



THE EFFECT OF THE FRICTION COEFFICIENT AND RADIUS OF CURVATURE ON THE CALCULATED PARAMETERS OF FRICTION PENDULUM SEISMIC ISOLATORS

Boltaboyev Muslimbek Qodirjon o'g'li

Structural Designer, AKFA ASSEMBLY LLC, Tashkent, Uzbekistan

Qodirov Sardor Sobir o'g'li

Assistant Lecturer, Department of Building and Structures Construction,
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Uzbekistan

Maxmudov Said Maxmudovich

Professor, Department of Building and Structures Construction, Tashkent
University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Uzbekistan

Abstract

The effects of the kinetic friction coefficient and the effective sliding-surface radius on the calculated dynamic parameters of single-curvature friction pendulum seismic isolators were investigated using an idealized parametric model. At a prescribed displacement amplitude of $D = 0.15$ m, normalized peak force, effective vibration period, and equivalent viscous damping were evaluated for nine combinations of $\mu = 0.04, 0.08$, and 0.12 and $R = 2, 3$, and 4 m. The results showed that increasing friction increases the energy dissipated through hysteresis while also increasing the contribution of friction relative to the restoring force. The findings do not replace dynamic analysis of buildings using real accelerograms; rather, they provide an analytical and computational basis for the preliminary selection of seismic isolator parameters.

Keywords

friction pendulum, seismic isolator, kinetic friction, radius of curvature, equivalent damping, effective period, residual displacement, parametric analysis.



**FRIKSION MAYATNIKLI SEYSMOIZOLYATORLARDA ISHQALANISH
KOEFFITSIYENTI VA EGRILIK RADIUSINING HISOBIY
KO'RSATKICHLARGA TA'SIRI**

Boltaboyev Muslimbek Qodirjon o'g'li (*konstruktor, «AKFA ASSEMBLY» MChJ,
Toshkent, O'zbekiston; boltabayevmuslimbek@gmail.com*)

Qodirov Sardor Sobir o'g'li (*«Bino va inshootlar qurilishi» kafedrası assistenti,
Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, Toshkent, O'zbekiston;
sardorqodirov110599@gmail.com*)

Maxmudov Said Maxmudovich (*«Bino va inshootlar qurilishi» kafedrası professori,
Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, Toshkent, O'zbekiston; s.maxmudov@taqu.uz*)

Annotatsiya. Bir egrilikli friksion mayatnikli seysmoizolyatorlarda kinetik ishqalanish ko'effitsiyenti va sirpanish sirtining samarali radiusi hisobiy dinamik ko'rsatkichlarga qanday ta'sir qilishi idealizatsiyalangan parametrik model asosida o'rganildi. Belgilangan $D = 0,15$ m siljish amplitudasida $\mu = 0,04; 0,08; 0,12$ va $R = 2; 3; 4$ m qiymatlarining to'qqizta kombinatsiyasi uchun normallashtirilgan maksimal kuch, samarali tebranish davri va ekvivalent viskoz so'nish baholandi. Ishqalanishning oshishi gisterezis bo'yicha dissipatsiyalangan energiyani ko'paytirishi, ammo tiklovchi kuchga nisbatan ishqalanish ulushini ham oshirishi ko'rsatildi. Natijalar haqiqiy akselerogrammalar bilan bajarilgan bino dinamik hisobining o'rnini bosmaydi, balki izolyator parametrlarini dastlabki tanlash uchun analitik-hisobiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: friksion mayatnik, seysmoizolyator, kinetik ishqalanish, egrilik radiusi, ekvivalent so'nish, samarali davr, qoldiq siljish, parametrik tahlil.

Kirish. Binolarning seysmik himoyasida friksion mayatnikli sirpanma tayanchlar ishqalanish energiyasini dissipatsiyalash va egrilik yuzasi orqali geometrik qaytaruvchi kuch hosil qilish xususiyatini birlashtiradi. Ushbu mexanizm Zayas, Low va Mahin ishlarida nazariy hamda tajribaviy jihatdan asoslangan [1]. Biroq ishqalanish



koeffitsiyentini faqat yuqori energiya dissipatsiyasini ta'minlaydigan qiymat bo'yicha tanlash izolyatorning qayta markazlash qobiliyatiga va uzatiladigan kuchga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Deringöl va Güneyisi turli qavatli po'lat karkaslarning 27 ta izolyatsiya konfiguratsiyasini nochiziqli dinamik tahlil orqali solishtirib, tayanch parametrlarini to'g'ri tanlash seysmik javobga ta'sir etishini ko'rsatgan [2]. Vibhute va hammualliflar friksion mayatnikda maqbul ishqalanish koeffitsiyenti bir nechta konstruktiv talabni birgalikda hisobga olgan holda baholanishini taklif etgan [3]. Cardone, Gesualdi va Brancato tadqiqotida esa qoldiq siljish va qayta markazlash masalasi alohida ahamiyat kasb etishi asoslangan [4].

Mazkur ishning maqsadi — bitta berilgan siljish amplitudasi sharoitida ishqalanish koeffitsiyenti va egrilik radiusining normallashtirilgan tayanch qarshiligi, samarali davr, ekvivalent so'nish va dastlabki qayta markazlash mezoniga ta'sirini analitik-parametrik tarzda baholashdir. Birinchi tezisidagi umumiy bino modellaridan farqli ravishda, bunda tadqiqotning bevosita obyekti friksion mayatnik izolyatorining parametrlaridir.

Tadqiqot metodologiyasi

Bir egrilikli tayanch uchun kichik sirpanish burchagi, doimiy normal yuk W , o'zgarmas kinetik ishqalanish μ_k va ideal Kulon qonuni qabul qilindi. Sirpanish bosqichida qarshilik kuchining W og'irlikka nisbati quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{F_{FP}}{W} = \frac{u}{R_{eff}} + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{u}), \quad \dot{u} \neq 0 \quad (1)$$

bu yerda F_{FP} — gorizonttal qarshilik (N), W — vertikal og'irlik kuchi (N), u — gorizonttal siljish (m), R_{eff} — samarali egrilik radiusi (m), μ_k — kinetik ishqalanish koeffitsiyenti, $\dot{u}$ — sirpanish tezligi (m/s). Bu tenglama faqat $\dot{u} \neq 0$ holati uchun; qo'zg'almaslik–sirpanish o'tishi alohida kontakt qonunini talab qiladi.

Qayd etilgan maksimal siljish D da hisobiy sekant bikirlik, samarali tebranish davri va gisterezis maydonidan topilgan ekvivalent viskoz so'nish quyidagi ifodalar bilan



baholanadi:

$$\frac{K_{\text{eff}}}{W} = \frac{1}{R_{\text{eff}}} + \frac{\mu_k}{D} \quad (2)$$

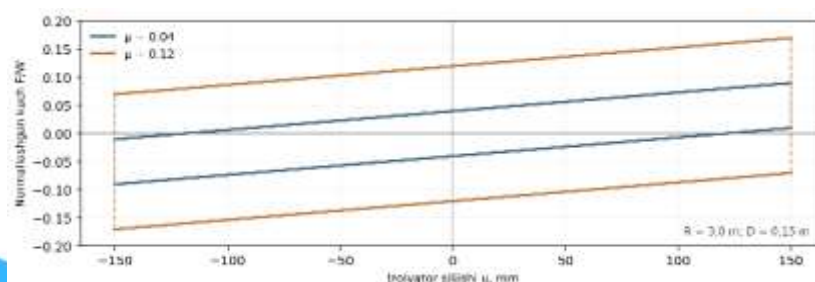
$$T_{\text{eff}} = 2\pi \sqrt{\frac{D}{g(\mu_k + D/R_{\text{eff}})}} \quad (3)$$

$$\xi_{\text{eq}} = \frac{2\mu_k}{\pi(\mu_k + D/R_{\text{eff}})} \quad (4)$$

Bu yerda K_{eff} — maksimal siljishdagi sekant bikirlik (N/m), T_{eff} — qattiq ustki konstruksiya farazidagi ekvivalent davr (s), ξ_{eq} — ekvivalent viskoz so‘nish ulushi (o‘lchamsiz), D — belgilangan siljish amplitudasi (m), $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. 4-formula bir xil D ga ega to‘liq simmetrik sirpanish sikli uchun $E_D = 4\mu_k WD$ energiya maydonidan hosil qilindi; haqiqiy zilzila tebranishi bu shartni har doim ham bajarmaydi.

Tadqiqot variantlari: $D = 0,15 \text{ m}$ o‘zgarmas saqlanib, $\mu_k \in \{0,04; 0,08; 0,12\}$ va $R_{\text{eff}} \in \{2; 3; 4\}$ m olindi. Jami $3 \times 3 = 9$ ta nazariy hisobiy kombinatsiya shakllantirildi. OpenSees dasturidagi singleFPBearing elementi keyingi dinamik hisoblash bosqichi uchun mos bo‘lib, uning asosiy parametrlari rasmiy hujjatlarda berilgan [5]. Qiymatlar sertifikatlangan izolyator parametrlari yoki muayyan bino natijalari emas; ular formulalarning sezgirlikni ko‘rsatadigan shartli ssenariylardir.

Natijalar va muhokama. 1-rasmda $R = 3 \text{ m}$ va $D = 0,15 \text{ m}$ uchun ideal Kulon modelining me‘yorlashtirilgan kuch–siljish sikllari keltirilgan. Ishqalanish koeffitsiyenti ortishi bilan sirpanish shoxlari orasidagi masofa kattalashadi va gisterezis maydoni ortadi. Biroq ushbu grafik akselerogramma asosida bajarilgan vaqt tarixi emas, balki oldindan berilgan simmetrik siljish siklining nazariy tasviridir.





1-rasm. Kinetik ishqalanishning ideal kuch–siljish gisterezisiga ta’siri (shartli sikl).

Hisoblangan to‘qqizta variant 1-jadvalda jamlandi. $F_{\max}/W = \mu_k + D/R_{\text{eff}}$ ko‘rsatkichi izolyatorning maksimal qarshiligini og‘irlikka nisbatan ifodalaydi. Jadvaldagi T_{eff} va ξ_{eq} ko‘rsatkichlari muayyan zilzila yozuvi natijalari emas, balki tanlangan amplituda va soddalashtirilgan modeldan olingan ekvivalent hisobiy qiymatlardir.

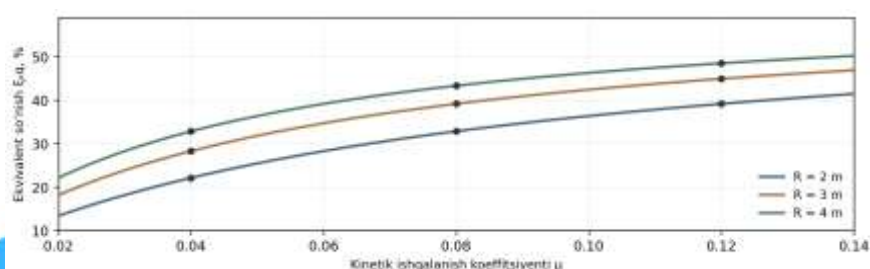
1-jadval

Friksion mayatnik parametrlarining hisobiy ko‘rsatkichlarga ta’siri ($D = 0,15 \text{ m}$)

μ_k	$R_{\text{eff}}, \text{ m}$	$F_{\max}/W$	$T_{\text{eff}}, \text{ s}$	$\xi_{\text{eq}}, \%$	ρ^*
0,04	2	0,1150	2,291	22,1	1,88
0,04	3	0,0900	2,590	28,3	1,25
0,04	4	0,0775	2,791	32,9	0,94
0,08	2	0,1550	1,973	32,9	0,94
0,08	3	0,1300	2,155	39,2	0,62
0,08	4	0,1175	2,267	43,3	0,47
0,12	2	0,1950	1,759	39,2	0,62
0,12	3	0,1700	1,884	44,9	0,42
0,12	4	0,1575	1,958	48,5	0,31

* $\rho = D/(\mu_s R_{\text{eff}})$ shartli mezoni uchun faqat jadval misolida $\mu_s = \mu_k$ deb qabul qilindi; real izolyatorlarda statik koeffitsiyent mustaqil aniqlanadi.

Jadvalga ko‘ra, $R = 3 \text{ m}$ bo‘lganda μ_k ning 0,04 dan 0,12 gacha ortishi T_{eff} ni 2,590 s dan 1,884 s gacha qisqartiradi, ξ_{eq} ni esa 28,3 % dan 44,9 % gacha oshiradi. R ning 2 m dan 4 m gacha ortishi esa $\mu_k = 0,08$ holatida T_{eff} ni 1,973 s dan 2,267 s gacha uzaytiradi. Ushbu o‘zgarishlar aynan $D = 0,15 \text{ m}$ ni o‘zgarmas qabul qilgan hisobiy taqqoslashga tegishli; real zilzila ta’sirida D ham μ_k va R ga qarab o‘zgaradi.





2-rasm. Belgilangan siljish amplitudasida ξ_{eq} ning μ_k va R_{eff} ga bog‘liqligi.

Friksion mayatnikni qayta markazlashga moyilligi uchun ideal statik kuchlar muvozanatidan ρ ko‘rsatkichi olinadi:

$$\rho = \frac{D}{\mu_s R_{eff}} \quad (5)$$

Bu yerda μ_s — statik ishqalanish ko‘effitsiyenti. $\rho > 1$ bo‘lsa, aynan $u = D$ holatida geometrik qaytaruvchi kuch statik ishqalanish chegarasidan katta bo‘ladi; $\rho \leq 1$ bo‘lsa, ushbu siljishdan o‘z-o‘zidan sirpanib qaytish kafolatlanmaydi. $\rho > 1$ sharti ham qoldiq siljish nolga teng bo‘lishini kafolatlamaydi: harakat davomida ishqalanish hisobiga boshqa nuqtada to‘xtash mumkin. To‘liq qoldiq siljishni dinamik integrallash bilan aniqlash zarur [4].

Shunday qilib, μ_k ni oshirish energiya dissipatsiyasi bo‘yicha foydali bo‘lishi mumkin, biroq maksimal uzatiladigan kuchning nisbiy qiymatini orttiradi va qayta markazlash shartini og‘irlashtirishi mumkin. Dolce va hammualliflarning kontakt yuzalari bo‘yicha tajribalari real ishqalanish ko‘effitsiyenti tezlik, bosim, harorat va moylash holatiga bog‘liq bo‘lishini ko‘rsatadi [6]. Shuning uchun bitta o‘zgarmas μ_k bilan olingan parametrik natijalarni loyihaviy tavsiya sifatida bevosita qo‘llash to‘g‘ri emas.

Xulosa

Friksion mayatnikli seysmoizolyatorlarning μ_k va R_{eff} parametrlariga sezgirligini baholash uchun to‘qqizta shartli hisobiy variant asosida normallashgan qarshilik, samarali davr va ekvivalent so‘nish ko‘rsatkichlari aniqlanib, gisterezis hamda parametrik bog‘lanish grafiklari ishlab chiqildi. Bir xil siljish amplitudasida ishqalanishning ortishi hisobiy so‘nishni oshirish bilan birga kuch uzatilishini ham ko‘paytirishi, egrilik radiusining ortishi esa qaytaruvchi bikirlikni kamaytirishi aniqlandi. Qayta markazlashni dastlabki baholash uchun statik va geometrik kuchlar nisbatiga asoslangan cheklangan mezon keltirildi. Bino miqyosidagi seysmik



xavfsizlikni yakuniy baholash uchun kontakt parametrlarini sinov bilan aniqlash, ko‘p qavatli fazoviy model va tanlangan real akselerogrammlar asosida nochiziqli dinamik hisoblash talab qilinadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Zayas V. A., Low S. S., Mahin S. A. A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation // Earthquake Spectra. – 1990. – Vol. 6, No. 2. – P. 317–333. – DOI: 10.1193/1.1585573.
2. Deringöl A. H., Güneyisi E. M. Effect of Friction Pendulum Bearing Properties on Behaviour of Buildings Subjected to Seismic Loads // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2019. – Vol. 125. – Art. 105746. – DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105746.
3. Optimum Coefficient of Friction in FPS for Base Isolation of Building Frames / A. S. Vibhute, S. D. Bharati, M. K. Shrimali, T. K. Datta // Practice Periodical on Structural Design and Construction. – 2022. – Vol. 27, No. 4. – DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000722.
4. Cardone D., Gesualdi G., Brancato P. Restoring Capability of Friction Pendulum Seismic Isolation Systems // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2015. – Vol. 13. – P. 2449–2480. – DOI: 10.1007/s10518-014-9719-5.
5. Single Friction Pendulum Bearing Element // OpenSees Documentation. – URL: <https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/model/elements/SingleFrictionPendulumBearing.html> (murojaat sanasi: 09.10.2026).
6. Dolce M., Cardone D., Croatto F. Frictional Behaviour of Steel-PTFE Interfaces for Seismic Isolation // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2005. – Vol. 3. – P. 75–99. – DOI: 10.1007/s10518-005-0187-9.