بررسی مکانیسم‌ها و چگونگی رفتار موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر در برابر حمله امواج

محمدنوید مقیم[1*]، وحید چگینی[2]، مهدی شفیعی‌فر[1]، پیمان آق‌تومان[3]

۱ـ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲ـ مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی

۳ـ مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی

© نشریه علمی ـ پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۸۹، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

در این تحقیق به بررسی مکانیسم‌ها و رفتارهای مختلف موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر در برابر حمله امواج پرداخته شده است. این موج‌شکن‌ها نوعی موج‌شکن توده‌سنگی هستند که نیم‌رخ اولیه آنها پس از برخورد امواج طراحی به حالت تعادل می‌رسند. پژوهش حاضر با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی در فلوم موج و با تولید امواج منظم و نامنظم انجام شده است. بررسی مکانیسم‌ها و رفتار جریان‌های داخل و خارج از سازه توسط تزریق مواد رنگی و فیلمبرداری از آنها انجام شده است.

کلمات کلیدی: *موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، امواج آب، مدل آزمایشگاهی، فلوم موج*

۱. مقدمه

یک موج‌شکن شکل‌پذیر به‌صورت توده سنگی و معمولاً از محدوده وسیعی از اندازه‌های سنگ تشکیل شده است. این سازه در اثر برخورد امواج دچار تغییر شکل شده و نیم‌رخ آن پس از وقوع طوفان طرح به یک نیم‌رخ پایدار تبدیل می‌شود. دو فرآیند اصلی در شکل‌گیری نیم‌رخ نهایی سازه روی می‌دهد. ابتدا هندسه کلی سازه در مقابل نیروهای هیدرودینامیکی وارده واکنش نشان می‌دهد؛ در نتیجه مصالح تشکیل دهنده لایه آرمور مرتب گردیده و در طول نیم‌رخ به‌صورتی توزیع می‌گردند که با تغییر سینماتیک میدان جریان بتوانند نیروی بوجود آمده را به حداقل ممکن برسانند. دوم اینکه در اثر واکنش نیم‌رخ در برابر برخورد امواج، سنگها به‌طور تصادفی حرکت نموده و در میان فضای خالی بین خود جای می‌گیرند، که این عمل منجر به تحکیم، وزین شدن، افزایش پیوستگی سنگها و در نهایت افزایش مقاومت برشی توده‌سنگی در برابر امواج می‌گردد (Hall and Kao, 1991).

موج‌شکن سکویی نوعی موج‌شکن توده‌سنگی شکل‌پذیر است، که با ایجاد سکویی بزرگ در تراز بالاتر و یا همتراز سطح ایستابی (SWL) در سمت دریا ساخته می‌شود (شکل ۱). نیم‌رخ موج‌شکن سکویی پس از برخورد امواج برای رسیدن به تعادل نسبی به‌صورت نیم‌رخی به شکل حرف لاتین S خوابیده، تغییر شکل می‌دهد.

بر اساس دسته‌بندی PIANC (۲۰۰۳) موج‌شکن‌های سکویی را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

* پست الکترونیکی: moghim@modares.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

۱ـ غیر قابل تغییر شکل استاتیکی[1]

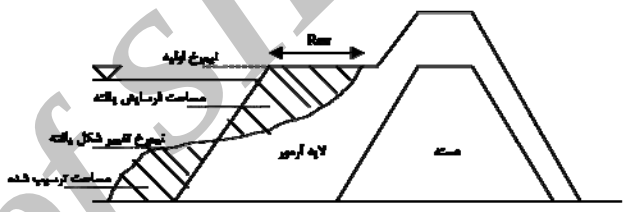
در این حالت مشابه شرایط موج‌شکن‌های سنتی، تعداد کمی از سنگها اجازه حرکت و تغییر مکان دارند.

۲ـ قابل تغییر شکل استاتیکی[2]

در این حالت به نیم‌رخ اجازه تغییر شکل به نیم‌رخ پایدار داده می‌شود، که در این حالت هر یک از سنگها به‌تنهایی باید پایداری خود را حفظ کنند.

۳ـ قابل تغییر شکل دینامیکی[3]

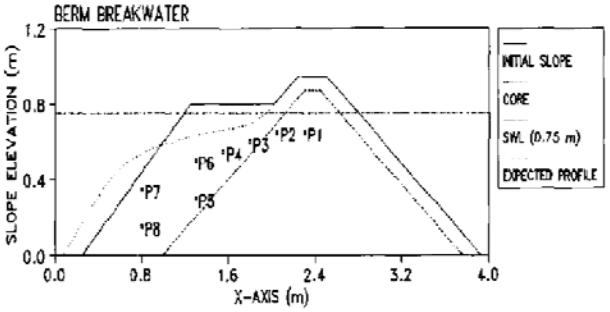
در این حالت به نیم‌رخ، اجازه تغییر شکل به نیم‌رخ پایدار داده می‌شود و هر یک از سنگها می‌توانند به‌طرف بالا و پایین در وجه جلوی موج‌شکن حرکت کنند.



شکل ۱ـ موج‌شکن سکویی

Tørum (۱۹۹۴) برای بررسی نیروهای موازی و عمود بر شیب سازه موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر ناشی از برخورد موج به سازه، از روش اندازه‌گیری نیرو بر واحد دانه سنگی استفاده کرد. وی دستگاه طراحی شده برای اندازه‌گیری نیرو را به واحد دانه سنگی متصل نمود و سپس آن مجموعه را در قسمت مسطح و کم شیب موج‌شکن شکل‌پذیر بعد از ایجاد تغییر شکل نصب نمود به‌طور همزمان نیرو و سرعت ذرات آب در مجاورت دانه‌های سنگی توسط سرعت سنج لیزری ۴ اندازه‌گیری می‌شد. نیروهای موازی شیب سازه توسط سرعت جریان اندازه‌گیری شده در مجاورت ذره و روش موریسون تحلیل شده و مقادیری میانگین برای ضرایب نیروهای پسا (درگ) و لختی (اینرسی) پیشنهاد گردید، ولی تلاش وی برای بررسی نیروهای برآ با این روش بی‌نتیجه ماند. به‌دلیل خاصیت دینامیکی سازه‌های شکل‌پذیر سنگها توانایی حرکت از یک نقطه به نقطه دیگر دارند و از آنجایی که نیروی بدست آمده از این روش در موقعیت‌های متفاوت تغییر می‌نماید، بنابراین لازم بوده که به‌طور همزمان در چندین نقطه از سازه نیروسنج نصب گردیده و نتیجه آنها با هم مقایسه گردد.

Van Gent (۱۹۹۵) به‌منظور درستی نتایج روش عددی بکار گرفته شده توسط وی برای بررسی اندرکنش موج و موج‌شکن سکویی، از فشار سنج و اندازه‌گیری فشار درون سازه استفاده نمود. موقعیت فشارسنج‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تعدادی از آنها درون هسته سازه و تعداد دیگر در لایه آرمور جاسازی شده‌اند.



شکل ۲ـ موقعیت فشارسنج‌های نصب شده در سازه (Van Gent, 1995)

تحلیل نتایج بدست آمده از فشارسنجها نشان می‌دهد که فشار داخل سازه با تغییرات تراز سطح آزاد، بسیار نزدیک و سریع تغییر کرده و تغییرات سطح آزاد آب به‌صورت کامل داخل قسمت نفوذپذیر نفوذ نمی‌کند. بیشترین فشار اندازه‌گیری شده، زمانی است که سطح آزاد آب بالای فشارسنج (در حالت بالاروی موج روی سازه)، به بیشترین مقدار خود رسیده و در نتیجه اختلاف فشار بین سطح آزاد و سطح آب داخلی به بیشترین مقدار خود برسند. این موضوع کاملاً منطقی به‌نظر می‌رسد زیرا که اصطکاک داخل محیط متخلخل بر سرعت قائم در محیط متخلخل و همچنین نوسانات فشار در جهت قائم اثر می‌گذارد.

با توجه به وسعت زیاد مرزهای آبی جنوب کشور، عدم دستیابی به سنگهای آرمور وزین در این مناطق و همچنین سادگی اجرای موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، ترویج و ساخت این نوع موج‌شکن‌ها در سواحل کشور مورد توجه قرار گرفته است. جذابیت ساخت موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر و در نتیجه درک مفهومی این نوع از سازه‌ها ضرورت بررسی مکانیسم‌ها و چگونگی رفتار این‌گونه سازه‌ها در برابر حمله

[1] Statically Stable Non-reshaping condition
[2] Statically Stable Reshaped condition
[3] Dynamically Stable condition
[4] Laser Doppler Velocimeter

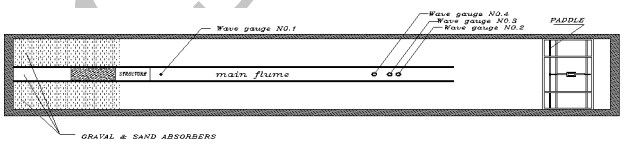
Archive of SID
www.SID.ir

امواج را توجیه می‌نماید.

۲. مدلسازی آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی مکانیسم جریان داخل و خارج سازه موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر مدلسازی آزمایشگاهی انجام شد. در این مدلسازی، موج شکن سکویی متشکل از سه لایه آرمور، فیلتر و هسته بوده و بررسی‌ها به‌صورت مدل دو بعدی توسط تزریق ماده رنگی و فیلمبرداری از آن صورت گرفته است.

آزمایشهای مدل آزمایشگاهی بر روی مقطع موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر، در فلوم موج مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی با ۳۵ متر طول، ۵/۵ متر عرض در سه قسمت و ۱ متر ارتفاع، انجام شده است (شکل ۳).



شکل ۳ـ پلانی از فلوم موج و موقعیتهای مربوط به حسگرهای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب

تولید موج در این فلوم به‌صورت منظم و نامنظم با طیف انرژی JONSWAP توسط دستگاه مولد موج ساخت شرکت DHI انجام شد. مقطع مدل موج‌شکن در انتهای قسمت میانی فلوم موج و جاذب‌های موج در انتهای فلوم‌های کناری احداث گردیده‌اند. مقطع اجرا شده و همچنین مشخصات مصالح تشکیل دهنده موج‌شکن توده‌سنگی سکویی از جمله قطر اسمی، وزن، چگالی و عرض منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها مطابق تحقیق انجام گرفته توسط مقیم و همکاران (۱۳۸۷) در نظر گرفته شدند. ثبت نوسانات سطح آب توسط دستگاه ارتفاع سنج موج در حین انجام آزمایش صورت می‌گرفت و در رایانه ذخیره می‌شد.

فیلمبرداری از الگوی جریان در داخل و خارج موج‌شکن شکل‌پذیر توسط دوربین صورت گرفته است. فلوم موج توسط صفحه‌ای از جنس پلکسی گلاس با طول کافی به دو قسمت تقسیم‌بندی شد تا در یک طرف آن، جعبه دوربین و در طرف دیگر، سازه مورد نظر به‌همراه شلنگهای تزریق ماده رنگی اجرا گردند (شکل ۴ و ۵). دلیل به‌کارگیری صفحه پلکسی گلاس بین جعبه دوربین و سازه موردنظر، جلوگیری از دخالت حضور جعبه دوربین در الگوی جریان مورد بررسی در داخل و خارج سازه است.

شکل ۴ـ نمایی از جعبه حاوی دوربین فیلمبرداری به‌منظور ضد آب نمودن آن

شکل ۵ـ نمایی از تقسیم‌بندی فلوم و چگونگی اجرای سازه موج‌شکن سکویی

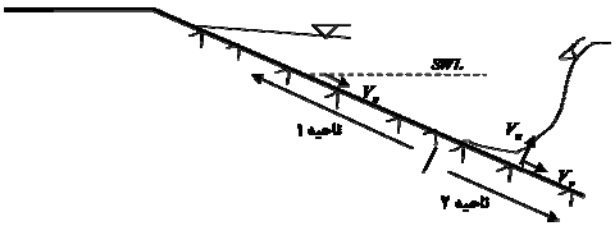
۳. مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل آنها

به‌منظور بررسی پدیده تغییر شکل سازه توده‌سنگی باید عوامل بوجود آمدن این پدیده شناخته شوند. به‌همین دلیل ابتدا به بررسی و تحلیل جریان‌های خارجی و داخلی سازه و سپس به چگونگی تغییر شکل سازه شکل‌پذیر پرداخته می‌شود. برای بررسی جریانهای بوجود آمده داخل و خارج سازه توده‌سنگی در اثر اندرکنش موج برخوردی با سازه، موقعیت شلنگهای تزریق کننده متناسب با هدف مورد مطالعه تغییر پیدا می‌نمودند.

www.SID.ir

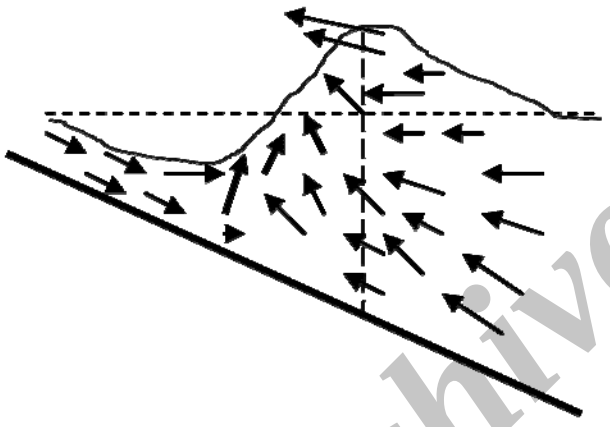
۱.۳ بررسی جریان ایجاد شده روی سازه و نیروهای حاصل از آن

بعد از آغاز بالاروی جریان روی شیب سازه، نیروی ایجاد گردیده به موازات شیب شامل نیروهای لختی و پسا ($F_p = F_D(drag) + F_I(inertia)$)، در لحظه غرق شدن ذرات کروی، بیشینه می‌شوند. در این لحظه، سرعت و شتاب جریان به‌موازات شیب سازه (V_p) بیشینه هستند. بعد از غرق شدن ذرات کروی به‌دلیل ایجاد نیروی شناوری و در نتیجه کاهش نیروی وزن ذره، قفل‌شدگی بین سنگدانه‌ها کم‌اثرتر می‌گردد و در نتیجه راحت‌تر از جای خود در می‌آیند. در طول پایین‌روی، لحظه‌ای که ذره کروی در حال پدیدار شدن است (یعنی هنگامی که از حالت غرق‌شدگی رهایی می‌یابند)، نیروی وارده به‌موازات شیب سازه (F_p) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. به‌عبارت دیگر در این لحظه سرعت جریان در حالت پایین‌روی در آن ناحیه به حداکثر مقدار خود رسیده است. این مطلب برای ناحیه ۱ یا ناحیه‌ای که بالای قسمت پایین‌روی ـ شکست موج قرار دارد، صادق است (شکل ۶). کمی پایین‌تر، نیروی F_n ناشی از ایجاد بردارهای سرعت چرخشی در پنجه موج برخوردی، افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان شیب سازه را به دو ناحیه اصلی تقسیم‌بندی نمود، یکی ناحیه ۱، که در آن سرعت و شتاب جریان اصولاً به‌موازات شیب سازه هستند و دیگری ناحیه ۲، که در آن زمانی که موج در حین پایین‌روی به داخل موج قبلی (پیشانی موج قبلی) فرو می‌رود، میدان سرعت جریان به‌صورت ناگهانی عوض شده و منجر به ایجاد مؤلفه جریان قوی عمود بر شیب می‌شود که در نتیجه آن نیروی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌گردد.

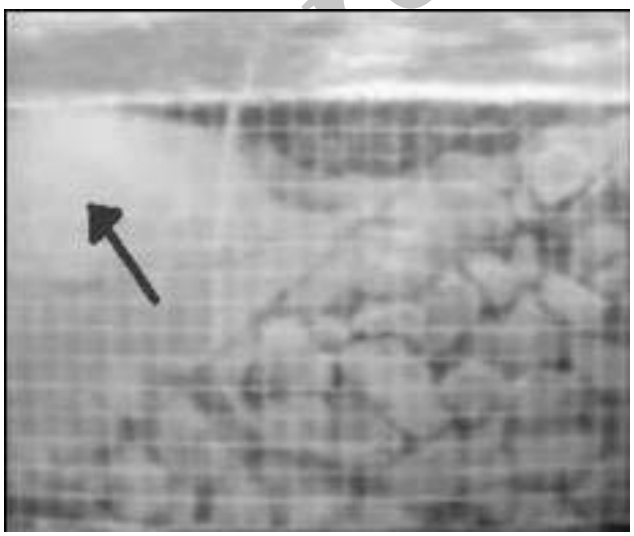


شکل ۶ ـ چگونگی توزیع شکل نیم‌رخ موج روی شیب سازه موج‌شکن

تفهیم بهتر شرایط جریان در طول پایین‌روی موج روی شیب سازه، با مرور میدان سرعت در حین شکست موج روی ساحل شیبدار بدست می‌آید. شکل ۷ یک سازه یا ساحل شیبدار را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷، سرعت بالای پیشروی در تاج موج غالب بوده و همچنین بردارهای سرعت در قسمت پایینی موج در خلاف جهت هم قرار دارند. تغییرات سریع در جهت بردارهای سرعت در قسمت پایین موج، شتابهای بزرگی را بوجود می‌آورد. این شرایط همانند حالتی است که موج روی شیب سازه می‌شکند و در نتیجه بردارهای سرعت پایین‌روی و بردارهای سرعت ایجاد شده به سمت بالا در پنجه سازه با هم ترکیب می‌شوند. زمانی که بردارهای سرعت پایین‌روی به بردارهای جریان به‌سمت بالای جریان در قسمت پنجه موج می‌رسند، بردارهای سرعت ترکیبی چرخیده و در نتیجه بردارهای سرعت بزرگی در جهت عمود بر شیب سازه موج‌شکن بوجود می‌آیند. در این لحظه نیروی عمود بر شیب سازه (F_n) بزرگی ایجاد می‌گردد. مطلب اخیر را می‌توان در شکل ۸ که حاصل از فیلمبرداری آزمایشگاهی است مشاهده نمود. همانطور که مشاهده می‌شود جهت حرکت ماده تزریقی سفید رنگ به‌صورت عمود بر سازه و در جهت بیرونی آن است.



شکل ۷ـ میدان سرعت جریان در حین پایین‌روی و شکست موج



شکل ۸ ـ جهت حرکت ماده تزریقی سفید رنگ در هنگام بیشترین تراز پایین‌روی موج برخوردی به سازه

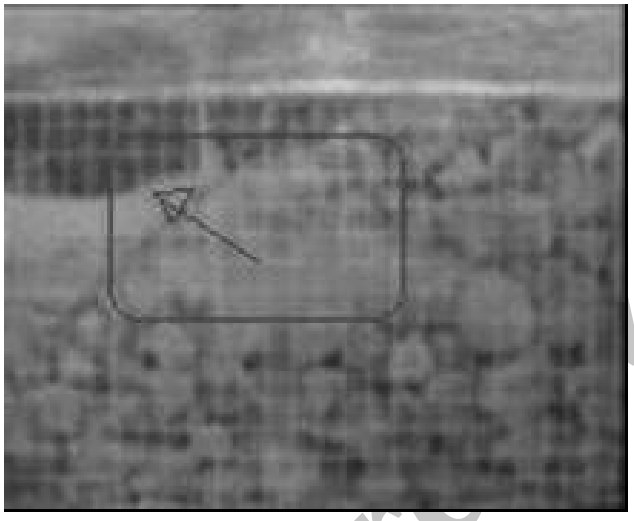
Archive of SID
www.SID.ir

با توجه به توضیحات ارایه شده، شیب سازه را می‌توان به دو قسمت تقسیم‌بندی کرد، یکی ناحیه بالایی شیب سازه که نیم‌رخ سطح آب روی آن (در حین بالاروی)، صاف بوده و به‌صورت جریان برگشتی نیست و دیگری ناحیه پایینی شیب سازه که نیم‌رخ سطح آب روی آن صاف نبوده، به‌صورتی که قسمت بالایی نیم‌رخ سطح آب در این ناحیه به‌صورت پنجه عمل نموده و قسمت پایینی این نیم‌رخ به‌صورت یک زبانه بلند است که در نتیجه جریان در پنجه این نیم‌رخ به‌صورت یک جریان چرخشی عمل می‌نماید.

نیروی پسا و برای وارد بر سنگدانه‌ها در مکانهایی که سرعتها بیشینه هستند، به حداکثر مقدار خود می‌رسند. حداکثر نیروی لختی به موازات شیب سازه، در شروع بالاروی جایی که در این قسمت سرعتها کمینه و جریان دارای شتاب زیادی بوده و در نتیجه نیروی پسا و برآ کوچک هستند، اتفاق می‌افتد. همچنین موقعیت دیگری از سازه که در آن نیروی لختی بزرگی بوجود می‌آید، محلی است که موج در حال شکست به سازه برخورد می‌کند. در این زمان سرعتها و شتابها در جهت پایین شیب سازه جهت دارند.

۲.۳ *بررسی جریان ایجاد شده داخل سازه و چگونگی تأثیر آن بر تغییر شکل سازه توده‌سنگی*

با توجه به مشاهده‌های آزمایشگاهی، یکی از پدیده‌های مهم در داخل محیط متخلخل موج‌شکن توده‌سنگی که فرآیند تغییر شکل سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، افزایش سطح آب داخل سازه است. تفسیر و علت افزایش سطح آب داخل سازه با در نظر گرفتن طول و عرض مقطع جریان لوله‌ای در طول ورود و خروج جریان شرح داده می‌شود. در طول نفوذ جریان به داخل محیط متخلخل[1]، سطح مقطع سازه جلوی جریان نسبتاً بزرگ بوده و بنابراین طول مسیر نفوذ نسبتاً کوتاه می‌باشد. با توجه به اینکه جریان خروجی یا تراوش[2] در قسمت پایینی سازه رخ می‌دهد، طول مسیر نفوذ زیاد بوده (خطوط جریان طولانی بوجود آمده) و به‌نظر می‌رسد که به‌دلیل پایین بودن تراز ناحیه تراوش آب، سطح آب داخل سازه پایین می‌آید. به‌منظور بدست آوردن جریان خروجی برابر با جریان ورودی در هر دوره رفت و برگشت موج، باید سرعت جریان خروجی بزرگتری نسبت به سرعت نفوذ (ورودی) به‌وجود آید، که این پدیده نیاز به وجود گرادیان فشار هیدرولیکی بزرگتری است. پدیده بالا آمدن سطح آب داخل سازه منجر به کاهش جریان نفوذی (بخصوص در پریودهای پایین موج)، ایجاد سطح مقطع بزرگتر در طول تراوش و گرادیان فشار بزرگتر در طول تراوش شده و در نتیجه سرعت تراوش بزرگتری در محدوده ناحیه بیشترین پایین‌روی موج (شکل ۹) ایجاد می‌گردد. به بیان ساده‌تر بدلیل آنکه جریان خروجی از سازه در حالت پایین‌روی و در قسمت پایین سازه اتفاق می‌افتد و با توجه به اینکه در حالت خروج آب از سازه (تراوش)، آب مجبور است از فضای کوچکتری نسبت به حالت نفوذ عبور کند، بنابراین برای آنکه حجم آب ورودی و خروجی از سازه یکسان باشند باید گرادیان فشار هیدرولیکی موجود باشد، که این امر با افزایش سطح آب داخلی تامین می‌گردد.



شکل ۹ـ ناحیه خروج ماده تزریقی سفید رنگ داخل سازه در حالت بیشترین تراز پایین‌روی موج برخوردی به سازه

۳.۳ *تفسیر پدیده تغییر شکل سازه و ایجاد نیم‌رخ S شکل به تعادل رسیده*

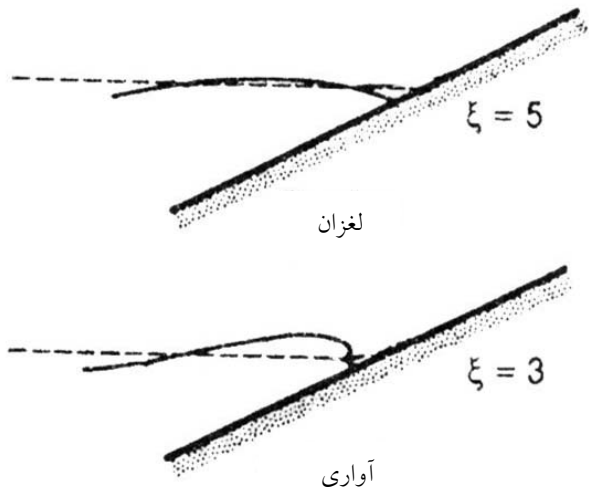
با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و همچنین تحلیل فیزیکی پدیده موردنظر، به بررسی مراحل تغییر شکل نیم‌رخ موج‌شکن سکویی و همچنین ایجاد نیم‌رخ تعادل S شکل، پرداخته خواهد شد. بدین منظور برای درک بهتر پدیده و همچنین توجیه نیروهای به‌وجود آمده در اثر شکست و بالاروی موج روی سازه، به بررسی و تحلیل مشاهدات مربوط به شکست موج روی سازه در حال تغییر شکل و انواع مرتبط آن، پرداخته خواهد شد.

[1] Infiltration
[2] Exfiltration

Archive of SID
www.SID.ir

۱.۳.۳. بررسی شروع تغییر شکل سازه

به‌طور کلی شکست موج را می‌توان یک مرحله انتقالی از حرکت ذرات به صورت غیرچرخشی به حرکت چرخشی بیان نمود. فرآیندهای به‌وجود آمده و میزان شدت آنها در ناحیه شکست موج (آشفتگی، بردارهای سرعت و...) متناسب با نوع شکست خواهند بود. نوع شکست موج نیز به تیزی موج و شیب سازه بستگی دارد. با توجه به شیب اولیه سازه (شیب تند)، شکست موج روی سازه در ابتدای تغییر شکل بر اساس تیزی موج برخوردی از نوع شکست لغزان[1] و یا آواری[2] است (شکل ۱۰). در این حالت شکست موج روی سازه، منجر به بالاروی یک توده آب (گوه آب) بر روی سازه می‌گردد، با بیان ساده می‌توان این نوع شکست را یک مرحله انتقالی بین موج نشکسته و موج در حال شکست معرفی کرد. در این نوع شکست، انرژی موج فقط به‌اندازه کمی زایل می‌شود.



شکل ۱۰ـ شکل نمایشی شکست موج در دو حالت شکست لغزان و آواری

در اثر وجود اصطکاک بین موج و سازه و همچنین شکست موج روی شیب، با بالا رفتن موج روی سازه، انرژی موج مستهلک گردیده و در نتیجه ارتفاع و سرعت موج به‌تدریج کاهش می‌یابند. با توجه به بیشینه بودن سرعت بالاروی موج روی شیب سازه در لحظه ابتدای بالاروی موج که منجر به بیشینه شدن نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذره می‌شود، کاهش وزن ذرات در اثر غرق شدن داخل آب (نیروی شناوری)، کاهش قفل شدگی و اصطکاک ذره با ذرات مجاور و با توجه به اینکه شروع بالاروی موج در ابتدای تغییر شکل از حدود ناحیه تراز ایستابی (SWL) است، بنابراین سنگها در محدوده تراز ایستابی و پایین‌تر از آن دارای بیشترین شانس برای تحریک شدن دارند. مشاهده‌های انجام شده در حین انجام آزمایشها نیز نشان دادند که ناحیه شروع تغییر شکل از ناحیه تراز سطح ایستابی تا پایین‌ترین نقطه پایین‌روی موج ادامه دارد.

به‌تدریج که در اثر برخورد موج با سازه، سنگها از محدوده ناحیه تراز ایستابی از محل خود خارج گردیدند و در اثر نیروی وزن ذره، نیروهای هیدرودینامیکی حاصل از جریان پایین‌رونده بر روی سازه در حین پایین‌روی موج، نیروی عمود بر شیب سازه در قسمت زیرین حضیض موج ناشی از بردار چرخشی جریان و همچنین تراوش جریان قوی بوجود آمده از داخل سازه، شروع به حرکت به‌سمت پایین شیب سازه نمودند، سازه توده‌سنگی تغییر شکل پیدا نموده و شیب میانی سازه ملایم‌تر می‌گردد. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که بیشترین تغییر شکل موج‌شکن بعد از برخورد چند ده موج اولیه رخ می‌دهد.

۲.۳.۳. بررسی ادامه تغییر شکل سازه

با ملایم شدن شیب موج‌شکن تغییر شکل یافته، شکست موج روی سازه به شکست نوع آواری و یا چرخان تبدیل می‌گردد. از مشخصه شکست موج به‌صورت چرخان، ایجاد جریان بسیار آشفته و زوال انرژی موج در یک ناحیه متمرکز است که در نتیجه جایی که شکست موج اتفاق می‌افتد جریان کاملاً آشفته شده و انرژی زیادی آزاد می‌گردد.

در اثر آشفتگی ایجاد شده در ناحیه شکست موج و آزاد نمودن انرژی زیاد روی سازه به‌سمت بالا، انتقال جریان بالاروی آشفته با سرعت زیادی به‌وجود آمده و در نتیجه نیروهای پسا، لختی و شناوری به‌عنوان نیروهای محرک به‌وجود می‌آیند. در اثر به‌وجود آمدن عوامل محرک ذکر شده، سنگها یا در جای خود می‌لغزند و یا به سمت بالا با مود حرکتی غلتیدن، جابجا می‌شوند. با توجه به توضیحات ارائه شده و مشاهدات آزمایشگاهی، ذرات سنگی پس از شروع آزمایش می‌توانند در اثر سرعت‌های بالاروی زیاد به سمت بالای سکوی موج‌شکن حرکت نمایند.

بعد از رسیدن موج به حداکثر تراز بالاروی، پایین‌روی موج روی شیب سازه آغاز می‌شود. در ابتدای پایین‌روی، سرعت جریان کمینه بوده ولی با وجود شتاب ناشی از شتاب گرانش،

[1] Surging
[2] Collapsing

www.SID.ir

سرعت جریان زیاد می‌گردد. ذراتی که در حین بالاروی از جای خود در آمده‌اند، اگر در یک موقعیت پایدار در بین سنگهای دیگر قرار نگرفته باشند (آرمورینگ) توسط سرعت جریان برگشتی و همچنین نیروی وزن آنها به سمت پایین شیب حرکت می‌کنند. ذراتی که در حین بالاروی در جای خود تکان می‌خورند، اگر نیروی پسا و لختی بوجود آمده در اثر پایین‌روی، نیروی وزن ذره، نیروی عمود برشیب سازه در قسمت زیرین حضیض موج ناشی از بردار چرخشی جریان و همچنین جریان قوی بوجود آمده از داخل سازه به طرف بیرون به اندازه کافی بزرگ باشند، می‌توانند ذره را از جای خود خارج و به سمت پایین شیب ببرند.

با توجه به فرسایش قسمت جلویی سکوی سازه روی شیب موج‌شکن سکویی و تغییر شکل سازه، سنگهای فرسایش یافته با حرکت به سمت پایین شیب، بر روی هم دپو می‌گردند. با افزایش تعداد موج برخوردی به سازه شکل‌پذیر، عرض فرسایش یافته سکو و در نتیجه مساحت فرسایش یافته به‌تدریج بیشتر خواهد گردید و در نتیجه سازه به‌سمت جلوتر به‌طرف دریا تغییر شکل می‌دهد. با توجه به اینکه انتهای سازه تغییر شکل یافته نسبت به حالت اولیه به‌سمت دریا پیش رفته است، بنابراین موج در موقعیت مکانی جلوتری از سازه در مقایسه با لحظه‌های قبلی، شکسته خواهد شد و انرژی آن در مکان جلوتری نسبت به سازه از بین خواهد رفت.

بر اساس مشاهده‌های آزمایشگاهی و مباحثی که ذکر گردید، عمده حرکت سنگها و تغییر شکل سازه، در فاصله بین حداکثر تراز بالاروی و پایین‌روی موج انجام می‌شود. در این فاصله (ناحیه میانی شیب جلوی سازه)، نیروهای هیدرودینامیکی، بیشترین مقدار را دارا هستند، که همین امر منجر به ایجاد شیب ملایمی از مصالح توده‌سنگی می‌گردد تا امواج با ارتفاع بلندتر، در اثر توسعه و پهن شدن سازه به‌طرف جلو و در نتیجه کاهش عمق آب، زودتر جلوی سازه بشکنند و انرژی موج برخوردی را کاهش دهند و همچنین طول محیط متخلخل بیشتری برای استهلاک و جذب انرژی موج به‌وجود آورد. بنابراین پیشروی قسمت بالایی شیب سازه شکل‌پذیر به‌سمت عقب و جلوروی قسمت پایینی شیب سازه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شیب میانی سازه، برای تحمل بارها و نیروهای هیدرودینامیکی بیشینه به‌وجود آمده، به‌اندازه کافی ملایم گردیده و در نتیجه مؤلفه قائم نیروی وزن ذرات سنگی بزرگ‌تر گردد و همچنین محیط متخلخل طول کافی برای مقابله با انرژی موج برخوردی برای رسیدن به یک حالت پایدار دینامیکی تحت شرایط خاص موج ایجاد شود.

۳.۳.۳. *توزیع سنگ بر روی سازه*

افراد متعددی از جمله Tørum و همکاران (۲۰۰۰) بر روی توزیع سنگها بر اساس اندازه آنها در طول شیب موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر کار کرده‌اند. در موج‌شکن‌های سکویی توزیع مهمی از مصالح سنگی در طول شیب موج‌شکن اتفاق می‌افتد، که منجر به قرار گرفتن سنگهای بزرگتر در ناحیه پایینی شیب و سنگهای کوچکتر در محل سکوی موج‌شکن می‌شود. چگونگی توزیع سنگها در طول شیب شاید به این دلیل باشد که سرعت چرخشی جریان برای مصالح سنگی بزرگتر، معادل سرعت چرخشی جریان برای مصالح سنگی کوچکتر است، که منجر به حرکت بیشتر مصالح بزرگتر در طول یک دوره تناوب موج می‌شود (شکل ۱۱). با صرف‌نظر کردن از این مفهوم می‌توان این پدیده را به صورت دیگر بیان نمود که سنگهای بزرگتر دارای لختی بیشتری نسبت به سنگهای کوچکتر هستند، بنابراین پس از شروع حرکت این سنگها به‌سمت پایین، متوقف شدن آنها توسط موج بعدی مشکل است و از طرف دیگر سنگهای بزرگتر در مقایسه با سنگهای کوچکتر، راحتتر روی شیب سطح زبر می‌غلتند.

شکل ۱۱ـ نیم‌رخ موج‌شکن سکویی تغییر شکل یافته و چگونگی توزیع سنگها روی آن

مشاهدات نشان دادند که در برخی موارد، سنگهای با اندازه کوچک و متوسط بعد از بلند شدن از جای خود در اثر جریان‌های بالارونده و پایین‌رونده در قسمت شیب میانی ملایم پشت سنگهای بزرگتر پنهان می‌شوند و موقعیت خود را نسبت به سایر ذرات سنگی تثبیت می‌نمایند (پدیده آرمورینگ). همچنین

www.SID.ir

در حین تغییر شکل، سنگهای تیز گوشه بر خلاف سنگهای گرد گوشه‌سخت‌تر از جای خود بلند شده و خیلی سریع در مکان دیگر گیر می‌افتند.

۴. نتیجه‌گیری

عملکرد و چگونگی تغییر شکل موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر را می‌توان اینطور بیان نمود که به‌منظور کاهش نیروهای هیدرودینامیکی، هندسه موج‌شکن به‌صورتی در خواهد آمد که مقاومت سازه در هر منطقه از شیب سازه، مطابق و سازگار با نیروهای هیدرودینامیکی محلی باشد. یعنی تک‌تک سنگها به موقعیتی که در آن به حالت پایدار می‌رسند، تغییر مکان می‌دهند. این بدین معناست که در موقعیتهایی که موج می‌شکند و نیروی هیدرودینامیکی ناشی از جریان بالارونده و پایین‌رونده نسبتاً بزرگی ایجاد می‌گردد، شیب محلی سازه ملایم‌تر می‌گردد. برعکس در موقعیتهایی از سازه که نیروها کوچک هستند، شیب سازه می‌تواند تندتر باشد. در قسمت بالای نیم‌رخ شیب سازه، به‌دلیل آنکه اولاً سنگها مغروق نیستند و ثانیاً موج برخوردی به سازه قبل از اینکه به این قسمت برسد، می‌شکند و مقدار زیادی از انرژی آن از بین می‌رود و در نتیجه نیروی کوچکتری را به‌وجود می‌آورد، مقاومت سازه نسبتاً بزرگ است. در این ناحیه شیب قرارگیری مصالح تیزتر می‌گردد. نیم‌رخ تغییر شکل یافته نهایی به صورت نیم‌رخ S شکل در می‌آید، به‌طوری که شیب نیم‌رخ نزدیک کف دریا، تیز، در محل شکست موج، ملایم و نزدیک نقطه شکست موج، تیز است. این شکل‌گیری نیم‌رخ سمت دریا که منجر به حداقل شدن نیروهای هیدرودینامیکی و افزایش مقاومت سازه در برابر نیرو می‌شود، به سازه امکان ساخت با مصالح کوچکتر را می‌دهد.

۵. تقدیر و تشکر

این تحقیق با کد ۸۶ ـ ۰۵ـ۳۱ ـ TMU و با حمایت مالی اداره کل مهندسی سواحل سازمان بنادر و دریانوردی انجام گرفته است. از مسوولین محترم سازمان بنادر و دریانوردی به‌خاطر حمایت مالی و همچنین از مسؤلین محترم مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی برای فراهم آوردن امکان انجام این تحقیق در فلوم موج آن مرکز و به‌خصوص آقایان رحمت‌اله خلیلی، مهدی علی‌وردلو و عبداله عبدالهی برای همکاریهای شبانه‌روزی در آزمایشگاه و انجام آزمایشهای مدل آزمایشگاهی تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

مقیم، م.ن.؛ شفیعی‌فر، م.؛ آق‌تومان، پ. و چگینی، و. ۱۳۸۷. اثر عرض اولیه سکوی موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته و عرض فرسایش یافته سکو. هشتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی.

Hall, K. and Kao, S. 1991. A study of the stability of dynamically stable breakwaters. Canadian Journal of Civil Engineering. 18:916-925.

MarCom, W.G. 2003. State-of-the-art of designing and constructing berm breakwaters. PIANC. Brussels.

Tørum, A. 1994. Wave induced forces on an armour unit on a berm breakwater. Journal of Waterway. Port, Coastal and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers. 120(3). May/June.

Tørum, A.; Krøgh, S.R.; Bjordal, S.; Fjeld, S.; Archetti, R. and Jakobsen, A. 2000. Design criteria and design procedures for berm breakwaters. Coastal Structures' 99. Losada (ed.) Balkema. Rotterdam. Netherlands. 331-341.

Van Gent, Marcel M.A. 1995. Wave interaction with berm breakwaters. ASCE, J. of WPC. and OE. 121(5).

Archive of SID

www.SID.ir