



شناسائی خصوصیات پروفیل خاک با استفاده از معکوس تابع تبدیل

حسین صادقی، غلامرضا لشکری پور، محمد غفوری، زینب سویزی*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این تحقیق، یک روش عددی، تحلیلی برای شناسائی خصوصیات پروفیل خاک با استفاده از معکوس تابع تبدیل بیان شده است. ابتدا تابع تبدیل برای سایت بر حسب پارامترهای متفاوت لایه های تشکیل دهنده خاک شامل ضخامت، نسبت میرائی، سرعت موج برشی و وزن مخصوص تعریف می شود. سپس این تابع با توجه به تابع محاسبه شده با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی موجود برای هر گمانه با استفاده از روش کم کردن حداقل مربعات (Least squares minimization) هموار می شود. پارامترها با حل عددی مسأله غیر خطی، شناسائی می شوند.

Identification of soil profile characteristics using inversion of transfer function

Abstract

In this paper, an analytical and numerical approach for identifying soil profile characteristics by using inverse of transfer function, is presented. First a theoretical soil amplification function for site is defined and expressed in terms of the different parameters of the layers constituting the soil profile including, thickness, damping ratio, shear wave velocity and unit weight. Then, this function is smoothed with an analogous function calculated by existing geotechnical data by using the least squares minimization technique. The identification of the parameters is performed by solving, numerically, a nonlinear optimization problem.

مقدمه

اثر ساختگاه یکی از عوامل مهم کنترل کننده میزان تخریب در اثر زلزله های بزرگ می باشد. تقویت حرکت زمین در فرکانس های ۱ تا ۱۰ Hz به شدت تحت تأثیر شرایط سطحی محل شامل زمین شناسی و توپوگرافی نامنظم سطح قرار می گیرد. در زمان حرکت موج به سمت سطح زمین در حین عبور از لایه های خاک محتوای فرکانسی و دامنه حرکت زمین به طور گسترده ای تغییر می کند. وزن مخصوص، سختی، ضخامت، میرائی و دیگر خواص فیزیکی لایه های خاک عوامل اساسی هستند که خصوصیات موجهای لرزه ای را تحت تأثیر قرار می دهند. مطالعات زیادی در ارتباط با نقش زمین شناسی سطحی در حرکات لرزه ای صورت گرفته است (۱-۳).

از آنجا که ساختمانها بر سایتها متنوع از لحاظ زمین شناسی واقع می شوند ارزیابی پاسخ سایت در مناطق مستعد زلزله امری مهم به نظر می رسد که معمولاً به صورت تجربی یا تئوری مورد بررسی قرار می گیرد.

در روشهای تئوری، با استفاده از روشهای ژئوتکنیکی یا لرزه ای شامل انکساری و یا انعکاسی، خصوصیات فیزیکی و دینامیکی لایه های خاکی و سنگی منطقه مشخص می شود و سپس با استفاده از



آنها پاسخ سایت مشخص می شود. در حالیکه روشهای تجربی مبتنی بر رکوردهای زلزله است که در ساختگاههای با شرایط متفاوت زمین شناسی ثبت شده اند (۴-۶).

کاهش ریسک زمین لرزه در مناطق با نرخ لرزه خیزی بالا نیازمند مطالعات مفصل ریز پهنه بندی است که در آنها از پارامترهای مکانیکی لایه های خاک استفاده می شود که به طور معمول به روشهای آزمایشگاهی یا آزمایشات در محل به دست می آیند (۷-۸). به ویژه تحلیل داده های حاصل از گمانه های لرزه ای (down hole seismic array) اطلاعاتی از رفتار واقعی ساختگاه در یک رنج وسیعی از شرایط بارگذاری را فراهم می کنند (۹).

از آنجا که اختلاف فاحشی بین نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات در محل وجود دارد (۶) از طرف دیگر هزینه بالای این آزمایشات و تجهیزات گرانی که نیاز دارند هدف از این تحقیق ارائه روش عددی برای شناسائی پارامترهای دینامیکی پروفیل خاک با استفاده از معکوس تابع پاسخ سایت است. استفاده از پاسخ ساختگاه در طی یک زلزله، روش مفیدی برای تخمین خصوصیات پروفیل خاک است (۱۰-۱۴).

در این بررسی تابع تبدیل به صورت تئوری بر حسب پارامترهای متفاوت لایه های تشکیل دهنده پروفیل خاک شامل ضخامت، سرعت موج برشی، وزن مخصوص و ضریب میرایی بیان می شود سپس با استفاده از روش کاهش حداقل مربعات (Least squares minimization) اختلاف بین این تابع و تابع محاسبه شده با استفاده از اطالات ژئوتکنیکی موجود به حداقل می رسد و مقادیر پارامترها با حل عددی مسأله غیر خطی اصلاح می شود.

مبانی ریاضی تابع تبدیل

با وجود این که امواج زلزله از میان دهها کیلومتر سنگ و غالباً کمتر از ۱۰۰ متر خاک عبور می نمایند لایه خاک نقش مهمی در تعیین خصوصیات حرکت سطح زمین ایفا می کند. طی سالها روشهای یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی زیادی برای تعیین پاسخ توده خاک در برابر حرکت بستر سنگی زیر آن تدوین شده است. تحلیل یک بعدی پاسخ زمین بر پایه فرضیاتی چون افقی بودن مرز لایه ها و اینکه پاسخ یک توده خاک عمدتاً در اثر امواج SH که از بستر سنگی به صورت عمودی منتشر می شوند، استوار است. برای تحلیل یک بعدی زمین فرض می شود که سطح خاک و بستر سنگی در جهت افقی تا بی نهایت ادامه دارند. پاسخ زمین ناشی از روشهای مبتنی بر این فرضیه، تطابق منطقی با پاسخ اندازه گیری شده در حالات مختلف دارد. روشهای یک بعدی بر پایه توابع تبدیل بنا شده است. توابع تبدیل چگونگی تشدید یا میرایی هر فرکانس در حرکت بستر سنگی را به وسیله توده خاک تعیین می نماید.

هنگامی که یک گسل در زیر سطح زمین گسیخته می شود امواج حجمی از منبع به تمام جهات منتشر می شوند هنگامی که این امواج به مرز بین مصالح مختلف زمین شناسی می رسند بخشی منعکس و بخشی منکسر می شوند. معادله حرکت حاکم بر انتشار قائم امواج برشی از بستر سنگی تا سطح زمین در هر لایه از پروفیل خاک را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{\partial^2 u_j(z_{j,t})}{\partial t^2} = \frac{Vs_j^2 \partial^2 u_j(z_{j,t})}{\partial z^2} \quad (1)$$

Vs_j : سرعت موج برشی در z -امین لایه پروفیل خاک

z_j : $(0 < z_j < h_j)$ عمق z -امین لایه پروفیل خاک، h_j : ضخامت z -امین لایه

که پاسخ این معادله را می توان به صورت زیر بیان نمود :

$$u_j(z_{j,t}) = A_j e^{i(\omega t + p_j z_j)} + A'_j e^{i(\omega t - p_j z_j)} \quad (2)$$

w : فرکانس دورانی لرزه زمین $P = w/v_s$: عدد موج

A و A' به ترتیب عبارتند از دامنه امواج برخوردی به فصل مشترک و موج منعکس شده در هر لایه با فرض ۱- تنش برشی صفر در سطح آزاد ۲- پیوستگی جابجائی (Displacement) و استرس برشی (Shear stress) در مرز بین دو لایه دامنه موج برخوردی و منعکس شده به صورت زیر حاصل می شود:

$$A_{j+1} = 1/2 A_j (1 + q_j) e^{i p_j h_j} + 1/2 A'_j (1 - q_j) e^{-i p_j h_j} \quad (3)$$

$$A'_{j+1} = 1/2 A_j (1 - q_j) e^{i p_j h_j} + 1/2 A'_j (1 + q_j) e^{-i p_j h_j} \quad (4)$$

$$q_j = \frac{\gamma_j V_j^* s_j}{\gamma_{j+1} V_{j+1}^* s_{j+1}} = \sqrt{\frac{\gamma_j G_j^*}{\gamma_{j+1} G_{j+1}^*}} \quad (5)$$

$$V_j^* s_j = Vs_j \sqrt{1 + 2\xi i} \quad , \quad G_j^* = G_j (1 + 2\xi i)$$

G = مدول برشی (۱۵)، ξ = ضریب میرائی، γ = وزن مخصوص

تابع تبدیل برای یک پروفیل N لایه به عنوان نسبت دامنه جابجائی در سطح پروفیل خاک به دامنه جابجائی در مرز بین خاک و بستر سنگی تعریف می شود:

$$T_{1,N+1}(\{\mathbf{m}\}, \omega) = \frac{2A_1}{A_{N+1} + A'_{N+1}} \quad (6)$$

A_1 = دامنه موج برخوردی در سطح زمین

A'_{N+1}, A_{N+1} = دامنه موج برخوردی و منعکس شده در بستر سنگی

\mathbf{M} = بردار پارامتر شامل سرعت موج برشی، ضریب میرائی، وزن مخصوص

روابط (۳) و (۴) را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\begin{bmatrix} A_j \\ A'_j \end{bmatrix} = (1/2)^{j-1} [M]_{j-1} [G] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} A_1 \quad (۷)$$

$$[G] = \prod_{k=j-2}^1 [M]_k \quad (۸)$$

$$[M]_k = \begin{pmatrix} (1+q_k) e^{i p_k h_k} & (1-q_k) e^{-i p_k h_k} \\ (1-q_k) e^{i p_k h_k} & (1+q_k) e^{-i p_k h_k} \end{pmatrix} \quad (۹)$$

از روابط (۶) و (۷) می توان نتیجه گرفت:

$$T_{1,N+1}(\{\mathbf{m}\}, \omega) = \frac{1}{(1/2)^N V(\{\mathbf{m}\}, \omega)} \quad (۱۰)$$

$$V(\{\mathbf{m}\}, \omega) = e^{i p_N h_N} (G_{11} + G_{12}) + e^{-i p_N h_N} (G_{21} + G_{22}) \quad (۱۱)$$

روش معکوس (occam inversion method) occam

در این مطالعه تخمین پارامترهای پروفیل خاک بر اساس روش کم کردن حداقل مربعات (Least squares minimization) انجام می شود.

پارامترهای مدل (\mathbf{m}) توسط تابع غیر خطی $T(\{\mathbf{m}\}, \omega)$ با مجموعه داده های مشاهده ای با تعداد N شامل $(d_1, \omega_1), (d_2, \omega_2), \dots, (d_n, \omega_n)$ ارتباط داده می شود:

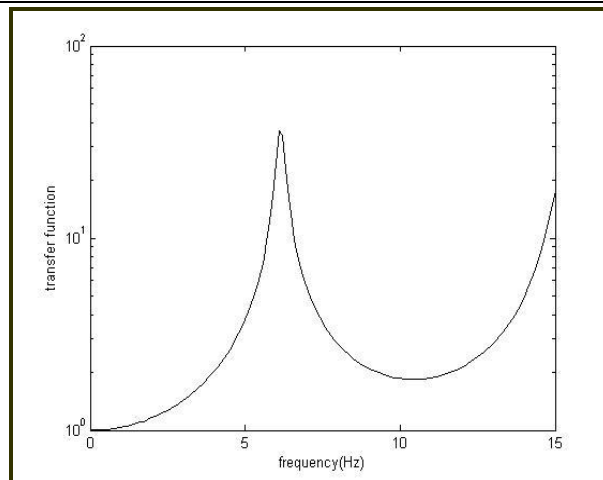
$$T(\{\mathbf{m}\}, \omega) = d$$

هدف یافتن مقادیر پارامترها است به طوریکه بهترین انطباق را با داده های مشاهده ای داشته باشند. تابعی که مینیمم می شود به صورت زیر تعریف می شود:

$$f(m) = \sum_{i=1}^N (T(\{m\}, \omega_i) - d_i)^2 \quad (۱۲)$$

در روش (damped least squares) تابع $f(\mathbf{m})$ به صورت زیر بیان می شود:

Depth (m)	Thickness (m)	Velocity (m/s)	Density (KN/m ³)	Damping Ratio	Soil type
2	2	250	17.6	0.022	SC
4	2	300	18	0.02	SM
8	4	380	18.5	0.019	SP
16	8	524	17.9	0.019	SM
24	8	716	18.7	0.019	SP
bedrock	—	805	20	0.019	SP



شکل ۱- تابع تبدیل پروفیل ۱

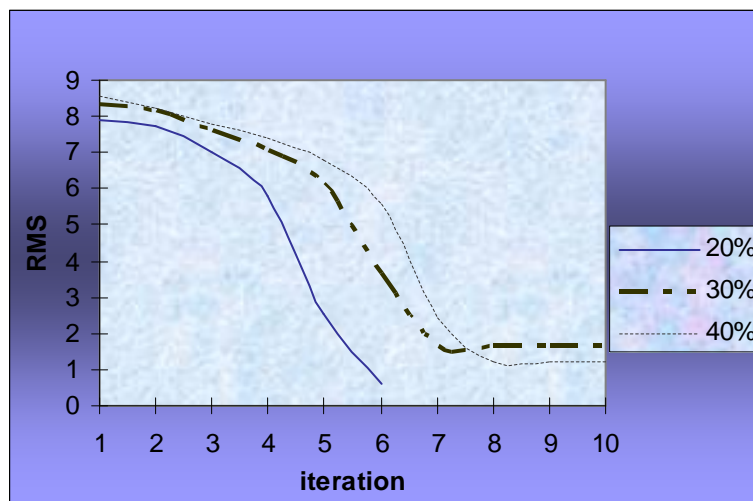
جدول شماره ۲- نتایج حاصل از روش معکوس با مدل اولیه 30% خطا-پروفیل ۱

Velocity (m/s)	Density (KN/m ³)	Damping Ratio
264	17.0	2.1E-02
317	17.2	1.9E-02
444	17.0	1.8E-02
531	17.6	2.0E-02
658	17.0	2.0E-02

جدول شماره ۳- نتایج حاصل از روش معکوس با مدل اولیه 40% خطا-پروفیل ۱

Velocity (m/s)	Density (KN/m ³)	Damping Ratio
270	17.0	2.16E-02
343	17.0	1.96E-02
452	17.0	1.89E-02
550	17.0	2.08E-02

625	17.8	2.08E-02
-----	------	----------



شکل ۲- روند کاهش میزان rms تابع تبدیل در طی تکرارهای متوالی مربوط به پروفیل ۱

نتیجه گیری

در این تحقیق، یک روش برای شناسایی خصوصیات پروفیل خاک با استفاده از معکوس تابع تبدیل بیان شده است. با فرض مدل یک بعدی، تابع تبدیل برای هر گمانه، بر حسب پارامترهای متفاوت لایه های تشکیل دهنده خاک شامل ضخامت، نسبت میرایی، سرعت موج برشی و وزن مخصوص تعریف می شود. سپس این تابع با توجه به تابع محاسبه شده با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی موجود برای هر گمانه با استفاده از روش کم کردن حداقل مربعات (Least squares minimization) در حوزه فرکانس، هموار می شود. پارامترها با حل عددی مسأله غیر خطی، شناسایی می شوند. این روش برای ۱۶ گمانه استفاده شد. میزان خطا برای سرعت: ۶۰٪، وزن مخصوص: ۷۶٪، نسبت میرایی: ۶۰٪ کاهش یافت.

منابع

- [1] Bonilla L, Jamison H, Grant T, Alexei G, Ralph J. Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of Site-Effect estimation using the S-Wave,Coda, H/V methods. Bulletin of



- Seismological Society of America 1997;87(3):710 -730
- [2] Nihal A, Aybige A, Haluk E. Site amplification of S-Waves in Bursa City and its vicinity, Northwestern Turkey: comparison of different approaches. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2002;22:579-587
- [3] Giuseppe G, Riccardo M, Giovanna C, Maria S, Paola V, Antonio R. Effect of local geology on ground motion in the city of Palermo, Italy, as inferred from aftershocks of the 6 september 2002 M_w 5.9 Earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America* 2005;95(6):2328 -2341.
- [4] Ojeda A, Escallon J. Comparison between different techniques for evaluation of predominant periods using strong ground motion records and microtremors in Pereira Colombia. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2000;20(1- 4):137-43
- [5] Moya A, Schmidt V, Segura C, Boschini I, Atakan K. Empirical evaluation of site effects in the metropolitan area of San Jose, Costa Rica. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2000;20(1-4):177-85
- [6] Dimitriu P, Theodulidis N, Hatzidimitriou P, Anastasiadis A. Sediment non-linearity and attenuation of seismic waves: a study of accelerograms from Lefkas, western Greece. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2001;21(1):63-73
- [7] Ozudogru K, Hartikainen J, Kolisoja P. Combined laboratory testing method to determine dynamic properties of geological material. *Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering*. Amsterdam: Balkema; 1998.
- [8] Vucetic M. Soil properties and seismic response. *Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering*. Amsterdam: Balkema; 1998.
- [9] Elgamal AW, Zeghal M, Tang HT, Stepp JC. Lotung downhole array. Evaluation of site dynamic properties. *J Geotech Eng* 1995;121(6):350-62
- [10] Ghayamghamian MR, Motosaka M. Identification of dynamic soil properties using vertical array recordings. *Proceedings of the 4th international conference on earthquake geotechnical eng* 2001.
- [11] Kurita T, Matsui K. Sensitivity analysis on measurement noise in the identification of soil properties from vertical array observation data. *Earthquake Eng Struct Dyn* 1998;26(9):951-65
- [12] Glaser SD. Estimation of system damping at the Lotung site by application of system identification. GCR 96-700, Gaithersburg: NIST, 1996.
- [13] Elgamal AW, Zeghal M, Parra E, Gunturi R, Tang HT, Stepp JC. Identification and modeling of earthquake ground response – I. Site amplification. *Soil Dyn and Earthquake Eng* 1996;15:499-522.
- [14] Harichane Z, Afra H, Elachachi S.M. An identification procedure of soil profile characteristics from two free field accelerometer records. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2005;25:431-38.
- [15] Wolf JP. *Dynamic soil –structure interaction*. New Jersey: Prentice-Hall; 1985.
- [16] Steven C, Robert L, Catherine G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth Models from electromagnetic sounding data. *Journal of Geophysics*, 1987;52 (3):289-300.

{۱۷} حافظی مقدس، ناصر، ۱۳۸۵، پروژه ریز پهنه بندی لرزه ای شهر مشهد، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت منطقه شمال شرق.

- [18] Vucetic M, Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1991;112(11):89-107.
- [19] Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu K, Moduli and damping factors for dynamic analyses of Cohesionless soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1991;117(1):1016-1032.
- [20] Seed H.B., Idriss I.M., Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (1970).