An Investigation on the Effect of Shear Wave Field of Motion on Seismic Demands of Underground Structures: The Case of 2D Rectangular-Cross-Section Structures

Hossein Jahankhah
Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center
h.jahankhah@iiees.ac.ir

Seyyed Javad Fattahy

With an overview of conventional methods for seismic analysis of underground structures, one could distinguish four main approaches, including equivalent static analysis, close formed solutions, analysis under statically imposed deformation, and time history analysis. Among these methods, the first three cannot reflect the differences in seismic behaviors under various excitation frequencies. On the other hand, the results from the fourth method, because of notable required analysis time and also difficulties in drawing general conclusions, are usually restricted to specific cases and certain ground motions. Therefore, at the time, concluding remarks on the dynamic behavior of underground structures are scarce, even in the linear domain. In addition to the above restrictions, several inspiring articles on this field are based on some assumptions that narrow their applicability domain. Two of these articles are the ones published by Wang (1993) and Penzien (2000). The central assumption in these documents is that, under shear wave field of motion, the transverse section of the structures can be analyzed assuming that the surrounding domain has uniform free field shear deformations at far boundaries. This assumption is valid provided that the structure dimensions become too smaller than the wavelength.

Additionally, they suggested that maximum shear deformation of the free field should be imposed on the soil domain boundaries, including the structure. It means that the structure is placed in the node point of the wavelength of the stress field where the shear deformation is maximum. As the structure dimensions enlarge, the assumption of shear wave field uniformity may lose its validity, not always on the conservative side. The reported differences between linear dynamic analysis and linear static analysis can be followed within various axes. The other point is that wave fields usually pass through subsurface structures with incident angles other than zero. This takes place as a result of various geological reasons like underground topography, subsurface natural inclusions, basin effect, inclined layering, etc. However, classic approaches to seismic design of

بررسی دوبعدی توابع انتقال دینامیکی جهت تبدیل مستقیم حرکت میدان آزاد برشی به کرنشهای درونی سازه‌های زیرزمینی مستطیلی

حسین جهانخواه
دانشیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک h.jahankhah@iiees.ac.ir

سیدجواد فتاحی

با نگاهی به روش‌های متداول در طراحی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی می‌توان رویکردهای موجود را در چهار دسته شامل استاتیکی معادل، حل‌های بسته، تحلیل تحت تغییرشکل‌های استاتیکی و تحلیل تاریخچه زمانی، تقسیم‌بندی نمود. در میان این رویکردها، سه روش نخست امکان تمایز میان تحریک با فرکانس‌های مختلف را ندارند. از طرفی، تحلیل چهارم نیز بدلیل زمان زیاد مورد نیاز برای آنالیز و دشواری در تفسیر نتایج، عموما محدود به موارد خاص و تحریک‌های مشخص بوده است. از این رو، در حال حاضر جمع‌بندی‌های جامعی در رابطه با رفتار دینامیکی سازه‌های زیرزمینی، حتی در حوزه رفتار خطی، وجود ندارد. علاوه بر موارد فوق، برخی تحقیقات پایه در زمینه سازه‌های زیرزمینی، بر مبنای فرضیاتی بنا شده‌اند که دامنه اعتبار ضوابط طراحی را محدود می‌نماید. دو مورد از این تحقیقات مربوط به ونگ (۱۹۹۳) و پنزین (۲۰۰۰) می‌باشد. فرض اصلی این مقالات آن است که تحت میدان موج برشی مربوط به میدان آزاد، محیط اطراف سازه در مرزهای دور را می‌توان به صورت میدان موج برشی یکنواخت بارگذاری نمود. این فرض زمانی صحیح است که ابعاد سازه نسبت به طول موج مهاجم بسیار کوچک باشد. دیگر آنکه تحقیقات مذکور پیشنهاد نموده‌اند که بیشنه کرنش میدان آزاد در مرزهای دور باید اعمال شود. این فرض نیز زمانی صحیح است که سازه در گره میدان موج واقع شده باشد. در حالتی که ابعاد سازه افزایش یابد، فرض یکنواختی و بیشینه بودن میدان مهاجم لازم است تغییر کند که این تغییر لزوماً همیشه در جهت کاهش پاسخ‌ها نخواهد بود. تفاوت میان تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی خطی تاکنون در تحقیق‌های متعددی مورد اشاره قرار گرفته است. نکته دیگر آن است که میدان‌های موج معمولاً از ساختارهای زیرسطحی عبور می‌کنند و این باعث می‌شود زاویه مواجه آنها با سطح زمین و به تبع آن سازه‌های زیرزمینی متغیر باشد. لیکن رویکردهای متداول در طرح لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی این نکته را در نظر نمی‌گیرند. همچنین انعکاس این تفاوت اگرچه در تحقیقات گذشته وجود داشته است، اما عموماً محدود به تحلیل‌های موردی بوده و در روابط عمومی وارد نشده است. با توجه به محدودیت‌های اشاره شده، در این تحقیق در نظر است به چند سؤال، که تاکنون در ادبیات فنی با پاسخ جامعی مواجه نشده‌اند، پاسخ‌های قابل اتکایی داده شود. نخست آنکه تا چه سطحی روابط متداول طرح لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی قادر به پیش‌بینی بیشنه نیازهای لرزه‌ای می‌باشند؟ سؤال بعد آن است که آیا روش‌های موجود قادر به پیش‌بینی توزیع صحیح نیازهای لرزه‌ای در مقاطع مختلف سازه‌ای می‌باشند؟ دیگر آنکه تغییر زاویه مواجهه با میدان موج چه میزان بر تغییر نیازهای لرزه‌ای اثرگذار است و آیا در این میان تفاوتی میان لنگر، برش و نیروی محوری وجود دارد؟ در نهایت

آیا امکان ارائه روابطی ساده جهت تخمین مناسب نیازهای لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی با احتساب پدیده‌های پیش‌گفته وجود دارد؟ جهت پاسخ‌گویی به پرسش‌های فوق مجموعه‌ای از تحلیل‌های خطی در این تحقیق انجام پذیرفته است. در این راستا کرنش‌های تحمیل شده به سازه‌های زیرزمینی مستطیلی شکل تحت عبور میدان‌های موج برشی با زوایای تابش مختلف به عنوان نیازهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. محیط مورد بررسی به صورت همگن، ایزوتروپ و دو بعدی در نظر گرفته شده است. نتایج در فصل‌های ۴، ۵ و ۶ گزارش ارائه شده است. در فصل ۴، کرنش‌های ایجاد شده در سازه در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا، در گام نخست کرنش‌ها برای المان‌های فوقانی، تحتانی و کناری سازه و برای نسبت‌های انعطاف‌پذیری مختلف، نسبت‌های ابعادی مختلف و زوایای مواجهه متفاوت گزارش شده‌اند. در گام دوم، زاویه مواجهه حاکم در هر مورد مبنا قرار گرفته و سایر زوایا حذف شده‌اند. در گام سوم، فرکانس حاکم از میان همه فرکانس‌ها اخذ شده و سایر فرکانس‌های کنار گذاشته شده‌اند. با توجه به این نتایج خلاصه شده، روابطی جهت محاسبه کران بالای کرنش‌های اعمال شده به سازه‌های زیرزمینی بدست آمده است. در فصل ۵، روابطی ساده در قالب توابع تبدیل جهت محاسبه تاریخچه کرنش اعمال شده در مقاطع مختلف سازه ارائه شده است. در فصل ۶، یک مثال واقعی از یک ایستگاه مترو با احتساب نزدیکی به سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته و تاریخچه‌های کرنش در مقاطع مختلف آن ارائه شده است. لازم به ذکر است، اگرچه فرض خطی بودن سیستم خاک ـ سازه محدودیت‌هایی برای اعتبار نتایج ایجاد می‌کند، لیکن به دو دلیل هدف اصلی این طرح که برآورد دست بالای نیازهای لرزه‌ای است را تحت‌الشعاع قرار نخواهد داد. نخست آنکه رفتار غیرخطی خاک باعث کاهش نیاز لرزه‌ای در سازه‌های زیرزمینی عمیق که دارای نسبت انعطاف‌پذیری بالایی هستند، می‌شود. دیگر آنکه بررسی نیازها در حوزه خطی موجب می‌شود امکان مطالعه اثر فرکانس‌های مختلف تحریک بر پاسخ به صورت جداگانه انجام پذیرفته و فرکانس بحرانی انتخاب شود. در حقیقت واردسازی وابستگی به فرکانس نیازهای لرزه‌ای در روابط ساده طراحی، نوآوری اصلی طرح حاضر است.

واژه‌های کلیدی: کرنش‌های نیاز لرزه‌ای، سازه‌های زیرزمینی، مقطع مستطیلی، میدان موج برشی، زاویه تابش

embedded structures do not consider this fact explicitly. Besides, the trace of this issue in the literature of seismic demand estimation is commonly restricted to specific cases, while no general easy-to-use solution has been presented yet. Regarding previously mentioned statements on limited validity of the common method, several questions are aimed to be answered in this research which has not been responded, in an integrated and dimensionless framework, yet. A major question that would be raised is, “To what extent, can the common method for underground rectangular spaces, can predict accurately maximum seismic responses?”. The other question is that “Is the current common method capable of predicting the sections at which maximum demands occur?”, or more generally, “Is it suitable for predicting rational spatial distribution for seismic demands throughout the structure?”. The next question is that “How different incident angles of the wave field would affect the distribution of demands and related maximums?”. In this case, “Is there any difference between, flexural, axial and shear demands?”. The last question is that “Is it possible to reach rational approximations on dynamic strains that take place in an underground structure, under the passage of a shear wave field of motion through easy-to-use equations?”. In order to provide proper responses, a set of linear parametric analysis are conducted here. In this regard, dynamic strain demands imposed on beneath ground structures, under the complete passage of a shear wave field of motion, are investigated. The domain is considered as a homogeneous, isotropic and linear 2D medium. The results are presented in chapters 4, 5 and 6. In chapter 4, the normalized dynamic strains are reviewed, as system responses, in the frequency domain. In the first step, the results are reported for each of the tops, down and side edge elements of the structure including various structural aspect ratios, flexibility ratios, and wavefield incident angles. In the second step, the governing incident angle of the wavefield, which brings about maximum demand at each section on of the structural elements, is studied. In the third and final step, peak dynamic strains under all incident angles and different frequencies of excitation are summarized. Based on these latter compact results, simple accurate equations are presented which guide to novel upper bound levels of dynamic strain demands in a linear analysis. In chapter 5, simple equations for transfer functions are presented that can provide strain histories in time domain at specific points throughout the structure. In chapter 6, a real case metro station is modeled including proximity to surface and its related strain histories in specific points on the structure. It should be noted that, although

system linearity put restrictions on the results, but for two reasons, it would not prevent reaching the target goals of this research. First, soil nonlinearity usually works in the conservative side in deep underground structures having large flexibility ratios, i.e. reduces the structural seismic demands. This happens as the governing seismic loads for such cases originate from kinematic soil-structure interaction rather than inertial one. Therefore, dealing with linear systems would still provide upper bound results when the surrounding medium is somehow stiffer than the structure. Second, using linear analysis makes it possible to study the effect of each frequency of excitation on the demands separately in a non-dimensional format without losing results generality. Inserting the frequency dependency of the strain demands into simple predicting equations would be the major contribution of this research that has not been covered comprehensively yet.

Keywords: Seismic strain demands, Underground structures, Rectangular section, Shear wave field, Incident angle