

การประเมินการทรุดตัวของฐานรากตื้นแบบแถบยาวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินลมหอบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และแบบจำลองดิน Modified Cam Clay

Evaluation of Strip Footing Settlement from Consolidation of Silty Soil by Finite Element Method with Modified Cam Clay Soil Model

นบปนม แก้วหานาม¹ ชัยรัตน์ เสนารัตน์² ยูธภูมิ บัวผัน³

Nopanom Kaewhanam¹ Chairad Senarad² Yoothaphum Buaphan³

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอค่าการทรุดตัวของฐานรากตื้นแบบแถบยาว เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินลมหอบ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองดิน Modified Cam Clay (MCC) การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1) การทดลองหาค่าคุณสมบัติของดินลมหอบในห้องปฏิบัติการ และ 2) การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างดินลมหอบที่มีความลึก 1.5 เมตร 2.5 เมตร และ 3.5 เมตร จากจังหวัดกาฬสินธุ์ ถูกนำมาทดสอบหาพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำในห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์กำหนดให้ค่าน้ำหนักที่กระทำต่อฐานรากอยู่ในแนวตั้งไม่มีการเยื้องศูนย์ และมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 2.0 จากผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างดินลมหอบจำแนกได้เป็น SM-SC (ระบบจำแนกดิน USCS) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางสำหรับความกว้างของฐานราก 0.2-15.0 เมตร และแรงกระทำ 1.0-10.0 ตัน/ม² ในตอนท้ายของการศึกษาแสดงการใช้ค่าจากตาราง 2 ตัวอย่าง คือ การก่อสร้างกำแพงและถนน ในทั้งสองกรณีน้ำหนักกระทำเป็นแบบแถบยาว และการทรุดตัวสามารถหาได้อย่างสะดวกรวดเร็ว

คำสำคัญ: การทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำ, ดินลมหอบ, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This paper presents the consolidation settlement of strip footing resting on silty soil analyzed by finite element method with the Modified Cam Clay (MCC) soil model. The study was divided into 2 steps: 1) the laboratory tests, and 2) finite element analyses. Soil samples were selected from depth of 1.5 m, 2.5 m and 3.5 m in Kalasin province were then tested in laboratory. In the finite element analyses, loading was set in vertical direction without eccentricity. The magnitude of load was controlled by Safety Factor valued not less than 2.0. The results show that the soil was classified as SM-SC (USCS system). The resulting consolidation settlement was shown in tables for footing width of 0.2-15.0 m and loading of 1.0-10.0 t/m². Two examples utilizing settlement from the tables i.e., the construction of wall and road embankment were demonstrated. In both cases, loading was considered strip-type and the settlement can be quickly obtained.

¹อาจารย์, ^{2,3} นิสิตปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม

44150, ¹Lecturer, ^{2,3} Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand.,

^{*} Corresponding author, Email: nopanom.k@msu.ac.th

Keyword: consolidation settlement, silty soil, finite element

บทนำ

การทรุดตัวของฐานรากยังคงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากปัญหาหนึ่งในงานวิศวกรรมปฐพี โดยเฉพาะเมื่อมีการก่อสร้างฐานรากบนชั้นดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด ซึ่งการทรุดตัวของฐานรากบนดินชนิดนี้จะไม่เกิดทั้งหมดในทันทีที่มีน้ำหนักกระทำเนื่องจากขนาดของโพรงระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็กมาก จนทำให้น้ำในดินไหลออกไปได้ช้าเมื่อมีน้ำหนักกระทำ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ [1] สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีฐานรากหรือก่อสร้างบนดินเดิม เมื่อเวลาผ่านไปมากพอ การทรุดตัวก็จะสามารถปรากฏให้เห็นได้ในระดับที่อาจเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ ตัวอย่างภาพความเสียหายของอาคารที่ก่อสร้างบนดินลมหอบดังแสดงใน

Figure 1



(a)



(b)

Figure 1 Damage of brick wall constructed on silty soil (a) building wall crack (b) width of the crack

ทั้งดินเหนียว (Clay) และทรายแป้ง(Silt) ต่างก็จัดอยู่ในกลุ่มดินที่เรียกว่าดินเม็ดละเอียด (Fine-grained soil) เหมือนกัน ซึ่งมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร [2] แต่โดยทั่วไปมักจะพบเห็นผลการทดสอบและการศึกษาการอัดตัวคายน้ำสำหรับเฉพาะในดินเหนียวเท่านั้น ตัวอย่างงานศึกษาการทรุดตัวของดินเหนียว เช่น M. Battaglio และคณะ ได้เสนอแบบจำลองดินสำหรับดินเหนียวที่มีการอัดตัวคายน้ำแบบไม่เชิงเส้น [3] Guo Yong Zheng [4] ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรม การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนแบบไม่เชิงเส้นในหลายๆวิธี Watabe และคณะ ได้ศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในระยะยาว [5]

ดินทรายแป้งหรือเรียกอีกชื่อว่าดินลมหอบ เนื่องจากมีขนาดเม็ดดินเล็กมาก มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า จึงสามารถถูกลมพัดปลิวไปอยู่ในอากาศแวดล้อมทั่วไปได้ ซึ่งดินชนิดนี้พบเห็นได้ทั่วไปในหลายจังหวัดทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ดังแสดงในแผนที่ชนิดดินใน Figure 2

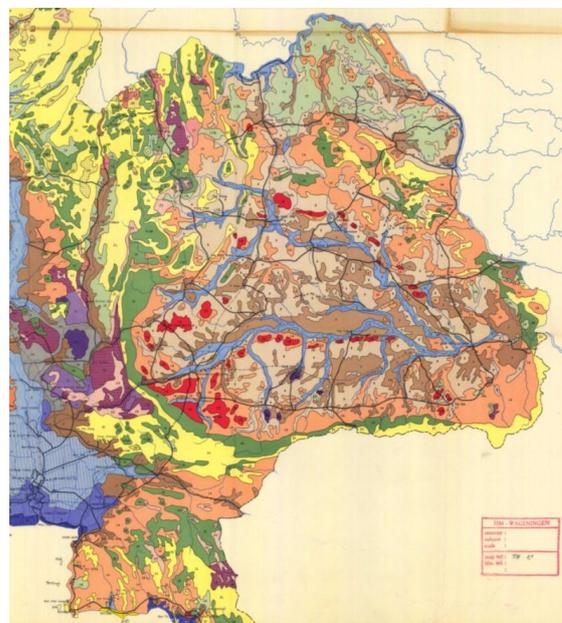


Figure 2 Soil Map in Northeast Thailand: taken from http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/EuDASM/asia/images/maps/download/th2004_2so.jpg

ตะแกรง เพื่อจำแนกชนิดดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS)

หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน มาทดสอบการอัดตัวคายน้ำเพื่อหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัว ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองดินชั้นสูง ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองดิน Modified Cam Clay (MCC) [16] แล้วนำเสนอผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี ในรูปแบบตาราง

ในแบบจำลอง Modified Cam Clay ดินถูกจำลองพฤติกรรมผ่านระนาบของค่าเฉลี่ยหน่วยแรง p' และ ค่าหน่วยแรงเฉือน q ซึ่งทั้งสองค่านี้สามารถคำนวณจากหน่วยแรงหลักทั้งสาม (Principal stress - $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) ได้ โดยมีสมการสำหรับพื้นผิวขอบเขตความเป็นอีลาสติก (Yield Surface) และ พื้นผิวที่ใช้ในการวิเคราะห์การเสถียรแบบพลาสติก (Plastic Potential Surface) ดังแสดงในสมการที่ (1) และรูปของพื้นผิวนี้นับระนาบ p' - q เป็นรูปวงรี ดังแสดงใน Figure 4

$$\frac{q^2}{p'^2} + M \left(1 - \frac{p'_c}{p'} \right) = 0 \quad \dots(1)$$

เมื่อ

p'_c = ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงประสิทธิผลก่อนเริ่มการอัดตัวคายน้ำ (Pre-consolidation pressure)

$$p' = \text{ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงหลักประสิทธิผล} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)}{2} \quad \dots(2)$$

q = ค่าหน่วยแรงเฉือน

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2} \quad \dots(3)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad \dots(4)$$

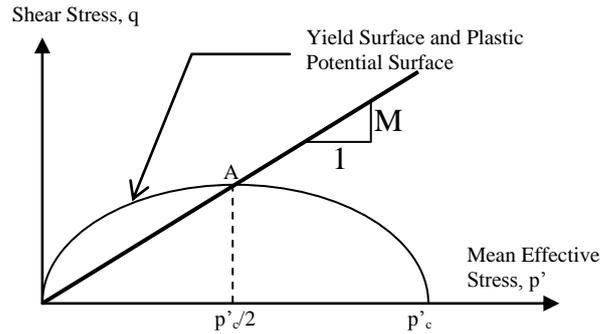


Figure 4 Yield Surface and Plastic Potential Surface of Modified Cam Clay Model

รูปแบบของปัญหาที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงใน Figure 5 โดยในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ความกว้างของฐานรากดินแบบแถบยาวเป็น 1.0 เมตร 1.5 เมตร 2.0 เมตร และ 2.5 เมตร และค่าน้ำหนักที่กระทำต่อฐานรากมีค่าอยู่ในช่วง 1-20 ตัน/ม²

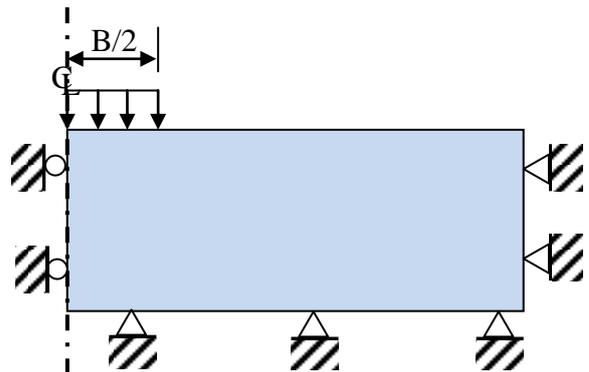


Figure 5 Problem model for the finite element analysis

ผลการศึกษา

จากผลการศึกษา พบว่า ตัวอย่างดินที่นำมาศึกษา จัดอยู่ในกลุ่มดินที่มีดินลมหอมหรือ Silt ปนอยู่ ซึ่งตามการจำแนกดินระบบ USCS ตัวอย่างดินจัดอยู่ในกลุ่ม SM-SC (Silty, clayey sand with gravel) และผลการทดลองการอัดตัวคายน้ำของดินลมหอบได้พารามิเตอร์ดังแสดงใน Table 1

Table 1: Consolidation parameter of Silty Soil

Depth (m)	e_0	OCR	Cc	Cs	σ'_{vo} *	c_v **
1.5	0.54	5.97	0.14	0.33	2.6	1.62
2.5	0.57	4.19	0.12	0.39	4.5	1.61
3.5	0.51	2.67	0.14	0.69	6.5	1.57

Note: * t/m^2 ** $\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{min}$.

ข้อมูลใน Table 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของดิน ลมหอบจากจังหวัดกาฬสินธุ์ที่ระดับความลึกต่างๆ พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัว ได้แก่ อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นตามธรรมชาติ (Initial void ratio, e_0) ค่าอัตราส่วนการรับน้ำหนักในอดีตต่อปัจจุบัน (Overconsolidation Ratio, OCR) ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Compression index, Cc) ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Swelling index, Cs) หน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มต้น (Effective Overburden pressure, σ'_{vo}) และ ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (c_v)

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อความลึกมากขึ้น ดิน จะมีค่า OCR น้อยลง แต่สำหรับค่า สัมประสิทธิ์การอัดตัว (Cc) มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ความลึก ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Cs) มีค่ามากขึ้นเมื่อความลึกมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (c_v) มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง สามความลึก นอกจากนี้ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของดิน ที่ความลึกต่างๆก็เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามความลึก

ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากแถบยาว ที่มีความกว้าง **B** มีค่าเท่ากับ 0.2-15.0 เมตร และ น้ำหนักกระทำต่อฐานราก **q** มีค่าตั้งแต่ 1-10 ตัน/ม² ที่ ระดับการอัดตัวคายน้ำ (U) เท่ากับ 100% ดังแสดงใน

Table 2 - Table 3

Table 2: Consolidation settlement of strip footing for load valued between 1-5 t/m^2

B (m)	Consolidation Settlement (cm)				
	q=1 t/m^2	q=2 t/m^2	q=3 t/m^2	q=4 t/m^2	q=5 t/m^2
0.2	4.7	9.2	13.5	17.6	21.6
0.5	7.6	14.5	21.0	27.0	32.6
1.0	11.2	21.1	30.0	38.1	45.5
1.5	12.9	24.1	33.9	42.7	50.7
2.0	14.1	26.0	36.4	45.6	53.9
2.5	14.9	27.3	38.1	47.6	56.2
5.0	16.1	29.2	40.1	49.7	58.1
7.5	17.0	30.5	41.8	51.6	60.2
10.	17.4	31.2	42.7	52.6	61.4
	17.7	31.6	43.2	53.2	61.9
12.	17.9	32.0	43.7	53.7	62.5
15.					

Table 3: Consolidation settlement of strip footing for load valued between 6-10 t/m^2

B (m)	Consolidation Settlement (cm)				
	q=6 t/m^2	q=7 t/m^2	q=8 t/m^2	q=9 t/m^2	q=10 t/m^2
0.2	25.4	29.1	32.7	36.1	39.5
0.5	37.9	42.9	47.6	52.2	56.5
1.0	52.4	58.8	64.8	70.5	75.8
1.5	58.0	64.8	71.2	77.0	82.7
2.0	61.5	68.6	75.1	81.2	87.0
2.5	64.0	71.1	77.8	84.0	89.0
5.0	65.7	72.7	79.1	85.1	90.6
7.5	68.0	75.1	81.6	87.6	93.3
10.	69.2	76.3	82.9	89.0	94.6
	69.8	77.0	83.6	89.7	95.4
12.	70.5	77.7	84.3	90.4	96.1
15.					

การนำไปใช้

ตัวอย่างการใช้งานผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากแบบแถบยาวเนื่องจากการอัดตัวของน้ำของดินลมหอบ แสดงโดยงานก่อสร้างที่รูปร่างของน้ำหนักมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว(B/L) มีค่าน้อยมาก ซึ่งทำให้น้ำหนักมีลักษณะใกล้เคียงกับฐานรากแบบแถบยาว เช่น

1) การก่อสร้างกำแพง ดังแสดงใน

Figure 6

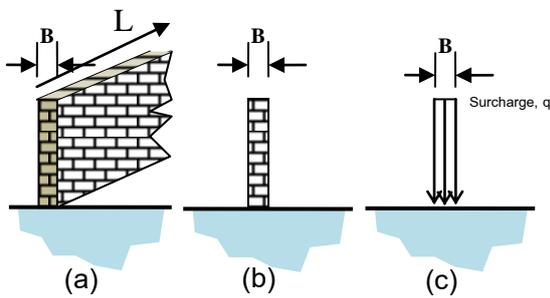


Figure 6 Strip footing from brick wall (a) 3-D brick wall (b) Plane strain simulation of brick wall (c) strip footing with surcharge q

จากรูปที่ 5 (c) น้ำหนักแผ่กระจาย q สามารถคำนวณได้จากหน่วยน้ำหนักของกำแพง คูณกับความสูงของกำแพง ในที่นี้ กำหนดให้กำแพงมีความกว้าง 0.2 เมตร หน่วยน้ำหนักของกำแพงเป็น 2.0 ตัน/ม³ และมีความสูง 2.5 เมตร ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{Surcharge } q &= 2.0 \times 2.5 \text{ ตัน/ม}^2 \\ &= 5.0 \text{ ตัน/ม}^2 \end{aligned}$$

จาก Table 1 จะได้ว่าที่ความกว้างฐานราก $t_n = 0.2$ เมตร และ $q = 5.0$ ตัน/ม² จะได้การทรุดตัวมีค่าเป็น 21.6 เซนติเมตร

2) การก่อสร้างถนน ดังแสดงใน Figure

7

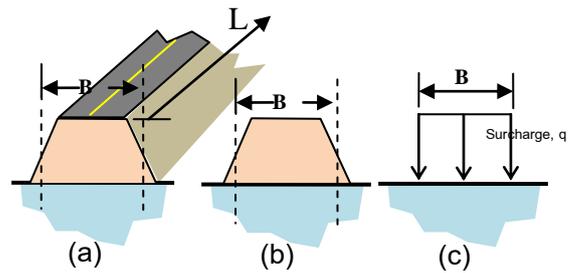


Figure 7 Road embankment (a) 3-D road embankment (b) Plane strain simulation of embankment (c) strip footing with surcharge q

จาก Figure 6 (b) สามารถประมาณความกว้างของถนนได้จากการวัดถึงกึ่งกลางความลาดชันด้านข้างทั้งสอง และ จาก Figure 6 (c) น้ำหนักแผ่กระจาย q สามารถคำนวณได้จากหน่วยน้ำหนักของดินคูณกับความสูงของคันดิน นอกจากนี้ อาจพิจารณาเพิ่มน้ำหนักจรเนื่องจากการสัญจรที่เกิดจากการจราจรที่ด้านบนถนนอีก ในที่นี้ กำหนดให้ถนนมีความกว้าง 10 เมตร หน่วยน้ำหนักของดินถมเป็น 2.0 ตัน/ม³ ความสูง 1.5 เมตร และน้ำหนักจรเท่ากับ 1 ตัน/ม² จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Surcharge } q &= \text{น้ำหนักคงที่} + \text{น้ำหนักจร} \\ &= (2.0 \times 1.5) + 1.0 \text{ ตัน/ม}^2 \\ &= 4.0 \text{ ตัน/ม}^2 \end{aligned}$$

จาก Table 1 จะได้ว่าที่ความกว้างฐานราก $t_n = 10$ เมตร และ $q = 4.0$ ตัน/ม² จะได้การทรุดตัวมีค่าเป็น 52.6 เซนติเมตร

วิจารณ์และสรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการทรุดตัวของฐานรากดินแบบแถบยาวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินลมหอบ ตัวอย่างดินลมหอบในพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์ถูกรวบรวมมาจาก 3 ระดับความลึก (1.5 เมตร 2.5 เมตร และ 3.5 เมตร) ตัวอย่างดินตามระบบ USCS จัดอยู่ในกลุ่ม SM-SC การวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำทำโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองดิน Modified Cam Clay โดยที่ค่าน้ำหนักกระทำต่อฐานรากถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงความปลอดภัย (Factor Safety) ไม่น้อยกว่า 2.0 สามารถนำมาใช้ประกอบการออกแบบและการควบคุมการก่อสร้างได้ และมีความสะดวกรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม ค่าการทรุดตัวที่นำเสนอไว้คือการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด เมื่อน้ำในโพรงดินระบายออกไปจนแรงดันส่วนเกิน (Excess pore pressure) มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งใช้เวลาในการเกิดการทรุดตัวที่นานมาก ทำให้ค่าการทรุดตัวที่สังเกตได้จริงหลังจากการก่อสร้างในระยะแรกๆ มีค่าน้อยกว่าค่าการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้ ซึ่งในการนำค่าการทรุดตัวที่เวลาต่างๆไปใช้งานจะต้องพิจารณาดีกรีการอัดตัวคายน้ำ (Degree of Consolidation) U นำเข้าไปคูณกับปริมาณการทรุดตัวจากตาราง ก็จะได้การทรุดตัวที่เวลานั้นๆออกมา ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$\rho_t = \rho_{total} * U \quad \dots(5)$$

เมื่อ ρ_t = การทรุดตัวที่เวลาใดๆหลังการก่อสร้าง

ρ_{total} = การทรุดตัวทั้งหมดจากตาราง

U = Degree of consolidation_t

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนทุนวิจัยและอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

[1] T.W. Lambe, R.V. Whitman, Soil mechanics SI version, John Wiley & Sons, 2008.

[2] Das, Braja M. Principles of geotechnical engineering. CI-Engineering, 2010.

[3] Guo Yong Zheng, Peng Li, Chun Yan Zhao, Analysis of non-linear consolidation of soft clay by differential quadrature method, Applied Clay Science, Vol.79, pp.2-7, 2013.

[4] M. Battaglio, N. Bellomo, I. Bonzani, R. Lancellotta, Non-linear consolidation models of clay which change type, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol.38, No.4, pp.493-500, 2003.

[5] Watabe Y., Udaka K., Nakatani Y., Leroueil S., Long-term consolidation behavior interpreted with isotache concept for worldwide clays, Soils and Foundations, Vol.52, No.2, pp.357-359, 2013.

[6] Abdul Mounem Mouazen, Miklós Neményi, Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil, Soil and Tillage Research, Vol.51, No. 1–2, pp.1-15, 1999.

[7] Nidal H Abu-Hamdeh, Randall C Reeder, A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces acting on a disk plow, Soil and Tillage Research, Vol.74, No. 2, pp.115-124, 2003.

[8] Y.B Yang, H.H Hung, D.W Chang, Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.23, No. 4, pp.263-278, 2003.

[9] W. Huang, D. Sheng, S.W. Sloan, H.S. Yu, Finite element analysis of cone penetration in cohesionless soil, Computers and Geotechnics, Vol. 31, No. 7, pp.517-528, 2004.

[10] Akbar A. Javadi, Asaad Faramarzi, Alireza Ahangar-Asr, Analysis of behaviour of soils under cyclic loading using EPR-based finite element method, Finite Elements in Analysis and Design, Vol.58, pp. 53-65, 2012.

[11] Potts D.M., Zdravkovic, Some pitfalls when using Modified Cam Clay, Soil-Structure interaction in Urban Civil Engineering, 2000.

[12] Y.M.A. Hashash, A.J. Whittle, Integration of the modified Cam-Clay model in non-linear finite element analysis, *Computers and Geotechnics*, Vol.14, No.2, pp.59-83, 1992.

[13] M.A. Tripodi, V.M. Puri, H.B. Manbeck, G.L. Messing, Triaxial testing of dry, cohesive powder and its application to a modified Cam-clay constitutive model, *Powder Technology*, Vol.80, No.1, pp.35-43, 1994.

[14] M.F. Chang, C.I. Teh, L.F. Cao, Undrained cavity expansion in modified Cam clay II: Application

to the interpretation of the piezocone test, *Géotechnique*, Vol.51, No.4, pp.335–350, 2001.

[15] M.F. Randolph, J.P. Carter and C.P. Wroth, Driven piles in clay-the effects of installation and subsequent consolidation, *Geotechnique*, Vol.29, No.4, pp.361-393, 1979.

[16] Roscoe, K.H. and Burland, J.B., On the generalized stress-strain behavior of “wet” clay, *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, pp. 535-560, 1968.