BOLETÍN TÉCNICO NO. 6

CONTROL DE ASENTAMIENTOS PARA TERRAPLENES Y ESTRUCTURAS DE TRANSPORTACIÓN USANDO SISTEMAS DE REFUERZO DE SUELOS GEOPIER

Este Boletín Técnico discute el uso de los sistemas Geopier para el apoyo de estructuras de transportación incluyendo los Muros de Tierra Mecánicamente Estabilizada (MSE) y terraplenes de relleno de gran tamaño. La instalación de elementos rígidos Geopier provee un aumento significativo en la rigidez compuesta de suelos de cimentación que fueran blandos y compresibles. La construcción de elementos Geopier usando agregado grueso de granulometría abierta ayuda al drenaje radial hacia los elementos. El resultado de la instalación de elementos Geopier es la reducción de ambos, la magnitud de asentamiento y duración del mismo, en la zona reforzada con Geopier. Este Boletín Técnico describe métodos de diseño usados para el refuerzo de suelos de cimentación pobre para el apoyo de estructuras de transportación como lo son los muros MSE y terraplenes, usando elementos de refuerzo Geopier.

1. TRASFONDO: DISEÑO DE TERRAPLENES Y ESTRUCTURAS DE TRANSPORTACIÓN

Sin refuerzo de suelos, la construcción de muros MSE y terraplenes de rellenos en suelos compresibles puede resultar en asentamientos significativos. Su duración puede ser en el orden de meses o años antes de que la mayoría del mismo se complete, dependiendo de la compresibilidad del suelo, su espesor, y el nivel de la napa freática. El controlar el asentamiento post-construcción en este tipo de estructuras es crítico para prevenir asentamiento diferencial significativo que resulte en agrietamientos de pavimentos de carreteras o el movimiento visible de las caras de muros MSE.

Los elementos de refuerzo Geopier son instalados antes de la construcción de muros MSE, terraplenes de relleno y otras estructuras de transportación para reforzar suelos de cimentación compresibles y reducir la magnitud y duración del asentamiento, además de controlar la estabilidad. El uso del refuerzo Geopier para aumentar la resistencia al cortante y mejorar la estabilidad global es descrito en el Boletín Técnico No.5. Los elementos Geopier usados para reforzar el suelo matriz bajo muros MSE y terraplenes se ilustran en las Figuras 1a y 1b.

GEOPIER®
Tensar.

2. CONSTRUCCIÓN DE GEOPIER

La construcción del Geopier se describe a detalle en el Manual de Referencia Geopier (Fox y Cowell, 1998) y en la literatura (Lawton y Fox, 1994, Lawtone, Et.al., 1994). Los elementos se construyen barrenando un volumen de suelo compresible para crear una cavidad, y entonces apisonando agregado selecto en la cavidad en capas finas usando un apisonador biselado patentado. La acción del apisonado hace que el agregado se compacte verticalmente y empuje horizontalmente contra el suelo matriz, haciendo que aumente el esfuerzo lateral en el suelo matriz y reduciendo la compresibilidad del suelo matriz entre los elementos. La construcción de los elementos Geopier resulta en una pila de agregado bien denso con una rigidez bien alta que otorga una rigidez compuesta significativamente aumentada en la zona reforzada Geopier. El uso de grava de granulometría abierta durante la construcción permite el drenaje radial del exceso de presión de agua en los poros hacia los elementos, los cuales actúan como drenes verticales para aumentar la razón de tiempo del asentamiento.

Figura 1a.
Apoyo de Muro MSE con Refuerzo de Suelo Geopier

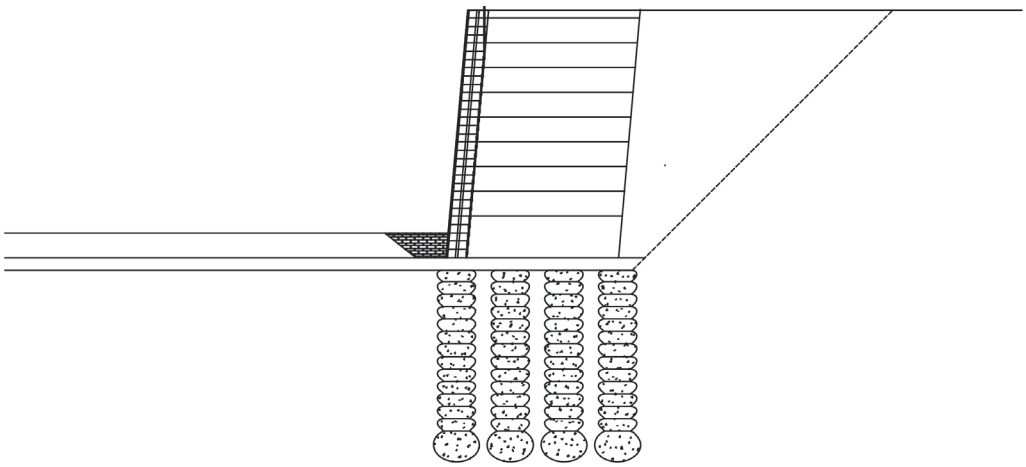
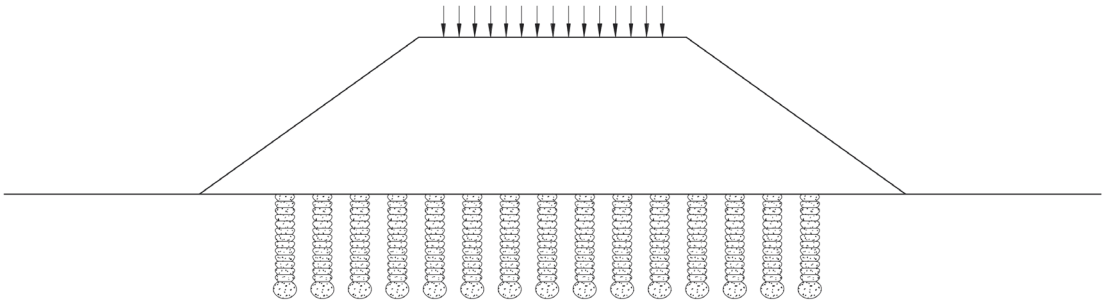


Figura 1b.
Apoyo de Terraplén con Refuerzo de Suelo Geopier



3. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE CONTROL DE ASENTAMIENTO GEOPIER

La metodología de diseño de control de asentamiento con los sistemas de refuerzo de suelos Geopier está basada en un modelo de asentamiento de dos-capas según descrito en Lawton, et.al. (1994), Lawton and Fox (1994), Fox and Cowell (1998), y Wissmann, et.al., (2002). La instalación de los elementos Geopier en la zona reforzada Geopier, referida como la Zona Superior, crea una zona rigidizada con compresibilidad reducida que reduce el asentamiento de terraplenes y estructuras relacionadas a la transportación. El asentamiento bajo la zona reforzada Geopier, referida como la Zona Inferior, se evalúa usando análisis convencionales de ingeniería geotécnica. El asentamiento total de (S_{tot}) de las estructuras de transportación se evalúa como la suma del asentamiento en la Zona Superior (S_{uz}) y el asentamiento de la Zona Inferior (S_{LZ}):

$$S_{tot} = S_{uz} + S_{LZ} . \qquad \text{Ec. 1.}$$

3.1 ASENTAMIENTO EN LA ZONA REFORZADA GEOPIER

El asentamiento en la zona reforzada Geopier se estima por medio de la ley de Hooke:

$$S_{uz} = \frac{\Delta q \cdot I_{\sigma} \cdot H_{uz}}{E_{comp}} , \qquad \text{Ec. 2.}$$

donde Δq se refiere a la presión aplicada al suelo por el terraplén o por el muro de contención, I_{σ} es el factor de influencia promedio en la zona superior (normalmente se asume como 1.0), H_{uz} es el espesor de la zona superior reforzada y E_{comp} es el modulo elástico compuesto de la zona superior reforzada. Los valores para E_{comp} son calculados como el promedio ponderado del módulo elástico de los elementos Geopier (E_g) y el modulo elástico del suelo matriz en la zona superior (E_m):

$$E_{comp} = E_g \cdot R_a + E_m \cdot (1-R_a) , \qquad \text{Ec. 3.}$$

Donde R_a es el área de remplazo.

Los valores seleccionados para E_g dependen del módulo elástico del elemento construido y en la habilidad del cimiento de aplicar esfuerzos concentrados a los topes de los elementos. Para cimientos de concreto que presentan alta rigidez, se podrán utilizar valores elevados de E_g debido a que la razón de concentración de esfuerzos equivale a la razón de rigideces entre elemento y suelo. Valores más pequeños de E_g son seleccionados para terraplenes y muros flexibles que no pueden aplicar esfuerzos concentrados de forma eficiente y por ende no pueden utilizar por completo la rigidez del elemento.

La metodología de control de asentamiento en la zona superior permite determinar la deflexión de los elementos Geopier pero no el suelo matriz entre los elementos. No obstante, resultados de pruebas por instrumentación en campo demuestran que el asentamiento diferencial entre los topes de los elementos Geopier y el suelo matriz debajo del terraplén es mínimo. Se podrían realizar análisis más rigorosos para evaluar el potencial de tal asentamiento y sus efectos; sin embargo, su impacto en el asentamiento visto en superficie es mínimo para casos de terraplenes de gran altura. Esto se debe al desarrollo de un plano de distorsión uniforme causado por el arqueo del suelo del terraplén a los elementos Geopier rígidos (Terzaghi 1936).

3.2 ASENTAMIENTO EN LA ZONA REFORZADA GEOPIER

El asentamiento debajo la zona reforzada Geopier es evaluada por medio de métodos geotécnicos convencionales y consiste en análisis de asentamiento elástico o análisis de consolidación usando las siguientes expresiones:

$$S_{LZ} = \frac{\Delta q I_{\sigma} H_{LZ}}{E} , \qquad \text{Ec. 4.}$$

y

$$S_{LZ} = c_c \left[\frac{1}{1 + e_0} \right] H_{LZ} \log \left[\frac{P_0 + \Delta q}{P_0} \right] \qquad \text{Ec. 5.}$$

donde H_{Lz} es el espesor de la zona inferior compresible, E es el modulo elástico del suelo matriz en la zona inferior, c_c es el coeficiente de compresibilidad del suelo matriz, e_0 es la relación de vacíos del suelo matriz, P_0 es el esfuerzo vertical efectivo en el centro del estrato compresible, y Δq es el esfuerzo promedio aplicado por el muro o terraplén. El esfuerzo promedio aplicado al suelo es el producto de la presión aplicada y el factor de influencia, I_σ. El factor de influencia dentro de la zona inferior típicamente se asume como 1.0 debido a la gran extensión lateral de los muros MSE y terraplenes. Típicamente, los métodos para el cálculo de asentamiento utilizando el modulo elástico se emplean para estimar asentamientos en suelos granulares y suelos cohesivos altamente sobre consolidados. Los valores de modulo elástico equivalentes del suelo matriz pueden estimarse utilizando correlaciones publicadas para valores N de ensayos SPT, la resistencia no drenada, resistencia de punta de ensayos CPT, u otros ensayos de campo. En cambio, los métodos de cálculo de asentamiento por medio de consolidación se emplean para evaluar asentamientos en suelos normalmente consolidados a ligeramente sobre consolidados.

4. TASA DE ASENTAMIENTO CON EL TIEMPO

La magnitud del asentamiento posterior a la construcción es tan importante como el asentamiento total del muro MSE o terraplén a construirse. El asentamiento post construcción puede ser reducido drásticamente usando elementos Geopier construidos con grava limpia que actúan como drenes verticales, permitiendo el drenaje radial hacia los elementos. Cálculos de drenaje radial pueden ser realizados para evaluar el porcentaje de las presiones de poro que haya sido disipada durante el perdió de construcción estimado y para determinar el asentamiento post-construcción restante.

4.1 TASA DE ASENTAMIENTO CON EL TIEMPO EN LA ZONA REFORZADA GEOPIER

El drenaje radial hacia los elementos Geopier se calcula utilizando el método de Barron para estimar la duración de los asentamientos (t) por el drenaje radial de drenes de arena (1948). Este método relaciona la duración del asentamiento a un factor de tiempo (T), el coeficiente de consolidación radial (c_r), y la longitud de drenaje efectiva (d_e) al cuadrado.

$$t = \frac{T_r d_e^2}{c_r} \quad . \qquad \text{Ec. 6.}$$

El factor de tiempo se calcula evaluando la relación de diámetros (n), la cual es la relación entre diámetro efectivo del drenaje y el diámetro construido del drenaje instalado (d_w). Los diámetros de drenaje efectivos se evalúan basándose en la geometría de elementos espaciados en arreglos triangulares o cuadrados, respectivamente:

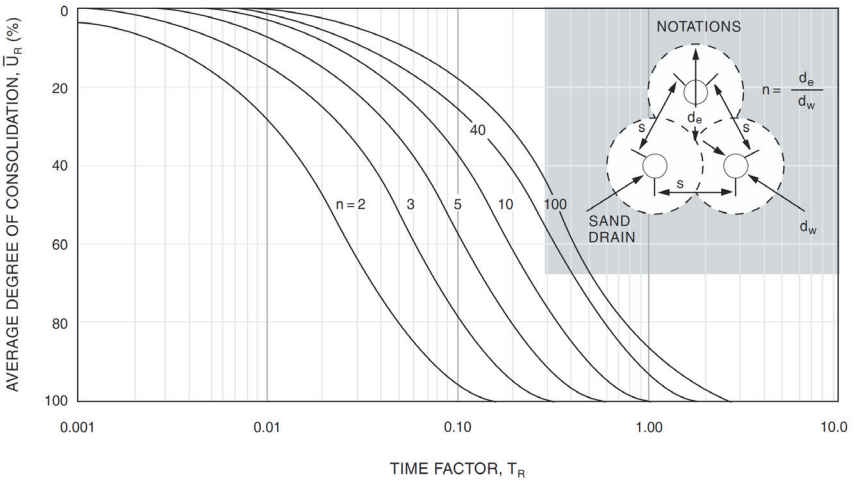
Arreglo triangular: $d_e = 1.05s$, Ec. 7a.

Arreglo cuadrado: $d_e = 1.13s$, Ec. 7b.

donde s es el espaciamiento centro a centro de los elementos. El espaciamiento de los elementos Geopier se selecciona para proveer un incremento suficiente en la rigidez de la zona superior para lograr que se presenten asentamientos post construcción en rangos tolerables (ver Sección 3), considerando a la vez que un porcentaje significativo del asentamiento ocurrirá durante el periodo de construcción como resultado del drenaje radial inducido.

El valor del coeficiente de consolidación radial comúnmente se asume entre dos a cuatro veces el coeficiente de consolidación vertical (c_v). Esta relación puede ser significativamente más alta en varva o suelos estratificados horizontalmente. Los valores del coeficiente de consolidación (c_v) se relacionan a muchos factores como la mineralogía del suelo, graduación y el historial de depositacion del suelo matriz (Terzaghi et al. 1996). Para suelos cohesivos, estos pueden ser estimados de ensayos de consolidación, o del limite liquido y el historial de esfuerzos (sobre consolidación).

Figura 2.
Grado de Consolidación para Drenaje Radial



De la relación de diámetros (n) y del porcentaje de presiones de poro disipados (μ), se puede interpretar un valor del factor tiempo de la Figura 2.

El factor tiempo (T_R) se utiliza junto con la longitud de drenaje (d_e) y el coeficiente de consolidación radial (c_r) para estimar el tiempo de drenaje (t) de la Ecuación 6.

Investigaciones recientes elaboradas por Han y Ye (2001) describen un método de drenaje radial modificado que toma en cuenta la concentración de esfuerzos en columnas de agregado rígidas. La concentración de esfuerzos en los elementos Geopier rígidos reduce la cantidad de esfuerzo en el suelo matriz, lo que causa que el asentamiento ocurra a mayor velocidad y que aumente el coeficiente de consolidación radial. Han y Ye sugiere que se use un coeficiente radial modificado en el método de Barron:

$$c'_r = c_r \left[1 + n_s \left[\frac{1}{n^2 - 1} \right] \right], \qquad \text{Ec. 8.}$$

donde n_s es la relación de concentración de esfuerzos. El coeficiente de consolidación radial aumentado se sustituye por el coeficiente de consolidación radial en la Ecuación 6 para determinar el porcentaje de disipación de presiones de poro para un tiempo determinado.

Investigaciones han demostrado que la relación de concentración de esfuerzos en elementos Geopier para el apoyo de zapatas varía entre 4 y 45 (Lawton and Merry 2000, Hoevelkamp 2002). Se sugieren valores conservadores de concentración de esfuerzos para el diseño. Este método para evaluar el drenaje radial es respaldado por resultados de pruebas de monitoreo de asentamientos con el tiempo (Hoevelkamp 2002).

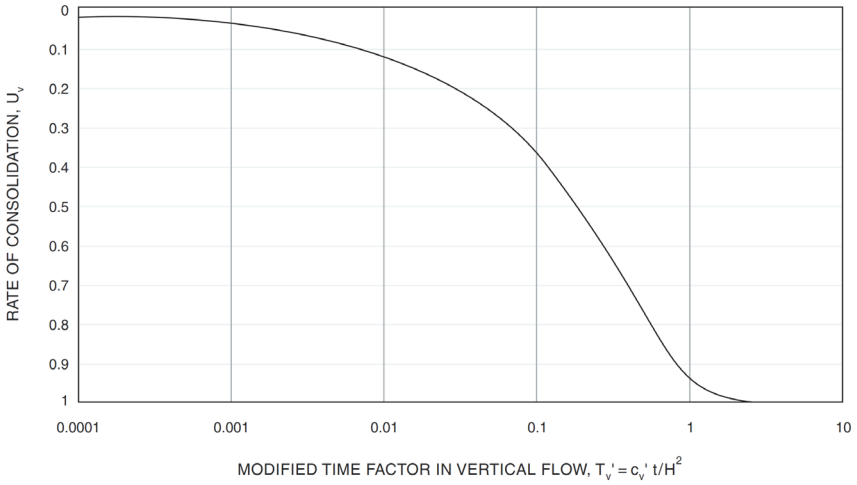
4.2 TASA DE ASENTAMIENTO CON EL TIEMPO DEBAJO LA ZONA REFORZADA GEOPIER

La tasa de asentamiento con el tiempo debajo la zona reforzada Geopier se calcula utilizando ecuaciones tradicionales para la consolidación vertical, como se demuestra en la siguiente ecuación y descrita en la literatura:

$$t = \frac{T_v (H_{dr})^2}{c_v}, \qquad \text{Ec. 9.}$$

donde t es el tiempo de drenaje, c_v es el coeficiente de consolidación vertical, H_{dr} es la longitud de drenaje vertical y T_v es el factor tiempo vertical que corresponde a un porcentaje particular de disipación de presiones de poro determinado de la Figura 3.

Figura 3.
Grado de Consolidación para Drenaje Vertical
(Han and Ye 2001)

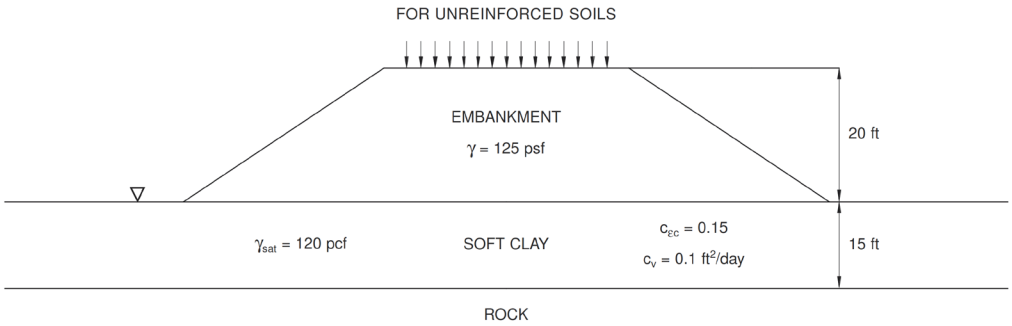


5. MAGNITUD DE ASENTAMIENTO Y EJEMPLO DE CONSOLIDACIÓN CON EL TIEMPO

En las Figuras 4 y 5 se presenta un ejemplo elaborado para la construcción de un terraplén de 20 pies de altura, sobre un estrato de 15 pies de altura consistiendo en arcilla suave, y sobre una fundación de roca. La Figura 4 muestra un ejemplo de cálculos elaborados para estimar magnitud y duración de asentamientos de forma convencional para el terraplén. La Figura 5 ilustra cálculos de magnitud y duración de asentamientos para suelos reforzados con Geopier como descrito anteriormente. Asentamientos para la zona inferior se asumen como insignificantes en ambos ejemplos debido a que los elementos se empotran en la roca subyacente.

Los resultados de los ejemplos demostrados en la Figuras 4 y 5 ilustran como la instalación de refuerzo Geopier en los suelos reduce significativamente los asentamientos. Adicionalmente, el asentamiento ocurre a tal tasa que como resultado la mayoría del asentamiento ocurre durante la construcción.

Figura 4.
Ejemplo de Cálculo de Magnitud y Duración de Asentamientos en Suelos No Reforzados



SETTLEMENT MAGNITUDE

$$P_o = z(\gamma_{sat} - \gamma_w) = 7.5\ \text{ft}(120\ \text{pcf} - 62.4\ \text{pcf}) = 432\ \text{psf}$$

$$q = \gamma H = 125\ \text{pcf}\ (20\ \text{ft}) = 2{,}500\ \text{psf}$$

$$I_\sigma = 1.0\ (\text{for areal loads})$$

$$E_m = \frac{(I_\sigma q)}{c_\varepsilon \log\left[\dfrac{P_o + I_\sigma q}{P_o}\right]} = \frac{(1.0)(2{,}500\ \text{psf})}{0.15 \log\left[\dfrac{432 + 2500}{432}\right]} = 20\ \text{ksf}$$

$$s_{unreinforced} = \frac{I_\sigma q H}{E_m} = \frac{(1.0)(2.5\ \text{ksf})(15\ \text{ft})}{20\ \text{ksf}} = 1.875\ \text{ft} = 22.5\ \text{in}$$

TIME RATE OF SETTLEMENT (FOR 90% EXCESS PORE WATER PRESSURE DISSIPATION)

$$t_{90\%} = \frac{T_{90}(H_{dr})^2}{c_v} = \frac{0.848(7.5\ \text{ft})^2}{0.1\ \text{ft}^2 / \text{day}} = 480\ \text{days}$$

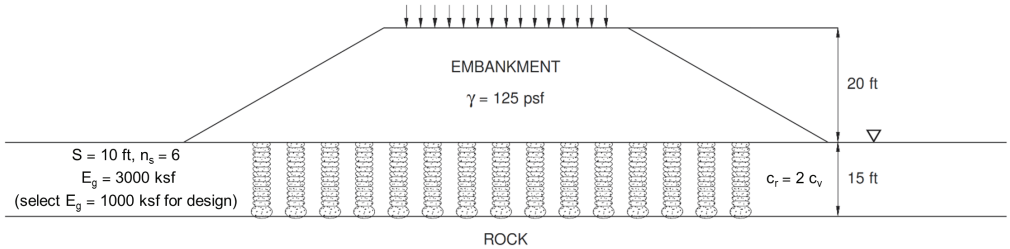
POST-CONSTRUCTION SETTLEMENT (AFTER 90 DAY PERIOD)

$$T_{90\ \text{days}} = \frac{tc_v}{(H_{dr})^2} = \frac{90\ \text{days}(0.1\ \text{ft}^2 / \text{day})}{(7.5\ \text{ft})^2} = 0.16$$

At T = 0.16, U% is equal to 45% from Figure 3
Remaining settlement after 90 days is (1-U%)s = (1-0.45)(22.5 inches) = 12.4 inches

Figura 5.
Ejemplo de Calculo de Magnitud y Duración de
Asentamientos en Suelos Reforzados con Geopier

FOR GEOPIER-REINFORCED SOILS
WITH AN ASSUMED STRESS CONCENTRATION RATIO OF 6



SETTLEMENT MAGNITUDE

$$R_a = \frac{A_g}{A} = \frac{5.94\ ft^2}{(10\ ft)^2} = 0.06$$

$$q = \gamma H = 125\ pcf\ (20\ ft) = 2.5\ ksf$$

$$E_{comp} = E_g R_a + E_m(1 - R_a) = 1000\ ksf\ (0.06) + 20\ ksf\ (1 - 0.06) = 78.8\ ksf$$

$$s_{uz} = \frac{I_o q H_{uz}}{E_{comp}} = \frac{1.0\ (2.5\ ksf\ )\ (15\ ft)}{78.8\ ksf} = 0.476\ ft = 5.7\ in$$

TIME RATE OF SETTLEMENT (FOR 90% EXCESS PORE WATER PRESSURE DISSIPATION)

$$n = \frac{d_e}{d_w} = \frac{1.13s}{d_w} = \frac{1.13(10\ ft)}{2.75\ ft} = 4.1$$

$$c'_r = c_r \left[1 + n_s \frac{1}{n^2 - 1}\right] = 0.2\ ft^2 / day \left[1 + 6\ \frac{1}{(4.1)^2 - 1}\right] = 0.28\ ft^2 / day$$

POST-CONSTRUCTION SETTLEMENT (AFTER 90 DAY PERIOD)

$$T = \frac{t_{90\ days}\ c'_r}{(d_e)^2} = \frac{90\ days(0.28\ ft^2 / day)}{(11.3\ ft)^2} = 0.20$$

For a time factor (T) = 0.20, N = 4.1, U% is equal to 90% from Figure 2
Remaining settlement after 90 days is (1-U%)s = (1-0.90)(5.7 inches) = 0.6 inches

6. RESUMEN

La tecnología de refuerzo para suelos Geopier se utiliza para reforzar y rigidizar suelos de fundación compresibles e incrementar la tasa de asentamiento con el tiempo para controlar los asentamientos post-construcción. La metodología de diseño utiliza métodos de cálculo de asentamientos y drenaje radial convencionales junto con leves modificaciones basadas en investigaciones avanzadas para determinar el espaciamiento requerido de los elementos Geopier para controlar asentamientos y cumplir con el criterio de asentamientos máximos del proyecto.

REFERENCIAS

Barron, R.A. (1948). "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells." Trans. ASCE, Vol. 113, pp. 718-742.

Han J. and Ye, S.L. (2001). "Simplified Method for Consolidated Rate of Stone Column Reinforced Foundations." ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 127, No. 7.

Hoevelkamp, K.K. (2002). "Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement: Group Load Tests and Settlement Monitoring of Large Box Culvert." Masters Thesis. Iowa State University.

Lawton, E.C., and Fox, N.S. (1994). "Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soils Stiffened with Short Aggregate Piers." Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, A.T. Yeung and G.Y. Fello (Editors),American Society of Civil Engineers, 2, 962-74.

Lawton, E.C., Fox, N.S. Fox, and Handy, R.L. (1994). "Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers." In-Situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia. 121-132.

Lawton, E.C. and Merry, S.M. (2000). "Performance of Geopier Supported Foundations During Simulated Seismic Tests on Northbound Interstate 15 Bridge Over South Temple, Salt Lake City." Final Report No. UUCVEEN 00-03. University of Utah. December.

Minks, A.G., Wissmann, K.J., Caskey, J.M., and Pando, M.A. (2001). "Distribution of Stresses and Settlements Below Floor Slabs Supported by Rammed Aggregate Piers." Proceedings, 54th Canadian Geotechnical Conference. Calgary, Alberta. September 16-19.

NAVFAC (1982). Soil Mechanics—Design Manual DM 7.1. Department of the Navy Naval Facilities Engineering Command. Alexandria, VA p.7.1-228.

Terzaghi, K. (1936). "Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand Above a Yielding Trap-Door." Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics, Cambridge, Massachusetts, pp. 307-311.

Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G., and Gaul, A.J. (2002). "Embankment Support: A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement." Presented, Transportation Research Board. 81st Meeting, Washington, D.C. January 13-17.

Wissmann, K.J., FitzPatrick, B.T., White, D.J., and Lien, B.H. (2002). "Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements." Proceedings, 4th International Conference on Ground Improvement. Kuala Lumpur, Malaysia, 26-28 March.

RECONOCIMIENTOS

Kord J. Wissmann, Ph.D., P.E.

Brendan T. FitzPatrick, P.E.

David J. White, Ph.D.

SIMBOLOS UTILIZADOS

c_c	=	Coeficiente de compresibilidad del suelo matriz
c_r	=	Coeficiente radial de consolidación
c'_r	=	Coeficiente radial de consolidación modificado
c_v	=	Coeficiente vertical de consolidación
d_e	=	Longitud de drenaje
e_o	=	Relacion de vacíos del suelo matriz
E	=	Modulo elástico del suelo en la zona inferior
E_{comp}	=	Composite elastic modulus of the reinforced upper zone layer
E_g	=	Modulo elástico compuesto de la zona superior
E_m	=	Modulo elástico compuesto del suelo matriz
H_{dr}	=	Longitud de drenaje vertical
H_{uz}	=	Espesor de la zona superior reforzada
H_{LZ}	=	Espesor de la zona inferior
I_σ	=	Factor de influencia del esfuerzo aplicado
n	=	Relación de diámetros
P_o	=	Esfuerzo vertical efectivo en el centro del estrato compresible
Δq	=	Esfuerzo promedio aplicado por el muro o terraplén
R_a	=	Relación entre el área de cobertura de las pilas de grava compactada y el área bruta de la matriz del suelo
S_{tot}	=	Asentamiento total de la estructura
S_{uz}	=	Asentamiento en la zona superior
S_{LZ}	=	Asentamiento en la zona inferior
T_r	=	Factor de tiempo radial
T_v	=	Factor de tiempo vertical
t	=	Tiempo de drenaje

REFUERZO Y MEJORAMIENTO DE SUELOS CON LOS SISTEMAS GEOPIER®

Trabaje con nuestros ingenieros alrededor del mundo para resolver sus retos de refuerzo y mejoramiento de suelos. Para más informacion, llame al 800-371-7470, correo electrónico info@geopier.com, o visite geopier.com.

130 Harbour Place Drive, Suite 280, Davidson, NC 28036
800.371.7470 | info@geopier.com | marketing@geopier.com
www.geopier.com

GEOPIER®
Tensar.

©2017 Geopier Foundation Company, Inc. La tecnología Geopier® y las marcas de fábrica están protegidas bajo patentes de los EUA y marcas de fábrica listadas en www.geopier.com/patents y otras aplicaciones de marca y patentes pendientes. Existen otras patentes extranjeras, aplicaciones de patentes, marcas registradas y marcas de fábrica.

GEOPIER_TB_11_01.17