

https://doi.org/10.51885/3134-8041_IACS_2026_3_6

XFTAP 67.09.37

СЕЙСМИКАЛЫҚ ӘСЕР БАҒЫТЫ БҰРЫШЫНЫҢ ҚҰМДЫ ГРУНТТАРДАҒЫ ЕҢІСТЕРДІҢ ОРНЫҚТЫЛЫҚ КОЭФФИЦИЕНТІНЕ ӘСЕРІ

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАПРАВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

INFLUENCE OF THE SEISMIC LOADING DIRECTION ANGLE ON THE STABILITY COEFFICIENT OF SLOPES IN SANDY SOILS

Н.С. Накбаев ¹, Д.Ж. Артыкбаев ^{1*}, Ф.Х. Аубакирова ¹, А.М. Будикова ²,
М. Бабажанов ³

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан

²Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда қ., Қазақстан

³Ташкент сәулет-құрылыс университеті, Ташкент қ., Өзбекстан

*Жауапты автор: Артыкбаев Дархан Жақсылықұлы, e-mail: artykbaev_d@mail.ru

Түйінді сөздер:

Сейсмикалық әсер,
бағыт бұрышы,
құмды топырақ,
еңіс орнықтылығы,
орнықтылық
коэффициенті,
шекті тепе-теңдік әдісі,
параметрлік талдау,
сейсмикалық аймақ

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада құмды топырақтардан құралған еңістердің орнықтылық коэффициентіне сейсмикалық әсердің бағыт бұрышының ықпалы қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі Қазақстанның оңтүстік өңірлеріндегі жоғары сейсмикалық белсенділікпен және динамикалық жүктеменің кеңістіктік бағытын есептік схемаларда ескерудің қажеттілігімен байланысты. Жұмыстың мақсаты – сейсмикалық күштің әсер ету бұрышы 0°-тан 180°-қа дейін өзгерген кезде орнықтылық коэффициентінің өзгерісін сандық тұрғыдан бағалау. Есептеулер шекті тепе-теңдік әдісі негізінде псевдостатикалық тәсілді қолдану арқылы орындалды, горизонталь және вертикаль үдеулер ескерілді. Ішкі үйкеліс бұрышы мен сейсмикалық коэффициенттің әртүрлі мәндері үшін параметрлік талдау жүргізілді. Нәтижесінде 30-60° аралығындағы көлбеу бағыт ең қауіпті болып табылатыны және дәстүрлі есептік схемаға қарағанда орнықтылықтың 15-20 % төмендеуі мүмкін екендігі анықталды. Алынған нәтижелер сейсмикалық қауіпті аймақтарда еңістерді жобалау кезінде қолдануға ұсынылады.

Ключевые слова:

сейсмическое
воздействие,
угол направления,
песчаный грунт,
устойчивость откосов,
коэффициент

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается влияние угла направления сейсмического воздействия на коэффициент устойчивости откосов, сложенных песчаными грунтами. Актуальность исследования обусловлена высокой сейсмической активностью южного региона Казахстана и необходимостью уточнения расчетных схем устойчивости земляных сооружений с учетом пространственной ориентации динами-





устойчивости,
предельное равновесие,
псевдостатический
анализ,
сейсмоопасный район

ческой нагрузки. Цель работы заключается в количественной оценке изменения коэффициента устойчивости при варьировании угла приложения сейсмической силы в диапазоне от 0° до 180° . Исследование выполнено методом предельного равновесия с использованием псевдостатического подхода и с учетом горизонтальной и вертикальной составляющих ускорения. Проведен параметрический анализ при различных значениях угла внутреннего трения и коэффициента сейсмичности. Установлено, что минимальные значения коэффициента устойчивости наблюдаются при наклонном направлении воздействия в пределах $30-60^\circ$, при этом снижение устойчивости достигает 15-20 % по сравнению с традиционной расчетной схемой. Полученные результаты имеют практическое значение для проектирования откосов в сейсмоопасных районах.

keywords:

seismic loading, direction
angle, sandy soil, slope
stability, stability
coefficient, limit
equilibrium method,
pseudostatic analysis,
seismic region

ABSTRACT

The paper investigates the influence of the direction angle of seismic loading on the stability coefficient of slopes composed of sandy soils. The relevance of the study is determined by the high seismic activity in the southern region of Kazakhstan and the necessity to refine slope stability assessment methods considering the spatial orientation of dynamic forces. The objective of the research is to quantitatively evaluate the variation of the stability coefficient when the seismic force direction changes within the range from 0° to 180° . The analysis was carried out using the limit equilibrium method combined with a pseudostatic approach, taking into account both horizontal and vertical components of acceleration. A parametric study was performed for different values of the internal friction angle and the seismic coefficient. The results demonstrate that the minimum stability coefficient corresponds to inclined loading directions within $30-60^\circ$, where the reduction in stability reaches 15-20% compared to the conventional horizontal loading assumption. The obtained findings provide practical recommendations for the design of slopes in seismically active regions.

КІРІСПЕ

Сейсмикалық әсер жағдайындағы еңістердің орнықтылығы қазіргі геотехникалық инженериядағы ең күрделі әрі пікірталасты мәселелердің бірі болып табылады. Орталық Азияның сейсмоқауіпті аймақтарында, соның ішінде Қазақстанның оңтүстік өңірлерінде, қарқындылығы 8–9 баллға дейін жететін динамикалық әсерлер жер қыртысының сырғу процестері мен жер жұмыстары құрылымдарының деформациялану қаупін едәуір арттырады. Соңғы жылдары еңістердің сейсмикалық орнықтылығын бағалау әдістерін жетілдіруге арналған зерттеулердің тұрақты түрде өсуі байқалады (Bayati et al., 2025; Shah Malekpoor et al., 2024).

Жер сілкінісі кезіндегі еңістердің орнықтылығын талдаудың қазіргі тәсілдерін шартты түрде екі топқа бөлуге болады: орнықтылық қоры коэффициентін бағалау әдістері және қалдық ығысу шамаларын анықтауға негізделген әдістер. Псевдостатикалық әдіс салыстырмалы қарапайымдылығы мен нормативтік тұрғыдан бекітілгендігіне байланысты жобалау тәжірибесінде әлі күнге дейін кеңінен қолданылады. Алайда оның классикалық қойылымы сейсмикалық әсердің тек горизонталь бағытта әрекет етуін қарастырады (Xu et al., 2025). Сонымен қатар, эксперименттік және сандық зерттеулер динамикалық жүктеменің кеңістіктегі бағыттылығы грунт массивінің кернеулі-деформациялық күйіне елеулі әсер ететінін көрсетеді (Song et al., 2024).

Соңғы жылдардағы бірқатар еңбектерде үдеудің вертикаль құрамдас бөлігін есепке алу орнықтылық коэффициентінің шамасын дәстүрлі сұлбаға қарағанда 10–15% аралығында өзгертуі мүмкін екендігі дәлелденген (Zhong & Yang, 2021). Бұдан бөлек, сейсмикалық жүктеменің және грунттың физика-механикалық қасиеттерінің анық еместігін ескеретін псевдостатикалық талдаудың стохастикалық тәсілдері қарқынды түрде дамып келеді (Fuławka et al., 2025). Алайда қазіргі модельдерді қолдану барысында әсердің бағыттылығы көбіне ығысу көрсеткіштері арқылы ғана қарастырылады, ал инерциялық күштің қорытқы векторының еркін бағдарлану бұрышының орнықтылық коэффициентіне әсері жеткілікті деңгейде зерттелмей отыр.

Бұл мәселе әсіресе құмды грунттар үшін өзекті болып табылады, себебі олардың ығысуға қарсыласуы негізінен ішкі үйкеліс бұрышымен және тиімді кернеулермен анықталады. Динамикалық жүктеме бағыты өзгерген жағдайда ықтимал сырғу беті бойындағы нормаль және жанама кернеулердің қайта бөлінуі орын алады, бұл сейсмикалық коэффициенттің мәні тұрақты болғанның өзінде орнықтылық коэффициентінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Сейсмикалық орнықтылық мәселесіне арналған көптеген жарияланымдардың болуына қарамастан (Rasulov et al., 2023; Artykbaev et al., 2025), сейсмикалық әсер бағыты бұрышының құмды еңістердің орнықтылық коэффициентіне әсері инженерлік есеп тұрғысынан бүгінгі күнге дейін жеткіліксіз ашылған.

Псевдостатикалық жүктеме қойылымында сейсмикалық әсер бағыты бұрышының 0° – 180° аралығында өзгеруі еңістердің орнықтылық коэффициентіне әсерін жүйелі түрде бағалау бойынша зерттеулер саны шектеулі. Осы зерттеудің мақсаты - құмды грунттардан құралған еңістердің орнықтылық коэффициентінің сейсмикалық әсер бағыты бұрышына тәуелді өзгеру заңдылығын анықтау.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешіледі:

1. Инерциялық күштің еркін бағдарлануын ескеретін есептік схеманы әзірлеу;
2. Сейсмикалық әсерді горизонталь және вертикаль құрамдас бөліктерге жіктеудің математикалық сипаттамасын орындау;
3. Әсер бағыты бұрышы 0° – 180° аралығында өзгерген жағдайда параметрлік талдау жүргізу;
4. Ішкі үйкеліс бұрышы мен сейсмикалық коэффициенттің орнықтылық коэффициентінің өзгеру сипатына әсерін бағалау;
5. Динамикалық әсердің ең қауіпті бағыттарының диапазонын анықтау.

Зерттеу нысаны ретінде сейсмикалық әсер жағдайындағы құмды еңіс қарастырылады.

Зерттеу пәні – шекті тепе-теңдік әдісімен анықталатын орнықтылық коэффициентінің шамасына динамикалық жүктеме бағыты бұрышының әсері.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы құмды еңістердің орнықтылық коэффициентінің сейсмикалық әсер бағыты бұрышына тәуелділігін сандық түрде анықтаудан және орнықтылықтың минимал мәндері байқалатын бұрыштар диапазонын белгілеуден тұрады. Дәстүрлі тәсілдерде сейсмикалық күштің горизонталь бағытта әсер етуі қарастырылса, ұсынылған әдістеме динамикалық әсердің кеңістіктегі бағдарын ескеруге мүмкіндік береді және сейсмоқауіпті аймақтарда орнықтылық коэффициентінің есептік мәндерін нақтылауға жағдай жасайды.

Алынған нәтижелер сейсмикалық белсенділігі жоғары өңірлерде жер жұмыстары құрылымдарын жобалаудың есептік әдістемелерін жетілдіру барысында пайдаланылуы мүмкін.



ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Сейсмикалық әсер жағдайындағы еңістердің орнықтылығын бағалау инженерлік тәжірибеде алдын ала және жобалық талдаулар үшін кеңінен қолданылатын псевдостатикалық есептік схема аясында орындалды (Griffiths et al., 1999; Duncan et al., 2005). Динамикалық және сандық әдістердің қарқынды дамуына қарамастан, псевдостатикалық тәсіл нормативтік құжаттарда бекітілген және сейсмоқауіпті аймақтардағы жер жұмыстары құрылымдарын есептеу кезінде кеңінен пайдаланылады.

Осы зерттеуде дәстүрлі есептік қойылымнан айырмашылығы ретінде сейсмикалық әсердің еркін бағыты қарастырылды. Сейсмикалық жүктеменің бағыты горизонтальға қатысты α бұрышымен сипатталады. Мұндай тәсіл жер сілкіністерінің бағыттылық ерекшеліктерін және олардың еңістердің реакциясына әсерін зерттеуге арналған заманауи еңбектерге негізделген (Kramer, 1996; Seed et al., 1971).

Есептік нысан ретінде орташа тығыздықтағы құмды грунттан құралған біртекті еңіс қабылданды. Еңістің геометриялық параметрлері инженерлік тәжірибеде жиі кездесетін типтік жағдайларға сәйкес таңдалды.

Еңістің геометриялық параметрлері:

- еңіс биіктігі $H = 10$ м;
- еңістің көлбеу қатынасы $1:1,5$;
- еңістің көлбеу бұрышы $\beta = 33,7^\circ$.

Грунт біртекті және изотропты орта ретінде қарастырылды, мұнда ілінісуе шамасын өлгетен ($c = 0$), ал ығысуға қарсыласу тек ішкі үйкеліс бұрышы φ арқылы сипатталады. Бұл қабылдау құмды грунттардың механикалық қасиеттерін инженерлік есептерде модельдеудің классикалық тәсіліне сәйкескеледі.

Қабылданған физикалық-механикалық параметрлер орташа түйіршікті құмдарға тән мәндер диапазонына сай келеді және әдеби деректер негізінде таңдалды (Bray et al., 2007), 1-кестеде келтірілген. Сейсмикалық әсердің көлбеу бағыты кезіндегі еңістің есептік схемасы 1-суретте көрсетілген.

1-кесте. Грунттың физикалық-механикалық сипаттамалары

№	Параметр атауы	Белгіленуі	Өлшем бірлігі	Мәні
1	Көлемдік салмақ	γ	кН/м ³	18–19
2	Ішкі үйкеліс бұрышы	φ	градус	30–35
3	Ілінісу	c	кПа	0
4	Серпімділік модулі	E	МПа	30–50
5	Пуассон коэффициенті	ν	–	0,25–0,30

Ескерту – көрсетілген параметрлер орташа тығыздықтағы құмды грунттар үшін ұсынылатын әдеби деректер негізінде қабылданған (Ling et al., 1997).

Сейсмикалық әсерлердің математикалық сипаттамасын қарастырайық. Сейсмикалық жүктеме сырғанау призмасының салмағына пропорционалды инерциялық күш арқылы псевдостатикалық тәсіл шеңберінде ескеріледі:

$$F_s = k_h \cdot W$$

мұндағы: W – ықтимал сырғу призмасының толық салмағы (ауырлық күші);

k_h – сейсмикалық горизонтал коэффициент.

Классикалық модельден айырмашылығы ретінде инерциялық күш горизонталь жазықтыққа қатысты α бұрышымен бағытталған.

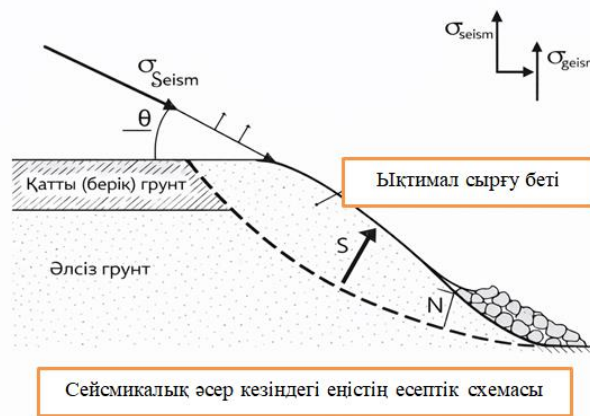
Күшті жіктеу:

$$F_h = k_h \cdot W \cdot \cos \alpha$$

$$F_v = k_h \cdot W \cdot \sin \alpha$$

Мұндай қойылым сейсмикалық әсердің кеңістіктегі бағдарлануы туралы заманауи ғылыми түсініктерге сәйкес келеді (Das, 2010).

Бұрыштың өзгеру диапазоны: $0^0 \leq \alpha \leq 180^0$, қадам мәні 15^0 .



1-сурет. Сейсмикалық әсердің көлбеу бағыты кезіндегі еңістің есептік схемасы
Ескерту – авторлар құрастырған

Орнықтылық коэффициентін есептеу үшін шекті тепе-теңдік әдісі қолданылды (Бишоптың жеңілдетілген әдісі). Аталған әдіс шеңберлік сырғу беттері үшін жүргізілетін талдауларда жоғары орнықтылық пен есептік жинақтылықты қамтамасыз ететінімен дәлелденген (Zhong & Yang, 2021).

Орнықтылық коэффициенті келесі өрнек бойынша анықталады:

$$K = \frac{\sum(N' \tan \varphi)}{\sum T}$$

$$N' = (W + F_v) \cos \theta - F_h \sin \theta$$

$$T = (W + F_v) \sin \theta + F_h \cos \theta$$

θ – есептік элемент табанының көлбеу бұрышы (1-сурет).

Есептеулер критикалық сырғу бетін іздеу арқылы итерациялық әдіспен орындалды.

Орнықтылық коэффициентінің өзгер сипатын бағалау мақсатында келесі параметрлерді өзгерту арқылы параметрлік талдау жүргізілді:

- сейсмикалық әсер бағытының бұрышы α ;
- ішкі үйкеліс бұрышы φ ;
- сейсмикалық горизонталь коэффициент k_h .

Мұндай тәсіл еңістердің орнықтылығын зерттеудің заманауи жұмыстарында параметрлердің критикалық үйлесімдерін анықтау үшін кеңінен қолданылады (Artykbaev et. al., 2025).

Параметрлердің әрбір үйлесімі үшін орнықтылық коэффициентінің минимал мәні анықталды (2 – 4 суреттер).

Еңістің орнықтылығы келесі шарт бойынша бағаланды:

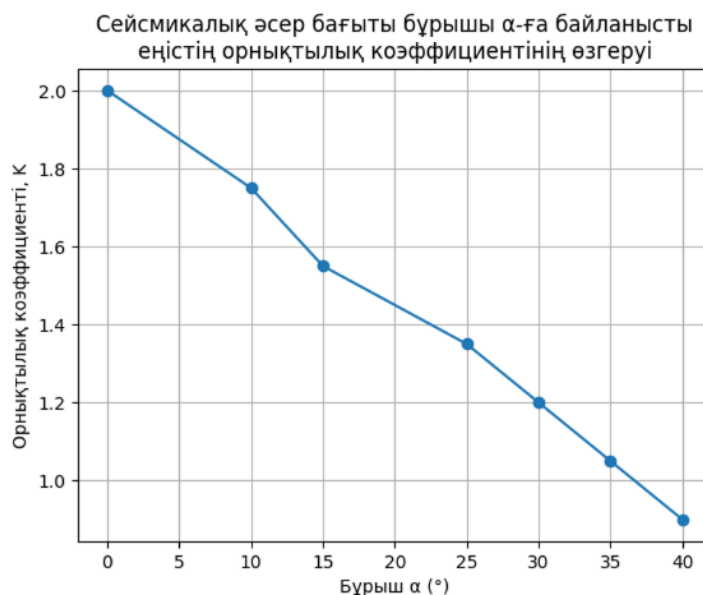
$$K \geq 1,0$$

Қосымша ретінде орнықтылықтың салыстырмалы жоғалуы анықталды:

$$\Delta K = \frac{K_0 - K_\alpha}{K_0} \cdot 100\%$$

мұндағы K_0 – горизонталь әсер жағдайындағы орнықтылық коэффициенті ($\alpha = 0^0$);

K_α – еркін (кез келген) бұрыштағы коэффициент



2-сурет. Сейсмикалық әсер бағыты бұрышы α -ға байланысты еңістің орнықтылық коэффициентінің өзгеру графигі

Ескерту – авторлар құрастырған

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

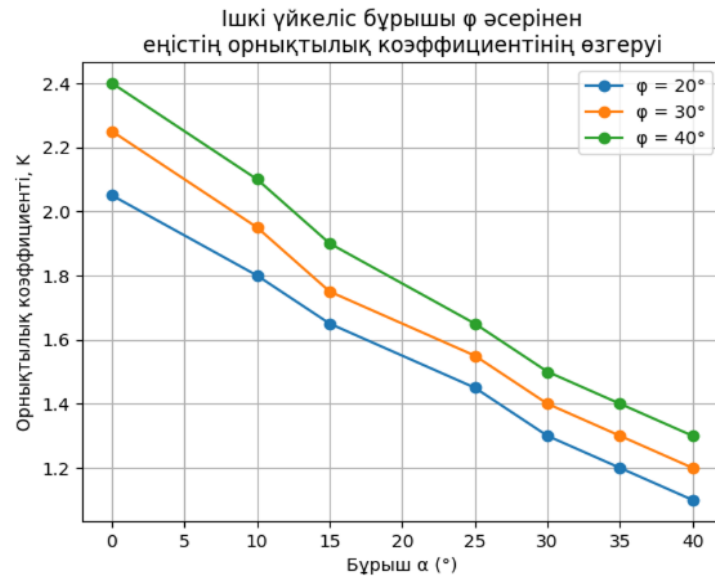
Сейсмикалық әсер ету бағытының көлбеу тұрақтылық коэффициентіне әсерін қарастырайық. Жүргізілген параметрлік талдау нәтижесінде еңістің орнықтылық коэффициенті K -ның сейсмикалық әсер бағытының бұрышы α -ға елеулі түрде тәуелді екендігі анықталды. Алынған есептік мәндер $K(\alpha)$ тәуелділігінің айқын бейсызық сипатын көрсетеді, бұл дәстүрлі псевдостатикалық схемаларда қабылданған инерциялық күштің тек қана горизонталь бағытта әсер етуі туралы жорамалдың жеткіліксіздігін растайды.

2-суретте орнықтылық коэффициентінің сейсмикалық әсер бағытының бұрышына тәуелділігі келтірілген. Графикті талдау α бұрышының кіші мәндерінде ($0-15^\circ$) орнықтылық коэффициентінің максимал шамаларын сақтайтынын және олардың бастапқы статикалық деңгейге жақын болатынын көрсетеді. Алайда әсер бағыты бұрышының ұлғаюымен K коэффициентінің жүйелі түрде төмендеуі байқалады, ал оның минимал мәндері $30-60^\circ$ аралығында тіркеледі.

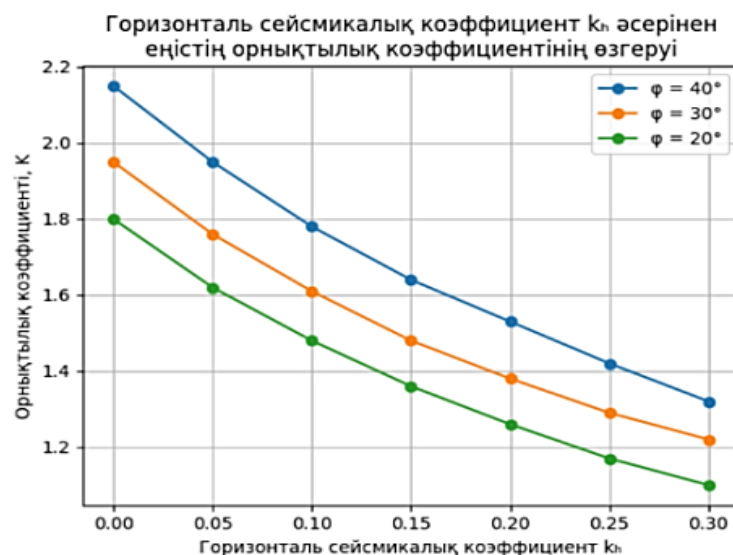
Аталған диапазонда орнықтылық коэффициентінің минимал мәндерге жетуі инерциялық күштің жанама және нормаль құрамдас бөліктерінің қолайсыз үйлесуімен түсіндіріледі, бұл ықтимал сырғу беті бойындағы тиімді кернеулердің төмендеуіне әкеледі. Ұқсас заңдылықтар (Song et al. (2024) және Shah Malekpoor et al. (2024) еңбектерінде де көрсетілген, алайда осы зерттеуде олар динамикалық жүктеменің еркін бағдарлануын ескеретін инженерлік есептік схема үшін расталды.

Осылайша, сейсмикалық әсер бағытының бұрышын есепке алу классикалық горизонталь модельді қолдану барысында анықталмайтын жасырын қауіпті есептік жағдайларды айқындауға мүмкіндік береді.

Грунттың ішкі үйкеліс бұрышы φ -ның сейсмикалық әсер бағыты бұрышы α өзгерген кездегі орнықтылық коэффициентіне ықпалын талдау нәтижелері 3-суретте келтірілген. Зерттеу барысында құмды грунттардың әртүрлі күйін сипаттайтын $\varphi=20^\circ$, 30° және 40° мәндері қарастырылды, олар сәйкесінше борпылдақ, орташа тығыз және тығыз құмдарға тән.



3-сурет. Ішкі үйкеліс бұрышы φ -тің $K(\alpha)$ тәуелділігіне әсері графигі
Ескерту – авторлар құрастырған



4-сурет. Горизонталь сейсмикалық коэффициент k_h әсерінен еңістің орнықтылық
коэффициентінің өзгеру графигі
Ескерту – авторлар құрастырған

Ішкі үйкеліс бұрышының артуы α бұрышының барлық мәндері үшін орнықтылық коэффициентінің жалпы өсуіне әкелетіні анықталды. Бұл ретте $K(\alpha)$ қисығының жалпы пішіні сақталады, алайда φ мәні жоғарылаған сайын орнықтылықтың сейсмикалық әсер бағытының өзгеруіне айтарлықтай төмендейді.

Ішкі үйкеліс бұрышы төмен құмдар үшін ($\varphi=20^\circ$) қауіпті бұрыштар диапазонында орнықтылық коэффициентінің төмендеуі 20-25 %-ға дейін жетсе, тығыз құмдарда ($\varphi = 40^\circ$) бұл төмендеу 10-12 %-дан аспайды. Бұл борпылдақ және суға қаныққан құмды грунттардың сейсмикалық әсердің көлбеу бағытына аса осал екендігін көрсетеді, әрі бұл тұжырым Zhong және Yang (2021) еңбектерінде алынған нәтижелермен үйлеседі.

Алынған деректер сейсмикалық жүктемелер жағдайында еңістердің орнықтылығын талдау кезінде грунттардың нақты физика-механикалық сипаттамаларын міндетті түрде



ескерудің қажеттілігін растайды, әсіресе геотехникалық ақпараттың анық еместігі жағдайында бұл талаптың маңыздылығы арта түседі.

Сейсмикалық коэффициенттің еңіс орнықтылығына әсерін қарастырыңыз. 4-суретте көлденең сейсмикалық коэффициентке байланысты тұрақтылық коэффициентінің өзгеруі көрсетілген K . ішкі үйкеліс бұрышының әртүрлі мәндерінде. Графикті талдау k_h мәні артқан сайын орнықтылық коэффициентінің монотонды түрде төмендейтінін айқын көрсетеді, бұл псевдостатикалық тәсілдің физикалық табиғатына толық сәйкес келеді.

K_h коэффициенті 0,05-тен 0,30-ға дейін ұлғайған кезде орнықтылық коэффициенті φ мәніне байланысты орта есеппен 35-45 % аралығында төмендейді. Бұл ретте сейсмикалық коэффициенттің әсері динамикалық жүктеменің қолайсыз бағыттарымен үйлескен жағдайда күшейе түседі, бұл тәуекел факторларының суперпозициясы әсерінің бар екендігін көрсетеді.

Айта кету қажет, k_h мәндерінің жоғары деңгейінде (0,25-0,30) және сейсмикалық әсер бағытының бұрышы α 30-60° диапазонында болған кезде орнықтылық коэффициенті шекті мәннен ($K = 1,0$) төмен түсуі мүмкін. Бұл еңістің орнықтылығын жоғалту қаупінің, ылғалдылықтың артуы немесе беріктік параметрлерінің төмендеуі сияқты қосымша факторлар болмағанның өзінде, орын алуы мүмкін екендігін білдіреді.

Алынған нәтижелерді горизонталь сейсмикалық әсерді қарастыратын классикалық есептік схемамен салыстыру дәстүрлі тәсілдің еңістердің орнықтылығын 15–20 % шамасында артық бағалауы мүмкін екенін көрсетті. Бұл айырмашылық әсіресе орташа және төмен тығыздықтағы құмды грунттар үшін, сондай-ақ сейсмикалық әсер деңгейі жоғары жағдайларда айқын байқалады.

Осылайша, сейсмикалық әсер бағытының бұрышын есепке алу инженерлік есептердің сенімділігін арттыруға және сейсмоқауіпті аймақтарда геотехникалық тәуекелдің нақты деңгейін неғұрлым дәл бағалауға мүмкіндік береді.

Алынған тәуелділіктер сейсмикалық белсенді аймақтарда орналасқан жер жұмыстары құрылымдарының орнықтылығын жобалау және бағалау үшін маңызды қолданбалы мәнге ие. Анықталған сейсмикалық әсердің ең қауіпті бағыттары (30-60° диапазоны) есептік сценарийлерді әзірлеу және орнықтылық қоры коэффициенттерін таңдау барысында тиімді түрде пайдаланылуы мүмкін.

Зерттеу нәтижелерін келесі жағдайларда ескеру орынды болып табылады:

- автомобиль және теміржол жолдарының еңістерін жобалау кезінде;
- карьерлер мен қазбалардың еңістерінің орнықтылығын бағалау барысында;
- сейсмикалық әсер жағдайында үйінді құрылымдар мен бөгеттерді есептеу кезінде.

Перспективалық тұрғыдан алғанда, алынған тәуелділіктерді қолданыстағы псевдостатикалық талдау әдістемелерін толықтыра отырып, нормативтік құжаттар мен есептік ұсынымдарға енгізу мүмкіндігі бар.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу барысында сейсмикалық әсер бағытын ескере отырып, құмды грунттардағы еңістердің орнықтылығын бағалау мәселесі қарастырылды. Инерциялық күштердің тек горизонталь бағытта әсер етуін болжайтын дәстүрлі псевдостатикалық тәсілдерден айырмашылығы ретінде, бұл жұмыста сейсмикалық әсердің еркін бағдарлануының еңіс орнықтылық коэффициентіне ықпалы талданды.

Жүргізілген есептеулер нәтижесінде еңістің орнықтылық коэффициентінің сейсмикалық әсер бағытының бұрышына елеулі дәрежеде тәуелді екендігі анықталды. Алынған $K(\alpha)$ тәуелділіктері айқын бейсызық сипатқа ие болып, орнықтылық коэффициентінің

минимал мәндері $\alpha = 30 - 60^\circ$ бұрыштар диапазонында байқалды. Аталған диапазон инерциялық күштердің нормаль және жанама құрамдас бөліктерінің ең қолайсыз үйлесіміне сәйкес келіп, ықтимал сырғу беті бойындағы тиімді кернеулердің төмендеуіне әкеледі.

Грунттың ішкі үйкеліс бұрышының артуы сейсмикалық әсер бағыты бұрышының барлық мәндері үшін орнықтылық коэффициентінің өсуіне ықпал ететіні көрсетілді. Сонымен қатар беріктік сипаттамалары төмен грунттар үшін сейсмикалық әсердің көлбеу бағыты жағдайында орнықтылықтың төмендеуі айтарлықтай жоғары болатыны анықталды, бұл олардың сейсмоқауіпті жағдайларда жоғары осалдыққа ие екендігін көрсетеді.

Сейсмикалық коэффициенттің әсерін талдау горизонталь сейсмикалық коэффициенттің ұлғаюы еңістің орнықтылық коэффициентінің монотонды түрде төмендеуімен қатар жүретінін көрсетті. Сейсмикалық коэффициенттің шамасы мен әсер бағытының қолайсыз үйлесуі кезінде орнықтылық коэффициенті шекті және шекті мәннен төмен деңгейлерге дейін төмендеуі мүмкін, бұл құрылымның статикалық орнықтылығы сақталған жағдайда да еңістің орнықтылығын жоғалту қаупінің бар екендігін айғақтайды.

Алынған нәтижелерді классикалық есептік схемамен салыстыру сейсмикалық әсердің тек горизонталь бағытта әрекет етуі туралы жорамалға негізделген дәстүрлі тәсілдің бірқатар жағдайларда еңістердің орнықтылығын артық бағалауға әкелетінін көрсетті. Сейсмикалық әсер бағытын есепке алу геотехникалық тәуекелдің нақты деңгейін неғұрлым дәл бағалауға және әлеуетті қауіпті есептік жағдайларды анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері практикалық маңызға ие және оларды сейсмикалық белсенді аймақтарда орналасқан жер жұмыстары құрылымдарының, автомобиль және теміржол насыптарының, сондай-ақ басқа да инженерлік нысандардың еңістерін жобалау және орнықтылығын бағалау барысында қолдануға болады. Сейсмикалық әсер бағытын есепке алу жобалық шешімдерді инженерлік-геотехникалық негіздеу кезінде қосымша есептік фактор ретінде қарастырылуы орынды.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екендігін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу сыртқы гранттық немесе мақсатты қаржыландыруды тартусыз орындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар әдістемелік кеңестер мен ғылыми талқылаулар үшін әріптестеріне, сондай-ақ осы мақаланың сапасын арттыруға ықпал еткен құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Ғылыми мақалалардың авторлары өз еңбектерін дайындау барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын әртүрлі кезеңдерде, соның ішінде мәтін жазу, редакциялау, фактілерді тексеру және деректерді талдау кезінде қолдана алмады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Bayati, M., Lashkaripour, G. R., Ghorbani, A., & Fathollahi, A. (2025). Seismic stability analysis of sandy slopes considering arbitrary direction of earthquake loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108512. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108512>
- Shah Malekpoor, M., Mirghasemi, A. A., & Ghanbari, A. (2024). Probabilistic pseudo-static slope stability analysis under seismic loading uncertainty. *Engineering Geology*, 332, 107345. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107345>
- Xu, Z., Chen, G., Li, T., & Zhang, Y. (2025). Limit equilibrium evaluation of seismic slope stability using pseudo-static approaches: Advances and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(2), 421–438. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03112-6>



- Song, Y., Zhou, J., & Yang, Z. (2024). Influence of seismic loading direction on deformation and stability of sandy slopes: Numerical investigation. *Computers and Geotechnics*, 170, 105218. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.105218>
- Zhong, R., & Yang, Q. (2021). Effect of vertical seismic acceleration on slope stability based on pseudo-static analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146, 106742. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106742>
- Fuławka, K., Pytel, W., & Stefaniuk, D. (2025). Parametric sensitivity analysis of slope stability under seismic loading conditions. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25, 102. <https://doi.org/10.1007/s43452-025-01002-4>
- Rasulov, R. H., Artykbaev, D. Z., Abdikerova, U. B., & Dosaliyev, K. C. (2023). Earthquake-resistant slope of bulk structures. *D. Serikbayev EKTU Bulletin*, 4, 51–60.
- Artykbaev, D. Z., Jumabayev, A., Tleubayeva, A., Tleulenova, G., & Tleubayeva, S. (2025). Method for earthquake-resistant slope steepness: An integrated experimental–numerical approach. *International Journal of GEOMATE*, 29(131), 67–75. <https://doi.org/10.21660/2025.131.4889>
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 49(3), 387–403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Wiley.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273.
- Bray, J. D., & Travasarou, T. (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 381–392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:4\(381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(381))
- Ling, H. I., Leshchinsky, D., & Mohri, Y. (1997). Soil–geosynthetic interaction in stability of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 123(5), 456–464.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Нақбаев Нұркен Сайфулинұлы – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент, Қазақстан

Накбаев Нуркен Сайфуллинович – докторант, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан.

Nakbayev Nurken – Doctoral Researcher, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan.

e-mail: turkestanproject@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3608-7208>



Артықбаев Дархан Жақсылықұлы – PhD, доцент, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент, Қазақстан

Артыкбаев Дархан Жаксылыкович – PhD, доцент, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан.

Artykbaev Darkhan – PhD, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan.

e-mail: artykbaev_d@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4794-8707>



Аубакирова Фарида Хабиевна – техникалық ғылымдар кандидаты, қауымдастырылған профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан

Аубакирова Фарида Хабиевна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан

Aubakirova Farida – candidate of technical sciences, Associate Professor, South Kazakhstan Research University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan

e-mail: faraub1011@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4687-1528>



Будикова Айгуль Молдашевна – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда қ., Қазақстан.

Будикова Айгуль Молдашевна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, г. Кызылорда, Казахстан.

Budikova Aigul – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan.

E-mail: construction-work2022@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4879-9467>



Бабажанов Мансурбек – PhD, доцент, Ташкент сәулет – құрылыс университеті, Ташкент қ., Өзбекстан.

Бабажанов Мансурбек – PhD, доцент, Ташкентский архитектурно-строительный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Babazhanov Mansurbek – PhD, Associate Professor, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Uzbekistan.

e-mail: mansur.babajanov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6425-8076>