

FTAMP 67.21.21

Д.Ж. Артықбаев¹ – негізгі автор, ©
Ф.Х. Аубакирова², Н.С. Нақбаев³,
Ж.Ж. Бердалиева⁴, Г.М. Отарбаева⁵



¹PhD, аға оқытушы, ²Техн. ғылым. канд., доцент, ^{3,5}Докторант, ⁴Оқытушы

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0003-4794-8707> ²<https://orcid.org/0000-0002-4687-1528>

³<https://orcid.org/0009-0003-3608-7208> ⁴<https://orcid.org/0009-0003-5477-5151>

⁵<https://orcid.org/0009-0001-2401-9457>



^{1,2,3}М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан ғылыми зерттеу

университеті, Шымкент, Қазақстан



⁴Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясы, Алматы, Қазақстан

⁵Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан



²faraub@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/TITR3459>

ЕҢІСТЕРДІҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫНА ӘСЕР ЕТЕТІН ТОПЫРАҚТЫҢ ГЕОТЕХНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

Аңдатпа. Мақалада еңістер мен үйінді құрылыстарының сейсмотұрақтылығына тікелей әсер ететін грунттардың геотехникалық сипаттамалары қарастырылған. Жер сілкінісі кезіндегі динамикалық жүктемелер жағдайында грунттардың гранулометриялық құрамы, ылғалдылығы, кеуектілік коэффициенті, үйкеліс бұрышы, жабысу күші және деформация модулі сияқты негізгі параметрлердің өзгеру ерекшеліктері талданды. Далалық (SPT, CPT, SCPT) және зертханалық (циклдік үшосьты, ығысу, резонанстық баған әдісі) сынақтар арқылы грунттардың беріктік және сүзгіштік қасиеттерінің деградациясы анықталды. Сандық модельдеу әдістерін (қалыпты тепе-теңдік әдісі, Ньюмарк әдісі, ақырлы элементтер моделі) және ықтималдық тәсілдерін (Монте-Карло симуляциясы) қолдану арқылы тұрақтылық коэффициентінің F_s шекті мәндерге дейін төмендеу шарттары айқындалды. Зерттеу нәтижелері инженерлік тәжірибеде грунттардың қасиеттерін кешенді ескерудің маңыздылығын дәлелдеп, сейсмотұрақты құрылымдарды жобалау және нормативтік талаптарды жетілдіру үшін қолданылуы мүмкін.

Тірек сөздер: грунт, үйінді, геотехникалық сипаттама, сейсмотұрақтылық, тұрақтылық коэффициенті, динамикалық сынақтар, сандық модельдеу, Ньюмарк әдісі.



Артықбаев, Д.Ж. Еңістердің сейсмикалық тұрақтылығына әсер ететін топырақтың геотехникалық сипаттамалары [Мәтін] / Д.Ж. Артықбаев, Ф.Х. Аубакирова, Н.С. Нақбаев, Ж.Ж. Бердалиева, Г.М. Отарбаева // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №4(90). – Б.195-203.
<https://doi.org/10.55956/TITR3459>

Кіріспе. Сейсмикалық қауіпті аймақтардағы қалалар мен инфрақұрылымның заманауи дамуы инженерлік нысандардың геотехникалық қауіпсіздігі мәселелеріне ерекше назар аударуды талап етеді. Жер сілкіністері – жер массаларында күрделі деформациялық үдерістерді тудырып, опырылу,

көшкін және еңістер мен үйінділердің тұрақтылығын жоғалту сияқты зардаптарға әкелетін ең жойқын табиғи факторлардың бірі болып қала береді [1,2]. Бұл ретте еңістердің беріктігі мен тұрақтылығы тікелей топырақтың геотехникалық сипаттамаларына тәуелді, ал динамикалық жүктемелер жағдайында бұл сипаттамалар уақыт пен кеңістік бойынша өзгеріп отырады [3,4].

Соңғы жылдардағы зерттеулер көрсеткендей, сейсмикалық тербелістердің әсерінен топырақтың мінез-құлқын айқындайтын негізгі параметрлер – ішкі үйкеліс бұрышы, ілінісу, тығыздығы, кеуектілік коэффициенті, ылғалдану дәрежесі және деформация модулі болып табылады [1,5,6]. Топырақтың ылғалдылығы мен қанығу деңгейінің артуы кеуектік қысымның көтерілуіне және тиімді кернеу күйінің төмендеуіне алып келеді, бұл өз кезегінде жылжу кедергісін азайтып, тұрақтылық қоры коэффициентінің (F_s) төмендеуіне себеп болады [3,7]. Дәндік (гранулометриялық) құрам да маңызды рөл атқарады: құмды және лесс тәрізді топырақтар сейсмопросядқыштыққа бейім, ал сазды жыныстар көп мәрте циклдік тербелістер кезінде сұйылуға ұшырайды [4,7,8]. Бұл ерекшеліктер Оңтүстік Қазақстан, Орта Азия және Тянь-Шань аймақтары үшін өзекті, себебі бұл өңірлерде лесс қабаттары мен шаңды-сазды жыныстар басым таралған және олар жоғары қасиеттерімен сипатталады [4].

Далалық және зертханалық зерттеулер (SPT, CPT, SCPT, циклдік үшосьтік және қарапайым ығысу сынақтары) динамикалық жүктемелер әсер еткен кезде топырақтардың беріктік және сүзгілік қасиеттерінің әлсіреу заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді [9-11]. W. Wu [9] және X. Fan [4] зерттеулерінің нәтижелері бойынша құмды және лесс тәрізді топырақтарда қайталанған жүктеме циклдары кезінде беріктік шамамен 40%-ға дейін төмендеуі мүмкін екендігі анықталған.

Сандық модельдеу әдістері (соңғы элементтер әдісі – FEM, соңғы айырмалар әдісі – FDM, Ньюмарк әдісі) және ықтималдық тәсілдері (Монте-Карло талдауы, параметрлердің өрістері) нақты жағдайларды дәлірек бейнелеуге мүмкіндік береді және топырақ қасиеттерінің өзгергіштігінің еңістердің тұрақтылығына әсерін бағалауға жағдай жасайды [2,11,12]. Мысалы, L. Zhang және әріптестері [1] көрсеткендей, ілінісу (c) мен ішкі үйкеліс бұрышының (φ) $\pm 15\%$ вариациясы кезінде тұрақтылық коэффициенті F_s шамамен 0,85-1,15 аралығында өзгеруі мүмкін.

Осылайша, бұл зерттеудің өзектілігі – сейсмикалық факторлар мен табиғи әртектілікті ескере отырып, топырақтардың геотехникалық сипаттамаларын кешенді түрде талдау қажеттілігімен айқындалады. Зерттеу жұмысының ғылыми жаңалығы – жер сілкіністері жағдайындағы еңістердің тұрақтылығын анықтайтын параметрлерді жүйелеу және оларды инженерлік есептеулер мен сейсмикалық төзімді құрылыстарды жобалау кезінде ескерудің әдістемесін нақтылау болып табылады [12,13].

Зерттеу шарттары мен әдістері. Еңістердің жер сілкінісіне төзімділігі табиғи және инженерлік параметрлермен анықталады. Дұрыс бағалау үшін келесі факторларды ескеру қажет:

- геологиялық жағдайлар: топырақ түрлері (құмдар, құмайттар, сарғыш, саздар), әлсіз қабаттардың болуы және құрылымдық анизотропия [1,4];

- гидрогеологиялық жағдай: жер асты суларының деңгейі, сүзгілік коэффициенті k , қанығу дәрежесі S_r және жауын-шашын кезінде олардың динамикасы [3];

– сейсмикалық әсер: жеделдету (PGA), қозғалыс спектрлік сипаттамалары және оның ұзақтығы [1,9];

– еңіс геометриясы: биіктігі H , көлбеу бұрышы β , еңіс ұзындығы және сейсмикалық векторға қатысты бағыты [5];

– топырақ параметрлері: ілінісу c , ішкі үйкеліс бұрышы ϕ , ығысу модулі G , деформация модулі E , сөну коэффициенті және сұйылуға бейімділігі [4].

Бұл шарттар зертханалық, далалық және сандық зерттеулердің бастапқы деректерін анықтайды. Деректерді жинау үшін келесі әдістер пайдаланылды:

– стандартты сынақтар (SPT, CPT, SCPT) – топырақтың тығыздығын, енуге қарсы кедергісін және сүзгілік параметрлерін анықтау үшін [3];

– циклдік үшосьтік және қарапайым ығысу сынақтары – көп мәрте жүктеме әсерінен топырақтың беріктігі мен қаттылығының төмендеуін бағалау үшін [4];

– резонанстық баған сынағы және толқындық әдістер (V_s , V_{s30}) – кіші деформациялар кезіндегі қаттылық пен сөну коэффициентін анықтау үшін [1];

– ылғалдылықты, кеуектілікті және қанығу дәрежесін анықтау – сүзгілік және капиллярлық қасиеттерді бағалау мақсатында [5].

Жоғарыда аталған топырақтарды зерттеудің негізгі зертханалық және далалық әдістері 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1

Топырақтарды зерттеудің негізгі зертханалық және далалық әдістері

Әдіс атауы	Анықталатын параметрлер	Қолданылу шарты	Дерек көзі
SPT, CPT, SCPT	тығыздық, кедергі, кеуектік қысым	инженерлік-геологиялық жағдайларды бағалау	[3]
Үшосьтік циклдік сынақтар	c , ϕ , ығысу модулі, деградация	сейсмикалық әсер кезіндегі беріктікті бағалау	[4]
Резонанстық баған сынағы	V_s , сөну коэффициенті, G_{max}	динамикалық модельдеу	[1]
Зертханалық ылғалдылық пен тығыздық анықтау	w , S_r , e	Сүзгілік параметрлерді анықтау	[5]

Еңістердің тұрақтылығын бағалау үшін аналитикалық зерттеу әдістерінің ішінде шекті тепе-теңдік әдісі (LEM), сондай-ақ псевдостатикалық және сандық тәсілдер қолданылады.

Шекті тепе-теңдік әдісі (LEM) еңіс қимасындағы күштердің тепе-теңдігін талдау негізінде тұрақтылық коэффициентін анықтауға негізделеді:

$$F_s = \frac{\sum(c' \cdot l + W \cos \alpha \cdot \tan \phi')}{\sum(W \sin \alpha + u \cdot l)} \quad (1)$$

мұндағы: c' – ілінісу, ϕ' – ішкі үйкеліс бұрышы, W – қиманың салмағы, u – кеуектік қысым, l – сырғыма бетінің ұзындығы [3,9].

Псевдостатикалық әдісте қосымша жүктемелерді есептеу үшін горизонталь және вертикаль сейсмикалық коэффициенттер енгізіледі [1]:

$$a_h = k_h \cdot g, \quad a_v = k_v \cdot g \quad (2)$$

Нюмарк әдісі еңіс тұрақтылығы коэффициенті уақытша сыни мәннен төмендеген жағдайларда қалдық орын ауыстыруларды бағалау үшін қолданылады [9].

Сандық модельдеу (FEM/FDM) кезінде топырақ қасиеттерінің деградациясы, кеуектік қысымның жиналуы және біртіндеп бұзылу процестері ескеріледі [4].

Қазіргі зерттеулер топырақ қасиеттерінің өзгергіштігін есепке алуға ерекше назар аударады, сондықтан келесі ықтималдық әдістері қолданылады:

- Монте-Карло симуляциясы: c , φ , тығыздық, қабаттардың тереңдігі және су деңгейі параметрлері вариацияланады [3];
- сезімталдық талдауы (sensitivity analysis): ең маңызды параметрлерді анықтау үшін [5];
- біріктірілген модельдер (детерминистік + ықтималдық): мүмкін болатын тұрақтылық коэффициенттері F_s диапазонын бағалауға мүмкіндік береді [1,3].

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Талдау үшін құмды және сазды топырақтар бойынша зертханалық және сандық зерттеу деректері пайдаланылды [12,14]. Топырақтардың индекстік және динамикалық сипаттамалары 2-кестеде келтірілген.

Кесте 2

Топырақтардың индекстік және динамикалық параметрлері

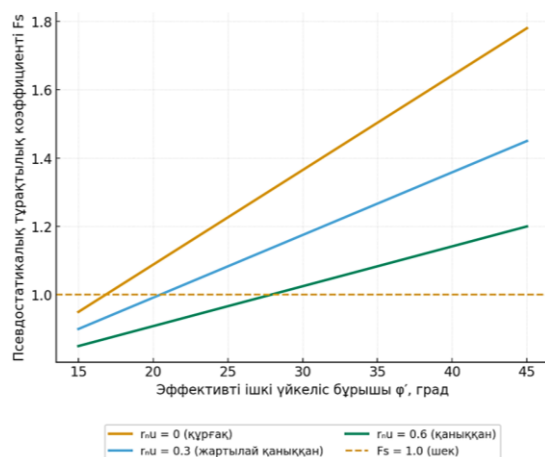
Топырақ түрі	φ' , град	c' , кПа	γ , кН/м ³	V_{S30} , м/с	Пластикалық көрсеткіш (PI)
Тығыз құм	40	0	19.0	450	0
Орташа тығыз құм	34	0	18.0	300	0
Құмайт	30	5	18.5	220	4
Жұмсақ саз	20	12	17.0	160	40
Қатты саз	25	25	18.0	250	20

Тұрақтылық қорының коэффициенті Моор-Кулон критерийі бойынша есептелді:

$$F_{s,ps} = \frac{c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \varphi'}{\tau_{dem}} \quad (3)$$

мұндағы: σ_n – нормаль кернеу, $u = r_u \sigma_n$ – кеуектік қысым, r_u – қанығу коэффициенті.

Псевдостатикалық тұрақтылық қоры коэффициентінің графикалық тәуелділігі 1-суретте көрсетілген.

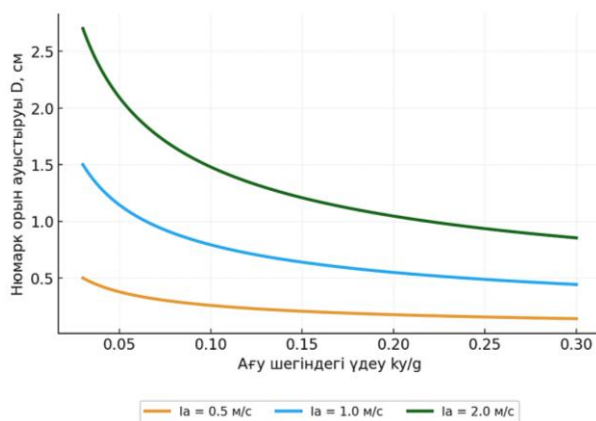


Сурет 1. Тұрақтылық коэффициенті F_s -тің ішкі үйкеліс бұрышы ϕ' және топырақтың қанығу дәрежесіне тәуелділігі

Деформациялық сейсмикалық төзімділіктерін бағалау үшін Ньюмарк әдісі қолданылды. Қорытынды орын ауыстыру шамасы (D) «ағу үдеуі» (k_y) функциясы ретінде есептелді:

$$D = A \cdot e^{-B \cdot k_y} \cdot I_a \quad (4)$$

мұндағы, I_a – Ариас интенсивтілігі (2-сурет).



Сурет 2. Ньюмарк әдісі бойынша орын ауыстырулардың Ариас интенсивтілігіне тәуелділігі

Жүргізілген зерттеулердің нәтижелері сейсмикалық әсерлер жағдайында еңістердің тұрақтылығына топырақтардың физика-механикалық және динамикалық сипаттамалары шешуші әсер ететінін дәлелдейді. Ең сезімтал параметрлерге ішкі үйкеліс бұрышы, ілінісу, суға қанығу дәрежесі, тығыздық және деформация модулі жатады. Осы параметрлердің кез келгенінің төмендеуі тұрақтылық қоры коэффициенті F_s -тің азаюына және еңістердің қалдық орын ауыстыруларының артуына алып келеді [1,3,4].

Зертханалық деректер мен сандық есептеулерді талдау топырақтың қанығу дәрежесінің артуы кеуектік қысымның көтерілуіне әкелетінін

көрсетті, бұл өз кезегінде тиімді кернеу жағдайын төмендетеді және нәтижесінде жылжу кедергісін азайтады [3,7].

Қанығу коэффициентінің жоғары мәндері ($r_u > 0,8$) кезінде F_s -тің күрт төмендеуі байқалады. Бұл Т. Jiang [3] зерттеулерінің нәтижелерімен сәйкес келеді: топырақтың жартылай қаныққан күйден толық қаныққан күйге өтуі тұрақтылық коэффициентінің 25%-дан астамға төмендеуіне алып келеді.

Гранулометриялық құрам да топырақтың сейсмикалық әсерге жауап беру сипатына айтарлықтай ықпал етеді. Құмды және лесс тәрізді топырақтар сейсмопросадқыштыққа бейім болса, сазды жыныстар көп мәрте циклдік тербелістер кезінде сұйылуға ұшырайды [4,7,8]. Х. Fan [4] және W. Zhou [8] зерттеулерінің нәтижелері көрсеткендей, саздардағы беріктіктің деградациясы орташа амплитудалы жүктеменің небәрі 5-10 циклінен кейін-ақ басталады. Бұл еңістерді есептеу барысында циклдік беріктікті және ілінісу қасиетінің төмендеу жылдамдығын міндетті түрде ескерудің маңыздылығын дәлелдейді.

Топырақ құрылымының әртектілігіне ерекше назар аудару қажет. L. Zhang [1] еңіс аумағындағы ілінісу мен ішкі үйкеліс бұрышы параметрлерінің ауытқуы пластикалық деформациялардың локализациясына және сырғыма бетінің орын ауысуына әкелетінін дәлелдеді. Бұл нәтижелер В. Yan [11] орындаған Монте-Карло әдісінің ықтималдық талдауларымен сәйкес келеді, оған сәйкес беріктік сипаттамаларының $\pm 15\%$ шегіндегі өзгеруі тұрақтылық коэффициентінің 0,85-1,15 аралығында тербелуіне себеп болады.

Сандық модельдеу әдістері (FEM, FDM) сейсмикалық жағдайларда еңістердің мінез-құлқын болжауда жоғары тиімділігін көрсетті. Алайда шынайы нәтижелер алу үшін бастапқы топырақ параметрлерін дұрыс тағайындау қажет, әсіресе Ньюмарк әдісін қолданғанда. W. Wu [9] атап өткендей, ағу шегіндегі үдеуді (k_x) анықтаудағы небәрі 0,02g қателік қалдық орын ауыстыру болжамының 30%-дан астам өзгеруіне әкелуі мүмкін.

Ықтималдық әдістерді және сезімталдық талдауын қолдану топырақ қасиеттерінің өзгергіштігін және сыртқы әсерлердің белгісіздігін есепке алуға мүмкіндік береді. Н. Tang [2], сондай-ақ R.B. Seed пен J.D. Bray [6] көрсеткендей, детерминистік және стохастикалық тәсілдерді үйлестіру еңістердің тұрақтылығын болжаудың сенімділігін арттырады. Бұл әсіресе стратиграфиясы күрделі және гидрогеологиялық жағдайлары өзгермелі аймақтар үшін маңызды.

Жұмсартқыш (G_{max}) және сөну коэффициенті де топырақтың динамикалық жауабына ықпал етеді. S.L. Kramer және P. Arduino [10] топырақтардың жоғары ығысу модуліне (G_{max}) және 7-10% демпфирлеу коэффициентіне ие болған жағдайларда орын ауыстыру амплитудаларының аз болатынын және сейсмикалық төзімділікті артатынын көрсетті. Алайда жеткілікті демпфирлеусіз шамадан тыс қаттылық резонанстық әсерлерге әкелуі мүмкін, сондықтан сандық модельдеу кезінде параметрлердің кешенді түрде таңдалуын талап етеді.

Осылайша, еңістердің сейсмикалық төзімділіктеріне сенімді бағалау тек кешенді тәсіл қолданылғанда мүмкін: зертханалық сынақтар, далалық зерттеулер, сандық модельдеу және ықтималдық талдаулар. SPT, CPT, резонанстық баған, FEM және Монте-Карло әдістері арқылы алынған нәтижелерді теңестіру топырақтардың мінез-құлқын тереңірек түсінуге және инженерлік шешімдердегі белгісіздікті төмендетуге мүмкіндік береді.

Аталған қорытындылар заманауи халықаралық талаптарға толық сәйкес келеді [11,12].

Қорытынды. Жүргізілген зерттеулер топырақтардың геотехникалық сипаттамалары сейсмикалық әсерлер жағдайында еңістердің тұрақтылығын қамтамасыз етуде шешуші рөл атқаратынын көрсетті. Еңіс пен үйінді тұрақтылығын айқындайтын ең маңызды параметрлерге ішкі үйкеліс бұрышы, ілінісу, тығыздық, суға қанығу дәрежесі және деформация модулі жатады. Динамикалық жүктемелер әсерінен осы сипаттамалардың өзгеруі тұрақтылық қоры коэффициентінің төмендеуіне және қалдық деформациялардың пайда болуына әкеледі.

Белгілі болғандай, құмды және лесс тәрізді топырақтар жоғары сейсмопроясқыншылықпен ерекшеленеді, ал сазды жыныстар сейсмикалық тербелістердің жоғары деңгейінде сұйылуға бейім келеді. Бұл ерекшеліктер еңістерді жобалау және есептеу кезінде сүзгілік және беріктік қасиеттерді жан-жақты ескеруді талап етеді.

Пайдалы нәтижелер кешенді тәсіл қолданудың тиімділігін көрсетті: далалық сынақтар (SPT, CPT), зертханалық циклдік зерттеулер және сандық модельдеу әдістерін біріктіру жер сілкіністері кезіндегі топырақтардың мінез-құлқын дәлірек болжауға және тұрақтылықтың шекті деңгейге дейін төмендеуіне себеп болатын критикалық параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді. Ықтималдық тәсілдерін, әсіресе Монте-Карло әдісін пайдалану топырақ қасиеттерінің өзгергіштігі мен сыртқы әсерлердің белгісіздігін ескере отырып, тәуекелдерді неғұрлым сенімді бағалауға жағдай жасайды.

Осылайша, зерттеу нәтижелері инженерлік геология мен сейсотұрақтылық құрылыс саласы үшін маңызды практикалық мәнге ие. Олар нормативтік талаптарды әзірлеуде, инженерлік ізденістер жүргізуде және жобалық есептеулер орындауда қолданылуы мүмкін. Айқындалған тәуелділіктер мен ұсыныстар сейсмикалық қауіпті аймақтарда еңістердің тұрақтылығын бағалау әдістерін жетілдіруге және техногендік апаттар қаупін төмендетуге негіз қалайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Zhang L., Wang J., Chen R. Seismic slope stability evaluation considering soil heterogeneity // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2021. – Vol. 141. – P. 106522.
2. Tang H., Wang F., Catani F. Modelling seismic-induced landslides: Recent advances and challenges // *Natural Hazards*. – 2022. – Vol. 113. – No. 2. – P. 1025-1049.
3. Jiang T., Liu H., Yang Z. Effects of soil saturation on seismic slope responses // *Engineering Geology*. – 2023. – Vol. 317. – P. 107060.
4. Fan X., Tang C., Zhang Y. Seismic performance of compacted loess slopes under dynamic loading // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – Vol. 140. – P. 106556.
5. Lee C., Cho W., Kim S. Stability of earth slopes under coupled seismic and rainfall conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – Vol. 78. – No. 8. – P. 5933-5947.
6. Seed R.B., Bray J.D. Recent insights into seismic slope stability analysis // *Geotechnical Special Publication (ASCE)*. – 2020. – Vol. 310. – P. 55-78.
7. Zhang Z., Wang S., Li J. Seismic response of loess slopes considering pore water pressure buildup // *Engineering Geology*. – 2021. – Vol. 283. – P. 106010.
8. Zhou W., Xu Q., Dong X. Influence of cyclic loading on shear strength of clays // *Soils and Foundations*. – 2020. – Vol. 60. – No. 5. – P. 1032-1045.

9. Wu W., Chen Q., Zhou Y. Probabilistic assessment of earthquake-induced slope displacements using Newmark's method // Landslides. – 2023. – Vol. 20. – No. 4. – P. 789-804.
10. Kramer S.L., Arduino P. Advances in performance-based earthquake engineering for slopes // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE). – 2021. – Vol. 147. – No. 6. – P. 04021037.
11. Yan B., Liu C., Sun X. Reliability analysis of slope stability under earthquake loading using Monte Carlo simulations // Computers and Geotechnics. – 2022. – Vol. 145. – P. 104728.
12. EN 1998-5:2024. Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects [Electronic resource]. – Access mode: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/cd181261-777d-4cbf-9b78-3700a50ecb7a/en-1998-5-2024>. Date of access: 02.10.2025.
13. ISO 23469:2005(en). Bases for design of structures – Seismic actions for geotechnical works [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:23469:ed-1:v1:en>. Date of access: 02.10.2025.
14. USGS. National Seismic Hazard Maps. Methodology and Data [Electronic resource]. – Access mode: <https://earthquake.usgs.gov>. Date of access: 07.10.2025.

Материал редакцияға 31.10.25 түсті, 03.12.25 қабылданды.

Д.Ж. Артықбаев¹, Ф.Х. Аубакирова¹,
Н.С. Нақбаев¹, Ж.Ж. Бердалиева², Г.М. Отарбаева³

¹Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова,
Шымкент, Казахстан

²Казахская головная архитектурно-строительная академия, Алматы, Казахстан

³Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ

Аннотация. В статье рассмотрены геотехнические характеристики грунтов, оказывающие ключевое влияние на сейсмоустойчивость откосов и насыпных сооружений. Проведен анализ природных и инженерных факторов, имеющих влияние на устойчивость склонов в условиях динамических нагрузок: гранулометрический состав, влажность, коэффициенты пористости, сцепления, угол внутреннего трения и модуль деформации. Применение полевых (SPT, CPT, SCPT) и лабораторных (циклические трёхосные, простые сдвиговые, резонансные испытания на колонне) методов позволило оценить деградацию прочностных и фильтрационных характеристик грунтов при сейсмических воздействиях. На основе численного моделирования (LEM, метод Ньюмарка, FEM/FDM) и вероятностных подходов (симуляции Монте-Карло) выявлены критические значения параметров, при которых коэффициент устойчивости F_s снижается до предельно допустимого значения. Результаты исследования подтверждают необходимость комплексного подхода к учёту свойств грунтов в инженерной практике и могут быть использованы при разработке нормативных документов и проектировании сейсмоустойчивых сооружений.

Ключевые слова: грунт, откос, геотехническая характеристика, сейсмоустойчивость, коэффициент устойчивости, динамическое испытание, численное моделирование, метод Ньюмарка.

D.Zh. Artykbaev¹, F.Kh. Aubakirova¹,
N.S. Nakbaev¹, Zh.Zh. Berdalieva², G.M. Otarbaeva³

¹M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan

²Kazakh National Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan

³Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF SOILS AFFECTING THE SEISMIC RESISTANCE OF SLOPES

Abstract. The article examines the geotechnical characteristics of soils that have a decisive impact on the seismic stability of slopes and embankments. The study analyzes the behavior of key parameters under dynamic loading, including grain-size distribution, moisture content, porosity ratio, angle of internal friction, cohesion, and deformation modulus. Field tests (SPT, CPT, SCPT) and laboratory experiments (cyclic triaxial, direct shear, and resonant column tests) were used to assess the degradation of strength and filtration properties of soils during seismic events. Numerical modeling methods (limit equilibrium method, Newmark's sliding block analysis, and finite element method) combined with probabilistic approaches (Monte Carlo simulations) identified critical parameter values at which the factor of safety (Fs) decreases to critical levels. The findings confirm the necessity of a comprehensive approach to considering soil properties in engineering practice and can be applied in developing regulatory frameworks and in the design of earthquake-resistant geotechnical structures.

Keywords: soil, slope, geotechnical characteristic, seismic stability, factor of safety, dynamic test, numerical modeling, Newmark method.