

실내모형실험을 통한 히빙 이론에 관한 연구 A Study on Heaving Phenomenon by Model Test

옥용관¹⁾, Yong-Kwan Oak, 임종철²⁾, Jong-Chul, Im, 권정근³⁾, Jeong-Keun Kwon

¹⁾부산대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Pusan Univ.

²⁾부산대학교 공과대학 토목공학과 정교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan Univ.

³⁾부산대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Doctor Course, Dept. of Civil Engineering, Pusan Univ.

개요(SYNOPSIS) : In this paper, heaving phenomenon is analyzed by laboratory tests. A laboratory test is consist of building soft clay foundation in plane-strain soil tank, construction of retaining wall, and excavation work. And range of shear strain, and destruction shape about soft clay foundation is compared, and analyzed with results of proposal formula. Using this study, safety factor is suggested for heaving phenomenon in the construction of wall on the soft clay. Actual theory is suggested by this suggested safety factor. There are various proposal formula for heaving phenomenon. For example, Terzaghi & Peck, Tschebotarioff, Bjerrum & Eide(Experience formula) and so on. Terzaghi & Peck's proposal formula is chosen, compared with laboratory test's result and analyzed in this study. A soft clay used in study is assumed homogeneous. A Depth of foundation is enough to observe shear strain by heaving phenomenon. Retaining wall is enough hard not to have vertical displacement.

주요어(Key words) : Heaving Phenomenon, Laboratory Test, Terzaghi, Peck, Safety Factor

1. 서론

본 연구는 평면변형을 토조를 이용, 연약점토 지반을 조성하고 흙막이 벽체 시공 및 굴착 공사를 모사한 실내모형실험을 통해 히빙 현상을 분석한다. 또한, 실내모형실험에 이용되는 지반에 대해 기 제안된 방법으로 전단파괴의 영향범위, 파괴 형태를 검토하고 비교, 분석하고자 한다. 이를 통해 연약점토 지반 상의 흙막이 공사 진행 시, 발생하는 히빙 현상에 관한 안전계수를 제안하여 실제적인 이론적 제안 기준을 마련하고자 한다. 히빙 현상에 대한 제안식으로는 Terzaghi & Peck 방법, 경험적인 방법인 'Bjerrum & Eide' 방법, Tschebotarioff 방법, 구 규준식(일본 건축기초 설계기준에 의한 방법), 및 수정식(국내 설계 기준)에 의한 방법 등이 있으며, 본 연구에서는 Terzaghi & Peck 방법을 선택하여, 비교, 분석하였다.

본 연구에 이용되는 연약점토 지반은 등방성 균질이라 가정하였고, 심도가 히빙 활동면보다 충분히 깊다고 가정하였으며, 흙막이 벽체는 강성으로 수평변위가 없다고 설정하여 수행하였다.

2. 종래연구

2.1 개요

‘히빙 현상(Heaving Phenomenon)’이란, 흙막이 굴착 공사 진행 시 연약한 점성토지반의 굴착으로 인한 하중제거 효과로 굴착 배면의 흙의 중량이 굴착면 이하의 극한지지력보다 크게 되어 굴착 저면의 흙이 활동전단파괴를 일으켜, 굴착 저면이 부풀어 오르는 현상을 말한다.

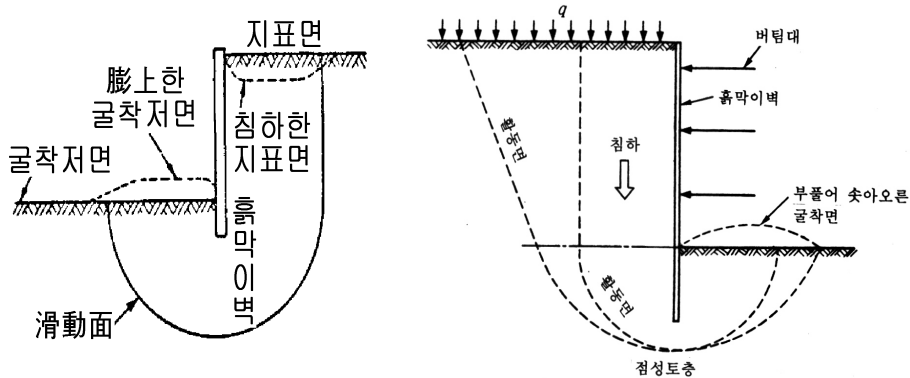


그림 2.1 히빙 현상(Heaving Phenomenon) 모식도

2.2 굴착에 따른 지반의 변화

굴착 주변 지반의 변형은 굴착에 따라 지하수위의 저하에 따른 압밀과 압축, 흙막이말뚝 뒤채움 상태, 지보공 및 흙막이말뚝의 철거방법, 시공속도, 굴착순서 등의 영향을 받는다. 따라서 주변 지반의 변형이 문제가 되는 경우에는 설계 계획 시에 현실의 시공조건을 충분히 파악하여 이것을 설계에 반영시키는 것이 필요하고 동시에 설계의 취지에 적합한 시공을 하여야 한다. 그림 2.3은 굴착에 따른 주변지반의 변형상태를 나타낸 것이다. 흙막이 벽체 배면 지반은 흙막이 벽체가 굴착면 측으로 변형하여 지표면에 침하가 발생하고, 굴착면 측 지반은 흙막이 벽체 근입부가 굴착면 측으로 밀려 굴착 저면에 용기 현상이 발생한다. 굴착에 따른 지반의 응력변화를 나타내면 그림 2.4와 같다. 굴착 배면 지반은 연직방향의 상재하중의 변화 없이, 지반 내 수평응력이 감소한다. 굴착 저면 이하의 지반은 상재하중이 굴착과 동시에 점차적으로 감소하게 되고 흙막이 벽체의 근입부가 굴착면 측으로 변형되어 굴착 저부가 용기되는 것에 의해 수평방향으로 압축응력을 받는 상태가 된다. 이 응력변화의 정도가 굴착에 따른 주변지반 변형의 크기를 좌우한다.

흙막이 벽체 변형에 따른 굴착배면지반의 침하량을 예측하는 방법으로서는 현장계측치를 토대로 한 이론 및 경험적 방법과 흙막이구조물과 주변지반을 일체로 하여 유한요소로 해석하는 수치계산 등이 있다. 그러나 굴착배면지반의 침하는 토질특성, 흙막이공의 강성, 굴착 규모, 시공기술 등에 크게 영향을 받으므로 정량적으로 규명하기가 무척 힘들다.

Peck(1969)은 H-말뚝 흙막이 벽이나 널말뚝 흙막이 벽이 설치된 지반의 굴착으로 인하여 발생된 지반침하량에 대하여 많은 실측결과를 토대로 배면지반의 침하특성을 그림 2.4와 같이 나타내었다. 굴착현장은 연약한 지반으로부터 사질토 지반까지 굴착 깊이가 6~23m이 포함되어 있지만, 이것들을 토질이나 시공 상태로 구분하여 세 가지 영역으로 나타내었다.

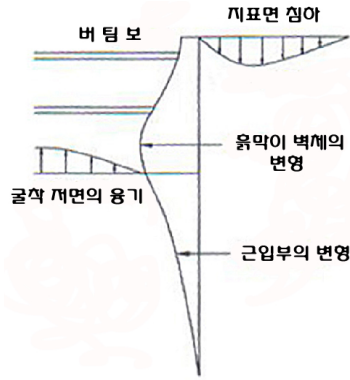


그림 2.2 주변 지반의 변형상태

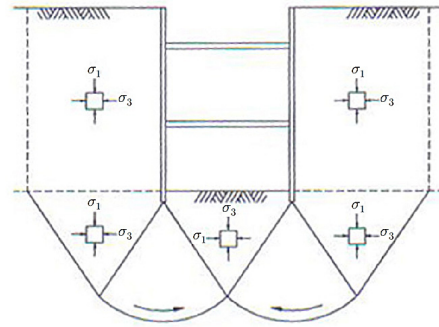


그림 2.3 굴착에 따른 지반의 응력 변화

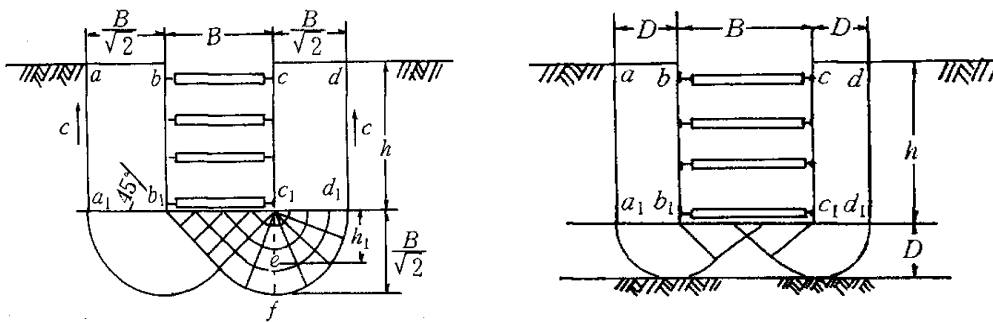
2.3 히빙 현상 검토식

Terzaghi & Peck 제안식은 그림 4와 같이 활동면이 원형면과 평면으로 구성되었다고 가정하고 점토지반의 극한지지력과 터파기 저면보다 위쪽에 있는 배면측 지반의 재하하중과의 균형으로부터 히빙에 관한 안정검토를 한다.

그림 2.4에서 dd_1 면에는 점착력 c 가 작용하므로, $c_1 d_1$ 면에 작용하는 상재하중 P 는 식 2.1와 같다.

$$P = \frac{\gamma HB}{\sqrt{2}} - cH \quad (\text{식 2.1})$$

여기서, γ = 흙의 단위 체적중량, H = 굴착깊이
 B = 굴착면의 폭, c = 흙의 점착력



(a) 단단한 지층이 깊은 경우

(b) 단단한 지층이 얇은 경우

그림 2.4 히빙 현상에 관한 Terzaghi & Peck의 방법

따라서, 재하중 강도 P_v 는 식 2.2과 같다.

$$P_v = \gamma H - \frac{\sqrt{2}cH}{B} \quad (\text{식 2.2})$$

또한, Terzaghi에 의한 점토의 극한지지력 q_d 는 식 2.3과 같다.

$$q_d = 5.7c \quad (\text{식 2.3})$$

여기서, 히빙 현상에 대한 안전율 F_s 은 재하중 강도에 대한 극한지지력의 비로 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{q_d}{P_v} = \frac{5.7c}{\gamma H - \frac{\sqrt{2}cH}{B}} \quad (\text{식 2.4})$$

단단한 지반이 굴착면에 가깝게 있는 경우에는 활동면이 그림 2.4(b)와 같이 단단한 지반에 접해서 발생한다고 가정하고 굴착면에서 이 단단한 지반까지의 거리를 D 라고 하면 위 식에서 $\frac{B}{\sqrt{2}}$ 대신 D 를 대입하여 F_s 는 식 2.5와 같이 된다.

$$F_s = \frac{5.7c}{\gamma H - \frac{cH}{D}} \quad (\text{식 2.5})$$

Terzaghi & Peck이 식 2.5를 통해 제안한 히빙 현상에 대한 최소안전율은 1.5이다.

3. 실내모형실험

평면변형율(Plane-strain) 토조에 연약점토 지반을 조성하고 흙막이 벽체를 시공하여 굴착을 진행하는, 실제 현장 조건을 모사한 히빙 실내모형실험을 실시하고자 한다. 지반은 등방성 균질 재료로 가정하고, 지반 하부에 단단한 지층이 없는 것으로 가정한다. 지반 심도는 히빙의 활동면보다 충분히 깊게 산정하였다. 흙막이 벽체는 수평 변위가 없는 강성벽체로 정하였다. 벽체 근입심도는 굴착심도와 동일하게 설정하였다. 목표 굴착심도까지 일시굴착을 실시한 후, 시간에 따라 나타나는 지반의 전단파괴 양상과 변위를 사진촬영과 기록으로 계측한다. Terzaghi & Peck 방법에 따라, 굴착 배면의 활동전단파괴 영향범위와 굴착 지반의 파괴형상을 관찰한다. 실험 결과는 사진촬영을 하여 데이터의 사진 관독을 통하여 Terzaghi & Peck 방법을 통한 계산값과 비교·분석하고자 한다.

3.1 실내모형실험 준비

실내모형실험에 이용되는 점토의 공학적 성질은 표 3.1과 같다.

<표 3.1> 모델링 지반 조성용 해성점토의 지반공학적 성질

물성종류	기호	물성치	비고
비중	G_s	2.67	
함수비	w	95 ~ 99(%)	
액성한계	w_L	53.39(%)	
소성지수	PI	25.65(%)	
압축지수	C_c	0.605	
압밀계수	c_v	$3.32 \times 10^{-4} (cm^2/sec)$	

실내모형실험에 이용되는 토조는 $400(H) \times 1200(L) \times 250(W)mm$ ($V = 0.12m^3$)이며, 토조의 넓은 양면은 투명 아크릴 판으로 제작하여 실험 단계에 따른 지반의 거동을 사진 관독을 통하여 관측할 수 있도록 하였다. 토조가 평면변형률 상태를 유지할 수 있도록, 강재를 이용하여 프레임을 제작하였다. 실험에 이용하게 되는 평면변형률 토조는 그림 3.1과 같다.

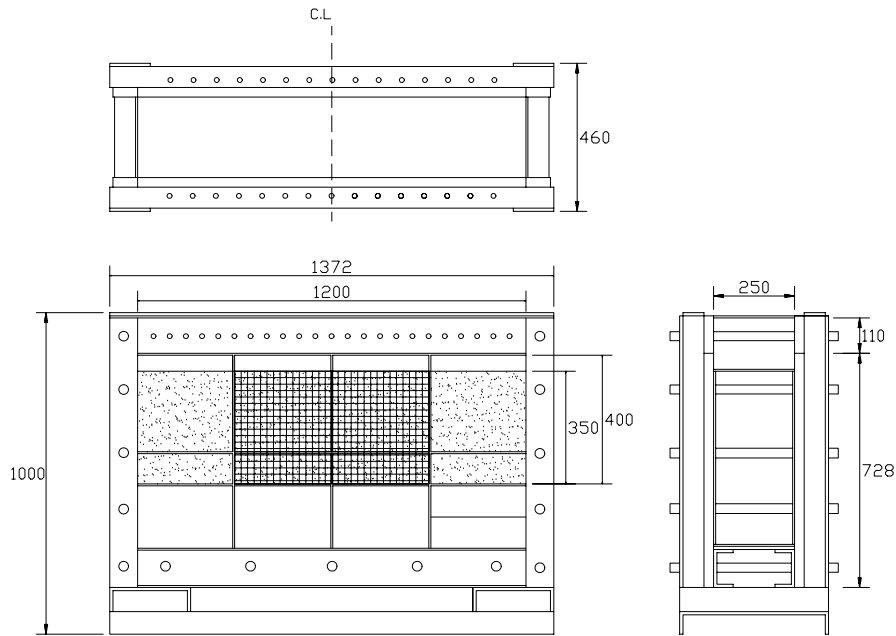


그림 3.1 평면변형률 토조

실내모형실험에 사용되는 흙막이 벽체는 흙막이 벽체와 벽체 시공을 위한 가이드 판으로 구성되어있으며, 가이드 판에 다양한 조건의 벽체 간격 B 와 굴착 깊이 H 에 따라, 흙막이 벽체를 고정시킬 수 있는 홈을 뚫으며, 실험에 쓰이지 않는 홈은 같은 아크릴 재질의 막대를 삽입하여 평면변형률 상태를 유지할 수 있도록 하였다.

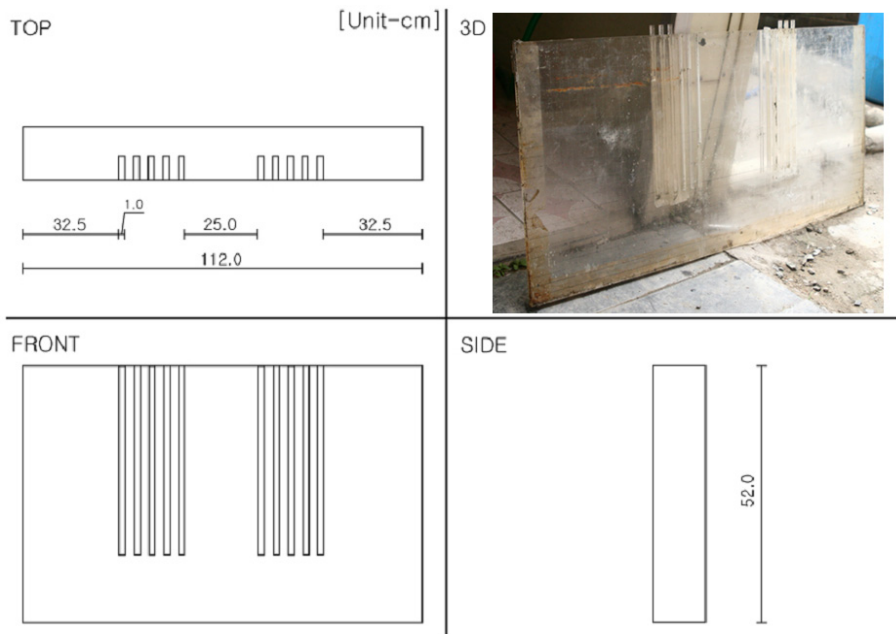


그림 3.2 흙막이 벽체 시공 가이드 판

3.2 실내모형실험 과정

① 흙막이 벽체 가이드 판과 타겟 설치 : 흙막이 벽체 가이드 판 내측 전면에 지반과의 마찰을 줄이기 위해 얇고 균일한 두께로 실리콘 그리스(Silicone grease)를 도포한다. 이는 지반 뿐 아니라, 가이드 판과 타겟 사이의 마찰을 줄이기 위한 목적으로도 쓰인다. 균질하게 도포된 실리콘 그리스(Silicone grease) 위에 벽체 배면을 따라, 1cm 간격으로 타겟을 설치한다. 평면변형률(Plane strain) 토조 내측에 흙막이 벽체 가이드 판과 흙막이 벽체를 설치한다.

② 실내모형실험 지반 조성 : 95%의 일정한 함수비를 가지는 균질한 지반을 조성하기 위하여 교반기를 이용, 시료를 교반한다. 토조 전면에 걸쳐 일정한 레벨을 맞추면서 지반을 조성한다. 이 때, 가이드 판에 부착된 타겟이 점토에 밀려 이동되지 않도록 유의한다. 지표 레벨을 동일하게 하여 표면을 고르게 한 후, 이를 정도 안정화 기간을 가진다. 안정화 기간 동안, 균질한 지반을 위해 표면의 함수비를 유지한다.

③ 변위계(Dial gage) 설치 : 지반 표면에 변위계를 설치한다. 변위계가 높은 함수비를 가지는 지표의 침하를 정확하게 계측할 수 있도록 가벼운 불투수성 보조 장치를 설치한다.



그림 3.3 전단파괴 후의 굴착 저면



그림 3.4 상재하중과 변위계 설치

④ 초기값 계측 : 굴착 직전의 지반 상태를 파악하고, 변위계를 제로(zero) 세팅한다.

⑤ 굴착 : 굴착 단면을 레벨 맞추면서 굴착한다. 굴착 완료 직후, 지표 침하량 계측과 사진 촬영을 실시한다.

⑥ 상재하중 재하 및 변위계(Dial gage) 재설치 : 지표 침하량 계측을 통해 지표 침하량이 수렴되면, 상재하중을 재하하고 변위계를 재설치한 뒤, 1mm 침하할 때마다 사진 촬영을 한다. 지반이 전단파괴가 발생하면, 실험을 종료한다.

4. 실내모형실험 결과

Terzaghi & Peck 검토식을 통해 흙막이 벽체 간격 B 에 따라 산정한 전단파괴 영향범위는 표 4.1과 같다.

<표 4.1> Terzaghi & Peck 검토식으로 산정한 전단파괴 영향범위

CASE	벽체간격 B	벽체에서 활동면까지 거리 $\frac{B}{\sqrt{2}}$
HA-1	25cm	17.7cm
HA-2	30cm	21.2cm
HA-3	35cm	24.7cm
HA-4	40cm	28.3cm
HA-5	45cm	31.8cm

원지반 상태를 모사한 함수비 95% 모델링 지반의 실내실험결과로 얻은 굴착 배면의 변위를 나타내었다.

① 벽체 간격 25cm

벽체 간격이 25cm일 때, 검토식을 이용한 벽체에서 활동전단 파괴면 간 거리 $\frac{B}{\sqrt{2}}$ 는 17.7cm이다. 실내모형시험을 통해 얻은 벽체와 전단파괴 활동면 간 거리는 17.5cm로 검토식 결과와 거의 일치했다.

<표 4.2> 실내실험으로 얻은 전단파괴 변위 (벽체 간격 25cm)

벽체로부터 심도	47.5	42.5	37.5	32.5	27.5	22.5	17.5	12.5	7.5	2.5
0	8.8	9.4	9.8	10.1	10.5	11.1	11.7	10.9	10.6	9.7
5	8.5	9.1	9.3	9.6	9.7	10.6	10.9	10.3	9.8	9.2
10	8.1	8.7	8.8	9.0	9.2	10.2	10.3	9.5	9.1	8.6
15	7.6	8.1	8.4	8.8	9.0	9.4	9.6	9.1	8.6	8.1
20	7.2	7.6	8.1	8.5	8.6	8.8	9.2	8.7	8.2	7.8
25	6.9	7.3	7.4	7.8	8.1	8.6	8.7	8.4	7.9	7.5
30	6.6	6.9	7.1	7.5	7.7	7.9	8.3	8.1	7.6	7.0
35	6.4	6.5	6.7	7.0	7.3	7.4	7.8	7.5	7.1	6.8
40	6.0	6.4	6.6	6.8	7.1	7.4	7.5	7.3	6.8	6.5
45	5.8	6.0	6.1	6.5	6.7	7.1	7.2	6.9	6.6	6.2

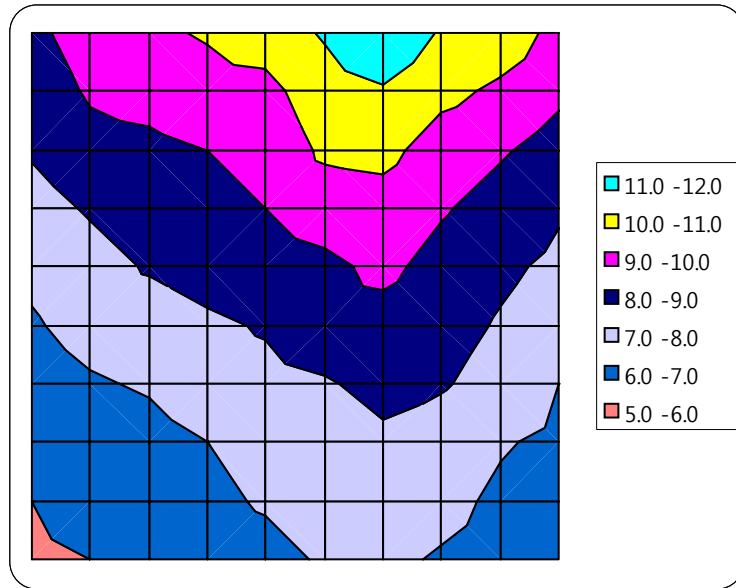


그림 4.1 굴착 배면 전단파괴 영향범위(벽체 간격 25cm)

② 벽체 간격 30cm

벽체 간격이 30cm일 때, 검토식으로 산정한 벽체~활동전단 파괴면 거리 $\frac{B}{\sqrt{2}}$ 는 21.2cm, 실내시험 결과는 20.5cm로 거의 유사하였다.

<표 4.3> 실내시험으로 얻은 전단파괴 변위 (벽체 간격 30cm)

벽체로부터 심도	45	40	35	30	25	20	15	10	5
0	9.7	10.4	11.0	11.5	12.1	12.5	12.0	11.6	11.0
5	9.2	9.8	10.5	10.8	11.7	11.9	11.5	11.0	10.5
10	8.4	9.5	10.2	10.4	11.2	11.5	11.1	10.6	10.1
15	8.1	9.2	9.7	9.9	10.8	11.0	10.6	10.1	9.7
20	7.7	8.8	9.2	9.6	10.3	10.6	10.0	9.7	9.2
25	7.4	8.3	8.6	9.1	9.8	10.1	9.7	9.3	8.7
30	6.9	7.9	8.1	8.7	9.4	9.6	9.2	8.8	8.3
35	6.4	7.5	7.6	8.1	9.0	9.4	8.9	8.2	7.7
40	6.1	7.0	7.2	7.8	8.5	9.0	8.3	7.9	7.2
45	5.8	6.5	6.8	7.2	8.1	8.5	7.9	7.3	6.8

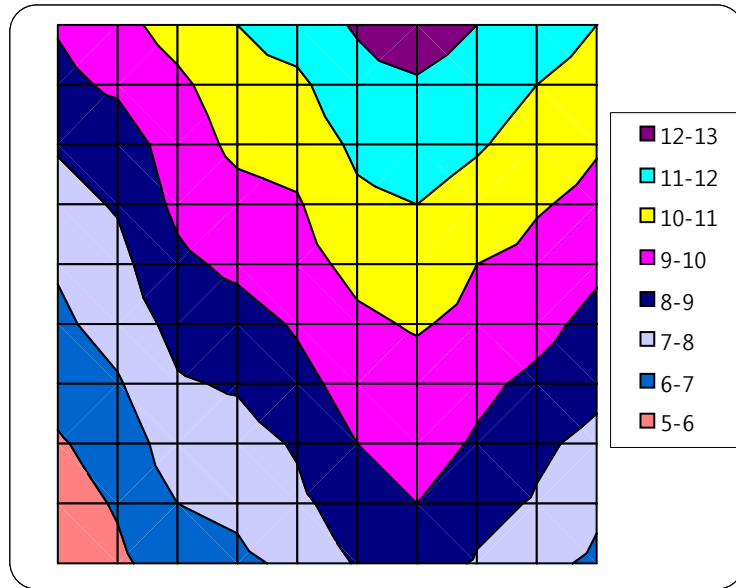


그림 4.2 굴착 배면 전단파괴 영향범위(벽체 간격 30cm)

③ 벽체 간격 35cm

검토식으로 산정한 거리 $\frac{B}{\sqrt{2}}$ 는 24.7cm, 실내시험 결과는 22cm로 거의 유사하였다.

<표 4.4> 실내시험으로 얻은 전단파괴 변위 (벽체 간격 35cm)

벽체로부터 심도 거리	42.5	37.5	32.5	27.5	22.5	17.5	12.5	7.5	2.5
0	10.6	11.0	11.5	11.9	12.3	12.0	11.4	11.1	10.6
5	10.1	10.7	11.2	11.5	12.1	11.5	10.9	10.6	10.1
10	9.7	10.2	10.7	11.0	11.4	11.1	10.6	10.1	9.6
15	9.2	9.7	10.3	10.7	10.9	10.6	10.1	9.6	9.1
20	8.9	9.3	9.8	10.3	10.5	10.2	9.7	9.2	8.7
25	8.4	9.0	9.6	10.0	10.3	9.8	9.3	8.7	8.2
30	8.1	8.6	9.1	9.6	9.9	9.2	8.9	8.2	7.9
35	7.6	8.1	8.7	9.3	9.6	8.9	8.4	7.8	7.5
40	7.1	7.6	8.2	8.9	9.1	8.5	7.9	7.4	7.1
45	6.8	7.2	7.9	8.4	8.8	8.0	7.5	6.9	6.5

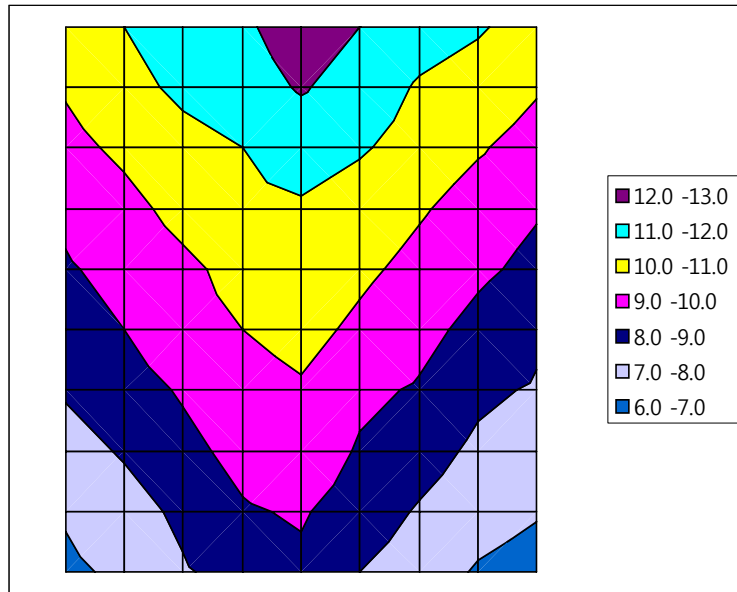


그림 4.3 굴착 배면 전단파괴 영향범위(벽체 간격 35cm)

④ 벽체 간격 40cm

검토식으로 산정한 거리 $\frac{B}{\sqrt{2}}$ 는 28.3cm, 실내시험 결과는 28cm 정도로 거의 유사하였다.

<표 4.5> 실내시험으로 얻은 전단파괴 변위 (벽체 간격 40cm)

벽체로부터 심도	40	35	30	25	20	15	10	5
0	11.8	12.4	12.8	12.6	12.0	11.4	10.9	10.5
5	11.2	12.0	12.5	12.2	11.7	10.9	10.4	10.1
10	10.7	11.7	12.1	11.9	11.4	10.4	9.9	9.7
15	10.3	11.4	11.8	11.6	11.0	10.0	9.6	9.2
20	9.8	11.0	11.4	11.1	10.7	9.7	9.2	8.9
25	9.2	10.5	10.9	10.6	10.2	9.3	8.9	8.3
30	8.5	10.1	10.5	10.3	9.9	8.7	8.5	7.8
35	8.0	9.7	10.0	9.9	9.3	8.2	8.0	7.4
40	7.4	9.2	9.7	9.4	8.9	8.0	7.5	7.0
45	7.1	9.0	9.3	9.1	8.5	7.6	6.9	6.5

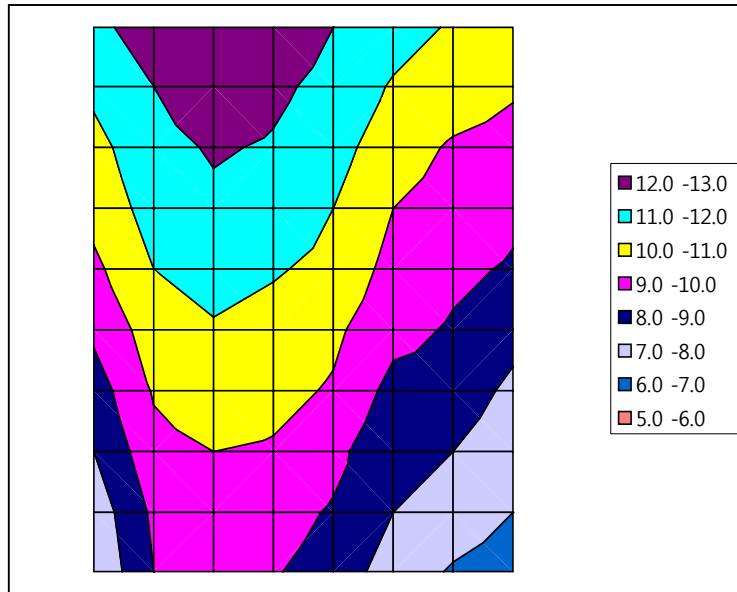


그림 4.4 굴착 배면 전단파괴 영향범위(벽체 간격 40cm)

⑤ 벽체 간격 45cm

검토식으로 산정한 거리 $\frac{B}{\sqrt{2}}$ 는 31.8cm, 실내시험 결과는 32.5cm 정도로 거의 유사하였다.

<표 4.6> 실내시험으로 얻은 전단파괴 변위 (벽체 간격 45cm)

벽체로부터 심도	37.5	32.5	27.5	22.5	17.5	12.5	7.5	2.5
0	12.5	13.4	12.8	12.5	12.1	11.8	11.6	11.1
5	12.1	12.9	12.4	12.1	11.8	11.4	11.1	10.8
10	11.7	12.5	12.1	11.7	11.2	11.0	10.7	10.4
15	11.4	12.1	11.8	11.3	10.8	10.6	10.3	10.0
20	10.9	11.7	11.5	10.9	10.5	10.1	9.8	9.5
25	10.5	11.3	11.1	10.6	10.3	9.8	9.2	9.1
30	10.1	10.8	10.6	10.2	9.9	9.3	8.7	8.6
35	9.7	10.4	10.1	9.8	9.4	8.9	8.3	8.1
40	9.3	9.9	9.6	9.3	9.1	8.5	8.0	7.6
45	8.9	9.5	9.1	9.0	8.7	8.2	7.7	7.2

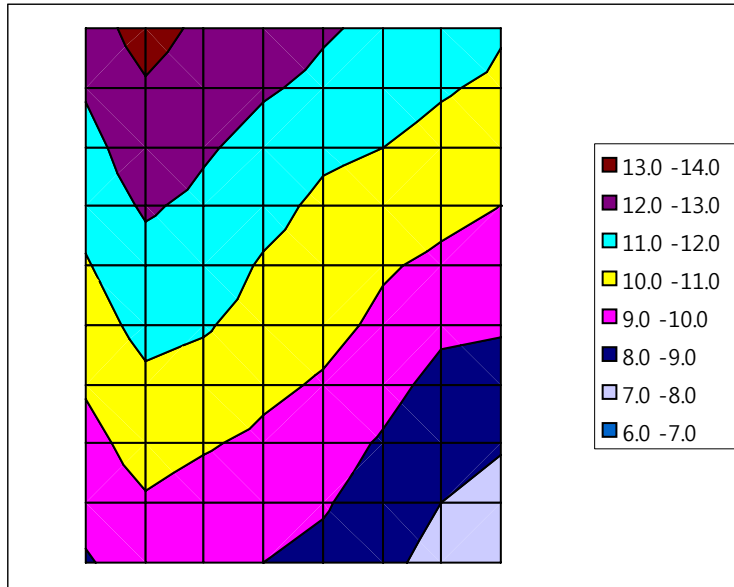


그림 4.5 굴착 배면 전단파괴 영향범위(벽체 간격 45cm)

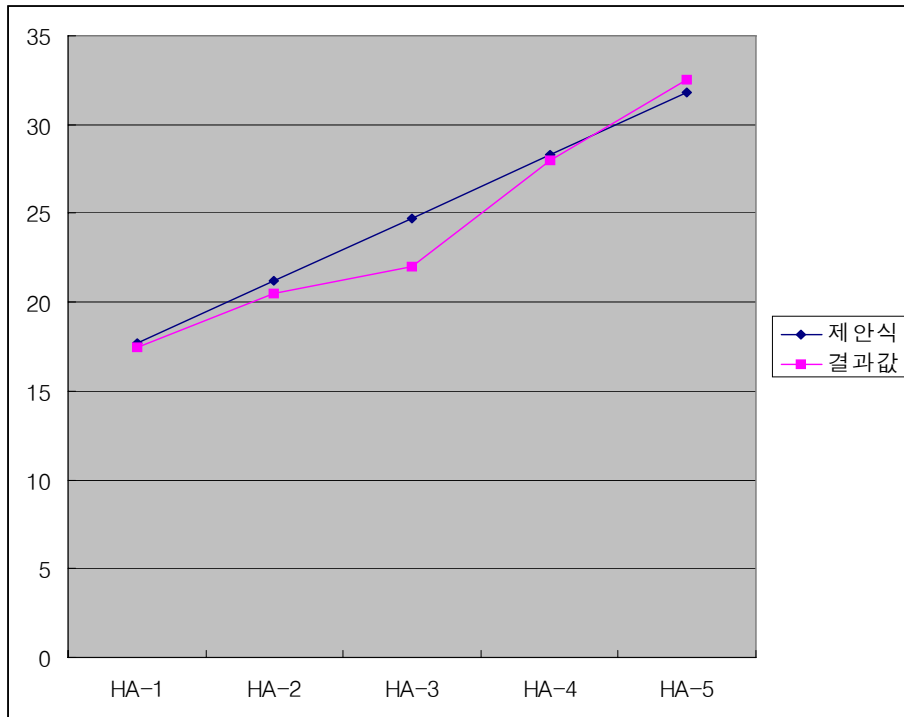
5. 결론

실내실험 결과값과 Terzaghi & Peck 제안식으로 계산된 활동폭 및 파괴양상을 비교하면 전체적으로 유사한 형태를 띠었다. 이는 Terzaghi & Peck 제안식이 폭 B 를 제어요소로 할 때, 일정한 안전율을 얻을 수 있는, 정확한 식이 된다는 의미이다. 전제조건으로 언급했던 벽체의 강성 및 근입심도와 굴착심도가 제한적인 조건이지만, 해당 조건에서 Terzaghi & Peck 식은 전단파괴 활동폭 B 에 대해 신뢰도 높은 결과값을 산출해준다는 것을 보여준다.

결과적으로 자연상태 함수비에서 해당 점토가 상재하중 등의 이유로 활동전단파괴가 발생하게 된다면, 이는 Terzaghi & Peck 식을 통해 충분히 예측할 수 있으며, 이에 대한 대책을 강구할 수 있게 된다.

<표 5.1> 제안식과 실험결과값의 비교

CASE	벽체간격 B	제안식의 활동폭	실험결과값	비 고
HA-1	25cm	17.7cm	17.5	
HA-2	30cm	21.2cm	20.5	
HA-3	35cm	24.7cm	22	
HA-4	40cm	28.3cm	28	
HA-5	45cm	31.8cm	32.5	



Terzaghi & Peck 식을 이용하여 충분한 신뢰도의 안전율을 구할 수 있으며, 이를 토대로 히빙 현상에 대해 합당한 대처방안을 설계할 수 있다.