بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن انعطاف‌پذیر سیال با پلان مستطیلی و جداسازی شده از پایه تحت اثر حرکت قوی زلزله

رساله دکترای مهندسی عمران-سازه

شمس‌الدین هاشمی

استاد راهنما

دکتر محمد مهدی سعادتپور

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکترای مهندسی عمران گرایش سازه آقای شمس‌الدین هاشمی

تحت عنوان

بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن انعطاف‌پذیر سیال با پلان مستطیلی و جداسازی شده از پایه تحت اثر حرکت قوی زلزله

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۲۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محمد مهدی سعادت‌پور
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر بیژن برومند
۳- استاد داور	دکتر مجتبی محزون
۴- استاد داور	دکتر ناصر خاجی
۵- استاد داور	دکتر فرهاد بهنام‌فر
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

از استاد راهنمای گرانقدر خود جناب آقای دکتر سعادتپور که با حوصله و دقت فراوان، در تمام مراحل انجام تحقیق دلسوزانه مرا یاری کردند و همواره از راهنمایی‌های ارزنده‌شان برخوردار شده‌ام تشکر می‌کنم. از اساتید بزرگوارم، جناب آقایان دکتر بیژن برومند و دکتر مجتبی محزون که با نقطه نظرات و راهنمایی‌های ارزشمندشان در انجام این رساله همکاری نموده‌اند، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم. همچنین از سایر اساتید عزیزم، آقایان دکتر ازهری، دکتر خاجی و دکتر مستوفی‌نژاد قدردانی می‌نمایم. در پایان لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر کیانوش که برای فرصت مطالعاتی، زمینه حضور اینجانب در دانشگاه رایرسون کانادا را فراهم کرده و در آن مدت نقش راهنمایی پایان نامه را بر عهده داشتند، تشکر و قدردانی نمایم.

خدایا همواره در کنارم بودی و با توکل به تو مراحل را طی نمودم، مرا به حال خود تنها مگذار...

یکشنبه هشتم اسفند ماه یکهزار و سیصد و نود و یک خورشیدی

شمس‌الدین هاشمی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر دلسوز

همسر فداکار و دختر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه و ضرورت مطالعه ۲

۱-۲- اهداف مطالعه حاضر ٤

فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده

۲-۱- آسیب پذیری مخازن در طی زلزله های گذشته ۷

۲-۲- مروری بر تاریخچه مطالعات انجام شده در زمینه مخازن ذخیره سیال ۱۳

فصل سوم: جداسازی مخزن ازپایه

۳-۱-مقدمه ۲٤

۳-۲- اجزای اصلی سیستم‌های جداساز لرزه ای ۲٦

۳-۳- انواع سیستم‌های جداساز لرزه ای ۲۸

۳-۴-شرایط بهینه جهت استفاده از سیستم های جداساز لرزه ای ۳۵

فصل چهارم: مبانی تئوری

٤-۱- مقدمه ۳۷

٤-۲- استخراج معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی سیال ٤۰

٤-۳-تحلیل مخزن تحت حرکت افقی زمین در زلزله ٤٥

٤-٤-نیروهای طراحی لرزه‌ای ٦۱

٤-٥-تحلیل اندرکنش جداساز- سازه- مایع ۷۷

فصل پنجم: بررسی و تأیید روش

٥-۱- مقدمه ۸۱

٥-۲- اثبات همگرایی و تأیید اعتبار روش تحلیلی ارائه شده ۸۲

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

٦-١- نتیجه‌گیری ١١٠

٦-٢- پیشنهادات ١١٣

مراجع ١١٤

چکیده :

مخازن نگهداری سیالات به عنوان سازه‌های ویژه، از نظر رفتار دینامیکی متفاوت از سازه های معمولی عمل می‌کنند. این سازه های پر اهمیت به منظور ذخیره سیالات مورد نیاز شهرها و صنایع مختلف، نظیر مواد نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخازن بتنی مستطیلی مسلح شده، به طور وسیعی برای ذخیره پسماندهای سوخت هسته‌ای استفاده می‌شوند. در این رساله، یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ لرزه‌ای مخازن سه بعدی ذخیره مایع با چهار دیواره انعطاف‌پذیر، در معرض حرکت قوی زلزله ارائه می‌شود. اثرات اندرکنش سازه–مایع روی پاسخ دینامیکی مخازنی که تاسطح معینی از مایع پر شده باشد با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوار مخزن مورد بررسی واقع می‌شود. تابع پتانسیل سرعت با حفظ ارضای شرایط مرزی، با استفاده از روش جداسازی متغیرها و با استفاده از اصل برهم نهی، حل شده و توزیع فشار ضربه‌ای محاسبه می‌شود. حل مسأله بر اساس مدل سه بعدی مخازن مستطیلی با بکارگیری روش ریلی–ریتز و استفاده از مودهای ارتعاشی ورق‌های انعطاف پذیر با شرایط مرزی مناسب، انجام می‌شود. برای مودهای ارتعاشی مجاز، از توابع مثلثاتی‌ای استفاده می‌شود که شرایط مرزی مخازن را به گونه‌ای که انعطاف پذیری جداره مخازن کاملاً در نظر گرفته شده باشد، ارضاء کنند. پس از آن تحلیل سازه در حوزه زمان انجام می‌شود. علاوه بر این، یک روش تحلیلی برای استنتاج فرمولی ساده که قادر است پاسخ تاریخچه زمانیِ فشار نوسانی و جابجایی های سطح آزاد مایع را محاسبه کند، توسعه داده شده است. نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات قبلی مقایسه می‌شوند.

یک مدل مکانیکی ساده که در آن انعطاف‌پذیری جداره مخزن در نظر گرفته شده، توسعه داده می‌شود. پارامترهای این مدل را می‌توان به راحتی با استفاده از روابط و منحنی‌های مربوطه محاسبه کرد. حداکثر جابجایی‌های حاصل از تلاطم سطح آزاد مایع وهمین‌طور حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای با استفاده از مفهوم طیف پاسخ تخمین زده می‌شود. یک مدل دو بعدی ساده برای منحنی توزیع فشار بر روی دیوارهای انعطاف‌پذیر مخازن پیشنهاد شده که می‌تواند برای اصلاح آئین‌نامه‌ها که تغییر فشار در جهت افقی را در نظر نمی‌گیرند، استفاده شود. مقایسه نتایج حاصل از روش توسعه داده شده با نتایج حاصل از تحلیل دقیق، اعتبار مدل مکانیکی ارائه شده را تأیید می‌کند.

آنالیز لرزه‌ای مخازن زمینی مستطیلی با پایه جداسازی شده و مقایسه با حالت پایه ثابت، هدف بعدی تحقیق حاضر می باشد. در مخزن جداسازی شده، کل سیستم از دو قسمت عمده تشکیل می‌شود: روسازه با در نظر گرفتن اندرکنش سیال–سازه و سیستم جداساز لرزه‌ای. سیستم جداساز، از نوع الاستومری با هسته سربی بوده و توسط یک مدل با رفتار سختی دو خطی مدل می‌شود. معادله مزدوج حرکت سیال–مخزن با سیستم جداگر لرزه‌ای ترکیب می‌شود تا رفتار کل سیستم بررسی شود. سپس تحلیل در حوزه زمان انجام می‌شود.

در این رساله نشان داده شده، جداساز می‌تواند به نحو مؤثری پاسخ‌های دینامیکی مانند فشار هیدرودینامیکی، برش‌پایه و شتاب و جابجایی-های نسبی در روسازه را کاهش دهد. البته استفاده از سیستم جداسازی لرزه‌ای می‌تواند اثرات معکوسی روی حرکت تلاطم سطح آزاد مایع و جابجایی نسبی جداساز نسبت به زمین داشته باشد؛ زیرا با نرم‌تر شدن جداساز، جابجایی نسبی جداساز نسبت به زمین بیشتر می‌شود. همچنین اگر فرکانس مؤثر جداساز، به فرکانس اصلی امواج سطحی نزدیک شود، ارتفاع امواج به سرعت افزایش می‌یابد. بر اساس این نتایج، برای طراحی بهینه جداساز زیر مخازن مستطیلی باید به دقت، جداسازهایی با یک حد مشخص از خصوصیات مکانیکی انتخاب شوند.

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- مقدمه و ضرورت مطالعه

مخازن ذخیره مایعات از جمله سازه های حیاتی و پر اهمیت در جوامع امروزی می باشند. آنها همچنین نقش مهمی در امور امداد رسانی پس از زلزله، ایفا می‌کنند. هرگونه آسیب به چنین مخازنی بعد از یک زلزله ممکن است کمبود مهمی را برای جامعه ایجاد کند. آسیب دیدگی مخازن پس از وقوع زلزله علاوه بر زیان اقتصادی ممکن است قطع آب، آتش سوزی های کنترل نشده و اتلاف و نشت مواد شیمیایی آلوده کننده و سمی را به همراه داشته باشد. با توجه به اهمیت این نوع مخازن، اطمینان از عملکرد رضایت بخش آنها طی زمین لرزه‌های قوی ضروری است.

این مخازن بر حسب وضعیت استقرار خود به سه دسته کلی زمینی، هوایی و مدفون و از نظر جنس عموما به دو نوع مخازن فلزی و بتنی طبقه‌بندی می‌شوند. در این میان مخازن زمینی که معمولا با گنجایش زیاد ساخته می‌شوند، برای ذخیره مایعات متنوعی مثل فراورده های نفتی و شیمیایی و همینطور آب برای مصارف شرب و خاموش کردن آتش، بکار گرفته می‌شوند. مخازن ذخیره آب علاوه بر نقش پراهمیت تنظیم نوسانات ساعتی آب، فشار لازم جهت شبکه آب رسانی را تامین می‌کنند. در صورت وجود جایگاه مرتفع در منطقه مورد نظر جهت آب رسانی، مخزن مستقیما

بر روی زمین قرار می‌گیرد و در صورت عدم وجود ناحیه مرتفع، مخازن مزبور جهت ایجاد فشار لازم بر روی قاب-های مهاربندی شده فلزی یا استوانه‌های بتنی[1] قرار می‌گیرند (مخازن هوایی).

اکثر مطالعات اساسی که در گذشته به عمل آمده مرتبط با مخازن ذخیره‌ی مایعات استوانه‌ای به ویژه مخازن فولادی بوده، و توجه کمی به پاسخ دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی شده است. با این حال استخرهای ساخته شده از بتن مسلح به طور وسیعی برای نگهداری آب یا ذخیره‌سازی طولانی مدت پسماندهای سوخت هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند و باید تحت حرکت زمین ایجاد شده توسط زلزله، ضوابط لازم برای ایمنی را داشته باشند. از طرف دیگر به خاطر هندسه متفاوت، مخازن مستطیلی تحت زلزله رفتار متفاوتی از مخازن استوانه‌ای نشان می‌دهند. در این رساله، پاسخ دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی ذخیره‌ی مایعات بررسی می شود.

آسیب دیدگی مخازن ذخیره مایعات تحت تأثیر زلزله‌های اخیر مثل زلزله ۱۹۹۰ لوزان فیلیپین یا زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، باعث شکل‌گیری پژوهش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی گوناگونی در این زمینه شده است. اصولا جهت طراحی یک سازه مقاوم در برابر زلزله، بررسی سه موضوع از اهمیت زیادی برخوردار است: مشخصات زلزله ورودی (در قالب بیشینه شتاب، مدت زمان تداوم و محتوای فرکانسی)، خصوصیات مکانیکی سازه (توزیع جرم وسختی، خواص ماده و نحوه سرهم‌بندی) و خصوصیات دینامیکی سیستم(فرکانس‌های طبیعی و میرایی).

بسیاری از مطالعات تاکنون بر روی آنالیز مخازن دایروی مهاربندی شده در کف متمرکز شده است. در این حالت مخزن از طریق میله های مهاری[2] به گونه‌ای به فونداسیون متصل می شود تا هنگام بروز زلزله از پدیده برکنش[3] جلوگیری شود.

با توجه به مطالب فوق در مناطق با خطر لرزه خیزی بالا مانند ایران لازم است توجه خاصی به طراحی ایمن این نوع سازه ها معطوف گردد. اصولا جهت طراحی یک سازه ایمن در برابر زلزله دو رویکرد وجود دارد: یکی طراحی مقاوم سازه می باشد به طوری که بتواند نیروی ایجاد شده در سازه بر اثر زلزله را بخوبی تحمل کرده و آسیب نبیند. دیگری، طراحی ضد لرزه‌ای به روش جداسازی ارتعاشی می‌باشد.

اصل جداسازی لرزه‌ای، ارائه انعطاف پذیری درتراز پایه سازه در یک سطح افقی به منظور افزایش پریود اصلی سیستم ترکیبی و نیز تامین میرایی لازم برای محدود کردن دامنه حرکت ناشی از زلزله است.

---

[1] Axisymmetrical Concrete Shaft

[2] Anchor Bolt

[3] Uplift

از اجزاء اصلی هر سیستم جداساز لرزه‌ای می توان به المانی انعطاف پذیر اشاره نمود که به منظور افزایش زمان تناوب ارتعاش کل سیستم بکار می‌رود. همچنین یک میراگر یا تلف‌کننده انرژی جهت کنترل تغییر مکان نسبی بین سازه و زمین در این سیستم تعبیه می‌شود. در یک جداگر سختی ابزار باید صلابت لازم برای جلوگیری از حرکت زمین در مقابل بارهای کم[1] نظیر باد و زلزله‌های کوچک را دارا باشد.

اساسا هر سازه‌یِ متکی بر زمین، هنگام وقوع زلزله تحت اثر دو مؤلفه حرکت جانبی، یک مؤلفه قائم و سه مؤلفه پیچش حول محورهای مختصات سازه قرار می‌گیرد. مؤلفه افقی شتاب زمین باعث اعمال فشار هیدرودینامیکی به دیواره مخزن می‌شود که این فشار در قالب دو مؤلفه ضربه‌ای و نوسانی ظاهر می شود. فشار ضربه‌ای در اثر ارتعاشات مخزن رخ می‌دهد که دوره تناوب آن همان دوره تناوب ارتعاش مخزن است، در صورتی که فشار نوسانی در اثر تحریک سیال و در غالب امواج سطحی ظاهر می‌شود و دارای دوره تناوبی بسیار بالاتر از دوره تناوب فشار ضربه‌ای است. جهت ارزیابی فشارهای ایجاد شده در مخازن تحت اثر زلزله روش‌های مختلفی وجود دارد که از روش هاوسنر می توان به عنوان گام‌های اولیه در این راستا نام برد.

در طی دهه‌های اخیر بحث فشار هیدرودینامیکی آب و اثراتی که بر سازه در هنگام وقوع زلزله دارد نظر بسیاری از محققان را به‌خود معطوف داشته است و پاسخ مخازن ذخیره مایعات نسبت به زلزله به عنوان سر فصلی برای تحقیقات گوناگون در زمینه اندرکنش سیال و سازه همواره مطرح بوده است.

به طور کلی مخازن حاوی مایع هنگام وقوع زلزله رفتار صلبی از خود نشان نمی‌دهند و به دلیل وقوع تحریکاتی که صورت می‌گیرد، ضمن همراهی با کل سازه یک ارتعاش داخلی نیز خواهند داشت که در آن سازه و آب به طور متقابل روی یکدیگر تاثیر گذاشته و پاسخ هریک در برابر دیگری باعث تاثیر در رفتار ارتعاشی سازه خواهد شد. بنابراین فشار دینامیکی وارد بر بدنه مخازن، برایند سه مؤلفه زیر می‌باشد:

مؤلفه ضربه ای فشار، که با فرض صلب بودن مخزن شتاب زمین را به بدنه مخزن وارد می‌کند.

مؤلفه نوسانی فشار، که به صورت تلاطم امواج سطحی فشار قابل توجهی بر بدنه مخزن اعمال می‌کند.

مؤلفه اندرکنش فشار، که نتیجه تغییر مکان نسبی دیواره مخزن می‌باشد[۱].

[1] Service Load

۱-۲- اهداف مطالعه حاضر

هدف اصلی این مطالعه، بررسی پاسخ دینامیکی مخازن مستطیلی ذخیره‌ی مایعات می‌باشد. به طوری که قبلاً اشاره شد، در حالی که اصول کلی حاکم بر رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای ذخیره‌ی مایعات مطالعه شده‌اند، در این مطالعه تأکید بیشتر بر واکنش دینامیکی مخازن مستطیلی ذخیره‌ی مایعات می‌باشد.

علی‌رغم تحقیقات مفصلی که در زمینه مخازن ذخیره‌ی مایعات شده ، هنوز سؤالاتی مطرح است که برای پاسخ به آنها لازم است مطالعات بیشتری صورت گیرد. یکی از آنها اندرکنش بین مایع و سازه مخزن تحت بار زلزله می باشد. آیین‌نامه‌های طراحی اخیر مانند ACI 350.3 [۲]، استاندارد نیوزیلند NZS 1170.5 [۳]، یوروکد ۸ [٤] و نشریه شماره ۱۲۳ (ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی) [۵]، در محاسبه‌ی فشار هیدرودینامیکی، شرایط مرزی را به صورت دیوار صلب در نظر گرفته‌اند. برای مورد مخازن مستطیلی، تأثیر انعطاف پذیری مخزن بر واکنش دینامیکی هنوز سوال‌برانگیز است. در این رساله، یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ لرزه‌ای مخازن مستطیلی ذخیره مایع با چهار دیواره انعطاف‌پذیر، در معرض حرکت قوی زلزله ارائه شده و با استفاده از آن، یک مدل مکانیکی ساده که در آن انعطاف‌پذیری جداره مخزن در نظر گرفته شده، توسعه داده می‌شود. بر اساس این مدل، پاسخ دینامیکی مخازن ذخیره‌ی مایعات به آسانی قابل محاسبه است. آنالیز لرزه‌ای مخازن زمینی مستطیلی با پایه جداسازی شده (شکل ۱-۱) و مقایسه با حالت پایه ثابت، هدف بعدی تحقیق حاضر می باشد.

اهداف اصلی مطالعه حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه نمود :

۱-توسعه‌ی یک مدل مناسب برای آنالیز دینامیکی مخازن ذخیره مایعات و استفاده از این مدل در آنالیز کامپیوتری مخازن.

۲-تحلیل مخازن مستطیلی تحت حرکت افقی زمین و مطالعه‌ی نمونه‌های مختلف به منظور بررسی اعتبار مدل ارائه شده.

۳- مطالعه‌ی فشار هیدرودینامیکی در وضعیت مرزی دیوار انعطاف پذیر.

٤- مروری بر نحوه تغییرات مؤلفه‌های فشار هیدرودینامیکی و بررسی تاثیر شتاب زمین بر هریک از این مؤلفه ها.

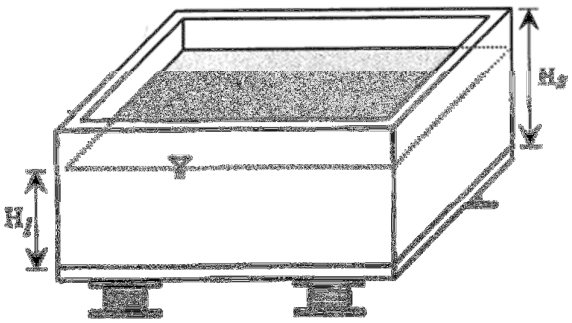
۵- استنتاج فرمولی ساده که قادر است پاسخ تاریخچه زمانیِ فشار نوسانی و جابجایی‌های سطح آزاد مایع را محاسبه کند.

۶- توسعه یک مدل مکانیکی ساده با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری جداره مخزن به منظور ارزیابی حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای و حداکثر تلاطم سطح آزاد مایع

۷-توسعه یک مدل دو بعدی ساده برای برآورد منحنی توزیع فشار روی دیوارهای انعطاف‌پذیر برای اصلاح آئین-نامه‌های طراحی مخازن مستطیلی.

۸- آنالیز لرزه‌ای مخازن زمینی مستطیلی با پایه جداسازی شده و مقایسه با حالت پایه ثابت.

۹- بررسی اثرات پارامترهای مختلف جداساز از قبیل زمان تناوب و میرایی بر پاسخ کل سیستم.



شکل ۱-۱- شمای کل سیستم سیال – سازه-جداساز.

فصل دوم:

مروری بر مطالعات انجام شده

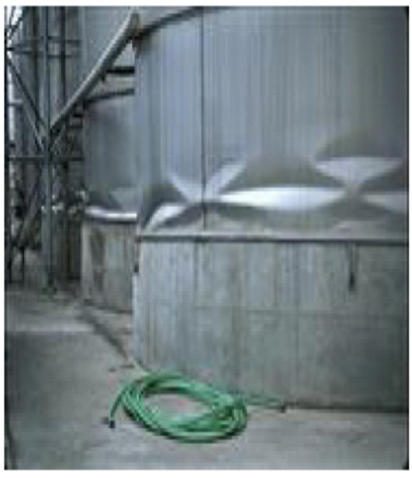
۲-۱- آسیب پذیری مخازن در طی زلزله های گذشته

مخازن ذخیره‌ی مایعات در تأسیسات صنعتی و حیاتی اهمیت زیادی دارند. آسیب رسیدن به چنین مخازنی تنها به معنای ازدست دادن ارزش اقتصادی مخازن و محتویات آنها نیست. زیرا بدون تدارک آب تضمین شده، خطرات مهمی مثل آتش های غیرقابل کنترل هم ممکن است رخ دهد. به علاوه در حالی که این سازه‌ها به طور گسترده‌ای برای ذخیره‌ی مایعات و سیالات گوناگونی مثل روغن مایع، گاز طبیعی و مایعات شیمیایی استفاده می شوند، خرابی آنها در طول زلزله می‌تواند برای محیط فاجعه بار باشد. نتیجه حتی ممکن است به وضعیت‌های بدتری منجر شود که از خود زلزله هم زیان بارتر است[٦].

بازدیدهای اخیر در خصوص ارزیابی عملکرد مخازن طی زمین لرزه های گوناگون نشان می دهد که مخازن بتنی نسبت به مخازن فولادی در سطح بالاتری از خطر پذیری قرار دارند و باید در مورد آنها آنالیزهای دقیق‌تری انجام شود. معمول‌ترین نوع خرابی مخازن استوانه‌ای عمودی نگهداری سیال، کمانش پوسته آن در نزدیکی زمین است.

در کمانش الماسی شکل، در نواحی نزدیک به زمین تنش های فشاری بزرگی برای ایستادگی در برابر لنگر واژگونی ایجاد شده، بوجود می‌آید. نیوا وکلاف [۷] نتیجه گرفتند که حرکت گهواره‌ای که در کف مخزن مهار نشده رخ می‌دهد باعث ایجاد تنش های فشاری محوری بالا در مجاورت ناحیه تماس مخزن و زمین می‌گردد که منجر به کمانش الماسی شکل می‌گردد. همچنین تغییر شکل هندسی جداره مخزن ناشی از نواقص ساخت، تاثیر قابل توجهی در وقوع این نوع کمانش دارد[۸]. شکل ۲-۱ کمانش الماسی شکل را در مخزن ذخیره یک کارخانه، بعد از زلزله‌ی ۲۴ ژانویه ۱۹۸۰ در لیورمور کالیفرنیا نشان می دهد[۶]. همه‌ی این مخازن فولادی ضد زنگ شده‌ی پر از مایع، کمانش کرده‌اند.

در کمانش پافیلی، نوعی برآمدگی به سمت خارج جداره مخزن درنزدیکی کف دیده می‌شود. این نوع کمانش در مخازن چاق بیشتر از مخازن لاغر قابل ملاحظه است. کمانش پافیلی اکثرا دور تا دور محیط مخزن گسترش می یابد و عمده دلیل آن قرارگیری کف مخزن بر روی پی کاملا صلب است. این بدین معنی است که مخازن مهار نشده بر روی شالوده های انعطاف پذیر، کمتر در معرض این پدیده مضر قرار می گیرند. علت وقوع کمانش پافیلی در مخازن با کف صلب این است که در این حالت فشار ضربه‌ای بخاطر کاهش دوره تناوب طبیعی سازه نسبت به کف انعطاف پذیر، به طور چشمگیری افزایش می یابد. از آنجا که تنش های ضربه‌ای در نزدیکی کف مخزن دارای بیشترین مقدار هستند ممکن است از حد بحرانی خود تجاوز کرده و منجر به ناپایداری جداره مخزن در نزدیکی کف گردند[۹]. شکل ۲-۲ کمانش پافیلی یک مخزن فولادی را بعد از زلزله ی فوریه ۱۹۷۱ در سان فرناندو کالیفرنیا، نشان می دهد.



شکل ۲-۱- کمانش الماسی شکل[۱۰]

شکل ۲-۲- کمانش پا فیلی[۱۰]

مخازن زمینی بسته به محتوای سیال، دارای سقف ثابت و سقف شناور می‌باشند. سقف ثابت به شکل مخروطی یا گنبدی بوده و عموما روی جداره مخزن قرار می‌گیرد، ولی در مخازن خیلی بزرگ علاوه بر جداره، ستون یا ستونهایی در داخل مخزن نیز وزن سقف را تحمل می کنند. سقف شناور بوسیله مکانیزم‌های مختلفی بر روی سطح مایع داخل مخزن شناور می‌ماند. امواج با ارتفاع نسبتا بالا که هنگام وقوع زلزله در سطح مایع درون مخزن ایجاد می-گردند، غالبا باعث ایجاد آسیب‌های جدی به سقف مخازن می‌شوند که اغلب همراه با نشت مایع از محل خرابی سقف و گاهی آتش‌سوزی می‌باشد. آسیب‌دیدگی سقف مخزن همچنین می‌تواند در اثر خراب شدن اتصالات ترد و شکننده‌ای که بین دیوار و سقف هستند اتفاق بیفتد. برخی گزارشات نشان می‌دهد در حالی که آسیب های وارده به مخازن فولادی طی زلزله تنوع فراوانی دارد، اکثر صدمات وارده به مخازن بتنی زمینی ناشی از ایجاد امواج سطحی می باشد. چنین خرابی های سقف به طور متعدد در زلزله‌ی ۱۹۷۱ سان فرناندو کالیفرنیا اتفاق افتاد. برای مثال مخزن بلند گرانادا که یک مخزن فولادی محکم با پهنای ۵۵ فوت و بلندی ۴۵ فوت، است با خرابی خرپاهای سقف که از نبشی‌های فولادی نازک ساخته شده بودند، آسیب دید.

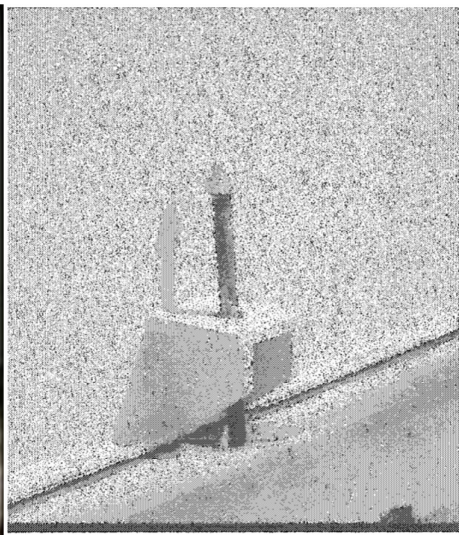
مخازن زمینی از نظر اتصال به تکیه گاه خود به دو گروه مخازن مهار شده و مخازن مهار نشده تقسیم می شوند. مخازن مهار شده باید به فونداسیون با ابعاد نسبتا بزرگ متصل شوند و از طرفی وجود اتصالات نامناسب و عدم رعایت جزئیات مهاربندی باعث ایجاد آسیب به بدنه مخزن تحت بارهای لرزه‌ای می‌گردد. مثلاً در مخازن مهارنشده یا جزئی مهارشده ممکن است شکستگی اتصال دیوار با پایه اتفاق بیفتد. شکل ۲-۳ شکستگی در پایین یک مخزن بزرگ، در زلزله‌ی ۱۷ ژانویه ۱۹۹۵ کوبه ژاپن در اثر برکنش را نشان می دهد. هم مخازن مهار شده و هم مخازن مهار نشده تحت اثر لنگرهای واژگونی بیش از حد بحرانی می توانند دچار بلندشدگی موضعی گردند که این امکان برای مخازن مهار نشده بیشتر است [۹].

جنبش مخزن ناشی از تلاطم مایع داخل مخزن ممکن است باعث بیرون آمدن یا بوجود آمدن تنشهای کششی در پیچ و مهره‌ها شود. شکل ۲-٤ حدود ۱۳ اینچ بیرون آمدگی پیچ و مهره در مخزن کارخانه‌ی تصفیه‌ی آب جوزف جانسون در اثر زلزله ی ۹ فوریه ۱۹۷۱ سان فرناندو کالیفرنیا را نشان می‌دهد.

در مورد مخازن هوایی ممکن است سیستم نگهدارنده مخازن نیز ممکن است آسیب ببیند. شکل ۲-۵ سقوط یک مخزن فولادی هوایی را در زلزله ی ۲۷ مارس ۱۹۶۴ آلاسکا نشان می دهد[۶].

شکل ۲-۳- بلند شده‌گی مخزن[۶]

شکل ۲-۵- سقوط مخزن فولادی هوایی[۶]



شکل ۲-٤- بیرون آمدن پیچ و مهره‌ها [۶]

مخازن بتنی ذخیره‌ی مایعات به خاطر نیروهای اولیه‌ی بسیار زیاد در زلزله های گذشته در ستون ها، سقف ها و دیوارها متحمل خسارات زیادی گشته‌اند. در مخازن ذخیره آب مرتفع، معمولاًسیستم پشتیبانی بتنی استفاده می شود. خرابی چنین سیستم هایی مانند ناتوانی مفاصل پلاستیک ستون و تیر درقاب‌های دایره ای بعد از زلزله های قدرتمند، مکرراً مشاهده شده است. در زلزله می ۱۹۶۰ شیلی[1] پایه یک مخزن آب بتن مسلح مرتفع با گنجایش ۷۰۰۰۰ لیتر آسیب دید. میزان دقیق آب درون آن در هنگام زلزله ۶۰۰۰۰ لیتر بود. شکل ۲-٦ مخزن آسیب دیده را بعد از زلزله نشان می دهد[۶]. این پدیده هچنین در زلزله ازمیر(زلزله ۱۷ آگوست ۱۹۹۹ کوکالی ترکیه) مشاهده شده است (شکل ۲-۷)[۱۱]. در شکل ۲-۸ یک مخزن بتنی ذخیره آب که در لحظه وقوع زلزله بم پر از آب بود، نمایش داده شده است. با وجود اینکه این سازه رفتار نسبتا خوبی در برابر زلزله از خود نشان داد و قابلیت بهره برداری خود را حفظ کرد، اما بعضی ستونهای بتن مسلح آن کمانش کردند.

در کنار این ها انواع دیگری از آسیب‌ها، مانند خرابی فونداسیون در اثر روانگرایی[2] خاک زیر مخزن یا خرابی اتصال میان مخزن و لوله‌ها، هم در مخازن ذخیره مایعات فولادی و هم بتنی وجود دارند.

[1] Chilean

[2] Liquefaction