

## 모형토조 실험을 이용한 연약지반내 중간모래층이 호안제방하부 강제치환 깊이에 미치는 영향 연구

### Model Test on the Effect of the Depth of Revetment by Inter Sand Layer in Soft Ground

정형식<sup>1)</sup>, Hyung-Sik Chung, 방창국<sup>2)</sup>, Chang-Kug Bang, 이용준<sup>3)</sup>, Yong-Jun Lee

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 대우교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hanyang

<sup>2)</sup> 한국전력기술(주) 토목기술처 책임기술원, Senior Engineer, Dept' of Civil Engineer, KOPEC

<sup>3)</sup> 포스코 건설(주), 기술연구소 차장, Deputy General Manager, POSCO E&C

**SYNOPSIS :** In this paper, the effect on the forced replacement depth of the revetment in soft soil with inter sand layer is analyzed by model test. In the result, the forced replacement occur in 60 second from filling the embankment material. The shape of the forced replacement depth is like to punching shape. Then, in case of thin inter sand layer and near the embankment, the forced replacement depth of inter sand layer case is more than only clayed soil case.

**Keyword :** Force replacement depth, Inter sand layer, Model test

## 1. 서론

연약지반상에 호안 제방축조는 간편하고 경제적인 강제치환 공법을 주로 사용되고 있는데, 강제치환공법은 성토 제방하중에 의한 연약지반내 강제치환을 유발시켜 제방하부에 양질의 사석재료로 치환하는 공법이다. 따라서 연약지반상에 호안 제방축조시 제방하부 강제치환 깊이는 제방의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다.

제방하부 강제치환 깊이 산정에 주로 적용하는 방법은 성토 제방하중과 비배수 전단강도 증분율을 고려한 제방하부 실트질 점토지반의 지지력을 고려하고 있다. 그러나 해성퇴적층의 층후 특성에 따라 연약지반내 중간 모래층 또는 점토질 실트층이 있는 경우가 있으며, 이와 같은 중간 모래층 또는 점토질 실트층은 제방하부 연약지반의 지지력에 영향을 미치게 되어 제방하부의 강제치환 깊이에 영향을 주게 된다.

본 논문에서는 실내 모형실험을 통해 중간 모래층이 있는 연약지반내 강제치환 깊이에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

## 2. 치환 깊이 산정

정규압밀상태인 연약 점토지반내 제방하부 강제치환 깊이는 성토 제방하중과 심도별 비배수 전단강도 증분율을 고려한 제방하부 연약지반의 지지력에 의해 다음 식(1)과 같이 산정하고 있다(그림 1 참조).

$$q_{ult} = N_c c_z + \gamma_2 D_z + \gamma_3 \frac{D_z}{6} \quad (1)$$

- $N_c$  : 지지력계수
- $c_0$  : 연약 지반표면에서의 점착력
- $\gamma_2$  : 연약지반 단위중량
- $\gamma_3$  : 용기부의 단위중량
- $D_z$  : 치환깊이
- $c_z$  : 제방하부 접지면에서의 비배수 전단강도

지중응력 영향계수를 고려한 사석제방하부 접지면에서 작용하는 제방성토 하중은 다음 식(2)과 같다.

$$P = \lambda \gamma_1 h_0 + \gamma'_1 D_z \quad (2)$$

- $\lambda$  : 지중응력 영향계수
- $h_0$  : 제방 높이
- $\gamma_1$  : 제방의 습윤단위중량
- $\gamma'_1$  : 제방의 수중단위중량

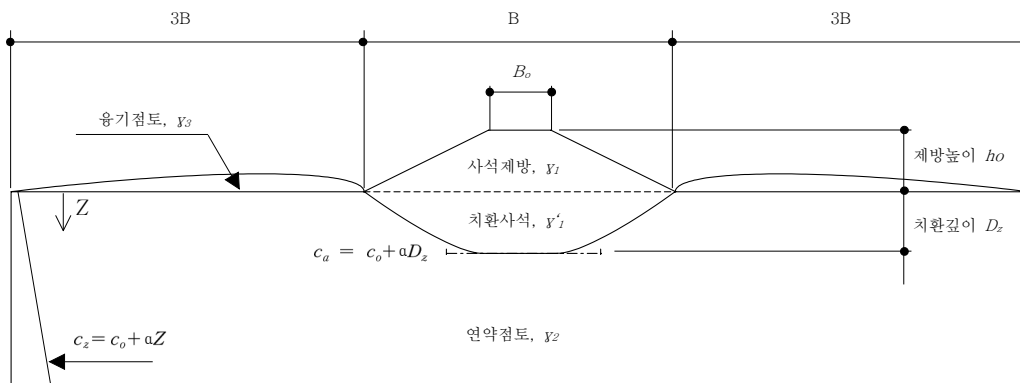


그림 1. 제방하부 강제치환 개요도

일반적으로 강제치환 깊이를 산정하기 위해 식(1)과 식(2)의 대소 비교를 통한 반복산정법으로 상부 성토하중과 지지력이 평형을 이루는 강제치환 깊이를 산정한다.

### 3. 모형토조 실험

표 1. 중간모래층 영향을 분석하기 위한 모형토조 실험항목

구 분	중간모래층 위치	중간모래층 두께	비 고
단일층	-	-	
중간층	0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub> , 0.10h <sub>0</sub> , 0.30h <sub>0</sub>	
	0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub> , 0.10h <sub>0</sub> , 0.30h <sub>0</sub>	
	0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub> , 0.10h <sub>0</sub> , 0.30h <sub>0</sub>	

본 논문에서는 중간모래층이 강제치환 깊이에 미치는 영향을 분석하기 위해 Prototype을 1/100으로 축소, 제작한 실험체를 이용하였다. 중간모래층 위치 및 두께에 대한 모형토조 실험을 실시하였으며 단일층 실험결과와 비교하여 중간모래층이 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 수행된 모형토조 실험항목은 다음 표 1.과 같다.

### 3.1 모형토조 실험을 위한 Similitude Rule

표 2. 모형토조에 적용한 Scale Factor( $\lambda'$ )

Quantity	Scale Factor (Prototype/Model)
Length	$\lambda'$
Density	1
Displacement	$\lambda'$
Stress	$\lambda'$
Strain	1
Stiffness	$\lambda'$
Pore Pressure	$\lambda'$

1957년 Rocha 등과 같은 많은 지반공학자들은 수치해석과 실제거동에 대한 비교분석을 통해 축소모형체에 따른 지반거동 특성을 연구하였다. 축소모형체 실험에 적용되는 Similitude Rule에 다음과 같은 2가지 주요개념을 제안하였다(Rocha 1957, Rosco 1968, Kagawa 1978 등). 첫째로 Prototype지반 거동은 임의의 Scale Factor에 따른 응력-변형률관계를 만족시켜야 한다는 것이며, 둘째로 지반-구조물 시스템의 거동에 대한 Scale Factor를 만족시켜야 한다는 것이다. 본 논문에서 적용한 모형토조와 Prototype의 관계는 다음 표 2와 같이 적용하였다.

### 3.2 모형토조 실험 계획

#### 3.2.1 실험시료

모형토조 실험에 사용된 하부 연약점토 시료는 초연약 점토로서 남해안 지역에서 Bulk 형태로 채취되었으며, 실험을 위해 수분을 첨가, 교반작업을 통해 실험에 사용되었다(표 3. 참조).

표 3. 현장시료와 모형실험용 시료 물성치

구 분	현장시료	모형실험용 시료
액성한계	72.4%~88.2%	72.4%~88.2%
소성한계	27.9%~31.7%	27.9%~31.7%
함수비	70.5%~82.0%	90%~120%
공극비	1.904	2.464
포화도	100%	100%
비 중	2.7	2.7
비배수전단강도	0.035kgf/cm <sup>2</sup> ~0.07kgf/cm <sup>2</sup>	0.0077kgf/cm <sup>2</sup>
습윤단위중량	1.464tf/m <sup>2</sup> ~1.58tf/m <sup>2</sup>	1.49tf/m <sup>2</sup>
통일분류	CH	CH

모형토조 실험에 사용된 중간모래층은 그 특성이 잘 알려진 주문진 표준사이며, 표준사의 건조 단위중량은 1.55tf/m<sup>3</sup>, 습윤 단위중량은 1.92tf/m<sup>3</sup>으로 측정되었다. 중간모래층으로 사용된 표준사의 특성은 다음 표 4와 같다.

표 4. 중간모래층으로 사용된 표준사의 물성치

비 중	최대공극비 ( $e_{max}$ )	최소 공극비 ( $e_{min}$ )	D10	D30	D60	통일분류
2.6	0.879	0.546	0.21mm	0.23mm	0.25mm	SP

강제치환깊이 산정을 위한 모형토조 실험에서 상부 성토하중에 따른 침하량은 성토재의 입경과 관련이 있으며, 입경이 클수록 치환깊이가 증가하는 것으로 알려져 있다(이승원, 2000). 성토재는 대표입경 0.2mm, 1.5mm, 5.0mm, 10.0mm인 모래와 자갈을 주로 사용하고 있다. 모형토조 실험에서 성토재의

입경이 클수록 치환깊이가 큰 것으로 알려져 있고, 교반된 모형토조내 점토시료의 비배수전단강도가 Scale Factor 고려시 실제 지반(Prototype)에서 큰 경우에 해당하므로 본 논문에서는 비교적 대표입경이 큰 15.0mm인 자갈질 재료를 성토재로 사용하였다.

### 3.2.2 실험장치

모형토조는 길이 150cm, 폭 40cm, 높이 50cm, 두께 2cm인 아크릴판을 이용하여 제작하였으며, 모형토조의 크기는 실제 제방단면(Prototype)의 1/100 Scale과 제방단면의 하중영향을 고려하여 제작하였다. 또한 벽면 마찰력을 최소화하기 위해 아크릴 벽면에 비닐을 부착하고, 비닐 하단부분을 고정하여 연약지반하부의 고정조건을 고려하였다.(그림 2. 참조)



그림 2. 모형토조 전경

표 5. 모형토조 제원

구분	사양	비고
크기	길이	150cm
	폭	40cm
	높이	50cm
두께	2cm	
눈금	5cm x 5cm	전·후면 설치
수직 침하계	7개소	
성토하중	10.8kgf	

### 3.2.3 계측계획

제방 성토에 따른 제방하부의 변형을 측정하기 위해 모형토조 제방의 중심을 기준으로 7개의 수직 침하판을 설치하고 1/100mm의 다이알게이지를 설치하여 성토에 따른 제방하부의 변형을 일정한 간격의 시간별로 측정하였다(그림 3. 참조). 각 실험의 경우에 대한 침하측정시간은 성토투기 완료후 1분, 4분, 15분, 35분, 1시간 5분까지 측정되었다.

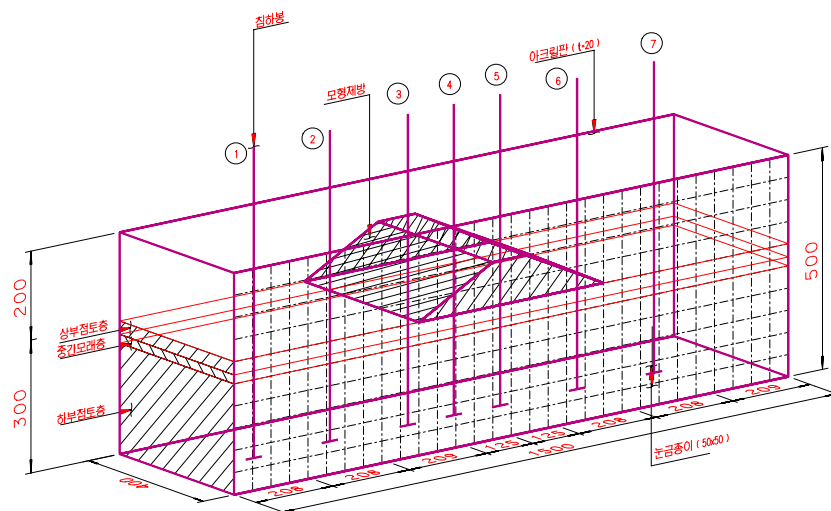


그림 3. 모형토조내 침하계 배치도

### 3.2.4 실험방법

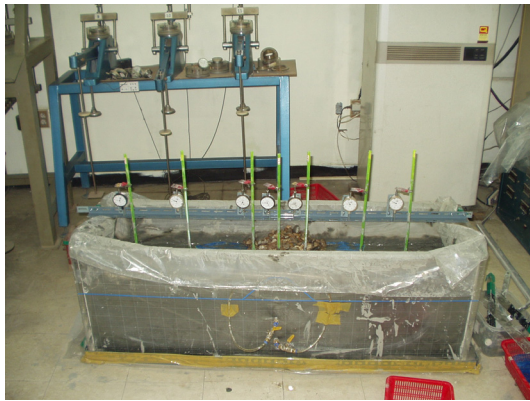


그림 4. 모형제방 축조에 따른 침하량 계측

채취한 원지반 시료를 교반기에 부설후 수분을 첨가하고 2시간동안 교반시켜, 함수비를 균등하게 분포시켰다. 토조내 수직침하계측기를 고정한 후 교반된 시료를 부설하고 점토시료의 상부를 최대한 편평하게 유지하였다. 중간모래층 포설의 경우 각 실험항목별 모래층 하단까지 하부 점토층을 부설하고 중간모래층인 표준사를 부설하였다. 재성형된 점토시료의 강도회복과 시료의 안정성을 위해 24시간동안 정적인 상태를 유지하였으며, 정적인 상태를 유지하는 동안 시료의 물리적, 역학적 성질이 변하지 않도록 보호 조치하였다. 계측기의 침하기록을 투기 완료 후 1분, 3분, 10분, 20분, 40분 간격의 계측기별로 측정하였다(그림 4. 참조).

성토재 투기전 토조내 Vane 시험기를 통한 비배수전단강도를 측정하였으며, 토조내 좌우측의 심도 중앙에서 측정되었다. Vane 시험기로 구한 비배수전단강도는 Ladd등(1977)이 제안 수정계수를 적용하였다.

### 3.2.5 즉시침하 시간

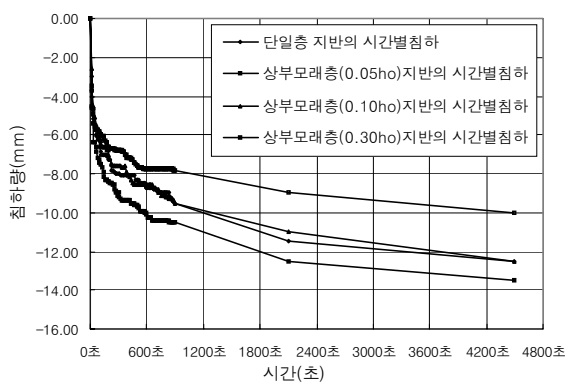


그림 5. 시간별침하 측정결과

연약지반에서의 토공구조물 축조는 투기에 다른 강제치환이 발생한 후 제방하중에 대한 압밀침하가 발생하게 된다.

본 논문에서는 성토에 따른 강제치환 깊이를 측정하기 위해 단일층 및 상부 모래층 두께 0.05h<sub>0</sub>, 0.1h<sub>0</sub>, 0.3h<sub>0</sub>의 경우에 대하여 시간별 침하량을 10초 간격으로 측정하였다(그림 5. 참조).

시간별 침하량 측정결과 단일층과 상부 모래층 지반에 대한 시간-침하곡선은 제방 투기 시작후 2분정도 까지 거의 직선형태를 이루며 그 이후에는 곡선형태의 침하곡선을 이루고 있어, 강제치환 깊이는 투기 완료 후 1분인 것을 알 수 있었다.

## 4. 모형토조 실험결과 및 분석

### 4.1 모형토조 실험결과

#### 4.1.1 강제치환 깊이

모형제방 실험에 따른 시간별, 계측기별 측정결과는 다음 표 6.과 같다.

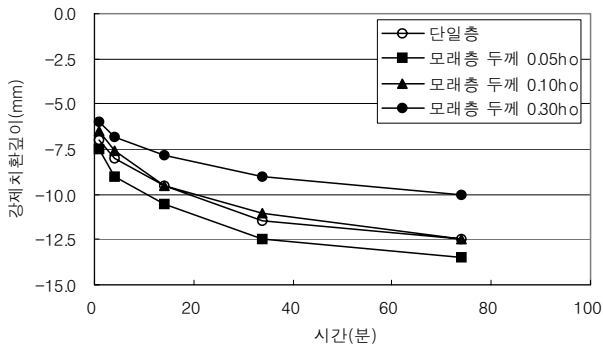
표 6. 모형제방축조에 따른 측정 침하량 결과, (-) : 침하, (+) : 융기 (1/2)

계측기 번호	종 류			축조 후 시간별 침하량(mm)				
	층구분	위치	두께	1분	4분	15분	35분	1시간15분
①	단일층	-	-	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
		0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
	상부모래층	0h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	0.80	1.00	1.10	1.20	1.20
		0h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.00	1.10
		0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.20	1.20
	중간모래층	0.1h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	0.90	1.10	1.20	1.30	1.30
		0.1h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
		0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.20	1.20
		0.3h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
②	단일층	-	-	1.05	1.25	1.55	1.65	1.75
		0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	1.10	1.40	1.70	1.80	1.90
	상부모래층	0h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	1.00	1.20	1.50	1.60	1.70
		0h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	1.00	1.30	1.50	1.60	1.70
		0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	1.10	1.40	1.50	1.70	1.80
	중간모래층	0.1h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	1.10	1.50	1.70	1.80	2.00
		0.1h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.90	1.00	1.20	1.30	1.40
		0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	1.00	1.40	1.50	1.70	1.80
		0.3h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	1.00	1.30	1.45	1.60	1.70
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.70	0.90	1.10	1.20	1.30
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.70	0.90	1.10	1.20	1.30
③	단일층	-	-	-3.75	-4.25	-5.25	-6.25	-7.25
		0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-4.00	-5.00	-6.50	-7.20	-8.40
	상부모래층	0h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-3.70	-4.20	-6.00	-6.70	-8.00
		0h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-3.30	-3.80	-4.80	-5.50	-6.80
		0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-4.00	-5.00	-6.50	-7.20	-8.40
	중간모래층	0.1h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-3.70	-4.20	-6.00	-6.70	-8.00
		0.1h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-3.10	-3.60	-4.60	-5.10	-6.10
		0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-3.70	-4.70	-6.00	-6.70	-7.70
		0.3h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-3.50	-4.00	-5.50	-6.20	-7.20
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-2.80	-3.40	-4.30	-4.80	-5.60
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-2.80	-3.40	-4.30	-4.80	-5.60
④	층구분	위치	두께	1분	4분	15분	35분	1시간15분
		단일층	-	-	-7.00	-8.00	-9.50	-11.00
	상부모래층	0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-7.50	-9.00	-10.50	-12.50	-13.50
		0h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-6.50	-7.60	-9.50	-11.00	-12.50
		0h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-6.00	-6.80	-7.80	-9.00	-10.00
	중간모래층	0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-7.25	-8.75	-10.25	-11.75	-13.25
		0.1h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-6.50	-7.50	-9.40	-10.90	-12.40
		0.1h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-5.80	-6.30	-7.50	-9.00	-10.00
		0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-6.50	-8.00	-9.50	-10.50	-12.50
		0.3h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-6.00	-7.00	-8.60	-9.50	-11.00
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-5.00	-5.60	-6.60	-7.60	-8.40
⑤	단일층	-	-	-4.25	-4.75	-5.75	-6.75	-7.75
		0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-4.40	-4.90	-6.40	-7.10	-8.40
	상부모래층	0h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-4.00	-4.50	-6.30	-7.00	-8.30
		0h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-3.70	-4.20	-5.20	-5.90	-7.20
		0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-4.50	-5.00	-6.50	-7.20	-8.40
	중간모래층	0.1h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-4.00	-4.50	-6.30	-7.00	-8.30
		0.1h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-3.50	-4.00	-5.00	-5.50	-6.50
		0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	-4.00	-4.50	-5.90	-6.60	-7.60
		0.3h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	-3.80	-4.30	-5.60	-6.30	-7.30
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-3.00	-3.60	-4.50	-5.00	-5.80
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	-3.00	-3.60	-4.50	-5.00	-5.80

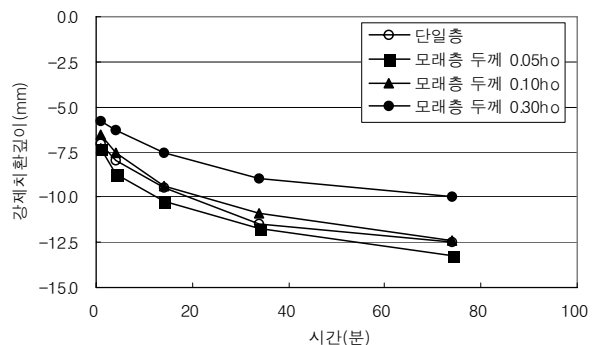
표 6. 모형제방축조에 따른 측정 침하량 결과(계속)

계측기 번호	종 류		축조 후 시간별 침하량(mm)					
⑥	단일층	-	-	1.45	1.75	1.95	2.05	2.15
		상부모래층	0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	1.50	1.80	2.00	2.10
	0h <sub>0</sub>		0.10h <sub>0</sub>	1.40	1.60	1.90	2.00	2.10
	0h <sub>0</sub>		0.30h <sub>0</sub>	1.30	1.50	1.80	1.90	2.00
	중간모래층	0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	1.50	1.70	1.90	2.10	2.20
		0.1h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	1.40	1.80	2.00	2.10	2.30
		0.1h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	1.30	1.40	1.60	1.70	1.80
		0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	1.40	1.80	1.90	2.00	2.10
		0.3h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	1.30	1.60	1.80	1.95	2.05
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	1.00	1.20	1.40	1.50	1.60
⑦	단일층	-	-	0.75	0.85	0.95	1.05	1.15
		상부모래층	0h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.10
	0h <sub>0</sub>		0.10h <sub>0</sub>	0.80	1.00	1.10	1.20	1.20
	0h <sub>0</sub>		0.30h <sub>0</sub>	0.70	0.80	0.90	0.90	1.00
	중간모래층	0.1h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.20	1.20
		0.1h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	0.80	1.00	1.20	1.30	1.30
		0.1h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
		0.3h <sub>0</sub>	0.05h <sub>0</sub>	0.80	0.90	1.00	1.20	1.20
		0.3h <sub>0</sub>	0.10h <sub>0</sub>	0.70	0.80	0.95	1.05	1.15
		0.3h <sub>0</sub>	0.30h <sub>0</sub>	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90

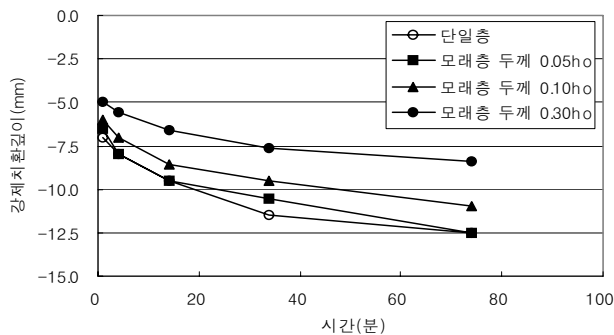
측정시간(모형 제방투기 완료후 1분, 3분, 10분, 20분, 40분간격)에 따른 모형제방 중심부 계측기 ④의 침하량 측정결과는 다음 그림 6.과 같다. 단일층 지반의 침하량보다 중간 모래층 두께가 0.05h<sub>0</sub>이고 중간 모래층이 제방 접지면에 근접한 경우(상부 모래층, 상부 모래층 위치 0.1h<sub>0</sub>)에서 침하량이 큰 것은 성토재 투기시 초기 침하는 원지반에 관입형태를 이루고 있기 때문인 것으로 분석되었다.



(a) 계측기 ④의 시간별 침하량 (단일층, 상부 모래층)



(b) 계측기 ④의 시간별 침하량 (단일층, 중간 모래층 위치 0.1h<sub>0</sub>)



(c) 계측기 ④의 시간별 침하량 (단일층, 중간 모래층 위치 0.3h<sub>0</sub>)

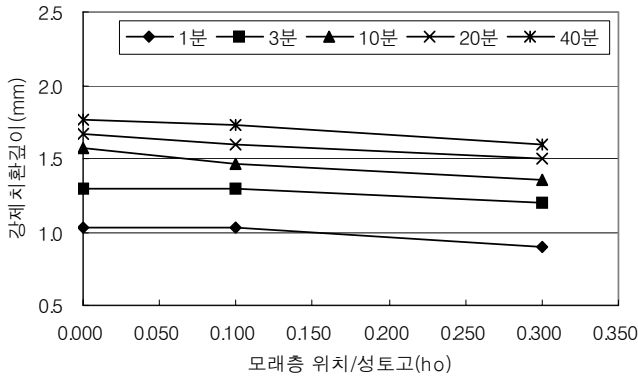
그림 6. 모형제방 중심부 계측기 ④에 대한 시간별 침하량 측정결과

즉 성토재 투기 초기에 성토재가 상부 모래층 두께이상으로 관입하거나, 중간 모래층이 제방하부에 근접하여 교란을 받는 경우 추가 성토재는 관입지점 또는 교란지점에 더욱 많은 양의 성토재가 함몰하는 것으로 분석되었다. 이는 제방하부 보강재를 부설한 경우 성토하중으로 보강재가 찢어져서 추가 침하가 많이 발생하는 경우(이승호, 1992)와 유사한 경우로 분석되었다.

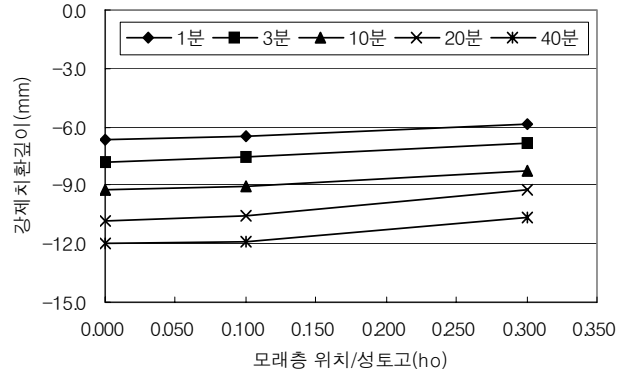
#### 4.1.2 중간모래층 위치에 따른 강제치환 깊이

중간모래층 위치에 따른 제방 중심부(계측기 ④)와 토조 측면부(계측기 ②)에서의 측정된 침하량은 다음 그림 7.과 같다. 측정결과는 모래층 두께별 평균치에 대하여 산정하였다.

시간별 침하량이 각 계측기별로 증가하고 있으며, 제방 중심부 및 제방 사면부에서 특히 큰 침하량이 발생하고 있는데, 이는 제방부의 하중으로 인한 압밀침하 거동이 발생하고 있는 것으로 분석되었다.



(a) 모래층 위치별 침하량(계측기 ②, +:융기,-:침하)



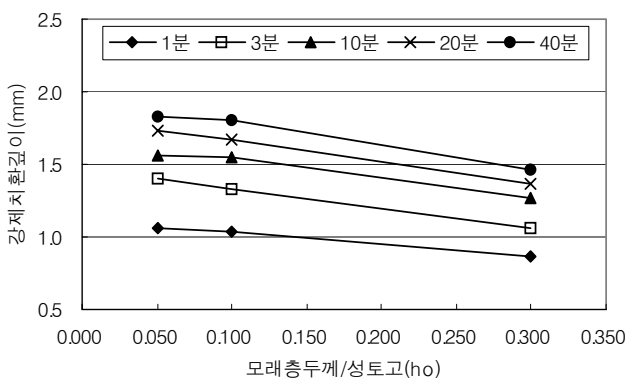
(b) 모래층 위치별 침하량(계측기 ④, +:융기,-:침하)

그림 7. 중간모래층 위치에 따른 계측기별 침하량 측정결과

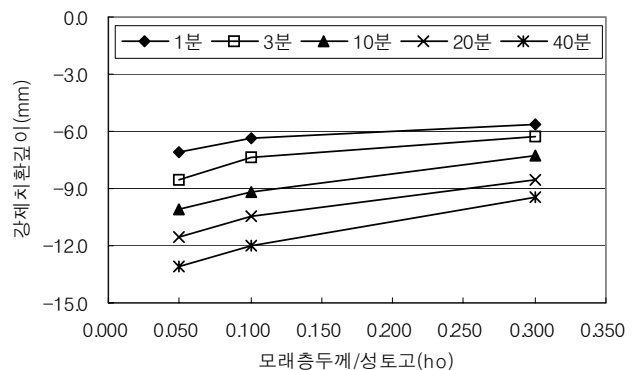
중간 모래층 위치에 따른 침하 영향은 제방 중심부 및 제방 사면부에 비해 토조 좌·우측부에서 0.23배 정도 작은 것을 알 수 있었다.

#### 4.1.3 중간모래층 두께에 따른 강제치환 깊이

중간모래층 두께에 따른 제방 중심부(계측기 ④)와 토조 측면부(계측기 ②)에서의 측정된 침하량 결과는 다음 그림 8.과 같으며 측정결과는 모래층 위치에 대한 평균값이다.



(a) 모래층 두께별 침하량 (계측기 ②, +:융기,-:침하)



(b) 모래층 두께별 침하량 (계측기 ④, +:융기,-:침하)

그림 8. 중간모래층 두께에 따른 계측기별 침하량 측정결과

시간별 침하량이 각 계측기별로 증가하고 있으며, 제방 중심부 및 제방 사면부에서 특히 큰 침하량이 발생하고 있는데, 이는 제방투기로 인한 하중이 압밀침하 거동을 발생시키고 있는 것으로 분석되었다.



중간 모래층 두께에 따른 침하량 영향은 제방 중심부 및 사면부에 비해 모형토조 좌·우측부에서 0.1배 정도 작은 것을 알 수 있었다.

## 4.2 중간모래층 영향분석

### 4.2.1 중간모래층 위치에 따른 영향

중간모래층 위치에 따른 제방 중심부(계측기 ④)와 토조 측면부(계측기 ②)에서의 모래층 영향비 분석 결과는 다음 그림 9.와 같으며, 분석결과는 모래층 두께에 대한 평균값이다.

모래층 위치에 따른 시간별 모래층 영향비 차이는 10%이내의 미소한 값을 나타내고 있어, 모래층 영향비는 제방 투기시 발생하는 강제치환 깊이에 큰 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었다.

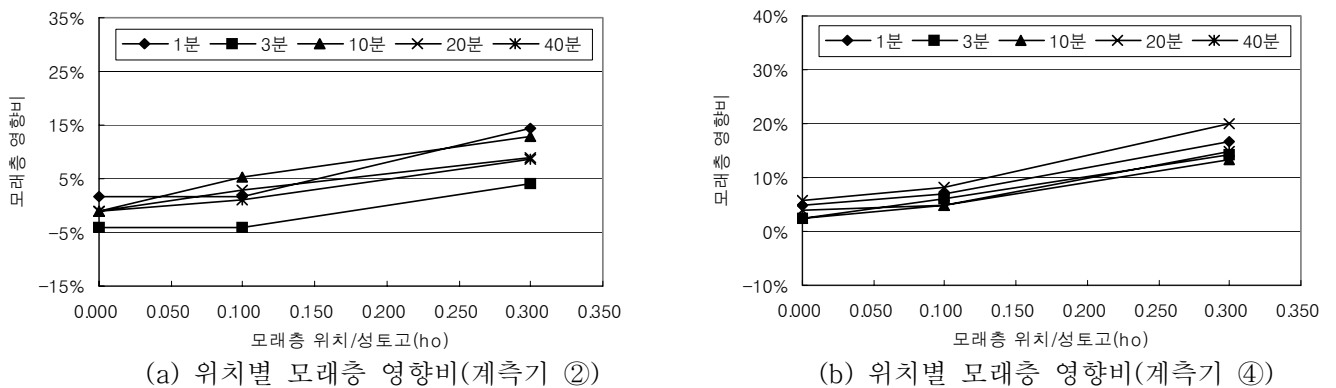


그림 9. 중간모래층 위치에 따른 계측기별 모래층 영향비 분석결과

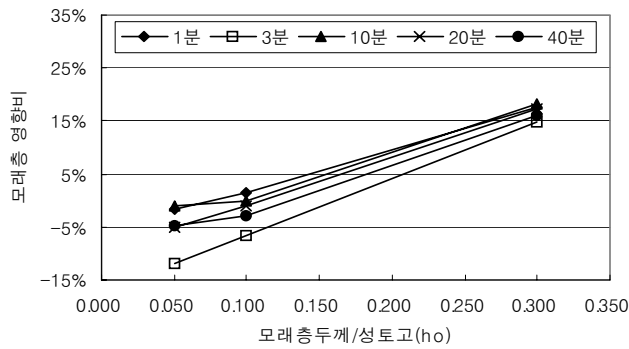
계측기 ④의 모래층 위치에 따른 모래층 영향비는 모래층 위치 0h<sub>0</sub>에서 보다 0.3h<sub>0</sub>에서 3.49배로 증가하고 있는 것으로 측정되어, 모래층 위치의 증가에 따른 모래층 영향비가 증가하고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 중간 모래층의 위치가 적은 경우 제방 투기하중으로 인한 관입이 발생, 모래층 위치가 큰 경우보다 침하량이 크게 발생하였기 때문으로 분석되었다. 또한 실험조건이 일정량의 성토재를 투기한 후 침하량을 측정하였기 때문에 강제치환 깊이에 따른 추가 하중이 고려되지 않아 중간 모래층 위치 0.3h<sub>0</sub>에서의 모래층 영향이 증가 된 것으로 분석되었다.

중간 모래층 위치에 따른 모래층 영향비는 제방 중심부 및 제방 사면부에 비해 모형토조 좌·우측부에서 0.75배로 감소하고 있는 것을 알 수 있었다.

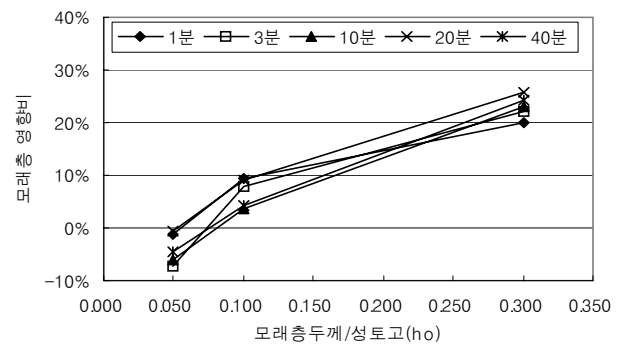
### 4.2.2 중간모래층 두께에 따른 영향

중간모래층 두께에 따른 제방 중심부(계측기 ④)와 토조 측면부(계측기 ②)에서의 모래층 영향비 분석 결과는 다음 그림 10.과 같으며, 분석결과는 모래층 위치에 대한 평균값이다.

모래층 두께에 따른 시간별 모래층 영향비는 제방 중앙부에서 10%정도의 미소한 차이를 나타내고 있으나, 제방 사면부에서는 모래층 두께에 따라 20%정도의 모래층 영향비를 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 모래층 영향비가 제방 투기시 발생하는 강제치환 깊이에 큰 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었으며, 제방 중심부의 관입현상으로 인한 사면부의 용기영향으로 모래층 두께에 따른 모래층 영향비가 다소 차이를 보이고 있는 것으로 분석되었다.



(a) 두께별 모래층 영향비(계측기 ②)



(b) 두께별 모래층 영향비(계측기 ①)

그림 10. 중간모래층 두께에 따른 계측기별 모래층 영향비 분석결과

제방 중심부 ④계측기에서 측정된 모래층 영향비는 중간 모래층 두께 0.05h<sub>0</sub>에 비해 0.3h<sub>0</sub>에서 8.17배로 증가하는 것으로 나타나 모래층 두께가 강제치환 깊이에 큰 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 중간 모래층 두께에 따른 모래층 영향비는 제방 중심부 및 사면부에 비해 모형토조 좌·우측부에서 0.8배로 감소하고 있는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결론

모형토조를 이용하여 중간 모래층이 제방하부 강제치환 깊이에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모형 성토재 투기에 따른 시간별 침하량 측정결과 성토재 투기 시작후 1분이내에서 강제치환이 발생하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 중간모래층이 작고, 모래층 위치가 제방하부에 매우 근접하는 경우 성토재의 투기하중 영향으로 상부 모래층이 찢어져 성토재가 관입하여 단일층인 경우보다 중간모래층인 경우 강제치환 깊이가 큰 것을 알 수 있었다.
- 3) 모래층 두께가 증가할수록 모래층 영향비는 증가하고 있으며, 제방 중심부 및 사면부에 비해 토조 좌·우측부에서 0.8배정도 모래층 영향이 감소하고 있는 것을 알 수 있었다.
- 4) 시간이 경과 하면서 제방 중앙부의 침하량이 제방 좌우측 보다 큰 것을 알 수 있었는데, 이는 제방 중앙부와 사면부의 하중차이로 인해, 압밀침하량의 차이가 발생한 것을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. 이승원, 이영남, Allersma, H.G.B(2000), “원심모형시험을 통한 연약지반의 강제치환거동 연구”, **한국지반공학회논문집**, 제16권, 제6호, pp.141~151
2. 이승호(1992), “토질구조물 축조에 의한 연약점토지반의 변형에 관한 연구”, **한양대학교**, 박사학위논문, pp.5~32
3. 정형식, 이승호, 황영철(1993), 제방축조에 의한 연약점토지반의 변형해석에 관한 연구. **한국지반공학회지**, 제9권, 제6호, pp.55~62
4. 한국지반공학회(1986), 구조물 기초설계기준. 건설부, pp.116~117
5. Bowles, J. E.(1988), *Foundation Analysis and Design.*, 4th, McGrawHill Book Co., pp.208~215
6. ITASCA Consulting Group, INC., "FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 3.3, Volume I, II, III, 1995