սմ^2/կգ, $\gamma_1 = 0.01^2$ վրկ, $a_s = 0,001$ սմ^3/կգ։

Որոշելով այդ մեծությունները (34′) և (33″) բանաձևերով գտնում ենք, որ նրանք համապատասխանաբար հավասար են $t' = 6775$ վրկ, $t'' = 910$ վրկ։

Ակներև է, որ ռելաքսացիոն-կոմպրեսիոն սարքերում ուժաչափի կոշտության հաշվառման անտեսումը կարող է բերել կոպիտ սխալների ռեոլոգիական պարամետրերը որոշելիս։

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

1. Ստացված է հարթ և միաչափ ռելաքսացիոն խնդիրների տեսական լուծումը գրունտների համար, որոնք ենթարկվում են ժառանգական սողքի վիճակի հավասարումներին՝ նախնական դեֆորմացիաների պահման սխեմի վերջավոր կոշտության դեպքում։

2. Հարթ խնդրի լուծումը հնարավորություն է տալիս հաշվել ցիցը վարսելուց հետո նրա շուրջը առաջացած լարվածային վիճակը։

3. Ստացված լուծումները կարող են օգտագործվել գրունտների ռեոլոգիական պարամետրերի որոշման համար դաշտային և լաբորատոր փորձարկումների արդյունքների հիման վրա։

4. Միաչափ ռելաքսացիայի խնդիրը թույլ է տալիս ռելաքսացիոն սարքերում օգտագործել ցանկացած կոշտության ուժաչափեր։

5. Առաջարկված է գրունտների ռեոլոգիական փորձարկման նոր սխեմաներ և տրված է դրանց համապատասխան տեսական լուծումները՝ արդյունքների մշակման համար։

О РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТАХ

Канд. техн. наук З. Г. ТЕР-МАРТИРОСЯН*

Реферат. В статье рассматривается ряд задач, встречающихся в инженерной и исследовательской практике, которые имеют теоретическое и прикладное значение в реологии грунтов.

Дается теоретическое решение задач о затухании избыточных напряжений в массиве грунта вокруг свай (плоская задача) и в образце грунта, находящегося в условиях компрессии (одномерная задача) в наиболее общем случае, когда границы фиксации начальных деформаций грунтов (свая, динамометр) имеют конечную жесткость. Решение задачи о затухании напряжений в массиве грунта дается с учетом жесткости материала сваи, изменения модуля мгновенной деформации, ползучести и старения скелета грунта. Это решение может быть применено для оценки напряженного состояния массива грунта вокруг свай, оно необходимо для расчетов осадок и длительной несущей способности свай. Решение задачи о затухании напряжений в образце грунта, находящегося в условиях компрессии, дается с учетом изменения коэффициента мгновенного уплотнения, ползучести и старения грунта, а также с учетом конечной жесткости динамометра.

На основе предложенных решений предлагаются новые методы и схемы испытания грунтов для определения их реологических параметров. В частности, предлагается расчетная схема для учета жесткости динамометров в релаксационно-компрессионных приборах при вычислении параметров грунта.

В инженерной и исследовательской практике часто встречаются условия, вызывающие затухание избыточных внутренних напряжений в грунтах (релаксация). Так, например, вокруг свай после их забивки в грунте возникают избыточные напряжения, сжимающие грунт и сваю, которые постепенно рассеиваются. Это явление особенно интенсивно протекает в песчаных, мерзлых и неводонасыщенных глинистых грунтах. В водонасыщенных же глинистых грунтах это явление протекает одновременно с процессом рассеивания порового давления и не обнаруживается, так как последнее почти всегда имеет превалирующее значение.

Интенсивное протекание процессов релаксации в грунтах широко используется в исследовательской практике для определения их реологических параметров в короткий срок.

В исследовательской практике наиболее распространены релаксационные—компрессионные приборы и релаксационные приборы для одноосного сжатия. В этих приборах для обеспечения условий релаксации начальных напряжений в грунтовом образце и их замера применяются динамометры большой жесткости и чувствительности. Последнее обстоятельство осложняет конструкцию релаксационных приборов, требующих применения электронной аппаратуры (Абелев, Тер-Мартиросян, 1965). Обычно жесткостью динамометров в релаксационных приборах пренебрегают, что не всегда правильно.

---

* Старший научный сотрудник отдела геомеханики Института геологических наук АН АрмССР.

Учет жесткости динамометров при исследовании плотных глинистых грунтов, как это будет показано ниже, необходим; в противном случае определяемые реологические параметры могут быть неверными.

В настоящей статье рассматривается ряд задач, встречающихся в инженерной и исследовательской практике, которые имеют прикладное значение в реологии грунтов.

В частности, рассматривается задача о затухании избыточных напряжений в массиве грунта вокруг свай (плоская задача) и в образце грунта, находящегося в условиях компрессии (одномерная задача) в наиболее общем случае, когда границы фиксации начальных деформаций (свая, динамометр) имеют конечную жесткость.

Решение задачи о затухании напряжений в массиве грунта вокруг свай с учетом жесткости материала сваи дает возможность, во-первых, оценить напряженное состояние вокруг свай, необходимое для расчета их осадки и длительной несущей способности; во-вторых, по результатам полевых измерений скорости затухания напряжений вокруг свай определять реологические параметры грунтов ненарушенной структуры.

Последнее обстоятельство привело к мысли о возможности создания нового полевого реологического прибора релаксометра, который даст возможность за короткий срок в полевых условиях определять реологические параметры грунтов.

Решение одноименной задачи релаксации даст возможность определить реологические параметры грунтов по результатам релаксационно-компрессионных испытаний с учетом жесткости динамометра. Последнее обстоятельство позволяет применять в релаксационных-компрессионных приборах динамометры любой жесткости, что намного упрощает конструкцию релаксационных приборов.

Для решения вышеуказанных задач будем считать, что скелет грунта подчиняется наследственной теории ползучести Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна (Арутюнян, 1952), которая для одноосного сжатия записывается в виде

$$\varepsilon_x(t) = \frac{\sigma_x(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^{t} \sigma_x(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \delta(t,\tau) d\tau, \tag{1}$$

а для условий компрессий (Флорин, 1961).

$$e(\tau_1) - e(t) = a(t,\tau) \cdot \sigma(t) - \int_{\tau_1}^{t} \sigma(t) \frac{\partial}{\partial \tau} a(t,\tau) \cdot d\tau, \tag{2}$$

где, первые члены в правых частях этих уравнений представляют мгновенную деформацию, а вторые—развивающиеся во времени деформации ползучести, вызванные переменными во времени напряжениями.

Входящие в уравнения состояния (1) и (2) буквы имеют следующие значения:

$\varepsilon_{zz}(t)$ — изменяющаяся во времени суммарная относительная деформация при одноосном сжатии;

$\sigma_{zz}(t)$ — изменяющееся во времени напряжение;

$\delta(t,\tau)$ — полная относительная деформация к моменту времени t при одноосном сжатии, определяемая зависимостью

$$\delta(t,\tau)=\frac{1}{E(\tau)}+C(t,\tau), \tag{3}$$

где $\frac{1}{E(\tau)}$ —упруго-мгновенная деформация, а $C(t,\tau)$—деформация ползучести к моменту времени t, называемая мерой ползучести;

$e(t)$—изменяющийся во времени коэффициент пористости;

$e(\tau_1)$—начальный коэффициент пористости;

$a(t,\tau)$—изменение коэффициента пористости к моменту времени t от единичной нагрузки, приложенной в момент времени τ_1 в условиях компрессии, определяемое выражением

$$a(t,\tau)=a_m(\tau)+a_l(t,\tau), \tag{4}$$

где $a_m(\tau)$— изменяющийся во времени коэффициент мгновенного уплотнения;

$a_l(t,\tau)$— изменяющийся во времени коэффициент длительного уплотнения.

Известно (Флорин, 1961), что между указанными параметрами при одноосном сжатии (E, C, δ) и компрессии (a, β) имеются определенные соотношения:

$$a(t,\tau)=\beta\cdot[1+e(\tau_1)]\cdot\delta(t,\tau_1), \tag{5}$$

где

$$\beta=1-\frac{2\cdot\nu^2}{1-\nu}.$$

Для меры ползучести $C(t,\tau)$ и изменяющегося модуля мгновенной деформации $E(\tau)$ Н. Х. Арутюняном (1952) предложены выражения вида

$$C(t,\tau)=\varphi(\tau)\cdot[1-e^{-\gamma(t-\tau)}], \tag{6}$$

$$E(\tau)=E_0(1-\beta\cdot e^{-\alpha\cdot\tau}), \tag{7}$$

где $\varphi(\tau)$—функция старения, определяемая в наиболее простом случае выражением

$$(\varphi)=C_0+\frac{A_1}{1+\tau}. \tag{8}$$

Аналогичные выражения для условий компрессии можно написать для $a_m(\tau)$, $a_l(t,\tau)$ и $\varphi(\tau)$

$$a_l(t,\tau)=\varphi(\tau)\cdot[1-e^{-\gamma(t-\tau)}], \tag{6'}$$

$$a_m(\tau)=a_m\cdot[1-\beta\cdot e^{-\alpha\cdot\tau}], \tag{7'}$$

$$\varphi(\tau) = a_1 + \frac{A_1}{1+\tau}. \tag{8'}$$

Таким образом, реологические свойства грунта будут характеризоваться следующими характеристиками: модулем мгновенной деформации $E(\tau)$ или $\vartheta_m(\tau)$, коэффициентом поперечного сжатия ν и мерой ползучести $C(t,\tau)$ или $a_1(t,\tau)$.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние грунта вокруг сваи в условиях плоской задачи, когда грунт обладает свойством ползучести, а материал сваи—упругостью. Начальное значение порового давления будем считать малым и, следовательно, явление фильтрации исключается.

Избыточное напряжение в грунте вокруг сваи после его забивки рассматривается в рамках плоской задачи. В процессе затухания избыточных контактных напряжений соблюдаются условия равенства давлений и радиальных перемещений в соприкасающихся поверхностях. Кроме того, полагается, что в грунте имеется начальное отверстие радиусом r_0 достаточно длинное, и поэтому влиянием торцов при рассмотрении задачи можно пренебречь.

Расчетная схема приведена на рис. 1.

После вдавливания свай в цилиндрическое отверстие массива грунта между ними возникает контактное напряжение $q(t)$, сжимающее сваю и окружающий грунтовый массив. Причем, в силу симметричности, касательные напряжения будут отсутствовать.

Рассмотрим сначала задачу о деформации сваи и отверстия в грунте под воздействием контактных напряжений, изменяющихся во времени. Напряжения от веса грунта не учитываются, так как они не могут релаксироваться.

Компоненты напряжений в окружающем масиве грунта находим по известным формулам теории упругости (Безухов, 1961):

$$\left.\begin{matrix}\sigma(r,t)\\ \sigma(\Theta,t)\end{matrix}\right\} = \pm\, q(t)\cdot\left[\frac{r_0}{r}\right]^2, \tag{9}$$

где, $\sigma(r,t)$ и $\sigma(\Theta,t)$—нормальные и касательные напряжения в грунте на расстоянии r, r_0—радиус начального отверстия в массиве грунта, $q(t)$—контактное нормальное напряжение.

Радиальные деформации в этой области можно получить по известной формуле (Арутюнян, 1952):

$$\varepsilon(r,t) = \frac{\sigma(\Theta,t) - \nu\cdot\sigma(r,t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^{t}\left[\sigma(\Theta,\tau) - \nu\cdot\sigma(r,\tau)\right]\frac{\partial}{\partial\tau}\left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t,\tau)\right]d\tau. \tag{10}$$

Учитывая выражения (9) и имея в виду известную (Безухов, 1961) зависимость между относительной деформацией $\varepsilon(r,t)$ и перемещением $u(r,t)$,

$$e(r,t)=\frac{\partial}{\partial r}u(r,t), \tag{11}$$

получаем выражение для перемещения внутренней поверхности отверстия в грунте в виде

$$u(t)=q(t)\frac{1+\nu}{E(t)}\cdot r_0-\int_{\tau_1}^{t}(1+\nu)\cdot r_0\cdot q(\tau)\frac{\partial}{\partial\tau}\delta(t,\tau)d\tau. \tag{12}$$

Радиальное напряжение внешней поверхности сваи под воздействием контактных напряжений будет определяться выражением

$$u_p(t)=q(t)\frac{1+\nu_p}{E_p}\cdot R_p, \tag{13}$$

где, E_p, ν_p — модули Юнга и Пуассона для материала сваи, R_p — радиус сваи.

Переходим к определению закона затухания во времени избыточных начальных напряжений в грунтовом массиве под влиянием ползучести, изменения модуля мгновенной деформации и старения грунта.

Условия совместности деформаций на контактной поверхности свая-грунт запишутся в виде

$$u(t)=u_p(\tau_1)-u_p(t)+u(\tau_1). \tag{14}$$

Подставляя значения $u(t)$ и $u_p(t)$ в (14), получим окончательно

$$q(t)\cdot\left[\frac{R_p(1+\nu_p)}{E_p}+\frac{r_0(1+\nu)}{E(t)}\right]=u_p(\tau_1)+u(\tau_1)+\int_{\tau_1}^{t}r_0(1+\nu)q(\tau)\frac{\partial}{\partial\tau}\delta(t,\tau)d\tau. \tag{15}$$

После некоторых преобразований получим интегральное уравнение

$$q(t)=\frac{E_p\cdot\Delta}{R_p(1+\nu_p)[1+\omega\cdot n(t)]}+\frac{\omega\cdot E_p}{1+\omega\cdot n(t)}\times\int_{\tau_1}^{t}q(\tau)\delta(t,\tau)d\tau, \tag{16}$$

где

$$\begin{cases}\omega=\dfrac{r_0}{R_p}\,\dfrac{1+\nu}{1+\nu_p}\\ n(t)=\dfrac{E_p}{E(t)}\\ \Delta=u_p(\tau_1)+u(\tau_1)\end{cases} \tag{17}$$

Таким образом, задача определения контактных напряжений $q(t)$ сводится к решению интегрального уравнения (16) с ядром

$$K(t,\tau)=\frac{1}{1+\omega\cdot n(t)}\,\frac{\partial}{\partial\tau}\left[\frac{1}{E(\tau)}+C(t,\tau)\right],$$

со свободным членом

$$f(t)=\frac{E_p\cdot\Delta}{R_p(1+\nu_p)[1+\omega\cdot n(t)]},$$

и параметром

$$\lambda_0 = \omega \cdot E_p .$$

Интегральное уравнение (16) после некоторых преобразований можем представить в виде

$$q''(t) + q'(t) \cdot \left\{ \gamma_i \cdot \left[1 + \frac{\omega \cdot \varphi(t) \cdot E_p}{1 + \omega \cdot n(t)} \right] + \frac{\omega \cdot n'(t)}{1 + \omega \cdot n(t)} \right\} = 0. \tag{18}$$

Таким образом, решение интегрального уравнения (16) сводится к решению однородного линейного дифференциального уравнения второго порядка (18) с переменным коэффициентом, со следующими начальными условиями:

$$\begin{cases} q(\tau_1) = \dfrac{E_p \cdot \Delta}{R_p(1+\nu_p)[1+\omega \cdot n(\tau_1)]} \\ q'(\tau_1) = -\dfrac{q(\tau_1) \cdot \gamma_i \cdot \omega \cdot \varphi(\tau_1)}{1 + \omega \cdot n(\tau_1)} \end{cases} \tag{19}$$

Общее решение уравнения (18) запишется в виде

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_i \cdot \omega \cdot E_p \cdot \varphi(\tau_1)}{1 + \omega \cdot n(\tau_1)} \times \int_{\tau_1}^{t} e^{-\int_{\tau_1}^{t} \left\{ \gamma_i \left[1 + \frac{\omega \cdot E_p \cdot \varphi(x)}{1 + \omega \cdot n(x)} + \frac{\omega \cdot n'(x)}{1 + \omega \cdot n(x)} \right] \right\} dx} d\tau \right). \tag{20}$$

Выражение (20) определяет закономерность изменения напряжений во времени на контакте грунт-свая с учетом упругости сван, изменения модуля мгновенной деформации, ползучести и старения грунта.

Компоненты напряжений в окружающем массиве грунта могут определяться вышеприведенными зависимостями (9).

Для простоты предположим, что модуль мгновенной деформации грунта постоянен, т. е. $E(\tau) = E = \text{const}$, и старение отсутствует, т. е. $\varphi(\tau) = C_0 = \text{const}$.

В этом случае выражение (18) примет вид:

$$q(t) = q(\tau_1) \left(1 - \frac{\omega \cdot E_p \cdot C_0}{1 + \omega \cdot n + E_p \cdot C_0} - + \left\{ 1 - e^{-\gamma_i \left[1 - \frac{\omega \cdot E_p \cdot C_0}{1 + \omega \cdot n} \right] \cdot (t - \tau_1)} \right\} \right). \tag{20'}$$

В случае большой жесткости материала сван по отношению к грунту, что обычно имеет место на практике, т. е. при $n = \dfrac{E_p}{E} \to \infty$, получим условие чистой релаксации в массиве грунта

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot \left(1 - \frac{E \cdot C_0}{1 + E \cdot C_0} \left\{ 1 - e^{-\gamma_i [1 + E \cdot C_0] \cdot (t - \tau_1)} \right\} \right). \tag{20''}$$

Причем, скорость затухания напряжений в этом случае увеличится, а остаточные напряжения будут равны:

$$q_\infty = q(\tau_1) \frac{1}{1 + E \cdot C_0} . \tag{21}$$

Если принять, например, что $E = 2 \cdot 10$ *кг/см²* и $C_0 = 2 \cdot 10^{-2}$*см²/кг*, то получим, что $q_\infty = 0{,}2 \cdot q(\tau_1)$, т. е. начальные напряжения на контакте грунт-свая снижаются в пять раз.

Анализ полученных результатов показывает, что при $r_0 \to 0$ $q(\tau_1) \to \frac{E_p}{1+\nu_p}$ по (20′) и $q(\tau_1) \to \infty$ по (20″).

Это обстоятельство несколько затрудняет применение полученных результатов для прогноза затухания избыточных напряжений в массиве грунта вокруг свай.

Формула (20″) справедлива в случаях, если $r_0 \gg \frac{R_p}{2}$, которое обеспечивает исходное условие задачи о том, что относительные деформации в массиве грунта меньше единицы.

Однако известно, что в технологии производства работ по забивке свай в мерзлый грунт предусматривается предварительное бурение скважины определенного диаметра. Причем, при забивке свай в мерзлый грунт наблюдается релаксация напряжений в грунте.

Полученные результаты могут быть использованы для определения оптимальных параметров и размеров скважин при забивке свай, а также при уточнении технологии производства работ.

Как уже отмечалось выше, результаты решения задачи о релаксации напряжений вокруг упругой сваи позволяют их использовать для определения параметров ползучести в полевых условиях при помощи релаксометра.

Если известна жесткость релаксометра

$$C_r = \frac{R_r \cdot q}{u_r}, \tag{22}$$

где q — напряжение, действующее по параметру релаксометра,

u_r — радиальное перемещение наружной поверхности релаксометра,

R_r — радиус релаксометра,

то на основании формул (17), (19), (20) и (21[1]) можем написать выражение для определения контактного напряжения во времени в релаксометре

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot \left(1 - \frac{\omega_1 \cdot C_r \cdot C_0}{1 + \omega_1 \cdot n_1 + \omega \cdot C_r \cdot C_0} \cdot \left\{1 - e^{-\gamma_t \cdot \left[1 - \frac{\omega_1 \cdot C_r \cdot C_0}{1 + \omega_1 \cdot n_1}\right] \cdot (t - \tau_1)}\right\}\right), \tag{23}$$

где

$$\left|\begin{aligned} n_1 &= \frac{C_r}{E} \\ \omega_1 &= \frac{r_0(1+\nu)}{R_r} \\ \Delta_1 &= u_r(\tau_1) + u(\tau_1) \end{aligned}\right. \tag{24}$$

$$q(\tau_1) = \frac{C_r \cdot \Delta_1}{R_r(1 + \omega_1 \cdot n_1)}. \tag{25}$$

Таким образом, вопрос об определении реологических параметров грунтов в полевых условиях можно считать с теоретической точки зрения решенным.

Перейдем теперь к рассмотрению одномерной задачи релаксации.

Рассмотрим задачу о затухании начальных напряжений в системе пружина-грунт, находящейся между двумя фиксированными жесткими стенами (рис. 2).

Пусть к слою грунта толщиной h в момент времени τ_1 приложена внешняя нагрузка интенсивностью $q(\tau_1)$, которая вызывает в грунте начальное перемещение $S(\tau_1)$. В дальнейшем возникающее напряжение будет постепенно затухать вследствие ползучести скелета грунта и жесткости пружины. В процессе затухания начальных напряжений будут, очевидно, соблюдаться условия равенства давлений и перемещений на контакте грунт-свая.

Вертикальное перемещение грунта на контакте с пружиной можно определить по известному (Цитович, 1963) выражению

$$S(t) = \frac{e(\tau_1) - e(t)}{1 + e(\tau_1)} \cdot h. \tag{26}$$

Вертикальное перемещение сжимающей пружины определится в зависимости от ее жесткости

$$l(t) = q(t) \cdot a_s. \tag{27}$$

Условие одинаковых перемещений на контакте грунт-пружина в процессе затухания напряжений запишется в виде

$$S(t) - S(\tau_1) = -l(t) + l(t), \tag{28}$$

где $S(\tau_1)$ и $l(\tau_1)$—соответственно начальные перемещения грунта и пружины.

Подставляя значения $S(t)$ и $l(t)$ из уравнений (26) и (27) в (28) и учитывая зависимости (2), (4), (5), (6^1, 7^1, 8^1), получаем:

$$\frac{h}{1 + e(\tau_1)} \cdot \left\{a(t,t) \cdot \sigma(t) - \int_{\tau_1}^{t} \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial}{\partial\tau} a(t,\tau) \cdot d\tau\right\} - S(\tau_1) = -q(t) \cdot a_s + l(\tau_1). \tag{29}$$

Учитывая, что $q(t) = \sigma(t)$, задача затухания избыточных напряжений в грунте и пружине, зажатых между двумя неподвижными плитами, приводится к решению интегрального уравнения

$$q(t) = -\frac{\Delta(\tau_1)}{a_s[1 + \chi \cdot m(t)]} + \frac{\chi}{a_s} x \int_{\tau_1}^{t} q(t) \frac{\partial}{\partial\tau} \frac{a(t,\tau)}{1 + \chi \cdot m(t)} d\tau \tag{30}$$

с ядром $$K(t,\tau) = \frac{1}{1 + \chi \cdot m(t)} \frac{\partial}{\partial\tau}\left\{a_m(\tau) + \varphi(t)\left[1 - e^{-\gamma(t-\tau)}\right]\right\},$$

со свободным членом $$f(t) = \frac{\Delta(\tau_1)}{a_s \cdot [1 + \chi \cdot m(t)]}$$

параметром $\lambda_m = \frac{\chi}{a_s}$,

где приняты следующие обозначения:

$$\begin{cases} \chi = \dfrac{h}{1 + e(\tau_1)} \\ m(t) = \dfrac{a(t)}{a_s} \\ \Delta(\tau_1) = S(\tau_1) + l(\tau_1) \end{cases} \tag{31}$$

Аналогично вышеприведенному решению мы можем интегральное уравнение (30) преобразовать в дифференциальное уравнение вида

$$q''(t) + q'(t) \cdot \left(\eta_i \cdot \left\{ 1 + \frac{\chi \cdot \varphi(t)}{a_s \cdot [1 + \chi \cdot m(t)]} \right\} + \frac{\chi \cdot m'(t)}{1 + \chi \cdot m(t)} \right), \tag{32}$$

с начальными условиями

$$\begin{cases} q(\tau_1) = \dfrac{\Delta(\tau_1)}{a_s[1 + \chi \cdot m(\tau_1)]} \\ q'(\tau_1) = \dfrac{q(\tau_1) \cdot \chi \cdot \eta_i \cdot \varphi(\tau_1)}{a_s \cdot [1 + \chi \cdot m(\tau_1)]} \end{cases} \tag{33}$$

Общее решение этого уравнения можно представить в виде

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot$$

$$\cdot \left(1 - \frac{\eta_i \cdot \chi \cdot \varphi(\tau_1)}{a_s \cdot [1 + \chi \cdot m(\tau_1)]} \cdot \int_{\tau_1}^{t} e^{-\int_{\tau_1}^{t} \left(\eta_i \left\{ 1 + \frac{\chi \cdot m(x)}{a_s[1 + \chi \cdot m(x)]} \right\} + \frac{\chi \cdot m'(x)}{1 + \chi \cdot m(x)} \right) dx} d\tau \right). \tag{34}$$

Выражение (34) определяет закономерность затухания во времени начальных напряжений по контакту системы грунт-пружина с учетом изменения коэффициента мгновенного уплотнения, старения и ползучести скелета грунта.

Если коэффициент мгновенного уплотнения грунта $a_m(\tau) = a_m =$ $=$ const изменяется во времени незначительно и его можно принять постоянным, а старение незначительное, т. е. $\varphi(\tau) = a_1 =$ const, тогда выражение (34) запишется в виде

$$q(t) = q(\tau_1) \cdot \left(1 - \frac{\chi \cdot a_1}{a_s(1 + \chi \cdot m) + \chi \cdot a_1} \cdot \left\{ 1 - e^{+\eta_i \left[1 + \frac{\chi \cdot a_1}{a_s(1 + \chi \cdot m)} \right] \cdot (t - \tau_1)} \right\} \right). \tag{34'}$$

В случае же большой жесткости пружины по отношению к грунту, т. е. при $m=\frac{a}{a_s}\to 0$, мы получаем более упрощенное выражение

$$q(t)=q(\tau_1)\cdot\left\{1-\frac{a_1}{a_m+a_1}\left[1-e^{-\eta\left(1+\frac{a_1}{a_m}\right)\cdot(t-\tau_1)}\right]\right\}. \tag{34}$$

Последний случай соответствует условию чистой релаксации, что невозможно создать в лабораторных условиях.

Чтобы убедиться в необходимости учета жесткости динамометров в релаксационных компрессионных приборах, приведем один пример.

Пусть к образцу грунта толщиной 1 *см* и начальным коэффициентом пористости $e(\tau_1)=1$ через пружину приложена в момент времени $\tau_1=0$ вертикальная нагрузка $q(\tau_1)=1$ *кг/см²*. Требуется определить период затухания начальных напряжений с учетом и без учета жесткой пружины при следующих параметрах грунта и пружины:

$a_m=0{,}001$ *см²/кг*, $a_1=0{,}01$ *см²/кг*; $\eta=0{,}01\frac{1}{\text{сек}}$; $a_s=0{,}001$ *см³/кг*.

По формуле (34′) и (34″) определяем эти величины, соответственно равные $t'=6775$ *сек*, $t''=910$ *сек*.

Очевидно, что пренебрежение жесткостью динамометра может привести к грубым ошибкам при релаксационных компрессионных испытаниях грунтов.

ВЫВОДЫ

1. Получено теоретическое решение плоской и одномерной задач релаксации грунтов с учетом жесткости системы фиксации начальных напряжений, справедливое для грунтов, подчиняющихся уравнению состояния наследственной ползучести.

2. Плоская задача релаксации дает возможность рассчитывать напряженное состояние в массиве грунта вокруг свай после их забивки.

3. Полученные решения могут быть использованы для определения реологических параметров грунтов по результатам полевых и лабораторных релаксационных испытаний.

4. Одномерная задача релаксации позволяет применять в релаксационных приборах динамометры любой жесткости, что намного упрощает их конструкцию.

5. Предложена новая схема реологических испытаний грунтов и дано соответствующее решение для обработки результатов.

ON RELAXATION OF STRESSES IN SOILS

Cand. Techn. Sc. ZAVEN TER-MARTIROSIAN*

Abstract. A series of problems are considered in the paper which concern engineering and research practice which have a theoretical significance in soil rheology.

The theoretical solution of the problems of the dissipation of excess stresses in the soil mass around piles (two—dimensional problem), as well as of stresses in soil sample in consolidation tests (one-dimentional probem) are given. These solutions are carried out in a general case when the restriction of initial deformation of soils has a finite rigidity. The solution of the problem on the dissipation of stresses in the soil mass is given considering the rigidity of pile material, the alteration of the modulus of instantaneous deformation, creep and ageing of the soil. This solution can be applied to estimate the stress state in the soil mass around the pile; this is essential in calculation of the settlement and the bearing capacity of piles.

The solution of the problem on the dissipation of stresses in soil samples in consolidation tests is given considering the alteration of instantaneous coefficient of compressibility, creep and ageing of the soil and the stiffness of the dynamometer.

Based on the above-mentioned solution a new method of testing of soils is proposed to determine their rhelogical parameters.

In particular, a scheme of calculation of soil parameters is proposed taking into consideration the stiffness of dynamometers in the relaxation-consolidation apparatus.

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ — ЛИТЕРАТУРА — REFERENCES

Абелев М. Ю., Тер-Мартиросян З. Г., 1965. Некоторые опыты по релаксации напряжений в сильно сжимаемых водонасыщенных глинистых грунтах для решения инженерных задач. Материалы Всесоюзного совещания по строительству на слабых водонасыщенных грунтах. Таллин.

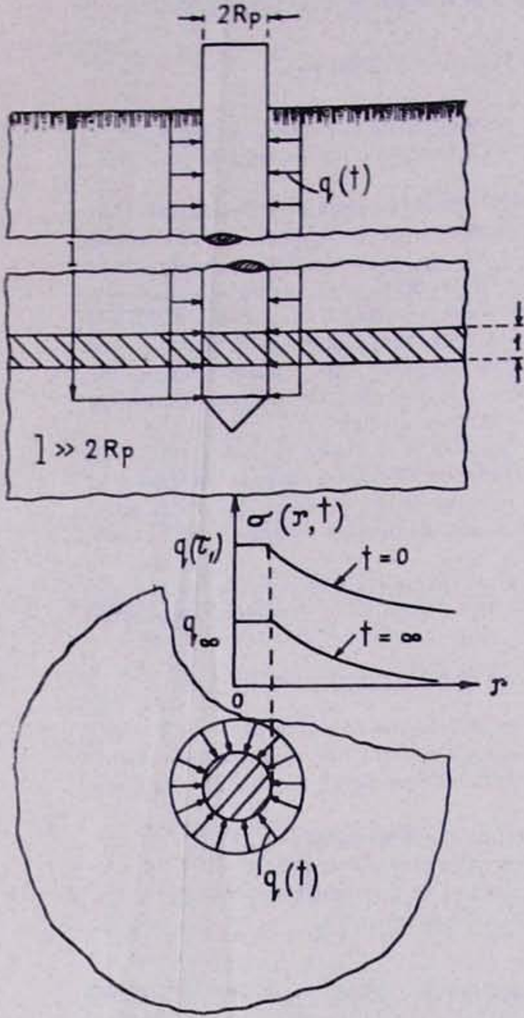
Арутюнян Н. Х., 1952. Некоторые вопросы теории ползучести. М.—Л., ГТТИ.

Безухов Н. И., 1961. Основы теории упругости, пластичности и ползучести.

Флорин В. А., 1961. Основы механики грунтов, М.—Л., Госстройиздат, т. 2.

Цытович Н. А., 1963. Механика грунтов. М., Госстройиздат.

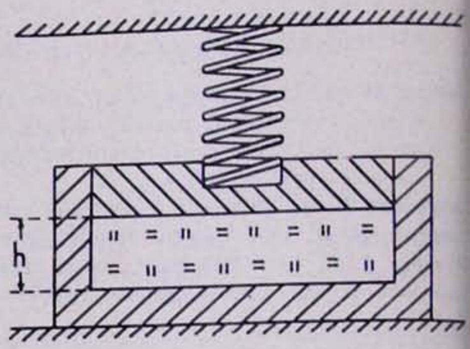
* Senior Scientific Worker, Dept. of Geomechanics, Geological Institute, Armenian Academy of Sciences.



Նկ. 1. Ցցի շրջակայքի լարումների ռելաքսացիայի հաշվարկային սխեման։

Рис. 1. Расчетная схема релаксации напряжений в массиве грунта вокруг свай.

Fig. 1. Calculation scheme of the relaxation of stresses in the soil massif around the pile.



Նկ. 2. Միաչափ ռելաքսացիայի խնդրի լուծման սխեման։

Рис. 2. Расчетная схема одномерной задачи лаксации напряжений в грунтах.

Fig. 2. Calculation scheme of an one-dimensi problem of the relaxation of stresses in soi