Investigación experimental con onda solitaria y N-waves de la forma del perfil inicial de la onda de un tsunami

Flores Álvarez Juan Esteban, Servín Lugo María Dolores, Ávila Arzani Dora Luz, Segura Quiroz David Humberto, Ramírez Cuevas José Miguel

Investigadores de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte. jflores@imt.mx, dservin@imt.mx, davila@imt.mx, dsegura@imt.mx, jose.rc@zacatepec.tecnm.mx

Resumen

En vista de los recientes, trágicos y desastrosos tsunamis, como el ocurrido en el Océano Índico en 2004 y el de Tohoku-Oki en 2011, aún no se conocen los mecanismos que transforman los desastres naturales en acontecimientos que cambian la vida de quienes viven en regiones propensas de situación de riesgo. Desde la generación, la propagación, evolución y hasta la etapa final, donde un frente de olas se aproxima a una costa. Aunque muchos estudios se han centrado en los dos primeros aspectos de un tsunami, continúa siendo difícil evaluar el impacto inducido por las olas largas de las desastrosas ondas impulsadas cerca y en tierra.

Parece que, especialmente en la región cercana a la costa, donde existen estructuras de flujo complicadas junto con el flujo de escombros, el transporte de sedimentos y turbulencias complejas, los modelos tradicionales a escala física son esenciales. Por lo tanto, los modelos físicos podrían contribuir a comprender la naturaleza compleja de la propagación y el crecimiento de las ondas solitarias y sus diversos tipos de interacciones con el entorno de construcción. Esto podría ayudar a reducir las pérdidas humanas, mediante la mejora de los códigos de construcción y las medidas de defensa costera. Además, las técnicas robustas de modelado físico permiten la medición directa de la distribución de la presión y de las fuerzas expuestas a corrientes violentas inducidas por la aceleración.

Lo anterior, nos lleva a la definición de tsunami, que es una ola, o serie de olas, generadas por el desplazamiento vertical repentino de una columna de agua. El agua puede ser desplazada debido a la actividad sísmica, explosiones volcánicas, un deslizamiento de tierra sobre o debajo del agua, un impacto de asteroide o ciertos fenómenos meteorológicos. El término tsunami es japonés para una ola de puerto (Bryant, 2008).

Un tsunami se crea por el desplazamiento de una gran masa de agua. Un terremoto es, en la mayoría de los casos la causa de este desplazamiento. El terremoto que induce el mayor tsunami es causado por una placa tectónica que se desliza debajo de la placa adyacente. Esto se llama una "zona de subducción". Estas zonas generalmente se localizan en tierra, en aguas poco profundas o incluso en aguas profundas del océano. Este es, por ejemplo, el caso de Japón, donde el Océano Pacífico se encuentra a un lado y las islas de Japón al otro lado de la línea de fractura.

Características del tsunami

La figura 1 muestra el mecanismo de un tsunami causado por una placa de subducción. En la figura 1.a, la placa se desliza debajo de la placa adyacente hasta que las dos placas se atascan. En la figura 1.b, el movimiento de las dos placas continúa, pero la placa de subducción tiende a arrastrar la placa superior hacia abajo. La placa superior se dobla y produce energía que puede acumularse durante décadas. En la figura 1.c, la energía es demasiado grande para las dos placas atascadas y en la figura 1.d, el tsunami es causado por un terremoto en la zona de subducción (Arcas y Segur., 2012). El movimiento del lecho marino genera una depresión que viaja hacia tierra y una elevación que viaja hacia el mar. Es por eso que la ola líder es principalmente una depresión en un evento de tsunami (Labeur et al., 2014).



Figura 1. Tsunami causado por un terremoto en la zona de subducción (Arcas y Segur., 2012).

Las olas de tsunami difieren mucho de las olas de tormenta u olas de oleaje. Las olas de tormenta o de oleaje disipan su energía principalmente en la zona de rompientes, mientras que los tsunamis pierden poca energía a medida que se acercan a la orilla y pueden subir mucho más que las olas de tormenta. Este comportamiento se debe principalmente a la longitud de onda que es de varios kilómetros para los tsunamis. La longitud de la ola es del mismo orden que la longitud del área desplazada del terremoto y puede ser de 10 a 500 km. Otro parámetro importante de un tsunami es el período de la ola y generalmente varía de varios minutos a horas. Las olas con este período viajan a velocidades de 166 a 250 m/s en alta mar, de 28 a 83 m/s en la plataforma continental y de 10 m/s en la costa. (Bryant, 2008).

La forma de la ola experimenta una transformación de aguas profundas en alta mar a la costa poco profunda. En aguas profundas, la ola tiene una forma sinusoidal. Las

crestas y los valles son de la misma altura. Cuando la ola cruza la plataforma continental, el pico de la ola se agudiza y la depresión (valle) se aplana. Éste pico de la onda es matemáticamente descrito por la teoría de la onda de Stokes. Las partículas de agua en una onda de Stokes no siguen órbitas cerradas, y se produce un movimiento masivo de agua debido a la onda. A medida que la ola llega a la orilla, llega a su punto máximo y desaparece. La ola del tsunami se convierte en una onda solitaria. Aquí toda la masa de agua se mueve en la dirección de la ola. En muchas olas de tsunami hay un paso a través de la cresta de la ola de tsunami. Tales ondas están mejor descritas por las N-waves (Bryant, 2008). Las N-waves no se basan en ninguna teoría, se basan matemáticamente para describir una onda que parece un tsunami con una depresión. Las N-waves se crean al multiplicar una onda solitaria con una línea recta inclinada.



Figura 2. Esquema de diferentes formas de ondas (Bryant, 2008).

Ecuación de onda solitaria

La onda solitaria fue descrita por Boussinesq en 1972. Munk (1947), Dean y Dalrymple (1984), Madsen (et al. 2008) y Horsten (2016) utilizaron la onda solitaria de Boussinesq en sus estudios. La serie temporal para el modelo SWASH para describir una onda solitaria se derivará de la siguiente fórmula (Schimmels et al., 2016):

$$n(t) = H * sech^{2}(k * c(t - t_{0}))$$
(1)

Donde η es la elevación de la superficie, H es la amplitud de la onda, d es la profundidad inicial del agua y k es el número de onda. En todo el perfil de onda no hay η menor que cero. La H, por lo tanto, representa la altura de la ola. Para obtener una serie temporal de la ecuación 1, la velocidad de propagación y el número de onda son obligatorios y se dan en la ecuación 2.

$$k = \sqrt{\frac{3H}{4d^2}} \qquad c = \sqrt{g(d+H)} \tag{2}$$

Ecuación N-waves

Una ola de tsunami es generalmente precedida por una depresión del agua. Esto no

está representado en la onda solitaria. Una N-waves sería mejor si la depresión del agua se incluyera en el modelo. Sin embargo, la N-waves no tiene conexión matemática con una ola de tsunami real. La N-waves es una onda solitaria transformada para que parezca una ola de tsunami. La onda solitaria se manipula, multiplicándola linealmente, hasta que tenga la forma deseada. La ola puede tener una depresión principal o una cresta principal seguida de una depresión de agua, que depende de la pendiente lineal (Tadepali, 1994). Se puede encontrar una ecuación de la N-waves en el informe de Tadepali y Synolakis (1994) y se establece de la siguiente manera:

$$n(x,0) = (\in H)(x - X_2) * sech^2(\gamma_s(x - X_1))$$
(3)

Donde ε ·H es una amplitud de N-waves escalada, la distancia L = X2-X1, L=0 conduce a una ola con igual valle y cresta. Para obtener (γ s):

$$\gamma_S = \sqrt{\frac{3}{4} \cot H} \tag{4}$$

Propagación

Debido a la longitud de onda larga, la relación de la profundidad del agua sobre la longitud de onda es muy pequeña (d / L <0,05). Esto significa que una ola de tsunami es una ola de aguas poco profundas, incluso en aguas profundas. La propagación de las olas se puede expresar como $c \approx \sqrt{gd}$ y, por lo tanto, está influenciada por la profundidad del agua (Battjes y Labeur, 2014). Esta influencia de la profundidad del agua tiene efecto en cuatro procesos: el aumento de la amplitud de las olas debido a la disminución de la profundidad del agua cerca de la costa (Shoaling), el cambio en la dirección de las olas debido a la batimetría (Refracción), el cambio en la dirección de las olas y atenuación debido a islas y estructuras (Difracción), y el reflejo de las olas debido a la batimetría solas (Reflexión) (Jager et al., 2015). Para modelar estos efectos se debe usar un modelo 2D.

Transformación de las olas

Un tsunami tiene cuatro etapas diferentes: la generación (ver antecedentes figura 1), la propagación en aguas relativamente profundas a la región costera, la deformación en el agua que empuja hasta la zona de rompientes y el ascenso hacia la costa.

La propagación de la zona de generación a la región costera puede tardar varios minutos a varias horas, depende de la distancia. En aguas profundas, las olas individuales en un tren de olas de tsunami tienen una gran longitud de ola de aproximadamente 100 km. Combinado con las alturas de ola moderada en el océano profundo, menos de un metro, da a las olas una pendiente muy baja. Esto hace que las olas puedan pasar desapercibidas por los barcos en el océano profundo (Battjes y Labeur, 2014).



Figura 3. Transformación del oleaje, desde la zona de generación hasta la playa (González, 1999).

Reducción del oleaje

Cuando un tsunami entra en agua de profundidad decreciente la velocidad de las olas disminuye, las longitudes de las olas se acortan y las olas comienzan a sobreponerse, disminuyendo la distancia entre ellas. La energía de las olas se concentrará en un volumen menor. Esta mayor densidad de energía empina la ola y aumenta su altura y corrientes, posiblemente hasta el punto de romperse (González, 1999). Este proceso se ilustra claramente en la figura 3 (González, 1999). Este proceso le da al tsunami la mayor parte de su poder destructivo. La relación entre la altura de la ola y la profundidad del agua se conoce como la ley de Green (Camfield, 1980).

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0.25}$$

(9)

Rompiente del oleaje

La mayoría de los tsunamis no resultan en una ola gigante. Más bien vienen como mareas muy fuertes y rápidas, es decir, fuertes oleadas y rápidos cambios en el nivel del mar. Entonces se causa mucho daño por los escombros flotantes y las fuertes corrientes. Cuando la ola llega a un punto durante la reducción del oleaje por fondo, donde la pendiente se vuelve demasiado grande, la ola romperá. La ola entonces forma a menudo una pared vertical de agua turbulenta llamada bore.

Revisión de las técnicas de generación de oleaje

El modelado físico de ondas solitarias en ambientes de laboratorio ha sido frecuentemente publicado en la literatura. El cual depende de su fuente generativa (es decir, deslizamientos de tierra, terremotos suboceánicos e impactos tales como meteoritos, piroclásticos y erupciones volcánicas), estos tipos de ondas se generaron de manera diferente a escala de laboratorio (ver por ejemplo, Hughes, 1993). En el

modelado físico, la elección de la longitud y las escalas de tiempo es muy importante. Debido a los efectos globales de los tsunamis, la elección no es fácil; los modelos que se centran en la región de origen o de destino a menudo se descomponen.

En Liu et al. (1991), Yeh et al. (1995) y Liu (2008) se informa de una revisión exhaustiva de los avances en el modelado físico de ondas solitarias. Se proporciona información técnica detallada sobre técnicas de modelado físico en Yalin (1971) y Hughes (1993). Los diferentes enfoques sobre la generación de ondas podrían determinarse a partir de la literatura. Las diferentes técnicas de generación de ondas, que se describen en las secciones siguientes, se clasifican principalmente según el mecanismo de generación. Aunque las ondas solitarias inducidas por deslizamientos de tierra importantes están excluidas por el momento, se pueden encontrar estudios importantes en la literatura (Fritz et al., 2004, 2009; Heinrich, 1992; Iwasaki, 1987; Synolakis y Kanoglu, 2009; Watts, 2000; Wiegel, 1955).

Tabla 1. Revisión de importantes configuraciones experimentales de generación de tsunamis, dimensiones, datos técnicos, geométricos, parámetros de olas y pendientes según disponibilidad.

Cita	Generador	Pedinete de la playa	Profundidad del agua	Longitud de ola/Periodo	Rompiente
Synolakis (1987)	tipo Pistón	1/19.85	6.3–38.3 cm.	H/d = 0.005–0.607	2.44 m.
				$T \sqrt{(gd)} = 0.98 - 11.32^{a}$	
M.J. Briggs y al. (1995 b)	tipo Pistón	1/30.0	0.32 m.	H/d = 0.01–0.05	±0.15 m.
				L = 2.28-16-10 m.	
				T = 2.07-15.81 s.	
Liu y al. (1995)	tipo Pistón	-	-	L = 3.6-9.46 m.	±0.15 m.
				T = 3.41-8.03 s.	
Moronkeji (2007) ^b	tipo Pistón	1/10, 1/15	1.0–1.1 m.	T = 0.5-10.0 s.	2.1 m.
				L = 8.0-12.0 s.	
Schmidt-Koppenhagen y al. (2007) ^C	tipo Pistón	1/25	2.5 m.	≈20.0 s.	4.0 m.
Yeh y al. (1989)	tipo compuerta	1/7.6	h ₀ = 9.75 cm.	-	-
Chanson y al. (2003)	tipo compuerta	1/5.92	0.0-0.2 m.	-	-
Raichlen y al. (1970)	desplazamiento vertical	1/∞	5.0-50.0 m.	-	-
(Rossetto y al., 2011)	entrada de volumen	1/20	0.45-0.65 m.	9.5-501.9 m.	-

^a Los rangos de parámetros de ondas adimensionales tabulados no se relacionan necesariamente entre sí, por lo que la conversión en valores dimensionales exige tablas originales.

^b Velocidad de oscilación: 2.0 m/s, un lecho móvil compuesto de arena natural de playa se había aplicado para estudiar la evolución de la playa inducida por las olas.

^c Sección longitudinal segmentada que consiste en una cuña de playa de arena con cama móvil, detalles se aplican a la sección de la costa.

Generación de oleaje con paleta tipo pistón

A menudo, los investigadores realizan experimentos de laboratorio sobre la base de generadores de olas de tipo pistón, que liberan energía de onda a la columna de agua que mueven horizontalmente una paleta de ondas y generan ondas en primer o segundo orden (por ejemplo, Dean y Dalrymple, 1991; Schäffer, 1996). Se llevaron a cabo experimentos tempranos que abordaron la propagación de ondas solitarias como una representación probable de ondas de tsunami. Para más información sobre la facilidad aplicada, ver tabla 1 (Synolakis, 1987). En este estudio, se generaron ondas solitarias donde se utilizó la teoría del generador de olas de Goring (1979). Synolakis (1990) también informa sobre la generación de olas largas. Un requisito previo para la aplicación de la teoría de Goring era que el movimiento de la superficie tenía que ser pequeño, mientras que las condiciones de contorno tenían que especificarse sólo en la posición inicial de la superficie en lugar de en la posición instantánea. Synolakis (1990) amplió esta teoría para permitir ondas sin forma permanente, pero aquellas que evolucionan durante la propagación en el laboratorio. Concluyó que estos hallazgos facilitan la generación de ondas arbitrarias de amplitud finita a cualquier distancia del Página 6-18

generador de oleaje.

El modelo

Se utilizó un modelo físico reducido escala 1:34, permeable, con cubos tipo antifer en la coraza, de sección trapecial con talud 2:1 (lado mar) y 1.5:1 (lado puerto), en un tanque de olas con un generador de oleaje aleatorio, de fondo fijo. El modelo se rigió con la Ley de similitud de Froude.

Diseño de Estructuras

Los pesos y la geometría de las estructuras ensayadas se obtuvieron a partir de la fórmula de Hudson, las características para las secciones prototipo y del modelo propuestas se muestran en la Figura 4.

La fórmula de Hudson se expresa como sigue:

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (S_r - I)^3 \cot \alpha}$$
(10)

Donde:

- W.- Peso de los elementos de coraza (ton)
- H.- Altura de ola de diseño (m)
- γ s.- Peso específico del material de los elementos de coraza (ton)
- Sr.- Densidad relativa del material
- α.- Ángulo del talud con respecto a la horizontal (°)
- Kd.- Coeficiente de estabilidad



Figura 4. Sección Tipo estudiada del rompeolas.

Medio, Equipo e instrumentación

El tanque de olas (Fotografía 1), tiene dimensiones de 45 m x 16.40 m x 1.30 m, cuenta con un sistema de alimentación y desagüe, una paleta metálica con movimiento tipo pistón, con servo motor de corriente directa con poca inercia operado por una computadora, el sistema de generación es capaz de reproducir oleaje monocromático y aleatorio unidireccional con un tirante máximo de agua de 80 cm es posible generar oleaje con alturas de ola de 0 a 40 cm con períodos de ola de 0.5 a 5 segundos.





Los sensores de oleaje registran la variación de niveles de agua, estos se conectan a un convertidor de señales analógicas y transforman los datos analógicos en digitales para su interpretación.

Al termino de los ensayos, el equipo permite analizar las señales captadas por el sensor, donde se obtuvo en el caso del oleaje irregular, alturas de ola significante $(H_{1/3})$, $(H_{1/10})$ y altura máxima (H_{MAX}) , así como el período del tren de olas (T). El sistema de medición se hizo en línea, y se registró la altura de ola incidente; para amortiguar el efecto de reflexión en el canal, se colocaron taludes de roca en ambos extremos del canal, uno en la parte posterior del generador y en la parte final del canal.

Procedimiento experimental

Para la medición de los perfiles de tsunami en el modelo hidráulico, dentro del tanque de olas menor se utilizaron sensores de oleaje tipo resistivo de ±5 volts de resolución, colocados equidistantemente a 3 m. entre cada uno de ellos y el generador de oleaje, y uno al pie de la estructura rompeolas, como se indica en Figura 5.



Figura 5. Ubicación de los sensores de oleaje en el modelo.

Construida la sección, colocados los sensores y una vez lleno el tanque, se seleccionaron las señales y el espectro de oleaje de acuerdo a la programación de ensayos, el cual se presenta en la Tabla 2:

Nivel a ensayar	Pendiente de fondo	Software	No. De Ensayo	Altura de ola tsunami (m)
	0.034	Tsunami	ES01	1.08
			ES02	1.46
		Generation	ES03	2.58
		Generation	ES04	3.44
		N-waves	ES05	1.08
		signal	ES06	1.46
N.B.M.I (0.00 m.)		(Leading	ES07	2.58
		Elevation)	ES08	3.44
		N-waves	ES09	1.08
		signal	ES10	1.46
		generation	ES11	2.58
		Depression)	ES12	3.44
	0.044	Depression	ES13	1.08
		Tsunami	ES14	1.46
		Wave	ES15	2.58
		Generation	ES16	3.44
		N-waves	ES17	1.08
		signal	ES18	1.46
		generation	ES19	2.58
		(Leading	ES20	3.44
		N-waves	ES21	1.08
		signal	ES22	1.46
		generation	ES23	2.58
		(Leading	ES24	3.44
	0.054	Depression)	ES25	1.08
		Tsunami	ES26	1.46
		Wave	ES27	2.58
		Generation	ES28	3.44
		N-waves	ES29	1.08
		signal	ES30	1.46
		generation	ES31	2.58
		(Leading	ES32	3.44
		N-waves	ES33	1.08
		signal	ES34	1.46
		generation	ES35	2.58
		(∟eading Depression)	ES36	3.44

Tabla 2. Programa de ensayos para verificar los perfiles de Tsunami en Tanque de olas.

La duración de cada ensayo fue de 15 minutos en modelo, con el fin de caracterizar de manera adecuada cada uno de los perfiles, ya que con generación de los tsunamis se mueve toda la masa de agua del medio, con lo que se produce resonancia de las ondas, por lo que había que monitorear que el agua estuviera en reposo total antes de generar el siguiente tsunami.

A continuación, se describen los movimientos que realiza el generador de oleaje con respecto al control del software en turno utilizado para producir la onda solitaria.

Movimiento del generador de oleaje para onda solitaria

Con este movimiento la paleta del generador de oleaje se desplaza en primera instancia hacia atrás (ver Figura 6) y queda totalmente en reposo para posteriormente dar paso al desplazamiento hacia adelante y generar la onda solitaria.



Figura 6. Movimientos que del generador de oleaje para realizar una onda (ola) solitaria.

Movimiento del generador para N-waves

El software para este tipo de generación de tsunami cuenta con dos formas de realizar la onda solitaria, la primera es la forma de Leading Elevation (o elevación frontal al inicio del desplazamiento), cuyo movimiento de la paleta del generador de oleaje es de la misma forma de generar una onda solitaria arbitraria (Figura 6). Con la segunda forma de generar la onda solitaria se verifica la forma inversa denominada Leading Depression (o depresión frontal a la paleta del generador) (Figura 7), lo que produce una mayor acumulación de volumen de agua frente a la paleta del generador de oleaje y por lo tanto más sobrelevación en la altura de ola registrada al llegar a tierra.



Figura 7. Movimientos que del generador de oleaje para realizar una onda (ola) solitaria N-waves.

Análisis de Resultados

Después de haber obtenido los perfiles de tsunami con las tres pendientes de fondo representadas en el modelo hidráulico (0.034, 0.044 y 0.054), los resultados se presentaron en las siguientes gráficas comparativas de las alturas de tsunami (1.08, 1.46, 2.58 y 3.44 m.) por separado para observar el comportamiento de la onda solitaria.

Gráficas comparativas de los perfiles de ola obtenidos con la variante de software Onda Solitaria.



Gráfica 1 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) para una altura de 1.08 m.













Gráficas comparativas de los perfiles de ola obtenidos con la variante de software *N-Wave (Leading Elevation).*













Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) para una altura de 2.58 m.



Gráfica 8 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) para una altura de 3.44 m.

Gráficas comparativas de los perfiles de ola obtenidos con la variante de software *N-Wave (Leading Depression).*







Gráfica 10 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) para una altura de 1.46 m.



Gráfica 11 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) para una altura de 2.58 m.



Gráfica 12 Perfil del tsunami generado (comparación de resultados obtenidos con las tres pendientes de fondo de modelo) para una altura de 3.44 m.

Conclusiones

Lo descrito en las gráficas de los perfiles de tsunami, nos permite verificar que, para la onda solitaria, conforme la pendiente aumentó de 0.34 a 0.54, el perfil de tsunami también incrementó de acuerdo a la elevación del terreno, en un aumento de 0.17 m. en los dos primeros ensayos (1.08 y 1.46 m. de altura de ola de tsunami) a 0.25 m. en los dos últimos ensayos (2.58 y 3.44 m. de altura de ola de tsunami).

Para la onda tipo N-Wave (Leading Elevation) se observó que, con el incremento en la pendiente de fondo del modelo, los valores de la onda solitaria también aumentan, en 0.08 m. para la altura de ola de tsunami de 1.08 m., 0.09 m. para la altura de ola de tsunami de 1.46 m., 0.18 m. para la altura de ola de tsunami de 2.58 m. y de 0.22 m. para la altura de ola de tsunami de 3.44 m.

Por lo que respecta a la forma N-Wave (Leading Depression) se observó que los valores de la sobrelevación de la ola de tsunami también se incrementan conforme la pendiente aumentó, en 0.16 m. para la altura de tsunami de 1.08 m., 0.22 m. para el tsunami de 1.46 m., 0.23 m. para el tsunami de 2.58 m. y de 0.24 m. para el tsunami de 3.44 m.

Lo anterior descrito, nos hace observar que de acuerdo a las formas de reproducir un tsunami, la que arroja valores más altos es la forma de N-Wave (leading depression), la cual muestra un aumento de 7.4 % en la altura de ola en comparación a la registrada

en aguas profundas frente al generador, esto se debe al mayor volumen de masa de agua movida por el tsunami, ya que el movimiento de la paleta del generador desplaza un mayor volumen de agua, al moverse en primera instancia hacia atrás y posterior mente hacia adelante.

Referencias Bibliográficas

Borreo et al., (1997): field Survey of Mexican Tsunami Produces New Data, Unsual Photos, Eos, Trnassactions, American Geophysical Union, Vol. 78, No. 8, pp 85-92

Dziewonski A. M., Chou T.-*A., Woodhouse J. H. (1981): Determination of earthquake source parameters from wave form data of studies of global and regional seismicity, J. Geophys Res., 86, 2825-2852.

Glasbergen, T. (2018): Characterization of incoming tsunamis for the design of coastal structures, A numerical study using the SWASH model, Delf University of technology, pp 15-24

https://repository.tudelft.nl > OBJ

Goseberg, N., Wurpts, A. and Schlurmann, T. (2013): Laboratory-scale generation of tsunami and long waves, Coastal Engineering, Journal, VI. 79, pp 2-4, 9-18 https://www.researchgate.net/publication/257211525_Laboratory-scale_generation_of_tsunami_and_long_waves

Imamura, F. and N. Shuto (1990): Tsunami propagation by of numerical dispersion, Proc. Of Int. Sym. Comp. Fluid Dynamics, Nagoya, pp 390 -395.

Li, Ying and Raichlen, Fredric (2000): Tsunamis: Non-Breaking and Breaking solitary Wave Run-Up, W. M. Keck Laboratory of Hidraulics and Water Resources, California Institute of Technology, pp 29-40, 230-234 https://core.ac.uk/download/pdf/4890953.pdf

Manshina, L. and Smylie, D. (1971): The displacement Fields of inclined Faults: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 61, no. 5, pp 1433-1440.

Sing, S. K., Astiz, L., and Havskov, J. (1981): Seismic Gaps and Recurrence Periods of Lrge Earthquakes along the Mexican subduction zone: a Reexamination, Bull. Seis. Soc. Am. 71, pp 827-843.

Yen (2008): Evaluation of erthquake potential and Surface deformation by Differential Interferometry Jiun-Yee Yena.

1.