

پاسخ سیستم‌های خاک - سازه به پالس‌های ناشی از جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست در نواحی نزدیک گسل

زینب آذرهوش^۱، غلامرضا قدرتی امیری^{۲*}، حمیدرضا رازقی^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش مهندسی زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

Ghodrati@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۴/۱۵

چکیده- در این مطالعه آثار ترکیبی اندرکنش خاک-سازه و زلزله‌های نزدیک گسل بر پاسخ ارتجاعی سازه‌های یک درجه‌آزادی سیستم خاک-سازه تحت اثر پالس‌های ناشی از جهت‌گیری پیش‌رونده انتشار شکست به عنوان نماینده‌ی خصوصیات سینماتیکی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل، بررسی شده است. نحوه‌ی تغییرات مقاومت تقاضای ارتجاعی سازه بر حسب محدوده‌ی وسیعی از پارامترهای بی‌بعد که معرف آثار اندرکنش خاک-سازه و نزدیک گسل است، ارائه می‌شود. برای ارزیابی آثار خاک بر پاسخ ارتجاعی سازه‌ها در اثر زلزله‌های نزدیک گسل، پاسخ سازه‌ی مستقر بر بستر صلب نیز برآورد شده و با نتایج سازه‌ی مستقر بر بستر خاک مقایسه می‌شود.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، زلزله‌های نزدیک گسل، پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده انتشار شکست، پاسخ ارتجاعی سازه‌ها.

۱- مقدمه

مطالعات حوزه‌ی نزدیک گسل در ویرایش ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ آیین‌نامه‌هایی مانند ای تی سی- ۴۰، جی آر ای، یو بی سی- ۹۷ و فیما- ۲۷۳ با استفاده از فاکتورهای اصلاحی در نواحی شتاب و سرعت طیف پاسخ، اعمال شد [۱و۲]. از آن‌جا که این آیین‌نامه‌ها به گونه‌ای ویژه مؤلفه‌ی قائم حرکت زمین را بررسی نکرده بودند [۳]، محققان به توسعه‌ی روش‌های طراحی برای زلزله‌های نزدیک گسل با محوریت مؤلفه‌ی مؤثر قائم حرکت زمین پرداختند.

هم‌زمان با زلزله‌ی پارکفیلد (۱۹۶۶) و همراه با رشد مناطق شهری در نواحی نزدیک گسل، لزوم بررسی آثار زلزله‌های نزدیک گسل توجه دانشمندان را جلب کرد. خصوصیات ویژه‌ی زلزله‌های نزدیک گسل مدت‌ها شناخته شده بود؛ ولی مطالعات متمرکزی بر جنبه‌ی حرکت زمین نزدیک گسل تا مشاهده‌ی خسارات ناشی از زلزله‌های نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) انجام نشده بود. سرانجام نتایج

[۲۶-۳۲] خود با اعمال تمهیداتی مانند افزایش دوره‌ی غالب و تغییر در میرایی مؤثر سازه وارد نمودند [۳۳]. در حالی که در این مطالعات، حساسیتی نسبت به نوع تحریک اعمالی از جمله حرکت زمین در نزدیک گسل نشان داده نشده است [۳۴]. بعدها این مطالعات مقدماتی [۳۰-۳۲] سبب ایجاد بندهایی در ویرایش ۱۹۷۸ آیین‌نامه‌ی ای تی سی ۳-۰۶ (اصلی‌ترین آیین‌نامه در طراحی لرزه‌ای سیستم‌های خاک-سازه) شد. به تازگی مطالعاتی درباره‌ی آثار ترکیبی اندرکنش خاک-سازه در نزدیکی گسل انجام شده است [۳۵-۳۷]. این مطالعات محدود به شرایط خاصی از سیستم خاک-سازه تحت اثر زلزله‌ای معین است. بنابراین لزوم مطالعات جامع به شدت احساس می‌شود. بر اساس این یافته‌ها، پاسخ سازه‌های مستقر بر بستر خاک در محدوده‌ای از پرپود سازه‌ها، بیش از سازه‌های مستقر بر بستر صلب برآورد می‌شود.

در این مطالعه آثار ترکیبی اندرکنش اینرسی خاک-سازه و زلزله‌های نزدیک گسل بر پاسخ ارتجاعی سازه‌های یک‌درجه‌ی آزادی تعیین می‌شود. مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی بی‌بعد که معرف آثار اندرکنش خاک-سازه است پس از بحثی کوتاه پیرامون مدل‌سازی سیستم خاک-سازه بیان می‌شوند، سپس یک مدل ریاضی برای پالس‌های پیش‌رونده‌ی انتشار شکست معرفی می‌شود. با اعمال پالس پیشنهادی به سیستم خاک-سازه و با استفاده از آنالیزهای عددی گام به گام، مقاومت تقاضای ارتجاعی سازه محاسبه می‌شود. سرانجام نتایج بدست آمده از این مطالعه بیان می‌شود.

۲- مدل سیستم خاک-سازه

شکل ۱ مدل سیستم خاک-سازه در این مطالعه را نشان می‌دهد. این مدل بر فرضیات زیر استوار است:

۱- سازه با سیستم یک‌درجه‌ی آزادی رفتار دوخطی با

تحقیقات اخیر [۴-۶] شاهده‌ی بر این مدعاست. از آن پس، تلاش‌های فراوانی از سوی دانشمندان برای توسعه روش‌های سیستماتیکی که منعکس‌کننده‌ی آثار زلزله‌های نزدیک گسل باشد، انجام شد. پس از زلزله‌ی سانفرناندو (۱۹۷۱)، پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست (امواج به هم پیوسته‌ای که با حرکت پالسی شکل با دامنه‌ی بلند و دوره‌ی تناوب کوتاه در ابتدای مؤلفه‌ی قائم حرکت زمین در نزدیک گسل مشاهده می‌شوند) مورد توجه قرار گرفت [۷-۹]. براساس تحقیقات انجام‌شده، این حرکات پالسی شکل توانایی شبیه‌سازی خصوصیات غالب سینماتیکی حرکات زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل را دارند. بر این اساس و با هدف تخمین پاسخ سازه‌ها در نواحی نزدیک گسل، تحقیقات دانشمندان متعددی معطوف به جایگزینی این پالس‌ها با مدل‌های ریاضی شد [۹-۲۴]. یافته‌های به دست آمده از این تحقیقات، نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه‌شده، پاسخ سازه‌های انعطاف‌پذیر را به‌درستی برآورد می‌کند ولی دربرآورد پاسخ سازه‌های صلب، با نقایصی همراه است. این نقایص به طور عمده ناشی از وابستگی پاسخ سازه‌های صلب به محتوای فرکانسی بالای حرکت زمین در نزدیک گسل است [۲۵]. برای دست‌یابی به پاسخی واقعی باید علاوه بر پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده، نگاشت‌های واقعی حرکات زمین در نواحی نزدیک گسل را که دارای محتوای فرکانسی بالایی است به سازه اعمال کرد.

علاوه بر آثار بالا، اندرکنش خاک-سازه نیز در برآورد پاسخ سازه‌ها مؤثر است. وجود خاک، زمینه‌ی تغییراتی را در تحریک اعمالی به پایه‌ی سازه (آثار اندرکنش سینماتیکی) و خصوصیات دینامیکی سازه (آثار اندرکنش اینرسی) فراهم می‌کند. در ابتدای دهه‌ی ۱۹۷۰، گروهی از محققان، آثار اندرکنش خاک-سازه را در مطالعات عملی

فنها و میراگرها برای حرکت انتقالی و گهواره‌ای درجات آزادی عبارت است از:

$$\begin{aligned} k_h &= \frac{8\rho V_s^2 r}{2-\nu} & c_h &= \pi\rho V_s r^2 \\ k_\phi &= \frac{8\rho V_s^2 r^3}{3(1-\nu)} & c_\phi &= \rho V_p I_f \\ I_{1\phi} &= \frac{9\rho\pi r I_f (1-\nu)}{32} \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

v_s سرعت موج برشی، v_p سرعت موج فشاری در خاک، ν ضریب پواسون خاک و ρ چگالی جرمی خاک است.

۳- پارامترهای بی‌بعد جایگزین آثار اندرکنش خاک - سازه

پاسخ سیستم‌های خاک-سازه در اساس، وابسته به ابعاد سازه، خصوصیات دینامیکی آن، پروفیل خاک و تحریک اعمالی است. می‌توان نشان داد که اثر این عوامل به وسیله پارامترهای بی‌بعد زیر به بهترین نحو توصیف می‌شود [۳۲-۴۰]:

۱. فرکانس بی‌بعد (a_0)، شاخصی برای بیان سختی سازه نسبت به خاک است:

$$a_0 = \omega_{fix} h / v_s \quad (2)$$

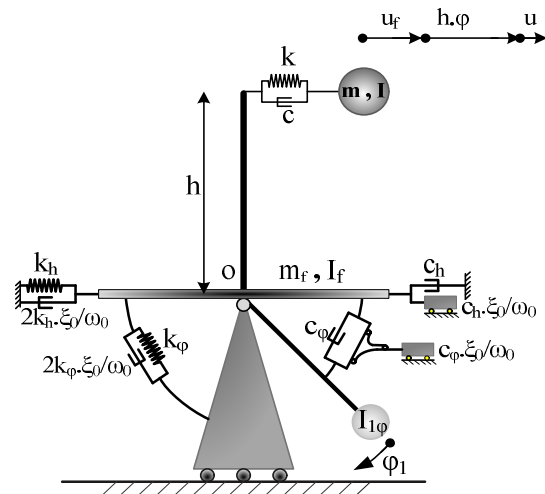
ω_{fix} فرکانس دورانی سازه‌ی مستقر بر بستر صلب است. شدت آثار اندرکنش را مشخص می‌کند و در ساختمان‌های متعارف برای حالتی که اثر اندرکنش خاک-سازه کم‌اهمیت است، به سمت صفر و برای حالتی که اثر اندرکنش خاک-سازه اهمیت دارد به سمت ۳ میل می‌کند.

۲. نسبت h/r ، شاخصی برای میزان لاغری سازه است.

۳. نسبت جرمی (\bar{m})، معرف نسبت جرم سازه به جرم معادل ستون خاک است:

$$\bar{m} = m / \rho r^2 h \quad (3)$$

ضریب سختی کرنشی ۳ درصد جایگزین می‌شود. جرم مؤثر m ، ارتفاع h و ممان اینرسی جرمی I به سازه اختصاص می‌یابد.



شکل (۱) مدل گسسته‌ی سیستم خاک-سازه [۳۹].

۲- پی با یک دیسک صلب دایره‌ای به شعاع r ، جرم m_f و ممان اینرسی جرمی I_f جانشین می‌شود.

۳- خاک زیر سازه، نیم‌فضای همگن الاستیک فرض می‌شود و به وسیله مدل گسسته، ترکیبی از مفاهیم مدل مخروطی و مدل ویسکو الاستیک ویت جایگزین می‌شود. قابل ذکر است که اساس مدل مخروطی، تئوری انتشار یک‌بعدی امواج بوده است و می‌تواند با دقت کافی در مهندسی به کار برده شود [۳۸].

دو درجه‌ی آزادی در این مدل برای بیان حرکت انتقالی u_f و گهواره‌ای پی ϕ به کار می‌رود. به خاطر وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس تحریک، درجه آزادی داخلی ϕ_1 ، به اینرسی دورانی جرم آویزان $I_{1\phi}$ تخصیص می‌یابد. در نتیجه، سیستم خاک-سازه با سیستم چهاردرجه‌ی آزادی، مدل‌سازی می‌شود. از آنجا که در این مطالعه تنها آثار اندرکنش اینرسی بررسی شده است، تحریک آزاد زمین به u_f اعمال می‌شود. ضرایب سختی

زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل را دارند؛ بر این اساس، مدل‌های ریاضی متعددی جایگزین این پالس‌ها شده است [۹-۲۴]. در این مطالعه از میان مدل‌های پیشنهادی، از مدل پالس مثلثاتی ماکریس [۱۴-۱۵] که در آن پالس سرعت زمین به صورت یک تابع سینوسی تک سیکل معرفی شده است، استفاده می‌شود. در این مدل، معادله تاریخیچه‌ی زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی زمین عبارت است از:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_g(t) &= \omega_p V_p \cos(\omega_p t) \\ \dot{u}_g(t) &= V_p \sin(\omega_p t) \\ u_g(t) &= \frac{V_p}{\omega_p} - \frac{V_p}{\omega_p} \cos(\omega_p t) \end{aligned} \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (5)$$

$\omega_p = 2\pi/T_p$ فرکانس دورانی پالس سرعت است. شکل ۲ جایگاه این پالس در نمودار تاریخیچه‌ی زمانی مؤلفه‌ی قائم حرکت زمین در زلزله‌ی امپریال وایلی (۱۹۷۹) ایستگاه السترو اری ۵ # را نشان می‌دهد.

۴. نسبت جرم پی به جرم سازه (m_f/m).

۵. ضریب پواسون خاک (ν).

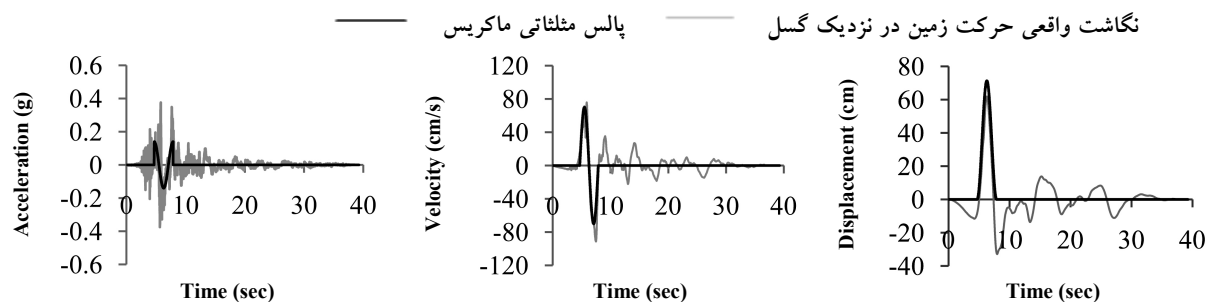
۶. میرایی سازه (ξ_s) و میرایی بحرانی خاک (ξ_g)

دو پارامتر اول، پارامترهای کلیدی بررسی آثار اندرکنش خاک-سازه است. بقیه‌ی پارامترها کم اهمیت بوده و در ساختمان‌های متعارف برابر مقادیر زیر در نظر گرفته می‌شوند [۴۰]:

$$\begin{aligned} \bar{m} &= 0.5 & m_f/m &= 0.1 & \nu &= 0.25 \\ \xi_s &= 0.05 & \xi_g &= 0.05 & & \end{aligned} \quad (4)$$

۴- جایگزینی پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، مطالعات نشان می‌دهد که پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست، توانایی شبیه‌سازی خصوصیات غالب سینماتیکی حرکات



شکل (۲) نمودارهای تاریخیچه زمانی مؤلفه‌ی قائم زلزله‌ی امپریال وایلی (۱۹۷۹) ایستگاه السترو اری ۵ # و پالس مثلثاتی ماکریس.

جدول (۱) مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل اعمالی و پارامترهای مدل پالس.

| رویداد | سال | ایستگاه | پارامترهای پالس | | فاصله (km) | |
|--------------------|------|-----------------------|-----------------|--------------|------------|------------|
| | | | T_p (s) | V_p (cm/s) | نزدیک‌ترین | مرکز زلزله |
| Imperial Valley-06 | ۱۹۷۹ | El Centro Array #4 | ۴/۳ | ۶۰/۸ | ۷/۱ | ۲۷/۱ |
| Imperial Valley-06 | ۱۹۷۹ | El Centro Array #5 | ۳/۲ | ۷۰/۰ | ۴/۰ | ۲۷/۸ |
| Imperial Valley-06 | ۱۹۷۹ | El Centro Array #6 | ۳/۷ | ۱۰۰/۰ | ۱/۴ | ۲۷/۵ |
| Imperial Valley-06 | ۱۹۷۹ | El Centro Diff. Array | ۴/۳ | ۴۴/۰ | ۵/۱ | ۲۷/۲ |
| Loma Prieta | ۱۹۸۹ | Los Gatos PC | ۲/۱ | ۷۶/۲ | ۳/۸ | ۱۸/۴ |
| Landers | ۱۹۹۲ | Lucerne | ۵/۰ | ۱۰۰/۰ | ۲/۱ | ۴۴/۰ |

۵- مقادیر و حدود پارامترها

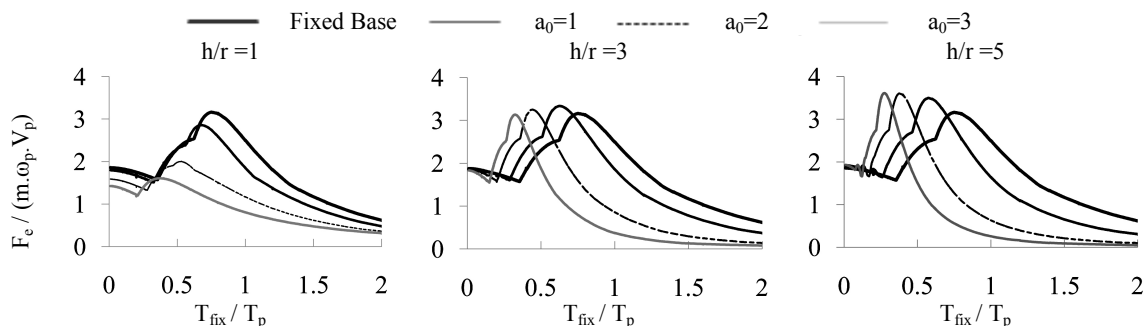
در این مطالعه ۳۶۰ سیستم خاک-سازه، شامل ۳۰ سازه‌ی یک‌درجه‌ی آزادی در محدوده‌ی پریود سازه‌ی مستقر بر بستر صلب (T_{fix}) از ۰/۱ تا ۳ و دارای مقادیر $a_0 = 0, 1, 2, 3$ و $h/r = 1, 3, 5$ ارزیابی می‌شوند. سیستم‌های خاک-سازه تحت اثر گروهی متشکل از ۶۰ پالس با دامنه‌ی سرعت (V_p) ۵۰ تا ۳۰۰ سانتی‌متر بر ثانیه و پریود (T_p) ۰/۵ تا ۵ ثانیه قرار می‌گیرند. به علاوه، ۶ نگاشت واقعی حرکت زمین در نزدیک گسل به سیستم خاک-سازه اعمال می‌شود. جدول ۱ شتاب این نگاشت‌ها و مشخصات پالس ماکریس را نشان می‌دهد. سرانجام با استفاده از آنالیزهای عددی گام به گام، مقاومت تقاضای ارتجاعی سازه به عنوان جزئی از سیستم خاک-سازه محاسبه می‌شود.

۶- نتایج عددی

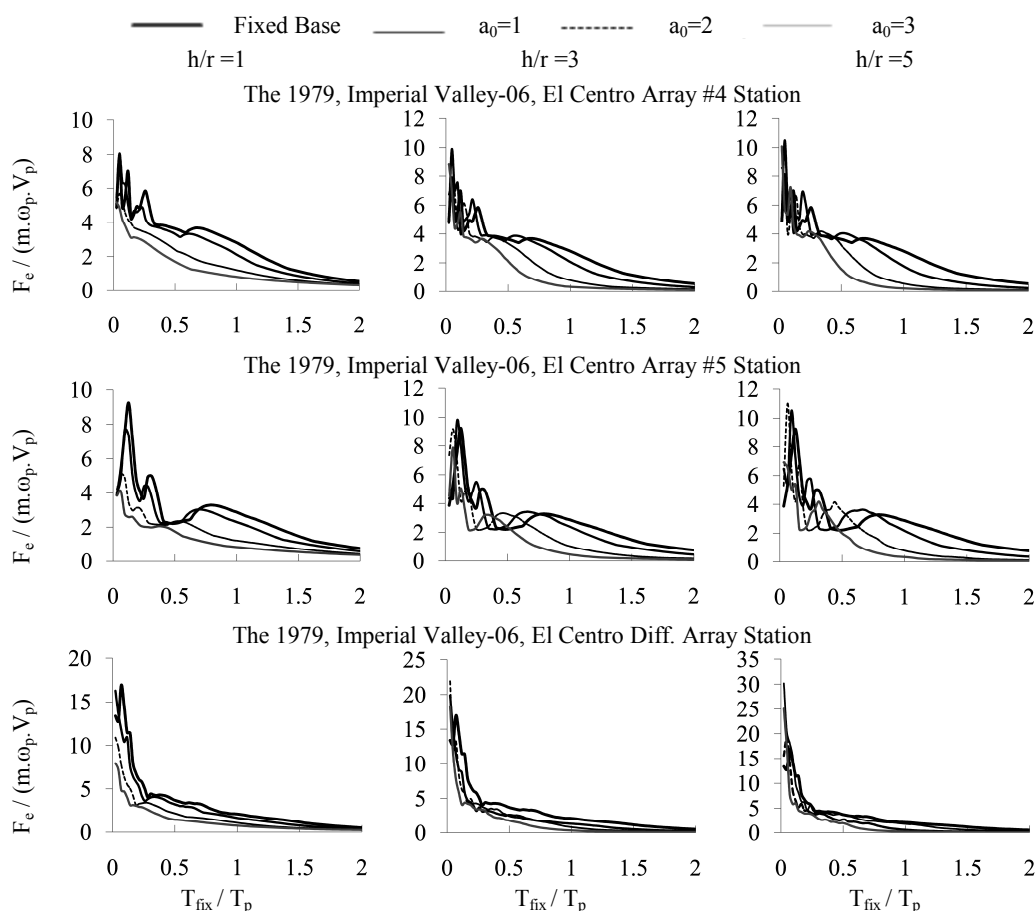
در این بخش آثار اندرکنش خاک-سازه بر رفتار ارتجاعی سازه تحت اثر پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده نزدیک گسل ارزیابی شده است. شکل ۳، نحوه‌ی تغییرات مقاومت تقاضای ارتجاعی (F_e) را تحت اثر پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده بر حسب مقادیر نسبت پریود سازه‌ی مستقر بر بستر صلب به پریود پالس محرک (T_{fix}/T_p) نشان می‌دهد. در این نمودارها، نتایج به حاصل ضرب جرم سازه در فرکانس دورانی و دامنه‌ی پالس نرمال شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در سازه‌های لاغر

($h/r = 3, 5$) نسبت پریود، موسوم به τ_{rr} وجود دارد که در سازه‌های با دوره‌های کمتر از آن مقدار، مقاومت تقاضای سازه‌ی مستقر بر بستر خاک، بیش از مقاومت تقاضای سازه‌ی مستقر بر بستر صلب برآورد می‌شود؛ حال آن‌که برای دوره‌های بیشتر از آن مقدار، روند معکوسی مشاهده می‌شود. آثار اندرکنش خاک-سازه، مقاومت تقاضای بیشتری را بر سازه‌های با پریود کمتر از τ_{rr} تحمیل می‌کند. مقدار τ_{rr} با تغییر پارامترهای بی‌بعد، از ۰/۳۶ تا ۰/۷۲ تغییر می‌کند. با افزایش میزان نسبت سختی سازه به خاک (a_0)، تفاوت میان مقاومت تقاضای سازه‌ی مستقر بر بستر خاک و مقاومت تقاضای سازه‌ی مستقر بر بستر صلب افزایش می‌یابد. نکته‌ی چشم‌گیری که در بررسی این نمودارها مشاهده می‌شود انتقال پیک‌های منحنی به سمت چپ و بالا همراه با افزایش a_0 است؛ علت آن، افزایش پریود معادل سیستم خاک-سازه همراه با افزایش میزان انعطاف‌پذیری خاک است. در نتیجه هر چند افزایش a_0 ، شرایط را قبل از نسبت پریود τ_{rr} بحرانی‌تر می‌کند، بعد از τ_{rr} ، سطح ایمنی را برای محدوده‌ی وسیع‌تری از سازه‌ها فراهم می‌کند. در سازه‌های چاق ($h/r = 1$)، آثار متفاوتی از اندرکنش خاک-سازه مشاهده می‌شود؛ به این ترتیب که اندرکنش باعث کاهش مقاومت ارتجاعی در مقایسه با سازه‌ی مستقر بر بستر صلب می‌شود و پیک‌های منحنی به سمت چپ و پائین انتقال می‌یابند. علت، افزایش میرایی سیستم خاک-سازه در اثر افزایش میزان انعطاف‌پذیری خاک است [۴۰]. این اثر چنان نیرومند است که باعث کاهش مقاومت تقاضای سازه قبل از τ_{rr} می‌شود.



شکل (۳) نحوه‌ی تغییر مقاومت تقاضای ارتجاعی، تحت اثر پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست



شکل (۴) نحوه‌ی تغییرات مقاومت تقاضای ارتجاعی تحت اثر نگاشت‌های واقعی حرکت زمین در نزدیکی گسل

دارای پررود بالا، نتایج شکل ۴ بر نتایج حاصل از پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده، منطبق است. در حالی که در سازه‌های دارای پررود کوتاه، نتایج متأثر از محتوای فرکانسی بالای زلزله‌های نزدیک گسل بوده که در شکل ۳ وجود ندارند. بنابراین هر چند پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست در برآورد شکل اصلی پاسخ سیستم‌های خاک-سازه در نواحی نزدیک گسل مناسب است، ولی به دلیل حذف آثار محتوای فرکانسی بالای زلزله‌های نزدیک گسل، استفاده از این پالس‌ها به تنهایی به عنوان نماینده‌ی نگاشت‌های نزدیک گسل، منجر به تخمین پاسخ‌هایی غیر قابل اطمینان می‌شود.

در شکل ۴ برای ارزیابی میزان مشارکت محتوای فرکانسی بالای زلزله‌های نزدیک گسل در برآورد پاسخ سیستم‌های خاک-سازه نحوه‌ی تغییر مقاومت تقاضای ارتجاعی تحت اثر نگاشت‌های واقعی حرکت زمین در نزدیک گسل ترسیم شده است. نکته‌ی چشم‌گیر در بررسی این نمودارها، وجود دو محدوده‌ی اوج موضعی در نسبت پررود کوتاه و بلند است. دلیل آن در مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ جست‌وجو می‌شود. بر مبنای این مقایسه، پاسخ ارتجاعی سازه‌ها تحت اثر نگاشت‌های واقعی حرکت زمین در نزدیک گسل، مشابه پاسخ ارتجاعی سازه‌ها تحت اثر پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست است. به‌ویژه در سازه‌های

۷- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی آثار جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست بر رفتار ارتجاعی سازه‌ها و تبیین پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده انتشار شکست [به عنوان نماینده‌ی آثار حوزه‌ی نزدیک گسل] و پاسخ سیستم خاک-سازه تحت اثر این بخش از نگاشت‌های نزدیک گسل پرداخته و نتایج زیر حاصل شده است:

۱. پاسخ ارتجاعی سیستم‌های خاک-سازه (به‌ویژه در سازه‌های دارای پرپود بالا) تحت اثر نگاشت‌های واقعی حرکت زمین در نزدیکی گسل، مشابه پاسخ ارتجاعی سیستم‌های خاک-سازه تحت اثر پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده‌ی انتشار شکست است؛ بنابراین پالس‌های جهت‌گیری پیش‌رونده می‌توانند در برآورد شکل اصلی پاسخ ارتجاعی سیستم‌های خاک-سازه در نواحی نزدیک گسل به‌کار روند.

۲. پاسخ ارتجاعی سیستم‌های خاک-سازه تحت اثر نگاشت واقعی حرکت زمین در نزدیکی گسل، دو محدوده‌ی اوج موضعی در نسبت دوره‌های کوتاه و بلند دارد؛ ولی مطالعات بیشتر درباره‌ی حدود این نواحی پیشنهاد می‌شود.

۳. چشم‌پوشی از آثار اندرکنش خاک-سازه در برآورد پاسخ ارتجاعی سازه‌ها در نواحی نزدیک گسل در سازه‌های دارای پرپود بیش از τ_{rr} نتایج قابل اطمینانی به دست می‌آید، ولی چشم‌پوشی از این آثار در سازه‌های دارای دوره‌ی کمتر از τ_{rr} ایمن نیست؛ به طوری که با افزایش لاغری سازه میزان این عدم ایمنی‌ها نیز افزایش می‌یابد.

۸- قدردانی

در پایان از جناب آقای دکتر محمدعلی قناد استاد ارجمند دانشگاه صنعتی شریف و آقای سید فرید قهاری دانشجویی

دکترای دانشگاه صنعتی شریف که با نظرات و راهنمایی‌های خود باعث برابری شدن این مقاله شده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

۹- مراجع

- [1] MacRae A, Morrow D, Roeder C; "Near-fault Ground Motion Effects on Simple Structures", Journal of Structural Engineering (ASCE); Vol. 127, 2001, pp. 996-1004.
- [2] Naeim F; "Impact of the 1994 Northridge Earthquake on the Art and Practice of Structural Engineering", The Structural Design of Tall and Special Buildings; Vol. 13, No. 5, 2004, pp. 373-389.
- [3] Somerville PG; "Development of an Improved Ground Motion Representation for Near-Fault Ground Motions", Proceeding of the SMIP 98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data, Oakland, CA; 1998.
- [4] Malhotra PK; "Response of Buildings to Near-Field Pulse-Like Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics; Vol. 28, 1999, pp. 1309-1326.
- [5] Liao WI, Loh CH, Wan S; "Earthquake Responses of RC Moment Frames Subjected to Near-Fault Ground Motions", Structural Design of Tall Buildings; Vol. 10, 2001, pp. 219-229.
- [6] Bazzurro P, Luco N; "Damage Potential of Near-Source Ground Motion Records", Proceeding of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1302, San Francisco, CA, 2006.
- [7] Somerville PG, Smith N, Graves R, Abrahamson N; "Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity", Seismological Research Letters; Vol. 68, No. 1, 1997, pp. 180-203.
- [8] Somerville PG; "Magnitude Scaling of the Near-Fault Directivity Pulse", Physics of the Earth and Planetary Interiors; Vol. 137, 2003,

- of Elastic and Inelastic Single-Degree-of-Freedom (SDOF) Systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 33, 2004, pp. 1023–1049.
- [18] Xin-Le L, Xi, Z; “Study on Equivalent Velocity Pulse of Near-Fault Ground Motions”, *ACTA Seismologica Sinica*; Vol. 17, No. 6, 2004, pp. 697–706.
- [19] Elsheikh A, Ghobarah A; “Response of RC Structures to Near-Fault Records”, *Emirates Journal for Engineering Research*; Vol. 9, No. 2, 2004, pp. 45–51.
- [20] Mylonakis G, Voyagaki E; “Yielding Oscillator Subjected to Simple Pulse Waveforms: Numerical Analysis & Closed Form Solutions”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 35, 2006, pp. 1949–1974.
- [21] Mollaioli F, Bruno S, Decanini LD, Panza GF; “Characterization of the Dynamic Response of Structures to Damping Pulse-Type Near-Fault Ground Motions”, *Meccanica*; Vol. 41, 2006, pp. 23–46.
- [22] Tothong P, Cornell CA, Baker JW; “Explicit Directivity-Pulse Inclusion in Probabilistic Seismic Hazard Analysis”, *Earthquake Spectra*; Vol. 23, No. 4, 2007, pp. 867–891.
- [23] Tothong P, Cornell CA; “Structural Performance Assessment under Near-Source Pulse-Like Ground Motions Using Advanced Ground Motion Intensity Measure”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 37, 2008, pp. 1013–1037.
- [24] Ghahari SF, Jahankhah H, Ghannad MA; “Study on Elastic Response of Structures to Near-Fault Ground Motions through Record Decomposition”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; Vol. 30, No. 7, 2010, pp. 536–546.
- [25] Ghobarah A; “Response of Structures to Near-fault Ground Motion”, *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1031, Vancouver, Canada, 2004.
- [26] Perelman DS, Parmelee RA, Lee SL; “Seismic Response of Single-Storey Interaction System”, pp. 201–212.
- [9] Bray J, Rodriguez-Marek A; “Characterization of Forward-Directivity Ground Motions in the Near-Fault Region”, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*; Vol. 24, 2004, pp. 815–828.
- [10] Alavi B, Krawinkler H; “Development of Improved Design Procedures for Near-Fault Ground Motions”, *Proceeding of the SMIP98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data*, Oakland, CA, 1998.
- [11] Alavi B, Krawinkler H; “Effects of Near-Fault Ground Motions on Frame Structures”, Report No.138, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 2001; 301.
- [12] Agrawal AK, He WL; “Closed-Form Approximations of Near-Fault Ground Motions for Design of Protective Systems”, *Proceeding of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Columbia University, NY, 2002.
- [13] Menun C, Fu Q; “An Analytical Model for Near-Fault Ground Motions and the Response of SDOF Systems”, *Proceeding of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, MA, 2002.
- [14] Makris N; “Rigidity-Plasticity-Viscosity: Can Electrorheological Dampers Protect Base-Isolated Structures from Near-Source Ground Motions”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 26, 1997, pp. 571–591.
- [15] Makris N, Black C; “Dimensional Analysis of Inelastic Structures Subjected to Near-Fault Ground Motions”, Report No.05, Earthquake Engineering Research Center (EERC), University of California, Berkeley, CA, 2003; 96.
- [16] Mavroeidis GP, Papageorgiou AS; “A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions”, *Bulletin of the Seismological Society of America*; Vol. 93, No. 3, 2003, pp.1099–1131.
- [17] Mavroeidis GP, Dong G, Papageorgiou AS; “Near-Fault Ground Motions and the Response

- [35] Chow N; "Influence of Soil-Structure Interaction on Pounding Response of Adjacent Buildings Due to Near-Source Earthquake", *Journal of Applied Mechanics*; Vol. 5, 2002, pp. 543-553.
- [36] Hashimoto K, Chow N; "Influence of Three-Dimensional Soil-Structure Interaction on Structural responses Induced by Near-Source Earthquakes", *Proceeding of Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 104, Christchurch, New Zealand, 2003.
- [37] Zhang J, Tang Y; "Dimensional Analysis of Linear Soil-Foundation-Structure System Subjected to Near-Fault Ground Motions", *Proceeding of the 18th Analysis and Computation Specialty Conference*, Vancouver, Canada, 2008.
- [38] Meek W, Wolf JP; "Why Cone Models Can Represent the Elastic Half-space", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 22, 1993, pp. 759-771.
- [39] Wolf JP; "Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models", Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1994.
- [40] Ghannad MA, Fukuwa N, Nishizaka R; "A Study on the Frequency and Damping of Soil-Structure Systems Using a Simplified Model", *Journal of Structural Engineering (Architectural Institute of Japan (AIJ))*; Vol. 44, No. B, 1998, pp. 85-93.
- Journal of the Structural Division (ASCE); Vol. 94, No. ST11, 1968, pp. 2597-2608.
- [27] Sarrazin MA, Roesset JM, Whittman RV; "Dynamic Soil-Structure Interaction", *Journal of the Structural Division (ASCE)*; Vol. 98, No. ST7, 1972, pp. 1525-1544.
- [28] Jennings PC, Bielak J; "Dynamics of Buildings-Soil Interaction", *Bulletin of Seismological Society of America*; Vol. 63, No. 1, 1973, pp. 9-48.
- [29] Chopra AK, Gutierrez JA; "Earthquake Response Analysis of Multistorey Buildings Including Foundation Interaction", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 3, No. 1, 1974, pp. 65-77.
- [30] Veletsos AS, Meek JW; "Dynamic Behavior of Building-Foundation System", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 3, No. 2, 1974, pp. 121-138.
- [31] Veletsos AS, Nair VVD; "Seismic Interaction of Structures on Hysteretic Foundations", *Journal of the Structural Division (ASCE)*; Vol. 101, No. 1, 1975, pp. 109-129.
- [32] Veletsos AS; "Dynamics of Structure-Foundation Systems", *Structural and Geotechnical Mechanics*, Hall WJ (ed.), A Volume Honoring N.M. Newmark. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ; 1977, pp. 333-361.
- [33] Applied Technology Council; "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings", ATC3-06, California, 1978.
- [34] Stewart JP, Comartin C, Moehle JP; "Implementation of Soil Structure Interaction Model in Performance Based Design Procedures", *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1546, Vancouver, B.C., Canada, 2004.

«Research Note»

Response of Soil-Structure Systems Subjected to Forward Rupture Directivity Pulses

Z. Azarhoosh¹, G. R. Ghodrati Amiri^{2*}, H.R. Razeghi³

1- M.Sc., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

2- Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

2- Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

Ghodrati@iust.ac.ir

Abstract:

The combined effects of two major contributing factors, i.e. inertial soil-structure interaction (SSI) and near-fault ground motions, on structural responses were studied. Considering near-fault characteristics, soil-structure systems are subjected to both actual near-fault ground motion records and their dominant kinematic characteristics, i.e. forward rupture-directivity pulses, coherently travelling waves seen as a large amplitude and short duration pulse-type motion at the beginning of each fault-normal component of the record. As a result of the suitability of forward rupture-directivity pulses for quantifying the salient response features of structures, a mathematical model, proposed by Makris, was used to represent the forward rupture-directivity pulse-type motions. Using a comprehensive parametric study, the structure, a bilinear single degree of freedom (SDOF) system, the soil beneath the structure and a homogeneous elastic half-space were combined based on a discrete model to constitute the overall soil-structure model. The results have been presented in the form of elastic strength demand graphs for a wide range of non-dimensional key parameters, which describe the SSI effects. Both the soil-structure systems and the corresponding fixed-base structures were considered and compared. Using numerical time-stepping analyses, it was found that the response of soil-structure systems subjected to actual near-fault records is similar to those subjected to forward rupture-directivity pulses. Consequently, the forward rupture-directivity pulses can be used to predict the salient response features of soil-structure systems in seismically active regions. They can also be a realistic representation of near-fault ground motions for predicting the response of long-period structures. It was further observed that quite interestingly, the response of soil-structure systems subjected to actual near-fault records, has two maximum regions. However, it was recognized that further study would be required to clarify these regions. The results also indicated that considering SSI is critical for a variety of structures. Accordingly, underestimated near-fault responses could be obtained when the SSI effects are ignored.

Keywords: Soil-Structure interaction, Near-Fault ground motions, Forward rupture-directivity pulses, Elastic response of structures