

ANÁLISIS DE LA FALLA DE UN TALUD DE ROCA EN TULUM, MÉXICO¹

Luis E. Vallejo²

Resumen: La acción de las olas sobre taludes en las costas es el principal responsable de sus fallas. El nivel del agua en el océano influye en la intensidad de la erosión ocasionada por las olas. Cuando los niveles del agua en el océano son altos, las olas son permanentes o se desintegran al pie de los taludes costeros. La energía de estas olas causa la erosión de los taludes y la formación de una hendidura al pie del talud. Este estudio analiza la formación de una hendidura en un talud rocoso localizado en Tulum, México, y el efecto de esta hendidura en su estabilidad. Se encontró que la hendidura causa una concentración de esfuerzos en el material rocoso. Si un talud rocoso con una hendidura falla, la falla se debe a la presencia de la hendidura y a la concentración de esfuerzos creados por ella. La falla comienza desde la punta de la hendidura. La manera como el talud rocoso de Tulum falla fue interpretado usando los principios de la teoría de la Mecánica de Fracturas.

Palabras clave: falla, hendidura, mecánica de fracturas, talud de roca.

ANALYSIS OF THE FAILURE OF A ROCK SLOPE IN TULUM, MEXICO

Abstract: Wave action on coastal slopes is the primary factor responsible for their failure. Ocean water levels have an important effect on the intensity of wave induced erosion. At high water levels, waves break at the toe of the slopes. The energy from the waves causes the erosion of the slopes and a notch develops as a result. This study describes the formation of a notch in a coastal rock slope located in Tulum, México, and analyzes the effect of the notch on the failure of the slope. A notch in a coastal slope acts as a stress concentrator. If a slope with a notch fails, the failure starts at the notch where the stresses are higher. Thus, a notch dictates the way a coastal rock slope fails. An explanation for the notch-induced failure in the Tulum slope is presented using the principles of Fracture Mechanics theory.

Keywords: failure, fracture mechanics, notch, rock slope.

INTRODUCCIÓN

Se llevaron a cabo investigaciones de campo y laboratorio para entender el modo de falla de un talud rocoso localizado en la ciudad Maya de Tulum, México. Caliza es el tipo de roca que forma parte de este talud. La caliza tiene aproximadamente una densidad igual a 2200 kg/m³, una resistencia a la tensión igual a 14380 kPa, y una resistencia a la compresión igual a 134100 kPa (West, 2010). El propósito de este estudio fue la investigación de la manera en que este talud rocoso falla por la acción de las olas que erosionan la caliza al pie del talud. Esta erosión causa la formación de una hendidura en la caliza al pie del talud. Esta hendidura causa una concentración de esfuerzos que son la causa de la falla del talud. Un análisis de la falla se llevó a cabo usando los principios de la Mecánica de Fracturas para medios elásticos.

EROSIÓN POR LA ACCIÓN DE LAS OLAS

La acción de las olas al pie de los taludes rocosos en zonas costeras es la principal causa de la erosión y falla de los taludes (Sunamura, 1975; Vallejo y DeGroot, 1988). Las olas causan presiones oscilatorias en el material de los taludes que están en contacto con el agua del océano. Las presiones oscilatorias del agua causan deformaciones en la roca que a su turno causan que la roca experimente un decremento en su resistencia a la erosión.

De acuerdo a Sunamura (1975), tres tipos de olas pueden ser efectivas en el pie de un talud costero. Estas olas son: (a) ola permanente, (b) ola que se desintegra en el pie del talud, y (c) ola ya desintegrada (Figura 1). La formación de estas olas como la energía asociada con ellas depende del nivel de agua en el océano y de la topografía del terreno cerca a los taludes.

¹ Artículo recibido el 30 de agosto de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

²Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania 15261, USA, E-mail: vallejo@pitt.edu

Cuando el gradiente del terreno cerca a los taludes es muy bajo, las olas se desintegran en regiones muy lejos del pie de los taludes. De manera que este tipo de olas tendrán muy baja energía cuando alcancen el pie de los taludes ya que estas olas habrán gastado su energía moviéndose sobre la playa contigua a los taludes. Sin embargo, cuando el nivel del agua en los océanos es alto, las olas afectan permanentemente el talud o pueden desintegrarse muy cerca del pie del talud, causando su erosión y la formación de hendiduras. Entonces, la energía que causa la erosión y la formación de hendiduras en taludes costeros depende del nivel del océano y de la topografía del terreno cerca a los taludes.

Cuando las olas actúan al pie de taludes costeros se desarrollan dos tipos de fuerzas. Un tipo de fuerzas es la fuerza de compresión que actúa perpendicular a la cara del talud, y la otra es una fuerza tangencial (de corte) que actúa cuando el agua regresa al océano. La fuerza de compresión causa una desintegración del material rocoso y la fuerza de corte (tangencial) remueve el material del talud. Una hendidura en el pie del talud es el resultado de la acción de estas dos fuerzas (Figura 2).

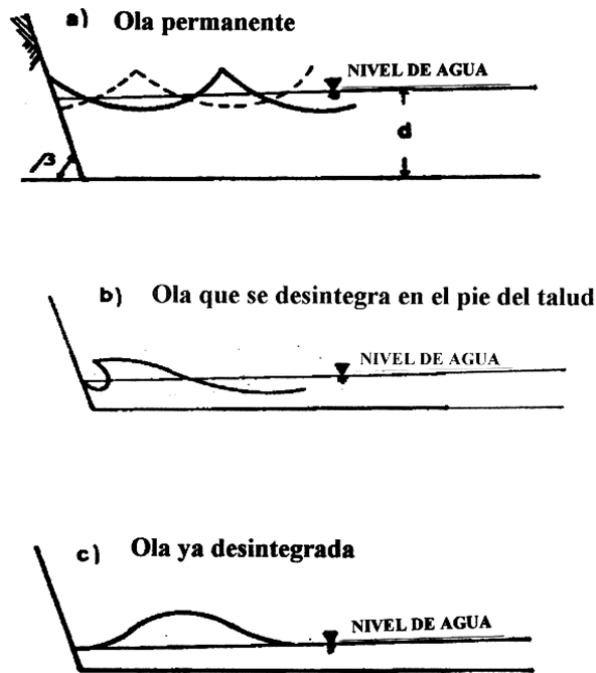


Figura 1: Tipo de olas al pie de un talud en regiones costeras.



Figura 2: Hendidura al pie de un talud rocoso localizado en Tulum, México.

Además de la erosión debida a las fuerzas de las olas, existe también una erosión química debido a la composición del agua en el océano. La erosión química tiene lugar cuando la caliza del talud se disuelve en el agua del océano. La caliza se disuelve fácilmente en el agua salada del océano (Zenkovich, 1967). De manera que la erosión mecánica y química producida por el agua del océano produce la formación de la hendidura en el talud localizado en Tulum (Figura 2). La parte vertical de este talud mide aproximadamente 25 metros. En un área muy cerca al talud de la Figura 2, existe un talud que falló debido a la hendidura presente al pie del talud que es similar a la que se muestra en la Figura 2. La Figura 3 presenta el talud que falló y se muestra la parte del talud que se desprendió. Un análisis de la Figura 3 indica que la inclinación de la falla fue vertical. Los análisis de campo también indicaron que la falla comenzó en la hendidura localizada en el pie de este talud. Esta hendidura fue el resultado de la erosión mecánica y química de la caliza del talud por las aguas del océano Atlántico.



Figura 3: Falla de un talud rocoso localizado en Tulum, México.

ESFUERZOS INDUCIDOS POR LA HENDIDURA EN UN TALUD COSTERO

Los esfuerzos en un elemento de roca cerca de la esquina de una hendidura localizada en un talud rocoso son: el esfuerzo tangencial σ_θ , el esfuerzo radial σ_r y el esfuerzo cortante $\tau_{r\theta}$ (Figura 4). De estos tres esfuerzos, el tangencial causa la falla del material rocoso cerca a la esquina de la hendidura. La falla está representada por una fisura secundaria que se propaga de la esquina de la hendidura. Esta fisura sigue la dirección radial r que es normal a la dirección del esfuerzo tangencial y está inclinada a un ángulo θ con respecto al eje X (Figura 4) (Ingraffea y Heuze, 1980; Vallejo, 1994).

De acuerdo a Ingraffea y Heuze (1980) y a Vallejo (1994), el esfuerzo tangencial σ_θ puede ser obtenido de la siguiente relación,

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) \quad (1)$$

En la ecuación (1), K_I y K_{II} representan los factores de intensidad de esfuerzos. El valor de estos factores pueden ser obtenidos usando las siguientes relaciones (Vallejo, 1994),

$$K_I = 1.12 \sigma (\pi c)^{1/2} \quad (2)$$

y

$$K_{II} = 1.12 \tau (\pi c)^{1/2} \quad (3)$$

En las ecuaciones (2) y (3), σ es el esfuerzo normal que actúa en una dirección perpendicular al eje en la dirección X de la hendidura, τ es el esfuerzo cortante que actúa paralelo al eje X de la hendidura, y c es la longitud de penetración de la hendidura en el pie del talud (Figura 4).

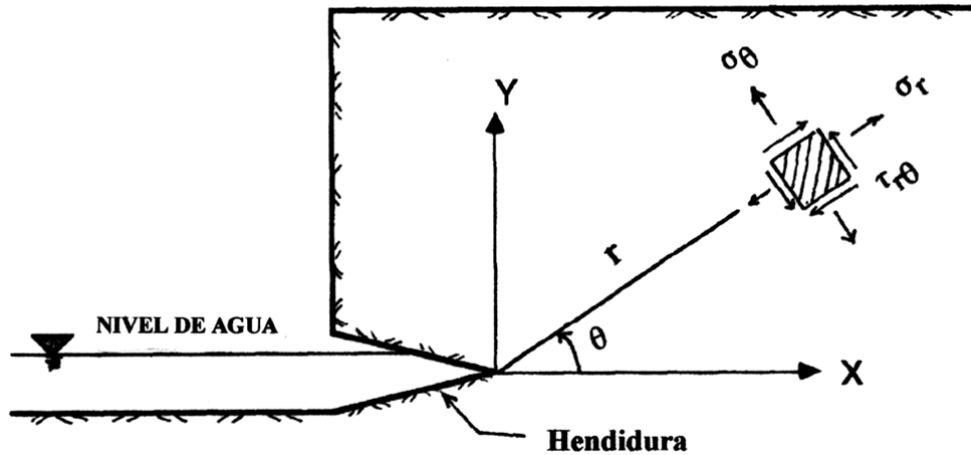


Figura 4: Esfuerzos en la esquina de una hendidura en el pie del talud rocoso.

ÁNGULO DE PROPAGACIÓN DE LA HENDIDURA

La falla del talud mostrado en la Figura 4 se produce cuando una fisura secundaria que se propaga desde la esquina de la hendidura siguiendo la dirección radial r y formando un ángulo $\theta = \alpha$ (Figura 4). Para obtener la dirección de propagación α , que se obtiene cuando el esfuerzo tangencial σ_θ alcanza su máximo valor, uno puede diferenciar σ_θ con respecto a θ e igualar a cero la relación obtenida ($d\sigma_\theta/d\theta = 0$). Después de hacer esto, se obtiene la siguiente relación de la cual se puede obtener el ángulo de propagación α de la fisura secundaria,

$$\sin \alpha + \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right) (3 \cos \alpha - 1) = 0 \quad (4)$$

Usando la ecuación (4) junto con las ecuaciones (2) y (3), se puede hacer un gráfico que relacione el ángulo de propagación α con la relación (K_{II}/K_I) o con (τ/σ) . Este gráfico se muestra en la Figura 5. Esta figura indica que el ángulo de propagación α de la fisura secundaria que se propaga desde la esquina de la hendidura tiene valores que van desde 90° hasta 180° en sentido contrario al seguido por las manecillas del reloj (Figura 4). La falla en el talud localizado en Tulum siguió una dirección de 90° con respecto al eje horizontal de la hendidura (Figura 3). Esta inclinación de la falla se produjo en el talud cuando la relación (K_{II}/K_I) o (τ/σ) en el talud fue igual a uno (Figura 5).

CONCLUSIONES

El presente estudio analiza la formación de una hendidura en un talud en caliza localizado en Tulum, México. La hendidura produce una concentración de esfuerzos que causa la falla del talud. La falla se produce cuando una fisura secundaria se propaga desde la punta de la hendidura en una dirección de 90° con respecto a la inclinación de la hendidura. Esta hendidura penetra el talud en una dirección horizontal. La dirección de propagación de la fisura secundaria fue obtenida usando la teoría relacionada con la Mecánica de Fracturas en un material elástico.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo financiero proporcionado por la National Science Foundation (NSF), de Washington, D.C. (NSF Grant ECE-8414931).

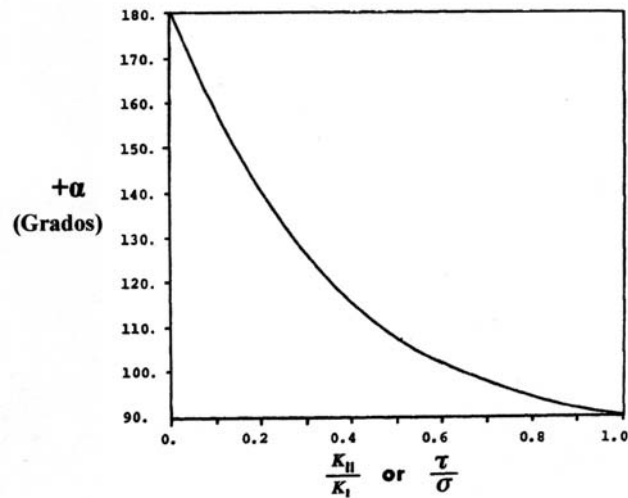


Figura 5: Ángulo de propagación de la fisura secundaria en función de (K_{II}/K_I) ó (τ/σ) .

REFERENCIAS

- Ingraffea, A.R. y Heuze, F.E. (1980). "Finite element models for rock fracture mechanics", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-43
- Sunamura, T. (1975). "A laboratory study of wave-cut platform formation", *Journal of Geology*, Vol. 83, pp. 389-397.
- Vallejo, L.E. y DeGroot, R. (1988). "Bluff response to wave action", *Engineering Geology*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-16.
- Vallejo, L.E. (1994). "Application of Fracture Mechanics to soils: an overview", en: *Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering*, Vallejo, L.E. y Liang, R.Y. (editors), *ASCE Geotechnical Special Publication*, No. 43, pp. 1-20.
- West, T.R. (2010). *Geology Applied to Engineering*, Waveland Press Inc., Long Grove, Illinois.
- Zenkovich, V.P. (1967). *Processes in Coastal Development*, Oliver & Boyd Ltd., Edinburgh and London, U.K.