INVESTIGATION OF NUMERICAL MODELING OF BUILDINGS WITH DRY-FRICTION SEISMIC ISOLATION

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

This thesis develops a methodology for representing dry-friction sliding seismic isolators in numerical models of buildings and verifying the reliability of the resulting calculations. A set of comparison criteria is systematized for buildings with a fixed-base foundation (M1), a flat sliding bearing (M2), and a single-curvature friction pendulum bearing (M3). The dynamic equilibrium equation, Coulomb friction, and the restoring force of the curved-surface bearing are presented using a consistent system of notation. A K0–K3 verification sequence is proposed for static equilibrium, time integration, force–displacement hysteresis, and energy balance. As a result, a methodological framework is established to support consistent modeling and comparison of dynamic responses in the OpenSeesPy environment; numerical performance indicators based on real earthquake records are not presented in this study.

Keywords

Dry friction, seismic isolation, numerical modeling, friction pendulum, sliding bearing, OpenSeesPy, nonlinear dynamic analysis, computational verification.

QURUQ ISHQALANISHLI SEYSMOIZOLYATSIYALANGAN BINOLARNI SONLI MODELLASHTIRISHNI TADQIQ QILISH

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» kafedrasi assistenti, Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, Toshkent, O‘zbekiston; sardorqodirov110599@gmail.com)

Maxmudov Said Maxmudovich

(«Bino va inshootlar qurilishi» kafedrasi professori, Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, Toshkent, O‘zbekiston; s.maxmudov@taqu.uz)

Annotatsiya. Tezisda quruq ishqalanish asosidagi sirpanma seysmoizolyatorlarni binolarning sonli hisobiy sxemalarida ifodalash va hisoblash natijalarining ishonchliligini tekshirish metodikasi ishlab chiqiladi. Poydevori qattiq mahkamlangan (M1), tekis sirpanma tayanchli (M2) va bir egrilikli friksion mayatnik tayanchli (M3) binolar uchun taqqoslash mezonlari tizimlashtirilgan. Dinamik muvozanat tenglamasi, Kulon ishqalanishi va egri sirtli tayanchning qaytaruvchi kuchi bir xil belgilar tizimida ko‘rsatilgan. Statik muvozanat, vaqt bo‘yicha integrallash, kuch–siljish gisterezisi va energiya balansi uchun K0–K3 tekshiruv ketma-ketligi taklif etiladi. Natijada OpenSeesPy muhitida izchil modellashtirish va dinamik javoblarni taqqoslashga xizmat qiluvchi metodik sxema shakllantiriladi; real zilzila yozuvlari bo‘yicha hisobiy samaradorlik ko‘rsatkichlari bu ishda berilmaydi.

Kalit so‘zlar: quruq ishqalanish, seysmoizolyatsiya, sonli modellashtirish, friksion mayatnik, sirpanma tayanch, OpenSeesPy, nochiziqli dinamik tahlil, hisobiy tekshiruv.

Kirish

Zilzilaviy hududlarda bino va inshootlarning seysmik ishonchliligini oshirish

muhandislik loyihalashining muhim vazifasidir. QMQ 2.01.03-19 “Zilzilaviy hududlarda qurilish” talablariga muvofiq konstruktiv yechimlarni tanlashda seysmik ta’sirni inobatga olish zarur [1]. Oddiy qattiq tayanchli sxemada poydevorning gorizontal tebranishlari ustki konstruksiyaga uzatiladi, seysmoizolyatsiyada esa maxsus tayanch qatlamining deformatsiyasi dinamik javobni o‘zgartiradi. Shu sababli seysmoizolyatorning mexanik modeli hisobning ishonchliligini belgilovchi omillardan biridir. Zayas, Low va Mahin friksion mayatnikli tayanchlarda egri sirt geometriyasi hamda og‘irlik kuchi asosida qaytaruvchi ta’sir yuzaga kelishini asoslagan [2]. Constantinou, Mokha va Reinhorn esa sirpanma kontaktlarning ishqalanishi tezlik, bosim va boshlang‘ich siljishga bog‘liq bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatgan [3]. Dolce va hammualliflar po‘lat–PTFE kontaktining mexanik xususiyatlari ish rejimi bilan bog‘liqligini eksperimental tekshirgan [4]. Demak, doimiy ishqalanish koeffitsiyentiga asoslangan Kulon modeli metodik jihatdan qulay bo‘lsa-da, u materialning barcha real xususiyatlarini qamrab olmaydi. Tadqiqotning maqsadi — quruq ishqalanishli seysmoizolyatsiyalangan binolar uchun qiyosiy hisobiy modellar, asosiy tenglamalar va sifat nazorati nuqtalarini bir tizimga keltirish. Bunda mavjud tadqiqotlarda ochib berilgan kontakt mexanikasini takroran “yangilik” sifatida taqdim etish emas, balki uch xil konstruktiv sxemani izchil hisoblash va olingan natijalarni bir xil mezonlarda tekshirishga qaratilgan metodik yechim ishlab chiqish ko‘zda tutiladi.



1-rasm. Qattiq mahkamlangan va quruq ishqalanishli tayanchlarga ega binolarning taqqoslama hisobiy sxemalari.

Tadqiqot metodologiyasi

Hisobiy tajribada bir xil ustki konstruksiya uchun uchta variant qabul qilinadi: M1 — poydevori qattiq mahkamlangan bino; M2 — tekis sirpanma tayanchli bino; M3 — bir egrilikli friksion mayatnik tayanchli bino (1-rasm). Barcha variantlarda geometriya, massa, materiallar, ustki konstruksiya bikirligi va grunt tezlanishi bir xil olinadi. Dastlab bir yo‘nalishli ikki o‘lchamli hisobiy sxema tanlanadi; haqiqiy loyiha uchun fazoviy ta’sirlar ham alohida tekshiriladi.

Yerga nisbatan erkinlik darajalarida harakatning umumiy tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\mathbf{M\ddot{u}} + \mathbf{C\dot{u}} + \mathbf{f}_s(\mathbf{u}) + \mathbf{b}F_b = -\mathbf{M}\mathbf{r}a_g(t) \qquad (1)$$

bu yerda M — massalar matritsasi (kg); C — viskoz so‘nish matritsasi (N·s/m); u — nisbiy siljishlar vektori (m); f_s — ustki konstruksiyaning ichki kuchlari (N); F_b — izolyatorning gorizontal qarshiligi (N); b — uni erkinlik darajalariga taqsimlash vektori; r — seysmik ta’sir yo‘nalishi vektori; $a_g(t)$ — grunt tezlanishi (m/s^2). Qattiq tayanchli M1 modelida izolyator erkinlik darajasi kiritilmaydi.

Tekis sirpanma tayanchning sirpanish holatidagi qarshiligi doimiy kinetik ishqalanish koeffitsiyenti bilan ifodalanadi:

$$F_{\text{sl}} = \mu N \,\text{sgn}(\dot{u}_b) \qquad (2)$$

bunda μ — kinetik ishqalanish koeffitsiyenti (o‘lchamsiz); N — normal siquvchi kuch (N); $\dot{u}_b$ — sirpanish tezligi (m/s); sgn — tezlik ishorasi. Qo‘zg‘almaslik–sirpanish o‘tishida chegaraviy statik ishqalanish sharti alohida hisobga olinadi. M3 modelida kichik burchak va doimiy vertikal yuk farazlarida:

$$F_{\text{FP}} = \frac{N}{R_{\text{eff}}} u_b + \mu N \,\text{sgn}(\dot{u}_b) \qquad (3)$$

bu yerda R_{eff} — tayanchning samarali egrilik radiusi (m), u_b — izolyatorning gorizontal siljishi (m). Birinchi had geometrik qaytaruvchi kuchni, ikkinchisi esa ishqalanish qarshiligini ifodalaydi. Tekis sirpanma M2 sxemasida mazkur geometrik

qaytaruvchi had mavjud emas. Ushbu sodda ifodalar sirpanish holatiga tegishli bo‘lib, to‘liq element modeli kontakt shartlarini ham hisobga oladi.

OpenSeesPy hisoblash muhitida M2 uchun flatSliderBearing, M3 uchun singleFPBearing elementlari, kontakt yuzasi uchun Coulomb ishqalanish modeli tanlanadi [5–7]. Grunt akselerogrammasi UniformExcitation orqali beriladi; vaqt bo‘yicha integrallashda Newmark algoritmidan ($\gamma = 0{,}5$; $\beta = 0{,}25$) foydalanish mumkin [8, 9]. Ushbu algoritm nochiziqli tenglamalarni iteratsion yechishni va qadam bo‘yicha yaqinlashishni nazorat qilishni talab etadi.

Natijalar va muhokama

Metodik tadqiqot natijasida uch model uchun hisobiy farqlarni ajratib beruvchi tasnif ishlab chiqildi (1-jadval). Undan ko‘rinadiki, M2 va M3 variantlarining asosiy umumiy jihati sirpanishdagi ishqalanish bo‘lsa, M3 da egrilikdan keladigan qaytaruvchi kuch ham mavjud. Demak, M1–M2 taqqoslanishi sirpanish qatlamining, M2–M3 taqqoslanishi esa egri sirtli tayanchning qo‘shimcha mexanik ta’sirini baholashga xizmat qiladi. Bu xulosa konstruktiv-matematik modeldan kelib chiqadi, hisoblangan foizli samaradorlik emas.

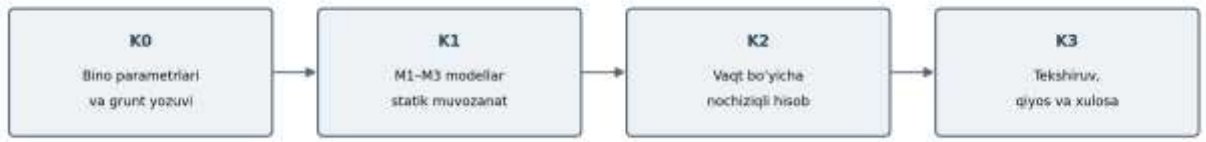
1-jadval

Qiyosiy hisobiy modellar va ularning verifikatsiya mezonlari

Model	Izolyatsiya qatlamining ishlashi	Asosiy tekshiruv mezoni
M1	Gorizontal sirpanish erkinligi yo‘q	Poydevor reaksiyasi; qavat tezlanishi
M2	Kulon ishqalanishi; geometrik qaytaruvchi had yo‘q	Sirpanish sharti; kuch–siljish gisterezisi
M3	Ishqalanish va $N \cdot u_b/R_{eff}$ qaytaruvchi kuch	Gisterezis; qaytaruvchi bikirlik; qoldiq siljish

Hisobning takrorlanuvchanligini ta’minlash uchun K0–K3 nazorat nuqtalari belgilandi (2-rasm). K0 da geometriya, massalar, tayanch xususiyatlari va zilzila

yozuvlari birliklari tekshiriladi. K1 da statik muvozanat hamda tayanchlarga tushadigan normal yuklamalar solishtiriladi. K2 da vaqt qadami, iteratsion yaqinlashish va kontaktning sirpanish holati nazorat qilinadi. K3 da mutlaq va nisbiy tezlanishlar, qavatlararo siljishlar, izolyator kuchlari hamda energiya balansi qiyoslanadi.



2-rasm. Sonli modellashtirish bosqichlari va hisoblash natijalarini nazorat qilish nuqtalari K0–K3.

Qavatlarning mutlaq tezlanishini baholashda yerga nisbatan hisoblangan tezlanishga grunt tezlanishi qo‘shiladi; bu UniformExcitation modelidagi nisbiy koordinatalardan kelib chiqadi [9]. Ishqalanishda dissipatsiyalangan energiya sirpanish davomida kontakt kuchining bajargan ishiga teng. Doimiy N va μ sharoitida to‘liq simmetrik sirpanish sikli uchun gisterezis maydonini nazorat bahosi sifatida $E_{fr} = 4\mu ND$ ifodasidan foydalanish mumkin; D — sirpanishning maksimal amplitudasi (m). Bu formula haqiqiy zilzila yozuvi bo‘yicha hisobiy natija o‘rnini bosa olmaydi. Metodikaning asosiy cheklovlari: tekis sirpanma tayanchda mustaqil qaytaruvchi kuchning yo‘qligi, ishqalanish koeffitsiyentining real kontakt sharoitlariga sezgirligi, vertikal yuk va ko‘p yo‘nalishli harakatning o‘zgarishi, shuningdek, hisoblash qadami tanlanishidir. Shu sababli tekshiruvsiz qabul qilingan birgina μ qiymati yoki birgina akselerogramma asosida seysmoizolyatsiya samaradorligi haqida umumiy xulosa chiqarish mumkin emas.

Xulosa

Quruq ishqalanishli seysmoizolyatsiyalangan binolar uchun uchta qiyosiy sonli model, yagona matematik tavsif va K0–K3 hisobiy nazorat ketma-ketligi shakllantirildi. Taklif etilgan sxema ishqalanishning o‘z ta’sirini friksion mayatnikning geometrik qaytaruvchi kuchidan ajratishga, shuningdek, akselerogramma asosidagi nochiziqli

hisoblashlarning ishonchliligini tekshirishga imkon beradi. Ushbu metodikani konkret binoda qo‘llash uchun geometrik, material va tayanch parametrlari hamda mos zilzila yozuvlari asosida alohida sonli hisoblashlar bajarilishi zarur. Sonli samaradorlik foizlari va parametrik optimallashtirish ushbu tezisning natijasi sifatida da’vo qilinmaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. QMQ 2.01.03-19. Zilzilaviy hududlarda qurilish. – Toshkent: O‘zbekiston Respublikasi Qurilish vazirligi, 2019. – URL: https://gov.uz/oz/mc/pages/shaharsozlik-normalari-va-qoidalari (murojaat sanasi: 09.10.2026).

2. 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.

3. Constantinou M. C., Mokha A., Reinhorn A. M. Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling // Journal of Structural Engineering. – 1990. – Vol. 116, No. 2. – P. 455–474. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:2(455).

4. 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.

5. Flat Slider Bearing Element // OpenSees Documentation. – URL: https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/model/elements/FlatSliderBearingElement.html (murojaat sanasi: 09.10.2026).

6. Single Friction Pendulum Bearing Element // OpenSees Documentation. – URL: https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/model/elements/SingleFrictionPendulumBearing.html (murojaat sanasi: 09.10.2026).

7. Coulomb Friction // OpenSees Wiki. – URL: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Coulomb_Friction (murojaat sanasi: 09.10.2026).

8. Newmark Method // OpenSees Documentation. – URL: https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/analysis/integrator/Newmark.html (murojaat sanasi: 09.10.2026).

9. Uniform Excitation Pattern // OpenSees Documentation. – URL: https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/model/pattern/uniformExcitationPattern.html (murojaat sanasi: 09.10.2026).