



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN MODELO
REDUCIDO DE LA CONSOLIDACIÓN RADIAL
Y DEFORMACIÓN DE UN SUELO BLANDO
MEJORADO CON COLUMNAS DE GRAVA**

Autora

ANA ISABEL CIMENTADA HERNÁNDEZ

Directora

ALMUDENA DA COSTA GARCÍA

Santander, Marzo de 2009

Conclusiones

De todo lo expuesto a lo largo de la tesis, se resaltan a continuación las principales conclusiones a las que se ha llegado.

- Sobre los materiales utilizados

Los materiales empleados en los ensayos son dos: el suelo arcilloso blando y el material granular para la construcción de la columna. Para simular el suelo blando se ha empleado caolín, que presenta una permeabilidad relativamente alta dentro de los rangos que poseen las arcillas. Además de realizar un análisis de su comportamiento plástico, se han hecho ensayos edométricos y de compresión triaxial consolidados no drenados. El material granular empleado es una grava con tamaño de árido adecuado al factor de escala en los ensayos. Se han realizado ensayos de compresión triaxial consolidados drenados para su caracterización resistente y deformacional. Para el análisis del proceso de consolidación, las distintas soluciones teóricas requieren conocer el valor de la relación de módulos entre la grava y la columna. En un tratamiento real, la trayectoria tensional de la grava dista bastante de la seguida en un ensayo triaxial, y es conocido que, el valor del módulo de un material varía con la trayectoria tensional seguida. Para representar de manera más precisa la trayectoria real de la columna se han realizado ensayos de consolidación anisótropa imponiendo distintos valores del coeficiente de empuje, comprendidos entre el reposo y el activo. A partir de estos ensayos se ha obtenido el módulo de deformación de la columna de grava.

- Sobre el equipo de ensayo

El estudio en laboratorio de la consolidación alrededor de columnas de grava y de la deformabilidad del conjunto, requiere de un equipo de ensayo en el cual se puedan realizar medidas de presiones intersticiales y tensiones totales en distintos puntos, así como de asientos.

En la presente investigación se emplea una célula edométrica Rowe-Barden modificada e instrumentada con el fin de poder medir presiones intersticiales y tensiones totales en distintos puntos del suelo y la columna. La ubicación idónea de los puntos de medida se ha establecido en base a soluciones teóricas existentes con respecto a la consolidación radial y teniendo en cuenta las geometrías de estudio establecidas en el modelo.

Para comprobar el buen funcionamiento del sistema diseñado se ha realizado un ensayo edométrico con caolín, en el cual se van dando distintos escalones de carga y descarga. A lo largo de cada escalón se han tomado datos de presiones intersticiales y totales en distintos puntos, así como del asiento producido. De los resultados obtenidos se concluye el correcto funcionamiento del sistema diseñado, en base al contraste realizado con ensayos edométricos convencionales sobre el mismo caolín y con respecto a los resultados que cabe esperar según la teoría existente.

- Sobre el procedimiento de ensayo

Se ha establecido el procedimiento de ensayo del modelo planteado para el estudio. De este modo, se aseguran las distintas condiciones consideradas (condiciones de contorno, geométricas, carga rígida aplicada, drenaje únicamente radial del suelo hacia la columna) en los distintos ensayos realizados. Se ha ensayado el suelo mejorado con dos geometrías distintas de columna de grava. La relación de diámetros N elegida para los ensayos es de 3 y 4 respectivamente, resultando una escala horizontal del ensayo de 1/10 y 1/15 en cada caso, aproximadamente.

La construcción de la columna de grava se realiza mediante compactación dentro de un tubo de PVC y posterior congelación. Se ha diseñado un equipo para la excavación del suelo blando y la posterior instalación de la columna congelada, para las dos geometrías consideradas en la investigación. Aunque el método de construcción e hincado difiere del empleado en un tratamiento real, el objetivo no es analizar lo que ocurre durante la instalación de las columnas de grava, sino la consolidación radial producida por la aplicación de una carga en superficie una vez instaladas, y el reparto de cargas entre suelo y columna. Por este motivo se concluye que el método y el sistema empleado son adecuados para el estudio, tal y como han justificado también otros autores.

- Sobre el análisis de resultados

El análisis de los resultados obtenidos de los ensayos realizados con columna de grava y para las dos geometrías consideradas permite establecer conclusiones sobre el comportamiento del conjunto suelo- columna, unas de carácter cualitativo y otras cuantitativas. Con respecto a las primeras, se concluyen los siguientes comportamientos, ya conocidos de los tratamientos con columnas de grava: la presencia de la columna reduce los asientos con respecto al caso sin columna, el proceso de consolidación se acelera y se produce un reparto de carga entre el suelo y la columna de forma que el suelo se descarga con respecto a la situación sin columna.

Por otro lado, con respecto al análisis de los resultados numéricos obtenidos, se establecen otras conclusiones cuantitativas que se detallan a continuación. Se han realizado un total de nueve ensayos: cinco con geometría $N = 4$ y cuatro con $N = 3$. A partir de las medidas de presiones intersticiales realizadas a distintas distancias radiales se observa que el tiempo necesario para que se disipen completamente las presiones intersticiales debidas a la aplicación de los escalones de carga es menor en la geometría con $N = 3$ que en la geometría $N = 4$, como cabía esperar. Puesto que el proceso seguido en el ensayo y la magnitud de los escalones de carga aplicados son los mismos en ambas geometrías es posible realizar una comparación directa de los tiempos de consolidación. Así, en los ensayos con mayor área de columna ($N = 3$) la disipación total de las presiones intersticiales se produce transcurridas entre 9 y 11 horas, frente al intervalo entre 13 y 16 horas necesarias en los ensayos con menor diámetro de columna ($N = 4$). Esto refleja claramente la aceleración de la consolidación que supone la colocación de una columna de mayor diámetro en un mismo área de suelo blando (aumento del área de sustitución) que provoca una disminución del camino de drenaje.

De las curvas de grado de consolidación con el tiempo obtenidas en los ensayos, también se concluye que el empleo de soluciones teóricas de la consolidación que consideran drenes verticales no son representativas del comportamiento con columnas. Así, se ha comprobado que el empleo de dichas soluciones con el coeficiente de consolidación del caolín da lugar a curvas U_r-t mas lentas de lo que reproducen los ensayos. Para cada uno de los ensayos se ha estimado el coeficiente de consolidación que habría que introducir en la solución de Barron-Hansbo para drenes y se ha

comprobado que los valores obtenidos son mayores que los correspondientes al caolín. La solución teórica de consolidación de Han y Ye (2001) para columnas permite estimar el valor del coeficiente de consolidación en la hipótesis de deformación radial nula y comportamiento elástico, en función de la geometría y los módulos edométricos de la columna y el suelo. Se ha comprobado que el valor del coeficiente de consolidación radial obtenido con esta solución reproduce mejor los resultados de los ensayos. Finalmente, se ha contrastado que si se emplea la solución de Castro (2008) que contempla la deformación radial de la columna y su posible plastificación, el valor del coeficiente de consolidación radial obtenido reproduce aún mejor las medidas de presiones intersticiales. Todo ello pone de manifiesto la influencia de la deformación radial de la columna y el hecho de que la columna plastifica durante el proceso de consolidación.

Para todo el análisis anterior ha sido necesario obtener la relación de módulos entre la columna y el suelo, no sólo en condiciones edométricas sino también cuando se considera cierta deformación lateral de la columna. Se quiere resaltar de nuevo los ensayos realizados con la grava en célula triaxial con trayectoria de relación $\Delta\sigma'_r/\Delta\sigma'_a$ constante.

Las tensiones totales verticales medidas en el suelo son menores para la geometría $N = 3$ dado que la sustitución de material blando por uno más rígido es mayor en este caso que en la geometría $N = 4$. Esto conlleva además que, el módulo del suelo (que aumenta con el nivel de tensiones) alcance un valor menor al final de los ensayos de la citada geometría. Por tanto, la relación de rigideces columna-suelo disminuye en menor cuantía en estos ensayos. Esta disminución de la relación de tensiones es acorde con la disminución del factor de concentración de tensiones (*SCF*) registrada en todos los ensayos de la geometría $N = 4$ y alguno de la geometría $N = 3$. Además, se han comparado los resultados con los obtenidos de la aplicación de las soluciones teóricas de Han y Ye y Castro. Al considerar confinamiento lateral de la columna (Han y Ye), el factor de concentración de tensiones alcanza un valor final igual a la relación de módulos edométricos entre la columna y el suelo, que en los ensayos es igual a 19,6 y 28 para la geometría con $N = 4$ y $N = 3$, respectivamente. Sin embargo, los resultados experimentales obtenidos en los ensayos se encuentran por lo general entre 5 y 9,

aproximadamente, muy por debajo de los propuestos por Han y Ye. Al considerar la deformación radial de la columna (Castro, 2008) se reduce el valor final del *SCF* con respecto a la solución de confinamiento lateral, tanto si se considera un comportamiento elástico como elasto-plástico de la columna. Así, con esta solución se obtiene valores finales del *SCF* de 17,18 y 22,11 para la geometría con $N = 4$ y $N = 3$, respectivamente, si se considera únicamente comportamiento elástico de la columna y entre 4,98 y 5,24 para la geometría con $N = 4$, y entre 5,16 y 6,50 para la geometría con $N = 3$ considerando un comportamiento elasto-plástico de la columna, situación que se encuentra más acorde con los resultados experimentales obtenidos en esta investigación.

En cuanto a la reducción del asiento debida al tratamiento con columnas, se encuentra directamente relacionada con el reparto final de tensiones entre el suelo y la columna. Como se ha comentado, las tensiones verticales en el suelo son menores en los ensayos con mayor diámetro de columna ($N = 3$) lo que supone una mayor reducción en estos para una misma carga aplicada (la muestra es más rígida). Los resultados de los ensayos muestran una reducción del asiento entre un 20 y un 30%, aproximadamente, para la geometría $N = 4$ y en torno a un 35% para la geometría $N = 3$. Comparando estos resultados con teorías existentes se tiene que, si se considera un comportamiento elástico no confinado de la columna (Balaam y Booker, 1981), la reducción de asientos para la relación de módulos de deformación media que se tiene en los ensayos es del 50 y 60% para $N = 4$ y $N = 3$, respectivamente. Sin embargo, si se aplica la solución de Castro (2008) considerando la plastificación de la columna, se obtiene una reducción del asiento en torno a un 22 y 35% para $N = 4$ y $N = 3$, respectivamente. Esto pone de nuevo de manifiesto la influencia de la plastificación de la columna.

Futuras líneas de investigación

Las futuras líneas de investigación que se proponen se refieren principalmente a la realización de nuevos ensayos en los que se modifiquen algunas de las condiciones aplicadas al modelo. Esto requerirá un continuo progreso del equipo de ensayo empleado mediante la implementación de nueva instrumentación, todo ello orientado al análisis del comportamiento de la columna con distintas condiciones y al contraste de resultados con diferentes soluciones teóricas existentes.

A continuación se detallan las líneas de investigación que se consideran más interesantes y su justificación.

El comportamiento de los suelos tratados con columnas está fuertemente marcado por la relación de módulos entre ambos materiales. Para definir de forma más precisa estos módulos, que además varían durante el proceso de consolidación, sería interesante conocer la tensión radial en el contacto suelo-columna. Esto supondría una mejora a la actual instrumentación de la célula edométrica.

Para ampliar la interpretación de los resultados sería interesante conocer la deformación radial de la columna. Con ello se sabría el diámetro real en cada momento y se podría extender la comparación de las teorías existentes, que dependen de la geometría, a escalones de carga distintos de los iniciales.

En lo que concierne a la geometría de ensayo, podría ser interesante ensayar un número mayor de áreas de sustitución para poder realizar un análisis más detallado de la influencia de este parámetro en los distintos comportamientos de las columnas de grava.

En el diseño convencional del tratamiento se suelen utilizar valores del ángulo de rozamiento de la grava en torno a 40° . La revisión de resultados experimentales publicados (p.ej. Herle et al., 2008) muestran que la densidad del material influye sustancialmente en el valor del ángulo de rozamiento, pudiendo alcanzarse valores de unos 50° para muestras muy densas. Si esto sucede, los valores empleados en el diseño resultan demasiado conservadores. Es deseable conocer de manera más fiable las

densidades reales de una columna para mejorar su diseño. La medida de densidades de columna en el laboratorio y la ejecución de ensayos con distinto grado de compactación pueden ayudar en el estudio de este fenómeno.

Existen múltiples variantes en desarrollo de las columnas de grava, nacidas de los requerimientos actuales de la sociedad. La elevada ocupación de suelo y su valor ha llevado a la necesidad de utilizar suelos marginales con capacidades portantes tan bajas que no garantizan la estabilidad de un tratamiento convencional con columnas de grava. Existe la posibilidad de reforzar las columnas con geotextiles que aumenten la capacidad de carga del tratamiento y permitan su ejecución en este tipo de suelos. Su estudio en laboratorio puede ser una ayuda inestimable para el desarrollo de esta técnica, que puede dar lugar a resultados satisfactorios.

La consecución de columnas de grava elaboradas con materiales reciclados, incidiría positivamente sobre algunos aspectos de la problemática medioambiental actual. La utilización, en cierta medida, de parte de la gran cantidad de residuos de construcción y demolición que se producen hoy en día en España, y que son susceptibles de ser reutilizados, reduciría, por una parte, la cantidad de ellos que han de ser llevados a vertedero y, por otra parte, disminuiría, también en gran medida, el volumen de áridos que han de ser extraídos de canteras. En este sentido, varios grupos de investigación han caracterizado ampliamente este tipo de áridos reciclados en cuanto a sus propiedades físicas y comportamiento, comparándolos con áridos naturales en distintas aplicaciones. Los áridos reciclados provienen del procesado de hormigones estructurales que son triturados o machacados y cribados para conseguir cualquier granulometría de árido grueso. En este sentido, resultaría muy interesante estudiar la posibilidad de la utilidad de estos materiales en la construcción de columnas de grava.