

تأثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی تحت تأثیر انفجارات زیرآبی

حسین پورسلحشوری^۱. آرمان ختار^۲

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران

۲- استادیار

آدرس پست الکترونیک: hossein.logan.skyboy@gmail.com

چکیده

بارهای انفجاری باعث آسیب جدی به سدهای وزنی بتنی می شود و شکستن احتمالی سد می تواند باعث فاجعه در نواحی پرجمعیت پایین دستی بشود. جلوگیری از آسیب به سازه های سد از اهمیت بالایی در طراحی سدهای مقاوم در برابر انفجار، برخوردار است. این مقاله، تأثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی یک سد وزنی بتنی معمول تحت بارهای انفجاری را مورد بررسی قرار می دهد. به این منظور، پنج سطح آب مختلف مخزن، در این مطالعه مورد ملاحظه قرار می گیرند. بخاطر اینکه سازه سد ممکن است تحت بارهای انفجاری هوایی و زیرآبی نزدیک سطح آزاد آب با پایین رفتن سب آب مخزن، قرار گیرد، تحلیل های مقایسه ای مشخصه های انتشار موج ضربه ای یک انفجار زیرآبی و یک انفجار هوایی نزدیک مرزها، ابتدا انجام می شوند. نتایج نشان می دهند که پیک فشار موج ضربه ای از انفجار زیرآبی نزدیک سطح آب آزاد، بسیار بیشتر از انفجار هوایی نزدیک سطح آزاد آب است. برای مقایسه بیشتر مشخصه های آسیب سدهای وزنی بتنی در این دو سناریوی انفجار، یک روش عددی کاملاً تزویج شده با روش های ترکیبی لاگرانژی و اوپلری انجام می شود تا سیستم سد-مخزن-فونداسیون، مدلسازی شود. برای سد تأثیر پذیرفته از یک انفجار هوایی نزدیک سطح آب آزاد، تقریباً هیچ آسیبی بوجود نمی آید و بنابراین، یک انفجار زیرآبی عمدتاً مورد بررسی قرار می گیرد. تأثیر موقعیت انفجار بر درجه آسیب به یک سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی، مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین، تأثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی یک سد مورد بحث قرار می گیرد. نتایج نشان می دهند که عملکرد حفاظتی به میزان زیادی بهبود می یابد هنگامی که سطح آب مخزن، پایین تر از تغییر شیب پایین دست سد باشد، که این امر همچنین آسیب به نواحی پایین دست را حتی هنگامی که در سد بتنی ترک بوجود بیاید، را کاهش می دهد.

کلمات کلیدی: سد وزنی بتنی، عملکرد حفاظتی، سطح آب مخزن، انفجار زیرآبی، انتشار موج ضربه ای.

مقدمه

در سالهای اخیر، حوادث متعدد مرتبط با انفجار بخاطر فعالیت های نظامی و تروریستی، در سراسر جهان رخ داده اند و باعث تهدید هنگفتی برای ایمنی زیرساخت های اساسی مانند ساختمان های دولتی، ایستگاه های مترو، کشتی های جنگی، پل ها و سدهای مرتفع می شوند. توجه روز افزونی به پاسخ دینامیک و عملکرد حفاظتی این سازه ها تحت بارهای انفجاری، جلب شده است (ویلیامز و ویلیامسون، ۲۰۱۱؛ ترگوت و همکاران، ۲۰۱۳؛ زونگ و همکاران، ۲۰۱۳). سدهای مرتفع، بخاطر مزیت های اقتصادی قابل توجهشان برای جامعه، اهداف احتمالی حمله های تروریستی می توانند باشند. تاکنون، سدهای بتنی مرتفع

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

متعددی در سراسر ساخته شده اند یا در حال ساخت می باشند که از جمله می توان سد «سه جورج» (*Three Gorges*) در چین (ارتفاع: ۱۸۵ متر؛ ظرفیت: ۳۹/۳ میلیارد متر مکعب)، ایتاپو بیناشیونال در برزیل و پرتقال (ارتفاع: ۱۹۶ متر؛ ظرفیت: ۲۹/۰ میلیارد متر مکعب)، نیروگاه برق آبی شیوان در چین (ارتفاع سد: ۲۹۲ متر، ظرفیت: ۱۵/۰ میلیارد متر مکعب) و نیروگاه برق آبی بیهتان در چین (ارتفاع: ۲۸۹ متر؛ ظرفیت: ۲۰/۶ میلیارد متر مکعب) را می توان نام برد. این سدهای مرتفع معمولاً سطح آب بالا و ظرفیت ذخیره زیاد دارند که این می تواند باعث بوجود آوردن حجم تخریب قابل توجه در نواحی پرجمعیت پایین دست بعد از پدیدار شدن سیلاب ناشی از شکستن سد، شوند. بنابراین، نحوه بهبود موثر عملکرد حفاظتی سدها و کاهش ریسک شکستن سد، یک موضوع مهم در طراحی مقاوم در برابر انفجار سدها می باشد.

بسیاری از محققان، تعدادی بررسی قابل توجه مرتبط با عملکرد مقاوم در برابر انفجار سازه های ساختمانی (جایوسوریا و همکاران، ۲۰۱۱؛ پارسی و اوگنتی، ۲۰۱۲)، سازه های دریایی (جین و دینگ، ۲۰۱۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱)، سازه های پل (اسلام و یزدانی، ۲۰۰۸؛ سان و لی، ۲۰۱۱) و سازه های دال (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ اورتون و همکاران، ۲۰۱۴)، انجام داده اند، اما توجه نسبتاً اندکی به سازه ای سد قرار گرفته در معرض انفجارهای زیرآبی داده شده است. این نوع انفجارها محتمل می باشند، زیرا می تواند در خود تزویج دینامیک مواد مختلف، مانند خرج، محصولات انفجار، آب مخزن، هوا، سد و سنگ، را داشته باشد. یو (۲۰۰۹) از الگوریتم لاگرانژی-اولبری اختیاری» (*ALE*) برای بررسی پاسخ دینامیک یک سد وزنی بتنی قرار گرفته در معرض انفجار تماسی، استفاده کرد و تکامل آسیب سد را توصیف کرد. لینسباوئر (۲۰۱۱)، مکانیزم آسیب به سدهای وزنی بتنی هنگام انفجار خرج در کف مخزن را بررسی کرد. وانادیت-الیس و دیویس (۲۰۱۰)، یک مدل مقیاس کوچک از یک سد وزنی عادی تحت بارهای انفجاری در یک سانتریفوژ بزرگ طراحی کردند و آسیب قابل مشاهده ناشی از بارهای دینامیک را مشاهده کردند. وانگ و ژانگ (۲۰۱۴) از یک شبیه سازی عددی کاملاً تزویج شده برای پیش بینی رفتار سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی در موقعیت های انفجار مختلف، استفاده کردند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۴)، تاثیر ارتفاع سد و فاصله توقف بر عملکرد مقاوم در برابر انفجار سدهای وزنی بتنی را مورد بررسی قرار دادند.

هدف مطالعات ذکر شده، بررسی پاسخ دینامیک غیرخطی و تکامل آسیب سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض انفجارهای زیرآبی، بوده است. مطالعات اندکی بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض بارهای انفجاری، تمرکز کرده اند. اقدامات حفاظتی سازه ها تحت بارهای از اهمیت بسزایی برای امنیت و پایداری آنها برخوردار هستند و همچنین می توانند بلاپای ثانویه ناشی از خرابی سازه ای را کاهش دهند. در حال حاضر، اقدامات مقاوم سازی، مانند پلیمر تقویت شده با الیاف کربنی» (*CFRP*) (ها و همکاران، ۲۰۱۱؛ جاجیموویکز و همکاران، ۲۰۱۵)، پولیوریا (لبلانک و همکاران، ۲۰۱۳؛ سمیعی و همکاران، ۲۰۱۳) و فوم آلومینیومی (جینگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ گوئل و همکاران، ۲۰۱۵) معمولاً در سازه های دریایی، سازه های پل و سازه های ورقه ای مورد استفاده قرار می گیرند. اما، این اقدامات حفاظتی ممکن است برای سدهای مرتفع کارایی نداشته باشد یا مقرون به صرفه نباشد. محتمل تر اینکه، بخاطر محدودیت زمانی در زمان جنگ، زمان کافی برای پیاده سازی این اقدامات حفاظتی وجود ندارد. بنابراین، روش استفاده شده برای بهبود عملکرد حفاظتی سدها تحت بارهای انفجاری باید ابداع شود. با توجه به اینکه جنگ مدرن قابل پیش بینی است، در پیش گرفتن اقدامات موثر برای اطمینان حاصل کردن از ایمنی سازه های سد، مانند کاهش سطح آب مخزن، امکان پذیر است. برای مثال، حفره های پایینی سد «تری جورج» برای کاهش سریع سطح آب در هنگام جنگ و صلح، طراحی شده اند. حداکثر تقریباً هفت روز طول می کشد تا سطح آب مخزن از ۱۷۵ متر (سطح آب نرمال) تا ۱۳۵ متر، کاهش یابد.

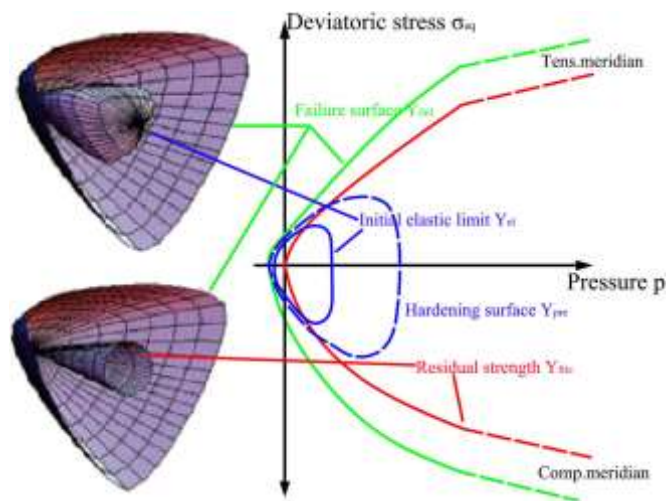
جلوگیری از آسیب به سازه ها، از اهمیت زیادی در طراحی مقاوم در برابر انفجار سدهای بتنی برخوردار است. این مقاله، یک عامل کنترل پذیر مصنوعی (سطح آب مخزن) را به عنوان نقطه آغازین برای بررسی عملکرد حفاظتی یک سیستم معمولی سد وزنی-مخزن-فونداسیون قرار گرفته در معرض بارهای انفجاری، در نظر می گیرد. مشخصه های انتشار موج ضربه ای در محیط های مختلف و اثر مرزی بر قوانین انتشار آنها، ابتدا مورد بررسی قرار می گیرند. یک روش عددی کاملاً تزویج شده با روش های

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

لاگرانژی و اویلری ترکیبی (بنسون، ۱۹۹۲)، که فرآیندهای انفجار اساسی را شامل می کند، بکار گرفته می شود. خرج انفجاری، هوا، و آب با استفاده از شبکه اویلر مدل سازی می شوند و بتن جامد و سنگ، با استفاده از شبکه لاگرانژی مدل سازی می شوند. برای یک سد قرار گرفته در معرض انفجار هوایی نزدیک سطح آب آزاد، هیچ آسیب مشهودی رخ نمی دهد. بنابراین، انفجار زیرآبی عمدتاً مورد بررسی قرار می گیرد (بخصوص، تاثیر موقعیت مواد منفجره بر میزان آسیب). اثر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سد نیز به بحث گذاشته می شود.

مدل مصالح بتن

پاسخ دینامیک مصالح بتن تحت بارگذاری انفجاری، یک فرآیند غیرخطی و وابسته به نرخ بسیار پیچیده است. در این مطالعه، مدل «ریدل-هیرومایر-توما» (RHT) (ریدل، ۲۰۰۰)، توسعه یافته براساس مدل «هولمکوئیست-جانسون-کوک» (HJC) (هولمکوئیست و همکاران، ۱۹۹۳؛ جانسون و همکاران، ۱۹۹۸)، برای مدل سازی مصالح بتن مورد استفاده قرار می گیرد. مدل RHT از سه سطح وابسته به فشار در فضای تنش (سطح حد الاستیک، سطح خرابی و سطح خرابی پسماند، به صورت نشان داده شده در شکل ۱)، تشکیل شده است (ریدل، ۲۰۰۹). این مدل همچنین، سخت شوندگی فشاری، سخت شوندگی کرنشی، سخت شوندگی نرخ کرنش، وابستگی پایای سوم برای نصف النهارهای تراکمی و کششی و یک مدل آسیب برای نرم شوندگی کرنشی را نیز در نظر می گیرد.



شکل ۱. سه سطح مقاومتی مدل RHT

سطح خرابی

سطح خرابی، Y_{fail} ، به صورت تابعی از فشار بهنجار شده p^* ، زاویه بار θ و نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ ، تعریف می شود:

(۱)



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

که $Y_c(p^*)$ شدت نصف النهار تراکمی است؛ $R_3(\theta)$ ، مقاومت کاهش یافته بر روی نصف النهار برشی و کششی، $F_{rate}(\dot{\epsilon})$ ضریب افزایش دینامیک (DIF) به صورت تابعی از نرخ کرنش زیر می باشند:

(۲)

که f_c ، مقاومت فشاری تک محوری مصالح؛ A ، ثابت سطح خرابی؛ $p_{spall}^* = f_t/f_c$ که f_t مقاومت کششی تک محوری مصالح و N ، شاخص سطح خرابی می باشند:

(۳)

در اینجا، ψ ، وابستگی نصف النهار کششی و برشی می باشد. اثرات نرخ کرنش، از طریق افزایش مقاومت شکست با نرخ کرنش پلاستیک، افزایش می یابند. دو عبارت متفاوت را می توان برای تراکم و کشش مورد استفاده قرار داد و درونیایی خطی در رژیم فشار میانی استفاده می شود:

(۴)

که در آن α ضریب نرخ کرنش فشاری و σ ضریب نرخ کرنش کششی می باشند.

سطح حد الاستیک

سطح حد الاستیک را می توان به صورت زیر توصیف نمود:

(۵)

که $F_{elastic}$ ، نسبت مقاومت الاستیک به مقاومت سطح خرابی در راستای یک مسیر شعاعی می باشد و $F_{cap}(p)$ حد تنش های انحراف دهنده کشسان تحت تراکم هیدرواستاتیک می باشد.

سطح خرابی پسماند

برای توصیف مقاومت مواد کاملاً خرد شده، یک سطح خرابی پسماند به صورت زیر تعریف می شود:

(۶)

که در آن B ، ثابت سطح خرابی پسماند؛ و M ، نمای سطح خرابی پسماند می باشند.

تکامل آسیب

در مدل RHT ، آسیب، حاصل جمع کرنش پلاستیک است؛ متغیر آسیب D را می توان به صورت زیر بیان نمود:

(۷)

که در آن $\Delta\epsilon_{PL}$ ، نمو (گام افزایشی) کرنش پلاستیک معادل؛ $\epsilon_p^{failure} = \epsilon_f^{min}$ ؛ $D_1(p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \geq \epsilon_f^{min}$ می باشند؛ D_1 و D_2 ثوابت آسیب می باشند و ϵ_f^{min} ، حداکثر کرنش خرابی می باشد. متغیر آسیب D با تجمع کرنش پلاستیک، افزایش می یابد. بعد از خرابی کامل مصالح بتن (یعنی $D = 1$)، مصالح تنها می توانند فشار محدودی را تحمل کنند و نمی توانند هرگونه تنش کششی را تحمل شوند. پارامترهای مصالح (تیو و لیو، ۲۰۰۹؛ ANSYS 2010)، بکار گرفته شده در مقاله حاضر، براساس داده های معمول مربوط به مصالح بتن هستند که در جدول ۱ نشان داده شده اند.



پارامتر	مقدار
چگالی مرجع (kg/m^3)	2.750×10^3
چگالی متخلخل (kg/m^3)	2.314×10^3
سرعت صدای متخلخل (m/s)	2.920×10^3
فشار تراکم اولیه (Pa)	2.330×10^7
فشار تراکم جامد (Pa)	5.999×10^9
مدول فشار تراکم حجمی	3.000
A_1 (Pa)	3.527×10^{10}
A_2 (Pa)	3.958×10^{10}
A_3 (Pa)	9.040×10^9
B_0	1.220
B_1	1.220
T_1 (Pa)	3.527×10^{10}
T_2 (Pa)	0
دمای مرجع (K)	300.000
گرمای ویژه ($J/kg \cdot K$)	654.000
D_1 ، ثابت خسارت	0.015
D_2 ، ثابت خسارت	1.000
حداقل فشار برای شکست	8.000×10^{-4}
کسر مدول برشی باقیمانده	0.130
مدول برشی (Pa)	1.670×10^{10}
f_c (Pa)، مقاومت فشاری	3.500×10^7
f_t / f_c ، استحکام کششی	0.100
f_s / f_c ، مقاومت برشی	0.180
ثابت سطح شکست دست نخورده، A	1.600
توان سطح شکست دست نخورده، N	0.610
نسبت نصف النهار کششی/فشاری، Q	0.6805
انتقال شکننده به شکل پذیر	0.0105
G (الاستیک)/(الاستیک-پلاستیک)	2.000
f_t / استحکام الاستیک	0.700
f_c / استحکام الاستیک	0.530
توان شکست، M	0.800



ثابت مقاومت شکست، B	0.700
α ، توان فشاری نرخ کرنش	0.032
δ ، توان کششی نرخ کرنش	0.036
حداکثر نسبت استحکام شکست	1.000×10^{20}
کرنش فرسایشی	2.000

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در مدل RHT بتن

پارامتر	مقدار
ρ_0 (kg/m ³)، چگالی مرجع	2.660×10^3
k_1 (Pa)، مدول حجمی	2.570×10^{10}
k_2 (Pa)، ثابت چند فرمولی EOS	-4.500×10^{12}
k_3 (Pa)، ثابت چند فرمولی EOS	3.000×10^{14}
مدول برشی، G (Pa)	2.190×10^{10}
حد الاستیک $Hugoniot$ ، HEL (Pa)	4.500×10^9
ثابت استحکام دست نخورده، A	0.760
β ، کماتش ثابت	0.500
توان استحکام دست نخورده، N	0.620
ثابت نرخ کرنش، C	0.005
ثابت مقاومت شکست، B	0.250
توان شکست، M	0.620
حداکثر نسبت مقاومت شکستگی	-5.400×10^7
D_1 ، ثابت خسارت	0.005
D_2 ، ثابت خسارت	0.700

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در مدل $JH-2$ برای توده سنگ

مدل اساسی دینامیک غیرخطی برای توده سنگ

طبق پژوهش قبلی، مدل اساسی جانسون-هولمکوئیست ($JH-2$) (جانسون و هولمکوئیست، ۱۹۹۹) برای مدل سازی مصالح سنگی مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل در ابتدا برای توصیف پاسخ شکننده سرامیک ها، تدوین شده بود (جانسون و همکاران، ۲۰۰۳؛ هولمکوئیست و جانسون، ۲۰۰۵). خلاصه ای از ثوابت مربوط به سنگ در جدول ۲ ارائه شده اند.

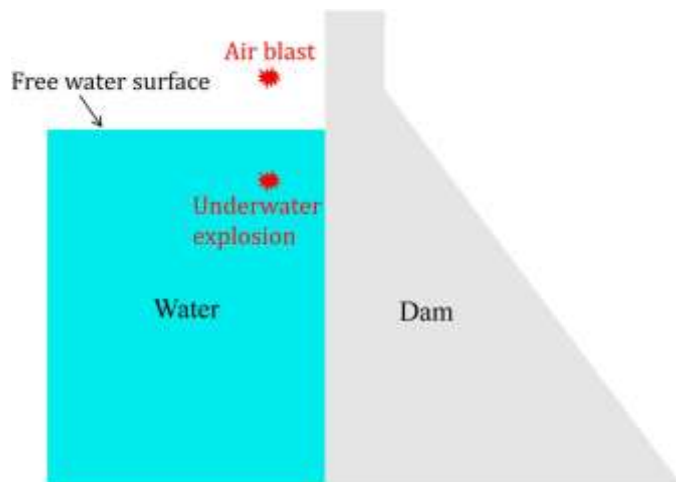
مدل مصالح برای مواد منفجره، آب و هوا

مواد منفجره پرنرژی، معمولاً بوسیله معادله حالت (EOS) جونز، ویلکینس و لی (JWL) استاندارد، که توصیفی از رابطه بین فشار انفجار، انرژی داخلی واحد حجمی و حجم نسبی ارائه می دهد، مدل سازی می شوند.

محیط آب، بوسیله EOS چندجمله ای که در حالت های تراکمی مختلف، شکل های مختلف دارد، توصیف می شود. EOS گاز ایده آل برای هوا استفاده می شود. در این مطالعه، ثوابت استاندارد مواد منفجره، آب و هوا، استخراج شده از کتابخانه مواد ($ANSYS 2010$) $AUTODYN$ مورد استفاده قرار می گیرند.

انتشار موج ضربه ای از انفجار زیرآبی و انفجار هوایی نزدیک مرزها

این مقاله، تاثیر سطوح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض بارهای انفجاری را مورد بررسی قرار می دهد. اما، با پایین آمدن سطح آب مخزن، ممکن است سدها از هر دوی بارهای انفجاری هوایی و زیرآبی، آسیب ببینند، همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده. معروف است که فشار موج ضربه ای ناشی از انفجار زیرآبی در میدان آزاد، بسیار بیشتر از انفجار هوا در میدان آزاد است (هنریچ، ۱۹۷۹؛ راجندران و لی، ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۴). عمدتاً این به علت اختلاف خواص فیزیکی انفجارها و پدیده لایه مرزی بین محصولات انفجار و محیط اطراف، می باشد. اما، موج ضربه ای از هوا به آب منتشر می شود اگر انفجار هوایی نزدیک سطح آب آزاد باشد. بنابراین، مشخصه های موج ضربه ای در آب از هر دوی انفجار زیرآبی و انفجار هوایی نزدیک سطح آب آزاد، باید ابتدا با هم مقایسه شوند. برای بررسی تاثیر لایه مرزی بر مشخصه های انتشار موج ضربه ای یک انفجار زیرآبی و یک انفجار هوایی، یک مدل عددی المان محدود متقارن محوری دو بعدی، ایجاد می شود.





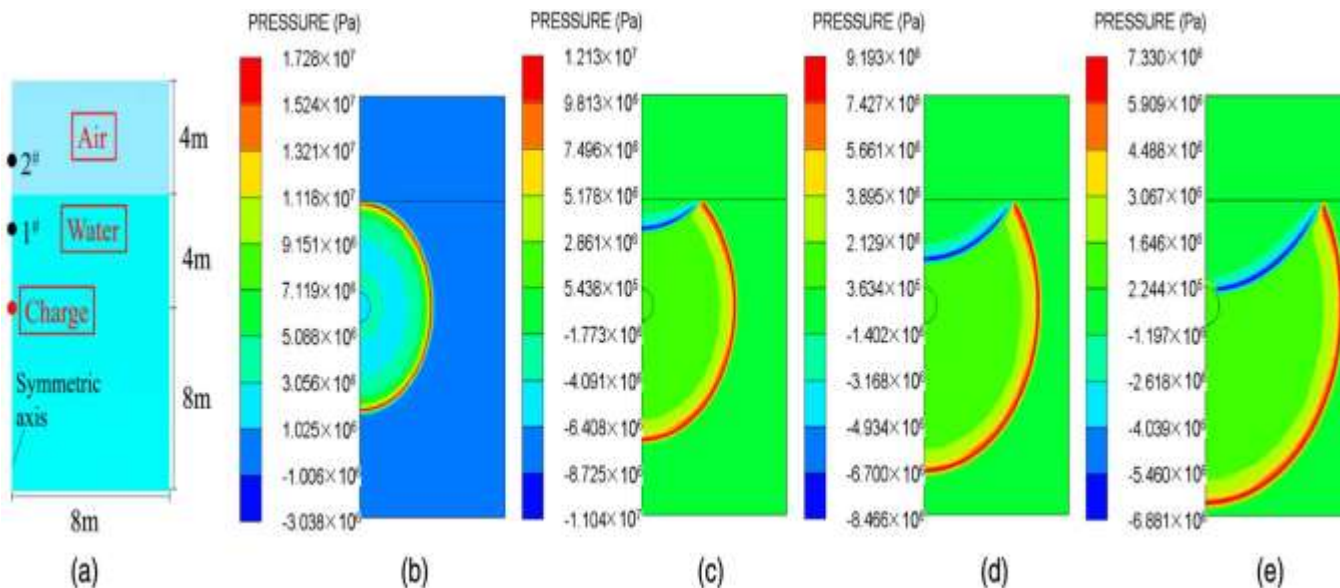
شکل ۲. دیاگرام شماتیک سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض یک انفجار زیرآبی و یک انفجار هوایی هنگامی که سطح آب مخزن در حال کاهش است.

مدل محاسبات در شکل های ۳ (الف) و ۴ (الف) نشان داده شده است. مساحت این مدل 16×8 متر است. المان جامد برای همه مصالح استفاده می شود و اندازه المان، ۱۰ میلی متر است. محاسبات در حوزه سیال، انجام می شوند. آب، هوا و مواد منفجره بوسیله شبکه اویلر، مدل سازی می شوند. یک خرج انفجاری کروی به وزن ۸ کیلوگرم از جنس تری نیتروتولون (TNT) برای این شبیه سازی، انتخاب می شود. آب و هوا با هم پیوند داده می شوند و مواد منفجره در آب/هوا، پر می شود. شرایط مرزی انتقالی برای همه مرزهای برشی، استفاده می شوند. شکل های ۳ و ۴، کانتورهای فشار به ترتیب انفجارهای زیرآبی و هوایی، نزدیک سطح آب را نشان می دهند. جهت مقایسه پتانسیل آسیب مواد منفجره، دو نقطه هدف در شکل های ۳ (الف) و ۴ (الف)، گذاشته می شوند. فواصل بین این اهداف و لایه مرزی همگی برابر با ۱ متر انتخاب می شوند. همانگونه که می توان مشاهده نمود، نقاط ۱ و ۴، در آب هستند و نقاط ۲ و ۳ در هوا هستند.

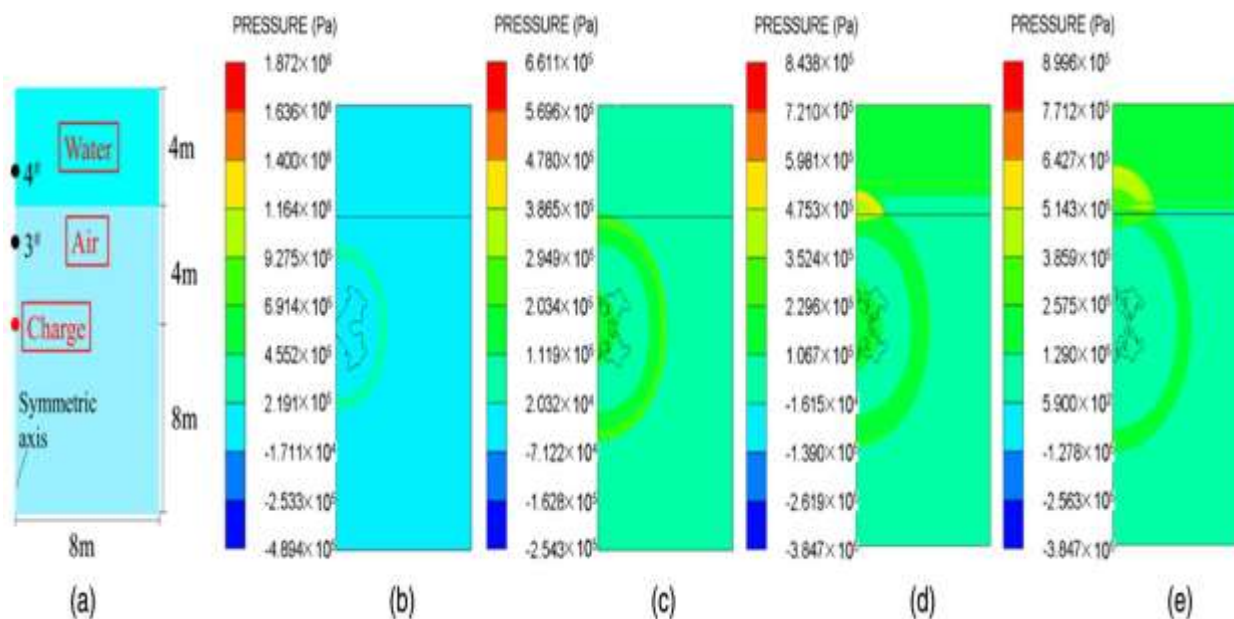
از شکل ۳ (ب) می توان ملاحظه نمود که موج ضربه ای، تولید شده بوسیله انفجار زیرآبی، انتشار می یابد و در زمان $t = 2.4 \text{ ms}$ به سطح آب آزاد می رسد. هنگامی که موج ضربه ای با سطح آب آزاد اثر متقابل پیدا می کند، یک موج بازتابی کششی (موج رقیق کننده پراندتل-مایر) و یک موج ارسال شده، تشکیل می شوند. بخاطر امیدانس صوتی بسیار کمتر و چگالی هوا، موج ارسال شده، بسیار ضعیف تر از موج رقیق کننده بازتابی است. به این دلیل است که انتشار موج ضربه ای منتقل شده در محیط هوا در شکل های ۳ (ج تا ه) در نظر گرفته نشده است. بخاطر اینکه آب نمی تواند مقدار قابل توجهی از کشش را تحمل کند، موج رقیق کننده باعث افت سریع فشار آب می شود (درست پایین تر از سطح آب آزاد) و در آب، حفره تشکیل می شود [شکل ۳ (ج)]. با ادامه انتشار موج رقیق کننده، زون حفره زایی، بزرگتر می شود [شکل های ۳ (د تا ه)].

می توان از شکل ۴ (ب) ملاحظه نمود که موج ضربه ای، تولید شده بوسیله انفجار هوایی، بعد از انفجار در هوا انتشار می یابد. در $t = 4.2 \text{ ms}$ ، موج ضربه ای هوا به لایه مرزی می رسد [شکل ۴ (ج)] و سپس با سطح آب آزاد، اثر متقابل پیدا می کند، که این نشان می دهد که سرعت انتشار موج ضربه ای هوایی، کمتر از انتشار موج ضربه ای در زیر آب است.

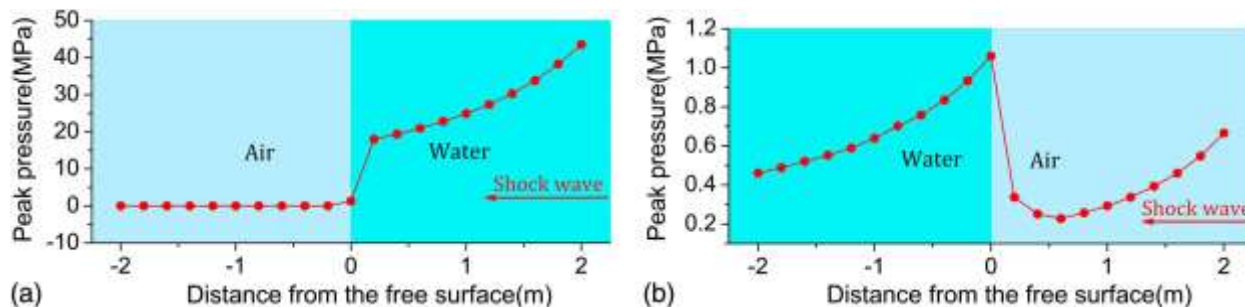
شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۳. کانتور فشار یک انفجار زیرآبی نزدیک سطح آب آزاد: (الف) مدل محاسباتی؛ (ب) $t = 2.4 \text{ ms}$ (ج) $t = 3.2 \text{ ms}$ ؛ (د) $t = 4.0 \text{ ms}$ و (ه) $t = 4.8 \text{ ms}$



شکل ۴. کانتور فشار یک انفجار هوایی نزدیک سطح آب آزاد (الف) مدل محاسباتی (ب) $t = 2.4 \text{ ms}$ (ج) $t = 4.2 \text{ ms}$ ؛ (د) $t = 4.8 \text{ ms}$ و (ه) $t = 5.4 \text{ ms}$



شکل ۵. پیک فشار (اضافه فشار) یک موج ضربه ای از انفجار زیرآبی نزدیک سطح آب آزاد و (ب) انفجار هوایی نزدیک سطح آب آزاد.

در نتیجه، موج منعکس شده (حاصل از انعکاس سطح آب آزاد) و موج ضربه ای منتشر شده (انتشار از محیط هوا به محیط آب)، تشکیل می شوند. بخاطر اینکه امپدانس صوتی و چگالی آب بیشتر از هوا می باشند، موج منعکس شده مشخصاً فشار آب را (درست بالاتر از سطح آب آزاد) افزایش می دهد، همانگونه که در شکل ۴ (د و ه) نشان داده شده.

شکل ۵، پیک فشار (اضافه فشار) موج ضربه ای نزدیک سطح آب آزاد را نشان می دهد. هنگامی که مواد منفجره در آب منفجر می شود [شکل ۵ (الف)]، پیک فشار موج ضربه ای سریعاً نزدیک لایه مرزی از 17.95 MPa در آب به 0.01 MPa در هوا، کاهش می یابد. بنابراین، شدت موج ضربه ای ارسال شده بسیار کمتر از موج ضربه ای بازتابیده شده می باشد. هنگامی که مواد منفجره در هوا منفجر می شود [شکل ۵ (ب)]، پیک فشار موج ضربه ای با افزایش فاصله توقف، کاهش می یابد. بخاطر برهمهنگامی موج انعکاسی، پیک فشار نزدیک سطح آب آزاد به صورت نشان داده شده در شکل ۵ (ب)، افزایش می یابد. هنگامی که موج ضربه ای از هوا به آب منتقل می شود، افزایش پیک فشار از 0.34 MPa در هوا به 1.06 MPa در آب رخ می دهد. سپس، موج ضربه ای منتقل شده که در هوا انتشار پیدا کرده به تدریج کاهش پیدا می کند. می توان نتیجه گیری کرد که اثر برشی موج ضربه ای، در انفجار زیرآبی نزدیک سطح آب آزاد رخ می دهد و بهبود اثر موج ضربه ای در انفجار هوایی نزدیک سطح آب آزاد، رخ می دهد.

در شکل ۹، منحنی سابقه فشار (اضافه فشار) انفجار زیرآبی با انفجار هوایی، مقایسه شده است. می توان ملاحظه نمود که پیک فشار (26.54 MPa)، موج ضربه ای انفجار زیرآبی (نقطه ۱) بسیار بیشتر از (0.32 MPa) انفجار در هوا (نقطه ۳) می باشد و پیک فشار (0.005 MPa) موج ضربه ای منتقل شده از انفجار زیرآبی (نقطه ۲)، کمتر از (0.51 MPa) از انفجار هوا (نقطه ۴)، کمتر است. با اینکه اثر بهبود در انفجار در هوا نزدیک سطح آب آزاد رخ می دهد هنگامی که موج ضربه ای از هوا به آب منتشر می شود، شدت موج ضربه ای در آب از انفجار زیرآبی بسیار بیشتر از انفجار در هوا، هم در آب و هم در هوا می باشد.

اثر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی

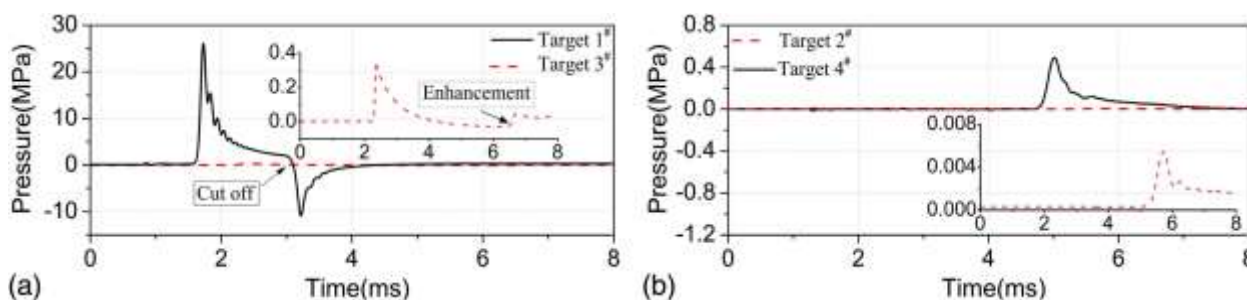
تحلیل های تازه ارائه شده نشان می دهند که پیک فشار موج ضربه ای از یک انفجار زیرآبی نزدیک سطح آب آزاد، بسیار بیشتر از انفجار در هوا نزدیک سطح آب آزاد می باشد. برای مقایسه مشخصه های آسیب سدهای وزنی بتنی در این دو سناریوی انفجار، یک تحلیل آسیب متناظر در این بخش انجام می شود. بخاطر اینکه سدها، به احتمال کمتر تحت شرایط نرمال آب، در معرض انفجار هوایی قرار می گیرند، انفجار هوایی نزدیک در سطح آب آزاد، هنگام کاهش سطح آب تا سطح آب راکد، در نظر

گرفته می شود. تاثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض انفجارهای زیرآبی در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد.

آرایش سد وزنی بتنی و راه اندازی مدل عددی

در اینجا، یک سد وزنی بتنی عادی برای بررسی عددی بکار گرفته می شود. ارتفاع سطح آب نرمال $1791.0 m$ است و ارتفاع سطح آب راکد $1746.0 m$ می باشد. عرض یکپارچه، 15 متر و حداکثر ارتفاع سد، 120 متر است. با توجه به تقارن مدل، تنها یک قاچ با عرض $7/5$ متر از سیستم سد-مخزن-فونداسیون برای کاهش محاسبات، انتخاب می شود. دیاگرام محاسباتی و مدل کاملاً تزویج شده یکپارچه (تک سنگ) غیرسرریز، در شکل ۷ نشان داده شده اند. مواد منفجره، هوا و آب مخزن بوسیله شبکه اویلر مدل سازی می شوند و در حوزه سیال، محاسبه می شوند. سد و فونداسیون بوسیله شبکه لاگرانژ مدل سازی می شوند و درحوزه جامد، محاسبه می شوند. مصالح درون حوزه یکسان، به هم ملحق می شوند و مواد منفجره در آب قرار داده می شود. الگوریتم تزویج سیال-جامد، برای اثر متقابل بین آب مخزن، سد و فونداسیون، بکار گرفته می شود.

یک ماده منفجره TNT کروی با وزن 500 کیلوگرم، که نشان دهنده یک واقعه بزرگ است، برای این محاسبات انتخاب می شود. فاصله توقف و عمق انفجار، برابر با 10 متر انتخاب می شوند. در قسمت مرکزی مواد منفجره، اندازه المان 100 میلی متر (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶) می باشد و اندازه مش به تدریج از مرکز مواد منفجره، افزایش می یابد. اندازه المان در زون بالایی سد، 100 میلی متر است و اندازه مش به تدریج به سمت ته سد، افزایش می یابد. کل مدل دارای 2107440 المان و 2240998 گره می باشد. اندازه مش، بوسیله تست همگرایی، تعیین می شود. فهمیده شده که اندازه المان کمتر برای آب و بتن باعث بدست آمدن نتایج مشابه می شود اما زمان محاسبات به صورت هنگفتی افزایش می یابد. برای مطالعه پاسخ دینامیک سد در سطوح آب مختلف، یک نقطه هدف در تاج سد، در نظر گرفته می شود.



شکل ۶. آرایش مدل عددی کاملاً تزویج شده

نواحی محدود از آب مخزن، هوا و فونداسیون، بخاطر ظرفیت و قدرت محاسبات محدود، برش داده می شوند. برای کل حوزه محاسباتی، یک مرز انتقالی بر روی مرزهای برش دهنده بکار گرفته می شود تا عبور آزاد موج های ضربه ای/تنشی، ممکن شود. در عین حال، مرز متقارن بر روی صفحه تقارن بکار گرفته می شود و ته سنگ، در همه جهت ها، ثابت در نظر گرفته می شود. همه شبیه سازی های عددی در مدل سه بعدی انجام می شوند. با اینکه شکل ۷ تنها مدل محاسبات کاملاً تزویج شده، که تنها با سطح آب نرمال کاملاً تزویج شده است، اما مدل های محاسباتی برای سطوح آب دیگر را می توان براحتی ایجاد نمود.



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

انفجار یک ماده بسیار منفجره در آب، باعث انتشار سریع موج ضربه ای در آب می شود. بعد از گسیل موج ضربه ای، محصولات انفجار، یک حباب گاز دما بالا و فشار بالا تشکیل می دهد که فشار پالس حباب را بخاطر گرانش، فشار هیدرواستاتیک و اینرسی ایجاد می کند. این مطالعه، عمدتاً بر پاسخ سازه ای به یک موج ضربه ای انفجاری مستقیم و آسیب از آن، تمرکز می کند. دو دلیل دارد. از یک سو، پالس حباب اول، بسیار دیرتر از موج ضربه ای رخ می دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸)، و در نتیجه به میزان زیادی، زمان محاسبات افزایش می یابد و باعث پر شدن حافظه کامپیوتر می گردد (وانگ و ژانگ، ۲۰۱۴). از سوی دیگر، فشار از پالس حباب اول (تنها ۱۰ تا ۲۰ درصد موج ضربه ای) بسیار کمتر از پیک فشار موج ضربه ای است (کول، ۱۹۴۸). مطالعات بیشتر در مورد اثر ترکیبی بارگذاری ضربه ای و فشار پالس حباب بر پاسخ سازه ای و آسیب سد، لازم می باشند، زیرا مدت پالس حباب، طولانی تر از موج ضربه ای است که این می تواند باعث آسیب معین برای سد شود.

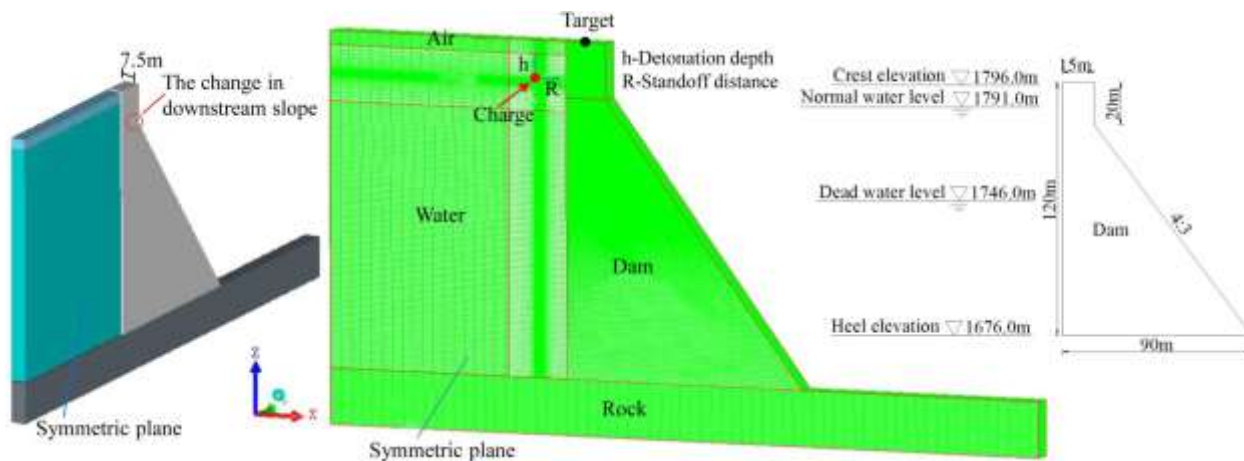
تست اعتباریابی

برای اعتباریابی دقت و قابلیت اطمینان مدل عددی تزویج یافته، که برای شبیه سازی پاسخ سازه بتن به بار انفجاری و آسیب از آن، توسعه یافته، یک دال «بتن آرمه» (RC) تست شده بوسیله وانگ و همکاران (۲۰۱۳) ابتدا طبق شرایط آزمون، شبیه سازی می شود. طول و عرض دال ۱۰۰۰ میلی متر و ضخامت دال، ۴۰ میلی متر است. این دال، در دو جهت تقویت می شود و فاصله بین هر میلگرد ۷۵ میلی متر است همانگونه که در شکل ۸ (الف) نشان داده شده. نسبت تقویت و آرماتوربندی در هر دو جهت ۱/۴۳ درصد است. وزن TNT ، ۰/۴۶ کیلوگرم و فاصله توقف ۴۰۰ میلیمتر، انتخاب می شود. این دال بر روی قاب فولادی به صورت نشان داده شده در شکل ۸ (ب)، تثبیت شده است. اطلاعات تفصیلی بیشتر در مورد این تست را می توان در مقاله وانگ و همکاران (۲۰۱۳) ملاحظه نمود. یک مدل عددی المان محدود سه بعدی، شامل مواد منفجره، هوا و دال RC برای شبیه سازی آزمایش تجربی، ایجاد می شود. در این شبیه سازی، یک روش لاگرانژی-اولیری کاملاً تزویج شده، برای در نظر گرفتن شمول فرآیندهای اساسی، بکار گرفته می شود. هوا و مواد منفجره بوسیله شبکه اولیر، مدل سازی می شوند، دال RC ، بوسیله شبکه لاگرانژی مدل سازی می شود و میلگردها بوسیله المان های تیر، مدل سازی می شوند. اندازه المان های بتن، TNT ، هوا و فولاد به ترتیب ۱۰، ۵، ۲۰ و ۱۰ میلی متر می باشند. شبیه سازی در ۶ میلی ثانیه متوقف می شود، زیرا سرعت پسماند در دال فوق العاده کم می شود. کل مدل از ۱۲۰۲۰۰ المان تشکیل شده است. برای کل حوزه محاسباتی، یک مرز انتقالی بر روی مرزهای برش دهنده هوا، بکار گرفته می شود، دال RC در هر دو جهت عمودی و طولی، ثابت فرض می شوند.

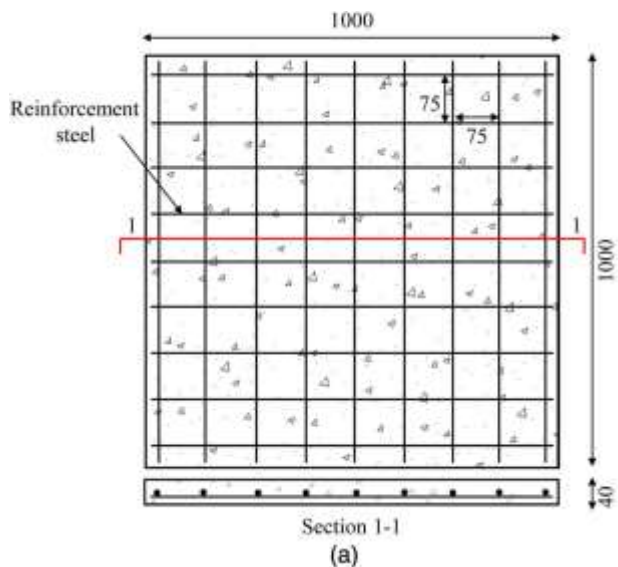
شکل های ۹ و ۱۰، نواحی آسیب دیده بدست آمده از شبیه سازی عددی و تست های انفجار را با هم مقایسه می کنند. نتایج عددی نشان می دهند که طرف بالایی دال بوسیله مقداری ترک های شعاعی و حلقوی، آسیب می بینند. قطر ترک های حلقوی بدست آمده از نتایج شبیه سازی و تجربی، به ترتیب تقریباً ۷۵۰ و ۸۲۰ میلی متر می باشند. در سطح ته دال، مقاومت کم بتن به ککش باعث بوجود آمدن یک دهانه پوسته پوسته کششی در سطح پشتی می شود. قطر پوسته ها بدست آمده از نتایج شبیه سازی و تجربی به ترتیب تقریباً ۱۲۰ و ۱۴۰ میلی متر می باشند. این مقایسات نشان می دهند که نتایج عددی با نتایج تجربی بسیار همخوانی دارند و نشان می دهند که مدل عددی باعث بدست آمدن پیش بینی های معقول در مورد پاسخ سازه ای سد به بارهای انفجاری می شود.

تایید مش

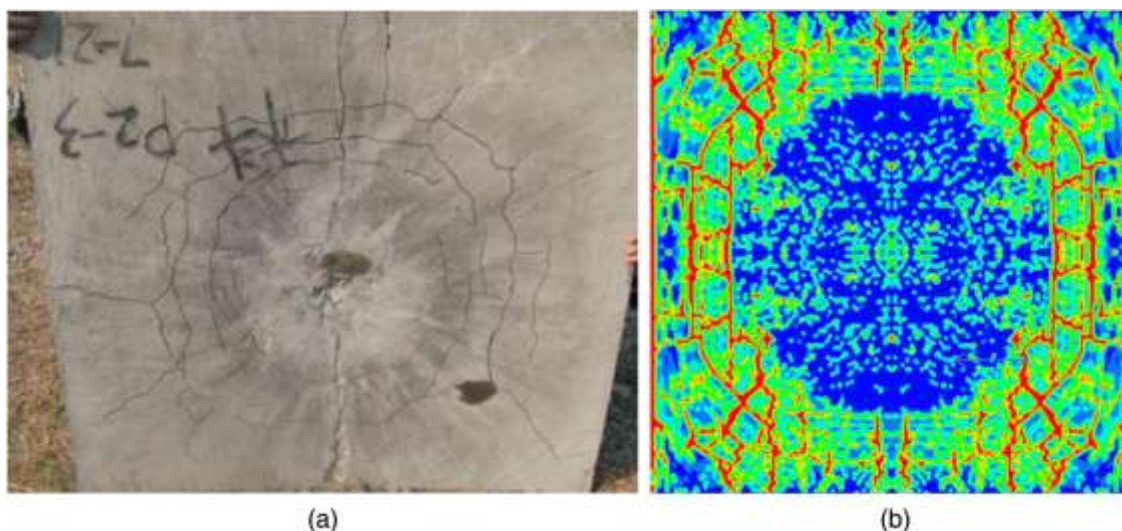
برای تایید اینکه اندازه مش انتخاب شده در مدل سد، می تواند بطور موثر انتشار موج ضربه ای را شبیه سازی کند، یک مدل عددی سه بعدی برای یک انفجار زیرآبی/هوایی میدان آزاد، ایجاد می شود. نتایج شبیه سازی با فرمول های تجربی مقایسه می شوند (زامیشلیائف و یاکوفلف، ۱۹۶۷؛ هنریچ، ۱۹۷۹). مدل سه بعدی، یک هشتم یک مکعب با سه صفحه متقارن به صورت نشان داده شده در شکل ۱۱ می باشد.



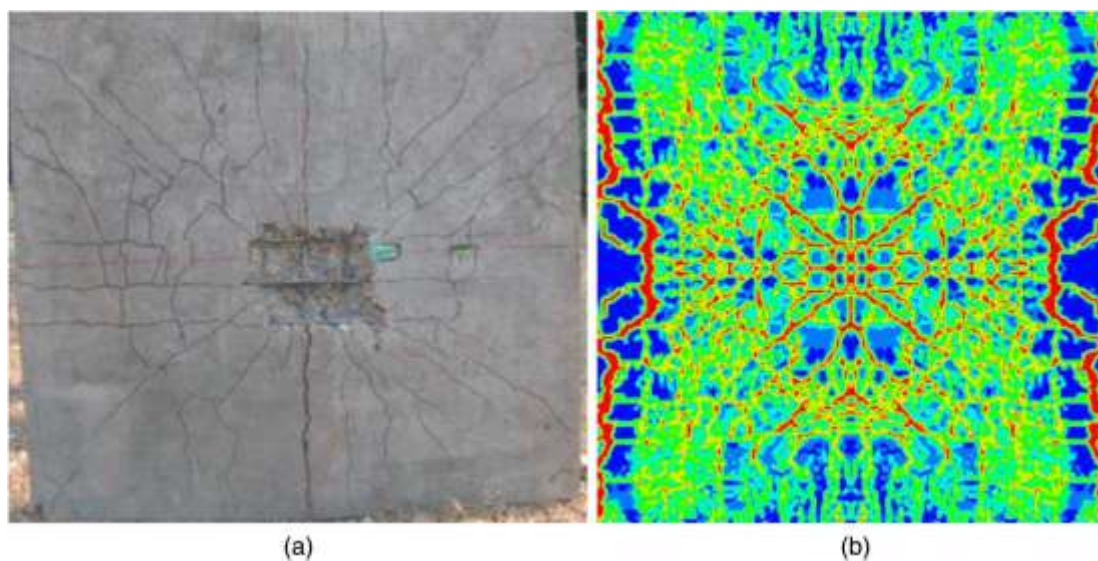
شکل ۷. آزمون نمونه (بر حسب میلیمتر): (الف) ابعاد دال و آرماتورها و (ب) تکیه گاه فولادی



شکل ۸. سطح بالایی دال RC تحت انفجار (الف) نتایج عددی و (ب) نتایج تجربی



شکل ۹. سطح پایینی دال RC تحت انفجار (الف) نتایج عددی و (ب) نتایج تجربی



شکل ۱۰. مدل محاسباتی یک انفجار میدان آزاد

مساحت پیرامونی مدل $10 \times 10 \times 10 \text{ m}$ است و اندازه المان، ۱۰۰ میلی متر است. وزن مواد منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم است. همه مواد بوسیله شبکه اویلر مدل سازی می شوند. شرایط مرزی انتقال برای همه مرزهای برش دهنده مورد استفاده قرار می گیرند تا یک انفجار میدان آزاد شبیه سازی شود.



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

شکل های ۱۲ (الف و ب)، پیک فشار عددی و تجربی را برای بترتیب انفجار زیرآبی و انفجار در هوا، را مقایسه می کنند. می توان ملاحظه نمود که مقادیر عددی در اطراف مواد منفجره، بیشتر از مقادیر تجربی هستند که این ممکن است در نتیجه اندازه مش به اندازه غیرکافی کوچک مورد استفاده در شبیه سازی باشد. اما، با افزایش فاصله از مرکز مواد منفجره (بزرگتر از ۳ متر)، مقادیر عددی مربوط به پیک فشار موج ضربه ای همخوانی خوبی با نتایج تجربی دارند که این نشان می دهد که مدل کاملاً تزویج شده، قابلیت اطمینان قوی دارد و برای محاسبه و تحلیل توضیح داده شده در ادامه، قابل استفاده می باشد.

عملکرد حفاظتی برای سطح آب نرمال و سطح آب راکد

سطح آب نرمال

برای مطالعه تاثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی یک سد وزنی بتنی، قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی، پاسخ دینامیک غیرخطی سد با یک سطح آب نرمال، ابتدا بدست می آید. شکل ۱۳ (الف)، یک نمای شماتیک از سد با سطح آب نرمال می باشد. فاصله توقف و عمق انفجار هر دو برابر با ۱۰ متر انتخاب می شوند. شکل های ۱۳ (ب تا د)، کانتورهای فشار را در گذر زمان نشان می دهند. در $t = 4 \text{ ms}$ [شکل ۱۳ (ب)]، موج ضربه ای تولید شده بوسیله انفجار زیرآبی به سطح آب آزاد و وجه بالادست سد می رسد. هنگامی که موج ضربه ای فرودی با سطح آزاد آب اثر متقابل می کند، یک موج منعکس شده کششی (موج رقیق کننده) و یک موج ارسال شده، تشکیل می شوند. بخاطر اینکه آب نمی تواند مقدار قابل توجهی کشش را تحمل کند، موج رقیق کننده که در جهت های عکس در راستای مرز آب-هوا حرکت می کند، باعث افت سریع فشار آب (درست زیر سطح آب آزاد) می شود و حفره زایی در آب به صورت نشان داده شده در شکل ۱۳ (ج) رخ می دهد. هنگامی که موج ضربه ای فرودی به سطح بالادست سد برخورد می کند، اثر متقابل موج ضربه ای-سازه، ابتدا باعث منعکس شدن موج ضربه ای می شود که این باعث افزایش فشار آب نزدیک سطح بالادست سد می شود. سپس، موج شوک منعکس شده با محصولات انفجار اثر متقابل می کند تا یک موج رقیق شونده تولید کند. این موج رقیق کننده، سپس با لایه مرزی آب-سازه اثر متقابل می کند و یک حفره نزدیک سطح سازه ای، به صورت نشان داده شده در شکل ۱۳ (د)، ایجاد می کند.

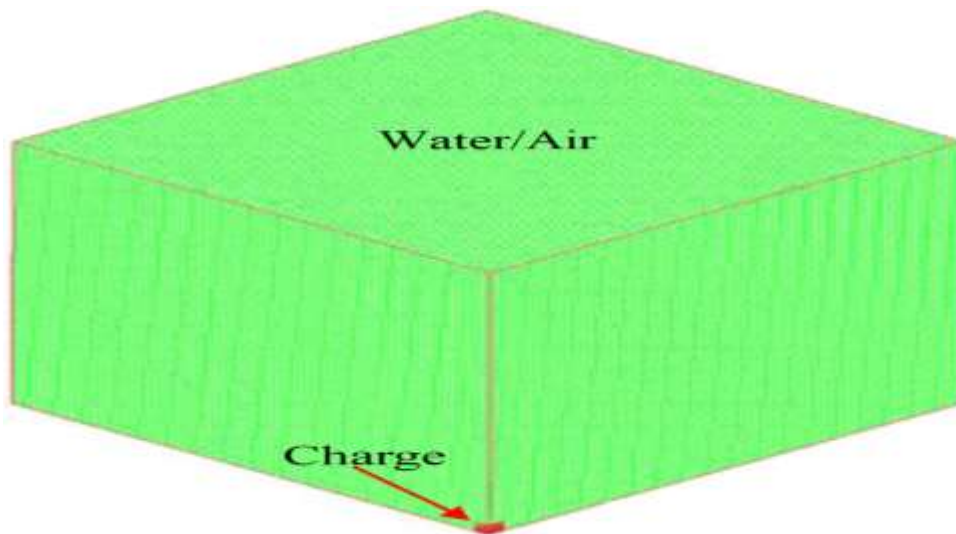
تکامل آسیب سد وزنی بتنی قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی در شکل ۱۴ نشان داده شده. مقدار کانتور بین ۰ و ۱ در توضیحات شکل، نشان دهنده وضعیت آسیب عنصر بتنی از اثر متقابل تا آسیب کامل می باشد. در $t = 8 \text{ ms}$ [شکل ۱۴ (الف)]، مشاهده می شود که این آسیب در ابتدا بر سطح بالادست سد، نزدیک مرکز انفجار و لایه مرزی بین سد و سطح آزاد آب، رخ می دهد. این عمدتاً بخاطر اثر پانچی موج ضربه ای و اثر حفره زایی است. هنگامی که موج ضربه ای از آب مخزن به بدنه سد منتشر می شود، تضعیف می شود و به یک موج تنش تراکمی، تبدیل می شود. این موج تنش تراکمی، باعث انبساط شعاعی و آسیب کششی مماسی تا زون بالایی سد، به صورت نشان داده شده در شکل ۱۴ (ب) می شود. سطح پایین دست سد نیز از آسیب کششی در این زمان لطمه می خورد که این بخاطر آن است که امپدانس (مقاومت) موج هوا بسیار کمتر از مواد بتنی است. هنگامی که موج تنش تراکمی به سطح پایین دست انتشار می یابد، موج منعکس شده از سطح پایین دست باعث بوجود آمدن یک موج منعکس شده کششی می شود. با انتشار موج تنش کششی، آسیب کششی به صورت پیوسته در سد انبساط پیدا می کند و آسیب غیرمنظم به صورت نشان داده شده در شکل های ۱۴ (ج و د) ظاهر می شود. آسیب خمشی در سطح بالادست سد مشاهده می شود که این بخاطر اثر غیرمستقیم موج ضربه ای است.

سطح آب راکد

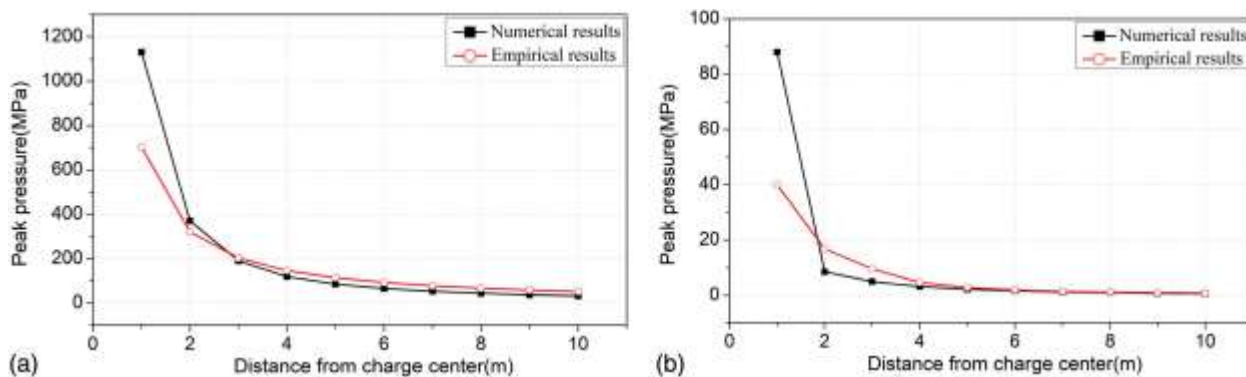
تحت شرایط معمول، سطح آب نرمال می تواند به تدریج تا سطح آب راکد، کاهش یابد. اما، سد ممکن است نزدیک سطح آب آزاد تحت شرایط سطح آب راکد، در معرض هر دوی انفجارهای زیرآبی و هوایی قرار گیرد. برای مطالعه عملکرد حفاظتی سد

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

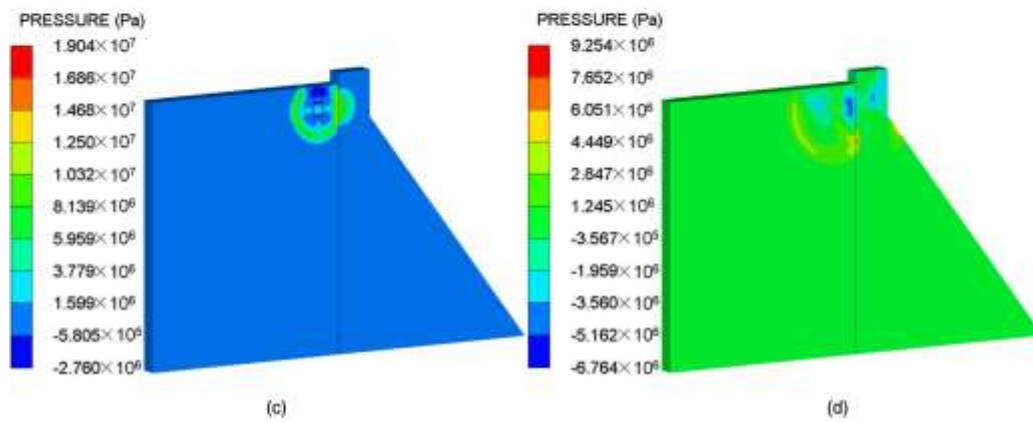
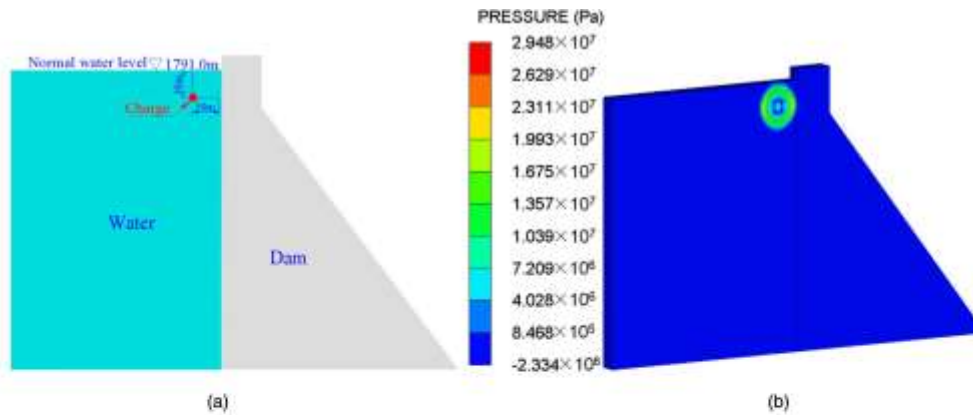
وزنی بتنی در سطح آب راکد و مقایسه آسیب به سد هنگامی که در معرض انفجار زیرآبی و انفجار هوایی قرار می گیرد، دو مدل کاملاً تزویج شده با سطح آب راکد، ایجاد می شود. شکل‌های ۱۵ (الف) و ۱۶ (الف) به صورت شماتیک سد را در سطح آب راکد برای انفجار زیرآبی و انفجار هوایی، به ترتیب نشان می دهند. فاصله از سطح آب آزاد و فاصله توقف، ۱۰ متر هستند.



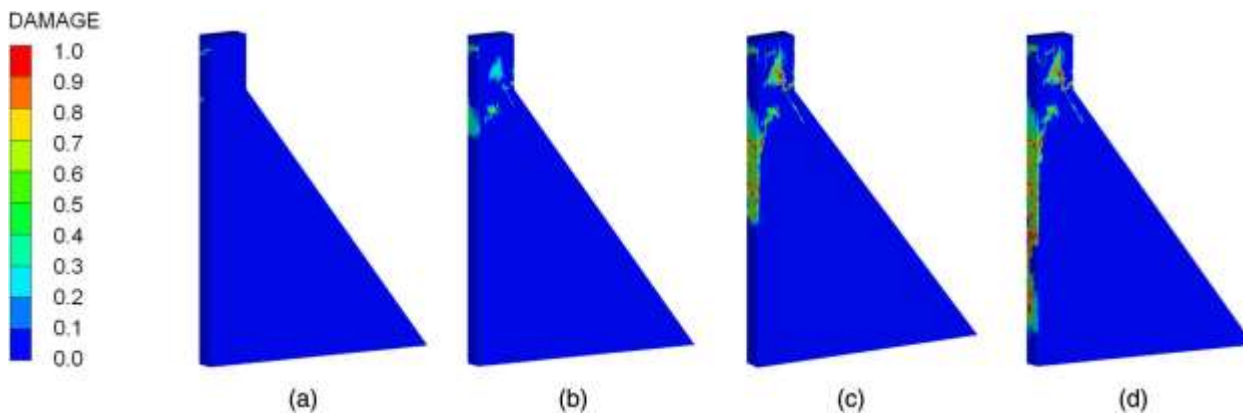
شکل ۱۱.



شکل ۱۲. مقایسه پیک فشار عددی و تجربی (الف) انفجار زیر آب و (ب) انفجار در هوا



شکل ۱۳. کانتور فشار انفجار زیرآبی در سطح آب نرمال (الف) شماتیک (ب) $t = 4 \text{ ms}$ (ج) $t = 7 \text{ ms}$ و (د) $t = 12 \text{ ms}$



شکل ۱۴. تکامل آسیب به سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی در سطح آب نرمال (الف) $t = 8 \text{ ms}$ (ب) $t = 13 \text{ ms}$ (ج) $t = 30 \text{ ms}$ و (د) $t = 60 \text{ ms}$

تکامل آسیب برای سد بتنی قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی در شکل های ۱۵ (ب تا د)، نشان داده شده. با مقایسه تکامل در سطح آب نرمال و سطح آب راکد (شکل های ۱۴ و ۱۵)، مشاهده شد که آسیب موضوعی به هد سد، در سطح آب راکد، به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. این به علت جلوگیری از انتقال انرژی بوسیله اثر برش (*cutoff*) سطح آب است. با اینکه آسیب به تاج سد در انفجار زیرآبی در سطح آب راکد بدتر است، آسیب مخرب در تاج سد، مشاهده نمی شود. عملکرد حفاظتی سراسری سد را می توان با کاهش سطح آب براساس تعریف سناریوی انفجار فرض شده، بهبود داد که این همچنین، متاثر شدن نواحی پایین دست هنگام رخداد رخنه در سد بتنی را کاهش می دهد. هر جا که آسیب قابل توجه ناشی از بار انفجاری در بدنه سد رخ دهد، ترک برداری و رخنه می تواند رخ دهد. بنابراین، سناریوهای انفجار واقع بینانه، احتمال رخنه با سطوح آب مختلف را مورد ملاحظه قرار می دهد.

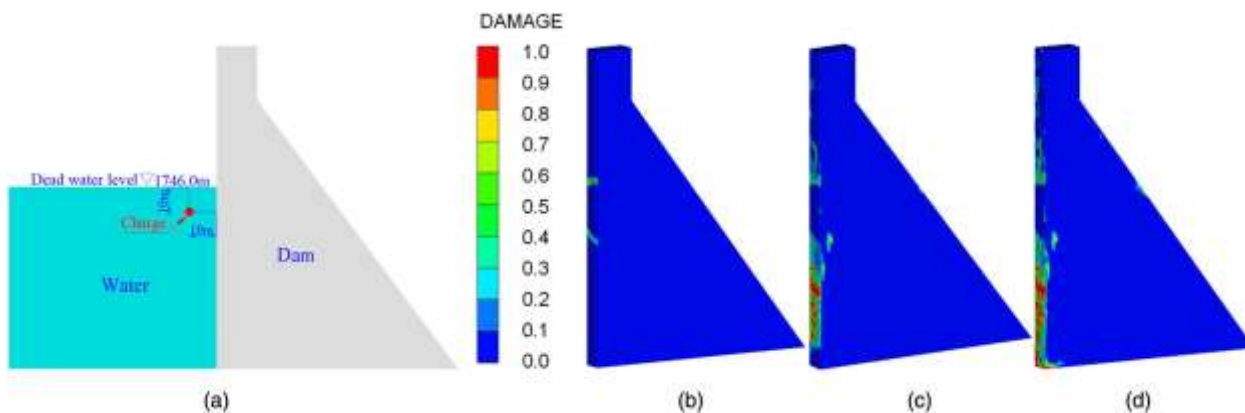
تکامل آسیب ایجاد شده برای سد بتنی قرار گرفته در معرض انفجار در هوا، نزدیک سطح آب آزاد (فاصله از سطح آب و فاصله توقف ۱۰ متر هستند) در شکل های ۱۶ (ب تا د) نشان داده شده اند.

می توان مشاهده نمود که آسیب مشهودی در سد رخ نمی دهد. این عمدتاً بخاطر این است که موج ضربه ای سریعاً در هوا تنزل پیدا می کند و سد وزنی، یک سازه بتنی عظیم است. می توان نتیجه گیری کرد که یک انفجار زیرآبی می تواند به میزان قابل توجهی باعث آسیب بیشتر نسبت به همان مقدار ماده انفجاری در هوا، وارد کند. بنابراین، تحلیل های بعدی عمدتاً بر تاثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض انفجارهای زیرآبی، تمرکز می کنند.

تحلیل های مقایسه ای

مکان های شروع انفجار برای دو انفجار زیرآبی قبلاً توصیف شده، متفاوت هستند. برای کنار گذاشتن تاثیر موقعیت شروع انفجار بر آسیب به سد، یک حالت متمایز در نظر گرفته می شود که در آن سطح آب در مخزن، سطح آب نرمال است و فاصله توقف برابر تا ۱۰ متر انتخاب می شود اما عمق انفجار برابر با ۵۵ متر انتخاب می شود.

برای تحلیل جامع تاثیر سطح آب مخزن و شرایط شروع بر عملکرد حفاظتی سد، دیاگرام های خرابی آسیب نهایی سد قرار گرفته در معرض انفجارهای زیرآبی با سطح آب نرمال (عمق انفجار ۱۰ متر)، سطح آب راکد (عمق انفجار ۱۰ متر) و سطح آب نرمال (عمق انفجار ۵۵ متر) در شکل ۱۷ نشان داده شده اند. فاصله توقف برای هر سه مورد، ۱۰ متر است و وزن مواد منفجره، ۵۰۰ کیلوگرم است. با مقایسه شکل های ۱۷ (الف و ج)، می توان دریافت که آسیب موضعی به هد سد، برای این دو حالت با سطح آب نرمال، نسبتاً جدی و خطرناک است.





شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

شکل ۱۵. تکامل آسیب به سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی در سطح آب راکد (الف) شماتیک (ب) $t = 8 \text{ ms}$ (ج)

$t = 30 \text{ ms}$ (د) و $t = 60 \text{ ms}$

اما هنگامی که مکان شروع انفجار، بدون تغییر باقی بماند، آسیب به هد یا تاج سد با سطح آب نرمال [شکل ۱۷ (ج) آ]، جدی تر از سطح آب راکد [شکل ۱۷ (ب)]، این بدان معناست که تاثیر آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی، بسیار بیشتر از عمق انفجار است.

شکل ۱۸، سوابق زمانی سرعت افقی برای تاج سد را نشان می دهد. مقادیر پیک برای انفجار زیرآبی در سطح آب نرمال، در سطح آب راکد و در حالت مقایسه ای به ترتیب 0.92 ، 0.20 و 0.85 متر در ثانیه می باشند. سرعت افقی حداکثر تاج سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی با سطح آب راکد، $3/78\%$ کمتر از سطح آب نرمال (عمق انفجار ۱۰ متر) است. زمان محاسبه برابر با ۶۰ میلی ثانیه انتخاب می شود تا هزینه محاسبات کاهش یابد و این دلیل اصلی است که سرعت ها، متوازن نیستند.

عملکرد حفاظتی بین سطح آب نرمال و سطح آب راکد

با اینکه عملکرد حفاظتی سراسری سد هنگام قرار گرفتن در معرض انفجارهای زیرآبی بهبود قابل توجهی پیدا می کند هنگامی که سطح آب نرمال به سطح آب راکد افت کند، اما کاهش سطح آب می تواند چند روز طول بکشد. این یک مسئله مبرم در زمان جنگ است. تحلیل های بیشتری باید انجام شوند تا مشخص شود آیا عملکرد حفاظتی سد در سطوح دیگر آب را می تواند بهبود داد هنگامی که در معرض انفجارهای زیرآبی قرار گیرد. با توجه به اینکه آسیب موضعی در قسمت بالایی سد، در اطراف تغییر شیب پایین دست، متمرکز میشود، سه مدل تزویج کامل ایجاد می شوند هنگامی که سطح آب مخزن بین نرمال و راکد باشد (یعنی، در تغییر شیب پایین دست، ۱۰ متر پایین تر از تغییر شیب پایین دست و ۲۰ متر پایین تر از تغییر شیب پایین دست). فاصله توقف و عمق انفجار، ۱۰ متر می باشند. شماتیک و توزیع های آسیب در شکل ۱۹ نشان داده شده اند.

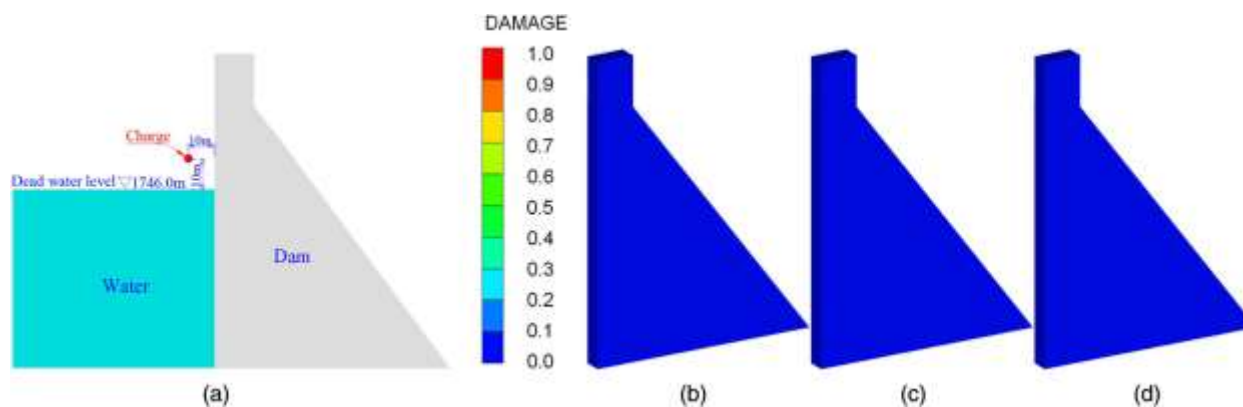
هنگامی که سطح آب مخزن در تغییر در شیب پایین دست باشد [شکل ۱۹ (الف)]، سد از آسیب کششی و تورفتگی متوسط رنج خواهد بد. هنگامی که سطح آب مخزن ۱۰ متر پایین تر از تغییر شیب پایین دست باشد [شکل ۱۹ (ب)]، تنها آسیب سطحی در وجه بالادست سد رخ می دهد. آسیب به سد به میزان قابل مشاهده ای کاهش می یابد و عملکرد حفاظتی سد به میزان قابل توجهی در مقایسه با سطح آب نرمال، بهبود می یابد. اما، هنگامی که سطح آب تا ۲۰ متر پایین تر از تغییر شیب پایین دست کاهش یابد [شکل ۱۹ (ج)]، آسیب به صورت جزئی در مقایسه با سطح آب ۱۰ متر پایین تر از تغییر شیب پایین دست، تغییر می یابد [شکل ۱۹ (ب)]. این بدان معناست که پس از اینکه سطح آب مخزن به کمتر از تغییر شیب پایین دست، کاهش می یابد، عملکرد حفاظتی سد به میزان قابل توجهی بهبود می یابد. کاهش بیشتر سطح آب، باعث اثر حاضتی بهتر نمی شود.

شکل ۲۰، پاسخ سرعت افقی تاج سد، قرار گرفته در معرض انفجارهای زیرآبی با سطوح آب مخزن مختلف، را نشان می دهد. حداکثر سرعت افقی تاج سد هنگامی که سطح آب در مکان تغییر شیب پایین دست باشند، ۱۰ متر پایین تر از این تغییر و ۲۰ متر پایین تر از آن، به ترتیب 0.69 ، 0.45 و 0.42 متر بر ثانیه می باشند. در مقایسه با سطح آب نرمال، حداکثر سرعت های افقی به اندازه به ترتیب $0.25/1$ ، $54/3$ و $51/1$ درصد کاهش می یابند. می توان نتیجه گیری کرد که با کاهش سطح آب مخزن، پاسخ دینامیک سد قرار گرفته در معرض بار ضربه ای انفجاری، به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و عملکرد حفاظتی سد بهبود می یابد.

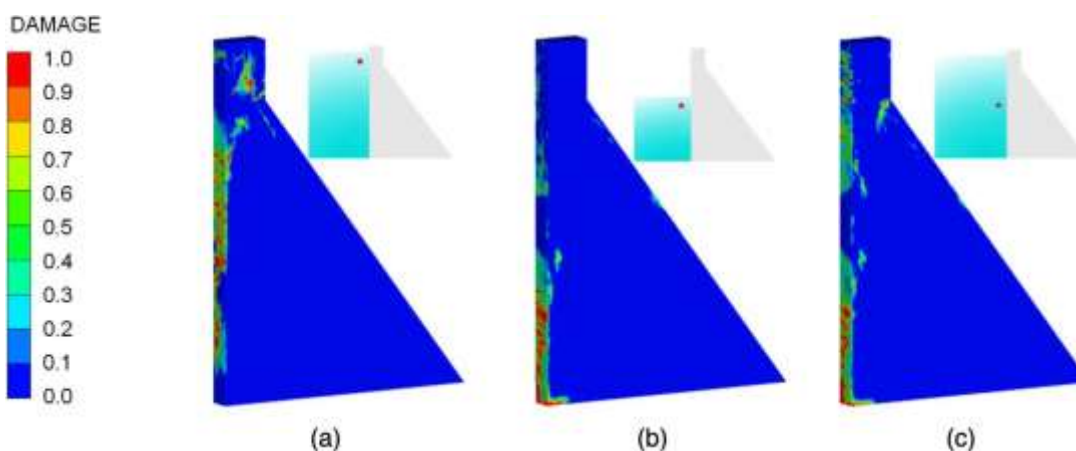
شناسایی تاثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سدها

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

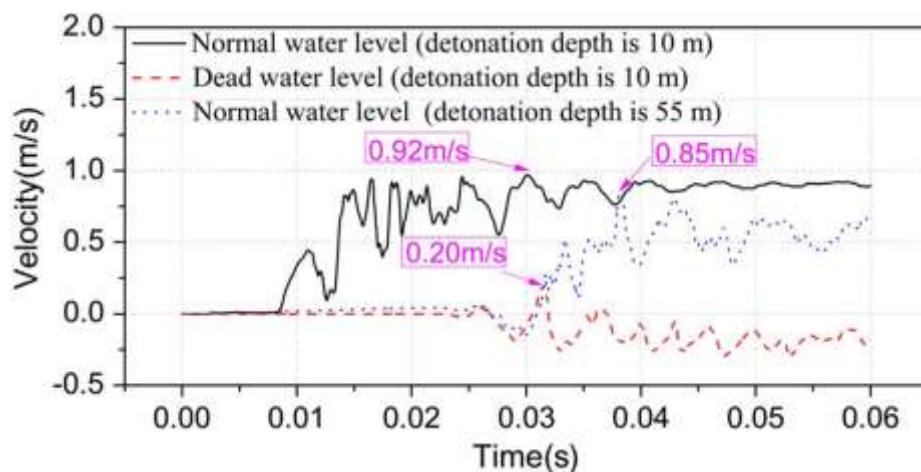
هدف دوم این مقاله، شناسایی سریع عملکرد حفاظتی سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی با سطوح آب مخزن مختلف، می باشد. تحلیل های پاسخ دینامیک غیرخطی با پارامترهای انفجار مختلف، مانند فاصله توقف، وزن مواد منفجره، عمق مواد منفجره و سطح آب مخزن، انجام می شوند. بیش از ۱۵۰ حالت در مطالعه حاضر محاسبه می شوند. سطوح آب متعدد مورد ملاحظه قرار می گیرند، اما تنها پنج سطح آب معمول، که قبلاً ذکر شده در اینجا به بحث گذاشته می شوند.



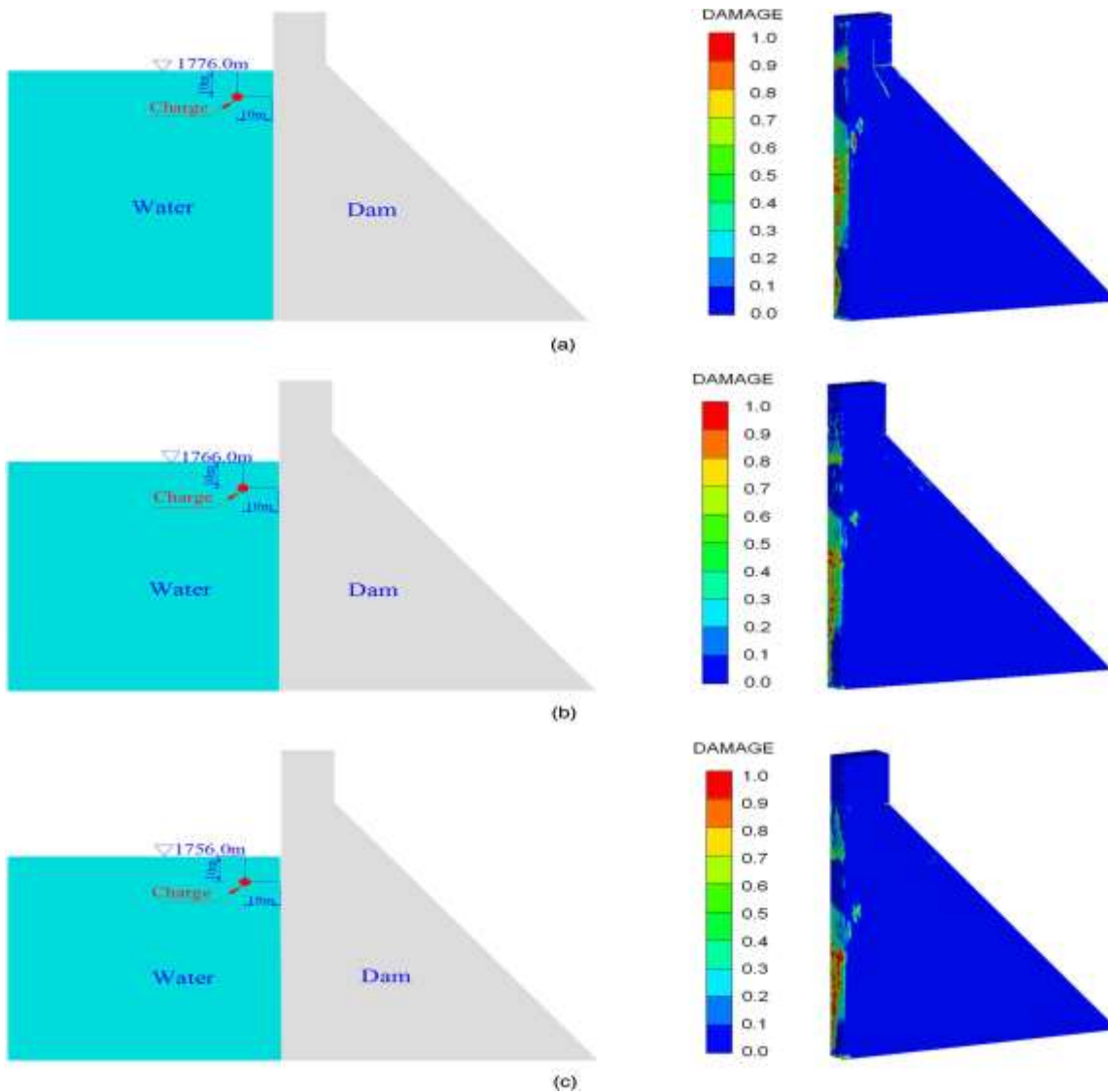
شکل ۱۶. تکامل آسیب به سد قرار گرفته در معرض انفجار هوا در سطح آب راکد (الف) شماتیک (ب) $t = 8 \text{ ms}$ (ج) $t = 30 \text{ ms}$ و (د) $t = 60 \text{ ms}$.



شکل ۱۷. توزیع آسیب به سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی تحت شرایط انفجار مختلف (الف) سطح آب نرمال (عمق انفجار ۱۰ متر) (ب) سطح آب راکد (عمق انفجار ۱۰ متر) و (ج) سطح آب عادی (عمق انفجار ۵۵ متر).

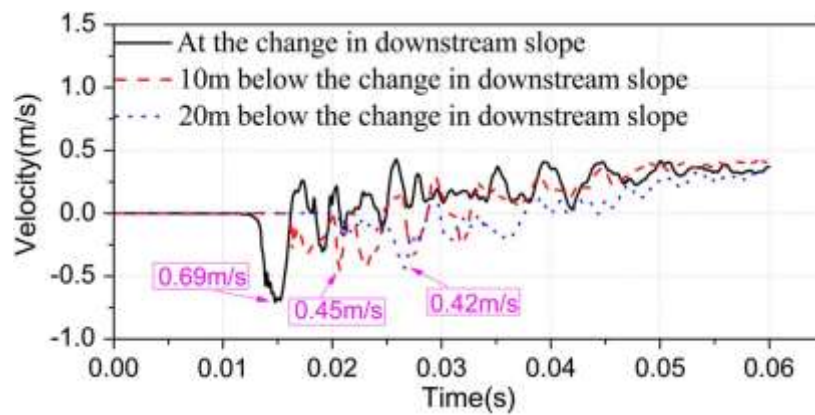


شکل ۱۸. سوابق زمانی سرعت افقی تاج سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی تحت شرایط انفجار مختلف



شکل ۱۹. توزیع آسیب به سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی هنگامی که سطح آب (الف) در مکان تغییر شیب پایین دست (ب) ۱۰ متر پایین تر از تغییر شیب پایین دست و (ج) ۲۰ متر پایین تر از تغییر شیب پایین دست باشد.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۲۰. سوابق زمانی سرعت افقی تاج سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی در سطوح آب مختلف



شکل ۲۱. روابط وزن مواد منفجره-سطح آب مخزن برای سطوح آسیب مختلف با فاصله توقف (الف) ۲ متر (ب) ۱۰ متر و (ج) ۱۵ متر.

در شبیه سازی های عددی، یک سری فاصله های ۲-۳۰ متری در نظر گرفته می شوند، اما تنها سه فاصله توقف معمول (۲، ۱۰ و ۱۵ متر) در این بخش مورد ملاحظه قرار می گیرند. در هر فاصله توقف، یک سری محاسبات با وزن مواد منفجره مختلف، ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم (متناظر با بمب های تروریستی معمول) برای مشاهده پاسخ دینامیک سد بتنی و وضعیت آسیب، انجام می شوند. برای هر حالت محاسباتی، عمق انفجار برابر با ۱۰ متر انتخاب می شود. علت آن است که این پژوهش نشان داده است که عمق انفجار باعث تغییر قابل توجه آسیب برای انفجارهای آب کم عمق، نمی شوند (وانگ و ژانگ، ۲۰۱۴). شماتیک این مدل مثل شماتیک نشان داده شده در شکل ۷ است و همان شرایط مرزی استفاده می شوند. اندازه مش برای ماده انفجاری و آب زیاد



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در قسمت مرکزی مواد منفجره، ۱۰۰ میلی متر است که در آن اندازه مش به تدریج با فاصله گرفتن از مرکز مواد منفجره افزایش می یابد و برای قسمت بالایی سد، ۲۰۰ میلی متر است.

دسته بندی های آسیب پیشنهاد شده توسط وانگ و ژانگ (۲۰۱۴) برای انجام تحلیل های زیر، بکار گرفته می شوند: (۱) بدون آسیب: از حالت اولیه تا تعدادی ترک جزئی (۲) آسیب جزئی: از چند ترک تا خرد شدن یا پوسته ای شدن تا تقریباً یک سوم وزن مقطع سد (۳) آسیب متوسط: عمق ترک برای خرد شدن و پوسته ای شدن از یک سوم عرض مقطع سد تا دو سوم؛ و (۴) آسیب شدید: عمق خرد شدن و پوسته ای شدن از دو سوم عرض مقطع تا نزدیک مشبک ها. طبق این دسته بندی های آسیب، روابط «وزن مواد منفجره»-«سطح آب مخزن»، متناظر با چهار حالت آسیب براساس نتایج عددی در شکل ۲۱ برای سه فاصله توقف در نظر گرفته شده، ساخته می شوند. در این شکل، محور افقی، وزن مواد منفجره و محور طولی، سطح آب مخزن معمول ذکر شده در قبل است. در این شکل، محور افقی، وزن مواد منفجره و محور طولی، سطح معمول آب مخزن است که قبلاً ذکر شده بود.

طبق شکل ۲۱، وضعیت آسیب به سدهای وزنی بتنی قرار گرفته در معرض انفجارهای زیرآبی با پارامترهای مواد منفجره مختلف را می توان به آسانی شناسایی نمود. همچنین مشاهده می شود که شرایط انفجار مانند سطح آب مخزن، وزن مواد منفجره و فاصله توقف، تاثیر قابل توجهی بر عملکرد سد در برابر بارهای انفجاری دارند. با کاهش سطح آب مخزن، آسیب به سد به همان میزان کاهش می یابد. برای مثال، هنگامی که سطح آب مخزن از نرمال تا ارتفاع تغییر شیب پایین دست، کاهش یابد، آسیب از شدید تا متوسط در این پارامترهای انفجار، تغییر می کند: وزن مواد منفجره ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم، و فاصله توقف ۲ متر [شکل ۲۱ الف]. اگر سطح آب مخزن کمتر از سطح تغییر شیب پایین دست باشد، آسیب شدید برای همه سناریوهای انفجار فرض شده رخ نمی دهد و عملکرد حفاظتی سد به میزان قابل توجهی بهبود می یابد. بنابراین، کاهش سطح آب تا ارتفاع پایین تر از تغییر شیب پایین دست، یک اقدام حفاظتی موثر برای سدهای وزنی بتنی هنگام قرار گرفتن در معرض انفجارهای زیرآبی می باشد.

نتیجه گیری های حاصل شده در اینجا، تنها برای سیستم سد-مخزن-فونداسیون انتخاب شده و سناریوهای انفجار فرض شده، کارایی دارند. در مورد عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی با ابعاد مختلف، عمق های انفجار مختلف و شرایط مرزی متغیر، تحقیقات بیشتری لازم است تا یک نتیجه گیری کلی تر حاصل شود.

نتیجه گیری

این مقاله، تاثیر سطح آب مخزن بر عملکرد حفاظتی سیستم های سد-مخزن-فونداسیون را مورد بررسی قرار داد. مشخصات انتشار موج ضربه ای در محیط های مختلف و تاثیر لایه مرزی بر اقوانین انتشار موج ضربه ای در ابتدا بررسی شدند. برای ارزیابی تاثیر سطح آب مخزن بر پاسخ دینامیک سد، تکامل آسیب و عملکرد حفاظتی، پنج سطح آب مخزن مورد ملاحظه قرار گرفتند. نتایج و یافته های اصلی به صورت زیر خلاصه می شوند:

- اثر برشی (*cutoff*) موج ضربه ای در انفجار زیرآبی نزدیک سطح آب آزاد، رخ می دهد. با اینکه اثر کمتری در موج ضربه ای ناشی از انفجار در هوا نزدیک سطح آب آزاد رخ می دهد هنگامی که موج ضربه ای از هوا به آب منتشر شود، اما شدت موج ضربه ای در آب بسیار بیشتر از انفجار در هوا در هر دوی هوا و آب است. یک انفجار زیرآبی می تواند باعث آسیب بسیار بیشتر به سدهای وزنی بتنی نسبت به همان مقدار مواد منفجره در هوا داشته باشد.
- آسیب به سد قرار گرفته در معرض انفجار زیرآبی در سطح آب راکد به میزان قابل توجهی در مقایسه با سطح آب نرمال، کاهش می یابد. در سطح آب نرمال، نواحی آسیب عمدتاً در زون بالایی و سطح بالادست سد، متمرکز می شود. با اینکه



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

آسیب به تاج سد بدتر می شود اگر در معرض انفجار زیرآبی در سطح آب راکد قرار گیرد، اما آسیب مخرب در تاج سد مشاهده نمی شود. قابل توجه اینکه، آسیب موضعی به تاج سد به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

- سطح آب مخزن، تاثیر قابل توجهی بر عملکرد حفاظتی سدهای وزنی بتنی می گذارد هنگامی که در معرض انفجارهای زیرآبی قرار گیرد. با کاهش سطح آب مخزن، حداکثر سرعت افقی تاج سد، به میزان متناظر کاهش می یابد (۰/۲۵، ۱/۵۱ و ۳/۵۴ درصد برای سطح آب در مکان تغییر شیب پایین دست، ۱۰ متر پایین تر از آن و ۲۰ متر پایین تر از آن، در مقایسه با سطح آب نرمال) و عملکرد حفاظتی قدری بهبود می یابد. بعد از اینکه سطح آب مخزن تا ارتفاع پایین تر از تغییر شیب پایین دست کاهش می یابد، عملکرد حفاظتی سد به میزان قابل توجهی بهبود می یابد و هیچ آسیب شدیدی در هیچکدام از سناریوهای انفجار فرض شده رخ نمی دهد. با اینکه کاهش بیشتر سطح آب باعث آسیب کمتر نمی شود، اما این اقدام از بین رفتن نواحی پایین دست در صورت رخداد رخنه را کاهش می دهد.

- Benson, D. J. 1992. "Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes." *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 99 (2): 235–394. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(92\)90042-I](https://doi.org/10.1016/0045-7825(92)90042-I).
- Cole, R. H. 1948. *Underwater explosions*. New York: Dover Publications.
- Goel, M. D., V. A. Matsagar, and A. K. Gupta. 2015. "Blast resistance of stiffened sandwich panels with aluminum cenosphere syntactic foam." *Int. J. Impact. Eng.* 77: 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.11.017>.
- Ha, J., N. Yi, J. Choi, and J. J. Kim. 2011. "Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading." *Compos. Struct.* 93 (8): 2070–2082. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.02.014>.
- Henrych, J. 1979. *The dynamics of explosion and its use*. New York: Elsevier.
- Holmquist, T. J., and G. R. Johnson. 2005. "Characterization and evaluation of silicon carbide for high-velocity impact." *J. Appl. Phys.* 97 (9): 093502-1–93502 12 <https://doi.org/10.1063/1.1881798>.
- Holmquist, T. J., G. R. Johnson, and W. H. Cook. 1993. "A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures." In *Proc., 14th Int. Symp. On Ballistics*. Arlington, TX: ADPA.
- Islam, A. K. M. A., and N. Yazdani. 2008. "Performance of AASHTO girder bridges under blast loading." *Eng. Struct.* 30(7):1922-1937. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.014>.
- Jachimowicz, J., E. Szymczyk, and K. Puchala. 2015. "Study of material mass efficiency and numerical analysis of modified CFRP laminate in bearing conditions." *Compos. Struct.* 134: 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.031>.
- Jayasooriya, R., D. P. Thambiratnam, N. J. Perera, and V. Kosse. 2011. "Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings." *Eng. Struct.* 33 (12):3483-3495. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.011>.
- Jin, Q., and G. Ding. 2011. "A finite element analysis of ship sections subjected to underwater explosion." *Int. J. Impact. Eng.* 38 (7): 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.11.005>.
- Jing, L., Z. Wang, V. P. W. Shim, and L. Zhao. 2014. "An experimental study of the dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores subjected to blast loading." *Int. J. Impact. Eng.* 71: 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.03.009>.
- penetrated by a steel projectile." In *Proc., 5th Int. Conf. on Structures under Shock and Impact*, 793–806. Southampton, UK: Computational Mechanics Publications.
- Johnson, G. R., and T. J. Holmquist. 1999. "Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures." *J. Appl. Phys.* 85 (12): 8060–8073. <https://doi.org/10.1063/1.370643>.
- Johnson, G. R., T. J. Holmquist, and S. R. Beissel. 2003. "Response of aluminum nitride (including a phase change) to large strains, high strain rates, and high pressures." *J. Appl. Phys.* 94 (3): 1639–1646. <https://doi.org/10.1063/1.1589177>.
- Leblanc, J., N. Gardner, and A. Shukla. 2013. "Effect of polyurea coatings on the response of curved E-glass/vinyl ester composite panels to underwater explosive loading." *Compos. Part B Eng.* 44 (1): 565–574. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.02.038>.

Linsbauer, H. 2011. "Hazard potential of zones of weakness in gravity dams under impact loading conditions." *Front. Archit. Civ. Eng. China* 5 (1): 90–97. <https://doi.org/10.1007/s11709-010-0008-3>.

Orton, S. L., V. P. Chiarito, J. K. Minor, and T. G. Coleman. 2014. "Experimental testing of CFRP-strengthened reinforced concrete slab elements loaded by close-in blast." *J. Struct. Eng.* 140 (2): 04013060. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000821](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000821).

Parisi, F., and N. Augenti. 2012. "Influence of seismic design criteria on blast resistance of RC framed buildings: A case study." *Eng. Struct.* 44: 78–93. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.046>.

Rajendran, R., and J. M. Lee. 2009. "Blast loaded plates." *Mar. Struct.* 22 (2): 99–127. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2008.04.001>.

Riedel, W. 2000. "Beton unter dynamischen Lasten: Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter." Ph.D. thesis, Institut Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, der Bundeswehr Munchen.

Riedel, W. 2009. "10 years RHT: A review of concrete modelling and hydrocode applications." In *Predictive modeling of dynamic processes*, 143–165. Boston: Springer.

Samiee, A., A. V. Amirkhizi, and S. Nemat-Nasser. 2013. "Numerical study of the effect of polyurea on the performance of steel plates under blast loads." *Mech. Mater.* 64: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.03.008>.

Son, J., and H. Lee. 2011. "Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading." *Eng. Struct.* 33 (4): 1133–1148. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.031>.

Tu, Z., and Y. Lu. 2009. "Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations." *Int. J. Impact. Eng.* 36 (1): 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.12.010>.

Turgut, P., M. A. Gurel, and R. K. Pekgokgoz. 2013. "LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A case study in Sanliurfa, Turkey." *Eng. Fail. Anal.* 32 (32): 220–235. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.04.004>.

Vanadit-Ellis, W., and L. K. Davis. 2010. "Physical modeling of concrete gravity dam vulnerability to explosions." In *Proc., Int. Waterside Security Conf.*, 1–11. Piscataway, NJ: IEEE. Wang, G., Y. Wang, W. Lu, W. Zhou, M. Chen, and P. Yan. 2016. "On the determination of the mesh size for numerical simulations of shock wave propagation in near field underwater explosion." *Appl. Ocean Res.* 59: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.05.011>.

Wang, G., and S. Zhang. 2014. "Damage prediction of concrete gravity dams subjected to underwater explosion shock loading." *Eng. Fail. Anal.* 39 (4): 72–91. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.018>.

Wang, G., S. Zhang, Y. Kong, and H. Li. 2014. "Comparative study of the dynamic response of concrete gravity dams subjected to underwater and air explosions." *J. Perform. Constr. Facil.* 29 (4): 04014092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000589](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000589).

Wang, W., D. Zhang, F. Lu, S. Wang, and F. Tang. 2013. "Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion." *Eng. Fail. Anal.* 27 (1): 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.010>.

Williams, G. D., and E. B. Williamson. 2011. "Response of reinforced concrete bridge columns subjected to blast loads." *J. Struct. Eng.* 137 (9): 903–913. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000440](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000440).

Yu, T. 2009. "Dynamical response simulation of concrete dam subjected to underwater contact explosion load." In *Proc., WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 769–774. Piscataway, NJ: IEEE.

Zamyshlyayev, B. V., and Y. S. Yakovlev. 1967. "Dynamic loading in underwater explosions." Sudostroenie, Leningrad.

Zhang, A., X. Yao, and X. Yu. 2008. "The dynamics of three-dimensional underwater explosion bubble." J. Sound Vibr. 311 (3-5): 1196-1212. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.10.007>.

Zhang, A., L. Zeng, X. Cheng, S. Wang, and Y. Chen. 2011. "The evaluation method of total damage to ship in underwater explosion." Appl. Ocean Res. 33 (4): 240-251. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2011.06.002>.

Zhang, S., G. Wang, C. Wang, B. Pang, and C. Du. 2014. "Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion." Eng. Fail. Anal. 36: 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.10.001>.

Zong, Z., Y. Zhao, and H. Li. 2013. "A numerical study of whole ship structural damage resulting from close-in underwater explosion shock." Mar. Struct. 31: 24-43. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2013.01.004>.

Johnson, G. R., S. R. Beissel, T. J. Holmquist, and D. J. Frew. 1998. "Computed radial stresses in a concrete target

ANSYS. 2010. AUTODYN user manual version 13. Canonsburg, PA: ANSYS