Бийбосунов Б.И., Чейчебаев А.Б., Бексултанов Ж. Т.

КӨЧКҮ ЖҮРҮҮГӨ КАРШЫ ЖАНТАЙМА БЕТТИН ТУРУКТУУЛУГУН ЭСЕПТӨӨ МАСЕЛЕСИ

Бийбосунов Б.И., Чейчебаев А.Б., Бексултанов Ж. Т.

ЗАДАЧИ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА ПРОТИВ ПАДЕНИЯ СЕЛЕЙ

B.I. Biibosunov, A.B. Checheibaev, J.T. Beksultanov

TASK OF CALCULATING THE SLOPE STABILITY AGAINST CREEPING

УДК:532. 546

Көчкүлөрдү изилдөөдөгү бирден бир маанилүү маселелердин бири болуп, тоо беттеринин туруктуулугун механиканын закондорунун негизинде изшдөө болуп эсептелет. Берилген статьяда көчкү жүрүүгө карты жантайма беттин туруктуулук коэффициентин эсептөө маселеси каралган. Ошондой эле, майда суулардын физикалык теориясынын негизинде, көчкү - агымдарыньш кыймыльш баяндап жазуучу, так аналитикалык чыгарылышын табуу жөнүндө маселе чыгарылган.

One of the important questions in the study of landslides is to study the stability of the slopes in the sense of the laws of mechanics. In this article there is reviewed the problem of the calculation of the slope stability against sliding of. And also there is solved the problem of finding the exact analytical solutions describing the motion of the landslide-stream based on the physical theory of shallow water.

Азыркы учурда табыйгый катастрофалык процесстерди, тактап айтканда Кыргызстандын аймагындагы көчкүлөрдү, изилдөөнүн кубаттуу инструменттери катарында, механиканын жана математикалык физиканын аналитикалык методдорун алсак болот. Көчкүлөрдү изилдөөдөгү бирден бир маанилуу маселелердин бири болуп, тоо беттеринин туруктуулугун механиканын закондорунун негизинде изилдөө болуп эсептелет. Беттердин туруктуулугуна атмосфералык жаан-чачындар жана топурактагы суулардын денгээли маанилүү таасир тийгизет. Беттердин туруктуулугу, негизги деформацияланууччу горизонттун жана тоо тектериндеги суулардын денгээлинин өз ара жайланышуусунан көз каранды, Жогорудагы параграфта белгиленгендей, көчкү жүрүү беттеринин туруктуулугу тоо тектеринин механикасында, К $_{тур}$ туруктуулук коэффициента менен мүнөздөлөт:

$$K_{тур} = \frac{\sum F_{жылд}}{\sum F_{карм}} \qquad (1)$$

мында $F_{жылд}$ - жылдыруучу күчтөр, ал эми $F_{карм}$ кармоочу күчтөр. $K_{тур} > 1$ болсо, жантайма бет туруктуу эмес, ал эми $K_{тур} \leq 1$ болсо, туруктуу деп эсептейли.

Жылдыруучу күчтөргө оордук күчүн (G), көчкүнүн денесиндеги суюктуктун гидродинамикалык басымын (P) киргизели. Кармоочу күчтөргө - ички сүрүлүү күчүн жана илиштирүү күчүн киргизели – бул эки күчтүн суммасын F_r менен белгилейли жана аны жылууга карата каршылык күчү деп атайлы. Анда көчкү беттериндеги $K_{тур}$ туруктуулук коэффициентин төмөндөгүдөй туюнтууга болот:

$$K_{тур} = \frac{(G+P)}{F_r} \qquad (2)$$

Оордук күчү, тангенционалдык жана нормалдык түзүүчүлөрү менен, эки вектор аркылуу төмөндөгүдөй мүнөздөлөт:

$$T = G \cdot \sin\alpha, \quad N = G \cdot \cos\alpha, \quad F_r = -K_0 \cdot G \cdot \cos\alpha, \quad K_0 = tg\varphi,$$

мында α - көчкү бетинин горизонтко карата жантайган беттин бурчу; K_0 – жылдыруу коэффициенти, ички сүрүлүү коэффициентинин жана илиштирүү коэффицентинин суммасынан турат.

(2) барабардыгынан көрүнүп тургандай, тоо бети туруктуу болуп эсептелет эгерде $P < F_r - G$ шарты аткарылса. Эгерде аткарылбаса, б.а. $P > F_r - G$ болсо, анда жантайма беттин туруктуулугу жоголот.

Белгилей кетүүчү нерсе, көчкүнүн денесиндеги гидродинамикалык басымды стационардык эмес фильтрациянын теңдемесинен аныктоого болот:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - K \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = 0, \qquad (3)$$

мында, H - фильтрациондук түртүүнүн функциясы; K- фильтрация коэффициенти, бул жерде бир тектүү – изотроптуу чөйрө кабыл алынган.

Көчкү бетинин өзүнүн салмагын, нымдуулук ташуу теңдемесин чыгаруу аркылуу аныктоого болот:

$$\frac{\partial W}{\partial t} - D_0 \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + K_0 \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \qquad (4)$$

мында W - топурактын нымдуулугу, нымдуулуктун эки түрүнүн суммасынан турат – табигый абалынан жана толук сууга каныгуудан, б.а. $W = W_{табиг} + W_{каньк.}$; D_0 жана K_0 - тиешелүү түрдө диффузиянын жана ным өткөзүүчүлүктүн коэффициенттери, буларды жалпы жолунан бир тектүү – изотроптуу чөйрөдө нымдуулук ташуу коэффициенттери деп атоого болот.

Анда (2) туруктуулук коэффициенти төмөндөгү туюнтма менен аныкталат:

$$K_{тур} = \frac{(G_1 + G_2) \cdot \sin\alpha + H_0 \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \sin\alpha}{(G_1 + G_2) \cdot \cos\alpha \cdot tg\varphi} \quad \text{же} \quad K_{тур} = \frac{(G_1 + G_2 + I)}{(G_1 + G_2)} \cdot \frac{tg\alpha}{tg\varphi}, \qquad (5)$$

мында $I = H_0 \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$ - фильтрациондук басым менен байланышкан күч, $G_1 = \gamma_e \cdot W_e \cdot D_1 \cdot l$ - топурактын табигый (абсолюттук) каныккан салмагы, $G_2 = \gamma_н \cdot W_н \cdot D_2 \cdot l$ - топурактын суу менен толук каныккан салмагы, $W_{табиг}$ - табигый каныккандагы топурактын нымдуулугу, $W_{каньк}$ - топурактын суу менен толук каныккандагы топурактын нымдуулугу, $\gamma_{табиг}$ - табигый каныгуудагы борпоң сыныктуу катмардын көлөмдүү салмагы, $\gamma_{каньк}$ - топурактын суу менен толук каныккандагы көлөмдүү салмагы, D_1, D_2 - катмарлардын калыңдыгы.

Нымдуулук ташуу (4) жана стационардык эмес фильтрациянын (3) теңдемелери үчүн төмөндөгү чыгарылыштар табылган:

a) $$W(x,t) = C_1 \cdot \exp\left[\frac{(kx - \lambda t)\cdot(k \cdot k_0 - \lambda)}{D_0 \cdot k^2}\right] + C_2; \qquad (6)$$

b) $$W(x,t) = \frac{D_0 \cdot \lambda}{k_0} \cdot x - \lambda \cdot t_1 + \frac{D_0}{k_0} \cdot C_2 \cdot \exp\left[\frac{k_0 \cdot x}{D_0}\right] + C_1; \qquad (7)$$

c) $$H(x,t) = C_1 + C_2 \cdot \exp\left[-\frac{\lambda}{k \cdot s^2} \cdot (s \cdot x - \lambda \cdot t)\right]; \qquad (8)$$

d) $$H(x,t) = \lambda \cdot t + \frac{\lambda}{k} \cdot \frac{x^2}{2} + C_2 \cdot x + C_1, \qquad (9)$$

мында k, λ, s, C_1, C_2 - турактуулар.

Андан ары, (5) барабардыгын колдонуп, көчкү жүрүү беттеринин туруктуулук жана туруксуздук областарын аныктоого болот.

Эми, майда суулардын физикалык теориясынын негизинде, көчкү – агымдарынын кыймылын баяндап жазуучу, так аналитикалык чыгарылышын табуу жөнүндө маселени карайбыз.

Жантайма бет боюнча агымдын кыймылын баяндап жазуу үчүн бир катмарлуу майда суулардын теңдемелер системасын кабыл алабыз, бир өлчөмдүү жакындаштырууда жана консервативтик формада төмөндөгүдөй түргө келет [2]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0, \qquad (10)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \cos\alpha)}{\partial x} = gh \sin\alpha - \tau_x.$$

Мында t - убакыт, x - жантайма бетти жээктеген координата, $u(x,t)$ - жантайма бетти жээктеген туурасынан кеткен кесилиш агымы бонча орточо ылдамдык, $h(x,t)$ - жантайма беттин үстүнө перпендикулярдуу эсептелүүчү агымдын бийиктиги (кубаттулугу), $\alpha(x)$ - горизонтко карата жантайма беттин бурчу, τ_x - сүрүлүү күчүнүн x огундагы проекциясы.

Суюктуктардын агымы учурдагы сүрүлүү күчү төмөндөгүдөй түрдө болот:

$$\tau = k_g u^2 \quad (11)$$

мында k_g - гидравликалык каршылыктын коэффициенти.

Чополорду жана таштарды кармоочу агымдар, селдер жана чополуу аралашмалар тибиндеги агымдар үчүн, $\tau = \tau_c + k_g u^2$ түрүндөгү формула колдонууга сунушталат. Мында τ_c - кургак сүрүлүүнүн чоңдугу. Мындай агымдар үчүн $\tau_c = k_c gh\cos\alpha$ формуласы туура келет, мында k_c - кулондук сүрүлүү коэффициенти.

Ошондуктан, τ_x үчүн туюнтма бул учурда төмөндөгүдөй түргө келет:

$$\tau_x = k_g u|u| + k_c gh\cos\alpha. \quad (12)$$

Андан ары (11) сүрүлүү күчүнүн модели үчүн (10) системасын карайбыз, анткени бул учурда (10) системасы көз карандысыз чоңдуктардан көз каранды болбойт жана жүгүртмө толкун тибиндеги так аналитикалык чыгарылышты алууга болот.

Анда төмөндөгүдөй математикалык моделди алабыз:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\cos\alpha)}{\partial x} = gh\sin\alpha - k_g \cdot u^2.$$

Бул иште жөнөкөйлөтүү үчүн, жантайма бет тиктиги боюнча турактуу болсун деп кабыл алабыз.

(13) биринчи тартиптеги жекече туундудагы сызыктуу эмес теңдемелердин системасын интегралдоо боюнча маселе үчүн, баштапкы шарттар катары, каралып жаткан агымдын мүнөздүк өлчөмү менен салыштырмалуу кичине жана $h_0(x,t)$ менен салыштырмалуу чоң, кесиндидеги $u(x,t)$ жана $h(x,t)$ агымдын ылдамдыгы жана агымдын бийиктиги функциялары үчүн баштапкы таралуу маселелери боло алат.

(13) системасынын чыгарылышын, жүгүртмө толкун чыгаруу формасында издейбиз:

$$h = h(x,t) = H(z),\ u = u(x,t) = U(z), \quad (14)$$

мында $z = mx - \lambda t$; $m, \lambda = const$. Бул жерде λ/m чоңдугу толкундун таралуу ылдамдыгы ролун ойнойт (λ каалагандай белгиде болушу мүмкүн, $\lambda = 0$ мааниси стационардык чыгарылышына, ал эми $m = 0$ мааниси мейкиндиктик – бир тектүү чыгарылышына жооп берет) [1]. Жүгүртмө толкун тибиндеги чыгарылыш төмөндөгүдөй мүнөздөлөт, бул чыгарылыштардын профилдери убакыттын ар кандай моментинде бири биринен кыймылды өзгөртүү менен алынат жана декарттык координаталар системасында турактуу ылдамдык менен кыймылдоону киргизүүгө болот, мында изделүүчү чоңдуктун профили турактуу. $\lambda > 0, m > 0$ болгондо, толкун Ox огуна жандаш оң жакты көздөй кыймылдайт (x тин маанисинин өсүүсү жакка).

(14) формасында (13) системасынын чыгарылышын издөө [1] ишинде берилген алгоритмдин негизинде жүргүзүлөт. Анда (13) системасын интегралдоо маселеси төмөндөгү сызыктуу эмес дифференциалдык теңдемелерди интегралдоого алынып келинет:

$$H'[-\frac{\lambda^2}{k} + \frac{\lambda^2\cdot(H-C_1)\cdot C_1}{k\cdot H^2} + \frac{\lambda^2\cdot(H-C_1)}{k^2\cdot H} + (k\cdot\cos\alpha)\cdot H] = g\cdot\cos\alpha - \frac{k_g\cdot\lambda^2\cdot(H-C_1)^2}{H^2} \quad (15)$$

(15) теңдемесин интегралдоо кубаттуу математикалык пакет MatLab дын жардамы менен жүргүзүлдү. (13) системасынын жалпы чыгарылышы айкын эмес түрдө жүгүртмө толкун формасында алынды:

$$z = x - t = \frac{1}{2}\cdot\frac{h^2\cdot k^3\cdot\cos\alpha}{q_1} + \frac{\lambda^2\cdot h\cdot g\cdot k^2\cdot\cos\alpha}{q_1^2} - \frac{\lambda^4\cdot h\cdot(k_g)}{q_1^2} - \frac{\lambda^2\cdot h\cdot g\cdot k^3\cdot\cos\alpha}{q_1^2} +$$
$$+ \frac{\lambda^4\cdot h\cdot k\cdot k_g}{q_1^2} - \frac{2\cdot\lambda^2\cdot h\cdot k^3\cdot k_g\cdot C_1\cdot\cos(\alpha)}{q_1^2} - \frac{1}{2}\cdot\frac{\lambda^2\cdot C_1\cdot q_3\cdot g^2\cdot k^4\cdot\cos^2\alpha}{q_1^3} + \frac{\lambda^6\cdot C_1\cdot q_3\cdot(k_g)^2}{2q_1^3} +$$
$$+ \frac{\lambda^2\cdot C_1\cdot q_3\cdot g^2\cdot k^5\cdot\cos^2\alpha}{2q_1^3} - \frac{\lambda^6\cdot q_3\cdot k\cdot(k_g)^2\cdot C_1}{2q_1^3} + \frac{1}{2}\cdot\frac{\lambda^2\cdot(C_1)^2\cdot q_3\cdot g\cdot k_g\cdot k^5\cdot\cos^2\alpha}{q_1^3} +$$
$$+ \frac{3\lambda^4\cdot(C_1)^2\cdot(k_g)^2\cdot q_3\cdot k^3\cdot\cos\alpha}{2q_1^3} + \frac{\lambda\cdot q_2\cdot g^2\cdot(\cos^2\alpha)\cdot k^4\cdot C_1}{q_1^2\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}} - \frac{\lambda^3\cdot q_2\cdot g\cdot(\cos\alpha)\cdot k^2\cdot k_g\cdot C_1}{q_1^2\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}} - \quad (16)$$

$$-\frac{\lambda^3\cdot C_1\cdot k_g\cdot q_2\cdot g\cdot k\cdot\cos\alpha}{q_1^3\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}+\frac{\lambda^5\cdot q_2\cdot(k_g)^2\cdot C_1}{q_1^2 k\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}+\frac{2\lambda^3\cdot q_2\cdot(\cos\alpha)\cdot k^2\cdot(k_g)^2\cdot(C_1)^2}{q_1^2\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}-$$

$$-\frac{\lambda^3\cdot C_1\cdot k_g\cdot q_2\cdot g^2\cdot k^3\cdot\cos^2\alpha}{q_1^3\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}+\frac{\lambda^7\cdot q_2\cdot(k_g)^3\cdot C_1}{q_1^3 k\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}+\frac{\lambda^3\cdot q_2\cdot(\cos^2\alpha)\cdot k^4\cdot g^2\cdot k_g\cdot C_1}{q_1^3\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}-$$

$$-\frac{\lambda^7\cdot C_1\cdot(k_g)^3\cdot q_2}{q_1^3\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}+\frac{\lambda^3\cdot q_2\cdot(k_g)^2\cdot k^4\cdot(C_1)^2\cdot g\cdot\cos^2\alpha}{q_1^3\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}+\frac{3\lambda^5\cdot q_2\cdot(\cos\alpha)\cdot k^2\cdot(k_g)^3\cdot(C_1)^2}{q_1^3\sqrt{g\cdot k_g\cos\alpha}}+C_2,$$

мында

$$C_2=const,\ q_1=g\cdot k^2\cdot\cos\alpha-k_g\cdot\lambda^2,\quad q_2=arth\Big(\frac{1}{2}\cdot\frac{2\cdot q_1\cdot h+2\cdot k_g\cdot\lambda^2\cdot C_1}{\lambda\cdot C_1\cdot k\cdot\sqrt{g\cdot k_g\cdot\cos\alpha}}\Big),$$

$$q_3=\ln(g\cdot\cos\alpha)\cdot k^2\cdot h^2-k_g\cdot\lambda^2\cdot h^2+2\cdot k_g\cdot\lambda^2\cdot h\cdot C_1-k_g\cdot\lambda^2\cdot(C_1)^2.$$

$$z=x-t=C_2+\frac{\lambda^2\cdot(C_1)^2\cdot k^3\cdot\cos\alpha}{2d_1(\lambda-k\cdot u)^2}-\frac{\lambda^3\cdot g\cdot k^2\cdot C_1\cdot\cos\alpha}{d_1^2(\lambda-ku)}-\frac{\lambda^5\cdot k_g\cdot C_1}{d_1^2(\lambda-ku)}-\frac{\lambda^3\cdot g\cdot k^3\cdot C_1\cdot\cos\alpha}{d_1^2(\lambda-ku)}-$$

$$-\frac{\lambda^5\cdot C_1\cdot k\cdot k_g}{d_1^2(\lambda-k\cdot u)}-\frac{2\cdot\lambda^3\cdot k_g\cdot k^3\cdot(C_1)^2\cdot\cos\alpha}{d_1^2(\lambda-ku)}-\frac{\lambda^2\cdot d_3\cdot g^2\cdot(\cos^2\alpha)\cdot k^4\cdot C_1}{2\cdot d_1^3}+\frac{\lambda^6\cdot d_3\cdot(k_g)^2\cdot C_1}{2\cdot d_1^3}+$$

$$+\frac{\lambda^2 C_1 d_3 g^2 k^5\cos^2\alpha}{2\cdot d_1^3}-\frac{\lambda^6 d_3(k_g)^2 k\cdot C_1}{2\cdot d_1^3}+\frac{\lambda^2 d_3 g\cdot(\cos^2\alpha)\cdot k^5(C_1)^2 k_g}{2\cdot d_1^3}+\frac{3\lambda^4 d_3 k^3(k_g)^2\cdot(C_1)^2\cos\alpha}{2\cdot d_1^3}+$$

$$+\frac{\lambda\cdot C_1\cdot d_2\cdot g^2\cdot k^4\cdot\cos^2\alpha}{2\cdot d_1^3}-\frac{\lambda^3 d_2 g\cdot(\cos\alpha)\cdot k^2 C_1\cdot k_g}{d_1^2\sqrt{gk_g\cos\alpha}}-\frac{\lambda^3\cdot d_2 gk\cdot(k_g)C_1\cdot\cos\alpha}{d_1^2\sqrt{gk_g\cos\alpha}}+\tag{17}$$

$$+\frac{\lambda^5 C_1 d_2(k_g)^2}{d_1^2\sqrt{gk_g\cos\alpha}}-\frac{2\lambda^3 d_2(k_g)^2 k^2\cdot(C_1)^2\cos\alpha}{d_1^2\sqrt{gk_g\cos\alpha}}-\frac{\lambda^3 d_2 g^2\cdot(\cos^2\alpha)\cdot k^3 C_1 k_g}{d_1^3\sqrt{gk_g\cos\alpha}}+\frac{\lambda^7 d_2(k_g)^3 C_1\cos\alpha}{d_1^3 k\sqrt{gk_g\cos\alpha}}+$$

$$+\frac{\lambda^3 C_1 k^4 d_2(k_g)g^2\cos^2\alpha}{d_1^3\sqrt{gk_g\cos\alpha}}-\frac{\lambda^7 d_2(k_g)^3\cdot(C_1)}{d_1^3\sqrt{gk_g\cos\alpha}}+\frac{\lambda^3 d_2 gk^4(C_1)^2(k_g)^2\cdot\cos^2\alpha}{d_1^3\sqrt{gk_g\cos\alpha}}+\frac{3\lambda^5 d_2(k_g)^3 k^2(C_1)^2\cos\alpha}{d_1^3\sqrt{gk_g\cos\alpha}}$$

мында

$$C_2=const,\ d_1=g\cdot k^2\cdot\cos\alpha-(k_g)\cdot\lambda^2,\quad d_2=arth\Bigg(\frac{1}{2}\cdot\frac{2\cdot\dfrac{d_1\cdot C_1\cdot\lambda}{\lambda-ku}+2\cdot k_g\cdot\lambda^2\cdot C_1}{\lambda\cdot C_1\cdot k\cdot\sqrt{g\cdot k_g\cdot\cos\alpha}}\Bigg),$$

$$d_3=\ln\Big(\frac{g\cdot k^2\cdot(C_1)^2\cdot\lambda^2}{(\lambda-ku)^2}-\frac{\lambda^4\cdot(C_1)^2\cdot\lambda^3}{(\lambda-ku)^2}+\frac{2\cdot k_g\cdot\lambda^3\cdot(C_1)^2}{\lambda-ku}-k_g\cdot\lambda^2\cdot(C_1)^2\Big).$$

Демек, (17) айкын эмес формада, биз (11) түрүндөгү күчтү колдонуу учуру үчүн, (10) агымдын кыймылынын тендемелеринин системасынын жалпы чыгарылышын аныктадык.

Адабияттар:

1. Стокер Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. - М.: Изд-во иностр. Литературы, 1959. - 617 с.
2. Эглит М.Э. Неустановившиеся движения в руслах и на склонах. - М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1986.-96 с.
3. Ершин Ш.А., Бийбосунов А.И. Аналитический метод расчета устойчивости оползневых склонов. //Современные проблемы механики сплошных сред. Выпуск третий. Гидрогазодинамика и экзогенно-геологические процессы природы. - Бишкек, Комитет по теоретической и прикладной механике Кыргызстана, 2004. - С. 14-21.

Рецензент: к.ф-м.н., доцент Бекболотов Д.Б.