

کاربرد مهاریهای شکل‌پذیر در دال‌های کف بند سازه‌های هیدرولیکی

امیر بهرامی فر^۱؛ حسن افشین^۲؛ مهرداد امامی تبریزی^۳

۱- دانشجوی دکترا مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷

چکیده

جابجایی‌های موضعی شدید و تنش بالای ناشی از آن در دال‌های کف بند سازه‌های هیدرولیکی اغلب در اثر جابجایی لایه‌های زیرین دارای درزه و ترک و یا وجود خاک‌های متورم شونده در پی آن‌ها ایجاد می‌شود. علاوه بر عوامل فوق، فشار برگشت ناشی از فشار هیدرواستاتیکی و نیز هیدرودینامیکی ناشی از جریان آب روی دال نیز می‌تواند چنین تنش‌هایی ایجاد نماید که در سال‌های اخیر در سرریز سدهای مهم جهان نمونه‌هایی از آن را می‌توان مشاهده نمود. تخریب‌های سرریز سدهای بوکان (مهم‌ترین سد شمال غرب کشور) در سال ۱۳۹۸ و اورویل (بلندترین سد آمریکا) در سال ۱۳۹۵ از آن جمله می‌باشند. عوامل مؤثر متعددی از جمله شاخص توده سنگ، شرایط تنش پی، نوع و عملکرد سیستم‌های تکیه‌گاهی، وضعیت سازندهای زمین‌شناسی، نحوه زهکشی پی و سطح آب زیرزمینی، رژیم جریان در طراحی سیستم تکیه‌گاهی این نوع دال‌ها مؤثر می‌باشند. در این تحقیق پس از معرفی عوامل مؤثر در ایجاد جابجایی‌های موضعی و ترک در دال‌های کف بند سازه‌های هیدرولیکی روش‌های مختلف جذب انرژی با استفاده از عناصر شکل‌پذیر تکیه‌گاهی و جلوگیری از ایجاد ترک در دال معرفی گردیده است. در نهایت مکانیسم پیشنهادی مهاریهای شکل‌پذیر معرفی و با استفاده از چینه‌شناسی آزمایشگاهی ساخته‌شده میزان اثربخشی آن‌ها در مقایسه با مهاریهای الاستیک معمول در دال‌های کف بند تحت بار فشار برگشت یکنواخت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در مهاریهای شکل‌پذیر ۴ برابر مهاریهای الاستیک متعارف بوده و استفاده از تکیه‌گاه‌های شکل‌پذیر می‌تواند از ترک‌خوردگی دال‌های کف بند در معرض جریان از جمله شوت سرریزها و حوضچه‌های آرامش جلوگیری نماید.

واژگان کلیدی

فشار برگشت، تکیه‌گاه نرم، المان شکل‌پذیر، دال بتنی

۱- مقدمه

به ضخامت کم، این دال‌ها مستعد بروز و گسترش ترک در اثر بارهای محیطی می‌باشند. از جمله این سازه‌ها می‌توان به شوت سرریزها و حوضچه‌های آرامش در سازه‌های خروجی اشاره نمود. جریان بر روی این دال‌ها اغلب با سرعت بالایی تخلیه می‌شوند. طراحی این سازه‌ها نیازمند معیارهایی برای جلوگیری از کاویتاسیون، سایش، فرسایش

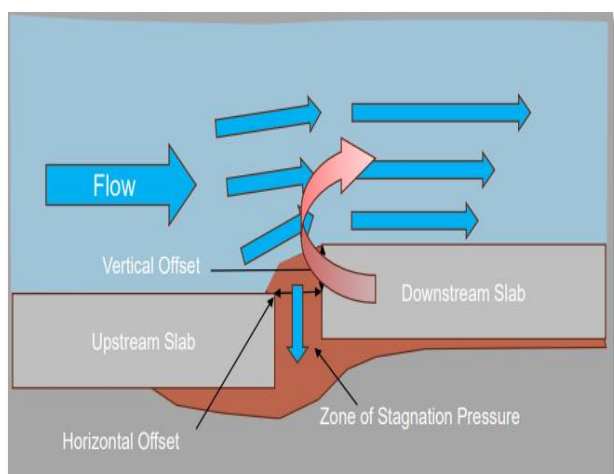
دال‌های کف بند^۱ نوعی پی کم‌عمق هستند که در آن‌ها دال بر روی زمین قرار می‌گیرد. فونداسیون دال‌های کف بند معمولاً از یک‌لایه نازک بتن در کل ناحیه فونداسیون تشکیل می‌گردد. با توجه

¹ Slab on ground

بدون جابجایی در دال زمانی که رویه بتن در بالادست درزه، کنده شده باشد به وجود می‌آید.

بالا آمدگی دال ممکن است به دلیل خشک و تر شدن مداوم پی، چرخه های ذوب و یخبندان، فرسایش داخلی خاک های پی به وجود آید و یا جریان آب از طریق درزه های باز به یک سیستم زهکش جذب یا هدایت نشود.

هنگامی فرسایش داخلی منجر به ایجاد حفره های بزرگ در زیر دال می گردد که فشارهای ایجاد شده در یک درز به راحتی در منطقه بزرگی زیر دال وارد شده و نیروی بزرگی را به وجود آورد.



شکل ۱- مکانیسم پدیده جک هیدرولیکی

بولارت [۳۴] به تشریح جزئیات نحوه ایجاد فشارهای دینامیکی بزرگ، به ویژه زمانی که حباب هوا وجود داشته باشد پرداخته است و تأثیر آن‌ها بر آب شستگی در حوضچه های سنگی بدون لاینینگ که در معرض فشار جت آب هستند پرداخته و تولید فشارهای فشار برکنش قابل توجه در حوضچه های لاینینگ شده و بدون لاینینگ را مطالعه و بررسی نموده است.

ملو و همکاران [۵] نیز تأثیر مکان و هندسه در میزان فشار برکنش حوضچه های آرامش مستغرق در معرض جریان جت آب را مورد بحث قرار داده اند. دانشمندان متعدد دیگری به درک کلی عوامل فیزیکی مؤثر بر فشار برکنش پرداخته اند.

علیرغم موارد تاریخی شکست دال شوت سرریز توسط جک هیدرولیک، تلاش ها برای تعیین کمیت فشار بالا برنده ناشی از جریان های با سرعت بالا بر روی اتصالات افست و باز سرریز بسیار محدود بوده است. اکثر مطالعات در مورد بالا آمدن بر روی دال ها و

داخلی و مقابله با نیروی فشار برکنش هیدرو استاتیکی و هیدرودینامیکی است. گزارش های قبلی در خصوص خرابی شوت سرریزها و حوضچه های آرامش با ضخامت های مختلف نشان می دهد که فشار برکنش ناشی از جریان، مهم ترین پارامتر در طراحی در این سازه ها به شمار می آید [۱].

در اوایل دهه ۶۰ میلادی معیارهای طراحی دال های کف بند صرفاً بر اساس نیروی فشار برکنش و ضخامت معادل آن‌ها پیشنهاد شده بود. شناخته شده ترین معیارهای طراحی بر اساس تحلیل تصادفی نوسانات فشار و نیرو در کف پرش هیدرولیکی در یک مدل فیزیکی مورد آزمایش قرار گرفته بود.

شکست فاجعه بار شوت سرریز سد اورویل^۱ (مرتفع ترین سد آمریکا) در زمستان سال ۱۳۹۵ شمسی نگرانی ها در رابطه با طراحی، ساخت و نگهداری شوت سرریزهای بتنی به ویژه درزه ها و ترک هایی که می توانند اجازه نفوذ آب پرفشار به فونداسیون شوت را ایجاد کند افزایش داد. مطالعات کمیته تحقیقاتی تشکیل شده در این خصوص پس از بررسی، پدیده جک هیدرولیکی در سرریزهای ساخته شده را محتمل ارزیابی و اصلاح طراحی های صورت گرفته در سرریزهایی که تحت شرایط جریان با سرعت بالا کار می کنند را حائز اهمیت اعلام نمود [۲]. محققین بر اساس حادثه سرریز سد اورویل و یافته های آزمایشگاهی موجود فشار برکنش و جریان منتقل شده از طریق درزه های این سرریز را مورد بررسی نموده اند.

جک هیدرولیکی^۲

پدیده جک هیدرولیکی زمانی اتفاق می افتد که نیروهای محرک جهت بلند کردن دال سرریز بیشتر از نیروهای مقاوم در برابر حرکت رو به بالا باشد. نیروهای مقاوم شامل وزن خود دال، ظرفیت مهاربندی پی و فشار وارده بالای دال توسط جریان آب در شوت است. هنگامی فشار برکنش در زیر دال ایجاد می شود که تحت اثر جریان سریع، فشار زیاد در زیر دال و فشار کم در بالای دال ایجاد گردد. فشارهای بالا در زیر دال زمانی ایجاد می شود که جریان با سرعت بالا در اثر برخورد با یک بالا آمدگی راکد گردد این مکانیسم در شکل ۱ به صورت شماتیک آورده شده است. بالا آمدگی ها می تواند به دلیل نشست دال بالادست، بلند شدگی یا کج شدگی لبه پایین دست و یا

^۱ Oroville Dam

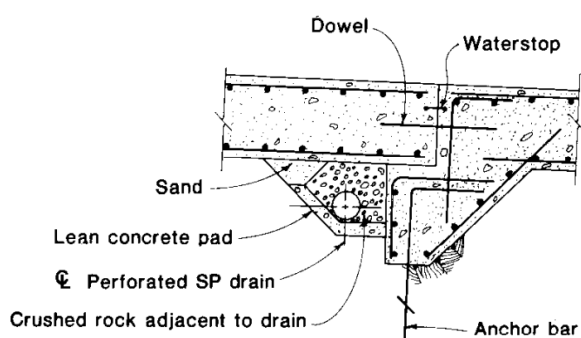
^۲ Hydraulic Jacking

علاج بخشی، ترمیم و پایدارسازی دال‌های کف بند در معرض جریان ساخته‌شده تاکنون در کشور ضروری می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۲ آورده شده است برای جلوگیری از ایجاد این ترک‌ها در دال‌های کف بند روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله آن‌ها استفاده از واتراستاپ (جهت بستن مسیر جریان از داخل درزهای دال)، اجرای کاتاف عرضی (جهت جلوگیری از ترک‌های عرضی و محدود کردن جریان از داخل شوت به فونداسیون)، کار گذاشتن طولی میلگرد در داخل درزهای کف (جهت کاهش عرض ترک‌ها و بازشدگی‌ها و جلوگیری از بازشدگی آن‌ها) و تعبیه مهار (جهت مقابله با فشارهای بالابرنده) تعبیه زهکش فیلتر دار در پی (جهت آزاد کردن فشارهای بالابرنده در زیر دال‌ها) و عایق سازی (سیستم زهکشی و جلوگیری از ذوب و یخ‌بندان‌های موضعی) می‌توان اشاره نمود [۱].

۱-۱- سیستم مهاربندی^۲

یکی از روش‌های پایدارسازی متعارف دال‌های کف بند در معرض جریان استفاده از سیستم دوخت به پشت یا مهاربندی می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ قابل‌مشاهده است در سیستم متعارف مهاربندی، دال از طریق میله یا رشته کششی به بستر صلب متصل می‌گردد.



شکل ۲- روش‌های متعارف جلوگیری از ترک در دال‌های کف بند

اتصالات در حوضچه‌های ساکن و استخرهای غوطه ور متمرکز شده اند، که در آن فشارهای نوسان ایجاد شده توسط پرش‌های هیدرولیک و جت‌های برخوردی مکانیسم حرکت هستند Toso and Bowers 1988; Fiorotto and Rinaldo 1992a, b; Bellin and Fiorotto 1995; Fiorotto and Salandin 2000; Melo et al. 2006; Liu and Li 2007; Mahzari and Schleiss 2010; GonzálezBetancourt and Posada-García 2016. Bowers and Toso (1988) یک مطالعه مدل را برای بررسی این مکانیسم در خرابی یک حوضچه ثابت سرریز توصیف کردند. Fiorotto and Caroni (2014) and Barjastehmaleki et al. (2016a, b) در نظر گرفتند که چگونه فشارهای بالا ایجاد شده در اتصالات دال حوضه ساکن در زیر دال منتشر می‌شود و با افزایش فاصله از محل اتصال از بین می‌رود [۶-۱۴].

ناشناخته‌های زیادی در مورد فشار برکنش و جریان از داخل شکاف‌ها و درزه‌ها تحت جریان با سرعت‌بالا در شوت سرریزها وجود دارد. این موضوع برای اولین بار توسط کمیته آبادانی آمریکا^۱ مورد بررسی و تأکید قرار گرفت.

نیروی فشار برکنش در شوت سرریز می‌تواند به دلیل کاهش فشار موضعی ناشی از جداسدگی جریان از جدار به وجود آید و انتقال فشارهای دینامیکی به سطح زیرین دال نیز از طریق درز یا ترک باز ایجاد شود. علاوه بر این، احتمال وجود نیروهای بالابرنده به دلیل نشت بیش‌ازحد یا پایین‌نگ از مخزن در مصالح فونداسیون شوت وجود دارد. بالا آمدگی به دلیل انتقال فشار از ترک‌ها و یا درزه‌ها از مدت‌ها پیش در محافل علمی مورد توجه بوده است.

هلپر و جانسون [۱۵] دلایل عمده خرابی سرریز به دلیل فشار برکنش را بررسی نموده و نمونه‌های موردی متعددی را مورد بحث قرار داده‌اند.

تروجانوسکی [۱۶] فرسایش مصالح پی ناشی از جریان در شکاف‌ها یا درزه‌ها را به‌عنوان یک مشکل مهم در سرریزها بر روی فونداسیون خاکی مطرح نموده است.

هر دو پژوهش شکست ناشی از جک هیدرولیکی در سدهای دیکنسون (Dikenson) در سال ۱۹۵۴ میلادی و بیگ سندی (Big Sandy) در سال ۱۹۸۳ میلادی را نیز گزارش نموده‌اند.

در سال ۱۳۹۸ شمسی در اثر بارش‌های سیلابی سرریز سد بوکان به دلیل پدیده جک هیدرولیکی دچار آسیب شد فلذا اهمیت

² Ground anchorage system

¹ USBR



ساخت سرریز سد بوکان (سال ۱۳۵۰-۱۳۴۶)

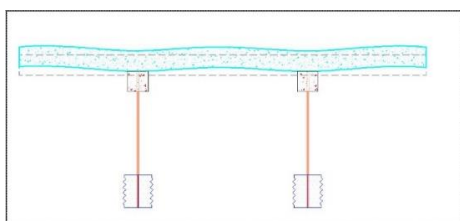


ساخت سرریز سد اورویل (۱۳۴۰-۱۳۴۸)

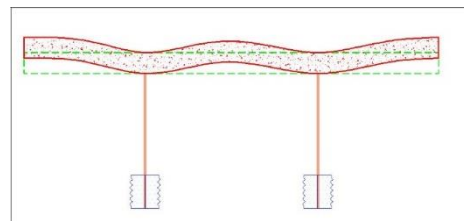
شکل ۳- نحوه اجرای سیستم مهاربندی الاستیک در دال های کف بند

هدف از این پژوهش، ارائه روشی نوین جهت بهبود عملکرد دال کف بند در مقابل نیروهای فشار برکنش و جلوگیری از ایجاد جابجایی‌های موضعی زیاد هست. مطابق شکل ۴، در این روش با بهره‌گیری از المان‌های شکل‌پذیر جابه‌جایی‌های موضعی به جابه‌جایی کلی تبدیل می‌شود که در نتیجه پتانسیل ایجاد ترک در دال کاهش خواهد یافت.

اولین استفاده از مهاربندی در ایالات متحده برای پایدارسازی موقت از سیستم‌های حفاری مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم‌ها معمولاً توسط پیمانکاران تخصصی طراحی و ساخته می‌شدند. امروزه، این سیستم به عنوان یک روش متداول برای حفظ و تثبیت سازه‌ها در شیب به کار می‌رود. در سال ۱۹۷۹ میلادی اداره مدیریت بزرگراه‌های فدرال وزارت ترابری آمریکا مجوز استفاده از مهاربندی‌های دائمی در تمامی پروژه‌های عمرانی را صادر نمود [۱۷]. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود استفاده از سیستم مهاربندی الاستیک در ساخت دال‌های کف بند سابقه طولانی دارد.



ب) مکانیسم عملکرد سیستم مهاربندی پیشنهادی



الف) مکانیسم عملکرد سیستم مهاربندی الاستیک

شکل ۴- مکانیسم سیستم تکیه‌گاه شکل‌پذیر و تبدیل جابه‌جایی موضعی به جابه‌جایی کلی در دال کف بند

(HDC) استفاده می‌شود. مزیت دیگر این سیستم این است که المان شکل‌پذیر همانند فیوز عمل نموده و به جای ترک خوردگی و تخریب در بدنه دال، المان‌های شکل‌پذیر دچار آسیب خواهند شد و این المان‌ها قابلیت جایگزینی دارند در نتیجه هزینه ترمیم آسیب‌دیدگی نیز بسیار کمتر خواهد بود.

درواقع با استفاده از خاصیت پلاستیسیته المان‌های با شکل‌پذیری بالا می‌توان از دال در برابر ترک و شکست محافظت کرد. در سیستم مهاربندی شکل‌پذیر از بتن‌های با شکل‌پذیری بالا^۱

¹ High Deformable Concrete

۱-۲- المان بتنی با شکل پذیری بالا

کواری [۱۸] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از ترکیبات سیمان، آب، *Hollow Glass* فوق روان کننده و الیاف فولادی توانست به رفتار بتن با شکل پذیر زیاد دست پیدا کند. وی اولین فرد در زمینه ساخت عناصر بتنی با شکل پذیری بالا (*HDC*) می باشد. به علت تجاری و انحصاری بودن تولید این محصول، در مقالات و مطالعات صرفاً به رفتار تنش-کرنش و به محدوده مصالح مصرفی در این دسته از المان ها اشاره شده است. وی در تحقیقات خود به این نکته نیز

اشاره نموده است که علاوه بر ترکیبات فوق می توان برای رسیدن به ویژگی های بتن با شکل پذیری بالا، از رزین و چسب نیز به عنوان ماده سیمانی و یا چسباننده استفاده نمود. در شکل ۵ نحوه رفتار نوعی از المان بتنی شکل پذیر به همراه کاربرد این المان ها در تونل ها با محیط خاک جمع شونده اشاره نمود که از آن جمله می توان به استفاده از آن ها در تونل چینبرگ *Chienberg* در سوئیس اشاره نمود.



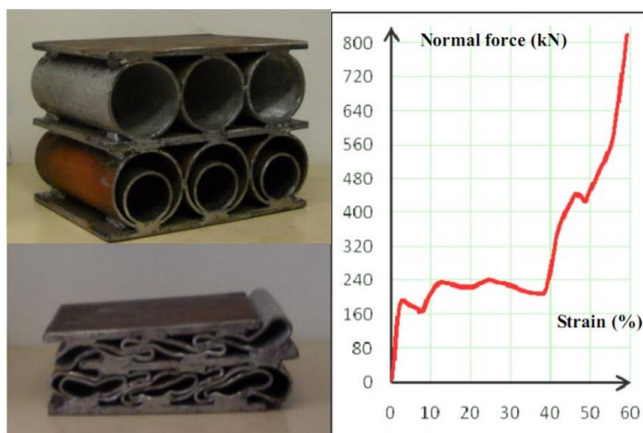
ب) بارگذاری فشاری نمونه المان شکل پذیر



الف) لاینینگ تونل با استفاده از المان شکل پذیر

شکل ۵- نمونه ای از کاربرد المان شکل پذیر بتنی و نحوه رفتار

سباسک و لیکار [۱۹] در سال ۲۰۱۴ المان شکل پذیر با استفاده از لوله ها و ورق های فولادی و اتصال آن ها به یکدیگر جهت استفاده در تونل ها در ناحیه بسیار گسلی تولید نمودند شکل ۶ نحوه رفتار این المان را تحت بارگذاری نشان می دهد. این المان رفتار سخت شوندگی پس از کرنش ۴۸ درصد از خود نشان می دهد. از این المان ها، تینا مارولت و ژاکوب لیکار توانستند رفتار شکل پذیر در تکیه گاه ایجاد نمایند. رفتار شکل پذیر در نواحی گسلی به علت تغییر شکل های زیاد بسیار کارآمد می باشد.



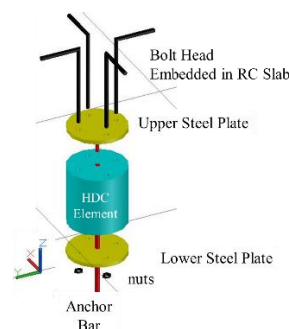
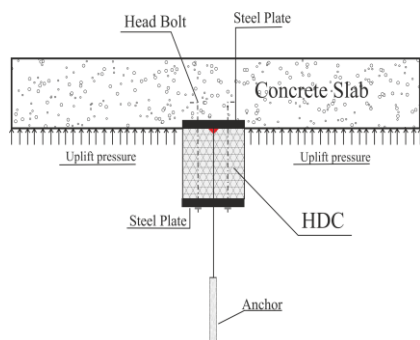
شکل ۶- رفتار تنش کرنش المان شکل پذیر از نوع لوله و ورق فولادی و رفتار تنش - کرنش نمونه تحت بارگذاری

۲- مواد و روش ها

در این بخش پس از معرفی مهاریهای شکل پذیر و جزئیات اتصال آنها به بررسی عملکرد این سیستم به عنوان تکیه‌گاه شکل پذیر در دال های بتنی کف بند پرداخته شده است. در ادامه به معرفی چینش آزمایشگاهی پرداخته و سپس مکانیسم بارگذاری مورد بحث قرار خواهد گرفت.

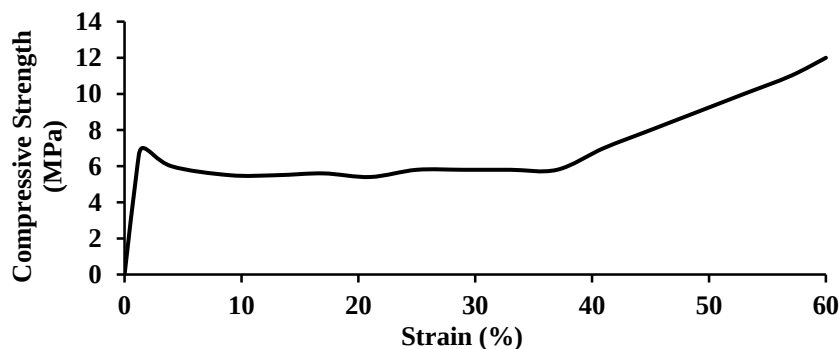
۱-۲ معرفی مهاریهی شکل پذیر

در سیستم مهاربندی متداول صرفاً ظرفیت الاستیک مصالح مورد استفاده قرار می گیرد در حالی که در سیستم پیشنهادی علاوه بر ظرفیت الاستیک از ظرفیت پلاستیک المان های شکل پذیر نیز جهت جذب انرژی می توان بهره برد. جزئیات نحوه اتصال این سیستم در شکل ۷ آمده است.



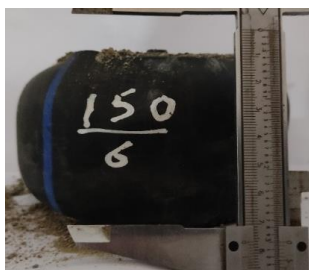
شکل ۷- جزئیات تکیه‌گاه شکل پذیر و نحوه اتصال به دال کف بند

منحنی تنش-کرنش المان بتنی با شکل پذیری بالا که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته در شکل ۸ نشان داده شده است.

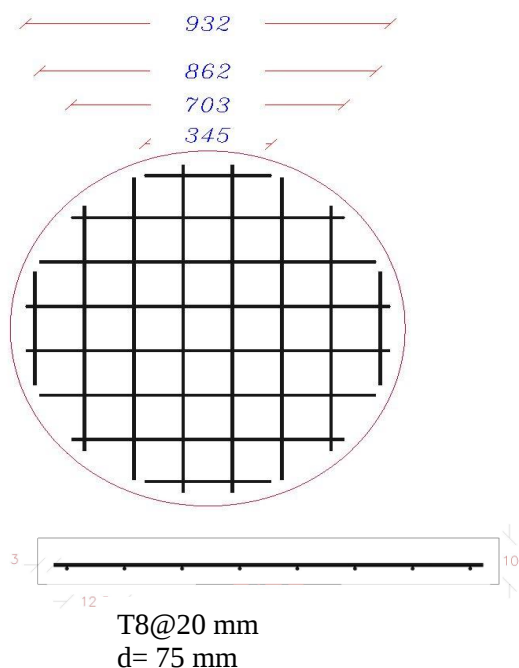


شکل ۸- رفتار تنش کرنش المان بتنی با شکل پذیری بالا

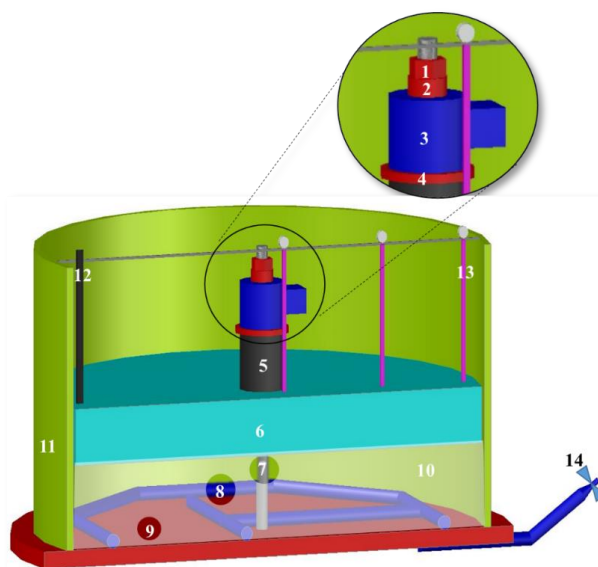
تغییر شکل نهایی المان های شکل پذیر در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۹- تغییر شکل نهایی المان های شکل پذیر



شکل ۱۰- آرماتوربندی دال بتنی



شکل ۱۱- شمای سه بعدی چینش آزمایشگاهی استفاده شده

جزئیات تکمیلی در خصوص مصالح مورد استفاده و رفتار آن‌ها در مقاله پیشین این نویسندگان به طور مبسوط بحث گردیده است [۲۰].

۲-۲- مشخصات دال بتنی مورد آزمایش

دال بتنی مورد استفاده در این آزمایش، به صورت دایره‌ای به قطر ۱ متر و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. مش آرماتور مورد استفاده به صورت تک لایه با میلگرد نمره ۸ و فواصل ۲۰ سانتی‌متر به صورت متقارن کار گذاشته شده است. جزئیات لازم در شکل ۱۰ آورده شده است.

۲-۳- مکانیسم بارگذاری

در این پژوهش چینش آزمایشگاهی جهت بارگذاری و شبیه‌سازی نیروی فشار برکنش بر روی دال طراحی و ساخته شد. جزئیات چینش آزمایشگاهی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

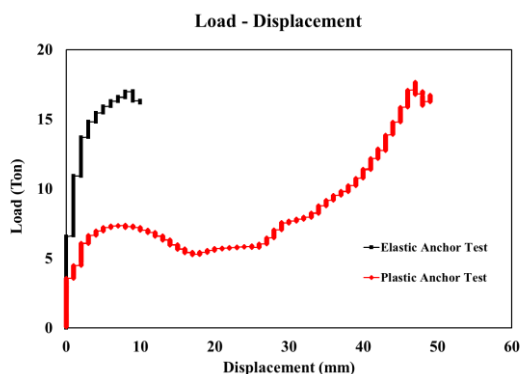
۱	مهره فولادی
۲	واشر فولادی
۳	Load Cell
۴	صفحه فولادی
۵	المان با شکل پذیری بالا
۶	دال بتنی مسلح
۷	میله مهاری
۸	لوله اشباع کننده
۹	کف صلب فولادی
۱۰	محفظه آهک زنده
۱۱	رینگ محصورکننده GRP
۱۲	تغییر مکان سنج دیجیتالی
۱۳	گیج تغییر مکان
۱۴	شیر ورودی محفظه استغراق

نمونه با سربار ۱,۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، مطابق شرایط ست آب و ظرفیت دال طراحی شده را نشان می‌دهد. با توجه به خاصیت افزایش حجم تدریجی آهک زنده در مجاورت با آب، بارگذاری به صورت یکنواخت بوده و مشابه فشار برکنش استاتیکی اعمال خواهد شد. مکانیسم بارگذاری به نحوی طراحی شده است که فشار به صورت تدریجی و یکنواخت در تمامی نواحی زیر دال افزایش یابد.

آهک زنده^۷، آهک فعال یا اکسید کلسیم در حقیقت همان آهک خالص است که در تماس با آب به شدت واکنش را بوده و ضمن ایجاد حرارت بالا، افزایش حجم بسیار زیادی نسبت به زمان از خود نشان می‌دهد. با استفاده از استاندارد ASTM 4546 بر روی نمونه آهک زنده در سربارهای مختلف جابجایی نمونه‌ها نسبت به زمان مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۲ نمودار جابه‌جایی نسبت به زمان در

^۷ Quicklime

سخت شوندگی با افزایش مقاومت می‌باشند به گونه‌ای که در یک لحظه مقاومت آن‌ها از مقاومت و یا سطح تسلیم فشاری دال بالاتر می‌رود.

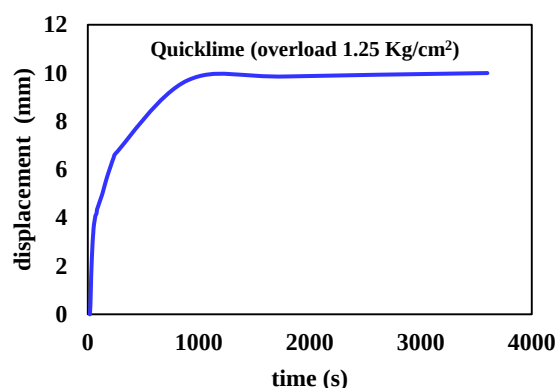


شکل ۱۳- مقایسه رفتار بار - تغییر مکان دال تحت شرایط

تکیه‌گاهی مختلف

در محدوده کارهای آزمایشگاهی و اجرایی انجام شده نتایج زیر حاصل شده است:

- استفاده از مهارهای شکل پذیر، میزان جذب انرژی سیستم دال و مهار را افزایش و جابجایی‌های ایجاد شده در مهارها را میرا می‌نماید.
- رفتار الاستوپلاستیک و مقاومت فشاری کمتر مهارها نسبت به دال منجر به عملکرد فیوزی و شکل پذیر این المان‌ها گردیده است.
- میزان جذب انرژی در مهارهای شکل پذیر ۴ برابر مهارهای الاستیک متعارف است.
- رفتار سخت شوندگی کرنشی مهارهای شکل پذیر در انتهای رفتار بار- تغییر مکان، ظرفیت کنترل نرخ جابجایی مورد نیاز وارده به دال در شرایط محیطی مختلف را افزایش داده است.
- استفاده از تکیه‌گاه‌های شکل پذیر، از ترک خوردگی کف بندهای در معرض جریان از جمله شوت سرریزها و حوضچه‌های آرامش جلوگیری می‌نماید.



شکل ۱۲- آزمایش افزایش حجم آهک زنده تحت

۱,۲۵ kg/cm^2 سربار

۳- نتایج و بحث

شکل پذیر نمودن دال‌ها از طرفی جذب انرژی نمونه‌ها را افزایش داده و از طرفی میزان تحمل ظرفیت شکل پذیری را افزایش می‌دهد. دال‌هایی که در معرض جابجایی‌های ناهمگن قرار می‌گیرند به شدت آسیب پذیر هستند. مهارهای شکل پذیر دارای رفتار الاستوپلاستیک بوده و میزان جذب انرژی و ظرفیت تحمل تغییر شکل در آن‌ها بسیار بالا است. از این رو به منظور بررسی این موارد در آزمایشگاه دو دال با مشخصات مکانیکی یکسان که یک دال مطابق روش‌های معمول و دال دیگر با استفاده از سیستم مهاربندی شکل پذیر پایداری شده‌اند، تحت بارگذاری قرار گرفته است.

نتایج این آزمایش‌ها که شامل جابجایی و بار ثبت شده می‌باشد به ترتیب با استفاده از LVDT و Load Cell ثبت گردیده است. در شکل ۱۳ رفتار بار- تغییر مکان دال در شرایط تکیه‌گاهی صلب و شکل پذیر مورد مقایسه مورد مقایسه قرار گرفته است.

بر اساس شکل ۱۳ میزان جذب انرژی در سیستم مهاربندی شکل پذیر نسبت به مهاربندی متداول صلب در حدود ۴ برابر بیشتر می‌باشد. دال‌های شکل پذیر در انتهای رفتار خود دارای رفتار سخت شوندگی می‌باشند این عامل می‌تواند به عنوان محدودکننده تغییر شکل‌ها لحاظ گردد که در نمودار فوق در جابجایی‌های بالای ۳۰ میلی‌متر قابل مشاهده می‌باشد. در راستای مهارها دارای رفتار

۴- منابع

[1] Bureau of Reclamation. 2014. "General spillway design considerations." Chap. 3 in Reclamation: Managing water in the West. Design standards No. 14,

appurtenant structures for dams (spillways and outlet works). Accessed December 16, 2021

- [2] Wahl, T. L., Frizell, K. W., & Falvey, H. T. (2019). Uplift pressures below spillway chute slabs at unvented open offset joints. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(11), 04019039.
- [3] Bollaert, E. F. R. (2004). A new procedure to evaluate dynamic uplift of concrete linings or rock blocks in plunge pools. In *Proc. of the Intl. Conf. Hydraulics of Dams and River Structures*, (pp. 125-132).
- [4] Bollaert, E. F. R. (2009, April). Dynamic uplift of concrete linings: Theory and case studies. In *USSD Annual Meeting* (pp. 1-16).
- [5] Melo, J. F., Pinheiro, A. N., & Ramos, C. M. (2006). Forces on plunge pool slabs: Influence of joints location and width. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 49-60.
- [6] Fiorotto, V., and E. Caroni. 2014. "Unsteady seepage applied to lining design in stilling basins." *J. Hydr. Eng.* 140 (7): 04014025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000867](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000867).
- [7] Fiorotto, V., and A. Rinaldo. 1992a. "Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins." *J. Hydr. Eng.* 118 (4): 578-596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:4\(578\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:4(578)).
- [8] Fiorotto, V., and A. Rinaldo. 1992b. "Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps." *J. Hydr. Res.* 30 (4): 499-520. <https://doi.org/10.1080/00221689209498897>.
- [9] Fiorotto, V., and P. Salandin. 2000. "Design of anchored slabs in stilling basins." *J. Hydr. Eng.* 126 (7): 502-512. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:7\(502\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:7(502)).
- [10] Frizell, K. W. 2007. Uplift and crack flow resulting from high velocity discharges over open offset joints. Rep. No. DSO-07-07. Denver: Bureau of Reclamation Dam Safety Technology Development Program.
- [11] González-Betancourt, M., and L. Posada-García. 2016. "Effects of joints and their waterstops on pressures spread over a slab." *DYNA* 83 (197): 94-103. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.47579>.
- [12] Liu, P. Q., and A. H. Li. 2007. "Model discussion of pressure fluctuations propagation within lining slab joints in stilling basins." *J. Hydr. Eng.* 133 (6): 618-624. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(618\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(618)).
- [13] Mahzari, M., and A. J. Schleiss. 2010. "Dynamic analysis of anchored concrete linings of plunge pools loaded by high velocity jet impacts issuing from dam spillways." *Dam Eng.* 20 (4): 307-327.
- [14] Toso, J. W., and C. E. Bowers. 1988. "Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins." *J. Hydr. Eng.* 114 (8): 829-843. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(829\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(829)).
- [15] Hepler, T. E., & Johnson, P. L. (1988). Analysis of spillway failures by uplift pressure. In *Hydraulic Engineering* (pp. 857-862). ASCE.
- [16] Trojanowski, J. (2004, September). Assessing failure potential of spillways on soil foundation. In *Proc., Association of State Dam Safety Officials Annual Conf.* Lexington, KY.
- [17] Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C. (1999). Ground anchors and anchored systems (No. FHWA-IF-99-015). United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.
- [18] K. Kovari, 2009. Consulting Engineer, Fabrikstr. 4, 8102 Oberengstringen, Switzerland-design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks, World Tunnel Congress 2009, Budapest, Hungary, may 23-28.
- [19] Cebasek, T. M., & Likar, J. (2014). Compatibility of the support system consisting of yielding elements and shotcrete lining in highly faulted grounds. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(11).
- [20] Kesejini, Y. A., Bahramifar, A., Afshin, H., & Tabrizi, M. E. (2021). High Deformable Concrete (HDC) element: An experimental and numerical study. *Advances in concrete construction*, 11(5), 357-365.