

MODELAMIENTO NUMÉRICO DE MUROS DE CONTENCIÓN DE GAVIONES MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

César A. Lifonzo Salcedo¹, Serapio Lifonzo Ruiz²

¹ Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho-Perú.

² Advanced Global Engineering Corporation, Lima- Perú.
E-mail: coamcycesh@gmail.com, serapiolr@gmail.com

Resumen

El presente trabajo de investigación contempla la modelación matemática y computacional del comportamiento de esfuerzos y deformaciones de los muros de contención de gaviones con el Método de Elementos Finitos, considerando la interacción de la fundación, refuerzo de malla y el relleno, incorporando la formulación hiperbólica no lineal, así mismo se ha considerado en el modelo la carga estática del agua para muros de sistemas de defensa ribereña con gaviones. Para la simulación computacional se elaboró el programa GWALL en Matlab, que permite calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones en todo el dominio del muro de contención. Los resultados de las simulaciones varias muestran la robustez del método de los elementos finitos en cuanto a estabilidad y convergencia.

Introducción

Las lluvias extremas debido al calentamiento global han generado inundaciones en diferentes partes del mundo provocando desbordamientos de ríos, fallos en energía eléctrica, colapso de puentes y cortes en carreteras y pérdida de vidas humanas. Bajo este escenario los ingenieros deben diseñar estructuras de protección o sistemas de defensa utilizando metodologías más sofisticadas y no las metodologías tradicionales que no consideran la interacción suelo-estructura de la fundación, malla de alambre y el relleno. Los sistemas de protección con gaviones se utilizan en defensas ribereñas, revestimientos de canales, presas, contrafuertes de puentes, muros de alcantarillas, rompeolas y protección de playas y muros de contención. Es obvio que la mayoría de los usos de gaviones han estado en áreas relacionadas con el agua, tales como las estructuras fluviales y oceánicas. Los muros de contención revestidos con gaviones son esencialmente estructuras semirrígidas que generalmente pueden soportar grandes movimientos laterales y verticales y tienen ventajas como su flexibilidad y permeabilidad, además de su durabilidad, menores costos y ambientalmente crea mejor estética de paisaje. En consecuencia, en esta investigación se utiliza método de elementos finitos es idea para tratar el problema de interacción suelo-estructura de la pared de retención de gaviones.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos generales

Desarrollar un modelo matemático y computacional bidimensional de Elementos Finitos para analizar los muros de retención de gaviones considerando su interacción global.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un conjunto de ecuaciones constitutivas para caracterizar la fundación, caja de gavión y el relleno.
- Utilizar la triangulación de Delaunay para el mallado y el enfoque de Galerkin para la solución de las ecuaciones gobernantes del estado de esfuerzos.
- Implementar un código interactivo de ordenador en Matlab para la simulación computacional del estado de esfuerzos en los muros de contención.

Materiales y métodos

1.1 Estado de esfuerzos

El estado de esfuerzo en un punto dentro de una masa de suelo puede ser representado por un cubo infinitesimal (muy pequeño) con tres componentes de esfuerzo en cada uno de sus seis lados (uno normal y dos componentes de cortante), como se muestra en la Figura 1. Estos nueve componentes de tensión pueden organizarse en la matriz de del tensor de esfuerzo de la siguiente forma:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad [1]$$

Donde σ_{11} , σ_{22} , y σ_{33} son los esfuerzos normales y τ_{12} , τ_{21} , τ_{13} , τ_{31} , τ_{23} , y τ_{32} son esfuerzos cortantes. Los esfuerzos cortantes a lo largo de la diagonal son idénticas ($\tau_{12}=\tau_{21}$, $\tau_{13}=\tau_{31}$ y $\tau_{23}=\tau_{32}$) como resultado del equilibrio estático.

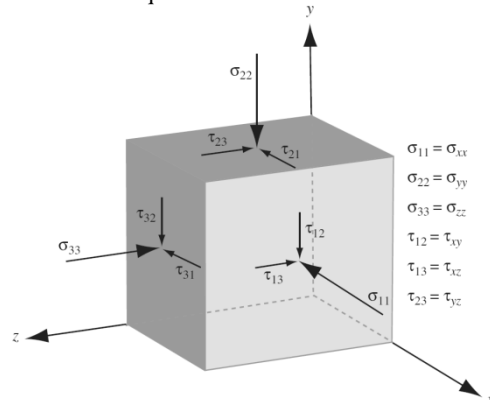


Figura 1.- Esfuerzo en el espacio tridimensional.

Bajo la hipótesis de materiales elásticos lineales isotrópicos se puede aplicar la ley generalizada de Hooke al problema de deformación plana y esfuerzo plano. Obviamente los suelos no son elásticos lineales ni isotrópicos, sin embargo, por conveniencia se idealiza bajo esta suposición para estimar las deformaciones elásticas asociadas con los esfuerzos aplicadas dentro de la masa del suelo. Para la condición de deformación plana se tiene la relación de esfuerzo-deformación en la ecuación [2].

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ 0 \\ \epsilon_{12} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [2]$$

1.2 Método de elementos finitos

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones

diferenciales parciales y transformar a un sistema algebraico discreto.

1.2.1 Discretización

El principio de discretización implica la división del muro de contención de gavión, la fundación y el relleno (Figura 2) en un sistema equivalente de un continuo más pequeño llamado elementos finitos.

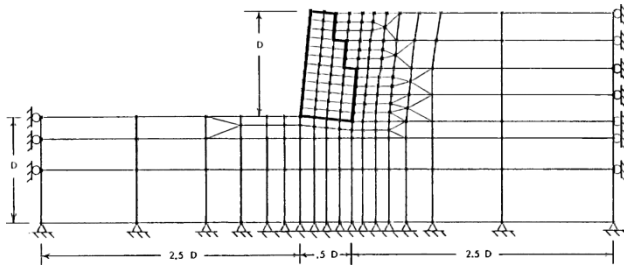


Figura 2.- Discretización de un muro de contención de gavión con mallas estructuradas y no estructuradas.

1.2.2 Solución con MEF

Una característica básica del método de elementos finitos es que los elementos finitos se analizan y se tratan por separado, uno por uno. Cada elemento tiene asignadas sus propiedades físicas o constitutivas, y sus propiedades con la cual se formula su matriz de rigidez del elemento. La matriz de rigidez y el vector de cargas para cada elemento se calcula con las siguientes ecuaciones.

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 t [B]^T [D] [B] |J| d\xi d\eta \quad [3]$$

$$[f] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 t [N]^T \{ \bar{X} \} |J| d\xi d\eta + \int_{\Gamma} t [N]^T \{ \bar{T} \} d\Gamma \quad [4]$$

Donde t es el espesor constante del elemento, para deformación plana, se adopta un espesor unitario.

Donde:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_2 - y_3 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 \end{bmatrix} \quad [5]$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \quad [6]$$

Donde B es una matriz de elemento deformación unitaria-desplazamiento que relaciona las 3 deformaciones unitarias con 6 desplazamientos nodales. Posteriormente, las matrices elementales se ensamblan para obtener la matriz de rigidez global del sistema, bajo la condición de compatibilidad.

$$\{ \delta \} = [K]^{-1} \{ F \} \quad [7]$$

Resultados y discusión

Los resultados del análisis con el método de elementos finitos muestran la distribución en los esfuerzos verticales y horizontales en todo el dominio del problema, como se puede ver en las Figuras 3 y 4, donde se observa una reducción de los esfuerzos inmediatamente detrás de la pared. Esta reducción de esfuerzo es debido a la transferencia de carga a través de corte vertical.

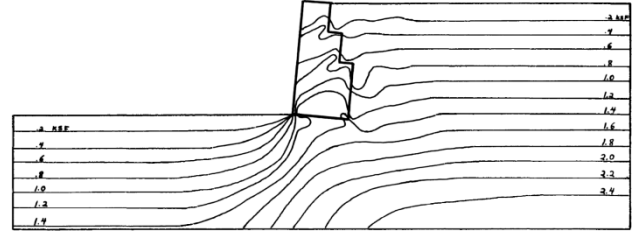


Figura 3.- Mapa de contorno del esfuerzo vertical.

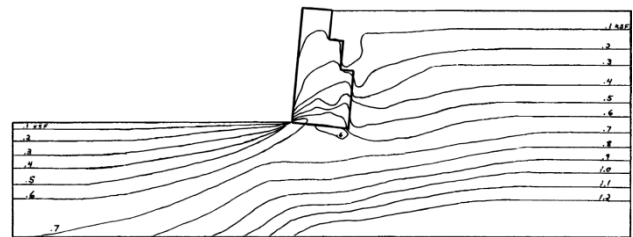


Figura 4.- Mapa de contorno del esfuerzo horizontal.

El método de elementos finitos proporcionar una herramienta valiosa en el diseño de muros de contención de gaviones. El análisis de estabilidad convencional que se usa más comúnmente tiene muchas limitaciones por considerar una estructura rígida con una distribución de presión de tierra Coulomb triangular activa que actúa en la parte posterior de la pared. La pared del gavión no es realmente rígida y la distribución de la presión de la tierra puede no ser necesariamente triangular. La malla de alambre y los alambres de conexión no se consideran en el análisis convencional, su efecto solo se considera como un factor de seguridad adicional.

Conclusiones y recomendaciones

- En el modelado numérico, el método de elementos finitos permite una excelente simulación del comportamiento compuesto de la malla de alambre y piedra de relleno además de la fundación y el relleno.
- Los resultados del modelo muestran que es posible simular con precisión el sistema acoplado del muro de gaviones y su entorno tanto en condiciones de carga variable, considerando cargas de su peso propio, carga estática del agua, cargas externas, carga lateral del relleno incluso la fuerza de los sismos.

Referencias

- Saeed Moaveni (1999). Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Chandrupatla T. y Belegundu A. (1999). Introducción al estudio del Elemento Finito en Ingeniería. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A, segunda edición.
- Delwyn G. F. y Harianto R. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc., A Wiley-Interscience Publication.
- Karpurapu, R. and Bathurst, R. J. (1995). Behaviour of geosynthetic reinforced soil retaining walls using the finite element method. Computers and geotechnics. Elsevier.