



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

A la memoria de mi padre

“Lo último que uno sabe, es por dónde empezar”

Isaac Newton

Esta tesis doctoral ha sido financiada parcialmente por la siguiente institución:

- Proyecto de Investigación "Tratamiento de suelos blandos mediante columnas de grava para la cimentación de terraplenes de carretera. Análisis del proceso y criterios de dimensionamiento". Desarrollado al amparo de una Ayuda a la Investigación del Ministerio de Fomento (ref. 2003/17), según convocatoria del B.O.E. 25/02/2003.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda que me han brindado numerosas personas a lo largo de estos años. Espero saber transmitir mediante estas líneas mi sincero agradecimiento a todas ellas.

En primer lugar quiero dar las gracias a la Profesora Almudena Da Costa García, directora de esta tesis doctoral, por todo el esfuerzo y tiempo dedicado. Sus ideas, sugerencias y el ímpetu con el que ha realizado la labor de dirección han sido una ayuda inestimable.

Deseo expresar, también, mi más profundo agradecimiento al Profesor César Sagaseta Millán, por haber colaborado en tiempo (quizás más del que disponía) y esfuerzo, en numerosas ocasiones a lo largo de estos años de investigación. Sus amplios conocimientos y su experiencia, que de forma tan generosa ha compartido conmigo, han sido una gran ayuda para llegar al final de este camino.

Igualmente, quiero transmitir mi agradecimiento al Profesor Jorge Cañizal Berini por la ayuda que me ha prestado y por su apoyo constante.

Quiero transmitir mi sincero agradecimiento a todos los miembros del Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, donde he desarrollado este trabajo. En especial, a Javier y a Fernando por su ayuda, su disponibilidad, su implicación en esta tesis doctoral, y por convertir en agradables todos los duros momentos de trabajo en el laboratorio. También quiero dar las gracias, de un modo especial, a mis compañeros de doctorado Jorge, Belén y José Miguel, porque siempre he podido contar con ellos cuando lo he necesitado, no sólo en el ámbito laboral, también en lo personal.

Por otro lado, debo dar las gracias al Ministerio de Fomento por haber financiado el proyecto de investigación del que esta tesis forma parte. En este sentido, he de hacer constar de nuevo mi agradecimiento a los responsables del Grupo de Geotecnia por haber confiado en mí para desarrollar este trabajo.

Igualmente, deseo agradecer a la red europea AMGISS la organización de varias jornadas en las que me han dado la oportunidad de participar y que han supuesto para mí una grata y fructuosa experiencia.

Quiero expresar mi agradecimiento a los responsables de la planta de Burela (Lugo) de la empresa Explotaciones Cerámicas Españolas, S.A. y de la empresa Icinsa (Cantabria), por proporcionarme de manera desinteresada los materiales empleados en esta investigación.

Quiero dar las gracias a mis amigos por su apoyo, por todos los buenos momentos que hemos pasado y porque han estado ahí a pesar de no haber podido dedicarles en muchas ocasiones el tiempo que se merecen. En particular, quiero dar las gracias a Sari por tantas cosas que no caben en un breve párrafo. También quiero agradecer a Fer el haberme ayudado en numerosas ocasiones.

Por último, quiero dar las gracias a mi familia: mi madre, mis hermanos, mis sobrinos y mis padrinos, por todo el apoyo y cariño que de ellos he recibido a pesar de la distancia, y porque sin su esfuerzo nada de esto habría sido posible. Gracias a Carlos por su paciencia, su ayuda incondicional y por las fuerzas prestadas para terminar este trabajo.

Ana Isabel Cimentada Hernández

Santander, Marzo de 2009

Contenido

Lista de Figuras	19
Lista de Tablas	27
Resumen	29
Abstract	31
Presentación del documento	33
Motivación y objetivos	35
Notación	39
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	45
1.1. COLUMNAS DE GRAVA	47
1.1.1. Descripción	47
1.1.2. Objetivos	49
1.1.3. Forma de trabajo. Interacción suelo-columna	50
1.1.4. Métodos constructivos	51
1.1.5. Características de las columnas de grava	57
1.2. MODELOS TEÓRICOS DE COMPORTAMIENTO	59
1.2.1. Consolidación radial	61
1.2.2. Deformaciones y reparto de tensiones	67
1.3. ANÁLISIS EN LABORATORIO	71
1.3.1. Justificación. Limitaciones de los estudios en campo	71
1.3.2. Consolidación radial en un suelo blando. Estimación de c_{vr}	72
1.3.3. Comportamiento de las columnas de grava	77

CAPÍTULO 2. MODELO Y EQUIPO DE ENSAYO	91
2.1. DEFINICIÓN Y GEOMETRÍA DEL MODELO	92
2.2. MATERIALES	96
2.2.1. Material arcilloso. Caolín	96
2.2.2. Grava	107
2.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DISEÑADO	129
2.3.1. Descripción de la célula edométrica Rowe-Barden	129
2.3.2. Diseño de la instrumentación. Modificación de la célula edométrica Rowe	131
2.3.3. Sensores de medida y sistema de toma de datos	138
2.4. ENSAYOS DE CALIBRADO DEL SISTEMA	147
2.4.1. Preparación de la muestra y el equipo	150
2.4.2. Proceso de consolidación	152
2.4.3. Resultados	154
CAPÍTULO 3. ENSAYOS CON COLUMNA DE GRAVA	165
3.1. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	166
3.1.1. Descripción del ensayo	166
3.1.2. Construcción e instalación de la columna de grava	169
3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA GEOMETRÍA $N = 4$	177
3.2.1. Presiones intersticiales	178
3.2.2. Tensiones totales. Factor de concentración de tensiones	188
3.2.3. Deformación vertical	199
3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA GEOMETRÍA $N = 3$	205
3.3.1. Presiones intersticiales	206
3.3.2. Tensiones totales. Factor de concentración de tensiones	214
3.3.3. Deformación vertical	222
3.4. INTERPRETACIÓN CONJUNTA	227
3.4.1. Comparación de resultados $N = 4$ y $N = 3$	227
3.4.2. Aplicación de soluciones teóricas a los resultados	232

Conclusiones	245
Futuras líneas de investigación	251
Bibliografía	253
APÉNDICES	259
Apéndice A. Caracterización de materiales	261
Apéndice B. Instrumentación y toma de datos	281
Apéndice C. Ensayo edométrico	303
Apéndice D. Ensayos con columna	319
Apéndice E. Fotográfico	491

Lista de figuras

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Criterio de adecuación de suelos para tratamiento por vibro-compactación (Glover, 1982)

Figura 1.2. Esquema de construcción por vía húmeda (Raju et al., 2004)

Figura 1.3. Esquema de construcción por vía seca (Raju et al., 2004)

Figura 1.4. Vibradores para alimentación por fondo, bottom feed, (izquierda) y en superficie, top feed, (derecha). Terratest, 2007

Figura 1.5. Hoja de control de la ejecución de una columna (Keller GmbH, 2005)

Figura 1.6. Esquema de empleo de columnas de grava (CEDEX, 2006)

Figura 1.7. Disposiciones usuales de columnas. Celdas equivalentes

Figura 1.8. Reparto tensional en suelo y columna a lo largo del tiempo (Han y Ye, 2001)

Figura 1.9. Factor de concentración de tensiones. Influencia de la deformación radial y deformaciones plásticas (Castro, 2008)

Figura 1.10. Factor de mejora (Priebe, 1995)

Figura 1.11. Influencia del área de sustitución en el factor de reducción de asientos (Balaam y Booker, 1985)

Figura 1.12. Método de ajuste de la raíz cuadrada de tiempo para drenaje radial (Sridharan et al., 1996)

Figura 1.13. Deformación y tensiones durante la aplicación de una carga, de una columna vibrada (Hughes y Withers, 1974)

Figura 1.14. Sección del modelo de ensayo. Sistema de aplicación de carga (Izq.). Instrumentación (Dcha.). Christoulas et al., 2000

Figura 1.15. Deformación de las columnas bajo cimentación circular (Izq.) y rectangular (Dcha.). Sivakumar et al., 2007.

Figura 1.16. Célula triaxial instrumentada. Modelo de ensayo. (Juran y Guermazi, 1988)

Figura 1.17. Esquema del modelo de ensayo (Matsui et al., 2001)

Figura 1.18. Relación entre (a) el factor de concentración de tensiones y el área de sustitución (b) el factor de reducción de asientos y el área de sustitución (Matsui et al., 2001)

Figura 1.19. Carga de cimentación vs. asiento (Black et al., 2006)

Figura 1.20. Deformación de las columnas al final del ensayo (Muir Wood et al., 2000)

Figura 1.21. Detalles del programa de ensayos realizado (Ambily y Gandhi, 2007)

Figura 1.22. Modelización en un campo bajo gravedad artificial (Kimura y Kusakabe, 1987)

Figura 1.23. Herramienta para la instalación de las columnas. a) Esquema del equipo b) Disposición para el ensayo en centrífuga (Weber, 2004)

Figura 1.24. Sección del modelo después de un ensayo (Weber et al., 2006)

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Celda unitaria equivalente

Figura 2.2. Modelo reducido de estudio

Figura 2.3. Gráfico de Plasticidad de Casagrande. Representación de los caolines estudiados

Figura 2.4. Variación de c_v con la presión de consolidación para los caolines estudiados

Figura 2.5. Variación de c_v con la presión de consolidación para los caolines preseleccionados

Figura 2.6. Análisis granulométrico del caolín C-301

Figura 2.7. Curva edométrica del caolín C-301

Figura 2.8. Curva de consolidación en escala logarítmica de tiempos. Caolín C-301. Escalón de 40 a 80 kPa

Figura 2.9. Curva de consolidación en escala de raíz cuadrada de tiempos. Caolín C-301. Escalón de 40 a 80 kPa

Figura 2.10. Molde para fabricación de probetas de caolín de 38,5 mm de diámetro

Figura 2.11. Trayectorias de tensiones en el plano de Lambe (ensayo triaxial C-U, caolín C-301)

Figura 2.12. Resultados del ensayo de compresión triaxial C-U (Caolín C-301)

Figura 2.13. Molde para fabricación de probetas de grava para ensayo de compresión triaxial

- Figura 2.14. Tensión desviadora y cambio volumétrico de la grava frente a deformación axial en ensayo de compresión triaxial C-D
- Figura 2.15. Trayectorias en el plano de Lambe (ensayo triaxial C-D en la grava)
- Figura 2.16. Superficie de plastificación de Mohr-Coulomb. Corte por un plano π
- Figura 2.17. Rigidez de una muestra amasada de arcilla de Londres. Ensayos con trayectoria inicial p' constante (Atkinson et al.,1990)
- Figura 2.18. Rigidez de una muestra amasada de arcilla de Londres. Ensayos con trayectoria inicial q' constante (Atkinson et al.,1990)
- Figura 2.19. Valores del coeficiente de empuje de la grava durante el ensayo de consolidación anisótropa con trayectoria edométrica
- Figura 2.20. Resultado de los ensayos con trayectoria edométrica sobre la grava en el plano de Lambe
- Figura 2.21. Tensión axial efectiva vs. deformación axial en ensayos con trayectoria edométrica en la grava
- Figura 2.22. Esquema de la trayectoria tensional en el plano de Lambe de los ensayos con coeficiente de empuje constante
- Figura 2.23. Trayectoria tensional en el plano de Lambe de los ensayos con coeficiente de empuje constante en la grava
- Figura 2.24. Tensión axial efectiva vs. deformación axial en ensayos en la grava con coeficiente de empuje constante
- Figura 2.25. Variación del módulo de deformación con el coeficiente de empuje
- Figura 2.26. Célula edométrica (Rowe y Barden, 1966)
- Figura 2.27. Drenaje y medida de presiones intersticiales en la célula Rowe-Barden (Rowe y Barden, 1966)
- Figura 2.28. Disipación de presiones intersticiales en un radio según solución teórica de Barron-Hansbo. Caso $N=3$
- Figura 2.29. Disipación de presiones intersticiales en un radio según solución teórica de Barron-Hansbo. Caso $N=4$
- Figura 2.30. Planta de la instrumentación instalada en la base de la célula Rowe
- Figura 2.31. Detalles de la instrumentación instalada en la base de la célula Rowe
- Figura 2.32. Detalle del sensor de medida de tensión total y su acoplamiento en la base de la célula

- Figura 2.33. Sistema de medida de presión intersticial
- Figura 2.34. Puntos de medida de presiones intersticiales. Detalle del sistema de medida
- Figura 2.35. Canal del DT800 y esquema de conexión de un puente de Wheastone
- Figura 2.36. Elementos que constituyen el ensayo
- Figura 2.37. Membrana de la célula Rowe
- Figura 2.38. Placa rígida superior de aluminio
- Figura 2.39. Placas para reparto de carga bajo la columna
- Figura 2.40. Muestra de caolín en la célula edométrica Rowe
- Figura 2.41. Sistema de poleas y pesas para aplicación de la carga inicial
- Figura 2.42. Sistema de presión aire comprimido-agua
- Figura 2.43. Curva edométrica del caolín C-301 obtenida en el ensayo en célula Rowe
- Figura 2.44. Comparación de las curvas edométricas del caolín C-301 en edómetro convencional y célula Rowe
- Figura 2.45. Grado de consolidación en el plano impermeable vs. factor de tiempo. Escalón 50–100 kPa del ensayo edométrico con caolín en la célula Rowe
- Figura 2.46. Grado de consolidación medio vs. factor de tiempo. Escalón 300 – 400 kPa del ensayo edométrico con caolín en la célula Rowe
- Figura 2.47. Grado de consolidación en un punto de la base vs. factor de tiempo. Escalón 300 – 400 kPa del ensayo edométrico con caolín en la célula Rowe
- Figura 2.48. Tensión horizontal efectiva vs. tensión vertical efectiva al final de cada escalón en el ensayo edométrico con caolín en célula Rowe
- Figura 2.49. K_0 vs. RSC del ensayo edométrico con caolín en célula Rowe

CAPÍTULO 3

- Figura 3.1. Moldes para la construcción de la columna de grava
- Figura 3.2. Base diseñada para el sistema de excavación de la columna de grava
- Figura 3.3. Elemento de empuje y tubos de hincado para la construcción de la columna de grava
- Figura 3.4. Soporte para taladro adquirido para el sistema de excavación de la columna de grava
- Figura 3.5. Sistema de excavación diseñado para la construcción de la columna de grava
- Figura 3.6. Fondo de la excavación con la capa de arena colocada

- Figura 3.7. Orificio antes de la colocación de la columna con la chapa de separación, y después, una vez colocada la columna de grava
- Figura 3.8. Medidas de presión intersticial a lo largo del tiempo durante el escalón de carga 100-200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.9. Medidas de presiones intersticiales a lo largo de un radio. Escalón 100–200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.10. Distribución de presiones intersticiales iniciales real y según Barron (1948)
- Figura 3.11. Presiones intersticiales medidas e isócronas obtenidas con la solución de Barron empleando el coeficiente de consolidación estimado. Escalón 100–200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.12. Grado de consolidación medio. Comparación con la solución teórica. Escalón 100–200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.13. Registro de tensiones totales verticales en la columna. Escalón 100-200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.14. Registro de tensiones totales verticales en el suelo. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.15. Variación de la tensión vertical y la presión intersticial con el radio. Solución de Barron (1948) con carga rígida
- Figura 3.16. Tensiones totales verticales teóricas a distintos radios en el suelo. Solución de Han y Ye (2001). Geometría $N = 4$
- Figura 3.17. Reparto de tensión total vertical en el caolín y en la columna en el tiempo. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.18. Evolución con el tiempo de las tensiones en el suelo y la columna. Geometría $N = 4$
- Figura 3.19. Valor del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón. Geometría $N = 4$
- Figura 3.20. Tensiones totales horizontales en el contorno lateral de la muestra. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4
- Figura 3.21. Curva de consolidación. Escalón 100 – 200 kPa. Ensayo 2N4.
- Figura 3.22. Factor de reducción de asientos. Geometría $N=4$. Comparación con el método de Balaam y Booker (1985)

- Figura 3.23. Medidas de presión intersticiales a lo largo del tiempo durante el escalón de carga 200-300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.24. Medidas de presiones intersticiales a lo largo de un radio. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.25. Presiones intersticiales medidas e isócronas obtenidas con la solución de Barron empleando el coeficiente de consolidación estimado. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.26. Grado de consolidación medio. Comparación con la solución teórica. Escalón de carga 200- 300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.27. Tensiones totales verticales en la columna. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.28. Tensiones totales en el caolín. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.29. Tensiones totales verticales teóricas a distintos radios en el suelo. Solución de Han y Ye (2001). Geometría $N = 3$
- Figura 3.30. Reparto de tensión total vertical en el caolín y en la columna en el tiempo. Escalón 200 – 300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.31. Evolución con el tiempo de las tensiones en el suelo y la columna. Geometría $N = 3$
- Figura 3.32. Valor del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón de los ensayos con geometría $N = 3$
- Figura 3.33. Tensiones totales horizontales en el contorno lateral de la muestra. Escalón 200 – 300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.34. Curva de consolidación en escala logarítmica de tiempos. Escalón 200-300 kPa. Ensayo 1N3
- Figura 3.35. Factor de reducción de asientos obtenido en los ensayos con geometría $N=3$
- Figura 3.36. Valores del coeficiente de consolidación equivalente estimado a partir de las presiones intersticiales en ambas geometrías de ensayo
- Figura 3.37. Tensiones verticales que actúan sobre el suelo y la columna al final de cada escalón en ambas geometrías
- Figura 3.38. Valor del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón para ambas geometrías

Figura 3.39. Coeficiente de consolidación equivalente. Columna elástica. Comparación de los resultados teóricos y de laboratorio.

Figura 3.40. Evolución del factor de concentración de tensiones en un escalón. Comparación con la solución de Han y Ye (2001) y Castro (2008).
(a) $N = 4$ (b) $N = 3$

Figura 3.41. Factor de reducción de asientos obtenido en los ensayos con ambas geometrías. Comparación con el método de Balaam y Booker, Priebe (sin correcciones) y Castro

Figura 3.42. Evolución del asiento medido en un escalón. Comparación con el obtenido con comportamiento elástico y elasto-plástico de la columna (Castro, 2008) (a) $N = 4$ (b) $N = 3$

Lista de tablas

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1. Comparación de los resultados obtenidos de c_{vr} a partir de ensayos edométricos y mediante observaciones en campo (Leminen y Rathmayer, 1983)

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1. Límites de Atterberg de los caolines estudiados

Tabla 2.2. Propiedades del caolín C-301

Tabla 2.3. Valores del coeficiente de consolidación vertical. Caolín C-301

Tabla 2.4. Valores de c_u del caolín C-301 consolidado a 50 kPa (Ensayo Molinete)

Tabla 2.5. Módulos edométrico y efectivo del caolín C-301

Tabla 2.6. Parámetros resistentes y deformacionales de la grava

Tabla 2.7. Módulos de deformación de la grava

Tabla 2.8. Características de los transductores de medida de tensión total

Tabla 2.9 Características de los transductores de medida de presión intersticial

Tabla 2.10. Valores de C_c y C_s del caolín (ensayo convencional y célula Rowe)

Tabla 2.11. Comparación de valores de c_v del caolín (ensayo convencional y célula Rowe)

Tabla 2.12. Valores de K_0 obtenidos en el ensayo edométrico en célula Rowe al final de cada escalón

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Ensayos realizados con geometría $N = 4$

Tabla 3.2. Valores de c_{vr}^{eq} , estimados a partir de las medidas de Δu , a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N = 4$

Tabla 3.3. Valores de c_{vr}^{eq} , estimados a partir del grado de consolidación medio, a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N=4$

- Tabla 3.4. Valores del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón.
Geometría $N = 4$
- Tabla 3.5. Rango de tensión vertical total en suelo y columna al final de cada escalón y módulos de deformación correspondientes. Geometría $N = 4$
- Tabla 3.6. Valores del factor de reducción de asientos (final del ensayo). Geometría $N=4$
- Tabla 3.7. Ensayos realizados con geometría $N = 3$
- Tabla 3.8. Valores de c_{vr}^{eq} estimados a partir de las medidas de Δu , a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N = 3$
- Tabla 3.9. Valores de c_{vr}^{eq} estimados a partir del grado de consolidación medio, a utilizar en la solución de Barron para reproducir el ensayo. Geometría $N = 3$
- Tabla 3.10. Valores del factor de concentración de tensiones al final de cada escalón.
Geometría $N = 3$
- Tabla 3.11. Rango de tensión vertical total en suelo y columna al final de cada escalón y módulos de deformación correspondientes. Geometría $N = 3$
- Tabla 3.12. Valores del factor de reducción de asientos (final del ensayo). Geometría $N=3$
- Tabla 3.13. Valores del factor de reducción de asientos en ambas geometrías
- Tabla 3.14. Tensión vertical total en suelo al final de cada escalón y módulos edométrico y de deformación del caolín, correspondientes para ambas geometrías
- Tabla 3.15. Relación del coeficiente de consolidación radial equivalente y sin columna.
Comparación de los resultados con soluciones teóricas
- Tabla 3.16. Factor de concentración de tensiones al final del segundo escalón.
Comparación con la solución de Han y Ye (2001) y Castro (2008)

Resumen

El tratamiento de suelos blandos con columnas de grava es un método de mejora del terreno que posibilita el apoyo de terraplenes o estructuras sobre suelos poco competentes para esta función. Consiste en perforaciones verticales realizadas en el terreno, que se rellenan con grava por medio de un vibrador. Habitualmente se disponen de forma uniforme en extensas mallas con distintas geometrías.

Las columnas de grava presentan una rigidez, resistencia y permeabilidad mayores que el terreno natural a tratar, por lo que contribuyen a aumentar la capacidad portante del terreno y a reducir el asiento, así como el tiempo que tarda en producirse. La mayor rigidez de la columna hace que una parte importante de la carga aplicada sea soportada por ella, quedando el suelo blando sometido a una carga menor. Esta distribución de la carga entre el suelo y la columna reduce el valor del asiento. Por otro lado, las columnas actúan como drenes verticales de gran diámetro. Su presencia reduce el camino de drenaje lo que da lugar a una aceleración de la consolidación.

El estudio del proceso de consolidación radial alrededor de las columnas y de la interacción suelo-columna suele realizarse mediante el análisis de una celda unitaria formada por una columna de grava central y el área de terreno que se encuentra alrededor, sobre la cual ejerce su acción de mejora. En esta tesis doctoral se ha modelizado a escala reducida una celda unidad con el objetivo de analizar la transferencia de carga entre la columna y el terreno y el proceso de consolidación que se produce alrededor de la columna, para condiciones de carga vertical rígida.

Para ello, se ha empleado una célula edométrica Rowe-Barden donde se introduce el suelo blando y la columna de grava, y se reproducen las condiciones de carga y drenaje adecuadas para el análisis. Para conseguir el fin de la investigación, ha sido necesario instrumentar la célula original para permitir la medida de tensiones en el suelo y la columna, así como de presiones intersticiales en distintos puntos del suelo

blando. Una vez definida e instalada la instrumentación necesaria, se han realizado una serie de ensayos para comprobar el correcto funcionamiento del equipo.

Se han realizado ensayos con columnas de dos diámetros distintos, con el fin de estudiar también la influencia del área de suelo blando reemplazada por la columna. Se presentan los resultados obtenidos en cada ensayo, su interpretación, y la comparación con soluciones teóricas existentes. Todo ello tanto para el análisis de la consolidación radial como para el comportamiento deformacional del conjunto suelo-columna.

Abstract

The treatment of soft soils with stone columns is an improvement technique which allows the foundation of embankments or structures on unsuitable soils for it. It consists of vertical boreholes into the soil which are filled with gravel by means of a vibrator. In actual practice, stone columns are placed on extensive regular grids with different geometries.

Stone columns show a higher stiffness, resistance and permeability than the natural soil. Therefore they increase the bearing capacity of soft soils, as well as reduce and accelerate settlements. The column supports an important part of the applied load due to its higher stiffness. Therefore the soft soil carries less load than without column. This load transfer reduces the final settlement. On the other hand, stone columns act as vertical drains with a high diameter, accelerating the consolidation process because they shorten the drainage path.

The analysis of the radial consolidation process around the column and the column-soil interaction is based on the study of a unit cell approach, which consists of a central column of gravel and the surrounding soil. In this thesis, a unit cell in small scale has been reproduced with the aim of analyzing load transfer between soil and column, settlement reduction and radial consolidation process that happen when a rigid vertical load is applied on surface.

For the research, a Rowe-Barden cell with 254 mm in diameter has been used, where soft soil and a central column of gravel are placed. Appropriate load and drainage conditions are reproduced in the laboratory tests. A new instrumentation has been designed and installed on the cell, which allows the measurement of pore pressures and total stresses at different points of the soil and column. The system has been checked by means of various oedometric calibration tests that were carried out on the soil without a column.

Tests with two different geometries are carried out: 63,5 mm ($N = 4$) and 84,67 mm ($N = 3$) in column diameter, where N is cell to column diameter ratio. A total of nine tests are accomplished, five of them with $N = 4$ geometry and four tests with $N = 3$.

From the results, some conclusions related to consolidation process, stress concentration factor and settlement reduction have been obtained for each testing geometry.

The influence of the replacement area has been studied comparing the results of both geometries.

Finally, the results are presented and interpreted using some existing analytical solutions related to consolidation process and stone columns deformation.

Presentación del documento

La presente tesis doctoral se estructura en tres capítulos. Previamente se incluye un breve resumen del documento, la motivación y objetivos del estudio desarrollado, y un resumen de la notación empleada.

En el primer capítulo se repasa el estado del conocimiento sobre el tratamiento de suelos blandos con columnas de grava. En primer lugar se presenta una introducción de las columnas de grava: descripción, objetivos, forma de trabajo, principales características y métodos constructivos empleados. A continuación se repasan los modelos teóricos existentes para el estudio de la consolidación radial y de las deformaciones y reparto de tensiones del conjunto suelo-columna. Por último, se presenta una recopilación de los estudios en laboratorio existentes sobre consolidación radial en suelos blandos y comportamiento de las columnas de grava.

En el segundo capítulo se presenta el modelo y equipo de ensayo: la caracterización de los materiales empleados, la instrumentación diseñada, las modificaciones realizadas al equipo de ensayo, y los resultados de los ensayos para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema.

En el tercer capítulo se presentan los ensayos realizados con columna de grava. Se explica la metodología de ensayo y se interpretan los resultados sobre consolidación, reparto de carga entre suelo y columna y asientos. Estos resultados se contrastan con soluciones teóricas existentes.

Por último, se resumen las principales conclusiones establecidas en esta tesis doctoral y las futuras líneas de investigación que podrían derivar de este estudio.

Motivación y objetivos

Las columnas de grava constituyen un método de mejora del terreno y de aceleración de asientos que posibilita realizar actuaciones en terrenos marginales o blandos. Se trata de una técnica desarrollada a principios de los años 60, y desde entonces su uso se ha realizado con éxito, razón que ha contribuido a su gran aceptación. Sin embargo, a pesar de su antigüedad, las bases de su dimensionamiento han experimentado avances sólo moderados y aunque existe una investigación relativamente abundante, tanto teórica como experimental, el traslado de los resultados a la aplicación práctica no ha sido todo lo intenso que hubiera sido deseable.

En consecuencia, en líneas generales, las predicciones realizadas con los métodos actuales de análisis y dimensionamiento resultan no del todo satisfactorias. La experiencia revela que, junto a numerosos casos de predicción correcta del funcionamiento de este método, son relativamente frecuentes las inexactitudes en la predicción de la velocidad de desarrollo de los asientos, siendo ésta superior a la prevista en todos los casos. Además, son muchas las ocasiones en las que a nivel de proyecto el tratamiento no se considera factible por no poseer el terreno natural la suficiente capacidad portante como para asegurar lateralmente la estabilidad de las columnas, mientras que otros estudios aseguran lo contrario.

Si el origen de estas inexactitudes en la predicción fuera únicamente la incorrección del análisis, se estaría ante una simple falta de difusión de los métodos correctos de dimensionamiento. Sin embargo, en la mayoría de los casos mencionados el estudio se ha realizado aplicando métodos de análisis avanzados, apoyados por publicaciones a nivel internacional de autores de prestigio. En España, la ausencia de una normativa o recomendaciones sobre estos aspectos contribuye a esta situación. Únicamente, en la “Guía de cimentaciones en obras de carretera” (Ministerio de Fomento, 2002) se hace una pequeña referencia al diseño de una cimentación mediante columnas de grava.

Como consecuencia de esta situación surgió el Proyecto de Investigación denominado: “Tratamiento de suelos blandos mediante columnas de grava para la cimentación de terraplenes de carretera. Análisis del proceso y criterios de dimensionamiento” (Ref. 03 A634), asignado por el Ministerio de Fomento al Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, con el objetivo de desarrollar herramientas y métodos de dimensionamiento de aplicación práctica en el diseño de un tratamiento con columnas de grava. En él se analizó el comportamiento de las columnas de grava cuando se emplean en extensas mallas y no en aquellas situaciones en las que su uso es más puntual. El problema se ha examinado tanto desde la perspectiva teórica: analítica y numérica; como desde la experimental: ensayos de laboratorio e instrumentación de obras reales.

Esta tesis forma parte de este proyecto y desarrolla la parte experimental en laboratorio.

En el repaso del estado del conocimiento se ha comprobado que el análisis experimental en modelo reducido en laboratorio se emplea con relativa poca frecuencia. La fuente más fructífera ha sido el análisis del comportamiento de obras reales, puesto que existen multitud de casos descritos en la literatura técnica sobre el comportamiento de las columnas de grava desde los primeros tiempos de desarrollo de la técnica, aunque la mayoría sólo facilitan resultados parciales. Los resultados obtenidos en laboratorio no han sido hasta el momento concluyentes debido al gran número de variables existentes y la imposibilidad de modelar el proceso constructivo real de las columnas de grava. Sin embargo, es una vía necesaria para mejorar el conocimiento del problema.

El motivo para llevar a cabo el presente estudio en laboratorio es que, aunque los análisis a escala real presentan una mayor aproximación en cuanto al método constructivo habitual, implican una mayor dificultad para controlar otros parámetros, como pueden ser el diámetro o el grado de compactación de la columna ejecutada. En cuanto a la instrumentación en campo, es difícil su disposición de manera exacta y la toma de lecturas no aporta toda la información que sería deseable. Todo ello es en parte debido a las grandes heterogeneidades del terreno in situ y la imposibilidad de controlar todos los parámetros que intervienen en el problema.

Todos estos motivos justifican el acudir a análisis experimentales en laboratorio donde muchos de estos inconvenientes se eliminan. Esta necesidad resulta aún mayor en el estudio del proceso de consolidación radial puesto que, el control de las condiciones de drenaje en la obra real es muy difícil así como la medida precisa de presiones intersticiales.

El objetivo de la investigación experimental no es el de reproducir en laboratorio todos los detalles del tratamiento, sino que se centra en el proceso de consolidación que tiene lugar alrededor de la columna, los mecanismos de transferencia de carga entre una columna aislada y el terreno blando circundante y los asentamientos producidos, todo ello para condiciones de carga vertical rígida, es decir, desplazamiento vertical uniforme.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados se pretenden contrastar con las diferentes soluciones teóricas existentes, siendo una de ellas la desarrollada en el análisis teórico de este Proyecto de Investigación.

Notación

Se presenta la notación específica más importante empleada en este documento. No obstante, cuando se hace referencia a otros trabajos o publicaciones, en algún caso se ha empleado la notación original, especificando en estos casos su significado en el texto.

a_r	Relación de sustitución: $a_r = A_c / A_e$
c	Cohesión
c_u	Resistencia al corte sin drenaje
c_v	Coefficiente de consolidación vertical
c_{vr}	Coefficiente de consolidación radial
c_{vr}^{eq}	Coefficiente de consolidación radial equivalente
d_c	Diámetro de la columna
d_e	Diámetro de la celda unidad / Diámetro del área tributaria de suelo blando
g	Potencial plástico
n	Factor de mejora (relación entre el asiento sin y con columnas)
p, q	Parámetros de Lambe
Δp	Incremento de carga vertical aplicado
p_0'	Presión de célula
r	Radio
r_c	Radio de la columna
r_e	Radio de la celda unidad
s_c	Asiento con columnas
s_0	Asiento sin columnas

t	Tiempo
u	Presión intersticial
$\overline{\Delta u_r}$	Incremento medio de presión intersticial a lo largo de un radio
Δu_0	Incremento de presión intersticial inicial
A_c	Área de la columna
A_e	Área de la celda unidad / Área tributaria del material arcilloso
A_s	Área de suelo blando
C_c	Índice de compresión noval
C_s	Índice de entumecimiento
D	Tensión desviadora
E	Módulo de Young
E_{50}	Módulo de deformación para el 50% del desviador máximo
E_k	Módulo de deformación en función de la dirección de la trayectoria tensional
E_m	Módulo edométrico
G	Módulo de elasticidad transversal
H	Altura de la muestra de ensayo
IP	Índice de plasticidad
K	Módulo de compresibilidad volumétrica
K_0	Coefficiente de empuje en reposo
K_{0NC}	Coefficiente de empuje en reposo de un suelo normalmente consolidado
K_a	Coefficiente de empuje activo
K_α	Coefficiente de empuje: $K_\alpha = \Delta\sigma'_r / \Delta\sigma'_a$
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
N	Relación de diámetros o radios: $N = r_e / r_c$
RSC	Razón de sobreconsolidación

SCF	Factor de concentración de tensiones: $SCF = \sigma_{vc} / \sigma_{vs}$
T_v, T_r	Factor de tiempo adimensional (vertical y radial)
U_v, U_r	Grado de consolidación (vertical y radial)
α	Factor de reducción de asientos: $\alpha = 1/n = s_c / s_0$
δ	Ángulo de fricción entre el suelo y la célula edométrica
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Deformaciones unitarias en las direcciones principales
$\varepsilon_a, \varepsilon_r$	Deformación unitaria en la dirección axial y radial
ε_{vol}	Deformación unitaria volumétrica
λ	Factor plástico
μ	Coefficiente de Poisson
σ	Tensión total normal
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensiones totales principales
σ_a, σ_r	Tensión axial y radial
σ_h	Tensión horizontal
$\sigma_v, \sigma_{vc}, \sigma_{vs}$	Tensión vertical, vertical en columna y vertical en suelo
ϕ	Ángulo de rozamiento
ψ	Ángulo de dilatancia

Convenio de signos:

Como es habitual en mecánica de suelos se consideran positivas las tensiones y deformaciones de compresión. Los desplazamientos siempre son positivos en las direcciones de los ejes respectivos.

Capítulos