

## 중간 모래층이 있는 연약지반내 제방하부 강제치환 깊이 산정에 관한 연구

### A Study on Replacement Depth in Soft Soil with Inter Sand Layer

정형식\* · 방창국\*\*

Chung, Hyung-Sik · Bang, Chang-Kug

#### Abstract

On the soft soil consisted of silty clay, the compulsion replacement method is useful for revetment and its safety is very much affected by compulsion replacement depth. Usual method calculating the compulsion replacement depth on silty clay is considered the bearing capacity of soft soil with undrained shear strength increase from ground surface and weight of revetment. But according to soil deposit, there are some cases of soft soil with inter sand layer or clayed silt, which affect the compulsion replacement depth. In this paper, the compulsion replacement depth on soft soil with inter sand layer is analyzed by layered weighted average bearing capacity considering influence effect of Perloff et al.(1967) and compared with numerical method(FLAC). In the result, the calculated depth from numerical method is nearest to layered weighted average bearing capacity in case that contact width under revetment is  $0.2B_0$ (soft soil with inter sand layer),  $0.5B_0$ (only soft soil) and the effect of contact width under revetment is less than undrained shear strength, thickness and location of inter sand layer. Also the compulsion replacement depth is as much as the inter sand thickness( $d_2/B_0$ ) is thinner, the inter sand layer location( $d_1/B_0$ ) is farther, and undrained shear strength is less.

**Keywords** : Replacement depth, Inter sand layer, Layered weighted average bearing capacity

#### 요 지

실트질 점토로 이루어진 연약지반의 호안 제방축조는 성토 제방하중에 의한 연약지반내 강제치환 공법으로 이루어지고 있으며, 축조 제방하부 강제치환 깊이는 호안 제방의 안정성에 큰 영향을 미치고 있다. 기존의 제방하부 강제치환 깊이 산정방법은 하부 연약점토지반의 비배수 전단강도 증분율을 고려한 제방하부 연약지반의 지지력과 성토제방 하중에 의해 산정하고 있다. 그러나 지반 층후 특성에 따라 중간층 형태의 점토질 실트층 또는 모래층이 있는 경우가 있으며, 이러한 점토질 실트층 또는 모래층은 제방하부 연약지반의 지지력에 영향을 미치게 되어 강제치환 깊이에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 중간 모래층이 있는 연약지반내 제방 축조시 강제치환 깊이를 Perloff et al.(1967) 영향계수를 고려한 성토제방 하중과 층두께 가중평균 지지력(Bowles, 1988)에 의해 산정하였으며, 수치해석(FLAC)적 방법에 의한 산정결과와 비교 분석하였다. 해석 결과 제방하부 접지폭이  $0.2B_0$ (중간 모래층),  $0.5B_0$ (단일층)인 경우 산정된 강제치환 깊이는 수치해석과 매우 근접하는 것을 알 수 있었으며, 제방 하부 접지폭의 영향보다 비배수 전단강도 및 중간 모래층 두께, 중간 모래층 위치의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 중간 모래층 두께가 작을수록 강제치환 깊이는 증가하며, 중간 모래층 위치가 증가 할수록 강제치환 깊이는 증가하고, 비배수 전단강도가 감소할수록 강제치환 깊이가 증가하는 것을 알 수 있었다.

**주요어** : 강제치환 깊이, 중간 모래층, 층두께 가중평균 지지력

\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail:civilbck@kopec.co.kr)

## 1. 서론

근래 산업발전과 더불어 서·남해안의 매립공사를 통한 농경지 조성이 이루어지고 있으며, 취·배수원 확보에 따른 해안가에 발전단지와 같은 산업단지 조성이 이루어지고 있다. 해안가의 매립공사는 부지 매립공사의 원활을 확보하고 외해로부터의 내습피해를 방지하기 위한 호안 제방축조가 선행되고 있다.

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

기존에 주로 사용되고 있는 제방하부 강제치환 깊이 산정방법은 성토 제방하중과 비배수 전단강도 증분율을 고려한 제방하부 실트질 점토지반의 지지력에 의해 산정하고 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 다층 지반의 지지력 산정을 위해 층두께 가중평균방법(Bowles, 1988)으로 제방하부 지지력을 산정하고 Perloff et al.(1967) 영향계수를 고려한 성토 제방하중과 비교하여 중간 모래층이 있는 연약지반의 강제치환 깊이를 알아보고자 하며, 수치해석(FLAC)과 비교 분석을 통해 중간 모래층이 있는 연약지반내 강제치환 깊이를 알아보고자 한다.

## 2. 치환 깊이 산정 이론식

정규압밀상태인 연약 점토지반내 제방하부 강제치환 깊이는 성토 제방하중과 심도별 비배수 전단강도 증분율을 고려한 제방하부 연약지반의 지지력에 의해 산정하고 있다. 그러나 중간 모래층이 있는 경우 기존의 강제치환 공식을 적용할 수 없으므로 본 논문에서는 중간 모래층의 영향을 고려하기 위해 제방하부 지지력 영향깊이에 따른 층두께 가중평균방법(Bowles, 1988)으로 제방하부 지지력을 산정하였으며, Perloff et al.(1967) 영향계수를 고려한 성토 제방하중과 비교하여 제방하부 강제치환 깊이를 산정하였다.

층두께 가중평균방법(Bowles, 1988)으로 제방하부 연약지반의 지지력 산정시 적용한 지지력 계수는 Vesic

(1973)에 의해 제안된 다음 식(1)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} N_c &= (N_q - 1) \cot \phi \\ N_q &= e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \\ N_\gamma &= 2(N_q + 1) \tan \phi \end{aligned} \quad (1)$$

### 2.1 Perloff et al. 영향계수

연약지반상부에 성토 제방하중은 연약지반내 심도 및 위치에 따른 영향으로 지중응력이 분산된다. 상부하중에 따른 지중응력 영향을 고려하기 위해 상부 성토하중을 상부하중으로 가정, 연약지반에 미치는 영향계수를 산정하는 방법과 상부 성토하중에 대한 제방효과를 고려하여 연약지반에 미치는 영향계수를 산정하는 방법이 있다.

본 논문에서와 같이 사석 제방축조에 따른 제방하중이 연약지반내 미치는 영향을 산정하기위해 제방효과를 고려한 Perloff et al.(1967) 영향계수를 적용하였다. Perloff et al.(1967) 영향도표는 제방 효과를 고려하여 제방형상에 따라 연약지반의 심도별, 위치별 영향계수를 나타낸 도표이다(그림 1참조).

### 2.2 단일층(연약층) 지반의 경우

본 논문에서는 제방하부 접지면에서의 지지력 영향깊이를 고려한 층두께 가중평균방법(Bowles, 1988)으로 제방하부 지지력을 다음 식(2)과 같이 산정하였으며(정형식 등, 1993) 용기에 따른 상재하중을 고려하였다(그림 2 참조).

$$q_{ult} = N_c c_z + \gamma_2 D_z + \gamma_3 \frac{D_z}{6} \quad (2)$$

- $N_c$  : 지지력계수
- $c_o$  : 연약지반 표면에서의 점착력
- $a$  : 깊이에 따른 비배수 전단강도 증분율
- $\gamma_2$  : 연약지반 단위중량
- $\gamma_3$  : 용기부의 단위중량
- $D_z$  : 치환깊이
- $B_f$  : 제방하부 접지폭
- $c_z$  : 제방하부 접지면에서의 비배수 전단강도
- $c_a$  :  $a$  지점의 비배수 전단강도
- $c_b$  :  $b$  지점의 비배수 전단강도

$$\begin{aligned} c_z &= \frac{1}{2} (c_a + c_b) \\ &= \frac{1}{2} [c_o + a D_z + c_o + a(D_z + 0.5 B_f \tan(45 + \frac{\phi}{2}))] \\ &= c_o + a D_z + 0.25 a B_f \quad (\text{연약지반 마찰각 } \phi = 0 \text{인 경우}) \end{aligned}$$

Perloff et al.(1967) 영향계수를 고려한 사석 제방하부 접지면에서 작용하는 제방성토 하중은 다음 식(3)과 같다.

$$P = \lambda \gamma_1 h_0 + \gamma'_1 D_z \quad (3)$$

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

제방 작용하중과 지지력이 평형을 이루는 깊이까지 강제치환되므로 다음 식(4)와 같은 강제치환식이 성립된다(그림 2 참조).

$$\begin{aligned} \lambda \gamma_1 h_0 + \gamma'_1 D_z &= N_c c_z + \gamma_2 D_z + \gamma_3 \frac{D_z}{6} \quad (4) \\ \gamma_2 &\equiv \gamma_3 \text{로 가정하면} \\ &= N_c(c_o + 0.25\alpha B_f + \alpha D_z) + \frac{7}{6} \gamma_2 D_z \\ D_z &= \frac{N_c(c_o + 0.25\alpha B_f) - \lambda \gamma_1 h_0}{\gamma_1 - (\alpha N_c + \frac{7}{6} \gamma_2)} \end{aligned}$$

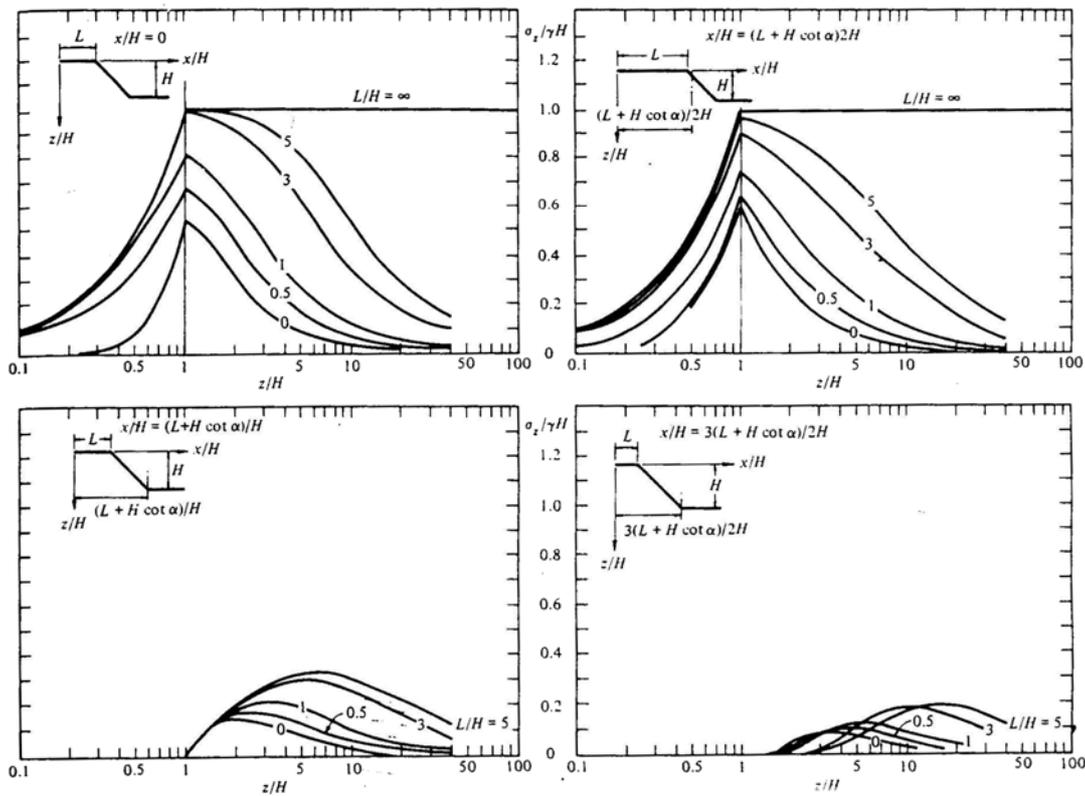


그림 1. Perloff et al. 영향도표( $\alpha=45^\circ, \nu=0.3$ )

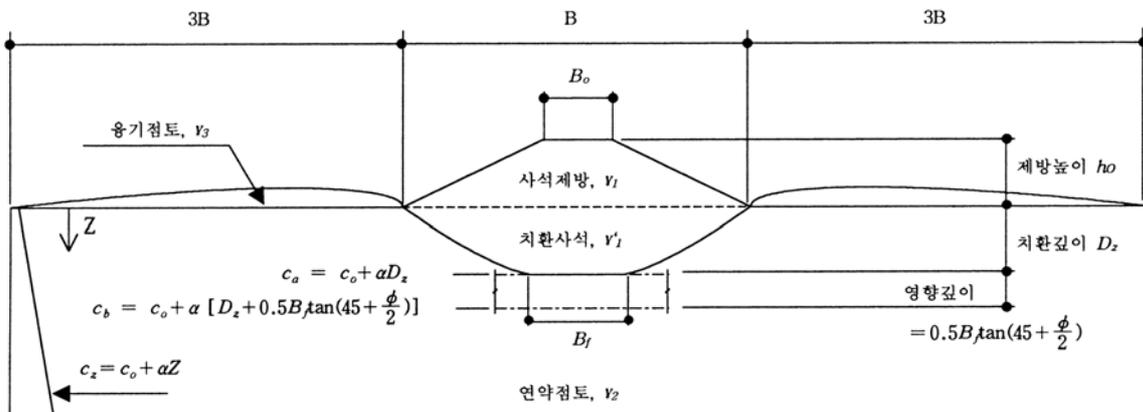


그림 2. 제방하부 강제치환 개요도(단일층)

### 2.3 중간 모래층이 있는 경우

제방하부에 중간 모래층이 있는 경우 제방하부의 영향깊이를 고려한 층두께 가중평균 지지력(Bowles, 1988)을 다음 식(5)와 같이 적용하였다(그림 3 참조).

$$q_{ult} = N_c c_{ave} + \frac{1}{2} \gamma_{ave} B_f N_r + [\gamma_2 D_z + \frac{D_z}{6} \gamma_2] N_q \quad (5)$$

$$c_{ave} = \frac{c_2 d_1 + c_3 d_3 + c_4 d_2}{d_1 + d_2 + d_3}$$

$$\phi_{ave} = \tan^{-1} \left( \frac{d_1 \tan \phi_2 + d_2 \tan \phi_4 + d_3 \tan \phi_3}{d_1 + d_2 + d_3} \right)$$

$$\gamma_{ave} = \frac{d_1 \gamma_2 + d_2 \gamma_4 + d_3 \gamma_3}{d_1 + d_2 + d_3}$$

$$d_e (\text{영향깊이}) = 0.5 B_f \tan \left( 45 + \frac{\phi_{ave}}{2} \right)$$

중간 모래층이 있는 경우 강제치환 깊이를 산정하기 위해 식(5)와 식(3)의 대소 비교를 통한 반복산정법으로 상부 성토하중과 지지력이 평형을 이루는 강제치환 깊이를 산정하였다.

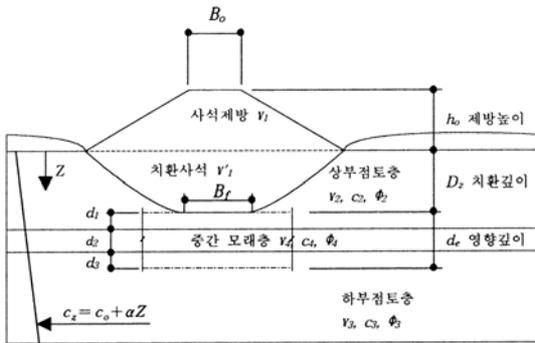


그림 3. 제방하부 강제치환 개요도(중간 모래층)

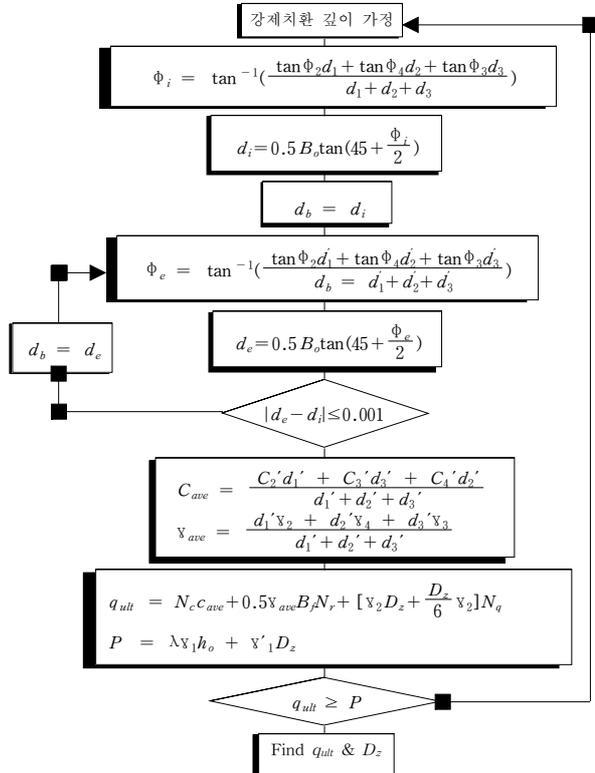
## 3. 해석방법 및 지반 강도정수

### 3.1 해석방법

#### 3.1.1 층두께 가중 평균 지지력(Bowles, 1988)에 의한 해석방법

Perloff et al.(1967) 영향계수를 고려한 제방하중과 층두께 가중평균 지지력(Bowles, 1988)의 대소 비교를 통한 반복 산정법으로 강제치환 깊이를 산정하였다(그림 4

참조).



$\phi_i$  : 초기 마찰각,  $d_i$  : 초기 영향깊이  
 $\phi_e$  : 최종 마찰각,  $d_e$  : 최종 영향깊이  
 $d_b$  : 이전 영향깊이

그림 4. 층두께 가중평균법(Bowles, 1988)에 의한 강제치환 깊이 산정 순서도

### 3.1.2 수치해석 방법

본 논문에서는 연약지반내 사석 제방축조에 따른 강제치환 깊이를 수치해석에 의해 산정하였으며, 성토 제방에 따른 탄성해석을 통해 사석 제방하부의 탄성침하를 산정하였다. 층두께 가중평균 지지력(Bowles, 1988)에 의해 산정된 강제치환 깊이와 탄성침하를 고려하여 총 침하량을 산정하였다.

연약지반내 사석 제방축조에 따른 수치해석은 범용 지반 해석 Program인 FLAC을 적용하였으며, 수치해석에 적용된 지반 및 성토제방의 Model은 그림 5와 같다. 하부 연약지반의 폭은 제방 저면폭의 3배(90m)이상인 135m를 적용하였으며, 연약지반의 깊이는 사석 제방의 영향을 고려하여 30m를 적용하였다. 사석 제방의 사면 구배는 1:1이며 제방의 성토 높이 및 침단폭은 10m를 적용하였

다.

수치해석시 연약지반의 비배수 전단강도 증분율을 고려하였으며, 파괴기준은 Mohr-Coulomb Model을 적용하였다. 연약지반의 강제치환 깊이 산정을 위한 수치해석이므로 연약지반은 과대변형(Large Strain Method)해석을 하여 제방하부의 강제치환 깊이를 산정하였다.

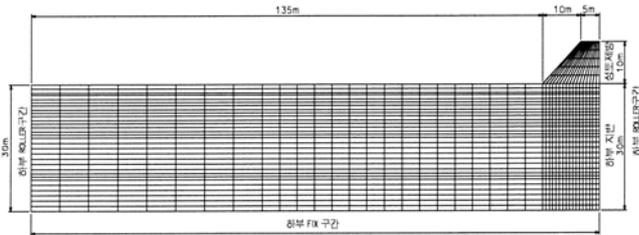


그림 5. 수치해석을 위한 제방 및 하부지반 모델링

연약지반내 제방 축조해석은 강제치환에 따른 추가성토를 고려하여 제방하부의 변위차가 매우 적을 때까지 반복 산정하여 제방하부의 강제치환 깊이를 산정하였다(그림 6 참조).

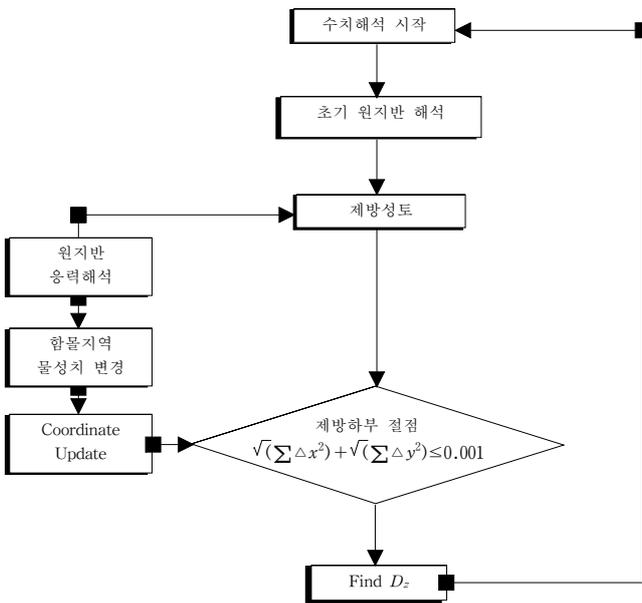


그림 6. 수치해석에 의한 강제치환 깊이 산정 순서도

### 3.2 해석에 적용된 지반 강도정수

#### 3.2.1 치환깊이에 산정된 지반강도 정수

본 논문에서는 제방하부 치환깊이 산정을 위해 남해안 광양만 지질관련 자료(천병식 등, 1988)와 항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 1999)를 참고하여 비배수 전단강도 및 비배수 전단 강도 증분율, 모래층의 마찰각을 다음 표 1 과 같이 적용하였다.

표 1. 치환깊이 산정에 적용된 지반 강도정수

토질구분	비배수 전단강도 (t/m <sup>2</sup> )	내부 마찰각 (°)	강도 증분율 (α)	단위 중량 (t/m <sup>3</sup> )	비고
점토 (상·하부)	1.00~2.75	0.0	0.16~0.17	0.633	수중단위중량
모래	0.0	20.0~30.0	0.0	0.635	수중단위중량
사석제방	0.0	40.0	0.0	1.8	습윤단위중량
사석제방 (치환지역)	0.0	35.0	0.0	1.0	수중단위중량

#### 3.2.2 수치해석에 적용된 토질제원

본 논문에서는 제방의 강제치환 깊이를 수치해석으로 산정하기 위해 지반 강도정수(표 1 참조)에 따른 연약지반의 변형계수, 전단계수, 체적변형계수를 구조물 기초설계기준(한국지반공학회, 1986)을 참고하여 다음 표 2와 같이 적용하였다.

표 2. 수치해석에 적용된 물성치

구분	변형 계수 (t/m <sup>2</sup> )	전단 계수 (t/m <sup>2</sup> )	체적 변형 계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아 슨비	강도 증분율 (α)	비고
점토 (상·하부)	38.250~105.188	13.190~36.272	127.500~350.627	0.45	0.16~0.17	정규압밀 점토
모래	557.6~1,101.6	206.52~408.00	619.60~1,224.00	0.35	-	실트질 모래
사석제방	18,298.8	6,777.33	20,332.0	0.35	-	

## 4. 해석결과 및 분석

본 논문에서는 성토 제방하중의 영향범위를 고려하여 중

간 모래층 위치를 제방 침단폭의 0.1배에서 2.0배까지 5개 구간으로 구분 해석을 하였으며, 중간 모래층 두께는 제방 침단폭의 0.1배에서 0.75배까지 4개 구간으로 구분 해석을 하였다. 제방하부 접지폭에 따른 강제치환 깊이의 영향을 분석하기 위해 제방 침단폭의 0.01배에서  $B_o+2h_o$ 까지 7개 구간으로 구분 해석하였다.

연약지반의 비배수 전단강도는  $1.0t/m^2$ 에서  $2.75t/m^2$ 까지 3개로 구분 해석하였으며 중간 모래층 마찰각 및 비배수 전단강도 증분율은 평균값을 적용하였다.

상부 제방성도에 따른 탄성해석 결과와 층두께 가중평균 지지력(Bowles, 1988)으로 산정한 강제치환 깊이를 고려한 총 침하량을 산정, 추가 제방성도를 고려하는 수치해석 결과와 비교 분석하였다.

#### 4.1 단일층 지반의 경우

##### 4.1.1 제방하부 접지폭에 따른 영향

단일층 지반에 대해 제방하부 접지폭에 따른 강제치환 깊이가 산정결과는 다음 그림 7과 같으며, 해석결과는 제방하부 접지폭별 비배수 전단강도에 대한 강제치환 깊이의 평균값이다.

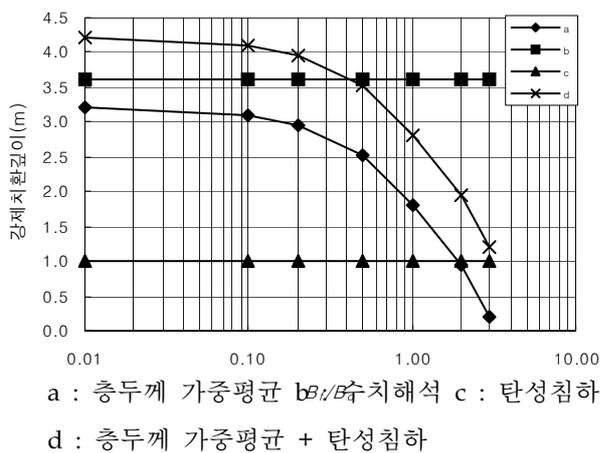


그림 7. 제방 접지폭에 따른 치환깊이 산정결과(단일층)

제방하부 접지폭  $0.01B_o$ 에서의 강제치환 깊이는 최대 4.227m이며  $B_o+2h_o$ 에서는 최소 1.203m로 감소하여 (그림 7, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조), 제방하부 접

지폭에 따른 강제치환 깊이가 차이가 매우 큰 것을 알 수 있었는데, 이는 제방하부 지지력이 강제치환에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다.

수치해석과 층두께 가중평균 + 탄성침하에 의해 산정된 강제치환 깊이가 차이는 제방하부 접지폭이  $0.5B_o$ 이하에서 0.347m,  $0.5B_o$ 이상에서 1.233m로 산정되어  $0.5B_o$ 이하인 경우에 비해  $0.5B_o$ 이상에서 강제치환 깊이가 차이가 3.55배정도 큰 것으로 산정되었으며, 층두께 가중평균 + 탄성침하에 따른 강제치환 깊이가 수치해석결과와  $0.5B_o$ 에서 가장 근접하고 있는 것을 알 수 있었다(그림 7 참조). 이는 단일층의 강제치환 깊이가 산정시 제방하부 접지폭의 영향보다는 비배수 전단강도와 치환깊이의 영향이 매우 큰 것으로 분석되었다.

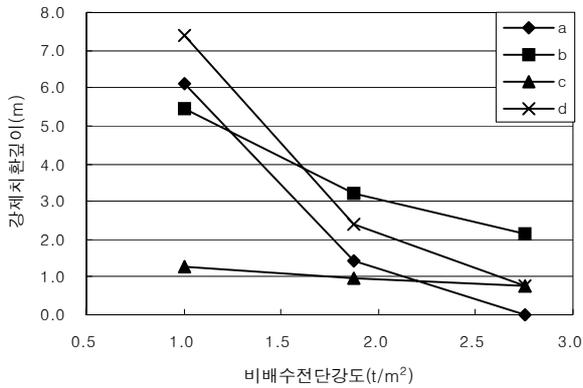
##### 4.1.2 비배수 전단강도별 강제치환 깊이

단일층에 대한 비배수 전단강도별 강제치환 깊이가 산정결과는 다음 그림 8과 같으며 해석결과는 제방하부 접지폭  $0.5B_o$ 에 대한 비배수 전단강도별 강제치환 깊이가 산정결과이다.

수치해석의 경우 산정된 강제치환 깊이는 비배수 전단강도  $1.0t/m^2$ 에서 최대 5.45m,  $2.75t/m^2$ 에서는 최소 2.14m로 산정되었으며, 층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우 산정된 강제치환 깊이는 비배수 전단강도  $1.0t/m^2$ 에서 최대 7.4m,  $2.75t/m^2$ 에서는 최소 0.77m로 산정되어 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있었다(그림 8, 수치해석, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조).

수치해석의 경우 비배수 전단강도  $1.875t/m^2$ 이하보다  $1.875t/m^2$ 이상에서 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이가 영향은 0.38배 감소하며, 층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우에는 0.32배로 감소하는 것으로 산정되어, 비배수 전단강도가 적은 경우에 강제치환 형상에 따른 영향이 매우 큰 것을 알 수 있었다(그림 8, 수치해석, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조).

수치해석의 경우 비배수 전단강도  $1.0t/m^2$ 에서 탄성침하는 수치해석에 따른 강제치환 깊이에 비해 24%,  $2.75t/m^2$ 에서는 36%로 증가하는 것으로 산정되어 비배수 전단강도가 증가할수록 탄성침하에 대한 영향이 증가하고 있는 것을 알 수 있었다(그림 8, 수치해석, 탄성침하 참조).



a : 층두께 가중평균 b : 수치해석 c : 탄성침하  
d : 층두께 가중평균 + 탄성침하

그림 8. 비배수 전단강도에 따른 치환깊이 산정결과(0.5B<sub>0</sub>, 단일층)

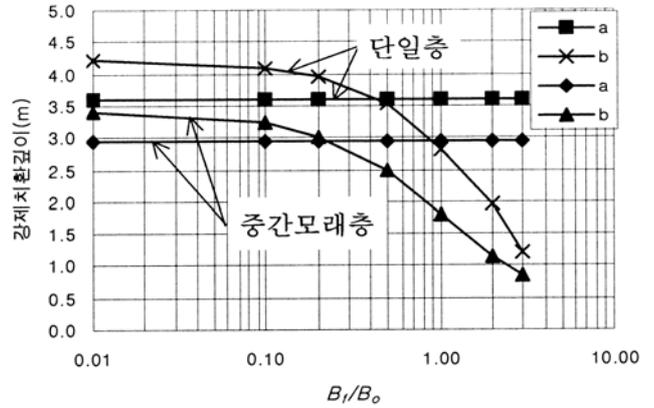
#### 4.2 중간 모래층 지반

중간 모래층 및 단일층 지반에 대한 제방하부 접지폭에 따른 강제치환 깊이 산정결과는 다음 그림 9와 같으며, 해석결과는 제방하부 접지폭별 비배수 전단강도에 대한 강제치환 깊이의 평균값이다.

강제치환 깊이 산정결과 제방하부 접지폭 0.01B<sub>0</sub>에서 3.82m, B<sub>0</sub>+2h<sub>0</sub>에서 1.03m로 감소하여(그림 9, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조) 제방하부 접지폭에 따른 강제치환 깊이 산정결과 차이가 큰 것을 알 수 있었는데, 이는 제방하부 연약지반의 지지력이 강제치환 깊이 산정에 큰 영향을 주고 있는 것으로 분석되었다.

수치해석에 따른 강제치환 깊이와 층두께 가중평균 + 탄성침하 결과는 단일층인 경우 0.5B<sub>0</sub>에서 가장 근접하고, 중간 모래층인 경우 0.2B<sub>0</sub>에서 가장 근접한 것을 알 수 있었는데(그림 9 참조), 이는 층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우 중간 모래층의 영향으로 제방 하부 지지력이 크게 증가되었기 때문으로 분석되었다.

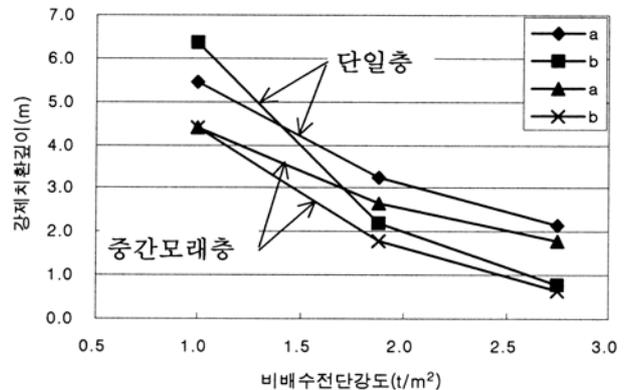
중간 모래층 지반과 단일층 지반인 경우 제방하부 접지폭이 0.2B<sub>0</sub>~0.5B<sub>0</sub>사이에서 수치해석과 근접하므로 강제치환 깊이 산정시 제방하부 접지폭의 영향은 크지 않으며, 비배수 전단강도와 치환깊이에 따른 영향이 큰 것으로 분석되었다.



a : 수치해석  
b : 층두께 가중평균 + 탄성침하

그림 9. 제방 접지폭에 따른 치환깊이 산정결과

비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이 산정결과는 다음 그림 10과 같으며, 해석결과는 비배수 전단강도별로 제방하부 접지폭에 대한 강제치환 산정결과를 평균한 값이다.



a : 수치해석  
b : 층두께 가중평균 + 탄성침하

그림 10. 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이 산정결과

비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이 산정결과 수치해석의 경우 비배수 전단강도 1.0t/m<sup>2</sup>에서 최대 4.917m, 2.75t/m<sup>2</sup>에서는 최소 1.97m로 산정되었으며(그림 10, 수치해석 참조), 층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우 비배수 전단강도 1.0t/m<sup>2</sup>에서 최대 5.369m, 2.75t/m<sup>2</sup>에서는 최소 0.71m로 산정되어(그림 10, 층두께 가중평균 +

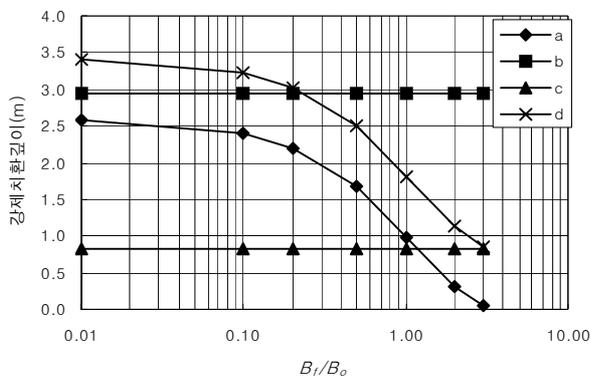
탄성침하 참조) 비배수 전단강도가 강제치환 깊이 산정에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이의 영향은 중간 모래층 지반의 경우에 비해 단일층 지반인 경우 1.4배정도 크게 산정되어 중간 모래층에 따른 제방하부 연약지반의 지지력이 강제치환 깊이에 영향을 주고 있는 것으로 분석되었다(그림 10 참조).

수치해석의 경우 비배수 전단강도  $1.875t/m^2$  이하 보다  $1.875t/m^2$  이상에서 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이가 영향은 0.49배 감소하며, 층두께 가중평균 + 탄성침하인 경우에는 0.38배 감소하는 것으로 산정되어 비배수 전단강도가 적은 경우 강제치환 형상에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있었다(그림 10 참조).

#### 4.2.1 접지폭에 따른 강제치환 깊이

중간 모래층 지반에 대한 제방하부 접지폭에 따른 강제치환 깊이 산정결과는 다음 그림 11과 같으며, 해석결과는 제방하부 접지폭별 비배수 전단강도 및 중간 모래층 위치, 중간 모래층 두께에 대한 강제치환 깊이 산정결과를 평균한 것이다.



a : 층두께 가중평균 b : 수치해석 c : 탄성침하  
d : 층두께 가중평균 + 탄성침하

그림 11. 제방 접지폭에 따른 치환깊이 산정결과  
(중간 모래층)

층두께 가중 평균 + 탄성침하에 따른 강제치환 깊이는 제방 하부 접지폭이  $0.01B_0$ 에서 최대 3.41m,  $B_0+2h_0$ 에서 최소 0.86m로 산정되어(그림 11, 층두께 가중평균 +

탄성침하 참조) 제방하부 접지폭에 따른 강제치환 깊이의 차이가 큰 것을 알 수 있었는데, 이는 제방하부 지반지지력이 강제치환 깊이 산정에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

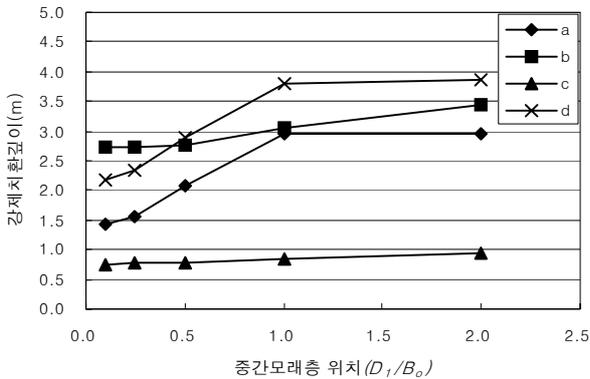
수치해석과 층두께 가중평균 + 탄성침하에 따른 강제치환 깊이 차이는 제방하부 접지폭이  $0.2B_0$ 이하에서 0.28m,  $0.2B_0$ 이상에서 1.08m로 산정되었으며, 제방하부 접지폭이  $0.2B_0$ 이하보다  $0.2B_0$ 이상에서의 강제치환 깊이 차이가 3.91배 크게 산정되었다. 또한 제방하부 접지폭이  $0.2B_0$ 인 경우 수치해석과 가장 근접하고 있는 것을 알 수 있었는데(그림 11, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조), 이는 중간 모래층 지반의 강제치환 깊이 산정시 제방하부 접지폭의 영향보다는 비배수 전단강도와 치환깊이의 영향이 매우 큰 것으로 분석되었다.

#### 4.2.2 중간 모래층 위치에 따른 강제치환 깊이

중간 모래층 위치에 따른 강제치환 깊이 산정결과는 다음 그림 12와 같으며, 해석결과는 제방하부 접지폭이  $0.2B_0$ 인 경우 중간 모래층 위치별 비배수 전단강도 및 중간 모래층 두께에 대한 강제치환 깊이 산정결과의 평균값이다.

수치해석의 경우 강제치환 깊이는  $d_1/B_0=0.1$ 에서 최소 2.741m,  $d_1/B_0=2.0$ 에서 최대 3.427m로 산정되었으며, 층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우에는  $d_1/B_0=0.1$ 에서 최소 2.18m,  $d_1/B_0=2.0$ 에서 최대 3.879m로 산정되어 중간 모래층 위치가 증가할수록 강제치환 깊이는 증가하고 있는 것을 알 수 있었다(그림 12, 수치해석, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조). 이는 중간 모래층 영향으로 제방하부의 지지력이 큰 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다.

중간 모래층 위치  $0.1B_0$ 에서의 탄성침하는 중간 모래층 위치  $2.0B_0$ 에서의 탄성침하에 비해 0.82배로 산정되어 중간 모래층 위치에 따른 영향이 적은 것을 알 수 있었는데(그림 12, 탄성침하 참조), 이는 탄성해석시 강제치환에 따른 추가성도가 고려되지 않고 모래층 위치에 따른 하부 지반의 전체 강성의 영향이 크지 않기 때문으로 분석되었다.



a : 층두께 가중평균 b : 수치해석 c : 탄성침하  
d : 층두께 가중평균 + 탄성침하

그림 12. 중간 모래층 위치에 따른 치환깊이 산정결과(0.2B<sub>0</sub>)

층두께 가중평균 + 탄성침하인 경우 중간 모래층 위치에 따라 제방하부 강제치환 깊이에 미치는 영향이 중간 모래층 위치 1.0B<sub>0</sub>이상에서 크게 감소하는 것을 알 수 있었으며, 중간 모래층 위치 1.0B<sub>0</sub>이하인 경우에 비해 1.0B<sub>0</sub> 이상에서 강제치환 깊이의 영향이 0.05배로 감소하고 있는 것을 알 수 있었다(그림 12, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조). 이는 층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우 중간 모래층 위치가 1.0B<sub>0</sub>이상에서는 비배수 전단강도와 중간 모래층 두께의 영향이 크기 때문으로 분석되었다.

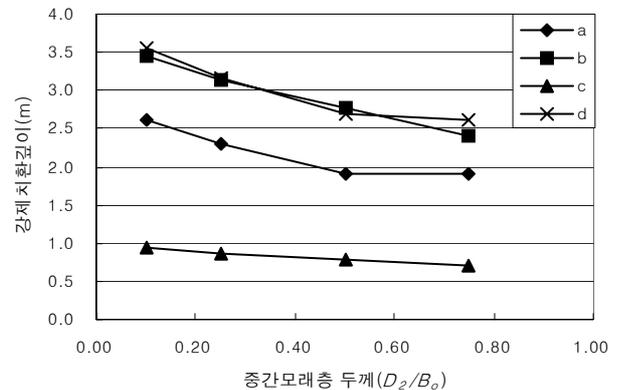
#### 4.2.3 중간 모래층 두께에 따른 강제치환 깊이

중간 모래층 위치에 따른 강제치환 깊이 산정결과는 다음 그림 13과 같으며, 해석결과는 제방하부 접지폭이 0.2B<sub>0</sub>인 경우 중간 모래층 두께별 비배수 전단강도 및 중간 모래층 위치에 따른 강제치환 깊이를 평균한 것이다.

산정된 강제치환 깊이는 수치해석의 경우 중간 모래층 두께 0.1B<sub>0</sub>에서 최대 3.46m, 0.75B<sub>0</sub>에서 최소 2.41m로 산정되었으며, 층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우 중간 모래층 두께 0.1B<sub>0</sub>에서 최대 3.56m, 0.75B<sub>0</sub>에서 최소 2.62m로 산정되어 중간 모래층 두께에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있었다(그림 13, 수치해석, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조). 이는 중간 모래층 두께에 따른 제방 하부 지반의 지지력이 큰 영향을 받고 있는 것으로 분석되었다. 산정된 강제치환 깊이는 수치해석에 비해 층두께 가중평균

+ 탄성침하인 경우 1.02배 정도로 산정되어 거의 유사한 것을 알 수 있었다(그림 13 참조).

층두께 가중평균 + 탄성침하의 경우 중간 모래층 두께 0.5B<sub>0</sub>이상에서 중간 모래층 두께에 따른 강제치환 깊이의 영향이 매우 적은 것을 알 수 있었으며, 중간 모래층 두께에 따른 강제치환 깊이 영향은 중간 모래층 두께가 0.5B<sub>0</sub> 이하 보다 0.5B<sub>0</sub>이상에서 0.121배로 감소하고 있는 것을 알 수 있었다(그림 13, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조). 이는 층두께 가중평균 + 탄성침하에 따른 강제치환 깊이의 경우 중간 모래층 두께가 0.5B<sub>0</sub>이상에서는 중간 모래층 위치 및 비배수 전단강도의 영향을 크게 받고 있는 것으로 분석되었다.

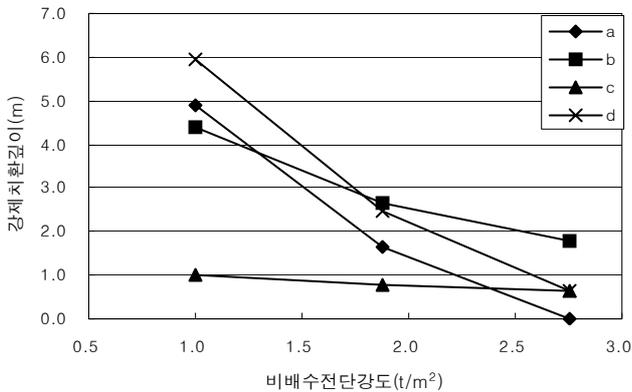


a : 층두께 가중평균 b : 수치해석 c : 탄성침하  
d : 층두께 가중평균 + 탄성침하

그림 13. 중간 모래층 두께에 따른 치환깊이 산정결과(0.2B<sub>0</sub>)

#### 4.2.4 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이

비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이 산정결과는 다음 그림 14와 같으며, 해석결과는 제방하부 접지폭이 0.2B<sub>0</sub>인 경우 비배수 전단강도별 중간 모래층 위치 및 중간 모래층 두께에 대한 강제치환 깊이의 평균값이다.



a : 층두께 가중평균 b : 수치해석 c : 탄성침하  
 d : 층두께 가중평균 + 탄성침하

그림 14. 비배수 전단강도에 따른 치환깊이 산정결과(0.2B<sub>0</sub>)

중간 모래층에 대한 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이가 산정결과는 수치해석의 경우 비배수 전단강도 1.0t/m<sup>2</sup>에서 최대 4.384m, 2.75t/m<sup>2</sup>에서는 최소 1.797m로 산정되었으며, 층 두께 가중평균 + 탄성침하인 경우 비배수 전단강도 1.0t/m<sup>2</sup>에서 최대 5.931m, 2.75t/m<sup>2</sup>에서 최소 0.648m로 산정되어(그림 14, 수치해석, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조) 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있었다.

수치해석의 경우 비배수 전단강도 1.875t/m<sup>2</sup>이상에서 비배수 전단강도 1.875t/m<sup>2</sup>이하보다 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이 영향은 0.48배 작게 산정되었으며, 층 두께 가중 평균 + 탄성침하의 경우 0.52배정도 작게 산정되어 비배수 전단강도가 작은 경우에 강제치환 형상에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있었다(그림 14, 수치해석, 층두께 가중평균 + 탄성침하 참조).

수치해석의 경우 비배수 전단강도 1.0t/m<sup>2</sup>에서 탄성침하는 수치해석에 따른 강제치환 깊이에 비해 23%정도이며, 2.75t/m<sup>2</sup>에서는 36%로 증가하여(그림 14, 수치해석, 탄성침하 참조) 비배수 전단강도가 증가할수록 탄성침하에 대한 영향이 증가하고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 비배수 전단강도 증가에 따른 하부지반의 강성이 증가하여 탄성침하량이 증가한 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

중간 모래층이 있는 연약지반내 사석 제방의 강제치환 깊이에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 제방하부 접지폭이 매우 적은 경우에 수치해석과 근접하므로(단일층인 경우 0.5B<sub>0</sub>에서 수치해석에 비해 층 두께 가중평균+탄성침하인 경우 0.98배, 중간 모래층인 경우 0.2B<sub>0</sub>에서 1.02배) 강제치환 깊이 산정시 제방의 접지폭의 영향보다 비배수전단강도 및 치환깊이에 대한 영향이 큰 것을 알 수 있었다.
2. 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이의 영향은(비배수 전단강도 1.0t/m<sup>2</sup>에 비해 2.75t/m<sup>2</sup>에서 0.24배 감소) 매우 큰 것을 알 수 있었다.
3. 비배수 전단강도에 따른 강제치환 깊이 영향은 비배수 전단강도 1.875t/m<sup>2</sup>이하에서 보다 1.875t/m<sup>2</sup>이상에서 0.43배정도 작은 것으로 산정되어, 비배수 전단강도가 적은 경우 강제치환 형상에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있었다.
4. 비배수 전단강도가 증가할수록 제방하부 지반의 강성이 증가하여 탄성침하에 대한 영향이 증가(비배수 전단강도 1.0t/m<sup>2</sup>에서 보다 2.75t/m<sup>2</sup>에서 1.5배 증가)하는 것을 알 수 있었다.
5. 중간 모래층 두께에 따른 강제치환 깊이 영향은(중간 모래층 두께 0.1B<sub>0</sub>에서 보다 0.75B<sub>0</sub>에서 0.72배 감소) 큰 것을 알 수 있었으며, 중간 모래층 두께 0.5B<sub>0</sub>이상에서는 비배수 전단강도 및 중간 모래층의 위치에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있었다.
6. 중간 모래층 위치에 따른 강제치환 깊이 영향은(중간 모래층 위치 0.1B<sub>0</sub>에서 보다 2.0B<sub>0</sub>에서 1.48배 증가) 매우 큰 것을 알 수 있었으며, 중간 모래층 위치 1.0B<sub>0</sub> 이상에서는 중간 모래층 두께 및 비배수 전단강도의 영향이 큰 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 2003년도 한양대학교 건설연구소 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

(접수일자 : 2003년 9월 18일)

## 참 고 문 헌

1. 정형식, 이승호, 황영철(1993), 제방축조에 의한 연약점토지반의 변형해석에 관한 연구. 한국지반공학회지, 제9권, 제6호, pp.55~62.
2. 천병식, 유양수(1988), 임해공업단지 기초조사(광양만의 지질 및 토성을 중심으로). 광양공업단지 조성에 관한 토목공학 심포지움, pp.207~244.
3. 한국지반공학회(1986), 구조물 기초설계기준. 건설부, pp.116~117.
4. 해양수산부(1999), 항만 및 어항 설계기준. pp.379
5. Bowles, J. E.(1988), Foundation Analysis and Design., 4th, McGrawHill Book Co., pp.208~215.
6. Perloff, W.H., Baladi, G. Y., and Harr, M.E.(1967), Stress distribution within and under long elastic embankments. Highway Research Record, No. 181.
7. Vesic A. S.(1973), Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, Vol.99, No. SMI, pp.45~73.