بررسی مسائل لرزه ای سدهای بتنی وخاکی بر اساس مشاهدات

مهندس زهرا حیرانی

کارشناس ارشد سازه هیدرولیکی

zheirany@yahoo.com

دکتر حمید رضا وثوقی فر

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

Vosoughifar@Azad.ac.ir

چکیده

سد پایه دار Hsinfengkiang (زلزله ۱۹٦۲ چین)، سد وزنی Koyna (زلزله ۱۹٦۷ هند)، سد قوسی Pacoima (زلزله ۱۹۷۱و۱۹۹٤ کالیفرنیا)، سد قوسی Rapel (زلزله ۱۹۸۵ شیلی) و سد پایه دار سفید رود (زلزله ۱۹۹۰ ایران) بلند ترین سد های بتنی هستند که در معرض تکان خیلی شدید زمین قرار گرفتند و با وجود تحمل خسارات بسیار، هیچکدام از آنها خراب نشدند.

تعمیرات اساسی و کار مقاوم سازی روی سدهای Hsinfengkiang، Koyna و سفید رود انجام شد و همه سدها در حا ل کاربری می‌باشند. این سدها مانند بیشتر سدهای موجود با استفاده از معیار لرزه ای یا روشهای تحلیل لرزه ای که امروزه دیگر متداول نیستند، در برابر زلزله طراحی شده اند و همه آنها تکانهایی را تجربه نمودند که خیلی بیشتر از حدی بود که زمان ساخت آنها انتظار میرفت.

در طول سه دهه اخیر پیشرفت قابل ملاحظه ای بمنظور درک عملکرد زلزله بر روی سدهای بتنی و خاکی صورت گرفته است. این پیشرفتها اساسا بدلیل توسعه برنامه های کامپیوتری مورد استفاده در تحلیل دینامیکی سدها می باشد. البته پیش بینی رفتار دقیق سدها در طول تکانهای خیلی شدید زمین، بدلیل دشواری مدلسازی رفتار غیر الاستیک سدها، اطلاعات نا کافی درباره تغییر فضایی حرکت زمین و دیگر عوامل غیر ممکن می‌باشد.

در این مقاله درسهایی که از این زلزله ها و الزامات آنها برای طراحی لرزه ای سدهای بزرگ بتنی و خاکی کسب شده است، بحث خواهد شد.

وا ژه های کلیدی: طراحی لرزه ای، سدهای بتنی، سدهای خاکی

۱- مقدمه :

در طول سه دهه اخیر پیشرفتهای اساسی در بررسی اثر زلزله بر سدهای بتنی و خاکی صورت گرفته است. این پیشرفتها اساسا بواسطه توسعه برنامه‌های کامپیوتری در تحلیلهای دینامیکی سدها می باشد. بهر حال هنوز پیش بینی واقعی رفتار سدها، در طول تکان شدید زمین ممکن نیست. دلیل این امر، دشواری مدل سازی غیر الاستیک رفتار سدها، اطلاعات ناکافی در مورد تغییر فضایی حرکت زمین و دیگر عوامل می‌باشد.

بررسیهای انجام شده نشان می دهد که در طول زلزله های شدید، مانند ماکزیمم زلزله متحمل (MCE)، حرکات زمین متجاوز از مقادیری است که برای طراحی سدهای بزرگ در گذشته بکار رفته است. هم اکنون یک زلزله متوسط در صورتیکه نزدیک به سطح رخ دهد، می تواند سبب شتاب ماکزیمم حدود ۰٫۵g گردد. بعنوان مثال زلزله ناپا (NAPA) در کالیفرنیا (سپتامبر ۲۰۰۰) با دامنه۵٫۲ در فاصله ۷ کیلومتری از گسل موثر، شتاب ماکزیمم زمین (PGA) حدود ۰٫۴۹g را ایجاد نمود. البته مدت زمان تکان شدید زمین در مقایسه با زلزله های قویتر، خیلی کوتاه بود.

بیشتر سدهای موجود با استفاده از تقریب معادل استاتیکی برای شتاب ۰٫۱g در برابر زلزله طراحی شده‌اند. بنابراین هنگامی که زلزله با شتابPGA متجاوز از ۰٫۵g رخ دهد، برخی خسارات در سدهای طراحی شده برای ۰٫۱g انتظار میرود.

بدلیل اختلاف بسیار میان شتاب طراحی و PGA (که در طول زلزله قوی دقیقا رخ میدهد) و تردید در تخمین حرکت زمین (در طول زلزله های خیلی شدید در کارگاه سد)، مکانیزمی بمنظور تامین ایمنی سد در صورت تجاوز شتاب از شتاب طراحی مورد نیاز است.

در مورد سدهای بزرگ، ICOLD کاربرد MCE بعنوان اساس ایمنی در طراحی سد را پیشنهاد می‌نماید. از نظر تئوری هیچگونه تکان زمین نباید متجاوز از MCE رخ دهد. بهر حال بدلیل دشواری تخمین حرکت زمین در سایت سد، ممکن است حرکات بزرگتر زمین رخ دهد. حدود ۵۰ سال پیش مهندسین سازه، مقدار ۰٫۲g را بعنوان مرز فوقانی شتاب زمین لرزه مدنظر قرار میدادند. امروزه با وجود رکوردهای بالاتر زلزله، مرز فوقانی شتاب حداکثر زمین از ۱g متجاوز گشته و برخی سازه های مهم در برابر چنین شتابهای بزرگی مورد بررسی قرار گرفته اند.

۲ – طراحی لرزه ای :

بر طبق توصیه های جاریICOLD ، سدهای بزرگ باید قادر به تحمل اثرات باصطلاح ماکزیمم زمین لرزه محتمل(MCE) باشند. این زمین لرزه، قویترین زلزله ای است که در ناحیه یک سد با دوره بازگشت چندین هزار ساله می تواند رخ دهد (بعنوان نمونه در نواحی با لرزه خیزی کم تا متوسط، ۱۰ هزار ساله) .

در تعریف ، MCE بزرگترین پدیده ای است که می توان انتظار داشت بر سد اثر بگذارد. این پدیده می‌تواند خیلی قدرتمند بوده و خیلی نزدیک به سد رخ دهد. ممکن است فرض شود که در نواحی با لرزه خیزی متوسط MCE دامنه ۶٫۵ یا بیشتر دارد. چنین زمین لرزه هایی به سادگی می توانند سبب شتابهای زمین برابر ۰٫۵g شوند.

طراح باید حرکات منتجه از هر زلزله در هر فاصله از سایت سد و حرکت احتمالی پی (اگر یک گسل فعال از سایت سد عبور نماید) را محاسبه نماید. وجود یک گسل فعال در پی، برخی اوقات اجتناب ناپذیر است. بویژه در نواحی با فعالیت لرزه خیزی بالا باید بعنوان یکی از سخت ترین چالشهای طراحی که توجه خاص نیاز دارد، مورد بررسی قرار گیرد.

اطلاعات اصلی برای طراحی مقاوم لرزه ای سد شامل موارد زیر می باشد::

- مطالعه رفتار مشاهده شده سدها در طول زلزله های قوی
- برآورد واقعی حرکت زمین در سایت سد برای مقادیر مختلف تکان زمین(بعنوان مثال زلزله پایه کاربری Operating Basis Earthquake)OBE)، ماکزیمم زلزله محتمل MCE (Maximum Credible Earthquake) و غیره)
- پیش بینی رفتار دینامیکی سد با استفاده از روشهای عددی معتبر

باید به خاطر داشت که هر سد یک سازه نمونه اصلی است و تجربه بدست آمده ار رفتار لرزه ای دیگر سدها مقادیر را محدود کرده است. بنابراین مشاهدات باید با تحلیلهای پیشرفته ترکیب شود تا واقعیت را تا حد ممکن منعکس نماید. همچنین باید باور نمود که مهندسی زلزله یک روش نسبتا جوان با بسیاری از مسائل حل نشده می باشد. بنابراین هر زمان یک زلزله قوی دیگر با برخی پدیده های جدید غیر منتظره ممکن است بوقوع بپیوندد که دشواریهایی بر روی برنامه ها وارد می نماید. این امر بویژه برای سدهای جدیدتر که واقعا تحت حرکات زمین ناشی از MCE قرار گرفته‌اند، درست است.

۳- مرور تاثیرات زلزله های قوی بر روی سدهای خاکی

در ۲۶ ژانویه ۲۰۰۱، زلزله Bhuj در گجرات هند سبب خسارت اساسی به چندین سد آبیاری گشت. خسارت اصلی بواسطه روانگرائی، نشستهای زیاد تاج، پخش افقی، شکافهای طولی بزرگ در وجه بالا دست سد و در طول تاج سد، تورم در پنجه بالا دست سد و ماسه های جوشان در سطح مخزن (شکل ۱ تا ۵) رخ داد. به دلیل تراز پایین آب در مخازن هیچ یک از سدها خراب نشدند.

دیگر زلزله های مستند که سبب بروز خساراتی در سدهای خاکی شدند، به شرح زیر می باشند :

- زلزله Chi-Chi در سال ۱۹۹۹ در تایوان : نشست جزئی تاج و ترک های طولی
- زلزلهKocacli وDuzec درسال ۱۹۹۹ در ترکیه : ترک ها و نشست جزئی
- زلزله Kobe در سال ۱۹۹۵ در ژاپن : خسارت شدید درسه سد خاکی کوچک رخ داد و یک سد کوچک ویران شد. دیگر سدها ترک متوسط را تجربه نمودند (ترک طولی و مایل).
- زلزله Northridge در کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴ (امریکا): یازده سد خاکی و سنگریزه ای برخی ترک و تغییر مکان های اریب را تجربه نمودند. یکی از سدهای خاکی که خسارت قابل توجهی را متحمل شد با ۳۸ متر ارتفاع، یک سد سنگریزه ای هیدرولیکی بود. این سد به صورت یک مخزن آب رها شده است. از زلزله San Fernando در سال ۱۹۷۱، برای کنترل سیلاب با مخزن خالی استفاده می‌شود. این سد ترک های با عرض ۵ تا ۹ سانتی متر با چند صد متر طول را تجربه نمود. ترک و تغییر مکان بصورت جدی به شیب بالا دست آسیب رساند و بخشی از لوله خروجی ویران شد.

– زلزله Loma Prieta در سال ۱۹۸۹ کالیفرنیا(امریکا): سدAustrian، سد خاکی با ۶۰ متر ارتفاع، ترک اساسی تکیه گاه و ماکزیمم نشست تاج حدود یک متر را تجربه نمود.

–زلزله San Fernando در کالیفرنیا: چند سد خاکی (خاکریزهیدرولیکی) بطور جدی آسیب دیدند و آسیب کلی به سد Van Norman وارد شد.

– زلزله Santa Barbara در سال ۱۹۲۵ در کالیفرنیا: لغزشها و آسیب زیاد سد Sheffield .

–زلزله Kanto در سال۱۹۲۳ در ژاپن: خسارات عمده به سد خاکیOno با ارتفاع ۲۱۵ متر گزارش شد. بطوریکه شکافی بطول ۲۱ متر در طول هسته رسی امتداد یافت و نشست ها تا ۳۰ سانتی متر به همراه ترک هایی تا طول ۶۰ سانتی متر و عرض ۲۵ سانتی متر و لغزش های موضعی گزارش شد.

–زلزلهSan Francisco در کالیفرنیا در سال۱۹۰۴ : باعث آسیب بر روی ۳۰ سد متوسط که در طول ۵۰ کیلومتری خط اثر شکست گسل قرار گرفته بودند،گشت. ۱۵ مورد از این سدها در فاصله کمتر از ۵ کیلومتر از محل شکست قرار داشتند. بیشتر این سدها تکان را بهمراه آسیب جزئی تحمل نمودند. چنین کارایی رضایت بخشی تحت شرایط بارگذاری، به طبیعت رسی این سدهای خاکی نسبت داده می شود.

زلزله San Fernando در سال۱۹۷۱ پدیده ای است که آسیب پذیری برخی انواع سدهای خاکی را تصدیق نمود و ممکن است بعنوان نقطه شروع پیشرفت و توسعه تحقیقات در ایمنی لرزه ای سدهای بزرگ مورد بررسی قرار گیرد. سد هیدرولیکی Lower Van Norman روانگرائی گسترده و گسیختگی های عمده شیب را تجربه نمود. بالا آمدگی نسبت به تاج و سیل در منطقه ای شامل بیش از ۷۰ هزار سکنه پائین دست، بدلیل پائین بودن سطح آب در مخزن در فصلی که زلزله رخ داد، جلوگیری گشت. گسیختگی نزدیک سد Lower Van Norman پتانسیل آسیب پذیری سدهای خاکی ساخته شده از ماسه و سیلت نرم اشباع و فشرده ضعیف را مورد توجه مراجع و مهندسین ایمنی سد قرار داد.

از مرور اخبار گذشته، مشخص شد که سدهای خاکی در طول زلزله های قوی هم رضایت بخش و هم ضعیف عمل نموده اند. کارائی آنها خیلی وابسته به طبیعت مصالح خاکریز است. سدهای ساخته شده از مصالح فشرده رسی بر روی رس خشک یا بستر سنگی، ایستادگی قابل توجه در برابر حرکت زمین دارند. حتی وقتی که روشهای تراکم نامناسب یا غیر مستعمل بکار رفته باشد. در مقایسه، سدهای خاکی قدیمی ساخته شده از سیلت یا ماسه متراکم نامناسب با طراحی قدیمی سدها، گسیختگی ناشی از روانگرائی این مصالح را در پی دارند. سدهای هیدرولیکی، نوعی از ساخت که متروکه شده و سدهای از رده خارج، انواع خاکی هستند که بیشترین آسیب پذیری را در برابر زلزله دارند. سدهای سنگریزه‌ای و سنگریزه ای با ظاهر بتنی معمولا بصورت سدهای پایدار تحت ماکزیمم بارگذاری لرزه ای مد نظر قرار می گیرند. اما این فرض باید با توجه به مشاهدات و تحلیلها مورد بررسی قرار گیرد. بویژه رفتار لرزه ای انواع جدید سدها مانند سدهای خیلی بلند CFR باید مورد بررسی قرار گیرند بطوریکه تراوش سطح بتن بواسطه زلزله ها ممکن است امنیت سد را بخطر اندازد.

هیچ کدام از این سدها زلزله ای قابل مقایسه با MCE را تجربه ننموده اند. سدهای خاکی با استفاده از مدل دو بعدی بلند ترین مقطع سد تحت مقدار زلزله افقی و قائم در بالا و پایین دست تحلیل می‌شوند. در چنین تحلیلهای ساده ای، دال بتنی تنشهای لرزه ای زیاد را تجربه نمی‌نماید. از اینرو این مدل برای ارزیابی ایمنی لرزه ای دال بتنی مناسب نمی باشد.

عکس العمل سد بواسطه cross conyen و با یک حرکت زمین در زلزله مهم می باشد. برای چنین تحلیلهای دینامیکی، مدل سه بعدی سد باید بکار رود و اندر کنش وجه بتن و زونهای انتقالی خاک باید بطور کامل مدل شوند.

بواسطه اینکه رفتار تغییر شکل دال بتنی که مانند یک دیافراگم صلب عمل می نماید، خیلی متفاوت از مصالح سنگریزه ای نسبتا نرم می باشد، پاسخcross conyen سنگریزه ای ممکن است بوسیله دال دیافرگمی صلب مما نعت شود. این امر بصورت تنشهای صفحه ای در دال بتنی نتیجه خواهد داد. نیروهای اصطکاکی بین سنگریزه و دال بتنی نیروهای لرزه ای را که از سنگریزه به دال بتنی منتقل می شوند، محدود می نماید. بواسطه این حقیقت که تمام بار آب بواسطه دال تحمل می شود، این نیروهای اصطکاکی خیلی بزرگ بوده و از این رو تنشهای صفحه ای در دال بتنی ممکن است به اندازه کافی برای ایجاد کمانش موضعی یا برش در دال بزرگ باشد.

اگر چه این یک فرضیه است، بررسی رفتار وجه بتنی تحت تکان زمین لرزه cross-conyen ضروری به نظر می رسد.

٤- مرور اثرات زلزله های قوی بر روی سدهای بتنی

سد بتنی غیر مدرن به عنوان نتیجه زلزله خرابی خواهد داشت. در طول زلزله Chi Chi سپتامبر۱۹۹۹ تایوان، با عبور گسل ثانویه تقریبا عمود بر سد انحرافی بتنی اصلی Shih-Kang سبب ۶ تا ۸ متر جابجایی قائم بین دهانه های دریچه نزدیک به پایه راست گشت. آب در طول دهانه های شکسته بدون آزاد سازی بلا خیز مخزن، جریان یافت. شتاب حداکثر زمین در سایت سد حدود ۰٫۵g برآورد شد. شاید کمتر از بیست سد بتنی شتابهای حداکثر زمین متجاوز از ۰٫۲g را تجربه نموده اند. مهمترین موارد آسیب زلزله تحت تکان شدید زمین به شرح زیر می باشد:

سد قوسی Pacamia درامریکا :در طول زلزله سان فرناندو در سال ۱۹۷۱ با ۱۱۳ متر ارتفاع، شتاب پایه حدود ۰٫۷g و شتاب حداکثر ۱.۲۵g روی سنگ در پایه چپ باعبور از تاج سد،گزارش شد. سد هیچ گونه ترک سازه ای نداشت.

پایه چپ بانصب میل مهارهای پس تنیده مقاوم سازی شد. این میل مهار بمنظور تثبیت دولبه سنگی بزرگ که در طول زلزله حرکت کرده اند، به کاررفتند. شتاب حداکثر نزدیک بالای پایه چپ درطول زلزله Northridge در سال ۱۹۹۴ حدود ۱.۷۶g افقی و ۱٫۶g قائم بود. اتصال بین پایه چپ و انتهای چپ قوس بیش از ۵ سانتیمتر به واسطه حرکت دو لبه سنگی روی بالای پایه، باز شد. ترک افقی جزئی بتن درانتهای چپ سد و چندین انحراف جزئی بلوک های افقی و قائم دراتصالات رخ داد. تراز مخزن حدود نصف ارتفاع سد درطول دو زلزله بود.

- سد چند قوسی Hononike در ژاپن : ترک در یک قوس نزدیک پایه بواسطه زلزله Nankai در سال ۱۹۴۶ رخ داد (M ۷٫۲)
- سد Kayna در هند، سد وزنی با ارتفاع ۱۰۲ متر و سد Hsinfengkiang در چین سد پایه دار با ارتفاع ۱۰۴ متر، در نتیجه زلزله های با دامنه به ترتیب ۶٫۵ (۱۹۶۷)، ۶٫۱ (۱۹۶۲) تکان خوردند. نحوه ایجاد هر دو زلزله مشکوک به لرزه پاشنه مخزن بود. هر دو سد ترک طولی اساسی نزدیک قسمت فوقانی را توسعه دادند. خسارت مربوط به جزئیات طراحی یا ساخت (که در سازه های جدید جلوگیری می‌شود) بود. هر دو سد مقاوم سازی شده و اکنون در حال خدمت دهی می باشند.
- سد پایه دار سفید رود در ایران (شکل ۶) سد با ارتفاع ۱۰۶ متر در طول زلزله منجیل ۲۱ ژوئن ۱۹۹۰، متحمل آسیب شد. سد در مرکز زلزله واقع بود و شتاب حداکثر حدود g ۰٫۷ برآورد شد. سد خسارات عمده ای شامل ترک شدید در طولLIFT JOINT افقی در بخش بالائی

پایه ها را متحمل شد، اما در کل کارائی رضایت بخشی داشت زیرا زلزله منجیل خیلی دور از آنچه بعنوان ماکزیمم پدیده در سایت سد انتظار میرفت، نبود.

- سد Lower Crystal Springs در آمریکا : سد بتنی وزنی انحنا دار که از بلوکهای بتنی پیوسته ساخته شده است. این سد زلزله ۱۹۰۶ سان فرانسیسکو را بدون یک ترک منفرد تحمل نمود. شکست گسل در فاصله کمتر از ۱۸۰ متر از سد قرار گرفته بود. سد Lower Crystal Springs ، تکان متوسطی را در طول زلزله ۱۹۸۹ Loma Prieta Earthquake تجربه نمود اما بار دیگر تحت تاثیر قرار نگرفت.

تاکنون کارائی سدهای بتنی رضایت بخش بوده است، بهر حال نتیجه گیری ایمنی بیشتر این سدها نسبت به سدهای خاکی زود هنگام است. بدلیل آنکه تعداد سدهای خاکی اساسا بیشتر از سدهای بتنی است. بعلاوه سدهای بتنی ممکن است تحت استانداردهای طراحی لرزه ای بیشتری نسبت به آنچه برای سدهای خاکی قدیمی بکار رفته ساخته شده باشند و سدهای بتنی کمتر مستعد زوال مصالح، تراوش و نگهداری ضعیف نسبت به سدهای خاکی هستند. در سالهای اخیر سدهای بتنی غلتکی (RCC) گزینه های کارآمد تری نسبت به سدهای بتنی قدیمی هستند. البته مشاهدات بسیار کمی درباره رفتار لرزه ای سدهای RCC وجود دارد از اینرو نتیجه گیری درباره ایمنی لرزه ای آنها نسبت به سدهای بتنی قدیمی، زود هنگام است.

۵- طراحی لرزه ای سدهای خاکی

همانطور که بحث شد ، کارائی لرزه ای بیشتر سدهای خاکی رضایت بخش بوده است. تنها سدهایی که بطور کامل در نتیجه تکان لرزه ای از بین رفتند، سدهای هیدرولیکی یا سدهای خاکی نسبتا کوچک بدلیل قدمت یا طراحی نامناسب بوده اند.

یکی از خطرناک ترین نتایج بارگذاری دینامیکی سد خاکی روانگرائی فونداسیون خاکی می باشد که شامل ریزدانه غیر چسبنده اشباع و یا مصالح غیر فشرده می باشد.

توصیه های اصلی برای طراحی و ساخت سدهای خاکی تحت تکان شدید زلزله بصورت زیرمی باشند:

- فونداسیونها باید در مصالح چگالتر یا سنگ حفر شوند، مصالح فونداسیون با مصالح چگالتر یا مصالح متراکم ترجایگزین شوند. این امر از روانگرائی یا افت مقاومت جلوگیری می نماید.
- مصالح خاکریزه ای که تمایل به ایجاد مقدار زیاد فشار های آب منفذی در طول تکان شدید دارند، نباید بکار روند.
- همه زونهای سد خاکی باید بطور کامل متراکم شوند. این امر نشست بیش از حد در طول زلزله را جلوگیری می نماید.
- همه سدهای خاکی و بویژه سدهای همگن باید ظرفیت بالای زونهای زهکشی داشته باشند. زونهای زهکشی به هنگام زلزله، مانع تراوش از هر ترک مایل می شوند. از اینرو زونهای خاکی طراحی شده این اطمینان را بوجود می آورند که پس از هر رخداد که منجر به ترک می شود، غیر اشباع باقی بمانند.
- فیلترها باید روی سنگ بستر شکسته شده بمنظور مسدود نمودن منافذ خاکی به سمت فونداسیون، قرار بگیرند.

- زونهای فیلتر عریض و خشک باید بکار روند
- زونهای انتقالی بالا و پایین دست باید باید خود Self-healing باشند و از دانه بندی مانند
- ارتفاع سطح آزاد کافی بمنظور پوشش نشستهای ممکن در اثر زلزله و نیز پوشش امواج آب مخزن ناشی ازحرکت جرم تامین گردد.
- از آنجا که وقوع ترک در تاج ممکن می باشد، عرض تاج باید عریضتر از معمول باشد. هدف از این امر، ایجاد مسیرهای طولانی تر تراوش در طول هر شکاف مایل که ممکن است به هنگام زمین لرزه ها توسعه یابد، می باشد.

٦ – طراحی لرزه ای سدهای بتنی

تاکنون ، کارایی لرزه ای سدهای بتنی رضایت بخش بوده است. موارد زیر بر طبق توصیه های ICOLD ارائه می شود :

سدهای قوسی : چند نکته طراحی وجود دارد که بصورت زیر بیان می شود :

- توسعه طرح با هندسه منظم و یکنواخت (تقارن مطلوب می باشد).
- تامین بارگذاری پیوسته و فشرده در طول شالوده، شکل فونداسیون و نیز طراحی
- محدودیت نسبت طول به ارتفاع تاج در مدهای بالاتر وییراسیون در حین تکان زلزله، نسبت به از شکل نیفتادن سد اطمینان حاصل شود با توجه به اینکه بخش اساسی عملکرد نیروهای لرزه ای بواسطه عملکرد قوس به این مساله وابسته است.
- ایجاد درزهای انقباضی بهمراه پیوستگی مناسب
- بهبود مقاومت دینامیکی و تحکیم فونداسیون سنگی بواسطه حفاری و تزریق مناسب
- پیش بینی سطوح بالابر که بخوبی مهیا شده اند، بمنظور به حداکثر رساندن قیود مقاومت کششی
- افزایش عرض تاج بمنظور کاهش تنشهای کششی دینامیکی بالا در ناحیه تاج
- به حداقل رساندن جرم در بخش بالائی سد که برروی سختی تاج موثر نمی باشد.

سدهای وزنی و سدهای پایه دار: مواردی بمنظور پیشرفت کارائی لرزه ای سدهای پایه دار و وزنی به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- نگهداری دمای بتن در حداقل، کاهش تنشهای حرارتی کششی و ترک ناشی از جمع شدگی
- توسعه و نگهداری سیستم مناسب زهکشی
- مهیا ساختنlift areas بمنظور حداکثر نمودن مقاومت کششی و قید.
- بکاربردن Shear Keys در درزهای قائم.
- حداقل نمودن ناپیوستگیهای موجود در بدنه سد بمنظور جلوگیری از تمرکز تنش موضعی.
- افزایش عرض تاج برای بهبود پایداری دینامیکی تاج سد .
- اجتناب از شکست در شیب روی وجوه پایین دست سدهای وزنی بمنظور حذف تمرکز تنشهای موضعی.

۷ –نتایج

همه انواع سدها می توانند با تحمل رضایت بخش بار های لرزه ای در مناطقی با لرزه خیزی بالا طراحی یا ساخته شوند. تجربه نشان می دهد که سدهای جدیدی که در معرض تکانهای شدید قرار گرفته اند، کارایی خوبی داشته اند. زلزله های قوی پتانسیلی برای ایجاد خسارت شدید بر روی سدهای بزرگ دارند. در حال حاضر بیش از ۴۰ هزار سد با ارتفاع بیش از ۱۵ متر بر طبق اطلاعات وجود دارد. بیشتر این سدها در برابر زلزله بوسیله روشهایی طراحی شده اند که امروزه منسوخ می باشند. بنا براین یک برنامه ارزیابی لرزه ای کامل، مورد نیاز است که ایمنی سدهای موجود را تا حد استانداردهای ایمنی لرزه ای جدید بالا ببرد.. سدهایی که از نظر لرزه ای مطلوب نیستند یا مقاوم سازی شده یا مخازن آنها به حدی پائین آورده شوند که ایمنی لرزه ای مطلوبی داشته باشند.

مراجع

[۱] Wieland.M, “Lessons learnt from the earthquake behaviour of large dams and their implications on seismic design criteria”,Proc.Third International Conference on Dam Engineering,Editors:M.Wieland and J.S.Y.Tan,CI Premier Pte Ltd.,Singapore,March ۲۰–۲۲,۲۰۰۲.

[۲] Wieland.M. “Seismic aspects of dams, General Report Question ۸۳: Seismic aspects of dams;International Commission on Large Dams”, Proc.۲۱"Congress of ICOLD, Montreal, Canada, June ۱۶–۲۰, ۲۰۰۳.

[۳] Wieland.M. “Earthquake Safety Of Concrete Dams And Seismic Design Criteria For Major Dam Projects”,۲۰۰۳.

شکل ۱– شکست سد خاکی تحت زلزله Bhuj در سال ۲۰۰۱

شکل ۲– آسیب در تاج سد خاکی تحت زلزله Bhuj در سال ۲۰۰۱

شکل ۳- ترک بزرگ در سد خاکی تحت زلزله Bhuj در سال ۲۰۰۱

شکل ۴- شکست سد خاکی در حین زلزله Bhuj در سال ۲۰۰۱

شکل۵- ترک طولی در تاج سد تحت زلزله Bhuj در سال ۲۰۰۱

شکل ۶- سقوط سنگها در سایت و مخزن سد پایه دار سفید رود تحت زلزله منجیل در سال ۱۹۹۰

شکل ۷- آسیب سرریز Shih-Kang تحت زلزله Chi-Chi در سال ۱۹۹۹