

تحلیل دینامیکی دو بعدی و مبتنی بر تاریخچه زمانی شتاب زلزله برای سد خاکی ماملو با استفاده از روش FDM

دکتر احمد رضا محبوبی اردکانی، استادیار دانشگاه صنعت آب و برق عباسپور، گروه مهندسی آب

دکتر عباس مهدویان، استادیار دانشگاه صنعت آب و برق عباسپور، گروه مهندسی آب

محمد حسن عبدی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه صنعت آب و برق عباسپور

چکیده:

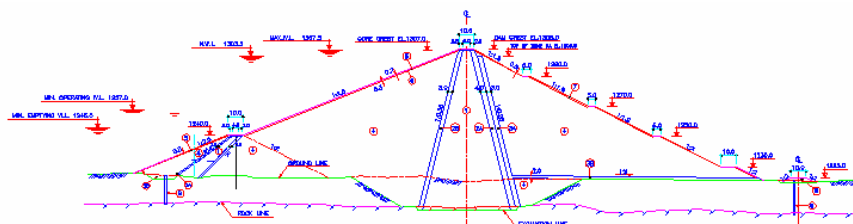
با توجه به وسعت کاربرد سدهای خاکی در مقایسه با دیگر انواع سدها در کشور لرزه خیز ایران، برآورد ایمنی لرزه‌ای اینگونه سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل و طراحی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای در مقابل زلزله، عموماً با دو روش شبه استاتیکی و دینامیکی انجام می‌گیرد. روش شبه استاتیکی هر چند که با کاربرد آسان و فرضیات ساده، ایمنی سد را ارائه می‌دهد، اما بعضاً می‌تواند به نتایج غیر ایمن و غیراقتصادی منجر شود. روش تحلیل دینامیکی عمدتاً بر اساس تحلیل تنش و تحلیل تغییر مکان استوار می‌باشد که معمولاً به کمک روش‌های عددی (اجزاء محدود یا تفاضل محدود) انجام می‌گیرد. تحقیق حاضر بر اساس مبانی روش آنالیز دینامیکی غیر خطی تلاش کرده است تا با لحاظ نمودن رفتار واقعی مصالح و شکل واقعی بارگذاری زلزله، درک مناسبتری از ایمنی سازه تحت زلزله‌های مختلف ارائه نماید. مدل رفتاری ساده الاستو پلاستیک مبتنی بر معیار موهر-کولمب برای بیان رابطه تنش - کرنش خاک و نیز میرایی ریلی برای افزایش سطح میرایی هیسترتیک و جبران کمبود میرایی هیسترتیک در تحلیل‌ها به کار گرفته شده‌اند. خروجی‌های تحلیل‌های دینامیکی شامل شتاب در تاج و وسط سد می‌باشد. تخمین ایمنی لرزه‌ای با استفاده از نمودار تغییرات کرنش برشی حداکثر و حداکثر تغییر مکان تاج انجام گردیده است.

کلید واژه: سد خاکی، برآورد ایمنی، آنالیز دینامیکی، غیر خطی، لرزه‌ای.

۱- مقدمه: امروزه با پیشرفت روز افزون و فراگیر شدن کامپیوتر، استفاده از روش‌های عددی در تحلیل و طراحی سدهای خاکی در مقابل زلزله بمراتب از گذشته بیشتر شده است. در مقابل، روش‌های دیگری چون روش شبه استاتیکی نیز که بر مبنای تحلیل‌های تعادل حدی قرار گرفته‌اند، هنوز به دلیل سادگی بطور گسترده‌ای مورد استفاده واقع می‌شوند، بخصوص اینکه نهایتاً یک ضریب ایمنی در مقابل گسیختگی برشی نیز ارائه می‌دهند. در کنار تمام مزایای این روش، در سدهای خاکی که احتمال افزایش فشار آب حفره‌ای در سد وجود دارد، روش شبه استاتیکی قادر به در نظر گرفتن این عامل در پایداری نمی‌باشد. خرابی سدهای سن فرناندو و شفلید که بر مبنای روش شبه استاتیکی طرح شده بودند نیز موید این مطلب است که این روش جهت طراحی کافی نمی‌باشد. تعدادی از محققین (مانند Russel, ۱۹۹۳ و Wilson, ۲۰۰۰ و ...) نشان دادند که می‌توان به کمک آنالیزهای دینامیکی با روش‌های اجزاء محدود یا تفاضل محدود پیش بینی بهتری از رفتار سد در حین زلزله ارائه داد که منجر به طراحی مناسب‌تر سازه می‌گردد. علاوه بر این، با کمک این آنالیزها می‌توان روند گسیختگی احتمالی سازه را در حین زلزله و به صورت کمی نشان داد. در حالیکه در روش شبه استاتیکی با استفاده از تحلیل‌های تعادل حدی، پایداری سازه تحت اثر حرکت تناوبی زلزله تنها با اعمال یک ضریب زلزله بررسی می‌شود و شناختی از چگونگی گسیختگی در طی زلزله ارائه نمی‌دهد. بنابراین استفاده از روش‌های عددی می‌تواند با توجه به مشاهده رفتار سد حین زلزله، ارائه طرح مناسبتری برای پایدار سازی را امکان پذیر نماید. در همین راستا تحقیق حاضر کوشیده است تا بر اساس نتایج آنالیزهای دینامیکی غیر خطی و استفاده از شاخص‌های ایمنی مناسب، برآوردی از ایمنی سد را بصورت کمی ارائه دهد. نرم افزار اصلی مورد استفاده FLACver4.0 می‌باشد که در حال حاضر بصورت گسترده‌ای در مسائل مکانیک خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- مشخصات مدل

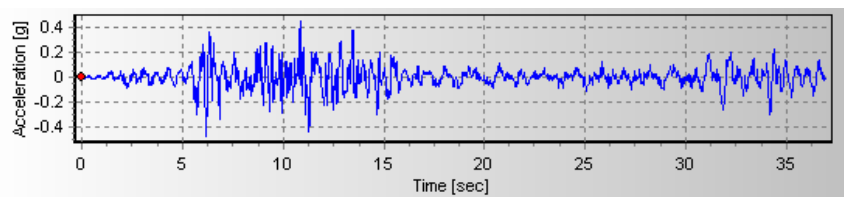
سد ماملو در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی تهران، تلاقی جاجرود و دماوند و مشرف به دشت حاصلخیز ورامین است. ارتفاع محل سد از سطح دریا ۱۱۰۰ متر می‌باشد. سد ماملو، سد خاکی با هسته رسی و با ارتفاع ۸۶ متر از بستر رودخانه و طول تاج نیز ۸۰۷ متر می‌باشد. ارتفاع نرمال آب در تراز حدود ۸۱/۵ متری سد می‌باشد و سد در بزرگترین مقطع دارای عرض ۲۰۰ متر می‌باشد. در شکل ۱ مقطع عرضی سد ماملو و در جدول ۱ نیز خصوصیات مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح آورده شده است. در شکل‌های ۲ و ۳ نیز پیشینه شتاب ورودی زلزله (مولفه طولی و عمودی) که حاصل از به مقیاس درآوردن شتابنگاشتهای زلزله منجیل است، نشان داده شده است ماکزیمم شتاب موجود در شتابنگاشت مولفه افقی برابر با $0.48g$ می‌باشد و در مولفه عمودی زلزله $0.36g$ می‌باشد. تصحیح **baseline** با استفاده از نرم افزار SeismoSignal انجام پذیرفت و پیشینه سرعت و تغییر مکان موج ورودی نیز با استفاده از همین نرم افزار استخراج گردید. در شکل ۳ نیز طیف فوریه برای شتابنگاشت مولفه طولی آمده است. تحلیل دینامیکی سد برای نگاشتهای ورودی مذکور، در طی ۳۷ ثانیه انجام پذیرفته است.

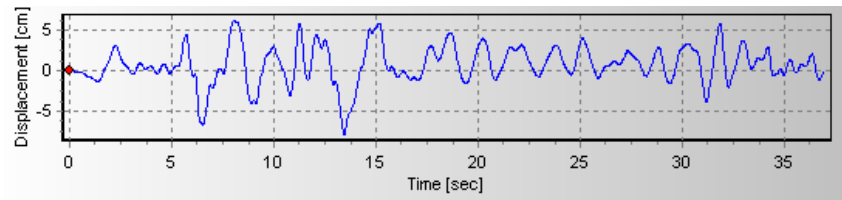


(شکل ۱) - مقطع عرضی سد ماملو

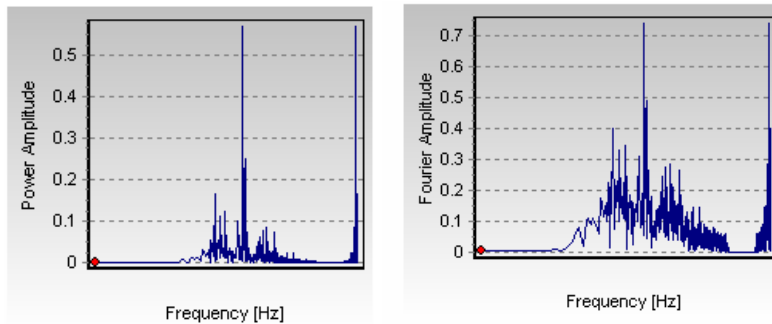
جدول (۱-۵) خصوصیات گروه های مختلف مصالح

مصلح	ویژگی	پوسته	پی	هسته	زهکش
وزن مخصوص مرطوب (kN/m^3)		۲۱/۵	۲۱/۵	۲۰/۵	۲۰
مدول الاستیسیته (MPa)		۱۰۰	۸۰	۷۵	۸۰
نسبت پواسون		۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۳
چسبندگی (kPa)		۰	۰	۲۰	۰
زاویه اصطکاک داخلی		۴۲	۳۶	۲۶	۳۶
زاویه اتساع		۰	۰	۰	۰
تخلخل		۰/۳	۰/۳۶	۰/۳	۰/۳۸

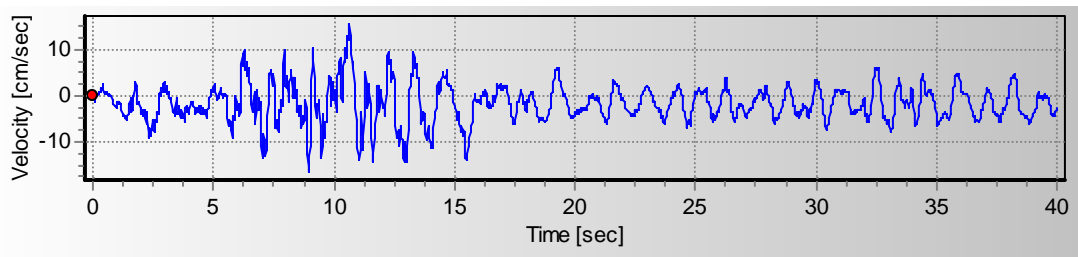
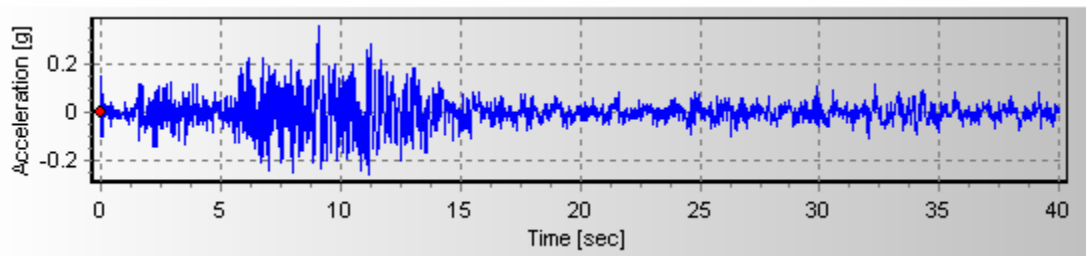




(شکل ۲) - سری های زمانی مربوط به مولفه طولی زلزله منجیل



(شکل ۳) - طیف توانی و طیف دامنه فوریه مربوط به مولفه طولی زلزله منجیل



(شکل ۴) - سری های زمانی مربوط به مولفه عمودی زلزله منجیل

۳- روش تحلیل:

بطور کلی انجام آنالیز را در ۳ گام می توان خلاصه نمود:

- ۱- برقراری حالت اولیه تنش در سد خاکی و پی آن پس از ساخت اولیه
 - ۲- برقراری حالت اولیه تنش وقتی که ارتفاع آب مخزن در بالاترین مقدار حالت بهره برداری است.
 - ۳- انجام آنالیز لرزه‌ای با فرض اینکه خاکهای موجود در مساله امکان روانگرایی ندارد.
- مدل رفتاری ساده الاستو پلاستیک مبتنی بر معیار موهر- کولمب برای بیان رابطه تنش - کرنش خاک و نیز میرایی رایلی برای افزایش سطح میرایی هیسترتیک و جبران کمبود میرایی هیسترتیک در تحلیل‌ها به کار گرفته شده‌اند. برای

تخصیص پارامترهای میرایی از نتایج آنالیز مودال که با استفاده از نرم افزار SAP 2000 انجام شده، استفاده شده است و f_{min} سد مذکور برابر با ۰/۹۸Hz بدست آمد. فاز محاسبات دینامیکی در حالت کرنش‌های بزرگ انجام می‌شود، چرا که ایجاد تغییر شکل‌ها و اعوجاج‌های زیاد، در مسایلی از این دست مورد انتظار است.

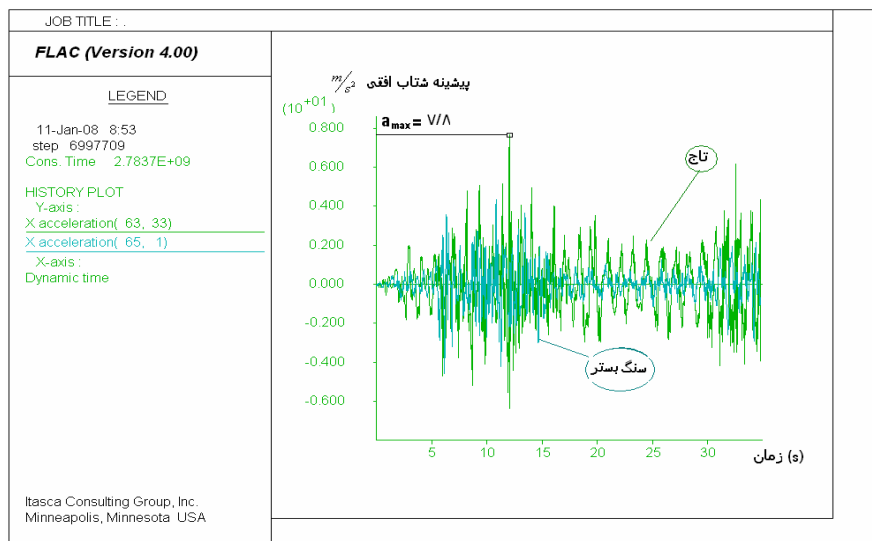
مدل‌سازی مسئله بروش لایه‌ای انجام گرفته است. بدین ترتیب که ابتدا در ۲ لایه حفاری مدل و آنالیز شده است و سپس کل بدنه سد در ۱۳ لایه در نظر گرفته شده و هر یک از لایه‌ها در یک مرحله جداگانه آنالیز شده است. به عبارت دیگر هر لایه روی لایه قبلی قرار داده شده و آنالیز مکانیکی جدیدی برای کل مسئله انجام شده است. پس از تکمیل آنالیز استاتیکی، فشار مکانیکی آب به مرزهای بالا دست مدل اعمال شده و آنالیز استاتیکی تکمیلی انجام می‌گیرد. نتایج این آنالیز متناظر با شرایط سد بلافاصله پس از آبیگری می باشد. بدلیل آنکه فرض شده است سد ماملو، زلزله مورد بحث را پس از رسیدن به حالت پایای تراوش تجربه کرده است، لذا لازم است شرایط استاتیکی موجود در سد پس از رسیدن به این حالت تعیین شود.

جهت جلوگیری از انعکاس امواج انتشار یافته در مدل که سبب بروز خطا در حل می‌شود، از مرز میدان آزاد (Free - Field) که بدین منظور در نرم افزار تعریف شده‌اند، بهره گرفته می‌شود. به عبارت دیگر استهلاک انرژی لازم جهت جلوگیری از بازتابش امواج در مدل هنگام برخورد به مرزها، بجای آنکه توسط میرایی مصالح تامین گردد، در مرزهای جاذب انرژی ایجاد می‌شود.

۴- نتایج آنالیز دینامیکی

۱- تاریخچه شتاب افقی تاج سد و مقایسه آن با تاریخچه شتاب بستر

شکل (۵) تاریخچه شتاب محاسبه شده در تاج سد و مقایسه آنرا با شتاب بستر نشان می‌دهد. شتاب حداکثر در تاج برابر ۰/۷۸g بدست آمده و بنابراین میزان بزرگنمایی شتاب در تاج سد برابر ۱/۶۲۵ محاسبه می‌گردد.

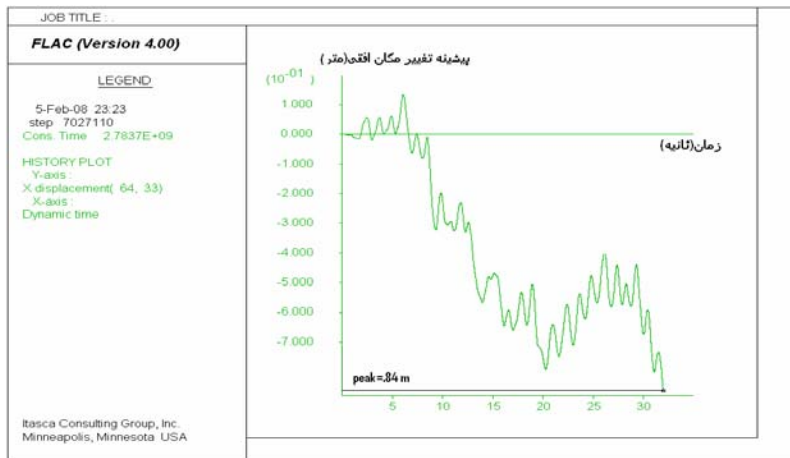


(شکل ۵)- مقایسه شتاب افقی در تاج و بستر(در حالت وقوع زلزله در هنگام تراوش پایدار)

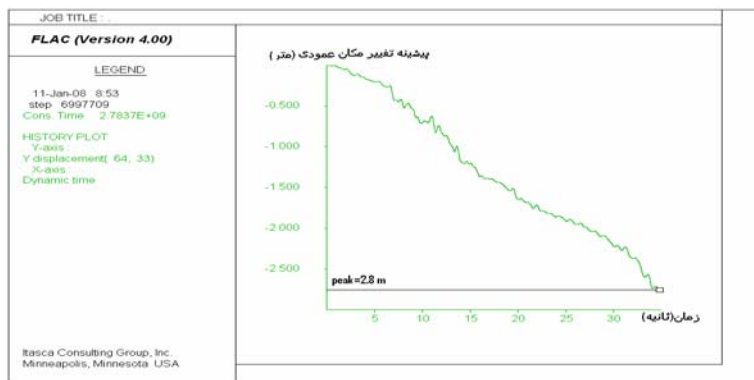
۲- تاریخچه جابجایی افقی تاج سد

با توجه شکل(۶) ملاحظه می‌شود میزان جابجایی افقی حداکثر ۰/۸۴ متر، و در جهت پایین دست سد می‌باشند. در شکل (۷) ، پیشینه تغییر مکان قائم در تاج سد ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که ماکزیمم تغییر مکان قائم تاج در

طول زلزله تقریبا ۲/۸ متر است که از ارتفاع آزاد سد (که برابر با ۵ متر است) کمتر می‌باشد. بنابراین این عامل گسیختگی سد (Overtopping) نیز کنترل گردید.



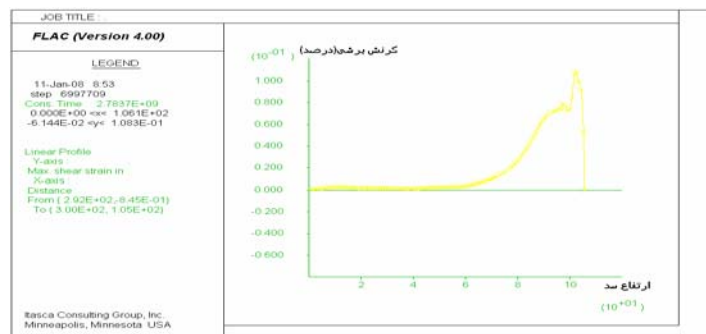
(شکل ۶) - تاریخچه جابجایی افقی در تاج سد



(شکل ۷) - پیشینه تغییر مکان قائم در تاج سد

۳- کنترل کرنش برشی در مقطع سد

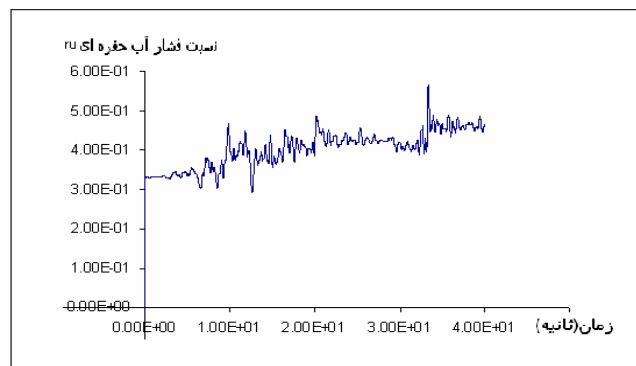
در شکل (۸) منحنی کرنش برشی در هسته و در ارتفاع سد، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع سد کرنش برشی افزایش پیدا می‌کند و ماکزیمم کرنش برشی برابر با ۱۱ درصد می‌باشد که در ارتفاع ۱۲ متری از تاج سد اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر به دلیل اینکه ماکزیمم کرنش برشی زیر ۱۵ درصد می‌باشد، لذا در هسته سد ترک عمودی اتفاق نمی‌افتد.



(شکل ۸) - منحنی ماکزیمم کرنش برشی در هسته و در ارتفاع سد (در پایان زلزله)

۴- کنترل نسبت فشار آب حفره‌ای (r_u)

در این قسمت برای کنترل عدم به وجود آمدن ترک هیدرولیکی (ترک عرضی در سد) که یکی از عوامل گسیختگی سد می‌باشد، نسبت فشار آب حفره‌ای در یک نقطه از سد (وسط سد) را کنترل می‌کنیم. شکل (۹)، تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای (r_u) نسبت به زمان را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که ماکزیمم نسبت فشار آب حفره‌ای برابر با ۰/۵۷ است. بنابراین این عامل گسیختگی در سد نیز کنترل گردید.



(شکل ۹) - منحنی تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای در هنگام زلزله

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به آنالیز دینامیکی انجام شده، رفتار دینامیکی سد بلحاظ کرنشها و شتاب و تغییر مکان پسماند دارای روند منطقی و قابل قبول می‌باشد. مقادیر حداکثر نشست سد کمتر از ارتفاع آزاد سد می‌باشد و حداکثر تغییر مکان افقی در حد ۱ متر است که با توجه به پهنای سد قابل قبول می‌باشد.

منابع و مأخذ

1. Ambraseys, N. N., "On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to an arbitrary disturbance," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 50. No. 1, pp. 45-56, 1960.
2. Das, B. M., "Principles of soil dynamics," Pws-Kent Publishing Co., Boston, 1993.
3. Finn, W. D. L., "Dynamic analysis in geotechnical engineering," Earthquake Engineering and soil Dynamics II: Recent Advances in Ground-motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20, ASCE, New York, pp. 523-591, 1988.
4. Gazetas, G., "Seismic response of earth dams: some recent developments," Journal of Soil Dynamic and Earthquake. Eng., Vol. 6, No. 1, pp. 2-47, 1987.

5. Idriss, I. M. & Seed, H. B., "An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 6, pp. 2013-2032, 1968.
6. Itasca Consulting Group, Inc, "Fast Lagrangian Analysis of Continua Ver. 4.0, User'S Guide," Minnesota, USA, 2001.