



ХҒТАР 67.11.03
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-49-65>

Жер сілкінісі әсерін төмендетуге арналған геотехникалық сейсмоқорғаудың (GSI) сенімділігі

Р. Шегенбаева¹ , Е. Бесимбаев² , А. Шадкам² , С. Ниетбай^{*2,3,4} 

¹ Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда қ., Қазақстан

² Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

³ Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан

⁴ «Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясы» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан

*E mail: sh.raihan@mail.ru, y.bessimbayev@satbayev.university,
asybek.shadkam@stud.satbayev.university sayat_90@inbox.ru*

Аңдатпа. Мақала сейсмикалық қауіпті аймақтарда орналасқан ғимараттардың сенімділігі мен орнықтылығын арттыру мақсатында топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқшаулау, негіз және конструкцияның өзара әрекеттесуін зерттеуге арналған. Зерттеудің мақсаты – топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқшаулауы бар ғимараттардың сейсмикалық сенімділігін сандық модельдеу және берілген қарқындылықтағы жер сілкіністері кезінде негіз деформациясы мен ғимараттың динамикалық сипаттамаларын ықтималдық тұрғыда бағалау. Зерттеу әдістеріне теориялық талдау, PLAXIS 2D бағдарламасында шекті элементтер әдісімен сандық модельдеу, алынған нәтижелерді интерпретациялау және статистикалық біртекті еместік пен кездейсоқ әсерлерді ескеретін ықтималдық әдістер арқылы ғимарат сенімділігін есептеу кіреді. Алынған нәтижелер топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқшаулаудың жоғары тиімділігін дәлелдейді және оны сейсмикалық тәуекелдерді төмендетудің қолжетімді әрі сенімді тәсілі ретінде инженерлік практикада қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: сейсмикалық әсерлер, топырақ, жасанды негіз, акселерограммалар, ғимараттардың динамикалық әсерді сезінуі, үдеуді төмендету.

Кіріспе

Жер сілкінісі табиғи апат ретінде бұрын болған аумақтарда уақыт пен қирау қарқындылығы жағынан белгісіздік жағдайында қайталану қасиетіне ие. Осыған байланысты бүкіл әлемде сейсмикалық тәуекелді төмендетудің басым бағыты ретінде ғимараттар мен имараттардың орнықтылығын арттыруға бағытталған сейсмикалық қорғау және сейсмооқшаулау жүйелерін, соның ішінде демпферлік құрылғыларды әзірлеу қарастырылады. Соңғы онжылдықтардағы жойқын жер сілкіністері, атап айтқанда Түркиядағы (2023 ж.) және Мьянмадағы (2025 ж.) жер сілкіністері, дәстүрлі сейсмотөзімді құрылыс тәсілдерінің конструкцияның сызықтық емес деформацияланатын топырақтық негізбен бірлескен жұмысын ескеретін тұрғыда елеулі қайта қарауды талап ететінін айқын көрсетті.

Соңғы жылдары сейсмикалық әсерлерді төмендетуге бағытталған геотехникалық сейсмооқшаулау (GSI) тұжырымдамасы белсенді түрде дамуда. Бұл жүйелер сейсмикалық толқындар құрылыс нысанының іргетасына жеткенге дейін оларды ішінара шағылыстыруға, жұтуға немесе түрлендіруге қабілетті. Hing Ho Tsang [1,2], Ivan Banović [3], Анастасиус [4], Xiong W., Tsang H.H. [5], Forcellini D. [6] еңбектерінде көрсетілгендей, геотехникалық сейсмооқшаулау жүйелері оларды орнату және пайдалану жағдайында жеткілікті сенімділік пен тиімділікке ие. Теориялық және эксперименттік зерттеулер GSI жүйелерінің тиімділігін олардың тік, көлбеу немесе көлденең орналасуына [7, 8, 9], тікбұрышты немесе дөңгелек пішініне, ғимараттан қашықтығына, сондай-ақ қалыңдығы мен орналастыру тереңдігіне байланысты екенін дәлелдеді [10, 11]. Іргетас астында әртүрлі геоматериалдарды, оның ішінде құм, қиыршық тас, тас малталарын [12,13], резеңке – топырақ қоспаларын (RSM) [14–21], геопенаны [22–24] және геосинтетикалық материалдарды [25,26] қолдану арқылы жүргізілген эксперименттік зерттеулер де GSI жүйелерінің сейсмикалық әсерлерді азайтудағы жұмысқа қабілеттілігін көрсетті.

Осы зерттеу әртүрлі геоматериалдардан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмооқшаулаудың тиімділігін эксперименттік және сандық модельдеу нәтижелеріне негізделген [25–29]. Жұмыстың негізгі мақсаты – топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмооқшаулау қолданылған ғимараттардың сейсмикалық сенімділігін сандық модельдеу, сондай-ақ берілген қарқындылықтағы жер сілкіністері кезінде негіз деформациясының артуын және ғимараттың динамикалық сипатын ықтималдық тұрғыда бағалау болып табылады.

Сандық модельдеу геотехникалық сейсмооқшаулаудың (GSI) топырақтық төсеніштер түріндегі геометриялық және физика-механикалық параметрлерінің сейсмикалық әсер кезіндегі ғимараттардың динамикалық әсерді сезінуіне ықпалын анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, берілген қарқындылықтағы әсерлер жағдайында ғимараттың динамикалық сипатын талдау барысында статистикалық біртекті еместік пен кездейсоқ әсерлерді ескеретін ықтималдық бағалау әдістері қолданылады.

Әдіснама

Зерттеу әдістері мыналарды қамтиды:

– топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмооқшаулаудың негіздеріне теориялық талдау жүргізу және сейсмикалық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің қолданыстағы тәсілдерін бағалау;

– PLAXIS 2D бағдарламалық кешені негізінде соңғы элементтер әдісімен берілген

қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезіндегі ғимараттардың динамикалық әсерді сезінуіне сандық модельдеу;

– топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқорғаудың сенімділігін ықтималдық тұрғыда талдау және сейсмикалық әсерлер жағдайында ғимараттың динамикалық сипатын бағалау.

Сенімділікті бағалау бойынша модельдеу 4 кезеңде жүргізіледі:

1. Табиғи негіздің шөгуін есептеу және берілген қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезіндегі ғимараттың динамикалық әсерді сезінуін анықтау.

Мақсаты: табиғи негіздің көтергіш қабілетін, сондай-ақ іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы нүктесінде пайда болатын динамикалық үдеулерді анықтау.

2. Қалыңдығы 3 м ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқорғаудың статикалық және динамикалық сипаттамаларын зерттеу. Мақсаты: ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштің көтергіш қабілетін және берілген әсерлер кезіндегі ғимараттың динамикалық сипатын анықтау.

3. Геоторлы қабаты бар ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқорғау жағдайында ғимараттың динамикалық сипаттамаларын зерттеу.

Мақсаты: геотор қабаты бар ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі ғимараттың көтергіш қабілетін және берілген қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезіндегі динамикалық әсерді сезінуін анықтау.

4. Модельдеу нәтижелері бойынша алынған орташа мәндер төңірегіндегі ықтималдықтардың нормаль таралуына негізделген топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқорғаудың сенімділігін талдау.

Мақсаты: шекті жағдайлардың нормативтік критерийлерінен асу ықтималдықтарын және сенімділік коэффициенттерін анықтау. Мұндай тәсіл есептеу үдерісіне кездейсоқ факторларды енгізуге, әртүрлі шекті жағдайларды тәуекел деңгейі бойынша салыстыруға, сондай-ақ мақсатты сенімділік деңгейіне сүйене отырып нормативтік қауіпсіздік коэффициенттерін калибрлеуге мүмкіндік береді.

Нәтижелер мен талқылау

Ғимараттың сейсмикалық әсерлерге сезінуін анықтау әдістемесі модельдеу деректері бойынша алынған орташа мәндер айналасындағы ықтималдықтардың нормаль таралуына негізделеді. Құрылым шөгуінің шекті мәнінен асу ықтималдығы келесі өрнек арқылы анықталады:

$$P(s > s_{lim}) = 1 - \Phi\left(\frac{s_{lim} - \mu(s)}{\sigma_s}\right) \quad (1)$$

мұндағы, $\mu(s)$ – шөгудің орташа мәні, σ_s – стандарттық ауытқу, s_{lim} – шөгудің шекті рұқсат етілген мәні, Φ – стандартты нормаль үлестірім функциясы. Шөгу бойынша сәйкес сенімділік коэффициенті келесі өрнекпен анықталады:

$$\beta_s = \frac{s_{lim} - \mu(s)}{\sigma_s} \quad (2)$$

Ұқсас түрде сейсмикалық әсер кезінде іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы

нүктесінде рұқсат етілген үдеудің асып кетуі критерийі бойынша істен шығу ықтималдығы анықталады:

$$P_f(a_{fund} > a_{lim}) = 1 - \Phi\left(\frac{a_{lim} - \mu(a_{fund})}{\sigma_{af}}\right) \quad (3)$$

мұндағы, $\mu(a_{fund})$ және σ_{af} – негіздегі тік үдеудің орташа мәні мен стандарттық ауытқуы, a_{lim} – үдеудің рұқсат етілген нормативтік мәні.

Осы критерийге сәйкес келетін сенімділік коэффициенті келесі түрде анықталады:

$$\beta_{af} = \frac{a_{lim} - \mu(a_{fund})}{\sigma_{af}} \quad (4)$$

Материалдар. Модельдеу үшін Қызылорда қаласындағы нақты 10 қабатты ғимараттың деректері қолданылды. Ғимараттың жоспарда өлшемдері 15,5×27 м, биіктігі 39 м. Конструктивтік сұлбасы – қаңқалы-байланысты жүйе (қаттылық диафрагмалары бар монолитті қаңқа). Іргетасы – қалыңдығы 1,0 м плиталық іргетас, бетон класы В25.

Құрылыс алаңының геологиялық қимасы: қалыңдығы 3 м-ге дейінгі үйінді топырақ және төменгі қабат – қалыңдығы 12 м-ге дейінгі орташа тығыздықтағы ұсақ құм. Деформация модулі $E = 19,9$ МПа, тығыздығы $1,88$ г/см³.

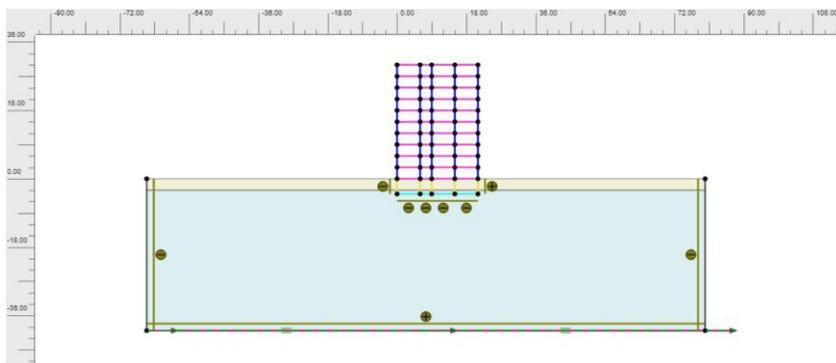
Есептік топырақ массиві орталық аймақта ғимараттың динамикалық сипатына есептік аймақ шекараларынан шағылған толқындардың әсерін болдырмау мақсатында ені 150 м және тереңдігі 40 м болып қабылданды.

Есептік сейсмикалық әсер 0,25g, әсер ету ұзақтығы – 20 с. Бұл әсер Кобе жер сілкінісінің (1995 ж., магнитудасы 6,9, Рихтер шкаласы бойынша 7,3) акселерограммасы негізінде масштабталды.

Аталған жер сілкінісінің спектрлік деректері MSK-64 шкаласы бойынша 7–8 балл қарқындылығына тән сейсмикалық жүктеме жағдайларын жеткілікті деңгейде қайта өндіруге мүмкіндік береді.

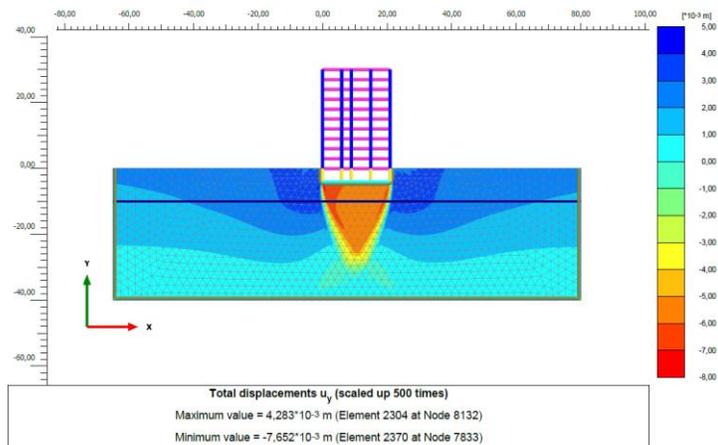
Модельдеу міндетін қою және нәтижелер

Міндет 1. Табиғи негіздің шөгуді есептеу және берілген сейсмикалық әсерлер кезінде (Кобе жер сілкінісінің акселерограммасы бойынша) іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы нүктесінде үдеулерді анықтау. Сондай-ақ, сейсмикалық әсерлер кезінде іргетасқа түсетін жүктеменің ықтимал артуын бағалау (1-3 суреттер).



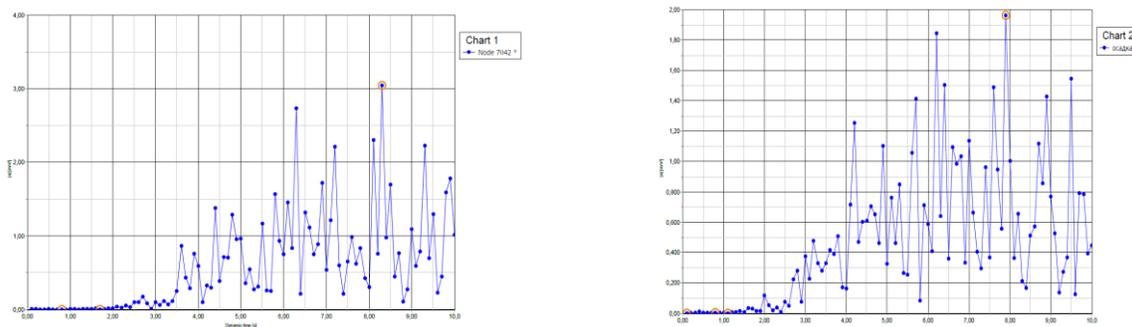
1-сурет. Ғимараттың жобалау схемасы

Ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу іргетас деңгейіндегі мәннен 35% жоғары, бұл ғимараттың жалпы сенімділігіне әсер етуі мүмкін.



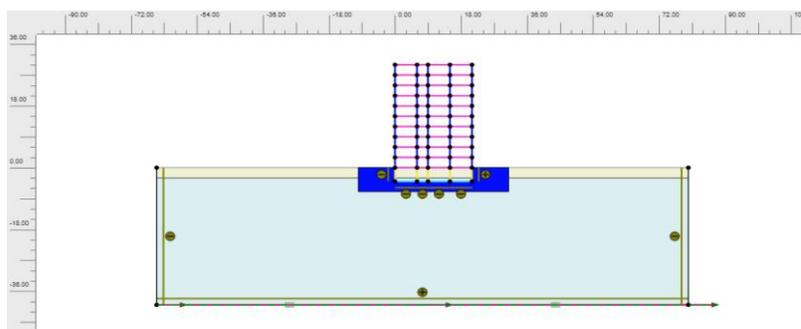
2-сурет. Іргетастың шөгюі (141 мм)

Есептік жүктеме әсерінен іргетастың шөгюі нормативтік мәндерден асып түседі.



3-сурет. Іргетас деңгейіндегі үдеу ($1,96 \text{ м/с}^2$) (а) және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу ($3,04 \text{ м/с}^2$) (б)

Міндет 2. Қалыңдығы 3 м ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқшаулаудың статикалық және динамикалық сипаттамаларын зерттеу, топырақты төсеніштер ауданы ғимарат өлшемі А-ға қатысты 1,5А-ға тең (4–7 суреттер).

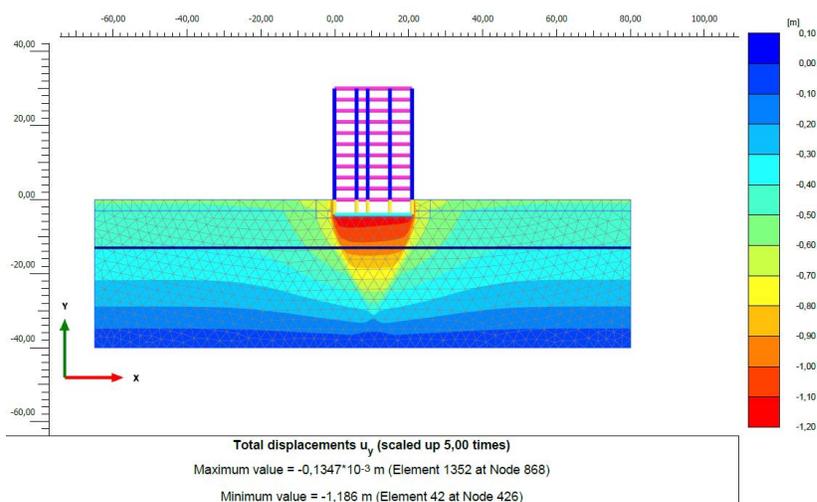


4-сурет. Ғимараттың жобалау схемасы (ірі түйіршікті құм)

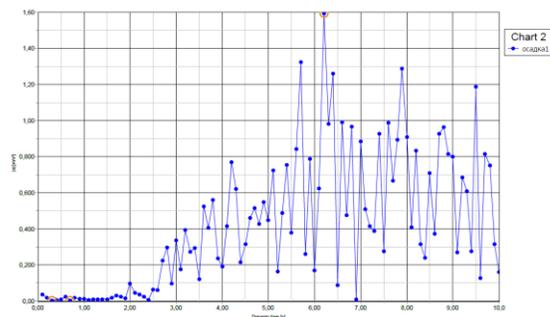
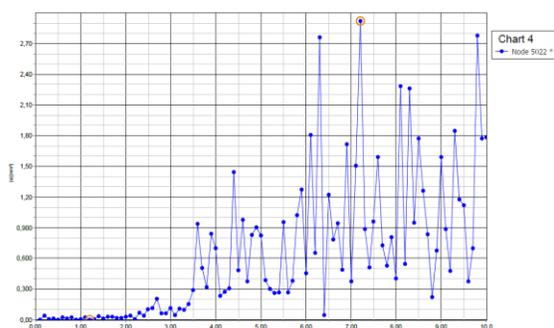
Міндет 3. Геотор қабаты бар топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау қолданылған жағдайда ғимараттың динамикалық әсерді сезінуін зерттеу.

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	45,00E3
ν' (nu)		0,3000
Alternatives		
G	kN/m ²	17,31E3
E _{oed}	kN/m ²	60,58E3
Strength		
c _{ref}	kN/m ²	0,000
ϕ' (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
Velocities		
V _s	m/s	92,14
V _p	m/s	172,4

5-сурет. Құмның физика-механикалық сипаттамалары

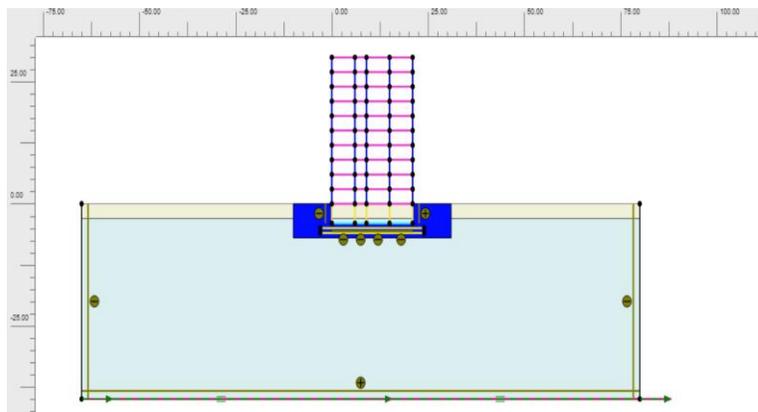


6-сурет. Іргетастың шөгуі (-129 мм) (ірі түйіршікті құм)

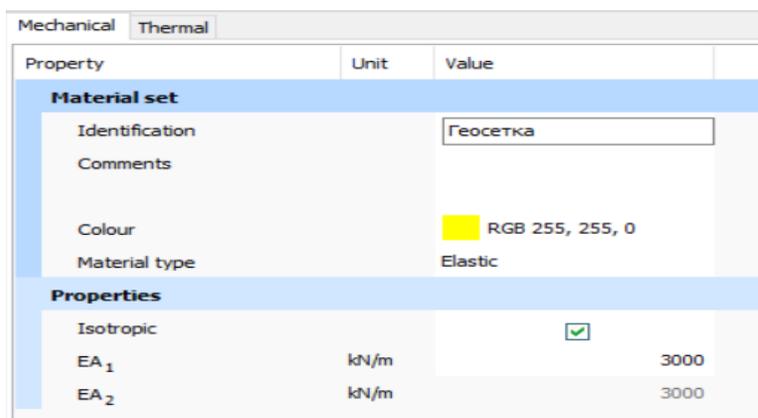


7-сурет. іргетас деңгейіндегі үдеу (1,595 м/с²) (а) және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу (2,922 м/с²) (б).

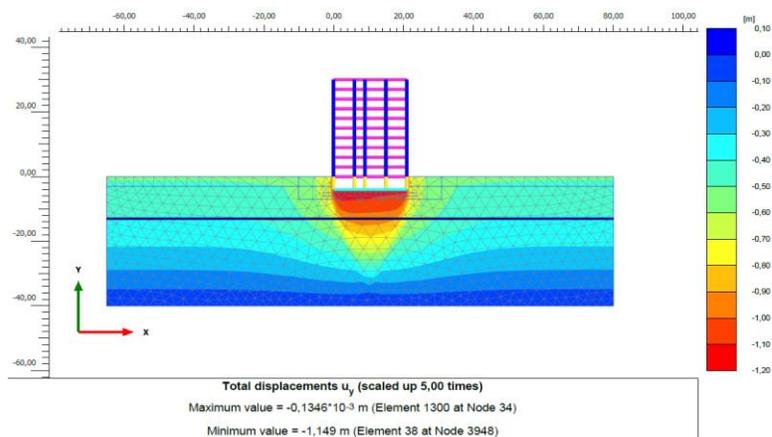
Бұл ретте биіктігі 2 м болатын ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштерде 1 м тереңдікте орналасқан геотор қабаты бар сейсмооқшаулау нұсқасы қарастырылды (8 – 11суреттер).



8-сурет. Ғимараттың жобалау схемасы (геотор қабаттары бар ірі түйіршікті құм)

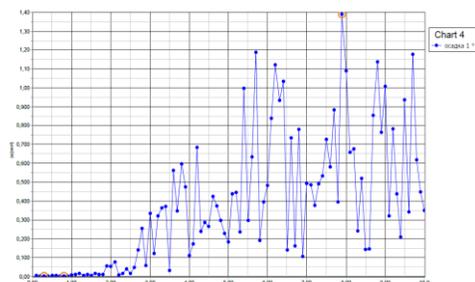
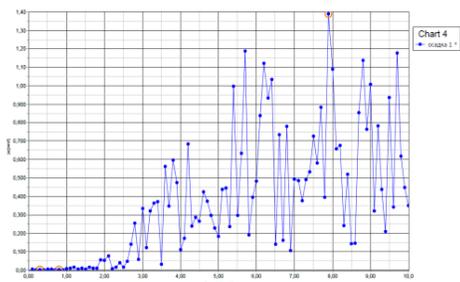


9-сурет. Геоторлардың сипаттамалары



10-сурет. Іргетастың шөгуі (-114 мм) (геотор қабаттары бар ірі түйіршікті құм)

Геотор қабаты бар топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқшаулау қолданылған жағдайда іргетастың шөгуі геоторсыз нұсқамен салыстырғанда 10 %-ға аз.



11-сурет. Іргетас деңгейіндегі үдеу ($1,389 \text{ м/с}^2$) (а) және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу ($2,585 \text{ м/с}^2$) (б)

Геотор қабаты бар негізде де үдеудің төмендеуі байқалады.

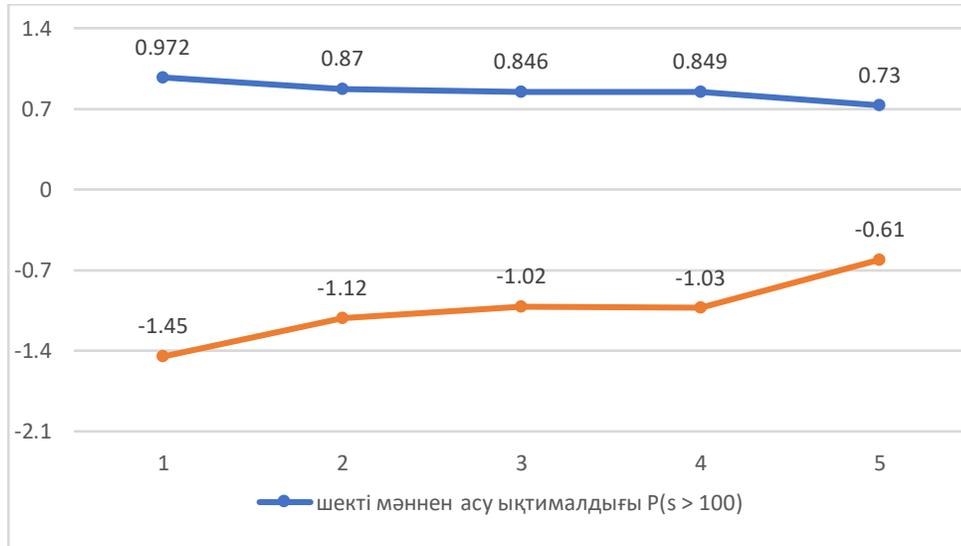
1-кесте. Әртүрлі негіз түрлері жағдайында ғимарат конструкциясының сенімділігін ықтималдық тұрғыда бағалау параметрлері

Нұсқалар	$\mu(s)$, мм	σ_{μ} , мм	$P(s>100)$	β_{μ}	$\mu(a_{fund})$, м/с^2	σ_{af}	$P_f(a_{fund}>2,5)$	β_{af}
Сейсмоқшаулаусыз	141	28,2	92,7 %	-1,45	1,960	0,490	13,52 %	1,10
Сейсмоқшаулау – құм (h = 3,0 м)	129	25,8	87 %	-1,12	1,595	0,399	1,16 %	2,27
Сейсмоқшаулау – құм + 2×геотор (h = 3,0 м)	114	22,8	73 %	- 0,61	1,389	0,347	0,069 %	3,20

2-кесте. Конструкцияның жоғарғы бөлігінде әртүрлі негіз түрлері жағдайында ғимарат конструкциясының сенімділігін ықтималдық тұрғыда бағалау параметрлері.

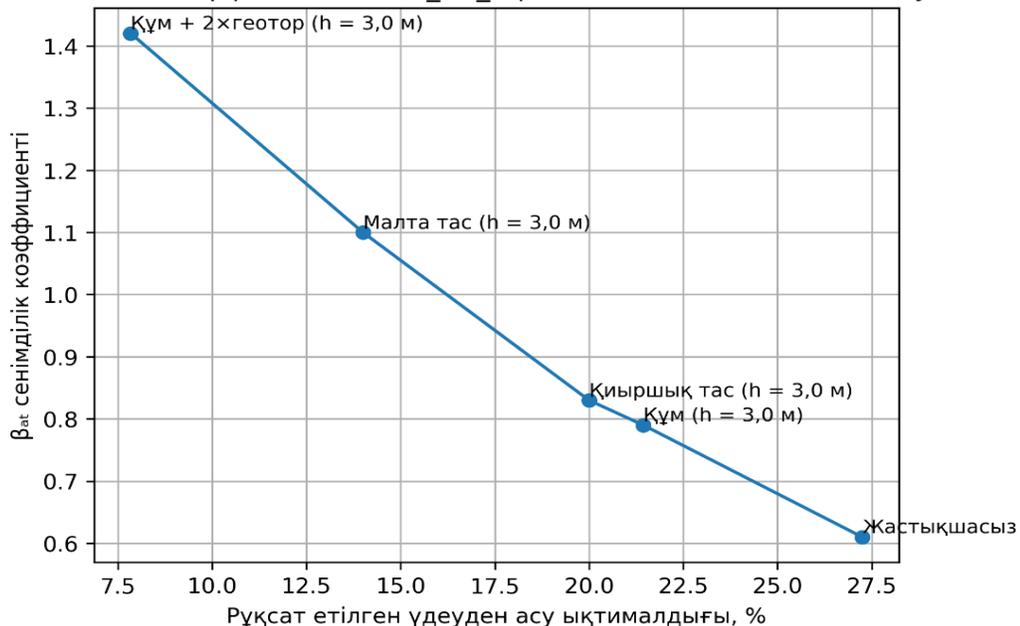
Нұсқалар	$\mu(a_{top})$, м/с^2	σ_{at}	$P_f(a_{top}>3,5)$	β_{at}
Төсенішсіз	3,040	0,760	27,25 %	0,61
Құм (h = 3,0 м)	2,922	0,731	21,44 %	0,79
Құм + 2×геотор (h = 3,0 м)	2,585	0,646	7,84 %	1,42

Әртүрлі негіз түрлерімен және конструкцияның жоғарғы бөлігінде әртүрлі негіз түрлері жағдайында ғимарат конструкциясының сенімділігін ықтималдық тұрғыда бағалау параметрлері төмендегі 1 және 2 кестелерде берілген.



12-сурет. Шөгу бойынша сенімділік коэффициенттері мен шекті мәннен асу ықтималдықтарының графигі

β_{at} сенімділік коэффициентінің $P_f(a_{top} > 3,5)$ ықтималдығына тәуелділігі



13-сурет. Конструкцияның жоғарғы бөлігіндегі үдеу бойынша сенімділік коэффициенттері және рұқсат етілген үдеуден асу ықтималдықтарының графигі

Іргетастың шөгуі бойынша жүргізілген сандық модельдеу нәтижелері (2-сурет және 6-сурет) берілген ғимарат үшін топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулаудың оңтайлы қалыңдығы 3,0 м шамасында екенін көрсетеді. Бұл жағдайда іргетастың шөгуі аталған жоба үшін белгіленген нормативтік талаптардан аспайды.

10-суреттен көрінгендей, топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау қолданылған іргетас негізінің көтергіш қабілеті геотор қабаты жоқ нұсқамен салыстырғанда 20 %-ға артқан. Сонымен қатар, геотор қабаты бар сейсмооқшаулау жағдайында іргетастың шөгуі геоторсыз нұсқамен салыстырғанда 20 %-ға азайған.

Топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулаудың ғимараттың сейсмикалық сезінуі әсерін зерттеу нәтижелері, яғни іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы нүктесінде үдеулерді өлшеу, сейсмооқшаулаудың қалыңдығы артқан сайын іргетас деңгейіндегі үдеулердің айтарлықтай төмендейтінін көрсетеді (13-сурет). Сонымен қатар, ғимараттың жоғарғы нүктесінде орын ауыстырулар мен үдеу мәндерінің аз болуы байқалады. Бұл топырақ тербелістерінің ғимаратқа берілуі барысында энергияның бір бөлігі пластикалық сипатымен сипатталатын конструктивтік жүйе арқылы жұтылуымен түсіндірілуі мүмкін.

Қорытынды

Конструкция, негіз және топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау өзара әрекеттесуін сандық модельдеу нәтижелері геотехникалық сейсмооқшаулауды (GSI) дамыту үшін негіз бола алады. Сандық модельдеу талдауы қалыңдығы 3,0 м-ге дейінгі топырақтық төсеніштің деформацияларды оқшаулау қабатының шегінде локализациялауға мүмкіндік беретінін және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеудің жоғары мәні (PGA) 30–40 %-ға төмендететінін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері құм – қиыршықтас қоспасын және геосинтетикалық қабаттарды қамтитын аралас шешімдердің ең жоғары тиімділік көрсететінін анықтады. Сейсмооқшаулаудың сенімділігін модельдеу нәтижелері бойынша алынған орташа мәндер төңірегіндегі ықтималдықтардың қалыпты таралуына негізделген есептеу берілген қарқындылықтағы жер сілкіністері кезінде шекті жағдайлардың нормативтік критерийлерінен асу ықтималдықтарын және сенімділік коэффициенттерін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді.

Ғимараттар үшін геотехникалық сейсмооқшаулауды (GSI) сандық модельдеу нәтижелері топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау тәсілінің жоғары тиімділігін растайды және оны сейсмикалық тәуекелдерден қорғаудың қолжетімді, сенімді әрі бейімделгіш технологиясы ретінде қазіргі инженерлік практикада қолдануға болатынын дәлелдейді.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы ұсынылған шешімдердің әртүрлі геотехникалық жағдайлары бар жобаларға интеграциялану мүмкіндігімен айқындалады.

Авторлардың қосқан үлесі

Е. Бесимбаев- Зерттеу жұмысының тұжырымдамасын әзірлеуге және ғылыми бағытын айқындауға жетекшілік жасады.

С. Ниетбай-Зерттеудің әдіснамасын әзірлеу, сандық модельдеуді орындау және есептеу нәтижелерін талдауға қатысты.

Р. Шегенбаев- Теориялық талдау жүргізу, бастапқы материалдарды жинау және

мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау жұмыстарын орындады.

А. Шадкам-Сандық модельдеу нәтижелерін өңдеу, деректерді жүйелеу, графиктер мен иллюстрациялық материалдарды дайындау жұмыстарына қатысты. Мақаланың ғылыми редакциясы мен мазмұнын жетілдіру жұмыстары

Әдебиеттер тізімі

1. Ахметжанова С.Б. Қазақстандағы жоғары білім: даму мәселелері мен перспективалары // *Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы.* – 2016. – № 5. – Б. 10–18.
2. Tsang H.H. Analytical design models for geotechnical seismic isolation systems // *Bulletin of Earthquake Engineering.* – 2023. – Vol. 21. – P. 3881–3904. – <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01469-x>
3. Tsang H.H., Pitilakis K. Mechanism of geotechnical seismic isolation system: analytical modeling // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* – 2019. – Vol. 122. – P. 171–184. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.037>
4. Banović I., Radnić J., Grgić N. Foundation size effect on the efficiency of seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Earthquakes and Structures.* – 2020. – Vol. 19, No. 2. – P. 103–116. – <https://doi.org/10.12989/eas.2020.19.2.103>
5. Tsiavos A., Haladij P., Sextos A., Alexander N.A. Analytical investigation of the effect of a deformable sliding layer on the dynamic response of seismically isolated structures // *Structures.* – 2020. – <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.016>
6. Xiong W., Tsang H.H., Lo S.H., Shang S.P., Wang H.D., Zhou F.Y. Geotechnical seismic isolation system — experimental study // *Advanced Materials Research.* – 2011. – Vol. 163–167. – P. 4451–4455. – <https://www.scientific.net/AMR.163-167.4449>
7. Forcellini D. Assessment of geotechnical seismic isolation (GSI) as a mitigation technique for seismic hazard events // *Geosciences.* – 2020. – Vol. 10, No. 6. – Art. 222. – <https://doi.org/10.3390/geosciences10060222>
8. Ильичев В.А. К оценке коэффициента демпфирования основания фундаментов, совершающих вертикальные колебания // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 1981. – № 4. – С. 22–26.
9. Bessimbayev E., Zhambakina Zh., Niyetbay S. Ensuring the seismic safety of a building using a geotechnical seismic isolating screen // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2022. – Vol. 3, No. 7(117). – P. 59–67. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.260035>
10. Orekhov V.V., Negahdar H. Efficiency of trench barriers used to protect structures from dynamic loads // *Vestnik MGSU.* – 2016. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/efficiency-of-trench-barriers-used-to-protect-structures-from-dynamic-loads-and-studyof-the-stress-strain-state-of-soils-based-on-strain-1> (дата обращения: 05.01.2026).
11. Jauhari N., Hedge A. Performance evaluation of single and multiple trenches in screening ground vibrations // *Soil Dynamics, Earthquake and Computational Geotechnical Engineering.* – Singapore: Springer, 2022. – P. 335–345. – https://doi.org/10.1007/978-981-19-6998-0_29
12. Bessimbayev Y., Shadkam A., Begaliev U., Begentayev M., Suleyev D., Zhumadilova Z.,

- Irgibayev T., Ussipbekov Y. Development of geotechnical seismic isolation system in the form of vertical barriers // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 9. – Art. 2736. – <https://doi.org/10.3390/buildings14092736>
13. Banović I., Radnić J., Grgić N. Numerical model for dynamic analysis of structures with seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Ingegneria Sismica*. – 2018. – URL: <https://ingegneriasismica.com/2021/vol-38-issue-1/numerical-model-for-dynamic-analysis-of-structures-with-seismic-base-isolation-using-a-layer-of-stone-pebbles/>
 14. Ptilakis K., Trevelopoulos K., Anastasiadis A., Senetakis K. Seismic response of structures on improved soil // *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*. – Leuven, Belgium, 2011.
 15. Tsiavos A., Alexander N.A., Diambra A., Ibraim E., Vardanega P.J., Gonzalez-Buelga A., Sextos A. A sand-rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 125. – Art. 105731. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105731>
 16. Ptilakis K. et al. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber-sand mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 79. – P. 237–252.
 17. Brunet S., de la Llera J.C., Kausel E. Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2016. – Vol. 85. – P. 134–145.
 18. Hazarika H. Structural stability during earthquakes using tyres // *Proceedings of IW-TDGM*. – Yokosuka, Japan, 2008.
 19. Pistolas G.A., Ptilakis K., Anastasiadis A. Seismic isolation potential of rubber/soil mixtures // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. – 2020. – Vol. 19. – P. 683–704.
 20. Senetakis K., Anastasiadis A., Ptilakis K. Dynamic properties of sand/rubber mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2012. – Vol. 33, No. 1. – P. 38–53.
 21. Feng Z.Y., Sutter K.G. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures // *Geotechnical Testing Journal*. – 2000. – Vol. 23, No. 3. – P. 338–344.
 22. Karatzia X., Mylonakis G. Geotechnical isolation of pile-supported bridge piers using EPS geofoam // *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*. – Santiago, Chile, 2017.
 23. Mehran N., Martin Z., Raul F. Vibration screening in layered soil by geofoam-filled barrier // *HAL Open Science*. – 2023. – URL: <https://hal.science/hal-04155034>
 24. Amato L., Flora A., Bilotta E., Nappa V. Field trials on soft grouting barriers // *ISSMGE*. – 2017. – URL: <https://www.issmge.org/publications/publication/field-trials-on-soft-grouting-barriers-to-mitigate-vibrations-effects>
 25. Yegian M.K., Lahlaf A.M. Dynamic interface shear strength of geomembranes // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1992. – Vol. 118, No. 5. – P. 760–779.
 26. Yegian M.K., Kadakal U. Foundation isolation using a smooth synthetic liner // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2004. – Vol. 130, No. 11. – P. 1121–1130.
 27. Banović I., Radnić J., Grgić N., Matešan D. Use of limestone sand for seismic isolation of foundations. – 2018. – <https://doi.org/10.1155/2018/9734283>
 28. Zhang H. et al. Marine sand cushion-based geotechnical seismic isolation system // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2023. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107854>

29. Хасанов Н.Н., Бай В.Ф., Рабиев К.Р. Проектирование и устройство оснований с помощью грунтоизвестковых подушек // *Инженерный вестник Дона*. – 2022. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovaniya-i-ustroystvo-osnovaniy-i-s-pomoschyu-gruntoizvestkovyh-podushek/viewer>

R. Shegenbayeva¹, Y. Bessimbayev², A. Shadkam², S. Niyetbay^{*2,3,4}

¹*Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan;*

²*Satbayev University, 22 Satbayev Street, Almaty, Kazakhstan; School of*

³*Construction, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan;*

⁴*LLP Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan*

Reliability of Geotechnical Seismic Isolation (GSI) for Reducing Earthquake Effects

Abstract. The article investigates the interaction between soil cushion-based geotechnical seismic isolation, the foundation, and the superstructure with the aim of improving the reliability and stability of buildings located in seismically hazardous regions. The main objective of the study is the numerical modeling of the seismic reliability of buildings equipped with geotechnical seismic isolation in the form of soil cushions, as well as the probabilistic assessment of foundation deformation growth and the dynamic response of the structure under earthquakes of a given intensity. The research methodology includes theoretical analysis, numerical modeling using the finite element method implemented in PLAXIS 2D, interpretation of the obtained results, and reliability assessment based on probabilistic methods that account for statistical heterogeneity and random effects. Probabilistic analysis indicates that the probability of exceeding the allowable acceleration at the top of the building decreases from 27% to 7.84%, while the reliability index increases to $\beta_{at} = 1.42$ (a 73% improvement). These findings confirm the high efficiency of soil cushion-based geotechnical seismic isolation and demonstrate its potential for practical application as an affordable, reliable, and adaptable solution for reducing seismic risk in engineering practice.

Keywords: seismic effects, soils, artificial foundation, accelerograms, dynamic response of buildings, acceleration reduction.

Р. Шегенбаева¹, Е. Бесимбаев², А. Шадкам², С. Ниятбай^{*2,3,4}

¹*Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан*

²*Казахский национальный исследовательский технический университет, Алматы, Казахстан*

³*Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан*

⁴*ТОО «Казахская головная архитектурно-строительная академия», Алматы, Казахстан*

Надежность геотехнической сейсмоизоляции (gsi) для снижения воздействий землетрясения

Аннотация. Статья посвящена исследованию взаимодействия геотехнической

сейсмоизоляции в виде грунтовых подушек, основания и надземной части сооружения с целью повышения надёжности и устойчивости зданий, расположенных в сеймоопасных районах. Целью исследования является численное моделирование сейсмической надёжности зданий с геотехнической сейсмоизоляцией в виде грунтовых подушек, а также вероятностная оценка увеличения деформаций основания и динамических характеристик здания при землетрясениях заданной интенсивности. В работе исследована эффективность систем сейсмоизоляции в виде грунтовых подушек, выполненных из песка, щебня, а также песка, армированного геосеткой. Определены показатели надёжности по осадке основания, а также вероятности превышения допустимых ускорений на уровне фундамента и в верхней части здания. Результаты анализа показали, что применение геотехнической сейсмоизоляции (GSI) приводит к снижению горизонтальных ускорений на уровне подошвы фундамента и в верхней точке здания примерно на 16 %. Вероятностная оценка показала, что вероятность превышения допустимого ускорения в верхней части здания снижается с 27 % до 7,84 %, при этом коэффициент надёжности возрастает до $\beta_{at} = 1,42$ (увеличение на 73 %). Полученные результаты подтверждают высокую эффективность геотехнической сейсмоизоляции в виде грунтовых подушек и обосновывают возможность её применения в современной инженерной практике как доступного, надёжного и адаптивного метода снижения сейсмических рисков.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, грунты, искусственное основание, акселерограммы, динамический отклик зданий, снижение ускорения.

References

1. Ahmetzhanova S.B. Vysshee obrazovanie v Kazahstane: problemy i perspektivy razvitiya [Higher Education in Kazakhstan: Problems and Prospects of Development] Vestnik ENU im. L.N. Gumileva. Seriya Himiya. Geografiya. Ekologiya [BULLETIN of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series]». 5. 10-18(2016), <https://doi.org/10.32523/2789-4320-2024-1-x-x>. [Ресейде]
2. Tsang H.H. Analytical design models for geotechnical seismic isolation systems // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2023. – Vol. 21. – P. 3881–3904. – <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01469-x>
3. Tsang H.H., Pitilakis K. Mechanism of geotechnical seismic isolation system: analytical modeling // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 122. – P. 171–184. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.037>
4. Banović I., Radnić J., Grgić N. Foundation size effect on the efficiency of seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Earthquakes and Structures*. – 2020. – Vol. 19, No. 2. – P. 103–116. – <https://doi.org/10.12989/eas.2020.19.2.103>
5. Tsiavos A., Haladij P., Sextos A., Alexander N.A. Analytical investigation of the effect of a deformable sliding layer on the dynamic response of seismically isolated structures // *Structures*. – 2020. – <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.016>
6. Xiong W., Tsang H.H., Lo S.H., Shang S.P., Wang H.D., Zhou F.Y. Geotechnical seismic isolation system — experimental study // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 163–167. – P. 4451–4455. – <https://www.scientific.net/AMR.163-167.4449>

7. Forcellini D. Assessment of geotechnical seismic isolation (GSI) as a mitigation technique for seismic hazard events // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 6. – Art. 222. – <https://doi.org/10.3390/geosciences10060222>
8. Il'ichev V.A. K otsenke koeffitsienta dempfirovaniya osnovaniya fundamentov, sovershayushchikh vertikal'nye kolebaniya [On the evaluation of the damping coefficient of foundation bases subjected to vertical vibrations] *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 4. 22–26 (1981).
9. Bessimbayev E., Zhambakina Zh., Niyetbay S. Ensuring the seismic safety of a building using a geotechnical seismic isolating screen // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – Vol. 3, No. 7(117). – P. 59–67. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.260035>
10. Orekhov V.V., Negahdar H. Efficiency of trench barriers used to protect structures from dynamic loads // *Vestnik MGSU*. – 2016. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/efficiency-of-trench-barriers-used-to-protect-structures-from-dynamic-loads-and-studyof-the-stress-strain-state-of-soils-based-on-strain-1> (дата обращения: 05.01.2026).
11. Jauhari N., Hedge A. Performance evaluation of single and multiple trenches in screening ground vibrations // *Soil Dynamics, Earthquake and Computational Geotechnical Engineering*. – Singapore: Springer, 2022. – P. 335–345. – https://doi.org/10.1007/978-981-19-6998-0_29
12. Bessimbayev Y., Shadkam A., Begaliev U., Begentayev M., Suleyev D., Zhumadilova Z., Irgibayev T., Ussipbekov Y. Development of geotechnical seismic isolation system in the form of vertical barriers // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 9. – Art. 2736. – <https://doi.org/10.3390/buildings14092736>
13. Banović I., Radnić J., Grgić N. Numerical model for dynamic analysis of structures with seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Ingegneria Sismica*. – 2018. – URL: <https://ingegneriasismica.com/2021/vol-38-issue-1/numerical-model-for-dynamic-analysis-of-structures-with-seismic-base-isolation-using-a-layer-of-stone-pebbles/>
14. Ptilakis K., Trevlopoulos K., Anastasiadis A., Senetakis K. Seismic response of structures on improved soil // *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*. – Leuven, Belgium, 2011.
15. Tsiavos A., Alexander N.A., Diambra A., Ibrahim E., Vardanega P.J., Gonzalez-Buelga A., Sextos A. A sand–rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 125. – Art. 105731. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105731>
16. Ptilakis K. et al. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber–sand mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 79. – P. 237–252.
17. Brunet S., de la Llera J.C., Kausel E. Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2016. – Vol. 85. – P. 134–145.

18. Hazarika H. Structural stability during earthquakes using tyres // *Proceedings of IW-TDGM*. – Yokosuka, Japan, 2008.
19. Pistolas G.A., Pitilakis K., Anastasiadis A. Seismic isolation potential of rubber/soil mixtures // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. – 2020. – Vol. 19. – P. 683–704.
20. Senetakis K., Anastasiadis A., Pitilakis K. Dynamic properties of sand/rubber mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2012. – Vol. 33, No. 1. – P. 38–53.
21. Feng Z.Y., Sutter K.G. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures // *Geotechnical Testing Journal*. – 2000. – Vol. 23, No. 3. – P. 338–344.
22. Karatzia X., Mylonakis G. Geotechnical isolation of pile-supported bridge piers using EPS geofoam // *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*. – Santiago, Chile, 2017.
23. Mehran N., Martin Z., Raul F. Vibration screening in layered soil by geofoam-filled barrier // *HAL Open Science*. – 2023. – URL: <https://hal.science/hal-04155034>
24. Amato L., Flora A., Bilotta E., Nappa V. Field trials on soft grouting barriers // *ISSMGE*. – 2017. – URL: <https://www.issmge.org/publications/publication/field-trials-on-soft-grouting-barriers-to-mitigate-vibrations-effects>
25. Yegian M.K., Lahlaf A.M. Dynamic interface shear strength of geomembranes // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1992. – Vol. 118, No. 5. – P. 760–779.
26. Yegian M.K., Kadakal U. Foundation isolation using a smooth synthetic liner // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2004. – Vol. 130, No. 11. – P. 1121–1130.
27. Banović I., Radnić J., Grgić N., Matešan D. Use of limestone sand for seismic isolation of foundations. – 2018. – <https://doi.org/10.1155/2018/9734283>
28. Zhang H. et al. Marine sand cushion-based geotechnical seismic isolation system // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2023. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107854>
29. Khasanov N.N., Bai V.F., Rabiev K.R. Proektirovanie i ustroystvo osnovanii s pomoshch'yu gruntoizvestkovykh podushek [Design and construction of foundations using soil–lime cushions] *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don]. 2 (2022). Available at: [URL:https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovaniya-i-ustroystvo-osnovaniy-i-s-pomoschyu-gruntoizvestkovykh-podushek/viewer](https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovaniya-i-ustroystvo-osnovaniy-i-s-pomoschyu-gruntoizvestkovykh-podushek/viewer)

Сведения об авторах:

Шегенбаева Р.К. – докторант, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и безопасность жизнедеятельности», Кызылординский университет имени Коркыт Ата, 120014, Кызылорда, Казахстан

Бесимбаев Е.Т. – д.т.н., ассоциированный профессор кафедры строительства и строительных материалов, института архитектуры и строительства, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, ул. Сатпаева 22а, 050013, Алматы, Казахстан.

Шадкам А.С. – докторант, старший преподаватель кафедры строительства и строительных материалов, института архитектуры и строительства, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, ул. Сатпаева 22а, 050013, Алматы, Казахстан.

Ниетбай С.Е. – PhD, ассоциированный профессор кафедры Проектирование зданий и сооружений, факультета общего строительства Международной образовательной корпорации, ул. Рыскулбекова 28, г. Алматы, 050043, Казахстан.

Шегенбаева Р.К. – докторант, «Электр энергетикасы және тіршілік қауіпсіздігі» кафедрасының аға оқытушысы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, 120014, Қызылорда, Қазақстан.

Бесимбаев Е.Т. – т.ғ.д., Сәулет және құрылыс институты, «Құрылыс және құрылыс материалдары» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Сәтбаев көш., 22а, 050013, Алматы, Қазақстан.

Шадкам А.С. – докторант, Сәулет және құрылыс институты, «Құрылыс және құрылыс материалдары» кафедрасының аға оқытушысы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Сәтбаев көш., 22а, 050013, Алматы, Қазақстан.

Ниетбай С.Е. – PhD, Халықаралық білім беру корпорациясы, Жалпы құрылыс факультеті, «Ғимараттар мен құрылыстарды жобалау» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Рысқұлбеков к-сі, 28, 050043, Алматы, Қазақстан.

Shegenbayeva R.K. – PhD candidate, Senior Lecturer, Department of Electric Power Engineering and Life Safety, Korkyt Ata Kyzylorda University, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan.

Bessimbayev Y. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction and Building Materials, Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, Satpayev St. 22a, 050013, Almaty, Kazakhstan.

Shadkam A.S. – PhD candidate, Senior Lecturer, Department of *Construction and Building Materials*, Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, 22a Satbayev St., 050013, Almaty, Kazakhstan.

Niyetbay S. – PhD, Associate Professor, Department of Building and Structure Design, Faculty of General Construction, International Educational Corporation, Ryskulbekov St. 28, 050043, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).