

MCC 모델에 의한 연약지반의 교대측방이동 영향범위에 관한 연구

박춘식* · 김종환** · 백진솔***

Park, Choon Sik*, Kim, Jong Hwan**, Baek, Jin Sool***

A Study on the Influence Range of Lateral Movement of Abutment on the Soft Clay by MCC Model

ABSTRACT : This study, using the MCC Model to consider consolidation, estimated the range within which no influences occur from lateral movement and its amount of the foundation pile and abutment on the soft ground. This study performed finite element analyses, with variations on the adhesiveness and internal friction angle, depth of soft clay, embankment height, consolidation parameters, and separation distance between the abutment and embankment. The abutment's horizontal displacement exhibits linear change with a longer separation distance, and changes into an exponential form as the embankment gets closer to the abutment. As the soft clay layer becomes 10 m deeper, the horizontal displacement tends to increase 1.5 ~ 3.0 times. However, it decreases at a rate of 0.3 ~ 0.95 when adhesiveness is increased by 10 kN/m² and internal friction angle is increased by 5°. The increase change rate in a lateral movement amount becomes greater if it is closer to the abutment when the abutment separation distance is long. When the distance is short, the change rate of horizontal displacement increases in similar a way, but it tends to be decreasing overall.

Key words : Modified Cam-Clay Model, Soft Clay, Abutment, Embankment, Lateral Movement, Horizontal Displacement

초록 : 본 연구는 압밀과정을 고려하기 위해 MCC(Modified Cam-Clay) 모델을 사용하여 연약지반 상의 교대 및 기초파일의 측방이동량 및 측방이동이 영향을 미치지 않는 범위를 산정하였다. 연구를 위하여 연약점토층의 점착력과 내부마찰각, 연약점토층의 깊이, 성토 높이, 압밀 정수, 교대에서 성토부까지의 이격거리를 바꾸어서 유한요소해석을 실시하였다. 교대의 수평변위는 이격거리가 멀수록 직선적으로 변화하는 양상을 보이다가 교대에 근접하여 성토가 이루어지면 지수적인 형태로 변화하였다. 연약점토층의 깊이가 10 m 깊어짐에 따라 수평변위는 1.5 ~ 3.0배로 증가하는 경향이 나타났으며, 점착력이 10 kN/m² 증가하는 경우와 내부마찰각이 5° 증가하는 경우에 있어 교대의 수평변위는 0.3 ~ 0.95 정도의 비율로 감소하였다. 측방이동량의 변화비는 교대 이격거리가 먼 경우는 교대에 가까워질수록 증가하고, 이격거리가 가까운 경우는 수평변위의 변화비는 비슷한 형태로 증가하지만 전체적으로 감소하는 경향이 나타났다.

검색어 : 수정 Cam-Clay 모델, 연약점토, 교대, 제방, 측방이동, 수평변위

* 정희원 · 창원대학교 토목공학과 교수 (pcs@changwon.ac.kr)

** 정희원 · 창원대학교 토목공학과 (Corresponding Author · Civil Engineering of Changwon University · gypsys@nate.com)

*** 정희원 · 경남도청 회계과 공학박사 (jsb0720@korea.kr)

Received October 5 2012, Revised November 12 2012, Accepted December 6 2012

1. 서론

연약지반 상의 성토에 따라 발생하는 연약지반의 거동에 관한 연구는 Indraratna et, al.(1992)는 Malaysia 해성점토 위에 축조될 제방의 시험성토에 대한 실제 계측치와 수정 Cam-Clay 모델을 사용한 유한요소해석 결과를 비교·분석하였고, Chai & Bergado(1993)은 성토에 의한 하부 연약지반의 거동을 분석하기 위하여 수정 Cam-Clay 모델을 사용하여 성토기간과 압밀기간 동안 변화하는 하부지반의 토질정수를 고려하는 방법에 대하여 연구하였다. 또한 Sarah(1997)는 Wood(1990)가 제한한 이론을 바탕으로 실내시험에서 얻은 비배수전단강도로 수정 Cam-Clay 모델의 매개변수를 결정하고, 이를 연약한 점토 위에 축조된 제방에 대하여 역해석을 수행하였다. 김상규 등(1991)은 수정 Cam-Clay 모델을 적용한 해석치를 Hyperbolic 모델의 해석치와 실제 계측치와 상호 비교·평가하였다.

Peck(1969)에 의해 처음으로 연약지반의 교대측방이동이라는 용어 이후로 Franx & Boostatra(1948)은 연약 지반 상에 설치된 말뚝의 파손 원인 및 측방변위 상관관계를 연구하였고, 권성진 등(1995)은 시험성토한 지반의 토질정수와 현장상태가 비교적 자세히 소개되어 있는 국외 2개 지역의 시험성토 자료를 수집, 분석하여 측방이동을 발생시키는 주요 요인 중 영향이 크다고 생각되는 연약지반 상의 성토고, 연약 점토층의 두께 및 전단강도를 변화시키면서 측방이동에 대한 영향을 유한요소 해석을 통해 분석하고 각 요소들 간의 연관성을 분석하였다. 홍원표 등(1994 & 2007)은 국내현장에 수집된 43개 교대의 측방이동 실측자료에 대한 분석을 통해 말뚝기초 교대의 측방이동을 간편하게 평가할 수 있는 방안을 제안하였다. 또한 정재성 등(1995)은 연약지반 상 7개 교량의 측방이동 판정과 대책공법에 대해 검토하였으며, 김대규(2005)는 측방이동 변위에 대한 실제 계측과 시공단계별 수치해석 결과를 비교·분석하였다.

하지만 교대에서 발생하는 측방 이동량에 대하여 정확하게 예측하거나 성토에 따라 연약지반의 압밀과정을 고려한 발생 변위에 의해 교대에 어느 정도의 영향이 미치는지에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 못하고 있는 상황이다. 또한 실제 현장에서는 연약지반 상의 성토 및 교대 시공에 따라 발생하는 교대측방이동 때문에 교대에 대한 추가적인 보수보강에 의한 공사비 증가 및 그에 따른 공사기간이 연장되는 문제점들이 발생한다. 이러한 현장의 문제점들은 연약지반 위의 성토에 따라 발생하는 변위가 교대에 미치는 영향범위, 즉 측방이동에 대한 보강범위를 객관적으로 정할 수 없는 상황에서 발생하는 문제라고 판단된다. 실제로 현장에서 참고로 할 수 있는 자료 또한 미비한 실정이고, 교대측방이동 발생에 따른 보강범위를 산정하는 방법 또한 전무한 실정에서 이흥기(2008)가 Mohr-Coulomb 모델을

이용하여 연약지반 상 교대 측방이동 보강대책인 EPS 보강길이 산정에 대하여 3차원 해석 연구를 수행하였지만, Mohr-Coulomb 모델 특성상 압밀을 고려하지는 못 하였다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 교대 측방이동에 대한 보강범위를 산정하기 위해 연약지반 조건, 연약층 깊이 및 성토높이를 변화시켜 유한요소해석을 실시하고, 각각의 경우에 있어 연약지반의 수정 Cam-Clay 모델을 이용하여 압밀을 고려한 교대의 측방이동에 대한 영향성을 분석하고자 하였다.

2. 유한요소해석

본 연구에서 성토에 따른 연약지반의 압밀을 고려한 교대의 측방이동에 대한 영향성을 분석하기 위하여 연약지반의 압밀 거동에 대한 해석이 가능한 2차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 8.2를 사용하였다. 본 연구에서는 1.0 m의 단계성토를 실시한 후 최소 과잉간극수압이 10.0 kN/m²이 될 때까지 압밀을 완료하고, 다음 성토를 실시하는 과정을 반복하여 계획된 성토 고까지 성토를 하는 시공단계 압밀해석을 수행하였다. 교대의 최대 수평변위는 성토고 3.0 m, 5.0 m, 7.0 m, 9.0 m 일 때 발생하는 수평변위에서 최대값을 찾아서 산정하였고, 그 때

Table 1. Analysis Results for Spacing of Piles(Lee, Hong Gi, 2008)

c (kN/m ²)	Clay Depth (m)	Embankment Height (m)	Pile Gab (m)	Abutment Hor. Disp. (mm)
30	25	5	1	16.2
			2	15.8
			3	15.7
		9	1	15.9
			2	15.8
			3	16.6

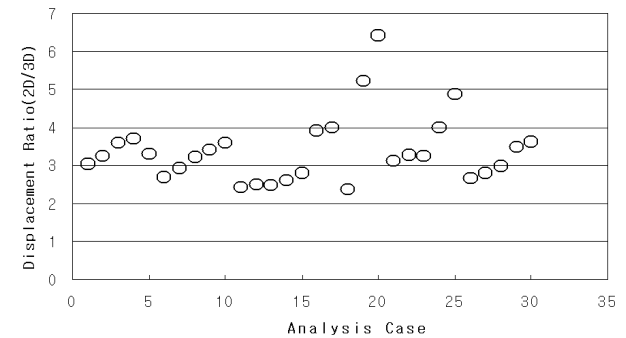


Fig. 1. Horizontal Displacement Ratio of 2D & 3D Analysis for Abutment(Lee, Hong Gi, 2008)

교대에서 발생하는 최대 수평변위를 토대로 그래프 및 영향식을 도출하였다. 또한 이흥기(2008)는 교대측방이동에 대한 3차원 해석에서 Table 1과 같이 파일 간격에 따른 측방변위의 차이가 작아 해석 시 파일 간격을 무시해도 무관할 것이라는 결론을 도출하여, 본 연구에서는 파일의 설치간격에 대한 영향은 없는 것으로 가정하여 연구를 수행하였다. 또한 Figure 1의 3차원 및 2차원 해석결과에 의해 2차원 해석이 3차원 해석보다 2~4배 정도 크게 나타나는 것으로 연구되어, 본 연구에서는 2차원 해석에 따른 교대수평변위 기준치를 캐나다법의 상당히 변형이 발생하는 측방이동 판정기준인 실측치 25 mm보다 작은 15 mm를 적용하여 3차원해석 결과를 적용하여 $15 \text{ mm} \times (2-4) \approx 40.0 \text{ mm}$ 로 검토하였다.

2.1 해석단면 및 모델링

유한요소해석에 이용된 표준 해석단면은 Figure 2와 같고, 유한요소해석을 위한 mesh 생성은 Figure 3과 같다. Figure

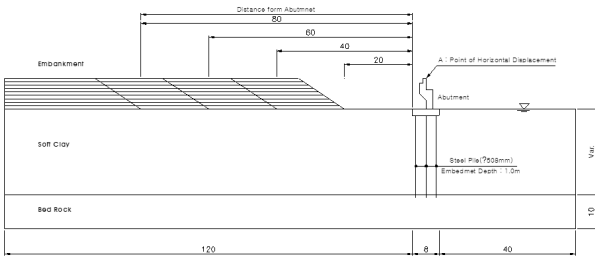


Fig. 2. Section

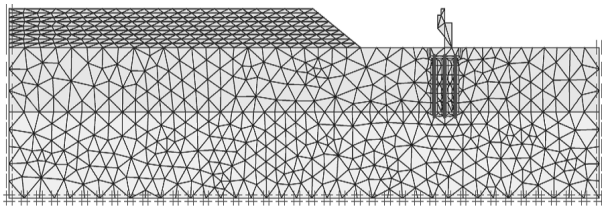


Fig. 3. Modeling of FEA

2에서 교대에서 발생하는 최대수평변위의 측정위치는 교대의 측방이동과 측방이동에 의한 구조물 파손을 쉽게 확인할 수 있는 교량 상판 구조물과 맞닿아 있는 교대의 「A」 위치로 선정하였다.

2.2 적용 물성치

본 연구에서 연약지반은 점성토 압밀거동을 반영할 수 있는 수정 Cam-Clay 모델의 일종인 Soft Soil 모델을 적용하였으며, 압반층과 성토층은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 또한 교대는 Linear Elastic 모델을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료에 대한 물성치는 Table 2와 같고, 연약 점토층의 기본적인 특성 및 압밀특성은 Figure 4와 같이 남해안 연약점토의 실내토질시험 결과를 토대로 그 범위를 산정하였으며, 적용 지반정수는 Table 3과 같다. 연약 점토층의 C_c 는 0.3, 0.5, 0.8로 변화시켰고, C_s 는 $1/5 C_c$ 로 산정하였으며, 초기 간극비(e_{ini})는 1.80으로 가정하여 수정 압축지수(λ^*), 수정 팽창지수(κ^*)를 식 (1) 및 (2)와 같이 산정하였다. 또한 연약 점토층의 점착력(c)은 실내토질시험 결과를 토대로 10.0 kN/m^2 , 20.0 kN/m^2 으로 변화시켰으며, 내부마찰각(ϕ)은 실내토질시험 결과가 충분하지 않아 10.0° , 15.0° 가정하여 변화시켰다.

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1+e)} \quad (1)$$

$$\kappa^* = \frac{C_s}{2.3(1+e)} \quad (2)$$

여기서, C_c : 압밀시험에 의한 압축지수, C_s : 압밀시험에 의한 팽창지수, e : 간극비

2.3 유한요소해석 시 변화 조건

본 연구에서는 Table 4와 같이 연약 점토층 깊이(z) 15.0 m,

Table 2. Applied Properties

Contents	Embankment	Clay	Bed Rock	Concrete(Abutment)	Pile
$E(\text{kN/m}^2)$	30000	-	500000	2.3×10^7	2.1×10^8
ν	0.30	-	0.30	0.18	0.30
$r_t(\text{kN/m}^3)$	19	15	20	25	78
$r_{sat}(\text{kN/m}^3)$	20	16	21	-	-
$c(\text{kN/m}^2)$	20	10/20	100	-	-
$\phi(^\circ)$	30	10/15	35	-	-
$k(\text{cm/sec})$	1	1.0×10^{-7}	-	-	-

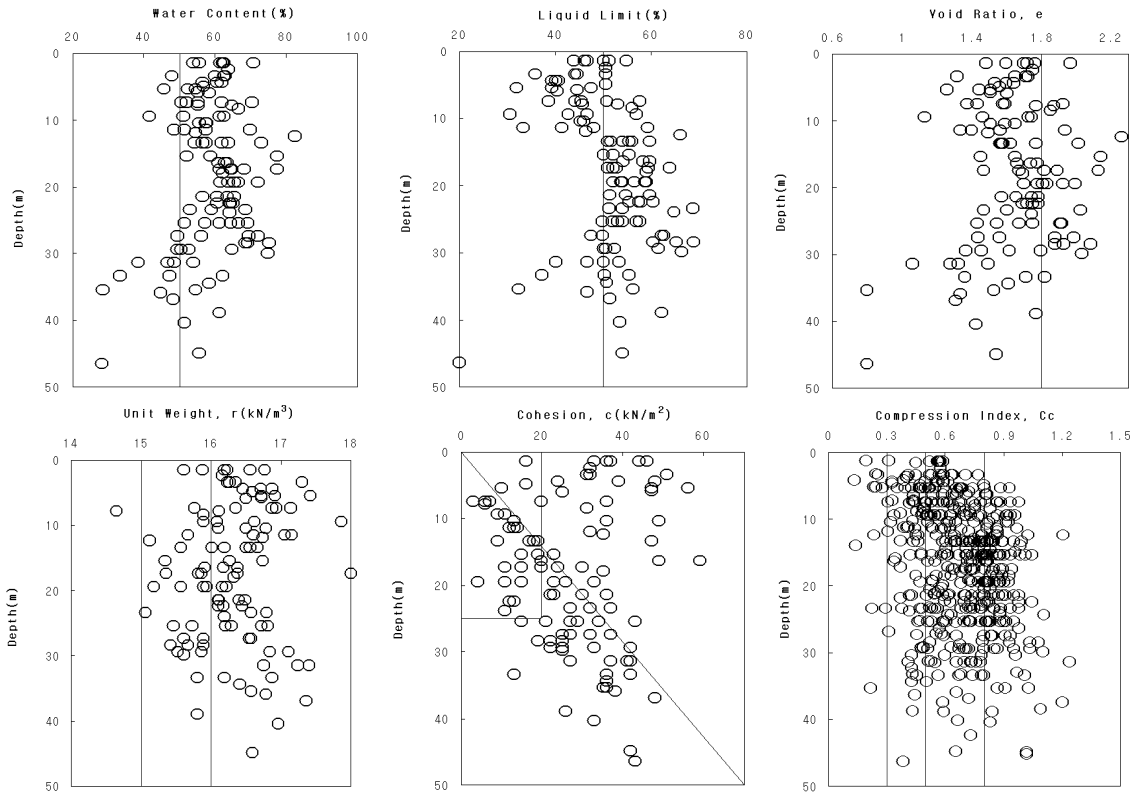


Fig. 4. Soil Test Results of Soft Clay

Table 3. Properties of Soft Clay

	Stiffness		Strength	
	λ^*	κ^*	c (kN/m ²)	ϕ (°)
1	0.047	0.019	10	10
2	0.078	0.031	10	10
3	0.124	0.050	10	10
4	0.047	0.019	20	10
5	0.078	0.031	20	10
6	0.124	0.050	20	10
7	0.047	0.019	10	15
8	0.078	0.031	10	15
9	0.124	0.050	10	15
10	0.047	0.019	20	15
11	0.078	0.031	20	15
12	0.124	0.050	20	15

25.0 m, 성토고(h) 3.0 m, 5.0 m, 7.0 m, 9.0 m, 교대에서의 성토에 대한 이격거리(d) 20.0 m, 40.0 m, 60.0 m, 80.0 m의 경우에 대해서 연약 점토층의 물성치를 바꿔가면서 압밀과정을 고려한 유한요소해석을 수행하였다.

Table 4. Variable Conditions on Finite Element Analysis

Contents		Analysis Conditions			
Soil Properties of Clay	Compression Index, C_c	0.3	0.5	0.8	-
	Cohesion, c (kN/m ²)	10.0	20.0	-	-
	Internal Friction Angle, ϕ (°)	10.0	15.0	-	-
Soft Clay Depth, z (m)		15.0	25.0	-	-
Embankment Height, h (m)		3.0	5.0	7.0	9.0
Abutment Distance, d (m)		20.0	40.0	60.0	80.0

3 해석 결과 및 분석

3.1 교대 이격거리별 해석 결과

Table 5와 같이 case별 해석 경우에 대하여 연약 점토층의 지반정수(c , ϕ , C_c), 연약 점토층의 깊이(z), 성토높이(h), 교대에서의 이격거리(d)에 따른 해석조건에 대하여 성토에 따른 압밀해석을 실시한 후 교대에서 발생하는 최대수평변위를 검토하였다. 여러 조건에 대하여 교대의 수평변위에 대한 변화양상을 비교·분석하여 실제 현장에서 교대측방이동이 발생하지 않도록 하기 위한 연약지반의 보강범위 및 성토에 따른 영향범위를 쉽게 산정할 수 있도록 하는 상관식을 추론하였으며, 상관식

Table 5. Cases of Finite Element Analysis

Case	Clay Depth (m)	Cohesion (kN/m ²)	Internal Friction Angle (°)	C _c	Embankment Height (m)	Distance (m)
1	15.0	10.0	10.0	var.	var.	var.
2	15.0	10.0	15.0	var.	var.	var.
3	15.0	20.0	10.0	var.	var.	var.
4	15.0	20.0	15.0	var.	var.	var.
5	25.0	10.0	10.0	var.	var.	var.
6	25.0	10.0	15.0	var.	var.	var.
7	25.0	20.0	10.0	var.	var.	var.
8	25.0	20.0	15.0	var.	var.	var.

※ Var. : Compression Index(C_c) : 0.3, 0.5, 0.8, Embankment Height(h) : 3.0m, 5.0m, 7.0m, 9.0m
Distance : 20.0m, 40.0m, 60.0m, 80.0m

Table 6. Equations by Distance of Case 1(Typical Case)

Distance(m)	Compression Index(C _c)	Interaction Equation	Note
20.0	0.3	y=9.10e ^{0.27x}	Exponential Equation
	0.5	y=12.01e ^{0.30x}	
	0.8	y=16.06e ^{0.33x}	
40.0	0.3	y=8.57e ^{0.08x}	
	0.5	y=9.70e ^{0.10x}	
	0.8	y=11.26e ^{0.13x}	
60.0	0.3	y=0.27x+7.43	Linear Equation
	0.5	y=0.46x+7.76	
	0.8	y=0.71x+8.20	
80.0	0.3	y=0.11x+7.19	
	0.5	y=0.15x+7.70	
	0.8	y=0.23x+8.12	

※ y : Abutment Horizontal Displacement, x : Embankment Height

은 결정계수 R²가 1.0에 가까운 상관식을 선정하였다. 대표적인 예로 case 1에 대한 교대측방이동 보강범위에 관한 상관식은 다음 Table 6과 같다.

Case 1 ~ Case 8에 대한 이격거리별 해석 결과, 교대의 수평변위는 교대에서 이격거리가 멀수록 직선적으로 변화하는 양상을 보이다가 교대에 근접하여 성도가 이루어지면 지수식의 형태로 수평변위가 변화하는 양상을 보였다. 연약지반 상에서 성도에 따라 교대의 수평변위가 교대에 근접할수록 지수적인 형태로 급격하게 크게 발생하는 것은 연약지반 상의 성도하중, 교대에서의 성도부 근접시공, 연약 점토층의 압축성과 강도의 영향인 것으로 판단할 수 있었고, 교대에 크게 영향을 미치는 범위를 넘어서면 위의 여러 인자들에 의한 영향이 적어 교대의 수평변위 발생량도 적고 또한 그 변화 양상도 직선적으로

변화하는 것을 알 수 있었다. 대표적으로 Case1에 대하여 Figure 5와 같이 나타내었다. Figure 5(a)~(d)에는 교대 수평변위 산정을 위한 이격거리별 상관식을 산정하기 위하여 세부적인 분석을 실시하였고, Figure 5(e)에는 이격거리별 발생된 수평변위를 비교해 보기 위해 각 결과를 모두 나타내었다.

Figure 6(a)는 교대 이격거리에 따른 발생 수평변위를 이격거리 80.0 m에 대하여 정규화한 것이고, Figure 6(b)는 그 상관관계계를 이용하여 이격거리에 따른 교대 수평변위 양상을 나타낸 것으로 이격거리에 멀어질수록 이격거리 80.0 m의 정규화에 의한 수평변위비가 거둬제곱의 형태로 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2 성도높이별 해석 결과

성도높이별 교대의 수평변위에 대한 변화양상을 확인하기 위해서 Case 1 ~ Case 8에 대하여 성도부의 교대 이격거리에 따른 교대 수평변위의 결과를 그래프로 나타내었고, 거둬제곱의 상관식을 도출하였다. 성도높이에 대한 교대에서의 성도부 이격거리에 따른 결과는 성도높이가 높아질수록 발생하는 교대의 수평변위는 커지고, 급격히 변하는 거둬제곱의 상관식이 나타났다. 또한 연약 점토층의 깊이가 깊어질수록 결정계수 R²가 1.0에 근접하여 보다 정확한 상관식을 얻을 수 있는데 이는 Figure 7에서 확인할 수 있다.

교대 이격거리에 따른 수평변위를 산정한 그래프에서 x축의 교대 이격거리와 y축의 교대 수평변위를 바꾸어서 상관식을 도출하면 수평변위에 따른 보강범위를 쉽게 계산할 수 있는 보강범위 상관식을 도출할 수 있다. 이 때 x축은 교대 수평변위이고, y축은 교대 이격거리, 즉 보강범위로 간주할 수 있다. Figure 7에 대표적으로 모든 조건은 같고, 연약 점토층의 깊이만 15.0

MCC 모델에 의한 연약지반의 교대측방이동 영향범위에 관한 연구

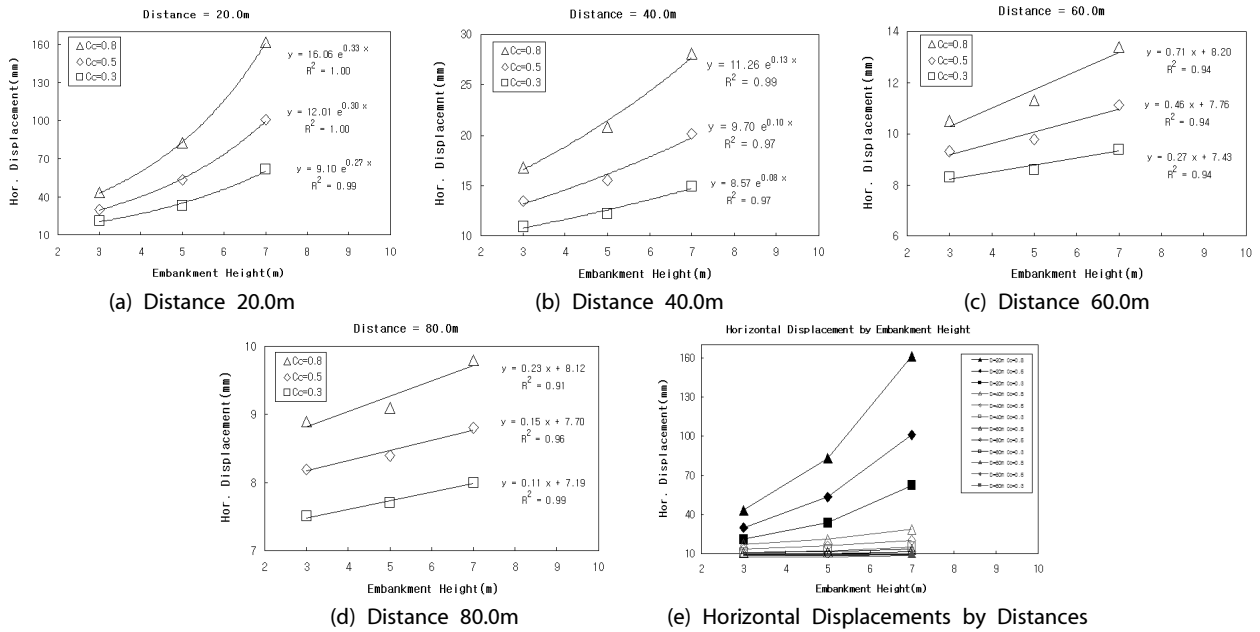


Fig. 5. FEA Results by Distances of Case 1 ($c=10.0\text{kN/m}^2$, $\phi=10.0^\circ$, $z=15.0\text{m}$)

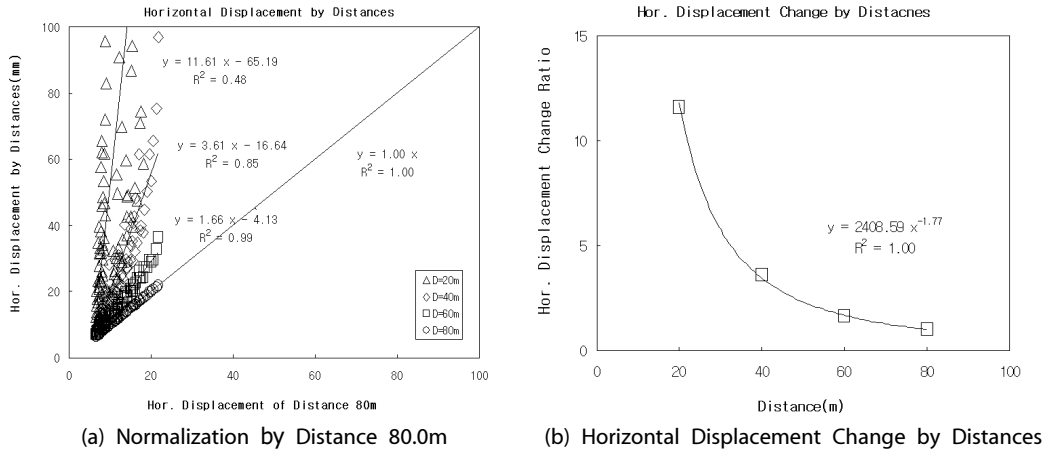


Fig. 6. Abutment Horizontal Displacements by Distances

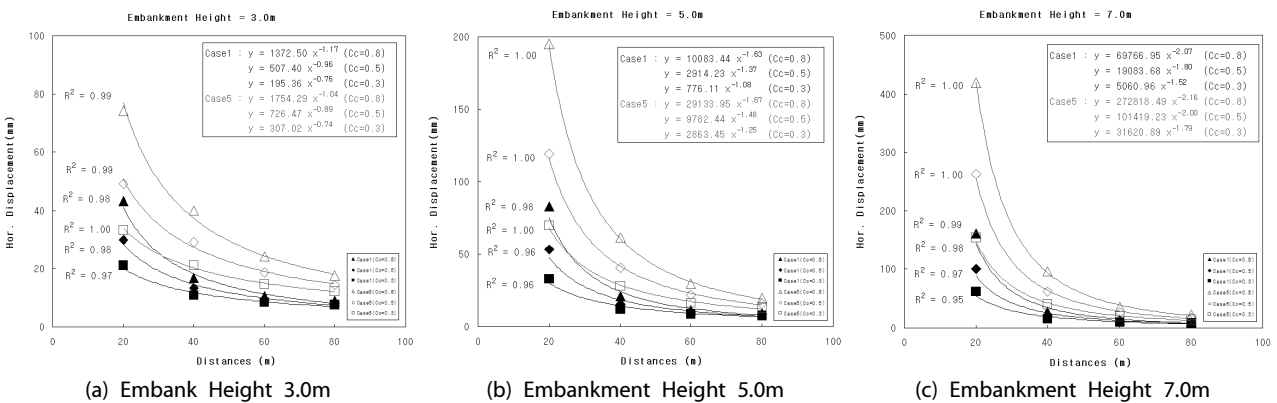
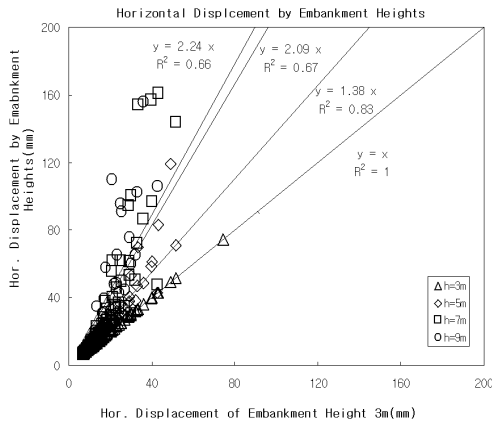
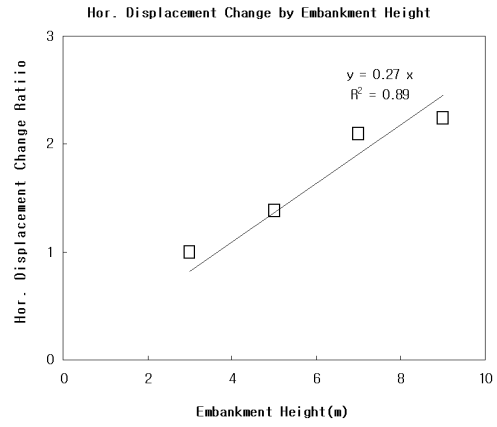


Fig. 7. FEA Results by Embankment Height of Case 1 & Case 5

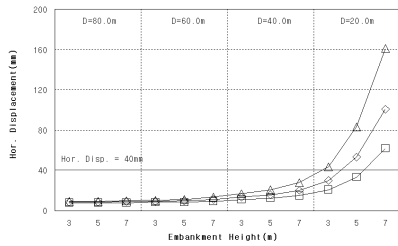


(a) Normalization by embankment Height 3.0m

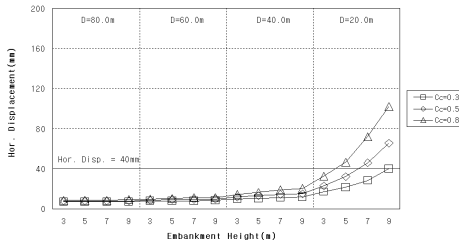


(b) Horizontal Displacement Change by Embankment Heights

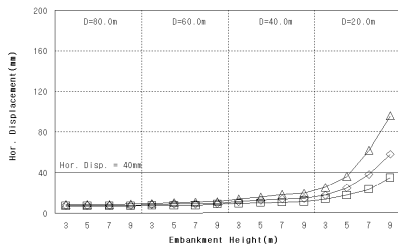
Fig. 8. Abutment Horizontal Displacements of Embankment Height



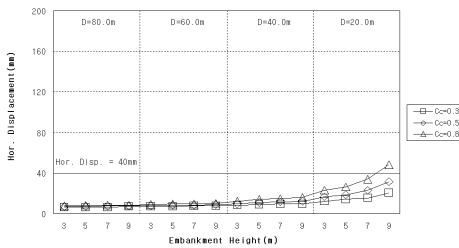
(a) Case 1 ($c=10.0\text{kN/m}^2$, $\phi=10.0^\circ$, $z=15.0\text{m}$)



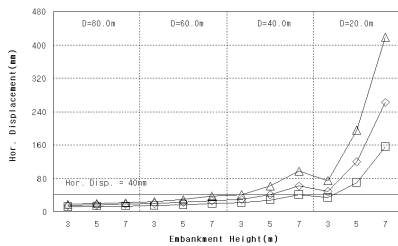
(b) Case 2 ($c=10.0\text{kN/m}^2$, $\phi=15.0^\circ$, $z=15.0\text{m}$)



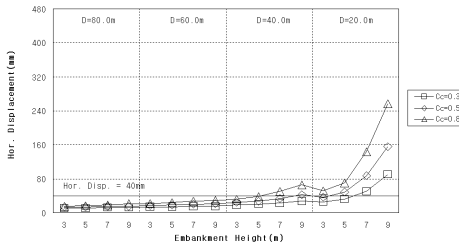
(c) Case 3 ($c=20.0\text{kN/m}^2$, $\phi=10.0^\circ$, $z=15.0\text{m}$)



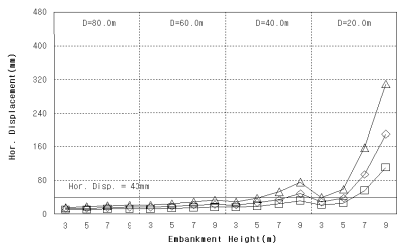
(d) Case 4 ($c=20.0\text{kN/m}^2$, $\phi=15.0^\circ$, $z=15.0\text{m}$)



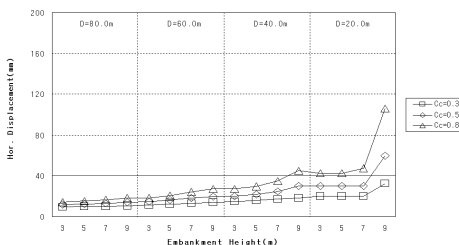
(e) Case 5 ($c=10.0\text{kN/m}^2$, $\phi=10.0^\circ$, $z=25.0\text{m}$)



(f) Case 6 ($c=10.0\text{kN/m}^2$, $\phi=15.0^\circ$, $z=25.0\text{m}$)



(g) Case 7 ($c=20.0\text{kN/m}^2$, $\phi=10.0^\circ$, $z=25.0\text{m}$)



(h) Case 8 ($c=20.0\text{kN/m}^2$, $\phi=10.0^\circ$, $z=25.0\text{m}$)

Fig. 9. Abutment Horizontal Displacements by Case

m와 25.0 m로 다른 case 1과 case5에 대한 성토높이별 상관식을 나타내었다. 연약 점토층의 강도가 $c=10.0 \text{ kN/m}^2$, $\phi=10.0^\circ$ 로 작은 case 1과 case 5는 성토를 9.0 m까지 할 수 없는 것으로 나타났다.

Figure 8(a)는 성토높이에 따른 발생 수평변위를 성토높이 3.0 m에 대하여 정규화한 것이고, Figure 8(b)는 그 상관관계를 이용하여 성토높이에 따른 교대 수평변위 변화를 나타낸 것으로 성토높이가 높아질수록 0.27배로 성토높이 3.0 m의 정규화에 의한 수평변위비가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 교대 수평변위 분석

Figure 9의 case 1 ~ case 8에 대한 해석 결과에서 알 수 있듯이 교대에서의 이격거리(d)에 따른 성토높이(h)에 대한 교대의 수평변위는 압축지수(C_c)가 클수록 크게 발생하고, 이격거리(d)가 멀수록 작게 발생하였다. 연약 점토층의 깊이가 15.0 m일 경우에는 교대 이격거리 20.0 m 이상에서의 성토에서는 성토높이 및 연약 점토층의 지반정수에 상관없이 수평변위가 40.0 mm 이하로 발생하였고, 연약 점토층의 깊이가 25.0 m일 경우는 교대 이격거리 40.0 m 이상에서 교대 수평변위가 40.0 mm 이하로 발생하였다.

또한 연약 점토층의 깊이가 15.0 m인 case 1, case 2, case 3, case 4는 성토에 따른 이격거리가 교대에 가까워질수록 교대에서 발생하는 수평변위가 계속적으로 증가하는 반면, 연약 점토층의 깊이가 25.0 m인 case 5, case 6, case 7, case 8은 40.0 m까지는 수평변위가 증가하다가 교대 이격거리가 20.0 m에서 성토높이가 낮은 3.0 m 또는 일부 경우의 5.0 m 까지 교대 이격거리 40.0 m의 최종 성토고에서의 발생하는 수평변위보다 작게 발생하였다. 이는 교대의 측방이동에 영향을

주는 요소로 연약 점토층의 특성과 성토하중, 교대 이격거리 뿐만 아니라 연약 점토층의 깊이에 따라 성토하중에 의해 발생하는 침하가 수평변위에 미치는 영향으로 연약 점토층이 깊어질수록 교대의 이격거리보다는 성토하중에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 그 이유를 파악할 수 있었다.

3.4 압축지수(C_c)에 따른 해석 결과

각 case에 대한 해석결과, 압축지수(C_c)가 증가하면 교대에서 발생하는 수평변위도 증가하는 경향이 나타났다. 3.1절의 교대 이격거리별 해석결과에서 이격거리(d)가 교대에서 멀수록 압축지수에 따른 변화는 직선적으로 변화하고, 교대에 가까워질수록 지수적인 변화를 나타내었다. 또한 3.2절 성토높이별 해석 결과에 의해 성토높이(h)에 따른 수평변위 변화도 압축지수가 크고, 교대에 가까워질수록 급격하게 크게 발생하는 거동형태를 나타내었다. Figure 10(a)와 같이 case 1 ~ case 8의 수평변위 해석 결과에서 압축지수 0.3일 때의 수평변위에 대하여 압축지수 0.5와 0.8의 수평변위를 정규화하면 압축지수 0.5일 때의 수평변위는 1.62, 압축지수 0.8일 때의 수평변위는 2.54 정도 압축지수 0.3일 때의 수평변위보다 크게 산정되었고, 압축지수 0.3에 의한 정규화에 대한 압축지수 변화에 따른 수평변위비가 3.21배로 변화하는 것을 Figure 10(b)에서 확인할 수 있다.

3.5 점착력(c) 및 내부마찰각(ϕ)에 따른 해석 결과

연약 점토층의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)에 따른 교대 수평변위 변화의 경향을 알아보기 위하여 동일한 해석조건에서 연약 점토층의 점착력과 내부마찰각을 증가시킨 경우를 비교한 것을 수평변위 감소변화비로 정의하여 비교하였다. Figure 11

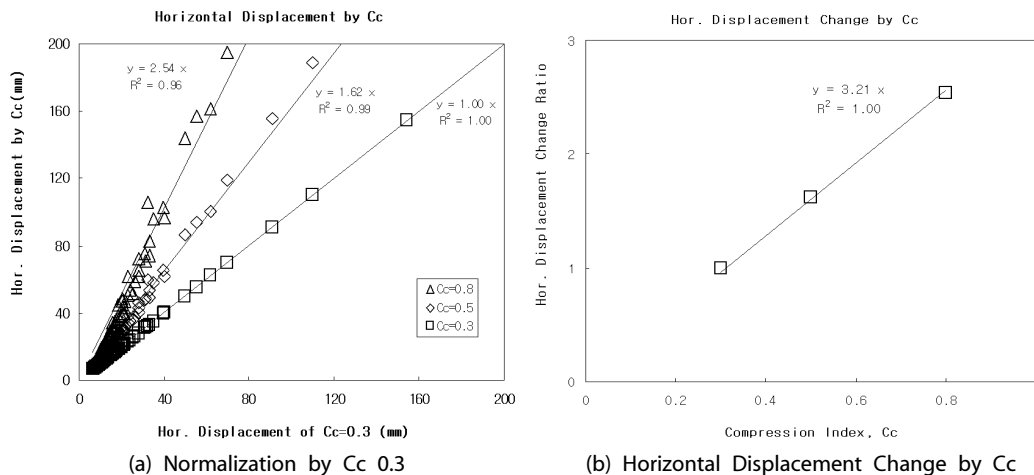
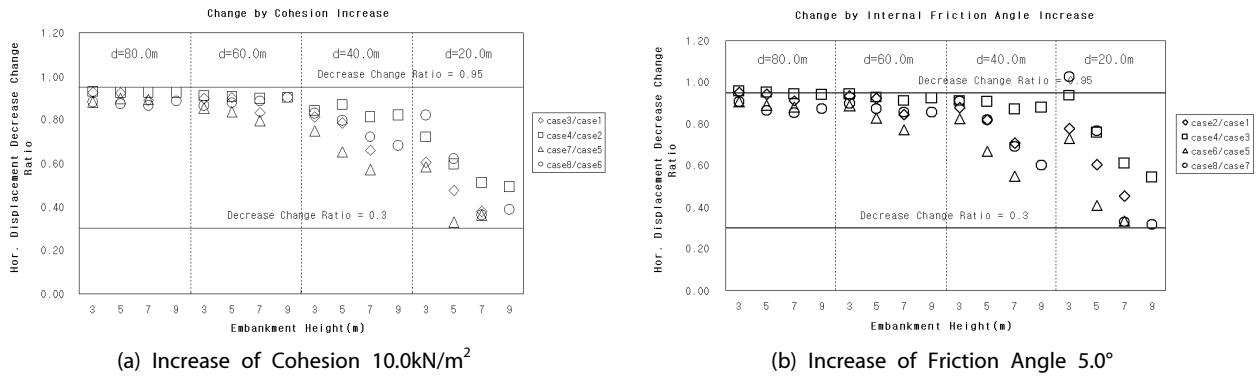


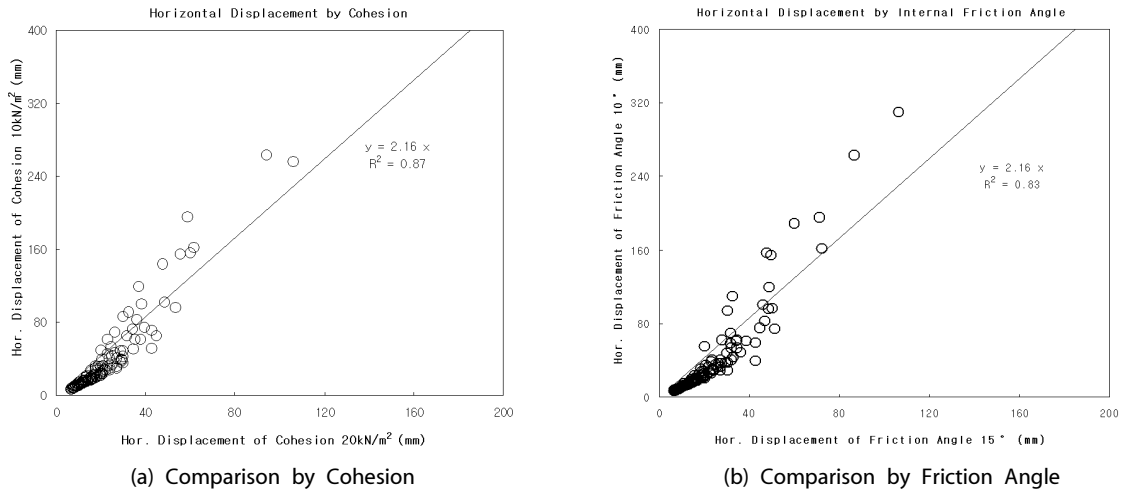
Fig. 10. Abutment Horizontal Displacements by Compression Index, C_c



(a) Increase of Cohesion 10.0kN/m²

(b) Increase of Friction Angle 5.0°

Fig. 11. Horizontal Displacement Decrease Change Ratio according to Soil Properties Increase



(a) Comparison by Cohesion

(b) Comparison by Friction Angle

Fig. 12. Abutment Horizontal Displacement by Soil Properties Changes

(a)는 점착력만을 10.0 kN/m² 증가시킨 경우를 비교한 것이고, Figure 11(b)는 내부마찰각을 5.0° 증가시킨 경우를 비교한 것이다. Figure 11에서 연약 점토층의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)이 증가함에 따라 교대의 수평변위는 0.30 ~ 0.95 정도의 비율로 줄어든 경향을 나타낸 것이다. 수평변위 감소변화비는 점착력과 내부마찰각이 증가함에 따라 이격거리(d), 성토높이(h)의 변화에 의해 다양하게 나타나지만, 대체적으로 이격거리가 가까워지고 성토높이가 높을수록 교대의 수평변위비 작아지는 경향을 나타내었다.

Figure 12은 점토층의 점착력과 내부마찰각에 변화에 대한 수평변위를 나타낸 결과로 Figure 12(a)에서 점착력이 10 kN/m² 줄어든 경우와 Figure 12(b)에서 내부마찰각이 5° 줄어든 경우에 교대 수평변위는 2.16배 늘어나는 경향을 보였다.

3.6 연약 점토층 깊이(z)에 따른 해석 결과

Figure 13(a)는 연약 점토층의 깊이(z) 증가에 따른 교대의

수평변위 변화 양상을 알아보기 위하여 동일한 해석조건에서 깊이만 15.0 m에서 25.0 m로 증가시킨 경우를 비교한 것을 수평변위 증가변화비로 정의하여 비교하였다. 비교 결과, 연약 점토층의 깊이가 증가할수록 교대의 수평변위는 1.5 ~ 3.0배로 증가하는 경향을 나타내었다. 수평변위 증가변화비는 성토높이(h)가 높을수록 증가하는 경향이 커지고, 이격거리가 교대에 가까워질수록 어느 정도의 이격거리까지는 증가하지만 그 이후에 성토부가 교대에 가까워질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서는 수평변위 증가변화비가 교대 이격거리 80.0 m, 60.0 m, 40.0 m까지는 증가하고 20.0 m에서는 40.0 m에 비해 같은 성토높이에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 성토부가 교대에 근접할수록 연약 점토층 깊이에 따른 영향보다 이격거리에 의해 영향이 더 크기 때문인 것으로 그 원인을 추정할 수 있다. Figure 13(b)는 점토층 깊이 15.0 m와 25.0 m의 수평변위를 비교한 것으로 점토층 깊이가 10.0 m 증가할 때 교대 수평변위는 2.40배 증가하는 것을 알 수 있다.

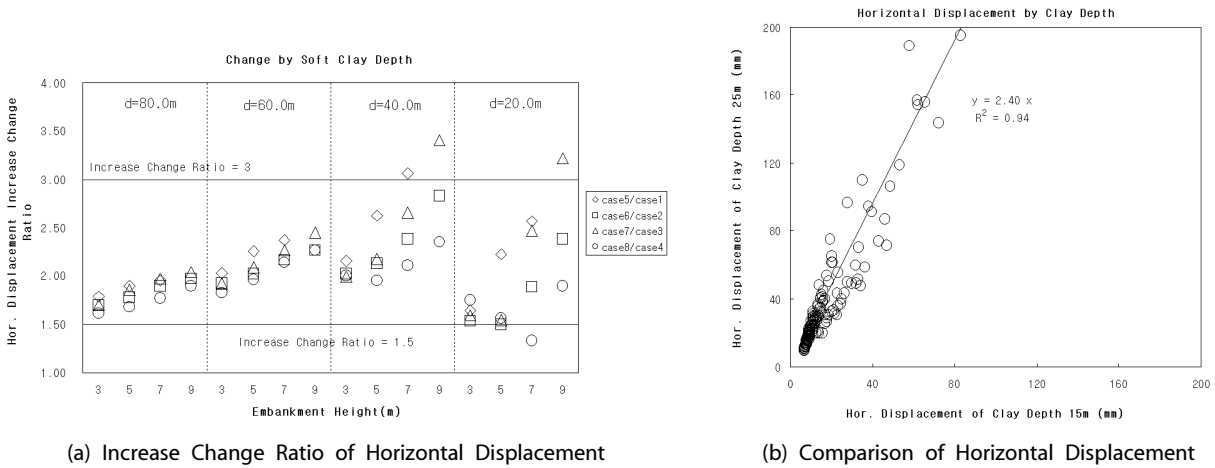


Fig. 13. Abutment Horizontal Displacement Change by increase of Soft Clay Depth 10.0m

4. 결론

본 연구에서는 연약 점토층의 깊이, 점착력과 내부마찰각, 성토높이, 교대에서의 성토부까지의 이격거리에 따른 교대의 수평변위 변화양상을 파악하기 위하여 수정 Cam-Clay 모델의 일종인 Soft Soil 모델을 이용하여 유한요소해석을 통한 압밀해석을 수행하였고, 해석결과에 의해 다양한 조건에서의 수평변위 경향을 검토하였으며, 상관식에 의해 교대 수평변위와 측방이동에 대한 영향범위, 즉 보강범위를 쉽게 산정하도록 하고자 하였다.

- (1) 교대에서의 이격거리별 연약지반 상의 성토에 따른 교대 수평변위는 이격거리가 멀수록 직선적으로 변화하는 양상을 보이다가 교대에 근접하여 성토가 이루어지면 지수적인 형태로 변화하였고, 성토가 교대에 가까워질수록 교대 수평변위와 이격거리는 $y=2408.59x^{-1.77}$ 의 거듭제곱의 관계를 나타내었다.
- (2) 성토높이별 교대 이격거리에 따른 교대 수평변위 결과 성토높이가 높아질수록 발생하는 교대의 수평변위는 커지고, 급격히 변하는 거듭제곱의 상관식이 나타났고, 성토높이에 따른 교대의 수평변위 변화는 연약 점토층의 깊이가 15.0 m 보다는 25.0 m 일 때가 결정계수 R^2 가 1.0에 근접하여 보다 정확한 상관식을 얻을 수 있었으며, 성토높이가 높아질수록 교대 수평변위는 0.27배씩 증가하는 관계를 나타내었다.
- (3) 연약 점토층의 깊이가 15.0 m일 경우에는 교대 이격거리 40.0 m 이상에서의 성토에서는 성토높이 및 연약 점토층의 지반정수에 상관없이 수평변위 40.0 mm이하로 발생하

였고, 연약 점토층의 깊이가 25.0 m일 경우는 교대 이격거리 60.0 m 이상에서 교대 수평변위 40.0 mm이하로 발생하였다.

- (4) 압축지수에 따른 교대의 수평변위는 교대에서의 이격거리에 멀어질수록 지수적인 변화에서 직선적인 변화를 보이고, 성토높이에 따라서는 거듭제곱의 변화를 나타내었으며, 압축지수가 커질수록 3.21배의 증가관계를 나타내었다.
- (5) 연약 점토층의 점착력과 내부마찰각을 10.0 kN/m^2 , 5.0° 증가하는 경우 교대 수평변위는 0.30 ~ 0.95 정도의 비율로 감소하였고, 수평변위 감소변화비는 점착력 및 내부마찰각의 증가에 따라 이격거리, 성토높이의 변화에 의해 다양하게 나타내지만, 대체적으로 이격거리가 가까워지고 성토높이가 높을수록 작아지는 경향을 나타내었다. 또한 점토층의 전단강도 감소에 따라 교대 수평변위는 2.16배 증가하는 관계를 나타내었다.
- (6) 연약 점토층의 깊이가 15.0 m에서 25.0 m로 10.0 m 증가함에 따라 교대의 수평변위는 1.5 ~ 3.0배로 증가하는 경향이 나타났다. 또한 수평변위 증가변화비는 성토높이가 높을수록 증가하는 경향이 커지고, 교대 이격거리 80.0 m, 60.0 m, 40.0 m로 교대에 가까워질수록 증가하였지만 20.0 m에서는 수평변위 증가변화비가 40.0 m의 경우와 비슷한 형태로 증가하지만, 교대 이격거리의 영향으로 인해 전체적으로 감소하는 경향이 나타났다. 점토층 깊이 증가에 따른 교대 수평변위는 2.40배로 증가하는 관계를 나타내었다.

References

Chai, J.C. and Bergade, D.T. (1993) Some Techniques for Finite

- Element Analysis of Embankments on Soft Ground, *Canadian Geotechnical K/J.*, Vol. 30, pp. 710-719.
- Franx and Boostatra, G.C. (1948) Horizontal pressure on pile foundation, *Proc. 2nd Int. conf. SMFE.*, Vol. 1, pp. 131-135.
- Hong, Won Pyo, Kwon, Oh Hyun, Han, Jung Geun, Cho, Sung Han(1994) A Study on Lateral Movement of Bridge Abutment on Soft Ground. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 10, NO. 4, pp. 54-65.
- Hong, Won Pyo, Lee, Kwang Wu, Cho, Sam Deok, Lee, Jae Ho(2007) Evaluation on Lateral Movement of Piled Bridge-Abutments on Soft Grounds under Lateral Flow. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, NO. 5C, pp. 305-312.
- Indrartna, B., Balasubramaniam, A.S. and Balachandran, S. (1992) Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, NO. 1, pp. 12-33.
- Kim, Dae Kyu(2005) Study on Lateral Flow of Soft soils by Field Measurement and Numerical Analysis, *Journal of Academia-Industrial Technology*, Vol. 6, No. 5, pp. 423-427.
- Jung, Jae Sung, Kim, Nam Ho, Lee, Jea Man, Kim Yeon Jung(1995) A Case Study on Ground Improvement Technique to Limit Lateral Movement of Pile Supported Bridge Abutments on Soft Soils. *KSCE Conference*, pp. 245-248.
- Kim, Sang Kyu, Shin, Seung Mok, Heo, Jung Hun(1991) Deformation Analysis of Improved Soft Ground Applying Cam-Clay Model. *KSCE Conference*, pp. 549-552.
- Kwon, Sung Jin, Lee Gwang Chan, Lee, Gang Il, Park Byeong ki(1995) A Numerical Analysis of Lateral Flow in Soft Foundation under Embankment. *KSCE Conference*, pp. 473-476.
- Peck, R.B. (1969) *Deep excavation and tunneling in soft ground proceedings of 7th Int., Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, State-of the art report, Mexico, pp. 225-290.
- Jung Jin Seob, Lee Mun Seob(1995) *Soil Mechanics of Limit State*, Shaeron.
- Lee, Hong Gi(2008) *An Analytical Study of the Reinforcement Length in the Protection Method of Lateral Movement*, a Doctoral Thesis, Changwon Univ.
- Sarah J. Ryde (1997) *The performance and backanalysis of embankments on soft marine clay*, Ph.D. Thesis, Bristol Univ.
- Korea Institute of Construction Technology(1999) *A Study on Consolidation Characteristics of Soft Ground(I · II)*, Korea Land Corp.
- Korea Land Corp.(1997) *A Study on Improvement Method and Settlement Measurement of Soft Ground*.