

Seismic Analysis of CFRD and ECRD Dams

S. Abedi^۱, F. Farhadi^{۲*}

تحلیل دینامیکی سدهای CFRD و ECRD

سبا عابدی^۱، فریدون فرهادی^{۲*}

Abstract

Earthquake is the most destructive natural disaster which may not take long more than some seconds and during this short period of time, there may be serious casualties. What happens then and its extend is directly relevant to the earthquake acceleration, its depth and power. During the current century, constructions of many dams are fulfilled and many others will be constructed maybe in the areas in which serious earthquakes are predicted. Since more than a million of people are living in the downstream of these dams, it is a vital issue that further attention be taken into account for the construction and monitoring of these Dams against earthquakes. For the evaluation of stability and reliability of Dams, it is needed that their seismic behavior be completely studied and all their weak point be cleared. It seems that the best solution for this regard is the monitoring of Dam's health. This process contains structure's monitoring or its mechanical systems during a special period of time by use of special monitoring sensors. This will provide us with important data which will be used in the future analyses. Prediction of a failure will be much easier and emergency action plans will be defined before the occurrence of a phenomenon. The main purpose of this article is to evaluate the seismic behavior of CFRD and ECRD dams by use of different methods such as Centrifuge test; accelerograph and laser sensors equipped with high speed cameras to monitor all movements (vertical and horizontal).

Keywords: CFRD, ECRD, Earthquake, Seismic Acceleration

Received: April ۲۱, ۲۰۲۴

Accepted: May ۳۰, ۲۰۲۴

چکیده

زلزله مخرب‌ترین پدیده طبیعی است که معمولاً بیش از چند ثانیه طول نمی‌کشد و در همین زمان اندک خرابی‌های زیادی را به بار می‌آورد؛ بروز این خرابی‌ها به قدرت، سرعت و ناگهانی بودن حرکات زمین بازمی‌گردد. طی قرون حاضر، سدهای زیادی ساخته شده و انتظار می‌رود که تعداد زیادتری نیز در مناطق زلزله‌خیز ساخته شود. سدها دیر یا زود در معرض زمین‌لرزه‌های مهمی قرار خواهند گرفت. از آنجا که میلیون‌ها نفر در پایین‌دست سدها زندگی می‌کنند الزم است توجه فزاینده‌ای به ارزیابی ایمنی و پایداری سدها در مقابل زلزله مبذول شود. بدین‌منظور نیاز است که رفتار لرزه‌ای آن‌ها به‌طور کامل مورد مطالعه قرار گیرد و تمام نقاط ضعف آن‌ها پاکسازی شود. به نظر می‌رسد بهترین راهکار پیرامون این موضوع، پایش سلامت سد می‌باشد. این فرایند شامل پایش یک سازه یا سیستم مکانیکی در طول زمان با استفاده از اندازه‌گیری‌های دوره‌ای منظم توسط سنسورهای خاص است. در این روش به دلیل اندازه‌گیری‌های پارامترهای مربوط به سد توسط سنسورها به‌طور منظم، تشخیص خرابی قسمت‌های مختلف سد قبل از ایجاد ترک و یا شکست آن قابل انجام است و می‌توان قبل از وقوع حادثه اقدامات لازم را انجام داد. در این صورت پیش‌بینی شکست بسیار آسان‌تر خواهد بود و برنامه‌های اقدام اضطراری قبل از وقوع یک پدیده تعریف می‌شود. هدف اصلی این مقاله ارزیابی رفتار لرزه‌ای سدهای CFRD و ECRD با استفاده روش‌های مختلف از جمله تست سانتریفیوژ، شتاب‌نگار و سنسور لیزر مجهز به دوربین‌های پرسرعت برای نظارت بر تمامی حرکات (عمودی و افقی) است.

کلمات کلیدی: زلزله، CFRD، ECRD، رفتار لرزه‌ای.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۲/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۳/۱۰

۱. MSc., Civil Engineering Department, University of Tehran, Iran.

۲. Director of Water and Civil Engineering Department Yekom Consulting Engineers Company, Iran.

Email: fereidoun.farhadi@yekom.com

* Corresponding Author

۱. سبا عابدی، کارشناسی‌ارشد سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه تهران.

۲. فریدون فرهادی، مدیر دپارتمان مهندسی آب و عمران، شرکت مهندسی مشاور یکم.

ایمیل: fereidoun.farhadi@yekom.com

* نویسنده مسئول

مقدمه

روبر منابع و پیشینه ی پژوهشی

زلزله مخرب ترین پدیده طبیعی است که معمولاً بیش از چند ثانیه طول نمی کشد و در همین زمان اندک خرابی های زیادی را به بار می آورد و بروز این خرابی ها نیز به قدرت، سرعت و ناگهانی بودن حرکات زمین باز میگردد. این حرکات اغلب ناشی از تغییرات زمین ساختی در حاشیه گسل ها بوده و لذا در مناطقی که شکستگیهای ساختاری مذکور توسعه بیشتری یافته اند، زلزله ها نیز تراکم بیشتری خواهند داشت.

از جمله شریان های حیاتی که تاثیر بسزایی در تولید آب و برق هر کشور دارند، سدها هستند و به همان میزان که تاثیر مثبت آنها برجسته و قابل توجه است، در صورت صدمه دیدن و شکسته شدن می توانند مخرب و فاجعه آمیز باشند. زلزله از جمله مهمترین عواملی است که می تواند چنین فاجعه ای را به بار آورد. طی قرون حاضر سدهای زیادی ساخته شده و انتظار می رود که تعداد زیادتری نیز در مناطق زلزله خیز ساخته شود و سدها دیر یا زود در معرض زمین لرزه های مهمی نیز قرار خواهند گرفت. از آنجا که میلیون ها نفر در دشت های سیلابی پایین دست این سدها زندگی می کنند لازم است توجه فزاینده ای به ایمنی آنها در مقابل زلزله مبذول شود. برای ارزیابی ایمنی و پایداری سدها نیز لازم است که رفتار لرزه ای آنها به طور کامل شناسایی شده و چگونگی عملکرد و نقاط ضعف آنها مورد بررسی و ارزیابی قرارگیرد.

بیشتر سد ها اگرنگوییم همه آنها، در نزدیکی و یا بر روی گسل ها ساخته شده اند و جنبش قوی زمین ناشی از زمین لرزه های نزدیک گسل، ممکن است آسیب های جدی بر این سدها وارد نماید. چنین آسیب هایی به طور معمول با تغییر در سختی سازه ای همراه می باشد. در نتیجه پیش بینی عملکرد واقعی سد با تحلیل غیر خطی امکان پذیر خواهد بود. علاوه بر این، روش های تحلیل متداول در مهندسی سازه از ورودی یکنواخت زمین لرزه برای تحلیل آن ها استفاده می کند. در صورتی که تغییرات قابل توجهی هم در دامنه وهم در محتویات فرکانسی زمین لرزه ها، در محل تماس شالوده با زمین پل های با دهانه بلند و سدهای بزرگ روی می دهد. تعیین مشخصات ارتعاشی، بررسی اثرات اندرکنش بر روی این مشخصات، و سرانجام ردیابی کردن رفتار غیر خطی سیستم سد-پی-مخزن با بکارگیری روش های تعیین هویت بر روی داده های پاسخ لرزه ای سد پاکویما توسط عبدالرحیم جلالی انجام گردید. میرایی های مودی، فرکانس های طبیعی و تابع پاسخ فرکانسی سیستم به دست آمد و این اطلاعات بدست آمده با فرکانس ها و میرایی های تعیین شده به وسیله ارتعاش اجباری و روش های تحلیلی مقایسه گردید. نتایج سازگاری مناسبی را با همدیگر نشان می دهند. این روش برای بدست آوردن مشخصات دینامیکی سد-پی-مخزن مفید می باشد، زیرا این مشخصات در ارزیابی ایمنی لرزه ای سازه های موجود بسیار حیاتی

تغییر شکل پلاستیکی باعث کاهش رشد سرعت دینامیکی مخصوصا در تاج سد می شود. این نتایج ناشی از اتلاف انرژی بوسیله پلاستیسیته شدن است و تاثیر آن در کاهش فرکانس اصلی سیستم می باشد [۴].

مطالعه ی موردی

هدف [۵]

تحقیق در مورد رفتار لرزه ای سدها بسیار حائز اهمیت است اما در این ارتباط با فقدان داده های برجا و آزمایشگاهی روبرو هستیم. ECRD ها (concrete-faced rock fill dams) شامل ناحیه سنگی نفوذپذیر و ناحیه هسته ی رسی با نفوذپذیری کم است، بدنه اصلی CFRD ها (earth-core rock fill dams) شامل مصالح سنگی با دال رویه ی بتنی روی شیب بالادست جهت ضدآب کردن است. چنین سدهایی با خصوصیات مصالح و زون های متفاوت بر روی پاسخ لرزه ای سد از جمله خصوصیات تقویتی، تغییر شکل سد و تنش های روی سطح بتن تاثیر می گذارند. بررسی رفتار لرزه ای سدها بر پایه ی آنالیزهای عددی و تئوری است. آزمایشهای فراوانی با کمک روش سانتریفیوژ (استفاده از میز لرزه) برای بررسی سد تحت شرایط لرزه ای انجام شده است. مدل سانتریفیوژ می تواند شرایط واقعی تنش در محل را ایجاد کند و این روش یک روش کارا برای بررسی رفتار سیستم ژئوتکنیک طی بارگذاری زلزله است. هدف این مقاله بررسی و ارزیابی رفتار لرزه ای دو نوع سد CFRD و

هستند [۱]. همچنین کاربرد روش ARX در مورد سدها در سال ۱۹۹۶ به وسیله چین شیانگ و تسو شیو گزارش گردید [۲]. هادیانی و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی سد خاکی مارون همانند بزرگنمایی شتاب، تغییر مکان ماندگار افقی در ارتفاع سد و نشست تاج سد در معرض شتابنگاشتهای مختلف حوزه نزدیک و حوزه دور پرداختند. بطور کلی نتایج حاصل از این آنالیزها نشان می دهد، سد مارون در برابر نگاشت های حوزه نزدیک دارای پاسخ بحرانی تری می باشد و ضریب اطمینان پایداری سد در برابر نگاشت های دارای پالس جهت پذیری پیشرونده پایین تر از نگاشت های حوزه دور می باشد. همچنین نشان داده شده است که پرپود پالس غالب و نسبت حداکثر سرعت به حداکثر شتاب، دو پارامتر بسیار مهمی می باشند که پاسخ سد حساسیت زیادی به آنها دارد [۳]. در یک مقاله یک مطالعه عددی از رفتار ارتعاشی سدهای خاکی ارائه شده است. آنالیز با استفاده از برنامه تفاضلات محدود FLAC^{3D} انجام شده است. همچنین یک آنالیز پارامتری برای تحقیق نقش مکانیکی هسته و پوسته و اثر آنها در بارهای دینامیکی صورت گرفته است. آن مربوط به پاسخ سد قبل از آگیری می شود. آنالیز عددی برای داده های واقعی زلزله انجام شده است. آنالیز الاستوپلاستیک نشان می دهد که بارهای ارتعاشی باعث غلبه پلاستیسیته بر قسمت زیادی از پوسته و پایین هسته می شود. تغییرات جابجائی در نصف ارتفاع سد یک افزایش شدید در دو انتهای سد را نشان می دهد که نشان دهنده ناپایداری در آن منطقه است. همچنین

در این رابطه پارامترهای E_p ، E_m ، T_p و N به ترتیب مدول الاستیسیته پروتوتایپ، مدول الاستیسیته مدل، ضخامت دال پروتوتایپ و مقیاس می‌باشند. بعد از مدل‌سازی سد و اطمینان از شرایط مصالح و بدنه سد، نوبت به اعمال شتاب به نمونه می‌رسد. با توجه به اینکه سد مورد نظر در کدام منطقه قرار گرفته می‌توان از رکورد زلزله‌ای استفاده کرد که شرایط زلزله‌های آن منطقه را برآورده کند. برای پیش رفتار لرزه‌ای سد، از مدل‌های مختلفی استفاده شده است که در شکل ۱ قابل مشاهده است. برای پیش تغییر شکل بدنه سد، نشست عمودی و جابه‌جایی افقی سطح سد اندازه‌گیری می‌شود. برای نشست عمودی، سنسورهای جابه‌جایی لیزری بر روی تاج سد نصب می‌شود تا نشست تاج سد اندازه‌گیری شود. برای جابه‌جایی افقی، دوربین سرعت بالا بر روی قاب بازوی سانتریفیوژ نصب می‌شود. این مکان بهترین جا برای دوربین است و دوربین می‌تواند از نمای فوقانی سد و جابه‌جایی‌های افقی سطح آن عکسبرداری کند. این دوربین‌ها قادر به عکسبرداری ۱۰۰۰ عکس در ثانیه هستند. تاریخچه جابه‌جایی افقی سطح سد با استفاده از این عکس‌ها قابل آنالیز است. ابتدا یک قسمت از عکس به‌عنوان هدف در نظر گرفته می‌شود و با کمک روش ارتباط دیجیتال این قسمت از عکس با عکس‌های بعدی مقایسه می‌شود. این فرایند به‌صورت اتوماتیک برای تمام عکس‌ها تکرار می‌شود. در نهایت جابه‌جایی سطح سد با ضرب حساسیت در فاکتور مقیاس به‌دست می‌آید که در آن پیکسل‌ها به میلی‌متر تبدیل می‌شوند. حساسیت با اندازه‌گیری فاصله بین هدف‌های مرجع

ECRD با استفاده از تست‌های سانتریفیوژ می‌باشد. با استفاده از شتاب نگار، سنسورهای لیزری و دوربین‌های با سرعت بالا می‌توان تغییرات ایجاد شده در سد را ثبت کرد و با کمک سنسورهای لیزری و دوربین‌های با سرعت بالا می‌توان نشست عمودی و جابه‌جایی افقی را ثبت کرد. بهتر است علاوه بر مدل‌سازی سد، شبیه‌سازی هم انجام شده و نتایج باهم مقایسه شوند. شبیه‌سازی سد با کمک نرم‌افزارهای مختلف قابل انجام است و برای واقعی‌تر کردن نتایج می‌توان از رکوردهای واقعی زلزله استفاده کرد.

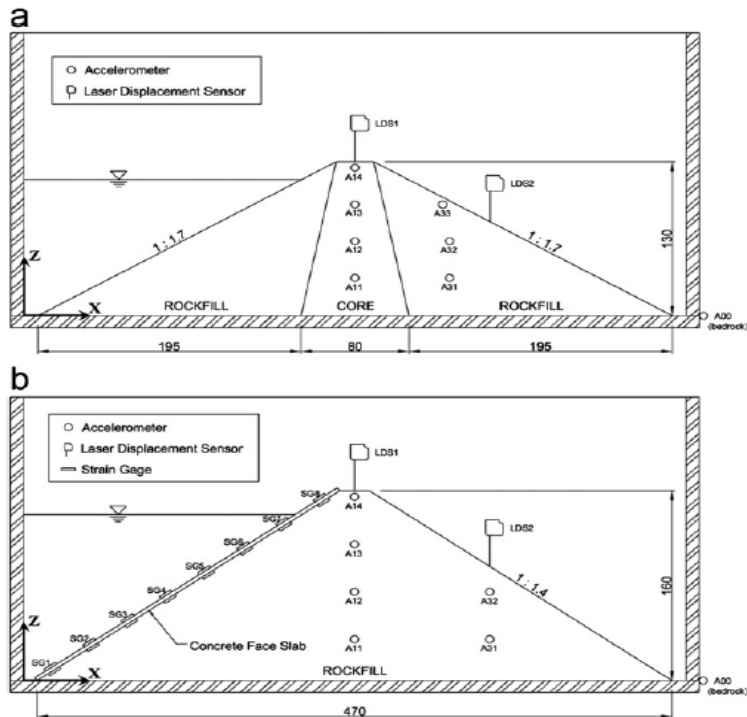
مواد و روش‌ها

مدل‌سازی سد به این صورت است که سد در مقیاس کوچک‌تر ساخته شده و به کمک یک میز لرزه شتاب در سد اعمال شود. هرچند نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی دقیق نیست اما می‌توان با ایجاد شرایطی، نتایج را به نتایج واقعی نزدیک کرد. به‌عنوان مثال برای ایجاد اصطکاک کامل بین کف سد و زمین می‌توان از کاغذ سنباده استفاده کرد و یا اینکه با کمک گریس از اصطکاک لغزشی دیواره‌های سد با طرفین کاست. برای اطمینان از اینکه مصالح به‌کار برده شده در پروتوتایپ شرایط واقعی را برآورده کند، این مصالح در آزمایشگاه تست می‌شوند. ضخامت مدل با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$tm = \sqrt{\frac{E_p T_p}{E_m N}} \quad Eq - 1$$

سد و در وسط شیب پایین دست سد قرار گرفته‌اند. در سد CFRD تعداد ۸ کرنش‌سنج در دو وجه‌نما، دال برای اندازه‌گیری ممان‌های خمشی و نیروهای محوری نصب شدند.

که بر روی بخش صلب سد قرار گرفته‌اند محاسبه می‌شود. شتاب‌سنج‌های کوچک یک محوری، درون مدل سد قرار گرفته تا افزایش شتاب مدل سد بررسی شود. این شتاب‌سنج‌ها در عمق‌های مختلف در زیر تاج



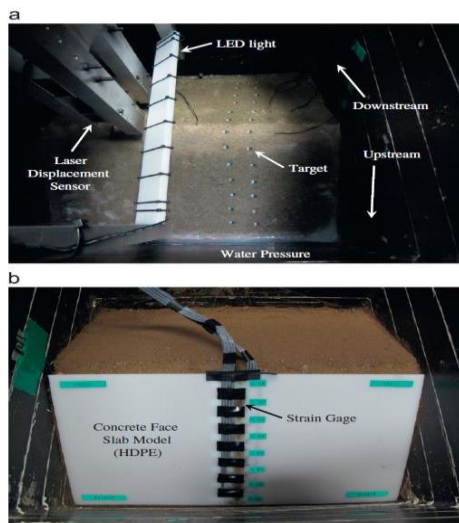
شکل ۱: لایه‌های مدل سد و ابزارآلات در مدل مقیاس شده (a: ECRD و b: CFRD)

در این روابط ϵ کرنش روی سطح بیرونی، ϵ_i کرنش روی سطح درونی، E مدول یانگ، t ضخامت دال، N فاکتور مقیاس و ν ضریب پواسون می‌باشد.

داده‌های اندازه‌گیری شده از کرنش‌سنج‌ها با کمک روابط زیر به ممان خمشی و نیروی محوری تبدیل می‌شوند:

$$M_p = -(\epsilon_i - \epsilon_o) \frac{Et^3 N^2}{12(1 - \nu^2)} \quad Eq - 2$$

$$F_p = (\epsilon_o + \epsilon_i) \frac{EtN}{12(1 - \nu^2)} \quad Eq - 3$$



شکل ۲: عکس از مدل ساخته شده (ECRD :a و CFRD :b)

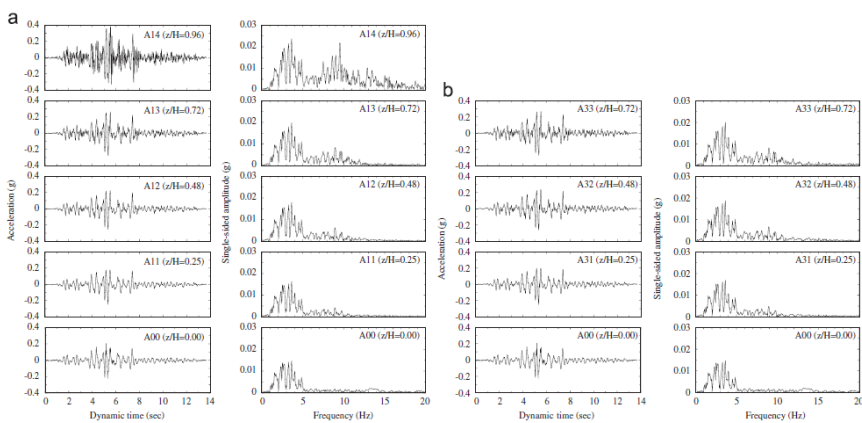


Fig. 6. Acceleration records and Fourier spectrums at different depths of the ECRD model (maximum bedrock acceleration=0.221g). (a) Accelerometers A00, A11, A12, A13, A14 at the center of dam and (b) accelerometer A00, A31, A32, A33 at downstream slope.

شکل ۳

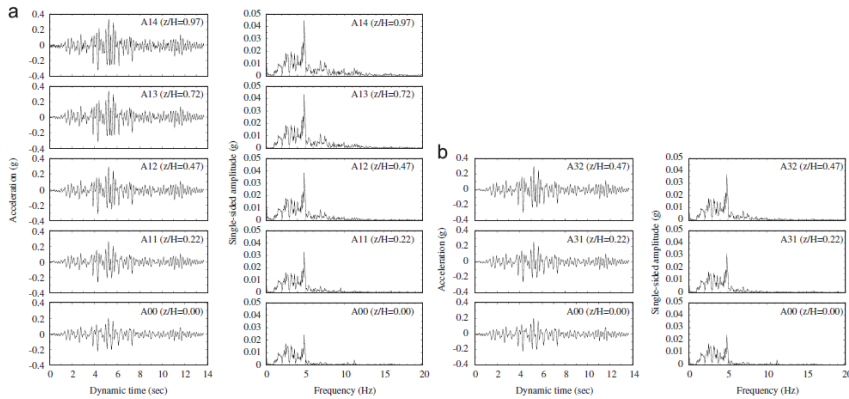


Fig. 7. Acceleration records and Fourier spectrums at different depths of the CFRD model (maximum bedrock acceleration=0.221g). (a) Accelerometers A00, A11, A12, A13, A14 at the center of dam and (b) accelerometer A00, A31, A32 at downstream slope.

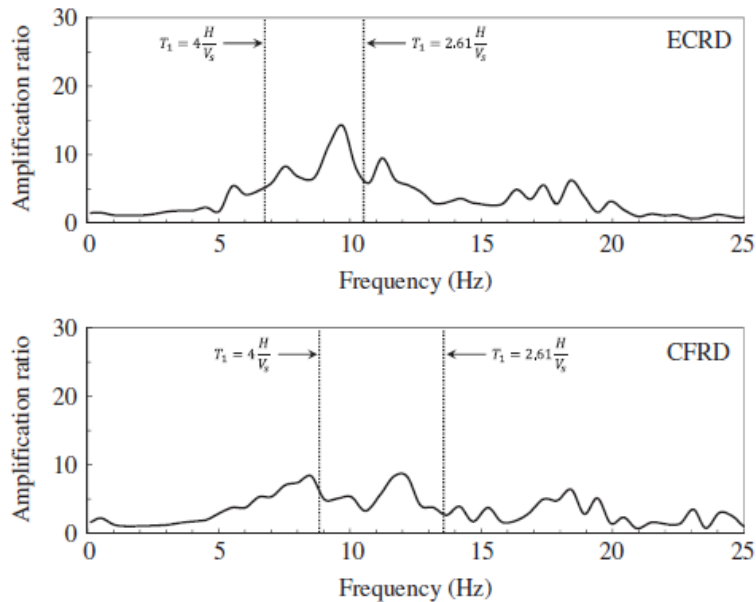
شکل ۴

تاج سد با ارتفاع اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد. پاسخ‌های شتاب شیب پایین‌دست و مرکز در یک ارتفاع یکسان قابل مقایسه هستند. محتویات دامنه طیف فوریه در پایه و تاج هر سد محاسبه شده و نسبت محتویات فرکانسی پایه تا تاج سد (تابع تبدیل) در شکل ۵ رسم شده است. تابع تبدیل، دلالت بر این دارد که نقاط پیک در فرکانس حدود ۹.۵ هرتز برای سد ECRD و ۱۲ هرتز برای سد CFRD رخ داده است.

نتایج

اندازه‌گیری شتاب

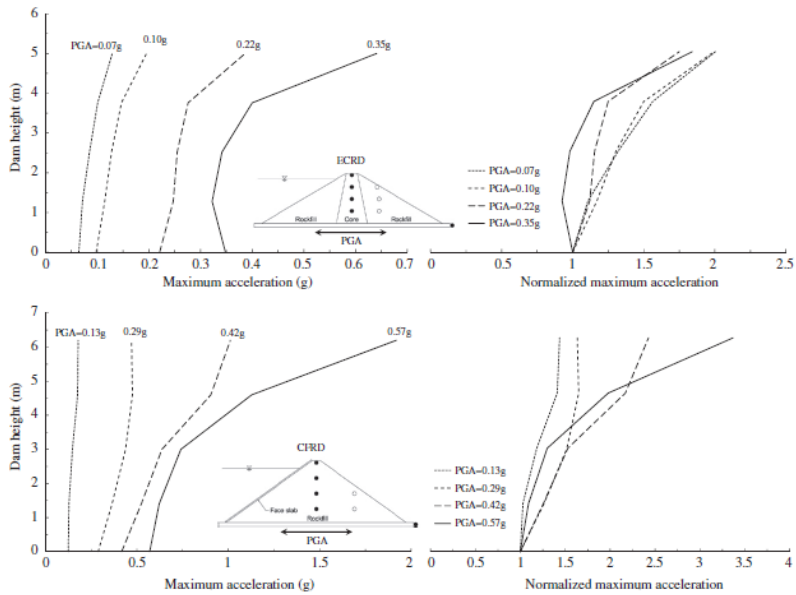
شکل ۳ و ۴ رکوردهای تاریخچه شتاب - زمان و محتویات فرکانس اندازه‌گیری شده در ارتفاعات مختلف، از سنگ بستر زیر تاج و در وسط شیب پایین‌دست را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که اساساً بزرگی شتاب‌های منتشر شده از سنگ بستر تا



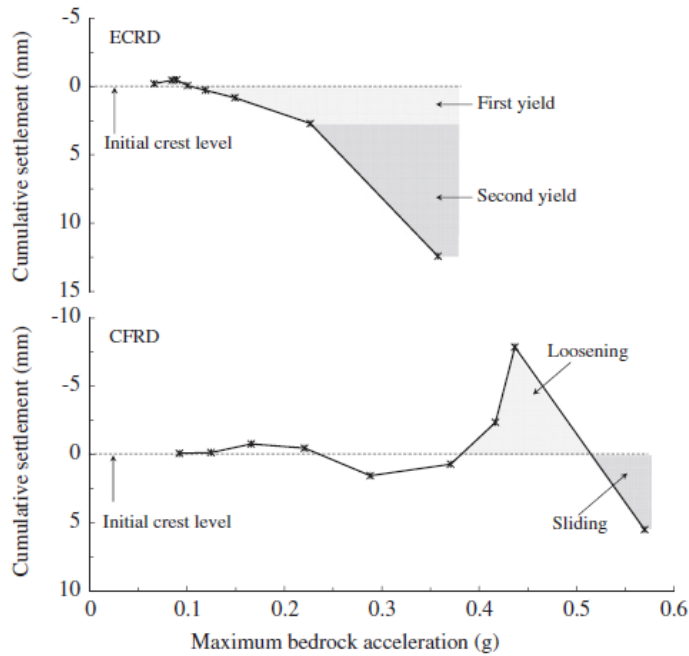
شکل ۵: نرخ تقویت سنگ بستر تا تاج مدل‌ها (در مقیاس پروتوتایپ)

نرخ تقویت در قسمت‌های بالاتر با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد. توزیع نرخ تقویت سد CFRD افزایش مشابه سد ECRD در شتاب‌های سنگ بستر کوچک دارد. نرخ تقویت در قسمت‌های فوقانی، افزایش قابل توجهی در شتاب‌های سنگ بستر را نشان می‌دهد که از ۰.۴g تجاوز می‌کند در حالی که نرخ تقویت در ماکزیمم سنگ بستر ۰.۵۷g اعمال می‌شود، نرخ تقویت (توسعه) بین پایه و تاج به ۳.۴ در سد CFRD افزایش می‌یابد. فرض می‌شود که مقدار قابل توجه تغییر تقویت به علت سست شدن بخش فوقانی پشته می‌باشد؛ زیرا نشست قابل توجهی در این زلزله دیده شد. وقتی بخشی از بدنه سد سست می‌شود، اجزا آزادانه‌تر حرکت می‌کنند؛ زیرا مقاومت اجزاء خاک در برابر حرکت کاهش می‌یابد.

در حالت کلی پیوند با رابطه تقریبی $T_s = \frac{4H}{V_s}$ برای لایه افقی نیمه‌محدود و $T_s = \frac{2/61H}{V_s}$ برای لایه مثلثی شکل به دست می‌آید. پیک‌های ۹.۵ هرتز برای ECRD و ۱۲ هرتز برای CFRD بین دو مقدار پیوند اساسی قرار گرفته‌اند. مشخص است که تقویت محتویات فرکانسی با پیوند طبیعی مدل پشته، ارتباط دارد. به علاوه، مشاهده می‌شود اختلاف توزیع شتاب‌های پیک به نوع سد، بزرگی بارگذاری زلزله و شرایط منطقه‌بندی بستگی دارد. توزیع شتاب در برابر ارتفاع سد در ۴ سطح مختلف زلزله و توزیع نرمال آن‌ها در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. در سد ECRD، شتاب پیک به طور پیوسته از سنگ بستر تا تاج سد حدود ۰.۱g از شتاب سنگ بستر افزایش یافته است. در شتاب بالاتر سنگ بستر، فاکتورهای تقویت در قسمت‌های پایین‌تر سد زیاد تغییر نمی‌کنند؛ اگرچه،



شکل ۶: شتاب ماکزیمم و توزیع شتاب نرمال شده در مرکز برای تست سانتریفیوژ



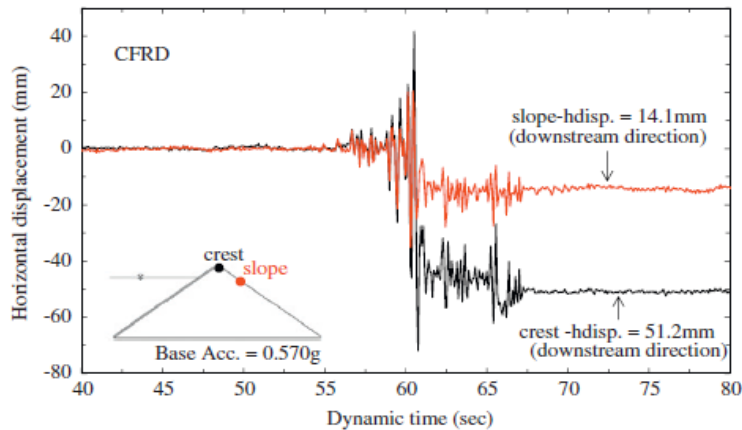
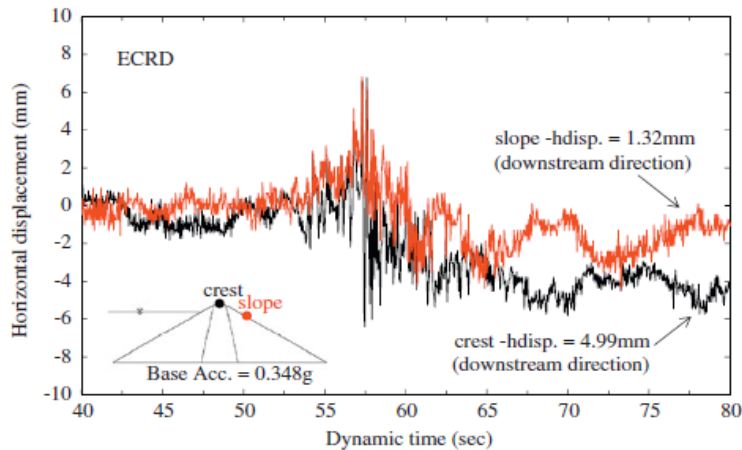
شکل ۷: تاریخچه نشست تجمعی با افزایش شتاب ماکزیمم سنگ بستر

متراکم و به مصالح متراکم تبدیل شد. با شروع تحریک زلزله، این مصالح شروع به حرکت کرده و باعث تغییر در چگالی و تراکم می‌شود. وقتی که اجزای متراکم شده ذرات مجاور خود را وادار به حرکت می‌کنند، بخش فوقانی سد منبسط و سست می‌شود. در پی این سست‌شدگی، شتاب به صورت قابل توجهی در بخش فوقانی سد افزایش می‌یابد و همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش شتاب باعث نشست قابل توجه و لغزش سطح در جهت پایین‌دست می‌شود. وقتی که بیشترین مقدار نشست رخ می‌دهد، نشست پسماند تاج ۹.۷۲ میلی‌متر برای مدل ECRD (تحت شتاب سنگ بستر ماکزیمم ۰.۳۴۸) و ۱۳.۳۶ میلی‌متر برای مدل CFRD (تحت شتاب سنگ بستر ماکزیمم ۰.۵۷g) رخ می‌دهد. این نشست برای مدل ECRD ۰.۱۹٪ ارتفاع سد و برای مدل CFRD ۰.۱۲٪ ارتفاع سد است. نرخ نشست نسبت به ارتفاع سد یک پارامتر مناسب برای تعیین مقدار خسارت، وارده بر سد می‌باشد؛ زیرا نشست بازتاب تغییر شکل بدنه سد، لغزش، ترک و غیره است. شکل ۹ تاریخچه جابه‌جایی افقی دو نقطه تاج و شیب را که با تکنیک پردازش عکس به‌دست آمد، نشان می‌دهد. در مدل ECRD، ماکزیمم جابه‌جایی افقی ۴.۹۹ میلی‌متر (۰.۹۶٪ ارتفاع سد) در تاج سد و ۱.۳۲ میلی‌متر (۰.۰۲۵٪ ارتفاع سد) در شیب پایین‌دست می‌باشد. ماکزیمم جابه‌جایی افقی تقریباً نصف ماکزیمم نشست تاج (۹.۷۲ میلی‌متر) در همان تست است. در مدل CFRD، ماکزیمم جابه‌جایی افقی ۵۱.۲ میلی‌متر (۰.۸۰٪ ارتفاع سد) در تاج سد و ۱۴.۱ میلی‌متر (۰.۲۲٪ ارتفاع سد) در شیب پایین‌دست می‌باشد.

بنابراین اثر سستی مصالح پشته باعث توسعه قابل توجه شتاب زمین می‌شود. این سستی با نتایج تغییر شکل ارتباط دارد.

نشست و تغییر شکل افقی

نشست استاتیکی طی افزایش تعداد دور سانتریفیوژ و پیرو ثابت قبل از زلزله حدود ۰.۲ میلی‌متر در نمونه پروتوتایپ برای هر دو سد CFRD و ECRD بوده، که تغییر شکل کوچکی است. طی مراحل آزمایش، نشست نمونه‌های سد پیوسته توسط سنسورهای جابه‌جایی لیزری اندازه‌گیری شدند، و مقدار نشست پسماند بعد از هر تست به‌دست آمد. نشست تجمعی تاج در شکل ۷ نشان داده شده است. در نمونه سد ECRD، بدنه سد تحت شتاب سنگ بستر ۰.۱g شروع به نشست می‌کند. نشست‌های کوچک نسبی در زلزله‌های کوچک و خفیف (از ۰.۱g تا ۰.۲g) ثبت شدند. در نهایت بعد از بزرگ‌ترین شتاب سنگ بستر (۰.۳۵g) نشست بزرگی ثبت شد. نشست در سد ECRD با خصوصیات تقویتی ارتباط دارد. تقویت بالاتر در بخش فوقانی سد در شتاب بیشتر از ۰.۲g را نشان می‌دهد. (شکل ۶) این نشست و تقویت مرتبط در بخش فوقانی به احتمال زیاد به‌وسیله مصالح هسته رسی در مدل ECRD وقتی که مصالح رسی شروع به تسلیم می‌کنند، ایجاد می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، در تاج نمونه CFRD تا شتاب سنگ بستر ۰.۳۷g نشست خیلی کمی وجود داشته است. متعاقباً در بازه شتاب ۰.۳۷g تا ۰.۴۵g نشست منفی بزرگی (بلند شدن) دارد (به‌وسیله نشست مثبت قابل توجه در لرزش نهایی دنبال شده است). بلندشدگی احتمالاً به علت سستی مصالح سنگی که به صورت متراکم ساخته شده‌اند، رخ داده است. در طی آماده‌سازی مدل، ناحیه سنگی



شکل ۹: تغییر مکان افقی به دست آمده به وسیله تکنیک پردازش عکس

مشاهدات سد زیپینگپو (Zipingpu) که زلزله ون چوان (Wenchuan) را در تاریخ ۱۲ می ۲۰۰۸ تجربه کرده است، می باشد. در گزارش‌ها، بلوک‌های سنگی صاف شده بر روی شیب پایین دست سد زیپینگپو دچار سست‌شدگی و بالآمدگی شدند و تعدادی از این بلوک‌ها روی شیب پایین دست از هم جدا شدند.

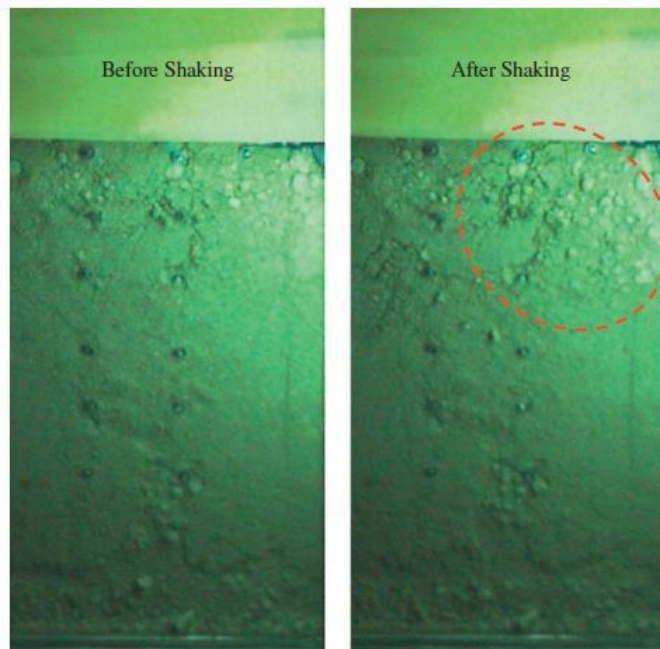
تنش غالب روی رویه CFRD

کرنش‌های رویه دال در طی افزایش شتاب سانتیفریوژ (شرایط استاتیکی) و شرایط اعمال بارگذاری زلزله (شرایط دینامیکی) اندازه‌گیری شده است. تاریخچه

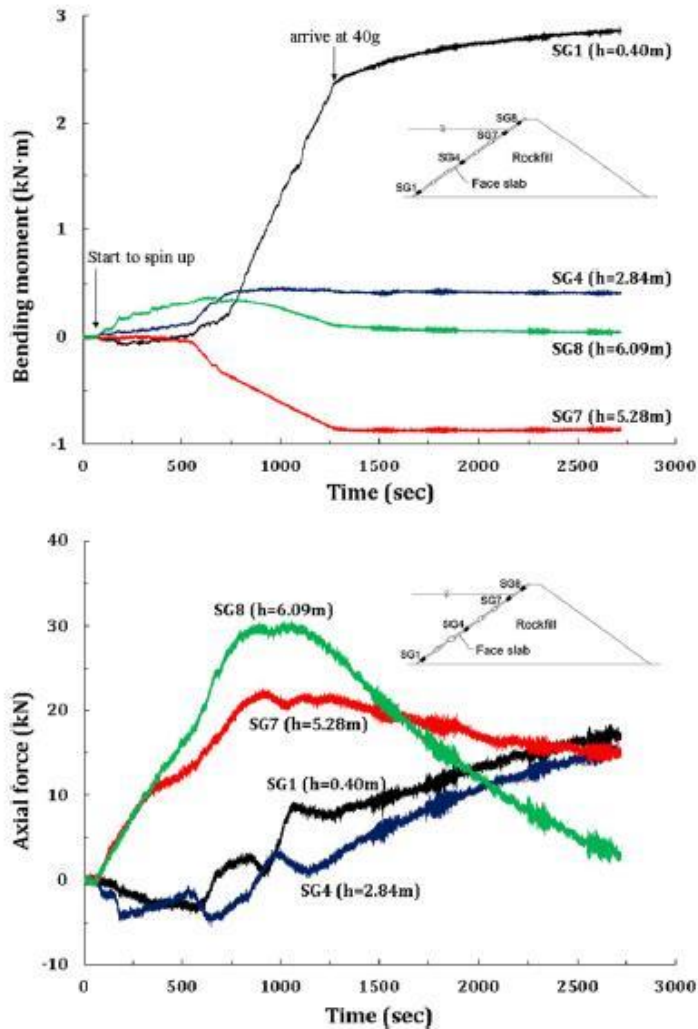
این مقادیر، لغزش کم در جهت پایین دست را نشان می‌دهد. جالب است خاطر نشان کنیم که لغزش کمی در جهت پایین دست به ویژه روی سطح در حین لرزش حتی تحت شتاب سنگ بستر $0.5g$ رخ می‌دهد و این شدیدترین خسارت در این مطالعه است. به علاوه عکس‌های گرفته شده با دوربین سرعت بالا لغزش کم عمق سطح را در شکل ۸ نشان می‌دهد. در سطح پایین دست مدل، مقدار زیادی مصالح خاکی و سنگی در جهت پایین دست ریزش کردند. لغزش و پدیده سست‌شدگی مشاهده شده در بالا قابل قیاس با

شکل ۱۱ ممان خمشی و نیروی محوری را تحت بارگذاری دینامیکی نشان می‌دهد. طی لرزش، دال تنش‌های کششی و فشاری را تجربه می‌کند. در حالت کلی در بتن مقاومت فشاری خیلی بیشتر از مقاومت کششی است و تنش کششی به گسترش ترک و شکست ارتباط زیادی دارد؛ بنابراین نمو تنش کششی بر روی دو رویه بیرونی و درونی در ۴ نقطه مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمو تنش کششی در هر دو رویه بیرونی و درونی کم کم افزایش می‌یابد. سپس افزایش ناگهانی در تنش کششی رخ می‌دهد که نشان‌دهنده سستی پشته می‌باشد.

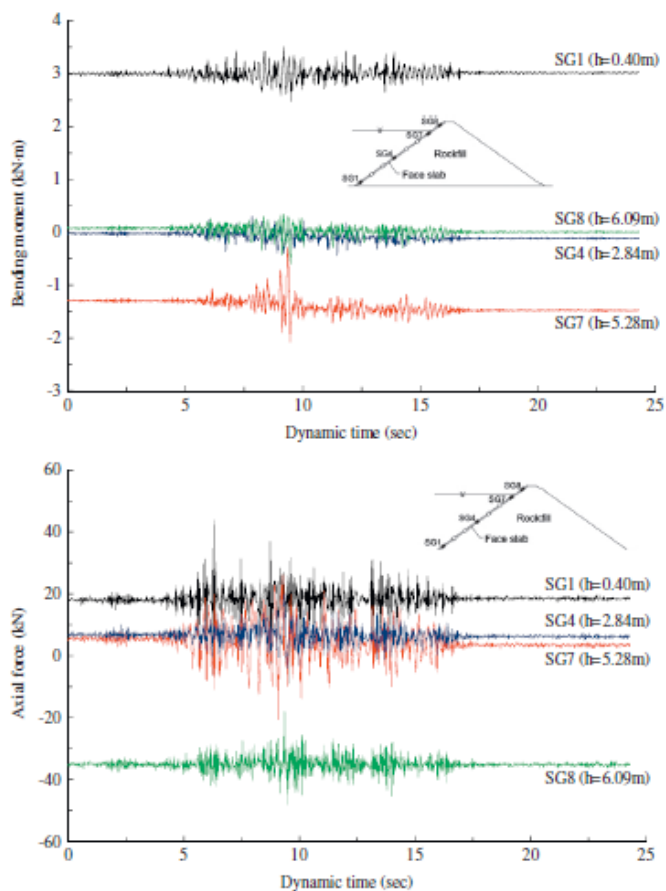
ممان خمشی و نیروی محوری در ۴ نقطه رویه دال مدل CFRD با بارگذاری استاتیکی در شکل ۱۰ نشان داده شده است (ابتدا، ۸ جفت کرنش‌سنج روی دال نصب شد ولی به دلیل مشکل در سیستم، فقط در ۴ نقطه داده‌ها قابل قرائت بودند). این نتایج اختلاف زیاد در رکورد ممان خمشی را نشان می‌دهد، درحالی‌که اختلاف کمی در نیروی محوری مشاهده می‌شود؛ بنابراین تغییر شکل دال تحت شرایط استاتیکی به ممان خمشی بستگی دارد. افزایش ممان خمشی تا 2.87 KN.m (مثبت) در بخش تحتانی ($h = 0.40 \text{ m}$)، 0.42 KN.m (SG۱)، افزایش کمی در بخش میانی ($h = 2.84 \text{ m}$)، و کاهش تا -0.86 KN.m در بخش فوقانی ($h = 5.28 \text{ m}$)، در مدل دال رخ می‌دهد.



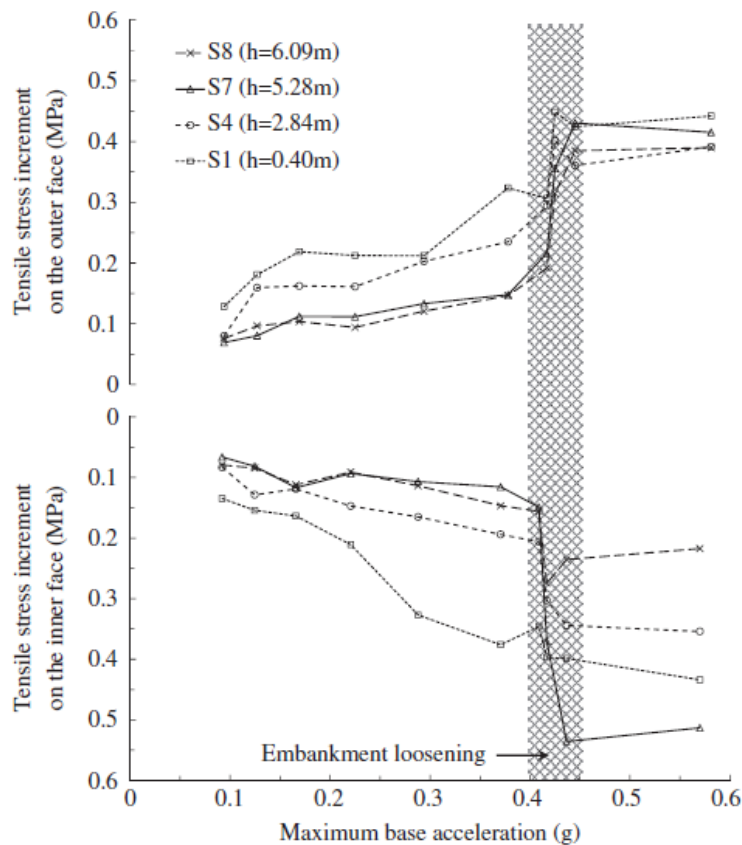
شکل ۸: عکس از شیب پایین دست مدل CFRD بعد از تحریک 0.57 g



شکل ۱۰: پاسخ دال CFRD تحت بارگذاری استاتیکی



شکل ۱۱: پاسخ دال CFRD تحت بارگذاری دینامیکی



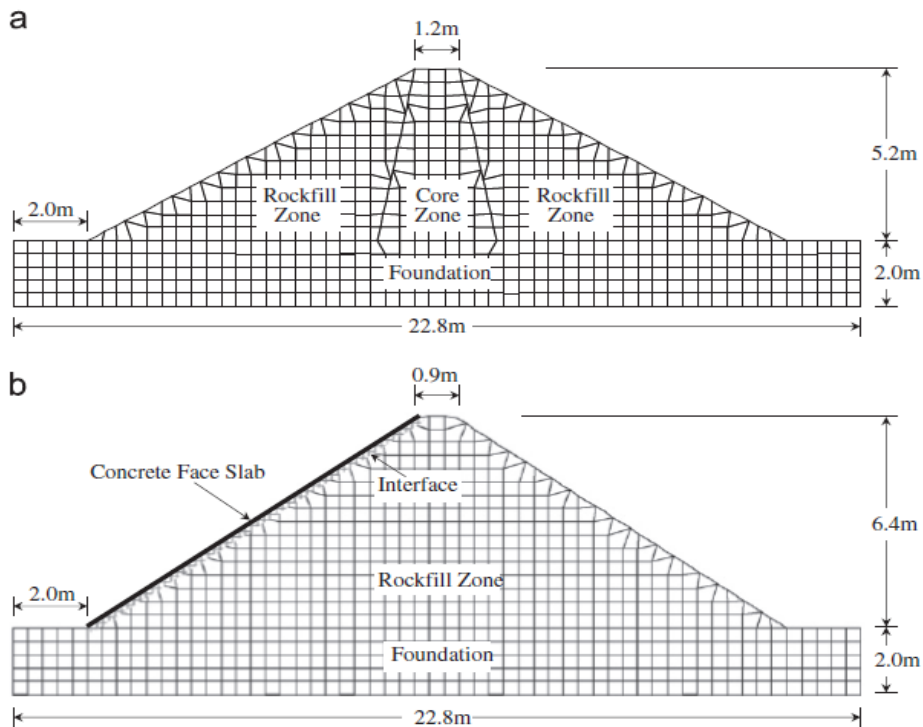
شکل ۱۲: نمو تنش کششی در سطوح داخلی و خارجی دال

در آنالیز عددی، زلزله ورودی به سنگ بستر اعمال گردید. شرایط مرزی برای مینیمم کردن انعکاس موج در مرزهای مدل اعمال شد.

شبیه‌سازی عددی از نتایج سانتریفیوژ

مدل‌سازی عددی

برای بازبینی نتایج تست سانتریفیوژ، شبیه‌سازی عددی برای همان نمونه پروتوتایپ در حالت دو بعدی و با استفاده از آیین نامه ۲D FLAC انجام شد. این مدل‌ها در شکل ۱۳ قابل مشاهده هستند. برای اینکه نمونه سد مستقیماً در یک محفظه آلومینیومی ساخته شده بود، سنگ بستر مدل عددی با کمک مدل الاستیک مدل شد. برای مدل‌سازی رفتار مصالح خاکی از معیار مو-کولمب استفاده شد.



شکل ۱۳ - مدل عددی (a: ECRD و b: CFRD)

Table 1
Material property and construction conditions of centrifuge model materials.

Property	ECRD-rock-fill	ECRD-core	CFRD-rock-fill
γ_d (g/cm ³)	2.02	1.92	2.10
w (%)	4.0	9.0	4.0
γ_t (g/cm ³)	2.10	2.10	2.10
c (kPa)	2	64	8
ϕ (deg.)	40	33	43

استفاده از آزمایش فشاری سه‌محوره به‌دست آمده.

(جدول ۱)

پاسخ‌های شتاب

شکل ۱۴ و ۱۵ تاریخچه شتاب و دامنه فوریه در مدل

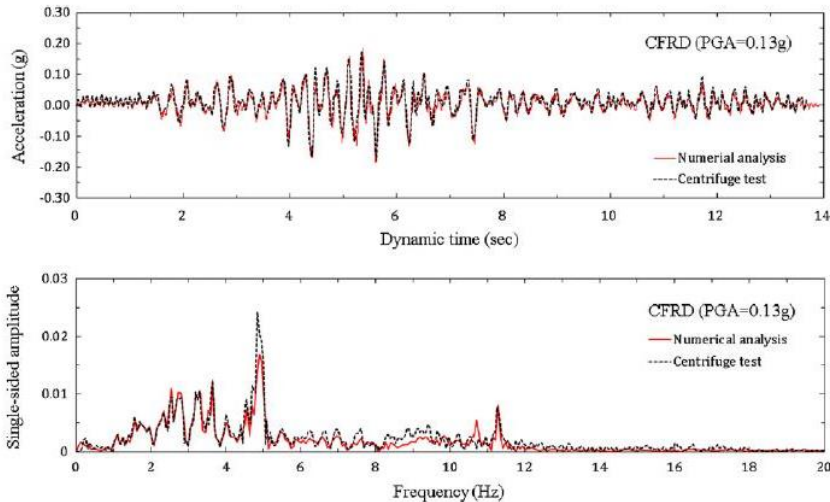
CFRD و ECRD را نشان می‌دهند.

پارامترهای ورودی خاک

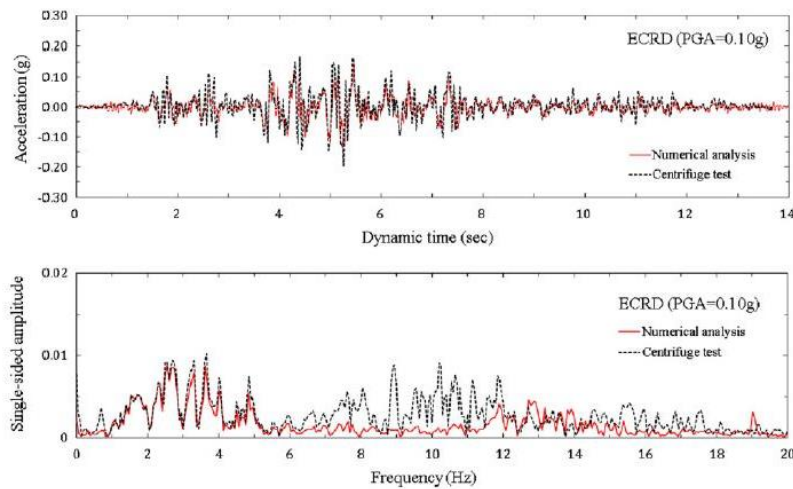
تمام پارامترهای خاک مدل‌های سانتریفیوژ با مدل

الاستو-پلاستیک مور-کولمب شبیه‌سازی شدند. زاویه

اصطکاک ϕ و چسبندگی c از مدل مور-کولمب با



شکل ۱۴: تاریخچه شتاب - زمان و طیف دامنه فوری در تاج سد CFRD مدل سانتریفیوژ و مدل عددی



شکل ۱۵: تاریخچه شتاب - زمان و طیف دامنه فوری در تاج سد ECRD مدل سانتریفیوژ و مدل عددی

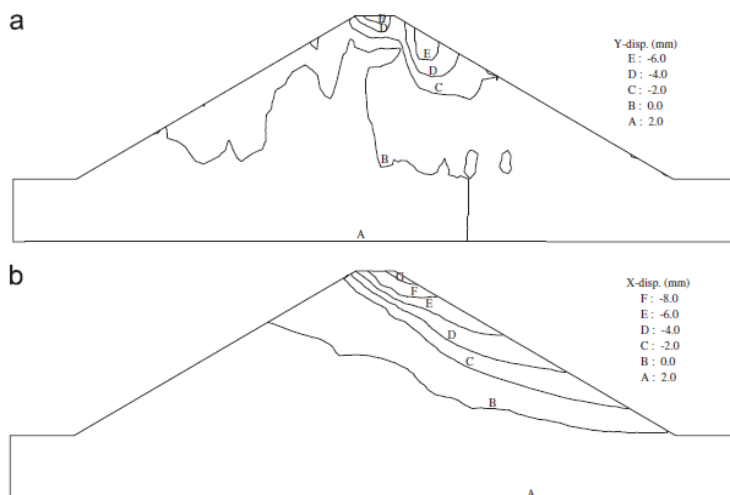
زلزله و اثر ویران کننده آن بر روی سدها، از مسائل مهم احداث این تأسیسات آبی و بهره‌برداری از آنها به‌شمار می‌رود. از این‌رو قبل از احداث سد باید منطقه مورد نظر از لحاظ زلزله‌خیزی مورد بررسی قرار گیرد تا بر

نتایج

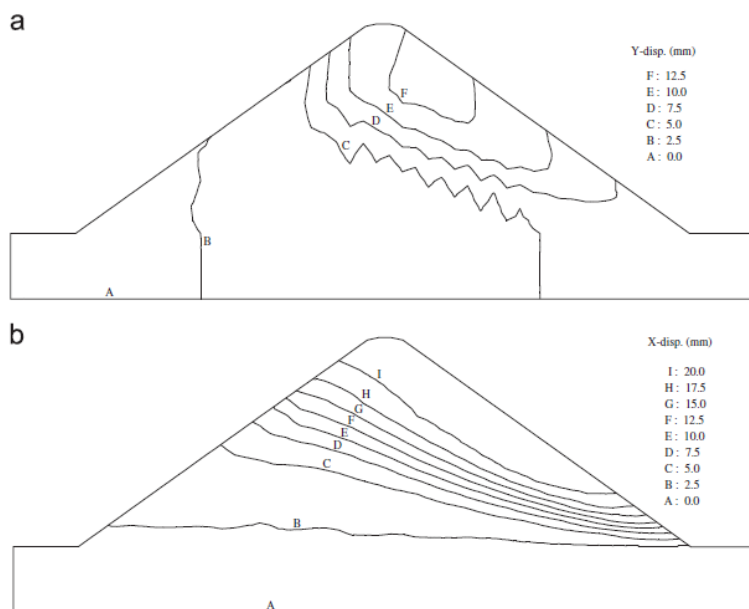
تغییر شکل مدل سازی عددی دو نوع سد در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد،

این فرایند شامل پایش یک سازه یا سیستم مکانیکی در طول زمان با استفاده از اندازه‌گیری‌های دوره‌ای منظم توسط سنسورهای خاص، به دست آوردن مشخصه‌های حساس به خرابی از این اندازه‌گیری‌ها و تجزیه و تحلیل آماری این مشخصه‌ها برای تعیین وضعیت فعلی سلامت سیستم است. در این روش به دلیل اندازه‌گیری‌های پارامترهای مربوط به سد توسط سنسورها به طور منظم، تشخیص خرابی قسمت‌های مختلف سد قبل از ایجاد ترک و یا شکست آن قابل انجام است و می‌توان قبل از وقوع حادثه اقدامات لازم را مبذول داشت.

آن اساس، یا در آن محل به علت امکان وقوع زلزله‌های خطرناک سد احداث نشود و یا اگر شرایط منطقه از لحاظ زلزله‌خیزی به گونه‌ای است که امکان احداث سد وجود دارد، باید سازه چنان ساخته شود که زلزله‌هایی که امکان وقوع آن‌ها برآورد شده، قادر به وارد کردن آسیب به آن نباشد. در این خصوص روش‌های مختلفی برای تحلیل و آنالیز سد در برابر زلزله بیان شد تا سازه مورد نظر در برابر آسیب‌های ناشی از زلزله مصون بماند. به نظر بهترین راهکار پیرامون این موضوع، پایش سلامت سد است. فرایند اجرای استراتژی تشخیص خرابی در زیرساخت‌های هواافضا، مهندسی عمران و مکانیک به عنوان پایش سلامت سازه معرفی می‌شود.



شکل ۱۶: تغییر شکل نمونه عددی ECRD در شتاب سنگ بستر ۰.۳۵g (a: نشست عمودی و b: جابه‌جایی افقی)



شکل ۱۷: تغییر شکل نمونه عددی CFRD در شتاب سنگ بستر ۰.۵۷ g (a: نشست عمودی و b: جابه‌جایی افقی)



جمع‌بندی

زلزله مخرب‌ترین پدیده طبیعی است که خرابی‌های زیادی را به بار می‌آورد. در طی سال‌ها سدهای زیادی ساخته شده و انتظار می‌رود که تعداد زیادی در مناطق زلزله‌خیز ساخته شود و سدها دیر یا زود در معرض زمین‌لرزه‌های مهمی نیز قرار خواهند گرفت. بنابراین لازم است توجه فزاینده‌ای به ارزیابی ایمنی و پایداری سدها در مقابل زلزله مبذول شود که بهترین راه‌حل پایش سلامت سد است. هدف اصلی این مقاله ارزیابی رفتار لرزه‌ای سدهای CFRD و ECRD با استفاده از روش‌های مختلف از جمله تست سانتریفیوژ، شتاب‌نگار و سنسور لیزر مجهز به دوربین‌های پرسرعت برای نظارت بر تمامی حرکات (عمودی و افقی) می‌باشد. این فرایند شامل پایش یک سازه یا سیستم مکانیکی در طول زمان با استفاده از اندازه‌گیری‌های دوره‌ای منظم توسط سنسورهای خاص، به دست آوردن مشخصه‌های حساس به خرابی از این اندازه‌گیری‌ها و تجزیه و تحلیل آماری این مشخصه‌ها برای تعیین وضعیت فعلی سلامت سیستم است. در این روش به دلیل اندازه‌گیری‌های پارامترهای سد توسط سنسورها به‌طور منظم، تشخیص خرابی قسمت‌های مختلف سد قبل از ایجاد ترک و یا شکست آن قابل انجام است و می‌توان قبل از وقوع حادثه اقدامات لازم را مبذول داشت.

مراجع

تعیین مشخصات دینامیکی سد پاکویما با استفاده از شتاب نگاشت‌های زلزله نورتریج - عبدالرحیم جلالی-۱۳۸۷- نشریه دانشکده فنی دانشگاه تبریز

ارزیابی رفتار دینامیکی سد خاکی مارون در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور - محمد داوودی، رضا فیضی، نوید هادیانی-۱۳۸۹- پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران

بررسی تاثیر چسبندگی مصالح در مقاوم سازی رفتار ارتعاشی سدهای خاکی - یوسف پریش، فهمیه نجائی آبادی-۱۳۸۷- سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی مقاوم سازی

Identification of Fei-Tsui arch dam from both ambient and seismic response data / Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. ۱۵, PP. ۴۶۵ - ۴۸۳. Chin-Hsiung, L., Tsu-Shiu W. ۱۹۹۶

Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests / Mu-Kwang Kim, Sei-Hyun Lee, Yun Wook Choo, Dong-Soo Kim ۲۰۱۱